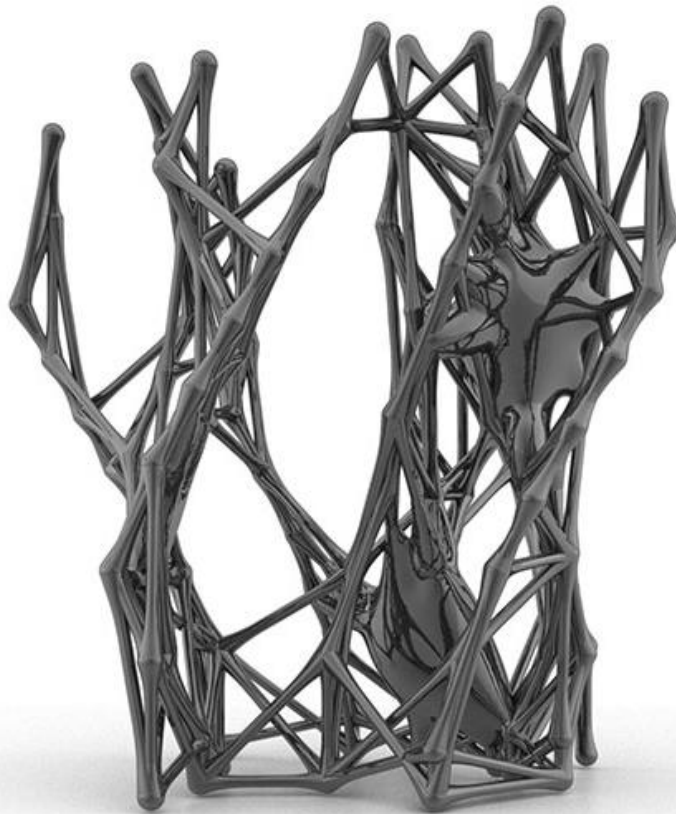


Digital Fabrication και 3D Printing,

**Σύγχρονες Μέθοδοι Κατασκευής και ο
Ρόλος του Αρχιτέκτονα**



Κατερίνα Φλωράκη



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών

Digital Fabrication και 3D Printing, Σύγχρονες Μέθοδοι Κατασκευής και ο Ρόλος του Αρχιτέκτονα

διάλεξη 9^{ου} εξαμήνου

Φοιτήτρια

Κατερίνα Φλωράκη

Επιβλ. Καθηγήτρια

Αθηνά Σταυρίδου

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

Ευχαριστώ

Την καθηγήτριά μου Αθηνά Σταυρίδου
για την καθοδήγησή της
Τον Γαβριήλ, την οικογένεια και τις φίλες μου
για την υπομονή και την υποστήριξή τους

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	6
A. Μέρος: Ψηφιακός Σχεδιασμός	9
1. Σχεδιασμός στον υπολογιστή	11
1.1 Αρχιτεκτονικό «Design»	11
2. Εξέλιξη του ψηφιακού σχεδιασμού	15
3. Αλγοριθμικός σχεδιασμός	19
3.1 Πολυπλοκότητα	19
3.2 Αλγόριθμος	20
3.3 Η παράμετρος	21
3.4 Μορφογένεση και εξελικτικοί αλγόριθμοι	22
4. Εργαλεία Σχεδιασμού	26
4.1 Building Information Model	27
4.2 BIM και Μορφογένεση	30
4.3 Αρχιτεκτονική γεωμετρία	31
5. Ο ρόλος του αρχιτέκτονα στον ψηφιακό σχεδιασμό	33
6. Γεφυρώνοντας το χάσμα ανάμεσα στο σχεδιασμό και την κατασκευή	34
B. Μέρος: Digital Fabrication	38
1. Digital Materiality	39
2. From mass production to mass customization	41
3. Digital fabrication	44
3.1 Ορισμός	44
3.2 Τεχνικές παραγωγής	45
3.3 Τύποι ψηφιακών κατασκευών	49

4. Τα υλικά στην κατασκευή	54
4.1 Τα υλικά την περίοδο του Μοντέρνου	54
4.2 Συμβατικά και έξυπνα υλικά	55
4.3 Με έμπνευση από τη φύση	58
5. Ψηφιακά ελεγχόμενες μηχανές κατασκευής	61
5.1 Σχεδιασμός και κωδικοποίηση	61
5.2 Χειρισμός ψηφιακών μηχανημάτων	63
5.3 Τύποι μηχανημάτων ψηφιακής κατασκευής	65
6. Πρότυπα στο εργαστήριο	68
7. Χαρακτηριστικά των κατασκευών που προκύπτουν μέσω Digital Fabrication	69
Γ. Μέρος: 3D Printing	71
1. Τρισδιάστατη εκτύπωση με σκυρόδεμα	73
1.1 Landscape House, από τη μορφή στον τρόπο κατασκευής	73
1.2 The Bloom pavilion, ακρίβεια και λεπτότητα	77
1.3 Τρισδιάστατα εκτυπωμένες κατοικίες από σκυρόδεμα	80
2. Δουλεύοντας με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των υλικών και του περιβάλλοντος	84
3. Protohouse 2.0, αρχιτεκτονική από ίνες υλικού	87
4. Silk Pavilion, η τρισδιάστατη εκτύπωση της φύσης	90
5. 4D Printing, μια εφαρμογή εξελικτικής κατασκευής	93
Δ. Μέρος: Επίλογος	98
1. Το μέλλον	98
2. Προβληματισμοί	101
3. Ο αρχιτέκτονας στο νέο παράδειγμα	103
Πηγές	106

Εισαγωγή

Σχετικά με την εργασία

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας ερευνητικής εργασίας αποτελούν οι αλλαγές που φέρνει η εισαγωγή σύγχρονων ψηφιακών μεθόδων κατασκευής στην διαδικασία σχεδιασμού και παραγωγής αρχιτεκτονικού έργου. Στόχος είναι η παρουσίαση ενός νέου τρόπου προσέγγισης της σχεδιαστικής διαδικασίας και της ελευθερίας που ανοίγεται στην παραγωγή των αρχιτεκτονικών μορφών, χάρη στις νέες δυνατότητες που προσφέρει το digital fabrication, η ψηφιακή κατασκευή.

Ο αρχικός προβληματισμός που στάθηκε αφορμή για την εκπόνηση της εργασίας αφορά τη σχέση του αρχιτέκτονα με τις νέες μεθόδους κατασκευής. Πώς αλλάζει ο τρόπος σχεδιασμού λόγω της εισαγωγής νέων ψηφιακών τεχνολογιών; Φαίνεται ότι η κατασκευή και οι ιδιότητες των υλικών μπαίνουν σήμερα ως πολύ σημαντικές παράμετροι κατά την παραγωγή μορφών, πρέπει λοιπόν να λαμβάνονται υπόψη από τα πρώτα κιόλας στάδια της σύνθεσης; Πώς διαμορφώνεται τελικά ο ρόλος του αρχιτέκτονα σε ένα νέο παράδειγμα συνεχούς ψηφιακής ροής από το σχεδιασμό στην κατασκευή; Αποτελεί ο αρχιτέκτονας κεντρικό πρόσωπο και κατά τη διαδικασία κατασκευής, προγραμματίζοντας τα ψηφιακά και ρομποτικά μηχανήματα και «παίζοντας» με τις νέες δυνατότητες που προσφέρουν; Συνολικά ερευνάται η ανάδυση ενός νέου παραδείγματος αρχιτεκτονικής έκφρασης και πρακτικής με κέντρο τις ψηφιακές τεχνολογίες κατασκευής.

Η διάλεξη ξεκινά με την ανάλυση του ψηφιακού σχεδιασμού, χωρίς τον οποίο δε θα μπορούσαμε να μιλάμε για ψηφιακή κατασκευή. Σε μεγαλύτερο βαθμό αναλύονται οι μέθοδοι computational design κατά τις οποίες οι αρχιτέκτονες μπορούν να εκμεταλλεύονται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό τις δυνατότητες που προσφέρει η ισχύς των σημερινών υπολογιστών από ότι στον καθαρά αναπαραστατικό-γεωμετρικό σχεδιασμό, με αποτέλεσμα περισσότερο ελεύθερες και καινοτόμες μορφές. Το επόμενο κεφάλαιο αναφέρεται στην ψηφιακή κατασκευή, στις τεχνικές, τα

μηχανήματα αλλά και τον τρόπο με τον οποίο εισβάλλει στην παραγωγή αρχιτεκτονικής, φέρνοντας ένα νέο παράδειγμα. Από τις τεχνικές ψηφιακού σχεδιασμού επιλέγεται στη συνέχεια να αναλυθεί σε μεγαλύτερο βάθος αυτή της τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D printing). Επιλέγονται έτσι χαρακτηριστικά παραδείγματα, μέσω των οποίων παρουσιάζονται οι διαφορετικές προσεγγίσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην αρχιτεκτονική. Ολοκληρώνοντας, γίνονται κάποιες σκέψεις σχετικά με το μέλλον της σχέσης της αρχιτεκτονικής με τις ψηφιακές τεχνολογίες και παρουσιάζονται οι προβληματισμοί και τα νέα ερωτήματα που αναδύονται.

Εάν η νέα σχέση της αρχιτεκτονικής με την κατασκευή η οποία παρουσιάζεται διευρύνει τους ορίζοντες στην αρχιτεκτονική σκέψη του αναγνώστη, προσφέρει ιδέες για νέες προσεγγίσεις και προβληματίσει σχετικά με το μέλλον της αρχιτεκτονικής έκφρασης και πρακτικής, η διάλεξη θα έχει επιτύχει το στόχο της.



Landscape House από την ομάδα Universe Architecture.

Εισαγωγικά

Ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός χαρακτηριζόταν παραδοσιακά από την σταδιακή εξέλιξη από τη μορφή στον τρόπο κατασκευής και τελικά στην επιλογή των υλικών. Σταδιακά όμως, με τις δυνατότητες που δίνουν οι νέες ψηφιακές τεχνολογίες η παραδοσιακή διαδικασία «μορφή-δομή-υλικά» αντιστρέφεται για να καταλήξει ως «υλικά – δομή - μορφή». ¹Αυτή η νέα προσέγγιση στην αρχιτεκτονική πρακτική συνεπάγεται αυτόματα αλλαγές στον τρόπο σύνθεσης των μορφών, απαιτώντας νέες γνώσεις και ικανότητες από τον αρχιτέκτονα και συχνά αλλαγή στον τρόπο σκέψης.

Προβληματισμοί για τον τρόπο αντίληψης της αρχιτεκτονικής ως πρακτική εμφανίζονται στα τέλη του προηγούμενου αιώνα. Ήδη από το 1999 ο Alain Guiheux, αρχιτέκτονας και πολεοδόμος, στο άρθρο του «Towards the invisibility of the buildings» γράφει: «*Η δουλειά του αρχιτέκτονα θα είναι η έρευνα πάνω στα υλικά, η παραγωγή βιομηχανικών μεθόδων και ο πειραματισμός. Η αρχιτεκτονική σήμερα λειτουργεί σαν ένας μηχανισμός. [...] Ο μηχανισμός σαν σχεδιασμός είναι ο τρόπος διευθέτησης των πραγμάτων, συσχετισμού του ενός με το άλλο, χωρίς όμως αυτή η διευθέτηση να περιορίζει τον εαυτό της. Το να θέτεις σημαίνει να κάνεις, να φτιάχνεις.*»²Γίνεται φανερό ότι αρχίζει να απασχολεί η αρχιτεκτονική ως διαδικασία και όχι ως αποτέλεσμα, μία διαδικασία η οποία περιλαμβάνει τον ορισμό σχέσεων και παραμέτρων που οδηγούν στη σύνθεση και δίνει μεγαλύτερη βάση στην κατασκευή και την υλικότητα σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια.

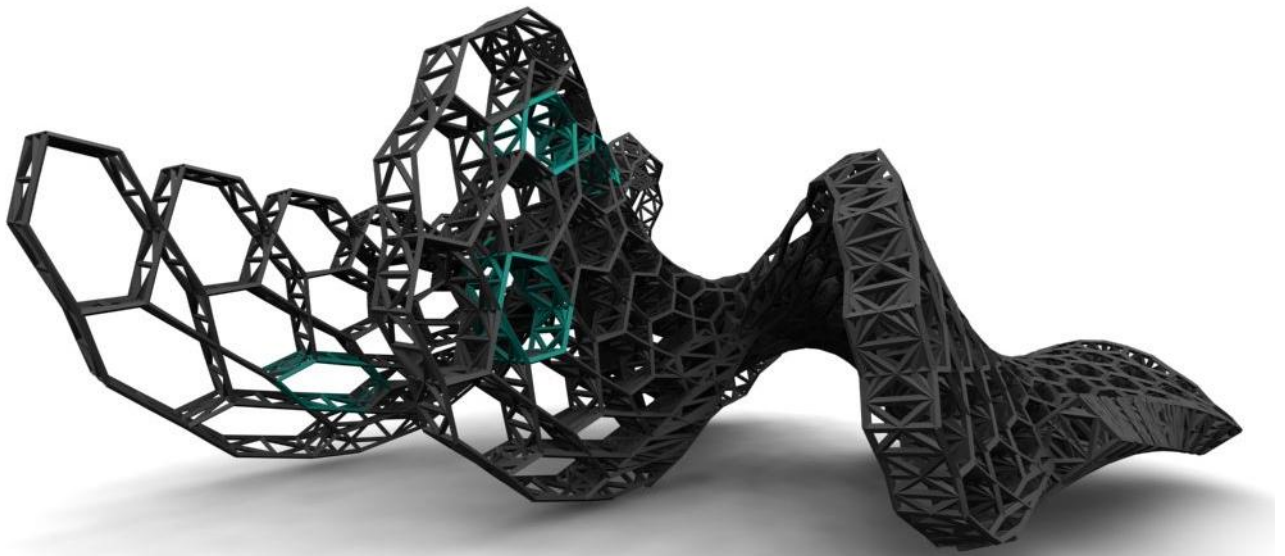
Έχουμε μπει σε μία νέα εποχή όπου τα ψηφιακά μέσα και η χρήση των πιο προωθημένων τεχνολογιών οδηγούν σε μια συνεργασία ανάμεσα στον αρχιτέκτονα και τον υπολογιστή για την ανάδυση της μορφής και ταυτόχρονα η έρευνα και ο πειραματισμός με τα υλικά και τους τρόπους δόμησης συμβάλλουν στην τελική δημιουργία. Αποτέλεσμα είναι ελεύθερες και καινοτόμες αρχιτεκτονικές μορφές, οι οποίες ικανοποιούν με βέλτιστο τρόπο απαιτήσεις λειτουργικότητας, οικονομίας και απόδοσης.

¹ Rivka Oxman, Robert Oxman, *The New Structuralism, Introduction*, στο *Architectural Design, The New Structuralism*, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ. 15, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

² Αθηνά Σταυρίδου, Δημήτρης Παπαδόπουλος, *Εννοιολογικός προσδιορισμός παραμετρικών ιδιοτήτων αρχιτεκτονικών κατασκευαστικών στοιχείων και δομικών υλικών*, υπευθ. Δημήτρης Παπαλεξόπουλος, Ε.Μ.Π., ΠΕΒΕ 2007, σελ. 84

Α. Μέρος:

Ψηφιακός Σχεδιασμός

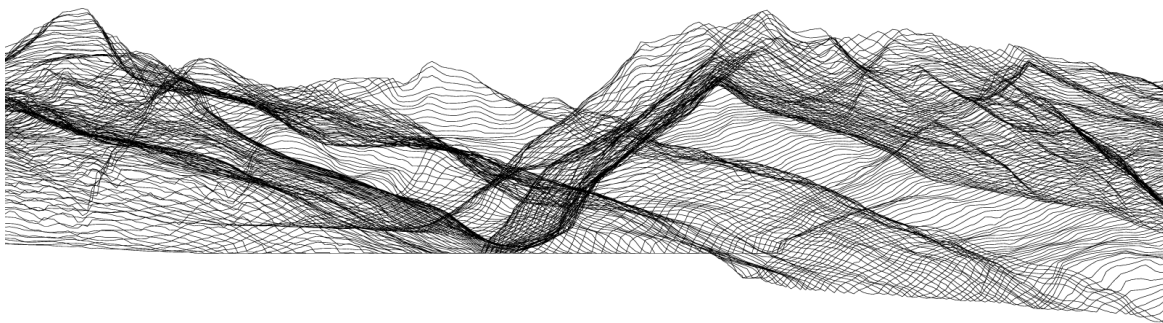


A. Μέρος: Ψηφιακός Σχεδιασμός

Οι τεχνολογία των ηλεκτρονικών υπολογιστών, με τη ραγδαία ανάπτυξη που έχει δει τα τελευταία χρόνια, έχει εισβάλλει πια για τα καλά στη διαδικασία του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, καθορίζοντάς τη σε μεγάλο βαθμό και προσφέροντας πολλές νέες δυνατότητες.

Τα τρισδιάστατα μοντέλα και η οπτικοποίηση, η ψηφιακή μορφογένεση, τα συστήματα κωδικοποιημένης διαμόρφωσης, οι δομικές και θερμικές αναλύσεις, η διαχείριση και ο συντονισμός της εργασίας και της κατασκευής είναι μερικές μόνο από τις ψηφιακές πρακτικές που υιοθετούνται από τους αρχιτέκτονες και τους σύμβουλους κατασκευής.³

Πέραν των παραπάνω ο ψηφιακός σχεδιασμός και οι σχετικές τεχνολογίες αποτελούν τους κύριους παράγοντες οι οποίοι επέτρεψαν την ανάπτυξη των μεθόδων ψηφιακής κατασκευής. Η ανάλυση της εξέλιξης, των νέων τεχνικών και των δυνατοτήτων του ψηφιακού (computational) σχεδιασμού, κρίνεται λοιπόν ενδιαφέρουσα και απαραίτητη.



³ Lisa Iwamoto, *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*. New York: Princeton Architectural Press, 2009, σελ. 5. (μτφ. Κ. Φλωράκη)

1. Σχεδιασμός στον υπολογιστή

1.1 Αρχιτεκτονικό «Design»

Η ιστορία και η θέση του αρχιτέκτονα και του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού είναι στενά συνδεδεμένες με την έννοια του «αρχιτεκτονικού design».

Η σημερινή έννοια του design αναφέρεται κυρίως στην μεταφορά μιας ιδέας σε σύνθεση, σχέδιο ή μοντέλο με σκοπό να βοηθήσει στην υλική πραγματοποίηση της και στον καθορισμό του σκοπού και της λειτουργίας της.⁴

Ο όρος *design* προέρχεται από το ιταλικό «*disegno*», που σημαίνει σχεδιάζω, με την έννοια του σχεδιασμού γραμμών στο χαρτί αλλά και της πραγματοποίησης μιας ιδέας από το όραμα στην υλοποίηση. Το «*disegno*» συνεπάγεται μια άμεση σύνδεση μεταξύ της ιδέας και του αντικειμένου. Όπως παρατηρεί ο Vilém Flusser: «Η λέξη προέρχεται από το λατινικό *signum* που σημαίνει σημάδι και μοιράζονται την ίδια αρχαία ρίζα.»⁵

Η αντίληψη για το σχεδιασμό (*design*) που καθιερώθηκε με την προβολή του *disegno* κατά την ιταλική Αναγέννηση, και κυριαρχεί έκτοτε, δηλώνει ότι αρχικά συλλαμβάνεται μια ιδέα, ένα όραμα, στη συνέχεια σχεδιάζεται στο χαρτί και τέλος, κατασκευάζεται. Το *design* αναφέρεται λοιπόν στον σχεδιασμό. Από το μυαλό στην ύλη.⁶

Σχεδιαστική διαδικασία (*design process*) είναι η σειρά των δραστηριοτήτων που ακολουθούνται από τον σχεδιαστή για να καταλήξει στην λύση ενός τεχνολογικού προβλήματος.⁷

⁴ Σύμφωνα με το διαδικτυακό λεξικό www.businessdictionary.com, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

⁵ Jonathan Hill, *Building the Drawing*, στο *Architectural Design, Design through Making*, Vol 75, Wiley, London 2005, σελ. 14, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

⁶ Στο ίδιο, σελ. 15

⁷ K. Lalit Narayan, K. Mallikarjuna Rao, M.M.M. Sarcar, *Computer Aided Design and Manufacturing*, New Delhi: Prentice-Hall of India, 2008, σελ. 4 (μτφ. Κ.Φλωράκη)

1.2 Computer-Aided Design (CAD)

Το *Computer-Aided Design* (σχεδιασμός με τη βοήθεια του υπολογιστή) ορίζεται ως η χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την υποστήριξη της δημιουργίας, επεξεργασίας, ανάλυσης και βελτιστοποίησης ενός σχεδίου.⁸ Τα σύγχρονα προγράμματα CAD βασίζονται σε interactive computer graphics, περιβάλλοντα όπου ο υπολογιστής δημιουργεί, αναμορφώνει και εμφανίζει σχεδιαστικά δεδομένα με τη μορφή εικόνων και συμβόλων ενώ ο χρήστης επικοινωνεί μαζί του δίνοντας εντολές μέσω των συσκευών εισόδου, με αποτέλεσμα σχέδια σε ψηφιακή μορφή.

Τα προγράμματα CAD χρησιμοποιούνται για την παραγωγή σχεδίων σε δύο διαστάσεις αλλά και τρισδιάστατων μοντέλων.

Συχνά συναντάται το δίδυμο CAD/CAM (Computer-Aided Design and Manufacturing) το οποίο αναφέρεται σε προγράμματα και εφαρμογές που χρησιμοποιούν τον υπολογιστή όχι μόνο για το σχεδιασμό αλλά και για την διευκόλυνση και αυτοματοποίηση των κατασκευαστικών διαδικασιών.⁹

1.3 Computational Design

Το *computational design* αναφέρεται στην εφαρμογή υπολογιστικών (*computational*) στρατηγικών στη σχεδιαστική διαδικασία.¹⁰ Το κρίσιμο χαρακτηριστικό του *computational* τρόπου εργασίας είναι η επεξεργασία των πληροφοριών αλγοριθμικά.¹¹ Ενώ οι αρχιτέκτονες παραδοσιακά βασίζονται στην διαίσθηση και την εμπειρία για τη επίλυση των αρχιτεκτονικών προβλημάτων, το *computational design* έχει σκοπό να ενισχύσει αυτή τη διαδικασία με την κωδικοποίηση των σχεδιαστικών αποφάσεων σε γλώσσα υπολογιστή. Ο στόχος δεν είναι απαραίτητα η καταγραφή του σχεδίου του

⁸ Στο ίδιο, σελ. 3

⁹ Σύμφωνα με τον ορισμό του διαδικτυακού λεξικού: www.techopedia.com

¹⁰ Michael KilKelly, *5 Ways Computational Design Will Change the Way You Work*, Arch Daily, 15 Απριλίου 2016, από: www.archdaily.com/785602/5-ways-computational-design-will-change-the-way-you-work (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹¹ Achim Menges, Sean Ahlquist, *AD Reader: Computational Design Thinking*, London: Wiley, 2011, σελ. 11 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

τελικού αποτελέσματος, αλλά περισσότερο των βημάτων που χρειάστηκαν ώστε να προκύψει αυτό το αποτέλεσμα.

Τα περισσότερα περιβάλλοντα computational σχεδιασμού βασίζονται σε οπτικό (visual) προγραμματισμό κατά τον οποίο τα προγράμματα σχηματίζονται γραφικά, αντί να γράφεται κώδικας παραδοσιακά. Το αποτέλεσμα είναι μια διαγραμματική αναπαράσταση των βημάτων που ακολουθούνται για την επίτευξη της τελικής μορφής.¹²

Ο computational σχεδιασμός θεωρείται από πολλούς ότι υπάγεται στις τεχνικές του computer-aided design, καθώς αυτός περιλαμβάνει όλα τα προγράμματα που υποστηρίζουν το σχεδιασμό μέσω υπολογιστή. Είναι σημαντικό όμως να διαχωρίσουμε τον πρώτο από το παραδοσιακό CAD, κυρίως όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο ο σχεδιαστής οδηγείται στην τελική μορφή.

Οι διαφορές ανάμεσα στο computer-aided design (CAD) και το computational design βρίσκονται στην προσέγγιση απέναντι στον σχεδιασμό και όχι σε συγκεκριμένες δυνατότητες ή γνώσεις. Η προσέγγιση του computer-aided αφορά σε μια στρατηγική συμβολικής αναπαράστασης της πληροφορίας βασισμένη στο αντικείμενο, τη μορφή. Σε αντίθεση, η computational λογική επιτρέπει συγκεκριμένα δεδομένα να υλοποιηθούν μέσα από μια αρχική αφαίρεση, με τη μορφή κώδικα ο οποίος περιλαμβάνει τιμές και σχέσεις.¹³

Γίνεται λοιπόν εμφανές ότι η διαδικασία που ακολουθείται κατά το computer-aided design δεν έχει απομακρυνθεί ιδιαίτερα από αυτήν του σχεδιασμού στο χέρι, μη επιτρέποντας έτσι στον υπολογιστή να προσφέρει ένα πλήθος νέων δυνατοτήτων.

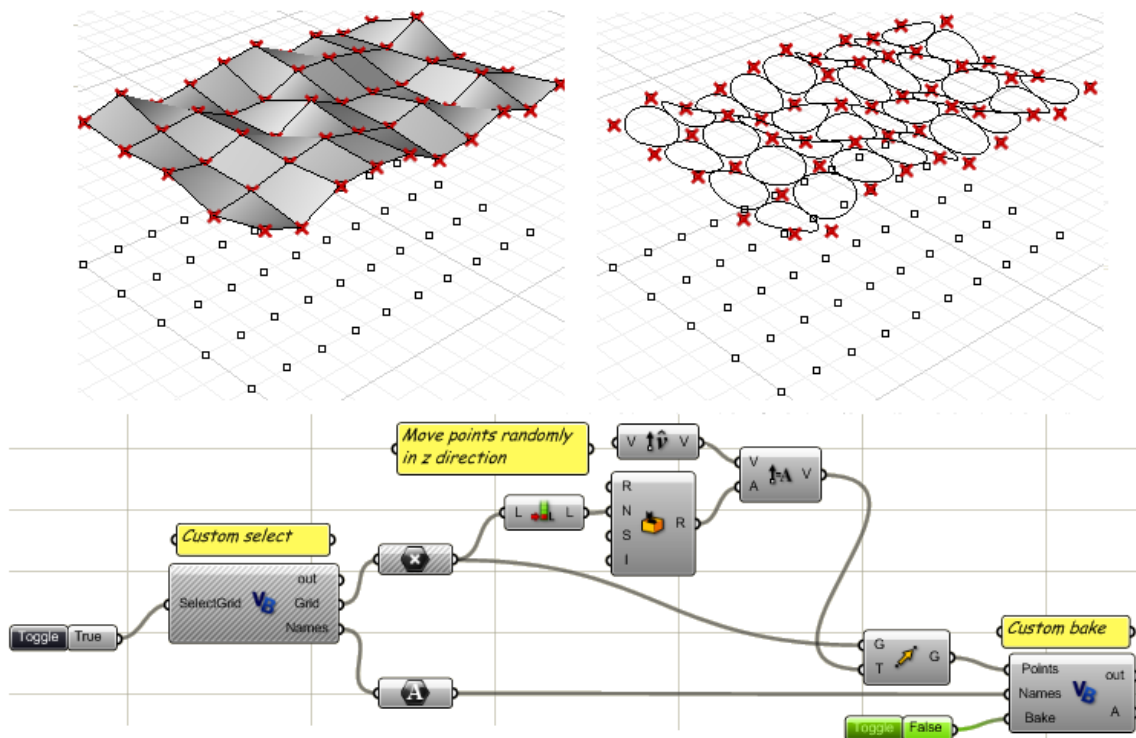
Σύμφωνα με τον Κώστα Τερζίδη, ο κυρίαρχος τρόπος αξιοποίησης των υπολογιστών στην αρχιτεκτονική σήμερα είναι αυτός του computerization, οντότητες και διαδικασίες οι οποίες έχουν ήδη συλληφθεί στο μυαλό του σχεδιαστή, εισάγονται, υφίστανται επεξεργασία ή αποθηκεύονται στο σύστημα του υπολογιστή. Αντιθέτως, το

¹² Michael KilKelly, *5 Ways Computational Design Will Change the Way You Work*, Arch Daily, 15 Απριλίου 2016, από: www.archdaily.com/785602/5-ways-computational-design-will-change-the-way-you-work (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹³ Achim Menges, Sean Ahlquist, *AD Reader: Computational Design Thinking*, London: Wiley, 2011, σελ. 11 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

computation, ως βασισμένο στις δυνατότητες του υπολογιστή εργαλείο είναι περιορισμένο. Το πρόβλημα που δημιουργείται έτσι είναι ότι οι σχεδιαστές δεν αξιοποιούν πλήρως την υπολογιστική ισχύ του κομπιούτερ.¹⁴

Υποκατηγορίες του computational design αποτελούν ο αλγοριθμικός σχεδιασμός, όπου παράγονται πρωτότυπες και πολύπλοκες μορφές με τη χρήση αλγορίθμου (καθορισμένης αλληλουχίας ενεργειών), ο εξελικτικός (evolutionary) σχεδιασμός και ο γενεσιουργός (generative) σχεδιασμός (βλ. κεφάλαιο Α.3.4) και ο παραμετρικός σχεδιασμός, όπου περιγράφονται οι σχέσεις μεταξύ οντοτήτων με τον ορισμό παραμέτρων και περιορισμών. Γενικά τα όρια μεταξύ των κατηγοριών δεν είναι απολύτως διακριτά και είναι συχνό φαινόμενο ο συνδυασμός τους.



Το πρόγραμμα Grasshopper αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα computational σχεδιασμού

¹⁴Achim Menges, Sean Ahlquist, *AD Reader: Computational Design Thinking*, London: Wiley, 2011, σελ. 10 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

2. Εξέλιξη του ψηφιακού σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός με τη βοήθεια υπολογιστικών συστημάτων αποτελεί εδώ και πολλές δεκαετίες βασικό εργαλείο της αρχιτεκτονικής σύνθεσης, αντικαθιστώντας σε μεγάλο βαθμό τον παραδοσιακό τρόπο σχεδιασμού στο χέρι. Τα πρώτα γραφικά συστήματα για σχεδιασμό με τη βοήθεια υπολογιστή αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του '60 και αφορούσαν τις βιομηχανίες αυτοκινήτων και αεροσκαφών.¹⁵ Τα πρώτα χρόνια της εφαρμογής τους, τα προγράμματα CAD χρησιμοποιήθηκαν κυρίως με μεθόδους παραγωγής σχεδίων παρόμοιους με το συμβατικό μοντέλο στο χέρι, αξιοποιώντας τον υπολογιστή κυρίως για διευκόλυνση στην αναπαράσταση.

Καθώς η διαδικασία παραγωγής σχεδίων σταδιακά μεταβαλλόταν από αναλογική σε ψηφιακή και τα προγράμματα CAD αντικατέστησαν το σχέδιο με χάρακα και μολύβι, οι μορφές των κτηρίων δεν αντικατόπτριζαν ιδιαίτερα την αλλαγή. Χρειάστηκε η εισαγωγή των τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων και του *digital fabrication* προκειμένου να ενεργοποιηθεί η σχεδιαστική σκέψη και φαντασία και να διευρυνθούν τα όρια των αρχιτεκτονικών μορφών και της κατασκευής.¹⁶

Παράδειγμα του συμβατικού μοντέλου στον ψηφιακό αρχιτεκτονικό σχεδιασμό είναι το *image mapping* όπου χρησιμοποιούνται αποκλειστικά αναπαραστατικά κριτήρια, και όχι βασισμένα στην απόδοση, για την επιλογή της κατάλληλης σχεδιαστικής πρότασης. Τα προγράμματα παραγωγής τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για την προσομοίωση της τελικής εικόνας του κτηρίου μέσω βιβλιοθηκών με υλικά (γενικά εικόνων *bitmap*) τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν με σχετική ευκολία σε μορφές που έχουν ήδη συλληφθεί. Αυτή η εικονική πραγματικότητα διαχωρίζει ακόμα περισσότερο τους αρχιτέκτονες από την υλική διαδικασία της «οικοδόμησης». Όταν δεν είναι συνδεδεμένο με μια βιβλιοθήκη το *bitmap* τούβλο (ή γρασίδι, πέτρα, ή «μοβ») που έχει για παράδειγμα ένας τοίχος, δεν έχει φυσικές ή υλικές ιδιότητες ή γνωρίσματα τα οποία πρέπει να λάβει υπόψη ο αρχιτέκτονας στην κατασκευή του. Κατά συνέπεια, δεν υπάρχουν σχετικά δεδομένα ώστε να καθορίσουν εάν μπορεί να λειτουργήσει επαρκώς ως τοίχος.¹⁷

¹⁵ Achim Menges, Sean Ahlquist, *AD Reader: Computational Design Thinking*, London: Wiley, 2011, σελ. 11 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹⁶ Lisa Iwamoto, *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*. New York: Princeton Architectural Press, 2009, σελ. 5. (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹⁷ Richard Garber, *Optimization Stories: The Impact of Building Information Modeling on Contemporary Design Practice*, στο *Architectural Design, Closing The Gap: Information Models in Contemporary Design Practice*, Vol 79, Wiley, London 2009, σελ. 13 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

Στο μοντέρνο, επικρατεί ο top-down διαχωρισμός, που ορίζει ως πρώτο στάδιο, την σύλληψη της μορφής, στην συνέχεια τον σχεδιασμό της κατασκευαστικής της απόδοσης και τέλος την έκφρασή της σε υλική δομή, με την αντίστοιχη προσαρμογή και σχεδιαστική απόδοση. Η πρώτη ψηφιακή εποχή, ακολουθεί τον παραπάνω διαχωρισμό, μεταφρασμένο όμως σε ψηφιακά μέσα. *Το πρώτο στάδιο αφορά το «modeling», το επόμενο στάδιο αφορά το «analysis» και το τρίτο στάδιο αφορά το τελικό «fabrication».*¹⁸

Καμπύλες

Κατά τα μέσα της δεκαετίας του '90 οι καμπύλες Splines και καμπύλες επιφάνειες (NURBS), οι οποίες αναπτύχθηκαν από την γαλλική βιομηχανία αυτοκινήτων ως μαθηματικοί ορισμοί για καμπύλες τη δεκαετία του '50, κάνουν την εμφάνισή τους στα προγράμματα CAD που χρησιμοποιούνται από αρχιτέκτονες. Σύντομα τα αποτελέσματα της χρήσης τους γίνονται εμφανή σε κτήρια σε όλο τον κόσμο. Δεν άργησε όμως να γίνει εμφανές το πρόβλημα που δημιουργείται όταν τα αρχιτεκτονικά αυτά σχέδια περνάνε στη φάση της κατασκευής. *«Αυτό που ξεκίνησε ως ένα χαρούμενο ταξίδι μακριά από την επαναλαμβανόμενη, βιομηχανική, ορθογωνική ανία κατέληξε ένας εφιάλτης εξοντωτικής δουλειάς.»*¹⁹ Για παράδειγμα, τα πλαίσια των κουφωμάτων έπρεπε να καμπυλώσουν, όπως στους σταθμούς τελεφερίκ της Zaha Hadid στο Innsbruck της Αυστρίας (2007), κάτι πολύ ακριβό. Ή η τοποθέτηση των πλασιών έπρεπε να βελτιστοποιηθεί σχολαστικά ώστε να προσεγγίσει την καμπύλη επιφάνεια με επίπεδες όψεις, όπως στο πολυκατάστημα Peek & Cloppenburg του Renzo Piano στην Κολόνια, ιδιαίτερα δύσκολο. Δεν υπάρχουν πια επαναλαμβανόμενες οικοδομικές λεπτομέρειες που μπορούν να σχεδιαστούν από μια φορά, αλλά χάρη στο μη κανονικό σχήμα, κάθε πλαίσιο και κάθε σύνδεσμος έχει μια μικρή διαφοροποίηση στη γεωμετρία με αποτέλεσμα εκατοντάδες ή χιλιάδες μεμονωμένα σχέδια εργαστηρίου.

