

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο



Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών  
Τομέας IV - Συνθέσεις Τεχνολογικής Αιχμής

Τιμολέων Κουιμτζόγλου  
Αρχιτέκτων Μηχανικός ΕΜΠ

Διδακτορική Διατριβή

**Η τυχαιότητα ως εργαλείο στην αρχιτεκτονική:  
Διερεύνηση δομών και μορφών μέσω στοχαστικών  
διαδικασιών**

Τριμελής συμβουλευτική επιτροπή:

Μ. Κατσαρός, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Αρχιτέκτων Μηχανικός  
Α. Λιάπη, Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Πατρών, Δρ. Αρχιτέκτων Μηχανικός  
Χ. Μουζάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Αθήνα  
2024



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο



Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών  
Τομέας IV - Συνθέσεις Τεχνολογικής Αιχμής

Τιμολέων Κουιμτζόγλου, Αρχιτέκτων Μηχανικός ΕΜΠ

Διδακτορική Διατριβή

**Η τυχαιότητα ως εργαλείο στην αρχιτεκτονική:  
Διερεύνηση δομών και μορφών μέσω στοχαστικών διαδικασιών**

Επταμελής εξεταστική επιτροπή:

- Μ. Κατσαρός, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Αρχιτέκτων Μηχανικός
- Α. Λιάπη, Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Πατρών, Δρ. Αρχιτέκτων Μηχανικός
- Χ. Μουζάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
- Κ. Κωστόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, Αρχιτέκτων Μηχανικός
- Ε. Τσακανίκα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
- Ι. Συμεωνίδου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Δρ. Αρχιτέκτων Μηχανικός
- Α. Σταυρίδου, Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΜΠ, Αρχιτέκτων Μηχανικός

Ημερομηνία προφορικής ανάπτυξης και υποστήριξης Διδακτορικής Διατριβής: 20 Ιουνίου 2024.

Η έγκριση της παρούσας διδακτορικής διατριβής από την επταμελή εξεταστική επιτροπή και τη Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν προϋποθέτει και την αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 202, παράγραφος 2 του Ν.5343/1932.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή υποστηρίχθηκε και εκπονήθηκε με χρηματοδότηση υποτροφίας από τον Ειδικό Λογαριασμό Κονδυλίων Έρευνας ΕΜΠ – ΕΛΚΕ ΕΜΠ.

Αθήνα, 2024

© Τιμολέων Κουιμτζόγλου 2024, εκτός εάν αναφέρεται διαφορετικά ή προέρχεται από άλλη πηγή



CC BY-NC-ND 4.0

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Τα πνευματικά δικαιώματα των εικόνων ανήκουν στους αντίστοιχους κατόχους τους



## Ευχαριστίες

Το κείμενο αυτής της διδακτορικής διατριβής δεν θα ήταν ολοκληρωμένο εάν έλειπε μια σύντομη αναφορά σε όλους όσους βοήθησαν, υποστήριξαν και έδειξαν ενδιαφέρον για την εκπόνηση και ολοκλήρωση αυτού του εγχειρήματος.

Οι καθηγητές της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, συνεργάτες και φίλοι συμμετείχαν υποστηρικτικά ο καθένας με το δικό του τρόπο, ώστε να μπορέσει να ξεκινήσει, να προχωρήσει αυτή η διατριβή, να αλλάξει, να διορθωθεί, να επαναπροσδιοριστεί και στο τέλος να φτάσει στην παρούσα της μορφή, η οποία και παρουσιάζεται σε αυτό το τεύχος.

Θα ήθελα λοιπόν αρχικά να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κατσαρό ως επιβλέποντα, την Καθηγήτρια Δρ. Κ. Λιάπη και τον Αναπληρωτή Καθηγητή Δρ. Χ. Μουζάκη ως μέλη, που αποφάσισαν να με εμπιστευτούν, να αφιερώσουν το χρόνο και τις γνώσεις τους, να συνεργαστούμε και να υποστηρίξουν αυτήν την προσπάθεια.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης την αρχική τριμελή επιτροπή αυτής της διατριβής: Καθηγητή †Δ. Παπαλεξόπουλο, Ομότιμη Καθηγήτρια κ. Ε. Εφεσίου και Ομότιμο Καθηγητή Δρ. Γ. Παρμενίδη, που την υποστήριξαν στα αρχικά της στάδια.

Θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Δρ. Ε. Τσακανίκα, για τη συνεχή βοήθεια της τόσο ως επιστημονικής συμβούλου χωρίς να είναι στην τριμελή επιτροπή, για τη βοήθεια της στην ανασύσταση της παρούσας τριμελούς επιτροπής, για τη συνεχή της υποστήριξη και καθοδήγηση, τις επισημάνσεις της, όσο και για τη διάθεση της μηχανής των εργαστηριακών δοκιμών του Εργαστηρίου Τεχνικών Υλικών της Σχολής Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την Δρ. πολιτικό μηχανικό Ν. Ψύλλα, για τις συζητήσεις, συμβουλές, βοήθεια και επισημάνσεις της.

Ευχαριστίες αρμόζουν επίσης στην υποψήφια διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ κ. Λυδία Πανουτσοπούλου, για τη βοήθεια της στη διεξαγωγή της εργαστηριακής διαδικασίας των πειραμάτων.

Ευχαριστώ επίσης τον Καθηγητή κ. Μπαμπινιώτη για την άδεια χρήσης υλικού από το λεξικό του, το γραφείο Kengo Kuma, το γραφείο Delugan Meissl Associated Architects, τους Roland Korner/Close Up AG, τους Kavanaugh and Nguyen, το γραφείο Ernst Giselbrecht, Giselbrecht + Partner ZT GmbH, το γραφείο Soma architecture, το γραφείο Orproject, τους Schweder + Shelley, το γραφείο Modu architecture, το γραφείο WhiteVOID, τον καλλιτέχνη Gerhard Richter, το ίδρυμα Robert Rauschenberg Foundation, τον David Andres Torreblanca Diaz, τον Emanuele Zamperini, για αποστολή υλικού ή/και άδεια χρήσης του στη διατριβή. Θα ήθελα τέλος να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Dr. Alan Boyde για τη διάθεση και άδεια χρήσης εικόνων από τις μελέτες του.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί επίσης η προσφορά του ομίλου της Βιοϊατρικής, και η συνεργασία και βοήθεια της Επικεφαλής του Τεχνικού τμήματος του ομίλου, κα Γ. Παππά και των συνεργατών της, που διέθεσαν αφιλοκεδώς τον ιατρικό εξοπλισμό του ομίλου, το χρόνο και την τεχνογνωσία τους για την διεξαγωγή των μη καταστροφικών ελέγχων σε πειραματικά δοκίμια.

Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι η παρούσα διδακτορική διατριβή υποστηρίχθηκε και εκπονήθηκε με χρηματοδότηση υποτροφίας από τον Ειδικό Λογαριασμό Κονδυλίων Έρευνας ΕΜΠ – ΕΛΚΕ ΕΜΠ. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους δεν αναφέρονται ονομαστικά σε αυτό το σύντομο κείμενο, είτε αυτοί είναι οικογένεια, φίλοι, συνεργάτες, παλιοί φοιτητές και φοιτήτριες, οι οποίοι ήταν πάντα ενθαρρυντικοί και υποστηρικτικοί σε αυτήν την προσπάθεια και βοήθησαν με τις συζητήσεις, τις ιδέες και την υπομονή τους.

## Περίληψη

Η παρούσα διδακτορική διατριβή έχει τίτλο: «**Η τυχαιότητα ως εργαλείο στην αρχιτεκτονική: Διερεύνηση δομών και μορφών μέσω στοχαστικών διαδικασιών**» και επιχειρεί να διερευνήσει τους πιθανούς τρόπους με τους οποίους η τυχαιότητα, ως **παράμετρος** ή/και ως **διαδικασία**, μπορεί να επηρεάσει και να συμβάλει στο σχεδιασμό και στην κατασκευή ενός αρχιτεκτονικού έργου, ως προς τη δομή και τη μορφή του.

Η συνειδητή και ελεγχόμενη χρήση της τυχαιότητας μπορεί να είναι ένα **καινοτόμο εργαλείο στην αρχιτεκτονική** και υπό προϋποθέσεις και σε επιλεγμένες εφαρμογές να οδηγήσει σε διαχείριση και επίλυση προβλημάτων τα οποία είναι δύσκολο να αντιμετωπιστούν με συμβατικές προσεγγίσεις.

Στο **Α' μέρος** μέρος της διατριβής γίνεται βιβλιογραφική και θεωρητική διερεύνηση του ζητήματος της έννοιας και της χρήσης της τυχαιότητας γενικά στις επιστήμες και στην τέχνη και ειδικά σε σχέση με την αρχιτεκτονική. Παρουσιάζεται συνοπτικά πώς γίνεται κατανοητή η τυχαιότητα σε **διάφορες περιόδους** και από **διαφορετικούς μελετητές της**. Γίνεται αναφορά σε **ενδεικτικά έργα τέχνης**, τα οποία περιλαμβάνουν την παράμετρο της τυχαιότητας και τη χρησιμοποιούν ως νέο μέσο έκφρασης και εικαστικό εργαλείο. Αναφέρεται επίσης **η διάκριση ανάμεσα στα δύο είδη τυχαιότητας** που υπάρχουν: την πραγματική-φυσική τυχαιότητα και την τεχνητά κατασκευασμένη τυχαιότητα-την ψευδοτυχειότητα, καθώς και τρόποι δημιουργίας και εφαρμογές της τυχαιότητας. Ακολουθώντας, γίνεται προσπάθεια να παρουσιαστούν χαρακτηριστικά και επιλεγμένα **παραδείγματα τυχαιότητας στην αρχιτεκτονική**, προκειμένου να γίνουν καλύτερα κατανοητές οι παράμετροι που σχετίζονται με την τυχαιότητα στα αρχιτεκτονικά έργα (ακουσία ή εκούσια τυχαιότητα, βαθμός, τρόπος δημιουργίας, επιρροή κ.λπ.). Στη συνέχεια, εξετάζονται οι τρόποι με τους οποίους μπορεί **η τυχαιότητα να ενσωματωθεί** σε μια **διαδικασία σχεδιασμού** σε ένα αρχιτεκτονικό έργο, όσον αφορά στα κριτήρια, στις προδιαγραφές, στους περιορισμούς, στις παραδοχές και στις παραμέτρους.

Στο **Β' μέρος** της διατριβής, για να διερευνηθεί σε μεγαλύτερο βάθος η σχέση της τυχαιότητας κυρίως με τη δομή, αλλά και με τη μορφή, διεξάγεται **πείραμα παραδείγματος εφαρμογής**, το οποίο εξετάζει την τυχαιότητα σε σχέση με παράδειγμα **φέρουσας κατασκευής**, ως την πιο απαιτητική και κρίσιμη περίπτωση εφαρμογής της. Χρησιμοποιείται λογισμικό για τον ψηφιακό σχεδιασμό δοκιμίων με τυχαίες δομές τύπου νοροποι (27 ραβδωτά δοκίμια κυλινδρικής μορφής διαμέτρου 10,5cm και ύψους 20,5cm) καθώς και συμπαγών δοκιμίων (3 κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 10cm και ύψους 20cm), τα οποία στη συνέχεια, μέσω της λογικής **file to factory**, κατασκευάζονται ως φυσικά δοκίμια με χρήση τεχνολογίας **3d printing**. Τα φυσικά δοκίμια ελέγχονται εργαστηριακά σε **πειραματική διάταξη** ως προς τη φέρουσα ικανότητά τους. Τα αποτελέσματα των δοκιμών του πειράματος καταγράφονται και αξιολογούνται ποσοτικά, ποιοτικά και στατιστικά.

Στο **Γ' μέρος** της διατριβής, γίνεται αποτίμηση των αποτελεσμάτων της εργαστηριακής πειραματικής διαδικασίας και παρουσίαση ειδικών και γενικών συμπερασμάτων, σε σχέση με τον γενικότερο προβληματισμό χρήσης της τυχαιότητας ως εργαλείο σχεδιασμού στην αρχιτεκτονική. Επιβεβαιώνεται

το ερευνητικό ερώτημα ότι η τυχαιότητα είναι σημαντική όσον αφορά στη δομή και στη μορφή μιας κατασκευής, καθώς διαπιστώθηκε πώς μπορεί να τις επηρεάσει και να είναι χρήσιμη και ελέγξιμη υπό προϋποθέσεις, συνεισφέροντας ως εργαλείο στη συνολική διαδικασία του σχεδιασμού στην αρχιτεκτονική και του αποτελέσμάτος του. Τέλος, προτείνονται πιθανές χρήσεις και εφαρμογές της τυχαιότητας στην αρχιτεκτονική, καθώς και επόμενα στάδια της έρευνας προς την ίδια κατεύθυνση.

Μετά το τέλος του Γ' μέρους της διατριβής, παραθέτονται σε **Παραρτήματα** 4 κεφάλαια που δεν παρουσιάστηκαν στο κύριο μέρος της διατριβής, ως συμπληρωματικά τμήματα της συγκεκριμένης έρευνας.

**Λέξεις κλειδιά:** Τυχαιότητα, Αρχιτεκτονική, Στοχαστικές διαδικασίες, Δομή, Μορφή, 3d printing, Πειραματική διερεύνηση τυχαιότητας, PETG, Voronoi.



## Abstract

This doctoral dissertation is titled: “**Randomness as a tool in architecture: An investigation of structure and form through stochastic processes**” and it attempts to explore the possible ways in which randomness, used as a **parameter** and/or as a **process**, can influence and contribute to the design and construction of an architectural project, in terms of its structure and form.

The conscious and controlled use of randomness can be an **innovative tool in architecture** and under certain conditions and in selected applications can lead to the management and resolution of problems that are difficult to address with conventional approaches.

In **Part A** of the thesis, through a bibliographic and theoretical investigation, the concept and use of randomness in science, art and particularly in relation to architecture, is examined. The perception of randomness in **different historical periods** and by **different scholars** is briefly presented. **Selected reference works of art** that include and use the parameter of randomness as a new means of expression and artistic tool are also presented. The **distinction between the two types of randomness**: true/natural randomness and artificially constructed randomness/pseudo-randomness that exist is also mentioned, along with methods for creating and using them. Subsequently, an attempt is made to present characteristic and selected **examples of randomness in architecture**, in order to better understand the parameters related to it (unintentional or intentional randomness, degree, means of creation, influence, etc.). Finally, the ways in which **randomness can be incorporated into a design process** in an architectural project are examined, in terms of criteria, specifications, constraints, assumptions and parameters.

In **Part B** of the thesis, **a case study experiment** is conducted to investigate in greater depth the relationship between randomness, primarily in relation to structure, but also to form. This experiment examines randomness in a **load-bearing** case study construction, as this category of applications (randomness, structural system and load bearing capacity) is considered to be the most demanding and critical. Software is used to digitally design samples with random voronoi structures (27 cylindrical samples with a diameter of 10,5cm and a height of 20,5cm) as well as solid samples (3 cylindrical samples with a diameter of 10cm and a height of 20cm), which then, through the **file to factory** logic, are manufactured as physical samples by using **3d printing** technology. The physical samples are then tested in an experimental setup in the **laboratory** for their load bearing capacity. The test results of the experiment are recorded and are evaluated quantitatively, qualitatively and statistically.

In **Part C** of the thesis, the results of the experimental process are evaluated and the specific and general conclusions are presented, in relation to the more general consideration of the use of randomness as a design tool in architecture. The research question whether randomness is important in architecture is confirmed, as it is demonstrated how randomness can influence structure and form and could be useful and controllable under certain conditions, therefore

contributing as a tool to the overall design process and outcome. Finally, possible uses and applications of randomness in architecture are proposed, as well as next future research stages in the same direction.

After the conclusion of **Part C** of the thesis, chapters that were not incorporated in the main part of the thesis are presented in **4 appendices**, as complementary parts of the specific research.

**Keywords:** *Randomness, Architecture, Stochastic processes, Structure, Form, 3d printing, Experimental investigation of randomness, PETG, Voronoi.*

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
Περίληψη.....	5
Abstract.....	7
Περιεχόμενα.....	9
<b>Α' μέρος.....</b>	<b>13</b>
<b>1. Εισαγωγή.....</b>	<b>15</b>
1.1 Γενική περιγραφή.....	15
1.2 Μεθοδολογία και δομή.....	18
<b>2. Έννοιες, ορισμοί και συνοπτική παρουσίαση της τυχαιότητας στις επιστήμες και στην τέχνη.....</b>	<b>23</b>
2.1 Η τυχαιότητα στις επιστήμες έως και το 18ο αιώνα.....	23
2.2 Η τυχαιότητα στις επιστήμες το 19ο και 20ο αιώνα.....	33
2.3 Η τυχαιότητα στην Τέχνη.....	54
2.3.1 Η τυχαιότητα στις πλαστικές και εικαστικές τέχνες.....	54
2.3.2 Η τυχαιότητα στη μουσική.....	71
<b>3. Δημιουργία και χρήση της τυχαιότητας.....</b>	<b>73</b>
3.1 Πραγματικά Τυχαίοι αριθμοί.....	73
3.2 Ψευδοτυχαίοι αριθμοί.....	76
3.3 Χρήση της τυχαιότητας.....	78
3.3.1 Τυχειοποιημένοι αλγόριθμοι.....	78
3.3.2 Στοχαστικές διαδικασίες.....	79
3.3.3 Γενετικοί αλγόριθμοι (GA) και γενετικός προγραμματισμός (GP).....	80
3.3.4 Cellular automata.....	84
3.3.5 L-systems.....	86
<b>4. Παραδείγματα τυχαιότητας στην αρχιτεκτονική.....</b>	<b>89</b>
4.1 Τυχαιότητα σε ιστορικές και παραδοσιακές κατασκευές με τη χρήση φυσικών υλικών μη τυποποιημένων διαστάσεων.....	90
4.1.1 Επικαλύψεις με φυτικά στοιχεία.....	91
4.1.2 Ξύλο.....	95
4.1.3 Λίθοι.....	102
4.1.4 Πλίνθοι.....	107
4.2 Τυχαιότητα ως αποκριτική αντίδραση σε περιβαλλοντικές παραμέτρους σε σύγχρονες κατασκευές.....	109
4.2.1 Επιδερμίδες κατασκευών και άνεμος.....	109
4.2.2 Επιδερμίδες κατασκευών και φως.....	114
4.3 Τυχαιότητα ως συνθετική αρχιτεκτονική επιλογή.....	119
4.4 Τυχαιότητα σε φέροντα στοιχεία της κατασκευής.....	136
4.4.1 Φέροντα στοιχεία.....	140
4.4.2 Φέροντα στοιχεία ως περιβλήματα κατασκευών.....	150
<b>5. Η τυχαιότητα στη διαδικασία του σχεδιασμού.....</b>	<b>161</b>
5.1 Κριτήρια (Criteria).....	162
5.2 Π1: Προδιαγραφές (Specifications).....	164
5.3 Π2: Περιορισμοί (Constraints).....	165
5.4 Π3: Παραδοχές (Assumptions).....	167
5.5 Π4: Παράμετροι (Parameters).....	169
<b>6. Ψηφιακά εργαλεία για τη δημιουργία τυχαιότητας στην αρχιτεκτονική.....</b>	<b>173</b>

6.1 Η τυχαιότητα ως παράμετρος στην αρχιτεκτονική.....	173
6.2 Η τυχαιότητα ως διαδικασία στην αρχιτεκτονική.....	177
6.2.1 Γενετικοί αλγόριθμοι και αρχιτεκτονική.....	177
6.2.2 Cellular automata και αρχιτεκτονική.....	183
6.2.3 L-systems και αρχιτεκτονική.....	184
<b>7. Επίλογος Α' μέρους.....</b>	<b>189</b>
<b>Β' μέρος.....</b>	<b>191</b>
<b>8. Παράδειγμα εφαρμογής και Πειραματική διαδικασία.....</b>	<b>193</b>
8.1 Εισαγωγή.....	193
8.2 Προηγούμενη έρευνα.....	194
8.3 Γενική περιγραφή πειράματος.....	203
8.4 Αλγόριθμος δημιουργίας γεωμετρίας.....	203
8.5 Παραγωγή ψηφιακών τρισδιάστατων δοκιμίων.....	210
8.6 Παραγωγή φυσικών τρισδιάστατων δοκιμίων.....	218
8.7 Μη καταστρεπτικοί έλεγχοι φυσικών δοκιμίων.....	230
8.8 Πειραματική διάταξη.....	234
8.9 Αξιολόγηση πειραματικών αποτελεσμάτων.....	248
8.9.1 Συγκεντρωτική καταγραφή και ανάλυση δεδομένων.....	248
8.9.2 Κόμβοι και ράβδοι.....	258
8.9.3 Μορφές αστοχίας για τα ραβδωτά δοκίμια.....	261
8.9.4 Διαγράμματα φορτίσεων για τα ραβδωτά δοκίμια.....	274
8.9.4.1 Οικογένεια δοκιμίων 50.....	274
8.9.4.2 Οικογένεια δοκιμίων 100.....	275
8.9.4.3 Οικογένεια δοκιμίων 200.....	276
8.9.4.4 Συνολικό διάγραμμα φορτίσεων για όλες τις οικογένειες δοκιμίων.....	277
8.9.5 Διαγράμματα φορτίσεων για τα συμπαγή δοκίμια.....	279
8.9.6 Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας.....	281
<b>Γ' μέρος.....</b>	<b>285</b>
<b>9. Συμπεράσματα.....</b>	<b>287</b>
9.1 Η τυχαιότητα στις επιστήμες, στην τέχνη και στην αρχιτεκτονική.....	287
9.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων πειραμάτων και συσχετισμός τους με το γενικότερο προβληματισμό για την έννοια της τυχαιότητας στην αρχιτεκτονική τεχνολογία.....	289
9.3 Πιθανές χρήσεις και εφαρμογές με αφετηρία την πειραματική διάταξη.....	291
9.4 Επόμενα στάδια έρευνας.....	292
9.5 Επίλογος.....	294
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>295</b>
<b>Ευρετήριο εικόνων.....</b>	<b>319</b>
<b>Ευρετήριο πινάκων.....</b>	<b>337</b>
<b>Παραρτήματα.....</b>	<b>339</b>
<b>Παράρτημα Ι – Συνοπτική εξέλιξη στην τέχνη προς μια ρεαλιστική αναπαράσταση.....</b>	<b>341</b>
Βιβλιογραφία Παραρτήματος Ι.....	363
Ευρετήριο εικόνων Παραρτήματος Ι.....	364
<b>Παράρτημα ΙΙ - Υπολογιστικός, Παραμετρικός, Γενεσιουργός και Αλγοριθμικός σχεδιασμός - Ψηφιακή κατασκευή.....</b>	<b>369</b>
1. Ψηφιακή επανάσταση στην αρχιτεκτονική.....	369
2. Υπολογιστικός, Παραμετρικός, Γενεσιουργός και Αλγοριθμικός σχεδιασμός (computational, parametric, generative and algorithmic design).....	375

3. Ψηφιακή κατασκευή.....	385
Βιβλιογραφία Παραρτήματος II.....	395
Ευρετήριο εικόνων Παραρτήματος II.....	400
Ευρετήριο πινάκων Παραρτήματος II.....	400
<b>Παράρτημα III - Αρχικές διερευνήσεις παραδειγμάτων εφαρμογής τυχαιότητας με τη χρήση λογισμικού.....</b>	<b>401</b>
1. Παράδειγμα #1 - Γεωμετρικές Παράμετροι I (μήκος, πλάτος, ύψος, περιστροφή).....	401
2. Παράδειγμα #2 - Γεωμετρικές Παράμετροι II (θέση, περιστροφή, διάταξη).....	406
3. Παράδειγμα #3 - Morphing.....	411
4. Παράδειγμα #4 - Κύρια και προκύπτουσα γεωμετρία - Nurbs.....	412
5. Παράδειγμα #5 - Κύριες και προκύπτουσες γεωμετρίες στο χώρο.....	413
6. Παράδειγμα #6 - Paneling.....	415
7. Παράδειγμα #7 - Populate.....	419
8. Παράδειγμα #8 - Attractors.....	422
9. Παράδειγμα #9 - Υλικότητα.....	424
10. Παράδειγμα #10 – Διερευνήσεις φορτίσεων φορέων στα λογισμικά Grasshopper 3D και KARAMBA 3D.....	431
11. Παράδειγμα #11 - Χρήση πραγματικής τυχαιότητας ως παράμετρος στο σχεδιασμό....	435
12. Παράδειγμα #12 - Βελτιστοποίηση και Γενετικός αλγόριθμος - Ενεργειακές και γεωμετρικές παράμετροι.....	437
13. Παράδειγμα #13 - Τυχαιότητα στη δομή.....	442
Βιβλιογραφία Παραρτήματος III.....	446
Ευρετήριο εικόνων Παραρτήματος III.....	447
Ευρετήριο πινάκων Παραρτήματος III.....	450
<b>Παράρτημα IV – Χρήση γενετικών αλγορίθμων για βελτιστοποίηση των δοκιμίων του αλγορίθμου της πειραματικής διάταξης.....</b>	<b>451</b>
Ευρετήριο εικόνων Παραρτήματος IV.....	458



## Α' μέρος





# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Γενική περιγραφή

Η παρούσα διδακτορική διατριβή έχει τίτλο: «**Η τυχαιότητα ως εργαλείο στην αρχιτεκτονική: Διερεύνηση δομών και μορφών μέσω στοχαστικών διαδικασιών**» και επιχειρεί να διερευνήσει τους πιθανούς τρόπους με τους οποίους η τυχαιότητα ως **παράμετρος** ή/και ως **διαδικασία** μπορεί να επηρεάσει και να συμβάλει στο σχεδιασμό και στην κατασκευή ενός αρχιτεκτονικού έργου, ως προς τη δομή και τη μορφή του.

Σύμφωνα με έναν από τους ορισμούς της **τυχαιότητας**, αυτή είναι:

*«Η ποιότητα ή κατάσταση του να είναι ή να φαίνεται κάτι ως τυχαίο (για παράδειγμα να λείπει ή να φαίνεται ότι λείπει συγκεκριμένο σχέδιο, σκοπός ή μοτίβο).»<sup>1</sup> (μτφρ. Τ. Κουιμτζόγλου)*

Αντίστοιχα, **στοχαστική διαδικασία**:

*«...είναι μια οικογένεια τυχαίων μεταβλητών ορισμένων σε κοινό χώρο πιθανοτήτων με παράμετρο την πραγματική μεταβλητή  $t$  (χρόνος).»<sup>2</sup>*

Γενικά στοχαστική διαδικασία είναι η διαδικασία που εμπεριέχει μια **τυχαία μεταβλητή**, την **τυχαιότητα** ή την **πιθανότητα**<sup>3</sup>, με τους όρους τυχαίος και στοχαστικός να είναι συνώνυμοι και να χρησιμοποιούνται και οι δύο εναλλακτικά<sup>4</sup>.

Η έννοια της τυχαιότητας έχει μελετηθεί φιλοσοφικά και επιστημονικά, έχει χρησιμοποιηθεί ως παράμετρος και διαδικασία στις επιστήμες και την τέχνη και έχει παρουσιαστεί σε πολλές άλλες πτυχές της ανθρώπινης δραστηριότητας. Η **μη προβλεψιμότητα** που είναι συνυφασμένη με την τυχαιότητα, είναι τις περισσότερες φορές αιτία η τελευταία να μην είναι επιθυμητή, καθώς οι συνέπειες της δεν μπορούν να προβλεφθούν ή και να ελεγχθούν με ευκολία.

**Σε αυτή τη διατριβή διερευνώνται οι έννοιες της μη προβλεψιμότητας και του ακούσιου και αναπάντεχου αποτελέσματος που προκύπτουν μέσα από την τυχαιότητα<sup>5</sup>, με εστίαση στη χρήση**

1 'Definition of RANDOMNESS', 25 Φεβρουάριος 2024, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/randomness>.

2 Γιάννης Α. Φίλης, 'Στοχαστικές διαδικασίες' (Πολυτεχνείο Κρήτης, 2006), 2, <http://www.cam.tuc.gr/DIAFORA%20JPG/BIBLIA/stochastic%20processes.pdf>.

3 Merriam-Webster, 'Stochastic', ημερομηνία πρόσβασης 30 Απρίλιος 2020, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/stochastic>.

4 'Stochastic Process', στο *Wikipedia, the Free Encyclopedia*, 3 Μάιος 2014, [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Stochastic\\_process&oldid=606867309](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Stochastic_process&oldid=606867309).

5 • «συνδυασμός γεγονότων, τα οποία από μόνα τους δεν παράγουν θετικό αποτέλεσμα, ενώ, όταν συνδυάζονται, παράγουν» • «(μαθηματικά) κατάσταση που δεν εμφανίζει προβλεψιμότητα, μοτίβο και τάξη μεταξύ των συστατικών που την περιγράφουν» • «ακούσια και αναπάντεχη ανακάλυψη (ή γενικότερα απόκτηση γνώσης), που συμβαίνει τυχαία» 'τυχαιότητα', στο *Βικιλεξικό*, 4 Φεβρουάριος 2022, <https://el.wiktionary.org/w/index.php?title=%CF%84%CF%85%CF%87%CE%B1%CE%B9%CF%8C%CF%84%CE>

**στοχαστικών διαδικασιών στο σχεδιασμό, οι οποίες επηρεάζουν τη δομή και τη μορφή ενός αρχιτεκτονικού έργου.** Η τυχαιότητα όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως εξετάζεται κυρίως ως παράμετρος και ως διαδικασία.

**Αντικείμενο** λοιπόν αυτής της έρευνας, είναι η μη προβλέψιμη φύση της τυχαιότητας και η σχέση της με την αρχιτεκτονική, η οποία μπορεί όταν εμφανίζεται να αποδώσει τόσο θετικά όσο και αρνητικά αποτελέσματα σε σχέση με κάποιο συγκεκριμένο στόχο. Η συνειδητή και ελεγχόμενη χρήση μιας παραμέτρου ή διαδικασίας, η οποία είναι συνδεδεμένη με την μη προβλεψιμότητα, είναι δυναμικά **για την αρχιτεκτονική ένα καινοτόμο εργαλείο**, το οποίο μπορεί να έχει εξαιρετικές εφαρμογές σε κάποιες περιπτώσεις. Η χρήση της τυχαιότητας ως **εργαλείο στην αρχιτεκτονική**, μπορεί υπό προϋποθέσεις και σε επιλεγμένες εφαρμογές να οδηγήσει σε διαχείριση και επίλυση προβλημάτων τα οποία είναι δύσκολο να αντιμετωπιστούν με συμβατικές προσεγγίσεις. Η δυνατότητα αυτή έχει ήδη διερευνηθεί σε άλλα επιστημονικά πεδία (π.χ. τυχαίοι και στοχαστικοί αλγόριθμοι, κ.λπ.) και φαίνεται ότι έχει σημαντικές προοπτικές και στην αρχιτεκτονική, με κάποια παραδείγματα έρευνας και έργων ήδη να την αξιοποιούν. Αυτή η χρήση της τυχαιότητας και πιο συγκεκριμένα η διερεύνηση για τη σχέση της στη διαμόρφωση **δομών και μορφών** χρήζει περαιτέρω διερεύνησης, η οποία επιχειρείται σε αυτή τη διατριβή.

Όπως θα φανεί σε επόμενο κεφάλαιο, από την εξέταση των διαφόρων παραδειγμάτων τυχαιότητας στην αρχιτεκτονική, οι περιπτώσεις όπου αυτή εμφανίζεται σε σχέση με τη δομή (και κατ' επέκταση και τη μορφή), είναι συγκριτικά πολύ λιγότερες με όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις εφαρμογής της σε μη φέροντα στοιχεία. Αυτό οφείλεται στη δυσκολία συσχετισμού της τυχαιότητας με το φέροντα οργανισμό μιας κατασκευής, καθώς πρωταρχικά πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη της επαρκούς στατικής επάρκειας της. Η παραπάνω απαίτηση σχετικά με τη στατική επάρκεια της κατασκευής έχει ως συνέπεια η εφαρμογή τυχαιότητας στη συγκεκριμένη κατηγορία (τυχειότητα και φέρουσα κατασκευή), είτε να εμφανίζεται συνήθως σε περιορισμένη περιοχή του έργου, καθώς είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμη η διαδικασία, είτε να γίνεται υπό εξαιρετικά αυστηρές παραδοχές, προκειμένου να μην υπάρξουν αστοχίες. Στη συνέχεια, αφού δηλαδή ικανοποιηθεί η συνθήκη της στατικής επάρκειας, γίνεται συνήθως προσαρμογή της μορφής ή και της λειτουργίας.

Μία από τις νέες προσεγγίσεις στο σχεδιασμό με τη χρήση ψηφιακών εργαλείων, στη λογική του **file to factory**, είναι αυτή που τείνει προς ένα σχεδιασμό όπου η δομή και η μορφή προκύπτουν παράλληλα. **Αυτή ακριβώς η συνάφεια δομών και μορφών σε σχέση με την τυχαιότητα εξετάζεται σε αυτή τη διατριβή.** Διερευνάται ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιείται η τυχαιότητα σε υπάρχοντα παραδείγματα και στη συνέχεια αξιολογείται η επιρροή της σε σχέση με τη δομή και τη μορφή της κατασκευής σε παράδειγμα εφαρμογής, επιστημονική περιοχή που δεν έχει μελετηθεί συνολικά επαρκώς από αρχιτεκτονική οπτική μέχρι τώρα. Εκεί έγκειται και η πρωτοτυπία της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως σύμφωνα με τον **DeLanda**<sup>6</sup> **τονίζεται η ανάγκη ενσωμάτωσης διερευνήσεων της δομικής (structural) διάστασης στο σχεδιασμό** και αυτή είναι η κατεύθυνση προς την οποία κινείται η παρούσα διδακτορική διατριβή. Η διαμόρφωση μεθοδολογίας προσέγγισης

[%B7%CF%84%CE%B1&oldid=5522730.](#)

6 *Manuel de Landa Part 8 Day 1: Genetic Algorithms*, ημερομηνία πρόσβασης 24 Απρίλιος 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=NoPgS2Se9ZQ&feature=relmfu>.

αυτού του ζητήματος με τη χρήση πειράματος και τη λήψη αριθμητικών και στατιστικών σχετικών δεδομένων, είναι επίσης μια πρωτότυπη προσέγγιση που εξετάζει την τυχαιότητα και επιχειρεί να διερευνήσει αν μπορεί να είναι ένα ελέγχσιμο και ευέλικτο εργαλείο στην αρχιτεκτονική και το σχεδιασμό. Οι εφαρμογές της τυχαιότητας όσον αφορά στη δομική διάσταση, κρίνονται ως οι δυσμενέστερες περιπτώσεις. Εφ' όσον υπάρχουν ευνοϊκά αποτελέσματα από την έρευνα, εκτιμάται ότι η τυχαιότητα θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε εφαρμογές που σχετίζονται με το φέροντα οργανισμό, ως τις πιο απαιτητικές και κρίσιμες περιπτώσεις, όπως και σε άλλες λιγότερο απαιτητικές.

**Κύριος στόχος** αυτής της διδακτορικής διατριβής είναι η διερεύνηση σχετικά με τους τρόπους με τους οποίους η τυχαιότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως **εργαλείο** στην αρχιτεκτονική και η διαπίστωση για το υπό ποιες προϋποθέσεις μπορεί να γίνεται αυτό. Πιο συγκεκριμένα, καθώς η **δομή** και η **μορφή** αποτελούν θεμελιώδεις και διαχρονικές έννοιες στην αρχιτεκτονική <sup>7</sup>, έχει ενδιαφέρον να εξεταστεί **πρώτον** πώς η τυχαιότητα ως εργαλείο μπορεί να συσχετιστεί μαζί τους και **δεύτερον** τι συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν από ένα τέτοιο συσχετισμό.

#### **Επιμέρους στόχοι είναι:**

- α. Κατανόηση της έννοιας της τυχαιότητας και η αναγνώριση της στις άλλες επιστήμες και στην τέχνη.
- β. Η αναγνώριση της τυχαιότητας σε ήδη υπάρχοντα αρχιτεκτονικά έργα, η διερεύνηση των τρόπων δημιουργία της και η επιρροή της σε αυτά.
- γ. Η κατανόηση των διαφορετικών ειδών, τρόπων και μεθόδων δημιουργίας της τυχαιότητας.
- δ. Η διερεύνηση για το πώς μπορεί να ενσωματωθεί η έννοια της τυχαιότητας στη διαδικασία του σχεδιασμού ενός αρχιτεκτονικού έργου.
- ε. Η κατανόηση για το πώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τυχαιότητα ως ψηφιακό εργαλείο στην αρχιτεκτονική σε σχέση με τον παραμετρικό και αλγοριθμικό σχεδιασμό.
- στ. Η διαμόρφωση μεθοδολογίας πειραματικής διάταξης με την οποία μπορεί να εξεταστεί ποσοτικά και ποιοτικά η επιρροή της τυχαιότητας στην αρχιτεκτονική, ειδικά σε περιπτώσεις δομών και μορφών.
- ζ. Η στοιχειοθέτηση περαιτέρω σταδίων έρευνας πάνω στο συγκεκριμένο θέμα.

**Σκοπιμότητα** αυτής της διατριβής είναι η περιγραφή και κατάδειξη της τυχαιότητας ως **καινοτόμο εργαλείο στην αρχιτεκτονική**, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνειδητά και ελεγχόμενα, να προστεθεί στα ήδη υπάρχοντα εργαλεία που διαχειρίζεται ένας μηχανικός, με ειδικότερο στόχο να μπορέσει να αξιοποιηθεί σε ζητήματα **δομής** και **μορφής** στην αρχιτεκτονική.

<sup>7</sup> Vitruvius, *Vitruvius: The Ten Books on Architecture*, μετάφρ. Morris Hicky Morgan (New York: Dover Publications, 1960)., Violet le Duc, Sullivan, Wright, κ.λπ.

## 1.2 Μεθοδολογία και δομή

Η παρούσα διδακτορική διατριβή οργανώνεται σε τρία μέρη.

Στο **Α' μέρος**, γίνεται βιβλιογραφική και θεωρητική διερεύνηση του ζητήματος της έννοιας, της εφαρμογής και της χρήσης της τυχαιότητας γενικά στις επιστήμες και στην τέχνη και ειδικότερα σε σχέση με την αρχιτεκτονική.

Στο **Β' μέρος**, εξετάζεται παράδειγμα εφαρμογής με τη χρήση κατάλληλης πειραματικής διάταξης και επιχειρείται να επιβεβαιωθεί ή να απορριφθεί η ερευνητική υπόθεση, το αν δηλαδή η τυχαιότητα είναι υπό προϋποθέσεις αξιοποιήσιμο εργαλείο στην αρχιτεκτονική σε σχέση με τη δομή και τη μορφή.

Στο **Γ' μέρος**, συνοψίζονται και αξιολογούνται τα συμπεράσματα των προηγούμενων κεφαλαίων και τέλος, προτείνεται περαιτέρω διερεύνηση και επόμενα στάδια έρευνας.

Μετά το Γ' μέρος παραθέτονται **Παραρτήματα** με πρόσθετες πληροφορίες.

**Πιο αναλυτικά τα μέρη Α', Β' και Γ' και τα παραρτήματα περιγράφονται ως εξής:**

### Α' μέρος

#### **Κεφάλαιο 1**

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται σύντομη εισαγωγή σχετικά με το αντικείμενο, τους στόχους, τη μεθοδολογία και τη δομή της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

#### **Κεφάλαιο 2**

Αρχικά επιχειρείται να διασαφηνιστεί ποιος είναι ο ορισμός και η έννοια της τυχαιότητας ανάλογα με το πλαίσιο στο οποίο αυτή προσεγγίζεται. Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση παραδειγμάτων που έχουν σχέση με την τυχαιότητα σε άλλες επιστήμες (εκτός της αρχιτεκτονικής) και στην τέχνη, καθώς η διερεύνησή τους θα μπορέσει πιθανώς να δώσει μια καλύτερη εικόνα για τις δυνατότητες και τα αποτελέσματα εφαρμογής της στην αρχιτεκτονική.

#### **Κεφάλαιο 3**

Σε αυτό το στάδιο της έρευνας εξετάζονται τα διαφορετικά είδη και οι αντίστοιχοι τρόποι δημιουργίας της τυχαιότητας. Παρουσιάζονται επίσης συγκεκριμένοι τρόποι χρήσης της όπως αυτοί έχουν διαμορφωθεί σε άλλες επιστήμες (π.χ. τυχαιοποιημένοι αλγόριθμοι, στοχαστικές διαδικασίες, cellular automata, L-systems).

#### **Κεφάλαιο 4**

Ακολούθως, γίνεται προσπάθεια να παρουσιαστούν ενδεικτικά χαρακτηριστικά και επιλεγμένα παραδείγματα τυχαιότητας στην αρχιτεκτονική. Στόχος αυτού του σταδίου της έρευνας είναι να εντοπιστούν και να κατηγοριοποιηθούν αυτά τα ενδεικτικά παραδείγματα, έτσι ώστε να βοηθηθεί

τόσο ο γράφων όσο και ο αναγνώστης, στο να γίνουν καλύτερα κατανοητές οι παράμετροι που σχετίζονται με την τυχαιότητα, αν η τυχαιότητα που παρουσιάζεται είναι ακούσια ή εκούσια, σε τι βαθμό παρουσιάζεται, πώς αυτή δημιουργείται, καθώς και ποια είναι η επιρροή της στο αρχιτεκτονικό έργο όσον αφορά στη δομή, τη μορφή, τη λειτουργία, κ.λπ.

Τα παραδείγματα αυτά ομαδοποιούνται σε κατηγορίες, ανάλογα με το είδος της τυχαιότητας και τον τρόπο με τον οποίο αυτή χρησιμοποιείται κάθε φορά. Η παρατήρηση και ανάλυση των παραδειγμάτων τυχαιότητας σε σχέση με τη δομή και με τη μορφή τους, δίνει τη δυνατότητα να εντοπιστούν **βασικές αρχές** ή **παράμετροι** που συνδυάζονται με αυτήν, οι οποίες μπορούν να έχουν εφαρμογή στην αρχιτεκτονική. Κάποιες από αυτές τις βασικές αρχές πιθανώς να είναι συναφείς με αντίστοιχες αρχές που παρουσιάζονται σε άλλα επιστημονικά πεδία.

### Κεφάλαιο 5

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τρόποι με τους οποίους μπορεί η τυχαιότητα να ενσωματωθεί σε μια διαδικασία σχεδιασμού σε ένα αρχιτεκτονικό έργο όσον αφορά στα κριτήρια, στις προδιαγραφές, στους περιορισμούς, στις παραδοχές και στις παραμέτρους.

### Κεφάλαιο 6

Τέλος, στο Α' μέρος παρουσιάζονται συγκεκριμένα ψηφιακά εργαλεία και μεθοδολογίες παραμετρικού και αλγοριθμικού σχεδιασμού με εφαρμογή στην αρχιτεκτονική τα οποία έχουν σχέση με την τυχαιότητα, όπου αυτή χρησιμοποιείται είτε ως παράμετρος είτε ως διαδικασία.

### Κεφάλαιο 7

Με την ολοκλήρωση του Α' μέρους ολοκληρώνεται και το θεωρητικό τμήμα της διατριβής. Οι πληροφορίες που παρουσιάζονται μέχρι αυτό το σημείο ιδανικά θα μπορούν να δώσουν μια πιο σαφή εικόνα για το τι είναι η τυχαιότητα και ποιες εφαρμογές μπορεί να έχει στην αρχιτεκτονική, ειδικότερα σε σχέση με τη δομή και τη μορφή.

Η σχέση της τυχαιότητας με τη δομή της κατασκευής (structure) πρόκειται για τις πιο δύσκολες περιπτώσεις εφαρμογής και χρήσης της, καθώς η δομική ακεραιότητα είναι πρωταρχικής σπουδαιότητας, έχοντας ως δεδομένο ότι δεν μπορούν να υπάρχουν περιθώρια αστοχίας, και αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του σχεδιασμού. Για να διερευνηθεί σε μεγαλύτερο βάθος η σχέση της τυχαιότητας κυρίως με τη δομή, αλλά και με τη μορφή, διεξάγεται στο Β' μέρος της διατριβής **πείραμα παραδείγματος εφαρμογής**. Το πείραμα αυτό έχει ως στόχο να αποδώσει ποσοτικά, ποιοτικά και στατιστικά στοιχεία για την τυχαιότητα, τα οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για να την περιγράψουν και να την αξιολογήσουν όσον αφορά στο συσχετισμό της με τη δομή και τη μορφή του συγκεκριμένου παραδείγματος εφαρμογής, αλλά να δώσουν και γενικότερα συμπεράσματα.

Η επιρροή της τυχαιότητας των δομών, αυτή δηλαδή που σχετίζεται με τη φέρουσα κατασκευή, είναι ίσως η δυσμενέστερη περίπτωση εφαρμογής της. Εφ' όσον τα αποτελέσματα του πειράματος είναι ευνοϊκά για το παράδειγμα εφαρμογής, εκτιμάται ότι η τυχαιότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε εφαρμογές που σχετίζονται με το φέροντα οργανισμό, ως τις πιο απαιτητικές και κρίσιμες περιπτώσεις, όπως και σε άλλες λιγότερο απαιτητικές (π.χ. μη φέροντα στοιχεία).

## **B' μέρος**

### **Κεφάλαιο 8**

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται παραδείγματα προηγούμενης έρευνας από τη βιβλιογραφία. Στη συνέχεια, εξετάζεται αναλυτικά παράδειγμα εφαρμογής (case study) με τη διενέργεια πειραμάτων μέσω κατάλληλα σχεδιασμένων δοκιμών που αφορούν σε στοιχεία φέροντος οργανισμού, προκειμένου να επιβεβαιωθεί ή να απορριφθεί το κύριο ερευνητικό ερώτημα: **Αν η επιρροή της παραμέτρου της τυχαιότητας όσον αφορά στη δομή και τη μορφή μιας κατασκευής είναι σημαντική ή όχι, ποια είναι αυτή και τι βαθμό έχει, αν και υπό ποιες προϋποθέσεις μπορεί να είναι χρήσιμη.** Τα αποτελέσματα των πειραμάτων του παραδείγματος εφαρμογής καταγράφονται και παράγουν τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά δεδομένα, τα οποία μπορούν να αξιολογηθούν και να επιβεβαιώσουν ή να απορρίψουν το ερευνητικό ερώτημα. Χρησιμοποιείται λογισμικό για τον ψηφιακό σχεδιασμό δοκιμών, τα οποία στη συνέχεια μέσω της λογικής **file to factory** κατασκευάζονται ως φυσικά δοκίμια με χρήση **3d printing** και ελέγχονται σε **πειραματική διάταξη** ως προς τη φέρουσα ικανότητά τους. Τα αποτελέσματα των δοκιμών του πειράματος καταγράφονται και αξιολογούνται ποσοτικά, ποιοτικά και στατιστικά.

## **Γ' μέρος**

### **Κεφάλαιο 9**

Στο Γ' μέρος της διατριβής, γίνεται αποτίμηση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας, όπως και παρουσίαση ειδικών και γενικών συμπερασμάτων, σε σχέση και με τον γενικότερο προβληματισμό χρήσης της τυχαιότητας ως εργαλείο σχεδιασμού στην αρχιτεκτονική. Προτείνονται πιθανές χρήσεις και εφαρμογές, καθώς και επόμενα στάδια της έρευνας προς την ίδια κατεύθυνση.

Στη συνέχεια παρατίθεται η βιβλιογραφία, το ευρετήριο εικόνων και το ευρετήριο πινάκων για τα μέρη Α', Β', και Γ' της διατριβής.

## **Παραρτήματα**

Μετά το τέλος του Γ' μέρους της διατριβής, παραθέτονται σε 4 παραρτήματα κεφάλαια που δεν παρουσιάστηκαν στο κύριο μέρος της διατριβής, ως συμπληρωματικά τμήματα της συγκεκριμένης έρευνας.

### **Παράρτημα I**

Σε αυτό το Παράρτημα γίνεται προσπάθεια να παρουσιαστεί με ενδεικτικά παραδείγματα η **εξέλιξη στην Τέχνη** όσον αφορά στα χαρακτηριστικά της τυχαιότητας και της ασάφειας. Τα χαρακτηριστικά αυτά φαίνεται ότι βαθμιαία εξαλείφονται, μέσω της διαμόρφωσης των τεχνικών, των μέσων και της αντίληψης των καλλιτεχνών, με στόχο τη δημιουργία έργων στα οποία κυριαρχεί η ρεαλιστική απεικόνιση της φύσης και των μορφών, **καταργώντας όσο το δυνατόν είναι εφικτό την τυχαιότητα σε αυτά.**

## Παράρτημα II

Σε αυτό το Παράρτημα παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με τον **Υπολογιστικό, Παραμετρικό, Γενεσιουργό και Αλγοριθμικό σχεδιασμό** καθώς και την **Ψηφιακή κατασκευή**, ως τεχνολογικές καινοτομίες και εξελίξεις που έχουν διαμορφώσει σε σημαντικό βαθμό την υπάρχουσα κατάσταση όσον αφορά στη χρήση της τεχνολογίας στην αρχιτεκτονική.

## Παράρτημα III

Σε αυτό το Παράρτημα παρουσιάζονται διάφορα παραδείγματα και μεθοδολογίες για το πώς η παράμετρος της τυχαιότητας μπορεί να ενσωματωθεί με συγκεκριμένο τρόπο στο σχεδιασμό μιας δομής ή μορφής σε περιβάλλον λογισμικού 2d και 3d.

## Παράρτημα IV

Σε αυτό το Παράρτημα παρουσιάζεται διερευνητικά ένα από τα πιθανά επόμενα στάδια διαχείρισης του αλγορίθμου της πειραματικής διαδικασίας. Ο αρχικός αλγόριθμος συνδέεται στο περιβάλλον **Grasshopper** με το λογισμικό **Karamba3D**, όπου γίνεται συγκριτικός έλεγχος των δοκιμών από άποψη παραμορφώσεων μετά την εφαρμογή φορτίου και γίνεται βελτιστοποίηση τους σύμφωνα με συγκεκριμένους στόχους με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου.





## 2. Έννοιες, ορισμοί και συνοπτική παρουσίαση της τυχαιότητας στις επιστήμες και στην τέχνη

### 2.1 Η τυχαιότητα στις επιστήμες έως και το 18ο αιώνα

Από την αρχαιότητα, οι έννοιες της τύχης και της τυχαιότητας ήταν συνυφασμένες με τις έννοιες της μοίρας και του πεπρωμένου. Η ανάγκη του ανθρώπου να αναζητήσει τα αίτια των γεγονότων και η αδυναμία κατανόησης των φυσικών νόμων και της πρόβλεψης των μελλοντικών συμβάντων, συντέλεσε στην απόδοση των αιτίων αυτών πολλές φορές σε μυθικά όντα και θεότητες, οι οποίες κυβερνούσαν τον κόσμο κατά τη βούλησή τους. Ως αποτέλεσμα, θεωρούνταν ότι ο άνθρωπος γινόταν εργαλείο ή απλός θεατής των εξελίξεων, χωρίς δυνατότητα παρεμβάσεων ή τροποποίησης των προκαθορισμένων γεγονότων.

Ένας από τους ορισμούς της τύχης είναι ο ακόλουθος:

*«τύχη (η) (τυχών) 1. η υποθετική δύναμη που καθορίζει ευνοϊκά ή αρνητικά την έκβαση των γεγονότων, που αφορούν στους ανθρώπους και στις προσπάθειές τους.»<sup>8</sup>*

Σύμφωνα με έναν άλλο ορισμό τυχαίος είναι.....:

*«τυχαίος, -α, -ο [μτγν.] 1. αυτός που γίνεται ή προκύπτει κατά τύχη, όχι σκόπιμα ή σχεδιασμένα: ...- 2. τυχαίο (το) το απρόβλεπτο στοιχείο τής ζωής...»<sup>9</sup>*

Σύμφωνα με έναν ακόμα από τους ορισμούς της **τυχαιότητας**, αυτή είναι:

- *«συνδυασμός γεγονότων, τα οποία από μόνα τους δεν παράγουν θετικό αποτέλεσμα, ενώ, όταν συνδυάζονται, παράγουν»*
- *«(μαθηματικά) κατάσταση που δεν εμφανίζει προβλεψιμότητα, μοτίβο και τάξη μεταξύ των συστατικών που την περιγράφουν»*
- *«ακούσια και αναπάντεχη ανακάλυψη (ή γενικότερα απόκτηση γνώσης), που συμβαίνει τυχαία»<sup>10</sup>*

Ως τυχαιότητα θα μπορούσε να περιγραφεί **το αποτέλεσμα της τύχης**.

8 Γ. Μπαμπινιώτης, *Λεξικό της νέας ελληνικής γλώσσας*, Γ' (Αθήνα: Κέντρο Λεξικολογίας, 2008), 1820.

9 Μπαμπινιώτης, 1819.

10 'τυχαιότητα', στο *Βικιλεξικό*, 4 Φεβρουάριος 2022, <https://el.wiktionary.org/w/index.php?title=%CF%84%CF%85%CF%87%CE%B1%CE%B9%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1&oldid=5522730>.

Στα αγγλικά η λέξη **τυχειότητα** μεταφράζεται ως **randomness**<sup>11</sup>, σε αντιδιαστολή με τη μετάφραση της λέξης **τύχης** η οποία είναι: **luck**<sup>12</sup>. Η ετυμολογία της λέξης **random** προέρχεται από το γαλλικό **randon**, το οποίο πηγάζει από το γερμανικό **randir** και το πρωτογερμανικό **randa**<sup>13</sup>, που σημαίνουν να τρέχεις με μεγάλη ταχύτητα και δύναμη χωρίς τάση, λέξη που θα μπορούσε να περιγράψει τα χαρακτηριστικά του καλπασμού. **Ως τυχαίο (random) μπορεί να περιγραφεί αυτό που δεν έχει προκαθορισμένη εξέλιξη ή κατάληξη**. Αντίθετα, η έννοια της λέξης **luck**, είναι συνδεδεμένη με την έννοια της ευνοϊκής μοίρας, την τάση να λαμβάνει κάποιος τα επιθυμητά αγαθά ή αποτελέσματα<sup>14</sup>. Σημαντικό είναι επίσης να αναφερθεί η λέξη **chance**<sup>15</sup> που κι αυτή περιγράφει το στοιχείο εκείνο που συντελεί στο μη προβλέψιμο, μη οργανωμένο. Η λέξη **chance** προέρχεται από το γαλλικό **cheance** (ατύχημα, τύχη, κ.λπ.), εκ του λατινικού **cadentia**, που σημαίνει αυτό που πέφτει (όρος που περιέγραφε την πτώση του ζαριού ως πτώση με ακανόνιστη και μη προβλεπόμενη έκβαση). Η χρήση των ζαριών εκτός από αγαπημένο παιχνίδι, χρησιμοποιούνταν για τη μελέτη του τυχαίου.

Στην αρχαία ελληνική μυθολογία, σύμφωνα με τον Ησίοδο, **η Θεά Τύχη** ήταν μία από τις Ωκεανίδες, κόρη του Ωκεανού και της Τηθύος<sup>16</sup>, υποδηλώνοντας με αυτό τον τρόπο πιθανώς ότι η θάλασσα ως πηγή αφθονίας και ευτυχίας είναι άμεσα συσχετισμένη με τους ανθρώπους. Ο Πίνδαρος την αναφέρει ως κόρη του Δία<sup>17</sup>. Κατά άλλους, η **Τύχη** στη μυθολογία ήταν κόρη του Ερμή και της Αφροδίτης. Η τύχη ήταν συνδεδεμένη με τον πλούτο και την ευμάρεια, τη μεταβλητότητα και την ανατροπή. Αναπαριστάνεται συνήθως ως γυναίκα, η οποία κρατάει στα χέρια της ένα μικρό παιδί, τον Πλούτο, ένα στάχυ ή το κέρασ της Αμάλθειας, σύμβολο της αφθονίας. Πολλές φορές γινόταν προστάτιδα πόλεων.

Για τους Ρωμαίους, θεότητες της **Τύχης** ήταν ο **Fors** και η θηλυκή εκδοχή του **Fortuna**, η οποία είχε παραπλήσιες με την αρχαιοελληνική θεά Τύχη ιδιότητες. Η Fortuna ήταν πιο διαδεδομένη θεότητα από τον Fors και θεωρούνταν και θεότητα της Μοίρας<sup>18</sup>.

Στην Πραγματεία του «**Περί Τύχης**», ο **Πλούταρχος** εξετάζει την έννοια της Τύχης ως παράμετρο που δεν μπορεί να καθορίσει την ευτυχία ή τη δυστυχία του ανθρώπου, καθώς στην ουσία τα παραπάνω εξαρτώνται από τη φρόνηση και επινοητικότητα. Στο εισαγωγικό σημείωμα των σχολίων της έκδοσης Κάκτος<sup>19</sup> αναφέρεται ότι ο Πλούταρχος πραγματεύεται το ζήτημα της τύχης ως αιτία των διαφόρων γεγονότων και επισημαίνεται ότι η χρήση του αιτίου είναι έννοια αντίθετη προς την έννοια της τύχης.

11 Collins, *Collins English Dictionary: 30th Anniversary Edition, Tenth Edition, Tenth edition edition* (London: HarperCollins UK, 2010), 1361.

12 Collins, 981.

13 'Random | Origin and Meaning of Random by Online Etymology Dictionary', ημερομηνία πρόσβασης 15 Δεκέμβριος 2018, <https://www.etymonline.com/word/random>.

14 'Luck | Origin and Meaning of Luck by Online Etymology Dictionary', ημερομηνία πρόσβασης 15 Δεκέμβριος 2018, <https://www.etymonline.com/word/luck>.

15 Collins, *Collins English Dictionary*, 288.

16 Ησίοδος, 'Θεογονία - Βικιθήκη', ημερομηνία πρόσβασης 15 Νοέμβριος 2018, <https://el.wikisource.org/wiki/Θεογονία>.

17 'Τύχη (μυθολογία)', στο *Βικιπαίδεια*, 6 Μάιος 2017, [https://el.wikipedia.org/wiki/Τύχη\\_\(μυθολογία\)](https://el.wikipedia.org/wiki/Τύχη_(μυθολογία)).

18 'Fortuna', στο *Wikipedia*, 19 Οκτώβριος 2018, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fortuna&oldid=864856305>.

19 Πλούταρχος, *Ηθικά, Τόμος 3, Οι Έλληνες 345* (Αθήνα: Κάκτος, 1995), 61.

καθώς και ότι τυχαίο τελικά είναι αυτό που δεν προέρχεται από κάποια αιτία, πρόθεση ή φυσικό γεγονός. Σύμφωνα με τους **Ίωνες φιλοσόφους**, κάθε τι που πραγματοποιείται πηγάζει από κάποια ανάγκη, διαφορετικά θεωρείται αναίτιο ή άσκοπο. Χαρακτηριστική είναι η ρήση του **Λεύκιππου** ότι όλα γίνονται για κάποιο λόγο:

*«ούδέν χρήμα μάτην γίνεται, αλλά πάντα έκ λόγου  
τε καί υπ' ανάγκης»<sup>20</sup>*

Φαίνεται δηλαδή, ότι τα αποτελέσματα του τυχαίου και της ανάγκης είναι συμπληρωματικές έννοιες, οι οποίες καλύπτουν όλες τις περιπτώσεις για τις οποίες πραγματοποιούνται οι ενέργειες στον κόσμο. Το πρώτο σύνολο αφορά σε ενέργειες χωρίς πρόθεση ή έλεγχο, ως τυχαία γεγονότα, ενώ το δεύτερο σύνολο αφορά στις ενέργειες που απορρέουν από κάποια ανάγκη. Τα δύο αυτά σύνολα είναι αντίθετα και ανταγωνιστικά.

Ο **Δημόκριτος** στηρίζεται στην έννοια της αναγκαιότητας, η οποία είναι το αίτιο των φαινομένων, και καταλήγει στη θεμελιώδη δομή του ατόμου ως γενεσιουργό στοιχείο της ύπαρξης του κόσμου και των μηχανισμών του. Παρ' όλα αυτά:

*«Ενώ όμως για τις εκδηλώσεις των φαινομένων, ο Δημόκριτος καταφεύγει στην αναγκαιότητα, για τη δημιουργία και την τοποθέτηση των ατόμων μέσα στο κενό, ως αιτία λαμβάνει την τυχαιότητα.»<sup>21</sup>*



Εικόνα 2\_1: Θεά Τύχη. Πηγή: Tyche Pluto Prusias ad Hypium IstArchMu451b.jpg, Istanbul Archaeological Museum - The goddess Tyche holding in her arms Plutus (god of wealth) as a child. Hellenistic art, Roman period, 2nd century AD. From Prusias ad Hypium (in the present-day il of Düzce). The coloring of the hair is remarkably well preserved, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tyche\\_Pluto\\_Prusias\\_ad\\_Hypium\\_IstArchMu451b.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tyche_Pluto_Prusias_ad_Hypium_IstArchMu451b.jpg), εικόνα του/της: QuartierLatin1968, άδεια: [GNU Free Documentation License, Version 1.2 or any later version](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/), [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/), [Creative Commons Attribution-Share Alike Attribution-Share Alike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/), [CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/), [3.0 Unported](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/), [CC BY-SA 2.5](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/), [2.5 Generic](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/), [CC BY-SA 2.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/), [2.0 Generic](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/) και [CC BY-SA 1.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/), [1.0 Generic license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/). Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

20 DK67 B1, Αέτιος 1.25.4

21 Άννα Λάζου και Κωνσταντίνος Καλαχάνης, *Φιλοσοφία της Φύσης. Η Φύση στην Αρχαία Ελληνική Φιλοσοφία.*, 1.0 (Αθήνα: Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών, 2015), 9, <https://opencourses.uoa.gr/modules/document/index.php?course=PPP107&download=/564763a1KUtc/56e13f27yZcd/56e14032Fdt9/56e14032W3Ro.pdf>.

Κατά τον **Επίκουρο**, δεν απορρίπτεται η έννοια της Τύχης, αλλά αντίθετα αναγνωρίζεται ως παράγοντας ανεξάρτητος από την ανθρώπινη γνώση:

*«Ο Επίκουρος αντίθετα δέχεται την τυχειότητα ως κινητήριο δύναμη του αισθητού κόσμου.»<sup>22</sup>*

Ο Επίκουρος αναφέρει στην επιστολή του προς το Μενοικέα <sup>23</sup> ότι ο άνθρωπος που έχει συνειδητοποιήσει το σκοπό του και δεν έχει το φόβο του θανάτου κατανοεί ότι δεν υπάρχει ειμαρμένη και ότι τα πράγματα οφείλονται είτε σε ανάγκη, είτε σε τύχη ή στη βούληση του ανθρώπου. Ο άνθρωπος, κατά τον Επίκουρο, δεν θεωρεί πως η τύχη είναι κάποια θεότητα, διότι ο θεός δεν λειτουργεί με άτακτο τρόπο, ούτε ότι είναι η τύχη είναι η αιτία των πραγμάτων, αγαθών ή κακών, καθώς το κυριότερο είναι κάποιος να μπορεί να κρίνει σωστά ακόμα κι αν αυτό οδηγήσει σε κάποια αποτυχία, το οποίο είναι προτιμότερο από μια επιτυχία που προκύπτει από κακή επιλογή λόγω τύχης. Η **Στωική φιλοσοφία** είναι αντίθετη στην έννοια του τυχαίου και είναι χαρακτηριστική η άποψη ότι κάτι **ερμηνεύεται ως τυχαίο εξαιτίας του ότι δεν υπάρχουν αρκετά δεδομένα για την εξήγησή του**. Σύμφωνα με το Στωικό **Χρύσιππο** <sup>24</sup>, πάντα υπάρχει μία αιτία πίσω από κάθε τι που συμβαίνει, αλλά πολλές φορές ο άνθρωπος δεν είναι δυνατόν να την αντιληφθεί. Το τυχαίο είναι μία υποκειμενική δοξασία που οφείλεται στις ελλιπείς γνώσεις ως προς τα αίτια. Την άποψη αυτή υιοθετεί πολύ αργότερα και ο **Μαρκήσιος Pierre-Simon de Laplace** (βλέπε επόμενες παραγράφους).

Κατά τον **Χρύσιππο**, υπάρχει η ειμαρμένη, η οποία είναι:

*«μια ορισμένη φυσική και συγκροτημένη διάταξη των πάντων μέσα στην αιωνιότητα, όπου μια ομάδα πραγμάτων αενάως απορρέει από άλλη και εμπλέκεται με άλλη, σε μία απαραβίαστη αλληλουχία.»<sup>25</sup>*

Παράλληλα, η αλληλουχία αυτή επηρεάζεται από την ανθρώπινη βούληση.

*«Αν και είναι γεγονός, λέει (ο Χρύσιππος), ότι τα πάντα περιορίζονται και δένονται μεταξύ τους από την ειμαρμένη χάρη σε μια συγκεκριμένη και αναγκαία αρχή, εντούτοις ο τρόπος με τον οποίο υπόκειται στο πεπρωμένο ο νους μας εξαρτάται από την ιδιαίτερη ποιότητα του κάθε ανθρώπου.»<sup>26</sup>*

Ο **Αριστοτέλης**, σε αντίθεση με τους Στωικούς, δέχεται ότι υπάρχει η έννοια της τύχης. Όμως, αντί για διαχωρισμό σε δύο σύνολα ενεργειών που ελέγχουν τον κόσμο, κάνει διαχωρισμό σε τρεις κατηγορίες.

Σύμφωνα με την ανάλυσή του, αυτά που γίνονται διαχωρίζονται αρχικά **i)** σε όσα γίνονται πάντα με τον ίδιο τρόπο **ii)** σε όσα συμβαίνουν κατά κανόνα και **iii)** σε όσα γίνονται κατ' εξαίρεση. Αυτά που συμβαίνουν όμως, δηλαδή ενδεχόμενα και των τριών παραπάνω κατηγοριών, μπορούν να διαχωριστούν **α)** σε όσα έχουν σκοπό και **β)** σε όσα δεν έχουν σκοπό.

22 Λάζου και Καλαχάνης, 9.

23 Επίκουρος, *ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ: ΑΠΑΝΤΑ*, Αρχαία Ελληνική Γραμματεία «Οι Έλληνες» 284 (Αθήνα: Κάκτος, 1994), 165.

24 Πλούταρχος, *Ηθικά, Τόμος 3*, 63.

25 Αύλος Γέλλιος, *Αττικές Νυκτες*, χ.χ., τμ. 7.2.3,

<http://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Gellius/home.html>.

26 Γέλλιος, τμ. 7.2.7.

Οι παραπάνω διακρίσεις και συνδυασμοί τους φαίνονται συγκεντρωτικά στον πίνακα που ακολουθεί:

Γεγονότα που πραγματοποιούνται			
	Πάντα με τον ίδιο τρόπο	Κατά κανόνα, όχι πάντα	Κατ' εξαίρεση
Που έχουν σκοπό	<b>i α</b>	<b>ii α</b>	<b>iii α</b>
Που ΔΕΝ έχουν σκοπό	<b>i β</b>	<b>ii β</b>	<b>iii β</b>

Πίνακας 2\_1: Περιπτώσεις γεγονότων ανάλογα με το σκοπό και τον τρόπο που πραγματοποιούνται κατά Αριστοτέλη.  
Πηγή: Τ. Κουμτζόγλου.

Κάποιος θα περίμενε να οριστούν ως τυχαία αυτά που εμπίπτουν στην κατηγορία iii β, αυτά δηλαδή που γίνονται κατ' εξαίρεση και ΔΕΝ έχουν σκοπό. Ο Αριστοτέλης όμως υποστηρίζει ότι τυχαία είναι αυτά που γίνονται κατ' εξαίρεση, αλλά έχουν σκοπό (περίπτωση iii α).

Ο Αριστοτέλης γράφει στα Φυσικά, Βιβλίο Β':

*«Εξάλλου, από αυτά που γίνονται, άλλα γίνονται για κάποιον σκοπό και άλλα όχι. Και από τα πρώτα, ορισμένα είναι αποτέλεσμα προαίρεσης και ορισμένα δεν είναι – και τα μεν και τα δε εντάσσονται σε όσα έχουν σκοπό. Είναι λοιπόν φανερό ότι ανάμεσα στα πράγματα που δεν γίνονται ούτε κατ' ανάγκη ούτε κατά κανόνα βρίσκονται και κάποια για τα οποία ενδέχεται να υπάρχει σκοπός. Έχουν σκοπό όσα θα μπορούσαμε να προκαλέσουμε μετά από σκέψη και όσα γίνονται από τη φύση. Αυτού του είδους τα πράγματα λοιπόν, όταν γίνονται «κατά συμβεβηκός», λέμε ότι οφείλονται στην τύχη. Γιατί, όπως υπάρχει ον «καθαυτό» και ον «κατά συμβεβηκός», κατά τον ίδιο τρόπο μπορεί να υπάρξει αίτιο «καθαυτό» και αίτιο «κατά συμβεβηκός»: «καθαυτό» αίτιο της οικίας είναι αυτό που οικοδομεί, ενώ «κατά συμβεβηκός» αίτιο είναι αυτό που είναι λευκό ή μουσικό. Το «καθαυτό» αίτιο είναι καθορισμένο, ενώ το «κατά συμβεβηκός» ακαθόριστο – γιατί πολλά θα μπορούσαν να συμβούν σε κάποιο πράγμα. Όπως είπαμε λοιπόν, όταν γίνει κάτι τέτοιο σε πράγματα που γίνονται για κάποιον σκοπό, τότε λέμε ότι έγινε αυτομάτως ή κατά τύχη.»<sup>27</sup>*

Η διάκριση που γίνεται κατά τον Αριστοτέλη για το αν κάτι είναι τυχαίο ή όχι, αφορά τελικά αν υπάρχει πραγματικό αίτιο των γεγονότων ή κατά πόσο αυτό είναι δευτερεύον και προκύπτει. Το πραγματικό αίτιο ονομάζεται «καθαυτό» ποιητικό αίτιο, ενώ το δευτερεύον ή μη πραγματικό αίτιο ονομάζεται «αίτιο κατά συμβεβηκός» ποιητικό αίτιο. **Τα πραγματικά τυχαία γεγονότα** είναι αυτά που οφείλονται σε «κατά συμβεβηκός» αίτια.

Ο Β. Κάλφας επισημαίνει για την προσέγγιση του Αριστοτέλη:

*«Τα τυχαία γεγονότα αντιθέτως είναι μόνο δυνάμει σκόπιμα, αφού δεν προέκυψαν από την επίτευξη του σκοπού που εμπεριέχουν. Στο αριστοτελικό κείμενο αυτό δηλώνεται με την επανειλημμένη χρήση του ρήματος ενδέχεται και της δυνατηκής ευκτικής.»<sup>28</sup>*

27 Βασίλης Κάλφας, *Αριστοτέλης, Περί Φύσεως Το Β' βιβλίο των Φυσικών* (Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, 2015), 86, <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/684>.

28 Κάλφας, 155.

Ενδιαφέρουσα είναι η περιγραφή σε σχέση με την τυχαιότητα των γεγονότων που γίνονται κατ' εξαίρεση, αλλά δεν έχουν σκοπό (κατηγορία **iii β**). Αυτά τα γεγονότα ερμηνεύονται εν μέρη με βάση την έννοια **του αυτόματου**. Το αυτόματο διαχωρίζεται από την τύχη, διότι αναφέρεται τόσο σε έμψυχα όσο και σε άψυχα, ενώ η τύχη κατά τον Αριστοτέλη αφορά στην ανθρώπινη πρόθεση και τα αποτελέσματά αυτής, θετικής ή αρνητικής έκβασης. Η τύχη είναι υποσύνολο του αυτόματου, καθώς το τελευταίο εμπεριέχει τόσο τις προθέσεις του ανθρώπου όσο και της φύσης <sup>29</sup>.

**Η έννοια της τύχης** εμφανίζεται φυσικά και στα υπόλοιπα μέρη του κόσμου, με αντίστοιχες θεότητες και έννοιες. Θεοί και θεές της Τύχης συναντώνται σε χώρες της Ν. Αμερικής και Αφρικής, στην Αίγυπτο, στην Ινδία, στην Ιαπωνία, στην Κίνα, κ.λπ. Τέτοιο παράδειγμα αποτελούν οι **7 Θεοί της Τύχης** στην Ιαπωνική παράδοση **"Sichi Fukujin"**, οι οποίοι συμβολίζουν αντίστοιχα 7 αρετές (ειλικρίνεια, τύχη, αξιοπρέπεια, καλοσύνη, μακροζωία, ευτυχία και σοφία). Οι θεότητες αυτές προήλθαν από Ινδουϊστικές, Βουδιστικές, Ταοϊστικές και Σιντοϊστικές παραδόσεις <sup>30</sup>.



Εικόνα 2\_2: Οι 7 Θεοί της Τύχης στην Ιαπωνική παράδοση, Sichi Fukujin. Πηγή: 7 lucky gods @ Azabu Juban Inari Shrine, [https://www.flickr.com/photos/o\\_0/13842647885/](https://www.flickr.com/photos/o_0/13842647885/), εικόνα του/της: [Guilhem Vellut](https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/), άδεια: CC BY 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>

29 Περισσότερες πληροφορίες για την έννοια της τύχης στη φιλοσοφία του Αριστοτέλη μπορούν να βρεθούν στη Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία: Ειρήνη Δ. Γούση, 'Ο ρόλος της Τύχης στη φιλοσοφία του Αριστοτέλη ( Φυσικά, Πολιτικά, Ηθικά Νικομάχεια).'(ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, Θεσσαλονίκη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Φιλοσοφική Σχολή, Τμήμα φιλοσοφίας και παιδαγωγικής, 2019), <http://ikee.lib.auth.gr/record/306931/files/GRI-2019-25484.pdf>.

30 'Shichi Fukujin - Seven Gods of Fortune', *Kusuyama* (blog), 3 Σεπτέμβριος 2013, <https://kusuyama.jp/blog/culture/shichi-fukujin-seven-gods-of-luck-and-good-fortune>.

Όσον αφορά στην Κίνα, ίσως το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα αναφοράς στην τυχαιότητα αποτελεί το «**Βιβλίο των Αλλαγών**» (~1000-750 π.χ), “**I Ching**”.

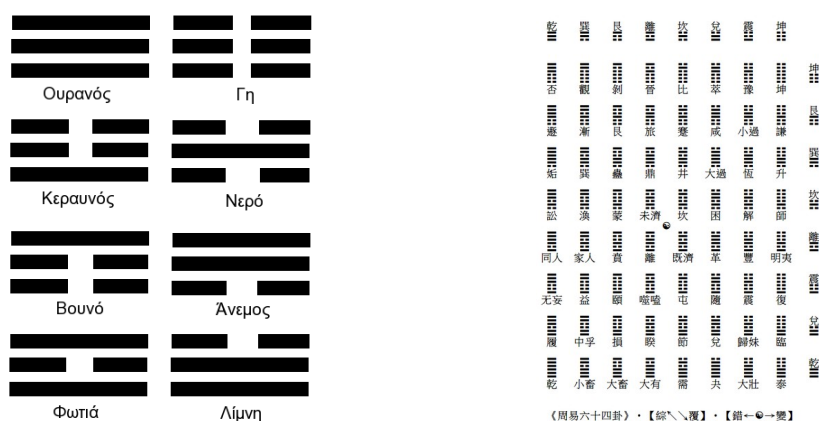
*«Το I Τσινγκ (易經, yì jīng) ή Βιβλίο των Αλλαγών είναι ένα από τα κλασικά έργα της κινέζικης φιλοσοφίας...Στο κέντρο της φιλοσοφίας του I Τσινγκ βρίσκεται η έννοια της διαρκούς αλλαγής και η πεποίθηση πως στη ρίζα των πραγμάτων βρίσκεται το Γιν και το Γιάνγκ, οι αντίρροπες και εναλλασσόμενες καταστάσεις που αποτελούν την κινητήρια δύναμη του κόσμου. Ο όρος I Τσινγκ μεταφράζεται ως Νόμος της Αλλαγής.»*<sup>31</sup>

Το “I Ching” περιλαμβάνει 64 διαφορετικά εξάγραμμα, και περιγραφές αυτών, τα οποία αναπαριστούν όλους τους συνδυασμούς εξάδων που μπορεί να έχουν οι βασικές μονάδες του αρσενικού (yang – συνεχής γραμμή) και θηλυκού (ying – διακεκομμένη γραμμή). Οι συνδυασμοί αυτοί συνθέτουν ένα «λεξιλόγιο» που εκφράζει τις αντίθετες πολικότητες, το αρσενικό και το θηλυκό, τα πέντε κινέζικα στοιχεία, κατευθύνσεις στο χώρο, την ιεραρχία στην οικογένεια, καθώς και άλλες πιο σύνθετες ποιότητες, οι οποίες αποτελούν τις βασικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται σε μαντική πρόβλεψη. Η μαντική πρόβλεψη βασίζεται σε αυτά τα 64 βασικά στοιχεία και πραγματοποιείται με τη ρίψη κλήρων με διάφορες μεθόδους και ακολουθεί η ερμηνεία τους με βάση το «Βιβλίο των Αλλαγών».

Καθώς το “I Ching” βασίζεται στις δύο βασικές αντίθετες ποιότητες του ying και yang, μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι πρόκειται στην ουσία για ένα δυαδικό σύστημα (1 – αρσενικό, 0 - θηλυκό), όπου οι συνδυασμοί σε εξάδες των βασικών μονάδων του, παράγουν όλες τις πιθανές εκδοχές που μπορεί να προκύψουν. Το ying και το yang συνθέτουν τριάδες συνδυασμών, τα λεγόμενα τρίγραμμα, κι αυτά με τη σειρά τους τα εξάγραμμα. Τα 8 τρίγραμμα προκύπτουν από το συνδυασμό των δύο βασικών ποιοτήτων και δίνουν 6 παράγωγα στοιχεία, 3 όπου επικρατεί το αρσενικό στοιχείο (2 συνεχείς γραμμές και 1 διακεκομμένη) και 3 όπου επικρατεί το θηλυκό στοιχείο (1 συνεχής γραμμή και 2 διακεκομμένες). Τα 64 εξάγραμμα προκύπτουν ως συνδυασμοί του  $2^6=64$ . Στην Εικόνα 2\_3 παρουσιάζονται οι παραλλαγές των 64 εξαγράμμων.

Ο τρόπος που συνδυάζονται οι αρσενικές και θηλυκές ποιότητες και παράγουν όλες τις πιθανές παραλλαγές τους, οδηγώντας σε ένα σύστημα ιεραρχίας με αυξημένη πολυπλοκότητα και σαφείς σχέσεις μεταξύ των αρχικών ποιοτήτων (αρσενικό και θηλυκό) και τις παραλλαγές των γόνων τους, δεν μπορεί παρά να φέρει στο νου τους γενετικούς συνδυασμούς του Mendel. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρηθεί ότι ενώ στο “I Ching” υπάρχει μια ορθολογική, αυστηρή ιεραρχία και σχεσιακή εξάρτηση των στοιχείων μεταξύ τους, η οποία είναι **απόλυτα προκαθορισμένη** και έχει προκύψει με βάση μαθηματική λογική, χρησιμοποιείται ως βάση πάνω στην οποία λειτουργεί η **τυχαιότητα** μέσω της μαντικής πρόβλεψης των 64 εξαγράμμων. Ορθολογισμός και τυχαιότητα λοιπόν συνδυάζονται και λειτουργούν για τους Κινέζους ταυτόχρονα στο ίδιο σύστημα ερμηνείας του κόσμου.

31 ‘I Τσινγκ’, στο Βικιπαίδεια, 11 Οκτώβριος 2019, [https://el.wikipedia.org/wiki/I\\_Τσινγκ](https://el.wikipedia.org/wiki/I_Τσινγκ).



Εικόνα 2\_3: I Ching, Τρίγραμμα (αριστερά), Πηγή: [ICHING-trigramma.png](http://ICHING-trigramma.png), Τρίγραμμα του I Tsing, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ICHING-trigramma.png>, εικόνα του/της: [Dada at Greek Wikipedia](http://Dada at Greek Wikipedia), άδεια: public domain. Οι παραλλαγές των 64 εξαγράμμων (δεξιά). Πηγή: [Iching-64diagrams change symmetry.png](http://Iching-64diagrams change symmetry.png), 中文 (臺灣): 周易 64 卦表, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Iching-64diagrams\\_change\\_symmetry.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Iching-64diagrams_change_symmetry.png), εικόνα του/της: [東岐明](http://東岐明), άδεια: CC BY-SA 4.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license](http://Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license). Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

Επιστρέφοντας στη Δύση, χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του **Επίσκοπου Wibold του Cambray**, ο οποίος κατά το 10ο αιώνα ασχολείται με το ζήτημα ρίψης ζαριών και καταγράφει 56 διαφορετικές εκβάσεις ρίψεων, ρίχνοντας ένα ζάρι 3 φορές διαδοχικά ή 3 διαφορετικά ζάρια σε μία ρίψη, τις οποίες ρίψεις αντιστοιχεί σε 56 αρετές. Με τον τρόπο αυτό ορίζει ποια αρετή θα έπρεπε να εξασκήσει κάθε μοναχός για την αυτοβελτίωσή του <sup>32</sup>.

Ο **Θωμάς ο Ακινάτης** στο έργο του "**Summa Theologica**" (1485), αναρωτιέται αν υπάρχει **μοίρα ή τύχη** στον κόσμο. Βασική πεποίθησή του είναι ότι όλα βασίζονται στη θεία πρόνοια η οποία είναι αναλλοίωτη και βέβαιη και είναι αυτή που συντελεί στο να γίνονται τα πράγματα όπως έχει προβλεφθεί να γίνουν, είτε λόγω αναγκαιότητας, είτε λόγω απροόπτου. Σύμφωνα με τον Θωμά Ακινάτη, κάποια πράγματα **παρουσιάζονται να γίνονται από τύχη**, τα οποία σχετίζονται με **αιτίες χαμηλού επιπέδου**, σε αντίθεση με **αιτίες υψηλού επιπέδου, οι οποίες έχουν σαφή πρόθεση**. Ως παράδειγμα φέρνει τη συνάντηση δύο υπηρετών, τους οποίους έστειλαν οι κύριοί τους σε συγκεκριμένο μέρος. Οι υπηρέτες θεωρούν το γεγονός της συνάντησής τους τυχαίο, καθώς **δεν γνωρίζουν την πρόθεση των κύριων τους**, οι οποίοι όμως είχαν σαφή βούληση για τη συνάντηση των υπηρετών τους. Κάποια γεγονότα φαίνεται ότι δεν μπορούν να εμποδιστούν να συμβούν από τύχη, όταν εξετάζονται σε σχέση με τα κοντινά τους αίτια. **Όταν όμως αναλογίζεται κανείς τη Θεία Πρόνοια, τίποτα δεν συμβαίνει από τύχη στον κόσμο**, όπως αναφέρει ο Αυγουστίνος <sup>33</sup> («Απαντήσεις σε διάφορες ερωτήσεις», ερώτηση #24). Το πρωταρχικό αίτιο είναι η Θεία Πρόνοια και όλα τα άλλα αίτια είναι δευτερεύοντα και υποτάσσονται σε αυτό. Η μοίρα καθορίζει τα δευτερεύοντα αίτια και αυτή καθορίζεται από τη Θεία Βούληση <sup>34</sup>. **Συνεπώς, κατά τον Ακινάτη πραγματική τυχασιότητα δεν υπάρχει, αλλά είναι αποτέλεσμα της βούλησης του Θεού, καθώς όλα απορρέουν από αυτή.**

32 Edna Ernestine Kramer, *The Nature and Growth of Modern Mathematics* (Princeton University Press, 1982), 306.

33 Saint Augustine Of Hippo, *St. Augustine Answers 101 Questions: On Prayer*, 1st edition (Sophia Institute Press, 2009).

34 Thomas Aquinas, *Summa Theologica*, 1485, 2387–88, [http://www.documentacatholicaomnia.eu/03d/1225-1274,\\_Thomas\\_Aquinas,\\_Summa\\_Theologiae\\_%5B1%5D,\\_EN.pdf](http://www.documentacatholicaomnia.eu/03d/1225-1274,_Thomas_Aquinas,_Summa_Theologiae_%5B1%5D,_EN.pdf).



Ο **Jerolamo Cardano** διερευνεί τα τυχερά παιχνίδια και γράφει το "**Liber de ludo aleae**" («**Βιβλίο των τυχερών παιγνίων**») το 1564, το οποίο αποτέλεσε το πρώτο ορόσημο για τη θεωρία πιθανοτήτων, αλλά παράλληλα ήταν και ένας πρακτικός οδηγός για τον τζόγο! Στο σύγγραμμά του μελετά τα ζάρια, τους αστραγάλους και τα χαρτιά και εισαγάγει μαθηματικούς όρους όπως το "**circuit**" ή αλλιώς **δειγματικό χώρο** και το "**equality**", το **ήμισι του δειγματικού χώρου**. Ο Cardano επινοεί την πρότυπη μέθοδο που χρησιμοποιείται στη στατιστική ανάλυση σήμερα, δηλαδή την διαίρεση των ευνοϊκών συμβάντων με τα συνολικά συμβάντα, καθώς και τη μέθοδο μέσου όρου (ROTM, Reasoning Of The Mean), μέθοδο που απαιτεί δοκιμές και δεν αποδίδει πάντα σωστά αποτελέσματα <sup>35</sup>.

Ο **Γαλιλαίος** το 1620 ασχολείται με το ζήτημα ρίψης 3 ζαριών και γράφει το κείμενο: "**Sopra le Scoperte dei Dadi**", «**Περί μιας ανακάλυψης για τα ζάρια**». Το πρόβλημα που εξετάζει αφορά στο γιατί το άθροισμα δέκα (10) από την ρίψη τριών (3) ζαριών παρουσιάζει μεγαλύτερη πιθανότητα από το άθροισμα εννέα (9) από την ρίψη τριών ζαριών. Η απάντηση στην οποία καταλήγει είναι ότι το άθροισμα δέκα (10) μπορεί να προκύψει από περισσότερους συνδυασμούς αθροισμάτων, καθώς υπάρχουν 27 τρόποι να προκύψει το δέκα (10), ενώ 25 μόνο τρόποι να προκύψει το άθροισμα εννέα (9), άρα και η πιθανότητα του αθροίσματος δέκα (10) είναι μεγαλύτερη. Αυτό σημαίνει ότι το πλήθος των τρόπων που μπορεί να γίνει κάτι καθορίζει την πιθανότητα που αυτό μπορεί να συμβεί <sup>36</sup>.

Οι **Pascal και Fermat** το 1654 θέτουν τη βάση της σύγχρονης θεωρίας των πιθανοτήτων ξεκινώντας αλληλογραφία και πάλι με αφετηρία ερωτήσεις για τα **τυχερά παιχνίδια** που έθεσε ο Antoine Gombaux, Ιππότης του Μέρé, στον Blaise Pascal. Χρησιμοποιώντας τις βασικές αρχές της απαρίθμησης και του πολλαπλασιασμού, οι Pascal και Fermat ασχολούνται με τον κλάδο που θα κληθεί αργότερα στα μαθηματικά ως **συνδυαστική** <sup>37 38</sup>.

Ο **Leibnitz** επηρεάζεται από το έργο των Pascal και Fermat και πραγματοποιεί την πρώτη σύνδεση της **τυχειότητας με την πολυπλοκότητα** με μαθηματικούς πια όρους. Σύμφωνα με τον Chaitin <sup>39</sup>, ο Leibnitz αναφέρει χαρακτηριστικά στο έργο του "**Discours de métaphysique**" (1686) στα μέρη V και VI, τη δυσκολία να διακρίνει κανείς ένα κόσμο στον οποίο εφαρμόζονται οι επιστήμες, από έναν άλλο που δεν ισχύουν. Υποστηρίζει (ο Leibniz) ότι **πάντα μπορεί να βρεθεί μια μαθηματική εξίσωση η οποία μπορεί να ορίσει τα σημεία που σχηματίζει στο χαρτί ένα ψέκασμα από μελάνι**, και ότι αυτό μπορεί να γίνει πλέον με διάφορους τρόπους, όπως για παράδειγμα με την παρεμβολή Lagrange <sup>40</sup>. Συνεπώς, η ύπαρξη μαθηματικών τύπων δεν μπορεί να λειτουργήσει ως κριτήριο επιλογής για το αν κάτι είναι τυχαίο ή όχι. Αντίθετα, κριτήριο αποτελεί η πολυπλοκότητα που έχει η εκάστοτε εξίσωση, με

35 Nathan Bowman, 'The Reception of Gerolamo Cardano's Liber De Ludo Aleae', χ.χ., 4, [https://www.maa.org/sites/default/files/pdf/upload\\_library/46/Bowman\\_Cardano\\_ed.pdf](https://www.maa.org/sites/default/files/pdf/upload_library/46/Bowman_Cardano_ed.pdf).

36 Αντικλείδι, 'Leonard Mlodinow – Ο Γαλιλαίος Και Οι Πιθανότητες', Αντικλείδι (blog), 15 Φεβρουάριος 2019, [https://antikleidi.com/2019/02/15/mlodinow\\_galileo/](https://antikleidi.com/2019/02/15/mlodinow_galileo/).

37 Anders Hald, *A History of Probability and Statistics and Their Applications Before 1750* (John Wiley & Sons, 2003), 42.

38 «Η Συνδυαστική από τα πρώτα στάδια της εμφάνισης της είχε ως αντικείμενο τη μελέτη του σχηματισμού, της απαρίθμησης και των ιδιοτήτων των διατάξεων, των συνδυασμών και των διαμερίσεων ενός πεπερασμένου συνόλου κάτω από ορισμένες συνθήκες». Θεοδόσης Δημητράκος, *Σημειώσεις για το μάθημα συνδυαστική* (Σάμος: Πανεπιστήμιο Αιγαίου, 2014), 2, [http://www.samos.aegean.gr/math/dimitheo/Sindiastiki\\_Kef\\_1.pdf](http://www.samos.aegean.gr/math/dimitheo/Sindiastiki_Kef_1.pdf).

39 Gregory J. Chaitin, *Thinking About Gödel And Turing: Essays on Complexity, 1970-2007* (Hackensack, N.J: World Scientific Publishing Company, 2007), 242.

40 'Lagrange Polynomial', στο *Wikipedia*, 13 Απρίλιος 2024, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lagrange\\_polynomial&oldid=1218658172](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lagrange_polynomial&oldid=1218658172).

τις εξαιρετικά πολύπλοκες εξισώσεις να δείχνουν ότι δεν εξηγούν κάποιο φυσικό νόμο και ότι εμφανίζεται τυχειότητα ("irrégulier").

Το παράδειγμα του Leibnitz δεν μπορεί παρά να μη φέρει στο νου τις χρωματιστές κηλίδες του Pollock στον καμβά. Για τον Leibnitz λοιπόν, υφίσταται η τυχειότητα και η ύπαρξή της συσχετίζεται με την πολυπλοκότητα μιας μαθηματικής εξίσωσης.

Στον αντίποδα των παραπάνω, ο **Ισαάκ Νεύτων**<sup>41</sup> με το "**Philosophiae Naturalis Principa Mathematica**" το 1687, όπως και ο **Κοπέρνικος** πριν από αυτόν<sup>42</sup>, επιδιώκουν να εξηγήσουν τον φυσικό κόσμο με αυστηρούς κανόνες τάξης, οι οποίοι επιχειρούν να περιγράψουν τις κινήσεις των σωμάτων.

Το 1711 ο **Abraham de Moivre** εκδίδει το "**The Doctrine of Chances: a method of calculating the probabilities of events in play**", το δεύτερο βιβλίο σχετικά με τα τυχερά παιχνίδια, σε συνέχεια του έργου του Cardano, όπου εμφανίζεται ανάμεσα σε άλλα η αρχική διατύπωση αυτού που καλείται σήμερα ως **κανονική κατανομή ή κατανομή Gauss**<sup>43</sup>.

Το 1748 ο **Hume** στο δοκίμιό του για την πιθανότητα, "**On Probability**", ξεκινάει χαρακτηριστικά στην πρώτη φράση να δηλώνει απερίφραστα ότι δεν υπάρχει Τύχη στον κόσμο<sup>44</sup>:

*«Ενώ δεν υπάρχει τέτοιο πράγμα στον κόσμο που λέγεται Τύχη (chance)....» (μτφρ. Τ. Κουιμτζόγλου)*

Και συνεχίζει:

*«..., η άγνοιά μας για την πραγματική αιτία οποιουδήποτε συμβάντος έχει την ίδια επιρροή στην κατανόηση και προκαλεί δοξασίες ή γνώμες.» (μτφρ. Τ. Κουιμτζόγλου)*

Εδώ γίνεται σύνδεση των εννοιών της τύχης, της αιτίας όπως και της γνώσης για ένα γεγονός. **Κατά τον Hume, όλα έχουν κάποια αιτία, είτε είμαστε σε θέση να την αντιληφθούμε, είτε όχι.** Η τύχη είναι μια δοξασία η οποία προκύπτει στις περιπτώσεις που δεν μπορούμε να ανακαλύψουμε ή να αναγνωρίσουμε για οποιοδήποτε λόγο την πραγματική αιτία. Ο Hume εκφράζει την πεποίθηση ότι υπάρχει η έννοια της πιθανότητας, η οποία προκύπτει από την ανωτερότητα των δυνατοτήτων (chances) ενός γεγονότος να συμβεί προς μια κατεύθυνση, σε αντίθεση με τις δυνατότητες (chances) του γεγονότος να συμβεί προς την αντίθετη κατεύθυνση, οι οποίες είναι υποδεέστερες.

41 'Ισαάκ Νεύτων', στο *Βικιπαίδεια*, 23 Οκτώβριος 2017, [https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Ισαάκ\\_Νεύτων&oldid=6697229](https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Ισαάκ_Νεύτων&oldid=6697229).

42 Το 1543 ο Νικόλαος Κοπέρνικος έρχεται να αμφισβητήσει το γεωκεντρικό μοντέλο του Πτολεμαίου παρουσιάζοντας την πραγματεία του: «Έξι Βιβλία για τις Περιστροφές των Ουρανίων Σφαιρών», "De Revolutionibus Orbium Coelestium Libri VI". 'Nicolaus Copernicus', στο *Wikipedia*, 8 Ιούλιος 2024, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nicolaus\\_Copernicus&oldid=1233408967](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nicolaus_Copernicus&oldid=1233408967).

43 «Η **κανονική κατανομή** (γνωστή και ως *γκουασιανή κατανομή*) αναφέρεται σε συνεχείς μεταβλητές αποτελώντας μία συνεχή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Χρησιμοποιείται ως μία πρώτη προσέγγιση για να περιγραφούν τυχαίες μεταβλητές πραγματικών τιμών, οι οποίες τείνουν να συγκεντρώνονται γύρω από μια μέση τιμή. Η κανονική κατανομή αποτελεί την πιο σημαντική κατανομή της στατιστικής μεθοδολογίας». 'Κανονική κατανομή', στο *Βικιπαίδεια*, 7 Φεβρουάριος 2019, [https://el.wikipedia.org/wiki/Κανονική\\_κατανομή](https://el.wikipedia.org/wiki/Κανονική_κατανομή).

44 David Hume, *An Enquiry Concerning Human Understanding*, επιμέλ. Tom L. Beauchamp, Underlining edition (Oxford ; New York: Oxford University Press, 1999), 131, <https://arisuchan.jp/r/src/1499820435851-1.pdf>.

Στην περίπτωση ενός ζαριού, η φύση της τύχης είναι τέτοια η οποία καθιστά να αναγνωρίζουμε ότι όλα τα συμβάντα είναι το ίδιο πιθανά.

Τέλος, ένας άλλος ορισμός που σχετίζεται με την τυχαιότητα είναι η λέξη **serendipity**, η οποία καθιερώθηκε από τον συγγραφέα **Horace Walpole** το 18ο αιώνα, ως έννοια που συνδέεται με την ανακάλυψη πραγμάτων που κάποιος δεν αναζητά, αλλά αυτά απλώς προκύπτουν. Η έννοια αυτή σχετίζεται και με τις τυχαίες ανακαλύψεις στην επιστήμη <sup>45 46 47</sup>.

## 2.2 Η τυχαιότητα στις επιστήμες το 19ο και 20ο αιώνα

Το 19ο αιώνα, επιστήμες όπως η φυσική, τα μαθηματικά, η χημεία, η κοσμολογία, η γεωλογία, βιολογία και γενετική αρχίζουν να μελετώνται υπό νέα οπτική και δημιουργούν σταδιακά μια διαφορετική νέα ερμηνεία των φυσικών νόμων οι οποίοι βασίζονται στο ντετερμινισμό, την αιτιότητα και τη Νευτώνεια μηχανική. Η τυχαιότητα αρχίζει σταδιακά να έχει όλο και μεγαλύτερη σημασία. Σύμφωνα με ένα ποίημα που αποδίδεται στον **Goethe**, ενδεικτικό του κλίματος της εποχής:

*«Ο ιστός του κόσμου είναι χτισμένος από Αναγκαιότητα και Τυχαιότητα.*

*Αλίμονο σε αυτόν που έχει συνηθίσει τον εαυτό του από τη νιότη του να βρίσκει κάτι απαραίτητο σε ό,τι είναι ιδιότροπο,*

*και που θα απέδιδε κάτι όπως η λογική στην Τυχαιότητα και θα γινόταν θρησκεία του να παραδίνεται σε αυτή» <sup>48</sup> (μτφρ. Τ. Κουιμτζόγλου)*

Ο Μαρκήσιος **Pierre-Simon de Laplace** εκδίδει το 1814 το "**A Philosophical Essay on Probabilities**". Εδώ διατυπώνεται για πρώτη φορά ο ορισμός της πιθανότητας, ορισμός κατά Laplace, που είναι το πηλίκο του αριθμού των ευνοϊκών περιπτώσεων προς το συνολικό πλήθος των περιπτώσεων. Κατά τον Laplace, η ανθρώπινη γνώση είναι περιορισμένη και ακόμα και για τα λίγα που γνωρίζουμε, ένας από τους βασικούς τρόπους να διαπιστώνουμε την αλήθεια βασίζεται στις πιθανότητες <sup>49</sup>. Στο ίδιο πνεύμα με τον Hume, ο Laplace διατυπώνει κι αυτός ότι όλα όσα γίνονται έχουν κάποια αιτία. Τα τωρινά γεγονότα βασίζονται στα προηγούμενα και κανένα πράγμα δεν μπορεί να συμβεί χωρίς να το δημιουργεί κάποια αιτία. Αυτό το αξίωμα ονομάζεται ως **«Αρχή επαρκούς αιτίας»** και επεκτείνεται και σε ενέργειες που φαίνονται αδιάφορες <sup>50</sup>. Πολλές φορές ο άνθρωπος δεν είναι σε θέση να αναγνωρίσει την πραγματική αιτία, για διάφορους λόγους. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχει αιτία πίσω από τα γεγονότα.

45 'Definition of SERENDIPITY', 12 Νοέμβριος 2023, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/serendipity>.

46 'ΘΕΜΑΤΑ ΙΣΤΟΡΙΑΣ ΤΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ - Τυχαίες ανακαλύψεις στη Χημεία', ημερομηνία πρόσβασης 12 Δεκέμβριος 2023, [http://molwave.chem.auth.gr/chemhistory/random\\_discoveries.html](http://molwave.chem.auth.gr/chemhistory/random_discoveries.html).

47 'ΘΕΜΑΤΑ ΙΣΤΟΡΙΑΣ ΤΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ - Ορισμός της τυχαιότητας στην επιστήμη', ημερομηνία πρόσβασης 12 Δεκέμβριος 2023, [http://molwave.chem.auth.gr/chemhistory/random\\_discoveries/3\\_1.html](http://molwave.chem.auth.gr/chemhistory/random_discoveries/3_1.html).

48 'GOETHE', ημερομηνία πρόσβασης 3 Ιούλιος 2023, <http://home.primus.ca/~remedy3/GOETHE.htm>.

49 Pierre Simon Marquis de Laplace, *A Philosophical Essay on Probabilities*, μετάφρ. F. W. Truscott και F. L. Emory (London: John Wiley & Sons, 1902), 1, [https://bayes.wustl.edu/Manual/laplace\\_A\\_philosophical\\_essay\\_on\\_probabilities.pdf](https://bayes.wustl.edu/Manual/laplace_A_philosophical_essay_on_probabilities.pdf).

50 Laplace, 3.

Σύμφωνα με τον Laplace:

*«Πρέπει να θεωρήσουμε ότι η τωρινή κατάσταση του σύμπαντος είναι αποτέλεσμα της προηγούμενης του κατάστασης, καθώς και ότι είναι η αιτία της κατάστασης που πρόκειται να ακολουθήσει. Αν σκεφτούμε ότι υπάρχει μια διάνοια η οποία μπορεί να κατανοήσει όλες τις δυνάμεις με τις οποίες κινείται η φύση και τις αντίστοιχες καταστάσεις των όντων που την απαρτίζουν, μία διάνοια τόσο ευρεία που να μπορεί να αναλύσει αυτά τα δεδομένα, θα μπορούσε να συμπεριλάβει στην ίδια φόρμουλα τις κινήσεις των μεγαλύτερων σωμάτων του σύμπαντος αλλά και των μικρότερων ατόμων, γιατί για αυτή τίποτα δεν θα ήταν αβέβαιο και το μέλλον όπως το παρελθόν θα παρουσιαζόταν σαν το παρόν στα μάτια της.»*<sup>51</sup> (μτφρ. Τ. Κουιμτζόγλου)

Η θεώρηση του Laplace δεν αφήνει περιθώριο για τυχαίες διαδικασίες. Η θέση του είναι ίδια ουσιαστικά με αυτή των Στωικών, και την υποστηρίζει με εξαιρετικό ζήλο. Η τυχαιότητα δεν έχει καμία θέση σε αυτό το μοντέλο θεώρησης του κόσμου. Από τις αρχές όμως του επόμενου αιώνα, θα ξεκινήσουν διεργασίες στις επιστήμες που σιγά σιγά θα αρχίσουν να θέτουν τα θεμέλια για αλλαγή αυτής της θέσης και θα φανερώσουν την πιθανότητα ύπαρξης ενός διαφορετικού μοντέλου του κόσμου, το οποίο δεν απορρίπτει την τυχαιότητα.

Το 1824 ο **Sadi Carnot** δημοσιεύει τη μελέτη του με τίτλο: «**Σκέψεις σχετικά με την κινητήρια δύναμη της φωτιάς**» ("**Reflections on the Motive Power of Fire**"), όπου διερευνά τη σχέση μεταξύ θερμότητας, δύναμης, ενέργειας και απόδοσης της μηχανής<sup>52</sup>. Ο **Carnot** θεωρείται ως ο πατέρας της θερμοδυναμικής και το έργο του αποτελεί τη βάση για την εξέλιξη αυτού του νέου τομέα της φυσικής. Το έργο του συνεχίζουν οι **Rankine, Clausius, Thomson** κ.ά., με αποτέλεσμα να οριστούν τελικά οι 3 νόμοι της θερμοδυναμικής.

Κατά τον **Lindley**<sup>53</sup>, η θερμότητα δεν μπορεί να είναι το συλλογικό κόχλασμα των μεμονωμένων ατόμων, καθώς αν ήταν, θα έπρεπε η φυσική της να υπόκειται στους νόμους του Νεύτωνα, αφού αυτοί εφαρμόζονταν πρώτα στα άτομα. Αν ίσχυε αυτό, η συμπεριφορά της θερμότητας θα ήταν προβλέψιμη (σύμφωνα με τη Νευτώνεια προσέγγιση), κάτι όμως που τελικά δεν ισχύει. Ο Lindley υποστηρίζει ότι ο φυσικός κόσμος είναι στη βάση του αιποκρατικός. **Παρ' όλα αυτά δεν υπάρχει δυνατότητα για την τέλεια επιστημονική γνώση και άρα δυνατότητα της τέλει προβλεψιμότητας**<sup>54</sup>.

Στις αρχές του 19ου αιώνα, οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της εργαστηριακής έρευνας καθιερώνουν τη χρήση του μικροσκοπίου, ως όργανο που επιτρέπει την παρατήρηση αερίων και υγρών σε μεγεθύνσεις που δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθούν στο παρελθόν. Το 1827 διαπιστώνεται από τον Βρετανό βοτανολόγο **Robert Brown** ότι αιωρούμενα μόρια γύρης μέσα σε νερό μετακινούνται κατά τρόπο **εμφανώς τυχαίο**, εξαιτίας του συνεχούς βομβαρδισμού τους από τις γρήγορες κινήσεις των ατόμων και μορίων του υγρού. Αυτή η τυχαία κίνηση ονομάστηκε **κίνηση Brown**<sup>55</sup> (Εικόνα 2\_4). Η κίνηση Brown καταδεικνύει την ύπαρξη των μορίων και την μη καθολική εφαρμογή των Νόμων του Νεύτωνα. Σε αυτή την περίπτωση η **στατιστική** προσέγγιση δεν μπορεί να

<sup>51</sup> Laplace, 4.

<sup>52</sup> 'Thermodynamics', στο *Wikipedia*, 7 Μάιος 2019, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Thermodynamics&oldid=895916339>.

<sup>53</sup> David Lindley, *Η αρχή της αβεβαιότητας* (Π. Τραυλός, 2011), 35.

<sup>54</sup> Lindley, 43.

<sup>55</sup> 'Για την κίνηση Brown', *Scientific American*, ημερομηνία πρόσβασης 7 Ιανουάριος 2018, [http://www.sciam.gr/topics.asp?action\\_id=topic\\_analysis&issue\\_id=402&topic\\_id=676](http://www.sciam.gr/topics.asp?action_id=topic_analysis&issue_id=402&topic_id=676).

εξηγήσει μέχρι την τελευταία λεπτομέρεια τις κινήσεις των σωματιδίων, αλλά μπορεί να δώσει ένα **στατιστικό μέτρο** <sup>56</sup>.

Το 1888 ο **John Venn** δημοσιεύει το βιβλίο "**The Logic of Chance**" κλασσικό πλέον σύγγραμμα για τη θεωρία πιθανοτήτων. Στο βιβλίο του ο Venn αναφέρεται ανάμεσα σε άλλα στις έννοιες της τυχαιότητας (chance), τα αίτια (causation) και το σχεδιασμό (design). Σύμφωνα με τον Venn, στο κεφάλαιο V με τίτλο "**Randomness and its Scientific Treatment**" αναφέρεται:

*«Πιθανότατα το καλύτερο τυπικό παράδειγμα που μπορούμε να δώσουμε για τον επιστημονικό όρο της τυχαίας κατανομής μπορεί να δοθεί με τη διάταξη των σταγόνων βροχής σε μία νεροποντή. Κανένας δεν μπορεί να μαντέψει σε ποιο σημείο και πότε θα πέσει μία σταγόνα, αλλά γνωρίζουμε ότι αν βάλουμε στη βροχή μια κόλλα χαρτί, σταδιακά θα σηματοδοτεί ομοιόμορφα από τις σταγόνες, και αν σημειώνουμε δυο ίσες περιοχές στο χαρτί, αυτές σταδιακά θα έτειναν να δέχονται σταγόνες το ίδιο συχνά.»* <sup>57</sup> (μτφρ. Τ. Κουιμτζόγλου)

Ο Venn σημειώνει ότι έχει σημασία όχι μόνο να εξετάζουμε το τελικό αποτέλεσμα, αλλά **την ίδια τη διαδικασία** που οδηγεί στο συγκεκριμένο αποτέλεσμα. Εξαιρετική σημασία έχει η επιλογή των σταδίων κατά τα οποία γίνεται η εξέταση της διαδικασίας, διότι η επιλογή εξέτασης συγκεκριμένου σταδίου μπορεί να οδηγήσει κάθε φορά σε διαφορετικά συμπεράσματα, αφού σε κάθε στάδιο μπορεί να μην ισχύουν οι ίδιες συνθήκες <sup>58</sup>.

Ο Venn, προσπαθώντας να αξιολογήσει με απεικονιστικό τρόπο την τυχαιότητα που υπάρχει στη φύση, και συγκεκριμένα στη διαδοχή των δεκαδικών στοιχείων του αριθμού **π**, κάνει το εξής πείραμα: Σχεδιάζει σε δύο διαστάσεις, στο χαρτί, ένα συνεχιζόμενο διάνυσμα με την ακόλουθη σύμβαση: Ξεκινώντας από ένα σημείο, σχεδιάζει την αρχή του διανύσματος και προχωρά με σταθερό βήμα, ενώ αλλάζει διεύθυνση σύμφωνα με τις διαδοχικές τιμές του αριθμού π, για παράδειγμα 0 για επάνω, 1 για διαγώνια αριστερά, κ.ο.κ.... Κατά τον Venn:

*«Το μάτι είναι πολύ γρήγορο στο να αναγνωρίζει συμπτώματα ακανονιστίας στη διάταξη, ή όποια τάση για πυκνότερη συσσώρευση στη μία κατεύθυνση από μία άλλη.»* <sup>59</sup> (μτφρ. Τ. Κουιμτζόγλου)

...και καταλήγει στο ότι το αποτέλεσμα του φαίνεται ότι αποδίδει μια πολύ καλή γραφική ένδειξη της **τυχαιότητας**, το οποίο έχει συγκρίνει με ανάλογες διαδρομές από σειρές αριθμών που έχουν ληφθεί από λογαριθμικούς πίνακες και άλλους τρόπους, οι οποίοι παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα <sup>60</sup>.

Το γράφημα που προκύπτει είναι η Εικόνα 2\_5, η οποία είναι μια απεικόνιση αυτού που θα ονομασθεί αργότερα ως **τυχαία διαδρομή (random walk)** <sup>61</sup>. Η ομοιότητα που έχει το συγκεκριμένο γράφημα με

<sup>56</sup> Lindley, Η αρχή της αβεβαιότητας, 31.

<sup>57</sup> John Venn, *The Logic of Chance, 3rd Edition An Essay on the Foundations and Province of the Theory of Probability, With Especial Reference to Its Logical Bearings and Its Application to Moral and Social Science and to Statistics*, 2018, 104, <http://www.gutenberg.org/ebooks/57359>.

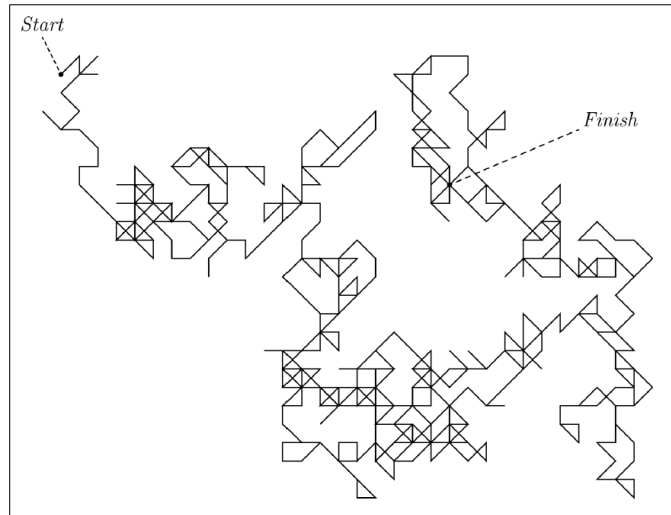
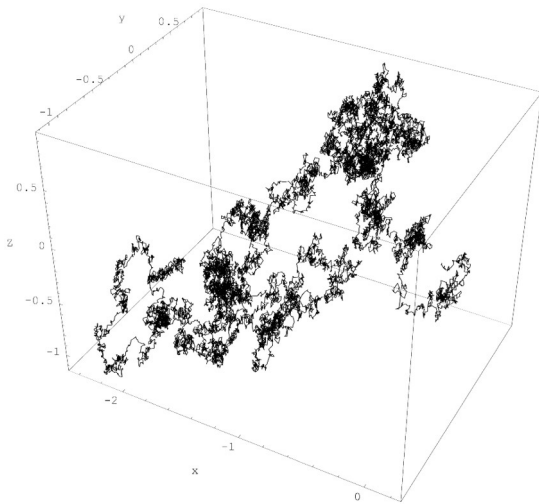
<sup>58</sup> Venn, 105.

<sup>59</sup> Venn, 121.

<sup>60</sup> Venn, 127.

<sup>61</sup> «Μια τυχαία διαδρομή είναι ένα μαθηματικό αντικείμενο, γνωστό ως στοχαστική ή τυχαία διαδικασία, που περιγράφει μια διαδρομή η οποία αποτελείται από τυχαία βήματα σε κάποιο μαθηματικό χώρο, όπως πχ αυτόν των ακεραίων αριθμών.» 'Random Walk', στο *Wikipedia*, 20 Απρίλιος 2019, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?>

τις απεικονίσεις της καταγραφής της κίνησης Brown είναι παραπάνω από εμφανής. Στην πραγματικότητα οι απεικονίσεις της κίνησης Brown είναι κι αυτές τυχαιές διαδρομές, με την ορολογία “random walk” να προτείνεται το 1905 από τον **Karl Pearson** <sup>62</sup>.



Εικόνα 2\_4 (αριστερά): Απεικόνιση της κίνησης Brown στον τρισδιάστατο χώρο. Πηγή: *Wiener process 3d.png*, A single sample path of a three-dimensional Brownian motion (Wiener process)  $W_t$ , as generated by Wolfram Mathematica with a time step of size 0.0001, for times  $0 \leq t \leq 2$ , [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wiener\\_process\\_3d.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wiener_process_3d.png), εικόνα του/της: Original uploader was *Sullivan.t.j* at *English Wikipedia*, άδεια: *CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported* license.

Εικόνα 2\_5 (δεξιά): Απεικόνιση τυχαιάς διαδρομής για τον αριθμό  $\pi$ . Πηγή: John Venn, *The Logic of Chance, 3rd Edition An Essay on the Foundations and Province of the Theory of Probability, With Especial Reference to Its Logical Bearings and Its Application to Moral and Social Science and to Statistics*, 2018, σελ. 126, <http://www.gutenberg.org/ebooks/57359>.

Το 1859 ο **Κάρλος Δαρβίνος**, βιολόγος, γεωλόγος και φυσιοδίφης, δημοσιεύει το έργο του για την εξέλιξη των ειδών με τίτλο: “**On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life**” <sup>63</sup>, το οποίο θεωρείται ως το σημαντικότερο κείμενο στην ιστορία της σύγχρονης βιολογίας. Ο Δαρβίνος, όπως και ο Lamarck, υιοθέτησε την έννοια της εξέλιξης των ειδών. Η διαφορά μεταξύ τους ήταν όμως στον τρόπο με τον οποίο αυτή δικαιολογείται. Ενώ ο Lamarck επικεντρώνεται στη χρήση ή αχρησία οργάνων και χαρακτηριστικών, ο Δαρβίνος πιστεύει ότι η εξέλιξη είναι αποτέλεσμα αυτού που καλεί ως **φυσική επιλογή**.

Στο “**On the Origin of Species**” γίνεται αναφορά στην έννοια της **παραλλαγής** (variation). Ο Δαρβίνος αναφέρει ότι κατά την παρατήρηση μεμονωμένων μελών ενός πληθυσμού του ίδιου είδους είτε ζώων είτε φυτών, αυτό που προκαλεί εντύπωση είναι οι μεγάλες διαφορές του ενός μέλους του πληθυσμού από ένα άλλο <sup>64</sup>. Ο Δαρβίνος εκτιμά ότι η μεγάλη διαφοροποίηση που

[title=Random\\_walk&oldid=893350809](https://www.gutenberg.org/ebooks/57359).

<sup>62</sup> K. Pearson, ‘The Problem of the Random Walk’, *Nature*, 1905, 294, <http://www.e-m-h.org/Pear05.pdf>.

<sup>63</sup> Charles Darwin, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*, 1859, [http://www.f.waseda.jp/sidoli/Darwin\\_Origin\\_Of\\_Species.pdf](http://www.f.waseda.jp/sidoli/Darwin_Origin_Of_Species.pdf).

<sup>64</sup> Darwin, 14.

παρατηρείται σε ζώα και φυτά οφείλεται μεν στις διαφορετικές συνθήκες στις οποίες μεγαλώνουν, αλλά θεωρεί δε ότι η πιο συχνή αιτία διαφοροποίησης οφείλεται στο ότι τα αρσενικά και θηλυκά στοιχεία αναπαραγωγής έχουν επηρεαστεί **πριν** τη σύλληψη<sup>65</sup>. Όπως ο ίδιος αναφέρει:

*«Η παραλλαγή ορίζεται από πολλούς αγνώστους νόμους, πολύ περισσότερο από αυτόν του συσχετισμού της ανάπτυξης. Κάτι (από αυτήν) μπορεί να αποδίδεται στην άμεση δράση των συνθηκών της ζωής. Κάτι (από αυτήν) πρέπει να αποδίδεται στην χρήση και την αχρησία. Έτσι το τελικό αποτέλεσμα καταλήγει να είναι απείρως πολύπλοκο.»<sup>66</sup>*  
(μτφρ. Τ. Κουιμτζόγλου)

Σε πολλά σημεία του κειμένου του ο Δαρβίνος κάνει αναφορά στις αιτίες των παραλλαγών αυτών οι οποίες όταν δεν μπορούν να αποδοθούν κάπου, ανάγονται στο **ατύχημα** (accidental). Σύμφωνα με τον Δαρβίνο:

*«Τα αποτελέσματα της συνήθειας είναι πολύ κατώτερης σημασίας από τα αποτελέσματα της φυσικής επιλογής αυτού που μπορεί να ονομαστεί τυχαία παραλλαγή των ενστίκτων, δηλαδή των παραλλαγών που προέρχονται από τις ίδιες άγνωστες αιτίες που παράγουν μικρές παρεκκλίσεις της σωματικής δομής.»<sup>67</sup>* (μτφρ. Τ. Κουιμτζόγλου)

Παρατηρείται λοιπόν ότι ο Δαρβίνος δέχεται την έννοια της **τυχαιότητας** ως παράγοντα δημιουργίας των **παραλλαγών** (variations). Η τυχαιότητα, ως (α)τύχημα, υποδηλώνει τη μη δυνατότητα ανεύρεσης της αιτίας ενός αποτελέσματος, καθώς και ότι ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα δεν οφείλεται σε συγκεκριμένη πρόθεση. Η αδυναμία εύρεσης της αιτίας τοποθετεί ως παράμετρο επιρροής την τύχη<sup>68</sup>. Η λέξη accident που χρησιμοποιεί ο Δαρβίνος έχει μια αρνητική θα μπορούσε να πει κανείς χροιά, με την έννοια ότι το ατύχημα είναι μια **παρέκκλιση** από τον κανόνα ή την αρχική πρόθεση. Για το Δαρβίνο, υπάρχουν δύο είδη τυχαιότητας: **α.** η τυχαιότητα ως άγνωστη αιτία που προκαλεί μικρές τροποποιήσεις στο βασικό θέμα, όπως λ.χ. η δομή ενός σώματος και **β.** η τυχαιότητα των φυσικών διεργασιών, όπως είναι για παράδειγμα η τυχαία γονιμοποίηση ενός άνθους από μια μέλισσα ή η κίνηση των ρευμάτων της θάλασσας, η οποία μεταφέρει σπόρους φυτών σε διαφορετικά μέρη. Ο Δαρβίνος θεωρεί ότι ουσιαστικά η τυχαιότητα της δεύτερης κατηγορίας **δεν είναι πραγματική**, καθώς τα υδάτινα ρεύματα ορίζονται από τους φυσικούς νόμους.

*«Αυτά τα μέσα μεταφοράς ονομάζονται τυχαία (accidental), αλλά αυτό δεν είναι απόλυτα σωστό: Τα ρεύματα της θάλασσας δεν είναι τυχαία, ούτε και η κατεύθυνση των επικρατούντων ανέμων.»<sup>69</sup>* (μτφρ. Τ. Κουιμτζόγλου)

Σε αυτή την περίπτωση, η σωστή απόδοση σύμφωνα με τον Δαρβίνο θα έπρεπε να γίνεται με τον όρο **περιστασιακή** (occasional), αντί για τη χρήση του όρου **τυχαία/συμπτωματική** (accidental)<sup>70</sup>.

Ο Curtis Johnson στο "**Darwin's Dice: The Idea of Chance in the Thought of Charles Darwin**" υποστηρίζει ότι η θεωρία του Δαρβίνου είναι στην ουσία μια θεωρία βασισμένη στην πραγματικότητα στην **τυχαιότητα**. Σύμφωνα με τον Johnson, η αρχική έκδοση του βιβλίου περιείχε

65 Darwin, 15.

66 Darwin, 46.

67 Darwin, 191.

68 Darwin, 123.

69 Darwin, 323.

70 Darwin, 319.

λέξεις όπως **chance** και **accident**, οι οποίες αντικαταστάθηκαν σε μετέπειτα εκδόσεις από φράσεις όπως **spontaneous variation**<sup>71</sup>, λόγω της δυσκολίας αποδοχής που περιείχε το εγχείρημα του να συνδέσει τη θεωρία του ο Δαρβίνος με έννοιες όπως η τύχη. Κατά τον Johnson, στο έργο του Δαρβίνου υπάρχουν δύο είδη τυχαιότητας. **1. Η τυχαιότητα ως πιθανότητα του κάτι να συμβεί ή όχι**, π.χ. η πιθανότητα να επιβιώσει ένας οργανισμός ή όχι, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που έχει, στο πλαίσιο της φυσικής επιλογής. **2. Η τυχαιότητα που συνιστά στη δημιουργία ενός μεγάλου δείγματος διαφορετικών χαρακτηριστικών τα οποία προκύπτουν από την ατομική παραλλαγή**<sup>72</sup>.

Ο **Gregor Mendel** ήταν Αυστριακός μοναχός, ο οποίος θεωρείται ως ο πατέρας της γενετικής. Διεξάγοντας πειράματα διασταυρώσεων ποικιλιών για το είδος μοσχομπίζελο (*Pisum sativum*) σε ένα διάστημα από το 1856 έως το 1863, καταφέρνει να διατυπώσει τους αποκαλούμενους νόμους της **Μενδελιανής κληρονομικότητας**<sup>73</sup>. Σύμφωνα με αυτούς, οι διαφορετικές μορφές ενός οργανισμού καθορίζονται από γονίδια τα οποία καλούνται αλληλόμορφα, δηλαδή γονίδια που μεταφέρουν πληροφορία για συγκεκριμένη ιδιότητα και έχουν την ίδια θέση στα χρωμοσώματα. **Γονότυπος** καλείται το σύνολο των αλληλόμορφων γονιδίων που έχει ένας οργανισμός, ενώ **φαινότυπος** καλείται το σύνολο των χαρακτήρων που αποτελούν την έκφραση του γονοτύπου<sup>74</sup>. Κατά τη διαδικασία της μείωσης, δηλαδή της ειδικής διαδικασίας κατά την οποία ένα κύτταρο διαιρείται προκειμένου να πολλαπλασιαστεί, **εμφανίζεται τυχαιότητα**, καθώς γίνεται ανασυνδυασμός των γονιδίων **με ΤΥΧΑΙΑ διανομή χρωμοσωμάτων και ανταλλαγές περιοχών χρωμοσωμάτων**<sup>75</sup>. Κατά την εξέλιξη της διαδικασίας ενδέχεται να εμφανιστούν **μεταλλάξεις**, οι οποίες αυξάνουν περαιτέρω την τυχαιότητα. Σύμφωνα με τον ορισμό του National Human Genome Research Institute genome.gov:

*«Μια μετάλλαξη είναι μια αλλαγή στην αλληλουχία DNA ενός οργανισμού. Οι μεταλλάξεις μπορεί να προκύψουν από σφάλματα στην αντιγραφή του DNA κατά τη διάρκεια της κυτταρικής διαίρεσης, της έκθεσης σε μεταλλαξιογόνους παράγοντες ή μιας ιογενούς μόλυνσης.»*<sup>76</sup> (μτφρ. Τ. Κουιμτζόγλου)

Οι μεταλλάξεις μπορούν να δημιουργηθούν από διαφορετικές αιτίες όπως λάθη στην αντιγραφή ή επισκευή του DNA ή RNA, βλάβες λόγω ακτινοβολίας, χημικών, ή ιούς, κ.λπ. και έχουν διαφορετικό βαθμό. Υπάρχουν μεταλλάξεις μικρής και μεγάλης κλίμακας που επηρεάζουν τις πρωτεΐνες και τα κύτταρα με διαφορετικό τρόπο<sup>77</sup>. Η λέξη μετάλλαξη έχει αρνητική χροιά, λόγω του ότι υποδηλώνει μη σκόπιμη ή μη προγραμματισμένη αλλοίωση του κώδικα των πρωτεϊνών και των κυττάρων. Μελέτες σε συγκεκριμένα είδη έχουν δείξει για παράδειγμα ότι μεταλλάξεις στις πρωτεΐνες είναι βλαβερές σε ποσοστό κατά περίπου 70% με το υπόλοιπο ποσοστό να είναι είτε ουδέτερο, είτε ασθενώς ευεργετικό

71 Noah Berlatsky, 'True Darwinism Is All About Chance', Pacific Standard, ημερομηνία πρόσβασης 22 Ιούνιος 2019, <https://psmag.com/environment/wealth-rich-chance-charles-darwin-darwinism-chance-meritocracy-89764>.

72 Berlatsky.

73 'Μεντελική κληρονομικότητα', στο *Βικιπαίδεια*, 24 Μάρτιος 2018, [https://el.wikipedia.org/wiki/Μεντελική\\_κληρονομικότητα](https://el.wikipedia.org/wiki/Μεντελική_κληρονομικότητα).

74 Βασιλική Αλεπόρου-Μαρίνου κ.ά., *Βιολογία Θετικής κατεύθυνσης Γ'τάξης Γενικού Λυκείου* (Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών και Εκδόσεων «Διόφαντος», 1999), 70–71.

75 'Meiosis', στο *Wikipedia*, 16 Ιούνιος 2019, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Meiosis&oldid=902079797>.

76 'Mutation', ημερομηνία πρόσβασης 3 Ιούλιος 2024, <https://www.genome.gov/genetics-glossary/Mutation>.

77 'Mutation', στο *Wikipedia*, 17 Ιούνιος 2019, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Mutation&oldid=902252820>.



<sup>78</sup>. Παραδείγματα ευεργετικών μεταλλάξεων είναι μετάλλαξη που προσδίδει ανοχή στον ιό HIV, στην ελονοσία ή στα αντιβιοτικά για συγκεκριμένα βακτήρια (ευεργετική μετάλλαξη για το βακτήριο).

Γενικά, η έννοια της **μετάλλαξης** θεωρείται ότι είναι συνδεδεμένη με την έννοια της **μη προβλεψιμότητας και την τυχαιότητα**. Ωστόσο αυτό ισχύει σε ένα μόνο ποσοστό. Οι αιτίες δημιουργίας των μεταλλάξεων αυτών, είναι μεν συγκεκριμένες, αλλά δεν είναι προκαθορισμένες και αυτή είναι η πρώτη παράμετρος τυχαιότητας στη διαδικασία της μετάλλαξης. Όπως υποστηρίζεται, **οι συνέπειες μίας μετάλλαξης δεν σχετίζονται με την πιθανότητα που θα συμβεί ή όχι αυτή η μετάλλαξη**<sup>79</sup>, δηλαδή μια ευεργετική, ουδέτερη ή βλαβερή μετάλλαξη μπορεί να πραγματοποιηθεί στο ίδιο ποσοστό. Σύμφωνα με τους **Futuyama και Kirckpatrick**<sup>80</sup>, η μετάλλαξη είναι τυχαία από την άποψη ότι δεν είναι γνωστό πώς θα επηρεαστεί η επιβίωση και η αναπαραγωγή, καθώς και ότι νέες συνθήκες δεν αυξάνουν τις ευεργετικές μεταλλάξεις που είναι ευεργετικές σε εκείνες τις συνθήκες.

Όπως φάνηκε στις προηγούμενες παραγράφους, η τυχαιότητα στη Βιολογία είναι μια αμφιλεγόμενη έννοια. Η θεωρία του Δαρβίνου είναι μια θεωρία αυστηρά ορθολογική, η οποία όμως δεν θα μπορούσε να βασιστεί, αν δεν υπήρχε μια πολύ μεγάλη βάση οργανισμών πάνω στην οποία μπορεί να εφαρμοστεί η διαδικασία της φυσικής επιλογής. Αναφέρθηκε ο τρόπος πολλαπλασιασμού των οργανισμών, η μεταφορά της γενετικής πληροφορίας και ο συνδυασμός των γονιδίων. Παρουσιάστηκε το ζήτημα των μεταλλάξεων και ο αυθόρμητος τρόπος με τον οποίο αυτές συμβαίνουν. Ο **Heams** παραθέτει τον Merlín όπου σύμφωνα με αυτόν, η βιολογία είναι μια εμπειρική επιστήμη στην οποία όταν πρόκειται για απρόβλεπτα γεγονότα, οι βιολόγοι πολύ συχνά δεν έχουν τα εργαλεία να διαπιστώνουν αν αυτά είναι τυχαία, χαστικά, θορυβώδη, στοχαστικά, πιθανοκρατικά ή αβέβαια<sup>81</sup>. Παρ' όλα αυτά, τυχαία γεγονότα συμβαίνουν στη Βιολογία και αυτά μπορούν να συνοψιστούν σε τρεις κύριες κατηγορίες<sup>82</sup>:

α. **Στις μεταλλάξεις**: Οι μεταλλάξεις μπορούν να πραγματοποιούνται με στοχαστικό τρόπο, να οφείλονται σε διαφορετικές αιτίες, να επηρεάζουν διαφορετικά βιολογικά στοιχεία, σε διαφορετική θέση και σε διαφορετικό βαθμό.

Κατά τον Heams, οι αυθόρμητες γενετικές μεταλλάξεις μπορούν να εξηγηθούν από φυσικούς νόμους, αλλά αυτές παρουσιάζονται τυχαία στο DNA<sup>83</sup>.

β. **Στη γενετική διαδικασία της αναπαραγωγής**, με το διαχωρισμό των χρωμοσωμάτων κάθε πατρικού και μητρικού οργανισμού κατά τη διαδικασία της μείωσης, όπου παρατηρείται η σύνθεση του νέου συνδυασμένου χρωμοσώματος, με τις όποιες τυχαίες ανταλλαγές και τυχαία αναδιάταξη γονιδίων, στην τυχαιότητα στην έκφραση των γονιδίων, διαδικασίες που έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή ενός νέου οργανισμού μέσα από ένα τεράστιο εύρος πιθανών δυνατοτήτων.

78 'Mutation'.

79 L. Loewe, 'Genetic Mutation', *Nature Education*, 2008, <https://www.nature.com/scitable/topicpage/genetic-mutation-1127>.

80 Douglas J. Futuyama και Mark Kirckpatrick, *Evolution*, 4th έκδ. (Sunderland, Massachusetts USA: Sinauer Associates, Inc, 2017), 95.

81 Thomas Heams, 'Randomness in Biology', *Mathematical Structures in Computer Science* 24, τχ. 3 (Ιούνιος 2014): 3, <https://doi.org/10.1017/S096012951200076X>.

82 Heams, 5,6.

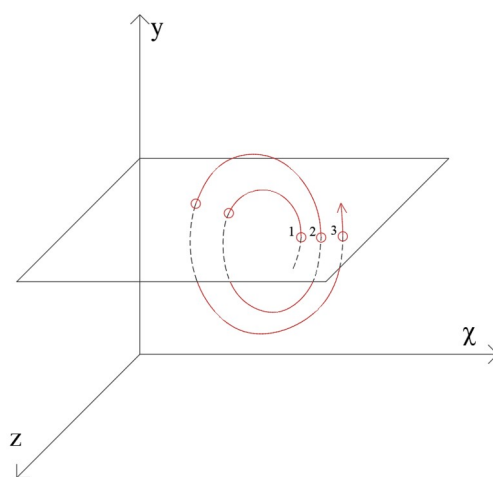
83 Heams, 3.

γ. **Στην επιρροή του περιβάλλοντος**, βιοτικού ή αβιοτικού, καθώς οι περιβαλλοντικές συνθήκες και διακυμάνσεις, είτε περιοδικές όπως οι εποχές, είτε στοχαστικές όπως για παράδειγμα κάποιο απρόβλεπτο φυσικό γεγονός, επιδρούν δραστικά σε όλα τα στάδια της εξέλιξης των πληθυσμών.

Ο **Ernst Mayr** υποστηρίζει για το ίδιο ζήτημα <sup>84</sup>, ότι **οι στοχαστικές διαδικασίες** παίζουν κυρίαρχο ρόλο στη διαδικασία της επιβίωσης και αναπαραγωγής, με την τύχη να εμφανίζεται τόσο αρχικά στη διαδικασία της μείωσης και της επιβίωσης των νέων ζυγωτών, όσο και στην επιβίωση ακόμα και των ευνοϊκών γονιδιακών συνδυασμών από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες λειτουργούν με αδιάκριτο τρόπο, προτού καν μπορέσει να εξελιχθεί η διαδικασία της φυσικής επιλογής και να επιβιώσουν οι γονότυποι με τα περισσότερα πλεονεκτήματα.

Το 1893 ο Γάλλος μαθηματικός **Henri Poincaré**, διαπιστώνει ότι οι τροχιές των ουρανίων σωμάτων, τα οποία επηρεάζονται από τις βαρυτικές δυνάμεις, περιέχουν τόσο την κανονικότητα όσο και την μη προβλεψιμότητα, μία ασαφή ισορροπία παραμέτρων που θα ονομαστεί τελικά «**Χάος**». Στην πραγματεία του, «**Περί του προβλήματος των τριών σωμάτων και των εξισώσεων της δυναμικής**», ο Poincaré επιχειρεί να επιλύσει μαθηματικά τις κινήσεις όχι **δύο σωμάτων** (π.χ. Ήλιος και Γη), όπως είχε κάνει μέχρι τότε ο Νεύτωνας, αλλά εξετάζει τη δυναμική με την οποία αλληλεπιδρούν **τρία σώματα** μεταξύ τους, στο χώρο και το χρόνο. Ένα από τα μαθηματικά εργαλεία που δημιουργεί, και το οποίο του αποκαλύπτει σημαντικά στοιχεία, είναι το επίπεδο Poincaré (Εικόνα 2\_6).

Η εικόνα αυτή απεικονίζει, υπό τη μορφή γραφικής παράστασης, την περιοδικότητα της συνεχόμενης κίνησης ενός σώματος. Η σπικιοποίηση των κινήσεων σύνθετων συστημάτων (σύστημα με 3 ή και περισσότερα σώματα) επιτρέπει στον Poincaré να διαπιστώσει ότι ακόμα και στην περίπτωση ενός απλού συστήματος με 3 σώματα όπως η Σελήνη, η Γη και ο Ήλιος, τα οποία ακολουθούν τους νόμους του Νεύτωνα, μπορεί να εμφανιστεί το απρόβλεπτο. Αυτό κάνει τον Poincaré να συνειδητοποιήσει ότι το απρόβλεπτο και το προβλέψιμο δεν απέχουν πολύ μεταξύ τους, κάτι που μπορεί να φανεί στο επίπεδο Poincaré, όπου συνυπάρχουν περιοχές τάξης και περιοχές χάους <sup>85</sup>.

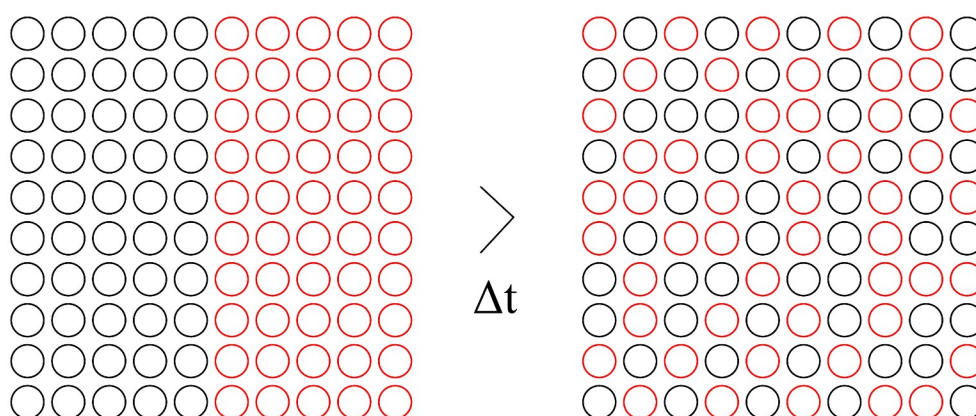


Εικόνα 2\_6: Επίπεδο Poincaré: Ενδεικτικό επίπεδο Poincaré. Η τομή του τρισδιάστατου χώρου φάσεων είναι ένα δισδιάστατο επίπεδο που τοποθετείται στον άξονα ΧΖ όπου καταγράφονται τα σημεία τομής 1, 2, 3 των διαδοχικών τροχιών με το επίπεδο. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

84 Ernst Mayr, *Τι είναι η εξέλιξη*, Πρώτη ελληνική έκδοση (Αθήνα: Κάτοπτρο, 2005), 179.

85 Thuan Trinh Xuan, *Χάος και αρμονία* (Αθήνα: Τραυλός, 2004), 135.

Ο **Ludwig Boltzmann**, ήταν Αυστριακός φυσικός και φιλόσοφος, ο οποίος επιδίωξε την προσέγγιση της φύσης μέσω της στατιστικής θεωρίας. Διατυπώνει την κινητική θεωρία των αερίων, η οποία προϋποθέτει την ύπαρξη ατόμων και μορίων τα οποία δεν μπορούσαν να μελετηθούν μεμονωμένα, όπως θα γινόταν για παράδειγμα για μικρό αριθμό σωμάτων μέσω της Νευτώνειας μηχανικής, αλλά μόνο συνολικά εξετάζοντας τον πληθυσμό με **στατιστικές ή πιθανοκρατικές** πια μεθόδους. Εκτός από την πιθανοκρατική θεώρηση των συστημάτων μεγάλου αριθμού σωμάτων από τον Ludwig Boltzmann, εισάγεται από τον ίδιο το 1877 και η έννοια της **εντροπίας**<sup>86</sup>, ή αλλιώς η έννοια της **αταξίας** ενός συστήματος και συνδέεται με τη θερμοδυναμική, όπου όσο μεγαλύτερη είναι η εντροπία τόσο μεγαλύτερη είναι και η αταξία ενός συστήματος.



Εικόνα 2\_7: Σχηματικό διάγραμμα αύξησης της εντροπίας κατά μεταβολή χρόνου  $\Delta t$ . Πηγή: Τ.Κουιμτζόγλου.

Η διαχείριση μεγάλων πληθυσμών ή δεδομένων που δεν μπορούν να αναλυθούν από τη μελέτη των μονάδων που τα αποτελούν, συντελεί στην προσέγγιση μέσω των πιθανοτήτων, οι οποίες απομακρύνουν τις δυσκολίες της μέχρι τότε συμβατικής ερμηνείας. Η **τύχη** και η **τυχειότητα** συνδέονται έτσι με την έννοια των πιθανοτήτων.

Σύμφωνα με τον **Eagle**<sup>87</sup>, υπάρχει η κοινή πεποίθηση ότι κάτι είναι τυχαίο (**random**), όταν αυτό συμβαίνει από / εξαιτίας της τύχης (**chance**). Ο Eagle αναφέρει ότι κατά τον Futuyama, στην επιστήμη χρησιμοποιούνται οι όροι **chance** ή **randomness** στις περιπτώσεις όπου κάποιες φυσικές αιτίες οδηγούν σε πολλαπλά πιθανά αποτελέσματα, τα οποία όμως δεν μπορούμε να προβλέψουμε<sup>88</sup>.

Για τον Eagle, οι έννοιες τύχη (**chance**) και τυχειότητα (**randomness**), είναι διαφορετικές μεταξύ τους, με την τύχη (**chance**) να συνδέεται γενικά με την **πιθανότητα** (ή δυνατότητα) του να μπορεί να συμβεί κάτι, ενώ η τυχειότητα (**randomness**) σχετίζεται γενικά με την **περιγραφή του αποτελέσματος της τύχης**. Ο Eagle κάνει τη διάκριση ανάμεσα στην τυχειότητα της διαδικασίας η οποία δημιουργεί ένα αποτέλεσμα, και στην τυχειότητα του αποτελέσματος αυτής της τυχαίας διαδικασίας (**product randomness**). Κατά τον Eagle, υπάρχει η γενική άποψη ότι η τύχη (**chance**) φαίνεται να συνδέεται

86 'Ludwig Boltzmann', στο *Wikipedia*, 26 Ιούλιος 2023, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ludwig\\_Boltzmann&oldid=1167240953](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ludwig_Boltzmann&oldid=1167240953).

87 Antony Eagle, 'Chance versus Randomness', στο *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, επιμ. Edward N. Zalta, Spring 2018 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018), <https://plato.stanford.edu/archives/spr2018/entries/chance-randomness/>.

88 Eagle.

περισσότερο με την αντικειμενική πιθανότητα και μπορεί να περιγραφεί ως αντικειμενική πιθανότητα μεμονωμένης περίπτωσης (**single case probability**)<sup>89</sup>, δηλαδή ότι ένα αποτέλεσμα είναι πιθανό αποτέλεσμα μιας **διαδικασίας**, ακόμη και όταν αυτή δεν επαναλαμβάνεται πολλές φορές και αρκεί μία ολοκλήρωσή της. Η τύχη (chance) σύμφωνα με αυτό το σκεπτικό, είναι έννοια που σχετίζεται κυρίως με τη **διαδικασία (process)** και όχι τόσο με το αποτέλεσμα αυτής. Συνεχίζοντας ο Eagle αναφέρει ότι η ρίψη ενός νομίσματος είτε μία είτε πολλές φορές, δεν μπορεί να διευκρινίσει την έκβαση για το ποια πλευρά θα προσγειωθεί το νόμισμα. Το ότι υπάρχει **τύχη** στην περίπτωση ρίψης του νομίσματος σχετίζεται με **την ίδια τη διαδικασία της ρίψης**, και όχι από το αποτέλεσμα είτε μιας είτε περισσότερων ρίψεων.

Ο Αμερικάνος φιλόσοφος **Charles Sanders Peirce** παρουσιάζει το 1892 τον όρο «**τυχισμός**» (“**tychism**”), σύμφωνα με την ιδέα ότι **η απόλυτη τύχη είναι αυτή που κυριαρχεί ουσιαστικά στο σύμπαν** και οδηγεί σε αυτό που αποκαλεί «**συνεχισμός**» (“**synchism**”)<sup>90</sup>. Η συνέχεια όλης της φύσης, δηλαδή του χώρου, του χρόνου, του ιδεατού, των συναισθημάτων και της αντίληψης συνιστούν ένα συνεχές (continuum) το οποίο είναι αναπόσπαστο μέρος όλων των επιστημών<sup>91</sup>. Ο Peirce εισάγει την έννοια του «τυχισμού» για να επιχειρηματολογήσει κατά της κύριας θέσης του “**Doctrine of Philosophical Necessity**” του Joseph Priestley (μεταξύ 1774 και 1778), όπου υποστηρίζεται ότι οι άνθρωποι δεν έχουν ελεύθερη βούληση και όλα είναι προκαθορισμένα σε ένα σύστημα που στηρίζεται στο ντετερμινισμό και τον υλισμό, ως Νόμο της ανώτερης δύναμης του Θεού<sup>92</sup>. Σύμφωνα με τον Peirce, η φύση βρίσκεται σε μια διαρκή διαδικασία εξέλιξης (evolution) και στην ουσία πρόκειται για ένα δυναμικό σύστημα, όπου υπάρχει φυσικά η έννοια της τάξης και των νόμων, τα οποία όμως καλεί συνήθειες (habbits), λόγω της μη απόλυτης εφαρμογής τους. Εξαιτίας της διαρκούς μεταβολής, οι κανόνες του νόμου (“**The Law**”) εξελίσσονται κι αυτοί<sup>93</sup>. **Ως αποτέλεσμα, προκαλείται η εμφάνιση απροόπτων και παρεκκλίσεων από τις συνήθειες (habbits), που εκλαμβάνονται ως τύχη.** Σύμφωνα με τον Popper<sup>94</sup>, ο Peirce υποθέτει ότι ταυτόχρονα ο κόσμος κυβερνάται όχι μόνο από τους νόμους του Νεύτωνα, αλλά ταυτόχρονα και από τους νόμους της τύχης.

Ο **William James** το 1897 δημοσιεύει το κείμενο “**The dilemma of Determinism**”, όπου υποστηρίζει ότι **η τύχη είναι στην πραγματικότητα η δυνατότητα ύπαρξης πολλαπλών πιθανών ενδεχομένων, ένα από τα οποία έρχεται να επιλέξει η ελεύθερη βούληση**<sup>95</sup>. Ο James αναφέρει ότι η τύχη (chance) είναι γενικά ένας όρος με αρνητική χροιά, καθώς σαν έννοια δεν δίνει καμία πληροφορία για αυτό που πρόκειται να ακολουθήσει, είτε θετικό είτε αρνητικό, και απλά εμπεριέχει ως δεδομένο μόνο το ότι η

89 Eagle.

90 ‘The History of Chance’, ημερομηνία πρόσβασης 9 Μάιος 2019, <http://www.informationphilosopher.com/chance/history/>.

91 Robert Burch, ‘Charles Sanders Peirce’, στο *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, επιμέλ. Edward N. Zalta, Winter 2018 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018), <https://plato.stanford.edu/archives/win2018/entries/peirce/>.

92 ‘The Doctrine of Philosophical Necessity Illustrated’, στο *Wikipedia*, 19 Απρίλιος 2019, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=The\\_Doctrine\\_of\\_Philosophical\\_Necessity\\_Illustrated&oldid=893199593](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=The_Doctrine_of_Philosophical_Necessity_Illustrated&oldid=893199593).

93 Burch, ‘Charles Sanders Peirce’.

94 Karl R. Popper, *Objective Knowledge: An Evolutionary Approach*, Revised edition (Oxford Eng. : New York: Oxford University Press, 1972).

95 ‘The History of Chance’.

έκβαση είναι **μη βέβαιη**<sup>96</sup>. Για τον James, τα πιθανά μελλοντικά ενδεχόμενα είναι υπαρκτά και η τύχη είναι ακριβώς αυτή η δυνατότητα των πολλαπλοτήτων. Η τύχη είναι εξίσου σημαντική στο ζήτημα της ελεύθερης βούλησης, διότι μόνο έτσι μπορεί να διασπαστεί η άρρηκτη ντετερμινιστική συνέχεια αιτίων και αποτελεσμάτων τα οποία σχηματοποιούν μία μόνο εκδοχή μέλλοντος, χωρίς παραλλαγές. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα επιλογής διαδρομής κατά την επιστροφή στο σπίτι από τον ένα δρόμο ή κάποιον διαφορετικό. Και οι δύο διαδρομές είναι πιθανό να πραγματοποιηθούν, αλλά μόνο μία θα επιλεγεί. Η τύχη, θα μπορούσε να ισχυριστεί κανείς ότι είναι ένα εργαλείο που δίνει τη δυνατότητα αποδέσμευσης από την απόλυτη βεβαιότητα και τη μονοσήμαντη εξέλιξη των πραγμάτων.

Στην ίδια λογική με τους Peirce και James, ο φυσικός **Franz Exner**, μαθητής του Boltzman, στην ομιλία αναγόρευσής του ως κοσμήτορα του Πανεπιστημίου της Βιέννης το 1908, υπερασπίζεται την ιδέα της απόλυτης τυχαιότητας και του ντετερμινισμού, ως μια υπόθεση που δεν μπορεί να αποκλειστεί μόνο από στοιχεία παρατήρησης. Η θέση του Exner παρ' όλα αυτά δεν ήταν ενδεικτική του κλίματος που επικρατούσε στην εποχή<sup>97</sup>, και αυτό το κλίμα θα συνέχιζε μέχρι την εμφάνιση του κλάδου της κβαντομηχανικής, όχι πολύ αργότερα δηλαδή από την εποχή του Exner, ένα νέο κλάδο της φυσικής που θα έδινε αποδείξεις υπέρ των υποστηρικτών του ντετερμινισμού.

**Τον 20ο αιώνα** γίνονται πρόοδοι σε πολλά πεδία της επιστήμης τα οποία σταδιακά οδηγούν στην αναγνώριση της τυχαιότητας ως σημαντικής παραμέτρου, η οποία αποτελεί μέρος των φυσικών νόμων. Το 1870 ο χημικός **Dmitri Mendeleev**<sup>98</sup> παρουσιάζει τον περιοδικό πίνακα των χημικών στοιχείων. Το 1902 το ζεύγος **Curie** ανακαλύπτει το νέο στοιχείο που ονομάζεται ράδιο<sup>99</sup>. Το 1911 το ατομικό μοντέλο του **Ernest Rutherford**<sup>100</sup> έρχεται να αποδώσει γεωμετρικά χαρακτηριστικά στη διάταξη των σωματιδίων που αποτελούν το άτομο, με βάση νέα πειραματικά δεδομένα. Το 1894 ο Γερμανός φυσικός **Max Planck** ασχολείται με το ζήτημα της ακτινοβολίας θερμαινόμενου σώματος σε ορισμένη θερμοκρασία και καθιερώνεται η σταθερά Planck. Το 1913 ο Δανός φυσικός **Niels Bohr**

96 William James, *The Will to Believe, and Other Essays in Popular Philosophy* (New York [etc.] : Longmans, Green, and co., 1912), 153, <http://archive.org/details/willtobelieveot00jameiala>.

97 'The History of Chance'.

98 «Ο πίνακας του Μεντελέγιεφ ήταν ένα διάγραμμα με έξι οριζόντιες και οκτώ κάθετες στήλες, όπως περίπου είναι τα σταυρόλεξα. Τοποθέτησε πρώτα τα στοιχεία κατά περιόδους στις οριζόντιες σειρές. Αυτό σημαίνει ότι τα στοιχεία μιας ορισμένης γραμμής παρουσιάζουν κανονική επανάληψη των χημικών ιδιοτήτων. Μετά κατέταξε τα στοιχεία των οριζοντίων γραμμών καθέτως, ώστε κάθε κάθετη στήλη να περιέχει στοιχεία που παρουσιάζουν κάπως όμοιες ιδιότητες. Τις κάθετες αυτές στήλες ονόμασε οικογένειες. Με την κατάρτιση του πίνακα, ο Μεντελέγιεφ διαπίστωσε ότι υπήρχαν κενά, δηλαδή άδεια διαστήματα, σε μερικές στήλες. Συμπέρανε ότι τα κενά αυτά έπρεπε να παριστάνουν τα άγνωστα στοιχεία. Πίστευε όμως ότι τα στοιχεία αυτά έπρεπε να βρίσκονται στη γη, αφού ο πίνακας περιοδικότητας αποτελούσε νόμο της φύσης.

Τα τρία στοιχεία που ανακαλύφθηκαν μετά από την πρόρρηση του Μεντελέγιεφ δεν πρόσθεσαν τίποτε στον υλικό πλούτο της χώρας, διότι η παραγωγή τους είναι πολύ δαπανηρή ώστε να έχει κάποια εμπορική αξία.

Ωστόσο η επιστημονική τους αξία είναι ανυπολόγιστη, διότι με την ανακάλυψή τους έγινε παραδεκτό το περιοδικό σύστημα και ο πίνακας του Μεντελέγιεφ. Από το σύστημα αυτό, οι επιστήμονες μπόρεσαν να προχωρήσουν στο θέμα των ηλεκτρονίων και μετά στην ατομική ενέργεια.»

‘Ντιμίτρι Μεντελέγιεφ’, στο *Βικιπαίδεια*, 12 Ιούνιος 2017, [https://el.wikipedia.org/wiki/Ντιμίτρι\\_Μεντελέγιεφ](https://el.wikipedia.org/wiki/Ντιμίτρι_Μεντελέγιεφ).

99 «Ραδιενέργεια είναι το φαινόμενο της εκπομπής σωματιδίων ή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τους πυρήνες ορισμένων χημικών στοιχείων, που γι' αυτό το λόγο ονομάζονται ραδιενεργά.»

‘Ραδιενέργεια’, στο *Βικιπαίδεια*, 6 Δεκέμβριος 2017, <https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Ραδιενέργεια&oldid=6765283>.

100 ‘Rutherford Model’, στο *Wikipedia*, 27 Νοέμβριος 2017, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Rutherford\\_model&oldid=812401467](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Rutherford_model&oldid=812401467).

υποστηρίζει το ζήτημα της σταθερότητας του ατομικού πυρήνα σύμφωνα με το μοντέλο Rutherford. Το 1925 ο **Wolfgang Pauli** εισάγει την απαγορευτική αρχή για τα ηλεκτρόνια <sup>101</sup> και το 1924 ο **Max Born** με τη νέα θεωρία που βαπτίζει ως Κβαντομηχανική (Quantum Mechanics), συμπληρώνει τα κενά της κλασικής φυσικής. Στο πείραμα της διπλής σχισμής αποδεικνύεται η διπλή φύση των φωτονίων (σωματιδιακή και κυματική) ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν, **αλλά ποτέ και με τις δύο φύσεις ταυτόχρονα**, καθώς και η επιρροή του παρατηρητή στο πείραμα <sup>102</sup>. Ο **Werner Heisenberg** διατυπώνει το 1927 την περίφημη **αρχή της απροσδιοριστίας ή αβεβαιότητας** <sup>103</sup>. Σύμφωνα με αυτή, δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί ταυτόχρονα και η θέση και η ταχύτητα ενός σωματιδίου. Η πολύ χαμηλή τιμή της παγκόσμιας ανηγμένης σταθεράς του Planck  $h=6.62607015 \times 10^{-34}$  J·s υποδηλώνει και ερμηνεύει το γεγονός ότι οι συνέπειες της κβαντικής αβεβαιότητας παρουσιάζονται πρακτικά μόνο στην ατομική και υποατομική κλίμακα, αλλά **ως αρχή υπάρχει σε όλα τα συστήματα** <sup>104</sup>.

Ο **Einstein** με την **ειδική** (1905) και **γενική θεωρία της σχετικότητας** (1915) συμπληρώνει τη Νευτώνεια μηχανική. Η σχέση του Einstein με την κβαντομηχανική και την αβεβαιότητα που αυτή διατυπώνει, είναι γενικά αρνητική. Είναι χαρακτηριστική η φράση του σε αλληλογραφία στο συνάδελφό του Max Born στον οποίο αναφέρει την πεποίθησή του ότι ο Θεός δεν παίζει ζάρια με το σύμπαν <sup>105</sup>, απορρίπτοντας τον παράγοντα της τυχαιότητας που εισήγαγε και υπεράσπιζε η κβαντομηχανική, αν και ο ίδιος ο Einstein χρησιμοποιεί τις αρχές της κβαντομηχανικής για να ερμηνεύσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο <sup>106</sup>. Με τη δημοσίευση του παράδοξου EPR <sup>107</sup> των **Einstein-Podolsky-Rosen**, το 1935, όπως παραδέχθηκε και ο ίδιος ο Einstein, οι αρχές της κβαντομηχανικής δεν ήταν λάθος, αλλά ημιτελείς, καθώς σύμφωνα με τον ίδιο υπήρχαν κρυφές μεταβλητές και αυτές είναι υπεύθυνες για τις μη αναγνωρίσιμες ιδιότητες που περιέγραφε η κβαντομηχανική, όπως η αβεβαιότητα και η τυχαιότητα <sup>108</sup>. Το θέμα ξεκαθαρίζει το 1964 από τον **John Stewart Bell** <sup>109</sup>, ο οποίος απέκλεισε την ύπαρξη κρυφών μεταβλητών, βεβαιώνοντας την κβαντική διεμπλοκή, με συνέπεια να υποστηρίζεται και το κομμάτι της τυχαιότητας / αβεβαιότητας της θεωρίας της κβαντομηχανικής, σε διάψευση του Einstein. Πιθανώς, οι πιο σημαντικές εξελίξεις της επιστήμης τον 20ο αιώνα που αφορούν στην **τυχαιότητα** έχουν σχέση με την εισαγωγή της έννοιας του **Χάους**.

Το 1961 ο μετεωρολόγος **Edward Lorenz**, εργαζόμενος σε μια πρότυπη υπολογιστική μηχανή στις εγκαταστάσεις του MIT, κατασκευάζει ένα πρωτόγονο υπολογιστικό σύστημα προσομοίωσης καιρικών φαινομένων και συγκεκριμένα ένα σύστημα προσομοίωσης της γήινης ατμόσφαιρας και

101 'Κβαντική μηχανική', στο *Βικιπαίδεια*, 24 Ιουνίου 2017, [https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Κβαντική\\_μηχανική&oldid=6532530](https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Κβαντική_μηχανική&oldid=6532530).

102 'Πείραμα των δύο σχισμών', στο *Βικιπαίδεια*, 7 Μάιος 2017, [https://el.wikipedia.org/wiki/Πείραμα\\_των\\_δύο\\_σχισμών](https://el.wikipedia.org/wiki/Πείραμα_των_δύο_σχισμών).

103 'Αρχή της απροσδιοριστίας', στο *Βικιπαίδεια*, 28 Αύγουστος 2018, [https://el.wikipedia.org/wiki/Αρχή\\_της\\_απροσδιοριστίας](https://el.wikipedia.org/wiki/Αρχή_της_απροσδιοριστίας).

104 Paul Davies και Julian Brown, *Υπερχορδές*, Δεύτερη έκδοση (Αθήνα: Κάτοπτρο, 1989), 38.

105 Max Born, *The Born Einstein Letters* (Macmillan, 1971), 91, <http://archive.org/details/TheBornEinsteinLetters>.

106 'Einstein's Love-Hate Relationship with Quantum Physics', *OpenMind*, 14 Μάρτιος 2017, <https://www.bbvaopenmind.com/en/temas/einsteins-love-hate-relationship-with-quantum-physics/>.

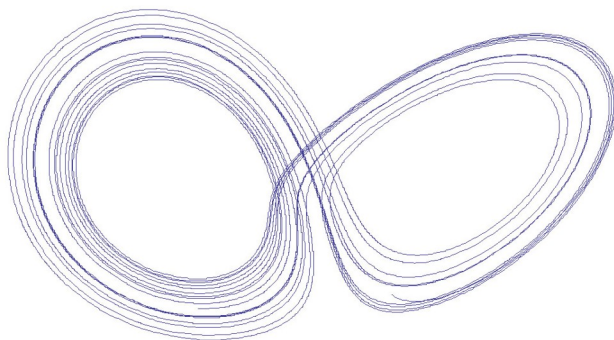
107 'EPR Paradox', στο *Wikipedia*, 11 Μάιος 2019, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=EPR\\_paradox&oldid=896581579](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=EPR_paradox&oldid=896581579).

108 Chad Orzel, 'How Quantum Randomness Saves Relativity', *Forbes*, ημερομηνία πρόσβασης 11 Μάιος 2019, <https://www.forbes.com/sites/chadorzel/2015/08/11/how-quantum-randomness-saves-relativity/>.

109 'John Stewart Bell', στο *Wikipedia*, 11 Φεβρουάριος 2019, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=John\\_Stewart\\_Bell&oldid=882746952](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=John_Stewart_Bell&oldid=882746952).

της κίνησης των ωκεανών. Προκειμένου να δημιουργήσει το τεχνητό του μηχανιστικό σύμπαν, επιλέγει συγκεκριμένους παραμετρικούς κανόνες οι οποίοι συνιστούν μαθηματικές σχέσεις ανάμεσα στην πίεση, τη θερμοκρασία και την ταχύτητα των ανέμων και οι οποίοι περιγράφουν με αφαιρετικό τρόπο όσο το δυνατόν πληρέστερα τους φυσικούς νόμους που ελέγχουν το φυσικό σύστημα του περιβάλλοντός μας.

Μετά από μια διακοπή και επανεκκίνηση ενός κύκλου προσομοίωσης, όπου για λόγους ευκολίας δεν επαναπρογραμματίζει μια συνάρτηση με την αρχική αριθμητική τιμή των 6 δεκαδικών ψηφίων, αλλά αποκόπτει τα 3 τελευταία δεκαδικά ψηφία της αρχικής παραμέτρου, προκύπτει κάτι αναπάντεχο. Τα γραφήματα των δύο κύκλων προσομοίωσης, αυτής με τα 6 και αυτής με τα 3 δεκαδικά ψηφία, παρουσιάζουν, όσο διαρκεί η προσομοίωση, μικρές αρχικές αποκλίσεις, οι οποίες αυξάνονται εκθετικά κατά την χρονική εξέλιξη του συστήματος. Συνεπώς, χωρίς να έχει αλλάξει ο αρχικός κώδικας, οι σχέσεις δηλαδή μεταξύ των μεγεθών που ορίζονται από τις διαφορικές συναρτήσεις του Lorenz, προκύπτει ότι ελάχιστα **μικρές διαφοροποιήσεις** στην εισαγωγή δεδομένων κατά τις αρχικές συνθήκες <sup>110</sup>, **οδηγούν σταδιακά το σύστημα σε μεγάλες και απρόβλεπτες αποκλίσεις.**



$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \sigma(y - x), \\ \frac{dy}{dt} &= x(\rho - z) - y, \\ \frac{dz}{dt} &= xy - \beta z.\end{aligned}$$

Εικόνα 2\_8: Ελκυστής Lorenz. Πηγή: Δημιουργία ελκυστών με βάση την εφαρμογή στο <http://demonstrations.wolfram.com/LorenzAttractor/>, Rob Morris, "Lorenz Attractor", Wolfram Demonstrations Project, 7 Μαρτίου 2011. © 2024 Wolfram.

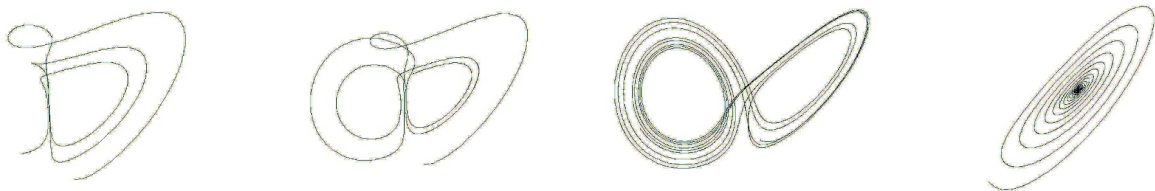
Εικόνα 2\_9: Οι τρεις διαφορικές εξισώσεις του συστήματος Lorenz όπου  $x, y, z$  είναι οι καταστάσεις του συστήματος και  $\sigma, \rho, \beta$  είναι οι παράμετροι του. Πηγή: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lorenz\\_system&oldid=818892854](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lorenz_system&oldid=818892854)

110 'Θεωρία του χάους', στο Βικιπαίδεια, 16 Δεκέμβριος 2017, [https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Θεωρία\\_του\\_χάους&oldid=6776493](https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Θεωρία_του_χάους&oldid=6776493).

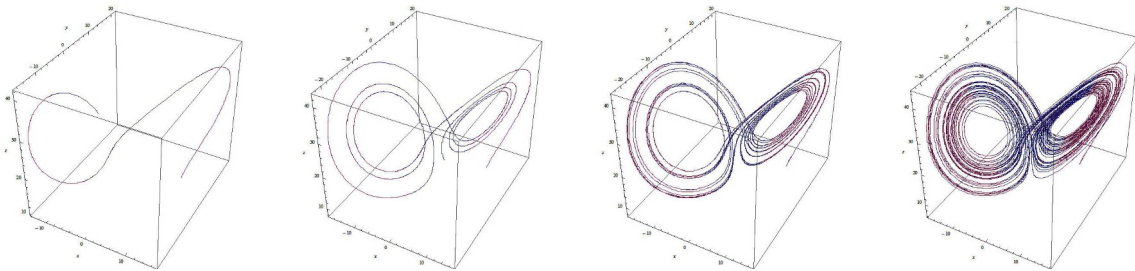
Εκθέτης Lyapunov: Ο εκθέτης Lyapunov χαρακτηρίζει την έκταση της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες. Ποσοτικώς, δύο τροχιές εντός του χώρου φάσης με αρχικό διαχωρισμό αποκλίνουν  $|\delta \mathbf{Z}(t)| \approx e^{\lambda t} |\delta \mathbf{Z}_0|$  όπου  $\lambda$  είναι ο εκθέτης Lyapunov. Ο ρυθμός διαχωρισμού μπορεί να είναι διαφορετικός για διαφορετικούς προσανατολισμούς του αρχικού φορέα διαχωρισμού. Έτσι, υπάρχει ένα ολόκληρο φάσμα από εκθέτες Lyapunov - ο αριθμός των οποίων είναι ίσος με τον αριθμό των διαστάσεων του χώρου φάσης. Είναι σύνηθες να αναφέρεται μόνο ο μεγαλύτερος, δηλαδή ο μέγιστος εκθέτης Lyapunov (ΜΕΛ), διότι αυτός καθορίζει τη **συνολική προβλεψιμότητα του συστήματος**. Ένας θετικός μέγιστος εκθέτης Lyapunov συνήθως λαμβάνεται ως ένδειξη ότι το σύστημα είναι χαοτικό.

Αν σχεδιαστεί η γραφική παράσταση του  $x(t)$  σε σχέση με το  $z(t)$ , προκύπτει η οπτικοποίηση μιας τροχιάς στον τρισδιάστατο χώρο η οποία παραπέμπει μορφολογικά στα φτερά μιας πεταλούδας. Το διάγραμμα που προκύπτει είναι ένα «**διάγραμμα φάσης**». Η απεικόνιση που παρατίθεται πιο κάτω είναι μια δισδιάστατη προβολική αναπαράσταση του τρισδιάστατου χώρου, στην οποία όμως δεν ευδιάκριτο ότι οι επαναλαμβανόμενες τροχιές της γραφικής παράστασης δεν αλληλοτέμνονται μεταξύ τους σε κανένα σημείο. Χαρακτηριστικό είναι ότι η τροχιά μεταπηδά από το αριστερό μέρος στο δεξί και αντίστροφα με μη προβλέψιμο τρόπο.

Ο **James Gleik** γράφει πως η απεικόνιση του συστήματος του Lorenz <sup>111</sup> παρουσιάζει μια άπειρη πολυπλοκότητα, καθώς το σχήμα που προκύπτει έχει ιδιαίτερη μορφή στο χώρο, η οποία μοιάζει με φτερά πεταλούδας και η οποία ενσωματώνει την απόλυτη αταξία, καθώς κανένα σημείο της εξίσωσης δεν επαναλαμβάνεται, αλλά μεταπηδά από την μία πλευρά στην άλλη της γραφικής παράστασης και παράλληλα **δεν διαφεύγει από το γενικό όριο**, γεγονός που υποδηλώνει μια τάξη άλλου είδους, η οποία συνυπάρχει με την αταξία.



Εικόνα 2\_10: Στιγμιότυπα παραλλαγών ελκυστή Lorenz για  $t=10$ ,  $\sigma=10$ ,  $\rho=28$ , και διαδοχικά  $\beta=0,27$ ,  $\beta=0,38$ ,  $\beta=8/3$ ,  $\beta=5,88$ . Πηγή: Δημιουργία ελκυστών με βάση την εφαρμογή στο <http://demonstrations.wolfram.com/LorenzAttractor/> Rob Morris, "Lorenz Attractor", Wolfram Demonstrations Project, 7 Μαρτίου 2011. © 2024 Wolfram.



Εικόνα 2\_11: Εξέλιξη ελκυστή Lorenz για  $t=1$ ,  $t=5$ ,  $t=20$ ,  $t=50$  και  $\sigma=10$ ,  $\rho=28$ ,  $\beta=8/3$ . Πηγή: Δημιουργία ελκυστών με βάση την εφαρμογή στο <http://demonstrations.wolfram.com/DynamicalSystemsWithLorenzAttractors/> John Holland "Dynaical Systems with Lorenz Attractors", Wolfram Demonstrations Project, 24 Ιουνίου 2011. © 2024 Wolfram.

Οι ανακαλύψεις του Lorenz δίνουν ώθηση σε μια περιοχή γνώσης που ονομάζεται **θεωρία του χάους**, η οποία επιχειρεί να τεκμηριώσει πώς μέσα από την τάξη προκύπτει η αταξία αλλά και πώς μέσα από την αταξία μπορεί να προκύψει τάξη. Ο όρος χάος καθιερώνεται από τη δημοσίευση των **Li και Yorke** το 1975 με τίτλο "**Period Three Implies Chaos**" <sup>112</sup>. **Χάος** <sup>113</sup> ονομάζεται η εξαιρετική ευαισθησία ενός συστήματος στις αρχικές συνθήκες, δηλαδή η κατάσταση στην οποία βρίσκεται ένα

111 James Gleick, *Χάος. Η επιστήμη της μη γραμμικής δυναμικής.*, Πρώτη έκδοση (Αθήνα: Κάτοπτρο, 1990), 58.

112 Tien-Yien Li και James A. Yorke, 'Period Three Implies Chaos', *The American Mathematical Monthly* 82, τχ. 10 (1975): 985–92, <https://doi.org/10.2307/2318254>.

113 Gleick, *Χάος. Η επιστήμη της μη γραμμικής δυναμικής.*, 16.



σύστημα όπου μικρές διαφοροποιήσεις στις αρχικές συνθήκες μπορούν να αποδώσουν πολύ μεγάλες αλλαγές στα αποτελέσματα που δίνει το σύστημα.

Η νέα επιστήμη του Χάους αρχίζει να χρησιμοποιείται ως εργαλείο διερεύνησης σε πολλά άλλα πεδία της φυσικής και σε άλλες επιστήμες, όπως η οικολογία, η βιολογία, κ.λπ. Οι μαθηματικοί και οι φυσικοί στρέφονται με νέα ματιά σε κλασικά προβλήματα που δεν έχουν μέχρι τότε τεκμηριωθεί επαρκώς και προσπαθούν να τα επεξηγήσουν με βάση τα νέα δεδομένα, αλλά και να απαντήσουν ταυτόχρονα σε νέα ερωτήματα. Τέτοια χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η κίνηση του **εκκρεμούς** και ο **στροβιλισμός**, δύο συστήματα που παρουσιάζουν τη δυνατότητα δημιουργίας χαστικής συμπεριφοράς και τη δημιουργία παράξενων ελκυστών.

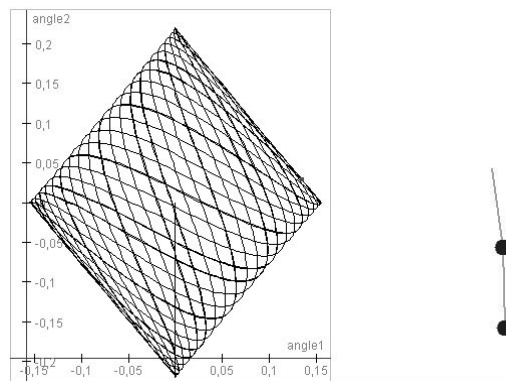
Το ιδανικό εκκρεμές είναι ένα απλό μηχανικό σύστημα που παρουσιάζει ιδιαίτερη συμπεριφορά κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Το ιδανικό εκκρεμές έχει γραμμική συμπεριφορά για μικρές γωνιακές αποκλίσεις, ενώ συμπεριφέρεται μη γραμμικά για μεγαλύτερες.

Στην Εικόνα 2\_12 παρουσιάζονται τα γραφήματα γωνιών για ένα διπλό ιδανικό εκκρεμές.

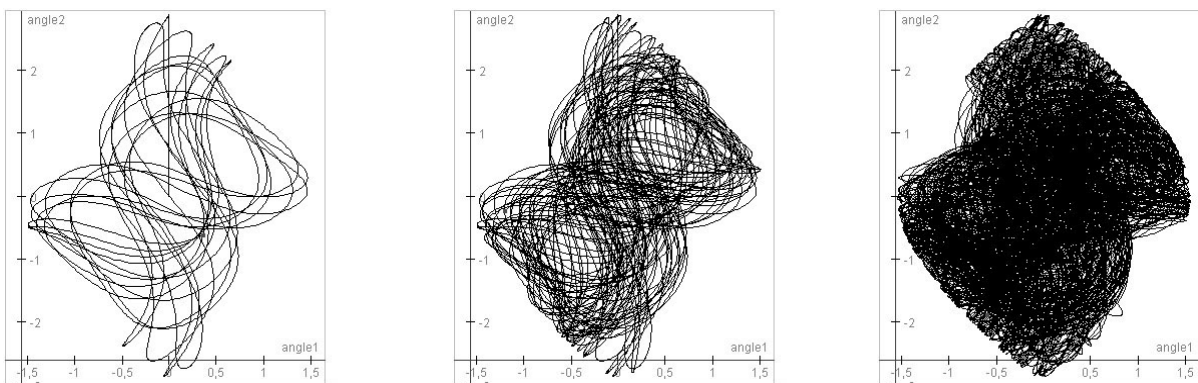
Στην Εικόνα 2\_13 παρουσιάζεται το γράφημα για ένα σύστημα που ταλαντώνεται σε πολύ μικρές αρχικές γωνίες και παρατηρείται ότι κινήσεις των δύο εκκρεμών έχουν μια περιοδικότητα που αποτυπώνεται σε ένα διάγραμμα με συγκεκριμένη κανονικότητα. Στην Εικόνα 2\_14, το διπλό σύστημα εκτελεί μη κανονικές κινήσεις, οι οποίες οφείλονται στη μεγάλη γωνία εκκίνησης της ταλάντωσης του συστήματος. Παρατηρείται ότι το σύστημα δεν εμφανίζει την περιοδικότητα της προηγούμενης περίπτωσης και διακατέχεται από **χαστική συμπεριφορά**. Καθώς το σύστημα συνεχίζει την κίνησή του με την εξέλιξη του χρόνου, είναι ορατή μια πύκνωση των γραμμών. Το σύστημα λαμβάνει όλες τις πιθανές παραλλαγές σχέσεων γωνιών εντός συγκεκριμένων ορίων. Οι μελλοντικοί συσχετισμοί των δύο γωνιών δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν όπως στο προηγούμενο παράδειγμα όπου το σύστημα συμπεριφέρεται γραμμικά.

Παρατηρείται λοιπόν **μη γραμμικότητα** και **υψηλή πολυπλοκότητα** του συστήματος. Μετά από ικανό χρόνο, οι πυκνώσεις του γραφήματος δείχνουν ότι πραγματοποιούνται όλο και περισσότεροι πιθανοί συνδυασμοί γωνιών, εντός όμως συγκεκριμένων ορίων τιμών.

Αν αφήσουμε ένα σύστημα διπλού εκκρεμούς, με διαφορετικές αρχικές τιμές μεγάλης ταλάντωσης, να εξελιχθεί χρονικά μέχρι το διάγραμμα του ελκυστή του να κορεστεί γραφικά, παρατηρείται ότι σχηματίζεται και πάλι ένα ευδιάκριτο **όριο** που διαχωρίζει τις περιοχές στο χώρο φάσεων όπου υπάρχει η χαστική συμπεριφορά του συστήματος με τις περιοχές όπου οι τιμές των γωνιών είναι μηδενικές, εκεί δηλαδή που δεν είναι ενεργό το σύστημα. Όλη η ακανόνιστη συμπεριφορά καθορίζεται από ένα όριο το οποίο «περιορίζει» την αταξία. **Το όριο** αυτό δεν ορίζεται από δική του μαθηματική εξίσωση, αλλά σχηματίζεται **έμμεσα** και **κατά προσέγγιση** από τα απεριοδικά στιγμιότυπα του μη γραμμικού συστήματος. Η αταξία λοιπόν του μη γραμμικού συστήματος, αν παρατηρηθεί σε βάθος χρόνου, επιτρέπει να αναγνωρισθεί η δημιουργία ενός νέου είδους τάξης. Η τυχαιότητα που λαμβάνουν οι συνδυασμοί του ζεύγους γωνιών αυτο-περιορίζεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών και διαπιστώνεται πως κατά κάποιο τρόπο το σύστημα **αυτο-ελέγχεται**.



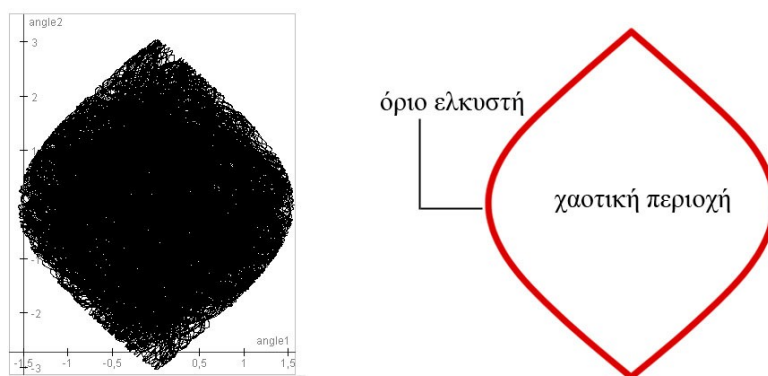
Εικόνα 2.12: Διάγραμμα γωνιών διπλού ιδανικού εκκρεμούς για μικρές ταλαντώσεις. Πηγή: εφαρμογή στο [http://www.myphysicslab.com/dbl\\_pendulum.html](http://www.myphysicslab.com/dbl_pendulum.html), © Erik Neumann, Apache 2.0 License.



Εικόνα 2.13: Διαγράμματα γωνιών διπλού ιδανικού εκκρεμούς για μεγάλες ταλαντώσεις. Πηγή: εφαρμογή στο [http://www.myphysicslab.com/dbl\\_pendulum.html](http://www.myphysicslab.com/dbl_pendulum.html), © Erik Neumann, Apache 2.0 License.

Ένα από τα εύλογα ερωτήματα που προκύπτουν είναι πότε τελικά ένα σύστημα συμπεριφέρεται γραμμικά και πότε χαστικά. Υπάρχει δηλαδή μια συγκεκριμένη τιμή πέρα από την οποία ένα σύστημα μεταπηδά από την κατάσταση κανονικότητας σε κατάσταση μη κανονικότητας; Στην περίπτωση του διπλού εκκρεμούς υπάρχει συγκεκριμένη αριθμητική τιμή μιας παραμέτρου μετά την οποία το σύστημα υιοθετεί μη γραμμική συμπεριφορά<sup>114</sup>. **Η αριθμητική αυτή τιμή είναι η τιμή που μετατρέπει τη συμπεριφορά του συστήματος από γραμμική σε μη γραμμική, χωρίς να υπάρχει μεταβολή οποιασδήποτε άλλης παραμέτρου.**

<sup>114</sup> Πέτρος Ιωάννου, 'Εκκρεμές εξαναγκασμένο με αρμονική εξωτερική δύναμη', χ.χ., <http://users.uoa.gr/~rjioannou/nonlin/pendulum.doc>.



Εικόνα 2.14: Διάγραμμα όριου ελκυστή για τιμές γωνιών διπλού εκκρεμούς για μεγάλες ταλαντώσεις. Πηγή: Αριστερά εφαρμογή στο: [http://www.myphysicslab.com/dbl\\_pendulum.html](http://www.myphysicslab.com/dbl_pendulum.html) © Erik Neumann, Apache 2.0 License. Δεξιά: διαμόρφωση ορίων από Τ. Κουιμτζόγλου.

Σε ένα δυναμικό σύστημα με 2 κοιτίδες έλξης και εκκρεμές που ταλαντώνεται οριζόντια με σταδιακά αυξανόμενο εύρος (π.χ. μονό εκκρεμές από το οποίο αναρτάται μεταλλική σφαίρα και ταλαντώνεται οριζόντια με σταδιακά αυξανόμενο εύρος έλκεται από δύο μαγνήτες στη βάση του), παρατηρείται πως αν σχεδιαστούν τα διαγράμματα φάσης του συστήματος προκύπτει η. Όσο το εύρος της ταλάντωσης παραμένει σταθερό, το πρώτο διάγραμμα φάσης παρουσιάζεται ως διάγραμμα με ξεκάθαρα όρια (άσπρο-μαύρο) ανάμεσα στους δύο ελκυστές. Όσο αρχίζει να αυξάνεται το εύρος της ταλάντωσης, το διαχωριστικό όριο ανάμεσα στους ελκυστές αρχίζει να διασπάζεται και αποκτάει χαρακτηριστικά **fractal**<sup>115</sup>. Το «**fractal όριο**» είναι δυσδιάκριτο και δεν επιτρέπει στον παρατηρητή να έχει ξεκάθαρη εικόνα για το ποιος ελκυστής υπερισχύει σε δεδομένη χρονική στιγμή, ούτε τελικά ποια θα είναι οριστική κατάσταση ισορροπίας του συστήματος. Συνεπώς, ένα σύνθετο δυναμικό σύστημα με χαοτικά χαρακτηριστικά παρουσιάζει μεγάλη δυσκολία πρόβλεψης της εξέλιξής του και ειδικότερα όσον αφορά στην πρόβλεψη ανάμεσα στο όριο των ελκυστών, αυτή γίνεται ουσιαστικά αδύνατη.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει αναφορά στο μαθηματικό **Andrey Kolmogorov**, ο οποίος μεταξύ άλλων ασχολήθηκε και με την πολυπλοκότητα και την τυχαιότητα. Η **πολυπλοκότητα Kolmogorov** σε ένα αντικείμενο είναι το μέγεθος του μικρότερου κώδικα που μπορεί να αναπαράξει το αντικείμενο και αποτελεί μέτρο της πολυπλοκότητας και του υπολογιστικού δυναμικού που απαιτείται για την περιγραφή του αντικειμένου. Η **τυχαιότητα Kolmogorov ορίζει ότι τμήμα του κώδικα σε ένα τέτοιο πρόγραμμα είναι τυχαίο, όταν το μέγεθός του είναι μικρότερο από τον κώδικα που μπορεί να περιγράψει το αντικείμενο**<sup>116</sup>.

Σύμφωνα με το παράδειγμα των εικόνων της **DataGenetics** σχετικά με την τυχαιότητα, που βρίσκονται στο σύνδεσμο<sup>117</sup>, απεικονίζονται τρεις εικόνες που περιέχουν σημεία. Η **πρώτη εικόνα** έχει

<sup>115</sup> Σχετική εικόνα μπορεί να βρεθεί στο σύνδεσμο: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQqplaw2SFJaaSeuAR3zwpj16tf0sFAGBzycsRZYtYxXdkMgVUjqUnlajPScpNmIfiSxrE&usqp=CAU>

<sup>116</sup> 'Kolmogorov Complexity', στο *Wikipedia*, 21 Απρίλιος 2019, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Kolmogorov\\_complexity&oldid=893454427](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Kolmogorov_complexity&oldid=893454427).

<sup>117</sup> 'Kolmogorov and Randomness', ημερομηνία πρόσβασης 3 Ιούλιος 2023, <http://datagenetics.com/blog/february52018/index.html>.

τα σημεία διατεταγμένα σε ορθοκανονικό κানাβο. Η διάταξη των σημείων σε αυτή την περίπτωση **δεν είναι τυχαία** και ο κανόνας που ορίζει τη διάταξη ορίζεται από τον κানাβο. Η **δεύτερη εικόνα** έχει τα σημεία διατεταγμένα ακανόνιστα, αλλά **όχι τυχαία**. Ο κανόνας που περιγράφει τις θέσεις τους, σύμφωνα με το συγγραφέα, ορίζει τα σημεία να έχουν ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Οπτικά διακρίνεται μια μη κανονικότητα, αλλά υπάρχει σχετική ομοιομορφία στην πυκνότητα. Σε αυτή την περίπτωση, ο κανόνας που ορίζει τη διάταξη είναι πιο σύνθετος από αυτόν του παραδείγματος της πρώτης εικόνας. Στην **τρίτη εικόνα**, η διάταξη **είναι τυχαία**, όπου και παρατηρούνται πυκνώσεις και αραιώσεις με ακανόνιστο τρόπο. Η αύξηση της πολυπλοκότητας είναι εμφανής.

Αν κάποιος θεωρήσει ότι οι τελείες αποτελούν μόρια στο χώρο καθώς εξελίσσονται στο χρόνο, μπορεί να σκεφτεί ότι κατά την εξέλιξη του χρόνου η διάταξη αποδιοργανώνεται και η εντροπία και πολυπλοκότητα του συστήματος αυξάνεται.

Το παράδειγμα αριθμητικών τιμών που ακολουθεί βασίζεται στο παράδειγμα της **DataGenetics** στο σύνδεσμο <sup>118</sup> και μπορεί να εξηγήσει καλύτερα την πολυπλοκότητα Kolmogorov. Σύμφωνα με το άρθρο στον παραπάνω σύνδεσμο, το αν κάτι είναι ή όχι τυχαίο, μπορεί να καθοριστεί από τον τρόπο που μπορούμε να το περιγράψουμε. Έτσι παρατηρείται ότι:

1. Ο αριθμός: **111111111 000000000**, μπορεί να περιγραφεί ως: 10 φορές "1" + 10 φορές "0".
2. Ο αριθμός: **10 10 10 10 10 10 10 10 10 10**, μπορεί να περιγραφεί ως: 10 φορές "10".
3. Ο αριθμός: **11 01 01 01 01 11 01 01 01 01**, μπορεί να περιγραφεί ως 2 φορές το "11 01 01 01 01" ή ("11" + 4 φορές το "01") για 2 φορές.
4. Ο αριθμός: **11010100100001011011**, δεν μπορεί να περιγραφεί με συνοπτικό τρόπο και ο πιο σύντομος τρόπος να γραφεί η παραπάνω διαδοχή ψηφίων είναι ο ίδιος ο αριθμός.

Το τελευταίο παράδειγμα περιγράφει μια τυχαία κατά Kolmogorov διαδοχή ψηφίων (string), καθώς δεν υπάρχει δομή ή επαναληψιμότητα και κατ' επέκταση δυνατότητα «συμπίεσης» μέσω κάποιου μαθηματικού κώδικα, όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις, τέτοιου που να είναι τελικά μικρότερος από τον ίδιο τον αριθμό <sup>119</sup>.

Σε συνεργασία με τον μαθητή του Yakov Sinai, οι Kolmogorov-Sinai αναπτύσσουν την έννοια της **εντροπίας Kolmogorov-Sinai (εντροπία K-S)**, η οποία είναι μέγεθος που περιγράφει σε ένα δυναμικό σύστημα το κατά πόσο είναι πιθανό να συμβούν όλες οι πιθανές καταστάσεις του και άρα είναι μέτρο **της πολυπλοκότητας του**. Όταν η εντροπία K-S είναι ίση με μηδέν το σύστημα είναι ντετερμινιστικό και μπορεί να προβλεφθεί πλήρως η συμπεριφορά του. Όταν το σύστημα είναι χαοτικό και διαπιστώνεται ότι μπορούν να συμβούν όλες οι πιθανές καταστάσεις τότε το σύστημα ονομάζεται **εργοδικό**.

Ο **Ilya Prigogine** ασχολήθηκε με ζητήματα που αφορούσαν σε **δομές έκλυσης, πολύπλοκα συστήματα** και την **μη αναστρεψιμότητα** <sup>120</sup>. Σύμφωνα με τον Prigogine η αιτιοκρατική θεώρηση των πραγμάτων δεν είναι πλέον επαρκής για να εξηγήσει τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί η φύση. Το

<sup>118</sup> <http://datagenetics.com/blog/february52018/index.html>

<sup>119</sup> 'Kolmogorov and Randomness'.

<sup>120</sup> 'Ilya Prigogine', στο *Wikipedia*, 6 Μάιος 2019, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ilya\\_Prigogine&oldid=895713956](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ilya_Prigogine&oldid=895713956).

1996 στο «**Τέλος της Βεβαιότητας**» επαναδιατυπώνει την άποψή του. Η κλασική φυσική, δεδομένης της αδυναμίας της να εξηγήσει το σύνολο των περιπτώσεων, θα πρέπει να επεκταθεί ώστε να καλύπτει και αυτές τις περιπτώσεις για τις οποίες υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα. Η Νευτώνεια μηχανική επεκτάθηκε αρχικά με τη **Γενική Σχετικότητα**, έπειτα με την εμφάνιση της **Κβαντομηχανικής** και τέλος με την αναγνώριση της **πιθανοκρατίας** και του **ντετερμινιστικού χάους**. Ο **Prigogine** αναφέρει ότι νέες σημαντικές παράμετροι που σχετίζονται με το ζήτημα των νόμων της φύσης είναι αυτές του **βέλους του χρόνου**, της **μη αναστρεψιμότητας**, καθώς και η **ευστάθεια** ή **αστάθεια** των συστημάτων στη φύση. Οι έννοιες αυτές θεωρεί ότι μπορούν να ολοκληρώσουν τους φυσικούς νόμους που δεν μπορεί να επεξηγήσει πλήρως τόσο η Νευτώνεια Μηχανική όσο και η Κβαντομηχανική. Οι έννοιες αυτές, μέσω της στατιστικής μηχανικής και της θερμοδυναμικής, συμπληρώνουν και ολοκληρώνουν τα κενά που υπάρχουν στους παραπάνω κλάδους της επιστήμης.

Ο **Prigogine** υποστηρίζει ότι στη φύση υπάρχουν τόσο αναστρέψιμες όσο και μη αναστρέψιμες διαδικασίες. Όμως οι διαδικασίες είναι στην πλειονότητά τους **μη αναστρέψιμες**, με τις αναστρέψιμες διαδικασίες να αποτελούν την εξαίρεση στον κανόνα <sup>121</sup>.

Η κλασική φυσική και η αιτιοκρατία είναι συνδεδεμένες με την έννοια της **αναστρεψιμότητας**. Σύμφωνα με αυτή, εφ' όσον είναι γνωστή η αρχική κατάσταση ενός συστήματος, μπορούμε να προβλέψουμε την τελική του κατάσταση, αλλά και το αντίστροφο, η τελική κατάσταση να οδηγήσει στη διαπίστωση των αρχικών συνθηκών. Αυτό θα σήμαινε ότι ο χρόνος δεν διαχωρίζεται σε παρελθόν και μέλλον και το βέλος του χρόνου δεν υπάρχει <sup>122</sup>. Όμως, καθώς πολλές από τις διεργασίες στη φύση είναι μη αναστρέψιμες, όπως για παράδειγμα η ραδιενέργεια, οι χημικές διεργασίες, κ.λπ., δεν μπορεί να ισχύει το ντετερμινιστικό μοντέλο και συνεπώς υφίσταται διάκριση στο παρελθόν και το μέλλον. Η αστάθεια και η μη αναστρεψιμότητα συνηγορούν και αυτές, πέρα από τις ανακαλύψεις της κβαντομηχανικής και του χάους, προς ένα νέο μοντέλο κατανόησης των νόμων της φύσης όπου περιλαμβάνεται η **αβεβαιότητα** και απομακρύνεται το απόλυτο της αιτιοκρατίας.

Όπως αναφέρει ο **Prigogine** <sup>123</sup>, το νέο μοντέλο της αντίληψης της σύγχρονης επιστήμης αναγνωρίζει τον πρωταρχικό ρόλο των διακυμάνσεων και της αστάθειας, παραμέτρους που περιορίζουν τη δυνατότητα για προβλεψιμότητα. Σε αντίθεση με τα μοντέλα της κλασικής φυσικής όπου επικρατεί η τάξη και ευστάθεια, της κβαντομηχανικής και της σχετικότητας, η νέα προσέγγιση με βάση την μη αναστρεψιμότητα και την αβεβαιότητα επανερμηνεύει τους νόμους της φύσης.

Για τον **Prigogine**, η **μη αναστρεψιμότητα προκύπτει από το ότι υπάρχουν περισσότεροι τρόποι να υπάρχει μια ανάμιξη ή αποδιοργάνωση μέσα σε ένα σύστημα (π.χ. ανακάτεμα καρφιών) και όχι μόνο ένας**. Η φυσική εξέλιξη ενός συστήματος είναι η αύξηση της εντροπίας του, δηλαδή της αταξίας του. Ο **Prigogine** παραθέτει τον **Gell-Mann**, ο οποίος περιγράφει ότι ένα κλειστό σύστημα μπορεί να έχει πολλές διαφορετικές καταστάσεις, τις οποίες ονομάζει «**μικροκαταστάσεις**» οι οποίες με τη σειρά τους ομαδοποιούνται και αντιστοιχούν σε «**μακροκαταστάσεις**» <sup>124</sup>.

Κατ' ανάλογο τρόπο, ο **Prigogine** είναι πεπεισμένος ότι η μικροσκοπική και μακροσκοπική κλίμακα συνδέονται με την εξής σχέση: **Στοχαστικές διαδικασίες στο μικροσκοπικό επίπεδο έχουν ως συνέπεια να δημιουργείται μη αναστρεψιμότητα στο μακροσκοπικό επίπεδο. Αυτός είναι ο τρόπος**

121 Ilya Prigogine, *Το τέλος της βεβαιότητας* (Αθήνα: Κάτοπτρο, 2003), 33.

122 Prigogine, 18.

123 Prigogine, 20.

124 Prigogine, 36.

**με τον οποίο εκφράζεται στη μακροσκοπική κλίμακα η τυχαιότητα στη μικροσκοπική κλίμακα του κόσμου**<sup>125</sup>.

Υπάρχει λοιπόν κατά τον **Prigogine** άμεση σχέση των φαινομένων στις διαφορετικές κλίμακες του κόσμου, τη μικροσκοπική και τη μακροσκοπική, με την τυχαιότητα να εμφανίζεται στην πρώτη ως αίτιο και το αποτέλεσμα της να γίνεται αντιληπτό μακροσκοπικά. Συνεπώς, το μέλλον δεν είναι πάντα καθορισμένο και υφίσταται αβεβαιότητα, καθώς δεν εφαρμόζεται πάντα το αιτιοκρατικό μοντέλο.

Η **αστάθεια** που περιγράφει ο Prigogine είναι συνδεδεμένη με την **αβεβαιότητα**. Σε ένα σύστημα, μετά από ένα κρίσιμο σημείο, παρατηρείται αστάθεια και το ίδιο το σύστημα οδεύει προς έναν από τους δυνατούς τρόπους ισορροπίας<sup>126</sup>. Προκύπτουν έτσι νέες δομές, οι δομές έκλυσης όπως τις ονομάζει, και το σύστημα **αυτοοργανώνεται** μέσω της επιλογής κάποιας από τις δυνατές / πιθανές καταστάσεις που μπορεί να βρεθεί<sup>127</sup>. Αυτή η αστάθεια και οι πολλαπλές λύσεις συντελούν στη δημιουργία της πολυπλοκότητας.

Για τον Prigogine, ένα σύστημα είναι **πολύπλοκο** όταν μπορεί να παρουσιάσει περισσότερες από μία εκβάσεις. Σε αυτά τα συστήματα, παρατηρούνται συσχετισμοί διεργασιών μεγάλης κλίμακας με διεργασίες μικρής κλίμακας<sup>128</sup>.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι για τον **Karl Popper**<sup>129</sup>, η τυχαιότητα παρουσιάζεται ως μια από τις δύο έννοιες που μπορούν να εξηγήσουν την έννοια της ελευθερίας. Αυτές είναι η **τύχη** (chance) και ο **έλεγχος** (control), σε αντίθεση με μια επεξήγηση της **ελευθερίας** που εξηγείται από ένα συνδυασμό τύχης και αναγκαιότητας. Για τον Popper (με αφετηρία την υπόθεση του Compton<sup>130</sup>) η ελευθερία είναι κάτι πέρα από την τύχη και είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στο σχεδόν τυχαίο και στο επιλεκτικά ελεγχόμενο.

Μέσα από τη συλλογή στοιχείων του τελευταίου κεφαλαίου, φαίνεται πως η τυχαιότητα είναι μία παράμετρος ή ποιότητα, η οποία είναι παρούσα σε πάρα πολλές πτυχές των φυσικών διεργασιών, τόσο σε μικρή όσο και σε μεγάλη κλίμακα. Παρατηρείται πολλές φορές ότι ένα σύστημα που συμπεριφέρεται με ντετερμινιστικό τρόπο, **μπορεί υπό προϋποθέσεις να συμπεριφερθεί χασοτικά**, αφού ξεπεραστεί ένα **συγκεκριμένο όριο / threshold** για κάποια παράμετρο. Σημαντικό είναι επίσης να σημειωθεί ότι ένα χασοτικό σύστημα **διαμορφώνει ένα όριο εντός του οποίου εξελίσσεται η αταξία του**. Το **όριο** αυτό (ως περιοχή - διαφορετικό από το προαναφερθέν όριο μετά το οποίο ένα σύστημα συμπεριφέρεται χασοτικά), μπορεί να γίνει αντιληπτό και να διαμορφωθεί με σαφήνεια, μόνο με την εξέλιξη του χασοτικού φαινομένου. Πολλές φορές **η πολυπλοκότητα συγγέεται με την τυχαιότητα**, καθώς είναι δύσκολο να εντοπιστεί ένας κανόνας που διέπει την οργάνωση ενός συστήματος.

Συχνά υπάρχει κανόνας, αλλά δεν αναγνωρίζεται, με αποτέλεσμα ένα σύστημα να χαρακτηρίζεται ως «τυχαίο» λόγω ελλειπών δεδομένων και μειωμένης κατανόησης. Φαίνεται δηλαδή ότι η τυχαιότητα είναι ως ένα βαθμό μια παράμετρος που θυμίζει τη διττή φύση των φωτονίων, καθώς αυτή

<sup>125</sup> Prigogine, 74.

<sup>126</sup> Prigogine, 83.

<sup>127</sup> Prigogine, 85.

<sup>128</sup> Prigogine, 259.

<sup>129</sup> 'Karl Popper', στο *Wikipedia*, 26 Νοέμβριος 2023, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Karl\\_Popper&oldid=1186922718#cite\\_note-89](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Karl_Popper&oldid=1186922718#cite_note-89).

<sup>130</sup> 'Arthur Compton', στο *Wikipedia*, 1 Μάιος 2024, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Arthur\\_Compton&oldid=1221716075#cite\\_note-FOOTNOTECompton1967121-44](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Arthur_Compton&oldid=1221716075#cite_note-FOOTNOTECompton1967121-44).

ορίζεται/επηρεάζεται από τον παρατηρητή της. Η τυχαιότητα υφίσταται ως τυχαία μέχρι να αναγνωρισθεί ένας κανόνας που μπορεί να την επεξηγή, ο οποίος κανόνας νοηματικά τελικά την καταργεί.

## 2.3 Η τυχαιότητα στην Τέχνη

Η προσπάθεια του ανθρώπου να εκφραστεί και να αναπαραστήσει έννοιες, ιδέες και τον κόσμο γύρω του μέσω της Τέχνης συνοδεύεται πάντα από την αντίστοιχη αντίληψη και τεχνική του ικανότητα για αναπαράσταση. Αρχικά αυτή η ικανότητα περιοριζόταν από τα διαθέσιμα μέσα και το τεχνικό επίπεδο του καλλιτέχνη. Τα προϊόντα αυτής της δραστηριότητας παρουσίαζαν σημαντικό βαθμό ασάφειας, ασυμμετρίας και μη κανονικότητας. Με την εξέλιξη των διαθέσιμων μέσων και εργαλείων και με την βελτίωση των ικανοτήτων έκφρασης του δημιουργού, τα έργα άρχισαν σταδιακά να πλησιάζουν τη ρεαλιστική αναπαράσταση, η οποία κατακτάται στη γλυπτική στην κλασική τέχνη κατά την αρχαιότητα και στη ζωγραφική κατά την περίοδο της αναγέννησης. Μέχρι τότε, η τυχαιότητα στην Τέχνη φαίνεται να υφίσταται ως παράμετρος που προκύπτει ακούσια, χωρίς να είναι επιθυμητή. Περισσότερες σχετικές πληροφορίες μπορούν να βρεθούν στο **Παράρτημα Ι**.

Από μια περίοδο και μετά όμως, η τυχαιότητα στην Τέχνη αρχίζει σταδιακά να αποτελεί για τον καλλιτέχνη ένα νέο εργαλείο έκφρασης και απόδοσης, το οποίο, καθώς συνδυάζεται με υπάρχουσες τεχνικές, οδηγεί στη δημιουργία πρωτότυπων έργων. Η τυχαιότητα στην Τέχνη μπορεί έτσι να συσχετιστεί με την πολυπλοκότητα, να συνδεθεί με τη μορφή, την πυκνότητα, το όριο, την παραλλαγή, το χώρο και το χρόνο και άλλες παραμέτρους που εξυπηρετούν την καλλιτεχνική πρόθεση.

### 2.3.1 Η τυχαιότητα στις πλαστικές και εικαστικές τέχνες

Στη ζωγραφική και τη γλυπτική, μέχρι την περίοδο του Ρομαντισμού, επιδιώκεται μια ρεαλιστική απεικόνιση του χώρου, του φωτός, της σκιάς και των μορφών, η οποία έχει όπως προαναφέρθηκε αφητηρία τους κλασικούς δημιουργούς της αρχαιότητας και απόγειό της αποτελεί η περίοδος της Αναγέννησης, του Νεοκλασικισμού και του Ρεαλισμού, με τις κατακτήσεις και τη συμβολή πολλών δημιουργών. Αυτή η επιδίωξη φαίνεται να χάνει έδαφος με την εμφάνιση του Ρομαντισμού, η οποία παρατηρείται ότι συμβαίνει παράλληλα με τη σταδιακή αναγνώριση της τυχαιότητας ως σημαντικής παραμέτρου στην επιστήμη. Στην Τέχνη, αυτή η σταδιακή εμφάνιση της τυχαιότητας αρχίζει να γίνεται με συνειδητό τρόπο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά παραδείγματα έργων στην Τέχνη τα οποία σχετίζονται με την τυχαιότητα.

Ο **Caspar David Friedrich** στο έργο του «**Η Θάλασσα από Πάγο**» (1823-1824) (Εικόνα 2\_15), αποδίδει με ρεαλιστικό τρόπο μια δυναμική σύνθεση ενός τοπίου στην Αρκτική. Ενώ η τεχνοτροπία του Friedrich είναι αναπαραστατική, το σύνολο της σύνθεσης έχει μια έντονη δυναμικότητα και κινητικότητα χάρη στην πολυπλοκότητα και την **φαινομενικά τυχαία και φυσική διάταξη** των μορφών. Μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι το κύριο θέμα είναι **η αταξία των μορφών**, μέσα από τις οποίες υλοποιείται μια ευκρινής κορύφωση στο κέντρο της σύνθεσης.

Ο **William Turner** επιδιώκοντας να παρουσιάσει μια προσωπική τεχνοτροπία διαφορετική από την επικρατούσα της εποχής, ενσωματώνει την παράμετρο της κίνησης στο έργο του. Στην (Εικόνα 2\_16) απεικονίζεται το έργο: «**The Burning of the Houses of Lords and Commons**» (1834). Τα περιγράμματα

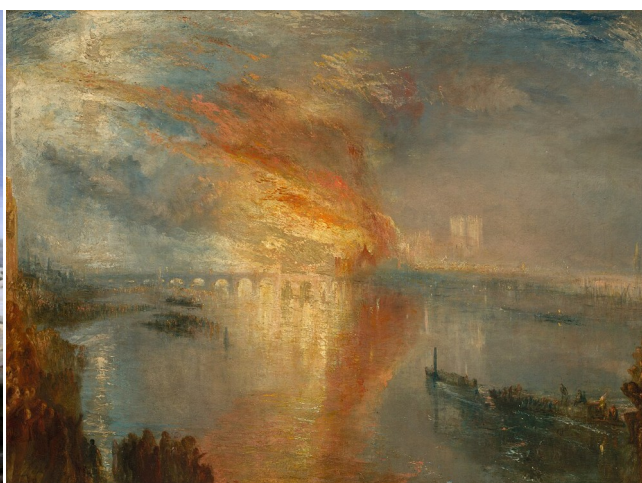


ουσιαστικά καταργούνται, οι περιοχές της σύνθεσης χάνουν τα όριά τους, η έννοια του βάθους εξαυλώνεται, καθώς όλα τα στοιχεία είτε βρίσκονται στο φόντο είτε στο προσκήνιο, αναμιγνύονται μεταξύ τους. Ο βασικός στόχος πλέον δεν είναι η πιστή αναπαράσταση, αλλά η δημιουργία της εντύπωσης και των συναισθημάτων.

Με την έλευση του ιμπρεσιονισμού, η έννοια της τυχαιότητας αρχίζει να έρχεται ακόμα περισσότερο στο προσκήνιο.

Η ασάφεια που εισήγαγε ο Turner, γοητεύει επόμενους καλλιτέχνες, όπως για παράδειγμα ο **Delacroix**, ο οποίος όπως αναφέρει ο **Gombrich**<sup>131</sup>, βασίζεται περισσότερο στο χρώμα και την εντύπωση παρά στην πόζα και τη θεματολογία, ενώ χάνεται η διαύγεια του περιγράμματος (Εικόνα 2\_17). Ο **Manet** (Εικόνα 2\_18) προσπαθεί να εισάγει την έννοια της κίνησης και της εντύπωσης του φωτός. Καλλιτέχνες όπως οι **Monet** (Εικόνα 2\_19), **Renoir**, **Degas** (Εικόνα 2\_20), **Sezan**, προσπαθούν να συλλάβουν στο έργο τους την εντύπωση που δημιουργεί εκείνη τη στιγμή το φως και το χρώμα.

Η τεχνοτροπία των ιμπρεσιονιστών αναστατώνει το κοινό και τους κριτικούς, καθώς όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται, αυτά τα νέα έργα φαίνονται να έχουν γίνει **στην τύχη** (!) από υποτιθέμενους καλλιτέχνες<sup>132</sup>.



Εικόνα 2\_15: Caspar David Friedrich – Η θάλασσα από Πάγο – Πινακοθήκη Αμβούργου, 1824. Πηγή: [IMG\\_6005 Caspar David Friedrich. 1774-1840. La Mer de Glace.The Sea of Ice. 1824. Hambourg Kunsthalle, <https://www.flickr.com/photos/mazanto/29228385961/in/photolist-LwP7QZ-2pEUZ5T-25DbdJd-2ixAKxJ-2nmcQan-2qTFIA7-2pKaxsF-2b7bfND-zFtGPz-KbtMnQ-rhHNY5-oEYt6D-2Ifyai8-Rdxhh5-fjQPQo-zmBfxS-KbGHVx-97iVub-WjifGr9-RJifTq-RyoX2h-2ixBVvw-26D5DUq-5qxrHg-gWiA5Q-4pT3SS-4oEkv7-jLkhp-2pKjqdY-FXgFwr-dDwso1-by3JqT-GSG94k-2ps8DgS-wB69H-znZnUh-9hnrLj-eeen3XU-GEWgFW-TA6fcA-qRQGgq-GLJZr6-2pkkiRK-WjMmPP-7JzrHu-2gkMU7A-6sePxp-z4RCYR-bVWoBF-uBvf5m>, εικόνα του/της: \*jean louis mazieres\*, άδεια: CC BY-NC-SA 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/>](https://www.flickr.com/photos/mazanto/29228385961/in/photolist-LwP7QZ-2pEUZ5T-25DbdJd-2ixAKxJ-2nmcQan-2qTFIA7-2pKaxsF-2b7bfND-zFtGPz-KbtMnQ-rhHNY5-oEYt6D-2Ifyai8-Rdxhh5-fjQPQo-zmBfxS-KbGHVx-97iVub-WjifGr9-RJifTq-RyoX2h-2ixBVvw-26D5DUq-5qxrHg-gWiA5Q-4pT3SS-4oEkv7-jLkhp-2pKjqdY-FXgFwr-dDwso1-by3JqT-GSG94k-2ps8DgS-wB69H-znZnUh-9hnrLj-eeen3XU-GEWgFW-TA6fcA-qRQGgq-GLJZr6-2pkkiRK-WjMmPP-7JzrHu-2gkMU7A-6sePxp-z4RCYR-bVWoBF-uBvf5m)

Εικόνα 2\_16: Joseph Mallord William Turner, *The Burning of the Houses of Lords and Commons, 16 October 1834 - 1942*. Πηγή: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Joseph\\_Mallord\\_William\\_Turner\\_-\\_The\\_Burning\\_of\\_the\\_Houses\\_of\\_Lords\\_and\\_Commons\\_16\\_October\\_1834\\_-\\_1942.647\\_-\\_Cleveland\\_Museum\\_of\\_Art.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Joseph_Mallord_William_Turner_-_The_Burning_of_the_Houses_of_Lords_and_Commons_16_October_1834_-_1942.647_-_Cleveland_Museum_of_Art.jpg), εικόνα του/της: *Yann*, άδεια: public domain.

131 E. H. Gombrich, *Το χρονικό της τέχνης*, Δεύτερη ελληνική έκδοση (Αθήνα: Μορφωτικό Ίδρυμα Εθνικής Τραπέζης, 1998), 506.

132 Gombrich, 519.

Όπως αναφέρει ο **Schapiro Meyer** στο: «**Ιμπρεσιονισμός, Αντανακλάσεις και Αντιλήψεις**»<sup>133</sup>, τα χαρακτηριστικά του ιμπρεσιονισμού είναι τέσσερα: 1. Η κυριαρχία της πινελιάς, 2. Η διάκριση της επιφάνειας να μοιάζει ως πλέξιμο πάνω στον καμβά, 3. **Ένας βαθμός από τυχαιότητα** και 4. Η έννοια του μετασχηματισμού κατά τον οποίο το έργο γίνεται αντιληπτό και ως εικόνα και ως χρωματισμένη επιφάνεια.

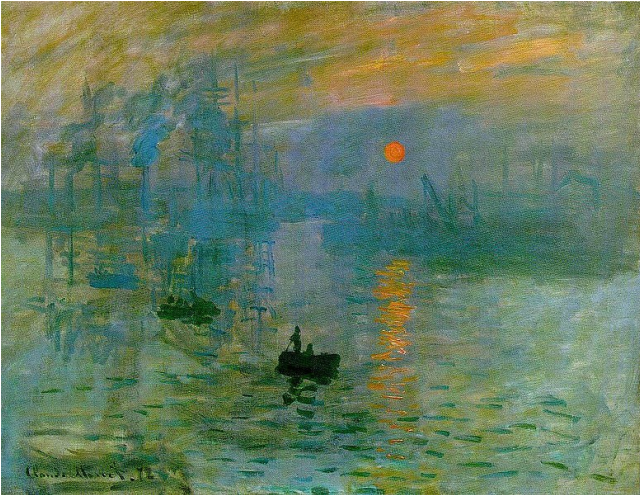
Σε συνέχεια των ιμπρεσιονιστών, ο νεο-ιμπρεσιονισμός έρχεται να δώσει μια νέα εκδοχή απόδοσης της πραγματικότητας. Ο ιδρυτής της σχολής **Seurat** χρησιμοποιεί την τεχνική του **πουαντιγισμού (pointillism)** για να αποδώσει τις μορφές, το χρώμα και το φως. Τα περιγράμματα όπως είναι μέχρι τότε συνηθισμένο να αποδίδονται **ως σαφή όρια** αρχίζουν να καταργούνται. Για παράδειγμα το έργο: «**Ένα Κυριακάτικο απόγευμα στο νησί της Grande Jatte**» (1884-86) δημιουργείται από μεμονωμένες χρωματιστές κουκίδες. Η **πυκνότητά τους** και η επιλογή των χρωματικών συνδυασμών των κουκίδων που είναι σε κοντινή απόσταση δημιουργούν, αν παρατηρηθούν από απόσταση, τις μορφές, **τα όρια**, τα σχήματα και τα χρώματα.



Εικόνα 2\_17: Delacroix, Άλογο τρομαγμένο από την καταιγίδα. Πηγή: Horse Frightened by Lightning, <https://www.flickr.com/photos/lluissribes/9470741013/in/photo-list-hgvaH5-HpepMk-qMZ91r-pu3qeR-21zsceJ-28dDceu-fqU2ma-AleiUb-5hhgej-ZAqcmo-R17iQ-245hoyA-22Gfijd-dNu7p4-csPyQh-2pDtC2t-2pDtC2D-er2r6L-cYzu5b-clvBM7-hSeb9E-bXgSDi-2pQ3JyL-fSeRxA-qDNQWZ-9FWNs5-clvBcC-2pCpqnM-S7V6iv-fyXXn8-R2LJ7p-2ey5NUi-2pP158X-2pQ2DxU-2pPzZG4-2pP7szv-2ptWfyA-2pP5GE5-2pP18SA-2pP7Vj3-2pPFGtW-rSimX-jWfgSi-SbtRf6-2eKExJd-2fRPVBN-2jwKfRG-9ZDW4X-2k8rkSK>, εικόνα του/της: [Lluís Ribes Mateu](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/), άδεια: CC BY-NC 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>

Εικόνα 2\_18: Édouard Manet, Βαρκάδα, 1874 μ.Χ. Πηγή: Boating, 1874. <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/436947> άδεια: public domain.

133 Meyer Schapiro, *Impressionism: Reflections and Perceptions*, 1 edition (New York: George Braziller Inc., 1997), 322.



Εικόνα 2\_19: Claude Monet, Εντύπωση, ανατέλλων ήλιος, 1872. Πηγή: Claude Monet's SUNRISE "soleil levant" 1872, <https://www.flickr.com/photos/huffstutterrobert/5970865384/>, εικόνα του/της: ROBERT HUFFSTUTTER, άδεια: CC BY-NC 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>

Εικόνα 2\_20: Edgar Degas, The Ballet Class, 1880. Πηγή: Degas, <https://www.flickr.com/photos/jonathanjo/510993405/in/photolist-M9Yx8-awexvR-4pkmTF-e1mQTW-8S4f9f-8S19Et-2gSPRUo-WcPRvK-dF7sXr-eZ2D9c-2k9wELk-TKVVQm-dF7t8v-eZ2D4F-7G2bk-8S19tp-2cChMpQ-gkPc8-8aXvSP-bEnGTh-8UhgMe-V8N3ee-boLZq2-9U2cEb-2k9wfJG-96lPeg-29xtuZf-JAwms-5rN3mC-BbBdMq-dpPTTv-e7iqTC-Gfj7v1-wS4bw6-wPdGUf-wz3QFe-2mGHHTX-wRxaea-dUwZ7a-6AjSUJ-2nJGHqW-cKnFKs-WrydaM-bkLkwT-74ws7-dUwYae-8UkmaG-5FnHrh-8UhgFc-8UkmcE>, εικόνα του/της: jonathan, άδεια: CC BY-SA 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>



Εικόνα 2\_21: Georges Seurat, Ένα Κυριακάτικο απόγευμα στο νησί της Grande Jatte, 1884-86. Πηγή: A Sunday on La Grande Jatte — 1884, <https://www.artic.edu/artworks/27992/a-sunday-on-la-grande-jatte-1884>, CC0 Public Domain Designation, <https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/>

Εικόνα 2\_22: Georges Seurat, Ένα Κυριακάτικο απόγευμα στο νησί της Grande Jatte, 1884-86. Πηγή: A Sunday on La Grande Jatte — 1884, <https://www.artic.edu/artworks/27992/a-sunday-on-la-grande-jatte-1884>, CC0 Public Domain Designation, <https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/>

Η αρχή του 20ού αιώνα φέρνει στο προσκήνιο ένα νέο είδος τέχνης που θα ονομαστεί αφηρημένη τέχνη. Με τον όρο αφηρημένη τέχνη εννοείται μια τέχνη που χρησιμοποιεί τα σχήματα, τη μορφή, το χρώμα και τις γραμμές για να δημιουργήσει ένα αποτέλεσμα το οποίο έχει κάποιο βαθμό ανεξαρτησίας από οπτικές αναφορές <sup>134</sup>.

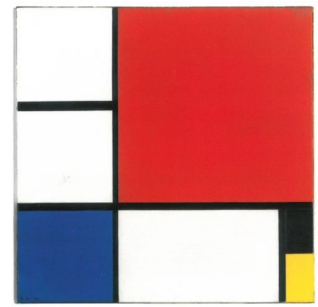
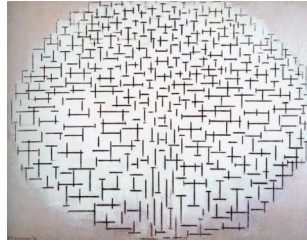
Για τον **Piet Mondrian** έργα του όπως τα **“Composition Trees 2”** (1912-1913) (Εικόνα 2\_23) και **“Composition no. IV”** (1914) (Εικόνα 2\_24), είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα τα οποία εμφανίζουν την παράμετρο της πολυπλοκότητας ως βασικό συνθετικό εργαλείο του καλλιτέχνη. Όπως αναφέρεται, ο Mondrian απεχθανόταν τόσο τον υπολογισμό όσο και την τυχαιότητα και υποστήριζε πως κατευθυνόταν από ανώτερη διαίσθηση <sup>135</sup>. Η **φαινομενική αυτή τυχαιότητα** των έργων του πηγάζει από την **πολυπλοκότητα της σύνθεσης** και την αδυναμία να αντιληφθεί κανείς τους κανόνες που τη διέπουν. Η αναγνώριση των κανόνων ίσως είναι δύσκολο να γίνει εξ' αρχής ή μπορεί να μη γίνει και καθόλου (αν για παράδειγμα δεν υπάρχει η επεξήγησή τους από τον καλλιτέχνη). **Η αναγνώριση του κανόνα είναι για τον παρατηρητή η κρίσιμη παράμετρος που συντελεί στην αντίληψη και κατηγοριοποίηση του έργου ως τυχαίου ή μη τυχαίου.**

Εφ' όσον όμως ανευρεθεί ο κανόνας, είναι δυνατόν να παραχθούν ισοδύναμες παραλλαγές των έργων, οι οποίες έχουν κοινά στοιχεία με το πρωτότυπο. Στην περίπτωση του έργου **“Composition 2”** με τη χρήση κώδικα δημιουργούνται παραλλαγές όμοιες με το αρχικό πρωτότυπο έργο οι οποίες παρουσιάζονται από τους **Zang και Yu**, 2013 <sup>136</sup>.

134 'Abstract Art', στο *Wikipedia*, 29 Σεπτέμβριος 2019, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Abstract\\_art&oldid=918627427](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Abstract_art&oldid=918627427).

135 Ross Wolfe, 'Mondrian: Order and Randomness in Abstract Painting', *The Charnel-House* (blog), 5 Σεπτέμβριος 2015, <https://thecharnelhouse.org/2015/09/04/mondrian-order-and-randomness-in-abstract-painting-1978/>.

136 Kang Zhang και Jinhui Yu, 'Generating Abstract Paintings in Kandinsky Style', στο *SIGGRAPH Asia 2013 Art Gallery*, SA '13 (New York, NY, USA: ACM, 2013), 18:1-18:6, <https://doi.org/10.1145/2542256.2542257>.

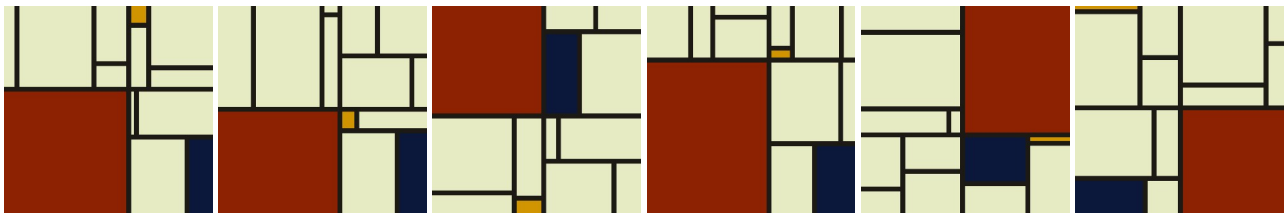


Εικόνα 2\_23: Piet Mondrian, *Composition Trees 2*, 1912-1913. Πηγή: <https://research.rkd.nl/en/detail/https%3A%2F%2Fdata.rkd.nl%2Fimages%2F270430>, άδεια: CC0 1.0, <https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/>

Εικόνα 2\_24: Piet Mondrian, *Composition no. IV*, 1914. Πηγή: <https://research.rkd.nl/en/detail/https%3A%2F%2Fdata.rkd.nl%2Fimages%2F270884?c=q%3DComposition%2520no%2520IV%26filters%255B0%255D%255Bfield%255D%3Ddb%26filters%255B0%255D%255Bvalues%255D%255B0%255D%3Drkdimages%26filters%255B0%255D%255Btype%255D%3Dall&n=i%3D0%26pp%3D1%26rpp%3D6%26tp%3D1>, άδεια: CC0 1.0, <https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/>

Εικόνα 2\_25: Piet Mondrian, *Compositie 10 in zwart wit*, 1915. Πηγή: <https://research.rkd.nl/en/detail/https%3A%2F%2Fdata.rkd.nl%2Fimages%2F218082?c=q%3DComposition%2520in%2520Black%2520and%2520White%26filters%255B0%255D%255Bfield%255D%3Ddb%26filters%255B0%255D%255Bvalues%255D%255B0%255D%3Drkdimages%26filters%255B0%255D%255Btype%255D%3Dall&n=i%3D2%26pp%3D13%26tp%3D1>, άδεια: CC0 1.0, <https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/>

Εικόνα 2\_26: Piet Mondrian, *Composition II*, 1929. Πηγή: <https://research.rkd.nl/en/detail/https%3A%2F%2Fdata.rkd.nl%2Fimages%2F253575?c=q%3DComposition%2520II%2520%26filters%255B0%255D%255Bfield%255D%3Ddb%26filters%255B0%255D%255Bvalues%255D%255B0%255D%3Drkdimages%26filters%255B0%255D%255Btype%255D%3Dall&n=i%3D3%26pp%3D20%26tp%3D3>, άδεια: CC0 1.0, <https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/>



Εικόνα 2\_27: Εικόνες 1-6 έργων τύπου Mondrian ως παραλλαγές του αυθεντικού έργου *Composition II*, που δημιουργήθηκαν από τον κώδικα στο σύνδεσμο: <https://filosophy.org/projects/mondrian/>

Ένας άλλος από τους πρωτοπόρους της αφηρημένης τέχνης, ο **Wassily Kandinsky**, παρουσιάζει αυτό το νέο στυλ της αφηρημένης / αφαιρετικής (abstract) ζωγραφικής όπου όπως ο ίδιος υποστηρίζει:

*«...τίποτα δεν είναι απόλυτο αλλά όλα είναι σχετικά. Η σχέση βασίζεται στις τροποποιήσεις των αμοιβαίων σχέσεων των μορφών μεταξύ τους και στις τροποποιήσεις της κάθε μεμονωμένης μορφής, ακόμα και της μικρότερης.»*<sup>137</sup> (μτφρ. Τ. Κουιμτζόγλου)

Για τον Kandinsky, το έργο του είναι ένα **μαθηματικό σύστημα από παραμέτρους, σχέσεις και ισορροπίες**. Κάθε τροποποίηση και μεταβλητή επηρεάζει όχι μόνο τη μονάδα αλλά και το σύνολο, καθώς όλα τα στοιχεία είναι συσχετισμένα μεταξύ τους. Το αποτέλεσμα μπορεί να φαίνεται **τυχαίο**, αν κάποιος δεν γνωρίζει την εσωτερική λογική πάνω στην οποία έχουν δομηθεί οι μορφές και τα χρώματα. Και σε αυτή την περίπτωση, όπως και προηγουμένως, αν δεν είναι γνωστός ο κανόνας, τα έργα θεωρούνται ότι περιλαμβάνουν την τυχαιότητα.



Εικόνα 2\_28: Wassily Kandinsky, *Painting with Green Center*, 1913. Oil on canvas (1866-1944) Art Institute of Chicago. Πηγή: <https://www.flickr.com/photos/rocor/15001993065/in/photolist-oRF8SR-2oV7GYc-2oV6CYh-aMio8a-aMipfP-dJcP6D-dJctmZ-2poQs3n-2oV9e8x-2oV8LDT-5jYVpp-2oMq8BV-2oMpgz7-nggUdn-oRF8yp-2kBwFfZ-2gbWjRc-ofJw8s-2oXhAnG-2mMvryg-6gazW6-2pBxFJn-2jXmyrS-QQER8r-2pqufPd-df4vKj-81xE7H-b9844x-73ZMfd-2nW7R5t-ohHvXL-ohzQZE-2pfjGxr-dwV2yE-2nafN4o-Nqt9hn-Q5VWhD-7XrccA-2mkMhZd-ohKN9C-aiiaW8-AyfMIn-r96apd-2pByjeH-2nW53UE-2efY8hx-2nafRvP-2i7kklL-5WX8XL-2pLqbH2>, εικόνα του/της: *Rob Corder*, άδεια: CC BY-NC 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>

137 Wassily Kandinsky, *Concerning the Spiritual in Art*, μετάφρ. Michael Sadleir, 2004, κεφ. VI. The Language of form and colour, <http://www.gutenberg.org/ebooks/5321>.

