1 + 1 = 3*

* greater than the sum of its parts

1 + 1 = 3

Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΑΝΑΔΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΧΑΟΥΣ

ΑΛΚΗΣΤΙΣ ΚΡΟΥΣΤΗ
επιβλέπων: Π. Τουρνικιώτης

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2013

Περιεχόμενα

0. Εισαγωγή 9

0.1. Ένα τοπόσημο για το Αμβούργο 10
0.2. Η θεωρία του χάους 12

1. Μη-γραμμικά Δυναμικά Συστήματα 15

1.1. Τι ονομάζουμε Δυναμικά συστήματα; 15
1.1.1. Γραμμικά και Μη-γραμμικά δυναμικά συστήματα 15
1.1.2. Ο χώρος των φάσεων 17
1.2. Σταθερά σημεία και διακλαδώσεις 19
1.3. Ελκυστές 22
1.4. Ο Lorenz και ο "παράξενος" ελκυστής 24
1.5. Ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες 25
1.6. Υπέρθεση 26

2. Η έννοια της ανάδυσης (Emergence) 28

2.1. Η έννοια στα φυσικά συστήματα 28
2.2. Η πληροφορία ως βασικό στοιχείο της ανάδυσης 32
2.3. Η εφαρμογή της ανάδυσης στην αρχιτεκτονική 33
2.3.1. Form Follows Force 34
2.3.2. Η μοντελοποίηση, τα μοντέλα χορδών, και ο Frei Otto 36
2.3.3. Το "μέρος" και το "όλον" του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού 37

2.3.4. Ψηφιακά μοντέλα και νέοι ορίζοντες 38

3. Παραμετρικός σχεδιασμός και Generative Algorithms 39

3.1. Inheritance- Selection- Mutation- Crossover 39
3.2. Μορφογένεση 41
3.2.1. Παραμετροποίηση 41
3.2.2. Η διαδικασία: Παραγωγή-Ανάλυση- Ανατροφοδότηση- Προσαρμογή 45
3.2.3. Μορφογενετικός μηχανισμός ή Εργαλείο βελτιστοποίησης; 46

4. Case Studies 52

4.1. Rolex Learning Centre 52
4.2. Centre Pompidou Metz 58
4.3. Elbphilharmonie, Hamburg 60

5. Back to the future: Οι ανακατατάξεις στους κλάδους της μηχανικής και οι αναδυόμενες ανάγκες στην κατασκευή 66

5.1. Περιορισμοί και Ιδιαιτερότητες της αρχιτεκτονικής εφαρμογής 66
5.2. Προς μια διεπιστημονική προσέγγιση 68
5.3. Νέοι ορίζοντες 70

Παράρτημα 73
Βιβλιογραφία 75

0. Εισαγωγή

Δεκατρία χρόνια μετά την είσοδο στον 21ο αιώνα, βρισκόμαστε στο κατώφλι μεγάλων αλλαγών, αλλαγών που πυροδοτούνται από το συνδυασμό της αλματώδους τεχνολογικής εξέλιξης, κυρίως στον τομέα της πληροφορίας και της παγκοσμιοποίησης. Η νέα χιλιετία έφερε στις εφαρμοσμένες επιστήμες ένα μεγάλο εύρος τεχνολογικών επιτευγμάτων, που για δεκαετίες αναπτύσσονταν σε καθαρά θεωρητικό πεδίο.

Στη σύγχρονη πραγματικότητα, μια πραγματικότητα που διέπεται όλο και περισσότερο από την ψηφιακή τεχνολογία, η αρχιτεκτονική ήταν αναμενόμενο να ακολουθήσει, τα πρωτοπόρα προσφερόμενα μέσα στην πρακτική της. Έτσι σήμερα, βρισκόμαστε στο στάδιο όπου οι ραγδαίες εξελίξεις των τελών του 20ου και αρχών του 21ου αιώνα στην ψηφιακή τεχνολογία, τις φυσικές επιστήμες και τους Η/Υ αρχίζουν να εφαρμόζονται πιο οργανωμένα και μάλλον πειραματικά στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό.

Στο στάδιο όπου απ΄τη μία το μοντέρνο κίνημα υφίσταται έντονη κριτική ως προς την ανταπόκριση του στις σύγχρονες συνθήκες και απ΄την άλλη διαφαίνονται καινούργιες απαιτήσεις, τα νέα ψηφιακά μέσα στρατεύονται σε εξυπηρέτηση του σχεδιασμού.

Εμφανίζονται, ιδιαίτερα την τελευταία δεκαετία, ολοένα και περισσότερα έργα, από αστικό σχεδιασμό μέχρι σχεδιασμό επίπλου, που διατείνονται ότι βασίζουν τη δημιουργία τους σε αλγορίθμους παραγωγής μορφής και μαθηματικά μοντέλα, βασισμένα στη θεωρία του χάους. Η σχεδίαση με τη βοήθεια παραγωγικών αλγορίθμων, με στόχο την απελευθέρωση της μορφής από τα στενά όρια του μοντέρνου και του μεταμοντέρνου, και την επανασύνδεση της αρχιτεκτονικής με τις συναφείς κατασκευαστικές πρακτικές, είναι αδιαμφισβήτητα μια τάση της εποχής μας. Είτε πρόκειται για ελεύθερες μορφές που θυμίζουν ταινία φαντασίας του ' 80, είτε για βιοκλιματικά προσαρμοσμένα συστήματα όψεων, είτε για βιομορφικά σχέδια που αντιγράφουν φυσικά μοτίβα, οι παραγωγικοί αλγόριθμοι είναι το εργαλείο που καλείται να ανοίξει νέους ορίζοντες και να δημιουργήσει νέα αρχιτεκτονικά στυλ στις επόμενες δεκαετίες.

Παρότι η χρήση Η/Υ υπήρξε ιδιαίτερα διαδεδομένη ανάμεσα στους αρχιτέκτονες, ήδη από τη δεκαετία του '80, η ανάπτυξη της πληροφορικής στην κατεύθυνση της φυσικής εξέλιξης και με τη βοήθεια των μοντέλων της θεωρίας του χάους, που παρατηρείται την τελευταία δεκαετία, έρχεται να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο στην πρακτική της αρχιτεκτονικής. Ένα νέο εργαλειοστάσιο δυνατών υπολογιστι-

κών και απεικονιστικών εργαλείων παρέχει στο δημιουργό τη δυνατότητα να διευρύνει τα όρια της σκέψης του και του σχεδιασμού του, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι αυτός αποποιείται του ρόλου του. Ως εργαλείο για την αρχιτεκτονική σύλληψη και το σχεδιασμό προσφέρει μεγάλα πλεονεκτήματα, αλλά επιφέρει και νέες προκλήσεις ως προς τη χρήση του.

Όπως είναι αναμενόμενο, ο νέος τρόπος αυτός σχεδιασμού, που αυτή τη στιγμή τόσο διαφορετικά εφαρμόζεται από τους αρχιτέκτονες στο πειραματικό ακόμα στάδιο του, έχει εγείρει τεράστιο ρεύμα κριτικής και προβληματισμού, πάνω στην αισθητική ποιότητα του αποτελέσματος, στην επιστημονικοφανή προώθηση των προσεγγίσεων και το ρόλο του αρχιτέκτονα στην ψηφιακή εποχή. Τα ερωτήματα που προκύπτουν, σχετικά με τη χρήση των αλγορίθμων ως αρχιτεκτονικό μέσο είναι πολλά:

“Πού βασίζεται η λειτουργία τους;”

“Ποια η σχέση τους με την τόσο πολυσυζητημένη Θεωρία του χάους;”

“Μπορούν πράγματι να προσφέρουν στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, ή αποτελούν εφήμερη “μόδα”;”

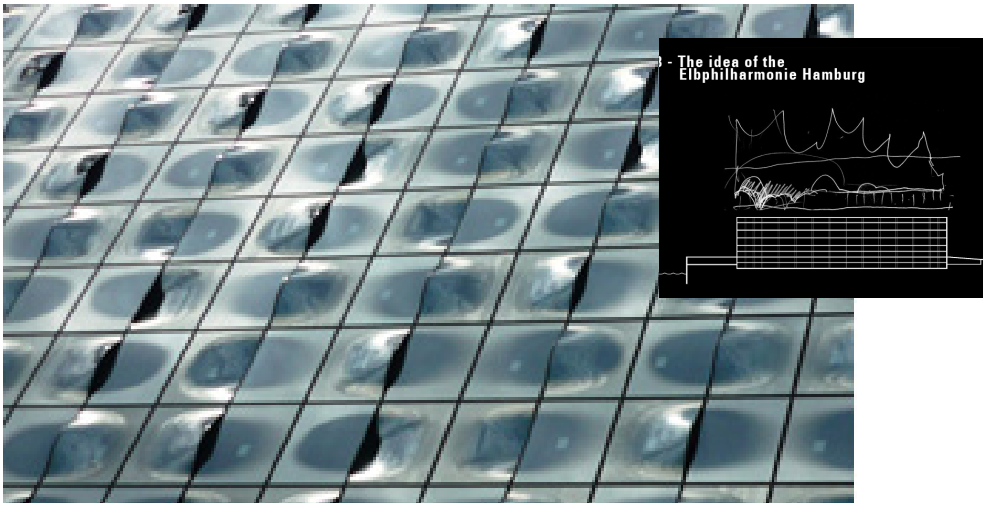
“Πώς συνδέονται τα εντυπωσιακά υαλοστάσια της φιλαρμονικής του Αμβούργου με τη διάταξη των σπόρων του ηλιοτροπίου;”

0.1. Ένα τοπόσημο για το Αμβούργο

Η Elbphilharmonie, το έργο που βρίσκεται υπό κατασκευή στο λιμάνι του Αμβούργου είναι ένα κτίριο που αντιπροσωπεύει από πολλές απόψεις, το πνεύμα της εποχής του. Πρόκειται για ένα έργο μεγάλης έκτασης, και τεράστιου προϋπολογισμού (περίπου 480 εκατομμύρια ευρώ, αντί για τα 280 που αρχικά είχαν υπολογιστεί), το οποίο χτίζεται με βασικό στόχο να αποτελέσει τοπόσημο που θα προωθήσει παγκοσμίως την εικόνα του Αμβούργου ως πόλη της μουσικής. Εγείρεται με βάση το παλιό, χαρακτηριστικό για την βιομηχανική εικόνα της πόλης, κτίριο αποθήκης Kaispeicher A, του οποίου διατηρεί την όψη, και αναπτύσσεται σε ύψος 110m. Η εντυπωσιακή γυάλινη όψη του, στην οποία επαναλαμβάνονται, μη περιοδικά, πανέλα γυαλιού, καμπυλωμένα ως προς τη μία ακμή, είναι η επιτομή της σύγχρονης κατασκευαστικής δυνατότητας. Για την περάτωση της όψης έχουν χρησιμοποιηθεί παραγωγικοί (generative) αλγόριθμοι σε κάθε στάδιο του σχεδιασμού και της κατασκευής, ενώ έχουν αναπτυχθεί σε ερευνητικό επίπεδο μέθοδοι κατασκευής και ελέγχου, ειδικά για το έργο.

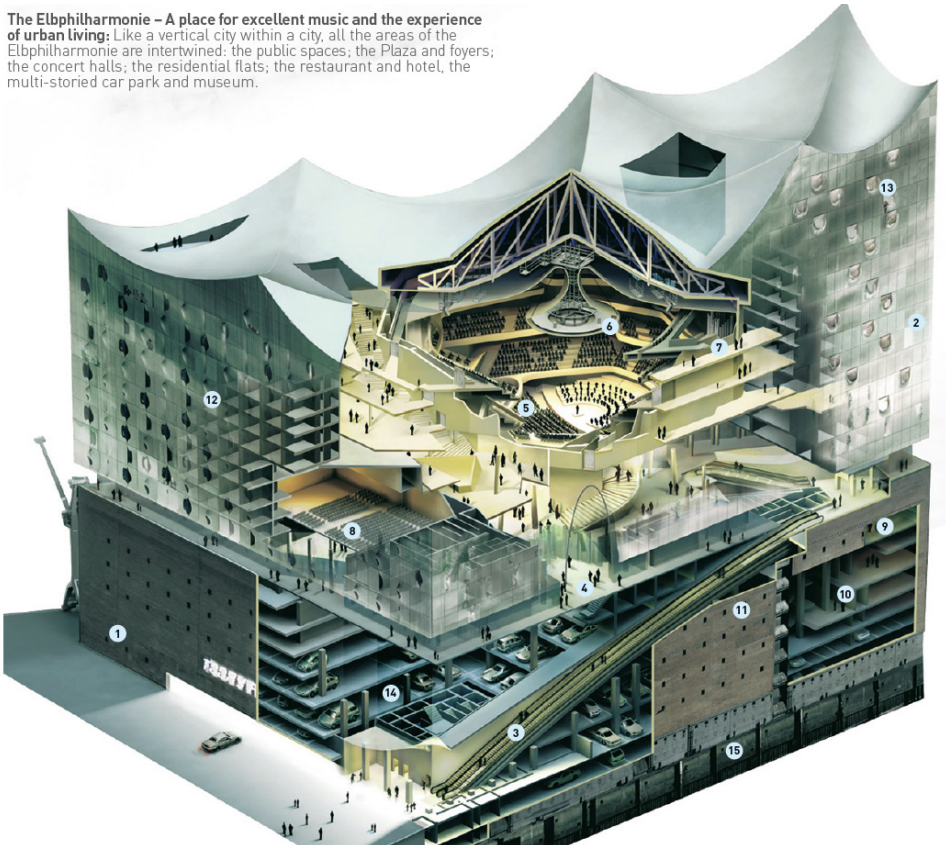
Αν κοιτάξουμε λίγο πιο προσεκτικά το σύνολο της όψης, και τον τρόπο που συνδέεται με την εσωτερική δομή, γίνεται σαφέστερο το φιλόδοξο του εγχειρήματος. Το ανάπτυγμα της όψης, όχι απλά καταλήγει στις κυματιστές μορφές του ανώτατου τμήματος, αλλά αποτελείται από πανέλα τεσσάρων τύπων διαστάσεων και δύο τύπων ανοιγμάτων, τοποθετημένων φαινομενικά “τυχαία”, δηλαδή απεριοδικά, αλλά βάσει των εσωτερικών λειτουργιών, της βιοκλιματικής λειτουργίας, και του ζητούμενου αισθητικού αποτελέσματος. Επιπρόσθετα, τα πανέλα είναι κατασκευασμένα ώστε να ενσωματώνουν στρώματα ηλιοαπορρόφησης και θερμομόνωσης, ενώ παρουσιάζουν ιδιαίτερα περίπλοκη στην κατασκευή της κυρτωμένη

0.1. Σκίτσο που αποτυπώνει την κεντρική σύλληψη της ebphilharmonie., η ανάλαφρη όψη-πέτασμα που επιστεγάζει την υπό διατήρηση όψη της παλιάς βιομηχανικής αποθήκης. (πηγή: open-buildings.com)



0.2. Τμήμα της όψης του νέου τμήματος του κτιρίου. Εδώ γίνεται σαφής η απεριοδική επανάληψη των στοιχείων του υαλοστασίου, με τις κυρτές και κοίλες επιφάνειες να εναλλάσονται.(πηγή: elb-philharmonie-erleben.de)

0.3. Σκίτσο που αποτυπώνει την κεντρική σύλληψη της ebphilharmonie., την ανάλαφρη όψη-πέτασμα που επιστεγάζει την υπό διατήρηση όψη της παλιάς βιομηχανικής αποθήκης. (πηγή: open-buildings.com)



0.4. Αξονομετρική απεικόνιση του νέου κτιρίου της Elbphilharmonie, με το εντυπωσιακό αμφιθέατρο, και τη διαδρομή μέσα από το παλαιό κτίριο. Στην εικόνα:

1. Το Kaispeicher
2. Η υάλινη όψη
3. Ο διάδρομος ανάβασης μέσα από το Kaispeicher
4. Η πλατεία, σε ύψος 37m
5. Το κεντρικό αμφιθέατρο
6. Ο ηχοανακλαστήρας
7. Το όργανο
8. Η αίθουσα συναυλιών,
9. Το studio πειραματικής μουσικής
10. Το διαδραστικό μουσείο οργάνων για παιδιά και νέους
11. Τα παρασκήνια
12. Το ξενοδοχείο, 14 ορόφων
13. Τα διαμερίσματα
14. Χώρος στάθμευσης
15. Τα υποστηλώματα

(πηγή: elbphilharmonie-erleben.de)

μορφή.

Η σχεδίαση και υλοποίηση του συνολικού έργου και ειδικά της εκτενούς όψης, με τις αυξημένες απαιτήσεις ως προς την ιδιαίτερη μορφολογία, την μη περιοδική επανάληψη στοιχείων, τον έλεγχο του ηλιασμού και αερισμού, θα ήταν αδύνατη χωρίς την υποστήριξη από τα σύγχρονα υπολογιστικά και σχεδιαστικά μέσα. Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη, όπως και σε πλήθος άλλων περιπτώσεων τα τελευταία δέκα χρόνια, καθιστούν δυνατή την παραμετροποίηση του σχεδιασμού με τη χρήση ορισμένων κριτηρίων και διαδικασιών ελέγχου της πλήρωσης τους. Οι αλγόριθμοι αυτοί χαίρουν αρκετά εκτενούς χρήσης σήμερα, και η λειτουργία τους βασίζεται, στα μαθηματικά μοντέλα που εισήγαγε η θεωρία του χάους και η θεωρία καταστροφών, ήδη από τις αρχές του 20ου αιώνα, και στην παρατήρηση και μίμηση της εξέλιξης των φυσικών συστημάτων. Αντίστοιχα, η εφαρμογή τους διατείνεται ότι στηρίζεται εξίσου στις θεωρήσεις αυτές του φυσικού κόσμου, και την αναγνώριση του τεχνητού αρχιτεκτονικού έργου ως μέρος αυτού, που βρίσκεται σε συνεχή αλληλεπίδραση με το περιβάλλον του.

Το κατά πόσο η εφαρμογή του νέου αυτού εργαλείου παραμένει, ή μπορεί να παραμείνει κοντά στο υπόβαθρο που έχει τεθεί από άλλες επιστήμες, και το ποιό τελικά είναι αυτό το υπόβαθρο, είναι το θέμα της συγκεκριμένης εργασίας.

0.2. Η θεωρία του Χάους

Η θεωρία του χάους, μαζί με τη θεωρία καταστροφών είναι ένας κλάδος των μαθηματικών που αναπτύχθηκε και βρήκε υποστηριχτές, ήδη από τις αρχές του 20ού αιώνα, με τα μοντέλα που πρότεινε να βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλο εύρος σύγχρονων πρακτικών, από τις φυσικές ως τις ανθρωπιστικές επιστήμες.

Η θεωρία του χάους μελετά τη συμπεριφορά δυναμικών συστημάτων που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στη μεταβολή των αρχικών συνθηκών τους, κάτι που συχνά περιγράφεται ως «φαινόμενο της πεταλούδας» [1]. Παρότι τα συστήματα που περιγράφονται είναι ντετερμινιστικά, δηλαδή η μελλοντική τους κατάσταση εξαρτάται άμεσα από την εξέλιξη των αρχικών συνθηκών, χωρίς να εμπλέκονται "τυχαία" στοιχεία, η μακροπρόθεσμη συμπεριφορά τους είναι αδύνατο να προβλεφθεί, λόγω της μεγάλης διαφοροποίησης στο αποτέλεσμα, που μπορεί να προκληθεί από μια πολύ μικρή μεταβολή στις αρχικές συνθήκες. Η απεριοδική ντετερμινιστική συμπεριφορά που παρουσιάζει ευαίσθητη εξάρτηση στις αρχικές συνθήκες, ονομάζεται χάος.

Η παρατήρηση χαοτικών φαινομένων συνδέθηκε, αρχικά, με μια πρακτική, που απ' τη δεκαετία του '60 άρχισε να γίνεται αντιληπτή ως επιστήμη, σαν εξαιρετικά περίπλοκο πρόβλημα, τη μετεωρολογία. Ο μετεωρολόγος Edward Lorenz ήταν ο πρώτος που διέκρινε την αταξία στη συμπεριφορά του καιρού και επιχείρησε να την ερμηνεύσει αντί να την αγνοήσει, όπως συνηθιζόταν από τους μελετητές μέχρι τότε. Η απεριοδικότητα των καιρικών φαινομένων είναι η βασική αιτία αδυναμίας ακριβούς πρόβλεψης τους. Στην προσπάθεια για πιο οργανωμένη ερμηνεία του φαινομένου, ήρθε να δώσει ώθηση η χρήση του υπολογιστή. Η μοντελοποίη-

1. Ο όρος "φαινόμενο της πεταλούδας" χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από τον E.Lorenz, προκειμένου να περιγράψει το γρήγορο εκφυλισμό των προβλέψεων της μετεωρολογίας λόγω μικρών μεταβολών στα δεδομένα. Ο όρος προέκυψε από την απλουστευμένη περιγραφή του φαινομένου ως το πετάρισμα των φτερών μιας πεταλούδας στο Πεκίνο, που επηρεάζει τον καιρό του επόμενου μήνα εκατοντάδεις χιλιόμετρα μακριά.

ση περίπλοκων συστημάτων έχει την αφετηρία της στη μετεωρολογία, παρότι οι τεχνικές που χρησιμοποιούσε εξυπηρέτησαν, στη συνέχεια, πλήθος κατηγοριών φυσικών και κοινωνικών επιστημών.

Η έννοια της πρόβλεψης πήρε έτσι άλλο χαρακτήρα, μέσα από τη χρήση μοντέλων υπολογισμού και διαγραμματικής απεικόνισης των συστημάτων, και η μελέτη των χαοτικών φαινομένων συνεχίστηκε με πιο επιστημονικούς όρους. Από μαθηματικοί, όπως ο Stephen Smale, και ο James Yorke, μέχρι βιολόγοι, σαν τον Robert May, αντιλήφθηκαν το συσχετισμό των μαθηματικών μοντέλων που ήταν υπό έρευνα με την ουσία της εξέλιξης των φυσικών συστημάτων. Ο Stephen Smale, και ο βασικός αναγνωριστής του έργου του, James Yorke, ήταν από τους πρώτους που διέκριναν την αταξία πίσω από καταγεγραμμένες τιμές που μέχρι τότε απορριπτόταν ως "θόρυβος" και μελέτησαν περιπλοκότερες μορφές περιοδικότητας. Ακόλουθα, ο Robert May, από το πρίσμα της βιολογίας , ανίχνευσε τη χαοτική συμπεριφορά στην αναπαραγωγή πληθυσμών, προχωρώντας πολύ την έρευνα της συμπεριφοράς των φυσικών συστημάτων με βάση τη μεταβολή των παραμέτρων τους.

Το συνολικό συμπέρασμα που συνοψίζει την έρευνα πάνω στο χάος, είναι ότι τα απλά ντετερμινιστικά μοντέλα μπορούν να δημιουργήσουν αυτό που θα αποκαλούσαμε "τυχαία" μακροσκοπική συμπεριφορά. Τη μακροσκοπική αυτή συμπεριφορά των συστημάτων, ο μαθηματικός Benoit Mandelbrot ήρθε να συνδέσει με τη μικροσκοπική, αναζητώντας την επανάληψη των μορφών σε όλες τις κλίμακες. Η συμμετρία αυτή των μορφών απ' τις μικρές στις μεγάλες κλίμακες, είναι και η βάση για τη θεωρία των *fractals*[2], σύμφωνα με την οποία οι μορφές του φυσικού κόσμου, από έναν κεραυνό έως την ακτογραμμή της Μεγάλης Βρετανίας [3], χαρακτηρίζονται από αυτοομοιότητα. Όσο μεταβάλλεται η κλίμακα θέασης μιας μορφολογίας, ο βαθμός αταξίας και πολυπλοκότητας της παραμένει ο ίδιος. *[σχήμα 0.5., η νιφάδα Κωχ]*

Αυτό εκφράζει τη δυνατότητα ενός αντικειμένου να καταλαμβάνει χώρο, βάσει του βαθμού μη- κανονικότητας του, και την αναδρομή της μορφής, την επανάληψη δηλαδή της ίδιας της μορφής μέσα στον εαυτό της. Η σταθερότητα κλίμακας ήταν και η αφετηρία της έρευνας του μαθηματικού Michel Feigenbaum, ο οποίος διατύπωσε την αρχή της παγκοσμιότητας, θέλοντας να μεταφέρει τα πορίσματα του απ' το χώρο των μαθηματικών στο φυσικό κόσμο. Η έρευνα του, κατέστησε εμφανή την ύπαρξη καθολικών κανόνων που διέπουν την εξέλιξη των φυσικών δυναμικών συστημάτων.

Συνολικά, υπήρξε μια θεμελιώδης αλλαγή παραδείγματος (paradigm shift) από το πλαίσιο της ευκλείδειος γεωμετρίας σε μια νέα γεωμετρία που εισήγαγε νέες έννοιες και σχετιζόταν άμεσα με την τοπολογία [4]. Η περαιτέρω μελέτη πάνω στους κανόνες της νέας γεωμετρίας οδήγησε σε εντυπωσιακές εφαρμογές στη μηχανική, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με την ραγδαία εξελισσόμενη ψηφιακή τεχνολογία.

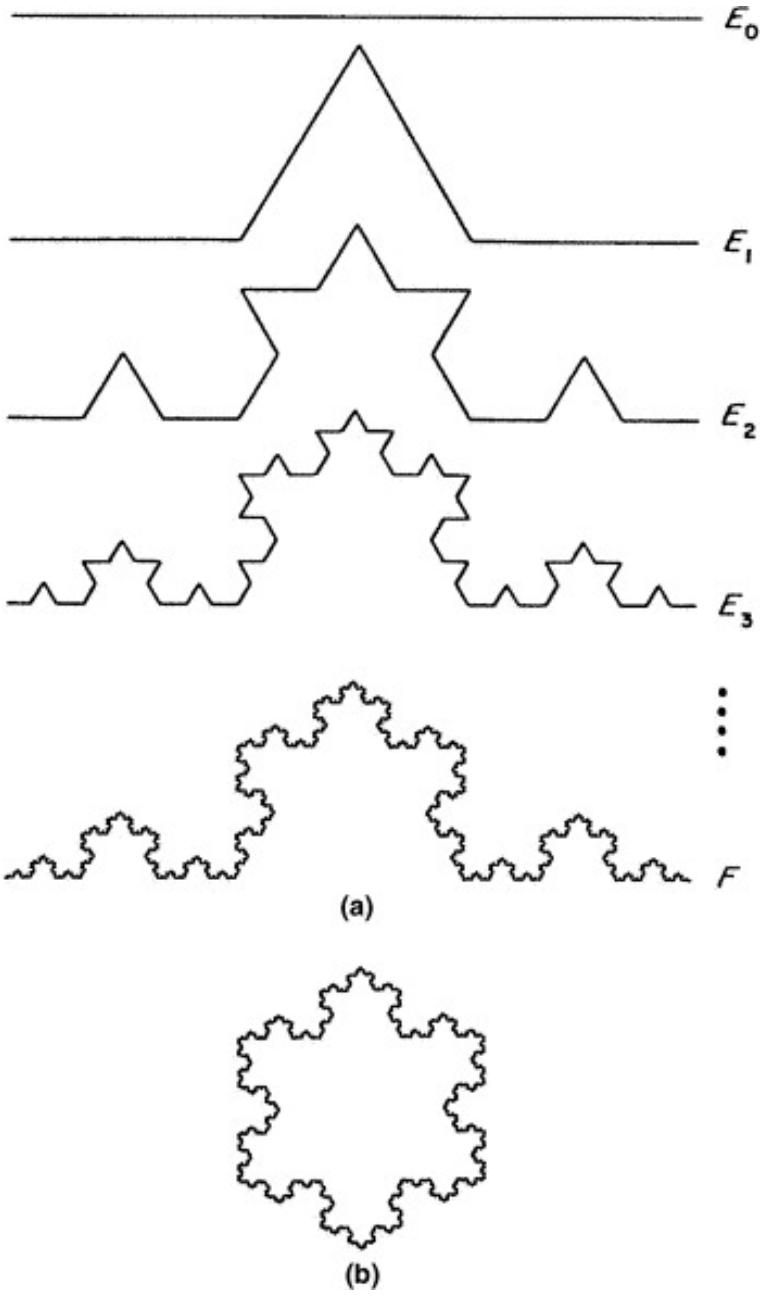
Στην έρευνα πάνω στα φαινόμενα που σχετίζονται με το χάος, βασικό ρόλο παίζει η έννοια της δυναμικής αστάθειας των συστημάτων, δηλαδή των σημείων ισορροπίας , ευσταθών και ασταθών, των δυναμικών συστημάτων, καθώς και η γραμμικοποίηση των μη γραμμικών διαφορικών συστημάτων που τα περιγράφουν.

Στη συνέχεια επιχειρείται μια εξερεύνηση στην έννοια των δυναμικών συστημάτων, της απρόβλεπτης συμπεριφοράς που αναπτύσσουν για συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων, τον τρόπο που τέτοια συστήματα λειτουργούν στον φυσικό κόσμο, και στις ιδιότητες τους που βρίσκουν εφαρμογή στην αρχιτεκτονική πρακτική.

2. *Fractals* σημαίνει θραύσματα. Ο όρος επινοήθηκε από τον B. Mandelbrot, προκειμένου να περιγράψει τον χαρακτηριστικό βαθμό ανωμαλίας μιας μορφολογίας, τον οποίο συνέλαβε ως κλασματική διάσταση.

3. Άρθρο του Benoit Mandelbrot, *How long is the coast of Britain? (Πόσο μήκος έχει η παραλία της Μεγάλης Βρετανίας;* , Science, Vol. 156, Μάϊος 1967)

4. Τοπολογία είναι η μαθηματική μελέτη των ιδιοτήτων που διατηρούνται μέσα από συνεχείς παραμορφώσεις των αντικειμένων. Χαρακτηριστικά, η γνωστή μορφή του ντόνατ, είναι τοπολογικά ανάλογη αυτής μιας κούπας του καφέ. , καθώς το ένα μπορεί να προκύψει από το άλλο, σα μορφή, κάτω από παραμόρφωση, χωρίς να προκύψει σκίσιμο. Σαν επιστήμη, ξεκίνησε από τη μελέτη επιφανειών , και άλλων αντικειμένων στο επίπεδο ή στον τρισδιάστατο χώρο. (πηγή: mathworld.wolfram.com)



0.5. Η νιφάδα Κωχ (Von Koch) είναι ένα χονδροειδές αλλά ικανοποιητικό μοντέλο μιας ακτής για τον Mandelbrot. Ξεκινώντας από ένα ευθύγραμμο τμήμα μήκους 1, φτιάχνουμε ισοσκελές τρίγωνο στο μέσο της γραμμής, με πλευρά 1/3. Συνεχίζοντας τη διαδικασία, το μήκος της οριογραμμής θα είναι 3 x 4/3 x 4/3 x 4/3 x ... έως το άπειρο. Ενώ η οριογραμμή αυξάνεται διαρκώς σε μήκος, το εμβαδό του σχήματος θα μένει πάντα μικρότερο από αυτό του κύκλου που το περιγράφει. (πηγή εικόνας: sciencedirect.com)

1 • Μη Γραμμικά Δυναμικά Συστήματα

Μια ορισμένη μαθηματική όψη της μορφολογίας [...] είναι βοηθητική, αν όχι και ουσιαστική, για τη σωστή μελέτη και την κατανόηση της ανάπτυξης και της μορφής.
(D' Arcy W. Thomson, *Ανάπτυξη και Μορφή στο φυσικό κόσμο*, 1999)

1.1. Τι ονομάζουμε δυναμικά συστήματα

Τα δυναμικά συστήματα είναι ένας τρόπος περιγραφής μιας μεταβολής από μια κατάσταση σε μία άλλη με την πάροδο του χρόνου. Είναι

> το φυσικό φαινόμενο ή η φυσική διεργασία που δύναται να περιγραφεί από μια διαφορική εξίσωση ή ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων (ή εξισώσεων διαφορών), όπου ως ανεξάρτητη μεταβλητή θεωρείται ο χρόνος. Οι εξισώσεις αυτές είναι συνήθως μη-γραμμικές και γενικά μη επιλύσιμες, με τις γνωστές μεθόδους που χρησιμοποιούνται σήμερα, για κάθε τιμή του χρόνου t, και για οιεσδήποτε αρχικές συνθήκες. (Ιωάννης Χαΐνης, *Εισαγωγή στη θεωρία του Χάους*, 2007,σελ. 39)

Το σύστημα μακροπρόθεσμα μπορεί να καταλήγει σε ισορροπία, σε περιοδική μεταβολή ή σε περίπλοκη χαοτική συμπεριφορά, όπως θα δούμε στη συνέχεια.

Ένα συνεχές δυναμικό σύστημα θα ήταν της μορφής:

$x' = f(x)$,

δηλαδή ένα σύστημα N διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξεως, η λύση της οποίας είναι η καμπύλη $x = x(t) = [x1(t), x2(t), \ldots, xN(t)]$. (1)

Άρα ο ρυθμός μεταβολής του συστήματος εμφανίζεται ως συνάρτηση της παρούσας κατάστασης του.

1.1.1. Γραμμικά και Μη-γραμμικά δυναμικά συστήματα

Τα δυναμικά συστήματα διακρίνονται, χάριν μελέτης, σε συνεχούς χρόνου και διακριτού χρόνου. Στην πραγματικότητα τα φυσικά συστήματα εμφανίζουν τις μεταβολές σε συνεχές διάστημα χρόνου, οπότε ο χρόνος t είναι και η μόνη ανεξάρτητη μεταβλητή. Τα περισσότερα προβλήματα της μηχανικής χρησιμοποιούν διαφορικές εξισώσεις συνεχούς χρόνου. Απ' την άλλη, χρησιμοποιούμε διακριτό χρόνο στους λεγόμενους *χάρτες (iterated maps),* ως εργαλεία για την ανάλυση περιοδικών ή χαοτικών λύσεων διαφορικών εξισώσεων, καθώς προσφέρουν μια

απλοποιημένη εικόνα των χαοτικών συμπεριφορών. Σ' αυτήν την περίπτωση η παρατήρηση και τα αποτελέσματα για ένα σύστημα γίνονται σε τακτές επαναλήψεις n. Για παράδειγμα, στη μελέτη πληθυσμών, όπως και στον R.M. May, οι τιμές καταγράφονται ανά αναπαραγωγική περίοδο.