Οι παραπάνω δυσκολίες που δημιουργήθηκαν στον σχεδιασμό και την κατασκευή, οδήγησαν στην εμφάνιση του computational design αλλά και του digital fabrication για την επίλυσή τους.

¹⁸ Ιάσων Ζιρώ, *Από τον Προγραμματισμό των υπολογιστών στον Προγραμματισμό της ύλης*, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2015, σελ. 51

¹⁹ Fabian Scheurer, *Materializing Complexity*, στο *Architectural Design, The New Structuralism*, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ 89, (μτφ. Κ. Φλωράκη)



Αλγόριθμοι

Κάποια προγράμματα CAD είχαν διεπαφές προγραμματισμού (APIs) οι οποίες επέτρεπαν τον χειρισμό των σχεδιαστικών εργαλείων με αλγοριθμικό τρόπο. Έτσι ορισμένοι αρχιτέκτονες άδραξαν την ευκαιρία και άρχισαν να προγραμματίζουν σχεδιαστικούς αλγόριθμους αντί να σχεδιάζουν αμέτρητες παραλλαγές του ίδιου στοιχείου στο χέρι.²⁰ Ένας τέτοιος αλγόριθμος λαμβάνει τις καθοριστικές ιδιότητες ενός στοιχείου ή συνδέσμου ως παραμέτρους εισόδου και παραδίδει ένα ολοκληρωμένο σχέδιο ή τρισδιάστατο μοντέλο ως έξοδο. Οι πληροφορίες που περιέχουν χιλιάδες σχέδια μπορεί να περιοριστεί έτσι σε έναν σωστά διατυπωμένο αλγόριθμο και μερικές εκατοντάδες συλλογές λίγων παραμέτρων.²¹ Γίνεται έτσι η εισαγωγή στις computational διαδικασίες σχεδιασμού, οι οποίες αξιοποιούν τις δυνατότητες του υπολογιστή σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από τα CAD για την παραγωγή της αρχιτεκτονικής μορφής.

Οι νέες προκλήσεις που θέτει ο αλγοριθμικός τρόπος σχεδιασμού αφορούν την απαραίτητη γνώση προγραμματισμού από τους αρχιτέκτονες και τον καθορισμό του προβλήματος. Οι σχεδιαστές οι οποίοι είναι συνηθισμένοι να ασχολούνται με ασαφή και αόριστα προβλήματα, πρέπει να αντιμετωπίσουν εδώ σαφείς, πλήρως ορισμένες και τυπικές περιγραφές, σωστές συντακτικά ως το τελευταίο σημείο στίξης. Το να βρεθεί ένας κομψός, κοινός ορισμός για όλες τις διαφορετικές λεπτομέρειες μια καμπύλης πρόσοψης είναι πολύ δυσκολότερο από το να λυθεί το πρόβλημα για μία απλή ορθογωνική κατάσταση.²² Ταυτόχρονα απαιτείται τεράστια ακρίβεια αλλά και γνώσεις γεωμετρίας. Εάν χρησιμοποιείται για την κατασκευή υψηλής τεχνολογίας εξοπλισμός που ελέγχεται από υπολογιστές (digital fabrication) και δουλεύει με αποκλίσεις της τάξεως κάτω του χιλιοστού, η ακρίβεια στο ψηφιακό μοντέλο πρέπει να είναι ακόμα υψηλότερη.

²⁰ Fabian Scheurer, *Materializing Complexity*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ 89, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

²¹ Fabian Scheurer, *Materializing Complexity*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ 89, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

²² Fabian Scheurer, *Materializing Complexity*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ 89, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

3. Αλγοριθμικός σχεδιασμός

Όπως φαίνεται από το προηγούμενο κεφάλαιο η εισαγωγή των αλγορίθμων στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό αποτελεί σημείο σταθμό, καθώς προσφέρει μια νέα λογική παραγωγής αρχιτεκτονικών μορφών.

3.1 Πολυπλοκότητα

Ο ψηφιακός σχεδιασμός, και ειδικότερα οι computational διαδικασίες, είναι συνυφασμένες με την έννοια της πολυπλοκότητας, μιας και αποτελούν τα μέσα για τη δημιουργία και τη διαχείριση πολύπλοκων αρχιτεκτονικών κατασκευών, οι οποίες χωρίς αυτά θα ήταν ιδιαίτερα δύσκολο, έως αδύνατο, να πραγματοποιηθούν.

Συνήθως όταν αναφερόμαστε στην έννοια της πολυπλοκότητας μιλάμε για την πολυπλοκότητα κατά - Kolmogorov (ή K-Complexity). Η έρευνα του Ρώσου μαθηματικού *Andrey Nikolayevich Kolmogorov* στο πεδίο της θεωρίας των αλγορίθμων είναι αυτή που ανέδειξε αυτό που σήμερα είναι κοινώς αποδεκτό ως η γενικευμένη έννοια της πολυπλοκότητας, καθώς αναζητούσε να δώσει έναν μαθηματικό ορισμό στην έννοια της ποσότητας της πληροφορίας: «Η πολυπλοκότητα ενός μηνύματος ορίζεται ως το μήκος του συντομότερου αλγόριθμου, ή σταδιακής διαδικασίας, ο οποίος απαιτείται για την αναπαραγωγή του.»²³

Ο Κώστας Τερζίδης συμπυκνώνει τον ορισμό: «Πολυπλοκότητα είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να δηλώσει τη διάρκεια της περιγραφής ενός συστήματος, ή την ποσότητα του χρόνου που απαιτείται για να δημιουργηθεί ένα σύστημα»²⁴

Είναι σημαντικό να επισημανθεί η διαφορά που υφίσταται μεταξύ των εννοιών του πολύπλοκου και του περίπλοκου. Σύμφωνα με τον Τερζίδη, το πολύπλοκο αφορά το μεγάλο πλήθος από συναρμοζόμενα στοιχεία, το οποίο μπορεί να γίνει πλήρως κατανοητό αν αναλυθεί στα στοιχεία αυτά. Στη περίπτωση του περίπλοκου δεν αρκεί

²³ Αθηνά Σταυρίδου, Δημήτρης Παπαδόπουλος, *Εννοιολογικός προσδιορισμός παραμετρικών ιδιοτήτων αρχιτεκτονικών κατασκευαστικών στοιχείων και δομικών υλικών*, υπευθ. Δημήτρης Παπαλεξόπουλος, Ε.Μ.Π., ΠΕΒΕ 2007, σελ. 62

²⁴ Στο ίδιο

αυτή η ανάλυση προκειμένου να γίνουν κατανοητές οι ιδιότητες και οι λειτουργίες ενός συστήματος.^{25, 26}

3.2 Αλγόριθμος

Η χρήση αλγορίθμων καταλαμβάνει κυρίαρχη θέση στις σύγχρονες διερευνήσεις του computational design για παραγωγή πρωτότυπων ή πολύπλοκων δομών. Η αλματώδης αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των προσωπικών ηλεκτρονικών υπολογιστών, παρέχει την δυνατότητα για κατανόηση και περιγραφή όλο και πιο πολύπλοκων αλγορίθμων, και ταυτόχρονα την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων τους με ταχύτητες προηγουμένως ασύλληπτες από τον ανθρώπινο νου.

Σύμφωνα με τον Κώστα Τερζίδα, «Αλγόριθμος είναι μια υπολογιστική διαδικασία η οποία διατυπώνει ένα πρόβλημα σε έναν πεπερασμένο αριθμό βημάτων. Περιλαμβάνει διαδικασίες μείωσης, επαγωγής, αφαίρεσης, γενίκευσης και δομημένης λογικής. Είναι η συστηματική εξαγωγή λογικών αρχών, και η ανάπτυξη ενός γενικού πλάνου επίλυσης. Οι αλγοριθμικές στρατηγικές αξιοποιούν την αναζήτηση επαναλαμβανόμενων μοτίβων, καθολικών αρχών, εναλλασσόμενων υποσυνόλων, και επαγωγικών συνδέσεων.»²⁷

Αν και η έννοια του αλγορίθμου συχνά συνδέεται με αυτή της πολυπλοκότητας (βλ. κεφάλαιο 3.1), είναι σημαντικό να διακρίνεται η πολυπλοκότητα του αποτελέσματος από αυτήν του αλγορίθμου που την παράγει. Είναι σύνηθες να παράγονται εξαιρετικά πολύπλοκα αποτελέσματα από πολύ απλούς αλγορίθμους.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των αλγορίθμων είναι ότι ενώ διατυπώνονται συνήθως για να επιλύσουν κάποιο συγκεκριμένο πρόβλημα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την επίλυση ή διατύπωση διαφορετικών προβλημάτων. Κατ'

²⁵ Στο ίδιο

²⁶ Ο George Vrachliotis εντοπίζει τρεις κατευθύνσεις στις οποίες εξελίσσεται η έννοια της πολυπλοκότητας στην αρχιτεκτονική: «Έχουμε τρεις πορείες ανάπτυξης της έννοιας του πολύπλοκου στην αρχιτεκτονική: μια μορφολογική-ψυχολογική πορεία (gestalt-psychological), μια κυβερνητική (αυτόματη) πορεία (cybernetic), και μια βιολογική-αλγοριθμική πορεία (biological-algorithmic). Φυσικά αυτές οι πορείες δεν αποκλείουν η μία την άλλη, αλλά δεν μπορούμε να παραβλέψουμε την αυξανόμενη τεχνικοποίηση (technologization) της έννοιας του πολύπλοκου.»

²⁷ Αθηνά Σταυρίδου, Δημήτρης Παπαδόπουλος, *Εννοιολογικός προσδιορισμός παραμετρικών ιδιοτήτων αρχιτεκτονικών κατασκευαστικών στοιχείων και δομικών υλικών*, υπευθ. Δημήτρης Παπαλεξόπουλος, Ε.Μ.Π., ΠΕΒΕ 2007, σελ. 65

επέκταση, ένας αλγόριθμος μπορεί να αποτελέσει το αφηρημένο και ασαφές πλαίσιο κανόνων, το οποίο ανάλογα με την πρόθεση του δημιουργού μπορεί να οδηγήσει σε απρόβλεπτες -από τον αρχικό δημιουργό του αλγορίθμου- μορφές.²⁸

3.3 Η παράμετρος

Για τα μαθηματικά η παράμετρος ορίζεται ως

μια σταθερά ή μεταβλητή σε μία συνάρτηση η οποία καθορίζει τη συγκεκριμένη μορφή της αλλά όχι τη γενική φύση της, όπως στην $f(x)=ax$ όπου το a καθορίζει μόνο την κλίση της γραμμής που περιγράφει η $f(x)$.

ή

μία από της ανεξάρτητες μεταβλητές σε ένα σύνολο παραμετρικών εξισώσεων.²⁹

Σύμφωνα με την επιστήμη της πληροφορικής όμως ορίζεται ως μια μεταβλητή η οποία πρέπει να λάβει μια ορισμένη τιμή κατά την εκτέλεση ενός προγράμματος ή μιας διαδικασίας εντός ενός προγράμματος.

Κατα το computational design και την δημιουργία αλγορίθμων παραγωγής μορφών οι σχεδιαστές δεν περιγράφουν αντικείμενα αλλά τις μεταξύ τους σχέσεις, οι οποίες παραμένουν σταθερές. Η μοναδικότητα των παραγόμενων μορφών επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση διαφορετικών κάθε φορά τιμών στις παραμέτρους που καθορίζουν αυτές τις σχέσεις.

Ως παράμετροι ορίζονται όχι μόνο αισθητικά και λειτουργικά, αλλά και υλικά και κατασκευαστικά στοιχεία. Ειδικότερα η κατασκευή μπαίνει ως πολύ σημαντική παράμετρος κατά τον σχεδιασμό της μορφής, στο νέο παράδειγμα που αφορά την εισαγωγή μεθόδων digital fabrication στην αρχιτεκτονική.

²⁸ Αθηνά Σταυρίδου, Δημήτρης Παπαδόπουλος, *Εννοιολογικός προσδιορισμός παραμετρικών ιδιοτήτων αρχιτεκτονικών κατασκευαστικών στοιχείων και δομικών υλικών*, υπευθ. Δημήτρης Παπαλεξόπουλος, Ε.Μ.Π., ΠΕΒΕ 2007, σελ. 66

²⁹ Σύμφωνα με το διαδικτυακό λεξικό: www.dictionary.com

3.4 Μορφογένεση και εξελικτικοί αλγόριθμοι

Η ψηφιακή μορφογένεση είναι η παραγωγή σχεδιαστικών λύσεων μέσω γενετικών και επιτελεστικών διαδικασιών.³⁰ Για την παραγωγή των αρχιτεκτονικών μορφών εμπνέεται από της διαδικασίες εξέλιξης της φύσης και τη βιολογία.

Η προϋπόθεση για μια εξελικτική και γενετική διαδικασία σχεδιασμού, είναι μια γεωμετρικά καθορισμένη σειρά από σχέσεις αλληλεξάρτησης, με αποτέλεσμα να μπορούν να εξαχθούν παραμετρικά γεωμετρικές παραλλαγές μιας δομής με την διαφοροποίηση των τιμών των συστατικών στοιχείων της. Για το γενετικό και επαναληπτικό σχεδιασμό γίνεται χρήση παραμετρικού λογισμικού όπως το Generative Components του Bentley Systems και το Grasshopper for Rhino του McNeel.³¹

Στην δομική σχεδιαστική ανάλυση (*structural design analysis*), η πρόβλεψη της συμπεριφοράς των πολύπλοκων δομών συμπληρώνεται με τη σύνθεση, που σημαίνει ότι απαιτούνται όχι μόνο αναλυτικές αλλά και γενετικές στρατηγικές.³²

Καθώς αναπτύσσεται η επιστημονική προσέγγιση η οποία προβλέπει την εξερεύνηση των φυσικών συστημάτων και του τρόπου με τον οποίο αυτά εξελίσσονται και αλληλεπιδρούν, εντοπίζεται από τον Michael Weinstock μια στροφή προς τις γενετικές διαδικασίες σχεδιασμού, η οποία συντελείται στα πλαίσια της θεωρίας της ανάδυσης. Ο όρος ανάδυση (*emergence*), χρησιμοποιείται για να περιγράψει την «μετάβαση από χαμηλής τάξης κανόνες οργάνωσης, σε υψηλής τάξης πολυπλοκότητα, βασιζόμενη σε παράλληλης τάξης πολύπλοκες διαδράσεις ανάμεσα σε τοπικούς παράγοντες». ³³ Η πολυπλοκότητα χαρακτηρίζει συστήματα (σειρές στοιχείων και τις μεταξύ τους σχέσεις) των οποίων η συμπεριφορά είναι δύσκολα προβλέψιμη. Κατά την ανάδυση, οι ιδιότητες του συστήματος δεν καθορίζονται από μεμονωμένα στοιχεία, αλλά

³⁰ Rivka Oxman, Robert Oxman, *The New Structuralism, Introduction*, στο *Architectural Design, The New Structuralism*, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ. 20, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

³¹ Στο ίδιο, σελ. 20

³² Klaus Bollinger, Manfred Grohmann, Oliver Tessmann, *Structured becoming: Evolutionary Processes in Design Engineering*, στο *Architectural Design, The New Structuralism*, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ. 36, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

³³ Ιάσων Ζιρώ, *Από τον Προγραμματισμό των υπολογιστών στον Προγραμματισμό της ύλης*, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2015, σελ. 20

περισσότερο αναδύονται από πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις χωρίς από πάνω προς τα κάτω έλεγχο.³⁴ Συγκεκριμένα αναφερόμαστε «στις ιδιότητες ενός συστήματος το οποίο δεν μπορεί να διαχωριστεί / εξαχθεί από τα δομικά του στοιχεία, δημιουργώντας κάτι ανώτερο από τα συστατικά που το δημιούργησαν. Ο ρόλος της αρχιτεκτονικής είναι να χαράξει ένα λειτουργικό μοντέλο που να μπορεί να επενδύει και να προωθεί την ανάπτυξη και να θεσπίσει την μαθηματική γλώσσα και τις διαδικασίες με τις οποίες θα γίνει πραγματικό εργαλείο σχεδιασμού».³⁵

Οι εξελικτικοί (evolutionary) αλγόριθμοι παράγουν και χειρίζονται σειρές χαρακτήρων που εξυπηρετούν ως γενότυποι, ή σχέδια, από ολόκληρους πληθυσμούς δομών. Ο γενότυπος λειτουργεί ως δεδομένο εισόδου για τη δημιουργία παραμετρικών δομικών μοντέλων, τα οποία θα γίνουν τελικά οι φαινότυποι. Αυτά τα μοντέλα αναλύονται και αξιολογούνται με κριτήρια αξιολόγησης τα οποία δεν προέρχονται μόνο από τις οικοδομικές απαιτήσεις, αλλά καλύπτουν ακόμα και αρχιτεκτονικές απόψεις. Το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι όχι μια βελτιστοποιημένη δομή, αλλά μια ισορροπία από ποικίλες απαιτήσεις. Οι μεμονωμένες δομές αναδιαρθρώνονται και αναπαράγονται για να δημιουργήσουν μια νέα σειρά από διάφορες λύσεις. Η επόμενη διαδοχική γενιά βασίζεται κυρίως στα γονίδια των καλύτερων λύσεων της προηγούμενης επανάληψης.³⁶ Με αυτόν τον τρόπο καθιερώνεται μια κυκλική διαδικασία η οποία παίρνει την προηγούμενη έξοδο ως τη νέα είσοδο, έχουμε δηλαδή μια διαδικασία ανατροφοδότησης και όχι μια ευθεία σχέση αιτίου-αποτελέσματος.

Παρότι τα εξελικτικά μοντέλα σχεδιασμού αμφισβητούν την διαδικασία σχεδιασμού από πάνω προς τα κάτω (top- down) και αναφέρονται στην ανάπτυξη μορφών και πολυπλοκότητας μέσω αλγοριθμικών διαδικασιών, διακατέχονται συνήθως από το μοντέρνο διαχωρισμό των διαδικασιών σχεδιασμού και κατασκευής, με αποτέλεσμα να

³⁴ Klaus Bollinger, Manfred Grohmann, Oliver Tessmann, *Structured becoming: Evolutionary Processes in Design Engineering*, στο *Architectural Design, The New Structuralism*, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ. 36, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

³⁵ Ιάσων Ζιρώ, *Από τον Προγραμματισμό των υπολογιστών στον Προγραμματισμό της ύλης*, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2015, σελ. 20

³⁶ Klaus Bollinger, Manfred Grohmann, Oliver Tessmann, *Structured becoming: Evolutionary Processes in Design Engineering*, στο *Architectural Design, The New Structuralism*, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ. 36, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

μην γίνεται αναφορά στην έννοια της υλικότητας και την ένταξή της στην σχεδιαστική διαδικασία.³⁷ Έχουμε λοιπόν μια κουλτούρα η οποία αναφέρεται από τον Menges ως «geometric-driven form-generation».³⁸ Ένα τέτοιο μοντέλο σκέψης αποτελεί ένα κλειστό σύστημα παραγωγής μη πραγματικών μορφών, βασισμένες σε αλγοριθμικά δεδομένα χωρίς άμεση δυνατότητα ενημέρωσης ή *feedback* από το πραγματικό περιβάλλον, τα οποία υφίστανται και υπάρχουν μόνο στον χώρο του *cyberspace*.³⁹

Οι HoB Lipson και Melba Kurman σημειώνοντας ότι «... η φαντασία μας παραμένει εγκλωβισμένη στην παλιά εμπειρία... οι δημιουργίες μας είναι παραλλαγές αυτού που μας είναι ήδη οικείο»⁴⁰ αναφέρονται στο γεγονός ότι οι αρχιτέκτονες, δεν εκμεταλλεύονται σε όλο το φάσμα των δυνατοτήτων τους τις νέες ψηφιακές τεχνολογίες που τους προσφέρονται, όπως τα νέα μέσα παραγωγής και την τεχνολογία 3D Printing.

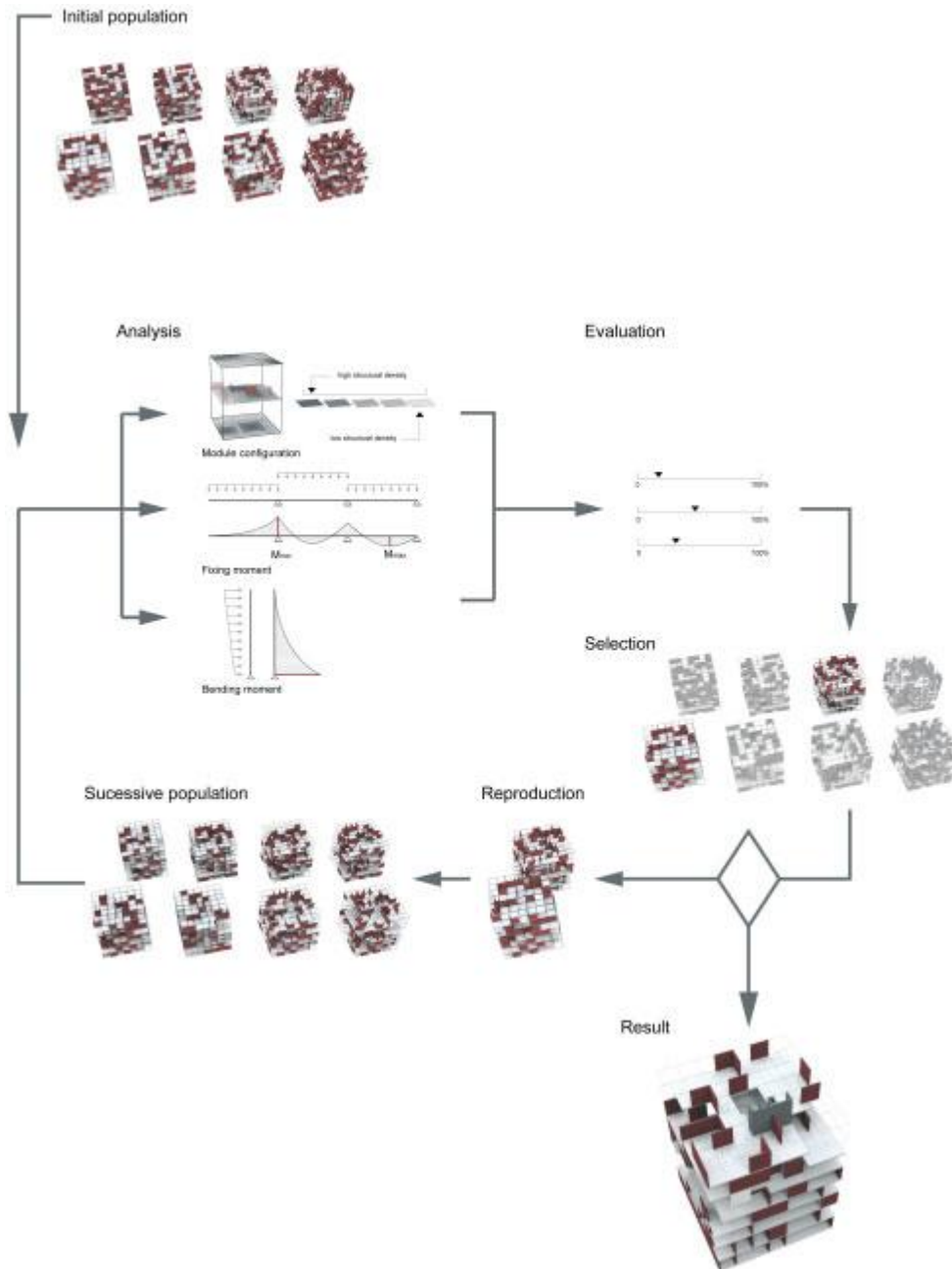
Από την άλλη, το βιολογικό παράδειγμα καταδεικνύει τον ρόλο του αρχιτέκτονα στην σύγχρονη εποχή, αυτόν του μεσολαβητή που θέτει τις παραμέτρους και τις σχέσεις μεταξύ των στοιχείων, αντί να οραματίζεται αυτούσια την τελική μορφή, δημιουργώντας ρήξη με την έννοια της αυθεντίας της εποχής του μοντέρνου.

³⁷ Ιάσων Ζιρώ, *Από τον Προγραμματισμό των υπολογιστών στον Προγραμματισμό της ύλης*, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2015, σελ. 53

³⁸ Achim Menges, *Morphospaces of Robotic Fabrication*, Robarch 2012: *Robotic Fabrication in architecture, Art, and Design*, Sigrid Brell-Cokcan, Johannes Braumann (Eds.), Springer Wien New York 2013

³⁹ Ιάσων Ζιρώ, *Από τον Προγραμματισμό των υπολογιστών στον Προγραμματισμό της ύλης*, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2015, σελ. 54

⁴⁰ "... our imaginations remain enslaved by past experience... Our creations are elaborations of what we're already familiar with", Hod Lipson, Melba Kurman, *Fabricated: the new world of 3d printing*, Wiley, London 2013, (μτφ. Κ. Φλωράκη)



Διάγραμμα του εξελικτικού αλγόριθμου. Ένας αρχικός πληθυσμός τυχαίων συνθέσεων εξελίσσεται σταδιακά με διαδικασίες ανάλυσης, αξιολόγησης, επιλογής και αναπαραγωγής, ώσπου να επιτευχθούν οι προκαθορισμένες επιθυμητές ιδιότητες.

4. Εργαλεία Σχεδιασμού

Η μετάβαση από την αναλυτική και αναπαραστατική μέθοδο αρχιτεκτονικού σχεδιασμού σε μια λογική διαχείρισης της μεταβολής, των αλληλεπιδράσεων και των σχέσεων ανάμεσα στα επιμέρους στοιχεία και τους παράγοντες της μεταβολής, οδηγεί στην δημιουργία νέων κατάλληλων σχεδιαστικών εργαλείων και λογισμικού. *Ακόμη και τα προγράμματα τα οποία ακολουθούν μια συμβατική στρατηγική διάδοσης, προτείνοντας πακέτα εφαρμογών τα οποία διαχειρίζονται το σύνολο του υπό σχεδίαση αντικειμένου, εντάσσουν δυνατότητες δημιουργίας νέων εργαλείων από τους χρήστες (Bentley - GC). Ταυτόχρονα πιο ευέλικτα και εξειδικευμένα προγράμματα ευνοούν την δημιουργία plug-in τα οποία λειτουργούν παράλληλα με το μητρικό πρόγραμμα και παρέχουν δυνατότητες παραμετρικής σχεδίασης (Rhino 3D - Grasshopper).*⁴¹

*Διακρίνουμε επίσης μια στρατηγική σχεδιασμού η οποία δεν δεσμεύεται από συγκεκριμένα προγράμματα, αλλά δύναται να εντάξει σε επιμέρους τμήματα ή φάσεις του σχεδιασμού παραμετρικές μικρο-εφαρμογές, προκειμένου να επιλύσει στοχευμένα προβλήματα (Processing). Η στρατηγική αυτή αξιοποιεί την δυναμική του ελεύθερου και ανοιχτού λογισμικού (open source, free software), μέσω μιας διεθνούς κοινότητας η οποία υποστηρίζει και εργάζεται για την ελεύθερη διάδοση της γνώσης και των εργαλείων παραγωγής. Κεντρική σημασία στην εξέλιξη αυτή αποτελεί η συνεργατική φύση των προγραμμάτων αυτών, αφού αποτελούν μια κοινή πλατφόρμα συνεύρεσης και συνεννόησης διαφορετικών επιστημονικώς πεδίων, με κοινό παρονομαστή την επιστήμη της πληροφορικής.*⁴²

Τα παραπάνω προγράμματα παρά την καινοτομία του computational design και την απομάκρυνση από την αποκλειστικά αναπαραστατική χρήση, φαίνεται ότι παραμένουν εργαλεία επίλυσης και παραγωγής κυρίως της αρχιτεκτονικής μορφής, ανεξάρτητης από τον τρόπο κατασκευής της. Σε αντίθεση τα λογισμικά BIM που θα δούμε στη συνέχεια, περιλαμβάνουν τα δεδομένα και τους παράγοντες της κατασκευής.

⁴¹ Αθηνά Σταυρίδου, Δημήτρης Παπαδόπουλος, *Εννοιολογικός προσδιορισμός παραμετρικών ιδιοτήτων αρχιτεκτονικών κατασκευαστικών στοιχείων και δομικών υλικών*, υπευθ. Δημήτρης Παπαλεξόπουλος, Ε.Μ.Π., ΠΕΒΕ 2007, σελ. 110

⁴² Στο ίδιο, σελ. 110

4.1 Building Information Model

Ένα εργαλείο σχεδιασμού το οποίο αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια, και υποστηρίζει μια αδιάλλειπτη σχέση του ψηφιακού σχεδιασμού με την τελική κατασκευή, αποτελούν τα Building Information Models (BIM). Η απόδοση της ονομασίας στα ελληνικά είναι, σύμφωνα με τον Ιωάννη Βενέρη, Πληροφορικό Ομοίωμα Κτηρίου.⁴³

Ο ψηφιακός σχεδιασμός, όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, έχει εξαπλωθεί πια σε πεδία εφαρμογής πέρα από τον βασισμένο στην αναπαράσταση σχεδιασμό, και συμπεριλαμβάνει ανάλυση, προσομοίωση και digital fabrication. Η σύνθεση τέτοιων τεχνολογιών και η ανάγκη για καλύτερη εποπτεία της κατασκευής οδήγησαν στην ανάπτυξη των *building information models* τα οποία γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ σχεδιασμού και κατασκευής και υπόσχονται να φέρουν επανάσταση στις σύγχρονες πρακτικές σχεδιασμού.⁴⁴

Η νέα δυνατότητα που προσφέρει το *building information modeling (BIM)* είναι ότι ένα μοναδικό, «έξυπνο», εικονικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει όλες τις πτυχές της σχεδιαστικής διαδικασίας συμπεριλαμβανομένων του οραματισμού, του ελέγχου για χωρικές συγκρούσεις⁴⁵, της παραγωγής των αυτοματοποιημένων μελών και της συνδεσμολογίας, την αλληλουχία της κατασκευής και της έρευνας και του ελέγχου για τα υλικά.⁴⁶

⁴³ Ιωάννης Βενέρης, *Πληροφορική και Αρχιτεκτονική*, Εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2011, κεφάλαιο 7

⁴⁴ Richard Garber, *Optimization Stories: The Impact of Building Information Modeling on Contemporary Design Practice*, στο *Architectural Design, Closing The Gap: Information Models in Contemporary Design Practice*, Vol 79, Wiley, London 2009, σελ. 8 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

⁴⁵ Αναφέρεται σε συγκρούσεις μεταξύ στοιχείων και υποσυστημάτων του κτηρίου, όπως όταν ένας αγωγός συναντά άλλον αγωγό, χωρίς να πρέπει ή κάποιο δομικό στοιχείο του κτηρίου. (Ιωάννης Βενέρης, *Πληροφορική και Αρχιτεκτονική*, Εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2011, σελ. 1489)

⁴⁶ Richard Garber, *Optimization Stories: The Impact of Building Information Modeling on Contemporary Design Practice*, στο *Architectural Design, Closing The Gap: Information Models in Contemporary Design Practice*, Vol 79, Wiley, London 2009, σελ. 8 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

Τα BIM δίνουν αρκετή έμφαση στη γεωμετρική παράσταση των στοιχείων του κτηρίου αλλά επιτρέπουν την επέκτασή τους με στοιχεία ποσότητας υλικών και εργασίας, άρα και κόστους, χρονικό προγραμματισμό εργασιών, και διάφορα είδη αναλύσεων-προσομοιώσεων (ενεργειακών, κατασκευής, κ.α.). Το BIM συγκροτείται ουσιαστικά ως μια βάση δεδομένων του κτηρίου, η οποία επεκτείνεται διαρκώς ώστε να περιλάβει όλα τα απαραίτητα στοιχεία για ολόκληρο τον κύκλο ζωής του, από τον προγραμματισμό και τον σχεδιασμό, μέχρι την κατασκευή, την λειτουργία, και το τέλος της ζωής του.^{47,48}

Αυτή η συνεχής επέκταση και εμπλουτισμός γίνεται χάρη στην εμπλοκή και τη συνεισφορά όλων των συνεργαζόμενων για την δημιουργία του κτηρίου μελών και επαγγελματιών, και όχι μόνο των αρχιτεκτόνων. Τα *information models* καλλιεργούν έτσι ένα είδος αυτοματοποιημένου συντονισμού και συνεργασίας, το οποίο, λόγω αφ' ενός των μέσων και αφ' ετέρου των προθέσεων των σχεδιαστών, δεν είχε εμφανιστεί παλαιότερα στην ευρύτερη οικοδομική βιομηχανία.⁴⁹

Η δυνατότητα εξομοίωσης της κατασκευής σε ένα ψηφιακό μοντέλο χρησιμοποιεί λειτουργίες οι οποίες συχνά καλούνται 4D και 5D. Η τέταρτη διάσταση αφορά την επιπλέον διάσταση του χρόνου, τον προγραμματισμό δηλαδή της διάρκειας, των φάσεων και γενικά της χρονικής εξέλιξης του έργου, ενώ η πέμπτη διάσταση αναφέρεται συνήθως στην κοστολόγηση.

Έχει ενδιαφέρον το γεγονός ότι αυτές οι τεχνολογίες δίνουν ένα μέσο με το οποίο οι έννοιες της δημιουργικότητας και της καινοτομίας συγχωνεύονται με αυτές της

⁴⁷ Ιωάννης Βενέρης, *Πληροφορική και Αρχιτεκτονική*, Εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2011, σελ.1503

⁴⁸ Το National BIM Standard του National Institute of Building Sciences των ΗΠΑ ορίζει το BIM ως εξής:

«Το BIM είναι η ψηφιακή αναπαράσταση των φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός κτηριακού συγκροτήματος ώστε να συγκροτείται κοινό γνωστικό πλαίσιο για τις πληροφορίες που το αφορούν και να διευκολύνονται οι αποφάσεις που αναφέρονται σε αυτό, από τη σύλληψή του και μετά. Βασική πλευρά του Βιμ είναι η συνεργασία μεταξύ διαφορετικών μερών που εμπλέκονται στις διάφορες φάσεις του κύκλου ζωής του κτηρίου ώστε να εισάγουν, να εξάγουν, να ενημερώνουν ή να τροποποιούν πληροφορίες του BIM. Το BIM είναι ψηφιακή παράσταση κτηρίου που βασίζεται σε ανοικτά πρότυπα διαλειτουργικότητας.» (δίνεται στο: Ιωάννης Βενέρης, *Πληροφορική και Αρχιτεκτονική*, Εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2011, σελ. 1505)

⁴⁹ Richard Garber, *Optimization Stories: The Impact of Building Information Modeling on Contemporary Design Practice*, στο *Architectural Design, Closing The Gap: Information Models in Contemporary Design Practice*, Vol 79, Wiley, London 2009, σελ. 9 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

απόδοσης και της αποδοτικότητας, αλλά και με κόστη και προσομοιώσεις υλικών και συστημάτων, τα οποία επαναπροσδιορίζονται ψηφιακά μέχρι να βελτιστοποιηθούν. Αποφεύγεται έτσι η εύρεση λαθών ή συγκρούσεων στο εργοτάξιο κάτι που θα μπορούσε να οδηγήσει σε τεράστιες δαπάνες χρόνου και προϋπολογισμού.

