ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ: ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΩΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ

Στέλιος Πάσσος

Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών
Ερευνητική Εργασία Ακαδημαϊκό
έτος: 2020-2021

Ψηφιακός Σχεδιασμός: το Υλικό ως Παράμετρος

Στέλιος Πάσσος

Επιβλέπων καθηγητής: Αλέξανδρος Βαζάκας
Χανιά, Ιούλιος 2021

[1] Εικόνα απέναντι σελίδας: Philip Block

Περιεχόμενα

0. Εισαγωγή 7

1. Ο ψηφιακός σχεδιασμός πέρα απο το CAD 10
1.1. Η αφαιρετική/εικονική διάσταση του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού 13
1.2. Παραλληλισμός του αυτοκινήτου 15
1.3. Ένα χρονικό των εξελίξεων στον ψηφιακό σχεδιασμό 17
1.3.1. Η Πτύχωση του Lynn 17
1.3.2. Η εμφάνιση του Παραμετρικού σχεδιασμού 19
1.3.3. Παραμετρικός σχεδιασμός με γνώμονα την απόδοση 19
1.3.4. Scripting, χρήση προγραμματισμού στην αρχιτεκτονική 20
1.4. Η επαναφορά της τεκτονικής ως κυρίαρχο ζήτημα 21

2. Τεκτονική 22
2.1. Παραδοσιακή τεκτονική 23
2.2. Μοντέρνα τεκτονική 24
2.3. Ψηφιακή Τεκτονική (Digital Tectonics) 25
2.3.1. Αντίθεση 25
2.3.2. Νέες δυνατότητες 26
2.3.3. Το (προβληματικό) παράδειγμα του Gehry 26
2.3.4. Η Κριτική του Kenneth Frampton 27
2.3.5. Sendai Mediatheque - Toyo Ito 29
2.3.6. Yokohama Terminal Stations - FOA 29
2.3.7. Εστίαση στην απόδοση - Performative Design 31
2.4. Ορισμοί 33
2.4.1. Η εικονική υλικότητα του William Mitchell 33
2.4.2. Ψηφιακή τεκτονική ως ενισχυμένη φυσική υλικότητα 34
2.4.3. Ψηφιακή τεκτονική ως κατασκευασμένη υλικότητα 35
2.4.4. Ψηφιακή τεκτονική ως ψηφιακή εύρεση μορφής 35
2.4.5. Ψηφιακή τεκτονική ως προσαρμόσιμη ύλη 37
2.4.6. Ενήμερη Τεκτονική “Informed Tectonics” 38
2.5. Ανακεφαλαίωση: Ψηφιακή τεκτονική και υλικότητα 39

3. Σχεδιασμός Υλικής Κατασκευής (MFD) 40
3.1. Σχεδιάζοντας με βάση το υλικό (MFD) 41
3.1.1. Σχεδιασμός με βάση την κατασκευή 42
3.1.2. Υλικός σχεδιασμός 43
3.1.3. Μοντελοποίηση υλικών και τεκτονική των συστημάτων υλικών 44
3.1.4. Υλικότητα 44
3.1.5. Συστήματα υλικών 45

3.2. Παραδείγματα 47
3.2.1. Metropol Parasol 47
3.2.2. Armadillo Vault 49
3.2.3. Παραμετρικός ΙΙ 51

4. Συμπεράσματα 53

5. Βιβλιογραφία 56

6. Πηγές Εικόνων 58

Περίληψη

Από την αναγέννηση και μετά ο αρχιτέκτονας σχεδιάζει χρησιμοποιώντας νοητά μοντέλα, είτε ειναι αυτα σχέδια ή μακέτες. Εχει έτσι μια απόσταση από το υλικό, ως εκ τούτου σχεδιάζει εικονικά (virtually). Πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα της μορφογένεσης, θεωρίες, ψηφιακές τεχνικές και μέθοδοι κατασκευής εχουν συνεισφέρει σε νέα μοντέλα ενσωμάτωσης μεταξύ δομής, υλικού και μορφής μέσω της ψηφιακής τεκτονικής. Έτσι ο αρχιτέκτονας μπορεί να γίνει ένας συνδυασμός του μεσαιωνικού αρχιτέκτονα αρχιμάστορα με το σημερινό αρχιτέκτονα. Να αποκτήσει, δηλαδή, μία νέα σχέση με τα υλικά, να σχεδιάζει μαζί με τα αυτα και τις ιδιότητές τους. Αυτή είναι η πτυχή των ψηφιακών τεχνολογιών η οποία διερευνάται στην εργασία.