Στην μελέτη των δυναμικών συστημάτων, ήδη από τον 17ο αιώνα διακρίνουμε γραμμικά και μη-γραμμικά συστήματα. *Γραμμικά* είναι τα οικεία μας συστήματα εξισώσεων που εμφανίζουν στο δεξί σκέλος της εξίσωσης μόνο πρώτες δυνάμεις της μεταβλητής x.

Για παράδειγμα, θεωρώντας x' το βαθμό μεταβολής του x όσο μεταβάλλεται ο χρόνος t, το σύστημα:

x1'=x2

x2'= -(b/m)x2 – (k/m)x1 ,

με παραμέτρους *b,k,m* και μεταβλητή το *x*,

είναι γραμμικό και μπορεί να επιλυθεί με τη βοήθεια πινάκων. Σε γενικές γραμμές τα γραμμικά συστήματα μπορούν να γραφούν σε μορφή πίνακα *Ax=b* , όπου το *A* είναι ο πίακας των συντελεστών, *x* η στήλη των μεταβλητών και *b* η στήλη των λύσεων. Έτσι:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{-k}{m} & 0 \\ \frac{-b}{m} & 1 \end{pmatrix}$$

$$b = \begin{pmatrix} x_1' \\ x_2' \end{pmatrix} \quad \text{και οι μεταβλητές} \quad \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_1' \\ x_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-k}{m} & 0 \\ \frac{-b}{m} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$$

Μη γραμμικό χαρακτηρίζεται ένα δυναμικό σύστημα εάν αυτό αποκλίνει από την σχέση απλής αναλογίας μεταξύ δύο μεγεθών, δλδ των αποτελεσμάτων που παρατηρούνται και των αιτιών που τα προκάλεσαν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μη-γραμμικότητας είναι η εμφάνιση πολλαπλών λύσεων των εξισώσεων που προσδιορίζουν ένα σύστημα. Δημιουργείται έτσι ένα σύνολο εμφανιζόμενων, δυνατών τιμών, τις οποίες μπορεί να πάρει κάποια μεταβλητή του συστήματος. Κάτι τέτοιο γίνεται αντιληπτό από τον παρατηρητή ως απροσδόκητη μετάβαση χρονικά ή βηματικά από τη μία τιμή στην άλλη, και ως "αδυναμία πρόβλεψης" της μελλοντικής μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς του συστήματος.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα μη-γραμμικού συστήματος που συναντάται πολύ συχνά στη συστημική μελέτη είναι το εκκρεμές. Το εκκρεμές που εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση περιγράφεται από τις εξισώσεις :

$x_1' = x_2$

$x_2' = -g/L \sin x_1$

όπου *g* η επιτάχυνση της βαρύτητας, *L* το μήκος του εκκρεμούς, *x, (ή θ)* η γωνία ταλάντωσης σε σχέση με την κάθετο, και *x'* ο ρυθμός μεταβολής του *x*, δηλαδή η γωνιακή ταχύτητα του εκκρεμούς. *[σχήμα 1.1.]*

Πλέον είναι ευρέως παραδεκτό ότι οι νόμοι της Φυσικής είναι ανεξαιρέτως μη γραμμικοί.

1.1.2. Ο χώρος των φάσεων

Για την απεικόνιση και την ερμηνεία των δυναμικών συστημάτων, οι διαδοχικές τιμές των μεταβλητών καταγράφονται στο χώρο των φάσεων. Ο *χώρος των φάσεων* είναι ο χώρος ο αποτελούμενος από n διαστάσεις *(x1, x2, …, xn)*, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις μεταβλητές του συστήματος. [σχήμα 1.2.] Κάθε κατάσταση του συστήματος στο πέρας του χρόνου απεικονίζεται άρα με μοναδικό σημείο του χώρου αυτού. Το σύνολο των σημείων αυτών αποτελεί την τροχιά του συστήματος, η οποία δίνεται από την καμπύλη (1). Ο τρόπος αυτός απεικόνισης διαδοχικών σημείων είναι βασικός για τη γραφική απεικόνιση μη-γραμμικών συστημάτων, καθώς οι τροχιές αυτών των συστημάτων δεν μπορούν να προσδιοριστούν αναλυτικά από εξισώσεις. Τα γραμμικά συστήματα αυτά εμφανίζουν χαρακτηριστικά, στο χώρο των φάσεων, περιοχές στις οποίες η φασική τροχιά εξελίσσεται «απρόβλεπτα», ή «τυχαία».

Αν πάρουμε για παράδειγμα τις εξισώσεις που διέπουν την απλή αρμονική ταλάντωση:

$\frac{d^2x}{dt^2}+\omega^2 x=0$ (1),

η οποία έχει τη γενική λύση:

x= A cosωt+ B sinωt

x= C cos(ωt – D) , όπου $C=\sqrt{A^2+B^2}$ και $D=\arctan(\frac{B}{A})$

Εισάγουμε μεταβλητή $y=\frac{dx}{dt}=x'$.

$$y'=\frac{d^2x}{dt}$$

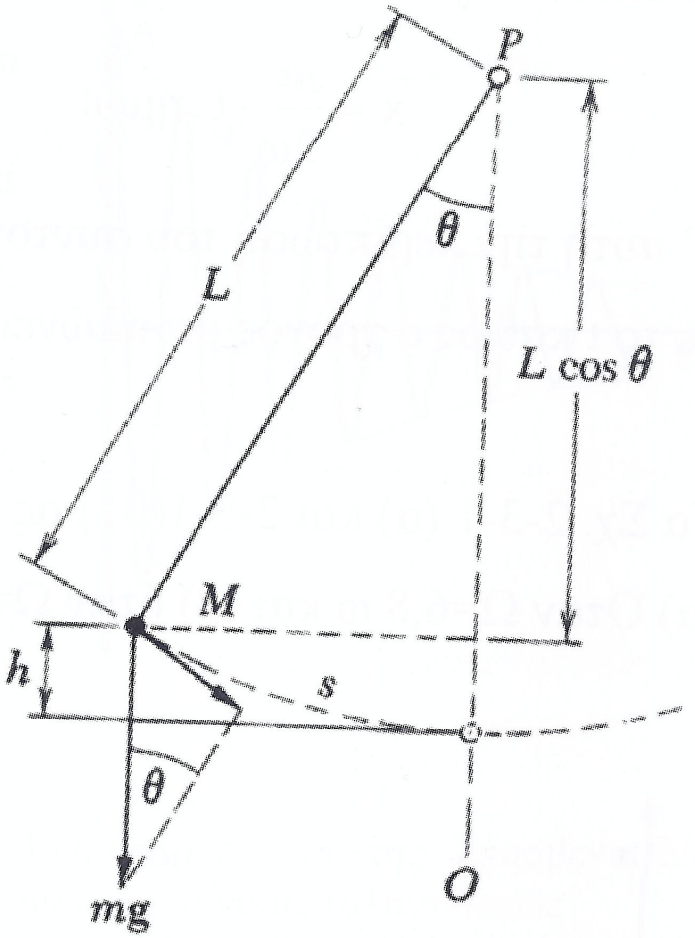
Έτσι η εξίσωση (1), γράφεται:

$x'=y$

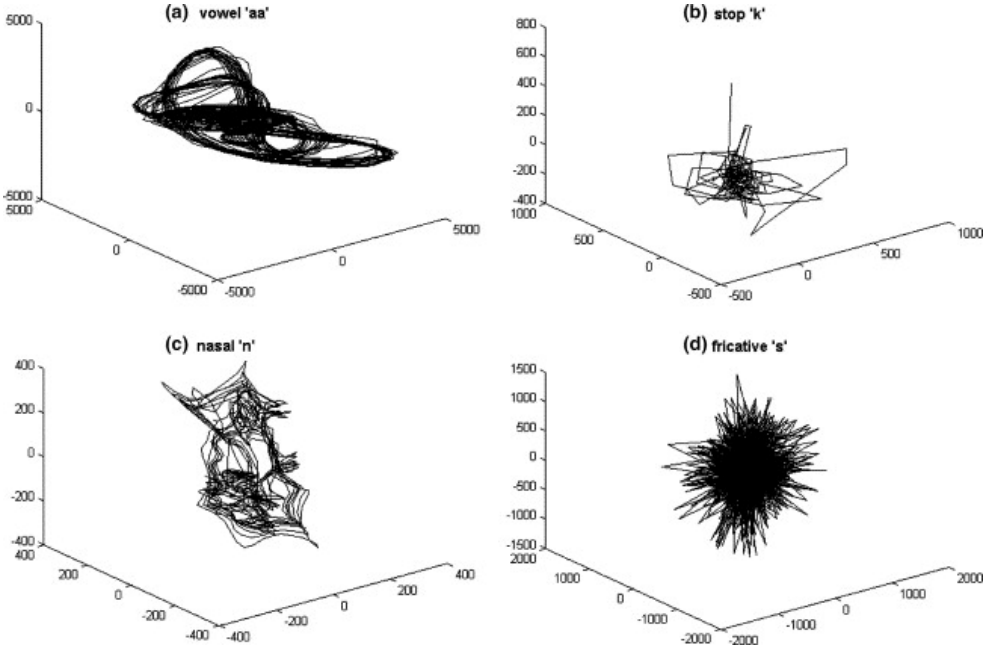
$y'=-\omega^2 x$ (2)

Το πιο πάνω σύστημα (2), δεν εμφανίζει εξάρτηση από τον χρόνο επειδή στο δεξιά σκέλος των εξισώσεων απουσιάζει η μεταβλητή t. Σ' αυτή την περίπτωση το σύστημα είναι αυτόνομο. Για την επίλυση των μη-γραμμικών δυναμικών συστημάτων, επιδιώκεται η αναγωγή τους σε αυτόνομα. Με την προσθήκη μιας ακόμα διάστασης, στη συγκεκριμένη περίπτωση του ρυθμού μεταβολής του x, y, μπορεί να εξαλειφθεί η εξάρτηση από το χρόνο. Το πρόβλημα είναι πλέον δύο διαστάσεων και οι συντεταγμένες του χώρου των φάσεων θα είναι οι x και y.

Η αυξημένη δυσκολία αριθμητικής μελέτης και περιγραφής συστημάτων από δύο και πάνω διαστάσεις, οδήγησε στη σύγχρονη οπτική γωνία όσον αφορά στα δυναμικά συστήματα, η οποία αφορά στην ποιοτική μάλλον, παρά ποσοτική μελέτη της εξέλιξης των συστημάτων. Αντί για τον ακριβή προσδιορισμό μεγεθών , η προσοχή στράφηκε στην παρατήρηση και διατύπωση θεωριών για τη συσχέτιση των παραμέτρων ,τα σημεία ισορροπίας και την εξέλιξη τους και τη σταθερότητα των συστημάτων.



1.1. Εκκρεμές σε απλή αρμονική ταλάντωση, όπου *L* το μήκος του εκκρεμούς , *θ* η γωνία ταλάντωσης και *M* η μάζα του (πηγή: Ι.Χαϊνης, *Εισαγωγή στη θεωρία του Χάους*, σχήμα 2.4.3.)



1.2. Τέσσερα παραδείγματα φαινομένων στον τρισδιάστατο χώρο των φάσεων. Με τη διαδοχική καταγραφή σημείων, που έχουν ως συντεταγμένες τις παραμέτρους του συστήματος, σχηματίζεται η τροχιά που αποτυπώνεται σε κάθε ένα από τα τέσσερα διαγράμματα. (πηγή: sciencedirect.com)

Τη συστηματοποίηση αυτής της ποιοτικής και μορφολογικής μάλλον προσέγγισης, η οποία κινείται περισσότερο στο πλαίσιο της τοπολογίας παρά των καθαρών μαθηματικών, υποστηρίζει και ο Réné Thom, Γάλλος μαθηματικός που διατύπωσε την θεωρία καταστροφών. Διαχωρίζοντας την *δομική (structurale)*, όπως την ονομάζει, από την *αναγωγηστική (réductionniste)*, ο Thom δανείζεται, για να περιγράψει το χώρο των φάσεων των δυναμικών συστημάτων, τον όρο *μορφογενετικό πεδίο (champ morfogénétique)* από εμβρυολόγους το 19ο αιώνα που περιέγραφαν τον πολύ σταθερό χαρακτήρα σχηματισμών ιστών και οργάνων στην εμβρυολογία. Προσθέτοντας την παράμετρο του χρόνου, ο Thom χρησιμοποιεί τον όρο *chréode (από το ελληνικό χρη + οδός)* για να δηλώσει την τάση των δυναμικών συστημάτων να φτάνουν σε σταθερή και αμετάβλητη μορφή, όσο η μεταβλητή του χρόνου τείνει στο άπειρο.

1.2. Σταθερά σημεία και διακλαδώσεις

Τα δυναμικά συστήματα στη συντριπτική πλειοψηφία τους τείνουν να σταθεροποιηθούν σε μια συγκεκριμένη κατάσταση ή περιοδική συμπεριφορά, στο πέρας του χρόνου. Η συμπεριφορά αυτή στο χώρο των φάσεων εκδηλώνεται με τη μορφή σημείων ή επαναλαμβανόμενων τροχιών. Στις θέσεις αυτές, ο ρυθμός μεταβολής της κατάστασης του συστήματος μηδενίζεται, κάτι που υποδηλώνει ότι ένα σύστημα που ξεκινάει από τη θέση αυτή θα παραμένει αμετάβλητο, ενώ από οποιαδήποτε άλλη θέση τείνει να καταλήξει σε κάποια από αυτές τις θέσεις σταθερότητας.

Για ένα μη-γραμμικό δυναμικό σύστημα συνεχομένου χρόνου σε χώρο n διαστάσεων, θεωρούμε ως *f(x)* τη συνάρτηση της παραγώγου του *x* ως προς μεταβολή χρόνου *dt*:

$$\frac{dx}{dt} = f(x)$$

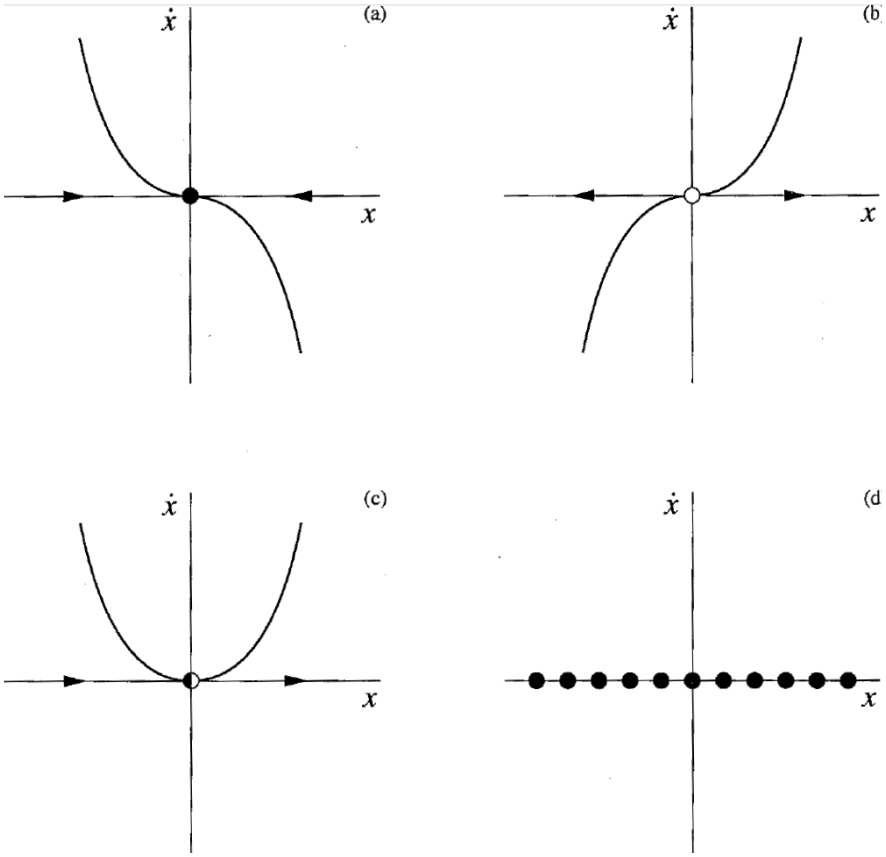
ή $x' = f(x)$,με $x \in R^n$

,όπου η *f(x)* είναι συνεχώς διαφορίσιμη, σταθερά σημεία ή σημεία ισορροπίας ενός συστήματος ονομάζονται τα σημεία x* για τα οποία *f(x*) = 0*. δηλαδή όπου ο ρυθμός μεταβολής του x ως προς το χρόνο t μηδενίζεται.

Εάν για το σταθερό σημείο *x**, ισχύει *f '(x*)<0*, τότε το σημείο αυτό είναι ευσταθές σημείο ισορροπίας του δυναμικού συστήματος. Αντίθετα, εάν *f '(x*)>0* τότε το *x** είναι ασταθές σημείο ισορροπίας, ενώ για *f '(x*) = 0,* δεν είναι δυνατόν να αποφανθούμε.

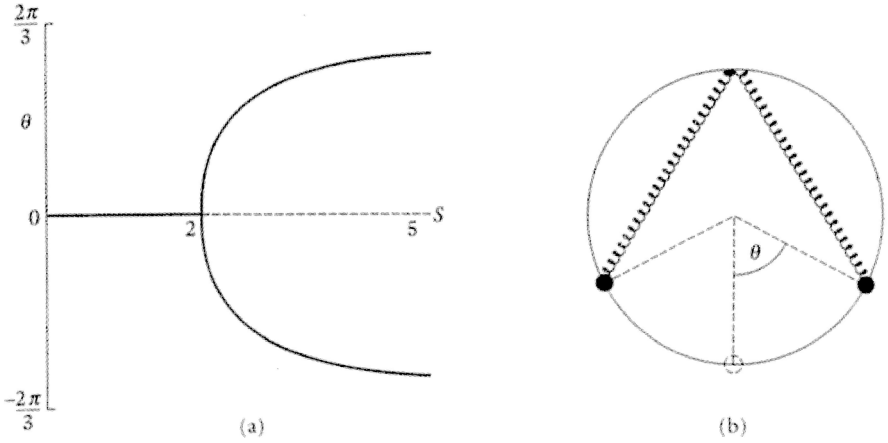
Στην ουσία τα σημεία αυτά απεικονίζουν τις καταστάσεις ισορροπίας του συστήματος. Όπως παρατηρεί και ο Réné Thom[5], οι μορφολογίες τείνουν σε μια σταθερή οριακή θέση, αμετάβλητη στο χρόνο. Τα σταθερά σημεία ενός συστήματος n διαστάσεων μπορούν ν' αλλάξουν, ανάλογα με το πώς μεταβάλλονται οι παράμετροι. Τα σημεία μπορεί να καταστραφούν, να μεταβληθεί η σταθερότητα τους, ή να δημιουργηθούν νέα.

5. Réné Thom, *Modéles Mathématiques de la morphogénése*, Academia Nazionale dei lincei, Scuola Normale Superiore Di Pisa, MCMLXXI

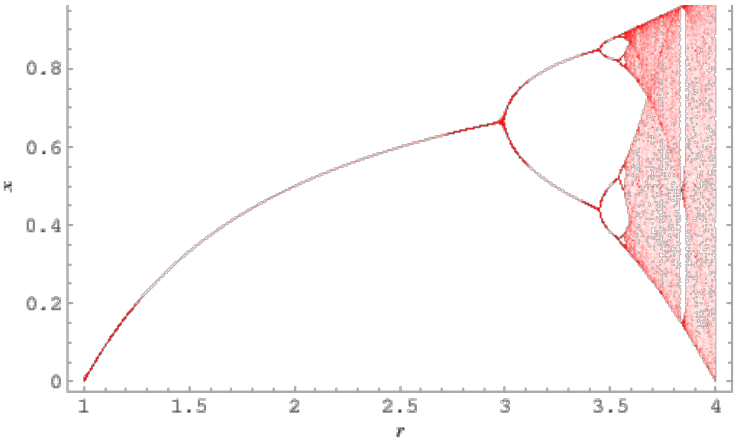


1.3. Γραφική απεικόνιση x, x'=f(x), τεσσάρων εξισώσεων,
a. $f(x)= -x^3$ c. $f(x)= x^2$
b. $f(x)= x^3$ d. $f(x)=0$

Κάθε σύστημα εμφανίζει σταθερό σημείο στο $x^*=0$, όπου $f'(x^*)=0$. αλλά η σταθερότητα τους είναι διαφορετική σε κάθε περίπτωση. Στην (a) είναι ευσταθές. και συμβολίζεται με συμπαγές κύκλο, αφού σε αυτό τείνουν και οι υπόλοιπες καταστάσεις του συστήματος, ενώ αντίθετα το (b) είναι ασταθές, και συμβολίζεται με κενό κύκλο. Στο (c) το σταθερό σημείο είναι υβριδικό, και ονομάζεται ημι-ευσταθές, καθώς από τα αριστερά έλκει και από τα δεξιά απωθεί τις θέσεις του συστήματος. Τέλος, το (d) είναι μια συνεχής γραμμή ευσταθών σταθερών σημείων, χωρίς να υπάρχουν διακυμάνσεις. (πηγή: Strogatz, *Non-linear dynamics and chaos*, σχήμα 2.4.1.)



1.4. Εμφάνιση διακλάδωσης στην απεικόνιση της κίνησης εκκρεμούς που κινείται στην άκρη ελατηρίου, πάνω σε μεταλλικό στεφάνι. Για S>2 τα σταθερά σημεία του συστήματος μεταβάλλονται. (πηγή: Ι.Χαϊνης, *Εισαγωγή στη θεωρία του Χάους*, σχήμα 4.3.1.)



1.5. Εμφάνιση διακλάδωσης στην απεικόνιση του συστήματος, που εμφανίζονται ως προς την παράμετρο r. Κάθε νέα περίοδος σηματοδοτείται από την εμφάνιση νέας διακλάδωσης, ενώ για περίοδο >3, παρατηρείται χαοτική συμπεριφορά. (πηγή: mathworld.wolfram.com)

Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε εκκρεμές, μία σφαίρα μάζας m, που κινείται περιμετρικά ενός λείου κυκλικού σύρματος ακτίνας l χωρίς τριβή. Εάν η σφαίρα είναι ενωμένη με το υψηλότερο σημείο Q του σύρματος με ελατήριο φυσικού μήκους επίσης l.

Εάν το ελατήριο είναι "αδύναμο", τότε η θέση θ=0 είναι θέση ευσταθούς ισορροπίας του συστήματος, όπως και στην περίπτωση που δεν υπήρχε ελατήριο. Εάν όμως το ελατήριο είναι δυνατό, και η σφαίρα βρίσκεται στο θ=0, θα παραμείνει μεν ακίνητη, αλλά με την παραμικρή εξωτερική δύναμη που θα ασκηθεί πάνω της, θα εκτιναχθεί και θα σταθεροποιηθεί σε τελείως διαφορετική θέση, είτε προς τη θετική είτε αρνητική φορά του συστήματος. Τότε, η θέση θ=0 είναι θέση ασταθούς ισορροπίας.

Βλέπουμε άρα ότι η σταθερότητα ή αστάθεια των σημείων ισορροπίας εξαρτάται από τις παραμέτρους του συστήματος, στη συγκεκριμένη περίπτωση από την τιμή της σταθεράς του ελατηρίου α. Όσο το α αλλάζει τιμές, τα σημεία ισορροπίας του συστήματος μεταβάλλονται τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά. [σχήμα 1.4.]

Στο προηγούμενο παράδειγμα, αν θεωρήσουμε παράμετρο , τότε:

- για S<2 (αδύναμο ελατήριο), το θ=0 είναι θέση ευσταθούς ισορροπίας
- για S>2 (δυνατό ελατήριο), το θ=0 είναι θέση ασταθούς ισορροπίας,

ενώ τα σημεία ευσταθούς ισορροπίας δίνονται από την εξίσωση:

$$\theta = 2\cos\text{arc}\frac{1}{\left(2\left(1-S^{-1}\right)\right)}$$

Οι ποιοτικές αυτές μεταβολές στα σταθερά σημεία ενός συστήματος ονομάζονται *διακλαδώσεις*, ή *bifurcations*. Το φαινόμενο αυτό φέρει την ονομασία αυτή ακριβώς επειδή, εάν γίνει η απεικόνιση σε ένα διάγραμμα του *f(x)* ως προς μια παράμετρο, η αρχική θέση ισορροπίας στο διάγραμμα φαίνεται να "σπάει" και να διχαλώνεται σε δύο άλλες.

Η εμφάνιση των διακλαδώσεων περιορίζεται σε μία διάσταση, δηλαδή στη μεταβολή μόνο μίας από της παραμέτρους του συστήματος, επομένως ο αριθμός n των διαστάσεων του συστήματος δεν επηρεάζει τη μορφή της διακλάδωσης που μας ενδιαφέρει.

Τα ευσταθή σταθερά σημεία, ιδιαίτερα όταν αναφερόμαστε σε μη-γραμμικά δυναμικά συστήματα, ονομάζονται *ελκυστές (attractors)*, καθώς οι τροχιές στο χώρο ή στο επίπεδο των φάσεων (το επίπεδο x, x') φαίνονται να "έλκονται" από τα σταθερά σημεία. Δηλαδή όλες οι τροχιές που ξεκινούν από γειτονικά σημεία $x(t) \rightarrow x^*$, όσο $t \rightarrow \infty$ και το σύστημα τείνει να σταθεροποιηθεί, έστω προσωρινά, στη συγκεκριμένη κατάσταση του χώρου των φάσεων. Εάν ένα σημείο "ελκύει" όλες τις τροχιές του χώρου των φάσεων, ονομάζεται *ολικός ελκυστής (global attractor)*. Αντίστοιχα, τα ασταθή σταθερά σημεία ονομάζονται και *απωθητές (repellers)*.

Εκτός από σταθερά σημεία, στις απεικονίσεις των δυναμικών συστημάτων στο χώρο των φάσεων εμφανίζονται κλειστές τροχιές , οι οποίες αντιπροσωπεύουν περιοδική συμπεριφορά του συστήματος, για ορισμένο εύρος τιμών, δηλαδή για $x(t+T)= x(t)$, $T>0$. Αντίστοιχα, η διαμόρφωση των γειτονικών τροχιών γίνεται διαφορετικά κοντά στις κλειστές τροχιές και διαφορετικά κοντά στα σταθερά σημεία. Για παράδειγμα, ένα γραμμικό σύστημα, όπως η απλή αρμονική ταλάντωση, στο επίπεδο των φάσεων (x,x') αποτυπώνεται με τη μορφή ομόκεντρων ελλείψεων γύρω από το σταθερό σημείο $x^* = (0,0)$. Αυτό σημαίνει ότι στην απλή αρμονική

ταλάντωση ένα σώμα που έχει μηδενική ταχύτητα στο κατώτερο σημείο (x=0) θα παραμείνει ακίνητο εκεί, ενώ ένα σώμα με συγκεκριμένη αρχική ταχύτητα και θέση, θα επιστρέψει σε αυτήν μετά από το πέρας μιας περιόδου Τ. [σχήμα 1.6.]

Η περιοδική συμπεριφορά μπορεί να εκδηλωθεί, και σε μη κυκλική , περιπλοκότερη, αλλά απαραίτητα κλειστή καμπύλη, όπως στην περίπτωση μιας μη απλής αρμονικής ταλάντωσης. Στην περίπτωση αυτή, στον χώρο των φάσεων, οι τροχιές του συστήματος εμφανίζονται "απομονωμένες" είτε στη εντός είτε εκτός της καμπύλης, ενώ τείνουν συνεχώς προς αυτήν. Η καμπύλη ονομάζεται *οριακός κύκλος (stable limit cycle)*. Οι κύκλοι αυτοί εκφράζουν μια κλειστή τροχιά σημείων, που μπορεί να ελκύει ή να απωθεί τα γύρω της σημεία, παράλληλα όμως λειτουργεί σαν όριο. Περιορίζει τις τροχιές που ξεκίνησαν εντός τους να παραμείνουν εντός τους για $t \rightarrow \infty$, και αντίστοιχα αυτές που ξεκίνησαν εκτός να παραμείνουν εκτός. *[σχήμα 1.7]*

Η λίστα αυτή των συμπεριφορών είναι εξαντλητική, όπως αποδεικνύεται από το θεώρημα των Poincaré- Bedixon. Αυτό σημαίνει, πως οι τροχιές στον χώρο των φάσεων των δυναμικών συστημάτων μπορούν:

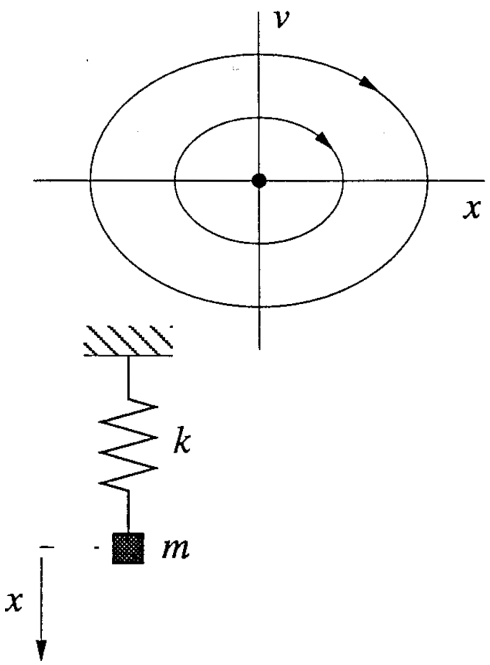
- να τερματίζουν σε ένα σημείο ισορροπίας
- να επιστρέφουν στο αρχικό τους σημείο (κλειστή τροχιά)
- να προσεγγίζουν έναν οριακό κύκλο.

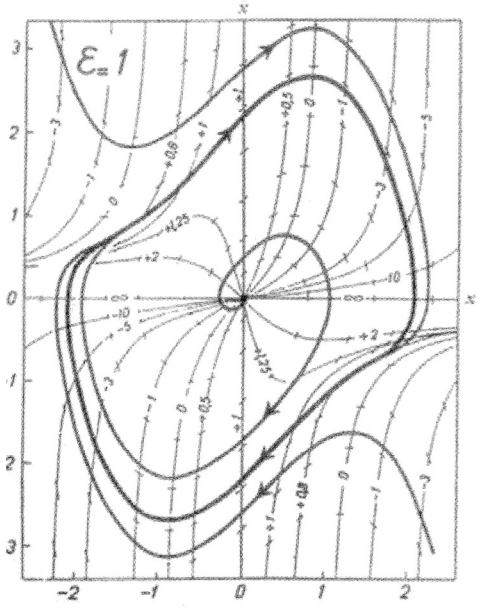
Το βασικότερο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι ως εκ τούτου, οι τροχιές στο χώρο των φάσεων δεν είναι δυνατό να τέμνονται, παρά μόνο να συναντώνται στα σταθερά σημεία. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν προβάλλουμε ένα σύστημα n διαστάσεων σε χώρο λιγότερων διαστάσεων, όπως εάν δούμε μια προβολή ενός τρισδιάστατου χώρου φάσεων στο επίπεδο, μπορεί να δοθεί η εντύπωση πως οι τροχιές διασταυρώνονται, ενώ στην πραγματικότητα αυτό δε συμβαίνει.

1.3. Ελκυστές

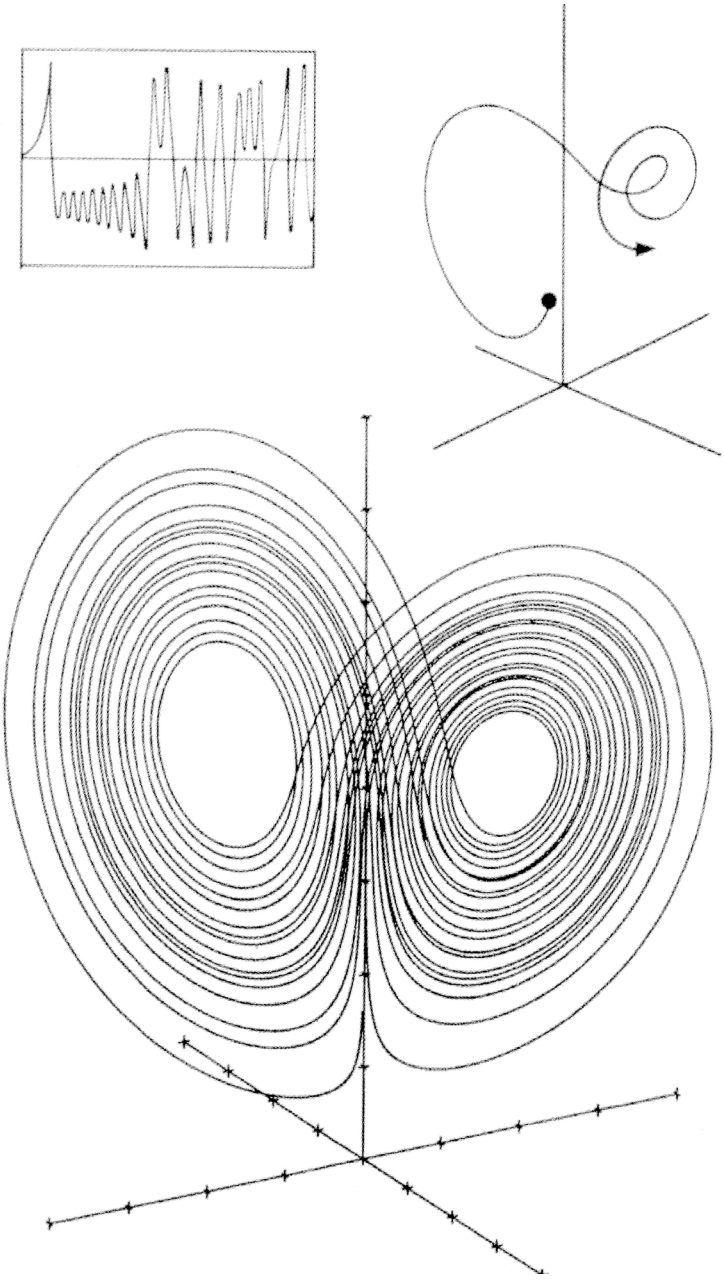
Κατά τον Réné Thom, ως *ελκυστής (attracteur)* ορίζεται το σύνολο των σημείων στο χώρο των φάσεων, στα οποία τείνει να αναχθεί η κατάσταση ενός συστήματος στην πάροδο του χρόνου. Ο κάθε ελκυστής παρουσιάζει μια *λεκάνη* (*bassin,* σύμφωνα με την ορολογία του Réné Thom) από τις τροχιές που τείνουν στο απώτερο όριο του. Η λεκάνη ελκυσμού συντίθεται από το σύνολο των αρχικών καταστάσεων x_0 τέτοιων ώστε $x(t) \rightarrow x^*$,όσο το $t \rightarrow \infty$. Ουσιαστικά αναφέρεται στα σημεία που "επηρεάζονται" από το σημείο ελκυσμού. Η κατάσταση γίνεται κάπως πιο περίπλοκη από την ύπαρξη δύο ή περισσοτέρων ελκυστών. Σ' αυτή την περίπτωση, οι "λεκάνες" τους βρίσκονται σε ανταγωνισμό και τείνουν να διαχωριστούν από επιφάνειες ορισμένης γεωμετρίας, οι οποίες ονομάζονται όρια της λεκάνης.