Η δυνατότητα μεταφοράς των ψηφιακών δεδομένων απευθείας στους κατασκευαστές, λύνει επίσης όλα τα προβλήματα κατανόησης και ερμηνείας των σχεδίων, προσφέροντας την μηδενική απόκλιση από το ψηφιακό μοντέλο στην υλοποιημένη μορφή (zero tolerance in design and construction). *Τα ψηφιακά μοντέλα πληροφορίας είναι ήδη εκ φύσεως ρεαλιστικά. Καθώς σχεδιάζονται ακριβείς τρισδιάστατες ιδέες, ελέγχονται, επανεξετάζονται και βελτιστοποιούνται στον εικονικό χώρο, χρειάζεται μόνο να μεταφραστούν, ή αλλιώς να πραγματοποιηθούν, σε φυσικά μέσα.*⁵⁰

Αν η κατασκευή μπορεί τώρα να ελέγχεται από ένα μοναδικό μοντέλο, μια βιβλιοθήκη δεδομένων η οποία μπορεί να δέχεται πληροφορίες από μια ποικιλία πηγών, βελτιστοποιήσεις στο σχεδιασμό σαν αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω, μπορούν να λαμβάνονται υπόψη και να μελετώνται από τα πρώτα στάδια της ανάπτυξης του σχεδίου. Η ικανότητα αντίδρασης σε υλικούς και γεωμετρικούς παράγοντες καθώς και η μέριμνα για θέματα χρόνου όπως η αλληλουχία στην κατασκευή, επιτρέπουν στους σχεδιαστές να δώσουν δυνητικά γνωρίσματα τα οποία αποφέρουν την μορφή.⁵¹

*Η μελέτη σχεδιασμού γίνεται και μελέτη κατασκευής κτηρίου. Και ο σχεδιαστής – αρχιτέκτων καλείται να σκεφτεί όλο και περισσότερο ως κατασκευαστής. Το ομοίωμα BIM τον προκαλεί και τον υποστηρίζει σε αυτόν τον νέο ρόλο.*⁵²

⁵⁰ Richard Garber, *Optimization Stories: The Impact of Building Information Modeling on Contemporary Design Practice*, στο Architectural Design, Closing The Gap: Information Models in Contemporary Design Practice, Vol 79, Wiley, London 2009, σελ. 13 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

⁵¹ Richard Garber, *Optimization Stories: The Impact of Building Information Modeling on Contemporary Design Practice*, στο Architectural Design, Closing The Gap: Information Models in Contemporary Design Practice, Vol 79, Wiley, London 2009, σελ. 11 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

⁵² Ιωάννης Βενέρης, *Πληροφορική και Αρχιτεκτονική*, Εκδ. Τζιόλα, Αθήνα 2011, σελ 1522

4.2 BIM και Μορφογένεση

Ο διαχωρισμός ανάμεσα στα σχεδιαστικά προγράμματα που χρησιμοποιούνται για πειραματισμούς πάνω στη μορφή και τα βιομηχανικά προγράμματα που χρησιμοποιούνται πρωτίστως για την παραγωγή οδηγεί σε νέους προβληματισμούς.

Η Cynthia Ottchen⁵³ εντοπίζει τις δύο διαφορετικές προσεγγίσεις που συναντώνται στο σύγχρονο ψηφιακό σχεδιασμό. Από τη μία πλευρά έχουμε το πρόσφατο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον προς προγραμματιστικές μεθοδολογίες σχεδιασμού και παραγωγής μορφής, δηλαδή διαδικασίες *computational design*, όπως γενετικούς και εξελικτικούς αλγόριθμους βασισμένους στο βιολογικό μοντέλο (μορφογένεση) η οποία προτείνει την έννοια της λειτουργικής καταλληλότητας ως το κριτήριο για την επιλογή της μορφής. Από την άλλη, έχουμε την περαιτέρω ανάπτυξη εξειδικευμένων προγραμμάτων δομικής και περιβαλλοντικής προσομοίωσης και ανάλυσης, και την παραμετροποίηση των ιδιοτήτων των υλικών, καθώς και των συστατικών της κατασκευής και της συναρμολόγησης. Τέτοια προγράμματα εξυψώνουν τα πρακτικά, τεχνολογικά δεδομένα σε μια νέα προνομιά κατάσταση: μπορούν να παραχθούν και να ληφθούν υπόψη νωρίτερα κατά τη δημιουργική διαδικασία ώστε να αποτελέσουν ένα σημαντικό και αναπόσπαστο κομμάτι της σύλληψης του σχεδίου.⁵⁴

Δεν τίθεται ζήτημα σχετικά με ποια προσέγγιση είναι καλύτερη. Οι προβληματισμοί εντοπίζονται στον δυνατότητες βελτίωσης της κάθε προσέγγισης ώστε να ικανοποιούν περισσότερες απαιτήσεις και στους δύο τομείς, του σχεδιασμού και της κατασκευής. Είναι δυνατό κατά τον αλγοριθμικό και μορφογενετικό σχεδιασμό να λαμβάνεται σε μεγαλύτερο βαθμό υπόψη ο τρόπος κατασκευής και η υλικότητα; Μπορεί ο ψηφιακός σχεδιασμός του τύπου των BIM να προσφέρει τη δημιουργικότητα, την ελευθερία και καινοτομία στην παραγωγή της μορφής με τον τρόπο που αυτό επιτυγχάνεται με τις τεχνικές *computational design*; Είναι μήπως δυνατό και επιθυμητό αυτές οι δύο προσεγγίσεις να συνδυαστούν ανοίγοντας νέους ορίζοντες στην αρχιτεκτονική έκφραση και δημιουργία;

⁵³ Η Cynthia Ottchen, πρώην επικεφαλής Έρευνας και Καινοτομίας στο αρχιτεκτονικό γραφείο OMA.

⁵⁴ Cynthia Ottchen, *The Future of Information Modeling and the End of Theory*, στο *Architectural Design, Closing The Gap: Information Models in Contemporary Design Practice*, Vol 79, Wiley, London 2009, σελ. 23 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

4.3 Αρχιτεκτονική γεωμετρία

Η γεωμετρία συνιστούσε πάντοτε μια από τις βασικές γνώσεις στην αρχιτεκτονική, καθώς η γλώσσα του σχεδιασμού είχε τη μορφή σχεδίων βασισμένων στους κανόνες της παραστατικής γεωμετρίας, αλλά συνήθως δεν αποτελούσε πεδίο έρευνας. Η άφιξη του ψηφιακού σχεδιασμού επέτρεψε στους σύγχρονους αρχιτέκτονες νέα επίπεδα πειραματισμού με τα ελεύθερα σχήματα, αλλάζοντας ριζικά την προηγούμενη κατάσταση.

Η άφιξη των numerically controlled μηχανημάτων και άλλων ψηφιακών τεχνολογιών παραγωγής στις βιομηχανίες αυτοκινήτων και αεροσκαφών είχε ως αποτέλεσμα ένα σημαντικό σώμα ερευνών πάνω στις κατάλληλες μαθηματικές αναπαραστάσεις και αλγοριθμικές λύσεις. Τα κύρια ευρήματα των ερευνών αυτών συντελούν τον πυρήνα των πιο σύγχρονων προγραμμάτων 3D σχεδιασμού. Αυτή την τεχνολογία εκμεταλλεύονται τα τελευταία χρόνια οι αρχιτέκτονες για εργασίες αρχιτεκτονικού σχεδιασμού και κατασκευής. Αυτό οδηγεί σε μια σειρά προβλημάτων, καθώς οι αρχιτεκτονικές εφαρμογές διαφέρουν από αυτές του αρχικού στόχου σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων της αισθητικής, της στατικής και των τεχνολογιών και τρόπων κατασκευής. Σύμφωνα με τον Helmut Pottmann, το πεδίο έρευνας που προκύπτει από την αντίστοιχη ανάπτυξη για αρχιτεκτονικές εφαρμογές θα μπορούσε να ονομαστεί «αρχιτεκτονική γεωμετρία».⁵⁵

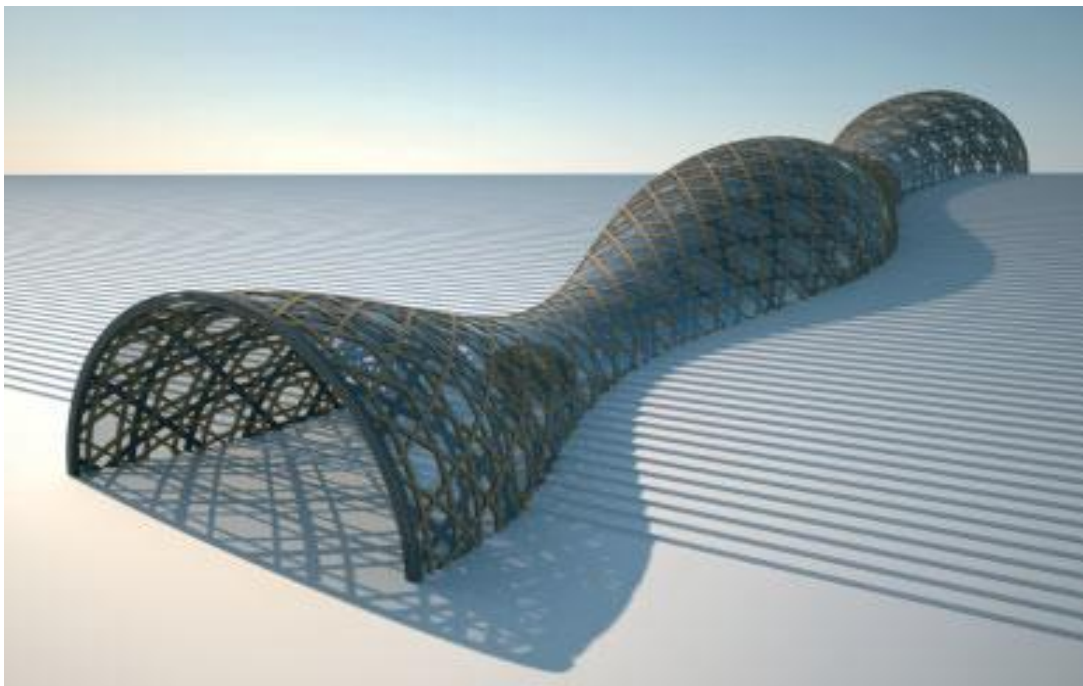
*Η έρευνα στην αρχιτεκτονική γεωμετρία σκοπεύει στην ανάπτυξη νέων εργαλείων για τη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων για την αρχιτεκτονική, τα οποία ικανοποιούν τις απαιτήσεις κατά τη δημιουργία του σχήματος της μορφής και τη φάση του σχεδιασμού, αλλά και ενσωματώνουν ήδη βασικές όψεις της πραγματικής κατασκευής, συμπεριλαμβανομένων των υλικών, των τεχνολογιών κατασκευής και των δομικών ιδιοτήτων. Έτσι η αρχιτεκτονική γεωμετρία επιτρέπει μια εξολοκλήρου ψηφιακή ροή εργασίας από το σχεδιασμό στην κατασκευή, ιδιαίτερα στις ιδιαίτερα σύνθετες γεωμετρίες.*⁵⁶

⁵⁵ Helmut Pottmann, *Architectural Geometry as Design Knowledge*, στο *Architectural Design, The New Structuralism*, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ. 74,

⁵⁶ Στο ίδιο, σελ. 74

Συχνά είναι απαραίτητο να μπαίνει μια φάση επανασχεδιασμού μετά τον αρχικό προσδιορισμό της γεωμετρίας η οποία αναφέρεται ως rationalization (λογικοποίηση) και επαναυπολογίζει τη γεωμετρία διαφοροποιώντας την το ελάχιστο δυνατό από το αρχικό σχέδιο και ταυτόχρονα ικανοποιώντας τις απαιτήσεις στους τύπους πλαισίων, στην ομοιομορφία της εξωτερικής επιφάνειας, στην αισθητική, στο κόστος παραγωγής και σε άλλους παράγοντες. *Η αρχιτεκτονική γεωμετρία ερευνά την ανάπτυξη αποτελεσματικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης και την ενσωμάτωσή τους σε φιλικά προς το χρήστη εργαλεία λογικοποίησης.*⁵⁷

Η τάση προς ένα υψηλό επίπεδο πολυπλοκότητας στη γεωμετρία έχει επίσης ισχυρές επιπτώσεις στην αρχιτεκτονική εκπαίδευση. *Η αποτελεσματική χρήση ισχυρών προγραμμάτων γεωμετρικού σχεδιασμού ήδη απαιτεί περαιτέρω γνώσεις γεωμετρίας από αυτές που παραδοσιακά διδάσκονται στα μαθήματα σχεδιασμού και παραστατικής γεωμετρίας και μια ακόμα βαθύτερη κατανόηση είναι απαραίτητη για την πλήρη εκμετάλλευση της τεχνολογίας του παραμετρικού σχεδιασμού.*⁵⁸



⁵⁷ Helmut Pottmann, *Architectural Geometry as Design Knowledge*, στο *Architectural Design, The New Structuralism*, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ. 74, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

⁵⁸ Στο ίδιο, σελ. 74

5. Ο ρόλος του αρχιτέκτονα στον ψηφιακό σχεδιασμό

Φαίνεται ότι οι νέες τεχνικές ψηφιακού σχεδιασμού τείνουν να αλλάξουν ριζικά τον τρόπο σκέψης των αρχιτεκτόνων και τη λογική με την οποία σχεδιάζουν και παράγουν αρχιτεκτονική.

*Ο νέος αρχιτέκτονας είναι ακόμα πλήρως υπεύθυνος για τη σχεδιαστική πρόθεση και χρειάζεται να είναι ικανός να δει τη συνολική εικόνα και να αποφασίσει ποιους παράγοντες να παραμετροποιήσει, να δώσει όρια στις παραμέτρους, να προσδιορίσει τη βαρύτητα του κάθε παράγοντα και να καθορίσει τη σειρά και τη μέθοδο της διαδικασίας του information modeling. Συνοψίζοντας, να φτιάξει μια στρατηγική για το ποιοι παράγοντες και μέθοδοι θα χρησιμοποιηθούν, πώς θα εφαρμοστούν ή παραχθούν και να κρίνει σε τι θα συμβάλλουν.*⁵⁹

Ο ρόλος του αρχιτέκτονα στο νέο αυτό παράδειγμα σχεδιασμού είναι λοιπόν να χαρτογραφεί την πορεία προς την λύση και να οργανώνει τις σχέσεις και τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στους εμπλεκόμενους παράγοντες και τις παραμέτρους. Μάλιστα όσο πολυπλοκότερη είναι η διατύπωση ενός αρχιτεκτονικού προβλήματος τόσο περισσότερο ο αρχιτέκτονας καλείται να αποδεσμευτεί από την αναπαραστατική απόδοση και να φαντάζεται περισσότερο το πρόβλημα με την μορφή σχέσεων και παραμέτρων.

*Αυτό που καταδεικνύει, όμως η αλλαγή που συντελείται είναι, ότι ο αρχιτέκτονας, δεν είναι ο “μικρός θεός” της εποχής του μοντερνισμού, αλλά αποτελεί μέρος μιας ευρύτερης σχεδιαστικής πλατφόρμας, στην οποία αποτελεί κομμάτι και χειριστής της ταυτόχρονα.*⁶⁰

Ο προβληματισμός ο οποίος θέλει η τεχνολογική εξέλιξη και οι ανοιχτές δομές σχεδιασμού να προμηνύουν τον θάνατο του αρχιτέκτονα, φαίνεται ότι αποδεικνύεται ελλιπής. Σίγουρα η επιστημονική και τεχνολογική αλλαγή που συντελείται προκαλεί τον

⁵⁹ Cynthia Ottchen, *The Future of Information Modeling and the End of Theory*, στο *Architectural Design, Closing The Gap: Information Models in Contemporary Design Practice*, Vol 79, Wiley, London 2009, σελ. 25 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

⁶⁰ Ιάσων Ζιρώ, *Από τον Προγραμματισμό των υπολογιστών στον Προγραμματισμό της ύλης*, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2015, σελ. 115

αρχιτέκτονα να αλλάξει ριζικά τον τρόπο που δρα και εξασκεί το επάγγελμά και τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζει, αλλά σε καμία περίπτωση δεν τον ακυρώνει.

*Ο αρχιτέκτονας βρίσκεται στη θέση του πλοηγού κατά τη διαδικασία αναζήτησης, και μέσα από αυτό γίνεται σαφές ότι όταν δεν υπάρχει εποπτεία του αποτελέσματος πρέπει να υπάρχει εποπτεία της ερώτησης.*⁶¹

6. Γεφυρώνοντας το χάσμα ανάμεσα στο σχεδιασμό και την κατασκευή

Η συμβολή των σύγχρονων τεχνικών ψηφιακού σχεδιασμού είναι καταλυτική στη γεφύρωση του κενού μεταξύ σχεδιασμού και κατασκευής, η οποία έχει πια επιτευχθεί με τρόπο μη αναστρέψιμο.⁶² Τις προηγούμενες δεκαετίες και την εποχή του μοντέρνου ο αρχιτέκτονας έφτιαχνε σχέδια, μακέτες και κείμενα για να περιγράψει κτήρια που δεν κατασκεύαζε ο ίδιος. Ο διαχωρισμός ανάμεσα στην θεωρία και την πράξη, τον σχεδιασμό και την κατασκευή, ενισχύεται από τη σχέση μεταξύ των αρχιτεκτόνων και αυτών που υλοποιούν τελικά τις σχεδιαστικές τους προτάσεις. Η ανά χειράς μεταφορά των σχεδίων και η ερμηνεία τους που γινόταν παλαιότερα, δημιουργούσε ρήγματα και κενά σε αυτό που θα έπρεπε να είναι μια συνεχής και αδιάσπαστη πορεία από την ανάπτυξη της ιδέας στην κατασκευαστική υλοποίηση με αμοιβαία ανατροφοδότηση και από τις δύο πλευρές μέχρι την κατάληξη στο τελικό αποτέλεσμα. Αυτά τα κενά τείνουν σήμερα να κλείσουν καθώς οι νέες δυνατότητες που κάνουν την εμφάνισή τους σε κάθε μία από τις δύο πλευρές του φάσματος απαιτούν την υποστήριξη η μία της άλλης: το *software* υψηλής ανάλυσης δεν θα ήταν απαραίτητο χωρίς σχεδιαστική φαντασία.⁶³

⁶¹ Ιάσων Ζιρώ, *Από τον Προγραμματισμό των υπολογιστών στον Προγραμματισμό της ύλης*, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2015, σελ. 110

⁶² Bob Sheil, *Design through Making: an Introduction*, στο *Architectural Design, Design through Making*, Vol 75, Wiley, London 2005, σελ. 7, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

⁶³ Richard Garber, *Optimization Stories: The Impact of Building Information Modeling on Contemporary Design Practice*, στο *Architectural Design, Closing The Gap: Information Models in Contemporary Design Practice*, Vol 79, Wiley, London 2009, σελ. 8 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

Σήμερα έχουμε πια ένα εικονικό εργοτάξιο με βασικότερο μέλος τον αρχιτέκτονα ο οποίος καλείται να πάρει ήδη από τη διαδικασία του σχεδιασμού αποφάσεις που αφορούν τα υλικά, τη συνδεσμολογία και την επίλυση της κατασκευής. Ότι σχεδιάζει ο αρχιτέκτονας στο τρισδιάστατο περιβάλλον του υπολογιστή μπορεί να κατασκευαστεί αυτούσιο με όλα τα στοιχεία που το απαρτίζουν και δεν τίθενται πια προβλήματα ερμηνείας από τα διαφορετικά μέλη που συμμετέχουν στην κατασκευή.

Οι αρχιτέκτονες πάντοτε σχεδίαζαν αυτά που μπορούσαν να χτίσουν και έχτιζαν αυτά που μπορούσαν να σχεδιάσουν, μια αμοιβαία σχέση αναπαράστασης και κατασκευής η οποία παραμένει και στην ψηφιακή εποχή. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι νέα λογισμικά computational σχεδιασμού ή μοντέλα ανάλυσης και προσομοίωσης, σε συνδυασμό με τα CNC και ρομποτικά μηχανήματα για την κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών, προστίθενται στα εργαλεία του αρχιτέκτονα και επεκτείνουν κατά πολύ τα όρια του τι μπορεί να σχεδιαστεί αλλά και να κατασκευαστεί. Αποτέλεσμα είναι η μεγαλύτερη και πιο άμεση συμμετοχή του σχεδιαστή στην κατασκευή.

Όπως αναφέρει ο Branko Kolarevic⁶⁴:

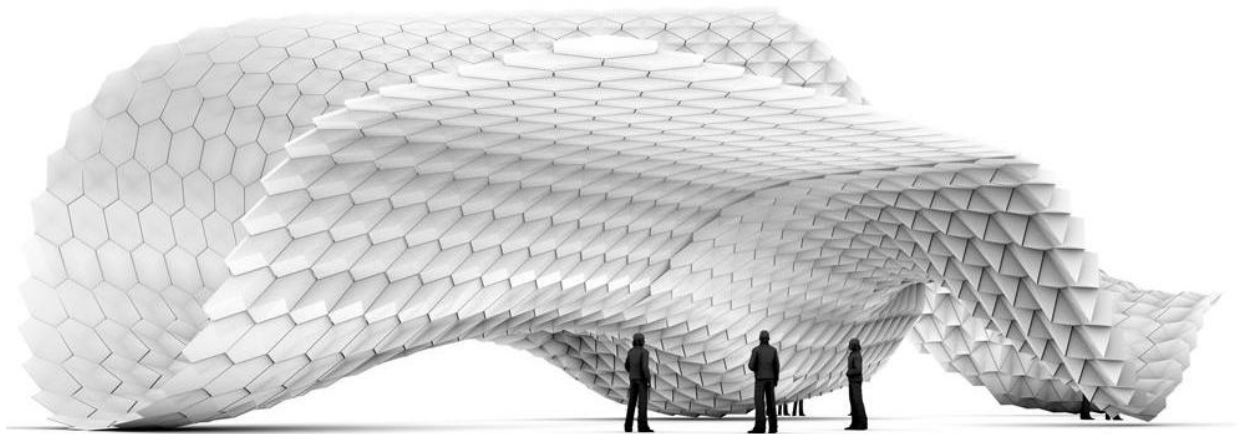
«Αυτή η πρωτόγνωρη δυνατότητα παραγωγής κατασκευαστικής πληροφορίας απευθείας από την σχεδιαστική πληροφορία, και όχι οι περίπλοκες καμπύλες μορφές, είναι αυτή που καθορίζει την πιο βαθιά πτυχή της σύγχρονης αρχιτεκτονικής (the most profound aspect of much of the contemporary architecture).»⁶⁵

⁶⁴ Ο Branko Kolarevic είναι καθηγητής στο Πανεπιστήμιο Calgary του Καναδά, στο τμήμα Περιβαλλοντικού Σχεδιασμού

⁶⁵ Branko Kolarevic, *Information Master Builders*, στο *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, Spon Press, New York 2003, σελ. 57 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

Β. Μέρος:

Digital Fabrication



B. Μέρος: Digital Fabrication

Ο τρόπος κατασκευής απαιτεί ιδιαίτερη μελέτη από πλευράς του αρχιτέκτονα κατά τον σχεδιασμό, κατά το computational design κυρίως, καθώς μπορεί ο ίδιος να αποτελεί παράμετρο του σχεδιασμού, και μάλιστα πολύ σημαντική. Η διευκόλυνση που παρέχουν οι νέες τεχνολογίες για τη χρήση σύνθετων γεωμετριών στην αρχιτεκτονική δεν αρκεί από μόνη της, καθώς απαιτείται από την πλευρά του σχεδιαστή μεγάλη έρευνα, κατανόηση της συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων των υλικών, γνώση των νέων τεχνολογιών κατασκευής και των δυνατοτήτων τους και φαντασία για την πλήρη πρόβλεψη της κατασκευής, έτσι ώστε να δύναται να πραγματοποιηθεί με το βέλτιστο τρόπο το εκάστοτε παραμετροποιημένο μοντέλο.



Το ICD/ITKE Research Pavilion του 2011 αποτελεί παράδειγμα σύμπραξης του μορφογενετικού σχεδιασμού και της ρομποτικής κατασκευής (robotic fabrication).

1. Digital Materiality

Φαίνεται ότι στις σύγχρονες προσεγγίσεις ο ψηφιακός σχεδιασμός βασίζεται σε μοντέλα ενημερωμένα με δεδομένα από το περιβάλλον και η σχεδιαστική διαδικασία περιέχει τα μέσα της παραγωγής.

Ο απώτερος σκοπός είναι το τελικό παραγόμενο αρχιτεκτονικό σύνολο, να μπορεί να προβλεφθεί, υπολογιστεί και να βελτιστοποιηθεί, ήδη μέσα από το προγραμματιστικό περιβάλλον, μέσω «informed design models» σε άμεση συνέργεια με το περιβάλλον και το υλικό, ώστε, αν χρησιμοποιηθεί ένας 3d scanner στο τελικό μοντέλο, να συμπίπτει με το ψηφιακό μοντέλο.⁶⁶ Η παραπάνω θέση αποτελεί μάλιστα μια νέα πρόκληση στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, δηλαδή την επίτευξη της μηδενικής απόκλισης (zero tolerance) μεταξύ «design» και «fabrication».⁶⁷

Οι Fabio Gramazio και Mathias Kohler χρησιμοποιούν την έννοια «digital materiality», ή σε ελεύθερη μετάφραση «ψηφιακή υλικότητα», αναφερόμενοι σε μια *νέα έκφραση της αρχιτεκτονικής* η οποία εμπεριέχει τη *συνδιαλλαγή μεταξύ υλικών και ψηφιακών διαδικασιών στους τομείς του σχεδιασμού και της κατασκευής*.⁶⁸ Η σύμπραξη αυτών των δύο στοιχείων γίνεται δυνατή μέσω τεχνικών που προέρχονται από τον χώρο της ψηφιακής κατασκευής, οι οποίες επιτρέπουν στον αρχιτέκτονα να έχει απόλυτο έλεγχο της παραγωγικής διαδικασίας μέσω σχεδιαστικών δεδομένων. Επομένως *το υλικό και η υλικότητα, εμπλουτίζεται με πληροφορία (material becomes informed)*. Αυτή η νέα κατάσταση αλλάζει ριζικά τις δυνατότητες και την επαγγελματική θέση του αρχιτέκτονα.

Σύμφωνα με τον Kohler και τον Gramazio⁶⁹ η ψηφιακή υλικότητα εκφράζεται μέσα από τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

⁶⁶ Ιάσων Ζιρώ, *Από τον Προγραμματισμό των υπολογιστών στον Προγραμματισμό της ύλης*, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2015, σελ. 57

⁶⁷ Bob Sheil, *Introduction*, στο *Architectural Design: High Definition: Zero tolerance in design and production*, Wiley, London 2014

⁶⁸ Fabio Gramazio, Matthias Kohler, *Digital Materiality in Architecture*, Lars Müller Publishers, Baden 2008, σελ. 7 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

⁶⁹ Fabio Gramazio, Matthias Kohler, *Digital Materiality in Architecture*, Lars Müller Publishers, Baden 2008, σελ. 7-11

- Οδηγεί σε μία νέα έκφραση και μία νέα αίσθηση για την αρχιτεκτονική, η οποία, χάρη στη σύμπραξη ψηφιακών και υλικών τεχνικών και μεθόδων, χαρακτηρίζεται από μεγάλη ακρίβεια, λεπτομέρεια και πλαστικότητα και πολλά επίπεδα διαμόρφωσης, έχοντας όμως μια φυσική όψη.

- Χαρακτηρίζεται από την ενσωμάτωση της κατασκευής και του προγραμματισμού στην σχεδιαστική διαδικασία. Σταματά να υφίσταται ο μοντέρνος διαχωρισμός στις διαδικασίες παραγωγής και κατασκευής της μορφής, κάτι που σχετίζεται με την μετατόπιση στο ενδιαφέρον από το αντικείμενο αυτό καθ' αυτό, στην διαδικασία παραγωγής του αντικειμένου.

«We are no longer designing the form that will ultimately be produced, but the production process itself. Design and execution are no longer phases in a temporal sequence- design sketches do not need to be converted into execution drawings anymore».

Δηλαδή επισημαίνεται η πάγια θέση που χαρακτηρίζει το νέο παράδειγμα, ότι η διαδικασία σχεδιασμού ενσωματώνει την ιδέα και την γνώση που απαιτείται για την κατασκευή ήδη από την στιγμή της σύλληψης της ιδέας.

- Ο ρομποτικός βραχίονας αποτελεί το σημείο σύγκλισης της ψηφιακής πραγματικότητας (digital reality) του υπολογιστή και της υλικής πραγματικότητας (material reality) της αρχιτεκτονικής που κατασκευάζεται. Αποτελεί ένα εργαλείο παραγωγής το οποίο δεν είναι κατασκευασμένο για μια συγκεκριμένη εργασία, αλλά προορίζεται για πολλές διαφορετικές εφαρμογές. Το παραπάνω πλεονέκτημα ουσιαστικά δίνει την δυνατότητα στους αρχιτέκτονες να αναπτύξουν ο καθένας εντελώς διαφορετικές μεθόδους κατασκευής που οδηγούν σε διαφορετικές μορφές αρχιτεκτονικής έκφρασης.

- Το παράδειγμα της «digital materiality», αποτελεί μέσο εμπλουτισμού και διαφοροποίησης της αρχιτεκτονικής πρακτικής, καθώς γίνεται δυνατός ο σχεδιασμός μεγάλου αριθμού στοιχείων με διαφορετικούς τρόπους χάρη στα ψηφιακά μέσα. Αυτά τα σχέδια θα ήταν όμως άχρηστα χωρίς τις τεχνικές ψηφιακής κατασκευής.

- Μέσω της «digital materiality» γίνεται η μετάβαση από τον σχεδιασμό υλικών μορφών στον σχεδιασμό υλικών διαδικασιών (material processes). Ουσιαστικά μεταβαίνουμε από τον ορισμό γεωμετριών στον ορισμό σχέσεων και διαδικασιών οι οποίες εμπεριέχονται στην αρχιτεκτονική και αναδύονται ως τη φυσική της

έκφραση. Το μοντέλο το οποίο αναδύεται, αφορά τον σχεδιασμό με παραμέτρους, περιορισμούς, σχέσεις και βαθμούς ελευθερίας.

Η αλλαγή στη σκέψη που συνοδεύει την «ψηφιακή υλικότητα» ανοίγει νέους δρόμους αρχιτεκτονικής ελευθερίας και καινοτομίας. Με αυτόν τον τρόπο αλλάζει σύμφωνα με τον Gramazio και τον Kohler η φύση της αρχιτεκτονικής, ο ρόλος και ο τρόπος δουλειάς του αρχιτέκτονα.

2. From mass production to mass customization

Η εξέλιξη που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια στην κατασκευή, και η οποία γίνεται δυνατή χάρη στις νέες ψηφιακές μεθόδους κατασκευής περιγράφεται ως μια στροφή από τη μαζική παραγωγή (mass production) προς τη μαζική εξατομίκευση (mass customization).

Η Neri Oxman⁷⁰ περιγράφει συνοπτικά την εξέλιξη από τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής του τεχνίτη στην βιομηχανοποίηση και τη σύγχρονη στροφή προς την παραγωγή μοναδικών αντικειμένων μαζικά.

Πριν την βιομηχανική επανάσταση οι τεχνικές παραγωγής στο χέρι ήταν άφθονες. Η τέχνη καθόριζε τα πάντα. Ο τεχνίτης είχε μια βαθιά γνώση των υλικών και τη διαίσθηση για το πώς διαφοροποιούνται οι ιδιότητές τους ανάλογα με τα δομικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά τους. Αλλά με την εμφάνιση της βιομηχανικής επανάστασης θριάμβευσε η μηχανή πάνω από τον τεχνίτη. Τα μηχανήματα χρησιμοποιήθηκαν για να τυποποιήσουν τα πάντα. Ότι κατασκευάζαμε, τα προϊόντα, τα κτήρια, όλα καθορίζονταν από αυτή τη βιομηχανική τυποποίηση. Σήμερα όμως, οι ψηφιακές τεχνολογίες, όπως για παράδειγμα το additive manufacturing, επιτρέπουν στην τέχνη και τη βιομηχανία να συνδυαστούν αρμονικά. Η τέχνη συναντάει τη μηχανή στην γρήγορη κατασκευή, παράγουμε τέχνη με τη βοήθεια της τεχνολογίας.⁷¹

⁷⁰ Αρχιτέκτονας και ιδρυτής της ομάδας Mediated Matter στο Media Lab του MIT

⁷¹ Emilie Chalcraft, *How 3D printing will change architecture and construction*, Dezeen, 2013, από: www.dezeen.com/2013/05/21/3d-printing-architecture-print-shift (μτφ. Κ. Φλωράκη)

Το 1959 ο Konrad Wachsmann⁷² αντιλαμβάνονταν τις αρχές της βιομηχανοποίησης ως ταυτόσημες με αυτές της μαζικής παραγωγής. Τα πλεονεκτήματα του αυτοματισμού, όπως η οικονομία και η αποδοτικότητα, γίνονται αντιληπτά μόνο μέσω της μεγάλης ποσότητας στην παραγωγή, μια αρχή η οποία διαφοροποιεί την βιομηχανία από την βιοτεχνία. Για να εγγραφεί την επιτυχημένη συναρμολόγηση των μαζικά παραγόμενων αντικειμένων, ο Wachsmann εισήγαγε ένα σύστημα τυποποίησης για το συντονισμό, το οποίο καθορίζει τις ιδιότητες και την ποιότητα των προϊόντων. Αυτή η βιομηχανική λογική εξασφάλιζε σταθερή και επαναλαμβανόμενη ποιότητα, αλλά την ίδια στιγμή περιόριζε την ποικιλία του τι είναι δυνατό να κατασκευαστεί. Οι αποκλίσεις από τον εξιδανικευμένο τύπο απορρίπτονταν και δε λαμβάνονταν ως πιθανές λύσεις.