0. Εισαγωγή

Συχνή είναι η θεώρηση πως τα ψηφιακά εργαλεία απομακρύνουν τον αρχιτέκτονα απο το υλικό. Ένα παράδειγμα είναι η ανησυχία που εκφράστηκε από τον θεωρητικό της αρχιτεκτονικής Kenneth Frampton (1995) σε κείμενά του οπως το “Studies in tectonic culture”. Σε αυτά εκφράζει πως πολλά έργα της ψηφιακής αρχιτεκτονικής είναι έντονα φορμαλιστικά, και πως αδιαφορούν για την τεκτονική εστιάζοντας μόνο στην πλαστικότητα, ωθώντας την αρχιτεκτονική προς μια εικονική κατεύθυνση, μια κατεύθυνση “αποϋλοποίησης”.

Από την αναγέννηση και μετά ο αρχιτέκτονας σχεδιάζει χρησιμοποιώντας νοητά μοντέλα, είτε αυτά είναι σχέδια ή μακέτες. Έχει έτσι μια απόσταση από το υλικό, ως εκ τούτου σχεδιάζει εικονικά (virtually). Ο λόγος για τον οποίο υφίσταται ο χαρακτηρισμός “εικονικά” στην ψηφιακή αρχιτεκτονική είναι ευκόλως κατανοητός παρατηρώντας τον φορμαλισμό στον σχεδιασμό πολλών ψηφιακών αρχιτεκτόνων. Οι μορφές τους φαίνονται ελεύθερες χωρίς να υπακούν σε φυσικούς περιορισμούς, επιδράσεις ροπών και δυνάμεων οπως της βαρύτητας. Με μόνα όρια το λογισμικό και την φαντασία του σχεδιαστή. Το γεγονός αυτό προκαλεί αμφίσημες αντιδράσεις, από ανησυχία και αποστροφή έως θαυμασμό, στην αρχιτεκτονική κοινότητα. Καθώς η ψηφιακή αρχιτεκτονική είναι ένας κλάδος συνεχώς εξελισσόμενος είναι λάθος να εξάγουμε καθολικά συμπεράσματα, από ενδεχομένως προσωρινά χαρακτηριστικά ή μόνο καποια δημοφιλή αρχιτεκτονικά γραφεία.

Πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα της μορφογένεσης, θεωρίες, ψηφιακές τεχνικές και μέθοδοι σχεδιασμού και κατασκευής εχουν συνεισφέρει σε νέα μοντέλα ενσωμάτωσης μεταξύ δομής, υλικού και μορφής μέσω της ψηφιακής τεκτονικής (Rivka Oxman, 2010). Έτσι ο αρχιτέκτονας μπορεί να γίνει ένας συνδυασμός του μεσαιωνικού αρχιτέκτονα, του αρχιτέκτονα αρχιμάστορα, με το σημερινό αρχιτέκτονα. Να αποκτήσει, δηλαδή, μία νέα σχέση με τα υλικά, να σχεδιάζει μαζί με τα αυτα και τις ιδιότητές τους. Αυτό θεωρούμε ότι είναι

μία νέα δυνατότητα που μας δίνουν τα ψηφιακά εργαλεία, την επιστροφή σε αυτή την υλικότητα και στην “μαστοριά”. Αυτή είναι η πτυχή των ψηφιακών τεχνολογιών η οποία διερευνάται στην εργασία.

Αντικείμενο της έρευνας αυτής είναι οι διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους εκφράζεται η ψηφιακότητα στην υλοποίηση και πως παίρνει μορφή ο ψηφιακός σχεδιασμός. Έχοντας το υλικό σαν βασική παράμετρο, μαζί με τις εκάστοτε πολιτιστικές, τεχνολογικές και κατασκευαστικές παραμέτρους, και τις απαιτήσεις του περιβάλλοντος, στα πλαίσια μιας παραμετρικής λογικής ψηφιακού σχεδιασμού.