Το ρεύμα του **κυβισμού** παρουσιάζει μια πρωτοπόρα αντίληψη για την απεικόνιση της πραγματικότητας<sup>138</sup>. Ένα αντικείμενο μπορεί να αναπαρασταθεί παρουσιάζοντας στο δισδιάστατο καμβά ταυτόχρονα πολλές διαφορετικές από τις όψεις του. Αυτή η προσέγγιση, αυξάνει την πολυπλοκότητα του έργου και τη δυνατότητα διαφορετικών αναγνώσεων και ερμηνειών του από τον παρατηρητή, καθώς οι πολλαπλές απεικονίσεις δεν εμπίπτουν στην περίπτωση της μονοσήμαντης σχέσης που συνδέει τη γεωμετρία με την προοπτική της αναπαράστασης από μία μόνο οπτική. Όπως αναφέρει η **L. Pesce**<sup>139</sup>, ο κυβισμός και η κβαντομηχανική είχαν το κοινό στοιχείο ότι παρουσίαζαν μια εικόνα της πραγματικότητας πολύ διαφορετική από αυτή που είχε συνηθίσει ο κόσμος μέχρι τότε, μια πραγματικότητα δηλαδή η οποία μπορεί να παρουσιάζει πολλαπλές εκφάνσεις της.

Λέγεται ότι ο φυσικός **Max Bohr**, ένας από τους πατέρες της κβαντομηχανικής, είχε επηρεαστεί από τον κυβισμό, καθώς είχε αγοράσει τον πίνακα του **Jean Metzinger** με τίτλο «**Η Γυναίκα στο άλογο**», 1911-1912<sup>140</sup>, ένα δείγμα αφηρημένου κυβισμού, το οποίο παρουσιάζει το θέμα με τρόπο ζωντανό σαν να βρίσκεται σε διαρκή κίνηση. Οι πολλαπλές όψεις του θέματος και η αίσθηση της κίνησης θα μπορούσαν να φέρουν στο νου μια αναλογία με την κβαντομηχανική και την μη μοναδικά καθορισμένη θέση των σωματιδίων στο χώρο κατά την παρατήρησή τους<sup>141</sup>. Η διάσπαση των περιγραμμάτων και των μορφών, καθώς και η απόδοση του συνόλου με επιμέρους γεωμετρικά στοιχεία τα οποία συνδέονται και αναγιγνώσκονται με διαφορετικούς τρόπους, αυξάνουν την πολυπλοκότητα, η οποία **όταν δεν είναι αναγνωρίσιμη από τον παρατηρητή εκλαμβάνεται ως τυχαιότητα**.

Το νέο κίνημα στην Τέχνη που καλείται **Dada** έρχεται να παρουσιάσει νέους τρόπους έκφρασης και περιλαμβάνει συχνά παρουσιάσεις, συγκεντρώσεις, επιδείξεις και χρησιμοποιεί ακόμα και τους θεατές ως συντελεστές που συμμετέχουν στην παραγωγή αντισυμβατικών, σοκαριστικών και **τυχαίων** συμβάντων. Μια από τις ερμηνείες για την ονομασία του κινήματος εικάζεται ότι ήταν το **τυχαίο** άνοιγμα του λεξικού στη λέξη dada.

Ο **Marcel Duchamp** το 1912, παρουσιάζει το έργο: «**Γυμνό κατεβαίνει μια σκάλα, νο 2**» το οποίο απεικονίζει όπως αναφέρει και ο τίτλος μια γυμνή ανθρώπινη φιγούρα να κατεβαίνει μια σκάλα. Φαίνεται ότι το έργο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να παρουσιάσει τη ροή του σώματος, καθώς απεικονίζονται το ένα πάνω στο άλλο τα διαδοχικά στιγμιότυπα της κίνησης του. Αντί για την ταυτόχρονη προβολή της γεωμετρίας από διαφορετικές οπτικές, ο Duchamp επιλέγει να καταγράψει ταυτόχρονα **στιγμιότυπα διαδοχικών χρονικών στιγμών στον ίδιο χώρο**<sup>142</sup>.

Ο **Duchamp** συνεχίζει τους πειραματισμούς και το 1913 παρουσιάζει το έργο του: «**3 stoppages étalon**» στο οποίο: 3 κομμάτια νήματος μήκους ενός μέτρου αφήνονται να πέσουν **με τυχαίο** τρόπο από ύψος ενός μέτρου πάνω σε πάνελ χρώματος πρωσικού μπλε και στη συνέχεια κατασκευάζει 3 ξύλινα προφίλ μήκους ενός μέτρου που ακολουθούν τα σχήματα των πεσμένων νημάτων. Ο **Duchamp** ασχολείται επίσης με τη σύνθεση μουσικής και δύο από τις τρεις συνθέσεις του, το

138 <https://en.wikipedia.org/wiki/Cubism#/media/>

[File:Pablo Picasso, 1910, Girl with a Mandolin \(Fanny Tellier\), oil on canvas, 100.3 x 73.6 cm, Museum of Modern Art New York..jpg](#)

139 Laura Pesce, *Close Encounters of Art and Physics: An Artist's View* (Springer Nature, 2019), 45.

140 [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/f/f8/Jean Metzinger%2C 1911-12%2C La Femme au Cheval - The Rider.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/f/f8/Jean_Metzinger%2C_1911-12%2C_La_Femme_au_Cheval_-_The_Rider.jpg)

141 Pesce, *Close Encounters of Art and Physics*, 47.

142 [https://en.wikipedia.org/wiki/Marcel\\_Duchamp#/media/File:Duchamp\\_-\\_Nude\\_Descending\\_a\\_Staircase.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Marcel_Duchamp#/media/File:Duchamp_-_Nude_Descending_a_Staircase.jpg)

“*Erratum Musical*” και το “*La Mariée mise à nu par ses célibataires même*” βασίζονται σε τυχαίες διεργασίες<sup>143</sup>.

Το μανιφέστο του **Tristan Tzara** του 1920 είναι η πρόταση για ένα νέο είδος ποίησης που χρησιμοποιεί λέξεις κομμένες από εφημερίδα οι οποίες συνθέτονται **τυχαία** ώστε να δημιουργήσουν ένα έργο στο οποίο συμμετέχει το σύμπαν<sup>144</sup>. Οι οδηγίες του Tzara είναι ουσιαστικά ο **αλγόριθμος** κατασκευής ενός ποιήματος dada<sup>145</sup>.

Ο **Hans Jean Arp** παρουσιάζει μια σειρά από έργα collage τα οποία δημιουργεί όπως υποστηρίζει με βάση την τύχη κόβοντας κομμάτια χαρτί και αφήνοντάς τα να πέσουν με ακαθόριστο τρόπο στο κάδρο της σύνθεσής του. Το αποτέλεσμα είναι ένα έργο όπως στην Εικόνα 2\_29 το οποίο είναι ένα “**Collage με τετράγωνα διατεταγμένα σύμφωνα με το Νόμο της Τύχης**”, 1916-1917 (ίσως όχι εντελώς τυχαίο αποτέλεσμα κρίνοντας από τη σχετικά τακτοποιημένη διάταξη των κομματιών χωρίς επικαλύψεις και με ίσες περιόδους αποστάσεις μεταξύ τους) ή στο «**Σύμφωνα με τους Νόμους της Τύχης**», το 1933, του οποίου η διάταξη φαίνεται πιο πειστικά τυχαία<sup>146</sup>. Η εικόνα του έργου μπορεί να βρεθεί στο σύνδεσμο: <https://www.moma.org/collection/works/37013>.

Στο χώρο της ζωγραφικής, διάφοροι καλλιτέχνες πειραματίζονται επίσης με την τυχαιότητα. Επηρεασμένος από το έργο του Hans Jean Arp, ο **Ellsworth Kelly** φτιάχνει το 1951 το έργο “**Seine**”<sup>147</sup>, μια αναπαράσταση του Σηκουάνα που αποτελείται από λευκά και μαύρα παραλληλόγραμμα τα οποία οργανώνονται σε στήλες, με κάθε στήλη να ξεκινάει με ένα μαύρο κελί σε τυχαία θέση, τη 2η στήλη να έχει 2 μαύρα κελιά σε τυχαία θέση κ.ο.κ. Το 1957 οι **Broadbent και Hammersly**<sup>148</sup> εισάγουν την έννοια της διήθησης και το 1985 οι **Sapoval, Rosso και Gouyet**<sup>149</sup> προτείνουν ένα μοντέλο διάχυσης μετώπων, που τώρα καλείται κλιμακωτή διήθηση (**gradient percolation**), παρόμοιο οπτικά με το συγκεκριμένο έργο τέχνης. Το αποτέλεσμα της απεικόνισης μοιάζει σημαντικά με τον πίνακα του

143 ‘Marcel Duchamp - Wikipedia’, ημερομηνία πρόσβασης 10 Οκτώβριος 2019,

[https://en.wikipedia.org/wiki/Marcel\\_Duchamp](https://en.wikipedia.org/wiki/Marcel_Duchamp).

144 ‘Dada’, στο *Wikipedia*, 9 Οκτώβριος 2019, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dada&oldid=920424405>.

145 «Πώς να φτιάξετε ένα ποίημα Dada:

Πάρτε μια εφημερίδα.

Πάρτε ένα ψαλίδι.

Διαλέξτε από αυτήν την εφημερίδα ένα άρθρο με το ίδιο μέγεθος που θέλετε να έχει το ποίημά σας.

Κόψτε το άρθρο.

Στη συνέχεια κόψτε όλες τις λέξεις που αποτελούν το άρθρο και βάλτε τις όλες σε μια τσάντα.

Ανακινήστε μαλακά.

Στη συνέχεια βγάλτε τη μια λέξη μετά την άλλη.

Αντιγράψτε συνειδητά με τη σειρά που βγαίνουν από τη τσάντα.

Το ποίημα θα μοιάζει σε εσάς.

Και ορίστε, ένας ατελείωτα πρωτότυπος συγγραφέας γοητευτικής ευαισθησίας, παρά το ότι δεν εκτιμάται από το χυδαίο κοπάδι.»

Tristan Tzara, ‘How to Make a Dadaist Poem, (method of Tristan Tzara)’, ημερομηνία πρόσβασης 10 Οκτώβριος 2019,

<https://www.writing.upenn.edu/~afilreis/88v/tzara.html>.

146 <https://www.tate.org.uk/about-us/policies-and-procedures/website-terms-use>

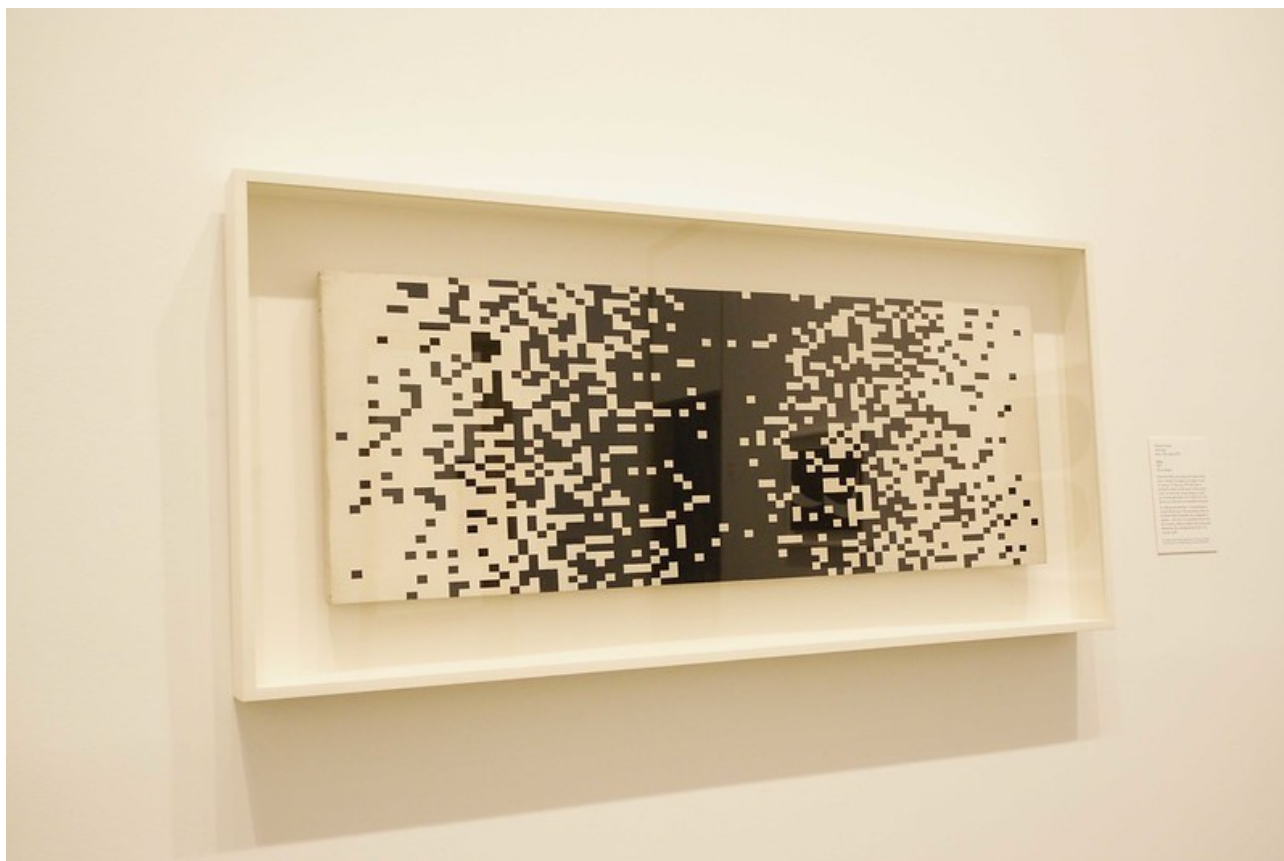
147 <https://ellsworthkelly.org/work/seine/>

148 S. R. Broadbent και J. M. Hammersley, ‘Percolation processes: I. Crystals and mazes’, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 53, τχ. 3 (1957): 629β€“641, <https://doi.org/10.1017/S0305004100032680>.

149 Bernard Sapoval, Michel Rosso, και Jean-François Gouyet, ‘The fractal nature of a diffusion front and the relation to percolation’, *Edp sciences, Journal de Physique Lettres*, τχ. 46 (4) (1985): 149–56, <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00232493/document>.



Ellsworth <sup>150</sup> και δείχνει ότι η μεθοδολογία του Ellsworth κατάφερε, χωρίς να το γνωρίζει ο ίδιος, να απεικονίσει αφαιρετικά μια διαδικασία τυχαιότητας στο φυσικό κόσμο. Ο **Ellsworth** το 1951 δημιουργεί μία σειρά από 8 collages τα οποία αποτελούνται από εκατοντάδες χρωματιστά τετράγωνα τα οποία είναι τοποθετημένα σε λευκό ή μαύρο φόντο. Τα έργα έχουν τίτλο: «**Φασματικά χρώματα διατεταγμένα τυχαία, I έως VIII**» <sup>151</sup>.



Εικόνα 2\_29: Ellsworth Kelly, *Seine*, 1951. Πηγή: *Seine PMA(6s)*, <https://www.flickr.com/photos/rverc/51512688286/in/photolist-2mtZZy3-2qiXzk4-2qiQSZ3-2qiWwNA-2qiXc6D-2qiVsRY-2qiVsKF-2qiWF3w-2qiQSTM-2qiVsSz-2qiXLqW-2qiVsSe-2qiVgJ2-2qiXLiw-2qiWF9Z-2qiVsY6-2qiXcdC-2qiQSXE-2qiQSXK-2qiXLvA-2qiVsWY-2qiVsMj-2qiQSMz-2qiXcck-2qiQJSm-2qiVgMy-2qiQTlq-2qiVsWn-2qiQFGJ-2qiVsZd-2qiXLwY-2qiWEWE-2qiWwPh-2qiXLjd-2qiWEUW-2qiQJT8-2qiVjqQ-2qiWfb7-2qiWF5v-2qiWuIm-8VaR8d-2qiVsNS-2qiVjz2-2qiVsZy-2qiX3PJ-2qiVt2n-2qiXc6t-2qiXLzU-2qiXLxE-2qiXLqf>, εικόνα του/της: *Regan Vercreuy*, άδεια: CC BY-NC-ND 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/>

Ο **Jackson Pollock** από το 1947 μέχρι το 1950 διανύει την λεγόμενη περίοδο σταξίματος (drip period) της τεχνοτροπίας του. Τοποθετώντας τον καμβά στο δάπεδο, έπειτα από προτροπή του Duchamp <sup>152</sup>, πετάει, απλώνει και πιπιλάει το χρώμα, ώστε να δημιουργήσει αφηρημένες εξπρεσιονιστικές συνθέσεις εμπνευσμένες από το υποσυνείδητό του. Όπως ο ίδιος ο Pollock υποστηρίζει, τα έργα του **δεν είναι χαοτικά και τυχαία**. Παρ' όλα αυτά υπάρχει το στοιχείο της **τυχαιότητας**, η οποία είναι

150 Bryan Gin-ge Chen, 'The river banks of Ellsworth Kelly's Seine' (Penn University, χ.χ.), [http://www.sas.upenn.edu/~chb/kelly/chen\\_bryan\\_artofresearch.pdf](http://www.sas.upenn.edu/~chb/kelly/chen_bryan_artofresearch.pdf).

151 <https://ellsworthkelly.org/work/spectrum-colors-arranged-by-chance/>

152 'Jackson Pollock', στο *Wikipedia*, 25 Σεπτέμβριος 2019, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Jackson\\_Pollock&oldid=917834087](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Jackson_Pollock&oldid=917834087).

**κατευθυνόμενη** από τον καλλιτέχνη. Ο Pollock είναι αυτός που καθορίζει τη γενική μορφή του έργου και τα βασικά χαρακτηριστικά που το χαρακτηρίζουν. Χρησιμοποιεί συγκεκριμένες τεχνικές για να κατευθύνει το χρώμα και να ελέγξει **την πυκνότητα** των σχεδίων στον καμβά, ο οποίος αποτελεί και **το όριο** εντός του οποίου διαμορφώνεται το έργο τέχνης. Όμως, καθώς η διαδικασία της αποκόλλησης του χρώματος από το πινέλο ή το δοχείο από το οποίο πέφτει είναι μια πολύπλοκη διαδικασία με όρους φυσικής μηχανικής, ο Pollock δεν μπορεί να προϋπολογίσει ποια θα είναι η **ακριβής θέση** και **σχήμα** των μορφών που θα σχηματίσει το χρώμα την στιγμή που θα προσγειωθεί στον καμβά. Όπως αναγράφεται στην περιγραφή του συγκεκριμένου έργου από το MoMA:

*«Ο εναγκαλισμός του ατυχήματος από τους Υπερρεαλιστές ως τρόπος να ξεπεραστεί ο συνειδητός νους δελέασε τον Pollock στο να πειραματιστεί με τα τυχαία αποτελέσματα της βαρύτητας και της αδράνειας του χρώματος που πέφτει.»*<sup>153</sup> (μτφρ. Τ. Κουιμτζόγλου)



Εικόνα 2\_30: Jackson Pollock, Autumn Rhythm (Number 30), 1950. Enamel on canvas (1912-1956) Metropolitan Museum. Πηγή: <https://www.flickr.com/photos/rocor/5495180677/in/photolist-9nAeLr-STNWHh-24qwScp-STNWdu-bT7CTc-24qwSse-3WafAn-9nDeCA-KCph2-D2kKXQ-9nDjYE-dvGKQp-STNYeJ-4KCuQh-STNY2j-oxqQqh-oxrsCe-o9Ejcr-Cw41LP-8U6Ho5-9mSdHx-eWMLNq-9nDe5d-Dmbixa-aANYyM-23UsYdb-JKyNsB-8fnYe2-2q9hcWf-DtryQX-bpPzDb-8frbEY-28YDFkY-DiRVE1-CUYcf2-pZSJ1-Cw8WK3-8ph2cJ-2bsLTKv-cmW5r5-DtDm8i-2pKbsAV-6mWKCZ-Dr8n4j-CwfSSt-7Emca9-DtDoGM-aKb8y8-fc6kC-DiRVv3>, εικόνα του/της: Rob Corder, άδεια: CC BY-NC 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>

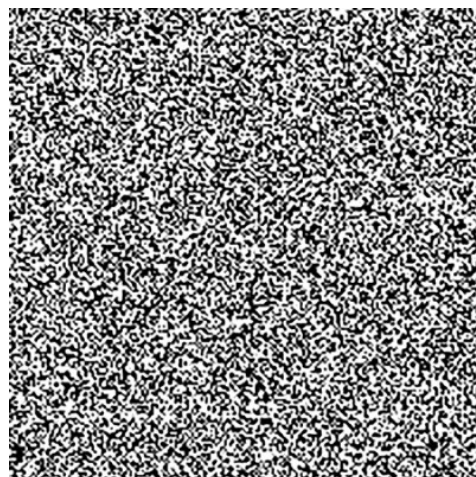
153 'Jackson Pollock. One: Number 31, 1950. 1950 | MoMA', The Museum of Modern Art, ημερομηνία πρόσβασης 11 Οκτώβριος 2019, <https://www.moma.org/collection/works/78386>.

Στο ίδιο πνεύμα, ο **François Morellet** ασχολείται κι αυτός με την τυχαιότητα και παράγει μια σειρά έργων που καλεί «**Τυχαίοι Διαχωρισμοί**», 1958 ("**Répartitions Aléatoires**")<sup>154</sup>. Στο έργο με τίτλο: «**6 τυχαίοι διαχωρισμοί των 4 μαύρων και λευκών τετραγώνων σύμφωνα με τα μονά και ζυγά ψηφία του αριθμού π**», παράγει μια σειρά από 6 κάδρα στη σειρά σύμφωνα με το μετασχηματισμό του τίτλου του έργου.

Ο **Morellet** σε ένα μετέπειτα έργο του με τίτλο «**Τυχαίοι διαχωρισμοί 40.000 τετραγώνων**», του 1961, πάλι χρησιμοποιεί αριθμούς από τηλεφωνικό κατάλογο επιλεγμένους στην τύχη και χρωματίζει τα κελιά σύμφωνα με τον κανόνα ζυγών και μονών αριθμών όπου: ζυγός αριθμός αντιπροσωπεύει ένα χρώμα, και ο μονός αριθμός το άλλο χρώμα. Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου φαίνεται στην Εικόνα 2\_31. Παρατηρώντας το έργο από απόσταση διακρίνεται ότι η κατανομή των διαφορετικών τόνων σε μπλε και σε πορτοκαλί είναι ομοιόμορφη και φαίνεται πως είναι και ισοδύναμη. Αν συγκριθεί το έργο του **Morellet** με μια εικόνα από μονοχρωματικό θόρυβο (Εικόνα 2\_32) μπορεί να παρατηρηθεί κανείς ότι πρόκειται ως συνολικό αποτέλεσμα για το ίδιο σχεδόν μοτίβο.



Εικόνα 2\_31: François Morellet, Répartition aléatoire de 40.000 carrés, (50% bleu, 50% rouge, suivant les chiffres pairs et impairs de l'annuaire téléphonique du Maine-et-Loire), 1961. Πηγή: <https://www.flickr.com/photos/97758145@N08/15634113775>, εικόνα του/της: William Chevillon, άδεια: CC BY-NC-ND 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/>



Εικόνα 2\_32: Μονοχρωματικός θόρυβος που δημιουργήθηκε με τη χρήση λογισμικού επεξεργασίας εικόνας, 2019. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Ο **Robert Rauschenberg** χρησιμοποιεί στα έργα του την έννοια **του ορίου** εντός του οποίου εξελίσσεται το έργο. Για παράδειγμα, στο έργο "**Dirt Painting**" (1953), υπάρχει ένα ξύλινο κουτί με χρώμα που περιέχει μούχλα η οποία αναπτύσσεται αυτόνομα και υλοποιεί ένα μη προκαθορισμένο έργο που μεταβάλλεται στο χρόνο (Εικόνα 2\_33). Η οργανική σύνθεση που παρουσιάζει ο Rauschenberg είναι τοποθετημένη σε ένα ξύλινο πλαίσιο με **αυστηρά όρια**, εντός του οποίου εξελίσσεται το έργο με ακανόνιστο τρόπο. Στο "**Gold Painting**"<sup>155</sup>, η τυχαιότητα και πολυπλοκότητα προκύπτουν από την ακαθόριστη μίξη και τοποθέτηση με αμελή τρόπο των επάλληλων στρωμάτων

<sup>154</sup> <https://www.centrepompidou.fr/fr/ressources/oeuvre/ckn5BR>

<sup>155</sup> <https://www.rauschenbergfoundation.org/art/artwork/untitled-gold-painting-1>

των υλικών (φύλλα χρυσού σε ύφασμα και κόλλα). Στο "**Paper Painting**" (1953)<sup>156</sup>, το έργο είναι μια γυάλινη προθήκη σε ξύλινη βάση η οποία περιέχει μέσα της τσαλακωμένα χαρτομάντηλα. Εδώ ο Rauschenberg και πάλι δημιουργεί ένα οπτικά πολύπλοκο έργο στο χώρο, όπου ένα σαφώς καθορισμένο δοχείο - **όριο** εμπεριέχει πλήθος ακανόνιστων μορφολογικά στοιχείων τα οποία έχουν τοποθετηθεί με **τυχαίο τρόπο και διάταξη**.

Ο **Kenneth Martin** δημιουργεί μια σειρά έργων που έχουν τίτλο «**Τύχη και Τάξη**». Το πρώτο έργο από αυτά, με τίτλο «**Τύχη και Τάξη Ι**»<sup>157</sup>, πραγματοποιείται το 1971-72 και αποτελεί μέρος του ρεύματος της αναβίωσης του κονστρουκτιβισμού. Ο Kenneth Martin ξεκινάει με έναν τετραγωνικό κάναβο με αριθμημένα σημεία. Με μια τυχαία διαδικασία, επιλέγονται δύο σημεία και ο καλλιτέχνης τα συνδέει με ευθείες χρωματιστές γραμμές. Η σύνθεση συνεχίζεται με βάση αυτή την αρχή και οι γραμμές συνδυάζονται, εκτρέπονται ή σταματάνε σύμφωνα με τη βούληση του καλλιτέχνη. Το αποτέλεσμα είναι ένα έργο που έχει ως αφετηρία την **τυchaiότητα**, το οποίο όμως **ελέγχεται** και εξελίσσεται με βάση τους προβληματισμούς, τη βούληση και την αισθητική του καλλιτέχνη<sup>158</sup>.

156 <https://interventionsjournal.wordpress.com/2015/01/23/a-radical-disregard-for-the-preservation-of-art-robert-rauschenbergs-elemental-paintings/>

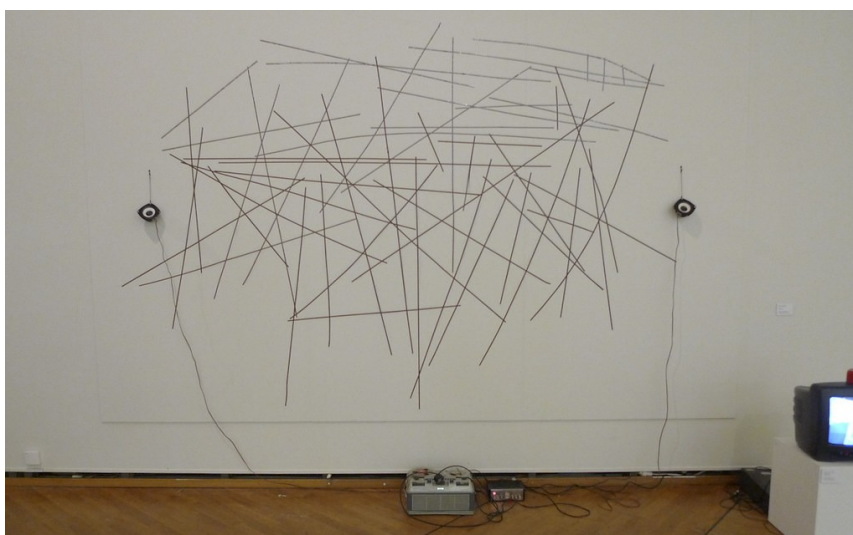
157 <https://www.tate.org.uk/art/artworks/martin-chance-and-order-i-p04585>

158 Andrew Mead, 'Kenneth Martin: The Chance and Order Series, Screw Mobiles and Related Works 1953-1984', Architects Journal, ημερομηνία πρόσβασης 10 Οκτώβριος 2019, <https://www.architectsjournal.co.uk/home/kenneth-martin-the-chance-and-order-series-screw-mobiles-and-related-works-1953-1984/769390.article>.



Εικόνα 2\_33: Robert Rauschenberg, *Dirt Painting (for John Cage)*, ca. 1953, *Dirt and mold in wood box*, 15 5/8 x 15 7/8 x 2 1/2 inches (39.7 x 40.2 x 6.4 cm), Robert Rauschenberg Foundation, © Robert Rauschenberg Foundation. Πηγή:

<https://www.rauschenbergfoundation.org/art/artwork/dirt-painting-john-cage> ,



Εικόνα 2\_34: Nam June Paik – *Random Access Music*. Πηγή: Nam June Paik – *Random Access Music*, <https://www.flickr.com/photos/saschapohflepp/4557743496> , εικόνα του/της: [Sascha Pohflepp](https://www.flickr.com/photos/saschapohflepp/4557743496) , άδεια: CC BY 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>

Ο Κορεάτης εικαστικός **Nam June Paik** υλοποιεί το 1963 τη διαδραστική εγκατάσταση με τίτλο **"Random Access"** (Εικόνα 2\_34). Πρόκειται για την τοποθέτηση σε έναν τοίχο, 50 περίπου προμαγνητοφωνημένων μαγνητοταινιών καταγραφής ήχου σε ελεύθερη διάταξη. Οι μαγνητοταινίες έχουν διαφορετικό μήκος και περιστροφή. Άλλες είναι ευθύγραμμα τοποθετημένες ενώ άλλες σχηματίζουν καμπύλες. Πολλές από αυτές τέμνονται μεταξύ τους και αλληλοεπικαλύπτονται. Η διάταξη τους στο επίπεδο του τοίχου είναι μη κανονική και φαινομενικά τυχαία. Μπροστά από τη διάταξη των μαγνητοταινιών υπάρχει συσκευή απομαγνητοφώνησης, την οποία μπορεί να χρησιμοποιήσει ο επισκέπτης του έργου για να τοποθετήσει την ειδικά διαμορφωμένη κεφαλή σε όποια μαγνητοταινία στον τοίχο θέλει και να ακούσει την εκάστοτε καταγραφή με τη σειρά που επιλέγει ο ίδιος.

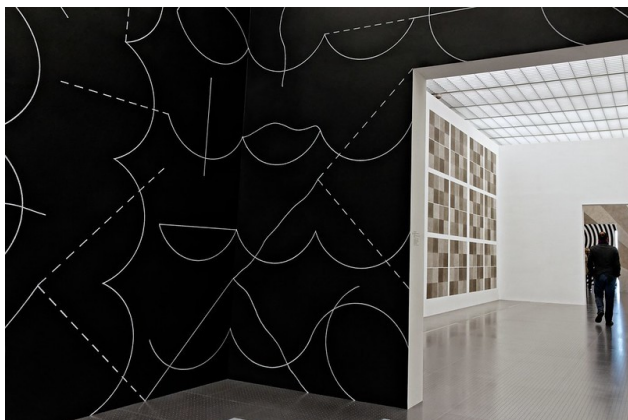
Το 1965 ο Γερμανός μαθηματικός και φυσικός **Georg Nees** πειραματίζεται με τη δημιουργία έργων με τη χρήση των πρώιμων τότε ηλεκτρονικών υπολογιστών και μηχανημάτων εκτύπωσης. Το έργο του με τίτλο **"Kreisbogengewirre"** (Σύγχυση τόξων) δημιουργείται από υπολογιστή που χρησιμοποιεί τη γλώσσα προγραμματισμού ALGOL και τη χρήση **γεννητριών τυχαίων αριθμών**. Καταφέρει έτσι με τον υπολογιστή και τον εκτυπωτή Zuse Z64 Graphomat να εκτυπώσει σε χαρτί τόξα τυχαίων μεγεθών και προσανατολισμών<sup>159</sup>. Στο έργο **"Schotterttextur"** (Υφή χαλικιών) του 1969, ο Nees χρησιμοποιεί πάλι υπολογιστή, **γεννήτριες τυχαίων αριθμών** και εκτυπωτή για να δημιουργήσει ένα έργο που συνδυάζει την τάξη και την αταξία. Μια διάταξη από στοιχισμένα τετράγωνα στο πάνω μέρος μιας εικόνας με κατακόρυφο προσανατολισμό αρχίζει σταδιακά να παραμορφώνεται και τα επιμέρους τετράγωνα να αποκτούν τυχαία θέση και περιστροφή. Στο έργο αυτό εισάγει στο πρόγραμμα τυχαίες μεταβλητές, ώστε να ωθήσει τη διάταξη στο **χάος**<sup>160</sup> (Error: Reference source not found). Η εικόνα του έργου μπορεί να βρεθεί στο σύνδεσμο: <http://collections.vam.ac.uk/item/O221321/schotter-print-nees-georg/>.

Το 1972 ο καλλιτέχνης **Sol LeWitt**, εκπρόσωπος της μινιμαλιστικής και conceptual τέχνης, παρουσιάζει στο MIT το έργο με τίτλο: **"Wall Drawing #122"**. Ο καλλιτέχνης δίνει κάποιες οδηγίες στην ομάδα των βοηθών που θα πραγματοποιήσει την εγκατάσταση του έργου. Σύμφωνα με αυτές οι βοηθοί θα πρέπει να υλοποιήσουν συγκεκριμένους συνδυασμούς με τυχαίο τρόπο χρησιμοποιώντας γραμμές και τόξα, με συγκεκριμένες αφετηρίες, κ.ο.κ. Έτσι προκύπτει το έργο που φαίνεται στην Εικόνα 2\_35 το οποίο είναι μία τοιχογραφία που καλύπτει τρεις τοίχους μιας αίθουσας και περιλαμβάνει 150 διαφορετικούς συνδυασμούς που βασίζονται στην παραπάνω οδηγία του καλλιτέχνη. **Υπάρχουν συνεπώς σαφή όρια εντός των οποίων μπορεί να εξελιχθεί το έργο με ελεγχόμενα τυχαίο όμως τρόπο, τις οδηγίες του καλλιτέχνη που αποτελούν τον αλγόριθμο παραγωγής του έργου.** Το έργο δεν είναι ούτε προκαθορισμένο εξαρχής ούτε τυχαίο, καθώς βρίσκεται κάπου ανάμεσα. Τη λογική αυτή ακολουθεί ο LeWitt και σε άλλα παρόμοια έργα εγκαταστάσεις, διαφοροποιώντας τις παραμέτρους των αρχικών κανόνων, τη παράμετρο της χωροθέτησης και τις παραμέτρους του συνεργείου εφαρμογής (αφού πρόκειται κάθε φορά για διαφορετικά άτομα που υλοποιούν το έργο). Τέτοια παρόμοια έργα έγιναν στο MoMA με το έργο **"Wall Drawing #260"** ή το έργο **"Wall Drawing #792"** σε galerie στις Βρυξέλλες το 1995. Τα έργα του

<sup>159</sup> <http://dada.compart-bremen.de/item/artwork/994>

<sup>160</sup> 'Design Is Fine. History Is Mine.', Design is fine. History is mine., ημερομηνία πρόσβασης 25 Οκτώβριος 2019, <https://www.design-is-fine.org/post/59220554764/georg-nees-texture-of-gravel-schotterttextur>.

LeWitt συνεχίζουν να υλοποιούνται σύμφωνα με τις οδηγίες του ακόμα και μετά το θάνατό του. Συνολικά έχουν υλοποιηθεί πάνω από 1270 τέτοιου τύπου έργα.<sup>161</sup>



Εικόνα 2\_35: Sol LeWitt, Πηγή: Expo Sol LeWitt Centre Pompidou Metz 027, <https://www.flickr.com/photos/marc-feldmann/7346606006/in/photostream/>, εικόνα του/της: Marc Feldmann, άδεια: CC BY-NC 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>

Εικόνα 2\_36: Antony Gormley, Amazonian Field, 2012. Πηγή: Homenzinhos de barro, <https://www.flickr.com/photos/leandrociuffo/8196334011>, εικόνα του/της: Leandro Neumann Ciuffo, άδεια: CC BY 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>

Το 1993 ο Βρετανός εικαστικός **Antony Gormley** υλοποιεί το έργο με τίτλο: "**Field for the British isles**". (Στην Εικόνα 2\_36 απεικονίζεται νεότερη παραλλαγή του έργου με τίτλο Amazonian Field, 2012). Πρόκειται για μία εγκατάσταση η οποία περιλαμβάνει την τοποθέτηση 40.000 περίπου μικρών ανθρώπινων ομοιωμάτων από πηλό σε έναν εκθεσιακό χώρο. Κάθε φιγούρα είναι απλή και ξεχωριστή, με τα κύρια χαρακτηριστικά της να είναι οι **παρόμοιες διαστάσεις** και οι δύο τρύπες που αντιπροσωπεύουν τα μάτια. Οι φιγούρες εκτείνονται σε όλο τον ελεύθερο χώρο που αποδίδεται στην εγκατάσταση, η οποία είναι διαμορφωμένη έτσι ώστε να υπάρχει μόνο μια οπτική παρατήρησή της με τις φιγούρες να κοιτούν μετωπικά το θεατή<sup>162</sup>. Οι οδηγίες του καλλιτέχνη οδηγούν στην κατασκευή μη προβλεπόμενων παρόμοιων παραλλαγών των ανθρώπινων ομοιωμάτων, οι οποίες κατασκευάζονται βάσει των προδιαγραφών για τις διαστάσεις και τη μορφή που έχουν οριστεί από τον καλλιτέχνη.

Ο καλλιτέχνης **Tim Knowles** χρησιμοποιεί τις ακανόνιστες, εξαιτίας του αέρα, κινήσεις κλαδιών δέντρων στα οποία έχει ενσωματώσει μαρκαδόρους για να δημιουργήσει εικόνες σε καμβά με τυχαία και μη προκαθορισμένα σχήματα στο έργο "**Oak on Easel #1**", 2005<sup>163</sup>.

Ο εικαστικός **Gerhard Richter** παρουσιάζει το έργο "**4900 Colours**" (2007) το οποίο αποτελείται από 196 πινακίδες, με κάθε μία από αυτές να αποτελείται από 25 χρωματιστά τετράγωνα. Οι χρωματιστές

161 'Sol LeWitt', στο *Wikipedia*, 15 Αύγουστος 2019, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sol\\_LeWitt&oldid=910988577](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sol_LeWitt&oldid=910988577).

162 Fiona Godfrey, 'Antony Gormley. Field for the British Isles. Education Information Pack.' (The Arts Council Collection), ημερομηνία πρόσβασης 10 Δεκέμβριος 2019, <http://www.artscouncilcollection.org.uk/sites/default/files/Field%20for%20the%20British%20Isles%20-%20Education%20Information%20Pack.pdf>.

163 'Tim Knowles - Tree Drawings - Circular Weeping Willow Drawing', 25 Οκτώβριος 2019, <http://archive.timknowles.com/Tim%20Knowles%20-%20Tree%20Drawings%20-%20Oak%20on%20Easel%201.html>.

πινακίδες μπορούν να διαταχθούν σε 11 βασικούς συνδυασμούς, στους οποίους χρησιμοποιούνται και οι 196 επιμέρους πινακίδες. Οι συνδυασμοί αυτοί μπορεί να είναι συνδυασμοί μικρότερων κανάβων διαφορετικών μεγεθών, είτε ένα συνολικό έργο μεγάλης κλίμακας (Εικόνα 2\_37).



Εικόνα 2\_37: Gerhard Richter, "4.900 Colors, 2007 / Version V", 7 πινακίδες (plates) μεγέθους 242,5X242,5 εκ., 1 πινακίδα μεγέθους 194X194εκ., 1 πινακίδα 97X97εκ., 1 πινακίδα 48,5X48,5εκ., 2007. © Gerhard Richter 2024 (24062024). Πηγή: <https://www.gerhard-richter.com/en/art/microsites/4900-colours/V>, χρήση κατόπιν αδείας.

Ο **Roxy Paine** είναι ένας Αμερικανός γλύπτης που χρησιμοποιεί ανάμεσα σε άλλα μέσα, μηχανές για να δημιουργήσει γλυπτά. Ένα χαρακτηριστικό έργο του είναι το "**Auto Sculpture Maker – SCUMAK No 1**" (1998) <sup>164</sup>. Πρόκειται για μία μηχανή που τροφοδοτείται με χαμηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο σε ημίρευστη μορφή <sup>165</sup>. Στη συνέχεια το υλικό απλώνεται μέσω στομίου πάνω σε ταινία μεταφοράς αντικειμένων βιομηχανικού τύπου η οποία ενεργοποιείται ώστε να δημιουργηθεί το επόμενο έργο. Οι μορφές που παράγονται είναι μη προβλέψιμες και μοναδικές, λόγω της έκχυσης του υλικού από το στόμιο της μηχανής καθώς ποτέ, λόγω φυσικών συνθηκών, δεν μπορεί να αναπαραχθεί το ίδιο ακριβώς αποτέλεσμα.

Η κατασκευή του έργου τέχνης "**Hubris Atē Nemesis**" (2019) από τους **Kavanaugh and Nguyen** <sup>166</sup> ακολουθεί τη λογική των μεμονωμένων λωρίδων από plywood οι οποίες υλοποιούν σύνθετη μορφή στο χώρο. Η εγκατάσταση τοποθετείται σε εσωτερικό χώρο της gallery σύγχρονης τέχνης στο Maine και αναπαριστά μεταφορικά τη μορφή κυμματώδους θάλασσας στην τοπική ακτογραμμή. Η εγκατάσταση εκτείνεται σε όλο τον ελεύθερο χώρο που έχει διατεθεί για το έργο και σε διάφορες περιοχές του υψώνεται και καλύπτει και τις διαδρομές των επισκεπτών του μουσείου. Η χρήση των μεμονωμένων λωρίδων επιτρέπει τη διαμόρφωση ενός σύνθετου συνόλου, όπου διακρίνεται ότι η τοποθέτηση και διαστάσεις της κάθε μεμονωμένης λωρίδας είναι διαφορετική και ακανόνιστη, ωστόσο οι λωρίδες προσαρμόζονται στο συνολικό σχήμα και μορφή του έργου.

<sup>164</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=yqY5XekV2mc>

<sup>165</sup> 'Roxy Paine', στο *Wikipedia*, 28 Σεπτεμβρίου 2019, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Roxy\\_Paine&oldid=918471674](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Roxy_Paine&oldid=918471674).

<sup>166</sup> 'Hubris Atē Nemesis Installation Curves up Maine Contemporary Art Gallery', *Dezeen*, 14 Ιούλιος 2019, <https://www.dezeen.com/2019/07/14/hubris-ate-nemesis-installation-wade-kavanaugh-stephen-b-nguyen/>.



### 2.3.2 Η τυχαιότητα στη μουσική

Ο χώρος της μουσικής είναι ένα ακόμα πεδίο στην Τέχνη όπου γίνονται πειραματισμοί με την τυχαιότητα. Ο **John Cage** το 1951 παρουσιάζει το μουσικό έργο που ονομάζεται «**Μουσική των αλλαγών**»<sup>167</sup>, το οποίο είναι βασισμένο στο κινέζικο κλασικό «**Βιβλίο των αλλαγών**», «**I Ching**», καθώς ο καλλιτέχνης επιλέγει μουσικά τμήματα με τυχαίο τρόπο τα οποία συνδέει μεταξύ τους σε συνεχόμενο έργο. Ο John Cage στα έργα του από το 1951 και μετά χρησιμοποιεί την τυχαιότητα γενικότερα, σε έργα όπως τα «**Atlas Eclipticalis**», «**Etudes Australes**», «**Freeman Etudes**», «**Etudes Boreales**»<sup>168</sup>. Η προσέγγιση του Cage σταδιακά μετατοπίζεται από την τυχαία συνθετική διαδικασία προς πιο ευέλικτους χειρισμούς, όπου ο συνθέτης δεν προκαθορίζει τα πάντα, αλλά δίνει οδηγίες τις οποίες καλείται ο ερμηνευτής να αποδώσει με βάση τη δική του συμμετοχή, όπως για παράδειγμα στη σειρά έργων «**Variations I**» έως «**Variations VIII**» (1958 έως 1967). Αυτό το είδος της μουσικής καλείται **αλεατορική μουσική**, προερχόμενη από το λατινικό **alea** που σημαίνει ζάρι.

Ο **Γιάννης Ξενάκης**, αρχιτέκτονας και μουσικός, ξεκινώντας από τη δεκαετία του 1960, αντλώντας γνώσεις από την επιστήμη των μαθηματικών, κάνει χρήση τους στη διαδικασία σύνθεσης μουσικής. Έτσι, ο Ξενάκης εφαρμόζει αρχές της κινητικής θεωρίας των Maxwell-Boltzmann στο έργο «**Pithoprakta**»<sup>169</sup>, αλεατορική κατανομή σημείων σε επίπεδο στο έργο «**Diamorphoses**», ελάχιστες περιοριστικές παραμέτρους (constraints) στο έργο «**Achorripsis**», κατανομή Gauss στα «**ST/10**» και «**Atrees**», αλυσίδες Markov στο «**Analogiques**», θεωρία παιγνίων στα «**Duel**» και «**Strategie**», θεωρία συνόλων στο «**Nomos Alpha**» και άλγεβρα Boole στα «**Herma**» και «**Eonta**»<sup>170</sup>. Η μουσική που έχει δημιουργηθεί με τη χρήση μεθόδων **στοχαστικών διαδικασιών και τυχαίων μεταβλητών** ονομάζεται από τον Ξενάκη **στοχαστική μουσική**<sup>171</sup> (1956). Η μουσική του Ξενάκη έχει αυστηρή μαθηματική βάση και αυτό τη διαφοροποιεί από την αλεατορική μουσική του Cage. Ο Ξενάκης αναζητώντας νέους τρόπους μουσικής έκφρασης προσπαθεί να απεμπλακεί από αυτό που καλεί σειριακή μουσική και ένας τρόπος να το επιτύχει είναι μέσω της **χρήσης πιθανοτήτων και στοχαστικών διαδικασιών**. Ο τρόπος αυτός είναι μια μέθοδος για να εκφράσει ως μουσική ήχους που εμπνέονται από τη φύση (οι οποίοι ορίζονται από τυχαιότητα, όπως ο ήχος που κάνει το χαλάζι και η βροχή πάνω σε σκληρές επιφάνειες) να εισάγει στη μουσική έννοιες της σύγχρονης επιστήμης, ή **να βρει την απάντηση στο ερώτημα ποιοί είναι οι ελάχιστοι περιορισμοί (constraints) που απαιτούνται για τη δημιουργία μιας μουσικής διαδικασίας**<sup>172</sup>. Για τον Ξενάκη, η αυστηρή ντετερμινιστική αιτιότητα όταν χάνεται πρέπει να αντικατασταθεί από μια πιθανοκρατική λογική<sup>173</sup>. Το 1962 ο Ξενάκης εισάγει στη διαδικασία τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών, καθώς χρησιμοποιεί το πρώτο λογισμικό σε γλώσσα προγραμματισμού

167 [https://www.youtube.com/watch?v=B\\_8-B2rNw7s](https://www.youtube.com/watch?v=B_8-B2rNw7s)

168 'John Cage', στο *Wikipedia*, 21 Οκτώβριος 2019, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=John\\_Cage&oldid=922393480](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=John_Cage&oldid=922393480).

169 <https://www.youtube.com/watch?v=nvH2KYYJg-o>

170 'Stochastic Music | Sweetwater', inSync, 14 Δεκέμβριος 2004, <https://www.sweetwater.com/insync/stochastic-music/>.

171 Iannis Xenakis, *Formalized Music: Thought and Mathematics in Composition*, 2nd edition (Hillsdale, NY: Pendragon Press, 1992), 8.

172 Sergio Luque, 'The Stochastic Synthesis of Iannis Xenakis', *Leonardo Music Journal* 19: 77–84, ημερομηνία πρόσβασης 23 Οκτώβριος 2019, [https://www.academia.edu/30571247/The\\_Stochastic\\_Synthesis\\_of\\_Iannis\\_Xenakis](https://www.academia.edu/30571247/The_Stochastic_Synthesis_of_Iannis_Xenakis).

173 Xenakis, *Formalized Music*, 8.

FORTTRAN, για να δημιουργήσει μουσικές συνθέσεις με τίτλο "**Stochastic Music Program**" (ST Program). Ακολουθούν αργότερα τα λογισμικά **GENDY** και **PARAG** (το οποίο ενώνει τμήματα από παράγωγα του GENDY). Ένα παράδειγμα χρήσης του υπολογιστή είναι το ακόλουθο: Ο Ξενάκης χρησιμοποιώντας τον ηλεκτρονικό υπολογιστή εκτυπώνει γράφημα τυχαίας διαδρομής (random walk) ως αποτέλεσμα της κίνησης Brown. Στη συνέχεια, το γράφημα χρησιμοποιείται στη συνθετική διαδικασία με το να αναχθεί ο άξονας xx' σε άξονα χρόνου και ο άξονας yy' να αναχθεί σε κλίμακα από τιμές τετάρτου του τόνου. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται οι συνθέσεις "**Mikka**" (1971), "**N'Shim**" (1974) και "**Mikka "S"**" (1975) <sup>174</sup>.

---

174 Luque, 'The Stochastic Synthesis of Iannis Xenakis'.

### 3. Δημιουργία και χρήση της τυχαιότητας

Όπως παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες, η τυχαιότητα είναι εξαιρετικά σημαντική για τις επιστήμες, όπως εξίσου σημαντική είναι η επιρροή της στην Τέχνη. Εκτός από τη χρήση της τυχαιότητας στην καθημερινότητα, με τις πιο απλές εφαρμογές της στα τυχερά παιχνίδια και τις ρίψεις ζαριών, τυχαίοι αριθμοί χρησιμοποιούνται στην κρυπτογράφηση, στην προσομοίωση και μοντελοποίηση, στη στατιστική, στις πιθανότητες,<sup>175</sup> καθώς και σε αλγορίθμους και στην επίλυση σύνθετων προβλημάτων.

Παρατηρείται λοιπόν ότι η ανάγκη για τη χρήση τυχαίων πιθανών ενδεχομένων και αριθμών, για διαφορετικούς λόγους κάθε φορά, απαιτεί και τους αντίστοιχους τρόπους δημιουργίας τους. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά τα διαφορετικά είδη της τυχαιότητας, ανάλογα με τον τύπο των αριθμών που παράγουν και το πώς μπορούν αυτά να δημιουργηθούν.

Υπάρχουν δύο είδη τυχαιότητας: Η **πραγματική τυχαιότητα** και η **κατασκευασμένη τυχαιότητα**. Πραγματική τυχαιότητα παράγεται για παράδειγμα από τη ρίψη αντικειμένων τα οποία πέφτουν σε τυχαία διάταξη στο έδαφος, από τη ρίψη εντός νομίσματος (2 πιθανά αποτελέσματα) ή ενός ζαριού (έξι ή περισσότερα πιθανά αποτελέσματα<sup>176</sup> ανάλογα με τον αριθμό πλευρών του ζαριού). Σε αυτές τις περιπτώσεις οι φυσικές παράμετροι που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα είναι τόσες πολλές που δεν μπορεί αυτό να προβλεφθεί. Πρόκειται επομένως για **φυσική – πραγματική τυχαιότητα**. Υπάρχει όμως και το άλλο είδος τυχαιότητας, η **κατασκευασμένη τυχαιότητα** που εκλαμβάνεται ως τυχαία λόγω της εξαιρετικά μεγάλης πολυπλοκότητάς της, χωρίς όμως να είναι πραγματικά τυχαία. Τέτοιο παράδειγμα τυχαιότητας αποτελεί η τυχαιότητα που δημιουργείται από τους υπολογιστές, η οποία ονομάζεται **ψευδοτυχαιότητα (pseudorandomness)**<sup>177</sup>.

Συνεπώς υπάρχουν δύο κατηγορίες τυχαίων αριθμών. Οι **πραγματικά τυχαίοι αριθμοί** και οι **ψευδοτυχαίοι αριθμοί**, οι οποίοι εξετάζονται στη συνέχεια.

#### 3.1 Πραγματικά Τυχαίοι αριθμοί

Η ανάγκη για πρόσβαση ή δημιουργία τυχαίων αριθμών με αξιόπιστο και εύκολο τρόπο γινόταν αρχικά μέσω βιβλίων πινάκων που περιείχαν λίστες με τυχαίους αριθμούς. Ο πρώτος τέτοιος πίνακας

<sup>175</sup> 'RANDOM.ORG - Introduction to Randomness and Random Numbers', ημερομηνία πρόσβασης 18 Μάιος 2019, <https://www.random.org/randomness/>.

<sup>176</sup> Το ζάρι με τις περισσότερες πλευρές είναι ζάρι 120 πλευρών και βασίζεται στο πολυέδρο που ονομάζεται Δισδυάκις Τριαντακοντάεδρο. 'The Dice Lab | 120 Sided Dice', National Museum Of Mathematics, ημερομηνία πρόσβασης 19 Αύγουστος 2023, <https://shop.momath.org/gato-the-dice-lab-120-sided-dice.html?source=facebook..>

<sup>177</sup> 'Pseudorandomness', στο *Wikipedia*, 16 Φεβρουάριος 2024, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Pseudorandomness&oldid=1208065036>.

δημοσιεύθηκε για πρώτη φορά το 1927 από τον **L.H.C Tippet**<sup>178</sup> με τον τίτλο "**Random Sampling Numbers**". Ο Tippet διαμόρφωσε τον πίνακά του παίρνοντας 41600 τυχαίους αριθμούς από δεδομένα απογραφών και έπειτα τους συνδύασε ανά 4 προκειμένου να καταλήξει σε 10.400 τυχαίους αριθμούς. Οι αριθμοί αυτοί ελέγχθηκαν στατιστικά για την τυχειότητα τους και έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα επιβεβαιώνοντας τον τυχαίο χαρακτήρα των αριθμών του Tippet<sup>179</sup>.

**Οι πραγματικά τυχαίοι αριθμοί** είναι οι αριθμοί που προκύπτουν από φυσικές διεργασίες και δυναμικά συστήματα, όπως π.χ. αναφέρθηκε προηγουμένως από τη διερεύνηση καιρικών φαινομένων από τον Lorenz, την κίνηση των μορίων, τη διάσπαση ραδιενεργών ισotόπων, τον ηλεκτρονικό θόρυβο, κ.ά.<sup>180</sup>. Οι πηγές των πραγματικά τυχαίων αριθμών καλούνται γενικά γεννήτριες αριθμών και στην περίπτωση των πραγματικά τυχαίων αριθμών καλούνται ως **TRNG – True Random Number Generators**. Μετά την συλλογή των μετρήσεων από την εκάστοτε πηγή, τα πρωτογενή στοιχεία που εμπεριέχουν πραγματική τυχειότητα μπορούν να εισαχθούν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και να αξιοποιηθούν προς την παραγωγή τυχαίων αριθμών. Οι γεννήτριες **TRNG** καθώς παράγουν πραγματική τυχειότητα δεν είναι τόσο αποδοτικές, λόγω των διαδικασιών που ακολουθούνται για την παραγωγή των τυχαίων αριθμών, σε αντίθεση με τις γεννήτριες ψευδοτυχαίων αριθμών που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια και οι οποίες είναι πολύ πιο αποδοτικές.

Παράδειγμα **TRNG** είναι η υπηρεσία **HotBits**<sup>181</sup> (1996), όπου υπάρχει μέσω διαδικτύου η δυνατότητα πρόσβασης σε πραγματικά τυχαίους αριθμούς. Η διάταξη λειτουργεί ως εξής: Αρχικά καταγράφονται μέσω ανιχνευτή ραδιενέργειας οι χρόνοι διάσπασης για πυρήνες από Καισίοιο-137 οι οποίοι μετατρέπονται, σε τυχαίο μη προκαθορισμένο ρυθμό, σε Βάριο-137, εκπέμποντας ακτινοβολία γάμμα. Τα δεδομένα της καταγραφής μεταφέρονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και μέσω αλγορίθμου μεταφράζονται σε σειρές πραγματικά τυχαίων αριθμών. Ο επισκέπτης μέσω διαδικτύου μπορεί να λάβει τα δεδομένα των αριθμών στον δικό του υπολογιστή, ανάλογα με τη μορφή που τα επιθυμεί, π.χ. 16ξαδική, δυαδική, κ.λπ.

Παράδειγμα παραγόμενου πραγματικά τυχαίου αλφαριθμητικού αριθμού:

```
6F721BA2C4CD9CF010168C8267F0C995FC484BE30EBD1695BF924D0A7F9779A6
E1163D5DDE6884B6A4829321CE3ABC22C27BF62F281FBC14AECAB036D66ED796
```

Ένα άλλο παράδειγμα **TRNG** είναι το **LavaRand**<sup>182</sup> (1996), όπου χρησιμοποιείται ως γεννήτρια τυχειότητας η ψηφιοποίηση φωτογραφιών θερμαινόμενων φωτιστικών λάβας. Το θερμαινόμενο κεριά μέσα στα φωτιστικά λάβας στροβιλίζεται και μετασχηματίζεται διαρκώς σε ακανόνιστες τυχειές

178 'Random Number Table', στο *Wikipedia*, 10 Φεβρουάριος 2019, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Random\\_number\\_table&oldid=882644735](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Random_number_table&oldid=882644735).

179 K. Raghavan Nair, 'On Tippetts 'Random Sampling Numbers.', *Sankhyā: The Indian Journal of Statistics (1933-1960)* 4, τχ. 1 (1938): 65–72.

180 Κωνσταντίνος Στάικος, *Διπλωματική εργασία: Σχεδίαση Γεννητριών Τυχαίων Αριθμών Χαμηλής Κατανάλωσης Ισχύος* (Πάτρα: Πολυτεχνική Σχολή Πάτρας, 2009), [http://nemertes.lis.upatras.gr/jsrui/bitstream/10889/1895/1/Σχεδίαση\\_Γεννητριών\\_Τυχαίων\\_Αριθμών\\_Χαμηλής\\_Κατανάλωσης\\_Ισχύος.pdf](http://nemertes.lis.upatras.gr/jsrui/bitstream/10889/1895/1/Σχεδίαση_Γεννητριών_Τυχαίων_Αριθμών_Χαμηλής_Κατανάλωσης_Ισχύος.pdf).

181 'HotBits: Genuine Random Numbers', ημερομηνία πρόσβασης 18 Μάιος 2019, <http://www.fourmilab.ch/hotbits/>.

182 'LavaRand in Production: The Nitty-Gritty Technical Details', *The Cloudflare Blog*, 6 Νοέμβριος 2017, <https://blog.cloudflare.com/lavarand-in-production-the-nitty-gritty-technical-details/>.

μορφές. Οι μορφές αυτές καταγράφονται με ψηφιακή φωτογραφική μηχανή και μέσω αλγορίθμου μεταφράζονται με ηλεκτρονικό υπολογιστή σε σειρές τυχαίων αριθμών. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το πρωτογενές υλικό που τροφοδοτεί τη γεννήτρια είναι η φυσική ροή και οι στροβιλισμοί της μάζας του κεριού, ένα όπως και στην προηγούμενη περίπτωση φυσικό φαινόμενο. Ο υπολογιστικός αλγόριθμος εισάγεται στη διαδικασία μόνο για τη μετατροπή της οπτικής πληροφορίας (που διαρκώς μεταβάλλεται με τυχαίο τρόπο) σε σειρές τυχαίων αριθμών.



Εικόνα 3\_1: Διάταξη από Λάμπες Λάβας της εταιρείας Cloudflare, που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία κλειδιών κρυπτογράφησης. Πηγή: Lava lamp wall at Cloudflare office -1.jpg, A wall of lava lamps in the entrance area of the Cloudflare offices at 101 Townsend Street in San Francisco (seen from the street through the window, some window reflection visible), [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lava\\_lamp\\_wall\\_at\\_Cloudflare\\_office\\_-1.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lava_lamp_wall_at_Cloudflare_office_-1.jpg), εικόνα του/της: HaeB, άδεια: CC BY-SA 4.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

Επίσης χαρακτηριστική είναι η αναφορά στην περιγραφή του τρόπου λειτουργίας της γεννήτριας ότι η καταγραφή της εικόνας μέσω ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής προσθέτει στο υλικό καταγραφής «ψηφιακό θόρυβο». Ο θόρυβος αυτός, ακόμα και σε δύο πανομοιότυπες λήψεις, είναι πάντα διαφορετικός, γεγονός που αυξάνει περαιτέρω την τυχειότητα στη διάταξη.

Παράδειγμα παραγόμενου πραγματικά τυχαίου αριθμού LavaRand <sup>183</sup>:

```
5360751114622011236087979022735306713592537659947455285353148181
8526455500785383194936281698585494806464721601253386562653528822
5543322562532917886396992291116815877218495559211688377961466145
0857446201926232198015028137924055146650866097197909406089918491
4133568666470293429076893274969016410915119621659901793350665953
```

Στην περίπτωση που απαιτείται αυξημένη πολυπλοκότητα και περισσότερες παράμετροι τυχειότητας, αυτό μπορεί να επιτευχθεί σύμφωνα με το παράδειγμα της διάταξης που φαίνεται στην Εικόνα 3\_1 με την αύξηση των πηγών τυχειότητας, δηλαδή στο συγκεκριμένο παράδειγμα, με την καταγραφή δεδομένων από περισσότερες λάμπες. Το υλικό αυτό μπορεί να εμπλουτιστεί κι άλλο με την προσθήκη στον αλγόριθμο της γεννήτριας και πρόσθετων πηγών τυχειότητας. Στην περίπτωση αυτή παρεμβάλλονται, μετά τη διάταξη με τις λάμπες, 3 πηγές τυχειότητας / θορύβου, οι οποίες είναι στην προκειμένη περίπτωση ο θόρυβος της κάμερας και 2 πηγές εντροπίας, μία σε κάθε στάδιο της διαδικασίας.

Η μορφή που λαμβάνει το κερύ στο λάμπες είναι τυχαία καθώς προέρχεται από μια διαδικασία φυσικών διεργασιών και πρόκειται για **αναλογική πληροφορία**. Αυτή η διαρκής μορφολογική διαφοροποίηση της αναλογικής πληροφορίας **ψηφιοποιείται** και μετατρέπεται στην ουσία σε γεννήτρια πραγματικά τυχαίων αριθμών. Παρατηρείται λοιπόν μια συνεχής μεταβολή της **μορφής** εξαιτίας της **τυχειότητας των φυσικών διεργασιών της διάταξης**, με παράλληλη μετάβαση από το **αναλογικό** στο **ψηφιακό**.

### 3.2 Ψευδοτυχαίοι αριθμοί

Οι τυχαίοι αριθμοί που παράγονται πρωτογενώς από ηλεκτρονικούς υπολογιστές δεν είναι στην πραγματικότητα τυχαίοι, καθώς οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές είναι ντετερμινιστικά συστήματα και επομένως δεν μπορούν να δημιουργήσουν πραγματική τυχειότητα. Σε αυτήν την περίπτωση οι σειρές των τυχαίων αριθμών προκύπτουν από αλγορίθμους με ντετερμινιστική βάση, οι οποίοι δίνουν ένα αποτέλεσμα που φαίνεται τυχαίο, π.χ. λόγω αυξημένης πολυπλοκότητας και μη συχνής επαναληψιμότητας, αλλά στην πραγματικότητα δεν πρόκειται για πραγματικά τυχαίους αριθμούς με την έννοια που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Οι αριθμοί που παράγονται με αυτόν τον τρόπο καλούνται **ψευδοτυχαίοι αριθμοί** και οι γεννήτριες τους ονομάζονται Γεννήτριες Ψευδοτυχαίων Αριθμών, **PRNG – Pseudo Random Number Generators**.

<sup>183</sup> 262588213843476, 'Lava Lamp Random Number Generator', Gist, ημερομηνία πρόσβασης 8 Μάιος 2024, <https://gist.github.com/UnquietCode/99b69b99e00ce52e34c1>.

Για τη δημιουργία ψευδοτυχαίων αριθμών χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι και μαθηματικοί τύποι ή και βάσεις δεδομένων προ-υπολογισμένων τυχαίων αριθμών <sup>184</sup>. Ένα από τα πρώτα παραδείγματα κατασκευασμένης τυχαιότητας από πρώιμο ηλεκτρονικό υπολογιστή με τη χρήση αλγορίθμων είναι το παράδειγμα του βιβλίου των «1.000.000 Τυχαίων Ψηφίων» με την πρώτη του έκδοση το 1955 <sup>185</sup>. Οι αριθμοί αυτού του πίνακα δημιουργήθηκαν με την επανατυχαιοποίηση ενός βασικού πίνακα μέσω συγκεκριμένης αλγοριθμικής διαδικασίας. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι αριθμοί που παράχθηκαν από την αρχική μηχανή/διάταξη παραγωγής του πίνακα παρουσίαζαν αρχικά σημαντικά στατιστικά σφάλματα και συσχετισμούς που δεν ήταν επιθυμητά. Γι' αυτό το λόγο, η μηχανή επανασχεδιάστηκε, ώστε οι παραγόμενοι πίνακες να πλησιάζουν περισσότερο την τυχαιότητα, χωρίς όμως να εξαλείφονται πλήρως τα στατιστικά σφάλματά τους <sup>186</sup>.

**Τα δεδομένα αρχικών πληροφοριών που εισάγονται** σε μια τέτοια διάταξη ονομάζονται **seeds** (σπόροι) και είναι αυτά που καθορίζουν την παραγωγή του ψευδοτυχαίου αποτελέσματος <sup>187 188</sup>. Ως seeds μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικών ειδών τιμές, όπως για παράδειγμα ημερομηνίες, βάσεις δεδομένων, πληροφορίες hardware, κ.λπ.

**Οι ψευδοτυχαίοι αριθμοί είναι επαρκείς για τις περισσότερες χρήσεις**, καθώς οι διεργασίες που τους παράγουν οδηγούν σε αποτέλεσμα με αυξημένη πολυπλοκότητα και συνεπώς μικρή επαναληψιμότητα. Δεν παύουν όμως να είναι προϊόντα εντός ντετερμινιστικού συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι ανά πάσα στιγμή μπορεί να επαναληφθεί ο αλγόριθμος και να εισαχθούν οι ίδιες αρχικές τιμές (random **seeds**) στον μαθηματικό τύπο και να παραχθεί το ίδιο **ακριβώς** αποτέλεσμα. Αυτό δεν θα ήταν εφικτό να γίνει σε μία χαοτική (μη ντετερμινιστική) διάταξη/γεννήτρια. Το παραπάνω αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό των **PRNG** και αποτελεί τόσο μειονέκτημα όσο και πλεονέκτημα. Το μειονέκτημα είναι ότι δεν καθίσταται εφικτή η παραγωγή πραγματικής τυχαιότητας, με ότι συνεπάγεται αυτό για κάποιο αποτέλεσμα ή ερευνητική διεργασία. Το πλεονέκτημα είναι ότι με αυτή τη διαδικασία δίνεται η δυνατότητα παραγωγής ψευδοτυχαιότητας υψηλής πολυπλοκότητας η οποία είναι ανά πάσα στιγμή **ανακαλέσιμη, αποθηκεύσιμη και μεταβιβάσιμη**. Με αυτόν τον τρόπο η τυχαιότητα/πολυπλοκότητα **παραμετροποιείται**. Στην περίπτωση της κρυπτογραφίας αν κάποιος γνωρίζει το seed, ως παράμετρο ενός αλγορίθμου, και έχει πρόσβαση στον αλγόριθμο μπορεί να αποκτήσει το κλειδί της κρυπτογράφησης. Το seed μπορεί να μεταβιβασθεί και να γίνει μεταφορά της κρυπτογραφημένης πληροφορίας σε άλλο χρήστη.

Με το ίδιο σκεπτικό, είναι εύκολο να γίνει αντιληπτό ότι μπορεί να γίνει **αποθήκευση σύνθετης πληροφορίας** και συμπίεση της πληροφορίας. Αν για παράδειγμα υπάρχει ένας αλγόριθμος που βασίζεται σε ψευδοτυχαίους αριθμούς για τη διασπορά (με ψευδοτυχαίο τρόπο) αντικειμένων στο χώρο με βάση κάποιο **seed**, τότε η ακριβής διάταξη των αντικειμένων μπορεί να ανακληθεί εισάγοντας το κατάλληλο seed. Διαφορετικές διατάξεις αντιστοιχούν σε διαφορετικά seeds. Οι συντεταγμένες θέσης και περιστροφής κάθε αντικειμένου προέρχονται σε αυτό το παράδειγμα από τον αλγόριθμο και το seed που επιλέγεται κάθε φορά. Αυτό που είναι αναγκαίο για να υλοποιηθεί μια

184 'RANDOM.ORG - Introduction to Randomness and Random Numbers'.

185 Rand Corporation, επιμ., *A Million Random Digits with 100,000 Normal Deviates* (Santa Monica, CA: Rand, 2001).

186 Rand Corporation, 'A Million Random Digits with 100,000 Normal Deviates' (RAND Corporation, 1 Ιανουάριος 2001), [https://www.rand.org/pubs/monograph\\_reports/MR1418.html](https://www.rand.org/pubs/monograph_reports/MR1418.html).

187 Eric W. Weisstein, 'Seed', Text (Wolfram Research, Inc.), ημερομηνία πρόσβασης 25 Ιανουάριος 2024, <https://mathworld.wolfram.com/>.

188 'Random Seed', στο *Wikipedia*, 8 Φεβρουάριος 2019, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Random\\_seed&oldid=882370504](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Random_seed&oldid=882370504).

συγκεκριμένη διάταξη είναι η γνώση του αλγορίθμου και του συγκεκριμένου seed, και όχι π.χ. οι μεμονωμένες συντεταγμένες θέσης και περιστροφής για το κάθε ένα αντικείμενο ξεχωριστά. Η οικονομία στο εύρος της πληροφορίας είναι πολύ σημαντική όταν πρόκειται για μεγάλο αριθμό αντικειμένων, όπως και η δυνατότητα αποθήκευσης, ανάκλησης, διαχείρισης και μεταφοράς αυτής της πληροφορίας.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των δύο κατηγοριών γεννητριών τυχαίων αριθμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι μπορεί να υπάρξουν γεννήτριες που προκύπτουν και από συνδυασμό των δύο αυτών βασικών τυπολογιών, όπως για παράδειγμα η **Υβριδική Γεννήτρια Τυχαίων Αριθμών (Hybrid Random Number Generator) HRNG** που αποτελείται από μια **PRNG** και μία **TRNG** <sup>189</sup>.

Χαρακτηριστικά	Γεννήτρια Ψευδοτυχαίων αριθμών	Γεννήτρια Πραγματικά τυχαίων αριθμών
Γίνεται αντιληπτή ως τυχαία	Ναι	Ναι
Είναι προβλέψιμη	Ναι	Όχι
Μπορεί να αναπαραχθεί	Ναι	Όχι
Είναι ντετερμινιστική	Ναι	Όχι
Είναι περιοδική	Ναι	Όχι
Αποδοτικότητα	Μεγάλη	Μικρή

Πίνακας 3\_1: Χαρακτηριστικά γεννητριών τυχαίων αριθμών. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

### 3.3 Χρήση της τυχειότητας

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεκριμένες κατηγορίες χρήσης της τυχειότητας. Κάποιες από αυτές μπορούν να έχουν εφαρμογή και σε περιπτώσεις εισαγωγής και χρήσης τυχειότητας στο σχεδιασμό και την αρχιτεκτονική, όπως θα εξηγηθεί αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

#### 3.3.1 Τυχειοποιημένοι αλγόριθμοι

Οι **randomized** (τυχειοποιημένοι) αλγόριθμοι πραγματοποιούν κάποιες επιλογές με τυχαίο ή ψευδοτυχαίο τρόπο. Αυτό βοηθάει στην περίπτωση εύρεσης προσεγγιστικών λύσεων, στην περίπτωση που μια ακριβής λύση δεν είναι δυνατόν να ανευρεθεί. Οι αλγόριθμοι αυτή της κατηγορίας διακρίνονται σε τρεις υποκατηγορίες: **α**. Τους αλγορίθμους τύπου **Monte Carlo**, **β**. Τους αλγορίθμους τύπου **Las Vegas**, και **γ**. Τους αλγορίθμους τύπου **Serwood**.

Οι αλγόριθμοι τύπου **Monte Carlo** χρησιμοποιούν επαναλαμβανόμενη τυχαία δειγματοληψία και ονομάζονται και στοχαστικοί αλγόριθμοι <sup>190</sup>. Απαιτούν ίδιο χρόνο εκτέλεσης κατά την εφαρμογή

189 Στάικος, *Διπλωματική εργασία: Σχεδίαση Γεννητριών Τυχαίων Αριθμών Χαμηλής Κατανάλωσης Ισχύος*, 3–6.

190 Σπύρος Ι. Χατζησπύρος, *Σημειώσεις στην Υπολογιστική Στατιστική μέρος Α', χ.χ.*,

<http://www.samos.aegean.gr/actuar/schatz/notes/Simulation%20I.pdf>.



τους, αλλά μπορεί να δώσουν διαφορετικά αποτελέσματα εξόδου **output**, για τα ίδια δεδομένα εισόδου **input** <sup>191</sup>. Τα αποτελέσματα αυτά μπορεί να είναι σωστά με μεγάλη πιθανότητα  $\leq 1$  <sup>192</sup>.

Οι αλγόριθμοι τύπου **Las Vegas** όταν ολοκληρώνονται δίνουν πάντοτε το ίδιο αποτέλεσμα εξόδου **output** όταν τα δεδομένα εισόδου **input** είναι τα ίδια, αλλά ο χρόνος εκτέλεσης είναι μεταβλητός ανάλογα με την έξοδο **output** <sup>193</sup>. Οι αλγόριθμοι αυτού δεν ολοκληρώνονται πάντα <sup>194</sup>, ενδέχεται δηλαδή να αποτυγχάνουν, με μεγάλη πιθανότητα ολοκλήρωσης  $\leq 1$ , όταν όμως τερματίζουν δίνουν πάντα τη σωστή απάντηση <sup>195</sup>.

Οι αλγόριθμοι τύπου **Serwood** είναι μια κατηγορία αλγορίθμων η οποία:

*«...περιλαμβάνει αλγορίθμους που πάντοτε δίνουν απάντηση και η απάντηση αυτή είναι σωστή. Συχνά σε αιτιοκρατικούς αλγορίθμους η χειρότερη περίπτωση είναι σημαντικά χειρότερη από τη μέση περίπτωση. Ενσωματώνοντας, λοιπόν, την τυχαία επιλογή μίας γεννήτριας (με μηδαμινό κόστος) είναι δυνατόν να εξαλειφθεί η διαφορά μεταξύ της χειρότερης και της μέσης περίπτωσης.»* <sup>196</sup>

Οι τυχαιοποιημένοι αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται σε πολλές επιστήμες όπως η θεωρία αριθμών, η υπολογιστική γεωμετρία, η θεωρία γραφημάτων, βελτιστοποίηση, μηχανική μάθηση, κ.λπ. Ως λογική χρησιμοποιούν τα ίδια inputs με έναν ντετερμινιστικό αλγόριθμο, αλλά μπορούν να δώσουν διαφορετικά αποτελέσματα για το ίδιο input. Τα πλεονεκτήματά τους είναι η απλότητά τους, η ευκολία στην εφαρμογή τους, η αποδοτικότητά τους, η ταχύτητά τους και η δυνατότητά τους να μπορούν να επιλύσουν σε κάποιες περιπτώσεις προβλήματα που δεν μπορούν να χειριστούν οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι <sup>197 198</sup>.

### 3.3.2 Στοχαστικές διαδικασίες

Η **τυχειότητα** (randomness) σύμφωνα με τον Eagle μπορεί να παρατηρηθεί σε δύο σκέλη:

**α.** Σε τυχειότητα στη **διαδικασία (random process)**, και **β.** Σε τυχειότητα στο **αποτέλεσμα της διαδικασίας (random product)** <sup>199</sup>.

Στη θεωρία πιθανοτήτων, μια **τυχαία** ή **στοχαστική διαδικασία** είναι ένα μαθηματικό αντικείμενο το οποίο συνήθως ορίζεται από ένα σύνολο **τυχαίων/στοχαστικών μεταβλητών**.

191 Κωνσταντίνος Τσίχλας, Ιωάννης Μανωλόπουλος, και Αναστάσιος Γούναρης, *Σχεδίαση και ανάλυση αλγορίθμων*, 2015, 362, <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/4005>.

192 'Τυχαιοποιημένοι Αλγόριθμοι', χ.χ., 3, <http://www.cs.ucy.ac.cy/~annap/epl232/notes/notes17-19.pdf>.

193 Τσίχλας, Μανωλόπουλος, και Γούναρης, *Σχεδίαση και ανάλυση αλγορίθμων*, 362.

194 Τσίχλας, Μανωλόπουλος, και Γούναρης, 363.

195 'Τυχαιοποιημένοι Αλγόριθμοι', 3.

196 Τσίχλας, Μανωλόπουλος, και Γούναρης, *Σχεδίαση και ανάλυση αλγορίθμων*, 362.

197 Richard M. Karp, 'An introduction to randomized algorithms', *Discrete Applied Mathematics* 34, τχ. 1 (21 Νοέμβριος 1991): 165–201, [https://doi.org/10.1016/0166-218X\(91\)90086-C](https://doi.org/10.1016/0166-218X(91)90086-C).

198 'Importance of Randomized Algorithms', *GeeksforGeeks* (blog), 29 Ιούνιος 2021, <https://www.geeksforgeeks.org/importance-of-randomized-algorithms/>.

199 Antony Eagle, 'Chance versus Randomness', στο *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, επιμέλ. Edward N. Zalta, Spring 2018 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018), <https://plato.stanford.edu/archives/spr2018/entries/chance-randomness/>.

«Μια στοχαστική διαδικασία (stochastic process)  $\{X_t(\omega), t \in T\}$  είναι μια οικογένεια τυχαίων μεταβλητών ορισμένων σε κοινό χώρο πιθανοτήτων  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  με παράμετρο την πραγματική μεταβλητή  $t$  (χρόνος). Έτσι σε κάθε εξαγόμενο  $\omega$  του τυχαίου πειράματος ορίζουμε μια συνάρτηση  $X_t(\omega)$ . Προφανώς  $\omega \in \Omega$ .»<sup>200</sup> (βλέπε επίσης<sup>201</sup>)

Οι στοχαστικές διαδικασίες χωρίζονται σε **α.** στοχαστικές διαδικασίες **συνεχούς χρόνου** και **β.** σε στοχαστικές διαδικασίες **διακριτού χρόνου**. Οι στοχαστικές διαδικασίες επίσης περιγράφονται ως **I. Συνεχείς** και ως **II. Διακριτές**<sup>202</sup>. Οι όροι **τυχαία διαδικασία** και **στοχαστική διαδικασία** είναι συνώνυμοι και χρησιμοποιούνται και οι δύο εναλλακτικά. Οι στοχαστικές διαδικασίες χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιολογία, την οικολογία, τις νευροεπιστήμες, τη φυσική, την επεξεργασία εικόνας και σημάτων, τη θεωρία ελέγχου, τη θεωρία πληροφορίας, την επιστήμη υπολογιστών, τις τηλεπικοινωνίες, κ.λπ.<sup>203</sup>. Παράδειγμα στοχαστικής διαδικασίας είναι η κίνηση των μορίων στον τρισδιάστατο χώρο, όπως αυτή περιγράφεται στην κίνηση Brown: Τα μόρια κινούνται ακανόνιστα στις 3 διαστάσεις του χώρου  $X, Y, Z$  κατά την εξέλιξη του χρόνου.

### 3.3.3 Γενετικοί αλγόριθμοι (GA) και γενετικός προγραμματισμός (GP)

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (**GA**) είναι μια κατηγορία αλγορίθμων οι οποίοι δημιουργήθηκαν τη δεκαετία του 1960 από τον **John Holland** και τους συνεργάτες του<sup>204</sup>. Ο αρχικός στόχος του Holland ήταν να μελετήσει το φαινόμενο της προσαρμογής όπως αυτό συμβαίνει στη φύση και πώς ο μηχανισμός αυτός θα μπορούσε να μεταφερθεί για χρήση στην επιστήμη των υπολογιστών. Η προσέγγιση του Holland βασίστηκε στη θεωρία της φυσικής επιλογής του Κ. Δαρβίνου και περιείχε την έννοια της μεταφοράς της πληροφορίας από ένα χρωμόσωμα σε ένα άλλο με μεθόδους φυσικής επιλογής και

200 «Μια στοχαστική διαδικασία (stochastic process)  $\{X_t(\omega), t \in T\}$  είναι μια οικογένεια τυχαίων μεταβλητών ορισμένων σε κοινό χώρο πιθανοτήτων  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  με παράμετρο την πραγματική μεταβλητή  $t$  (χρόνος). Έτσι σε κάθε εξαγόμενο  $\omega$  του τυχαίου πειράματος ορίζουμε μια συνάρτηση  $X_t(\omega)$ . Προφανώς  $\omega \in \Omega$ . Αν το σύνολο  $T$  είναι ο άξονας των πραγματικών τότε η διαδικασία λέγεται διαδικασία συνεχούς χρόνου. Αν το  $T$  είναι σύνολο ακεραίων τότε η διαδικασία λέγεται διακεκριμένου χρόνου. Επί πλέον η διαδικασία  $X_t(\omega)$  λέγεται διακεκριμένης κατάστασης αν οι τιμές της είναι μετρητές (αριθμησιμες). Άλλως λέγεται συνεχούς κατάστασης.» Γιάννης Α. Φίλης, 'Στοχαστικές διαδικασίες' (Πολυτεχνείο Κρήτης, 2006), 2, <http://www.cam.tuc.gr/DIAFORA%20JPG/BIBLIA/stochastic%20processes.pdf>.

201 «Οι στοχαστικές διαδικασίες διακρίνονται σε: 1. Στοχαστικές διαδικασίες συνεχούς χρόνου: Μια στοχαστική διαδικασία συνεχούς χρόνου  $X(t)$  ορίζεται σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. 2. Στοχαστικές διαδικασίες διακριτού χρόνου: Μια στοχαστική διαδικασία διακριτού χρόνου  $X[n]$  ορίζεται μόνο σε διακριτές χρονικές στιγμές. Επιπρόσθετα, ανάλογα με τις τιμές που λαμβάνει μια στοχαστική διαδικασία έχουμε τις ακόλουθες κατηγορίες: 1. **Συνεχείς** στοχαστικές διαδικασίες: Η τιμή μιας συνεχούς στοχαστικής διαδικασίας είναι μια συνεχής τυχαία μεταβλητή. 2. **Διακριτές** στοχαστικές διαδικασίες: Η τιμή μιας διακριτής στοχαστικής διαδικασίας είναι μια διακριτή τυχαία μεταβλητή. Οι διακριτές στοχαστικές διαδικασίες διακριτού χρόνου ονομάζονται και αλυσίδες.»

Κωνσταντίνος Μπερμπερίδης, Δημήτριος Αμπελιώτης, και Χρήστος Μαυροκεφαλίδης, 'Εισαγωγή στις στοχαστικές διαδικασίες', στο *Στατιστική επεξεργασία σημάτων και μάθηση* (Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, 2015), 9, <http://hdl.handle.net/11419/2195>.

202 Μπερμπερίδης, Αμπελιώτης, και Μαυροκεφαλίδης, 9.

203 'Stochastic Process', στο *Wikipedia, the Free Encyclopedia*, 3 Μάιος 2014, [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Stochastic\\_process&oldid=606867309](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Stochastic_process&oldid=606867309).

204 John Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence* (Cambridge, Mass: A Bradford Book, 1992).

γενετικής, μέσω ενεργειών όπως **διασταύρωση** (crossover), **αντιστροφή** (inversion) και **μετάλλαξη** (mutation) <sup>205</sup>.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν μια μετα-ευρετική μέθοδο αναζήτησης (metaheuristics), δηλαδή μια ευρετική <sup>206</sup> μέθοδο υψηλού επιπέδου που καλείται να βρει μια λύση με αρκετά καλή προσέγγιση σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα <sup>207</sup>. Σύμφωνα με τον **Negroponte** <sup>208</sup>, μια ευρετική μέθοδος είναι συνώνυμη με ένα γενικό κανόνα – μέθοδο όπου επιτρέπει να γίνεται επιλογή από ένα μεγάλο αριθμό εναλλακτικών, χωρίς να είναι απαραίτητο να εξεταστούν όλες τους, ή επιτρέπει να λαμβάνεται μια απόφαση χωρίς να υπάρχει πλήρης πληροφορία, καθώς η μέθοδος περιορίζει με έξυπνο τρόπο τους υπολογισμούς που απαιτούνται για να επιτευχθεί ο στόχος.

Ο **DeLanda** παραθέτει τον **von Buelow** ο οποίος αναφέρει ότι η εξελικτική αναζήτηση ξεπερνά μια προκαθορισμένη διαδικασία ανάλυσης που έχει στόχο να βοηθήσει το μελετητή να βρει τη μορφή που επιθυμεί, αλλά έχει ως στόχο να τον κεντρίσει δημιουργικά και γι' αυτό και θα πρέπει να χρησιμοποιείται στα πρώτα στάδια του σχεδιασμού, **χωρίς να τον οδηγεί σε μία και μόνο συγκεκριμένη λύση αλλά σε ένα χώρο λύσεων** <sup>209</sup>.

Η αντιμετώπιση ενός προβλήματος κατά μία εξελικτική γενετική αλγοριθμική λογική και η δυνατότητα παραγωγής πολλαπλών λύσεων μέσω μιας κοινής αρχικής μήτρας, ουσιαστικά επαναδιατυπώνει το πρόβλημα και δυναμικοποιεί τις δυνατότητες επίλυσής του. Η έννοια της δυναμικοποίησης κατά τον **Pierre Lévy** <sup>210</sup>, συνίσταται στην αναγωγή από την πραγματοποίηση μιας προκαθορισμένης δυνατότητας, στη συγκεκριμένη περίπτωση της μίας και μόνο επίλυσης ενός αρχιτεκτονικού ή κατασκευαστικού προβλήματος, στην δυνατότητα δημιουργίας ενός μηχανισμού που επιτρέπει την μετάβαση από το εν ενεργεία υπαρκτό στο δυναμικό, **δηλαδή τις πολλαπλές πιθανές λύσεις**.

Όπως αναφέρει ο **Terzidis** <sup>211</sup>, ο γενετικός αλγόριθμος χρησιμοποιεί μια **στοχαστική αναζήτηση**, δηλαδή μια διαδικασία που βασίζεται **και** στην τυχαιότητα, σύμφωνα με την παραδοχή ότι υπάρχει μια ή περισσότερες πιθανές βέλτιστες λύσεις και στις οποίες μπορεί ένα υπολογιστικό σύστημα να καταλήξει μέσω της ισχύος που διαθέτει, της ταχύτητας και της ακριβείας του.

Σύμφωνα με τον ορισμό του Merriam-Webster Dictionary **στοχαστικός** (stochastic) είναι:

205 Melanie Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, Reprint edition (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1998), 3.

206 «Heuristic: Definition of *heuristic* (Entry 1 of 2): involving or serving as an aid to learning, discovery, or problem-solving by experimental and especially trial-and-error methods, also : of or relating to exploratory problem-solving techniques that utilize self-educating techniques (such as the evaluation of feedback) to improve performance» Merriam-Webster, 'Heuristics', ημερομηνία πρόσβασης 30 Απρίλιος 2020, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/heuristics>.

207 Wikipedia, 'Genetic Algorithm', στο *Wikipedia*, 21 Απρίλιος 2020, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Genetic\\_algorithm&oldid=952333404](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Genetic_algorithm&oldid=952333404).

208 Nicholas Negroponte, *Soft Architecture Machines*, First Edition edition (Cambridge, Mass: The MIT Press, 1976), 177.

209 Manuel DeLanda, 'The Use of Genetic Algorithms in Art', στο *ACADIA 12: Synthetic Digital Ecologies [Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 978-1-62407-267-3] San Francisco 18-21 October, 2012*, pp. 25-31 (CUMINCAD, 2012), 26, [http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia12\\_25](http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia12_25).

210 Pierre Lévy Lévy, *Δυναμική πραγματικότητα*, μετάφρ. Μιχάλης Καραχάλιος, Η φιλοσοφία του πολιτισμού και του κυβερνοχώρου (Αθήνα: Εκδόσεις Κριτική, 1999), 24.

211 Kostas Terzidis, *Algorithmic Architecture*, 1 edition (Routledge, 2016), 19.

«1: *random*

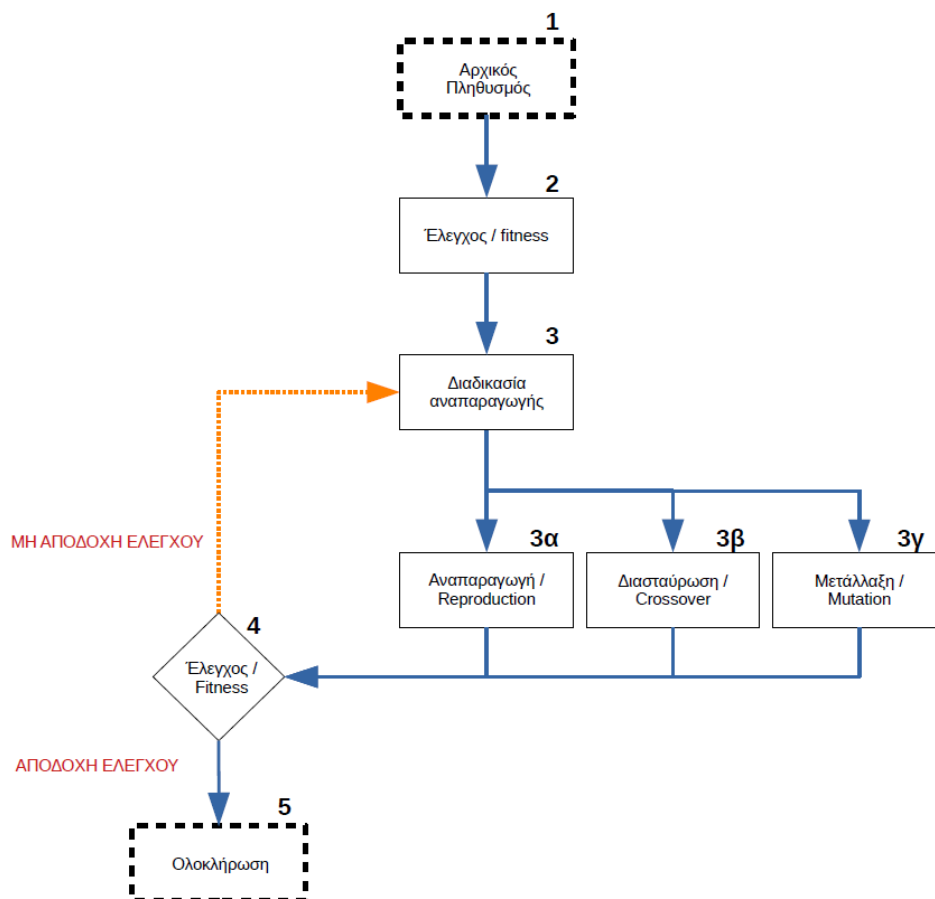
*specifically: involving a random variable*

// *a stochastic process*

2: *involving chance or probability: probabilistic*

// *a stochastic model of radiation-induced mutation»* <sup>212</sup>

Σύμφωνα με τον **Gleik** <sup>213</sup>, μία στοχαστική διαδικασία δεν είναι ούτε ντετερμινιστική (εξέλιξη της σε βέβαιο αποτέλεσμα) ούτε τυχαία (ελεύθερη εξέλιξη της), αλλά διέπεται από ένα σύνολο πιθανοτήτων. Στην περίπτωση αυτή η διαδικασία, και συγκεκριμένα τα γεγονότα που συμβαίνουν κατά την εξέλιξη της διαδικασίας υλοποιούνται με βάση κάποια πιθανότητα. Αυτή η πιθανότητα εξαρτάται από την κατάσταση του συστήματος και ενδεχομένως όπως αναφέρει ο Gleik και από την ιστορία που έχει ακολουθήσει το σύστημα.



Εικόνα 3\_2: Διάγραμμα εξέλιξης τυπικού γενετικού αλγορίθμου (GA) σε απλοποιημένη μορφή. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

212 Merriam-Webster, 'Stochastic', ημερομηνία πρόσβασης 30 Απρίλιος 2020, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/stochastic>.

213 James Gleick, *Η πληροφορία*, μετάφρ. Γιώργος Κυριακόπουλος, Πρώτη έκδοση (Αθήνα: Τραυλός, 2011), 315.

Βασικές έννοιες της θεωρίας των γενετικών αλγορίθμων αποτελούν ο **search space** (χώρος αναζήτησης ή αλλιώς *space of possibilities*) και η έννοια **fitness** (υγεία). Ο χώρος αναζήτησης περιλαμβάνει όλες τις πιθανές υποψήφια λύσεις που μπορούν να προκύψουν κατά τη διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος από τους πιθανούς συνδυασμούς του πληθυσμού, μέσω της γενετικής εξέλιξης. Ο όρος εμπεριέχει επίσης την έννοια κάποιας απόστασης<sup>214</sup> – χώρου μεταξύ των λύσεων, που υπονοεί ότι υπάρχει ποικιλία και διαφοροποίηση σε αυτές. Η υγεία – **fitness** είναι ένα κριτήριο απόδοσης σύμφωνα με το οποίο αξιολογούνται οι παραγόμενες λύσεις κάθε γενιάς<sup>215</sup>. Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές επιστήμες για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων μέσω της ευρηστικής (*heuristics*) διαδικασίας των εξελισσόμενων απογόνων / λύσεων. Το διάγραμμα εξέλιξης τυπικού γενετικού αλγορίθμου (GA) φαίνεται στην Εικόνα 3\_2.

Σύμφωνα με τον **Koza**<sup>216</sup> τα στάδια για την εκτέλεση ενός γενετικού αλγορίθμου μονάδων πληθυσμού με σταθερό αριθμό υπομονάδων (*strings*) είναι τρία και είναι τα ακόλουθα:

- I. Δημιουργία τυχαίου αρχικού πληθυσμού μονάδων σταθερού αριθμού υπομονάδων. (Εικόνα 3\_2, Αρχικός πληθυσμός)
- II. Επανάληψη των ακόλουθων βημάτων της ακολουθίας μέχρι την ικανοποίηση των κριτηρίων (Εικόνα 3\_2)
  - A) Κάθε μονάδα του αρχικού πληθυσμού λαμβάνει μια τιμή *fitness* (Εικόνα 3\_2, 2).
  - B) Δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός από μονάδες εφαρμόζοντας τρεις γενετικές διεργασίες (Εικόνα 3\_2, 3). Οι γενετικές διεργασίες εφαρμόζονται σε κάποιες από τις μονάδες του αρχικού πληθυσμού βάσει πιθανοτήτων σε σχέση με το *fitness* που ήδη αυτές έχουν και αυτές είναι:
    1. Αναπαραγωγή (**reproduction**) μιας μονάδας με αντιγραφή στο νέο πληθυσμό. (Εικόνα 3\_2, 3α)
    2. Χρησιμοποιώντας διασταύρωση (**crossover** / *sexual recombination*) δύο μονάδες συνδυάζουν με **τυχαίο** τρόπο τα υποχαρακτηριστικά τους έτσι ώστε να δημιουργηθούν δύο νέες μονάδες. (Εικόνα 3\_2, 3β)
    3. Δημιουργώντας μια νέα μονάδα, μεταλλάσσοντας (**mutation**) με τυχαίο τρόπο κάποιο από τα υποχαρακτηριστικά της αρχικής μονάδας. (Εικόνα 3\_2, 3γ)
- III. Η μονάδα που θα προκύψει από τα παραπάνω στάδια διεργασιών με βάση το καλύτερο *fitness*, ορίζεται ως το αποτέλεσμα του αλγορίθμου και μπορεί να αναπαριστά μια λύση ή μια προσέγγιση λύσης στο πρόβλημα (Εικόνα 3\_2, 5).

Ο γενετικός αλγόριθμος όπως υποστηρίζει ο Koza<sup>217</sup>, έχει πιθανοτική φύση και γι' αυτό μπορεί να είναι απαραίτητο να χρειαστεί να εκτελεστεί ο αλγόριθμος περισσότερες φορές ανεξάρτητα, για να επιτευχθεί μια ικανοποιητική λύση. Η πιθανοτική φύση του αλγορίθμου εντοπίζεται στα **πιθανοτικά βήματα** για τρία σημεία του, τα οποία είναι:

1. Η τυχαία αρχικοποίηση του πληθυσμού.
2. Η επιλογή μονάδων του αρχικού πληθυσμού (μέσω πιθανοτήτων και της τιμής *fitness*) για εφαρμογή αναπαραγωγής, διασταύρωσης, μετάλλαξης.

<sup>214</sup> Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, 6.

<sup>215</sup> Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, 4.

<sup>216</sup> John Koza, 'Introduction to Genetic Algorithms', στο *Advances in Genetic Programming*, επιμ. Kenneth E. Jr. Kinnear (Cambridge, Mass.: The MIT Press, 1994), 22.

<sup>217</sup> Koza, 22.

3. Επιλογή του σημείου μέσα στη μονάδα όπου θα εφαρμοστούν οι διεργασίες της διασταύρωσης ή της μετάλλαξης.

Οι τρεις τρόποι μεταβολών των χρωμοσωμάτων (**reproduction, crossover, mutation**) σε ένα γενετικό αλγόριθμο μπορούν να αναπαρασταθούν ενδεικτικά όπως φαίνεται στη συνέχεια:

1. **Αναπαραγωγή** (reproduction):

Γονίδιο #1: **011101 01010011** → Γονίδιο #1: **011101 01010011**

2. **A. Διασταύρωση** – παραλλαγή διασταύρωσης μονού σημείου (one point crossover):

πριν την διασταύρωση:

Γονίδιο #1: **011101 01011111**

Γονίδιο #2: **111111 01010011**

μετά την διασταύρωση:

Γονίδιο #1: **111111 01011111**

Γονίδιο #2: **011101 01010011**

**B. Διασταύρωση** – παραλλαγή διασταύρωσης διπλού σημείου (two point crossover):

πριν την διασταύρωση:

Γονίδιο #1: **0001 111101 0011**

Γονίδιο #2: **1111 110011 1100**

μετά την διασταύρωση:

Γονίδιο #1: **1111 111101 1100**

Γονίδιο #2: **0001 110011 0011**

3. **Μετάλλαξη** (mutation):

Γονίδιο #1: **011101 010101111** → **111101 000111000**

Γονίδιο #2: **111111 000111000** → **111111 010101110**

Πηγή στην οποία βασίζονται τα παραπάνω παραδείγματα: <sup>218</sup>

Στην περίπτωση του γενετικού προγραμματισμού (GP), κάθε χρωμόσωμα είναι ένα ξεχωριστό πρόγραμμα και ο χώρος αναζήτησης είναι όλα τα πιθανά, κατάλληλα σε σχέση με το πρόβλημα, προγράμματα που αποτελούνται από επιμέρους λειτουργίες και τερματικές διατάξεις <sup>219</sup>.

### 3.3.4 Cellular automata

Μια κατηγορία εξελικτικών συστημάτων δομών αποτελούν τα κυτταρικά αυτόματα <sup>220</sup> (**cellular automata, CA**). Τα κυτταρικά αυτόματα, έχοντας προγραμματιστεί με βάση συγκεκριμένους κανόνες

<sup>218</sup> Βλάχης Κουμούσης, 'Στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης', χ.χ., [http://users.ntua.gr/vkoum/postgraduate/beltsxed/theory/stox\\_opti.pdf](http://users.ntua.gr/vkoum/postgraduate/beltsxed/theory/stox_opti.pdf).

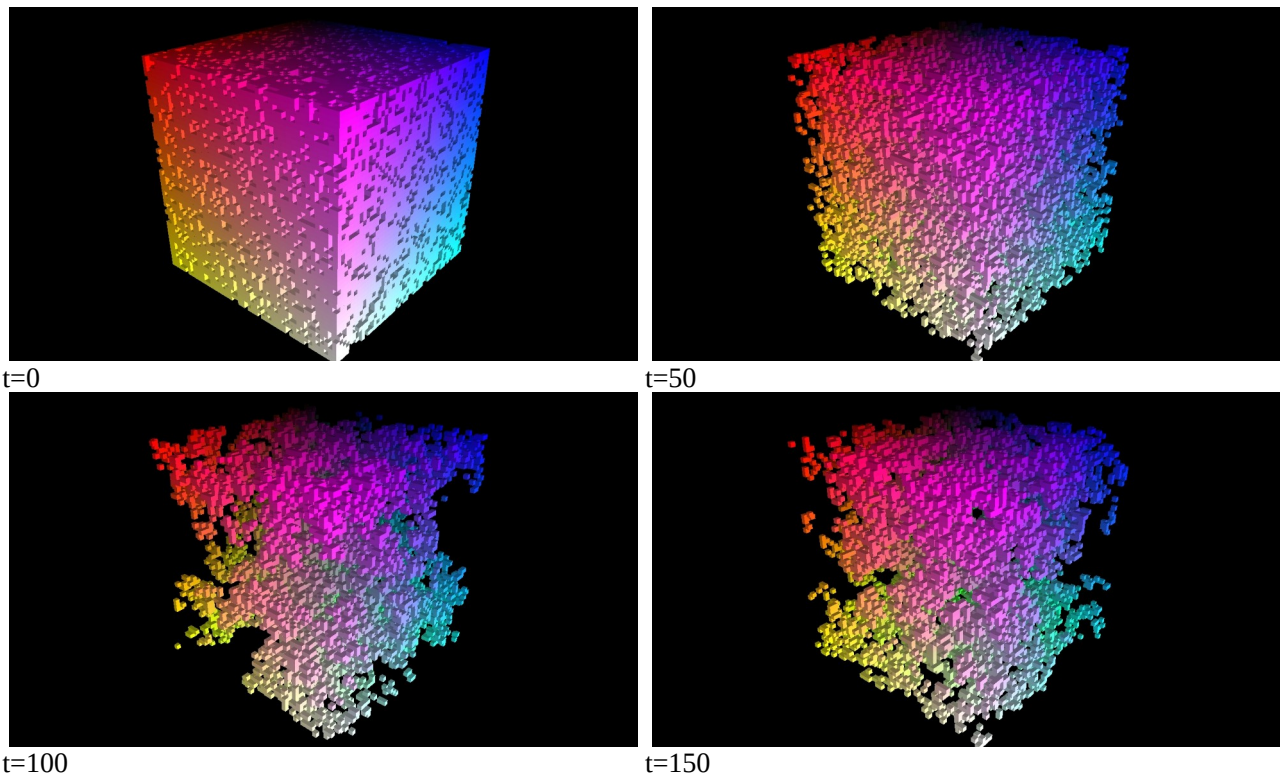
<sup>219</sup> Koza, 'Introduction to Genetic Algorithms', 29.

<sup>220</sup> «Τα κυτταρικά αυτόματα εισήχθησαν και μελετήθηκαν κατ' αρχήν στη δεκαετία του 1960 από τον Ούγγρο μαθηματικό **John von Neumann** που ερευνούσε την ύπαρξη και τις ιδιότητες μοντέλων "αυτομάτων" που έχουν την ιδιότητα της αναπαραγωγής, δηλαδή της παραγωγής αντιγράφων. Τα κυτταρικά αυτόματα είναι δομές που μοντελοποιούν τη συμπεριφορά καταναμημένων συστημάτων με συγκεκριμένη χωρική (γεωμετρική) διάταξη. Ονομάζονται "κυτταρικά" επειδή είναι εμπνευσμένα από κυτταρικές διατάξεις όπου κάθε κύτταρο αλληλεπιδρά με τα γειτονικά του στο χώρο και είναι "αυτόματα" επειδή η συμπεριφορά κάθε κυττάρου είναι πλήρως καθορισμένη από το αντίστοιχο μοντέλο, άρα "αυτόματη"» 'Κυτταρικά αυτόματα και το παιχνίδι της ζωής', ημερομηνία πρόσβασης 27 Απρίλιος 2020, <http://users.softlab.ntua.gr/~brensham/Demos/CellularAutomata/>.

ζωής ή θανάτου κάθε κυψέλης ανάλογα με την κατάσταση και τον αριθμό των γειτονικών της κυψελών, εξελίσσονται σταδιακά είτε σε δύο (2D) είτε σε τρεις διαστάσεις (3D). Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά κυτταρικά αυτόματα είναι το “**Game of Life**” του **J. Conway** (1960). Τα cellular automata αποτελούν στην ουσία ένα είδος προσομοίωσης σε μία (1D), δύο (2D), τρεις (3D) και τέσσερις (4D) διαστάσεις, καθώς υπάρχει εξέλιξη της δομής των οντοτήτων κατά τον άξονα του χρόνου, για τα οποία παράγονται αποτελέσματα μικρής ή μεγάλης πολυπλοκότητας, τάξης ή αταξίας.

Ο **DeLanda** αναφέρει ότι το ενδιαφέρον στις προσομοιώσεις, είναι η διαφορά τους με τις μαθηματικές εξισώσεις, ως προς το ότι η διαδικασία μπορεί να παρατηρείται καθώς αυτή εξελίσσεται <sup>221</sup> λαμβάνοντας ως στιγμιότυπα τις διαδοχικές καταστάσεις που λαμβάνει το σύστημα. Στην Εικόνα 3\_3 παρουσιάζονται 4 στιγμιότυπα από ένα 3D stochastic cellular automaton που δημιουργήθηκε με το λογισμικό “**Visions of Chaos**” <sup>222</sup> στο οποίο διακρίνεται η ομοιογενής πυκνότητα των αρχικών κυψελών στον χρόνο  $t=0$  και η διαφοροποίηση της δομής τους με την πάροδο του χρόνου για τιμές  $t=50$ ,  $t=100$ ,  $t=150$ .

Οι δομές τόσο των **Cellular automata** όσο και των **L-systems**, που θα περιγραφούν στη συνέχεια, βασίζονται σε συγκεκριμένους κανόνες οι οποίοι μπορούν να δημιουργήσουν πολύπλοκα αποτελέσματα τα οποία είναι μεν αναπαράξιμα, αλλά λόγω της μεγάλης τους πολυπλοκότητας δεν μπορεί να προβλεφθεί η τελική τους κατάληξη από τον παρατηρητή μέχρι να ολοκληρωθεί ο αλγόριθμος.



Εικόνα 3\_3: Στιγμιότυπα από 3D stochastic cellular automaton δημιουργημένο με το λογισμικό Visions of Chaos σε χρονική εξέλιξη ( $t=0$ ,  $t=50$ ,  $t=100$ ,  $t=150$ ).

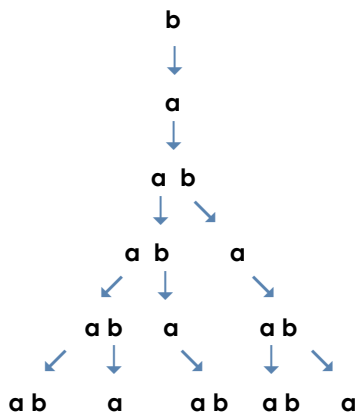
<sup>221</sup> Manuel DeLanda, *Philosophy and Simulation: The Emergence of Synthetic Reason*, Reprint edition (London New Delhi New York Sydney: Bloomsbury Academic, 2015), 34.

<sup>222</sup> ‘Softology - Visions of Chaos’, ημερομηνία πρόσβασης 27 Απρίλιος 2020, <https://softology.com.au/voc.htm>.

Υπάρχουν επίσης περιπτώσεις με μη ντετερμινιστικά (άρα **τυχαία**) cellular automata όπως παρουσιάζουν οι **Coe et al**<sup>223</sup>, αυτά δηλαδή όπου η πιθανότητα της κατάστασης μιας κυψέλης είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες καταστάσεις της. Συγκεκριμένα σε ένα σύνολο από 256 απλά automata βρίσκεται ότι 28 παρουσιάζουν **τυχαία** συμπεριφορά. Ο **S. Wolfram**<sup>224</sup> αναφέρει ότι κάποια συγκεκριμένα cellular automata αν ξεκινήσουν από διαφορετικές **τυχαίες αρχικές συνθήκες** παρουσιάζουν, ενώ διέπονται από τους ίδιους κανόνες, διαφορετικά αποτελέσματα εξέλιξης. Υπάρχουν, αναφέρει, 4 κατηγορίες αυξανόμενης πολυπλοκότητας οι οποίες επηρεάζονται από τις αρχικές συνθήκες με την 1η κατηγορία να παρουσιάζει σχεδόν πάντα την ίδια κατάληξη και την κατηγορία 4 να καταλήξει να παρουσιάζει μίξη τάξης και τυχαιότητας με πολύπλοκους τρόπους. Συνεπώς, σε κάποια από τα cellular automata η τυχαιότητα είναι μια εγγενής ιδιότητα.

### 3.3.5 L-systems

Εξελικτική λογική βάσει κανόνων υπάρχει και στις δενδροειδείς δομές που ονομάζονται **Lindenmayer trees** ή **L-systems**, καλούμενες έτσι από το όνομα του δημιουργού τους, βιολόγου **Aristid Lindenmayer** (1968). Τα L-systems είναι αλγόριθμοι δημιουργίας δομών, είτε δισδιάστατων είτε τρισδιάστατων, οι οποίοι βασίζονται σε ένα αρχικό **αξίωμα** (axiom) ως αφετηρία και σε **κανόνες** εξέλιξης του (rules). Ένα απλό παράδειγμα δομής L-system σύμφωνα με το **αξίωμα a** και τους **κανόνες a→ab** και **b→a** (δηλαδή αντικατάσταση στον επόμενο κύκλο του **a** με **ab** και του **b** με **a**) για 4 στάδια εξέλιξης είναι η δομή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3\_4.



Εικόνα 3\_4: 2D L-system, σύμφωνα με το αξίωμα a και τους κανόνες  $a \rightarrow ab$  και  $b \rightarrow a$ , κατά το παράδειγμα των Prusinkiewicz P. and Hanan J. και Prusinkiewicz P. Lindenmayer A.. Πηγή: [http://www1.biologie.uni-hamburg.de/b-online/e28\\_3/sys.html](http://www1.biologie.uni-hamburg.de/b-online/e28_3/sys.html)

223 J. B. Coe, S. E. Ahnert, και T. M. A. Fink, 'When Are Cellular Automata Random?', *EPL (Europhysics Letters)* 84, τχ. 5 (Δεκέμβριος 2008): 50005, <https://doi.org/10.1209/0295-5075/84/50005>.

224 Stephen Wolfram, *A New Kind of Science* (Champaign, IL: Wolfram Media, Inc., 2002), 231, <https://www.wolframscience.com/nks/>.



Αντίθετα με τα Cellular automata, η **τυχειότητα στα L-systems** είναι μια προγραμματιζόμενη ιδιότητα. Σύμφωνα με τον **Prusinkiewicz** <sup>225</sup> υπάρχουν δύο τρόποι να εισαχθεί τυχειότητα σε ένα L-system. Ο πρώτος είναι να εισαχθεί τυχειότητα στον κανόνα, άρα στη δομή, και ο δεύτερος είναι να εισαχθεί τυχειότητα στις επιμέρους παραμέτρους ενός στοιχείου της δομής, π.χ. μήκος, διατομή, καμπυλότητα ως μεταβαλλόμενη παραμετρική ιδιότητα. Στην περίπτωση αυτή τα L-systems περιλαμβάνουν **στοχαστικές γραμματικές (stochastic L-systems)**. Σε αυτές, ένας κανόνας είναι εφικτό να οριστεί να έχει περισσότερα από ένα αποτελέσματα, αν εισαχθεί η έννοια της πιθανότητας με βάση κάποιο ποσοστό. Με τη μέθοδο αυτή εισάγεται στη γεννήτρια παραγωγής δομών η έννοια της **τυχειότητας** και άρα η δυνατότητα παραγωγής άπειρου αριθμού πιθανών παραλλαγών μέσα από την ίδια μήτρα, κατά την έννοια της λογικής του **γονότυπου – φαινότυπου**. Έτσι, το προηγούμενο απλό παράδειγμα μπορεί να μετασχηματιστεί, σύμφωνα με τη λογική παρόμοιου παραδείγματος στο διαδίκτυο <sup>226</sup>, στο αξίωμα **b** το οποίο ορίζεται να έχει **3 κανόνες** με πιθανότητες για τον κάθε έναν από αυτούς αντίστοιχα: **0.34** , **0.33** και **0.33**.

Αξίωμα:	<b>b</b>	
Κανόνες:	b=(.34)a	(Α' πιθανή παραλλαγή αντικατάστασης του <b>b</b> με <b>a</b> , πιθανότητα 0.34)
	b=(.33)b	(Β' πιθανή παραλλαγή αντικατάστασης του <b>b</b> με <b>b</b> , πιθανότητα 0.33)
	b=(.33)abc	(Γ' πιθανή παραλλαγή αντικατάστασης του <b>b</b> με <b>abc</b> , πιθανότητα 0.33)

<sup>225</sup> *Lindenmayer Systems, Fractals, and Plants* (Berlin ; New York: Springer, 1989), 51, <https://algorithmicbotany.org/papers/lsfp.pdf>.

<sup>226</sup> 'Stochastic L-systems', ημερομηνία πρόσβασης 28 Απρίλιος 2020, <https://www.csee.umbc.edu/~ebert/693/TLin/node18.html>.



## 4. Παραδείγματα τυχειότητας στην αρχιτεκτονική

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται παραδείγματα αρχιτεκτονικών έργων τα οποία σχετίζονται με την παράμετρο της τυχειότητας. Στόχος αυτού του σταδίου διερεύνησης είναι να εντοπιστούν και να κατηγοριοποιηθούν αυτά τα ενδεικτικά παραδείγματα, έτσι ώστε να γίνει καλύτερα κατανοητό εάν η τυχειότητα που παρουσιάζεται είναι ακούσια ή εκούσια, σε τι βαθμό παρουσιάζεται, πώς αυτή δημιουργείται καθώς και ποια είναι η επιρροή της στο έργο όσον αφορά στη δομή, τη μορφή, τη λειτουργία, κ.λπ. Αυτά τα παραδείγματα μπορούν να ομαδοποιηθούν σε κατηγορίες ανάλογα με το είδος της και τη σχέση με την τυχειότητα που παρατηρείται κάθε φορά.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι με τον όρο **δομή** ορίζεται ανάμεσα σε άλλες ερμηνείες ως:

*«δομή (η) 1. ο τρόπος με τον οποίο έχει φτιαχτεί, χτιστεί ή κατασκευαστεί (κάτι), ..., 2. ο τρόπος με τον οποίο επιμέρους στοιχεία σχετίζονται και συνδέονται μεταξύ τους, ώστε να σχηματίζουν ενιαίο σύνολο ή σύστημα...»<sup>227</sup>*

*«1. Η δράση της δόμησης, 2 b. Η οργάνωση κάποιου στοιχείου σε συγκεκριμένο μοτίβο οργάνωσης, 3. Η τεχνοτροπία της κατασκευής, ..., 4 b. Η οργάνωση των μερών όπως κυριαρχείται από το γενικό χαρακτήρα του συνόλου, 4 c. Η συνεκτική μορφή ή τρόπος οργάνωσης, 5. Το άθροισμα των στοιχείων μιας οντότητας στις μεταξύ τους σχέσεις. ...»<sup>228</sup>  
(μτφρ. Τ. Κουιμιτζόγλου)*

Αντίστοιχα με τον όρο **μορφή** ορίζεται ανάμεσα σε άλλες ερμηνείες ως:

*«μορφή (η) 1. η εξωτερική όψη, το πώς φαίνεται κάτι, το σύνολο των εξωτερικών του χαρακτηριστικών, ..., 4. το σύνολο των χαρακτηριστικών ενός πράγματος, 8. (γενικότ.) η απεικόνιση, σχέδιο...»<sup>229</sup>*

*«1 a. Το σχήμα και τη δομή κάποιου όπως διακρίνεται από το υλικό του, 2. Η ουσιαστική φύση ενός πράγματος όπως διακρίνεται από την ύλη, 2 b. Το μέρος ενός πράγματος που καθορίζει το είδος του, 7 c Το καλούπι μέσα στο οποίο τοποθετείται το σκυρόδεμα για πήξη...»<sup>230</sup> (μτφρ. Τ. Κουιμιτζόγλου)*

227 Γ. Μπαμπινιώτης, *Λεξικό της νέας ελληνικής γλώσσας*, Γ' (Αθήνα: Κέντρο Λεξικολογίας, 2008), 520.

228 'Definition of STRUCTURE', 22 Φεβρουάριος 2024, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/structure>.

229 Μπαμπινιώτης, *Λεξικό της νέας ελληνικής γλώσσας*, 1123.

230 'Definition of FORM', 27 Φεβρουάριος 2024, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/form>.

## 4.1 Τυχειότητα σε ιστορικές και παραδοσιακές κατασκευές με τη χρήση φυσικών υλικών μη τυποποιημένων διαστάσεων

Κατασκευές που δομούνται με φυσικά υλικά όπως είναι το χώμα, το ξύλο και ο λίθος μπορούν να παρουσιάσουν τυχειότητα, σε παραμέτρους που αφορούν στη γεωμετρία, στη μορφή και στη διάταξή τους. Τέτοιες περιπτώσεις είναι πιο συνηθισμένες σε κατασκευές της παραδοσιακής ή λαϊκής αρχιτεκτονικής, καθώς στα παλιότερα χρόνια τα φυσικά μη τυποποιημένα υλικά ήταν τα μόνα υλικά δόμησης, όταν δεν πρόκειται για σημαντικά κτίσματα και μνημεία. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η διαδικασία της δόμησης αναγκαστικά προσαρμοζόταν στο άμεσο περιβάλλον με τον πιο εύκολο, γρήγορο και οικονομικό από άποψη κόστους κατασκευής και υλικών τρόπο, αλλά και συμβατό και ευρηματικό τρόπο ως προς την αντιμετώπιση των ιδιαίτερων συνθηκών και καταπονήσεων του περιβάλλοντος αυτού.

Η έλλειψη τυποποιημένων υλικών, σχεδιασμού και τεχνικών κατασκευής, έχει ως αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται σε αυτές τις περιπτώσεις η ομοιομορφία που παρουσιάζεται στις περιπτώσεις της σύγχρονης κατασκευής.

Τα νέα υλικά όπως το σκυρόδεμα, ο χάλυβας, το αλουμίνιο, κ.λπ., παρουσιάζουν σημαντική ακρίβεια στις διαστάσεις και στις μορφές λόγω της τυποποίησης και των τεχνικών κατασκευής (τα περισσότερα από αυτά αποτελούν βιομηχανικά προϊόντα) καθώς και εφαρμογής τους. Ακόμα και το ξύλο, λόγω της βιομηχανικής επεξεργασίας του (πριστή φυσική ξυλεία) και των βιομηχανικών προϊόντων του (επικολητή ξυλεία, LVL, CLT, κόντρα-πλακέ, OSB, MDF κ.λπ.) τυποποιείται πλέον και ως προς τη μορφή, τις διαστάσεις και την αντοχή. Τα σύγχρονα ρεύματα στην αρχιτεκτονική και το σχεδιασμό προσανατολίζονται συχνά σε καθαρές γεωμετρίες, με επίπεδες επιφάνειες και καθαρές γραμμές, σε συνδυασμό με τη χρήση νέων υλικών που μπορούν να παράξουν τέτοιου είδους αποτελέσματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις δεν προτιμούνται τα μη τυποποιημένα φυσικά υλικά, καθώς αυτά δεν μπορούν να αποδώσουν ανάλογα αποτελέσματα.

Η οικονομία στην επεξεργασία των πρωτογενών υλικών από άποψη έργου και ποσοτήτων, μπορεί να συμβάλλει στην απόδοση ενός ακανόνιστου αποτελέσματος. Συχνά, η επεξεργασία των υλικών πραγματοποιείται μέχρι τον απολύτως απαραίτητο βαθμό που απαιτείται για την εκάστοτε κατασκευαστική, λειτουργική ή μορφολογική ανάγκη. Έτσι, πολύ συχνά υπάρχει διαφοροποίηση στα βασικά δομικά στοιχεία και διατηρείται σε ένα ποσοστό η τυχειότητα της μορφής των φυσικών χαρακτηριστικών των υλικών, καθώς δεν είναι απαραίτητο και δεν συμφέρει αυτή να εξαιρεθεί, αν ικανοποιούνται με επαρκή τρόπο οι συνθήκες της δομής, μορφής και λειτουργίας και δεν υπάρχουν πρόσθετες απαιτήσεις.

Όταν γίνεται χρήση μη τυποποιημένων φυσικών υλικών κατασκευής, όπου χρησιμοποιούνται ομοειδείς δομικές μονάδες για την υλοποίηση κάποιας κατασκευής, παρατηρείται ότι εμφανίζονται συχνά διαφοροποιήσεις μεταξύ των επιμέρους στοιχείων, άρα και τυχειότητα. Τα ομοειδή στοιχεία έχουν συνήθως γεωμετρικά μεγέθη που κινούνται εντός κάποιου αποδεκτού για την κατασκευή εύρους (minimum, maximum) και με παραπλήσιες μορφές, οι οποίες παρουσιάζουν διαφοροποίηση, αλλά δεν εμποδίζουν τη βασική κατασκευαστική λειτουργία που καλούνται να εξυπηρετήσουν. Η διάταξή τους στο χώρο (θέση / πυκνότητα) κυμαίνεται επίσης συχνά εντός κάποιων ορίων (minimum, maximum) που εξυπηρετούν τις κατασκευαστικές απαιτήσεις ενός έργου.

## 4.1.1 Επικαλύψεις με φυτικά στοιχεία

- Σε περιπτώσεις επικαλύψεων ξύλινων κατασκευών από άχυρο ή καλάμια, γίνεται τοποθέτηση τους πάνω σε φέροντα οργανισμό από ξύλο. Τα άχυρα ή καλάμια τοποθετούνται σε σιβάδες ή ζώνες, έτσι ώστε να υπάρχει επικάλυψη της χαμηλότερης στρώσης από την επόμενη προκειμένου να μην επιτρέπεται η εισροή νερού στο εσωτερικό. Η κάθε στρώση αποτελείται από πλήθος ομοειδών στελεχών από άχυρο ή καλάμια τα οποία τοποθετούνται **κατά προσέγγιση και με τυχαιότητα εντός των ορίων** της συγκεκριμένης σιβάδας / στρώσης και έχουν περίπου όμοιες διαστάσεις, αλλά δεν είναι ολόιδια. Αυτό που είναι σημαντικό είναι να υπάρχει ίδια περίπου **πυκνότητα** των στρώσεων, ώστε να μην μπορεί να εισχωρήσει το νερό στο εσωτερικό. Οι μικρές διαφοροποιήσεις στις αποστάσεις, στις διαστάσεις, στις διατομές και στη θέση δεν έχουν σημασία. **Η κατά προσέγγιση τοποθέτηση και η χοντρική διαλογή των υλικών εξοικονομεί χρόνο και πόρους στην κατασκευή** (Εικόνα 4\_1).
- Η ίδια λογική διαφοροποιήσεων διατομών και σχημάτων παρατηρείται κατά τη χρήση ξύλινων στοιχείων, αλλά σε διαφορετική κλίμακα, στις περιπτώσεις δημιουργίας κατακόρυφων και οριζόντιων επιπέδων με τις τεχνικές του **μπαγδατί** και του **ξυλόπηκτου τοίχου**, οι οποίες όμως δεν είναι συνήθως εμφανείς.
- Το **μπαγδατί** είναι μια ελαφριά μη φέρουσα ξυλόπλεκτη επένδυση ενός ξύλινου σκελετού τοίχου (φέροντος ή μη φέροντος), οροφής στέγης ή πατώματος. Το μπαγδατί λειτουργεί ως υπόβαθρο για την εφαρμογή επιχρίσματος, είτε εσωτερικά, είτε εξωτερικά, είτε αμφίπλευρα, και αποτελείται από πλέγμα από λεπτά ξύλινα στοιχεία, κλαδιά ή καλάμια, σε οριζόντια και κατακόρυφη διάταξη, τοποθετημένα σε απόσταση μεταξύ τους για την αγκύρωση του επιχρίσματος. Φωτογραφίες από παραδείγματα τύπων μπαγδατί φαίνονται στις εικόνες (Εικόνα 4\_2, Εικόνα 4\_3, Εικόνα 4\_4).



Εικόνα 4\_1: Σαρακατσάνικη καλύβα σε γενική άποψη και σε μεγέθυνση εξωτερικά. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 4\_2: Μεσοτοιχία ξύλινου κτίσματος στην Κωνσταντινούπολη. Γενική άποψη (αριστερά) και λεπτομέρεια (δεξιά), όπου διακρίνεται η μια παρειά της τοιχοποιίας και ο ξύλινος φέρων οργανισμός πάνω στον οποίο στηρίζεται το μπαγδατί από πήχεις ξύλου διαφορετικών μεγεθών. Διακρίνεται επίσης το επίχρισμα που έχει συμπληρώσει τα κενά ανάμεσα στις οριζόντιες σανίδες του μπαγδατί. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Τα οριζόντια στοιχεία, που διαμορφώνουν το επίπεδο προς επίχριση, έχουν **τυχαίες διαστάσεις και μορφές εντός συγκεκριμένων ορίων**. Καθώς είναι στοιχεία που δεν θα είναι τελικά εμφανή, λόγω της επικάλυψης από το επίχρισμα, δεν απαιτείται να έχουν κάποια μορφολογική τυποποίηση. Απαιτείται ωστόσο να έχουν κατάλληλο και κοινό προσανατολισμό, αλλά και διαστάσεις πάχους, πλάτους και πλέξης εντός ελάχιστων και μέγιστων ορίων, ώστε η σύνθεση πολλών μονάδων από αυτά να δημιουργεί ένα σχετικά ομοιόμορφο επίπεδο, που εξυπηρετεί τον σωστό τρόπο κατασκευής με την συγκεκριμένη τεχνική. Η τυχαιότητα και μη κανονικότητα του επιπέδου αυτού θα εξομαλυνθεί από το στρώμα επιχρίσματος που θα καλύψει τις διαφοροποιήσεις της γεωμετρίας και θα συμπληρώσει τα κενά.



Εικόνα 4\_3: Μπαγδατί από κλαδιά ως κατακόρυφο διαχωριστικό σε εξώστη κτίσματος στον οικισμό Άνω Καλάθηνες στην Κρήτη. Πηγή: Ψηφιακό αποθετήριο μαθήματος Αρχιτεκτονικής ανάλυσης παραδοσιακών κτηρίων και συνόλων (5Α) Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ. <http://5a.arch.ntua.gr/project/12932/14003>, © Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ.

Εικόνα 4\_4: Μπαγδατί από κλαδιά ως κατακόρυφη και οριζόντια αλαφριά κατασκευή σε κτίσμα στον οικισμό Αργαλαστής στη Μαγνησία. Πηγή: Ψηφιακό αποθετήριο μαθήματος Αρχιτεκτονικής ανάλυσης παραδοσιακών κτηρίων και συνόλων (5Α) Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ. <http://5a.arch.ntua.gr/project/5301/5709>, © Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ.



Εικόνα 4\_5: Ξυλόπηκτος τοίχος σε κτίσμα στον οικισμό Βελημάχι στην Αρκαδία. Πηγή: Ψηφιακό αποθετήριο μαθήματος Αρχιτεκτονικής ανάλυσης παραδοσιακών κτηρίων και συνόλων (5Α) Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ. <http://5a.arch.ntua.gr/project/1001/1348>, © Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ.



Εικόνα 4\_6: Τοιχοποιία από τσατμά με γέμισμα από λίθους και κονίαμα σε κτίσμα στον οικισμό Τρικέρι στη Μαγνησία. Πηγή: Ψηφιακό αποθετήριο μαθήματος Αρχιτεκτονικής ανάλυσης παραδοσιακών κτηρίων και συνόλων (5Α) Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ. <http://5a.arch.ntua.gr/project/5305/5953>, © Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ.

- Στην περίπτωση του **ξυλόπηκτου τοίχου**, παρατηρείται η δημιουργία αφανούς ή εμφανούς φέροντος οργανισμού από ξύλο, τα κενά το οποίου συμπληρώνονται από γέμισμα από λίθους, κεραμικά στοιχεία, ξύλα, και άλλα υλικά, σε συνήθως τυχαία διάταξη και με τυχαίο μέγεθος. Το γέμισμα αποσκοπεί, εκτός από την ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας του ξυλινού σκελετού, στην πλήρωση του όγκου του κενού ανάμεσα στα στοιχεία του φέροντος οργανισμού για τη διαμόρφωση συμπαγούς κατακόρυφου επιπέδου χωρίς κενά προκειμένου να επιχρισθεί αργότερα. Γι' αυτό το λόγο, δεν γίνεται προσπάθεια αυστηρής τυποποίησης, πέρα ίσως από μια προσπάθεια για μια σχετική ομοιογένεια στις διαστάσεις και τη διάταξη των υλικών πλήρωσης. Παρατηρείται λοιπόν ότι ένα καθορισμένο και γεωμετρικά οριοθετημένο σύστημα, που είναι ο ξυλινός φέρων οργανισμός της κατασκευής, εμπεριέχει σε κυψέλες, περιοχές μη κανονικής διάταξης και τυχαιότητας (περιοχές πληρώσεων). Τα δύο διαφορετικά συστήματα οργάνωσης συνδυάζονται και συμπληρωματικά δημιουργούν κατακόρυφα στοιχεία δόμησης. Ο φέρων οργανισμός απαιτείται να είναι καθορισμένος και επιμελημένος, γεγονός που απαιτεί καλή επεξεργασία των υλικών και του τρόπου κατασκευής και σύνδεσης, ενώ οι πληρώσεις για οικονομία χρόνου, έργου και υλικών συχνά αποτελούνται από υπολείμματα και δευτερεύοντα υλικά σε μη επιμελημένη διάταξη. **Το όριο** που διαχωρίζει τις τυχαίες από τις κανονικές περιοχές είναι στην προκειμένη περίπτωση ο φέρων οργανισμός της κατασκευής.

- Η ενσωμάτωση βλάστησης σε περιοχές της κατασκευής είναι ακόμα μια προσέγγιση εφαρμογής, κατά μια έννοια, κάποιων αρχών της οργανικής αρχιτεκτονικής<sup>231</sup>. Η διαδικασία ενσωμάτωσης οργανικών στοιχείων όπως χώμα και φύτευση στο κέλυφος της κατασκευής δεν είναι

<sup>231</sup> Σύμφωνα με το Dictionary of architecture & construction, η οργανική αρχιτεκτονική είναι η αρχιτεκτονική της οποίας ο σχεδιασμός συνδέεται με διαδικασίες (processes) που συναντώνται στη φύση, αντί για την χρήση προκαθορισμένου σχεδίου (imposed design). Cyril Harris, *Dictionary of Architecture and Construction*, 4 edition (New York: McGraw-Hill Education, 2005), 685. Μια τέτοια αρχιτεκτονική, η οποία χρησιμοποιεί διαδικασίες που προέρχονται από τη φύση ενδέχεται να εμπεριέχει τον παράγοντα της τυχαιότητας, αφού η φύση είναι στη βάση της ένα πολύπλοκο σύστημα που εμπεριέχει τόσο το ντετερμινισμό όσο και την τυχαιότητα.

νέα (για παράδειγμα πράσινες/φυτεμένες στέγες για λόγους θερμομόνωσης στη βόρεια Ευρώπη, Εικόνα 4\_7). Στη σύγχρονη κατασκευή έχει επανέλθει αυτή η προσέγγιση για βιοκλιματικούς, αισθητικούς και οικολογικούς λόγους. Η εφαρμογή οργανικών στοιχείων φύτευσης μπορεί να αναπτυχθεί σε όψεις (Εικόνα 4\_8) και δώματα κτηρίων. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, υπάρχει μια ξεκάθαρα οριοθετημένη κατακόρυφη ή οριζόντια περιοχή του κελύφους του κτηρίου όπου εφαρμόζεται η φύτευση. Η περιοχή αυτή, ανάλογα με τις προδιαγραφές της υλοποίησής της, επιτρέπει την ανάπτυξη φυτών διαφορετικών μεγεθών, από χαμηλά φυτά μέχρι ολόκληρα δένδρα.



Εικόνα 4\_7: Φυτεμένη στέγη σε κτίσμα στη Νορβηγία, 2012. Πηγή: *Shed with green roof at Lyngen fjord, 2012 June.jpg*, *A shed with a green roof at the east coast of Lyngen fjord in Troms, Norway in 2012 June. The mountains in the background belong to Lyngen alps*, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shed\\_with\\_green\\_roof\\_at\\_Lyngen\\_fjord\\_2012\\_June.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shed_with_green_roof_at_Lyngen_fjord_2012_June.jpg), εικόνα του/της: *Ximonic (Simo Räsänen)*, άδεια: *CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license*.



Εικόνα 4\_8: Πράσινη όψη του Caixa Forum, Μαδρίτη, Herzog & de Meuron, 2012. Πηγή: *Green wall, Madrid.JPG*, *Green wall at Caixa Forum, Paseo del Prado, Madrid*, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Green\\_wall\\_Madrid.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Green_wall_Madrid.JPG), εικόνα του/της: *Mike.dixon.design*, άδεια: *CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license*. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

Εντός αυτών των **ορίων** παρατηρείται ελεύθερη ή ελεγχόμενη ανάπτυξη των φυτών, όπου η **πυκνότητα** διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος και τη διάταξη της χλωρίδας. Τα οργανικά στοιχεία ενσωματώνονται στην κατασκευή και δημιουργούν θύλακες τυχαίας ανάπτυξης και μορφής, εντός των προκαθορισμένων ορίων τοποθέτησής τους. Οι παράμετροι που τροποποιούνται στην περίπτωση πράσινων όψεων ή φυτεμένων δωματίων είναι αυτές που σχετίζονται με την βιολογική κατάσταση της βλάστησης, δηλαδή βαθμός ανάπτυξης των φυτών, πυκνότητα, είδη φύτευσης και εποχιακές διαφοροποιήσεις σε χρώματα, άνθισμα, καρποφορία, αειθαλότητα ή φυλλοβολία, κ.λπ. Στην περίπτωση αυτή, **η τυχαιότητα της οργανικής προσθήκης οριοθετείται γεωμετρικά** από την περιοχή εφαρμογής και τις προδιαγραφές υλοποίησής της (π.χ. πάχος χώματος, προσανατολισμός, άρδευση, υγρασία, είδη φυτών κ.λπ.). Αυτό το τμήμα των κατασκευών έχει άμεση σχέση με την τυχαιότητα, καθώς η φύση εξ' ορισμού συνδέεται με την τυχαιότητα.



## 4.1.2 Ξύλο

- Το ξύλο είναι άφθονο υλικό στη φύση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ελάχιστο ή μέχρι και μεγάλο βαθμό επεξεργασίας. Η περίφημη πρωτόγονη καλύβα του Βιτρούβιου που αναφέρει ο **Marc-Antoine Laugier** περιγράφει μια πρόχειρη αρχετυπική κατασκευή. Στην εικόνα της προμετωπίδας της β' έκδοσης της «**Πραγματείας για την Αρχιτεκτονική**» το 1755 <sup>232</sup>, απεικονίζεται ένα καταφύγιο κατασκευασμένο από τέσσερα δέντρα σε κοντινή θέση, οι κορμοί των οποίων λειτουργούν ως υποστυλώματα που στηρίζουν μια απλοϊκή δίρριχτη στέγη από κλαδιά. Η αναπαράσταση είναι αλληγορική και εμπεριέχει τις βασικές αρχές που ο Laugier θέλει να τονίσει για την κατασκευή: κατακόρυφα στοιχεία ως υποστυλώματα, οριζόντια στοιχεία ως δοκοί και κεκλιμένα στοιχεία ως στέγη <sup>233</sup>. Η εικονογράφηση της καλύβας του Laugier συμβολίζει την αναγκαιότητα της στροφής της αρχιτεκτονικής στην εξυπηρέτηση των βασικών αναγκών του ανθρώπου και απομάκρυνση από ότι είναι μη ουσιώδες. Σύμφωνα με τον **Π. Τουρνικιώτη**, ο Laugier πιστεύει στην ουσία της αρχιτεκτονικής, όπου όλες οι μορφές πρέπει να υποτάσσονται στην κατασκευαστική λογική και τη λειτουργία <sup>234</sup>.



Εικόνα 4\_9: Charles Eisen, προμετωπίδα για τη β' έκδοση της Πραγματείας για την Αρχιτεκτονική του Laugier, 1755.

Πηγή: *La cabaña primitiva*. Marc Antoine Laugier, *Ilustración de Essai sur l'architecture*. 1755,

<https://www.flickr.com/photos/campobaeza/8134650044>, εικόνα του/της: [Alberto Campo Baeza](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/), άδεια: CC BY-NC 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>

Εικόνα 4\_10: Charles Eisen, προμετωπίδα για τη β' έκδοση της Πραγματείας για την Αρχιτεκτονική του Laugier, 1755.

Πηγή: *La cabaña primitiva*. Marc Antoine Laugier, *Ilustración de Essai sur l'architecture*. 1755,

<https://www.flickr.com/photos/campobaeza/8134650044>, εικόνα του/της: [Alberto Campo Baeza](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/), άδεια: CC BY-NC 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/> (μεγέθυνση).

232 Marc-Antoine Laugier, *Essai sur l'architecture* (A Paris : Chez Duchesne, Libraire, rue S. Jacques, au-dessous de la Fontaine S. Benoît, au Temple du Goût, 1755), [https://archive.org/details/bub\\_gb\\_BWZJgiv1QvkC/page/n8/mode/2up](https://archive.org/details/bub_gb_BWZJgiv1QvkC/page/n8/mode/2up).

233 Laugier, 10.

234 Παναγιώτης Τουρνικιώτης, *Εισαγωγή στη θεωρία της Αρχιτεκτονικής. Μια ιστορική επισκόπηση*. (Αθήνα: Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ. Τομέας αρχιτεκτονικού σχεδιασμού. Περιοχή θεωρίας της αρχιτεκτονικής., 2008), 37, [http://www.arch.ntua.gr/sites/default/files/resource/12901/\\_tournikiotis\\_introduction\\_theory\\_2008\\_b.pdf](http://www.arch.ntua.gr/sites/default/files/resource/12901/_tournikiotis_introduction_theory_2008_b.pdf).

Για τον **A. Vidler**, η κατοικία του Laugier αποτελεί την πρώτη τυπολογία στην αρχιτεκτονική. Η τυπολογία αυτή είναι μίμηση της τάξης της Φύσης και συνδέει την πρωτόγονη κατασκευή της καλύβας με την ιδανική γεωμετρία. Τα κατακόρυφα δένδρα τοποθετούνται σε αποστάσεις τέτοιες ώστε να διαμορφώνουν ένα τέλειο τετράγωνο σε κάτοψη και είναι αρχέτυπα αρχαίων κιόνων. Εφ' όσον εξυπηρετείται η λειτουργία της στέγασης και του καταφυγίου, αλλά και η δομή του κτίσματος με τα υποστυλώματα, τις δοκούς και τα κεκλιμένα μέλη είναι επαρκής, δεν υπάρχει λόγος για ομοιομορφία και το κάθε στοιχείο μπορεί να διατηρεί την τυχαία του φυσική μορφή. Σε παραδείγματα από κατασκευές τέτοιου τύπου, διακρίνει κανείς τα χαρακτηριστικά στα οποία αναφέρεται ο Laugier: κατακόρυφα στοιχεία που οριοθετούν τον κυρίως χώρο κατοίκησης, οριζόντια και κεκλιμένα στοιχεία - δοκοί και κάποιου είδους στέγαση για προστασία.

- Η χρήση φυσικών υλικών δεν περιορίζεται μόνο στις εξωτερικές επικαλύψεις για τη στέγαση των κατασκευών. Το ξύλο ως δομικό υλικό χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση του φέροντος οργανισμού των κατασκευών (τοιχών, πατωμάτων και στεγών), για τη διαμόρφωση εσωτερικών και εξωτερικών στοιχείων επικάλυψης (σανιδώματα τοίχων, δαπέδων, οροφών). Πολλές φορές, τα δομικά στοιχεία από ξύλο παρουσιάζουν μορφή ανόμοια, ως φυσικό υλικό που χρησιμοποιούνται με μερική μόνο επεξεργασία. Σε περιπτώσεις παλαιότερων κατασκευών, η ξυλεία, **είτε φυσική στρογγυλή ξυλεία** (κυκλικές διατομές με μόνη επεξεργασία την αποφλοίωση του φλοιού), είτε **πελεκητή φυσική ξυλεία** (χονδροειδής διαμόρφωση διατομών τετραγωνικών ή ορθογώνιων), είχε πολύ μικρό βαθμό επεξεργασίας, ο οποίος επιβαλλόταν από την τεχνολογία της εποχής και την ανάγκη οικονομίας υλικού και εργασίας. Παράλληλα, το μη ομοιόμορφο αισθητικό και μορφολογικό αποτέλεσμα, ήταν αποδεκτό για πολλές κατηγορίες κτηρίων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, κύριο μέλημα είναι πρωταρχικά να εξασφαλίζονται οι δομικές και κατασκευαστικές παράμετροι και έπειτα, αν απαιτείται, να ικανοποιούνται και οι μορφολογικές και αισθητικές παράμετροι. Η πολυμορφία και οι παραλλαγές στα σχήματα και τις διαστάσεις στις παραπάνω περιπτώσεις είναι τυχαίες, αλλά εμπίπτουν κάθε φορά εντός των ελάχιστων και μέγιστων απαιτούμενων ορίων, ανάλογα με την περίπτωση, κατασκευαστικών μεγεθών, για παράδειγμα μήκους, διαστάσεων και τύπων διατομών.

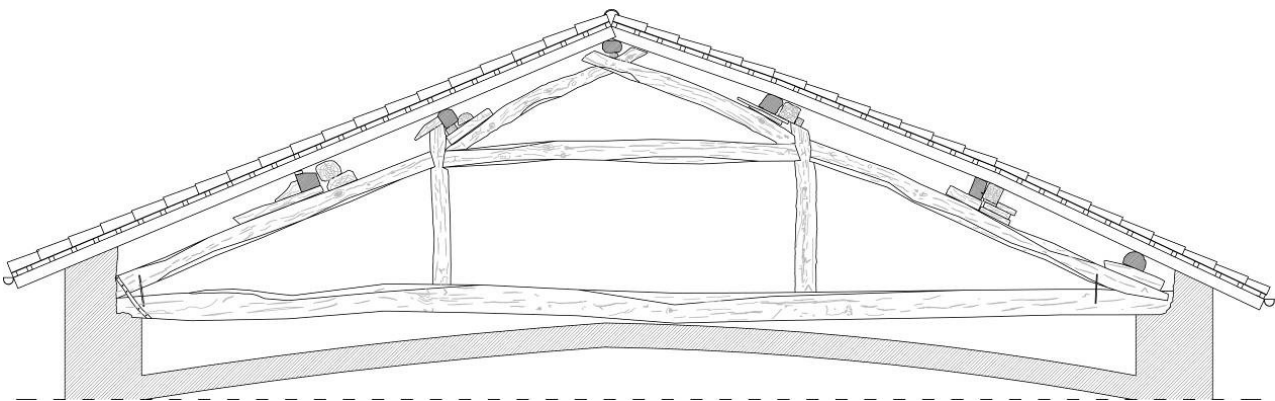
- Στο παράδειγμα φέροντος οργανισμού στέγης από ξυλεία ιστορικού κτίσματος, διακρίνεται ότι οι διατομές των ξύλινων στοιχείων δεν είναι τυποποιημένες και λαμβάνουν διαφορετικές διαστάσεις, ακόμα και για στοιχεία ομοειδών τύπων. Στην Εικόνα 4\_11 απεικονίζονται φωτογραφίες από την κατασκευή της ξύλινης στέγης του κυρίως ναού της **Βασιλικής του San Michele** στην **Pavia** (κατασκευή στέγης 1488-91 μ.Χ.)<sup>235</sup>. Η στέγη αποτελείται από 7 διαφορετικού τύπου ξύλινα ζευκτά με τα δευτερεύοντα στοιχεία της στέγης να είναι επίσης από ξύλο. Όπως φαίνεται από τις φωτογραφίες και το σχέδιο όψης του ζευκτού νο. 3 (Εικόνα 4\_12), η ξυλεία δεν είναι επεξεργασμένη επιμελώς και οι διατομές της είναι έντονα μεταβαλλόμενες σε σχήμα και διαστάσεις (π.χ. ελκυστήρας και ορθοστάτες ζευκτού νο. 3, αμείβοντες ζευκτού νο. 1).

235 Emanuele Zamperini, 'The Timber Roof of the Central Nave in the Basilica of San Michele in Pavia' (SAHC2014 – 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Mexico city, 2014), [https://www.academia.edu/9176141/The\\_timber\\_roof\\_of\\_the\\_central\\_nave\\_in\\_the\\_Basilica\\_of\\_San\\_Michele\\_in\\_Pavia](https://www.academia.edu/9176141/The_timber_roof_of_the_central_nave_in_the_Basilica_of_San_Michele_in_Pavia).



Εικόνα 4\_11: Φωτογραφίες εσωτερικού της κατασκευής της ξύλινης στέγης του κυρίως ναού της Βασιλικής του San Michele στην Pavia. Ζευκτό νο.3 (αριστερά), Ζευκτό νο.1 (δεξιά). Πηγή: Emanuele Zamperini, 'The Timber Roof of the Central Nave in the Basilica of San Michele in Pavia' (SAHC2014 – 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Mexico city, 2014),

[https://www.academia.edu/9176141/The\\_timber\\_roof\\_of\\_the\\_central\\_nave\\_in\\_the\\_Basilica\\_of\\_San\\_Michele\\_in\\_Pavia](https://www.academia.edu/9176141/The_timber_roof_of_the_central_nave_in_the_Basilica_of_San_Michele_in_Pavia), Φωτογραφίες: Emanuele Zamperini., χρήση κατόπιν αδείας.



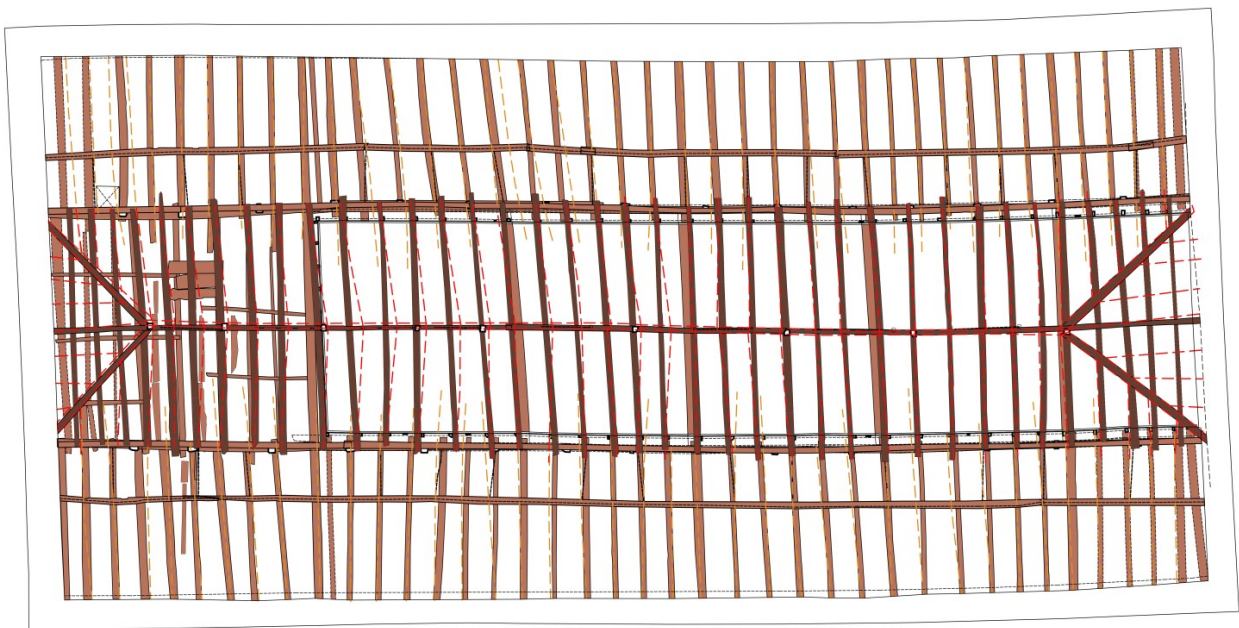
Εικόνα 4\_12: Σχέδιο ζευκτού νο.3 κατασκευής της ξύλινης στέγης του κυρίως ναού της Βασιλικής του San Michele στην Pavia. Πηγή: Emanuele Zamperini, 'The Timber Roof of the Central Nave in the Basilica of San Michele in Pavia' (SAHC2014 – 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Mexico city, 2014), [https://www.academia.edu/9176141/The\\_timber\\_roof\\_of\\_the\\_central\\_nave\\_in\\_the\\_Basilica\\_of\\_San\\_Michele\\_in\\_Pavia](https://www.academia.edu/9176141/The_timber_roof_of_the_central_nave_in_the_Basilica_of_San_Michele_in_Pavia), Survey by Giorgio Aivazopoulos, Stefania Bertagnolli, Federica Lana, Santo Occhiuzzi, Teresa Oddi and Antonella Semeraro, under the supervision of the author, χρήση κατόπιν αδείας.

Καθώς το κύριο μέλημα στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η δομική επάρκεια της κατασκευής, και όπως στις περισσότερες παλαιότερες αφανείς κατασκευές (μη εμφανής στέγη), δεν υπάρχει ιδιαίτερος λόγος για επιμελημένη επεξεργασία των αφανών στοιχείων τους. Οι διατομές του κάθε μεμονωμένου ξύλινου στοιχείου μεταβάλλονται σε διαφορετικό βαθμό τυχαία και με φυσικό τρόπο κατά το μήκος του. Ακόμα και τα ομοειδή στοιχεία είναι διαφορετικά (π.χ. οι δύο αμείβοντες), με διαστάσεις που αυξομειώνονται **εντός συγκεκριμένων ορίων**, τέτοιων όμως που καθιστούν τα διάφορα μεγέθη επαρκή για την κατασκευαστική και δομική τους επάρκεια και λειτουργία.

- Στη στέγη του **Ιερού Ναού Αγίας Παρασκευής στο Παλαιοσέλλι Κόνιτσας** (1864 μ.Χ.) η γενική κάτοψη της στέγης φαίνεται στην Εικόνα 4\_13 όπου παρατηρείται: **a.** η διαφοροποίηση στα

πλάτη των δοκών οροφής (b),  $\beta$ , η κατά προσέγγιση διάταξή τους σε περίπου ίσες μεταξύ τους αποστάσεις σε κάτοψη και γ. οι παραμορφώσεις που έχουν δημιουργηθεί στο φέροντα οργανισμό της στέγης λόγω της παθολογίας της κατασκευής.

Οι διατομές των δοκών οροφής για το κάτω τμήμα της στέγης στο νότιο κλίτος είναι κατά προσέγγιση αυτές που απεικονίζονται στη συνέχεια (Πίνακας 4\_1). Οι διαστάσεις για το (b) κυμαίνονται σε εύρος από ~0,09-0,21m με **μέσο όρο** 0,13m και **τυπική απόκλιση** 0,03m, οι διαστάσεις για το (h) κυμαίνονται σε εύρος από ~0,04-0,17m με **μέσο όρο** 0,14m και **τυπική απόκλιση** 0,02m. Υπάρχουν δηλαδή ελάχιστα και μέγιστα όρια τόσο για το (b) όσο και για το (h) εντός των οποίων κυμαίνονται **τυχαία** οι διαστάσεις των δοκών. Η τυπική απόκλιση είναι μικρή τόσο στο (b) όσο και στο (h), γεγονός που σημαίνει ότι οι τιμές των διατομών συγκεντρώνονται κοντά στους μέσους όρους των (b) και (h) αντίστοιχα.



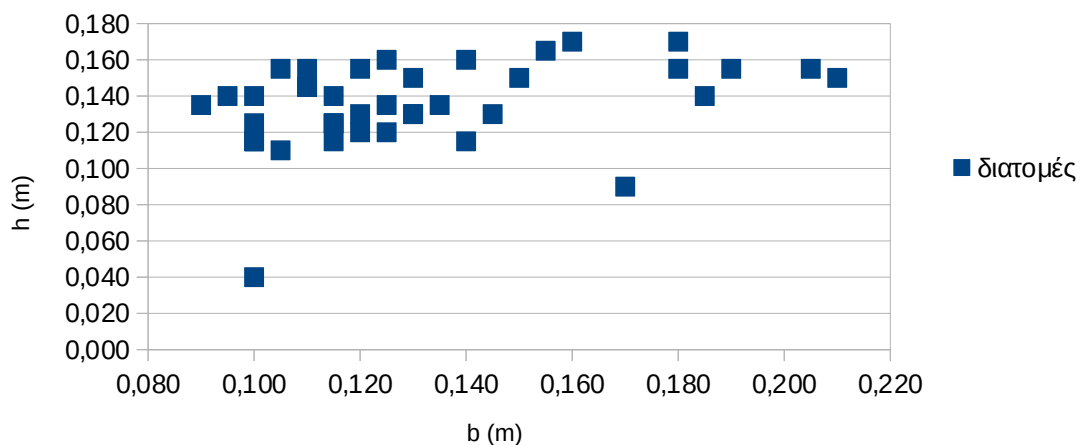
Εικόνα 4\_13: Γενικό σχέδιο κάτοψης στέγης Ιερού Ναού Αγίας Παρασκευής στο Παλαιосέλλι Κόνιτσας. Πηγή: Τ. Κουιμιτζόγλου.

I.N. Αγ. Παρασκευής στο Παλαιοσέλλι Κόνιτσας											
Διατομές κατά προσέγγιση δοκών οροφής Νότιου κλίτους στέγης											
A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Δοκοί οροφής (h)	0,115	0,155	0,130	0,155	0,155	0,120	0,170	0,130	0,160	0,040	m
Δοκοί οροφής:(b)	0,140	0,180	0,145	0,190	0,190	0,125	0,180	0,130	0,125	0,100	m
A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Δοκοί οροφής (h)	0,140	0,130	0,120	0,165	0,115	0,135	0,150	0,155	0,160	0,145	m
Δοκοί οροφής:(b)	0,115	0,120	0,120	0,155	0,115	0,090	0,150	0,105	0,140	0,110	m
A/A	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Δοκοί οροφής (h)	0,150	0,135	0,150	0,115	0,125	0,135	0,130	0,140	0,170	0,140	m
Δοκοί οροφής:(b)	0,130	0,125	0,210	0,100	0,115	0,135	0,130	0,950	0,160	0,100	m
A/A	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
Δοκοί οροφής (h)	0,110	0,125	0,145	0,155	0,155	0,155	0,125	0,115	0,090	0,140	m
Δοκοί οροφής:(b)	0,105	0,100	0,110	0,120	0,205	0,110	0,115	0,100	0,170	0,185	m
min (h):		0,04		m		μέσος όρος (h):		0,14		m	
max (h):		0,17		m		μέσος όρος (b):		0,13		m	
min (b):		0,09		m		τυπική απόκλιση (h):		0,02		m	
max (b):		0,21		m		τυπική απόκλιση (b):		0,03		m	

Πίνακας 4\_1: I.N. Αγ. Παρασκευής στο Παλαιοσέλλι Κόνιτσας. Διατομές κατά προσέγγιση δοκών οροφής Νότιου Κλίτους στέγης. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

### I.N Αγίας Παρασκευής - Παλαιοσέλλι Κόνιτσας

Διάγραμμα διαστάσεων διατομών δοκών οροφής - Νότιο κλίτος



Εικόνα 4\_14: Γράμμα διαστάσεων διατομών δοκών οροφής Νότιου κλίτους στέγης. Ιερός Ναός Αγίας Παρασκευής στο Παλαιοσέλλι Κόνιτσας. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

- Στην Ιαπωνική αρχιτεκτονική υπάρχει επίσης η έννοια της ενσωμάτωσης στην κατασκευή ξύλινων στοιχείων με τη φυσική τους, όσο το δυνατόν ακατέργαστη μορφή, καθώς θεωρείται ότι διατηρείται έτσι η ποιότητα, το πνεύμα της θεότητας (kami) και της φύσης μέσα τους. Αυτά τα ανομοιογενή ξύλα προσαρμόζονται και ενσωματώνονται στο δομικό σύστημα της κατασκευής. Παραδείγματα αποτελούν δοκοί ή υποστυλώματα σε κατασκευές κτισμάτων με ξυλεία στη φυσική της μορφή, με αποτέλεσμα να προκύπτει ένα σύνθετο δομικό σύστημα το οποίο συνδυάζει διατάξεις σε κανάβους τυπικών στοιχείων με συγκεκριμένες διαστάσεις, διατομές και μορφές που προκύπτουν



Εικόνα 4\_15: Κατασκευή στέγης ιαπωνικής κατοικίας με παραδοσιακό τρόπο όπου στην κατασκευή ενσωματώνονται ξύλινα στοιχεία στη φυσική τους σχεδόν μορφή. Πηγή: *Japanese traditional style farm house / 旧土肥* μορφή. Πηγή: *Girder / 梁(はり)*, 家住宅(きゅうどいけじゅうたく) [https://www.flickr.com/photos/tanaka\\_juuyoh/6142380486/in/album-72157605568359952/](https://www.flickr.com/photos/tanaka_juuyoh/6142380486/in/album-72157605568359952/), εικόνα του/της: TANAKA Juuyoh (田中十洋), άδεια: CC BY 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>



Εικόνα 4\_16: Κατασκευή στέγης ιαπωνικής κατοικίας με παραδοσιακό τρόπο όπου στην κατασκευή ενσωματώνονται ξύλινα στοιχεία στη φυσική τους σχεδόν μορφή. Πηγή: *Girder / 梁(はり)*, [https://www.flickr.com/photos/tanaka\\_juuyoh/8076572660/in/album-72157605568359952/](https://www.flickr.com/photos/tanaka_juuyoh/8076572660/in/album-72157605568359952/), εικόνα του/της: TANAKA Juuyoh (田中十洋), άδεια: CC BY 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>

έπειτα από επεξεργασία ταυτόχρονα με ακατέργαστα δομικά στοιχεία σχεδόν στην **τυχαία φυσική τους μορφή**. Παραδείγματα προσαρμογής δοκών από ξυλεία με έντονη φυσική καμπυλότητα στο συμβατικό δομικό σύστημα ιαπωνικής παραδοσιακής κατοικίας παρουσιάζονται στην Εικόνα 4\_15 και στην Εικόνα 4\_16. Η προσέγγιση αυτή δείχνει ότι ο συγκεκριμένος συνδυασμός κατεργασμένων και ακατέργαστων δομικών στοιχείων όχι μόνο είναι εφικτός, αλλά και σε κάποιες περιπτώσεις είναι και επιθυμητός για διάφορους λόγους (κατασκευαστικούς, οικονομικούς αλλά και αισθητικούς ή συμβολικούς).

- Άλλο παρόμοιο παράδειγμα είναι οι κατασκευές κτισμάτων από **κορμούς δέντρων**. Σε αυτές τις κατασκευές, ο φέρων οργανισμός του κτίσματος ταυτίζεται με το εξωτερικό περίβλημα και αποτελείται από κορμούς δέντρων διατεταγμένους οριζόντια καθ' ύψος, η κύρια σύνδεση των οποίων πραγματοποιείται με τη μορφή μεγάλων εντορμιών στα άκρα των κορμών. Στην πιο ακατέργαστη μορφή τους οι κορμοί διατηρούν το γενικό κυλινδρικό τους σχήμα και η επεξεργασία που δέχονται είναι η αποφλοιώση, οι εντορμίες σύνδεσης στις γωνίες και η ελαφριά διαπλάτυνση στο άνω και κάτω μέρος τους για καλύτερη έδραση των γεινιαζόντων στοιχείων. Σε άλλες περιπτώσεις όπου γίνεται περαιτέρω επεξεργασία, οι κορμοί αποκτούν ορθογωνική διατομή, έτσι ώστε η έδρασή τους να είναι καλύτερη και να σχηματίζονται πιο ομοιόμορφες όψεις και ισοπαχή τοιχώματα. Στην Εικόνα 4\_17 διακρίνεται κτίσμα από κορμούς. Διακρίνεται ότι οι κορμοί που σχηματίζουν τα κατακόρυφα εξωτερικά τοιχώματα του κτίσματος δεν έχουν ίδια διάμετρο, καθώς παρατηρούνται τόσο μικρότεροι όσο και μεγαλύτεροι κορμοί να εναλλάσσονται καθ' ύψος. Οι διαστάσεις των διαμέτρων των κορμών είναι προφανώς τυχαίες και κυμαίνονται εντός κάποιων ελάχιστων και μέγιστων ορίων, που προκύπτουν κυρίως από στατικές και οικοδομικές απαιτήσεις. Στο εγχειρίδιο του Υπουργείου Γεωργίας των ΗΠΑ για την οικοδόμηση με κορμούς το 1944,

προτείνεται η χρήση κορμών με διαμέτρους από 10 έως 12 ίντσες οι οποίοι είναι σημαντικό να είναι ευθείς και ομοιόμορφοι <sup>236</sup>.

- Στην περίπτωση του παραδείγματος των **1000 πυλών Senbon Torii** του μονοπατιού που οδηγεί στο ιερό **Fushimi Inari** υπάρχουν δύο διαδρομές από ξύλινες πύλες οι οποίες είναι γραμμικά διατεταγμένες σε δύο παράλληλα μονοπάτια. Η κάθε πύλη είναι κατασκευασμένη από δύο κυλινδρικά υποστυλώματα που συνδέονται με μία ή δύο οριζόντιες δοκούς και έχουν προστατευτική στέψη - επικάλυψη. Παρατηρείται ότι ενώ οι πύλες ακολουθούν όλες την ίδια τυπολογία (2 υποστυλώματα και μια οριζόντια συνδετήρια δοκός), δεν έχουν ακριβώς τις ίδιες διαστάσεις και υπάρχουν **τυχαίες** διαφοροποιήσεις εντός ορίων στις διαμέτρους των κατακόρυφων κυλινδρικών στοιχείων, στις εδράσεις τους και στο ύψος της κάθε πύλης. Κάθε πύλη είναι στην πραγματικότητα ξεχωριστή και αποτελεί μοναδική παραλλαγή της τυπολογίας. Η διάταξη τους είναι γραμμική και η τοποθέτηση των διαφορετικών παραλλαγών ή η αντικατάσταση φθαρμένων πυλών συντελεί στην γραμμική τυχαία παράθεση των παραλλαγών της τυπολογίας. Οι παραλλαγές των πυλών δίνουν μια αίσθηση εξέλιξης και διαφοροποίησης της πορείας που δεν θα υπήρχε αν όλες οι πύλες ήταν εντελώς όμοιες μεταξύ τους.



Εικόνα 4\_17: Κτίσμα υπό κατασκευή με τη χρήση κορμών δένδρων στην Αμερική. Πηγή: [Valley Forge cabin.jpg](#), A replica of a cabin at Valley Forge in which soldiers of George Washington's army would have stayed during the winter of 1777-1778, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Valley\\_Forge\\_cabin.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Valley_Forge_cabin.jpg), εικόνα του/της: [Rdsmith4](#), άδεια: CC BY-SA 2.5, [Creative Commons Attribution-Share Alike 2.5 Generic license](#).



Εικόνα 4\_18: 1000 πύλες - Sendon Torii Fumishi Inari Taisha, Kyoto. Πηγή: [The incredible avenue of 10,00 torii gates at the Fushimi-inari shrine in Kyoto must be one of the most fascinating sites in Japan. Each gate has been donated and inscribed by a business or individual giving thanks for their prosperity](#), <https://www.flickr.com/photos/anguskirk/18434783241>, εικόνα του/της: [Anguskirk](#), άδεια: CC BY-NC-ND 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/>

236 Clyde P. Fickes και Ellis Groben, *Building with logs*, Structures section (Washington, D.C.: United States Department of Agriculture, 1944), 2, [https://www.fs.fed.us/eng/facilities/documents/build\\_with\\_logs.pdf](https://www.fs.fed.us/eng/facilities/documents/build_with_logs.pdf).

- Ακόμα δύο σύγχρονες εφαρμογές της χρήσης του ξύλου στην κατασκευή με στοιχεία τυχαιότητας, αποτελούν δύο έργα υλοποίησης σπουδαστικών εργασιών της AA – Architectural Association.
- Το έργο **Cocoon** (2011)<sup>237 238</sup>, είναι ένας προσωρινός χώρος διαμονής / δενδρόσπιτο κατασκευασμένος από plywood. Το κουκούλι προκατασκευάστηκε και τοποθετήθηκε στο δάσος αναρτώμενο από δέντρα. Η κατασκευή αποτελείται από ένα τοπικό δένδρο κέδρου και 4 φύλλα ανεπεξέργαστου plywood τα οποία κομμένα σε λωρίδες διαμορφώνουν χώρο που ορίζεται από καμπύλες επιφάνειες και έχει μορφή κουκουλιού. Η τοποθέτηση των λωρίδων ακολουθεί **τυχαία** διάταξη η οποία **προσαρμόζεται** στο όριο και γενικό επιθυμητό σχήμα και προσανατολισμό του κουκουλιού. Το περίβλημα της κατασκευής αποτελεί και τον φέροντα οργανισμό της.
- Στην κατασκευή του έργου ενός ξύλινου αχυρώνα **Wood Chip Barn** (2016)<sup>239 240</sup>, έγινε χρήση φυσικής ξυλείας σε σχεδόν ανεπεξέργαστη μορφή για μέρος του φέροντος οργανισμού της στέγης. **25 διχαλωτοί κορμοί** (fork) ακανόνιστης μορφής συλλέχθηκαν από το δάσος, καταγράφηκαν ψηφιακά σε τρεις διαστάσεις στο εργαστήριο και στη συνέχεια μέσω ψηφιακού αλγορίθμου βρέθηκε η βέλτιστη θέση τους στην κατασκευή με βάση το επιθυμητό συνολικό σχεδιασμό. Οι 25 ξύλινοι διχαλωτοί κορμοί χρησιμοποιήθηκαν για να σχηματίσουν το κεντρικό φέρον σύνθετο τόξο της κατασκευής της στέγης. Η βελτιστοποίηση της διάταξης υλοποιήθηκε κατασκευαστικά μέσω της διαμόρφωσης των συναρμογών των 25 στελεχών από ρομποτικό βραχίονα CNC, ενώ παράλληλα διατηρήθηκε η τυχαία διαφοροποίηση των πρωτογενών μορφών τους. Σε αυτό το παράδειγμα κατασκευής, η τυχαιότητα των μορφών της φυσικής ξυλείας συνδυάζεται με την υπόλοιπη συμβατική κατασκευή και προκύπτει ένα μικτό κατασκευαστικό σύστημα κανονικών και ακανόνιστων / τυχαίας-φυσικής μορφής στοιχείων τα οποία συνεργάζονται τόσο δομικά όσο και μορφολογικά.

### 4.1.3 Λίθοι

Ο λίθος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μη φέρον φυσικό υλικό στην κατασκευή μη φερουσών λιθοδομών, δαπέδων και επικαλύψεων στεγών. Και στις τρεις περιπτώσεις, οι λίθοι τοποθετούνται σε θέση έπειτα από καθόλου, μερική ή πλήρη λάξευση, με ή χωρίς συνδετικό κονίαμα. Σε όλες τις περιπτώσεις, εκτός από αυτές όπου υπάρχει πλήρης λάξευση του δόμου, εμφανίζεται η παράμετρος της τυχαιότητας στα γεωμετρικά μεγέθη των ομοειδών στοιχείων και τη διάταξη τους κατά την τοποθέτηση.

<sup>237</sup> 'Cocoon / AA Design + Make', ημερομηνία πρόσβασης 6 Ιούλιος 2024,

<https://designandmake.aaschool.ac.uk/project/cocoon/>.

<sup>238</sup> 'The Cocoon by AA Design & Make', Dezeen, 25 Ιούνιος 2013, <https://www.dezeen.com/2013/06/25/the-cocoon-hooke-park-big-shed-by-aa-design-make/>.

<sup>239</sup> 'Wood Chip Barn / AA Design + Make', ημερομηνία πρόσβασης 6 Μάιος 2024,

<https://designandmake.aaschool.ac.uk/project/wood-chip-barn/>.

<sup>240</sup> 'AA Design & Make Students Build Woodland Barn with Robot', Dezeen, 23 Φεβρουάριος 2016,

<https://www.dezeen.com/2016/02/23/architectural-association-students-london-robotically-fabricated-barn-dorset-woodland/>.



- Στις περιπτώσεις των **ξερολιθιών**, οι λίθοι τοποθετούνται ο ένας πάνω στον άλλον χωρίς κονίαμα, δομούνται και σχηματίζουν την κατασκευή λόγω του βάρους τους και του (ενίοτε πεπλατυσμένου) σχήματός τους. Οι λίθοι σε αυτή την περίπτωση είναι ακατέργαστοι και γι' αυτό παρουσιάζουν έντονες μεταξύ τους διαφοροποιήσεις στο σχήμα και το μέγεθος. Για την κατασκευή επιλέγονται τυχαία μέλη, εντός αποδεκτών ελάχιστων και μέγιστων ορίων διαστάσεων, τα οποία έχουν σχέση κυρίως με τη δυνατότητα προμήθειας υλικού συγκεκριμένων διαστάσεων από κοντινές περιοχές. Πέρα από το **σχήμα** και το **μέγεθος** του κάθε στοιχείου, η **διάταξη** είναι επίσης ακανόνιστη, καθώς η τοποθέτηση γίνεται σχεδόν με **τυχαίο** τρόπο. Η κατασκευή αυτή παρουσιάζει μεγάλο βαθμό τυχειότητας στα μοναδιαία στοιχεία που την αποτελούν.



Εικόνα 4\_19: Ξερολιθιά. Πηγή: 2013 Dry stone walls by Carlton 02.jpg, Dry stone walls by Carlton, North Yorkshire, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2013\\_Dry\\_stone\\_walls\\_by\\_Carlton\\_02.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2013_Dry_stone_walls_by_Carlton_02.jpg), εικόνα του/της: Kreuzschnabel, άδεια: CC BY-SA 3.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/).

Εικόνα 4\_20: Ξερολιθιά, Dry stone wall construction by Bob Harvey. Πηγή: Dry stone wall construction - [geograph.org.uk](http://geograph.org.uk) - 4990661.jpg, Dry stone wall construction, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dry\\_stone\\_wall\\_construction\\_-\\_geograph.org.uk\\_-\\_4990661.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dry_stone_wall_construction_-_geograph.org.uk_-_4990661.jpg), εικόνα του/της: Bob Harvey, άδεια: CC BY-SA 2.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 2.0 Generic license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/).

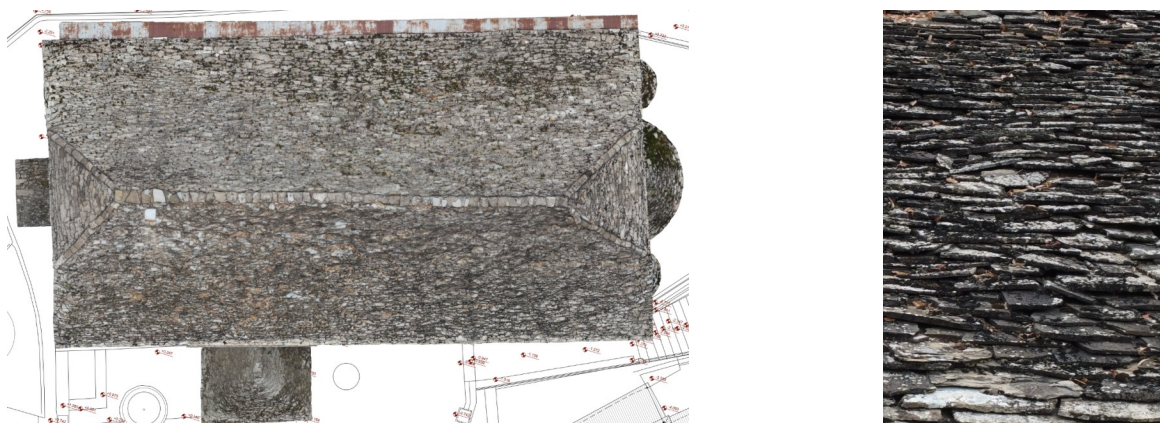
Εικόνα 4\_21: Ξερολιθιά στο Γεράκι Λακωνίας. Πηγή: Ψηφιακό αποθετήριο μαθήματος Αρχιτεκτονικής ανάλυσης παραδοσιακών κτηρίων και συνόλων (5A) Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ. <http://5a.arch.ntua.gr/project/4258/4898>, © Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ.

Η οργάνωση που διακρίνεται εντοπίζεται στις γενικές διαστάσεις του όγκου της κατασκευής, πάχος και ύψος, το οποίο είναι και το όριο εντός του οποίου εξελίσσεται η τυχειότητα της διάταξης, των μορφών και των μεγεθών των μεμονωμένων στοιχείων. Στα παραδείγματα στην Εικόνα 4\_19, Εικόνα 4\_20 και Εικόνα 4\_21 παρουσιάζονται διαφορετικοί τύποι ξερολιθιών. Σε κάθε τύπο υπάρχουν έντονες διαφοροποιήσεις στα μεγέθη και τα σχήματα των λίθων που τις συνιστούν. Στο πρώτο παράδειγμα η διαφοροποίηση κάθε λίθου που χρησιμοποιείται είναι και χρωματική, ως ακόμα μια παράμετρος τυχειότητας που ενσωματώνεται στην κατασκευή εκτός από το μέγεθος και το σχήμα. Στις περιπτώσεις των ξερολιθιών φαίνεται ότι μια πρακτική ανάγκη που ενσωματώνει την τυχειότητα κατέληξε σε συγκεκριμένη τυπολογία με σημαντική αρχιτεκτονική αξία παρόλο που πρόκειται για απλές αγροτικές κατασκευές.

- Λίθοι χρησιμοποιούνται επίσης σε επικαλύψεις στεγών (Εικόνα 4\_22), όπου γίνεται τοποθέτηση πλακών **περίπου ίδιων διαστάσεων και παρόμοιου πάχους** έπειτα από **χονδροειδή διαμόρφωση**, σε διάταξη κατάλληλη έτσι ώστε να μην επιτρέπεται εισροή υγρασίας στο εσωτερικό και να γίνεται σωστή στερέωση πάνω στο πέτωμα της στέγης. Στις περιπτώσεις των μη

τυποποιημένων επικαλύψεων, τα επιμέρους στοιχεία διαφοροποιούνται σε διαστάσεις με τυχαίο τρόπο εντός τυχαίων ορίων και γίνεται προσπάθεια να διατηρείται σταθερή η πυκνότητά τους στην επιφάνεια στρώσης για λόγους επάρκειας της στεγάνωσης, ομοιομορφίας, οικονομίας υλικού και διαμοιρασμού των φορτίων στον υποκείμενο φέροντα οργανισμό. Στην Εικόνα 4\_22 φαίνεται ένα τέτοιο παράδειγμα επικάλυψης από σχιστόπλακες σε κάτοψη και σε όψη.

- Λίθοι χρησιμοποιούνται τέλος για τη διάστρωση δαπέδων σε διάφορες διατάξεις και μεγέθη με μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό επεξεργασίας. Πολλές φορές η επεξεργασία τους είναι αδρή και η τοποθέτησή τους γίνεται χωρίς μεγάλη επιμέλεια, οπότε προκύπτουν επιφάνειες που παρουσιάζουν μη κανονικότητα και τυχαιότητα ως προς τις διαστάσεις αλλά και τη διάταξη.



Εικόνα 4\_22: Αριστερά: Ψηφιακή καταγραφή κάτοψης στέγης από σχιστόπλακες. Ιερός Ναός Αγ. Παρασκευής στο Παλαιοσέλλι Κόνιτσας. Δεξιά: Φωτογραφία όψης στέγης σε μεγέθυνση. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Ο λίθος ως ένα από τα αρχαιότερα δομικά υλικά χρησιμοποιείται συστηματικά για χιλιετίες ως κύριο φέρον δομικό υλικό στις των τοιχοποιίες.

- Στην περίπτωση των **αργολιθοδομών** (Εικόνα 4\_23, Εικόνα 4\_24, Εικόνα 4\_25), οι λίθοι χρησιμοποιούνται χωρίς καθόλου είτε με πολύ μικρή επεξεργασία. Προκειμένου η κατασκευή να μπορέσει να αναπτυχθεί σε ύψος και να δεχθεί φορτία, προστίθεται, αντίθετα με την περίπτωση των ξερολιθιών, συνδετικό κονίαμα. Το κονίαμα διευκολύνει τη συναρμογή και στερέωση των διαφορετικών λίθων μεταξύ τους, καθώς γεμίζει συνδετικούς αρμούς ανάμεσα στις μορφές των λίθων που έχουν ακανόνιστη και διαφορετική γεωμετρία, ενώ παράλληλα βοηθάει στην καλύτερη μόνωση και προστασία των εσωτερικών χώρων. Η παράμετρος της τυχαιότητας στην αργολιθοδομή παρουσιάζεται όσον αφορά στα μεγέθη, στα σχήματα και ακόμη και στα χρώματα των λίθων και του συνδετικού κονιάματος. Το κονίαμα λειτουργεί ως εργαλείο μείωσης του βαθμού της τυχαιότητας της – μη κανονικότητας της κατασκευής, καθώς εξομαλύνει και απαλείφει κατασκευαστικά τις διαφοροποιήσεις των μεμονωμένων λίθων και συντελεί στη δημιουργία πιο συνεκτικής δομής. Όπως και στην περίπτωση των ξερολιθιών, ακολουθείται το όριο μιας γενικής κυρίαρχης γεωμετρίας της κατασκευής, μέσα στο οποίο αναπτύσσεται στο χώρο η διάταξη των

λίθων της λιθοδομής. Στην περίπτωση αυτή, η τυχαιότητα εμφανίζεται και στις μορφές που λαμβάνει το κονίαμα, καθώς αυτό προσαρμόζεται στην τυχαιά μορφή των λίθων και γεμίζει τα μεταξύ τους κενά, ως υλικό πλήρωσης. Τέλος, το «πρόσωπο» ενός τοίχου από εμφανή αργολιθοδομή δεν είναι λείο και επίπεδο, καθώς υπάρχουν εξάρσεις και εισχωρήσεις, εξαιτίας του αναγλύφου των λίθων και του εύρους και βάθους των αρμών και του τρόπου του αρμολογήματος. Η τυχαιότητα του υλικού και της διάταξης αναδεικνύεται στη συνολική υφή της λίθινης κατασκευής.



*Εικόνα 4\_23: Αργολιθοδομή σε παραδοσιακή κατοικία στην Καρύταινα, 2019. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου*

*Εικόνα 4\_24: Αργολιθοδομή σε αγροικία με αλώνι. Τίτλος: Αγροικία με αλώνι. Πηγή: [https://www.searchculture.gr/aggregator/edm/Dig\\_TEE/000170-18340](https://www.searchculture.gr/aggregator/edm/Dig_TEE/000170-18340), άδεια: CC BY-NC 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.*

*Εικόνα 4\_25: Αργολιθοδομή στο Κάτω Σούλι, 2002. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου*



*Εικόνα 4\_26: Ημιλαξευτή λιθοδομή στο τέμενος Καλούτσιανης στα Ιωάννινα, 2018. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου*

*Εικόνα 4\_27: Ημιλαξευτοί λίθοι από το κεντρικό τόξο της γέφυρας της Πλάκας στα Τζουμέρκα, 2018. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου*

*Εικόνα 4\_28: Λαξευτή λιθοδομή στο Ι.Ν. Φανερωμένης στη Ζάκυνθο, 2018. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου*

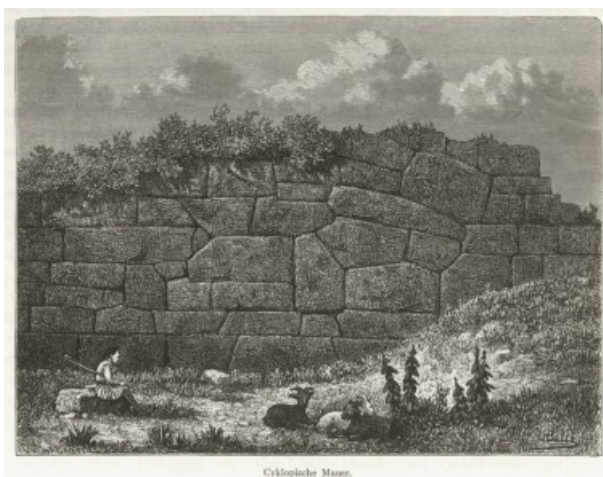
Το πλεονέκτημα αυτού του τρόπου δόμησης είναι ότι τα μεμονωμένα δομικά στοιχεία των λίθων χρειάζονται ελάχιστη ή και καμία επεξεργασία. Η χρήση της φυσικής, ή σχεδόν φυσικής μορφής του υλικού (δηλαδή χωρίς λάξευση) εξασφαλίζει ταχύτητα και οικονομία στην κατασκευή και το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζει συγκεκριμένη και χαρακτηριστική μορφολογία και χαρακτηριστικά. Συχνά όμως, η αργολιθοδομή είναι μη εμφανής, καλυπτόμενη από επίχρισμα είτε στην εσωτερική, είτε και στις δύο παρειές. Η τυχαιότητα των μορφών των χρησιμοποιούμενων λίθων επιτρέπει τη γρήγορη επιλογή και τοποθέτηση λίθου στην επιλεγείσα θέση χωρίς να υπάρχει ανάγκη για τέλεια συναρμογή και επιμελημένη δόμηση, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της ημιλαξευτής ή λαξευτής λιθοδομής, όπου η τυχαιότητα που παρουσιάζουν οι μορφές των δομικών στοιχείων και των αρμών μειώνεται δραστικά.

- Στην **ημιλαξευτή** λιθοδομή οι λίθοι σχηματοποιούνται σε σχετικά ορθογωνικά / παραλληλεπίπεδα σχήματα και εμφανίζουν συνολικά πιο ομοιογενές μέτωπο. Ενώ ο κάθε ένας από τους λίθους μπορεί να είναι ελαφρώς διαφορετικός σε διαστάσεις, δεν παρατηρείται η εξαιρετική ανομοιογένεια του προηγούμενου τύπου.

- Στη **λαξευτή** λιθοδομή η ακανόνιστη μορφή και οι διαστάσεις των αρμών μειώνονται πολύ περισσότερο, σχεδόν εξαλείφονται, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει συνδετικό κονίαμα, και σχηματίζεται ένα σχετικά ομοιόμορφο μέτωπο από ομοειδείς λίθους χωρίς εξάρσεις και διαφοροποιήσεις στο σχήμα και την επεξεργασία. Το μέγεθος, ακόμα και στην ίδια δομική ενότητα ενός τοίχου μπορεί να διαφέρει αναλόγως την περίπτωση (π.χ. λίθοι με διαφορετικές στρώσεις καθ' ύψος). Η τυχαιότητα και διαφορετικότητα σε αυτή την περίπτωση επιδιώκεται να περιοριστεί συνειδητά για κατασκευαστικούς και μορφολογικούς λόγους, η οποία όμως εξακολουθεί να υφίσταται διότι ο κάθε λίθος είναι κάπως διαφορετικός από τους υπόλοιπους, πλέον με τις μεταξύ τους διαφορές να μειώνονται αισθητά.

Στις περιπτώσεις των ημιλαξευτών και λαξευτών λίθων, ενώ γίνεται προσπάθεια να μειωθούν οι διαφοροποιήσεις του φυσικού – ακατέργαστου υλικού, ενδέχεται να παρουσιαστούν διαφορετικές τεχνοτροπίες κατεργασίας από τους διαφορετικούς τεχνίτες στο ίδιο έργο. Προκειμένου αυτό να μην γίνεται αντιληπτό στο τελικό αποτέλεσμα, γίνεται σε κάποιες περιπτώσεις, σκόπιμη τυχαία διασπορά και μίξη των κατεργασμένων λίθων του κάθε τεχνίτη στις διαδοχικές στρώσεις του έργου ώστε να μην υπάρχουν συγκεντρώσεις λίθων όμοιας τεχνοτροπίας<sup>241</sup>.

- Ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα τυχαιότητας της λιθοδομής στην κατασκευή είναι αυτό των κυκλώπειων κατασκευών (Εικόνα 4\_29). Σε αυτές διαμορφώνεται, έπειτα από επεξεργασία, ένα πρόσωπο της λιθοδομής και οι λίθοι κτίζονται χωρίς να χρησιμοποιείται συνδετικό κονίαμα. Σε κάποια παραδείγματα οι αρμοί συμπληρώνονται με μικρότερους λίθους<sup>242</sup> ή τα όρια των ογκολίθων που πρόκειται να έρθουν σε γεινίαση επεξεργάζονται έτσι ώστε να συναρμόζουν όσο το δυνατόν καλύτερα, αφήνοντας τη μορφή του κυρίως σώματος του λίθου στο φυσικό/τυχαίο της σχήμα.



Εικόνα 4\_29: Τα κυκλώπεια τείχη των Μυκηνών. (ΕΛ), *Cyclopische Mauer.*, SCHWEIGER LERCHENFELD, Amand, (Freiherr von). *Griechenland in Wort und Bild, Eine Schilderung des hellenischen Königreiches*, Λειψία, Heinrich Schmidt & Carl Günther, 1887 / Kettwig, Phaidon, 1992, σελ. 53. Πηγή:

<https://www.searchculture.gr/aggregator/edm/travelogues/000116-39692>, άδεια: CC BY-NC 4.0,

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

241 Θανάσης Πόραβος, *Λιθοδομή στο χτες και στο σήμερα...* (Εκδόσεις Ψύχαλου, 2015), 63.

242 Χαράλαμπος Θ. Μπούρας, *Μαθήματα Ιστορίας της Αρχιτεκτονικής*, τ. Πρώτος (Αθήνα: Συμμετρία, 1999), 109.

## 4.1.4 Πλίνθοι

- Οι ωμόπλινθοι και οι οπτόπλινθοι είναι ένα ακόμα παράδειγμα φυσικού υλικού όπου εμφανίζεται η τυχαιότητα, σε μικρότερο όμως βαθμό από τα προηγούμενα. Οι πλίνθοι ανάλογα με τη σύνθεσή τους και τον τρόπο και βαθμό κατεργασίας τους μπορεί να είναι σχετικά ανόμοιοι ή εντελώς σχηματοποιημένοι και τυποποιημένοι, όπως οι σύγχρονοι οπτόπλινθοι. Οι χειροποίητοι πλίνθοι είναι κατανοητό ότι παρουσιάζουν μικρές μορφολογικές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους (Εικόνα 4\_30) και εμφανίζουν την παράμετρο της τυχαιότητας, παρόλο που γίνεται χρήση καλουπιού για την κατασκευή τους, ώστε να διευκολύνεται η κατασκευή τους και να υπάρχει μια σχετική τυποποίηση στις διαστάσεις τους.

Κατά τη δόμηση, οι διαφοροποιήσεις των πλίνθων δεν έχουν τόσο μεγάλη σημασία, καθώς εξαλείφονται από το μεταξύ τους συνδετικό κονίαμα και οι τελικές επιφάνειες μπορούν να εξομαλυνθούν μετά από εφαρμογή επίστρωσης προστατευτικού στρώματος επιχρίσματος. Η γρήγορη κατασκευή των πλίνθων, σε μεγάλες ποσότητες, χωρίς μεγάλη κατασκευαστική προσπάθεια είναι πιο σημαντική σε αυτή την περίπτωση από την απόλυτη ομοιομορφία των μονάδων. Η τυχαιότητα που προκύπτει στις μορφές των πλίνθων είναι ένα φυσικό επακόλουθο αυτής της επιλογής.



Εικόνα 4\_30: Νέοι ωμόπλινθοι πριν την τοποθέτησή τους.  
 Πηγή: [Mudbricks in Palestine 2011.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mudbricks_in_Palestine_2011.jpg), *New mudbricks in Palestine 2011*,  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mudbricks\\_in\\_Palestine\\_2011.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mudbricks_in_Palestine_2011.jpg), εικόνα του/της: [Whiteghost.ink](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mudbricks_in_Palestine_2011.jpg), άδεια: [CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/), [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/).

Εικόνα 4\_31: Ziggurat της Ur στο Ιράκ, 2007. Πηγή: [Zig from side.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zig_from_side.JPG), *Ziggurat of Ur; side*,  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zig\\_from\\_side.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zig_from_side.JPG)  
 εικόνα του/της: [Kaufingdude](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zig_from_side.JPG), άδεια: [CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/), [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/).



Εικόνα 4\_32: Λεπτομέρεια από την κλίμακα στο Ziggurat της Ur στο Ιράκ, 2014. Πηγή: *At the Ziggurat of Ur - panoramio.jpg*, *At the Ziggurat of Ur*; [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:At\\_the\\_Ziggurat\\_of\\_Ur\\_-\\_panoramio.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:At_the_Ziggurat_of_Ur_-_panoramio.jpg), εικόνα του/της: *Duane Wilkins*, άδεια: CC BY-SA 3.0, *Creative Commons Attribution 3.0 Unported license*.

Εικόνα 4\_33: Ωμόπλινθοι σε υπό κατάρρευση ιστορικό κτίσμα. Πηγή: *T. Κουιμτζόγλου*.

Στο σημείο αυτό μπορεί να γίνει η εξής παρατήρηση: Όσο η κλίμακα είναι πιο μικρή, π.χ. κλίμακα πλίνθου, οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα στη μορφή της κάθε μονάδας είναι περισσότερο διακριτές. Όσο αυξάνεται η κλίμακα στην κατασκευή (μακροσκοπική παρατήρηση), παρατηρείται ομογενοποίηση και εξομάλυνση των τυχαίων διαφοροποιήσεων. Η δόμηση των πλίνθων σύμφωνα με **τα όρια του περιγράμματος του κτίσματος** και η τελική τους επεξεργασία αναιρούν τις διαφορές μεταξύ των μεμονωμένων στοιχείων. Εικόνα 4\_30, καθώς η κατασκευή αντιμετωπίζεται μορφολογικά στο σύνολό της. Σε ακόμα μεγαλύτερη κλίμακα, όπως για παράδειγμα σε αυτή του **Ziggurat της Ur** στο Ιράκ (Εικόνα 4\_31), **η τυχαιότητα και οι διαφοροποιήσεις των μονάδων των πλίνθων που δομούν την κατασκευή, εξαφανίζεται εντελώς συγκριτικά με τη μεγάλη κλίμακα του κτίσματος**. Στην Εικόνα 4\_32 διακρίνονται οι συμπαγείς οπτόπλινθοι που βρίσκονται στην εξωτερική στρώση της κατασκευής (ενώ οι εσωτερικές στρώσεις είναι δομημένες με ωμόπλινθους) διαστάσεων ~30x30x7cm.<sup>243</sup> Επισημαίνεται ότι οι συμπαγείς οπτόπλινθοι παρουσιάζουν μικρότερη τυχαιότητα, ως προς τις διαστάσεις και την εμφάνιση της εξωτερικής τους επιφάνειας, λόγω της μεγαλύτερης επεξεργασίας που προκύπτει κατά τη διαδικασία παραγωγής τους, η οποία στις τελευταίες ιστορικές περιόδους έγινε και βιομηχανική. Κάθε ένας ωμόπλινθος είναι μορφολογικά ξεχωριστός και ελάχιστα διαφορετικός με τυχαίο τρόπο από τους υπόλοιπους, αν και οι διαστάσεις τους είναι περίπου ίδιες και κυμαίνονται εντός των γενικών ορίων του καλουπιού από το οποίο παράχθηκαν. Μόνο η κοντινή παρατήρηση επιτρέπει την διάκριση της τυχαιότητας των επιμέρους μονάδων (Εικόνα 4\_30). Συνεπώς, η τυχαιότητα είναι υπαρκτή και παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις μεταξύ των μονάδων, αλλά λόγω της κλίμακας κατά την οποία αυτή παρουσιάζεται, δεν είναι σημαντική από άποψη φέρουσας ικανότητας. Σημαντικές διαφοροποιήσεις όμως στη σύσταση του υλικού κατασκευής και τις μηχανικές αντοχές των μονάδων είναι κρίσιμες για τη φέρουσα ικανότητα των στοιχείων.

<sup>243</sup> 'Ziggurat of Ur', Khan Academy, ημερομηνία πρόσβασης 12 Δεκέμβριος 2019, <https://www.khanacademy.org/humanities/ancient-art-civilizations/ancient-near-east1/sumerian/a/ziggurat-of-ur>.

## 4.2 Τυχειότητα ως αποκριτική αντίδραση σε περιβαλλοντικές παραμέτρους σε σύγχρονες κατασκευές

Ως δυναμική ή αποκριτική αρχιτεκτονική μπορεί να χαρακτηριστεί η αρχιτεκτονική η οποία εμπεριέχει στοιχεία τα οποία δίνουν τη δυνατότητα στην κατασκευή να μεταβάλλεται είτε στο χώρο ή και στο χρόνο σύμφωνα με διάφορες παραμέτρους. Σύμφωνα με τον Negroponte, το **αποκριτικό (responsive) ή αλλιώς προσαρμοστικό (adaptive) ή αντιδραστικό (reactive)** περιβάλλον είναι ένα περιβάλλον το οποίο παίζει έναν ενεργό ρόλο, το οποίο αποτελεί έναυσμα για μεγαλύτερες ή μικρότερες αλλαγές, μέσω σύνθετων ή απλών υπολογισμών<sup>244</sup>. Οι παράμετροι αυτές μπορεί να είναι είτε οι κλιματολογικές συνθήκες, παράμετροι που αφορούν το άμεσο περιβάλλον της κατασκευής και φυσικά παράμετροι που σχετίζονται με την ανθρώπινη δραστηριότητα, τόσο εκούσια όσο και ακούσια. Ο τρόπος που οι παράμετροι αυτές μπορούν να επιδράσουν στην αρχιτεκτονική κατασκευή μπορεί να έχει πολλές και διαφορετικές εκφάνσεις. Η διαφορά που έχουν οι δυναμικές / αποκριτικές κατασκευές από μια συμβατική – στατική κατασκευή είναι ότι εμπεριέχουν στην σχεδιαστική και κατασκευαστική λογική τους την έννοια της **μεταβολής**. Η μεταβολή μπορεί να είναι είτε προκαθορισμένη, είτε τυχαία, είτε να πραγματοποιείται σε μια ενδιάμεση περιοχή ανάμεσα στον έλεγχο και την τυχειότητα. Στα παραδείγματα που ακολουθούν παρουσιάζονται χαρακτηριστικές περιπτώσεις κατασκευών οι οποίες τροποποιούνται ή ανταποκρίνονται με διαφορετικούς τρόπους στα ερεθίσματα / επιλογές του χρήστη ή του περιβάλλοντος τους. Στη συνέχεια, θα γίνει προσπάθεια να αναδειχθεί η έννοια της **τυχειότητας** που συνδέεται με αυτά τα παραδείγματα. Στις αποκριτικές κατασκευές η μεταβολή και τυχειότητα περιορίζονται σε ένα μικρό τμήμα του συνόλου, στην πλειονότητα των περιπτώσεων μη φέρον, που συνήθως αφορά στις όψεις τους. Οι όψεις σε αυτές τις κατασκευές είναι συνήθως ανεξάρτητα δομικά συστήματα από τον φέροντα οργανισμό της κατασκευής και επομένως είναι εφικτή η τροποποίησή τους σύμφωνα με συγκεκριμένες παραμέτρους και εντός συγκεκριμένων **ορίων** και βαθμών ελευθερίας. **Στις περιπτώσεις όπου οι παραλλαγές πραγματοποιούνται με τον άμεσο έλεγχο του χρήστη το σύστημα είναι δυνητικά τυχαίο εντός ορίων, λόγω των πιθανών παραλλαγών που μπορούν θεωρητικά να δημιουργηθούν**, καθώς για τον χρήστη-χειριστή υπάρχει η δυνατότητα συνειδητής επιλογής συγκεκριμένων παραμέτρων χωρίς την ύπαρξη αυτόματης διαδικασίας που επηρεάζεται από μη προβλέψιμους παράγοντες. Η τυχειότητα σε αυτή την περίπτωση έγκειται στην **πιθανότητα δημιουργίας παραλλαγών**.

### 4.2.1 Επιδερμίδες κατασκευών και άνεμος

- Ο «**Πύργος των Ανέμων**»<sup>245</sup> είναι μια μεταλλική κατασκευή κάτοψης ελλειπτικού σχήματος που βρίσκεται στη Nishi-ku στη Yokohama της Ιαπωνίας, δίπλα στο σιδηροδρομικό σταθμό της πόλης. Ο πύργος σχεδιάστηκε από τον αρχιτέκτονα **Toyo Ito** και ανεγέρθηκε το 1986. Ο πύργος έχει μεταλλικό φέροντα οργανισμό, ο οποίος φέρει διάτρητα πανέλα από αλουμίνιο. Η όλη κατασκευή συμπληρώνεται από δίκτυο φωτιστικών πηγών, αισθητήρων και υπολογιστών που συνθέτουν ένα

<sup>244</sup> Nicholas Negroponte, *Soft Architecture Machines*, First Edition edition (Cambridge, Mass: The MIT Press, 1976), 132.

<sup>245</sup> 'AD Classics: Tower of Winds / Toyo Ito & Associates', ArchDaily, 18 Μάρτιος 2013, <http://www.archdaily.com/344664/ad-classics-tower-of-winds-toyo-ito/>.

**διαδραστικό** σύστημα το οποίο ενεργοποιείται από τον άνεμο και τον ήχο. Η κατασκευή στο εσωτερικό της κρύβει δεξαμενές νερού. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, ο μεταλλικός πύργος έχει οπτικά μια σχεδόν αδιαπέρατη μεταλλική όψη και το σύστημα φωτισμού παραμένει ανενεργό. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, το δίκτυο αισθητήρων καταγράφει αλλαγές στην ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου καθώς και ήχους του περιβάλλοντος. Με βάση τα δεδομένα που συλλέγονται από το περιβάλλον, ελέγχεται ο φωτισμός των 1.300 λαμπτήρων, των 12 φωτιστικών δακτυλίων και των 30 προβολέων που είναι τοποθετημένοι στον πύργο. Καθώς η κίνηση του ανέμου (ως φυσικό φαινόμενο) και οι ήχοι από το περιβάλλον του πύργου είναι μη προβλέψιμα και μη επαναλαμβανόμενα φαινόμενα, τα φωτιστικά μοτίβα που εμφανίζονται στον πύργο είναι κάθε φορά διαφορετικά. Η διάταξη είναι έτσι δομημένη έτσι ώστε η τυχαιότητα των δεδομένων εισαγωγής (input) να επηρεάζει με αντίστοιχα τυχαίο τρόπο την όψη (output) της κατασκευής τις νυκτερινές ώρες μέσω του συστήματος φωτισμού. Με αυτό τον τρόπο ο αρχιτέκτονας εκτός από τη φυσική υπόσταση της κατασκευής έχει σχεδιάσει μια **διαδικασία διάδρασης** η οποία παράγει **μη προκαθορισμένες - τυχαίες** τροποποιήσεις της όψης από άποψη χρωμάτων, φωτισμού και οπτικής διαπερατότητας. Η διάδραση βασίζεται στη φέρουσα υποδομή (μεταλλική κατασκευή) για να απεικονίζονται παραλλαγές των όψεων σύμφωνα με τις παραπάνω παραμέτρους.



Εικόνα 4\_34: Toyo Ito, Tower of Winds, Yokohama, Japan, 1986. Πηγή: Tower of Winds, <https://www.flickr.com/photos/colbwt-archi/450251549/>, εικόνα του/της: ..colb., άδεια: CC BY 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>



Εικόνα 4\_35: Toyo Ito, Tower of Winds, Yokohama, Japan, 1986. Πηγή: Toyo Ito - Tower of Winds 風之塔 - Photo 01, <https://www.flickr.com/photos/eager/8566225631/>, εικόνα του/της: 準建築人手札網站 Forgemind ArchiMedia, άδεια: CC BY 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>



- Στην ίδια κατηγορία κατασκευών όψης ανήκουν τα έργα του καλλιτέχνη **Ned Khan** ο οποίος παρουσιάζει διατάξεις μεταλλικών στοιχείων ως εξωτερικό κέλυφος κτισμάτων, το οποίο διαρκώς μεταβάλλεται από τις τοπικές συνθήκες του ανέμου. Ένα παράδειγμα μεγάλης κλίμακας είναι ο τερματικός σταθμός αυτοκινήτων μικρής διάρκειας στο αεροδρόμιο του Brisbane (2012) **Brisbane Domestic Terminal Car Park** (Εικόνα 4\_36). 250.000 πλάκες από αλουμίνιο έχουν τοποθετηθεί στο εξωτερικό της κατασκευής του σταθμού στάθμευσης αυτοκινήτων του αεροδρομίου, οι οποίες εξασφαλίζουν σκίαση στο εσωτερικό του κτηρίου. Το έργο δημιουργήθηκε ως συνεργασία του καλλιτέχνη **Ned Khan** και τους **Urban Art Projects (UAP)** <sup>246</sup>. Η κατασκευή αυτή δημιουργεί μια κινητική όψη, η οποία έχει εμβαδόν 5.000 m<sup>2</sup> και η οποία ανταποκρίνεται στις εναλλαγές του ανέμου. Η διάσταση και το βάρος των μεμονωμένων πλακιδίων είναι τέτοια έτσι ώστε αυτά να μπορούν να ανταποκρίνονται και σε μικρές διαφοροποιήσεις της έντασης του ανέμου. Το αποτέλεσμα είναι τέτοιο όπου το σύνολο των πλακιδίων μπορεί να απεικονίζει τις μεταβολές της κατάστασης του ανέμου με τη μορφή κυματισμών. Καθώς οι συνθήκες των τοπικών ανέμων είναι διαρκώς μεταβαλλόμενες, έτσι και η όψη από τα πλακίδια αλουμινίου μεταβάλλεται κι αυτή διαρκώς. Η δυνατότητα της υπό περιορισμούς διαρκούς μεταβολής είναι αυτή ακριβώς που της αποδίδει το χαρακτηρισμό κινητικής όψης. Οι παράμετροι που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά της όψης είναι η συνολική της επιφάνεια (που όπως αναφέρθηκε προηγουμένως είναι 5.000m<sup>2</sup>), το μέγεθος των μεμονωμένων πλακιδίων αλουμινίου και οι βαθμοί ελευθερίας κίνησης που έχει το καθένα από αυτά. Η κινητική όψη προκαλεί και αντίστοιχη τροποποίηση του φωτισμού και των σκιάσεων στο εσωτερικό του κτηρίου. Τη λογική των μεμονωμένων κινούμενων στοιχείων σε όψη κατασκευής έχει ήδη παρουσιάσει νωρίτερα ο Ned Khan το 2006 σε σταθμό αυτοκινήτων στο **Διεθνές εμπορικό κέντρο** στο Charlotte, North Carolina **Wind Silos** <sup>247</sup>, όσο και στο σταθμό αυτοκινήτων Gateway Village το 2000 **Wind Veil** <sup>248</sup>, πάλι στο Charlotte, North Carolina. Και στις δύο περιπτώσεις, μεταλλικός σκελετός υποστηρίζει διάταξη από μεταλλικά πλακίδια, η κίνηση των οποίων επηρεάζεται από τον άνεμο με **τυχαίο** τρόπο. **Η τυχαιότητα** στα παραπάνω παραδείγματα περιορίζεται στις όψεις και συγκεκριμένα στα στοιχεία επικάλυψής τους, τα οποία κινούνται με τυχαίο τρόπο σύμφωνα με συγκεκριμένους βαθμούς ελευθερίας, λόγω της απρόβλεπτης επιρροής του ανέμου .

246 'UAP + Ned Kahn to Create Kinetic Artwork for Brisbane Airport', ArchDaily, 18 Ιούλιος 2010, <http://www.archdaily.com/69219/uap-ned-kahn-to-create-kinetic-artwork-for-brisbane-airport/>.

247 'Wind Silos – NED KAHN', ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιανουάριος 2020, <http://nedkahn.com/portfolio/wind-silos>.

248 'Wind Veil – NED KAHN', ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιανουάριος 2020, <http://nedkahn.com/portfolio/wind-veil>.



Εικόνα 4\_36: Ned Khan και Urban Art Projects (UAP), Brisbane Domestic Terminal Car Park, 2011. Πηγή: Brisbane Airport Domestic Terminal car park 01.JPG, Brisbane Airport Domestic Terminal car park, Brisbane, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brisbane\\_Airport\\_Domestic\\_Terminal\\_car\\_park\\_01.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brisbane_Airport_Domestic_Terminal_car_park_01.JPG), εικόνα του/της: Kgbo, άδεια: CC BY-SA 4.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

- Ακόμα ένα παράδειγμα κτηρίου με κινούμενα στοιχεία στην όψη του είναι αυτό του **Μουσείου Randall** στο San Francisco (**Charles Sowers**, 2012)<sup>249</sup> (Εικόνα 4\_37, Εικόνα 4\_38). Η τυφλή όψη του Μουσείου είναι επενδεδυμένη με 25 πανέλα αλουμινίου πάνω στα οποία έχουν στερεωθεί 612 ανεμοδείκτες, κατασκευασμένοι επίσης από αλουμίνιο. Το έργο ονομάζεται **Windswept**. Οι ανεμοδείκτες είναι στερεωμένοι κάθετα στο επίπεδο της όψης σε κλίμακα και περιστρέφονται ελεύθερα κατά 360 μοίρες εξαιτίας του ανέμου. Ενώ δεν υπάρχει κάποια κατασκευαστική ή λειτουργική ανάγκη για τη χρήση αυτών των στοιχείων, έτσι «ενεργοποιείται» η όψη και οπτικοποιείται η ροή του ανέμου, ως μεταβαλλόμενο διάνυσμα πάνω στην επιφάνεια της κατασκευής. Οι σχηματισμοί διαρκώς τροποποιούνται και η διάταξη μεταμορφώνει την όψη, δίνοντάς της μια δυναμική / τυχαία διάσταση, που κυμαίνεται εντός των περιορισμών / ορίων της κατασκευής.

- Το **Cloud Seeding Pavilion**<sup>250 251</sup> (Εικόνα 4\_39, Εικόνα 4\_40) από τους **MODU architects + Geotectura** στο Ισραήλ (2015), είναι ένα υπαίθριο στέγαστρο εμβαδού 232 m<sup>2</sup>. Η κατασκευή είναι μεταλλική και η σκίαση του χώρου κάτω από το στέγαστρο επιτυγχάνεται από ένα μεγάλο αριθμό από πλαστικές σφαίρες οι οποίες είναι τοποθετημένες στην οριζόντια επιφάνεια του στεγαστρού και διαρκώς μεταβάλλουν τις θέσεις τους λόγω της μεταβολής του ανέμου. Οι παράμετροι της έντασης και της διεύθυνσης του ανέμου, είναι αυτές που καθορίζουν την ακριβή διάταξη της σκίασης με τη διαφοροποίηση της **πυκνότητας** των περιοχών της άνω όψης, ανάλογα με τη θέση των σφαιρών. Η

249 'Windswept installation by Charles Sowers', ημερομηνία πρόσβασης 24 Ιανουάριος 2020, <https://www.dezeen.com/2012/11/06/windswept-installation-by-charles-sowers/>.

250 'MODU's Pavilion Features a Canopy Made of 30,000 Plastic Balls', Dezeen, 24 Αύγουστος 2015, <https://www.dezeen.com/2015/08/24/cloud-seeding-pavilion-modu-roof-made-30000-plastic-balls-design-museum-holon-israel/>.

251 'MODU/ Phu Hoang, Rachely Rotem', ημερομηνία πρόσβασης 25 Ιανουάριος 2020, <https://moduarchitecture.com>.

Θέση των σφαιρών περιορίζεται από τα **όρια** του στεγάστρου σε κάτοψη, καθώς και τα οριζόντια άνω και κάτω επίπεδα της κατασκευής που εγκιβωτίζουν τις σφαίρες. Η κατασκευή δίνει τη δυνατότητα, και σε αυτή την περίπτωση, τη **δημιουργία τυχαίων παραλλαγών σε ένα τμήμα του έργου**, αυτό της επιφάνειας σκίασης, με τους περιορισμούς και τις παραμέτρους που προαναφέρθηκαν προηγουμένως **ως όρια**.



Εικόνα 4\_37: Windswept, Randall Museum, San Francisco.  
Πηγή: Randall Museum,  
<https://www.flickr.com/photos/frankfarm/10519993103/>,  
εικόνα του/της: [Frank Farm](#), άδεια: CC BY-NC-ND 2.0,  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/>



Εικόνα 4\_38: Windswept, Randall Museum, San Francisco.  
Πηγή: Charles Sowers,  
<https://www.flickr.com/photos/rocor/14322727682/>,  
εικόνα του/της: [Rob Corder](#), άδεια: CC BY-NC 2.0,  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>



Εικόνα 4\_39: Cloud Seeding Pavilion, Modu Architecture, Israel, 2015. Γενική άποψη. Πηγή:  
<https://moduarchitecture.com/Cloud-Seeding-Tel-Aviv/>,  
© MODU Architecture, Photography: Aviad Bar Ness,  
χρήση κατόπιν αδείας.

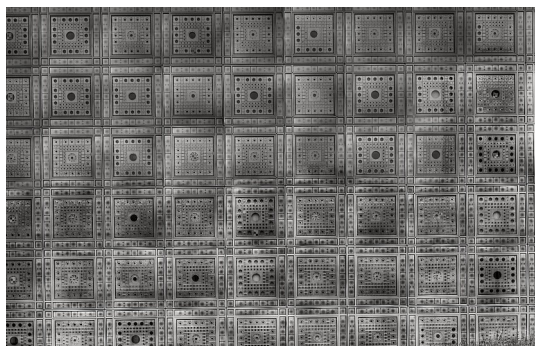


Εικόνα 4\_40: Cloud Seeding Pavilion, Modu Architecture, Israel, 2015. Λεπτομέρεια. Πηγή:  
<https://moduarchitecture.com/Cloud-Seeding-Tel-Aviv/>,  
© MODU Architecture, Photography: Aviad Bar Ness,  
χρήση κατόπιν αδείας.

## 4.2.2 Επιδερμίδες κατασκευών και φως

• Το **Institut du Monde Arabe** στο Παρίσι (1987)<sup>252</sup>, είναι ένα πολιτιστικό κέντρο που φιλοξενεί πολιτιστικές δραστηριότητες των αραβικών χωρών. Ο αρχιτέκτονας **Jean Nouvel** και οι συνεργάτες του, προκειμένου να ελέγξουν τις συνθήκες φωτισμού για τους χώρους του κέντρου, κατασκευάζουν τη νότια όψη του κτηρίου ως σύνθετο μηχανισμό που αποτελείται από επιμέρους διαφράγματα μεταβαλλόμενης διαμέτρου. Η Νότια όψη αποτελείται από 240 επιμέρους τετράγωνα πανέλα διαφραγμάτων που λειτουργούν ανεξάρτητα. Η ιδέα της μεταβαλλόμενης όψης βασίζεται στα παραδοσιακά **mashrabiya**<sup>253</sup>, διάτρητα διαφράγματα της παραδοσιακής αραβικής αρχιτεκτονικής, τα οποία επιτρέπουν την ιδιωτικότητα του χρήστη και την ελεγχόμενη κυκλοφορία του ήλιου και του αέρα στο εσωτερικό της κατοικίας. Στο παράδειγμα του Institut du monde Arabe (IMA) παρουσιάζονται σε μια σύγχρονη εκδοχή τους ως μεταλλικοί κινούμενοι μηχανισμοί, παρόμοιοι με τα διαφράγματα των φωτογραφικών μηχανών, τα οποία ανοιγοκλείνουν και σχηματίζουν οπές από κυκλικά και πολυγωνικά σχήματα.

Η όψη που έχει κατασκευαστεί με αυτό τον τρόπο επηρεάζεται από τις συνθήκες του εξωτερικού φωτισμού και προσαρμόζεται σε αυτές. Η προσαρμογή της όψης γίνεται πάντα σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις φωτισμού των χώρων εσωτερικά. Οι δύο αυτές παράμετροι διαμορφώνουν ένα σύστημα όψης όπου τμήμα του μεταβάλλεται δυναμικά και με τυχαίο τρόπο, καθώς προσαρμόζεται στις παραμέτρους επιρροής του. Η μεταβολή των διαφραγμάτων μεταβάλει την αναλογία πλήρων και κενών στην όψη και την καθιστά ως μια ενεργή / κινητική όψη.



Εικόνα 4\_41: Jean Nouvel et al, Institut du Monde Arabe, Paris, 1987. Νότια όψη. Πηγή: Jardin de l'Institut du Monde Arabe (27132660863).jpg, Jardin de l'Institut du Monde Arabe, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jardin\\_de\\_l%27Institut\\_du\\_Monde\\_Arabe\\_\(27132660863\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jardin_de_l%27Institut_du_Monde_Arabe_(27132660863).jpg), εικόνα του/της: *Miwok*, άδεια: CC0 1.0 Universal, *Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication* (cropped).



Εικόνα 4\_42: Jean Nouvel et al, Institut du Monde Arabe, Paris, 1987. Λεπτομέρειες διαφραγμάτων από το εσωτερικό του κτηρίου. Πηγή: Borne de prêt - Institut du monde arabe (34836403231).jpg, Borne de prêt - Institut du monde arabe, Bibliothèque de l'Institut du monde arabe, 1 Rue des Fossés Saint-Bernard, 75005 Paris, France, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Borne\\_de\\_pr%C3%AAt\\_-\\_Institut\\_du\\_monde\\_arabe\\_\(34836403231\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Borne_de_pr%C3%AAt_-_Institut_du_monde_arabe_(34836403231).jpg), εικόνα του/της: *ActuaLitté*, άδεια: CC BY-SA 2.0, *Creative Commons Attribution-Share Alike 2.0 Generic license*.

252 'Architecture', Institut du monde arabe, 16 Ιούλιος 2016, <https://www.imarabe.org/en/architecture>.

253 'Mashrabiya', στο *Wikipedia*, 4 Απρίλιος 2024, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Mashrabiya&oldid=1217281693>.

- Η κατασκευή των δίδυμων πύργων **Al Bahr**<sup>254</sup> (Εικόνα 4\_43, Εικόνα 4\_44) στο Abu Dhabi των Ηνωμένων αραβικών εμιράτων, είναι ακόμα ένα παράδειγμα κτίσματος το οποίο διαθέτει ένα εξωτερικό πέτασμα προστασίας από τον ήλιο ως δεύτερη επιδερμίδα. Οι δύο πύργοι έχουν ύψος 29 ορόφων και προκειμένου να προστατευτούν από την έντονη ηλιοφάνεια του τοπικού κλίματος διαθέτουν ένα εξωτερικό κέλυφος από μηχανικές περσίδες, οι οποίες ανοιγοκλείνουν αυτόματα ανάλογα με την επιθυμητή και βέλτιστη κάθε φορά ποσότητα φωτός ή σκίασης για το σύνολο του κτηρίου. Μορφολογικά, οι μηχανικές περσίδες έχουν ως έμπνευση και πάλι το αραβικό παραδοσιακό διάφραγμα **mashrabiya**, σε συνδυασμό με μορφές και σχεδιασμό βιολογικής έμπνευσης. Το δυναμικό αυτό κέλυφος δίνει τη δυνατότητα αυτόματης προσαρμογής των όψεων του κτηρίου στις κλιματολογικές συνθήκες και συνεπώς της αυτόματης βέλτιστης ενεργειακής συμπεριφοράς του κτηρίου, όσο και τη δυνατότητα θέασης από το εσωτερικό. Οι 2.098 μηχανικές μονάδες / διαφράγματα συνθέτουν μία δυναμική όψη, η οποία καθώς επηρεάζεται από τις φυσικές συνθήκες, διαρκώς τροποποιείται και μεταβάλλεται. Ο κύκλος προσαρμογής της όψης πραγματοποιείται τόσο κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου, όσο και κατά την εξέλιξη των εποχών. Οι παραλλαγές που λαμβάνουν αυτές οι δυναμικές όψεις είναι εξαιρετικά μεγάλες σε αριθμό, καθώς ο φυσικός κόσμος (με το φωτισμό ως την κύρια παράμετρο επιρροής του συστήματος), διακατέχεται από τυχαιότητα και είναι πολύ δύσκολο να υπάρχουν ακριβώς οι ίδιες συνθήκες σε επανάληψη.



Εικόνα 4\_43: Ahr, Al Bahr Towers, Abu Dhabi, Πηγή: Al Bahr Towers by AEDAS, <https://www.flickr.com/photos/inhabitat/12330946825/>, εικόνα του/της: *Inhabitat*, άδεια: CC BY-NC-ND 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/>



Εικόνα 4\_44: Ahr, Al Bahr Towers, Abu Dhabi, Πηγή: Al Bahr Towers by AEDAS, <https://www.flickr.com/photos/inhabitat/12331354474/>, εικόνα του/της: *Inhabitat*, άδεια: CC BY-NC-ND 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/>

- Το κτήριο γραφείο και εκθεσιακός χώρος της εταιρείας **Kiefer Technic Showroom**<sup>255</sup> (Ernst Giselsbrecht + Partner, 2007) (Εικόνα 4\_45, Εικόνα 4\_46) στο Steiermark της Αυστρίας, είναι ένα άλλο παράδειγμα κατασκευής μεταβαλλόμενης όψης για μορφολογικούς λόγους και λόγους ηλιοπροστασίας και ελέγχου των περιβαλλοντικών συνθηκών. Η όψη του εκθεσιακού χώρου έχει

254 'Al Bahr Towers | Office & Workplace | AHR | Architects and Building Consultants', ημερομηνία πρόσβασης 23 Δεκέμβριος 2019, <https://www.ahr.co.uk/Al-Bahr-Towers>.

255 'Kiefer Technic Showroom / Ernst Giselsbrecht + Partner | ArchDaily', ημερομηνία πρόσβασης 23 Δεκέμβριος 2019, <https://www.archdaily.com/89270/kiefer-technic-showroom-ernst-giselsbrecht-partner>.

καμπύλο σχήμα σε κάτοψη και εκτείνεται σε ύψος 2 ορόφων. Η κυρίως όψη του κτίσματος αποτελείται από συνεχές υαλοπέτασμα, προκειμένου ο εκθεσιακός χώρος να έχει απρόσκοπτη θέα. Μπροστά ακριβώς από το υαλοπέτασμα αναπτύσσεται ο φέρων οργανισμός μεταλλικής κατασκευής με κατακόρυφα στοιχεία, ο οποίος υποστηρίζει 112 μεταλλικά λευκά διάτρητα πανέλα αλουμινίου. Τα πανέλα έχουν δυνατότητα ανεξάρτητης κίνησης κατά τον κατακόρυφο άξονα και ταυτόχρονης περιστροφής τους κατά τον οριζόντιο άξονα, κινούμενα σε ειδικά κατασκευασμένους οδηγούς και ρουλεμάν. Τα 112 πανέλα είναι οργανωμένα σε 56 ζεύγη, για τα οποία υπάρχουν αντίστοιχα 56 μοτέρ κίνησης. Όταν τα πανέλα είναι εντελώς ανοιχτά, καλύπτουν πλήρως όλη την επιφάνεια της όψης και το κτίσμα παρουσιάζεται σαν μια μονολιθική κατασκευή χωρίς ανοίγματα. Όταν τα πανέλα είναι κλειστά, μετασχηματίζονται σε σκίαστρα της όψης και αποκαλύπτεται όλη η επιφάνεια του υαλοστασίου. Η δυνατότητα αυτόνομης κίνησης του κάθε ενός από τα 56 ζεύγη πανέλων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός εξαιρετικά μεγάλου αριθμού πιθανών συνδυασμών παραλλαγών όψεων του κτηρίου. Ο έλεγχος των παραλλαγών της όψης γίνεται από ηλεκτρονικό υπολογιστή και υπάρχουν τόσο προκαθορισμένες όψεις, όσο και χειροκίνητες παραλλαγές όψεων, προσαρμοζόμενες στις απαιτήσεις για σκίαση και ηλιασμό του κτηρίου, ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Κάθε μεταβολή της θέσης των πανέλων σε νέα διάταξη όψης απαιτεί για την αναδιάταξη χρονικό διάστημα μόνο 30 δευτερολέπτων. Ενώ δεν διευκρινίζεται για το αν υπάρχει αυτόματη προσαρμογή της όψης στις συνθήκες ηλιασμού, όπως στα προηγούμενα παραδείγματα, υπάρχει η δυνατότητα, όπως αναφέρθηκε, για απεριόριστες διαφορετικές παραλλαγές της όψης ανάλογα με διάταξη των επιμέρους στοιχείων. **Η τυχαιότητα** δεν εκτείνεται στο σύνολο της κατασκευής, αλλά περιορίζεται στην όψη, εντός των **ορίων** κίνησης για το κάθε σκίαστρο.



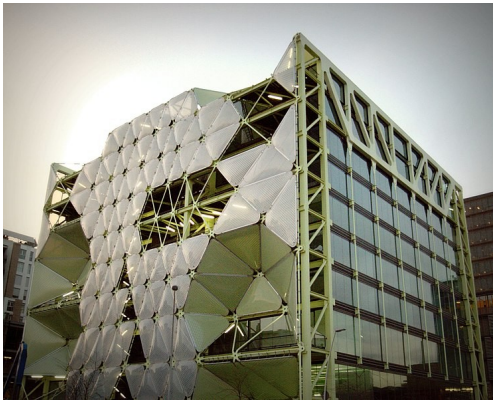
Εικόνα 4\_45: Kiefer Technic Showroom, 2007. Γενική διάταξη όψης. Πηγή: [https://www.giselbrecht.at/projekte/gewerbe\\_industriebauten/kiefer/index.html](https://www.giselbrecht.at/projekte/gewerbe_industriebauten/kiefer/index.html), © ERNST GISELBRECHT + PARTNER ZT GMBH, χρήση κατόπιν αδείας.



Εικόνα 4\_46: Kiefer Technic Showroom, 2007. Λεπτομέρεια κινητών στοιχείων. Πηγή: [https://www.giselbrecht.at/projekte/gewerbe\\_industriebauten/kiefer/index.html](https://www.giselbrecht.at/projekte/gewerbe_industriebauten/kiefer/index.html), © ERNST GISELBRECHT + PARTNER ZT GMBH, χρήση κατόπιν αδείας.

- Ένα ακόμα παράδειγμα κτηρίου το οποίο έχει μεταβαλλόμενη όψη είναι αυτό της περίπτωσης του **Media-ICT** στη Βαρκελώνη (2011) από τον **Enric Ruiz-Geli** (Εικόνα 4\_47). Τμήμα της όψης του κτηρίου είναι επενδεδυμένο με κυψέλες από το συνθετικό υλικό ETFE (Εικόνα 4\_48), οι οποίες φουσκώνουν και ξεφουσκώνουν σχηματίζοντας ένα δεύτερο εξωτερικό κέλυφος. Ο έλεγχος του

φουσκώματος και ξεφουσκώματος των κυψελών πραγματοποιείται με βάση δεδομένα από αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας και πίεσης, έτσι ώστε να ρυθμίζεται, τόσο το καλοκαίρι όσο και το χειμώνα, η κατανάλωση ενέργειας του κτηρίου. Η όψη του κτηρίου μεταβάλλεται με βάση τις κλιματολογικές συνθήκες και διαρκώς παρουσιάζει νέες παραλλαγές της. Η τυχαιότητα των αλλαγών της όψης έγκειται στην προσαρμογή στην **τυχειότητα** των κλιματολογικών συνθηκών εντός των προκαθορισμένων ορίων, όπως για παράδειγμα της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής διόγκωσης της κάθε κυψέλης καθώς και στην επιλογή για το ποιες κυψέλες θα διογκωθούν και ποιες όχι. Οι πιθανοί συνδυασμοί είναι εξαιρετικά μεγάλοι σε αριθμό.



Εικόνα 4\_47: Cloud 9, Media-ICT, Βαρκελώνη, Ισπανία. Πηγή: Edificio Media-TIC. Enric Ruiz Geli.jpg, Edificio Media-TIC. Enric Ruiz Geli. El Poblenou, Barcelona, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Edificio\\_Media-TIC\\_-\\_Enric\\_Ruiz\\_Geli.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Edificio_Media-TIC_-_Enric_Ruiz_Geli.jpg), εικόνα του/της: [Victoriano Javier Tornel García](#), άδεια: CC BY-SA 2.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 2.0 Generic license](#).