Ο Réné Thom ασχολήθηκε εκτενώς με τον προσδιορισμό των λεκανών των ελκυστών και των ορίων αυτών. Στο έργο του πάνω στη θεωρία καταστροφών ερμηνεύει την έννοια της διακλάδωσης (bifurcation) ως την καταστροφή ενός ελκυστή λόγω διαφοροποίησης του πεδίου του, και η αντικατάσταση του από νέ-





ΑΡΙΣΤΕΡΑ: 1.6. Γραφική απεικόνιση, στο χώρο των φάσεων, x, v=x′, της κίνησης ενός αρμονικού ταλαντωτή, με εξίσωση
x′= v
v′= -k/m x, όπου m, η μάζα και k η σταθερά του ελατηρίου.
Η περιοδική συμπεριφορά του συστήματος αποτυπώνεται στη μορφή των κλειστών ελλείψεων.
(πηγή: Strogatz, *Non-linear dynamics and chaos*, σχήμα 5.1.3.)



ΔΕΞΙΑ: 1.7. Προσέγγιση προς τον οριακό κύκλο στο επίπεδο των φάσεων της εξίσωσης : x′=y
y′=-x-ε (x^2-1)y
για ε=1.
Οι τροχιές κινούνται ελικοειδώς γύρω από τη γειτονιά της αρχικής θέσης και πληριάζουν συνεχώς πτος την κλειστή (και έντονη στο σχήμα) κλειστή καμπύλη.
(πηγή: Ι.Χαϊνης, *Εισαγωγή στη θεωρία του Χάους*, σχήμα 5.2.3.)

1.7. Ο παράξενος ελκυστής του Lorenz.
Στα δύο σκέλη που διακρίνονται στις τροχιές οφείλεται η ονομασία του ως "πεταλούδα".
ΠΑΝΩ ΑΡΙΣΤΕΡΑ:
Διάγραμμα *x,t,* όπου φαίνεται η απεριοδική κίνηση της κατάστασης του συστήματος.
ΠΑΝΩ ΔΕΞΙΑ: Ένδειξη της τροχιάς από μια συγκεκριμένη αρχική κατάσταση του συστήματος Lorenz.
(πηγή: Ι.Χαϊνης, *Εισαγωγή στη θεωρία του Χάους*, σχήμα 5.4.3)

ους ελκυστές. Ο σχηματισμός περισσοτέρων ελκυστών που μοιράζονται το πεδίο του αρχικού έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μορφολογιών στις περιοχές σύγκρουσης των "λεκανών". Ο Thom ορίζει ως *βασική καταστροφή (catastrophe élémentaire)*:

> Θεωρούμε ένα πεδίο τοπικών δυναμικών που ορίζονται ως κλίση[6] του δυναμικού. Με τον όρο βασική καταστροφή περιγράφουμε κάθε κατάσταση σύγκρουσης μεταξύ τοπικών καθεστώτων,που αντιστοιχούν στα ελάχιστα του δυναμικού, η οποία μπορεί να παραχθεί με τρόπο σταθερό στο χωροχρόνο τεσσάρων διαστάσεων. [7]

Κατ' επέκταση και οι μορφολογίες αυτές, που παρεμβάλλονται στη συνέχεια του συστήματος στο χώρο των φάσεων ορίζονται ως *καταστροφές (catastrophes)*, στην ορολογία του Thom. Αιτία δημιουργίας τους είναι η ύπαρξη των διακλαδώσεων στη διαγραμματική απεικόνιση του φαινομένου, και αποδεικνύεται ότι ο αριθμός των ειδών τους είναι πεπερασμένος. Σύμφωνα με την καταγραφή του Réné Thom συναντώνται επτά είδη καταστροφών στο χώρο φάσεων 4 διαστάσεων. [8]

Τελικά, με μαθηματικούς όρους ένας ελκυστής είναι ένα κλειστό σύνολο A, με τις ακόλουθες τρεις ιδιότητες:

1. Το A είναι ένα αμετάβλητο σύνολο. Κάθε τροχιά $x(t)$ που ξεκινά με $x_0 \in A$, μένει στο A για $t \to \infty$.

2. Το A "ελκύει" ένα ανοιχτό σύνολο αρχικών συνθηκών. Υπάρχει ανοιχτό σύνολο U που περιέχει το A, τέτοιο ώστε εάν $x(0) \in U$, τότε η απόσταση από το $x(t)$ στο $A \to 0$, όσο $t \to \infty$. Το μέγιστο τέτοιο U εκφράζεται με τη λεκάνη έλξης.

3. Το A είναι ελάχιστο. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει καθαρό υποσύνολο του A που να ικανοποιεί τις συνθήκες 1 και 2.

Η συνθήκη 3. είναι ιδιαίτερα δύσκολη ως προς την απόδειξη της, και άρα ο προσδιορισμός ενός συνόλου σημείων ως "ελκυστή" συχνά είναι αυθαίρετος. Ακόμα και ο ελκυστής του Lorenz, μια από τις σημαντικότερες εκφάνσεις του χάους, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, δεν είναι αποδεδειγμένο ότι ικανοποιεί την τελευταία συνθήκη.

6. *Κλίση,* ή *gradient* είναι ένας πρώτης τάξεως διαφορικός φορέας που αποτυπώνει μια συνάρτηση ανυσμάτων σε διανυσματικό πεδίο. Είναι ουσιαστικά μια γενίκευση της παραγώγου, που δίνει πληροφορία για το ρυθμό μεταβολής μιας συνάρτησης απέναντι σε μικρές μεταβολές των ανεξάρτητων παραμέτρων της. Συμβολίζεται με ανάδελτα ∇. [πηγή: planetmath.org]

7. Πρωτότυπο: On considére un champ de dynamiques locales définies comme gradient d´un potentiel. Par catastrophe élémentaire, on désigne toute situation de conflit entre régimes locaux, minima du potentiel, qui peut se produire de maniere stable sur l´espace-temps a quatres dimensions. [Réné Thom, *Modeles Mathématiques de la Morphogénése*, Accademia Nazionale dei Lincei, Scuola Normale Superiore di Pisa, Pisa, MCMLXXI, p.59]

8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Είδη καταστροφών, σελ. 73

1.4. Ο Lorenz και ο "παράξενος" ελκυστής

Ο μετεωρολόγος Edward Lorenz, τον οποίο συναντήσαμε σύντομα και στο κεφάλαιο 0.2., μελετώντας τις κινήσεις των ρευστών κατά τη μεταφορά θερμότητας από κάτω προς τα πάνω, οδηγήθηκε στην περιγραφή ενός δυναμικού συστήματος, το οποίο σε απεικόνιση στον χώρο των φάσεων, επέδειξε ένα πολύ ιδιαίτερο σύνολο σημείων.

Οι εξισώσεις του Lorenz, έχουν τη μορφή:

$$x' = \sigma (y - x)$$

$$y' = rx - y - xz$$

$z' = xy - bz$

όπου x η ταχύτητα της ροής του υγρού, y, z είναι χαρακτηριστικά γνωρίσματα της θερμοκρασίας του υγρού, και r το μέτρο της επιβαλλόμενης διαφοράς θερμοκρασίας.

Για ένα πεδίο τιμών των παραμέτρων $\sigma,r,b > 0$ (χαρακτηριστικά $r = 28$, $\sigma = 10$, $b = 8/3$), δεν εμφανίζονται στο σύστημα ούτε σταθερά σημεία ούτε σταθεροί οριακοί κύκλοι, παρότι αποδεδειγμένα όλες οι τροχιές βρίσκονται εντός οριοθετημένης περιοχής του χώρου των φάσεων. Οι τροχιές παραμένουν εντός συγκεκριμένων ορίων, καθώς $t \to \infty$, χωρίς όμως ποτέ να τέμνονται ούτε να παρουσιάζουν περιοδική κίνηση σε κανένα διάστημα. Ακόμα κι όταν δίνουν την εντύπωση πως τέμνονται , στην πραγματικότητα πρόκειται, σύμφωνα με τον Lorenz, για ζεύγη επιφανειών που αλληλεπίθενται χωρίς ποτέ να ακουμπούν. Αυτός είναι ο *παράξενος ελκυστής*, ή *ελκυστής του Lorenz*.

Όπως φαίνεται και στο γράφημα, ένα φασικό σημείο P, που ξεκινά κοντά στο σημείο O (0,0,0), πραγματοποιεί μερικές περιστροφές γύρω από τον αριστερό "λοβό" του γραφήματος, για να κινηθεί σύντομα στον δεξιά όπου επαναλαμβάνει την ίδια συμπεριφορά. Το εντυπωσιακότερο στο γράφημα αυτό είναι η τεράστια διαφοροποίηση της κίνησης του σημείου από πολλή μικρή μεταβολή του αρχικού σημείου. Χαρακτηριστικά, με αρχική διαφορά της τάξεως του 1:10.000 η απόκλιση των τροχιών γίνεται έντονα αισθητή, για $t > 16$.

Αξίζει να αναφερθεί ότι οι εξισώσεις Lorenz δεν οδηγούν πάντα σε παράξενους ελκυστές. Αυτό παρατηρείται για συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων, όπου τα σταθερά σημεία έχουν εκφυλιστεί. Παράξενοι ελκυστές συναντώνται με μεγάλη συχνότητα σε εξαναγκασμένα, μη αυτόνομα συστήματα.

Το εντυπωσιακό με αυτόν τον ελκυστή είναι ότι με αυτόν ο Lorenz απέδειξε πως στο χώρο των φάσεων, ο όγκος συρρικνώνεται εκθετικά, με αποτέλεσμα ο όγκος που ορίζεται από ένα ευρύ σύνολο αρχικών καταστάσεων να συρρικνώνεται τελικά σε περιορισμένο σύνολο μηδενικού όγκου, που ανάγεται σε επιφάνεια! Μπορεί κανείς να φανταστεί τον παράξενο ελκυστή σαν δύο δίσκους πικάπ που είναι τοποθετημένοι σε γωνία μεταξύ τους, με ένα σημείο επαφής.

1.5. Ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες

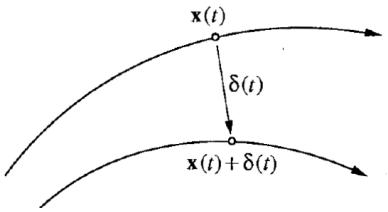
Η ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες είναι το βασικό χαρακτηριστικό του παράξενου ελκυστή. Ξεκινώντας από δύο γειτονικές αρχικές καταστάσεις στο σύστημα του Lorenz, οι τροχιές των σημείων θα διαφοροποιηθούν οριστικά σε πολύ σύντομο διάστημα, και οι ενδιάμεσες θέσεις είναι διασκορπισμένες σ' όλο το φάσμα της τροχιάς.

Θεωρούμε σημείο $x(t)$ μιας τροχιάς του συστήματος, με αρχικό σημείο x_o. Αν ορί-

σουμε ως *δ(t)* την απόσταση του σημείου αυτού από το *x(t) + δ(t)* σημείο τροχιάς με γειτονική αρχική κατάσταση $x_0 + \delta_0$, θα παρατηρήσουμε ότι το δ αυξάνεται εκθετικά. Συγκεκριμένα

$$||\delta(t)|| \sim ||\delta_0|| e^{\lambda t}$$

(λ≈ 0.9)[9]



Κάποια στιγμή φτάνει σε κορεσμό, καθώς η τιμή του δ γίνεται συγκρίσιμη με το εύρος του ελκυστή, το οποίο δε γίνεται να ξεπεράσει, εφόσον και οι δύο τροχιές παραμένουν εντός των ορίων του.

Η παρατήρηση αυτή φέρει μεγάλη σημασία, καθώς πάνω της έχει στηριχτεί σε μεγάλο βαθμό η θεωρία του χάους.

> Το χάος είναι απεριοδική μακροπρόθεσμη συμπεριφορά σε ένα ντετερμινιστικό σύστημα που επιδεικνύει ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες. [10]

Στον ορισμό αυτό η "απεριοδική μακροπρόθεσμη συμπεριφορά" αναφέρεται στις τροχιές που δεν καταλήγουν σε σταθερά σημεία, σε περιοδικές ή ημιπεριοδικές τροχιές όσο $t \to \infty$. Με τον όρο "ντετερμινιστικό" αναφερόμαστε στη μη ύπαρξη τυχαίων παραμέτρων- inputs στο σύστημα. Η ανωμαλία της συμπεριφοράς έγκειται στη μη-γραμμικότητα και όχι στις δυνάμεις που το διέπουν.

1.6. Υπέρθεση

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των γραμμικών συστημάτων είναι ότι η διαδοχική εφαρμογή στοιχειωδών δράσεων στους όρους του συστήματος, οδηγεί σ' ένα αποτέλεσμα το οποίο είναι το άθροισμα των επί μέρους αποτελεσμάτων εφαρμογής από τις στοιχειώδεις αυτές δράσεις.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση μιας κυματικής διαταραχής:

> Εάν κάθε μια από τις διεγέρσεις *fn , n= 1,2,..., N*, δημιουργεί (όταν δρα μόνο αυτή) την κυματική διαταραχή
>
> *yn (x,t) ,x∈ D, t∈ I,* (όπου D η περιοχή του χώρου και I το συνολικό χρονικό διάστημα)
>
> τότε η διέγερση:
>
> *f= a1f1 +a2f2 + … + aNfN , an∈R ή C,*
>
> η οποία προκύπτει από ταυτόχρονη δράση των επί μέρους διεγέρσεων (επί τους αντιστοίχους πολλαπλασιαστικούς παράγοντες) δημιουργεί την κυματική διαταραχή:
>
> *y(x,t) = a1y1(x,t) +a2y2(x,t) +... + aNyN (x,t).*

9. Ο αριθμός λ, ονομάζεται εκθέτης Lyapunov, και έχει υπολογιστεί αλγοριθμικά, βάσει πειραμάτων στην χαοτική δυναμική. Για κανονικές κινήσεις του δυναμικού συστήματος λ≤0, ενώ για χαοτικές κινήσεις λ>0.

10. Πρωτότυπο: Chaos is aperiodic long-term behaviour in a deterministic system that exhibits sensitive dependence on initial conditions. (Steven H. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos, with applications to Physics, Biology, Chemistry and Engineering*, PERSEUS BOOKS, Reading Massachusetts, 1994, σελ. 331)

Αντιθέτως, σ' ένα μη-γραμμικό σύστημα, η αρχή αυτή αναιρείται, καθώς, η πρόσθεση δύο στοιχειωδών δράσεων, μπορεί να οδηγήσει σε τελείως απροσδόκητα αποτελέσματα, που εκδηλώνονται με τη μορφή χωρικών δομών και χρονικών διαδικασιών, που χαρακτηρίζονται από νέες συλλογικές ιδιότητες, που δεν είναι δυνατό να αναχθούν στις επί μέρους δράσεις. Τα μη-γραμμικά συστήματα εμφανίζουν στο φυσικό κόσμο εξαιρετικά πολύπλοκες συμπεριφορές. Αυτή είναι και η βασικότερη αρχή που αφορά στην οργάνωση των φυσικών συστημάτων, και στον τρόπο ανάπτυξης αυτών, όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο.

2. Η έννοια της Ανάδυσης (Emergence)

"The movement from low-level rules to higher-level sophistication is what we call emergence".
Steven Johnson, Allan Lane
(*Emergence, the Connected Lives of Ants, Brains, Cities and Software*)

"The spontaneous creation of an "organized whole" out of a "disordered" collection of interacting parts, as witnessed in self-organising systems in physics, chemistry, biology, sociology… is a basic part of dynamical emergence".
Francis Heylighen
(Self-Organisation, Emergence and the Architecture of complexity)

2.1. Η έννοια στα φυσικά συστήματα

Είναι πλέον αποδεδειγμένο ότι η πλειονότητα των φυσικών συστημάτων πρόκειται για μη-γραμμικά δυναμικά συστήματα, κάτι που είναι λογικό εφόσον οι γραμμικές σχέσεις αποτελούν πολύ μικρό φάσμα των παρατηρούμενων συμπεριφορών. Σε γενικές γραμμές, στα φυσικά συστήματα, είτε έμβια είτε όχι, συναντώνται σύνολα εξαιρετικής πολυπλοκότητας, η μελέτη των οποίων αποδεικνύεται ιδιαιτέρως δύσκολη. Λόγω αυτής της δυσκολίας προκύπτει η ανάγκη χρησιμοποίησης απλουστευμένων μοντέλων και γραμμικοποιήσεων των δυναμικών συστημάτων, η οποία επιτυγχάνεται με την επικέντρωση σε μία από της παραμέτρους, ή της θεώρησης περιορισμένου εύρους τιμών, για τις οποίες τα συστήματα παρουσιάζουν κανονική συμπεριφορά.

Κύριο αίτιο της δυσκολίας της μελέτης των πραγματικών συστημάτων είναι η αδυναμία να αναχθεί η συμπεριφορά του συνόλου στις επιμέρους συμπεριφορές των τμημάτων του. Δεν ισχύει δηλαδή η αρχή της υπέρθεσης, $f= a1f1 +a2f2 + \ldots + aNfN$, καθώς πρόκειται για μη-γραμμικά συστήματα, και το σύστημα παρουσιάζει ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες. Η οποιαδήποτε διαφοροποίηση στα μέρη αυξάνεται εκθετικά ως προς το σύνολο, στο πέρας του χρόνου. Έτσι, μια πολύ μικρή μεταβολή σ' ένα από τα μέρη του συνόλου, μπορεί να προκαλέσει, σε βάθος χρόνου τεράστιες μεταβολές στη συνολική συμπεριφορά του συστήματος, καθιστώντας οποιαδήποτε πρόβλεψη αδύνατη, τουλάχιστον με τα διαθέσιμα μέσα.

Ο John Holland[11], αμερικανός ψυχολόγος και μηχανικός ηλεκτρονικών συστημάτων ορίζει την *ανάδυση (emergence)* ως το σύνολο των ιδιοτήτων ενός συστήματος που δεν μπορούν να αναχθούν στα συστατικά του μέρη. Πρόκειται για περίπλοκα προσαρμόσιμα συστήματα που αποτελούνται από μη-γραμμικώς αλληλεπιδρώ-

11. John Holland, *Emergence: From Chaos to Order* PERSEUS BOOKS, CAmbridge,1998

ντες *παράγοντες*, ή *agents,* με την ορολογία του Holland. Με πιο απλά λόγια ανάδυση είναι ο τρόπος που περίπλοκα συστήματα και μοτίβα αναδύονται μέσα από την αλληλεπίθεση μονάδων που δρούν με σχετικά απλούς μηχανισμούς.

Η ίδια η έννοια της ανάδυσης έχει τις ρίζες της στον Αριστοτέλη, ενώ μελετήθηκε εκτενέστερα από την σκοπιά της φιλοσοφίας, της οικονομίας και της αναπτυξιακής βιολογίας τον 19ο αιώνα. Το φαινόμενο μπορεί να διαχωριστεί στην ασθενή και την ισχυρή ανάδυση. Η πρώτη περιγράφει το μοντέλο δημιουργίας νέων ιδιοτήτων στα συστήματα, που προκύπτουν άμεσα από τις μορφές που η δομή οργανώνεται σε κατώτερα επίπεδα. Η δεύτερη αναφέρεται στα συστήματα που έχουν ιδιότητες όχι άμεσα ανιχνεύσιμες στους παράγοντες τους, αλλά που προκύπτουν από τον τρόπο αλληλεπίδρασης αυτών των παραγόντων. Σαν αποτέλεσμα, οι ιδιότητες που προκύπτουν δεν μπορούν να αναχθούν στις αρχικές συνθήκες μέσω αντίστροφων διαδικασιών. Ο λόγος είναι ότι ο αριθμός των σημειουμένων αλληλεπιδράσεων αυξάνεται συνδυαστικά του αριθμού των αλληλεπιδρώντων στοιχείων, ο οποίος είναι ήδη υψηλός.

Έτσι το σύνολο αποδεικνύεται σε κάτι περισσότερο από το άθροισμα των μερών του, είναι συνάρτηση στο χρόνο ενός μεγάλου εύρους παραγόντων, εσωτερικών, βάσει της δράσης των μερών του, αλλά και εξωτερικών. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο υψηλός αριθμών αλληλεπιδράσεων δεν εγγυάται από μόνος του την εμφάνιση του φαινομένου της ανάδυσης, καθώς μεγάλο ποσοστό αυτών μπορεί να αλληλοεξουδετερώνονται, να είναι αμελητέες, ή να μη συντελούν στην κατεύθυνση αυτή, αλλά να εκλαμβάνονται ως «θόρυβος» στη συνολική διαδικασία.

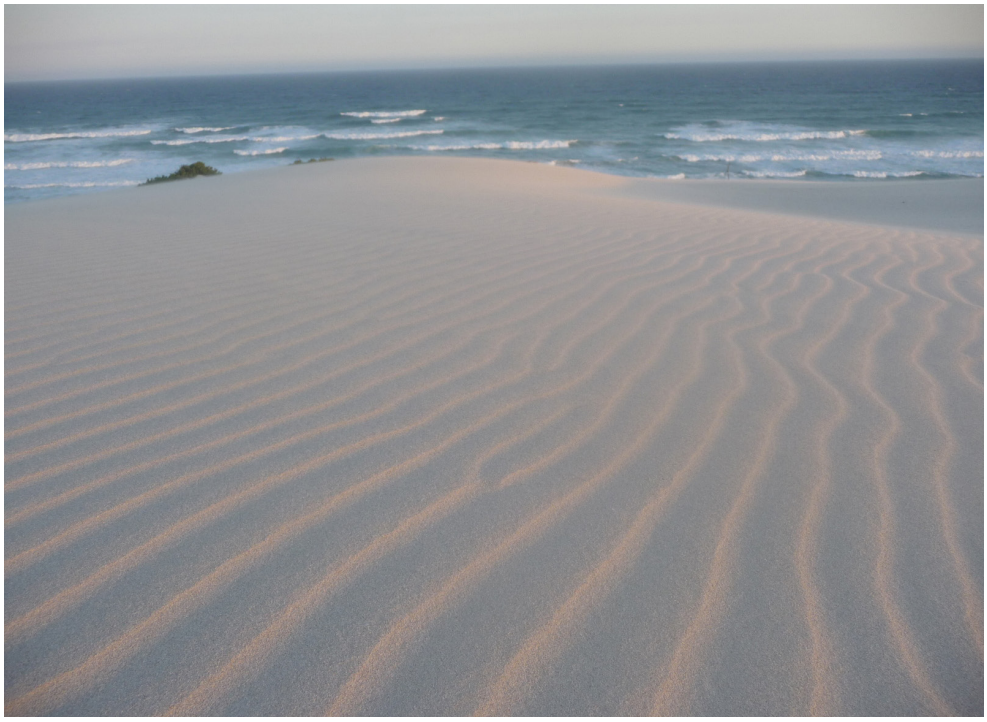
Σύμφωνα με τον φυσιολόγο , G.H. Lewes, κάθε έκβαση ενός φυσικού συστήματος είναι είτε το άθροισμα είτε η διαφορά των συνιστωσών δυνάμεων, ανάλογα με τη διεύθυνση τους. Η συνιστώσα αυτή είναι καθαρά ανιχνεύσιμη στα συστατικά της, γιατί είναι ομογενής και ισόμετρη. Τα πράγματα είναι διαφορετικά στην περίπτωση της ανάδυσης, όπου αντί να προστίθεται μετρήσιμη κίνηση σε μετρήσιμη κίνηση, ή μονάδες ενός είδους σε μονάδες του ίδιου είδους, υπάρχει μια συνεργασία πραγμάτων ανόμοιων ειδών. Το αναδυόμενο είναι εντέλει διαφορετικό από τα συστατικά του στο βαθμό που αυτά είναι ανισόμετρα και δεν μπορεί να αναχθεί στο άθροισμα ή τη διαφορά τους. Βασικά χαρακτηριστικά της ανάδυσης, όπως προσδιορίζονται από τον John Holland είναι η έλλειψη κάποιας μορφής κεντρικού ελέγχου πάνω στη δράση του συστήματος, καθώς και η αύξηση των δυνατοτήτων για ανάδυση με την αύξηση της ευλυγισίας, ή προσαρμοστικότητας των συστημάτων.

Ένα θεμελιώδες παράδειγμα ανάδυσης που χρησιμοποιείται εκτενώς στη στη βιβλιογραφία, παρότι δεν αποτελεί φυσικό σύστημα είναι το σκάκι. Εάν θεωρήσουμε μια παρτίδα σκακιού, που αποτελείται από τις διαδοχικές κινήσεις, σε διακριτό χρόνο, έξι διαφορετικών τύπων πιονιών, σε πεπερασμένο χώρο 8x8 τετραγώνων. Η κίνηση κάθε πιονιού ξεχωριστά διέπεται από απλούς και συγκεκριμένους κανόνες, ανάλογα με την ιδιότητα του. Ο πύργος κινείται μόνο ευθεία, ο αξιωματικός μόνο διαγώνια, και ούτω καθεξής. Κάθε μεμονωμένη κίνηση φαίνεται, στην σειρά της αρκετά απλή και προβλέψιμη. Αν όμως θεωρήσουμε μια παρτίδα σκακιού μακροσκοπικά, είναι αδύνατο να προβλεφθεί η έκβαση της από την αρχή, παρότι είναι γνωστά τα μέρη του συστήματος, οι ιδιότητες τους και οι κανόνες που διέπουν την κίνηση τους. Η διαδοχή των κινήσεων, και η έντονη εξάρτηση της κάθε κίνησης από την προηγούμενη της καθιστά το σύνολο της παρτίδας εντέλει τόσο περίπλοκο.

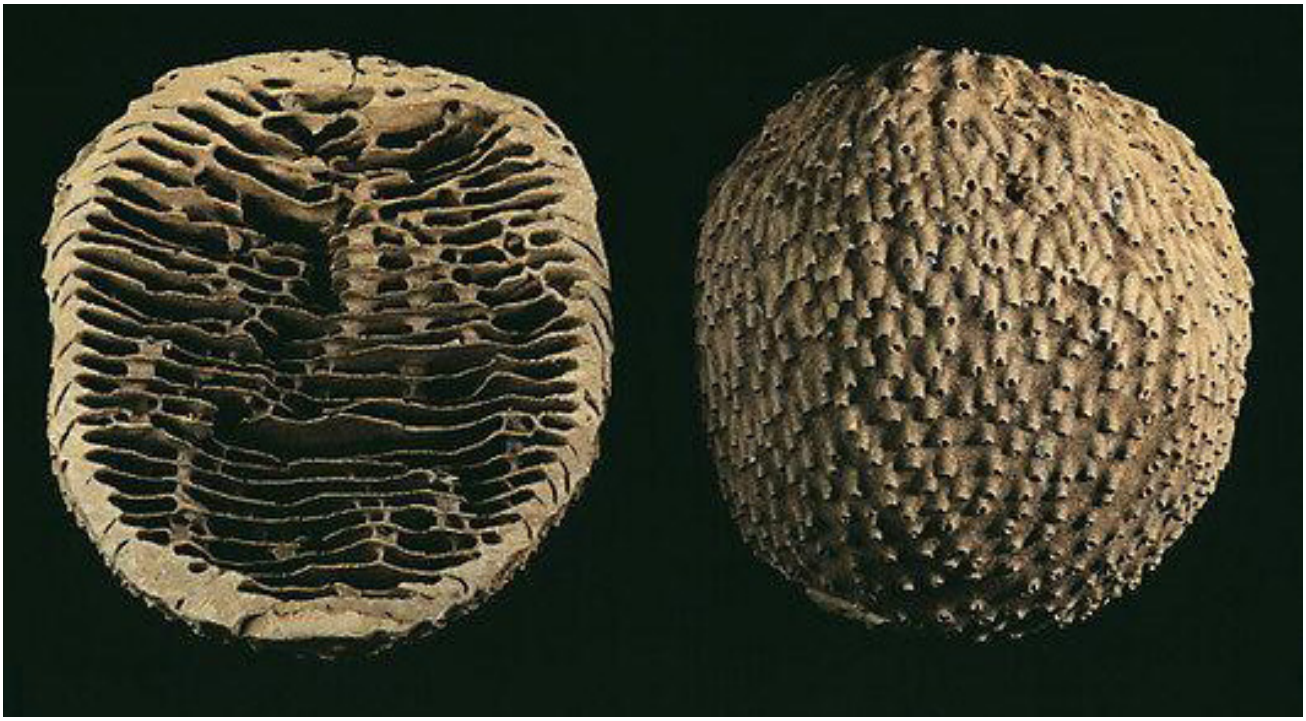
ΑΡΙΣΤΕΡΑ 2.1. Εμφάνιση του φαινομένου της ανάδυσης στο σύνθετο αυτό γεωφυσικό σχηματισμό, στο Giant's causeway, στη Βόρεια Ιρλανδία. (πηγή: wikipedia.org)

ΔΕΞΙΑ 2.2. Εμφάνιση του φαινομένου της ανάδυσης στον αποκαλούμενο "καθεδρικό" τερμιτών . (πηγή: wikipedia.org)

2.3. Σχηματισμοί στην άμμο, επίσης χαρακτηριστικό παράδειγμα συμπεριφοράς ανάδυσης στο φυσικό κόσμο. Οι κόκκοι άμμου μεταφέρονται κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους ανάλογα με την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου χωρίς εμφανές μοτίβο. (πηγή: wikipedia.org)



ΚΑΤΩ 2.4. Η φωλιά του είδους Apicotermes termites, τερμιτών. (πηγή: visualphotos.com)



Αντίστοιχος είναι και ο τρόπος λειτουργίας των φυσικών συστημάτων, σε συνεχή χρόνο. Η μακροπρόθεσμη εξέλιξη του συστήματος προκύπτει από τη συνεχή αλληλεπίδραση των μελών του, όσο και από τη δράση εξωτερικών δυνάμεων και γίνεται σε επίπεδα οργάνωσης. Ο αριθμός των αλληλεπιδρώντων μερών μπορεί να διαφέρει, ανάλογα με την πολυπλοκότητα των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων. Φαινόμενα ανάδυσης μπορούν να προκύψουν και με την αλληλεπίδραση λίγων μερών με έντονη πολυπλοκότητα, ή με πολύ περισσότερα μέρη που αλληλεπιδρούν απλούστερα. Η αλληλεπίδραση των μερών σε ένα επίπεδο, σε συνδυασμό με την επίδραση των δυνάμεων του εξωτερικού περιβάλλοντος, οδηγούν στη δημιουργία πιο σύνθετων σχηματισμών σε υψηλότερο επίπεδο, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από νέες ιδιότητες. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται στο παραχθέν επίπεδο, και οδηγούμαστε έτσι σε επίπεδα αυξανόμενης περιπλοκότητας. Οι νόμοι, που ρυθμίζουν τη λειτουργία του συστήματος δεν αλλάζουν ανά επίπεδο, αυτό που μεταβάλλεται είναι η φύση των μερών-αντικειμένων που διέπονται από αυτούς. Εμφανίζονται έτσι μοτίβα που είτε επαναλαμβάνονται είτε υφίστανται μεταλλάξεις κατά την μεταφορά από επίπεδο σε επίπεδο. Οι δομικές μονάδες, *building blocks* με την ορολογία του J.Holland, αλληλεπιδρούν βάσει πεπερασμένου εύρους κανόνων για να δημιουργήσουν σύνολα, τα οποία με τη σειρά τους αποτελούν τις δομικές μονάδες του επόμενου επιπέδου οργάνωσης. Οι διάφοροι κανόνες και η ατέρμονη αλλαγή των μοτίβων είναι αυτοί που προκαλούν την καινοτομία και το φαινόμενο της ανάδυσης.

Οι παραπάνω έννοιες συνοψίζονται, σύμφωνα με τον Holland, στην περιγραφή της ανάδυσης ως διαδικασία μέσα από τις ακόλουθες έννοιες:

Μηχανισμοί (mechanisms): Πρόκειται για τα building blocks, οι *γεννήτριες (generators)* και τα *μέρη (agents)*, καθώς και η διαρκής καινοτομία στην οποία οδηγούν, μέσα από πλήθος παραγόμενων διαμορφώσεων.

Δυναμικές και κανονικότητες (Dynamics and regularities), με την έννοια των επαναλαμβανόμενων δομών ή μοτίβων στις παραγόμενες διαμορφώσεις.