Τα κύρια ερωτήματα στα οποία η παρούσα εργασία καλείται να απαντήσει σε ερωτήματα είναι τα εξής. Αν και πως μεταβλήθηκε η σχέση της αρχιτεκτονικής με το υλικό προ και μετά της ψηφιακής εποχής. Πώς αντιμετωπίζουν σύγχρονοι ψηφιακοί αρχιτέκτονες στην ενσωμάτωση του υλικού στο σχεδιασμό. Ποιος είναι ο ρόλος του υλικού στην εξέλιξη της ψηφιακής αρχιτεκτονικής.

Στο πρώτο κεφάλαιο διερευνάται η απομάκρυνση του αρχιτέκτονα από την κατασκευή. Με αυτήν την αποχώρηση από το εργοτάξιο, η σχέση του με το υλικό έγινε έμμεση, αφαιρετική. Η εικονικότητα, στην μορφή της αφαίρεσης, ήταν έκτοτε χαρακτηριστικό του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού. Για να κατανοηθεί η αλλαγή που επιφέρει το εργαλείο του υπολογιστή στον σχεδιασμό παραλληλίζεται η σχέση σχεδιαστή-υπολογιστή με την σχέση ανθρώπου-αυτοκίνητο, διότι πρόκειται για εργαλεία μέσω των οποίων αντιλαμβανόμαστε διαφορετικά το χώρο και κατά συνέπεια έχουν μείζονα επιρροή στο αρχιτεκτονικό έργο. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια σύντομη ιστορία των ψηφιακού σχεδιασμού μέσω των σημαντικότερων μεθοδολογικών και τεχνολογικών εξελίξεων.

Έτσι το δεύτερο κεφάλαιο αφιερώνεται στην “τεκτονική” διότι είναι έννοια που διαμορφώνει την σχέση μεταξύ του σχεδιασμού και των δομικών και υλικών χαρακτηριστικών του. Ο όρος αναλύεται διερευνάται ιστορικά, από το 1840 με τα γραπτά του Bötticher που θέτει τις βάσεις για μια μοντέρνα τεκτονική θεώρηση, ψάχνοντας τους ορισμούς

που του έχουν δοθεί κατά την διάρκεια των αιώνων. Παρατηρώντας τα νέα χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής που ο ψηφιακός σχεδιασμός έχει φέρει στην επιφάνεια γίνεται λόγος για την υλική ασάφεια και την αδιαφορία ως προς την τεκτονική που έχει ο σχεδιασμός κάποιων ψηφιακών αρχιτεκτόνων όπως ο Frank Gehry. Σημερα ο όρος “τεκτονική” χρειάζεται μια σαφή “ψηφιακή” επέκταση, διότι πλέον η έρευνα και οι εξελίξεις στον τομέα της αρχιτεκτονικής και της κατασκευής καθιστούν τους παλιούς ορισμούς παρωχημένους. Για αυτόν τον λόγο αναζητείται μια προσέγγιση στον νέο τομέα της ψηφιακής τεκτονικής.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται μια σύγχρονη προσέγγιση πανω στον παραμετρικό σχεδιασμό, αυτή της θεωρητικού της αρχιτεκτονικής Rivka Oxman, όπου το υλικό λειτουργεί ως πηγή της μορφής. Εν συνεχεία παρουσιάζονται και συγκρίνονται 3 παραδείγματα όπου αυτό λαμβάνει χώρα.

Βασικές βιβλιογραφικές πηγές αποτελούν τα κείμενα της Rivka Oxman (2006, 2010, 2012, 2016, 2017), διότι εκφράζει μια δομημένη προσέγγιση σε ένα ευρύ φάσμα του ψηφιακού σχεδιασμού, ιδίως από την πρακτική πλευρά της υλοποίησης του σχεδιασμού, από την λογική σχεδίασης μεχρι την κατασκευή. Επιπλέον έχει συντάξει μια πληθώρα επιστημονικών άρθρων. Τα κείμενα του Antoine Picon (2004, 2010, 2021), αναλύουν από θεωρητική και αντιληπτική οπτική γωνία τις επιδράσεις της ψηφιακών εργαλείων στην αρχιτεκτονική. ο Branko Kolarevic (2003), εστιάζει στις πρακτική, σχεδιαστική και κατασκευαστική πλευρά των εξελίξεων την πρώτη δεκαετία της ψηφιακής αρχιτεκτονικής. Και καταληκτικά το βιβλίο του Frampton (1995), το οποίο, αποτελεί το πιο ολοκληρωμένο κείμενο πάνω στην τεκτονική του μοντέρνου κινήματος και βασικός αντίλογος πάνω στην ψηφιακή αρχιτεκτονική ως προς την υλικότητα.