Εικόνα 4\_48: Cloud 9, Media-ICT, Βαρκελώνη, Ισπανία. Πηγή: Barcelona - Edifici Media-TIC (2).jpg, Barcelona - Edifici Media-TIC, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Barcelona\\_-\\_Edifici\\_Media-TIC\\_%282%29.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Barcelona_-_Edifici_Media-TIC_%282%29.jpg), εικόνα του/της: [Fred Romero](#), άδεια: CC BY-SA 2.0, [Creative Commons Attribution 2.0 Generic license](#).

- Το **Theme pavilion Expo Yeosu** <sup>256</sup> (Εικόνα 4\_49, Εικόνα 4\_50) είναι ένα κτήριο / περίπτερο που σχεδιάστηκε για την έκθεση EXPO 2012 στην Κορέα από τους **soma architecture**. Η συνολική μορφή του παραπέμπει σε θαλάσσιο κήτος, ενώ στην πλαϊνή όψη του υπάρχουν κινούμενα πανέλα που παραπέμπουν σε βράγχια. Αυτά τα κινούμενα στοιχεία αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της όψης και δίνουν τη δυνατότητα διαμόρφωσης παραλλαγών της. Τα 108 πανέλα είναι κατασκευασμένα από fiber glass και η κίνησή τους ελέγχεται από 216 σερβομηχανισμούς. Οι **πιθανές διατάξεις** ελέγχονται και σε αυτή την περίπτωση από ηλεκτρονικό υπολογιστή και οι συνδυασμοί μπορεί να είναι απεριόριστοι. Την ημέρα, η θέση των πανέλων καθορίζει και ελέγχει τις συνθήκες φωτισμού στο εσωτερικό του κτηρίου στο χώρο που ονομάζεται "Best Practice Area", ενώ το βράδυ οι θέσεις των πανέλων τονίζονται από φωτισμό LED. Τα πανέλα καλύπτουν πολύ μεγάλο ποσοστό της επιφάνειας της όψης στην οποία είναι τοποθετημένα, με αποτέλεσμα όλη σχεδόν η όψη να έχει δυνατότητα μεταβολής. Τα πανέλα συνδέονται με το κυρίως κτίσμα στο πάνω και κάτω μέρος τους και περιστρέφονται κατά τον κατακόρυφο άξονα. Το κάθε πανέλο έχει ανεξάρτητη κίνηση, αλλά μπορεί να λειτουργήσει σε συσχέτισμό και με τα υπόλοιπα.

<sup>256</sup> 'soma architecture - theme pavilion', 24 Ιανουάριος 2020, [http://www.soma-architecture.com/index.php?page=theme\\_pavilion&parent=2](http://www.soma-architecture.com/index.php?page=theme_pavilion&parent=2).

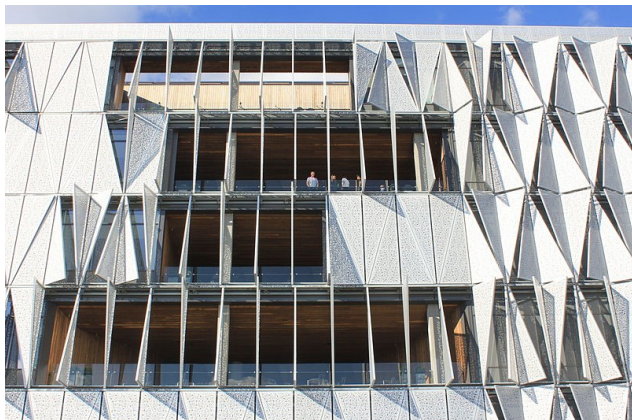


Εικόνα 4\_49: Theme pavilion Expo Yeosu, Soma Architecture, Korea, 2012. Πηγή: © Soma Architecture, χρήση κατόπιν αδείας.

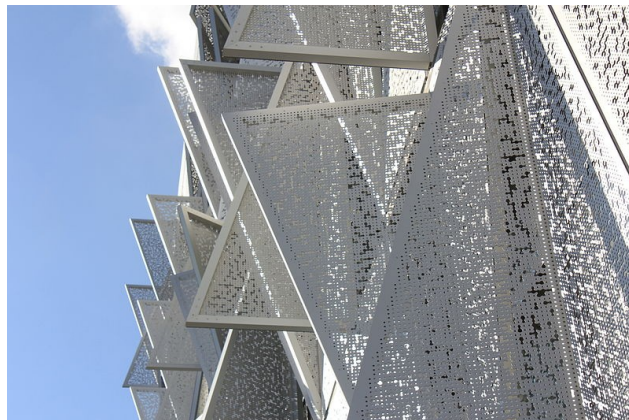
Εικόνα 4\_50: Theme pavilion Expo Yeosu, Soma Architecture, Korea, 2012. Πηγή: © Soma Architecture, χρήση κατόπιν αδείας.

- Το κτήριο **Επικοινωνίας και Σχεδιασμού** του πανεπιστημίου **Syddansk** στο Kolding της Δανίας (2015) (Εικόνα 4\_51, Εικόνα 4\_52) από τον **Henning Larsen**, είναι ακόμα ένα παράδειγμα κτηρίου η όψη του οποίου διαμορφώνεται από κινούμενα στοιχεία. Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις για την εξοικονόμηση ενέργειας του κτηρίου, σχεδιάστηκε ένα σύστημα κινητών πανέλων τα οποία, ανάλογα με τις συνθήκες φωτισμού και θερμοκρασίας που επικρατούν σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις λειτουργίας του κτηρίου στο εσωτερικό, προσαρμόζουν τη θέση τους με κατάλληλο τρόπο έτσι ώστε να υπάρχει η βέλτιστη κάθε φορά διάταξη τους. Τα πανέλα έχουν τριγωνικό σχήμα και είναι κατασκευασμένα από διάτρητη λαμαρίνα. Ανάλογα με τις απαιτήσεις, μπορούν να μένουν εντελώς κλειστά ή να μένουν εντελώς ανοιχτά. Το πλήθος των παραμέτρων που επηρεάζουν τη θέση των πανέλων (φωτισμός, θερμοκρασία, λειτουργία), έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση απεριόριστων πιθανών παραλλαγών όψεων οι οποίες μπορούν να εναλλάσσονται με **ελεγχόμενο** ή με **τυχαίο** τρόπο.





Εικόνα 4\_51: Syddansk University, Communication and Design building, 2015. Γενική άποψη του κτηρίου. Πηγή: [Syddansk universitet.Campus Kolding.Denmark.2014 \(39\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Syddansk_universitet.Campus_Kolding.Denmark.2014_(39).JPG), Campus Kolding is a part of Syddansk Universitet (University of Southern Denmark) and is made in 2012-2014. The building has a triangular shape and is designed by Henning Larsen Architects. Students started using it 1. september 2014. There are approximately 3000 students and 200 employees. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Syddansk\\_universitet.Campus\\_Kolding.Denmark.2014\\_\(39\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Syddansk_universitet.Campus_Kolding.Denmark.2014_(39).JPG), εικόνα του/της: [S.Juhl](#), άδεια: [CC0 1.0](#), [Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication](#).



Εικόνα 4\_52: Syddansk University, Communication and Design building, 2015. Λεπτομέρεια των διάτρητων πανέλων. Πηγή: [Syddansk universitet.Campus Kolding.Denmark.2014 \(40\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Syddansk_universitet.Campus_Kolding.Denmark.2014_(40).JPG), Campus Kolding is a part of Syddansk Universitet (University of Southern Denmark) and is made in 2012-2014. The building has a triangular shape and is designed by Henning Larsen Architects. Students started using it 1. september 2014. There are approximately 3000 students and 200 employees. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Syddansk\\_universitet.Campus\\_Kolding.Denmark.2014\\_\(40\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Syddansk_universitet.Campus_Kolding.Denmark.2014_(40).JPG), εικόνα του/της: [S.Juhl](#), άδεια: [CC0 1.0](#), [Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication](#).

### 4.3 Τυχαιότητα ως συνθετική αρχιτεκτονική επιλογή

- Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα κατασκευής που ενσωματώνει την παράμετρο της τυχαιότητας, και στη δομή και στη μορφή, είναι αυτό των **κυματοθραυστών** από προκατασκευασμένα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος (Εικόνα 4\_53, Εικόνα 4\_54). Κάθε ένα από τα προκατασκευασμένα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι απόλυτα όμοιο με τα υπόλοιπα, καθώς κατασκευάζεται μέσω τυποποιημένης διαδικασίας και μεταλότυπου. Οι κυματοθραύστες τοποθετούνται στην περιοχή ενδιαφέροντος με συγκεκριμένη **πυκνότητα διάταξης** ανάλογα με τις προδιαγραφές του έργου. Η περιοχή ενδιαφέροντος ενώ είναι χοντρικά προκαθορισμένη, δεν έχει **απόλυτα σαφή όρια**, καθώς το απώτατο ασαφές (fuzzy) όριο της διαμόρφωσης της ορίζεται κατά προσέγγιση από την τυχαία τοποθέτηση των μεμονωμένων στοιχείων κοντά σε αυτό. Η τοποθέτηση των μεμονωμένων στοιχείων στην περιοχή ενδιαφέροντος γίνεται με τυχαίο τρόπο και με μόνο κριτήριο, λόγω του τρόπου κατασκευής των στοιχείων, **την πυκνότητα διάταξής τους** όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Ο αντικειμενικός στόχος της κατασκευής επιτυγχάνεται ακόμα και αν υπάρχουν παραλλαγές στην χωροθέτηση των μεμονωμένων στοιχείων και δεν μεταβάλλεται α. Το γενικό **όριο** του φράγματος β. Η **πυκνότητα** της τοποθέτησης γ. Η **γεωμετρία των μονάδων**.



Εικόνα 4\_53: Κυματοθραύστες τύπου tetrapods από στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα. Πηγή: *Wave Breaker On Glagah Beach (246870295).jpeg*, *Wave Breaker On Glagah Beach*, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wave\\_Breaker\\_On\\_Glagah\\_Beach\\_\(246870295\).jpeg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wave_Breaker_On_Glagah_Beach_(246870295).jpeg), εικόνα του/της: *Nanda Widyatama*, άδεια: CC BY 3.0, This file is licensed under the *Creative Commons Attribution 3.0 Unported* license.



Εικόνα 4\_54: Κυματοθραύστες tetrapods από στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα. Πηγή: *Liepaja Karosta falochron polnocny 2.jpg*, *Liepaja - Karosta - northern breakwater*, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Liepaja\\_Karosta\\_falochron\\_polnocny\\_2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Liepaja_Karosta_falochron_polnocny_2.jpg), εικόνα του/της: *Andrzej Otrębski*, άδεια: CC BY-SA 4.0, *Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International* license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

Η τυχειότητα σε αυτή την περίπτωση είναι μία παράμετρος που δεν επηρεάζει, αλλά αντίθετα διευκολύνει τη λειτουργία και τον αντικειμενικό στόχο της κατασκευής διότι: 1. Δημιουργούνται ακανόνιστες μη συμμετρικές γεωμετρίες οι οποίες διασπών τα νερό κατά την πρόσκρουση του χωρίς να υπάρχει ενιαίο μέτωπο που θα απαιτούσε μια πιο ισχυρή κατασκευή, 2. Παράλληλα οι δομές επιτρέπουν να διαχέεται ανάμεσά τους το νερό αντί απλώς να το σταματούν<sup>257</sup> και να γίνεται απόσβεση της έντασής του, κάνοντας έτσι την κατασκευή πιο αποδοτική. Τέλος, η κατά προσέγγιση τοποθέτηση κάθε τυποποιημένης μονάδας εξασφαλίζει εξοικονόμηση ανθρώπινου δυναμικού, εξοπλισμού, χρόνου και πόρων, καθώς δεν απαιτείται ακρίβεια στην τοποθέτηση. **Στην περίπτωση των κυματοθραυστών η δομή και η μορφή των επιμέρους δομικών μονάδων παραμένει ίδια ενώ η τυχειότητα του συνόλου προκύπτει από τις διαφοροποιήσεις στη διάταξη.**

- Η λογική της **σκόπιμης απώλειας ελέγχου στο σχεδιασμό** και αντικατάστασής της παραμέτρου του ελέγχου από το τυχαίο ή δυνητικό ή απρόβλεπτο, ως συνειδητή αρχιτεκτονική επιλογή, μπορεί να βρεθεί στην προσέγγιση του **Alejandro Aravena** και το **Incremental housing**. Ο Aravena<sup>258</sup>, προκειμένου να αντιμετωπίσει το ζήτημα του οικονομικού, αλλά ποιοτικού σχεδιασμού και κατασκευής κοινωνικής κατοικίας, προτείνει μια μεθοδολογία, όπου ο μηχανικός σχεδιάζει και κατασκευάζει μόνο το περίπου 50% της κατοικίας και μόνο τις υποδομές για το υπόλοιπο 50%. Στη συνέχεια, όταν αυτό είναι εφικτό από οικονομική άποψη, η κατοικία μπορεί να επεκταθεί στο υπόλοιπο 50%, με βάση την πρωτοβουλία και το σχεδιασμό, αλλά αυτή τη φορά του ιδιοκτήτη της,

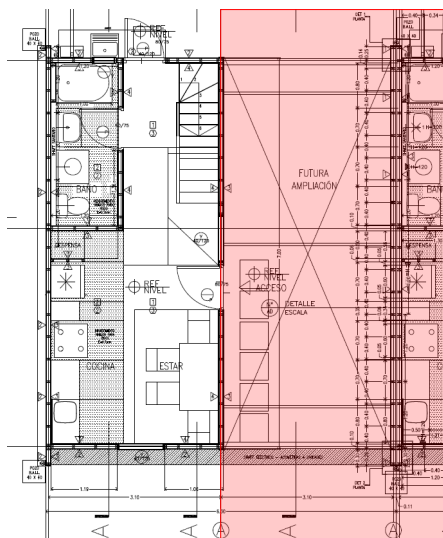
<sup>257</sup> Ars Staff, 'Covering Coasts with Concrete: Japan Looks to Tetrapods to Battle Elements', *Ars Technica*, 25 Νοέμβριος 2016, <https://arstechnica.com/science/2016/11/covering-coasts-with-concrete-japan-looks-to-tetrapods-to-battle-elements/>.

<sup>258</sup> 'Elemental', ημερομηνία πρόσβασης 25 Φεβρουάριος 2020, <http://www.elementalchile.cl/en/>.

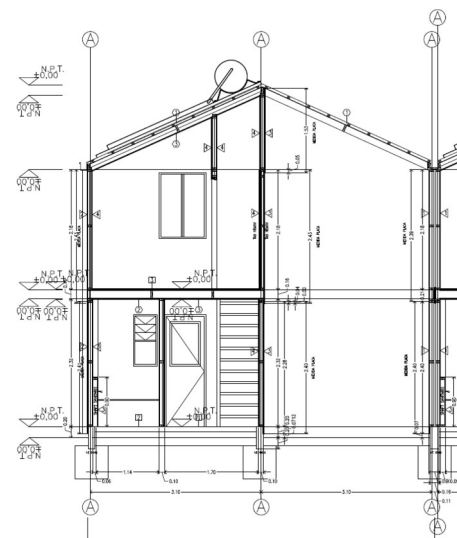
χωρίς τη συμμετοχή του μηχανικού. Πρόκειται για ένα είδος συμμετοχικού διαδοχικού σχεδιασμού όπου ο μηχανικός προδιαγράφει το έργο και καθορίζει **τα γεωμετρικά όρια** των κατασκευών, και υλοποιεί το τυπικό – επαναλαμβανόμενο τμήμα της κατασκευής. Το έργο συνεχίζεται και ολοκληρώνεται από τον ιδιοκτήτη **ως αυτοσχεδιασμός** με βάση τις επιθυμίες και δυνατότητες του, όμως εντός των ορίων και προδιαγραφών του μηχανικού. Για τον αρχιτέκτονα **υπάρχει τυχαιότητα στο τμήμα της κατασκευής που ΔΕΝ σχεδιάζει** και αφήνει να κατασκευαστεί από τον ένοικο. **Για τον ένοικο ΔΕΝ υπάρχει τυχαιότητα**, καθώς αυτός παραλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο τμήμα της κατασκευής και υλοποιεί σύμφωνα με τον προσωπικό του σχεδιασμό το υπόλοιπο τμήμα εντός των προδιαγεγραμμένων ορίων.

Το αποτέλεσμα είναι συγκροτήματα κατοικιών όπου υπάρχει ένα τμήμα όμοιο και επαναλαμβανόμενο, αυτό του αρχικού σχεδιασμού το οποίο έχει προβλεφθεί από τον αρχιτέκτονα, και ένα τμήμα μη προσχεδιασμένο και διαφορετικό, αυτό που σχεδίασε και κατασκεύασε ο κάθε ιδιοκτήτης. Το 50% της κατασκευής είναι απόλυτα ελεγχόμενο και προσχεδιασμένο. Υπάρχει τυποποίηση και επανάληψη. Το ίδιο ισχύει και για τις υποδομές του άκτιστου τμήματος. Το υπόλοιπο μη αρχικά κατασκευασμένο τμήμα αναπτύσσεται εντός **προδιαγεγραμμένων ορίων** που έχουν προβλεφθεί κατά τον αρχικό σχεδιασμό. Αυτό που δεν έχει προβλεφθεί είναι η μορφή και ο αρχιτεκτονικός χαρακτήρας του νέου τμήματος.

Με βάση τη **λογική του συμμετοχικού διαδοχικού σχεδιασμού** προκύπτουν πρωτότυπες και μη προβλέψιμες λύσεις. Η παράμετρος της τυχαιότητας προβλέπεται εξ' αρχής στη διαδικασία του σχεδιασμού και ενεργοποιείται κατά την επέκταση των κατασκευών από τους ιδιοκτήτες. Πρόκειται για **ελεγχόμενη τυχαιότητα**, καθώς καθορίζεται πότε θα ενεργοποιηθεί και υπό ποιους περιορισμούς, χωρικούς και κατασκευαστικούς.



Εικόνα 4\_55: Villa Verde, Elemental, Χιλή, 2010. Σχέδιο κάτοψης όπου διακρίνεται αριστερά το σχεδιασμένο τμήμα, στο κέντρο η ελεύθερη περιοχή της μελλοντικής επέκτασης (κόκκινη ένδειξη) και δεξιά της το επόμενο σχεδιασμένο τμήμα. Πηγή: <http://www.elementalchile.cl/en/>. © 2024 Elemental, all rights reserved. , Κόκκινη σκίαση: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 4\_56: Villa Verde, Elemental, Χιλή, 2010. Σχέδιο τομής όπου διακρίνεται αριστερά το σχεδιασμένο τμήμα, και δεξιά η ελεύθερη περιοχή της μελλοντικής επέκτασης τμήμα. Πηγή: <http://www.elementalchile.cl/en/>, © 2024 Elemental, all rights reserved.



Εικόνα 4\_57: Quinta Monroy, Elemental, Χιλή, 2003. Ύψεις κτηρίων μετά τις επεκτάσεις των ιδιοκτητών. Διακρίνονται οι βασικοί αρχικοί πυρήνες (κόκκινο πλαίσιο) και οι επεκτάσεις τους. Πηγή: Google Maps φωτ. 2015. <https://www.google.com/maps/@30.3220679,-81.6375202,442m/data=!3m1!1e3?entry=ttu>. Κόκκινες ενδείξεις: Τ. Κουιμτζόγλου.

- Το Μνημείο του Ολοκαυτώματος στο Βερολίνο **Memorial to the Murdered Jews of Europe**<sup>259</sup> (Εικόνα 4\_58) (Holocaust memorial) από τον **Peter Eisenman** (2004), είναι ένα υπαίθριο μνημείο που εκτείνεται σε μια έκταση 19.000m<sup>2</sup> και το υπέργειο τμήμα του αποτελείται από 2710 στήλες από σπλισμένο σκυρόδεμα. Οι στήλες είναι διατεταγμένες σε κंनाβο 87 σειρών X 54 στηλών σε ήπια κεκλιμένο επίπεδο με διάκενα 0,95m. και έχουν όλες τις ίδιες διαστάσεις μήκους 2,38m και πλάτους 0,95m. Το ύψος κάθε στήλης διαφοροποιείται: 811 στήλες έχουν ύψος από 0,20m. έως 2,00m, 916 στήλες έχουν ύψος από 2,00m έως 3,50m και 872 στήλες έχουν ύψος από 3,50m έως 4,70m. Τέλος, 112 στήλες έχουν κατασκευαστεί με ύψος 0,20m και έχουν τοποθετηθεί παράλληλα στη διάταξη των υπολοίπων. Οι στήλες δεν είναι τοποθετημένες κατακόρυφα, αλλά έχουν μια μικρή κλίση από 0,5° έως 2°. Παρατηρείται ότι πρόκειται για μία αυστηρή διάταξη πλήρως ορισμένη, η οποία όμως χαρακτηρίζεται από δύο παραμέτρους που τροποποιούνται με ακανόνιστο εντός ορίων τιμών τρόπο: η παράμετρος του ύψους και η παράμετρος της κατακόρυφης κλίσης. Οι δύο αυτές παράμετροι κινούνται εντός του εύρους ελάχιστου και μέγιστου ορίου. Ανάλογα με την ομάδα στην οποία ανήκει η κάθε στήλη, λαμβάνει αντίστοιχη τιμή ύψους ανάλογα με το εύρος τιμών της ομάδας της, ενώ η παράμετρος της κλίσης διαφοροποιείται για όλες τις στήλες ανεξαρτήτως ομάδας.

<sup>259</sup> Peter Eisenman, 'Memorial to the Murdered Jews of Europe', Stiftung Denkmal für die ermordeten Juden Europas, ημερομηνία πρόσβασης 16 Φεβρουάριος 2020, <https://www.stiftung-denkmal.de/memorials/memorial-to-the-murdered-jews-of-europe/?lang=en>.



Εικόνα 4\_58: Memorial to the Murdered Jews of Europe, Peter Eisenman, 2004. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

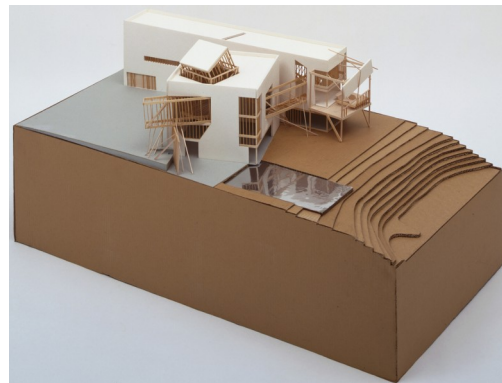
Όπως αναφέρει ο Eisenman <sup>260</sup>, η διαφορά ύψους μοιάζει τυχαία αλλά δεν ισχύει αυτό. Η στάθμη των επιπέδων καθορίζονται από τη διαστάυρωση του κενού με τον κανάβο του αστικού ιστού του Βερολίνου, γεγονός που δίνει την εντύπωση αταξίας όπου χάνεται η έννοια της απόλυτης αξονικότητας και χάνεται η έννοια της ασφάλειας στο εσωτερικό σύστημα όσο και στο περιβάλλον. Τα δύο συστήματα κανάβων, δημιουργούν μια ζώνη αστάθειας. Όπως περιγράφεται από τον αρχιτέκτονα, υπάρχει συγκεκριμένη μεθοδολογία ορισμού του ύψους των στηλών. Όμως, το πλήθος των στηλών και οι διαφοροποιήσεις που έχουν ως προς το ύψος και την κλίση δεν δίνουν τη δυνατότητα στον επισκέπτη να συνδέσει τη μορφή με τη μεθοδολογία από την οποία έχει προκύψει, οπότε μπορεί να θεωρηθεί ότι οι διαφοροποιήσεις **αναγνωρίζονται** ως τυχαίες. Ο κανόνας ενώ υπάρχει, δεν μπορεί να εξαχθεί νοητικά από το αποτέλεσμα που δημιουργεί. Για τον παρατηρητή που δεν γνωρίζει ή δεν αντιλαμβάνεται τον κανόνα **υφίσταται τυχειότητα**, ενώ για το δημιουργό του **δεν υπάρχει τυχειότητα**, καθώς όλες οι σχέσεις των μορφών και της δομής είναι απόλυτα ορισμένες και σχεδιασμένες.

- Οι κατοικίες **Gehry House** (1978) και **Familian House** (1978) του **Frank Gehry** είναι δύο δείγματα αρχιτεκτονικής αποδόμησης (deconstructivist architecture), όπου η **μη καθαρότητα** της μορφής παρουσιάζεται ως κεντρική αρχιτεκτονική αρχή, όπου τα ελαττώματα είναι βασικά στοιχεία της κατασκευής και δεν μπορούν να αφαιρεθούν καθώς είναι και δομικά της στοιχεία <sup>261</sup>.

<sup>260</sup> Eisenman.

<sup>261</sup> Philip Johnson και Mark Wigley, *Deconstructivist Architecture* (New York: The Museum of Modern Art: Distributed by New York Graphic Society Books, Little Brown and Co., 1988), [www.moma.org/calendar/exhibitions/1813](http://www.moma.org/calendar/exhibitions/1813).

- Η κατοικία **Gehry** (Εικόνα 4\_59), είναι η κατοικία του αρχιτέκτονα, η οποία έχει προκύψει από επανασχεδιασμό προϋπάρχουσας κατοικίας του 1920. Το αρχιτεκτονικό αυτό σύνολο χαρακτηρίζεται από πειραματισμούς με πολλά διαφορετικά υλικά και καινοτόμο προσέγγιση όσον αφορά στη γεωμετρία των όγκων και την τοποθέτησή τους σε μη συμβατικές θέσεις. Ως παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί ο γυάλινος κύβος που δεν εδράζεται σε κάποιο από τα επίπεδα των πλευρών του, αλλά **φαίνεται** σαν να έχει τοποθετηθεί στο χώρο **τυχαία**, μετά από κάποια υποθετική πτώση. Ο συνδυασμός των υλικών **φαίνεται** να έχει γίνει επίσης με τυχαίο τρόπο καθώς υπάρχει πλουραλισμός και συνδυασμοί που **παραπέμπουν στη λογική** υπολειμμάτων, που απλά έχουν προκύψει ως τυχαία σύνθεση.
- Σε αντίθεση με το Gehry House, το **Familian House** <sup>262</sup> (Εικόνα 4\_60), πάλι από τον Gehry, είναι ένα μη υλοποιημένο έργο κατοικίας τριών επιπέδων που είχε σχεδιαστεί για οικόπεδο με θέα στη θάλασσα στη Santa Monica, California. Το κτίσμα αποτελείται από παραλληλεπίπεδους κύριους όγκους από λευκό επίχρισμα οι οποίοι εμφανίζουν ακανόνιστες οπές/διασπάσεις σε διάφορες περιοχές τους, όπως για παράδειγμα σε γωνίες ή στις πλευρές. Στις θέσεις αυτές εμφανίζεται ο φέρων οργανισμός της κατοικίας, ο οποίος επεκτείνεται σε διάφορες κατασκευές οι οποίες προσαρτώνται στους κύριους όγκους και έχουν ακανόνιστη δομή και μορφή. Όπως αναφέρεται <sup>263</sup>, οι ιδιόμορφες αυτές κατασκευές δεν έχουν πάντα λειτουργική υπόσταση, αλλά ενίοτε αποτελούν διακοσμητικά στοιχεία και υποδηλώνουν ότι η κατασκευή δεν έχει ολοκληρωθεί, αλλά είναι ένα έργο σε εξέλιξη. Η εμφάνιση δύο μορφολογικών συστημάτων σε μία ενιαία σύνθεση προσδίδει στο έργο μια εικόνα ανταγωνισμού μεταξύ τους, με τα **ελεύθερα/«τυχαία»** στοιχεία να αντιμάχονται την τάξη και το ρυθμό των κύριων όγκων. Ο συνδυασμός των δύο διαφορετικών συστημάτων δίνει την εντύπωση ενός δυναμικού μη στατικού έργου.



Εικόνα 4\_59: Gehry House, Frank O. Gehry, 1978. Πηγή: Gehry House – Image01.jpg, Frank Gehry's house in a posh area in Santa Monica. It is built upon an old house, with new elements added into the frame, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gehry\\_House\\_-\\_Image01.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gehry_House_-_Image01.jpg), εικόνα του/της: *IK's World Trip*, άδεια: CC BY 2.0, [Creative Commons Attribution 2.0 Generic](https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/) license.

Εικόνα 4\_60: Familian House Project, Santa Monica, California, Frank O. Gehry, 1977-78. Πηγή: <https://www.moma.org/collection/works/1020>, © The Museum of Modern Art.

262 Michael J. Ostwald και Josephine Vaughan, *The Fractal Dimension of Architecture* (Birkhäuser, 2016), 296.

263 Ostwald και Vaughan, 296.

- Ο **Daniel Libeskind** στο έργο της επέκτασης του **Denver Art Museum**<sup>264 265</sup> (Εικόνα 4\_61, Εικόνα 4\_62) (2006) στο Colorado, δημιουργεί ένα σύγχρονο μουσείο τέχνης το οποίο έχει μη συμβατική γεωμετρία, από όγκους με κεκλιμένα επίπεδα που συμπλέκονται και δημιουργούν **«τυχαίους»** συνδυασμούς στο χώρο. Οι παραλληλίες στη μορφή φαίνεται να έχουν καταργηθεί τόσο στο εξωτερικό όσο και στο εσωτερικό της κατασκευής και δίνεται η εντύπωση ότι τα πρίσματα και οι αλληλοτομίες των γεωμετρικών στερεών έχουν προκύψει από κάποιο σχεδιαστικό «ατύχημα» και όχι από αρχιτεκτονικό σχεδιασμό.

Η μη ύπαρξη ευθυγραμμίσεων στη γεωμετρία, η κατάργηση της συμμετρίας και η έλλειψη κατακόρυφων και οριζώντιων ακμών είναι μερικά από τα συμβατικά στοιχεία σχεδιασμού που απουσιάζουν από το σχεδιασμό του συγκεκριμένου έργου και εντείνουν την αίσθηση ενός αρχιτεκτονικού αποτελέσματος **«αταξίας»**. Παρόμοια εντύπωση αταξίας, η οποία προκύπτει από γεωμετρία και χώρους που προκύπτουν από αλληλοτομίες στερεών, παρατηρείται σε πολλά από τα έργα του Libeskind όπως το Jewish Museum Berlin (2001), το Wohl Centre (2005), το Royal Ontario Museum, κ.ά. Σύμφωνα με αυτή τη λογική, η λύση πρέπει να είναι προϊόν διαδικασίας η οποία εξαρτάται από περιορισμούς και παραμέτρους που έχουν άμεση σχέση με το περιβάλλον, το χώρο, τις ανάγκες και τη λειτουργία.



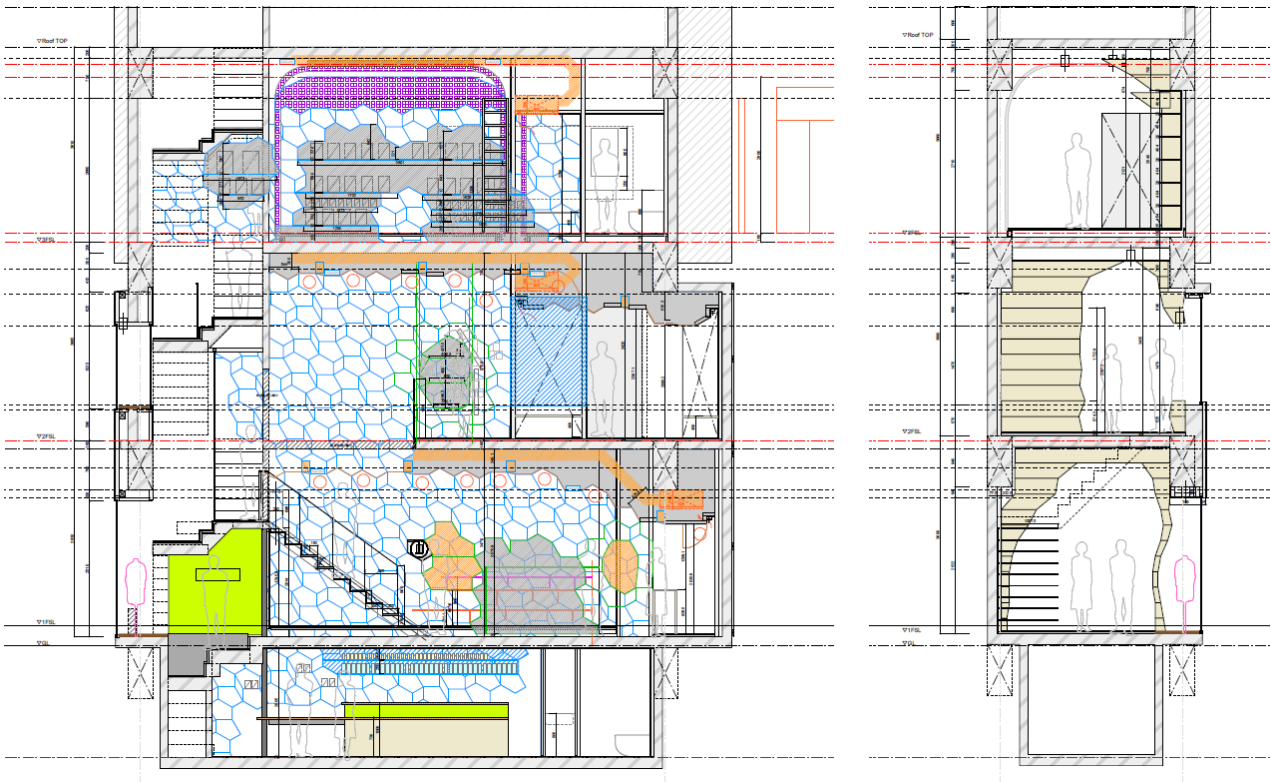
Εικόνα 4\_61: Denver Art Museum, Daniel Libeskind, 2006.  
 Πηγή: Denver Art Museum.JPG, Denver Art Museum (DAM) in Denver, CO,  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Denver\\_Art\\_Museum.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Denver_Art_Museum.JPG), εικόνα του/της: *Stilfehler*, άδεια: CC BY-SA 1.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 1.0 Generic license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/).

Εικόνα 4\_62: Denver Art Museum, Daniel Libeskind, 2006.  
 Πηγή: Denver Art Museum 2.jpg, Denver Art Museum, Denver,  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Denver\\_Art\\_Museum\\_2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Denver_Art_Museum_2.jpg), εικόνα του/της: *J. Miers - User: (WT-shared) Jtesla16 at wts wikivoyage*, άδεια: CC BY-SA 3.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/).

264 'Extension to the Denver Art Museum, Frederic C. Hamilton Building', Libeskind, ημερομηνία πρόσβασης 18 Φεβρουάριος 2020, <https://libeskind.com/work/extension-to-the-denver-art-museum-frederic-c-hamilton-building/>.

265 'Denver Art Museum / Studio Libeskind', ArchDaily, 5 Οκτώβριος 2010, <http://www.archdaily.com/80309/denver-art-museum-daniel-libeskind/>.

• Σε μικρότερη κλίμακα κατασκευής, στο έργο του **Kengo Kuma** για το σχεδιασμό του καταστήματος Lucien Pellat - **Finet boutique**<sup>266 267</sup> στην Osaka (2009), παρατηρείται η εφαρμογή μιας αλγοριθμικής / παραμετρικής προσέγγισης στο σχεδιασμό των ξύλινων κυψελών που εκτείνονται στο εσωτερικό του καταστήματος. Η διάταξη των κυψελών από plywood ξεκινάει από το ισόγειο του καταστήματος και καθώς απλώνεται σε τοίχους και οροφή συνεχίζει στον πρώτο και δεύτερο όροφο. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές κυψέλες κατασκευασμένες από 2 διαφορετικά πάχη plywood, ενώ χρησιμοποιούνται 3 τύποι συνδέσμων αλουμινίου. Η κατασκευή φαίνεται να προσαρμόζεται στο κέλυφος του κτηρίου και τα κελιά διαφοροποιούνται μεταξύ τους αλγοριθμικά όπου απαιτείται, ώστε να υλοποιηθεί η προσαρμογή των μερών με βάση το σχεδιασμό του συνόλου. Η τυχαιότητα λοιπόν σε αυτή την περίπτωση δίνει την δυνατότητα διαφοροποίησης τοπικά, ενώ συνολικά διατηρείται ο συνολικός σχεδιασμός βάση συγκεκριμένων παραμέτρων. Εάν δεν υπήρχε η δυνατότητα τοπικής διαφοροποίησης και προσαρμογής όπου απαιτείται, δεν θα μπορούσε να δημιουργηθεί μια κατασκευή όπως η συγκεκριμένη, με βασικά χαρακτηριστικά την έννοια της συνέχειας, της ροής και της επανάληψης (με παραλλαγές) μιας βασικής τυπολογίας, αυτής της κυψέλης.



Εικόνα 4\_63: Lucien Pellat Finet boutique, Kengo Kuma, 2009. Πηγή: Kengo Kuma and Associates. © Kengo Kuma and Associates., χρήση κατόπιν αδείας.

266 Salvador-John A. Liotta, *Kengo Kuma Organic Architecture Compasses*, ημερομηνία πρόσβασης 5 Φεβρουάριος 2020, [https://www.academia.edu/35438993/Kengo\\_Kuma\\_Organic\\_Architecture\\_Compasses](https://www.academia.edu/35438993/Kengo_Kuma_Organic_Architecture_Compasses).

267 'Lucien Pellat-Finet Shinsaibashi / Kengo Kuma & Associates', *ArchDaily*, 15 Ιανουάριος 2012, <http://www.archdaily.com/199601/lucien-pellat-finet-shinsaibashi-kengo-kuma-associates/>.





Εικόνα 4\_64: *Blur Building*, Diller Scofidio + Renfro, 2002. Πηγή: 20020717 Expo Yverdon 21.JPG, Expo.02 in Neuenburg, Yverdon, Biel and Murten (exact location see file name), [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20020717\\_Expo\\_Yverdon\\_21.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20020717_Expo_Yverdon_21.JPG), εικόνα του/της: Norbert Aepli, Switzerland (User:Noebu), άδεια: CC BY 2.5, [Creative Commons Attribution 2.5 Generic license](https://creativecommons.org/licenses/by/2.5/).

- Οι **Diller Scofidio + Renfro** το 2002 υλοποίησαν το **Blur Building**<sup>268</sup> (Εικόνα 4\_64) στο Yvedons-Les-Bains της Ελβετίας για τη Swiss Expo 2002. Το Blur Building είναι μια κατασκευή που βρίσκεται στην επιφάνεια της λίμνης Neuchâtel και όπως αναφέρεται από τους αρχιτέκτονες του έργου, πρόκειται για μια αρχιτεκτονική της ατμόσφαιρας, όπου παράγεται ομίχλη από φυσικές και ανθρωπογενείς δυνάμεις. Το νερό της λίμνης αντλείται και διοχετεύεται σε 35.000 ακροφύσια υψηλής πίεσης όπου και μετατρέπεται σε ομίχλη η οποία διαχέεται στο χώρο. Τα ακροφύσια ελέγχονται από αισθητήρες που λαμβάνουν δεδομένα για τη θερμοκρασία, την υγρασία, την ταχύτητα και δύναμη του ανέμου και ανάλογα προσαρμόζουν τη λειτουργία τους.

Η κατασκευή αυτή καθεαυτή είναι μια ελαφριά μεταλλική διάταξη τύπου tensegrity, διαστάσεων 91,44m X 60,96m και 22,86m ύψους στηριζόμενη σε 4 υποστυλώματα, η οποία λειτουργεί ως υποδομή για τη διάταξη των ακροφυσίων και χώρος πρόσβασης των επισκεπτών μέσω διαδρόμων που συνδέουν την κατασκευή με την ξηρά. Η χρήση της ομίχλης δεν έχει φυσικά κατασκευαστικό ρόλο, επηρεάζει όμως τον τρόπο που παρουσιάζεται η κατασκευή κάθε φορά. Η ομίχλη αποκρύπτει διαφορετικά τμήματά της κατασκευής και διαμορφώνει έναν ακαθόριστο όγκο διαχέουσας ομίχλης που έχει αφετηρία στην κατασκευή και διοχετεύεται στο περιβάλλον. Η **μορφή της κατασκευής** με την ενεργοποιημένη ομίχλη μεταβάλλεται διαρκώς, λόγω των φυσικών παραμέτρων που επηρεάζουν τους αισθητήρες ελέγχου, με αποτέλεσμα **η τυχειότητα** να εμφανίζεται σε αυτή την περίπτωση σε πολύ υψηλό βαθμό, ενώ **η δομή της κατασκευής** (και η υποδομή) της ομίχλης παραμένει απολύτως ελεγχόμενη και αναλλοίωτη.

- Το γλυπτό του **Arne Quinze** με τίτλο **“The Passenger”**<sup>269</sup> (Εικόνα 4\_65) κατασκευάστηκε το 2015 στην πόλη Mons στο Βέλγιο. Πρόκειται για μία ξύλινη κατασκευή διαστάσεων 85m μήκους και 16m ύψους, η οποία αναπαριστά φωλιά πουλιών. Η κατασκευή αποτελείται από τη σύνθεση ξύλινων

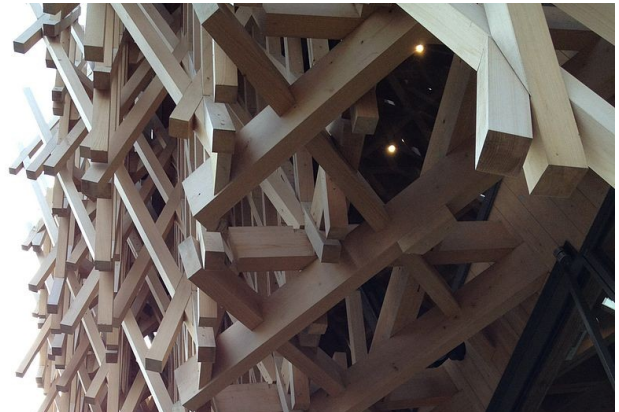
<sup>268</sup> ‘Blur Building’, DS+R, ημερομηνία πρόσβασης 4 Φεβρουάριος 2020, <https://dsrny.com/project/blur-building>.

<sup>269</sup> ‘The Passenger’, Arne Quinze, ημερομηνία πρόσβασης 1 Φεβρουάριος 2020, <https://www.arnequinze.com/art-and-exhibitions/the-passenger>.



Εικόνα 4\_65: *The Passenger*, Arne Quinze, Mons, 2015. Πηγή: Ε. Τσακανίκα. © Ε. Τσακανίκα, χρήση κατόπιν άδειάς.

Εικόνα 4\_66: *Sunny Hills Shop*, Kengo Kuma, 2013. Πηγή: <https://www.flickr.com/photos/superidoljp/13972861577/>, εικόνα του/της: *superidoljp*, άδεια: CC BY-SA 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>



Εικόνα 4\_67: *Dazaifu Starbucks*, Kengo Kuma, 2011. Η ξύλινη δικτυωματική κατασκευή στο εσωτερικού του κτηρίου. Πηγή: [STARBUCKS DAZAIFU BY KENGO KUMA](https://www.flickr.com/photos/aya80904/33521743365/), <https://www.flickr.com/photos/aya80904/33521743365/>, εικόνα του/της: *Hsuanya Tsai*, άδεια: CC BY-NC 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>

Εικόνα 4\_68: *Sunny Hills Shop*, Kengo Kuma, 2013, λεπτομέρεια. Πηγή: [Sunny Hills by Kengo Kuma.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sunny_Hills_by_Kengo_Kuma.JPG), *Sunny Hills, Minami Aoyama by Kengo Kuma and Associates*, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sunny\\_Hills\\_by\\_Kengo\\_Kuma.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sunny_Hills_by_Kengo_Kuma.JPG), εικόνα του/της: *Rafbalboa*, άδεια: CC BY-SA 3.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/).

στοιχείων διαφορετικών διατομών και μήκους, με **ακανόνιστο - τυχαίο** τρόπο, έτσι ώστε να δίνεται η εντύπωση ότι δημιουργείται πάνω από το έδαφος φωλιά πουλιών τεραστίων διαστάσεων.

Σε αντίθεση με τα προηγούμενα παραδείγματα, δεν υπάρχει εμφανώς κάποιο ξεκάθαρο δομικό σύστημα με την ανάλογη συνδεσμολογία των ξύλινων στοιχείων. Η κατασκευή στηρίζεται σε 6 τριπλά ξύλινα υποστυλώματα που εδράζονται σε βάσεις από οπλισμένο σκυρόδεμα, τα οποία στη συνέχεια δημιουργούν ένα σκελετό πάνω στον οποίο τοποθετούνται οι υπόλοιπες σανίδες. Η ποσότητα, η πυκνότητα και η διάταξη των ξύλινων στοιχείων δεν ευνοεί τη διάκριση του φέροντος οργανισμού της κατασκευής από τα στοιχεία επικάλυψής του. Αυτό που αντιλαμβάνεται ο επισκέπτης είναι ένα πυκνό και ακανόνιστο σύμπλεγμα, το οποίο δεν φαίνεται να έχει κάποια συγκεκριμένη δομή, μορφή ή όριο. Καθώς δεν ακολουθείται το αυστηρό γεωμετρικό σύστημα κατασκευής του **Kengo kuma**, όπως για

παράδειγμα στα έργα του **Dazaifu Starbucks** (Kengo Kuma, 2011, Εικόνα 4\_67) ή το κατάστημα **Sunny Hills** (Kengo Kuma, 2013, Εικόνα 4\_66, Εικόνα 4\_68) στο Τόκιο όπου οι μορφές και το φέρων σύστημα των κατασκευών **δεν είναι τυχαίες αλλά εξαιρετικά πολύπλοκες, με μεγάλη ακρίβεια μελετημένες και προσαρμοσμένες στο χώρο**, στην περίπτωση του **Arne Quinze**, κάθε μεμονωμένο στοιχείο έχει τοποθετηθεί ξεχωριστά και με διαφορετική συνδεσμολογία, χωρίς να υπάρχει κάποια ένδειξη της τυποποίησης και επανάληψης. Η μη ύπαρξη τυποποιημένων κανόνων στην κατασκευή υπονοεί **τον χαοτικό και τυχαίο χαρακτήρα του έργου**. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ενώ αρχικά προβλεπόταν διάρκεια έκθεσης του έργου για πέντε χρόνια, μετά από την πτώση σανίδων, η κατασκευή αποσυρμολογήθηκε για λόγους ασφαλείας και στη συνέχεια κατασκευάστηκε εκ νέου.

- Η κατοικία **Sharifi-ha**<sup>270</sup> στο Iran (2014), είναι ένα ακόμα παράδειγμα κινητικής αρχιτεκτονικής. Πρόκειται για ένα κτήριο κατοικίας το οποίο κατασκευάστηκε το 2014 από το αρχιτεκτονικό γραφείο **Next Office** στο Ιράν. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτού του κτηρίου είναι η δυνατότητα περιστροφής τριών διαφορετικών δωματίων, ένα σε κάθε όροφο, προς τον επιθυμητό κάθε φορά προσανατολισμό, η οποία επιτρέπει την μερική προσαρμογή στις έντονες εποχιακές θερμοκρασιακές μεταβολές της περιοχής. Έτσι, τα δωμάτια κατά τους καλοκαιρινούς μήνες μπορούν να στραφούν προς τη θέα, ενώ το χειμώνα, όπου υπάρχουν απαιτήσεις προστασίας από το έντονο κρύο, τα δωμάτια μπορούν να περιστραφούν και να παρουσιάσουν κλειστό μέτωπο προς την εκτεθειμένη πλευρά. Τα τρία αυτά δωμάτια μπορούν να τοποθετηθούν σε κατάλληλες θέσεις, με αποτέλεσμα να μπορούν να εμφανιστούν απεριόριστοι πιθανοί συνδυασμοί όψεων του κτηρίου, καθώς αυτά περιστρέφονται ανεξάρτητα και μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιαδήποτε γωνία στο εύρος από 0° έως 90°, εύρος που αποτελεί και το **όριο** της περιστροφής τους. Η μεταβολή της όψης του κτηρίου εμπεριέχει την παράμετρο της **τυχαιότητας**, καθώς οι **πιθανές παραλλαγές** της συνδέονται με τις κλιματολογικές μεταβολές **σε συνδυασμό** με τις επιθυμίες των χρηστών και τις λειτουργικές τους απαιτήσεις. Οι παραπάνω συνδυασμοί δίνουν έναν εξαιρετικά μεγάλο αριθμό πιθανών παραλλαγών όψεων. Το κτήριο αποκτά σημαντική ευελιξία, καθώς πρόκειται για μια δυναμική δομή που **μπορεί να παράξει πολύ μεγάλο αριθμό μη προκαθορισμένων παραλλαγών μορφών εντός συγκεκριμένων ορίων**. Η έννοια της μεταβολής είναι μία από τις βασικές ιδέες για το σχεδιασμό και την κατασκευή του έργου.

- Σε μία αντίστοιχη λογική περιστροφής μπορεί κανείς να παρατηρήσει το παράδειγμα του **ReActor** από τους **Schweder + Shelley** (2016)<sup>271</sup> (Εικόνα 4\_69). Πρόκειται για ένα έργο performance art σχετικά με την έννοια της κατοίκησης. Περιλαμβάνει ένα κτίσμα κατοικίας δύο ατόμων, το οποίο μορφολογικά είναι ένα επίμηκες παραλληλεπίπεδο μεταλλικής και ξύλινης κατασκευής, που φιλοξενεί τους χώρους της κατοικίας και το οποίο στηρίζεται σε ένα κεντρικό κυλινδρικό υποστύλωμα από σπλισμένο σκυρόδεμα. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της κατασκευής είναι ότι το κτήριο μπορεί να περιστρέφεται κατά 360 μοίρες (rotation) γύρω από το κεντρικό υποστύλωμα, αλλά παράλληλα μπορεί να λαμβάνει κλίση προς το ένα ή το αντίθετο άκρο του, ανάλογα με την κατανομή βάρους

270 'Next Office | Studio of Architectural Research and Design', Next Office, ημερομηνία πρόσβασης 25 Ιανουάριος 2020, <http://nextoffice.ir/#/>.

271 'ReActor | Schweder + Shelley', 25 Ιανουάριος 2020, <http://www.schwedershelley.com/reactor/>.



Εικόνα 4\_69: ReActor, Schweder + Shelley, 2016. Πηγή: <http://www.schwedershelley.com/reactor/> © Schweder + Shelley, χρήση κατόπιν άδειας.



Εικόνα 4\_70: The Shed, Diller Scofidio+Renfro, 2019. Το κτήριο/υπόστεγο σε διάταξη συστολής. Πηγή: The Shed - Complete (48206488176).jpg, Hudson Yards, NYC, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The\\_Shed\\_-\\_Complete\\_\(48206488176\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Shed_-_Complete_(48206488176).jpg), εικόνα του/της: Ajay Suresh from New York, NY, USA, άδεια: CC BY 2.0, [Creative Commons Attribution 2.0 Generic license](https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/).

στο εσωτερικό των χώρων (tilt). Ο συνδυασμός αυτών των δύο παραμέτρων περιστροφής μπορεί να αποδώσει πολλαπλές **τυχαίες μη προβλέψιμες** θέσεις της κατασκευής στο χώρο, εντός των ελάχιστων και μέγιστων επιτρεπτών ορίων που ορίζονται από τις κατασκευαστικές προδιαγραφές του έργου.

- Ακόμα ένα παράδειγμα κτηρίου το οποίο εμπεριέχει και κινητά τμήματα είναι το **The Shed (Diller Scofidio+Renfro, 2019, Εικόνα 4\_70)** στη Νέα Υόρκη <sup>272 273</sup>. Πρόκειται για ένα κέντρο Τεχνών το οποίο έχει έμβαδόν 16.000m<sup>2</sup> και αποτελείται από ένα σταθερό τμήμα κτηρίου το οποίο μπορεί να επεκταθεί μετά την επέκταση υπόστεγου στον υπαίθριο χώρο. Τόσο το σταθερό όσο και το υπό επέκταση τμήμα του κέντρου μπορούν να φιλοξενήσουν εκθέσεις και άλλες καλλιτεχνικές δραστηριότητες. Πρόκειται για μία μεταλλική κατασκευή, τόσο για το σταθερό όσο και για το κινούμενο τμήμα του κτηρίου. Προκειμένου να μειωθεί το βάρος του υπόστεγου και να διευκολυνθεί η κίνηση του στις ράγες στον υπαίθριο χώρο, η εξωτερική επικάλυψη της κατασκευής έχει γίνει με τη χρήση ETFE. Μετά την επέκταση του στεγάστρου στον υπαίθριο χώρο του κέντρου δημιουργείται στεγασμένος ελεύθερος χώρος μεγάλων διαστάσεων, ο οποίος μπορεί να φιλοξενήσει ιδιαίτερα απαιτητικά εκθέματα από άποψη μεγέθους. Η όλη κατασκευή είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε να μπορεί να τροποποιείται και να προσαρμόζεται στις εκάστοτε λειτουργικές απαιτήσεις (εκθέσεις, συναυλίες, προβολές, κ.λπ.) μέσω επεκτάσεων και ενοποιήσεων χώρων, υποδοχή και διαμόρφωση εγκαταστάσεων κερκίδων, κ.λπ. Αυτή η ευελιξία μέσω του σχεδιασμού και της κατασκευής, δίνει τη δυνατότητα συνεχούς μεταβολής της μορφής του κτηρίου και προσαρμογής του στις εκάστοτε ανάγκες. Η μεταβολή και η προσαρμοστικότητα είναι παράμετροι του σχεδιασμού και της

272 'The Shed', DS+R, ημερομηνία πρόσβασης 25 Ιανουάριος 2020, <https://dsrny.com/project/the-shed>.

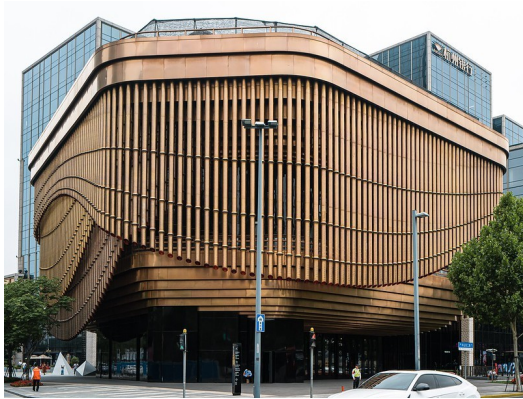
273 'The Shed (Arts Center)', στο *Wikipedia*, 23 Ιανουάριος 2020, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=The\\_Shed\\_\(arts\\_center\)&oldid=937216246](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=The_Shed_(arts_center)&oldid=937216246).

κατασκευής που σχετίζονται με την **τυχειότητα, το απρόβλεπτο και το μη προγραμματισμένο**. Αυτές οι παράμετροι λαμβάνονται υπ' όψη κατά το σχεδιασμό και τη διαμόρφωση της δομής και της μορφής του έργου.

- Το **Fosun Foundation** στην Shanghai (**Norman Foster+Partners, Heatherwick Studio**, 2017) <sup>274</sup> (Εικόνα 4\_71, Εικόνα 4\_72), είναι ένα ακόμα δείγμα κτηρίου κινητικής αρχιτεκτονικής που φιλοξενεί εκθέσεις και δραστηριότητες τέχνης. Το κτήριο χαρακτηρίζεται από την όψη του, στην οποία κυριαρχεί ένα κινητό πέτασμα τριών στρώσεων από κατακόρυφα κυλινδρικά στοιχεία αναρτημένα από την οροφή. Οι τρεις αυτές ζώνες στοιχείων όπως κινούνται στην περίμετρο του κτηρίου, λειτουργούν ως πέπλο που αποκαλύπτουν ή κρύβουν το κτήριο πίσω τους. Η κινούμενη όψη, με τους συνδυασμούς των τριών επάλληλων στρώσεων, δημιουργεί **πολλαπλές παραλλαγές** των όψεων του κτηρίου.
- Ένα ακόμα παράδειγμα κινητικής όψης κτηρίου είναι το σύστημα κινητικής μεμβράνης **FLARE** (2008) από τους **WhiteVOID** <sup>275</sup> (Εικόνα 4\_73, Εικόνα 4\_74). Το σύστημα αυτό είναι μία διάταξη από μεταλλικά στοιχεία τα οποία κινούνται από ανεξάρτητα ελεγχόμενα πνευματικά πιστόνια μέσω συστήματος ηλεκτρονικού υπολογιστή. Το σύστημα αυτό μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε κτήριο και να προσαρμοστεί στην επιφάνεια της όψης του. Οι θέσεις των μεταλλικών στοιχείων ελέγχονται από ηλεκτρονικό υπολογιστή έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα διαρκούς μεταβολής της όψης. Η κατασκευή αυτή δεν έχει ως στόχο τον έλεγχο του φωτισμού και τη σκίαση στο εσωτερικό του κτηρίου, αλλά επηρεάζει τη μορφή της όψης της, καθώς η διαφορετική κλίση των μεταλλικών στοιχείων τα κάνει να αντανακλούν με διαφορετικό τρόπο το φως και επιτρέπει τη δημιουργία σχεδίων πάνω στην όψη. Οι πιθανοί συνδυασμοί των θέσεων και ως εκ τούτου των όψεων, είναι απεριόριστοι και εξαρτώνται από τον κώδικα προγραμματισμού που τους καθορίζει και τους σχετικούς αισθητήρες και τα ερεθίσματα που αυτοί λαμβάνουν. Ενώ η διάταξη της όψης δεν είναι είναι τυχαία στην περίπτωση των προαποθηκευμένων επιλογών, καθώς σε αυτή την περίπτωση η θέση κάθε μεμονωμένου στοιχείου είναι αυστηρά προκαθορισμένη, δυναμικά μπορούν να δημιουργηθούν άπειρες παραλλαγές (εντός των προδιαγραφών του συστήματος) καθώς δεν υπάρχουν περιορισμοί στον επαναπρογραμματισμό και την αναδιάταξη του. **Το σύστημα αυτό εμπεριέχει δηλαδή την έννοια της τυχειότητας ως δυναμική υλοποίηση άπειρων πιθανών ενδεχόμενων**. Η διάταξη συμπληρώνεται από αισθητήρες στο εσωτερικό και εξωτερικό του κτηρίου, οι οποίοι είναι άμεσα συνδεδεμένοι με το σύστημα ελέγχου και τροποποιούν διαδραστικά την όψη με πραγματικά τυχαίο τρόπο.

274 Foster + Partners / [www.fosterandpartners.com](http://www.fosterandpartners.com), 'Bund Finance Center | Foster + Partners', ημερομηνία πρόσβασης 26 Ιανουάριος 2020, <https://www.fosterandpartners.com/projects/bund-finance-center/>.

275 Wolfgang Leeb, 'FLARE – Kinetic Membrane Facade', MAI, 7 Μάιος 2008, <https://www.mediaarchitecture.org/flare-kinetic-membrane-facade/>.

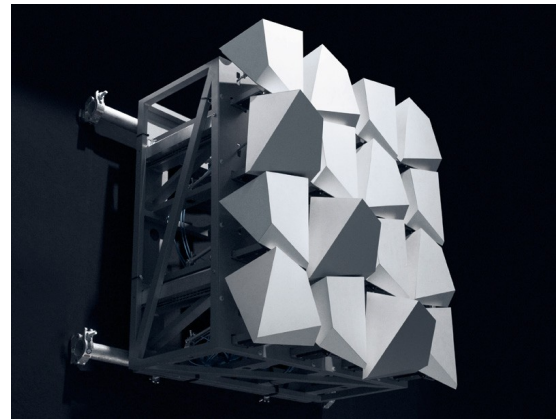


Εικόνα 4\_71: Fosun Foundation, Norman Foster+Partners, Heatherwick Studio, 2017. Πηγή: [The Bund Finance Center in Shanghai.jpg](#), Lamborghini Urus in-front of Bund Finance center;

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The\\_Bund\\_Finance\\_Center\\_in\\_Shanghai.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Bund_Finance_Center_in_Shanghai.jpg) , εικόνα του/της: GillyBerlin , άδεια: CC BY 2.0, [Creative Commons Attribution 2.0 Generic license](#). (cropped).

Εικόνα 4\_72: Fosun Foundation, Norman Foster+Partners, Heatherwick Studio, 2017. Πηγή: [Fundación Fosun en Shanghái.jpg](#), Edificio de la fundación Fosun en la ciudad de Shanghái en China,

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fundaci%C3%B3n\\_Fosun\\_en\\_Shangh%C3%A1i.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fundaci%C3%B3n_Fosun_en_Shangh%C3%A1i.jpg) , εικόνα του/της: Agomga14 , άδεια: CC BY-SA 4.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license](#). Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.



Εικόνα 4\_73: FLARE - Kinetic Membrane Facade, Whitevoid, 2008. Πηγή:

[https://www.whitevoid.com/#/main/architecture\\_spaces/fla\\_re\\_facade](https://www.whitevoid.com/#/main/architecture_spaces/fla_re_facade) , © WhiteVOID, χρήση κατόπιν αδείας.

Εικόνα 4\_74: FLARE - Kinetic Membrane Facade, Whitevoid, 2008. Λεπτομέρεια κατασκευής. Πηγή:

[https://www.whitevoid.com/#/main/architecture\\_spaces/fla\\_re\\_facade](https://www.whitevoid.com/#/main/architecture_spaces/fla_re_facade) , © WhiteVOID, χρήση κατόπιν αδείας.

- Το 2014 στις εγκαταστάσεις των χειμερινών Ολυμπιακών Αγώνων στο Sochi της Ρωσίας κατασκευάστηκε μία διαδραστική κινητική όψη μεγάλων διαστάσεων η οποία μπορούσε να αναπαράγει γεωμετρικά τα σχήματα προσώπων των επισκεπτών. Το έργο ονομάστηκε **MEGAFACES** και δημιουργήθηκε από το γραφείο **iart**<sup>276</sup> και συνεργάτες. Το έργο ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί με τη χρήση συστήματος καταγραφής φωτογραφιών και μετατροπής τους σε γεωμετρία μέσω διάταξης 11.000 πιστονιών που εισέρχονταν ή εξέρχονταν σε κατάλληλη απόσταση ώστε να δημιουργούνται επιφάνειες που αναπαριστούν τη μορφή των προσώπων. Οι παραλλαγές των πιθανών όψεων είναι απεριόριστες και εξαρτώνται από το πρωτογενές υλικό των φωτογραφιών που εισάγει ο κάθε χρήστης στο σύστημα.
- Άλλο δείγμα κινητικής αρχιτεκτονικής, σε μικρότερη όμως κλίμακα, είναι αυτό της κατασκευής του κινητικού τοίχου με τίλο **Aegis Hyposurface** (dECOi, 2011)<sup>277</sup>. Πρόκειται για έναν πρωτότυπο πειραματικό κινητικό τοίχο διαστάσεων μήκους 10m και ύψους 3m. Το Aegis είναι μια μεταλλική κατασκευή από επιμέρους μεταλλικά στοιχεία/πρόσωπα (faces) τα οποία κινούμενα από 896 πνευματικά πιστόνια αντιδρούν σε πραγματικό χρόνο σε ηλεκτρονικά ερεθίσματα που προέρχονται από το περιβάλλον όπως κίνηση, ήχος, φως, κ.λπ. Όπως αναφέρει ο Mark Burry<sup>278</sup>, το Aegis σηματοδοτεί τη μετάβαση σε ένα νέο είδος αρχιτεκτονικής από έναν αυτοπλαστικό/ντετερμινιστικό χώρο σε έναν αλλοπλαστικό χώρο.
- Στην ίδια λογική κινείται η κατασκευή κινητικού γλύπτου της εταιρείας Microsoft με τίτλο **Momentum** (Volvox Labs, 2017)<sup>279</sup>. Το Momentum είναι μία κατασκευή από 160 ξύλινα πανέλα τα οποία μπορούν να μετακινηθούν από μηχανισμούς συνδεδεμένους με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η χρήση προγραμματισμού και αισθητήρων δίνει τη δυνατότητα τροποποίησης της όψης ανάλογα με τον αλγόριθμο του συστήματος. Η κατασκευή κινείται όταν αντιλαμβάνεται ανθρώπινη κίνηση και για αυτό το κύριο χαρακτηριστικό της είναι η διάδραση. Η συλλογή ερεθισμάτων από το περιβάλλον και η επιρροή τους στη μορφή έχει ως αποτέλεσμα στη συγκεκριμένη περίπτωση κανένα στιγμιότυπο της μορφής της κατασκευής να μην είναι ίδιο και **η τυχειότητα/μη προβλεψιμότητα** να έχουν βασικό ρόλο στο σχεδιασμό, στη λογική και στη λειτουργία της κατασκευής. Η μεταβολή είναι τυχαία λόγω της διάδρασης και υλοποιείται εντός των ορίων κίνησης των πανέλων που επιτρέπονται από την κατασκευή.
- Μία άλλη κατηγορία κτηρίων όπου υπάρχει αλληλεπίδραση με το περιβάλλον τους είναι αυτή των κτηρίων που διαθέτουν **αποκριτικές/διαδραστικές** προσόψεις (**responsive facades**), όπου δεν υπάρχει κάποιος άμεσος συσχετισμός με τη δομή της κατασκευής. Συνήθως σε αυτές τις περιπτώσεις οι όψεις του κτηρίων εξοπλίζονται με εγκαταστάσεις φωτισμού ή οθονών οι οποίες αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους μέσω αισθητήρων και συστημάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών. Αυτές οι όψεις καλούνται ως **media facades**, καθώς μεταμορφώνουν τις όψεις των

276 'Iart - Studio for Media Architectures', ημερομηνία πρόσβασης 4 Ιουλίου 2024, <https://iart.ch>.

277 Mark Burry, 'Aegis Hyposurface', MARK BURRY, 20 Ιανουάριος 2012, <https://mcburry.net/aegis-hyposurface/>.

278 Burry.

279 'With the Microsoft Lounge at L.A. LIVE, a New Technological Vision Blends Hollywood's Past and Present', Stories, ημερομηνία πρόσβασης 25 Ιανουάριος 2020, <https://news.microsoft.com/features/microsoft-lounge-l-live-new-technological-vision-blends-hollywoods-past-present/>.

κτηρίων σε πηγές προβολής μεταβλητών οπτικών ερεθισμάτων ψηφιακού περιεχομένου και αποτελούν κατά ένα τρόπο τη σύνδεση ανάμεσα στον ψηφιακό και τον πραγματικό χώρο, με το κτήριο που τις φιλοξενεί να είναι το φυσικό υπόβαθρο αυτής της σύνδεσης χωρικά και χρονικά. Το υλικό που μπορεί να προβάλλεται, πολύ συχνά δεν είναι προκαθορισμένο και εξαρτάται από παραμέτρους οι οποίες συλλέγονται τοπικά με τη χρήση αισθητήρων ή καθορίζεται από τους χρήστες και επισκέπτες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το προϊόν προβολής να είναι κάθε φορά διαφορετικό και μη επαναλαμβανόμενο, με την παράμετρο της **τυχειότητας** να μπορεί να αποτελεί βασικό παράγοντα της διαδικασίας, ανάλογα με τον αλγόριθμο που έχει κάθε φορά οριστεί σε κάθε περίπτωση. Όπως παρουσιάστηκε στην αρχή αυτού του κεφαλαίου, ένα από τα πρώτα παραδείγματα κτηρίου αποκριτικής κατασκευής είναι ο **Πύργος των Ανέμων** του Τογο Ito (1986), όπου χρησιμοποιήθηκαν τα κύρια χαρακτηριστικά μιας αποκριτικής (responsive) όψης, όπως συστήματα φωτισμού, αισθητήρες, ηλεκτρονικοί υπολογιστές και φυσικά η γεωμετρία της αρχιτεκτονικής κατασκευής ως υπόβαθρο των παραπάνω. Σύγχρονα κτήρια αντίστοιχης λογικής, όπου γίνεται χρήση του φωτισμού για την τροποποίηση της εμφάνισης της όψης του κτηρίου, είναι για παράδειγμα τα: **Allianz Arena** (Herzog & de Meuron, 2005, Εικόνα 4\_77), προσωρινή εγκατάσταση **Blinken Lights** (Hermann Henselmann, 2001/2002 και 2004), **Centro de Creación Contemporánea de Andalucía** (Nieto Sobejano Arquitectos/realities:united, 2008/2009), **Chanel Tower** (Peter Marino, 2004, Εικόνα 4\_75), **Dexia Tower** (Philippe Samyn & Partners, M&J.M Jaspers-j.Eyers & Partners, 2006, Εικόνα 4\_78), **Galleria Store** (UNStudio/Arup Lighting, 2004), **Greenpix** (Simone Giostra & Partners/Arup, 2008), **KPN Tower** (Renzo Piano/Corsmit Engineers, 2000), **La Porte Shinsaibashi** (Plantec Architects Inc, 2007), **National Library Belarus** (Victor Karmaenko/Walter Industries, 2006), **Stadion Centre** (Freimuller Sollinger/ZT GmbH/Philips Lighting, 2007), **Uniq Tower** (Neumann und Partner/Erich Mosbacher, **Galleria Centercity** (UNStudio, 2008), **Roskilde incineration Line** (Gunver Hansen Tegnesteue, Erick van Egeraat/Martin Professional, 2014), BIX Light and Media Facade (realities:united, 2003, Εικόνα 4\_76).<sup>280 281 282</sup>

280 Thomas Fiedler, 'MEDIA FACADES EXHIBITION Deutsches Architektur Zentrum ( DAZ) GERMAN CENTRE FOR ARCHITECTURE ....., χ.χ., 59.

281 'Five Projects Awarded Prizes at the 2014 Media Architecture Biennale', ArchDaily, 26 Νοέμβριος 2014, <http://www.archdaily.com/572312/five-projects-awarded-prizes-at-the-2014-media-architecture-biennale/>.

282 'Light Matters: What Media Facades Are Saying', ArchDaily, 19 Μάρτιος 2013, <http://www.archdaily.com/344971/light-matters-what-media-facades-are-saying/>.






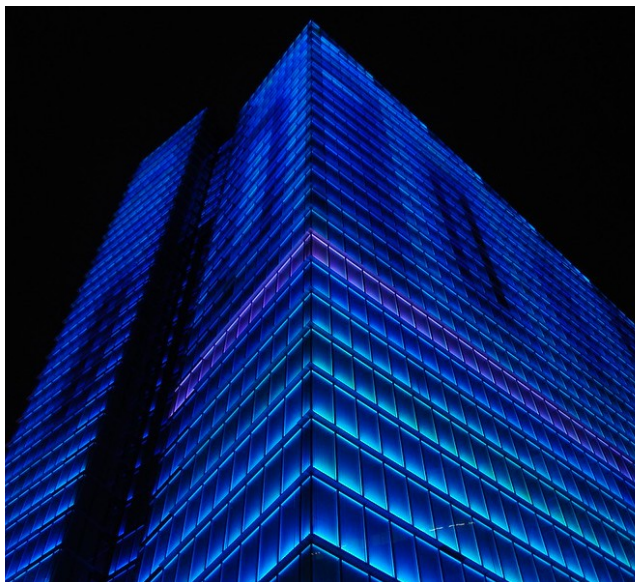
Εικόνα 4\_75: Chanel Tower, Peter Marino, 2004. Πηγή: Chanel-Ginza.jpg, Chanel Ginza, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chanel-Ginza.jpg>, εικόνα του/της: Luc Boegly, άδεια: CC BY-SA 4.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.



Εικόνα 4\_76: BIX Light and Media Facade, realities:united, 2003. Πηγή: Kunsthaus-Graz-Nacht-Medienfassade.jpg, Kunsthaus Graz - media facade (night shot), <https://ru.m.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Kunsthaus-Graz-Nacht-Medienfassade.jpg>, εικόνα του/της: Stephan Weinberger, άδεια: CC BY-SA 3.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)



Εικόνα 4\_77: Allianz Arena, Herzog & de Meuron, 2005. Πηγή: Allianz Arena zu verschiedenen Zeiten.jpg, The Allianz Arena is a football stadium in the north of Munich, Germany. The two professional Munich football clubs FC Bayern München and TSV 1860 München have played their home games at Allianz Arena since the start of the 2005/06 season. Because of its shape, the stadium is nicknamed the « Schlauchboot » (inflatable boat), [https://el.m.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Allianz\\_Arena\\_zu\\_verschiedenen\\_Zeiten.jpg](https://el.m.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Allianz_Arena_zu_verschiedenen_Zeiten.jpg), εικόνα του/της: Richard Bartz, Munich aka Makro Freak , Composition Niabot, άδεια: CC BY-SA 2.5, [Creative Commons Αναφορά προέλευσης-Παρόμοια διανομή 2.5 Γενική](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/)



Εικόνα 4\_78: Dexia Tower (Philippe Samyn & Partners, M&J.M Jaspers-j.Eyers & Partners, 2006. Πηγή: LAb[au]: Spectr|alum, <https://www.flickr.com/photos/marcwathieu/1467728846/>, εικόνα του/της: Marc Wathieu, άδεια: CC BY 2.0, [Marc Wathieu, https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/](https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/)

## 4.4 Τυχειότητα σε φέροντα στοιχεία της κατασκευής

Ο **τομέας της δομικής μηχανικής** (structural engineering) σχετίζεται με την **αβεβαιότητα** μέσω πολλών παραμέτρων, από τις οποίες άλλες είναι γνωστές ενώ άλλες όχι. Η αβεβαιότητα μπορεί να διακρίνεται είτε σε επιστημονική (ελλιπής γνώση), είτε σε αβεβαιότητα που σχετίζεται με την **τυχειότητα**

283 284

Η **τυχειότητα** θα μπορούσε να κατηγοριοποιηθεί συνοπτικά στις ακόλουθες κύριες περιπτώσεις:

**Τα υλικά κατασκευής** μπορούν να παρουσιάζουν λόγω δομής τους (κυρίως τα φυσικά υλικά), κατασκευαστικών λόγων, συνθηκών περιβάλλοντος ή άλλων αιτιών, σημαντική τυχειότητα και διαφοροποιήσεις στις μηχανικές τους ιδιότητες, οι οποίες λαμβάνονται υπ' όψιν από τους μηχανικούς σύμφωνα με πιθανοτικά μοντέλα και παραδοχές.

**Η γήρανση** των υλικών εμπεριέχει την τυχειότητα καθώς η συμπεριφορά τους κατά την εξέλιξη του χρόνου δεν μπορεί να προβλεφθεί απόλυτα.

**Το δομικό σύστημα** το οποίο μπορεί να είναι δομημένο από διάφορα υλικά (π.χ. λιθοδομές, ξυλόπηκτοι τοίχοι, κ.λπ.), των οποίων ο συνδυασμός (π.χ. λιθοδομή με αργούς λίθους και συνδετικό κονίαμα), δημιουργεί ανομοιογένεια στη συμπεριφορά και στην εκτίμηση της τελικής φέρουσας ικανότητας.

**Οι φορτίσεις και οι συνθήκες περιβάλλοντος** όπως ο άνεμος, η θερμοκρασία, η χιονόπτωση και η σεισμική δραστηριότητα κ.λπ., έχουν άμεση σχέση με την τυχειότητα ως φυσικοί παράγοντες που επίσης λαμβάνονται υπ' όψιν στους κανονισμούς βάσει πιθανοτικών μοντέλων και παραδοχών.

**Ο ανθρώπινος παράγοντας** είναι επίσης συσχετισμένος με την τυχειότητα στην κατασκευή, όπως για παράδειγμα στις περιπτώσεις ανθρώπινου σφάλματος, ελλειπούς σχεδιασμού, επίβλεψης και συντήρησης.

**Τα κινητά φορτία** (live loads) που καλούνται να αναλάβουν οι κατασκευές έχουν συχνά μεταβολές στις τιμές τους οι οποίες εκτιμώνται επίσης με πιθανοτικά μοντέλα και παραδοχές.

**Η εξέλιξη του χρόνου** εμπεριέχει την τυχειότητα, καθώς δεν μπορεί να προβλεφθούν όλα τα μελλοντικά συμβάντα που μπορούν να επηρεάσουν μια κατασκευή τα οποία μπορεί να προκαλέσουν μικρότερες ή μεγαλύτερες βλάβες.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι παραπάνω **απρόβλεπτες παράμετροι και αβεβαιότητες**, οι οποίες αυξάνουν σημαντικά την πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό, χρησιμοποιούνται κανονιστικά κείμενα τα οποία πρέπει να χρησιμοποιούν οι πολιτικοί μηχανικοί, στα οποία έχει ληφθεί υπ' όψιν η

283 William Bulleit και M Asce, 'Uncertainty in Structural Engineering', *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 13 (1 Φεβρουάριος 2008), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0680\(2008\)13:1\(24\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0680(2008)13:1(24)).

284 Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί και ο όρος fuzzy randomness, μια έννοια που συνδυάζει την αβεβαιότητα όπως αυτή χρησιμοποιείται στη **fuzzy logic** (όχι μόνο δυαδικές τιμές 0 ή 1) και την τυχειότητα (**randomness**) όπως αυτή χρησιμοποιείται στη θεωρία πιθανοτήτων. Σχετική βιβλιογραφία:

Bernd Möller κ.ά., 'Fuzzy Randomness - Towards a new Modeling of Uncertainty', *Fifth World Congress on Computational Mechanics*, 1 Ιανουάριος 2002.

Bernd Möller, Wolfgang Graf, και Michael Beer, 'Safety assessment of structures in view of fuzzy randomness', *Computers & Structures* 81, τχ. 15 (1 Ιούλιος 2003): 1567–82, [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(03\)00147-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(03)00147-0).

ασφάλεια με πιθανοτικά μοντέλα, διαδικασίες εκτίμησης κινδύνου και διαδικασίες ελέγχου ποιότητας <sup>285</sup> (ενδεικτικά βλέπε <sup>286 287 288</sup>).

Η δυνατότητα επιλογής και εφαρμογής όσο το δυνατόν περισσότερο **κανονικών** δομών φερόντων οργανισμών (Φ.Ο.), που μπορούν να υπολογιστούν με πιο ακριβή μαθηματικά προσομοιώματα και μεθόδους, μειώνει την **μη προβλεψιμότητα** όσον αφορά στη συμπεριφορά της κατασκευής από στατική και δυναμική άποψη. Με εργαλεία όπως τα παραπάνω, επιχειρείται να μειωθεί ή να εξαλειφθεί η αβεβαιότητα και η τυχειότητα κατά το σχεδιασμό, τον υπολογισμό και την κατασκευή, έτσι ώστε τελικά να εξασφαλιστεί μια όσο το δυνατόν **προβλέψιμη ως προς τη φέρουσα ικανότητά της και ικανή δομή**. Συνεπώς, οποιαδήποτε παράμετρος ή διαδικασία που απομακρύνει από αυτόν το στόχο (άρα και η τυχειότητα), δεν είναι επιθυμητή, καθώς δημιουργείται μεγαλύτερη αβεβαιότητα στη διαδικασία και το τελικό αποτέλεσμα, από το οποίο εξαρτάται η ασφάλεια της κατασκευής και των χρηστών.

Παρ' όλα αυτά, **νέες τεχνικές και εργαλεία** (software, hardware, digital manufacturing, parametric design, κ.λ.π) δίνουν πλέον τη δυνατότητα να σχεδιάζονται, να υπολογίζονται και να υλοποιούνται πιο γρήγορα, πιο σωστά και πιο ακριβή προσομοιώματα για ακόμα πιο πολύπλοκα φέροντα στοιχεία και συστήματα, με τη χρήση ενός ή και περισσότερων υπολογιστών σε συνεργασία (distributed / cloud computing <sup>289 290</sup>), κάτι που δεν ήταν δυνατόν κατά το παρελθόν. Εκεί λοιπόν που η υπολογιστική ισχύς επέτρεπε (είτε ανθρώπινη, είτε ηλεκτρονική) το σχεδιασμό, συγκριτικά με τώρα, απλών και κανονικών σχετικά δομών και μορφών λόγω των περιορισμών της ισχύος της, γίνεται αντιληπτό ότι τα τελευταία χρόνια έχει διανυθεί εξαιρετικά μεγάλη απόσταση, τόσο τεχνολογικά όσο και επιστημονικά. **Τα νέα μέσα** λοιπόν (software και hardware) επιτρέπουν το σχεδιασμό και την υλοποίηση περισσότερο πολύπλοκων και μη κανονικών δομών φέροντος οργανισμού, **χωρίς να διακυβεύεται η στατική επάρκεια της κατασκευής**.

Η **μη κανονικότητα** στις δομές συμβαδίζει με τη δυνατότητα σχεδιασμού και κατασκευής **ασύμμετρων και μη κανονικών φορέων**, οι οποίοι μπορεί να επιτυγχάνουν γεωμετρική προσαρμοστικότητα στο χώρο και το περιβάλλον τους και να υποστηρίζουν καινούργιες μορφές αρχιτεκτονικής που δεν ήταν εφικτό να υλοποιηθούν στο παρελθόν.

Η έννοια της **βελτιστοποίησης των φορέων** συμβάλλει στην οικονομία του έργου, καθώς δεν γίνεται σπατάλη υλικού, ενέργειας και χρόνου κατά τη κατασκευή, αφού ό,τι είναι μη απαραίτητο απορρίπτεται κατά τη φάση του σχεδιασμού και ενισχύονται δομικά οι περιοχές που καταπονούνται

<sup>285</sup> Bulleit και Asce, 'Uncertainty in Structural Engineering'.

<sup>286</sup> Möller κ.ά., 'Fuzzy Randomness - Towards a new Modeling of Uncertainty'.

<sup>287</sup> Steffen Freitag, Wolfgang Graf, και Michael Kaliske, 'Identification and Prediction of Time-Dependent Structural Behavior with Recurrent Neural Networks for Uncertain Data', 1 Ιανουάριος 2010, [https://doi.org/10.3850/978-981-08-5118-7\\_026](https://doi.org/10.3850/978-981-08-5118-7_026).

<sup>288</sup> Amir Gandomi, Christian Soize, και James Stewart, 'AI in computational mechanics and engineering sciences' 407 (1 Μάρτιος 2023): 115935, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.115935>.

<sup>289</sup> Hojjat Adeli Kumar Sanjay, *Distributed Computer-Aided Engineering* (Boca Raton: CRC Press, 2020), <https://doi.org/10.1201/9781003067795>.

<sup>290</sup> 'SIMULIA Cloud – Web-Based Access To Simulation - Dassault Systèmes®', ημερομηνία πρόσβασης 23 Σεπτεμβρίου 2023, <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/simulia-cloud/>.

περισσότερο, εφ' όσον αυτό κριθεί απαραίτητο. Με τη χρήση εξελικτικών και γενετικών αλγορίθμων, γίνεται προσπάθεια να επιτευχθεί ένας στόχος (π.χ. αντοχής, γεωμετρικός, ενεργειακός, κ.λπ.) και τα επιμέρους στοιχεία μορφοποιούνται αυτόματα βάση συγκεκριμένων παραμέτρων. Η τελική επιλογή του είδους, της δομής και της μορφής του φορέα γίνεται από συνδυασμό κριτηρίων που περιλαμβάνουν τα υπολογιστικά δεδομένα των μαθηματικών προσομοιώσεων και των σχετικών ελέγχων στατικής και δυναμικής επάρκειας, τους λειτουργικούς και αισθητικούς περιορισμούς, κ.λπ.

Παραδείγματα για τα νέα δεδομένα στο σχεδιασμό της δομής και της μορφής διερευνώνται και εξελίσσονται παράλληλα με την εξέλιξη των εργαλείων (ενδεικτικά βλέπε: <sup>291 292 293 294 295 296 297</sup>). Νέοι τρόποι κατασκευής, νέα υλικά και μέθοδοι, αλγοριθμικές, γενεσιουργές και εξελικτικές τεχνικές σχεδιασμού για τη διαμόρφωση δομών και μορφών σχετίζονται με την τυχαιότητα, καθώς δεν δημιουργούν ένα προκαθορισμένο αποτέλεσμα, αλλά καταλήγουν σε μία λύση ή σε ομάδες λύσεων, μεταβάλλοντας αντίστοιχα τη δομή και συνεπώς και τη μορφή του φορέα.

Σύμφωνα με τον **DeLanda** <sup>298</sup>, μια από τις νέες προσεγγίσεις στην κατασκευή είναι αυτή όπου η μορφή και η δομή **φαίνεται σαν να προκύπτουν εσωτερικά από το ίδιο το υλικό**, αντί να υπάρχει μια ιεραρχία ή εξωτερική πηγή που τις επιβάλλουν.

Το πεδίο στο οποίο αναπτύσσονται όλες οι παραπάνω προσεγγίσεις είναι η «ελευθερη» περιοχή ανάμεσα στους περιορισμούς, τα όρια και τη στρατηγική του σχεδιασμού που ορίζονται κάθε φορά από τους μηχανικούς, κατά τα πρώτα στάδια και κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού.

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή αυτού του κεφαλαίου, τα παραδείγματα εφαρμογής της τυχαιότητας ως προς τη δομή και τη μορφή ενός φέροντος οργανισμού είναι πολύ λιγότερα από τα αντίστοιχα

291 Michael Hensel, Achim Menges, και Michael Weinstock, επιμ., *Emergence: Morphogenetic Design Strategies*, 1 edition (Chichester: Academy Press, 2004).

292 Arno; Bonwetsch Schlueter, 'Design Rationalization of Irregular Cellular Structures', στο *International Journal of Architectural Computing* vol. 6 - no. 2, pp. 197-211 (CUMINCAD, 2008), <https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ijac20076204>.

293 Christiane Herr και Thomas Fischer, *Generative Column and Beam Layout for Reinforced Concrete Structures in China*, *Communications in Computer and Information Science*, τ. 369, 2013, [https://doi.org/10.1007/978-3-642-38974-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-38974-0_8).

294 Aikaterini Saraptzian, 'Irregular Structural Grid Systems: The Design of Non-Standard Architectural Forms with Structural Complexity' (Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Σχολή Πολυτεχνική. Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών. Τομέας Αρχιτεκτονικού Σχεδιασμού και Αρχιτεκτονικής Τεχνολογίας, 2018), <http://hdl.handle.net/10442/hedi/42933>.

295 Achim Menges, επιμ., *Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design*, 1st edition (Chichester: Academy Press, 2012).

296 Judyta Maria Cichocka, 'A Method for Generating Regular Grid Configurations on Free-From Surfaces for Structurally Sound Geodesic Gridshells', στο *Stojakovic, V and Tepavcevic, B (eds.), Towards a new, configurable architecture - Proceedings of the 39th eCAADe Conference - Volume 2, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia, 8-10 September 2021, pp. 493-502* (CUMINCAD, 2021), [https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2021\\_257](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2021_257).

297 'Proceedings of IASS Annual Symposia: Ingenta Connect Table Of Contents', ημερομηνία πρόσβασης 23 Σεπτέμβριος 2023, <https://www.ingentaconnect.com/content/iass/piass/2022/00002022/00000009>.

298 Neil Leach, David Turnbull, και Chris Williams, επιμ., *Digital Tectonics*, 1st edition (Chichester: Academy Press, 2004), 21.

μη φέροντα παραδείγματα, καθώς ένας φέρων οργανισμός μπορεί να είναι υπό προϋποθέσεις μόνο τυχαίος, αφού θα πρέπει να ικανοποιεί πρωταρχικά τις απαιτήσεις ασφάλειας για την φέρουσα ικανότητα της κατασκευής και οποιαδήποτε αβεβαιότητα σε αυτό τον τομέα θα πρέπει να απομακρύνεται. Στην προκείμενη περίπτωση, η τυχειότητα μπορεί να εφαρμοστεί μόνο με αυστηρότερες παραδοχές και περιορισμούς απ' ό,τι στην προηγούμενη περίπτωση των μη φερόντων στοιχείων. Όταν εφαρμόζεται τυχειότητα πρέπει να συμβάλει στην παραγωγή λύσεων που εξασφαλίζουν πρωταρχικά τη δομική επάρκεια, αλλά παράλληλα πρέπει να ικανοποιούν και τις αρχιτεκτονικές, αισθητικές και λειτουργικές απαιτήσεις. Η μεταβολή στη δομή και τη μορφή είναι αμφίδρομη όταν υπάρχει τέτοια προσέγγιση και **αυτή η σχέση θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν στο σχεδιασμό, τόσο από στατική όσο και αρχιτεκτονική άποψη.**

Στη συνέχεια παρουσιάζονται έργα τα οποία έχουν προκύψει με τη χρήση σύγχρονων ψηφιακών εργαλείων στο σχεδιασμό, όπως είναι ψηφιακές αλγοριθμικές και παραμετρικές διαδικασίες που σχετίζονται με την **τυχειότητα** και εστιάζουν **στην κατασκευή φερόντων οργανισμών και τρισδιάστατων φορέων, και πιο συγκεκριμένα στη διαμόρφωση δομών και μορφών**. Τα αρχιτεκτονικά έργα που ακολουθούν εμπεριέχουν ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά τα οποία υποδηλώνουν τη χρήση ψηφιακών τεχνολογιών σε σχέση με το σχεδιασμό σύνθετων δικτυωμάτων, πλεγμάτων, κ.λπ., τα οποία έχουν φέροντα ρόλο. Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτά που υποδηλώνουν σχεδιασμό με τέτοια εργαλεία είναι:

- Χρήση μονάδων σε επανάληψη σε μεγάλους αριθμούς, οι οποίες παραλλάσσονται σταδιακά ή εξελικτικά, στη χωροθέτηση ή/και στη γεωμετρία τους. Οι μονάδες αυτές έχουν συχνά παρόμοια μορφή, αλλά είναι ουσιαστικά στοιχεία μοναδικής-ξεχωριστής γεωμετρίας (**mass customization**<sup>299 300</sup>).
- Σύνθετες γεωμετρικές μορφές στο χώρο που συχνά παρουσιάζουν διπλή ή πολλαπλή καμπυλότητα.
- Σύνθετες γεωμετρικές μορφές στο χώρο που παρουσιάζουν έντονα βιολογικά μορφολογικά χαρακτηριστικά.
- Σύνθετες μορφές υψηλής γεωμετρικής πολυπλοκότητας.
- Κατασκευές που μπορούν να υλοποιηθούν μόνο με σύγχρονα εργαλεία κατασκευής στη λογική **File to Factory**<sup>301</sup>.

299 S. Jack Hu, 'Evolving Paradigms of Manufacturing: From Mass Production to Mass Customization and Personalization', *Procedia CIRP*, Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013, 7 (1 Ιανουάριος 2013): 3–8, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.002>.

300 Ingrid Paoletti, 'Mass Customization with Additive Manufacturing: New Perspectives for Multi Performative Building Components in Architecture', *Procedia Engineering*, International High-Performance Built Environment Conference – A Sustainable Built Environment Conference 2016 Series (SBE16), iHBE 2016, 180 (1 Ιανουάριος 2017): 1150–59, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.275>.

301 K. Oosterhuis κ.ά., 'File to Factory and Real Time Behavior in ONL-Architecture', *Fabrication: Examining the Digital Practice of Architecture*, *Proceedings of the 23rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture and the 2004 Conference of the AIA Technology in Architectural Practice Knowledge Community*, Cambridge, November 8-14, 2004, 2004, <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A01f55888-8034-42ec-b8e5-c9b4afeaaae7>.

- Κατασκευές που ενσωματώνουν την έννοια του **Structural Skin** <sup>302</sup>, όπου η γεωμετρία λειτουργεί ως φορέας και ταυτόχρονα ως κέλυφος/επικάλυψη, σε αντίθεση με το συμβατικό διαχωρισμό σε φέροντα στοιχεία και στοιχεία πλήρωσης ή επικάλυψης.

Όταν κάποιο έργο εμφανίζει ένα ή περισσότερα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά δεν σημαίνει ότι πρόκειται απαραίτητα για έργο όπου έχει εφαρμοστεί αλγοριθμικός ή παραμετρικός σχεδιασμός, αλλά ότι είναι πιο πιθανό να έχει ακολουθηθεί μια τέτοια κατεύθυνση, αντί για μια συμβατική προσέγγιση, λόγω των διευκολύνσεων και των δυνατοτήτων που προσφέρουν οι νέες τεχνικές και εργαλεία.

#### 4.4.1 Φέροντα στοιχεία

- Διαδικασίες αλγοριθμικού και παραμετρικού σχεδιασμού έχουν χρησιμοποιηθεί στη σχεδίαση και υλοποίηση έργων του **Frank Gehry**. Η δυνατότητα σχεδιασμού σύνθετης γεωμετρίας, επιφανειών πολλαπλών καμπυλοτήτων μεγάλης πολυπλοκότητας δεν θα ήταν δυνατόν να υλοποιηθεί χωρίς σύγχρονα ψηφιακά εργαλεία (π.χ. λογισμικό CATIA). Παρατηρώντας έργα του Gehry όπως το **Dancing House** <sup>303 304</sup> (Εικόνα 4\_79) (1996) στην Πράγα (σε συνεργασία με τους **Vlado Milunić και Eva Jiřičná**), το **Guggenheim στο Bilbao** <sup>305 306</sup> (Εικόνα 4\_80) (1997) ή το **Neuer Zollhof** <sup>307</sup> στο Dusseldorf (Εικόνα 4\_81) (1998), διακρίνεται κατάργηση της συμμετρίας, των ευθειών, των επίπεδων επιφανειών και της επανάληψης τυποποιημένων στοιχείων. Η εντύπωση που λαμβάνει κανείς από τα συγκεκριμένα παραδείγματα, και από τα έργα του Gehry γενικότερα, είναι ότι πρόκειται για κατασκευές των οποίων ο σχεδιασμός επιχειρεί να ανατρέψει τις μέχρι τότε φόρμες και να εξετάσει εκ νέου το ζήτημα της μορφής. Τα έργα του εμφανίζουν αυξημένη πολυπλοκότητα, η οποία με τη σειρά της συνδέεται και με την παράμετρο της τυχειότητας, καθώς δεν είναι άμεσα αντιληπτός ο κανόνας οργάνωσης των φερόντων και αρχιτεκτονικών στοιχείων και μορφών, με αποτέλεσμα η πολυπλοκότητα να ερμηνεύεται ως τυχειότητα. Για το Guggenheim του Gehry αναφέρεται ότι συνδυάζει την αρμονία και την ισορροπία με την τυχειότητα <sup>308</sup>.

---

302 Oosterhuis κ.ά.

303 'History | Dancing House Hotel, Prague 2', 12 Φεβρουάριος 2020, <https://www.dancinghousehotel.com/en/the-hotel/>.

304 'Dancing House | Vlado Milunic + Frank Ghery', *Arch2O.Com* (blog), 23 Αύγουστος 2012, <https://www.arch2o.com/dancing-house-vlado-milunic-frank-ghery/>.

305 'AD Classics: The Guggenheim Museum Bilbao / Gehry Partners', *ArchDaily*, 1 Σεπτέμβριος 2013, <http://www.archdaily.com/422470/ad-classics-the-guggenheim-museum-bilbao-frank-ghery/>.

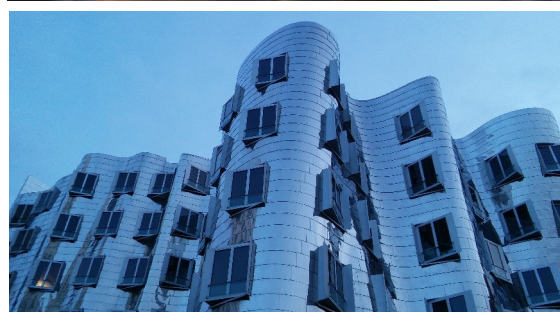
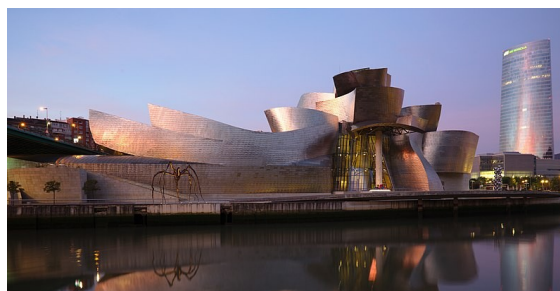
306 'The Guggenheim Museum Bilbao | Frank Gehry', *Arch2O.Com* (blog), ημερομηνία πρόσβασης 12 Φεβρουάριος 2020, <https://www.arch2o.com/guggenheim-museum-bilbao-frank-ghery/>.

307 Arcspace, 'Der Neue Zollhof', *Arcspace.Com* (blog), ημερομηνία πρόσβασης 12 Φεβρουάριος 2020, <https://arcspace.com/feature/der-neue-zollhof/>.

308 'Sketches of Frank Gehry', *The Irish Times*, 13 Φεβρουάριος 2020, <https://www.irishtimes.com/culture/sketches-of-frank-ghery-1.1212671>.



Εικόνα 4\_79: Dancing House, Frank Gehry, 1996. Πηγή: [Praag, Tsjechië Aug 21, 2019 05-42-54 PM.jpeg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Praag,_Tsjechië_Aug_21,_2019_05-42-54_PM.jpeg), Praag, Tsjechië, August 2019, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Praag,\\_Tsjechië\\_Aug\\_21,\\_2019\\_05-42-54\\_PM.jpeg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Praag,_Tsjechië_Aug_21,_2019_05-42-54_PM.jpeg), εικόνα του/της: [Bobby-John de Bot](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Praag,_Tsjechië_Aug_21,_2019_05-42-54_PM.jpeg), άδεια: CC BY-SA 4.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Praag,_Tsjechië_Aug_21,_2019_05-42-54_PM.jpeg). Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.



Εικόνα 4\_80: (άνω). Guggenheim Bilbao, Frank Gehry, 1997. Πηγή: [Bilbao - Guggenheim aurore.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bilbao_-_Guggenheim_aurore.jpg), Musée Guggenheim au petit matin, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bilbao\\_-\\_Guggenheim\\_aurore.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bilbao_-_Guggenheim_aurore.jpg) (πάνω), εικόνα του/της: [PA](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bilbao_-_Guggenheim_aurore.jpg), άδεια: CC BY-SA 4.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bilbao_-_Guggenheim_aurore.jpg). Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

Εικόνα 4\_81: (κάτω). Neuer Zollhof, Frank Gehry, 1998. Πηγή: [T. Κουιμτζόγλου](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neuer_Zollhof.jpg) (φωτογραφία 2016).

Ένα ακόμα κοινό χαρακτηριστικό και των τριών έργων είναι ότι στο κάθε ένα από αυτά αναγνωρίζονται διαφορετικές κλίμακες. Υπάρχει η κλίμακα της γενικής μορφής της κατασκευής, η οποία γενική μορφή είναι σχεδιασμένη με συγκεκριμένο τρόπο ώστε να κυριαρχούν συγκεκριμένα γεωμετρικά μοτίβα, καμπύλες, όγκοι, κ.λπ. Σε μικρότερη κλίμακα αναγνωρίζονται στοιχεία όπως είναι τα ανοίγματα, τα υποστυλώματα και οι κάναβοί τους, οι μεταλλικές επικαλύψεις, κ.ο.κ. Τα στοιχεία της δευτερεύουσας κλίμακας υποτάσσονται ιεραρχικά και γεωμετρικά στη γενική μορφή της κύριας κλίμακας του έργου. Έτσι για παράδειγμα, τα υποστυλώματα στο Dancing House έχουν μια εντελώς πλαστική μορφή, προσαρμοσμένη στις καμπύλες της συνολικής μορφής. Τα μεταλλικά πανέλα επικάλυψης στο Guggenheim ή στο Neuer Zollhof είναι όλα ξεχωριστά σε σχήμα και μορφή, καθώς μόνο έτσι μπορεί να γίνει η προσαρμογή τους στη συνολική μορφή. Το ίδιο συμβαίνει με τα ανοίγματα στο Neuer Zollhof.

**Συνεπώς, αν θεωρηθεί ότι η γενική μορφή είναι το πρωτεύον στοιχείο, τότε η ειδική μορφή των δευτερευόντων στοιχείων (π.χ. υποστυλώματα,) προκύπτει τυχαία από την προσαρμογή τους στη γενική μορφή και αναπτύσσεται εντός των ορίων που θέτει αυτή σε συνδυασμό και με άλλες κατασκευαστικές παραμέτρους. Η τυχειότητα λοιπόν, σε αυτή την περίπτωση δίνει τη δυνατότητα προσαρμογής των δευτερευόντων στοιχείων, προκειμένου τα διαφορετικά στοιχεία του έργου να μπορούν να ενοποιηθούν σε ενιαίο σύνολο, σύμφωνα με την επιθυμητή γενική μορφή.**

- Η **Sendai Mediatheque**<sup>309 310 311</sup> (Εικόνα 4\_82, Εικόνα 4\_83) στο Tokyo (2001) από τον **Toyo Ito**, είναι ένα κτήριο πολιτιστικών χρήσεων με διαστάσεις 50mX50m σε κάτοψη και 36,50m σε ύψος. Βασική συνθετική αρχή της κατασκευής είναι η διαφάνεια, οι ελεύθερα διαμορφωμένοι χώροι στο εσωτερικό της και οι πυρήνες από τα σύνθετα κατακόρυφα στοιχεία του φέροντος οργανισμού. Το κτήριο αναπτύσσεται σε 2 υπόγεια και 7 υπέργεια επίπεδα. Το πρώτο υπόγειο και όλα τα υπέργεια επίπεδα διατρέχονται από 13 κατακόρυφους πυρήνες από μεταλλικά δικτυώματα κυκλικού, ελλειπτικού ή ελεύθερου σχήματος σε κάτοψη. Από αυτά, τα τέσσερα μεγαλύτερα τοποθετούνται στις γωνίες του κτηρίου ως κύρια φέροντα στοιχεία και στο εσωτερικό τους παραλαμβάνουν κατακόρυφες κινήσεις ανελκυστήρων και κλιμακοστασίων.



Εικόνα 4\_82: Sendai Mediatheque, Toyo Ito, 2001. Πηγή: Sendai Mediatheque 2009.jpg, Sendai Mediatheque, Sendai-shi, Miyagi-pref., Japan, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sendai\\_Mediatheque\\_2009.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sendai_Mediatheque_2009.jpg), εικόνα του/της: [scarletgreen from Japan](#), άδεια: CC BY 2.0, [Creative Commons Attribution 2.0 Generic license](https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/).

Εικόνα 4\_83: (άνω). Sendai Mediatheque, Toyo Ito, 2001. Πηγή: Toyo Ito - Sendai Mediatheque - Photo 0004, <https://www.flickr.com/photos/eager/11996869554>, εικόνα του/της: 準建築人手札網站 Forgemind ArchiMedia, άδεια: CC BY 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>, Πηγή: (κάτω): smt02.JPG, <https://www.flickr.com/photos/9160678@N06/761943312>, εικόνα του/της: [scarletgreen](#), άδεια: CC BY 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>

309 'Toyo Ito & Associates, Architects - Sendai Mediatheque', ημερομηνία πρόσβασης 11 Φεβρουάριος 2020, [http://www.toyo-ito.co.jp/WWW/Project\\_Descript/2000-/2000-p\\_04/2000-p\\_04\\_en.html](http://www.toyo-ito.co.jp/WWW/Project_Descript/2000-/2000-p_04/2000-p_04_en.html).

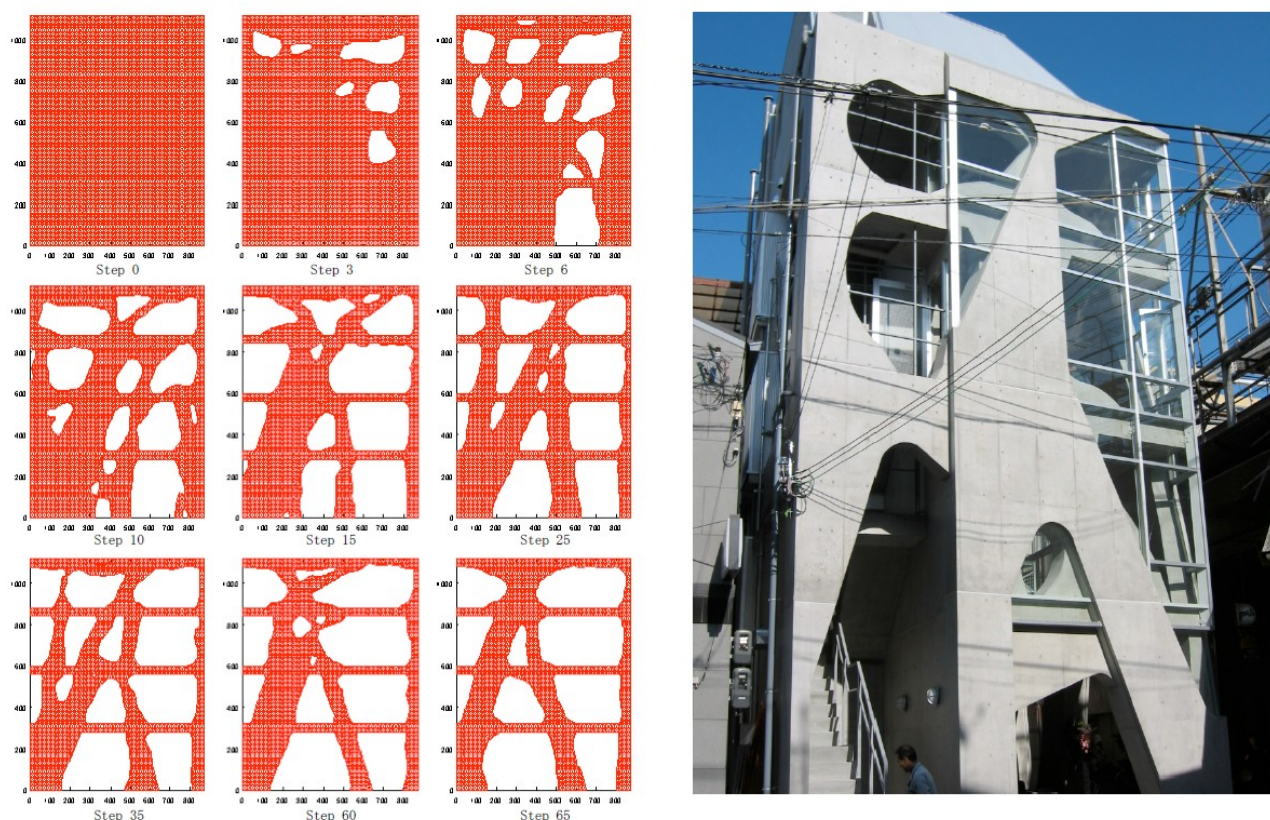
310 Toyo Ito - 1/3 The Sendai Media Center, ημερομηνία πρόσβασης 11 Φεβρουάριος 2020, [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=542&v=NZJSjTIm2Uk&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=542&v=NZJSjTIm2Uk&feature=emb_logo).

311 'Sendai Mediatheque - Data, Photos & Plans', WikiArquitectura, 11 Φεβρουάριος 2020, <https://en.wikiarquitectura.com/building/sendai-mediatheque/>.



Τα υπόλοιπα 9 δικτυώματα καταλαμβάνουν το χώρο **με τυχαίο/ακανόνιστο τρόπο**. Κάθε ένας από τους 13 πυρήνες εξυπηρετεί διαφορετική λειτουργία (αερισμός, εγκαταστάσεις, κινήσεις, κ.λπ). Τα οριζόντια επίπεδα/πλάκες της κατασκευής είναι επίσης μεταλλικά στοιχεία πάχους 80εμ κυψελοειδούς μορφής τα οποία υποστηρίζονται από τα 13 σύνθετα «υποστυλώματα». Η κάτοψη/διατομή των πυρήνων διαφοροποιείται καθ' ύψος με επίσης ακανόνιστο τρόπο. Η ελεγχόμενη τυχαία διάταξη των 13 κατακόρυφων πυρήνων στο όριο των 50mX50m που ορίζει η κάτοψη και η μη ορθοκανονική διαμερισμάτωση των χώρων, δημιουργεί ελεύθερους και ευέλικτους χώρους. Τα κατακόρυφα στοιχεία σε συνδυασμό με τη διαφάνεια των όψεων δίνουν στην κατασκευή ένα χαρακτήρα οργανικής προέλευσης, καθώς διατρέχουν όλο το ύψος του κτηρίου σαν «φλέβες».

- Παράδειγμα δομικής και μορφολογικής διαμόρφωσης κτηρίου με τη χρήση του αλγορίθμου **Extended ESO**<sup>312</sup>, είναι το τετραώροφο κτήριο γραφείων στο **Akutagawa River Side Project**<sup>313</sup> (Iijima Structural Design Office and F-tai Architects) (Εικόνα 4\_84) (2004), στο **Takatsuki** της Ιαπωνίας.



Εικόνα 4\_84: Akutagawa Project, Hiroshi Omori. Πηγή: Hiroshi OHMORI, *Computational morphogenesis: Its current state and possibility for the future*, <https://ecommons.cornell.edu/items/b65d52c3-3c74-4b11-8e5d-a24c7a6fbc8d>, Cornell eCommons, άδεια: CC BY 4.0, [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

312 C. Cui, H. Ohmori, και M. Sasaki, 'Computational morphogenesis of 3D structures by extended ESO method', *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 44 (1 Απρίλιος 2003): 51–61.

313 Hiroshi Ohmori, 'Computational Morphogenesis: Its Current State and Possibility for the Future', *International Journal of Space Structures*, 1 Σεπτέμβριος 2011, <https://journals.sagepub.com/doi/10.1260/0266-3511.26.3.269>.

Στην περίπτωση αυτή, οι δύο όψεις του κτηρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν διερευνηθεί με τον συγκεκριμένο αλγόριθμο, έτσι ώστε να υπάρχει βελτιστοποίηση από άποψη κατανομής φορτίων. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι μια εξελικτική διαδικασία που περνάει από διαφορετικά διαδοχικά στάδια μέχρι να καταλήξει στην εύρεση της βέλτιστης μορφής για την κατανομή των φορτίων. **Η τελική λύση δεν είναι προκαθορισμένη εξ αρχής αλλά, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, κινείται εντός ορίων συγκεκριμένου χώρου λύσεων, καθώς περιορίζεται πρωταρχικά από στατικά και στη συνέχεια χωρικά, λειτουργικά και κατασκευαστικά κριτήρια.**

- Για το κρεματόριο **Meiso no Mori** στο **Kakamigahara Gifu** (2006)<sup>314 315 316</sup> από τους **Toyo Ito** και **Mutsuro Sasaki**, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης **Extended ESO**, προκειμένου να διαμορφωθεί κελύφος στέγασης από οπλισμένο σκυρόδεμα το οποίο δομείται σε ελεύθερα υποστυλώματα. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε για να βρεθεί η τελική βέλτιστη δομή και μορφή του κελύφους, ώστε να ικανοποιούνται οι στατικές, δυναμικές, λειτουργικές και αισθητικές απαιτήσεις του έργου (morphogenesis). Η ακριβής τελική μορφή **δεν έχει προβλεφθεί, αλλά προκύπτει** σύμφωνα με τις παραδοχές, τις παραμέτρους, τους περιορισμούς και τα κριτήρια των μηχανικών.
- Εξελικτικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό του στεγάστρου του **Qatar National Convention Center**<sup>317 318</sup> (2011), από τον αρχιτέκτονα **Arata Isozaki** και τον πολιτικό μηχανικό **Mutsuro Sasaki**. Το στέγαστρο είναι μια κατασκευή μήκους 250m, πλάτους 30m και ύψους 20m, η οποία στηρίζεται σε σύνθετα μεταλλικά υποστυλώματα δενδροειδούς διάταξης, επενδεδυμένα με μεταλλικά φύλλα, έτσι ώστε η τελική μορφή της κατασκευής να θυμίζει κλαδιά δένδρων. Για το σχεδιασμό του σύνθετου συστήματος φέροντος οργανισμού χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος **Extended ESO Method**<sup>319</sup> (Extended Evolutionary Structural Optimization Method). Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε με τον αλγόριθμο Extended ESO είχε εφαρμοστεί στο σχεδιασμό για το διαγωνισμό του Νέου Σταθμού της Φλωρεντίας, όπου η μορφή των «οργανικών» υποστυλωμάτων προέκυψε από τη διαδοχική εξέλιξη της μορφής προς μια ομοιόμορφη τάση (stress) καταπόνησης των μελών του φορέα. Και στις δύο περιπτώσεις η τελική μορφή δεν είναι προκαθορισμένη, αλλά **προκύπτει αυτόματα** βάσει του αλγορίθμου και των κριτηρίων που έχουν τεθεί, οπότε μπορεί να θεωρηθεί **τυχαία εντός ορίων και περιορισμών.**

314 Krystyna Januszkiewicz και Marta Banachowicz, 'Nonlinear Shaping Architecture Designed with Using Evolutionary Structural Optimization Tools', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 245 (1 Οκτώβριος 2017): 082042, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/8/082042>.

315 Toyo Ito, Arata Isozaki, και Mutsuro Sasaki, *Morphogenesis of Flux Structure* (London: Architectural Association Publications, 2007).

316 Mutsuro Sasaki: 'Morphogenesis of Flux Structure: New Field of Structural Design', 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=p0Jo4emwhhk>.

317 Tomoko Sakamoto, επιμ., *From Control to Design* (Barcelona: Actar, 2008), 108.

318 'Qatar National Convention Centre / Arata Isozaki', *ArchDaily*, 10 Σεπτέμβριος 2013, <http://www.archdaily.com/425521/qatar-national-convention-centre-arata-isozaki/>.

319 Sakamoto, *From Control to Design*, 101.

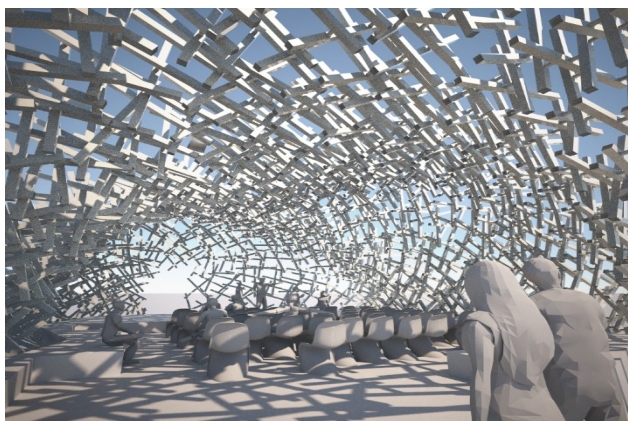


Εικόνα 4\_85: Meiso no Mori στο Kakamigahara Gifu (2006) από τους Toyo Ito και Mutsuro Sasaki. Πηγή: 瞑想の森 各務原市営斎場 / Forest of meditation (Kakamigahara city funeral hall) <https://www.flickr.com/photos/yuco/3177125616/>, εικόνα του/της: Yuco, άδεια: CC BY-SA 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>



Εικόνα 4\_86: Qatar National Convention Center, Arata Isozaki, 2011. Πηγή: The Qatar National Convention Center QNCC, <https://www.flickr.com/photos/unctad/6953154154/in/photolist-bAqJub-bPkodp-bPkozz-aYE3ET-bPkoF2-bPkopD-bPkoNM-jAbNTB-dR85B6-bq76m6-2kbtTUh-5X7ooP-2dYdmz1-2f58tY2-miXuWk-kqSeu4-5XbFJb-s89kjin-6dSZHv-dRfvgE-ocycYW-ocyd8J-octxch-bq74ok-bPARPx-pFiMSh-eZU4hm-eZSwk3-eZTSuh-f13oys-dQPN18-f13qes-eZMZX6-eZTyq3-eZTvCu-eZDpJp-eZTtwf-eZDvTT-eZMYeZ-eZSzJ7-kr1Vhc-kqSZxp-kqXxbL-kr3aX3-eZDraT-kqYZbk-kr474k-kr1f82-kr13Qb-pF6771>, εικόνα του/της: UN Trade and Development (UNCTAD), άδεια: CC BY-SA 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>

• Άλλο παράδειγμα κατασκευής όπου έγινε χρήση γενετικών αλγορίθμων στο σχεδιασμό είναι το **White Noise**<sup>320 321 322</sup> από τους **soma architecture** και πολιτικούς μηχανικούς **Bollinger-Grohmann** στο περίπτερο της Biennale του Salzburg (2010) (Εικόνα 4\_87, Εικόνα 4\_88). Το White Noise είναι ένα έργο τέχνης/μουσικό περίπτερο για τον υπαίθριο χώρο της Biennale, το οποίο αναπαριστά ένα θέμα κοινό στην αρχιτεκτονική και τη μουσική, τον κανόνα και την παραλλαγή. Το έργο είναι κατασκευασμένο από κοιλοδοκούς αλουμινίου τετραγωνικής διατομής ίσου μήκους, οι οποίες συνδέονται με κυλινδρικούς αποστάτες αλουμινίου και σχηματίζουν τόξα μήκους 12m. Η διαδικασία βελτιστοποίησης με τα λογισμικά **Karamba3D** και **Grasshopper** περιελάμβανε την εύρεση της περιστροφής του κάθε στοιχείου έτσι **ώστε να επιτυγχάνεται η μικρότερη μετατόπιση με το ελάχιστο βάρος κατασκευής**. Η διαδικασία βελτιστοποίησης, όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα δημιούργησε πολλές πιθανές λύσεις από τις οποίες επιλέχθηκε η βέλτιστη. Η μορφή της κατασκευής είναι πολύπλοκη, καθώς ο κανόνας με τον οποίο συγκροτείται η διάταξη δεν είναι εύκολα αναγνωρίσιμος, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται ένα «**τυχαίο**» μορφολογικά σύνολο. Πέρα όμως από την ακανόνιστη μορφή, **η τυχαιότητα** της τελικής μορφής έγκειται στη **διαδικασία** με την οποία αυτή έχει οριστικοποιηθεί, καθώς δεν έχει προκαθοριστεί με ακρίβεια από τους μελετητές εξ' αρχής, αλλά προκύπτει από τον αλγόριθμο. Όπως αναφέρεται στην ιστοσελίδα του λογισμικού Karamba3D για το έργο, κάθε παραλλαγή εξασφαλίζει εξ' ορισμού τα αρχικά αισθητικά κριτήρια που έχουν οριστεί παραμετρικά από τον αρχιτέκτονα. Στη συνέχεια όμως, για να ικανοποιηθούν οι δομικές απαιτήσεις και να ελεγχθούν οι πιθανές παραλλαγές, γίνεται χρήση γενετικών αλγορίθμων προκειμένου να διερευνηθεί ο χώρος των λύσεων και να γίνει η βελτιστοποίηση του φορέα εντός των ορίων των παραμέτρων, όπως είναι οι γενικές διαστάσεις, το υλικό και η συνδεσμολογία.



Εικόνα 4\_87: White Noise, 2010. Soma architecture. Πηγή: Soma architecture, © Soma architecture, χρήση κατόπιν αδείας.



Εικόνα 4\_88: White Noise, 2010. Soma architecture. Πηγή: Soma architecture, © Soma architecture, χρήση κατόπιν αδείας.

320 Xavier De Kestelier και Brady Peters, *Computation Works: The Building of Algorithmic Thought AD*, 2 edition (John Wiley & Sons, 2013), 110.

321 'White Noise – Karamba3D', ημερομηνία πρόσβασης 13 Φεβρουάριος 2020, <https://www.karamba3d.com/projects/white-noise/>.

322 'soma architecture - vague formation', 14 Φεβρουάριος 2020, [http://www.soma-architecture.com/index.php?page=vague\\_formation&parent=2](http://www.soma-architecture.com/index.php?page=vague_formation&parent=2).

- Η χρήση γενετικών αλγορίθμων (**Genetic Algorithm – GA**), είναι μία ακόμα περίπτωση όπου σύγχρονα σχεδιαστικά και υπολογιστικά εργαλεία μπορούν να καθορίσουν τη δομή και μορφή ενός έργου. Στην περίπτωση του **Active Energy Building** (Εικόνα 4\_89) (Falkeis architects, 2017)<sup>323 324</sup> στο Vaduz του Liechtenstein, αξιοποιήθηκαν γενετικοί αλγόριθμοι (**GA**) με τη χρήση του plugin **Karamba3D** στο περιβάλλον του plugin **Grasshopper**, ώστε να βρεθεί η βέλτιστη θέση και προσανατολισμός των υποστυλωμάτων της κατασκευής.

Όπως αναφέρεται στην ιστοσελίδα των μελετητών στατικών Bollinger-Grohmann, πρόκειται για ισόγειο με τέσσερις ορόφους κτήριο κατοικιών, διαστάσεων 40mX14m. Το κεντρικό τμήμα της κατασκευής αποτελείται από μεταλλικά προκατασκευασμένα υποστυλώματα, ενώ οι πλάκες (πλάτους από 6m έως 12m) και τα υπόλοιπα υποστυλώματα του κτηρίου είναι κατασκευασμένα από σπλισμένο σκυρόδεμα. Υπάρχουν τέσσερις τύποι υποστυλωμάτων σπλισμένου σκυροδέματος, δύο τύποι σχήματος **V** και δύο τύποι σχήματος **Λ**. Με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων επιλέχθηκαν σταδιακά οι καταλληλότερες θέσεις και τύποι υποστυλωμάτων για την κάθε θέση. **Με τον τρόπο αυτό παράχθηκαν τυχαίοι συνδυασμοί λύσεων μέχρι να υπάρξει βελτιστοποίηση της προτεινόμενης λύσης.** Στο συγκεκριμένο έργο χρησιμοποιήθηκαν δύο στάδια βελτιστοποίησης: στο πρώτο γίνεται τοπολογική βελτιστοποίηση των υποστυλωμάτων, όπου καθορίζεται το είδος και η θέση του υποστυλώματος (Topology Optimization by Structural Growth Analogy), στο δεύτερο στάδιο καθορίζεται η περιστροφή του κάθε υποστυλώματος μέσω γενετικών αλγορίθμων (GA) βασισμένο στα αποτελέσματα του πρώτου σταδίου (Geometry Optimization by Genetic Algorithm). Το αποτέλεσμα του συνδυασμού που θα επικρατήσει δεν είναι προκαθορισμένο και επομένως άγνωστο στο μελετητή μέχρι να ολοκληρωθεί ο αλγόριθμος. **Υπό αυτή την έννοια είναι ένα μη προβλέψιμο - τυχαίο αποτέλεσμα που έρχεται να ικανοποιήσει συγκεκριμένα κριτήρια, με βάση παραδοχές που έχουν γίνει, εντός συγκεκριμένων ορίων, οι οποίες έχουν μεταφραστεί σε παραμέτρους μέσω του λογισμικού.**



Εικόνα 4\_89: Active Energy Building, Falkeis architects, 2017. Πηγή: <https://www.karamba3d.com/projects/active-energy-building/> © Roland Korner, χρήση κατόπιν αδειάς.

323 'Active Energy Building', ημερομηνία πρόσβασης 13 Φεβρουάριος 2020, <https://www.bollinger-grohmann.com/en.projects.active-energy-building.html?f=2017>.

324 'Active Energy Building – Karamba3D', ημερομηνία πρόσβασης 13 Φεβρουάριος 2020, <https://www.karamba3d.com/projects/active-energy-building/>.

• Παρόμοια προσέγγιση ακολουθήθηκε στο σχεδιασμό και υπολογισμό του στεγάστρου του κτηρίου **Hyundai Motorstudio Goyang**<sup>325 326</sup> (2017) (Εικόνα 4\_90, Εικόνα 4\_91) στη Ν. Κορέα, από τους αρχιτέκτονες **Delugan Meissl Associated Architects** και πολιτικούς μηχανικούς **Bollinger-Grohmann**. Το στέγαστρο είναι μια μεταλλική κατασκευή η οποία υποστηρίζεται από τέσσερις μόνο πυρήνες και έξι ομάδες μεταλλικών υποστυλωμάτων, οι οποίες την σταθεροποιούν οριζόντια και κατακόρυφα. Το στέγαστρο έχει διαστάσεις 160m μήκος και από 30m έως 75m πλάτος, ενώ το ύψος του φτάνει τα 20m. Οι κύριες σύνθετες δοκοί του στεγάστρου έχουν σχεδιαστεί και υπολογιστεί με συμβατικές μεθόδους. Για τις δευτερεύουσες δοκούς έχει γίνει βελτιστοποίηση μέσω γενετικού αλγορίθμου, ώστε να έχουν την απαιτούμενη διατομή για την παραλαβή των φορτίων, αλλά παράλληλα οι αποστάσεις τους να μην ξεπερνούν τα 3m, προκειμένου να μπορεί να γίνει επικάλυψη με μεταλλικά φύλλα αυτών των διαστάσεων για κατασκευαστικούς και οικονομικούς λόγους.

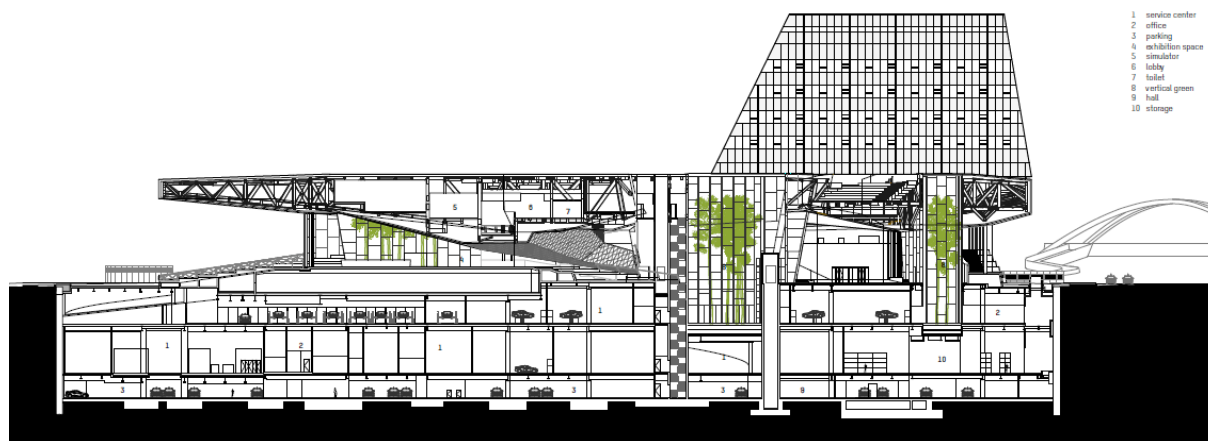
Στη συνέχεια, **γενετικοί αλγόριθμοι** χρησιμοποιήθηκαν για να βρεθεί η βέλτιστη θέση των έξι ομάδων από 5 έως 7 υποστυλώματα εντός περιοχής αποδεκτής λειτουργικά και αισθητικά από τους αρχιτέκτονες. Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν στη δεύτερη βελτιστοποίηση ήταν τρία: η μέγιστη μετατόπιση του στεγάστρου, ο αριθμός των ομάδων υποστυλωμάτων και η συνολική μάζα της κατασκευής. Μετά την παραγωγή διαφόρων τυχαίων λύσεων με βάση αυτά τα κριτήρια κατά την εξέλιξη της διαδικασίας, προέκυψε ένας αριθμός βέλτιστων λύσεων από τις οποίες οι αρχιτέκτονες επέλεξαν μια, η οποία και τελικά υλοποιήθηκε ως τελικό σχέδιο της κατασκευής. Σημειώνεται **ότι η διερεύνηση μέσω τυχαιότητας και του γενετικού αλγορίθμου αφορά στις θέσεις των υποστυλωμάτων και όχι στη μορφή τους, γεγονός που θα έκανε τη διαδικασία πολύ περισσότερο σύνθετη.**



Εικόνα 4\_90: Hyundai Motorstudio Goyang, Delugan Meissl Associated Architects και πολιτικοί μηχανικοί Bollinger-Grohmann, 2017. Πηγή: Delugan Meissl Associated Architects. © Katsuhisa Kida, χρήση κατόπιν αδείας.

325 'Hyundai Motorstudio Goyang – Karamba3D', ημερομηνία πρόσβασης 14 Φεβρουάριος 2020, <https://www.karamba3d.com/projects/hyundai-motorstudio-goyang/>.

326 'Hyundai Motorstudio Goyang', DMAA, ημερομηνία πρόσβασης 14 Φεβρουάριος 2020, <https://www.dmaa.at/work/hyundai-motorstudio-goyang>.



Εικόνα 4\_91: Hyundai Motorstudio Goyang, κατά μήκος τομή, Delugan Meissl Associated Architects και πολιτικοί μηχανικοί Bollinger-Grohmann, 2017. Πηγή: © Delugan Meissl Associated Architects, χρήση κατόπιν αδείας.

- Η γέφυρα **MX3D**<sup>327</sup> (**MX3D και ARUP**) (2021) είναι μια γέφυρα από αστάλι, κατασκευασμένη από **3d εκτυπωτή σε πραγματικό μέγεθος** και είναι η πρώτη κατασκευή τέτοιου είδους. Έχει διαστάσεις 12,5m με 6,3m και γεφυρώνει το κανάλι Oudezijds Achterburgwal στο Amsterdam. Για το σχεδιασμό της μορφής της, η οποία είναι άρρηκτα συσχετισμένη με τη δομή και τη στατική της λειτουργία, χρησιμοποιήθηκε εξειδικευμένο λογισμικό. Το λογισμικό υπολόγισε τα κύρια φορτία θλίψης και εφελκυσμού και μετέβαλλε το σχεδιασμό της κατασκευής, έτσι ώστε η μορφή και δομή της να είναι προσαρμοσμένες κατάλληλα σε αυτά. Η τελική μορφή δεν ήταν εξ αρχής γνωστή, αλλά οριστικοποιήθηκε εξελικτικά από το συνδυασμό των παραμέτρων του αλγοριθμικού μοντέλου με αυτές του στατικού μοντέλου. Καθώς είναι μια κατασκευή που **προκύπτει** αλγοριθμικά και υπολογιστικά με βάση συγκεκριμένους περιορισμούς, παραμέτρους και κριτήρια, χωρίς να είναι γνωστή η τελική της μορφή, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ένα μη αρχικά προβλέψιμο – τυχαίο εντός περιορισμών αποτέλεσμα.

327 'The Arup Journal 2022 Issue 1 - Arup', ημερομηνία πρόσβασης 12 Σεπτέμβριος 2023, <https://www.arup.com/perspectives/publications/the-arup-journal/section/the-arup-journal-2022-issue-1>.



Εικόνα 4\_92: Γέφυρα MX3D, 2021 σε δοκιμαστική τοποθέτηση. Πηγή: MX3D 3D printed bridge Dutch Design Week.jpg, Een 3D-geprinte brug van MX3D tijdens de Dutch Design Week op 20 oktober 2018 te Eindhoven, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MX3D\\_3D\\_printed\\_bridge\\_Dutch\\_Design\\_Week.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MX3D_3D_printed_bridge_Dutch_Design_Week.jpg), εικόνα του/της: IIVQ / Tijmen Stam, άδεια: CC BY-SA 4.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

#### 4.4.2 Φέροντα στοιχεία ως περιβλήματα κατασκευών

● Το **Serpentine Gallery Pavillion**<sup>328</sup> του **Toyo Ito** (2002) (Εικόνα 4\_93), είναι ακόμα ένα παράδειγμα κατασκευής που έχει προκύψει μέσω εφαρμογής αλγοριθμικού σχεδιασμού. Το περίπτερο είναι μια κατασκευή που υλοποιήθηκε σε διάστημα 14 εβδομάδων και αποτελείται από μέταλλο και γυαλί. Η κατασκευή διαμορφώνεται από **φαινομενικά τυχαίες γεωμετρικές μορφές** σε διαγώνιες θέσεις, τόσο στα τοιχώματα όσο και στην οροφή της, οι οποίες μορφοποιούνται είτε από μέταλλο είτε από γυαλί, είτε παραμένουν χωρίς πλήρωση. Όπως αναφέρουν οι μελετητές<sup>329</sup>, πρόκλησή τους ήταν να βρεθεί ένας κανόνας που θα δημιουργούσε χάος και την ομορφιά που το συνοδεύει, αλλά να είναι βασισμένο σε κάποιου είδους τάξη, έτσι ώστε να είναι εφικτό να γίνει η κατασκευή στο προβλεπόμενο χρονικό διάστημα υλοποίησης.

Ο σχεδιασμός βασίστηκε σε μια **επαναλαμβανόμενη (recursive)** διαδικασία περιστροφών και διαφοροποιήσεων της κλίμακας ενός απλού σχεδιαστικού γραμμικού μοτίβου, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα σύνθετο γραμμικό μοτίβο στις 3 διαστάσεις. Το μοτίβο που προκύπτει μέσω αυτού του σχεδιαστικού αλγορίθμου μετατρέπεται σε κατασκευή με την εξώθηση προς τα κάτω κατά 55cm των γραμμών της οροφής, κατά 55cm προς το εσωτερικό των γραμμών των τοιχωμάτων και τη διαμόρφωση των περιοχών που προκύπτουν, είτε με μέταλλο, γυαλί ή κενό.

<sup>328</sup> Sakamoto, *From Control to Design*, 36.

<sup>329</sup> Sakamoto, 36.





Εικόνα 4\_93: Serpentine Pavillion, Toyo Ito, 2002. Πηγή: Serpentine Pavillion 2002.jpg, Serpentine Gallery Pavilion 2002 – by architect Toyo Ito, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Serpentine\\_Pavillion\\_2002.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Serpentine_Pavillion_2002.jpg), εικόνα του/της: Frankie Roberto, άδεια: CC BY 2.0, Creative Commons Attribution 2.0 Generic license.

Σύμφωνα με τον **Sakamoto**<sup>330</sup>, η πολυπλοκότητα της σύνθεσης που προκύπτει από τις επαναλήψεις ενός απλού κανόνα είναι λανθάνουσα τάξη και όχι χάος. Αυτή η πολυπλοκότητα είναι αδιαχώριστη από τη δομή και κρατάει το θεατή σε διαρκή εγρήγορση καθώς αυτός προσπαθεί να ανακαλύψει τον κρυμμένο κανόνα στην κατασκευή. Όπως και σε προηγούμενα παραδείγματα σημειώνεται ότι η πολύπλοκη αυτή κατασκευή έχει προκύψει από συγκεκριμένα στάδια ενός αλγορίθμου και δεν έχει κατασκευαστεί τυχαία. Ο απλός παρατηρητής όμως, εάν δεν καταφέρει να αποκωδικοποιήσει τον κανόνα και τον αλγόριθμο μέσω της παρατήρησης, ή αν δεν ενημερωθεί από κάποιον για την ύπαρξή του, θεωρεί ότι πρόκειται για τυχαία διάταξη.

- **Αλγοριθμική προσέγγιση** στο σχεδιασμό με στοιχεία τυχαιότητας σε τμήματα ή περιοχές των κτηρίων εφαρμόστηκε από τον **Toyo Ito** και σε δύο ακόμα έργα του, με παρόμοια μεταξύ τους κατασκευαστική προσέγγιση: Αυτά είναι το **TOD's Omotesando Store** και το **Mikimoto Ginza 2** στο Tokyo. Στα δύο αυτά έργα, ο αρχιτέκτονας προκειμένου να δημιουργήσει έναν ελεύθερο χώρο από υποστυλώματα στο εσωτερικό, κατασκευάζει δομικά συστήματα τα οποία αναπτύσσονται στην περίμετρο των κτηρίων και παράλληλα διαμορφώνουν τις όψεις τους.

---

330 Sakamoto, 43.

- Στο **Omotesando Store**<sup>331 332 333</sup> (Εικόνα 4\_94) (2004), ο φέρων οργανισμός της κατασκευής αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 30cm το οποίο σχηματίζει ένα περιμετρικό κέλυφος από διαγώνια σχήματα τυχαίου σχήματος, εμπνευσμένα από την οργανική μορφή κλαδιών δένδρων. Με αυτόν τον τρόπο καταργείται το συμβατικό μοντέλο κατασκευής πλάκας επί υποστυλωμάτων διανεμημένων στο χώρο και προτείνεται ένα κτήριο με φέροντα οργανισμό στην όψη του, την οποία καθορίζει και μορφολογικά. Λόγω του ότι όλη η κατασκευή της όψης λειτουργεί ως φέρων κέλυφος, δεν παρατηρείται να υπάρχουν κατακόρυφα και οριζόντια στοιχεία φέροντος οργανισμού. Αντίθετα, η φέρουσα λειτουργία ικανοποιείται από την «**τυχαία**» διάταξη των διαγώνιων ορίων των σχημάτων του οπλισμένου σκυροδέματος. Παρατηρείται ωστόσο, ότι το ποσοστό στην όψη των πλήρων περιοχών από σκυρόδεμα είναι σχετικά μεγαλύτερο στη βάση του κτηρίου και τα κενά (250 ανοίγματα με διάφανους ή ημιδιάφανους υαλοπίνακες) αυξάνονται σε ποσοστό επιφάνειας της όψης, αναλογικά με την αύξηση του ύψους. Η τυχειότητα στη διαμόρφωση των όψεων εξυπηρετεί σε αυτή την περίπτωση διπλό ρόλο, αφού συντελεί στη διαμόρφωση ενός ιδιαίτερου δομικού συστήματος και παράλληλα συντάσσει μια μη κανονική και μη επαναλαμβανόμενη όψη με χαρακτηριστικό αρχιτεκτονικό ενδιαφέρον, συνδυάζοντας δομή και μορφή σε ενιαίο κατασκευαστικό σύστημα.
- Στην ίδια περίπου λογική, του περιμετρικού δηλαδή φέροντος κελύφους, κινείται και η κατασκευή του **Mikimoto Ginza 2**<sup>334 335 336</sup> (Εικόνα 4\_95) (2005). Σε αυτή την περίπτωση κατασκευάζεται ένα διπλό περιμετρικό κέλυφος από μεταλλικές πλάκες πάχους 1,2cm όπου η εσωτερική με την εξωτερική επιφάνεια έχουν απόσταση 20cm. Το κενό μεταξύ των μεταλλικών πλακών πληρώνεται με σκυρόδεμα. Μεταλλικοί αποστάτες εξασφαλίζουν τη σταθερή απόσταση ανάμεσα στις μεταλλικές πλάκες και λειτουργούν ως οπλισμός για το σκυρόδεμα. Ως αποτέλεσμα, δημιουργείται ένα κέλυφος πάχους 20cm εγκιβωτισμένο σε μεταλλικές πλάκες που αποτελούν και την τελική εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια των όψεων του κτηρίου. Το κτήριο συναρμολογήθηκε από 330 τμήματα όψης (εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας, με τους ενδιάμεσους αποστάτες ως οπλισμό καθώς και με σκυρόδεμα πλήρωσης). Η περιμετρική κατασκευή έχει ανοίγματα σε διαφορετικές θέσεις, διαστάσεις και σχήματα. Τα ανοίγματα αυτά **φαίνεται να έχουν τοποθετηθεί με τυχαίο τρόπο** και διαρθρώνονται σε όλη την επιφάνεια των όψεων του κτηρίου διαμορφώνοντας μια ακανόνιστη – τυχαία μορφή.

331 'Toyo Ito & Associates, Architects - TOD'S Omotesando Building', ημερομηνία πρόσβασης 11 Φεβρουάριος 2020, [http://www.toyo-ito.co.jp/WWW/Project\\_Descript/2000-/2000-p\\_13/2000-p\\_13\\_en.html](http://www.toyo-ito.co.jp/WWW/Project_Descript/2000-/2000-p_13/2000-p_13_en.html).

332 Carlos Zeballos, 'MY ARCHITECTURAL MOLESKINE®: TOYO ITO: TOD'S OMOTESANDO', *MY ARCHITECTURAL MOLESKINE®* (blog), 8 Νοέμβριος 2011, <http://architecturalmoleskine.blogspot.com/2011/11/toyo-ito-tods-omotesando.html>.

333 'TOD'S Omotesando Building | Toyo Ito & Associates, Architects', *Arch20.Com* (blog), 12 Δεκέμβριος 2012, <https://www.arch20.com/tods-omotesando-building-toyo-ito-associates-architects/>.

334 'Toyo Ito & Associates, Architects - MIKIMOTO Ginza2', ημερομηνία πρόσβασης 11 Φεβρουάριος 2020, [http://www.toyo-ito.co.jp/WWW/Project\\_Descript/2005-/2005-p\\_06/2005-p\\_06\\_en.html](http://www.toyo-ito.co.jp/WWW/Project_Descript/2005-/2005-p_06/2005-p_06_en.html).

335 'Mikimoto Ginza 2 - Data, Photos & Plans', WikiArquitectura, 11 Φεβρουάριος 2020, <https://en.wikiarquitectura.com/building/mikimoto-ginza-2/>.

336 Carlos Zeballos, 'MY ARCHITECTURAL MOLESKINE®: TOYO ITO: MIKIMOTO GINZA 2', 11 Φεβρουάριος 2020, <http://architecturalmoleskine.blogspot.com/2011/09/toyo-ito-mikimoto-ginza-2.html>.



Εικόνα 4\_94: TOD's Omotesando, Toyo Ito, 2004. Πηγή: *Tod's at Omotesando.jpg*, *Tod's at Omotesando, Tokyo*, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tod%27s\\_at\\_Omotesando.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tod%27s_at_Omotesando.jpg), εικόνα του/της: *Angaurits at English Wikipedia*, άδεια: *CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license*.



Εικόνα 4\_95: Mikimoto Ginza 2, Toyo Ito, 2005. Πηγή: *Mikimoto Ginza2.JPG*, *Mikimoto Ginza Building, at Ginza Tokyo Japan*, design by Toyo Ito, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mikimoto\\_Ginza2.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mikimoto_Ginza2.JPG), εικόνα του/της: *Oiuydsdfg*, άδεια: *CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license*.

Δεν διακρίνονται συνεχόμενες κατακόρυφες ή οριζόντιες ζώνες υποστυλωμάτων ή δοκών. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, έτσι και εδώ, το περιμετρικό δομικό σύστημα λειτουργεί με ενιαίο τρόπο και επιτρέπει την τοποθέτηση ανοιγμάτων σε μη κανονικές θέσεις χωρίς να δημιουργείται δομικό ή κατασκευαστικό πρόβλημα. Αντίθετα, το συγκεκριμένο δομικό σύστημα και η τυχαιότητα της διάταξης των ανοιγμάτων λειτουργούν συμπληρωματικά.

- **To Beijing National Aquatics Center** <sup>337 338 339</sup> (Εικόνα 4\_96, Εικόνα 4\_97) (2008), ή αλλιώς Water Cube, είναι ένα κλειστό κολυμβητήριο το οποίο κατασκευάστηκε για τους Ολυμπιακούς και Παραολυμπιακούς Αγώνες του 2008 στο Πεκίνο. Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από κοινοπραξία των **PTW architects**, την **ARUP** και τις κινεζικές **CSCEC** και **CCDI**. Η κατασκευή έχει ως έμπνευση το συμβολισμό του σχήματος του τετραγώνου και τη φυσική δομή των φυσαλίδων από σαπούνι. Αποτελείται από ένα διπλού πάχους μεταλλικό κέλυφος από πολυγωνικές κυψέλες το οποίο

337 'Designing the National Aquatics Center (Water Cube) for Beijing Olympics 2008', ημερομηνία πρόσβασης 16 Σεπτέμβριος 2023, <https://www.arup.com/projects/chinese-national-aquatics-center>.

338 'Watercube – National Swimming Centre', PTW Architects, ημερομηνία πρόσβασης 5 Φεβρουάριος 2020, [https://www.ptw.com.au/ptw\\_project/watercube-national-swimming-centre/](https://www.ptw.com.au/ptw_project/watercube-national-swimming-centre/).

339 'Engineering the Water Cube', ArchitectureAU, ημερομηνία πρόσβασης 5 Φεβρουάριος 2020, <https://architectureau.com/articles/practice-23/>.

συγκρατεί το υλικό πλήρωσης και επικάλυψης, που είναι θύλακες από το συνθετικό υλικό ETFE. Η επικάλυψη αποτελείται από 4.000 θύλακες από ETFE οι οποίοι έχουν μεταβλητές διαστάσεις, με μέγιστη διάσταση τα 9m. Η οροφή είναι κατασκευασμένη από 7 διαφορετικούς τύπους φυσαλίδων σε επανάληψη, ενώ τα τοιχώματα κατασκευάζονται από 15 είδη φυσαλίδων σε επανάληψη. Η πολυτυπία και πολυπλοκότητα των διατάξεων των φυσαλίδων οροφής και τοιχωμάτων σε συνδυασμό με το διπλού πάχους δικτύωμα, δίνει την **ψευδαισθηση τυχαιάς διάταξης** τους ως σύνθεση ενώ στην πραγματικότητα πρόκειται για μια οργανωμένη δομή. **Για τον παρατηρητή που δεν γνωρίζει όμως τη λογική της κατασκευής, η δομή εκλαμβάνεται ως τυχαιά.**

Η λύση που επιλέχθηκε βασίζεται σε μια διάταξη που ονομάζεται **δομή Weaire-Phelan**<sup>340</sup> η οποία αντιπροσωπεύει τη γεωμετρία των φυσαλίδων από σαπούνι, όπου συνδυάζονται δύο κελιά ίδιου όγκου, ένα μη κανονικό πενταγωνικό δωδεκάεδρο και ένα μη κανονικό τετραδεκάεδρο. Η σύνθετη αυτή κατασκευή περιλαμβάνει 22.000 μεταλλικές ράβδους, 12.000 κόμβους και 4.000 φυσαλίδες επικάλυψης γεγονός που καθιστά απαγορευτική τη διαχείριση όλου αυτού του όγκου δεδομένων χωρίς τη χρήση υπολογιστικής υποστήριξης μέσω αλγοριθμικών διαδικασιών. Το μοντέλο wireframe της διάταξης μεταφράστηκε αυτόματα με πρόγραμμα visual basic στο λογισμικό Microstation σε μοντέλο μεταλλικής κατασκευής και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν scripts για: α. Να δημιουργηθεί όλη η γεωμετρία εκ του μηδενός, β. Να γίνει δομική βελτιστοποίηση της κατασκευής και γ. Να παραχθούν με αυτόματο τρόπο κατασκευαστικά σχέδια<sup>341</sup>.



Εικόνα 4\_96: Watercube, 2008. Πηγή: Beijing National Aquatics Center, <https://www.flickr.com/photos/belenko/4279663700/>, εικόνα του/της: *Andrey Belenko*, άδεια: CC BY 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>



Εικόνα 4\_97: Watercube, 2008. Πηγή: *Watercube.jpg*, Centre national de natation en construction, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Watercube.jpg>, εικόνα του/της: *angus\_mac\_123*, άδεια: CC BY 2.0, *Creative Commons Attribution 2.0 Generic license*.

340 'Weaire-Phelan Structure', στο *Wikipedia*, 16 Ιανουάριος 2020, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Weaire%E2%80%93Phelan\\_structure&oldid=936137127](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Weaire%E2%80%93Phelan_structure&oldid=936137127).

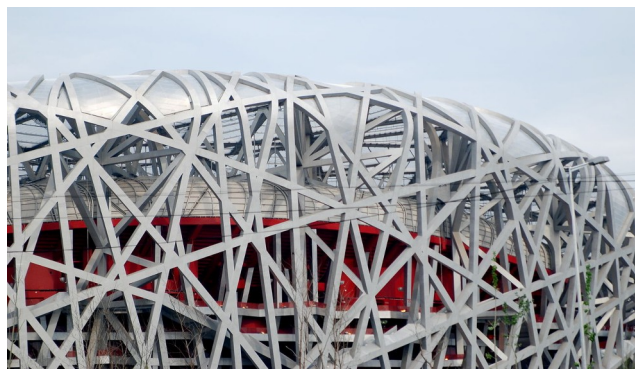
341 Hanif Kara, Andreas Georgoulas, και Jorge Silveti, *Interdisciplinary Design: New Lessons from Architecture and Engineering* (ACTAR Publishers, 2012), 167, [https://books.google.gr/books?id=oNQsXtPz6CcC&printsec=frontcover&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.gr/books?id=oNQsXtPz6CcC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false).

- Το **Beijing National Stadium** <sup>342</sup> <sup>343</sup> (Εικόνα 4\_82, Εικόνα 4\_83) (2008), ή αλλιώς Bird's Nest, είναι ακόμα ένα αθλητικό κέντρο που κατασκευάστηκε για τις ανάγκες των Ολυμπιακών και Παραολυμπιακών αγώνων του Πεκίνου το 2008 από τους **Hertzog & de Meuron, Stephan Marbach, Ai Weiwei** και **CADG**. Το στάδιο αποτελείται από δύο επιμέρους ανεξάρτητες κατασκευές, τη βάση όπου βρίσκονται οι κερκίδες των θεατών και την μεταλλική κατασκευή στέγασης που περιβάλλει τον αγωνιστικό χώρο και τις κερκίδες. Η μεταλλική κατασκευή για τη στέγαση έγινε με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μπορεί να κρυφτεί στην ακανόνιστη μορφή της η υποστήλωση για την μετακινούμενη στέγη του σταδίου, η οποία αποτελείται από 24 μεταλλικά κύρια στοιχεία. Η λύση της μετακινούμενης στέγης τελικά δεν υλοποιήθηκε, λόγω αλλαγών στο σχεδιασμό, αλλά η περιμετρική διάταξη του κελύφους παρέμεινε.

Για το σχεδιασμό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό της **Gehry Technologies Digital Project**, το οποίο είναι ένα αντικειμενοστραφές λογισμικό αλγοριθμικής / παραμετρικής σχεδίασης. Για την κατασκευή χρησιμοποιήθηκε λογισμικό της εταιρείας **TEKLA** τύπου BIM. Όπως αναφέρεται στην ιστοσελίδα της εταιρείας **TEKLA**, η όψη διαμορφώνεται από τα δομικά στοιχεία μαζί με πρόσθετα στοιχεία σε μια σχεδόν χαοτική διάταξη ώστε να μην διακρίνεται το όριο ανάμεσα στην κύρια και τη δευτερεύουσα δομή <sup>344</sup>.



Εικόνα 4\_98: Bird's Nest, 2007. Πηγή: *Beijing national stadium.jpg*, Beijing National Stadium. Architect: Herzog & de Meuron, ArupSport, China Architectural Design & Research Group, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beijing\\_national\\_stadium.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beijing_national_stadium.jpg), εικόνα του/της: *Peter23*, άδεια: CC BY-SA 3.0, *Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license*.



Εικόνα 4\_99: Bird's Nest, 2007. Πηγή: *The Bird's Nest.jpg*, The Beijing National Stadium, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The\\_Bird\\_%27s\\_Nest.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Bird_%27s_Nest.jpg), εικόνα του/της: *Kevin Lawver*, άδεια: CC BY-SA 2.0, *Creative Commons Attribution-Share Alike 2.0 Generic license*.

Η κατασκευή του δικτυώματος έχει έντονα **τυχαίο** μορφολογικό χαρακτήρα. Η διαδικασία παραγωγής αυτής της σύνθετης μορφής προέκυψε από έναν σχεδιαστικό αλγόριθμο ο οποίος συνέδεε τα επιμέρους κατασκευαστικά στοιχεία, ξεκινώντας από τα κατακόρυφα υποστυλώματα, συνεχίζοντας

342 'The Arup Journal 2009 Issue 1 - Arup', ημερομηνία πρόσβασης 12 Σεπτέμβριος 2023, <https://www.arup.com/perspectives/publications/the-arup-journal/section/the-arup-journal-2009-issue-1>.

343 '226 NATIONAL STADIUM - HERZOG & DE MEURON', ημερομηνία πρόσβασης 5 Φεβρουάριος 2020, <https://www.herzogdemeuron.com/index/projects/complete-works/226-250/226-national-stadium.html>.

344 TEKLA, 'Olympic Stadium: Bird's Nest', Tekla, 5 Ιουνίου 2013, <https://www.tekla.com/references/olympic-stadium-birds-nest>.

στις σύνθετες δοκούς, κ.ο.κ. Η αυξημένη πολυπλοκότητα και ασυμμετρία δεν ευνοεί την αναγνώριση της κατασκευαστικής λογικής και αυτός ήταν ένας από τους στόχους του σχεδιασμού, προκειμένου όπως αναφέρθηκε να ενσωματωθούν στο πλέγμα και να «χαθούν» τα κατακόρυφα κύρια υποστυλώματα ανάμεσα στα υπόλοιπα μη φέροντα στοιχεία.

**Η παρουσιαζόμενη τυχαιότητα της μορφής είναι κατασκευασμένη αλγοριθμικά και μπορεί να γίνει αντιληπτή μόνο εφ' όσον μπορεί να αναγνωριστει ο αλγόριθμος του σχεδιασμού της κατασκευής. Για τον παρατηρητή όμως, ο οποίος δεν γνωρίζει τη διαδικασία ή δεν μπορεί να αναγνωρίσει τον αλγόριθμο, η κατασκευή παρουσιάζει σε τμήματά της σημαντικό βαθμό πολυπλοκότητας, η οποία αναγνωρίζεται ως τυχαιότητα.**

- Το **Dogok Maximum**<sup>345 346</sup> (2016) (Εικόνα 4\_100, Εικόνα 4\_101) είναι ένα σύγχρονο κτίσμα μικτής χρήσης κατοικίας, υποδοχής και studio, σχεδιασμένο από την ομάδα του αρχιτέκτονα **Moon Hoon**. Πρόκειται για μία κατασκευή από εμφανές σκυρόδεμα η οποία εξωτερικά διαμορφώνεται από μη συμμετρικές μορφές και διαγράφεται από χαρακτηριστικές τεμνόμενες υποχωρήσεις και εξάρσεις της γεωμετρίας. Τα ανοίγματα της κατασκευής ορίζονται από τις ακανόνιστες ευθείες και από οριζόντιες ζώνες. Όπως αναφέρει ο αρχιτέκτονας, η συνήθειά του να ενώνει στοιχεία που μοιάζουν ασύνδετα με ευθείες, συνδυάστηκε με την **οργανωμένη τυχαιότητα**, η οποία έγινε η βάση για την εξωτερική μορφή του κτίσματος και η ανεξέλεγκτη κατάσταση όπως είναι η σύνδεση στοιχείων του σχεδιασμού σκόπιμα με την τυχαιότητα, δεν γίνεται λόγω αδιαφορίας, αλλά γιατί πολλές φορές έτσι παρουσιάζονται καλύτερες λύσεις.



Εικόνα 4\_100: Dogok Maximum, Moon Hoon, 2016. Πηγή: <http://www.moonhoon.com/sub/project/DOGOK%20MAXIMUM/DOGOK%20MAXIMUM.html>, © Moonhoon, χρήση κατόπιν αδειάς.



Εικόνα 4\_101: Dogok Maximum, Moon Hoon, 2016. Πηγή: <http://www.moonhoon.com/sub/project/DOGOK%20MAXIMUM/DOGOK%20MAXIMUM.html>, © Moonhoon, χρήση κατόπιν αδειάς.

345 MGS Architecture, 'Bringing Order to Randomness', MGS Architecture, ημερομηνία πρόσβασης 15 Σεπτέμβριος 2023, <https://www.mgsarchitecture.in/architecture-design/projects/1701-bringing-order-to-randomness.html>.

346 'Moon Hoon's Narrow Seoul House Features Small Windows and Diagonal Markings', Dezeen, 9 Ιανουάριος 2017, <https://www.dezeen.com/2017/01/09/dogok-maximum-moon-hoon-seoul-south-korea-house-tower/>.

- Το **Morpheus Hotel** <sup>347</sup> στο Μακάο (2018) από τους **Zaha Hadid Architects** (Εικόνα 4\_102, Εικόνα 4\_103), είναι ένα ξενοδοχείο 42 ορόφων το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερα δομικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά. Το κτήριο έχει γενική μορφή ενός παραλληλεπίπεδου, όπου ο φέρων οργανισμός της κατασκευής είναι ένας μεταλλικός εξωσκελετός που περιβάλλει το κτίσμα. Ο όγκος της κατασκευής έχει τρεις οπές στο κεντρικό τμήμα του, διαφορετικού μεγέθους και ακανόνιστου σχήματος. Ο μεταλλικός εξωσκελετός ακολουθεί τη φόρμα της γεωμετρίας του κτηρίου, ακόμα και στις περιοχές των διάκενων, με αποτέλεσμα να υιοθετεί μια επίσης ακανόνιστη – οργανική μορφή στις περιοχές εκείνες, ενώ στα τμήματα του κτηρίου όπου η γεωμετρία είναι ορθοκανονική, η διάταξη που έχει ο σκελετός είναι πιο συμβατική. Στην ουσία ο εξωσκελετός διαμορφώνει ένα πλέγμα στο χώρο με μεταβλητή πυκνότητα και μορφολογία, ενώ η διατομή των στοιχείων που τον αποτελούν παραμένει σταθερή. Η σχέση του φέροντος οργανισμού/εξωσκελετού και του κυρίως όγκου της κατασκευής είναι τέτοια η οποία δημιουργεί το ερώτημα για το αν ο σκελετός ακολουθεί τη μορφολογία του κυρίως κτηρίου ή συμβαίνει το αντίστροφο.

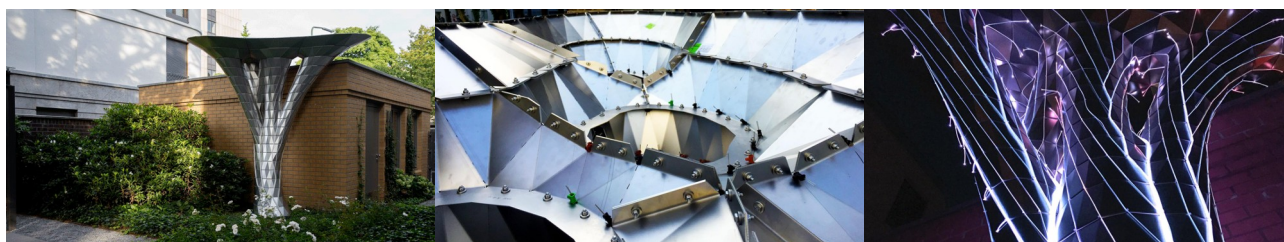


Εικόνα 4\_102: Morpheus Hotel Macau, Zaha Hadid Architects, 2018. Πηγή: Macau-Morpheus-02.jpg, Morpheus at City of Dreams, Hotel in Macau, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Macau-Morpheus-02.jpg>, εικόνα του/της: *Störfix*, άδεια: CC BY-SA 3.0 DE, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Germany license, [Creative Commons by-sa 3.0 de](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/).

Εικόνα 4\_103: Morpheus Hotel Macau, Zaha Hadid Architects, 2018. Πηγή: Macau-Morpheus-01.jpg, Morpheus at City of Dreams, Hotel in Macau, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Macau-Morpheus-01.jpg>, εικόνα του/της: *Störfix*, άδεια: CC BY-SA 3.0 DE, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Germany license, [Creative Commons by-sa 3.0 de](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/).

347 'Morpheus Hotel at City of Dreams, Macau – Zaha Hadid Architects', 20 Φεβρουάριος 2020, <https://www.zaha-hadid.com/architecture/city-of-dreams-hotel-tower-cotai-macau/>.

- Το **Steampunk**<sup>348 349</sup> (**SoomeenHahm Design, Igor Pantic and Fologram**) (2019), είναι μια αυτοφερόμενη κατασκευή / pavillion για τον υπαίθριο χώρο της έκθεσης της Tallin Architecture Biennale, κατασκευασμένη από ξύλο και μεταλλικούς συνδέσμους. Για το έκθεμα χρησιμοποιήθηκε σύγχρονη τεχνολογία τόσο κατά τη φάση του σχεδιασμού όσο και για τη φάση της υλοποίησής του. Η γενική διάταξη προέκυψε μετά από βελτιστοποίηση των μορφών της αρχικής χονδροειδούς γεωμετρίας στο χώρο, στην οποία προσαρμόστηκαν έπειτα από κατάλληλο υπολογισμό τα επιμέρους ξύλινα στοιχεία με τις κατάλληλες διαστάσεις και σε κατάλληλες θέσεις, γωνίες και συνδεσμολογίες. Η κυρίαρχη γενική μορφή είναι αυτή που καθορίζει το **όριο** εντός του οποίου αναπτύσσονται τα επιμέρους τμήματα των ξύλινων λωρίδων, τα οποία **κατέληξαν στην τελική τους μορφή** με τη χρήση των αλγορίθμων και την υπολογιστική βελτιστοποίηση. Ο μηχανικός δεν αναλαμβάνει να μελετήσει χωριστά το κάθε ένα ξύλινο στοιχείο, αλλά ο σχεδιασμός είναι συνολικός και **τα μέρη προκύπτουν** από το συνολικό αλγόριθμο. Από αυτή την έννοια υπάρχει η τυχαιότητα στη διαδικασία του σχεδιασμού, καθώς το τελικό αποτέλεσμα δεν είναι εξαρχής προβλέψιμο.
- Το **Photoptosis**<sup>350</sup> (**Orproject**) (2017) είναι ένα άλλο έργο/έκθεμα το οποίο είναι επίσης μια αυτοφερόμενη κατασκευή. Αναπαριστά ένα δένδρο κατασκευασμένο από μέταλλο και το οποίο φωτίζεται τις βραδινές ώρες. Είναι κατασκευασμένο από 100 ανοξείδωτα μεταλλικά στοιχεία πάχους 3mm τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε κατάλληλη διάταξη, χωρίς να υπάρχει ανάγκη για άλλο φέροντα οργανισμό πάνω στον οποίο πρέπει να γίνει ανάρτηση των στοιχείων επικάλυψης. Προκειμένου να μην παραμορφώνεται η κατασκευή, τοποθετήθηκαν πρόσθετες μεταλλικές λωρίδες ενίσχυσης και πρόσθετα μπουλόνια σε διάφορες θέσεις. Η τελική μορφή του συνόλου της κατασκευής, καθώς και των επιμέρους 100 στοιχείων προέκυψε από υπολογιστικό σχεδιασμό με τη χρήση παραμετρικού αλγορίθμου. Ο αλγόριθμος δίνει τη δυνατότητα παραγωγής πολλών παραλλαγών, σύμφωνα με συγκεκριμένες παραμέτρους, έτσι ώστε να είναι δυνατή η προσαρμογή της κατασκευής σε διαφορετικά περιβάλλοντα, όπου υπάρχουν και διαφορετικοί περιορισμοί. Τα επιμέρους στοιχεία δεν σχεδιάζονται χωριστά εξαρχής, αλλά **προκύπτουν, χωρίς να έχουν προκαθορισμένες ακριβείς διαστάσεις**, από το συνολικό αλγόριθμο και τη μεθοδολογία του σχεδιασμού, **σύμφωνα με τις παραμέτρους και περιορισμούς που υπάρχουν κάθε φορά**.



Εικόνα 4\_104: Photoptosis, Orproject, 2017. Πηγή: Orproject, ©Orproject, χρήση κατόπιν αδειάς.

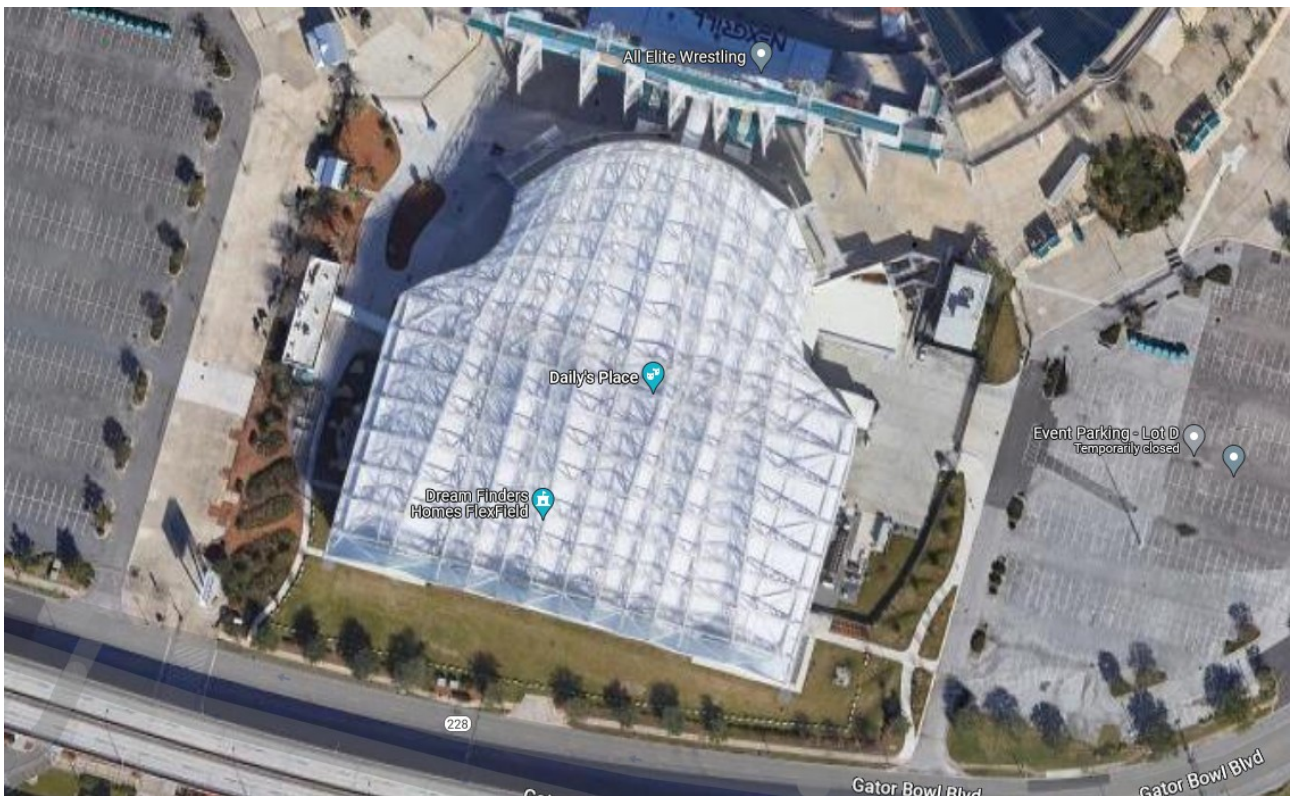
348 'Body Building Installation – TAB 2015', Karamba3D, ημερομηνία πρόσβασης 16 Σεπτέμβριος 2023, <https://karamba3d.com/projects/body-building-installation-tab-2015/>.

349 'Digital Models and Augmented Reality Used to Build Twisting Pavilion in Tallinn', Dezeen, 16 Οκτώβριος 2019, <https://www.dezeen.com/2019/10/16/steampunk-pavilion-fologram-tallinn-architecture-biennial/>.

350 A' Design Award & Competition, 'Photoptosis Installation by Rajat Sodhi and Christoph Klemmt', A' Design Award, ημερομηνία πρόσβασης 16 Σεπτέμβριος 2023, <https://competition.adesignaward.com/design.php?ID=65401>.



- Άλλο ένα παράδειγμα κατασκευής που έχει προκύψει μέσω διαδικασίας βελτιστοποίησης, με τα επιμέρους στοιχεία να μην σχεδιάζονται μεμονωμένα, αλλά να **προκύπτουν** από τον σχεδιαστικό και υπολογιστικό αλγόριθμο είναι το **Jacksonville Jaguars Flex Field and Amphitheatre**<sup>351</sup> (**Populus, Walter P. Moore**)(2017). Πρόκειται για μια μεταλλική κατασκευή φορέα - στεγάστρου, γενικής μορφής διπλής καμπυλότητας με πτυχώσεις, από την οποία αναρτάται μεμβράνη ETFE ως εξωτερική επιδερμίδα του κλειστού χώρου. Η κατασκευή δεν έχει προφανώς σχεδιαστεί τυχαία, αλλά έχει προκύψει αλγοριθμικά από την αυτόματη και μη προκαθορισμένη γεωμετρική προσαρμογή της δομής των στοιχείων του φορέα στη γενική μορφή του στεγάστρου, σύμφωνα με τις παραμέτρους και τους περιορισμούς που έχουν οριστεί από τους μηχανικούς.



Εικόνα 4\_105: Daily's Place, Jacksonville Jaguars Flex Field and Amphitheatre (Populus, Walter P. Moore), 2017. Πηγή: Google Maps, <https://www.google.com/maps/@30.3220679,-81.6375202,275m/data=!3m1!1e3?entry=ttu>

351 Kais Al-Rawi, 'Generative geometry workflows – from concept to fabrication', *Proceedings of IASS Annual Symposia 2017*, τχ. 23 (28 Σεπτέμβριος 2017): 1–9.



## 5. Η τυχαιότητα στη διαδικασία του σχεδιασμού

Η τυχαιότητα, όπως φάνηκε στα προηγούμενα παραδείγματα, είναι συχνά ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται ως αφετηρία στο σχεδιασμό, για να δώσει αναπάντεχα αποτελέσματα, για να δημιουργήσει νέες μορφές και δομές ή για να επιλύσει σύνθετα προβλήματα.

**Ενώ ο σχεδιασμός και η τυχαιότητα φαίνεται να είναι ασύμβατες έννοιες**, η τυχαιότητα μπορεί να ενισχύσει αυτό που καλείται από τον **Eckersley** ως **δυναμική ασυμμετρία**, δηλαδή τη διάταξη των συνθετικών στοιχείων με τέτοιο τρόπο ώστε να συγκροτούν μια ενότητα προκειμένου να παρατείνεται η νοητική αναγνώριση και καταγραφή και η αντιληπτική ολοκλήρωση της παρατήρησης <sup>352</sup>. Μια λύση που ξεκινάει από την τυχαιότητα μπορεί να αποτελέσει την αρχή μιας σχεδιαστικής προσέγγισης, που μπορεί να εξελιχθεί περαιτέρω από το μελετητή, εφ' όσον θεωρείται από αυτόν ως ικανοποιητική, **κατευθύνοντας τη σύμφωνα με συγκεκριμένους στόχους και παραμέτρους προς το επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα**.

Για τους **Keller και Jaeger** υπάρχει το ερώτημα αν η τυχαιότητα και η δομική μη κανονικότητα οδηγούν σε μορφές που όχι μόνο συμπεριφέρονται καλύτερα, αλλά είναι τελικά και πιο πλούσιες αισθητικά και σε νόημα <sup>353</sup>. Οι **Keller και Jaeger** αναφέρουν επίσης ότι σύμφωνα με τους **Moussavi και Rappaport**, υπάρχει τάση να δημιουργούνται ενιαία συστήματα που είναι και δομικά και διακοσμητικά με νέες σχέσεις μεταξύ τους αλλάζοντας τη μέχρι τότε ιεραρχία όπου πρωτεύον στοιχείο ήταν η δομή και δευτερεύον ήταν το διακοσμητικό <sup>354</sup>.

Η τυχαιότητα, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες ενότητες, σχετίζεται με την πολυπλοκότητα. Ο σχεδιασμός σχετίζεται άμεσα κι αυτός με την πολυπλοκότητα. Σύμφωνα με τον **Salingaros** <sup>355</sup>, η πολυπλοκότητα στο σχεδιασμένο περιβάλλον είτε προέρχεται από προσαρμογή (natural), είτε είναι σχεδιασμένη πολυπλοκότητα (designed/invented). Η σχεδιασμένη πολυπλοκότητα περιλαμβάνει ενίοτε την έννοια της τυχαιότητας (με αρνητική χροιά κατά τον Salingaros). Τέτοια κτίσματα των οποίων η πολυπλοκότητα προέρχεται από τυχαιότητα μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε μέρος, χωρίς να λαμβάνουν υπ' όψιν το περιβάλλον τους, αφού δεν έχουν προκύψει από προσαρμογή και επομένως δεν ικανοποιούν ουσιαστικά τις λειτουργικές απαιτήσεις και ανάγκες του ανθρώπου. Σε αντιδιαστολή, τα πολύπλοκα κτίσματα των οποίων η πολυπλοκότητα έχει προέλθει από προσαρμογή (adaptation) συνδέονται με συγκεκριμένο χώρο και συνθήκες.

Για τον **Koolhaas**, η ομορφιά της αρχιτεκτονικής βρίσκεται στην τυχαιότητά της και στην έκπληξη <sup>356</sup>.

Η τυχαιότητα του Koolhaas, είναι μια παράμετρος που θα πρέπει να μπορεί να ενσωματωθεί σε μια διαδικασία σχεδιασμού, όπου ο αρχιτέκτονας καλείται να ολοκληρώσει ένα συγκεκριμένο στόχο,

---

352 Michael Eckersley, 'Randomness, Rules and Compositional Structure in Design', *Leonardo* 23, τχ. 1 (1990): 75–80, <https://doi.org/10.2307/1578469>.

353 Sean Keller και Heinrich Jaeger, 'Aleatory Architectures' (arXiv, 19 Οκτώβριος 2015), <https://doi.org/10.48550/arXiv.1510.05721>.

354 Keller και Jaeger.

355 Nikos A. Salingaros, 'Adaptive vs. Random Complexity, Parts 1 and 2' (ArchNewsNow, 2015), <https://patterns.architecture.net/doc/az-cf-172769>.

356 'SPIEGEL Interview with Dutch Architect Rem Koolhaas: 'Evil Can Also Be Beautiful'', *Der Spiegel*, 27 Μάρτιος 2006, τμ. International, <https://www.spiegel.de/international/spiegel/spiegel-interview-with-dutch-architect-rem-koolhaas-evil-can-also-be-beautiful-a-408748.html>.

κάνοντας χρήση συγκεκριμένων πόρων που έχει στη διάθεσή του και σύμφωνα με συγκεκριμένους περιορισμούς.

Ο **DeLanda** αναφέρει ότι η ικανότητα να ωφελείται κανείς από την τυχαιότητα στα εξελισσόμενα υλικά είναι σημαντικό μάθημα που οι χρήστες της προσομοιωμένης εξέλιξης, όπως αρχιτέκτονες και οι πολεοδόμοι πρέπει να λαμβάνουν σοβαρά υπ' όψιν <sup>357</sup>.

Στην πορεία της διαδικασίας του σχεδιασμού ο αρχιτέκτονας καλείται να πάρει πολλαπλές **αποφάσεις** που σχετίζονται με διαφορετικά **Κριτήρια, Προδιαγραφές, Περιορισμούς, Παραδοχές** και **Παραμέτρους** του ζητήματος που καλείται να αντιμετωπίσει. Υπάρχουν διάφορες μεθοδολογίες σχεδιασμού, οι οποίες αποτελούνται από επί μέρους στάδια προόδου της διαδικασίας. Στις επόμενες παραγράφους θα γίνει προσπάθεια να διερευνηθεί πώς σχετίζεται η τυχαιότητα με τις παραπάνω συνιστώσες του σχεδιασμού.

### 5.1 Κριτήρια (Criteria)

Αφού καθοριστεί ο αντικειμενικός στόχος ενός προβλήματος σχεδιασμού (π.χ. την υλοποίηση μιας κατασκευής συγκεκριμένης λειτουργίας), στη συνέχεια και σύμφωνα με τη λογική ανάλυσης ενός ζητήματος σχεδιασμού σε μέρη, σύμφωνα με το **Lawson** <sup>358</sup> διακρίνονται **κριτήρια** τα οποία χρησιμοποιούνται για να αξιολογήσουν τον βαθμό επιτυχίας ενός σχεδίου. Τα κριτήρια δηλαδή αξιολογούν την απόδοση ενός συστήματος. Τα κριτήρια προϋποθέτουν ότι υπάρχει κάποιο σύστημα μέτρησης που μπορεί και καταγράφει ποσότητες ή ποιότητες. Τα κριτήρια που αφορούν σε στοιχεία που ήδη περιγράφονται από μονάδες μέτρησης όπως όγκος, βάρος, αντοχή, χρόνος, κόστος, ενέργεια, κ.λπ., είναι εύκολο να καταγραφούν αριθμητικά και να αξιολογηθούν. Τα υπόλοιπα κριτήρια, τα ποιοτικά κριτήρια, θα πρέπει με κάποιο τρόπο είτε να ανάγονται σε κάποιο υπάρχον σύστημα μέτρησης και στη συνέχεια να αξιολογούνται με έμμεσο τρόπο, είτε να αξιολογούνται με ποιοτικούς χαρακτηρισμούς. Ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός περιλαμβάνει και τα δύο είδη κριτηρίων, τόσο τα ποσοτικά όσο και τα ποιοτικά κριτήρια. Τα μεν πρώτα μπορούν να χαρακτηριστούν ως αντικειμενικά κριτήρια, ενώ τα δεύτερα ως υποκειμενικά κριτήρια. Η διαμόρφωση ενός σχεδιασμού (design) μπορεί να αναφέρεται σε διάφορες κατηγορίες μεγεθών ή ποιοτήτων, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της κατασκευής θα μπορούσαν να υπάρχουν ενδεικτικά για παράδειγμα κριτήρια (σε μη ιεραρχική παράθεση) σχετικά με:

1. την αντοχή της κατασκευής
2. τη λειτουργία
3. την εργονομία και άνεση
4. την πολυπλοκότητα
5. την αισθητική
6. την ενεργειακή απόδοση
7. την οικονομία σε υλικά

---

357 Manuel DeLanda, 'Matter Matters' (DOMUS Magazine), ημερομηνία πρόσβασης 11 Ιανουάριος 2023, <http://cmm.cenart.gob.mx/delanda/textos/matter.pdf>.

358 Bryan Lawson, *How Designers Think, Fourth Edition: The Design Process Demystified*, 4 edition (Amsterdam: Architectural Press, 2005), 64.

8. τον χρόνο κατασκευής
9. το κόστος κατασκευής
10. το κόστος λειτουργίας
11. το κόστος συντήρησης
12. την ανακυκλωσιμότητα της κατασκευής

Η συνειδητή επιλογή συγκεκριμένων κριτηρίων από τον αρχιτέκτονα, κατά ένα τρόπο υποδεικνύει τις άμεσες προτεραιότητες και τους στόχους προς τους οποίους θα πρέπει να κατευθυνθεί ο σχεδιασμός. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να υπάρχουν και άλλες ποσότητες ή ποιότητες που δεν είναι απαραίτητο να αξιολογηθούν, είτε τουλάχιστον αρχικά είτε και καθόλου, οι οποίες είτε είναι αμελητέας είτε δευτερεύουσας σημασίας στο σχεδιασμό και επομένως δεν επηρεάζουν ή επηρεάζουν ελάχιστα τη διαδικασία αξιολόγησης.

Η ιεραρχική ταξινόμηση των κριτηρίων, από τα πιο σημαντικά προς τα λιγότερο σημαντικά, καθορίζει επίσης τους στόχους και τις προτεραιότητες σε μια στρατηγική σχεδιασμού και κατατάσσει τα κριτήρια σε περισσότερο και σε λιγότερο σημαντικά. Έτσι λοιπόν, υπάρχει μια εκτίμηση του τι θα είναι ο σχεδιασμός πριν ακόμα ξεκινήσει. Κατά **Dahabreh**<sup>359</sup>, ο **Baxandall** χρησιμοποιεί τον όρο “*design charge*” σχετικά με τον προσδιορισμό του σχεδιασμού στην αρχική του φάση, ο οποίος περιλαμβάνει προδιαγραφές, απαιτήσεις, στόχους, κ.λπ., οι οποίες είναι ανεξάρτητες από το τελικό προϊόν.

**Σε πρώτο επίπεδο (και ειδικότερα στην περίπτωση της συνειδητής χρήσης τυχαιότητας), αναγνωρίζεται ή επιλέγεται αν η τυχαιότητα στο σχεδιασμό συνδέεται ή όχι με συγκεκριμένα κριτήρια.**

**Σε δεύτερο επίπεδο τα κριτήρια αυτά θα αξιολογήσουν την επιρροή της τυχαιότητας, εφ’ όσον αυτή υπάρχει.**

Σε ένα σύνθετο έργο, όπως πρόκειται για μια κτιριακή κατασκευή, γίνεται αντιληπτό ότι θα πρέπει να ικανοποιούνται πολλά κριτήρια ταυτόχρονα, τα οποία έχουν διαφορετική βαρύτητα επί του συνόλου. Για να ικανοποιηθούν τα πολλαπλά κριτήρια ταυτόχρονα απαιτείται σχεδιασμός, αξιολόγηση και εμπειρία. Το πρόβλημα αυτό δεν αφορά μόνο στην αρχιτεκτονική. Συναντάται στην μηχανική, στα οικονομικά, στις τηλεπικοινωνίες, κ.ο.κ. Η διαδικασία ανάλυσης πολλαπλών κριτηρίων ονομάζεται **MCDA – Multiple Criteria Decision Analysis** ή **MCDM - Multiple Criteria Decision Making**<sup>360 361</sup>, μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολλές μεθόδους και αλγορίθμους και υποστηρίζεται από εξειδικευμένο λογισμικό<sup>362</sup>. Στην περίπτωση των γενετικών αλγορίθμων **η έννοια fitness**, όπως θα παρουσιαστεί

359 Saleem Dahabreh, ‘The Architectural Design Machine (AD\_M): Integrating Architectural Knowledge’, *International Journal of Applied Engineering Research* 9 (2014): 489, [https://www.researchgate.net/publication/282861390\\_The\\_Architectural\\_Design\\_Machine\\_AD\\_M\\_Integrating\\_Architectural\\_Knowledge](https://www.researchgate.net/publication/282861390_The_Architectural_Design_Machine_AD_M_Integrating_Architectural_Knowledge).

360 ‘What Is MCDM / MCDA?’, 1000minds, ημερομηνία πρόσβασης 31 Αύγουστος 2020, <https://www.1000minds.com/decision-making/what-is-mcdm-mcda>.

361 ‘Multiple–Criteria Decision Making | Encyclopedia.com’, ημερομηνία πρόσβασης 31 Αύγουστος 2020, <https://www.encyclopedia.com/management/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/multiple-criteria-decision-making>.

στη συνέχεια, είναι ένα κριτήριο που χρησιμοποιείται για να αξιολογηθεί το αποτέλεσμα του γενετικού αλγορίθμου.

## 5.2 Π1: Προδιαγραφές (Specifications)

Σύμφωνα με τον ορισμό του Merriam-Webster Dictionary **προδιαγραφή** (specification) είναι:

*1: the act or process of specifying*

*2a: a detailed precise presentation of something or of a plan or proposal for something – usually used in plural*

*b: a statement of legal particulars (as of charges or of contract terms) also: a single item of such statement*

*c: a written description of an invention for which a patent is sought”* <sup>363</sup>

Όπως αναφέρεται στο εγχειρίδιο “**Materials and Process Specifications and Standards**” (1977) <sup>364</sup> οι προδιαγραφές αφορούν στη χρήση ενός αντικειμένου, ενός υλικού, σε διαδικασίες και σε υπηρεσίες και έχουν και οικονομική διάσταση. Οι προδιαγραφές καθορίζουν επίσης τις διαδικασίες ελέγχου και αποδοχής ενός αντικειμένου, υλικού ή υπηρεσίας. Επίσης περιλαμβάνουν τη συντήρηση, τη συσκευασία, τη σήμανση, κ.λπ. Γι' αυτούς τους λόγους οι προδιαγραφές και τα πρότυπα, είναι πολύ σημαντικά εργαλεία για το σχεδιασμό, την προμήθεια υλικών, την υλοποίηση, την παράδοση και την αποδοχή ενός έργου σε συνάρτηση με το κόστος και την ποιότητα κατασκευής.

Διεθνή συστήματα προδιαγραφών και πιστοποίησης είναι το **ISO** (International Organization for Standardization) <sup>365</sup>, το **CSI** (Construction Specifications Institute) <sup>366</sup>, το **CSC** (Construction Specifications Canada) <sup>367</sup>, το **TÜV** <sup>368</sup>. Στην Ελλάδα υπάρχουν οι **Ελληνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΕΤΕΠ)** <sup>369</sup> οι οποίες έχουν υποχρεωτική εφαρμογή σε όλα τα Δημόσια Έργα και Μελέτες, η βάση δεδομένων των οποίων ενημερώνεται και εμπλουτίζεται διαρκώς από τον **ΕΛΟΤ** <sup>370</sup> (Ελληνικό Οργανισμό Τυποποίησης).

362 ‘Decision-Making Software’, στο *Wikipedia*, 29 Φεβρουάριος 2020, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Decision-making\\_software&oldid=943187084](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Decision-making_software&oldid=943187084).

363 Merriam-Webster, ‘Specification’, ημερομηνία πρόσβασης 22 Απρίλιος 2020, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/specifications>.

364 National Research Council, *Materials and Process Specifications and Standards* (Washington, DC: The National Academies Press., 1977), 8, <http://nap.edu/20344>.

365 ‘ISO - International Organization for Standardization’, ISO, ημερομηνία πρόσβασης 5 Απρίλιος 2020, <https://www.iso.org/home.html>.

366 ‘Home - Construction Specifications Institute’, ημερομηνία πρόσβασης 5 Απρίλιος 2020, <https://www.csiresources.org/home>.

367 ‘Construction Specifications Canada (CSC)’, ημερομηνία πρόσβασης 5 Απρίλιος 2020, <https://www.csc-dcc.ca/>.

368 ‘Technischer Überwachungsverein’, στο *Wikipedia*, 11 Αύγουστος 2023, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Technischer\\_%C3%9Cberwachungsverein&oldid=1169863530](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Technischer_%C3%9Cberwachungsverein&oldid=1169863530).

369 ‘Ελληνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΕΤΕΠ)’, ημερομηνία πρόσβασης 5 Απρίλιος 2020, [https://www.ggde.gr/index.php?option=com\\_k2&view=itemlist&layout=category&task=category&id=89&Itemid=285](https://www.ggde.gr/index.php?option=com_k2&view=itemlist&layout=category&task=category&id=89&Itemid=285).

370 <https://elot.gr/>

Οι **προδιαγραφές**, όπως και οι περιορισμοί, αποτελούν αρχικό μέρος του σχεδιασμού και καθορίζονται πριν ακόμα έχει ξεκινήσει το κυρίως τμήμα του. Οι προδιαγραφές προκύπτουν σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις των κριτηρίων (5.1) και τους περιορισμούς (5.3). Χρησιμοποιούνται από τον κύριο του έργου, τους μελετητές, τους προμηθευτές, τους κατασκευαστές και τους επιβλεπόντες ενός έργου. Αποτελούν συμπληρωματικό τμήμα των σχεδίων και των τεχνικών προδιαγραφών και περιλαμβάνουν πληροφορίες που δεν μπορούν να καταγραφούν σε σχέδιο ή επιβεβαιώνουν ή/και δίνουν έμφαση σε πληροφορίες που περιλαμβάνονται στα σχέδια. Οι προδιαγραφές καθορίζουν σε τεχνικό επίπεδο τόσο κάποιες από τις γενικές κατευθύνσεις του σχεδιασμού, όσο και πολλές από τις πιο εξειδικευμένες. Καθορίζουν επίσης συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των διαδικασιών που θα πρέπει να ακολουθηθούν στο σχεδιασμό και την κατασκευή, ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των δομικών υλικών και της κατασκευής και όρια εντός των οποίων μπορούν να κυμαίνονται διάφορες παράμετροι.

**Κάποιες από τις προδιαγραφές μπορούν να ενσωματωθούν στο σχεδιασμό ως παράμετροι για τη διαμόρφωση ορίων κατώτατων και ανώτατων τιμών, εντός των οποίων μπορούν να βρίσκονται τα αποτελέσματα της τυχαιότητας και να βοηθήσουν στη διαμόρφωση του αλγορίθμου με τον οποίο ενσωματώνεται πιθανά η τυχαιότητα.**

### 5.3 Π2: Περιορισμοί (Constraints)

Σύμφωνα με τον ορισμό του Merriam-Webster Dictionary **περιορισμός** (constraint) είναι:

*“Constraint:*

*: a constraining condition, agency, or force”* <sup>371</sup>

Σύμφωνα με τον **Lawson** <sup>372</sup>, ο ρόλος των περιορισμών είναι να εξασφαλίσουν ότι το προϊόν του σχεδιασμού εκτελεί τις λειτουργίες ή τη χρήση για τις οποίες σχεδιάστηκε όσο το δυνατόν πιο ικανοποιητικά. Ο Lawson <sup>373</sup> κάνει μια κατηγοριοποίηση σχετικά με τους περιορισμούς και τους διακρίνει σε τύπους ανάλογα με το ποιος είναι ο δημιουργός τους (4 περιπτώσεις), αν είναι εσωγενής ή εξωγενής περιορισμός (2 περιπτώσεις) και τέλος ανάλογα με το τι είδος περιορισμού είναι (4 περιπτώσεις). Έτσι, σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, προκύπτει ένα σύνολο πιθανών περιορισμών που αποτελείται από  $4 \times 2 \times 4 = 32$  περιπτώσεις. Οι κατηγορίες περιορισμών καταγράφονται στον πίνακα που ακολουθεί:

371 Merriam-Webster, ‘Constraint’, ημερομηνία πρόσβασης 22 Απρίλιος 2020, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/constraint>.

372 Lawson, *How Designers Think, Fourth Edition*, 100.

373 Lawson, τμ. 90–107.

	Δημιουργός περιορισμού	Προέλευση	Είδος περιορισμού
A/A	A	B	Γ
1	Designer - Μελετητής	Internal - Εσωτερικός	Radical - Ριζικός
2	Client - Πελάτης	External - Εξωτερικός	Practical - Πρακτικός
3	User - Χρήστης		Formal - Μορφολογικός
4	Legislator - Νομοθέτης		Symbolic - Συμβολικός

Πίνακας 5\_1: Πίνακας κατηγοριοποίησης περιορισμών κατά Lawson. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι περιπτώσεις περιορισμών που μπορούν να συσχετιστούν πιο εύκολα με την τυχειότητα. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Η πρώτη στήλη (A) δεν χρειάζεται επεξήγηση, καθώς περιγράφει την κατηγορία του δημιουργού του περιορισμού με τις περιπτώσεις 1, 2 να είναι οι πιο ευέλικτες/προαιρετικές και τις 3, 4 να είναι πιο άκαμπτες/υποχρεωτικές. Σχετικά με την προέλευση (B), οι εσωτερικοί περιορισμοί (internal) είναι αυτοί που προκύπτουν για παράδειγμα από τις απαιτήσεις του σχεδιασμού. Οι εξωτερικοί περιορισμοί (external) είναι αυτοί που προκύπτουν από παραμέτρους που ο μελετητής δεν ελέγχει, όπως για παράδειγμα τη διαδικασία κάποιας υπηρεσίας ή τις προδιαγραφές ενός υλικού. Η τρίτη στήλη (Γ) περιγράφει τα είδη των περιορισμών ξεκινώντας από τους ριζικούς/κύριους περιορισμούς ως περιορισμούς που έχουν σημαντικότερη επίδραση στην εξέλιξη του σχεδιασμού. Οι πρακτικοί περιορισμοί αφορούν στην τεχνολογική-τεχνική διάσταση του σχεδιασμού. Οι μορφολογικοί περιορισμοί αφορούν σε περιορισμούς που έχουν σχέση με τη μορφή, τη γεωμετρία, τις αναλογίες, την αισθητική, κ.λπ. Τέλος, οι συμβολικοί περιορισμοί αφορούν σε περιορισμούς που έχουν να κάνουν με το συμβολισμό στο σχεδιασμό, τις αρχιτεκτονικές τεχνοτροπίες, τη νοηματοδότηση, κ.λπ. Οποιαδήποτε καταχώρηση της πρώτης στήλης (A) μπορεί να συνδυαστεί με οποιαδήποτε καταχώρηση της στήλης (B) και της στήλης (Γ), καλύπτοντας έτσι όλες τις πιθανές παραλλαγές του μοντέλου του Lawson.

Κατά τον Niemeijer<sup>374</sup> υπάρχουν δύο μέθοδοι χρήσης των constraints στο σχεδιασμό ανάλογα με το ποιος είναι ο δημιουργός τους, ο χρήστης ή ο υπολογιστής. Αν και το τελικό αποτέλεσμα είναι τέτοιο που τελικά ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί, οι μέθοδοι έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και πεδία εφαρμογών. Η πρώτη μέθοδος ονομάζεται **constraint solving**, δηλαδή οι περιορισμοί να λαμβάνονται ως input και στη συνέχεια να γίνεται προσπάθεια να βρεθεί μια λύση που να τους ικανοποιεί. Ο δεύτερος τρόπος χρήσης των περιορισμών είναι να πραγματοποιηθεί **πρώτα το σχέδιο**, στη συνέχεια να ελεγχθεί με βάση τους περιορισμούς και να γίνει προσαρμογή όπου απαιτείται<sup>375</sup>.

Όπως αναφέρει ο Svanerudh<sup>376</sup>, κατά τον Suh<sup>377</sup> υπάρχουν δύο είδη περιορισμών, οι περιορισμοί input, οι οποίοι είναι περιορισμοί στις προδιαγραφές του σχεδιασμού και οι περιορισμοί που επιβάλλονται από το σύστημα στο οποίο πρόκειται να λειτουργήσει η λύση.

374 R. A. Niemeijer, 'Constraint Specification in Architecture : A User-Oriented Approach for Mass Customization' (Doctor in de Filosofie, Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven, 2011), 32, <https://pure.tue.nl/ws/files/3456671/715226.pdf>.

375 Niemeijer, 34.

376 Patrik Svanerudh, 'Architectural constraints for design automation of multi-storey timber houses in Sweden', UC3M, Automation and Robotics in Construction, XVI (1999), [http://www.iaarc.org/publications/fulltext/Architectural\\_constraints\\_for\\_design\\_automation\\_of\\_multi-storey\\_timber\\_houses\\_in\\_sweden.PDF](http://www.iaarc.org/publications/fulltext/Architectural_constraints_for_design_automation_of_multi-storey_timber_houses_in_sweden.PDF).

377 Nam P. Suh, *The Principles of Design*, 1 edition (New York: Oxford University Press, 1990).



Μια επεξήγηση της χρήσης των περιορισμών (constraints) στο σχεδιασμό παρουσιάζεται στο εγχειρίδιο βοήθειας του λογισμικού Autocad Architecture <sup>378</sup>: Στο δισδιάστατο σχεδιασμό οι περιορισμοί (constraints) είναι συσχετισμοί και απαγορεύσεις που εφαρμόζονται στη γεωμετρία. Υπάρχουν δύο ειδών δισδιάστατοι περιορισμοί: οι γεωμετρικοί που ελέγχουν τις σχέσεις μεταξύ των αντικειμένων και οι περιορισμοί διαστάσεων οι οποίοι ελέγχουν τις τιμές απόστασης, μήκους, γωνίας και ακτίνας των αντικειμένων. Έτσι, η χρήση αυτού του είδους των περιορισμών επιτρέπει την εφαρμογή των προδιαγραφών, κατά τη διάρκεια της φάσης των διερευνήσεων του σχεδιασμού ή όταν γίνονται αλλαγές.

Οι περιορισμοί καθορίζουν συνεπώς επιτρεπτές και μη επιτρεπτές διαδικασίες, ελάχιστα και μέγιστα όρια εντός των οποίων μπορεί να κινηθεί ο σχεδιασμός και η κατασκευή, καθώς και επιτρεπτούς και μη συσχετισμούς ανάμεσα σε παραμέτρους της κατασκευής. Αποτελούν βασικό στοιχείο του σχεδιασμού, καθώς δεσμεύουν το σχεδιασμό ακόμα πριν αυτός καν ξεκινήσει και τον συνοδεύουν σε όλα τα στάδιά του.

**Υπό αυτή την έννοια οι περιορισμοί, όπως και οι προδιαγραφές, μπορούν να καθορίσουν τις περιοχές του σχεδιασμού όπου μπορεί να εμφανιστεί η τυχαιότητα και τα όρια εντός των οποίων μπορεί να κινηθούν αυτή και τα αποτελέσματα της εφαρμογής της.**

## 5.4 Π3: Παραδοχές (Assumptions)

Σύμφωνα με τον ορισμό του λεξικού Μπαμπινιώτη **παραδοχή** είναι:

*«...οτιδήποτε γίνεται δεκτό ως αληθινό ή έγκυρο για τις ανάγκες συλλογισμού, επιχειρήματος κλπ.»* <sup>379</sup>

Σύμφωνα με τον ορισμό του Merriam-Webster Dictionary **παραδοχή** (assumption) είναι:

*"Assumption:*

*3*

*a : an assuming that something is true // a mistaken assumption*

*b : a fact or statement (such as a proposition, axiom (see axiom sense 2), postulate, or notion) taken for granted"* <sup>380</sup>

Όπως αναφέρουν οι **Delin et al** (1994), κατά τον **Ennis** (1982) υπάρχουν **δύο κατηγορίες παραδοχών, οι παραδοχές χρήσης** (used assumptions) τις οποίες χρησιμοποιεί ο δημιουργός του

<sup>378</sup> 'About Parametric Drawing and Constraints | AutoCAD 2020 | Autodesk Knowledge Network', ημερομηνία πρόσβασης 10 Απρίλιος 2020, <https://knowledge.autodesk.com/support/autocad/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2020/ENU/AutoCAD-Core/files/GUID-899E008D-B422-4DF2-AC8D-1A4F5701ED4E-htm.html>.

<sup>379</sup> Γ. Μπαμπινιώτης, *Λεξικό της νέας ελληνικής γλώσσας*, Γ' (Αθήνα: Κέντρο Λεξικολογίας, 2008), 1324.

<sup>380</sup> Merriam-Webster, 'Assumption', ημερομηνία πρόσβασης 22 Απρίλιος 2020, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/assumption>.

επιχειρήματος κατά τη διάρκεια του σχηματισμού του, στην προκείμενη περίπτωση ο μελετητής, και οι παραδοχές που ο κριτής του επιχειρήματος κάνει τις καλούμενες ως **απαιτούμενες παραδοχές** (needed assumptions) <sup>381</sup>.

Οι παραδοχές είναι αποφάσεις ή υποθέσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται μετά από μια εκτίμηση ασφάλειας για την ορθότητά τους, με στόχο να απλοποιήσουν τη διαδικασία του σχεδιασμού, προκειμένου να μειωθεί η πολυπλοκότητα ενός συστήματος. Οι παραδοχές μπορεί να αφορούν είτε στη διαδικασία, είτε σε κάποια συγκεκριμένη παράμετρο αυτής.

Οι παραδοχές αντιστοιχούν στην επιλογή κάποιας απόφασης υπό το πρίσμα ελλιπούς ή μη διαθέσιμης γνώσης, ασαφείς απαιτήσεις, προηγούμενης εμπειρίας, έλλειψη εμπιστοσύνης ή άλλοι λόγοι, προκειμένου να μπορέσει να υπάρξει πρόοδος <sup>382</sup>.

Μετά την επιλογή των παραδοχών και την εξέλιξη ή ολοκλήρωση του σχεδιασμού, προκύπτει ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί στη συνέχεια να αξιολογηθεί σύμφωνα με κάποια κριτήρια. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα να επανεξεταστεί η ορθότητα και η σπουδαιότητα των παραδοχών όσον αφορά στο σύνολο του σχεδιασμού. Η αξιολόγηση των παραδοχών επιτρέπει επομένως έμμεσα και την αξιολόγηση των κρίσιμων ερωτημάτων, αλλά και των κριτηρίων του σχεδιασμού <sup>383</sup>.

Η διαφορά των παραδοχών από τις προδιαγραφές είναι ότι οι πρώτες επιλέγονται από το σχεδιαστή, καθώς δεν αποτελούν κανόνα ή περιορισμό που πρέπει να τηρηθεί υποχρεωτικά <sup>384</sup>. Επομένως οι παραδοχές αποτελούν στάδιο του σχεδιασμού και πραγματοποιούνται συνήθως στην αρχή της διαδικασίας.

Σύμφωνα με τον **Britton** <sup>385</sup>, οι παραδοχές χρησιμοποιούνται ως εργαλείο για να απλοποιήσουν πολύπλοκες καταστάσεις και για να δημιουργήσουν όρια εντός των οποίων μπορεί να προχωρήσει ο σχεδιασμός.

Για να είναι λοιπόν εφικτή η πρόοδος του σχεδιασμού απαιτούνται παραδοχές. Ο ασφαλής σχεδιασμός απαιτεί να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα χρήσης λανθασμένων παραδοχών <sup>386</sup> και ότι οι παραδοχές θα πρέπει προκειμένου να είναι αληθείς και ασφαλείς να βασίζονται σε δεδομένα και όχι σε υποκειμενική κρίση.

Οι παραδοχές (**assumptions**) επομένως μπορεί για παράδειγμα να περιλαμβάνουν ή να επηρεάζουν:

1. τη στοιχειοθέτηση ενός επιχειρήματος
2. τη λήψη μιας απόφασης
3. τη διάρθρωση μιας διαδικασίας
4. την επιλογή παραμέτρων που θεωρούνται αληθείς ή ψευδείς ή έχουν συγκεκριμένη αριθμητική τιμή ή άλλα ποιοτικά ή ποσοτικά χαρακτηριστικά.

381 P. S. Delin, P. Chittleborough, και C. R. Delin, 'What Is an Assumption?', *Informal Logic* 16, τχ. 2 (1994): 115, [https://www.academia.edu/33193744/What\\_is\\_an\\_Assumption](https://www.academia.edu/33193744/What_is_an_Assumption).

382 Grace A. Lewis, 'Assumptions Management in Software Development', 2004, 2, [https://resources.sei.cmu.edu/asset\\_files/TechnicalNote/2004\\_004\\_001\\_14327.pdf](https://resources.sei.cmu.edu/asset_files/TechnicalNote/2004_004_001_14327.pdf).

383 'Use Engineering Assumptions to Unlock Your Creative Genius - YouTube', ημερομηνία πρόσβασης 3 Απρίλιος 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=POPγW3LQYwM>.

384 Lewis, 'Assumptions Management in Software Development', 2.

385 M. G. Britton, 'Thoughts on Design. . . and assumptions', 2011, [https://umanitoba.ca/faculties/engineering/departments/ce2p2e/pdf/ToD\\_2011\\_06.pdf](https://umanitoba.ca/faculties/engineering/departments/ce2p2e/pdf/ToD_2011_06.pdf).

386 Britton.

5. τα ελάχιστα και μέγιστα αποδεκτά όρια εντός των οποίων κινούνται τα ποσοτικά ή ποιοτικά χαρακτηριστικά

Στην αρχιτεκτονική και την κατασκευή γενικότερα, οι παραδοχές μπορούν να αφορούν σε:

1. εκτίμηση χρήσης ή λειτουργίας
2. εκτίμηση επίδρασης του ανθρώπινου παράγοντα
3. εκτίμηση για μελλοντικές ανάγκες και περιορισμούς που δεν υπάρχουν κατά τη φάση του σχεδιασμού
4. εκτίμηση για συμπεριφορά της κατασκευής στο χρόνο
5. εκτίμηση για δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής (αντοχές, σεισμός, κ.λπ.)
6. εκτίμηση για καιρικές /κλιματολογικές συνθήκες

**Ο μελετητής έχει τη δυνατότητα να καθορίσει μέσω των παραδοχών το ποσοστό ελέγχου, ακρίβειας ή και την ύπαρξη και το βαθμό τυχαιότητας που θα έχει κάποιο στάδιο ή παράμετρος του σχεδιασμού. Η απόφαση για συνειδητή εισαγωγή της τυχαιότητας σε κάποιο μέρος του έργου, αποτελεί μια σχεδιαστική επιλογή και εντάσσεται στο συνολικό σχεδιασμό του μελετητή.**

## 5.5 Π4: Παράμετροι (Parameters)

Σύμφωνα με τον ορισμό του λεξικού Μπαμπινιώτη **παράμετρος** είναι:

*«1. η ποσότητα που χρησιμοποιείται ως μονάδα μετρήσεως άλλων ποσοτήτων 2. ΜΑΘ. Μεταβλητή προβλήματος η οποία όμως συμπεριφέρεται ως σταθερά 3. (στη στατιστική) μεταβλητή που εισάγεται στον μαθηματικό τύπο κάθε στατιστικής κατανομής, ώστε οι πιθανές τιμές της να ανταποκρίνονται σε διαφορετικές κατανομές 4. ΟΙΚΟΝ. Ο όρος μιας εξίσωσης, που καθορίζει τη σχέση μεταξύ των μεταβλητών, ο συντελεστής 5. (μτφ) κάθε πλευρά, διάσταση ενός θέματος»<sup>387</sup>*

Σύμφωνα με τον ορισμό της Encyclopaedia Britannica **παράμετρος** είναι:

*“Parameter, in mathematics, a variable for which the range of possible values identifies a collection of distinct cases in a problem. Any equation expressed in terms of parameters is a parametric equation.”<sup>388</sup>*

Αντίστοιχα, η διαδικασία του να περιγράφεται ή να αναπαρίσταται κάτι με όρους παραμέτρων ονομάζεται **παραμετροποίηση**.

*“Parameterize: to express in terms of parameters”<sup>389</sup>*

Η παραμετροποίηση ενός συστήματος έχει ως στόχο την κατάτμηση της συνολικής πληροφορίας που περιγράφει το σύστημα σε μέρη, έτσι ώστε να είναι εφικτή η κατανόηση και διαχείρισή του πιο

<sup>387</sup> Μπαμπινιώτης, *Λεξικό της νέας ελληνικής γλώσσας*, 1331.

<sup>388</sup> Encyclopedia Britannica, ‘Parameter | Mathematics and Statistics’, Encyclopedia, Encyclopedia Britannica, ημερομηνία πρόσβασης 22 Απρίλιος 2020, <https://www.britannica.com/topic/parameter>.

<sup>389</sup> Merriam-Webster, ‘Parameterize’, ημερομηνία πρόσβασης 22 Απρίλιος 2020, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/parameterize>.

αποτελεσματικά.

**Η επιλογή των κριτηρίων, σε συνδυασμό με τις προδιαγραφές, τους περιορισμούς και τις παραδοχές είναι αυτή που καθορίζει τη γενική σχεδιαστική και κατασκευαστική στρατηγική ενός εγχειρήματος.** Τα κριτήρια αποτελούν τους κύριους ή δευτερεύοντες στόχους οι οποίοι πρέπει να εκπληρωθούν σε επαρκή βαθμό ώστε το εγχείρημα να θεωρηθεί επιτυχημένο. Οι παράμετροι αποτελούν την οργανωτική και μαθηματική έκφραση των κριτηρίων, των προδιαγραφών, των περιορισμών και των παραδοχών ενός συστήματος σχεδιασμού. Κάθε κριτήριο, προδιαγραφή, περιορισμός ή παραδοχή μπορεί να ορίζεται από μία ή περισσότερες παραμέτρους.

Σύμφωνα με την παραπάνω λογική υπάρχουν δύο κατηγορίες παραμέτρων. Οι παράμετροι που εισάγονται από το χρήστη ως **input** και οι παράμετροι που προκύπτουν ως **output**. Τα κριτήρια χρησιμοποιούνται για να επιβεβαιώσουν την επιτυχία ή ορθότητα των παραμέτρων της 2ης κατηγορίας (**output**).

Είναι λογικό να υπάρχει ο προβληματισμός για το αν σε μια διαδικασία σχεδιασμού προηγείται ο ορισμός των κριτηρίων ή των παραμέτρων. Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα μπορεί να είναι ότι η επιλογή των κριτηρίων αντιστοιχεί στη στοιχειοθέτηση της γενικής προσέγγισης του στόχου ή αλλιώς τη στρατηγική του σχεδιασμού. Οι παράμετροι προκύπτουν από τον ορισμό των κριτηρίων, των προδιαγραφών, των περιορισμών και των παραδοχών. Τόσο κατά την εξέλιξη της διαδικασίας, όσο και κατά την ολοκλήρωσή της, τα κριτήρια επανέρχονται συστηματικά και αξιολογούν τις παραμέτρους και τα προϊόντα του σχεδιασμού κατά τα διάφορα στάδιά του, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι ικανοποιούνται οι προδιαγραφές και δεν υπάρχει καταστρατήγηση των περιορισμών.

Οι παράμετροι με τη σειρά τους συνδέονται ιεραρχικά τόσο μεταξύ τους όσο και με τα υπόλοιπα στοιχεία του σχεδιασμού και οργανώνονται σύμφωνα με το γενικό πλάνο του προκειμένου να επιτευχθεί κάποιος στόχος. Οι παράμετροι, αποτελούν εσωγενείς ή εξωγενείς συνιστώσες του σχεδιασμού, κάποιες από αυτές μπορεί να ορίζονται από τις προδιαγραφές, από τον σχεδιαστή ως παραδοχές, είτε ως συνθετική επιλογή ή να προκύπτουν έμμεσα κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού. Οι παράμετροι μπορούν να επηρεάζουν κάποιο τμήμα ή το σύνολο του σχεδιασμού, ανάλογα με την κρισιμότητά τους, και άρα έχουν διαβαθμίσεις σπουδαιότητας και συγκεκριμένο εύρος επιρροής.

Οι παράμετροι που διαμορφώνουν μια αρχιτεκτονική κατασκευή - σύνθεση, μπορούν να είναι πολλών ειδών όπως:

1. **Γεωμετρικές:** μήκος, πλάτος, ύψος, πάχος, ακτίνα, καμπυλότητα, εμβαδόν, όγκος, γωνία, κ.λπ.
2. **Αρχιτεκτονικές:** διάταξη, κλίση, ρυθμός, αναλογία, αισθητική, οικοδομική, επιλογή υλικών, χρωμάτων, κ.λπ.
3. **Μηχανικές:** βάρος, δύναμη, αντοχή, πυκνότητα, κ.λπ.
4. **Ενεργειακές:** θερμοκρασία, ενέργεια, κ.λπ.
5. **Οικονομικές:** κόστος υλικών, εργασίας, συντήρησης, κ.λπ.
6. **Χρονικές:** διάρκεια υλοποίησης μελετών, εγκρίσεων, σταδίων κατασκευής, κ.λπ.
7. **Ποσοτικές:** ποσότητες υλικών σε αριθμό, σε εμβαδόν, σε όγκο, κ.λπ.
8. **Κοινωνικές.**

9. Πολιτικές.

10. Άλλου είδους: πληθυσμός, ποιοτικές παράμετροι, κ.λπ.

Ο μελετητής, επιλέγοντας τις παραμέτρους που κρίνει ότι θέλει να συσχετίσει με την τυχαιότητα (ή αντίστοιχα αναγνωρίζοντας και ενσωματώνοντας στο σχεδιασμό τις παραμέτρους για τις οποίες έχει μειωμένο έλεγχο ή δεν έχει κανένα έλεγχο), καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο πρόκειται να γίνει εφαρμογή της σε μέρος ή στο σύνολο του σχεδιασμού.

Παράλληλα με την επιλογή ή αναγνώριση αυτών των παραμέτρων, καθορίζεται ο βαθμός επιρροής τους στο μέρος ή στο σύνολο, τα όρια και το εύρος των τιμών τους. Ο συσχετισμός μιας παραμέτρου με την τυχαιότητα αυτόματα συνεπάγεται μια συνειδητή και σκόπιμη απώλεια ελέγχου.



## 6. Ψηφιακά εργαλεία για τη δημιουργία τυχαιότητας στην αρχιτεκτονική

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στο χώρο του σχεδιασμού και της κατασκευής όπως η **Ψηφιακή κατασκευή, ο Υπολογιστικός, ο Παραμετρικός, ο Γενεσιουργός και ο Αλγοριθμικός σχεδιασμός** (αναλυτικές πληροφορίες υπάρχουν στο **Παράρτημα II** του παρόντος) δίνουν τη δυνατότητα η τυχαιότητα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό.

### 6.1 Η τυχαιότητα ως παράμετρος στην αρχιτεκτονική

Τα περισσότερα παραμετρικά λογισμικά παρέχουν τη δυνατότητα της εισαγωγής της παραμέτρου της τυχαιότητας μέσω χρήσης ψευδοτυχαίων αριθμών. Στην περίπτωση του λογισμικού **Grasshopper** χρησιμοποιείται ένα έτοιμο component που ονομάζεται **random** (Εικόνα 6\_1) και λειτουργεί ως εργαλείο δημιουργίας και διαχείρισης ψευδοτυχαίων αριθμών. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6\_2, στην περιγραφή του component, αναφέρεται ότι αυτό δημιουργεί λίστα ψευδοτυχαίων αριθμών των οποίων η διαδοχή είναι σταθερή για κάθε συγκεκριμένη τιμή seed. Το πεδίο seed διαφοροποιεί τη διαδοχή των τυχαίων αριθμών και επομένως αν κάποιος επιθυμεί διαφορετική αλληλουχία τυχαιότητας, αρκεί να αλλάξει την τιμή του seed. Στο component, η αριστερή πλευρά του δέχεται τις εισόδους R, N, S: [Range (R): Πεδίο τυχαίων αριθμών, Number (N): Πλήθος τυχαίων αριθμών (ακέραιος αριθμός) και Seed (S): Σπόρος – τιμή διαφοροποίησης της τυχαιότητας]. Το δεξί πεδίο R είναι η έξοδος της γεννήτριας των τυχαίων αριθμών.

Όπως χαρακτηριστικά αναφέρει σχετικά με το Seed ο δημιουργός του Grasshopper David Rutten:

*«Οι τιμές Seed είναι ακέραιοι αριθμοί οι οποίοι καθορίζουν την ακριβή ακολουθία των τυχαίων αριθμών, όμως δεν υπάρχει τρόπος να είναι γνωστή η ακολουθία εξαρχής και δεν υπάρχει τρόπος ελέγχου της ακολουθίας με μικρές διαφοροποιήσεις της τιμής του Seed. Ακόμα και η μικρότερη αλλαγή στην τιμή Seed έχει ως αποτέλεσμα στο να δημιουργηθεί μία εντελώς διαφορετική ψευδοτυχαία ακολουθία αριθμών.»<sup>390</sup> (μτφρ. Τ. Κουιμτζόγλου)*

Η παραπάνω περιγραφή φέρνει στο νου τα χαρακτηριστικά ενός χαστικού συστήματος, όπου οι μικρές μεταβολές στις αρχικές συνθήκες ενός συστήματος έχουν ως συνέπεια μεγάλες διαφοροποιήσεις στην εξέλιξη του. Σημειώνεται ότι οι τιμές του Seed δεν απαιτείται να είναι ακέραιοι αριθμοί.

Στο παράδειγμα στην Εικόνα 6\_3, παρουσιάζεται ο αλγόριθμος δημιουργίας 5 ψευδοτυχαίων αριθμών σε τρεις παραλλαγές με τη χρήση του component random, οι οποίοι προκύπτουν από μια δεξαμενή τιμών εύρους από 0 έως 100. Οι τρεις παραλλαγές προκύπτουν από τη διαφοροποίηση της τιμής Seed και η οποία στο συγκεκριμένο παράδειγμα λαμβάνει τις τιμές 0, 3 και 6. Η αύξηση της πολυπλοκότητας του αλγορίθμου και συνεπώς η αύξηση της μη προβλεψιμότητας των τιμών που

---

390 2012 at 9:52am in Discussion Posted by David Rutten on October 20 και View Discussions, 'What Are Random Seed Values?', μετάφρ. Τ. Κουιμτζόγλου, ημερομηνία πρόσβασης 15 Αύγουστος 2020, <https://www.grasshopper3d.com/forum/topics/what-are-random-seed-values>.

λαμβάνονται μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολύ εύκολο τρόπο τοποθετώντας ως είσοδο στην τιμή Seed (S) ψευδοτυχαίους αριθμούς από άλλη γεννήτρια random (Εικόνα 6\_4). Το απλό αυτό παράδειγμα παράγει 5 ομάδες από 5 τυχαίους αριθμούς οι οποίοι είναι εντελώς διαφορετικοί τόσο μεταξύ τους, όσο και σε σχέση με τα προϊόντα των προηγούμενων παραδειγμάτων.

Παρατηρείται ότι σε όλα αυτά τα παραδείγματα, ο μελετητής του αλγορίθμου ορίζει συγκεκριμένες παραμέτρους, κατευθύνοντας κατά ένα τρόπο την τυχαιότητα που θέλει να παράξει. Ορίζεται λοιπόν:

1. Το πλήθος **N**umber των τυχαίων αριθμών που θα παραχθούν.
2. Το εύρος του πεδίου τιμών **R**ange από το οποίο θα αντληθούν οι τυχαίοι αριθμοί (π.χ. άνω και κάτω όριο, ακέραιοι, δεκαδικοί, κ.λπ.).
3. Η τιμή μοναδικότητας **S**eed της ακολουθίας των τυχαίων αριθμών.

Το πεδίο του Seed μπορεί επίσης να τυχαιστοποιηθεί και να συνδεθεί παραμετρικά με τιμές που προέρχονται από άλλο random component (όπως περιγράφηκε παραπάνω) ή από εξωτερικές πηγές δεδομένων, π.χ. διαδίκτυο, όπως θα παρουσιαστεί σε συγκεκριμένα παραδείγματα που παρουσιάζονται στο **Παράρτημα III** της διατριβής.

Μετά τον ορισμό των παραπάνω παραμέτρων, προκύπτει αυτόματα κάποιο αποτέλεσμα, οι τιμές του οποίου μπορούν στη συνέχεια να διοχετευθούν ως τιμές συγκεκριμένων παραμέτρων σε άλλα στοιχεία ενός σχεδιαστικού αλγορίθμου.



Εικόνα 6\_1: Random Component. Πηγή: Λογισμικό Grasshopper.

Grasshopper Help

Generate a list of pseudo random numbers. The number sequence is unique but stable for each seed value. If you do not like a random distribution, try different seed values.

---

**Input parameters:**

**R (Domain)**  
Domain of random numeric range

**N (Integer)**  
Number of random values

**S (Integer)**  
Seed of random engine

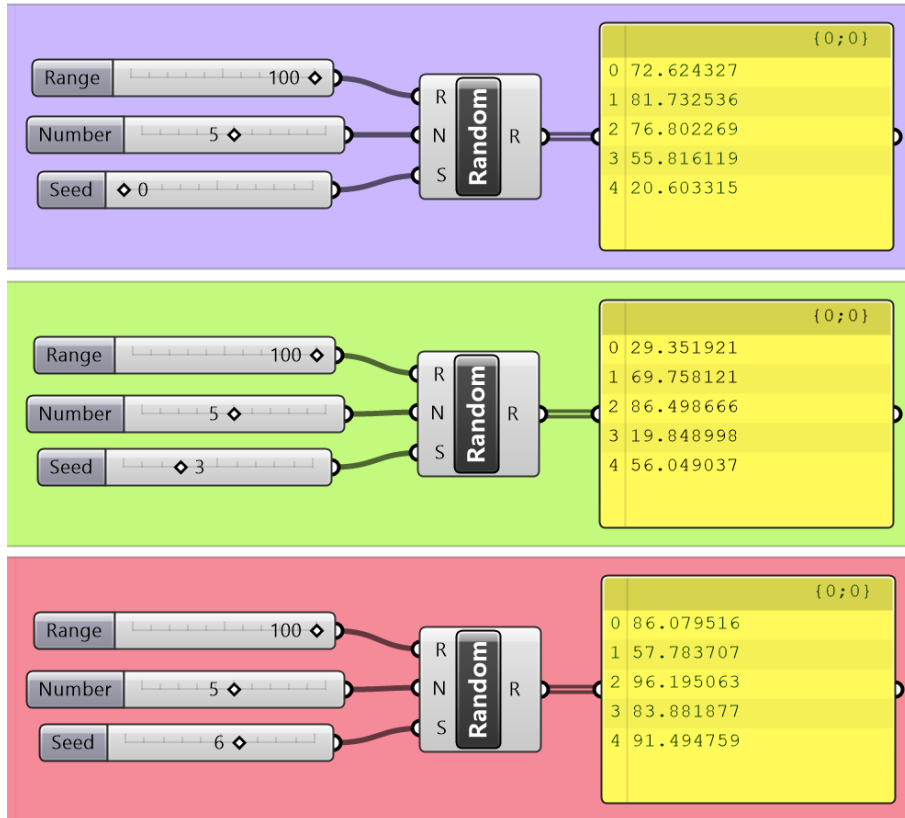
---

**Output parameters:**

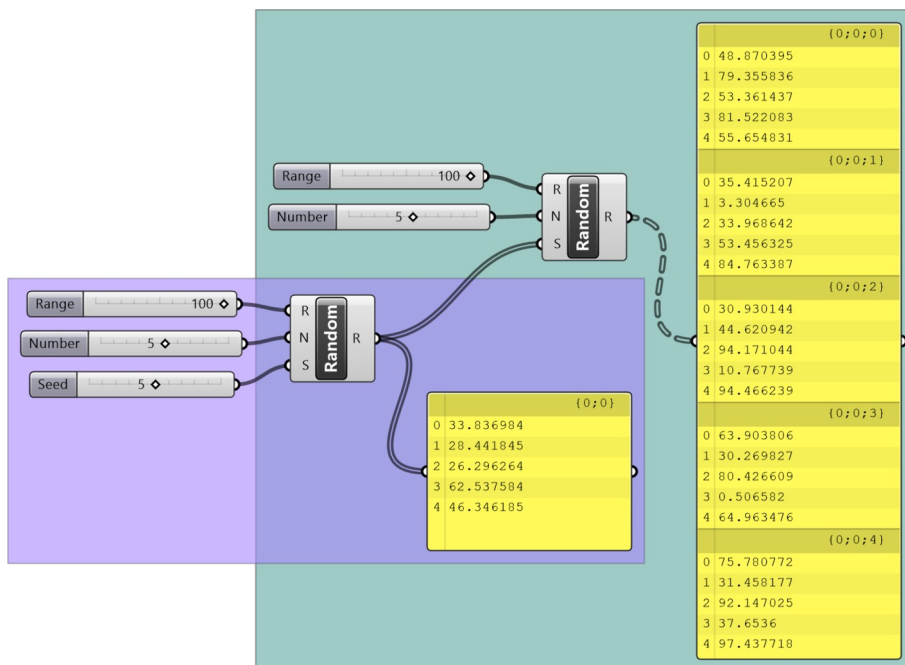
**R (Generic Data)**  
Random numbers

Εικόνα 6\_2: Random Component. Πηγή: Λογισμικό Grasshopper. Λεπτομέρειες βοήθειας.





Εικόνα 6\_3: Random Component στο λογισμικό Grasshopper. Παραλλαγές παραγωγής 5 ψευδοτυχαίων αριθμών, από πεδίο τιμών εύρους 0 έως 100 για Seed 0, 3, 6 αντίστοιχα. Πηγή: Τ. Κουιμιτζόγλου.

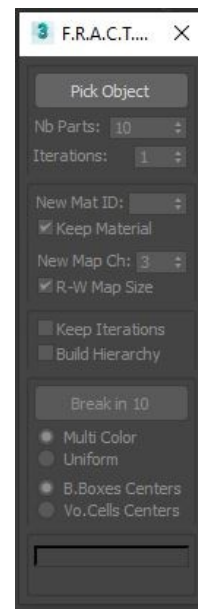


Εικόνα 6\_4: Random Component στο λογισμικό Grasshopper. Παραλλαγές παραγωγής 5 ψευδοτυχαίων αριθμών για 5 τυχαίες τιμές SEED από πεδίο τιμών εύρους 0 έως 100. Πηγή: Τ. Κουιμιτζόγλου.

Αντίστοιχες γεννήτριες τυχαιών αριθμών μπορούν να βρεθούν σε διαφορετικές μορφές και σε άλλα λογισμικά. Στον κώδικα προγραμματισμού **MAXScript** του **3ds Max**<sup>391</sup>, υπάρχει η λειτουργία **random**. Η λειτουργία random ακολουθείται από τις αριθμητικές τιμές των κάτω και άνω ορίων εντός των οποίων μπορεί να λάβει τιμές η γεννήτρια αριθμών, όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 6\_5).

Η έννοια του **Seed** εμφανίζεται και σε αυτό το λογισμικό. Όπως αναφέρεται στην ιστοσελίδα βοήθειας του **MAXScript**, η εντολή random δημιουργεί τους ίδιους τυχαιούς αριθμούς κάθε φορά που εκτελείται και επιλέγεται στη συνέχεια ένας από αυτούς. Όταν υπάρχει ανάγκη οι τιμές που παράγονται από την εντολή random να διαφοροποιούνται, μπορεί να χρησιμοποιείται η εντολή Seed η οποία δημιουργεί μια νέα ομάδα ψευδοτυχαιών αριθμών. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ξανά ότι εάν κάποιος γνωρίζει την τιμή του seed, μπορεί να ανακαλέσει τη αριθμητική ακολουθία που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη τιμή. Η τιμή seed δηλαδή είναι κατά κάποιο τρόπο μια **ταυτότητα της ψευδοτυχαιάς αριθμητικής ακολουθίας**.

```
random 1 100
73
random 1 100
62
random 1 100
78
random 1 100
81
random 1.0 100
13.2292
random 1.0 100
66.8078
random 1.0 100
82.8208
random 1.0 100
7.98762
random 1.0 100|
2.66975
random 1.0 100
83.7459
```



Εικόνα 6\_5: Ληφθείσες τιμές για την εντολή Random στο λογισμικό MAXscript του 3ds Max για εύρος από 1 έως 100.

Εικόνα 6\_6: MAXScript Fracture Voronoi interface. Πηγή: <http://www.scriptspot.com/3ds-max/scripts/fracture-voronoi>.

Οι εντολές random και seed μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συγγραφή κώδικα σύνθετων προγραμμάτων / plugins / scripts, έτσι ώστε να παράγονται τυχαιές κατανομές, μετασχηματισμοί και διαφοροποιήσεις στη γεωμετρία διαφόρων αντικειμένων ή μορφών.