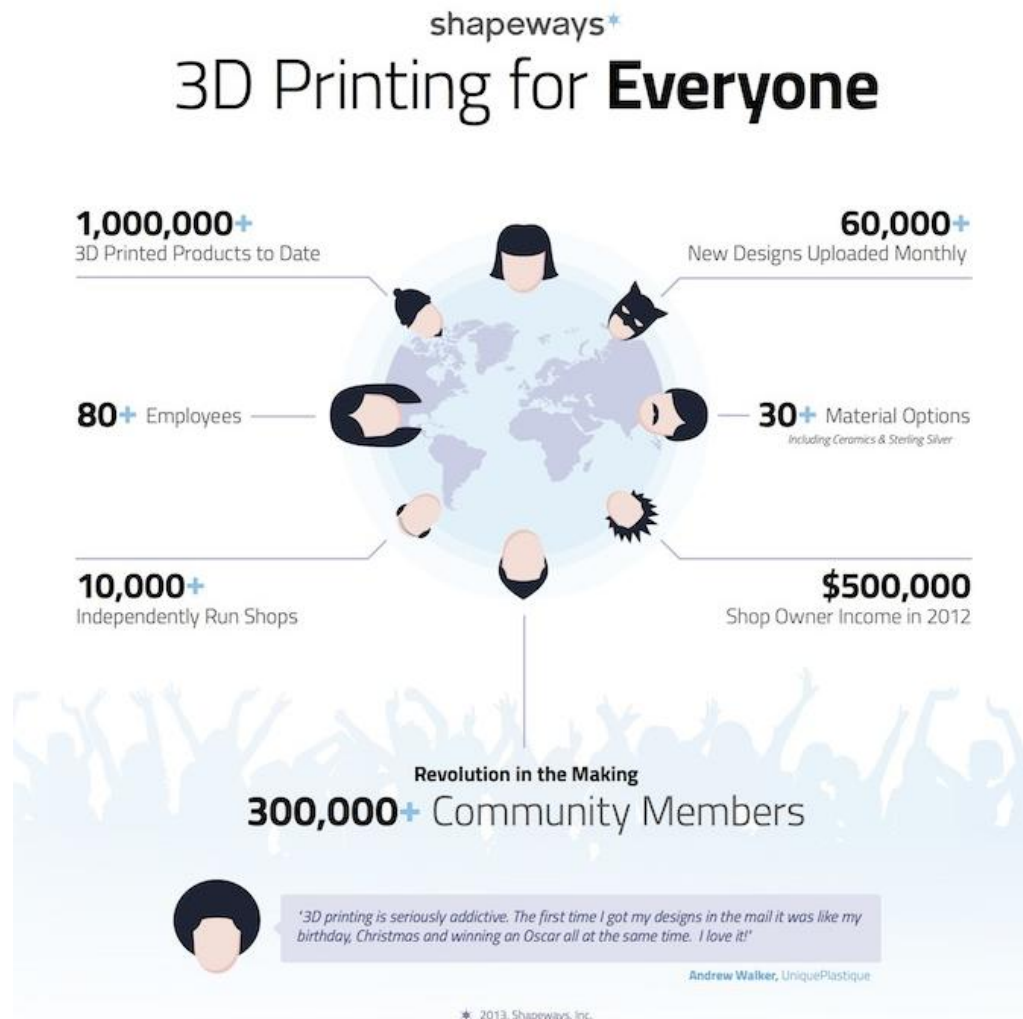
*Η συνεχής ψηφιακή ροή εργασίας αποτελείται από παρόμοια στοιχεία συντονισμού αλλά προσαρμοσμένα στις νέες τεχνολογικές δυνατότητες. Το αυθεντικό μέσα σε μια τέτοια διαδικασία είναι ο αλγόριθμος παραγωγής της μορφής, ο οποίος προσφέρει τα δεδομένα τα οποία αρχικοποιούνται ως κώδικας για επεξεργασία ή κοπή με laser, 3D εκτύπωση, rendering ή σχεδίαση.*⁷³ Καθώς η μορφή διαχωρίζεται από τις υποβόσκουσες αρχές που οργανώνουν τις σχέσεις των διαφορετικών στοιχείων που συγκροτούν τη δομή της, είναι δυνατό να παραχθεί μια ποικιλία διαφορετικών μορφών όσο οι σχέσεις μεταξύ των στοιχείων τους παραμένουν σωστές. Τα ψηφιακά ελεγχόμενα μηχανήματα, τα οποία επεξεργάζονται την ύλη και κατασκευάζουν δομές σύμφωνα με το δοσμένο κάθε φορά κώδικα, αποτελούν τα εργαλεία που επιτρέπουν την απελευθέρωση από τις μαζικές γραμμές παραγωγής και την παραγωγή μοναδικών και σύνθετων δομών. Η ελευθερία, η ποικιλία και η εξατομίκευση δεν συμβιβάζονται για χάρη της οικονομίας χρόνου και χρήματος και της αποδοτικότητας.

Η δυνατότητα να παράγονται μαζικά προϊόντα κατά παραγγελία, έχει φέρει αλλαγές όχι μόνο στον κλάδο της αρχιτεκτονικής, αλλά και σε πολλές άλλες βιομηχανίες οι οποίες επιδιώκουν την προσφορά εξατομικευμένων προϊόντων ανάλογα με τις ανάγκες των καταναλωτών τους.

⁷² Γερμανός αρχιτέκτονας της εποχής του μοντερνισμού, γνωστός για τη συμβολή του στην μαζική παραγωγή οικοδομικών στοιχείων.

⁷³ Klaus Bollinger, Manfred Grohmann, Oliver Tessmann, *Structured becoming: Evolutionary Processes in Design Engineering*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ. 38, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

Ειδικότερα η ικανότητα να παράγονται μαζικά διαφορετικά στοιχεία κατά παραγγελία, χωρίς ουσιώδη αύξηση στον απαιτούμενο χρόνο, τα υλικά και το κόστος θεωρείται ένα από τα επαναστατικά πλεονεκτήματα της προσθετικής κατασκευαστικής μεθόδου (*additive manufacturing*).⁷⁴



Η online εταιρία Shapeways δίνει τη δυνατότητα στους πελάτες της να διαλέξουν κάποιο από τα έτοιμα μοντέλα, εξατομικεύοντας τα χαρακτηριστικά του, είτε να δώσουν κάποιο δικό τους τρισδιάστατο σχέδιο, και να τους αποσταλεί το φυσικό αντικείμενο εκτυπωμένο με 3D printing.

⁷⁴ Skylar Tibbits, *4D Printing: Multi-Material Shape Change*, στο *Architectural Design: High Definition: Zero tolerance in design and production*, Wiley, London 2014 σελ. 118

3. Digital fabrication

3.1 Ορισμός

Η κατασκευή ξεκίνησε να αποτελεί σημαντική παράμετρο που πρέπει να λαμβάνει υπόψη ο αρχιτέκτονας κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού από την στιγμή της εισαγωγής του digital fabrication, της ψηφιακής κατασκευής. Το fabrication σαν έννοια διαφέρει από αυτήν της παραδοσιακής κατασκευής καθώς αναφέρεται στην δημιουργία ενός αντικειμένου από ακατέργαστα ή ελαφρώς κατεργασμένα υλικά, αντί για τη σύνθεσή του από έτοιμα συναρμολογούμενα κομμάτια.⁷⁵ Στην περίπτωση της ψηφιακής κατασκευής (digital fabrication) αναφέρεται επίσης στην άμεση πραγματοποίηση του φυσικού μοντέλου, όπως προκύπτει απευθείας από τη μελέτη στο υπολογιστικό περιβάλλον. Η ψηφιακή κατασκευή είναι ουσιαστικά ένας τρόπος παραγωγής ο οποίος χρησιμοποιεί ψηφιακά δεδομένα για να ελέγξει τη διαδικασία κατασκευής. Υπάγεται στον τομέα του *computer-aided design* και *manufacturing* (CAD/CAM), και βασίζεται καθοδηγούμενα μέσω υπολογιστή εργαλεία για την κατασκευή ή κοπή μερών.⁷⁶

Η εισαγωγή του *digital fabrication* πυροδότησε μια επανάσταση σε πολλές τεχνολογικές απόψεις, αλλά συνεπάγεται επίσης μια ανάγκη για ριζική αλλαγή στην ειδίκευση και τον τρόπο δουλειάς των σχεδιαστών και των κατασκευαστών.⁷⁷ Απαιτείται πια επίγνωση του τρόπου και των δυνατοτήτων κατασκευής από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού της μορφής και η δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου και των δεδομένων εισόδου που λαμβάνει το μηχάνημα κατασκευής. Ακόμα είναι απαραίτητη η ανάπτυξη δεξιοτήτων χειρισμού των μηχανημάτων, είτε από τους αρχιτέκτονες είτε από συνεργαζόμενη ειδικότητα τεχνικών και ικανότητες πειραματισμού με τις δυνατότητές τους. Η παραγωγή σχεδίων και η κατασκευή κτηρίων είναι πια αχώριστες και αλληλοεξαρτώμενες διαδικασίες.⁷⁸

⁷⁵ Σύμφωνα με τον ορισμό της ιστοσελίδας: www.businessdictionary.com/definition/fabrication.html

⁷⁶ Lisa Iwamoto, *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*. Princeton Architectural Press, New York 2009, σελ. 5. (μτφ. Κ. Φλωράκη)

⁷⁷ Bob Sheil, *Design through Making: an Introduction*, στο *Architectural Design, Design through Making*, Vol 75, Wiley, London 2005, σελ. 7, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

⁷⁸ Στο ίδιο, σελ. 11, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

3.2 Τεχνικές παραγωγής

Οι τεχνικές παραγωγής που υπάγονται στο digital fabrication, οι τρόποι δηλαδή με τους οποίους λειτουργούν τα ψηφιακά ελεγχόμενα μηχανήματα και δημιουργούν τα πρωτογενή δομικά μέλη των κατασκευών, χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

Additive manufacturing ή 3D Printing:

Η διαδικασία κατά την οποία δημιουργείται ένα τρισδιάστατο αντικείμενο με τη διαδοχική εναπόθεση υλικού σε στρώσεις έως ότου ολοκληρωθεί το προσχεδιασμένο σχήμα. Ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται και τον τρόπο παραγωγής διακρίνουμε της εξής κατηγορίες:

- Τεχνικές που χρησιμοποιούν extruder (εξωθητή):

Η ιδιότητα των θερμοπλαστικών υλικών να γίνονται εύπλαστα όταν θερμανθούν πάνω από μία θερμοκρασία και να σκληρύνουν ξανά όταν κρυώσουν αποτελεί τη βάση για την τεχνική *Fused Deposition Modeling (FDM)* ή *Fused Filament Fabrication (FFF)*. Το θερμοπλαστικό υλικό σε μορφή νήματος θερμαίνεται μέσα στον extruder και στη συνέχεια εναποθετείται σε διαδοχικές στρώσεις πάνω σε μία βάση εκτύπωσης μέχρι να ολοκληρωθεί το προσχεδιασμένο αντικείμενο. Παρόμοιας λογικής είναι και η τεχνική του *Direct Ink Writing (DWI)*, όπου το υλικό που χρησιμοποιείται βρίσκεται σε μορφή πάστας, τοποθετείται ημίυγρο και στη συνέχεια στερεοποιείται μόνο με τη βοήθεια αέρα. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ποικίλουν από κεραμικά έως σιλικόνες και βιο-υλικά.

- Τεχνικές που χρησιμοποιούν υγρές ρητίνες και υπεριώδης ακτίνες:

Η τεχνική *Stereolithography (SLA)* χρησιμοποιεί ως υλικό εκτύπωσης μια πολυμερής ρητίνη η οποία σκληραίνει όταν εκτίθεται στο φως. Εδώ μια ακτίνα laser με υπεριώδες φως αντανάκλαται από έναν καθρέφτη κάτω από τη βάση του υλικού κινούμενη και στερεοποιώντας το υλικό στα καθορισμένα σημεία. Η επιφάνεια εκτύπωσης κατεβαίνει κάθε φορά κατά το πάχος μίας στρώσης προκειμένου να εκτυπωθεί η επόμενη. Παρόμοια είναι η τεχνική *Digital Light Processing (DLP)*, με τη διαφορά ότι ο καθρέφτης έχει αφαιρεθεί και το ρόλο του έχει πάρει ένας προτζέκτορας με μικρο καθρέφτες, οποίος προβάλλει μια διατομή του επιθυμητού αντικείμενου δημιουργώντας ταυτόχρονα μια ολόκληρη στρώση υλικού. Η τεχνική *Multi-Jet Modeling (MJM)* από την άλλη, αντιγράφει τον τρόπο λειτουργίας

εκτυπωτών μελανιού, χρησιμοποιώντας αντί για μελάνι υγρό πλαστικό UV curable. Το εναποθέτει σε μορφή σταγόνων, δημιουργώντας στρώσεις τις οποίες στη συνέχεια σκληραίνει με ακτίνες laser, μια τεχνική η οποία επιτρέπει στο μοντέλο να περιλαμβάνει ποικίλα χρώματα και υλικά.

- Τεχνικές που χρησιμοποιούν πούδρα υλικού:

Κατά την τεχνική αυτή μια δεξαμενή γεμίζεται από πούδρα υλικού και ένα laser υψηλής ισχύος αποτυπώνει τη διατομή του αντικειμένου στην επιφάνεια. Η πούδρα συγχωνεύεται στα σημεία αυτά δημιουργώντας μια στρώση και στη συνέχεια το πιάτο ανεβαίνει, τοποθετείται νέα στρώση πούδρας και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Η τεχνική *Selective Laser Sintering (SLS)* χρησιμοποιεί πούδρα από πλαστικό, μέταλλο, γυαλί ή κεραμικό υλικό ενώ η *Selective Laser Melting (SLM)* χρησιμοποιεί πούδρα μετάλλου την οποία λιώνει με laser πολύ υψηλής ισχύος. Αντίστοιχα στη *3DP* η δεξαμενή περιέχει πούδρα γύψου ή αμύλου και η κεφαλή ψεκάζει μικρή ποσότητα συνδετικού υλικού.

- Τεχνικές με στρώσεις φύλλων:

Κατά τη διαδικασία του *Laminated Object Manufacturing (LOM)* φύλλα από χαρτί, πλαστικό ή μέταλλο κολλούν σε όλη την επιφάνειά τους μεταξύ τους σε στρώσεις και στη συνέχεια κάθε στρώση κόβεται στο απαιτούμενο σχήμα με laser ή κοπίδι. Αντίστοιχη είναι και η διαδικασία του *Selective Deposition Lamination (SDL)* όπου οι στρώσεις ενισχυμένες με κόλλα στα απαραίτητα σημεία ενώνονται διαδοχικά με ένα θερμαινόμενο ρολό και κόβονται με μόλις κολληθούν στην προηγούμενη με ένα laser cutter.

Subtractive manufacturing:

Η διαδικασία κατά την οποία από έναν αρχικό συμπαγή όγκο ή επιφάνεια υλικού, αφαιρούνται διαδοχικά τμήματα, έως ότου προκύψει το επιθυμητό προσχεδιασμένο αντικείμενο. Ανάλογα με το είδος της διαδικασίας που ακολουθείται χωρίζεται και αυτή η τεχνική σε υποκατηγορίες.

- Cutting:

Αποτελεί τη διαδικασία κατά την οποία αφαιρείται υλικό από μία επιφάνεια, είτε αυτή χαράσσεται ή είτε κόβεται σε επιμέρους τμήματα , ανάλογα με το

προσχεδιασμένο σχήμα. Οι διαδικασίες και τα μέσα κοπής διαφέρουν ανάλογα με το υλικό και το είδος του εργαλείου.

Η τεχνική η οποία είναι πιο διαδεδομένη στον τομέα της αρχιτεκτονικής είναι αυτή του laser cutting, που χρησιμοποιεί laser υψηλής ισχύος για να λιώσει, να κάψει ή να εξαχνώσει το αφαιρούμενο υλικό. Τα περισσότερα laser cutters είναι μικρά, τυπικά δουλεύουν με υλικά μοντελισμού όπως χαρτόνι, ακρυλικά και μορισανίδες, και είναι εύκολα στη χρήση τους με οικεία προγράμματα όπως το AutoCAD και το Adobe Illustrator. Αρχικά χρησιμοποιούνταν από τους αρχιτέκτονες για ακριβείς μακέτες, σκαλιστές όψεις, δομικά μέλη και οικοδομικές λεπτομέρειες. Σταδιακά τα laser cutters έκαναν την μετάβαση από την κατασκευή μοντέλων στην εκτέλεση κατασκευών πραγματικής κλίμακας. *Αργότερα συνδυάζοντας αυτά τα μηχανήματα με τα εργαλεία ψηφιακού σχεδιασμού που παρέχουν την δυνατότητα παραγωγής ακανόνιστων μορφών καθώς και εντολές που μπορούν να αναπαράγουν με ακρίβεια αυτές τις μορφές με μια σειρά τομών, οι αρχιτέκτονες ανακάλυψαν πώς το sectioning ως αναπαραστατική μέθοδος μπορεί να γίνει μια τεχνική κατασκευής.*⁷⁹

Άλλα είδη κοψίματος είναι τα: plasma cutting, water jet cutting, wire cutting, και άλλα.

- Milling:

Αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία από έναν αρχικό όγκο αφαιρείται σταδιακά υλικό έως ότου προκύψει το τελικό αντικείμενο. Η αφαίρεση του υλικού πραγματοποιείται με τη χρήση ενός περιστρεφόμενου τρυπανιού ή μύλου ενώ τα συνηθέστερα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διαδικασία είναι διάφορα είδη ξύλου, συμπιεσμένος αφρός, πλαστικά, μέταλλα και κερι.

- Drilling:

Αποτελεί παρόμοια τεχνική με αυτή του milling καθώς ένα περιστρεφόμενο μεταλλικό τρυπάνι χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει τρύπες σε αντίστοιχα υλικά, κινούμενο όμως αυτή τη φορά παράλληλα στον άξονα.

⁷⁹ Lisa Iwamoto, *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*. Princeton Architectural Press, New York 2009, σελ. 13 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

Molding ή Casting:

Κατά την παραδοσιακή αυτή διαδικασία δημιουργείται ένα καλούπι με το αρνητικό σχήμα του αντικειμένου προς κατασκευή. Στη συνέχεια εγχέεται μέσα σε αυτό το επιθυμητό υλικό σε υγρή μορφή και αφού κρυώσει και σκληρύνει, αφαιρείται από το καλούπι. Κάποια από τα είδη που χρησιμοποιούνται στην σύγχρονη αρχιτεκτονική είναι τα Injection molding, blow molding, matrix molding, compression molding και άλλα ενώ τα υλικά ποικίλουν, από θερμοπλαστικά, ελαστομερή και κράματα μέχρι γυαλί, μέταλλο και κεραμικά.

Evolutionary Fabrication:

Κατά το evolutionary fabrication συστατικά μέρη, υλικά ή μονάδες αυτό-οργανώνονται σε διαμορφώσεις ανάλογα με τη δυναμική του συστήματος που τα περιλαμβάνει και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Ουσιαστικά το σύστημα, δρώντας σαν ζωντανός οργανισμός, αποφασίζει μόνο του τα πιθανά παραγόμενα αποτελέσματα. Παράδειγμα αυτής της τεχνικής αποτελεί η έρευνα που εκπονεί το Self assembly Lab του MIT (βλ. κεφάλαιο Γ.5).

Vacuum Forming:

Αποτελεί τη διαδικασία κατά την οποία μία επιφάνεια θερμοπλαστικού υλικού παίρνει ένα επιθυμητό, προσχεδιασμένο σχήμα. Χρησιμοποιείται ένα καλούπι του επιθυμητού όγκου, πάνω στο οποίο τοποθετείται η επιφάνεια, ενώ στη συνέχεια, με την δημιουργία κενού αέρος, η επιφάνεια αποκτά τη μορφή του καλουπιού.

3D Scanning:

Αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία ένα μηχάνημα σαρώνει ένα αντικείμενο, λαμβάνοντας στοιχεία για το σχήμα, την υφή και το χρώμα του.

3.3 Τύποι ψηφιακών κατασκευών

Σύμφωνα με τη Lisa Iwamoto⁸⁰, οι αρχιτεκτονικές κατασκευές μεγάλης κλίμακας που δημιουργήθηκαν με ψηφιακά μέσα κατασκευής κατά τα τελευταία 20 χρόνια μπορούν να ταξινομηθούν σε πέντε μεγάλες κατηγορίες τεχνικών, αν και συχνά μια κατασκευή μπορεί να υπάγεται σε πάνω από μία κατηγορία, χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό μεθόδων. Αναφέρεται δηλαδή στους τρόπους με τους οποίους συνδέονται και διαρθρώνονται τα βασικά μέρη που παράγονται από ψηφιακά μηχανήματα για να δημιουργήσουν συστήματα και δομές.

Sectioning

Κατά την τεχνική του sectioning (από την αγγλική λέξη section = τομή) αντί να κατασκευάζεται η ίδια η επιφάνεια, χρησιμοποιούνται μια σειρά από προφίλ, των οποίων οι ακμές ακολουθούν την γεωμετρία της επιθυμητής επιφάνειας. Οι σχετικές εντολές που περιέχουν τα προγράμματα επεξεργασίας τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων μπορούν σχεδόν στιγμιαία να παράξουν αυτόματα τις παράλληλες τομές ενός αντικειμένου ανά ορισμένα διαστήματα, κάτι που κάνει αυτή τη μέθοδο εξαιρετικά απλή στην εφαρμογή της σήμερα.

Για την δημιουργία των συστατικών μελών, των προφίλ, χρησιμοποιείται συνήθως η τεχνική του subtractive manufacturing, με ψηφιακά μηχανήματα κοπής δυόμιση ή τριών διευθύνσεων όπως laser cutters, cnc δρομολογητές, water-jet και plasma cutters. Η μέθοδος αυτή συνεργάζεται άριστα με τα συμβατικά οικοδομικά υλικά, τα οποία έρχονται συνήθως σε φύλλα. Στην περίπτωση του sectioning οι τεχνικές που αναδύθηκαν περιλαμβάνουν το sectional ribbing (με τις τομές-προφίλ την μία μετά την άλλη να σχηματίζουν ραβδώσεις), το lamination ή parallel stacking (την τοποθέτηση των προφίλ διαδοχικά χωρίς κενά ώστε να επιτυγχάνεται μια στιβαρότητα) και το waffle-grid (με την πλέξη παράλληλων και κάθετων προφίλ).

Οι αρχιτέκτονες ξεκίνησαν να πειραματίζονται πάνω στην συναρμολόγηση τμημάτων τομής, ως μια μέθοδο η οποία περιέχει την δυνατότητα ταυτόχρονης παραγωγής της επιφάνειας και της δομής. Ακόμα με την χρήση του sectioning για να υποδηλωθεί μια

⁸⁰ Lisa Iwamoto, *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*. Princeton Architectural Press, New York 2009, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

επιφάνεια μέσα από υπονοούμενες οπτικές συνέχειες επιτυγχάνεται επίσης ο συνδυασμός και η εξύψωση της σχέσης της μορφής με την υλικότητα.

Tessellating

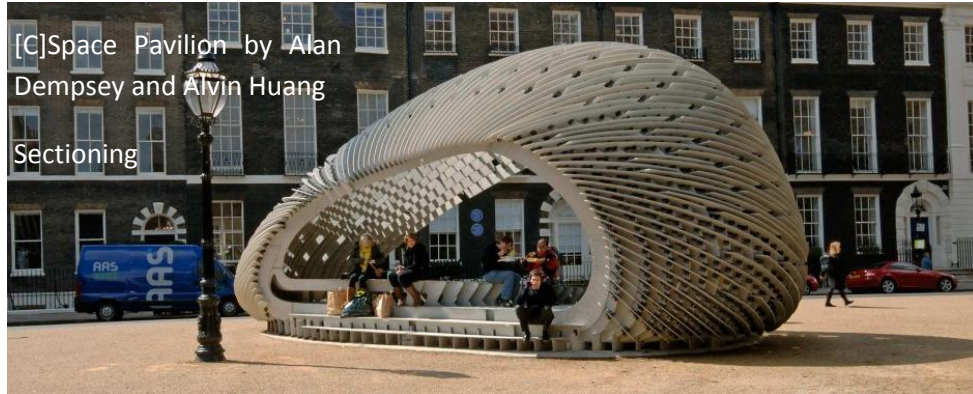
Το tessellation (ψηφίδωση) είναι μια συλλογή στοιχείων οποιουδήποτε σχήματος, τα οποία ταιριάζουν μεταξύ τους σε σφιχτό σχηματισμό χωρίς κενά, για το σχηματισμό μιας επιφάνειας. Στην αρχιτεκτονική ο όρος περιγράφει τα μοτίβα με κεραμικά πλακίδια αλλά και τα ψηφιακά μοντέλα με πλέγματα. Παρότι τα μωσαϊκά, οι τοιχοποιίες, τα βιτρώ και οι όψεις με πανέλα μπορούν όλα να θεωρηθούν ως tessellations, ο όρος αναφέρεται επίσης, στον ψηφιακό σχεδιασμό, στην προσέγγιση καμπύλων επιφανειών με πλέγματα επίπεδων πολυγωνικών σχημάτων. Οι καμπύλες επιφάνειες είναι κατά κανόνα πολύ πιο περίπλοκες και δαπανηρές στην κατασκευή τους από τις επίπεδες, οπότε το tessellating έρχεται να δώσει μια εύκολη και οικονομική λύση.

Η σύγχρονη έρευνα πάνω στο tessellating βασίζεται στη χρήση νέων παραμετρικών προγραμμάτων, τα οποία προσφέρουν τη δυνατότητα σύνδεσης των επιμέρους μελών με τη συνολική δομή μέσω μιας σειράς καθορισμένων γεωμετρικών σχέσεων. Οι ψηφιακές τεχνολογίες σχεδιασμού παρέχουν επίσης δυνατότητες για μεγαλύτερη ποικιλία και διαμόρφωση του γεωμετρικού πλέγματος. Όσον αφορά τις πολυγωνικές επιφάνειες, χάρη στις τεχνικές του digital fabrication και το mass customization, οι αρχιτέκτονες μπορούν, αντί να βασίζονται στα υπάρχοντα στο ευρύ εμπόριο, να κόβουν κομμάτια σε πολλά και διαφορετικά σχήματα και μεγέθη ώστε να προσαρμόζονται στις ανάγκες τους.

Για τη σύνδεση των επιμέρους στοιχείων χρησιμοποιούνται συνήθως ρομπότ κατασκευής, τα οποία έχουν την ιδιαιτερότητα να είναι ικανά να χειρίζονται, να περιστρέφουν, να τρυπάνε και να τοποθετούν διάφορα οικοδομικά στοιχεία αλλά και να τα συναρμολογούν, ανάλογα πάντα με το πώς έχουν προγραμματιστεί.

Folding

Το folding (αναδίπλωση) μετατρέπει μια επίπεδη επιφάνεια σε μία τρισδιάστατη. Είναι μια ισχυρή τεχνική για τη δημιουργία μορφών και δομών με γεωμετρία. Όταν τα επίπεδα υλικά αναδιπλώνονται αποκτούν στιβαρότητα και ακαμψία, μπορούν να καλύψουν χωρικές περιοχές και συχνά να έχουν αυτοϋποστήριξη. Το folding είναι



οικονομικό όσον αφορά τα υλικά, οπτικά ελκυστικό και αποτελεσματικό σε πολλές κλίμακες. Επιτρέπει την ανάδυση νέων χώρων και περιοχών χωρίς να χάνονται τα έμφυτα χαρακτηριστικά της επιφάνειας που αναδιπλώνεται.

Η διαδικασία της αναδίπλωσης υλικού είναι ένα γενεσιουργό σχεδιαστικό εργαλείο το οποίο έχει κερδίσει μια σημαντική θέση ανάμεσα στις διαδικασίες ψηφιακής κατασκευής, καθώς φιλοδοξεί να δημιουργήσει ρευστότητα και πολυλειτουργικότητα με μια συνεχή επιφάνεια. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στα ψηφιακά εργαλεία, τα οποία επιτρέπουν λεπτούς και πολύπλοκους γεωμετρικές μετασχηματισμούς.

Το folding βασίζεται στα χαρακτηριστικά του υλικού που χρησιμοποιείται καθώς αυτό προσφέρει μια νέα οπτική, δομική και χωρική διάσταση. Σχετικά με την επιλογή των υλικών, αυτή περιορίζεται στα εύκαμπτα, τα οποία έχουν την ιδιότητα να λυγίζουν χωρίς να σπάνε. Υλικά που έχουν την ίδια χρήση και σε άλλες βιομηχανίες, όπως τα φύλλα μετάλλου, το χοντρό χαρτί και το ύφασμα, είναι αυτά που συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται και στην αρχιτεκτονική.

Contouring

Τα οικοδομικά υλικά τυπικά παράγονται σε φύλλα, παρότι έρχονται σε μια ποικιλία από πάχη, στην ουσία είναι επιφάνειες δύο διαστάσεων. Το contouring είναι μια τεχνική που αναδιαμορφώνει αυτές τις επιφάνειες και δημιουργεί τρισδιάστατο ανάγλυφο με την αφαίρεση διαδοχικών στρώσεων υλικού. Ανήκει έτσι στις subtractive διαδικασίες, αφορά τη σμίλευση μοτίβων. Το digital fabrication επέτρεψε στους αρχιτέκτονες να ξεπεράσουν την ιδέα ότι η σμίλευση ανήκει αποκλειστικά στην παραδοσιακή χειρωνακτική τεχνική. Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται συμπεριλαμβάνουν CNC δρομολογητές και μύλους, οι οποίοι χρησιμοποιούν δεδομένα από ψηφιακά μοντέλα για τη συστηματική αφαίρεση υλικού κατά στρώσεις.

Το contouring είναι από τη φύση του μια σπάταλη τεχνική όσον αφορά τα υλικά και τον χρόνο, μιας και αφαιρείται υλικό σε μεγάλες ποσότητες. Ως αποτέλεσμα, χρησιμοποιείται με συνέπεια από τους αρχιτέκτονες για την ανάδειξη σχετικά συνηθισμένων οικοδομικών υλικών.

Forming

Καθώς η διαδικασία του forming (ή διαμόρφωσης, σχηματισμού) προσφέρει μια αυτόματη οικονομία στα μέσα, με την δημιουργία πολλών κομματιών από έναν μικρό

αριθμό καλουπιών και σχημάτων, είναι αναμενόμενο η πιο συνήθης χρήση της να είναι η μαζική παραγωγή προϊόντων. Στα κτήρια αυτή αφορά κυρίως τα αρχιτεκτονικά στοιχεία και εξαρτήματα όπως τα πανέλα των όψεων, τα στοιχεία των κουφωμάτων κ.λπ. Στην κατασκευή το forming χρησιμοποιείται επίσης σε μεγαλύτερες κλίμακες με λιγότερη επαναληψιμότητα, για στοιχεία όπως προκατασκευασμένα πανέλα, δομικά μέλη και διακοσμητικά στοιχεία, αλλά και για επιτόπου κατασκευή πλακών, τοίχων ακόμα και ολόκληρου του κτηρίου.

Το digital fabrication δημιούργησε νέες δυνατότητες για τη σύλληψη και τον σχεδιασμό τεχνικών forming, μιας και παράγει με οικονομία και απόδοση προσαρμόσιμα και μη τυποποιημένα καλούπια. Τεχνικές παραγωγής που υπάγονται στο forming είναι πέρα από το molding και το casting (χύτευση), το vacuum και το thermo forming.



Η στέγη του Prototype Pavilion, MOS το 2005 κατασκευάστηκε με τεχνική Forming.

4. Τα υλικά στην κατασκευή

Τα υλικά ήταν ανέκαθεν άρρηκτα συνδεδεμένα με την αρχιτεκτονική μιας και αποτελούν σημαντικό κομμάτι της διαδικασίας του σχεδιασμού αλλά και της όψης του τελικού αποτελέσματος. Ταυτόχρονα καθορίζουν τις μεθόδους οικοδόμησης και κατασκευής, καθώς θέτουν τις δυνατότητες και τους περιορισμούς ανάλογα με τις ιδιότητές και τα χαρακτηριστικά τους. Παραδοσιακά, τα υλικά επιλέγονταν βάση της διαθεσιμότητάς τους στην εκάστοτε περιοχή, της χρησιμότητάς τους, είτε και βάση της εμφάνισης και των διακοσμητικών χαρακτηριστικών τους. Για πολλά χρόνια οι αρχιτέκτονες έπρεπε να σχεδιάζουν με τις ιδιότητες ενός πρότυπου υλικού, όπως το ξύλο ή η πέτρα, και να δέχονται τους περιορισμούς που αυτό έβαζε.

4.1 Τα υλικά την περίοδο του Μοντέρνου

Κατά την περίοδο του μοντέρνου ο σχεδιασμός συνδέθηκε με τις έννοιες του σκελετού και της πλήρωσης προσανατολίζοντας την κατασκευή σε υλικά που θα μπορούσαν να ανταποκριθούν στις εκφραστικές απαιτήσεις αυτής της σύλληψης ενώ η ταξινόμηση των υλικών σε φέροντα και πλήρωσης τα διαμόρφωσε σε τυποποιημένα προϊόντα βιομηχανικής παραγωγής. *Η βιομηχανία κατασκευής βασίζεται σε ξεχωριστές λύσεις για συγκεκριμένες λειτουργίες. Η διαφοροποίηση επιτυγχάνεται με ποικιλία στα μεγέθη παρά στις ουσίες, και τυπικά παράγεται μαζικά, όχι κατά παραγγελία. Στον τεχνητό κόσμο, όσον αφορά τα υλικά, ένα είδος ταιριάζει παντού.*⁸¹

Στην κυρίαρχη εικόνα όπου ο αρχιτέκτονας είναι αυτός που δίνει τη μορφή, ο τρόπος δόμησης αποφασίζεται ύστερα από επανεξέταση και λογικοποίηση (rationalization) που λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις κατασκευής, ενώ η επιλογή και εφαρμογή των υλικών εξαρτώνται από τις κατασκευαστικές λύσεις. *Από αυτή τη σκοπιά η μορφή είναι το πρώτο αντικείμενο της παραγωγής, το οποίο οδηγεί ανάλογα τους τρόπους δόμησης και υλικών, έχουμε δηλαδή την ιεραρχία «μορφή-δομή-υλικά». Ένα διαφορετικό σχήμα είναι αυτό που δίνει προτεραιότητα στη λειτουργία της δόμησης, ως κύριο οδηγό της*

⁸¹ Neri Oxman, *Structuring Materiality: Design Fabrication of Heterogeneous Materials*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ. 80, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

έκφρασης της μορφής⁸². Αυτή η λογική υποστηρίζεται κυρίως από έργα μεγάλης μηχανικής πολυπλοκότητας όπως γέφυρες και ουρανοξύστες.

4.2 Συμβατικά και έξυπνα υλικά

Μετά το μοντέρνο, ο τρόπος αντίληψης και διαχείρισης της υλικότητας αλλάζει. Η δημιουργία του υλικού αρχίζει να ενσωματώνεται στη σχεδιαστική διαδικασία και να αποτελεί μέρος του συνθετικού προβλήματος. Με την εισαγωγή των υλικών που παράγονται μέσα από τις νέες ψηφιακές τεχνολογίες παραγωγής οι αρχιτέκτονες δεν χρειάζεται να περιορίζονται πια σε βιομηχανικά υλικά με ορισμένες διαστάσεις και προδιαγραφές αλλά είναι δυνατό να προσδιορίζονται κατά το σχεδιασμό τα επιθυμητά χαρακτηριστικά και ιδιότητες και να διερευνάται ποιο υλικό θα μπορέσει καλύτερα να τα εξασφαλίσει.

Τα έξυπνα υλικά έρχονται να αποτελέσουν μια πολύ σημαντική προσθήκη στις επιλογές του αρχιτέκτονα και να του παρέχουν ακόμα περισσότερες και νέες δυνατότητες. *Με τον όρο «έξυπνο» ή «ευφυές», περιγράφεται κάτι το οποίο λειτουργεί σαν να έχει ανθρώπινη νοημοσύνη. Τα ευφυή υλικά αντιδρούν στις αλλαγές στο περιβάλλον τους από μόνα τους, δηλαδή η αντίδραση είναι έμφυτη στα υλικά και όχι αποτέλεσμα ηλεκτρονικών εντολών ή μηχανισμών.*⁸³ Μπορούν να τροποποιήσουν τη συμπεριφορά τους με δεδομένο και ελεγχόμενο τρόπο, με αλλαγές στον όγκο, στο χρώμα, τη δυσκαμψία ή άλλα μηχανικά χαρακτηριστικά που μπορούν να συμβούν ως απόκριση σε κάποια αλλαγή στη θερμοκρασία, την πίεση, το μαγνητικό πεδίο κ.α. Οι ιδιότητές τους είναι ευμετάβλητες και έτσι ανταποκρίνονται στις παροδικές ανάγκες.

Πολλές φορές οι βασικοί τύποι έξυπνων υλικών δε χρησιμοποιούνται μόνοι τους αλλά σε συνδυασμό με άλλα υλικά για να δημιουργήσουν συσκευές, εξαρτήματα ή συστήματα που εξυπηρετούν πιο σύνθετες λειτουργίες. Δημιουργούν έτσι τις λεγόμενες «έξυπνες δομές» (smart structures) ή «έξυπνα συστήματα» (smart systems).