Ιεραρχική οργάνωση (hierarchical organisation) με την έννοια ότι οι διαμορφώσεις των γεννητριών του ενός επιπέδου γίνονται οι ίδιες γεννήτριες στο υψηλότερο επίπεδο. [12]

Ας πάρουμε ως παράδειγμα μια αποικία μυρμηγκιών [13]. Για να δημιουργηθεί μια μυρμηγκοφωλιά, οι "εργάτες" σκάβουν και εναποθέτουν το χώμα έξω από την είσοδο, φτιάχνοντας τα γνωστά λοφάκια χώματος. Έτσι χτίζονται δίκτυα κοιλοτήτων διαφορετικής χρήσης, διαμονή, αποθήκευση, καθώς και διάδρομοι, για τη σύνδεση αυτών μεταξύ τους και με την επιφάνεια. Η τροφή μεταφέρεται στους χώρους αποθήκευσης από το εξωτερικό. Οι "βασίλισσες" γεννούν τα αυγά, ενώ μετά την αναπαραγωγή είτε επιστρέφουν στην παλιά τους αποικία ή ιδρύουν νέα.

Κάθε μυρμήγκι, ως μέρος του συστήματος, επιδεικνύει μια ορισμένη συμπεριφορά η οποία βασίζεται σε περιορισμένο εύρος κανόνων καταγεγραμμένων στο ένστικτο του. Οι κανόνες αυτοί εάν γίνει προσπάθεια να καταγραφούν, φαίνεται να μην ξεπερνούν τους είκοσι. Και όμως, κατά εντυπωσιακό τρόπο, το σύνολο μιας αποικίας που απαρτίζεται από πλήθος μυρμηγκιών επιδεικνύει ως σύνολο τεράστια ευλυγισία στην ανίχνευση και εκμετάλλευση του περιβάλλοντος της. Ανταποκρίνεται συνολικά σε καταστροφές, όπως βροχές και επιθέσεις άλλων κοινοτήτων μυρμηγκιών, προσαρμόζεται στις αλλαγές των πηγών τροφής. Η ομαλή της λειτουργία συνεχίζει για χρόνια, καλύπτοντας πολλές γενεές μυρμηγκιών. Η συνολική λειτουργία της κοινότητας φαίνεται εδώ να ξεπερνάει τις δυνατότητες

12. John Holland, Emergence: *From Chaos to Order,* OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2000, σελ. 9

13. Douglas Hofstadter 1979: metaphor of the ant colony

των μεμονωμένων μελών της, προχωρώντας σε υψηλότερο επίπεδο αυτοοργάνωσης, και μάλιστα χωρίς την ύπαρξη κάποιας κεντρικής δύναμης που βρίσκεται σε εποπτεία της συνολικής λειτουργίας.

Η παρατήρηση δείχνει ότι το φαινόμενο της ανάδυσης συναντάται σε κάθε είδους φυσικές δομές, από ανόργανους σχηματισμούς σε κλιματολογικά φαινόμενα και από την λειτουργία και την αναπαραγωγή εμβίων οργανισμών ως την εξέλιξη κοινωνικών συνόλων.

2.2. Η πληροφορία ως βασικό στοιχείο της ανάδυσης

Η παραγωγή πληροφορίας είναι χαρακτηριστικό των συστημάτων που διέπονται από αυτοοργάνωση και η έννοια της είναι στενά συνδεδεμένη με την αλλαγή και το μετασχηματισμό. Πρόκειται για μέτρο της δομικής οργάνωσης ενός συστήματος, με επίκεντρο τη διαφοροποίηση της νέας κατάστασης ενός συστήματος από την αρχική. Όταν το δυναμικό σύστημα αντιδρά σε ένα εξωτερικό ερέθισμα, "επιλέγοντας" μέσα από ένα εύρος πιθανών εκβάσεων, η ανταλλαγή πληροφορίας είναι το στοιχείο που πραγματοποιεί την επιλογή αυτή, ο συνδετικός κρίκος ανάμεσα στο αίτιο και το αποτέλεσμα.

Η δομή, στα φυσικά συστήματα βασίζεται στη δομική αδράνεια της ύλης, στην αντίσταση της μάζας σε επιβαλλόμενη κίνηση. Για να προκύψουν αναδιοργανώσεις των υλικών δομών, απαιτείται ενέργεια, που καταναλώνεται από το σύστημα με τη μορφή έργου. Η ενέργεια αυτή προσλαμβάνεται από το περιβάλλον του συστήματος, χρησιμοποιείται για την αποδυνάμωση των υπαρχόντων δεσμών και την αναδιάταξη των στοιχείων του μέσω του έργου. Μέσω της διαδικασίας αυτής το σύστημα υφίσταται δομικές μεταβολές, ενώ αντιδρά με το περιβάλλον του, ανταλλάσσοντας ενέργεια και ύλη. Η δραστηριότητα αυτή αναφέρεται ως *ενεργειακός- υλικός μεταβολισμός (energetic-material metabolism, EMM)*.

Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε ένα σχετικά απλό παράδειγμα από τη φυσική, μία σιδερένια ράβδο δεδομένου μήκους, την οποία θερμαίνουμε ομοιόμορφα σε όλο της το μήκος. Η θερμική ενέργεια που προσλαμβάνει η ράβδος είναι η αιτία για μια αλυσίδα μεταβολών στην δομή της, κυρίως την επιτάχυνση της κίνησης των μορίων που την αποτελούν, με αποτέλεσμα την διαστολή της. Η διαστολή και η πιθανή μεταβολή του σχήματος της, είναι εκδήλωση της αντίδρασης της ράβδου ως σύνολο μορίων στην εξωτερικά επιβαλλόμενη δύναμη. Η ανταλλασσόμενοι ενέργεια μεταξύ ράβδου και περιβάλλοντος, αποτελεί υπό μία έννοια πληροφορία, βάση της οποίας προέκυψε η μεταβολή.

Αντίστοιχα, σε πιο περίπλοκα συστήματα, ή με επιβολή περισσοτέρων δυνάμεων, το φαινόμενο της ανάδυσης ανάγεται εντέλει στην αναπαραγωγή δομικής πληροφορίας, ρυθμίζοντας τη μεταβολή στο χώρο και τον χρόνο του συστήματος, με βάση την διανομή του μεταβολισμού ενέργειας -μάζας. Η δομική πληροφορία ουσιαστικά περιγράφει

> τις αρχές και τις παραμέτρους πάνω στις οποίες είναι βασισμένη η δομική οργάνωση (ενός συστήματος) και απαιτεί τουλάχιστον την αλληλεπίδραση δύο βασικών

ανταγωνιστικών χαρακτηριστικών των ανοιχτών συστημάτων: την τάση του συστήματος προς την ισορροπία, ικανοποιώντας την δομική του αδράνεια, και την ικανότητα του να εγκαταλείπει την δομική αδράνεια, ανταποκρινόμενο στις περιβαλλοντικές αλλαγές μέσω της επαναδιοργάνωσης και προσαρμογής της μικροκατάστασης, αποφεύγοντας τη γενική κατάρρευση της δομής του .[14]

Η δομική πληροφορία παίζει ενεργό ρόλο στη διαδοχή παρελθόντος-παρόντος-μέλλοντος στη ζωή ενός συστήματος, παραπέμποντας στην μη αναστρεψιμότητα και την πιθανοκρατία στην διαδικασία της εξέλιξης. Το φαινόμενο της ανάδυσης προκύπτει από την ύπαρξη κατάλληλων συνθηκών, ενεργειακών και υλικών, στην αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Η μορφή που αποκτά ένα σύστημα καθώς και οι μεταβολές αυτής μπορούν να θεωρηθούν ως αποτέλεσμα της πληροφορίας αυτής, στο βαθμό που αυτή εκδηλώνεται ως δράση κάποιων δυνάμεων, τόσο εσωτερικών όσο και εξωτερικών του συστήματος. Λόγω αυτής της αλληλεπίδρασης των δυνάμεων που καθορίζει την ισορροπία του συστήματος, φτάνει ο D'Arcy Thomson να καλέσει τη μορφή του φυσικού αντικειμένου ως *"διάγραμμα δυνάμεων"*[15]. Η συνολική θεώρηση των επιδρώντων δυνάμεων μπορεί να εκληφθεί άρα ως ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος, η πραγματοποίηση και η επεξεργασία αυτών επιφέρει την μεταβολή στο σύστημα στην πάροδο του χρόνου.

2.3. Η Εφαρμογή της Ανάδυσης στην αρχιτεκτονική

Με αυτήν την έννοια, το φαινόμενο της ανάδυσης, ως αποκύημα της επικοινωνίας και ανατροφοδότησης του διπόλου δυναμικό σύστημα- περιβάλλον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τεχνητά συστήματα για την δημιουργία δομών που λειτουργούν με βέλτιστο τρόπο ως προς το σκοπό τους και το περιβάλλον τους. Στο πλαίσιο πολλών επιστημών, το φαινόμενο της ανάδυσης αποτελεί ταυτόχρονα μια εξήγηση της εξέλιξης και συντήρησης των φυσικών συστημάτων, και ένα σύνολο μοντέλων και διαδικασιών που ενθαρρύνουν την δημιουργία τεχνητών συστημάτων μορφογένεσης. Ως τέτοιου είδους τεχνητά συστήματα μπορούν να νοηθούν από το χρηματιστήριο μέχρι τις ανθρώπινες κοινότητες, και από το διαδίκτυο μέχρι την τεχνητή νοημοσύνη. Η ανάδυση είναι ο επιστημονικός τρόπος με τον οποίο τα φυσικά συστήματα μπορούν να εξερευνηθούν και να εξηγηθούν σε ένα σύγχρονο πλαίσιο, ώστε η λογική της δομής τους να ενσωματωθεί στο σχεδιασμό τεχνητών συστημάτων που επιδιώκουν αντοχή και προσαρμοστικότητα στις εξωτερικές συνθήκες.

Η αρχιτεκτονική αποτελεί βασικό παράδειγμα αντικειμένου που φέρει τις παραπάνω αξιώσεις και όπως ήταν επόμενο δεν μπορούσε να μείνει εκτός της συζήτησης περί εφαρμογής της ανάδυσης σε τεχνητά συστήματα. Σύμφωνα με τα μέλη του Emergence and Design group, της σχολής AA του Λονδίνου, η έννοια της ανάδυσης παρέχει «μοντέλα και διαδικασίες για την δημιουργία τεχνητών συστημάτων που έχουν σχεδιαστεί να παράγουν μορφές και σύνθετες συμπεριφορές, ακόμα και πραγματική νοημοσύνη». [16]

14. Πρωτότυπο: "the principles and parameters upon which structural organization is based and requires at least the interaction of two main antagonic characteristics of open systems: a) the tendency of the system toward equilibrium, or non-movement, satisfying its structural inertia and b) the ability to surrender structural inertia, responding to environmental changes by reorganizing and adapting of the microstate, avoiding the general breakdown of the system structure".(Norbert Fenzl, Wolfgang Hofkirchner, *Emergence and Interaction of natural systems,* Universidade Federal do Pará)

15. D' Arcy Thomson, *Ανάπτυξη και μορφή στο φυσικό κόσμο,* μτφρ. Αμαλία Κώνστα, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 1999

16. Πρωτότυπο: "Emergence is the scientific model in which natural systems can be explored and explained in a contemporary context. It provides 'models and processes for the creation of artificial systems that are designed to produce forms and complex behavior, and perhaps even real intelligence'". Architectural Design no 74, *Emergence in architecture*, Wiley, May/ June 2004, σελ. 5)

2.3.1. Form Follows Force

Μια θεώρηση της αρχιτεκτονικής μέσα απ' το πρίσμα σημαίνει τη θεώρηση του προϊόντος της αρχιτεκτονικής, είτε πρόκειται για κτιριακό, είτε για πολεοδομικό σχεδιασμό, ως ένα σύνολο περίπλοκων ενεργειακών-υλικών μηχανισμών, που υπάρχουν σε συνεχή διάλογο με το περιβάλλον τους, τόσο φυσικό όσο και τεχνητό. Παύουμε πλέον να ασχολούμαστε μόνο με το αντικείμενο, αλλά ενδιαφερόμαστε για την εξέλιξη του στο χώρο και το χρόνο, τη βιωσιμότητα και προσαρμοστικότητα του, με άξονα αφενός τη σωστή λειτουργία και αφετέρου τη βέλτιστη ανταπόκριση του στις εξωτερικά επιβαλλόμενες συνθήκες.

Εάν θεωρήσουμε τη μορφή με τον τρόπο που το κάνει ο D' Arcy Thomson, αναλυτικά δηλαδή και όχι απλά αναπαραστατικά, η μορφή ως αποτέλεσμα της δομής ενός συστήματος, είναι αποτέλεσμα της επίδρασης των εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων πάνω σε αυτό. Το μορφολογικό αποτέλεσμα είναι κάθε στιγμή προϊόν μετασχηματισμών στη δομή του συστήματος βάσει της αντίδρασης του στα ερεθίσματα, στην "πληροφορία" που παίρνει από την αλληλεπίδραση των εσωτερικών του στοιχείων και του ίδιου με το περιβάλλον του. Εάν θεωρήσουμε λοιπόν, όπως προτείνει και ο Thomson, τη μορφή ως διάγραμμα δυνάμεων σε ισορροπία, η ανάπτυξη καθορίζεται ως προς την πάροδο του χρόνου από το μέγεθος και την κατεύθυνση των επιδρόντων δυνάμεων. Μέσα από αυτό το πρίσμα, η μηχανική αντοχή είναι αποτέλεσμα, όχι των χαρακτηριστικών κάθε στοιχείου-μέρους ξεχωριστά, αλλά της αποδοτικής λειτουργίας όλων των μερών σε σύνολο. Αυτή η μεθοδολογία προσδιορισμού και διαμόρφωσης της μορφής βρίσκει άμεση εφαρμογή στον τομέα της κατασκευής και ειδικά στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό.

Στο σημείο αυτό, έρχεται στο προσκήνιο μια πιο βιομιμητική, τουλάχιστον ως προς την κατανομή φορτίων, σχεδιαστική προσέγγιση, η οποία εξάλλου δεν είναι άγνωστη στην αρχιτεκτονική πρακτική. Από τις παλαιοιστορικές καλύβες μέχρι τα αλυσοειδή τόξα[17] του Gaudi, οι αυτοφερόμενες κατασκευές, των οποίων η μορφή στοχεύει να φέρει το φορτίο τους, επανέρχονταν συνεχώς στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Η μορφή και η δυναμική καταπόνηση μιας κατασκευής είναι μέρη άρρηκτα συνδεδεμένα και ως τέτοια θα πρέπει και να αντιμετωπίζονται. Όπως στο φυσικό κόσμο τα συστήματα αποκτούν τα μορφολογικά τους χαρακτηριστικά ώστε να ανταποκρίνονται βέλτιστα στην επιβολή εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων, έτσι και στον τεχνητό, οι ανθρώπινες κατασκευές μπορούν να εκμεταλλευτούν τη μορφή προκειμένου να ανταποκριθούν καλύτερα στο στατικό κομμάτι του ρόλου τους. Το σύνθημα Form Follows Function , η τόσο αμφισβητούμενη βάση του μοντέρνου κινήματος αντικαθίσταται από το Form Follows Force, η Μορφή ακολουθεί τη Δύναμη, διατύπωση που προδίδει τη βιομορφική προέλευση των νέων αυτών τάσεων.

Η εφαρμογή μιας τέτοιας προσέγγισης φυσικά υποβοηθάται πολύ από την εξέλιξη των δυνατοτήτων των Η/Υ, όσον αφορά στην παρατήρηση και τη μελέτη φυσικών δομών όσο και στην ευκολότερη προσαρμογή τους σε νέες παραμέτρους. Παρόλα αυτα, η διάθεση εκμετάλλευσης των φερουσών δυνατοτήτων των μορφών της φύσης δεν είναι από μόνη της κάτι καινούργιο, και ειδικότερα στον τομέα της αρχιτεκτονικής.

17. Αλυσοειδή (catenary) τόξα καλούνται τα τόξα που έχουν τη μορφή αλυσοειδούς καμπύλης, της καμπύλης δηλαδή που σχηματίζεται από μια αλυσίδα με την επίδραση του ιδίου βάρους της. Αντιστρέφοντας την καμπύλη, με τα κοίλα προς τα κάτω, αποτελεί βέλτιστη κατασκευή ως προς την κατανομή φορτίων.

2.5. Κρεμαστό μοντέλο του Antoni Gaudi, για τον προσδιορισμό της μορφής της Sagrada Familia. Οι χορδές αποκτούν τη μορφή αυτή, με την ανάρτηση επιπλέον βάρους. (πηγή:www.eaubergine.com)

2.6. Φωτορεαλιστική απεικόνιση για τον σιδηροδρομικό σταθμό στη Στουτγκάρδη, διαγωνισμός το 2000, μελέτη από τον Christoph Ingenhoven and Partner, Frei Otto και Büro Happold, Leonhardt and Andrae. (πηγή: eat-a-bug.blogspot.gr)

2.7. Μοντέλο χορδών, από τον Frei Otto, για τον προσδιορισμό της κατασκευής της οροφής του σιδηροδρομικού σταθμού στη Στουτγκάρδη. (πηγή: eat-a-bug.blogspot.gr)

2.3.2. Η μοντελοποίηση, τα μοντέλα χορδών και ο Frei Otto

When we meane to build, we first survey the Plot, then draw the Modell.

(William Shakespeare)

Η απόκλιση από τα αυστηρά ορθοκανονικά πλαίσια της αρχιτεκτονικής του 20ου αιώνα, είχε αρχίσει ήδη από τη δεκαετία του 1960 με τον Frei Otto να επιχειρεί κελύφη περίπλοκης γεωμετρίας, τα μαθηματικά μοντέλα των οποίων ήταν ιδιαιτέρως πολύπλοκα ως προς τον προσδιορισμό τον υπολογισμό τους. Αντί της μαθηματικής τεκμηρίωσης, η οποία ήταν εκ των πραγμάτων αδύνατη, επέλεξε, στα ίχνη του Gaudi, τον πειραματισμό πάνω σε φυσικά μοντέλα, και ιδιαίτερα σε μοντέλα αποτελούμενα από φορείς σε κάμψη, όπως αλυσίδες και χορδές.

Όπως επισημαίνει και ο John Holland, στο έργο του περί ανάδυσης, η μοντελοποίηση δεν αποτελεί απλώς έναν τρόπο μελέτης και απεικόνισης του φυσικού κόσμου, αλλά κινείται ακόμα βαθύτερα στην ουσία του φαινομένου. Η ουσία της δημιουργίας ενός μοντέλου έγκειται ακριβώς στην προσπάθεια απόρριψης ενός πλήθους λεπτομερειών προκειμένου ένα σύστημα να αναχθεί στα εξ ων συνετέθη και να γίνει, κατ' αυτόν τον τρόπο, προσιτότερη η μελέτη του. Τέτοιου είδους μοντέλα νοούνται βέβαια με πολύ ευρεία έννοια, φυσικά όσο και ψηφιακά, από χάρτες και διαγράμματα μέχρι μακέτες και προσομοιωτές. Από τις φυσικές, υπό κλίμακα κατασκευές, μέχρι τα ψηφιακά μοντέλα που παρέχονται από τα σύγχρονα υπολογιστικά μέσα, ο Holland επισημαίνει ότι "ένα καλοστημένο μοντέλο εκθέτει την περιπλοκότητα και τις διαδικασίες ανάδυσης του συστήματος που μοντελοποιείται, χωρίς τις επισκιαστικές επιπτώσεις τυχαίων συμβάντων"[18].

Η μοντελοποίηση άρα δεν έχει ως σκοπό την απλούστευση του συστήματος, με την αφαίρεση δομικών στοιχείων αλλά αντίθετα την αναγωγή του συστήματος στα συνθετικά του μέρη, προκειμένου μέσω δοκιμών και πειραμάτων, να κατανοηθεί και να προσδιοριστεί καλύτερα η συμπεριφορά του. Βάσει της θεωρίας του Holland, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο 2.1., για την προσομοίωση αυτή, πρέπει να προσδιοριστούν οι μηχανισμοί, δηλαδή το πλαίσιο μέσα στο οποίο γίνεται η σύνθεση των μερών που ορίζουν το πολύπλοκο σύστημα.

Η αξιοπιστία του μοντέλου έγκειται στην πιστή μεταφορά των ποιοτικών και ποσοτικών στοιχείων της κατασκευής στο μοντέλο, υπό κλίμακα. Στο πλαίσιο αυτό, το μοντέλο πρέπει να είναι κατασκευασμένο με τα ίδια υλικά και να έχει την ίδια μορφή με την τελική δομή. Αυτά τα *μοντέλα χορδών*, ή *string models* επέτρεψαν στον Otto την μελέτη και τελικά την υλοποίηση αυτοφερουσών κατασκευών μεγάλης κλίμακας. Μέσω του πειραματισμού αυτού κατάφερε να δημιουργήσει κελύφη και μεμβράνες, των οποίων τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι βασικά για τη φέρουσα ικανότητα, και επίσης προσφέρουν αρχιτεκτονικές διεξόδους σε καταστροφές, όπως η σεισμική δόνηση. Εξάλλου, σύμφωνα με τον Otto, ο αντισεισμικός σχεδιασμός δεν είναι θέμα επιλογής υλικών, αλλά κυρίως μορφών και δομών ικανών να παραλάβουν την σεισμική καταπόνηση. Τέτοια παραδείγματα δομών συναντώνται διαρκώς στη φύση και στοιχεία τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν παραγωγικά για τις κατασκευές. Εξάλλου όπως αναφέρει και ο ίδιος ο Otto:

> Η βιολογική εξέλιξη ξεκίνησε με μη-δύσκαμπτες κατασκευές. Οι δύσκαμπτες κατασκευές ήρθαν πολύ αργότερα, και συνήθως είναι απλά άκαμπτα μέρη μεγαλύτερων μαλακών κατασκευών. Πρέπει να μελετήσουμε τις βιολογικές δομές πολύ

18. Πρωτότυπο: "A well-conceived model exhibits the complexity, and emergent phenomena, of the system being modeled, without the obscuring effects of incidentals". (John Holland, *Emergence*, Philosophica 59, UNIVERSITY OF MICHIGAN, 1997, σελ. 17)

περισσότερο [19].

Φυσικά η εργασία και έρευνα επί φυσικού μοντέλου και κυρίως η μεταφορά των αποτελεσμάτων από το μοντέλο στα σχέδια καθίστονταν ιδιαίτερα δύσκολη χωρίς τα σύγχρονα μέσα *scanning (σάρωσης)* και *digitalizing (ψηφιοποίησης)*. Η δυσκολία αυτή έχει πλέον ξεπεραστεί με τη χρήση των Η/Υ και το εύρος των προγραμμάτων που έχουν σχεδιαστεί για κατασκευαστικούς σκοπούς. Βασικό χαρακτηριστικό που επέτρεψε την χρήση των μοντέλων αυτών ήταν η μεταφερσιμότητα των αποτελεσμάτων τους σε σχεδιαστικές, και αργότερα ψηφιακές αναπαραστάσεις.

2.3.3. Το "μέρος" και το "όλον" του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού

Η αυτοφερόμενη στατική δομή δεν είναι όμως το μοναδικό ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των φυσικών συστημάτων. Η έντονη σχέση τη εξέλιξης των φυσικών συστημάτων με την αρχιτεκτονική μορφή και τον τρόπο που αυτή μεταβάλλεται γίνεται αισθητή και ως προς τη σχέση μεταξύ μέρους και όλου στο αρχιτεκτονικό περιβάλλον, όπως και στο δυναμικό σύστημα.

Αυτή είναι και η πιο ενδιαφέρουσα πτυχή της θεωρίας της ανάδυσης, η παραμετρική λογική δηλαδή πίσω από το σχηματισμό σύνθετων δομών από απλά μέρη. Το σύνολο είναι κάτι περισσότερο από άθροισμα των μερών του, και οι περίπλοκες σχέσεις που οδηγούν από το μέρος στο όλον διέπονται από μεγάλο εύρος παραγόντων και κριτηρίων. Ο τρόπος που από πεπερασμένο αριθμό απλών σχετικά δομών δημιουργούνται περίπλοκες δομές, οι οποίες μάλιστα χαρακτηρίζονται από εξελιξιμότητα στο χρόνο, παρουσιάζει άμεσο ενδιαφέρον για την αρχιτεκτονική εφαρμογή.

Γι' αυτό το λόγο και έρευνα πάνω στην αρχιτεκτονική διάσταση της ανάδυσης ξεκίνησε περίπου το ίδιο διάστημα που αυτή πρωτοδιατυπώθηκε ως θεωρία οργάνωσης στη φύση. Εάν το προϊόν της αρχιτεκτονικής νοηθεί, σε κάθε περίπτωση, σαν τεχνητό σύστημα, το οποίο, όπως και τα φυσικά, είναι αποτέλεσμα περίπλοκων διαδικασιών μεταξύ των μερών του και επίσης βρίσκεται σε διαρκή αλληλεπίδραση με το περιβάλλον του, τότε σε αυτό ισχύουν οι ίδιες αρχές των δυναμικών μη-γραμμικών συστημάτων. Σε δομικό επίπεδο, εάν θεωρηθούν συγκεκριμένα και απλά συνθετικά μέρη, κάτι που είναι σύνηθες και πρακτικό στην κατασκευή, τότε η τελική μορφή είναι αποκύημα ενός πλήθους καθοριστικών παραγόντων, εσωτερικών, δηλαδή που ανταποκρίνεται στις ιδιότητες που καλείται να αποκτήσει το τελικό σύνολο, και εξωτερικών, που αφορούν στον τρόπο που αυτό καλείται να ενταχτεί σε ένα προϋπάρχον περιβάλλον και να γίνει μέρος του ευρύτερου οικοσυστήματος.

Η λογική αυτή, αν και δεν ήταν πρωτάκουστη για τα αρχιτεκτονικά δεδομένα, εκφράζεται έντονα με την έννοια του παραμετρικού σχεδιασμού, που εισήχθηκε στην αρχιτεκτονική ήδη από το 1964 και το συνέδριο που οργανώθηκε από το *Boston Architectural Center* , πάνω στα νέα ψηφιακά μέσα, που εμφανίστηκαν αρχικά στην αυτοκινητοβιομηχανία, ενώ η εντονότερη και πιο οργανωμένη χρήση στην αρχιτεκτονική δεν ξεκίνησε παρά τη δεκαετία του 1980.

Ο λόγος ήταν το γεγονός ότι η διαχείριση τέτοιου εύρους δεδομένων και σχέσεων μεταξύ παραμέτρων που εμφανίζουν τέτοιο επίπεδο πολυπλοκότητας, ήταν ασύλληπτη πριν την εμφάνιση των ηλεκτρονικών υπολογιστών και την ανάπτυξη λογισμικών βασισμένων στις διαφορικές μη-γραμμικές εξισώσεις που περιγράφουν τα δυναμικά συστήματα.

19. Πρωτότυπο: Biological evolution began with non-stiff structures. The stiff structures came much later, and they are usually just stiffening parts of larger soft structures. We need to study biological structures much more. (Frei Otto, Architectural Design, no 74, *Emergence in architecture*, Wiley, May/ June 2004, σελ. 25)

2.3.4. Ψηφιακά μοντέλα και νέοι ορίζοντες

Η δυνατότητα ψηφιακής απεικόνισης δυναμικών συστημάτων, την οποία έφερε ο 21ος αιώνας και η εξέλιξη του προγραμματισμού και των αυτοματισμών, παρέχει τεράστιες δυνατότητες για τη μελέτη του φαινομένου της ανάδυσης, και την εφαρμογή του σε πολλούς τομείς της μηχανικής, μέσω αλγορίθμων. Στόχος είναι πάντα η κατανόηση του τρόπου οργάνωσης των δυναμικών συστημάτων στη φύση και η άντληση από αυτά δομών και διαδικασιών που μπορούν να βοηθήσουν στον καλύτερο σχεδιασμό τεχνητών συστημάτων.

Τα μοντέλα μέσω υπολογιστή ενισχύουν σε μεγάλο βαθμό τη δυνατότητα μας για κατανόηση και αναπαραγωγή της ανάδυσης αλλά και γενικότερα των κανόνων που διέπουν τα δυναμικά μη-γραμμικά συστήματα. Δεδομένα του φαινομένου που παλαιότερα δε θα ήταν ούτε προσιτά, πόσο μάλλον ελέγξιμα, μπορούν μέσω αλγορίθμων να καταγραφούν, αναπαραχθούν και μεταβληθούν σε αρκετά μεγάλο βαθμό. Τα ψηφιακά μοντέλα είναι ταυτόχρονα αυστηρά καθορισμένα στις διαδικασίες παραγωγής τους και εκτελέσιμα σε πεπερασμένο χρόνο και χώρο. Είναι αφηρημένα, με την έννοια ότι το τελικό τους προϊόν δεν είναι εξαρχής γνωστό, και παράλληλα συγκεκριμένα, με την έννοια ότι μέσα τους εμπεριέχεται όλη η πληροφορία που είναι απαραίτητη για την εξέλιξη τους. Ορίζονται αφηρημένα όσο και αυστηρά από αριθμητικές σχέσεις που μεταβάλλονται στο χρόνο. Χρησιμοποιούν δηλαδή μαθηματικές εκφράσεις μη-γραμμικών δυναμικών συστημάτων εξισώσεων για να περιγράψουν τα δυναμικά συστήματα που προσομοιάζουν, μέσα από τον καθορισμό μεταβλητών και παραμέτρων.

Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 1, οι παράμετροι που καθορίζουν τη συμπεριφορά του δυναμικού συστήματος, και άρα και του μοντέλου που το περιγράφει μπορούν να ελεγχθούν και να μεταβληθούν, ώστε να παραχθούν διαφορετικά αποτελέσματα. Ο υπολογιστής δέχεται μια περιγραφή της κατάστασης του μοντέλουσυστήματος, μέσω της εισαγωγής παραμέτρων και στη συνέχεια τις μεταβάλλει βάσει συναρτήσεων μετάβασης. Το αποτέλεσμα είναι ένα δυναμικό ψηφιακό μοντέλο που μπορεί να διευκολύνει την έρευνα ενός φαινομένου, ή τον σχεδιασμό ενός τεχνητού συστήματος. Η διαχείριση των παραμέτρων αυτών, που αφορούν τόσο το εσωτερικό όσο και το εξωτερικό περιβάλλον του συστήματος για την παραγωγή μορφής στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό είναι το αντικείμενο του παραμετρικού σχεδιασμού.

3. Παραμετρικός σχεδιασμός και Generative Algorithms

Ενώ η έννοια της παραμετροποίησης δεν είναι ξένη στην αρχιτεκτονική, όπως εξάλλου και σε καμία επιστήμη που παράγει αποτέλεσμα βάσει δεδομένων, η βασική καινοτομία των τελευταίων χρόνων ήταν η εμφάνιση λογισμικών που λειτουργούν βάσει αλγορίθμων και που υποστηρίζονται από τα σύγχρονα υπολογιστικά συστήματα, ικανών να παράγουν τεχνητά συστήματα, βασισμένα σε μαθηματικά μοντέλα μη-γραμμικών δυναμικών συστημάτων. Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι σε θέση να μοντελοποιούν και να διαχειρίζονται βασικά στοιχεία της ανάδυσης βάσει προκαθορισμένων παραμέτρων και καλούνται *Generative Algorithms* στη διεθνή ορολογία.

Οι *Generative Algorithms (GA)*[20] που θα μπορούσαν να μεταφραστούν ως *Παραγωγικοί Αλγόριθμοι* ,είναι μια από τις βασικές εφαρμογές της *Παραγωγικής Επιστήμης (Generative Science)*. Η Generative Science έχει τις ρίζες της στην θεωρία καταστροφών και το φαινόμενο της ανάδυσης. Διερευνά τον φυσικό κόσμο και τις περίπλοκες συμπεριφορές σαν γενεσιουργό διαδικασία. Κύριο αντικείμενο της είναι ο τρόπος που ντετερμινιστικοί και πεπερασμένοι κανόνες, μέσω της αλληλεπίδρασης των μονάδων, καταλήγουν στην απρόβλεπτη και μη πεπερασμένη συμπεριφορά του συνόλου. Συναντά έτσι ποικίλες εφαρμογές ως μοντέλο της ανάπτυξης της έκβασης συστημάτων, βάσει της αλληλεπίδρασης υποφώσκοντων κανόνων και παραμέτρων.