Παράδειγμα αποτελεί για την πλατφόρμα του 3ds Max το plugin/script **Random Master**<sup>392</sup>, το οποίο δίνει τη δυνατότητα για τυχαιοποίηση: Θέσης, Περιστροφής, Κλίμακας, Υλικών, συντεταγμένων UVW,

391 '3ds Max | 3D Modeling, Animation & Rendering Software | Autodesk', ημερομηνία πρόσβασης 20 Απρίλιος 2020, <https://www.autodesk.com/products/3ds-max/overview?support=ADVANCED>.

392 'Random Master Script | KM-3D.COM', ημερομηνία πρόσβασης 15 Αύγουστος 2020, <https://km-3d.com/produkt/random-master-script/>.

keyframes (animation), σύνθετων τροποποιητών γεωμετρίας τύπου FFD, θορύβου, επιλογής αντικειμένων, επιλογής Faces/Vertices/Edges στη γεωμετρία ενός αντικειμένου, κ.λπ. Ξανά και σε αυτό το plugin γίνεται εκτεταμένη χρήση της λειτουργίας **Seed** για τη δημιουργία μοναδικών ψευδοτυχαίων παραλλαγών.

## 6.2 Η τυχαιότητα ως διαδικασία στην αρχιτεκτονική

### 6.2.1 Γενετικοί αλγόριθμοι και αρχιτεκτονική

Οι γενετικοί αλγόριθμοι παρουσιάστηκαν ως εργαλείο σε προηγούμενη ενότητα. Η χρήση τους μπορεί να βρει εφαρμογή και στο πεδίο της αρχιτεκτονικής. Ο **Manuel DeLanda** στο "**Deleuze and the Use of the Genetic Algorithm in Architecture**"<sup>393</sup> υποστηρίζει ότι για να έχουν αποδοτική χρήση οι γενετικοί αλγόριθμοι στην αρχιτεκτονική και να χρησιμοποιούνται ως χρήσιμο εργαλείο, χρειάζεται να παράγουν λύσεις που **έρχονται να εκπλήξουν το μελετητή**. Μόνο τότε η εικονική διεργασία της εξέλιξης, καθώς αναζητούνται λύσεις σε έναν πλούσιο χώρο αναζήτησης (search space), και τις οποίες ο μελετητής δεν μπορεί να προβλέψει με βάση μια συμβατική προσέγγιση, μπορεί να θεωρηθεί ως χρήσιμο εργαλείο οπτικοποίησης και σχεδιασμού. Το άλλο κρίσιμο στοιχείο που τονίζει ο DeLanda είναι **η ανάγκη ενσωμάτωσης της δομικής διάστασης στο σχεδιασμό (structural), η οποία αφορά στον φέροντα οργανισμό, καθώς η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει αυτή την απαίτηση**<sup>394</sup>.

Κατά το DeLanda, η δημιουργία ενός πλούσιου χώρου αναζήτησης μπορεί να ιχνηλατηθεί στο έργο του Gilles Deleuze, καθώς αυτός συνέδεσε τρία είδη φιλοσοφικής σκέψης (παρ' όλο που δεν τα εφηύρε ο ίδιος), την πληθυσμιακή (populational), εντατική (intensive) και τοπολογική (topological) σκέψη. Για γίνει εφαρμογή γενετικών αλγορίθμων στο σχεδιασμό ή παραγωγή ενός προϊόντος, πρέπει αρχικά να υπάρχει μια αναπαράσταση της διαδικασίας που δημιουργεί αυτό το τελικό προϊόν. Η διαδικασία αυτή είναι και το γενετικό υλικό του προϊόντος. Ο γενετικός κώδικας σε ένα αρχιτεκτονικό έργο, το οποίο χρησιμοποιεί ψηφιακά εργαλεία για το σχεδιασμό, αποτελείται από τις οδηγίες/εντολές που σχεδιάζουν τα ψηφιακά αντικείμενα.

Η έννοια της πληθυσμιακής σκέψης έγκειται στο ότι μια τέτοια διάταξη μπορεί τελικά να παράγει μία λύση, αλλά ο μηχανισμός βασίζεται στο μοντέλο και στις διεργασίες του **πληθυσμού**<sup>395</sup>.

Η έννοια της **εντατικής** σκέψης<sup>396</sup> περιγράφει ποιότητες όπως η θερμοκρασία, πίεση, κ.λπ. που δεν μπορούν να διαιρεθούν (σε αντίθεση με τα ποσοτικά χαρακτηριστικά δηλαδή, όπως αυτά που περιγράφει η εκτατική σκέψη: π.χ. μήκος, πλάτος, κ.λπ.). Αυτά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά, συγκεκριμένα στην αρχιτεκτονική αφορούν στοιχεία δομικής μηχανικής ως φορτία και εντάσεις

393 Manuel DeLanda, στο *Contemporary Techniques in Architecture*, επιμ. Ali Rahim, 1 edition (London ; New York: Academy Press, 2002), 9–13, [http://archtech.arch.ntua.gr/forum/post2006interaction/delanda\\_del\\_and\\_the\\_use\\_of\\_gen\\_alg\\_in\\_arch.htm](http://archtech.arch.ntua.gr/forum/post2006interaction/delanda_del_and_the_use_of_gen_alg_in_arch.htm).

394 Manuel de Landa Part 8 Day 1: Genetic Algorithms, ημερομηνία πρόσβασης 24 Απρίλιος 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=NoPgS2Se9ZQ&feature=relmfu>.

395 DeLanda, 10.

396 Manuel DeLanda, 'Deleuze and the Use of the Genetic Algorithm in Architecture', *ResearchGate*, Ιανουάριος 2002, [https://www.researchgate.net/publication/295600631\\_Deleuze\\_and\\_the\\_use\\_of\\_the\\_genetic\\_algorithm\\_in\\_architecture](https://www.researchgate.net/publication/295600631_Deleuze_and_the_use_of_the_genetic_algorithm_in_architecture).

αυτών, και θα πρέπει να μπορούν να μεταφερθούν σε ένα μοντέλο, διαφορετικά αυτό δεν μπορεί να εξελιχθεί. Συνεπώς, τα δομικά στοιχεία πρέπει να εξυπηρετούν το δομικό και κατασκευαστικό τους ρόλο και αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο με την ενσωμάτωση πληροφοριών «έντασης» στο γενετικό μοντέλο, ώστε αυτές να ελέγχονται και να μην διακινδυνεύει η δομική/στατική επάρκεια του μοντέλου<sup>397</sup>.

Η έννοια της **τοπολογικής** σκέψης παρουσιάζεται από τον DeLanda στην ανάγκη διαμόρφωσης ενός αφαιρετικού διαγράμματος όπως ορίζεται κατά τον Deleuze, πάνω στον οποίο θα πρέπει να βασίζεται ο σχεδιασμός και θα αναπτύσσεται η γενετική αλγοριθμική διαδικασία. Το αφαιρετικό αυτό διάγραμμα θα δίνει τη δυνατότητα για ποικιλία στις παραγόμενες λύσεις, οι οποίες όπως και στη φύση, θα έχουν μεγάλη διαφοροποίηση μεταξύ τους. Ως παράδειγμα φέρνει την πολυμορφία των σπονδυλωτών ζώων. Ενώ υπάρχουν πάρα πολλοί συνδυασμοί παραμέτρων που διαμορφώνουν τις ξεχωριστές μορφές, αυτές διαρθρώνονται στο υπόβαθρο κάποιων συγκεκριμένων τοπολογιών, π.χ. τετράποδου ή δίποδου οι οποίες «δέχονται» τις παραλλαγές.

Ο **DeLanda** υποστηρίζει<sup>398</sup> ότι αυτή η προσέγγιση στο σχεδιασμό **δεν καθιστά τον αρχιτέκτονα μη απαραίτητο**, καθώς οι λύσεις **προκύπτουν αυτόματα» από τον γενετικό αλγόριθμο. Ο μελετητής είναι αυτός που δημιουργεί και καθορίζει τη διαδικασία, ορίζει τις παραμέτρους καθώς και τις σχέσεις μεταξύ τους, έτσι ώστε να σχεδιάσει έναν «ενδιαφέροντα» μηχανισμό που θα καταλήξει σε κάποιο σχέδιο.** Ο **DeLanda**<sup>399</sup> υποστηρίζει ότι η κωδικοποίηση του προβλήματος σχεδιασμού και ο τρόπος που ορίζεται η αξιολόγηση του fitness είναι εργασίες που καθιστούν απαραίτητη την ανθρώπινη παρέμβαση.

Για το **DeLanda**, μια άλλη εργασία του μελετητή είναι να αποφασίσει τον τρόπο και την περιοχή που θα γίνουν οι μεταλλάξεις, οπότε και από αυτή την άποψη έχει ένα δημιουργικό ρόλο μεγάλης σημασίας. Αυτή είναι μια εργασία που μπορεί να κάνει μόνο ένας μελετητής ο οποίος μπορεί να κατευθύνει την ροή του αλγορίθμου σύμφωνα με συγκεκριμένες αποφάσεις. Το τρίτο στάδιο, η διασταύρωση των γονιδίων (crossover operator) η οποία εξασφαλίζει την πολυμορφία και την ποικιλία, είναι ένα στάδιο του οποίου οι κανόνες και πάλι ορίζονται από το μελετητή. Ο μελετητής είναι επίσης αυτός που θα επιλέξει την τελική λύση από όλες αυτές που θα προκύψουν, αφού την αξιολογήσει και συνυπολογίσει όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους που δεν μπορούν να εισαχθούν σε έναν υπολογιστικό αλγόριθμο<sup>400</sup> (π.χ. αισθητικές παράμετροι).

Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι στην πραγματικότητα ένα εργαλείο στις περιπτώσεις όπου ο χώρος πιθανοτήτων είναι εξαιρετικά μεγάλος και η διερεύνησή του δεν μπορεί να γίνει με συμβατικό τρόπο. Υπάρχουν κατά τον **DeLanda**<sup>401</sup> δύο προσεγγίσεις προσομοίωσης της θεωρίας της εξέλιξης του Δαρβίνου με βάση τις αρχές της γενετικής. Η πρώτη και παλαιότερη είναι οι **γενετικοί αλγόριθμοι** (genetic algorithm, **GA**) που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Η δεύτερη προσέγγιση καλείται **γενετικός προγραμματισμός** (genetic programming, **GP**<sup>402</sup>) και έχει προταθεί από τον **John Koza**

397 DeLanda, 10.

398 Manuel de Landa Part 8 Day 1.

399 Manuel DeLanda, 'The Use of Genetic Algorithms in Art', στο *ACADIA 12: Synthetic Digital Ecologies [Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 978-1-62407-267-3] San Francisco 18-21 October, 2012*, pp. 25-31 (CUMINCAD, 2012), 27, [http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia12\\_25](http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia12_25).

400 Manuel de Landa Part 8 Day 1.

401 Manuel de Landa Part 8 Day 1.

από το 1992<sup>403</sup>. Η διαφορά των δύο προσεγγίσεων εντοπίζεται στον τύπο και τρόπο καθορισμού των χρωμοσωμάτων των οντοτήτων. **Στην πρώτη περίπτωση (GA)**, τα χρωμοσώματα αποτελούνται από πληροφορίες - bits που περιγράφουν ιδιότητες. Αυτά τα bits είναι που τροποποιούνται έτσι ώστε να δημιουργηθούν οι παραλλαγές. Η περίπτωση αυτή είναι ιδανική για συνδυασμό για επιλύσεις που περιλαμβάνουν παραμετρικό σχεδιασμό ή προβλήματα βελτιστοποίησης. **Στη δεύτερη περίπτωση (GP)**, ο μελετητής έχει μεγαλύτερο έλεγχο στη διαδικασία, καθώς έχει πρόσθετα τη δυνατότητα να εφαρμόσει όρους με τους οποίους θα εξελιχθεί αυτή, με αποτέλεσμα να επικεντρώνεται ακόμα περισσότερο στη διαδικασία. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, κατά τον γενετικό προγραμματισμό (GP) κάθε χρωμόσωμα είναι ένα ξεχωριστό πρόγραμμα και ο χώρος αναζήτησης είναι όλα τα πιθανά, κατάλληλα σε σχέση με το πρόβλημα, προγράμματα που αποτελούνται από επιμέρους λειτουργίες και τερματικές διατάξεις<sup>404</sup>. Στην περίπτωση του γενετικού προγραμματισμού, ως γλώσσα προγραμματισμού, επιλέχθηκε από τον Koza η γλώσσα **LISP** η οποία είναι «*μια γλώσσα προτίμησης για έρευνα στην τεχνητή νοημοσύνη*»<sup>405</sup>. Και στις δύο περιπτώσεις η λύση που θα προκύψει είναι άγνωστη για το μελετητή, αφού προκύπτει από μια διαδικασία η οποία εμπεριέχει σε συγκεκριμένα σημεία της την τυχαιότητα. Σύμφωνα με το σκεπτικό του DeLanda όσο πιο αναπάντεχη και απρόβλεπτη είναι αυτή, τόσο πιο επιτυχημένος είναι ο αλγόριθμος.

Και στις δύο περιπτώσεις γενετικών αλγορίθμων (γενετικοί αλγόριθμοι - GA, αλγόριθμοι γενετικού προγραμματισμού - GP), απαιτείται αξιολόγηση, με βάση κάποιο κριτήριο που επιλέγεται από τον μελετητή, της απόδοσης των μονάδων του πληθυσμού (fitness). Σχετικά με το **fitness**, ο DeLanda ορίζει τρεις κατηγορίες ελέγχου και προτείνει ως εργαλείο αξιολόγησης τη διασύνδεση με εξωτερικά προγράμματα. **Για τη στατική ανάλυση – επάρκεια** μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα εξωτερικό πρόγραμμα στατικής ανάλυσης που είναι σχεδιασμένο ακριβώς για αυτό το σκοπό, οπότε το μόνο που απαιτείται είναι η διασύνδεση του αλγορίθμου με το συγκεκριμένο λογισμικό. **Για το κομμάτι του σχεδιασμού** μπορεί να χρησιμοποιηθεί πάλι ως εξωτερικό λογισμικό ένα λογισμικό τεχνητής νοημοσύνης (AI) το οποίο βασίζεται σε νευρωνικά δίκτυα (neural networks) και έχει ήδη «εκπαιδευθεί» προς την αναγνώριση και αξιολόγηση κάποιων συγκεκριμένων αισθητικών – σχεδιαστικών κανόνων με βάση συγκεκριμένα για παράδειγμα μορφολογικά κριτήρια. **Η τρίτη κατηγορία κριτηρίων είναι τα λειτουργικά κριτήρια στο σχεδιασμό** με βάση μοτίβα χρήσης της ανθρώπινης δραστηριότητας. Για αυτή τη διαδικασία ο DeLanda προτείνει τη χρήση multi-agent systems, δηλαδή ομάδες οντοτήτων τεχνητής νοημοσύνης, οι οποίες θα μπορέσουν να κατοικήσουν το σχεδιασμένο χώρο και να ελέγξουν έτσι το παραγόμενο αποτέλεσμα με βάση συγκεκριμένα κριτήρια που ορίζει ο μελετητής (π.χ. συνωστισμός, κυκλοφορία, κ.λπ.)<sup>406</sup>.

Ο **John Frazer**, από τη δεκαετία του 1960 πειραματιζόταν με δομές σύνθεσης από στοιχειώδεις μονάδες (modules) με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων ή άλλες εξελικτικές τεχνικές. Ο γενετικός κώδικας, όπως αναφέρει ο Frazer, αποδίδεται σε έναν πληθυσμό και στη συνέχεια αυτός εξελίσσεται

402 DeepAI, 'Genetic Programming', DeepAI, 17 Μάιος 2019, <https://deepai.org/machine-learning-glossary-and-terms/genetic-programming>.

403 John Koza, *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, 1 edition (Cambridge, Mass: A Bradford Book, 1992).

404 John Koza, 'Introduction to Genetic Algorithms', στο *Advances in Genetic Programming*, επιμ. Kenneth E. Jr. Kinneer (Cambridge, Mass.: The MIT Press, 1994), 29.

405 'Lisp', στο *Βικιπαίδεια*, 18 Δεκέμβριος 2019, <https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Lisp&oldid=7932106>.

406 *Manuel de Landa Part 8 Day 1*.

σε αφαιρετικά μοντέλα κατάλληλα για αξιολόγηση σε προσομοιωμένα περιβάλλοντα <sup>407</sup>. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το σύστημα ευέλικτου περιβλήματος το οποίο αποτελείται από μεγάλο αριθμό δύο επαναλαμβανόμενων βασικών μονάδων “**Reptile structural system**”, (1968) <sup>408</sup>, Άλλα παραδείγματα που παρουσιάζει ο Frazer είναι ενδεικτικά το “**A conceptual Seeding Technique for Architectural Design**”, (1979) από τον Frazer και J.M. Connor και το “**Genetic Algorithm**” από τον Ichiro Nagasaka, (1992) <sup>409</sup>.

Σύμφωνα με τον Frazer <sup>410</sup>, για να είναι επιτυχημένος ένας γενετικός αλγόριθμος πρέπει να ικανοποιούνται κάποια κριτήρια όπως τα παρακάτω:

1. Η γενετική πληροφορία πρέπει να αντιγράφεται με ακρίβεια.
2. Πρέπει να υπάρχει δυνατότητα για ποικιλία και μετάλλαξη.
3. Τα παράγωγα/παραλλαγές πρέπει κι αυτά να μπορούν να αναπαραχθούν, ενίοτε παρουσιάζοντας πλεονεκτήματα λόγω φαινοτύπου σε σχέση με την προηγούμενη γενιά.
4. Πρέπει να υπάρχει μαζική παραγωγή φαινοτύπων.
5. Πρέπει να υπάρχει επιλεκτικός ανταγωνισμός των παραγώγων σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα.

Η χρήση της τυχαιότητας ως παραδοχή ή ως παραμέτρου όπως παρουσιάστηκε μέχρι τώρα, είναι μια μη επαναλαμβανόμενη διαδικασία σε ένα γραμμικό (linear) αλγόριθμο. Η τυχαιότητα εισάγεται ως παραδοχή σε επίπεδο λήψης αποφάσεων και υλοποιείται παραμετρικά κατά τη δημιουργία του αλγορίθμου. Η τυχαιότητα ως παράμετρος λειτουργεί συνήθως ως εισαγωγή δεδομένων (input) και συνεισφέρει στη δημιουργία κάποιου αποτελέσματος (output). Ο αλγόριθμος στις περιπτώσεις αυτές εκτελείται μία φορά και ολοκληρώνεται με τη δημιουργία κάποιου αποτελέσματος. Στη συνέχεια, το αποτέλεσμα αξιολογείται με βάση τα κριτήρια και αν απαιτείται ο αλγόριθμος τροποποιείται με την αλλαγή των τιμών των παραμέτρων, δοκιμάζονται άλλες τυχαίες τιμές / παραλλαγές ή τροποποιείται ο ίδιος ο αλγόριθμος. Στην περίπτωση αυτή πρόκειται για έναν αλγόριθμο όπου εμπεριέχεται η τυχαιότητα ως παράμετρος. Σε αυτή την κατηγορία αλγορίθμων εντάσσονται τα προηγούμενα παραδείγματα και οι τυχαίοποιημένοι αλγόριθμοι.

Στην περίπτωση που γίνεται χρήση των παραμέτρων και το τελικό αποτέλεσμα προκύπτει από τις διαδοχικές μεταβολές των παραμέτρων με βάση κάποια διαδικασία, όπως π.χ. στην περίπτωση ενός γενετικού αλγορίθμου ή στην περίπτωση όπου γίνεται χρήση γενετικού προγραμματισμού (GP) τότε πρόκειται για την περίπτωση χρήσης της τυχαιότητας ως διαδικασία.

Για τα παραδείγματα που μπορούν να βρεθούν στο **Παράρτημα III** έχουν χρησιμοποιηθεί τα plugins **Galapagos** και **Octopus**, τα οποία είναι ενσωματωμένα στην πλατφόρμα αλγοριθμικού και παραμετρικού σχεδιασμού Grasshopper. Το **Galapagos** είναι ένας τυχαιοκρατικός εξελικτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης (evolutionary optimization algorithm) ο οποίος κάνει χρήση των εξελικτικών αρχών της βιολογίας προκειμένου να προκύψει η βέλτιστη λύση. Άλλα παρόμοια plugins

407 John Frazer, *An Evolutionary Architecture* (London: Architectural Association Publications, 1995), 68, <https://issuu.com/aaschool/docs/an-evolutionary-architecture-webocr>.

408 Frazer, 69.

409 Frazer, 79.

410 Frazer, 98.

είναι τα **Goat**<sup>411</sup>, **Octopus**<sup>412</sup> και **Octopus.E**<sup>413</sup> τα οποία βασίζονται στο Galapagos και επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση πολλαπλών παραμέτρων ή στόχων με τη χρήση διαφορετικών αλγορίθμων και την εύρεση μιας βέλτιστης λύσης ή τη βέλτιστη οικογένεια λύσεων σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Η βασική αρχή όλων των παραπάνω plugins είναι ότι καθορίζονται από το χρήστη εκείνες οι παράμετροι – γονίδια (genomes) που μπορούν να τροποποιηθούν έτσι ώστε να αποδώσουν διαφορετικά στιγμιότυπα του παραμετρικού μοντέλου, τα οποία στη συνέχεια θα αξιολογηθούν με βάση κάποιο στόχο, που επίσης ορίζεται από το χρήστη (fitness value).

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι **γενετικοί αλγόριθμοι (GA)** χρησιμοποιούν την τυχαιότητα για να δημιουργήσουν τυχαίες αρχικές λύσεις, οι οποίες στη συνέχεια αξιολογούνται και επιβιώνουν ή όχι με βάση κριτήρια (fitness), και λειτουργούν ως βάση - νέες αρχικές παράμετροι - για την επανεκτέλεση του αλγορίθμου προς αναζήτηση λύσης. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται οικονομία στην υπολογιστική διαδικασία και συνεπώς οικονομία χρόνου. Ο αλγόριθμος βασίζεται σε εξελικτικές αρχές, ώστε να καταλήξει σε κάποια βέλτιστη λύση. Η τυχαιοκρατική αυτή εξελικτική προσέγγιση είναι πολύ πιο αποδοτική από τη διαδοχική δοκιμή όλων των πιθανών παραλλαγών τιμών συνδυασμού παραμέτρων (**brute force**) ή από μια καθαρά τυχαία αναζήτηση λύσεων τύπου **Monte-Carlo**.

Η λογική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε όλων των ειδών τα προβλήματα σχεδιασμού που μπορούν να εκφραστούν με παραμέτρους αριθμητικών τιμών και μπορούν να αποδώσουν αποτελέσματα τα οποία μπορούν να αξιολογηθούν με βάση αριθμητικά κριτήρια. Οι τιμές βελτιστοποίησης αφορούν σε έναν ή σε περισσότερους στόχους, των οποίων οι τιμές που τους εκφράζουν πρέπει να ελαχιστοποιηθούν ή να μεγιστοποιηθούν. Συνεπώς, ο ορισμός των σταθερών παραμέτρων, των μεταβλητών παραμέτρων, ο ορισμός του αλγορίθμου και των στόχων αυτού είναι κρίσιμα σημεία για την επιτυχημένη εύρεση λύσεων που ικανοποιούν συγκεκριμένα κριτήρια. Είναι κατανοητό, ότι όσο πιο πολλές παράμετροι συνθέτουν την αλγοριθμική διάταξη και όσο πιο σύνθετες είναι οι σχέσεις που την περιγράφουν, ανάλογα αυξάνεται και η πολυπλοκότητα του συστήματος και επομένως η διαδικασία επίλυσης γίνεται πιο δύσκολη και χρονοβόρα. Στην περίπτωση παραγωγής μιας οικογένειας «ισοδύναμων» λύσεων **καλείται ο μελετητής να επιλέξει/συνυπολογίσει τελικά την καταλληλότερη λύση και με βάση άλλα κριτήρια** που δεν μπορούν να εκφραστούν αριθμητικά (άρα και να ενσωματωθούν στον αλγόριθμο εξαρχής), όπως για παράδειγμα αισθητικά κριτήρια.

Το **Galapagos** component χρησιμοποιεί ως **input** α. Τις τιμές **Genome** των παραμέτρων που καθορίζει ο χρήστης ότι χρειάζονται βελτιστοποίηση και β. Την τιμή **Fitness** που επίσης ορίζεται από το χρήστη και αποτελεί κριτήριο για την αξιολόγηση του επιθυμητού αποτελέσματος. Όπως αναφέρεται στις οδηγίες του εργαλείου, οι τιμές input μπορούν να είναι οποιοσδήποτε παράμετροι που μπορούν

411 'Rechenraum GmbH - goat', ημερομηνία πρόσβασης 28 Αύγουστος 2020, <https://www.rechenraum.com/en/goat.html>. Το Goat χρησιμοποιείται για την επίλυση σχεδιαστικών προβλημάτων ως προβλήματα βελτιστοποίησης.

412 'Octopus', Text, Food4Rhino, 6 Δεκέμβριος 2012, <https://www.food4rhino.com/app/octopus..> Δημιουργήθηκε για την αναζήτηση πολλών στόχων ταυτόχρονα και παράγει αριθμό λύσεων ανάμεσα στις ακραίες τιμές των στόχων. Χρησιμοποιεί το Galapagos και την αρχή Pareto (ότι δηλαδή το 80% των επιπτώσεων προκύπτει από 20% των αιτίων) για τη διερεύνηση πολλαπλών στόχων κάνοντας χρήση των αλγορίθμων SPEA-2 και HyrE του ETH Zurich (<https://sop.tik.ee.ethz.ch/pisa/>).

413 'Octopus.e', Text, Food4Rhino, 16 Ιούνιος 2014, <https://www.food4rhino.com/app/octopus.e>. Το Octopus.E (explicit) αποτελεί αποδόμηση του plugin Octopus, έτσι ώστε να επιτρέπεται η ρύθμιση / προσαρμογή των αλγορίθμων.

να εκφραστούν με αριθμητική τιμή, είτε ακέραιοι αριθμοί είτε δεκαδικοί. Το interface διασύνδεσης του component Galapagos απεικονίζεται στην Εικόνα 6\_7.

Το **Octopus** component χρησιμοποιεί ως **input** α. Τις τιμές **Genome** (G) των παραμέτρων που καθορίζει ο χρήστης ότι χρειάζονται βελτιστοποίηση, τις τιμές **Octopus** (O) που αποτελούν τα **Fitnesses** των πολλαπλών στόχων, το πεδίο **Phenotype** (P) όπου εισάγεται προαιρετικά μια γεωμετρική περιοχή αποδεκτών λύσεων με τη μορφή **mesh** ως φαινότυπος και το πεδίο εξόδου **Phenotypes** (Ps) ως **output** παραλλαγών φαινοτύπων. Το interface διασύνδεσης του component Octopus απεικονίζεται στην Εικόνα 6\_8.



Εικόνα 6\_7: Galapagos component για το λογισμικό Grasshopper. Διακρίνεται το πεδίο εισόδου input / Genome και το πεδίο εισόδου Fitness.



Εικόνα 6\_8: Octopus component για το λογισμικό Grasshopper. Διακρίνεται το πεδίο εισόδου input / Genome (G), το πεδίο Octopus (O) που αντιστοιχεί στο Fitness πολλαπλών στόχων, το πεδίο Phenotype (P) για την εισαγωγή mesh ως φαινότυπο λύσεων και το πεδίο Phenotypes (Ps) ως έξοδος παραλλαγών φαινοτύπων.

Το Octopus χρησιμοποιεί γενετικούς αλγόριθμους για να βελτιστοποιήσει σταδιακά τις λύσεις. Προκύπτουν με αυτό τον τρόπο δύο ομάδες λύσεων: Οι λύσεις **Pareto** και οι λύσεις **Elite**.

Η ομάδα των λύσεων **Pareto** ορίζει γραφικά το **μέτωπο Pareto (Pareto Front)**. Το μέτωπο Pareto είναι ένας χώρος βέλτιστων λύσεων σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, όπου οι λύσεις που τον διαμορφώνουν δεν είναι κυρίαρχες μεταξύ τους (**non-dominated**), δηλαδή είναι «**ισοδύναμες**» μεταξύ τους, αλλά είναι καλύτερες από όλες τις υπόλοιπες λύσεις. Αυτό σημαίνει ότι σε ένα χώρο λύσεων **Pareto**, δεν υπάρχει κάποια λύση που να υπερτερεί **σε όλους τους στόχους (objectives)** σε σχέση με τις υπόλοιπες λύσεις του χώρου Pareto. Η βελτίωση δηλαδή ενός από τους στόχους μιας τέτοιας λύσης σημαίνει ότι ένας άλλος στόχος της ίδιας λύσης θα επιδεινωθεί.

Η άλλη κατηγορία λύσεων είναι οι λύσεις **Elite**, οι οποίες παράγονται στο Octopus παράλληλα με τις λύσεις Pareto και στις οποίες μια ομάδα λύσεων με την καλύτερη αξιολόγηση μεταφέρεται ως έχει στην επόμενη γενεά χωρίς να δεχθεί δράσεις διασταύρωσης ή μετάλλαξης, εμποδίζοντας με αυτό τον τρόπο την καταστροφή λύσεων που αποδίδουν καλά αποτελέσματα και εξασφαλίζοντας ότι η συνολική απόδοση της επόμενης γενεάς δεν θα είναι εκφυλιστική. Από αυτή την άποψη προκύπτουν μη εξαρχής γνωστές στο μελετητή λύσεις, οι οποίες εμπεριέχουν την παράμετρο της τυχαιότητας.



## 6.2.2 Cellular automata και αρχιτεκτονική

Οι **Coates et al**<sup>414</sup> (1966) προτείνουν τη χρήση **cellular automata (CA)** για τη διερεύνηση στην αρχιτεκτονική των πραγματικών παραγόντων που καθορίζουν τη μορφή, κατά ένα τρόπο πολύ κοντά στη λογική του των υποστηρικτών του μοντέρνου κινήματος όπου η δομή και μορφή ακολουθούν τη λειτουργία, καθώς σε αυτή τη μεθοδολογία (CA) η μορφή είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαδικασία - «*λειτουργία*» από την οποία αυτή προκύπτει. Έτσι, χρησιμοποιούνται cellular automata για να αξιοποιηθεί η γενετική πληροφορία-κώδικας και μέσω της διαχείρισής της να αυξηθούν οι πιθανότητες ανάδυσης ενός αρχιτεκτονικού αποτελέσματος μέσα από αυτή.

Ο **Krawczyk**<sup>415</sup> (2002) μελετά τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα **CA** στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Παρατηρεί ότι η μετάφραση σε μια αρχιτεκτονική μορφή μπορεί να γίνει μετά την ολοκλήρωση της εξέλιξης του **CA** αξιοποιώντας τα πρωτογενή γεωμετρικά δεδομένα της δομής και μορφής του και αξιοποιώντας τα στη συνέχεια, μετά από διάφορους μετασχηματισμούς, σε κατασκευή.

Τα cellular automata είναι, όπως αναφέρει ο **Terzidis**<sup>416</sup> (2008), συστήματα που αποτελούνται από παράγοντες δράσης (agents) οι οποίοι εμφανίζουν χαρακτηριστικά συλλογικών αποφάσεων και συχνά αναπάντεχης συμπεριφοράς, όπως για παράδειγμα χαρακτηριστικά αυτοοργάνωσης, αυτονομίας, αυτοσυντήρησης, προσαρμογής, πολυπλοκότητας και τάξης. Ο Terzidis<sup>417</sup> αναφέρει ότι η τυχαία εφαρμογή κανόνων σε τυχαίες δομές δεν σημαίνει απαραίτητα ότι το αποτέλεσμα θα είναι κι αυτό τυχαίο, αλλά αντίθετα μπορεί να οδηγήσει σε τάξη κάποιου βαθμού.

Παραδείγματα διερευνήσεων στην αρχιτεκτονική με βάση CA αποτελούν οι δομές των **Devetakovic et al**<sup>418</sup> βασισμένες στις κατασκευές folies στη Vilette του Tschumi με τη χρήση του λογισμικού **Fun3D**<sup>419</sup> (Εικόνα 6\_9). Η εικόνα απεικονίζει δομή από Cellular automata διαστάσεων κανάβου 10X10X10 στοιχείων με βάση τον κανόνα: ελάχιστο 2, μέγιστο 3, γένεση 3, κατασκευασμένο με την εφαρμογή **Fun3D** του Bojan Mitronic, η οποία θυμίζει την οργανική εξελικτική λογική του κινήματος των μεταβολιστών και συγκεκριμένα το κτήριο **Nakagin Capsule Tower** (1972) στο Tokyo του **Kurokawa**. Άλλες διερευνήσεις όσον αφορά στη γεωμετρική πολυπλοκότητα αρχιτεκτονικών κατασκευών σε χώρες της Ασίας με βάση τη μαθηματική λογική των cellular automata παρουσιάζονται από τον **Situngir**<sup>420</sup> (2010).

414 Paul Coates κ.ά., 'The Use of Cellular Automata to Explore Bottom up Architectonic Rules', 1996, <http://hdl.handle.net/10552/949>.

415 Robert J. Krawczyk, 'Architectural Interpretation of Cellular Automata', στο *Generative Art 2002. 5th International Conference GA2002, Milan, 11-12-13 December 2002. Proceedings*, επιμέλ. Celestino Soddu, 2002ο έκδ. (Milan, 2002), 468, [http://www.artscience-ebookshop.com/ebooks\\_free/GA2002\\_proceedings.pdf](http://www.artscience-ebookshop.com/ebooks_free/GA2002_proceedings.pdf).

416 Kostas Terzidis, 'Algorithmic Complexity: Out of Nowhere', στο *Complexity Design Strategy and World View* (Berlin, Basel: Birkhäuser, 2008), 80, <https://doi.org/10.1515/9783034609692.75>.

417 Terzidis, 79.

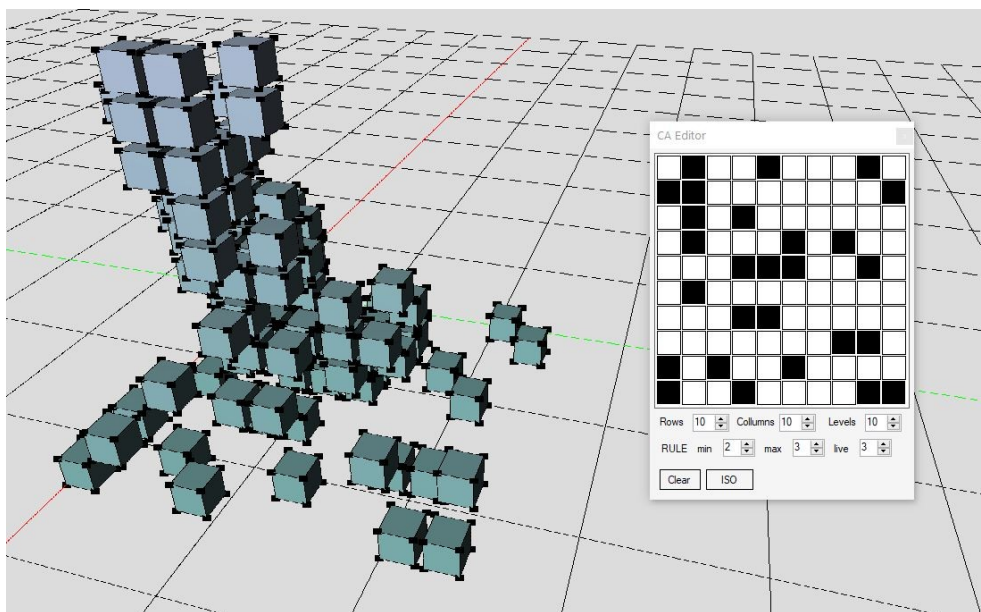
418 Mirjana Devetakovic κ.ά., 'Les Folies Cellulaires – An Exploration in Architectural Design Using Cellular Automata', ημερομηνία πρόσβασης 5 Μάιος 2020, [https://www.academia.edu/209564/Les\\_Folies\\_Cellulaires\\_An\\_Exploration\\_in\\_Architectural\\_Design\\_Using\\_Cellular\\_Automata](https://www.academia.edu/209564/Les_Folies_Cellulaires_An_Exploration_in_Architectural_Design_Using_Cellular_Automata).

419 piktogramstudio, 'piktogramstudio/fun3d', Visual Basic, 8 Ιούλιος 2015, <https://github.com/piktogramstudio/fun3d>.

420 Hokky Situngkir, 'Exploring Ancient Architectural Designs with Cellular Automata', SSRN Scholarly Paper (Rochester, NY: Social Science Research Network, 10 Οκτώβριος 2010), <https://doi.org/10.2139/ssrn.1696683>.

Εφαρμογή της χρήσης των cellular automata στην αρχιτεκτονική αποτελεί η διερεύνηση και η δημιουργία δομών σε δισδιάστατο ή τρισδιάστατο χώρο. Τέτοια παραδείγματα αναζητήθηκαν σε πειραματικές προσεγγίσεις του **AADLR** (Architectural Association Design Research Laboratory, 2014) όπου δημιουργήθηκαν δομές με βάση αρχικά δεδομένα εισόδου, κανόνες εξέλιξης, την συλλογή αριθμητικών στοιχείων από τα προϊόντα και τελικά τη δημιουργία φυσικών μοντέλων <sup>421</sup>.

Στο παράδειγμα σχεδιασμού με τη χρήση **CA** οι **Herr and Kvan** <sup>422</sup> (2005), καθορίζουν μια μεθοδολογία με την οποία μπορούν να παράξουν με αυτόματο και χειροκίνητο τρόπο συνδυαστικά πολυεπίπεδες δομές που αναπαριστούν πολυόροφα κτήρια σε πυκνοκατοικημένη περιοχή. Στη συγκεκριμένη προσέγγιση, οι κανόνες του CA τροποποιούνται από το μελετητή σύμφωνα με την απαιτούμενη χρήση και τις συνθήκες του έργου, ενώ εισάγεται και η χειροκίνητη παρέμβαση σε όποιο στάδιο απαιτείται.



Εικόνα 6\_9: Δομή από Cellular automata διαστάσεων κανάβου 10X10X10 στοιχείων με βάση τον κανόνα: ελάχιστο 2, μέγιστο 3, γένεση 3, κατασκευασμένο με την εφαρμογή Fun3D του Bojan Mitrovic. <https://github.com/piktogramstudio/fun3d>.

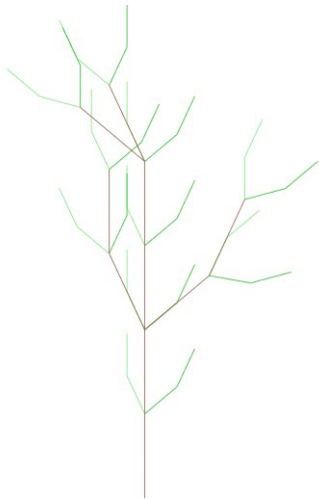
### 6.2.3 L-systems και αρχιτεκτονική

Καθώς τα **L-Systems** είναι αλγόριθμοι – γραμματικές εξελίξεις που κατασκευάστηκαν για να αναπαραστήσουν κυρίως βιολογικά συστήματα, όπως π.χ. την εξέλιξη φυτών (Εικόνα 6\_10), η άμεση εφαρμογή τους στην αρχιτεκτονική και την κατασκευή είναι δυσχερής.

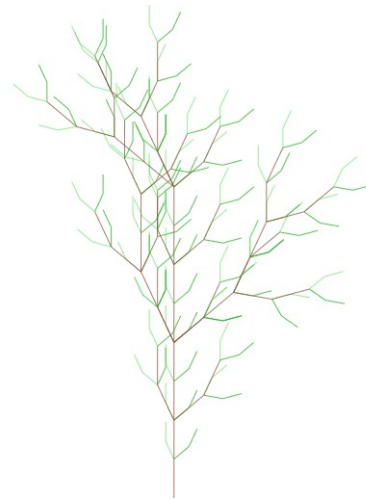
421 'Cellular Automata In Architecture / AA Workshop - eVolo | Architecture Magazine', ημερομηνία πρόσβασης 4 Μάιος 2020, <http://www.evolo.us/cellular-automata-in-architecture-aa-workshop/>.

422 Christiane M. Herr και Thomas Kvan, 'Using Cellular Automata to Generate High-Density Building Form', στο *Computer Aided Architectural Design Futures 2005*, επιμέλ. Bob Martens και Andre Brown (Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005), 249–58, [https://doi.org/10.1007/1-4020-3698-1\\_23](https://doi.org/10.1007/1-4020-3698-1_23).

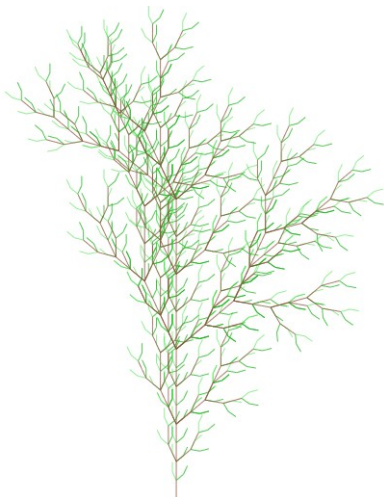
Παρ' όλα αυτά τα L-Systems, μπορούν να χρησιμοποιηθούν έμμεσα στην αρχιτεκτονική για διάφορους λόγους. Μερικοί από αυτούς κατά τον **Serrato-Combe**<sup>423</sup> (2005) είναι: η δημιουργία αναπαραστάσεων μοναδικών δομών που μπορούν στη συνέχεια να επεξεργαστούν σε λογισμικά CAD, η παραγωγή οπτικοποιημένης πληροφορίας για τη δημιουργία και τον μετασχηματισμό των μορφών, η δημιουργία πολύπλοκων δομών οργανικής μορφής που δεν θα ήταν δυνατόν να κατασκευαστούν εύκολα διαφορετικά, η δυνατότητα παραλλαγών της μορφής μέσω τροποποιήσεων στους κανόνες του συστήματος σε πολύ γρήγορο χρόνο.



Στάδιο 2



Στάδιο 3



Στάδιο 4



Στάδιο 5

Εικόνα 6\_10: 2D L-system, σύμφωνα με το αξίωμα FX και τους κανόνες  $F=C0FF-[C1-F+F]+[C2+F-F]$  και  $X=C0FF+[C1+F]+[C3-F]$  για 2, 3, 4 και 5 στάδια. Πηγή: Kevin Roast, <http://www.kevs3d.co.uk/dev/lsystems/>

423 Antonio Serrato-Combe, 'Lindenmayer Systems – Experimenting with Software String Rewriting as an Assist to the Study and Generation of Architectural Form', στο *Digital Design: The Quest for New Paradigms [23rd eCAADe Conference Proceedings / ISBN 0-9541183-3-2] Lisbon (Portugal) 21-24 September 2005*, pp. 615-621 (CUMINCAD, 2005), [http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?2005\\_615](http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?2005_615).



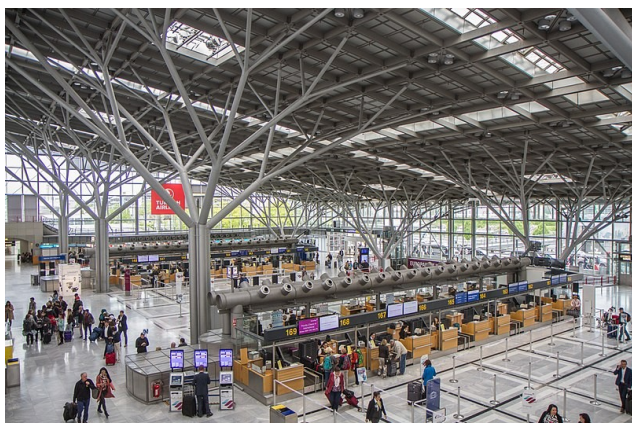
Εικόνα 6\_11: Μοντέλο στατικής διερεύνησης του A. Gaudí για τη Sagrada Família. Πηγή: *Maqueta funicular de la iglesia de la colonia Güell usada por Gaudí.jpg, maqueta funicular de la iglesia de la colonia Güell usada por Gaudí actualmente expuesta en el Museo del templo de la Sagrada Família, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Maqueta\\_funicular\\_de\\_la\\_iglesia\\_de\\_la\\_colonia\\_G%C3%BCell\\_usada\\_por\\_Gaud%C3%AD.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Maqueta_funicular_de_la_iglesia_de_la_colonia_G%C3%BCell_usada_por_Gaud%C3%AD.jpg), εικόνα του/της: *Javiermes*, άδεια: CC BY-SA 4.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.*

Η δενδροειδής διάταξη των L-Systems πιθανώς θυμίζει τα τρισδιάστατα φυσικά μοντέλα του A. Gaudí, τα οποία κατασκεύασε για να διερευνήσει τη μεταφορά των φορτίων και το σχεδιασμό των δομικών στοιχείων της Sagrada Família. Τα μοντέλα του Gaudí παρουσιάζονται αντεστραμμένα, δηλαδή με την κορυφή του κτηρίου να βρίσκεται στο κάτω μέρος, και έχουν σαφή ιεραρχική δομή με βάση την κατανομή των δυνάμεων λόγω της βαρύτητας, ενώ μοιάζουν με δενδροειδείς διατάξεις μεγάλης πολυπλοκότητας.

Ένα υλοποιημένο παράδειγμα δενδροειδούς δομής ως φέρων δομικό στοιχείο αποτελούν τα υποστυλώματα του terminal στο αεροδρόμιο της Στουτγάρδης από τους **Von Gerkan, Marg and Partner** (1991). Τα υποστυλώματα που στηρίζουν το στέγαστρο του τερματικού σταθμού είναι 18 μεταλλικά τετραπλά σύνθετα υποστυλώματα ύψους 5-18m και διαμέτρου 30m<sup>424</sup>. Σύμφωνα με τον

<sup>424</sup> 'Airport Stuttgart Terminal 3', ημερομηνία πρόσβασης 5 Μάιος 2020, <https://www.sbp.de/en/project/airport-stuttgart-terminal-3/>.

**Harris**<sup>425</sup>, η παραπάνω διάταξη είναι εμπνευσμένη από τις δομές δένδρων του **Frei Otto** (1960), όπου ο Otto και η ομάδα του διερεύνησαν τον τρόπο στήριξης μια πλάκας από υποστυλώματα βασισμένα σε δενδροειδείς δομές, προσπαθώντας να επιτύχουν βελτιστοποίηση στις διατομές και την ποσότητα του υλικού. Οι ιεραρχικές δομές των L-Systems προκύπτουν από την χρήση συγκεκριμένων κανόνων και τα αποτελέσματα μπορεί να είναι από απλά μέχρι εξαιρετικά σύνθετα. **Η μεγάλη πολυπλοκότητα που μπορεί να παρουσιάσει ένα τέτοιο σύστημα, μπορεί να παρερμηνευθεί για τυχαιότητα** αν και, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η **πραγματική τυχαιότητα** μπορεί να προκύψει μέσω της θέσπισης **πιθανοτικών κανόνων** οι οποίοι καθορίζουν στοχαστικά την εξέλιξη των δομών.



Εικόνα 6\_12: Stuttgart Airport terminal 1, γενική διάταξη. Πηγή: Stuttgart Airport Terminal 1.jpg, Terminal 1 at Stuttgart Airport with Tree-like Support Structures, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stuttgart\\_Airport\\_Terminal\\_1.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stuttgart_Airport_Terminal_1.jpg), εικόνα του/της; *CatalpaSpirit*, άδεια: CC BY-SA 4.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.



Εικόνα 6\_13: Stuttgart Airport terminal, λεπτομέρεια υποστηλώματος Πηγή: Stuttgart Airport Interior 2005-06-02.jpg, Image of the interior of Stuttgart Airport (between Terminal 1 and 3) taken on 2005-06-02 by James Bowes., [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stuttgart\\_Airport\\_Interior\\_2005-06-02.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stuttgart_Airport_Interior_2005-06-02.jpg), εικόνα του/της: No machine-readable author provided. *JamesBowes* assumed (based on copyright claims), άδεια: CC BY-SA 3.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/) license.

425 David Harris, 'How Can Biomimicry Be Used to Enhance the Design of an Architectural Column?' (Master of Architecture, Australia, Deakin University, 2016), 13, [https://www.researchgate.net/publication/303655581\\_How\\_can\\_biomimicry\\_be\\_used\\_to\\_enhance\\_the\\_design\\_of\\_an\\_architectural\\_column/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/303655581_How_can_biomimicry_be_used_to_enhance_the_design_of_an_architectural_column/figures?lo=1).



## 7. Επίλογος Α' μέρους

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται το **Α' μέρος** της διατριβής, όπου και παρουσιάστηκε η έρευνα για τον ορισμό και τη φύση της τυχαιότητας, για το πώς αυτή εμφανίζεται και χρησιμοποιείται στις Επιστήμες και την Τέχνη, με ποιους τρόπους μπορεί να δημιουργηθεί και ποια είναι τα διαφορετικά είδη της. Ολοκληρώθηκε επίσης η εξέταση των παραδειγμάτων ύπαρξης της τυχαιότητας σε επιλεγμένα αρχιτεκτονικά έργα, η οποία είχε ως στόχο να αναδείξει ότι η τυχαιότητα μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό, επηρεάζοντας διαφορετικές παραμέτρους που σχετίζονται με τη μορφή και τη δομή τους. Παρουσιάστηκαν τέλος τρόποι με τους οποίους μπορεί να συμπεριληφθεί η τυχαιότητα στη διαδικασία του σχεδιασμού, όσον αφορά στα κριτήρια, στις προδιαγραφές, στους περιορισμούς, στις παραδοχές και στις παραμέτρους με τη χρήση συγκεκριμένων ψηφιακών εργαλείων όπως ο παραμετρικός σχεδιασμός, οι γενετικοί αλγόριθμοι, τα cellular automata και τα L-systems.

Είναι κατανοητό ότι οι διαφορετικές εφαρμογές της τυχαιότητας μπορεί να έχουν ένα εξαιρετικά μεγάλο εύρος, τόσο από ποιοτική όσο και ποσοτική άποψη. Οι εφαρμογές αυτές, όπως παρουσιάστηκε από τα σχετικά παραδείγματα, μπορούν ενδεικτικά να κυμαίνονται από απλές διαφοροποιήσεις σε χρωματισμούς και στο φωτισμό σε όψεις κτιρίων, σε μεταβολές διατάξεων των στοιχείων επιδερμίδας κτηρίων, σε μη προβλέψιμες μεταβολές της μορφής λόγω της χρήσης φυσικών υλικών που μεταβάλλονται στο χρόνο, καταλήγοντας σε παραδείγματα όπου η τυχαιότητα χρησιμοποιείται για να διαμορφωθεί ο φέρων οργανισμός ενός κτίσματος, πάντα σε συνάρτηση και με άλλες παραμέτρους.

Είναι εξίσου κατανοητό ότι η τυχαιότητα που εντοπίζεται στην **πρώτη κατηγορία παραδειγμάτων**, η οποία σχετίζεται με στοιχεία και παραμέτρους που **ΔΕΝ αφορούν στη δομή της κατασκευής** είναι πιο εύκολα εφαρμόσιμη και ελέγξιμη, και αφορά κυρίως στη μορφή και στη λειτουργία (**venustas** και **utilitas**), χωρίς να εμπεριέχει κινδύνους για τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής (**firmitas**)<sup>426</sup>. Τα παραδείγματα αυτής της κατηγορίας είναι πολύ περισσότερα, καθώς όταν πρόκειται για μη φέροντα στοιχεία, η εφαρμογή της τυχαιότητας είναι πολύ πιο εύκολα διαχειρίσιμη, αφού δεν επηρεάζεται ο φέρων οργανισμός και αυτή περιορίζεται σε τμήμα συνήθως της κατασκευής.

Σε άλλα όμως παραδείγματα αρχιτεκτονικών έργων, παρουσιάστηκε ότι η τυχαιότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαμορφώσει και τη διάταξη και τη δομή ενός φέροντος οργανισμού, να συνεισφέρει στον υπολογισμό και διαμόρφωση φερόντων στοιχείων και να βοηθήσει στην παραγωγή παραλλαγών δομικών λύσεων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η χρήση της τυχαιότητας επιβάλλεται να γίνεται με τέτοιο τρόπο και με τις κατάλληλες ανοχές, προδιαγραφές, δικλείδες και όρια ασφαλείας, ώστε να μην υπάρχουν αστοχίες. Η εφαρμογή της τυχαιότητας σε αυτές τις περιπτώσεις είναι πιο δύσκολη και καθοριστική, διότι **επηρεάζει τη φέρουσα ικανότητα της κατασκευής και τη δομική της ακεραιότητα (firmitas)**. Τα παραδείγματα αυτής της κατηγορίας είναι πολύ λιγότερα, καθώς ένας φέρων οργανισμός μπορεί να είναι ελεγχόμενα μόνο τυχαίος, αφού θα πρέπει να ικανοποιεί **πρωταρχικά** τις απαιτήσεις για την φέρουσα ικανότητα της κατασκευής. Η εφαρμογή της τυχαιότητας σε αυτή την κατηγορία επιδέχεται περαιτέρω επιστημονικής διερεύνησης και η παρούσα

<sup>426</sup> Vitruvius, *Vitruvius: The Ten Books on Architecture*, μετάφρ. Morris Hicky Morgan (New York: Dover Publications, 1960).

διατριβή επιχειρεί την προώθηση της έρευνας προς αυτή την κατεύθυνση. Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή και σε προηγούμενο κεφάλαιο, **ο DeLanda τονίζει την ανάγκη ενσωμάτωσης της δομικής διάστασης στο σχεδιασμό (structural), καθώς η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει αυτή την απαίτηση**<sup>427</sup>.

Από τα παραπάνω διακρίνεται ότι εφ' όσον, μετά από κατάλληλη διερεύνηση, διεξαχθούν κάποια βασικά συμπεράσματα για τη δυνατότητα και τις προϋποθέσεις εφαρμογής της τυχαιότητας στη διαμόρφωση **της δομής της κατασκευής** (και κατ' επέκταση της μορφής της) **ως την πιο σύνθετη και κρίσιμη κατηγορία παραδειγμάτων**, τότε και οι λοιπές κατηγορίες εφαρμογής τυχαιότητας (π.χ. αισθητικές, μορφολογικές, κ.λπ.) μπορούν να είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμες.

Γι' αυτό το λόγο, ως συνέχεια αυτής της έρευνας, επιλέγεται στο **Β' Μέρος** της διατριβής να περιγραφεί και να διεξαχθεί **πείραμα** με το οποίο εξετάζεται η χρήση της παραμέτρου της τυχαιότητας σε ενδεικτικό παράδειγμα εφαρμογής (case study) που περιλαμβάνει ελέγχους δοκιμών σε θλίψη σε δομές ραβδωτών δοκιμίων. Το πείραμα μπορεί να αποδώσει μετρήσιμα αριθμητικά και στατιστικά στοιχεία για την τυχαιότητα τα οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για να την περιγράψουν και να την αξιολογήσουν, όσον αφορά στο συσχετισμό της με τη δομή και τη μορφή της κατασκευής.

Σημειώνεται ότι στο **Παράρτημα III** της διατριβής παρουσιάζονται αναλυτικά πειραματισμοί και άλλες περιπτώσεις παραδειγμάτων, που έγιναν κυρίως με τη χρήση λογισμικού, για το πώς η παράμετρος της τυχαιότητας μπορεί να ενσωματωθεί με συγκεκριμένο τρόπο στο σχεδιασμό, κυρίως ως προς τη μορφή (την πρώτη κατηγορία παραδειγμάτων τυχαιότητας), σε περιβάλλον λογισμικού 2d και 3d.

---

427 Manuel de Landa Part 8 Day 1: Genetic Algorithms, ημερομηνία πρόσβασης 24 Απρίλιος 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=NoPgS2Se9ZQ&feature=relmfu>.



## Β' μέρος



## 8. Παράδειγμα εφαρμογής και Πειραματική διαδικασία

### 8.1 Εισαγωγή

Για την εξέταση της επιρροής κάποιων από τις παραμέτρους της τυχαιότητας στη δομή και τη μορφή μιας κατασκευής γίνεται πειραματική διερεύνηση με φυσικά δοκίμια. Με τη χρήση του πειράματος επιδιώκεται να εξαχθούν μετρήσιμα δεδομένα τα οποία θα μπορέσουν να διασαφηνίσουν και να τεκμηριώσουν την επιρροή, συμπεριφορά και χρησιμότητα κάποιων από τις παραμέτρους της τυχαιότητας, όσον αφορά στη δομή και τη μορφή μιας κατασκευής.

**Ως δομή μιας κατασκευής ορίζεται η διάρθρωση που συνδέει τα επί μέρους τμήματα ενός φέροντος στοιχείου σε κάποια ιεραρχική διάταξη, τα οποία μπορεί να είναι όμοια ή διαφορετικά μεταξύ τους. Η τελική διάρθρωση της δομής σε συνδυασμό με γεωμετρικές παραμέτρους και τα δομικά υλικά καθορίζει τη μορφή της κατασκευής.**

Η επιλογή για τα είδος των πειραμάτων προέκυψε από τις διερευνήσεις των προηγούμενων κεφαλαίων, σε συνδυασμό με τα δεδομένα και την εμπειρία που αποκομίσθηκε από τα αρχικά παραδείγματα εφαρμογής της τυχαιότητας με τη χρήση λογισμικού που παρουσιάζονται στο **Παράρτημα III**. Τα πειράματα εστιάζονται σε παράδειγμα εφαρμογής ραβδωτών δοκιμίων που θα μπορούσε να αντιπροσωπεύει τμήμα φορέα κατασκευής.

Το γενικό ερευνητικό ερώτημα που εξετάζεται μέσω των πειραμάτων, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, είναι το εξής: **Αν η επιρροή της παραμέτρου της τυχαιότητας όσον αφορά στη μορφή και τη δομή μιας κατασκευής είναι σημαντική ή όχι, ποια είναι αυτή και τι βαθμό έχει η επιρροή της, αν μπορεί να είναι χρήσιμη και υπό ποιες προϋποθέσεις.**

Το πείραμα της παρούσας διατριβής παρουσιάζεται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες.

Συνοπτικά αναφέρεται ότι σε αυτό το πείραμα εξετάζονται **27 ραβδωτά δοκίμια κυλινδρικής μορφής γεωμετρίας τύπου Voronoi**, γενικών διαστάσεων **διαμέτρου 10,5cm** και **ύψους 20,5cm**, σε δοκιμές σε θλίψη. Επίσης εξετάζονται **3 συμπαγή κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 10cm** και **ύψους 20cm**, σε δοκιμές σε θλίψη. Όλα τα παραπάνω δοκίμια σχεδιάζονται πρώτα ψηφιακά σε κατάλληλο λογισμικό παραμετρικής σχεδίασης και στη συνέχεια κατασκευάζονται ως φυσικά δοκίμια από υλικό **PETG**, με τη χρήση τεχνολογίας **3d εκτύπωσης**. Τέλος, τα αποτελέσματα των δοκιμών σε θλίψη αξιολογούνται ποιοτικά, ποσοτικά-αριθμητικά και στατιστικά, προκειμένου να διερευνηθεί η τυχαιότητα και η σχέση της με τη δομή και τη μορφή της κατασκευής.

## 8.2 Προηγούμενη έρευνα

Στη βιβλιογραφία, η αντίστοιχη διερεύνηση μέσω πειραμάτων δοκιμών σε θλίψη για δοκίμια κατασκευασμένα με τεχνολογία 3d εκτύπωσης **FDM** και υλικά όπως π.χ. **PETG**, **PLA**, κ.λπ. που αφορούν σε **αρχιτεκτονική** και **δομική** κλίμακα είναι εξαιρετικά περιορισμένη. Επισημαίνεται ότι όλα τα επόμενα παραδείγματα **δεν εξετάζουν την παράμετρο της τυχαιότητας**, αλλά συγκεκριμένα μηχανικά χαρακτηριστικά.

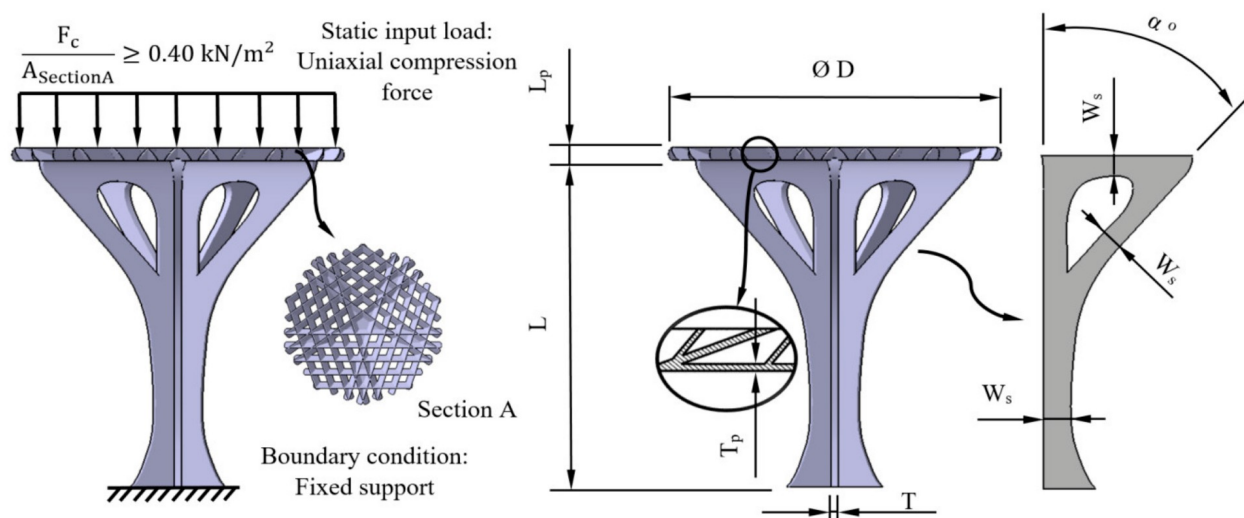
Στη μελέτη **Mercado-Colmenero et al.** 2020<sup>428</sup>, διερευνήθηκε δοκίμιο που αναπαριστά δενδροειδές στέγαστρο υπό **κλίμακα 1:25**, κατασκευασμένο με τεχνολογία 3d εκτύπωσης από υλικό PETG. Αρχικά κατασκευάστηκαν **18 βοηθητικά δοκίμια** για ελέγχους δοκιμών χαρακτηρισμού αντοχής του υλικού σύμφωνα με το **ISO-604** για τις διευθύνσεις εκτύπωσης κατά **X, Y, Z** για τις συγκεκριμένες παραμέτρους 3d εκτύπωσης που χρησιμοποίησαν οι ερευνητές. Σύμφωνα με τη δημοσίευση αυτής της εργασίας, πρέπει σύμφωνα με το ISO-604, για το χαρακτηρισμό ιδιοτήτων υλικού να ελέγχονται τουλάχιστον 5 δείγματα σε κάθε διεύθυνση εκτύπωσης. Από την πειραματική διαδικασία προσδιορίστηκαν τιμές για το **μέτρο ελαστικότητας**<sup>429</sup> (**young's modulus**) για κάθε διεύθυνση εκτύπωσης, X, Y, Z. Στη συνέχεια, εξετάστηκαν σύμφωνα με το **Ισπανικό CTE Standard, 2 μόνο δείγματα** πειραματικής γεωμετρίας (δενδροειδές στέγαστρο) με διευθύνσεις εκτύπωσης X και Z (ένα δείγμα για κάθε διεύθυνση). Επίσης, αναφέρεται ότι χρησιμοποιήθηκαν **supports**<sup>430</sup> κατά την 3d εκτύπωση, το οποίο εξυπηρετούν την υποστήριξη της κύριας γεωμετρίας και τη σωστή 3d εκτύπωση της όταν υπάρχουν κεκλιμένα στοιχεία της χωρίς υποστηρίζον υπόβαθρο. Τέλος, τα αποτελέσματα των εργαστηριακών πειραμάτων για τα δύο δενδροειδή δοκίμια, συγκρίθηκαν με αποτελέσματα από το λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (**Finite Element Method**<sup>431</sup> – **FEM**) **Ansys Mechanical**. Το συγκεκριμένο διερευνητικό παράδειγμα έχει παραπλήσια κλίμακα εφαρμογής με τις διερευνήσεις της παρούσας διατριβής, δηλαδή ως αρχιτεκτονικό στοιχείο και δομική κατασκευή, αλλά απουσιάζει το ικανό σε πλήθος στατιστικό δείγμα για τις δοκιμές των πειραματικών μοντέλων (δενδροειδές στέγαστρο). Τα **2 δενδροειδή δοκίμια** εκτυπώθηκαν σε **κλίμακα 1:25** της πραγματικής κλίμακας (ύψος δοκιμίων στεγαστρού ~16cm), ενώ ενδεχομένως να μπορούσαν να είχαν εκτυπωθεί σε λίγο ακόμα μεγαλύτερο μέγεθος στον συγκεκριμένο 3d εκτυπωτή που χρησιμοποιήθηκε.

428 Jorge Manuel Mercado-Colmenero κ.ά., 'Experimental and Numerical Analysis for the Mechanical Characterization of PETG Polymers Manufactured with FDM Technology under Pure Uniaxial Compression Stress States for Architectural Applications', *Polymers* 12, τχ. 10 (25 Σεπτέμβριος 2020): 2202, <https://doi.org/10.3390/polym12102202>.

429 'Ελαστικότητα', στο *Βικιπαίδεια*, 1 Μάιος 2024, <https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%95%CE%BB%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1&oldid=10549471>.

430 Περισσότερες πληροφορίες για τη χρήση supports στο 3d printing μπορούν να βρεθούν στο: '3D Printing Supports – The Ultimate Guide', All3DP, 27 Φεβρουάριος 2023, <https://all3dp.com/1/3d-printing-support-structures/>.

431 'Finite Element Method', στο *Wikipedia*, 20 Μάιος 2024, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Finite\\_element\\_method&oldid=1224746783](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Finite_element_method&oldid=1224746783).



Εικόνα 8\_1: Δενδροειδές δοκίμιο. Οριακές συνθήκες, ορισμός φορτίου και κύριες γεωμετρικές παράμετροι. Πηγή: Figure 2. Boundary conditions, load definition and main geometrical parameters of the plastic structural element. , Mercado-Colmenero et al., 2020. <https://doi.org/10.3390/polym12102202> , άδεια: Creative Commons Attribution (CC BY) license, CC BY 4.0, (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

Στο παράδειγμα των **Torreblanca-Díaz** και **Peña** 2022<sup>432</sup>, έγινε διερεύνηση μορφών για την κατασκευή σκαμνιών. Διερευνήθηκαν και συγκρίθηκαν μεταξύ τους **4 τύποι** σκαμνιών: α. **Συμπαγές κυλινδρικό**, β. **Νοσοποι κυλινδρικό**, γ. **Δενδροειδές** και δ. **Διαφορικής ανάπτυξης**. Τα σκαμνιά σχεδιάστηκαν ψηφιακά στο λογισμικό Grasshopper 3D και στη συνέχεια εκτυπώθηκε σε 3d εκτυπωτή από υλικό **PLA**, **ένα μόνο δοκίμιο** από κάθε τύπο σκαμνιού σε **κλίμακα 1:5** της πραγματικής του διάστασης. Τα **4** (υπό 1:5 κλίμακα) διαφορετικά μεταξύ τους δοκίμια-σκαμνιά είχαν **διάσταση ύψους ~12cm** και **διάμετρο ~6cm**. Στη συνέχεια δοκιμάστηκαν σε αντοχή σε θλίψη σε κατάλληλη διάταξη και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Διαπιστώθηκε ότι μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη είχαν με τη σειρά: Το συμπαγές κυλινδρικό δοκίμιο, το δοκίμιο διαφορικής ανάπτυξης, το δοκίμιο νοσοποι και τέλος το δενδροειδές δοκίμιο. Σημειώνεται ότι παράχθηκε **μόνο ένα δείγμα από κάθε τύπο** σκαμνιού υπό κλίμακα, **δεν έγινε στατιστική ανάλυση** (ανέφικτο λόγω του ενός μόνο δείγματος ανά τύπο) και **δεν έγινε έλεγχος δοκιμών χαρακτηρισμού αντοχής του υλικού** σύμφωνα με τις συγκεκριμένες παραμέτρους 3d εκτύπωσης. Μετά την παραπάνω διαδικασία, τα σκαμνιά εκτυπώθηκαν τρισδιάστατα σε τμήματα και συναρμολογήθηκαν σε κλίμακα 1:1. **Το συγκεκριμένο πείραμα αφορά σε συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ 4 τύπων εντελώς διαφορετικών κατασκευών, που όμως έχουν ίδιες περίπου γενικές διαστάσεις.**

432 David A. Torreblanca-Díaz και Juan Pablo Velásquez Peña, 'Biodigital Product Design Through Additive Fabrication Technologies: Stool Project', στο Herrera, PC, Dreifuss-Serrano, C, Gómez, P, Arris-Calderon, LF, *Critical Appropriations - Proceedings of the XXVI Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics (SIGraDi 2022)*, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, 7-11 November 2022 , pp. 1189–1200 (CUMINCAD, 2022), [https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/sigradi2022\\_116](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/sigradi2022_116).



Εικόνα 8.2: 4 τύποι σκαμνιών. Πηγή: Torreblanca-Díaz και Peña, 2022, [https://papers.cuminCAD.org/cgi-bin/works/paper/sigradi2022\\_116](https://papers.cuminCAD.org/cgi-bin/works/paper/sigradi2022_116). Χρήση κατόπιν αδειάς.

Τρισδιάστατες εκτυπώσεις δοκιμών **σε μεγάλη κλίμακα** για αρχιτεκτονικές εφαρμογές και εφαρμογές δομικής κλίμακας έχουν πραγματοποιηθεί και για άλλα υλικά, όπως **μέταλλο** και **σκυρόδεμα**. Τα ακόλουθα παραδείγματα έχουν σχέση με την τεχνολογία εκτύπωσης δοκιμών μελών σε μεγάλη διάσταση **και όχι με την διερεύνηση της τυχαιότητας**, η οποία εξετάζεται σε αυτή τη διατριβή.

Σε κάποια από αυτά τα παραδείγματα μεγάλης κλίμακας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μηχανικών χαρακτηριστικών των κατασκευών. Παραδείγματα πειραματικών δοκιμών σε **3d εκτυπωμένο σκυρόδεμα** σε μεγάλες διαστάσεις είναι ενδεικτικά αυτά των: **Salet et al.** 2018<sup>433</sup>, **Daungwilailuk et al.** 2021<sup>434</sup>, **Nováková και Jiří** 2021<sup>435</sup>, **Han et al.** 2022<sup>436</sup>, **Fu et al.** 2023<sup>437</sup>, **Silveira et al.** 2024<sup>438</sup>, κ.λπ.

433 Theo A. M. Salet κ.ά., 'Design of a 3D printed concrete bridge by testing', *Virtual and Physical Prototyping* 13, τχ. 3 (3 Ιούλιος 2018): 222–36, <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1476064>.

434 Totsawat Daungwilailuk, Phoosak Pheinsusom, και Withit Pansuk, 'Uniaxial load testing of large-scale 3D-printed concrete wall and finite-element model analysis', *Construction and Building Materials* 275 (1 Μάρτιος 2021): 122039, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122039>.

435 Kateřina Nováková και Vele Jiří, 'Prvok - An experiment with 3D printing large doublecurved concrete structure', στο *Stojakovic, V and Tepančević, B (eds.), Towards a new, configurable architecture - Proceedings of the 39th eCAADe Conference - Volume 2, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia, 8-10 September 2021, pp. 137-144* (CUMINCAD, 2021), [https://papers.cuminCAD.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2021\\_011](https://papers.cuminCAD.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2021_011).

436 Xiaoyu Han κ.ά., 'Experimental study on large-scale 3D printed concrete walls under axial compression', *Automation in Construction* 133 (1 Ιανουάριος 2022): 103993, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103993>.

437 Yanan Fu, Ying Zhang, και Lei Wu, 'Experimental Study on Structural Performance of Cast-in-Place Frame Printed Concrete Wall', *International Journal of Concrete Structures and Materials* 17, τχ. 1 (8 Νοέμβριος 2023): 56, <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00620-5>.

438 Marcos V. G. Silveira κ.ά., 'Structural performance of large-scale 3D-printed walls subjected to axial compression load', *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21 Φεβρουάριος 2024, <https://doi.org/10.1139/cjce-2023-0395>.

Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις διερευνήσεων, κατασκευάζονται αρχιτεκτονικά και δομικά μέλη και τμήματα κατασκευών, χωρίς να πραγματοποιούνται δοκιμές μηχανικών χαρακτηριστικών τους. Τέτοια παραδείγματα είναι περιπτώσεις διερευνητικών 3d εκτυπώσεων από σκυρόδεμα σε μεγάλη κλίμακα π.χ. **Anton et al.** 2019<sup>439</sup>, **Adilenidou et al.** 2019<sup>440</sup>, **Anton et al.** 2020<sup>441</sup>, **Abroleda-Pardo et al.** 2020,<sup>442</sup>, **Anton et al.** 2022<sup>443</sup>, **Conrad et al.** 2023<sup>444</sup>, κ.λπ.

Αντίστοιχη διερεύνηση εκτυπώσεων **δομικών στοιχείων** μεγάλης κλίμακας, αλλά από μέταλλο (και πάλι χωρίς πειραματικούς ελέγχους αντοχής), είναι η περίπτωση των **Baldschmitt et al.** 2022<sup>445</sup>, στην οποία έγινε χρήση **3d εκτύπωσης μετάλλου** με χρήση **ρομποτικού συστήματος 6 αξόνων**. Κατασκευάστηκαν από μέταλλο δυο μη συμπαγή στοιχεία υποστυλωμάτων (κοίλα), τα οποία υλοποιήθηκαν παράλληλα σε ταυτόχρονη εκτύπωση υπό κλίμακα (**52,2cm ύψος δοκιμίων**). Το πρώτο υποστύλωμα έχει **οκταγωνική διατομή σε περιστροφή καθ' ύψος** και το δεύτερο έχει **ελλειψοειδή διατομή**, επίσης **μεταβαλλόμενη καθ' ύψος**. Κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους, καταγράφηκαν όλες οι παράμετροι εκτύπωσης, συγκόλλησης, κ.λπ. και δημιουργήθηκαν ψηφιακά αντίγραφα των δοκιμίων. Χρησιμοποιήθηκαν δείγματα μετάλλου 3d εκτύπωσης για εύρεση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού για τις συγκεκριμένες ρυθμίσεις εκτύπωσης της διάταξης. Στη συνέχεια, ακολούθησε το **στάδιο αποτίμησης της γεωμετρικής πιστότητας και ποιότητας** της 3d εκτύπωσης με τη χρήση σαρωτή **3d laser scanner**, ο οποίος κατέγραψε την τρισδιάστατη γεωμετρία των δοκιμίων και ακολούθησε σύγκριση με τα ψηφιακά πρωτότυπα. **Δεν πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μηχανικών χαρακτηριστικών.**

439 Ana Anton κ.ά., 'Vertical Modulations', στο *ACADIA 19:UBIQUITY AND AUTONOMY [Proceedings of the 39th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 978-0-578-59179-7] (The University of Texas at Austin School of Architecture, Austin, Texas 21-26 October, 2019) pp. 596-605* (CUMINCAD, 2019), [https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia19\\_596](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia19_596).

440 Yota; Ahmed Adilenidou, 'Unprintable Forms', στο *ACADIA 19:UBIQUITY AND AUTONOMY [Proceedings of the 39th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 978-0-578-59179-7] (The University of Texas at Austin School of Architecture, Austin, Texas 21-26 October, 2019) pp.168-177* (CUMINCAD, 2019), [https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia19\\_168](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia19_168).

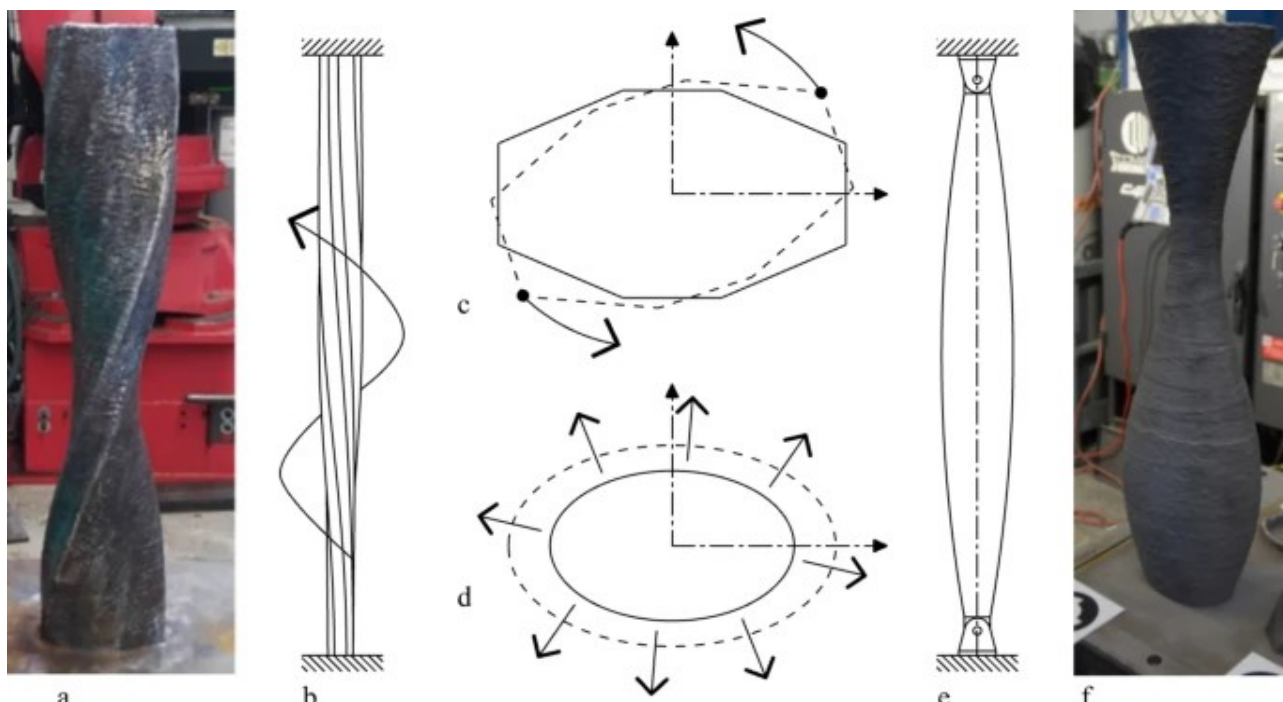
441 Ana Anton κ.ά., 'Fast Complexity', στο *ACADIA 2020: Distributed Proximities / Volume II: Projects [Proceedings of the 40th Annual Conference of the Association of Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 978-0-578-95253-6]. Online and Global. 24-30 October 2020. edited by M. Yablonina, A. Marcus, S. Doyle, M. del Campo, V. Ago, B. Slocum. 236-241* (CUMINCAD, 2020), [https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia20\\_236p](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia20_236p).

442 Juan Gabriel Arboleda-Pardo, Rodrigo Garcia Alvarado, και Alejandro Martinez Rocamora, 'BIM-modeling and programming of curved concrete walls for 3D-printed construction', στο *SIGraDi 2020 [Proceedings of the 24th Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics - ISSN: 2318-6968] Online Conference 18 - 20 November 2020, pp. 297-305* (CUMINCAD, 2020), [https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/sigradi2020\\_297](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/sigradi2020_297).

443 Ana Anton κ.ά., 'Column-Slab Interfaces for 3D Concrete Printing', στο *ACADIA 2022: Hybrids and Haeccities [Proceedings of the 42nd Annual Conference of the Association of Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 979-8-9860805-8-1]. University of Pennsylvania Stuart Weitzman School of Design. 27-29 October 2022. edited by M. Akbarzadeh, D. Aviv, H. Jamelle, and R. Stuart-Smith. 58-67.* (CUMINCAD, 2022), [https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia22\\_58](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia22_58).

444 John Conrad, 'Concrete Printed Gyroid Column: A structurally optimized, sand layer supported printing method', στο *Dokonal, W, Hirschberg, U and Wurzer, G (eds.), Digital Design Reconsidered - Proceedings of the 41st Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe 2023) - Volume 1, Graz, 20-22 September 2023, pp. 641-650* (CUMINCAD, 2023), [https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2023\\_384](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2023_384).

445 B. Waldschmitt κ.ά., '3d Printing of Column Structures for Architectural Applications', *Architecture, Structures and Construction* 2, τχ. 4 (1 Δεκέμβριος 2022): 565-74, <https://doi.org/10.1007/s44150-022-00050-z>.



Εικόνα 8\_3: 2 τύποι υποστυλωμάτων και οι αντίστοιχες σχηματικές οριζόντιες τομές τους σε συγκεκριμένες στάθμες. Πηγή: Baldschmitt et al., 2022. <https://doi.org/10.1007/s44150-022-00050-z>, άδεια: CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Πειράματα 3d εκτυπώσεων και δοκιμών αντοχής συγκεκριμένα για το υλικό **PETG** έχουν μελετηθεί στο παρελθόν από άποψη **χαρακτηρισμού ιδιοτήτων και τεχνολογίας υλικών**, τα οποία όμως **δεν αφορούν** την παρούσα διατριβή, αφού αυτή διαπραγματεύεται τη **διερεύνηση της τυχαιότητας** και εξετάζει δομές και μορφές σε κλίμακα **αρχιτεκτονικών και δομικών εφαρμογών**. Ενδεικτικά όμως αναφέρονται, ως προς τη χρήση και ιδιότητες του υλικού **PETG**, οι εργασίες των **Szykiedans et al.** 2017<sup>446</sup>, **Guessasma et al.** 2019<sup>447</sup>, **Durgashyam et al.** 2019<sup>448</sup>, **Shubbarao et al.** 2021<sup>449</sup>, **Loskot et al.** 2023<sup>450</sup>, κ.λπ.

Η έρευνα που αφορά σε **μικροδομές υλικών και τεχνολογία υλικών** όπως π.χ. **foams, πορώδη υλικά, νανοϋλικά, δομές υλικών για ιατρικές εφαρμογές**, κ.λπ., **επίσης δεν αφορά στην παρούσα διατριβή**, καθώς τέτοιες σχετικές διερευνήσεις χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθοδολογίες, όπως και δοκίμια

446 Ksawery Szykiedans, Wojciech Credo, και Dymitr Osiński, 'Selected Mechanical Properties of PETG 3-D Prints', *Procedia Engineering* 177 (31 Δεκέμβριος 2017): 455–61, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.245>.

447 Sofiane Guessasma, Sofiane Belhabib, και Hedi Nouri, 'Printability and Tensile Performance of 3D Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Using Fused Deposition Modelling', *Polymers* 11, τχ. 7 (22 Ιούλιος 2019): 1220, <https://doi.org/10.3390/polym11071220>.

448 K. Durgashyam κ.ά., 'Experimental investigation on mechanical properties of PETG material processed by fused deposition modeling method', *Materials Today: Proceedings* 18 (1 Ιούλιος 2019), <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.082>.

449 Ch V. Subbarao κ.ά., 'Dynamic Mechanical Analysis of 3D Printed PETG Material', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1057, τχ. 1 (Φεβρουάριος 2021): 012031, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1057/1/012031>.

450 Jan Loskot κ.ά., 'Influence of print speed on the microstructure, morphology, and mechanical properties of 3D-printed PETG products', *Polymer Testing* 123 (1 Ιούνιος 2023): 108055, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108055>.



πολύ μικρότερου μεγέθους (κλίμακα **εκατοστού** ή κλίμακα **χιλιοστού** και όχι κλίμακα **δεκατόμετρου** που χρησιμοποιείται σε πειράματα και δοκίμια **αρχιτεκτονικών και δομικών εφαρμογών που εξετάζει η παρούσα διατριβή**). Παρ' όλα αυτά, στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων διερευνήσεων, πρώτον ώστε να μπορέσουν να γίνουν εύκολα κατανοητές οι διαφορές τους σε σχέση με το **παράδειγμα εφαρμογής της παρούσας διατριβής** και δεύτερον για λόγους **βιβλιογραφικής πληρότητας**.

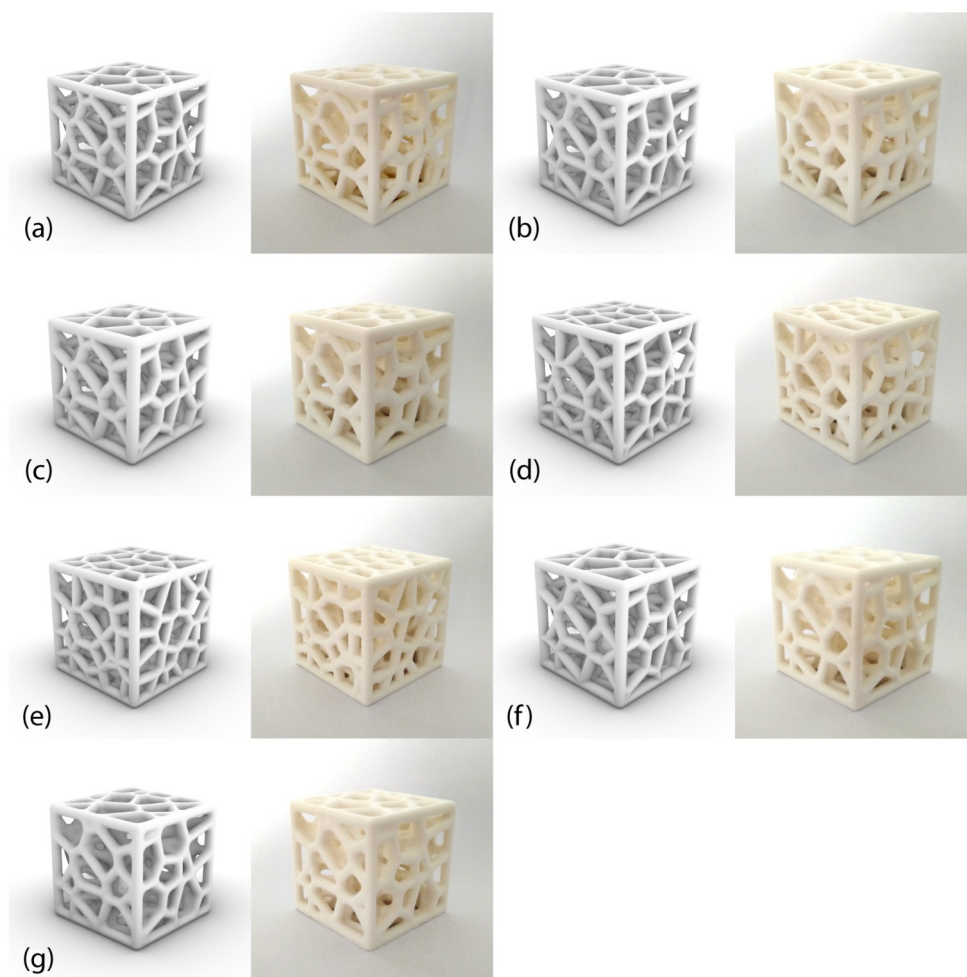
Οι **Maliaris και Sarafis**, 2016<sup>451 452</sup>, σχεδίασαν **κυβικά δοκίμια** μικρών διαστάσεων **ακμής κύβου ~38mm**, τα οποία διαμορφώνουν τρισδιάστατο πλέγμα δομής **Voronoi**. Για τον ψηφιακό σχεδιασμό τους χρησιμοποιήθηκε λογισμικό το οποίο δεν αναφέρεται. Σχεδιάστηκαν **δύο τύποι** κυβικών δοκιμίων, ίδιων εξωτερικών διαστάσεων, αλλά διαφορετικής πυκνότητας δομής και διαφορετικών διατομών ράβδων. Στην άνω και κάτω επιφάνεια των δοκιμίων προστέθηκαν **πλάκες πάχους 1mm** που αύξησαν το ύψος αρχικής δομής voronoi (κύβοι διάστασης ακμής **37mm**), ενώ υπάρχουν **4 κατακόρυφες συνεχόμενες ακμές στις 4 γωνίες των δοκιμίων**, με ίδια διατομή με αυτή των ράβδων. Οι δομές voronoi είναι δηλαδή περιορισμένες στο άνω και κάτω μέρος από επίπεδες πλάκες και από κατακόρυφες ακμές στις 4 γωνίες. Στον **πρώτο τύπο** δοκιμίου, οι ράβδοι έχουν διάμετρο **1mm** και **porosity 87%**. Στον **δεύτερο τύπο** δοκιμίου, οι ράβδοι έχουν διάμετρο **1,4mm** και **porosity 78%**. Για κάθε τύπο δημιουργήθηκαν **3 μόνο φυσικά δοκίμια** (μικρό στατιστικό δείγμα) για τις μηχανικές δοκιμές, με χρήση **SLA 3d printing** και υποβλήθηκαν σε δοκιμή σε θλίψη. Τα δοκίμια, όπως αναφέρεται, **υποβλήθηκαν σε μικρή προένταση (<10N)** ώστε να μην υπάρχουν σφάλματα επιπεδότητας. **Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού** για τις συγκεκριμένες ρυθμίσεις εκτύπωσης προήλθαν από μετρήσεις σύμφωνα με το **ISO 527-2**. Τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών συγκρίθηκαν με αποτελέσματα ανάλυσης **FEM**. Δεν αναφέρεται αν έγινε κάποια στατιστική ανάλυση.

Σε αντίστοιχο παράδειγμα, στην περίπτωση των **Efstathiadis et al.**, 2023<sup>453</sup>, κρίνοντας και από τη συνημμένη βιβλιογραφία της δημοσίευσης, φαίνεται ότι αυτή προσανατολίζεται στη μελέτη **δομών κλίμακας υλικών (foams, πορώδη υλικά, νανοϋλικά, κ.λπ.)** και όχι κλίμακας **δομικών μελών (structural members)**. Πιο αναλυτικά, έγινε διαμόρφωση και πειραματική διερεύνηση **κυβικών δοκιμίων** μικρού μεγέθους (**7 τύποι κύβων ακμής 40mm**), σύνθετης γεωμετρίας τύπου **3d Voronoi** από υλικό **PLA**, κατασκευασμένων **χωρίς χρήση supports**, η απουσία των οποίων μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στην αξιοπιστία του δοκιμίου από κατασκευαστική άποψη. Αναφέρεται επίσης ότι παράχθηκαν **3 μόνο φυσικά δοκίμια ανά τύπο** (μικρό στατιστικό δείγμα) και δεν αναφέρεται συγκεκριμένα κάποιου είδους στατιστική ανάλυση ή τα αποτελέσματα αυτής. **Δεν έγινε προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού** για τις συγκεκριμένες ρυθμίσεις 3d εκτύπωσης (εύρεση μέτρου ελαστικότητας), όπως μεθοδολογικά έγινε σε κάποιες από τις προηγούμενες περιπτώσεις, προκειμένου να γίνει η **ανάλυση FEM**. Αναφέρεται ότι χρησιμοποιήθηκαν ιδιότητες του υλικού **PLA**, γενικά, χωρίς κάποια άλλη διευκρίνιση. Σε ανάλυση FEM με τη χρήση λογισμικού **ANSYS**

451 Georgios Maliaris και Elias Sarafis, 'Mechanical Behavior of 3D Printed Stochastic Lattice Structures', *Solid State Phenomena* 258 (8 Δεκέμβριος 2016): 225–28, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.258.225>.

452 [https://www.researchgate.net/publication/311521182\\_Mechanical\\_Behavior\\_of\\_3D\\_Printed\\_Stochastic\\_Lattice\\_Structures](https://www.researchgate.net/publication/311521182_Mechanical_Behavior_of_3D_Printed_Stochastic_Lattice_Structures)

453 Alexandros Efstathiadis κ.ά., '3D Printed Voronoi Structures Inspired by Paracentrotus Lividus Shells', *Designs* 7, τχ. 5 (Οκτώβριος 2023): 113, <https://doi.org/10.3390/designs7050113>.



Εικόνα 8\_4: 7 τύποι κυβικών δοκιμών διαστάσεων ακμής κύβου 40mm. Διακρίνονται χαρακτηριστικά οι τυπικές δομές voronoi και κατακόρυφες ακμές των κύβων στις 4 γωνίες των δοκιμών, οι οποίες διακόπτουν τη συνέχεια των τρισδιάστατων δομών voronoi. Πηγή: Figure 4. Designed and fabricated samples: (a) Model 1; (b) Model 2; (c) Model 3; (d) Model 4; (e) Model 5; (f) Model 6; and (g) Model 7., Efstathiadis et al., 2023. <https://www.mdpi.com/2411-9660/7/5/113>, άδεια: CC BY 4.0, Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

**Mechanical** καταλήγει η μεθοδολογία και της συγκεκριμένης δημοσίευσης και τα αποτελέσματα της συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των πειραμάτων των μηχανικών χαρακτηριστικών.

Και οι δύο αυτές τελευταίες προσεγγίσεις: (**Maliaris και Sarafis** 2016<sup>454</sup> και **Efstathiadis et al.** 2023<sup>455</sup>) χρησιμοποιούν **κυβικά δοκίμια πολύ μικρών διαστάσεων** (ακμής κύβου **38mm** και **40mm** αντίστοιχα), που εμπεριέχουν **τυπικές δομές Voronoi**<sup>456</sup> στο χώρο. Αυτές οι διαστάσεις δοκιμών

454 Maliaris και Sarafis, 'Mechanical Behavior of 3D Printed Stochastic Lattice Structures'.

455 Efstathiadis κ.ά., '3D Printed Voronoi Structures Inspired by Paracentrotus Lividus Shells'.

456 Τα **διαγράμματα voronoi**, ονομάστηκαν έτσι από την έρευνα του **Georgy Feodosievych Voronoy** (1908), και είναι δισδιάστατα (2d) διαγράμματα που απεικονίζουν την κατάτμηση ενός επιπέδου σε περιοχές - κελιά (cells) με βάση τις θέσεις σημείων (seeds) στο επίπεδο σύμφωνα με συγκεκριμένους κανόνες. Τα σημεία που εμπεριέχονται σε κάθε κελί και τα οποία αντιστοιχούν σε συγκεκριμένο seed, είναι τα κοντινότερα σημεία στο seed αυτό από οποιοδήποτε άλλο σημείο seed στο επίπεδο. 'Voronoi Diagram', στο *Wikipedia*, 25 Αύγουστος 2023, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Voronoi\\_diagram&oldid=1172180711..](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Voronoi_diagram&oldid=1172180711..) Γεωμετρικά οι πλευρές

μπορεί να είναι κατάλληλες για διερευνήσεις σε **κλίμακες δομών υλικών**, αλλά **δεν είναι κατάλληλες**, λόγω των μικρών διαστάσεων των δοκιμίων, μικρών διατομών ράβδων και κλίμακας των συνδέσεων τους, **για χρήση δοκιμίων σε πειραματικές διερευνήσεις αρχιτεκτονικής και δομικής κλίμακας**. Επομένως, και τα δύο αυτά παραδείγματα **δεν έχουν συνάφεια** με την πειραματική διάταξη της παρούσας διατριβής, η οποία διερευνά το ζήτημα της τυχαιότητας **σε αρχιτεκτονική και δομική κλίμακα**.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι **στην περίπτωση κυβικών δοκιμίων σε συνδυασμό με δομές voronoi όπως στα συγκεκριμένα αυτά δύο τελευταία παραδείγματα**, διαμορφώνονται **4 κατακόρυφες συνεχόμενες ακμές στις 4 γωνίες των κύβων**. Οι ακμές αυτές λειτουργούν **εν είδει υποστυλωμάτων σε κατακόρυφη φόρτιση, διαταράσσουν την ομοιόμορφη γεωμετρία voronoi** στην περιφέρεια του δοκιμίου καθώς τη διακόπτουν και άρα **επηρεάζουν τη συμπεριφορά του δοκιμίου συνολικά κατά τη διάρκεια της δοκιμής σε θλίψη**.

Στην περίπτωση των **Yuan et al. 2023**<sup>457 458</sup>, **δεν** παρουσιάζεται το ζήτημα των ακμών των **κυβικών δοκιμίων** σε συνδυασμό με δομές **voronoi**, καθώς τα κυβικά δοκίμια που προτείνονται σε αυτό το άρθρο, πάλι δοκίμια μικρού μεγέθους σε διερεύνηση κλίμακας δομών υλικών **ακμής κύβου 60mm**, δεν έχουν ευθύγραμμες ακμές, ούτε στην οριζόντια ούτε και στην κατακόρυφη διάσταση (βλέπε εικόνα 3 του άρθρου). Στην περίπτωση των δομών **voronoi** που προτείνονται, **γίνεται χρήση κυψελών voronoi και όχι ράβδων**. Το κυψελωτό υλικό τύπου **foam** που διαμορφώθηκε με αυτή τη γεωμετρία παρουσιάζει ομοιομορφία. Αυτού του τύπου τα κυβικά δοκίμια, **ακμής κύβου 60mm**, κατασκευασμένα από θερμοπλαστικό **PLA** εξετάστηκαν στη συνέχεια σε πειραματική διάταξη **δοκιμής σε θλίψη** και **κρούση** και στη συνέχεια έγινε συγκριτική διερεύνηση μέσω ανάλυσης **FEM** στο λογισμικό **ABAQUS/Explicit**. Για το προσδιορισμό ιδιοτήτων του υλικού για τη συγκεκριμένη ποιότητα εκτύπωσης χρησιμοποιήθηκε το standard **ASTM / ISO 52921**.

Ένα ακόμα παράδειγμα σε κλίμακα μελέτης **υλικών και μικροδομών** είναι αυτό των **Alkner et al. 2022**<sup>459</sup>, όπου διερευνήθηκαν μικροδομές τύπου **voronoi σε κυλινδρικά δοκίμια πολύ μικρών διαστάσεων, ύψους 12mm και ακτίνας 3,27mm με προσανατολισμό σε εφαρμογές σχεδιασμού πορώδων δομών για αποκατάσταση οστών**<sup>460</sup>. Διαμορφώθηκαν **2 κατηγορίες δοκιμίων**, τα απλά

ενός κελιού voronoi χαράσσονται από ακμές οι οποίες είναι οι μεσοκάθετες πλευρών τριγώνου που δημιουργείται από 3 οποιαδήποτε σημεία (seeds) στο επίπεδο. Όταν οι ίδιες αρχές εφαρμόζονται σε σημεία στο χώρο προκύπτει ένα τρισδιάστατο (3d) διάγραμμα voronoi.

457 Ye Yuan κ.ά., 'Deformation and failure of additively manufactured Voronoi foams under dynamic compressive loadings', *Engineering Structures* 284 (1 Ιούνιος 2023): 115954, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115954>.

458 <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10169055/1/Manuscript-3D-Voronoi-compression-2022-revised-2nd.pdf>

459 Zainab Alkner, Zhwan Dilshad Ibrahim Sktani, και Ali Arab, 'Effect of Cell Geometry on the Mechanical Properties of 3D Voronoi Tessellation', *Journal of Functional Biomaterials* 13, τχ. 4 (16 Δεκέμβριος 2022): 302, <https://doi.org/10.3390/jfb13040302>.

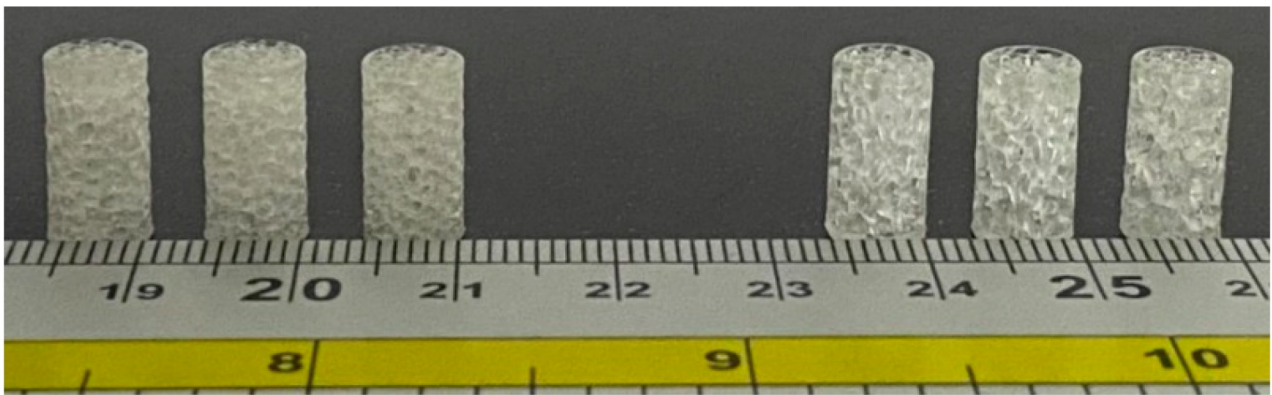
460 Άλλη συναφής έρευνα για ενίσχυση οστών ενδεικτικά είναι:

Markus Laubach κ.ά., 'In vivo characterization of 3D-printed polycaprolactone-hydroxyapatite scaffolds with Voronoi design to advance the concept of scaffold-guided bone regeneration', *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 11 (4 Οκτώβριος 2023), <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1272348>.

Spyros V. Kallivokas κ.ά., 'A Combined Computational and Experimental Analysis of PLA and PCL Hybrid Nanocomposites 3D Printed Scaffolds for Bone Regeneration', *Biomedicines* 12, τχ. 2 (Φεβρουάριος 2024): 261, <https://doi.org/10.3390/biomedicines12020261>.

**voronoi** και τα **επιμηκυμένα (elongated) voronoi**, τα οποία έχουν όλα ίδιο συνολικό ύψος. Για κάθε μια από αυτές τις κατηγορίες, σχεδιάστηκαν 3 παραλλαγές: **α**. Απλό δοκίμιο, **β**. Δοκίμιο με κενό κυλινδρικό πυρήνα (τύπου σωλήνα/tube) και **γ**. Δοκίμιο με κυλινδρικό πυρήνα ο οποίος πληρώνεται με πλέγμα δομής 3d voronoi. Συνολικά δηλαδή σχεδιάστηκαν **6 τύποι** διαφορετικών δοκιμίων. Ο σχεδιασμός έγινε στο λογισμικό grasshopper και τα δοκίμια εκτυπώθηκαν τρισδιάστατα με τεχνολογία **SLA**.

Σημειώνεται ότι σε αυτά τα δοκίμια, σύμφωνα με τον αλγόριθμο με τον οποίο σχεδιάστηκαν, όλες οι περιφερειακές ακμές των δοκιμίων δεν είναι ευθύγραμμες αλλά καμπύλες, καθώς προσαρμόζονται στη γεωμετρία της περιφέρειας του κυλίνδρου. Σε μεταγενέστερη δημοσίευση για την ίδια έρευνα <sup>461</sup> αναφέρεται ότι για κάθε τύπο δοκιμίου έγιναν **4 μόνο** ίδια αντίγραφα (μικρό στατιστικό δείγμα) για δοκιμή σε θλίψη για στατιστικούς λόγους.



Εικόνα 8\_5: Τύποι κυλινδρικών δοκιμίων διαστάσεων  $H=12\text{mm}$  και  $R=3,27\text{mm}$ . Πηγή: Alkner et al., 2022. <https://doi.org/10.3390/jfb13040302>, άδεια: CC BY 4.0, Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

<sup>461</sup> Zainab Alkner, 'Effect of Structure Design on the Compressive Strength and Energy Absorption of Different Resin-3D Printed Irregular Voronoi Structures by SLA Technique' (2023), <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12124.87687>.

### 8.3 Γενική περιγραφή πειράματος

Στην παρούσα διατριβή, τα πειράματα στο εργαστήριο εξετάζουν τη συμπεριφορά δοκιμίων τα οποία έχουν σχεδιαστεί με τη χρήση του αλγοριθμικού και παραμετρικού λογισμικού **Grasshopper**. Τα δοκίμια που δημιουργούνται ανήκουν σε διαφορετικές οικογένειες, ανάλογα με την πυκνότητα των ράβδων τους (πλήθος ράβδων ανά δοκίμιο). Τα δοκίμια-μέλη κάθε οικογένειας έχουν ίδια κατά προσέγγιση **πυκνότητα** ράβδων, αλλά διαφορετική μορφή και δομή. Αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται στην παράμετρο της τυχαιότητας, η οποία έχει εισαχθεί στον αλγόριθμο για τη μεταβολή, με ψευδοτυχαίο τρόπο, της δομής και της μορφής κάθε δοκιμίου.

Τα **φυσικά δοκίμια** που δημιουργούνται έχουν τη γενική μορφή κυλίνδρου (διαμέτρου **10,5cm** και ύψους **20,5cm**) και έχουν δομή και μορφή **ραβδωτού φορέα** (διάμετρος ράβδων **0,5cm**), με μονολιθική σύνδεση μεταξύ των ράβδων. Οι γενικές διαστάσεις του κυλίνδρου αποτελούν και **το όριο** εντός του οποίου εγγράφεται και διαμορφώνεται ο ραβδωτός φορέας και συνεπώς αναπτύσσεται η τυχαιότητα της **δομής και της μορφής**.

Τα δοκίμια αυτά παράγονται από **τον ίδιο βασικό αλγόριθμο του λογισμικού** και στη συνέχεια κατασκευάζονται ως φυσικά αντικείμενα με τη χρήση **3d printing** από πλαστικό τύπου **PETG**. Στη συνέχεια ελέγχονται εργαστηριακά σε θλιπτικές δοκιμές και τα αποτελέσματα των δοκιμών που προκύπτουν καταγράφονται και αξιολογούνται συγκριτικά μεταξύ τους. Συμπληρωματικά, κατασκευάζονται 3 συμπαγή δοκίμια (διαστάσεων διαμέτρου **10cm** και ύψους **20cm**) και τα οποία επίσης ελέγχονται εργαστηριακά σε θλιπτικές δοκιμές.

### 8.4 Αλγόριθμος δημιουργίας γεωμετρίας

Η γεωμετρία των δοκιμίων που παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους αποφασίστηκε να έχει τη γενική μορφή κυλίνδρου με αναλογία διαμέτρου βάσης προς ύψος κυλίνδρου 1:2, ως τυπική αναλογία κυλινδρικών δοκιμίων που χρησιμοποιούνται σε δοκιμές σε θλίψη σε πειράματα δομικών κατασκευών. Οι γενικές διαστάσεις των δοκιμίων, φυσικών και ψηφιακών, επιλέχθηκε να είναι τέτοιες ώστε τα φυσικά δοκίμια να έχουν ικανό μέγεθος, με μέγιστο ύψος 20,5cm για τα ραβδωτά και 20cm για τα συμπαγή δοκίμια, ώστε να μπορούν να εκτυπωθούν σε τρισδιάστατο εκτυπωτή οικιακής χρήσης.

Το ζήτημα μη ομοιόμορφης συμπεριφοράς των δοκιμίων στην ανάληψη φορτίων, που παρουσιάζεται κατά το συνδυασμό χρήσης κυβικών δοκιμίων και δομών Voronoi αναφέρθηκε αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα. Επομένως, **σκόπιμα** στη συγκεκριμένη διατριβή επιλέχθηκε η χρήση **κυλινδρικών** και όχι **κυβικών** δοκιμίων, προκειμένου ο ραβδωτός φορέας να έχει ομοιόμορφη δομή στην περιφέρειά του και επομένως να αναλαμβάνει τα φορτία επίσης ομοιόμορφα.

Για το σχεδιασμό των δοκιμίων χρησιμοποιείται το αλγοριθμικό και παραμετρικό λογισμικό **Grasshopper 3D**. Σχεδιάστηκε παραμετρικός αλγόριθμος ο οποίος ενσωματώνει διάφορες

παραμέτρους και κάποιες από αυτές επιλέγεται να τυχαιοποιηθούν, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας ισοδύναμων παραλλαγών δοκιμίων.

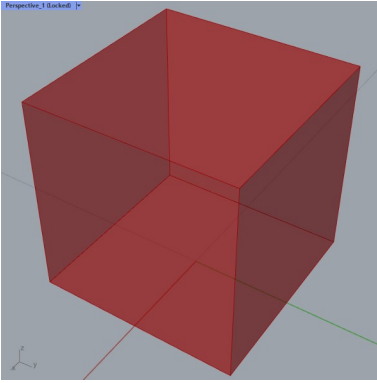
Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τη δομή **Voronoi 3D** που είναι ενσωματωμένη ως πρωτογενές component στο λογισμικό Grasshopper 3D. Επισημαίνεται ότι οι δομές Voronoi είναι πολύ κοινές δομές στο χώρο του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού και modelling (2D και 3D), παραμετρικού ή μη, και διερευνώνται και χρησιμοποιούνται ευρέως από πολλούς χρήστες και ερευνητές. Στην περίπτωση του παραδείγματος εφαρμογής αυτής της διατριβής, δεν διερευνάται αυτή καθαυτή η δομή της τρισδιάστατης διάταξης Voronoi στο χώρο (κάλλιστα θα μπορούσε να είχε χρησιμοποιηθεί μια άλλου τύπου χωρική δομή, π.χ. **Delaunay triangulation**<sup>462</sup>), αλλά επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη δομή, σε συνέχεια παλαιότερων σχετικών διερευνήσεων του γράφοντος<sup>463</sup>, ως τεχνικό εργαλείο χρησιμοποιούμενο **αποκλειστικά για τη διερεύνηση της παραμέτρου της τυχαιότητας**, που είναι ο αντικειμενικός στόχος αυτού του πειράματος εφαρμογής.

### Αλγόριθμος:

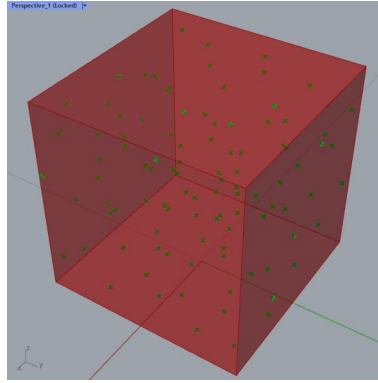
1. Δημιουργία κύβου διαστάσεων 20cmX20cmX20cm σε παραμετρική διάταξη.
2. Στον κυβικό χώρο διαστάσεων 20cmX20cmX20cm γίνεται τυχαία διασπορά σημείων με τη χρήση του component **Populate 3D**. Ο αρχικός αριθμός των τυχαίων σημείων στον κυβικό χώρο καθορίζει και την κάθε ομάδα - οικογένεια δοκιμίων που παράγονται με βάση τη συγκεκριμένη αρχική ποσότητα (π.χ. οικογένεια 50, οικογένεια 100, οικογένεια 200 για 50, 100 και 200 σημεία διασποράς αντίστοιχα). Στο component Populate 3D ενεργοποιείται το πεδίο Seed ώστε να μπορούν να δημιουργούνται ψευδοτυχαίες παραλλαγές της διασποράς των σημείων.
3. Για τη δημιουργία της τρισδιάστατης δομής του δικτύου των ράβδων χρησιμοποιείται το component του λογισμικού **Voronoi 3D** το οποίο δημιουργεί τρισδιάστατη δομή Voronoi με βάση τις θέσεις των προηγούμενων δημιουργημένων τυχαίων σημείων στο χώρο, τα οποία αποτελούν και τα seeds των τρισδιάστατων κελιών voronoi στο χώρο.
4. Μέσα στον όγκο του κύβου πλευράς 20cm εγγράφεται κύλινδρος ακτίνας 5cm και ύψους 20cm με παραμετρική διάταξη.
5. Λαμβάνεται η γεωμετρία της τομής των κελιών της τρισδιάστατης δομής voronoi και της γεωμετρίας του κυλίνδρου.
6. Οι περιμετρικές καμπύλες ακμές της προκύπτουσας γεωμετρίας του προηγούμενου βήματος μετατρέπονται σε ευθείες.
7. Από την προκύπτουσα νέα γεωμετρία διατηρούνται μόνο οι κορυφές (vertices) και οι ακμές (edges).

462 'Delaunay Triangulation', στο *Wikipedia*, 14 Μάιος 2024, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Delaunay\\_triangulation&oldid=1223834829](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Delaunay_triangulation&oldid=1223834829).

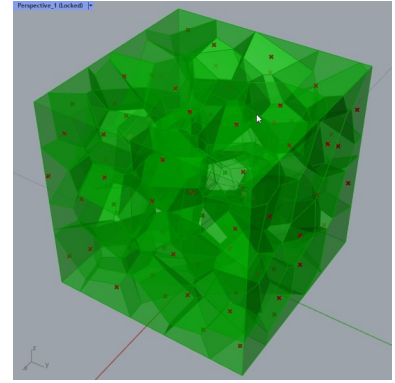
463 Βλέπε Παράρτημα III και σχετική δημοσίευση του αρχιτεκτονικού γραφείου ARSIS Architects στο διαδίκτυο το 2018: [https://www.facebook.com/photo/?fbid=513931915738510&set=ms.c.eJw1zMkNADAIA7CNKhKIgP0Xq3rw9MeCt6OSYUJh6Zp~\\_zNA3ui3RGPPZxvbMcUPRjdh34H7MDeU5FI4~-b.p.s.a.513931009071934](https://www.facebook.com/photo/?fbid=513931915738510&set=ms.c.eJw1zMkNADAIA7CNKhKIgP0Xq3rw9MeCt6OSYUJh6Zp~_zNA3ui3RGPPZxvbMcUPRjdh34H7MDeU5FI4~-b.p.s.a.513931009071934)



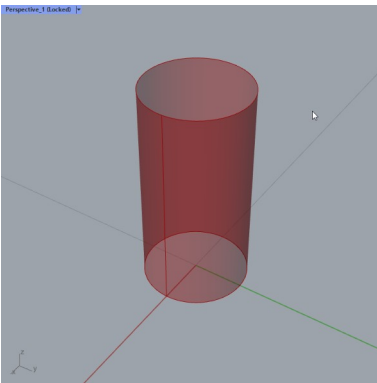
Εικόνα 8\_6: Παραμετρική διαμόρφωση κύβου πλευράς 20cm. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



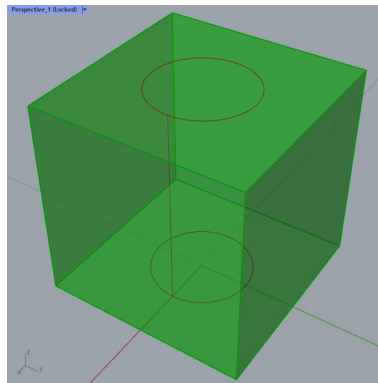
Εικόνα 8\_7: Παραμετρική διασπορά σημείων σε τυχαία θέση στα όρια της γεωμετρίας του κύβου πλευράς 20cm. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



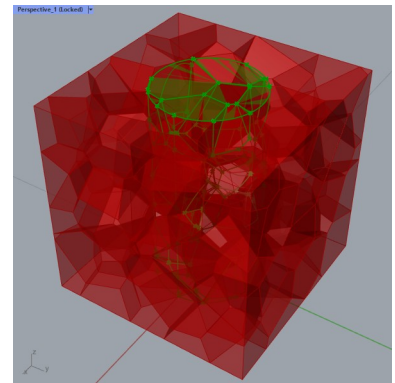
Εικόνα 8\_8: Παραμετρική δημιουργία τρισδιάστατων κελιών νοροποι με seeds τις θέσεις των τυχαίων σημείων στο χώρο του προηγούμενου σταδίου. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_9: Παραμετρική διαμόρφωση κυλίνδρου ακτίνας 5cm και ύψους 20cm. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

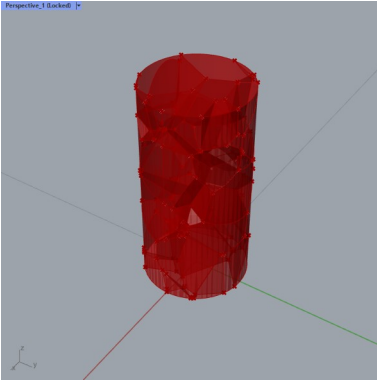


Εικόνα 8\_10: Παραμετρική εγγραφή του κυλίνδρου στο χώρο του κύβου. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

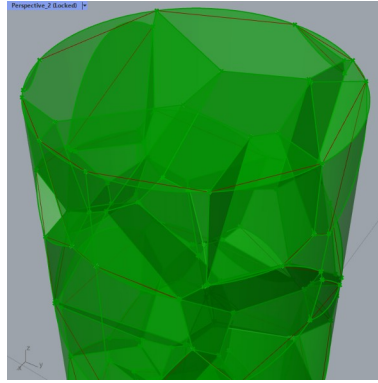


Εικόνα 8\_11: Παραμετρική Γεωμετρία της τομής των κελιών της τρισδιάστατης δομής νοροποι και της γεωμετρίας του κυλίνδρου. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

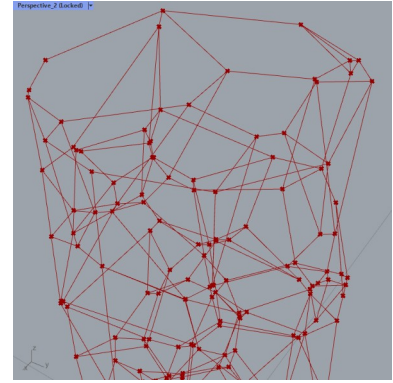
8. Οι γραμμές του πλέγματος διασπώνται σε κορυφές (vertices) και ακμές (edges).
9. Οι κορυφές μετατρέπονται σε κόμβους καθώς σε κάθε κορυφή δημιουργείται σφαίρα ακτίνας  $r=0,25\text{cm}$ .
10. Οι ακμές γίνονται άξονες κυλινδρικών ράβδων με ακτίνα όση και η ακτίνα των σφαιρών  $r=0,25\text{cm}$  και μήκος όσο το μήκος των ακμών.
11. Καταργούνται τα διπλά επικαλυπτόμενα στοιχεία κόμβων και ράβδων.
12. Αξιολόγηση δοκιμών και αποδοχή ή απόρριψη αποτελέσματος.
13. Η προκύπτουσα γεωμετρία μπορεί να εξαχθεί ως \*.obj ή \*.dxf ή να αξιοποιηθεί περαιτέρω.



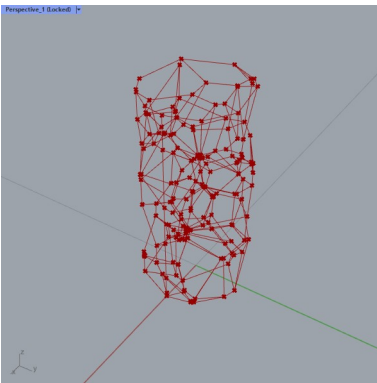
Εικόνα 8\_12: Προκύπτουσα γεωμετρία της τομής των κελιών της τρισδιάστατης δομής νοροποι και της γεωμετρίας του κυλίνδρου. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



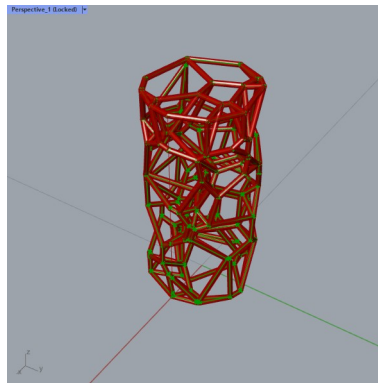
Εικόνα 8\_13: Οι περιμετρικές καμπύλες ακμές της προκύπτουσας γεωμετρίας του προηγούμενου σταδίου γίνονται ευθείες. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



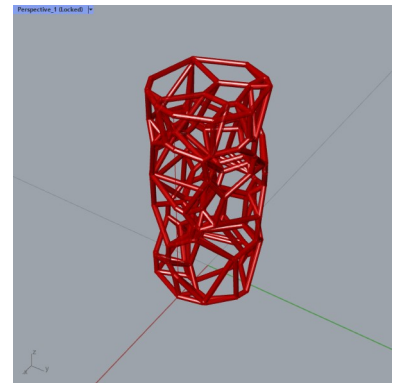
Εικόνα 8\_14: Από την προκύπτουσα νέα γεωμετρία διατηρούνται μόνο οι κορυφές (vertices) και οι ακμές (edges). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_15: Γεωμετρία ψηφιακού δοκιμίου μόνο με κόμβους και ακμές χωρίς όγκο. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_16: Γεωμετρία ψηφιακού δοκιμίου με σφαιρικούς κόμβους ακτίνας  $r=0,25\text{cm}$  και κυλινδρικές ράβδους ακτίνας  $r=0,25\text{cm}$  και τους ομόλογους άξονές τους. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_17: Τελική μορφή ψηφιακού δοκιμίου χωρίς άξονες. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

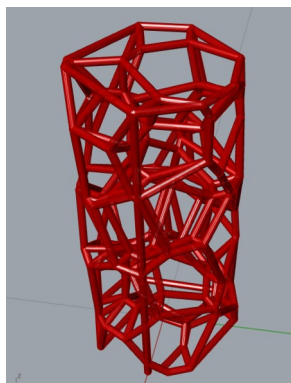
Για λόγους διατήρησης της πολυπλοκότητας των παραλλαγών των δοκιμών στα ελάχιστα δυνατά επίπεδα, ώστε να μπορούν να γίνονται ευκολότερα συγκρίσεις μεταξύ τους, **η παράμετρος που τυχαιοποιείται στο συγκεκριμένο αλγόριθμο μέσω της χρήσης Seed είναι μόνο αυτή στο Populate component.**

Το πλήθος των αρχικών σημείων για τη διαμόρφωση της γεωμετρίας νοροποι **επιλέγεται από το χρήστη χειροκίνητα και λαμβάνει τιμές 50, 100, 200**, κ.λπ., δημιουργώντας τις αντίστοιχες οικογένειες δοκιμών. Οι διατομές των ράβδων των δοκιμών και η ακτίνα των κόμβων τους παραμένουν σε όλα τα δοκίμια σταθερές και ίσες με την τιμή  **$r=0,25\text{cm}$**  (έτσι ώστε να προκύπτει διατομή ράβδων η οποία είναι πολλαπλάσια μεγαλύτερη σε μέγεθος σε σχέση με τη διατομή του ακροφυσίου της μηχανής εκτύπωσης, διάμετρος ακροφυσίου =  $0,4\text{mm}$ ).

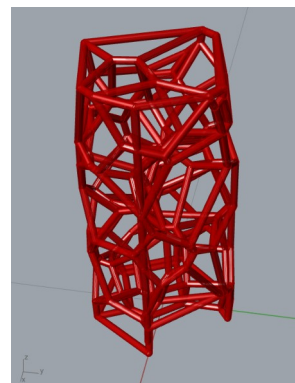
Οι υπόλοιπες γεωμετρικές παράμετροι του αλγορίθμου, όπως οι διαστάσεις και θέσεις του κύβου και του κυλίνδρου παραμένουν επίσης σταθερές. Σε κάποιες ειδικές περιπτώσεις, λόγω εγγενούς



λειτουργικής αδυναμίας του αλγορίθμου, εμφανίζονται κατακόρυφοι συνεχείς άξονες ράβδων, σημαντικές ασυνέχειες στην περίμετρο των δικτυωμάτων ή άλλες σοβαρές ατέλειες (Εικόνα 8\_18, Εικόνα 8\_19). Σε αυτές τις περιπτώσεις γίνεται μετακίνηση του κύβου διασποράς των σημείων και τα παραπάνω ελαττώματα δεν δημιουργούνται. Η συγκεκριμένη ενέργεια γίνεται προκειμένου τα δοκίμια να μην παρουσιάζουν καίριες τέτοιου τύπου γεωμετρικές διαφορές μεταξύ τους, οι οποίες θα τα καθιστούσαν μη ισοδύναμα ανά οικογένεια δοκιμίων και θα δημιουργούσαν προβλήματα στην συγκριτική τους αξιολόγηση.



*Εικόνα 8\_18: Περίπτωση συνεχόμενης κατακόρυφης ακμής και διακοπή στην περιμετρική συνέχεια. Απορριπτόμενο δοκίμιο. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.*



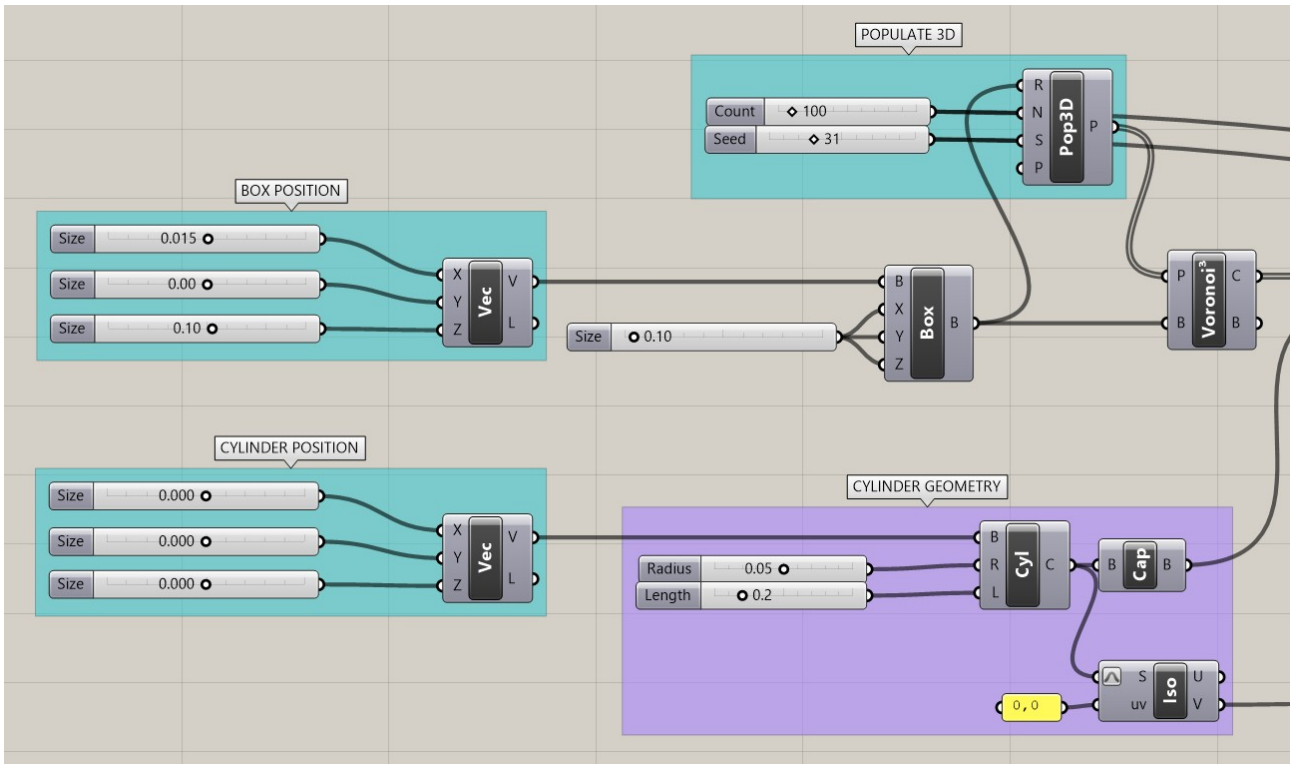
*Εικόνα 8\_19: Περίπτωση συνεχόμενης κατακόρυφης ακμής και διακοπή στην περιμετρική συνέχεια. Απορριπτόμενο δοκίμιο. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.*

Σημειώνεται επίσης ότι οι ράβδοι της βάσης των δοκιμίων βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο μεταξύ τους και διαμορφώνουν σταθερό επίπεδο έδρασης, όπως και οι ράβδοι της στέψης που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο μεταξύ τους, διαμορφώνουν σταθερό επίπεδο φόρτισης στο άνω μέρος. Οι ράβδοι που βρίσκονται στον ενδιάμεσο χώρο βάσης και στέψης έχουν τυχαίες διευθύνσεις και μήκη, αλλά ίδια διατομή μεταξύ τους. **Η τυχαιότητα στις διευθύνσεις των ράβδων σε συνδυασμό με τις πακτώσεις των κόμβων οι οποίοι διανέμονται σε όλο το ύψος του δοκιμίου σε τυχαίες θέσεις, φαίνεται να δημιουργεί ακαμψία σε όλες τις διευθύνσεις του στοιχείου.**

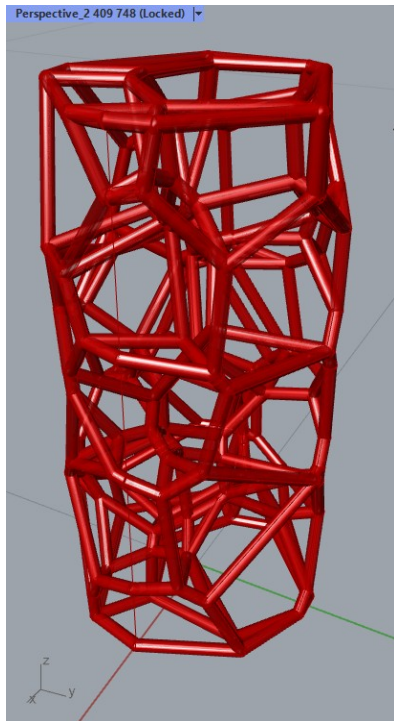
Για κάθε περίπτωση παραλλαγής δοκιμίου, εκτός από το ψηφιακό μοντέλο καταγράφονται οι εξής πληροφορίες:

1. Οικογένεια (αρχικό πλήθος σημείων στον κύβο πλευράς 20cm) : π.χ. 50, 100, 200, κ.λπ.
2. Seed: π.χ. 1, 2, 3, 4, κ.λπ.
3. Αριθμός κόμβων.
4. Αριθμός ράβδων.

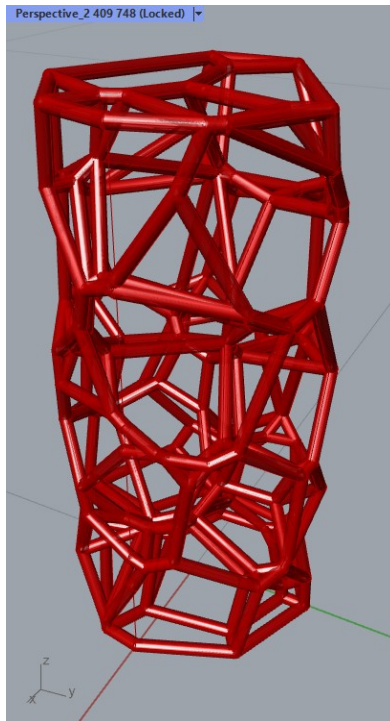
Παρατηρείται ότι τα δοκίμια της ίδιας οικογένειας έχουν ίδια πυκνότητα ράβδων στο χώρο, αλλά διαφορετική δομή και μορφή, η οποία οφείλεται στην ψευδοτυχαία διαμόρφωση του ραβδωτού φορέα λόγω των διαφορετικών Seeds σε κάθε παραλλαγή.



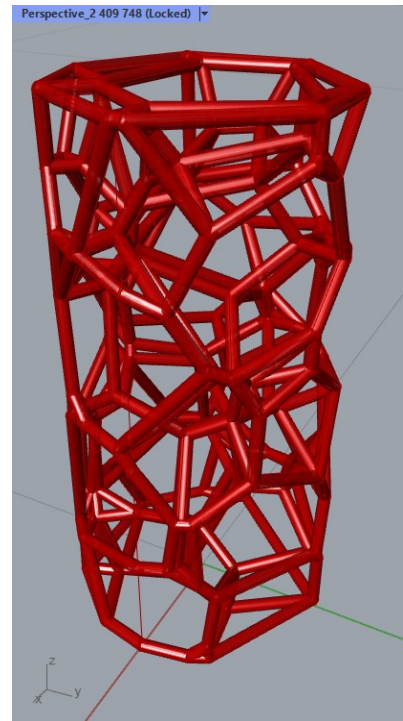
Εικόνα 8\_20: Παραμετρική διαμόρφωση των πρώτων σταδίων του αλγορίθμου στο λογισμικό Grasshopper. Διακρίνονται τα components δημιουργίας του κύβου, του κυλίνδρου, το Populate 3D, το Voronoi 3D καθώς και οι μεταξύ τους σχέσεις. Πηγή: Τ. Κουμιτζόγλου.



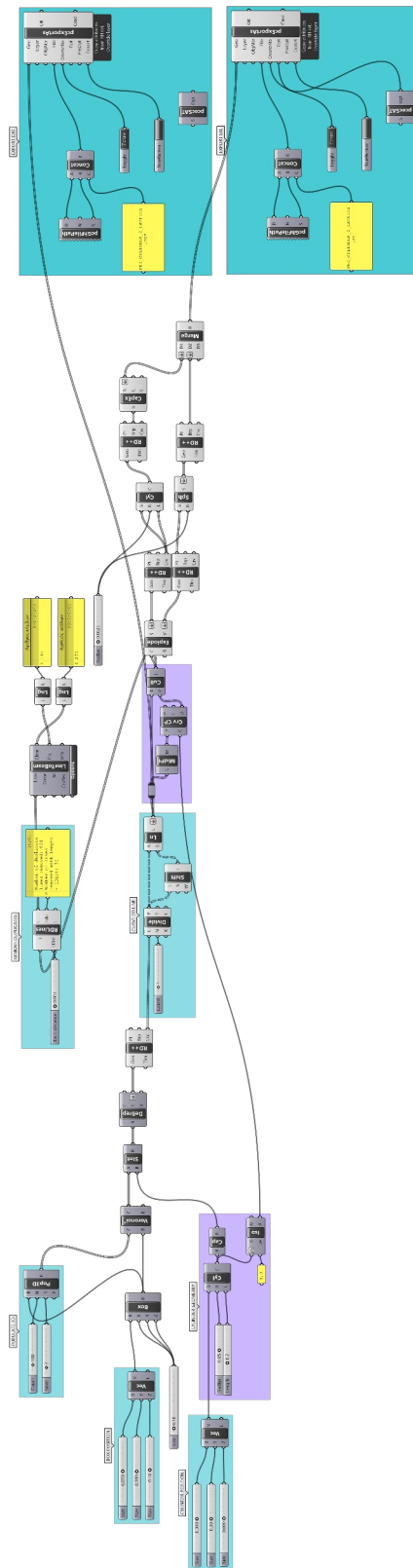
Εικόνα 8\_21: Ψηφιακό δοκίμιο για Οικογένεια 100, Seed 1, box X=0,015 - box Y=0,00. Πηγή: Τ. Κουμιτζόγλου.



Εικόνα 8\_22: Ψηφιακό δοκίμιο για Οικογένεια 100, Seed 2 box X=0,015 - box Y=0,00. Πηγή: Τ. Κουμιτζόγλου.



Εικόνα 8\_23: Ψηφιακό δοκίμιο για Οικογένεια 100, Seed 3, box X=0,015 - box Y=0,00. Πηγή: Τ. Κουμιτζόγλου.



Εικόνα 8\_24: Συνολική διάταξη αλγορίθμου. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

## 8.5 Παραγωγή ψηφιακών τρισδιάστατων δοκιμίων

Για τη διεξαγωγή των φυσικών πειραμάτων δημιουργούνται με τη χρήση του παραπάνω αλγορίθμου **3 οικογένειες δοκιμίων** με διαφορετική πυκνότητα.

Οι οικογένειες έχουν **200**, **100** και **50** αρχικά σημεία στον χώρο **κύβου** πλευράς **20cm** και καλούνται αντίστοιχα **Οικογένεια 200**, **Οικογένεια 100** και **Οικογένεια 50**.

Για κάθε οικογένεια ψηφιακών δοκιμίων δημιουργούνται **9 ψηφιακά δοκίμια** με τιμές **Seed 1** έως **Seed 9**, έτσι ώστε να υπάρχει ένα επαρκές σε πλήθος στατιστικό δείγμα για κάθε οικογένεια δοκιμίων.

Στις περιπτώσεις ευθυγραμμίσεων κατακόρυφων ακμών, σημαντικών ασυνεχειών στην περίμετρο ή άλλων σοβαρών ατελειών γίνονται οι διορθωτικές ενέργειες που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ώστε τα δοκίμια της κάθε οικογένειας να είναι ισοδύναμα και να μην έχουν καίριες δομικές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους.

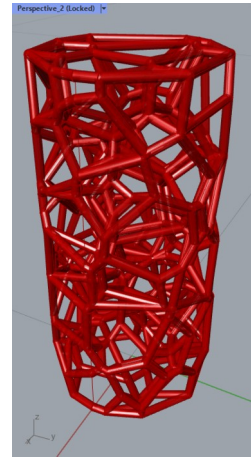
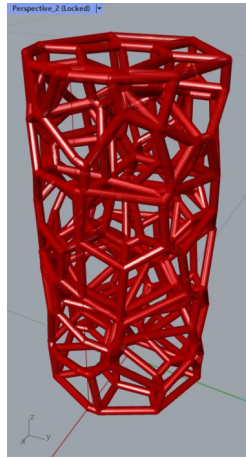
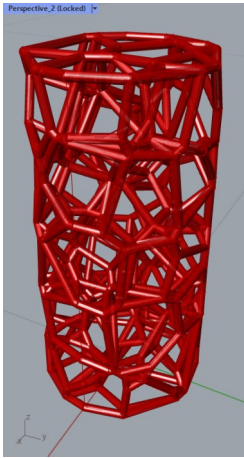
Όλα τα δοκίμια έχουν ακτίνα κυλινδρικών ράβδων και σφαιρών κόμβων **r=0,25cm**.

Για κάθε δοκίμιο καταγράφεται ο αριθμός κόμβων και ράβδων και τα στοιχεία συγκεντρώνονται σε συνολικό πίνακα.

Τα ψηφιακά δοκίμια μετά την ολοκλήρωσή τους εξάγονται σε αρχείο **\*.obj** για το επόμενο στάδιο επεξεργασίας.

Τα ψηφιακά δοκίμια που δημιουργούνται για την κάθε οικογένεια είναι αυτά που φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν. Κάθε δοκίμιο περιγράφεται από κωδικό που αναφέρεται στην Οικογένεια στην οποία ανήκει και το seed από το οποίο δημιουργήθηκε π.χ. **Δοκίμιο 200-1** είναι το δοκίμιο που ανήκει στην **Οικογένεια 200** και προέρχεται από το **Seed 1**.

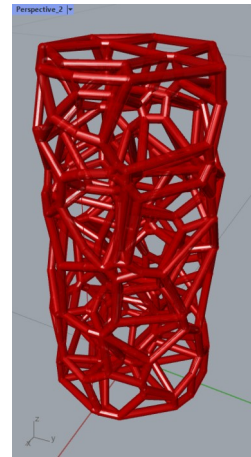
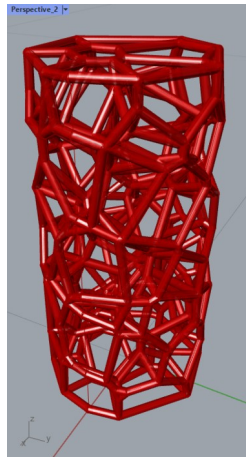
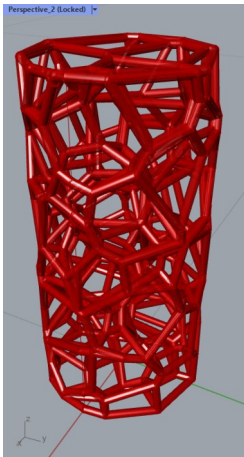
**Οικογένεια 200** – 9 ψηφιακά δοκίμια. Πηγή: Τ. Κουιμπζόγλου.



Εικόνα 8\_25: Ψηφιακό δοκίμιο 200-1.

Εικόνα 8\_26: Ψηφιακό δοκίμιο 200-2.

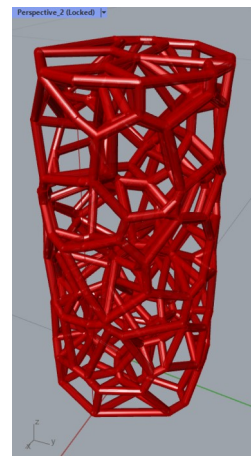
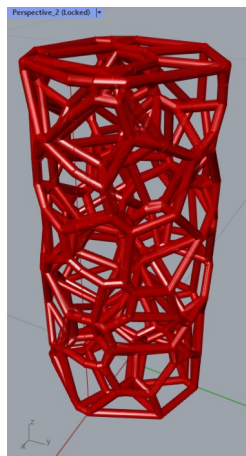
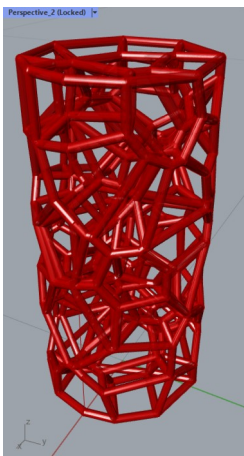
Εικόνα 8\_27: Ψηφιακό δοκίμιο 200-3.



Εικόνα 8\_28: Ψηφιακό δοκίμιο 200-4.

Εικόνα 8\_29: Ψηφιακό δοκίμιο 200-5.

Εικόνα 8\_30: Ψηφιακό δοκίμιο 200-6.

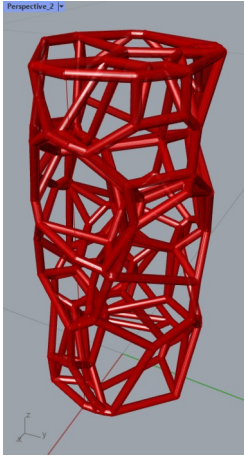


Εικόνα 8\_31: Ψηφιακό δοκίμιο 200-7.

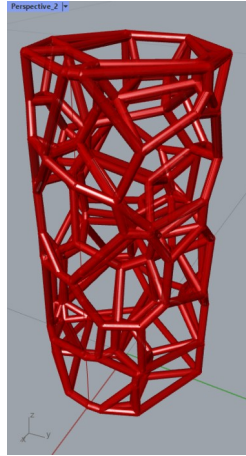
Εικόνα 8\_32: Ψηφιακό δοκίμιο 200-8.

Εικόνα 8\_33: Ψηφιακό δοκίμιο 200-9.

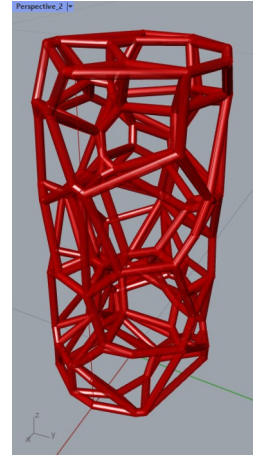
**Οικογένεια 100** – 9 ψηφιακά δοκίμια. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



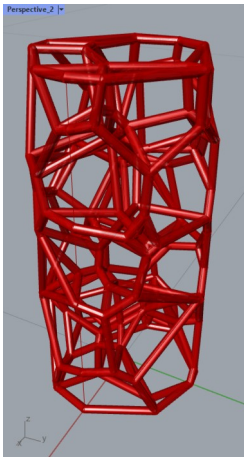
Εικόνα 8\_34: Ψηφιακό δοκίμιο 100-1.



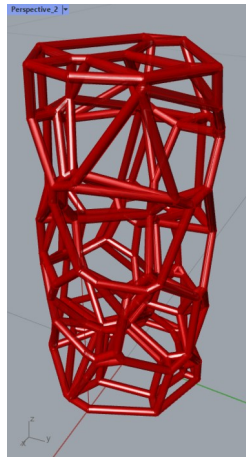
Εικόνα 8\_35: Ψηφιακό δοκίμιο 100-2.



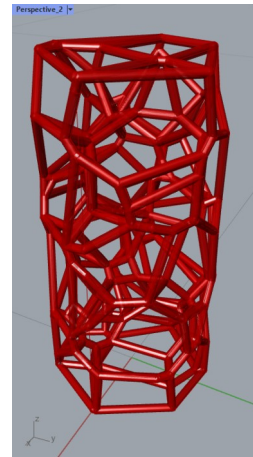
Εικόνα 8\_36: Ψηφιακό δοκίμιο 100-3.



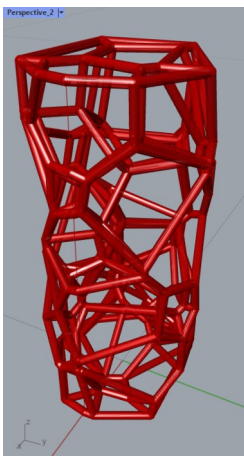
Εικόνα 8\_37: Ψηφιακό δοκίμιο 100-4.



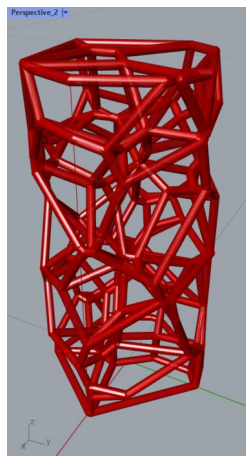
Εικόνα 8\_38: Ψηφιακό δοκίμιο 100-5.



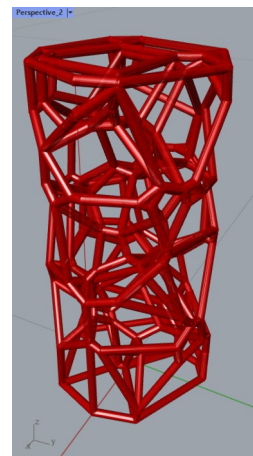
Εικόνα 8\_39: Ψηφιακό δοκίμιο 100-6.



Εικόνα 8\_40: Ψηφιακό δοκίμιο 100-7.

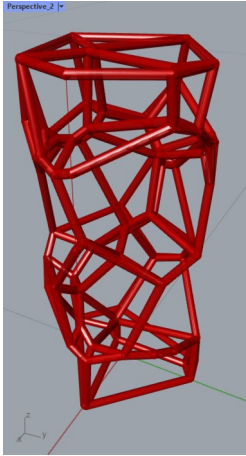


Εικόνα 8\_41: Ψηφιακό δοκίμιο 100-8.

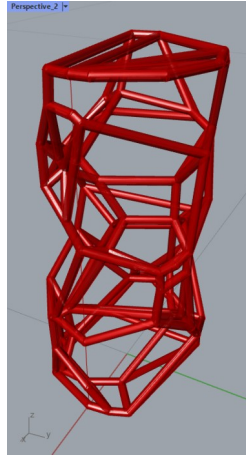


Εικόνα 8\_42: Ψηφιακό δοκίμιο 100-9.

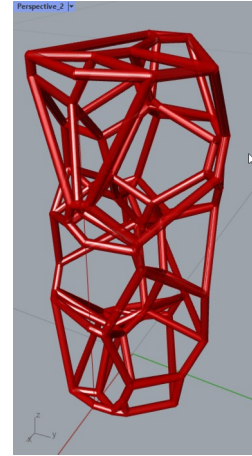
**Οικογένεια 50** – 9 ψηφιακά δοκίμια. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



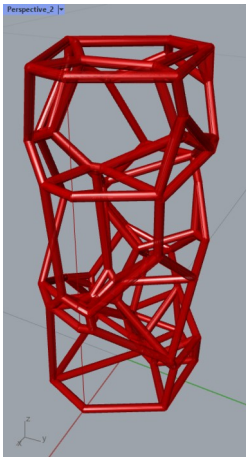
Εικόνα 8\_43: Ψηφιακό δοκίμιο 50-1.



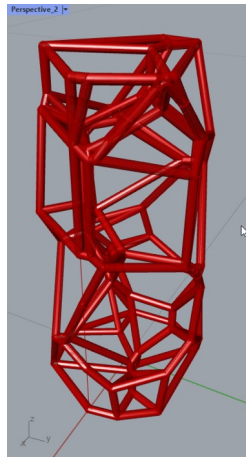
Εικόνα 8\_44: Ψηφιακό δοκίμιο 50-2.



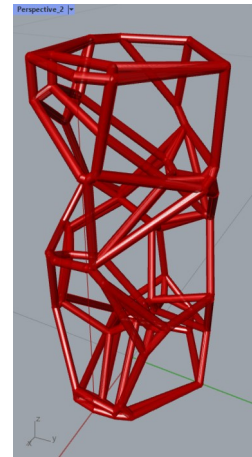
Εικόνα 8\_45: Ψηφιακό δοκίμιο 50-3.



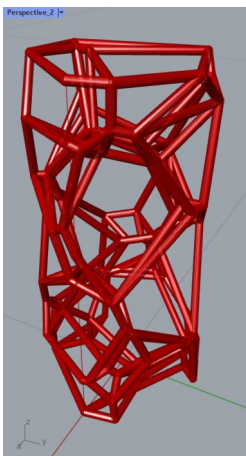
Εικόνα 8\_46: Ψηφιακό δοκίμιο 50-4.



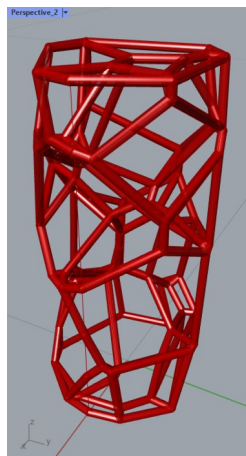
Εικόνα 8\_47: Ψηφιακό δοκίμιο 50-5.



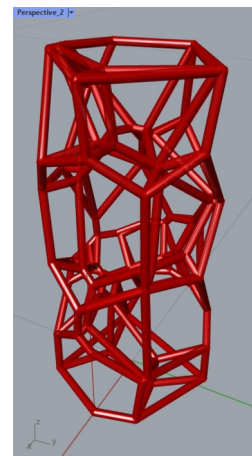
Εικόνα 8\_48: Ψηφιακό δοκίμιο 50-6.



Εικόνα 8\_49: Ψηφιακό δοκίμιο 50-7.

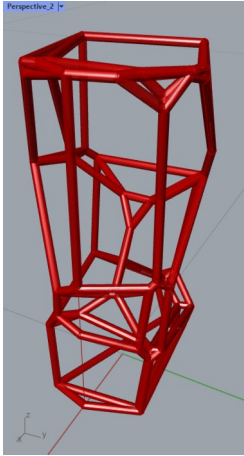


Εικόνα 8\_50: Ψηφιακό δοκίμιο 50-8.

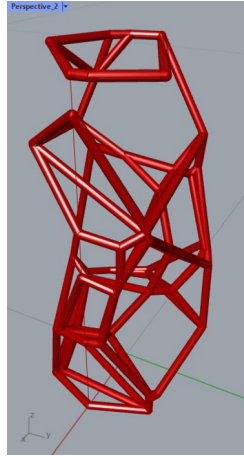


Εικόνα 8\_51: Ψηφιακό δοκίμιο 50-9.

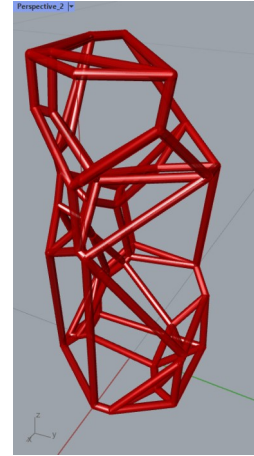
**Οικογένεια 25** – 9 ψηφιακά δοκίμια (η οικογένεια δοκιμών 25 υλοποιήθηκε μόνο ψηφιακά για εποπτικούς λόγους και δεν συμπεριλαμβάνεται στα κύρια δοκίμια). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



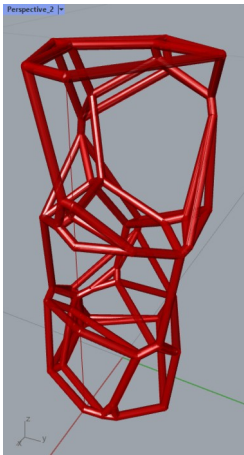
Εικόνα 8\_52: Ψηφιακό δοκίμιο 25-1.



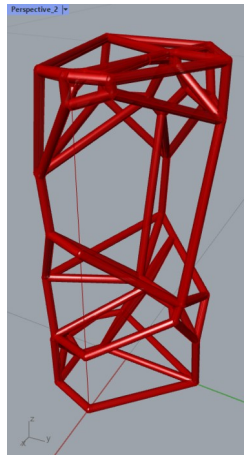
Εικόνα 8\_53: Ψηφιακό δοκίμιο 25-2.



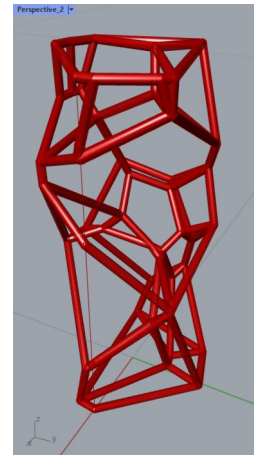
Εικόνα 8\_54: Ψηφιακό δοκίμιο 25-3.



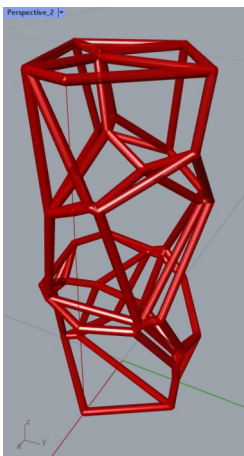
Εικόνα 8\_55: Ψηφιακό δοκίμιο 25-4.



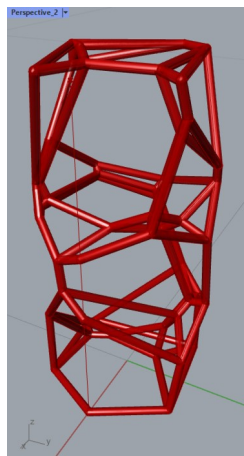
Εικόνα 8\_56: Ψηφιακό δοκίμιο 25-5.



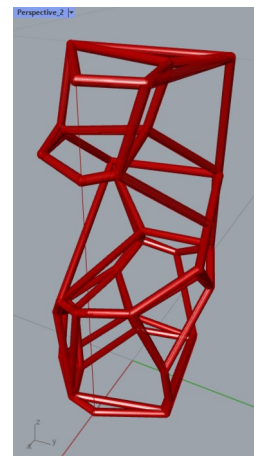
Εικόνα 8\_57: Ψηφιακό δοκίμιο 25-6.



Εικόνα 8\_58: Ψηφιακό δοκίμιο 25-7.



Εικόνα 8\_59: Ψηφιακό δοκίμιο 25-8.



Εικόνα 8\_60: Ψηφιακό δοκίμιο 25-9.



Grasshopper								
A/A	Γενικό σχήμα δοκιμίου	Είδος	Οικογένεια - porulate value	Seed	GH model version	Box position	Αριθμός κόμβων	Αριθμός ράβδων
S1	Κύλινδρος	Συμπαγής	-	-	-	-	-	-
S2	Κύλινδρος	Συμπαγής	-	-	-	-	-	-
S3	Κύλινδρος	Συμπαγής	-	-	-	-	-	-
50-1	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	50	1	0.3	X:0,01 Y:0,00	72	147
50-2	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	50	2	0.3	X:0,01 Y:0,00	76	151
50-3	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	50	3	0.3	X:0,01 Y:0,00	81	165
50-4	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	50	4	0.3	X:0,01 Y:0,00	97	201
50-5	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	50	5	0.3	X:0,00 Y:0,00	81	159
50-6	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	50	6	0.3	X:0,01 Y:0,00	84	167
50-7	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	50	7	0.3	X:0,01 Y:0,00	87	173
50-8	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	50	8	0.3	X:0,01 Y:0,00	83	168
50-9	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	50	9	0.3	X:0,01 Y:0,00	93	186
100-1	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	100	1	0.3	X:0,01 Y:0,00	137	281
100-2	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	100	2	0.3	X:0,01 Y:0,00	139	293
100-3	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	100	3	0.3	X:0,01 Y:0,00	145	307
100-4	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	100	4	0.3	X:0,00 Y:0,00	145	302
100-5	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	100	5	0.3	X:0,00 Y:0,00	137	282
100-6	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	100	6	0.3	X:0,01 Y:0,00	156	318
100-7	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	100	7	0.3	X:0,00 Y:0,00	138	287
100-8	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	100	8	0.3	X:0,01 Y:0,00	156	322
100-9	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	100	9	0.3	X:0,01 Y:0,00	139	287
200-1	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	200	1	0.3	X:0,01 Y:0,00	247	529
200-2	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	200	2	0.3	X:0,01 Y:0,00	248	537
200-3	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	200	3	0.3	X:0,01 Y:0,00	267	566
200-4	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	200	4	0.3	X:0,00 Y:0,00	269	584
200-5	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	200	5	0.3	X:0,00 Y:0,00	253	548
200-6	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	200	6	0.3	X:0,00 Y:0,00	264	568
200-7	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	200	7	0.3	X:0,01 Y:0,00	250	538
200-8	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	200	8	0.3	X:0,01 Y:0,00	269	569
200-9	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	200	9	0.3	X:0,01 Y:0,00	245	523

Πίνακας 8\_1: Συγκεντρωτικός πίνακας περιγραφής συμπαγών και ραβδωτών ψηφιακών δοκιμών για τις οικογένειες 50, 100 και 200 σύμφωνα με τον αλγόριθμο παραγωγής τους από το λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουμιτζόγλου.

Οικογένεια 50									
---------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Seed	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Αριθμός κόμβων	72	76	81	97	81	84	87	83	93
Αριθμός ράβδων	147	151	165	201	159	167	173	168	186
Κόμβοι/Ράβδοι	0,490	0,503	0,491	0,483	0,509	0,503	0,503	0,494	0,500

	min	max	μέσος όρος
Αριθμός κόμβων	72	97	83,778
Αριθμός ράβδων	147	201	168,556
Κόμβοι/Ράβδοι	0,483	0,509	0,497

Πίνακας 8\_2: Στατιστικά στοιχεία για κόμβους και ράβδους για τα ραβδωτά δοκίμια για την οικογένεια 50 σύμφωνα με τον αλγόριθμο παραγωγής τους από το λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Οικογένεια 100									
----------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Seed	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Αριθμός κόμβων	137	139	145	145	137	156	138	156	139
Αριθμός ράβδων	281	293	307	302	282	318	287	322	287
Κόμβοι/Ράβδοι	0,488	0,474	0,472	0,480	0,486	0,491	0,481	0,484	0,484

	min	max	μέσος όρος
Αριθμός κόμβων	137	156	143,556
Αριθμός ράβδων	281	322	297,667
Κόμβοι/Ράβδοι	0,472	0,491	0,482

Πίνακας 8\_3: Στατιστικά στοιχεία για κόμβους και ράβδους για τα ραβδωτά δοκίμια για την οικογένεια 100 σύμφωνα με τον αλγόριθμο παραγωγής τους από το λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Οικογένεια 200									
----------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Seed	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Αριθμός κόμβων	247	248	267	269	253	264	250	269	245
Αριθμός ράβδων	529	537	566	584	548	568	538	569	523
Κόμβοι/Ράβδοι	0,467	0,462	0,472	0,461	0,462	0,465	0,465	0,473	0,468

	min	max	μέσος όρος
Αριθμός κόμβων	245	269	256,889
Αριθμός ράβδων	523	584	551,333
Κόμβοι/Ράβδοι	0,461	0,473	0,466

Πίνακας 8\_4: Στατιστικά στοιχεία για κόμβους και ράβδους για τα ραβδωτά δοκίμια για την οικογένεια 200 σύμφωνα με τον αλγόριθμο παραγωγής τους από το λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

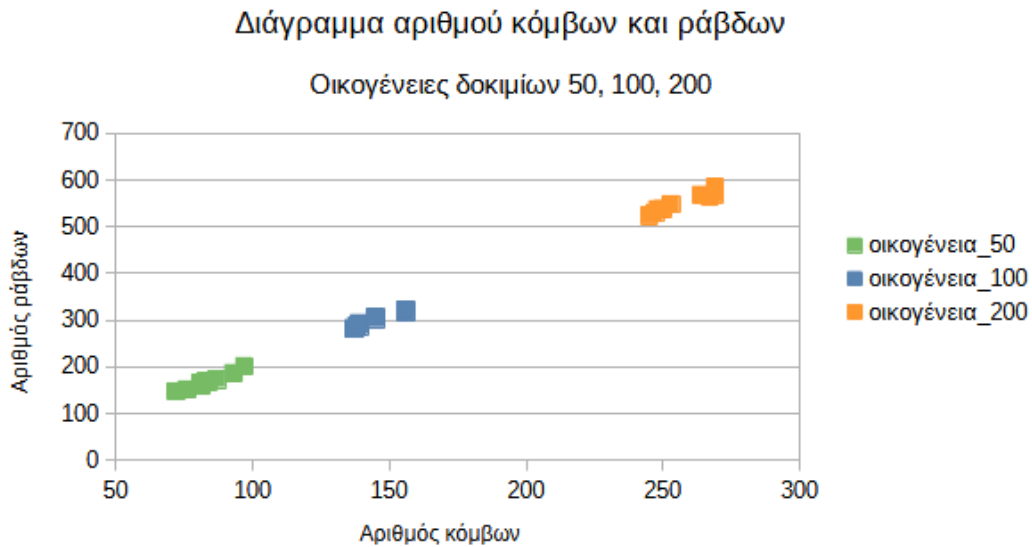
Σύμφωνα με τα στοιχεία των παραπάνω πινάκων παρατηρείται ότι:

Η **οικογένεια 50** έχει για 9 παραλλαγές δοκιμίων με Seeds από 1 έως και 9, ελάχιστο αριθμό κόμβων **72** και μέγιστο αριθμό κόμβων **97**, ελάχιστο αριθμό ράβδων **147** και μέγιστο αριθμό ράβδων **201**. Μέση τιμή αριθμού κόμβων: **83,778**. Μέση τιμή αριθμού ράβδων: **168,556**.

Η **οικογένεια 100** έχει για 9 παραλλαγές δοκιμίων με Seeds από 1 έως και 9, ελάχιστο αριθμό κόμβων **137** και μέγιστο αριθμό κόμβων **156**, ελάχιστο αριθμό ράβδων **281** και μέγιστο αριθμό ράβδων **322**. Μέση τιμή αριθμού κόμβων: **143,556**. Μέση τιμή αριθμού ράβδων: **297,667**.

Η **οικογένεια 200** έχει για 9 παραλλαγές δοκιμίων με Seeds από 1 έως και 9, ελάχιστο αριθμό κόμβων **245** και μέγιστο αριθμό κόμβων **269**, ελάχιστο αριθμό ράβδων **523** και μέγιστο αριθμό ράβδων **584**. Μέση τιμή αριθμού κόμβων: **256,889**. Μέση τιμή αριθμού ράβδων: **551,333**.

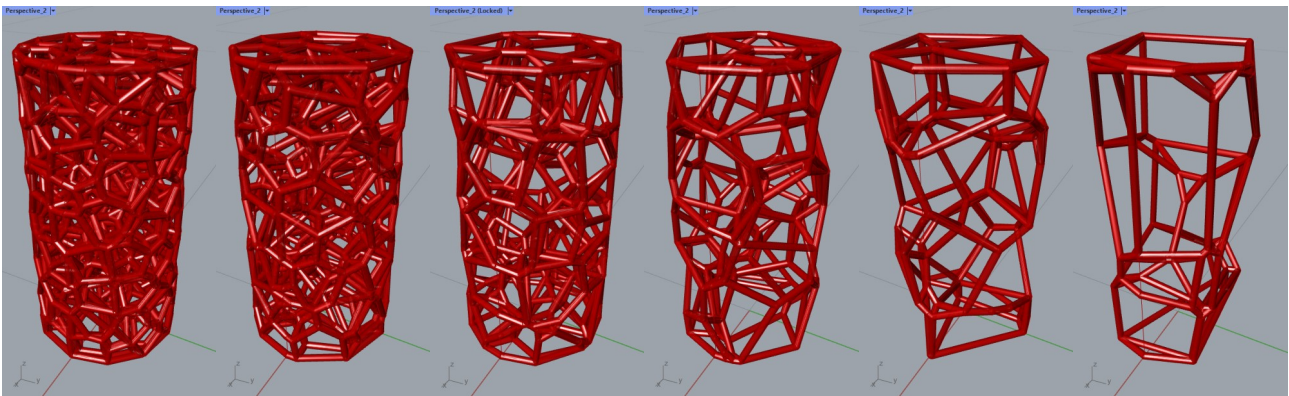
Ο **λόγος του αριθμού κόμβων προς τον αριθμό ράβδων** για το συγκεκριμένο αλγόριθμο είναι σε όλες τις οικογένειες σχεδόν ίδιος και είναι περίπου ίσος με 0.5 (~διπλάσιος αριθμός ράβδων από τον αριθμό κόμβων). Ο λόγος αυτός μειώνεται ανά οικογένεια και για τις οικογένειες 50, 100, 200 είναι **0,497**, **0,482** και **0,466** αντίστοιχα.



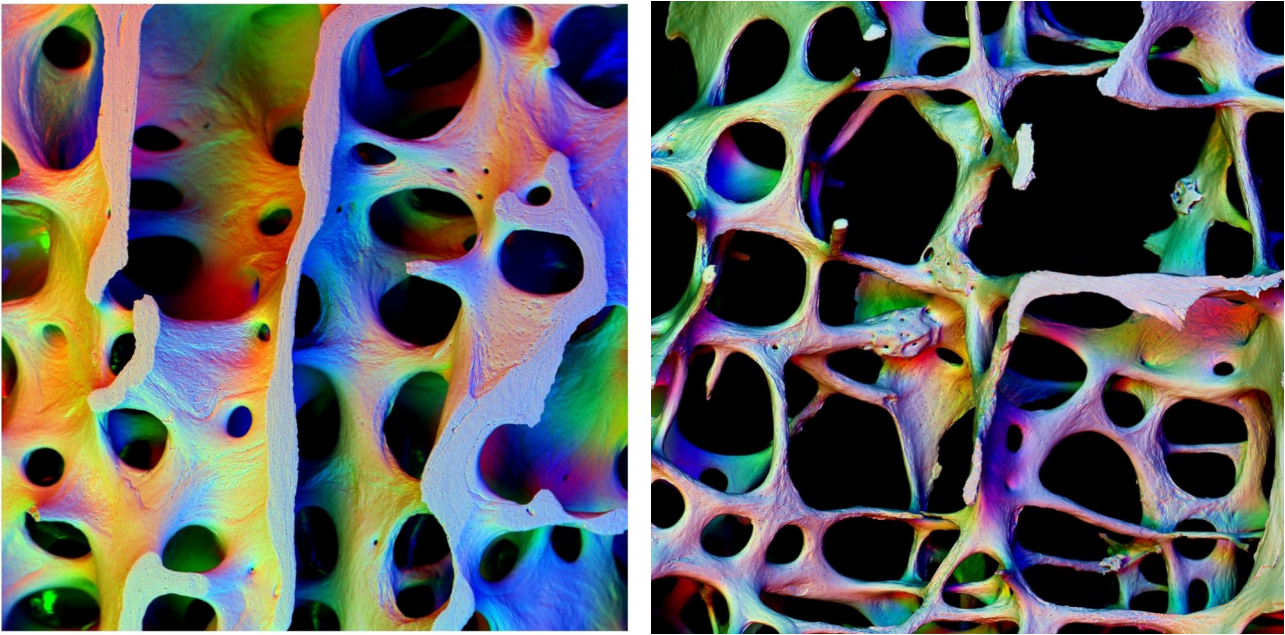
Εικόνα 8\_61: Διάγραμμα αριθμού κόμβων και ράβδων για τις οικογένειες δοκιμίων 50, 100 και 200. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Παρατηρείται μορφολογικά ότι όσο πιο αραιό γίνεται το δίκτυο των ράβδων (μειώνεται η πυκνότητα των ράβδων), δηλαδή τα κελιά της δομής νοσηποι είναι λιγότερα σε πλήθος και μεγαλύτερα σε διαστάσεις, ο ραβδωτός φορέας γίνεται λιγότερο ομοιόμορφος και διαμορφώνεται με περισσότερο ακανόνιστο τρόπο.

Η μεταβολή στην πυκνότητα της δομής θυμίζει τη μεταβολή που υφίστανται τα οστά μετά την απώλεια οστικού υλικού κατά την πάθηση της οστεοπόρωσης. Στην Εικόνα 8\_63 φαίνεται αριστερά σε μικροσκοπική απεικόνιση μια φυσιολογική δομή οστού στην οποία παρατηρείται μια σχετική ομοιομορφία στη δομή και ομοιογενής πυκνότητα, ενώ δεξιά φαίνεται η ακανόνιστη και ανομοιογενής δομή ενός οστού με οστεοπόρωση. Η μεταβολή στην ομοιογένεια και την πυκνότητα του οστού σχετίζεται με την αντοχή του, καθώς μεγαλύτερη ομοιογένεια και πυκνότητα αναλογούν σε μεγαλύτερες αντοχές της οστικής δομής.



Εικόνα 8\_62: Ψηφιακά δοκίμια: Οικογένεια 800 – Seed 1, Οικογένεια 400 – Seed 2, Οικογένεια 200 – Seed 1, Οικογένεια 100 – Seed 1, Οικογένεια 50 – Seed 1, Οικογένεια 25 – Seed 1. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_63: Μικροσκοπική δομή φυσιολογικού οστού (αριστερά) και οστεοπορωμένου οστού (δεξιά). Πηγή: © Alan Boyde, χρήση πρωτότυπων εικόνων κατόπιν αδείας.

Συνεπώς:

Η πυκνότητα της δομής συνδέεται με την ομοιομορφία της κατασκευής με ανάλογο τρόπο. Όσο αυξάνει η πυκνότητα των κελιών (μικραίνει η κλίμακα τους) αυξάνεται η ομοιομορφία της κατασκευής και το αντίστροφο.

Η επιρροή της τυχαιότητας είναι λιγότερο εμφανής στις μεγάλες πυκνότητες (μικρές κλίμακες των κελιών).

Σε όλες τις περιπτώσεις το όριο του κυλίνδρου περιορίζει τη δομή.

Τα όρια γίνονται πιο ευδιάκριτα και ομαλά όσο αυξάνεται η πυκνότητα της κατασκευής, μειώνονται οι διαστάσεις των κελιών και μειώνεται η επιρροή της τυχαιότητας.

Η πυκνή δομή από μικρές κυψέλες μπορεί να προσαρμόζεται καλύτερα σε όρια μορφών στο χώρο.

## 8.6 Παραγωγή φυσικών τρισδιάστατων δοκιμίων

Τα τρισδιάστατα ψηφιακά δοκίμια όπως παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, 3 συμπαγή και 27 ραβδωτά δοκίμια, υλοποιήθηκαν ως **φυσικά δοκίμια** με τη χρήση **3d εκτυπωτή** τα οποία θα καλούνται ως **συμπαγή δοκίμια και ραβδωτά δοκίμια**, σε αντίδιαστολή με τα **ψηφιακά συμπαγή και ραβδωτά δοκίμια**.

Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν τα φυσικά δοκίμια τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμές θλίψης σε κατάλληλη πειραματική διάταξη.

**Συμπαγή δοκίμια:** Κατασκευάστηκαν 3 συμπαγή κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου **d=10cm** και ύψους **h=20cm** με τη χρήση τρισδιάστατου οικιακού εκτυπωτή **FDM (Fused Deposition Modelling)**. Τα συμπαγή δοκίμια κατασκευάστηκαν για να γίνει αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού εκτύπωσης, με βάση τις συγκεκριμένες παραμέτρους της 3d εκτύπωσης και τον συγκεκριμένο

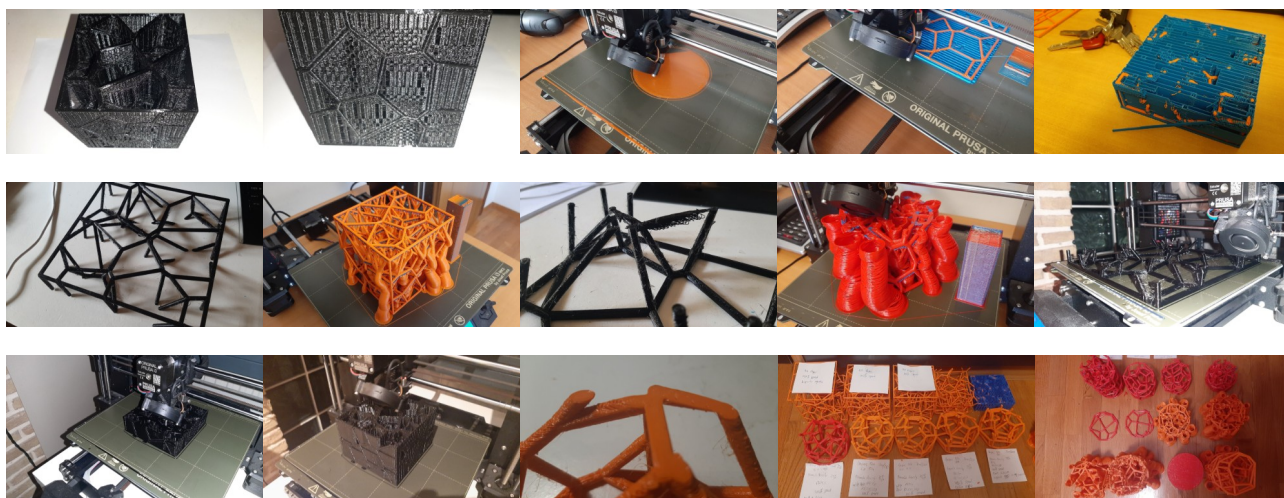
3d εκτυπωτή που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα, και να συγκριθούν με τις τιμές μηχανικών ιδιοτήτων που υπάρχουν για το συγκεκριμένο υλικό στη βιβλιογραφία.

**Ραβδωτά δοκίμια:** Για κάθε μία από τις οικογένειες **200**, **100** και **50** των ψηφιακών δοκιμών κατασκευάστηκαν **9 φυσικά δοκίμια** με τη χρήση τρισδιάστατου οικιακού εκτυπωτή τεχνολογίας **FDM** (Fused Deposition Modelling).

Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο **PRUSA MK3S** με το **MMU2S** upgrade και πρόσθετες βελτιώσεις. Ο ωφέλιμος όγκος εκτύπωσης για το συγκεκριμένο μοντέλο είναι 25×21×21cm και λόγω των περιορισμών των μέγιστων διαστάσεων εκτύπωσης επιλέχθηκε η κατασκευή δοκιμών που εγγράφονται σε κύλινδρο ακτίνας **r=5,25cm** και ύψους **h=20,5cm**.

Ως υλικό κατασκευής για τα φυσικά δοκίμια επιλέχθηκε το πλαστικό πολυμερές **PETG** (polyethylene terephthalate glycol). Το **PETG** είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα υλικά για FDM 3d εκτυπώσεις. Είναι μη τοξικό εύκολα διαχειρίσιμο υλικό, έχει χαμηλό κόστος και εκτυπώνεται σε θερμοκρασίες από ~215-270 °C, ακόμα και από οικιακούς 3d εκτυπωτές. Είναι ιδανικό για παραγωγή μηχανικών εξαρτημάτων, καθώς έχει υψηλότερες αντοχές σε μηχανικές καταπονήσεις και σε σκληρότητα σε σχέση με άλλα είδη πλαστικών (π.χ. PLA), εκτυπώνεται σχετικά εύκολα, δεν δημιουργούνται ιδιαίτερες στρεβλώσεις κατά την εκτύπωση σε σχέση με άλλα υλικά (π.χ. PLA) και είναι ανθεκτικό στην υγρασία.

Πριν την παραγωγή των τελικών δοκιμών πραγματοποιήθηκαν πολλές δοκιμές με διαφορετικά υλικά και μεθόδους κατασκευής και στη συνέχεια, μετά την αξιολόγηση των δοκιμαστικών 3d εκτυπώσεων και τρόπων κατασκευής, επιλέχθηκαν ρυθμίσεις οι οποίες εφαρμόστηκαν στην παραγωγή όλων των δοκιμών του πειράματος εφαρμογής.



Εικόνα 8\_64: Φωτογραφίες από τους πειραματισμούς για τις δοκιμαστικές 3d εκτυπώσεις για την επιλογή των κατάλληλων ρυθμίσεων και τρόπων εκτύπωσης για τα τελικά δοκίμια. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

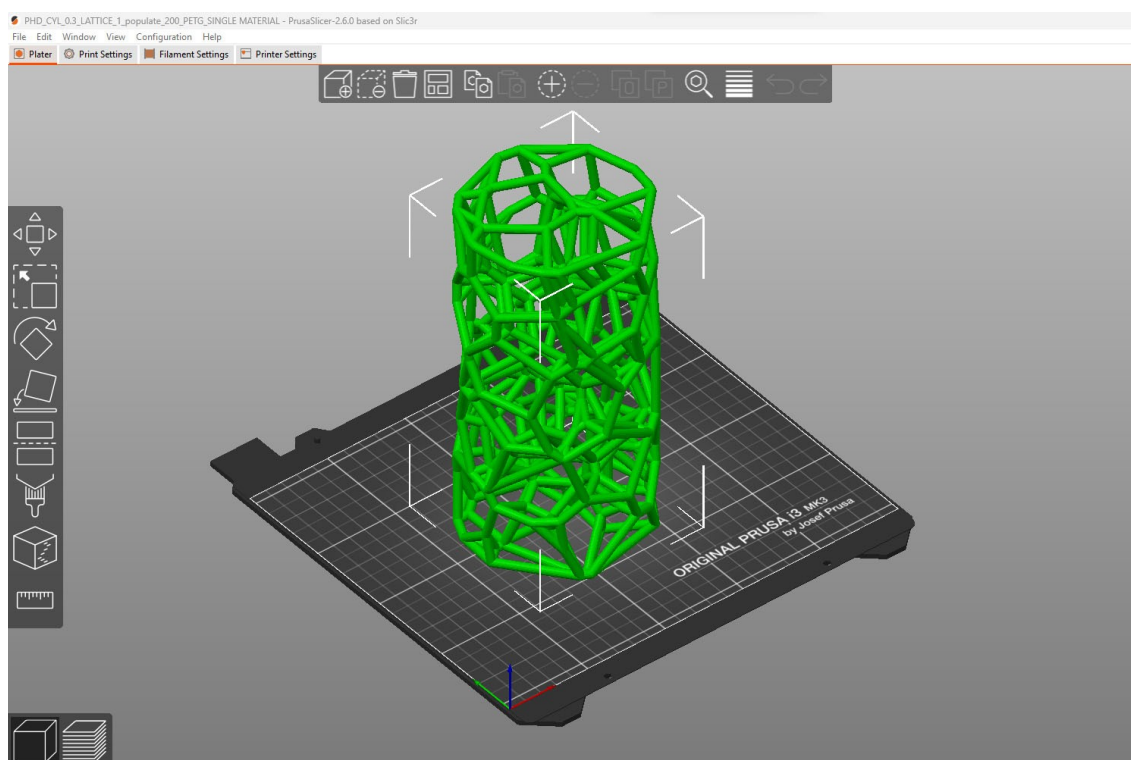
Για όλα τα φυσικά δοκίμια με ραβδωτό φορέα χρησιμοποιήθηκε το ίδιο υλικό, ίδιου χρώματος (**PETG πορτοκαλί**) από τον ίδιο προμηθευτή, ο ίδιος 3d εκτυπωτής με τις ίδιες ρυθμίσεις και την ίδια βαθμονόμηση για λόγους ομοιοτυπίας. Και τα τρία συμπαγή δοκίμια εκτυπώθηκαν από τον ίδιο 3d εκτυπωτή, με τις ίδιες ρυθμίσεις με τα δοκίμια ράβδων, εκτός από την ταχύτητα εκτύπωσης, η οποία αυξήθηκε στο 175% της κανονικής ταχύτητας. Στα δύο συμπαγή δοκίμια χρησιμοποιήθηκε υλικό από τον ίδιο προμηθευτή και ίδιου χρώματος με τα ραβδωτά δοκίμια (**PETG πορτοκαλί**), ενώ ένα από τα

συμπαγή δοκίμια κατασκευάστηκε από **PETG** από τον ίδιο προμηθευτή, αλλά διαφορετικού χρώματος (**PETG κόκκινο**).

Για τη μετατροπή των 3d αρχείων που δημιουργήθηκαν από το λογισμικό grasshopper σε κώδικα 3d εκτύπωσης G-code, χρησιμοποιήθηκε το δωρεάν και open source λογισμικό **PrusaSlicer** <sup>464</sup>.

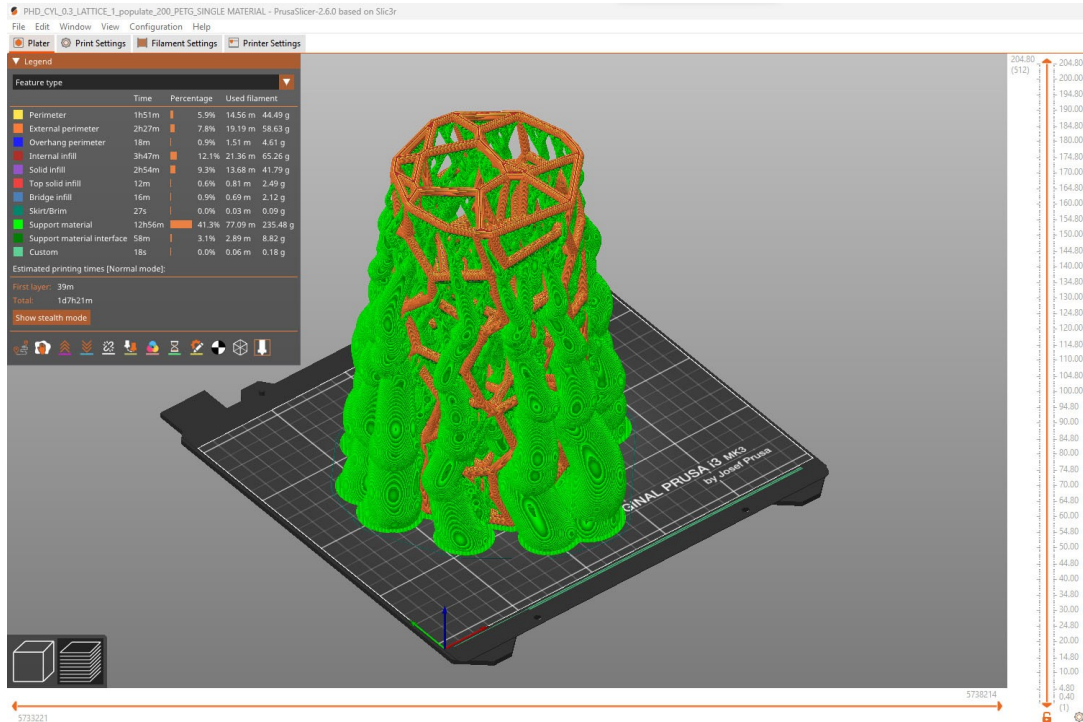
Το λογισμικό **PrusaSlicer** χρησιμοποιείται για να μετατραπεί το ψηφιακό αρχείο ενός τρισδιάστατου μοντέλου ενός αντικειμένου σε οδηγίες εκτύπωσης για τον 3d εκτυπωτή (G-code), σύμφωνα με συγκεκριμένες ρυθμίσεις που αφορούν σε ταχύτητα, θερμοκρασία, πάχη στρώσεων και πάχη εκτυπώσεων, πυκνότητα, υποστηρίξεις, υλικά, κ.λπ.

Για την κατασκευή των ραβδωτών δοκιμίων επιλέχθηκε η χρήση ικριωμάτων τύπου **organic supports**, τα οποία αφαιρούνται χειρωνακτικά με μηχανικό τρόπο μετά την ολοκλήρωση της 3d εκτύπωσης. Τα ικριώματα ήταν απαραίτητα για την όσο δυνατόν ομοιόμορφη κατασκευή των ράβδων συνολικά και ειδικότερα εκείνων με μεγάλη απόκλιση από την οριζόντιο, καθώς οι 3d εκτυπωτές δεν μπορούν να εκτυπώνουν με επάρκεια τμήματα μοντέλων με οριζόντια ή στοιχεία υπό έντονη κλίση ως προβόλους και χωρίς υποστήριξη.

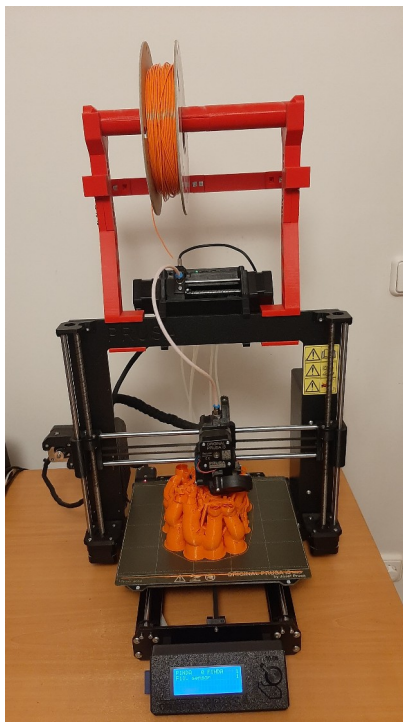


Εικόνα 8\_65: 3d ψηφιακό δοκίμιο στο λογισμικό PrusaSlicer. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

464 [https://www.prusa3d.com/page/prusaslicer\\_424/](https://www.prusa3d.com/page/prusaslicer_424/)



Εικόνα 8\_66: 3d ψηφιακό ραβδωτό δοκίμιο στο λογισμικό PrusaSlicer μετά τη δημιουργία οργανικών υποστηρίξεων, έτοιμο για εξαγωγή κώδικα 3d εκτύπωσης G-code για να χρησιμοποιηθεί από τον 3d εκτυπωτή ως οδηγία εκτύπωσης. Πηγή: Τ. Κουμτζόγλου.



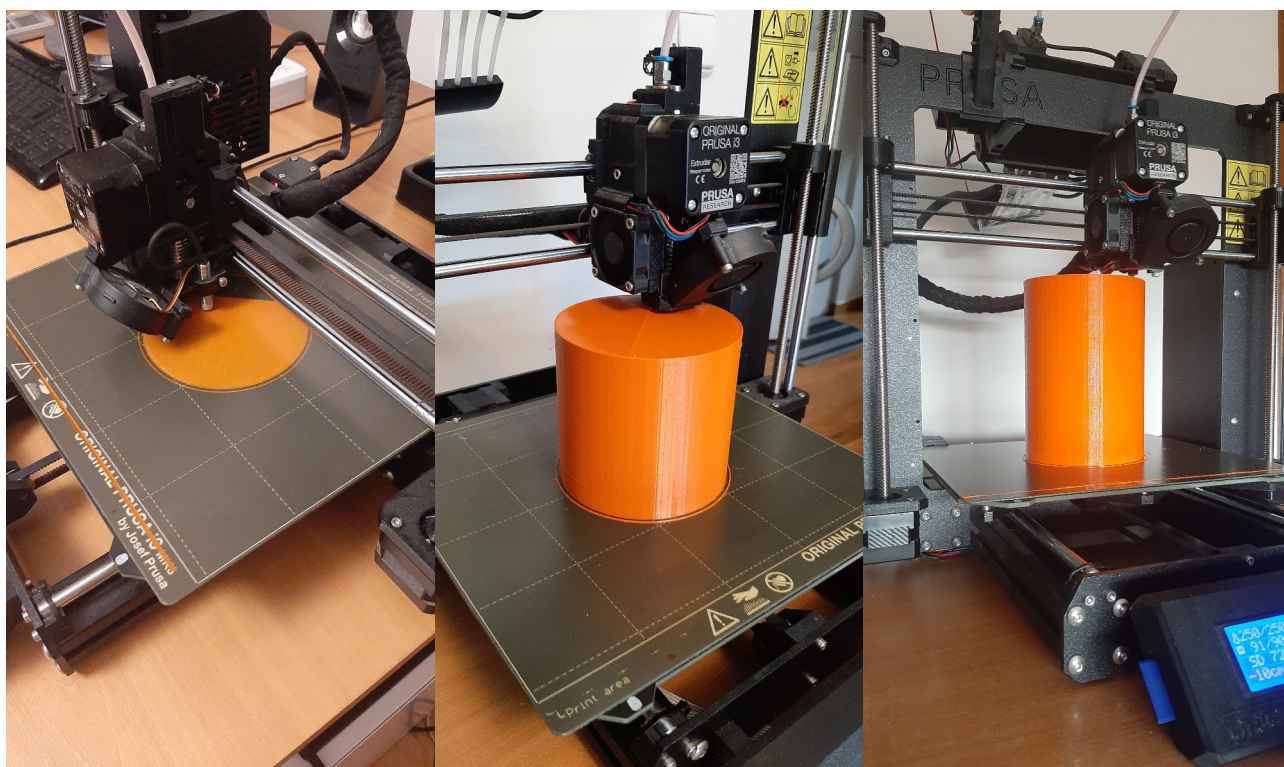
Εικόνα 8\_67: 3d εκτυπωτής PRUSA MK3S με MMU2S upgrade κατά τη διαδικασία εκτύπωσης φυσικού ραβδωτού upgrade μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκτύπωσης δοκιμίου από Πορτοκαλί PETG με οργανικές υποστηρίξεις. Πηγή: Τ. Κουμτζόγλου.



Εικόνα 8\_68: 3d εκτυπωτής PRUSA MK3S με MMU2S ραβδωτού δοκιμίου από Πορτοκαλί PETG πριν την αφαίρεση των ικριωμάτων τύπου organic supports. Πηγή: Τ. Κουμτζόγλου.

Επισημαίνεται επίσης ότι οι διαφορετικές παρτίδες αναλώσιμων, οι διαφορές στη θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια των εκτυπώσεων, οι χρόνοι αποθήκευσης των δοκιμών μέχρι την ολοκλήρωση των πειραμάτων και η πιθανή απορρόφηση υγρασίας, πιθανά μικρά ελαττώματα ή κατασκευαστικές διαφοροποιήσεις κατά τη διαδικασία κατασκευής των φυσικών δοκιμών ή μικρές ατέλειες που μπορεί να προέκυψαν από την αφαίρεση των κατασκευαστικών υποστηριγμάτων (organic supports), οι διαφορές στη θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια των δοκιμών αντοχής σε θλίψη, κ.λπ. ενδέχεται να έχουν δημιουργήσει μικρές αποκλίσεις στα μηχανικά χαρακτηριστικά των δοκιμών.

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται συμπαγή δοκίμια (Εικόνα 8\_69) και ραβδωτά δοκίμια (Εικόνα 8\_72) σε διάφορα στάδια της διαδικασίας κατασκευής τους με τη χρήση 3d εκτυπωτή.

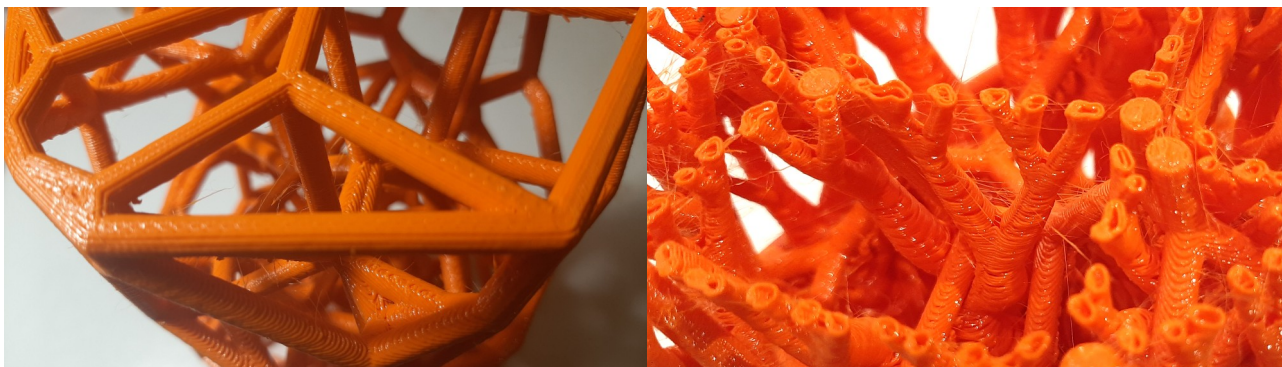


Εικόνα 8\_69: Συμπαγές δοκίμιο από πορτοκαλί PETG σε διάφορα στάδια της διαδικασίας κατασκευής του. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Στην Εικόνα 8\_70 φαίνεται σε μεγέθυνση περιοχή της στέψης ραβδωτού δοκιμίου. Διακρίνεται το οριζόντιο επίπεδο της στέψης καθώς και ράβδοι και κόμβοι του δοκιμίου. Παρατηρείται ότι η διάταξη ράβδων και κόμβων είναι μη συμμετρική, ενώ σε κάθε κόμβο καταλήγει διαφορετικός αριθμός ράβδων από διαφορετικές διευθύνσεις.

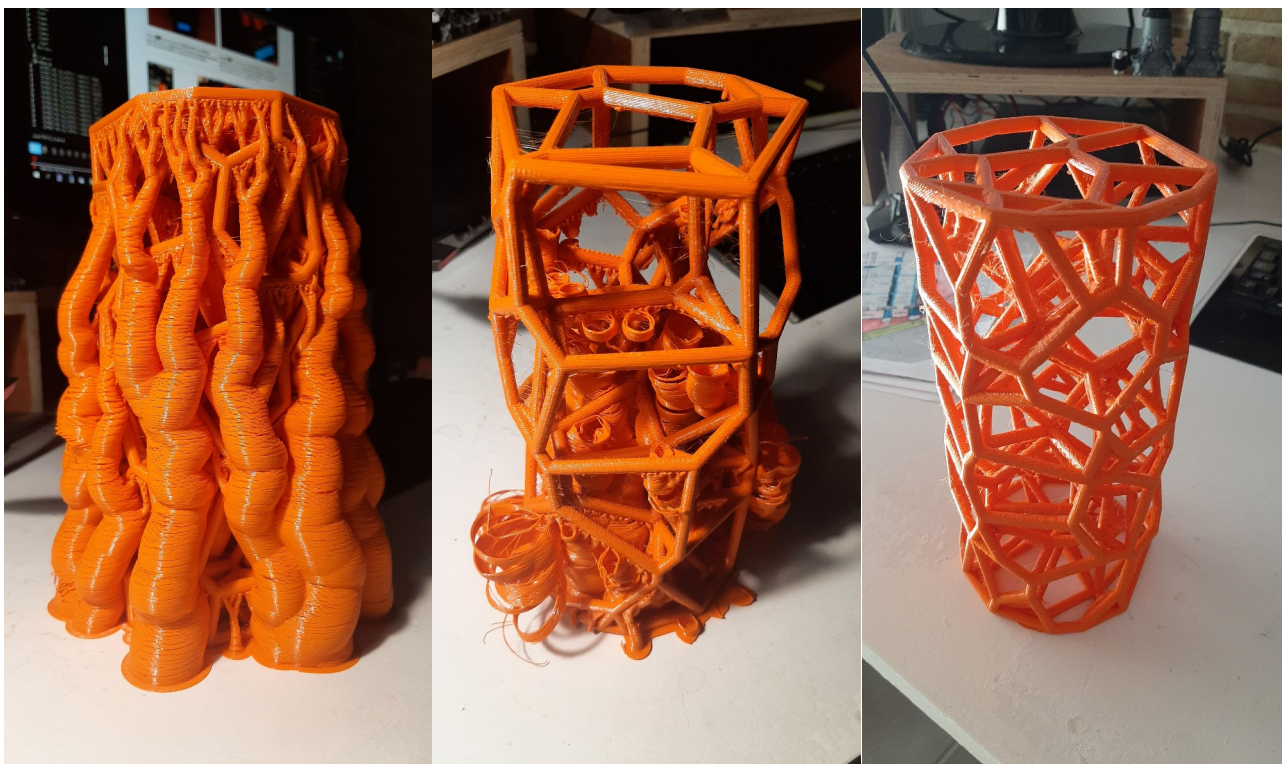
Στην Εικόνα 8\_71 παρουσιάζεται σε μεγέθυνση περιοχή ραβδωτού δοκιμίου κατά τη φάση της κατασκευής του. Διακρίνονται σε οριζόντια τομή τα ικριώματα υποστήριξης, καθώς και οι ράβδοι του δοκιμίου. Διακρίνεται επίσης το κυρίως γέμισμα της 3d εκτύπωσης (infill), η κατασκευή και οι εξωτερικές περιμέτροι των στοιχείων. Παρατηρείται ότι η περιοχή του infill μακροσκοπικά παρουσιάζεται λεία και σχετικά ομοιογενής.





Εικόνα 8\_70: Φυσικό ραβδωτό δοκίμιο. Μεγέθυνση σε κόμβους και ράβδους. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Εικόνα 8\_71: Ραβδωτό δοκίμιο κατά τη διαδικασία παραγωγής του. Μεγέθυνση σε περιοχή κόμβων και ράβδων όπου διακρίνεται το γέμισμα της 3d εκτύπωσης (infill), η κατασκευή των ικριωμάτων και οι εξωτερικές περιμετροί των στοιχείων. Παρατηρείται ότι η περιοχή του infill μακροσκοπικά παρουσιάζεται λεία και σχετικά ομοιογενής. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_72: Ραβδωτά δοκίμια από πορτοκαλί PETG σε διάφορα στάδια της διαδικασίας κατασκευής τους. α. Ολοκληρωμένο δοκίμιο με ικριώματα υποστήριξης. β. Ραβδωτό δοκίμιο κατά την αφαίρεση των ικριωμάτων και γ. Καθαρισμένο ραβδωτό δοκίμιο. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Τέλος, στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι κύριες ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τις 3d εκτυπώσεις τόσο των συμπαγών όσο και των ραβδωτών δοκιμών, οι οποίες είναι κοινές.

<b>Τεχνική 3d εκτύπωσης</b>	FDM - Fused Deposition Modelling
<b>3d Printer</b>	Prusa MK3S + MMU2 upgrade
<b>Υλικό</b>	PETG (polyethylene terephthalate glycol)
<b>Διάμετρος νήματος</b>	1.75mm
<b>Θερμοκρασίες εκτύπωσης</b>	Nozzle: 240°C για την πρώτη στρώση Nozzle: 250°C για τις υπόλοιπες στρώσεις Bed: 85°C για την πρώτη στρώση Bed: 90°C για τις υπόλοιπες στρώσεις
<b>Πάχος στρώσεων εκτύπωσης</b>	Πρώτη στρώση: 0.4mm Υπόλοιπες στρώσεις: 0.4mm
<b>Περίμετροι</b>	2
<b>Πυκνότητα πλήρωσης</b>	100%
<b>Υποστηρίξεις</b>	Παντού, organic supports

Πίνακας 8\_5: Κύριες ρυθμίσεις για τις 3d εκτυπώσεις. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλα τα κύρια δοκίμια των πειραμάτων πληροφορίες για τις 3d εκτυπώσεις τους.

3d printing – A								
A/A	Γενικό σχήμα δοκιμίου	Είδος	Υλικό	Χρώμα	Μέγιστη διάμετρος (cm) (αξονικά στα πλέγματα)	Ύψος (cm) (αξονικά στα πλέγματα)	Διάμετρος ράβδου στο πλέγμα (mm)	Ταχύτητα εκτύπωσης %
S1	Κύλινδρος	Συμπαγής	PETG	Κόκκινο	10	20	-	175
S2	Κύλινδρος	Συμπαγής	PETG	Πορτοκαλί	10	20	-	175
S3	Κύλινδρος	Συμπαγής	PETG	Πορτοκαλί	10	20	-	175
50-1	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
50-2	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
50-3	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
50-4	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
50-5	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
50-6	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
50-7	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
50-8	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
50-9	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
100-1	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
100-2	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
100-3	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
100-4	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
100-5	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
100-6	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
100-7	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
100-8	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
100-9	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
200-1	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
200-2	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
200-3	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
200-4	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
200-5	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
200-6	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
200-7	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
200-8	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100
200-9	Κύλινδρος	Ραβδ.Φορέας	PETG	Πορτοκαλί	10	20	5	100

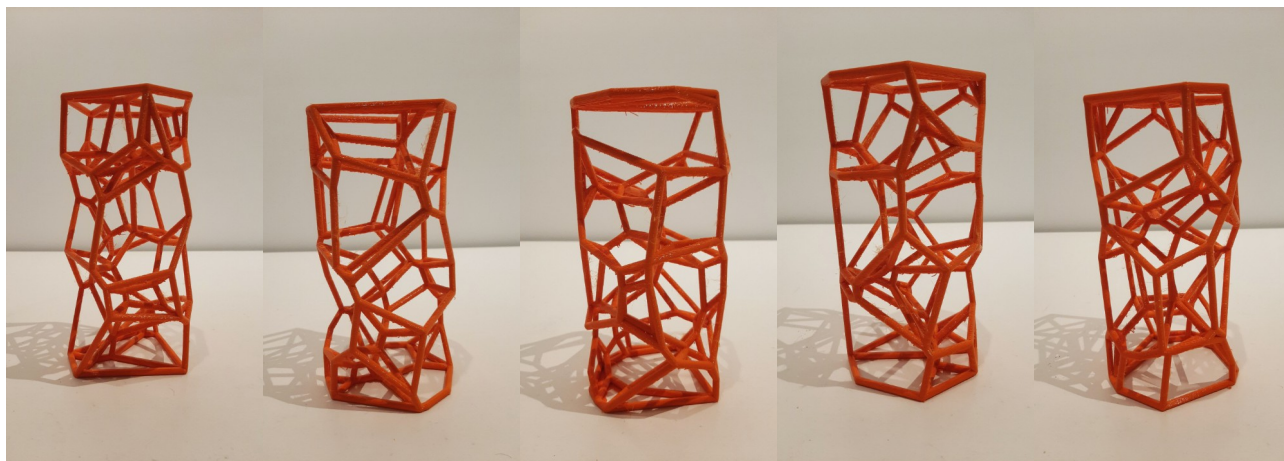
Πίνακας 8\_6: Συγκεντρωτικός πίνακας A περιγραφής δεδομένων 3d εκτυπώσεων για τα κύρια δοκίμια. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Οι χρόνοι κατασκευής των δοκιμίων, οι θερμοκρασίες, το αναλωθέν υλικό, ο όγκος του κάθε δοκιμίου και η πυκνότητα του εκτυπωμένου υλικού παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα που ακολουθεί.

3d printing – B							
A/A	Θερμοκρασία εκτύπωσης	Χρόνος εκτύπωσης σε 100% ταχύτητα – δοκίμιο και υποστηρίξεις	Πάχος στρώσης εκτύπωσης (mm)	Δοκίμιο: m – μάζα (gr)	Δοκίμιο: V – όγκος (mm <sup>3</sup> )	Δοκίμιο: V – Όγκος (cm <sup>3</sup> )	Δοκίμιο: Πυκνότητα $\gamma=m/V$ (gr/cm <sup>3</sup> )
S1	240°C-250°C	56h47m	0,4	<b>1987,13</b>	1570155,12	<b>1570,15512</b>	1,266
S2	240°C-250°C	56h47m	0,4	<b>1987,13</b>	1570155,12	<b>1570,15512</b>	1,266
S3	240°C-250°C	56h47m	0,4	<b>1987,13</b>	1570155,12	<b>1570,15512</b>	1,266
50-1	240°C-250°C	15h38m	0,4	<b>102,26</b>	82324,66	<b>82,32466</b>	1,242
50-2	240°C-250°C	16h24m	0,4	<b>103,59</b>	83291,62	<b>83,29162</b>	1,244
50-3	240°C-250°C	17h14m	0,4	<b>115,94</b>	93382,93	<b>93,38293</b>	1,242
50-4	240°C-250°C	18h31m	0,4	<b>126,46</b>	101675,56	<b>101,67556</b>	1,244
50-5	240°C-250°C	15h59m	0,4	<b>102,98</b>	82773,19	<b>82,77319</b>	1,244
50-6	240°C-250°C	16h55m	0,4	<b>111,18</b>	89307,46	<b>89,30746</b>	1,245
50-7	240°C-250°C	16h51m	0,4	<b>109,77</b>	88113,34	<b>88,11334</b>	1,246
50-8	240°C-250°C	16h23m	0,4	<b>108,4</b>	87143,84	<b>87,14384</b>	1,244
50-9	240°C-250°C	17h21m	0,4	<b>113,53</b>	91460,64	<b>91,46064</b>	1,241
100-1	240°C-250°C	22h50m	0,4	<b>148,99</b>	119778,15	<b>119,77815</b>	1,244
100-2	240°C-250°C	22h9m	0,4	<b>153,86</b>	123723,15	<b>123,72315</b>	1,244
100-3	240°C-250°C	23h46m	0,4	<b>158,3</b>	127363,2	<b>127,3632</b>	1,243
100-4	240°C-250°C	23h41m	0,4	<b>159,57</b>	128281,93	<b>128,28193</b>	1,244
100-5	240°C-250°C	22h56m	0,4	<b>150,92</b>	121398,41	<b>121,39841</b>	1,243
100-6	240°C-250°C	24h0m	0,4	<b>160,68</b>	129178,61	<b>129,17861</b>	1,244
100-7	240°C-250°C	22h25m	0,4	<b>152,2</b>	122395,27	<b>122,39527</b>	1,244
100-8	240°C-250°C	23h47m	0,4	<b>160,68</b>	129178,61	<b>129,17861</b>	1,244
100-9	240°C-250°C	23h5m	0,4	<b>153,05</b>	123171,23	<b>123,17123</b>	1,243
200-1	240°C-250°C	31h26m	0,4	<b>219,62</b>	176691,25	<b>176,69125</b>	1,243
200-2	240°C-250°C	32h17m	0,4	<b>223,88</b>	180021,09	<b>180,02109</b>	1,244
200-3	240°C-250°C	32h35m	0,4	<b>231,15</b>	185937,92	<b>185,93792</b>	1,243
200-4	240°C-250°C	32h46m	0,4	<b>234,87</b>	188876,92	<b>188,87692</b>	1,244
200-5	240°C-250°C	31h55m	0,4	<b>222,92</b>	179338,38	<b>179,33838</b>	1,243
200-6	240°C-250°C	31h51m	0,4	<b>226,89</b>	182385,39	<b>182,38539</b>	1,244
200-7	240°C-250°C	31h45m	0,4	<b>224,68</b>	180634,42	<b>180,63442</b>	1,244
200-8	240°C-250°C	32h4m	0,4	<b>224,48</b>	180625	<b>180,625</b>	1,243
200-9	240°C-250°C	31h39m	0,4	<b>220,36</b>	177343,52	<b>177,34352</b>	1,243

Πίνακας 8\_7: Συγκεντρωτικός πίνακας B περιγραφής δεδομένων 3d εκτυπώσεων για τα κύρια δοκίμια. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται ενδεικτικά τα δοκίμια με Seed 5, 6, 7, 8 και 9 για όλες τις οικογένειες (50, 100, 200) σε όψεις, κατόψεις στέψεων και κατόψεις βάσεων.



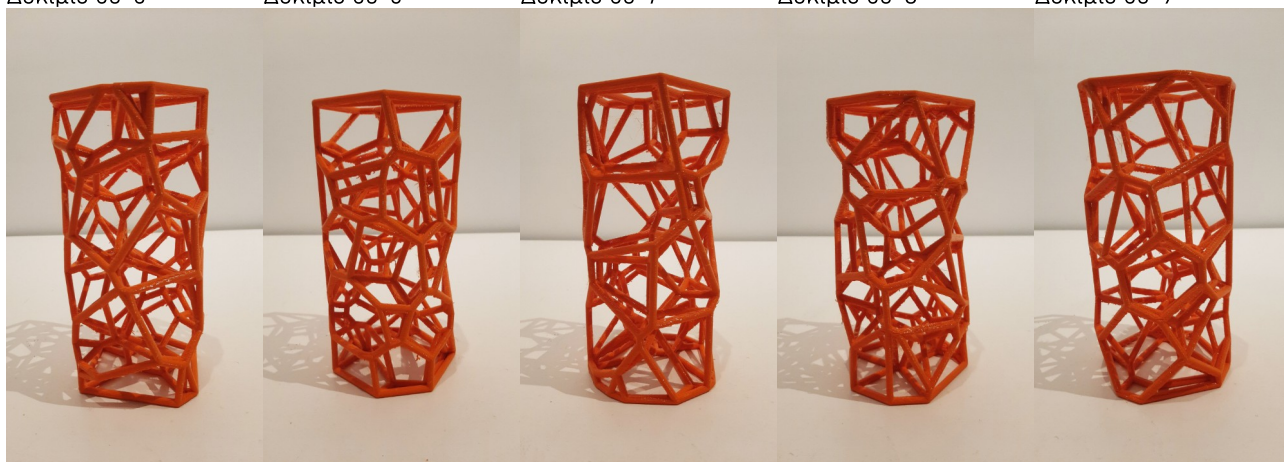
Δοκίμιο 50-5

Δοκίμιο 50-6

Δοκίμιο 50-7

Δοκίμιο 50-8

Δοκίμιο 50-9



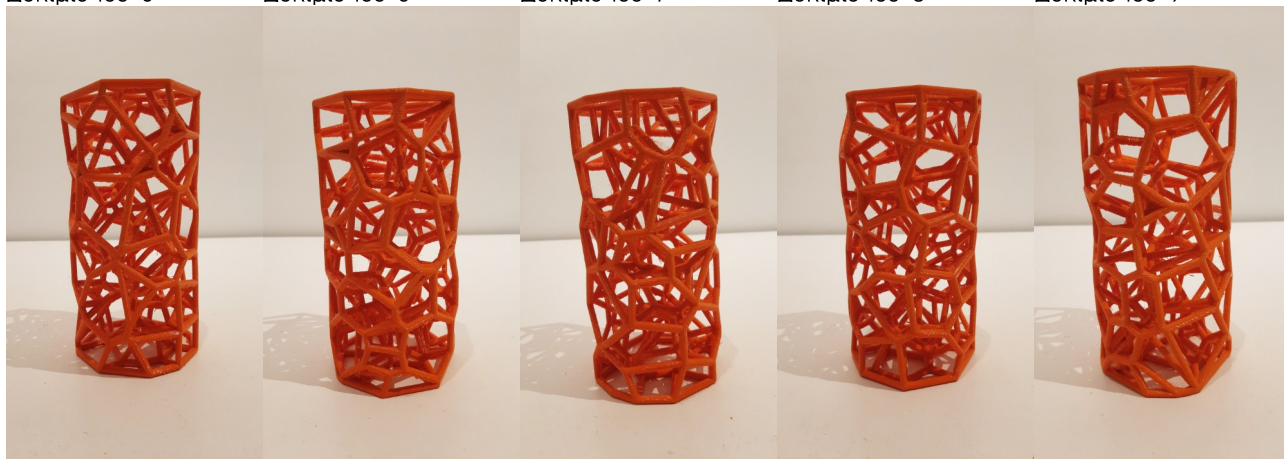
Δοκίμιο 100-5

Δοκίμιο 100-6

Δοκίμιο 100-7

Δοκίμιο 100-8

Δοκίμιο 100-9



Δοκίμιο 200-5

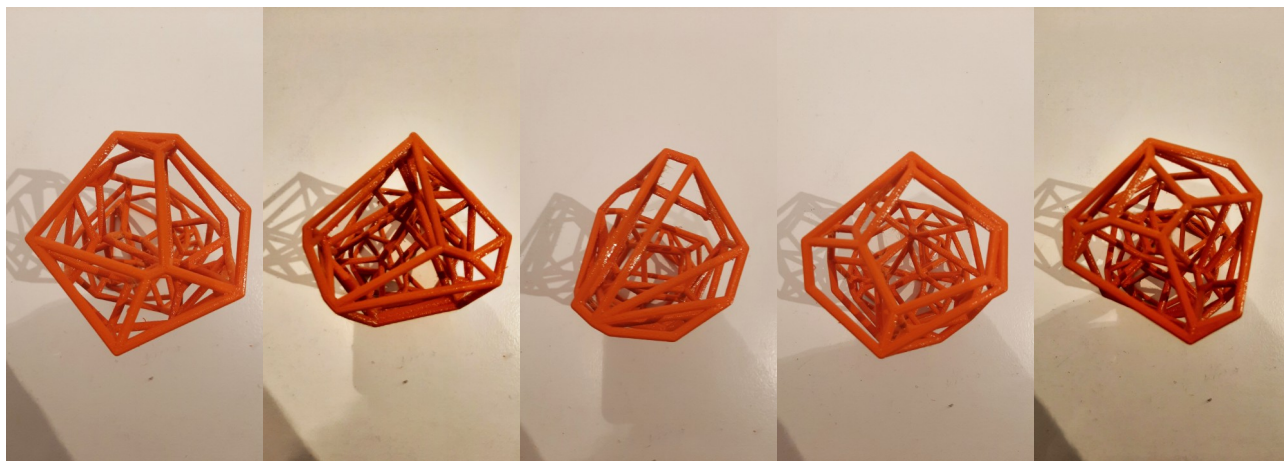
Δοκίμιο 200-6

Δοκίμιο 200-7

Δοκίμιο 200-8

Δοκίμιο 200-9

Εικόνα 8\_73: Τρίτη ομάδα κύριων δοκιμίων μετά την αφαίρεση των υποστηρίξεων. ΟΨΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



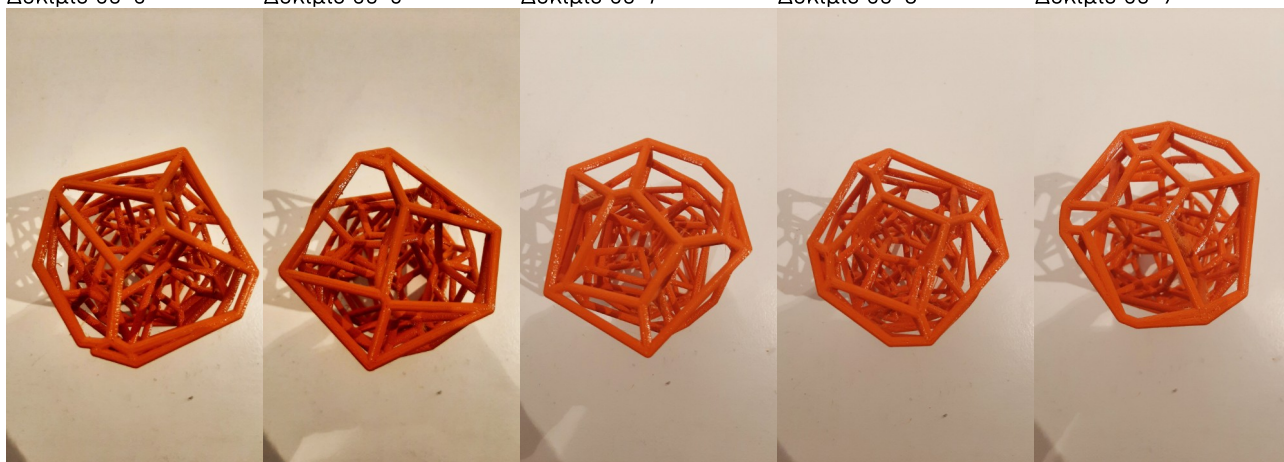
Δοκίμιο 50-5

Δοκίμιο 50-6

Δοκίμιο 50-7

Δοκίμιο 50-8

Δοκίμιο 50-9



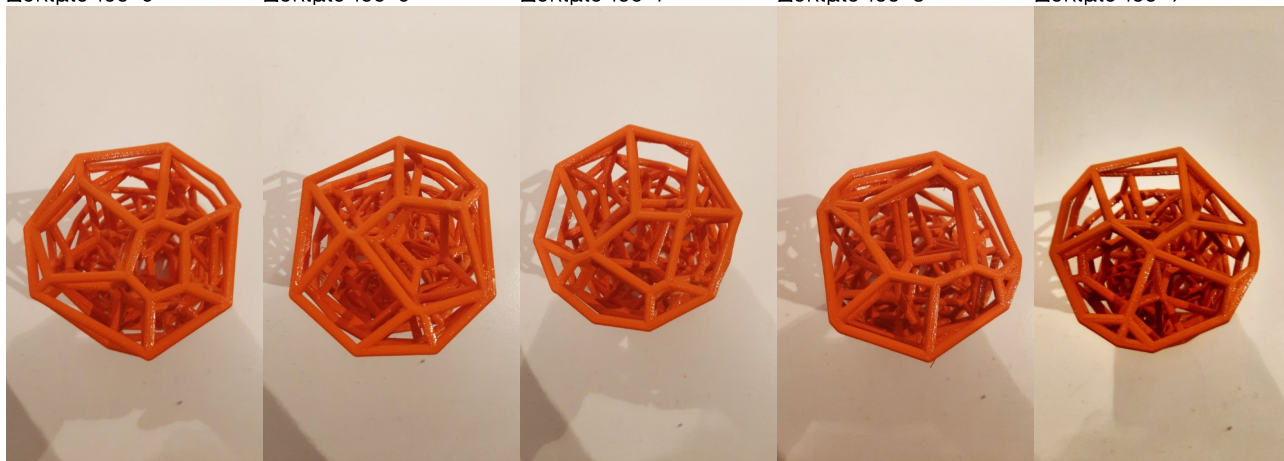
Δοκίμιο 100-5

Δοκίμιο 100-6

Δοκίμιο 100-7

Δοκίμιο 100-8

Δοκίμιο 100-9



Δοκίμιο 200-5

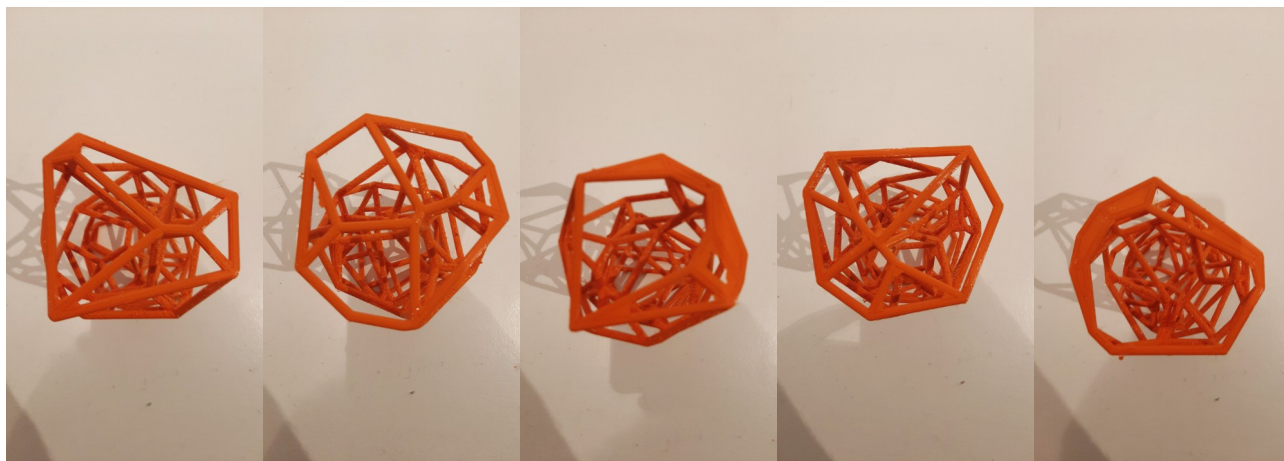
Δοκίμιο 200-6

Δοκίμιο 200-7

Δοκίμιο 200-8

Δοκίμιο 200-9

Εικόνα 8\_74: Τρίτη ομάδα κύριων δοκιμίων μετά την αφαίρεση των υποστηρίξεων. ΣΤΕΨΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



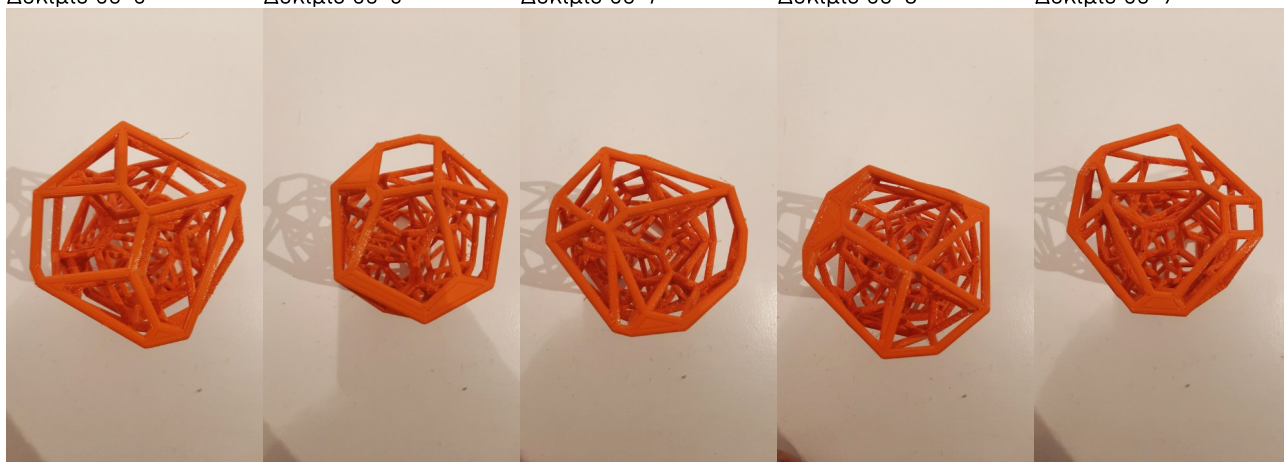
Δοκίμιο 50-5

Δοκίμιο 50-6

Δοκίμιο 50-7

Δοκίμιο 50-8

Δοκίμιο 50-9



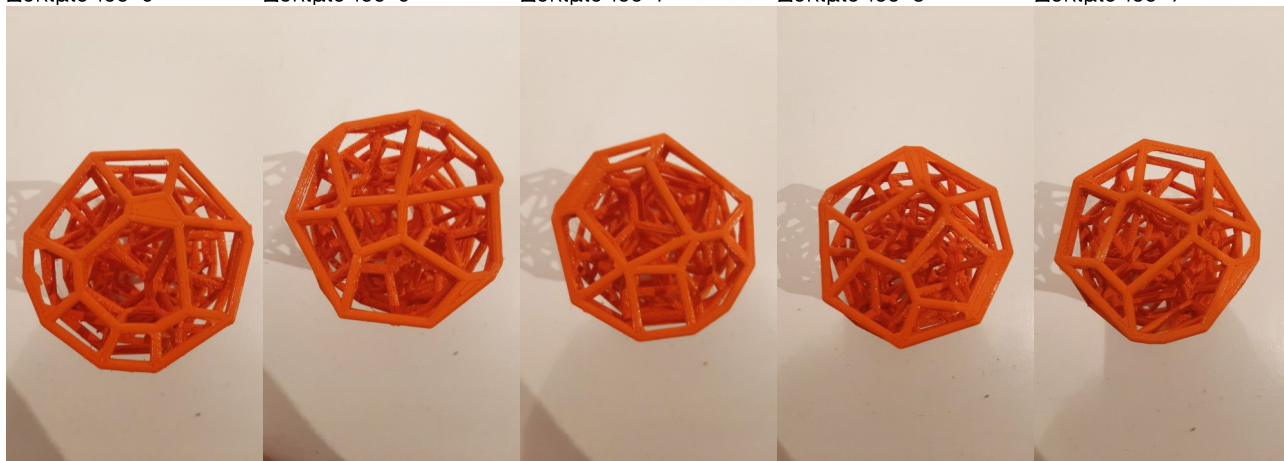
Δοκίμιο 100-5

Δοκίμιο 100-6

Δοκίμιο 100-7

Δοκίμιο 100-8

Δοκίμιο 100-9



Δοκίμιο 200-5

Δοκίμιο 200-6

Δοκίμιο 200-7

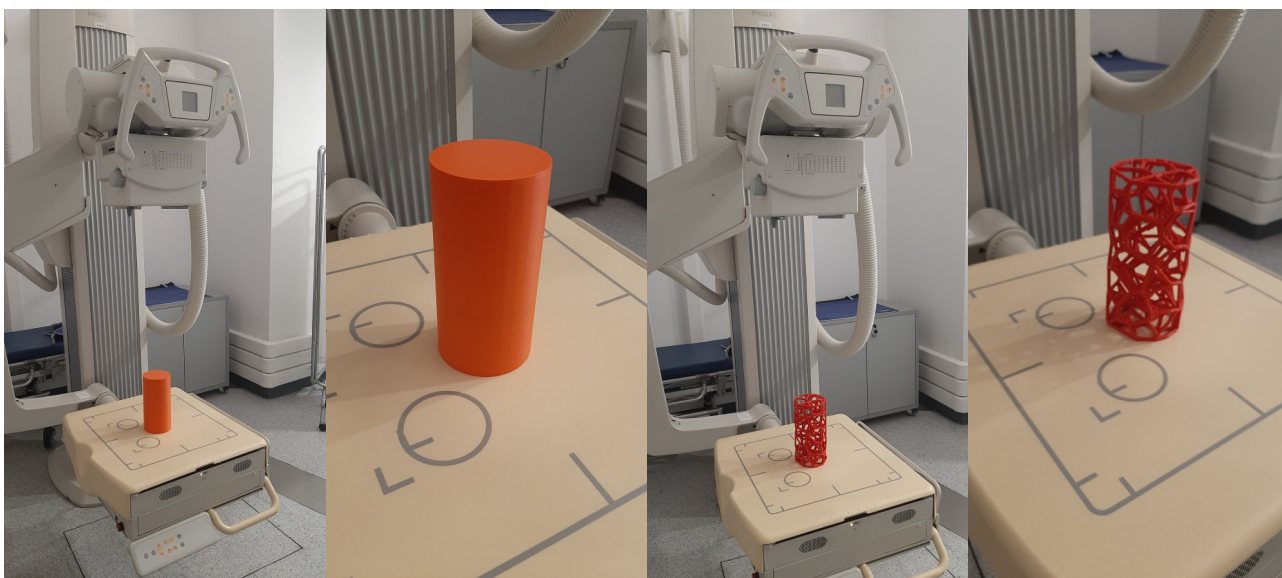
Δοκίμιο 200-8

Δοκίμιο 200-9

Εικόνα 8\_75: Τρίτη ομάδα κύριων δοκιμίων μετά την αφαίρεση των υποστηρίξεων. ΒΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

## 8.7 Μη καταστρεπτικοί έλεγχοι φυσικών δοκιμίων

Μετά την οριστικοποίηση της μεθοδολογίας του πειράματος και την κατασκευή των συμπαγών και κάποιων δοκιμαστικών ραβδωτών δοκιμίων, αλλά πριν την ολοκλήρωση της υλοποίησης του συνόλου των ραβδωτών δοκιμίων, αποφασίστηκε κάποια από αυτά να ελεγχθούν με μη καταστρεπτικούς ελέγχους, για ερευνητικούς λόγους ελέγχου της ποιότητας 3d εκτύπωσής τους, πριν την ολοκλήρωση της κατασκευής των υπολοίπων ραβδωτών δοκιμίων και τους καταστρεπτικούς ελέγχους δοκιμών σε θλίψη. Τα **3 συμπαγή** δοκίμια καθώς και **1 ραβδωτό** δοκίμιο, και συγκεκριμένα το δοκιμαστικό δοκίμιο **οικογένειας 200 – Seed 1** από κόκκινο PETG εξετάστηκαν με ιατρικό εξοπλισμό με **μη καταστρεπτικές μεθόδους** και υποβλήθησαν σε ελέγχους **με ψηφιακή ακτινογράφιση και αξονική τομογραφία**<sup>465</sup>. Σε κάθε δοκίμιο λήφθηκαν εγκάρσιες και κατά μήκος ακτινογραφίες και τομές στον αξονικό τομογράφο. Οι μη καταστρεφτικοί έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν σε μία (1) συνεδρία στο διαγνωστικό κέντρο **Βιοϊατρικής Αμπελοκήπων** στην Αθήνα στις **8 Ιουνίου 2023 με την καθοδήγηση και βοήθεια της επικεφαλής του Τεχνικού Τμήματος της Βιοϊατρικής κα Γ. Παππά και του τεχνικού προσωπικού του τμήματος**.