⁸² Στο ίδιο, σελ. 80

⁸³ Dr Diane Talbot, *Smart Materials*, resource for the Institute of Materials, Minerals and Mining, 2003, σελ. 1

Τα καθιερωμένα υλικά είναι στατικά και σαν στόχο έχουν να αντέχουν στις δυνάμεις. Τα έξυπνα υλικά είναι δυναμικά δηλαδή συμπεριφέρονται σε απόκριση των ενεργειακών πεδίων. Αυτός είναι ένας σημαντικός διαχωρισμός μια και τα κανονικά μέσα αναπαράστασης του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού έχουν εκχωρήσει το προνόμιο στα στατικά υλικά: η κάτοψη, η τομή και οι όψεις της ορθογώνιας προβολής σταθεροποιούν σε τόπο και σε θέαση τα φυσικά στοιχεία ενός κτηρίου.⁸⁴

Τα συμβατικά υλικά δεν είχαν ποτέ ιδιαίτερα προβλήματα ένταξης στις συμβατικές κατασκευές, για τον απλό λόγο ότι ο τρόπος εφαρμογής τους είναι συγκεκριμένος και είναι ελάχιστες οι περιπτώσεις στις οποίες χρειάζεται κάποιος πρωτοποριακός τρόπος εγκατάστασής τους, ή είναι πολύ συγκεκριμένοι οι λόγοι για τους οποίους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν (π.χ. περιβαλλοντικοί παράγοντες).

Όσον αφορά τα έξυπνα υλικά όμως, λόγω των πολύπλοκων τεχνολογικά μικροσυστημάτων τους, προκύπτει μια ιδιαιτερότητα στην εφαρμογή τους ώστε να προσαρμοστούν αποτελεσματικά αυτά τα συστήματα στην κάθε περίπτωση. Επιπλέον, όπως ένα έξυπνο υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διαφορετικό σκοπό σε ένα παιχνίδι απ' ότι στην ιατρική, έτσι και στην αρχιτεκτονική μπορεί να έχει πολλαπλούς τρόπους χρήσης ανά περίπτωση, άρα και διαφορετικό τρόπο εγκατάστασης και εφαρμογής, σύμφωνα πάντα με τις ανάγκες και τα ζητούμενα. Έτσι προκύπτει η μέγιστη εξατομίκευση (customization), ως απόρροια του διαφορετικού τρόπου σχεδιασμού και υλοποίησης κάθε φορά.

Εάν γίνει ένα ζουμ στα έξυπνα υλικά και τον τρόπο κατασκευής τους, ως ξεχωριστές οντότητες και όχι ως μέρος του κτηρίου, γίνεται κατανοητό ότι τα ίδια απαιτούν ιδιαίτερη μελέτη εφαρμογής. Από αυτό το ζουμ στη μικροκλίμακα γίνεται κατανοητό πως, όταν μεγεθυνθούν αρκετά ώστε να τα αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο μάτι, τείνουν να μοιάζουν περισσότερο τα ίδια ως παραμετροποιημένες κατασκευές, παρά ως υλικά. Η λέξη «υλικό» φέρνει στο νου κάτι ενιαίο, που έχει συνολική υπόσταση, ενώ αντίθετα η δομή είναι ένα σύνολο από πολλαπλά κομμάτια που συλλειτουργούν για τη δημιουργία μιας ολότητας. Η δυνατότητα όμως για τον έλεγχο της μικροκλίμακας που δίνεται, επιτρέπει τον χειρισμό τμημάτων τέτοιου μεγέθους όπως θα χειριζόμασταν τα

⁸⁴ Αθηνά Σταυρίδου, Δημήτρης Παπαδόπουλος, *Εννοιολογικός προσδιορισμός παραμετρικών ιδιοτήτων αρχιτεκτονικών κατασκευαστικών στοιχείων και δομικών υλικών*, υπευθ. Δημήτρης Παπαλεξόπουλος, Ε.Μ.Π., ΠΕΒΕ 2007, σελ. 98

μέρη μιας κανονικής κατασκευής. Υπό αυτές τις συνθήκες μπορεί κανείς να μιλήσει με όρους συνδεσμολογίας, καθορισμού παραμέτρων, σχεδιασμού, μορφολογίας και φυσικά συνολικής συμπεριφοράς, ανταπόκρισης και αποτελέσματος, όπως ακριβώς και με τα παραμετροποιημένα μοντέλα, καταλήγοντας στην ίδια λογική με τον *computational* σχεδιασμό, αλλά σε εντελώς διαφορετική κλίμακα.⁸⁵

Η σημερινή τεχνολογική επανάσταση γίνεται στο πολύ μικρό. Η έρευνα αιχμής ασχολείται με τις μοριακές ιδιότητες των υλικών. Οι τομείς που περιλαμβάνει εκτείνονται από την διάγνωση της σεισμικής συμπεριφοράς, την αναχαίτιση υλικών καταστροφών, την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων παραδοσιακών υλικών έως την διάδραση με τον χρήστη για την δημιουργία μεταβαλλόμενων – ευφυών περιβαλλόντων διαβίωσης με την χρήση έξυπνων υλικών.⁸⁶

Με τη χρήση ισχυρών υπολογιστικών συστημάτων και ψηφιακών μέσων κατασκευής είναι ακόμα δυνατή η δημιουργία νέων υλικών με ιδιότητες οι οποίες δεν έχουν ξαναυπάρξει παλιότερα. Για παράδειγμα πολύ ισχυρό αλλά και ταυτόχρονα ιδιαίτερα ελαφρύ μέταλλο, το οποίο συστέλλεται όταν θερμαίνεται και διαστέλλεται όταν κρυώνει.⁸⁷ Παραδοσιακά οι μηχανικοί θα χρησιμοποιούσαν μια σειρά κινητήρων, γραναζιών και ενεργοποιητών, τα οποία κινδυνεύουν να αστοχήσουν και καταναλώνουν πολλή ενέργεια. Όλα αυτά τα προβλήματα λύνονται με την εκτύπωση μιας δομής η οποία διαστέλλεται και συστέλλεται σε μια συγκεκριμένη τιμή ή δεν μεταβάλλεται καθόλου.⁸⁸

Καθώς η αρχιτεκτονική αρχίζει να ασχολείται με την παραγωγή και την κατασκευή, οι σχεδιαστές οδηγούνται να ανακτήσουν τον κεντρικό ρόλο του συνολικού επιβλέποντα

⁸⁵ Γεσθημανή Ρουμπάνη, Καλλιρρόη Ταρουδάκη, *Computational Design / Έξυπνα Υλικά: η παράλληλη προσέγγιση, διάλεξη*, ΕΜΠ, Αθήνα 2013, σελ. 82

⁸⁶ Αθηνά Σταυρίδου, Δημήτρης Παπαδόπουλος, *Εννοιολογικός προσδιορισμός παραμετρικών ιδιοτήτων αρχιτεκτονικών κατασκευαστικών στοιχείων και δομικών υλικών*, υπευθ. Δημήτρης Παπαλεξόπουλος, Ε.Μ.Π., ΠΕΒΕ 2007, σελ. 83

⁸⁷ Αυτό το υλικό έχει ήδη δημιουργηθεί από το Lawrence Livermore National Laboratory και έχει εφαρμογές στους δορυφόρους, των οποίων τα όργανα εκτίθενται σε ιδιαίτερα αντίξοες συνθήκες.

⁸⁸ Jordan Brandt, *3D Printing And The Complexity Of Compiling Matter*, Forbes, 2 Σεπτεμβρίου 2015, από: www.forbes.com/sites/valleyvoices/2015/09/02/3d-printing-and-the-complexity-of-compiling-matter/ (μτφ. Κ. Φλωράκη)

της διαδικασίας συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου των τεχνολογιών των υλικών. Η ιδέα του σχεδιασμού με τα υλικά ενοποιεί τις έννοιες της δόμησης, της συμπεριφοράς των υλικών και της ψηφιακής κατασκευής.⁸⁹ Η μελέτη των υλικών και του ρόλου τους στον σχεδιασμό, ψηφιακό και μη, αποτελεί πια ένα βασικό θέμα επαγγελματικού αλλά και ακαδημαϊκού ενδιαφέροντος. Η έρευνα και η κατανόηση της λειτουργίας των υλικών στον σχεδιασμό, η ικανότητα σχεδιασμού με υλικά, καθώς και οι τεχνικές χειρισμού των αναπαραστάσεων υλικών δομών μέσω ψηφιακών εφαρμογών, ανήκουν στις βασικές γνώσεις αρχιτεκτονικής αλλά αποτελούν ταυτόχρονα και ένα από τα πιο σύγχρονα και καυτά πεδία έρευνας.⁹⁰

4.3 Με έμπνευση από τη φύση

Μια κατηγορία έξυπνων υλικών, με δυνατότητα μεταβολής και προσαρμογής στο περιβάλλον τους, αποτελούν τα υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από τεχνητή «ανισοτροπία», μια ιδιότητα η οποία συναντάται στις περισσότερες φυσικές δομές. Η αρχιτέκτονας Neri Oxman μελετάει τα τελευταία χρόνια τις ιδιότητες τέτοιου είδους υλικών και τους τρόπους με τους οποίους σχεδιάζονται - προγραμματίζονται και κατασκευάζονται.

Η φύση από πάντα ενέπνεε τους ανθρώπους με την ικανότητά της να προσφέρει λύσεις οι οποίες έχουν τις μεγαλύτερες επιδόσεις με τη χρήση των ελάχιστων δυνατών πόρων. Τα δομικά υλικά της φύσης σχηματίζονται από οργανικές και ανόργανες συνθέσεις οι οποίες σχηματίζουν μικροδομές φτιαγμένες να προσαρμόζονται σε εξωτερικούς περιορισμούς. Καθώς αυτά τα υλικά αποτελούνται από ίνες, η πολυλειτουργικότητά τους συνήθως εμφανίζεται στη νανο- μικροκλίμακα, και η απόδοση επιτυγχάνεται με στρατηγικές δομής και κατανομής του υλικού. Το υλικό συγκεντρώνεται στα σημεία που απαιτείται μεγάλη αντοχή και αραιώνει στα υπόλοιπα.

⁸⁹ Rivka Oxman, Robert Oxman, *The New Structuralism, Introduction*, στο *Architectural Design, The New Structuralism*, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ. 20, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

⁹⁰ Στο ίδιο, σελ. 20

Αυτή η ιδιότητα της φύσης να διαφοροποιεί τις ιδιότητες του υλικού βελτιώνοντας τοπικά περιοχές που το απαιτούν ονομάζεται ανισοτροπία.⁹¹

Με αυτόν τον τρόπο το σχήμα του στοιχείου καθορίζεται τελικά από τις δυνάμεις που του ασκούνται. Στην φύση, η ιεραρχία «μορφή-δομή-υλικό» αντιστρέφεται καθώς το υλικό καθορίζει τη δομή, η οποία με τη σειρά της καθορίζει τη μορφή των φυσικά σχεδιασμένων ειδών.

Σε σχέση με τη φύση, ο τρόπος που παραδοσιακά χρησιμοποιεί τα υλικά ο άνθρωπος είναι λιγότερο αποτελεσματικός και περισσότερο σπάταλος. Σήμερα η αρχιτεκτονική κουλτούρα κατευθύνεται προς μία αλλαγή καθώς οι σχεδιαστές αναζητούν τη μίμηση της φύσης στους τρόπους δόμησης σχεδιάζοντας συνθετικά πολυλειτουργικά υλικά που συναγωνίζονται την ατελείωτη σχεδιαστική διαδικασία της εξέλιξης.⁹²

Η Neri Oxman περιγράφει τον Σχεδιασμό Μεταβλητών Ιδιοτήτων (Variable Property Design) ως μια σχεδιαστική προσέγγιση και μεθοδολογία με την οποία παράγονται συνθέσεις υλικών με διαφορετικές ιδιότητες, σχεδιασμένες να ανταποκρίνονται σε ποικίλες και συνεχώς μεταλλασσόμενες λειτουργικές απαιτήσεις. Η ιδιότητα που προκύπτει από την δυνατότητα στρατηγικού ελέγχου της πυκνότητας και της κατεύθυνσης του υλικού κατά την δημιουργία της μορφής, καλείται «συνθετική ανισοτροπία». Σε αυτή την προσέγγιση το υλικό προηγείται του σχήματος, ενώ οι θεωρητικές και τεχνικές βάσεις της ονομάζονται «material-based design computation».⁹³

Για την εφαρμογή του σχεδιασμού μεταβλητών ιδιοτήτων απαιτείται μια τεχνολογία η οποία να επιτρέπει την συνεχή και ομοιόμορφη μεταβολή ιδιοτήτων του υλικού όπως η αντοχή, η ακαμψία, η πυκνότητα και η ελαστικότητα, ανά την επιφάνεια ή τον όγκο ενός στοιχείου. Η Κατασκευή Μεταβλητών Ιδιοτήτων (Variable Property Fabrication) σκοπεύει στην εισαγωγή μιας νέας τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης υλικού, η οποία παρέχει τον έλεγχο της διαβαθμισμένης χρήσης πολλών υλικών μέσα στην ίδια εκτύπωση. Το αποτέλεσμα είναι μια ομοιόμορφα διαβαθμισμένη υλική δομή, βελτιστοποιημένη ώστε να ταιριάζει στις δομικές απαιτήσεις της, με αποτελεσματική

⁹¹ Neri Oxman, *Structuring Materiality: Design Fabrication of Heterogeneous Materials*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ. 80, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

⁹² Στο ίδιο, σελ. 81

⁹³ Στο ίδιο, σελ. 81

*χρήση των υλικών και μείωση της σπατάλης, και με υψηλά προσαρμοσίμα χαρακτηριστικά.*⁹⁴

*Οι νέες κατευθύνσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω χρειάζονται μια μετακίνηση στη δημιουργία μορφών στον υπολογιστή από τη γεωμετρική και αναπαραστατική προσέγγιση, σε μία προσέγγιση βασισμένη στα υλικά. Ο σχεδιασμός που βασίζεται στα υλικά προωθεί μια σχεδιαστική προσέγγιση μέσω της ψηφιακής παραγωγής ετερογενών υλικών, προσαρμοσμένων να ταιριάζουν στις δομικές και περιβαλλοντικές λειτουργίες τους.*⁹⁵



⁹⁴ Στο ίδιο, σελ. 83

⁹⁵ Στο ίδιο, σελ. 85

5. Ψηφιακά ελεγχόμενες μηχανές κατασκευής

Βρισκόμαστε σε μία περίοδο μεγάλης αλλαγής στις συνθήκες παραγωγής στην αρχιτεκτονική. Μέσα στα τελευταία 25 χρόνια έγινε δυνατή η βιομηχανική παραγωγή μοναδικών, διαφορετικών κάθε φορά στοιχείων ανάλογα την ψηφιακή τους περιγραφή. Όλη η προσπάθεια παραμετρικού σχεδιασμού θα ήταν ουσιαστικά άχρηστη χωρίς τα ψηφιακά εργαλεία κατασκευής (CNC machines) τα οποία επιτρέπουν την παραγωγή μοναδικών στοιχείων στο ίδιο σχεδόν κόστος με τη μαζική παραγωγή.⁹⁶ Ως αποτέλεσμα, οι αρχιτέκτονες άρχισαν να λαμβάνουν υπόψη και να ενσωματώνουν τις δυνατότητες των νέων ψηφιακών μηχανημάτων στην διαδικασία του σχεδιασμού.

5.1 Σχεδιασμός και κωδικοποίηση

Η χρήση ελεγχόμενων μέσω υπολογιστή εργαλείων παραγωγής, τα οποία είναι ήδη διαθέσιμα αλλά συχνά υποχρησιμοποιούνται στην κατασκευαστική βιομηχανία, παρέχει νέες δυνατότητες ελευθερίας στο σχεδιασμό, ώστε να είναι καινοτόμος αλλά και να υπακούει στην κατασκευαστική λογική ταυτόχρονα.

Οι βάσεις της διαδικασίας κατασκευής είναι το υλικό στοιχείο και η μηχανή κατασκευής, και αυτά τα δύο στοιχεία οφείλουν να προσφέρουν τις παραμέτρους και τα συστατικά για τον σχεδιασμό. Η λήψη αποφάσεων σχετικών με τον τρόπο κατασκευής κατά τη δημιουργία κωδικοποιημένων σχεδίων επιτρέπει στον αρχιτέκτονα τον έλεγχο πολύπλοκων διαδράσεων μεταξύ μοναδικών υλικών στοιχείων και διευκολύνει την απευθείας δημιουργία των δεδομένων που απαιτεί η μηχανή κατασκευής.⁹⁷ Αυτός ο τρόπος σχεδιασμού συνεπάγεται την βαθιά κατανόηση των φυσικών συνθηκών και των ιδιοτήτων των υλικών και την μετάβαση από το σχεδιασμό γεωμετρικών στοιχείων στον καθορισμό των υλικών συστατικών και της λογικής της μεταξύ τους συναρμολόγησης. Η πρόβλεψη των φυσικών απαιτήσεων κατά την αρχή της διαδικασίας παραμετρικού σχεδιασμού και η χρήση των ιδιοτήτων των υλικών και

⁹⁶ Fabian Scheurer, *Materializing Complexity*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ. 91, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

⁹⁷ Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Silvan Oesterle, *Encoding Material*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ. 111, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

των δυνατοτήτων των ψηφιακών μηχανών ως βάση για τον κώδικα, επιτρέπει τον σχεδιασμό με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά μιας οικοδομικής διαδικασίας και την ίδια ώρα τον σχηματισμό της ίδιας της διαδικασίας.⁹⁸

Η σχέση του ψηφιακού τρόπου κατασκευής και των υπολογιστών επιτρέπει τον απευθείας προγραμματισμό δεδομένων παραγωγής και συνδέει άμεσα τον σχεδιασμό με την παραγωγή αρχιτεκτονικής. Ως αποτέλεσμα ο αρχιτέκτονας μπορεί να ελέγχει πλήρως την κατασκευαστική διαδικασία μέχρι και την μικρότερη λεπτομέρεια. Τα δεδομένα σχεδιασμού του αρχιτέκτονα δεν απαιτείται να μετατρέπονται σε οδηγίες κατασκευής από έναν μεγάλο αριθμό διαφορετικών ομάδων που συμμετέχουν στη διαδικασία του κτισίματος, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ως είναι.

Ο χειρισμός αυτών των μηχανημάτων, που παρότι είναι ευρέως διαδεδομένα δεν είναι ούτε φθηνά ούτε μικρά σε μέγεθος, ειδικότερα σε κλίμακες ένα προς ένα, απαιτεί ειδικές γνώσεις. Ιδανικά αυτές οι γνώσεις πρέπει να υπάρχουν από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού ώστε να βελτιστοποιείται το σχέδιο για να ταιριάζει με την κατασκευαστική μέθοδο. Συνήθως όμως αυτό δεν συμβαίνει καθώς δεν είναι γνωστός ο κατασκευαστής και η τεχνολογία που σκοπεύει να χρησιμοποιήσει πριν ολοκληρωθεί η προσφορά. Ακόμα, δεν διαβάζουν όλα τα ψηφιακά μηχανήματα κατασκευής την ίδια μορφή δεδομένων, γεγονός που δυσκολεύει τη δημιουργία των ψηφιακών δεδομένων που χρειάζονται τα μηχανήματα από το παραμετρικό γεωμετρικό μοντέλο, για όλα τα μοναδικά κομμάτια. Συχνά απαιτείται ένα σύστημα το οποίο μεταφράζει τη σχεδιαστική είσοδο σε δεδομένα παραγωγής. Οι λεπτομέρειές του εξαρτώνται από το σχήμα και την ποιότητα της επιθυμητής επιφάνειας, τα υλικά και τη μέθοδο κατασκευής, τη λογική και τη μέθοδο συναρμολόγησης, τη μηχανή που θα φτιάξει τα στοιχεία και πολλούς άλλους παράγοντες.⁹⁹ Γενικά είναι επιθυμητή μια όσο το δυνατόν περισσότερο συνεχής ροή ψηφιακών δεδομένων από το σχεδιασμό στον προγραμματισμό των μηχανημάτων, χωρίς τη συμβολή διαφορετικών ατόμων και ειδικοτήτων, προκειμένου να μειωθούν

⁹⁸Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Silvan Oesterle, *Encoding Material*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ. 112, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

⁹⁹ Fabian Scheurer, *Materializing Complexity*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ. 91, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

όσο δυνατόν περισσότερο οι αποκλίσεις ανάμεσα στο αρχικό ψηφιακό μοντέλο και την τελική κατασκευή.

Η ενσωμάτωση της γνώσης περί της δομής, των υλικών, της κατασκευής και της παραγωγής μέσα στο σχεδιασμό είναι το κλειδί για τη δημιουργία αποτελεσματικών διαδικασιών και παραγωγής. Όλη αυτή η γνώση πρέπει να ενσωματωθεί σε συνεχείς ψηφιακές αλυσίδες παραγωγής που συνδέουν το σχεδιασμό, την κατασκευή και το κτίσιμο και εξασφαλίζουν την αποτελεσματική και αδιάσπαστη ροή όλης της πληροφορίας, συμπεριλαμβανομένων και των απαραίτητων μεταφράσεων μεταξύ διαφορετικών μορφών δεδομένων.¹⁰⁰

5.2 Χειρισμός ψηφιακών μηχανημάτων

Για να προχωρήσουμε από το σχεδιασμό στην κατασκευή, είναι απαραίτητο να μεταφραστούν τα παραστατικά δεδομένα από δισδιάστατα σχέδια και τρισδιάστατα μοντέλα, σε ψηφιακά δεδομένα τα οποία καταλαβαίνει ένα ψηφιακό μηχάνημα. Αυτό απαιτεί κατ' ουσίαν την μάθηση μιας νέας γλώσσας από τους αρχιτέκτονες. Ορισμένες πτυχές αυτής της μετάφρασης είναι σχετικά αυτόματες και συμπεριλαμβάνουν τη χρήση ξεχωριστών προγραμμάτων για κάθε μηχανή, ενώ άλλες είναι κατά κύριο λόγο μέσα στα όρια του σχεδιασμού. *Η λήψη αποφάσεων σχετικών με την επιλογή του μηχανήματος και της κατάλληλης μεθόδου απαιτεί τον συνδυασμό της σχεδιαστικής πρόθεσης με τις ικανότητες της μηχανής. Είναι έτσι απαραίτητο για τους αρχιτέκτονες που ασχολούνται με τον ψηφιακό σχεδιασμό και την κατασκευή να κατανοούν πώς λειτουργούν αυτά τα εργαλεία, ποια υλικά είναι τα πλέον κατάλληλα και ποιες επιλογές και δυνατότητες παρέχουν.¹⁰¹*

Τα ψηφιακά μηχανήματα κατασκευής απαιτούν εμπειρία η οποία επιτυγχάνεται με τριβή και πειραματισμό, προκειμένου να αξιοποιηθούν στο έπακρο οι δυνατότητες που προσφέρουν. *Στην περίπτωση της ψηφιακής κατασκευής το έργο της επεξεργασίας του υλικού γίνεται έμμεσα μέσω της χρήσης υπολογιστικά ελεγχόμενων μηχανών, σε αντίθεση με την άμεση αντίληψη της πορείας της δουλειάς που λαμβάνει ο έμπειρος*

¹⁰⁰ Fabian Scheurer, *Materializing Complexity*, στο *Architectural Design, The New Structuralism*, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ. 93, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹⁰¹ Lisa Iwamoto, *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*. Princeton Architectural Press, New York 2009, σελ. 7 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

τεχνίτης μέσω του εργαλείου στο χέρι του. Με την βοηθούμενη από υπολογιστές παραγωγή, το εργαλείο ελέγχεται από σαφή δρομολογημένα δεδομένα, κάτι το οποίο δεν αφήνει περιθώρια για διαφορετικές ερμηνείες και προσαρμογές. Αυτή η αλλαγή στη ροή εργασίας επαναπροσδιορίζει τη σχέση μεταξύ αρχιτέκτονα και κατασκευαστή. Ο κατασκευαστής γίνεται ένας ειδικός στον χειρισμό CNC μηχανημάτων και ο αρχιτέκτονας σχεδιάζει τα δεδομένα ελέγχου των μηχανών αυτών. Για την απόδοση λύσεων οι οποίες κινούνται αποτελεσματικά ανάμεσα στην αισθητική και την καλή δόμηση χωρίς να καταλήγουν σε μη διαχειρίσιμη πολυπλοκότητα, ο αρχιτέκτονας και ο κατασκευαστής πρέπει να συνεργάζονται. Ο αρχιτέκτονας πρέπει να είναι γνώστης των συνθηκών παραγωγής και ικανός να ενσωματώσει τις γνώσεις του στο σχεδιασμό ενός σαφούς κώδικα για τις μηχανές.¹⁰²

Η ψηφιακή περιγραφή ενός αντικειμένου προς κατασκευή μπορεί να είναι πολύ συγκεκριμένη και να αποτελείται από μια πληθώρα διαφορετικών οδηγιών. Ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός με τη λογική της συναρμολόγησης, αναπτύσσει πλήρως τις δυνατότητές του σε συνδυασμό με μία κατασκευαστική μηχανή ικανή να εκτελεί φυσικά διαφορετικές ενέργειες. Απαιτείται δηλαδή ένα εργαλείο το οποίο να επιτρέπει την κατασκευή στοιχείων σε πραγματική κλίμακα και είναι αρκετά ευέλικτο ώστε να ταιριάζει σε διαφορετικά υλικά και λογικές συναρμολόγησης. Ένα βιομηχανικό ρομπότ ικανοποιεί με τον καλύτερο τρόπο αυτή την απαίτηση σε μια αρχιτεκτονική κλίμακα ένα προς ένα. Είναι ένα γενετικό εργαλείο που δεν είναι ειδικευμένο σε μία συγκεκριμένη εργασία. Η κατασκευαστική διαδικασία αποτελείται έτσι από τα δεδομένα που απαιτούνται για τον έλεγχο του ρομπότ και τις σχετικές ιδιότητες του εργαλείου που χρησιμοποιείται.¹⁰³ Ακόμα, ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ειδικά προσαρμοσμένων μηχανικών άκρων για τον βραχίονα είναι σημαντική, καθώς επιτρέπει στον αρχιτέκτονα να φθάσει στην σύλληψη υλικών διαδικασιών.

¹⁰² Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Silvan Oesterle, *Encoding Material*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ. 115, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹⁰³ Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Silvan Oesterle, *Encoding Material*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010, σελ. 112, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

5.3 Τύποι μηχανημάτων ψηφιακής κατασκευής

Η ανάλυση των κυρίων μηχανημάτων ψηφιακής κατασκευής που χρησιμοποιούνται στην αρχιτεκτονική και του τρόπου με τον οποίο δουλεύουν είναι απαραίτητη για την σωστή επιλογή του ιδανικότερου για την εκάστοτε εργασία.

3D Printers:

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές αποτελούν συσκευές οι οποίες δημιουργούν προσχεδιασμένα τρισδιάστατα αντικείμενα από την αρχή, εναποθέτοντας υλικό σε διαδοχικές στρώσεις μέχρι να ολοκληρωθεί το προκαθορισμένο σχήμα τους, σύμφωνα με κάποια από τις τεχνικές 3D printing που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 3.2. Οι τύποι των μηχανημάτων ποικίλουν ανάλογα το υλικό που χρησιμοποιείται και τον τρόπο με τον οποίο τυπώνουν.

Computer Numerical Control (CNC):

Περιλαμβάνουν μηχανές κοπής, laser και μύλους ή τρυπάνια προκειμένου να επεξεργαστούν υλικό με τεχνικές subtractive manufacturing όπως milling, drilling και cutting. Τα CNC μηχανήματα, ακολουθώντας προγραμματισμένες εντολές, κωδικοποιημένες και αποθηκευμένες στο υπολογιστικό τους μέσο, εκτελούν εργασίες κινούμενα στους άξονες x-y-z, αυτόματα, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Για το σχεδιασμό χρησιμοποιείται κάποιο λογισμικό CAD (computer aided design), στη συνέχεια οι εντολές μεταφράζονται σε μορφή κατανοητή για το μηχάνημα και ελέγχονται οι κινήσεις του μέσω ενός CAM (Computer-aided manufacturing) λογισμικού και τέλος φορτώνονται σε αυτό προκειμένου να εκτελέσει την προγραμματισμένη εργασία.

Η ορολογία των διευθύνσεων ή αξόνων (axis) αναφέρεται στον βαθμό ελευθερίας κινήσεων που είναι ικανό να εκτελέσει το μηχάνημα κατά την κοπή ή την αφαίρεση υλικού γενικότερα. Ο πιο κοινός μύλος για παράδειγμα, των τριών διευθύνσεων, μπορεί να κινείται ταυτόχρονα στις x, y και z διευθύνσεις, δηλαδή το ενεργό άκρο μπορεί να κινηθεί σε οποιαδήποτε πορεία στο επίπεδο αλλά και πάνω κάτω τη ίδια στιγμή. Αυτή η εμβέλεια κινήσεων είναι συνήθως παραπάνω από αρκετή για τις περισσότερες εφαρμογές. Η ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στις δυνατότητές του και αυτές ενός μηχανήματος με μεγαλύτερο βαθμό ελευθερίας, έγκειται στο γεγονός ότι το άκρο του μύλου τριών διευθύνσεων δεν περιστρέφεται, άρα δεν μπορεί να

δημιουργήσει υποσκαφές ή πλήρως τρισδιάστατα αντικείμενα. Αυτή η επιπλέον εμβέλεια κίνησης είναι απελευθερωτική και επαναστατική αλλά σε πολλές περιπτώσεις μη απαραίτητη.¹⁰⁴

Robotic Arms:

Είναι ένας μηχανικός, ρομποτικός βραχίονας ο οποίος μιμείται τη λειτουργία ενός ανθρώπινου χεριού και μπορεί να φτάσει σε οποιοδήποτε σημείο του τρισδιάστατου χώρου. Το πραγματικό εργαλείο, το μηχανικό άκρο που καθορίζει τον τρόπο κατεργασίας του υλικού, εφαρμόζεται στην άκρη της κινητικής αλυσίδας.¹⁰⁵ Προγραμματιζόμενο και ανάλογα με το εξάρτημα που προσαρμόζεται στην άκρη του, έχει τη δυνατότητα να φέρει εις πέρας διαφορετικές εργασίες. Οι αρθρώσεις αντικαθίστανται με άξονες, που πραγματοποιούν είτε γραμμική είτε κυκλική κίνηση. Ο αριθμός και η κίνηση των αξόνων του ρομποβραχίονα καθορίζουν το βαθμό ελευθερίας της κίνησής του· έχουμε έτσι 4-axis, 5-axis, 6-axis ή 7-axis ρομποτικούς βραχίονες. Τα μεγέθη τους και οι μηχανικές δυνατότητές τους ποικίλλουν ανάλογα τη χρήση τους.

Η χρήση των ρομποτικών βραχιόνων στην αρχιτεκτονική παραγωγή επιτρέπει τον έλεγχο και την παραγωγικότητα να εφαρμοστούν σαν αρχές και στην κατασκευή, καθώς αποτελούν βασικά πλεονεκτήματα του scripting. Με την χρήση του ρομπότ, ουσιαστικά μεταφέρονται οι διαδικασίες και οι δυνατότητες του 3d printer, ως ενός «rapid prototyping εργαλείου», στην πραγματική αρχιτεκτονική και κατασκευαστική κλίμακα. Ταυτόχρονα, παράλληλα με την παραγωγικότητα, εισάγει στον διάλογο και την έννοια της αποδοτικότητας, καθώς μέσω του ελέγχου πάνω στην ύλη και την δυνατότητα εναπόθεσης υλικού ακριβώς εκεί που χρειάζεται και έχει υπολογιστεί, πληρείται μία από τις σημαντικότερες συνθήκες του βιολογικού παραδείγματος, την ανάπτυξη των μορφών σε σχέση με την ύλη, με την χρήση του ελάχιστου υλικού με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση.¹⁰⁶

¹⁰⁴ Lisa Iwamoto, *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*. Princeton Architectural Press, New York 2009, σελ. 90 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹⁰⁵ AD The New Structuralism, *Encoding Material*, σελ. 112

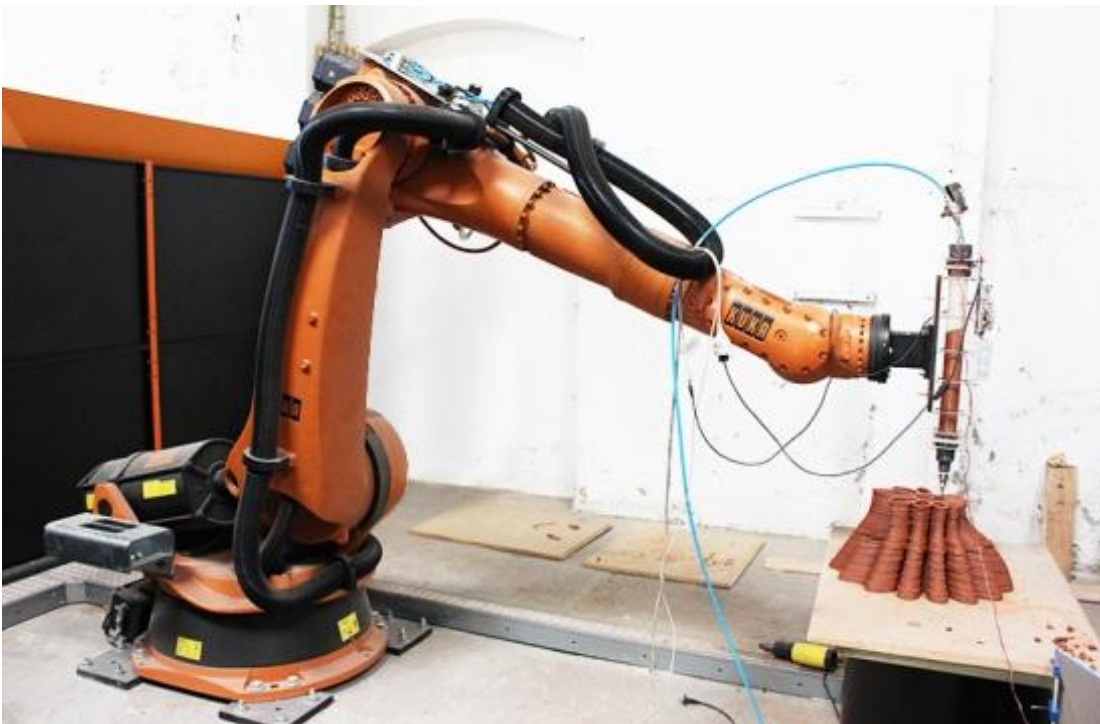
¹⁰⁶ Fabio Gramazio, Matthias Kohler, *Digital Materiality in Architecture*, Lars Müller Publishers, Baden 2008, σελ. 9 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

Swarm Robots:

Συστήματα που αποτελούνται από έναν μεγάλο αριθμό μικρών απλών ρομποτικών μονάδων που δρουν συλλογικά, αλληλοαντιδρώντας μεταξύ τους αλλά και με το περιβάλλον τους. Τα σμήνη ρομπότ, προγραμματίζονται να αντιδρούν, να εκτελούν δηλαδή προκαθορισμένες ενέργειες, ανάλογα με τα ερεθίσματα που λαμβάνουν από το περιβάλλον τους αλλά και την μεταξύ τους επικοινωνία, μιμούμενα την συμπεριφορά σμήνους πουλιών, εντόμων, ψαριών ή τις αποικίες βοτάνων ή μικροβίων. Έχουν την ικανότητα να αυτό-οργανώνονται και να προσαρμόζονται.

Mini Builders:

Μικρά ρομπότ τα οποία χτίζουν μεγάλες κατασκευές. Ένα είδος ρομπότ κατασκευάζει τα θεμέλια-βάση της κατασκευής, απλώνοντας διαδοχικές στρώσεις υλικού που ψύχονται και σκληραίνουν. Στη συνέχεια, μικρότερα ρομπότ προσαρτώνται στις εκτυπωμένες επιφάνειες και κινούμενες πάνω σε αυτές συνεχίζουν τη διαδικασία της εκτύπωσης. Η τροφοδότησή των δεύτερων με υλικό γίνεται μέσω καλωδίων από μία κεντρική μονάδα.