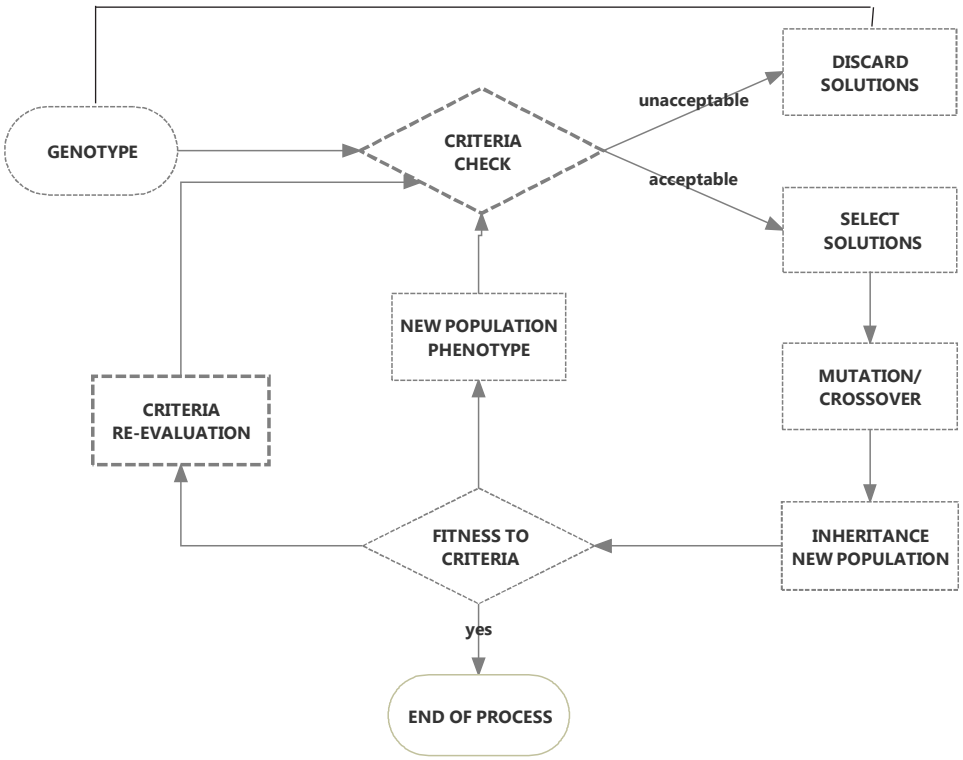
3.1. Inheritance-Selection-Mutation-Crossover

Η λειτουργία των Generative Algorithms βασίζεται στη μίμηση των αναπαραγωγικών διαδικασιών των βιολογικών συστημάτων. Με αφετηρία έναν πληθυσμό τυχαία παρηγμένων μονάδων *(γονότυποι)*, των υποψήφιων δυνατών λύσεων, *(φαινότυποι)*, η ανάπτυξη του συστήματος γίνεται σε "γενεές". Ο πληθυσμός που ανήκει κάθε φορά στη γενιά, υπόκειται σε έλεγχο με βάση ορισμένα φίλτρα και οι μονάδες του αξιολογούνται ως προς την πλήρωση ορισμένων κριτηρίων. Οι ικανοποιητικές μονάδες, ως προς τα κριτήρια αυτά, επιλέγονται *(selection)* και μεταβάλλονται, μέσω μεταλλάξεων *(mutations)* και ανασυνδυασμών *(crossovers)*, για τη δημιουργία νέου πληθυσμού *(inheritance)*. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνε-

20. Στη βιβλιογραφία συναντάται τόσο ο όρος Genetic Algorithms όσο και Generative Algorithms. Παρότι κατά βάση και οι δύο αναφέρονται στην ίδια έννοια, ο όρος generative συναντάται κατ' εξοχήν στην αρχιτεκτονική εφαρμογή.

ται είτε ως πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων- γενεών, είτε μέχρι να επιτευχθεί ένα ικανοποιητικό επίπεδο καταλληλότητας ως προς τις ορισμένες συνθήκες.

Βασικά στοιχεία που απαιτούνται ως εισαγωγή στον αλγόριθμο είναι ο προσδιορισμός του πεδίου ορισμού μέσα στο οποίο γίνεται η αναζήτηση των λύσεων, και ο καθορισμός συναρτήσεων που ορίζουν τα κριτήρια καταλληλότητας, βάσει των οποίων γίνεται η αξιολόγηση και η επιλογή.



3.2. Μορφογένεση

The form is the solution to the problem. The context defines the problem.

(Christopher Alexander, Notes on the Synthesis of Form, Cambridge, Harvard University Press: 1964,Ibid.)

Η διαδικασία εύρεσης μορφής, δηλαδή η διαδικασία βάσει της οποίας σχεδιάζεται η αρχιτεκτονική μορφή, έχει υποστεί σημαντικές αλλαγές στην εποχή της αλλαγής του σχεδιαστικού παραδείγματος *(paradigm shift)* από το αναλογικό στο ψηφιακό. Η δυνατότητα διαχείρισης τεράστιου όγκου δεδομένων σε συνδυασμό με την ανάπτυξη αλγορίθμων που προσομοιάζουν τη φυσική ανάπτυξη, και σχεδιαστικών προγραμμάτων ικανών να τους εκμεταλλευτούν, έχει διευρύνει σημαντικά τους ορίζοντες της μορφογένεσης στην αρχιτεκτονική πρακτική. Έτσι ο σχεδιασμός, αντί να αποτελεί προσαρμογή της σύλληψης του δημιουργού στα δεδομένα που η τελική κατασκευή καλείται να πληρεί, δύναται να προσδιορίσει εξαρχής και με σαφήνεια τις παραμέτρους του προβλήματος, οι οποίες με τη σειρά τους θα οδηγήσουν, στην επιλογή της τελικής μορφής.

Χωρίς αυτό φυσικά να υπαινίσσεται ότι ένας τέτοιου είδους σχεδιασμός είναι, στην ουσία του, λιγότερο "αυθαίρετος" από τον παραδοσιακό. Η βασικότερη διαφορά είναι η δυνατότητα, μέσω της χρήσης του υπολογιστή, να γίνει γρήγορα και αποδοτικά η επεξεργασία δεδομένων και παραγόντων που διαφορετικά θα επιχειρούσε να χειριστεί το μυαλό του μεμονωμένου δημιουργού. Το ανθρώπινο μυαλό παραμένει στον ενεργό ρόλο, φιλτράροντας, επεξεργάζοντας, συνθέτοντας και κρίνοντας τα αποτελέσματα σε κάθε στάδιο της διαδικασίας Λόγω της αυξανόμενης πολυπλοκότητας των προβλημάτων, αποτέλεσμα των κοινωνικοοικονομικών εξελίξεων που τοποθετούν στο πρίσμα του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού ένα ευρύτερο φάσμα παραγόντων, το βάρος τίθεται πλέον αντί για το σχεδιασμό αυτό καθεαυτό, στη σύλληψη της ιδέας, στην επιλογή και ιεράρχηση παραγόντων, στον προσδιορισμό του πλαισίου και των περιορισμών και εντέλει στην τελική επιλογή των επιθυμητών εκ των αποτελεσμάτων.

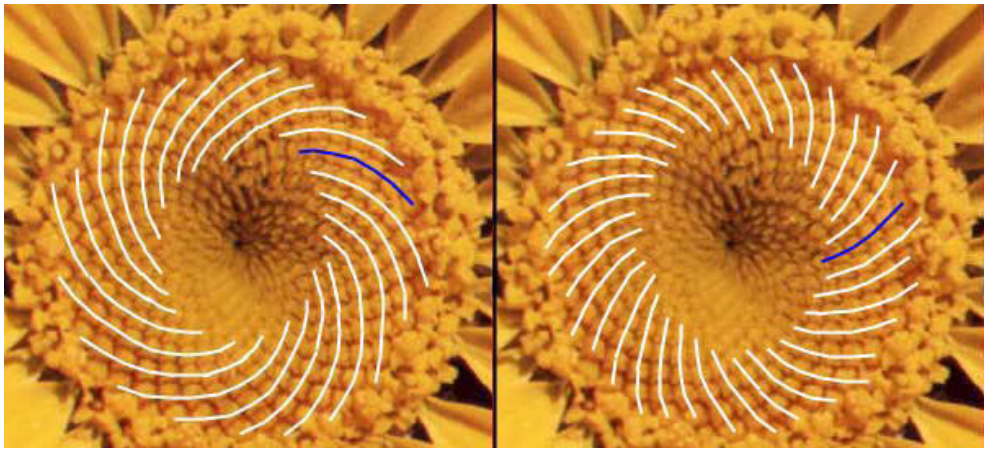
Η προαναφερθείσα διαδικασία λοιπόν παραγωγής μορφών, ή *form-finding*, με την διεθνή ορολογία, βάσει παραμετροποίησης, είναι η βασική εφαρμογή των παραγωγικών αλγορίθμων στη σύγχρονη αρχιτεκτονική. Βασικός στόχος της διαδικασίας είναι η ανάπτυξη και ο χειρισμός των αυτοοργανωτικών ιδιοτήτων των υλικών συστημάτων υπό την παρουσία εξωτερικών ερεθισμάτων, όπως αυτές προσομοιάζονται από τα διάφορα λογισμικά.

3.2.1. Παραμετροποίηση

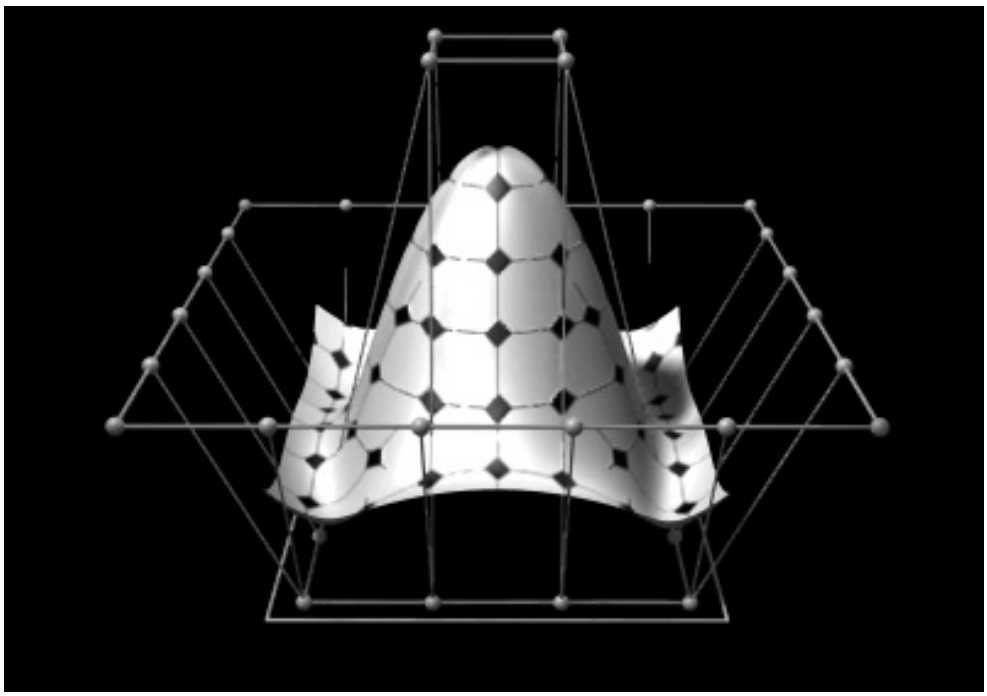
Ο παραμετρικός σχεδιασμός, με το πλήθος των εργαλείων που προσφέρονται από τα διάφορα λογισμικά, αποτελεί μια πρακτική που βρίσκεται σε έντονη άνοδο την τελευταία δεκαετία και ως προς τις αρχές σχεδιασμού δε διαφέρει σημαντικά από τις πιο "παραδοσιακές" μεθόδους. Η βασική διαφορά έγκειται στο χειρισμό των παραγωγικών αλγορίθμων ως ακριβέστερο, γρηγορότερο και πρακτικότερο

21. Chris Wise, Drunk in an Orgy of Technology, Architectural Design no 74, "Emergence in architecture", Wiley, May/June 2004, σελ 57

3.1. Η spiral plyllotaxis στο φυτό polyphylla (πηγή: wikipedia.org)



3.2. Οι σπίρες στο εσωτερικό του άνθους του ηλίανθου. (πηγή: scotton.freeshell.org)



3.3. Παράδειγμα N.U.R.B.S. τρισδιάστατης απεικόνισης, με τα σημεία ελέγχου (control points) και την παραχθείσα επιφάνεια. (πηγή: wikipedia.org)

μέσο διαχείρισης του όγκου των πληροφοριών που λαμβάνονται ως δεδομένα σε ένα αρχιτεκτονικό πρόβλημα. Επιπλέον η πρακτική αυτή αντιμετώπισης ενός έργου ως δυναμικό σύστημα προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στο σχεδιασμό, καθώς δύναται να μεταφέρει στο μοντέλο καινοτόμα χαρακτηριστικά που προέρχονται από την προσομοίωση των φυσικών συστημάτων.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό είναι αυτή ακριβώς η δυναμικότητα των συστημάτων, με την έννοια της μεταβολής στο χρόνο των παραμέτρων που καθορίζουν την εξέλιξη της μορφής. Αυτό μεταφράζεται ως διαρκής προσαρμογή των παραμέτρων και κριτηρίων κατά τη διάρκεια της μορφογένεσης, ανάλογα με την παρούσα κατάσταση του συστήματος και του περιβάλλοντος του, κάθε χρονική στιγμή.

Επιπλέον είναι δυνατή η γρήγορη και ακριβής επιλογή βέλτιστων λύσεων ως προς συγκεκριμένα κριτήρια. Παρότι τα συστήματα στα οποία αναφερόμαστε είναι εξαιρετικά πολύπλοκα και λειτουργούν δυναμικά στο χρόνο, η αντιμετώπιση ως προς ορισμένες παραμέτρους είναι ακριβής και αποδοτική. Στον σχεδιασμό, αυτό αποτελεί σημαντικό εργαλείο του δημιουργού, ο οποίος φυσικά καλείται να συνδυάσει και να ιεραρχήσει κριτήρια και λύσεις προκειμένου να παράξει αποτέλεσμα.

Τέλος, υπάρχει σαφής ομαδοποίηση των δομικών στοιχείων που απαρτίζουν το όλον. Οι σύνθετες μορφές σε πολλές περιπτώσεις προκύπτουν από επανάληψη με κάποιες μεταλλάξεις της ίδιας μονάδας. Στο φυσικό κόσμο το διακρίνουμε χαρακτηριστικά στο σώμα φυτών και καρπών, όπως ο ηλίανθος. Η διάταξη ομοίων μερών υπό κλίμακα και στρέψη ώστε να σχηματίζουν το όλον στη βοτανολογία ονομάζεται *spiral phyllotaxis* (φυλλο+ τάξις). Το λουλούδι του ηλίανθου για παράδειγμα αποτελείται στην πραγματικότητα από έναν τύπο "φολίδας" κλιμακούμενο σε διαφορετικά μεγέθη ανάλογα με τη θέση του πάνω στην επιφάνεια του λουλουδιού. Ακόμα κι έτσι, στην επιφάνεια του συναντάται πολύ περιορισμένος αριθμός διαφορετικών φολίδων. *[εικόνα 3.1.,3.2.]*[22]

Καθώς ο συνδυασμός πεπερασμένων στοιχείων οδηγεί σε αυξημένης περιπλοκότητας σύνολα, με λίγα σε αριθμό ομαδοποιημένα δομικά στοιχεία, που σημαίνουν μικρό αριθμό παραλλαγών κατασκευαστικών στοιχείων στο σχεδιασμό, μπορούν να παραχθούν ιδιαίτερα σύνθετες μορφές. Σ΄ αυτή την περίπτωση η βασικότερη διευκόλυνση στον τομέα της αρχιτεκτονικής είναι η δημιουργία ενός αρκετά ευρύ, αλλά παράλληλα σαφώς προσδιορισμένου αλγορίθμου, από τον οποίο, με την μεταβολή κάθε φορά των κατάλληλων παραμέτρων να μπορεί να προκύψει κάθε λεπτομέρεια της κατασκευής. Η λογική αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε συνδεσμολογίες, όπου η περιπλοκότητα της μορφής επιβάλει σχεδόν τη μοναδικότητα κάθε στοιχείου, με αποτέλεσμα το έργο να απαιτούσε τεράστιο όγκο σχεδίων για την περάτωσή του. Τα πολυάριθμα αυτά σχέδια αντικαθιστώνται από τον αλγόριθμο, ο οποίος προσδιορίζει με ακρίβεια τη θέση και τα χαρακτηριστικά κάθε στοιχείου, και σε συνδυασμό με τα ψηφιακά μηχανήματα κατασκευής (CAM)[23] καθιστά δυνατή την κατασκευή του.

Στη διαδικασία της μορφογένεσης ως πιο συνήθης επίδραση χρησιμοποιείται, σαφώς, η δύναμη της βαρύτητας, όπως άλλωστε και στα πειραματικά μοντέλα χορδών της παραγράφου 2.3.2. Κυριότερο όμως χαρακτηριστικό των ψηφιακών μοντέλων που προκύπτουν από τους παραγωγικούς αλγορίθμους, είναι η δυνατότητα συνεχούς αναπροσαρμογής σε μεγάλο εύρος δυναμικά μεταβαλλόμενων

22. Architectural Design no 74, Emergence in architecture, Wiley, May/June 2004, σελ. 47

23. CAM: Computer-Aided Manufacturing

παραμέτρων. Με βάση τα παραπάνω και το κεφάλαιο 2.3., ως βάση του αλγόριθμου, στην περίπτωση της αρχιτεκτονικής, θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν οι ποικίλες επιρροές του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος του συστήματος. Εάν ως σύστημα θεωρηθεί το αντικείμενο του σχεδιασμού, το οποίο μπορεί να είναι από συγκεκριμένος χώρος, ή κτίριο μέχρι και ολόκληρη πόλη, τότε οι παράμετροι του αλγορίθμου, τα κριτήρια δηλαδή που θα είναι καθοριστικά για τη μορφή, πρέπει να είναι ουσιαστικά το διάγραμμα δυνάμεων του Thomson, το σύνολο των επιδράσεων στο σύστημα.

Πέρα από τη δύναμη της βαρύτητας, που σαφώς αποτελεί το πρώτο "εμπόδιο" μιας κατασκευής που φιλοδοξεί να στέκεται, και η οποία όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2.3.2. χρησιμοποιείται στην εξομοίωση με φυσικά μοντέλα, υπάρχουν και άλλες δυνάμεις που πρέπει να ληφθούν υπόψιν, είτε με την αυστηρά φυσική ή με την ευρύτερη έννοια.

Στις επιδρούσες δυνάμεις με την φυσική έννοια, κατατάσσονται τα στατικά και μηχανικά κριτήρια που είναι πάντα παρόντα σε κάθε ανθρώπινη κατασκευή. Παράγοντες όπως η σεισμική καταπόνηση, η ανεμοπίεση, η θερμοπερατότητα, η ηχοαπορροφητικότητα, αν και δεν αποτελούν ακριβώς αντικείμενο της αρχιτεκτονικής πρακτικής έχουν έντονη επίδραση στην ισορροπία του συστήματος, και άρα είναι θεμελιώδους σημασίας για τη βιωσιμότητα των χώρων. Σ' αυτούς προστίθενται οι λεγόμενοι "βιοκλιματικοί" παράγοντες, στους οποίους δίνεται έντονη βαρύτητα τις τελευταίες δεκαετίες. Η εξοικονόμηση ενέργειας γενικότερα, ο αερισμός, ο σωστός ηλιασμός και η σκίαση είναι στοιχεία που μπορούν να παραμετροποιηθούν εξίσου.

Παράλληλα, υπάρχει ένα μεγάλο εύρος πιο "υποκειμενικά" καθοριζόμενων και δυσκολότερα εκφραζόμενων από μαθηματικές σχέσεις παραμέτρων οι οποίες αφορούν σε συνδέσεις χρήσεων, σε ροές- κινήσεις ανθρώπων και οχημάτων, σε πληθυσμιακές συγκεντρώσεις, σε οπτικές φυγές. Με τη βοήθεια των αλγορίθμων και των κατάλληλων λογισμικών όλα αυτά τα ποιοτικά κριτήρια μπορούν να ποσοτικοποιηθούν, να αναπαρασταθούν και να γίνει πιο έκδηλο το εύρος και ο τρόπος που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα.

Τέλος, η παραμετροποίηση μπορεί να αφορά και ακόμα υποκειμενικότερους παράγοντες στον σχεδιασμό, όπως αισθητικούς, ή ακόμα συμβολικούς, όσον αφορά σε άξονες, στοιχεία μνήμης, και καθαρά μορφολογικά. Οι παράγοντες αυτοί, αν και καθ΄ολοκλήρου βασιζόμενοι στην αρχιτεκτονική σύλληψη μπορούν επίσης να εισαχθούν ως παράμετροι για την δημιουργία του μοντέλου, όπως άλλωστε θα συνέβαινε και παραδοσιακά, στη σκέψη του αρχιτέκτονα.

Μέχρι στιγμής, η πλειονότητα των εφαρμογών των generative algorithms αφορά σε μονοπαραμετρικά συστήματα, δηλαδή η μορφή αναζητείται σε συνάρτηση με μια ,ή περισσότερες συναφείς, παραμέτρους, χωρίς να υπάρχει ανάγκη ανατροφοδότησης και ελέγχου. Λόγω της περιπλοκότητας τους, του όγκου των πληροφοριών που απαιτούνται και της συχνής μη συμβατότητας των παραμέτρων η χρήση περισσοτέρων παραμέτρων αποδεικνύεται αρκετά δύσκολη, παρά την συνεχή εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων και αποτελεί πρακτική των τελευταίων ετών.

Ο λόγος είναι ότι ο συνδυασμός στατικών, χωρικών, υλικών και μορφολογικών παραμέτρων απαιτεί την συνεχή ιεράρχηση των παραγόντων ανάλογα με τη θεωρούμενη σημασία τους, τον συνεχή έλεγχο και την ανατροφοδότηση του συστήματος, ώστε οι αλλαγές που αφορούν στο ένα πεδίο να ελέγχονται και ως προς

την επίδρασή τους στα υπόλοιπα. Αυτό αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα του προβλήματος και απαιτεί αφενός καλύτερο χειρισμό και κατάρτιση των αλγορίθμων, αλλά και ταχύτερη επεξεργασία των δεδομένων. Η παραδοχή αυτή οδηγεί στην ανάγκη χρήσης δομών ανοιχτού λογισμικού, που επιτρέπουν τη συνεχή προσαρμογή των δεδομένων, προκειμένου να επιτύχουν την κυκλική ανατροφοδότηση του συστήματος.

Υπάρχει πλήθος παραδειγμάτων λογισμικών που παράγουν μορφή παραμετρικά, χρησιμοποιώντας τέτοιους αλγόριθμους. Τα περισσότερα από αυτά είναι στην ουσία εφαρμογές που χρησιμοποιούνται εδώ και αρκετές δεκαετίες στην αυτοκινητοβιομηχανία για το σχεδιασμό αμαξωμάτων. Εξάλλου αυτή ήταν και η εφαρμογή στην οποία πρωτοεμφανίστηκε η ανάγκη για διαχείριση ελεύθερων μορφών, και εκεί έχει τις ρίζες της η ψηφιακή απεικόνιση τύπου NURBS (Non-Uniform Rational B-spline)[24], *[εικόνα 3.3.]* η οποία πλέον χρησιμοποιείται ευρέως σε αρχιτεκτονικές πρακτικές. Βασισμένα στην μέθοδο αυτή, πολλά λογισμικά στραμμένα στην αρχιτεκτονική εφαρμογή έχουν αναπτυχθεί στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων, και συνήθως βασίζονται σε προϋπάρχοντα εργαλεία σχεδιασμού, CAD (Computer-Aided Design), όπως το Rhinoceros, της εταιρίας Robert McNeel and associates και το Maya, της Autodesk.

Οι αλγόριθμοι εφαρμόζονται στην αρχιτεκτονική παράλληλα με την παρατήρηση, μοντελοποίηση και καταγραφή φυσικών διαδικασιών ανάδυσης, όπως αυτές φαίνονται μέσα από συγκεκριμένα παραδείγματα, με στόχο την αξιοποίηση τους ως εργαλείο μορφογένεσης. Οι generative algorithms λειτουργούν σε κάθε περίπτωση με παρόμοιο τρόπο όσον αφορά στην αρχιτεκτονική, με βάση τη λογική που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.1.

3.2.2. Η διαδικασία: Παραγωγή- Ανάλυση- Ανατροφοδότηση- Προσαρμογή

Η διαδικασία παραγωγής μορφής μέσω αλγορίθμων βασίζεται στη θεώρηση του αντικειμένου ως δυναμικό σύστημα. Προσδιορίζονται από τον χρήστη οι μεταβλητές και οι παράμετροι, με την ιεράρχηση που κρίνεται σκόπιμη. Το ψηφιακό μοντέλο προσαρμόζεται στα δεδομένα, αντιδρώντας στις δυνάμεις από το εξωτερικό περιβάλλον και την εσωτερική λειτουργία του συστήματος, και χρησιμοποιώντας σημεία ισορροπίας, ελκυστές και απωθητές.

Με αφετηρία ένα πρωταρχικό *input*, ένα βασικό συστατικό στοιχείο, μια επιφάνεια ή μια βασική δομή, προσδιορίζονται οι περιορισμοί του συστήματος, καθώς και οι παράμετροι, ως επιδρούσες δυνάμεις που επιβάλλονται στη συνολική γεωμετρία, παράγοντας ένα πληθυσμό ικανών λύσεων. Οι λύσεις αυτές αξιολογούνται βάσει του κατά πόσο πληρούν τα προσδιορισμένα κριτήρια και εμπίπτουν στους αρχικούς περιορισμούς, ώστε κάποιες να απορριφθούν και κάποιες να εξελιχθούν στην επόμενη γενιά. Η περαιτέρω εξέλιξη του φαινοτύπου οδηγείται από τις μεταλλάξεις και μετατροπές που υφίστανται οι γεωμετρίες προκειμένου να αποτελέσουν την νέα γενιά φαινοτύπων. Οι μετατροπές αυτές πραγματοποιούνται ως εντολές του τύπου αντιγραφή, περιστροφή, παραμόρφωση. Οι νέες λύσεις υπόκεινται σε νέο έλεγχο, ανατροφοδοτώντας τις παραμέτρους του συστήματος με νέα δεδομένα, βασισμένα στα αποτελέσματα που προέκυψαν και τα οποία μπορεί να είναι διαφορετικά από τα αναμενόμενα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να θεωρηθεί ότι έχουν καλυφθεί οι συνθήκες που ήταν ζητούμενες από την αρχή.

24. Ως NURBS (Non-Uniform Rational B-spline) νοείται ένα μαθηματικό μοντέλο για την ψηφιακή αναπαράσταση καμπυλών *(curves)* και επιφανειών *(surfaces)*, που αναπτύχθηκε τη δεκαετία του '50 από τις γαλλικές αυτοκινητοβιομηχανίες Renault και Citroen για το σχεδιασμό αμαξωμάτων.

Ουσιαστικά η μορφογένεση επιτυγχάνεται από την αλληλεπίδραση δύο συστατικών: τον αρχικό ορισμό και το σύνολο κανόνων-παραμέτρων που διέπουν την εξέλιξη του, και μια γραφική διαδικασία *(process)* που αναθεωρεί και επανερμηνεύει σε κάθε επανάληψη τους κανόνες αυτούς βάσει της τρέχουσας μορφής. Στην εφαρμογή, η χρήση αυτής της κυκλικής διαδικασίας, αντί της παραδοσιακής γραμμικής σχέσης αιτίου-αποτελέσματος, η ανατροφοδότηση αυτή *(feedback),* είναι και ο λόγος που καθίσταται τόσο δύσκολη η παραμετροποίηση με πολλές παραμέτρους, καθώς ανάλογα με την μεταβολή του αντικειμένου ώστε να προσαρμοστεί στα κριτήρια, καλούνται να μεταβάλλονται και τα ίδια τα κριτήρια, ανάλογα με το πόσο κοντά είναι το αποτέλεσμα της επιλογής στο επιθυμητό.

Σύμφωνα με τον Michael Hansen, αρχιτέκτονα και ιδρυτή της ερευνητικής ομάδας OCEAN[25], απαντώνται τρεις διαδικασίες ανατροφοδότησης *(feedback)*. Μία που αναφέρεται στις συγκεκριμένου περιεχομένου δυνάμεις που επηρεάζουν και επηρεάζονται από την υλική μορφή λόγω της αδράνειας στην αλλαγή, μία που αφορά στην αλληλεπίδραση με τον ανθρώπινο παράγοντα, και μία που αναφέρεται στην έμμεση επιρροή της αλληλεπίδρασης μεταξύ του ανθρώπου και του περιβάλλοντος του στη μορφογένεση. Με την έννοια αυτή, οι αναδυόμενες (emergent) από τη διαδικασία αυτή μορφές αποτελούν μεταβατικές καταστάσεις, εφόσον η δημιουργία τους έχει ως αποτέλεσμα την επανεξέταση των δεδομένων παραμέτρων.

3.2.3. Μορφογενετικός μηχανισμός ή Εργαλείο βελτιστοποίησης;

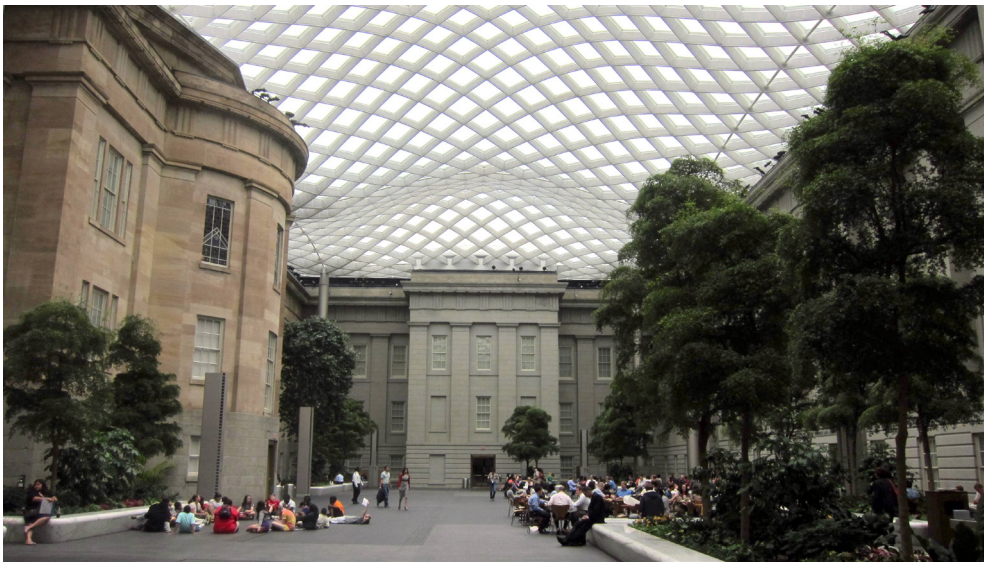
Αν και την τελευταία δεκαετία οι παραγωγικοί αλγόριθμοι έχουν αποτελέσει βασικό εργαλείο πολλών αρχιτεκτόνων και σχεδιαστών, η χρήση τους έχει παραμείνει, ως επί το πλείστον μερική και απομακρυσμένη από την αρχική λογική της ανάδυσης και της δυναμικότητας που αυτοί προσφέρουν, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει τελικά το πραγματικό όφελος που θα μπορούσε να υπάρχει από την εφαρμογή τους. Οι αλγοριθμικές διαδικασίες, στη σύγχρονη πρακτική, χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο είτε ως εργαλεία βελτιστοποίησης είτε καθαρά μορφογενετικά.

Στην πρώτη περίπτωση γίνεται η επίκληση τους προκειμένου να επιλυθούν προβλήματα στατικής ή μηχανολογικής φύσεως. Οι αλγόριθμοι λειτουργούν πάνω σε ένα σύνολο πιθανών λύσεων , από τις οποίες επιλέγεται η βέλτιστη, αυτή που εξυπηρετεί καλύτερα αυστηρά και σαφώς προσδιορισμένες προϋποθέσεις στον τομέα της μηχανικής αντοχής ή του ηλιασμού, του κλιματισμού, της ακουστικής, και της ενεργειακής κατανάλωσης. Συχνά μάλιστα το εύρος τον ελεγχόμενων λύσεων είναι προσδιορισμένο εξαρχής ως προς τα γεωμετρικά, και μορφολογικά χαρακτηριστικά τους, έτσι ώστε δεν πρόκειται πλέον για μορφογένεση, αλλά για έλεγχο της απόδοσης ήδη σχεδιασμένων περιπτώσεων. Ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, που οι ολοένα αυστηρότεροι κανονισμοί περί ασφάλειας, πρόβλεψης καταστροφών και περιορισμού της μόλυνσης του περιβάλλοντος, αποκτά ολοένα μεγαλύτερη αξία η εκπόνηση με ακρίβεια υπολογισμών πάνω στη μηχανική και ενεργειακή απόδοση των κτιρίων και των δημοσίων χώρων, ο οποίος γίνεται σημαντικά ευκολότερος χάρη στην δυνατότητα παραμετροποίησης του προβλήματος.