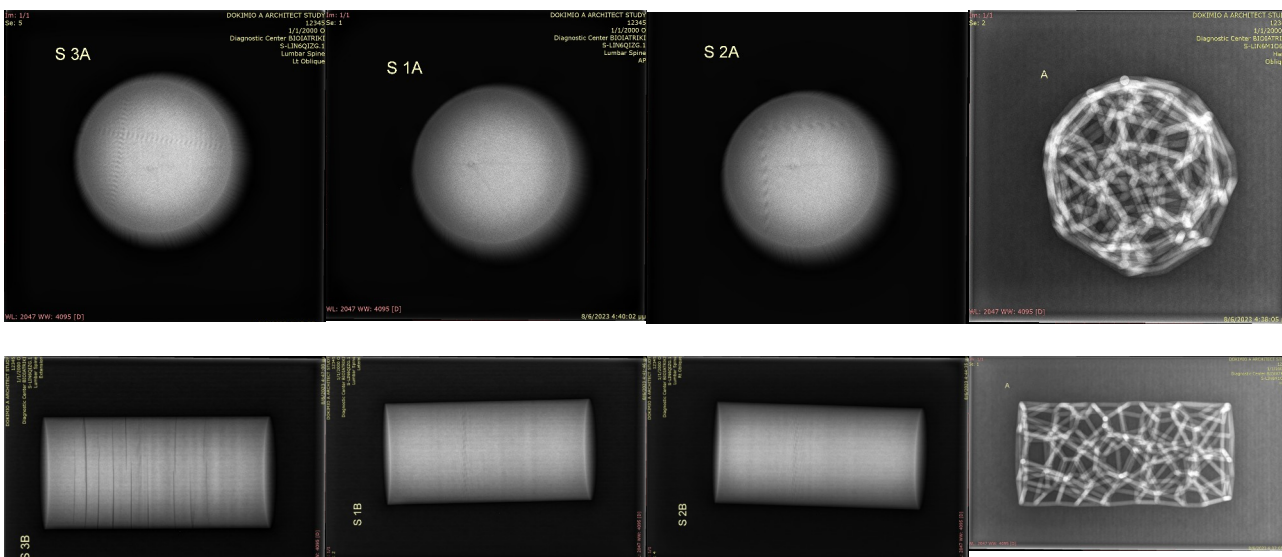
Εικόνα 8\_76: Συμπαγές και ραβδωτό δοκίμιο σε έλεγχο με ψηφιακή ακτινογράφιση. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

<sup>465</sup> Ο ιατρικός εξοπλισμός για τους συγκεκριμένους ελέγχους, η συνεργασία με το τεχνικό προσωπικό και την επικεφαλής του Τεχνικού Τμήματος της Βιοϊατρικής κα Γ. Παππά, ήταν μια ευγενική χορηγία του ομίλου της Βιοϊατρικής.

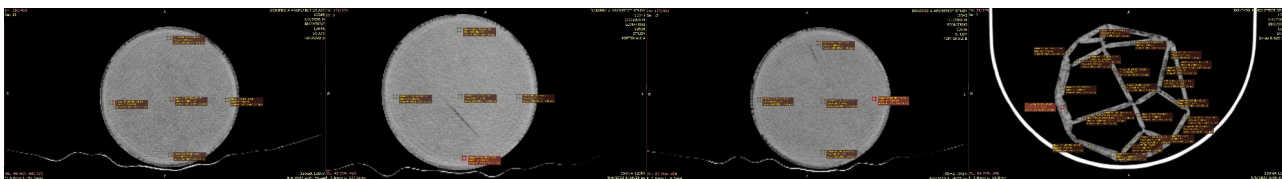




Εικόνα 8\_77: Ραβδωτό και συμπαγές δοκίμιο σε έλεγχο με αξονικό τομογράφο. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_78: Εγκάρσιες (άνω) και κατά μήκος τομές (κάτω) με ψηφιακή ακτινογράφιση σε συμπαγή και ραβδωτό δοκίμιο. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_79: Εγκάρσιες τομές συμπαγών και δικτυωματικού δοκιμίου σε αξονικό τομογράφο. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Από την **ψηφιακή ακτινογράφιση** δεν προέκυψαν κάποια ιδιαίτερα ευρήματα στα δοκίμια, πέραν από την σχετικά ομοιόμορφη πυκνότητα των συμπαγών δοκιμίων και κάποιες αποκολλήσεις στις στρώσεις εκτύπωσης για το συμπαγές δοκίμιο Sr20, οι οποίες ήταν εμφανείς και με μακροσκοπική παρατήρηση.

Οι αποκολλήσεις αυτές δημιουργήθηκαν πιθανότατα από ασυμβατότητα του κόκκινου υλικού PETG (πιο ψαθυρό υλικό) με τις ρυθμίσεις εκτύπωσης σε σχέση με τα πορτοκαλί PETG αναλώσιμα ή

προέκυψαν από κάποιο ελάττωμα στην παρτίδα του υλικού. Εξαιτίας αυτών των αποκολλήσεων το κόκκινο PETG, αν και προερχόταν από τον ίδιο κατασκευαστή, απορρίφθηκε και για την κατασκευή των ραβδωτών δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε μόνο το πορτοκαλί PETG, τα συμπαγή δείγματα του οποίου είχαν παρόμοια συμπεριφορά, χωρίς ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις.

Στις εγκάρσιες τομές του **αξονικού τομογράφου** πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις pixels σε διάφορες θέσεις των δοκιμίων στο λογισμικό **RadiAnt DICOM Viewer**<sup>466</sup>. Οι περιοχές μετρήσεων είχαν όλες την ίδια επιφάνεια pixels ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση των δεδομένων. Στα συμπαγή δοκίμια σε μια τυχαία τομή λήφθηκαν 5 μετρήσεις, 4 στην περιφέρεια του δοκιμίου (άνω, κάτω, αριστερά, δεξιά) και 1 στο κέντρο του δοκιμίου. Οι περιφερειακές μετρήσεις δεν έγιναν ακριβώς στο όριο του δοκιμίου, όπου αλλάζει και ο τρόπος εκτύπωσης (περιμετρικές εξωτερικές στρώσεις - perimeters) αλλά σε περιοχή γεμίματος (infill). Οι τιμές που προέκυψαν για τα συμπαγή δοκίμια παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

	<b>Sr20</b> (κόκκινο) συμπαγές	<b>Sor20-1</b> (πορτοκαλί 1) συμπαγές	<b>Sor20-2</b> (πορτοκαλί 2) συμπαγές
Μέση τιμή Pixels			
<b>Άνω</b>	64,39	89,55	65,5
<b>Κάτω</b>	51,79	73,91	68,34
<b>Αριστερά</b>	57,09	74,91	71,78
<b>Δεξιά</b>	55	80	85,89
<b>Κέντρο</b>	45,7	77,5	73,75
<b>Μέση τιμή</b>	<b>54,794</b>	<b>79,174</b>	<b>73,052</b>

Πίνακας 8\_8: Συγκεντρωτικός πίνακας καταγραφής τιμών μέσων όρων μετρήσεων τιμών pixels για τις εγκάρσιες τομές των συμπαγών δοκιμίων στο λογισμικό RadiAnt DICOM Viewer. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

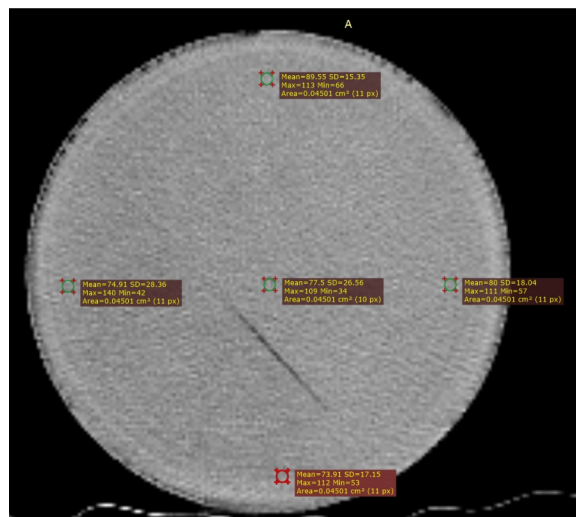
Από τις μετρήσεις των μέσων τιμών pixels (οι οποίες αντιπροσωπεύουν πυκνότητα), επιβεβαιώνεται ότι οι μέσες τιμές για τα πορτοκαλί συμπαγή PETG δοκίμια Sor20-1 και Sor20-2 είναι περίπου ίδιες και ομοιόμορφες στην επιφάνεια της τομής. Αυτό σημαίνει ότι η εκτύπωση από το 3d printer ήταν ομοιογενής. Το κόκκινο συμπαγές PETG δοκίμιο παρουσιάζει κάποιες διαφοροποιήσεις στις τιμές που λήφθηκαν στην επιφάνεια του, που μπορεί να οφείλονται στις αποκολλήσεις των στρώσεων ή και σε διαφοροποιήσεις ποιότητας του κόκκινου υλικού σε σχέση με το πορτοκαλί υλικό. Το κόκκινο συμπαγές δοκίμιο παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές μέσων τιμών και χαμηλότερο συνολικό μέσο όρο σε σχέση με τα συμπαγή πορτοκαλί PETG δοκίμια. Οι τιμές αυτές θα συγκριθούν στη συνέχεια με τις τιμές αντοχής σε θλίψη των συγκεκριμένων δοκιμίων. Εξαιτίας αυτών των διαφοροποιήσεων στις τιμές των μετρήσεων του κόκκινου και των πορτοκαλί συμπαγών δοκιμίων, αποφασίστηκε για λόγους ομοιογένειας του πειράματος, να χρησιμοποιηθεί ως υλικό εκτύπωσης για όλα τα δοκίμια μόνο πορτοκαλί PETG από τον ίδιο κατασκευαστή και από την ίδια ποιότητα.

Κατά την εξέταση των εγκάρσιων τομών στα συμπαγή δοκίμια εντοπίστηκαν οι περιοχές στη μάζα του αντικειμένου όπου πραγματοποιήθηκε η παύση της εκτύπωσης για την προσθήκη αναλώσιμου, αφού η απαιτούμενη ποσότητα υλικού για την κατασκευή του κάθε συμπαγούς δοκιμίου (~2Kg) ξεπερνάει την τυπική ποσότητα συσκευασίας του αναλώσιμου υλικού που είναι και το 1Kg.

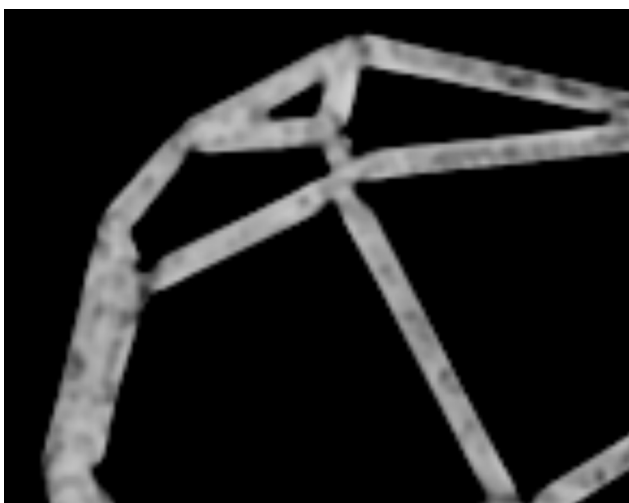
<sup>466</sup> 'RadiAnt DICOM Viewer', ημερομηνία πρόσβασης 13 Σεπτέμβριος 2023, <https://www.radiantviewer.com/>.



Εικόνα 8\_80: Αποκολλήσεις στρώσεων στο συμπαγές δοκίμιο Sr20 από κόκκινο PETG μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσής του οι οποίες δεν παρουσιάστηκαν στα πορτοκαλί PETG δοκίμια με τις ίδιες ρυθμίσεις 3d εκτύπωσης. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_81: Θέσεις μετρήσεων στο λογισμικό RadiAnt DICOM Viewer για την τομή σε αξονικό τομογράφο του δοκίμιου Sor20-1. Διακρίνεται επίσης η περιοχή αλλαγής αναλώσιμου υλικού κατά τη διαδικασία της 3d εκτύπωσης ως διαγώνια γραμμή διακοπής. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_82: Αριστερά: Τομή αξονικού τομογράφου στη βάση του δικτυωματικού δοκιμαστικού δοκίμιου. Παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στην πυκνότητα των στοιχείων των ράβδων οι οποίες υποδηλώνουν ότι οι περιοχές γεμίσματος (infill) της 3d εκτύπωσης για τις συγκεκριμένες διαστάσεις δεν είναι εντελώς ομοιογενείς. Δεξιά: Μεγέθυνση περιοχής. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Κατά την εξέταση των εγκάρσιων τομών στο ραβδωτό δοκίμιο εντοπίστηκαν διαφοροποιήσεις στην πυκνότητα των ράβδων οι οποίες υποδηλώνουν ότι οι περιοχές γεμίσματος (infill) της 3d εκτύπωσης για τις συγκεκριμένες διαστάσεις ράβδων δεν είναι εντελώς ομοιογενείς. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι καθώς όλα τα ραβδωτά δοκίμια εκτυπώθηκαν στον τρισδιάστατο εκτυπωτή από το ίδιο υλικό, με τις ίδιες ρυθμίσεις και με τις ίδιες διατομές ράβδων, οι όποιες ανομοιομορφίες είναι κοινές σε όλα τα δοκίμια. Από αυτή την άποψη, τα υλοποιημένα δοκίμια είναι ομόλογα και μπορούν

να χρησιμοποιηθούν σε μια μεταξύ τους συγκριτική διαδικασία αξιολόγησης των μηχανικών τους χαρακτηριστικών, χωρίς να θεωρείται ότι έχουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ τους.

## 8.8 Πειραματική διάταξη

Τα 3 συμπαγή φυσικά δοκίμια και τα 27 ραβδωτά φυσικά δοκίμια που δημιουργήθηκαν με τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης υποβλήθηκαν σε δοκιμές σε θλίψη σε πειραματική διάταξη στη μηχανή του **Εργαστηρίου Τεχνικών Υλικών της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ** που βρίσκεται στο **Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ** με τη βοήθεια του προσωπικού και συνεργατών του εργαστηρίου. Πριν τις τελικές δοκιμές σε θλίψη των κύριων δοκιμίων προηγήθηκαν δοκιμαστικές δοκιμές σε συμπαγή και ραβδωτά δοκίμια.

Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές αντοχής σε θλίψη είναι η μηχανή γενικών δοκιμών (universal machine) **Galdabini Spa QUASAR-600**<sup>467</sup> δυναμικότητας **600KN**, κατάλληλη για δοκιμές εφελκυσμού, θλίψης και κάμψης δομικών υλικών, όπως λίθων, ξύλινων δοκιμίων, μεταλλικών δοκιμίων κ.ά. (Εικόνα 8\_83). Τα πειράματα στο χώρο του εργαστηρίου, δοκιμές και κύριοι έλεγχοι σε θλίψη, πραγματοποιήθηκαν στο **Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ** σε τέσσερις (4) συνεδρίες συνολικά για όλα τα δοκίμια (δοκιμαστικά και κύρια) στις εξής ημερομηνίες: **17-7-2023**, **28-7-2023**, **5-9-2023** και **6-9-2023**, για τα πειράματα και μία (1) συνεδρία στις **11-9-2023** για εξαγωγή συνολικών δεδομένων, οπότε και ολοκληρώθηκαν οι εργασίες πειραμάτων στο χώρο του εργαστηρίου (δοκιμές σε θλίψη, ψηφιακή φωτογράφιση και βιντεοσκόπηση, καταγραφή και εξαγωγή δεδομένων πειραμάτων).

Για κάθε δοκίμιο καταγράφηκε το μέγιστο αναλαμβανόμενο θλιπτικό φορτίο και συντάχθηκε διάγραμμα **Κατακόρυφου Φορτίου/Load** (σε N) - **Μετακίνησης κεφαλής/Crosshead stroke** (σε mm). Τα διαγράμματα που εξάχθηκαν από το λογισμικό ήταν συνολικά διαγράμματα για περισσότερα δοκίμια, τα οποία στη συνέχεια ομαδοποιήθηκαν ανάλογα με την οικογένεια στην οποία ανήκουν. Ένα τέτοιο πρωτογενές διάγραμμα από την πρώτη συνεδρία για ραβδωτά δοκίμια, δοκιμαστικά και κύρια, φαίνεται στην εικόνα Εικόνα 8\_87.

Στα συμπαγή δοκίμια οι δοκιμές σταμάτησαν για μετακίνηση κεφαλής 5cm (δεδομένου ότι στην μετακίνηση αυτή δεν είχε επέλθει ακόμα καθολική αστοχία του δοκιμίου) λόγω ορίων ασφαλείας της μηχανής. Στα ραβδωτά δοκίμια οι δοκιμές προχώρησαν μέχρι την εμφάνιση των καθολικών αστοχιών.

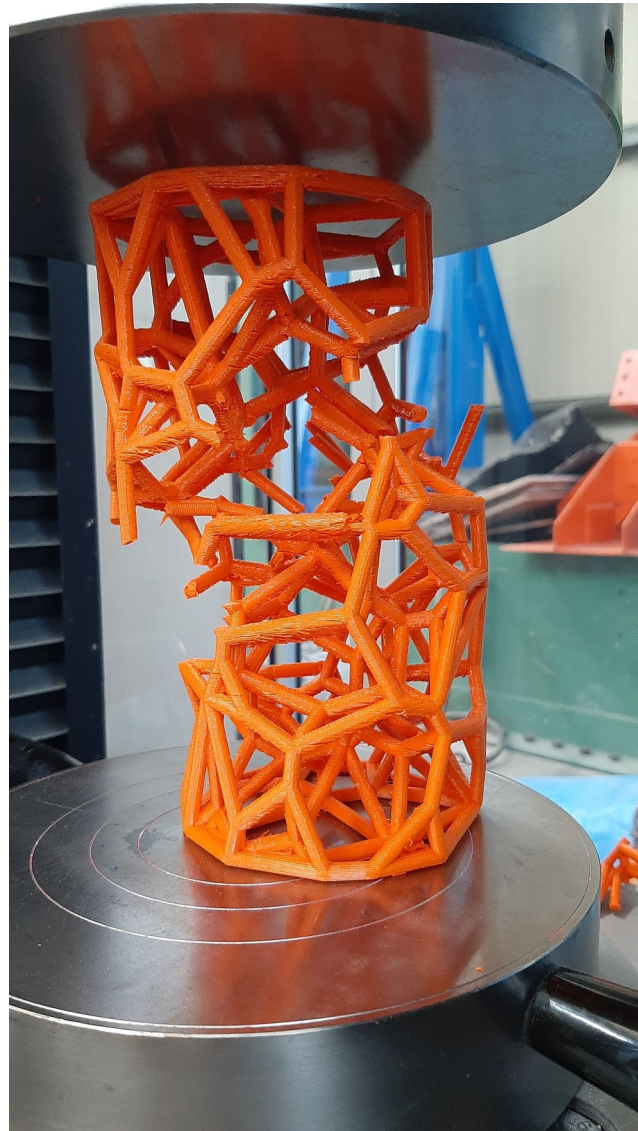
Η ταχύτητα καθόδου της κεφαλής για τα συμπαγή δοκίμια ήταν 3mm/minute ενώ για τα ραβδωτά δοκίμια ήταν 1mm/minute.

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η μηχανή Galdabini σε αδρανή κατάσταση (Εικόνα 8\_83), ενώ στην Εικόνα 8\_84 παρουσιάζεται σε μεγέθυνση ραβδωτό δοκίμιο μετά τη δοκιμή σε θλίψη και το οποίο έχει αστοχήσει σε διάφορες περιοχές, ενώ έχει μετατοπιστεί το κάτω τμήμα του ως προς το κέντρο της μηχανής.

<sup>467</sup> 'Quasar 600 - Material Testing machine', ημερομηνία πρόσβασης 13 Σεπτέμβριος 2023, <https://www.galdabini.eu/datasheets/quasar-600>.



Εικόνα 8\_83: Γενική άποψη της μηχανής Galdabini. Διακρίνεται το υδραυλικό έμβολο και η περιοχή τοποθέτησης των δοκιμίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



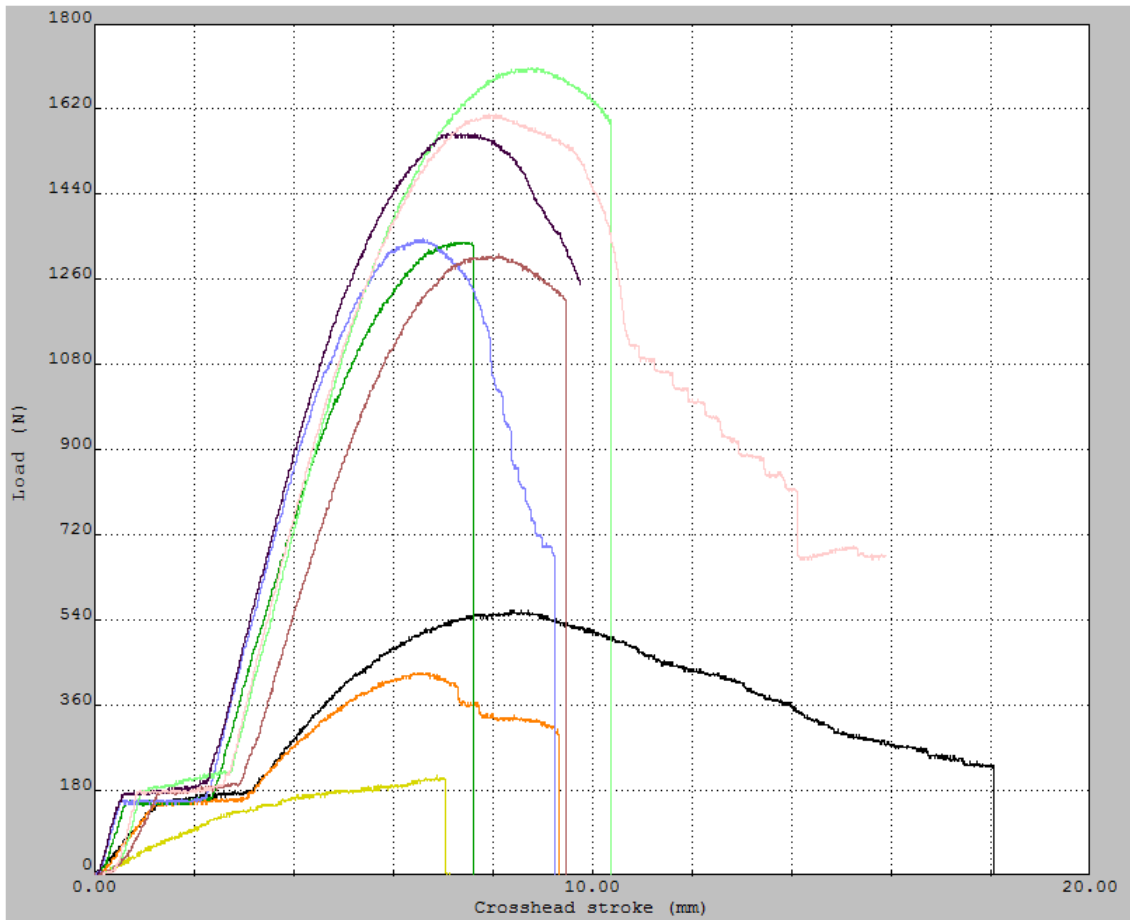
Εικόνα 8\_84: Μηχανή Galdabini μετά την ολοκλήρωση φόρτισης. Διακρίνεται το δοκίμιο που έχει αστοχήσει σε διάφορες περιοχές. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_85: Εργαστήριο αντισεισμικής τεχνολογίας ΕΜΠ. Πρώτη ομάδα πειραματικών ελέγχων. Δοκιμαστικά και κύρια συμπαγή και ραβδωτά δοκίμια πριν τους ελέγχους δοκιμών σε θλίψη στη μηχανή Galdabini. Πηγή: Τ. Κουμιτζόγλου.



Εικόνα 8\_86: Πειραματική διάταξη μηχανής Galdabini του Εργαστηρίου Τεχνικών Υλικών της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ, στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. Διακρίνεται κατά τη διεξαγωγή πειράματος: η μηχανή φόρτισης, ο συνδεδεμένος υπολογιστής καταγραφής δεδομένων και η camera καταγραφής video. Πηγή: Τ. Κουμιτζόγλου.

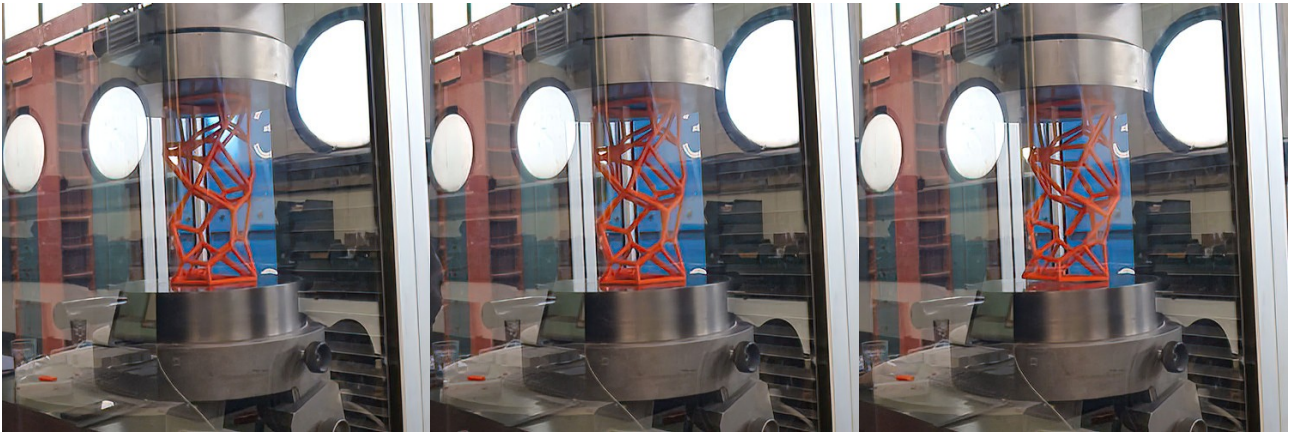


Εικόνα 8\_87: Διάγραμμα φορτίσεων / Load σε N (άξονας Y) με Κατακόρυφη μετακίνηση κεφαλής / Crosshead stroke σε mm (άξονας X) για ραβδωτά δοκιμαστικά και κύρια δοκίμια κατά την πρώτη συνεδρία πειραμάτων σε μορφή raster image από το λογισμικό της μηχανής Galdabini.. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

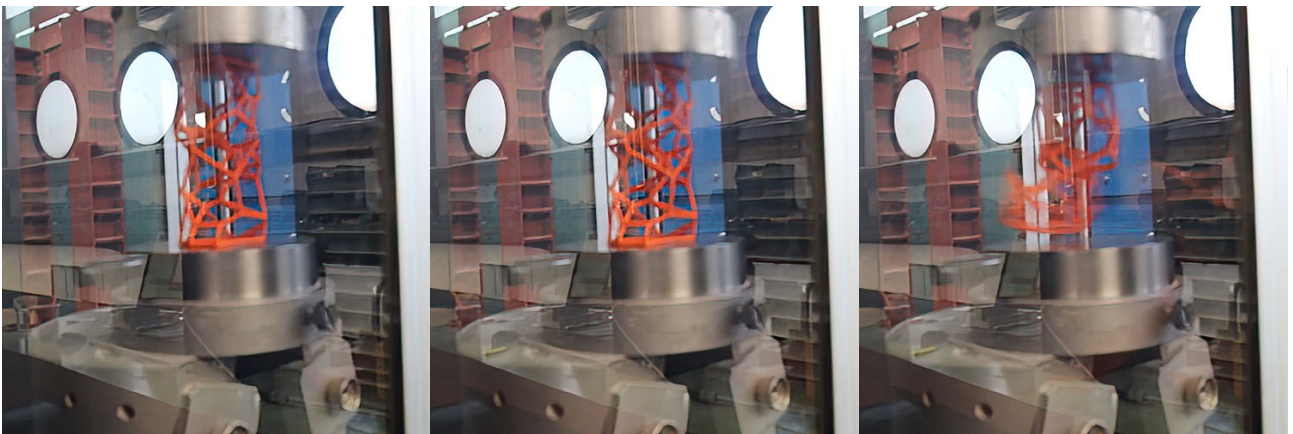
4		Lr20	17-07-2023	100.00	7853.98	1608.8	0.20
5		Lor20-1	17-07-2023	100.00	7853.98	1571.3	0.20
6		Lor20-2	17-07-2023	100.00	7853.98	1312.5	0.17
7		Lor20-3	17-07-2023	100.00	7853.98	1706.3	0.22
8		Lor20-4	17-07-2023	100.00	7853.98	1346.3	0.17
9		Lor20-5	17-07-2023	100.00	7853.98	1338.8	0.17
10		Lor20-a-1	17-07-2023	100.00	7853.98	427.5	0.05
11		Lor20-a-2	17-07-2023	100.00	7853.98	558.8	0.07
12		Lor20-aa	17-07-2023	100.00	7853.98	210.0	0.03
13 ***		Sr20	17-07-2023	100.00	7853.98	290028.8	36.93
14 ***		Sor20-1	17-07-2023	100.00	7853.98	302388.8	38.50
15 ***		Sor20-2	17-07-2023	100.00	7853.98	300101.3	38.21

Εικόνα 8\_88: Τμήμα πίνακα καταγραφής δεδομένων για ραβδωτά δοκιμαστικά και κύρια δοκίμια κατά την πρώτη συνεδρία πειραμάτων με λήψη φωτογραφίας από την οθόνη του υπολογιστή συλλογής δεδομένων για την πειραματική διάταξη της μηχανής Galdabini. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

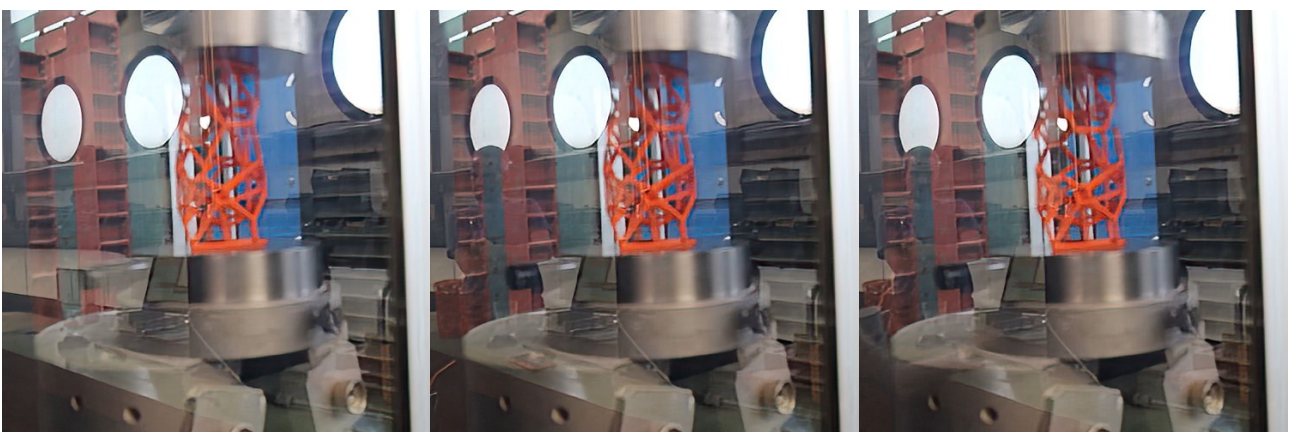
Στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζονται οι δοκιμές σε θλίψη για όλα τα κύρια δοκίμια τα οποία λήφθηκαν από το αντίστοιχο video καταγραφής σε τρία στιγμιότυπα: α. Πριν τη φόρτιση, β. Κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών και γ. Μετά την καθολική αστοχία.



Εικόνα 8\_89: Δοκίμιο 50-1. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

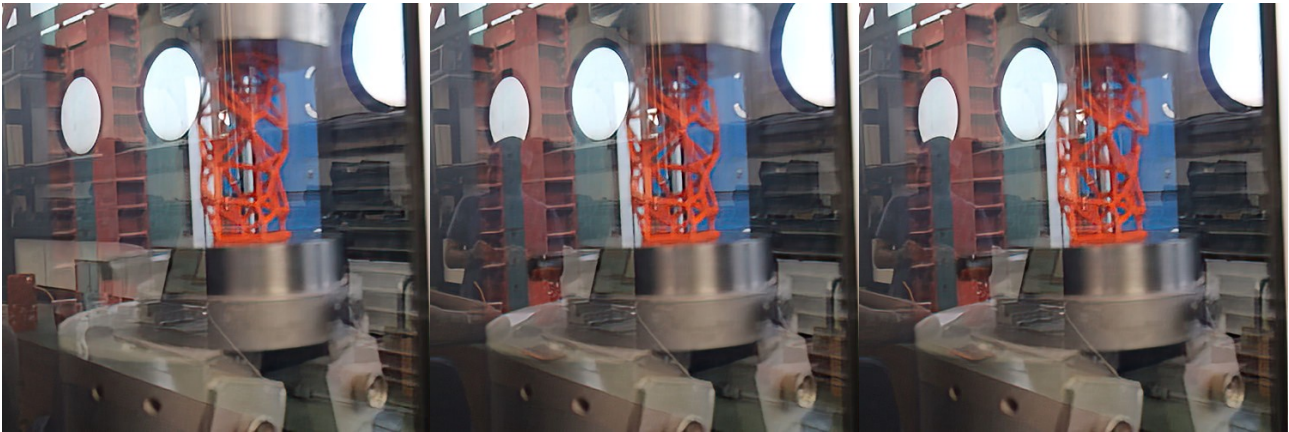


Εικόνα 8\_90: Δοκίμιο 50-2. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

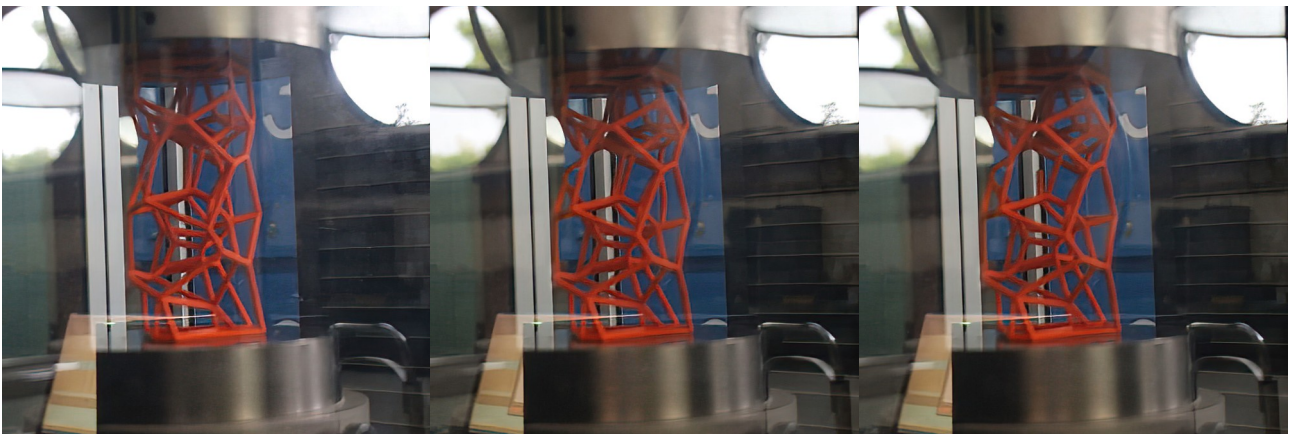


Εικόνα 8\_91: Δοκίμιο 50-3. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

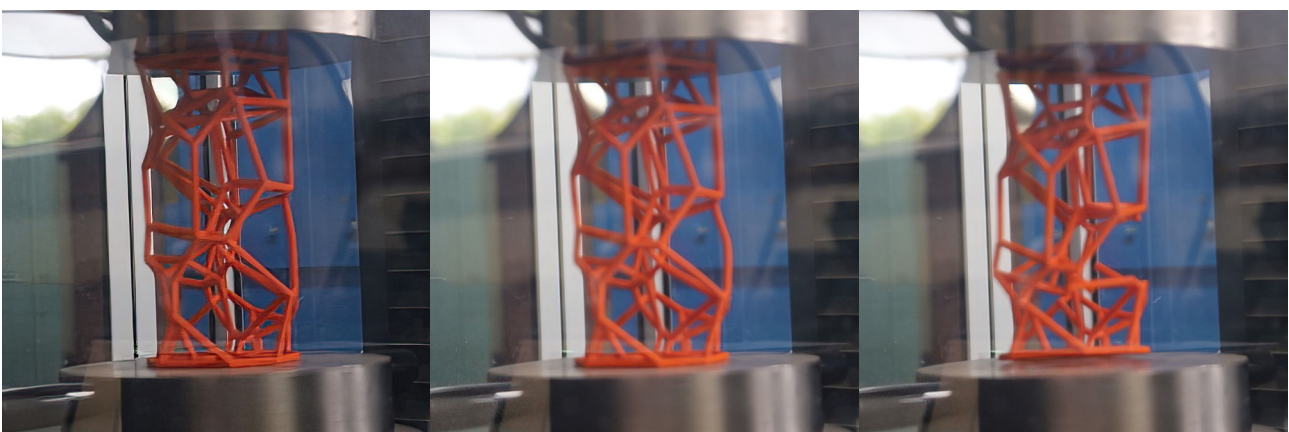




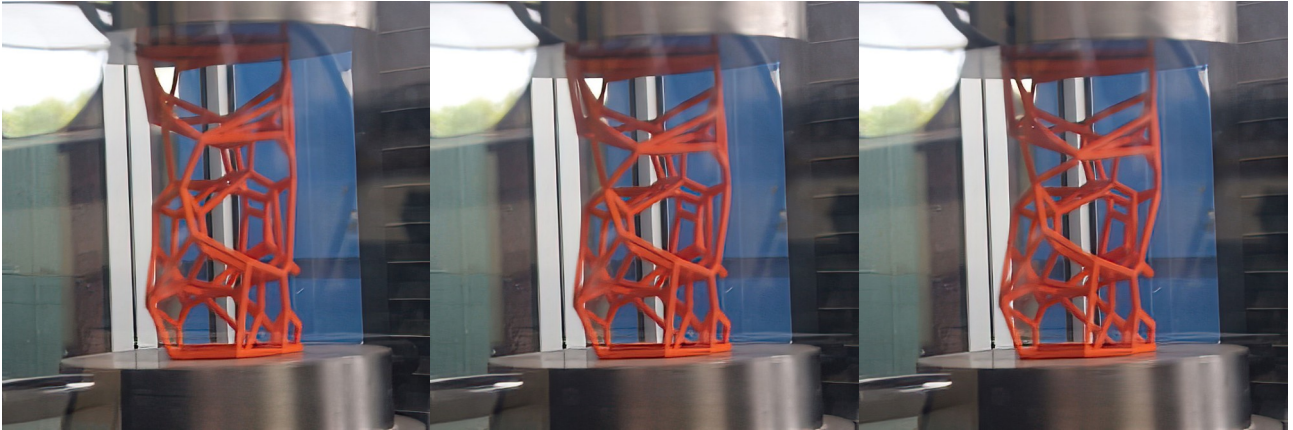
Εικόνα 8\_92: Δοκίμιο 50-4. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουμιτζόγλου.



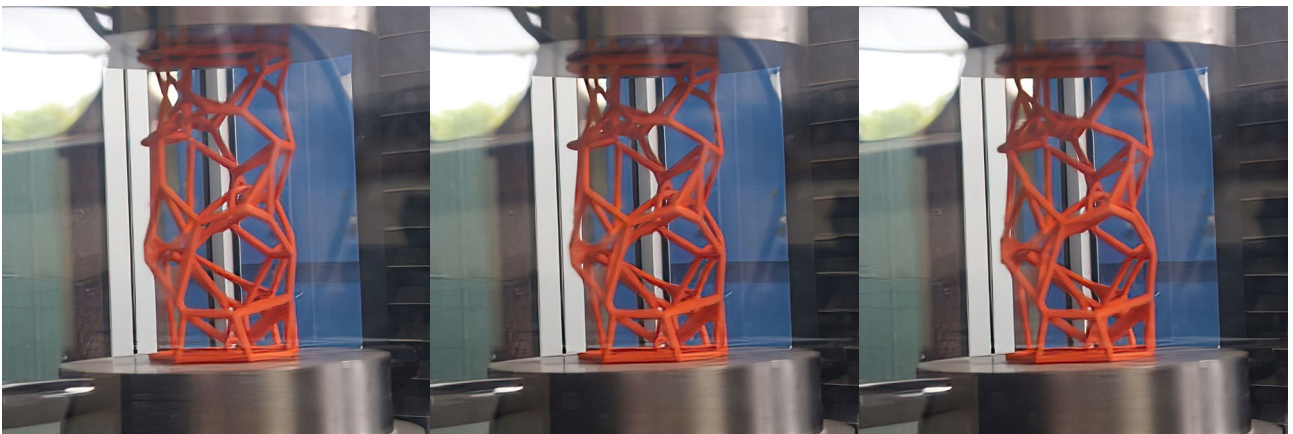
Εικόνα 8\_93: Δοκίμιο 50-5. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουμιτζόγλου.



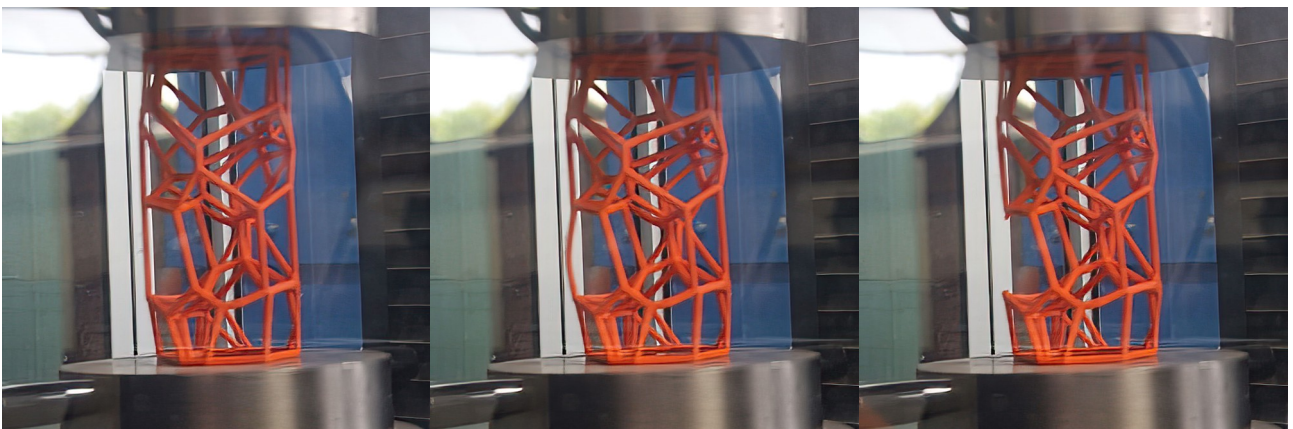
Εικόνα 8\_94: Δοκίμιο 50-6. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουμιτζόγλου.



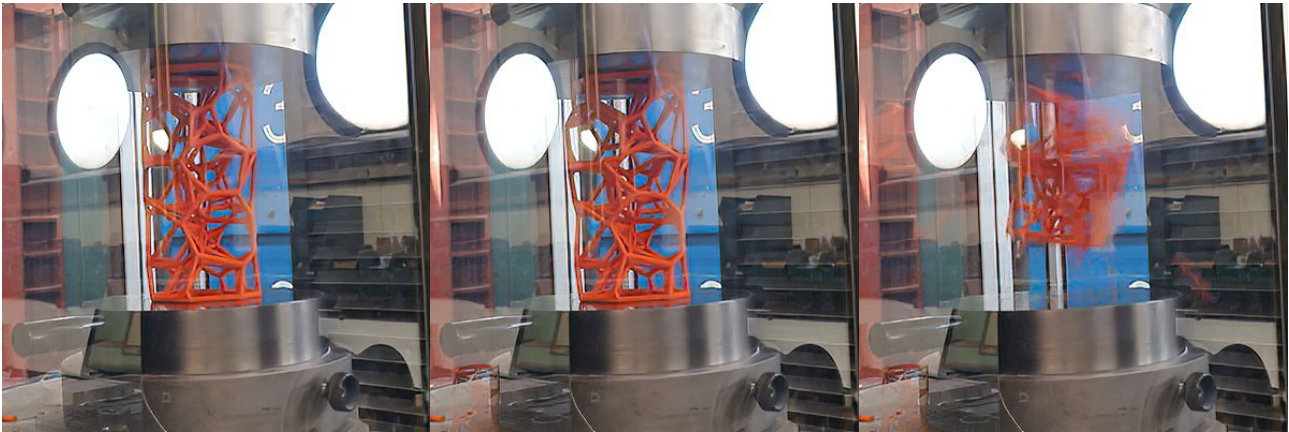
Εικόνα 8\_95: Δοκίμιο 50-7. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_96: Δοκίμιο 50-8. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



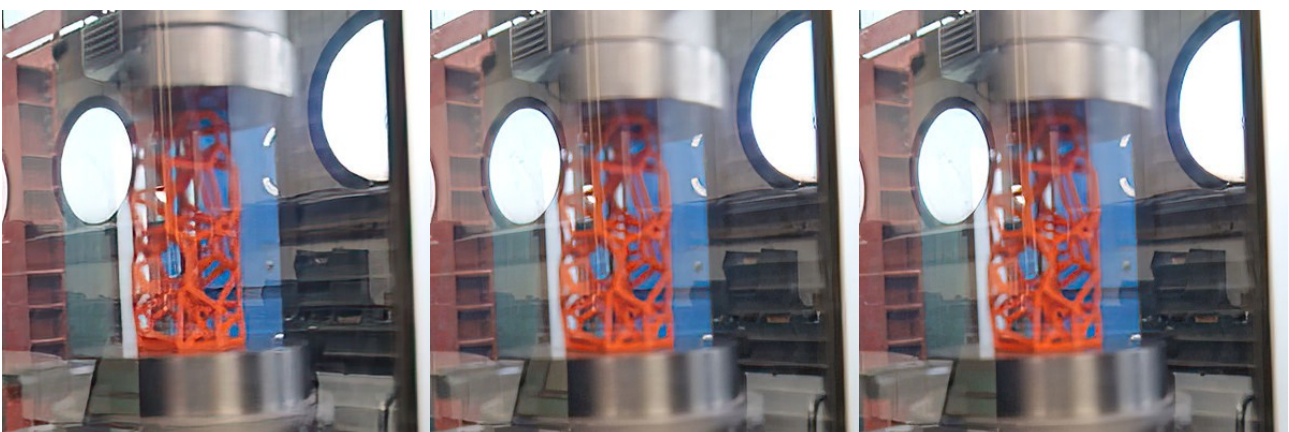
Εικόνα 8\_97: Δοκίμιο 50-9. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



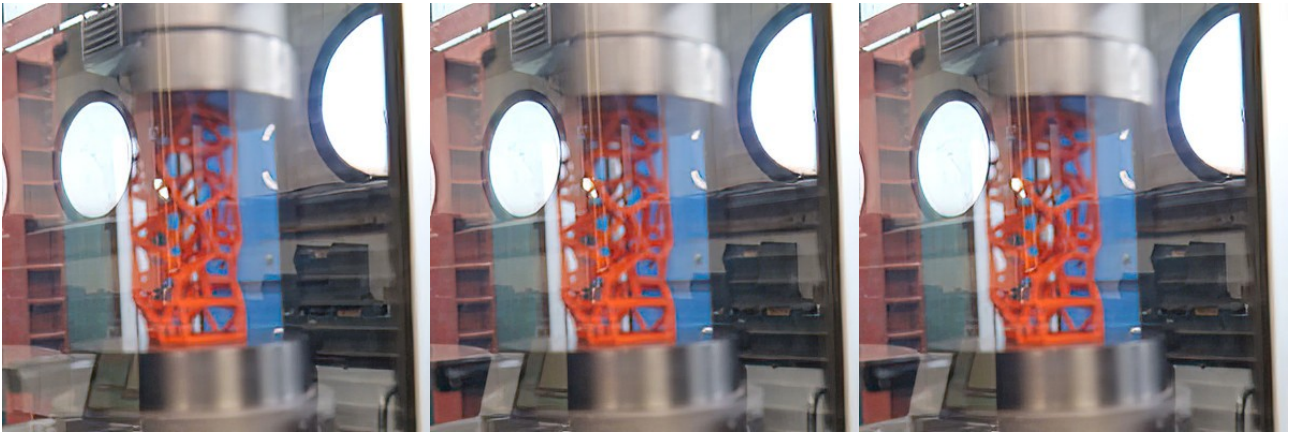
Εικόνα 8\_98: Δοκίμιο 100-1. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



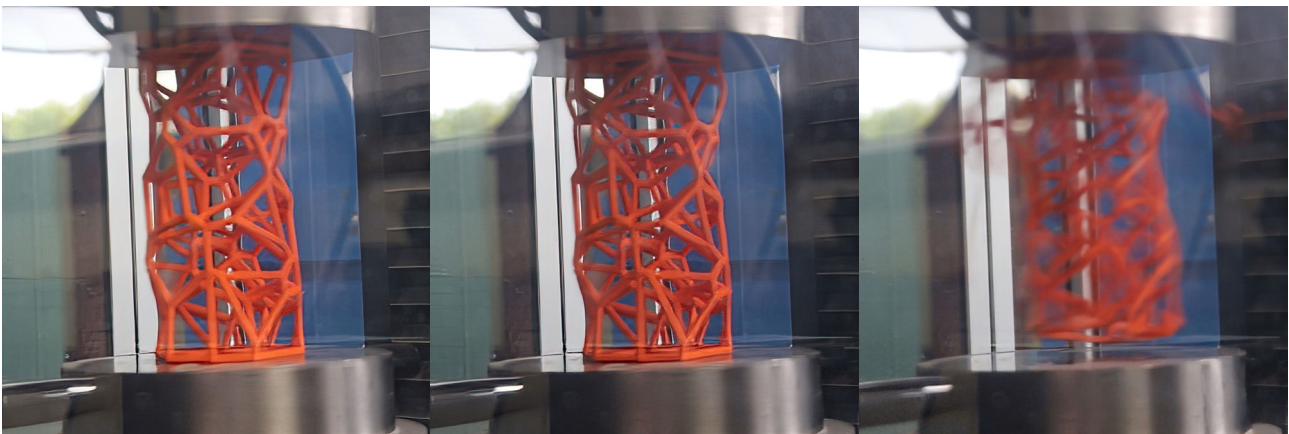
Εικόνα 8\_99: Δοκίμιο 100-2. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



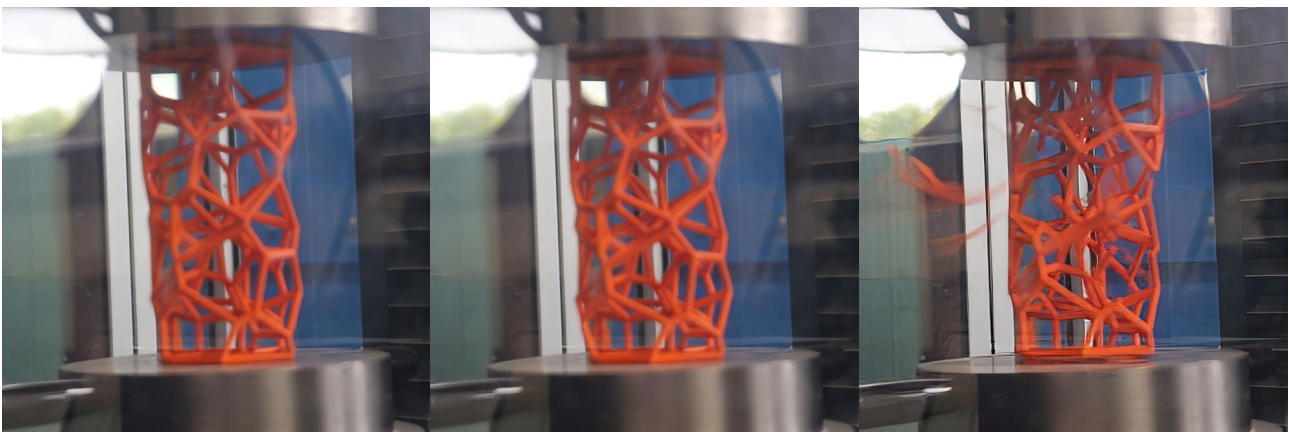
Εικόνα 8\_100: Δοκίμιο 100-3. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



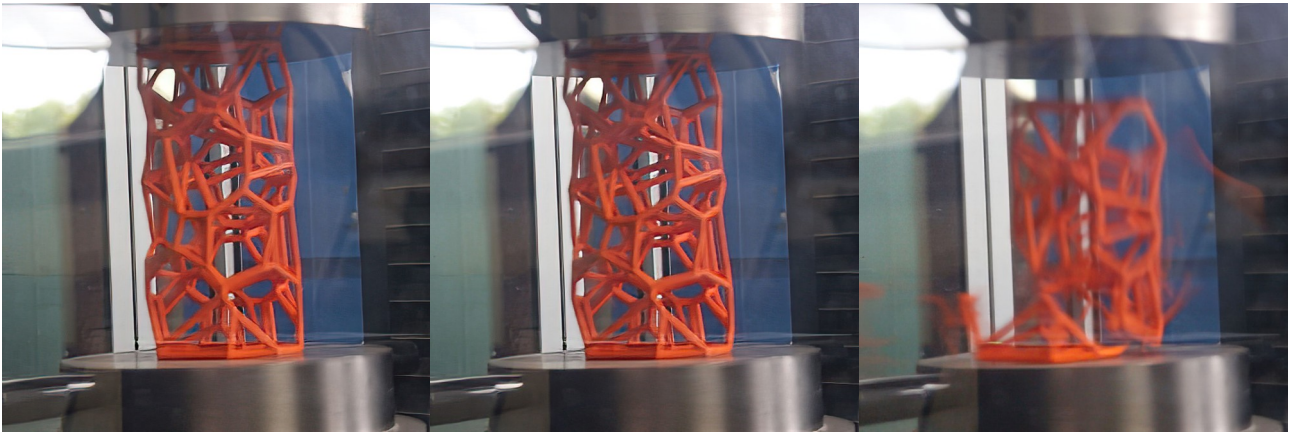
Εικόνα 8\_101: Δοκίμιο 100-4. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



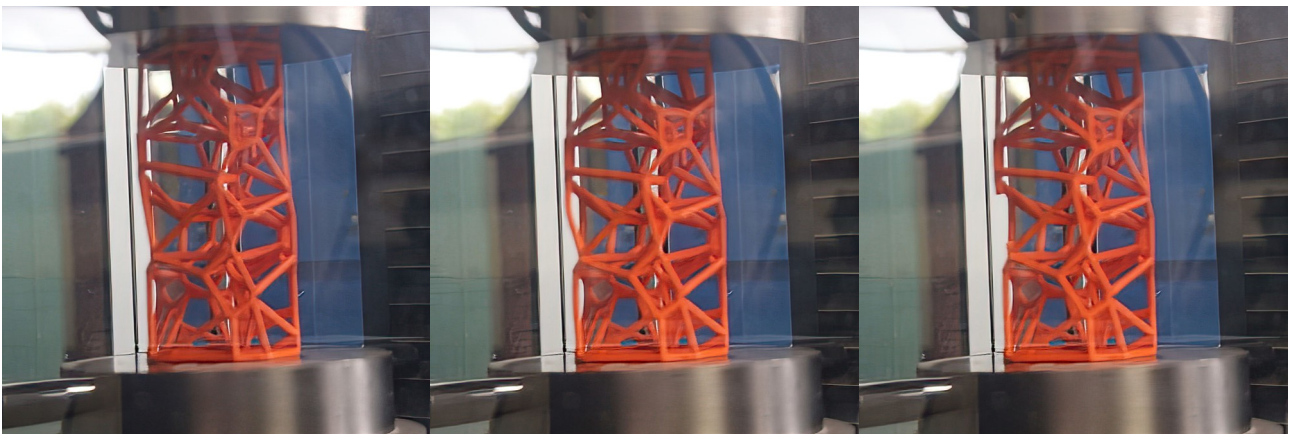
Εικόνα 8\_102: Δοκίμιο 100-5. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



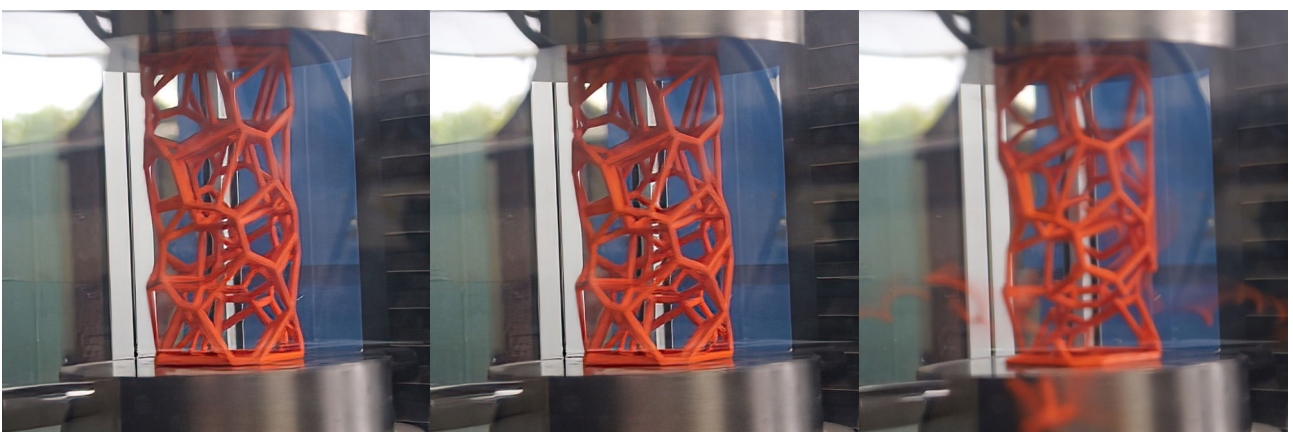
Εικόνα 8\_103: Δοκίμιο 100-6. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_104: Δοκίμιο 100-7. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



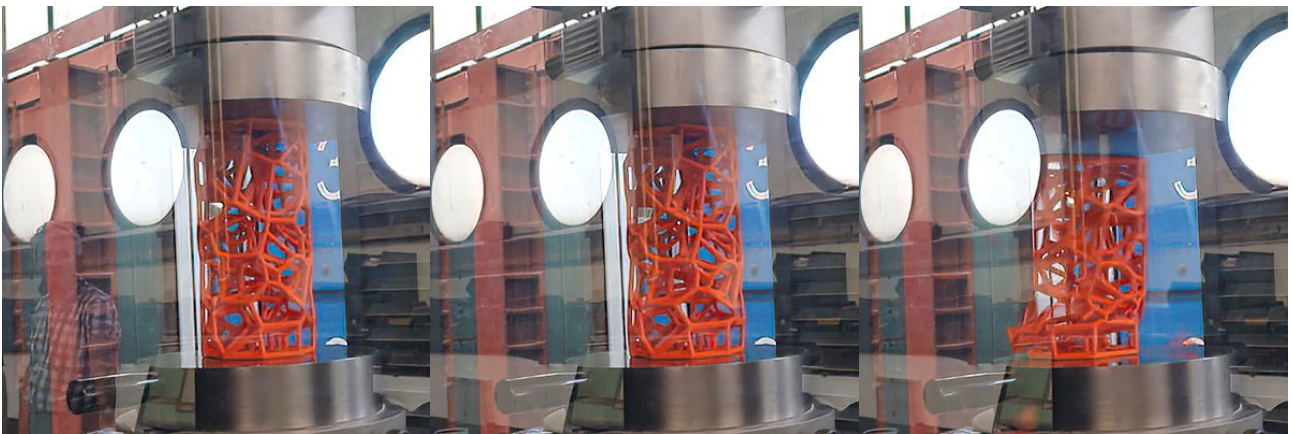
Εικόνα 8\_105: Δοκίμιο 100-8. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_106: Δοκίμιο 100-9. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_107: Δοκίμιο 200-1. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



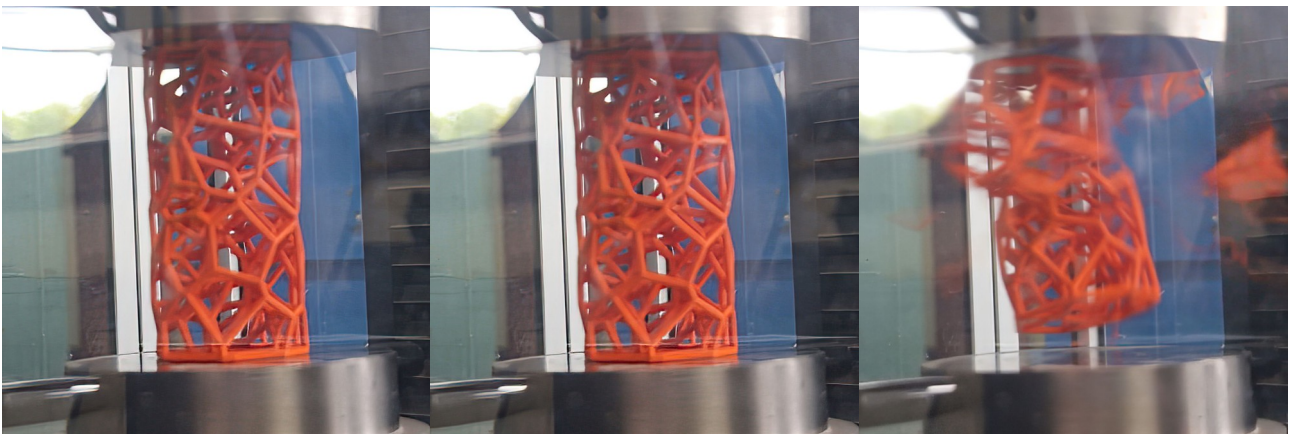
Εικόνα 8\_108: Δοκίμιο 200-2. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



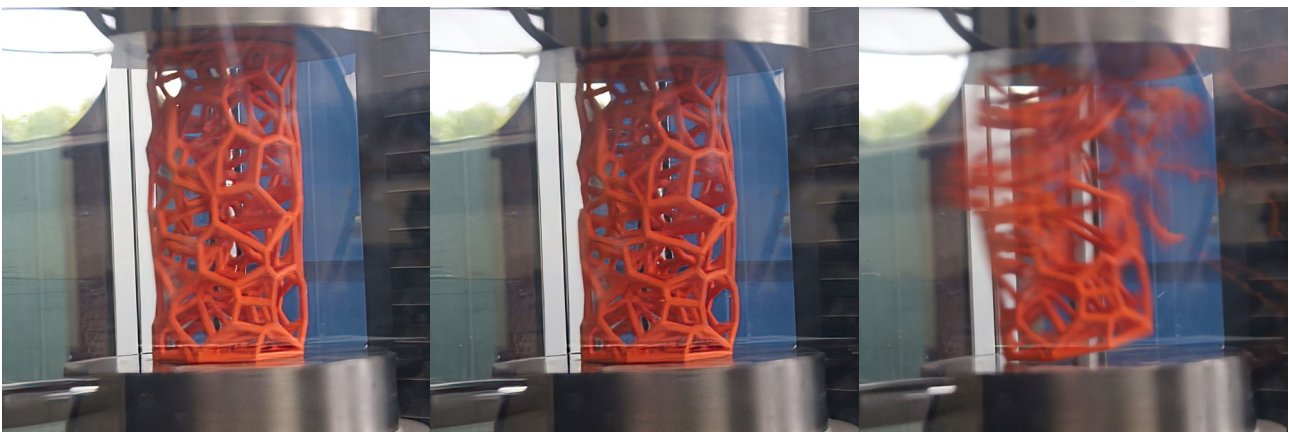
Εικόνα 8\_109: Δοκίμιο 200-3. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



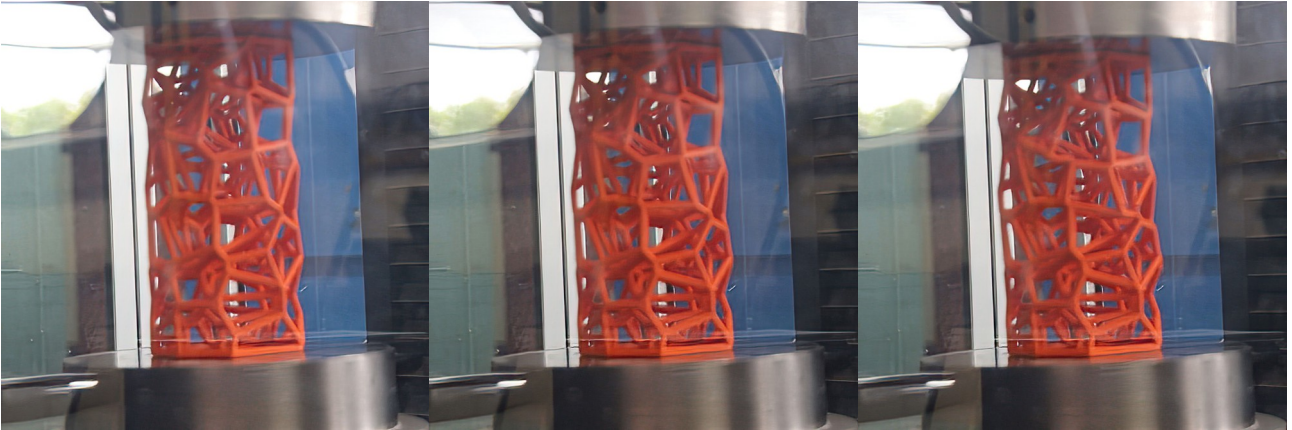
Εικόνα 8\_110: Δοκίμιο 200-4. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



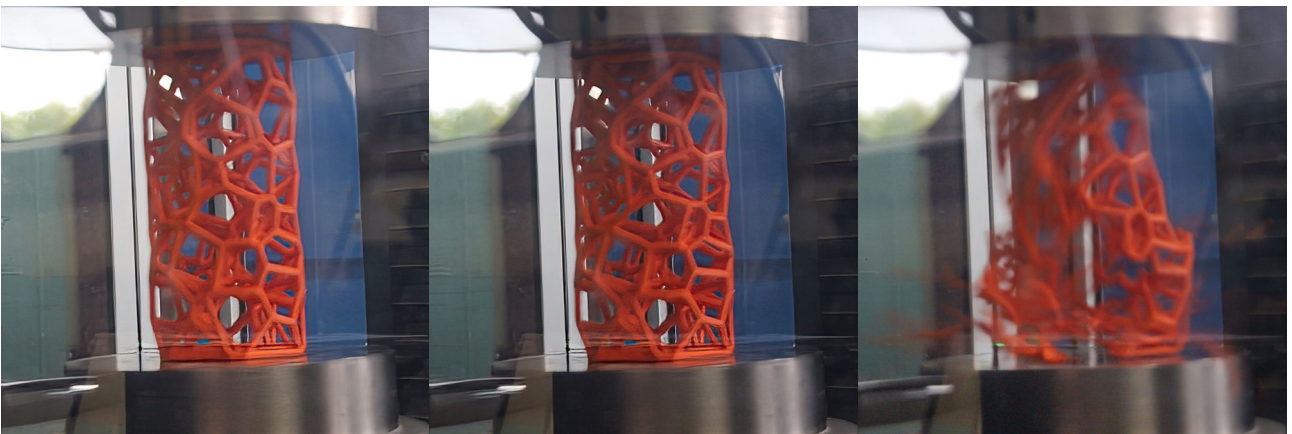
Εικόνα 8\_111: Δοκίμιο 200-5. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



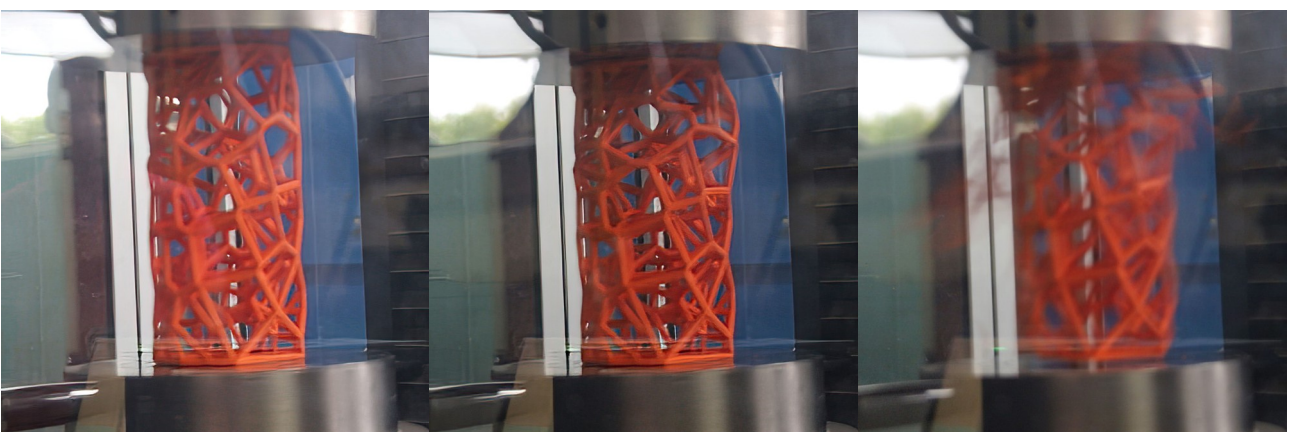
Εικόνα 8\_112: Δοκίμιο 200-6. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_113: Δοκίμιο 200-7. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_114: Δοκίμιο 200-8. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_115: Δοκίμιο 200-9. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

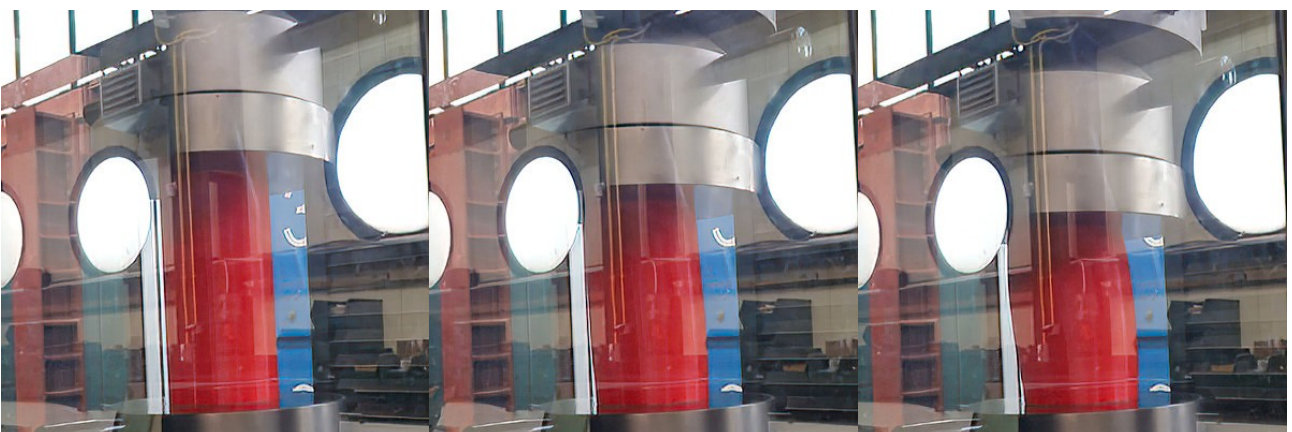




Εικόνα 8\_116: Δοκίμιο Sr20. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), φόρτιση με μετατόπιση κεφαλής ~25mm (κέντρο), φόρτιση με κάθοδο κεφαλής ~50mm (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_117: Δοκίμιο Sor20-1. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), φόρτιση με μετατόπιση κεφαλής ~25mm (κέντρο), φόρτιση με κάθοδο κεφαλής ~50mm (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_118: Δοκίμιο Sor20-2. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), φόρτιση με μετατόπιση κεφαλής ~25mm (κέντρο), φόρτιση με κάθοδο κεφαλής ~50mm (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

## 8.9 Αξιολόγηση πειραματικών αποτελεσμάτων

### 8.9.1 Συγκεντρωτική καταγραφή και ανάλυση δεδομένων

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε δοκίμιο ανά οικογένεια παρουσιάζει ο Πίνακας 8\_9.

Galdabini							
A/A	Ημερομηνία πειράματος	Κωδικός οικογένειας-Seed	Κωδικός log	Ταχύτητα καθόδου κεφαλής (mm/min)	Μέγιστο αναλαμβανόμενο θλιπτικό φορτίο (N)	Κατακόρυφη μετακίνηση στο μέγιστο φορτίο (mm)	Παρατηρήσεις
S1	17-07-2023	Solid 1	Sr20	3	290028,8	50	*
S2	17-07-2023	Solid 2	Sor20-1	3	302388,8	50	*
S3	17-07-2023	Solid 3	Sor20-2	3	300101,3	50	*
50-1	17-07-2023	50-1	Lor20-αα-1	1	210,0	7,02	-
50-2	28-07-2023	50-2	Lor20-αα-2	1	240,0	10,06	-
50-3	28-07-2023	50-3	Lor20-αα-3	1	558,8	6,96	-
50-4	28-07-2023	50-4	Lor20-αα-4	1	618,8	8,56	-
50-5	06-09-2023	50-5	Lor20-αα-5	1	198,8	7,97	-
50-6	05-09-2023	50-6	Lor20-αα-6	1	450,0	7,14	-
50-7	05-09-2023	50-7	Lor20-αα-7	1	247,5	9,33	-
50-8	05-09-2023	50-8	Lor20-αα-8	1	427,5	8,71	-
50-9	05-09-2023	50-9	Lor20-αα-9	1	465,0	6,91	-
100-1	17-07-2023	100-1	Lor20-α-1	1	427,5	6,59	-
100-2	28-07-2023	100-2	Lor20-α-3	1	671,3	8,68	-
100-3	28-07-2023	100-3	Lor20-α-4	1	825,0	7,08	-
100-4	28-07-2023	100-4	Lor20-α-5	1	746,3	7,41	-
100-5	05-09-2023	100-5	Lor20-α-6	1	810,0	8,14	-
100-6	05-09-2023	100-6	Lor20-α-7	1	1177,5	8,56	-
100-7	05-09-2023	100-7	Lor20-α-8	1	858,8	7,33	-
100-8	05-09-2023	100-8	Lor20-α-9	1	675,0	7,83	-
100-9	05-09-2023	100-9	Lor20-α-10	1	742,5	8,38	-
200-1	17-07-2023	200-1	Lor20-3	1	1706,3	8,73	-
200-2	17-07-2023	200-2	Lor20-4	1	1346,3	6,58	-
200-3	17-07-2023	200-3	Lor20-5	1	1338,8	7,45	-
200-4	28-07-2023	200-4	Lor20-6	1	2310,0	9,73	-
200-5	05-09-2023	200-5	Lor20-7	1	1991,3	8,09	-
200-6	05-09-2023	200-6	Lor20-8	1	1965,0	9,11	-
200-7	05-09-2023	200-7	Lor20-9	1	2010,0	8,92	-
200-8	05-09-2023	200-8	Lor20-10	1	1976,3	9,01	-
200-9	05-09-2023	200-9	Lor20-11	1	1473,8	7,84	-

\* Η δοκιμή δεν προχώρησε πέρα από τα 5 cm λόγω ορίων ασφαλείας της μηχανής

Πίνακας 8\_9: Συγκεντρωτικός πίνακας καταγραφής μετρήσεων για τα πειράματα αντοχής σε θλίψη που πραγματοποιήθηκαν στη μηχανή Galdabini. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Στο συγκεντρωτικό πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές αναλαμβανόμενων θλιπτικών φορτίων για όλα τα δοκίμια και τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των μετρήσεων. Οι τύποι για τον υπολογισμό της στατιστικής επεξεργασίας περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

μέγιστο αναλαμβανόμενο θλιπτικό φορτίο (N)

seed	οικογένεια	οικογένεια	οικογένεια
	50 (N)	100 (N)	200 (N)
1	210,0	427,5	1706,3
2	240,0	671,3	1346,3
3	558,8	825,0	1338,8
4	618,8	746,3	2310,0
5	198,8	810,0	1991,3
6	450,0	1177,5	1965,0
7	247,5	858,8	2010,0
8	427,5	675,0	1976,3
9	465,0	742,5	1473,8

μέγιστο αναλαμβανόμενο θλιπτικό φορτίο (N)

	οικογένεια	οικογένεια	οικογένεια	
	50	100	200	
Ελάχιστο σε (N)	198,8	427,5	1338,8	Min
Μέγιστο σε (N)	618,8	1177,5	2310,0	Max
Εύρος σε (N)	420,0	750,0	971,2	Range (R)
Μέγιστο/Ελάχιστο	3,1	2,8	1,7	Max/min
	(N)	(N)	(N)	
Μέση τιμή σε (N)	379,6	770,4	1790,9	Mean (x)
	(N <sup>2</sup> )	(N <sup>2</sup> )	(N <sup>2</sup> )	
Διασπορά σε (N <sup>2</sup> )	25283,05	39494,49	116510,86	Variance (s <sup>2</sup> )
	(N)	(N)	(N)	
Τυπική απόκλιση δείγματος σε (N)	159,01	198,73	341,34	Sample Standard Deviation (s)
	%	%	%	
Συντελεστής μεταβλητότητας (%)	41,89	25,80	19,06	Coefficient of variation (CV)

Πίνακας 8\_10: Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών για τα μέγιστα αναλαμβανόμενα θλιπτικά φορτία σε (N) για όλα τα δοκίμια και αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των μετρήσεων. Πηγή: Τ. Κουμιτζόγλου.

**Καταγράφονται οι ελάχιστες (min) και μέγιστες τιμές (max) σε αντοχή σε θλίψη σε (N), όπως και το εύρος τιμών ( R ) για κάθε κατηγορία.**

Ως εύρος τιμών ορίζεται η διαφορά της μέγιστης μείον της ελάχιστης παρατήρησης.

$$\text{Εύρος } R = \text{Μέγιστη παρατήρηση} - \text{Ελάχιστη παρατήρηση}$$

Όπως ήταν αναμενόμενο, τα δοκίμια της **οικογένειας 50** που έχουν τους λιγότερους κόμβους και άρα τη μικρότερη πυκνότητα ράβδων, αναλαμβάνουν και το μικρότερο θλιπτικό φορτίο. Η **οικογένεια 100** παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές από την **οικογένεια 50** και μικρότερες τιμές από την **οικογένεια**

**200.** Η **οικογένεια 200** παρουσιάζει τις μεγαλύτερες ελάχιστες και μέγιστες τιμές και αναλαμβάνει το μεγαλύτερο θλιπτικό φορτίο.

#### Υπολογίζεται το πηλίκο Μέγιστης / Ελάχιστης τιμής.

Παρατηρείται ότι:

Για την **οικογένεια 50** η μέγιστη τιμή (618,8 N) αντιστοιχεί σε **~3,1** φορές της ελάχιστης τιμής (198,8 N).

Για την **οικογένεια 100** η μέγιστη τιμή (1177,50 N) αντιστοιχεί σε **~2,8** φορές της ελάχιστης τιμής (427,5 N).

Για την **οικογένεια 200** η μέγιστη τιμή (2310 N) αντιστοιχεί σε **~1,7** φορές της ελάχιστης τιμής (1338,8 N).

Ενώ το εύρος τιμών για την **οικογένεια 200** είναι το μεγαλύτερο σε απόλυτη μέση τιμή (1790,9 N) ο λόγος Μέγιστης/Ελάχιστης τιμής της είναι ο μικρότερος από τις 3 οικογένειες. Αυτό είναι μια αρχική ένδειξη ότι οι μέγιστες τιμές μέγιστου αναλαμβανόμενου θλιπτικού φορτίου για την **οικογένεια 200** μπορεί να είναι πιο συγκεντρωμένες από ότι στις άλλες οικογένειες δοκιμίων.

#### Υπολογίζεται η Μέση τιμή – Mean ( $\bar{x}$ ).

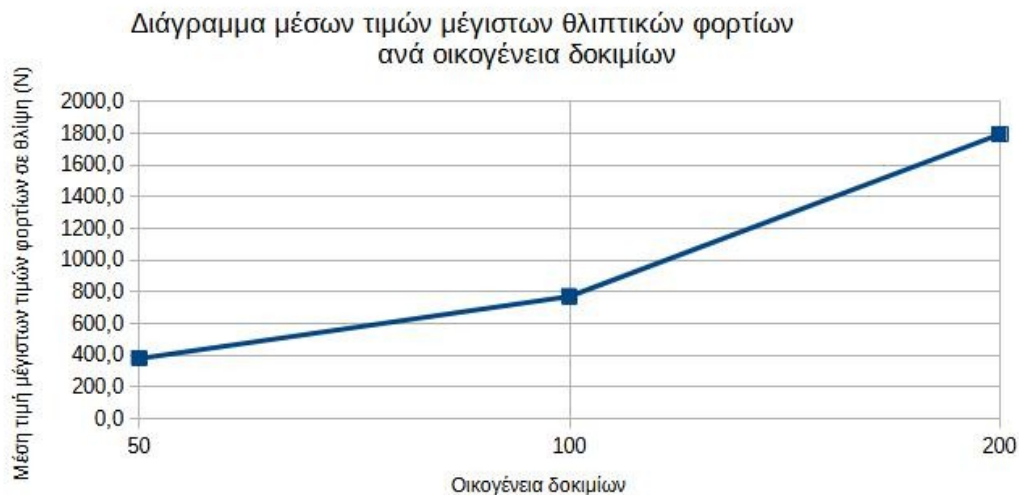
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Εικόνα 8\_119: Υπολογισμός μέσης τιμής. Πηγή: <https://en.wikipedia.org/wiki/Mean>

Η μέση τιμή για την **οικογένεια 50** (379,6 N) είναι περίπου **1/2** της μέσης τιμής της **οικογένειας 100** (770,4 N).

Η μέση τιμή για την **οικογένεια 200** (1790,9 N) είναι περίπου **2,5 φορές** μεγαλύτερη από τη μέση τιμή της **οικογένειας 100** (770,4 N).

Παρατηρείται ότι η αύξηση της μέσης τιμής του μέγιστου αναλαμβανόμενου θλιπτικού φορτίου για κάθε οικογένεια δεν είναι γραμμική, αλλά η τιμή της δύναμης αυξάνεται σημαντικά με το διπλασιασμό των αρχικών σημείων του αλγορίθμου (σημεία seeds κελιών νοσοποι) που χαρακτηρίζουν την οικογένεια. Εκτιμάται ότι η **οικογένεια 400** θα έχει ακόμα μεγαλύτερη αύξηση στη μέση τιμή αναλαμβανόμενου θλιπτικού φορτίου και αυτό είναι κάτι που έχει ενδιαφέρον να επαληθευτεί σε μελλοντικά στάδια της έρευνας, ώστε να επιβεβαιωθεί ο ρυθμός μεταβολής της αύξησης της μέσης τιμής της δύναμης αντοχής σε θλίψη/οικογένεια.



Εικόνα 8\_120: Διάγραμμα μέσων μέγιστων θλιπτικών φορτίων ανά οικογένεια δοκιμίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

### Διασπορά και τυπική απόκλιση δείγματος – Variance και Sample Standard Deviation.

Οι τιμές διασποράς και τυπικής απόκλισης δείγματος είναι αυξητικές από την **οικογένεια 50** προς την **οικογένεια 200**. Σημειώνεται ότι οι τιμές αυτές είναι **απόλυτες τιμές** για την κάθε οικογένεια και επομένως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση των διαφορών μεταξύ τους, αφού επηρεάζονται από την μέση τιμή για την κάθε περίπτωση. Παρατηρείται ότι η τυπική απόκλιση δείγματος για την **οικογένεια 200** είναι η μεγαλύτερη από όλες, αλλά δεν μπορεί να γίνει συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των οικογενειών μόνο από αυτή την τιμή. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο συντελεστής μεταβλητότητας **Coefficient of variation (CV)**, όπως περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο. Η τυπική απόκλιση δείγματος θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για τον ορισμό διαστημάτων εμπιστοσύνης.

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Εικόνα 8\_121: Υπολογισμός διασποράς δείγματος (αριστερά) και τυπικής απόκλισης δείγματος (δεξιά). Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Standard\\_deviation](https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_deviation).

### Συντελεστής μεταβλητότητας - Coefficient of variation (CV).

Ο συντελεστής μεταβλητότητας προκύπτει από το **πηλίκο της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή** και **πολλαπλασιάζεται με την τιμή 100**. Είναι ένα μέτρο **σχετικής διασποράς**, καθώς αυτός ο συντελεστής είναι ανεξάρτητος από τις μονάδες από τις οποίες προκύπτει και εκφράζεται επί τοις

εκατό (%). Ο συντελεστής μεταβλητότητας εκφράζει τη μεταβλητότητα των δεδομένων χωρίς την επίδραση της μέσης τιμής <sup>468</sup>.

$$CV (\%) = (\text{τυπική απόκλιση δείγματος} / \text{μέση τιμή}) * 100$$

Στις τιμές των **οικογενειών 50, 100 και 200** παρατηρείται ότι η **μέγιστη τιμή μεταβλητότητας** υπάρχει στην **οικογένεια 50** και βγαίνει μειούμενη κατά τη μετάβαση προς την **οικογένεια 100** και στη συνέχεια προς την **οικογένεια 200** (Πίνακας 8\_10). Παρατηρείται, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ότι ενώ η **οικογένεια 200** έχει τη μέγιστη τιμή τυπικής απόκλισης δείγματος (ως ΑΠΟΛΥΤΗ τιμή), έχει την **ελάχιστη τιμή συντελεστή μεταβλητότητας**.

Ο δείκτης που περιγράφει αν τα δείγματα είναι περισσότερο ή λιγότερο ομοιογενή μεταξύ τους είναι ο συντελεστής μεταβλητότητας. Από τις τρεις οικογένειες δειγμάτων, συγκριτικά η πιο ομοιογενής είναι η **οικογένεια 200** με δείκτη συντελεστή μεταβλητότητας **19,06**.

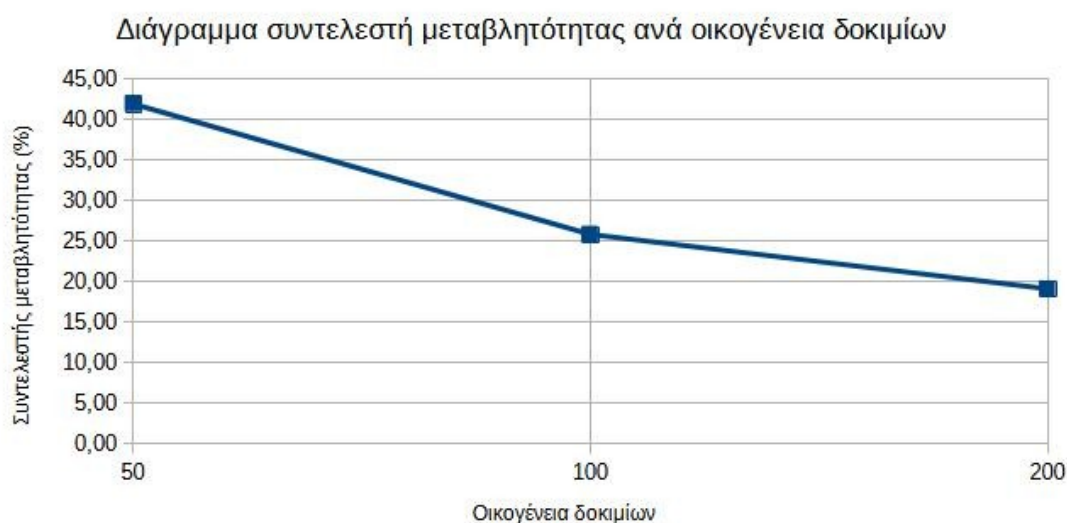
Η τιμή του **19,06 (%)** είναι μεγαλύτερη από την τιμή 10, που είναι και το ενδεικτικό όριο για να θεωρηθεί ότι το δείγμα είναι ομοιογενές <sup>469</sup>. Αυτό όμως που έχει σημασία στην προκείμενη περίπτωση είναι η διαφοροποίηση του δείκτη από τις τιμές που λαμβάνονται στις άλλες οικογένειες και η παρατήρηση ότι η τιμή του δείκτη μειώνεται όσο αυξάνει η πυκνότητα των ράβδων σε κάθε οικογένεια. Σε μια πιο πυκνή οικογένεια δοκιμίων, π.χ. την οικογένεια 300 ή 400 κ.ο.κ., αναμένεται η τιμή του δείκτη συντελεστή μεταβλητότητας να μειωθεί ακόμα περισσότερο.

**Τα παραπάνω σημαίνουν ότι τα δοκίμια της οικογένειας 200 έχουν σε σχέση με τα δοκίμια της οικογένειας 100 μικρότερη ΣΧΕΤΙΚΗ διασπορά ως προς τη δύναμη αντοχής σε θλίψη, και αυτά με τη σειρά τους (οικογένεια 100) έχουν μικρότερη ΣΧΕΤΙΚΗ διασπορά από τα δοκίμια της οικογένειας 50.**

Αποδεικνύεται συνεπώς πειραματικά και μαθηματικά ότι η επιρροή της τυχαιότητας είναι μικρότερη στα πυκνά δοκίμια και μεγαλύτερη στα αραιά δοκίμια. Όλα τα δοκίμια όλων των οικογενειών έχουν δημιουργηθεί αλγοριθμικά με στοχαστικές διαδικασίες, αλλά τα δοκίμια με τη μεγάλη πυκνότητα πλέγματος παρουσιάζουν κάποια κανονικότητα και σχετική προβλεψιμότητα, ενώ όσο το πλέγμα των δοκιμίων γίνεται πιο αραιό, το σύστημα γίνεται λιγότερο προβλέψιμο, πιο αόριστο και ασταθές και ίσως χαοτικό.

468 '2.3 ΜΕΤΡΑ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ', ημερομηνία πρόσβασης 5 Σεπτεμβρίου 2023, [http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/4704/Mathimatika-kai-Stoicheia-Statistikis\\_G-EPAL\\_html-apli/index2\\_3.html](http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/4704/Mathimatika-kai-Stoicheia-Statistikis_G-EPAL_html-apli/index2_3.html).

469 '2.3 ΜΕΤΡΑ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ'.



Εικόνα 8\_122: Διάγραμμα συντελεστή μεταβλητότητας ανά οικογένεια δοκιμίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

### Διαστήματα εμπιστοσύνης - Confidence intervals

Για τον υπολογισμό των διαστημάτων εμπιστοσύνης, τα αποτελέσματα των πειραμάτων της κάθε οικογένειας δοκιμίων εξετάζονται με την κατανομή **Student (t-distribution)**, καθώς ο αριθμός δειγμάτων ανά οικογένεια (9) είναι μικρός ( $9 < 30$ ).

Καθώς τα δοκίμια της κάθε οικογένειας είναι  $n=9$  οι βαθμοί ελευθερίας είναι  $n-1=8$

Επιλέγεται διάστημα εμπιστοσύνης **95%** για **8** βαθμούς ελευθερίας και  $\alpha=0.05$  (two tails),  $t_{8,0.025}$

Από πίνακα **t-Table** για 8 βαθμούς ελευθερίας,  $t_{8,0.025}$  και κατανομή two tails λαμβάνεται η τιμή:

$$t=2.306$$

### t Table

cum. prob	$t_{.50}$	$t_{.75}$	$t_{.80}$	$t_{.85}$	$t_{.90}$	$t_{.95}$	$t_{.975}$	$t_{.99}$	$t_{.995}$	$t_{.999}$	$t_{.9995}$
one-tail	0.50	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001	0.0005
two-tails	1.00	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.002	0.001
df											
1	0.000	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	318.31	636.62
2	0.000	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	0.000	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	0.000	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.000	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	0.000	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.000	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	0.000	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.000	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.000	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587

Εικόνα 8\_123: t-table. Πηγή: <https://www.sjsu.edu/faculty/gerstman/StatPrimer/t-table.pdf>

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το **διάστημα εμπιστοσύνης 95%** για  $t_{8,0.025}$  είναι:

$$\text{μέση τιμή} \pm 2.306 * (\text{τυπική απόκλιση}) / n^{-1}$$

Επομένως για τις **οικογένειες 50, 100, 200** τα διαστήματα εμπιστοσύνης **95%** διαμορφώνονται ως εξής:

μέγιστο αναλαμβανόμενο θλιπτικό φορτίο (N)				
	οικογένεια <b>50</b>	οικογένεια <b>100</b>	οικογένεια <b>200</b>	
	(N)	(N)	(N)	
Μέση τιμή (N)	<b>379,6</b>	<b>770,4</b>	<b>1790,9</b>	Mean <input checked="" type="checkbox"/>
$t_{8,0.025}$	2,306	2,306	2,306	
Τυπική απόκλιση δείγματος (N)	<b>159,01</b>	<b>198,7</b>	<b>341,3</b>	Sample Standard Deviation (s)
Πλήθος δείγματος: n	9	9	9	
$n^{-1}$	3	3	3	
διάστημα εμπιστοσύνης 95% για κατανομή student				
άνω όριο (N)	501,83	923,13	2053,25	
κάτω όριο (N)	257,37	617,67	1528,55	

Πίνακας 8\_11: Υπολογισμός διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% σύμφωνα με την κατανομή Student (t-distribution) για την κάθε οικογένεια δοκιμίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Συνεπώς:

Για την **οικογένεια 50**, με βεβαιότητα **95%**, η μέση τιμή **του πληθυσμού** κυμαίνεται στις τιμές από **257,37 (N)** έως **501,83 (N)**.

Για την **οικογένεια 100**, με βεβαιότητα **95%**, η μέση τιμή **του πληθυσμού** κυμαίνεται στις τιμές από **617,67 (N)** έως **923,13 (N)**.

Για την **οικογένεια 200**, με βεβαιότητα **95%**, η μέση τιμή **του πληθυσμού** κυμαίνεται στις τιμές από **1528,55 (N)** έως **2053,25 (N)**.

Παρατηρείται ότι το εύρος του διαστήματος εμπιστοσύνης προς τη μέγιστη τιμή του διαστήματος είναι αντίστοιχα για την κάθε οικογένεια:

Οικογένεια 50:	<b>[501,83 (N) - 257,37 (N)] / 501,83 (N) =</b>	<b>0,49</b>
Οικογένεια 100:	<b>[923,13 (N) - 617,67 (N)] / 923,13 (N) =</b>	<b>0,33</b>
Οικογένεια 200:	<b>[2053,25 (N) - 1528,55 (N)] / 2053,25 (N) =</b>	<b>0,26</b>

Η τιμή δηλαδή μειώνεται όσο πιο πυκνή γίνεται η οικογένεια, δηλαδή το διάστημα εμπιστοσύνης γίνεται πιο ακριβές ποσοστιαία όσο πιο πυκνή γίνεται η οικογένεια δοκιμίων.

Με αυτό τον τρόπο υπολογίστηκε στατιστικά το εύρος τιμών δυνάμεων εντός των οποίων βρίσκεται η μέση τιμή όχι του γνωστού δείγματος, αλλά του άγνωστου θεωρητικού πληθυσμού για την κάθε οικογένεια και επομένως προσδιορίζεται στατιστικά η μέση συμπεριφορά για όλα τα δοκίμια της κάθε οικογένειας.



## Χαρακτηριστικές τιμές

Υπολογίστηκαν **οι χαρακτηριστικές τιμές πιθανότητας 5%** (5<sup>th</sup> percentile) σε (N) για την κατανομή Student (t-distribution) για τα μέγιστα θλιπτικά φορτία για την κάθε οικογένεια δοκιμίων 50, 100 και 200.

Για τον υπολογισμό της τιμής της πιθανότητας  $\alpha=0,05$  για 9 δείγματα χρησιμοποιήθηκε ο τύπος που ακολουθεί:

$$\text{χαρακτηριστική τιμή} = \text{μέση τιμή} - t_{8,0.05} * (\text{τυπική απόκλιση})$$

Από τον πίνακα t-table για  $\alpha=0,05$ , δείγμα  $n=9$  και άρα  $n-1=8$  βαθμούς ελευθερίας η τιμή  $t=1,860$ .

### t Table

cum. prob	$t_{.50}$	$t_{.75}$	$t_{.80}$	$t_{.85}$	$t_{.90}$	$t_{.95}$	$t_{.975}$	$t_{.99}$	$t_{.995}$	$t_{.999}$	$t_{.9995}$
one-tail	<b>0.50</b>	<b>0.25</b>	<b>0.20</b>	<b>0.15</b>	<b>0.10</b>	<b>0.05</b>	<b>0.025</b>	<b>0.01</b>	<b>0.005</b>	<b>0.001</b>	<b>0.0005</b>
two-tails	<b>1.00</b>	<b>0.50</b>	<b>0.40</b>	<b>0.30</b>	<b>0.20</b>	<b>0.10</b>	<b>0.05</b>	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>	<b>0.002</b>	<b>0.001</b>
df											
1	0.000	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	318.31	636.62
2	0.000	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	0.000	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	0.000	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.000	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	0.000	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.000	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	0.000	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.000	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.000	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587

Εικόνα 8\_124: t-table. Πηγή: <https://www.sjsu.edu/faculty/gerstman/StatPrimer/t-table.pdf>

Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει ο πίνακας υπολογισμών **χαρακτηριστικών τιμών πιθανότητας 5%** (5<sup>th</sup> percentile) για τα μέγιστα θλιπτικά φορτία για την κάθε οικογένεια δοκιμίων 50, 100 και 200 σε (N) που ακολουθεί:

μέγιστο αναλαμβανόμενο θλιπτικό φορτίο (N)			
	οικογένεια 50	οικογένεια 100	οικογένεια 200
Μέση τιμή (N)	379,6	770,4	1790,9
$t_{8,0.025}$	2,306	2,306	2,306
Τυπική απόκλιση δείγματος (N)	159,01	198,7	341,3
Πλήθος δείγματος: n	9	9	9
χαρακτηριστική τιμή 5%			
$t_{8,0.05}$	1,86	1,86	1,86
χαρακτηριστική τιμή 5% (N)	83,84	400,8	1156,1

Πίνακας 8\_12: Υπολογισμών χαρακτηριστικών τιμών πιθανότητας 5% (5<sup>th</sup> percentile) για τα μέγιστα θλιπτικά φορτία για την κάθε οικογένεια δοκιμίων 50, 100 και 200 σε (N) για την κατανομή Student (t-distribution). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Συνεπώς:

Η **οικογένεια 50** έχει χαρακτηριστική τιμή πιθανότητας 5% για κατανομή Student 9 δειγμάτων = **83,84** N, δηλαδή το 95% των τιμών μέγιστων θλιπτικών φορτίων της **οικογένειας 50** θα είναι > **83,84** N.

Η **οικογένεια 100** έχει χαρακτηριστική τιμή πιθανότητας 5% για κατανομή Student 9 δειγμάτων = **400,8** N, δηλαδή το 95% των τιμών μέγιστων θλιπτικών φορτίων της **οικογένειας 100** θα είναι > **400,8** N.

Η **οικογένεια 200** έχει χαρακτηριστική τιμή πιθανότητας 5% για κατανομή Student 9 δειγμάτων = **1156,1** N, δηλαδή το 95% των τιμών μέγιστων θλιπτικών φορτίων της **οικογένειας 200** θα είναι > **1156,1** N.

### Κατακόρυφες μετατοπίσεις στο μέγιστο θλιπτικό φορτίο

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις των δοκιμίων (σε mm) κατά το μέγιστο θλιπτικό φορτίο για την κάθε οικογένεια δοκιμίων. Στη συνέχεια ακολουθούν διαγράμματα τιμών κατακόρυφης μετατόπισης για κάθε δοκίμιο (σε mm) σε σχέση με το μέγιστο θλιπτικό τους φορτίο (σε N).

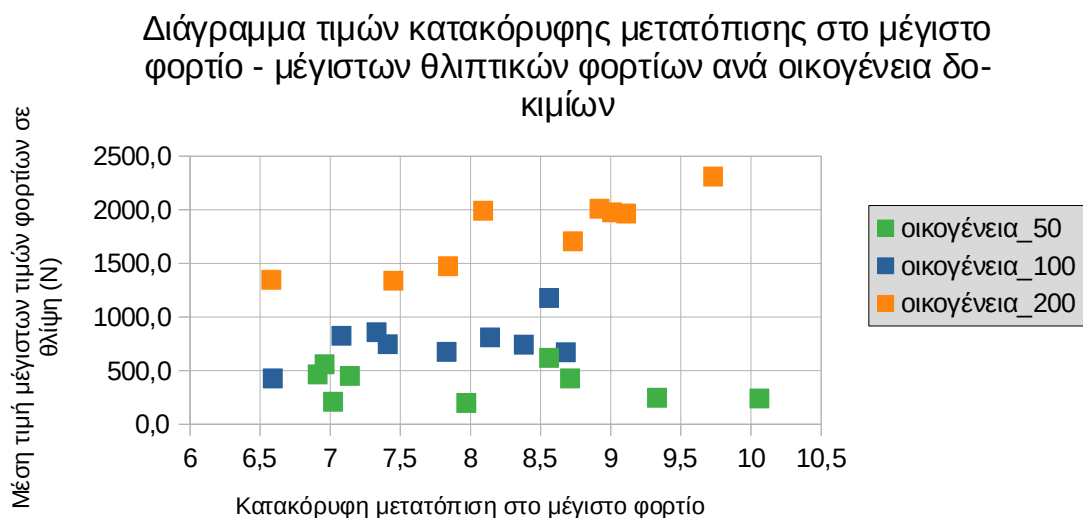
Από τις μετρήσεις των κατακόρυφων μετατοπίσεων κατά τα μέγιστα θλιπτικά φορτία για το κάθε δοκίμιο υπολογίζονται οι μέσες τιμές για κάθε οικογένεια. Παρατηρείται ότι οι μέσες τιμές είναι και για τις τρεις οικογένειες περίπου 8mm (8,07mm - 7,78mm – 8,38mm για οικογένειες 50, 100 και 200 αντίστοιχα). Παρατηρείται γραφικά ότι και οι τρεις οικογένειες έχουν παρόμοια διασπορά κατακόρυφης μετατόπισης, με τις κατακόρυφες όμως μετατοπίσεις της οικογένειας 100 να είναι σχετικά πιο συγκεντρωμένες.

κατακόρυφη μετακίνηση στο μέγιστο φορτίο (mm)

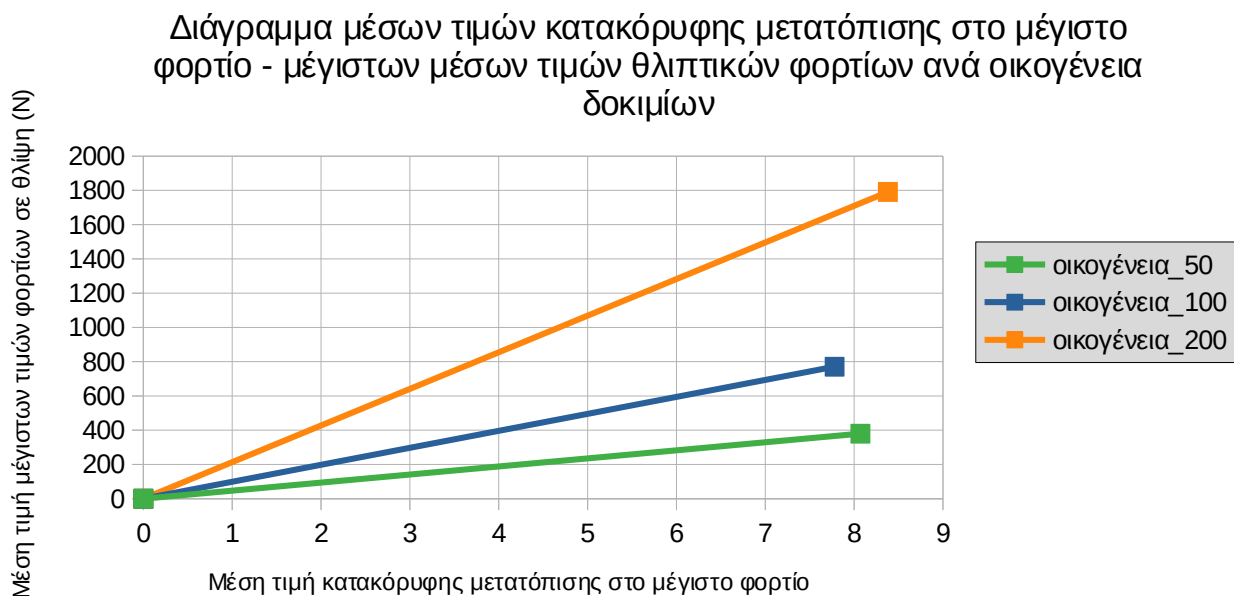
seed	οικογένεια	οικογένεια	οικογένεια
	50	100	200
	(mm)	(mm)	(mm)
1	7,02	6,59	8,73
2	10,06	8,68	6,58
3	6,96	7,08	7,45
4	8,56	7,41	9,73
5	7,97	8,14	8,09
6	7,14	8,56	9,11
7	9,33	7,33	8,92
8	8,71	7,83	9,01
9	6,91	8,38	7,84
Μέση τιμή (mm)	<b>8,07</b>	<b>7,78</b>	<b>8,38</b>

Πίνακας 8\_13: Κατακόρυφες μετατοπίσεις των δοκιμίων (σε mm) κατά το μέγιστο θλιπτικό φορτίο για την κάθε οικογένεια δοκιμίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Τέλος από το διάγραμμα μέσων τιμών κατακόρυφων μετατοπίσεων στα μέγιστα θλιπτικά φορτία και μέσων τιμών μέγιστων θλιπτικών φορτίων παρατηρείται αύξηση φέρουσας ικανότητας (μέγιστο φορτίο) με αντίστοιχη αύξηση της αρχικής ακαμψίας καθώς πυκνώνει το δίκτυο των ράβδων.



Εικόνα 8\_125: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων στο μέγιστο θλιπτικό φορτίο με μέγιστο θλιπτικό φορτίο για κάθε δοκίμιο, ανά οικογένεια. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_126: Διάγραμμα μέσων τιμών κατακόρυφης μετατόπισης στο μέγιστο θλιπτικό φορτίο - μέγιστων μέσων τιμών θλιπτικών φορτίων ανά οικογένεια δοκιμίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

	οικογένεια 50		οικογένεια 100		οικογένεια 200	
Μέση τιμή κατακόρυφης μετατόπισης (mm)	0,00	8,07	0,00	7,78	0,00	8,38
Μέση τιμή μέγιστου φορτίου (N)	0,0	379,6	0,0	770,4	0,0	1790,9

Πίνακας 8\_14: Πίνακας μέσων τιμών κατακόρυφης μετατόπισης στο μέγιστο θλιπτικό φορτίο - μέγιστων μέσων τιμών θλιπτικών φορτίων ανά οικογένεια δοκιμίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

## 8.9.2 Κόμβοι και ράβδοι

Στους πίνακες και τα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων των πειραμάτων σε συνδυασμό με τον αριθμό των κόμβων του κάθε δοκιμίου.

Η πρώτη γενική παρατήρηση είναι ότι οι οικογένειες με το μεγαλύτερο αριθμό κόμβων έχουν και μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη συνολικά ανά οικογένεια.

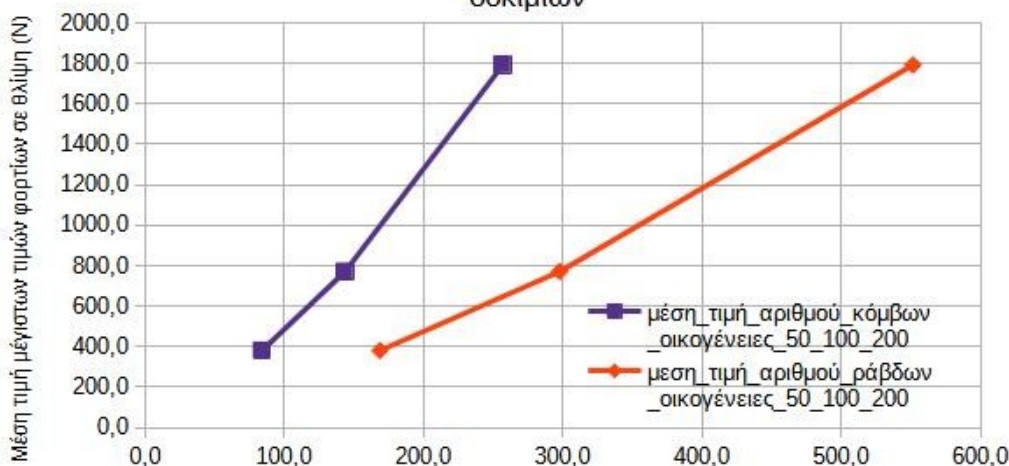
Σε συσχέτισμό με τα δεδομένα **μέσων τιμών αριθμού κόμβων** και **μέσων τιμών αριθμού ράβδων** παρατηρείται ότι η αύξηση της μέσης τιμής από οικογένεια σε οικογένεια δεν είναι γραμμική, αλλά όσο αυξάνεται η μέση τιμή αριθμού κόμβων και ράβδων, ο ρυθμός αύξησης μέγιστου θλιπτικού φορτίου **αυξάνεται**.

Πίνακας μέσων τιμών αριθμού κόμβων και ράβδων και μέσων τιμών μέγιστων θλιπτικών φορτίων

	οικογένεια 50	οικογένεια 100	οικογένεια 200	
Αριθμός κόμβων	83,8	143,6	256,9	Μέση τιμή
Αριθμός ράβδων	168,6	297,7	551,3	Μέση τιμή
Μέγιστο θλιπτικό φορτίο (N)	379,6	770,4	1790,9	Μέση τιμή

Πίνακας 8\_15: Πίνακας μέσων τιμών αριθμού κόμβων και ράβδων και μέσων τιμών μέγιστων θλιπτικών φορτίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Διάγραμμα μέσων τιμών αριθμού κόμβων και ράβδων και μέσων τιμών μέγιστων θλιπτικών φορτίων ανά οικογένεια δοκιμίων



Εικόνα 8\_127: Διάγραμμα μέσων τιμών αριθμού κόμβων και ράβδων και μέσων τιμών μέγιστων φορτίων σε θλίψη. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Παρατηρείται αρχικά ότι για τα δοκίμια της κάθε οικογένειας, δεν υπάρχει κάποιος εμφανής ξεκάθαρος συσχετισμός ανάμεσα στον αριθμό των κόμβων κάθε δοκιμίου σε σχέση με το μέγιστο θλιπτικό φορτίο που έχει αυτό. Φαίνεται πως η μεγαλύτερη αντοχή υπάρχει στα δοκίμια με τους περισσότερους κόμβους και πως υπάρχει γενικά μια σύνδεση της αύξησης του αριθμού κόμβων με την αύξηση της αντοχής των δοκιμίων. **Παρατηρείται όμως ότι και στις τρεις οικογένειες δοκιμίων**

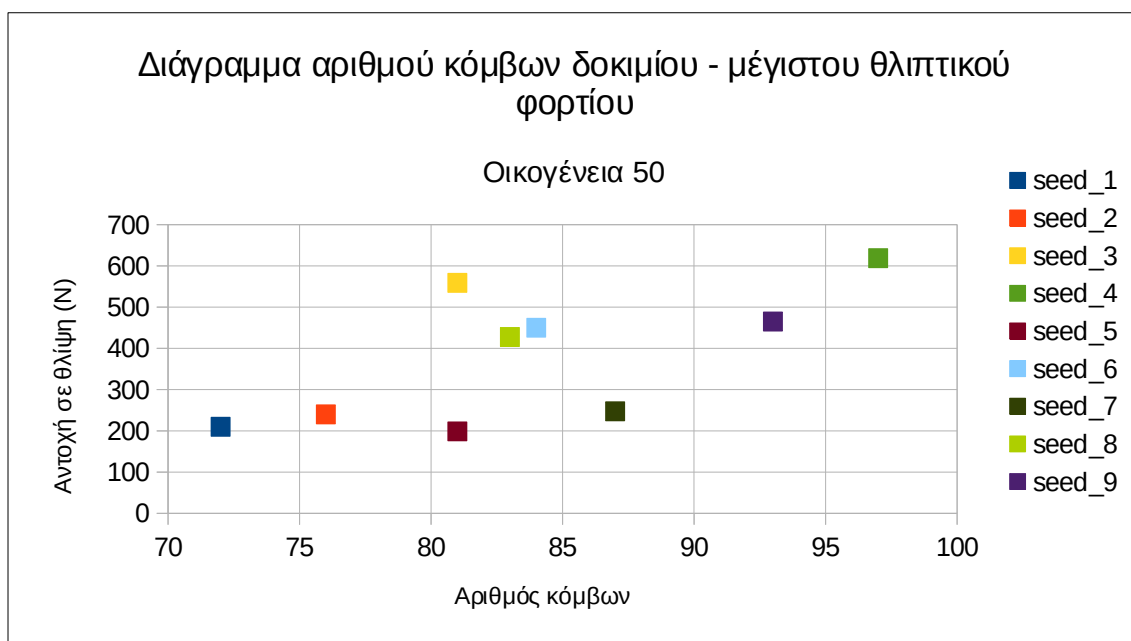
υπάρχουν μεμονωμένες περιπτώσεις δοκιμών με λιγότερους κόμβους που έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη από δοκίμια της ίδιας οικογένειας με μεγαλύτερο αριθμό κόμβων.

Αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός των κόμβων από μόνος του δεν αποτελεί διακριτό κριτήριο για την αντοχή σε θλίψη του κάθε δοκιμίου. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, ο αριθμός των ράβδων είναι περίπου διπλάσιος από τον αριθμό των κόμβων. Επομένως και ο αριθμός των ράβδων κάθε δοκιμίου δεν αποτελεί διακριτό κριτήριο του για την αντοχή σε θλίψη του κάθε δοκιμίου.

**Συνεπώς σημασία έχει ΚΑΙ η συνολική δομή της κατασκευής και η διάταξη των κόμβων, καθώς και η διάταξη των ράβδων σε σχέση με τους κόμβους ανά περίπτωση δοκιμίου.**

Οικογένεια 50	Seed 1	Seed 2	Seed 3	Seed 4	Seed 5	Seed 6	Seed 7	Seed 8	Seed 9
Αριθμός κόμβων δοκιμίου	72	76	81	97	81	84	87	83	93
Μέγιστο φορτίο σε θλίψη (N)	210	240	558,8	618,8	198,8	450	247,5	427,5	465

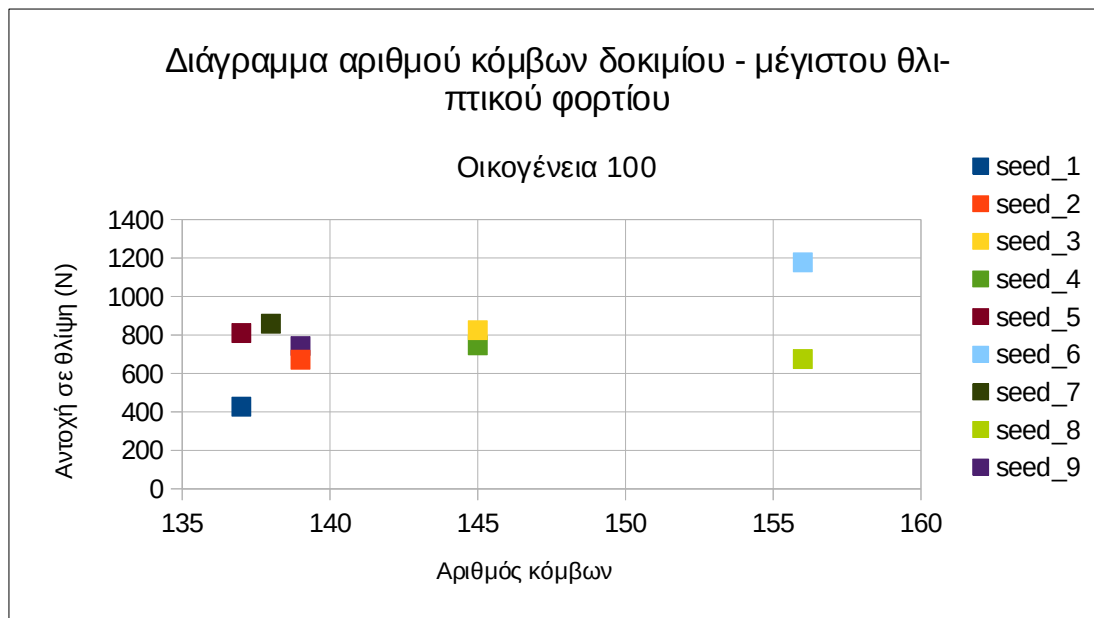
Πίνακας 8\_16: Αποτελέσματα πειράματος για τα δοκίμια οικογένειας 50. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_128: Διάγραμμα αριθμού κόμβων δοκιμίου – μέγιστων φορτίων σε θλίψη για την οικογένεια δοκιμών 50. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Οικογένεια 100	Seed 1	Seed 2	Seed 3	Seed 4	Seed 5	Seed 6	Seed 7	Seed 8	Seed 9
Αριθμός κόμβων δοκιμίου	137	139	145	145	137	156	138	156	139
Μέγιστο φορτίο σε θλίψη (N)	427,5	671,3	825	746,3	810	1177,5	858,8	675	742,5

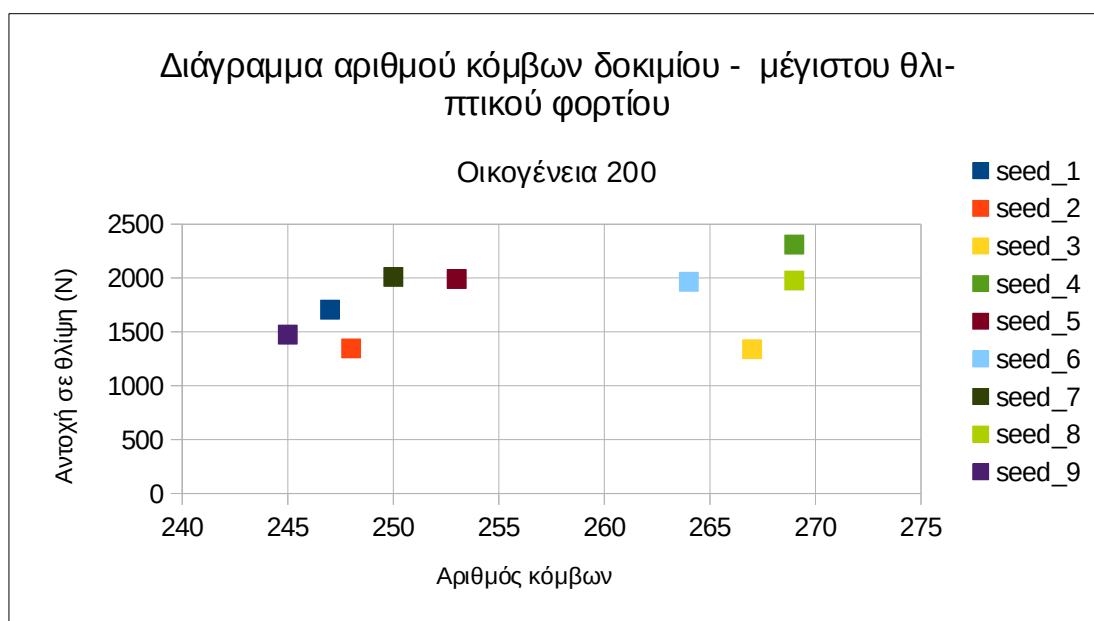
Πίνακας 8\_17: Αποτελέσματα πειράματος για τα δοκίμια οικογένειας 100. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_129: Διάγραμμα αριθμού κόμβων δοκιμίου - μέγιστων φορτίων σε θλίψη για την οικογένεια δοκιμίων 100. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Οικογένεια 200	Seed 1	Seed 2	Seed 3	Seed 4	Seed 5	Seed 6	Seed 7	Seed 8	Seed 9
Αριθμός κόμβων δοκιμίου	247	248	267	269	253	264	250	269	245
Μέγιστο φορτίο σε θλίψη (N)	1706,3	1346,3	1338,8	2310	1991,3	1965	2010	1976,3	1473,8

Πίνακας 8\_18: Αποτελέσματα πειράματος για τα δοκίμια οικογένειας 200. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_130: Διάγραμμα αριθμού κόμβων δοκιμίου - μέγιστων φορτίων σε θλίψη για την οικογένεια δοκιμίων 200. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Για την κάθε οικογένεια δοκιμίων υπολογίζεται επίσης για τον αριθμό κόμβων και ράβδων η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας, ενώ αναγράφεται και ο συντελεστής μεταβλητότητας για το μέγιστο θλιπτικό φορτίο, όπως υπολογίστηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής μεταβλητότητας για τον αριθμό των κόμβων και ο συντελεστής μεταβλητότητας για τον αριθμό των ράβδων μειώνεται όσο τα δοκίμια γίνονται πιο πυκνά, δηλαδή όταν τα δοκίμια έχουν περισσότερους κόμβους και ράβδους: (0,093→0,054→0,04 για τους κόμβους) και (0,10→0,052→0,038 για τις ράβδους).

**Αυτό σημαίνει ότι όσο αυξάνεται η πυκνότητα κόμβων και ράβδων τα δοκίμια γίνονται πιο ομοιόμορφα γεωμετρικά.**

Παρατηρείται επίσης ότι όσο μειώνονται οι συντελεστές μεταβλητότητας αριθμών κόμβων και αριθμών ράβδων μειώνεται και ο συντελεστής μεταβλητότητας αντοχής σε θλίψη: (41,89→25,8→19,06).

**Αυτό σημαίνει ότι όσο αυξάνεται η πυκνότητα κόμβων και ράβδων τα δοκίμια συμπεριφέρονται μηχανικά πιο ομοιότροπα.**

Οικογένεια 50	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	συντελεστής μεταβλητότητας	συντελεστής μεταβλητότητας μέγιστων θλιπτικών φορτίων
			(%)	(%)
<b>Αριθμός κόμβων</b>	83,778	7,791	0,093	41,89
<b>Αριθμός ράβδων</b>	168,556	16,794	0,100	

Οικογένεια 100	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	συντελεστής μεταβλητότητας	συντελεστής μεταβλητότητας μέγιστων θλιπτικών φορτίων
			(%)	(%)
<b>Αριθμός κόμβων</b>	143,556	7,683	0,054	25,8
<b>Αριθμός ράβδων</b>	297,667	15,346	0,052	

Οικογένεια 200	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	συντελεστής μεταβλητότητας	συντελεστής μεταβλητότητας μέγιστων θλιπτικών φορτίων
			(%)	(%)
<b>Αριθμός κόμβων</b>	256,889	10,167	0,040	19,06
<b>Αριθμός ράβδων</b>	551,333	21,119	0,038	

Πίνακας 8\_19: Πίνακας συσχέτισμού συντελεστών μεταβλητότητας αριθμού κόμβων/ράβδων και συντελεστή μεταβλητότητας μέγιστων φορτίων σε θλίψη για την κάθε οικογένεια δοκιμίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

### 8.9.3 Μορφές αστοχίας για τα ραβδωτά δοκίμια

Όσον αφορά στις μορφές αστοχίες πρέπει να σημειωθεί ότι εξετάζοντας τα δοκίμια μακροσκοπικά (ως κυλινδρικά δοκίμια στα οποία το φορτίο επιβάλλεται παράλληλα με τον άξονα του), παρατηρείται θλιπτική τους φόρτιση. Η ασύμμετρη δομή όμως των ράβδων και ο τυχαίος προσανατολισμός τους στη δομή του δοκιμίου, καθώς και οι μη συμμετρικές διατάξεις των κόμβων στη βάση και στη στέψη, έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται μη συμμετρικές έκκεντρες θλίψεις που δημιουργούν με τη σειρά τους ποικίλες μορφές φόρτισης (π.χ. θλίψη, θλίψη με λυγισμό, εφελκυσμό, διάτμηση), ανάλογα με τη τοπική διάταξη και προσανατολισμό των ράβδων.

Όλα τα ραβδωτά δοκίμια συμπεριφέρονται αρχικά με τον ίδιο τρόπο. Καθώς αρχίζει να ασκείται φορτίο στο επίπεδο της στέψης των δοκιμίων, αυτά αρχίζουν σταδιακά να συμπιέζονται. Καθώς συνεχίζεται η συμπίεση, ακολουθούν οι πρώτες αστοχίες, οι οποίες μπορεί να είναι τοπικές ή/και καθολικές. Η τοπική αστοχία δεν συνεπάγεται και καθολική αστοχία, καθώς μετά την τοπική αστοχία γίνονται ανακατανομές δυνάμεων και η καθολική αστοχία ακολουθεί με την αύξηση του θλιπτικού φορτίου.

Σε κάποιες περιπτώσεις, και ιδιαίτερα στα πυκνά δοκίμια της **οικογένειας 200**, η συσσωρευμένη δύναμη μετά την τοπική αστοχία και την ανακατανομή των δυνάμεων εκτονώνεται ξαφνικά, καθώς το δοκίμιο μετά την καθολική αστοχία αποσυμπιέζεται απότομα, με αποτέλεσμα να γίνεται εντυπωσιακή εκτίναξη του.

Τα ακριβή μεγέθη, τα μέγιστα φορτία και η μέγιστη μετατόπιση της κεφαλής για το κάθε δοκίμιο απεικονίζονται στις σχετικές γραφικές παραστάσεις δυνάμεων/μετατόπισης κεφαλής της μηχανής και στους πίνακες καταγραφής δεδομένων.



Εικόνα 8\_131: Ραβδωτά δοκίμια μετά τις δοκιμές σε θλίψη και πριν την εξέταση των αστοχιών τους. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Οι κύριες θέσεις αστοχίας των δοκιμών παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

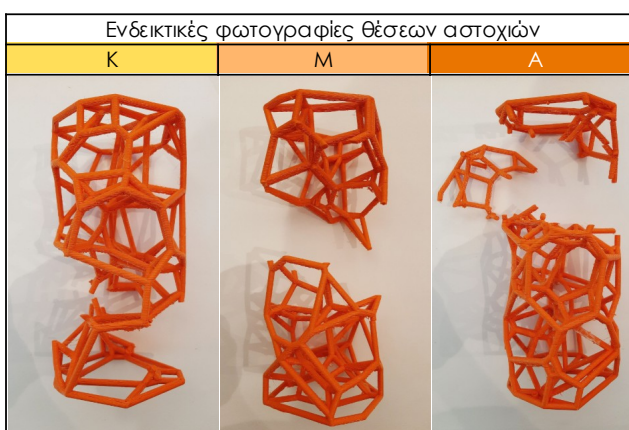
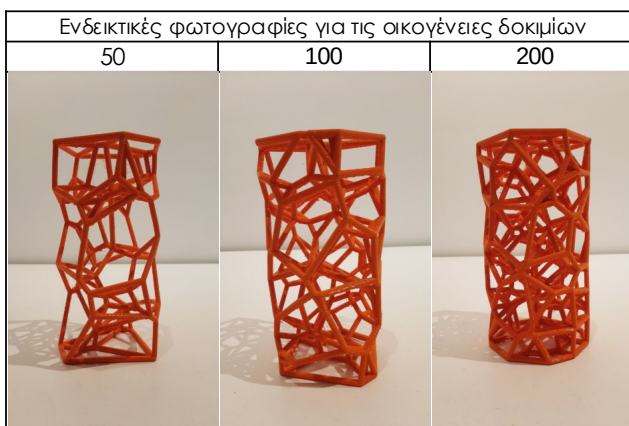
A/A	Κωδικός οικογένειας-Seed	Κωδικός log	Μέγιστες τιμές φορτίων σε θλίψη (N)	Θέση αστοχίας
-----	--------------------------	-------------	-------------------------------------	---------------

1	50-1	Lor20-aa-1	210	K
2	50-2	Lor20-aa-2	240	K
3	50-3	Lor20-aa-3	558,8	M
4	50-4	Lor20-aa-4	618,8	M
5	50-5	Lor20-aa-5	198,8	M
6	50-6	Lor20-aa-6	450	K
7	50-7	Lor20-aa-7	247,5	M
8	50-8	Lor20-aa-8	427,5	M
9	50-9	Lor20-aa-9	465	K

10	100-1	Lor20-a-1	427,5	M	A	
11	100-2	Lor20-a-3	671,3	M		
12	100-3	Lor20-a-4	825		A	
13	100-4	Lor20-a-5	746,3	M		
14	100-5	Lor20-a-6	810	K	M	A
15	100-6	Lor20-a-7	1177,5	K		
16	100-7	Lor20-a-8	858,8	M		
17	100-8	Lor20-a-9	675			A
18	100-9	Lor20-a-10	742,5	K		

19	200-1	Lor20-3	1706,3	M		
20	200-2	Lor20-4	1346,3	K		
21	200-3	Lor20-5	1338,8	M	A	
22	200-4	Lor20-6	2310	K		
23	200-5	Lor20-7	1991,3	M		
24	200-6	Lor20-8	1965	M	A	
25	200-7	Lor20-9	2010	M	A	
26	200-8	Lor20-10	1976,3	K	M	
27	200-9	Lor20-11	1473,8			A

A	Αστοχία σε ύψος ~2/3 από τη βάση του δοκιμίου
M	Αστοχία σε ύψος ~1/2 από τη βάση του δοκιμίου
K	Αστοχία σε ύψος ~1/3 από τη βάση του δοκιμίου



Πίνακας 8\_20: Πίνακας κατηγοριοποίησης αστοχιών για τα δοκίμια οικογενειών 50,100 και 200 ανάλογα με τη θέση των αστοχιών καθ' ύψος των δοκιμών. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Οι αστοχίες παρουσιάζονται σε διαφορετικές θέσεις στα δοκίμια.

Για όλες τις οικογένειες δοκιμών **50**, **100** και **200** η πλειονότητα των αστοχιών συμβαίνει σε ύψος **~1/2 του ύψους των δοκιμών**.

Στις **οικογένειες 100 και 200**, τα πιο πυκνά δοκίμια δηλαδή, παρατηρούνται αστοχίες **κυρίως** στο μεσαίο και στο άνω τμήμα των δοκιμών.

Μακροσκοπικά οι αστοχίες οφείλονται σε καταπόνηση από φόρτιση σε θλίψη, κεντρική ή έκκεντρη, ανάλογα με τη μορφή της δομής τους, όπως περιγράφηκε προηγουμένως.


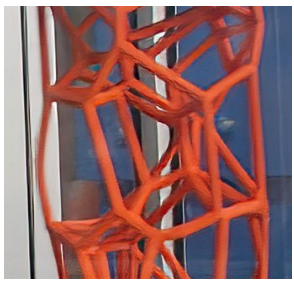

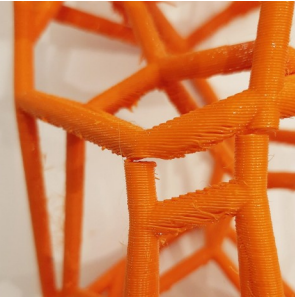
Οι περισσότερες αστοχίες παρατηρούνται στις ράβδους στις περιοχές κοντά στην ένωση τους με τους κόμβους, όπου και παρατηρείται αποκόλληση των ράβδων από τους κόμβους.

Παρατηρούνται αστοχίες κυρίως λόγω φόρτισης σε θλίψη, κάποιες λόγω θλίψης με λυγισμό και κάποιες αστοχίες λόγω διάτμησης. Παρατηρούνται επίσης αστοχίες λόγω εφελκυσμών.

Οι αστοχίες από θλίψη με λυγισμό των ράβδων (τοπικές αστοχίες που οδηγούν στη συνέχεια σε καθολική αστοχία) εμφανίζονται κυρίως στα δοκίμια της **οικογένειας 50**, καθώς τα δοκίμια αυτής της κατηγορίας είναι και τα πιο αραιά. Στα δοκίμια της οικογένειας 50, λόγω του μικρότερου αριθμού

κόμβων σε σχέση με τα δοκίμια των άλλων οικογενειών (100, 200), οι αντίστοιχες ράβδοι έχουν μεγαλύτερο μήκος λυγισμού, εξακολουθώντας όμως να έχουν την ίδια διατομή (0,5cm) όπως όλα τα δοκίμια όλων των οικογενειών. Συνεπώς οι ράβδοι αυτής της κατηγορίας είναι οι πιο ευάλωτες σε καταπονήσεις τέτοιου είδους.


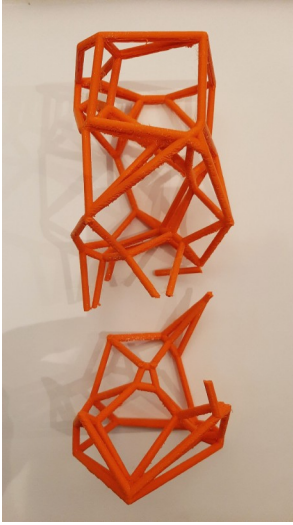
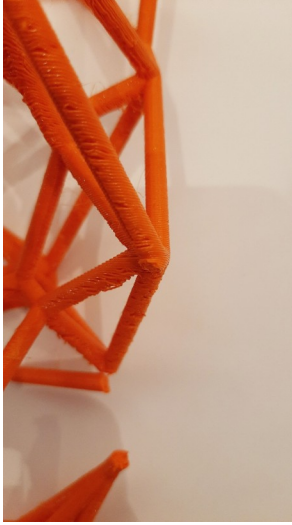
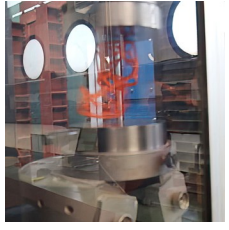
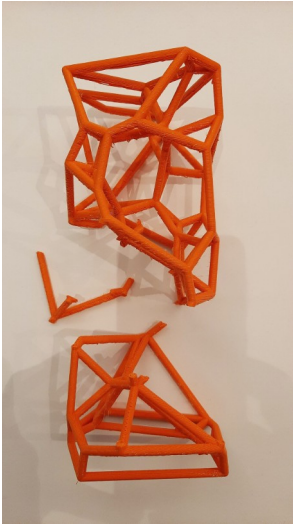


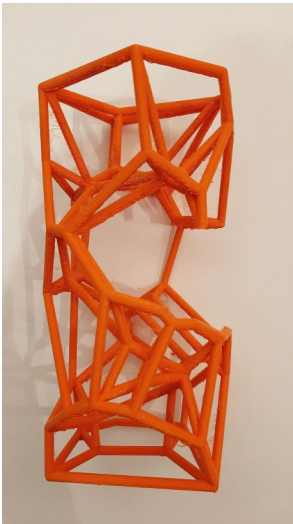

Οι κύριες μορφές αστοχίας των δοκιμίων παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:


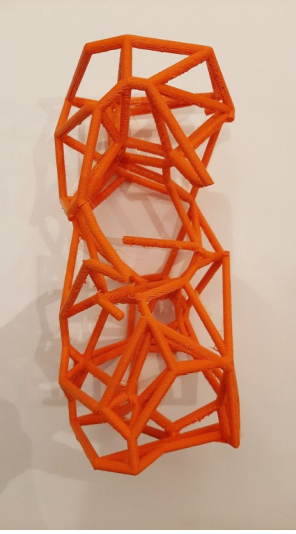

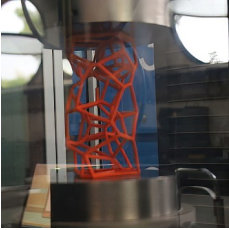
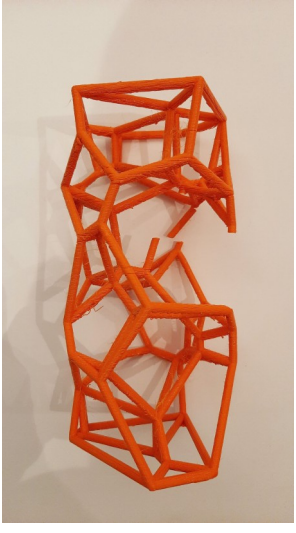

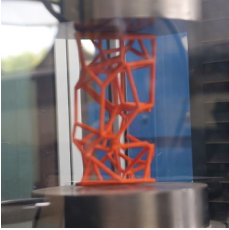
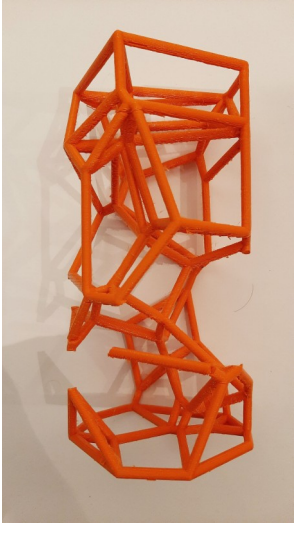

Κατηγορία αστοχίας: B1	Κατηγορία αστοχίας: B2	Κατηγορία αστοχίας: B3	Κατηγορία αστοχίας: B4
Αποκόλληση ράβδων από κόμβους.	Αστοχία σε ράβδους λόγω θλίψης με λυγισμό.	Αστοχία σε ράβδους λόγω διάτμησης.	Αστοχία σε ράβδους λόγω εφελκυσμού.
			
Ενδεικτική φωτογραφία από δοκίμιο 50-7	Ενδεικτική φωτογραφία από δοκίμιο 50-9	Ενδεικτική φωτογραφία από δοκίμιο 50-6	Ενδεικτική φωτογραφία από δοκίμιο 50-7

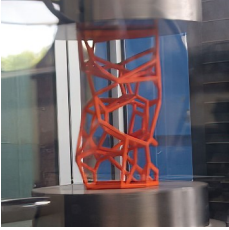


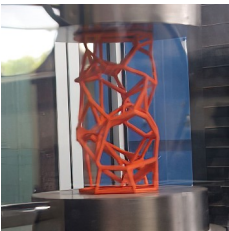
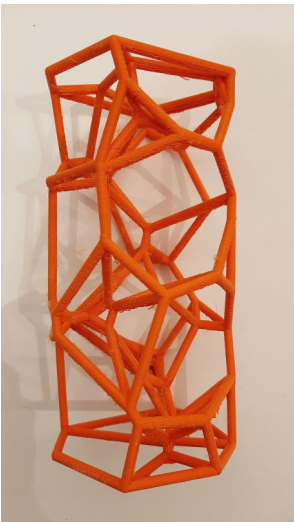
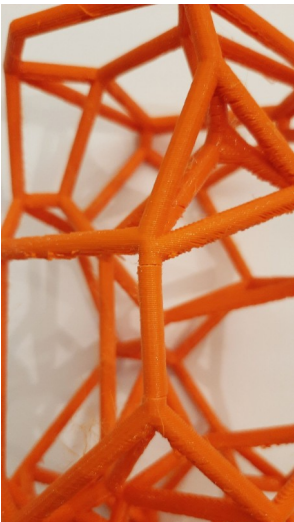
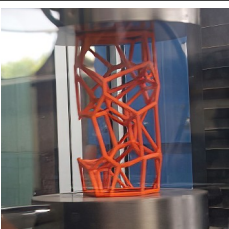


Πίνακας 8\_21: Κύριες μορφές αστοχίας και ενδεικτικές φωτογραφίες. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.


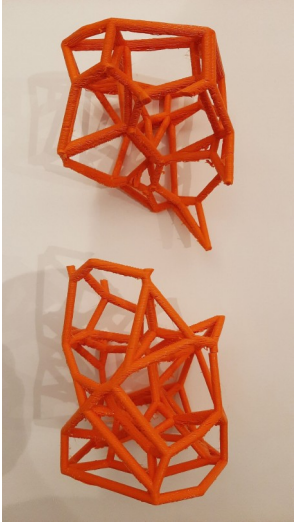

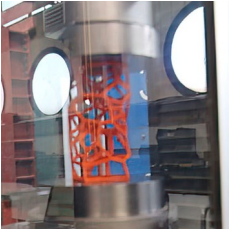

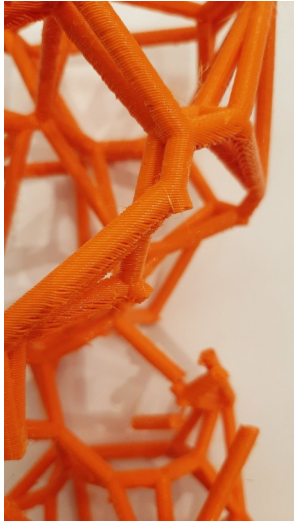
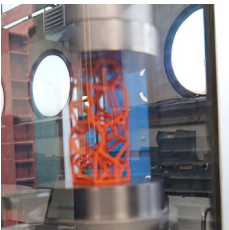
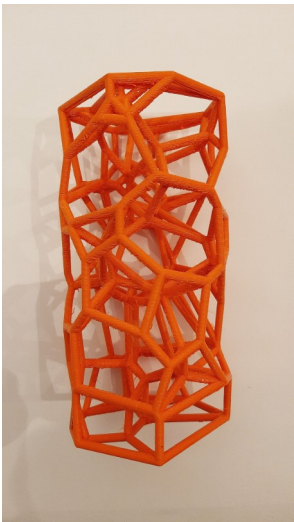

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά οι κύριες αστοχίες για κάθε δοκίμιο, σύμφωνα με τις κατηγορίες αστοχιών B1 έως B4 του πίνακα 8\_21.


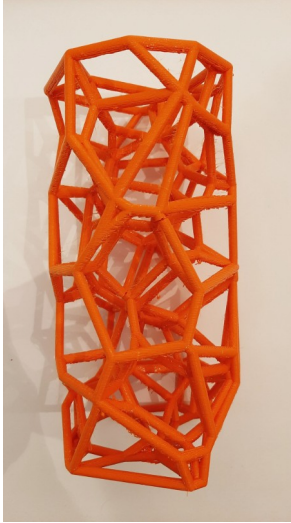

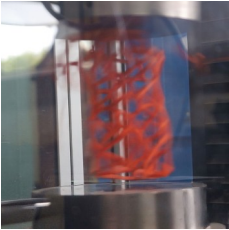


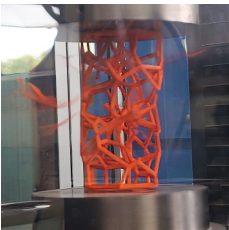
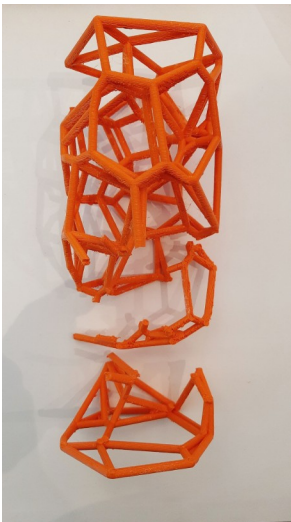

Πίνακας 8.22: Πίνακας καταγραφής κύριων αστοχιών για τα δοκίμια οικογενειών 50, 100 και 200. Πηγή: Τ.Κουιμτζόγλου.

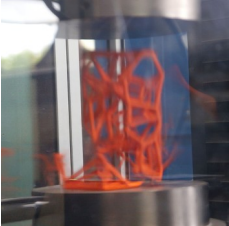
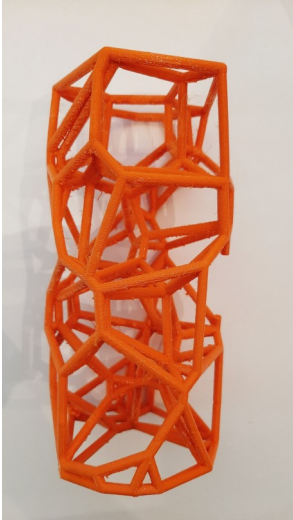

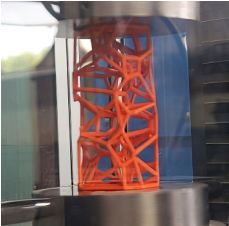
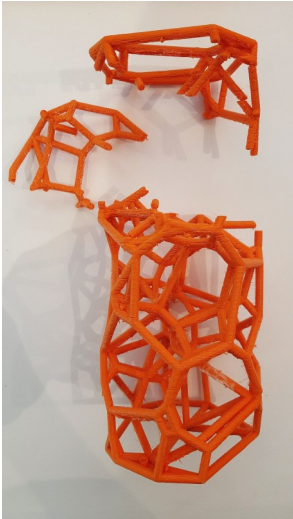

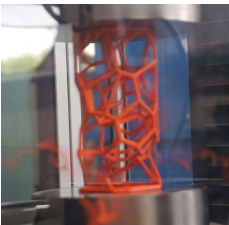
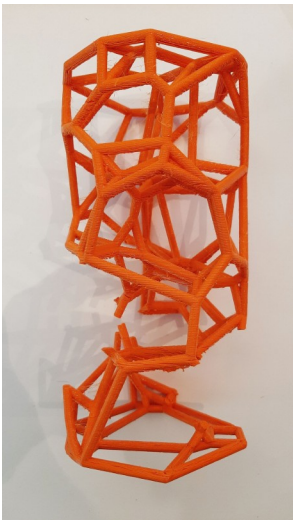
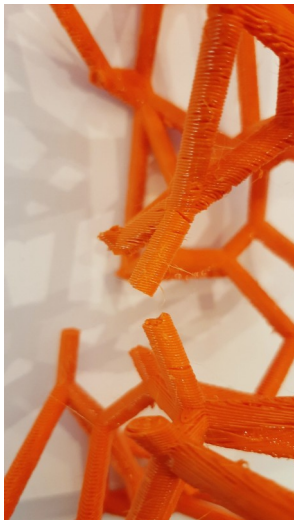
A/A	Κωδικός	Φωτογραφία αμέσως μετά την αστοχία	Ενδεικτικές φωτογραφίες		Θέση αστοχίας	Κύριες μορφές αστοχίας
1	50-1				~1/3 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1
2	50-2				~1/3 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1
3	50-3				~1/2 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1, B2

A/A	Κωδικός	Φωτογραφία αμέσως μετά την αστοχία	Ενδεικτικές φωτογραφίες		Θέση αστοχίας	Κύριες μορφές αστοχίας
4	50-4				~1/2 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1
5	50-5				~1/2 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1, B2
6	50-6				~1/3 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1, B2, B3

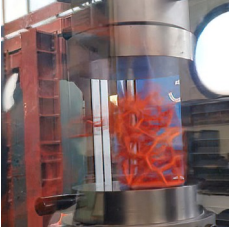


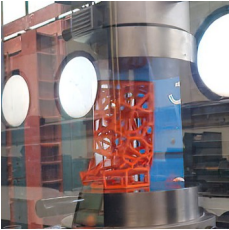
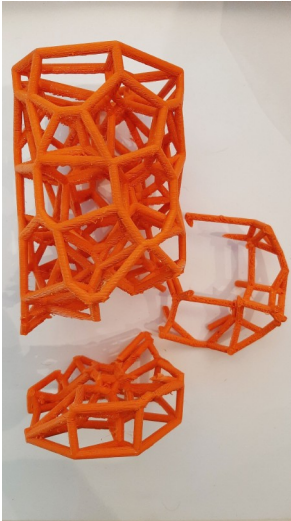


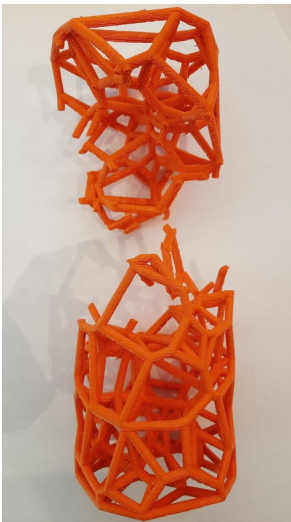

A/A	Κωδικός	Φωτογραφία αμέσως μετά την αστοχία	Ενδεικτικές φωτογραφίες		Θέση αστοχίας	Κύριες μορφές αστοχίας
7	50-7				~1/2 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1, B4
8	50-8				~1/2 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του..	B1, B4
9	50-9				~1/3 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1, B2


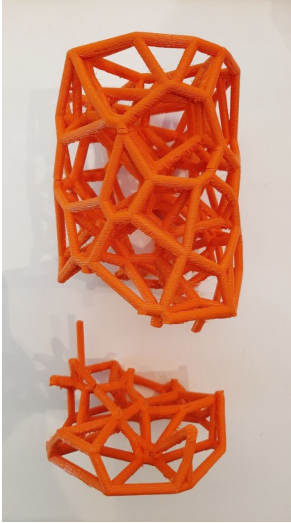

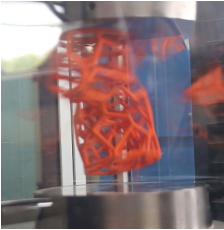


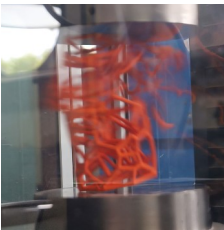
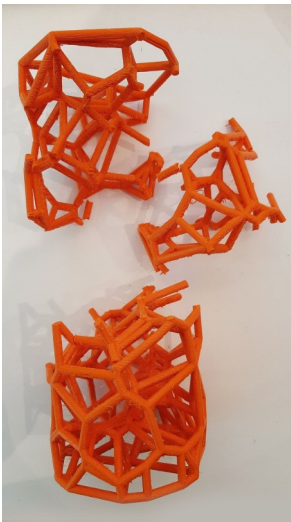

A/A	Κωδικός	Φωτογραφία αμέσως μετά την αστοχία	Ενδεικτικές φωτογραφίες		Θέση αστοχίας	Κύριες μορφές αστοχίας
10	100-1				~2/3 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1
11	100-2				~1/2 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1
12	100-3				~2/3 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1

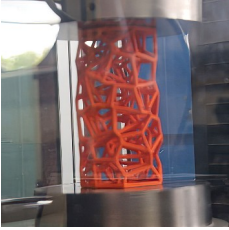
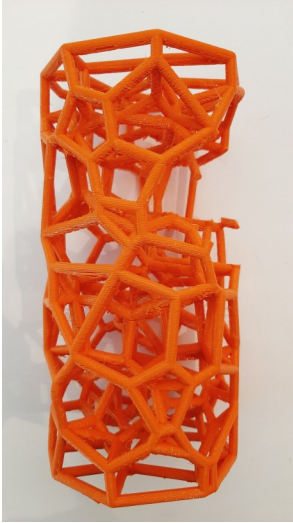
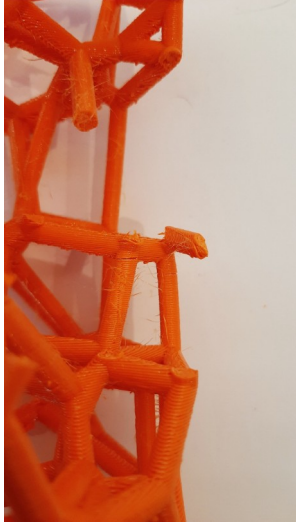
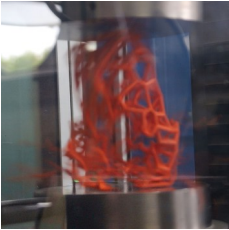


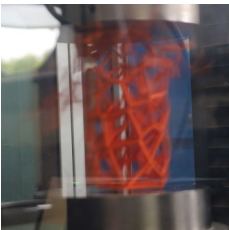
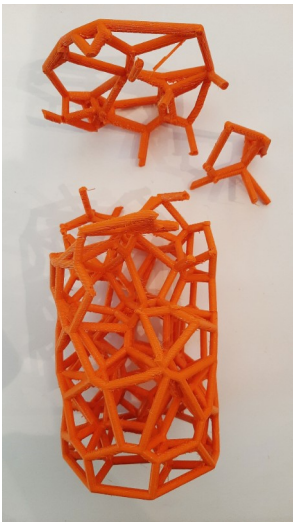

A/A	Κωδικός	Φωτογραφία αμέσως μετά την αστοχία	Ενδεικτικές φωτογραφίες		Θέση αστοχίας	Κύριες μορφές αστοχίας
13	100-4				~1/2 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1, B4
14	100-5				~2/3 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1, B4
					~1/2 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	
					~1/3 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	
15	100-6				~1/3 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1, B4

A/A	Κωδικός	Φωτογραφία αμέσως μετά την αστοχία	Ενδεικτικές φωτογραφίες		Θέση αστοχίας	Κύριες μορφές αστοχίας
16	100-7				~1/2 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1, B2, B4
17	100-8				~2/3 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1, B2
18	100-9				~1/3 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1



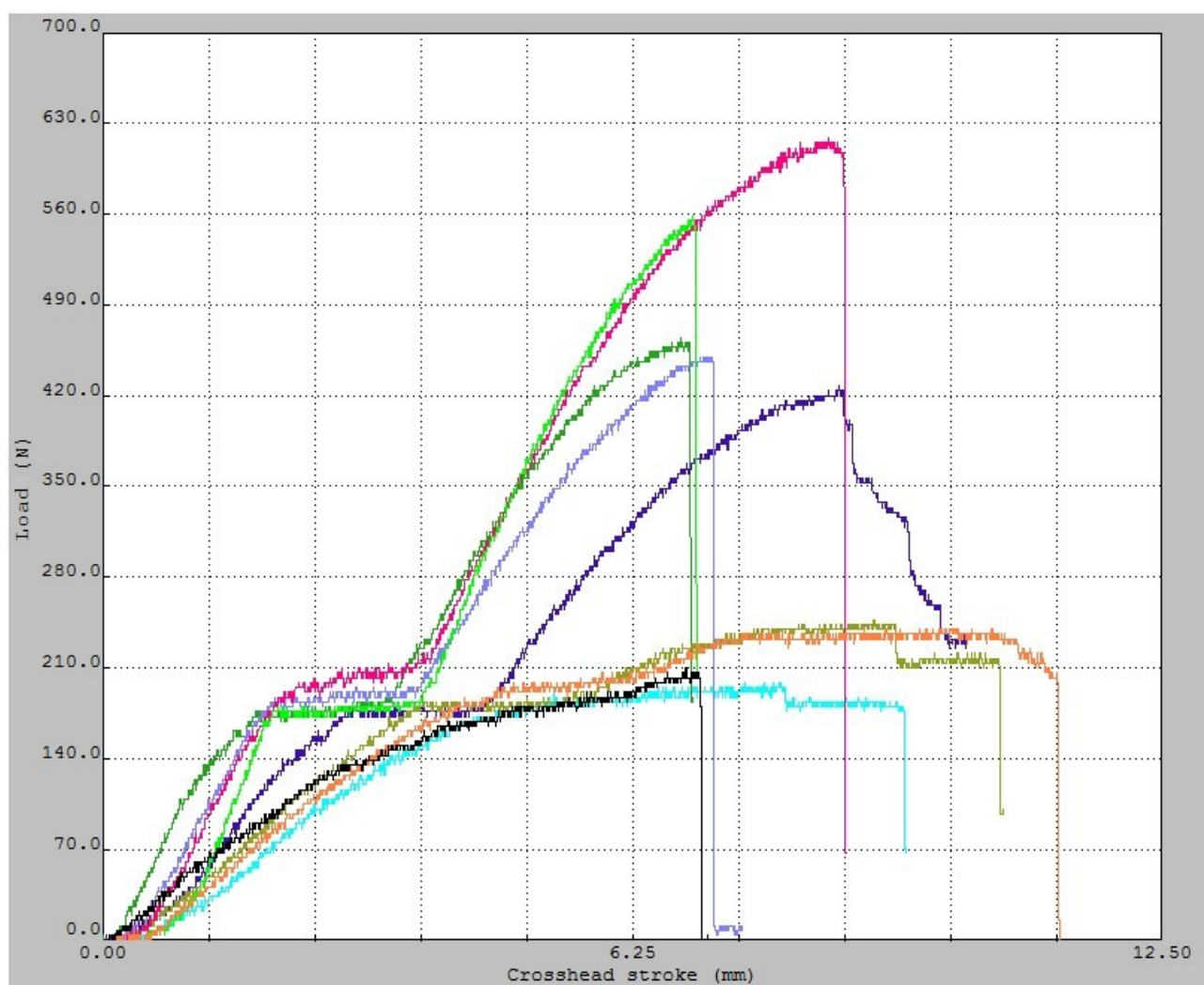
A/A	Κωδικός	Φωτογραφία αμέσως μετά την αστοχία	Ενδεικτικές φωτογραφίες		Θέση αστοχίας	Κύριες μορφές αστοχίας
19	200-1				~1/2 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1, B4
20	200-2				~1/3 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1
21	200-3				~2/3 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.  ~1/2 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1

A/A	Κωδικός	Φωτογραφία αμέσως μετά την αστοχία	Ενδεικτικές φωτογραφίες		Θέση αστοχίας	Κύριες μορφές αστοχίας
22	200-4				~1/3 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1
23	200-5				~1/2 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1, B2
24	200-6				~2/3 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.  ~1/2 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1

A/A	Κωδικός	Φωτογραφία αμέσως μετά την αστοχία	Ενδεικτικές φωτογραφίες		Θέση αστοχίας	Κύριες μορφές αστοχίας
25	200-7				~2/3 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1
26	200-8				~1/2 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1, B4
27	200-9				~2/3 ύψους του δοκιμίου από τη βάση του.	B1, B2

## 8.9.4 Διαγράμματα φορτίσεων για τα ραβδωτά δοκίμια

## 8.9.4.1 Οικογένεια δοκιμών 50



Εικόνα 8\_132: Διαγράμματα θλιπτικού φορτίου-κατακόρυφης μετατόπισης οικογένειας δοκιμών 50. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

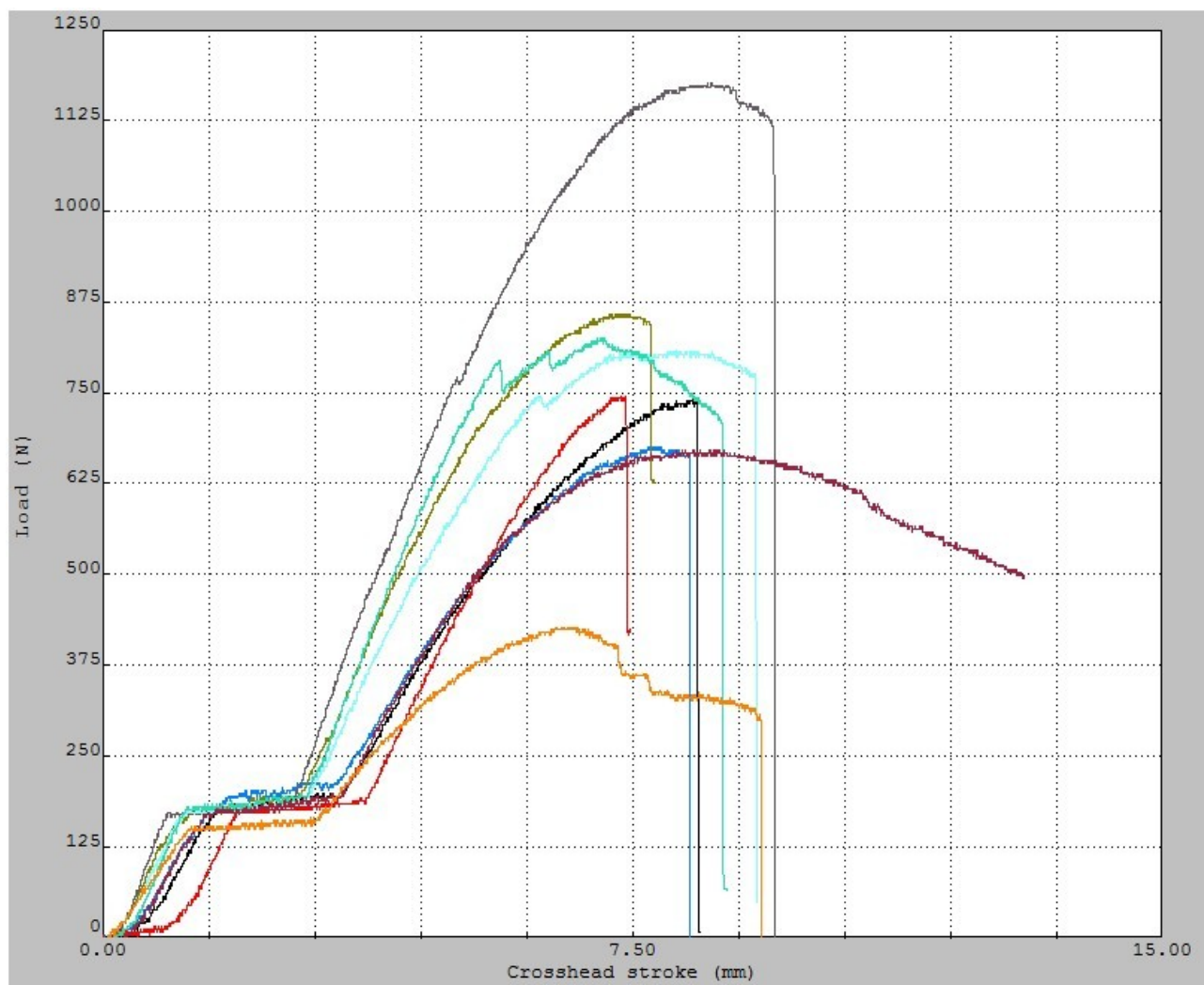
Παρατηρείται ότι τα διαγράμματα της συγκεκριμένης κατηγορίας **δεν** παρουσιάζουν ίδια γενική μορφή και έχουν τις αναμενόμενες μεγαλύτερες σχετικές αποκλίσεις στις μέγιστες τιμές φορτίων, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

Το **διάστημα διαρροής** των δοκιμών είναι μικρό, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα δοκίμια αυτής της κατηγορίας έχουν **ψαθυρή συμπεριφορά**.

Η **βαθμιδωτή πτώση** της γραφικής παράστασης υποδηλώνει **τοπική αστοχία** και συνέχεια της φόρτισης με μειωμένες τιμές.

Η **απότομη πτώση** της γραφικής παράστασης υποδηλώνει την **καθολική** και **απότομη** αστοχία του δοκιμίου και διακοπή της φόρτισης.

## 8.9.4.2 Οικογένεια δοκιμών 100



Εικόνα 8\_133: Διαγράμματα θλιπτικού φορτίου-κατακόρυφης μετατόπισης οικογένειας δοκιμών 100. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

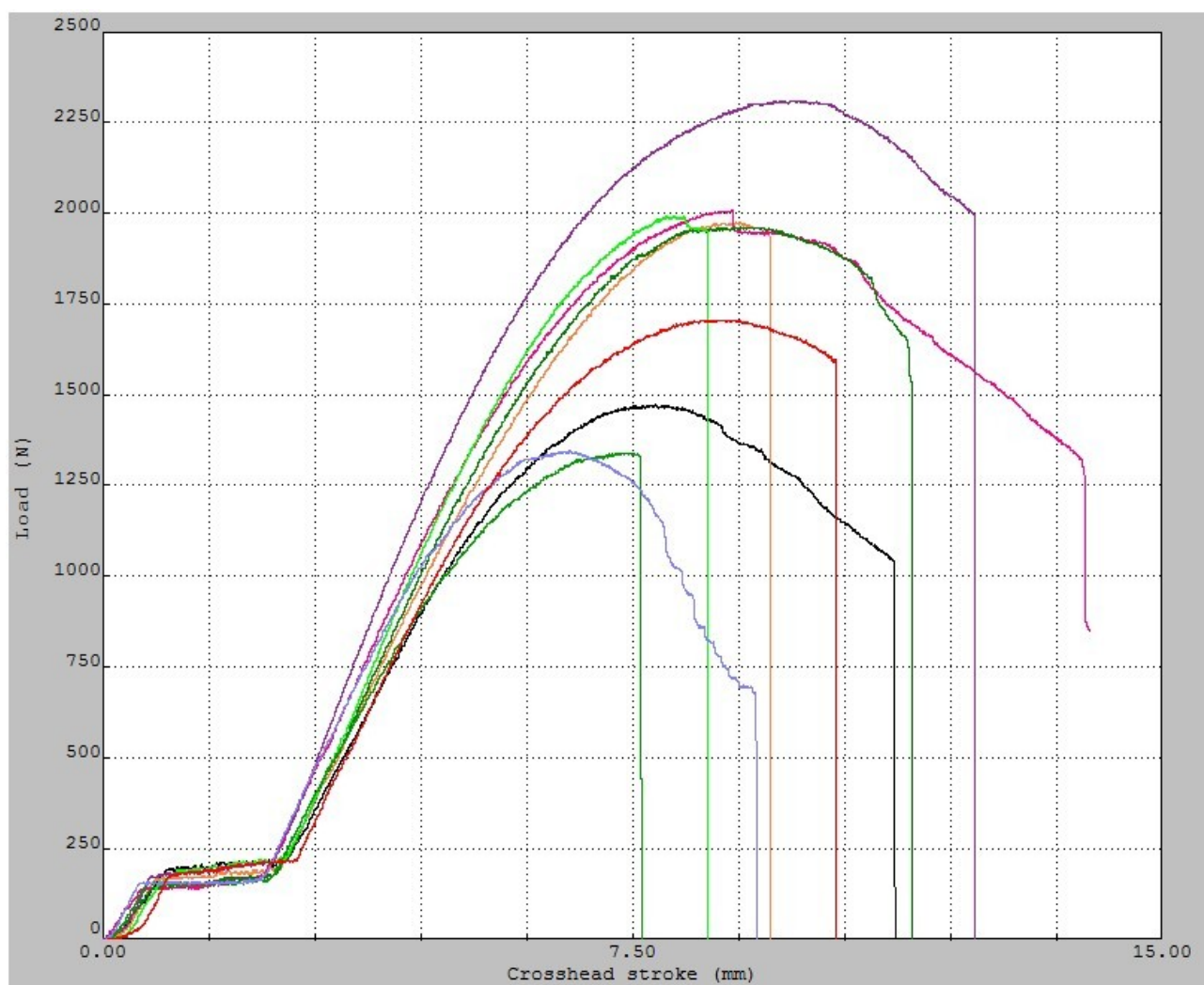
Παρατηρείται ότι τα διαγράμματα της συγκεκριμένης κατηγορίας παρουσιάζουν ίδια γενική μορφή και έχουν τις αναμενόμενες αποκλίσεις στις μέγιστες τιμές φορτίων όπως αυτές παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

Το **διάστημα διαρροής** των δοκιμών είναι μικρό, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα δοκίμια αυτής της κατηγορίας έχουν **ψαθυρή συμπεριφορά**.

Η **βαθμιδωτή πώση** της γραφικής παράστασης υποδηλώνει **τοπική αστοχία** και συνέχεια της φόρτισης με μειωμένες τιμές.

Η **απότομη πώση** της γραφικής παράστασης υποδηλώνει την **καθολική** και **απότομη** αστοχία του δοκιμίου και διακοπή της φόρτισης.

## 8.9.4.3 Οικογένεια δοκιμών 200



Εικόνα 8\_134: Διαγράμματα θλιπτικού φορτίου-κατακόρυφης μετατόπισης οικογένειας δοκιμών 200. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Παρατηρείται ότι τα διαγράμματα της συγκεκριμένης κατηγορίας παρουσιάζουν ίδια γενική μορφή και έχουν τις αναμενόμενες αποκλίσεις στις μέγιστες τιμές φορτίων όπως αυτές παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

Το **διάστημα διαρροής** των δοκιμών είναι μικρό, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα δοκίμια αυτής της κατηγορίας έχουν **ψαθυρή συμπεριφορά**.

Η **βαθμιδωτή πτώση** της γραφικής παράστασης υποδηλώνει **τοπική αστοχία** και συνέχεια της φόρτισης με μειωμένες τιμές.

Η **απότομη πτώση** της γραφικής παράστασης υποδηλώνει την **καθολική** και **απότομη** αστοχία του δοκιμίου και διακοπή της φόρτισης.

#### 8.9.4.4 Συνολικό διάγραμμα φορτίσεων για όλες τις οικογένειες δοκιμών

Από το συνολικό διάγραμμα φορτίσεων για όλες τις οικογένειες διαπιστώνεται ότι:

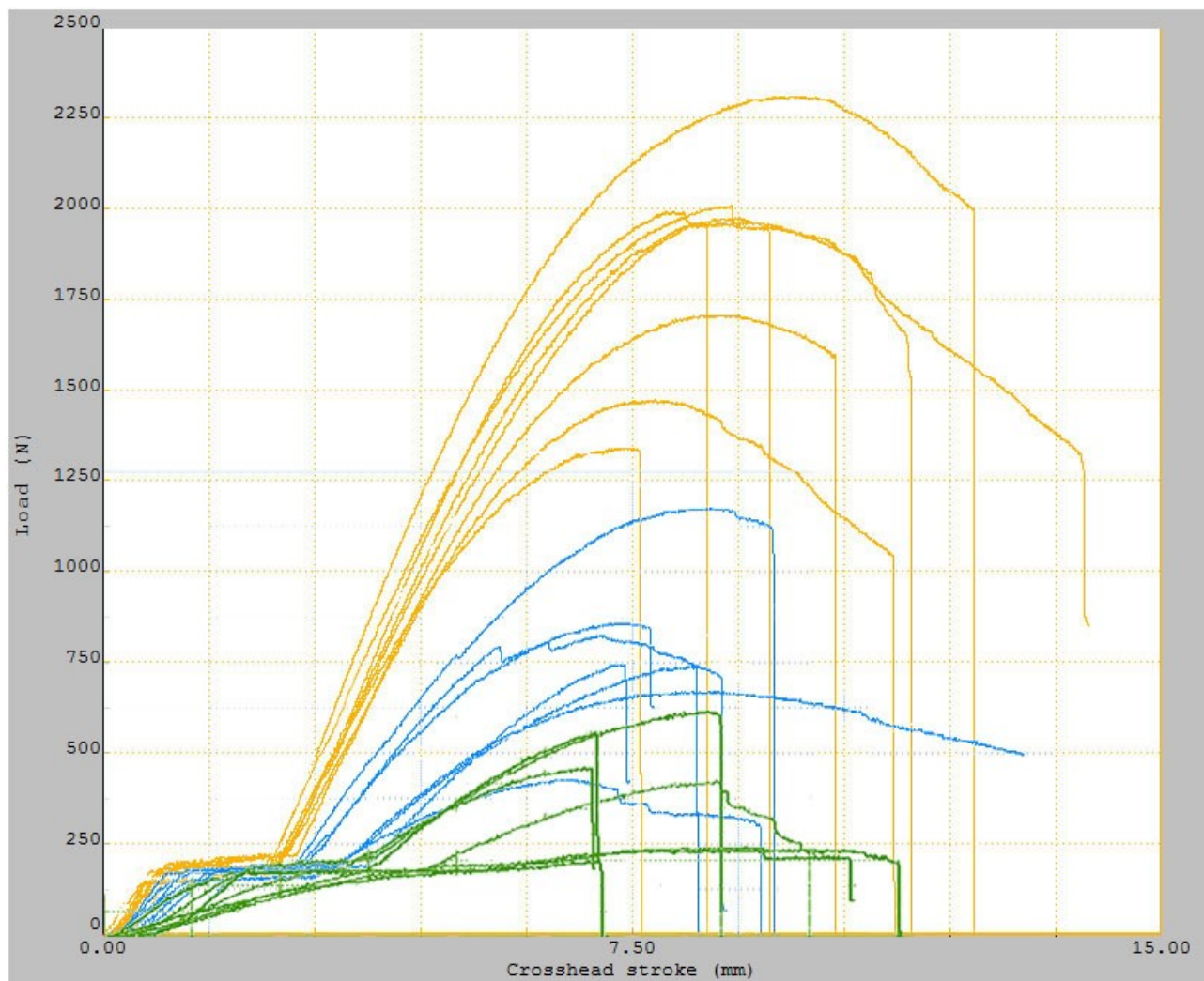
Τα δοκίμια της **οικογένειας 200** παρουσιάζουν γραφική παράσταση στο τμήμα της κύριας φόρτισης, πιο κατακόρυφη σε σχέση με τα δοκίμια των υπόλοιπων οικογενειών. Αντίστοιχα, τα δοκίμια της **οικογένειας 100** παρουσιάζουν γραφική παράσταση πιο κατακόρυφη σε σχέση με τα δοκίμια της **οικογένειας 50**.

Συνεπώς, τα δοκίμια της **οικογένειας 200** παρουσιάζουν εκτός από τα μεγαλύτερα φορτία σε απόλυτες τιμές και τη **μεγαλύτερη ακαμψία** σε σχέση με τις υπόλοιπες ομάδες δοκιμών.

Οι καμπύλες της **οικογένειας 200** παρουσιάζουν σε σχέση με τις υπόλοιπες ομάδες **μικρότερη διασπορά** στο τμήμα της κύριας φόρτισης, που υποδηλώνει την παρόμοια συμπεριφορά τους συνολικά. Οι καμπύλες των γραφικών παραστάσεων της οικογένειας 200, ενώ ξεκινούν συγκεντρωμένες, αρχίζουν και απομακρύνονται, λόγω της διαφορετικής συμπεριφοράς και αστοχίας του κάθε δοκιμίου στη φόρτιση.

Οι καθολικές αστοχίες παρουσιάζονται πολύ αργότερα κατά μέσο όρο στα δοκίμια της **οικογένειας 200**, συγκριτικά με τις υπόλοιπες ομάδες δοκιμών, γεγονός που δείχνει ότι εκτός από τις μέγιστες τιμές σε φορτία, τα πυκνότερα δοκίμια μπορούν να αναλάβουν και τη μεγαλύτερη παραμόρφωση συνολικά.

Τα δοκίμια της οικογένειας 200 παρουσιάζουν μακροσκοπικά πιο πλάσιμη συμπεριφορά σε σχέση με τα δοκίμια των άλλων οικογενειών, τα οποία φαίνεται να συμπεριφέρονται συγκριτικά πιο ψαθυρά.



Εικόνα 8\_135: Διαγράμματα θλιπτικού φορτίου-κατακόρυφης μετατόπισης οικογενειών δοκιμίων 50 (πράσινο χρώμα), 100 (μπλε χρώμα) και 200 (πορτοκαλί χρώμα) σε συνολική απεικόνιση. Πηγή: Τ. Κουιμιτζόγλου.



## 8.9.5 Διαγράμματα φορτίσεων για τα συμπαγή δοκίμια

Τα **συμπαγή δοκίμια**, όπως ήταν αναμενόμενο, παρουσίασαν τις μεγαλύτερες αντοχές σε θλίψη, συγκριτικά με τα δοκίμια ράβδων. Τα δύο από τα συμπαγή δοκίμια κατασκευάστηκαν από Πορτοκαλί PETG όπως αναφέρθηκε, ίδιο με το PETG των δοκιμίων με ράβδους. Το τρίτο συμπαγές δοκίμιο κατασκευάστηκε από Κόκκινο PETG. Και τα τρία δοκίμια εκτυπώθηκαν με τις ίδιες ρυθμίσεις με τα δοκίμια ράβδων, εκτός από την ταχύτητα εκτύπωσης, η οποία αυξήθηκε στο 175% της κανονικής ταχύτητας.

Από τις τιμές που λήφθηκαν από τις δοκιμές σε θλίψη για τα συμπαγή δοκίμια, φαίνεται πως η διαφοροποίηση του υλικού (πορτοκαλί και κόκκινο PETG) δεν είχε ως αποτέλεσμα σημαντικές διαφοροποιήσεις και στην αντοχή του κόκκινου δοκιμίου. Οι αποκολλήσεις στις στρώσεις του κόκκινου δοκιμίου, επίσης φαίνεται να μην είχαν σημαντική επιρροή στην αντοχή του δοκιμίου. Παρ' όλα αυτά σημειώνεται ότι το κόκκινο δοκίμιο είχε τη μικρότερη αντοχή από τα τρία συμπαγή δοκίμια. Η δοκιμή σε θλίψη για όλα τα δοκίμια διακόπηκε μετά τα 5cm καθόδου της κεφαλής για λόγους ασφαλείας της μηχανής.

Και τα τρία συμπαγή δοκίμια, όπως και τα δοκιμαστικά συμπαγή δοκίμια, παρουσίασαν έκκεντρες πλάστιμες παραμορφώσεις.

Στις εικόνες 8\_136, 8\_137, 8\_138 παρουσιάζονται τα συμπαγή δοκίμια μετά τις δοκιμές σε αντοχή σε θλίψη, όπου παρατηρείται η έκκεντρη παραμόρφωσή τους. Ειδικά στο δοκίμιο Sor20-1, διακρίνεται αμυδρά σε θέση περίπου στα 2/3 του ύψους του από τη βάση του, σκοτεινή στρώση εκτυπωμένου υλικού (πιθανότατα περιοχή αλλαγής αναλώσιμου κατά την εκτύπωση) μη παράλληλη με τη βάση, η οποία είναι ενδεικτική της έκκεντρης παραμόρφωσης του δοκιμίου. Χαρακτηριστική είναι επίσης η μη έκκεντρη παραμόρφωση του δοκιμίου Sor20-2, όπως διακρίνεται από τις καμπυλώσεις των μη βαθμονομημένων κατακόρυφων και οριζόντιων ευθειών στην επιφάνειά του.



Εικόνα 8\_136: Συμπαγές δοκίμιο Sr20 μετά τη δοκιμή σε αντοχή σε θλίψη.  
Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_137: Συμπαγές δοκίμιο Sor20-1 μετά τη δοκιμή σε αντοχή σε θλίψη.  
Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 8\_138: Συμπαγές δοκίμιο Sor20-2 μετά τη δοκιμή σε αντοχή σε θλίψη.  
Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Τα διαγράμματα φορτίου Load σε (N) με απόσταση μετατόπισης κεφαλής για τα συμπαγή δοκίμια παρουσιάζονται στην εικόνα που ακολουθεί.

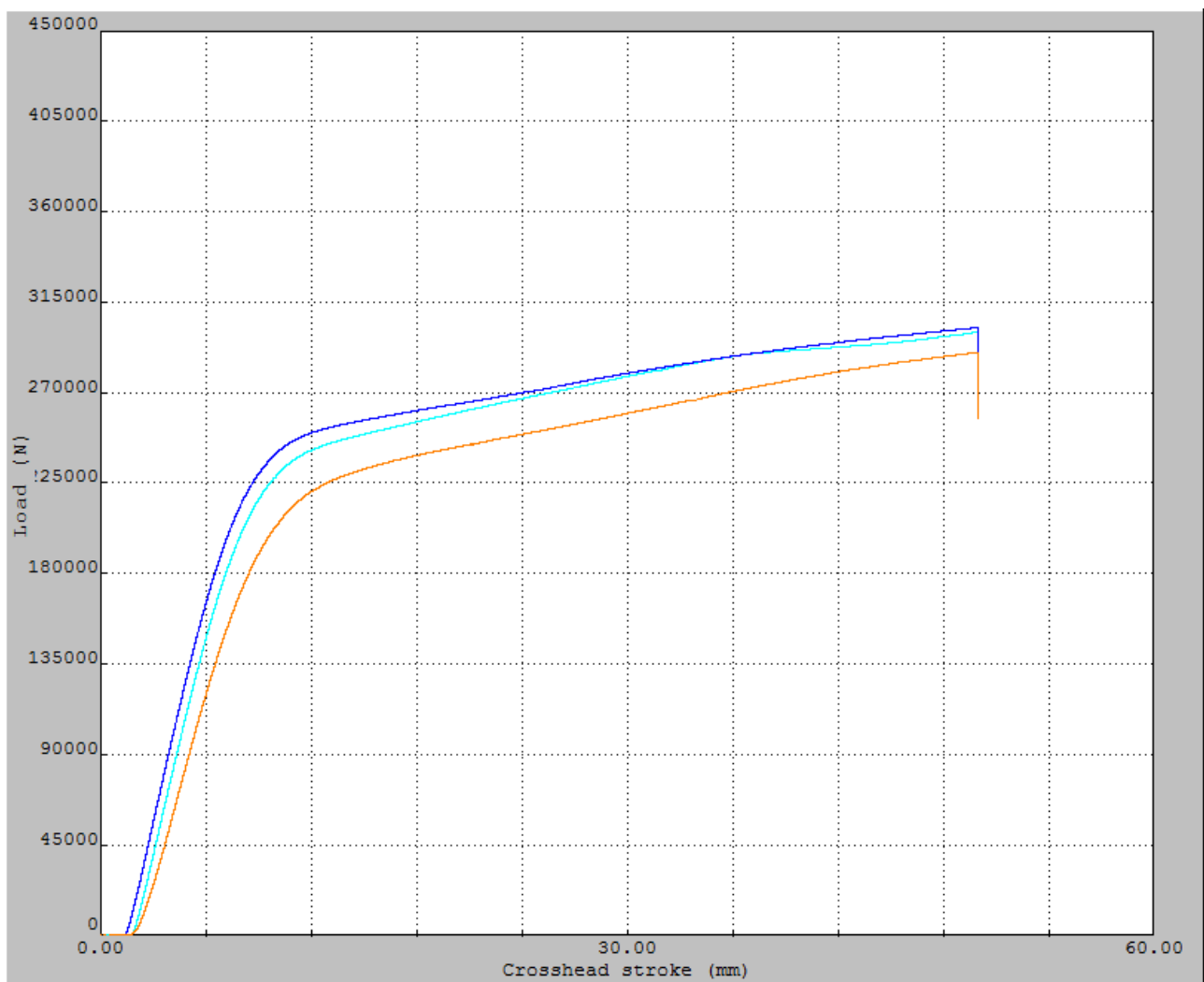
Παρατηρείται ότι οι καμπύλες φόρτισης / μετατόπισης είναι παρόμοιες και για τα τρία δοκίμια.

**Οι καμπύλες του διαγράμματος στο πρώτο τμήμα της φόρτισης είναι σχεδόν ευθύγραμμες και η παραμόρφωση φαίνεται να είναι ελαστική.**

**Στη συνέχεια υπάρχει περιοχή αλλαγής κλίσης, μετά την οποία οι καμπύλες γίνονται πιο οριζόντιες και η παραμόρφωση φαίνεται γίνεται πλαστική.**

**Η φόρτιση συνεχίζεται μέχρι τα 5cm καθόδου της κεφαλής, οπότε διακόπτεται και το πείραμα δοκιμής σε θλίψη για λόγους ασφαλείας της μηχανής.**

**Μέχρι τα 5 cm παρατηρείται ότι συνεχίζει να αυξάνεται το φορτίο, αλλά με χαμηλότερο ρυθμό σε σχέση με τον αρχικό.**



Εικόνα 8\_139: Διάγραμμα δοκιμής σε θλίψη με τη μηχανή Galdabini για τα κύρια συμπαγή δοκίμια. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

## 8.9.6 Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας

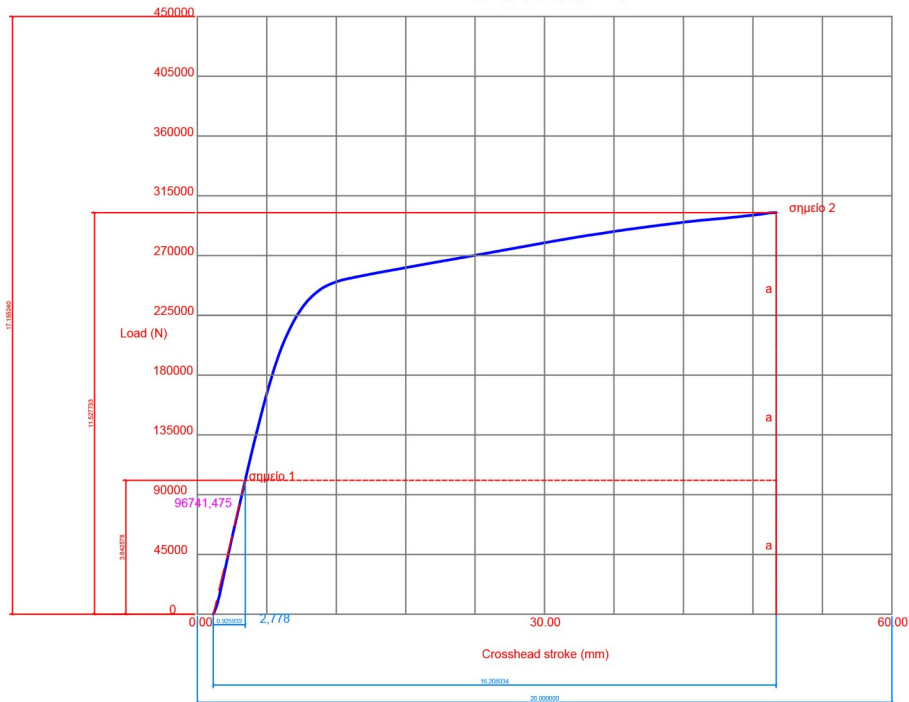
Από τις δοκιμές σε θλίψη των συμπαγών δοκιμίων έγινε δυνατό να υπολογιστεί το **μέτρο ελαστικότητας** του υλικού (young's modulus) **για τη συγκεκριμένη πυκνότητα και ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τις εκτυπώσεις των ραβδωτών δοκιμίων.**

Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας σε κάθε δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε σημείο της γραφικής παράστασής του που αντιστοιχεί στο 1/3 (σημείο 1) του συνολικού φορτίου (σημείο 2) που ασκήθηκε σε αυτό. Από τη γραφική παράσταση υπολογίστηκε η απόσταση της κεφαλής που διανύθηκε, και άρα η συμπίεση  $\delta X$  που είχε το δοκίμιο για τη συγκεκριμένη τιμή του φορτίου. Οι μετακινήσεις υπολογίστηκαν από τα γραφικά δεδομένα με απλή αναγωγή, αφού αφαιρέθηκε η απόσταση που διένυσε η κεφαλή μέχρι να πλησιάσει την άνω επιφάνεια του δοκιμίου, και αρχίσει να ασκεί θλιπτική δύναμη σε αυτό. Τα διαγράμματα φορτίων για τα 3 συμπαγή δοκίμια με τους γραφικούς υπολογισμούς των αναγωγών για το σημείο (1) είναι τα παρακάτω.



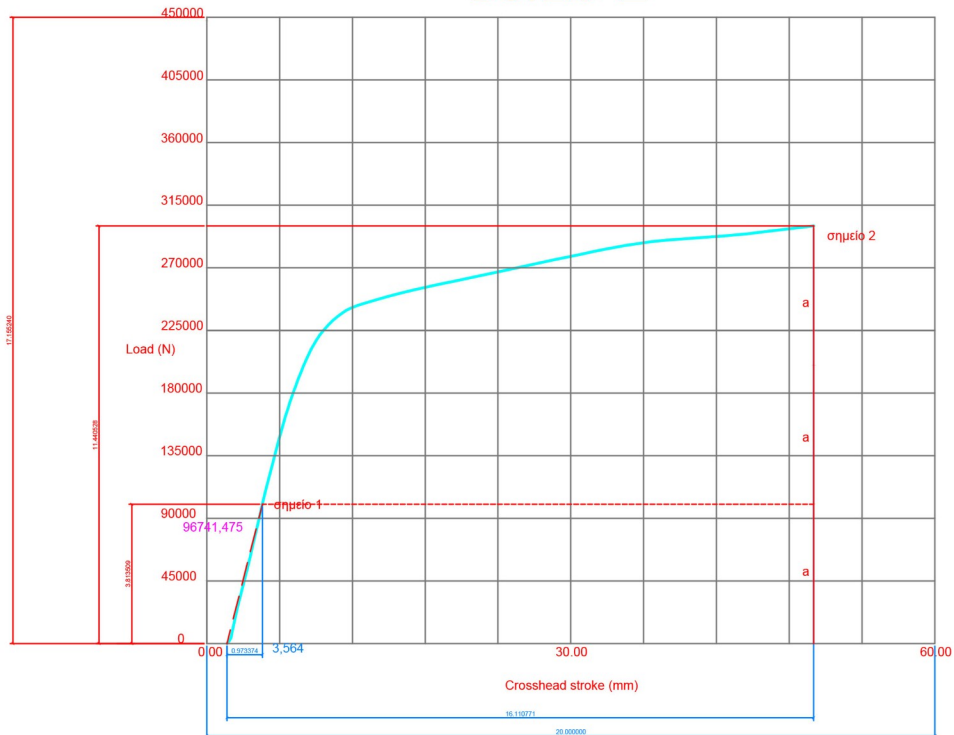
Εικόνα 8\_140: Διάγραμμα φόρτισης συμπαγούς κυλινδρικού δοκιμίου διαμέτρου 10cm και ύψους 20cm. Δοκίμιο Sr20. Πηγή: Τ. Κουμτζόγλου.

### Sor20-1



Εικόνα 8\_141: Διάγραμμα φόρτισης συμπαγούς κυλινδρικού δοκιμίου διαμέτρου 10cm και ύψους 20cm. Δοκίμιο Sor20-1. Πηγή: Τ. Κουμιτζόγλου.

### Sor20-2



Εικόνα 8\_142: Διάγραμμα φόρτισης συμπαγούς κυλινδρικού δοκιμίου διαμέτρου 10cm και ύψους 20cm. Δοκίμιο Sor20-2. Πηγή: Τ. Κουμιτζόγλου.

Με βάση τις τιμές μέγιστου φορτίου από τις μετρήσεις της μηχανής, τα παραπάνω διαγράμματα και τις αναγωγές για τον υπολογισμό των τιμών των σημείων (1) που αντιστοιχούν στο 1/3 της μέγιστης δύναμης, προέκυψε ο πίνακας υπολογισμών που ακολουθεί.

	κύλινδρος	κύλινδρος					κύλινδρος			
	ύψος	ακτίνα	σημείο 1	σημείο 2	σημείο 1	σημείο 2	διατομή	$\sigma_1$	$\epsilon_1$	E1
	H (mm)	r (mm)	Load (N)	Load (N)	$\delta X$ (mm)	$\delta X$ (mm)	$\pi r^2$ (mm <sup>2</sup> )	$\sigma = F / \pi r^2$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon = \delta X / H$ -	$E = \sigma / \epsilon$ (MPa)
Sr20	200	50	96741,48	290028,79	3,564	50,000	7850	12,324	0,018	684,667
Sor20-1	200	50	100796,28	302388,80	2,778	50,000	7850	12,840	0,014	917,143
Sor20-2	200	50	100033,75	300101,29	2,92	50,000	7850	12,743	0,015	849,533

Μέτρο ελαστικότητας για δοκίμιο Sr20	684,667	MPa	ή	684667,000	KPa
Μέτρο ελαστικότητας για δοκίμιο Sor20-1	917,143	MPa	ή	917143,000	KPa
Μέτρο ελαστικότητας για δοκίμιο Sor20-2	849,533	MPa	ή	849533,000	KPa

Μέση τιμή για Sor20-1 και Sor20-2 **883,338** MPa ή **883338** KPa

Πίνακας 8\_23: Υπολογισμοί μέτρου ελαστικότητας για τα συμπαγή δοκίμια. Πηγή: Τ. Κουιμιτζόγλου.

H: ύψος κυλίνδρου, r: ακτίνα κυλίνδρου
$\delta X$ : μήκος συμπίεσης, λαμβάνεται γραφικά
$\pi r^2$ : εμβαδόν διατομής κυλίνδρου
$\sigma$ : τάση ( $F/\pi r^2$ ), η δύναμη για το συγκεκριμένο $\delta X$ λαμβάνεται γραφικά
$\epsilon$ : ειδική επιμήκυνση ( $\delta X/H$ )
E: $\sigma/\epsilon$ , μέτρο ελαστικότητας – Young's modulus (MPa)

Πίνακας 8\_24: Επεξήγηση τύπων υπολογισμών για την εύρεση του μέτρου ελαστικότητας. Πηγή: Τ. Κουιμιτζόγλου.

Από τα 2 πορτοκαλί συμπαγή δοκίμια από υλικό PETG, τα οποία εκτυπώθηκαν με συγκεκριμένες ρυθμίσεις υπολογίστηκε μέση τιμή για το μέτρο ελαστικότητας (young's modulus) **E=883,338 MPa**. Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή μόνο των πορτοκαλί δοκιμίων PETG, καθώς τα ραβδωτά δοκίμια είναι κατασκευασμένα από πορτοκαλί PETG και το κόκκινο συμπαγές δοκίμιο παρουσίασε μεγάλη απόκλιση στην τιμή του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με τα 2 πορτοκαλί συμπαγή δοκίμια.

Η μέση τιμή που υπολογίστηκε για το μέτρο ελαστικότητας (**E=883,338 MPa**) είναι μικρότερη από διάφορες τιμές που βρίσκονται συχνότερα στη βιβλιογραφία (~2000-2950 MPa<sup>470</sup>), ενώ έρχεται πολύ κοντά σε άλλες (791+-91 MPa<sup>471</sup>) ή είναι μεγαλύτερη από τιμές σε πειράματα δοκιμών (491+-13 MPa και 478 +-51 MPa<sup>472</sup>). Η διαφορά σε σχέση με τις αυξημένες τιμές ή τις μειωμένες τιμές δικαιολογείται πιθανότατα λόγω των ρυθμίσεων της συγκεκριμένης 3d εκτύπωσης όπως: η θερμοκρασία

470 Mechanical properties: Average Young's Modulus (around 2000 MPa) and tensile strength (ca. 50 MPa). High strain at break and impact strength. 'Polyethylene terephthalate | Designerdata', ημερομηνία πρόσβασης 4 Σεπτεμβρίου 2023, <https://designerdata.nl/materials/plastics/thermo-plastics/polyethylene-terephthalate>.

2,2GPa: 'Glycol-Modified Polyethylene Terephthalate (PETG, PET-G) :: MakeltFrom.com', ημερομηνία πρόσβασης 4 Σεπτεμβρίου 2023, <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Glycol-Modified-Polyethylene-Terephthalate-PETG-PET-G>.

471 Guessasma, Belhabib, και Nouri, 'Printability and Tensile Performance of 3D Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Using Fused Deposition Modelling'.

472 Guessasma, Belhabib, και Nouri.

εκτύπωσης, η πυκνότητα των «συμπαγών» περιοχών (infill) και πιο συγκεκριμένα οι στρώσεις πάχους 0.4mm με αντίστοιχο περίπου πλάτος εκτύπωσης, οι οποίες δεν παράγουν εντελώς συμπαγές υλικό και τέλος από την ποιότητα του τύπου αναλώσιμου και της συγκεκριμένης παρτίδας. Μετρήσεις σε συμπαγή δοκίμια με πυκνότερη εκτύπωση (π.χ. 0,13mm) αναμένεται να αποδώσουν και μεγαλύτερες τιμές στο μέτρο ελαστικότητας και αυτό μπορεί να μελετηθεί μελλοντικά.

## Γ' μέρος





## 9. Συμπεράσματα

### 9.1 Η τυχαιότητα στις επιστήμες, στην τέχνη και στην αρχιτεκτονική

Στο **Α' μέρος** της διατριβής παρουσιάστηκε αρχικά η έρευνα για τον ορισμό της τυχαιότητας ανάλογα με το πλαίσιο στο οποίο εξετάζεται, πώς αναγνωρίζεται δηλαδή στις επιστήμες και στην Τέχνη, πώς δημιουργείται και τι ρόλο διαδραματίζει σε διάφορες δραστηριότητες και εφαρμογές.

Επιγραμματικά, μπορεί να αναφερθεί ότι η τύχη (chance) σχετίζεται με την πιθανότητα-δυνατότητα του να μπορεί να συμβεί κάτι, ενώ η τυχαιότητα (randomness) σχετίζεται με την περιγραφή του αποτελέσματος της τύχης <sup>473</sup>.

Από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε, παρουσιάστηκε ότι: **Το να αναγνωριστεί κάτι ως τυχαίο ή όχι, έχει άμεση σχέση τόσο με την ποσότητα πληροφοριών που έχει ο παρατηρητής στη διάθεσή του οι οποίες περιγράφουν αυτή τη διεργασία, όσο και με τη δυνατότητα αντίληψης και κατανόησης αυτών των πληροφοριών. Ελλιπής πληροφόρηση ή αδυναμία κατανόησης μιας διεργασίας μπορεί να οδηγήσει στο λανθασμένο χαρακτηρισμό της ως τυχαίας, ενώ στην πραγματικότητα είναι ουσιαστικά τόσο πολύπλοκη, ώστε δεν είναι δυνατόν να γίνουν κατανοητοί οι κανόνες που την ορίζουν.**

Επιβεβαιώθηκε μέσα από τη βιβλιογραφία ότι **η αιποκρατία** αναγνωρίζεται ως θεμέλιος λίθος για την εξήγηση των γεγονότων, η οποία όμως βρίσκεται στον αντίποδα της **τυχαιότητας**.

Διαπιστώθηκε μέσα από τη βιβλιογραφία ότι η τυχαιότητα είναι **εγγενές χαρακτηριστικό του φυσικού κόσμου** και ότι έχει αποδειχθεί πως αυτή υπάρχει πραγματικά.

Σημασία δεν έχει μόνο το **αποτέλεσμα της τύχης** (η τυχαιότητα), αλλά και **η διαδικασία** (process) με την οποία αυτή προκύπτει.

Αναγνωρίστηκε μέσα από τη βιβλιογραφία ότι υπάρχουν διαφορετικά είδη τυχαιότητας, **η φυσική τυχαιότητα του κόσμου και η τεχνητά κατασκευασμένη μη πραγματική τυχαιότητα, η ψευδοτυχαιότητα (pseudo-randomness)**, και παρατέθηκαν συνοπτικά διαφορετικοί τρόποι δημιουργίας των δύο ειδών τυχαιότητας.

Στο Α' μέρος της διατριβής παρουσιάστηκαν επίσης χαρακτηριστικά **παραδείγματα έργων τέχνης** τα οποία αξιοποιούν εποικοδομητικά την τυχαιότητα με διαφορετικούς τρόπους για να παράξουν πρωτότυπα και ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Στις περιπτώσεις αυτές παρατηρείται ένας σταδιακός

---

<sup>473</sup> Antony Eagle, 'Chance versus Randomness', στο *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, επιμέλ. Edward N. Zalta, Spring 2018 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018), <https://plato.stanford.edu/archives/spr2018/entries/chance-randomness/>.

μετασχηματισμός στην έκφραση και τα μέσα των καλλιτεχνών, που περιλαμβάνει την τυχειότητα ως νέο κύριο συνθετικό και εκφραστικό εργαλείο και το οποίο εξελίσσει την τέχνη γενικότερα.

Στη συνέχεια εξετάστηκαν **αναλυτικά παραδείγματα τυχειότητας στην αρχιτεκτονική** και κατηγοριοποιήθηκαν ανάλογα με το διαφορετικό τρόπο με τον οποίο σχετίζονται με την τυχειότητα. Παρουσιάστηκαν συνεπώς οι εξής κατηγορίες παραδειγμάτων:

- α. Παραδείγματα τυχειότητας σε ιστορικές και παραδοσιακές κατασκευές με τη χρήση φυσικών υλικών μη τυποποιημένων διαστάσεων.
- β. Παραδείγματα τυχειότητας ως αποκριτική αντίδραση σε περιβαλλοντικές παραμέτρους.
- γ. Παραδείγματα τυχειότητας ως συνθετική αρχιτεκτονική επιλογή.
- δ. Παραδείγματα τυχειότητας σε φέροντα στοιχεία της κατασκευής.

Στόχος αυτού του σταδίου διερεύνησης ήταν να εντοπιστούν και να κατηγοριοποιηθούν **επιλεγμένα ενδεικτικά παραδείγματα**, έτσι ώστε να γίνει καλύτερα κατανοητό εάν η τυχειότητα που παρουσιάζεται είναι ακούσια ή εκούσια, σε τι βαθμό παρουσιάζεται, πώς αυτή δημιουργείται, καθώς και ποια είναι η επιρροή της στο έργο όσον αφορά στη μορφή, τη δομή, τη λειτουργία, πώς μπορεί να αξιοποιηθεί, κ.λπ.

Η παρουσίαση των παραδειγμάτων ανάδειξε την **εξελισσόμενη δυναμική που υπάρχει τα τελευταία κυρίως χρόνια σε αυτή την τεχνολογική περιοχή** και υπογράμμισε τις δυνατότητες που υπάρχουν στις περιπτώσεις συσχετισμού της τυχειότητας κυρίως με τη δομή και τη μορφή, πεδίο που τελικά έχει πολλά περιθώρια εξέλιξης και έρευνας.

Από τη βιβλιογραφική έρευνα και την εξέταση των παραδειγμάτων, φάνηκε ότι σημαντικές έννοιες οι οποίες παρατηρούνται σε σχέση με την τυχειότητα είναι οι έννοιες του **ορίου** και της **πολυπλοκότητας**, έννοιες που όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο συναντώνται συχνά σε άλλες επιστήμες και στην Τέχνη.

Συχνά, μια περιοχή αταξίας - τυχειότητας διαχωρίζεται από μια περιοχή μη τυχειότητας – τάξης. Το **όριο** στις περιπτώσεις της σκόπιμης τυχειότητας διαμορφώνεται εξ' αρχής από το μελετητή και χρησιμοποιείται ως **περιορισμός** (constraint) για να την περιορίσει, να την ελέγξει και να την διαμορφώσει. Το όριο στην προκείμενη περίπτωση αποτελεί σχεδιαστικό εργαλείο διαχείρισης της τυχειότητας και συμβάλλει στη διαμόρφωση δομών και μορφών.

Η **πολυπλοκότητα** μπορεί να είναι αποτέλεσμα της τυχειότητας, και όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η δυνατότητα κατανόησης και ανάλυσής της αποτελεί και κριτήριο για το αν κάτι είναι τυχαίο ή όχι. Η πολυπλοκότητα που προκύπτει από την τυχειότητα, όπως στο παράδειγμα των ραβδωτών δοκιμίων του πειράματος, **συμβάλλει στην ποικιλομορφία των δομών και των μορφών**. Η πολυπλοκότητα της τυχειότητας, σε συνδυασμό με την ψηφιακή κατασκευή και την έννοια του mass customization, δίνουν τη δυνατότητα για τη δημιουργία **παραλλαγών** δομών και μορφών, οι οποίες διαμορφώνονται εντός συγκεκριμένων **ορίων** που έχουν καθοριστεί κατά τη φάση του σχεδιασμού.

Σε επόμενο κεφάλαιο αναλύθηκαν οι τρόποι με τους οποίους μπορεί η τυχειότητα να ενσωματωθεί σε μια διαδικασία σχεδιασμού όσον αφορά στα κριτήρια, στις προδιαγραφές, στους περιορισμούς, στις παραδοχές και στις παραμέτρους. Ακολούθως, διερευνήθηκαν μεθοδολογίες χρήσης της

τυχειότητας σε σχέση με συγκεκριμένα σύγχρονα ψηφιακά εργαλεία στην αρχιτεκτονική, όπως ο παραμετρικός και αλγοριθμικός σχεδιασμός, οι γενετικοί αλγόριθμοι, τα cellular automata και τα L-systems.

Η καλύτερη κατανόηση της εφαρμογής της τυχειότητας σε διαφορετικά παραδείγματα αρχιτεκτονικών έργων και με διαφορετικές μεθόδους έδειξε ότι **οι περιπτώσεις εφαρμογής της σε σχέση με τη δομή (φέροντα οργανισμό) είναι οι πιο σύνθετες και πιο κρίσιμες από αυτές**, καθώς ένας φέρων οργανισμός μπορεί να είναι ελεγχόμενο μόνο τυχαίος, αφού θα πρέπει να ικανοποιεί πρωταρχικά τις απαιτήσεις για την ασφάλεια και φέρουσα ικανότητα της κατασκευής. Από τα παραπάνω διαπιστώθηκε επίσης ότι εφ' όσον, μετά από κατάλληλη διερεύνηση, εξαχθούν κάποια βασικά συμπεράσματα για τις δυνατότητες και προϋποθέσεις εφαρμογής της τυχειότητας στη διαμόρφωση του φέροντα οργανισμού - δομή της κατασκευής (και κατ' επέκταση της μορφής της), ως την πιο σύνθετη και κρίσιμη κατηγορία παραδειγμάτων, τότε οι λοιπές κατηγορίες εφαρμογής τυχειότητας (π.χ. αισθητικές, μορφολογικές, κ.λπ.) μπορούν να είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμες.

Γι' αυτό το λόγο, κρίθηκε ότι στο Β' Μέρος της διατριβής είναι αναγκαίο να παρουσιαστεί **η διεξαγωγή πειράματος** με το οποίο εξετάζεται η χρήση της παραμέτρου της τυχειότητας σε ενδεικτικό παράδειγμα εφαρμογής (case study), που περιλαμβάνει ελέγχους δοκιμών σε θλίψη σε διαφορετικές δομές ραβδωτών δοκιμίων.

## 9.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων πειραμάτων και συσχετισμός τους με το γενικότερο προβληματισμό για την έννοια της τυχειότητας στην αρχιτεκτονική τεχνολογία

Η πειραματική διάταξη που παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Β' μέρος της διατριβής χρησιμοποιήθηκε για να εξεταστεί **η επιρροή της παραμέτρου της τυχειότητας, όσον αφορά στη δομή και τη μορφή μιας κατασκευής, για το ποιά είναι αυτή και τι βαθμό έχει η επιρροή της, αν και υπό ποιες προϋποθέσεις μπορεί να είναι χρήσιμη για τη διαμόρφωση στοιχείων φέροντος οργανισμού.**

**Το πείραμα απέδωσε ποσοτικά-αριθμητικά, ποιοτικά και στατιστικά στοιχεία για την τυχειότητα, τα οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για να την περιγράψουν και να την αξιολογήσουν όσον αφορά στο συσχετισμό της με τη δομή και τη μορφή της κατασκευής.**

Ως παράδειγμα εφαρμογής δημιουργίας και χρήσης της τυχειότητας στην περίπτωση διερεύνησης δομών και μορφών δημιουργήθηκε παραμετρικός αλγόριθμος στο λογισμικό **Grasshopper**. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος περιλαμβάνει **την τυχειότητα ως παράμετρο** και δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας δοκιμίων με διαφορετικές τυχαίες διατάξεις ράβδων και κόμβων, διαφορετικών πυκνοτήτων, ανάλογα με τις παραμέτρους του αλγορίθμου. Δοκίμια που σχεδιάστηκαν αρχικά ψηφιακά και στη συνέχεια υλοποιήθηκαν ως φυσικά δοκίμια, χρησιμοποιήθηκαν σε πειράματα άσκησης κατακόρυφης θλίψης σε κατάλληλη πειραματική διάταξη.

**Σε όλα τα δοκίμια που δημιουργήθηκαν, υπάρχει η τυχαιότητα στη διαμόρφωση της δομής του φέροντος οργανισμού και της μορφής τους,** καθώς τα δοκίμια και των τριών οικογενειών δοκιμίων διαφορετικής πυκνότητας προέρχονται από την ίδια γεννήτρια λογισμικού, η οποία έχει διαμορφωθεί ώστε να εμπεριέχει την παράμετρο της τυχαιότητας ως εγγενές χαρακτηριστικό της.

Από τη διεξαγωγή του πειράματος φάνηκε ότι **η μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων** κατά την εφαρμογή θλιπτικού φορτίου **είναι διαφορετική ανά οικογένεια δοκιμίων.**

**Τα δοκίμια με τη μεγάλη πυκνότητα πλέγματος παρουσιάζουν κάποια κανονικότητα και σχετική προβλεψιμότητα, ενώ όσο το πλέγμα των δοκιμίων γίνεται πιο αραιό, το σύστημα γίνεται λιγότερο προβλέψιμο, πιο αόριστο, ασταθές και ίσως χαοτικό.**

Συνεπώς, όπως αποδείχθηκε από την πειραματική διαδικασία, **η τυχαιότητα μπορεί υπό προϋποθέσεις να είναι προβλέψιμη εντός συγκεκριμένων ορίων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή φερόντων στοιχείων και μορφών.**

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, για τα δοκίμια των συγκεκριμένων διαστάσεων και από το συγκεκριμένο υλικό PETG βρέθηκαν οι **χαρακτηριστικές τιμές πιθανότητας 5%** για κάθε οικογένεια, (βλ. προηγούμενη ενότητα) οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό, καθώς το **95%** των αντίστοιχων δοκιμίων κάθε οικογένειας θα έχουν μέγιστες τιμές θλιπτικού φορτίου μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές τιμές για την κάθε οικογένεια.

Πρακτικά, αυτή η στατιστική επεξεργασία δείχνει τη δυνατότητα δημιουργίας **πολυάριθμων παραλλαγών φορέων**, εξαιτίας της παραμέτρου της τυχαιότητας που έχει εισαχθεί στον αλγόριθμο, για τους οποίους θα είναι γνωστό ότι το 95% από αυτούς θα έχουν μια συγκεκριμένη φέρουσα ικανότητα με τιμή πάνω από τη χαρακτηριστική τιμή που βρέθηκε (ασφαλείς λύσεις).

**Η συγκεκριμένη προσέγγιση δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας ολόκληρης ομάδας «ασφαλών» λύσεων και όχι μόνο μίας και μοναδικής και αυτό είναι ένα σημαντικό συγκριτικό πλεονέκτημα στο σχεδιασμό σε σχέση με μια συμβατική προσέγγιση.** Είναι αντιληπτό ότι μια μεμονωμένη επίλυση μπορεί να μελετηθεί και να καταλήξει σε ένα παραδεκτό αποτέλεσμα από άποψη στατικής επάρκειας, και αυτή άλλωστε είναι μια από τις τρέχουσες μεθοδολογίες στο σχεδιασμό. Όμως, η δυνατότητα δημιουργίας μιας ομάδας «ασφαλών» λύσεων σε συνδυασμό με άλλες παραμέτρους, κριτήρια, προδιαγραφές και περιορισμούς μπορεί να αποδώσει μια ή και περισσότερες συνολικά ορθές και εφαρμόσιμες λύσεις, οι οποίες, αν δεν είχε χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη διαδικασία, μπορεί να μην είχαν ποτέ διαμορφωθεί. **Από αυτή την άποψη η τυχαιότητα είναι για τη δομή και τη μορφή ένα καινοτόμο εργαλείο το οποίο συμβάλλει στη σφαιρική και πολύπλευρη διαδικασία του σχεδιασμού, παράγοντας πολλές πιθανές επιλύσεις σύμφωνα με τις κατευθύνσεις που ορίζει ο μελετητής, εξασφαλίζοντας παράλληλα και τη στατική επάρκεια της κατασκευής.**

Σε μια τέτοια κατεύθυνση σχεδιασμού με χρήση της τυχαιότητας ως εργαλείο, **η δομή, η μορφή και η λειτουργία** (structure, form, function) μπορούν να συνδιαμορφώνονται (στο πλαίσιο του μοντέλου

σχεδιασμού της ψηφιακής κατασκευής) παράλληλα στο ίδιο σχεδιαστικό προσομοίωμα και αυτό είναι ένα εξαιρετικά σημαντικό πλεονέκτημα από άποψη συνοχής στο σχεδιασμό, αποφυγής σφαλμάτων, βελτιστοποίησης, οικονομίας υλικών, ταχύτητας σχεδιασμού και κατασκευής, αμεσότητας και μεταφοράς της πληροφορίας, κ.λπ.

Όσον αφορά στο συγκεκριμένο παράδειγμα εφαρμογής ραβδωτών δοκιμίων, οι ψευδοτυχαίες δομές και μορφές από υλικό PETG, που διερευνήθηκαν στην παρούσα διατριβή, διαπιστώθηκε ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τις κατάλληλες ρυθμίσεις των παραμέτρων παραγωγής τους σε κατασκευές μικρής κλίμακας, όπως έπιπλα ή άλλα χρηστικά αντικείμενα αντίστοιχου μεγέθους. Αυτό είναι εφικτό, καθώς η μέση τιμή φόρτισης **σε κατακόρυφη θλίψη** των πυκνών **δοκιμίων οικογένειας 200** βρέθηκε να φτάνει, για δοκίμιο κυλινδρικής μορφής μέγιστων διαστάσεων ύψους 20,5cm και διαμέτρου 10,5cm, τα **1790,9 N** που αντιστοιχεί σε ~179 kg βάρους, ενώ **η αντίστοιχη χαρακτηριστική τιμή για αυτή την κατηγορία** είναι τα **1156,1 N** δηλαδή ~115,6 Kg βάρους. Γίνεται κατανοητό ότι για τους στατικούς υπολογισμούς μιας κατασκευής απαιτούνται περισσότεροι έλεγχοι και ολοκληρωμένη στατική και δυναμική ανάλυση, και ότι τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας εντάσσονται σε πειραματική διερεύνηση, που όμως δίνει σημαντικά στοιχεία για την αντοχή των συγκεκριμένων δομών και της μεθοδολογίας σχεδιασμού τους.

Ως γενικό συμπέρασμα των παραπάνω, επιβεβαιώθηκε το ερευνητικό ερώτημα ότι η τυχαιότητα είναι σημαντική **όσον αφορά στη δομή και τη μορφή μιας κατασκευής. Φάνηκε πώς μπορεί να επηρεάσει τη δομή και τη μορφή μιας κατασκευής και πως μπορεί να είναι χρήσιμη και ελέγξιμη υπό προϋποθέσεις, συνεισφέροντας ως εργαλείο στο συνολικό σχεδιασμό.**

### 9.3 Πιθανές χρήσεις και εφαρμογές με αφετηρία την πειραματική διάταξη

Η χρήση τρισδιάστατων δομών και μορφών που παράγονται με ελεγχόμενες ψευδοτυχαίες διαδικασίες, ανάλογων με αυτές της πειραματικής διάταξης, μπορεί να παρουσιάζει πλεονεκτήματα που δεν υπάρχουν σε συμβατικές διατάξεις κατασκευών. Κάποια από αυτά μπορεί να είναι:

**1.** Η δυνατότητα δημιουργίας φορέων ακανόνιστης και μη συμμετρικής διάταξης στο χώρο, που δεν θα μπορούσαν να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν με ένα τυπικό ορθοκανονικό σύστημα φέροντος οργανισμού. Τέτοιες ακανόνιστες μη συμμετρικές δομές έχουν το **πλεονέκτημα της γεωμετρικής και λειτουργικής προσαρμοστικότητας** της δομής και της μορφής στο χώρο και το περιβάλλον τους.

**2.** Η ακανόνιστη δομή των ράβδων και των κόμβων ενός τέτοιου φορέα **μπορεί να αυξάνει την ασφάλεια της κατασκευής**, καθώς αστοχία σε ένα στοιχείο, ράβδο ή κόμβο, μπορεί να είναι τοπική και όχι καθολική, λόγω της πιθανής ανακατανομής των δυνάμεων στα υπόλοιπα στοιχεία που αποτελούν τη δομή ενός τέτοιου πολυσύνθετου φορέα. Η παραπάνω υπόθεση χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

**3. Η δυνατότητα δημιουργίας παραλλαγών** σε στοιχεία της κατασκευής και εφαρμογή της αρχής του mass customization για τη δημιουργία ομόλογων μελών, γεγονός που μπορεί να προσδώσει μορφολογική ποικιλία και μοναδικότητα στην κατασκευή.

**4. Η δυνατότητα εφαρμογής των σχετικών αρχών** που διερευνήθηκαν σε σχέση με την τυχαιότητα **σε κατασκευές μικρής και μεγάλης κλίμακας**.

**5. Η δυνατότητα εφαρμογής των σχετικών αρχών** που διερευνήθηκαν σε σχέση με την τυχαιότητα **σε κατασκευές από διαφορετικά υλικά**.

**6. Η οικονομία υλικού και η βελτιστοποίηση του φορέα**.

## 9.4 Επόμενα στάδια έρευνας

Ως επόμενα στάδια έρευνας σε σχέση με την πειραματική διάταξη μπορούν και έχει ενδιαφέρον να υλοποιηθούν σε επόμενο χρόνο τα παρακάτω:

**1.** Εφαρμόζοντας την ίδια ερευνητική μεθοδολογία μπορούν να γίνουν πειράματα με δοκίμια κατασκευασμένα με διαφορετικά συνθετικά υλικά 3d εκτύπωσης σε διάταξη 3d εκτυπωτή οικιακής κατηγορίας, όπως **ABS, Carbon**, κ.λπ. και να γίνει συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Η συγκεκριμένη έρευνα θα μπορέσει να δείξει την επιρροή χρήσης διαφορετικού υλικού στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Τα πειράματα σε αυτή τη διερευνητική φάση μπορούν να επαναληφθούν σε απόλυτα ελεγχόμενες συνθήκες παραγωγής (π.χ. θερμοκρασία και υγρασία περιβάλλοντος παραγωγής, αποθήκευσης και περιβάλλοντος διενέργειας πειράματος) και με τρόπο κατασκευής που δεν θα εγκυμονεί κινδύνους τραυματισμού των δοκιμών κατά την προετοιμασία τους και την αφαίρεση των ικριωμάτων τους.

**2.** Να κατασκευαστούν δοκίμια ίδιων διαστάσεων και διατομών, αλλά από μέταλλο (αλουμίνιο ή ατσάλι) προκειμένου να εξεταστεί η συμπεριφορά των δοκιμών από υλικό κατασκευής αυξημένης αντοχής, συγκριτικά με το πλαστικό PETG που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα αυτής της διατριβής.

**3.** Να υλοποιηθούν δοκίμια μεγαλύτερου μεγέθους και διατομών από ινοπλισμένο σκυρόδεμα και να ελεγχθούν πειραματικά.

**4.** Να γίνει κατασκευή ραβδωτού δομικού στοιχείου υποστυλώματος διαστάσεων 20x20x300cm και να γίνει έλεγχος στατικής συμπεριφοράς του σε σεισμική τράπεζα. Τα παραπάνω προτεινόμενα πειράματα μπορούν να διερευνήσουν τη συμπεριφορά των τυχαίων δομών σε διαφορετικές κλίμακες και με διαφορετικά υλικά. Η συνολική και συγκριτική αξιολόγηση των αρχικών και νέων πειραμάτων μπορεί να δώσει πιθανώς καλύτερη εικόνα για τον τρόπο που η τυχαιότητα επηρεάζει τη δομή και τη μορφή ενός τέτοιου στοιχείου.

5. Να γίνει περαιτέρω διερεύνηση των δυνατοτήτων του λογισμικού **Grasshopper** για τη δημιουργία παραμετρικών δομών που εμπεριέχουν την τυχαιότητα, με παράλληλο στατικό υπολογισμό των παραγόμενων στοιχείων από εξειδικευμένο λογισμικό στο περιβάλλον του Grasshopper, όπως π.χ. το **Karamba3D**, και σε συνδυασμό με πειραματικές διατάξεις.
6. Να γίνει εκτενής χρήση γενετικών αλγορίθμων (**GA**) για τη βελτιστοποίηση των δομών που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες για τις παραμέτρους της πυκνότητας, του Seed, της διατομής των ράβδων, οικονομία υλικού, πιθανές ενισχύσεις στις περιοχές των κόμβων και άλλες.
7. Να γίνουν μετρήσεις εύρεσης μέτρου ελαστικότητας σε συμπαγή δοκίμια με διαφορετικές ρυθμίσεις εκτύπωσης, π.χ. ρυθμίσεις πυκνότερης 3d εκτύπωσης (πάχος στρώσεων 0,2mm ή/και 0,13mm) αναμένεται να αποδώσουν μεγαλύτερες τιμές και αυτό μπορεί να μελετηθεί μελλοντικά.
8. Να γίνει εκτύπωση από υλικό PETG δοκιμίων οικογένειας 400, ακόμα μεγαλύτερης πυκνότητας δηλαδή από αυτά της οικογένειας 200, στη συνέχεια να γίνει δοκιμή τους σε θλιπτικά φορτία σύμφωνα με την προηγουμένως περιγραφόμενη πειραματική διάταξη και να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας.
9. Να γίνει γεωμετρική παραμετρική βελτιστοποίηση των δοκιμίων του πειράματος στην περιοχή των συνδέσεων των ράβδων (κόμβοι), με προσθήκη υλικού και διαφοροποίηση της γεωμετρίας, ώστε να ενισχυθούν τα δοκίμια, καθώς στις περιοχές αυτές παρατηρήθηκαν οι περισσότερες αστοχίες των ραβδωτών δοκιμίων, και στη συνέχεια τα βελτιωμένα δοκίμια να ελεγχθούν πειραματικά ως προς την παράμετρο της τυχαιότητας και τις χρήσεις των συγκεκριμένων δομών και μορφών ως φέροντα στοιχεία (Εικόνα 9\_1).



Εικόνα 9\_1: Ενδεικτική παραμετρική διαμόρφωση βελτιωμένου δοκιμίου στην περιοχή των κόμβων. Αρχικό δοκίμιο 200-1 (αριστερά), βελτιωμένο δοκίμιο 200-1 (κέντρο), φυσικό βελτιωμένο δοκίμιο 200-1 κατασκευασμένο από PETG με χρήση 3d printing. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

## 9.5 Επίλογος

Η παρούσα διατριβή επιχείρησε να συγκεντρώσει στοιχεία σχετικά με τη διαχείριση και εφαρμογή της τυχαιότητας στην αρχιτεκτονική, τα οποία αφ' ενός διερευνούν τις υπάρχουσες δυνατότητες και αφ' ετέρου θέτουν βάσεις για μελλοντική έρευνα και χρήση της στο πεδίο αυτό.

Αυτή η έρευνα προσέγγισε αρχικά τον τρόπο με τον οποίο γίνεται αντιληπτή η τυχαιότητα σε άλλες επιστήμες και στην Τέχνη, για να εστιάσει στη συνέχεια στην Αρχιτεκτονική και πιο συγκεκριμένα σε περιπτώσεις που σχετίζονται με τη δομή και τη μορφή. Για τον γράφοντα τουλάχιστον, ήταν μια επιμορφωτική εμπειρία η οποία δεν συντέλεσε όλο αυτό το διάστημα μελέτης μόνο στην αποκομιδή γνώσεων, αλλά βοήθησε και στο να αλλάξει (ιδανικά προς το καλύτερο) ο τρόπος εργασίας, σκέψης, αντίληψης και κατανόησης του σχετικά με διάφορα ζητήματα. Η διατριβή αυτή έγινε αφορμή να γίνουν πολλές συζητήσεις με καθηγητές, συναδέλφους και φίλους, ακόμα και με άτομα που δεν έχουν την ιδιότητα του μηχανικού, οι οποίες ήταν εξαιρετικά χρήσιμες για την προσπάθεια κατανόησης αυτής της δύσκολης και αμφιλεγόμενης έννοιας.