Ρομποτικός βραχίονας από την ομάδα FABbots εκτυπώνει τρισδιάστατα.

Drones:

Αποτελούν μη επανδρωμένα συστήματα εναέριας ή υποθαλάσσιας κίνησης. Στην αρχιτεκτονική χρησιμοποιούνται για να σκανάρουν εκτάσεις, κτήρια ή αντικείμενα, για να συγκεντρώσουν πληροφορίες. Η αμερικάνικη εταιρία Skycatch χρησιμοποιεί ήδη drones σε μερικά υψηλού επιπέδου κατασκευαστικά έργα. *Τα drones δίνουν τη θέα μιας περιοχής όπως φαίνεται από τα μάτια ενός πουλιού και παραδίδουν αναφορές της προόδου, επιταχύνουν τα λογιστικά της κατασκευής χάρη στην παρακολούθηση των παραδόσεων και προσφέρουν ταυτόχρονη ενημέρωση για τυχόν αλλαγές που απαιτείται να γίνουν στα σχέδια. Ένα βήμα παρακάτω έχουν προχωρήσει τα μηχανήματα της Ιαπωνικής εταιρίας Komatsu, όπου τα drones χρησιμεύουν ως τα «μάτια» αυτόματων εκσκαφών. Τα drones στέλνουν τρισδιάστατα μοντέλα της περιοχής του εργοταξίου σε έναν υπολογιστή ο οποίος τροφοδοτεί τις πληροφορίες στα μη επανδρωμένα μηχανήματα ώστε να αποφασίσουν την πορεία τους.*¹⁰⁷

Δυνητικά τα drones θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και για τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέροντας ακόμα περισσότερες δυνατότητες στον τομέα του 3D printing.

6. Πρότυπα στο εργαστήριο

Ένα από τα σημαντικά προτερήματα της εισαγωγής των ψηφιακών μηχανημάτων κατασκευής στην αρχιτεκτονική αποτελεί η ικανοποίηση της ανάγκης ελέγχου του σχεδιασμού και αναπροσαρμογής του, καθώς το digital fabrication προσφέρει τη γρήγορη κατασκευή μοντέλων υπό κλίμακα (rapid prototyping). Με τη δημιουργία τέτοιων μοντέλων, τα οποία μπορεί να είναι μέχρι και σε ένα προς ένα κλίμακα, στο εργαστήριο, εύκολα και με μεγάλη ταχύτητα, επιτυγχάνεται ακρίβεια, ποιότητα, εργονομία και περιορισμός των αστοχιών. Ταυτόχρονα είναι δυνατός ο έλεγχος ενός φυσικού μοντέλου με δοκιμές αντοχής και λειτουργικότητας. *Η οργάνωση και η παρατήρηση της φυσικής δοκιμής αποτελούν μια πηγή σιγουριάς για τον αρχιτέκτονα ή το μηχανικό. Το να βλέπεις ένα σύστημα επένδυσης ή μια τοιχοποιία να επιβιώνει της*

¹⁰⁷ Jane Wakefield, *Tomorrow's Buildings: Construction industry goes robotic*, BBC News, 4 May 2016, στο: www.bbc.com/news/technology-35746648 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

*δοκιμής φορτίου ή ανέμου, σε παίρνει μακριά από το αόριστο, το θεωρητικό και το αμφισβητήσιμο.*¹⁰⁸

Η κατασκευή και οι δοκιμές του μοντέλου συμβαίνουν συνήθως παρουσία του αρχιτέκτονα, προσφέροντάς του έτσι μια μεγαλύτερη κατανόηση του αντικειμένου και του τρόπου κατασκευής, ώστε να δει τα προβλήματα και να σκεφτεί τις πιθανές βελτιώσεις. *Έχοντας ο αρχιτέκτονας τη δυνατότητα να φτιάξει μόνος του το μοντέλο και να καταλάβει πώς λειτουργεί, θα κατανοήσει καλύτερα και τις αστοχίες ή τις δυσκολίες που εξακολουθούν να υπάρχουν στην πραγματοποίησή του.*¹⁰⁹

Ακόμα, χάρη στο rapid prototyping ενισχύεται η σχέση των αρχιτεκτόνων με την κατασκευή, καθώς, μέσω της ψηφιακής κατασκευής των μοντέλων, κατανοούν καλύτερα τις τεχνικές παραγωγής των μηχανημάτων και τις δυνατότητες που αυτά προσφέρουν. Έχουν την ευκαιρία να πειραματιστούν με αυτά ώστε να φτάσουν σε αρχιτεκτονικές λύσεις οι οποίες εκμεταλλεύονται πλήρως τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα νέα μηχανήματα και οι τεχνικές, όντας οικονομικές στο χρόνο παραγωγής και τα υλικά, λειτουργικές, καλαίσθητες και καινοτόμες.

7. Χαρακτηριστικά των κατασκευών που προκύπτουν μέσω Digital Fabrication

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό και ενδιαφέρον να αναλυθούν τα χαρακτηριστικά που διακρίνουν τις αρχιτεκτονικές κατασκευές οι οποίες προκύπτουν μέσω των νέων τεχνικών του digital fabrication. Τα χαρακτηριστικά αυτά, παρότι συναντώνται σε ορισμένες περιπτώσεις και στις συμβατικές κατασκευές, κυρίως διακρίνουν κατασκευές οι οποίες δημιουργήθηκαν με επιτυχημένη χρήση του computational σχεδιασμού και των ψηφιακών μηχανημάτων και πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων που προσφέρουν.

¹⁰⁸ Michael Stacey, *In my Craft and Sullen Art or Sketching the Future by Drawing on the Past*, στο *Architectural Design, Design through Making*, Vol 75, Wiley, London 2005, σελ. 41, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹⁰⁹ Στο ίδιο, σελ. 41, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

Πολύπλοκες: Ο ψηφιακός σχεδιασμός και οι computational τεχνικές προσφέρουν σύνθετο σχεδιασμό, συνθέσεις από πολλά κομμάτια και πολύπλοκα αποτελέσματα, τα οποία οι νέες ψηφιακές τεχνικές κατασκευής δίνουν τη δυνατότητα να πραγματοποιηθούν.

Καινοτόμες: Χαρακτηρίζονται συχνά καινοτόμες καθώς εφαρμόζουν μία καινούργια τεχνική, ή σύστημα, που προκύπτει έπειτα από πειραματισμούς με τις νέες τεχνολογίες στον υπολογιστή και το εργαστήριο.

Βιομιμητικές: Συχνό φαινόμενο αποτελεί η μίμηση οργανισμών από τη φύση στο σχήμα και στα μοτίβα, αλλά και στις λειτουργικές και δομικές ιδιότητες και τα υλικά καθώς η φύση αποτελεί παράδειγμα με την προσαρμοστικότητα και την οικονομία της, επιτυγχάνοντας τη μέγιστη απόδοση και προσαρμογή με τη χρήση των λιγότερων πόρων.

Οικονομικές – φιλικές προς το περιβάλλον: Η οικονομία, η οποία χαρακτηρίζει τις κατασκευές αυτές και η επιλογή των υλικών τις κάνει και περισσότερο φιλικές προς το περιβάλλον.

Διαδραστικές: Οι νέες κατασκευές είναι συχνά διαδραστικές, αντιδρούν δηλαδή σε ερεθίσματα που λαμβάνουν από το χρήστη ή το περιβάλλον τους.

Ζωντανές, αυτό-προσαρμοζόμενες: Αυτή η διαδραστικότητα φτάνει ορισμένες φορές στο σημείο να μιλάμε για ευφυή συστήματα ή κατασκευές, οι οποίες προσαρμόζονται και αντιδρούν αυτόματα, σαν ζωντανοί οργανισμοί.

Δυναμικές: συχνά οι κατασκευές αυτές έχουν και την ιδιότητα να εξελίσσονται και να μεταβάλλονται στο χρόνο.

Προσαρμοσμένες στο περιβάλλον τους: ο περιβάλλον χώρος, οι ευκαιρίες και οι περιορισμοί που παρέχει, λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού ώστε να προκύψει μια κατασκευή η οποία εκμεταλλεύεται και ταιριάζει στο περιβάλλον της.

Βιώσιμες: ο σχεδιασμός βάσει των νέων ψηφιακών τεχνολογιών λαμβάνει σοβαρά υπόψη του μια βιώσιμη και αειφόρο ανάπτυξη για το μέλλον.

Γ. Μέρος:

3D Printing



Γ. Μέρος: 3D Printing

Από τις τεχνικές ψηφιακής κατασκευής που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι πιθανόν αυτή η οποία προσφέρει τη μεγαλύτερη ελευθερία στις μορφές αλλά και οικονομία στα υλικά. Χρησιμοποιείται πέρα από την αρχιτεκτονική σε πάρα πολλές βιομηχανίες, οπουδήποτε υπάρχει σύγκλιση υψηλής αξίας και μικρού όγκου ή απαιτήσεις ειδικής προσαρμογής. Παρουσιάζει επίσης πολύ καλή συνεργασία με τις υπολογιστικές (computational) τεχνικές σχεδιασμού. Αυτά τα προτερήματα οδήγησαν πολλές ερευνητικές ομάδες αλλά και εταιρίες να ασχοληθούν μαζί της, αναπτύσσοντας τις δυνατότητες, τις τεχνικές και τα μηχανήματα παραγωγής και παρουσιάζοντας εντυπωσιακά αποτελέσματα.

Στον παρόν κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια για μια περαιτέρω ανάλυση της τρισδιάστατης εκτύπωσης ως ψηφιακή τεχνική σχεδιασμού. Η ανάλυση επιχειρείται μέσω της παρουσίασης παραδειγμάτων εφαρμογών της 3D εκτύπωσης από διαφορετικές ερευνητικές ή αρχιτεκτονικές ομάδες και εταιρίες στην αρχιτεκτονική. Δίνεται έμφαση στους διαφορετικούς τρόπους προσέγγισης, βάση του τρόπου σχεδιασμού της μορφής, των μηχανημάτων και τεχνικών που χρησιμοποιούνται, των υλικών και του συνολικού τρόπου εργασίας των αρχιτεκτόνων, αλλά και στα διαφορετικά πλεονεκτήματα και καινοτομίες που προσφέρει η κάθε προσέγγιση.

Τα παραδείγματα που παρουσιάζονται αφορούν όλα εκτός του τελευταίου, την εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή ολόκληρης της δομής του κτηρίου και όχι μόνο επιμέρους στοιχείων του. Η επιλογή αυτή έγινε διότι, ενώ η χρήση ψηφιακών μηχανημάτων για την κατασκευή επιμέρους στοιχείων που το απαιτούν λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας τους είναι αρκετά διαδεδομένη, η κατασκευή κτηρίων εξ ολοκλήρου με τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μια νέα πρόκληση για τους αρχιτέκτονες που παρουσιάστηκε τα τελευταία χρόνια. Η δεύτερη αιτία για την επιλογή τέτοιων παραδειγμάτων είναι η καθαρότητα με την οποία επιδεικνύουν τις δυνατότητες της 3D εκτύπωσης ως ολοκληρωμένες κατασκευές, χωρίς να ενσωματώνουν και άλλες οικοδομικές τεχνικές. Η αύξηση πάντως της κλίμακας μιας τεχνολογίας η οποία ως τώρα χρησιμοποιείται για τη δημιουργία σχετικά μικρών αντικειμένων, έρχεται με ένα ποσοστό σκεπτικισμού, γεγονός το οποίο θα εξεταστεί επίσης παρακάτω.

1. Τρισδιάστατη εκτύπωση με σκυρόδεμα

Το οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελεί ένα από τα βασικότερα οικοδομικά υλικά, το οποίο καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις αρχιτεκτονικές μορφές και τον τρόπο κατασκευής από την εποχή του μοντέρνου μέχρι σήμερα. Όπως αναφέρει ο καθηγητής Simon Austin¹¹⁰, «είναι πολύ σημαντικοί οι λόγοι που ο κόσμος της οικοδομικής είναι φτιαγμένος κυρίως από ασφάλι και σκυρόδεμα – συμπεριλαμβάνουν την ανθεκτικότητα, τις μηχανικές επιδόσεις και τις αισθητικές ιδιότητες.»¹¹¹

Χάρη στα παραπάνω πλεονεκτήματα του σκυροδέματος και την εξαπλωμένη χρήση του στην οικοδομική βιομηχανία, είναι αναμενόμενες οι έρευνες για τη χρήση του σε τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης κτηρίων. Παρατηρείται μία ποικιλία προσεγγίσεων με διαφοροποίηση ως προς το είδος του τσιμέντου που χρησιμοποιείται, του τρόπου με τον οποίο γίνεται η εκτύπωση, του αρχικού σχεδιασμού και του είδους των μορφών που παράγονται.

1.1 Landscape House, από τη μορφή στον τρόπο κατασκευής

Η ολλανδική ομάδα Universe Architecture, έδωσε το 2013 στη δημοσιότητα τα σχέδιά της για την κατασκευή μίας διώροφης κατοικίας, η οποία θα λειτουργήσει ως εκθεσιακός χώρος, και θα εκτυπωθεί από σκυρόδεμα με την τεχνολογία του 3D printing. Το κτήριο καλείται Landscape House και στο σχήμα θυμίζει κλειστή καμπύλη Möbius, με πλάτος 8 μέτρα και μήκος 100 μέτρα. Θα υπάρχει επίσης ένα ευρύχωρο υπόγειο με ράμπα εισόδου. Μονάχα το τρισδιάστατα εκτυπωμένο σκυρόδεμα θα έχει διπλή καμπυλότητα, οι όψεις από γυαλί έχουν μονή.¹¹²

Σύμφωνα με τον Janjaap Ruijsenaars, μέλος της αρχιτεκτονικής ομάδας, η αρχική ιδέα ήταν να δημιουργήσουν ένα κτίσμα το οποίο να μην καταστρέφει την τοποθεσία αλλά να προσαρμόζεται αρμονικά. Έτσι κατέληξαν σε ένα συνεχές κτίσμα χωρίς αρχή και

¹¹⁰ ένας από τους βασικούς ερευνητές μιας ομάδας στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών στο Loughborough University η οποία ερευνά την τρισδιάστατη εκτύπωση με σκυρόδεμα.

¹¹¹ Jane Wakefield, *Tomorrow's Buildings: Construction industry goes robotic*, BBC News, 4 Μαΐου 2016, από: www.bbc.com/news/technology-35746648 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹¹² Universe Architecture, *Landscape House*, στο: landscapehouse.nl/phase3

τέλος.¹¹³ Στην προσπάθεια να κατασκευάσουν το μοντέλο οι αρχιτέκτονες δοκίμασαν πολλά υλικά όπως μολύβι και χαρτί, αλλά τελικά κατέληξαν στην ψηφιακή εκτύπωση. Έχοντας λοιπόν το σχέδιο αποφάσισαν να δοκιμάσουν την εκτύπωση ως μέθοδο κατασκευής και στην πραγματική κλίμακα.

Όπως εξηγεί ο Janjaap Ruijsenaars, η μέθοδος κατασκευής με τον 3D printer, και όχι με συμβατικά μέσα, κρίθηκε ως η πλέον κατάλληλη από τη μία διότι το σχήμα είναι συνεχές και μεταβάλλεται από πάτωμα σε κάθετο στοιχείο χωρίς αρχή και τέλος. Ο δεύτερος λόγος, και ίσως περισσότερο σημαντικός, είναι το γεγονός ότι το σχέδιο βρίσκεται ήδη στους υπολογιστές, σε ψηφιακή μορφή, και, με τη βοήθεια των ψηφιακών μηχανημάτων, το πολύπλοκο σχήμα με τις καμπύλες και τις στροφές, μπορεί να κατασκευαστεί ακριβώς όπως είναι σχεδιασμένο.¹¹⁴

Η αρχιτεκτονική ομάδα αποφάσισε να συνεργαστεί με τον Ιταλό μηχανικό ρομποτικής Enrico Dini και να χρησιμοποιήσει τον τεράστιο εκτυπωτή του, D-Shape, ο οποίος είναι ικανός να παράγει τμήματα έως και 6x9 μέτρων, με τη χρήση ενός μείγματος από άμμο και συνδετικό υλικό.¹¹⁵ Χρησιμοποιεί την τεχνική 3DP με πούδρα υλικού σε στρώσεις, που περιγράφεται σε προηγούμενο κεφάλαιο. Αντίστοιχα των pixel στη δισδιάστατη εκτύπωση, εδώ έχουμε τα voxels, μικρές μονάδες όγκου. Ο D-Shape τυπώνει voxels 5x5x5 χιλιοστών, κάτι που θα επηρεάσει και την εξωτερική όψη και υφή του κτηρίου.

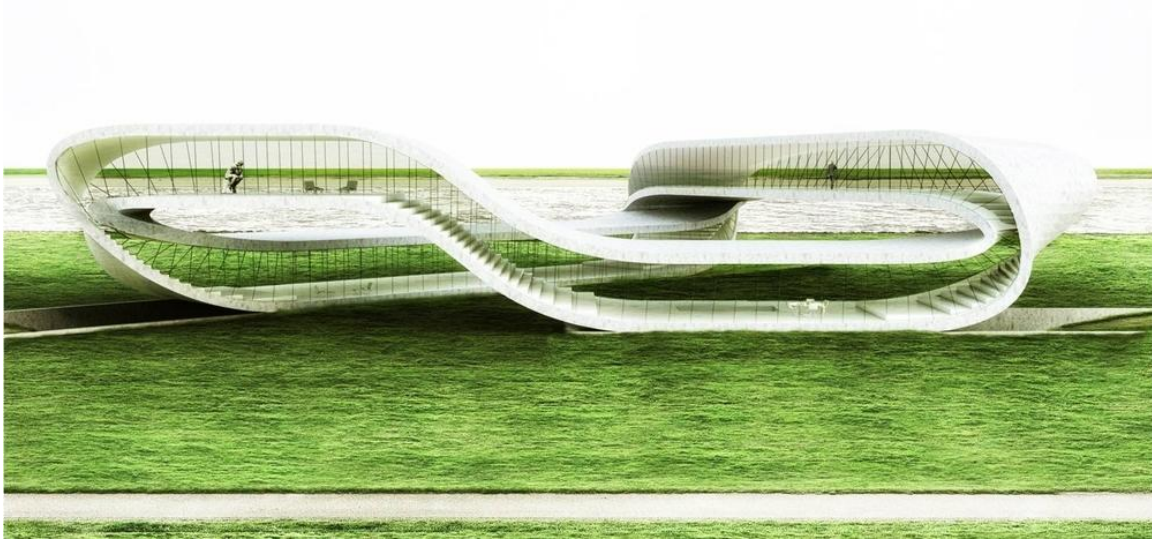
Ο εκτυπωτής θα τυπώσει κούφιους όγκους οι οποίοι θα γεμίσουν με σκυρόδεμα οπλισμένο με ίνες ώστε να λάβει την απαραίτητη αντοχή. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατό να εκτυπωθούν και οριζόντια στοιχεία, όπως πλάκες ή δοκάρια, με ικανότητα να παραλάβουν φορτία, και όχι μόνο κατακόρυφα, όπως κολώνες. Οι όγκοι στη συνέχεια θα συναρμολογηθούν ώστε να δημιουργήσουν το κτήριο. Μία νεότερη ιδέα που εκφράστηκε από τους αρχιτέκτονες είναι η δημιουργία ενός printer ο οποίος θα προχωράει παράλληλα στις καμπύλες του κτηρίου και θα το τυπώσει όλο συνεχόμενα με τη μία. Σύμφωνα με τον Janjaap Ruijsenaars, αυτός ο τρόπος κατασκευής είναι πιο κοντά στην αρχική τους ιδέα.¹¹⁶

¹¹³ Marcus Fairs, *3D printed house interview with Universe Architecture*, Dezeen, 24 Ιανουαρίου 2013, από www.dezeen.com/2013/01/24/3d-printed-house-interview/ (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹¹⁴ Στο ίδιο

¹¹⁵ Marcus Fairs, *Dutch architects to use 3D printer to print a house*, Dezeen, 20 Ιανουαρίου 2013, από: www.dezeen.com/2013/01/20/dutch-architects-to-use-3d-printer-to-build-a-house/ (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹¹⁶ Marcus Fairs, *3D printed house interview with Universe Architecture*, dezeen, 24 Ιανουαρίου 2013, από www.dezeen.com/2013/01/24/3d-printed-house-interview/ (μτφ. Κ. Φλωράκη)



Ο εκτιμώμενος χρόνος εκτύπωσης των στοιχείων είναι περίπου μισός χρόνος, και ένας χρόνος για την ολοκλήρωση του συνόλου της κατασκευής. Το χρονικό διάστημα φαίνεται να είναι μάλλον μεγάλο, αλλά ο Janjaap Ruijssenaars υποστηρίζει ότι με περαιτέρω έρευνα οι χρόνοι εκτύπωσης μπορούν να βελτιωθούν.

Ο Enrico Dini όπως και οι αρχιτέκτονες, συμφωνούν πάντως πως η συγκεκριμένη τεχνολογία μπορεί να παίξει πολύ σημαντικό ρόλο στην εκτύπωση μελών και όχι ολόκληρων κτηρίων, ή σε κατασκευές οι οποίες απαιτούν και ταιριάζουν με τέτοιου είδους τεχνικές. Μια πιο γενικευμένη και ευρεία χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην αρχιτεκτονική είναι πάντως πολύ πιθανή στο μέλλον.¹¹⁷

Έχει ενδιαφέρον στο Landscape House, ότι η μορφή του κτηρίου όπως προέκυψε από το σχεδιασμό απαιτεί την χρήση μιας ψηφιακής μεθόδου κατασκευής όπως το 3D printing. Ο ψηφιακός σχεδιασμός δίνει τη δυνατότητα να αναδυθούν πολύπλοκες και μη κανονικές αρχιτεκτονικές μορφές οι οποίες χρειάζονται την ανάπτυξη νέων μεθόδων κατασκευής για να μπορέσουν να πραγματοποιηθούν. Αυτή την ανάγκη ήρθαν να καλύψουν οι τεχνικές digital fabrication. Το παραπάνω αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα όπου η μορφή καλεί έναν νέο τρόπο κατασκευής, και πράγματι η τρισδιάστατη εκτύπωση φαίνεται να είναι ο καταλληλότερος.



¹¹⁷ Emilie Chalcraft , *How 3D printing will change architecture and construction*, Dezeen, 21 Μαΐου 2013, από: www.dezeen.com/2013/05/21/3d-printing-architecture-print-shift/ (μτφ. Κ. Φλωράκη)

1.2 The Bloom pavilion, ακρίβεια και λεπτότητα

Διαφορετική προσέγγιση είχε μια ομάδα ερευνητών από το Πανεπιστήμιο Berkeley της Καλιφόρνια, οι οποίοι, καθοδηγούμενοι από τον καθηγητή αρχιτεκτονικής Ronald Rael, δημιούργησαν το 2015 ένα ελεύθερο περίπτερο ώστε να αναδείξουν την ακρίβεια της μεθόδου τρισδιάστατης εκτύπωσης με χρήση τσιμέντου σε σκόνη που ανέπτυξαν.

Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει την εκτύπωση λεπτών στρώσεων μιας ειδικής στεγνής σκόνης τσιμέντου και τον ψεκασμό της καθεμιάς με νερό ώστε να σκληρύνει η δομή. Ο καθηγητής Rael αναφέρει ότι *παρότι υπάρχει μια χούφτα ανθρώπων που πειραματίζονται με το 3D printing στην αρχιτεκτονική, λίγοι μόνο ασχολούνται με τα βασισμένα στο τσιμέντο υλικά, και όλοι τους εξωθούν υγρό τσιμέντο μέσω μιας κεφαλής για την παραγωγής σκληρών επιφανειών.*¹¹⁸

Το πλεονέκτημα της τεχνική της ομάδας του Berkeley είναι ότι με τη χρήση μιας οικολογικής πολυμερικής ένωσης με τσιμέντο Portland χωρίς οξείδια του σιδήρου, την οποία οι ίδιοι ανέπτυξαν, και του συστήματός τους από 11 εκτυπωτές σκόνης, μπορούν να δημιουργήσουν περισσότερο πολύπλοκες και ακριβείς τελικές κατασκευές, με μείωση του βάρους τους και της σπατάλης υλικού. «Ανακατεύουμε πολυμερή με τσιμέντο και ίνες για τη δημιουργία πολύ ισχυρών, ελαφρών και υψηλής ανάλυσης κομματιών σε ήδη διαθέσιμο εξοπλισμό. Είναι μία πολύ ακριβής, αν και οικονομική τεχνική.» προσθέτει ο καθηγητής Rael. Ακόμα, η τρισδιάστατη εκτύπωση τσιμέντου έχει τα πλεονεκτήματα ότι δεν χρειάζεται ξυλότυπο, δεν παράγει υπολείμματα και απόβλητα, και το υλικό στήριξης μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για να παραχθούν κι άλλα τούβλα.

Το Bloom pavilion έχει 2.7 μέτρα ύψος και βάση περίπου 3.6x3.6 τετραγωνικά μέτρα, και έχει κατασκευαστεί από 840 ειδικά προσαρμοσμένα τετράγωνα τούβλα εκτυπωμένα με την παραπάνω μέθοδο και συνδεδεμένα με μεταλλικά στοιχεία, χωρίς να απαιτείται παραπάνω δομική υποστήριξη.¹¹⁹ Όλα τα τούβλα έχουν έναν τυπωμένο

¹¹⁸ Adam Williams, *Berkeley researchers pioneer new powder-based concrete 3D printing technique*, 2015, από: newatlas.com/berkeley-researchers-pioneer-powder-based-concrete-3d-printing/36515/ (μτφ. Κ. Φλωράκη)

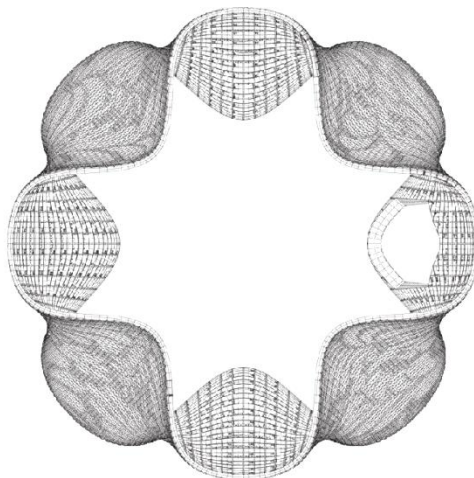
¹¹⁹ Adam Williams, *Berkeley researchers pioneer new powder-based concrete 3D printing technique*, 2015, από: newatlas.com/berkeley-researchers-pioneer-powder-based-concrete-3d-printing/36515/ (μτφ. Κ. Φλωράκη)

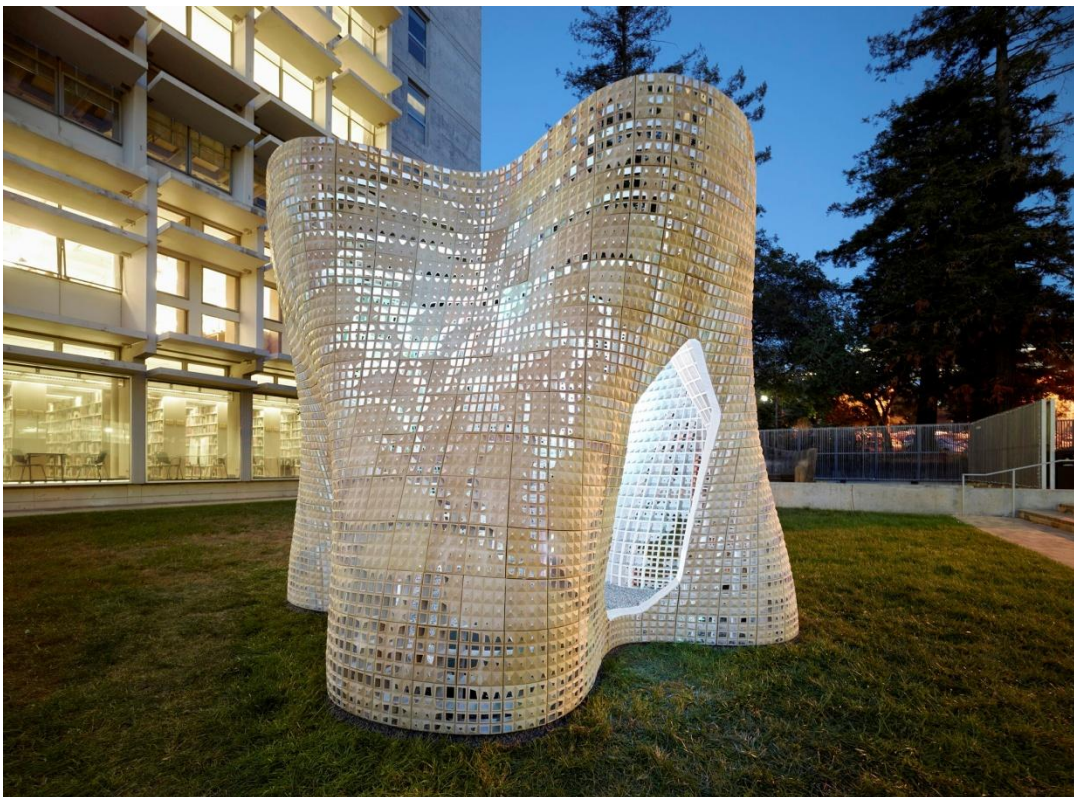
κάνναβο εσωτερικά, ο οποίος τονίζει τις καμπύλες του εσωτερικού του περιπτέρου. Κάθε τούβλο είναι μοναδικό και δημιουργεί ένα πολύπλοκο διακοσμητικό μοτίβο στο εξωτερικό, εμπνευσμένο από τα παραδοσιακά ταϊλανδέζικα λουλούδια, το οποίο επιτρέπει στο φως να εισέρχεται. Σε κάτοψη το περίπτερο έχει ως βάση έναν σταυρό ο οποίος εμφανίζεται στριμμένος κατά 45° στην κορυφή. Το καμπύλο σχήμα προσθέτει στιβαρότητα στην λεπτή και ελαφριά δομή.

Ο χρόνος που απαιτείται για την εκτύπωση των τούβλων είναι περίπου ένας μήνας, αλλά αυξάνεται με την προσθήκη του χρόνου σχεδιασμού, κατασκευής των εκτυπωτών, δοκιμών και επιδιορθώσεων.

Το Bloom Pavilion αποτελεί ένα παράδειγμα το οποίο τονίζει κυρίως τις δυνατότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην μαζική παραγωγή εξατομικευμένων στοιχείων, καθώς τα τούβλα που κατασκευάζονται από το ίδιο μηχάνημα έχουν το καθένα διαφορετική μορφή. Σε αντίθεση με άλλες εφαρμογές του 3D printing παρατηρείται μια τεράστια ακρίβεια και καθαρότητα στα σχήματα μια τη δημιουργία μιας σχεδόν διακοσμητικής μορφής που θυμίζει κέντημα. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την λεπτότητα και το μικρό βάρος, συνιστούν μια ιδιαίτερη καινοτομία καθώς το υλικό που χρησιμοποιείται, το τσιμέντο, είναι συνδεδεμένο με στιβαρές, ογκώδεις και χονδροκομμένες κατασκευές.

Όσον αφορά το σχεδιασμό, παρατηρείται μια αντίστροφη λογική από το προηγούμενο παράδειγμα, καθώς ο σχεδιασμός της μορφής, με τη βοήθεια ψηφιακών μέσων πάντα, έχει από την αρχή σκοπό να αναδείξει τις δυνατότητες της συγκεκριμένης τεχνικής κατασκευής.





1.3 Τρισδιάστατα εκτυπωμένες κατοικίες από σκυρόδεμα

Εντυπωσιακά φαίνονται να είναι τα αποτελέσματα της χρήσης του 3D printing με πρώτη ύλη το σκυρόδεμα από την κινέζικη εταιρία Winsun. Το Μάρτιο του 2014 ανακοίνωσε ότι κατάφερε να εκτυπώσει δέκα μονώροφες κατοικίες μέσα σε 24 ώρες, με τη χρήση ενός ειδικά κατασκευασμένου από την εταιρία τρισδιάστατου εκτυπωτή. Τα επίπεδα πανέλα των τοίχων και των πλακών αφού εκτυπώθηκαν, συναρμολογήθηκαν στην τοποθεσία. Με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας το κόστος κατασκευής κάθε σπιτιού εκτιμάται στα 5.000\$.¹²⁰ Όλες οι κατοικίες είναι σχεδιασμένες να παραλάβουν υδραυλικές και ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και μόνωση, τα οποία προστίθενται μετά την κατασκευή.

Σύντομα ακολούθησε από την ίδια εταιρία η κατασκευή μιας βίλας 1100 τετραγωνικών μέτρων και μιας πενταώροφης πολυκατοικίας με διαμερίσματα με τη χρήση της ίδιας τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης. Τα παραπάνω κτίσματα είναι ανοιχτά στο κοινό στο βιομηχανικό εκθεσιακό πάρκο της πόλης Suzhou στην Κίνα.¹²¹ Μέχρι σήμερα η εταιρία έχει δεχτεί πολλές παραγγελίες και έχει ολοκληρώσει και άλλα τρισδιάστατα εκτυπωμένα κτήρια.

Ο τεραστίων διαστάσεων εκτυπωτής, ο οποίος έχει ύψος 6,6 μέτρα, πλάτος 10 μέτρα και μήκος 40 μέτρα, χρησιμοποιεί ένα μείγμα οικοδομικών και βιομηχανικών υπολειμμάτων και ινών γυαλιού σε μια βάση από τσιμέντο γρήγορης πήξης και έναν ειδικό παράγοντα σκλήρυνσης. Το μείγμα αυτό, το οποίο εξωθεί το άκρο του εκτυπωτή σε ένα ακριβές μοτίβο, χρειάζεται 24 ώρες για να στεγνώσει. Ως πρότυπο χρησιμοποιείται ένα σχέδιο σε μορφή CAD, το οποίο χρησιμοποιεί ο υπολογιστής για το χειρισμό του βραχίονα με τον extruder που αποθέτει το υλικό. Οι τοίχοι τυπώνονται κούφιοι με ένα μοτίβο «ζιγκ-ζαγκ» εσωτερικά, το οποίο προσφέρει ενίσχυση, οικονομία στα υλικά αλλά και χώρο για μόνωση.