Καταρχάς, όσον αφορά στη φέρουσα ικανότητα, γίνεται προσπάθεια να εξοικονομηθεί όσο δυνατό περισσότερο υλικό στις κατασκευές, ειδικά όταν πρόκειται για μεγάλες και αρκετά περίπλοκες στατικά κατασκευές και στατική εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ίδιας της μορφής. Μέσω κατάλληλων προγραμμάτων μπορεί

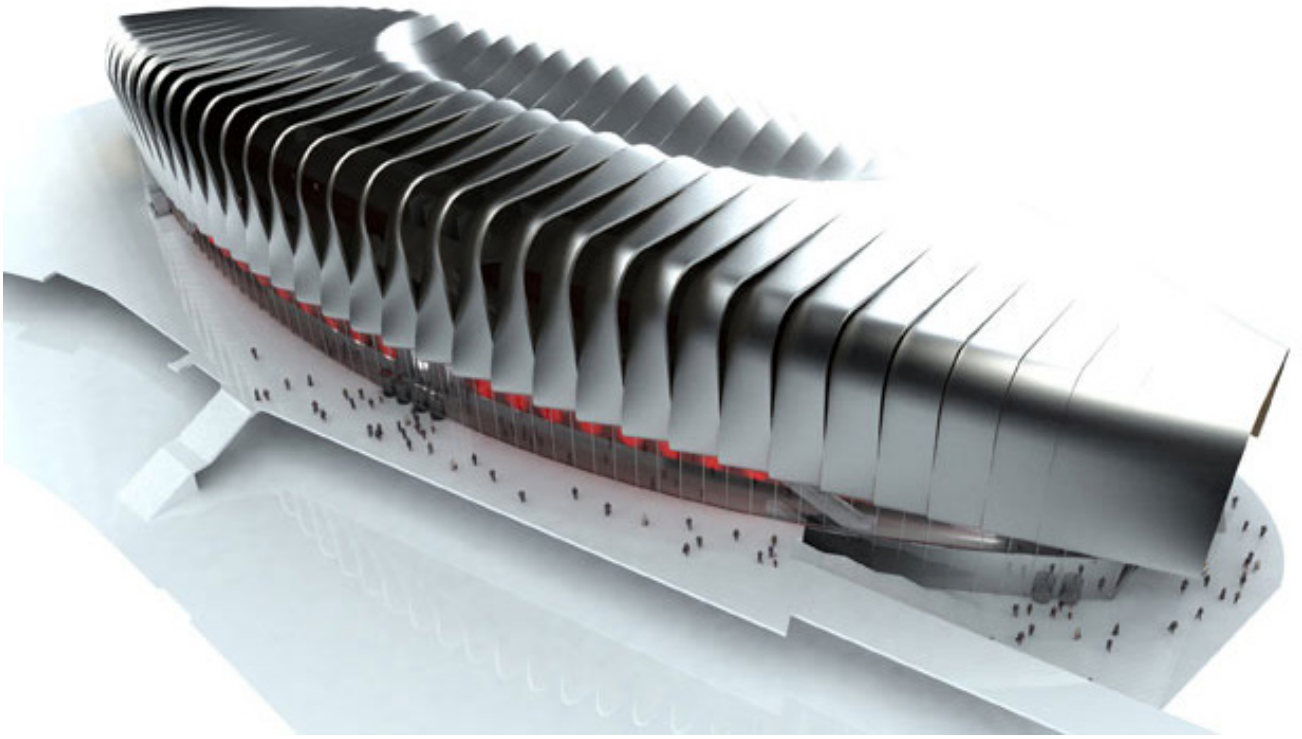
25. Michael Hansen, Finding Exotic Form: An evolution of Form Finding as a Design Method, Architectural Design no 74, "Emergence in architecture", Wiley, May/June 2004, σελ. 29

3.5. Ολυμπιακό κέντρο Μονάχου, Frei Otto (πηγή: de.academic.ru)



3.6. Smithsonian Institute, Washington, Norman Foster (πηγή: www.geolocation.ws

3.7. Φωτορεαλιστική απεικόνιση για το Milan E3 Exhibition Centre, 2006, Milan, των Grimshaw Architects (πηγή: grimshaw-architects.com)



να γίνει η απαραίτητη διαστασεολόγηση του φέροντος οργανισμού για κάθε προβλεπόμενο φορτίο, όπως εφαρμόστηκε για παράδειγμα στο Aquatics Centre for the 2008 Olympic Games του Πεκίνου. Παρόμοιες τακτικές χρησιμοποιούνται στη λογική των μοντέλων του Frei Otto, για την βέλτιστη παραλαβή των προβλεπόμενων φορτίων από την κατασκευή, με δανεισμό φυσικών μορφών. Σχεδιάζονται έτσι κατεξοχήν επιφάνειες, κελύφη και μεμβράνες που είτε εμφανίζονται ελεύθερες στο χώρο, σαν αυτές του Frei Otto στο Ολυμπιακό Κέντρο του Μονάχου *[εικόνα 3.4.]* , είτε αναπτύσσουν τη μορφολογία τους σε συγκεκριμένα όρια, όπως για παράδειγμα στα στέγαστρα του Norman Foster. [εικόνα 3.5., Smithsonian Institution Washington]

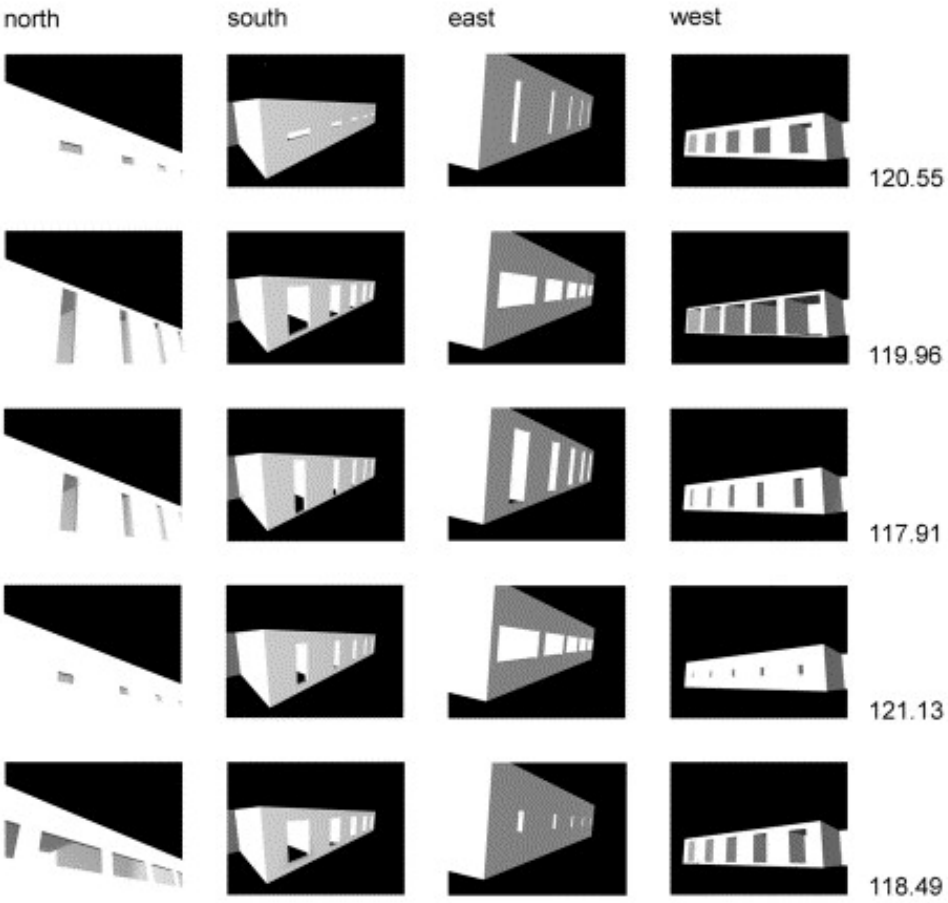
Με δεδομένα τα όρια, και πάνω σε ψηφιακό, συχνά παράλληλα με φυσικό, μοντέλο, προσδιορίζονται οι επιδρούσες στην επιφάνεια δυνάμεις και φορτία, και σε συνδυασμό με τα στοιχεία της αρχιτεκτονικής σύνθεσης, προκύπτουν η γεωμετρία, οι διαστάσεις και οι κατευθύνσεις των φερόντων στοιχείων, ανάλογα με το υλικό που έχει επιλεχθεί. Το αποτέλεσμα είναι μάλιστα άμεσα κατασκευάσιμο, χάρη στην δυνατότητα των σύγχρονων λογισμικών να ομαδοποιούν τα αποτελέσματα και να βοηθούν στην οργάνωση και τυποποίηση της κατασκευής, σε τμήματα. Υπάρχουν μηχανήματα ελεγχόμενης κατασκευής (CNC) που λειτουργούν με λογισμικά CAM, εισάγοντας τα δεδομένα απευθείας από το ψηφιακό μοντέλο.

Παράλληλα, καθώς η απόδοση των κατασκευών και των διαμορφώσεων με την ευρύτερη έννοια υφίσταται διεξοδικό έλεγχο, ειδικά στα έργα μεγάλης κλίμακας, η χρήση μεθόδων παραμετροποίησης στην περίπτωση αυτή αποτελεί αναγκαιότητα, που αφορά στη βιωσιμότητα του κτιρίου, και περιλαμβάνει υπολογισμούς και διαδικασίες τις οποίες ο μελετητής είναι δύσκολο να προβλέψει και να συνδυάσει με παραδοσιακά μέσα. Η μελέτη αυτή βασίζεται στην ψηφιακή προσομοίωση της απόδοσης του έργου ως προς κάποιους παράγοντες που ενδιαφέρουν τον εκάστοτε κατασκευαστή. Με την ακόλουθη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, με τη βοήθεια κάποιου λογισμικού, γίνεται η αξιολόγηση κάθε μίας μέσα από ένα αρχικά δεδομένο σύνολο πιθανών αρχιτεκτονικών λύσεων ώστε μετά από συνεχή ανατροφοδότηση να επιλεχθεί η βέλτιστη. Ο αλγόριθμος καθορίζεται από την συγκεκριμένη ποιότητα της οποίας η βελτιστοποίηση επιδιώκεται, για παράδειγμα η ακουστική, από τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψιν για τον υπολογισμό και από το εύρος τιμών στο οποίο κινούνται οι παράμετροι αυτές.

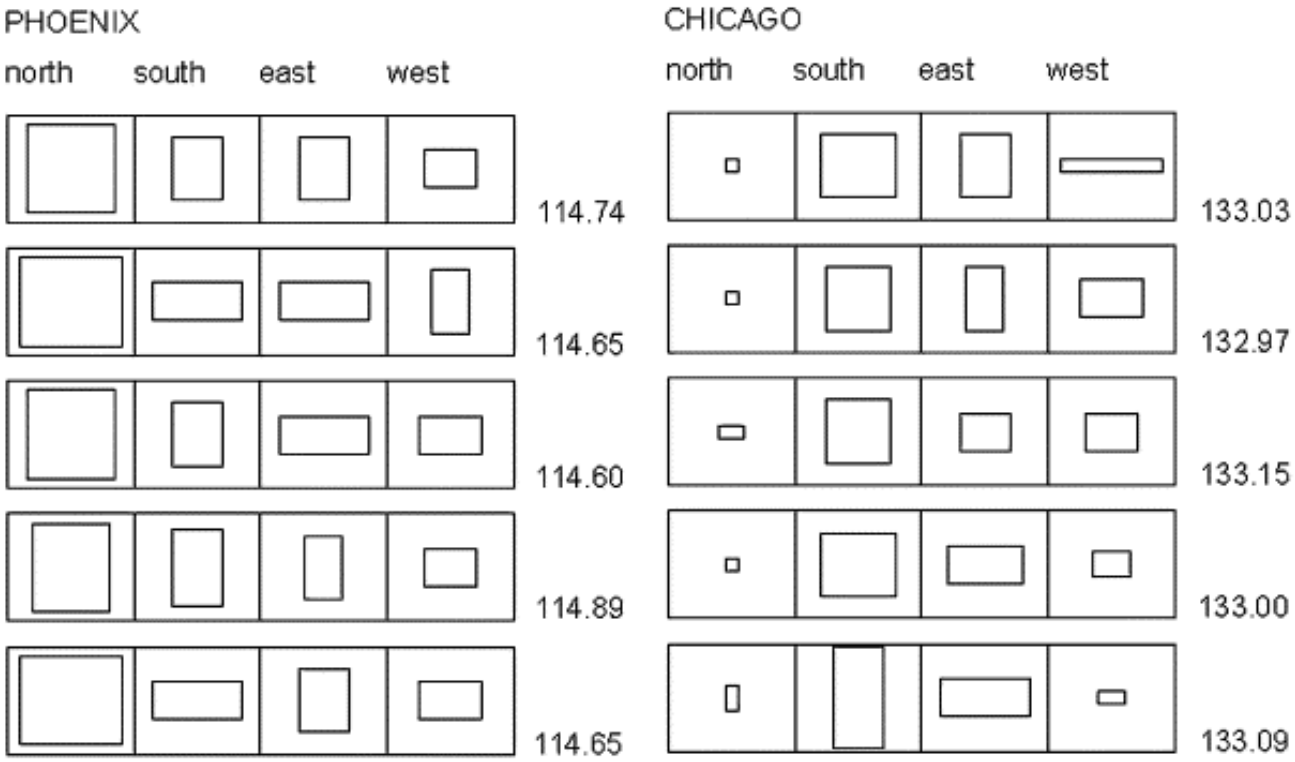
Για παράδειγμα μια τέτοια εφαρμογή των παραγωγικών αλγορίθμων είναι το Genetic Algorithmic Tool for Design Optimization[26], που αφορά στον προσδιορισμό των ανοιγμάτων, ως προς τον αριθμό, τη θέση και το μέγεθος, σε δεδομένη όψη βάσει κριτηρίων ηλιασμού, θέρμανσης και αερισμού. Στο πλαίσιο της έρευνας εξετάστηκαν δύο κτίρια γραφείων, ένα στο Phoenix της Arizona κι ένα στο Chicago του Illinois. Αφού παράχθηκε ένα πλήθος τυχαίων λύσεων, έγινε αξιολόγηση αυτών ως προς τη θερμική και ηλιακή τους απόδοση, με τη βοήθεια του προγράμματος θερμικής ανάλυσης DOE2.1 E. Η ηλιακή πρόσπτωση υπολογίστηκε καθ όλη τη διάρκεια του χρόνου για όλες τις ώρες τις ημέρας, και σε συνάρτηση με τις καθορισμένες απ' τον αρχιτέκτονα ανάγκες για ηλιακό φως και θερμική εξοικονόμηση. Προσδιορίστηκαν έτσι οι θέσεις, το μέγεθος και ο αριθμός των ανοιγμάτων για κάθε όψη, βόρεια, νότια, δυτική και ανατολική. Τα αποτελέσματα οπτικοποιήθηκαν σε πρόγραμμα σχεδίασης, σε AutoLisp, και προκύπτουν τρισδιάστατες απεικονίσεις και σχέδια. *[σχήμα 3.7. και 3.8.]*

Σε γενικές γραμμές, η πρακτική αυτή εφαρμόζεται κατ' εξοχήν από άλλες ειδικότητες μηχανικών και σπανιότερα από αρχιτέκτονες, οι οποίοι καλούνται να εφαρ-

26. Εφαρμογή που αναπτύχθηκε σε πλαίσιο έρευνας από τις Luisa Caldas και Leslie Norford το 1999.



3.8. Απεικόνιση της απόδοσης των λύσεων στο Phoenix. Στα δεξιά αναγράφεται η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση σε MWh. (πηγη:www.science-direct.com)



3.9. Συγκριτική παρουσίαση των λύσεων όλων των προσανατολισμών, για Phoenix και Chicago, σε όψη (πηγή: www.sciencedi-rect.com)

μόσουν τέτοιες τεχνικές βελτιστοποίησης σε τμήματα του έργου μεμονωμένα, δηλαδή σε συστήματα όψεων, διαμορφωμένα δώματα, ή δάπεδα. Η μελέτη των συγκεκριμένων παραμέτρων έρχεται, στην περίπτωση αυτή, να συμπληρώσει ένα ήδη πεπερασμένο αρχιτεκτονικά έργο, χωρίς να συντελεί σφαιρικά στο τελικό αποτέλεσμα. Η παραμετροποίηση παραμένει έτσι μεμονωμένη και τμηματική.

Η τρίτη περίπτωση, αφορά στην εφαρμογή της θεωρίας περί ανάδυσης ως μορφολογικό εργαλείο, και αποτελεί μια από τις εντονότερες σύγχρονες τάσεις. Στην περίπτωση αυτή, παρότι η λογική επιλογής βέλτιστων λύσεων μέσα από ένα σύνολο αποτελεσμάτων, παραμένει ισχύουσα, ο παραμετρικός σχεδιασμός εφαρμόζεται με καθαρά ογκοπλαστικά ή μορφολογικά κριτήρια, και ως εκ τούτου δεν αποτελεί αναγκαιότητα, αλλά απλώς έναν διαφορετικό, καινοτόμο ίσως, τρόπο σύλληψης της αρχιτεκτονικής ιδέας. Η αντίληψη αυτή είναι ίσως εγγύτερη στην έννοια της ανάδυσης των φυσικών συστημάτων, αντιμετωπίζοντας την αρχιτεκτονική μορφή ως ένα σύστημα που αναπτύσσεται βάσει κάποιων στοιχείων του περιβάλλοντος του. Σε θεωρητικό επίπεδο οι αρχιτεκτονική αυτή βασίζεται περισσότερο στη μορφολογική έκφανση των θεωριών του Réné Thom και του D΄Arcy Thomson περί ανάπτυξης και εξέλιξης, με στόχο την αποδέσμευση της μορφής από τα ορθοκανονικά πλαίσια που της έχουν επιβληθεί. Σαν αποτέλεσμα προκύπτουν περίπλοκα μοτίβα που απέχουν οπτικά και συνθετικά από τις παραδοσιακές μορφές.

Με βάση συγκεκριμένη δομική μονάδα, γεωμετρικά και υλικά προσδιορισμένη, γίνεται η σύνθεση της μορφής, μέσω διαδοχικών επαναλήψεων και μεταλλάξεων, με τον τρόπο που έχει ήδη περιγραφεί στο κεφάλαιο 3.2.2.. Η παραγωγή μορφής βασίζεται σε ορισμένα κριτήρια, τα οποία αφορούν σε κάποιες συνθετικές επιλογές, όπως ροές κινήσεων και οπτικές φυγές, οι οποίες στηρίζονται κυρίως σε παρατήρηση των υπαρχόντων ή των προβλεπόμενων δράσεων στο εσωτερικό και το εξωτερικό του έργου- συστήματος. Συχνά επίσης, η χρήση του αλγορίθμου αφορά αποκλειστικά στη δημιουργία κάποιας ήδη εξαρχής προσδιορισμένης αλλά δύσκολα σχεδιάσιμης γεωμετρίας, όπως στην περίπτωση του Milan E3 Exhibition Centre των Grimshaw Architects *[εικόνα 3.6.]*. Στο παράδειγμα αυτό, πρόκειται για τη σύλληψη μιας σύνθετης αρχιτεκτονικά μορφής, η οποία δημιουργείται από καμπύλες σχήματος Π που κινούνται πάνω σε άλλη καμπύλη ενώ παράλληλα συστρέφονται ως προς τον άξονα τους, δημιουργώντας τα αυξανόμενα προς το κέντρο ανοίγματα.

Οι πρακτικές αυτές, αν και παρουσιάζουν ιδιαίτερο μορφολογικό ενδιαφέρον, στην μεγάλη πλειονότητα των περιπτώσεων απέχουν σημαντικά από το σκοπό που διατείνονται ότι επιτελούν, και κατ' επέκταση από τη διαδικασία μορφογένεσης στη φύση. Η λογική της ανάδυσης εφαρμόζεται στις περιπτώσεις αυτές μερικά και μάλλον επιλεκτικά, και άρα μακριά από την ουσία της θεωρίας που τη συνοδεύει. Η ανάδυση αναφέρεται στη σχέση μέρους και όλου, στον συνδυασμό των μερών, βάσει κανόνων, για τον σχηματισμό ενός υψηλότερου επιπέδου πολυπλοκότητας συνόλου, και όχι στην αναπαραγωγή βιολογικοφανών μορφών.

Η μερική εφαρμογή των παραγωγικών αλγορίθμων στην παραμετροποίηση παραγόντων που αποτελούν στην ουσία συνθετικές επιλογές, γίνεται σε μια προσπάθεια να τεκμηριωθεί το αυθαίρετο της αρχιτεκτονικής σχεδίασης για την παραγωγή νεωτεριστικών μορφών. Η παραμετροποίηση εκτός του ότι εμπεριέχει μεγάλο βαθμό υποκειμενικότητας, συχνά δε λαμβάνει υπόψιν χωρική και λειτουργική άνεση, αλλά στηρίζεται κατεξοχήν σε πιο αφηρημένες έννοιες, όπως

κίνηση, ένταξη, μνήμη, καθιστώντας το αποτέλεσμα απλώς μορφοκρατικό. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της ανάδυσης ξεπερνούν όμως την απλή κυρτότητα και καμπύλωση των μορφών, αφορούν στην διαχείριση της προσλαμβανόμενης ενέργειας, είτε από το φυσικό και τεχνητό περιβάλλον, είτε από τους χρήστες, την προσαρμοστικότητα και την ευελιξία, και τον συνδυασμό όλων των παραμέτρων για τη δημιουργία της μορφής ενιαία, από μέσα προς τα έξω.

4. CASE STUDIES

Ας θεωρήσουμε τρία παραδείγματα έργων που έχουν χρησιμοποιήσει παραγωγικούς αλγορίθμους και παραμετρικό σχεδιασμό σε μέρος της εκπόνησης του σχεδιασμού. Επιλέχτηκαν τρία κτίρια, λόγω της ευρύτερης μέχρι στιγμής εφαρμογής του παραμετρικού σχεδιασμού σε κτίρια μεγάλης κλίμακας παρά σε άλλου είδους διαμορφώσεις, ή αστικό σχεδιασμό. Πρόκειται επίσης για έργα που έχουν κατασκευαστεί ή βρίσκονται υπό κατασκευή, δηλαδή δεν πρόκειται για ερευνητικές εργασίες ή πειραματικά σχέδια. Σε κάθε περίπτωση, η παραμετροποίηση έχει εφαρμοστεί με διαφορετικά κριτήρια και σε διαφορετική έκταση.

4.1. ROLEX LEARNING CENTER, Λωζάνη, Ελβετία

Αρχιτέκτονες: Kazuyo Sejima + Ryue Nishizawa/ SANAA, Τόκιο

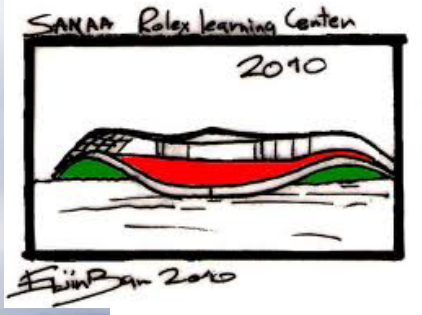
Δομοστατικοί: Bollinger und Grohmann, Φρανκφούρτη

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Κατασκευή: 2004-2009, σε χρήση από: 2010

Η νέα «καρδιά» του Πανεπιστημίου της Λωζάνης αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα των νέων τάσεων της αρχιτεκτονικής, με τη ρευστή, αλλά στην πραγματικότητα αυστηρά καθορισμένη μορφή του να δεσπόζει σε αρχιτεκτονικά περιοδικά τα τελευταία δύο χρόνια.

Η σύλληψη της μορφής είναι σχετικά απλή. Πρόκειται για δύο, σε απόσταση μεταξύ τους, ορθογώνιες σε κάτοψη, πλάκες με λόγο πλευρών ¾, διάτρητες από διάφορων μεγεθών οπές και οι οποίες καμπυλώνονται και ανασηκώνονται στο κέντρο. Το κτίριο, παρά το αναμενόμενο, εξελίσσεται σε ένα μόνο επίπεδο, θυμίζοντας φέτα ελβετικού Εμενταλ, πτυχώμενη στο κέντρο. Στο πλαίσιο της μορφής αυτής δημιουργεί υπαίθριους και ημιυπαίθριους χώρους στο κέντρο του κτισμένου όγκου, μια σειρά αιθρίων, που εξυπηρετούν το φωτισμό των εσωτερικών χώ-



4.1. (πηγή: archidialog.com)

4.2. Συνολική άποψη του Rolex Centre, μετά την κατασκευή του. (πηγή: dezeen.com)

4.3. ΔΕΞΙΑ: Εσωτερική άποψη του κτιρίου, το βασικό αμφιθέατρο, με την κλίση. (πηγή: housevariety.blogspot.gr, photo: Roland Halbe)

4.4 ΑΡΙΣΤΕΡΑ: Εσωτερική άποψη του κτιρίου, η καφετέρια. (πηγή: needle-andglobe.org)

4.5. Εξωτερική όψη ενός από τα αίθρια, Διακρίνεται η κάτω πλάκα από σκυρόδεμα, και το βοηθητικό τοιχείο, συμπληρωματικό για τη στήριξη της καμπυλωμένης πλάκας. (πηγή: dezeen.com)

ρων. Τα μεγαλύτερα από αυτά χρησιμεύουν επίσης ως είσοδοι στον κυρίως χώρο, στο σημείο όπου η περιφέρεια τους αγγίζει το έδαφος.

Οι χρήσεις, που περιλαμβάνουν γραφεία, καφετέριες, εστιατόρια, βιβλιοθήκη, και χώρους εργασίας, απλώνονται στον εσωτερικό χώρο ως επί το πλείστον χωρίς διαχωριστικά, παρέχοντας έναν ρέοντα χώρο, με καμπύλους σχηματισμούς στο δάπεδο, των οποίων η κλίση φτάνει το 30%!

Η κεντρική ιδέα πίσω απ' τη σύλληψη της μορφής ήταν η οπτική ενοποίηση του Πανεπιστημίου με τη λίμνη και τις Άλπεις, μέσω ενός ρευστού χώρου του οποίου οι διάφορες χρήσεις να είναι ορατές και άμεσα προσβάσιμες. Ο όγκος του κτιρίου αποκτά έτσι τη μορφή κύματος, ώστε αφενός να εκμεταλλευτεί την εντυπωσιακή θέα στο ανυψωμένο κομμάτι, και να του παρέχει άμεση πρόσβαση απ' το εξωτερικό, μέσω κεκλιμένων δαπέδων.

Ο προσδιορισμός της ακριβούς πτύχωσης της μορφής θα ήταν υπολογιστικά και σχεδιαστικά ιδιαίτερα δύσκολος με τη χρήση παραδοσιακών μέσων. Πρόκειται για μια γεωμετρία αυξημένης πολυπλοκότητας, που παρουσιάζει καμπύλωση σε δύο διευθύνσεις, και επιχειρεί να αξιοποιήσει, σε ένα βαθμό τουλάχιστον, τη μορφή αυτή και στατικά.

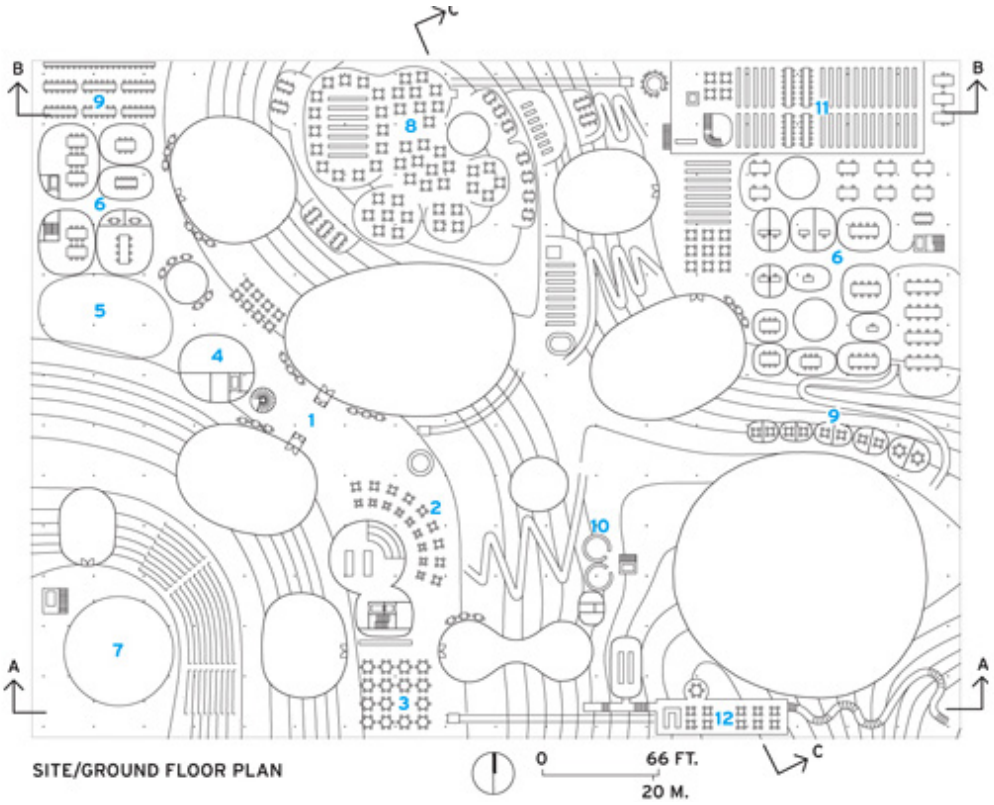
Με βάση την ιδέα αυτή και πρώτα φυσικά μοντέλα, καταρτίσθηκαν παράλληλα ένα αρχιτεκτονικό τρισδιάστατο μοντέλο για τον προσδιορισμό της ακριβούς γεωμετρίας του κελύφους και των αιθρίων, και ένα στατικό, το οποίο βάσει των αναμενόμενων μακροπρόθεσμων παραμορφώσεων επιχειρούσε να φέρει το αποτέλεσμα όσον το δυνατόν πλησιέστερα στην επιθυμητή γεωμετρία. Έγινε ο καθορισμός της τελικής μορφής ως ενιαία επιφάνεια, στην οποία από το αρχιτεκτονικό μοντέλο προστέθηκαν οι οπές-αίθρια, έτσι ώστε το αποτέλεσμα να είναι εύκολα μεταβαλλόμενο βάσει αλλαγών στις θέσεις και τα μεγέθη των αιθρίων.

Στην περίπτωση αυτή, ο παραμετρισμός αφορούσε κυρίως στη μορφολογική προσέγγιση και τη στατική μελέτη επί αυτής. Ως παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν οι επιθυμητές κλίσεις και το οργανόγραμμα των χώρων, σε συνδυασμό με την κατανομή των φορτίων, όπως αυτή προέκυψε από το στατικό μοντέλο. Τα παραγόμενα αποτελέσματα ανταλλάσσονται τακτικά από το αρχιτεκτονικό στο μηχανικό λογισμικό, προκειμένου οι δύο ξεχωριστοί αλγόριθμοι να λειτουργήσουν συνδυαστικά. Η προσπάθεια αυτή είναι στην κατεύθυνση της φυσικής ανάδυσης, τουλάχιστον ως προς τη σχέση μορφής- φέρουσας ικανότητας, παρότι απουσιάζει απ' τη λογική η ευρύτερη επίδραση του μεταβαλλόμενου εξωτερικού περιβάλλοντος.

Όσον αφορά στην κατασκευή , ο τελικός ξυλότυπος αποτελείται από 1.400 διαφορετικά καλούπια, 11 υψηλά ενισχυμένα τόξα χρησιμοποιήθηκαν στις μεγάλες καμπυλότητες, ανοίγματος μέχρι και 85m! Η οριζόντια προ εντεταμένη πλάκα του χώρου πάρκινγκ χρησιμεύει ως οριζόντια στήριξη στο μπετονένιο κέλυφος του δαπέδου, ενώ, επιπρόσθετα, για το μεγάλο κεντρικό αίθριο χρειάστηκαν ένα τοιχίο και ένα υποστύλωμα προκειμένου να παραλάβουν τα κατακόρυφα φορτία . Η στέγη είναι ελαφρά κατασκευή με κύριες μεταλλικές δοκούς, κατατμημένες ώστε να ακολουθούν τη γεωμετρία του κελύφους, και δευτερεύουσες ξύλινες δοκούς, που χρησιμοποιούν την τεχνολογία glu-lam)[27] ώστε να ακολουθούν της καμπύλες της στέγης.

Το Rolex Learning Centre αποτελεί σίγουρα ένα κτίριο σταθμό για τη σύγχρονη

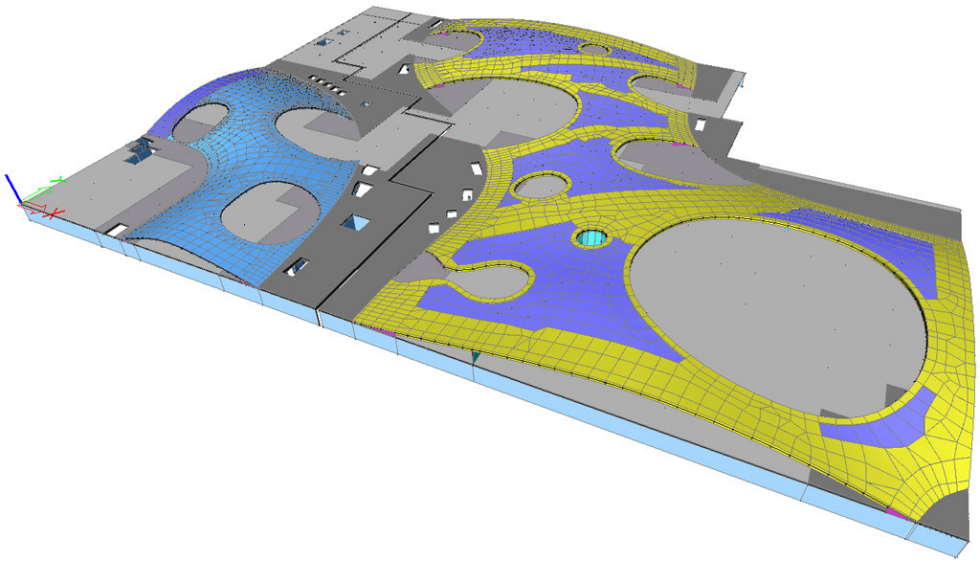
27. Το glu- lam ή glued laminated είναι ένα σύστημα κατασκευής ξύλινων διατομών από μικρότερες διατομές που κολλώνται μεταξύ τους. Το αποτέλεσμα είναι ιδιαίτερα υψηλής αντοχής και μπορεί να προσαρμοστεί για ευθεία ή καμπύλα στοιχεία. (πηγή: http://www.glulam.co.uk)



4.6. Γενική κάτοψη
1. κύρια είσοδος
2. καφέ
3. τραπεζαρία
4. τράπεζα
5. βιβλιοπωλείο
6. γραφεία
7. χώρος πολ/λών χρήσεων
8. βιβλιοθήκη
9. χώρος εργασίας
10. συλλογή αρχαίων χειρόγραφων
11. συλλογή ερευνών
12. εστιατόριο
13. χώρος στάθμευσης
14. αποθήκευση
(πηγή: Ronald Hable)

4.7. Διαμήκης κατασκευαστική τομή της οροφής. (πηγή: Ronald Hable)

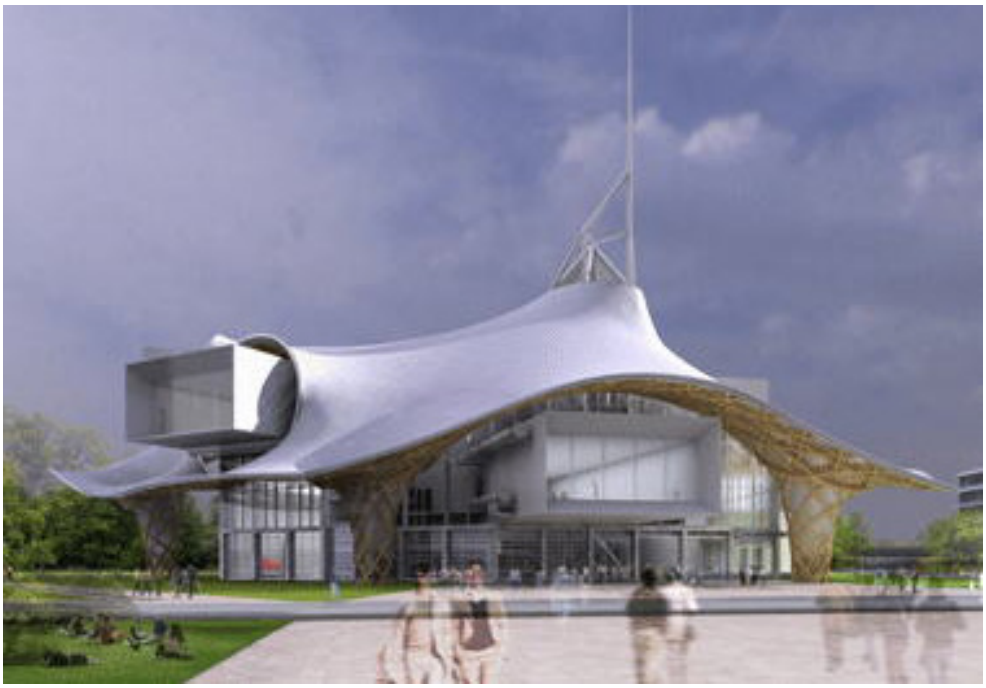
ΑΡΙΣΤΕΡΑ: 4.8. Άποψη από τη φάση της κατασκευής της κάτω πλάκας από σκυρόδεμα (πηγή: dezeen.com)
ΔΕΞΙΑ: 4.9. Γενική άποψη κατά την κατασκευή (πηγή: aedesign.wordpress.com)



4.10. Τρισδιάστατη απεικόνιση του φέροντος οργανισμού ,με χαλύβδινες δοκούς, της κάτω πλάκας του Rolex Centre, από την εταιρία SCIA. (πηγή: enews.nemetschek-scia.com)

αρχιτεκτονική, από την σύλληψη της υβριδικής του μορφής μέχρι τη χρήση ψηφιακών μοντέλων για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση. Παρά την έντονη προσπάθεια όμως για συντονισμό και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ αρχιτεκτονικού και στατικού μοντέλου, η κατασκευή εντέλει παραμένει συμβατική στην ουσία της. Καταφέρνει να υποστηρίξει την αρχιτεκτονική μορφή, όμως δεν φαίνεται να υπάρχει αρκετή ανταλλαγή πληροφοριών ώστε αφενός η υβριδική μορφή να είναι και στατικά εκμεταλλεύσιμη, και αφετέρου η κατασκευή να αναδείξει στο έπακρο την αρχιτεκτονική πρόθεση.