Η τυχαιότητα εξαιτίας του χαρακτήρα της και των ιδιοτήτων που εμπεριέχει, απ' ό,τι φαίνεται, μπορεί να είναι εκτός από απρόβλεπτη παράμετρος παράλληλα και ένα πανίσχυρο εργαλείο. Στην αρχιτεκτονική σχετίζεται με την πληροφορία, την πολυπλοκότητα, την οργάνωση, τη δομή και τη μορφή. Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τυχαιότητα σε αυτό το πεδίο είναι πολλαπλοί και ευέλικτοι, ανάλογα με τους στόχους που μπορεί να τεθούν, το βαθμό που επιδιώκεται να αξιοποιηθεί αυτή η παράμετρος, καθώς και τα διαθέσιμα μέσα με τα οποία μπορεί να γίνει η διαχείρισή της.

Κρίνοντας από τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας, εκτιμάται ότι η τυχαιότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο και υπό προϋποθέσεις να αξιοποιηθεί ακόμα και στις κρίσιμες περιπτώσεις που αφορούν διαμόρφωση δομών, αλλά και σε λιγότερες κρίσιμες που αφορούν στη διαμόρφωση μορφών. Οι δυνατότητες είναι πολλές και ενδιαφέρουσες και είναι βέβαιο ότι με την εξέλιξη της τεχνολογίας και της γνώσης, οι τεχνικές και τα μέσα θα βελτιωθούν και θα παρουσιάσουν νέοι πιο αποδοτικοί και ευρηματικοί τρόποι εφαρμογής της τυχαιότητας στην αρχιτεκτονική.



## Βιβλιογραφία

- '2.3 ΜΕΤΡΑ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ'. Ημερομηνία πρόσβασης 5 Σεπτέμβριος 2023.  
[http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/4704/Mathimatika-kai-Stoicheia-Statistikis\\_G-EPAL\\_html-apli/index2\\_3.html](http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/4704/Mathimatika-kai-Stoicheia-Statistikis_G-EPAL_html-apli/index2_3.html).
- '3ds Max | 3D Modeling, Animation & Rendering Software | Autodesk'. Ημερομηνία πρόσβασης 20 Απρίλιος 2020. <https://www.autodesk.com/products/3ds-max/overview?support=ADVANCED>.
- '226 NATIONAL STADIUM - HERZOG & DE MEURON'. Ημερομηνία πρόσβασης 5 Φεβρουάριος 2020.  
<https://www.herzogdemeuron.com/index/projects/complete-works/226-250/226-national-stadium.html>.
- 1000minds. 'What Is MCDM / MCDA?' Ημερομηνία πρόσβασης 31 Αύγουστος 2020.  
<https://www.1000minds.com/decision-making/what-is-mcdm-mcda>.
262588213843476. 'Lava Lamp Random Number Generator'. Gist. Ημερομηνία πρόσβασης 8 Μάιος 2024. <https://gist.github.com/UnquietCode/99b69b99e00ce52e34c1>.
- Αλεπόρου-Μαρίνου, Βασιλική, Αλέξανδρος Αργυροκαστρίτης, Αικατερίνη Κομητοπούλου, Περικλής Πιαλόγλου, και Βασιλική Σγουρίτσα. *Βιολογία Θετικής κατεύθυνσης Γ'τάξης Γενικού Λυκείου*. Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών και Εκδόσεων «Διόφαντος», 1999.
- Αντικλείδι. 'Leonard Mlodinow – Ο Γαλιλαίος Και Οι Πιθανότητες'. *Αντικλείδι* (blog), 15 Φεβρουάριος 2019. [https://antikleidi.com/2019/02/15/mlodinow\\_galileo/](https://antikleidi.com/2019/02/15/mlodinow_galileo/).
- 'Αρχή της απροσδιοριστίας'. Στο *Βικιπαίδεια*, 28 Αύγουστος 2018.  
[https://el.wikipedia.org/wiki/Αρχή\\_της\\_απροσδιοριστίας](https://el.wikipedia.org/wiki/Αρχή_της_απροσδιοριστίας).
- Γέλλιος, Αύλος. *ΑΤΤΙΚΕΣ ΝΥΚΤΕΣ*, χ.χ.  
<http://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Gellius/home.html>.
- Δημητράκος, Θεοδόσης. *Σημειώσεις για το μάθημα συνδυαστική*. Σάμος: Πανεπιστήμιο Αιγαίου, 2014. [http://www.samos.aegean.gr/math/dimitheo/Sindiastiki\\_Kef\\_1.pdf](http://www.samos.aegean.gr/math/dimitheo/Sindiastiki_Kef_1.pdf).
- Ειρήνη Δ. Γούση. 'Ο ρόλος της Τύχης στη φιλοσοφία του Αριστοτέλη ( Φυσικά, Πολιτικά, Ηθικά Νικομάχεια)'. ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Φιλοσοφική Σχολή, Τμήμα φιλοσοφίας και παιδαγωγικής, 2019.  
<http://ikee.lib.auth.gr/record/306931/files/GRI-2019-25484.pdf>.
- 'Ελαστικότητα'. Στο *Βικιπαίδεια*, 1 Μάιος 2024. <https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%95%CE%BB%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1&oldid=10549471>.
- 'Ελληνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΕΤΕΠ)'. Ημερομηνία πρόσβασης 5 Απρίλιος 2020.  
[https://www.ggde.gr/index.php?option=com\\_k2&view=itemlist&layout=category&task=category&id=89&Itemid=285](https://www.ggde.gr/index.php?option=com_k2&view=itemlist&layout=category&task=category&id=89&Itemid=285).
- Επικούρος. *ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ: ΑΠΑΝΤΑ*. Αρχαία Ελληνική Γραμματεία «Οι Έλληνες» 284. Αθήνα: Κάκτος, 1994.

- Ησίοδος. 'Θεογονία - Βικιθήκη'. Ημερομηνία πρόσβασης 15 Νοέμβριος 2018. <https://el.wikisource.org/wiki/Θεογονία>.
- 'ΘΕΜΑΤΑ ΙΣΤΟΡΙΑΣ ΤΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ - Ορισμός της τυχαιότητας στην επιστήμη'. Ημερομηνία πρόσβασης 12 Δεκέμβριος 2023. [http://molwave.chem.auth.gr/chemhistory/random\\_discoveries/3\\_1.html](http://molwave.chem.auth.gr/chemhistory/random_discoveries/3_1.html).
- 'ΘΕΜΑΤΑ ΙΣΤΟΡΙΑΣ ΤΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ - Τυχαίες ανακαλύψεις στη Χημεία'. Ημερομηνία πρόσβασης 12 Δεκέμβριος 2023. [http://molwave.chem.auth.gr/chemhistory/random\\_discoveries.html](http://molwave.chem.auth.gr/chemhistory/random_discoveries.html).
- 'Θεωρία του χάους'. Στο *Βικιπαίδεια*, 16 Δεκέμβριος 2017. [https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Θεωρία\\_του\\_χάους&oldid=6776493](https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Θεωρία_του_χάους&oldid=6776493).
- 'Ι Τσινγκ'. Στο *Βικιπαίδεια*, 11 Οκτώβριος 2019. [https://el.wikipedia.org/wiki/Ι\\_Τσινγκ](https://el.wikipedia.org/wiki/Ι_Τσινγκ).
- 'Ισαάκ Νεύτων'. Στο *Βικιπαίδεια*, 23 Οκτώβριος 2017. [https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Ισαάκ\\_Νεύτων&oldid=6697229](https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Ισαάκ_Νεύτων&oldid=6697229).
- Ιωάννου, Πέτρος. 'Εκκρεμές εξαναγκασμένο με αρμονική εξωτερική δύναμη', χ.χ. <http://users.uoa.gr/~rjioannou/nonlin/pendulum.doc>.
- Κάλφας, Βασίλης. *Αριστοτέλης, Περί Φύσεως Το Β'* βιβλίο των Φυσικών. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, 2015. <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/684>.
- 'Κανονική κατανομή'. Στο *Βικιπαίδεια*, 7 Φεβρουάριος 2019. [https://el.wikipedia.org/wiki/Κανονική\\_κατανομή](https://el.wikipedia.org/wiki/Κανονική_κατανομή).
- 'Κβαντική μηχανική'. Στο *Βικιπαίδεια*, 24 Ιούνιος 2017. [https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Κβαντική\\_μηχανική&oldid=6532530](https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Κβαντική_μηχανική&oldid=6532530).
- Κουμούσης, Βλάσης. 'Στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης', χ.χ. [http://users.ntua.gr/vkoum/postgraduate/beltsxed/theory/stox\\_opti.pdf](http://users.ntua.gr/vkoum/postgraduate/beltsxed/theory/stox_opti.pdf).
- 'Κυτταρικά αυτόματα και το παιχνίδι της ζωής'. Ημερομηνία πρόσβασης 27 Απρίλιος 2020. <http://users.softlab.ntua.gr/~brensham/Demos/CellularAutomata/>.
- Λάζου, Άννα, και Κωνσταντίνος Καλαχάνης. *Φιλοσοφία της Φύσης. Η Φύση στην Αρχαία Ελληνική Φιλοσοφία*. 1.0. Αθήνα: Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών, 2015. <https://opencourses.uoa.gr/modules/document/index.php?course=PPP107&download=/564763a1KUtc/56e13f27yZCd/56e14032Fd9/56e14032W3Ro.pdf>.
- 'Μεντελική κληρονομικότητα'. Στο *Βικιπαίδεια*, 24 Μάρτιος 2018. [https://el.wikipedia.org/wiki/Μεντελική\\_κληρονομικότητα](https://el.wikipedia.org/wiki/Μεντελική_κληρονομικότητα).
- Μπαμπινιώτης, Γ. *Λεξικό της νέας ελληνικής γλώσσας. Γ'*. Αθήνα: Κέντρο Λεξικολογίας, 2008.
- . *Λεξικό της νέας ελληνικής γλώσσας. Γ'*. Αθήνα: Κέντρο Λεξικολογίας, 2008.
- Μπερμπερίδης, Κωνσταντίνος, Δημήτριος Αμπελιώτης, και Χρήστος Μαυροκεφαλίδης. 'Εισαγωγή στις στοχαστικές διαδικασίες'. Στο *Στατιστική επεξεργασία σημάτων και μάθηση*. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, 2015. <http://hdl.handle.net/11419/2195>.
- Μπούρας, Χαράλαμπος Θ. *Μαθήματα Ιστορίας της Αρχιτεκτονικής*. τ. Πρώτος. Αθήνα: Συμμετρία, 1999.

- 'Ντιμίτρι Μεντελέγιεφ'. Στο *Βικιπαίδεια*, 12 Ιούνιος 2017. [https://el.wikipedia.org/wiki/Ντιμίτρι\\_Μεντελέγιεφ](https://el.wikipedia.org/wiki/Ντιμίτρι_Μεντελέγιεφ).
- 'Πείραμα των δύο σχισμών'. Στο *Βικιπαίδεια*, 7 Μάιος 2017. [https://el.wikipedia.org/wiki/Πείραμα\\_των\\_δύο\\_σχισμών](https://el.wikipedia.org/wiki/Πείραμα_των_δύο_σχισμών).
- Πλούταρχος. *Ηθικά, Τόμος 3. Οι Έλληνες 345*. Αθήνα: Κάκτος, 1995.
- Πόραβος, Θανάσης. *Λιθοδομή στο χτες και στο σήμερα...* Εκδόσεις Ψύχαλου, 2015.
- 'Ραδιενέργεια'. Στο *Βικιπαίδεια*, 6 Δεκέμβριος 2017. <https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Ραδιενέργεια&oldid=6765283>.
- Στάικος, Κωνσταντίνος. *Διπλωματική εργασία: Σχεδίαση Γεννητριών Τυχαίων Αριθμών Χαμηλής Κατανάλωσης Ισχύος*. Πάτρα: Πολυτεχνική Σχολή Πάτρας, 2009. [http://nemertes.lis.uratras.gr/jsrui/bitstream/10889/1895/1/Σχεδίαση\\_Γεννητριών\\_Τυχαίων\\_Αριθμών\\_Χαμηλής\\_Κατανάλωσης\\_Ισχύος.pdf](http://nemertes.lis.uratras.gr/jsrui/bitstream/10889/1895/1/Σχεδίαση_Γεννητριών_Τυχαίων_Αριθμών_Χαμηλής_Κατανάλωσης_Ισχύος.pdf).
- Τουρνικιώτης, Παναγιώτης. *Εισαγωγή στη θεωρία της Αρχιτεκτονικής. Μια ιστορική επισκόπηση*. Αθήνα: Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ. Τομέας αρχιτεκτονικού σχεδιασμού. Περιοχή θεωρίας της αρχιτεκτονικής., 2008. [http://www.arch.ntua.gr/sites/default/files/resource/12901\\_/tournikiotis\\_introduction\\_theory\\_2008\\_b.pdf](http://www.arch.ntua.gr/sites/default/files/resource/12901_/tournikiotis_introduction_theory_2008_b.pdf).
- Τσίχλας, Κωνσταντίνος, Ιωάννης Μανωλόπουλος, και Αναστάσιος Γούναρης. *Σχεδίαση και ανάλυση αλγορίθμων*, 2015. <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/4005>.
- 'Τυχαιοποιημένοι Αλγόριθμοι', χ.χ. <http://www.cs.ucy.ac.cy/~annap/epl232/notes/notes17-19.pdf>.
- 'τυχειότητα'. Στο *Βικιλεξικό*, 4 Φεβρουάριος 2022. <https://el.wiktionary.org/w/index.php?title=%CF%84%CF%85%CF%87%CE%B1%CE%B9%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1&oldid=5522730>.
- 'Τύχη (μυθολογία)'. Στο *Βικιπαίδεια*, 6 Μάιος 2017. [https://el.wikipedia.org/wiki/Τύχη\\_\(μυθολογία\)](https://el.wikipedia.org/wiki/Τύχη_(μυθολογία)).
- Φίλης, Γιάννης Α. 'Στοχαστικές διαδικασίες'. Πολυτεχνείο Κρήτης, 2006. <http://www.cam.tuc.gr/DIAFORA%20JPG/BIBLIA/stochastic%20processes.pdf>.
- Χατζησπύρος, Σπύρος Ι. 'Σημειώσεις στην Υπολογιστική Στατιστική μέρος Α', χ.χ. <http://www.samos.aegean.gr/actuar/schatz/notes/Simulation%20I.pdf>.
- 'About Parametric Drawing and Constraints | AutoCAD 2020 | Autodesk Knowledge Network'. Ημερομηνία πρόσβασης 10 Απριλίου 2020. <https://knowledge.autodesk.com/support/autocad/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2020/ENU/AutoCAD-Core/files/GUID-899E008D-B422-4DF2-AC8D-1A4F5701ED4E-htm.html>.
- 'Abstract Art'. Στο *Wikipedia*, 29 Σεπτέμβριος 2019. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Abstract\\_art&oldid=918627427](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Abstract_art&oldid=918627427).
- 'Active Energy Building'. Ημερομηνία πρόσβασης 13 Φεβρουάριος 2020. <https://www.bollinger-grohmann.com/en.projects.active-energy-building.html?f=2017>.
- 'Active Energy Building – Karamba3D'. Ημερομηνία πρόσβασης 13 Φεβρουάριος 2020. <https://www.karamba3d.com/projects/active-energy-building/>.

- Adilenidou, Yota; Ahmed. 'Unprintable Forms'. Στο *ACADIA 19:UBIQUITY AND AUTONOMY [Proceedings of the 39th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 978-0-578-59179-7] (The University of Texas at Austin School of Architecture, Austin, Texas 21-26 October, 2019) pp.168-177. CUMINCAD, 2019. [https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia19\\_168](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia19_168).*
- 'Airport Stuttgart Terminal 3'. Ημερομηνία πρόσβασης 5 Μάιος 2020. <https://www.sbp.de/en/project/airport-stuttgart-terminal-3/>.
- 'Al Bahr Towers | Office & Workplace | AHR | Architects and Building Consultants'. Ημερομηνία πρόσβασης 23 Δεκέμβριος 2019. <https://www.ahr.co.uk/Al-Bahr-Towers>.
- Alkner, Zainab. 'Effect of Structure Design on the Compressive Strength and Energy Absorption of Different Resin-3D Printed Irregular Voronoi Structures by SLA Technique', 2023. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12124.87687>.
- Alkner, Zainab, Zhwan Dilshad Ibrahim Sktani, και Ali Arab. 'Effect of Cell Geometry on the Mechanical Properties of 3D Voronoi Tessellation'. *Journal of Functional Biomaterials* 13, τχ. 4 (16 Δεκέμβριος 2022): 302. <https://doi.org/10.3390/jfb13040302>.
- All3DP. '3D Printing Supports – The Ultimate Guide', 27 Φεβρουάριος 2023. <https://all3dp.com/1/3d-printing-support-structures/>.
- Al-Rawi, Kais. 'Generative geometry workflows – from concept to fabrication'. *Proceedings of IASS Annual Symposia 2017*, τχ. 23 (28 Σεπτέμβριος 2017): 1–9.
- Andrew Mead. 'Kenneth Martin: The Chance and Order Series, Screw Mobiles and Related Works 1953-1984'. *Architects Journal*. Ημερομηνία πρόσβασης 10 Οκτώβριος 2019. <https://www.architectsjournal.co.uk/home/kenneth-martin-the-chance-and-order-series-screw-mobiles-and-related-works-1953-1984/769390.article>.
- Anton, Ana, Andrei Jipa, Lex Reiter, και Benjamin Dillenburder. 'Fast Complexity'. Στο *ACADIA 2020: Distributed Proximities / Volume II: Projects [Proceedings of the 40th Annual Conference of the Association of Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 978-0-578-95253-6]. Online and Global. 24-30 October 2020. edited by M. Yablonina, A. Marcus, S. Doyle, M. del Campo, V. Ago, B. Slocum. 236-241. CUMINCAD, 2020. [https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia20\\_236p](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia20_236p).*
- Anton, Ana, Eleni Skevaki, Patrick Bischof, και Benjamin Dillenburder. 'Column-Slab Interfaces for 3D Concrete Printing'. Στο *ACADIA 2022: Hybrids and Haecceities [Proceedings of the 42nd Annual Conference of the Association of Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 979-8-9860805-8-1]. University of Pennsylvania Stuart Weitzman School of Design. 27-29 October 2022. edited by M. Akbarzadeh, D. Aviv, H. Jamelle, and R. Stuart-Smith. 58-67. CUMINCAD, 2022. [https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia22\\_58](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia22_58).*
- Anton, Ana, Angela Yoo, Patrick Bedarf, Lex Reiter, Timothy Wangler, και Benjamin Dillenburder. 'Vertical Modulations'. Στο *ACADIA 19:UBIQUITY AND AUTONOMY [Proceedings of the 39th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 978-0-578-59179-7] (The University of Texas at Austin School of Architecture, Austin, Texas 21-26 October, 2019) pp. 596-605. CUMINCAD, 2019. [https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia19\\_596](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia19_596).*
- Aquinas, Thomas. *Summa Theologica*, 1485. [http://www.documentacatholicaomnia.eu/03d/1225-1274,\\_Thomas\\_Aquinas,\\_Summa\\_Theologiae\\_%5B1%5D,\\_EN.pdf](http://www.documentacatholicaomnia.eu/03d/1225-1274,_Thomas_Aquinas,_Summa_Theologiae_%5B1%5D,_EN.pdf).

- Arboleda-Pardo, Juan Gabriel, Rodrigo Garcia Alvarado, και Alejandro Martinez Rocamora. 'BIM-modeling and programming of curved concrete walls for 3D-printed construction'. Στο *SIGraDi 2020 [Proceedings of the 24th Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics - ISSN: 2318-6968] Online Conference 18 - 20 November 2020*, pp. 297-305. CUMINCAD, 2020. [https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/sigradi2020\\_297](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/sigradi2020_297).
- Arch2O.com. 'Dancing House | Vlado Milunic + Frank Gehry', 23 Αύγουστος 2012. <https://www.arch2o.com/dancing-house-vlado-milunic-frank-ghery/>.
- Arch2O.com. 'The Guggenheim Museum Bilbao | Frank Gehry'. Ημερομηνία πρόσβασης 12 Φεβρουάριος 2020. <https://www.arch2o.com/guggenheim-museum-bilbao-frank-ghery/>.
- Arch2O.com. 'TOD'S Omotesando Building | Toyo Ito & Associates, Architects', 12 Δεκέμβριος 2012. <https://www.arch2o.com/tods-omotesando-building-toyo-ito-associates-architects/>.
- ArchDaily. 'AD Classics: The Guggenheim Museum Bilbao / Gehry Partners', 1 Σεπτέμβριος 2013. <http://www.archdaily.com/422470/ad-classics-the-guggenheim-museum-bilbao-frank-ghery/>.
- ArchDaily. 'AD Classics: Tower of Winds / Toyo Ito & Associates', 18 Μάρτιος 2013. <http://www.archdaily.com/344664/ad-classics-tower-of-winds-toyo-ito/>.
- ArchDaily. 'Denver Art Museum / Studio Libeskind', 5 Οκτώβριος 2010. <http://www.archdaily.com/80309/denver-art-museum-daniel-libeskind/>.
- ArchDaily. 'Five Projects Awarded Prizes at the 2014 Media Architecture Biennale', 26 Νοέμβριος 2014. <http://www.archdaily.com/572312/five-projects-awarded-prizes-at-the-2014-media-architecture-biennale/>.
- ArchDaily. 'Light Matters: What Media Facades Are Saying', 19 Μάρτιος 2013. <http://www.archdaily.com/344971/light-matters-what-media-facades-are-saying/>.
- ArchDaily. 'Lucien Pellat-Finet Shinsaibashi / Kengo Kuma & Associates', 15 Ιανουάριος 2012. <http://www.archdaily.com/199601/lucien-pellat-finet-shinsaibashi-kengo-kuma-associates/>.
- ArchDaily. 'Qatar National Convention Centre / Arata Isozaki', 10 Σεπτέμβριος 2013. <http://www.archdaily.com/425521/qatar-national-convention-centre-arata-isozaki/>.
- ArchDaily. 'UAP + Ned Kahn to Create Kinetic Artwork for Brisbane Airport', 18 Ιούλιος 2010. <http://www.archdaily.com/69219/uap-ned-kahn-to-create-kinetic-artwork-for-brisbane-airport/>.
- ArchitectureAU. 'Engineering the Water Cube'. Ημερομηνία πρόσβασης 5 Φεβρουάριος 2020. <https://architectureau.com/articles/practice-23/>.
- Arcspace. 'Der Neue Zollhof'. Arcspace.Com (blog). Ημερομηνία πρόσβασης 12 Φεβρουάριος 2020. <https://arcspace.com/feature/der-neue-zollhof/>.
- Arne Quinze. 'The Passenger'. Ημερομηνία πρόσβασης 1 Φεβρουάριος 2020. <https://www.arnequinze.com/art-and-exhibitions/the-passenger>.
- 'Arthur Compton'. Στο *Wikipedia*, 1 Μάιος 2024. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Arthur\\_Compton&oldid=1221716075#cite\\_note-FOOTNOTECompton1967121-44](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Arthur_Compton&oldid=1221716075#cite_note-FOOTNOTECompton1967121-44).

- Berlatsky, Noah. 'True Darwinism Is All About Chance'. Pacific Standard. Ημερομηνία πρόσβασης 22 Ιούλιος 2019. <https://psmag.com/environment/wealth-rich-chance-charles-darwin-darwinism-chance-meritocracy-89764>.
- Bowman, Nathan. 'The Reception of Gerolamo Cardano's Liber De Ludo Aleae', 12, χ.χ. [https://www.maa.org/sites/default/files/pdf/upload\\_library/46/Bowman\\_Cardano\\_ed.pdf](https://www.maa.org/sites/default/files/pdf/upload_library/46/Bowman_Cardano_ed.pdf).
- Britton, M. G. 'Thoughts on Design. . . and assumptions', 2011. [https://umanitoba.ca/faculties/engineering/departments/ce2p2e/pdf/ToD\\_2011\\_06.pdf](https://umanitoba.ca/faculties/engineering/departments/ce2p2e/pdf/ToD_2011_06.pdf).
- Broadbent, S. R., και J. M. Hammersley. 'Percolation processes: I. Crystals and mazes'. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 53, τχ. 3 (1957): 629β€“641. <https://doi.org/10.1017/S0305004100032680>.
- Bulleit, William, και M Asce. 'Uncertainty in Structural Engineering'. *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 13 (1 Φεβρουάριος 2008). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0680\(2008\)13:1\(24\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0680(2008)13:1(24)).
- Burch, Robert. 'Charles Sanders Peirce'. Στο *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, επιμέλεια Edward N. Zalta, Winter 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018. <https://plato.stanford.edu/archives/win2018/entries/peirce/>.
- Burry, Mark. 'Aegis Hyposurface'. MARK BURRY, 20 Ιανουάριος 2012. <https://mcburry.net/aegis-hyposurface/>.
- 'Cellular Automata In Architecture / AA Workshop - eVolo | Architecture Magazine'. Ημερομηνία πρόσβασης 4 Μάιος 2020. <http://www.evolo.us/cellular-automata-in-architecture-aa-workshop/>.
- Chaitin, Gregory J. *Thinking About Gödel And Turing: Essays on Complexity, 1970-2007*. Hackensack, N.J.: World Scientific Publishing Company, 2007.
- Cichocka, Judyta Maria. 'A Method for Generating Regular Grid Configurations on Free-From Surfaces for Structurally Sound Geodesic Gridshells'. Στο *Stojakovic, V and Tepavcevic, B (eds.), Towards a new, configurable architecture - Proceedings of the 39th eCAADe Conference - Volume 2, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia, 8-10 September 2021*, pp. 493-502. CUMINCAD, 2021. [https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2021\\_257](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2021_257).
- Coates, Paul, N. Healy, C. Lamb, και W. L. Voon. 'The Use of Cellular Automata to Explore Bottom up Architectonic Rules', 1996. <http://hdl.handle.net/10552/949>.
- 'Cocoon / AA Design + Make'. Ημερομηνία πρόσβασης 6 Ιούλιος 2024. <https://designandmake.aaschool.ac.uk/project/cocoon/>.
- Coe, J. B., S. E. Ahnert, και T. M. A. Fink. 'When Are Cellular Automata Random?' *EPL (Europhysics Letters)* 84, τχ. 5 (Δεκέμβριος 2008): 50005. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/84/50005>.
- Collins. *Collins English Dictionary: 30th Anniversary Edition*. Tenth Edition, Tenth edition edition. London: HarperCollins UK, 2010.
- Competition, A' Design Award &. 'Photoptosis Installation by Rajat Sodhi and Christoph Klemmt'. A' Design Award. Ημερομηνία πρόσβασης 16 Σεπτέμβριος 2023. <https://competition.adesignaward.com/design.php?ID=65401>.

- Conrad, John. 'Concrete Printed Gyroid Column: A structurally optimized, sand layer supported printing method'. Στο *Dokonal, W, Hirschberg, U and Wurzer, G (eds.), Digital Design Reconsidered - Proceedings of the 41st Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe 2023) - Volume 1, Graz, 20-22 September 2023*, pp. 641–650. CUMINCAD, 2023.  
[https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2023\\_384](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2023_384).
- 'Construction Specifications Canada (CSC)'. Ημερομηνία πρόσβασης 5 Απρίλιος 2020.  
<https://www.csc-dcc.ca/>.
- Cui, C., H. Ohmori, και M. Sasaki. 'Computational morphogenesis of 3D structures by extended ESO method'. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 44 (1 Απρίλιος 2003): 51–61.
- 'Dada'. Στο *Wikipedia*, 9 Οκτώβριος 2019. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dada&oldid=920424405>.
- Dahabreh, Saleem. 'The Architectural Design Machine (AD\_M): Integrating Architectural Knowledge'. *International Journal of Applied Engineering Research* 9 (2014).  
[https://www.researchgate.net/publication/282861390\\_The\\_Architectural\\_Design\\_Machine\\_AD\\_M\\_Integrating\\_Architectural\\_Knowledge](https://www.researchgate.net/publication/282861390_The_Architectural_Design_Machine_AD_M_Integrating_Architectural_Knowledge).
- Darwin, Charles. *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*, 1859.  
[http://www.f.waseda.jp/sidoli/Darwin-Origin\\_Of\\_Species.pdf](http://www.f.waseda.jp/sidoli/Darwin-Origin_Of_Species.pdf).
- Daungwilailuk, Totsawat, Phoonsak Pheinsusom, και Withit Pansuk. 'Uniaxial load testing of large-scale 3D-printed concrete wall and finite-element model analysis'. *Construction and Building Materials* 275 (1 Μάρτιος 2021): 122039.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122039>.
- Davies, Paul, και Julian Brown. *Υπερχορδές*. Δεύτερη έκδοση. Αθήνα: Κάτοπτρο, 1989.
- 'Decision-Making Software'. Στο *Wikipedia*, 29 Φεβρουάριος 2020.  
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Decision-making\\_software&oldid=943187084](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Decision-making_software&oldid=943187084).
- DeepAI. 'Genetic Programming'. DeepAI, 17 Μάιος 2019. <https://deepai.org/machine-learning-glossary-and-terms/genetic-programming>.
- 'Definition of FORM', 27 Φεβρουάριος 2024. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/form>.
- 'Definition of RANDOMNESS', 25 Φεβρουάριος 2024.  
<https://www.merriam-webster.com/dictionary/randomness>.
- 'Definition of SERENDIPITY', 12 Νοέμβριος 2023.  
<https://www.merriam-webster.com/dictionary/serendipity>.
- 'Definition of STRUCTURE', 22 Φεβρουάριος 2024.  
<https://www.merriam-webster.com/dictionary/structure>.
- DeLanda, Manuel. 'Deleuze and the Use of the Genetic Algorithm in Architecture'. *ResearchGate*, Ιανουάριος 2002.  
[https://www.researchgate.net/publication/295600631\\_Deleuze\\_and\\_the\\_use\\_of\\_the\\_genetic\\_algorithm\\_in\\_architecture](https://www.researchgate.net/publication/295600631_Deleuze_and_the_use_of_the_genetic_algorithm_in_architecture).

- . *Philosophy and Simulation: The Emergence of Synthetic Reason*. Reprint edition. London New Delhi New York Sydney: Bloomsbury Academic, 2015.
- . 'The Use of Genetic Algorithms in Art'. Στο *ACADIA 12: Synthetic Digital Ecologies [Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 978-1-62407-267-3] San Francisco 18-21 October, 2012*, pp. 25-31. CUMINCAD, 2012.  
[http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia12\\_25](http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/acadia12_25).
- . Στο *Contemporary Techniques in Architecture*, επιμέλεια Ali Rahim, 1 edition., 9–13. London ; New York: Academy Press, 2002.  
[http://archtech.arch.ntua.gr/forum/post2006interaction/delanda\\_del\\_and\\_the\\_use\\_of\\_genetic\\_algorithms\\_in\\_arch.htm](http://archtech.arch.ntua.gr/forum/post2006interaction/delanda_del_and_the_use_of_genetic_algorithms_in_arch.htm).
- 'Delaunay Triangulation'. Στο *Wikipedia*, 14 Μαΐος 2024. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Delaunay\\_triangulation&oldid=1223834829](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Delaunay_triangulation&oldid=1223834829).
- Delin, P. S., P. Chittleborough, και C. R. Delin. 'What Is an Assumption?' *Informal Logic* 16, τχ. 2 (1994). [https://www.academia.edu/33193744/What\\_is\\_an\\_Assumption](https://www.academia.edu/33193744/What_is_an_Assumption).
- Der Spiegel*. 'SPIEGEL Interview with Dutch Architect Rem Koolhaas: 'Evil Can Also Be Beautiful''. 27 Μάρτιος 2006, τμ. International. <https://www.spiegel.de/international/spiegel/spiegel-interview-with-dutch-architect-rem-koolhaas-evil-can-also-be-beautiful-a-408748.html>.
- Design is fine. History is mine. 'Design Is Fine. History Is Mine.' Ημερομηνία πρόσβασης 25 Οκτώβριος 2019. <https://www.design-is-fine.org/post/59220554764/georg-nees-texture-of-gravel-schottertextur>.
- 'Designing the National Aquatics Center (Water Cube) for Beijing Olympics 2008'. Ημερομηνία πρόσβασης 16 Σεπτεμβρίου 2023. <https://www.arup.com/projects/chinese-national-aquatics-center>.
- Devetakovic, Mirjana, Ljiljana Petrusovski, Milana Dabic, και Bojan Mitrovic. 'Les Folies Cellulaires – An Exploration in Architectural Design Using Cellular Automata'. Ημερομηνία πρόσβασης 5 Μαΐος 2020.  
[https://www.academia.edu/209564/Les\\_Folies\\_Cellulaires\\_An\\_Exploration\\_in\\_Architectural\\_Design\\_Using\\_Cellular\\_Automata](https://www.academia.edu/209564/Les_Folies_Cellulaires_An_Exploration_in_Architectural_Design_Using_Cellular_Automata).
- Dezeen. 'AA Design & Make Students Build Woodland Barn with Robot', 23 Φεβρουάριος 2016.  
<https://www.dezeen.com/2016/02/23/architectural-association-students-london-robotically-fabricated-barn-dorset-woodland/>.
- Dezeen. 'Digital Models and Augmented Reality Used to Build Twisting Pavilion in Tallinn', 16 Οκτώβριος 2019. <https://www.dezeen.com/2019/10/16/steampunk-pavilion-fologram-tallinn-architecture-biennial/>.
- Dezeen. 'Hubris Atë Nemesis Installation Curves up Maine Contemporary Art Gallery', 14 Ιούλιος 2019. <https://www.dezeen.com/2019/07/14/hubris-ate-nemesis-installation-wade-kavanaugh-stephen-b-nguyen/>.
- Dezeen. 'MODU's Pavilion Features a Canopy Made of 30,000 Plastic Balls', 24 Αύγουστος 2015.  
<https://www.dezeen.com/2015/08/24/cloud-seeding-pavilion-modu-roof-made-30000-plastic-balls-design-museum-holon-israel/>.



- Dezeen. 'Moon Hoon's Narrow Seoul House Features Small Windows and Diagonal Markings', 9 Ιανουάριος 2017. <https://www.dezeen.com/2017/01/09/dogok-maximum-moon-hoon-seoul-south-korea-house-tower/>.
- Dezeen. 'The Cocoon by AA Design & Make', 25 Ιούνιος 2013. <https://www.dezeen.com/2013/06/25/the-cocoon-hooke-park-big-shed-by-aa-design-make/>.
- DMAA. 'Hyundai Motorstudio Goyang'. Ημερομηνία πρόσβασης 14 Φεβρουάριος 2020. <https://www.dmaa.at/work/hyundai-motorstudio-goyang>.
- DS+R. 'Blur Building'. Ημερομηνία πρόσβασης 4 Φεβρουάριος 2020. <https://dsrny.com/project/blur-building>.
- DS+R. 'The Shed'. Ημερομηνία πρόσβασης 25 Ιανουάριος 2020. <https://dsrny.com/project/the-shed>.
- Durgashyam, K., Indra Reddy, A. Balakrishna, και K. Satyanarayana. 'Experimental investigation on mechanical properties of PETG material processed by fused deposition modeling method'. *Materials Today: Proceedings* 18 (1 Ιούλιος 2019). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.082>.
- Eagle, Antony. 'Chance versus Randomness'. Στο *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, επιμέλεια Edward N. Zalta, Spring 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018. <https://plato.stanford.edu/archives/spr2018/entries/chance-randomness/>.
- Eckersley, Michael. 'Randomness, Rules and Compositional Structure in Design'. *Leonardo* 23, τχ. 1 (1990): 75–80. <https://doi.org/10.2307/1578469>.
- Efstathiadis, Alexandros, Ioanna Symeonidou, Konstantinos Tsongas, Emmanouil K. Tzimtzimis, και Dimitrios Tzetzis. '3D Printed Voronoi Structures Inspired by Paracentrotus Lividus Shells'. *Designs* 7, τχ. 5 (Οκτώβριος 2023): 113. <https://doi.org/10.3390/designs7050113>.
- Eisenman, Peter. 'Memorial to the Murdered Jews of Europe'. Stiftung Denkmal für die ermordeten Juden Europas. Ημερομηνία πρόσβασης 16 Φεβρουάριος 2020. <https://www.stiftung-denkmal.de/memorials/memorial-to-the-murdered-jews-of-europe/?lang=en>.
- 'Elemental'. Ημερομηνία πρόσβασης 25 Φεβρουάριος 2020. <http://www.elementalchile.cl/en/>.
- Encyclopedia Britannica. 'Parameter | Mathematics and Statistics'. Encyclopedia. Encyclopedia Britannica. Ημερομηνία πρόσβασης 22 Απρίλιος 2020. <https://www.britannica.com/topic/parameter>.
- 'EPR Paradox'. Στο *Wikipedia*, 11 Μάιος 2019. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=EPR\\_paradox&oldid=896581579](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=EPR_paradox&oldid=896581579).
- Fickes, Clyde P., και Ellis Groben. *Building with logs*. Structures section. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture, 1944. [https://www.fs.fed.us/eng/facilities/documents/build\\_with\\_logs.pdf](https://www.fs.fed.us/eng/facilities/documents/build_with_logs.pdf).
- Fiedler, Thomas. 'MEDIA FACADES EXHIBITION Deutsches Architektur Zentrum ( DAZ) GERMAN CENTRE FOR ARCHITECTURE .....', χ.χ., 59.
- 'Finite Element Method'. Στο *Wikipedia*, 20 Μάιος 2024. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Finite\\_element\\_method&oldid=1224746783](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Finite_element_method&oldid=1224746783).
- Food4Rhino. 'Octopus'. Text, 6 Δεκέμβριος 2012. <https://www.food4rhino.com/app/octopus>.

- Food4Rhino. 'Octopus.e'. Text, 16 Ιούνιος 2014. <https://www.food4rhino.com/app/octopuse>.
- 'Fortuna'. Στο *Wikipedia*, 19 Οκτώβριος 2018. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fortuna&oldid=864856305>.
- Frazer, John. *An Evolutionary Architecture*. London: Architectural Association Publications, 1995. <https://issuu.com/aaschool/docs/an-evolutionary-architecture-webocr>.
- Freitag, Steffen, Wolfgang Graf, και Michael Kaliske. 'Identification and Prediction of Time-Dependent Structural Behavior with Recurrent Neural Networks for Uncertain Data', 1 Ιανουάριος 2010. [https://doi.org/10.3850/978-981-08-5118-7\\_026](https://doi.org/10.3850/978-981-08-5118-7_026).
- Fu, Yanan, Ying Zhang, και Lei Wu. 'Experimental Study on Structural Performance of Cast-in-Place Frame Printed Concrete Wall'. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 17, τχ. 1 (8 Νοέμβριος 2023): 56. <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00620-5>.
- Futuyma, Douglas J., και Mark Kirckpatrick. *Evolution*. 4th έκδ. Sunderland, Massachusetts USA: Sinauer Associates, Inc, 2017.
- Gandomi, Amir, Christian Soize, και James Stewart. 'AI in computational mechanics and engineering sciences' 407 (1 Μάρτιος 2023): 115935. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.115935>.
- GeeksforGeeks. 'Importance of Randomized Algorithms', 29 Ιούνιος 2021. <https://www.geeksforgeeks.org/importance-of-randomized-algorithms/>.
- Gin-ge Chen, Bryan. 'The river banks of Ellsworth Kelly's Seine'. Penn University, χ.χ. [http://www.sas.upenn.edu/~chb/kelly/chen\\_bryan\\_artofresearch.pdf](http://www.sas.upenn.edu/~chb/kelly/chen_bryan_artofresearch.pdf).
- Gleick, James. *Η πληροφορία*. Μετάφραση Γιώργος Κυριακόπουλος. Πρώτη έκδοση. Αθήνα: Τραυλός, 2011.
- . *Χάος. Η επιστήμη της μη γραμμικής δυναμικής*. Πρώτη έκδοση. Αθήνα: Κάτοπτρο, 1990.
- 'Glycol-Modified Polyethylene Terephthalate (PETG, PET-G) :: MakeItFrom.com'. Ημερομηνία πρόσβασης 4 Σεπτέμβριος 2023. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Glycol-Modified-Polyethylene-Terephthalate-PETG-PET-G>.
- Godfrey, Fiona. 'Antony Gormley. Field for the British Isles. Education Information Pack.' The Arts Council Collection. Ημερομηνία πρόσβασης 10 Δεκέμβριος 2019. <http://www.artscouncilcollection.org.uk/sites/default/files/Field%20for%20the%20British%20Isles%20-%20Education%20Information%20Pack.pdf>.
- 'GOETHE'. Ημερομηνία πρόσβασης 3 Ιούλιος 2023. <http://home.primus.ca/~remedy3/GOETHE.htm>.
- Gombrich, E. H. *Το χρονικό της τέχνης*. Δεύτερη ελληνική έκδοση. Αθήνα: Μορφωτικό Ίδρυμα Εθνικής Τραπέζης, 1998.
- Guessasma, Sofiane, Sofiane Belhabib, και Hedi Nouri. 'Printability and Tensile Performance of 3D Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Using Fused Deposition Modelling'. *Polymers* 11, τχ. 7 (22 Ιούλιος 2019): 1220. <https://doi.org/10.3390/polym11071220>.
- Hald, Anders. *A History of Probability and Statistics and Their Applications Before 1750*. John Wiley & Sons, 2003.

- Han, Xiaoyu, Jiachuan Yan, Mingjian Liu, Liang Huo, και Junlin Li. 'Experimental study on large-scale 3D printed concrete walls under axial compression'. *Automation in Construction* 133 (1 Ιανουάριος 2022): 103993. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103993>.
- Harris, Cyril. *Dictionary of Architecture and Construction*. 4 edition. New York: McGraw-Hill Education, 2005.
- Harris, David. 'How Can Biomimicry Be Used to Enhance the Design of an Architectural Column?' Master of Architecture, Deakin University, 2016. [https://www.researchgate.net/publication/303655581\\_How\\_can\\_biomimicry\\_be\\_used\\_to\\_enhance\\_the\\_design\\_of\\_an\\_architectural\\_column/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/303655581_How_can_biomimicry_be_used_to_enhance_the_design_of_an_architectural_column/figures?lo=1).
- Heams, Thomas. 'Randomness in Biology'. *Mathematical Structures in Computer Science* 24, τχ. 3 (Ιούλιος 2014). <https://doi.org/10.1017/S096012951200076X>.
- Hensel, Michael, Achim Menges, και Michael Weinstock, επιμ. *Emergence: Morphogenetic Design Strategies*. 1 edition. Chichester: Academy Press, 2004.
- Herr, Christiane, και Thomas Fischer. *Generative Column and Beam Layout for Reinforced Concrete Structures in China. Communications in Computer and Information Science*. τ. 369, 2013. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-38974-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-38974-0_8).
- Herr, Christiane M., και Thomas Kvan. 'Using Cellular Automata to Generate High-Density Building Form'. Στο *Computer Aided Architectural Design Futures 2005*, επιμέλεια Bob Martens και Andre Brown, 249–58. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. [https://doi.org/10.1007/1-4020-3698-1\\_23](https://doi.org/10.1007/1-4020-3698-1_23).
- Hippo, Saint Augustine Of. *St. Augustine Answers 101 Questions: On Prayer*. 1st edition. Sophia Institute Press, 2009.
- 'History | Dancing House Hotel, Prague 2', 12 Φεβρουάριος 2020. <https://www.dancinghousehotel.com/en/the-hotel/>.
- Holland, John. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. Cambridge, Mass: A Bradford Book, 1992.
- 'Home - Construction Specifications Institute'. Ημερομηνία πρόσβασης 5 Απρίλιος 2020. <https://www.csiresources.org/home>.
- 'HotBits: Genuine Random Numbers'. Ημερομηνία πρόσβασης 18 Μάιος 2019. <http://www.fourmilab.ch/hotbits/>.
- Hu, S. Jack. 'Evolving Paradigms of Manufacturing: From Mass Production to Mass Customization and Personalization'. *Procedia CIRP*, Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013, 7 (1 Ιανουάριος 2013): 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.002>.
- Hume, David. *An Enquiry Concerning Human Understanding*. Επιμέλεια Tom L. Beauchamp. Underlining edition. Oxford; New York: Oxford University Press, 1999. <https://arisuchan.jp/r/src/1499820435851-1.pdf>.
- 'Hyundai Motorstudio Goyang – Karamba3D'. Ημερομηνία πρόσβασης 14 Φεβρουάριος 2020. <https://www.karamba3d.com/projects/hyundai-motorstudio-goyang/>.
- 'Iart - Studio for Media Architectures'. Ημερομηνία πρόσβασης 4 Ιούλιος 2024. <https://iart.ch>.

- 'Ilya Prigogine'. Στο *Wikipedia*, 6 Μάιος 2019. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ilya\\_Prigogine&oldid=895713956](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ilya_Prigogine&oldid=895713956).
- Institut du monde arabe. 'Architecture', 16 Ιούνιος 2016. <https://www.imarabe.org/en/architecture>.
- inSync. 'Stochastic Music | Sweetwater', 14 Δεκέμβριος 2004. <https://www.sweetwater.com/insync/stochastic-music/>.
- ISO. 'ISO - International Organization for Standardization'. Ημερομηνία πρόσβασης 5 Απρίλιος 2020. <https://www.iso.org/home.html>.
- Ito, Toyo, Arata Isozaki, και Mutsuro Sasaki. *Morphogenesis of Flux Structure*. London: Architectural Association Publications, 2007.
- 'Jackson Pollock'. Στο *Wikipedia*, 25 Σεπτέμβριος 2019. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Jackson\\_Pollock&oldid=917834087](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Jackson_Pollock&oldid=917834087).
- James, William. *The Will to Believe, and Other Essays in Popular Philosophy*. New York [etc.] : Longmans, Green, and co., 1912. <http://archive.org/details/willtobelieveot00jameiala>.
- Januszkiewicz, Krystyna, και Marta Banachowicz. 'Nonlinear Shaping Architecture Designed with Using Evolutionary Structural Optimization Tools'. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 245 (1 Οκτώβριος 2017): 082042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/8/082042>.
- 'John Cage'. Στο *Wikipedia*, 21 Οκτώβριος 2019. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=John\\_Cage&oldid=922393480](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=John_Cage&oldid=922393480).
- 'John Stewart Bell'. Στο *Wikipedia*, 11 Φεβρουάριος 2019. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=John\\_Stewart\\_Bell&oldid=882746952](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=John_Stewart_Bell&oldid=882746952).
- Johnson, Philip, και Mark Wigley. *Deconstructivist Architecture*. New York: The Museum of Modern Art: Distributed by New York Graphic Society Books, Little Brown and Co., 1988. [www.moma.org/calendar/exhibitions/1813](http://www.moma.org/calendar/exhibitions/1813).
- Kallivokas, Spyros V., Lykourgos C. Kontaxis, Spyridon Psarras, Maria Roumpi, Ourania Ntousi, Ioannis Kakkos, Despina Deligianni, George K. Matsopoulos, Dimitrios I. Fotiadis, και Vassilis Kostopoulos. 'A Combined Computational and Experimental Analysis of PLA and PCL Hybrid Nanocomposites 3D Printed Scaffolds for Bone Regeneration'. *Biomedicines* 12, τχ. 2 (Φεβρουάριος 2024): 261. <https://doi.org/10.3390/biomedicines12020261>.
- Kandinsky, Wassily. *Concerning the Spiritual in Art*. Μετάφραση Michael Sadleir, 2004. <http://www.gutenberg.org/ebooks/5321>.
- Kara, Hanif, Andreas Georgoulas, και Jorge Silveti. *Interdisciplinary Design: New Lessons from Architecture and Engineering*. ACTAR Publishers, 2012. [https://books.google.gr/books?id=oNQsXtPz6CcC&printsec=frontcover&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.gr/books?id=oNQsXtPz6CcC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false).
- Karamba3D. 'Body Building Installation – TAB 2015'. Ημερομηνία πρόσβασης 16 Σεπτέμβριος 2023. <https://karamba3d.com/projects/body-building-installation-tab-2015/>.
- 'Karl Popper'. Στο *Wikipedia*, 26 Νοέμβριος 2023. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Karl\\_Popper&oldid=1186922718#cite\\_note-89](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Karl_Popper&oldid=1186922718#cite_note-89).

- Karp, Richard M. 'An introduction to randomized algorithms'. *Discrete Applied Mathematics* 34, τχ. 1 (21 Νοέμβριος 1991): 165–201. [https://doi.org/10.1016/0166-218X\(91\)90086-C](https://doi.org/10.1016/0166-218X(91)90086-C).
- Keller, Sean, και Heinrich Jaeger. 'Aleatory Architectures'. arXiv, 19 Οκτώβριος 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1510.05721>.
- Kestelier, Xavier De, και Brady Peters. *Computation Works: The Building of Algorithmic Thought AD*. 2 edition. John Wiley & Sons, 2013.
- Khan Academy. 'Ziggurat of Ur'. Ημερομηνία πρόσβασης 12 Δεκέμβριος 2019. <https://www.khanacademy.org/humanities/ancient-art-civilizations/ancient-near-east1/sumerian/a/ziggurat-of-ur>.
- 'Kiefer Technic Showroom / Ernst Giselbrecht + Partner | ArchDaily'. Ημερομηνία πρόσβασης 23 Δεκέμβριος 2019. <https://www.archdaily.com/89270/kiefer-technic-showroom-ernst-giselbrecht-partner>.
- 'Kolmogorov and Randomness'. Ημερομηνία πρόσβασης 3 Ιούλιος 2023. <http://datagenetics.com/blog/february52018/index.html>.
- 'Kolmogorov Complexity'. Στο *Wikipedia*, 21 Απρίλιος 2019. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Kolmogorov\\_complexity&oldid=893454427](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Kolmogorov_complexity&oldid=893454427).
- Koza, John. *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. 1 edition. Cambridge, Mass: A Bradford Book, 1992.
- . 'Introduction to Genetic Algorithms'. Στο *Advances in Genetic Programming*, επιμέλεια Kenneth E. Jr. Kinnear. Cambridge, Mass.: The MIT Press, 1994.
- Kramer, Edna Ernestine. *The Nature and Growth of Modern Mathematics*. Princeton University Press, 1982.
- Krawczyk, Robert J. 'Architectural Interpretation of Cellular Automata'. Στο *Generative Art 2002. 5th International Conference GA2002, Milan, 11-12-13 December 2002. Proceedings*, επιμέλεια Celestino Soddu, 2002ο έκδ., 468. Milan, 2002. [http://www.artscience-ebookshop.com/ebooks\\_free/GA2002\\_proceedings.pdf](http://www.artscience-ebookshop.com/ebooks_free/GA2002_proceedings.pdf).
- Kumar, Hojjat Adeli, Sanjay. *Distributed Computer-Aided Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2020. <https://doi.org/10.1201/9781003067795>.
- Kusuyama. 'Shichi Fukujin - Seven Gods of Fortune', 3 Σεπτέμβριος 2013. <https://kusuyama.jp/blog/culture/shichi-fukujin-seven-gods-of-luck-and-good-fortune>.
- 'Lagrange Polynomial'. Στο *Wikipedia*, 13 Απρίλιος 2024. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lagrange\\_polynomial&oldid=1218658172](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lagrange_polynomial&oldid=1218658172).
- Laplace, Pierre Simon Marquis de. *A Philosophical Essay on Probabilities*. Μετάφραση F. W. Truscott και F. L. Emory. London: John Wiley & Sons, 1902. [https://bayes.wustl.edu/Manual/laplace\\_A\\_philosophical\\_essay\\_on\\_probabilities.pdf](https://bayes.wustl.edu/Manual/laplace_A_philosophical_essay_on_probabilities.pdf).
- Laubach, Markus, Buddhi Herath, Nathalie Bock, Sinduja Suresh, Siamak Saifzadeh, Bronwin Dargaville, Jacqui McGovern, Marie-Luise Wille, Dietmar Hutmacher, και Flavia M Savi. 'In vivo characterization of 3D-printed polycaprolactone-hydroxyapatite scaffolds with Voronoi design to advance the concept of scaffold-guided bone regeneration'. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 11 (4 Οκτώβριος 2023). <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1272348>.

- Laugier, Marc-Antoine. *Essai sur l'architecture*. A Paris: Chez Duchesne, Libraire, rue S. Jacques, au-dessous de la Fontaine S. Benoît, au Temple du Goût, 1755.  
[https://archive.org/details/bub\\_gb\\_BWZJgiv1QvkC/page/n8/mode/2up](https://archive.org/details/bub_gb_BWZJgiv1QvkC/page/n8/mode/2up).
- Lawson, Bryan. *How Designers Think, Fourth Edition: The Design Process Demystified*. 4 edition. Amsterdam: Architectural Press, 2005.
- Leach, Neil, David Turnbull, και Chris Williams, επιμ. *Digital Tectonics*. 1st edition. Chichester: Academy Press, 2004.
- Leeb, Wolfgang. 'FLARE – Kinetic Membrane Facade'. MAI, 7 Μάιος 2008.  
<https://www.mediaarchitecture.org/flare-kinetic-membrane-facade/>.
- Lévy, Pierre Lévy. *Δυνητική πραγματικότητα*. Μετάφραση Μιχάλης Καραχάλιος. Η φιλοσοφία του πολιτισμού και του κυβερνοχώρου. Αθήνα: Εκδόσεις Κριτική, 1999.
- Lewis, Grace A. 'Assumptions Management in Software Development', 2004.  
[https://resources.sei.cmu.edu/asset\\_files/TechnicalNote/2004\\_004\\_001\\_14327.pdf](https://resources.sei.cmu.edu/asset_files/TechnicalNote/2004_004_001_14327.pdf).
- Li, Tien-Yien, και James A. Yorke. 'Period Three Implies Chaos'. *The American Mathematical Monthly* 82, τχ. 10 (1975): 985–92. <https://doi.org/10.2307/2318254>.
- Libeskind. 'Extension to the Denver Art Museum, Frederic C. Hamilton Building'. Ημερομηνία πρόσβασης 18 Φεβρουάριος 2020. <https://libeskind.com/work/extension-to-the-denver-art-museum-frederic-c-hamilton-building/>.
- Lindenmayer Systems, Fractals, and Plants*. Berlin; New York: Springer, 1989.  
<https://algorithmicbotany.org/papers/lfsp.pdf>.
- Lindley, David. *Η αρχή της αβεβαιότητας*. Π. Τραυλός, 2011.
- Liotta, Salvator-John A. *Kengo Kuma Organic Architecture Compasses*. Ημερομηνία πρόσβασης 5 Φεβρουάριος 2020.  
[https://www.academia.edu/35438993/Kengo\\_Kuma\\_Organic\\_Architecture\\_Compasses](https://www.academia.edu/35438993/Kengo_Kuma_Organic_Architecture_Compasses).
- 'Lisp'. Στο *Βικιπαίδεια*, 18 Δεκέμβριος 2019. <https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Lisp&oldid=7932106>.
- Loewe, L. 'Genetic Mutation'. *Nature Education*, 2008.  
<https://www.nature.com/scitable/topicpage/genetic-mutation-1127>.
- Loskot, Jan, Daniel Jezbera, Roman Loskot, Damián Bušovský, Adrian Barylski, Karsten Glowka, Piotr Duda, Krzysztof Aniołek, Kateřina Voglová, και Maciej Zubko. 'Influence of print speed on the microstructure, morphology, and mechanical properties of 3D-printed PETG products'. *Polymer Testing* 123 (1 Ιούνιος 2023): 108055.  
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108055>.
- 'Luck | Origin and Meaning of Luck by Online Etymology Dictionary'. Ημερομηνία πρόσβασης 15 Δεκέμβριος 2018. <https://www.etymonline.com/word/luck>.
- 'Ludwig Boltzmann'. Στο *Wikipedia*, 26 Ιούλιος 2023. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ludwig\\_Boltzmann&oldid=1167240953](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ludwig_Boltzmann&oldid=1167240953).
- Luque, Sergio. 'The Stochastic Synthesis of Iannis Xenakis'. *Leonardo Music Journal* 19: 77–84. Ημερομηνία πρόσβασης 23 Οκτώβριος 2019.  
[https://www.academia.edu/30571247/The\\_Stochastic\\_Synthesis\\_of\\_Iannis\\_Xenakis](https://www.academia.edu/30571247/The_Stochastic_Synthesis_of_Iannis_Xenakis).

- Maliaris, Georgios, και Elias Sarafis. 'Mechanical Behavior of 3D Printed Stochastic Lattice Structures'. *Solid State Phenomena* 258 (8 Δεκέμβριος 2016): 225–28. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.258.225>.
- Manuel de Landa Part 8 Day 1: Genetic Algorithms. Ημερομηνία πρόσβασης 24 Απρίλιος 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=NoPgS2Se9ZQ&feature=relmfu>.
- Manuel DeLanda. 'Matter Matters'. DOMUS Magazine. Ημερομηνία πρόσβασης 11 Ιανουάριος 2023. <http://cmm.cenart.gob.mx/delanda/textos/matter.pdf>.
- 'Marcel Duchamp - Wikipedia'. Ημερομηνία πρόσβασης 10 Οκτώβριος 2019. [https://en.wikipedia.org/wiki/Marcel\\_Duchamp](https://en.wikipedia.org/wiki/Marcel_Duchamp).
- 'Mashrabiya'. Στο *Wikipedia*, 4 Απρίλιος 2024. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Mashrabiya&oldid=1217281693>.
- Max Born. *The Born Einstein Letters*. Macmillan, 1971. <http://archive.org/details/TheBornEinsteinLetters>.
- Mayr, Ernst. *Τι είναι η εξέλιξη*. Πρώτη ελληνική έκδοση. Αθήνα: Κάτοπτρο, 2005.
- 'Meiosis'. Στο *Wikipedia*, 16 Ιούνιος 2019. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Meiosis&oldid=902079797>.
- Menges, Achim, επιμ. *Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design*. 1st edition. Chichester: Academy Press, 2012.
- Mercado-Colmenero, Jorge Manuel, M. Dolores La Rubia, Elena Mata-Garcia, Moises Rodriguez-Santiago, και Cristina Marín-Doñate. 'Experimental and Numerical Analysis for the Mechanical Characterization of PETG Polymers Manufactured with FDM Technology under Pure Uniaxial Compression Stress States for Architectural Applications'. *Polymers* 12, τχ. 10 (25 Σεπτέμβριος 2020): 2202. <https://doi.org/10.3390/polym12102202>.
- Merriam-Webster. 'Assumption'. Ημερομηνία πρόσβασης 22 Απρίλιος 2020. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/assumption>.
- . 'Constraint'. Ημερομηνία πρόσβασης 22 Απρίλιος 2020. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/constraint>.
- . 'Heuristics'. Ημερομηνία πρόσβασης 30 Απρίλιος 2020. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/heuristics>.
- . 'Parameterize'. Ημερομηνία πρόσβασης 22 Απρίλιος 2020. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/parameterize>.
- . 'Specification'. Ημερομηνία πρόσβασης 22 Απρίλιος 2020. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/specifications>.
- . 'Stochastic'. Ημερομηνία πρόσβασης 30 Απρίλιος 2020. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/stochastic>.
- MGS Architecture. 'Bringing Order to Randomness'. MGS Architecture. Ημερομηνία πρόσβασης 15 Σεπτέμβριος 2023. <https://www.mgsarchitecture.in/architecture-design/projects/1701-bringing-order-to-randomness.html>.

- Mitchell, Melanie. *An Introduction to Genetic Algorithms*. Reprint edition. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1998.
- 'MODU/ Phu Hoang, Rachely Rotem'. Ημερομηνία πρόσβασης 25 Ιανουάριος 2020. <https://moduarchitecture.com>.
- Möller, Bernd, Wolfgang Graf, και Michael Beer. 'Safety assessment of structures in view of fuzzy randomness'. *Computers & Structures* 81, τχ. 15 (1 Ιούλιος 2003): 1567–82. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(03\)00147-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(03)00147-0).
- Möller, Bernd, Wolfgang Graf, Michael Beer, και Jan-Uwe Sickert. 'Fuzzy Randomness - Towards a new Modeling of Uncertainty'. *Fifth World Congress on Computational Mechanics*, 1 Ιανουάριος 2002.
- 'Morpheus Hotel at City of Dreams, Macau – Zaha Hadid Architects', 20 Φεβρουάριος 2020. <https://www.zaha-hadid.com/architecture/city-of-dreams-hotel-tower-cotai-macau/>.
- 'Multiple-Criteria Decision Making | Encyclopedia.com'. Ημερομηνία πρόσβασης 31 Αύγουστος 2020. <https://www.encyclopedia.com/management/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/multiple-criteria-decision-making>.
- 'Mutation'. Στο *Wikipedia*, 17 Ιούνιος 2019. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Mutation&oldid=902252820>.
- 'Mutation'. Ημερομηνία πρόσβασης 3 Ιούλιος 2024. <https://www.genome.gov/genetics-glossary/Mutation>.
- Mutsuro Sasaki: '*Morphogenesis of Flux Structure: New Field of Structural Design*', 2016. <https://www.youtube.com/watch?v=p0Jo4emwhhk>.
- Nair, K. Raghavan. 'On Tippett's 'Random Sampling Numbers.' *Sankhyā: The Indian Journal of Statistics (1933-1960)* 4, τχ. 1 (1938): 65–72.
- National Museum Of Mathematics. 'The Dice Lab | 120 Sided Dice'. Ημερομηνία πρόσβασης 19 Αύγουστος 2023. <https://shop.momath.org/gato-the-dice-lab-120-sided-dice.html?source=facebook>.
- National Research Council. *Materials and Process Specifications and Standards*. Washington, DC: The National Academies Press., 1977. <http://nap.edu/20344>.
- Negroponte, Nicholas. *Soft Architecture Machines*. First Edition edition. Cambridge, Mass: The MIT Press, 1976.
- Next Office. 'Next Office | Studio of Architectural Research and Design'. Ημερομηνία πρόσβασης 25 Ιανουάριος 2020. <http://nextoffice.ir/#!/>.
- 'Nicolaus Copernicus'. Στο *Wikipedia*, 8 Ιούλιος 2024. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nicolaus\\_Copernicus&oldid=1233408967](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nicolaus_Copernicus&oldid=1233408967).
- Niemeijer, R. A. 'Constraint Specification in Architecture : A User-Oriented Approach for Mass Customization'. Doctor in de Filosofie, Technische Universiteit Eindhoven, 2011. <https://pure.tue.nl/ws/files/3456671/715226.pdf>.
- Nováková, Kateřina, και Vele Jiří. 'Prvok - An experiment with 3D printing large doublecurved concrete structure'. Στο *Stojakovic, V and Tepavcevic, B (eds.), Towards a new, configurable architecture - Proceedings of the 39th eCAADe Conference - Volume 2*,



University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia, 8-10 September 2021, pp. 137-144. CUMINCAD, 2021. [https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2021\\_011](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ecaade2021_011).

Ohmori, Hiroshi. 'Computational Morphogenesis: Its Current State and Possibility for the Future'. *International Journal of Space Structures*, 1 Σεπτέμβριος 2011. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1260/0266-3511.26.3.269>.

Oosterhuis, K., H. H. Bier, C. Aalbers, και S. Boer. 'File to Factory and Real Time Behavior in ONL-Architecture'. *Fabrication: Examining the Digital Practice of Architecture, Proceedings of the 23rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture and the 2004 Conference of the AIA Technology in Architectural Practice Knowledge Community, Cambridge, November 8-14, 2004*, 2004. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A01f55888-8034-42ec-b8e5-c9b4afeaaae7>.

OpenMind. 'Einstein's Love-Hate Relationship with Quantum Physics', 14 Μάρτιος 2017. <https://www.bbvaopenmind.com/en/temas/einsteins-love-hate-relationship-with-quantum-physics/>.

Orzel, Chad. 'How Quantum Randomness Saves Relativity'. *Forbes*. Ημερομηνία πρόσβασης 11 Μάιος 2019. <https://www.forbes.com/sites/chadorzel/2015/08/11/how-quantum-randomness-saves-relativity/>.

Ostwald, Michael J., και Josephine Vaughan. *The Fractal Dimension of Architecture*. Birkhäuser, 2016.

Paoletti, Ingrid. 'Mass Customization with Additive Manufacturing: New Perspectives for Multi Performative Building Components in Architecture'. *Procedia Engineering, International High-Performance Built Environment Conference – A Sustainable Built Environment Conference 2016 Series (SBE16), iHBE 2016*, 180 (1 Ιανουάριος 2017): 1150–59. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.275>.

Pearson, K. 'The Problem of the Random Walk'. *Nature*, 1905. <http://www.e-m-h.org/Pear05.pdf>.

Pesce, Laura. *Close Encounters of Art and Physics: An Artist's View*. Springer Nature, 2019.

piktogramstudio. 'piktogramstudio/fun3d'. *Visual Basic*, 8 Ιούλιος 2015. <https://github.com/piktogramstudio/fun3d>.

'Polyethylene terephthalate | Designerdata'. Ημερομηνία πρόσβασης 4 Σεπτέμβριος 2023. <https://designerdata.nl/materials/plastics/thermo-plastics/polyethylene-terephthalate>.

Popper, Karl R. *Objective Knowledge: An Evolutionary Approach*. Revised edition. Oxford Eng.: New York: Oxford University Press, 1972.

Posted by David Rutten on October 20, 2012 at 9:52am in Discussion, και View Discussions. 'What Are Random Seed Values?' Μετάφραση Τ. Κουιμτζόγλου. Ημερομηνία πρόσβασης 15 Αύγουστος 2020. <https://www.grasshopper3d.com/forum/topics/what-are-random-seed-values>.

Prigogine, Ilya. *Το τέλος της βεβαιότητας*. Αθήνα: Κάτοπτρο, 2003.

'Proceedings of IASS Annual Symposia: Ingenta Connect Table Of Contents'. Ημερομηνία πρόσβασης 23 Σεπτέμβριος 2023. <https://www.ingentaconnect.com/content/iass/piass/2022/00002022/00000009>.

- 'Pseudorandomness'. Στο *Wikipedia*, 16 Φεβρουάριος 2024. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Pseudorandomness&oldid=1208065036>.
- PTW Architects. 'Watercube – National Swimming Centre'. Ημερομηνία πρόσβασης 5 Φεβρουάριος 2020. [https://www.ptw.com.au/ptw\\_project/watercube-national-swimming-centre/](https://www.ptw.com.au/ptw_project/watercube-national-swimming-centre/).
- 'Quasar 600 - Material Testing machine'. Ημερομηνία πρόσβασης 13 Σεπτέμβριος 2023. <https://www.galdabini.eu/datasheets/quasar-600>.
- 'RadiAnt DICOM Viewer'. Ημερομηνία πρόσβασης 13 Σεπτέμβριος 2023. <https://www.radiantviewer.com/>.
- Rand Corporation, επιμ. *A Million Random Digits with 100,000 Normal Deviates*. Santa Monica, CA: Rand, 2001.
- . 'A Million Random Digits with 100,000 Normal Deviates'. RAND Corporation, 1 Ιανουάριος 2001. [https://www.rand.org/pubs/monograph\\_reports/MR1418.html](https://www.rand.org/pubs/monograph_reports/MR1418.html).
- 'Random | Origin and Meaning of Random by Online Etymology Dictionary'. Ημερομηνία πρόσβασης 15 Δεκέμβριος 2018. <https://www.etymonline.com/word/random>.
- 'Random Master Script | KM-3D.COM'. Ημερομηνία πρόσβασης 15 Αύγουστος 2020. <https://km-3d.com/produkt/random-master-script/>.
- 'Random Number Table'. Στο *Wikipedia*, 10 Φεβρουάριος 2019. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Random\\_number\\_table&oldid=882644735](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Random_number_table&oldid=882644735).
- 'Random Seed'. Στο *Wikipedia*, 8 Φεβρουάριος 2019. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Random\\_seed&oldid=882370504](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Random_seed&oldid=882370504).
- 'Random Walk'. Στο *Wikipedia*, 20 Απρίλιος 2019. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Random\\_walk&oldid=893350809](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Random_walk&oldid=893350809).
- 'RANDOM.ORG - Introduction to Randomness and Random Numbers'. Ημερομηνία πρόσβασης 18 Μάιος 2019. <https://www.random.org/randomness/>.
- 'ReActor | Schweder + Shelley', 25 Ιανουάριος 2020. <http://www.schwedershelley.com/reactor/>.
- 'Rechenraum GmbH - goat'. Ημερομηνία πρόσβασης 28 Αύγουστος 2020. <https://www.rechenraum.com/en/goat.html>.
- 'Roxy Paine'. Στο *Wikipedia*, 28 Σεπτέμβριος 2019. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Roxy\\_Paine&oldid=918471674](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Roxy_Paine&oldid=918471674).
- 'Rutherford Model'. Στο *Wikipedia*, 27 Νοέμβριος 2017. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Rutherford\\_model&oldid=812401467](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Rutherford_model&oldid=812401467).
- Sakamoto, Tomoko, επιμ. *From Control to Design*. Barcelona: Actar, 2008.
- Salet, Theo A. M., Zeeshan Y. Ahmed, Freek P. Bos, και Hans L. M. Laagland. 'Design of a 3D printed concrete bridge by testing'. *Virtual and Physical Prototyping* 13, τχ. 3 (3 Ιούλιος 2018): 222–36. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1476064>.
- Salingaros, Nikos A. 'Adaptive vs. Random Complexity, Parts 1 and 2'. ArchNewsNow, 2015. <https://patterns.architecturez.net/doc/az-cf-172769>.

- Sapoval, Bernard, Michel Rosso, και Jean-François Gouyet. 'The fractal nature of a diffusion front and the relation to percolation'. *Edp sciences, Journal de Physique Lettres*, τχ. 46 (4) (1985): 149–56. <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00232493/document>.
- Saraptzian, Aikaterini. 'Irregular Structural Grid Systems: The Design of Non-Standard Architectural Forms with Structural Complexity'. Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Σχολή Πολυτεχνική. Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών. Τομέας Αρχιτεκτονικού Σχεδιασμού και Αρχιτεκτονικής Τεχνολογίας, 2018. <http://hdl.handle.net/10442/hedi/42933>.
- Schapiro, Meyer. *Impressionism: Reflections and Perceptions*. 1 edition. New York: George Braziller Inc., 1997.
- Schlueter, Arno; Bonwetsch. 'Design Rationalization of Irregular Cellular Structures'. Στο *International Journal of Architectural Computing* vol. 6 - no. 2, pp. 197-211. CUMINCAD, 2008. <https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/ijac20076204>.
- Scientific American. 'Για την κίνηση Brown'. Ημερομηνία πρόσβασης 7 Ιανουάριος 2018. [http://www.sciam.gr/topics.asp?action\\_id=topic\\_analysis&issue\\_id=402&topic\\_id=676](http://www.sciam.gr/topics.asp?action_id=topic_analysis&issue_id=402&topic_id=676).
- Serrato-Combe, Antonio. 'Lindenmayer Systems – Experimenting with Software String Rewriting as an Assist to the Study and Generation of Architectural Form'. Στο *Digital Design: The Quest for New Paradigms [23rd eCAADe Conference Proceedings / ISBN 0-9541183-3-2] Lisbon (Portugal) 21-24 September 2005, pp. 615-621*. CUMINCAD, 2005. [http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?2005\\_615](http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?2005_615).
- Silveira, Marcos V. G., Juliana S. Wagner, Mohsen Khanverdi, και Sreekanta Das. 'Structural performance of large-scale 3D-printed walls subjected to axial compression load'. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21 Φεβρουάριος 2024. <https://doi.org/10.1139/cjce-2023-0395>.
- 'SIMULIA Cloud – Web-Based Access To Simulation - Dassault Systèmes®'. Ημερομηνία πρόσβασης 23 Σεπτέμβριος 2023. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/simulia-cloud/>.
- Situngkir, Hokky. 'Exploring Ancient Architectural Designs with Cellular Automata'. SSRN Scholarly Paper. Rochester, NY: Social Science Research Network, 10 Οκτώβριος 2010. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1696683>.
- 'Softology - Visions of Chaos'. Ημερομηνία πρόσβασης 27 Απρίλιος 2020. <https://softology.com.au/voc.htm>.
- 'Sol LeWitt'. Στο *Wikipedia*, 15 Αύγουστος 2019. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sol\\_LeWitt&oldid=910988577](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sol_LeWitt&oldid=910988577).
- 'soma architecture - theme pavilion', 24 Ιανουάριος 2020. [http://www.soma-architecture.com/index.php?page=theme\\_pavilion&parent=2](http://www.soma-architecture.com/index.php?page=theme_pavilion&parent=2).
- 'soma architecture - vague formation', 14 Φεβρουάριος 2020. [http://www.soma-architecture.com/index.php?page=vague\\_formation&parent=2](http://www.soma-architecture.com/index.php?page=vague_formation&parent=2).
- Staff, Ars. 'Covering Coasts with Concrete: Japan Looks to Tetrapods to Battle Elements'. *Ars Technica*, 25 Νοέμβριος 2016. <https://arstechnica.com/science/2016/11/covering-coasts-with-concrete-japan-looks-to-tetrapods-to-battle-elements/>.

- 'Stochastic L-systems'. Ημερομηνία πρόσβασης 28 Απρίλιος 2020.  
<https://www.csee.umbc.edu/~ebert/693/TLin/node18.html>.
- 'Stochastic Process'. Στο *Wikipedia, the Free Encyclopedia*, 3 Μάιος 2014.  
[http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Stochastic\\_process&oldid=606867309](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Stochastic_process&oldid=606867309).
- Stories. 'With the Microsoft Lounge at L.A. LIVE, a New Technological Vision Blends Hollywood's Past and Present'. Ημερομηνία πρόσβασης 25 Ιανουάριος 2020.  
<https://news.microsoft.com/features/microsoft-lounge-l-live-new-technological-vision-blends-hollywoods-past-present/>.
- Subbarao, Ch V., Y. Srinivasa Reddy, Vamsi Inturi, και M. Indra Reddy. 'Dynamic Mechanical Analysis of 3D Printed PETG Material'. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1057, τχ. 1 (Φεβρουάριος 2021): 012031.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1057/1/012031>.
- Suh, Nam P. *The Principles of Design*. 1 edition. New York: Oxford University Press, 1990.
- Svanerudh, Patrik. 'Architectural constraints for design automation of multi-storey timber houses in Sweeden'. *UC3M, Automation and Robotics in Construction*, XVI (1999).  
[http://www.iaarc.org/publications/fulltext/Architectural\\_constraints\\_for\\_design\\_automation\\_of\\_multi-storey\\_timber\\_houses\\_in\\_sweden.PDF](http://www.iaarc.org/publications/fulltext/Architectural_constraints_for_design_automation_of_multi-storey_timber_houses_in_sweden.PDF).
- Szykiedans, Ksawery, Wojciech Credo, και Dymitr Osiński. 'Selected Mechanical Properties of PETG 3-D Prints'. *Procedia Engineering* 177 (31 Δεκέμβριος 2017): 455–61.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.245>.
- 'Technischer Überwachungsverein'. Στο *Wikipedia*, 11 Αύγουστος 2023.  
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Technischer\\_%C3%9Cberwachungsverein&oldid=1169863530](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Technischer_%C3%9Cberwachungsverein&oldid=1169863530).
- TEKLA. 'Olympic Stadium: Bird's Nest'. *Tekla*, 5 Ιούνιος 2013.  
<https://www.tekla.com/references/olympic-stadium-birds-nest>.
- Terzidis, Kostas. *Algorithmic Architecture*. 1 edition. Routledge, 2016.
- . 'Algorithmic Complexity: Out of Nowhere'. Στο *Complexity Design Strategy and World View*. Berlin, Basel: Birkhäuser, 2008. <https://doi.org/10.1515/9783034609692.75>.
- 'The Arup Journal 2009 Issue 1 - Arup'. Ημερομηνία πρόσβασης 12 Σεπτέμβριος 2023.  
<https://www.arup.com/perspectives/publications/the-arup-journal/section/the-arup-journal-2009-issue-1>.
- 'The Arup Journal 2022 Issue 1 - Arup'. Ημερομηνία πρόσβασης 12 Σεπτέμβριος 2023.  
<https://www.arup.com/perspectives/publications/the-arup-journal/section/the-arup-journal-2022-issue-1>.
- The Cloudflare Blog. 'LavaRand in Production: The Nitty-Gritty Technical Details', 6 Νοέμβριος 2017.  
<https://blog.cloudflare.com/lavarand-in-production-the-nitty-gritty-technical-details/>.
- 'The Doctrine of Philosophical Necessity Illustrated'. Στο *Wikipedia*, 19 Απρίλιος 2019.  
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=The\\_Doctrine\\_of\\_Philosophical\\_Necessity\\_Illustrated&oldid=893199593](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=The_Doctrine_of_Philosophical_Necessity_Illustrated&oldid=893199593).
- 'The History of Chance'. Ημερομηνία πρόσβασης 9 Μάιος 2019.  
<http://www.informationphilosopher.com/chance/history/>.

- The Irish Times. 'Sketches of Frank Gehry', 13 Φεβρουάριος 2020. <https://www.irishtimes.com/culture/sketches-of-frank-gehry-1.1212671>.
- The Museum of Modern Art. 'Jackson Pollock. One: Number 31, 1950. 1950 | MoMA'. Ημερομηνία πρόσβασης 11 Οκτώβριος 2019. <https://www.moma.org/collection/works/78386>.
- 'The Shed (Arts Center)'. Στο *Wikipedia*, 23 Ιανουάριος 2020. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=The\\_Shed\\_\(arts\\_center\)&oldid=937216246](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=The_Shed_(arts_center)&oldid=937216246).
- 'Thermodynamics'. Στο *Wikipedia*, 7 Μάιος 2019. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Thermodynamics&oldid=895916339>.
- 'Tim Knowles - Tree Drawings - Circular Weeping Willow Drawing', 25 Οκτώβριος 2019. <http://archive.timknowles.com/Tim%20Knowles%20-%20Tree%20Drawings%20-%20Oak%20on%20Easel%201.html>.
- Torreblanca-Díaz, David A., και Juan Pablo Velásquez Peña. 'Biodigital Product Design Through Additive Fabrication Technologies: Stool Project'. Στο *Herrera, PC, Dreifuss-Serrano, C, Gómez, P, Arris-Calderon, LF, Critical Appropriations - Proceedings of the XXVI Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics (SIGraDi 2022), Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, 7-11 November 2022*, pp. 1189–1200. CUMINCAD, 2022. [https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/sigradi2022\\_116](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/sigradi2022_116).
- Toyo Ito - 1/3 The Sendai Media Center. Ημερομηνία πρόσβασης 11 Φεβρουάριος 2020. [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=542&v=NZJSjTIm2Uk&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=542&v=NZJSjTIm2Uk&feature=emb_logo).
- 'Toyo Ito & Associates, Architects - MIKIMOTO Ginza2'. Ημερομηνία πρόσβασης 11 Φεβρουάριος 2020. [http://www.toyo-ito.co.jp/WWW/Project\\_Descript/2005-/2005-p\\_06/2005-p\\_06\\_en.html](http://www.toyo-ito.co.jp/WWW/Project_Descript/2005-/2005-p_06/2005-p_06_en.html).
- 'Toyo Ito & Associates, Architects - Sendai Mediatheque'. Ημερομηνία πρόσβασης 11 Φεβρουάριος 2020. [http://www.toyo-ito.co.jp/WWW/Project\\_Descript/2000-/2000-p\\_04/2000-p\\_04\\_en.html](http://www.toyo-ito.co.jp/WWW/Project_Descript/2000-/2000-p_04/2000-p_04_en.html).
- 'Toyo Ito & Associates, Architects - TOD'S Omotesando Building'. Ημερομηνία πρόσβασης 11 Φεβρουάριος 2020. [http://www.toyo-ito.co.jp/WWW/Project\\_Descript/2000-/2000-p\\_13/2000-p\\_13\\_en.html](http://www.toyo-ito.co.jp/WWW/Project_Descript/2000-/2000-p_13/2000-p_13_en.html).
- Tzara, Tristan. 'How to Make a Dadaist Poem, (method of Tristan Tzara)'. Ημερομηνία πρόσβασης 10 Οκτώβριος 2019. <https://www.writing.upenn.edu/~afilreis/88v/tzara.html>.
- 'Use Engineering Assumptions to Unlock Your Creative Genius - YouTube'. Ημερομηνία πρόσβασης 3 Απριλίου 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=POPyW3LQYwM>.
- Venn, John. *The Logic of Chance, 3rd Edition An Essay on the Foundations and Province of the Theory of Probability, With Especial Reference to Its Logical Bearings and Its Application to Moral and Social Science and to Statistics*, 2018. <http://www.gutenberg.org/ebooks/57359>.
- Vitruvius. *Vitruvius: The Ten Books on Architecture*. Μετάφραση Morris Hicky Morgan. New York: Dover Publications, 1960.
- 'Voronoi Diagram'. Στο *Wikipedia*, 25 Αύγουστος 2023. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Voronoi\\_diagram&oldid=1172180711](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Voronoi_diagram&oldid=1172180711).

- Waldschmitt, B., C. Borg Costanzi, U. Knaack, και J. Lange. '3d Printing of Column Structures for Architectural Applications'. *Architecture, Structures and Construction* 2, τχ. 4 (1 Δεκέμβριος 2022): 565–74. <https://doi.org/10.1007/s44150-022-00050-z>.
- 'Weaire–Phelan Structure'. Στο *Wikipedia*, 16 Ιανουάριος 2020. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Weaire%E2%80%93Phelan\\_structure&oldid=936137127](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Weaire%E2%80%93Phelan_structure&oldid=936137127).
- Weisstein, Eric W. 'Seed'. Text. Wolfram Research, Inc. Ημερομηνία πρόσβασης 25 Ιανουάριος 2024. <https://mathworld.wolfram.com/>.
- 'White Noise – Karamba3D'. Ημερομηνία πρόσβασης 13 Φεβρουάριος 2020. <https://www.karamba3d.com/projects/white-noise/>.
- WikiArquitectura. 'Mikimoto Ginza 2 - Data, Photos & Plans', 11 Φεβρουάριος 2020. <https://en.wikiarquitectura.com/building/mikimoto-ginza-2/>.
- WikiArquitectura. 'Sendai Mediatheque - Data, Photos & Plans', 11 Φεβρουάριος 2020. <https://en.wikiarquitectura.com/building/sendai-mediatheque/>.
- Wikipedia. 'Genetic Algorithm'. Στο *Wikipedia*, 21 Απρίλιος 2020. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Genetic\\_algorithm&oldid=952333404](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Genetic_algorithm&oldid=952333404).
- 'Wind Silos – NED KAHN'. Ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιανουάριος 2020. <http://nedkahn.com/portfolio/wind-silos>.
- 'Wind Veil – NED KAHN'. Ημερομηνία πρόσβασης 23 Ιανουάριος 2020. <http://nedkahn.com/portfolio/wind-veil>.
- 'Windswept installation by Charles Sowers'. Ημερομηνία πρόσβασης 24 Ιανουάριος 2020. <https://www.dezeen.com/2012/11/06/windswept-installation-by-charles-sowers/>.
- Wolfe, Ross. 'Mondrian: Order and Randomness in Abstract Painting'. *The Charnel-House* (blog), 5 Σεπτέμβριος 2015. <https://thecharnelhouse.org/2015/09/04/mondrian-order-and-randomness-in-abstract-painting-1978/>.
- Wolfram, Stephen. *A New Kind of Science*. Champaign, IL: Wolfram Media, Inc., 2002. <https://www.wolframscience.com/nks/>.
- 'Wood Chip Barn / AA Design + Make'. Ημερομηνία πρόσβασης 6 Μάιος 2024. <https://designandmake.aaschool.ac.uk/project/wood-chip-barn/>.
- [www.fosterandpartners.com](http://www.fosterandpartners.com), Foster + Partners /. 'Bund Finance Center | Foster + Partners'. Ημερομηνία πρόσβασης 26 Ιανουάριος 2020. <https://www.fosterandpartners.com/projects/bund-finance-center/>.
- Xenakis, Iannis. *Formalized Music: Thought and Mathematics in Composition*. 2nd edition. Hillsdale, NY: Pendragon Press, 1992.
- Xuan, Thuan Trinh. *Χάος και αρμονία*. Αθήνα: Τραυλός, 2004.
- Yuan, Ye, Yufeng Zhang, Dong Ruan, Ao Zhang, Yiming Liang, P. J. Tan, και Pengwan Chen. 'Deformation and failure of additively manufactured Voronoi foams under dynamic compressive loadings'. *Engineering Structures* 284 (1 Ιούνιος 2023): 115954. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115954>.

- Zamperini, Emanuele. 'The Timber Roof of the Central Nave in the Basilica of San Michele in Pavia'. Mexico city, 2014.  
[https://www.academia.edu/9176141/The\\_timber\\_roof\\_of\\_the\\_central\\_nave\\_in\\_the\\_Basilica\\_of\\_San\\_Michele\\_in\\_Pavia](https://www.academia.edu/9176141/The_timber_roof_of_the_central_nave_in_the_Basilica_of_San_Michele_in_Pavia).
- Zeballos, Carlos. 'MY ARCHITECTURAL MOLESKINE®: TOYO ITO: MIKIMOTO GINZA 2', 11 Φεβρουάριος 2020. <http://architecturalmoleskine.blogspot.com/2011/09/toyo-ito-mikimoto-ginza-2.html>.
- . 'MY ARCHITECTURAL MOLESKINE®: TOYO ITO: TOD'S OMOTESANDO'. *MY ARCHITECTURAL MOLESKINE®* (blog), 8 Νοέμβριος 2011.  
<http://architecturalmoleskine.blogspot.com/2011/11/toyo-ito-tods-omotesando.html>.
- Zhang, Kang, και Jinhui Yu. 'Generating Abstract Paintings in Kandinsky Style'. Στο *SIGGRAPH Asia 2013 Art Gallery*, 18:1-18:6. SA '13. New York, NY, USA: ACM, 2013.  
<https://doi.org/10.1145/2542256.2542257>.





## Ευρετήριο εικόνων

Τα πνευματικά δικαιώματα των εικόνων ανήκουν στους αντίστοιχους κατόχους τους.

Εικόνα 2_1: Θεά Τύχη. Πηγή: Tyche Pluto Prusias ad Hypium IstArchMu451b.jpg, Istanbul Archaeological Museum - The goddess Tyche holding in her arms Plutus (god of wealth) as a child. Hellenistic art, Roman period, 2nd century AD. From Prusias ad Hypium (in the present-day il of Düzce). The coloring of the hair is remarkably well preserved, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tyche_Pluto_Prusias_ad_Hypium_IstArchMu451b.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tyche_Pluto_Prusias_ad_Hypium_IstArchMu451b.jpg</a> , εικόνα του/της: QuartierLatin1968 , άδεια: GNU Free Documentation License, Version 1.2 or any later version , CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike Attribution-Share Alike 4.0 International, CC BY-SA 3.0, 3.0 Unported, CC BY-SA 2.5, 2.5 Generic, CC BY-SA 2.0, 2.0 Generic και CC BY-SA 1.0, 1.0 Generic license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....	25
Εικόνα 2_2: Οι 7 θεοί της Τύχης στην Ιαπωνική παράδοση, Sichi Fukujin. Πηγή: 7 lucky gods @ Azabu Juban Inari Shrine, <a href="https://www.flickr.com/photos/o_0/13842647885/">https://www.flickr.com/photos/o_0/13842647885/</a> , εικόνα του/της: Guilhem Vellut , άδεια: CC BY 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/</a> .....	28
Εικόνα 2_3: I Ching, Τρίγραμμα (αριστερά), Πηγή: ICHING-trigramma.png, Τρίγραμμα του I Tsingκ, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ICHING-trigramma.png">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ICHING-trigramma.png</a> , εικόνα του/της: Dada at Greek Wikipedia , άδεια: public domain. Οι παραλλαγές των 64 εξαγράμμων (δεξιά). Πηγή: Iching-64diagrams change symmetry.png, 中文 (臺灣) : 周易 64 卦表, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Iching-64diagrams_change_symmetry.png">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Iching-64diagrams_change_symmetry.png</a> , εικόνα του/της: 東岐明 , άδεια: CC BY-SA 4.0 , Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....	30
Εικόνα 2_4 (αριστερά): Απεικόνιση της κίνησης Brown στον τρισδιάστατο χώρο. Πηγή: Wiener process 3d.png, A single sample path of a three-dimensional Brownian motion (Wiener process) Wt, as generated by Wolfram Mathematica with a time step of size 0.0001, for times $0 \leq t \leq 2.$ , <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wiener_process_3d.png">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wiener_process_3d.png</a> , εικόνα του/της: Original uploader was Sullivan.t.j at English Wikipedia , άδεια: CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.....	36
Εικόνα 2_5 (δεξιά): Απεικόνιση τυχαίας διαδρομής για τον αριθμό π. Πηγή: John Venn, The Logic of Chance, 3rd Edition An Essay on the Foundations and Province of the Theory of Probability, With Especial Reference to Its Logical Bearings and Its Application to Moral and Social Science and to Statistics, 2018, σελ. 126, <a href="http://www.gutenberg.org/ebooks/57359">http://www.gutenberg.org/ebooks/57359</a> .....	36
Εικόνα 2_6: Επίπεδο Poincare: Ενδεικτικό επίπεδο Poincare. Η τομή του τρισδιάστατου χώρου φάσεων είναι ένα δισδιάστατο επίπεδο που τοποθετείται στον άξονα XZ όπου καταγράφονται τα σημεία τομής 1, 2, 3 των διαδοχικών τροχιών με το επίπεδο. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	40
Εικόνα 2_7: Σχηματικό διάγραμμα αύξησης της εντροπίας κατά μεταβολή χρόνου $\Delta t$ . Πηγή: T.Κουιμτζόγλου.....	41
Εικόνα 2_8: Ελκυστής Lorenz. Πηγή: Δημιουργία ελκυστών με βάση την εφαρμογή στο <a href="http://demonstrations.wolfram.com/LorenzAttractor/">http://demonstrations.wolfram.com/LorenzAttractor/</a> , Rob Morris, "Lorenz Attractor", Wolfram Demonstrations Project, 7 Μαρτίου 2011. © 2024 Wolfram.....	45
Εικόνα 2_9: Οι τρεις διαφορετικές εξισώσεις του συστήματος Lorenz όπου x, y, z είναι οι καταστάσεις του συστήματος και $\sigma$ , $\rho$ , $\beta$ είναι οι παράμετροι του. Πηγή: <a href="https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lorenz_system&amp;oldid=818892854">https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lorenz_system&amp;oldid=818892854</a> .....	45
Εικόνα 2_10: Στιγμιότυπα παραλλαγών ελκυστή Lorenz για $t=10$ , $\sigma=10$ , $\rho=28$ , και διαδοχικά $\beta=0,27$ , $\beta=0,38$ , $\beta=8/3$ , $\beta=5.88$ . Πηγή: Δημιουργία ελκυστών με βάση την εφαρμογή στο <a href="http://demonstrations.wolfram.com/LorenzAttractor/">http://demonstrations.wolfram.com/LorenzAttractor/</a> Rob Morris, "Lorenz Attractor", Wolfram Demonstrations Project, 7 Μαρτίου 2011. © 2024 Wolfram.....	46
Εικόνα 2_11: Εξέλιξη ελκυστή Lorenz για $t=1$ , $t=5$ , $t=20$ , $t=50$ και $\sigma=10$ , $\rho=28$ , $\beta=8/3$ . Πηγή: Δημιουργία ελκυστών με βάση την εφαρμογή στο <a href="http://demonstrations.wolfram.com/DynamicalSystemsWithLorenzAttractors/">http://demonstrations.wolfram.com/DynamicalSystemsWithLorenzAttractors/</a> John Holland	

“Dynaical Systems with Lorenz Attractors”, Wolfram Demonstrations Project, 24 Ιουνίου 2011. © 2024 Wolfram.....	46
Εικόνα 2_12: Διάγραμμα γωνιών διπλού ιδανικού εκκρεμούς για μικρές ταλαντώσεις. Πηγή: εφαρμογή στο <a href="http://www.myphysicslab.com/dbl_pendulum.html">http://www.myphysicslab.com/dbl_pendulum.html</a> , © Erik Neumann, Apache 2.0 License.....	48
Εικόνα 2_13: Διαγράμματα γωνιών διπλού ιδανικού εκκρεμούς για μεγάλες ταλαντώσεις. Πηγή: εφαρμογή στο <a href="http://www.myphysicslab.com/dbl_pendulum.html">http://www.myphysicslab.com/dbl_pendulum.html</a> , © Erik Neumann, Apache 2.0 License.....	48
Εικόνα 2_14: Διάγραμμα ορίου ελκυστή για τιμές γωνιών διπλού εκκρεμούς για μεγάλες ταλαντώσεις. Πηγή: Αριστερά εφαρμογή στο: <a href="http://www.myphysicslab.com/dbl_pendulum.html">http://www.myphysicslab.com/dbl_pendulum.html</a> © Erik Neumann, Apache 2.0 License. Δεξιά: διαμόρφωση ορίων από Τ. Κουιμτζόγλου.....	49
Εικόνα 2_15: Caspar David Friedrich – Η θάλασσα από Πάγο – Πανακοθήκη Αμβούργου, 1824. Πηγή: IMG_6005 Caspar David Friedrich. 1774-1840. La Mer de Glace.The Sea of Ice. 1824. Hambourg Kunsthalle, <a href="https://www.flickr.com/photos/mazanto/29228385961/in/photolist-LwP7QZ-2pEUZ5T-25DbdJd-2ixAKxJ-2nmcQan-2gTF1A7-2pKaxsF-2b7bfND-zFtGPz-KbtMnQ-rhHNY5-oEYt6D-21fyai8-Rdxhh5-fjQPQo-ZmBfxS-KbGHVx-97iVub-WjfGr9-RJifTq-RyoX2h-2ixBVvw-26D5DUq-5qxrHg-gWiA5Q-4pT3SS-4oEkv7-jLkhoP-2pKjqdY-FXgFwr-dDwso1-by3JqT-GSG94k-2ps8DgS-wB69H-znZnUh-9hnrLj-eeen3XU-GEWgFW-TA6fcA-qRQGgq-GLJZr6-2pkkIRK-WjMmPP-7jZrHu-2gkMU7A-6sePxp-z4RCYR-bVWoBF-uBvf5m">https://www.flickr.com/photos/mazanto/29228385961/in/photolist-LwP7QZ-2pEUZ5T-25DbdJd-2ixAKxJ-2nmcQan-2gTF1A7-2pKaxsF-2b7bfND-zFtGPz-KbtMnQ-rhHNY5-oEYt6D-21fyai8-Rdxhh5-fjQPQo-ZmBfxS-KbGHVx-97iVub-WjfGr9-RJifTq-RyoX2h-2ixBVvw-26D5DUq-5qxrHg-gWiA5Q-4pT3SS-4oEkv7-jLkhoP-2pKjqdY-FXgFwr-dDwso1-by3JqT-GSG94k-2ps8DgS-wB69H-znZnUh-9hnrLj-eeen3XU-GEWgFW-TA6fcA-qRQGgq-GLJZr6-2pkkIRK-WjMmPP-7jZrHu-2gkMU7A-6sePxp-z4RCYR-bVWoBF-uBvf5m</a> , εικόνα του/της: jean louis mazieres, άδεια: CC BY-NC-SA 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/</a> .....	55
Εικόνα 2_16: Joseph Mallord William Turner, The Burning of the Houses of Lords and Commons, 16 October 1834 - 1942. Πηγή: <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Joseph_Mallord_William_Turner_-_The_Burning_of_the_Houses_of_Lords_and_Commons,_16_October_1834_-_1942.647_-_Cleveland_Museum_of_Art.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Joseph_Mallord_William_Turner_-_The_Burning_of_the_Houses_of_Lords_and_Commons,_16_October_1834_-_1942.647_-_Cleveland_Museum_of_Art.jpg</a> , εικόνα του/της: Yann, άδεια: public domain.....	55
Εικόνα 2_17: Delacroix, Άλογο τρομαγμένο από την καταιγίδα. Πηγή: Horse Frightened by Lightning, <a href="https://www.flickr.com/photos/lluissribes/9470741013/in/photolist-hgvaH5-HpepMk-qMZ91r-pu3qeR-21zscEJ-28dDceu-fqU2ma-A1eiUb-5hhgej-ZAqcmo-R17iQ-245hoyA-22Gfijd-dNuTp4-csPyQh-2pDtC2t-2pDtC2D-er2r6L-cYZu5b-c1yBM7-hSeb9E-bXgSDi-2pQ3JyL-fSeRxA-qDNQWZ-9FWNs5-c1yBcC-2pCpqnM-S7V6iv-fyXXn8-R2LJ7p-2ey5NUi-2pP158X-2pQ2DxU-2pPzZG4-2pP7szv-2ptWfyA-2pP5GE5-2pP18SA-2pP7Vj3-2pPFGtW-rSimX-jWfgSi-SbtRf6-2eKExJd-2fRPVBN-2jwKfRG-9ZDW4X-2k8rkSK">https://www.flickr.com/photos/lluissribes/9470741013/in/photolist-hgvaH5-HpepMk-qMZ91r-pu3qeR-21zscEJ-28dDceu-fqU2ma-A1eiUb-5hhgej-ZAqcmo-R17iQ-245hoyA-22Gfijd-dNuTp4-csPyQh-2pDtC2t-2pDtC2D-er2r6L-cYZu5b-c1yBM7-hSeb9E-bXgSDi-2pQ3JyL-fSeRxA-qDNQWZ-9FWNs5-c1yBcC-2pCpqnM-S7V6iv-fyXXn8-R2LJ7p-2ey5NUi-2pP158X-2pQ2DxU-2pPzZG4-2pP7szv-2ptWfyA-2pP5GE5-2pP18SA-2pP7Vj3-2pPFGtW-rSimX-jWfgSi-SbtRf6-2eKExJd-2fRPVBN-2jwKfRG-9ZDW4X-2k8rkSK</a> , εικόνα του/της: Lluís Ribes Mateu, άδεια: CC BY-NC 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/</a> .....	56
Εικόνα 2_18: Édouard Manet, Βαρκάδα, 1874 μ.Χ. Πηγή: Boating, 1874. <a href="https://www.metmuseum.org/art/collection/search/436947">https://www.metmuseum.org/art/collection/search/436947</a> άδεια: public domain.....	56
Εικόνα 2_19: Claude Monet, Εντύπωση, ανατέλλων ήλιος, 1872. Πηγή: Claude Monet's SUNRISE "soleil levant" 1872, <a href="https://www.flickr.com/photos/huffstutterrobertl/5970865384/">https://www.flickr.com/photos/huffstutterrobertl/5970865384/</a> , εικόνα του/της: ROBERT HUFFSTUTTER, άδεια: CC BY-NC 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/</a> .....	57
Εικόνα 2_20: Edgar Degas, The Ballet Class, 1880. Πηγή: Degas, <a href="https://www.flickr.com/photos/jonathanjo/510993405/in/photolist-M9Yx8-awexvR-4pkmTF-e1mQTW-8S4f9f-8S19Et-2gSPRUo-WcPRvK-dF7sXr-eZ2D9c-2k9wELK-TKVVQm-dF7t8v-eZ2D4F-7G2bk-8S19tp-2cChMpQ-gkPc8-8aXvSP-bEnGTh-8UhgMe-V8N3ee-boLZq2-9U2cEb-2k9wfJG-961Peg-29xtuZf-JAwms-5rN3mC-BbBdMq-dpPTTv-e7iqTC-Gfj7v1-wS4bw6-wPdGUf-wz3QFe-2mGHHTX-wRxaea-dUwZ7a-6AjSUJ-2nJGHqW-cKnFKs-WrydaM-bkLkwT-74ws7-dUwYae-8UkmaG-5FnHrh-8UhgFc-8UkmcE">https://www.flickr.com/photos/jonathanjo/510993405/in/photolist-M9Yx8-awexvR-4pkmTF-e1mQTW-8S4f9f-8S19Et-2gSPRUo-WcPRvK-dF7sXr-eZ2D9c-2k9wELK-TKVVQm-dF7t8v-eZ2D4F-7G2bk-8S19tp-2cChMpQ-gkPc8-8aXvSP-bEnGTh-8UhgMe-V8N3ee-boLZq2-9U2cEb-2k9wfJG-961Peg-29xtuZf-JAwms-5rN3mC-BbBdMq-dpPTTv-e7iqTC-Gfj7v1-wS4bw6-wPdGUf-wz3QFe-2mGHHTX-wRxaea-dUwZ7a-6AjSUJ-2nJGHqW-cKnFKs-WrydaM-bkLkwT-74ws7-dUwYae-8UkmaG-5FnHrh-8UhgFc-8UkmcE</a> , εικόνα του/της: jonathan, άδεια: CC BY-SA 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/</a> .....	57
Εικόνα 2_21: Georges Seurat, Ένα Κυριακάτικο απόγευμα στο νησί της Grande Jatte, 1884-86. Πηγή: A Sunday on La Grande Jatte — 1884, <a href="https://www.artic.edu/artworks/27992/a-sunday-on-la-grande-jatte-1884">https://www.artic.edu/artworks/27992/a-sunday-on-la-grande-jatte-1884</a> , CC0 Public Domain Designation, <a href="https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/">https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/</a> .....	57
Εικόνα 2_22: Georges Seurat, Ένα Κυριακάτικο απόγευμα στο νησί της Grande Jatte, 1884-86. Πηγή: A Sunday on La Grande Jatte — 1884, <a href="https://www.artic.edu/artworks/27992/a-sunday-on-la-grande-jatte-1884">https://www.artic.edu/artworks/27992/a-sunday-on-la-grande-jatte-1884</a> , CC0 Public Domain Designation, <a href="https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/">https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/</a> .....	57



Εικόνα 2_34: Nam June Paik – Random Access Music. Πηγή: Nam June Paik – Random Access Music, <a href="https://www.flickr.com/photos/saschapohflepp/4557743496">https://www.flickr.com/photos/saschapohflepp/4557743496</a> , εικόνα του/της: Sascha Pohflepp , άδεια: CC BY 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/</a> .....	67
Εικόνα 2_35: Sol LeWitt, Πηγή: Expo Sol LeWitt Centre Pompidou Metz 027, <a href="https://www.flickr.com/photos/marc-feldmann/7346606006/in/photostream/">https://www.flickr.com/photos/marc-feldmann/7346606006/in/photostream/</a> , εικόνα του/της: Marc Feldmann , άδεια: CC BY-NC 2.0 , <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/</a> .....	69
Εικόνα 2_36: Antony Gormley, Amazonian Field, 2012. Πηγή: Homenzinhos de barro, <a href="https://www.flickr.com/photos/leandrociuffo/8196334011">https://www.flickr.com/photos/leandrociuffo/8196334011</a> , εικόνα του/της: Leandro Neumann Ciuffo , άδεια: CC BY 2.0 , <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/</a> .....	69
Εικόνα 2_37: Gerhard Richter, "4.900 Colors, 2007 / Version V", 7 πινακίδες (plates) μεγέθους 242,5X242,5 εκ., 1 πινακίδα μεγέθους 194X194εκ., 1 πινακίδα 97X97εκ., 1 πινακίδα 48,5X48,5εκ., 2007. © Gerhard Richter 2024 (24062024). Πηγή: <a href="https://www.gerhard-richter.com/en/art/microsites/4900-colours/V">https://www.gerhard-richter.com/en/art/microsites/4900-colours/V</a> , χρήση κατόπιν άδειας.....	70
Εικόνα 3_1: Διάταξη από Λάμπες Λάβας της εταιρείας Cloudflare. που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία κλειδιών κρυπτογράφησης. Πηγή: Lava lamp wall at Cloudflare office -1.jpg, A wall of lava lamps in the entrance area of the Cloudflare offices at 101 Townsend Street in San Francisco (seen from the street through the window, some window reflection visible), <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lava_lamp_wall_at_Cloudflare_office_-1.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lava_lamp_wall_at_Cloudflare_office_-1.jpg</a> , εικόνα του/της: HaeB , άδεια: CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....	75
Εικόνα 3_2: Διάγραμμα εξέλιξης τυπικού γενετικού αλγορίθμου (GA) σε απλοποιημένη μορφή. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	82
Εικόνα 3_3: Στιγμιότυπα από 3D stochastic cellular automaton δημιουργημένο με το λογισμικό Visions of Chaos σε χρονική εξέλιξη (t=0, t=50, t=100, t=150).....	85
Εικόνα 3_4: 2D L-system, σύμφωνα με το αξίωμα a και τους κανόνες a→ab και b→a, κατά το παράδειγμα των Prusinkiewicz P. and Hanan J. και Prusinkiewicz P. Lindenmayer A.. Πηγή: <a href="http://www1.biologie.uni-hamburg.de/b-online/e28_3/lsys.html">http://www1.biologie.uni-hamburg.de/b-online/e28_3/lsys.html</a> .....	86
Εικόνα 4_1: Σαρακατσάνικη καλύβα σε γενική άποψη και σε μεγέθυνση εξωτερικά. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	91
Εικόνα 4_2: Μεσοτοιχία ξύλινου κτίσματος στην Κωνσταντινούπολη. Γενική άποψη (αριστερά) και λεπτομέρεια (δεξιά), όπου διακρίνεται η μια παρειά της τοιχοποιίας και ο ξύλινος φέρων οργανισμός πάνω στον οποίο στηρίζεται το μπαγδατί από πήχεις ξύλου διαφορετικών μεγεθών. Διακρίνεται επίσης το επίχρισμα που έχει συμπληρώσει τα κενά ανάμεσα στις οριζόντιες σανίδες του μπαγδατί. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	92
Εικόνα 4_3: Μπαγδατί από κλαδιά ως κατακόρυφο διαχωριστικό σε εξώστη κτίσματος στον οικισμό Άνω Καλάθενες στην Κρήτη. Πηγή: Ψηφιακό αποθετήριο μαθήματος Αρχιτεκτονικής ανάλυσης παραδοσιακών κτηρίων και συνόλων (5A) Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ. <a href="http://5a.arch.ntua.gr/project/12932/14003">http://5a.arch.ntua.gr/project/12932/14003</a> , © Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ.....	92
Εικόνα 4_4: Μπαγδατί από κλαδιά ως κατακόρυφη και οριζόντια αλαφριά κατασκευή σε κτίσμα στον οικισμό Αργαλαστής στη Μαγνησία. Πηγή: Ψηφιακό αποθετήριο μαθήματος Αρχιτεκτονικής ανάλυσης παραδοσιακών κτηρίων και συνόλων (5A) Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ. <a href="http://5a.arch.ntua.gr/project/5301/5709">http://5a.arch.ntua.gr/project/5301/5709</a> , © Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ.....	92
Εικόνα 4_5: Ξυλόπηκτος τοίχος σε κτίσμα στον οικισμό Βελημάχι στην Αρκαδία. Πηγή: Ψηφιακό αποθετήριο μαθήματος Αρχιτεκτονικής ανάλυσης παραδοσιακών κτηρίων και συνόλων (5A) Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ. <a href="http://5a.arch.ntua.gr/project/1001/1348">http://5a.arch.ntua.gr/project/1001/1348</a> , © Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ.....	93
Εικόνα 4_6: Τοιχοποιία από τσατμά με γέμισμα από λίθους και κόνιαμα σε κτίσμα στον οικισμό Τρικέρι στη Μαγνησία. Πηγή: Ψηφιακό αποθετήριο μαθήματος Αρχιτεκτονικής ανάλυσης παραδοσιακών κτηρίων και συνόλων (5A) Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ. <a href="http://5a.arch.ntua.gr/project/5305/5953">http://5a.arch.ntua.gr/project/5305/5953</a> , © Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ.....	93
Εικόνα 4_7: Φυτεμμένη στέγη σε κτίσμα στη Νορβηγία, 2012. Πηγή: Shed with green roof at Lyngen fjord, 2012 June.jpg, A shed with a green roof at the east coast of Lyngen fjord in Troms, Norway in 2012 June. The mountains in the background belong to Lyngen alps, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shed_with_green_roof_at_Lyngen_fjord,_2012_June.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shed_with_green_roof_at_Lyngen_fjord,_2012_June.jpg</a> ,	

εικόνα του/της: Ximonic (Simo Räsänen) , άδεια: CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.....	94
Εικόνα 4_8: Πράσινη όψη του Caixa Forum, Μαδρίτη, Herzog & de Meuron, 2012. Πηγή: Green wall, Madrid.JPG, Green wall at Caixa Forum, Paseo del Prado, Madrid, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Green_wall,_Madrid.JPG">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Green_wall,_Madrid.JPG</a> , εικόνα του/της: Mike.dixon.design , άδεια: CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....	94
Εικόνα 4_9: Charles Eisen, προμετωπίδα για τη β' έκδοση της Πραγματείας για την Αρχιτεκτονική του Laugier, 1755. Πηγή: La cabaña primitiva. Marc Antoine Laugier, Ilustración de Essai sur l'architecture. 1755, <a href="https://www.flickr.com/photos/campobaeza/8134650044">https://www.flickr.com/photos/campobaeza/8134650044</a> , εικόνα του/της: Alberto Campo Baeza , άδεια: CC BY-NC 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/</a> ....	95
Εικόνα 4_10: Charles Eisen, προμετωπίδα για τη β' έκδοση της Πραγματείας για την Αρχιτεκτονική του Laugier, 1755. Πηγή: La cabaña primitiva. Marc Antoine Laugier, Ilustración de Essai sur l'architecture. 1755, <a href="https://www.flickr.com/photos/campobaeza/8134650044">https://www.flickr.com/photos/campobaeza/8134650044</a> , εικόνα του/της: Alberto Campo Baeza , άδεια: CC BY-NC 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/</a> (μεγέθυνση).....	95
Εικόνα 4_11: Φωτογραφίες εσωτερικού της κατασκευής της ξύλινης στέγης του κυρίως ναού της Βασιλικής του San Michele στην Πάβια. Ζευκτό νο.3 (αριστερά), ζευκτό νο.1 (δεξιά). Πηγή: Emanuele Zamperini, 'The Timber Roof of the Central Nave in the Basilica of San Michele in Pavia' (SAHC2014 – 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Mexico city, 2014), <a href="https://www.academia.edu/9176141/The_timber_roof_of_the_central_nave_in_the_Basilica_of_San_Michele_in_Pavia">https://www.academia.edu/9176141/The_timber_roof_of_the_central_nave_in_the_Basilica_of_San_Michele_in_Pavia</a> ., Φωτογραφίες: Emanuele Zamperini., χρήση κατόπιν άδειας.....	97
Εικόνα 4_12: Σχέδιο ζευκτού νο.3 κατασκευής της ξύλινης στέγης του κυρίως ναού της Βασιλικής του San Michele στην Πάβια. Πηγή: Emanuele Zamperini, 'The Timber Roof of the Central Nave in the Basilica of San Michele in Pavia' (SAHC2014 – 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Mexico city, 2014), <a href="https://www.academia.edu/9176141/The_timber_roof_of_the_central_nave_in_the_Basilica_of_San_Michele_in_Pavia">https://www.academia.edu/9176141/The_timber_roof_of_the_central_nave_in_the_Basilica_of_San_Michele_in_Pavia</a> ., Survey by Giorgio Aivazopoulos, Stefania Bertagnolli, Federica Lana, Santo Occhiuzzi, Teresa Oddi and Antonella Semeraro, under the supervision of the author, χρήση κατόπιν άδειας.....	97
Εικόνα 4_13: Γενικό σχέδιο κάτοψης στέγης Ιερού Ναού Αγίας Παρασκευής στο Παλαιοσέλλι Κόνιτσας. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	98
Εικόνα 4_14: Γιάγραμμα διαστάσεων διατομών δοκών οροφής Νότιου κλίτους στέγης. Ιερός Ναός Αγίας Παρασκευής στο Παλαιοσέλλι Κόνιτσας. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	99
Εικόνα 4_15: Κατασκευή στέγης ιαπωνικής κατοικίας με παραδοσιακό τρόπο όπου στην κατασκευή ενσωματώνονται ξύλινα στοιχεία στη φυσική τους σχεδόν μορφή. Πηγή: Japanese traditional style farm house / 旧土肥家住宅(きゅうどいけじゅうたく) <a href="https://www.flickr.com/photos/tanaka_juuyoh/6142380486/in/album-72157605568359952/">https://www.flickr.com/photos/tanaka_juuyoh/6142380486/in/album-72157605568359952/</a> , εικόνα του/της: TANAKA Juuyoh (田中十洋) , άδεια: CC BY 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/</a> .....	100
Εικόνα 4_16: Κατασκευή στέγης ιαπωνικής κατοικίας με παραδοσιακό τρόπο όπου στην κατασκευή ενσωματώνονται ξύλινα στοιχεία στη φυσική τους σχεδόν μορφή. Πηγή: Girder / 梁(はり), <a href="https://www.flickr.com/photos/tanaka_juuyoh/8076572660/in/album-72157605568359952/">https://www.flickr.com/photos/tanaka_juuyoh/8076572660/in/album-72157605568359952/</a> , εικόνα του/της: TANAKA Juuyoh (田中十洋) , άδεια: CC BY 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/</a> .....	100
Εικόνα 4_17: Κτίσμα υπό κατασκευή με τη χρήση κορμών δένδρων στην Αμερική. Πηγή: Valley Forge cabin.jpg, A replica of a cabin at Valley Forge in which soldiers of George Washington's army would have stayed during the winter of 1777-1778, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Valley_Forge_cabin.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Valley_Forge_cabin.jpg</a> , εικόνα του/της: Rdsmith4 , άδεια: CC BY-SA 2.5, Creative Commons Attribution-Share Alike 2.5 Generic license.....	101
Εικόνα 4_18: 1000 πύλες - Sendon Torii Fumishi Inari Taisha, Kyoto. Πηγή: The incredible avenue of 10,00 torii gates at the Fushimi-inari shrine in Kyoto must be one of the most fascinating sites in Japan. Each gate has been donated and inscribed by a business or individual giving thanks for	

- their prosperity, <https://www.flickr.com/photos/anguskirk/18434783241> , εικόνα του/της: Anguskirk ,  
 άδεια: CC BY-NC-ND 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/> ..... 101
- Εικόνα 4\_19: Ξερολιθιά. Πηγή: 2013 Dry stone walls by Carlton 02.jpg, Dry stone walls by Carlton,  
 North Yorkshire, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2013\\_Dry\\_stone\\_walls\\_by\\_Carlton\\_02.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2013_Dry_stone_walls_by_Carlton_02.jpg) ,  
 εικόνα του/της: Kreuzschnabel , άδεια: CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0  
 Unported license..... 103
- Εικόνα 4\_20: Ξερολιθιά, Dry stone wall construction by Bob Harvey. Πηγή: Dry stone wall construction  
 - geograph.org.uk – 4990661.jpg, Dry stone wall construction,  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dry\\_stone\\_wall\\_construction\\_-\\_geograph.org.uk\\_-\\_4990661.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dry_stone_wall_construction_-_geograph.org.uk_-_4990661.jpg) ,  
 εικόνα του/της: Bob Harvey , άδεια: CC BY-SA 2.0, Creative Commons Attribution-  
 Share Alike 2.0 Generic license..... 103
- Εικόνα 4\_21: Ξερολιθιά στο Γεράκι Λακωνίας. Πηγή: Ψηφιακό αποθετήριο μαθήματος Αρχιτεκτονικής  
 ανάλυσης παραδοσιακών κτηρίων και συνόλων (5A) Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ.  
<http://5a.arch.ntua.gr/project/4258/4898> , © Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ..... 103
- Εικόνα 4\_22: Αριστερά: Ψηφιακή καταγραφή κάτοψης στέγης από σχιστόπλακες. Ιερός Ναός Αγ.  
 Παρασκευής στο Παλαιοσέλλι Κόνιτσας. Δεξιά: Φωτογραφία όψης στέγης σε μεγέθυνση. Πηγή: Τ.  
 Κουιμτζόγλου..... 104
- Εικόνα 4\_23: Αργολιθοδομή σε παραδοσιακή κατοικία στην Καρύταινα, 2019. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου  
 ..... 105
- Εικόνα 4\_24: Αργολιθοδομή σε αγροικία με αλώνι. Τίτλος: Αγροικία με αλώνι. Πηγή:  
[https://www.searchculture.gr/aggregator/edm/Dig\\_TEE/000170-18340](https://www.searchculture.gr/aggregator/edm/Dig_TEE/000170-18340) , άδεια: CC BY-NC 4.0,  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/> . Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο..... 105
- Εικόνα 4\_25: Αργολιθοδομή στο Κάτω Σούλι, 2002. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου..... 105
- Εικόνα 4\_26: Ημιλαξευτή λιθοδομή στο τέμενος Καλούτσιανης στα Ιωάννινα, 2018. Πηγή: Τ.  
 Κουιμτζόγλου..... 105
- Εικόνα 4\_27: Ημιλαξευτοί λίθοι από το κεντρικό τόξο της γέφυρας της Πλάκας στα Τζουμέρκα, 2018.  
 Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου..... 105
- Εικόνα 4\_28: Λαξευτή λιθοδομή στο Ι.Ν. Φανερωμένης στη Ζάκυνθο, 2018. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.. 105
- Εικόνα 4\_29: Τα κυκλώπεια τείχη των Μυκηνών. (EL), Cyclopische Mauer., SCHWEIGER LERCHENFELD,  
 Amand, (Freiherr von). Griechenland in Wort und Bild, Eine Schilderung des hellenischen  
 Konigreiches, Λειψία, Heinrich Schmidt & Carl Günther, 1887 / Kettwig, Phaidon, 1992, σελ. 53. Πηγή:  
<https://www.searchculture.gr/aggregator/edm/travelogues/000116-39692> , άδεια: CC BY-NC 4.0,  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/> . Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο..... 106
- Εικόνα 4\_30: Νέοι ωμόπλινθοι πριν την τοποθέτησή τους. Πηγή: Mudbricks in Palestine 2011.jpg, New  
 mudbricks in Palestine 2011,  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mudbricks\\_in\\_Palestine\\_2011.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mudbricks_in_Palestine_2011.jpg) , εικόνα του/της:  
 Whiteghost.ink , άδεια: CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported  
 license..... 107
- Εικόνα 4\_31: Ziggurat της Ur στο Ιράκ, 2007. Πηγή: Zig from side.JPG, Ziggurat of Ur, side,  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zig\\_from\\_side.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zig_from_side.JPG), εικόνα του/της: Kaufingdude , άδεια:  
 CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license..... 107
- Εικόνα 4\_32: Λεπτομέρεια από την κλίμακα στο Ziggurat της Ur στο Ιράκ, 2014. Πηγή: At the Ziggurat  
 of Ur – panoramio.jpg, At the Ziggurat of Ur,  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:At\\_the\\_Ziggurat\\_of\\_Ur\\_-\\_panoramio.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:At_the_Ziggurat_of_Ur_-_panoramio.jpg) , εικόνα του/της:  
 Duane Wilkins , άδεια: CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution 3.0 Unported license..... 108
- Εικόνα 4\_33: Ωμόπλινθοι σε υπό κατάρρευση ιστορικό κτίσμα. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου..... 108
- Εικόνα 4\_34: Toyo Ito, Tower of Winds, Yokohama, Japan, 1986. Πηγή: Tower of Winds,  
<https://www.flickr.com/photos/colbwt-archi/450251549/> , εικόνα του/της: ..colb.. , άδεια: CC BY 2.0,  
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/> ..... 110
- Εικόνα 4\_35: Toyo Ito, Tower of Winds, Yokohama, Japan, 1986. Πηγή: Toyo Ito - Tower of Winds 風之  
 塔 - Photo 01, <https://www.flickr.com/photos/eager/8566225631/> , εικόνα του/της: 準建築人手札  
 網站 Forgemind ArchiMedia, άδεια: CC BY 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/> .... 110
- Εικόνα 4\_36: Ned Khan και Urban Art Projects (UAP), Brisbane Domestic Terminal Car Park, 2011.  
 Πηγή: Brisbane Airport Domestic Terminal car park 01.JPG, Brisbane Airport Domestic Terminal car

park, Brisbane, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brisbane_Airport_Domestic_Terminal_car_park_01.JPG">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brisbane_Airport_Domestic_Terminal_car_park_01.JPG</a> , εικόνα του/της: Kgbo , άδεια: CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....	112
Εικόνα 4_37: Windswept, Randall Museum, San Francisco. Πηγή: Randall Museum, <a href="https://www.flickr.com/photos/frankfarm/10519993103/">https://www.flickr.com/photos/frankfarm/10519993103/</a> , εικόνα του/της: Frank Farm , άδεια: CC BY- NC-ND 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/</a> .....	113
Εικόνα 4_38: Windswept, Randall Museum, San Francisco. Πηγή: Charles Sowers, <a href="https://www.flickr.com/photos/rocor/14322727682/">https://www.flickr.com/photos/rocor/14322727682/</a> , εικόνα του/της: Rob Corder , άδεια: CC BY-NC 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/</a> .....	113
Εικόνα 4_39: Cloud Seeding Pavilion, Modu Architecture, Israel, 2015. Γενική άποψη. Πηγή: <a href="https://moduarchitecture.com/Cloud-Seeding-Tel-Aviv">https://moduarchitecture.com/Cloud-Seeding-Tel-Aviv</a> , © MODU Architecture, Photography: Aviad Bar Ness, χρήση κατόπιν άδειας.....	113
Εικόνα 4_40: Cloud Seeding Pavilion, Modu Architecture, Israel, 2015. Λεπτομέρεια. Πηγή: <a href="https://moduarchitecture.com/Cloud-Seeding-Tel-Aviv">https://moduarchitecture.com/Cloud-Seeding-Tel-Aviv</a> , © MODU Architecture, Photography: Aviad Bar Ness, χρήση κατόπιν άδειας.....	113
Εικόνα 4_41: Jean Nouvel et al, Institut du Monde Arabe, Paris, 1987. Νότια όψη. Πηγή: Jardin de l'Institut du Monde Arabe (27132660863).jpg, Jardin de l'Institut du Monde Arabe, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jardin_de_l%27Institut_du_Monde_Arabe_(27132660863).jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jardin_de_l %27Institut_du_Monde_Arabe_(27132660863).jpg</a> , εικόνα του/της: Miwok , άδεια: CC0 1.0 Universal, Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication. (cropped).....	114
Εικόνα 4_42: Jean Nouvel et al, Institut du Monde Arabe, Paris, 1987. Λεπτομέρειες διαφραγμάτων από το εσωτερικό του κτηρίου. Πηγή: Borne de prêt - Institut du monde arabe (34836403231).jpg, Borne de prêt - Institut du monde arabe, Bibliothèque de l'Institut du monde arabe, 1 Rue des Fossés Saint-Bernard, 75005 Paris, France, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Borne_de_pr%C3%AAAt_-_Institut_du_monde_arabe_(34836403231).jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Borne_de_pr %C3%AAAt_-_Institut_du_monde_arabe_(34836403231).jpg</a> , εικόνα του./της: ActuaLitté , άδεια: CC BY-SA 2.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 2.0 Generic license.....	114
Εικόνα 4_43: Ahr, Al Bahr Towers, Abu Dhabi, Πηγή: Al Bahr Towers by AEDAS, <a href="https://www.flickr.com/photos/inhabitat/12330946825/">https://www.flickr.com/photos/inhabitat/12330946825/</a> , εικόνα του/της: Inhabitat , άδεια: CC BY- NC-ND 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/</a> .....	115
Εικόνα 4_44: Ahr, Al Bahr Towers, Abu Dhabi, Πηγή: Al Bahr Towers by AEDAS, <a href="https://www.flickr.com/photos/inhabitat/12331354474/">https://www.flickr.com/photos/inhabitat/12331354474/</a> , εικόνα του/της: Inhabitat , άδεια: CC BY- NC-ND 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/</a> .....	115
Εικόνα 4_45: Kiefer Technic Showroom, 2007. Γενική διάταξη όψης. Πηγή: <a href="https://www.giselbrecht.at/projekte/gewerbe_industriebauten/kiefer/index.html">https://www.giselbrecht.at/projekte/gewerbe_industriebauten/kiefer/index.html</a> , © ERNST GISELBRECHT + PARTNER ZT GMBH, χρήση κατόπιν άδειας.....	116
Εικόνα 4_46: Kiefer Technic Showroom, 2007. Λεπτομέρεια κινητών στοιχείων. Πηγή: <a href="https://www.giselbrecht.at/projekte/gewerbe_industriebauten/kiefer/index.html">https://www.giselbrecht.at/projekte/gewerbe_industriebauten/kiefer/index.html</a> , © ERNST GISELBRECHT + PARTNER ZT GMBH, χρήση κατόπιν άδειας.....	116
Εικόνα 4_47: Cloud 9, Media-ICT, Βαρκελώνη, Ισπανία. Πηγή: Edificio Media-TIC. Enric Ruiz Geli.jpg, Edificio Media-TIC. Enric Ruiz Geli. El Poblenou, Barcelona, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Edificio_Media-TIC._Enric_Ruiz_Geli.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Edificio_Media-TIC._Enric_Ruiz_Geli.jpg</a> , εικόνα του/της: Victoriano Javier Tornel García , άδεια: CC BY-SA 2.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 2.0 Generic license.....	117
Εικόνα 4_48: Cloud 9, Media-ICT, Βαρκελώνη, Ισπανία. Πηγή: Barcelona - Edifici Media-TIC (2).jpg, Barcelona - Edifici Media-TIC, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Barcelona_-_Edifici_Media-TIC_%282%29.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Barcelona_-_Edifici_Media- TIC_%282%29.jpg</a> , εικόνα του/της: Fred Romero , άδεια: CC BY-SA 2.0, Creative Commons Attribution 2.0 Generic license.....	117
Εικόνα 4_49: Theme pavilion Expo Yeosu, Soma Architecture, Korea, 2012. Πηγή: © Soma Architecture, χρήση κατόπιν άδειας.....	118
Εικόνα 4_50: Theme pavilion Expo Yeosu, Soma Architecture, Korea, 2012. Πηγή: © Soma Architecture, χρήση κατόπιν άδειας.....	118
Εικόνα 4_51: Syddansk University, Communication and Design building, 2015. Γενική άποψη του κτηρίου. Πηγή: Syddansk universitet.Campus Kolding.Denmark.2014 (39).JPG, Campus Kolding is a part of Syddansk Universitet (University of Southern Denmark) and is made in 2012-2014. The building	

- has a triangular shape and is designed by Henning Larsen Architects. Students started using it 1. september 2014. There are approximately 3000 students and 200 employees.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Syddansk\\_universitet.Campus\\_Kolding.Denmark.2014\\_\(39\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Syddansk_universitet.Campus_Kolding.Denmark.2014_(39).JPG) , εικόνα του/της: S.Juhl , άδεια: CC0 1.0, Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication..... 119
- Εικόνα 4\_52: Syddansk University, Communication and Design building, 2015. *Λεπτομέρεια των διάτρητων πανέλων*. Πηγή: Syddansk universitet.Campus Kolding.Denmark.2014 (40).JPG, Campus Kolding is a part of Syddansk Universitet (University of Southern Denmark) and is made in 2012-2014. The building has a triangular shape and is designed by Henning Larsen Architects. Students started using it 1. september 2014. There are approximately 3000 students and 200 employees.  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Syddansk\\_universitet.Campus\\_Kolding.Denmark.2014\\_\(40\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Syddansk_universitet.Campus_Kolding.Denmark.2014_(40).JPG) , εικόνα του/της: S.Juhl , άδεια: CC0 1.0, Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication..... 119
- Εικόνα 4\_53: Κυματοθραύστες τύπου tetrapods από στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα. Πηγή: Wave Breaker On Glagah Beach (246870295).jpeg, Wave Breaker On Glagah Beach,  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wave\\_Breaker\\_On\\_Glagah\\_Beach\\_\(246870295\).jpeg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wave_Breaker_On_Glagah_Beach_(246870295).jpeg) , εικόνα του/της: Nanda Widayatama , άδεια: CC BY 3.0, This file is licensed under the Creative Commons Attribution 3.0 Unported license..... 120
- Εικόνα 4\_54: Κυματοθραύστες tetrapods από στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα. Πηγή: Liepaja Karosta falochron polnocny 2.jpg, Liepaja - Karosta - northern breakwater,  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Liepaja\\_Karosta\\_falochron\\_polnocny\\_2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Liepaja_Karosta_falochron_polnocny_2.jpg) , εικόνα του/της: Andrzej Otrębski , άδεια: CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο..... 120
- Εικόνα 4\_55: Villa Verde, Elemental, Χιλή, 2010. Σχέδιο κάτοψης όπου διακρίνεται αριστερά το σχεδιασμένο τμήμα, στο κέντρο η ελεύθερη περιοχή της μελλοντικής επέκτασης (κόκκινη ένδειξη) και δεξιά της το επόμενο σχεδιασμένο τμήμα. Πηγή: <http://www.elementalchile.cl/en/> . © 2024 Elemental, all rights reserved. , Κόκκινη σκίαση: Τ. Κουιμτζόγλου..... 121
- Εικόνα 4\_56: Villa Verde, Elemental, Χιλή, 2010. Σχέδιο τομής όπου διακρίνεται αριστερά το σχεδιασμένο τμήμα, και δεξιά η ελεύθερη περιοχή της μελλοντικής επέκτασης τμήμα. Πηγή: <http://www.elementalchile.cl/en/> , © 2024 Elemental, all rights reserved..... 121
- Εικόνα 4\_57: Quinta Monroy, Elemental, Χιλή, 2003. Όψεις κτηρίων μετά τις επεκτάσεις των ιδιοκτητών. Διακρίνονται οι βασικοί αρχικοί πυρήνες (κόκκινο πλαίσιο) και οι επεκτάσεις τους. Πηγή: Google Maps φωτ. 2015. <https://www.google.com/maps/@30.3220679,-81.6375202,442m/data=!3m1!1e3?entry=ttu> . Κόκκινες ενδείξεις: Τ. Κουιμτζόγλου..... 122
- Εικόνα 4\_58: Memorial to the Murdered Jews of Europe, Peter Eisenman, 2004. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου..... 123
- Εικόνα 4\_59: Gehry House, Frank O. Gehry, 1978. Πηγή: Gehry House – Image01.jpg, Frank Gehry's house in a posh area in Santa Monica. It is built upon an old house, with new elements added into the frame, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gehry\\_House\\_-\\_Image01.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gehry_House_-_Image01.jpg) , εικόνα του/της: IK's World Trip , άδεια: CC BY 2.0, Creative Commons Attribution 2.0 Generic license..... 124
- Εικόνα 4\_60: Familian House Project, Santa Monica, California, Frank O. Gehry, 1977-78. Πηγή: <https://www.moma.org/collection/works/1020> , © The Museum of Modern Art..... 124
- Εικόνα 4\_61: Denver Art Museum, Daniel Libeskind, 2006. Πηγή: Denver Art Museum.JPG, Denver Art Museum (DAM) in Denver, CO, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Denver\\_Art\\_Museum.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Denver_Art_Museum.JPG) , εικόνα του/της: Stillfehler , άδεια: CC BY-SA 1.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 1.0 Generic license..... 125
- Εικόνα 4\_62: Denver Art Museum, Daniel Libeskind, 2006. Πηγή: Denver Art Museum 2.jpg, Denver Art Museum, Denver, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Denver\\_Art\\_Museum\\_2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Denver_Art_Museum_2.jpg) , εικόνα του/της: J. Miers - User: (WT-shared) Jtesla16 at wts wikivoyage , άδεια: CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license..... 125
- Εικόνα 4\_63: Lucien Pellat Finet boutique, Kengo Kuma, 2009. Πηγή: Kengo Kuma and Associates. © Kengo Kuma and Associates., χρήση κατόπιν άδειας..... 126
- Εικόνα 4\_64: Blur Building, Diller Scofidio + Renfro, 2002. Πηγή: 20020717 Expo Yverdon 21.JPG, Expo.02 in Neuenburg, Yverdon, Biel and Murten (exact location see file name), [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20020717\\_Expo\\_Yverdon\\_21.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20020717_Expo_Yverdon_21.JPG) , εικόνα του/της: Norbert



Aepli, Switzerland (User:Noebu) , άδεια: CC BY 2.5, Creative Commons Attribution 2.5 Generic license.....	127
Εικόνα 4_65: The Passenger, Arne Quinze, Mons, 2015. Πηγή: E. Τσακανίκα. © E. Τσακανίκα, χρήση κατόπιν άδειας.....	128
Εικόνα 4_66: Sunny Hills Shop, Kengo Kuma, 2013. Πηγή: SunnyHills Tokyo, <a href="https://www.flickr.com/photos/superidoljp/13972861577/">https://www.flickr.com/photos/superidoljp/13972861577/</a> , εικόνα του/της: superidoljp , άδεια: CC BY-SA 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/</a> .....	128
Εικόνα 4_67: Dazaifu Starbucks, Kengo Kuma, 2011. Η ξύλινη δικτυωματική κατασκευή στο εσωτερικού του κτηρίου. Πηγή: STARBUCKS DAZAIFU BY KENGO KUMA. <a href="https://www.flickr.com/photos/aya80904/33521743365/">https://www.flickr.com/photos/aya80904/33521743365/</a> , εικόνα του/της: Hsuanya Tsai , άδεια: CC BY-NC 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/</a> .....	128
Εικόνα 4_68: Sunny Hills Shop, Kengo Kuma, 2013, λεπτομέρεια. Πηγή: Sunny Hills by Kengo Kuma.JPG, Sunny Hills, Minami Aoyama by Kengo Kuma and Associates , <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sunny_Hills_by_Kengo_Kuma.JPG">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sunny_Hills_by_Kengo_Kuma.JPG</a> , εικόνα του/της: Rafbalboa , άδεια: CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license. ....	128
Εικόνα 4_69: ReActor, Schweder + Shelley, 2016. Πηγή: <a href="http://www.schwedershelley.com/reactor/">http://www.schwedershelley.com/reactor/</a> © Schweder + Shelley, χρήση κατόπιν άδειας.....	130
Εικόνα 4_70: The Shed, Diller Scofidio+Renfro, 2019. Το κτήριο/υπόστεγο σε διάταξη συστολής. Πηγή: The Shed - Complete (48206488176).jpg, Hudson Yards, NYC, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Shed_-_Complete_(48206488176).jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Shed_-_Complete_(48206488176).jpg</a> , εικόνα του/της: Ajay Suresh from New York, NY, USA , άδεια: CC BY 2.0, Creative Commons Attribution 2.0 Generic license.....	130
Εικόνα 4_71: Fosun Foundation, Norman Foster+Partners, Heatherwick Studio, 2017. Πηγή: The Bund Finance Center in Shanghai.jpg, Lamborghini Urus in-front of Bund Finance center, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Bund_Finance_Center_in_Shanghai.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Bund_Finance_Center_in_Shanghai.jpg</a> , εικόνα του/της: GillyBerlin , άδεια: CC BY 2.0, Creative Commons Attribution 2.0 Generic license. (cropped). ....	132
Εικόνα 4_72: Fosun Foundation, Norman Foster+Partners, Heatherwick Studio, 2017. Πηγή: Fundación Fosun en Shanghai.jpg, Edificio de la fundación Fosun en la ciudad de Shanghai en China, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fundaci%C3%B3n_Fosun_en_Shangh%C3%A1i.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fundaci%C3%B3n_Fosun_en_Shangh%C3%A1i.jpg</a> , εικόνα του/της: Agomga14 , άδεια: CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....	132
Εικόνα 4_73: FLARE – Kinetic Membrane Facade, Whitevoid, 2008. Πηγή: <a href="https://www.whitevoid.com/#/main/architecture_spaces/flare_facade">https://www.whitevoid.com/#/main/architecture_spaces/flare_facade</a> , © WhiteVOID, χρήση κατόπιν άδειας.....	132
Εικόνα 4_74: FLARE – Kinetic Membrane Facade, Whitevoid, 2008. Λεπτομέρεια κατασκευής. Πηγή: <a href="https://www.whitevoid.com/#/main/architecture_spaces/flare_facade">https://www.whitevoid.com/#/main/architecture_spaces/flare_facade</a> , © WhiteVOID, χρήση κατόπιν άδειας.....	132
Εικόνα 4_75: Chanel Tower, Peter Marino, 2004. Πηγή: Chanel-Ginza.jpg, Chanel Ginza, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chanel-Ginza.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chanel-Ginza.jpg</a> , εικόνα του/της: Luc Boegly , άδεια: CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....	135
Εικόνα 4_76: BIX Light and Media Facade, realities:united, 2003. Πηγή: Kunsthaus-Graz-Nacht-Medienfassade.jpg, Kunsthaus Graz - media facade (night shot), <a href="https://ru.m.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Kunsthaus-Graz-Nacht-Medienfassade.jpg">https://ru.m.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Kunsthaus-Graz-Nacht-Medienfassade.jpg</a> , εικόνα του/της: Stephan Weinberger , άδεια: CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.....	135
Εικόνα 4_77: Allianz Arena, Herzog & de Meuron, 2005. Πηγή: Allianz Arena zu verschiedenen Zeiten.jpg, The Allianz Arena is a football stadium in the north of Munich, Germany. The two professional Munich football clubs FC Bayern München and TSV 1860 München have played their home games at Allianz Arena since the start of the 2005/06 season. Because of its shape, the stadium is nicknamed the « Schlauchboot » (inflatable boat), <a href="https://el.m.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Allianz_Arena_zu_versehiedenen_Zeiten.jpg">https://el.m.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Allianz_Arena_zu_versehiedenen_Zeiten.jpg</a> , εικόνα	

του/της: Richard Bartz, Munich aka Makro Freak , Composition Niabot , άδεια: CC BY-SA 2.5, Creative Commons Αναφορά προέλευσης-Παρόμοια διανομή 2.5 Γενική.....	135
Εικόνα 4_78: Dexia Tower (Philippe Samyn & Partners, M&J.M Jaspers-j.Eyers & Partners, 2006. Πηγή: LAb[au] : Spectr a um, <a href="https://www.flickr.com/photos/marcwathieu/1467728846">https://www.flickr.com/photos/marcwathieu/1467728846</a> , εικόνα του/της: Marc Wathieu , άδεια: CC BY 2.0, Marc Wathieu , <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/</a> . 135	
Εικόνα 4_79: Dancing House, Frank Gehry, 1996. Πηγή: Praag, Tsjechië Aug 21, 2019 05-42-54 PM.jpeg, Praag, Tsjechië, August 2019, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Praag,_Tsjechi%C3%AB_Aug_21,_2019_05-42-54_PM.jpeg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Praag,_Tsjechi%C3%AB_Aug_21,_2019_05-42-54_PM.jpeg</a> , εικόνα του/της: Bobby-John de Bot , άδεια: CC NY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....	141
Εικόνα 4_80: (άνω). Guggenheim Bilbao, Frank Gehry, 1997. Πηγή: Bilbao - Guggenheim aureore.jpg, Musée Guggenheim au petit matin, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bilbao_-_Guggenheim_aureore.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bilbao_-_Guggenheim_aureore.jpg</a> (πάνω), εικόνα του/της: PA , άδεια: CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....	141
Εικόνα 4_81: (κάτω). Neuer Zollhof, Frank Gehry, 1998. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου (φωτογραφία 2016). 141	
Εικόνα 4_82: Sendai Mediatheque, Toyo Ito, 2001. Πηγή: Sendai Mediatheque 2009.jpg, Sendai Mediatheque, Sendai-shi, Miyagi-pref., Japan, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sendai_Mediatheque_2009.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sendai_Mediatheque_2009.jpg</a> , εικόνα του/της: scarletgreen from Japan , άδεια: CC BY 2.0, Creative Commons Attribution 2.0 Generic license.. 142	
Εικόνα 4_83: (άνω). Sendai Mediatheque, Toyo Ito, 2001. Πηγή: Toyo Ito - Sendai Mediatheque - Photo 0004, <a href="https://www.flickr.com/photos/eager/11996869554">https://www.flickr.com/photos/eager/11996869554</a> , εικόνα του/της: 準建築人手札網站 Forgemind ArchiMedia , άδεια: CC BY 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/</a> , Πηγή: (κάτω): smt02.JPG, <a href="https://www.flickr.com/photos/9160678@N06/761943312">https://www.flickr.com/photos/9160678@N06/761943312</a> , εικόνα του/της: scarletgreen , άδεια: CC BY 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/</a> .....	142
Εικόνα 4_84: Akutagawa Project, Hiroshi Omori. Πηγή: Hiroshi OHMORI, Computational morphogenesis: Its current state and possibility for the future, <a href="https://ecommons.cornell.edu/items/b65d52c3-3c74-4b11-8e5d-a24c7a6fbc8d">https://ecommons.cornell.edu/items/b65d52c3-3c74-4b11-8e5d-a24c7a6fbc8d</a> , Cornell eCommons, άδεια: CC BY 4.0, Creative Commons Attribution 4.0 International License. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....	143
Εικόνα 4_85: Meiso no Mori στο Kakamigahara Gifu (2006) από τους Toyo Ito και Matsuro Sasaki. Πηγή: 瞑想の森 各務原市営斎場 / Forest of meditation (Kakamigahara city funeral hall) <a href="https://www.flickr.com/photos/yuco/3177125616/">https://www.flickr.com/photos/yuco/3177125616/</a> , εικόνα του/της: Yuco , άδεια: CC BY-SA 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/</a> .....	145
Εικόνα 4_86: Qatar National Convention Center, Arata Isosaki, 2011. Πηγή: The Qatar National Convention Center QNCC, <a href="https://www.flickr.com/photos/unctad/6953154154/in/photolist-bAqJub-bPkodp-bPkozz-aYE3ET-bPkoF2-bPkopD-bPkoNM-jAbNTB-dR85B6-bq76m6-2kbtTUh-5X7ooP-2dYdmz1-2f58tY2-miXuWk-kqSeu4-5XbFJb-s89kjn-6dSZHv-dRfvgE-ocycYW-ocyd8J-octxch-bq74ok-bPARPx-pFiMSh-eZU4hm-eZSwk3-eZTSuh-f13oys-dQPN18-f13qes-eZMZX6-eZTyq3-eZTvCu-eZDpJp-eZTtwf-eZDvTT-eZMYeZ-eZSzJ7-kr1Vhc-kqSZxp-kqXxbl-kr3aX3-eZDraT-kqYZbk-kr474k-kr1f82-kr13Qb-rF6771">https://www.flickr.com/photos/unctad/6953154154/in/photolist-bAqJub-bPkodp-bPkozz-aYE3ET-bPkoF2-bPkopD-bPkoNM-jAbNTB-dR85B6-bq76m6-2kbtTUh-5X7ooP-2dYdmz1-2f58tY2-miXuWk-kqSeu4-5XbFJb-s89kjn-6dSZHv-dRfvgE-ocycYW-ocyd8J-octxch-bq74ok-bPARPx-pFiMSh-eZU4hm-eZSwk3-eZTSuh-f13oys-dQPN18-f13qes-eZMZX6-eZTyq3-eZTvCu-eZDpJp-eZTtwf-eZDvTT-eZMYeZ-eZSzJ7-kr1Vhc-kqSZxp-kqXxbl-kr3aX3-eZDraT-kqYZbk-kr474k-kr1f82-kr13Qb-rF6771</a> , εικόνα του/της: UN Trade and Development (UNCTAD) , άδεια: CC BY-SA 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/</a> .....	145
Εικόνα 4_87: White Noise, 2010. Soma architecture. Πηγή: Soma architecture, © Soma architecture, χρήση κατόπιν άδειας.....	146
Εικόνα 4_88: White Noise, 2010. Soma architecture. Πηγή: Soma architecture, © Soma architecture, χρήση κατόπιν άδειας.....	146
Εικόνα 4_89: Active Energy Building, Falkeis architects, 2017. Πηγή: <a href="https://www.karamba3d.com/projects/active-energy-building/">https://www.karamba3d.com/projects/active-energy-building/</a> © Roland Korner, χρήση κατόπιν άδειας.....	147
Εικόνα 4_90: Hyundai Motorstudio Goyang, Delugan Meissl Associated Architects και πολιτικοί μηχανικοί Bollinger-Grohmann, 2017. Πηγή: Delugan Meissl Associated Architects.© Katsuhisa Kida, χρήση κατόπιν άδειας.....	148
Εικόνα 4_91: Hyundai Motorstudio Goyang, κατά μήκος τομή, Delugan Meissl Associated Architects και πολιτικοί μηχανικοί Bollinger-Grohmann, 2017. Πηγή: © Delugan Meissl Associated Architects, χρήση κατόπιν άδειας.....	149

Εικόνα 4_92: Γέφυρα MX3D, 2021 σε δοκιμαστική τοποθέτηση. Πηγή: MX3D 3D printed bridge Dutch Design Week.jpg, Een 3D-geprinte brug van MX3D tijdens de Dutch Design Week op 20 oktober 2018 te Eindhoven, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MX3D_3D_printed_bridge_Dutch_Design_Week.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MX3D_3D_printed_bridge_Dutch_Design_Week.jpg</a> , εικόνα του/της: IlvQ / Tijmen Stam , άδεια: CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....	150
Εικόνα 4_93: Serpentine Pavillion, Toyo Ito, 2002. Πηγή: Serpentine Pavillion 2002.jpg, Serpentine Gallery Pavilion 2002 — by architect Toyo Ito, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Serpentine_Pavillion_2002.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Serpentine_Pavillion_2002.jpg</a> , εικόνα του/της: Frankie Roberto , άδεια: CC BY 2.0, Creative Commons Attribution 2.0 Generic license.....	151
Εικόνα 4_94: TOD's Omotesando, Toyo Ito, 2004. Πηγή: Tod's at Omotesando.jpg, Tod's at Omotesando, Tokyo, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tod%27s_at_Omotesando.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tod%27s_at_Omotesando.jpg</a> , εικόνα του/της: Angaurits at English Wikipedia , άδεια: CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.....	153
Εικόνα 4_95: Mikimoto Ginza 2, Toyo Ito, 2005. Πηγή: Mikimoto Ginza2.JPG, Mikimoto Ginza Building, at Ginza Tokyo Japan, design by Toyo Ito, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mikimoto_Ginza2.JPG">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mikimoto_Ginza2.JPG</a> , εικόνα του/της: Oiuysdfg , άδεια: CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.....	153
Εικόνα 4_96: Watercube, 2008. Πηγή: Beijing National Aquatics Center, <a href="https://www.flickr.com/photos/belenko/4279663700/">https://www.flickr.com/photos/belenko/4279663700/</a> , εικόνα του/της: Andrey Belenko , άδεια: CC BY 2.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/</a> .....	154
Εικόνα 4_97: Watercube, 2008. Πηγή: Watercube.jpg, Centre national de natation en construction, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Watercube.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Watercube.jpg</a> , εικόνα του/της: angus_mac_123 , άδεια: CC BY 2.0, Creative Commons Attribution 2.0 Generic license.....	154
Εικόνα 4_98: Bird's Nest, 2007. Πηγή: Beijing national stadium.jpg, Beijing National Stadium. Architect: Herzog & de Meuron, ArupSport, China Architectural Design & Research Group, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beijing_national_stadium.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beijing_national_stadium.jpg</a> , εικόνα του/της: Peter23 , άδεια: CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.....	155
Εικόνα 4_99: Bird's Nest, 2007. Πηγή: The Bird's Nest.jpg, The Beijing National Stadium, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Bird%27s_Nest.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Bird%27s_Nest.jpg</a> , εικόνα του/της: Kevin Lawver , άδεια: CC BY-SA 2.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 2.0 Generic license.....	155
Εικόνα 4_100: Dogok Maximum, Moon Hoon, 2016. Πηγή: <a href="http://www.moonhoon.com/sub/project/DOGOK%20MAXIMUM/DOGOK%20MAXIMUM.html">http://www.moonhoon.com/sub/project/DOGOK%20MAXIMUM/DOGOK%20MAXIMUM.html</a> , © Moonhoon, χρήση κατόπιν άδειας.....	156
Εικόνα 4_101: Dogok Maximum, Moon Hoon, 2016. Πηγή: <a href="http://www.moonhoon.com/sub/project/DOGOK%20MAXIMUM/DOGOK%20MAXIMUM.html">http://www.moonhoon.com/sub/project/DOGOK%20MAXIMUM/DOGOK%20MAXIMUM.html</a> , © Moonhoon, χρήση κατόπιν άδειας.....	156
Εικόνα 4_102: Morpheus Hotel Macau, Zaha Hadid Architects, 2018. Πηγή: Macau-Morpheus-02.jpg, Morpheus at City of Dreams, Hotel in Macau, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Macau-Morpheus-02.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Macau-Morpheus-02.jpg</a> , εικόνα του/της: Störfix , άδεια: CC BY-SA 3.0 DE, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Germany license, Creative Commons by-sa 3.0 de .....	157
Εικόνα 4_103: Morpheus Hotel Macau, Zaha Hadid Architects, 2018. Πηγή: Macau-Morpheus-01.jpg, Morpheus at City of Dreams, Hotel in Macau, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Macau-Morpheus-01.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Macau-Morpheus-01.jpg</a> , εικόνα του/της: Störfix , άδεια: CC BY-SA 3.0 DE, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Germany license, Creative Commons by-sa 3.0 de .....	157
Εικόνα 4_104: Photoptosis, Orproject, 2017. Πηγή: Orproject, ©Orproject, χρήση κατόπιν άδειας....	158
Εικόνα 4_105: Daily's Place, Jacksonville Jaguars Flex Field and Amphitheatre (Populus, Walter P. Moore), 2017. Πηγή: Google Maps, <a href="https://www.google.com/maps/@30.3220679,-81.6375202,275m/data=!3m1!1e3?entry=ttu">https://www.google.com/maps/@30.3220679,-81.6375202,275m/data=!3m1!1e3?entry=ttu</a> .....	159
Εικόνα 6_1: Random Component. Πηγή: Λογισμικό Grasshopper.....	174
Εικόνα 6_2: Random Component. Πηγή: Λογισμικό Grasshopper. Λεπτομέρειες βοήθειας.....	174
Εικόνα 6_3: Random Component στο λογισμικό Grasshopper. Παραλλαγές παραγωγής 5 ψευδοτυχαίων αριθμών, από πεδίο τιμών εύρους 0 έως 100 για Seed 0, 3, 6 αντίστοιχα. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	175

Εικόνα 6_4: Random Component στο λογισμικό Grasshopper. Παραλλαγές παραγωγής 5 ψευδοτυχαίων αριθμών για 5 τυχαίες τιμές SEED από πεδίο τιμών εύρους 0 έως 100. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	175
Εικόνα 6_5: Ληφθείσες τιμές για την εντολή Random στο λογισμικό MAXscript του 3ds Max για εύρος από 1 έως 100.....	176
Εικόνα 6_6: MAXScript Fracture Voronoi interface. Πηγή: <a href="http://www.scriptsport.com/3ds-max/scripts/fracture-voronoi">http://www.scriptsport.com/3ds-max/scripts/fracture-voronoi</a> .....	176
Εικόνα 6_7: Galapagos component για το λογισμικό Grasshopper. Διακρίνεται το πεδίο εισόδου input / Genome και το πεδίο εισόδου Fitness.....	182
Εικόνα 6_8: Octopus component για το λογισμικό Grasshopper. Διακρίνεται το πεδίο εισόδου input / Genome (G), το πεδίο Octopus (O) που αντιστοιχεί στο Fitness πολλαπλών στόχων, το πεδίο Phenotype (P) για την εισαγωγή mesh ως φαινότυπο λύσεων και το πεδίο Phenotypes (Ps) ως έξοδος παραλλαγών φαινοτύπων.....	182
Εικόνα 6_9: Δομή από Cellular automata διαστάσεων κανάβου 10X10X10 στοιχείων με βάση τον κανόνα: ελάχιστο 2, μέγιστο 3, γένεση 3, κατασκευασμένο με την εφαρμογή Fun3D του Bojan Mitrovic. <a href="https://github.com/piktogramstudio/fun3d">https://github.com/piktogramstudio/fun3d</a> .....	184
Εικόνα 6_10: 2D L-system, σύμφωνα με το αξίωμα FX και τους κανόνες $F=C0FF-[C1-F+F]+[C2+F-F]$ και $X=C0FF+[C1+F]+[C3-F]$ για 2, 3, 4 και 5 στάδια. Πηγή: Kevin Roast, <a href="http://www.kevs3d.co.uk/dev/lsystems/">http://www.kevs3d.co.uk/dev/lsystems/</a> .....	185
Εικόνα 6_11: Μοντέλο στατικής διερεύνησης του A. Gaudí για τη Sagrada Familia. Πηγή: Maqueta funicular de la iglesia de la colonia Güell usada por Gaudí.jpg, maqueta funicular de la iglesia de la colonia Güell usada por Gaudí actualmente expuesta en el Museo del templo de la Sagrada Familia, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Maqueta_funicular_de_la_iglesia_de_la_colonia_G%C3%BCell_usada_por_Gaud%C3%AD.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Maqueta_funicular_de_la_iglesia_de_la_colonia_G%C3%BCell_usada_por_Gaud%C3%AD.jpg</a> , εικόνα του/της: Javiermes , άδεια: CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....	186
Εικόνα 6_12: Stuttgart Airport terminal 1, γενική διάταξη. Πηγή: Stuttgart Airport Terminal 1.jpg, Terminal 1 at Stuttgart Airport with Tree-like Support Structures, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stuttgart_Airport_Terminal_1.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stuttgart_Airport_Terminal_1.jpg</a> , εικόνα του/της: CatalpaSpirit , άδεια: CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....	187
Εικόνα 6_13: Stuttgart Airport terminal, λεπτομέρεια υποστηλώματος Πηγή: Stuttgart Airport Interior 2005-06-02.jpg, Image of the interior of Stuttgart Airport (between Terminal 1 and 3) taken on 2005-06-02 by James Bowes., <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stuttgart_Airport_Interior_2005-06-02.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stuttgart_Airport_Interior_2005-06-02.jpg</a> , εικόνα του/της: No machine-readable author provided. JamesBowes assumed (based on copyright claims), άδεια: CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.....	187
Εικόνα 8_1: Δενδροειδές δοκίμιο. Οριακές συνθήκες, ορισμός φορτίου και κύριες γεωμετρικές παράμετροι. Πηγή: Figure 2. Boundary conditions, load definition and main geometrical parameters of the plastic structural element. , Mercado-Colmenero et al., 2020. <a href="https://doi.org/10.3390/polym12102202">https://doi.org/10.3390/polym12102202</a> , άδεια: Creative Commons Attribution (CC BY) license, CC BY 4.0, ( <a href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a> ). Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....	195
Εικόνα 8_2: 4 τύποι σκαμνιών. Πηγή: Torreblanca-Díaz και Peña, 2022, <a href="https://papers.cuminCAD.org/cgi-bin/works/paper/sigradi2022_116">https://papers.cuminCAD.org/cgi-bin/works/paper/sigradi2022_116</a> . Χρήση κατόπιν άδειας.....	196
Εικόνα 8_3: 2 τύποι υποστυλωμάτων και οι αντίστοιχες σχηματικές οριζόντιες τομές τους σε συγκεκριμένες στάθμες. Πηγή: Baldschmitt et al., 2022. <a href="https://doi.org/10.1007/s44150-022-00050-z">https://doi.org/10.1007/s44150-022-00050-z</a> , άδεια: CC BY 4.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a> .....	198
Εικόνα 8_4: 7 τύποι κυβικών δοκιμίων διαστάσεων ακμής κύβου 40mm. Διακρίνονται χαρακτηριστικά οι τυπικές δομές voronoi και κατακόρυφες ακμές των κύβων στις 4 γωνίες των δοκιμίων, οι οποίες διακόπτουν τη συνέχεια των τρισδιάστατων δομών voronoi. Πηγή: Figure 4. Designed and fabricated samples: (a) Model 1; (b) Model 2; (c) Model 3; (d) Model 4; (e) Model 5; (f) Model 6; and (g) Model 7., Efstathiadis et al., 2023. <a href="https://www.mdpi.com/2411-9660/7/5/113">https://www.mdpi.com/2411-9660/7/5/113</a> , άδεια: CC BY 4.0, Creative Commons Attribution (CC BY) license ( <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a> ). Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....	200

Εικόνα 8_5: Τύποι κυλινδρικών δοκιμών διαστάσεων $H=12\text{mm}$ και $R=3,27\text{mm}$ . Πηγή: Alknery et al., 2022. <a href="https://doi.org/10.3390/jfb13040302">https://doi.org/10.3390/jfb13040302</a> , άδεια: CC BY 4.0, Creative Commons Attribution (CC BY) license ( <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a> ). Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....	202
Εικόνα 8_6: Παραμετρική διαμόρφωση κύβου πλευράς 20cm. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	205
Εικόνα 8_7: Παραμετρική διασπορά σημείων σε τυχαία θέση στα όρια της γεωμετρίας του κύβου πλευράς 20cm. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	205
Εικόνα 8_8: Παραμετρική δημιουργία τρισδιάστατων κελιών νοροποι με seeds τις θέσεις των τυχαίων σημείων στο χώρο του προηγούμενου σταδίου. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	205
Εικόνα 8_9: Παραμετρική διαμόρφωση κυλίνδρου ακτίνας 5cm και ύψους 20cm. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	205
Εικόνα 8_10: Παραμετρική εγγραφή του κυλίνδρου στο χώρο του κύβου. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	205
Εικόνα 8_11: Παραμετρική Γεωμετρία της τομής των κελιών της τρισδιάστατης δομής νοροποι και της γεωμετρίας του κυλίνδρου. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	205
Εικόνα 8_12: Προκύπτουσα γεωμετρία της τομής των κελιών της τρισδιάστατης δομής νοροποι και της γεωμετρίας του κυλίνδρου. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	206
Εικόνα 8_13: Οι περιμετρικές καμπύλες ακμές της προκύπτουσας γεωμετρίας του προηγούμενου σταδίου γίνονται ευθείες. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	206
Εικόνα 8_14: Από την προκύπτουσα νέα γεωμετρία διατηρούνται μόνο οι κορυφές (vertices) και οι ακμές (edges). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	206
Εικόνα 8_15: Γεωμετρία ψηφιακού δοκιμίου μόνο με κόμβους και ακμές χωρίς όγκο. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	206
Εικόνα 8_16: Γεωμετρία ψηφιακού δοκιμίου με σφαιρικούς κόμβους ακτίνας $r=0,25\text{cm}$ και κυλινδρικές ράβδους ακτίνας $r=0,25\text{cm}$ και τους ομόλογους άξονές τους. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	206
Εικόνα 8_17: Τελική μορφή ψηφιακού δοκιμίου χωρίς άξονες. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	206
Εικόνα 8_18: Περίπτωση συνεχόμενης κατακόρυφης ακμής και διακοπή στην περιμετρική συνέχεια. Απορριπτόμενο δοκίμιο. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	207
Εικόνα 8_19: Περίπτωση συνεχόμενης κατακόρυφης ακμής και διακοπή στην περιμετρική συνέχεια. Απορριπτόμενο δοκίμιο. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	207
Εικόνα 8_20: Παραμετρική διαμόρφωση των πρώτων σταδίων του αλγορίθμου στο λογισμικό Grasshopper. Διακρίνονται τα components δημιουργίας του κύβου, του κυλίνδρου, το Populate 3D, το Voronoi 3D καθώς και οι μεταξύ τους σχέσεις. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	208
Εικόνα 8_21: Ψηφιακό δοκίμιο για Οικογένεια 100, Seed 1, box $X=0,015$ - box $Y=0,00$ . Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	208
Εικόνα 8_22: Ψηφιακό δοκίμιο για Οικογένεια 100, Seed 2 box $X=0,015$ - box $Y=0,00$ . Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	208
Εικόνα 8_23: Ψηφιακό δοκίμιο για Οικογένεια 100, Seed 3, box $X=0,015$ - box $Y=0,00$ . Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	208
Εικόνα 8_24: Συνολική διάταξη αλγορίθμου. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	209
Εικόνα 8_25: Ψηφιακό δοκίμιο 200-1.....	211
Εικόνα 8_26: Ψηφιακό δοκίμιο 200-2.....	211
Εικόνα 8_27: Ψηφιακό δοκίμιο 200-3.....	211
Εικόνα 8_28: Ψηφιακό δοκίμιο 200-4.....	211
Εικόνα 8_29: Ψηφιακό δοκίμιο 200-5.....	211
Εικόνα 8_30: Ψηφιακό δοκίμιο 200-6.....	211
Εικόνα 8_31: Ψηφιακό δοκίμιο 200-7.....	211
Εικόνα 8_32: Ψηφιακό δοκίμιο 200-8.....	211
Εικόνα 8_33: Ψηφιακό δοκίμιο 200-9.....	211
Εικόνα 8_34: Ψηφιακό δοκίμιο 100-1.....	212
Εικόνα 8_35: Ψηφιακό δοκίμιο 100-2.....	212
Εικόνα 8_36: Ψηφιακό δοκίμιο 100-3.....	212
Εικόνα 8_37: Ψηφιακό δοκίμιο 100-4.....	212
Εικόνα 8_38: Ψηφιακό δοκίμιο 100-5.....	212
Εικόνα 8_39: Ψηφιακό δοκίμιο 100-6.....	212
Εικόνα 8_40: Ψηφιακό δοκίμιο 100-7.....	212
Εικόνα 8_41: Ψηφιακό δοκίμιο 100-8.....	212

Εικόνα 8_42: Ψηφιακό δοκίμιο 100-9.....	212
Εικόνα 8_43: Ψηφιακό δοκίμιο 50-1.....	213
Εικόνα 8_44: Ψηφιακό δοκίμιο 50-2.....	213
Εικόνα 8_45: Ψηφιακό δοκίμιο 50-3.....	213
Εικόνα 8_46: Ψηφιακό δοκίμιο 50-4.....	213
Εικόνα 8_47: Ψηφιακό δοκίμιο 50-5.....	213
Εικόνα 8_48: Ψηφιακό δοκίμιο 50-6.....	213
Εικόνα 8_49: Ψηφιακό δοκίμιο 50-7.....	213
Εικόνα 8_50: Ψηφιακό δοκίμιο 50-8.....	213
Εικόνα 8_51: Ψηφιακό δοκίμιο 50-9.....	213
Εικόνα 8_52: Ψηφιακό δοκίμιο 25-1.....	214
Εικόνα 8_53: Ψηφιακό δοκίμιο 25-2.....	214
Εικόνα 8_54: Ψηφιακό δοκίμιο 25-3.....	214
Εικόνα 8_55: Ψηφιακό δοκίμιο 25-4.....	214
Εικόνα 8_56: Ψηφιακό δοκίμιο 25-5.....	214
Εικόνα 8_57: Ψηφιακό δοκίμιο 25-6.....	214
Εικόνα 8_58: Ψηφιακό δοκίμιο 25-7.....	214
Εικόνα 8_59: Ψηφιακό δοκίμιο 25-8.....	214
Εικόνα 8_60: Ψηφιακό δοκίμιο 25-9.....	214
Εικόνα 8_61: Διάγραμμα αριθμού κόμβων και ράβδων για τις οικογένειες δοκιμών 50, 100 και 200.. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	217
Εικόνα 8_62: Ψηφιακά δοκίμια: Οικογένεια 800 – Seed 1, Οικογένεια 400 – Seed 2, Οικογένεια 200 – Seed 1, Οικογένεια 100 – Seed 1, Οικογένεια 50 – Seed 1, Οικογένεια 25– Seed 1. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	217
Εικόνα 8_63: Μικροσκοπική δομή φυσιολογικού οστού (αριστερά) και οστεοπορωμένου οστού (δεξιά). Πηγή: © Alan Boyde, χρήση πρωτότυπων εικόνων κατόπιν άδειας.....	218
Εικόνα 8_64: Φωτογραφίες από τους πειραματισμούς για τις δοκιμαστικές 3d εκτυπώσεις για την επιλογή των κατάλληλων ρυθμίσεων και τρόπων εκτύπωσης για τα τελικά δοκίμια. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	219
Εικόνα 8_65: 3d ψηφιακό δοκίμιο στο λογισμικό PrusaSlicer. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	220
Εικόνα 8_66: 3d ψηφιακό ραβδωτό δοκίμιο στο λογισμικό PrusaSlicer μετά τη δημιουργία οργανικών υποστηρίξεων, έτοιμο για εξαγωγή κώδικα 3d εκτύπωσης G-code για να χρησιμοποιηθεί από τον 3d εκτυπωτή ως οδηγία εκτύπωσης. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	221
Εικόνα 8_67: 3d εκτυπωτής PRUSA MK3S με MMU2S upgrade κατά τη διαδικασία εκτύπωσης φυσικού ραβδωτού δοκιμίου από Πορτοκαλί PETG με οργανικές υποστηρίξεις. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	221
Εικόνα 8_68: 3d εκτυπωτής PRUSA MK3S με MMU2S upgrade μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκτύπωσης ραβδωτού δοκιμίου από Πορτοκαλί PETG πριν την αφαίρεση των ικριωμάτων τύπου organic supports. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	221
Εικόνα 8_69: Συμπαγές δοκίμιο από πορτοκαλί PETG σε διάφορα στάδια της διαδικασίας κατασκευής του. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	222
Εικόνα 8_70: Φυσικό ραβδωτό δοκίμιο. Μεγέθυνση σε κόμβους και ράβδους. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου. .....	223
Εικόνα 8_71: Ραβδωτό δοκίμιο κατά τη διαδικασία παραγωγής του. Μεγέθυνση σε περιοχή κόμβων και ράβδων όπου διακρίνεται το γέμισμα της 3d εκτύπωσης (infill), η κατασκευή των ικριωμάτων και οι εξωτερικές περιμέτροι των στοιχείων. Παρατηρείται ότι η περιοχή του infill μακροσκοπικά παρουσιάζεται λεία και σχετικά ομοιογενής. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	223
Εικόνα 8_72: Ραβδωτά δοκίμια από πορτοκαλί PETG σε διάφορα στάδια της διαδικασίας κατασκευής τους. α. Ολοκληρωμένο δοκίμιο με ικριώματα υποστήριξης, β. Ραβδωτό δοκίμιο κατά την αφαίρεση των ικριωμάτων και γ. Καθαρισμένο ραβδωτό δοκίμιο. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	223
Εικόνα 8_73: Τρίτη ομάδα κύριων δοκιμών μετά την αφαίρεση των υποστηρίξεων. ΟΨΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	227
Εικόνα 8_74: Τρίτη ομάδα κύριων δοκιμών μετά την αφαίρεση των υποστηρίξεων. ΣΤΕΨΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	228
Εικόνα 8_75: Τρίτη ομάδα κύριων δοκιμών μετά την αφαίρεση των υποστηρίξεων. ΒΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	229

Εικόνα 8_76: Συμπαγές και ραβδωτό δοκίμιο σε έλεγχο με ψηφιακή ακτινογράφιση. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	230
Εικόνα 8_77: Ραβδωτό και συμπαγές δοκίμιο σε έλεγχο με αξονικό τομογράφο. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	231
Εικόνα 8_78: Εγκάρσιες (άνω) και κατά μήκος τομές (κάτω) με ψηφιακή ακτινογράφιση σε συμπαγή και ραβδωτό δοκίμιο. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	231
Εικόνα 8_79: Εγκάρσιες τομές συμπαγών και δικτυωματικού δοκιμίου σε αξονικό τομογράφο. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	231
Εικόνα 8_80: Αποκολλήσεις στρώσεων στο συμπαγές δοκίμιο Sr20 από κόκκινο PETG μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσής του οι οποίες δεν παρουσιάστηκαν στα πορτοκαλί PETG δοκίμια με τις ίδιες ρυθμίσεις 3d εκτύπωσης. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	233
Εικόνα 8_81: Θέσεις μετρήσεων στο λογισμικό RadiAnt DICOM Viewer για την τομή σε αξονικό τομογράφο του δοκιμίου Sor20-1. Διακρίνεται επίσης η περιοχή αλλαγής αναλώσιμου υλικού κατά τη διαδικασία της 3d εκτύπωσης ως διαγώνια γραμμή διακοπής. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	233
Εικόνα 8_82: Αριστερά: Τομή αξονικού τομογράφου στη βάση του δικτυωματικού δοκιμαστικού δοκιμίου. Παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στην πυκνότητα των στοιχείων των ράβδων οι οποίες υποδηλώνουν ότι οι περιοχές γεμίσματος (infill) της 3d εκτύπωσης για τις συγκεκριμένες διαστάσεις δεν είναι εντελώς ομοιογενείς. Δεξιά: Μεγέθυνση περιοχής. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	233
Εικόνα 8_83: Γενική άποψη της μηχανής Galdabini. Διακρίνεται το υδραυλικό έμβολο και η περιοχή τοποθέτησης των δοκιμίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	235
Εικόνα 8_84: Μηχανή Galdabini μετά την ολοκλήρωση φόρτισης. Διακρίνεται το δοκίμιο που έχει αστοχήσει σε διάφορες περιοχές. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	235
Εικόνα 8_85: Εργαστήριο αντισεισμικής τεχνολογίας ΕΜΠ. Πρώτη ομάδα πειραματικών ελέγχων. Δοκιμαστικά και κύρια συμπαγή και ραβδωτά δοκίμια πριν τους ελέγχους δοκιμών σε θλίψη στη μηχανή Galdabini. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	236
Εικόνα 8_86: Πειραματική διάταξη μηχανής Galdabini του Εργαστηρίου Τεχνικών Υλικών της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ, στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. Διακρίνεται κατά τη διεξαγωγή πειράματος: η μηχανή φόρτισης, ο συνδεδεμένος υπολογιστής καταγραφής δεδομένων και η camera καταγραφής video. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου....	236
Εικόνα 8_87: Διάγραμμα φορτίσεων / Load σε N (άξονας Y) με Κατακόρυφη μετακίνηση κεφαλής / Crosshead stroke σε mm (άξονας X) για ραβδωτά δοκιμαστικά και κύρια δοκίμια κατά την πρώτη συνεδρία πειραμάτων σε μορφή raster image από το λογισμικό της μηχανής Galdabini.. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	237
Εικόνα 8_88: Τμήμα πίνακα καταγραφής δεδομένων για ραβδωτά δοκιμαστικά και κύρια δοκίμια κατά την πρώτη συνεδρία πειραμάτων με λήψη φωτογραφίας από την οθόνη του υπολογιστή συλλογής δεδομένων για την πειραματική διάταξη της μηχανής Galdabini. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	237
Εικόνα 8_89: Δοκίμιο 50-1. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	238
Εικόνα 8_90: Δοκίμιο 50-2. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	238
Εικόνα 8_91: Δοκίμιο 50-3. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	238
Εικόνα 8_92: Δοκίμιο 50-4. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	239
Εικόνα 8_93: Δοκίμιο 50-5. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	239
Εικόνα 8_94: Δοκίμιο 50-6. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	239
Εικόνα 8_95: Δοκίμιο 50-7. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	240
Εικόνα 8_96: Δοκίμιο 50-8. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	240
Εικόνα 8_97: Δοκίμιο 50-9. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	240

Εικόνα 8_98: Δοκίμιο 100-1. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	241
Εικόνα 8_99: Δοκίμιο 100-2. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	241
Εικόνα 8_100: Δοκίμιο 100-3. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	241
Εικόνα 8_101: Δοκίμιο 100-4. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	242
Εικόνα 8_102: Δοκίμιο 100-5. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	242
Εικόνα 8_103: Δοκίμιο 100-6. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	242
Εικόνα 8_104: Δοκίμιο 100-7. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	243
Εικόνα 8_105: Δοκίμιο 100-8. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	243
Εικόνα 8_106: Δοκίμιο 100-9. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	243
Εικόνα 8_107: Δοκίμιο 200-1. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	244
Εικόνα 8_108: Δοκίμιο 200-2. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	244
Εικόνα 8_109: Δοκίμιο 200-3. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	244
Εικόνα 8_110: Δοκίμιο 200-4. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	245
Εικόνα 8_111: Δοκίμιο 200-5. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	245
Εικόνα 8_112: Δοκίμιο 200-6. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	245
Εικόνα 8_113: Δοκίμιο 200-7. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	246
Εικόνα 8_114: Δοκίμιο 200-8. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	246
Εικόνα 8_115: Δοκίμιο 200-9. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), κατά την εμφάνιση των αρχικών τοπικών αστοχιών (κέντρο), μετά την καθολική αστοχία (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	246
Εικόνα 8_116: Δοκίμιο Sr20. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), φόρτιση με μετατόπιση κεφαλής ~25mm (κέντρο), φόρτιση με κάθοδο κεφαλής ~50mm (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	247
Εικόνα 8_117: Δοκίμιο Sor20-1. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), φόρτιση με μετατόπιση κεφαλής ~25mm (κέντρο), φόρτιση με κάθοδο κεφαλής ~50mm (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	247
Εικόνα 8_118: Δοκίμιο Sor20-2. Πριν τη φόρτιση (αριστερά), φόρτιση με μετατόπιση κεφαλής ~25mm (κέντρο), φόρτιση με κάθοδο κεφαλής ~50mm (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	247
Εικόνα 8_119: Υπολογισμός μέσης τιμής. Πηγή: <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Mean">https://en.wikipedia.org/wiki/Mean</a> .....	250
Εικόνα 8_120: Διάγραμμα μέσων μέγιστων θλιπτικών φορτίων ανά οικογένεια δοκιμίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	251
Εικόνα 8_121: Υπολογισμός διασποράς δείγματος (αριστερά) και τυπικής απόκλισης δείγματος (δεξιά). Πηγή: <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_deviation">https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_deviation</a> .....	251
Εικόνα 8_122: Διάγραμμα συντελεστή μεταβλητότητας ανά οικογένεια δοκιμίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	253
Εικόνα 8_123: t-table. Πηγή: <a href="https://www.sjsu.edu/faculty/gerstman/StatPrimer/t-table.pdf">.https://www.sjsu.edu/faculty/gerstman/StatPrimer/t-table.pdf</a> .....	253
Εικόνα 8_124: t-table. Πηγή: <a href="https://www.sjsu.edu/faculty/gerstman/StatPrimer/t-table.pdf">.https://www.sjsu.edu/faculty/gerstman/StatPrimer/t-table.pdf</a> .....	255
Εικόνα 8_125: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων στο μέγιστο θλιπτικό φορτίο με μέγιστο θλιπτικό φορτίο για κάθε δοκίμιο, ανά οικογένεια. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	257
Εικόνα 8_126: Διάγραμμα μέσων τιμών κατακόρυφης μετατόπισης στο μέγιστο θλιπτικό φορτίο – μέγιστων μέσων τιμών θλιπτικών φορτίων ανά οικογένεια δοκιμίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	257



Εικόνα 8_127: Διάγραμμα μέσων τιμών αριθμού κόμβων και ράβδων και μέσων τιμών μέγιστων φορτίων σε θλίψη. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	258
Εικόνα 8_128: Διάγραμμα αριθμού κόμβων δοκιμίου – μέγιστων φορτίων σε θλίψη για την οικογένεια δοκιμίων 50. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	259
Εικόνα 8_129: Διάγραμμα αριθμού κόμβων δοκιμίου – μέγιστων φορτίων σε θλίψη για την οικογένεια δοκιμίων 100. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	260
Εικόνα 8_130: Διάγραμμα αριθμού κόμβων δοκιμίου – μέγιστων φορτίων σε θλίψη για την οικογένεια δοκιμίων 200. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	260
Εικόνα 8_131: Ραβδωτά δοκίμια μετά τις δοκιμές σε θλίψη και πριν την εξέταση των αστοχιών τους. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	262
Εικόνα 8_132: Διαγράμματα θλιπτικού φορτίου-κατακόρυφης μετατόπισης οικογένειας δοκιμίων 50. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	274
Εικόνα 8_133: Διαγράμματα θλιπτικού φορτίου-κατακόρυφης μετατόπισης οικογένειας δοκιμίων 100. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	275
Εικόνα 8_134: Διαγράμματα θλιπτικού φορτίου-κατακόρυφης μετατόπισης οικογένειας δοκιμίων 200. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	276
Εικόνα 8_135: Διαγράμματα θλιπτικού φορτίου-κατακόρυφης μετατόπισης οικογενειών δοκιμίων 50 (πράσινο χρώμα), 100 (μπλε χρώμα) και 200 (πορτοκαλί χρώμα) σε συνολική απεικόνιση. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	278
Εικόνα 8_136: Συμπαγές δοκίμιο Sr20 μετά τη δοκιμή σε αντοχή σε θλίψη. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	279
Εικόνα 8_137: Συμπαγές δοκίμιο Sor20-1 μετά τη δοκιμή σε αντοχή σε θλίψη. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	279
Εικόνα 8_138: Συμπαγές δοκίμιο Sor20-2 μετά τη δοκιμή σε αντοχή σε θλίψη. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	279
Εικόνα 8_139: Διάγραμμα δοκιμής σε θλίψη με τη μηχανή Galdabini για τα κύρια συμπαγή δοκίμια. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	280
Εικόνα 8_140: Διάγραμμα φόρτισης συμπαγούς κυλινδρικού δοκιμίου διαμέτρου 10cm και ύψους 20cm. Δοκίμιο Sr20. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	281
Εικόνα 8_141: Διάγραμμα φόρτισης συμπαγούς κυλινδρικού δοκιμίου διαμέτρου 10cm και ύψους 20cm. Δοκίμιο Sor20-1. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	282
Εικόνα 8_142: Διάγραμμα φόρτισης συμπαγούς κυλινδρικού δοκιμίου διαμέτρου 10cm και ύψους 20cm. Δοκίμιο Sor20-2. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	282
Εικόνα 9_1: Ενδεικτική παραμετρική διαμόρφωση βελτιωμένου δοκιμίου στην περιοχή των κόμβων. Αρχικό δοκίμιο 200-1 (αριστερά), βελτιωμένο δοκίμιο 200-1 (κέντρο), φυσικό βελτιωμένο δοκίμιο 200-1 κατασκευασμένο από PETG με χρήση 3d printing. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	293



## Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 2_1: Περιπτώσεις γεγονότων ανάλογα με το σκοπό και τον τρόπο που πραγματοποιούνται κατά Αριστοτέλη. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	27
Πίνακας 3_1: Χαρακτηριστικά γεννητριών τυχαίων αριθμών. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	78
Πίνακας 4_1: I.N. Αγ. Παρασκευής στο Παλαιοσέλλι Κόνιτσας. Διατομές κατά προσέγγιση δοκών οροφής Νότιου Κλίτους στέγης. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	99
Πίνακας 5_1: Πίνακας κατηγοριοποίησης περιορισμών κατά Lawson. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι περιπτώσεις περιορισμών που μπορούν να συσχετιστούν πιο εύκολα με την τυχαιότητα. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	166
Πίνακας 8_1: Συγκεντρωτικός πίνακας περιγραφής συμπαγών και ραβδωτών ψηφιακών δοκιμίων για τις οικογένειες 50, 100 και 200 σύμφωνα με τον αλγόριθμο παραγωγής τους από το λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	215
Πίνακας 8_2: Στατιστικά στοιχεία για κόμβους και ράβδους για τα ραβδωτά δοκίμια για την οικογένεια 50 σύμφωνα με τον αλγόριθμο παραγωγής τους από το λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	216
Πίνακας 8_3: Στατιστικά στοιχεία για κόμβους και ράβδους για τα ραβδωτά δοκίμια για την οικογένεια 100 σύμφωνα με τον αλγόριθμο παραγωγής τους από το λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	216
Πίνακας 8_4: Στατιστικά στοιχεία για κόμβους και ράβδους για τα ραβδωτά δοκίμια για την οικογένεια 200 σύμφωνα με τον αλγόριθμο παραγωγής τους από το λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	216
Πίνακας 8_5: Κύριες ρυθμίσεις για τις 3d εκτυπώσεις. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	224
Πίνακας 8_6: Συγκεντρωτικός πίνακας Α περιγραφής δεδομένων 3d εκτυπώσεων για τα κύρια δοκίμια. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	225
Πίνακας 8_7: Συγκεντρωτικός πίνακας Β περιγραφής δεδομένων 3d εκτυπώσεων για τα κύρια δοκίμια. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	226
Πίνακας 8_8: Συγκεντρωτικός πίνακας καταγραφής τιμών μέσων όρων μετρήσεων τιμών rixels για τις εγκάρσιες τομές των συμπαγών δοκιμίων στο λογισμικό RadiAnt DICOM Viewer. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	232
Πίνακας 8_9: Συγκεντρωτικός πίνακας καταγραφής μετρήσεων για τα πειράματα αντοχής σε θλίψη που πραγματοποιήθηκαν στη μηχανή Galdabini. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	248
Πίνακας 8_10: Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών για τα μέγιστα αναλαμβανόμενα θλιπτικά φορτία σε (N) για όλα τα δοκίμια και αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των μετρήσεων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	249
Πίνακας 8_11: Υπολογισμός διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% σύμφωνα με την κατανομή Student (t-distribution) για την κάθε οικογένεια δοκιμίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	254
Πίνακας 8_12: Υπολογισμών χαρακτηριστικών τιμών πιθανότητας 5% (5th percentile) για τα μέγιστα θλιπτικά φορτία για την κάθε οικογένεια δοκιμίων 50, 100 και 200 σε (N) για την κατανομή Student (t-distribution). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	255
Πίνακας 8_13: Κατακόρυφες μετατοπίσεις των δοκιμίων (σε mm) κατά το μέγιστο θλιπτικό φορτίο για την κάθε οικογένεια δοκιμίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	256
Πίνακας 8_14: Πίνακας μέσων τιμών κατακόρυφης μετατόπισης στο μέγιστο θλιπτικό φορτίο – μέγιστων μέσων τιμών θλιπτικών φορτίων ανά οικογένεια δοκιμίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	257
Πίνακας 8_15: Πίνακας μέσων τιμών αριθμού κόμβων και ράβδων και μέσων μέγιστων τιμών θλιπτικών φορτίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	258
Πίνακας 8_16: Αποτελέσματα πειράματος για τα δοκίμια οικογένειας 50. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	259
Πίνακας 8_17: Αποτελέσματα πειράματος για τα δοκίμια οικογένειας 100. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	260
Πίνακας 8_18: Αποτελέσματα πειράματος για τα δοκίμια οικογένειας 200. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	260
Πίνακας 8_19: Πίνακας συσχετισμού συντελεστών μεταβλητότητας αριθμού κόμβων/ράβδων και συντελεστή μεταβλητότητας μέγιστων φορτίων σε θλίψη για την κάθε οικογένεια δοκιμίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	261

Πίνακας 8_20: Πίνακας κατηγοριοποίησης αστοχιών για τα δοκίμια οικογενειών 50,100 και 200 ανάλογα με τη θέση των αστοχιών καθ' ύψος των δοκιμίων. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	263
Πίνακας 8_21: Κύριες μορφές αστοχίας και ενδεικτικές φωτογραφίες. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	264
Πίνακας 8_22: Πίνακας καταγραφής κύριων αστοχιών για τα δοκίμια οικογενειών 50, 100 και 200. Πηγή:Τ.Κουιμτζόγλου.....	265
Πίνακας 8_23: Υπολογισμοί μέτρου ελαστικότητας για τα συμπαγή δοκίμια. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.	283
Πίνακας 8_24: Επεξήγηση τύπων υπολογισμών για την εύρεση του μέτρου ελαστικότητας. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	283

## Παραρτήματα



## Παράρτημα Ι – Συνοπτική εξέλιξη στην τέχνη προς μια ρεαλιστική αναπαράσταση

Σε αυτό το παράρτημα γίνεται προσπάθεια να παρουσιαστεί με ενδεικτικά παραδείγματα η **εξέλιξη στην Τέχνη** όσον αφορά στα χαρακτηριστικά της τυχαιότητας και της ασάφειας. Τα χαρακτηριστικά αυτά φαίνεται ότι βαθμιαία εξαλείφονται, μέσω της διαμόρφωσης των τεχνικών, των μέσων και της αντίληψης των καλλιτεχνών, με στόχο τη δημιουργία έργων στα οποία κυριαρχεί η ρεαλιστική απεικόνιση της φύσης και των μορφών, **καταργώντας όσο το δυνατόν είναι εφικτό την τυχαιότητα**. Στη συνέχεια, μετά την κατάκτηση της ιδανικής μορφής, η ασάφεια και η τυχαιότητα αρχίζουν σταδιακά να επανέρχονται, όπως παρουσιάστηκε στο κυρίως μέρος της διατριβής.

Ως μεθοδολογικό εργαλείο χρησιμοποιείται μια **σύντομη** ιστορική αναδρομή στα κυριότερα ρεύματα στην Τέχνη, με την εξέταση **ενδεικτικών** χαρακτηριστικών έργων που μπορούν να τεκμηριώσουν την παραπάνω αναζήτηση, δίνοντας έμφαση στη γλυπτική, καθώς αυτή εμπεριέχει εξ' ορισμού την τρίτη διάσταση. Τα παραδείγματα που παρουσιάζονται προσπαθούν να επικεντρωθούν στην εξέλιξη της τεχνικής, της αντίληψης και των ικανοτήτων των δημιουργών τους, με την παράλληλη επαύξηση του ελέγχου στη διαδικασία και μείωση της ασάφειας και τυχαιότητας.

Στα παραδείγματα αυτά, γίνεται μια εστιασμένη αναφορά στην απόδοση της ανθρώπινης μορφής στην Τέχνη. Έχει ενδιαφέρον να παρατηρηθεί με ποιο τρόπο παρουσιάστηκε αυτή σε διάφορες ιστορικές περιόδους, σε σχέση με τα μέσα και ικανότητες που ήταν κάθε φορά διαθέσιμα. Αυτό που μπορεί να παρατηρηθεί και πάλι είναι μια σταδιακή μετάβαση από μια αρχικά αφαιρετική - ασαφή - τυχαία ικανότητα απόδοσης, προς μια σχεδόν τέλεια ρεαλιστική απεικόνιση και στη συνέχεια, μετά την κατάκτηση της μορφής, σε μια διάσπαση και εκ νέου αφαίρεσή της (βλέπε κυρίως μέρος διατριβής). Η απεικόνιση της ανθρώπινης μορφής ως θεματολογία είναι ένα διαχρονικό θέμα και έχει ενδιαφέρον πώς αυτή γίνεται αντιληπτή από τον καλλιτέχνη, πώς αποδίδεται και γιατί.

**Παλαιολιθικές βραχογραφίες** σε σπήλαια όπως αυτές που έχουν βρεθεί στο νησί **Sulawesi**<sup>474</sup> στην Ινδονησία με ηλικία τουλάχιστον 40.000 ετών ή αυτές του **Chauvet**<sup>475</sup> στη Γαλλία με ηλικία 30.000 ετών, αποτελούν ίσως τα παλαιότερα δείγματα έκφρασης τέχνης του ανθρώπινου είδους. Οι τοιχογραφίες αυτές αποτελούν απεικόνιση και αναπαράσταση θεμάτων της φύσης, όπως μορφές ζώων, σκηνών κυνηγιού και ανθρώπινης παρουσίας. Διακρίνονται από μια **προσπάθεια** πιστής και ρεαλιστικής απεικόνισης, η οποία όμως υλοποιείται με σχετική αφαίρεση των μορφών. Η αδυναμία της πιστής αναπαράστασης οφείλεται στο επίπεδο της τεχνικής και των μέσων απόδοσης.

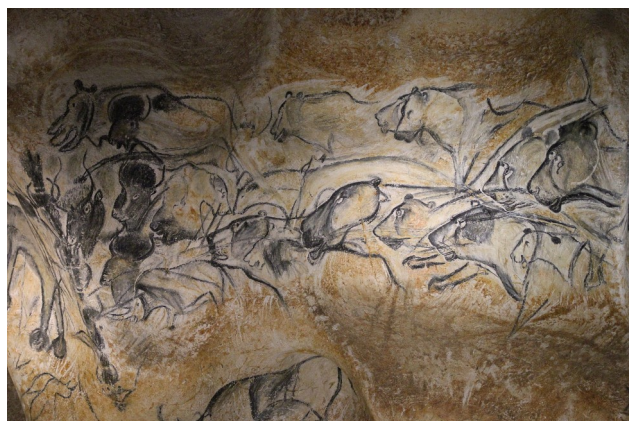
---

474 'Cave Paintings in Indonesia Redraw Picture of Earliest Art', ημερομηνία πρόσβασης 8 Ιούλιος 2019, <https://news.nationalgeographic.com/news/2014/10/141008-cave-art-sulawesi-hand-science/>.

475 Bradshaw Foundation, 'The Cave Art Paintings of the Chauvet Cave', Bradshaw Foundation, ημερομηνία πρόσβασης 8 Ιούλιος 2019, <http://www.bradshawfoundation.com/ Chauvet/>.



Εικόνα 1: Τοιχογραφία από το σπήλαιο του Sulawesi (40.000 χρόνια πριν). Πηγή: [Hands in Pettakere Cave detail.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hands_in_Pettakere_Cave_detail.jpg), Cave paintings from the Indonesian island of Sulawesi are situated in the Caves in the district of Maros were dated based on Uranium–thorium dating in a 2014 study. The oldest dated image was a hand stencil, given a minimum age of 39,900 years, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hands\\_in\\_Pettakere\\_Cave\\_detail.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hands_in_Pettakere_Cave_detail.jpg), εικόνα του/της: Cahyo, χρήστης: Benjaminfreyart, άδεια: CC BY-SA 4.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.



Εικόνα 2: Τοιχογραφία από το σπήλαιο του Chauvet (30.000 χρόνια πριν). Πηγή: [18\\_PanneauDesLions\(PartieDroite\)BisonsPoursuivisParDesLions.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:18_PanneauDesLions(PartieDroite)BisonsPoursuivisParDesLions.jpg), Lions Panel (right), the lions watch at the bison they pursue, bison look in front of the wall from which they escape. Wooden charcoal drawings with fading, flint scraping. Pont d'Arc cave (copy of the Chauvet Cave), [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:18\\_PanneauDesLions\(PartieDroite\)BisonsPoursuivisParDesLions.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:18_PanneauDesLions(PartieDroite)BisonsPoursuivisParDesLions.jpg), εικόνα του/της: Claude Valette, άδεια: CC BY-SA 4.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

Στο σπήλαιο του **Sulawesi** διακρίνεται περιοχή πάνω στο βράχο με ανθρώπινα χέρια σε τυχαία διάταξη στην κεντρική περιοχή τμήματος βράχου με τα αποτυπώματα να διαφοροποιούνται σε μέγεθος και γωνία περιστροφής (Εικόνα 1). Τα περιγράμματα είναι διεσπαρμένα σχετικά ομοιόμορφα και χωρίς επικαλύψεις. Η διαβάθμιση του χρώματος γύρω από τα περιγράμματα δημιουργεί ένα ακανόνιστο μωσαϊκό από σχήματα και χρώματα.





Εικόνα 3: Αντίγραφο Τοιχογραφίας από το σπήλαιο του Chauvet (30.000 χρόνια πριν). Πηγή: [22 PointsRouges.jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:22_PointsRouges.jpg), *Red points. Pigment : hematite. Pont d'Arc cave (copy of the Chauvet Cave)*, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:22\\_PointsRouges.jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:22_PointsRouges.jpg), εικόνα του/της: *Claude Valette*, άδεια: *CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license*. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.



Εικόνα 4: Τοιχογραφία σπηλαίου στην Altamira στην Ισπανία (20.000 χρόνια πριν). Πηγή: *Altamira bisons.jpg*, *Reproductions at the Museo del Mamut, Barcelona 2011*, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Altamira\\_bisons.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Altamira_bisons.jpg), εικόνα του/της: *Thomas Quine*, άδεια: *CC BY-SA 2.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 2.0 Generic license*.

Στο **Chauvet** διακρίνεται περιοχή αναπαράστασης με αγέλη από λιοντάρια που κυνηγούν βίσωνες (Εικόνα 2). Σε αυτή την περίπτωση δεν παρουσιάζεται κάποια τυχαιότητα, καθώς η αγέλη έχει συγκεκριμένη κατεύθυνση από δεξιά προς τα αριστερά και με τις μορφές των ζώων να είναι ζωγραφισμένες υπό στρώματα για να δημιουργείται η αίσθηση του βάθους. Σε μια άλλη εικόνα όμως στο ίδιο σπήλαιο παρουσιάζεται ένα σύνολο από μεγάλα στίγματα που φαίνεται να αναπαριστούν ένα μαμούθ (Εικόνα 3). Ενώ δεν υπάρχει σαφές περιγράμμα της μορφής, οι τελείες είναι τοποθετημένες σε περίπου ίσες αποστάσεις και τυχαίο τρόπο, έχοντας θέση τέτοια όμως ώστε να σέβονται τα όρια του ιδεατού περιγράμματος της μορφής ενός μαμούθ (Εικόνα 3). Η ακριβής διάταξη των κουκίδων στο «εσωτερικό» της μορφής δεν είναι τόσο σημαντική, όσο η υπόνοια ενός ιδεατού ορίου, καθώς το όριο είναι αυτό που ορίζει ουσιαστικά την αναπαράσταση της μορφής. Οι κουκίδες στο «εσωτερικό» θα μπορούσαν να έχουν άλλη διάταξη, τυχαία ξανά, αλλά ομοιόμορφη, δημιουργώντας και πάλι το ίδιο οπτικό αποτέλεσμα. Η βραχογραφία αυτή αναφέρεται ως το πρώτο παράδειγμα πουαντιγισμού στην τέχνη.

Στο σπήλαιο της **Altamira**<sup>476</sup> στην Ισπανία (χρονολογία 20.000 χρόνια πριν) παρουσιάζονται μορφές από βίσωνες σε παραλλαγές μορφών και στάσεων (Εικόνα 4). Διακρίνεται προσπάθεια πιστής αναπαράστασης τόσο στις μορφές όσο και στα χρώματα. Παρατηρείται επίσης διαφοροποίηση στη θέση των μορφών, καθώς πολλοί βίσωνες έχουν περιστροφή θέσης μέχρι και 180° και υπάρχουν παραλλαγές στη μορφή τους, με άλλα ζώα να παρουσιάζονται να στέκονται, άλλα να κοιμούνται ή να κάθονται. Οι διαφορετικές αυτές εκδοχές φαίνεται να έχουν μια γενική παράθεση σε οριζόντια διάταξη, αλλά κατά τις άλλες παραμέτρους παρουσιάζεται να υπάρχει τυχαιότητα.

Στο σπήλαιο **Cueva de las Manos** στην Αργεντινή (χρονολογία 13.000-9.000 χρόνια πριν) μπορεί κανείς να δει αναπαραστάσεις ανθρώπινων χεριών που έχουν δημιουργηθεί με την τεχνική του

476 'The Cave of Altamira', ημερομηνία πρόσβασης 8 Ιούλιος 2019, <http://www.bradshawfoundation.com/spain/altamira/index.php>.

stencil (Εικόνα 5). Οι απεικονιζόμενες παλάμες φαίνεται να έχουν τυχαία τοποθέτηση, προσανατολισμό και διαφοροποιήσεις στην κλίμακα και το χρώμα. Με μία πιο προσεκτική ματιά θα μπορούσε κανείς να παρατηρήσει ότι ο κύριος προσανατολισμός που έχουν οι παλάμες είναι προς τα πάνω, με διαφορετικές παραλλαγές στη γωνία. Είναι λογικό να υπάρχει αυτή η τοποθέτηση καθώς η θέση με τα δάχτυλα προς τα πάνω είναι ο πιο εύκολος τρόπος να ακουμπήσει κανείς το χέρι του πάνω στο βράχο όταν στέκεται όρθιος μπροστά του. Η διαφοροποίηση στις θέσεις οφείλεται πιθανότατα στους διαφορετικούς καλλιτέχνες που συμμετείχαν στη δημιουργία αυτού του έργου και τη διαδοχική εξέλιξη του. Η ποικιλία στα μεγέθη που έχουν οι παλάμες οφείλεται στον ίδιο λόγο. Η θέση που είναι τοποθετημένα τα περιγράμματα των χεριών στο βράχο δεν παρουσιάζει κάποια συγκεκριμένη διάταξη και παρατηρείται απλά αυξημένη πυκνότητα προς την κεντρική περιοχή, μια συγκέντρωση, δηλαδή μακριά από τα όρια του φυσικού βράχου. Οι παράμετροι συνεπώς που θα μπορούσε κανείς να διακρίνει ότι εμφανίζονται στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι: το μέγεθος των χεριών, οι γωνίες του προσανατολισμού τους, η χωροθέτηση και το χρώμα τους, με όλες τις επιμέρους μορφές να παρουσιάζουν ένα υψηλό βαθμό διαφοροποίησης – τυχαιότητας μεταξύ τους. Δεν μπορεί κανείς να μην κάνει το συλλογισμό ότι αυτή η βραχογραφία θα μπορούσε να είναι ένα σύγχρονο έργο τέχνης.

Η ανθρώπινη μορφή, αποδίδεται στην προϊστορική εποχή για παράδειγμα είτε με σχηματικό τρόπο είτε ως απλό περίγραμμα, είτε με αφαιρετική μορφή και γεωμετρία στην περίπτωση των ειδωλίων. Χαρακτηριστικές είναι οι απεικονίσεις ανθρώπινων μορφών σε παλαιολιθικά σπήλαια όπου ο κορμός και τα μέλη αποτελούνται από απλές γραμμές που συνοδεύονται από μια κουκίδα που αναπαριστά το κεφάλι (Εικόνα 6).

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι μορφές των ανθρώπων έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό τα υπερμεγέθη σε αναλογία άνω μέλη, σε σχέση με τον κορμό και τα κάτω μέλη, τα οποία σε όλες τις περιπτώσεις παρουσιάζονται σε έκταση και απόσταση από τον κορμό. Υπάρχει διαφοροποίηση στα μεγέθη των σωμάτων και τις διαστάσεις των μελών μεταξύ τους. Χαρακτηριστικό είναι το πάχος των γραμμών των εικονιζόμενων στοιχείων, το οποίο έχει ίδια διάσταση σε όλες τις φιγούρες, λόγω του εργαλείου βαφής, ίσως του δαχτύλου του καλλιτέχνη. Βασική έννοια του δημιουργού είναι να αποδοθεί κατά πρώτον η ανθρώπινη μορφή σχηματικά και αφαιρετικά, κατά δεύτερον να παρουσιαστεί το πλήθος της ομάδας και όχι να γίνει η τέλεια αναπαράσταση της μορφής. Με τη συγκεκριμένη τεχνοτροπία καλύπτονται επαρκώς οι παραπάνω απαιτήσεις, με αποτέλεσμα να συνυπάρχουν στη σύνθεση οι βασικές παράμετροι που αναφέρθηκαν, παράλληλα με ένα σχετικά μεγάλο βαθμό ασάφειας στην απεικόνιση. Στην παλαιολιθική τέχνη, η απεικόνιση δίνει έμφαση στα χαρακτηριστικά και παραμέτρους που είναι περισσότερο σημαντικές, όπως για παράδειγμα τα μεγάλα χέρια για τους κυνηγούς της ομάδας, ως μέσο επιβίωσης και ικανότητας, και τα μεγάλα στήθη και γλουτοί της γυναικείας μορφής, ως ένδειξη γονιμότητας. Αυτές είναι βασικές παράμετροι οι οποίες παρουσιάζουν τυχαία παραλλαγή εντός συγκεκριμένων ορίων. Δεν θα περίμενε να δει κανείς στο παράδειγμα του Monte Valonsandero ένα μέλος της ομάδας με κοντά χέρια, ή μια Αφροδίτη του Avedeenο με μικρά στήθη. Η έννοια των παραμέτρων και των ορίων στην απεικόνιση είναι και πάλι εμφανής με τυχαίες διακυμάνσεις σε τιμές μέσα στο εύρος αυτών των ορίων.



Εικόνα 5: Τοιχογραφία στο σπήλαιο Cueva de las Manos στην Αργεντινή (13.000-9.000 χρόνια πριν). Πηγή: [SantaCruz-CuevaManos-P2210651b.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:SantaCruz-CuevaManos-P2210651b.jpg), Hands at the Cuevas de las Manos upon Río Pinturas, near the town of Perito Moreno in Santa Cruz Province, Argentina. Picture taken by me in 2005, <https://en.wikipedia.org/wiki/File:SantaCruz-CuevaManos-P2210651b.jpg>, εικόνα του/της: [Mariano](#), άδεια: [GNU Free Documentation License, Version 1.2](#), [CC BY-SA 3.0](#), [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license](#), [CC BY-SA 2.5](#), [Creative Commons Attribution-Share Alike 2.5 Generic license](#).

Εικόνα 6: Αναπαραστάσεις ανθρώπων σε σπήλαιο στο Monte Valonsadero στην Ισπανία (μετα-Παλαιολιθική σχηματική τέχνη). Πηγή: [Valonsadero \(Soria\) Cave Art.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Valonsadero_(Soria)_Cave_Art.jpg), Cave art in Valonsadero (Soria), Spain, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Valonsadero \(Soria\)\\_Cave\\_Art.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Valonsadero_(Soria)_Cave_Art.jpg), εικόνα του/της: [ShaiHuludKitty](#), άδεια: [CC BY-SA 4.0](#), [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license](#). Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, των τεχνικών και της αντίληψης του χώρου, εξελίσσεται και η απεικόνιση της αναπαράστασης της ανθρώπινης μορφής. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται χαρακτηριστικά δείγματα αγαλματιδίων γυναικείων μορφών από διαφορετικές ιστορικές περιόδους και πολιτισμούς σε χρονολογική σειρά. Οι μορφές αυτές, χωρίς να αποτελούν απαραίτητα τα κύρια και αποκλειστικά αντιπροσωπευτικά δείγματα της εκάστοτε περιόδου, τεχνοτροπίας και περιοχής, δίνουν μια γενική εικόνα των τεχνικών δυνατοτήτων και της καλλιτεχνικής και αισθητικής αντιμετώπισης που επικρατεί τότε.

Στα διάφορα τεχνουργήματα και εργαλεία της περιόδου, παρατηρούνται ενδείξεις παραλλαγών και διαφοροποιήσεων βασικών μορφών.

Στο παράδειγμα των αγαλματιδίων του **Avdeevo**<sup>477</sup> στη Ρωσία, παρατηρείται η παραλλαγή της βασικής μορφής μιας γυναικείας φιγούρας. Οι Αφροδίτες του Avdeevo όπως χαρακτηριστικά ονομάζονται, είναι 10 στεατοπυγικά αγαλματίδια ύψους 10cm έως 20cm από χαυλιόδοντα με παλαιότητα περίπου 21.000 ετών.

Στην Εικόνα 7 παρουσιάζονται 4 από τα αγαλματίδια Avdeevo (a, b, c, d) και δύο ακόμα αγαλματίδια, η Αφροδίτη του Willendorf (e) και η Αφροδίτη του Hohle Fels (f). Μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις ομοιότητες αλλά και τις διαφοροποιήσεις των χαρακτηριστικών των αγαλματιδίων. Τα τρία αγαλματίδια (b, c, d) έχουν περίπου τις ίδιες διαστάσεις. Όλα τα αγαλματίδια, μορφολογικά περιγράφονται από τα ίδια στοιχεία, τα οποία όμως διαφοροποιούνται στις διαστάσεις και τις αναλογίες. Πρόκειται για μία γυναικεία μορφή με τα χέρια πίσω από την πλάτη όπου ξεχωρίζει το κεφάλι, ο κορμός του σώματος, το στήθος, η κοιλιακή χώρα και τα πόδια. Κάθε μία από τις μορφές έχει διαφορετική διάσταση στο συνολικό πλάτος και διαφορετική κλίμακα στα επιμέρους μορφολογικά στοιχεία που την αποτελούν. Η προσπάθεια που έχει γίνει για μεταξύ τους ομοιότητα είναι εμφανής (για τα b, c, d) τόσο στο υλικό όσο στη μορφή και την επεξεργασία. Θα πρέπει να υποθέσει κανείς ότι διαφοροποιήσεις που προκύπτουν από την διάθεση της πρώτης ύλης (διαστάσεις χαυλιόδοντα από τον οποίο σκαλίζονται οι μορφές) και από την τεχνική επεξεργασίας τους συντελούν στη δημιουργία μορφών που έχουν παραλλαγές μεταξύ τους, προσαρμοσμένες στο γενικό σχήμα της πρώτης ύλης.

Μια συνοπτική κατηγοριοποίηση υπό τη μορφή γεωμετρικών παραμέτρων που μπορούν να περιγράψουν τα αγαλματίδια θα μπορούσε να είναι η παρακάτω:

1. Συνολικό ύψος
2. Συνολικό πλάτος
3. Διαστάσεις κεφαλιού
4. Σχήμα κεφαλιού
5. Διαστάσεις στήθους
6. Διαστάσεις κοιλιακής χώρας
7. Διαστάσεις ποδιών

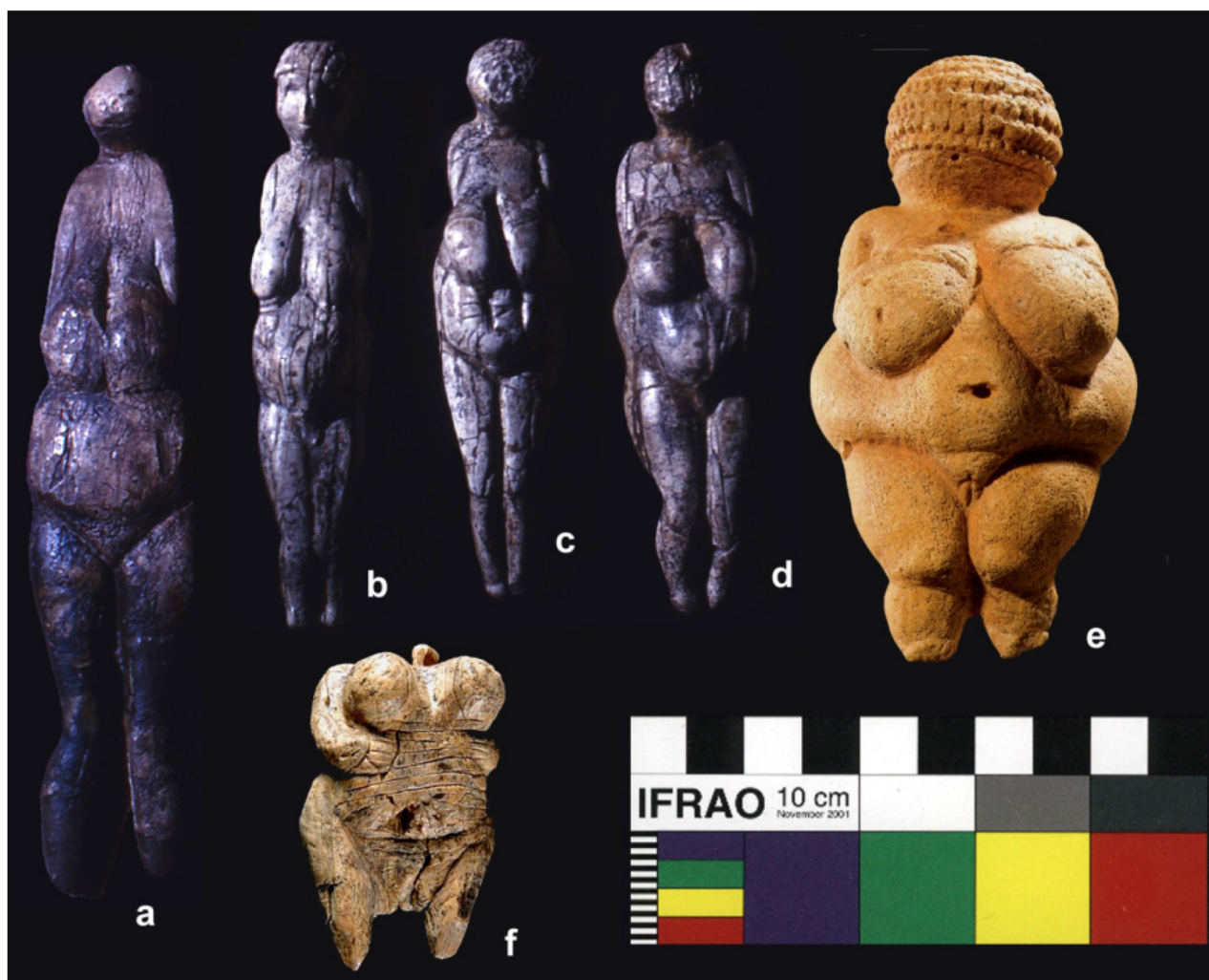
Οι παράμετροι 1 και 2, οι συνολικές διαστάσεις δηλαδή των μορφών, είναι κύριες παράμετροι. Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι δευτερεύουσες και προσαρμόζονται στις κύριες παραμέτρους. Εάν κάποιος επιχειρούσε να υλοποιήσει μία παραλλαγή ενός τέτοιου αγαλματιδίου με τα ίδια χαρακτηριστικά, θα ξεκινούσε με την επιλογή των βασικών διαστάσεων (παράμετροι 1 και 2) και στη

---

477 'Avdeevo - a Paleolithic site with strong links to Kostenki', ημερομηνία πρόσβασης 9 Ιούλιος 2019, <https://www.donsmaps.com/avdeevo.html>.

συνέχεια θα μορφοποιούσε τα επιμέρους στοιχεία. Προκειμένου να υπάρχει μία μορφολογική συνέπεια στα αρχικά αγαλματίδια θα έπρεπε οι τιμές των παραμέτρων της παραλλαγής να βρίσκονται εντός κάποιων συγκεκριμένων ορίων, ελάχιστων και μέγιστων, με τιμές κοντινές σε αυτές των αρχικών μορφών.

Παρατηρείται επίσης ότι δεν υπάρχει ακρίβεια στις διαστάσεις, που άλλωστε δεν θα μπορούσε να συμβεί λόγω των προαναφερθέντων περιορισμών, και γι' αυτό το λόγο υπάρχει μια ελεγχόμενη τυχαιότητα των μορφών, εντός όπως αναφέρθηκε συγκεκριμένων ορίων. Συνεπώς οι συγκεκριμένες μορφές μπορούν να θεωρηθούν ως παραλλαγές του ίδιου τύπου και όχι ως εντελώς διαφορετικά - μοναδικά (unique) αντικείμενα, διατηρώντας παράλληλα το καθένα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του που το ξεχωρίζουν από τα υπόλοιπα.



Εικόνα 7: 4 από τις Αφροδίτες το Anveeno ύψους περίπου 10-15 εκ. (a, b, c, d), η Αφροδίτη του Willendorf (e) και η Αφροδίτη του Hohle Fels (παλαιότητα 25.000-35.000 χρόνια). Πηγή: <https://www.mdpi.com/2076-0752/3/2/245>. Robert G. Bednarik, *Pleistocene Paleoart of Europe*, άδεια: CC BY 3.0, Creative Commons Attribution license, <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>.

Η ίδια λογική των παραλλαγών μπορεί να παρατηρηθεί στις διαστάσεις και σχήματα εργαλείων κοπής που βρέθηκαν στη συγκεκριμένη ανασκαφή<sup>478</sup>. Στο σύνδεσμο στην διεύθυνση <https://journals.openedition.org/paleo/docannexe/image/599/img-4-small580.png>, διακρίνονται δύο κύριοι τύποι, τα επιμήκη και τα πεπλατυσμένα εργαλεία, με κύριες επιφάνειες κοπής κατά γενική προσέγγιση στο άνω και κάτω άκρο τους και σε δευτερεύουσες σε όποια άλλη πλευρά ευνοεί το γενικό σχήμα του λίθου. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει μια προσπάθεια τυποποίησης, αλλά αυτή αναγκαστικά προσαρμόζεται και πάλι στη γεωμετρία του πρωτογενούς υλικού, καθώς πρέπει να προκύψει το εργαλείο με τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, αλλά και τη λιγότερη επεξεργασία.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στο να μην υπάρχουν δύο εντελώς ίδια εργαλεία και να παρουσιάζεται μια πολύ μεγάλη ποικιλία μη προκαθορισμένων παραλλαγών των βασικών τύπων. Οι κύριες παράμετροι που ορίζουν και πάλι τα εργαλεία είναι οι γενικές διαστάσεις και σχήμα, ενώ οι δευτερεύουσες παράμετροι αφορούν στις περιοχές κοπής. Το αποτέλεσμα προσαρμογής αυτών των παραμέτρων στο πρωτογενές υλικό αποδίδει ένα αποτέλεσμα που εμπεριέχει την τυχαιότητα ως ένα βαθμό.

Στην Εικόνα 8 (α-κ) του άρθρου στο σύνδεσμο στη διεύθυνση:

<https://www.researchgate.net/publication/>

[332111863\\_The\\_Late\\_Gravettian\\_Site\\_of\\_Kostenki\\_21\\_Layer\\_III\\_Russia\\_a\\_Chronocultural\\_Reassessment\\_Based\\_on\\_a\\_New\\_Interpretation\\_of\\_the\\_Significance\\_of\\_Intra-site\\_Spatial\\_Patterning](https://www.researchgate.net/publication/332111863_The_Late_Gravettian_Site_of_Kostenki_21_Layer_III_Russia_a_Chronocultural_Reassessment_Based_on_a_New_Interpretation_of_the_Significance_of_Intra-site_Spatial_Patterning),

παρουσιάζεται μια σειρά από **λίθινες αιχμές** της ίδιας περιοχής αλλά διαφορετικού τύπου<sup>479</sup>. Παρατηρείται μια μονόπλευρη εσοχή στις επιμήκεις αμφίπλευρες αιχμές. Και πάλι παρατηρείται μια διαφοροποίηση - τυχαιότητα στις μορφές, η οποία είναι προσαρμοσμένη στο πρωτογενές υλικό και τις κύριες παραμέτρους του συγκεκριμένου τύπου, δηλαδή γενικές διαστάσεις και σχήμα και μονόπλευρη εσοχή στο μέσο περίπου του μήκους του εργαλείου.

Με την πάροδο του χρόνου, οι τεχνικές και τα εργαλεία συνεχώς εξελίσσονται. Με την τεχνική εξέλιξη, η ασάφεια τόσο στα περιγράμματα όσο και στις μορφές που παρατηρήθηκε στις προηγούμενες παραγράφους μειώνεται όλο και περισσότερο. Η τεχνική ικανότητα είναι μια παράμετρος που αυξάνει την ομοιομορφία και απομακρύνει την τυχαιότητα στην απόδοση.

Στην Εικόνα 8 διακρίνονται **αιχμές βελών** που βρέθηκαν σε ανασκαφές στο **Plouvoirn** στη Βρετάννη και ανήκουν στην πρώιμη εποχή του χαλκού<sup>480</sup>. Οι αιχμές που απεικονίζονται ανήκουν στο πρώτο στάδιο (2150–1950 π.Χ.) και είναι κατασκευασμένες από διαφορετικά είδη πετρωμάτων. Το σχήμα των αιχμών ακολουθεί την ίδια μορφή και διακρίνεται ότι γίνεται προσπάθεια για τυποποίηση, με εμφανείς

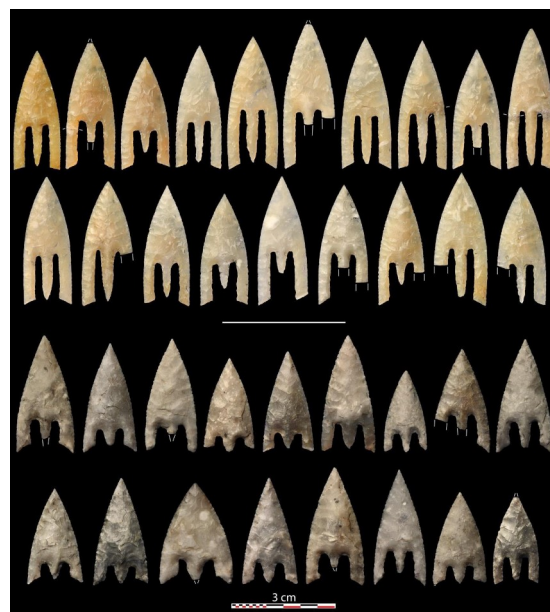
---

478 Andey A. Sinitsyn, 'Variabilité du Gravettien de Kostienki (Bassin moyen du Don) et des territoires associés', *PALEO. Revue d'archéologie préhistorique*, τχ. 19 (30 Δεκέμβριος 2007): 181–201, <http://journals.openedition.org/paleo/599>.

479 N. Reynolds κ.ά., 'The Late Gravettian Site of Kostënki 21 Layer III, Russia: A Chronocultural Reassessment Based on a New Interpretation of the Significance of Intra-Site Spatial Patterning', *Journal of Paleolithic Archaeology* 2, τχ. 2 (1 Ιούλιος 2019): 160–210, <https://doi.org/10.1007/s41982-018-0018-6>.

480 Clément Nicolas και Colas Guéret, 'Armorican Arrowhead Biographies: Production and Function of an Early Bronze Age Prestige Good from Brittany (France)', *Journal of Lithic Studies* 1, τχ. 2 (15 Σεπτέμβριος 2014): 101–28, <https://doi.org/10.2218/jls.v1i2.1126>.

μικρές παραλλαγές στις γενικές διαστάσεις των αιχμών. Αυτό που είναι ενδιαφέρον στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ότι παρατηρείται μια μεγάλη ποικιλία στους χρωματισμούς, η οποία οφείλεται στο είδος των πετρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Η πρώτη ύλη είναι είναι διάφανοι και ημιδιάφανοι πυριτόλιθοι (flint) διαφορετικών διαβαθμίσεων, χρώματος γκρι, πορτοκαλί, κόκκινου και μελιού. Η πρωταρχική έννοια των τεχνιτών είναι η συνέπεια στη γενική μορφή και διαστάσεις και είναι εμφανές ότι δεν υπάρχει καμία δέσμευση όσον αφορά στις παραλλαγές χρήσης του υλικού και επομένως στο χρώμα. Αυτή η διαφοροποίηση εμπεριέχει την παράμετρο της τυχαιότητας όσο αφορά στην επιλογή του υλικού, με αποτέλεσμα σε τυχαιότητα στο χρώμα, και πιθανώς και στις μηχανικές αντοχές των αντικειμένων λόγω διαφοροποίησης του υλικού.



Εικόνα 8: Αιχμές βελών τύπου Kerneven στο Plouhorne στη Βρετανία, σταδίου 1 (2150–1950 π.Χ.). Πρώιμη εποχή του χαλκού (2150–1700 π.Χ.). Πηγή: Clément Nicolas και Colas Guéret, 'Armorican Arrowhead Biographies: Production and Function of an Early Bronze Age Prestige Good from Brittany (France)', *Journal of Lithic Studies* 1, τχ. 2 (15 Σεπτέμβριος 2014): 101–28, <https://doi.org/10.2218/jls.v1i2.1126>, άδεια: CC BY 4.0, Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) licence. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

Εικόνα 9: Αιχμές βελών τύπου Kerneven στο Saint-Thégonnec, Finistère (πάνω) και στο Lescongar στο Plouhinec, Finistère (κάτω) στη Βρετανία, σταδίου 2 (1950–1750 π.Χ.). Πρώιμη εποχή του χαλκού (2150–1700 π.Χ.). Πηγή: Clément Nicolas και Colas Guéret, 'Armorican Arrowhead Biographies: Production and Function of an Early Bronze Age Prestige Good from Brittany (France)', *Journal of Lithic Studies* 1, τχ. 2 (15 Σεπτέμβριος 2014): 101–28, <https://doi.org/10.2218/jls.v1i2.1126>, άδεια: CC BY 4.0, Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) licence. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

**Οι αιχμές βελών** της ακόλουθης περιόδου (1950-1750 π.Χ.) (Εικόνα 9) παρουσιάζουν την ίδια ομοιογένεια στη μορφή, αλλά πρόσθετα παρατηρείται μια ομοιογένεια και στο υλικό/χρώμα. Επικρατούν δύο τύποι υλικών: οι γκρι και οι μελί πυριτόλιθοι. Η ομογενοποίηση και στην παράμετρο του υλικού/χρώματος μπορεί να υποδηλώνει την μετά από δοκιμές επιλογή για χρήση του καταλληλότερου τύπου πετρώματος με συγκεκριμένες ιδιότητες και αντοχές ή βασίζεται στην επαρκή ποσότητα της ίδιας πρώτης ύλης, παράμετροι που ακολουθώντας συντελούν και στην οπτική ομοιογένεια.

Στα συμπεράσματα της σχετικής δημοσίευσης <sup>481</sup> γίνεται η υπόθεση ότι η έλλειψη φθοράς στις αιχμές και άλλοι παράγοντες υποδηλώνουν ότι δεν ήταν χρηστικές, αλλά ήταν σύμβολα ισχύος και είχαν ίσως και τελετουργική χρήση. Η μορφή λοιπόν (και η επιδιωκόμενη ομοιομορφία) αποτελούν κύριους παράγοντες της κατασκευής τους.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η χρήση του μετάλλου (χαλκού, ορείχαλκου και σιδήρου) έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τυποποίησης στην παραγωγή των αντικειμένων. Η τυποποίηση στις περιπτώσεις αντικειμένων που παράγονται σε μεγάλους αριθμούς συμβαδίζει με την ομοιομορφία και την επανάληψη, με την τυχαιότητα να εμφανίζεται σε λιγότερες περιοχές και σε μικρότερο βαθμό.

Η τεχνολογία της επεξεργασίας του μετάλλου με τη χρήση μήτρας δίνει τη δυνατότητα για επανάληψη της διαδικασίας παραγωγής ενός αντικειμένου με βάση τις ίδιες γεωμετρικές παραμέτρους, αυτές δηλαδή που καθορίζονται από τη μήτρα. Προκύπτει δηλαδή η έννοια του **αντίγραφου αντικειμένου**, το οποίο δεν διαφοροποιείται (ή διαφοροποιείται ελάχιστα) από τα υπόλοιπα αντίγραφα. Με αυτό τον τρόπο η τυχαιότητα στη μορφή σχεδόν εκμηδενίζεται.



Εικόνα 10: Αιχμές βελών από ορείχαλκο (1η χιλιετία π.Χ.) από την περιοχή της Υπερκαυκασίας και του Β. Ιράν.

Πηγή:

<https://www.metmuseum.org/art/collection/search/327445>, άδεια: CC0 1.0, [Creative Commons Zero \(CC0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Εικόνα 11: Αιχμές βελών από ορείχαλκο στην Κίνα, Φυλή Υγυε. Πηγή: Yuyue People: Eastern Zhou Bronze Arrowheads,

<https://www.flickr.com/photos/101561334@N08/16474598954/in/photolist-r6NCiy-r6NjPf-87heCf-r717hM-hbD9PW-WdjGBx-g8Ah1H-27Kxvms-fXxjzW-g8xziq-5uQmT1-g8yg2F-KLhbT9-g8xDTW-hbD48W-MZfjLc-gqYj8n-26663Eq-g5eecV-gtZQik-rq9yqP-gqYk7M-KP3m7t-gqYEG9-Mx8vc7-h8Hdve-2bMR6JC-h8HcRD-h8JvN6-gr1Z66-guGdCm-P8vbDr-nm651o-syzwwK-hbU6ub-h8Lds1-gEn1z2-h8L2yt-h8Mk68-h8Ldj5-h8Mk4e-h8L8Sw-h8L8yW-h8L2ti-h8MjJX-b1WY3F-ssHqji-h8L92Q-h8L2GK-2a8bubG/>, εικόνα του/της: Gary Todd, άδεια: CC0 1.0, [Creative Commons Zero \(CC0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



**Οι αιχμές** που παρουσιάζονται στην Εικόνα 10 χρονολογούνται στην 1η χιλιετία π.Χ. από την περιοχή της Υπερκαυκασίας και του Β. Ιράν και είναι φτιαγμένες από χυτό ορείχαλκο με τη χρήση μήτρας <sup>482</sup>. Παρατηρείται ότι οι πρώτες 5 αιχμές ανήκουν στην ίδια κατηγορία και είναι σχεδόν πανομοιότυπες. Η 6η αιχμή είναι παραπλήσιας μορφής, αλλά προέρχεται σαφώς από άλλη μήτρα. Η ίδια τυποποίηση παρατηρείται σε αιχμές βελών πάλι από ορείχαλκο αλλά από την Κίνα (Εικόνα 11), όπου μακροσκοπικά η τυποποίηση φαίνεται να είναι ακόμα μεγαλύτερη.