¹²⁰ Rory Stott, *Chinese Company Showcases Ten 3D-Printed Houses*, archdaily, 2 Σεπτεμβρίου 2014, από: www.archdaily.com/543518/chinese-company-showcases-ten-3d-printed-houses (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹²¹ Nicola Davison, *3D-printed cities: is this the future?*, theguardian, 26 Φεβρουαρίου 2015, από: www.theguardian.com/cities/2015/feb/26/3d-printed-cities-future-housing-architecture (μτφ. Κ. Φλωράκη)

Για την κατασκευή της βίλας η οποία κοστίζει 105.000\$ χρειάστηκε η δουλειά οχτώ ατόμων για ένα μήνα, ενώ, όπως εξηγεί ο Zheng Jian¹²², αν γινόταν χρήση των παραδοσιακών μεθόδων, θα δούλευαν τριάντα άνθρωποι για τρεις μήνες. Το κόστος επίσης υποδιπλασιάστηκε.¹²³

Ακόμα με τη χρήση ανακυκλώσιμων υλικών, αυτή η μέθοδος κατασκευής είναι φιλική προς το περιβάλλον και οικονομική. Ο Ma Yihe¹²⁴ αναφέρει ότι τα βιομηχανικά υπολείμματα από την κατεδάφιση κτηρίων καταστρέφουν το περιβάλλον, αλλά με το 3D printing γίνεται δυνατή η ανακύκλωσή τους για τη δημιουργία νέων οικοδομικών υλικών. Η δυνατότητα αυτή προσφέρει ένα πιο ασφαλές περιβάλλον για τους εργάτες και μειώνει σημαντικά το κόστος κατασκευής.¹²⁵



¹²² Ο Zheng Jian είναι ο γενικός διευθυντής των κατασκευών της Winsun στο πάρκο της πόλης Suzhou

¹²³ Nicola Davison, *3D-printed cities: is this the future?*, theguardian, 26 Φεβρουαρίου 2015, από: www.theguardian.com/cities/2015/feb/26/3d-printed-cities-future-housing-architecture (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹²⁴ Ο Ma Yihe είναι διευθύνων σύμβουλος της Winsun

¹²⁵ Rory Stott, *Chinese Company Showcases Ten 3D-Printed Houses*, archdaily, 2 Σεπτεμβρίου 2014, από: www.archdaily.com/543518/chinese-company-showcases-ten-3d-printed-houses (μτφ. Κ. Φλωράκη)

Γίνεται φανερό ότι η παραπάνω προσέγγιση είναι βασισμένη στην οικονομία. Έχει εντυπωσιακά αποτελέσματα καθώς φαίνεται ότι μπορεί να καταφέρει την οικονομική κατασκευή κτηρίων σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να βοηθήσει στην επίλυση προβλημάτων ζήτησης κατοικίας σε αναπτυσσόμενες περιοχές ή σε οικισμούς άμεσης ανάγκης σε περιπτώσεις περιβαλλοντικών καταστροφών ή κυμάτων προσφύγων. Ακόμα η οικονομία συνίσταται και στο γεγονός ότι οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται είναι ανακυκλώσιμες και μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε περίπτωση κατεδάφισης.

Από την άλλη, προβληματίζει το γεγονός, ότι μια τόσο καινοτόμος κατασκευαστική μέθοδος συνδυάζεται με αρχιτεκτονικές μορφές η οποίες παραπέμπουν σε συμβατική αρχιτεκτονική του προηγούμενου αιώνα ή στο νεοκλασικισμό. Πιθανότατα αυτό συμβαίνει διότι η εταιρία έχει ως κύριο σκοπό την ανάπτυξη της τεχνολογίας και των μέσων κατασκευής. Όπως αναφέρει ο *Ma* «*Το μέλλον της Winsun είναι ως μια τεχνολογική εταιρία, μια που προάγει νέες τεχνολογίες.*»¹²⁶

Ένας γενικότερος προβληματισμός αφορά το κατά πόσο η τρισδιάστατη εκτύπωση με σκυρόδεμα αφορά έναν τρόπο παραγωγής των σημαντικών στοιχείων του κτηρίου ή ολόκληρου του οικοδομήματος όπως στο παραπάνω παράδειγμα. Ο καθηγητής Austin αναφέρει σχετικά ότι *δεν είναι πεπεισμένος ότι το τρισδιάστατα εκτυπωμένο σκυρόδεμα θα απασχολήσει την κατασκευή κατοικιών πολυτελείας, ενώ στον αναπτυσσόμενο κόσμο η εργασία είναι φθηνή και έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι κατασκευής κατοικιών με τοπικά υλικά που λειτουργούν για εκατοντάδες χρόνια. Έτσι η ιδέα μεταφοράς ενός τεράστιου μηχανήματος στο εργοτάξιο για την εκτύπωση ολόκληρων σπιτιών είναι λίγο τραβηγμένη. Από την άλλη, η εκτύπωση οικοδομικών στοιχείων όπου επιζητείται μια ποικιλία στη γεωμετρία, είναι μια ελκυστική προσέγγιση ή οποία σύντομα θα αποτελεί πραγματικότητα.*¹²⁷ Η ταχύτητα και η οικονομία που προσφέρει ο παραπάνω τρόπος κατασκευής, είναι πάντως πλεονεκτήματα που παραμένουν ακόμα και στην περίπτωση εκτύπωσης μερών κτηρίου, γεγονός που έχει να προσφέρει πολλά όταν υπάρχει ανάγκη γρήγορης και οικονομικής κατοικίας.

¹²⁶ Nicola Davison, *3D-printed cities: is this the future?*, theguardian, 26 Φεβρουαρίου 2015, από: www.theguardian.com/cities/2015/feb/26/3d-printed-cities-future-housing-architecture (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹²⁷ Jane Wakefield, *Tomorrow's Buildings: Construction industry goes robotic*, BBC News, 4 May 2016, από: www.bbc.com/news/technology-35746648 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

Σύγχρονες μέθοδοι κατασκευής και ο ρόλος του αρχιτέκτονα



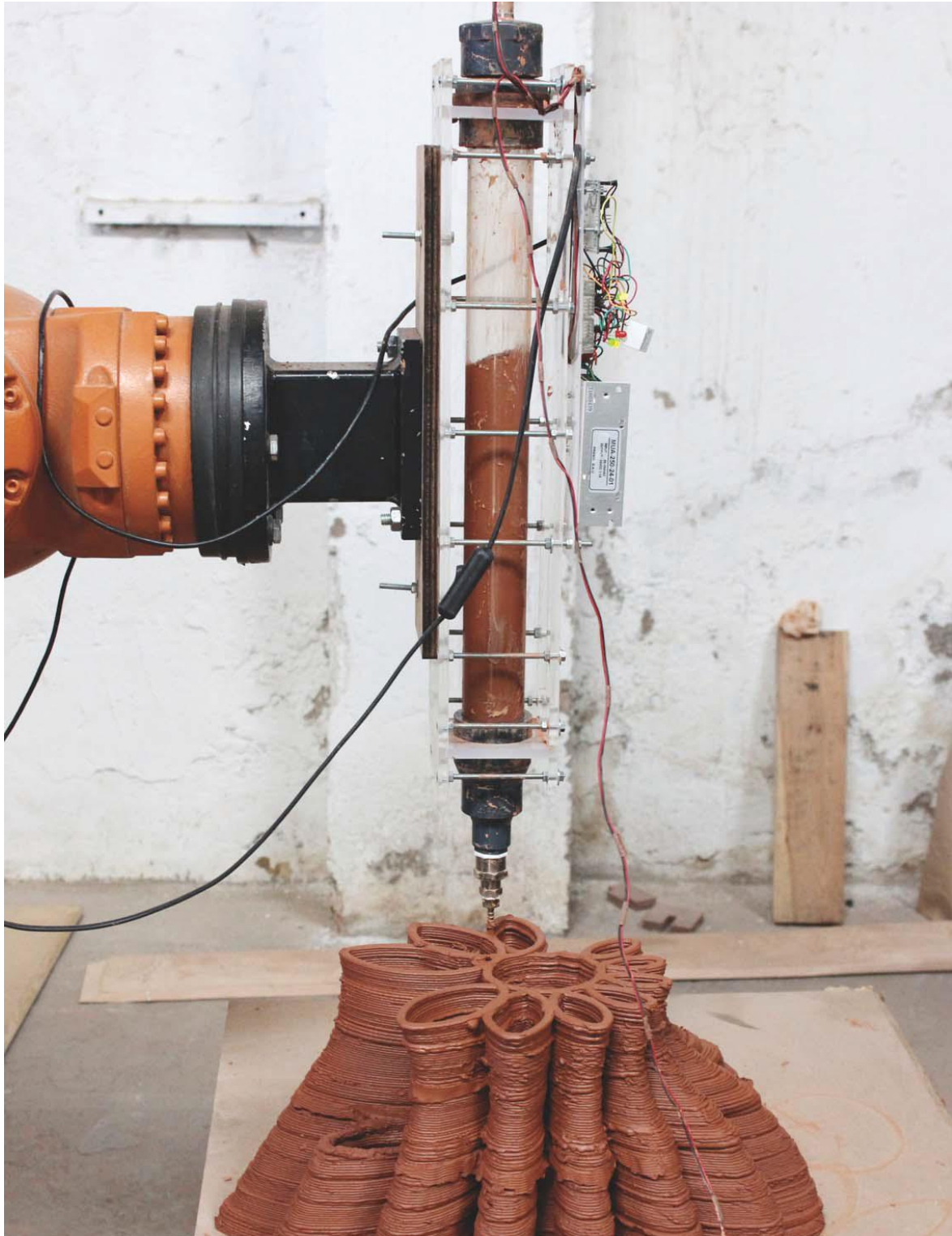
2. Δουλεύοντας με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των υλικών και του περιβάλλοντος

Το FABbots research studio έχει μια ιδιαίτερη προσέγγιση της τρισδιάστατης εκτύπωσης η οποία βασίζεται στην προσαρμογή των υπάρχοντων ρομποτικών μηχανημάτων για την οικοδόμηση με τεχνικές additive manufacturing στην τοποθεσία και την εξερεύνηση ιδεών τρισδιάστατης εκτύπωσης συνεχούς υλικού. *Πρωωθεί τη χρήση τοπικά διαθέσιμων υλικών, την προσαρμογή υπάρχοντων μηχανικών εργαλείων και την ανάπτυξη εξειδικευμένου λογισμικού, συνδυάζοντας έτσι την επιστήμη των υλικών, τον σχεδιασμό μηχανημάτων και το computational design για την παραγωγή αρχιτεκτονικών λύσεων.*¹²⁸

Τα συστήματα μηχανημάτων – υλικών που προκύπτουν εξερευνούν τρόπους παραγωγής μιας αρχιτεκτονικής η οποία είναι δυνατή μόνο με μεθόδους additive manufacturing. Χαρακτηρίζεται από πολύπλοκες διανομές υλικών που προσφέρουν πολυλειτουργικές αποδόσεις. Αυτή η προσέγγιση βασίζεται σε υψηλή ακρίβεια στην παραγωγή και την εκτέλεση του κώδικα εκτύπωσης, στις λειτουργικές ικανότητες της μηχανής και την ανάλυση των ιδιοτήτων των υλικών και του περιβάλλοντος. Παρόλ' αυτά οι παραγόμενες φυσικές δομές απέχουν από μια λεία και στρωτή όψη, η οποία πιθανόν αναμένεται από την παραπάνω ακρίβεια και αποτελεί το επιθυμητό αποτέλεσμα για τους περισσότερους που ασχολούνται με την τρισδιάστατη εκτύπωση. Το αποτέλεσμα στο παράδειγμα που εξετάζεται, και συχνά δε δύναται να προβλεφθεί, αναδύεται από το συνδυασμό της ακριβούς εκτέλεσης του κώδικα της μηχανής και τα πιο φυσικά και ανάγλυφα χαρακτηριστικά του υλικού το οποίο σχηματίζεται σε πραγματικό χρόνο, κάτω από διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η φυσική μορφή του αποτελέσματος προκύπτει από δύο κυρίως παράγοντες. Από τη μία συμβάλλει η χρήση άφθονων, φυσικών οικοδομικών υλικών όπως ο πηλός ή η άμμος, τα οποία είναι ετερογενή και παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά κατά την απόθεση, τη σκλήρυνση και την ωρίμανση. Από την άλλη, η εκμετάλλευση μηχανημάτων μεγάλης κλίμακας προσαρμοσμένα για τη συγκεκριμένη εργασία στην

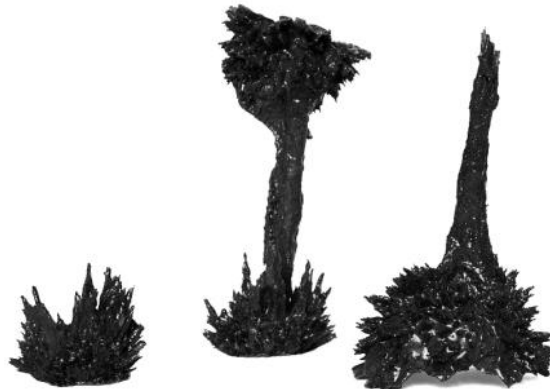
¹²⁸ Malé-Alemaný and Jordi Portell, *Soft Tolerance: An Approach for Additive Construction on Site*, στο *Architectural Design: High Definition: Zero tolerance in design and production*, Wiley, London 2014 σελ. 122, (μτφ. Κ. Φλωράκη)



τελική τοποθεσία, συνεπάγεται ότι η κατασκευαστική διαδικασία επηρεάζεται και από περιβαλλοντικούς παράγοντες και αλλαγές.

Με αυτόν τον τρόπο, η διαδικασία της εκτύπωσης γίνεται με συνεχή προσαρμογή και ανατροφοδότηση στον ψηφιακό κώδικα. Αυτά τα νέα *computational* εργαλεία διευκολύνουν γενετικές σχεδιαστικές διαδικασίες όπου η πολυπλοκότητα του υλικού, οι ιδιαιτερότητες της μηχανής και οι λογικές εκτύπωσης αποτελούν την ανάδυση του σχεδίου.¹²⁹ Όπως αναφέρουν οι Marta Malé-Alemany και Jordi Portell¹³⁰, η ομάδα FABbots προωθεί μια προσέγγιση *additive fabrication* η οποία παίζει με ενσωματωμένες ανοχές και καλωσορίζει την απρόβλεπτη ομορφιά αναδυόμενων μορφών, δίνοντας αξία στην υλική τους έκφραση και υφή.¹³¹

Έχει ενδιαφέρον επίσης ο τρόπος με τον οποίο τα αποτελέσματα της τεχνικής της ομάδας FABbots ταιριάζουν αρμονικά με το φυσικό περιβάλλον, χάρη στην επιλογή των υλικών και τον φυσικό τρόπο εναπόθεσής τους. Καθώς μοιάζουν να αποτελούν έργα της φύσης και δεν θυμίζουν στο ελάχιστο βιομηχανικές κατασκευές, αρχιτεκτονικά έργα κατασκευασμένα με την παραπάνω τεχνική θα μπορούσαν να ενταχθούν σε περιοχές της υπαίθρου.



¹²⁹ Malé-Alemany and Jordi Portell, *Soft Tolerance: An Approach for Additive Construction on Site*, στο *Architectural Design: High Definition: Zero tolerance in design and production*, Wiley, London 2014 σελ. 126, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹³⁰ Μέλη της ερευνητικής ομάδας FABbots

¹³¹ Malé-Alemany and Jordi Portell, *Soft Tolerance: An Approach for Additive Construction on Site*, στο *Architectural Design: High Definition: Zero tolerance in design and production*, Wiley, London 2014 σελ. 127, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

3. Protohouse 2.0, αρχιτεκτονική από ίνες υλικού

Πολύ διαφορετική προσέγγιση της τρισδιάστατης εκτύπωσης αποτελεί η εκτύπωση ινών υλικού και η πλέξη τους, αντί για την τοποθέτηση του υλικού σε στρώσεις. Το Protohouse 2.0, από την ομάδα αγγλική αρχιτεκτονική ομάδα Softkill Design¹³², είναι ένα μονώροφο οίκημα με ινώδη δομή η οποία μοιάζει με αυτήν των οστών. Θα είναι κατασκευασμένο από πλαστικό και θα εκτυπωθεί στο εργοστάσιο, σε μέρη που στη συνέχεια θα συναρμολογηθούν επιτόπου.¹³³

Είναι σχεδιασμένο να προβάλλει από την πλευρά ενός λόφου και η δομή του αναδύθηκε με τη χρήση ενός αλγορίθμου ο οποίος εξομοιώνει την ανάπτυξη των οστών για τη τοποθέτηση υλικού όπου απαιτείται ανάλογα με τα φορτία και τις δυνάμεις που ασκούνται. Ταυτόχρονα οι αρχιτέκτονες προσπάθησαν με τον αλγόριθμο να δημιουργήσουν τις δικές τους αρχιτεκτονικές μορφές. Το αποτέλεσμα είναι ένα πυκνό δίκτυο ινών, αντί για ένα συμπαγές περίβλημα. Η τοποθέτηση των ινών οι οποίες έχουν διάμετρο 0,7 χιλιοστά, προσφέρει ένα πλήθος από διαφορετικές υφές και τη δυνατότητα παραγωγής όλων των αρχιτεκτονικών στοιχείων όπως τον σκελετό, τις σκάλες, την επίπλωση και τις όψεις, ταυτόχρονα.¹³⁴ Το δόμημα είναι πορώδες, επιτρέποντας στην βροχή να το διαπερνά, με υδρομόνωση εσωτερικά, και όχι στο εξωτερικό. Τα κουφώματα θα έχουν τζάμια με τον παραδοσιακό τρόπο.

Το σχέδιο είναι να εκτυπωθεί σε 31 τμήματα με τη χρήση ενός μεγάλου 3D εκτυπωτή, και στη συνέχεια θα μεταφερθεί στην τοποθεσία του όπου και θα συναρμολογηθεί. Για την συναρμολόγηση δεν απαιτούνται επιπλέον εξαρτήματα ή στοιχεία, διότι χάρη στις ίνες τα κομμάτια «κουμπώνουν» μεταξύ τους. Οι αρχιτέκτονες επέλεξαν να δουλέψουν με τις διαθέσιμες τεχνολογίες 3D printing, με έναν σχετικά μικρό εκτυπωτή στο ελεγχόμενο περιβάλλον του εργαστηρίου και να μεταφερθούν στην τοποθεσία μόνο για τη συναρμολόγηση. Η τεχνική της εκτύπωσης είναι η Selective Laser Sintering, η

¹³² Η Softkill Design είναι μια ομάδα αρχιτεκτόνων αποτελούμενη από τους Nicholette Chan, Gilles Retsin, Aaron Silver, Sophia Tang, η οποία έχει ως έδρα το Λονδίνο. Ασχολείται με την έρευνα νέων μεθόδων γενετικού σχεδιασμού για additive manufacturing.

¹³³ Emilie Chalcraft, *How 3D printing will change architecture and construction*, Dezeen, 2013, από: www.dezeen.com/2013/05/21/3d-printing-architecture-print-shift (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹³⁴ Marcus Fairs, *Protohouse by Softkill Design*, Dezeen, 23 Οκτωβρίου 2012, από: www.dezeen.com/2012/10/23/protohouse-by-softkill-design/

οποία αναλύεται σε προηγούμενο κεφάλαιο. Σύμφωνα με την ομάδα τα κομμάτια μπορούν να τυπωθούν μέσα σε τρεις εβδομάδες και να συναρμολογηθούν μέσα σε μία ημέρα.

Όπως αναφέρει ο Aaron Silver, μέλος της αρχιτεκτονικής ομάδας, το *3D printing* μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα οικονομικά κτήρια τα οποία χρησιμοποιούν μικρότερη ποσότητα υλικών. Προβλέπει ένα πολύ ενδιαφέρον μέλλον για τη σχέση της αρχιτεκτονικής με την τρισδιάστατη εκτύπωση, καθώς επιτρέπει μεγάλη εξοικονόμηση του κόστους και αποδοτικότητα.¹³⁵

Ο Silver προσθέτει επίσης ότι οι επικαλύψεις και οι στέγες των κτηρίων μπορούν να εκτυπώνονται ως ευλύγιστα υφάσματα και να σκεπάζουν τα κτήρια. Η ομάδα Softkill Design αναπτύσσει εκτυπωμένα πετάσματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εσωτερικές μεμβράνες ή εξωτερικά, αδιάβροχα πανέλα ή επιφάνειες.

Το παραπάνω αποτελεί ένα επιτυχημένο παράδειγμα μίμησης της φύσης στην αρχιτεκτονική για την επίτευξη της μέγιστης αποδοτικότητας με την χρήση του ελάχιστου υλικού που τη χαρακτηρίζει. Αποτελεί μια ιδιαίτερα καινοτόμο ιδέα καθώς συνδυάζει το digital fabrication με μια πολύ διαφορετική μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης. Το αποτέλεσμα είναι μια μορφή η οποία διαφέρει ριζικά από τα συμβατικά κτήρια και ξενίζει στο μάτι, προβληματίζοντας έτσι σχετικά με το πόσο πιθανό είναι η βέλτιστη λύση για κάθε αρχιτεκτονικό πρόβλημα, και ίσως οι αρχιτεκτονικές μορφές του μέλλοντος, τόσο διαφορετική από τα σημερινά δεδομένα, να μπορεί να συλληφθεί μόνο με τη βοήθεια του υπολογιστή.



¹³⁵ Marcus Fairs, *Protohouse by Softkill Design*, dezeen, 23 Οκτωβρίου 2012, από www.dezeen.com/2012/10/23/protohouse-by-softkill-design/ (μτφ. Κ. Φλωράκη)



4. Silk Pavilion, η τρισδιάστατη εκτύπωση της φύσης

Η ερευνητική ομάδα Mediated Matter του Ινστιτούτου Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT) εξερευνεί, όπως αναφέρει η ιστοσελίδα τους, «*computational στρατηγικές μορφογένεσης με εμπνευσμένη από τη βιολογία κατασκευή*». ¹³⁶ Πολλές από αυτές συμπεριλαμβάνουν έρευνα ανάπτυξης των τεχνολογιών 3D printing για αρχιτεκτονικές εφαρμογές. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η ομάδα ερευνά επίσης τρόπους για εκτύπωση υλικών διαβαθμισμένων ιδιοτήτων μέσα στον όγκο τους.

Η Oxman και η ομάδα της αναζήτησαν έμπνευση στον φυσικό κόσμο και μελέτησαν τον τρόπο με τον οποίο οι μεταξοσκώληκες φτιάχνουν τα κουκούλια τους. Οι μεταξοσκώληκες «τυπώνουν» ουσιαστικά το κουκούλι κινώντας το κεφαλάκι τους σε οχτάρια, τοποθετώντας ίνες μεταξιού γύρω τους καθώς προχωρούν. Έχουν την ικανότητα να διαφοροποιούν τις ιδιότητες του υλικού φτιάχνοντας το κουκούλι απαλό εσωτερικά και σκληρό στην εξωτερική πλευρά. Πέρα από τις ίνες μεταξιού οι οποίες μπορεί να φτάνουν το χιλιόμετρο σε μήκος, η χρυσαλλίδα εκκρίνει και σερισίνη, μια κολλώδης ουσία η οποία συνδέει τις ίνες μεταξύ τους σχηματίζοντας το κουκούλι. Συνοπτικά, ο μεταξοσκώληκες δρα ως ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής πολλών διευθύνσεων και διαβάθμισης υλικών. Η Oxman αναφέρει ότι συνδέσαν μικροσκοπικούς μαγνήτες στα κεφάλια των χρυσαλλίδων και κατέγραψαν την κίνησή τους καθώς έχτιζαν τα κουκούλια τους. Στη συνέχεια μετέφρασαν τα δεδομένα σε έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή συνδεδεμένο σε έναν ρομποτικό βραχίονα, ο οποίος επιτρέπει την εξέταση της βιολογικής δόμησης σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Στην παραδοσιακή τρισδιάστατη εκτύπωση, το μέγεθος του μεταλλικού σκελετού του εκτυπωτή θέτει όρια στους σχεδιαστές που επιθυμούν να εκτυπώσουν σε μεγαλύτερη κλίμακα και να επιτύχουν δομική και υλική πολυπλοκότητα, ¹³⁷ όπως εξηγεί η Neri Oxman. Στην προσπάθεια εκτύπωσης με μεγαλύτερη ελευθερία, η ομάδα αντικατέστησε τον κλασικό σκελετό με έναν ρομποτικό βραχίονα έξι διευθύνσεων. Αυτή η αλλαγή επιτρέπει εκτύπωση ελεύθερων μορφών σε μεγάλη κλίμακα, χωρίς να απαιτείται υποστηρικτικός εξοπλισμός. Οι ρομποτικοί βραχίονες μπορούν να τυπώνουν

¹³⁶ Mediated Matter, about, από: matter.media.mit.edu/about (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹³⁷ Emilie Chalcraft, *How 3D printing will change architecture and construction*, Dezeen, 2013, από: www.dezeen.com/2013/05/21/3d-printing-architecture-print-shift (μτφ. Κ. Φλωράκη)



με παραδοσιακά υλικά, όπως πλαστικό, σκυρόδεμα ή σύνθετα υλικά, αλλά και να υφαινούν ή πλέκουν τρισδιάστατες δομές από ίνες.

Με την εφαρμογή των παραπάνω ερευνών, η ομάδα Mediated Matter κατασκεύασε το 2013 το Silk Pavilion, ή Μεταξωτό Περίπτερο, το οποίο συνδυάζει την επιστημονική έρευνα, τον computational σχεδιασμό και τη βιομηχανική και ψηφιακή κατασκευή.¹³⁸ Το περίπτερο δημιουργήθηκε με μία βάση από μεταλλικό σκελετό πάνω στον οποίο CNC μηχανήματα ύφαναν με μεταξωτό νήμα μια αραιή πλέξη. Ο προγραμματισμός των μηχανημάτων και, ο τρόπος και η πυκνότητα της πλέξης καθορίστηκαν ύστερα από ενδελεχή έρευνα πάνω στους μεταξοσκώληκες και τον τρόπο δουλειάς τους που θυμίζει συχνά προγραμματισμένη μηχανή. Στη συνέχεια πάνω σε αυτή την αρχική δομή, αφέθηκαν 6.500 ζωντανοί μεταξοσκώληκες οι οποίοι ολοκλήρωσαν το περίπτερο. Μέσα από τον συνδυασμό προσεκτικού σχεδιασμού του αρχικού σκελετού και του ενστίκτου των μεταξοσκώληκων να κατευθύνονται προς τις πιο σκοτεινές περιοχές της επιφάνειας του περιπτέρου, το διάστικτο περίβλημα του περιπτέρου αποτελεί το συνδυασμό ανάμεσα σε ένα γιγάντιο κουκούλι προνύμφης και σε ένα λειτουργικό χώρο για τον άνθρωπο.

Σύμφωνα με την Ochman στο μέλλον τα κτήρια είναι πιθανό να κατασκευάζονται από σμήνη μικροσκοπικών ρομπότ τα οποία χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό από τεχνικές εκτύπωσης και πλέξης. Παρότι η χρήση μεγάλων σκελετών στους τρισδιάστατους εκτυπωτές για την επίτευξη εκτυπώσεων μεγάλης κλίμακας προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, η εισαγωγή της κατασκευής από σμήνη μικρών ρομπότ είναι αυτή που ουσιαστικά οδηγεί την τεχνολογία της οικοδομικής στον 21^ο αιώνα¹³⁹. Για να περιγράψει το μέλλον των τεχνολογιών της αρχιτεκτονικής, η Ochman χρησιμοποιεί έννοιες όπως 4D printing, κατασκευή από σμήνη και CNC πλέξη.

Στην ουσία αυτό το παράδειγμα δεν διαφέρει πολύ από το προηγούμενο καθώς μελετάει μεθόδους της φύσης για να καταλήξει στην αρχιτεκτονική δομή και τη χρήση εκτύπωσης με τη μορφή πλέξης. Εδώ όμως η φύση προσέφερε επίσης την ιδέα της χρήσης του σμήνους των κατασκευαστικών ρομπότ, η οποία είναι πολλά υποσχόμενη.

¹³⁸ Rory Stott, *Silk Pavilion / MIT Media Lab*, Arch Daily, 5 Ιουνίου 2013, από: www.archdaily.com/384271/silk-pavilion-mit-media-lab

¹³⁹ Emilie Chalcraft, *How 3D printing will change architecture and construction*, Dezeen, 2013, από: www.dezeen.com/2013/05/21/3d-printing-architecture-print-shift (μτφ. Κ. Φλωράκη)

5. 4D Printing, μια εφαρμογή εξελικτικής κατασκευής

Το Self-Assembly Lab στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT) έχει ως στόχο του την ανάπτυξη αυτό-συναρμολογούμενων, προγραμματιζόμενων υλικών και της σχετικής τεχνολογίας για βιομηχανικές εφαρμογές στην περιοχή της οικοδομικής.

Ένας αριθμός αυτο-συναρμολογούμενων, αυτό-αναδιαμορφώμενων και προγραμματίσιμων προτύπων υλικών αναπτύχθηκαν έτσι, πολλά από τα οποία απαιτούν όμως ένα παραπάνω κατασκευαστικό βήμα για την ενσωμάτωση της ικανότητας προγραμματισμού και της απαραίτητης ενέργειας για τη μεταμόρφωση, για παράδειγμα μαγνήτες, ελαστικά νήματα, καλώδια νικελίου, γρανάζια και άλλα. Αυτή η πρόκληση οδήγησε στη συνεργασία με το Stratasys Ltd, μια κυρίαρχη βιομηχανία στην εκτύπωση με πολλά και διαφορετικά υλικά και στην ανάπτυξη αυτού που ονομάζουν «4D Printing», με στόχο την παροχή εξορθολογισμένων, πολυλειτουργικών συστημάτων εκτύπωσης υλικών.

Το 4D Printing είναι μια νέα διαδικασία evolutionary fabrication ή εξελικτικής κατασκευής, η οποία αναδεικνύει μια δραστική αλλαγή στο additive manufacturing. Αναφέρεται σε εκτυπώσεις με διαφορετικά υλικά με την ικανότητα να μεταμορφώνονται με το πέρασμα του χρόνου ή σε προσαρμοσμένα συστήματα υλικών με που μπορούν να αλλάξουν από ένα σχήμα σε ένα άλλο, αμέσως μετά την εκτύπωση. Αυτή η τεχνική προσφέρει μια συνεχή ροή από την ιδέα στην πραγματοποίηση με λειτουργικότητα ενσωματωμένη απευθείας μέσα στα υλικά. *Η τέταρτη διάσταση ορίζεται εδώ ως την μεταμόρφωση μέσα στο πέρασμα του χρόνου, δίνοντας έμφαση στο γεγονός ότι οι εκτυπωμένες δομές δεν είναι πια απλά στατικά, νεκρά αντικείμενα αλλά είναι προγραμματιστικά ενεργές και μπορούν αν μεταμορφωθούν ανεξάρτητα.*¹⁴⁰

Με τα υλικά του 4D Printing και τις δυνατότητες του εκτυπωτή, μια μοναδική εκτύπωση, με χαρακτηριστικά πολλών υλικών, μπορεί να μεταμορφώσει οποιοδήποτε μονοδιάστατο νήμα ή οποιαδήποτε δισδιάστατη επιφάνεια σε ένα τρισδιάστατο σχήμα ή μια μορφή από ένα τρισδιάστατο σχήμα σε ένα άλλο. Με τη χρήση μόνο του νερού για την απαιτούμενη ενέργεια ενεργοποίησης, αυτή η τεχνική αναδεικνύει νέες προοπτικές για την παραγωγή και την κατασκευή.

¹⁴⁰ Από την ομάδα του MIT χρησιμοποιείται ο εκτυπωτής Connex της εταιρίας Stratasys Ltd

Στον πυρήνα αυτής της τεχνολογίας βρίσκονται το μηχάνημα-εκτυπωτής, το υλικό και το γεωμετρικό «πρόγραμμα». Ο εκτυπωτής που χρησιμοποιείται προσφέρει multi-material εκτύπωση PolyJet με μία ποικιλία από ιδιότητες στα υλικά που χρησιμοποιεί, από άκαμπτο έως μαλακό πλαστικό και διάφανα υλικά, και με υψηλής ακρίβειας έλεγχο πάνω στο ενεργό άκρο και την εναπόθεση κουκκίδων υλικού. Το δυναμικό υλικό αναπτύχθηκε από την ομάδα έρευνας υλικών της Stratasys και είναι ένα υδρόφιλο πολυμερές τα οποίο διαστέλλεται κατά 150% όταν απορροφάει νερό. Ο εκτυπωτής εναποθέτει ένα άκαμπτο πολυμερές υλικό, το οποίο δίνει τη δομή και τους περιορισμούς στις γωνίες για την αναδίπλωση, ταυτοχρόνως με το «ενεργό» υλικό. Το τελευταίο σημαντικό συστατικό για το 4D Printing είναι ο σχεδιασμός του γεωμετρικού προγράμματος που ενσωματώνει την ικανότητα για αλλαγή κατάστασης απευθείας μέσα στα ίδια τα υλικά.¹⁴¹ Όταν εκτυπώνεται το κομμάτι έχει μια αρχική θέση, ενώ στη συνέχεια, μόλις συναντήσει νερό, το ενεργό υλικό φουσκώνει εξαναγκάζοντας το άκαμπτο υλικό να λυγίσει. Όταν το άκαμπτο υλικό συναντήσει τα γειτονικά του στοιχεία αναγκάζεται να σταματήσει να αναδιπλώνεται φτάνοντας έτσι στην τελική θέση της διαμόρφωσής του. Η τοποθέτηση και ο όγκος του άκαμπτου και του ενεργού υλικού αποτελούν ένα ενσωματωμένο μέσο στη δομή γεωμετρικό πρόγραμμα, με την απαραίτητη ενέργεια ενεργοποίησης για τη μεταμόρφωση από ένα σχήμα σε κάποιο άλλο.¹⁴²



¹⁴¹ Skylar Tibbits, *4D Printing: Multi-Material Shape Change*, στο *Architectural Design: High Definition: Zero tolerance in design and production*, Wiley, London 2014 σελ. 119, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

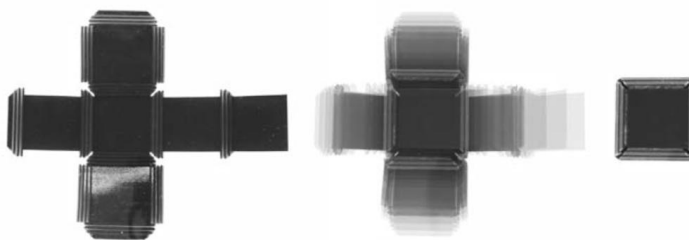
¹⁴² Στο ίδιο, σελ. 120, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

Με την εισαγωγή των προγραμματίσιμων εκτυπωμένων υλικών το όραμα για το μέλλον των προϊόντων και των διαδικασιών αλλάζει ριζικά. Προσωπικά και διαδραστικά προϊόντα θα προσαρμόζονται στις απαιτήσεις του χρήστη, τις βιομετρικές πληροφορίες, την θερμοκρασία του σώματος και τις εσωτερικές πιέσεις. Παρομοίως τα προϊόντα μπορούν να γίνουν πολύ πιο ελαστικά και συντονισμένα με τις περιβαλλοντικές αλλαγές συμπεριλαμβανομένων της υγρασίας, της θερμοκρασίας, της πίεσης, του υψόμετρου και του ήχου.¹⁴³ Μοναδικά και συντονισμένα προϊόντα θα παράγονται με εντελώς νέους τρόπους όπου τα υλικά θα ενεργοποιούνται μέσω εγκλωβισμένης ενέργειας ώστε να συντίθενται μόνα τους, να αναδιαμορφώνονται, μεταλλάσσονται και να αναπαράγονται.

Ακόμα, αυτές οι δυνατότητες μειώνουν τους περιορισμούς λόγω όγκου κατά την μεταφορά, με συσκευασίες συμπυκνωμένων υλικών, τα οποία θα ενεργοποιούνται μετά την παράδοση ώστε να ανακτήσουν τον πλήρη όγκο και λειτουργικότητα.

Όλα αυτά τα μελλοντικά προγραμματίσιμα υλικά δε θα πετιούνται όταν αστοχούν, αντιθέτως θα διορθώνουν την αστοχία και θα αυτοεπισκευάζονται ώστε να ικανοποιούν νέες απαιτήσεις. Ακόμα και όταν παλιώνουν θα μπορούν να αυτοαποσυναρμολογούνται για πλήρη ανακύκλωση, διαλυόμενα στα θεμελιώδη συστατικά τους ώστε να ανασυσταθούν ως νέα προϊόντα στο μέλλον.¹⁴⁴

Έτσι, το evolutionary fabrication και τα προγραμματίσιμα ενεργά υλικά προσφέρουν συναρπαστικές δυνατότητες για το μέλλον των εξατομικευμένων και διαδραστικών προϊόντων, των αυτοσυναρμολογούμενων οικοδομικών στοιχείων και τους τομείς της μεταφοράς και της παραγωγής.