4.11. Νυχτερινή άποψη του Centre Pompidou, με εσωτερικό φωτισμό. (πηγή: designboom.com)



4.12. Γενική φωτορεαλιστική απεικόνιση του Centre pompidou, (πηγή: lostateminor.com)

4.13. Λεπτομέρεια του στεγάστρου και σύνδεση με τον κτιριακό όγκο. (πηγή: dezeen.com)

4.2. CENTRE POMPIDOU, Metz, Γαλλία

Αρχιτέκτονες: Shigeru Ban, Τόκιο, και Jean de Gastines, Παρίσι

Δομοστατικοί: Arup, Λονδίνο

Centre Pompidou και ο δήμος του Metz

Κατασκευή: 2003-2010, σε χρήση από: 2010

"As visitors make their way across the terrace and through the gardens that connect the Centre Pompidou-Metz with the town centre and the railway station, they will see a bright, luminous building that appears to be both strong yet light, and which seems to invite them to take shelter under its protecting roof. We wanted the architecture to convey a sense of well-being, openness and multi-cultural mix in a building that has a direct, sensory relationship with its surroundings." (Shigeru Ban and Jean de Gastines, architects of the Centre Pompidou-Metz)

Προσφέροντας περίπου 5000m2 εκθεσιακών χώρων, το παράρτημα αυτό του ιδρύματος Pompidou, αποτελείται από τρεις επάλληλους όγκους εκθεσιακών χώρων, τοποθετημένους σε στρέψη. Το σύνολο της κατασκευής καλύπτεται από ένα ξύλινο στέγαστρο ελεύθερης μορφής, με πλήρωση από Teflon. Οι άκρες των εκθεσιακών χώρων εξέχουν του στεγάστρου, προβάλλοντας μέσα από οπές στην καμπύλη επιφάνεια. Το αποτέλεσμα είναι ένα εντυπωσιακό συνονθύλευμα μεταβαλλόμενων εκθεσιακών χώρων, δύο κήπων και περιβόλου, που ενοποιείται από την ημιδιαφανή κατασκευή του στεγάστρου, σε σχήμα που θυμίζει κινέζικο καπέλο.

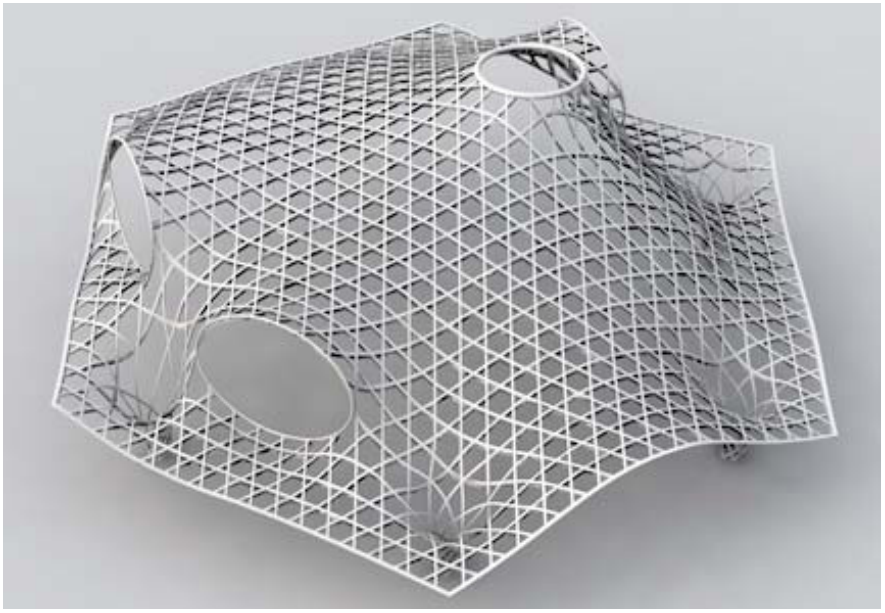
Εδώ η παραμετροποίηση του σχεδιασμού αφορά στο κομμάτι του στεγάστρου. Η τελική γεωμετρία της επιφάνειας προέκυψε από λογισμικό εύρεσης μορφής βάσει ιδιοτήτων *(Proprietary Form-Finding Software)*[28]. Συγκεκριμένα, για τον προσδιορισμό της ελεύθερης μορφής και της δομής του χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα iCapp με δεδομένα τα όρια του σχεδιασμού, τα άκρα του στεγάστρου, τις θέσεις των υποστυλωμάτων, τα σημεία όπου υπάρχουν οπές. Η εντυπωσιακή ξύλινη οροφή πρόκειται στην ουσία για προβολή ενός απλού τριγωνικού καννάβου στην επιφάνεια αναφοράς που προέκυψε από το ψηφιακό μοντέλο. Συνολικά 18Km δοκών τέμνονται σχηματίζοντας το χαρακτηριστικό εξαγωνικό μοτίβο. Η εκτενής modular δομή έχει οργανωθεί βάσει διεπιστημονικού προγραμματισμού, περιλαμβάνοντας στατικά και κατασκευαστικά στοιχεία, ώστε να καλύπτει τα 10.700m^2 των συνολικών χώρων του μουσείου. Τα ξύλινα στοιχεία είναι τοποθετημένα σε τρία στρώματα και είναι μεγάλης αντοχής, αξιοποιώντας της δυνατότητες της τεχνολογίας glu-lam, ενώ δεν χρειάζονται περαιτέρω συνδέσεις χάρη στην αλληλοτομία των δοκών.

Σαφώς η υλοποίηση ενός τέτοιου κελύφους θα ήταν αδύνατη χωρίς αυτοματοποιημένες μεθόδους υπολογισμού και κατασκευής. Χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο CAD για την αναπαράσταση της δομής και στη συνέχεια ένα N.U.R.B.S. μοντέλο για τον ακριβή προσδιορισμό της επιφάνειας. Το ψηφιακό παραμετρικό μοντέλο ήταν απαραίτητο για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό των συνδεσμολογιών. Η πρόκληση ήταν η εύρεση μιας περιγραφής αρκετά γενικής ώστε να είναι ευρέως εφαρμόσιμη και αρκετά ακριβούς ώστε να καταστήσει δυνατή την υλοποίηση. Η

28. Ο όρος Proprietary Form-Finding software, αναφέρεται σε λογισμικά του ανάγουν σε μορφή δεδομένα από το χρήστη χαρακτηριστικά και ιδιότητες που εφαρμόζονται πάνω σε ορισμένα στοιχεία. Τα συγκεκριμένα λογισμικά κάνουν εκτενή χρήση των παραγωγικών αλγορίθμων, ως προς τον τρόπο που γίνεται η μορφογένεση.

4.14. ΑΡΙΣΤΕΡΑ: Λεπτομέρεια του στεγάστρου και των συνδέσεων. (πηγή: designboom.com)
4.15. ΔΕΞΙΑ ΠΑΝΩ: Φωτογραφία από την κατασκευαστική φάση του στεγάστρου. (πηγή: wikipedia.org)
4.16. ΔΕΞΙΑ ΚΑΤΩ: Μετακίνηση για την τοποθέτηση τμήματος του στεγάστρου. (πηγή: commons.wikimedia.org)

4.17. Εργασίες για τη σύνδεση των ξύλινων δοκών στο εργοτάξιο. (πηγή: designboom.com)



4.18. Τρισδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας του στεγάστρου, παρηγμένη παραμετρικά, με έμπνευση από το παραδισιακό κινέζικο καπέλο. (πηγή: tumblr.com)

άλλη δυσκολία ήταν η έλλειψη αρχιτεκτονικών προγραμμάτων εξειδικευμένων σε τέτοιου είδους ελεύθερες μορφές, όπως αυτή της οροφής. Γι' αυτό το λόγο και χρησιμοποιήθηκε το iCapp, του οποίου η κύρια εφαρμογή είναι στο σχεδιασμό αμαξωμάτων για αυτοκίνητα.

Ως προς το συγκεκριμένο στέγαστρο, η χρήση του αλγορίθμου γίνεται καταρχήν για τον ακριβή προσδιορισμό της δομής, καθώς και της μορφής της τελικής επιφάνειας, βάσει δεδομένων αρχιτεκτονικών ορίων, των θέσεων των υποστυλωμάτων και των επιλεγμένων συνθετικών αρχών, και με αφετηρία το επιλεγμένο σύστημα δομής, στην προκειμένη το εξαγωνικό μοτίβο, εμπνευσμένο από το ιαπωνικό καπέλο. Επιπλέον, με παραμετροποίηση γίνεται και η οργάνωση της κατασκευής, κυρίως όσον αφορά στις συνδεσμολογίες, οι οποίες λόγω καμπύλωσης είναι ιδιαίτερα περίπλοκες για να σχεδιαστούν μεμονωμένα. Παρόλη όμως την συνέπεια ως προς τις αρχές του σχεδιασμού, η μορφογένεση δεν παύει να αφορά αποκλειστικά στο στέγαστρο ως ξεχωριστή κατασκευή και όχι στο κτίριο σαν σύνολο. Έτσι, ο παραμετρικός σχεδιασμός δεν εφαρμόζεται στο κτίριο ως σύστημα με όλα όσα συνεπάγεται αυτό, αλλά σε ένα κατασκευαστικά ανεξάρτητο τμήμα του που δε σχετίζεται με το υπόλοιπο ως προς τη λειτουργία και τη δομή.

4.3. ELBPHILHARMONIE, Αμβούργο, Γερμανία

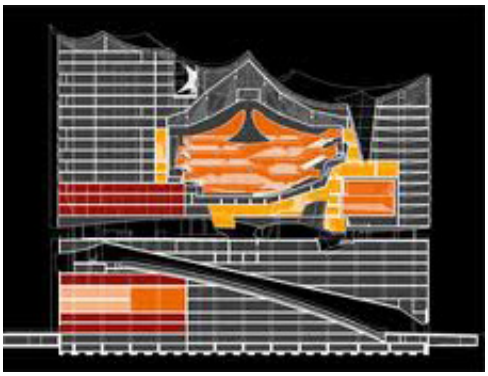
Αρχιτέκτονες: Herzog and De Meuron, Ελβετία
Development: Alexander Gérard
Δομοστατικοί: Arup, Λονδίνο
Centre Pompidou και ο δήμος του Metz
Κατασκευή: 2007-2012, αναμένεται

> "The history of the Elbphilharmonie is an almost incredible example of a bottom-up democratic project, informed with euphoric energy, driven by architectural beauty, cultural-political vision, and civic pride. The story of the Elbphilharmonie provides, as an example, an insight into the extremes that mark the reality of planning and building today."
> (Herzog and DeMeuron)

Στο σημείο αυτό επανερχόμαστε στο αρχικό παράδειγμα, αυτό του συναυλιακού κέντρου του Αμβούργου. Είναι ένα έργο που βρίσκεται στα τελικά πλέον στάδια της κατασκευής του, και φέρει τη φιλοδοξία να αποτελέσει το νέο τοπόσημο της πόλης, δίνοντας έμφαση στη σχέση του Αμβούργου με τον ποταμό Έλβα. Το νέο κτίριο στηρίζεται σημαντικά στη βάση του βιομηχανικού κτιρίου, Kaispeicher A, διατηρώντας μια σχέση συνάφειας και ταυτόχρονα αντιπαραβολής ως προς αυτό.

Στην πλίθινη τοιχοποιία του Kaispeicher A, τυπική των βιομηχανικών κτιρίων της βόρειας Ευρώπης, έρχεται να αντιπαραβληθεί ένας επιβλητικός γυάλινος όγκος, που ακολουθεί σε κάτοψη τα όρια του παλιού για να καταλήξει σε μια εντυπωσιακή κυματιστή οροφή. Μεταξύ παλιού και νέου παρεμβάλλεται ένα διάκενο, στα 37m από το επίπεδο της θάλασσας που προσφέρει θέα 360 μοιρών στην πόλη και το λιμάνι. Οι επισκέπτες ανεβαίνουν μέσα από το παλιό κτίριο, όπου φιλοξενείται

4.19. Φωτορεαλιστική απόδοση του έργου, άποψη μπαίνοντας στ λιμάνι του Αμβούργου. (πηγή: dezeen.com)



ΑΡΙΣΤΕΡΑ: 4.20. Τομή της Elbphilharmonie, διακρίνεται η διέλευση από το παλιό κτίριο Kaispeicher, το νέο κτίριο και το εντυπωσιακό αμφιθέατρο. (πηγή: dezeen.com)

ΔΕΞΙΑ: 4.21. Φωτορεαλιστική απόδοση του εσωτερικού , φουαγιέ. (πηγή: dezeen.com)

4.22. Φωτορεαλιστική απόδοση του έργου ,άποψη από την πόλη. (πηγή: dezeen.com)

διαδραστικό μουσείο μουσικών οργάνων και οι χώροι στάθμευσης, ως την πλατεία, όπου βρίσκονται και χρήσεις ψυχαγωγίας,εστιατόριο, μπαρ, καφέ. Το κεντρικό κτίριο στεγάζει δύο μεγάλες συναυλιακές αίθουσες, 2100 και 550 ακροατών αντίστοιχα, ξενοδοχείο 5 αστέρων και βοηθητικές χρήσεις.

Στον επίσημο ιστότοπο του ίδιου του έργου, περιγράφεται ως "κατακόρυφη πόλη μέσα στην πόλη" , με την έννοια ότι επιδιώκει να δημιουργήσει περίπλοκες ποιότητες χώρων, που συνδέονται άρρηκτα μεταξύ τους, όχι μόνο σε οριζόντιο, αλλά και σε κάθετο επίπεδο.

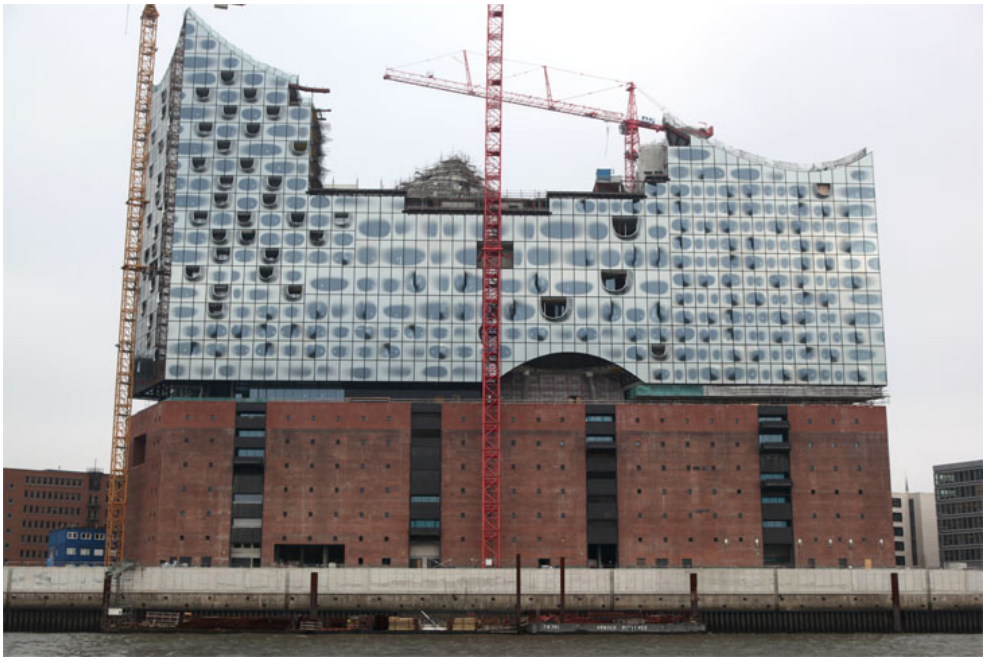
Από το παλαιό τμήμα της αποθήκης Kaispeicher A, δεν έχει διατηρηθεί παρά μόνο η εξωτερική τοιχοποιία, ενώ έχουν προστεθεί 650 υποστυλώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα, στα ήδη υπάρχοντα 1.111, προκειμένου να στηριχτεί το 200.000 τόνων βάρος της φιλαρμονικής. Ιδιαίτερη μέριμνα έχει δοθεί, ασφαλώς, στην ακουστική του χώρου, λόγω των υψηλών ηχητικών απαιτήσεων, ενώ η κεντρική αίθουσα συναυλιών περιβάλλεται από διπλό κέλυφος, απομονωμένο από την υπόλοιπη κατασκευή.

Κεντρικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής σύνθεσης αποτελεί, αναμφισβήτητα, η εντυπωσιακή γυάλινη όψη που περιβάλει το σύνολο της προσθήκης και η οποία έχει σχεδιαστεί στο μεταίχμιο των τεχνολογικών εξελίξεων στον τομέα του ψηφιακού σχεδιασμού και της κατασκευής. . Η γυάλινη όψη έχει συνολική επιφάνεια 21.500m^2, και αποτελείται από πανέλα γυαλιού και πολυμερούς ενισχυμένου με ίνες γυαλιού. Κάθε πανέλο είναι μοναδικό στην κατασκευή του, από τα καμπυλωτά ανοίγματα ως τα διάστικτα για ηλιοπροστασία τμήματα του. Αποτελείται από ένα ή δύο επίπεδα τζαμιού, και επικαλύψεις για την ηλιοπροστασία και την θερμομόνωση. Σε αυτά προστίθενται δύο ακόμα επιφάνειες με διαβάθμιση γκρίζας επίστρωσης, και κουκκίδες χρωμίου τοποθετημένες σε μεταβαλλόμενη πυκνότητα και μέγεθος, από 1mm έως 8mm. Οι κουκκίδες αυτές αποσκοπούν στην καλύτερη σκίαση και φιλτράρισμα της ηλιακής ακτινοβολίας ανάλογα με τη θέση του ανοίγματος, την ηλιακή πρόσπτωση και τη λειτουργία και τις διαστάσεις του εσωτερικού χώρου.

Οι υψηλές τεχνολογικά και συνθετικά απαιτήσεις για την εκπόνηση της όψης, οδήγησαν στην ανάγκη ψηφιακού παραμετρικού σχεδιασμού των επιφανειών αυτών, για τον προσδιορισμό της ακριβούς γεωμετρίας τους και των κουκκίδων που απλώνονται πάνω τους. Για τις ανάγκες του έργου χρειάστηκε να αναπτυχθούν νέα συστήματα κατασκευής, καθώς δεν υπήρχαν τα μέσα για την κατασκευή υαλοστασίων καμπυλωμένων μονομερώς κατ' αυτόν τον τρόπο.

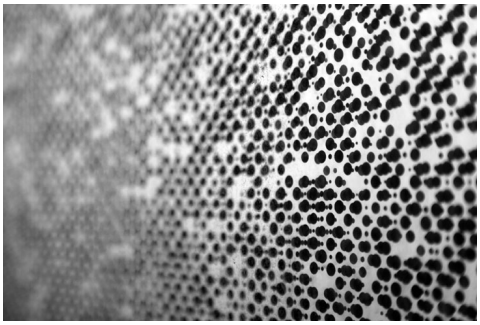
Εξάλλου, το ίδιο το αρχιτεκτονικό γραφείο ενσωματώνει ομάδα ψηφιακής τεχνολογίας, με στόχο όχι τη μορφογένεση, αλλά κυρίως την χρήση των ψηφιακών προγραμμάτων σαν ακριβές εργαλείο σχεδιασμού και επικοινωνίας μεταξύ αρχιτεκτόνων, μηχανικών και συμβούλων διαφόρων ειδικοτήτων. Στόχος, στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν να δημιουργηθεί για την όψη μια ψηφιακή δομή δεδομένων και ένας αλγόριθμος για τη διαχείριση αυτών, ώστε να προσδιοριστούν τα ανοίγματα και οι κουκκίδες σκίασης με βάση τις επιλεγμένες παραμέτρους.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο βασικοί αρχιτεκτονικά τύποι υαλοστασίων, που απαρτίζονται από δύο πανέλα 4.30m x 3.35m και 5.00m x 3.35m, οι οποίοι παρουσιάζουν μια παραμόρφωση, εμφανίζοντας μια πτύχωση στη μία ακμή τους, όπου και τοποθετήθηκε κούφωμα αλουμινίου. Τα ανοίγματα αυτά εξυπηρετούν την επικοινωνία με το εξωτερικό περιβάλλον, τις συνθήκες του λιμανιού του Αμβούργου, ο φυσικός αερισμός, σε κάποιο βαθμό, και κυρίως το μορφολογικό αποτέλεσμα,

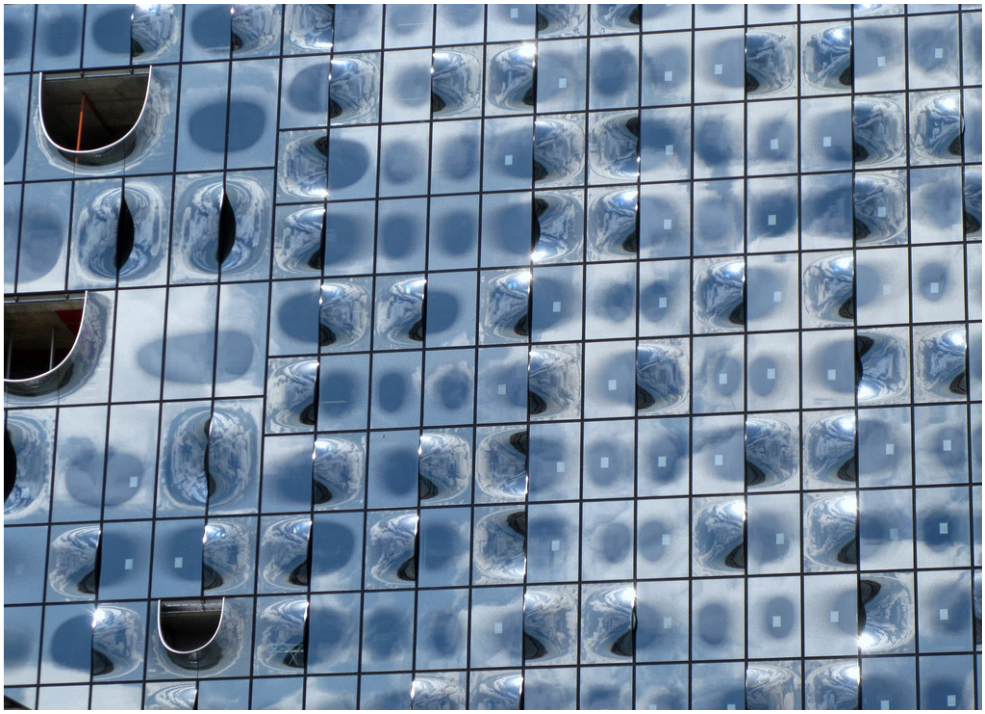


4.23. Όψη της Elbphilharmonie στην υπό ανέγερση φάση του έργου, κατά την τοποθέτηση των υαλοστασίων. (πηγή: inhabitat.com)

ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΠΑΝΩ:
4.24.Τύπος Α πανέλου υαλοστασίου. (πηγή: Elbphilharmonie-erleben.de)
ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΤΩ:
4.25. Τύπος Β πανέλου υαλοστασίου. (πηγή: bdonline.co.uk)



ΔΕΞΙΑ: 4.26. Κοντινή άποψη κουκίδων χρωμίου πάνω σε υαλοστάσιο. (πηγή: inhabitat.com)



4.27. Τμήμα της πρόσοψης, όπου συνδυάζονται οι τύποι Α και Β σε διαφορετικές διαστάσεις. (πηγή: flickr.com)

με την εναλλαγή των πανέλων για τη δημιουργία ενός ενδιαφέροντος στη θέαση ρυθμού. Και οι δύο τύποι εμφανίζονται σε παραλλαγές, διαφορετικού πλάτους, υπό διαφορετική γωνία, και τοποθετήθηκαν στην όψη ανάλογα με τις λειτουργίες των χώρων και τις ανάγκες για φυσικό αερισμό και εξαγωγή του καπνού.

Η χρήση του παραμετρισμού ήταν ουσιαστικής σημασίας για την υλοποίηση της όψης, κυρίως ως προς την εκτύπωση των κουκκίδων πάνω στα πανέλα, τη γενική διάταξη των διαφορετικών πανέλων και την οργάνωση των στοιχείων στη φάση της κατασκευής. Η υλοποίηση του εν λόγω κτιρίου, με το συγκεκριμένο σύστημα όψης, θα ήταν αδύνατη τόσο στη σύλληψη όσο και στην υλοποίηση χωρίς την ύπαρξη παραγωγικών αλγορίθμων και διεπιστημονικού επιτελείου στο σχεδιασμό.

Σε πρώτο επίπεδο, χρησιμοποιήθηκε ανάπτυγμα της όψης στο οποίο, με βάση τις χρήσεις, τα μεγέθη των χώρων, τον προσανατολισμό και τις ανάγκες αερισμού τους, προσδιορίστηκαν οι θέσεις των πανέλων και η εναλλαγή τυπολογίας. Δύο με πέντε πανέλα χρησιμοποιήθηκαν για κάθε διαφορετικό δωμάτιο. Η διάταξη των πανέλων, όσο κι αν είχε στόχο την "τυχηματική" εντύπωση, που δεν εμφανίζει ρυθμό, στην πράξη έγινε σε ένα βαθμό βάσει παραμέτρων, και σε έναν άλλο βάσει αλγορίθμων που προσομοιάζουν τυχηματικές διατάξεις. Η λογική αυτή ενσωματώνει την ουσία της ανάδυσης, όσον αφορά ακριβώς στη σχέση του μέρους ως προς το όλον. Το δομικό στοιχείο, το πανέλο, μεταλλάσσεται, παραμορφώνεται και επαναλαμβάνεται για να δημιουργηθεί το συνολικό υαλοστάσιο ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Έπειτα, έχοντας προσδιορίσει το 100% διαφανές τμήμα του πανέλου ως ελλειπτικού σχήματος, η πύκνωση των κουκκίδων χρωμίου τέθηκε ως συνάρτηση της ζητούμενης ηλιακής διαπερατότητας και απόσβεσης σε κάθε θέση. Με την ακόλουθη δημιουργία εικόνων σε greyscale με τις καμπύλες όπου αλλάζει η πυκνότητα, και τον υπολογισμό της πυκνότητας επί τις εκατό για κάθε δημιουργούμενη ζώνη, προσδιορίζεται η τελική εικόνα για την κατασκευή του πανέλου με τη χρήση αλγόριθμου για τυχαία διάταξη των κουκκίδων, στο ήδη προσδιορισμένο πλαίσιο, ώστε να αποφευχθεί οπτικά η χαρακτηριστική εντύπωση "τρεμοπαίγματος".[29]

Για την κατασκευή των πανέλων έγινε διεξοδικός έλεγχος μηχανικής αντοχής, φθοράς και θερμοδυναμικής συμπεριφοράς, για τον προσδιορισμό των παραμέτρων ηλιοπερατότητας και απόσβεσης της ακτινοβολίας, σε δοκίμια και πειραματικές κατασκευές, σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο του Μονάχου. Φυσικά για την κατασκευασιμότητα του εγχειρήματος καταρτίστηκε αναλυτική βάση δεδομένων ώστε κάθε "εκτύπωση" κουκκίδων να γίνει στο αντίστοιχο πανέλο, και κάθε πανέλο να τοποθετηθεί στη σωστή θέση στην όψη. Ειδικά chip προστέθηκαν σε κάθε πανέλο ατομικά, για τον γρήγορο έλεγχο της θέσης και των χαρακτηριστικών του μέσω υπολογιστή.

Η Elbphilharmonie, είναι ένα τεράστιο έργο, μεγάλου προϋπολογισμού, που κατασκευάζεται κάνοντας χρήση της τελευταίας λέξης της τεχνολογίας στον τομέα. Στην περίπτωση του ο παραμετρισμός έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε όλα τα στάδια κατασκευής της γυάλινης όψης, από τον καθορισμό της μορφής των ανοιγμάτων, στην τοποθέτηση τους για τη δημιουργία του μοτίβου της όψης, αλλά και στην επίστρωση τους με τις κουκκίδες ηλιοπροστασίας, μέχρι την οργάνωση και κατασκευή τους. Ανεξάρτητα από το αν εντέλει η σκοπιμότητα του εγχειρήματος ήταν τέτοια που να αιτιολογεί το κόστος, η εφαρμογή των παραγωγικών αλγορίθμων και της παραμετροποίησης φαίνεται να ήταν συνεπής ως προς την αρχιτεκτονική πρόθεση των δημιουργών. Χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή, ως

29. *moiré effect*, το φαινόμενο που παρατηρείται από την αλληλεπίθεση δύο ελαφρά διαφορετικών μοτίβων και γίνεται αισθητό κυρίως στην απεικόνιση σε φιλμ. Ονομάστηκε moiré λόγω της ομοιότητας του οπτικού αποτελέσματος με τα "νερά" των μεταξένιων υφασμάτων moire.

εργαλείο και όχι σε αντικατάσταση της μορφογενετικής διαδικασίας. Βέβαια, σε κάθε περίπτωση,η εφαρμογή τους παρέμεινε μερική καθώς το εξελιγμένο αυτό σύστημα όψης περισσότερο φαίνεται να σχετίζεται με τα αισθητικά κριτήρια των δημιουργών και το περιβάλλον ως προς την ηλιακή ακτινοβολία, και λιγότερο με το υπόλοιπο κτίριο συνολικά. Πρόκειται δηλαδή για έναν σχεδιασμό ο οποίος φαίνεται να αντιμετώπισε το περίβλημα με διαφορετικούς όρους απ' ότι το εσωτερικό, αντί για το κτίριο ως ενιαίο σύνολο, αν και η τελική αποτελεσματικότητα του καλείται να κριθεί μελλοντικά, μετά την έναρξη της λειτουργίας του.

5. Back to the future:
Οι ανακατατάξεις στους κλάδους της μηχανικής , και οι αναδυόμενες ανάγκες στην κατασκευή.

5.1. Περιορισμοί και Ιδιαιτερότητες της αρχιτεκτονικής εφαρμογής

Όπως γίνεται αισθητό από τα παραπάνω, οι παραγωγικοί αλγόριθμοι και η ανάδυση ως λογική, όσον αφορά στην αρχιτεκτονική τους εφαρμογή, βρίσκονται ακόμα στα πρώτα τους βήματα, με έντονο το στοιχείο του πειραματισμού. Αυτό γίνεται εξάλλου εμφανές από το ερευνητικό έργο που γίνεται στο πλαίσιο Πανεπιστημιακών έργων, σε πειραματικό επίπεδο, πάνω στις δυνατότητες της παραμετροποίησης ως νέο μέσο. Σε αντίθεση με άλλες πρακτικές, όπως η ναυπηγική, η εφαρμογή του παραμετρικού σχεδιασμού μέσω αλγορίθμων στην αρχιτεκτονική παρουσιάζει ορισμένες ιδιαιτερότητες και εμπόδια που καλούνται να ξεπεραστούν με την εκτενέστερη χρήση και την έρευνα πάνω στο αντικείμενο.

Η αδυναμία της εφαρμογής του αλγοριθμικού σχεδιασμού στο σύνολο ενός αρχιτεκτονικού έργου, όπως φάνηκε και από τα παραδείγματα του κεφαλαίου 4, οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην ιδιαιτερότητα της αρχιτεκτονικής ως επιστήμης αφενός και στην μέχρι τώρα εφαρμοζόμενη πρακτική της αφετέρου.