Θα πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι οι μορφές των αντικειμένων και πάλι μπορούν να περιγραφούν από **γεωμετρικές παραμέτρους** διαστάσεων και αναλογιών. Η διαφορά έγκειται στο ότι οι παράμετροι αυτές στα διαφορετικά αντίγραφα λαμβάνουν τιμές οι οποίες έχουν ένα πολύ περιορισμένο εύρος, ελάχιστου και μέγιστου, το εύρος που ορίζεται από τη μήτρα, με αποτέλεσμα να παραμένουν στην ουσία **σταθερές**. Οι διαφοροποιήσεις σε αυτή την περίπτωση είναι ελάχιστες και επομένως οι παραλλαγές είναι μηδαμινές. Η σταδιακή σταθεροποίηση των γεωμετρικών παραμέτρων γύρω από μια συγκεκριμένη τιμή, οδηγεί τη διαδικασία στη δημιουργία μιας νέας παραμέτρου, αυτής της ομοιομορφίας-ομοιογένειας, όπου το ζητούμενο είναι η πιστότητα και η ακρίβεια στην κατασκευή και συγκεκριμένα η ομοιότητα στο ιδανικό-αρχετυπικό-πρότυπο αντικείμενο. Το αρχετυπικό αντικείμενο είναι το αρνητικό γεωμετρικό αποτύπωμα στην ύλη, το οποίο είναι η μήτρα για όλα τα υπόλοιπα αντίγραφα και λειτουργεί ως **όριο** και στοιχείο **ελέγχου** της διαδικασίας και του αποτελέσματος. Η τεχνολογία είναι λοιπόν το μέσο με το οποίο βελτιώνεται η κατασκευή, επιτυγχάνεται η ακρίβεια και απομακρύνεται η ασάφεια και τυχαιότητα.

Η ανθρώπινη μορφή στον **Αιγυπτιακό πολιτισμό** εμφανίζεται τόσο στη γλυπτική όσο στη ζωγραφική. Και στις δύο αυτές τέχνες η μορφή παρουσιάζεται με βάση πολύ αυστηρούς κανόνες απεικόνισης και τεχνοτροπίας καθώς στόχος της αιγυπτιακής τέχνης είναι η μνημειακότητα, η καταγραφή και η διαιώνιση. Όπως αναφέρει ο Gombrich, στόχος της Αιγυπτιακής τέχνης ήταν η πληρότητα και όχι η ομορφιά <sup>483</sup>. Η αρχή αυτή δικαιολογεί τον τρόπο απεικόνισης των μορφών με τον ιδιαίτερο τρόπο που μπορεί να μεταφέρει ταυτόχρονα τις περισσότερες πληροφορίες.

Λόγω της ανάγκης της πληρότητας της πληροφορίας, οι μορφές στις τοιχογραφίες παρουσιάζονται να έχουν σαφή και οριοθετημένα περιγράμματα, είναι εμπλουτισμένες με λεπτομέρειες και παρουσιάζονται όσο το δυνατόν περισσότερο αναπαραστατικές με ταυτόχρονες μετωπικές και πλευρικές προβολές διαφορετικών περιοχών του σώματος. Η σύνθεση των διαφορετικών ταυτόχρονων προβολών γίνεται για να παρουσιαστεί η πιο αναγνωρίσιμη όψη της κάθε περιοχής του σώματος. Τα κεφάλια παρουσιάζονται σε πλαϊνή προβολή, τα μάτια μετωπικά, ο κορμός του σώματος μετωπικά, τα πόδια σε πλαϊνή προβολή (Εικόνα 12). Ο τρόπος αυτός συνδυασμού απεικονίσεων σε ένα στιγμιότυπο εμφανίζεται και στα ιερογλυφικά σε πιο αφαιρετική μορφή.

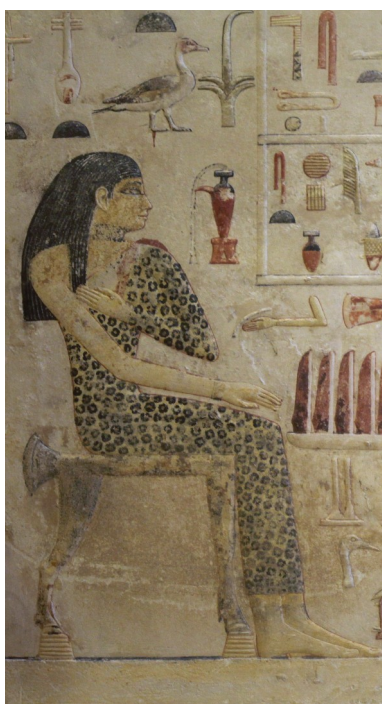
Στην Εικόνα 13 παρουσιάζεται το άγαλμα του **Μυκερίνου και Βασίλισσας** από την περίοδο του Παλαιού βασιλείου. Οι μορφές έχουν πιο ισορροπημένες αναλογίες και γενικές διαστάσεις σε σχέση με τα προηγούμενα παραδείγματα και υπάρχει σαφής πρόθεση για ρεαλιστική αναπαράσταση. Οι μορφές είναι τοποθετημένες αυστηρά μετωπικά, ενώ ακόμα παρατηρείται ότι τα άνω άκρα δεν έχουν αποκολληθεί από τον κορμό και οι δύο μορφές είναι στην ουσία ενωμένες δίπλα δίπλα σαν να

482 'Arrowhead | Iron Age | The Met', The Metropolitan Museum of Art, i.e. The Met Museum, ημερομηνία πρόσβασης 10 Ιούλιος 2019, <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/327445>.

483 E. H. Gombrich, *Το χρονικό της τέχνης*, Δεύτερη ελληνική έκδοση (Αθήνα: Μορφωτικό Ίδρυμα Εθνικής Τραπέζης, 1998), 60.

πρόκειται για ένα ουσιαστικά άγαλμα. Τα πρόσωπα και τα ενδύματα έχουν λεπτομερή χαρακτηριστικά.

Στην Εικόνα 14 παρουσιάζεται ξυλόγλυπτη μορφή της βασίλισσας Νεφερτίτης που προέρχεται από την Αίγυπτο (~1370-~1330 π.Χ.). Παρατηρείται και πάλι η τάση προσπάθειας ρεαλιστικής αναπαράστασης, η οποία ενισχύεται από την προσθήκη λεπτομερειών στο κεφάλι και ακόμα περισσότερο στο πρόσωπο. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι έχει κατακτηθεί περισσότερο η 3η διάσταση. Η μορφή παρουσιάζεται τρισδιάστατη, όχι μόνο στο μπροστινό τμήμα αλλά και στο πίσω μέρος της. Η προσπάθεια ρεαλιστικής αναπαράστασης είναι απόλυτα επιτυχής και δεν αφήνει κανένα περιθώριο για ασάφεια.



Εικόνα 12: Στήλη, Πριγκίπισσα Nefertabet πριν το γεύμα (Αίγυπτος, 2590-2565 π.Χ.) Πηγή: Princess Nefertabet before her meal-E 15591-IMG 9645-gradient.jpg, Stele of Nefertabet-E 15591, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Princess\\_Nefertabet\\_before\\_her\\_meal-E\\_15591-IMG\\_9645-gradient.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Princess_Nefertabet_before_her_meal-E_15591-IMG_9645-gradient.jpg), εικόνα του/της: Rama, άδεια: CC BY-SA 3.0 FR, Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 France license, CC BY-SA 2.0 FR, Creative Commons Attribution-Share Alike 2.0 France license.



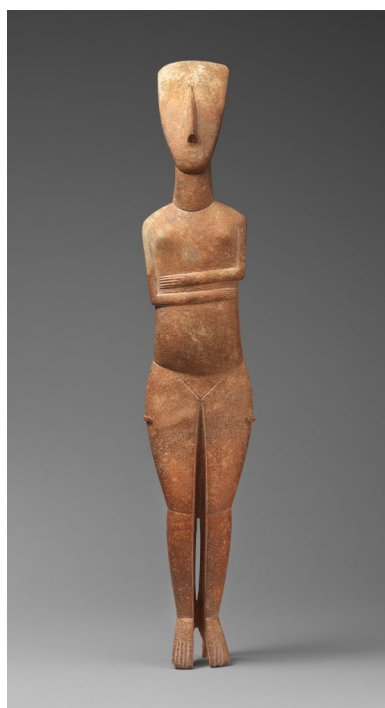
Εικόνα 13: Ο Βασιλιάς Μυκερίνος και Βασίλισσα (Αίγυπτος, 2490-2472 π.Χ.). Πηγή: King Menkaura and queen-11.1738-IMG 4928-white.jpg, King Menkaura (Mycerinus) and queen, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:King\\_Menkaura\\_and\\_queen-11.1738-IMG\\_4928-white.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:King_Menkaura_and_queen-11.1738-IMG_4928-white.jpg), εικόνα του/της: Rama, άδεια: CC BY-SA 3.0 FR, Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 France license, CC BY-SA 2.0 FR, Creative Commons Attribution-Share Alike 2.0 France license.



Εικόνα 14: Nefertiti (~1370 π.Χ. – ~1330 π.Χ.). Πηγή: The Queen Nefertiti - III, <https://www.flickr.com/photos/69716881@N02/8526185878>, εικόνα του/της: Egisto Sani, άδεια: CC BY-NC-SA 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/>.

Αυτό που μπορεί να παρατηρηθεί είναι ότι η ανάγκη για καταγραφή και απεικόνιση περισσότερης πληροφορίας αναπόφευκτα οδηγεί στην αύξηση της πολυπλοκότητας, η οποία υπακούει σε ένα σύνολο από αυστηρούς κανόνες. Η μετάβαση από το πιο απλοϊκό στο πιο σύνθετο, από το μη καθορισμένο στο σχηματοποιημένο γίνεται σταδιακά. Η ανάγκη να εξυπηρετηθεί μια αρχή (η πληρότητα και η καταγραφή) εισάγει παραμέτρους που αρχικά δεν υπήρχαν, με σκοπό να ελεγχθεί το τελικό προϊόν της εργασίας, ώστε να μην παρεκκλίνει από τις όποιες προδιαγραφές. Συγκεκριμένα για τα ιερογλυφικά, αυτό γίνεται αντιληπτό ότι είναι πολύ σημαντικό, καθώς για να είναι σαφής και αναγνωρίσιμη μια γραφή, ειδικά όταν πρόκειται για γραφή μνημειακού τύπου, πρέπει να υπάρχει κάποιου είδους τυποποίηση και επαναληψιμότητα στην αναπαραγωγή των μορφών-γραμμάτων.

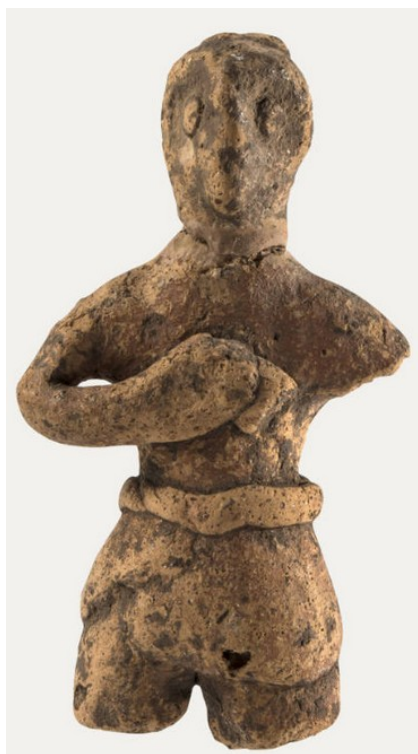
Στην Εικόνα 15 παρουσιάζεται **Κυκλαδικό ειδώλιο γυναικείας μορφής** (2600-2400 π.Χ.). Σε σχέση με το αγαλματίδιο της Αφροδίτης του Willendorf μπορεί να παρατηρηθεί ότι υπάρχει σαφής βελτίωση στις αναλογίες της αναπαράστασης συγκρίνοντάς το με την πραγματική ανθρώπινη μορφή, τόσο καθ' ύψος και πλάτος, όσο και σε διατομές κορμού και μελών. Εξαιρεση αποτελούν οι αναλογίες του κεφαλιού, παρά το ότι παρουσιάζεται απόπειρα απεικόνισης ρεαλιστικών χαρακτηριστικών, στην προκείμενη περίπτωση η μύτη. Αυτή η απόπειρα επαναλαμβάνεται και στην απεικόνιση των χεριών, τα οποία ακόμα, όπως και στην Αφροδίτη του Willendorf δεν έχουν αποκολληθεί από τον κορμό.



*Εικόνα 15: (αριστερά): Κυκλαδικό ειδώλιο γυναικείας μορφής (Ελλάδα, 2600-2400 π.Χ.). Πηγή: Marble female figure, Attributed to the Bastis Master, 2600-2400 BCE, <https://www.metmuseum.org/toah/works-of-art/68.148/>, άδεια: CC0 1.0, [Creative Commons Zero \(CC0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).*

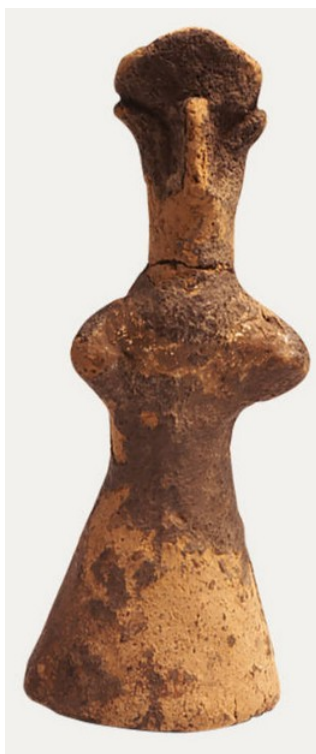
*Εικόνα 16: (δεξιά): Κυκλαδικά ειδώλια Πρωτοκυκλαδικής II περιόδου, Αρχαιολογικό μουσείο Νάξου. Πηγή: Cycladic figurines from various places in the Naxian countryside. AM Naxos, Case 3, 110026.jpg, Cycladic figurines (canonical type, EC II) from various places in the Naxian countryside. Archaeological Museum of Naxos, Case 3., [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cycladic\\_figurines\\_from\\_various\\_places\\_in\\_the\\_Naxian\\_countryside\\_AM\\_Naxos\\_Case\\_3\\_110026.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cycladic_figurines_from_various_places_in_the_Naxian_countryside_AM_Naxos_Case_3_110026.jpg), εικόνα του/της: Zde, άδεια: CC BY-SA 3.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).*

Η μορφή χαρακτηρίζεται από μια σαφή προσπάθεια απόδοσης ανθρωπομετρικών μεγεθών, με σχεδόν απόλυτη συμμετρία στον κατακόρυφο άξονα, όπου τα συμμετρικά στοιχεία δεν παρουσιάζουν τις διαφοροποιήσεις και την τυχαιότητα της προηγούμενης περίπτωσης (Willendorf). Στην περίπτωση των Κυκλαδικών ειδωλίων γενικότερα παρατηρείται έντονο το στοιχείο των παραλλαγών πάνω σε ένα βασικό μοτίβο, καθώς υπάρχουν διαφοροποιήσεις στην κλίμακα, τις



Εικόνα 17: Ειδώλιο, Μέση Εποχή του Χαλκού, 2000-1700 π.Χ.. Μουσείο Κυκλαδικής τέχνης. Πηγή: <https://cycladic.gr/https://collections.cycladic.gr/el/object/1873/-?ctx=64fc9a5f400284479c95af9951803982bfa2d9&idx=201>

© 2023 Museum of Cycladic Art. All rights reserved.



Εικόνα 18: Ειδώλιο, Μέση Εποχή του Χαλκού, 2000-1700 π.Χ.. Μουσείο Κυκλαδικής τέχνης. Πηγή: <https://cycladic.gr/https://collections.cycladic.gr/el/object/1876/-?ctx=64fc9a5f400284479c95af9951803982bfa2d9&idx=203>

© 2023 Museum of Cycladic Art. All rights reserved.



Εικόνα 19: Ειδώλιο, Ύστερη Εποχή του Χαλκού, 1400-1200 π.Χ.. Μουσείο Κυκλαδικής τέχνης. Πηγή: <https://cycladic.gr/https://collections.cycladic.gr/el/object/1126/-?ctx=b4e04eb67319f7b83eadb485a87271ec1997bedb&idx=73>

© 2023 Museum of Cycladic Art. All rights reserved.

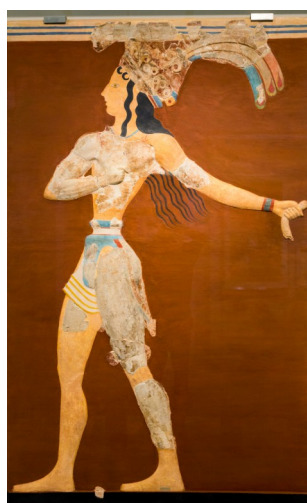
αναλογίες και τις διαστάσεις, οι οποίες είναι τυχαίες σε σύγκριση μεταξύ τους, με διακυμάνσεις εντός ορίων (Εικόνα 16).

**Ειδώλια της Μέσης και Ύστερης Εποχής του Χαλκού**, παρουσιάζονται να έχουν εντελώς διαφορετική τεχνοτροπία από τα κυκλαδικά. Οι μορφές τους (Εικόνα 17, Εικόνα 18) όπως και νεότερο ειδώλιο της Υστεροελλαδικής III A περιόδου 1400-1300 π.Χ. (Εικόνα 19) παρουσιάζονται εντελώς απλοποιημένα και ακατέργαστα. Τα κοινά τους χαρακτηριστικά είναι η διάκριση σε πόδια (φούστα στη 2η περίπτωση), κορμό και κεφάλι. Τα χέρια στα δύο πρώτα παραδείγματα αποτελούν ξεχωριστό στοιχείο (ειδικά στην 1η περίπτωση όπου διακρίνονται ξεκάθαρα) ενώ στο ειδώλιο στην Εικόνα 19 τα χέρια είναι ενοποιημένα με τον κορμό. Η αφαίρεση στη μορφή είναι πάρα πολύ έντονη και για τον καλλιτέχνη αρκεί αυτή η αφαιρετική απόδοση της ανθρώπινης μορφής και δεν είναι απαραίτητη η ρεαλιστική της απεικόνιση. Τα ειδώλια αυτά έχουν άλλωστε λατρευτικό χαρακτήρα και η υποτυπώδης αναφορά στην ανθρώπινη μορφή είναι ικανοποιητική για τον σκοπό για τον οποίο προορίζονται. Κάποια από τα πρώτα δείγματα ανθρώπινης μορφής στην αρχαία ελληνική ζωγραφική παρουσιάζονται σε τοιχογραφίες του **κυκλαδικού, μινωικού και μυκηναϊκού πολιτισμού**.

Τοιχογραφίες όπως ο ψαράς στο Ακρωτήριο της Θήρας (Εικόνα 20), παρουσιάζουν τον άνθρωπο σε δισδιάστατη απεικόνιση με ταυτόχρονη μετωπική και πλαϊνή προβολή, παρόμοια με την αιγυπτιακή τεχνοτροπία, αλλά όχι με τόσο μεγάλη αυστηρότητα. Το ίδιο παρατηρείται σε τοιχογραφίες μορφών στην **Κνωσό**. Συναντάται πάλι ο τρόπος σύνθετης απεικόνισης και τα σαφή περιγράμματα, αλλά οι αναλογίες στο σώμα είναι ιδιαίτερες (π.χ. στον κορμό) (Εικόνα 21). Στις τοιχογραφίες της Κνωσού υπάρχει σαφής ένδειξη για προσπάθεια ρεαλιστικής απεικόνισης, καθώς εμφανίζονται στις μορφές λεπτομέρειες στα χαρακτηριστικά του προσώπου, των μαλλιών, των ενδυμάτων και των κοσμημάτων (Εικόνα 22). Η ανάγκη για μεγαλύτερη πιστότητα σε σχέση με την πραγματικότητα οδηγεί στη μείωση της ασάφειας και την αύξηση των λεπτομερειών και της πολυπλοκότητας των συνθέσεων και των μορφών.



Εικόνα 20: Ο ψαράς – (Θήρα, Ακρωτήριο, 1650 π.Χ). Πηγή: [Fresco of a fisherman, Akrotiri, Greece.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fresco_of_a_fisherman,_Akrotiri,_Greece.jpg), [Fresco of a fisherman with Coryphaena hippurus](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fresco_of_a_fisherman_with_Coryphaena_hippurus), [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fresco\\_of\\_a\\_fisherman,\\_Akrotiri,\\_Greece.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fresco_of_a_fisherman,_Akrotiri,_Greece.jpg), εικόνα του/της: Yann Forget, άδεια: public domain.



Εικόνα 21: Ο πρίγκηπας με τα κρίνα (Κνωσός, Ύστερη εποχή του Χαλκού, περίπου 1550 π.Χ.). Πηγή: [Wall painting of the Priest-King from Knossos \(North-South Corridor\) - Heraklion AM.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wall_painting_of_the_Priest-King_from_Knossos_(North-South_Corridor)_-Heraklion_AM.jpg), - object type: wall painting (fresco) on high relief, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wall\\_painting\\_of\\_the\\_Priest-King\\_from\\_Knossos\\_\(North-South Corridor\)\\_-Heraklion\\_AM.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wall_painting_of_the_Priest-King_from_Knossos_(North-South_Corridor)_-Heraklion_AM.jpg), εικόνα του/της: [ArchaiOptix](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wall_painting_of_the_Priest-King_from_Knossos_(North-South_Corridor)_-Heraklion_AM.jpg), άδεια: CC BY-SA 4.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.



Εικόνα 22: Οι Γαλάζιες κυρίες, λεπτομέρεια (Κνωσός, Νεοανακτορική περίοδος, περίπου 1500 π.Χ.). Πηγή: Β. Βουτσάς, [https://www.searchculture.gr/aggregator/edm/TAPA/000054-11631\\_19551](https://www.searchculture.gr/aggregator/edm/TAPA/000054-11631_19551) Ταμείο Αρχαιολογικών Πόρων και Απαλλοτριώσεων, άδεια: CC BY-ND 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

Οι αντίστοιχες μυκηναϊκές αναπαραστάσεις των ανθρώπινων μορφών είναι πιο απλοϊκές σε σχέση με τις μινωικές, αλλά πιο ελεύθερες σαν μορφές στο χώρο και την κίνηση, γεγονός που ενισχύει τον ρεαλισμό τους<sup>484 485 486</sup>. Η αυστηρή μετωπική και πλαϊνή απεικόνιση αρχίζει σταδιακά να διασπάται και οι μορφές παρουσιάζουν απεικόνιση που υποδηλώνει βάθος, χωρίς βέβαια να υφίσταται ακόμα η έννοια της προοπτικής, γεγονός που συνιστά προσπάθεια για πληρέστερη απεικόνιση της πραγματικότητας.

Η εξέλιξη των τεχνικών και της τέχνης οδηγεί σταδιακά στα προϊόντα της **κλασσικής αρχαιότητας**, όπου η κυρίαρχη τάση είναι η ρεαλιστική και εξιδανικευμένη απόδοση των μορφών με κύρια χαρακτηριστικά της το μέτρο, την αρμονία και το κάλλος. Οι μορφές είναι όσο το δυνατόν γίνεται κοντά στην πραγματικότητα, με τις υπερβολές στις διαστάσεις και τις αναλογίες (πάντα σε σύγκριση με το ιδανικό) να απουσιάζουν. Η συμμετρία στο ανθρώπινο σώμα κυριαρχεί, αλλά όχι και στη στάση, η οποία διαρθρώνεται στο χώρο ελεύθερα και με δυναμικότητα. Η προσπάθεια για εξιδανίκευση απαλείφει τις ατέλειες και τις μη κανονικότητες. Η μορφή ορίζεται πλήρως και δεν υπάρχουν πια οι ασάφειες και ανομοιομορφίες των προηγούμενων περιόδων. Οι βάσεις που τέθηκαν στην τέχνη σε αυτή την περίοδο καθιερώνονται και αποτελούν για πολύ μεγάλο διάστημα το μέτρο σύγκρισης και το ιδανικό, με την εποχή και τα επιτεύγματά της να αποτελούν ορόσημο στην ιστορία της τέχνης.

Η ίδια σταδιακή εξέλιξη στην πιστότητα της αναπαράστασης μπορεί να παρατηρηθεί και στην **αγγειογραφία**. Τα πρώτα δείγματα από αγγεία κατά την περίοδο του Μινωικού και Μυκηναϊκού πολιτισμού διακοσμούνται από σχέδια με φυτικό και ζωικό διάκοσμο ή περίτεχνα γεωμετρικά σχέδια. Αργότερα, τα αγγεία διακοσμούνται με ανθρώπινες μορφές, όπως για παράδειγμα στον **Μυκηναϊκό κρατήρα των Πολεμιστών** (Εικόνα 23, Εικόνα 24). Στο αγγείο παρουσιάζονται δύο ομάδες από πολεμιστές οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι με όμοιο τρόπο, αλλά με μικρές διαφοροποιήσεις στα πρόσωπα και την ενδυμασία. Η απόδοση των μορφών είναι κάπως απλοϊκή, αλλά είναι εμφανής η προσπάθεια για καταγραφή λεπτομερειών και απόδοση μιας πιο φυσικής διάστασης στην απεικόνιση.

---

484 <https://commons.wikimedia.org/wiki/>

File:Two\_Mycenaean\_chariot\_warriors\_on\_a\_fresco\_from\_Pylos\_about\_1350\_BC.jpg

485 [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fresco\\_of\\_two\\_female\\_charioteers\\_from\\_Tiryns\\_1200\\_BC.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fresco_of_two_female_charioteers_from_Tiryns_1200_BC.jpg)

486 [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Battle\\_Scene\\_Fresco\\_from\\_Pylos.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Battle_Scene_Fresco_from_Pylos.jpg)



Εικόνα 23: Κρατήρας των Πολεμιστών. (Μυκήνες, Ύστερη εποχή του χαλκού. 12ος αι. π.Χ.). Πηγή: *Mycenaeen Ceramic Krater depicting Warriors departing for battle, from Mycenae Acropolis, c. 1200 BC.jpg*, Greek Prehistory Gallery, National Museum of Archaeology, Athens, Greece. Complete indexed photo collection at [WorldHistoryPics.com](http://WorldHistoryPics.com), [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mycenaeen\\_Ceramic\\_Krater\\_depicting\\_Warriors\\_departing\\_for\\_battle\\_from\\_Mycenae\\_Acropolis\\_c\\_1200\\_BC.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mycenaeen_Ceramic_Krater_depicting_Warriors_departing_for_battle_from_Mycenae_Acropolis_c_1200_BC.jpg), εικόνα του/της: [Gary Todd](#) from Xinzheng, China, άδεια: [CC0 1.0](#), [CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication](#).



Εικόνα 24: Κρατήρας των Πολεμιστών. (Μυκήνες, Ύστερη εποχή του χαλκού. 12ος αι. π.Χ.). Λεπτομέρεια. Πηγή: *02 2020 Grecia photo Paolo Villa FO190060 (Museo archeologico di Atene) Cratere dei guerrieri dipinto con soldati NAMA 1426, Acropoli di Micene. XII secolo a.C., senza gimp.jpg*, *02 2020 Greece photo Paolo Villa (Archaeological Museum of Athens) krater depicting soldier NAMA 1426 (helmet, cuirass, greaves, shield and spear) ready for war, a sack of supplies hanging from their spears. To the side, a woman raises hand for a farewell or mourning gesture. On the back five warriors with a different helmet, raise their spears. At handles relief bovine head and pairs of painted birds. Mycenaean Pictorial style. From the 'House of the Warrior Vase', Mycenae acropolis. 12th century BC, without gimp*, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:02\\_2020\\_Grecia\\_photo\\_Paolo\\_Villa\\_FO190060\\_\(Museo\\_archeologico\\_di\\_Atene\)\\_Cratere\\_dei\\_guerrieri\\_dipinto\\_con\\_soldati\\_NAMA\\_1426,\\_Acropoli\\_di\\_Micene\\_XII\\_secolo\\_a.C.,\\_senza\\_gimp.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:02_2020_Grecia_photo_Paolo_Villa_FO190060_(Museo_archeologico_di_Atene)_Cratere_dei_guerrieri_dipinto_con_soldati_NAMA_1426,_Acropoli_di_Micene_XII_secolo_a.C.,_senza_gimp.jpg), εικόνα του/της: [Paolo Villa](#), άδεια: [CC BY-SA 4.0](#), [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license](#). Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.



Εικόνα 25: Αμφορέας, απόδοση: Ζωγράφος της Αιώρας, Αρχαϊκή περίοδος, 540-530 π.Χ.. Μουσείο Κυκλαδικής Τέχνης. Πηγή: <https://cycladic.gr/https://collections.cycladic.gr/el/objects/3047/-?ctx=f188a70cfc0e4fe85108416f442932d1679452de&idx=321>

© 2023 Museum of Cycladic Art. All rights reserved.



Εικόνα 26: Πελίκη, απόδοση: Ζωγράφος της Κενταυρομαχίας του Λούβρου, Κλασική περίοδος, 440 π.Χ.. Μουσείο Κυκλαδικής Τέχνης. Πηγή: <https://cycladic.gr/https://collections.cycladic.gr/el/objects/1565/-?ctx=30537c692aea9cd51a1b9c2b762d9bc5679d36a6&idx=0>

© 2023 Museum of Cycladic Art. All rights reserved.

Η αγγειογραφία ακολουθεί κατά κάποιο τρόπο το ρεύμα της εποχής. Ο **μελανόμορφος ρυθμός** έχει εξελισσεται στον **ερυθρόμορφο ρυθμό**, όπου οι ανθρώπινες μορφές αναπαρίστανται όπως είναι στην πραγματικότητα με τη μεγαλύτερη δυνατή πιστότητα στις αναλογίες, τα χαρακτηριστικά και τη θέση τους στο χώρο. Το εύρημα της βράχυνσης των μορφών δίνει στις αναπαραστάσεις μια φυσικότητα και ρεαλιστικότητα που αποδεδειγμένα από τη στιβαρή διάταξη των αποδόσεων των προηγούμενων προσπαθειών. Οι αναπαραστάσεις του ερυθρόμορφου ρυθμού είναι τελικά ότι πιο κοντινό υπάρχει στην πραγματική απόδοση των μορφών στη ζωγραφική της αρχαϊκής περιόδου.

**Η Αφροδίτη της Μήλου** (Εικόνα 27) είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα κλασσικής τέχνης το οποίο ανάγεται στην ελληνιστική περίοδο (150-50 π.Χ.) όπου είναι αναγνωρίσιμα όλα τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά της κλασσικής περιόδου. Η μορφή είναι ακριβώς αυτό που παρουσιάζεται μπροστά στο θεατή. Οι αναλογίες και οι διαστάσεις είναι καθορισμένες με σαφήνεια. Η μορφή της γυναίκας είναι καθορισμένη στο χώρο και παρουσιάζεται ως ιδανική, χωρίς να δίνεται η δυνατότητα για διαφορετικές ερμηνείες της γεωμετρίας και των σχημάτων. Οι ασάφειες στα σχήματα και τη γεωμετρία δεν υφίστανται πλέον. Η κόμμωση και οι πτυχές του ενδύματος παρουσιάζουν έντονες λεπτομέρειες και αναπαρίστανται με ρεαλιστικό τρόπο. Οι πτυχές προσαρμόζονται στο ανθρώπινο σώμα που τις υποστηρίζει, εμφανίζοντας αυξημένη πολυπλοκότητα και έντονο πλαστικό χαρακτήρα. Το σώμα είναι λείο και σαφές, ενώ οι πτυχές αδρές και έντονα ανάγλυφες. Η τυχαιότητα που παρουσιάζει η σχηματοποίηση των πτυχών είναι περιορισμένη καθώς αυτές υποτάσσονται στη γεωμετρία του ανθρώπινου σώματος. Παρατηρείται δηλαδή το ξεκάθαρο περίγραμμα - όριο του ανθρώπινου σώματος ως βάση πάνω στην οποία εκτείνεται το στοιχείο του ενδύματος ως μια πιο ακανόνιστη μορφή.

Σύμφωνα με τον Gombrich, η χρήση των πτυχών στην τέχνη των Ελλήνων δείχνει πόση σημαντική ήταν γι' αυτούς η γνώση της φόρμας. Στα έργα των Ελλήνων υπάρχει ταυτόχρονα ο σεβασμός στους κανόνες, όσο και η ελευθερία εντός των ορίων των κανόνων. Αυτός ακριβώς ο συνδυασμός είναι που δίνει έναν ιδιαίτερο χαρακτήρα στην ελληνική τέχνη και την καθιστά διαχρονική και πηγή έμπνευσης <sup>487</sup>.

Οι κανόνες αποτελούν το όριο μέσα στο οποίο δίνεται η δυνατότητα για διαφοροποίηση. Τα δύο αυτά στοιχεία, κανόνας και διαφοροποίηση, διακρίνονται από μια λεπτή ισορροπία η οποία όταν τηρείται, αποδίδει μοναδικά παραδείγματα τέχνης.

Η εξιδανίκευση και τελειότητα στην απόδοση της μορφής συμπυκνώνει τα ιδανικά του αρχαίου ελληνικού κόσμου. Η ύλη μέσω της τέχνης μορφοποιεί και αποδίδει χαρακτηριστικά της αρμονίας, του ελεύθερου πνεύματος και της κριτικής σκέψης, αιτίες που συντέλεσαν στο να γίνει η κλασσική εποχή ορόσημο στην εξέλιξη της τέχνης. Με αυτό τον τρόπο η κλασσική τέχνη συνεχίζει μέχρι και σήμερα, μέσα από διακυμάνσεις, να υφίσταται ως μέτρο και πρότυπο του ιδανικού, της ομορφιάς και της αισθητικής.

Κατά την περίοδο της **Αναγέννησης**, το κλασσικό πρότυπο της αρχαιότητας λειτουργεί ως εφαλτήριο το οποίο μετέφερε την τέχνη στο επόμενο στάδιο εξέλιξης. Η αναβίωση των ρυθμών των αρχαίων προσαρμοσμένων στα δεδομένα της τότε εποχής, οι καινοτομίες της προοπτικής στη ζωγραφική και η ανάγκη για ανανέωση, οδηγούν στην εξέλιξη του κλασσικού προτύπου. Σε αυτό το νέο πρότυπο επιχειρείται η ρεαλιστική καταγραφή της πραγματικότητας, όσον αφορά στις διαστάσεις, τις αναλογίες, τη μορφή και το χώρο, χωρίς τις εξιδανικεύσεις του κλασσικού ρυθμού. Ως

---

487 Gombrich, 89.



αποτέλεσμα, δημιουργούνται έργα που η μορφή τους έρχεται ακόμα πιο κοντά στον πραγματικό κόσμο και η αναπαράσταση εμπεριέχει ατέλειες, ασυμμετρίες, την έννοια της φθοράς και του χρόνου. Η αρχαία λοιπόν προσέγγιση τροποποιείται και αρχίζει να ενσωματώνει στοιχεία μη ιδεατά.

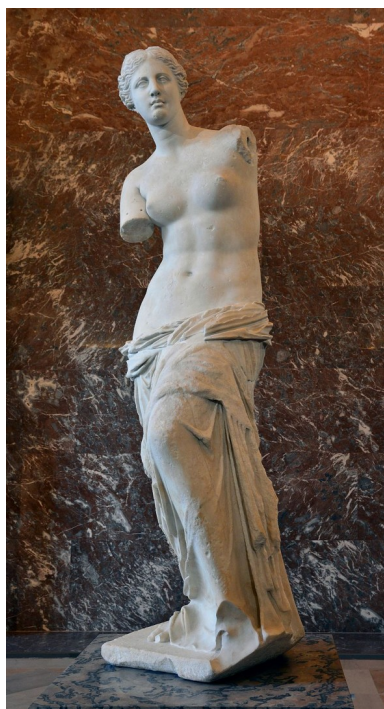
Ο **Donatello**, στο έργο του *Zuccone*<sup>488</sup> (Εικόνα 28), παρουσιάζει την ολόσωμη μορφή του προφήτη Habakkuk. Το έργο πραγματοποιήθηκε στην περίοδο από το 1423 μ.Χ έως το 1425 μ.Χ. και είναι κατασκευασμένο από μάρμαρο. Θεωρείται ότι ήταν ένα από τα πιο αγαπημένα έργα του Donatello και λέγεται ότι όσο εργαζόταν ο γλύπτης σε αυτό, το κοίταζε και του ζήτηγε να μιλήσει. Ο τίτλος του αγάλματος είναι *Zuccone*, που σε μετάφραση σημαίνει κολοκύθα, λόγω του ιδιαίτερου σχήματος του κρανίου του προφήτη. Πρόκειται για ένα νατουραλιστικό και ρεαλιστικό γλυπτό που ήταν ένα από τα πιο «ζωντανά» αγάλματα του 15ου αιώνα. Η επιλογή του υλικού δεν είναι τυχαία, καθώς το μάρμαρο και συγκεκριμένα ο καλσίτης (ασβεστίτης) είναι διαφώτιστο (translucent) υλικό, γεγονός που ενισχύει την αίσθηση ρεαλισμού και θυμίζει την ημιδιαφάνεια του ανθρώπινου δέρματος.

Το σώμα του προφήτη παρουσιάζεται σε φυσική στάση, να γέρνει προς τη μια πλευρά, κάπως καταπονημένος και με το κεφάλι στραμμένο προς τα κάτω. Το πρόσωπο φαίνεται να είναι γερασμένο και κουρασμένο. Το σώμα καλύπτεται από ένδυμα που δημιουργεί πολύ έντονες πτυχές και εντείνει τις φωτοσκιάσεις. Οι πτυχές σε αυτό το άγαλμα είναι αρκετά διαφορετικές από τις πτυχές του ενδύματος της Αφροδίτης της Μήλου. Στην περίπτωση της Αφροδίτης της Μήλου οι πτυχές είναι πλήρως υποταγμένες στην υποβόσκουσα φόρμα του σώματος, οι λεπτομέρειές τους είναι διακριτικές και η θέση τους στη σύνθεση είναι δευτερεύουσα, καθώς κυριαρχεί το σώμα της Αφροδίτης. Στην περίπτωση του *Zuccone*, οι πτυχές του ενδύματος αποκολλούνται από το σώμα, είναι δυναμικές και επιθετικές. Δημιουργούν έντονες φωτοσκιάσεις και οι πτυχώσεις παρουσιάζουν το σώμα να ξεπηδάει μέσα από το ένδυμα. Το γεγονός ότι οι πτυχώσεις έχουν αποκολληθεί από το σώμα μοιάζει σαν να τους αποδίδεται δική τους υπόσταση, ανεξάρτητη από αυτή του σώματος του προφήτη, με αυτές να παρουσιάζονται να διπλώνουν και να τσαλακώνονται σε κάποιες περιοχές με τυχαίο τρόπο.

Η μορφή του προφήτη αποδίδεται με μεγάλο ρεαλισμό, χωρίς εξιδανικεύσεις. Ο θεατής δεν βλέπει ένα τέλειο σώμα, νέο και δυναμικό χωρίς φθορά. Ο χρόνος και οι επιδράσεις του είναι αποτυπωμένες στο άγαλμα. Το κλασικό πρότυπο έχει εξελιχθεί στο πραγματικό ή φυσικό πρότυπο. Η τελειότητα στη μορφή χάνεται. Το σώμα αρχίζει να παρουσιάζεται ταλαιπωρημένο και γερασμένο. Η συμμετρία του σώματος αναιρείται από την κάλυψη του ενδύματος.

---

488 'Zuccone by Donatello', ημερομηνία πρόσβασης 14 Ιούλιος 2019, <http://www.donatellosculptures.com/zuccone/>.



Εικόνα 27: Η Αφροδίτη της Μήλου, μάρμαρο - (150-50 π.Χ.). Πηγή: *Vénus de Milo - Musée du Louvre AGER LL 299 ; N 527 ; Ma 399.jpg*, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:V%C3%A9nus\\_de\\_Milo\\_-\\_Mus%C3%A9e\\_du\\_Louvre\\_AGER\\_LL\\_299\\_ ; N\\_527\\_ ; Ma\\_399.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:V%C3%A9nus_de_Milo_-_Mus%C3%A9e_du_Louvre_AGER_LL_299_ ; N_527_ ; Ma_399.jpg), εικόνα του/της: *Shonagon*, άδεια: *CC0 1.0, Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication*.



Εικόνα 28: Zuccone, μάρμαρο - Donatello (~1423-1425). Πηγή: *Zuccone Donatello OPA Florence.jpg*, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zuccone\\_Donatello\\_OPA\\_Florence.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zuccone_Donatello_OPA_Florence.jpg), εικόνα του/της: *Jastrow*, άδεια: *public domain*.



Εικόνα 29: Μετανοούσα Μαγδαληνή, ξύλο - Donatello (~1453-1455). Πηγή: *Mary Magdalen Donatello OPA Florence.jpg*, *Statue of Mary Magdalene, detail. Was probably placed on the south-western side of the Baptistry of Florence, Italy. Painted and gilded wood, Museo dell'Opera del Duomo*, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mary\\_Magdalen\\_Donatello\\_OPA\\_Florence.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mary_Magdalen_Donatello_OPA_Florence.jpg), εικόνα του/της: *Jastrow*, άδεια: *public domain*.

30 χρόνια αργότερα, ο **Donatello** κατασκευάζει το άγαλμα της **Μετανοούσας Μαγδαληνής** (Εικόνα 29). Πρόκειται για ένα ξύλινο ολόσωμο άγαλμα που απεικονίζει τη Μαρία Μαγδαληνή να μετανοεί. Οι διαφορές στην εξέλιξη της τεχνοτροπίας του Donatello είναι αρκετά εμφανείς σε αυτό το διάστημα των 30 ετών. Αναφέρεται <sup>489</sup>, ότι όσο εξελισσόταν ο Donatello, η τεχνοτροπία του γινόταν περισσότερο δραματική και ο ίδιος βασιζόταν περισσότερο στην πραγματικότητα για έμπνευση, με σκοπό να αναπαραστήσει με ακρίβεια τα ανθρώπινα συναισθήματα. Κοιτάζοντας κανείς το άγαλμα βλέπει μια αποστεωμένη μορφή γεμάτη μαρτύριο. Το πρόσωπο της Μαγδαληνής φανερώνει πόνο και αγωνία, το οποίο μοιάζει περισσότερο με σκελετό παρά με γυναικείο πρόσωπο. Τα μαλλιά είναι εντελώς ακατάστατα και μοιάζουν περισσότερο με το κουρελιασμένο ένδυμα που καλύπτει το σώμα. Εντύπωση προκαλεί η αντίθεση που έχουν τα άνω και κάτω άκρα, τα οποία παρουσιάζονται σφριγηλά και με το δέρμα ομοιόμορφο, χωρίς τη γήρανση του προσώπου. Το άγαλμα ως παρουσία είναι πολύ δυναμικό και μαγνητίζει τον θεατή, ο οποίος έχει μπροστά του μια μορφή που

489 'Donatello', Artble, ημερομηνία πρόσβασης 14 Ιούλιος 2019, <https://www.artble.com/artists/donatello>.

είναι σχεδόν έτοιμη να του μιλήσει. Τα χέρια τείνουν να ακουμπήσουν το ένα το άλλο και φαίνεται σαν η πόζα να είναι ένα στιγμιότυπο στο μέσο της κίνησης, την οποία ο θεατής περιμένει να ολοκληρωθεί.



Εικόνα 30: Leonardo DaVinci. Επιφανειακή μελέτη ανατομίας ώμου και λαιμού, ~1510μ.Χ. Πηγή: Leonardo da Vinci - Superficial anatomy of the shoulder and neck (recto) - Google Art Project.jpg, Superficial anatomy of the shoulder and neck (recto), [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leonardo\\_da\\_Vinci\\_-\\_Superficial\\_anatomy\\_of\\_the\\_shoulders\\_and\\_neck\\_\(recto\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leonardo_da_Vinci_-_Superficial_anatomy_of_the_shoulders_and_neck_(recto).jpg), εικόνα του/της: [oAG1jpfKAZFzWQ at Google Cultural Institute maximum zoom level](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leonardo_da_Vinci_-_Superficial_anatomy_of_the_shoulders_and_neck_(recto).jpg), άδεια: public domain.

Εικόνα 31: Michelangelo, Δαβίδ, 1501-1504 μ.Χ., Galleria dell' Accademia (Φλωρεντία). Πηγή: Michelangelo's David 2021 - 1.jpg, Michelangelo's David, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelangelo%27s\\_David\\_2021\\_-\\_1.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelangelo%27s_David_2021_-_1.jpg), εικόνα του/της: [Commonists](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelangelo%27s_David_2021_-_1.jpg), άδεια: CC BY-SA 4.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/). Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.

Η μορφή της Μαγδαληνής απέχει πάρα πολύ από το κλασικό πρότυπο και οι διαφοροποιήσεις του από το Zuccone, 30 χρόνια πριν, είναι εμφανείς. Ο Donatello θυσιάζει την ομορφιά για να μεταφέρει στο θεατή την ένταση και τα συναισθήματα.

Το θέμα δραματοποιείται, με το ρεαλισμό να έχει αντικαταστήσει την αρμονία και το κάλος των αρχαίων. Το κλασικό πρότυπο έχει πλέον διασπαστεί, με το άγαλμα αυτό να είναι μια χειρονομία ανατροπής που σοκάρει. Για το δημιουργό του είναι πιο σημαντικός ο ρεαλισμός από τους κανόνες των αρχαίων δασκάλων. Έτσι λοιπόν, η μορφή παρουσιάζεται άγρια και βασανισμένη, χωρίς συμμετρία και ρυθμό. Τα μαλλιά και το ένδυμα είναι ακατάστατα και εκτείνονται τυχαία πάνω στο σώμα. Αυτές οι αλλαγές και η σύνδεση με το ρεαλισμό ενδυναμώνουν τη μορφή και της προσδίδουν δυναμικότητα και αμεσότητα.

Στη ζωγραφική, η προσπάθεια κατανόησης της ανθρώπινης μορφής οδηγεί τον **Leonardo DaVinci** να μελετήσει και να αναπαραστήσει το ανθρώπινο σώμα με πολύ μεγάλη λεπτομέρεια και ανάλυση. Οι σπουδές ανατομίας του είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της προσέγγισης (Εικόνα 30).



Εικόνα 32: Michelangelo. Η Δημιουργία του Αδάμ, Cappella Sistina, ~1511 μ.Χ. Πηγή: The Creation of Adam by Michelangelo-, <https://www.flickr.com/photos/larrywkoester/32975724116/in/photolist-5eXcVw-2jLqGU5-c5Ywao-2k2Rpbg-2pe8gmd-2kQKwTc-ooAJBF-2gJybdH-2nXY8x5-6iMx87-7EBaRr-2nRyvS4-nEhXGV-5t4aVD-a5uPxi-2jDbbA7-2kqWras-UCrtZ9-qLFPro-2eaiCpt-2nWRqkF-2gCwEyz-2nWTMIt-2jkNnEq-2jnHJGp-2pY5BRD-24dSfhm-2nEaiNY-2nVncDc-2jXMTco-2pB5XmL-Z3j5CJ-2nWPgv5-2irhmSS-UEKQ15-mqdsj8-Jz8qGh-2pzRNAX-2pH4gY4-Uu81Gf-ksx4oB-25FVAEA-2pz2UkN-2kjmCVR-52BhhS-2nVLFQT-5WBMTa-2g9fJQN-2pCPVmG-2oh5PWγ>, εικόνα του/της: Larry Koester, άδεια: CC BY 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>

Ο **Mickelangelo** στην εικονογράφηση της **Cappella Sistina** έχει μελετήσει και αποδίδει την ανθρώπινη μορφή, όπως αναφέρει ο Gombrich, με ένα τρόπο που είχε να γίνει από την εποχή των αρχαίων Ελλήνων <sup>490</sup> (Εικόνα 32). Ο **Δαυίδ** του **Mickelangelo**, είναι ένα τέλειο παράδειγμα ρεαλισμού και φυσικής αναπαράστασης της ανθρώπινης μορφής στο χώρο (Εικόνα 31). Στην ίδια αναζήτηση του ιδεώδους και εξέλιξη της τεχνοτροπίας της αρχαίας τέχνης ο **Ραφαήλ** εκφράζει το έργο του με μια καθαρή φόρμα και σαφήνεια <sup>491</sup>. Τα πορτραίτα του **Τισιανού** <sup>492</sup> μαγνητίζουν με την απλότητα και αμεσότητά τους, ενώ το έργο του **Hans Holbein** του νεώτερου <sup>493</sup> μοιάζει σαν να έχει φωτογραφική πιστότητα, με ότι αυτό συνεπάγεται από άποψη ρεαλιστικής απεικόνισης, δηλαδή ατέλειες, ασυμμετρίες και η απόδοση της σύνθεσης μέσα από την οπτική του πραγματικού κόσμου.

**Η ρεαλιστική προσέγγιση συνεχίζεται με τους Caravaggio, Rubens, Rembrandt, Vermeer, Velasquez και άλλους μεγάλους δασκάλους, οι οποίοι κατάφεραν να φέρουν αυτή την τεχνοτροπία της ζωγραφικής στο απόγειό της, περιγράφοντας την ανθρώπινη μορφή σε μια κατάσταση πολύ κοντά σε αυτήν του πραγματικού κόσμου, μακριά από την ιδανική και τέλεια συνθήκη της αρχαιότητας.**

<sup>490</sup> Gombrich, *To χρονικό της τέχνης*, 312.

<sup>491</sup> [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Raphael\\_-\\_St.\\_Michael\\_Vanquishing\\_Satan.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Raphael_-_St._Michael_Vanquishing_Satan.jpg)

<sup>492</sup> [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tizian\\_090.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tizian_090.jpg)

<sup>493</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Hans\\_Holbein\\_the\\_Younger\\_-\\_Charles\\_de\\_Solier,\\_Sieur\\_de\\_Morette\\_-\\_Google\\_Art\\_Project.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Hans_Holbein_the_Younger_-_Charles_de_Solier,_Sieur_de_Morette_-_Google_Art_Project.jpg)

## Βιβλιογραφία Παραρτήματος Ι

- Artble. 'Donatello'. Ημερομηνία πρόσβασης 14 Ιούλιος 2019.  
<https://www.artble.com/artists/donatello>.
- 'Avdeevo - a Paleolithic site with strong links to Kostenki'. Ημερομηνία πρόσβασης 9 Ιούλιος 2019.  
<https://www.donsmaps.com/avdeevo.html>.
- 'Cave Paintings in Indonesia Redraw Picture of Earliest Art'. Ημερομηνία πρόσβασης 8 Ιούλιος 2019.  
<https://news.nationalgeographic.com/news/2014/10/141008-cave-art-sulawesi-hand-science/>.
- Foundation, Bradshaw. 'The Cave Art Paintings of the Chauvet Cave'. Bradshaw Foundation. Ημερομηνία πρόσβασης 8 Ιούλιος 2019. <http://www.bradshawfoundation.com/ Chauvet/>.
- Gombrich, E. H. *Το χρονικό της τέχνης*. Δεύτερη ελληνική έκδοση. Αθήνα: Μορφωτικό Ίδρυμα Εθνικής Τραπέζης, 1998.
- Nicolas, Clément, και Colas Guéret. 'Armorican Arrowhead Biographies: Production and Function of an Early Bronze Age Prestige Good from Brittany (France)'. *Journal of Lithic Studies* 1, τχ. 2 (15 Σεπτέμβριος 2014): 101–28. <https://doi.org/10.2218/jls.v1i2.1126>.
- Reynolds, N., M. Germonpré, A. A. Bessudnov, και M. V. Sablin. 'The Late Gravettian Site of Kostënki 21 Layer III, Russia: A Chronocultural Reassessment Based on a New Interpretation of the Significance of Intra-Site Spatial Patterning'. *Journal of Paleolithic Archaeology* 2, τχ. 2 (1 Ιούνιος 2019): 160–210. <https://doi.org/10.1007/s41982-018-0018-6>.
- Sinitsyn, Andey A. 'Variabilité du Gravettien de Kostienki (Bassin moyen du Don) et des territoires associés'. *PALEO. Revue d'archéologie préhistorique*, τχ. 19 (30 Δεκέμβριος 2007): 181–201. <http://journals.openedition.org/paleo/599>.
- 'The Cave of Altamira'. Ημερομηνία πρόσβασης 8 Ιούλιος 2019.  
<http://www.bradshawfoundation.com/spain/altamira/index.php>.
- The Metropolitan Museum of Art, i.e. The Met Museum. 'Arrowhead | Iron Age | The Met'. Ημερομηνία πρόσβασης 10 Ιούλιος 2019.  
<https://www.metmuseum.org/art/collection/search/327445>.
- 'Zuccone by Donatello'. Ημερομηνία πρόσβασης 14 Ιούλιος 2019.  
<http://www.donatellosculptures.com/zuccone/>.

## Ευρετήριο εικόνων Παραρτήματος Ι

Τα πνευματικά δικαιώματα των εικόνων ανήκουν στους αντίστοιχους κατόχους τους.

- Εικόνα 1: Τοιχογραφία από το σπήλαιο του Sulawesi (40.000 χρόνια πριν). Πηγή: Hands in Pettakere Cave detail.jpg, Cave paintings from the Indonesian island of Sulawesi are situated in the Caves in the district of Maros were dated based on Uranium–thorium dating in a 2014 study. The oldest dated image was a hand stencil, given a minimum age of 39,900 years, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hands\\_in\\_Pettakere\\_Cave\\_detail.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hands_in_Pettakere_Cave_detail.jpg), εικόνα του/της: Cahyo, χρήστης: Benjaminfreyart , άδεια: CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license.. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....342
- Εικόνα 2: Τοιχογραφία από το σπήλαιο του Chauvet (30.000 χρόνια πριν). Πηγή: 18 PanneauDesLions(PartieDroite)BisonsPoursuivisParDesLions.jpg, Lions Panel (right), the lions watch at the bison they pursue, bison look in front of the wall from which they escape. Wooden charcoal drawings with fading, flint scraping. Pont d'Arc cave (copy of the Chauvet Cave)., [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:18\\_PanneauDesLions\(PartieDroite\)BisonsPoursuivisParDesLions.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:18_PanneauDesLions(PartieDroite)BisonsPoursuivisParDesLions.jpg), εικόνα του/της: Claude Valette , άδεια: CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....342
- Εικόνα 3: Αντίγραφο Τοιχογραφίας από το σπήλαιο του Chauvet (30.000 χρόνια πριν). Πηγή: 22 PointsRouges.jpg, Red points. Pigment : hematite. Pont d'Arc cave (copy of the Chauvet Cave), [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:22\\_PointsRouges.jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:22_PointsRouges.jpg) , εικόνα του/της: Claude Valette , άδεια: CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....343
- Εικόνα 4: Τοιχογραφία σπηλαιίου στην Altamira στην Ισπανία (20.000 χρόνια πριν). Πηγή: Altamira bisons.jpg, Reproductions at the Museo del Mamut, Barcelona 2011, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Altamira\\_bisons.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Altamira_bisons.jpg) , εικόνα του/της: Thomas Quine , άδεια: CC BY-SA 2.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 2.0 Generic license.....343
- Εικόνα 5: Τοιχογραφία στο σπήλαιο Cueva de las Manos στην Αργεντινή (13.000-9.000 χρόνια πριν). Πηγή: SantaCruz-CuevaManos-P2210651b.jpg, Hands at the Cuevas de las Manos upon Río Pinturas, near the town of Perito Moreno in Santa Cruz Province, Argentina. Picture taken by me in 2005, <https://en.wikipedia.org/wiki/File:SantaCruz-CuevaManos-P2210651b.jpg> , εικόνα του/της: Mariano , άδεια: GNU Free Documentation License, Version 1.2 , CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license, CC BY-SA 2.5, Creative Commons Attribution-Share Alike 2.5 Generic license.....345
- Εικόνα 6: Αναπαραστάσεις ανθρώπων σε σπήλαιο στο Monte Valonsadero στην Ισπανία (μετα-Παλαιολιθική σχηματική τέχνη). Πηγή: Valonsadero (Soria) Cave Art.jpg, Cave art in Valonsadero (Soria), Spain, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Valonsadero\\_\(Soria\)\\_Cave\\_Art.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Valonsadero_(Soria)_Cave_Art.jpg) , εικόνα του/της: ShaiHuludKitty , άδεια: CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....345
- Εικόνα 7: 4 από τις Αφροδίτες το Ανδεενο ύψους περίπου 10-15 εκ. (α, b, c, d), η Αφροδίτη του Willendorf (e) και η Αφροδίτη του Hohle Fels (παλαιότητα 25.000-35.000 χρόνια). Πηγή: <https://www.mdpi.com/2076-0752/3/2/245> . Robert G. Bednarik, Pleistocene Paleoart of Europe, άδεια: CC BY 3.0, Creative Commons Attribution license, <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>.....347
- Εικόνα 8: Αιχμές βελών τύπου Kernonen στο Plouvonη στη Βρετάννη, σταδίου 1 (2150–1950 π.Χ.). Πρώιμη εποχή του χαλκού (2150-1700 π.Χ.). Πηγή: Clément Nicolas και Colas Guéret, 'Armorican Arrowhead Biographies: Production and Function of an Early Bronze Age Prestige Good from Brittany (France)', Journal of Lithic Studies 1, τχ. 2 (15 Σεπτέμβριος 2014): 101–28, <https://doi.org/10.2218/jls.v1i2.1126> , άδεια: CC BY 4.0, Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) licence. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....349
- Εικόνα 9: Αιχμές βελών τύπου Kernonen στο Saint-Thégonnec, Finistère (πάνω) και στο Lescongar στο Plouhinec, Finistère (κάτω) στη Βρετάννη, σταδίου 2 (1950-1750 π.Χ.). Πρώιμη εποχή του χαλκού

- (2150-1700 π.Χ.). Πηγή: Clément Nicolas και Colas Guéret, 'Armorican Arrowhead Biographies: Production and Function of an Early Bronze Age Prestige Good from Brittany (France)', *Journal of Lithic Studies* 1, τχ. 2 (15 Σεπτέμβριος 2014): 101–28, <https://doi.org/10.2218/jls.v1i2.1126>, άδεια: CC BY 4.0, Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) licence. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....349
- Εικόνα 10: Αιχμές βελών από ορείχαλκο (1η χιλιετία π.Χ.) από την περιοχή της Υπερκαυκασίας και του Β. Ιράν. Πηγή: <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/327445>, άδεια: CC0 1.0, Creative Commons Zero (CC0) .....350
- Εικόνα 11: Αιχμές βελών από ορείχαλκο στην Κίνα, Φυλή Υυγυε. Πηγή: Yuyue People: Eastern Zhou Bronze Arrowheads, <https://www.flickr.com/photos/101561334@N08/16474598954/in/photolist-r6NCiy-r6NjPf-87heCf-r717hM-hbD9PW-WdjGBx-g8Ah1H-27Kxvms-fXxjzW-g8xziq-5uQmT1-g8yg2F-KLhbT9-g8xDTW-hbD48W-MZfjLc-gqYj8n-26663Eq-g5eecV-gtZQik-rq9yqP-gqYk7M-KP3m7t-gqYEG9-Mx8vc7-h8Hdve-2bMR6JC-h8HcRD-h8JvN6-gr1Z66-guGdCm-P8vbDr-nm651o-syzwwK-hbU6ub-h8Lds1-gEn1z2-h8L2yt-h8Mk68-h8Ldj5-h8Mk4e-h8L8Sw-h8L8yW-h8L2fi-h8MjJX-b1WY3F-ssHaji-h8L92Q-h8L2GK-2a8bubG/>, εικόνα του/της: Gary Todd, άδεια: CC0 1.0, Creative Commons Zero (CC0) .350
- Εικόνα 12: Στήλη, Πριγκίπισσα Nefertabet πριν το γεύμα (Αίγυπτος, 2590-2565 π.Χ.) Πηγή: Princess Nefertabet before her meal-E 1591-IMG 9645-gradient.jpg, Stele of Nefertabet-E 1591, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Princess\\_Nefertabet\\_before\\_her\\_meal-E\\_1591-IMG\\_9645-gradient.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Princess_Nefertabet_before_her_meal-E_1591-IMG_9645-gradient.jpg), εικόνα του/της: Rama, άδεια: CC BY-SA 3.0 FR, Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 France license, CC BY-SA 2.0 FR, Creative Commons Attribution-Share Alike 2.0 France license.....352
- Εικόνα 13: Ο Βασιλιάς Μυκερίνος και Βασίλισσα (Αίγυπτος, 2490-2472 π.Χ.). Πηγή: King Menkaura and queen-11.1738-IMG 4928-white.jpg, King Menkaura (Mycerinus) and queen, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:King\\_Menkaura\\_and\\_queen-11.1738-IMG\\_4928-white.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:King_Menkaura_and_queen-11.1738-IMG_4928-white.jpg), εικόνα του/της: Rama, άδεια: CC BY-SA 3.0 FR, Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 France license, CC BY-SA 2.0 FR, Creative Commons Attribution-Share Alike 2.0 France license.....352
- Εικόνα 14: Nefertiti (~1370 π.Χ. – ~1330 π.Χ.). Πηγή: The Queen Nefertiti – III, <https://www.flickr.com/photos/69716881@N02/8526185878>, εικόνα του/της: Egisto Sani, άδεια: CC BY-NC-SA 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/> .....352
- Εικόνα 15: (αριστερά): Κυκλαδικό ειδώλιο γυναικείας μορφής (Ελλάδα, 2600-2400 π.Χ.). Πηγή: Marble female figure, Attributed to the Bastis Master, 2600–2400 BCE, <https://www.metmuseum.org/toah/works-of-art/68.148/>, άδεια: CC0 1.0, Creative Commons Zero (CC0).....353
- Εικόνα 16: (δεξιά): Κυκλαδικά ειδώλια Πρωτοκυκλαδικής ΙΙ περιόδου, Αρχαιολογικό μουσείο Νάξου. Πηγή: Cycladic figurines from various places in the Naxian countryside. AM Naxos, Case 3, 110026.jpg, Cycladic figurines (canonical type, EC II) from various places in the Naxian countryside. Archaeological Museum of Naxos, Case 3., [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cycladic\\_figurines\\_from\\_various\\_places\\_in\\_the\\_Naxian\\_countryside.\\_AM\\_Naxos,\\_Case\\_3,\\_110026.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cycladic_figurines_from_various_places_in_the_Naxian_countryside._AM_Naxos,_Case_3,_110026.jpg), εικόνα του/της: Zde, άδεια: CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.....353
- Εικόνα 17: Ειδώλιο, Μέση Εποχή του Χαλκού, 2000-1700 π.Χ.. Μουσείο Κυκλαδικής τέχνης. Πηγή: <https://cycladic.gr> <https://collections.cycladic.gr/el/objects/1873/-?ctx=64fc9af9a5f400284479c95af9951803982bfa2d9&idx=201>.....354
- Εικόνα 18: Ειδώλιο, Μέση Εποχή του Χαλκού, 2000-1700 π.Χ.. Μουσείο Κυκλαδικής τέχνης. Πηγή: <https://cycladic.gr> <https://collections.cycladic.gr/el/objects/1876/-?ctx=64fc9af9a5f400284479c95af9951803982bfa2d9&idx=203>.....354
- Εικόνα 19: Ειδώλιο, Ύστερη Εποχή του Χαλκού, 1400-1200 π.Χ.. Μουσείο Κυκλαδικής τέχνης. Πηγή: <https://cycladic.gr> <https://collections.cycladic.gr/el/objects/1126/-?ctx=b4e04eb67319f7b83eadb485a87271ec1997bedb&idx=73>.....354
- Εικόνα 20: Ο ψαράς – (Θήρα, Ακρωτήρι, 1650 π.Χ.). Πηγή: Fresco of a fisherman, Akrotiri, Greece.jpg, Fresco of a fisherman with Coryphaena hippurus, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fresco\\_of\\_a\\_fisherman,\\_Akrotiri,\\_Greece.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fresco_of_a_fisherman,_Akrotiri,_Greece.jpg), εικόνα του/της: Yann Forget, άδεια: public domain.....355
- Εικόνα 21: Ο πρίγκηπας με τα κρίνα (Κνωσός, Ύστερη εποχή του Χαλκού, περίπου 1550 π.Χ.). Πηγή: Wall painting of the Priest-King from Knossos (North-South Corridor) - Heraklion AM.jpg, - object type:

- wall painting (fresco) on high relief ,  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wall\\_painting\\_of\\_the\\_Priest-King\\_from\\_Knossos\\_\(North-South\\_Corridor\)\\_-\\_Heraklion\\_AM.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wall_painting_of_the_Priest-King_from_Knossos_(North-South_Corridor)_-_Heraklion_AM.jpg) , εικόνα του/της: ArchaiOptix , άδεια: CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....355
- Εικόνα 22: Οι Γαλάζιες κυρίες, λεπτομέρεια (Κνωσός, Νεοανακτορική περίοδος, περίπου 1500 π.Χ.). Πηγή: B. Βουτσάς, [https://www.searchculture.gr/aggregator/edm/TAPA/000054-11631\\_19551.....](https://www.searchculture.gr/aggregator/edm/TAPA/000054-11631_19551.....)355
- Εικόνα 23: Κρατήρας των Πολεμιστών. (Μυκήνες, Ύστερη εποχή του χαλκού. 12ος αι. π.Χ.). Πηγή: Mycenaean Ceramic Krater depicting Warriors departing for battle, from Mycenae Acropolis, c. 1200 BC.jpg, Greek Prehistory Gallery, National Museum of Archaeology, Athens, Greece. Complete indexed photo collection at WorldHistoryPics.com, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mycenaean\\_Ceramic\\_Krater\\_depicting\\_Warriors\\_departing\\_for\\_battle,\\_from\\_Mycenae\\_Acropolis,\\_c.\\_1200\\_BC.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mycenaean_Ceramic_Krater_depicting_Warriors_departing_for_battle,_from_Mycenae_Acropolis,_c._1200_BC.jpg) , εικόνα του/της: Gary Todd from Xinzheng, China , άδεια: CC0 1.0, CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication.....357
- Εικόνα 24: Κρατήρας των Πολεμιστών. (Μυκήνες, Ύστερη εποχή του χαλκού. 12ος αι. π.Χ.). Λεπτομέρεια. Πηγή: 02 2020 Grecia photo Paolo Villa FO190060 (Museo archeologico di Atene) Cratere dei guerrieri dipinto con soldati NAMA 1426, Acropoli di Micene. XII secolo a.C., senza gimp.jpg, 02 2020 Greece photo Paolo Villa (Archaeological Museum of Athens) krater depicting soldier NAMA 1426 (helmet, cuirass, greaves, shield and spear) ready for war, a sack of supplies hanging from their spears. To the side, a woman raises hand for a farewell or mourning gesture. On the back five warriors with a different helmet, raise their spears. At handles relief bovine head and pairs of painted birds. Mycenaean Pictorial style. From the 'House of the Warrior Vase', Mycenae acropolis. 12th century BC, without gimp, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:02\\_2020\\_Grecia\\_photo\\_Paolo\\_Villa\\_FO190060\\_\(Museo\\_archeologico\\_di\\_Atene\)\\_Cratere\\_dei\\_guerrieri\\_dipinto\\_con\\_soldati\\_NAMA\\_1426,\\_Acropoli\\_di\\_Micene.\\_XII\\_secolo\\_a.C.\\_senza\\_gimp.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:02_2020_Grecia_photo_Paolo_Villa_FO190060_(Museo_archeologico_di_Atene)_Cratere_dei_guerrieri_dipinto_con_soldati_NAMA_1426,_Acropoli_di_Micene._XII_secolo_a.C._senza_gimp.jpg) , εικόνα του/της: Paolo Villa , άδεια: CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....357
- Εικόνα 25: Αμφορέας, απόδοση: Ζωγράφος της Αιώρας, Αρχαϊκή περίοδος, 540-530 π.Χ.. Μουσείο Κυκλαδικής Τέχνης. Πηγή: <https://cycladic.gr/> <https://collections.cycladic.gr/el/objects/3047/-?ctx=f188a70cfb0e4fe85108416f442932d1679452de&idx=321> .....357
- Εικόνα 26: Πελική. απόδοση: Ζωγράφος της Κενταυρομαχίας του Λούβρου, Κλασική περίοδος, 440 π.Χ.. Μουσείο Κυκλαδικής Τέχνης. Πηγή: <https://cycladic.gr/> <https://collections.cycladic.gr/el/objects/1565/-?ctx=30537c692aea9cd51a1b9c2b762d9bc5679d36a6&idx=0.....>357
- Εικόνα 27: Η Αφροδίτη της Μήλου, μάρμαρο - (150-50 π.Χ.). Πηγή: Venus de Milo - Musée du Louvre AGER LL 299 ; N 527 ; Ma 399.jpg, Venus de Milo, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:V%C3%A9nus\\_de\\_Milo\\_-\\_Mus%C3%A9e\\_du\\_Louvre\\_AGER\\_LL\\_299\\_:\\_N\\_527\\_:\\_Ma\\_399.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:V%C3%A9nus_de_Milo_-_Mus%C3%A9e_du_Louvre_AGER_LL_299_:_N_527_:_Ma_399.jpg) , εικόνα του/της: Shonagon , άδεια: CC0 1.0, Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication.....360
- Εικόνα 28: Zuccone, μάρμαρο - Donatello (~1423-1425). Πηγή: Zuccone Donatello OPA Florence.jpg, Zuccone, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zuccone\\_Donatello\\_OPA\\_Florence.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zuccone_Donatello_OPA_Florence.jpg) , εικόνα του/της: Jastrow , άδεια: public domain.....360
- Εικόνα 29: Μετανοούσα Μαγδαληνή, ξύλο - Donatello (~1453-1455). Πηγή: Mary Magdalen Donatello OPA Florence.jpg, Statue of Mary Magdalene, detail. Was probably placed on the south-western side of the Baptistry of Florence, Italy. Painted and gilded wood, Museo dell'Opera del Duomo, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mary\\_Magdalen\\_Donatello\\_OPA\\_Florence.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mary_Magdalen_Donatello_OPA_Florence.jpg) , εικόνα του/της: Jastrow , άδεια: public domain.....360
- Εικόνα 30: Leonardo DaVinci. Επιφανειακή μελέτη ανατομίας ώμου και λαιμού, ~1510μ.Χ. Πηγή: Leonardo da Vinci - Superficial anatomy of the shoulder and neck (recto) - Google Art Project.jpg, Superficial anatomy of the shoulder and neck (recto), [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leonardo\\_da\\_Vinci\\_-\\_Superficial\\_anatomy\\_of\\_the\\_shoulders\\_and\\_neck\\_\(recto\)\\_-\\_Google\\_Art\\_Project.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leonardo_da_Vinci_-_Superficial_anatomy_of_the_shoulders_and_neck_(recto)_-_Google_Art_Project.jpg) , εικόνα του/της: oAG1jpfKAZFzWQ at Google Cultural Institute maximum zoom level , άδεια: public domain. ....361



- Εικόνα 31: Michelangelo, Δαβίδ, 1501-1504 μ.Χ., Galleria dell' Accademia (Φλωρεντία). Πηγή: Michelangelo's David 2021 – 1.jpg, Michelangelo's David, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelangelo%27s\\_David\\_2021\\_-\\_1.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Michelangelo%27s_David_2021_-_1.jpg) , εικόνα του/της: Commonists , άδεια: CC BY-SA 4.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο αρχείο.....361
- Εικόνα 32: Michelangelo. Η Δημιουργία του Αδάμ, Cappella Sistina, ~1511 μ.Χ. Πηγή: The Creation of Adam by Michelangelo-, <https://www.flickr.com/photos/larrywkoester/32975724116/in/photolist-SeXcVw-2jLqGUs-c5Ywao-2k2RPbg-2pe8gmd-2kQKwTc-ooAJBF-2gJybdH-2nXY8x5-6iMx87-7EBaRr-2nRyvS4-nEhXGV-5t4aVD-a5uPxj-2jDbbA7-2kqWras-UCrtZ9-qLFPro-2eaiCpt-2nWRqkF-2gCwEyz-2nWTM1t-2jkNnEq-2jnHJGp-2pY5BRD-24dSfhm-2nEaiNY-2nVNcDc-2jXMTco-2pB5XmL-Z3j5CJ-2nWPgv5-2irhmSS-UEKQ15-mqdsj8-Jz8qGh-2pzRNAX-2pH4gY4-Uu81Gf-ksx4oB-25FVAEA-2pz2UkN-2kjmCVR-52BhhS-2nVLFQT-5WBMTa-2g9fJQN-2pCPVmG-2oh5PWy> , εικόνα του/της: Larry Koester, άδεια: CC BY 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.....362



## Παράρτημα II - Υπολογιστικός, Παραμετρικός, Γενεσιουργός και Αλγοριθμικός σχεδιασμός - Ψηφιακή κατασκευή

Σε αυτό το παράρτημα παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με τον **Υπολογιστικό, Παραμετρικό, Γενεσιουργό και Αλγοριθμικό σχεδιασμό** καθώς και την **Ψηφιακή κατασκευή**, ως τεχνολογικές καινοτομίες και εξελίξεις που έχουν διαμορφώσει σε σημαντικό βαθμό την υπάρχουσα κατάσταση, όσον αφορά στη χρήση της τεχνολογίας στην αρχιτεκτονική.

### 1. Ψηφιακή επανάσταση στην αρχιτεκτονική

Η εισαγωγή της χρήσης των ηλεκτρονικών υπολογιστών στο πεδίο της αρχιτεκτονικής δημιούργησε σταδιακά νέα εργαλεία και τεχνικές τα οποία στην εποχή μας, στην εξελιγμένη μορφή τους, χρησιμοποιούνται όλο και εκτενέστερα. Η τάση που επικρατεί, φαίνεται ότι μελλοντικά θα ενισχυθεί περισσότερο και η χρήση ψηφιακών τεχνικών και εργαλείων θα κυριαρχήσει στην πρακτική της αρχιτεκτονικής, του σχεδιασμού και της κατασκευής.

Το 1960 ο **J.C.R. Licklider** στο **"Man-Computer Symbiosis"**<sup>494</sup> προβλέπει τη συμβίωση-συνεργασία ανθρώπου και υπολογιστή, η οποία θα αποσκοπεί πρώτον στο να δοθεί στους υπολογιστές η δυνατότητα να διευκολύνουν τη σχηματοποιητική σκέψη, καθώς τώρα οι υπολογιστές μπορούν να συνεισφέρουν στη λύση προβλημάτων, και δεύτερον να επιτρέψουν τη συνεργασία ανθρώπων και υπολογιστών στη λήψη αποφάσεων και τον έλεγχο πολύπλοκων καταστάσεων, χωρίς να βασίζονται σε μια άκαμπτη εξάρτηση από προκαθορισμένα προγράμματα. Σε αυτή την αναμενόμενη συμβίωση, ο Licklider<sup>495</sup> πιστεύει ότι οι άνθρωποι θα θέτουν τους στόχους, τις υποθέσεις, τα κριτήρια και τις αξιολογήσεις, ενώ οι μηχανές θα κάνουν επαναλαμβανόμενες εργασίες, προκειμένου να γίνει προεργασία για επίγνωση και αποφάσεις σχετικά με την επιστήμη.

Ο **Gordon Pask** το 1969 στο άρθρο του με τίτλο **"The Architectural Relevance of Cybernetics"**<sup>496</sup>, υποστηρίζει ότι η αρχιτεκτονική σχετίζεται με την κυβερνητική<sup>497</sup> όσο κάθε άλλη επιστήμη. Οι αρχιτέκτονες και τα προβλήματα στο σχεδιασμό, τα τελευταία 100 χρόνια, οδήγησαν σε ένα

494 J.C.R. Licklider, 'Man-Computer Symbiosis', *IRE Transactions on Human Factors in Electronics* HFE-1 (1960): 4–11.

495 Licklider.

496 Gordon Pask, 'The Architectural Relevance of Cybernetics', *Architectural Design*, 1969,

[https://arl.human.cornell.edu/879Readings/GordonPask\\_Architectural%20Relevance%20of%20Cybernetics.pdf](https://arl.human.cornell.edu/879Readings/GordonPask_Architectural%20Relevance%20of%20Cybernetics.pdf).

497 **Κυβερνητική** (cybernetics) είναι ένα υποσύνολο της επιστήμης συστημάτων το οποίο επικεντρώνεται στη μελέτη κυβερνητικών συστημάτων. Η κυβερνητική προέκυψε μετά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο από μία μείξη της θεωρίας πληροφοριών, η οποία μελετούσε τη μαθηματική έννοια της πληροφορίας από τη σκοπιά των τηλεπικοινωνιών, και της θεωρίας ελέγχου, η οποία μελετούσε πρακτικούς συνθετικούς μηχανισμούς ανάδρασης από τη σκοπιά των μηχανικών. Χωρίς ακόμη να έχει διαμορφωθεί τότε η επιστήμη συστημάτων και η ολιστική μεθοδολογία, η κυβερνητική υιοθέτησε εξ αρχής μία συστημική προσέγγιση και μία έμφαση στην αυτοοργάνωση και στην αυτονομία, αποτελώντας έτσι σημαντική πηγή ερεθισμάτων για την ανάπτυξη της σύγχρονης επιστήμης συστημάτων αλλά και κλάδων όπως η τεχνητή νοημοσύνη. Ιστορικά, κεντρική ιδέα πίσω από την κυβερνητική υπήρξε η ομοιότητα μεταξύ ζωντανών οργανισμών και τεχνολογικών μηχανισμών, μία ομοιότητα που μοντελοποιήθηκε με τις έννοιες του συστήματος, της ομοιόστασης και της ανάδρασης. Σε σχέση με τη θεωρία συστημάτων η κυβερνητική επικεντρώνεται περισσότερο στη λειτουργία των πολύπλοκων συστημάτων, δηλαδή στον τρόπο που ελέγχουν τη δράση τους, επικοινωνούν μεταξύ τους, αλληλεπιδρούν τα μέρη τους κλπ, παρά στη δομή τους. 'Επιστήμη συστημάτων', στο *Βικιπαίδεια*, 5 Φεβρουάριος 2020, [https://el.wikipedia.org/wiki/Επιστήμη\\_συστημάτων](https://el.wikipedia.org/wiki/Επιστήμη_συστημάτων).

αυξημένο ενδιαφέρον στις οργανωτικές ιδιότητες της ανάπτυξης, της επικοινωνίας και του ελέγχου. Ο Pask προτείνει την έννοια του **mutualism**, σύμφωνα με την οποία υπάρχει μια δυναμική επικοινωνία ανάμεσα στο χρήστη και στο αντικείμενο/κτήριο-σύστημα και το περιβάλλον του. Για τον Pask είναι ξεκάθαρο ότι το ανθρώπινο τμήμα του συστήματος είναι δυναμικό, ενώ το δομικό (structural) τμήμα, αν και λιγότερο εμφανώς, πρέπει να θεωρείται ότι διαρκώς «ρυθμίζει» τους ανθρώπινους κατοίκους του.

Στη λογική αυτή, ο **Cedric Price**<sup>498</sup> στο μη υλοποιημένο conceptual project του **Fun Palace** (1959-1961) προτείνει μια κατασκευή που προσαρμόζεται στις απαιτήσεις των χρηστών με δυναμικό, μη προκαθορισμένο τρόπο.

Η **Computer City** (1964) από τους **Archigram** είναι μια σύγχρονη πόλη - δίκτυο στην οποία διακρίνονται οι ροές πληροφορίας, κυκλοφορίας και υποδομών. Η σύγχρονη αυτή πόλη υποστηρίζεται από ηλεκτρονικό εξοπλισμό επιτήρησης και διαχείρισης των λειτουργιών της. Το μοντέλο της πόλης που προτείνεται είναι ένας συνδυασμός ανόργανων και οργανικών λειτουργιών, με τις τελευταίες να δημιουργούν λογικές και τυχαίες δράσεις, αντιδράσεις και αντί-αντιδράσεις<sup>499</sup>.

Το 1976-1979 ο **Cedric Price** σε συνεργασία με τους **John** και **Julia Frazer** χρησιμοποιούν το **Generator Project**, ένα σύστημα ηλεκτρονικού υπολογιστή, για να οργανώσουν τη διάταξη ενός συγκροτήματος κτηρίων για τη Gilman Corporation. Στο σχεδιασμό προτείνεται η τοποθέτηση και χρήση computer chip σε κάθε μέρος του κτηρίου, έτσι ώστε να γίνεται έξυπνη λειτουργία του. Με αυτόν τον τρόπο, το κτήριο ελέγχει το ίδιο την οργάνωσή του ανάλογα με τη χρήση. Το σύστημα του υπολογιστή λειτουργούσε με 4 προγράμματα, από τα οποία τα 3 χρησίμευαν στην εισαγωγή δεδομένων για το σχεδιασμό παραλλαγών λύσεων και βελτιώσεων: α. Πρόγραμμα βάσης δεδομένων και κανόνων, β. Πρόγραμμα inventory που προσέφερε πληροφορίες κατά τη χρήση και γ. Πρόγραμμα για «διαδραστική ανάκριση» από το χρήστη<sup>500</sup>.

Οι πρώτοι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, περιορισμένων δυνατοτήτων φυσικά σε σύγκριση με τα σύγχρονα δεδομένα, ήδη από τη δεκαετία του 1970 εισάγονται σταδιακά στη διαδικασία του σχεδιασμού. Η άποψη του **N. Negroponte** είναι ότι στο μακρινό μέλλον οι αρχιτεκτονικές μηχανές δεν θα μας βοηθούν να σχεδιάζουμε, αλλά αντίθετα θα είναι οι ίδιες ένα έξυπνο και αποκριτικό περιβάλλον μέσα στο οποίο θα ζούμε<sup>501</sup>.

Ο **M. Carpo** στο "**Digital Style**"<sup>502</sup>, αναφέρει ότι η αρχιτεκτονική υιοθετούσε από νωρίς τα ψηφιακά εργαλεία. Ήδη από το 1990 θεωρίες ψηφιακού σχεδιασμού καινοτόμησαν και προέβλεψαν την στροφή προς την ψηφιακή εποχή.

Τα πρώτα σχεδιαστικά λογισμικά τύπου CAD αναπαριστούσαν σε δύο διαστάσεις 2D χωρικά δεδομένα και ήταν περιορισμένων δυνατοτήτων. Τα λογισμικά, σταδιακά, και παράλληλα με την εξέλιξη του hardware, αναπτύσσονταν τεχνολογικά και άρχισαν να διαχειρίζονται και τις τρεις διαστάσεις (3D). Τέτοια παραδείγματα αποτελούν τα **PRONTO** (1957), το **Sketchpad** (1963) στον

498 Ruairi Glynn, 'Fun Palace – Cedric Price', *Interactive Architecture Lab* (blog), ημερομηνία πρόσβασης 17 Απρίλιος 2020, <http://www.interactivearchitecture.org/fun-palace-cedric-price.html>.

499 Simon Sadler, *Archigram: Architecture without Architecture* (Cambridge, Mass: The MIT Press, 2005), 121.

500 'The Generator Project', *Interactive Architecture Lab* (blog), ημερομηνία πρόσβασης 17 Απρίλιος 2020, <http://www.interactivearchitecture.org/the-generator-project.html>.

501 Nicholas Negroponte, *The Architecture Machine: Toward a More Human Environment*, First Edition edition (Cambridge, Mass: The MIT Press, 1973), 5.

502 Mario Carpo, 'Digital Style', *Log*, τχ. 23 (2011): 41–52.

υπολογιστή TX-2<sup>503 504</sup>, **CADD** (1966) από την McDonell-Douglas, **PDGS** (1967) από την Ford, **SynthaVision** (1970) από την MAGI, **ADAM** (1971), **ComputerVision** (1975), CADAM (1977), **CATIA** (1977), **Unigraphics** (1978), **MiniCAD** (1980) από την Apple, **Autocad** (1982), **BRL-CAD** (1983) κ.ο.κ.<sup>505</sup>

<sup>506</sup>

Ο **P. Eisenman** στο **Biocenter** (1987) χρησιμοποίησε ηλεκτρονικό υπολογιστή και κώδικα λογισμικού για να εκφράσει τη σκέψη του ως μορφολογικό διάγραμμα, το οποίο αναπαριστούσε πιθανές σχεδιαστικές λύσεις μέσω της αντιγραφής, μεταγραφής και μετάφρασης<sup>507 508</sup>.

Αντίστοιχα παραδείγματα αποτελούν οι πρωτοπόρες, για παράδειγμα, εφαρμογές χρήσης ψηφιακού σχεδιασμού και κατασκευής του **F. Gehry** στο **Guggenheim** του **Bilbao** (1997) (Εικόνα 1)(Εικόνα 2), και σε επόμενα έργα του.



Εικόνα 1: Guggenheim Bilbao (1997), F. Gehry. Πηγή: Bilbao - Museo Guggenheim 2014 - panoramio.jpg, Bilbao - Museo Guggenheim 2014, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bilbao\\_-\\_Museo\\_Guggenheim\\_2014\\_-\\_panoramio.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bilbao_-_Museo_Guggenheim_2014_-_panoramio.jpg) (φωτογραφία 2014), εικόνα του/της: *Βαλεριή Δεδ*, άδεια: CC BY 3.0, [Creative Commons Attribution 3.0 Unported license](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/).

Εικόνα 2: Guggenheim Bilbao (1997), F. Gehry. Πηγή: [Guggenheim detail.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Guggenheim_detail.jpg), [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Guggenheim\\_detail.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Guggenheim_detail.jpg) (φωτογραφία 2004), εικόνα του/της: *Chris 73*, άδεια: CC BY-SA 3.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/).

Στο συγκεκριμένο έργο χρησιμοποιήθηκε με εφαρμογή στην αρχιτεκτονική το λογισμικό **CATIA** (λογισμικό που χρησιμοποιούνταν μέχρι τότε στην αεροναυπηγική)<sup>509</sup>, ώστε να σχεδιαστούν και να

<sup>503</sup> 'Sketchpad', στο *Wikipedia*, 20 Μάρτιος 2020, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sketchpad&oldid=946503020>.

<sup>504</sup> Daniel Davis, 'A History of Parametric', Daniel Davis, ημερομηνία πρόσβασης 19 Απρίλιος 2020, <https://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/>.

<sup>505</sup> 'The-history-of-CAD\_CADENAS\_R3.png (PNG Image, 2015 × 1000 pixels) - Scaled (91%)', ημερομηνία πρόσβασης 21 Απρίλιος 2020, [https://partsolutions.com/wp-content/uploads/2017/09/The-history-of-CAD\\_CADENAS\\_R3.png](https://partsolutions.com/wp-content/uploads/2017/09/The-history-of-CAD_CADENAS_R3.png).

<sup>506</sup> 'History of CAD Software', στο *Wikipedia*, 3 Μάρτιος 2020, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=History\\_of\\_CAD\\_software&oldid=943716965](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=History_of_CAD_software&oldid=943716965).

<sup>507</sup> 'Biocenter 1987 — EISENMAN ARCHITECTS', ημερομηνία πρόσβασης 2 Ιούλιος 2024, <https://eisenmanarchitects.com/Biocenter-1987>.

<sup>508</sup> 'The Digital in Architecture: Then, Now and in the Future', SPACE10, 12 Νοέμβριος 2019, <https://space10.com/project/digital-in-architecture/>.

κατασκευαστούν πολύπλοκες γεωμετρίες στο χώρο με πολλαπλές καμπυλότητες, κάτι που δεν ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί μέχρι τότε, χωρίς τη συγκεκριμένη τεχνολογική υποβοήθηση.

Οι πειραματισμοί του **Greg Lynn** στο **Embryological House** (1997-2001), αποτελούν τις παραλλαγές μορφών κατοικίας που προκύπτουν από αυτό που καλεί **“mass customization”**, έτσι ώστε να μπορεί να παράγει μαζικά μεγάλο αριθμό μοναδικά ξεχωριστών προϊόντων. Οι πειραματισμοί βασίστηκαν στη χρήση **CAD** (Computer Aided Design) και **CAM** (Computer Aided Manufacturing). Με αυτή την τεχνική σχεδιάστηκαν ως παραλλαγές, 50.000 διαφορετικές κατοικίες, με τον ίδιο αριθμό και τύπο εξαρτημάτων <sup>510</sup>.

Το **Yokohama International Port Terminal** από τους **AZPA/FOA** (1995) είναι ένα παράδειγμα έργου πολύπλοκου γεωμετρικού σχεδιασμού, με καμπύλες μορφές χωρίς ορθοκανονικά στοιχεία ή επαναλαμβανόμενα – τυποποιημένα μέρη. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή παρόμοιων, αλλά όχι πανομοιότυπων στοιχείων, έγιναν εφικτά μέσω της χρήσης ψηφιακών εργαλείων.

Ακόμα ένα χαρακτηριστικό αρχιτεκτονικό παράδειγμα αυτής της περιόδου είναι το **Mercedes Benz Museum** από το **UN Studio** (2001-2006) στη Στουτγάρδη, ένα πολύπλοκο γεωμετρικό σχέδιο με συνεχή μορφή που εμπεριέχει την έννοια της ροής, το οποίο και πάλι υλοποιήθηκε με τη χρήση σύγχρονου λογισμικού <sup>511</sup>.



Εικόνα 3: Φωτογραφία μοντέλου σε φυσική κλίμακα της σειράς Embryological House. Πηγή: Architecture Model - Large scale model for the unrealized Embryological House by Greg Lynn FORM.jpeg,

<https://www.flickr.com/photos/eager/10781374024/in/photostream/>, εικόνα του/της: 準建築人手札網站 Forgemind ArchiMedia, άδεια: CC BY 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.

509 ‘The Software Behind Frank Gehry’s Geometrically Complex Architecture’, Priceonomics, ημερομηνία πρόσβασης 17 Απρίλιος 2020, <http://priceonomics.com/the-software-behind-frank-gehrys-geometrically/>.

510 Canadian Centre for Architecture (CCA), ‘Embryological House’, ημερομηνία πρόσβασης 18 Απρίλιος 2020, <https://www.cca.qc.ca/en/articles/issues/4/origins-of-the-digital/5/embryological-house>.

511 ‘Mercedes-Benz Museum’, UNStudio, 17 Απρίλιος 2020, <http://www.unstudio.com/en/page/12482/mercedes-benz-museum>.



Εικόνα 4: Yokohama International Port Terminal (1995), AZPA/FOA. Πηγή: Yokohama International Port Terminal, <https://www.flickr.com/photos/st3f4n/2826250178/>, εικόνα του/της: [DocChewbacca](#), άδεια: CC BY-SA 2.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>



Εικόνα 5: Mercedes-Benz Museum (2001-2006), UN Studio. Πηγή: Mercedes-Benz Museum 201312 08 blue hour.jpg, Mercedes-Benz Museum in Stuttgart, Germany, during blue hour, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mercedes-Benz\\_Museum\\_201312\\_08\\_blue\\_hour.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mercedes-Benz_Museum_201312_08_blue_hour.jpg), εικόνα του/της: [Julian Herzog](#), άδεια: [GNU Free Documentation License, Version 1.2](#), [CC BY 4.0](#), [Creative Commons Attribution 4.0 International](#) license, The photographic reproduction of this work is covered under the article § 59 of the [German copyright law](#).

Σύμφωνα με τον **Carpo**, η πληροφορία στη σύγχρονη εποχή είναι αποθηκευμένη και ανασύρεται από βάσεις δεδομένων μέσω αλγορίθμων (π.χ. Google) <sup>512</sup>. Παράλληλα, μπορεί και να συντεθεί αποσπασματικά από τους πολλούς δημιουργούς (π.χ. Wikipedia) <sup>513</sup>. Για τον Carpo, στην ψηφιακή εποχή ο πρωταγωνιστής δεν είναι ο μεμονωμένος χαρισματικός δημιουργός όπως συνέβαινε μέχρι τώρα, αλλά ένα σύνολο εξειδικευμένων ειδικών οι οποίοι συνεργάζονται στο..., όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο Carpo, “**the style of many hands**” <sup>514</sup>. Αυτό το είδος συνολικού/αθροιστικού σχεδιασμού συντελεί κατά κάποιο τρόπο στη σύγκλιση σε ένα μέσο όρο ενός πολύπλοκου στατιστικού μοντέλου λύσεων. Προκειμένου να υπάρχει δυνατότητα αυτοδιόρθωσης του, το μοντέλο αυτό θα πρέπει να παραμένει «ανοιχτό» στο μεγαλύτερο δυνατό αριθμό διορθωτικών παραγόντων για το μεγαλύτερο δυνατό διάστημα <sup>515</sup>. Αυτού του είδους λογική έχει μεταφερθεί και στο σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής και στην κατασκευή. Η ψηφιακή αρχιτεκτονική είναι ένας τομέας όπου ο σχεδιαστής μπορεί να ορίσει κάποια γενική λειτουργία (function) και τα όρια εντός των οποίων μπορούν να κινηθούν οι τιμές των μεταβλητών-παραμέτρων (parameters).

Η έννοια του **παραμετρισμού** (parametricism) όπως θα εξεταστεί στην συνέχεια, εμπεριέχει κατά τον Carpo τη λογική του συλλογικού σχεδιασμού, υπό το πρίσμα που παρουσιάστηκε προηγουμένως <sup>516</sup>. Η άλλη προσέγγιση κατά τον Carpo στον «συμμετοχικό» ψηφιακό σχεδιασμό είναι το λογισμικό τύπου **BIM** (Building Information Modelling), το οποίο επιτρέπει την ταυτόχρονη εργασία πολλαπλών ειδικοτήτων σε ένα ψηφιακό μοντέλο από τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού. Τέτοιο παράδειγμα

512 Carpo, ‘Digital Style’, 42.

513 Carpo, 47.

514 Carpo, 44.

515 Carpo, 45.

516 Carpo, 47.

συμμετοχικής ταυτόχρονης δημιουργίας μέσω διαδικτύου, σε απλοποιημένη μορφή του, αποτελεί η χρήση κειμένων **Google Docs** ή λογιστικών φύλλων **Google Sheets**, όπου πολλοί χρήστες εισάγουν δεδομένα ταυτόχρονα και αλληλεπιδρούν τόσο σε πραγματικό (real time - σύγχρονο) όσο και σε μη πραγματικό χρόνο (ασύγχρονα) μεταξύ τους στο ίδιο αρχείο, χωρίς να απαιτείται η τοπική αποθήκευσή του ή συμβατική σειριακή εργασία του κάθε χρήστη ή παρουσία στον ίδιο φυσικό χώρο.

Το δυαδικό σύστημα, στο οποίο είναι βασισμένοι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, επιτρέπει την ενσωμάτωση της μαθηματικής λογικής ακόμα περισσότερο στη διαδικασία της αναπαράστασης και στο σχεδιασμό. Αρχίζει να πραγματοποιείται η μετάβαση από το αναλογικό στο ψηφιακό μοντέλο, με την έννοια της πληροφορίας (information) και των δεδομένων (data) να αποκτούν σταδιακά όλο και περισσότερο βαρύνουσα σημασία.

Η εισαγωγή δεδομένων στον υπολογιστή, προκειμένου να γίνει η επεξεργασία τους μέσω λογισμικού, απαιτεί τη μετάφρασή τους σε αριθμητικές τιμές και μαθηματικές εκφράσεις. Η πληροφορία του πραγματικού κόσμου καλείται λοιπόν να μεταφραστεί από **αναλογικά** σε **ψηφιακά δεδομένα**. Για παράδειγμα, μια ευθεία γραμμή που υπάρχει στον φυσικό κόσμο, αναπαρίσταται στο ψηφιακό περιβάλλον ως διάνυσμα (vector) στο χώρο, το οποίο ορίζεται από συντεταγμένες αρχικού και τελικού σημείου. Το λογισμικό (software) λοιπόν και ο υπολογιστής (hardware) γίνονται ένα συνδεδεμένο μέσο ανάμεσα στην αναλογική σκέψη του/των δημιουργών και την ψηφιακή πληροφορία. Η διαδικασία της μετατροπής από το αναλογικό στο ψηφιακό είναι μια αφαιρετική διαδικασία ψηφιοποίησης του φυσικού κόσμου η οποία ολοκληρώνεται, όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, στο στάδιο της ψηφιακής κατασκευής (digital manufacturing), όπου από τα ψηφιακά δεδομένα προκύπτει τελικά κάποιο αναλογικό φυσικό προϊόν.

Οι αυξημένες τεχνικές δυνατότητες των ηλεκτρονικών υπολογιστών δίνουν σήμερα τη δυνατότητα για ψηφιακή καταγραφή, απεικόνιση και επεξεργασία δεδομένων σε δύο (**2D**), τρεις (**3D**) και τέσσερις (**4D** – χρόνος) διαστάσεις. Η προσομοίωση αποτελεί πλέον βασικό εργαλείο του σχεδιασμού και χρησιμοποιείται για να προβλέψει τα προϊόντα του, προκειμένου να γίνουν αξιολογήσεις και βελτιστοποιήσεις. Εξελισσόμενες ή νέες ψηφιακές τεχνολογίες, όπως η Εικονική Πραγματικότητα (**Virtual Reality, VR**) ή η Επαυξημένη Πραγματικότητα (**Augmented Reality, AR**) αρχίζουν σταδιακά να ενσωματώνονται σε μεθοδολογίες ψηφιακής επεξεργασίας, αποκαλύπτοντας νέα πλεονεκτήματα στο σχεδιασμό, την αναπαράσταση και την κατασκευή (ενδεικτικά βλέπε <sup>517</sup>). Ο τρόπος εργασίας έχει αλλάξει, καθώς η χρήση μοντέλων-προσομοιωμάτων, είτε αρχιτεκτονικών, είτε στατικών, είτε μηχανολογικών ή άλλων μοντέλων, ξεκινάει από τα αρχικά στάδια πλέον του σχεδιασμού και συνοδεύει ένα έργο μέχρι και το στάδιο της κατασκευής και ολοκλήρωσής του. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο J. Baudrillard <sup>518</sup>, η προσομοίωση χαρακτηρίζεται από την ακρίβεια που έχει το μοντέλο και ότι όλα τα μοντέλα έρχονται πρώτα, με την τροχιακή κυκλοφορία τους να αποτελεί το πραγματικό μαγνητικό πεδίο των γεγονότων.

Η ψηφιακή εποχή στο σχεδιασμό και την κατασκευή μπορεί να διακριθεί σε δύο χαρακτηριστικές ενότητες, οι οποίες είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους. Την ενότητα των ειδών ψηφιακού σχεδιασμού: η οποία περιλαμβάνει τον **παραμετρικό σχεδιασμό**, τον **αλγοριθμικό σχεδιασμό** και τον **υπολογιστικό**

<sup>517</sup> 'Fologram', ημερομηνία πρόσβασης 27 Σεπτέμβριος 2023, <https://fologram.com/>.

<sup>518</sup> Jean Baudrillard, *Simulations*, μετάφρ. Phil Beitchman, Paul Foss, και Paul Patton (New York City, N.Y., U.S.A: Semiotext, 1983), 32.



**σχεδιασμό** και την ενότητα της **ψηφιακής κατασκευής**. Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιαστούν πιο αναλυτικά οι δύο αυτές ενότητες καθώς και η μεταξύ τους συνάφεια.

## 2. Υπολογιστικός, Παραμετρικός, Γενεσιουργός και Αλγοριθμικός σχεδιασμός (computational, parametric, generative and algorithmic design)

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η σύγχρονη τεχνολογία έχει δώσει νέες εναλλακτικές όσον αφορά στις μεθόδους σχεδιασμού και κατασκευής. Κάποιες από αυτές επιτρέπουν την ελεγχόμενη ενσωμάτωση της έννοιας της τυχαιότητας, έτσι ώστε αυτή να λειτουργεί εποικοδομητικά στη συνολική σχεδιαστική προσέγγιση και πολλές φορές να δίνει τη δυνατότητα λύσεων, αρχιτεκτονικά και κατασκευαστικά, που δεν θα ήταν εφικτές διαφορετικά. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι εξελίξεις στο σχεδιασμό και την κατασκευή που δίνουν ακριβώς αυτές τις νέες δυνατότητες. Έμφαση θα δοθεί στον παραμετρικό σχεδιασμό, τον αλγοριθμικό σχεδιασμό και την ψηφιακή κατασκευή.

Με τον όρο **computational design** στον αρχιτεκτονικό **σχεδιασμό** και **κατασκευή**, αναφέρονται όλες εκείνες οι μεθοδολογίες και τεχνικές οι οποίες κάνουν χρήση υπολογιστικών εργαλείων, μέσω της χρήσης **software** προκειμένου να υποβοηθήσουν, να κατευθύνουν ή να ολοκληρώσουν ένα σχεδιαστικό έργο. Η σύγχρονη τεχνολογία έχει κάνει πλέον προσιτή αυτού του είδους την προσέγγιση, καθώς πλέον υπάρχει πληθώρα διαθέσιμων εργαλείων ακόμα και για τον μέσο χρήστη, τα οποία εξυπηρετούν διαφορετικές μεθοδολογίες και τεχνικές σχεδιασμού και κατασκευής. Σε αυτά περιλαμβάνονται το **CAD** (Computer Aided Design), ο **παραμετρικός** και ο **αλγοριθμικός σχεδιασμός**, η τεχνολογία **BIM** (Building Information Modelling), εργαλεία προγραμματισμού, αυτοματοποίησης και βελτιστοποίησης σε διάφορες γλώσσες κώδικα **scripting** (Python, Maxscript, AutoLISP, Processing, RhinoScript, MEL, κ.λπ.), λογισμικό **προσομοίωσης** (simulation) γεωμετρικών, στατικών, δυναμικών και ενεργειακών χαρακτηριστικών, το **CAM** (Computer Aided Manufacturing) και η **ψηφιακή κατασκευή** (digital manufacturing). Τα πλεονεκτήματα χρήσης τέτοιων εργαλείων είναι ότι αυτά δίνουν τη δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλου αριθμού δεδομένων, σε γρήγορο χρόνο, σε πολύπλοκες δομές, με μεγαλύτερη ακρίβεια και με τρόπους και μεθόδους που δεν υπήρχαν στο παρελθόν. Συνεπώς, δημιουργούνται νέα προϊόντα σχεδιασμού και κατασκευής που δεν θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν με συμβατικές μεθοδολογίες και τεχνικές.

Η παραμετροποίηση στην αρχιτεκτονική, αν και κανείς μπορεί να θεωρήσει ότι είναι μια πρόσφατη πρακτική η οποία συνδέεται με ψηφιακές δεξιότητες και εξελίξεις, έχει παρατηρηθεί να υλοποιείται υπό μια έννοια, ήδη από την εποχή του αναλογικού σχεδιασμού.

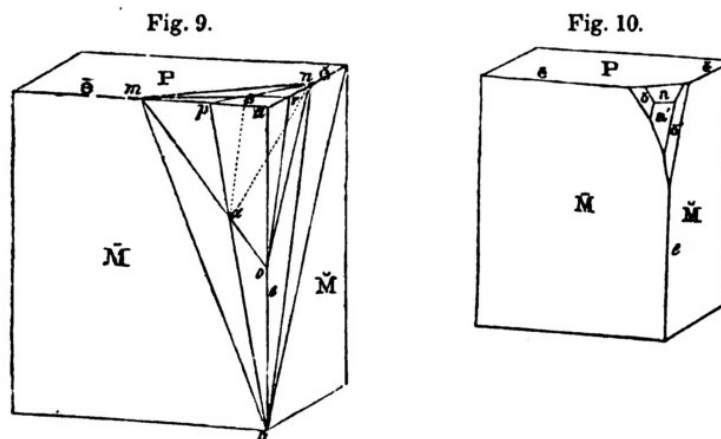
Σύμφωνα με τον **Carpo**<sup>519</sup>, ο **Vitruvius** και ο **Leon Batista Alberti** στα χειρόγραφα τους, τα οποία δεν περιείχαν εικόνες για λόγους δυνατότητας αναπαραγωγής, περιέγραφαν τρόπους κατασκευής κτιρίων μόνο με τη χρήση λεκτικών κανόνων που όριζαν τις αναλογίες και τη σχέση των μερών των αρχιτεκτονικών στοιχείων. Έτσι, το τελικό προϊόν, προκύπτει από μια μέθοδο ή έναν κώδικα (script) όπως αναφέρει ο Carpo, και μπορεί να έχει πολλές παραλλαγές στη μορφή οι οποίες όμως είναι παραπλήσιες, καθώς προέρχονται από την ίδια πηγή. Στη μεσαιωνική αρχιτεκτονική, π.χ. Γοθική, υπάρχουν κανόνες οι οποίοι εξηγούν τη διαδικασία κατασκευής ως στάδια (αλγόριθμος), αλλά δεν

519 Mario Carpo, 'Parametric Notations: The Birth of the Non-Standard', *Architectural Design* 86, τχ. 2 (2016): 27, <https://doi.org/10.1002/ad.2020>.

προκαθορίζουν επακριβώς την τελική μορφή του κάθε μεμονωμένου στοιχείου. Έτσι, πάλι παρουσιάζεται η περίπτωση όπου στοιχεία της ίδιας οικογένειας (π.χ. κιονόκρανα), είναι συχνά παρόμοια, αλλά όχι ακριβώς ίδια. Τα στοιχεία αυτά ανήκουν στην ίδια κλάση (class) με το καθένα από αυτά να διαφοροποιείται μοναδικά.

Ο **Pierre Lévy** αναλύοντας την έννοια της δυνητικοποίησης εξηγεί ότι είναι μια διαδικασία αλλαγής ταυτότητας, **από την επιμέρους λύση σε μια γενική προβληματική**<sup>520</sup>. Αντί λοιπόν να αναζητείται μία και μόνο συγκεκριμένη λύση σε ένα πρόβλημα, όταν επιτυγχάνεται η αντιμετώπισή του με πιο γενικό τρόπο και γίνεται προσπάθεια δημιουργίας **ενός μηχανισμού που παράγει λύσεις** (στη συγκεκριμένη περίπτωση μιας παραμετρικής διάταξης η οποία μπορεί να παράξει πολλαπλές λύσεις), δυνητικοποιείται το πρόβλημα και εμπλουτίζεται ο χώρος λύσεων, καθώς αποδεσμεύεται από τη μοναδική δυνατότητα.

Σύμφωνα με τον **Mitchell**<sup>521</sup>, μπορεί κανείς να αναφερθεί σε κάποιο αντικείμενο είτε δείχνοντάς το, είτε επιλέγοντας έναν τίτλο για αυτό και χρησιμοποιώντας στη συνέχεια τον τίτλο του. Έπειτα, τα αντικείμενα μπορούν να περιγραφούν. Ο Mitchell<sup>522</sup> φέρνοντας ως παράδειγμα τον Παρθενώνα, θεωρεί ότι υπάρχει καταρχάς η γενική περιγραφή του τίτλου, η οποία δέχεται το αντικείμενο ως σύνολο. Όμως, υπάρχει μια ιεραρχία από μέρη, τα οποία αποτελούν το συνολικό αντικείμενο, κι αυτά με τη σειρά τους αποτελούνται από μικρότερα μέρη. Με άλλα λόγια, το σύνολο μπορεί να διαιρεθεί σε ομάδες από βασικά τμήματα. Αυτά τα βασικά τμήματα μπορούν να ομαδοποιηθούν σε διάφορα υποσύνολα, και τα υποσύνολα σε ακόμα μεγαλύτερα σύνολα. Κάθε ένα από τα βασικά τμήματα μπορεί να περιγράφεται από διάφορες ιδιότητες. Πέρα από αυτές τις ιδιότητες, μπορούν να περιγραφούν οι σχέσεις μεταξύ των τμημάτων ή των υποσυνόλων ή συνόλων<sup>523</sup>.



Εικόνα 6: Παράδειγμα αλλαγής αναλογιών παραμέτρων ομαλοποίησης (chamfer) γωνίας κρυστάλλου κατά τον J. Dana. Πηγή: <https://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/>, James Dwight Dana, *On the Drawing of Figures of Crystals* (American journal of science and arts, 1838), 43.

520 Pierre Lévy Lévy, *Δυνητική πραγματικότητα*, μετάφρ. Μιχάλης Καραχάλιος, Η φιλοσοφία του πολιτισμού και του κυβερνοχώρου (Αθήνα: Εκδόσεις Κριτική, 1999), 43.

521 *The Logic of Architecture: Design, Computation, and Cognition* (Cambridge, Mass: The M.I.T. Press, 1990), 9.

522 *The Logic of Architecture*, 14.

523 *The Logic of Architecture*, 18.

Τα πρώτα δείγματα σύγχρονης παραμετρικής έκφρασης προέρχονται από τα μαθηματικά και συγκεκριμένα τη μαθηματική κρυσταλλογραφία. Όπως αναφέρει ο Davis <sup>524</sup>, το 1838 ο **James Dana** στο **“On the Drawing of Figures of Crystals”** <sup>525</sup> παρουσιάζει οδηγίες σχεδιασμού της γεωμετρίας κρυστάλλων. Τα σχέδια του βασίζονται σε παραμέτρους, οι οποίες καθορίζονται μέσω συγκεκριμένων σχέσεων και αναλογιών. Ο Davis αναφέρει ένα τέτοιο παράδειγμα, όπου στο κείμενο του Dana, τρεις παράμετροι  $e$ ,  $\bar{e}$  και  $\ddot{e}$  πρέπει να έχουν αναλογία 4:2:1.

Ο Dana χρησιμοποίησε παραμέτρους, αναλογίες και σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων, έτσι ώστε να διατυπώσει **γενικούς κανόνες**, οι οποίοι μπορούν να εφαρμοστούν σε διαφορετικές κλίμακες και μεγέθη κρυστάλλων, καλύπτοντας με αυτό τον τρόπο **όλες τις πιθανές περιπτώσεις**. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις ομαλοποίησης (chamfer) γωνίας κρυστάλλου, μετά την αλλαγή αναλογιών των διαφόρων παραμέτρων.

Ο **A. Gaudi** για το σχεδιασμό της Sagrada Familia, χρησιμοποίησε φυσικά μοντέλα υπό κλίμακα προκειμένου να μπορεί να υπολογίσει τα φορτία και τη μεταφορά τους, μελετώντας το πολύπλοκο δομικό σύστημα του καθεδρικού ναού. Ο τρόπος εργασίας του Gaudi ήταν μεν αναλογικός, αλλά με αυτή τη μεθοδολογία διερεύνησης είχε τη δυνατότητα να κατανοήσει τις σχέσεις μεταξύ των στοιχείων της κατασκευής, τη μορφή και το χώρο. Τα μοντέλα του Gaudi είχαν όλα τα χαρακτηριστικά ενός σύγχρονου παραμετρικού συστήματος, με παραμέτρους όπως το μήκος των νημάτων, το βάρος των φορτίσεων, τις θέσεις των συνδέσμων, κ.λπ., τις οποίες ο Gaudi τροποποιούσε για να καταλήξει στην μορφολογικά και στατικά επιθυμητή λύση <sup>526</sup>. Η γεωμετρία των πολλών δομικών στοιχείων προσαρμόζεται ανάλογα με τις απαιτήσεις που επικρατούν κάθε φορά, όσον αφορά στα φορτία και τη μορφή. Η αναλογική μελέτη του Gaudi διερευνήθηκε από τον **M. Burry**, ο οποίος κατάφερε να την τεκμηριώσει γεωμετρικά και μαθηματικά μέσα από τη χρήση υπολογιστικών και ψηφιακών εργαλείων <sup>527</sup>.

Ακόμα ένα παράδειγμα παραμετρικής λογικής είναι αυτό του Ιταλού αρχιτέκτονα **Luigi Moretti** (1907-1973). Ο Moretti φαίνεται να είναι ο πρώτος που χρησιμοποίησε τον όρο παραμετρική αρχιτεκτονική ήδη από το 1940 <sup>528</sup>. Στο ώριμο άρθρο του με τίτλο **“Ricerca matematica in architettura e urbanistico”** 1971 στο Moebius IV, σύμφωνα με τους **Gallo και Pellitteri** <sup>529</sup>, ο Moretti αναφέρει τα 8 σημεία που καθορίζουν την παραμετρική του αρχιτεκτονική, όπως απόρριψη εμπειρικών αποφάσεων, αξιολόγηση παραδοσιακών φαινομένων, ακριβή ορισμό αρχιτεκτονικών θεμάτων, αντικειμενική παρατήρηση, καθορισμό σχέσεων μεταξύ τιμών και παραμέτρων, κ.λπ. Βασικό στοιχείο της προσέγγισης του Moretti είναι ο καθορισμός των παραμέτρων και των σχέσεων μεταξύ τους. Σύμφωνα με την **A. Navone** <sup>530</sup>, στόχος του Moretti ήταν να κάνει αναγωγή των λειτουργιών σε παραμέτρους οι οποίες αλλάζουν ποσοτικά σε συνδυασμό με μαθηματικές φόρμουλες, ώστε να

524 Daniel Davis, ‘Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture.’ (Doctor of Philosophy, RMIT University, 2013), 19, <https://core.ac.uk/download/pdf/78558704.pdf>.

525 James Dwight Dana, *On the Drawing of Figures of Crystals* (American journal of science and arts, 1838).

526 Davis, ‘A History of Parametric’.

527 ‘The Digital in Architecture’.

528 Giuseppe Gallo και Giuseppe Pellitteri, ‘Luigi Moretti, from History to Parametric Architecture.’, στο *23rd International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2018* (Beijing, 2018), 1, [https://www.researchgate.net/publication/325967005\\_Luigi\\_Moretti\\_from\\_History\\_to\\_parametric\\_architecture](https://www.researchgate.net/publication/325967005_Luigi_Moretti_from_History_to_parametric_architecture).

529 Gallo και Pellitteri, 4.

530 Annalisa Viati Navone, ‘The Architect Luigi Moretti. From Rationalism to Informalism.’, 19 Απρίλιος 2020, [https://www.academia.edu/36174716/Httpwww\\_kaiu\\_pan\\_plimagesstories2\\_2012pdfa\\_v\\_navone\\_eng\\_2\\_](https://www.academia.edu/36174716/Httpwww_kaiu_pan_plimagesstories2_2012pdfa_v_navone_eng_2_).

μπει τέλος στην υποκειμενικότητα στο σχεδιασμό. Στο παράδειγμα σχεδιασμού αθλητικού σταδίου σε διαφορετικές παραλλαγές, π.χ. εκδοχές «M» και «N», ο Moretti χρησιμοποίησε για τον καθορισμό της μορφής ένα σύνολο από 19 συνδεδεμένες παραμέτρους. Μια από αυτές («N») παρουσιάστηκε σε πρόπλασμα στην 12η έκθεση Αρχιτεκτονικής στο Μιλάνο (εικόνα στο σύνδεσμο:

<https://www.facebook.com/snkh.architecture/photos/a.357655601060582/857402841085853/?type=1&theater> )<sup>531</sup>.

Οι **Christopher Alexander et al** στο "**A Pattern Language**" (1977) προτείνουν ένα νέο συντακτικό της αρχιτεκτονικής, το οποίο περιλαμβάνει **253 τυπικά μοτίβα/patterns** τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά ως λεξιλόγιο αρχιτεκτονικών στοιχείων και ποιοτήτων, χαρακτηριστικών στο σχεδιασμό κτηρίων και πολεοδομικών συνόλων. Όπως αναφέρεται, το σύνολο των 253 μοτίβων συνθέτουν μια γλώσσα η οποία έχει τη δύναμη να δημιουργήσει μια ολόκληρη περιοχή με ένα εκατομμύριο διαφορετικούς τρόπους. Κάθε μία μικρή διαδοχή από μοτίβα από αυτή τη γλώσσα, γίνεται γλώσσα για ένα μικρό τμήμα του περιβάλλοντος<sup>532</sup>. Κάθε μοτίβο αναφέρεται σε ένα πρόβλημα που συναντάμε σε επανάληψη στο περιβάλλον μας και στη συνέχεια περιγράφεται η λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα, με τέτοιο τρόπο που η λύση μπορεί να χρησιμοποιηθεί πολλές φορές, χωρίς όμως να γίνεται με τον ίδιο τρόπο<sup>533</sup>. Κανένα μοτίβο/pattern δεν είναι μια απομονωμένη οντότητα, καθώς μπορεί να υπάρξει στον κόσμο μόνο σε σχέση με το βαθμό που υποστηρίζεται από άλλα μοτίβα.

Η ευρύτερη αντιμετώπιση της ομάδας Alexander είναι ότι όταν κατασκευάζεται κάτι, πρέπει να επιδιορθώνεται και ο κόσμος γύρω του, έτσι η σχέση της κατασκευής με το χώρο γύρω της να γίνεται πιο συνεκτική και πιο ολοκληρωμένη<sup>534</sup>. Η οργάνωση αρχιτεκτονικών στοιχείων/ποιοτήτων από τους Alexander et al είναι μια από τις πρώτες διαδικασίες παραμετροποίησης αυτών των στοιχείων, αλλά και των σχέσεων που τα συνδέουν τόσο μεταξύ τους, όσο και με το περιβάλλον τους. Η «γλώσσα» που προτείνεται από αυτή την ομάδα, είναι μια συγκεκριμένη «γλώσσα» ανάμεσα σε πολλές πιθανές άλλες γλώσσες, εξ' ου και ο τίτλος «A» στον τίτλο της, καθώς κάθε άνθρωπος μπορεί να σχηματίσει τη δική του προσωπική «γλώσσα»<sup>535</sup>. Η παραμετροποίηση αυτή, γλώσσα όπως την καλούν οι εμπνευστές της, επιτρέπει στο χρήστη να δημιουργήσει άπειρους συνδυασμούς και προτεινόμενες λύσεις, όλες διαφορετικές και μη προβλέψιμες μεταξύ τους. Οι συγγραφείς ορίζουν τις παραμέτρους και τις βασικές σχέσεις (ή περιορισμούς των παραμέτρων) και ο χρήστης επιλέγει το ποιες μπορεί να χρησιμοποιήσει και με ποιες σχέσεις και διάταξη, έτσι ώστε να δημιουργήσει, έχοντας ως αφετηρία το ίδιο πρωτογενές υλικό, μια ή περισσότερες ιδιαίτερες και ξεχωριστές λύσεις ή προτάσεις. Η γλώσσα του "**A Pattern Language**" έχει τη δομή δικτύου, αλλά πρακτικά η χρήση των μοτίβων γίνεται σειριακά, από τα μεγαλύτερα μοτίβα στα μικρότερα<sup>536</sup>.

---

531 Davis, 'Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture.', 17.

532 Christopher Alexander κ.ά., *A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction* (New York: Oxford University Press, 1977), xxxv.

533 Alexander κ.ά., x.

534 Alexander κ.ά., xiii.

535 Alexander κ.ά., xvi.

536 Alexander κ.ά., xviii.

Σύμφωνα με τον Carpo <sup>537</sup>, το 1988 ο **G. Deleuze** στο *“The Fold”* <sup>538</sup> παρουσιάζει για πρώτη φορά την έννοια του ψηφιακού παραμετρισμού (digital parametricism), εξετάζοντας το διαφορικό λογισμό του Leibniz και τη χρήση παραμέτρων στις εξισώσεις. Ο Deleuze ενδιαφερόταν για τη δυνατότητα που δίνουν οι παράμετροι μέσα από έναν γενικό τύπο - κώδικα να περιγράφουν ολόκληρες οικογένειες από αντικείμενα και όχι κάποιο συγκεκριμένο μοναδικό αντικείμενο. Ο Deleuze <sup>539</sup> καλεί αυτό το νέο αντικείμενο *“objectile”* το οποίο αποτελεί για τον **Bernard Cache**, όπως μας πληροφορεί ο Deleuze, μια πολύ μοντέρνα έκφραση του τεχνολογικού αντικειμένου το οποίο δεν αναφέρεται ούτε στην αρχή της βιομηχανικής εποχής, ούτε στην ιδέα του πρότυπου (standard), αλλά στη νέα κατάσταση των πραγμάτων όπου η διακύμανση της κανονικότητας **υπονοεί την παραλλαγή (variation) και τη συνεχή εξέλιξη της μορφής.**

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο **F. Gehry** προκειμένου να ανταπεξέλθει στον απαιτητικό σχεδιασμό πολύπλοκων γεωμετριών και την υλοποίησή τους κατασκευαστικά, όπως και έκανε με επιτυχία στην περίπτωση του μουσείου **Guggenheim** στο **Bilbao** (1997), στράφηκε σε μεθοδολογία εργασίας που περιελάμβανε τη χρήση λογισμικού. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησε το **CATIA** της **Dassault**, ένα λογισμικό το οποίο χρησιμοποιούνταν από αεροναυπηγούς για το σχεδιασμό αεροσκαφών. Η πολυπλοκότητα της μορφής της γεωμετρίας και η απεικόνισή της σε συμβατικά αναλογικά σχέδια, δεν μπορούσε να υλοποιηθεί με συμβατικές τεχνικές. Το CATIA χρησιμοποιούσε παραμετρικές καμπύλες **BEZIER** και **3D αλγορίθμους** για να ορίσει τις καμπυλότητες πολύπλοκων επιφανειών. Το μοντέλο αποτελούνταν από σημεία ελέγχου, τα οποία σε συνδυασμό με μαθηματικές εκφράσεις και σχέσεις, καθόριζαν τη γεωμετρία <sup>540</sup>.

Η χρήση του CATIA, καθώς πρόκειται για ένα παραμετρικό διανυσματικό (vector) λογισμικό, επέτρεπε επίσης την μεγάλη κατασκευαστική ακρίβεια σε όλες τις κλίμακες. Ο νέος τρόπος κατασκευής, δεν έγινε όπως συνηθιζόταν μέχρι τότε, να παραδίδονται δηλαδή στον εργολάβο συμβατικά σχέδια σε δύο διαστάσεις (2D) και αυτός με τη σειρά του να τα «μεταφράζει» σε γεωμετρία. Αντίθετα, ο εργολάβος έπρεπε να μπορεί να υλοποιεί το έργο από πληροφορίες που προέρχονται κατευθείαν από το 3D μοντέλο του αρχιτέκτονα, χωρίς ενδιάμεσα στάδια μεταγραφής της πληροφορίας <sup>541</sup> (**file to factory**). Η νέα μεθοδολογία σχεδιασμού και κατασκευής, της ψηφιακής δηλαδή κατασκευής (digital manufacturing), ήταν για τον κλάδο της αρχιτεκτονικής καινοτόμος και είχε ως πλεονέκτημα τη μεγαλύτερη δυνατή αποδοτικότητα και τη λιγότερη σπατάλη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διαδικασία μείωσης του κόστους κατασκευής των έργων, εφαρμόζοντας κανόνες οι οποίοι μεταφέρονταν τελικά στη δομή και μορφή των κατασκευών, αλλά και τη διαδικασία κατασκευής τους. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί για παράδειγμα ανάλογα με το αν μια επιφάνεια μπορεί να είναι καμπύλη ή επίπεδη (και γι' αυτό το λόγο 60% των τοίχων παρέμειναν επίπεδοι στο έργο του Bilbao), αν μπορεί μια επιφάνεια να λυγιστεί από το να κοπεί, αν μπορεί να κοπεί με αυτόματο τρόπο με μηχανή CNC, παρά χειρωνακτικά <sup>542</sup>.

Ο **Gehry** και οι συνεργάτες του εξέλιξαν σταδιακά την αρχική έκδοση του CATIA που χρησιμοποίησαν στο **Digital Project**, ένα CAD/CAM λογισμικό πλήρως προσαρμοσμένο στις ανάγκες του γραφείου

537 Carpo, ‘Parametric Notations’.

538 Gilles Deleuze, *Fold: Leibniz and the Baroque* (London: Athlone Press, 2000).

539 Deleuze, 19.

540 ‘The Software Behind Frank Gehry’s Geometrically Complex Architecture’.

541 ‘The Software Behind Frank Gehry’s Geometrically Complex Architecture’.

542 ‘The Software Behind Frank Gehry’s Geometrically Complex Architecture’.

τους, από πλευρά δηλαδή αρχιτεκτονικών απαιτήσεων και όχι αεροναυπηγικών για τους οποίους προοριζόταν αρχικά το λογισμικό.

Το 2008 ο **P. Schumacher** παρουσιάζει στη bienale Αρχιτεκτονικής της Βενετίας το μανιφέστο με τίτλο: **"Parametricism as Style - Parametricist Manifesto"** <sup>543</sup>. Το μανιφέστο παρουσιάζει τις σκέψεις και στόχους του Schumacher για το νέο στυλ της αρχιτεκτονικής που καλεί παραμετρισμό (parametricism). Σύμφωνα με αυτό, ο βασικός στόχος με τον οποίο πρέπει να ασχοληθεί η σύγχρονη αρχιτεκτονική είναι η διάρθρωση της αυξημένης πολυπλοκότητας. Το νέο αυτό στυλ βασίζεται σε μεθοδολογικούς κανόνες οι οποίοι υποδεικνύουν ποιες κατευθύνσεις πρέπει να αποφευχθούν (negative heuristics) και άλλες που πρέπει να επιδιωχθούν (positive heuristics).

Ο Schumacher αναφέρεται στις απαρχές του στυλ, οι οποίες τέθηκαν ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1990, με βάση το ρητό της «διαρκούς διαφοροποίησης» το οποίο αποδίδεται στους Greg Lynn και Jeff Kipnis. Η εξέλιξη του στυλ ωφελήθηκε από τις τεχνολογικές εξελίξεις στο λογισμικό και στα ψηφιακά εργαλεία, τα οποία επέτρεψαν τον ακριβή σχηματισμό σχέσεων ανάμεσα σε στοιχεία και υποσυστήματα. Η νέα λογική στο σχεδιασμό και την κατασκευή προτείνει την πιθανή σύνθεση τμημάτων από πολλαπλά στοιχεία τα οποία συνδέονται με ιεραρχικές συνδετικές σχέσεις, έτσι ώστε το τμήμα να μπορεί να προσαρμόζεται σε διαφορετικές τοπικές συνθήκες, κατ' αναλογία του βιολογικού γονότυπου και φαινότυπου και την προσαρμογή των οργανισμών στις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Τα εργαλεία όμως, υποστηρίζει ο Schumacher, δεν επαρκούν μόνο τους για τη δημιουργία ενός νέου αρχιτεκτονικού στυλ. Αυτό που ουσιαστικά διαφοροποιεί για παράδειγμα τον παραμετρισμό από τον μοντερνισμό, είναι η συνειδητή στροφή προς τη μέγιστη έμφαση στην καταφανή διαφοροποίηση. Ο παραμετρισμός του Schumacher προέρχεται από την ανάγκη να εκφραστούν, μέσω του σχεδιασμού, κοινωνικές διαδικασίες και θεσμοί με αυξανόμενη πολυπλοκότητα. Η πολυπλοκότητα στον παραμετρισμό είναι οργανωμένη κατ' αναλογία των φυσικών συστημάτων, όπου όλες οι μορφές είναι αποτέλεσμα διαδραστικών δυνάμεων. Ο συσχετισμός των παραμετρικών συνθέσεων είναι τόσο αυξημένος που τα επιμέρους υποσυστήματα δεν μπορούν να αποσυνδεθούν σε ανεξάρτητα υποσυστήματα, σε αντίθεση των παραδειγμάτων του μοντέρνου σχεδιασμού, όπου υπάρχει ξεκάθαρος διαχωρισμός των λειτουργικών υποσυστημάτων. Το 2016, ο Schumacher υποστηρίζει τα πλεονεκτήματα του παραμετρισμού στο **"Parametricism 2.0"** <sup>544</sup>, καθώς επιχειρηματολογεί ότι μόνο ο παραμετρισμός μπορεί να διαχειριστεί τα ζητήματα δομικής προσαρμογής και τεκτονικής διαφοροποίησης που προκύπτουν από την νέα κατασκευαστική νοημοσύνη.

Σήμερα, το λογισμικό παραμετρικών εφαρμογών έχει εξελιχθεί σημαντικά και είναι άμεσα συνδεδεμένο με τη διαδικασία της ψηφιακής κατασκευής, η οποία θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Το λογισμικό όσον αφορά στην αρχιτεκτονική μπορεί να διακριθεί σε δύο κύριες κατηγορίες:

Η πρώτη είναι αυτή που αφορά αμιγώς αρχιτεκτονικό παραμετρικό λογισμικό και πρόκειται για προγράμματα τύπου BIM (Building Information Modelling). Τα πιο διαδεδομένα λογισμικά BIM εμπορικής χρήσης είναι την τρέχουσα περίοδο το **Revit** <sup>545</sup> της Autodesk, το **Archicad** <sup>546</sup> της

---

543 Patrik Schumacher, 'Parametricism as Style - Parametricist Manifesto', ημερομηνία πρόσβασης 4 Απρίλιος 2020, <https://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.htm>.

544 Patrik Schumacher, επιμ., *Parametricism 2.0: Rethinking Architecture's Agenda for the 21st Century AD*, 1 edition (John Wiley & Sons, 2016).

Graphisoft, το **Generative Components**<sup>547</sup> της Bentley, το **Vectorworks Architect**<sup>548</sup> της Vectorworks και το **Digital Project**<sup>549</sup> της Gehry Technologies.

Η δεύτερη κατηγορία παραμετρικού λογισμικού είναι προγράμματα μη αμιγώς αρχιτεκτονικά ή plugins προγραμμάτων, τα οποία υποστηρίζουν τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και την ψηφιακή κατασκευή. Τα λογισμικά αυτής της κατηγορίας είχαν ως πρωταρχικό σκοπό την εξυπηρέτηση αναγκών άλλων βιομηχανιών, όπως για παράδειγμα του κινηματογράφου, των ψηφιακών effects και του animation. Η εξαιρετική εξέλιξη όμως των τεχνολογικών εργαλείων και κάποιες κοινές απαιτήσεις με το πεδίο της αρχιτεκτονικής, επιτρέπουν την ώσμωση των τεχνολογικών λύσεων από το ένα πεδίο στο άλλο επιτρέποντας τη χρήση του ίδιου λογισμικού και για την αρχιτεκτονική και την ψηφιακή κατασκευή. Μερικά από αυτά είναι το plugin **Grasshopper**<sup>550</sup> το οποίο πλέον έχει ενσωματωθεί πλήρως στο **Rhinoceros 3D** της McNeel and Associates, το **3d Studio Max**<sup>551</sup> της Autodesk, το **Maya**<sup>552</sup> της Autodesk, το **Blender**<sup>553</sup> ως open source λογισμικό, το **Parametric Array**<sup>554</sup> ως plugin για το 3ds Max, η **Processing**<sup>555</sup> ως γλώσσα προγραμματισμού open source, κ.λπ.

Τα παραπάνω λογισμικά δίνουν τη δυνατότητα οργάνωσης μια δομής σχεδιασμού η οποία περιλαμβάνει κριτήρια, περιορισμούς και παραδοχές, τα οποία εκφράζονται μέσω **παραμέτρων** και **σχέσεων** μεταξύ τους. Ο παραμετρικός σχεδιασμός δεν περιλαμβάνει μόνο τον ορισμό των παραμέτρων και τη διαχείριση των τιμών τους. Θεμελιωδώς βασίζεται στις σχέσεις των παραμέτρων και τη γενική οργάνωση του σχεδιασμού που καθορίζει αυτές τις σχέσεις. Γι' αυτό άλλωστε μια εναλλακτική ονομασία αυτού του είδους του σχεδιασμού είναι και το **Associative Geometry**<sup>556</sup>.

Οι **Παπαλεξόπουλος et al** δηλώνουν ότι:

*«Θα μπορούσαμε να υποστηρίξουμε πως το διάγραμμα αποτελεί το κύριο εργαλείο του παραμετρικού σχεδιασμού για τη δημιουργία σεναρίων διάδρασης, καθώς όπως θα φανεί και παρακάτω διαχειρίζεται κυρίως πληροφορίες, κανόνες περιορισμούς, και ιδιότητες (υλικών και συμπεριφοράς τους), σύμφωνα με τις πιο σύγχρονες εκδοχές του, οι οποίες*

545 'Revit | BIM Software | Autodesk Official Store', 20 Απρίλιος 2020, <https://www.autodesk.com/products/revit/overview>.

546 'About ARCHICAD — A 3D architectural BIM software for design & modeling', ημερομηνία πρόσβασης 20 Απρίλιος 2020, <https://www.graphisoft.com/archicad/>.

547 'Computational Design Software, Buildings - GenerativeComponents', ημερομηνία πρόσβασης 20 Απρίλιος 2020, <https://www.bentley.com/en/products/product-line/modeling-and-visualization-software/generativecomponents>.

548 'AEC Design Software - BIM CAD Tools | Vectorworks Architect', ημερομηνία πρόσβασης 20 Απρίλιος 2020, <https://www.vectorworks.net/en-GB/architect>.

549 'Digital Project | Building Together', ημερομηνία πρόσβασης 20 Απρίλιος 2020, <https://www.digitalproject3d.com/>.

550 Scott Davidson, 'Grasshopper. Algorithmic Modeling for Rhino.', ημερομηνία πρόσβασης 20 Απρίλιος 2020, <https://www.grasshopper3d.com/>.

551 '3ds Max | 3D Modeling, Animation & Rendering Software | Autodesk', ημερομηνία πρόσβασης 20 Απρίλιος 2020, <https://www.autodesk.com/products/3ds-max/overview?support=ADVANCED>.

552 'Maya | Computer Animation & Modeling Software | Autodesk', 20 Απρίλιος 2020, <https://www.autodesk.com/products/maya/overview>.

553 Blender Foundation, 'Blender.Org - Home of the Blender Project - Free and Open 3D Creation Software', *Blender.Org* (blog), ημερομηνία πρόσβασης 20 Απρίλιος 2020, <https://www.blender.org/>.

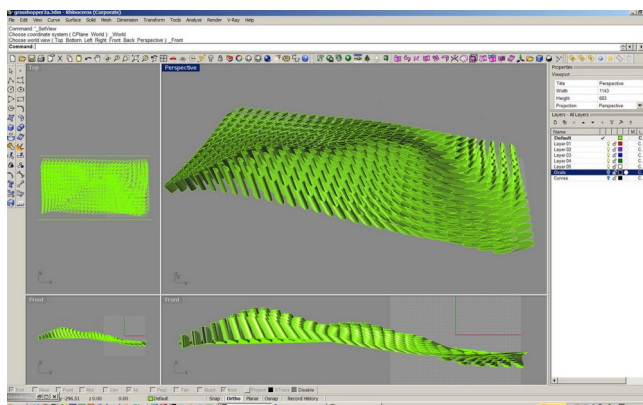
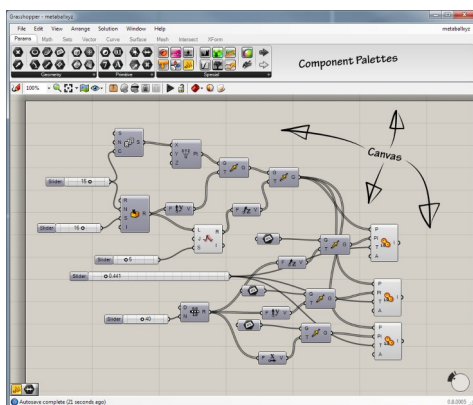
554 'Para 3d | 3ds Max | Autodesk App Store', 20 Απρίλιος 2020, <https://apps.autodesk.com/3DSMAX/en/Detail/Index?id=7147262754532706746&appLang=en&os=Win64>.

555 'Processing.org', 20 Απρίλιος 2020, <https://processing.org/>.

556 Mark Burry και Zolna Murray, '15th ECAADE conference: challenges of the future: proceedings', electronic resource, eCAADE: Conferences (Vienna: Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, 1997).

μετατρέπονται σε παραμέτρους, και αυτές με τη σειρά τους δημιουργούν τις συνθήκες για πολλαπλές στρατηγικές σχεδιασμού. Άλλωστε στο κεφάλαιο Λογισμικά Παραμετρικού Σχεδιασμού είδαμε πως το διάγραμμα αποτελεί επίσης ένα από τα βασικά παράθυρα απεικόνισης όχι μόνο της διαδικασίας σχεδιασμού αλλά και της δομής του.»<sup>557</sup>

Μετά τον καθορισμό της δομής του σχεδιασμού και της διαδικασίας αυτού, δυο ενέργειες που εξελίσσονται ουσιαστικά παράλληλα, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί η προσαρμογή του παραμετρικού μοντέλου με βάση διαφοροποιήσεις στις τιμές των παραμέτρων. Ενώ οι τιμές των παραμέτρων διαφοροποιούνται ανάλογα με τους περιορισμούς και τα όρια, οι σχέσεις που τις συνδέουν παραμένουν ίδιες. Η διάταξη αυτή δίνει τη δυνατότητα για τη δημιουργία άπειρων παραλλαγών, οι οποίες όμως βασίζονται στις ίδιες αρχές σχεδιασμού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το **Ebryological house** του **Greg Lynn** που αναφέρθηκε προηγουμένως, με 50.000 παραλλαγές κατοικίας πάνω στην ίδια παραμετρική μήτρα σχεδιασμού.



Εικόνα 7: Εικόνα επιφάνειας εργασίας για το λογισμικό Grasshopper 3D. Πηγή: Grasshopper MainWindow.png, A screen shot of the Grasshopper main window, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Grasshopper\\_MainWindow.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Grasshopper_MainWindow.png), εικόνα του/της: [David Rutten](#), άδεια: CC BY-SA 3.0, [Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license](#).

Εικόνα 8: Grasshopper 3D: Πηγή: ghopper2d, <https://www.flickr.com/photos/mpsyp/3018839473/in/photo1st-5ALkNr-5ALkNa-5ALkN4-5ALkNi-98FsR9-2kGTZhx-98FrUb-5qApeT-81xtxz-5qPxbX-G8bBqp-27ef6y2-5qTT7Q-5qTT2N-7nRiiS-5qTSVJ-pedNPo-98Chfz-aaeNM9-9Dx6M8-5qApiv-9EFizG-9oXM9S-WTKcVx-aabZc6-7TNMBh-9oXM4s-9oXM6u-9oUG9F-9oUGg4-9DAnEE-8HfFFC-9DzWrl-9DAivv-9JDWGF-9Jz94D-9ECoa6-9FUmIr-aaeNzW-9EFiyu-9ECoaV-9oXLV5-9oUG5X-7Rq7Qz>, εικόνα του/της: [Marc Syp](#), άδεια: CC BY-NC-ND 2.0. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/>.

557 Δημήτρης Παπαλεξόπουλος, Αθηνά Σταυρίδου, και Δημήτρης Παπαδόπουλος, 'Εννοιολογικός Προσδιορισμός Παραμετρικών Ιδιοτήτων Αρχιτεκτονικών Κατασκευαστικών Στοιχείων Και Δομικών Υλικών' (Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2010), 50, [https://www.academia.edu/35180607/\\_%CE%95%CE%9D%CE%9D%CE%9F%CE%99%CE%9F%CE%9B%CE%9F%CE%93%CE%99%CE%9A%CE%9F%CE%A3\\_%CE%A0%CE%A1%CE%9F%CE%A3%CE%94%CE%99%CE%9F%CE%A1%CE%99%CE%A3%CE%9C%CE%9F%CE%A3\\_%CE%A0%CE%91%CE%A1%CE%91%CE%9C%CE%95%CE%A4%CE%A1%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D\\_%CE%99%CE%94%CE%99%CE%9F%CE%A4%CE%97%CE%A4%CE%A9%CE%9D\\_%CE%91%CE%A1%CE%A7%CE%99%CE%A4%CE%95%CE%9A%CE%A4%CE%9F%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D\\_%CE%9A%CE%91%CE%A4%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%95%CE%A5%CE%91%CE%A3%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D\\_%CE%A3%CE%A4%CE%9F%CE%99%CE%A7%CE%95%CE%99%CE%A9%CE%9D\\_%CE%9A%CE%91%CE%99\\_%CE%94%CE%9F%CE%9C%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D\\_%CE%A5%CE%9B%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D\\_](https://www.academia.edu/35180607/_%CE%95%CE%9D%CE%9D%CE%9F%CE%99%CE%9F%CE%9B%CE%9F%CE%93%CE%99%CE%9A%CE%9F%CE%A3_%CE%A0%CE%A1%CE%9F%CE%A3%CE%94%CE%99%CE%9F%CE%A1%CE%99%CE%A3%CE%9C%CE%9F%CE%A3_%CE%A0%CE%91%CE%A1%CE%91%CE%9C%CE%95%CE%A4%CE%A1%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D_%CE%99%CE%94%CE%99%CE%9F%CE%A4%CE%97%CE%A4%CE%A9%CE%9D_%CE%91%CE%A1%CE%A7%CE%99%CE%A4%CE%95%CE%9A%CE%A4%CE%9F%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D_%CE%9A%CE%91%CE%A4%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%95%CE%A5%CE%91%CE%A3%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D_%CE%A3%CE%A4%CE%9F%CE%99%CE%A7%CE%95%CE%99%CE%A9%CE%9D_%CE%9A%CE%91%CE%99_%CE%94%CE%9F%CE%9C%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D_%CE%A5%CE%9B%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D_).



Κατά τον **Kolarevic**<sup>558</sup>, η δυνατότητα μαζικής παραγωγής διαφορετικών εξαρτημάτων ενός κτηρίου από την ίδια εγκατάσταση παραγωγής εισήγαγε την έννοια της **μαζικής προσαρμογής (mass customization)**. Ο Kolarevic αναφέρει το παράδειγμα των ποδηλάτων Panasonic στην Ιαπωνία όπου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να καθορίσει ορισμένα από τα χαρακτηριστικά του, όπως π.χ. διαστάσεις, χρώμα, κ.λπ. από ένα σύνολο 11.000.000 διαφορετικών πιθανών συνδυασμών<sup>559</sup>. Η διαδικασία του σχεδιασμού με βάση μία παραμετρική μήτρα, είναι εμπροσθοβαρής, καθώς απαιτεί σημαντικό χρόνο για την υλοποίηση του παραμετρικού ψηφιακού μοντέλου παράλληλα με τη διαδικασία του σχεδιασμού. Σύμφωνα με τον **Whitehead**<sup>560</sup>, η χρήση μοντέλων παραλλαγών είναι συνηθισμένη πλέον διαδικασία στο πλαίσιο του σχεδιασμού και ενώ η παραγωγή ενός παραμετρικού μοντέλου είναι χρονοβόρα διαδικασία, το ψηφιακό παραμετρικό μοντέλο χρησιμοποιείται στη συνέχεια για μήνες για να παράξει εναλλακτικές προτάσεις προς έλεγχο κατά την εξέλιξη του σχεδιασμού.

Ο **Mark Burry**<sup>561 562</sup> εφάρμοσε τη χρήση ενός παραμετρικού ψηφιακού μοντέλου στην αρχιτεκτονική και γεωμετρική διερεύνηση για την ολοκλήρωση της Sagrada Família. Συγκεκριμένα για το Rose Window στην Passion Façade, απαιτήθηκε η δημιουργία γεωμετρικών παραλλαγών με κοινά σχεσιακά χαρακτηριστικά τα οποία περιελάμβαναν μικρές αποκλίσεις από το ιδανικό συμμετρικό μοντέλο, καθώς και την οριστική προσαρμογή του τελικού μοντέλου in situ μετά από ακριβέστερες οριστικές μετρήσεις της υπάρχουσας κατάστασης. Ο Burry υποστηρίζει ότι οι πολύπλοκες γεωμετρίες του Gaudí βασιζόντουσαν σε γεωμετρικές πράξεις με βάση την άλγεβρα Boole τριών βασικών στερεών. Η παραγόμενη πολυπλοκότητα προέκυπτε από παραλλαγές με βάση τις τιμές εννέα μεταβλητών που καθόριζαν κάθε επιφάνεια, καθώς και τη σχέση της με τις γειτονικά αλληλοτεμνόμενες επιφάνειες.

Σύμφωνα με τον **Milos Dimcic**<sup>563</sup>, όταν γίνεται αναφορά στον παραμετρικό σχεδιασμό ως parametric design, θα πρέπει να γίνεται μια διάκριση για το αν το τελικό σχέδιο προκύπτει μέσα από παραμετρική διερεύνηση, ή χρησιμοποιείται ένα παραμετρικό μοντέλο για την υλοποίηση και την ψηφιακή κατασκευή ενός ήδη σχεδιασμένου με κάποιο τρόπο project. Στη δεύτερη περίπτωση, που είναι και η πλειοψηφία των εφαρμογών, το σωστότερο είναι να αναγνωρίζεται η παραμετρική υλοποίηση- κατασκευή και όχι ο παραμετρικός σχεδιασμός του τελικού προϊόντος. Η σωστότερη ορολογία για τον Dimcic είναι για τη δεύτερη περίπτωση οι λέξεις **programming** και **automation**. Αντίθετα, η ορολογία **παραμετρικός σχεδιασμός** θα πρέπει να συνδέεται με **διαδικασίες σχεδιασμού** που εμπεριέχουν παραμέτρους και σχέσεις παραμέτρων, όπως για παράδειγμα σχεδιασμό με γενετικούς αλγορίθμους, τεχνητή νοημοσύνη ή αλγορίθμους βελτιστοποίησης.

Μια εναλλακτική και πιθανώς πιο ακριβής διάκριση του λογισμικού ανάλογα με τη χρήση παραμέτρων μπορεί να γίνει ως εξής: α. Βασικό λογισμικό CAD (**Basic CAD software**). β. Παραμετρικό λογισμικό (**Parametric Software**) και γ. Παραμετρικό Σχεσιακό Λογισμικό (**Associative Parametric Software**). Η περίπτωση **α.** αφορά στην ψηφιακή σχεδίαση 2D ή 3D αντικειμένων με βάση

558 Branko Kolarevic, επιμ., *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, 1 edition (New York: Taylor & Francis, 2005), 84.

559 Kolarevic, 85.

560 Kolarevic, 121.

561 Mark Burry, *Scripting Cultures: Architectural Design and Programming*, 1 edition (Chichester, UK: Wiley, 2011), 147.

562 Kolarevic, *Architecture in the Digital Age*, 226.

563 ProArchitect #005 - Parametric DESIGN? Not really..., 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=rDPTrtRMBQk>.

κάποια τυπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως θα μπορούσε να γίνει και με συμβατικό τρόπο (π.χ. κέντρο κύκλου και μήκος ακτίνας). Η περίπτωση **β.** αφορά στην ψηφιακή σχεδίαση 2D ή 3D αντικειμένων με βάση κάποια τυπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και την πληροφορία να αποθηκεύεται υπό τη μορφή παραμέτρων που μπορούν να τροποποιηθούν ανά πάσα στιγμή (π.χ. διαστάσεις X,Y,Z ενός κουτιού). Η περίπτωση **γ.** αφορά σε λογισμικά που εκτός από τη χρήση παραμέτρων, έχουν τη δυνατότητα δημιουργίας σχέσεων μεταξύ των αντικειμένων και παραμέτρων

564

Η παραμετρική σχεσιακή προσέγγιση σε ένα σχεδιαστικό ζήτημα δίνει τη δυνατότητα για παραγωγή άπειρων πιθανών επιλύσεων. Η παραμετρική μήτρα είναι ένας μηχανισμός παραγωγής εν δυνάμει λύσεων. Από αυτές τελικά επιλέγονται κάποιες συγκεκριμένες που πληρούν επιμέρους κριτήρια, πέρα από αυτά που μπορούν να εισαχθούν ως παράμετροι και περιορισμοί στο παραμετρικό σύστημα, όπως για παράδειγμα ποιοτικά κριτήρια, αισθητικά, κ.λπ.

Σύμφωνα με τον ορισμό του λεξικού Μπαμπινιώτη **αλγόριθμος** είναι:













*«αλγόριθμος (ο) {αλγορίθμ-ου / -ων, -ους} 1. ΜΑΘ η λογική διαδικασία για την επίλυση ενός προβλήματος, σύμφωνα με την οποία ακολουθείται σειρά βημάτων και ορισμένος αριθμός κανόνων 2. ΠΛΗΡΟΦ. η διαδοχή λογικών βημάτων που απαιτούνται για την επίλυση προβλήματος με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή σε γλώσσα κατανοητή από αυτόν (γλώσσα μηχανής) ή σε γλώσσα που χρησιμοποιεί όμοια δομή (συμβολική γλώσσα) – αλγοριθμικός, -ή, -ό. [ΕΤΥΜ Μεταφορά του αγγλ. algorithm < algorism (με την επίδρ. τής λ αριθμός) < μεσν. λατ. algorismus < αραβ. al-Khowarizmi, όνομα μεγάλου Άραβα μαθηματικού του 9ου αι.]»* <sup>565</sup>

Σύμφωνα με τον ορισμό της Encyclopaedia Britannica **αλγόριθμος** είναι:

*«Αλγόριθμος, μία συστηματική διαδικασία η οποία παράγει σε περασμένο αριθμό βημάτων την απάντηση σε ένα ερώτημα ή τη λύση σε ένα πρόβλημα. Το όνομα προκύπτει από την λατινική μετάφραση του Algoritmi de numero Indorum, της μελέτης του μουσουλμάνου μαθηματικού του 9ου αι. al-Khwarizmi με τίτλο: «Al-Khwarizmi σχετικά με την Ινδική τέχνη του υπολογισμού»»* <sup>566</sup> (μτφρ. Τ. Κουιμτζόγλου)

Όπως φαίνεται από τους ορισμούς, ο αλγόριθμος είναι μια διαδικασία συγκεκριμένων σταδίων που έχει στόχο να επιλύσει ένα πρόβλημα ή να ολοκληρώσει ένα έργο.

Η έννοια του παραμετρικού σχεδιασμού, ή του σχεδιασμού εν γένει, εμπεριέχει ως διαδικασία την έννοια του αλγορίθμου. Ο αλγόριθμος της επίλυσης ενός προβλήματος με παραμετρική προσέγγιση αφορά κατ' αρχάς στον ορισμό των παραμέτρων και των σχέσεων μεταξύ των στοιχείων των οντοτήτων του σχεδιασμού και των παραμέτρων.

564 'Associative parametric design - Architecture of Israel Quarterly'            +     
0/ Απρίλιος 2020, [https://www.aiq.co.il/su\\_article.php?id=69&num=6&lang=eng](https://www.aiq.co.il/su_article.php?id=69&num=6&lang=eng).

565 Γ. Μπαμπινιώτης, *Λεξικό της νέας ελληνικής γλώσσας*, Γ' (Αθήνα: Κέντρο Λεξικολογίας, 2008), 115.

566 Encyclopedia Britannica, 'Algorithm | Mathematics', Encyclopedia, μετάφρ. Τ. Κουιμτζόγλου, Encyclopedia Britannica, ημερομηνία πρόσβασης 22 Απρίλιος 2020, <https://www.britannica.com/science/algorithm>.

Ο **Terzidis**, συγκεκριμένα για το πεδίο της αρχιτεκτονικής αναφέρει ότι οι αλγόριθμοι περιλαμβάνουν διαδικασίες μείωσης (deduction), επαγωγής (induction), αφαίρεσης (abstraction), γενίκευσης (generalization) και δομημένης λογικής (structured logic) <sup>567</sup>.

Από την πλευρά της επιστήμης των υπολογιστών ο αλγόριθμος είναι μια πολύ καλά καθορισμένη διαδικασία η οποία χρησιμοποιεί μια τιμή ή ομάδα τιμών ως είσοδο/**input** και παράγει μια τιμή ή ομάδα τιμών ως έξοδο/**output**. <sup>568</sup> Οι **Cormen et al** υποστηρίζουν ότι οι αλγόριθμοι μπορούν να βοηθήσουν στην επίλυση πολλών ειδών προβλημάτων, αλλά τα περισσότερα ενδιαφέροντα αλγοριθμικά προβλήματα παρουσιάζουν δύο χαρακτηριστικά: α. Υπάρχουν πολλές υποψήφιες λύσεις, οι περισσότερες από τις οποίες ΔΕΝ λύνουν το πρόβλημα, επομένως πρέπει να ανευρεθεί η κατάλληλη. β. Έχουν πρακτική εφαρμογή <sup>569</sup>. Καθώς ένα πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με πολλές προσεγγίσεις, είναι κατανοητό ότι υπάρχει αντίστοιχος αριθμός αλγορίθμων για την επίλυσή του. Κάθε αλγόριθμος όμως μπορεί να παράγει **περισσότερες από μία λύσεις** (π.χ. Monte Carlo Algorithm). Τα πολλά και διαφορετικά είδη αλγορίθμων μπορούν να καταταχθούν σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο εφαρμογής τους, ανάλογα με το παράδειγμα σχεδιασμού τους ή ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους.

Οι κύριες κατηγορίες αλγορίθμων είναι: Recursion, Serial-parallel-distributed, Deterministic/non-Deterministic, Exact/Approximate, Quantum, Brute force, Divide and conquer, Search and enumeration, Randomized, Reduction of complexity, Backtracking, Linear programming, Dynamic programming, Greedy method, Heuristic method, Genetic, κ.λπ. <sup>570 571 572 573</sup>.

### 3. Ψηφιακή κατασκευή

Οι σημαντικές ανακατατάξεις της ενσωμάτωσης της ψηφιακής τεχνολογίας και της επικοινωνίας της πληροφορίας στο σύγχρονο τρόπο ζωής καλούνται ως **Ψηφιακή επανάσταση (Digital revolution)** και θεωρούνται τόσο σημαντικές ώστε να περιγραφούν ως η **Τρίτη βιομηχανική επανάσταση** <sup>574</sup>. Η χρήση ηλεκτρονικών και στη συνέχεια ψηφιακών εργαλείων, η μείωση του κόστους των υπολογιστών, η συνεχής αύξηση της υπολογιστικής τους ισχύος, η διαδεδομένη χρήση τους και η

567 Kostas Terzidis, *Algorithmic Architecture*, 1 edition (Routledge, 2016).

568 Thomas H. Cormen κ.ά., *Introduction to Algorithms*, 3 edition (The MIT Press, 2009), 5.

569 Cormen κ.ά., 8.

570 'List of Algorithms', στο *Wikipedia*, 31 Μάρτιος 2020, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List\\_of\\_algorithms&oldid=948287207](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List_of_algorithms&oldid=948287207).

571 Wikipedia, 'Genetic Algorithm', στο *Wikipedia*, 21 Απρίλιος 2020, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Genetic\\_algorithm&oldid=952333404](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Genetic_algorithm&oldid=952333404).

572 'Algorithm and its types', ημερομηνία πρόσβασης 22 Απρίλιος 2020, <https://www.includehelp.com/data-structure-tutorial/algorithm-and-its-types.aspx>.

573 'Algorithm', στο *Wikipedia*, 3 Ιούλιος 2024, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Algorithm&oldid=1232359321>.

574 Ως πρώτη βιομηχανική επανάσταση καλείται η μηχανοποίηση του 18ου αιώνα και η χρήση της ατμομηχανής. Ως δεύτερη βιομηχανική επανάσταση καλείται η εφαρμογή των επιστημών στη μαζική παραγωγή και την κατασκευή. Ως τρίτη βιομηχανική επανάσταση καλείται η ψηφιοποίηση και χρήση της πληροφορίας στις διάφορες μορφές της. Ως τέταρτη βιομηχανική επανάσταση καλείται η σύγκλιση βιολογικών, ψηφιακών και φυσικών παραμέτρων σε κοινό σχήμα εξέλιξης. Πηγή: 'The Fourth Industrial Revolution | Special Feature', Encyclopedia Britannica, ημερομηνία πρόσβασης 6 Μάιος 2020, <https://www.britannica.com/topic/The-Fourth-Industrial-Revolution-2119734>.

δυνατότητα αποθήκευσης και ταχύτατης μεταφοράς της πληροφορίας ψηφιακά, αποτελούν κομβικά σημεία της ψηφιακής επανάστασης. Η ψηφιακή επανάσταση επηρέασε και το χώρο της κατασκευής σε πολλές κατηγορίες της βιομηχανίας και σε αυτές περιλαμβάνεται και η αρχιτεκτονική και η βιομηχανία των κατασκευών.

Παρ' όλα αυτά, χαρακτηριστική είναι η αναφορά ότι αν και η αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί ψηφιακά εργαλεία εδώ και 30 χρόνια (κυρίως στο σχεδιασμό), **η κατασκευή** παρέμενε αναλογική (εκτός ελαχίστων πρωτοπόρων εξαιρέσεων), καθώς βασιζόταν στη χειρωνακτική εργασία ημιειδικευμένων ή ανιδίκευτων εργατών <sup>575</sup>.

Εξέλιξη των μεθόδων ή σταδίων ψηφιακού σχεδιασμού στα οποία γίνεται χρήση ψηφιακών τεχνολογιών, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, αποτελεί η έννοια της **ψηφιακής** <sup>576</sup> **κατασκευής (digital manufacturing)**. Η έννοια της χρήσης υπολογιστικών μηχανών για την εκτέλεση της παραγωγής ονομάζεται **CAM (Computer Aided Manufacturing)**. Η μέθοδος έχει την αφετηρία της ήδη από τη δεκαετία του 1940, όπου και προτάθηκε η χρήση αυτοματοποιημένων προγραμματιζόμενων μηχανών μέσω της χρήσης διάτρητων καρτών από τον **J. T. Parsons**, οι οποίες ονομάζονταν **NC (Numerical Control) Machines** (1955) <sup>577</sup>. Οι αρχικές αυτές μηχανές βελτιώθηκαν σταδιακά και εγκαταλείποντας την αναλογική επικοινωνία των διάτρητων καρτών, συνδέθηκαν τελικά ψηφιακά με συστήματα ηλεκτρονικών υπολογιστών τα οποία παρείχαν τις οδηγίες ελέγχου της μηχανής, με τις διατάξεις αυτές να ονομάζονται μηχανές **CNC (Computer Numerical Control)**.

Η χρήση των **CNC** μηχανών συνδυάζεται άμεσα πλέον με την ψηφιακή σχεδίαση **CAD** (Computer Aided Design). Στην περίπτωση αυτή, γίνεται αναφορά σε μεθοδολογίες τύπου **CAD/CAM** <sup>578</sup> όπου η σχεδιαστική πληροφορία παράγεται ψηφιακά και μεταφέρεται κατευθείαν ψηφιακά στη μηχανή παραγωγής, χωρίς ενδιάμεση μεταγραφή της σε «αναλογική» μορφή ή σχέδια.

Στην περίπτωση επίλυσης ενός προβλήματος αρχιτεκτονικού σχεδιασμού και κατασκευής, θεωρείται ότι πρόκειται για την επίλυση ενός προβλήματος με υλική υπόσταση, είτε αυτό είναι γεωμετρία, δομή ή λειτουργία. Τότε, καθώς υπάρχει υλική υπόσταση του προβλήματος, θεωρείται ότι η αρχή και η κατάληξή του θα είναι επίσης υλικής υπόστασης και άρα **αναλογικού** <sup>579</sup> τύπου. Όλες οι διαδικασίες και εργαλεία σχεδιασμού ήταν μέχρι την εμφάνιση των ψηφιακών εργαλείων αναλογικά, γεγονός που είχε ως συνέπεια, με την εμφάνιση των ψηφιακών εργαλείων, να διασπαστεί ο κύκλος της κατασκευής ως μια συνεχής αναλογική διαδικασία. Στην Εικόνα 9 παρουσιάζονται με ενδεικτική απεικόνιση τρεις προσεγγίσεις φάσεων κατασκευής σε σχέση με τη χρήση αναλογικών ή ψηφιακών εργαλείων.

575 'The Digital in Architecture'.

576 «Definition of Digital (adjective): 3: : of, relating to, or using calculation by numerical methods or by discrete units, 4: composed of data in the form of especially binary digits, 5: : providing a readout in numerical digits, 6: : relating to an audio recording method in which sound waves are represented digitally (as on magnetic tape) so that in the recording wow and flutter are eliminated and background noise is reduced.» Merriam-Webster, 'Digital', ημερομηνία πρόσβασης 6 Μάιος 2020, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/digital>.

577 B. S. Dhillon, *Advanced Design Concepts for Engineers* (CRC Press, 1998), 211.

578 Πρώτα αναφέρεται το CAD διότι προηγείται ο ψηφιακός σχεδιασμός της ψηφιακής κατασκευής CAM ως διαδικασία.

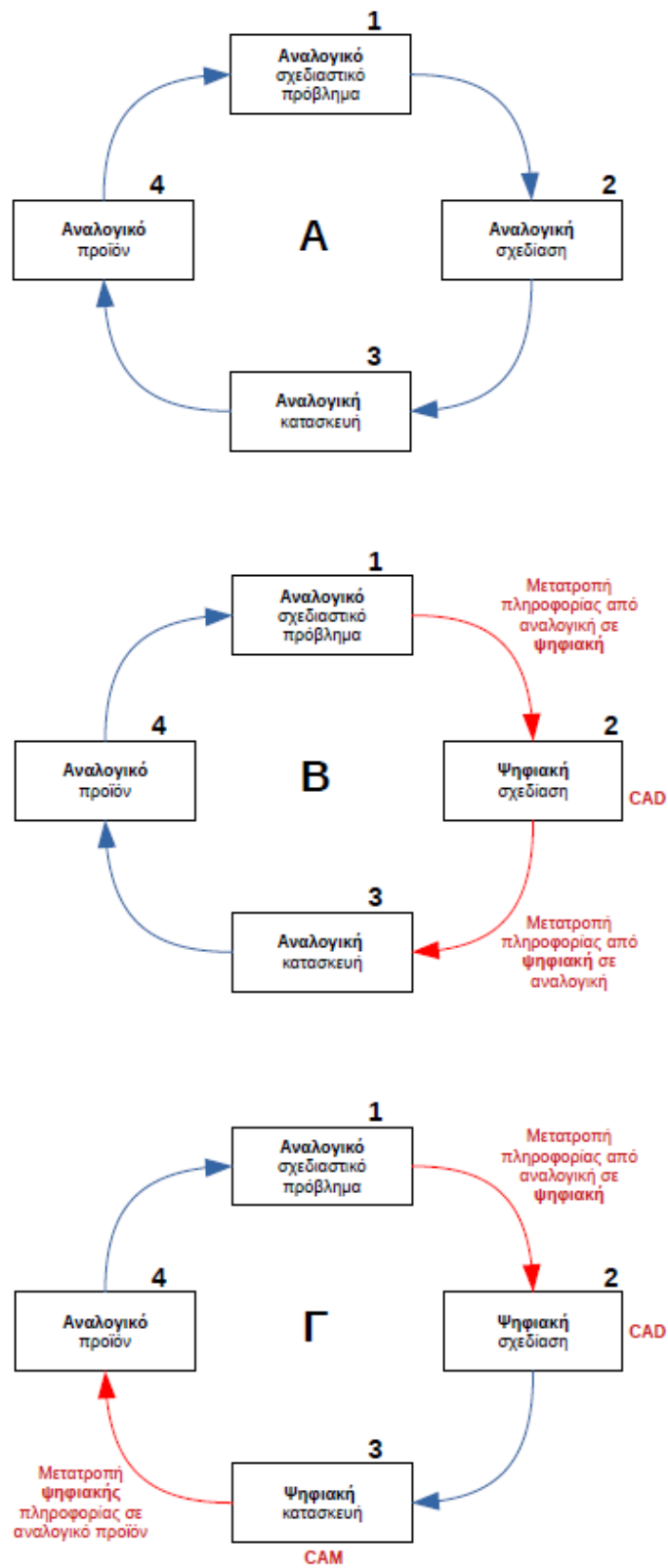
579 «Definition of Analog (adjective): 1a: of, relating to, or being a mechanism or device in which information is represented by continuously variable physical quantities,(...)d: not computerized» Merriam-Webster, 'Analog', ημερομηνία πρόσβασης 6 Μάιος 2020, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/analog>.

Στην πρώτη περίπτωση (Εικόνα 9 **A**) **δεν γίνεται** χρήση ψηφιακών εργαλείων και πρόκειται για τον συμβατικό τρόπο σχεδιασμού και κατασκευής με όλη την πληροφορία που μεταφέρεται από το ένα στάδιο της κατασκευής στο επόμενο να είναι αναλογικού τύπου.

Στη δεύτερη περίπτωση (Εικόνα 9 **B**) **χρησιμοποιούνται λογισμικά CAD** τα οποία διαχειρίζονται το αναλογικό σχεδιαστικό ζήτημα, μεταγράφουν (κόκκινο βέλος) την αρχική αναλογική πληροφορία και τη διαχειρίζονται σε ψηφιακή μορφή ως CAD, και στη συνέχεια η ψηφιακή πληροφορία μεταγράφεται σε αναλογική μορφή (κόκκινο βέλος) ως σχέδια κατασκευής, η οποία χρησιμοποιείται για την υλοποίηση του έργου. Σε αυτή την περίπτωση η πληροφορία ακολουθεί τον κύκλο αναλογικό-ψηφιακό-αναλογικό και η λύση που σχεδιάζεται ψηφιακά πρέπει να μεταγραφεί σε αναλογική μορφή προτού αρχίσει η υλοποίησή της.

Στην τρίτη περίπτωση (Εικόνα 9 **Γ**) η αναλογική πληροφορία του σχεδιαστικού προβλήματος μεταφράζεται σε ψηφιακή μορφή (κόκκινο βέλος) και διαχειρίζεται ψηφιακά ως CAD, και στη συνέχεια η κατασκευή υλοποιείται κατευθείαν από την ψηφιακή πληροφορία χωρίς την ανάγκη μετατροπής της σε κάποιο αναλογικό ενδιάμεσο. Το τρίτο στάδιο είναι το πιο αποδοτικό καθώς διατηρούνται όλα τα πλεονεκτήματα της ψηφιοποίησης μέχρι και το τελικό στάδιο της υλοποίησης της κατασκευής.

Η τρίτη περίπτωση περιγράφει αυτό ακριβώς που καλείται ως **ψηφιακή κατασκευή (digital manufacturing)**, δηλαδή την υλοποίηση της κατασκευής κατευθείαν από την ψηφιακά σχεδιασμένη πληροφορία χωρίς παρεμβαλλόμενη αναλογική μεταγραφή της.



Εικόνα 9: Διαγράμματα προσεγγίσεων κατασκευής. Α: Συμβατική αναλογική προσέγγιση. Β: Χρήση CAD, Γ: Χρήση CAD και CAM. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Όπως αναφέρουν οι **Παπαλεξόπουλος et al**:

*«Το σημείο κλειδί της ψηφιακής αρχιτεκτονικής μοιάζει να είναι η πλήρης συσχέτιση σχεδιασμού και παραγωγής (Συνεχές Σχεδιασμού Κατασκευής), όπως επίσης η συσχέτιση κατασκευασμένου χώρου και χρηστών. Αυτή ακριβώς η συσχέτιση φαίνεται να θέτει κάποια ερωτήματα σχετικά με: τη διαχείριση της πληροφορίας που θα απορρέει από το ίδιο το κτήριο, την πληροφορία που θα εισάγεται στο κτήριο από έξω, την χρήση των ψηφιακών μέσων για την κατασκευή μοντέλων-διαγραμμάτων των μεταβολών του κτηρίου, την επιλογή εκείνων των ιδιοτήτων του κτηρίου που μπορούν να είναι παραμετρικές.»<sup>580</sup>*

Η ψηφιακή παραγωγή προσφέρει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής. Κάποια από αυτά είναι τα παρακάτω:

1. Το προϊόν παράγεται μηχανικά ή ρομποτικά κατ' ευθείαν από τα ψηφιακά σχέδια (CAD) από ψηφιακά εργαλεία CNC, χωρίς τη διαμεσολάβηση οδηγίων προς αναλογικά εργαλεία ή ανθρώπινη χειρωνακτική εργασία, γεγονός που εξασφαλίζει ακρίβεια στην κατασκευή και ομοιοτυπία.
2. Η απευθείας παραγωγή αφαιρεί τους μεσάζοντες κατασκευαστές, διαδικασία που εξ' οικονομεί χρόνο, κόστος και μειώνει την πιθανότητα σφαλμάτων ή παρερμηνειών των σχεδίων.
3. Ο σχεδιασμός και η παραγωγή μπορούν να πραγματοποιηθούν σε διαφορετικά μέρη, αλλά το αποτέλεσμα/προϊόν στο χώρο παραγωγής είναι πάντα το ίδιο.
4. Η δυνατότητα υλοποίησης πρωτοτύπων γρήγορα και με χαμηλό κόστος (rapid prototyping).
5. Μπορούν να κατασκευαστούν προϊόντα που δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστούν με συμβατικές μεθόδους.
6. Η δυνατότητα χρήσης των ίδιων ψηφιακών εργαλείων για την παραγωγή διαφορετικών προϊόντων και η άμεση δυνατότητα διαφοροποίησης της παραγωγής.
7. Σε συνδυασμό με τον ψηφιακό και παραμετρικό σχεδιασμό, η δημιουργία παραλλαγών των προϊόντων και η μαζική εξατομίκευση ή προσαρμογή (**mass customization - MC**).

Ειδικά για την τελευταία ιδιότητα έχει γίνει αναφορά στο κεφάλαιο του παραμετρικού σχεδιασμού (βλέπε 2 Υπολογιστικός, Παραμετρικός, Γενεσιουργός και Αλγοριθμικός σχεδιασμός (computational, parametric, generative and algorithmic design)), όπου αναφέρεται η στροφή προς την λογική της δημιουργίας μιας ψηφιακής μήτρας (γονότυπος) από την οποία μπορούν να παραχθούν, μέσω της διαφοροποίησης των παραμέτρων της, άπειρες παραλλαγές παραγωγών (φαινότυπος). Υπενθυμίζεται η έννοια του "**objectfile**" του **Deleuze**<sup>581</sup> και η θέση του **Kolarevich**<sup>582</sup> όπου ο τελευταίος διατυπώνει ότι η δυνατότητα μαζικής παραγωγής διαφορετικών εξαρτημάτων ενός κτηρίου από την ίδια εγκατάσταση παραγωγής εισήγαγε την έννοια της **μαζικής προσαρμογής (mass customization)**. Ο **Kolarevich** υπογραμμίζει την σπουδαιότητα της δυνατότητας να καθορίζονται στην αρχιτεκτονική πρακτική τα μεμονωμένα μέρη της κατασκευής (components) τα

580 Παπαλεξόπουλος, Σταυρίδου, και Παπαδόπουλος, 'Εννοιολογικός Προσδιορισμός Παραμετρικών Ιδιοτήτων Αρχιτεκτονικών Κατασκευαστικών Στοιχείων Και Δομικών Υλικών', 49.

581 Deleuze, *Fold*, 19.

582 Kolarevic, *Architecture in the Digital Age*, 84.

οποία θα κατασκευάζονται από εμάς τους ίδιους και τα οποία θα έχουν τη δυνατότητα προσαρμογής κάθε φορά σε νέες απαιτήσεις <sup>583</sup>.

Ο **Cronin** <sup>584</sup> σημειώνει ότι την εποχή της μηχανικής αναπαραγωγής μια μεταλλική πλάκα (μήτρα) εκτύπωσης μπορεί να δημιουργήσει μια μόνο αλλά πολύ ακριβή εκτύπωση, ενώ την εποχή της ψηφιακής αναπαραγωγής ένας εκτυπωτής laser μπορεί να τυπώσει εκατό αντίτυπα της ίδιας σελίδας ή εκατό διαφορετικές σελίδες στο ίδιο κόστος ανά σελίδα. Ο Cronin παραθέτει τον **Carpo** ο οποίος επισημαίνει ότι υπό κατάλληλες συνθήκες η χρήση των ψηφιακών τεχνολογιών δίνει την δυνατότητα παραγωγής παραλλαγών (χωρίς να διευκρινίζει σε τι αναφέρονται αυτές οι παραλλαγές), οι οποίες είναι όλες διαφορετικές, με τις διαφορές τους όμως να βρίσκονται ανάμεσα σε συγκεκριμένα όρια.

Όπως αναφέρει ο **Mitchell** <sup>585</sup>, σχετικά με το πρωτοποριακό έργο του **Guggenheim** στο **Bilbao**, ο Gehry χρησιμοποιώντας σύγχρονες ψηφιακές τεχνικές CAD/CAM για το σχεδιασμό και την κατασκευή, κατάφερε σημαντικά να περιορίσει την ανάγκη για μορφολογική ομοιομορφία και επανάληψη των μερών, καθώς τα νέα εργαλεία έδιναν διέξοδο από τους περιορισμούς του παρελθόντος που απαιτούσαν σημαντικές απλοποιήσεις, ανάλογες με αυτές που πραγματοποίησε ο Utzon στην όπερα του Σίδνεϋ.

Η στροφή στις τεχνικές και την τεχνολογία της κατασκευής είναι σημαντικές και όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται στο περιοδικό Economist σε αφιέρωμα για την ψηφιακή κατασκευή ένας από τους στόχους του μέλλοντος θα είναι η μαζική παραγωγή <sup>586</sup>.

Οι μηχανές **CNC (Computer Numerical Control)** <sup>587</sup> που χρησιμοποιούνται στην ψηφιακή κατασκευή διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο διαχείρισης των υλικών:

1. Στις μηχανές που παράγουν γεωμετρικές μορφές μέσω αφαίρεσης υλικού (**Subtractive Manufacturing**). Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει μηχανές που αφαιρούν υλικό από τη μάζα ενός σώματος για να δημιουργήσουν τμήματα της κατασκευής. Τέτοιες μηχανές είναι τα CNC Routers, CNC Cutters (water, plasma, laser, knife), CNC Milling Machines, CNC Lathes, CNC Electrical Discharge Machines EDM <sup>588</sup>.
2. Στις μηχανές που παράγουν γεωμετρικές μορφές μέσω πρόσθεσης υλικού (**Additive Manufacturing - AM**). Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι 3d printers όλων των τεχνολογιών και υλικών, καθώς ένα εξάρτημα ή μέρος παράγεται από την σταδιακή απόθεση μικροποσοτήτων υλικού σε στρώσεις, οι οποίες στερεοποιούνται και σταδιακά μορφοποιούν το παραγόμενο αντικείμενο.

583 Kolarevic, 206.

584 Michael Cronin, *Translation in the Digital Age* (Routledge, 2013), 87.

585 William J. Mitchell, 'A Tale of Two Cities: Architecture and the Digital Revolution', *Science* 285, τχ. 5429 (6 Αύγουστος 1999): 839–41, <https://doi.org/10.1126/science.285.5429.839>.

586 'Technology and Design: The Digital Industrial Revolution', Dezeen, 26 Ιούνιος 2012, <https://www.dezeen.com/2012/06/26/technology-and-design-the-digital-industrial-revolution/>.

587 'Numerical Control', στο *Wikipedia*, 25 Σεπτέμβριος 2023, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Numerical\\_control&oldid=1177002929](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Numerical_control&oldid=1177002929).

588 'What Is Computer Aided Manufacturing (CAM)?', Fusion 360 Blog, 25 Απρίλιος 2018, <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/computer-aided-manufacturing-beginners/>.



Όσον αφορά στις δύο κατηγορίες μηχανών ψηφιακής κατασκευής **CNC subtractive – CNC additive manufacturing**, υπάρχουν τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Ένας συγκριτικός πίνακας των χαρακτηριστικών των δύο κατηγοριών παρουσιάζεται στη συνέχεια.

<b>Subtractive Manufacturing CNC</b>	<b>Additive Manufacturing CNC</b>
Παλαιότερη τεχνολογία (J. T. Parsons, 1940).	Νεότερη τεχνολογία (Hideo Kodama, 1981).
Γίνεται χρήση NC από ηλεκτρονικό υπολογιστή για τον έλεγχο της μηχανής.	Γίνεται χρήση NC από ηλεκτρονικό υπολογιστή για τον έλεγχο της μηχανής.
Αφαιρείται σταδιακά υλικό από ένα αντικείμενο με τη χρήση εργαλείων κοπής.	Προστίθεται σταδιακά υλικό σε στρώσεις σε ρευστή μορφή ή πούδρα, το οποίο στη συνέχεια στερεοποιείται.
Μπορούν να κατασκευαστούν πολύπλοκες γεωμετρικές μορφές, αλλά υπάρχει δυσχέρεια σε κοίλες περιοχές λόγω δυσκολίας μηχανικής πρόσβασης του εργαλείου.	Μπορούν να κατασκευαστούν πολύπλοκες μορφές οποιασδήποτε γεωμετρίας, καθώς λόγω της διαδικασίας κατασκευής σε στρώσεις δεν υπάρχει περιορισμός μηχανικής πρόσβασης του εργαλείου.
Προτείνεται για την κατασκευή μεγαλύτερων σε διαστάσεις αντικειμένων, κυρίως ξύλινων ή μεταλλικών.	Προτείνεται για την κατασκευή αντικειμένων μικρότερων διαστάσεων, κυρίως πλαστικών. Νεότερες μηχανές κατασκευάζονται πλέον και σε μεγαλύτερα μεγέθη και διαχειρίζονται το μέταλλο και το σκυρόδεμα ως υλικό εκτύπωσης.
Πιο γρήγορη διαδικασία κατασκευής σε σχέση με τη διαδικασία AD.	Πιο αργή διαδικασία κατασκευής σε σχέση με τη διαδικασία SM.
Μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα σχεδόν τα στερεά υλικά (ξύλα, μέταλλα, πλαστικά, συνθετικά υλικά).	Μπορεί να χρησιμοποιήσει μόνο συμβατά υλικά κατασκευής ανάλογα με την τεχνολογία 3D εκτύπωσης της κάθε μηχανής (π.χ. resin, πλαστικά, σύνθετα υλικά, μέταλλα, κεραμικά, κονιάματα, κ.λπ. <sup>589</sup> )

Πίνακας 1: Συγκριτικός πίνακας μεθόδων κατασκευής CNC – Subtractive Manufacturing και Additive manufacturing.  
Πηγή: T. Koumτζόγλου.

Οι μηχανές CNC της πρώτης κατηγορίας (SM) είναι παλαιότερες καθώς προήλθαν από την εξέλιξη συμβατικών μηχανών κατασκευής, οι οποίες άρχισαν να ελέγχονται με τεχνικές Numerical Control (NC) (J. T. Parsons, 1940). Οι μηχανές CNC Additive manufacturing αναφέρονται ουσιαστικά σε μηχανές **3D printing** διαφόρων τεχνολογιών. Όπως περιγράφεται από την Autodesk <sup>590</sup>, το 3D printing είναι μια τεχνολογία νεότερης κατασκευής η οποία δημιουργήθηκε το 1981 από τον Hideo Kodama. Το 1984 εφευρέθηκε η τεχνική της στερεολιθογραφίας (stereolithography - **SLA**) από τον Charles Hull. Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιείται ακτίνα laser η οποία σταθεροποιεί ρητίνη σε υγρή μορφή σε επάλληλες στρώσεις. Το 1999 «εκτυπώθηκε» το πρώτο όργανο για ανθρώπινη μεταμόσχευση. Την περίοδο εκείνη η τεχνολογία 3D εκτύπωσης ήταν πολύ ακριβή και η χρήση της

#### 589 Υλικά 3D Printing :

Πλαστικά: ABS, PLA, Nylon (Polyamide), PEEK, PET, PETG, ULTEM, HIPS, PVA.

Μέταλλο / πλαστικά σύνθετα: (Bronze, Copper, Steel, Iron), Alumide, Wood, Carbon Fiber.

Μέταλλο: Aluminum, Cobalt Chromium. Copper, Bronze, Inconel, Nickel, Gold, Silver, Platinum, Steel, Titanium.

Resins (φωτοπολυμερή): SLA resins, PolyJet resins.

Κεραμικά. Κερί. Χαρτί. Sandstone. Αγώγιμα υλικά. Πηλός. Σκυρόδεμα. Πηγή και από: 'The 3D Printing Materials Guide', All3DP, 13 Ιούλιος 2019, <https://all3dp.com/1/3d-printing-materials-guide-3d-printer-material/>.

590 'History of 3D Printing: It's Older Than You Think [Updated]', Redshift EN (blog), 13 Απρίλιος 2018, <https://www.autodesk.com/redshift/history-of-3d-printing/>.

περιοριζόταν από τη βιομηχανία και την ιατρική. Με την εξάπλωση των ηλεκτρονικών οικιακών υπολογιστών, το κίνημα του open source software και hardware, τη διεύρυνση της βάσης των χρηστών, κ.λπ., η τεχνολογία αυτή έγινε πολύ πιο προσιτή και τώρα ο μέσος χρήστης έχει τη δυνατότητα να διαθέτει μια τέτοια μηχανή, για την κατασκευή μικρών αντικειμένων, αλλά κυρίως για πειραματισμό και διερεύνηση. Οι ρυθμοί εξάπλωσης της χρήσης τεχνολογίας 3D Printing είναι τόσο μεγάλοι που πλέον υπάρχουν υπηρεσίες εκτύπωσης από απόσταση μέσω διαδικτύου οι οποίες παραλαμβάνουν αρχεία 3D CAD και παράγουν τα αντίστοιχα αντικείμενα, ενώ προσωπικοί 3D printers εκτελούν εργασίες κατασκευής μικρών αντικειμένων και πρωτοτύπων σε διάφορα επιστημονικά και εμπορικά πεδία. Παράλληλα, αυξάνονται συνεχώς τα διαθέσιμα συμβατά υλικά 3D εκτύπωσης ενώ αυξάνονται και οι δυνατότητες 3D εκτύπωσης από άποψη μέγιστων διαστάσεων κατασκευής. Οι οικιακοί τρισδιάστατοι εκτυπωτές πλέον προσφέρονται σε προσιτές οικονομικά διατάξεις σε σχέση με το παρελθόν και χρησιμοποιούν τις τεχνολογίες **FDM** (Fusion Deposition Modelling) η οποία αφορά την έγχυση τηγμένου θερμοπλαστικού το οποίο σταθεροποιείται και λαμβάνει τη μορφή του μοντέλου, την τεχνολογία **DLP** (Digital Light Processing) όπου ακτίνα laser τήκει υλικά σε μορφή σκόνης και τα σταθεροποιεί σε στρώσεις στη μορφή του μοντέλου. Άλλες μέθοδοι είναι: Η μέθοδος **Binder Jetting** η οποία χρησιμοποιεί την έγχυση υλικού το οποίο στη συνέχεια σταθεροποιείται μέσω χημικών διαδικασιών, η μέθοδος **Material Jetting** όπου γίνεται έγχυση υγρού πολυμερούς το οποίο σταθεροποιείται με τη χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας, η μέθοδος **SDL** (Selective Deposition Lamination) όπου γίνεται χρήση απλού χαρτιού φωτοτυπίας το οποίο ενώνεται με συγκόλληση διαδοχικά σε στρώσεις και η μέθοδος **EBM** (Electron Beam Melting) κατά την οποία εκτυπώνονται μεταλλικά υλικά με τη χρήση τήξης από ακτίνα laser <sup>591</sup>, η μέθοδος στερεολιθογραφίας **SLA** που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Η τεχνολογία 3D Printing μεγάλου μεγέθους με υλικά όπως το μίγματα θερμοπλαστικών, πηλό ή σκυρόδεμα, βασίζεται κι αυτή στη διαδοχική διαστρωμάτωση εύπλαστου υλικού το οποίο στη συνέχεια στερεοποιείται. Άλλες τεχνικές είναι το powder bonding (στερεοποίηση κονίας) ή η προσθετική συγκόλληση. Πρώτη γενιά τέτοιων τεχνολογιών αποτελεί το σύστημα **D-Shape** <sup>592</sup> το οποίο δημιουργήθηκε το 2005 και χρησιμοποιεί απόθεση μείγματος από εκτυπωτή που στηρίζεται σε 4 πυλώνες και υπερυψώνεται σταδιακά. Το **"Building on Demand"** (BOD) <sup>593</sup> project ανήκει στην τελευταία γενιά τρισδιάστατων δομικών εκτυπωτών (2019) τα μεγάλα μοντέλα του οποίου μπορούν να εκτυπώσουν ενιαίες κατασκευές μέγιστων διαστάσεων 7mX34,90mX5,60m.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα κατασκευών μεγάλης κλίμακας αποτελεί η πρόκληση επίδειξης τεχνολογίας της **NASA 3D-printed Habitat Challenge** <sup>594</sup>. Η πρόκληση αφορούσε στην κατασκευή βιώσιμης κατοικίας μέσω 3D printing για τις ανάγκες εξερεύνησης του διαστήματος. Η πρόκληση είχε ως στόχο να προωθηθεί η απαραίτητη οικοδομική τεχνολογία για την κατασκευή χώρων διαβίωσης σε άλλους πλανήτες και συγκεκριμένα στον Άρη. Μια από τις προτάσεις (**AI SpaceFactory MARSHA**

591 'The Free Beginner's Guide', 3D Printing Industry, ημερομηνία πρόσβασης 19 Αύγουστος 2020, <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/>.

592 'D-shape', ημερομηνία πρόσβασης 11 Μάιος 2020, <https://d-shape.com/>.

593 Asger, 'The BOD - The First 3D Printed Building in Europe', COBOD (blog), ημερομηνία πρόσβασης 11 Μάιος 2020, <https://cobod.com/the-bod/>.

594 Jennifer Harbaugh, 'NASA's Centennial Challenges: 3D-Printed Habitat Challenge', Text, NASA, 5 Οκτώβριος 2016, [http://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial\\_challenges/3DPHab/about.html](http://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/3DPHab/about.html).

<sup>595</sup>, 2020) περιελάμβανε χρήση 3D εκτυπωτή μεγάλου μεγέθους ο οποίος κατασκεύασε κέλυφος κατοικίας σε μεγάλη κλίμακα με διάμετρο βάσης 6,5m και ύψος 12m από μείγμα πλαστικού PLA και βασάλτη (ως πρώτη ύλη άφθονη στον πλανήτη Άρη). Άλλο τέτοιου είδους παράδειγμα κατασκευής σε πραγματική κλίμακα είναι η αυτοκατασκευαζόμενη γέφυρα από ασφάλι που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε από την Ολλανδική **MX3D** <sup>596</sup> (2018) για να γεφυρώσει το άνοιγμα ενός καναλιού. Παρόμοιο επίτευγμα είναι κατοικία στο Dubai υλοποιημένη από την **Apis-Cor** <sup>597</sup> (2019) εμβαδού 640 m<sup>2</sup> και ύψους 9.5m κατασκευασμένη από σκυρόδεμα και χαλύβδινο οπλισμό. Αντίστοιχο παράδειγμα αλλά σε μικρότερη κλίμακα είναι οι διερευνητικές κατασκευές από σκυρόδεμα που υλοποιήθηκαν ξανά με τεχνολογία 3D εκτύπωσης με τίτλο **"Concrete Choreography"** <sup>598</sup> (2019) από ομάδα του ΕΘ. Παρατηρείται η δυνατότητα κατασκευής οργανικών – ακανόνιστων μορφών από συμβατικά υλικά. Η μέθοδος κατασκευής επιτρέπει δηλαδή την υλοποίηση ιδιαίτερων μορφών και δομών που δεν ήταν δυνατόν να υλοποιηθούν μέχρι τώρα με συμβατικές τεχνικές και εργαλεία. Στην ίδια λογική κινείται το project κατασκευής γειτονιάς στην Πόλη του Eindhoven - **"Project Milestone"** <sup>599</sup> <sup>600</sup>, μια γειτονιάς που πρόκειται να κατασκευαστεί από 3D εκτυπώσιμα κτήρια από σκυρόδεμα, τα οποία θα έχουν σταδιακά και μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στη μορφή και στην κατασκευή. Η μορφή τους δεν θα είναι αυτή συμβατικών κατασκευών, όπως π.χ. εκτυπώσιμα κτήρια από σκυρόδεμα σε εφαρμογές στην Κίνα που ακολουθούν συμβατικές μορφολογίες <sup>601</sup>, αλλά περισσότερο εξελιγμένη.

Η τεχνολογία της 3D εκτύπωσης μεγάλων διαστάσεων δεν αποδίδει μια απόλυτα ομοιόμορφη τελική επιφάνεια, όπως στην περίπτωση μια συμβατικής κατασκευής με ξυλότυπο ή επίχρισμα. Η κάθε στρώση υλικού έχει μικρές διαφοροποιήσεις σε πλάτος, εντός ορίων ανοχών, η οποία δημιουργεί χαρακτηριστική υφή. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η δυνατότητα κατασκευής εξειδικευμένων μορφών που δεν μπορούσαν να υλοποιηθούν στο παρελθόν, σε συνδυασμό με το πλεονέκτημα μεγάλης εξοικονόμησης χρόνου και εργατικού δυναμικού. Ενώ πρόκειται για CNC μηχανές οι οποίες μεταφράζουν σε κατασκευή τα δεδομένα του σχεδιασμού με πάρα πολύ μεγάλη ακρίβεια, η χρησιμότητά τους είναι η δυνατότητα παραγωγής απεριόριστων, συμβατικών και μη συμβατικών, μορφών και δομών από την ίδια διάταξη και η υλοποίηση οποιουδήποτε πιθανού σχεδιαστικού ενδεχομένου ή παραλλαγής. Ενώ η διάταξη μιας CNC μηχανής ΔΕΝ εμπεριέχει την παράμετρο της τυχαιότητας, καθώς ένα CNC σύστημα είναι μια ντετερμινιστική μηχανή η οποία λαμβάνει οδηγίες και τις εκτελεί χωρίς διαφοροποιήσεις, η διάταξη αυτή μπορεί να γίνει το μέσο υλοποίησής της ψηφιακά σχεδιασμένης τυχαιότητας στο φυσικό κόσμο.

595 *AI SpaceFactory - MARSHA - Our Vertical Martian Future - Part One*, ημερομηνία πρόσβασης 8 Μάιος 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=XnrVV0w2jrE>.

596 *'World's First 3D-Printed Steel Bridge Unveiled at Dutch Design Week'*, Dezeen, 22 Οκτώβριος 2018, <https://www.dezeen.com/2018/10/22/worlds-first-3d-printed-steel-bridge-completed-mx3d-technology/>.

597 *'World's Largest 3D-Printed Building Completes in Dubai'*, Dezeen, 22 Δεκέμβριος 2019, <https://www.dezeen.com/2019/12/22/apis-cor-worlds-largest-3d-printed-building-dubai/>.

598 *'Students' 3D-Printed Concrete Choreography Pillars Provide a Stage for Dancers'*, Dezeen, 24 Ιούλιος 2019, <https://www.dezeen.com/2019/07/24/3d-printed-concrete-choreography-pillars-design/>.

599 *3dprintedhouse, '3dprintedhouse: Project - Project Milestone'*, 3dprintedhouse, ημερομηνία πρόσβασης 10 Μάιος 2020, <https://3dprintedhouse.nl/en/project-info/project-milestone>.

600 *World's first commercial 3D-concrete printing housing project*, ημερομηνία πρόσβασης 10 Μάιος 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=UFWg6Qb8yYI>.

601 *'Chinese Company Builds 3D Printed Sustainable Houses'*, ημερομηνία πρόσβασης 10 Μάιος 2020, <https://greeninitiatives.cn/blog-description/chinese-company-builds-3d-printed-sustainable-houses>.

Άλλες τεχνικές 3D προσθετικής κατασκευής Additive Manufacturing (AM) αποτελούν διατάξεις κατασκευής με χρήση οπτόπλινθων, οι οποίοι τοποθετούνται από ρομποτικό βραχίονα σε ακριβείς συντεταγμένες. Αυτός ο τρόπος κατασκευής είναι ένας τρόπος τρισδιάστατης εκτύπωσης, καθώς δημιουργείται κατασκευή και χώρος με τη χρήση μηχανής CNC και την απόθεση, αντί για ρευστού υλικού ή σκόνης που στερεοποιείται όπως προηγουμένως, προκατασκευασμένων στοιχείων διαφόρων διαστάσεων. Οι περιορισμοί αυτής της μεθόδου είναι ότι υπόκεινται στους δομικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς του υλικού τοποθέτησης. Πρόκειται δηλαδή για μια ενδιάμεση/υβριδική μέθοδο κατασκευής ανάμεσα στη συμβατική κατασκευή και την κατασκευή με τεχνολογία 3D printing. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν και οι διερευνήσεις additive manufacturing του εργαστηρίου Gramazio Kohler Research στο ETH <sup>602</sup>.

---

602 'Gramazio Kohler Research', ημερομηνία πρόσβασης 10 Μάιος 2020, <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/index.html>.

## Βιβλιογραφία Παραρτήματος II

- 3D Printing Industry. 'The Free Beginner's Guide'. Ημερομηνία πρόσβασης 19 Αύγουστος 2020. <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/>.
- 3dprintedhouse. '3dprintedhouse: Project - Project Milestone'. 3dprintedhouse. Ημερομηνία πρόσβασης 10 Μάιος 2020. <https://3dprintedhouse.nl/en/project-info/project-milestone>.
- '3ds Max | 3D Modeling, Animation & Rendering Software | Autodesk'. Ημερομηνία πρόσβασης 20 Απρίλιος 2020. <https://www.autodesk.com/products/3ds-max/overview?support=ADVANCED>.
- 'Επιστήμη συστημάτων'. Στο *Βικιπαίδεια*, 5 Φεβρουάριος 2020. [https://el.wikipedia.org/wiki/Επιστήμη\\_συστημάτων](https://el.wikipedia.org/wiki/Επιστήμη_συστημάτων).
- Μπαμπινιώτης, Γ. *Λεξικό της νέας ελληνικής γλώσσας*. Γ'. Αθήνα: Κέντρο Λεξικολογίας, 2008.
- Παπαλεξόπουλος, Δημήτρης, Αθηνά Σταυρίδου, και Δημήτρης Παπαδόπουλος. 'Εννοιολογικός Προσδιορισμός Παραμετρικών Ιδιοτήτων Αρχιτεκτονικών Κατασκευαστικών Στοιχείων Και Δομικών Υλικών'. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2010. [https://www.academia.edu/35180607/\\_%CE%95%CE%9D%CE%9D%CE%9F%CE%99%CE%9F%CE%9B%CE%9F%CE%93%CE%99%CE%9A%CE%9F%CE%A3\\_%CE%A0%CE%A1%CE%9F%CE%A3%CE%94%CE%99%CE%9F%CE%A1%CE%99%CE%A3%CE%9C%CE%9F%CE%A3\\_%CE%A0%CE%91%CE%A1%CE%91%CE%9C%CE%95%CE%A4%CE%A1%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D\\_%CE%99%CE%94%CE%99%CE%9F%CE%A4%CE%97%CE%A4%CE%A9%CE%9D\\_%CE%91%CE%A1%CE%A7%CE%99%CE%A4%CE%95%CE%9A%CE%A4%CE%9F%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D\\_%CE%9A%CE%91%CE%A4%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%95%CE%A5%CE%91%CE%A3%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D\\_%CE%A3%CE%A4%CE%9F%CE%99%CE%A7%CE%95%CE%99%CE%A9%CE%9D\\_%CE%9A%CE%91%CE%99\\_%CE%94%CE%9F%CE%9C%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D\\_%CE%A5%CE%9B%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D\\_](https://www.academia.edu/35180607/_%CE%95%CE%9D%CE%9D%CE%9F%CE%99%CE%9F%CE%9B%CE%9F%CE%93%CE%99%CE%9A%CE%9F%CE%A3_%CE%A0%CE%A1%CE%9F%CE%A3%CE%94%CE%99%CE%9F%CE%A1%CE%99%CE%A3%CE%9C%CE%9F%CE%A3_%CE%A0%CE%91%CE%A1%CE%91%CE%9C%CE%95%CE%A4%CE%A1%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D_%CE%99%CE%94%CE%99%CE%9F%CE%A4%CE%97%CE%A4%CE%A9%CE%9D_%CE%91%CE%A1%CE%A7%CE%99%CE%A4%CE%95%CE%9A%CE%A4%CE%9F%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D_%CE%9A%CE%91%CE%A4%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%95%CE%A5%CE%91%CE%A3%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D_%CE%A3%CE%A4%CE%9F%CE%99%CE%A7%CE%95%CE%99%CE%A9%CE%9D_%CE%9A%CE%91%CE%99_%CE%94%CE%9F%CE%9C%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D_%CE%A5%CE%9B%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D_).
- 'About ARCHICAD — A 3D architectural BIM software for design & modeling'. Ημερομηνία πρόσβασης 20 Απρίλιος 2020. <https://www.graphisoft.com/archicad/>.
- 'AEC Design Software - BIM CAD Tools | Vectorworks Architect'. Ημερομηνία πρόσβασης 20 Απρίλιος 2020. <https://www.vectorworks.net/en-GB/architect>.
- AI SpaceFactory - MARSHA - Our Vertical Martian Future - Part One*. Ημερομηνία πρόσβασης 8 Μάιος 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=XnrVV0w2jrE>.
- Alexander, Christopher, Sara Ishikawa, Murray Silverstein, Max Jacobson, Ingrid Fiksdahl-King, και Shlomo Angel. *A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction*. New York: Oxford University Press, 1977.
- 'Algorithm'. Στο *Wikipedia*, 3 Ιούλιος 2024. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Algorithm&oldid=1232359321>.
- 'Algorithm and its types'. Ημερομηνία πρόσβασης 22 Απρίλιος 2020. <https://www.includehelp.com/data-structure-tutorial/algorithm-and-its-types.aspx>.
- All3DP. 'The 3D Printing Materials Guide', 13 Ιούλιος 2019. <https://all3dp.com/1/3d-printing-materials-guide-3d-printer-material/>.

- Architecture (CCA), Canadian Centre for. 'Embryological House'. Ημερομηνία πρόσβασης 18 Απρίλιος 2020. <https://www.cca.qc.ca/en/articles/issues/4/origins-of-the-digital/5/embryological-house>.
- Asger. 'The BOD - The First 3D Printed Building in Europe'. COBOD (blog). Ημερομηνία πρόσβασης 11 Μάιος 2020. <https://cobod.com/the-bod/>.
- 'Associative parametric design - Architecture of Israel Quarterly **כתב עת - אדריכלות ישראלית** 21, 'שפשר לבנות עליו', Απρίλιος 2020. [https://www.aiq.co.il/su\\_article.php?id=69&num=6&lang=eng](https://www.aiq.co.il/su_article.php?id=69&num=6&lang=eng).
- Baudrillard, Jean. *Simulations*. Μετάφραση Phil Beitchman, Paul Foss, και Paul Patton. New York City, N.Y., U.S.A: Semiotext, 1983.
- 'Biocenter 1987 — EISENMAN ARCHITECTS'. Ημερομηνία πρόσβασης 2 Ιούλιος 2024. <https://eisenmanarchitects.com/Biocenter-1987>.
- Burry, Mark. *Scripting Cultures: Architectural Design and Programming*. 1 edition. Chichester, UK: Wiley, 2011.
- Burry, Mark, και Zolna Murray. '15th ECAADE conference: challenges of the future: proceedings'. Electronic resource. eCAADe: Conferences. Vienna: Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, 1997.
- Carmo, Mario. 'Digital Style'. *Log*, τχ. 23 (2011): 41–52.
- . 'Parametric Notations: The Birth of the Non-Standard'. *Architectural Design* 86, τχ. 2 (2016): 24–29. <https://doi.org/10.1002/ad.2020>.
- 'Chinese Company Builds 3D Printed Sustainable Houses'. Ημερομηνία πρόσβασης 10 Μάιος 2020. <https://greeninitiatives.cn/blog-description/chinese-company-builds-3d-printed-sustainable-houses>.
- 'Computational Design Software, Buildings - GenerativeComponents'. Ημερομηνία πρόσβασης 20 Απρίλιος 2020. <https://www.bentley.com/en/products/product-line/modeling-and-visualization-software/generativecomponents>.
- Cormen, Thomas H., Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, και Clifford Stein. *Introduction to Algorithms*. 3 edition. The MIT Press, 2009.
- Cronin, Michael. *Translation in the Digital Age*. Routledge, 2013.
- Dana, James Dwight. *On the Drawing of Figures of Crystals*. American journal of science and arts, 1838.
- Davidson, Scott. 'Grasshopper. Algorithmic Modeling for Rhino.' Ημερομηνία πρόσβασης 20 Απρίλιος 2020. <https://www.grasshopper3d.com/>.
- Davis, Daniel. 'A History of Parametric'. Daniel Davis. Ημερομηνία πρόσβασης 19 Απρίλιος 2020. <https://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/>.
- . 'Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture.' Doctor of Philosophy, RMIT University, 2013. <https://core.ac.uk/download/pdf/78558704.pdf>.
- Deleuze, Gilles. *Fold: Leibniz and the Baroque*. London: Athlone Press, 2000.

- Dezeen. 'Students' 3D-Printed Concrete Choreography Pillars Provide a Stage for Dancers', 24 Ιούλιος 2019. <https://www.dezeen.com/2019/07/24/3d-printed-concrete-choreography-pillars-design/>.
- Dezeen. 'Technology and Design: The Digital Industrial Revolution', 26 Ιούνιος 2012. <https://www.dezeen.com/2012/06/26/technology-and-design-the-digital-industrial-revolution/>.
- Dezeen. 'World's First 3D-Printed Steel Bridge Unveiled at Dutch Design Week', 22 Οκτώβριος 2018. <https://www.dezeen.com/2018/10/22/worlds-first-3d-printed-steel-bridge-completed-mx3d-technology/>.
- Dezeen. 'World's Largest 3D-Printed Building Completes in Dubai', 22 Δεκέμβριος 2019. <https://www.dezeen.com/2019/12/22/apis-cor-worlds-largest-3d-printed-building-dubai/>.
- Dhillon, B. S. *Advanced Design Concepts for Engineers*. CRC Press, 1998.
- 'Digital Project | Building Together'. Ημερομηνία πρόσβασης 20 Απρίλιος 2020. <https://www.digitalproject3d.com/>.
- 'D-shape'. Ημερομηνία πρόσβασης 11 Μάιος 2020. <https://d-shape.com/>.
- Encyclopedia Britannica. 'Algorithm | Mathematics'. Encyclopedia. Μετάφραση Τ. Κουιμπζόγλου. Encyclopedia Britannica. Ημερομηνία πρόσβασης 22 Απρίλιος 2020. <https://www.britannica.com/science/algorithm>.
- Encyclopedia Britannica. 'The Fourth Industrial Revolution | Special Feature'. Ημερομηνία πρόσβασης 6 Μάιος 2020. <https://www.britannica.com/topic/The-Fourth-Industrial-Revolution-2119734>.
- 'Fologram'. Ημερομηνία πρόσβασης 27 Σεπτέμβριος 2023. <https://fologram.com/>.
- Foundation, Blender. 'Blender.Org - Home of the Blender Project - Free and Open 3D Creation Software'. *Blender.Org* (blog). Ημερομηνία πρόσβασης 20 Απρίλιος 2020. <https://www.blender.org/>.
- Fusion 360 Blog. 'What Is Computer Aided Manufacturing (CAM)?', 25 Απρίλιος 2018. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/computer-aided-manufacturing-beginners/>.
- Gallo, Giuseppe, και Giuseppe Pellitteri. 'Luigi Moretti, from History to Parametric Architecture.' Στο *23rd International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2018*. Beijing, 2018. [https://www.researchgate.net/publication/325967005\\_Luigi\\_Moretti\\_from\\_History\\_to\\_parametric\\_architecture](https://www.researchgate.net/publication/325967005_Luigi_Moretti_from_History_to_parametric_architecture).
- Glynn, Ruairi. 'Fun Palace – Cedric Price'. *Interactive Architecture Lab* (blog). Ημερομηνία πρόσβασης 17 Απρίλιος 2020. <http://www.interactivearchitecture.org/fun-palace-cedric-price.html>.
- 'Gramazio Kohler Research'. Ημερομηνία πρόσβασης 10 Μάιος 2020. <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/index.html>.
- Harbaugh, Jennifer. 'NASA's Centennial Challenges: 3D-Printed Habitat Challenge'. Text. NASA, 5 Οκτώβριος 2016. [http://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial\\_challenges/3DPHab/about.html](http://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/3DPHab/about.html).

- 'History of CAD Software'. Στο *Wikipedia*, 3 Μάρτιος 2020. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=History\\_of\\_CAD\\_software&oldid=943716965](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=History_of_CAD_software&oldid=943716965).
- Interactive Architecture Lab. 'The Generator Project'. Ημερομηνία πρόσβασης 17 Απρίλιος 2020. <http://www.interactivearchitecture.org/the-generator-project.html>.
- Kolarevic, Branko, επιμ. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. 1 edition. New York: Taylor & Francis, 2005.
- Lévy, Pierre Lévy. *Δυνητική πραγματικότητα*. Μετάφραση Μιχάλης Καραχάλιος. Η φιλοσοφία του πολιτισμού και του κυβερνοχώρου. Αθήνα: Εκδόσεις Κριτική, 1999.
- Licklider, J.C.R. 'Man-Computer Symbiosis'. *IRE Transactions on Human Factors in Electronics* HFE-1 (1960): 4–11.
- 'List of Algorithms'. Στο *Wikipedia*, 31 Μάρτιος 2020. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List\\_of\\_algorithms&oldid=948287207](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List_of_algorithms&oldid=948287207).
- 'Maya | Computer Animation & Modeling Software | Autodesk', 20 Απρίλιος 2020. <https://www.autodesk.com/products/maya/overview>.
- Merriam-Webster. 'Analog'. Ημερομηνία πρόσβασης 6 Μάιος 2020. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/analog>.
- . 'Digital'. Ημερομηνία πρόσβασης 6 Μάιος 2020. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/digital>.
- Mitchell, William J. 'A Tale of Two Cities: Architecture and the Digital Revolution'. *Science* 285, τχ. 5429 (6 Αύγουστος 1999): 839–41. <https://doi.org/10.1126/science.285.5429.839>.
- Negroponte, Nicholas. *The Architecture Machine: Toward a More Human Environment*. First Edition edition. Cambridge, Mass: The MIT Press, 1973.
- 'Numerical Control'. Στο *Wikipedia*, 25 Σεπτέμβριος 2023. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Numerical\\_control&oldid=1177002929](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Numerical_control&oldid=1177002929).
- 'Para 3d | 3ds Max | Autodesk App Store', 20 Απρίλιος 2020. <https://apps.autodesk.com/3DSMAX/en/Detail/Index?id=7147262754532706746&appLang=en&os=Win64>.
- Pask, Gordon. 'The Architectural Relevance of Cybernetics'. *Architectural Design*, 1969. [https://arl.human.cornell.edu/879Readings/GordonPask\\_Architectural%20Relevance%20of%20Cybernetics.pdf](https://arl.human.cornell.edu/879Readings/GordonPask_Architectural%20Relevance%20of%20Cybernetics.pdf).
- Priceonomics. 'The Software Behind Frank Gehry's Geometrically Complex Architecture'. Ημερομηνία πρόσβασης 17 Απρίλιος 2020. <http://priceonomics.com/the-software-behind-frank-gehrys-geometrically/>.
- ProArchitect #005 - Parametric DESIGN? Not really...*, 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=rDPTtrRMBQk>.
- 'Processing.org', 20 Απρίλιος 2020. <https://processing.org/>.
- Redshift EN. 'History of 3D Printing: It's Older Than You Think [Updated]', 13 Απρίλιος 2018. <https://www.autodesk.com/redshift/history-of-3d-printing/>.



'Revit | BIM Software | Autodesk Official Store', 20 Απρίλιος 2020.  
<https://www.autodesk.com/products/revit/overview>.

Sadler, Simon. *Archigram: Architecture without Architecture*. Cambridge, Mass: The MIT Press, 2005.

Schumacher, Patrik, επιμ. *Parametricism 2.0: Rethinking Architecture's Agenda for the 21st Century AD*. 1 edition. John Wiley & Sons, 2016.

———. 'Parametricism as Style - Parametricist Manifesto'. Ημερομηνία πρόσβασης 4 Απρίλιος 2020.  
<https://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.htm>.

'Sketchpad'. Στο *Wikipedia*, 20 Μάρτιος 2020. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sketchpad&oldid=946503020>.

SPACE10. 'The Digital in Architecture: Then, Now and in the Future', 12 Νοέμβριος 2019.  
<https://space10.com/project/digital-in-architecture/>.

Terzidis, Kostas. *Algorithmic Architecture*. 1 edition. Routledge, 2016.

*The Logic of Architecture: Design, Computation, and Cognition*. Cambridge, Mass: The M.I.T. Press, 1990.

'The-history-of-CAD\_CADENAS\_R3.png (PNG Image, 2015 × 1000 pixels) - Scaled (91%)'. Ημερομηνία πρόσβασης 21 Απρίλιος 2020. [https://partsolutions.com/wp-content/uploads/2017/09/The-history-of-CAD\\_CADENAS\\_R3.png](https://partsolutions.com/wp-content/uploads/2017/09/The-history-of-CAD_CADENAS_R3.png).

UNStudio. 'Mercedes-Benz Museum', 17 Απρίλιος 2020.  
<http://www.unstudio.com/en/page/12482/mercedes-benz-museum>.

Viati Navone, Annalisa. 'The Architect Luigi Moretti. From Rationalism to Informalism.', 19 Απρίλιος 2020.  
[https://www.academia.edu/36174716/Httpwww\\_kaiu\\_pan\\_plimagesstories2\\_2012pdfa\\_v\\_navone\\_eng\\_2\\_](https://www.academia.edu/36174716/Httpwww_kaiu_pan_plimagesstories2_2012pdfa_v_navone_eng_2_).

Wikipedia. 'Genetic Algorithm'. Στο *Wikipedia*, 21 Απρίλιος 2020.  
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Genetic\\_algorithm&oldid=952333404](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Genetic_algorithm&oldid=952333404).

*World's first commercial 3D-concrete printing housing project*. Ημερομηνία πρόσβασης 10 Μάιος 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=UFWg6Qb8yYI>.

## Ευρετήριο εικόνων Παραρτήματος II

Τα πνευματικά δικαιώματα των εικόνων ανήκουν στους αντίστοιχους κατόχους τους.

Εικόνα 1: Guggenheim Bilbao (1997), F. Gehry. Πηγή: Bilbao - Museo Guggenheim 2014 – panoramio.jpg, Bilbao - Museo Guggenheim 2014, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bilbao_-_Museo_Guggenheim_2014_-_panoramio.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bilbao_-_Museo_Guggenheim_2014_-_panoramio.jpg</a> (φωτογραφία 2014) , εικόνα του/της: Валерий Дед , άδεια: CC BY 3.0, Creative Commons Attribution 3.0 Unported license.....	371
Εικόνα 2: Guggenheim Bilbao (1997), F. Gehry. Πηγή: Guggenheim detail.jpg, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Guggenheim_detail.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Guggenheim_detail.jpg</a> (φωτογραφία 2004) , εικόνα του/της: Chris 73 , άδεια: CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.....	371
Εικόνα 3: Φωτογραφία μοντέλου σε φυσική κλίμακα της σειράς Embryological House. Πηγή: Architecture Model - Large scale model for the unrealized Embryological House by Greg Lynn FORM.jpeg, <a href="https://www.flickr.com/photos/eager/10781374024/in/photostream/">https://www.flickr.com/photos/eager/10781374024/in/photostream/</a> , εικόνα του/της: 準建築人手札網站 Forgemind ArchiMedia, άδεια: CC BY 2.0 , <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/</a> .....	372
Εικόνα 4: Yokohama International Port Terminal (1995), AZPA/FOA. Πηγή: Yokohama International Port Terminal, <a href="https://www.flickr.com/photos/st3f4n/2826250178/">https://www.flickr.com/photos/st3f4n/2826250178/</a> , εικόνα του/της: DocChewbacca , άδεια: CC BY-SA 2.0 , <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/</a> .....	373
Εικόνα 5: Mercedes-Benz Museum (2001-2006), UN Studio. Πηγή: Mercedes-Benz Museum 201312 08 blue hour.jpg, Mercedes-Benz Museum in Stuttgart, Germany, during blue hour, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mercedes-Benz_Museum_201312_08_blue_hour.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mercedes-Benz_Museum_201312_08_blue_hour.jpg</a> , εικόνα του/της: Julian Herzog , άδεια: GNU Free Documentation License, Version 1.2 , CC BY 4.0, Creative Commons Attribution 4.0 International license , The photographic reproduction of this work is covered under the article § 59 of the German copyright law.....	373
Εικόνα 6: Παράδειγμα αλλαγής αναλογιών παραμέτρων ομαλοποίησης (chamfer) γωνίας κρυστάλλου κατά τον J. Dana. Πηγή: <a href="https://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/">https://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/</a> , James Dwight Dana, <i>On the Drawing of Figures of Crystals</i> (American journal of science and arts, 1838) , 43.....	376
Εικόνα 7: Εικόνα επιφάνειας εργασίας για το λογισμικό Grasshopper 3D. Πηγή: Grasshopper MainWindow.png, A screen shot of the Grasshopper main window, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Grasshopper_MainWindow.png">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Grasshopper_MainWindow.png</a> , εικόνα του/της: David Rutten , άδεια: CC BY-SA 3.0, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.....	382
Εικόνα 8: Grasshopper 3D: Πηγή: ghopper2d, <a href="https://www.flickr.com/photos/mpsyp/3018839473/in/photolist-5ALkNr-5ALkNa-5ALkN4-5ALkNi-98FsR9-2kGTzhx-98FraC-5qPx5v-98Fq3o-98FqRL-24dAzLp-98Fssm-98FrUb-5qApeT-81xtxz-5qPxbX-G8bBqp-27ef6y2-5qTT7Q-5qTT2N-7nRiiS-5qTSVJ-pedNPO-98Chfz-aaeNM9-9Dx6M8-5qApiv-9EFizG-9oXM9S-WTKcVx-aabZc6-7TNMBh-9oXM4s-9oXM6u-9oUG9F-9oUGg4-9DAnEE-8HffFC-9DzWr1-9DAivγ-9JDWGF-9Jz94D-9ECoa6-9FUm1r-aaeNzW-9EFiyu-9ECoaV-9oXLV5-9oUG5X-7Rq7Qz">https://www.flickr.com/photos/mpsyp/3018839473/in/photolist-5ALkNr-5ALkNa-5ALkN4-5ALkNi-98FsR9-2kGTzhx-98FraC-5qPx5v-98Fq3o-98FqRL-24dAzLp-98Fssm-98FrUb-5qApeT-81xtxz-5qPxbX-G8bBqp-27ef6y2-5qTT7Q-5qTT2N-7nRiiS-5qTSVJ-pedNPO-98Chfz-aaeNM9-9Dx6M8-5qApiv-9EFizG-9oXM9S-WTKcVx-aabZc6-7TNMBh-9oXM4s-9oXM6u-9oUG9F-9oUGg4-9DAnEE-8HffFC-9DzWr1-9DAivγ-9JDWGF-9Jz94D-9ECoa6-9FUm1r-aaeNzW-9EFiyu-9ECoaV-9oXLV5-9oUG5X-7Rq7Qz</a> , εικόνα του/της: Marc Syp , άδεια: CC BY-NC-ND 2.0 . <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/</a> .	382
Εικόνα 9: Διαγράμματα προσεγγίσεων κατασκευής. Α: Συμβατική αναλογική προσέγγιση. Β: Χρήση CAD, Γ: Χρήση CAD και CAM. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	388

## Ευρετήριο πινάκων Παραρτήματος II

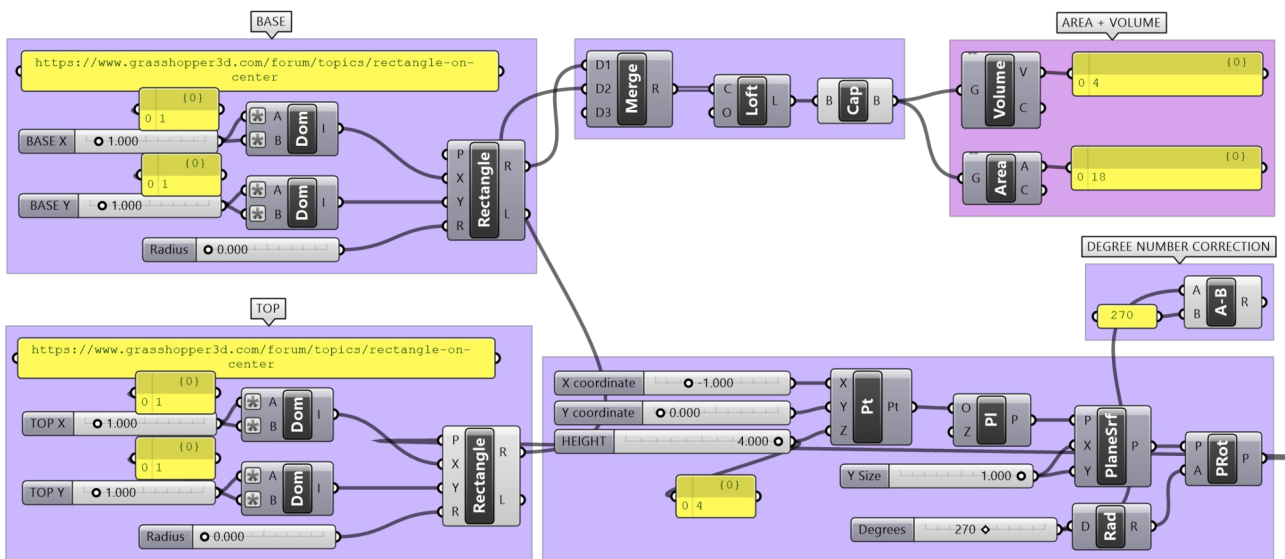
Πίνακας 1: Συγκριτικός πίνακας μεθόδων κατασκευής CNC – Subtractive Manufacturing και Additive manufacturing. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	391
--	-----

## Παράρτημα III - Αρχικές διερευνήσεις παραδειγμάτων εφαρμογής τυχαιότητας με τη χρήση λογισμικού

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται ενδεικτικά, απλά αλλά και πιο σύνθετα παραδείγματα και μεθοδολογίες για το πώς η παράμετρος της τυχαιότητας μπορεί να ενσωματωθεί με συγκεκριμένο τρόπο στο σχεδιασμό μιας δομής ή μορφής σε περιβάλλον λογισμικού 2d και 3d. Η διερεύνηση αυτή ήταν απαραίτητη, ώστε να γίνει καλύτερα κατανοητή στο γράφοντα η δυνατότητα εφαρμογής της τυχαιότητας σε σχέση με τη δομή και τη μορφή μιας κατασκευής. Ως μεθοδολογία, αρχικά διαμορφώνεται στις περισσότερες περιπτώσεις παραμετρικά μια γεωμετρική διάταξη. Στη συνέχεια, επιλέγονται οι σταθερές παράμετροι και οι παράμετροι που μπορούν να τυχαιοποιηθούν. Έπειτα, καθορίζονται τα όρια των τιμών που μπορούν να λάβουν οι παράμετροι που τυχαιοποιούνται και τέλος επιλέγεται ο τρόπος εφαρμογής/δημιουργίας της τυχαιότητας.

### 1. Παράδειγμα #1 - Γεωμετρικές Παράμετροι I (μήκος, πλάτος, ύψος, περιστροφή)

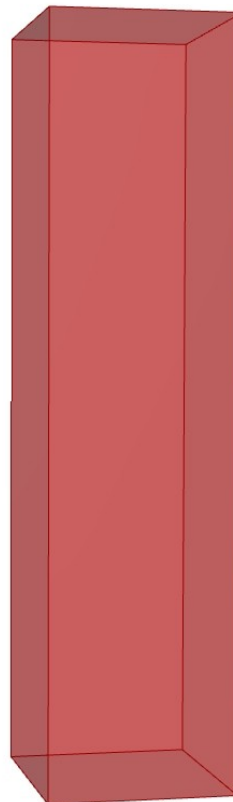
Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται αλγοριθμική παραμετρική διάταξη παραλληλεπίπεδου στο λογισμικό Grasshopper. Οι παράμετροι που είναι σημειωμένες με **bold** όπως δείχνει ο Πίνακας 1, είναι οι γεωμετρικές παράμετροι του παραδείγματος που μπορούν να παραμετροποιηθούν με τυχαίες τιμές (6 παράμετροι). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, γίνεται η **παραδοχή** να παραμετροποιηθούν με τυχαίες τιμές όλες οι παράμετροι εκτός από την παράμετρο του ύψους **HEIGHT**, η οποία θα παραμείνει σταθερή σε όλες τις παραλλαγές με τιμή 4. Για κάθε μία από τις παραμέτρους που θα λάβουν τυχαίες τιμές απαιτείται ένα ζεύγος παραμέτρων **Range** και **Seed** το οποίο θα συσχετιστεί με το **Random component** και θα καθορίσει την αριθμητική τιμή τους. Προκειμένου οι ψευδοτυχαίες αριθμητικές ακολουθίες να είναι διαφορετικές, οι τιμές **Seed** πρέπει επίσης να είναι διαφορετικές. Γι' αυτό το λόγο δημιουργείται αρχική αυθαίρετη τιμή **Seed** με μεγάλο εύρος ώστε να δίνεται η δυνατότητα παραγωγής πολλών διαφορετικών προϊόντων τιμών. Η αρχική τιμή **Seed** λειτουργεί με τη σειρά της ως **Seed** για 5 **random components**, ώστε να παραχθούν με τη σειρά τους 5 διαφορετικές τιμές **Seed** από 1 έως 5. Η τελική διαμόρφωση του αλγορίθμου μετά την εισαγωγή των επιμέρους αλγορίθμων **random**, κ.λπ., καθώς και αλγορίθμους απεικόνισης δεδομένων, καταμέτρησης επιφάνειας και όγκου των παραγόμενων γεωμετριών απεικονίζεται στην Εικόνα 3. Μερικά από τα γεωμετρικά προϊόντα του αλγορίθμου απεικονίζονται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 1: Παράδειγμα 1. Αλγόριθμος παραμετρικής διάταξης παραλληλεπιπέδου στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Grid Variation ID: 35534

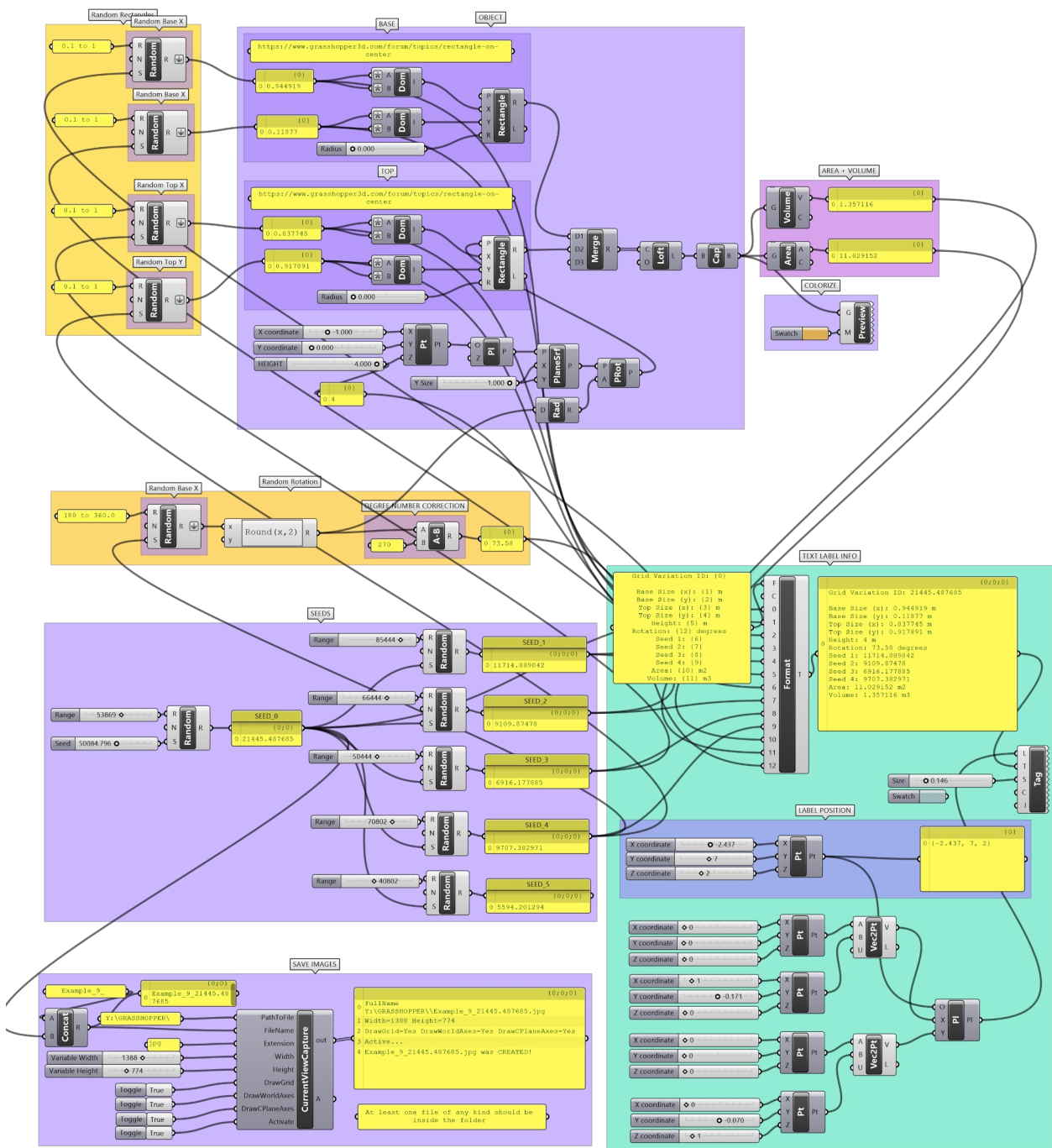
Base Size (x): 1 m  
 Base Size (y): 1 m  
 Top Size (x): 1 m  
 Top Size (y): 1 m  
 Height: 4 m  
 Rotation: 0 degrees  
 Seed 1: 50186.188466  
 Seed 2: 39026.392801  
 Seed 3: 29628.670135  
 Seed 4: 41586.097512  
 Area: 18 m<sup>2</sup>  
 Volume: 4 m<sup>3</sup>



Εικόνα 2: Παράδειγμα: Αλγοριθμική παραμετρική διάταξη παραλληλεπιπέδου χωρίς εισαγωγή τυχαιών τιμών παραμέτρων στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

	Παράμετρος	Περιγραφή	Δυνατότητα χρήσης τυχαιότητας
1	<b>Base X</b>	Διάσταση παραλληλογράμμου Βάσης κατά X	Ναι
2	<b>Base Y</b>	Διάστασης παραλληλογράμμου Βάσης κατά Y	Ναι
3	<b>Top X</b>	Διάσταση παραλληλογράμμου Στέψης κατά X	Ναι
4	<b>Top Y</b>	Διάσταση παραλληλογράμμου Στέψης κατά Y	Ναι
5	<b>Height</b>	Ύψος	Ναι
6	<b>Rotation</b>	Σχετική περιστροφή σε ° μεταξύ των δύο παραλληλογράμμων	Ναι
9	Random Base X	Εύρος τιμών random	Ορίζεται εύρος: 0.1 έως 1
10	Seed Random Base X	Τιμή Seed μοναδικότητας ακολουθίας	Seed 1
11	Random Base Y	Εύρος τιμών random	Ορίζεται εύρος: 0.1 έως 1
12	Seed Random Base Y	Τιμή Seed μοναδικότητας ακολουθίας	Seed 2
13	Random Top X	Εύρος τιμών random	Ορίζεται εύρος: 0.1 έως 1
14	Seed Random Top X	Τιμή Seed μοναδικότητας ακολουθίας	Seed 3
15	Random Top Y	Εύρος τιμών random	Ορίζεται εύρος: 0.1 έως 1
16	Seed Random Top Y	Τιμή Seed μοναδικότητας ακολουθίας	Seed 4
17	Height	Ορίζεται σταθερή τιμή σε αυτό το παράδειγμα	Ορίζεται τιμή: 4
18	Random Rotation	Εύρος τιμών random	Ορίζεται εύρος: 180 ° έως 360 °
19	Seed Random Rotation	Τιμή Seed μοναδικότητας ακολουθίας	Seed 5

Πίνακας 1: Παράμετροι παραδείγματος: Γεωμετρικές Παράμετροι. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 3: Παράδειγμα #1: Αλγοριθμική παραμετρική διάταξη παραλληλεπίπεδου στο λογισμικό Grasshopper σε τελική μορφή, η οποία συμπεριλαμβάνει τη γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών με τα πολλαπλά seeds, τους βοηθητικούς αλγοριθμικούς καταγραφείς εμβαδού και όγκου και απεικόνιση δεδομένων και αποθήκευση. Πηγή: Τ. Κουιμιτζόγλου.