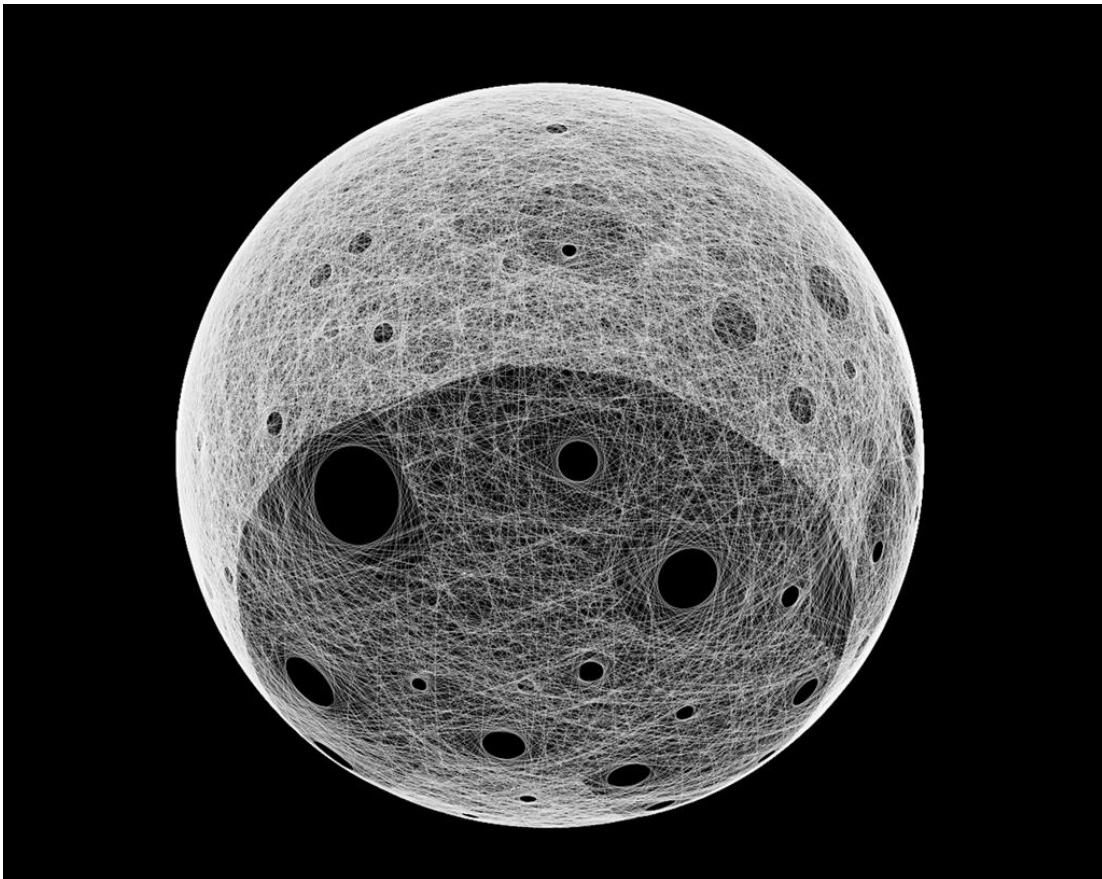


¹⁴³ Skylar Tibbits, *4D Printing: Multi-Material Shape Change*, στο *Architectural Design: High Definition: Zero tolerance in design and production*, Wiley, London 2014 σελ. 121, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹⁴⁴ Στο ίδιο, σελ. 121, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

Δ. Μέρος:

Επίλογος



Δ. Μέρος: Επίλογος

Η ανάλυση των σύγχρονων ψηφιακών μεθόδων κατασκευής και των εφαρμογών τους στην αρχιτεκτονική έκφραση και δημιουργία δίνει τροφή για σκέψη και θέτει νέα ερωτηματικά σχετικά με το πώς θα διαμορφωθεί το μέλλον της αρχιτεκτονικής τα επόμενα χρόνια, ποιον ρόλο καλείται να παίξει ο αρχιτέκτονας στο νέο παράδειγμα και ποια ζητήματα προβληματίζουν και απαιτούν προσοχή και επιφύλαξη.

1. Το μέλλον

Όλα δείχνουν ότι βρισκόμαστε στην αρχή μίας εποχής όπου ανοίγει ο διάλογος για κτιριακά σύνολα εξολοκλήρου κατασκευασμένα από ρομποτικά μέσα.

«Τα οικοδομικά εργοτάξια του μέλλοντος θα διαφέρουν πολύ από αυτά που έχουμε συνηθίσει. Αντί για εργάτες με κίτρινα γιλέκα και κράνη, θα υπάρχουν βοηητά από drones στον αέρα, ρομποτικοί εκσκαφείς και 3D printers να διαμορφώνουν νέες δομές.» Αυτό είναι σύμφωνα με την Jane Wakefield το όραμα όσων ερευνούν νέες τεχνολογίες.¹⁴⁵

Η αλήθεια είναι πάντως ότι η αλλαγή φαίνεται ήδη να συντελείται. Οι πωλήσεις βιομηχανικών τρισδιάστατων εκτυπωτών έχουν εκτοξευτεί, οι πωλήσεις μηχανημάτων για το 2015 πλησίασαν τα 15.000 κομμάτια. Με τις όλο και πιο αυξημένες δυνατότητες και το χαμηλότερο κόστος, αναμένεται τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα προϊόντα να διεισδύσουν σε ακόμα περισσότερες βιομηχανίες μέσα στα επόμενα χρόνια, ένα γεγονός το οποίο τροφοδοτεί προβλέψεις για μια αγορά των 20 δισεκατομμυρίων δολαρίων το 2020.¹⁴⁶ Η πρόκληση είναι όμως να ξαναανακαλύψουμε τον τρόπο με τον οποίο συλλαμβάνουμε και σχεδιάζουμε το τεχνητό και κτιστό περιβάλλον, έτσι ώστε η

¹⁴⁵ Jane Wakefield, *Tomorrow's Buildings: Construction industry goes robotic*, BBC News, 4 May 2016, από: www.bbc.com/news/technology-35746648 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

¹⁴⁶ Jordan Brandt, *3D Printing And The Complexity Of Compiling Matter*, Forbes, 2 Σεπτεμβρίου 2015, από: www.forbes.com/sites/valleyvoices/2015/09/02/3d-printing-and-the-complexity-of-compiling-matter/ (μτφ. Κ. Φλωράκη)

αλλαγή αυτή στη βιομηχανία της κατασκευής να οδηγήσει σε πραγματικά νέες προσεγγίσεις και καινοτομίες στην αρχιτεκτονική.

Οι Hob Lipson και Melba Kurman, εντοπίζουν το μέλλον του σχεδιασμού και της κατασκευής μέσα από την ανάπτυξη τριών τεχνολογιών - μοντέλων σκέψης και την εισαγωγή τους στον σχεδιασμό και στα μέσα παραγωγής.¹⁴⁷

Αρχικά προβλέπουν την ανάπτυξη λογισμικού το οποίο θα συνδυάζει την δύναμη της τεχνητής νοημοσύνης με την τρισδιάστατη εκτύπωση και θα ενσωματώνει την σχεδιαστική διαδικασία και τα μέσα παραγωγής σε μία πλατφόρμα. Η παραγωγή μορφής θα συμβαίνει μέσα από τη διάδραση ανθρώπου-μηχανής (human-machine interactions), όπου ο άνθρωπος θα θέτει τον χώρο προβλημάτων και η μηχανή μέσω ενός διαρκούς διαλόγου παράγει την μορφή και εν τέλει την κατασκευάζει. *Η διαδικασία αυτή θα επιτρέπει το σχεδιασμό νέων αντικειμένων τα οποία σήμερα ουσιαστικά δεν υπάρχουν.*¹⁴⁸

Αρά απαιτείται ένα ευέλικτο μέσο επικοινωνίας μεταξύ ανθρώπου και μηχανής. Οι Hob Lipson και Melba Kurman, προτείνουν ως το επόμενο βήμα μετά τον παραμετρικό σχεδιασμό τα reactive blueprints, σχέδια τα οποία μπορούν να αντιδρούν και να αλλάζουν ανάλογα με τις συνθήκες στις οποίες θα χρησιμοποιηθούν. Οπότε στο μέλλον θα είναι δυνατόν μέσα από «συζητήσεις» ανάμεσα στον αρχιτέκτονα και τον υπολογιστή να καταλήγουμε στο τελικό αποτέλεσμα.

Η παραπάνω θέση, ενισχύει τον ρόλο του αρχιτέκτονα ως διαμεσολαβητή ανάμεσα στους διάφορους παράγοντες που εμπλέκονται στον σχεδιασμό. Στο μέλλον πιθανώς οι αρχιτέκτονες να σχεδιάζουν με μια σειρά σκαριφημάτων και σκίτσων καθώς η αναζήτηση και δημιουργία των χώρων λύσεων θα γίνεται από υπολογιστές βασιζόμενους σε διαδικασίες μορφογενετικού σχεδιασμού. Η παραγωγή της μορφής θα γίνεται δηλαδή με τον υπολογιστή να «μελετά» τις συνθετικές κινήσεις και πράξεις του αρχιτέκτονα. Ταυτόχρονα κάνοντας γρήγορες τροποποιήσεις, προσφέρει τις μορφοποιημένες λύσεις. Δανειζόμενοι ορολογία από την επιστήμη των υπολογιστών, ο

¹⁴⁷ Hob Lipson, Melba Kurman, *Fabricated: The new world of 3d printing*, Wiley, London 2013, κεφ. 13

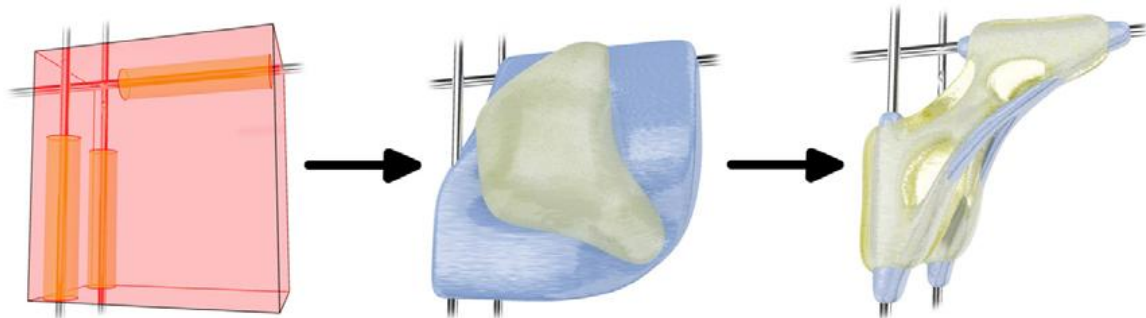
¹⁴⁸ Hob Lipson, Melba Kurman, *Fabricated: The new world of 3d printing*, Wiley, London 2013, σελ. 248 (μτφ. Κ. Φλωράκη)

υπολογιστής ουσιαστικά εφαρμόζει διαδικασίες design space optimization και design hysteresis, σε πραγματικό χρόνο ώστε να σχεδιάσει και κατασκευάσει την μορφή.

Τέλος αναφέρονται στην ίδια λογική στα μηχανήματα παραγωγής και συγκεκριμένα 3d printers, οι οποίοι ενσωματώνουν στον προγραμματισμό τους την λογική «close-loop». Ο όρος αναφέρεται στην ιδιότητα του εκτυπωτή να προσαρμόζει την εκτύπωση βάσει δεδομένων από το περιβάλλον. Ουσιαστικά μέσω τεχνολογίας 3d scanning, ο εκτυπωτής εκτελεί μια σειρά αξιολογήσεων του αποτελέσματος και τροποποιεί σε πραγματικό χρόνο την πορεία της ίδιας της εκτύπωσης. Η τεχνική αυτή ουσιαστικά αναφέρεται στην ικανότητα της μηχανής να εκτελεί διαδικασίες βελτιστοποίησης χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

Η παραπάνω λογική στην ρομποτική, απαιτεί μία νέα αντιμετώπιση στην έννοια της διάδρασης ανθρώπου-μηχανής. Ουσιαστικά ο αρχιτέκτονας, δεν επικοινωνεί με το ρομπότ κατασκευής με μία σειρά από τελειωμένα σχέδια αλλά από μια σειρά από διαγράμματα και σχεδιαστικές προθέσεις.

Συνολικά φαίνεται ότι οι αρχιτεκτονικές μορφές του μέλλοντος αλλά και ο τρόπος παραγωγής τους θα διαφέρουν ριζικά από τις σημερινές. Πιθανόν τα μελλοντικά κτήρια να ξένιζαν έναν παρατηρητή της εποχής μας, καθώς θα αποτελούν βελτιστοποιημένα μοντέλα λειτουργικότητας, οικονομίας υλικού και απόδοσης, προϊόντα υπολογιστικών διαδικασιών σχεδιασμού και παραγωγής τα οποία δε μπορεί να συλλάβει η ανθρώπινη φαντασία.



Στο μέλλον οι «έξυπνοι εκτυπωτές» θα παράγουν την βέλτιστη δομή για έναν δεδομένο σκοπό και στη συνέχεια θα την τυπώνουν. Ξεκινώντας με έναν γενικό όγκο ο εκτυπωτής παράγει έναν βέλτιστο σύνδεσμο για τη στήριξη τριών μπαρών.

2. Προβληματισμοί

Το νέο παράδειγμα της ψηφιακής κατασκευής στην αρχιτεκτονική και οι μελλοντικές προβλέψεις που αναλύθηκαν παραπάνω, δεν έρχονται χωρίς ορισμένους προβληματισμούς.

*Η πραγματικότητα των σημερινών δυνατοτήτων είναι αρκετά πίσω σε σχέση με τις προσδοκίες και το όραμα για τις τεχνολογίες της ψηφιακής κατασκευής.*¹⁴⁹ Από τα προηγούμενα κεφάλαια έγιναν φανερά προβλήματα που αφορούν το μέγεθος των μηχανημάτων και την μεταφορά των ψηφιακά κατασκευασμένων μερών όταν αυτές οι τεχνολογίες χρησιμοποιούνται στην πραγματική αρχιτεκτονική κλίμακα. Θα μπορούσαν ίσως να λυθούν με την κατασκευή τεράστιων μηχανημάτων ή με σμήνη μικρών ρομπότ που εργάζονται συνεργατικά; Ή με την κατασκευή μικρών κομματιών στο εργαστήριο και τη μεταφορά τους στη συνέχεια; Συχνά, η μαζική εξατομίκευση αγνοεί τον χρόνο και την ενέργεια που απαιτείται αφού έχουν παραχθεί τα διάφορα μέλη και χρειάζονται διαλογή και εντατική εργασία για τη συναρμολόγησή τους. Για την αυτοματοποίηση αυτής της διαδικασίας απαιτείται η κατάλληλη ανάπτυξη βιομηχανικών ρομπότ. Όλα αυτά τα εμπόδια πρέπει να αντιμετωπιστούν και πιθανότατα να συνδυαστούν ώστε να αναδειχθεί η αποτελεσματικότητα της ψηφιακής κατασκευής σε σχέση με τις αποδόσεις των συμβατικών μεθόδων κατασκευής.

Για την πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων που προσφέρουν οι νέες τεχνολογίες είναι ιδιαίτερα σημαντικό να διευρυνθεί η αρχιτεκτονική σκέψη και να ανοίξουν νέοι ορίζοντες, καθώς η προσκόλληση σε παλαιότερα πρότυπα, τα οποία βασίζονταν και σε προηγούμενες μεθόδους κατασκευής, εμποδίζει την εξέλιξη. Πιθανόν η χρήση, η εξοικείωση και ο πειραματισμός με τα λογισμικά και τα μηχανήματα παραγωγής μορφών είναι αυτά που θα προσφέρουν αυτό το άνοιγμα στη σκέψη; Προβληματισμοί τίθενται επίσης σχετικά με το κατά πόσο τα προγράμματα σπουδών των αρχιτεκτονικών σχολών δίνουν τις απαραίτητες βάσεις για νέες προσεγγίσεις στην αρχιτεκτονική πρακτική. Θα ήταν ίσως θεμιτή μία εξοικείωση και τριβή των φοιτητών πάνω σε θέματα υπολογιστικού (computational) σχεδιασμού και ψηφιακών μέσων κατασκευής; Θα συνέβαλλαν τα παραπάνω στην ανάπτυξη μιας περισσότερο

¹⁴⁹ Skylar Tibbits, *4D Printing: Multi-Material Shape Change*, στο *Architectural Design: High Definition: Zero tolerance in design and production*, Wiley, London 2014 σελ. 118, (μτφ. Κ. Φλωράκη)

δημιουργικής και ελεύθερης σκέψης και καινοτόμων ιδεών; Ταυτόχρονα ο κεντρικός ρόλος τον οποίο καλείται να αναλάβει ο αρχιτέκτονας απαιτεί περαιτέρω γνώσεις προγραμματισμού και οικοδομικής, προσανατολισμένες στις νέες τεχνολογίες. Καλύπτονται αυτές οι γνώσεις επαρκώς κατά τις αρχιτεκτονικές σπουδές σήμερα;

Συχνά λοιπόν πρέπει να αφήνονται παράμερα πεποιθήσεις για το πώς πρέπει να φαίνονται τα πράγματα και να γίνεται εστίαση στην απόδοση. Είναι πιθανό όμως με αυτόν τον τρόπο να χαθεί η αισθητική από την αρχιτεκτονική; Εάν οι μορφές γεννιούνται και κατασκευάζονται εξολοκλήρου από υπολογιστικά συστήματα θα διατηρούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που προσδίδει ο κάθε αρχιτέκτονας; Είναι άρα σημαντικό οι ψηφιακές διαδικασίες αρχιτεκτονικού έργου να χαρακτηρίζονται από μία διάδραση ανάμεσα στον αρχιτέκτονα και τη μηχανή, με τις απόψεις περί αισθητικής του πρώτου να λαμβάνονται ως παράμετροι και να γίνονται εμφανείς στο τελικό αποτέλεσμα. Με αυτόν τον τρόπο δε θα μπορούμε να μιλάμε για το θάνατο του αρχιτέκτονα στο νέο παράδειγμα. Από την άλλη η αποδοχή της πολυμορφίας, της διαφορετικότητας και της κρίσιμης συνθήκης βάσει της οποίας αναπτύσσεται η μορφή και η δομή στην φύση (*minimum υλικό/maximum performance*), προσδιορίζει εκ νέου την έννοια του ωραίου, όχι μόνο βάσει γλωσσικών μοντέλων, αλλά εισάγοντας ενεργά μια απόδοση του ωραίου μέσα από τα μαθηματικά και την βιολογία.¹⁵⁰ Οπότε είναι μήπως απαραίτητο να αναγνωρίσουμε την αισθητική όχι μόνο στην τελική μορφή αλλά και στην ίδια την διαδικασία ή ακόμα και στον αλγόριθμο;

Κάθε καινούρια σύλληψη πρέπει να έρχεται με μία δόση επιφύλαξης, και η εξ' ολοκλήρου ψηφιακή ροή πληροφορίας από τον σχεδιασμό στην κατασκευή, ακόμα και στα υλικά δεν αποτελεί εξαίρεση. Είναι πάντα υπαρκτός ο κίνδυνος για χρήση των νέων τεχνολογιών με κακόβουλες προθέσεις. Όταν θα υπάρχουν ψηφιακά σχέδια με αναλυτικές κατασκευαστικές οδηγίες για τα περισσότερα υλικά και αντικείμενα, υπάρχει η δυνατότητα για «hacking» στην ίδια την ύλη.¹⁵¹ Η σκόπιμη τοποθέτηση ενός εύθραυστου υλικού σε μια κρίσιμη σύνδεση σε ένα φτερό αεροσκάφους ή σε μια

¹⁵⁰ Ιάσων Ζιρώ, *Από τον Προγραμματισμό των υπολογιστών στον Προγραμματισμό της ύλης*, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2015, σελ. 116

¹⁵¹ Jordan Brandt, *3D Printing And The Complexity Of Compiling Matter*, Forbes, 2 Σεπτεμβρίου 2015, από: www.forbes.com/sites/valleyvoices/2015/09/02/3d-printing-and-the-complexity-of-compiling-matter/ (μτφ. Κ. Φλωράκη)

γέφυρα θα μπορούσε να προκαλέσει αστοχία με τραγικές συνέπειες. *Η ασφάλεια αυτών των ψηφιακών σχεδίων και η αποφάσεις για το τι επιτρέπεται να συντεθεί και τι όχι, πρέπει να αποτελέσει συλλογική ευθύνη.*¹⁵²

3. Ο αρχιτέκτονας στο νέο παράδειγμα

Όλα δείχνουν ότι ο ψηφιακός σχεδιασμός και οι σύγχρονες τεχνολογίες κατασκευής φέρνουν μια αλλαγή στον ρόλο του αρχιτέκτονα και τον τρόπο που συνθέτει αρχιτεκτονικές μορφές.

Ο υπολογιστικός (computational) σχεδιασμός προσφέρει στους αρχιτέκτονες την τεράστια ισχύ των σύγχρονων υπολογιστών, για την παραγωγή βελτιστοποιημένων αρχιτεκτονικών μορφών. Όπως περιγράφηκε στην πρώτη ενότητα η λογική σχεδιασμού τείνει να αλλάξει και από τη γεωμετρική αναπαράσταση της αρχικής ιδέας να μετατραπεί σε μια διαδικασία χαρτογράφησης της πορείας προς τη λύση και οργάνωσης σχέσεων και αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στους εμπλεκόμενους παράγοντες. Χάρη στις τεχνολογικές εξελίξεις, έναν από αυτούς τους παράγοντες, και μάλιστα πολύ σημαντικό, αποτελούν οι σύγχρονες τεχνικές κατασκευής, οι οποίες διευρύνουν πολύ τα όρια των μορφών που δύναται να πραγματοποιηθούν. Για την εκμετάλλευση λοιπόν αυτών των δυνατοτήτων οι αρχιτέκτονες πρέπει να έχουν γνώσεις των τεχνολογιών κατασκευής και να τις λαμβάνουν υπόψη κατά το σχεδιασμό, συμπεριλαμβάνοντας στους παράγοντες που καθορίζουν την τελική μορφή και τα μέσα παραγωγής.

Η παραπάνω λογική αρχιτεκτονικής πρακτικής απαιτεί από τον αρχιτέκτονα να αναλάβει έναν κεντρικό ρόλο από την αρχή μέχρι το τέλος της διαδικασίας παραγωγής. Αυτός ο κεντρικός ρόλος δε συνεπάγεται απαραίτητα ότι ο αρχιτέκτονας είναι «παντογνώστης», αντιθέτως, αποτελεί μέρος μιας ευρύτερης πλατφόρμας παραγωγής και συνεργάζεται με πολλές ακόμα ειδικότητες, όπως προγραμματιστές, πολιτικούς μηχανικούς, χειριστές ψηφιακών μηχανών κ.α. Καθώς όμως αποτελεί και τον χειριστή και συντονιστή αυτής της πλατφόρμας, είναι σημαντικό να έχει βασικές γνώσεις από όλους τους τομείς. Γνώσεις προγραμματισμού για την διαδραστική διαδικασία

¹⁵² Στο ίδιο

σχεδιασμού με τον υπολογιστή, γνώσεις των ιδιοτήτων των υλικών ώστε να τις εκμεταλλευτεί και να «παίξει» μαζί τους διαμορφώνοντας τις μορφές, καθώς και γνώσεις χειρισμού των μηχανημάτων μέσα από πειραματισμό και εμπειρία. Είναι όλες αυτές οι παραπάνω γνώσεις είναι αυτές που θα τον οδηγήσουν στην τελική αρχιτεκτονική μορφή.

Κομβικός είναι και παραμένει ο ρόλος του αρχιτέκτονα στην αισθητική του παραγόμενου αποτελέσματος. Το γεγονός ότι η έννοια του ωραίου έχει ποικίλους ορισμούς, από το υποκειμενικά όμορφο στην όψη έως το λειτουργικά βέλτιστο ή την άριστη αποδοτικότητα της φύσης, δε σημαίνει ότι ο αρχιτέκτονας, με την καλλιτεχνική παιδεία που έχει αποκτήσει από τις σπουδές του, δεν είναι ο πλέον κατάλληλος να καθορίσει το τελικό αποτέλεσμα ώστε να πληρεί όλα τα αισθητικά κριτήρια.



Πηγές

Βιβλία

Achim Menges, Sean Ahlquist, *AD Reader: Computational Design Thinking*, Wiley, London 2011

Fabio Gramazio, Matthias Kohler, *Digital Materiality in Architecture*, Lars Müller Publishers, Baden 2008

Hod Lipson, Melba Kurman, *Fabricated: the new world of 3d printing*, Wiley, London 2013

Lisa Iwamoto, *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*. Princeton Architectural Press, New York 2009

Sigrid Brell- Cokcan, Johannes Braumann, *RobArch: Robotic Fabrication in architecture Art, and Design*, Springer Wien, New York 2013

Ιωάννης Βενέρης, *Πληροφορική και Αρχιτεκτονική*, Εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2011

Άρθρα

Bob Sheil, *Design through Making: an Introduction*, στο Architectural Design, Design through Making, Vol 75, Wiley, London 2005

Jonathan Hill, *Building the Drawing*, στο Architectural Design, Design through Making, Vol 75, Wiley, London 2005

Michael Stacey, *In my Craft and Sullen Art or Sketching the Future by Drawing on the Past*, στο Architectural Design, Design through Making, Vol 75, Wiley, London 2005

Rivka Oxman, Robert Oxman, *The New Structuralism, Introduction*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010

Klaus Bollinger, Manfred Grohmann, Oliver Tessmann, *Structured becoming: Evolutionary Processes in Design Engineering*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010

Helmut Pottmann, *Architectural Geometry as Design Knowledge*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010

Neri Oxman, *Structuring Materiality: Design Fabrication of Heterogeneous Materials*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010

Fabian Scheurer, *Materializing Complexity*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010

Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Silvan Oesterle, *Encoding Material*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010

Bob Sheil, *Introduction*, στο Architectural Design: *High Definition: Zero tolerance in design and production*, Wiley, London 2014

Malé-Alemany and Jordi Portell, *Soft Tolerance: An Approach for Additive Construction on Site*, στο Architectural Design: *High Definition: Zero tolerance in design and production*, Wiley, London 2014

Skylar Tibbits, *4D Printing: Multi-Material Shape Change*, στο Architectural Design: *High Definition: Zero tolerance in design and production*, Wiley, London 2014

Cynthia Ottchen, *The Future of Information Modelling and the End of Theory*, στο Architectural Design, *Closing The Gap: Information Models in Contemporary Design Practice*, Vol 79, Wiley, London 2009

Richard Garber, *Optimization Stories: The Impact of Building Information Modeling on Contemporary Design Practice*, στο Architectural Design, *Closing The Gap: Information Models in Contemporary Design Practice*, Vol 79, Wiley, London 2009

Διαδικτυακό υλικό*

Michael Kilkelly, *5 Ways Computational Design Will Change the Way You Work*, Arch Daily, 15 Απριλίου 2016, από: www.archdaily.com/785602/5-ways-computational-design-will-change-the-way-you-work

Rory Stott, *Silk Pavilion / MIT Media Lab*, Arch Daily, 5 Ιουνίου 2013, από: www.archdaily.com/384271/silk-pavilion-mit-media-lab

Emilie Chalcraft, *How 3D printing will change architecture and construction*, Dezeen, 2013, από: www.dezeen.com/2013/05/21/3d-printing-architecture-print-shift

Jane Wakefield, *Tomorrow's Buildings: Construction industry goes robotic*, BBC News, 4 May 2016, από: www.bbc.com/news/technology-35746648

Marcus Fairs, *3D printed house interview with Universe Architecture*, dezeen, 24 Ιανουαρίου 2013, από: www.dezeen.com/2013/01/24/3d-printed-house-interview/

Marcus Fairs, *Protohouse by Softkill Design*, dezeen, 23 Οκτωβρίου 2012, από: www.dezeen.com/2012/10/23/protohouse-by-softkill-design/

Adam Williams, *Berkeley researchers pioneer new powder-based concrete 3D printing technique*, 2015, από: newatlas.com/berkeley-researchers-pioneer-powder-based-concrete-3d-printing/36515/

Rory Stott, *Chinese Company Showcases Ten 3D-Printed Houses*, archdaily, 2 Σεπτεμβρίου 2014, από: www.archdaily.com/543518/chinese-company-showcases-ten-3d-printed-houses

Nicola Davison, *3D-printed cities: is this the future?*, theguardian, 26 Φεβρουαρίου 2015, από: www.theguardian.com/cities/2015/feb/26/3d-printed-cities-future-housing-architecture

Jordan Brandt, *3D Printing And The Complexity Of Compiling Matter*, Forbes, 2 Σεπτεμβρίου 2015, από: www.forbes.com/sites/valleyvoices/2015/09/02/3d-printing-and-the-complexity-of-compiling-matter/

* η τελευταία ανάκτηση για το διαδικτυακό υλικό έγινε τον Φεβρουάριο του 2017

Mediated Matter, about, από: matter.media.mit.edu/about

Ερευνητικές εργασίες / Διαλέξεις

Αθηνά Σταυρίδου, Δημήτρης Παπαδόπουλος, *Εννοιολογικός προσδιορισμός παραμετρικών ιδιοτήτων αρχιτεκτονικών κατασκευαστικών στοιχείων και δομικών υλικών*, υπευθ. Δημήτρης Παπαλεξόπουλος, Ε.Μ.Π., ΠΕΒΕ 2007

Ιάσων Ζιρώ, *Από τον Προγραμματισμό των υπολογιστών στον Προγραμματισμό της ύλης*, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2015

Γεσθημανή Ρουμπάνη, Καλλιρρόη Ταρουδάκη, *Computational Design / Έξυπνα Υλικά: η παράλληλη προσέγγιση*, διάλεξη, ΕΜΠ, Αθήνα 2013

Dr Diane Talbot, *Smart Materials*, resource for the Institute of Materials, Minerals and Mining, 2003

Εικόνες

Εξώφυλλο: icd.uni-stuttgart.de/icd-imagedb/icd_Comp_Design_Hoell.jpg

Σελ. 7: www.universearchitecture.com/content/universe/projects/Landscape%20House/bg.jpg

Σελ. 9: code-collective.cc/wp-content/uploads/2011/02/6ugao001.jpg

Σελ. 10: www.mas.caad.arch.ethz.ch/blog/wp-content/uploads/2012/11/side.png

Σελ. 14: wiki.mcneel.com/_media/legacy/en/pt_selectandbake.png

Σελ. 17 (πάνω): www.innsbruck.info/emobilder/1000cx550c/13400/Nordkettenbahnen-Station-Hungerburg.jpg

Σελ. 17 (κάτω): blog.coyotecanyonwinery.com/wp-content/uploads/2016/10/Clg__198.jpg

Σελ. 25: *Structured becoming: Evolutionary Processes in Design Engineering*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010

Σελ. 32: *Architectural Geometry as Design Knowledge*, στο Architectural Design, The New Structuralism, Vol 80, Wiley, London 2010'

Σελ. 38: icd.uni-stuttgart.de/wp-content/gallery/researchpavilion_2011_8/14_view-seated.jpg

Σελ. 43: www.shapeways.com/wordpress/wp-content/uploads/2013/04/x_ShapewaysInfographic_3DPrintingforEveryone_April2013_674.jpg

Σελ. 51 (πάνω): www.akt-uk.com/medias/images/diaporamas/220/cspace-dlr-ten-pavilion-02-valerie-bennett_940x414.jpg

Σελ. 51 (μέση):
www.whitenoise.city/sites/default/files/uploads/1_helios_house_c_eric_staudenmaier.jpeg

Σελ. 51 (κάτω): Lisa Iwamoto, *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*. Princeton Architectural Press, New York 2009

Σελ. 53: Lisa Iwamoto, *Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques*. Princeton Architectural Press, New York 2009

Σελ. 60: Neri Oxman, *Structuring Materiality: Design Fabrication of Heterogeneous Materials*, στο *Architectural Design, The New Structuralism*, Vol 80, Wiley, London 2010

Σελ. 67: www.hizook.com/files/users/3/clay_3D_printer_3.jpg

Σελ. 71: www.3ders.org/images2016/dutch-architect-janjaap-ruijssenaars-unveils-3dprinted-bench-inspired-landscape-house-12.jpg

Σελ. 75 (πάνω): www.rapidreadytech.com/wp-content/uploads/2016/06/Landscape-House.jpg

Σελ. 75 (μέση): www.3ders.org/images2016/dutch-architect-janjaap-ruijssenaars-unveils-3dprinted-bench-inspired-landscape-house-14.jpg

Σελ. 75 (κάτω): www.3ders.org/images2016/dutch-architect-janjaap-ruijssenaars-unveils-3dprinted-bench-inspired-landscape-house-9.jpg

Σελ. 76: www.3ders.org/images2016/dutch-architect-janjaap-ruijssenaars-unveils-3dprinted-bench-inspired-landscape-house-10.jpg

Σελ. 78: art-sheep.com/wp-content/uploads/2015/04/emerging-objects-bloom-3D-printed-pavilion-designboom-07.jpg

Σελ. 79 (πάνω): assets.inhabitat.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2015/03/3d-printed-bloom-pavilion-Ronald-Rael-UC-Berkeley-10.jpg

Σελ. 79 (κάτω):

images.adsttc.com/media/images/5512/d6d5/e58e/ceef/c000/00f2/large_jpg/Rael_San_Fratello-Bloom-0378.jpg?1427297960

Σελ. 81: 3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2016/03/winsun-3D-printed-villa-1024x614.jpeg

Σελ. 83 (πάνω): 3dprint.com/wp-content/uploads/2015/01/113.png

Σελ. 83 (μέση): www.popularmechanics.co.za/wp-content/uploads/2015/09/3d-printed-house-3.jpg

Σελ. 83 (κάτω): 3dprinting.com/wp-content/uploads/2014/04/24.jpg

Σελ. 85: *Soft Tolerance: An Approach for Additive Construction on Site*, στο *Architectural Design: High Definition: Zero tolerance in design and production*, Wiley, London 2014

Σελ. 86: fabbots.files.wordpress.com/2012/12/ma_material_samples_04_sm.jpg?w=450&h=337

Σελ. 87: 42mzqz26jebqf6rd034t5pewpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2012/11/Protohouse11.jpg

Σελ. 88 (πάνω): static.dezeen.com/uploads/2013/02/dezeen_ProtoHouse-2-by-Softkill-Design_ss_1.jpg

Σελ. 88 (κάτω): static.dezeen.com/uploads/2013/02/dezeen_ProtoHouse-2-by-Softkill-Design_2.jpg

Σελ. 91 (πάνω): i.ytimg.com/vi/eCG0M6T5sMU/maxresdefault.jpg

Σελ. 91 (κάτω): vitaminr.com/wp-content/uploads/2013/06/silk_pav_9_1.jpg

Σελ. 94: *4D Printing: Multi-Material Shape Change*, στο *Architectural Design: High Definition: Zero tolerance in design and production*, Wiley, London 2014

Σελ. 95: *4D Printing: Multi-Material Shape Change*, στο *Architectural Design: High Definition: Zero tolerance in design and production*, Wiley, London 2014

Σελ. 97: matter.media.mit.edu/assets/images/SP-Comp-01.png

Σελ. 100: Hob Lipson, Melba Kurman, *Fabricated: The new world of 3d printing*, Wiley, London 2013

Σελ. 104: futuresplus.files.wordpress.com/2012/11/render-1_front1.jpg