Κατ' αρχάς, ο προσδιορισμός περισσότερων παραμέτρων, για τον παράλληλο έλεγχο παραγόντων χωρικών, στατικών, υλικών, και χρηστικών παρουσιάζει μεγάλες δυσκολίες, αφενός λόγω τις πολυπλοκότητας των απαιτούμενων ανατροφοδοτήσεων και αφετέρου λόγω της αντισυμβατότητας ορισμένων από τις παραμέτρους. Όσο αυξάνεται το πλήθος των στοιχείων που λαμβάνονται υπόψιν, και σε συνδυασμό με τον αυξημένο αριθμό των παραμέτρων, και την πολυπλοκότητα των σχέσεων που τις διέπουν, η συνεχής αναθεώρηση των παραμέτρων και των αποτελεσμάτων που απορρέουν γίνεται όλο και πιο δύσκολη και απαιτεί υπολογιστικά συστήματα όλο και μεγαλύτερων δυνατοτήτων. Παράλληλα, όσο περισσότερες παράμετροι εισάγονται στο ψηφιακό μοντέλο, τόσο περισσότερο γίνεται αισθητή η ασυμβατότητα πολλών από αυτές, καθώς το βέλτιστο ως προς τη μία δεν είναι απαραίτητα, όχι απλά το βέλτιστο, αλλά ούτε καν ικανοποιητικό ως προς κάποια άλλη. Για παράδειγμα, εάν θέσει κανείς ως θέμα τη βελτιστοποίηση της αρχιτεκτονικής μορφής ως προς τον ηλιασμό, το παραγόμενο αποτέλεσμα είναι πολύ πιθανό να στερείται συνθετικών αρετών, ή να μην εξυπηρετεί με τον ιδανικότερο τρόπο τη ζητούμενη λειτουργία. Το ίδιο μπορεί να ισχύει και αντίστροφα.

Έτσι, τελικά, όπως εξάλλου συμβαίνει και στον σχεδιασμό με παραδοσιακά μέσα, το τελικό αποτέλεσμα καλείται να ανταποκρίνεται σε όλο το εύρος των κριτηρίων που έχουν τεθεί, έτσι ώστε να ευρεθεί ο ικανοποιητικότερος δυνατός συνδυασμός των παραμέτρων. Φυσικά, το ποιος συνδυασμός είναι αυτός έγκειται κάθε φορά στην αξιολόγηση και ιεράρχηση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται, που γίνεται με βάση τα κριτήρια της κάθε εποχής, αλλά και κυρίως της προσωπικής κρίσης του δημιουργού.

Ο δεύτερος λόγος, που καθιστά δύσκολη την εφαρμογή της ανάδυσης και των μοντέλων της στον παραμετρικό σχεδιασμό και που επίσης προκύπτει από τα παραπάνω, είναι η δυσκολία στον ακριβή προσδιορισμό των αρχιτεκτονικών ζητημάτων, ώστε να δοθούν συγκεκριμένες βέλτιστες λύσεις. Εκεί έγκειται και η μεγαλύτερη δυσκολία της αρχιτεκτονικής στο να εφαρμόσει στο έπακρο τα τεχνολογικά επιτεύγματα της εποχής της. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, του παραμετρικού σχεδιασμού, συχνά η διατύπωση των ποιοτήτων που αποτελούν αρχιτεκτονικά κριτήρια ως μεταβαλλόμενες παραμέτρους είναι πιο χρονοβόρα και δύσκολη διαδικασία απ' τη διαχείρισή τους με πιο παραδοσιακά εργαλεία. Αυτό έχει και σε κάποιο βαθμό να κάνει με την εξοικείωση με το μέσο, που εμφανώς σταδιακά οδηγεί σε καλύτερη χρήση του, και άρα είναι ζήτημα τριβής. Απ΄την άλλη πλευρά η ίδια η φύση των αρχιτεκτονικών θεμάτων καθιστά εν γένει προβληματικό τον προσδιορισμό τους με αυστηρά, πόσο μάλλον ποσοτικά μοντέλα. Δεν είναι δηλαδή πάντα εύκολος ο αντικειμενικός καθορισμός των παραμέτρων και των σχέσεων που τις διέπουν, όπως ισχύει για τους υπόλοιπους κλάδους της μηχανικής. Οι αντικειμενικές αλήθειες που συναντώνται σε άλλους κλάδους της μηχανικής, εδώ αντικαθίστανται από την εκάστοτε κατά το δοκούν ιεράρχηση βασικών ευρέως αποδεκτών παραμέτρων. Έτσι ακόμα και στην περίπτωση παραμετροποίησης ο καθορισμός των παραμέτρων και η ιεράρχησή τους για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων θα μπορούσε να χαρακτηριστεί εν μέρει αυθαίρετη.

Τέλος, είναι σαφές ότι μια ευρύτερη προσέγγιση, που χρησιμοποιεί τους παραγωγικούς αλγορίθμους λαμβάνοντας υπόψιν μεγάλο πεδίο παραμέτρων απαιτεί μια εξίσου ευρεία διεπιστημονική προσέγγιση καθ' όλα τα στάδια εκπόνησης ενός έργου. Η προσπάθεια για σφαιρική χρήση της παραμετροποίησης ως εργαλείου υπονομεύεται από την καθυστερημένη εμπλοκή παραμέτρων που αφορούν στη στατική και βιοκλιματική λειτουργία, εκ των υστέρων στην αρχιτεκτονική μορφή που έχει ήδη παραχθεί.

Η παραδοσιακή θεώρηση της αρχιτεκτονικής ως κατά κύριο λόγο τέχνη της δόμησης, έχει δώσει, μετά την έλευση του μοντέρνου και την αποδέσμευση της μορφής από τα δομικά στοιχεία, τη θέση της σε μια κατά πολύ μορφοκρατικότερη, η οποία, από ένα σημείο και μετά δεν μπορεί να υποστηρίξει τις σύγχρονες αντιλήψεις που βασίζονται σε φυσικά μοντέλα και διαδικασίες ανάδυσης και προσαρμογής. Χωρίς αυτό να σημαίνει ότι μορφοκρατικές επιλογές δε συμβαδίζουν με τα παραμετρικά μοντέλα που προτείνονται, είναι αναγκαίο όμως να συνδυαστούν, εξαρχής με επιλογές που αφορούν στις υπόλοιπες πτυχές του έργου, προκειμένου ο σχεδιασμός να παραμείνει πιστός στη λογική που υποτίθεται ότι υποστηρίζει. Δεν είναι σκόπιμο να χρησιμοποιείται η παραμετροποίηση προκειμένου να "τεκμηριωθούν" και να επιστημονικοποιηθούν υποκειμενικές μορφολογικές επιλογές, οι οποίες, έτσι κι αλλιώς αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της αρχιτεκτονικής πρακτικής. Η μορφολογική σύνθεση αποτελεί βασικό κριτήριο , το οποίο ο κάθε δημιουργός μπορεί να ιεραρχήσει κατά το δοκούν, δεν αποτελεί όμως το μοναδικό για τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Ειδικά όσο αυξάνει η πολυπλοκότητα και το μέγεθος του προβλήματος, τόσο πιο αναγκαία γίνεται η δημιουργική συνεργασία των εμπλεκομένων ειδικοτήτων από την αρχή μέχρι το πέρας του σχεδιασμού.

Με την παραδοχή ότι τα εμπόδια που οφείλονται στην ιδιαίτερη φύση της αρχιτεκτονικής, που τη διαφοροποιεί από τους υπόλοιπους κλάδους της μηχανικής, είναι ζήτημα εμπειρίας και τριβής με το αντικείμενο, και ότι επομένως, ο αποδοτικός προσδιορισμός των παραμέτρων μπορεί να προκύψει μέσα από την εφαρμογή και την αναγνώριση του υψηλού βαθμού υποκειμενικότητας του τελικού αποτελέσματος, η πραγματική πρόκληση για το μέλλον έγκειται στην όσο δυνατόν σφαιρικότερη και διεπιστημονική προσέγγιση του αρχιτεκτονικού έργου.

5.2. Προς μια διεπιστημονική προσέγγιση

Οι σύγχρονες απαιτήσεις, για βιώσιμο σχεδιασμό, αυξημένη λειτουργική πολυπλοκότητα και μεταβλητότητα, έχουν οδηγήσει στην διερεύνηση νέων μορφών περιπλοκότητας, με αποτέλεσμα την παραγωγή ανορθόδοξων, εξειδικευμένων προσεγγίσεων στο ζήτημα του σχεδιασμού, ειδικά όσον αφορά στα μεγάλης κλίμακας και συλλογικού χαρακτήρα έργα. Η παραδοσιακή ιεραρχία στην αρχιτεκτονική του 20ου αιώνα, από τη μορφή, στην στατική και τα δομικά υλικά, τείνει να αντιστραφεί, καθώς η νέα τάξη πραγμάτων μεταφέρει το κέντρο βάρους στα υλικά και τη δομή. Φυσικά η σειρά αυτή δεν είναι κάτι το πρωτοφανές στην αρχιτεκτονική εφαρμογή. Αντίθετα υπήρξε η κυρίαρχη τάση για αιώνες, πριν την έλευση του μοντέρνου, που με τις νέες τεχνικές του σκυροδέματος ήρθε να αποδεσμεύσει τη μορφή από τη δομή. Παρά τα εμφανή πλεονεκτήματα της προσέγγισης του μοντέρνου, η αυξανόμενη πολυπλοκότητα, σε συνδυασμό με την έντονα εμφανιζόμενη πλέον θέληση για εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και τα σύγχρονα μέσα πρωτοπορίας, φαίνεται να στρέφουν τη διαδικασία παραγωγής του αρχιτεκτονικού έργου προς ένα μοντέλο που αποτελεί νέα εκδοχή του αρχέτυπου, ένα μοντέλο που τοποθετεί όλες τις επιλογές, από τα υλικά και τη στατική δομή έως την τελική μορφή στο πλαίσιο ενός και συνολικού σχεδιασμού, ο οποίος μπορεί να περιλαμβάνει άτομα, στελέχη διαφορετικών ειδικοτήτων.

Η αρχιτεκτονική επανεντάσσεται στο ευρύτερο σύστημα που περιλαμβάνει επιτεύγματα της μηχανικής, από αεροπλάνα μέχρι διαδικτυακά συστήματα επικοινωνίας, με στόχο την πλήρωση των επιταγών της σύγχρονης εποχής, με τις ραγδαίες κοινωνικές εξελίξεις της και τις αυξημένες λειτουργικές απαιτήσεις της. Ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός καλείται να πάρει ενεργό ρόλο ως μέρος του συστήματος αυτού, χωρίς όμως να έχει κατακτήσει ή ενσωματώσει στην πρακτική του τα επιτεύγματα άλλων κλάδων της μηχανικής. Αυτός είναι εξάλλου και ο λόγος που στη σχεδίαση αρχιτεκτονικών έργων τα τελευταία χρόνια συχνά δανείζονται εργαλεία, ψηφιακά και μηχανικά, που έχουν αναπτυχθεί για άλλους τομείς, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία ή η ναυπηγική. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η χρήση του λογισμικού Catia, σχεδιασμού αμαξωμάτων οχημάτων, από το γραφείο του Frank Gehry, αλλά και λογισμικά όπως το iCapp, που είδαμε νωρίτερα. Η πρακτική όμως αυτή είναι αρκετά προβληματική, αφού έτσι είναι η αρχιτεκτονική πρακτική που καλείται να προσαρμοστεί στα νέα εργαλεία, αντί να συμβαίνει το αντίθετο. Μόλις τα τελευταία χρόνια, που οι παραγωγικοί αλγόριθμοι χαίρουν τόσο μεγάλης εφαρμογής από αρχιτέκτονες, έχουν αρχίσει να αναπτύσσονται λογισμικά,

add-on σε λογισμικά σχεδιασμού μέσω υπολογιστή, CAD , με στόχο την αρχιτεκτονική εφαρμογή.

Η στροφή αυτή σε πιο πλουραλιστικά, διεπιστημονικά μοντέλα, μεταφέρει το ρόλο του αρχιτέκτονα στην τομή της "δημιουργίας" και της συνδυαστικής επίλυσης προβλημάτων. Η συνεργασία του με ένα αρκετά μεγάλο εύρος άλλων επιστημόνων γίνεται αναγκαία, άμα θεωρήσουμε το εύρος γνώσεων και τεχνικών που επιτάσσει ο νέος αυτός ρόλος. Ανάλογα με το μέγεθος και τις ειδικές ανάγκες κάθε έργου, φυσικά, μεταβάλλονται και οι απαιτήσεις σε εμπλοκή διαφορετικών επιστημόνων. Από γεωτεχνικοί, συγκοινωνιολόγοι, δομοστατικοί, μηχανολόγοι, προγραμματιστές, μέχρι και κοινωνιολόγοι και ψυχολόγοι μπορούν να εμπλακούν σε διάφορα στάδια ενός έργου. Από αυτούς άλλοι συνδέονται με την παραγόμενη αρχιτεκτονική μορφή περισσότερο και άλλοι λιγότερο άμεσα. Τα μέλη που συμμετέχουν αμεσότερα στο σχεδιασμό, γίνεται ολοένα και πιο αισθητό ότι πρέπει να βρίσκονται σε διαρκή συνεργασία και ανατροφοδότηση από την αρχή μέχρι το πέρας του έργου, να χρησιμοποιούν αντίστοιχα εργαλεία σχεδιασμού, και να έχουν μια κοινή "γλώσσα" επικοινωνίας επί του έργου. Φαίνεται να υπάρχει σήμερα ένα αρκετά μεγάλο χάσμα μεταξύ γνώσης και εφαρμογής και μεταφοράς της γνωσης αυτής λόγω του διαχωρισμού και σε ένα βαθμό απομόνωσης του αντικειμένου κάθε επιστήμης και την έλλειψη εμπειρίας στον συντονισμό διεπιστημονικών προσεγγίσεων.

Ο συντονισμός αυτός διαφαίνεται απαραίτητος και καλείται να παρέχει πρακτικές, βιώσιμες λύσεις όσον αφορά σε θέματα μηχανολογίας, στατικής και υλικών που υποστηρίζουν αυξημένης πολυπλοκότητας μορφολογικές επιλογές. Αντί να επιστρατεύονται διάφορες ειδικότητες εκ των υστέρων, για να "διορθώσουν" την αρχιτεκτονική μορφή, ώστε να πληρεί τις προϋποθέσεις που της έχουν τεθεί, αντί τα παραμετροποιημένα στοιχεία να "αναρτώνται" στο αρχιτεκτονικό έργο σε επόμενο στάδιο, η διεπιστημονικότητα της προσέγγισης καλείται να είναι εμφανής από τα πρώτα στάδια της αρχιτεκτονικής ιδέας, έως και το στάδιο της κατασκευής. Το έντονο κλίμα ανταγωνισμού και υπονόμευσης που υποφώσκει ανάμεσα στους διάφορους κλάδους της μηχανικής, και αφορά κυρίως στις επαγγελματικές σχέσεις των αρχιτεκτόνων με τις υπόλοιπες ειδικότητες, δεν μπορεί παρά να υπονομεύει την προσπάθεια για σφαιρική προσέγγιση του προβλήματος. Είναι καιρός να γίνει προσπάθεια στην κατεύθυνση αυτή, εφόσον ειδικά η νέες τεχνολογικές εξελίξεις και οι απαιτήσεις ως προς την αρχιτεκτονική το επιτάσσουν όλο και πιο έντονα.

Όπως εξάλλου υποστηρίζει και ο Cecil Balmond, ιδρυτής της ερευνητικής και σχεδιαστικής ομάδας Advanced Geometry Unit (AGU)[30],

> τα αρχιτεκτονικά πειράματα της εποχής μας κινούνται μακριά από τις μηχανολογικές έννοιες αναπαραγωγής μορφών, στην κατεύθυνση μηχανισμών συστημάτων που καθορίζουν τον τρόπο αλληλεπίδρασης των διαφορετικών στοιχείων των αρχιτεκτονικών προβλημάτων, ώστε να παραχθούν μορφές οργάνωσης αυξημένης πολυπλοκότητας.

Το νέο αυτό μοντέλο μεθόδων μηχανικής καλείται να λειτουργήσει σαν γενικό μοντέλο σχεδιασμού ενσωματώνοντας την στατική λειτουργία και την τεχνολογία υλικών στην αρχιτεκτονική σύνθεση. Η σύνθεση όλων των παραμέτρων, στατικών, χωρικών, αισθητικών, κλιματικών, εξαρχής καθίσταται απαραίτητη, ιδιαίτερα στην περίπτωση που σχεδιάζονται κτίρια μέσω μη τετριμμένων πρακτικών, που απαιτούν ένα βαθμό καινοτομίας και πειραματισμού.

Η ανάγκη για χωρική ευελιξία, η προσαρμογή στις περιβαλλοντικές συνθήκες, η δυνατότητα διαρκούς μακροπρόθεσμης μεταβολής, είναι στοιχεία των φυσικών συστημάτων που ο σύγχρονος αρχιτεκτονικός σχεδιασμός φιλοδοξεί να υιοθετή-

30. Η AGU ή Advanced Geometry Unit, είναι μια ερευνητική σχεδιαστική ομάδα που έχει οργανωθεί από το 2000 εντός της δομοστατικής εταιρίας Arup, από τον αρχιτέκτονα Cecil Balmond. Στόχος ήταν να σχετιστεί η βιομηχανική τεχνογνωσία που προέρχεται από άλλες πρακτικές, με την δημιουργική δυναμική της αρχιτεκτονικής.

σει προκειμένου να αντεπεξέλθει στις αναδυόμενες ευρύτερες ανάγκες της κοινωνίας για ανακύκλωση, εξοικονόμηση, προσαρμοστικότητα. Με τα δεδομένα αυτά, η αρχιτεκτονική, τουλάχιστον όσον αφορά σε μεγάλης κλίμακας και εύρους επιρροής έργα, καλείται πλέον να αντιμετωπίζεται σαν τμήμα ενός ευρύτερου οικοσυστήματος, αποκύημα της αλληλεπίδρασης περιβαλλοντικών, τοπογραφικών και στατικών συνθηκών σε συνδυασμό, φυσικά, με την ανθρώπινη δραστηριότητα. Απαιτείται μια σφαιρικότερη θεώρηση του σχεδιασμού, στο πλαίσιο μιας ευρύτερης μετάθεσης από το σχεδιασμό μονάδων στο σχεδιασμό συστημάτων βάσει καταστάσεων. Τα συστήματα αυτά καλούνται να λειτουργήσουν σε πολλά επίπεδα, από τα δομικά στοιχεία μέχρι τη μακροσκοπική τους επίδραση, και κάθε επίπεδο πρέπει να διέπεται από την ίδια δομική, όχι απαραίτητα και μορφολογική λογική, προκειμένου να έχει συνοχή και να λειτουργεί αποδοτικά. Για να επιτευχθεί αυτό , είναι σημαντικό να υπάρχει σε όλο το έργο μια σύμφυτη αρχιτεκτονική λογική που να είναι παρούσα σε κάθε τομέα του σχεδιασμού, ακόμα και αν εμπλέκονται περισσότερα στελέχη του διεπιστημονικού χώρου.

5.3. Νέοι ορίζοντες

Τα ψηφιακά προγράμματα τρισδιάστατου σχεδιασμού έχουν αλλάξει ριζικά τα δεδομένα, προσφέροντας τη δυνατότητα απεικόνισης και μορφοποίησης μοντέλων που περιγράφονται απο περίπλοκες μαθηματικές σχέσεις, αλλά και παραμετροποίησης της σχεδίασης των μοντέλων αυτών, βάσει δεδομένων στοιχείων. Νέες τεχνολογίες ψηφιακού σχεδιασμού και αναπαράστασης εμφανίζονται συνεχώς, με στόχο αφενός την βελτιστοποίηση της στατικής και βιοκλιματικής λειτουργίας και αφετέρου την ενίσχυση της αντίληψης της μορφής. Παράλληλα όμως με την εξέλιξη των υπολογιστικών δυνατοτήτων των Η/Υ και των παραγωγικών αλγορίθμων, οι σύγχρονες και ραγδαία αναπτυσσόμενες μέθοδοι στατικού υπολογισμού, τρισδιάστατης προσομοίωσης και κατασκευής με τη βοήθεια laser, έρχονται να υποβοηθήσουν στην πράξη την υλοποίηση ενός σφαιρικού σχεδιασμού, βάσει παραμετροποίησης. Παρέχονται δηλαδή τα ψηφιακά υπολογιστικά και κατασκευαστικά μέσα τα οποία μπορούν να βρίσκονται σε άμεση ανταλλαγή πληροφοριών με τους παραγωγούς αλγορίθμους, στην κατεύθυνση της όσο δυνατόν διεπιστημονικότερης προσέγγισης, που αναφέρθηκε παραπάνω.

Απ' τη μία, στον τομέα της δομοστατικής, έχει ήδη απ΄τη δεκαετία του '50 εισαχθεί η *Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite element analysis)*, η οποία σήμερα αξιοποιείται ιδιαίτερα χάρη στην ψηφιοποίηση των μοντέλων της και τις αυξημένες υπολογιστικές δυνατότητες των σύγχρονων Η/Υ. Πρόκειται για μια μέθοδο κατά προσέγγιση επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων και ολοκλήρωσης. Στόχος της είναι γενικά η αναγωγή του συνολικού προβλήματος σε μικρά στοιχεία-μέρη του, των οποίων η επίλυση είναι απλούστερη, και όπως και τα παραμετρικά λογισμικά, αναπτύχθηκαν από την αυτοκινητοβιομηχανία και τη ναυπηγική. Δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο των φερόντων στοιχείων και αφού προσδιοριστούν διεξοδικά το μέγεθος και η κατεύθυνση των φορτίων που καταπονούν την κατασκευή, γίνεται η ανάλυση του μοντέλου από το υπολογιστικό σύστημα και η διαστασεολόγηση των φορέων, με βάση το υλικό που χρησιμοποιείται. Γι' αυτό το λόγο και η χρήση της μεθόδου αυτής είναι ιδιαίτερα βοηθητική για τον

καθορισμό του φέροντος οργανισμού σε κατασκευές που ξεφεύγουν από τη λογική "δοκός επί στύλου".

Απ' την άλλη, η χρήση νέων κατασκευαστικών εργαλείων έχει διευρύνει δραστικά το πλαίσιου του δυνατού στα σύγχρονα έργα. Αφενός οι σύγρονες τεχνικές κοπής *CNC*[31], αλλά και με τη χρήση laser, παρέχουν ψηφιακά ελεγχόμενα εργαλεία που επιτρέπουν την κατασκευή σε πολλαπλές κλίμακες, εξειδικευμένων στοιχείων, με μεγάλη ακρίβεια. Περίπλοκες κυρτές επιφάνειες αναλύονται σε ευθεία μέλη, ή γνωστά και κατασκευάσιμα βασικά σχήματα. Επίσης, μέσω αλγορίθμων γίνεται ο τρισδιάστατος σχεδιασμός των κατασκευαστικών στοιχείων, ειδικά των αρθρώσεων και συνδέσμων, από τις ιδιότητες που τα προσδιορίζουν. Ένας αλγόριθμος μπορεί να εμπεριέχει μια σειρά εκατοντάδων λεπτομερών κατασκευαστικών σχεδίων, τα οποία θα ήταν σχεδόν αδύνατο να υλοποιηθούν και να διαβαστούν για την περάτωση ενός έργου. Χαρακτηριστική είναι η χρήση τέτοιων εργαλείων για την παραγωγή επαναλαμβανόμενων αλλά μη τυποποιημένων στοιχείων που αποτελούν τμήματα μεγάλων έργων, όπως για παράδειγμα τα υάλινα πανέλα της φιλαρμονικής του Αμβούργου.

Με τη συνδυασμένη χρήση των παραγωγικών αλγορίθμων και των ψηφιακών κατασκευαστικών τεχνικών υπάρχει άμεση ροή δεδομένων από το σχεδιασμό στην κατασκευή, κάτι που είναι τεράστιας σημασίας σε περίπλοκες κατασκευές. Τα τρισδιάστατα αρχιτεκτονικά μοντέλα μπορούν με αυτόν τον τρόπο να υλοποιηθούν άμεσα, ανοίγοντας το δρόμο σε ένα σχεδιασμό *"construction-aware"* που θα ενσωματώνει, ήδη απ' την αρχή, γνώση των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν και των μηχανικών τους ιδιοτήτων, των τρόπων τυποποίησης των κατασκευαστικών στοιχείων, και ούτο καθεξής.

Γίνεται σαφές ότι υπάρχει ένα βασικό τεχνολογικό υπόβαθρο, που αφορά στην υλοποίηση ενός σχεδίου, ικανό να υποστηρίξει περαιτέρω ερευνητική και πρακτική εφαρμογή των παραγωγικών αλγορίθμων και του παραμετρισμού ως εργαλείο σχεδιασμού. Με την τεχνολογική ανάπτυξη να αποκτά ολοένα γρηγορότερους ρυθμούς, η χρήση των νέων λογισμικών με βάση τους παραγωγικούς αλγόριθμους τείνει να γενικεύεται ολοένα. Προς το παρόν, δεν βρισκόμαστε παρά στο κατώφλι μια δυναμικής αλλαγής στον τρόπο σχεδιασμού, και στο πλαίσιο αυτό, οι παρατηρούμενες εφαρμογές μπορούν ίσως να χαρακτηρίζονται από πολλούς ως μερικές, ανούσιες ή αποτυχημένες. Παρόλα αυτά, αυτά τα βήματα πειραματισμού στον χώρο που προσφέρει το νέο μέσο, είναι ουσιαστικά στην κατεύθυνση της εξέλιξης της αρχιτεκτονικής και την δημιουργική εκμετάλλευση των τεχνολογικών δυνατοτήτων της νέας εποχής.

31. *CNC: Computer Numerical Control,* είναι η μέθοδος κοπής , στην οποία ο υπολογιστής μετατρέπει το σχέδιο που έχει παραχθεί με λογισμικό ψηφιακού σχεδιασμού (CAM) σε αριθμούς. Οι αριθμοί αυτοί μπορούν να νοηθούν ως συντεταγμένες ενός διαγράμματος, που καθορίζουν την κίνηση του εργαλείου χάραξης και κοπής. Η κοπή έτσι είναι πλήρως ελεγχόμενη από τον υπολογιστή.

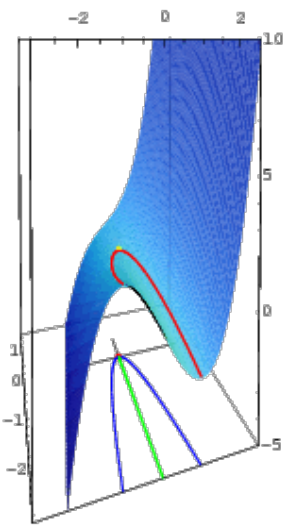
Παράρτημα

Τα επτά είδη καταστροφών, κατά τον Réné Thom

Ο Réné Thom, στο έργο του *Modéles Mathématiques de la morphogénése,* ανάγει την φαινομενολογία σε χωρική μορφή, προκειμένου να ερμηνεύσει και να κατηγοριοποιήσει τις απότομες μεταβολές των καταστροφικών φαινομένων.

Ορίζει ως *κανονικό σημείο (point régulier)*, ένα σημείο *u* ενός χώρου *U*, εάν σε κάθε σημείο *u'*, γειτονικό του *u,* το περιβάλλον που εμπεριέχεται στο χώρο *U* εμφανίζει τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά όπως στο *u*. Ο Réné Thom το εξηγεί ως το κέντρο μιας σφαίρας πολύ μικρής ακτίνας, εντός της οποίας δεν συμβαίνει καμία απότομη μεταβολή μεταβλητών.
Εάν θεωρήσουμε το ανοιχτό σύνολο των κανονικών σημείων ενός χώρου *U*, όλα τα σημεία που ανήκουν στο κλειστό σύνολο *K*, που είναι συμπληρωματικό του πρώτου, ονομάζονται *σημεία καταστροφής* της συγκεκριμένης μορφολογίας.

Ο Thom μελετώντας τα σημεία καταστροφής καταλήγει σε μια εξαντλητική λίστα 7 καταστροφών, ανάλογα με την *codimension* τους, τον αριθμό δηλαδή των παραμέτρων που χρειάζονται για να περιγραφούν.



Codimension 1:

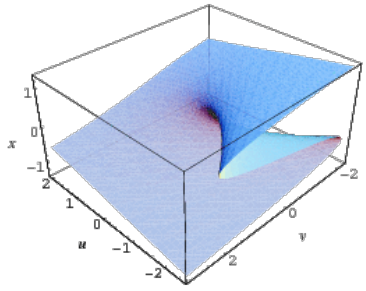
Le pli, η πτύχωση:

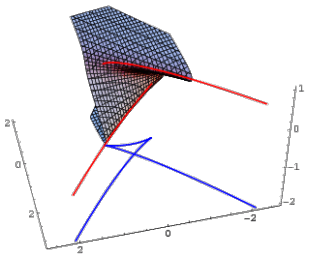
$$F(x, u) = x^3 + u\,x$$

Codimension 2:

Le cusp, η ακμή

$$F(x, u, v) = x^4 + u\,x^2 + v\,x \quad \text{ή} \quad y = x^{2/3}$$

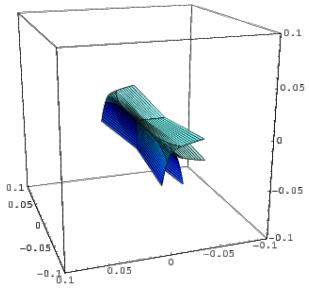




Codimension 3:

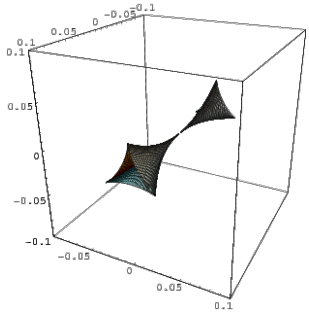
La queue d' aronde, η ουρά του χελιδονιού

$$F(x, u, v, w) = x^5 + u x^3 + v x^2 + w x$$



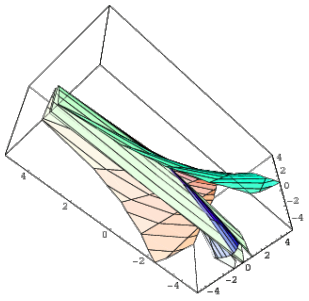
L´ombilic hyperbolique , ο υπερβολικός "ομφαλός"

$$f(x, y) = x^3 + y^3$$



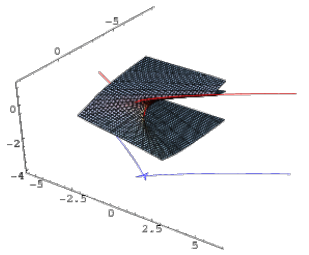
L´ombilic elliptique, ο ελλειπτικός "ομφαλός"

$$F(x, y, u, v, w) = x^3/3 - x y^2 + w(x^2 + y^2) - u x - v y$$



L´ombilic parabolique, ο παραβολικός "ομφαλός"

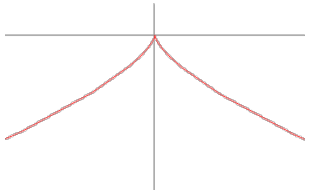
$$F(x, y, w, t, u, v) = y^4 + x^2 y + u x^2 + v y^2 + w x + t y$$



Codimension 4:

Le papillon, η πεταλούδα

$$F(x, u, v, w, t) = x^6 + u x^4 + v x^3 + w x^2 + t x$$



Βιβλιογραφία

- Ιωάννης Θ. Χαϊνης, *Εισαγωγή στη θεωρία του Χάους*, ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, Αθήνα, 2007
- James Gleick, *Χάος, μια νέα επιστήμη,* μτφρ. Μανώλης Κωνσταντινίδης, ΚΑΤΟΠΤΡΟ, 1990
- Réné Thom, *Modéles Mathématiques de la morphogénése,* Academia Nazionale dei lincei, Scuola Normale Superiore Di Pisa, MCMLXXI
- D' Arcy Thomson, *Ανάπτυξη και μορφή στο φυσικό κόσμο*, μτφρ. Αμαλία Κώνστα, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα, 1999
- Steven H. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos, with applications to Physics, Biology, Chemistry and Engineering*, PERSEUS BOOKS, Reading Massachusetts, 1994
- Architectural Design, no 206, *"The new structuralism"*, Wiley, July/August 2010
- Architectural Design no 74, *"Emergence in architecture"*, Wiley, May/June 2004
- DETAIL no 5, *"Analogue and Digital"*, series 2010

Αρθρογραφία

- Ελευθερία Φασουλάκη, *Genetic Algorithms in Architecture: a Necessity or a Trend?,* Master of Science in Architecture Studies, Massachusetts Institute of Technology.
- Jan W. Auer, *Mathematics on catastrophe theory,* Mathematics Magazine, Vol. 53, No. 1 (Jan., 1980), pp. 13-20
- Peter Eisenman, *Visions' Unfolding: Architecture in the age of electronic media*, www.roemervantoorn.nl , πρώτη δημοσίευση: Domus, no 734, Ιανουάριος 1992
- Norbert Fenzl, Wolfgang Hofkirchner, *Emergence and Interaction of natural systems,* Universidade Federal do Pará
- Jens Gravesen, *Catastrophe Theory and Caustics*, SIAM Review, Vol. 25, No. 2 (Apr., 1983), pp. 239-247
- John Holland, *Emergence*, Philosophica 59, p.11-40, UNIVERSITY OF MICHIGAN, 1997
- Branko Kolarevic, *Architecture in the Digital Age, Design and Manufacturing*, SPON PRESS, New York, 2003
- Pawel Rubinowics, *Chaos and Geometric Order in Architecture and Design,* Journal for Geometry and Graphics, Volume 4 (2000), No. 2, 197-207

Ιστότοποι

- http://www.inclusional-research.org/comparisons4.php
- http://mathworld.wolfram.com
- http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580500000960
- parametric design: a brief history, aiacc.org