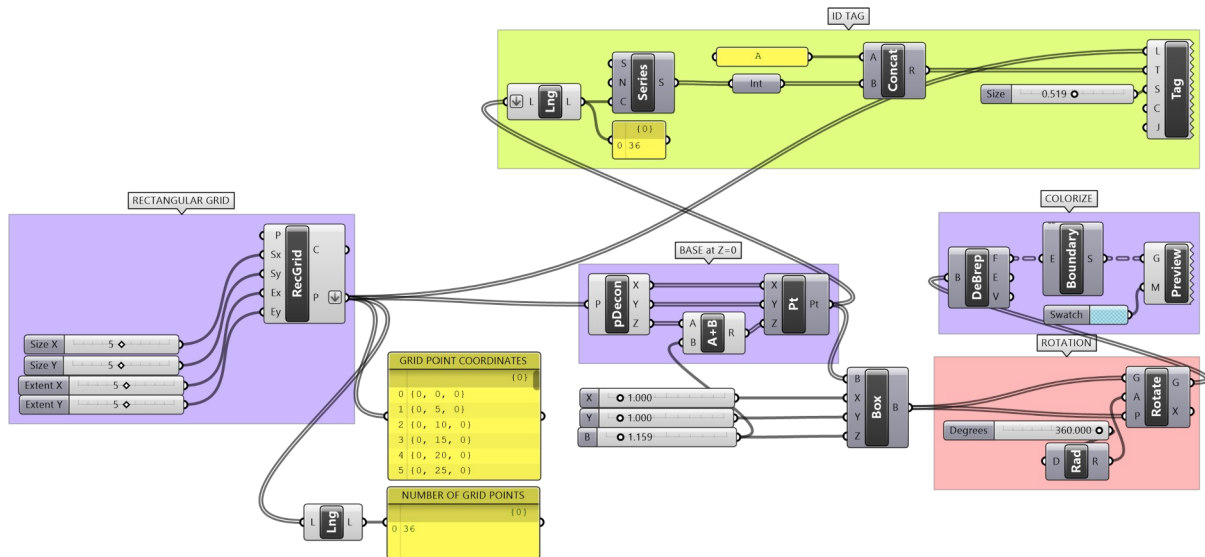
Παράρτημα ΙΙΙ - Αρχικές διερευνήσεις παραδειγμάτων εφαρμογής τυχαιότητας με τη χρήση λογισμικού

<p>Grid Variation ID: 1438-49743</p> <p>Base Size (x) 0.76088 m Base Size (y) 0.86273 m Top Size (x) 0.88174 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: -0.1 degrees Seed 1: 2371-04613 Seed 2: 2350-15481 Seed 3: 2187-05445 Seed 4: 2137-48269 Area: 0.65798 m<sup>2</sup> Volume: 1.27198 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 1779-49156</p> <p>Base Size (x) 0.43239 m Base Size (y) 0.86273 m Top Size (x) 0.53253 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: 28.87 degrees Seed 1: 1628-12239 Seed 2: 821-18503 Seed 3: 829-52654 Seed 4: 838-18479 Area: 0.36936 m<sup>2</sup> Volume: 1.39971 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 2005-18205</p> <p>Base Size (x) 0.51248 m Base Size (y) 0.86273 m Top Size (x) 0.54845 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: 0.0 degrees Seed 1: 2307-08189 Seed 2: 2382-23282 Seed 3: 2310-23562 Seed 4: 2160-23048 Area: 0.43939 m<sup>2</sup> Volume: 1.37468 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 12487-71968</p> <p>Base Size (x) 0.97200 m Base Size (y) 0.90583 m Top Size (x) 0.93047 m Top Size (y) 0.94562 m Height: 4 m Rotation: -0.81 degrees Seed 1: 8208-09048 Seed 2: 8229-25483 Seed 3: 8228-17864 Seed 4: 8481-06005 Area: 0.84453 m<sup>2</sup> Volume: 0.81952 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 5251-06814</p> <p>Base Size (x) 0.88978 m Base Size (y) 0.84263 m Top Size (x) 0.93048 m Top Size (y) 0.94562 m Height: 4 m Rotation: 19.88 degrees Seed 1: 2317-01981 Seed 2: 2335-04487 Seed 3: 2318-03887 Seed 4: 2318-23282 Area: 0.74129 m<sup>2</sup> Volume: 1.32296 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 5278-43722</p> <p>Base Size (x) 0.52472 m Base Size (y) 0.86273 m Top Size (x) 0.57028 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: -1.58 degrees Seed 1: 2318-03887 Seed 2: 2318-03887 Seed 3: 2318-03887 Seed 4: 2318-03887 Area: 0.45124 m<sup>2</sup> Volume: 1.36327 m<sup>3</sup></p>
<p>Grid Variation ID: 5881-37481</p> <p>Base Size (x) 0.83633 m Base Size (y) 0.81427 m Top Size (x) 0.88246 m Top Size (y) 0.88124 m Height: 4 m Rotation: -13.71 degrees Seed 1: 2328-17718 Seed 2: 2328-17718 Seed 3: 2328-17718 Seed 4: 2328-17718 Area: 0.68245 m<sup>2</sup> Volume: 0.87621 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 4871-13396</p> <p>Base Size (x) 0.37331 m Base Size (y) 0.57177 m Top Size (x) 0.52878 m Top Size (y) 0.61848 m Height: 4 m Rotation: 38.2 degrees Seed 1: 1386-01253 Seed 2: 1848-71028 Seed 3: 1848-71028 Seed 4: 1848-71028 Area: 0.21488 m<sup>2</sup> Volume: 0.92481 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 4887-10487</p> <p>Base Size (x) 0.37331 m Base Size (y) 0.74271 m Top Size (x) 0.52878 m Top Size (y) 0.81848 m Height: 4 m Rotation: -22.23 degrees Seed 1: 1386-01253 Seed 2: 1848-71028 Seed 3: 1848-71028 Seed 4: 1848-71028 Area: 0.21488 m<sup>2</sup> Volume: 0.92481 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 4348-58118</p> <p>Base Size (x) 0.47091 m Base Size (y) 0.87091 m Top Size (x) 0.52025 m Top Size (y) 0.93791 m Height: 4 m Rotation: -4.87 degrees Seed 1: 1401-03303 Seed 2: 1852-18282 Seed 3: 1852-18282 Seed 4: 1852-18282 Area: 0.41421 m<sup>2</sup> Volume: 1.04371 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 4048-98704</p> <p>Base Size (x) 0.57709 m Base Size (y) 0.47119 m Top Size (x) 0.52025 m Top Size (y) 0.58386 m Height: 4 m Rotation: -3.3 degrees Seed 1: 1401-03303 Seed 2: 1852-18282 Seed 3: 1852-18282 Seed 4: 1852-18282 Area: 0.27297 m<sup>2</sup> Volume: 0.87967 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 4832-36815</p> <p>Base Size (x) 0.88121 m Base Size (y) 0.54532 m Top Size (x) 0.93443 m Top Size (y) 0.61822 m Height: 4 m Rotation: -22.54 degrees Seed 1: 2318-03887 Seed 2: 2318-03887 Seed 3: 2318-03887 Seed 4: 2318-03887 Area: 0.51124 m<sup>2</sup> Volume: 1.04371 m<sup>3</sup></p>
<p>Grid Variation ID: 8987-27833</p> <p>Base Size (x) 0.89898 m Base Size (y) 0.89898 m Top Size (x) 0.93887 m Top Size (y) 0.93887 m Height: 4 m Rotation: -0.8 degrees Seed 1: 2382-01542 Seed 2: 2382-01542 Seed 3: 2382-01542 Seed 4: 2382-01542 Area: 0.80245 m<sup>2</sup> Volume: 1.05043 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 9488-49048</p> <p>Base Size (x) 0.73238 m Base Size (y) 0.88438 m Top Size (x) 0.83853 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: -0.28 degrees Seed 1: 4319-23267 Seed 2: 2386-14824 Seed 3: 2321-26011 Seed 4: 2321-26011 Area: 0.65188 m<sup>2</sup> Volume: 0.91511 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 9528-74205</p> <p>Base Size (x) 0.25626 m Base Size (y) 0.83273 m Top Size (x) 0.33448 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: -0.28 degrees Seed 1: 2308-26291 Seed 2: 2386-14824 Seed 3: 2321-26011 Seed 4: 2321-26011 Area: 0.21488 m<sup>2</sup> Volume: 0.87967 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 9278-13623</p> <p>Base Size (x) 0.71216 m Base Size (y) 0.84789 m Top Size (x) 0.83448 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: -0.81 degrees Seed 1: 2308-26291 Seed 2: 2386-14824 Seed 3: 2321-26011 Seed 4: 2321-26011 Area: 0.65188 m<sup>2</sup> Volume: 0.87967 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 10386-98513</p> <p>Base Size (x) 0.87098 m Base Size (y) 0.87098 m Top Size (x) 0.92713 m Top Size (y) 0.92713 m Height: 4 m Rotation: 3.11 degrees Seed 1: 2348-01877 Seed 2: 2372-23483 Seed 3: 2372-23483 Seed 4: 2372-23483 Area: 0.75924 m<sup>2</sup> Volume: 0.77297 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 9278-141478</p> <p>Base Size (x) 0.87098 m Base Size (y) 0.87098 m Top Size (x) 0.92713 m Top Size (y) 0.92713 m Height: 4 m Rotation: 3.11 degrees Seed 1: 2348-01877 Seed 2: 2372-23483 Seed 3: 2372-23483 Seed 4: 2372-23483 Area: 0.75924 m<sup>2</sup> Volume: 0.77297 m<sup>3</sup></p>
<p>Grid Variation ID: 1332-44234</p> <p>Base Size (x) 0.14268 m Base Size (y) 0.83426 m Top Size (x) 0.23796 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: -0.11 degrees Seed 1: 1868-01562 Seed 2: 2332-1582 Seed 3: 2332-1582 Seed 4: 2332-1582 Area: 0.20934 m<sup>2</sup> Volume: 0.84862 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 11462-23054</p> <p>Base Size (x) 0.61839 m Base Size (y) 0.84263 m Top Size (x) 0.83047 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: -0.89 degrees Seed 1: 2362-01562 Seed 2: 2362-01562 Seed 3: 2362-01562 Seed 4: 2362-01562 Area: 0.51124 m<sup>2</sup> Volume: 1.04371 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 1618-93568</p> <p>Base Size (x) 0.43239 m Base Size (y) 0.84263 m Top Size (x) 0.53253 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: -3.82 degrees Seed 1: 2362-01562 Seed 2: 2362-01562 Seed 3: 2362-01562 Seed 4: 2362-01562 Area: 0.36936 m<sup>2</sup> Volume: 1.39971 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 13037-86787</p> <p>Base Size (x) 0.65017 m Base Size (y) 0.84263 m Top Size (x) 0.83047 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: -3.2 degrees Seed 1: 2362-01562 Seed 2: 2362-01562 Seed 3: 2362-01562 Seed 4: 2362-01562 Area: 0.47624 m<sup>2</sup> Volume: 1.04371 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 18818-81928</p> <p>Base Size (x) 0.57293 m Base Size (y) 0.84263 m Top Size (x) 0.61848 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: 17.8 degrees Seed 1: 2362-01562 Seed 2: 2362-01562 Seed 3: 2362-01562 Seed 4: 2362-01562 Area: 0.47624 m<sup>2</sup> Volume: 1.04371 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 18818-91996</p> <p>Base Size (x) 0.58878 m Base Size (y) 0.84263 m Top Size (x) 0.61848 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: 17.8 degrees Seed 1: 2362-01562 Seed 2: 2362-01562 Seed 3: 2362-01562 Seed 4: 2362-01562 Area: 0.47624 m<sup>2</sup> Volume: 1.04371 m<sup>3</sup></p>
<p>Grid Variation ID: 20188-03883</p> <p>Base Size (x) 0.83633 m Base Size (y) 0.71918 m Top Size (x) 0.88246 m Top Size (y) 0.81948 m Height: 4 m Rotation: -0.22 degrees Seed 1: 1848-71028 Seed 2: 1848-71028 Seed 3: 1848-71028 Seed 4: 1848-71028 Area: 0.68245 m<sup>2</sup> Volume: 1.04371 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 2148-88788</p> <p>Base Size (x) 0.64391 m Base Size (y) 0.81877 m Top Size (x) 0.83718 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: 11.88 degrees Seed 1: 1774-88942 Seed 2: 1848-71028 Seed 3: 1848-71028 Seed 4: 1848-71028 Area: 0.51124 m<sup>2</sup> Volume: 1.04371 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 2388-98851</p> <p>Base Size (x) 0.57898 m Base Size (y) 0.81877 m Top Size (x) 0.63443 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: 1.88 degrees Seed 1: 1848-71028 Seed 2: 1848-71028 Seed 3: 1848-71028 Seed 4: 1848-71028 Area: 0.47624 m<sup>2</sup> Volume: 1.04371 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 2338-88426</p> <p>Base Size (x) 0.84263 m Base Size (y) 0.87091 m Top Size (x) 0.92713 m Top Size (y) 0.93791 m Height: 4 m Rotation: -3.2 degrees Seed 1: 2362-01562 Seed 2: 2362-01562 Seed 3: 2362-01562 Seed 4: 2362-01562 Area: 0.75924 m<sup>2</sup> Volume: 1.04371 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 2331-44284</p> <p>Base Size (x) 0.64826 m Base Size (y) 0.71843 m Top Size (x) 0.84263 m Top Size (y) 0.81948 m Height: 4 m Rotation: 18.88 degrees Seed 1: 1848-71028 Seed 2: 1848-71028 Seed 3: 1848-71028 Seed 4: 1848-71028 Area: 0.68245 m<sup>2</sup> Volume: 1.04371 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 2374-812318</p> <p>Base Size (x) 0.27271 m Base Size (y) 0.87171 m Top Size (x) 0.34423 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: 18.88 degrees Seed 1: 2362-01562 Seed 2: 2362-01562 Seed 3: 2362-01562 Seed 4: 2362-01562 Area: 0.21488 m<sup>2</sup> Volume: 1.04371 m<sup>3</sup></p>
<p>Grid Variation ID: 2527-96982</p> <p>Base Size (x) 0.93099 m Base Size (y) 0.93099 m Top Size (x) 0.93099 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: 3.17 degrees Seed 1: 2277-74822 Seed 2: 2342-10382 Seed 3: 2371-71028 Seed 4: 2371-71028 Area: 0.86245 m<sup>2</sup> Volume: 1.05043 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 2545-68025</p> <p>Base Size (x) 0.93099 m Base Size (y) 0.93099 m Top Size (x) 0.93099 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: 3.17 degrees Seed 1: 2277-74822 Seed 2: 2342-10382 Seed 3: 2371-71028 Seed 4: 2371-71028 Area: 0.86245 m<sup>2</sup> Volume: 1.05043 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 2682-97875</p> <p>Base Size (x) 0.23961 m Base Size (y) 0.84263 m Top Size (x) 0.34423 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: 18.88 degrees Seed 1: 2362-01562 Seed 2: 2362-01562 Seed 3: 2362-01562 Seed 4: 2362-01562 Area: 0.21488 m<sup>2</sup> Volume: 1.04371 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 2448-84274</p> <p>Base Size (x) 0.84263 m Base Size (y) 0.84263 m Top Size (x) 0.93099 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: 18.88 degrees Seed 1: 2362-01562 Seed 2: 2362-01562 Seed 3: 2362-01562 Seed 4: 2362-01562 Area: 0.75924 m<sup>2</sup> Volume: 1.04371 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 3041-81205</p> <p>Base Size (x) 0.23426 m Base Size (y) 0.81948 m Top Size (x) 0.34423 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: 18.88 degrees Seed 1: 2362-01562 Seed 2: 2362-01562 Seed 3: 2362-01562 Seed 4: 2362-01562 Area: 0.21488 m<sup>2</sup> Volume: 1.04371 m<sup>3</sup></p>	<p>Grid Variation ID: 3106-73055</p> <p>Base Size (x) 0.20971 m Base Size (y) 0.93099 m Top Size (x) 0.34423 m Top Size (y) 0.93099 m Height: 4 m Rotation: 18.88 degrees Seed 1: 2362-01562 Seed 2: 2362-01562 Seed 3: 2362-01562 Seed 4: 2362-01562 Area: 0.21488 m<sup>2</sup> Volume: 1.04371 m<sup>3</sup></p>

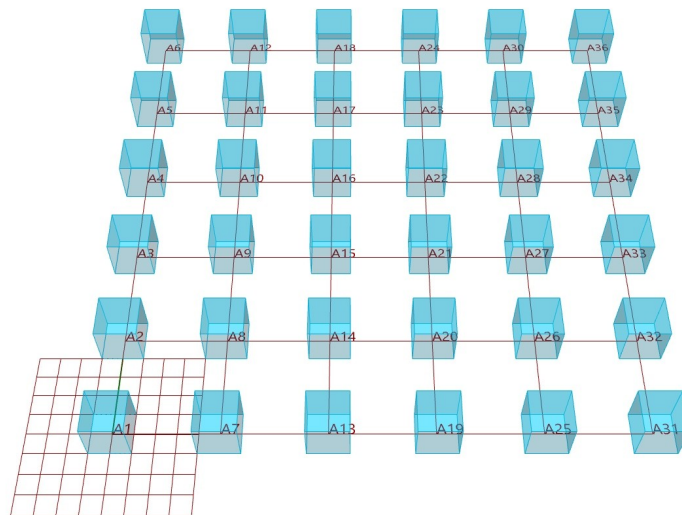
Εικόνα 4: Παράδειγμα #1: 36 προϊόντα αλγοριθμικής παραμετρικής διάταξης παραλληλεπιπέδου στο λογισμικό Grasshopper με διαφοροποιήσεις στις παραμέτρους διαστάσεων επιπέδων βάσης και στέψης καθώς και περιστροφής επιπέδου στέψης. Πηγή: Τ. Κουμτζόγλου.

## 2. Παράδειγμα #2 - Γεωμετρικές Παράμετροι II (θέση, περιστροφή, διάταξη)

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται αλγοριθμική παραμετρική διάταξη παραλληλεπιπέδων σε ορθογωνικό κάναβο στο λογισμικό Grasshopper.



Εικόνα 5: Παράδειγμα #2 Αλγόριθμος παραμετρικής διάταξης παραλληλεπιπέδων σε ορθογωνικό κάναβο στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 6: Παράδειγμα #2: Αλγοριθμική παραμετρική διάταξη παραλληλεπιπέδων σε ορθογωνικό κάναβο χωρίς εισαγωγή τυχαίων τιμών παραμέτρων στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



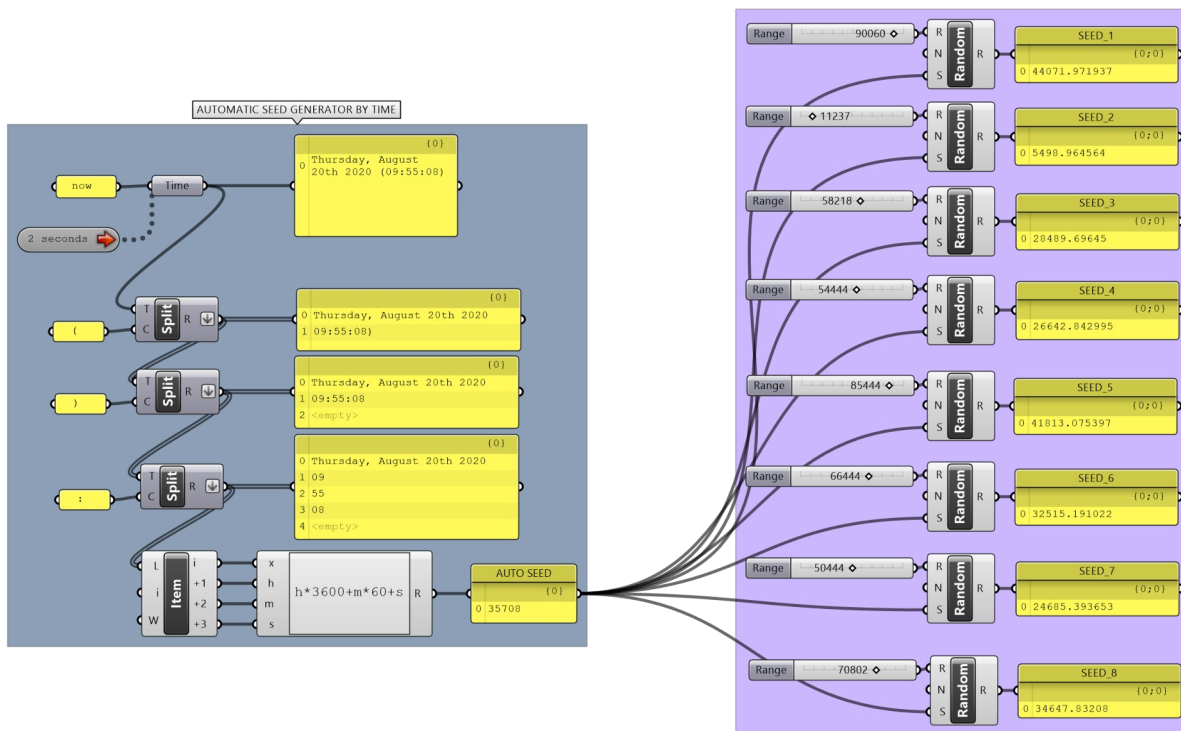
	Παράμετρος	Περιγραφή	Δυνατότητα χρήσης τυχαιότητας
1	<b>Size X</b>	κάναβος: Αριθμός κελιών κατά X	Ναι
2	<b>Size Y</b>	κάναβος: Αριθμός κελιών κατά Y	Ναι
3	<b>Extend X</b>	κάναβος: Αξονικές Αποστάσεις κελιών κατά X	Ναι
4	<b>Extend Y</b>	κάναβος: Αξονικές Αποστάσεις κελιών κατά Y	Ναι
5	<b>X</b>	Παραλληλεπίπεδο: Διάσταση κατά X	Ναι
6	<b>Y</b>	Παραλληλεπίπεδο: Διάσταση κατά Y	Ναι
7	<b>Z</b>	Παραλληλεπίπεδο: Διάσταση κατά Z	Ναι
8	<b>A (Angle)</b>	Παραλληλεπίπεδο: Περιστροφή κατά Z	Ναι
9	Random Size X	Εύρος τιμών random	Ορίζεται εύρος: 2 έως 3
10	Seed Random Size X	Τιμή Seed μοναδικότητας ακολουθίας	Seed 1
11	Random Size Y	Εύρος τιμών random	Ορίζεται εύρος: 2 έως 3
12	Seed Random Size Y	Τιμή Seed μοναδικότητας ακολουθίας	Seed 2
13	Random Extend X	Εύρος τιμών random	Ορίζεται εύρος: 5 έως 8
14	Seed Random Extend X	Τιμή Seed μοναδικότητας ακολουθίας	Seed 3
15	Random Extend Y	Εύρος τιμών random	Ορίζεται εύρος: 5 έως 8
16	Seed Random Extend Y	Τιμή Seed μοναδικότητας ακολουθίας	Seed 4
17	Range X	Εύρος τιμών random	Παράμετρος τυχαιότητας
18	Seed X	Τιμή Seed μοναδικότητας ακολουθίας	Seed 5
19	Range Y	Εύρος τιμών random	Παράμετρος τυχαιότητας
20	Seed Y	Τιμή Seed μοναδικότητας ακολουθίας	Seed 6
21	Range Z	Εύρος τιμών random	Παράμετρος τυχαιότητας
22	Seed Z	Τιμή Seed μοναδικότητας ακολουθίας	Seed 7
23	Range A	Εύρος τιμών random	Παράμετρος τυχαιότητας
24	Seed A	Τιμή Seed μοναδικότητας ακολουθίας	Seed 8

Πίνακας 2: Παράμετροι παραδείγματος #2: Αρχιτεκτονικές - Γεωμετρικές Παράμετροι. Πηγή: Τ. Κουιμιτζόγλου.

Οι παράμετροι που είναι σημειωμένες με **bold** όπως δείχνει ο Πίνακας 2, είναι οι γεωμετρικές παράμετροι του παραδείγματος που μπορούν να παραμετροποιηθούν με τυχαίες τιμές (8 παράμετροι). Για κάθε μία από αυτές τις παραμέτρους απαιτείται ένα ζεύγος παραμέτρων **Range** και **Seed**, το οποίο θα συσχετιστεί με το **Random component** και θα καθορίσει την αριθμητική τιμή για κάθε μια από τις 8 γεωμετρικές παραμέτρους που θα δημιουργηθούν με τυχαιο τρόπο. Οι τιμές **Seed** για το κάθε ζεύγος θα πρέπει να είναι διαφορετικές μεταξύ τους, έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται κάθε φορά διαφορετικές ακολουθίες ψευδοτυχαίων αριθμών. Για να επιτευχθεί αυτό οργανώνεται η διάταξη που φαίνεται στην Εικόνα 7, όπου κάνοντας χρήση ψηφιακού ρολογιού, δημιουργείται μοναδικό **Seed** που τροποποιείται κάθε ένα δευτερόλεπτο σύμφωνα με τη συνάρτηση:  $h*3600+m*60+s$ <sup>603</sup>, όπου **h**: η τιμή της τρέχουσας ώρας, **m**: η τιμή των τρεχόντων λεπτών και **s**: η τιμή των τρεχόντων δευτερολέπτων. Αυτή η τιμή **Auto Seed** σύμφωνα με την παραπάνω συνάρτηση

603 'Real Random Numbers', McNeel Forum, 25 Φεβρουάριος 2018, <https://discourse.mcneel.com/t/real-random-numbers/56072/6>.

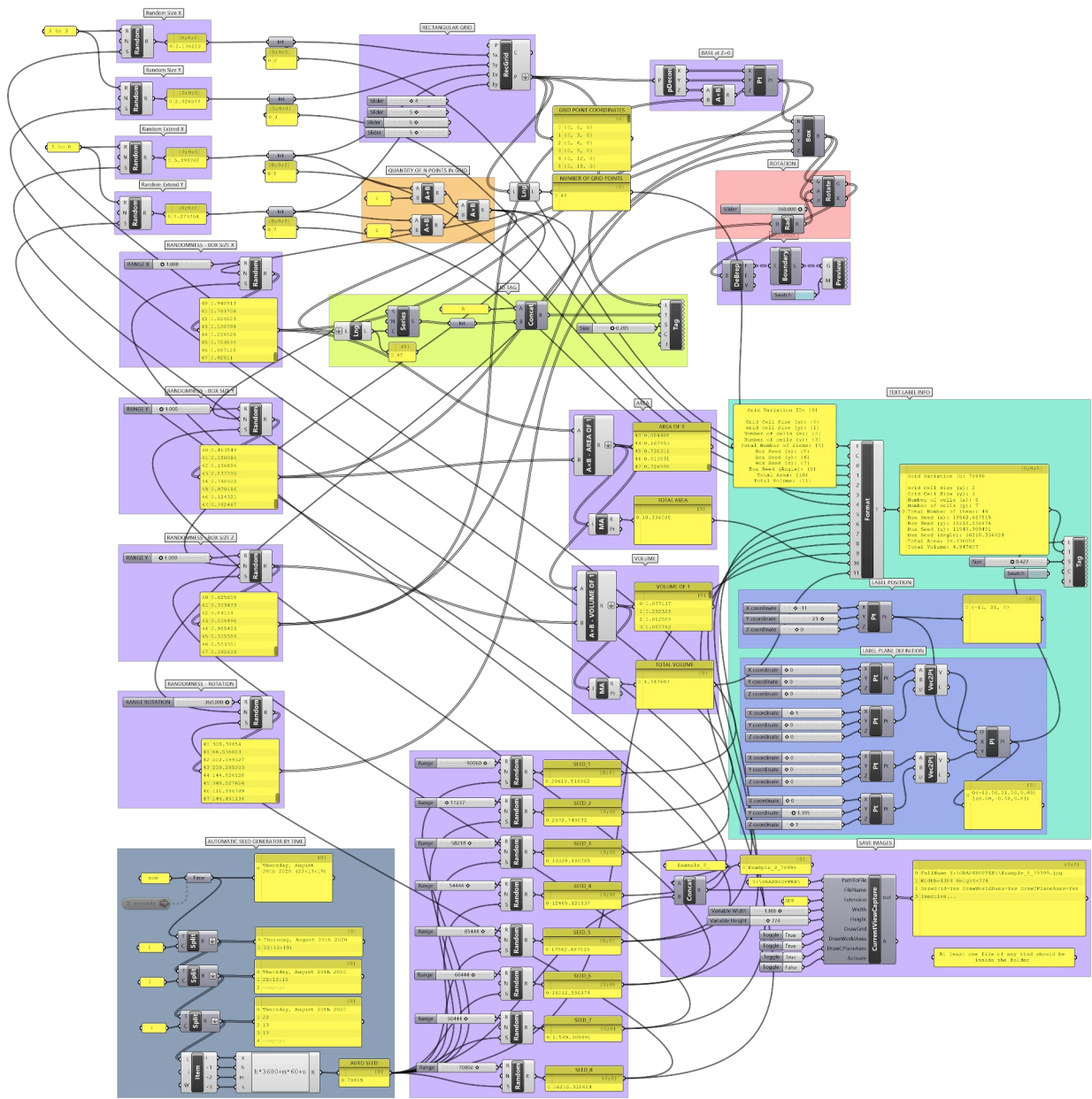
μπορεί να αποδώσει τιμές από **0** έως  $(24*3600+60*60+60)=90060$ . Προκειμένου να υπάρχει διαφοροποίηση των επιμέρους **8** τιμών Seed των γεωμετρικών παραμέτρων η αυτόματα παραγόμενη τιμή **Seed** τροφοδοτείται εκ νέου σε ισάριθμα **Random components** με αποτέλεσμα να δημιουργούνται **8** νέες μοναδικές τιμές **Seed 1** έως **8**.



Εικόνα 7: Παράδειγμα #2: Αλγόριθμος δημιουργίας τυχαίων τιμών Seed σε random component με τη χρήση συνάρτησης που περιλαμβάνει τιμές μέτρησης χρόνου και δημιουργία περισσότερων διαφορετικών τιμών seed από αυτόν. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Μετά την παραμετροποίηση του αλγορίθμου με βάση τις παραπάνω τιμές Seed, ο αλγόριθμος διαμορφώνεται στην τελική του μορφή όπως φαίνεται στην Εικόνα 8, η οποία συμπεριλαμβάνει τη γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών με τα πολλαπλά seeds, τους βοηθητικούς αλγορίθμους καταγραφής εμβαδού και όγκου και απεικόνισης δεδομένων και αποθήκευσης. Παρατηρείται ότι η εισαγωγή της ψευδοτυχαιότητας στις 8 παραμέτρους που προεπιλέχθηκαν κατά το σχεδιασμό του αλγορίθμου δημιουργεί μια αρκετά πολύπλοκη διάταξη (όπως διακρίνεται και από καμπύλες γραμμές που διαμορφώνουν τις σχέσεις των παραμέτρων και των components του αλγορίθμου). Σημειώνεται επίσης ότι αυτή η πολύπλοκη διάταξη μπορεί να αποδώσει άπειρο αριθμό μοναδικών παραλλαγών και τα αντίστοιχα μετρητικά δεδομένα. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα καταγράφονται οι διαστάσεις του κανάβου, ο αριθμός των κελιών, οι τιμές seed για τη γεωμετρία καθώς και συνολικό εμβαδόν και όγκος των στερεών για κάθε παραλλαγή. Οι μετρητικές αυτές πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε επόμενο στάδιο επεξεργασίας για την αξιολόγηση των παραλλαγών, για βελτιστοποίηση και για επιλογή συγκεκριμένης πρότασης με βάση διαφορετικά πιθανά κριτήρια (π.χ. επιλογή παραλλαγής η οποία παρουσιάζει το ελάχιστο εμβαδό ταυτόχρονα με τον μέγιστο όγκο). Τα

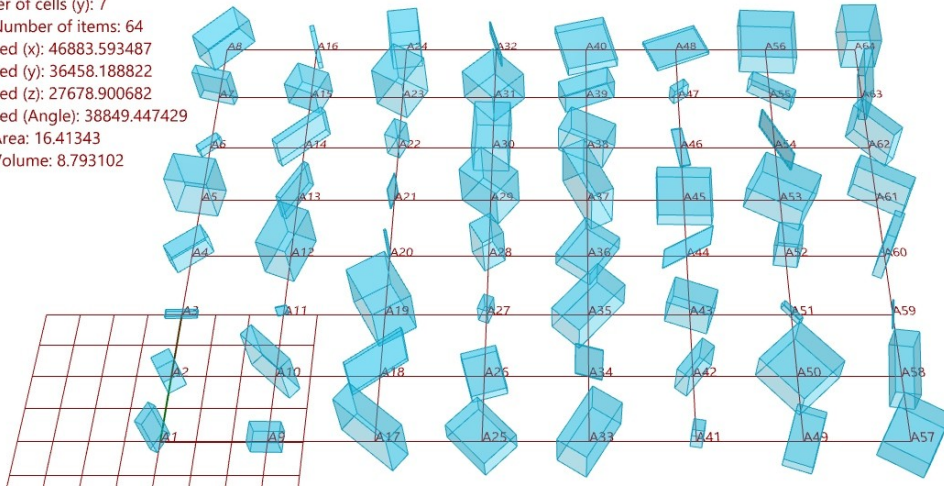
αποτελέσματα του αλγορίθμου παρουσιάζονται για διαφορετικές τιμές Seed στις αντίστοιχες παραλλαγές τους στην Εικόνα 9.



Εικόνα 8: Παράδειγμα #2: Αλγοριθμική παραμετρική διάταξη παραλληλεπίπεδων σε ορθογωνικό κείμενο στο λογισμικό Grasshopper σε τελική μορφή, η οποία συμπεριλαμβάνει τη γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών με τα πολλαπλά seeds, τους βοηθητικούς αλγορίθμους καταγραφής εμβαδού και όγκου και απεικόνιση δεδομένων και αποθήκευσης. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

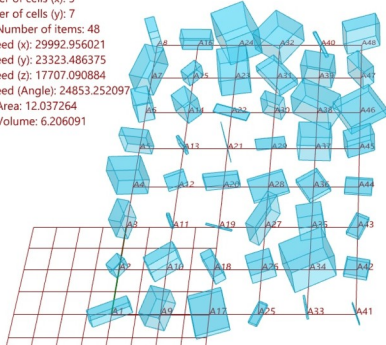
Grid Variation ID: 79768

Grid Cell Size (x): 3  
 Grid Cell Size (y): 2  
 Number of cells (x): 7  
 Number of cells (y): 7  
 Total Number of items: 64  
 Box Seed (x): 46883.593487  
 Box Seed (y): 36458.188822  
 Box Seed (z): 27678.900682  
 Box Seed (Angle): 38849.447429  
 Total Area: 16.41343  
 Total Volume: 8.793102



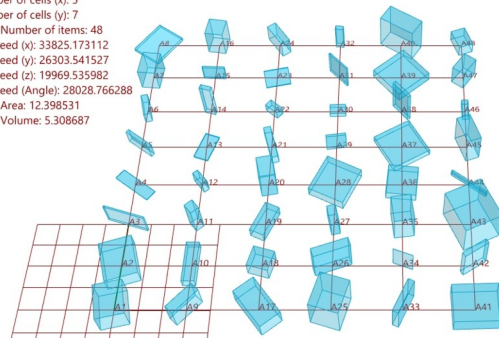
Grid Variation ID: 79670

Grid Cell Size (x): 2  
 Grid Cell Size (y): 2  
 Number of cells (x): 5  
 Number of cells (y): 7  
 Total Number of items: 48  
 Box Seed (x): 29992.956021  
 Box Seed (y): 23323.486375  
 Box Seed (z): 17707.090884  
 Box Seed (Angle): 24853.252097  
 Total Area: 12.037264  
 Total Volume: 6.206091



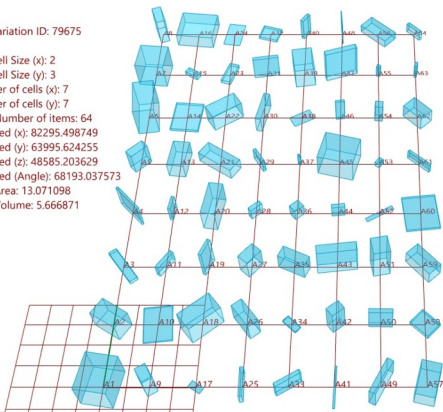
Grid Variation ID: 79672

Grid Cell Size (x): 3  
 Grid Cell Size (y): 2  
 Number of cells (x): 5  
 Number of cells (y): 7  
 Total Number of items: 48  
 Box Seed (x): 33825.173112  
 Box Seed (y): 26303.541527  
 Box Seed (z): 19969.535982  
 Box Seed (Angle): 28028.766288  
 Total Area: 12.398531  
 Total Volume: 5.308687



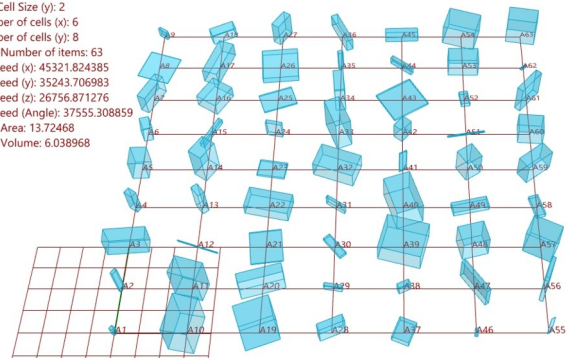
Grid Variation ID: 79675

Grid Cell Size (x): 2  
 Grid Cell Size (y): 3  
 Number of cells (x): 7  
 Number of cells (y): 7  
 Total Number of items: 64  
 Box Seed (x): 82295.498749  
 Box Seed (y): 63995.624255  
 Box Seed (z): 48585.203629  
 Box Seed (Angle): 68193.037573  
 Total Area: 13.071098  
 Total Volume: 5.666871



Grid Variation ID: 79678

Grid Cell Size (x): 3  
 Grid Cell Size (y): 2  
 Number of cells (x): 6  
 Number of cells (y): 8  
 Total Number of items: 63  
 Box Seed (x): 45321.824385  
 Box Seed (y): 35243.706983  
 Box Seed (z): 26756.871276  
 Box Seed (Angle): 37555.308859  
 Total Area: 13.72468  
 Total Volume: 6.038968



Εικόνα 9: Παράδειγμα #2: Παραλλαγές αλγοριθμικής παραμετρικής διάταξης παραλληλεπιπέδων σε ορθογωνικό κάναβο στο λογισμικό Grasshopper, κατά την οποία 8 παράμετροι λαμβάνουν ψευδοτυχαίες αριθμητικές τιμές. Παράλληλα πραγματοποιείται καταγραφή δεδομένων για κάθε μοναδική παραλλαγή. Πηγή: Τ. Κουιμιτζόγλου.

### 3. Παράδειγμα #3 - Morphing

Στην ίδια λογική της αρχικής και της τελικής κατάστασης κινείται και η έννοια του morphing, μια τεχνική που προέρχεται από το animation και τον κινηματογράφο <sup>604</sup>. Η τεχνική morphing περιλαμβάνει την επιλογή μιας αρχικής και μιας τελικής εικόνας και την αυτόματη μετάβαση από τη μία στην άλλη, με τη δημιουργία των ενδιάμεσων υβριδικών εικόνων οι οποίες μεταβάλλονται σταδιακά. Εξέλιξη της λογικής αυτής αποτελεί η εφαρμογή στα τρισδιάστατα γραφικά. Στην τεχνική αυτή ο μελετητής ορίζει την αρχική και την τελική κατάσταση μιας γεωμετρίας και το λογισμικό υπολογίζει αυτόματα τα ενδιάμεσα συμπληρωματικά στάδια. Η παραδοχή του μελετητή είναι ότι η ενδιάμεση δευτερεύουσα γεωμετρία δεν απαιτείται να σχεδιαστεί, αλλά μπορεί να προκύψει ως γεωμετρία που καθορίζεται από την αρχική και την τελική κατάσταση σε μια γραμμική διαδικασία. Αυτή η εφαρμογή μπορεί να υλοποιηθεί σε δύο και σε τρεις διαστάσεις.

Στην Εικόνα 10 που ακολουθεί, παρουσιάζεται μια δισδιάστατη εκδοχή της διαδικασίας morphing από μια εικόνα σε μια άλλη σε 11 στάδια. Ορίζονται μόνο η αρχική και η τελική φωτογραφία, ενώ όλες οι ενδιάμεσες δημιουργούνται αυτόματα και είναι στην ουσία μια μίξη χαρακτηριστικών των δύο φωτογραφιών.

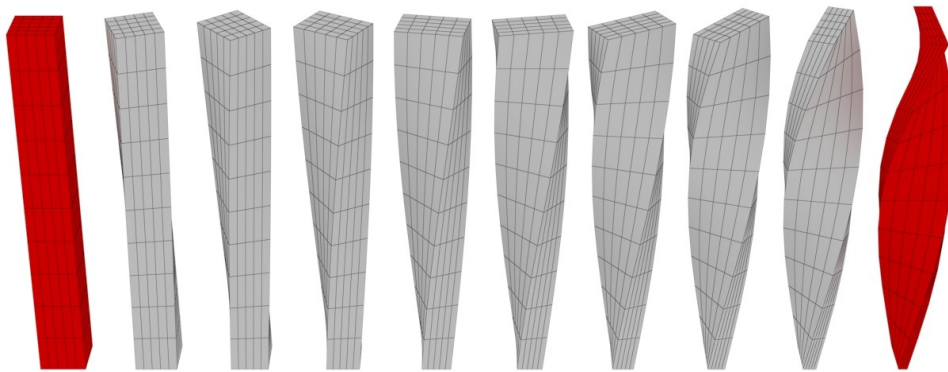


Εικόνα 10: 2d morphing εικόνας ανθρώπου σε εικόνα γάτας σε 11 στάδια. Πηγή: Morph11.jpg, Einzelbild aus einer Reihe zur Demonstration des Morphings. Selbst erzeugtes Bild, mit selbst programmiertem Programm für Studienzwecke, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Morph11.jpg>, Benutzer:Häger, εικόνα του/της: Benutzer:Häger, άδεια: public domain.

Μια τρισδιάστατη εκδοχή εφαρμογής morphing παρουσιάζεται στην Εικόνα 11 η οποία δημιουργήθηκε στο λογισμικό 3dsMAX με τη χρήση του παραμετρικού plugin **Parametric Array** <sup>605</sup>. Σε αυτό το παράδειγμα ορίζεται παραμετρικά με αριθμητικές τιμές η μορφή των σχημάτων της αρχικής και τελικής κατάστασης (κόκκινα ακραία σχήματα). Η αρχική μορφή του παραλληλεπίπεδου περιστρέφεται και λεπταίνει. Τα ενδιάμεσα 8 στοιχεία (γκρι) προκύπτουν με αυτόματο υπολογισμό ως γραμμική εξέλιξη των μετασχηματισμών από την αρχική (αριστερά) στην τελική κατάσταση (δεξιά).

604 'What Is Morphing in Animation? Morphing vs Tweening | Adobe', ημερομηνία πρόσβασης 25 Σεπτέμβριος 2023, <https://www.adobe.com/creativecloud/animation/discover/morphing-in-animation.html>.

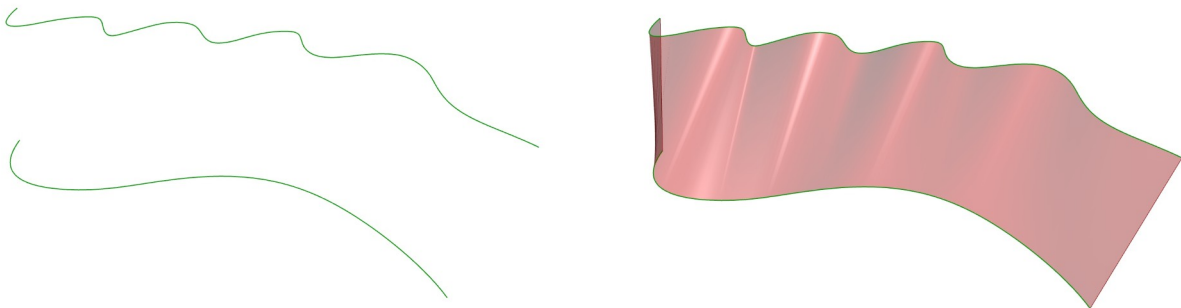
605 'Para 3d | 3ds Max | Autodesk App Store', 20 Απρίλιος 2020, <https://apps.autodesk.com/3DSMAX/en/Detail/Index?id=7147262754532706746&appLang=en&os=Win64>.



Εικόνα 11: Morphing με το λογισμικό Parametric Array στο 3ds Max. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

#### 4. Παράδειγμα #4 - Κύρια και προκύπτουσα γεωμετρία - Nurbs

Η χρήση γεωμετρίας ως όριο – οδηγό, με τη δευτερεύουσα γεωμετρία να αναπτύσσεται αυτόματα σε σχέση με τις παραμέτρους της κύριας γεωμετρίας, είναι μια εξελιγμένη μέθοδος δημιουργίας γεωμετρίας που θυμίζει τη λογική του προηγούμενου παραδείγματος. Στην περίπτωση αυτή ορίζονται η αρχική και τελική γεωμετρία ως οδηγοί (άνω και κάτω γενέτειρες), ενώ η γεωμετρία που συνδέει τις γενέτειρες υπολογίζεται μαθηματικά ή αλγοριθμικά. Η επιφάνεια που προκύπτει γεωμετρικά λόγω της πολυπλοκότητας της διάταξης και των γενετειρών δεν μπορεί να προβλεφθεί εξ' αρχής.



Εικόνα 12: Παραγωγή επιφάνειας NURBS από δύο καμπύλες οδηγούς point CURVES. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Τυπικό παράδειγμα αυτής της λογικής είναι οι **καμπύλες NURBS**<sup>606</sup> και η παραγωγή επιφανειών σύνθετης καμπυλότητας. Σε αυτή την προσέγγιση, στην πιο απλή της μορφή, ορίζονται δυο καμπύλες ως γενέτειρες και στη συνέχεια το λογισμικό δημιουργεί αυτόματα την επιφάνεια που τις συνδέει. Ο μελετητής καλείται αρχικά να οριοθετήσει τις δύο καμπύλες και μπορεί να υποθέσει κατά προσέγγιση μόνο ποια μπορεί να είναι η επιφάνεια που θα δημιουργηθεί. Μέχρι όμως να υλοποιηθεί ο αλγόριθμος, αυτή η προκύπτουσα γεωμετρία δεν μπορεί να περιγραφεί με ακρίβεια.

606 'Non-Uniform Rational B-Spline', στο *Wikipedia*, 17 Αύγουστος 2023, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Non-uniform\\_rational\\_B-spline&oldid=1170893542](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Non-uniform_rational_B-spline&oldid=1170893542).

## 5. Παράδειγμα #5 - Κύριες και προκύπτουσες γεωμετρίες στο χώρο

Η δημιουργία γεωμετρίας με αυτόματο τρόπο, η οποία προσαρμόζεται εντός δύο γεωμετρικών ορίων είναι μια πιο σύνθετη παραλλαγή του προηγούμενου παραδείγματος και όπως πριν, έτσι και σε αυτή την προσέγγιση, γίνεται η παραδοχή ότι ο μελετητής ορίζει:

1. Ότι κύριο στοιχείο του σχεδιασμού είναι η γενική μορφή και ο αλγόριθμος, ενώ οι επιμέρους λεπτομέρειες και προσαρμογές είναι δευτερευούσης σημασίας που μπορούν να προκύψουν.
2. Τη γεωμετρία των στοιχείων που λειτουργούν ως όρια και ως οδηγοί για την δημιουργία της προκύπτουσας γεωμετρίας.
3. Τη διαμόρφωση του αλγορίθμου και την επιλογή των παραμέτρων που διαμορφώνουν την προκύπτουσα γεωμετρία, όπως και τη σχέση που έχουν αυτές μεταξύ τους και με τα όρια.

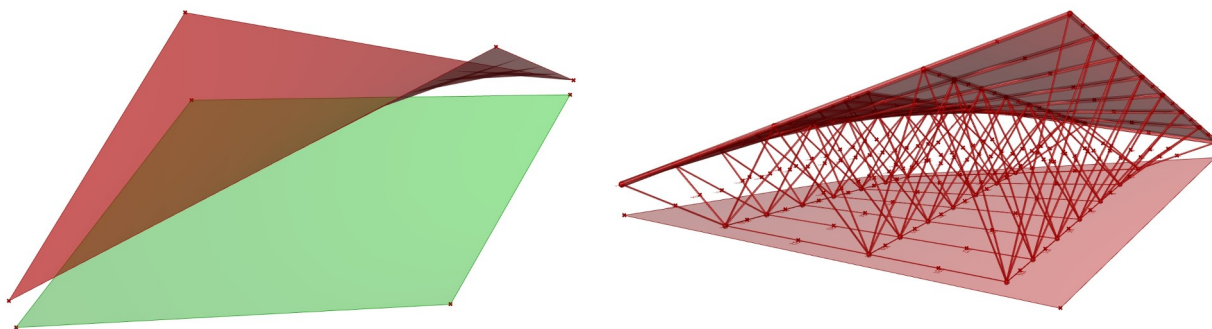
Στο παράδειγμα που ακολουθεί δυο επιφάνειες NURBS διπλής καμπυλότητας (άνω/κόκκινη και κάτω/πράσινη, Εικόνα 13) λειτουργούν ως τα όρια ανάμεσα στα οποία αναπτύσσεται ένα χωροδικτύωμα κανάβου κελιών 7Χ3. Όλη η διάταξη είναι διαμορφωμένη παραμετρικά, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 15. Η κάθε οριζουσα επιφάνεια (κόκκινη και πράσινη) ορίζεται από τις συντεταγμένες τεσσάρων σημείων στο χώρο. Στη συνέχεια δημιουργείται για το συγκεκριμένο παράδειγμα ένας κανάβος για το δικτύωμα 7Χ3 κελιών για την άνω επιφάνεια (κόκκινη) και επομένως 7Χ2 κελιών για την κάτω επιφάνεια (πράσινη). Μέσω της χρήσης κατάλληλου παραμετρικού component διαμορφώνεται αυτόματα το χωροδικτύωμα (Εικόνα 14). Τα αριθμητικά δεδομένα της συγκεκριμένης διάταξης για κανάβο 7Χ3 είναι τα εξής: Κύριες ράβδοι άνω επιφάνειας: 52, Κύριες ράβδοι κάτω επιφάνειας: 32, Δευτερεύουσες ράβδοι δικτυώματος: 84, Κόμβοι: 53.

### Στο παραπάνω παράδειγμα ο μελετητής:

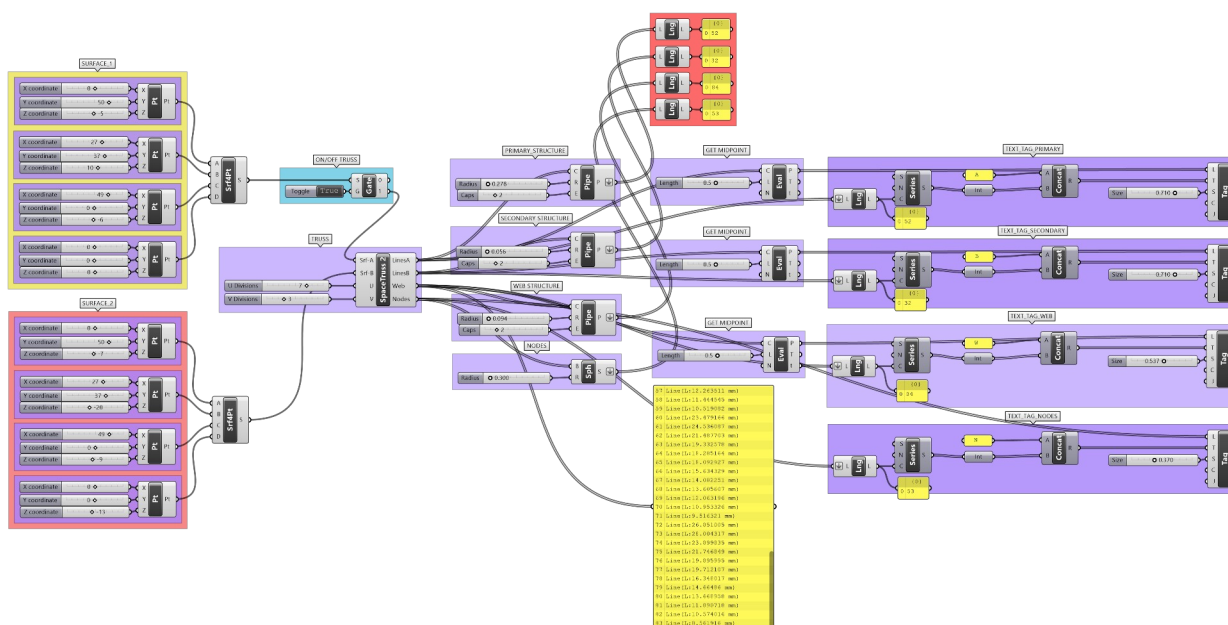
1. Διαμορφώνει τον αλγόριθμο.
2. Καθορίζει τις συντεταγμένες των 4 κορυφών (points) που ορίζουν την κάθε μία από τις καμπύλες, και συνεπώς την ακριβή γεωμετρία των επιφανειών γενετειρών.
3. Καθορίζει το μέγεθος του κανάβου του χωροδικτυώματος, υπό τη μορφή αριθμητικών τιμών στις αντίστοιχες παραμέτρους.
4. Καθορίζει τις διατομές των κύριων και των δευτερευόντων στοιχείων του χωροδικτυώματος.
5. Καθορίζει τις ακτίνες των σφαιρικών κόμβων.

### Από τον αλγόριθμο προκύπτουν αυτόματα:

- I. Η ακριβής διάταξη και θέση των δευτερευόντων ράβδων του χωροδικτυώματος (Εικόνα 16).
- II. Το πλήθος των δευτερευόντων ράβδων του χωροδικτυώματος (Εικόνα 16).
- III. Οι διαστάσεις σε μήκος των δευτερευόντων ράβδων του χωροδικτυώματος (Εικόνα 17).



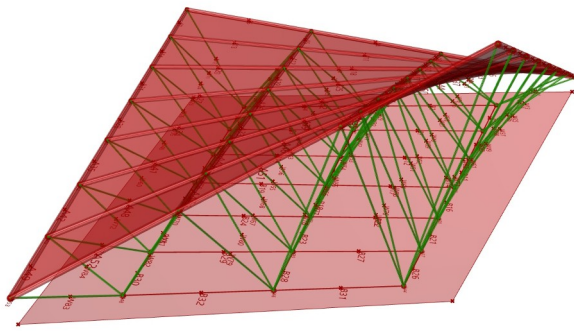
Εικόνα 13: Επιφάνειες NURBS διπλής καμπυλότητας (άνω / κόκκινη και κάτω / πράσινη) οι οποίες θα λειτουργήσουν ως αλγόριθμοι στο λογισμικό Grasshopper για τη δημιουργία γενέτρης / όρια για τη διαμόρφωση χωροδικτύματος. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.  
 Εικόνα 14: Γεωμετρικό αποτέλεσμα παραμετρικού χωροδικτύματος οριζόμενο από δύο επιφάνειες NURBS διπλής καμπυλότητας. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 15: Παραμετρικός αλγόριθμος στο λογισμικό Grasshopper για τη δημιουργία χωροδικτύματος οριζόμενο από επιφάνειες NURBS διπλής καμπυλότητας. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Ο μελετητής επικεντρώνεται στα σημεία 1 έως 5 της προηγούμενης παραγράφου, ενώ τα σημεία I, II και III προκύπτουν αυτόματα, χωρίς να έχουν προϋπολογιστεί ή να έχουν προεπιλεγεί οι τιμές τους. Ο μελετητής δεν έχει εικόνα των προϊόντων I, II και III προτού ολοκληρωθεί ο αλγόριθμος. Η εργασία του μελετητή συνεχίζεται με τη συλλογή των δεδομένων των προϊόντων και ακολουθεί η θετική ή αρνητική αξιολόγησή τους, με βάση συγκεκριμένα εκάστοτε κριτήρια. Υπό αυτή την άποψη μπορεί να ισχυριστεί κανείς ότι υπάρχει μια ισορροπία ανάμεσα στον έλεγχο και την τυχαιότητα και τα προϊόντα του αλγορίθμου προκύπτουν μεν από μια ντετερμινιστική διαδικασία, αλλά ως έννοια για τον μελετητή μπορούν να χαρακτηριστούν ως στοχαστικά, καθώς είναι αδύνατον να προβλεφθούν εξ' αρχής.





68	Line (L:13.605607 mm)
69	Line (L:12.063196 mm)
70	Line (L:10.953326 mm)
71	Line (L:9.516321 mm)
72	Line (L:26.851005 mm)
73	Line (L:28.004317 mm)
74	Line (L:23.899835 mm)
75	Line (L:21.746849 mm)
76	Line (L:19.895995 mm)
77	Line (L:19.712107 mm)
78	Line (L:16.348017 mm)
79	Line (L:14.66486 mm)
80	Line (L:13.668958 mm)
81	Line (L:11.890718 mm)
82	Line (L:10.574016 mm)
83	Line (L:8.561916 mm)

Εικόνα 16: Γεωμετρικό αποτέλεσμα παραμετρικού αλγορίθμου στο λογισμικό Grasshopper για τη δημιουργία χωροδικτυώματος οριζόμενο από δύο επιφάνειες NURBS διπλής καμπυλότητας. Διακρίνονται με πράσινο χρώμα οι ράβδοι του δικτυώματος που προκύπτουν αυτόματα από την παραμετροποίηση της διαδικασίας και την ολοκλήρωση του αλγορίθμου. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Εικόνα 17: Μετρήσεις μήκους δευτερευουσών ράβδων του παραδείγματος στην Εικόνα 14. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

## 6. Παράδειγμα #6 - Paneling

Μια χαρακτηριστική προσέγγιση σε σχέση με τα ψηφιακά εργαλεία είναι η μεθοδολογία κατά την οποία προκύπτει σύνθετη δομή και μορφή, μέσω παραμετρικού και αλγοριθμικού σχεδιασμού, από την προσαρμογή βασικού στοιχείου το οποίο επαναλαμβάνεται σε μεγάλους αριθμούς, αλλά με τοπικές γεωμετρικές παραλλαγές έχοντας ως οδηγό-υπόβαθρο κάποια κύρια γεωμετρία. Η συγκεκριμένη κατασκευαστική προσέγγιση καλείται **paneling**, όπου βασικό στοιχείο διατηρεί τη γενική του μορφή, αλλά η γεωμετρία του αλλοιώνεται κατά την προσαρμογή του στη γεωμετρία της γενικής μορφής. Οι **παραδοχές/αποφάσεις** του μελετητή αφορούν:

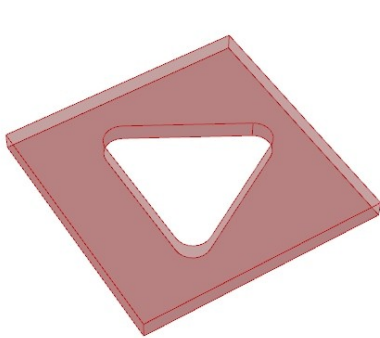
1. Στη γεωμετρία της βασικής επαναλαμβανόμενης μορφής (panel).
2. Στην κύρια γεωμετρική μορφή η οποία λειτουργεί ως γεωμετρικό και μορφολογικό υπόβαθρο.
3. Στο ρυθμό και τύπο της επανάληψης που θα λάβει το βασικό panel.
4. Στο ότι αναμένονται μη προκαθορισμένες – τυχαιές παραμορφώσεις του βασικού panel κατά την προσαρμογή του στη γεωμετρία της κύριας γεωμετρικής μορφής, οι οποίες δεν έχουν καθόλου ή έχουν δευτερεύουσα σημασία.

Οι τοπικές παραμορφώσεις των προσαρμοζόμενων panels προκύπτουν από τον αλγόριθμο με έμμεσο τρόπο. Σε αυτή την περίπτωση πρόκειται για νέες μη προσχεδιασμένες-προβλεψιμες μορφές (άρα τυχαιές) οι οποίες ικανοποιούν τις παραπάνω συνθήκες 1, 2, 3, 4. Παραδείγματα κατασκευών όπου γίνεται η λογική χρήσης paneling είναι οι επικαλύψεις των κελυφών έργων του Gehry όπως το **Guggenheim Bilbao**.

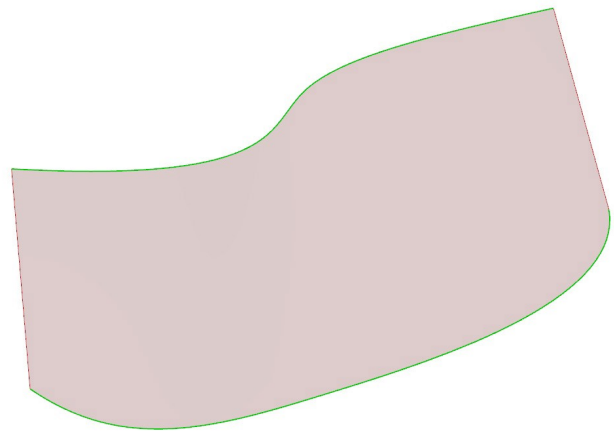
Στις εικόνες που ακολουθούν, περιγράφεται μια τυπική μεθοδολογία paneling και τα προϊόντα αυτής που μπορεί να υλοποιηθούν με το λογισμικό παραμετρικού και αλγοριθμικού σχεδιασμού Rhino/Grasshopper. Το βασικό γεωμετρικό μοτίβο μήτρα είναι αυτό που απεικονίζεται στην Εικόνα 18 και μπορεί να είναι οποιαδήποτε γεωμετρία. Στην Εικόνα 19 απεικονίζεται μια επιφάνεια NURBS διπλής

καμπυλότητας, η οποία στη συνέχεια υποδιαιρείται σε κάναβο 8X6 κελιών διαφορετικών διαστάσεων (Εικόνα 20).

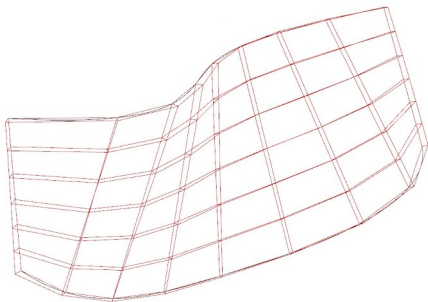
Τα κελιά αυτά αποτελούν τα γεωμετρικά όρια που θα μετασχηματίσουν και θα μορφοποιήσουν το βασικό panel – μήτρα. Το αποτέλεσμα της προσαρμογής φαίνεται στην Εικόνα 21. Διακρίνεται ότι το βασικό panel έχει μετασχηματιστεί μορφολογικά ώστε η γεωμετρία του να πληρώνει τον όγκο του κάθε κελιού-ορίου, όπως αυτά διαμορφώθηκαν στην Εικόνα 20. Ενώ η γενική μορφή του αρχικού panel είναι διακριτή (παραλληλεπίπεδο με τριγωνική οπή), έχουν προκύψει 48 μη προκαθορισμένες προσαρμοσμένες παραλλαγές του.



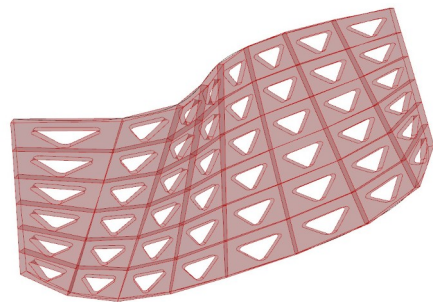
Εικόνα 18: Paneling – Βασική γεωμετρική μορφή / Panel.  
Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 19: Paneling – Επιφάνεια NURBS διπλής καμπυλότητας ως κύριο γεωμετρικό υπόβαθρο (υπόβαθρο A). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 20: Paneling – Καταμερισμός του υποβάθρου σε 8X6 Εικόνα 21: Paneling – Προσαρμογή του βασικού panel σε  
περιοχές (υπόβαθρο A). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



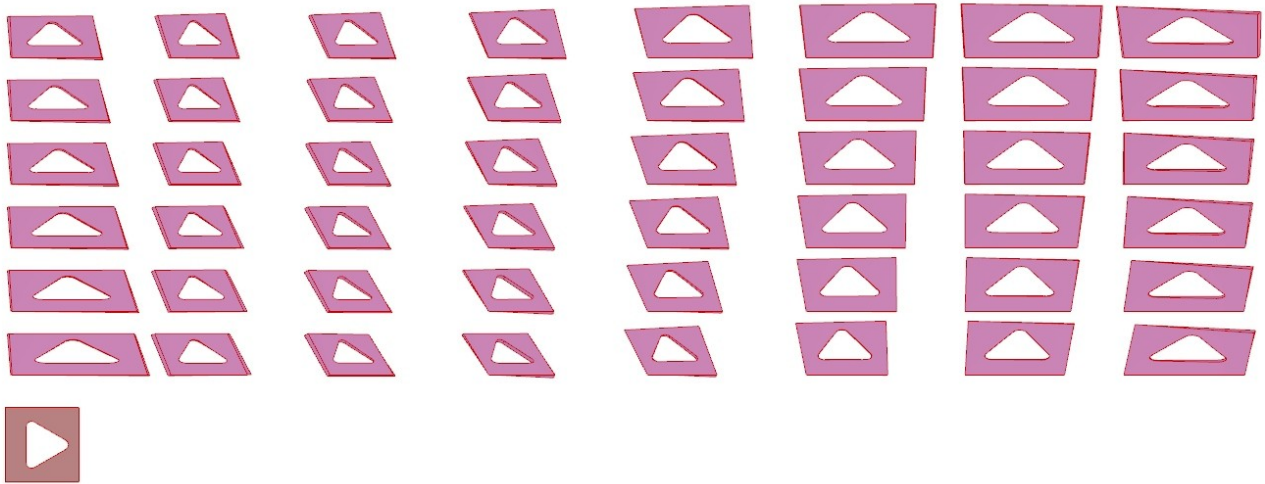
8X6 κελιά (υπόβαθρο A). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Ο αλγόριθμος είναι έτσι σχεδιασμένος έτσι ώστε:

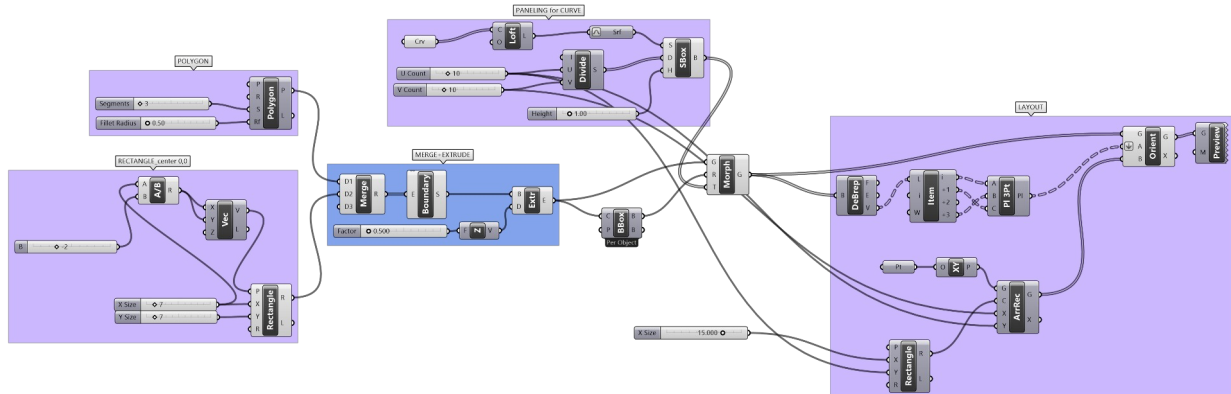
1. Να ορίζεται η γεωμετρία του βασικού panel. - Ορίζεται από τον μελετητή.
2. Να ορίζεται η γεωμετρία του υποβάθρου. - Ορίζεται από τον μελετητή.
3. Να ορίζεται ο καταμερισμός των κελιών προσαρμογής (πλήθος panels). - Ορίζεται από τον μελετητή.

4. Να πραγματοποιείται η προσαρμογή του βασικού ραφελ έτσι ώστε αυτό να καλύπτει όλη τη γεωμετρία του υποβάθρου με αποτέλεσμα να μορφοποιούνται μη προκαθορισμένες γεωμετρικές παραλλαγές του βασικού ραφελ κατά την τοπική προσαρμογή στο κάθε κελί. - Υλοποιείται αυτόματα.

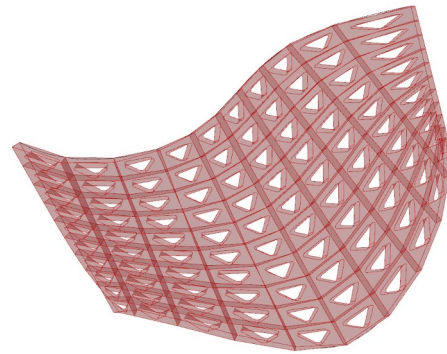
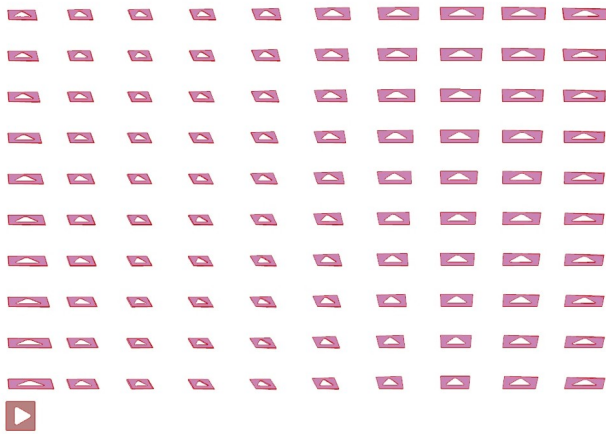
Στο συγκεκριμένο παράδειγμα οι παραδοχές στο σχεδιασμό προσανατολίζονται στην επιλογή των κύριων γεωμετρικών μορφών ραφελ και υποβάθρου, καθώς και τη μορφή και πλήθος των κελιών υποδιαιρέσεων.



Εικόνα 22: Paneling – Το βασικό ραφελ κάτω αριστερά και οι 48=6\*8 προσαρμογές του στην κύρια γεωμετρική μορφή σε μορφή αναπτύγματος (υπόβαθρο A). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 23: Paneling – Παραμετρικός αλγόριθμος από το λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 24: Paneling – Το βασικό panel κάτω αριστερά και οι Εικόνα 25: Paneling – Προσαρμογή του βασικού panel σε 10X10=100 προσαρμογές του στην κύρια γεωμετρική μορφή 10X10 κελιά αλλά σε διαφορετικό γεωμετρικό υπόβαθρο σε μορφή αναπτύγματος (υπόβαθρο Α). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου. Εικόνα 25: Paneling – Προσαρμογή του βασικού panel σε 10X10 κελιά αλλά σε διαφορετικό γεωμετρικό υπόβαθρο (υπόβαθρο Β). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Ο αλγόριθμος υλοποιεί αυτόματα την γεωμετρική προσαρμογή και προκύπτουν μορφές μη αρχικά προβλέψιμες, άρα από αυτή την έννοια τυχαίες. Η ακριβής μορφή τους δεν έχει τόση σημασία, όσο το να καλυφθεί όλη η επιφάνεια του υποβάθρου. Η κάθε παραλλαγή panel είναι μοναδική και μη επαναλαμβανόμενη. Ο αλγόριθμος είναι σχεδιασμένος παραμετρικά ώστε να δέχεται τροποποιήσεις και οι μορφές των panel να ενημερώνονται με αυτόματο τρόπο. Η έννοια του μη προκαθορισμένου ή αλλιώς τυχαιού (από την άποψη ότι δεν μπορεί να προβλεφθεί πριν υλοποιηθεί) καθορίζεται από τον αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος είναι ο μηχανισμός που επιτρέπει την μαζική προσαρμογή (**mass customization**) της μορφής, καθώς και τη δυνατότητα δημιουργίας άπειρων μοναδικών παραλλαγών, ανάλογα με την τροποποίηση των ρυθμίσεων-παραμέτρων. Η προσέγγιση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας είναι τέτοια η οποία ΔΕΝ δημιουργεί τυποποίηση στην κατασκευή (καθώς κάθε προσαρμοσμένο panel είναι διαφορετικό και μοναδικό) και επομένως για την υλοποίησή της απαιτεί τα αντίστοιχα εργαλεία κατασκευής, τα οποία μπορούν εύκολα να διαχειριστούν τη διαφοροποίηση και μοναδικότητα των επιμέρους στοιχείων, σύμφωνα με τη λογική του **file to factory**. Παρατηρείται ότι ο επιμερισμός του υποβάθρου σε τετράπλευρα έχει ως συνέπεια, αφού η γεωμετρία υπόβαθρο είναι γεωμετρία διπλής καμπυλότητας, τα προσαρμοσμένα panel να έχουν κι αυτά διπλή καμπυλότητα, κι επομένως απαιτούν και ιδιαίτερο–μη συμβατικό τρόπο κατασκευής, όπως για παράδειγμα με χρήση 3d printing ή CNC routing.

Σε μια διαφορετική παραλλαγή, όπου δημιουργούνται 10X10 κελιά με βάση τον ίδιο αλγόριθμο η μορφοποίησή τους είναι αυτή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 24. Τα κελιά έχουν αυξηθεί από 48 σε 100 και επομένως οι γενικές διαστάσεις τους είναι μικρότερες σε σχέση με το προηγούμενο παράδειγμα εξαιτίας του καταμερισμού τους στο ίδιο κύριο γεωμετρικό υπόβαθρο. Μια άλλου τύπου παραλλαγή θα μπορούσε να είναι η τροποποίηση της μορφής του κύριου γεωμετρικού υπόβαθρου. Μια τέτοια παραλλαγή φαίνεται στην Εικόνα 25 όπου το βασικό αρχικό panel παραμένει το ίδιο, ο αριθμός των κελιών είναι 10X10, αλλά έχει διαφοροποιηθεί η γεωμετρία της επιφάνειας υπόβαθρο. Αυτόματα προκύπτουν νέες μοναδικές προσαρμοσμένες παραλλαγές του αρχικού panel.

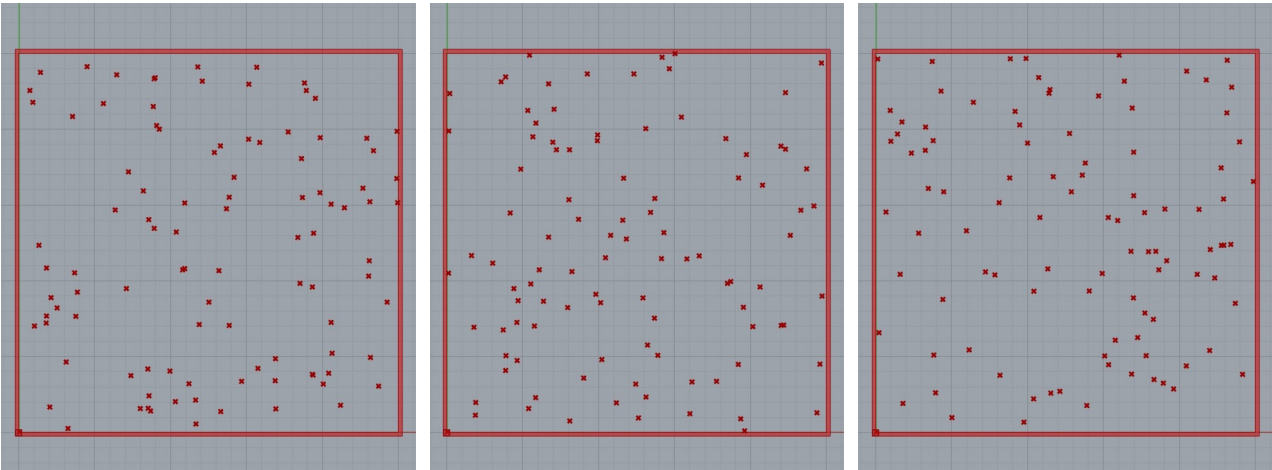
## 7. Παράδειγμα #7 - Populate

Μια αντίστοιχη περίπτωση παραδοχής, όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα, διαμόρφωσης ορίων και περιοχής τυχαιότητας μέσω λογισμικού, είναι η τεχνική populate κατά την οποία καθορίζεται όριο εντός του οποίου αναπτύσσεται τυχαιότητα. Τέτοια εφαρμογή παρουσιάστηκε στο παράδειγμα του **Hyundai Motorstudio Goyang** στο κυρίως τμήμα της διατριβής, όπου ορίστηκαν σε κάτοψη ζώνες εντός των οποίων, μέσω τεχνικών βελτιστοποίησης, αναζητήθηκε και προέκυψε η καταλληλότερη διάταξη των υποστυλωμάτων με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων. Στην περίπτωση αυτή έγινε παραδοχή ορισμού περιοχών σε ζώνες τυχαιότητας και ζώνες μη τυχαιότητας. Η παραδοχή αυτή είναι μια συνειδητή σχεδιαστική επιλογή.

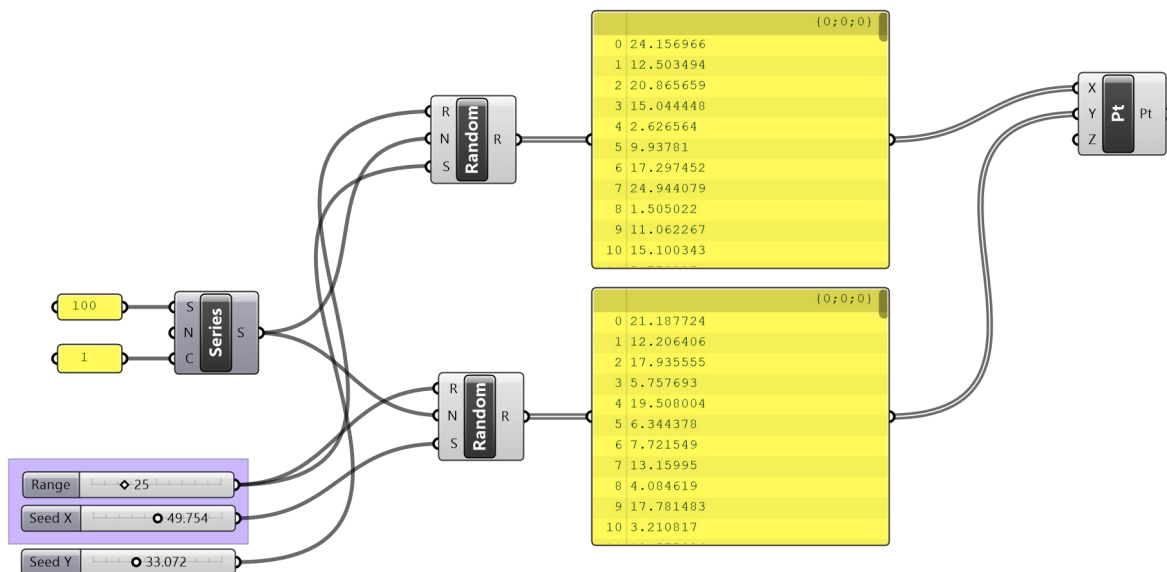
Στα παραδείγματα που ακολουθούν παρουσιάζεται ο καθορισμός μιας περιοχής τυχαιότητας σε διαφορετικές παραλλαγές διασποράς σημείων, οι οποίες πραγματοποιούνται με τη χρήση κάποιου ορίου, δισδιάστατου ή τρισδιάστατου, η οποία αποτελεί το περιοριστικό γεωμετρικό όριο της τυχαιότητας.

Περίπτωση **α**.

Δημιουργείται παραμετρικός αλγόριθμος ο οποίος τοποθετεί σημεία σε θετικές συντεταγμένες X,Y από την αρχή των αξόνων, οι οποίες ορίζονται με τυχαίο τρόπο. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δημιουργεί 100 σημεία σε τυχαίες θετικές συντεταγμένες οι οποίες λαμβάνουν τιμές εντός συγκεκριμένων ορίων. Στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο του αλγορίθμου, το εύρος των συντεταγμένων X και Y των σημείων ορίζεται παραμετρικά από την τιμή 0 έως την τιμή +25. Αυτόματα καθορίζεται και ο γεωμετρικός χώρος και τα όρια εντός των οποίων κινούνται οι θέσεις των σημείων και αυτός ο χώρος είναι ένα τετράγωνο, με τη μία κορυφή του στην αρχή των αξόνων και την αντιδιαμετρική κορυφή του σε συντεταγμένες +25,+25. Στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζονται παραλλαγές των θέσεων των σημείων, μέσω της διαφοροποίησης των τιμών των παραμέτρων seed, αλλά διατηρώντας σταθερή την παράμετρο range στην τιμή 25 ως το γεωμετρικό όριο της τυχαιότητας. Παρατηρείται ότι οι τυχαίες θέσεις των σημείων σε όλες τις παραλλαγές περιορίζονται εντός του ορίου αυτού (κόκκινο πλαίσιο).



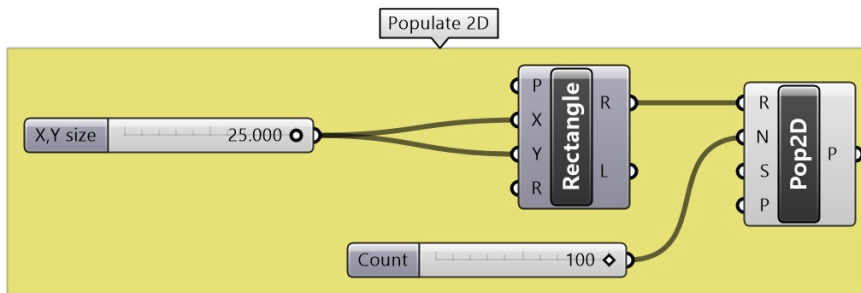
Εικόνα 26: Παράδειγμα #7, *populate*, παράδειγμα α: Αλγόριθμος δημιουργίας σημείων σε τυχαίες θετικές συντεταγμένες εντός ορίου τετραγώνου πλευράς 25 στο λογισμικό *Grasshopper*, στιγμιότυπα 1, 2, 3. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 27: Παράδειγμα #7, *populate*, παράδειγμα α: Αλγόριθμος δημιουργίας σημείων σε τυχαίες θετικές συντεταγμένες στο λογισμικό *Grasshopper*. 100 σημεία τυχαίων συντεταγμένων (0 έως *range*=25). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

**Περίπτωση β.**

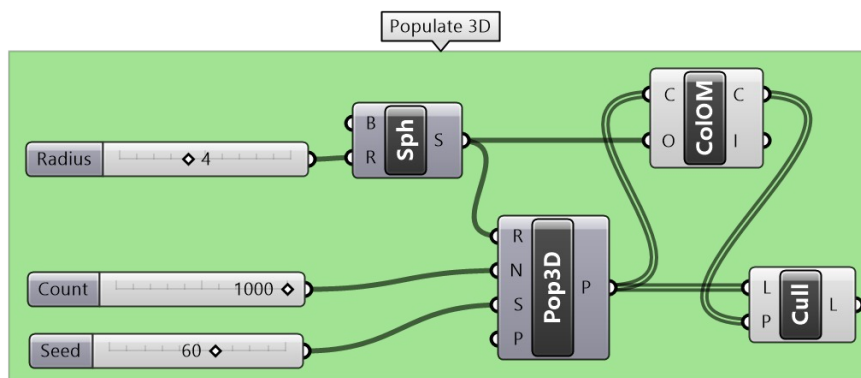
Στο ίδιο αποτέλεσμα μπορεί να καταλήξει κανείς με τη χρήση διαφορετικού αλγορίθμου (εργαλείο *Populate 2D*), όπου και πάλι το πλήθος των σημείων έχει οριστεί στην τιμή 100, οι συντεταγμένες τους X, Y είναι τυχαίες, με τη διαφορά ότι η περιοχή στην οποία τοποθετούνται καθορίζεται εξαρχής ως παραλληλόγραμμο συγκεκριμένων διαστάσεων, εδώ 25X25 (X, Y size).



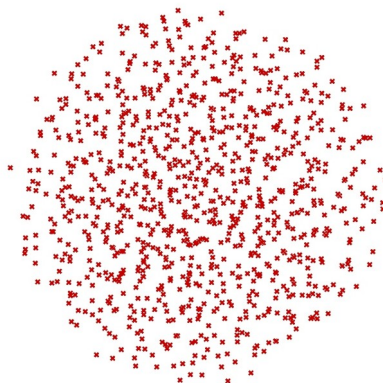
Εικόνα 28: Παράδειγμα #7, populate, παράδειγμα β: Αλγόριθμος δημιουργίας σημείων σε τυχαίες θετικές συντεταγμένες εντός ορίου παραλληλογράμμου πλευράς 25Χ25 στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

### Περίπτωση γ.

Η λογική περιορισμού της διασποράς των σημείων δεν εφαρμόζεται μόνο σε επιφάνεια (2d), αλλά μπορεί να υλοποιηθεί και στο χώρο (3d). Η προσαρμογή των συντεταγμένων των σημείων γίνεται εντός τρισδιάστατου ορίου όπως μπορεί να φανεί στο επόμενο παράδειγμα μέσω αλγορίθμου (Εικόνα 28) ο οποίος τοποθετεί σημεία σε τυχαίες συντεταγμένες εντός του ορίου που καθορίζεται από τον όγκο μιας σφαίρας (Εικόνα 30).



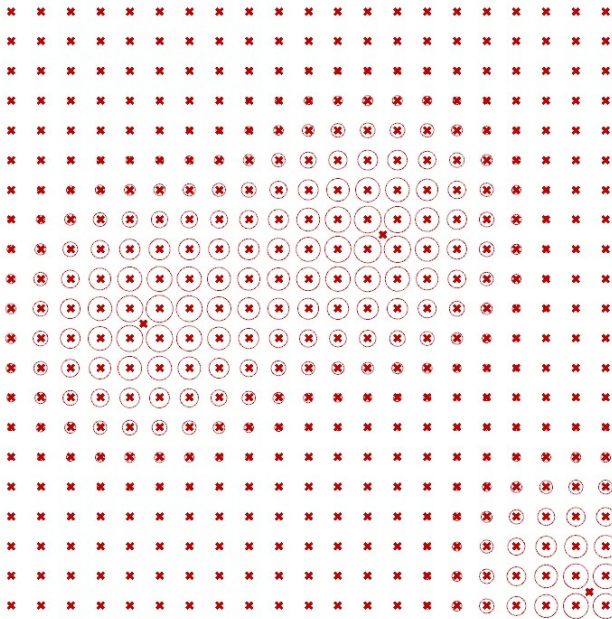
Εικόνα 29: Παράδειγμα #7, populate, παράδειγμα γ: Αλγόριθμος δημιουργίας σημείων στο χώρο σε τυχαίες συντεταγμένες εντός του ορίου όγκου σφαίρας που υλοποιήθηκε στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



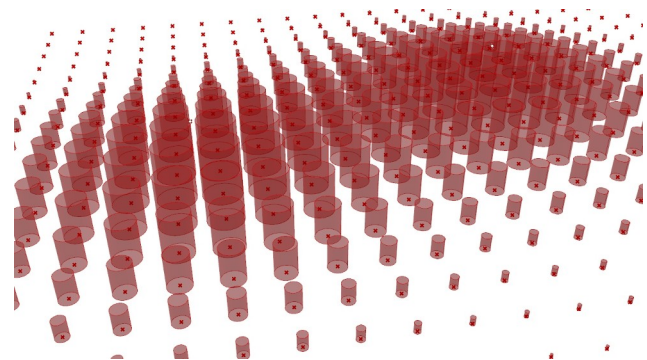
Εικόνα 30: Παράδειγμα #7, populate, παράδειγμα γ: Γεωμετρικό αποτέλεσμα αλγορίθμου δημιουργίας σημείων στο χώρο (3d) σε τυχαίες συντεταγμένες εντός του ορίου όγκου σφαίρας που υλοποιήθηκε στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.







Εικόνα 32: Παράδειγμα #8, 2d Attractors. Παράδειγμα επήρειας 3 ελκυστών στις ακτίνες κύκλων σε κάναβο 20X20. Λογισμικό Grasshopper. Πηγή: <https://www.grasshopper3d.com/forum/topics/multiple-attractor-points-in-a?id=2985220%3ATopic%3A108027&page=1#comments>, τροποποίηση κώδικα, Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 33: Παράδειγμα #8, 3d Attractors. Παράδειγμα επήρειας 3 ελκυστών στις ακτίνες κύκλων και τις τιμές εξώθησης τους σε κάναβο 20X20. Λογισμικό Grasshopper. Πηγή: <https://www.grasshopper3d.com/forum/topics/multiple-attractor-points-in-a?id=2985220%3ATopic%3A108027&page=1#comments>, τροποποίηση κώδικα, Τ. Κουιμτζόγλου.

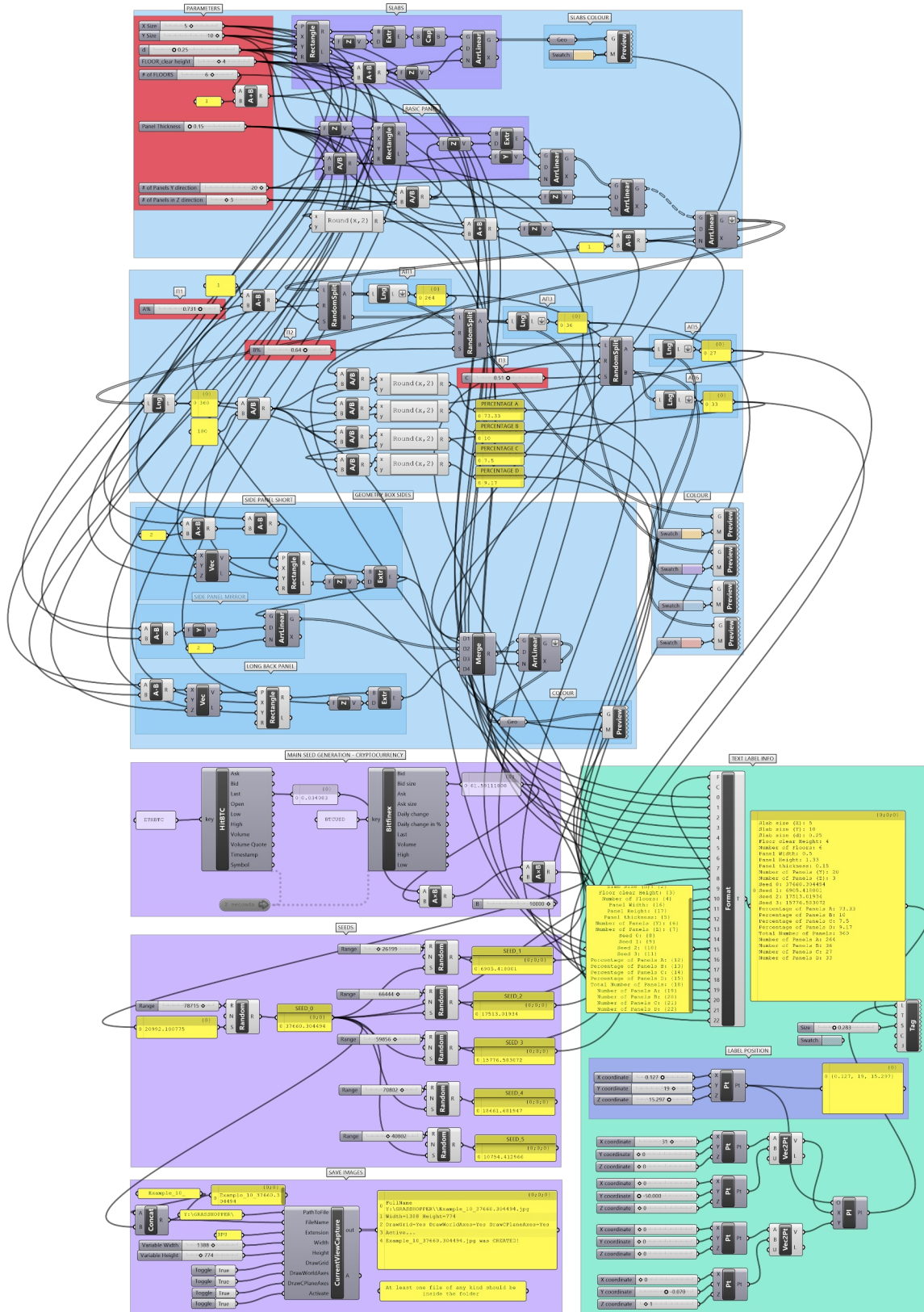
Ο μελετητής επιλέγει να καθορίσει κάποιες κρίσιμες παραμέτρους και επιλέγει συνειδητά οι υπόλοιπες να υπολογίζονται αυτόματα από τον αλγόριθμο. Σκόπιμα **μεταφέρεται ένα ποσοστό ελέγχου** από τον ίδιο (μελετητής) στη **διαδικασία** (υπολογιστικός αλγόριθμος). Η ακριβής μορφή των επιμέρους στοιχείων ή οι τιμές των παραμέτρων της τελικής γεωμετρίας του κάθε επιμέρους στοιχείου είναι δευτερεύουσες σε σχέση με το βάρος που αποδίδεται στη σύνθεση της διαδικασίας και στο γενικό σχεδιασμό.

Συνεπώς, και από αυτή την άποψη, οι δευτερεύουσες τιμές προκύπτουν, δεν μπορούν να προβλεφθούν από το μελετητή πριν την ολοκλήρωση του αλγορίθμου, δεν προκαθορίζονται και άρα μπορούν να θεωρηθούν τυχαιές. Τέτοιες προσεγγίσεις μπορούν να γίνουν ακόμα πιο πολύπλοκες όταν γίνεται εφαρμογή παρόμοιων αλγορίθμων στον τρισδιάστατο χώρο. Η εξαιρετικά αυξημένη πολυπλοκότητα καθιστά αδύνατη την πρόβλεψη του τελικού αποτελέσματος, το οποίο πολλές φορές μπορεί να εκπλήξει και το δημιουργό του. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η αυξημένη πολυπλοκότητα μπορεί να θεωρηθεί ότι παράγει απρόβλεπτες/τυχαιές επιλύσεις. Ένα σχετικά απλό παράδειγμα εφαρμογής της επήρειας ελκυστών στον τρισδιάστατο χώρο είναι αυτό που ακολουθεί στην Εικόνα 33. Σε μια τρισδιάστατη παραλλαγή μπορεί να διακριθεί ο συσχετισμός της τιμής εξώθησης (extrude) του κάθε κύκλου και πάλι αλγοριθμικά σε σχέση με την επιρροή των τριών ελκυστών.

## 9. Παράδειγμα #9 - Υλικότητα

Στην Εικόνα 34 παρουσιάζεται αλγοριθμική παραμετρική διάταξη παραλληλεπιπέδων σε ορθογωνικό κάναβο σε 4 διαφορετικές χρωματικές παραλλαγές στο λογισμικό Grasshopper. Το προϊόν της παραμετρικής διάταξης είναι είναι μια πολυεπίπεδη γεωμετρική κατασκευή όπου το κύριο μέτωπο κάθε επιπέδου αποτελείται από κάναβο με παραλληλεπίπεδα στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά διαμορφώνουν ένα μέτωπο κατασκευής και αντιπροσωπεύουν περιοχές με διαφορετική υλικότητα. Τα παραλληλεπίπεδα σύμφωνα με τον αλγόριθμο έχουν χωριστεί σε 4 διαφορετικές κατηγορίες **A**, **B**, **C**, **D** και διατάσσονται σε τυχαίες παραλλαγές θέσεων. Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τις παραμέτρους που καθορίζουν τον αλγόριθμο, ενώ τυχαία στιγμιότυπα των παραλλαγών του αλγορίθμου φαίνονται στην Εικόνα 35 και την Εικόνα 36.

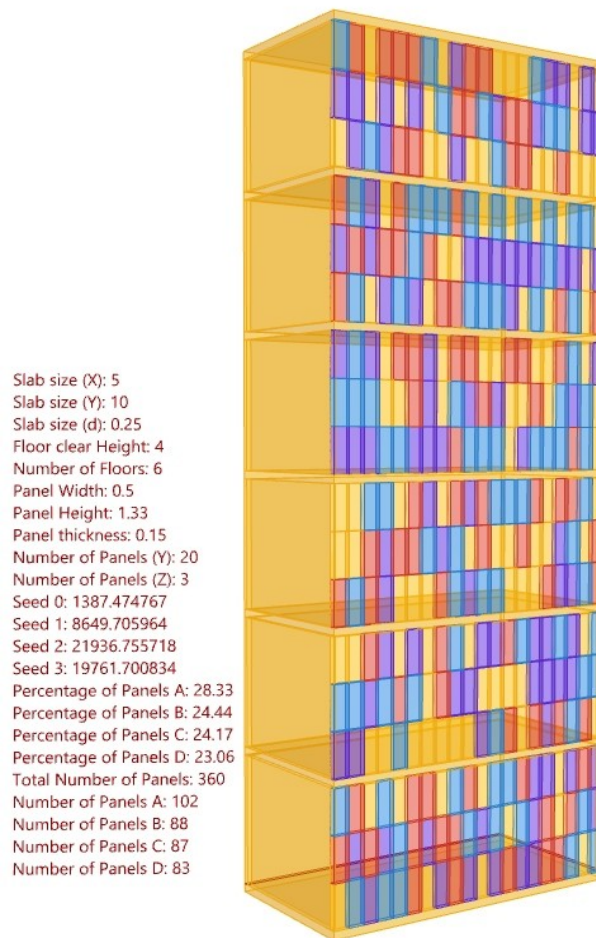
Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ορίζονται παράμετροι για τη γεωμετρία των επιπέδων, το ύψος του κάθε ορόφου, αριθμό ορόφων, τον αριθμό υποδιαίρέσεων των χρωματιστών πανέλων για κάθε επίπεδο κατά διάσταση Y και διάσταση Z, καθώς και του πάχους των πανέλων. Οι παραπάνω παράμετροι διατηρούνται σταθερές. Ορίζονται επίσης παράμετροι για το χρώμα κάθε μίας από τις 4 κατηγορίες πανέλων, ποσοστά % για το πλήθος των πανέλων ανά κατηγορία επί του συνόλου, καθώς και μια βασική παράμετρος Seed και 3 παράμετροι Seed που προκύπτουν από αυτή. Οι τιμές Seed καθορίζουν το αποτέλεσμα της τυχαίας επιλογής για την κατανομή των panel στις 4 κατηγορίες με βάση το προεπιλεγμένο ποσοστό τους από το χρήστη. Γίνεται σαφές ότι θα μπορούσαν να παραμετροποιηθούν με τυχαίο τρόπο και οι υπόλοιπες παράμετροι που έχουν αυτή τη δυνατότητα (1-10 και 14-21), αλλά επιλέγεται να τυχαιοποιηθούν οι παράμετροι που αφορούν μόνο στην κατανομή των panel ανά κατηγορία, για εποπτικούς λόγους εξέτασης του συγκριμένου παραδείγματος.



Εικόνα 34: Παράδειγμα 9#: Αλγοριθμική παραμετρική διάταξη παραλληλεπίπεδων με 4 διαφορετικά υλικά σε ορθογωνικό κάναβο με τυχαίες διατάξεις στο λογισμικό Grasshopper. Παράλληλα πραγματοποιείται καταγραφή δεδομένων για κάθε μοναδική παραλλαγή. Πηγή: Τ. Κουμτζόγλου.

	Παράμετρος	Περιγραφή	Δυνατότητα τυχαιότητας	χρήσης
1	Slab Size (X)	Διάσταση πλάκας κατά X	Ναι – Σταθερή τιμή - 5	
2	Slab Size (Y)	Διάσταση πλάκας κατά Y	Ναι – Σταθερή τιμή - 10	
3	Slab Size (d)	Πάχος πλάκας	Ναι – Σταθερή τιμή -	
4	Floor clear height	Καθαρό ύψος ορόφου	Ναι – Σταθερή τιμή	
5	Number of Floors	Αριθμών ορόφων	Ναι – Σταθερή τιμή	
6	Number of Panels (Y)	Αριθμός Panel κατά Y για κάθε επίπεδο	Ναι – Σταθερή τιμή	
7	Number of Panels (Z)	Αριθμός Panel κατά Z για κάθε επίπεδο	Ναι – Σταθερή τιμή	
8	Panel thickness	Πάχος Panel	Ναι – Σταθερή τιμή	
9	Main Seed Source A	Αριθμητικά δεδομένα τροφοδοσίας Main Seed, A	WWW data	
10	Main Seed Source B	Αριθμητικά δεδομένα τροφοδοσίας Main Seed, B	WWW data	
11	Random Split Value Seed 1	Τιμή Seed μοναδικότητας ακολουθίας – Καθορίζει κατανομή panel στην κατηγορία A	Seed 1	
12	Random Split Value Seed 2	Τιμή Seed μοναδικότητας ακολουθίας - Καθορίζει κατανομή panel στην κατηγορία B	Seed 2	
13	Random Split Value Seed 3	Τιμή Seed μοναδικότητας ακολουθίας - Καθορίζει κατανομή panel στην κατηγορία C	Seed 3	
14	Panel A Colour	Χρωματική παράμετρος RGB panel A	Ναι – Σταθερή τιμή	
15	Panel B Colour	Χρωματική παράμετρος RGB panel B	Ναι – Σταθερή τιμή	
16	Panel C Colour	Χρωματική παράμετρος RGB panel C	Ναι – Σταθερή τιμή	
17	Panel D Colour	Χρωματική παράμετρος RGB panel D	Ναι – Σταθερή τιμή	
18	A%	Ποσοστό % των panel A	Ναι – Σταθερή τιμή	
19	B%	Ποσοστό % των (100-A%) panel B	Ναι – Σταθερή τιμή	
20	C%	Ποσοστό % των (100-B%) panel C	Ναι – Σταθερή τιμή	
21	D%	Ποσοστό % των (100-B%) panel D (απομένον ποσοστό)	Ναι – Σταθερή τιμή	

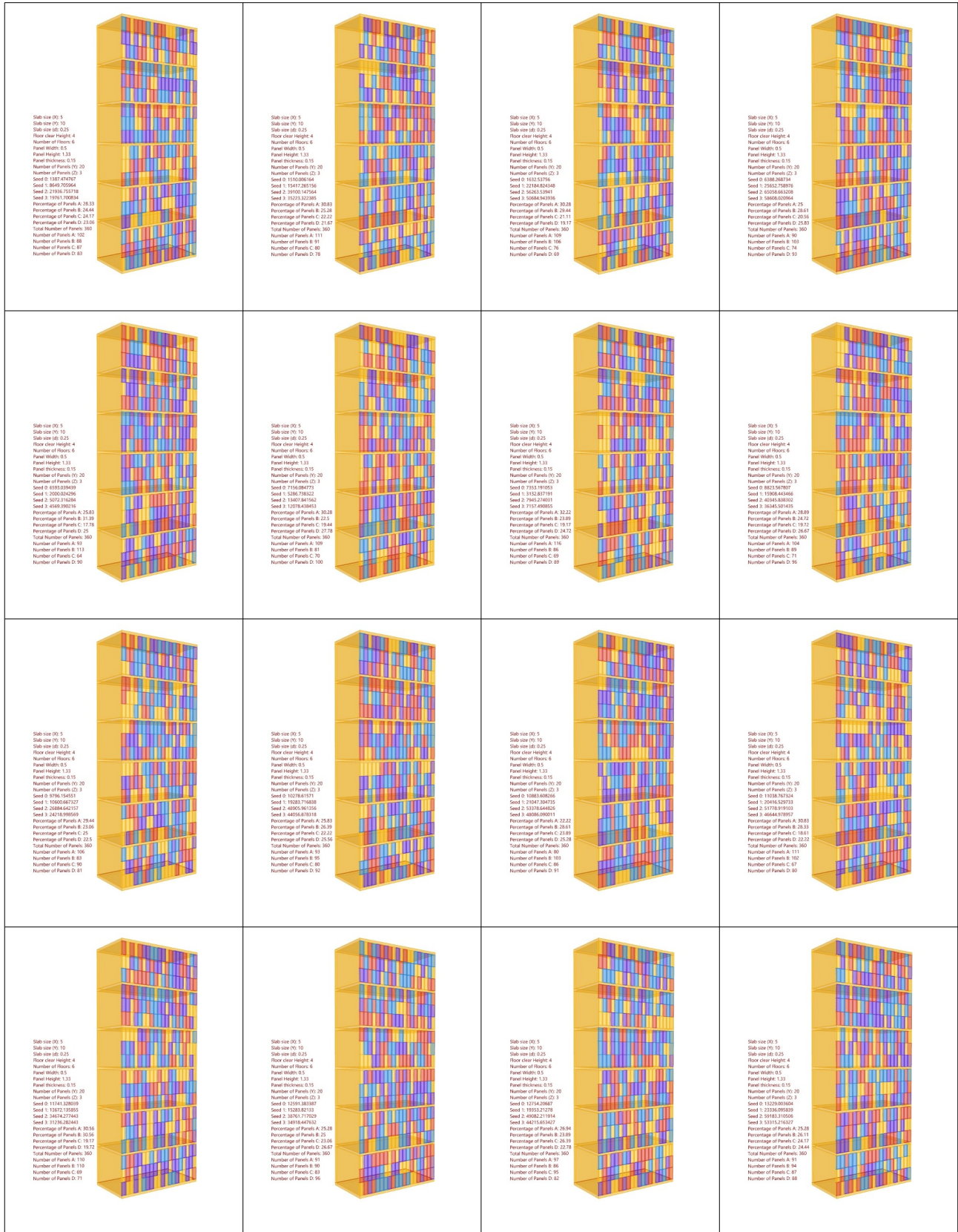
Πίνακας 3: Παράμετροι παραδείγματος: Χρωματικές – Γεωμετρικές Παράμετροι. Πηγή: Τ. Κουιμιτζόγλου.



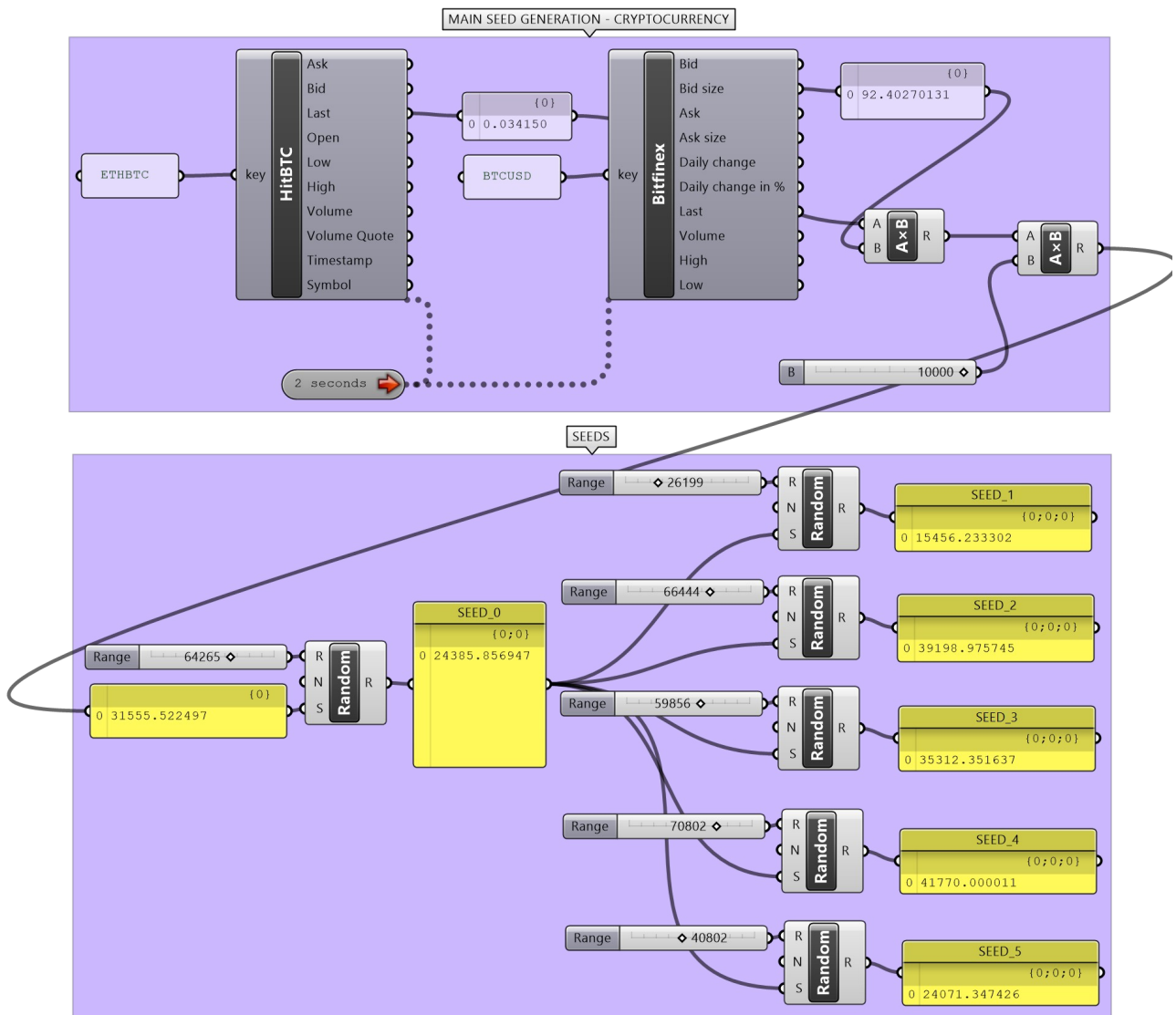
Εικόνα 35: Παράδειγμα #9: Παραλλαγή αλγοριθμικής παραμετρικής διάταξης παραλληλεπιπέδων 4 διαφορετικών κατηγοριών σε ορθογωνικό κάναβο με τυχαίες διατάξεις στο λογισμικό Grasshopper. Παράλληλα πραγματοποιείται καταγραφή δεδομένων για κάθε μοναδική παραλλαγή. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Για τη δημιουργία και μεταβολή της τιμής **Seed** του συγκεκριμένου παραδείγματος χρησιμοποιήθηκε συλλογή δεδομένων από το internet. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τιμές, η τιμή πώλησης σε πραγματικό χρόνο του ψηφιακού κρυπτονομίσματος **Ethereum** και η τρέχουσα μεγαλύτερη τιμή δημοπρασίας (bid) για το κρυπτονόμισμα **Bitcoin**. Και οι δύο τιμές ανασύρθηκαν από το διαδίκτυο σε πραγματικό χρόνο και το γινόμενό τους χρησιμοποιήθηκε ως μεταβαλλόμενη τιμή **Seed** με συχνότητα ενημέρωσης τα 2 δευτερόλεπτα. Ο αλγόριθμος συλλογής των τιμών φαίνεται στην Εικόνα 37. Μετά τη δημιουργία της κύριας τιμής Seed, η αριθμητική τιμή που προκύπτει τροφοδοτεί μέσω του **random component** άλλες γεννήτριες τιμών **Seed** οι οποίες τροποποιούν με ψευδοτυχαίο τρόπο τις παραμέτρους του κύριου αλγορίθμου.

Οι χρωματισμοί των πανέλων του 3d μοντέλου θα μπορούσαν να αντιστοιχούν σε χρωματικές διαφοροποιήσεις σε όψη ή σε προγραμματισμό χρωματισμών οθονών ή φωτιστικών LED. Μια παραλλαγή του συγκεκριμένου παραδείγματος αποτελεί η αφαίρεση των παραλληλεπιπέδων μιας ή περισσότερων κατηγοριών έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια διάτρητη όψη (πλήρη-κενά) όπως φαίνεται στην Εικόνα 38.



Εικόνα 36: Παράδειγμα #9: Παραλλαγές αλγοριθμικής παραμετρικής διάταξης παραλληλεπιπέδων 4 διαφορετικών κατηγοριών σε ορθογωνικό κάναβο με τυχαίες διατάξεις στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 37: Παράδειγμα #9: Αλγόριθμος γεννήτριας ψευδοτυχαίων αριθμών Seed σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση τιμών πώλησης και δημοπρασιών κρυπτονομισμάτων Ethereum και Bitcoin. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 38: Παράδειγμα #9: Γεωμετρικές παραλλαγές όψεων με πλήρη και κενά με βάση τον αλγόριθμο στην Εικόνα 34 και διαφοροποίηση των παραμέτρων του. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



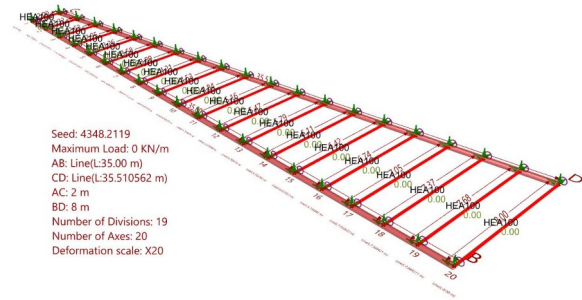
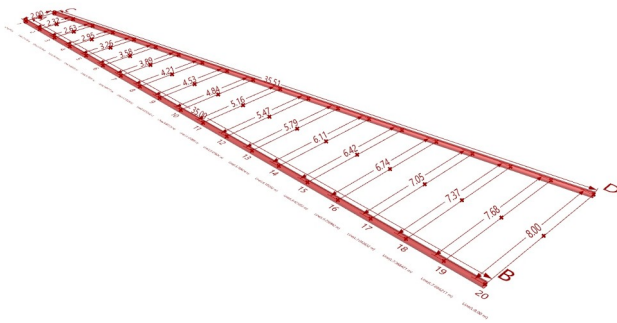


Η παραμετρική διάταξη χωρίς την εφαρμογή γεωμετρίας φορέων απεικονίζεται στην Εικόνα 40. Στη συγκεκριμένη παραλλαγή απεικονίζονται 20 φορείς οι οποίοι συνδέουν τις ευθείες AB (35m) και CD (35.51m) σε αποστάσεις AC (2m) και BC (8m). Στη συνέχεια εφαρμόζεται αρχικά ίδιο γραμμικό φορτίο σε κάθε φορέα τιμής 5KN/m (Εικόνα 41) και επιλέγεται χαλύβδινη διατομή HEA 100 (Εικόνα 42). Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τις κύριες παραμέτρους που καθορίζουν τη συγκεκριμένη αλγοριθμική παραμετρική διάταξη.

	Παράμετρος	Περιγραφή	Δυνατότητα χρήσης τυχαιότητας
1	Συντεταγμένες σημείου A	Συντεταγμένες σημείου A	Ναι – Επιλέγεται Σταθερή τιμή
2	Συντεταγμένες σημείου B	Συντεταγμένες σημείου B	Ναι – Επιλέγεται Σταθερή τιμή
3	Συντεταγμένες σημείου C	Συντεταγμένες σημείου C	Ναι – Επιλέγεται Σταθερή τιμή
4	Συντεταγμένες σημείου D	Συντεταγμένες σημείου D	Ναι – Επιλέγεται Σταθερή τιμή
5	Divisions	Υποδιαιρέσεις ισομήκων τμημάτων ευθειών AB, CD.	Ναι – Επιλέγεται Σταθερή τιμή
6	Διατομή φορέα	Επιλογής διατομής φορέα από την αντίστοιχη βιβλιοθήκη του λογισμικού.	Όχι
7	Επιλογή υλικού	Επιλογής υλικού του φορέα από την αντίστοιχη βιβλιοθήκη του λογισμικού.	Όχι
8	Load	Ομοιόμοφη φόρτιση φορέα	Ναι
9	<b>Range</b>	Εύρος τιμών παραμέτρου φορτίου Load	Ναι
10	<b>Seed</b>	Τιμή Seed μοναδικότητας ακολουθίας	Seed

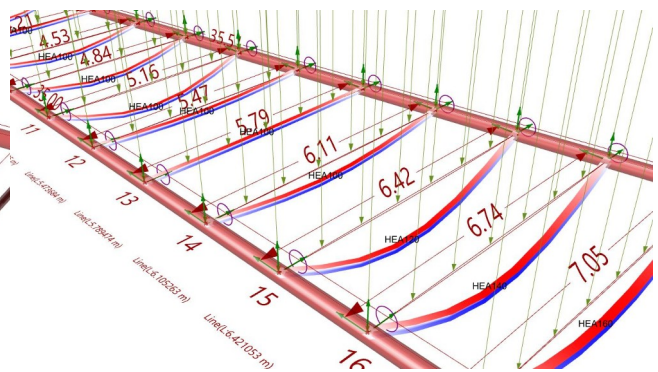
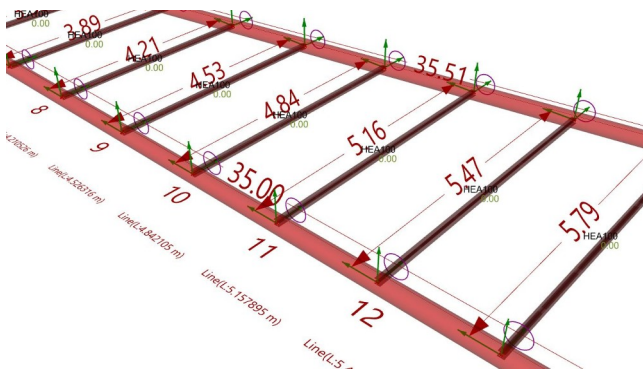
Πίνακας 4: Παράμετροι παραδείγματος #10: Γεωμετρικές και Δυναμικές Παράμετροι. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Η τυχαιότητα, στο συγκεκριμένο παράδειγμα, επιλέγεται να εφαρμοστεί ως μεταβολή της τιμής του γραμμικού φορτίου που δέχεται ο κάθε φορέας με τη χρήση του random component σε διάταξη όμοια με αυτή των προηγούμενων παραδειγμάτων. Η ψευδοτυχαία αριθμητική ακολουθία τροποποιείται από τη μεταβολή των τιμών της παραμέτρου **Seed**, με αποτέλεσμα να προκύπτουν κάθε φορά μοναδικές παραλλαγές της στατικής προσομοίωσης. Το παράδειγμα αυτό επιχειρεί μόνο να παρουσιάσει τη δυνατότητα εισαγωγής και χρήσης χαρακτηριστικών φορτίων ως παραμέτρους σε μια αλγοριθμική παραμετρική διάταξη και δεν ανταποκρίνεται σε κάποια στατική επίλυση ενός ρεαλιστικού πραγματικού μηχανικού προβλήματος. Μερικές από τις παραλλαγές των προσομοιώσεων για διαφορετικές τιμές SEED παρουσιάζονται στην Εικόνα 44.



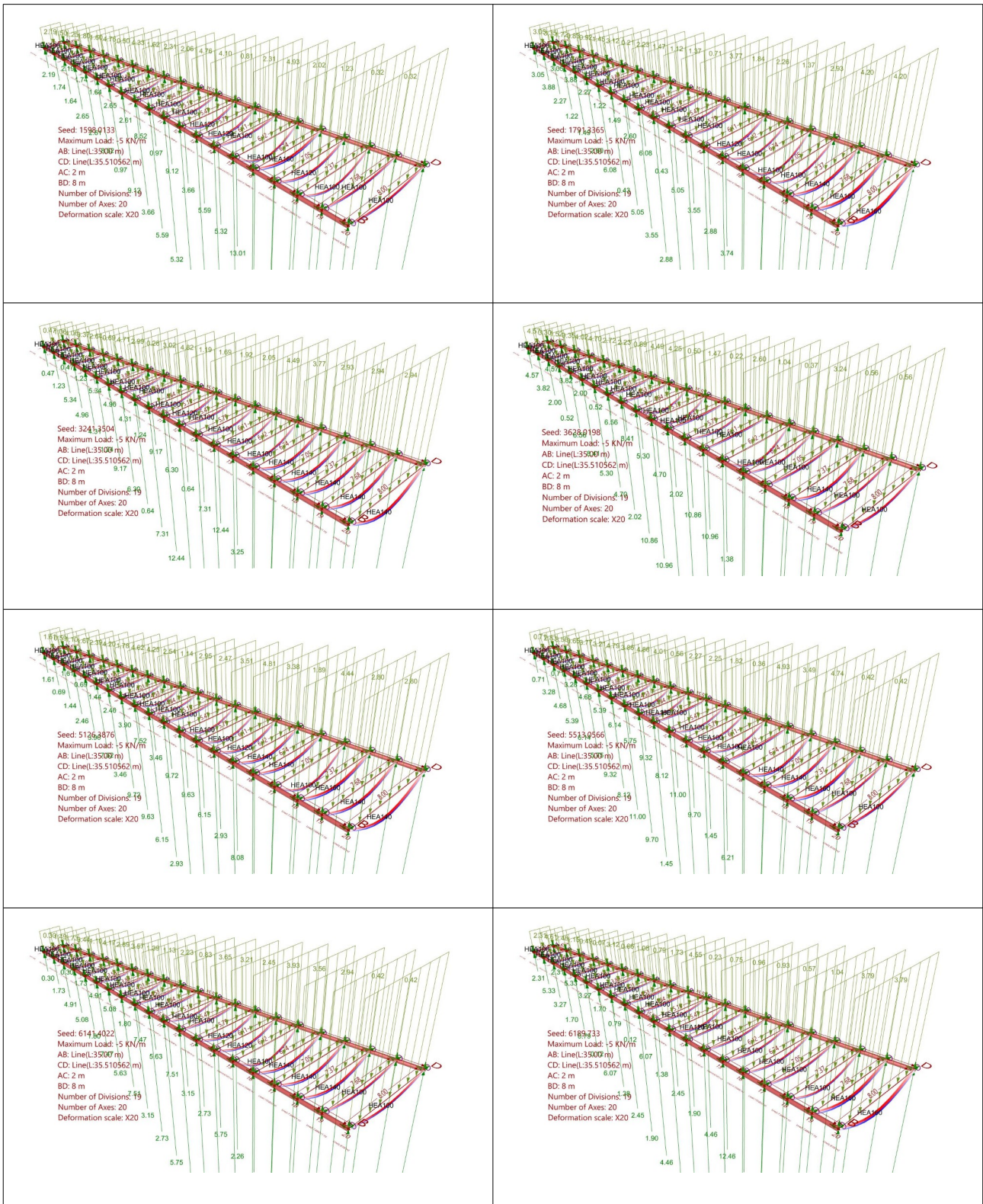
Εικόνα 40: Παράδειγμα Grasshopper/Karamba3D : Αλγοριθμική παραμετρική διάταξη ευθειών που λειτουργούν ως αμφιέριστοι φορείς, στο λογισμικό Grasshopper/Karamba3D. Στη συγκεκριμένη παραλλαγή απεικονίζονται 20 φορείς οι οποίοι συνδέουν τις ευθείες AB (35m) και CD (35.51m) σε αποστάσεις AC (2m) και BC (8m). Πηγή: Τ. Κουιμιτζόγλου.

Εικόνα 41: Παράδειγμα Grasshopper/Karamba3D : Επιλογή χαλύβδινης διατομής HEA 100 αμφιέριστου φορέα. Πηγή: Τ. Κουιμιτζόγλου.



Εικόνα 42: Παράδειγμα Grasshopper/Karamba3D : Επιλογή χαλύβδινης διατομής HEA 100 αμφιέριστου φορέα. Πηγή: Τ. Κουιμιτζόγλου.

Εικόνα 43: Παράδειγμα Grasshopper3D/Karamba3D: Παραμορφώσεις(×20) και φορτίσεις χαλύβδινης διατομής HEA 100 αμφιέριστων φορέων και τυχαίες φορτίσεις ανά φορέα μέχρι 5KN/m. Πηγή: Τ. Κουιμιτζόγλου.



Εικόνα 44: Παράδειγμα Grasshopper3D/Karamba3D: Παραλλαγές παραμορφώσεων(x20) και φορτίσεις χαλύβδινης διατομής HEA 100 αμφίεριστων φορέων και τυχαίες φορτίσεις ανά φορέα μέχρι 5kN/m. Πηγή: Τ. Κουμιτζόγλου.

## 11. Παράδειγμα #11 - Χρήση πραγματικής τυχαιότητας ως παράμετρος στο σχεδιασμό

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες παραγράφους, είναι εφικτή η ενσωμάτωση της πραγματικής τυχαιότητας σε έναν υπολογιστικό αλγόριθμο αρχιτεκτονικού σχεδιασμού. Το πρώτο στάδιο είναι η απόφαση-παραδοχή χρήσης μιας τέτοιας διάταξης ως συνειδητή επιλογή στο σχεδιασμό. Το δεύτερο στάδιο είναι η εφαρμογή της παραδοχής με τα διαθέσιμα τεχνικά μέσα υλικού και λογισμικού.

Ένας τρόπος σύνδεσης με δεδομένα πραγματικής τυχαιότητας (όπως αυτά περιγράφηκαν στην παράγραφο σχετικά με τη δημιουργία της πραγματικής τυχαιότητας), είναι η σύνδεση, με υπηρεσίες μέσω διαδικτύου και λογισμικού, που προσφέρουν αυτή ακριβώς τη δυνατότητα και ενσωμάτωση της πραγματικά τυχαίας πληροφορίας σε μια σχεδιαστική διάταξη ή διαδικασία. Τέτοια δεδομένα μπορούν να ληφθούν από οργανισμούς και υπηρεσίες όπως:

**RANDOM.org**<sup>607</sup> ο οποίος χρησιμοποιεί τον ατμοσφαιρικό θόρυβο για τη δημιουργία πραγματικής τυχαιότητας, **Quantum Random Numbers Server**<sup>608</sup> όπου χρησιμοποιούνται μετρήσεις κβαντικών διακυμάνσεων του κενού και προσφέρεται η δυνατότητα λήψεων πραγματικά τυχαίων αριθμών από το διαδίκτυο, **Quantum Random Bit Generator Service**<sup>609</sup> όπου χρησιμοποιείται μη ντετερμινιστική διάταξη τυχαιότητας η οποία βασίζεται στην κβαντική διαδικασία εκπομπής φωτονίων σε ημιαγωγούς.

Σύμφωνα με μια διαφορετική προσέγγιση, η εισαγωγή πραγματικής τυχαιότητας μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση αισθητήρων, οι οποίοι μπορούν να συλλέξουν δεδομένα από το φυσικό κόσμο, να τα ψηφιοποιήσουν και στη συνέχεια να γίνει επεξεργασία τους και χρήση τους σε μια αλγοριθμική-παραμετρική διάταξη σχεδιασμού μέσω κατάλληλου λογισμικού. Οι τιμές από τα πραγματικά δεδομένα μπορούν να επηρεάσουν τον αλγόριθμο, εισάγοντας πραγματική τυχαιότητα και στη συνέχεια εάν απαιτείται, είτε επαναπροωθούνται ψηφιακά σε άλλες συσκευές ως πληροφορία, είτε μέσω των ενεργοποιητών/μηχανισμών πραγματοποιείται κάποια ενέργεια που έχει καθοριστεί από τον αλγόριθμο στο φυσικό κόσμο, ολοκληρώνοντας με αυτόν τον τρόπο τη διαδικασία της διάδρασης. Οι αισθητήρες μπορούν πλέον να συνδέονται και με παραμετρικό λογισμικό όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της χρήσης αισθητήρων **Arduino**<sup>610</sup> με το παραμετρικό-αλγοριθμικό λογισμικό **Grasshopper**<sup>611</sup> μέσω plugin π.χ. **Firefly**<sup>612</sup>, **Heteroduino**<sup>613</sup>.

Με αυτές τις διατάξεις δημιουργούνται συστήματα αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ φυσικού (αναλογικού) και ψηφιακού κόσμου, είτε μεταξύ ψηφιακών συστημάτων. Οι δύο κύριες προσεγγίσεις αφορούν **α**. Στη συλλογή δεδομένων τα οποία ασύγχρονα μπορούν να επηρεάσουν τον σχεδιασμό διαμορφώνοντας τις τιμές συγκεκριμένων παραμέτρων, π.χ. η μορφή ενός κελύφους μπορεί να καθοριστεί από τις τυχαίες παραμέτρους ατμοσφαιρικών δεδομένων σε κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή (χρήση δεδομένων ως random number generator) **β**. Στη συλλογή δεδομένων σε

607 'RANDOM.ORG - True Random Number Service', ημερομηνία πρόσβασης 19 Αύγουστος 2020, <https://www.random.org/>.

608 'ANU Quantum Random Numbers Server', χ.χ., <https://qrng.anu.edu.au/>.

609 'Quantum Random Bit Generator Service', ημερομηνία πρόσβασης 19 Αύγουστος 2020, <http://random.irb.hr/>.

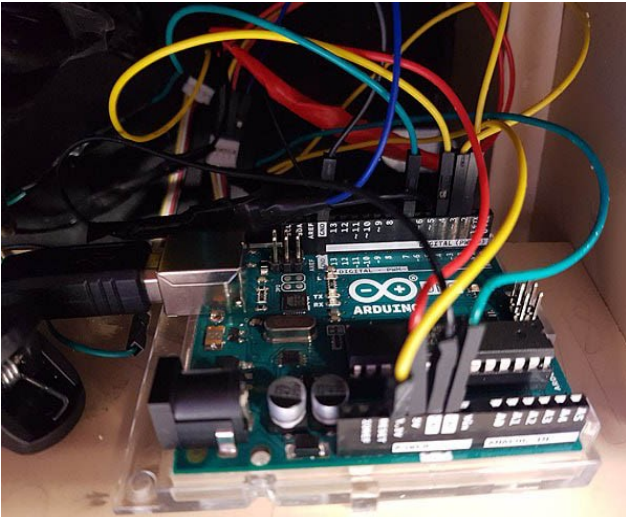
610 'Arduino - Home', ημερομηνία πρόσβασης 13 Αύγουστος 2020, <https://www.arduino.cc/>.

611 'Grasshopper - New in Rhino 6', ημερομηνία πρόσβασης 13 Αύγουστος 2020, <https://www.rhino3d.com/6/new/grasshopper>.

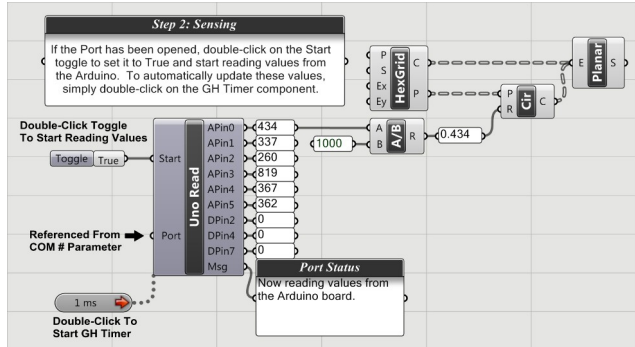
612 'Firefly Experiments', χ.χ., <http://fireflyexperiments.com/>.

613 'Heteroduino', Text, Food4Rhino, 12 Ιούνιος 2016, <https://www.food4rhino.com/app/heteroduino>.

πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο, προκειμένου να επιτυγχάνεται η αντίδραση της κατασκευής μέσω ενεργοποίησης μηχανισμών (π.χ. σκίαστρα, διαφράγματα, πιστόνια, κ.λπ.) ή άλλων εργαλείων (ρυθμιστές θερμοκρασίας, υγρασίας, φωτισμού, κ.λπ.). Σε κάθε περίπτωση, ο μελετητής σκόπιμα επιλέγει να απολέσει κάποιο βαθμό ελέγχου ώστε ένα συγκεκριμένο τμήμα του σχεδιασμού, της μορφής ή της δομής, να επηρεαστεί ή να καθοριστεί από την τυχαιότητα.



Εικόνα 45: Διάταξη μικροελεγκτή arduino. Πηγή: Arduino-Uno.jpg, Arduino Uno, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arduino-Uno.jpg>, εικόνα του/της: *Particitae*, άδεια: CC0 1.0, [Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/).



Εικόνα 46: Κώδικας Firefly διασύνδεσης arduino στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: [http://www.fireflyexperiments.com/s/110920\\_Firefly\\_Users\\_Guide.pdf](http://www.fireflyexperiments.com/s/110920_Firefly_Users_Guide.pdf), *Interactive prototyping. An introduction to physical computing using arduino, grasshopper and firefly*, άδεια: CC BY-NC-SA 3.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>.

## 12. Παράδειγμα #12 - Βελτιστοποίηση και Γενετικός αλγόριθμος - Ενεργειακές και γεωμετρικές παράμετροι

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα που υλοποιείται στο λογισμικό Grasshopper χρησιμοποιείται η γεννήτρια γεωμετρίας που χρησιμοποιήθηκε στην παράγραφο 1 Παράδειγμα #1 - Γεωμετρικές Παράμετροι I (μήκος, πλάτος, ύψος, περιστροφή) η οποία παραμετροποιείται έτσι ώστε να εξεταστεί με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου η μεταβολή της γεωμετρίας σε σχέση με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Το ζητούμενο αυτού του παραδείγματος είναι να βρεθεί η βέλτιστη γεωμετρική μορφή η οποία δέχεται στο χρονικό διάστημα από 15:00 έως 16:00 τη λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία. Οι γεωμετρικές παράμετροι που μπορούν να τροποποιηθούν είναι οι διαστάσεις (x) και (y) του παραλληλογράμμου στέψης, η διάσταση (x) της βάσης και η γωνία σχετικής περιστροφής μεταξύ των παραλληλογράμμων. Για τη χρήση των παραμέτρων ηλιασμού γίνεται χρήση του plugin **Ladybug**<sup>614</sup>, ενώ για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται γενετικός αλγόριθμος με τη χρήση του component **Galapagos**. Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τις σταθερές παραμέτρους και τις τιμές τους, καθώς και τις μεταβλητές παραμέτρους της συγκεκριμένης διάταξης, οι οποίες τροποποιούνται από τον γενετικό αλγόριθμο. Παρατηρείται ότι σε σχέση με το αρχικό παράδειγμα στην παράγραφο 1, απουσιάζουν τα random components και οι τιμές Seed, οι οποίες καθόριζαν με ψευδοτυχαίο τρόπο τις τιμές των μεταβλητών παραμέτρων. Η αρχική διαδικασία ήταν συνεπώς ψευδοτυχαία, ενώ η εισαγωγή του γενετικού αλγορίθμου την έχει μετατρέψει σε στοχαστική διαδικασία.

	Παράμετρος	Περιγραφή	Δυνατότητα χρήσης τυχαιότητας
1	Base X	Διάσταση παραλληλογράμμου Βάσης κατά X	Ορίζεται σταθερή τιμή: 1
2	Base Y	Διάσταση παραλληλογράμμου Βάσης κατά Y	Ελέγχεται από τον γενετικό αλγόριθμο. Εύρος από 0.1 έως 1
3	Top X	Διάσταση παραλληλογράμμου Στέψης κατά X	Ελέγχεται από τον γενετικό αλγόριθμο. Εύρος από 0.1 έως 1
4	Top Y	Διάσταση παραλληλογράμμου Στέψης κατά Y	Ελέγχεται από τον γενετικό αλγόριθμο. Εύρος από 0.1 έως 1
5	Height	Ύψος	Ορίζεται σταθερή τιμή: 4
6	Rotation	Σχετική περιστροφή σε ° σε μεταξύ των δύο παραλληλογράμμων	Ελέγχεται από τον γενετικό αλγόριθμο
7	Erw data	Δεδομένα καιρικών συνθηκών σε ψηφιακή μορφή	Radiation input

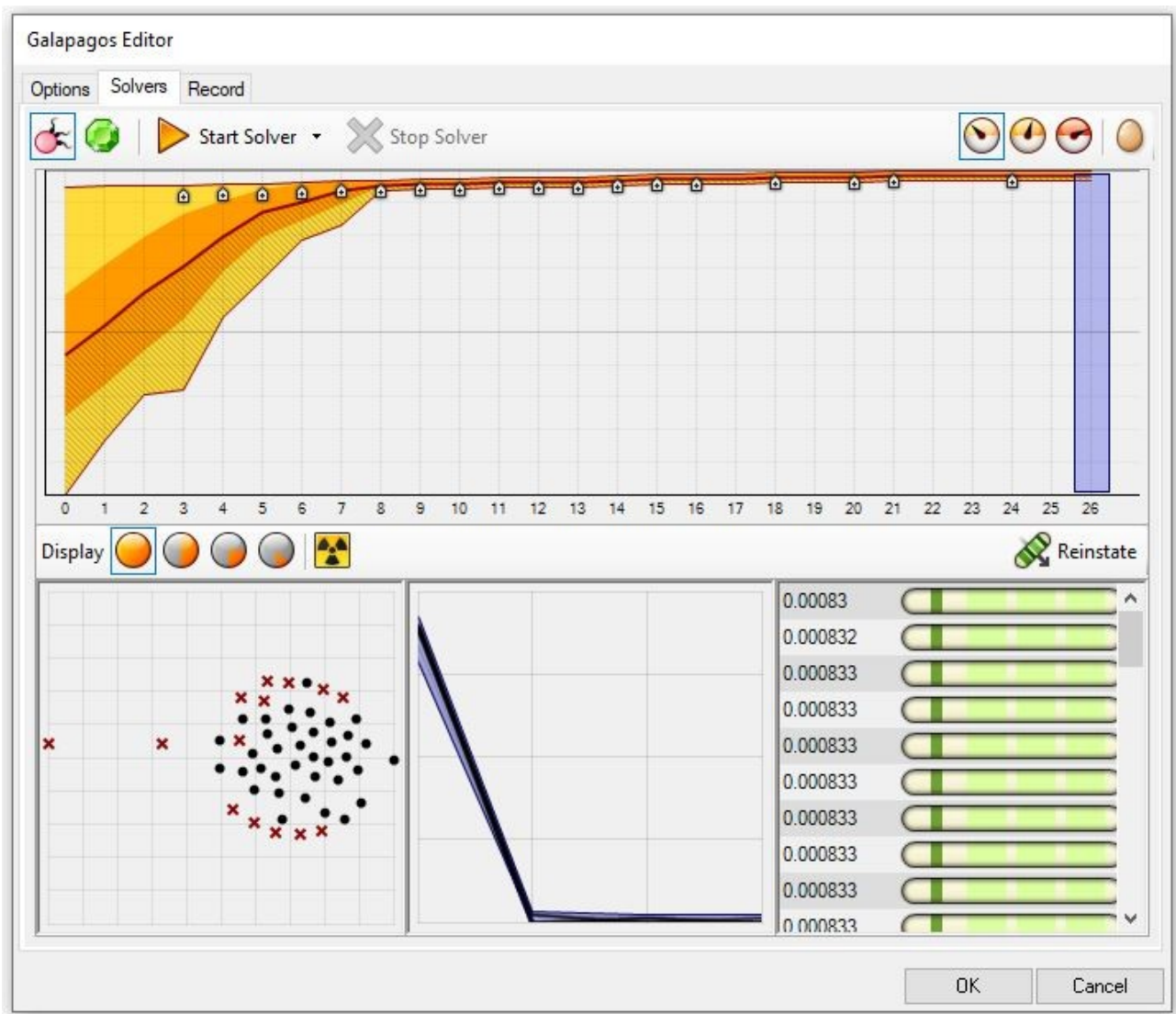
Πίνακας 5: Παράμετροι παραδείγματος: Γεωμετρικές Παράμετροι. Πηγή: Τ. Κουμτζόγλου.

Οι μεταβλητές παράμετροι #2, #3, #4, και #6 αποτελούν τα 4 γονίδια του αλγορίθμου τα οποία συνδυάζονται με βάση τις αρχές **διασταύρωση** (crossover), **αντιστροφή** (inversion) και **μετάλλαξη** (mutation), έτσι ώστε να προκύψει η βελτιστοποίηση με βάση το επιδιωκόμενο **fitness**. Παρατηρείται ότι η διασπορά των λύσεων της 26ης γενεάς είναι περιορισμένη (Εικόνα 47 κάτω αριστερά) ενώ διακρίνονται τα 4 διαφορετικά γονίδια σε πράσινο χρώμα (Εικόνα 47 κάτω δεξιά).

Στην Εικόνα 48 απεικονίζονται διαφορετικά αποτελέσματα κατά την εξέλιξη του αλγορίθμου με την αριστερή εικόνα να αποτελεί αρχική τυχαία παραλλαγή αφετηρίας, την κεντρική εικόνα ένα

<sup>614</sup> 'Ladybug Tools | Home Page', ημερομηνία πρόσβασης 30 Αύγουστος 2020, <https://www.ladybug.tools/>.

αποτέλεσμα κατά την εξέλιξη του αλγορίθμου περίπου στην 13η γενεά και τέλος δεξιά ένα από τα αποτελέσματα της 26ης γενεάς όπου διαμορφώνεται η βέλτιστη γεωμετρία, με βάση τις μεταβαλλόμενες παραμέτρους όπου η προσπίπτουσα ακτινοβολία ελαχιστοποιείται για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα από 15:00-16:00. Δεδομένα του γενετικού αλγορίθμου για τα γονιδιώματα της 26ης γενεάς παρουσιάζει ο Πίνακας 6, όπου αναγράφονται τα ποσοστά γονιδίων και οι τιμές διαφοροποίησης για τις μεταλλάξεις.

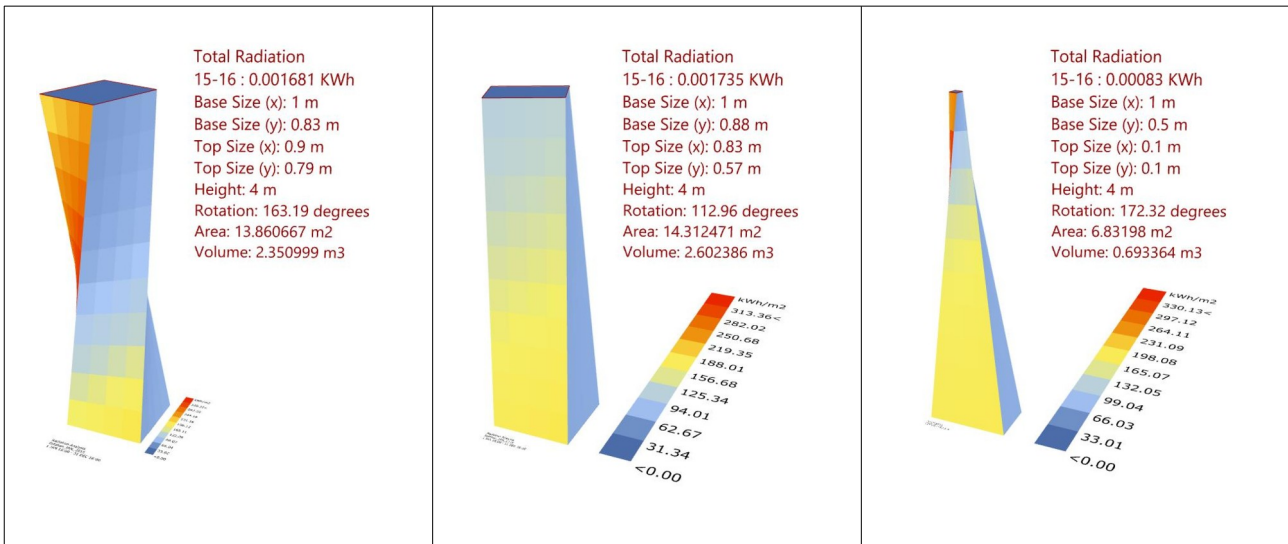


Εικόνα 47: Περιβάλλον Galapagos component στο λογισμικό grasshopper για παράδειγμα με 4 γονίδια. Παρατηρείται ότι η λύση βελτιστοποιείται σταδιακά και καταλήγει σε σχετικά σταθερό αποτέλεσμα μετά από 26 γενεές γονιδίων. Τα 4 διαφορετικά γονίδια απεικονίζονται γραφικά κάτω δεξιά ως πράσινα παραλληλόγραμμα. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Παρατηρείται ότι ο μελετητής στο συγκεκριμένο παράδειγμα: **α.** διαμορφώνει τον αλγόριθμο, **β.** καθορίζει τις σταθερές παραμέτρους, **γ.** ορίζει τις μεταβλητές και τα όρια αυτών **δ.** ορίζει την παράμετρο Fitness που αποτελεί το κριτήριο αξιολόγησης της κάθε παραλλαγής. Αν και μπορεί να υπάρχει μια ασαφής γενική εικόνα για το πιθανό αποτέλεσμα, αυτό δεν είναι προκαθορισμένο και δεν μπορεί να είναι γνωστό, πριν την ολοκλήρωση του γενετικού αλγορίθμου. Το συγκεκριμένο



παράδειγμα είναι σχετικά απλό και μπορεί να υπάρχει μια στοιχειώδης πρόβλεψη για το πιθανό αποτέλεσμα. Πιο σύνθετα όμως παραδείγματα έχουν σαφώς μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και επομένως το βελτιστοποιημένο προϊόν του αλγορίθμου δεν μπορεί να προβλεφθεί. Υπό αυτή την έννοια πρόκειται για μια **στοχαστική διαδικασία**, καθώς παράγεται μια μη προβλέψιμη λύση, η οποία υπόκειται σε συγκεκριμένους περιορισμούς.

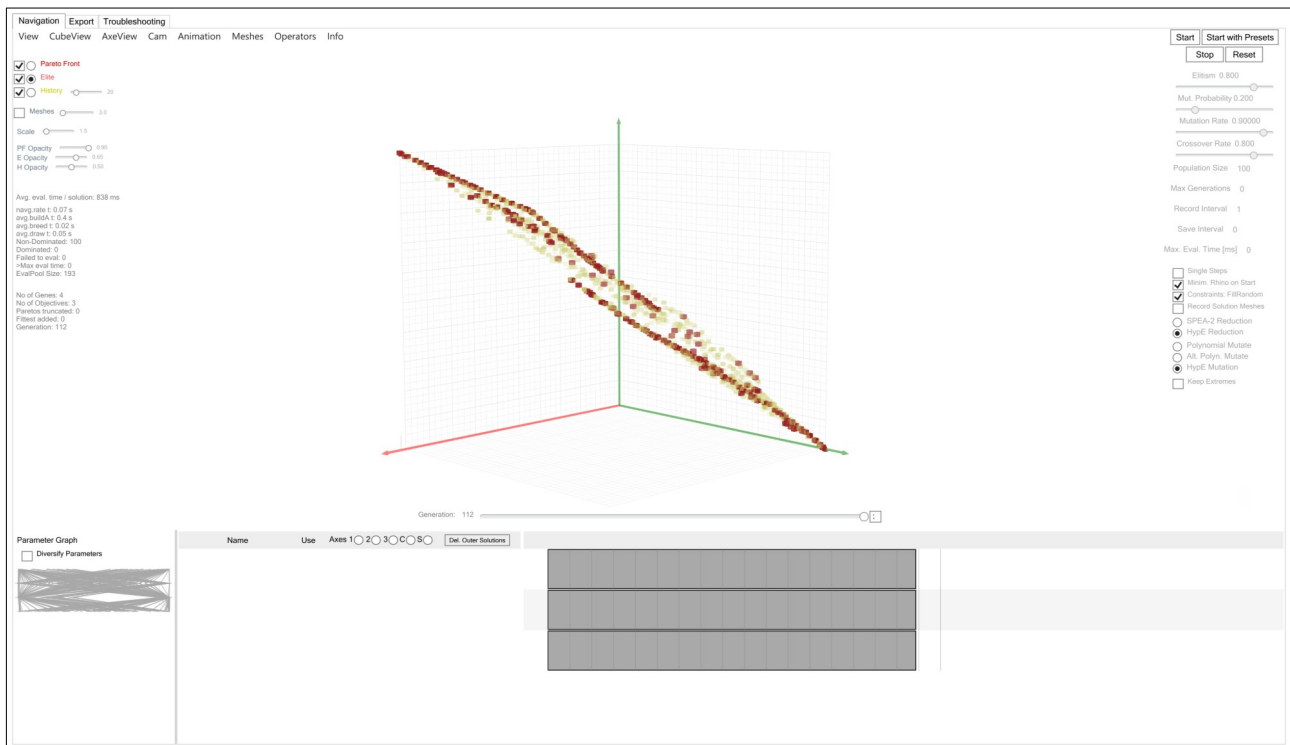


Εικόνα 48: Αποτελέσματα παραμετρικού γενετικού αλγορίθμου (genomes/γονιδιώματα) στο λογισμικό Grasshopper με τη χρήση του component Galapagos για 4 γονίδια. Γονιδίωμα αρχικής γενεάς (αριστερά), γονιδίωμα ενδιάμεσης γενεάς (κέντρο) και γονιδίωμα τελικής γενεάς (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

<p><b>Generation 26</b>                  { Bio-Diversity: 0.041  <b>Genome[0]</b>, Fitness=0.00, Genes [91% · 0% · 0% · 0%]                  { Record: Point Mutation at index 0: 0.8838 -&gt; 0.7919 }  <b>Genome[1]</b>, Fitness=0.00, Genes [90% · 0% · 0% · 0%]                  { Record: Genome was mutated to avoid collision                  Record: Genome was mutated to avoid collision }  <b>Genome[2]</b>, Fitness=0.00, Genes [90% · 0% · 0% · 0%]                  { Record: Genome was mutated to avoid collision                  Record: Genome was mutated to avoid collision                  Record: Genome was mutated to avoid collision                  Record: Genome was mutated to avoid collision }</p>	<p><b>Genome[3]</b>, Fitness=0.00, Genes [90% · 0% · 0% · 0%]                  { Record: Point Mutation at index 3: 0.0 -&gt; 0.0027                  Record: Genome was mutated to avoid collision                  Record: Genome was mutated to avoid collision                  Record: Genome was mutated to avoid collision }  <b>Genome[4]</b>, Fitness=0.00, Genes [89% · 0% · 0% · 0%]                  { Record: Genome was mutated to avoid collision                  Record: Genome was mutated to avoid collision }  <b>Genome[5]</b>, Fitness=0.00, Genes [89% · 0% · 0% · 0%]                  { Record: Point Mutation at index 1: 0.0 -&gt; -0.0032                  Record: Genome was mutated to avoid collision                  Record: Genome was mutated to avoid collision }</p>
---	---

Πίνακας 6: Δεδομένα γενετικού αλγορίθμου για τα 6 πρώτα γονιδιώματα της 26ης γενεάς. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

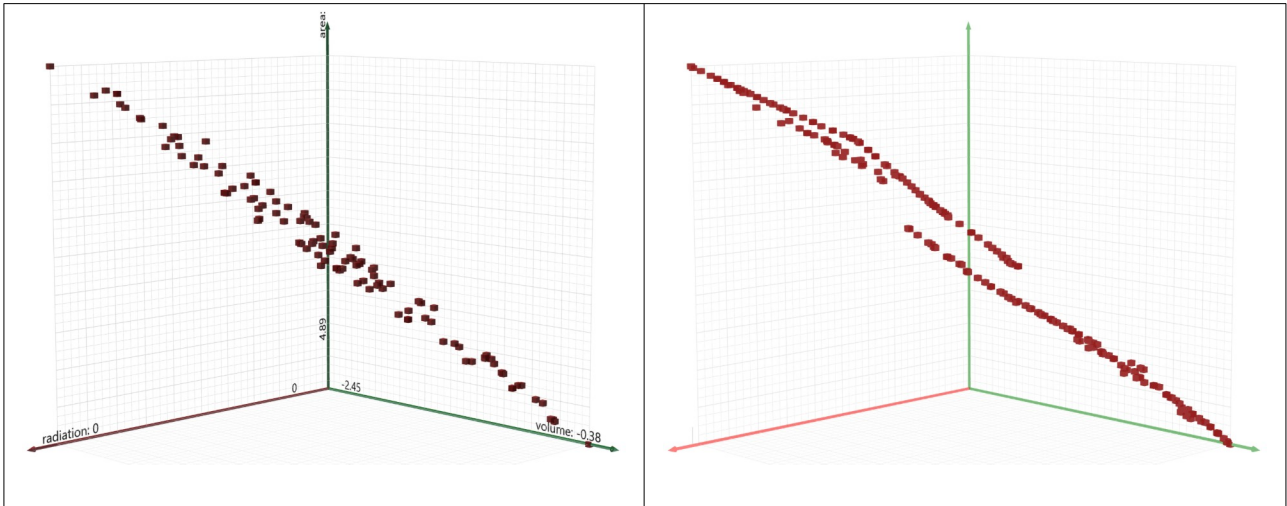
Στην ίδια παραμετρική διάταξη, μπορούν να οριστούν ως στόχοι βελτιστοποίησης **3 τιμές αντί για 1 που είχε το αρχικό παράδειγμα**. Σε αυτήν την περίπτωση, η πολυπλοκότητα της διαδικασίας βελτιστοποίησης αυξάνεται σημαντικά εξαιτίας της ανάγκης παράλληλης βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων. Για την βελτιστοποίηση αυτής της διάταξης, γίνεται χρήση του component **Octopus** (Εικόνα 49) και εφαρμόζεται βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων. Οι λύσεις που παράγονται είναι στην ουσία μια ομάδα από «ισοδύναμες» λύσεις και τελικά θα πρέπει να αποφασιστεί ποια θα επιλεγεί από το σύνολο των λύσεων μέσω διαδικασιών **MCDM Multiple Criteria Decision Making** ή **MCDA – Multiple Criteria Decision Analysis**).



Εικόνα 49: Περιβάλλον Octopus component στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουμιτζόγλου.

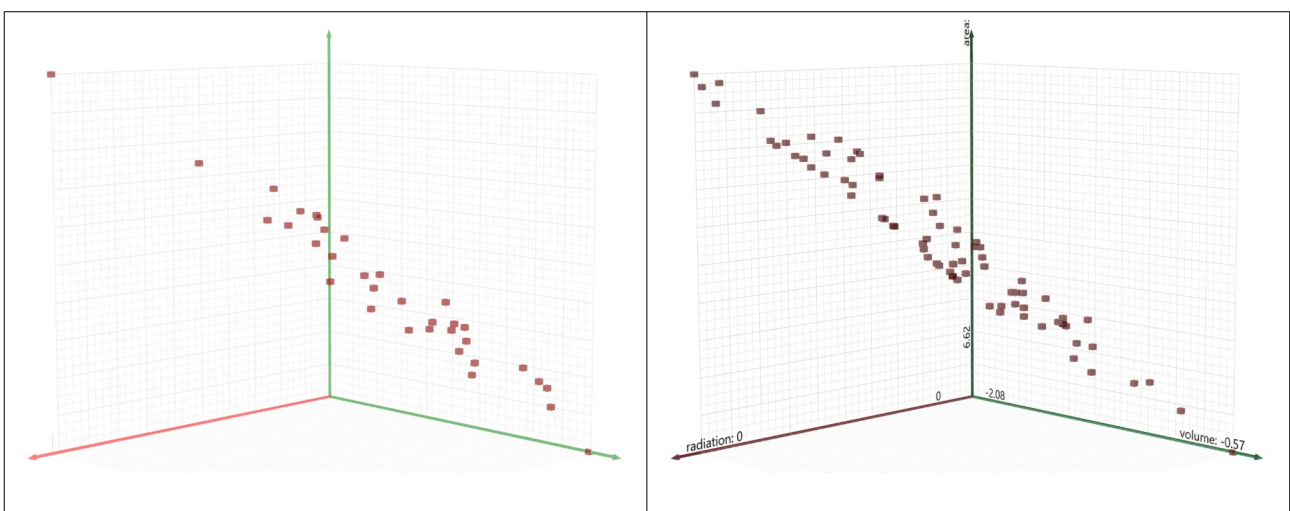
Στο παράδειγμα αναφοράς οι μεταβλητές είναι 5: **1. Base (x) 2. Base (y) 3. Top (x) 4. Top (y) 5. Rotation** ενώ οι στόχοι είναι **3: α. Η ελαχιστοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας β. Η μεγιστοποίηση του όγκου της γεωμετρίας και γ. Η ελαχιστοποίηση της επιφάνειας.**

Στην Εικόνα 50 απεικονίζεται το **μέτωπο Pareto** για τη συγκεκριμένη παραμετρική διάταξη των 4 μεταβλητών και των 3 στόχων, για την γενεά 1 του γενετικού αλγορίθμου (αριστερά), και τη γενεά 112 του γενετικού αλγορίθμου (δεξιά) από το λογισμικό **Octopus** με τη στρατηγική HyrE Reduction και HyrE Mutation. Παρατηρείται ότι μετά από 112 γενεές του γενετικού αλγορίθμου οι λύσεις έχουν μικρότερη διασπορά και σχηματίζουν ευθείες γραμμές αντί για συστάδες σημείων (γενεά 1) στην γραφική παράσταση. Στην Εικόνα 51 απεικονίζονται οι **Elite λύσεις** για την 1η και 112η γενεά αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι η διασπορά των Elite λύσεων παραμένει παρόμοια, ενώ η ποσότητά τους έχει αυξηθεί, διότι στο συγκεκριμένο παράδειγμα χρησιμοποιήθηκε συντελεστής Elitism 0.80 (δηλαδή ότι οι νέες λύσεις στην κάθε επόμενη γενεά προκύπτουν κατά 80% από τις προϋπάρχουσες Elite λύσεις, αντί για το σύνολο της γενεάς) με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο αριθμός βελτιστοποιημένων Elite λύσεων.



Εικόνα 50: Περιβάλλον *Ocortus component* στο λογισμικό *Grasshopper*. Μέτωπο Pareto για 4 παραμέτρους και 3 στόχους στην γενεά 1 (αριστερά) και γενεά 112 (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων (αριστερά) και οι τιμές των στόχων (δεξιά) για τη γενεά 111 του μετώπου Pareto μετά από την εξελικτική βελτιστοποίηση. Παρατηρείται ότι, σε αντίθεση με την περίπτωση του ενός στόχου (όπως πραγματοποιήθηκε προηγουμένως με τη χρήση του *Galapagos*), δεν προκύπτει μία μοναδική βέλτιστη λύση, αλλά μια ομάδα «ισοδύναμων» λύσεων οι οποίες χαρακτηρίζονται ως λύσεις **Pareto Front**. Για αυτές τις λύσεις, δηλαδή σε κάθε τριάδα αποτελεσμάτων στόχων, ένας στόχος δεν μπορεί να βελτιστοποιηθεί περισσότερο, χωρίς να επιδεινωθεί τουλάχιστον ένας άλλος στόχος από την ίδια τριάδα. Η εσωτερική αυτή ισορροπία της κάθε λύσης δίνει λύσεις με αρκετά μεγάλες διαφοροποιήσεις στις παραμέτρους και στα αποτελέσματα αυτών. Ο μελετητής θα πρέπει στη συνέχεια να επιλέξει μία από αυτές με βάση τη βαρύτητα του κάθε κριτηρίου, αλλά και τη συνεκτίμηση άλλων παραμέτρων που δεν είναι εφικτό ή δεν επιδιώκεται να εισαχθούν στον αλγόριθμο, π.χ. αρχιτεκτονικά, αισθητικά, διαισθητικά ή άλλα κριτήρια.



Εικόνα 51: Περιβάλλον *Ocortus component* στο λογισμικό *Grasshopper*. Elite λύσεις για 4 παραμέτρους και 3 στόχους στην γενεά 1 (αριστερά) και γενεά 112 (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Generation	111	Generation	111
0.00154722040556189		0.00105698064554426	
0.586409388148926		-1.082614	
0.00169374178670658		8.277375	
0.999751367339795			
0.00215366393192364		0.000978763468880267	
0.37847785735715		-0.94839	
0.0011637391773176		7.776776	
0.998185983938205			
0.994955911989476		0.00143128874110092	
0.230213488221274		-1.983815	
0.999902281335823		12.535516	
0.291717821208944			
0.999309287929929		0.00145543121113987	
0.00829945943130111		-2.118525	
0.999292670727964		13.336419	
0.962502034791346			
0.0782675044586611		0.00122577505436632	
0.973928682962216		-1.339992	
0.00241667730723326		9.328336	
0.969415826279129			
0.00128840404621201		0.000859495201784313	
0.234765750869533		-0.745808	
0.000386544393970596		6.827456	
0.736336116134416			

Πίνακας 7: Octopus component στο λογισμικό Grasshopper. Τιμές παραμέτρων και στόχων για μερικές από τις λύσεις Pareto front της 11ης γενιάς. Τιμές παραμέτρων (αριστερά) και τιμές στόχων (δεξιά). Η αρνητική τιμή του στόχου 2 απαιτείται για τη μεγιστοποίηση της τιμής του από το λογισμικό. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Η χρήση γενετικών αλγορίθμων μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε ζητήματα που αφορούν στη βελτιστοποίηση της μορφής και της δομής όπως παρουσιάζεται στο **Παράρτημα IV** της διατριβής.

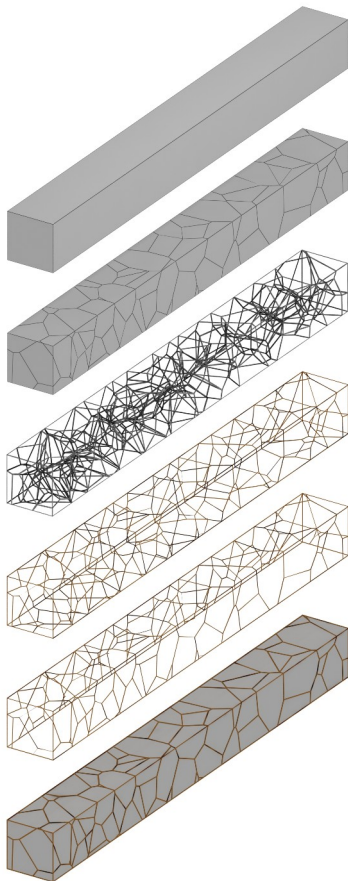
### 13. Παράδειγμα #13 - Τυχαιότητα στη δομή

Ένα άλλο απλό παράδειγμα παραγωγής ψευδοτυχαίας γεωμετρίας είναι αυτό που παρουσιάζεται στη συνέχεια. Στην ακόλουθη διεργασία, ένα παραλληλεπίπεδο διασπάται με τη χρήση κώδικα **MAXScript** από το script **Fracture Voronoi**<sup>615</sup> σε επιμέρους θραύσματα στο χώρο, στηριζόμενο σε αρχές των διαγραμμάτων Voronoi<sup>616</sup>, και στη συνέχεια μετασχηματίζεται σε χωροδικτύωμα με βάση αυτή την τυχαία διάσπαση (Εικόνα 52).

615 'Fracture Voronoi | ScriptSpot', ημερομηνία πρόσβασης 15 Αύγουστος 2020, <http://www.scriptspot.com/3ds-max/scripts/fracture-voronoi>.

616 'Voronoi Diagram', στο *Wikipedia*, 25 Αύγουστος 2023, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Voronoi\\_diagram&oldid=1172180711](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Voronoi_diagram&oldid=1172180711).

Παρ' όλο που από το συγκεκριμένο script απουσιάζει η παράμετρος του Seed, η διεργασία της διάσπασης βασίζεται σε τυχαία μη επαναλαμβανόμενη ακολουθία αριθμών, με συνέπεια κάθε φορά που εφαρμόζεται ο αλγόριθμος να παράγεται διαφορετικό αποτέλεσμα, παρ' όλο που οι παράμετροι κατάτμησης και η γεωμετρία βάσης παραμένουν ίδιες (Εικόνα 53). Έτσι, προκύπτουν μη προβλέψιμες παραλλαγές κατατμήσεων με διαφορετικά, αλλά παρόμοιου τύπου γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

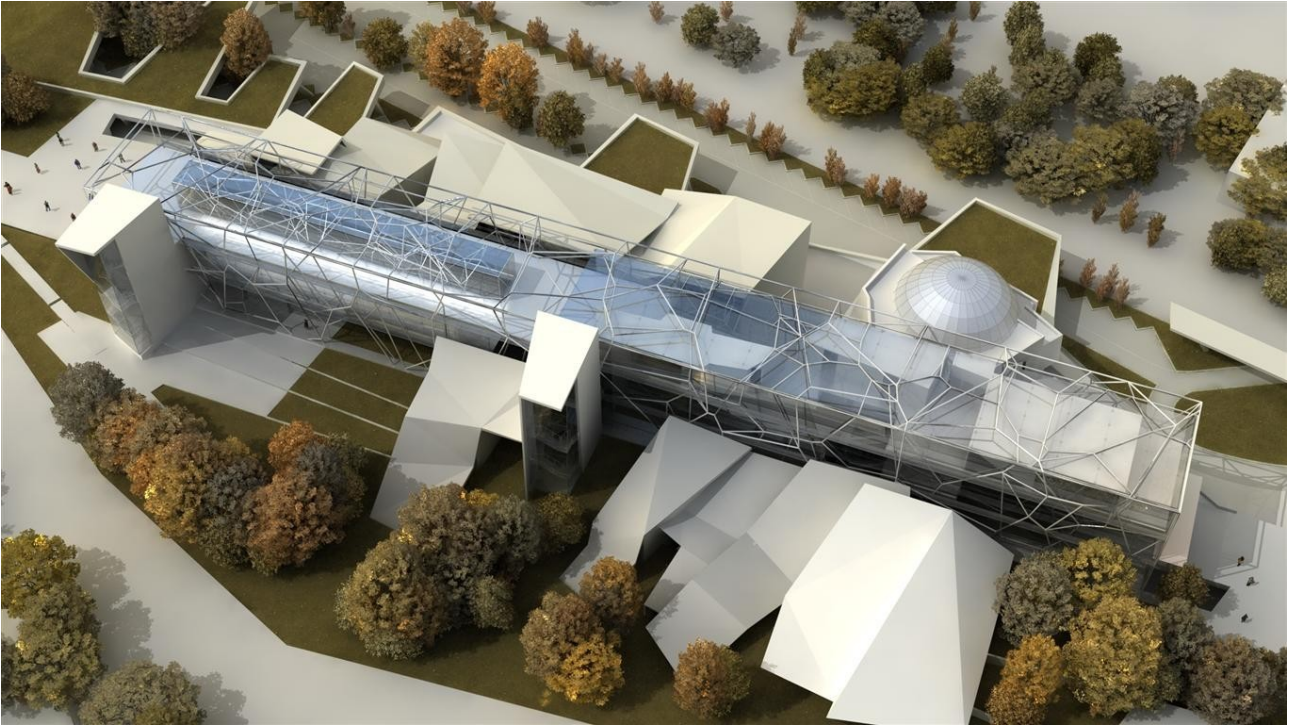


*Εικόνα 52: Διάσπαση όγκου παραλληλεπιπέδου και μετασχηματισμός σε γεωμετρία χωροδικτυώματος και κελύφους με τη χρήση του MAXScript Fracture Voronoi. Πηγή: Αρχιτεκτονικός διαγωνισμός Istanbul Disaster Prevention and Education Centre\_Pandora's Box. Arsis Architects, T. Κουιμτζόγλου, I. Παπαματθαίου, 2011.*

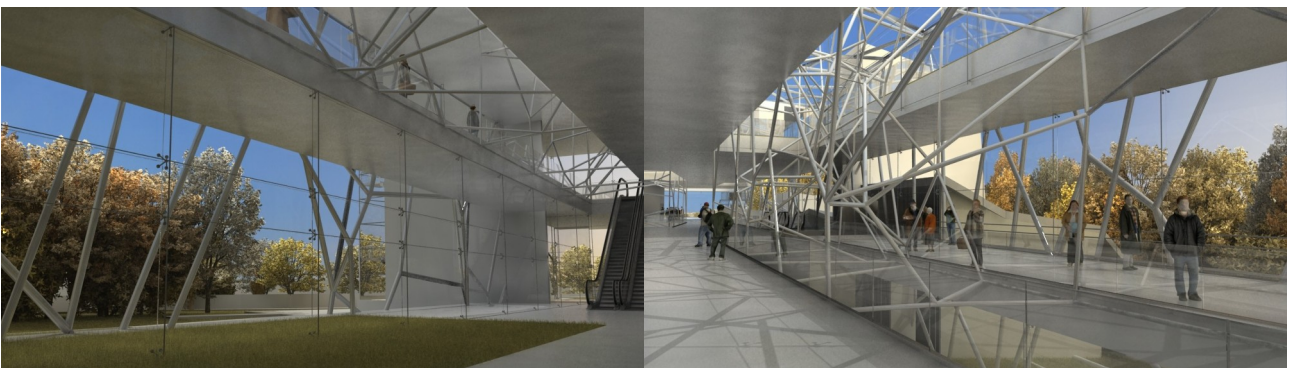


*Εικόνα 53: Παραλλαγές τυχαίας διάσπασης όγκου παραλληλεπιπέδου με τη χρήση του MAXScript Fracture Voronoi με τις ίδιες παραμέτρους και στο ίδιο γεωμετρικό υπόβαθρο. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου 2020.*

Παράδειγμα χρήσης διάταξης νορονοί σε φέροντα οργανισμό είχε προταθεί σε αρχιτεκτονικό διαγωνισμό ο οποίος δημιουργήθηκε με τον παραπάνω αλγόριθμο από τον γράφοντα.

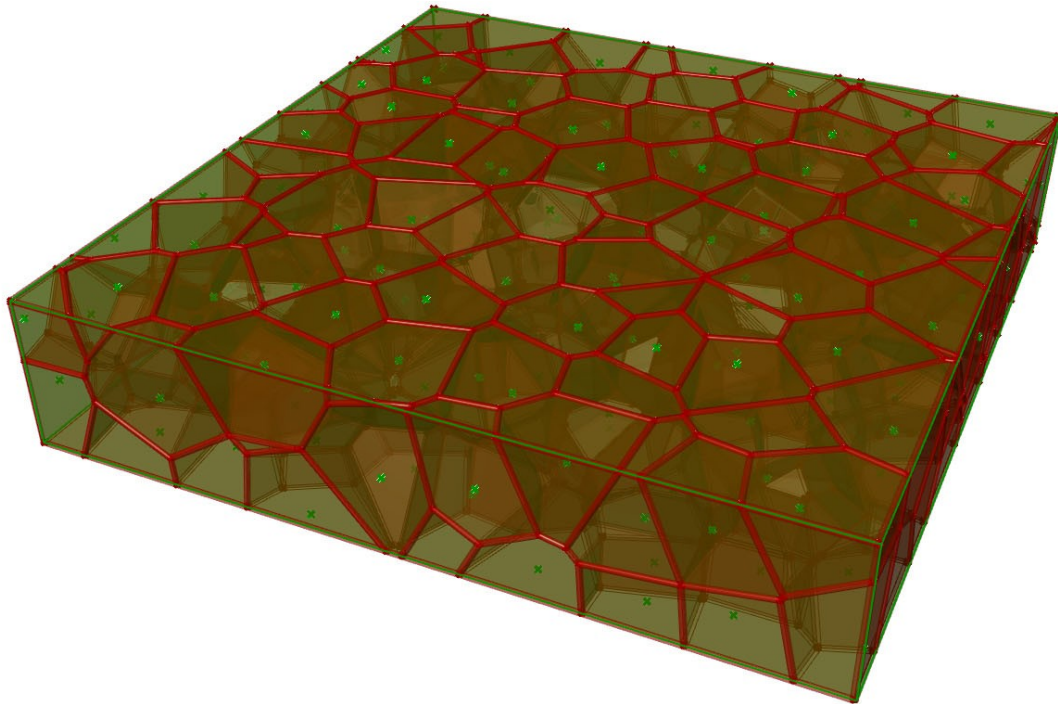


Εικόνα 54: Παράδειγμα εφαρμογής φέροντος οργανισμού κτίσματος με δομή voronoi με τη χρήση του MAXScript Fracture Voronoi.. Αρχιτεκτονικός διαγωνισμός Istanbul Disaster Prevention and Education Centre\_Pandora's Box. Arsis Architects, Τ. Κουιμτζόγλου, Ι. Παπαματθαίου, 2011.

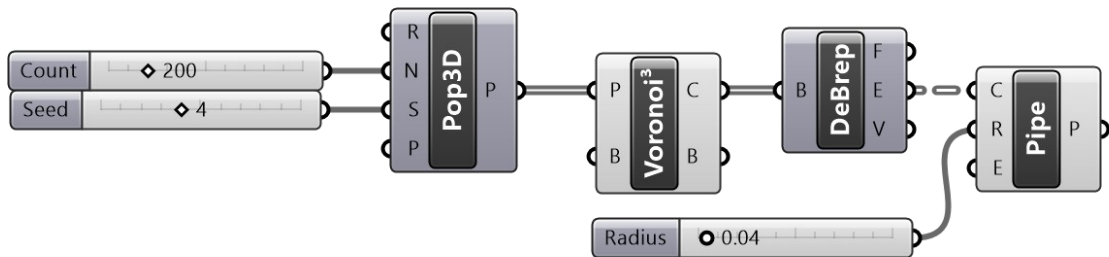


Εικόνα 55: Παράδειγμα εφαρμογής φέροντος οργανισμού κτίσματος με δομή voronoi με τη χρήση του MAXScript Fracture Voronoi.. Αρχιτεκτονικός διαγωνισμός Istanbul Disaster Prevention and Education Centre\_Pandora's Box. Arsis Architects, Τ. Κουιμτζόγλου, Ι. Παπαματθαίου, 2011.

Στο ίδιο γεωμετρικό αποτέλεσμα μπορεί να καταλήξει κανείς με τη χρήση διαφορετικού λογισμικού και διαφορετικού αλγορίθμου. Με χρήση του λογισμικού Grasshopper, ο αλγόριθμος κατάτμησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 57. Ο αλγόριθμος δημιουργεί 200 σημεία στο χώρο με τυχαίες συντεταγμένες εντός των ορίων όγκου παραλληλεπίπεδου. Με Seed=4 δημιουργούνται 199 γεωμετρικά τρισδιάστατα κελιά Voronoi με τυχαία σχήματα. Στην συνέχεια, οι ακμές των σχημάτων χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία πλέγματος κυλινδρικής διατομής ακτίνας 0.06 το οποίο απεικονίζεται στην Εικόνα 56.



Εικόνα 56: Ψηφιακό γεωμετρικό αποτέλεσμα αλγορίθμου κατάτμησης σε τυχαία 3d κελιά Voronoi με το λογισμικό Grasshopper. Παράμετροι: 200 σημεία, Seed: 4, ακτίνα R ράβδων: 0.06. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.



Εικόνα 57: Αλγόριθμος κατάτμησης σε τυχαία 3d κελιά Voronoi με το λογισμικό Grasshopper. Παράμετροι: 200 σημεία, Seed 4, ακτίνα R ράβδων πλαισίου ακμών: 0.04. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

## Βιβλιογραφία Παραρτήματος III

- 'ANU Quantum Random Numbers Server', χ.χ. <https://qrng.anu.edu.au/>.
- 'Arduino - Home'. Ημερομηνία πρόσβασης 13 Αύγουστος 2020. <https://www.arduino.cc/>.
- 'Firefly Experiments', χ.χ. <http://fireflyexperiments.com/>.
- Food4Rhino. 'Heteroduino'. Text, 12 Ιούνιος 2016. <https://www.food4rhino.com/app/heteroduino>.
- 'Fracture Voronoi | ScriptSpot'. Ημερομηνία πρόσβασης 15 Αύγουστος 2020. <http://www.scriptspot.com/3ds-max/scripts/fracture-voronoi>.
- 'Grasshopper - New in Rhino 6'. Ημερομηνία πρόσβασης 13 Αύγουστος 2020. <https://www.rhino3d.com/6/new/grasshopper>.
- 'Ladybug Tools | Home Page'. Ημερομηνία πρόσβασης 30 Αύγουστος 2020. <https://www.ladybug.tools/>.
- McNeel Forum. 'Real Random Numbers', 25 Φεβρουάριος 2018. <https://discourse.mcneel.com/t/real-random-numbers/56072/6>.
- 'Non-Uniform Rational B-Spline'. Στο *Wikipedia*, 17 Αύγουστος 2023. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Non-uniform\\_rational\\_B-spline&oldid=1170893542](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Non-uniform_rational_B-spline&oldid=1170893542).
- 'Para 3d | 3ds Max | Autodesk App Store', 20 Απρίλιος 2020. <https://apps.autodesk.com/3DSMAX/en/Detail/Index?id=7147262754532706746&appLang=en&os=Win64>.
- 'Quantum Random Bit Generator Service'. Ημερομηνία πρόσβασης 19 Αύγουστος 2020. <http://random.irb.hr/>.
- 'RANDOM.ORG - True Random Number Service'. Ημερομηνία πρόσβασης 19 Αύγουστος 2020. <https://www.random.org/>.
- 'Voronoi Diagram'. Στο *Wikipedia*, 25 Αύγουστος 2023. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Voronoi\\_diagram&oldid=1172180711](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Voronoi_diagram&oldid=1172180711).
- 'What Is Morphing in Animation? Morphing vs Tweening | Adobe'. Ημερομηνία πρόσβασης 25 Σεπτέμβριος 2023. <https://www.adobe.com/creativecloud/animation/discover/morphing-in-animation.html>.



## Ευρετήριο εικόνων Παραρτήματος III

Τα πνευματικά δικαιώματα των εικόνων ανήκουν στους αντίστοιχους κατόχους τους.

Εικόνα 1: Παράδειγμα 1. Αλγόριθμος παραμετρικής διάταξης παραλληλεπιπέδου στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	402
Εικόνα 2: Παράδειγμα: Αλγοριθμική παραμετρική διάταξη παραλληλεπιπέδου χωρίς εισαγωγή τυχαιών τιμών παραμέτρων στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	402
Εικόνα 3: Παράδειγμα #1: Αλγοριθμική παραμετρική διάταξη παραλληλεπιπέδου στο λογισμικό Grasshopper σε τελική μορφή, η οποία συμπεριλαμβάνει τη γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών με τα πολλαπλά seeds, τους βοηθητικούς αλγορίθμους καταγραφής εμβαδού και όγκου και απεικόνισης δεδομένων και αποθήκευσης. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	404
Εικόνα 4: Παράδειγμα #1: 36 προϊόντα αλγοριθμικής παραμετρικής διάταξης παραλληλεπιπέδου στο λογισμικό Grasshopper με διαφοροποιήσεις στις παραμέτρους διαστάσεων επιπέδων βάσης και στέψης καθώς και περιστροφής επιπέδου στέψης. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	405
Εικόνα 5: Παράδειγμα #2 Αλγόριθμος παραμετρικής διάταξης παραλληλεπιπέδων σε ορθογωνικό κάναβο στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	406
Εικόνα 6: Παράδειγμα #2: Αλγοριθμική παραμετρική διάταξη παραλληλεπιπέδων σε ορθογωνικό κάναβο χωρίς εισαγωγή τυχαιών τιμών παραμέτρων στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	406
Εικόνα 7: Παράδειγμα #2: Αλγόριθμος δημιουργίας τυχαιών τιμών Seed σε random component με τη χρήση συνάρτησης που περιλαμβάνει τιμές μέτρησης χρόνου και δημιουργία περισσότερων διαφορετικών τιμών seed από αυτόν. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	408
Εικόνα 8: Παράδειγμα #2: Αλγοριθμική παραμετρική διάταξη παραλληλεπιπέδων σε ορθογωνικό κάναβο στο λογισμικό Grasshopper σε τελική μορφή, η οποία συμπεριλαμβάνει τη γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών με τα πολλαπλά seeds, τους βοηθητικούς αλγορίθμους καταγραφής εμβαδού και όγκου και απεικόνισης δεδομένων και αποθήκευσης. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	409
Εικόνα 9: Παράδειγμα #2: Παραλλαγές αλγοριθμικής παραμετρικής διάταξης παραλληλεπιπέδων σε ορθογωνικό κάναβο στο λογισμικό Grasshopper, κατά την οποία 8 παράμετροι λαμβάνουν ψευδοτυχαίες αριθμητικές τιμές. Παράλληλα πραγματοποιείται καταγραφή δεδομένων για κάθε μοναδική παραλλαγή. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	410
Εικόνα 10: 2d morphing εικόνας ανθρώπου σε εικόνα γάτας σε 11 στάδια. Πηγή: Morph11.jpg, Einzelbild aus einer Reihe zur Demonstration des Morphings. Selbst erzeugtes Bild, mit selbst programmiertem Programm für Studienzwecke, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Morph11.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Morph11.jpg</a> , Benutzer:Häger , εικόνα του/της: Benutzer:Häger , άδεια: public domain.....	411
Εικόνα 11: Morphing με το λογισμικό Parametric Array στο 3ds Max. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	412
Εικόνα 12: Παραγωγή επιφάνειας NURBS από δύο καμπύλες οδηγούς point CURVES. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	412
Εικόνα 13: Επιφάνειες NURBS διπλής καμπυλότητας (άνω / κόκκινη και κάτω / πράσινη) οι οποίες θα λειτουργήσουν ως γενέτηρες / όρια για τη διαμόρφωση χωροδικτυώματος. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	414
Εικόνα 14: Γεωμετρικό αποτέλεσμα παραμετρικού αλγορίθμου στο λογισμικό Grasshopper για τη δημιουργία χωροδικτυώματος οριζόμενο από δύο επιφάνειες NURBS διπλής καμπυλότητας. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	414
Εικόνα 15: Παραμετρικός αλγόριθμος στο λογισμικό Grasshopper για τη δημιουργία χωροδικτυώματος οριζόμενο από επιφάνειες NURBS διπλής καμπυλότητας. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου.....	414
Εικόνα 16: Γεωμετρικό αποτέλεσμα παραμετρικού αλγορίθμου στο λογισμικό Grasshopper για τη δημιουργία χωροδικτυώματος οριζόμενο από δύο επιφάνειες NURBS διπλής καμπυλότητας. Διακρίνονται με πράσινο χρώμα οι ράβδοι του δικτυώματος που προκύπτουν αυτόματα από την παραμετροποίηση της διαδικασίας και την ολοκλήρωση του αλγορίθμου. Πηγή: T. Κουιμτζόγλου..	415

Εικόνα 17: Μετρήσεις μήκους δευτερευουσών ράβδων του παραδείγματος στην Εικόνα 14. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	415
Εικόνα 18: Paneling – Βασική γεωμετρική μορφή / Panel. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	416
Εικόνα 19: Paneling – Επιφάνεια NURBS διπλής καμπυλότητας ως κύριο γεωμετρικό υπόβαθρο (υπόβαθρο Α). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	416
Εικόνα 20: Paneling – Καταμερισμός του υποβάθρου σε 8X6 περιοχές (υπόβαθρο Α). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	416
Εικόνα 21: Paneling – Προσαρμογή του βασικού panel σε 8X6 κελιά (υπόβαθρο Α). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	416
Εικόνα 22: Paneling – Το βασικό panel κάτω αριστερά και οι 8X6=48 προσαρμογές του στην κύρια γεωμετρική μορφή σε μορφή αναπτύγματος (υπόβαθρο Α). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	417
Εικόνα 23: Paneling – Παραμετρικός αλγόριθμος από το λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	417
Εικόνα 24: Paneling – Το βασικό panel κάτω αριστερά και οι 10X10=100 προσαρμογές του στην κύρια γεωμετρική μορφή σε μορφή αναπτύγματος (υπόβαθρο Α). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	418
Εικόνα 25: Paneling – Προσαρμογή του βασικού panel σε 10X10 κελιά αλλά σε διαφορετικό γεωμετρικό υπόβαθρο (υπόβαθρο Β). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	418
Εικόνα 26: Παράδειγμα #7, populate, παράδειγμα α: Αλγόριθμος δημιουργίας σημείων σε τυχαίες θετικές συντεταγμένες εντός ορίου τετραγώνου πλευράς 25 στο λογισμικό Grasshopper, στιγμιότυπα 1, 2, 3. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	420
Εικόνα 27: Παράδειγμα #7, populate, παράδειγμα α: Αλγόριθμος δημιουργίας σημείων σε τυχαίες θετικές συντεταγμένες στο λογισμικό Grasshopper. 100 σημεία τυχαιών συντεταγμένων (0 έως range=25). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	420
Εικόνα 28: Παράδειγμα #7, populate, παράδειγμα β: Αλγόριθμος δημιουργίας σημείων σε τυχαίες θετικές συντεταγμένες εντός ορίου παραλληλογράμμου πλευράς 25X25 στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	421
Εικόνα 29: Παράδειγμα #7, populate, παράδειγμα γ: Αλγόριθμος δημιουργίας σημείων στο χώρο σε τυχαίες συντεταγμένες εντός του ορίου όγκου σφαίρας που υλοποιήθηκε στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	421
Εικόνα 30: Παράδειγμα #7, populate, παράδειγμα γ: Γεωμετρικό αποτέλεσμα αλγορίθμου δημιουργίας σημείων στο χώρο (3d) σε τυχαίες συντεταγμένες εντός του ορίου όγκου σφαίρας που υλοποιήθηκε στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	421
Εικόνα 31: Παράδειγμα #8, 2d Attractors. Αλγόριθμος επήρειας 3 ελκυστών στις ακτίνες κύκλων σε κানাβο 20X20. Λογισμικό Grasshopper. Πηγή: <a href="https://www.grasshopper3d.com/forum/topics/multiple-attractor-points-in-a?id=2985220%3ATopic%3A108027&amp;page=1#comments">https://www.grasshopper3d.com/forum/topics/multiple-attractor-points-in-a?id=2985220%3ATopic%3A108027&amp;page=1#comments</a> , τροποποίηση κώδικα, Τ. Κουιμτζόγλου.....	422
Εικόνα 32: Παράδειγμα #8, 2d Attractors. Παράδειγμα επήρειας 3 ελκυστών στις ακτίνες κύκλων σε κানাβο 20X20. Λογισμικό Grasshopper. Πηγή: <a href="https://www.grasshopper3d.com/forum/topics/multiple-attractor-points-in-a?id=2985220%3ATopic%3A108027&amp;page=1#comments">https://www.grasshopper3d.com/forum/topics/multiple-attractor-points-in-a?id=2985220%3ATopic%3A108027&amp;page=1#comments</a> , τροποποίηση κώδικα, Τ. Κουιμτζόγλου.....	423
Εικόνα 33: Παράδειγμα #8, 3d Attractors. Παράδειγμα επήρειας 3 ελκυστών στις ακτίνες κύκλων και τις τιμές εξώθησης τους σε κানাβο 20X20. Λογισμικό Grasshopper. Πηγή: <a href="https://www.grasshopper3d.com/forum/topics/multiple-attractor-points-in-a?id=2985220%3ATopic%3A108027&amp;page=1#comments">https://www.grasshopper3d.com/forum/topics/multiple-attractor-points-in-a?id=2985220%3ATopic%3A108027&amp;page=1#comments</a> , τροποποίηση κώδικα, Τ. Κουιμτζόγλου.....	423
Εικόνα 34: Παράδειγμα #9#: Αλγοριθμική παραμετρική διάταξη παραλληλεπιπέδων με 4 διαφορετικά υλικά σε ορθογωνικό κানাβο με τυχαίες διατάξεις στο λογισμικό Grasshopper. Παράλληλα πραγματοποιείται καταγραφή δεδομένων για κάθε μοναδική παραλλαγή. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου..	425
Εικόνα 35: Παράδειγμα #9: Παραλλαγή αλγοριθμικής παραμετρικής διάταξης παραλληλεπιπέδων 4 διαφορετικών κατηγοριών σε ορθογωνικό κানাβο με τυχαίες διατάξεις στο λογισμικό Grasshopper. Παράλληλα πραγματοποιείται καταγραφή δεδομένων για κάθε μοναδική παραλλαγή. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	427
Εικόνα 36: Παράδειγμα #9: Παραλλαγές αλγοριθμικής παραμετρικής διάταξης παραλληλεπιπέδων 4 διαφορετικών κατηγοριών σε ορθογωνικό κানাβο με τυχαίες διατάξεις στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	428

Εικόνα 37: Παράδειγμα #9: Αλγόριθμος γεννήτριας ψευδοτυχαίων αριθμών Seed σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση τιμών πώλησης και δημοπρασιών κρυπτονομισμάτων Ethereum και Bitcoin. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	429
Εικόνα 38: Παράδειγμα #9: Γεωμετρικές παραλλαγές όψεων με πλήρη και κενά με βάση τον αλγόριθμο στην Εικόνα 34 και διαφοροποίηση των παραμέτρων του. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	430
Εικόνα 39: Παράδειγμα #10: Αλγοριθμική παραμετρική διάταξη ευθειών που λειτουργούν ως αμφιέριστοι φορείς, στο λογισμικό Grasshopper. Τ. Κουιμτζόγλου.....	431
Εικόνα 40: Παράδειγμα Grasshopper/Karamba3D : Αλγοριθμική παραμετρική διάταξη ευθειών που λειτουργούν ως αμφιέριστοι φορείς, στο λογισμικό Grasshopper/Karamba3D. Στη συγκεκριμένη παραλλαγή απεικονίζονται 20 φορείς οι οποίοι συνδέουν τις ευθείες AB (35m) και CD (35.51m) σε αποστάσεις AC (2m) και BC (8m). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	433
Εικόνα 41: Παράδειγμα Grasshopper/Karamba3D : Επιλογή χαλύβδινης διατομής HEA 100 αμφιέριστου φορέα. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	433
Εικόνα 42: Παράδειγμα Grasshopper/Karamba3D : Επιλογή χαλύβδινης διατομής HEA 100 αμφιέριστου φορέα. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	433
Εικόνα 43: Παράδειγμα Grasshopper3D/Karamba3D: Παραμορφώσεις(x20) και φορτίσεις χαλύβδινης διατομής HEA 100 αμφιέριστων φορέων και τυχαίες φορτίσεις ανά φορέα μέχρι 5KN/m. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	433
Εικόνα 44: Παράδειγμα Grasshopper3D/Karamba3D: Παραλλαγές παραμορφώσεων(x20) και φορτίσεις χαλύβδινης διατομής HEA 100 αμφιέριστων φορέων και τυχαίες φορτίσεις ανά φορέα μέχρι 5KN/m. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	434
Εικόνα 45: Διάταξη μικροελεγκτή arduino. Πηγή: Arduino-Uno.jpg, Arduino Uno, <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arduino-Uno.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arduino-Uno.jpg</a> , εικόνα του/της: Particitae , άδεια: CC0 1.0, Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication.....	436
Εικόνα 46: Κώδικας Firefly διασύνδεσης arduino στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: <a href="http://www.fireflyexperiments.com/s/110920_Firefly_Users_Guide.pdf">http://www.fireflyexperiments.com/s/110920_Firefly_Users_Guide.pdf</a> , Interactive prototyping. An introduction to physical computing using arduino, grasshopper and firefly, άδεια: CC BY-NC-SA 3.0, <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/</a> .....	436
Εικόνα 47: Περιβάλλον Galaragos component στο λογισμικό grasshopper για παράδειγμα με 4 γονίδια. Παρατηρείται ότι η λύση βελτιστοποιείται σταδιακά και καταλήγει σε σχετικά σταθερό αποτέλεσμα μετά από 26 γενεές γονιδίων. Τα 4 διαφορετικά γονίδια απεικονίζονται γραφικά κάτω δεξιά ως πράσινα παραλληλόγραμμα. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	438
Εικόνα 48: Αποτελέσματα παραμετρικού γενετικού αλγορίθμου (genomes/γονιδιώματα) στο λογισμικό Grasshopper με τη χρήση του component Galaragos για 4 γονίδια. Γονιδίωμα αρχικής γενεάς (αριστερά), γονιδίωμα ενδιάμεσης γενεάς (κέντρο) και γονιδίωμα τελικής γενεάς (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	439
Εικόνα 49: Περιβάλλον Octopus component στο λογισμικό Grasshopper. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου...440	440
Εικόνα 50: Περιβάλλον Octopus component στο λογισμικό Grasshopper. Μέτωπο Pareto για 4 παραμέτρους και 3 στόχους στην γενεά 1 (αριστερά) και γενεά 112 (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.441	441
Εικόνα 51: Περιβάλλον Octopus component στο λογισμικό Grasshopper. Elite λύσεις για 4 παραμέτρους και 3 στόχους στην γενεά 1 (αριστερά) και γενεά 112 (δεξιά). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.441	441
Εικόνα 52: Διάσπαση όγκου παραλληλεπιπέδου και μετασχηματισμός σε γεωμετρία χωροδικτύωματος και κελύφους με τη χρήση του MAXScript Fracture Voronoi. Πηγή: Αρχιτεκτονικός διαγωνισμός Istanbul Disaster Prevention and Education Centre_Pandora's Box. Arsis Architects, Τ. Κουιμτζόγλου, Ι. Παπαματθαίου, 2011.....	443
Εικόνα 53: Παραλλαγές τυχαίας διάσπασης όγκου παραλληλεπιπέδου με τη χρήση του MAXScript Fracture Voronoi με τις ίδιες παραμέτρους και στο ίδιο γεωμετρικό υπόβαθρο. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου 2020.....	443
Εικόνα 54: Παράδειγμα εφαρμογής φέροντος οργανισμού κτίσματος με δομή voronoi με τη χρήση του MAXScript Fracture Voronoi.. Αρχιτεκτονικός διαγωνισμός Istanbul Disaster Prevention and Education Centre_Pandora's Box. Arsis Architects, Τ. Κουιμτζόγλου, Ι. Παπαματθαίου, 2011.....	444
Εικόνα 55: Παράδειγμα εφαρμογής φέροντος οργανισμού κτίσματος με δομή voronoi με τη χρήση του MAXScript Fracture Voronoi.. Αρχιτεκτονικός διαγωνισμός Istanbul Disaster Prevention and Education Centre_Pandora's Box. Arsis Architects, Τ. Κουιμτζόγλου, Ι. Παπαματθαίου, 2011.....	444

Εικόνα 56: Ψηφιακό γεωμετρικό αποτέλεσμα αλγορίθμου κατάτμησης σε τυχαία 3d κελιά Voronoi με το λογισμικό Grasshopper. Παράμετροι: 200 σημεία, Seed: 4, ακτίνα R ράβδων: 0.06. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....445

Εικόνα 57: Αλγόριθμος κατάτμησης σε τυχαία 3d κελιά Voronoi με το λογισμικό Grasshopper. Παράμετροι: 200 σημεία, Seed 4, ακτίνα R ράβδων πλαισίου ακμών: 0.04. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου... .445

## Ευρετήριο πινάκων Παραρτήματος III

Πίνακας 1: Παράμετροι παραδείγματος: Γεωμετρικές Παράμετροι. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....403

Πίνακας 2: Παράμετροι παραδείγματος #2: Αρχιτεκτονικές - Γεωμετρικές Παράμετροι. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....407

Πίνακας 3: Παράμετροι παραδείγματος: Χρωματικές - Γεωμετρικές Παράμετροι. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....426

Πίνακας 4: Παράμετροι παραδείγματος #10: Γεωμετρικές και Δυναμικές Παράμετροι. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....432

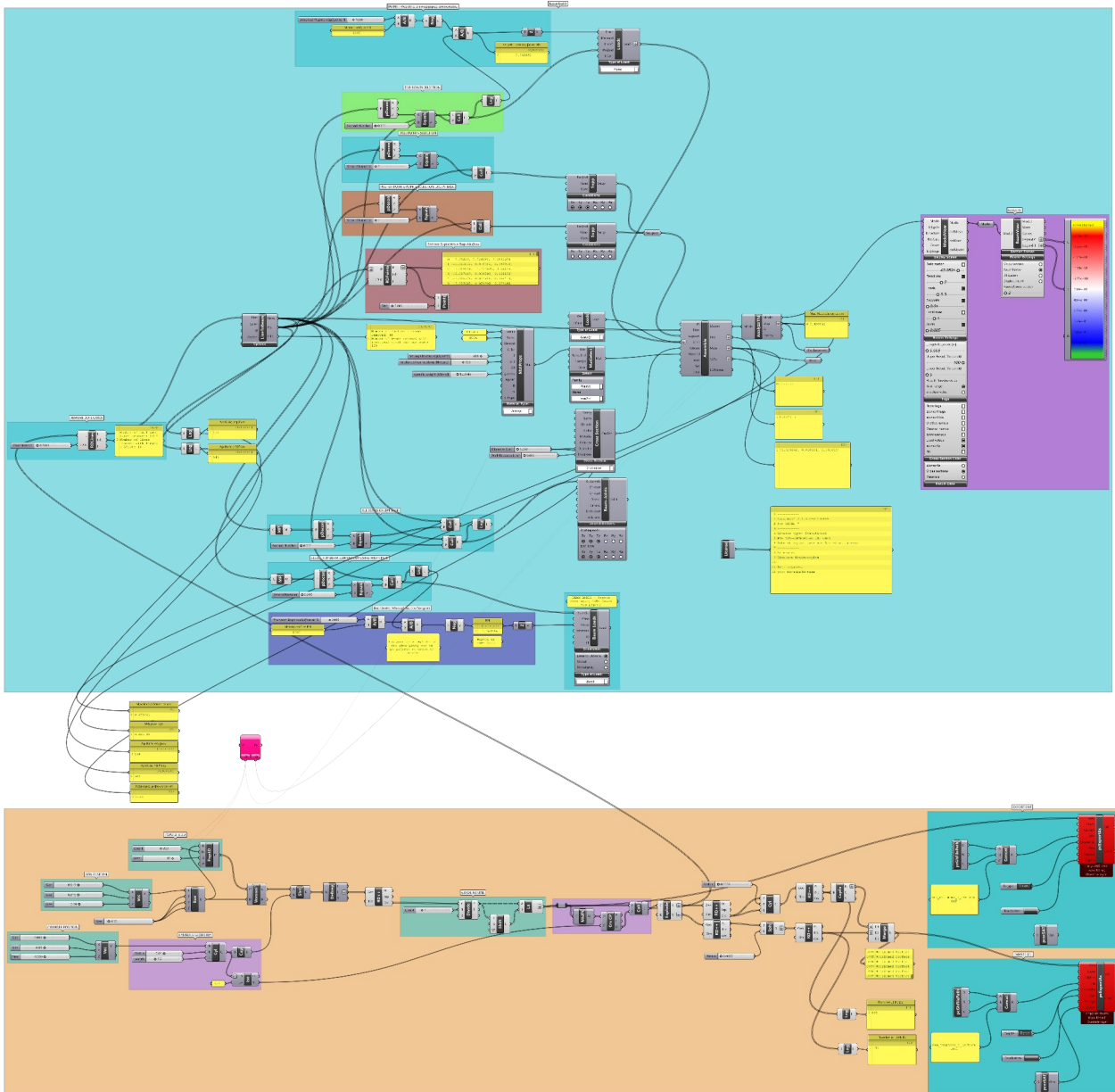
Πίνακας 5: Παράμετροι παραδείγματος: Γεωμετρικές Παράμετροι. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....437

Πίνακας 6: Δεδομένα γενετικού αλγορίθμου για τα 6 πρώτα γονιδιώματα της 26ης γενεάς. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....439

Πίνακας 7: Octopus component στο λογισμικό Grasshopper. Τιμές παραμέτρων και στόχων για μερικές από τις λύσεις Pareto front της 111ης γενεάς. Τιμές παραμέτρων (αριστερά) και τιμές στόχων (δεξιά). Η αρνητική τιμή του στόχου 2 απαιτείται για τη μεγιστοποίηση της τιμής του από το λογισμικό. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου..... 442

## Παράρτημα IV – Χρήση γενετικών αλγορίθμων για βελτιστοποίηση των δοκιμών του αλγορίθμου της πειραματικής διάταξης

Η περαιτέρω αξιοποίηση του παραμετρικού αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των δοκιμών των πειραμάτων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες περιλαμβάνει τη σύνδεσή του αλγορίθμου με το παραμετρικό λογισμικό Katamb3D στο περιβάλλον της εφαρμογής Grasshopper και παρουσιάζεται σε αυτό το παράρτημα διερευνητικά.



Εικόνα 1: Παραμετρικός αλγόριθμος στο λογισμικό Grasshopper. Κάτω τμήμα: αρχικός αλγόριθμος παραγωγής γεωμετρίας πειραματικής διαδικασίας. Άνω τμήμα: αλγόριθμος Katamb3D συνδεδεμένος με τον αρχικό αλγόριθμο. Στο ενδιάμεσο υπάρχει το Ostorus component το οποίο εκτελεί τη βελτιστοποίηση με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων, οι τιμές από τις παραμέτρους που τροποποιούνται και οι τιμές των δύο στόχων, μετατόπιση και μάζα. Πηγή: T. Κουιμιτζόγλου.

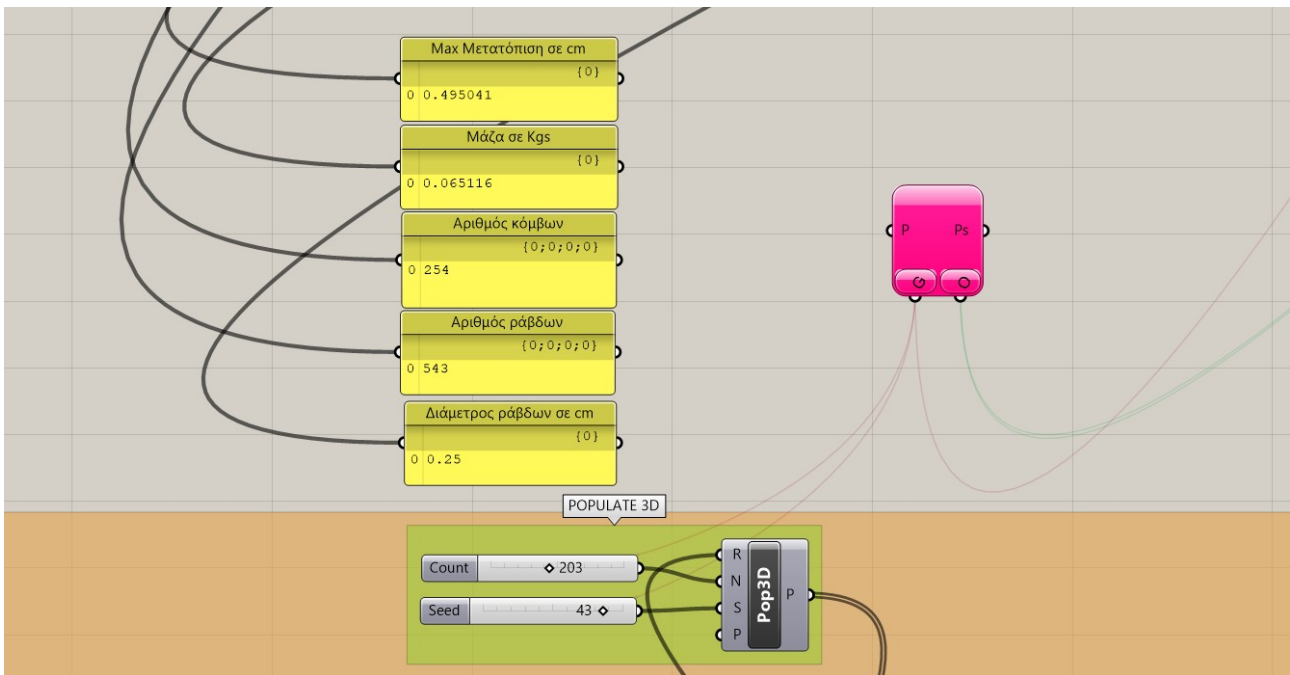
Για την αξιοποίηση του λογισμικού Karamba3D δημιουργήθηκε ψηφιακά νέο υλικό εφαρμογής το οποίο έχει την τιμή του μέτρου ελαστικότητας που βρέθηκε πειραματικά το οποίο έχει τιμή **~833MPa**. Εφαρμόστηκε στους κόμβους της στέψης των ψηφιακών δοκιμών φορτίο **1000N**, το οποίο σε κάθε παραλλαγή δοκιμίου ισομοιραζόταν στους κόμβους της στέψης του. Από το λογισμικό καταγράφηκε η τιμή για τη συνολική παραμόρφωση (displacement) των δοκιμών και η τιμή για τη μάζα των δοκιμών, προκειμένου να υπάρχουν δύο κοινά μεταξύ τους κριτήρια αξιολόγησης.

Για την παραμετρική διερεύνηση τροποποιήθηκαν ελαφρώς τα όρια κάποιων παραμέτρων του αρχικού αλγορίθμου, προκειμένου να αυξηθεί ο αριθμός των πιθανών λύσεων. Οι παράμετροι αυτές συνδέθηκαν με το **Octopus component**. Το Octopus εκτέλεσε βελτιστοποίηση με χρήση γενετικού αλγορίθμου, προκειμένου να πραγματοποιηθεί συγκριτική μεταξύ των ψηφιακών δοκιμών βελτιστοποίηση για **2 στόχους**.

Οι στόχοι που επιλέχθηκαν να βελτιστοποιηθούν είναι:

- α.** Η **παραμόρφωση** (displacement) του δοκιμίου, με τη βελτιστοποίηση να έχει ως στόχο την **ελαχιστοποίηση** της τιμής.
- β.** Η **συνολική μάζα** (mass) του δοκιμίου, με τη βελτιστοποίηση να έχει ως στόχο την **ελαχιστοποίηση** της τιμής.

**Άρα, στόχος της βελτιστοποίησης με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου (GA – genetic algorithm) είναι να βρεθούν τα δοκίμια που παρουσιάζουν τη μικρότερη παραμόρφωση, αλλά έχουν παράλληλα και τη μικρότερη χρήση υλικού – μάζα.**

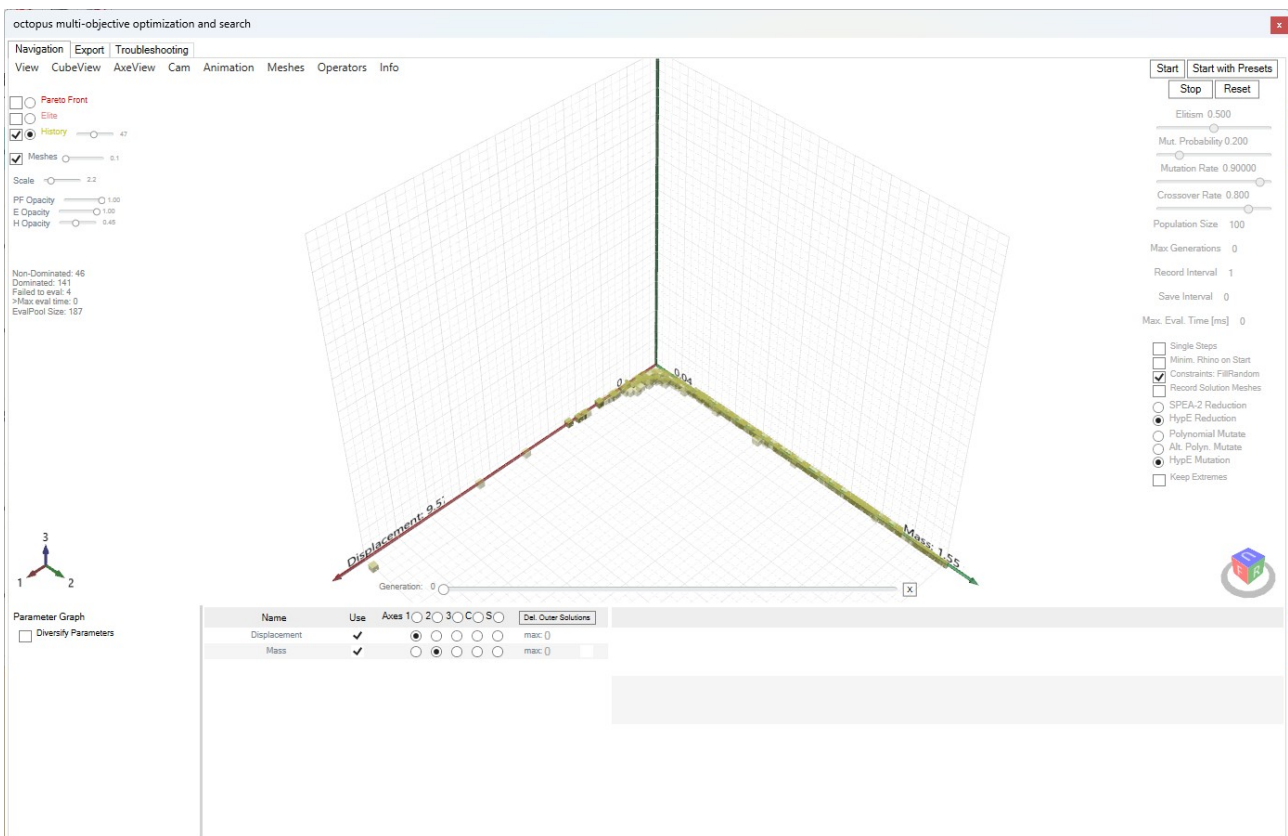


Εικόνα 2: Παραμετρικός αλγόριθμος στο λογισμικό Grasshopper. Φαίνεται το Octopus component το οποίο εκτελεί τη βελτιστοποίηση με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων, οι τιμές από τις παραμέτρους που τροποποιούνται και οι τιμές των δύο στόχων, μετατόπιση και μάζα. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν ως γονίδια για την γενετική βελτιστοποίηση ήταν τρεις:

1. **Count** - Πλήθος σημείων οικογένειας (γενική πυκνότητα οικογένειας όπως περιγράφεται στις προηγούμενες ενότητες), με τιμές από 50 έως 400.
2. **Seed**, με τιμές από 0 έως 50.
3. **Diameter** (cm) - Διάμετρος ράβδων δοκιμών, με τιμές από 0,25cm έως 1 cm.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης εκτελέστηκε για 15 γενεές, με μέγεθος πληθυσμού 100 για κάθε γενεά και μέγεθος δεξαμενής για κάθε γενεά (pool size)~187. Συνολικά δηλαδή δημιουργήθηκαν  $\sim 15 \times 187 = 2805$  λύσεις και από τις οποίες στη γενεά 15 υπάρχουν 127 λύσεις τύπου pareto front.



Εικόνα 3: Περιβάλλον Octopus component για τη βελτιστοποίηση 2 στόχων, Displacement και Mass. Generation 0. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.

Αποτελέσματα τιμών στόχων για μετατόπιση και μάζα αντίστοιχα για τα 8 πρώτα μέλη της 1ης γενεάς:

Generation

1

-----  
0.0245217222786427  
0.357304318152306

0.0222002515213031  
0.381448149999121

0.0169721992606346  
0.481245800357135

0.016775818632001  
0.571479549515622

0.668530497369233  
0.0814467900087346

0.0765286720370754  
0.180910992393

0.0128400027862006  
0.655009459977711

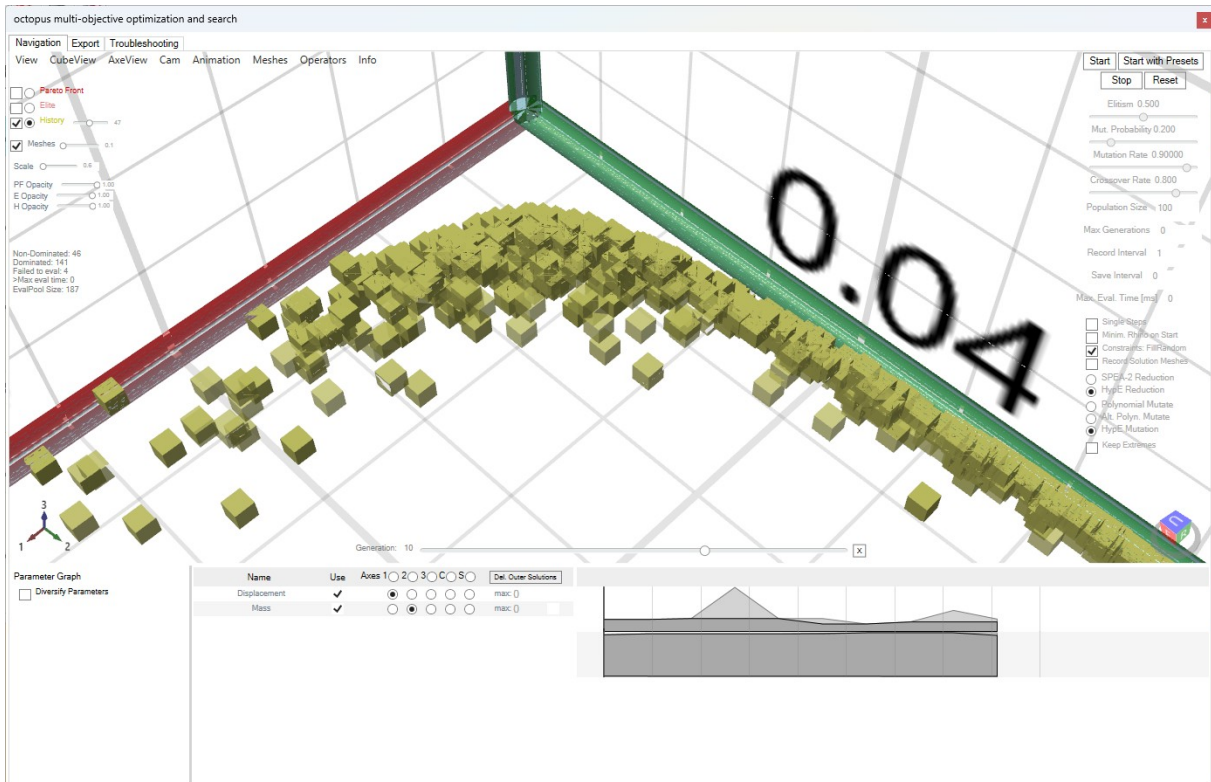
0.00423700244160279  
1.10675558709307

Στην Εικόνα 4 φαίνονται σε εστίαση οι περισσότερες από τις λύσεις της γενιάς 10.

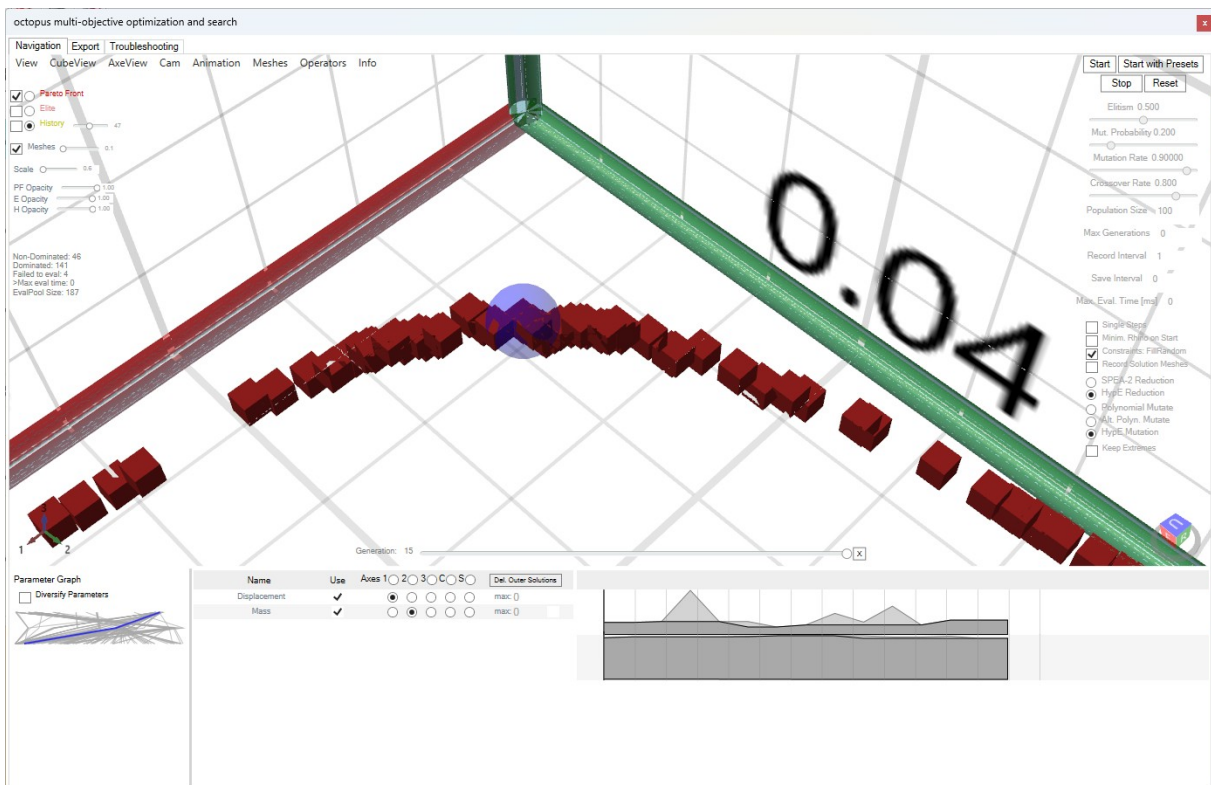
Στην Εικόνα 5 φαίνονται σε εστίαση οι περισσότερες από τις λύσεις Pareto front της γενιάς 15. Μια από αυτές είναι η λύση που προκύπτει για τιμές:

**Count:** 259, **Seed:** 43, **Diameter:** 0,29cm: **δοκίμιο (259, 43, 0,29)**, για τις οποίες καταγράφεται ότι το αντίστοιχο δοκίμιο έχει **306 κόμβους, 675 ράβδους, μέγιστη μετατόπιση 0,139687cm** και **μάζα 0,102751 Kgs** και παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.





Εικόνα 4: Περιβάλλον Octopus component για τη βελτιστοποίηση 2 στόχων, Displacement και Mass. Generation 10. Πηγή: Τ. Κουμτζόγλου.



Εικόνα 5: Περιβάλλον Octopus component για τη βελτιστοποίηση 2 στόχων, Displacement και Mass. Generation 15. Λύσεις Pareto front. Πηγή: Τ. Κουμτζόγλου.



Υπενθυμίζεται ότι οι λύσεις **pareto front**, είναι οι λύσεις οι οποίες είναι βελτιστοποιημένες, αλλά κανένας από τους στόχους τους δεν μπορεί να βελτιωθεί περισσότερο, αν δεν χειροτερεύσει τουλάχιστον ένας άλλος. Από τις **127 λύσεις Pareto front** της **γενεάς 15**, ισοδύναμες μεταξύ τους για τους συγκεκριμένους στόχους είναι κατά προσέγγιση αυτές που σχεδόν ισαπέχουν από τους άξονες του διαγράμματος για τους στόχους της μετατόπισης και της μάζας. Οι εικόνες 6, 7, 8 και 9 δείχνουν τα δοκίμια από **4 ενδεικτικές τέτοιες σχεδόν ισοδύναμες λύσεις** οι οποίες έχουν επιλεγεί χειροκίνητα με βάση τη θέση τους στο γράφημα.

Παρατηρείται ότι για τη βελτιστοποίηση των 2 στόχων (ελάχιστη μετατόπιση και ελάχιστη μάζα) τα 4 συγκεκριμένα βελτιστοποιημένα δοκίμια παρουσιάζουν μια πυκνότητα οικογένειας με εύρος από 259 έως 400. Με βάση το εύρος που ορίστηκε για την πυκνότητα των δοκιμών στην αρχική παράμετρο (50-400) θεωρούνται ως πυκνά δοκίμια. Η διάμετρος σε όλα τα παραπάνω δοκίμια είναι <0,5cm.

**Ως γενικό συμπέρασμα παρατηρείται ότι τα βέλτιστα δοκίμια για τους δύο παραπάνω στόχους (ελάχιστη μετατόπιση και ελάχιστη μάζα) στη συγκεκριμένη συγκριτική προσομοίωση δεν είναι αυτά με τις παχύτερες ράβδους και το λιγότερο αριθμό ράβδων, αλλά κάποια σχετικά πυκνά δοκίμια με λεπτές ράβδους. Οι βελτιστοποιημένες λύσεις με βάση τους συγκεκριμένους στόχους δεν ήταν εξ' αρχής γνωστές, αλλά προέκυψαν με τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου.**

## Ευρετήριο εικόνων Παραρτήματος IV

Τα πνευματικά δικαιώματα των εικόνων ανήκουν στους αντίστοιχους κατόχους τους.

Εικόνα 1: Παραμετρικός αλγόριθμος στο λογισμικό Grasshopper. Κάτω τμήμα: αρχικός αλγόριθμος παραγωγής γεωμετρίας πειραματικής διαδικασίας. Άνω τμήμα: αλγόριθμος Karamba3D συνδεδεμένος με τον αρχικό αλγόριθμο. Στο ενδιάμεσο υπάρχει το Octopus component το οποίο εκτελεί τη βελτιστοποίηση με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων, οι τιμές από τις παραμέτρους που τροποποιούνται και οι τιμές των δύο στόχων, μετατόπιση και μάζα. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	451
Εικόνα 2: Παραμετρικός αλγόριθμος στο λογισμικό Grasshopper: Φαίνεται το Octopus component το οποίο εκτελεί τη βελτιστοποίηση με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων, οι τιμές από τις παραμέτρους που τροποποιούνται και οι τιμές των δύο στόχων, μετατόπιση και μάζα. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	452
Εικόνα 3: Περιβάλλον Octopus component για τη βελτιστοποίηση 2 στόχων, Displacement και Mass. Generation 0. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	453
Εικόνα 4: Περιβάλλον Octopus component για τη βελτιστοποίηση 2 στόχων, Displacement και Mass. Generation 10. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	455
Εικόνα 5: Περιβάλλον Octopus component για τη βελτιστοποίηση 2 στόχων, Displacement και Mass. Generation 15. Λύσεις Pareto front. Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	455
Εικόνα 6: Βελτιστοποιημένο ψηφιακό ραβδωτό δοκίμιο για τους στόχους της ελάχιστης μετατόπισης και ελάχιστης μάζας της 15ης γενεάς ως λύση Pareto front. Δοκίμιο (259, 43, 0,290). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	456
Εικόνα 7: Βελτιστοποιημένο ψηφιακό ραβδωτό δοκίμιο για τους στόχους της ελάχιστης μετατόπισης και ελάχιστης μάζας της 15ης γενεάς ως λύση Pareto front. Δοκίμιο (384, 5, 0,270). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	456
Εικόνα 8: Βελτιστοποιημένο ψηφιακό ραβδωτό δοκίμιο για τους στόχους της ελάχιστης μετατόπισης και ελάχιστης μάζας της 15ης γενεάς ως λύση Pareto front. Δοκίμιο (400, 36, 0,261). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	456
Εικόνα 9: Βελτιστοποιημένο ψηφιακό ραβδωτό δοκίμιο για τους στόχους της ελάχιστης μετατόπισης και ελάχιστης μάζας της 15ης γενεάς ως λύση Pareto front. Δοκίμιο (303, 44, 0,258). Πηγή: Τ. Κουιμτζόγλου.....	456