1. Ο ψηφιακός σχεδιασμός πέρα από το CAD

1.1. Το χρονικό της αποσύνδεσης

Για αιώνες, ο αρχιτέκτονας ως βασική ενασχόληση δεν είχε μόνο το σχεδιασμό χωρικών ποιοτήτων, αλλά είχε και στενή σχέση με την κατασκευή των κτιρίων. Η γνώση των κατασκευαστικών τεχνικών ήταν βασική απαίτηση της δουλειάς του. Ο σχεδιασμός της μορφής του κτιρίου υπονοούσε τον σχεδιασμό του τρόπου κατασκευής του και το αντίστροφο.

Είτε μιλάμε για τον "τέκτονα" της αρχαίας Ελλάδας, είτε για τον "αρχιμάστορα" του μεσαίωνα, ο αρχιτέκτονας έχει την συνολική ευθύνη υλοποίησης του κτιρίου, με αυτή την κεντρική του θέση στην κατασκευή των κτιρίων να πηγάζει από την άριστη γνώση του υλικού και του τρόπου κατασκευής του. Καθώς όμως η ποικιλία των υλικών άρχισε να διευρύνεται, οι τρόποι κατασκευής έγιναν περισσότεροι και πιο πολύπλοκοι, ο αρχιτέκτονας "προικίστηκε" με όλο και περισσότερες απαιτήσεις γνώσεων και ικανοτήτων.

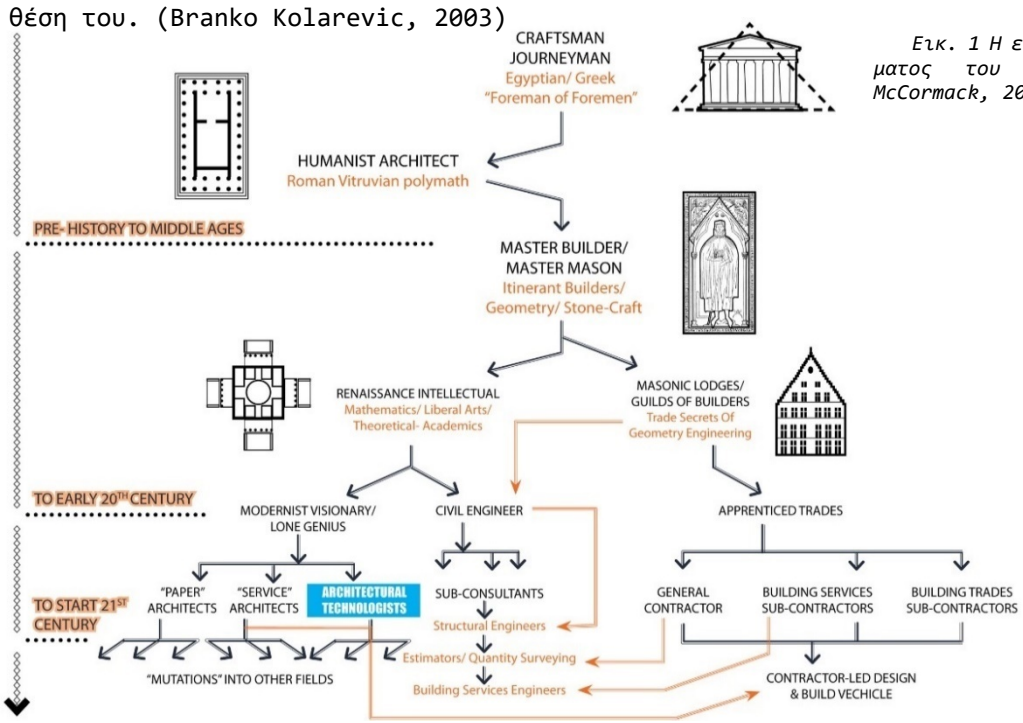
Στην αναγέννηση σταδιακά άρχισε να διαχωρίζεται η αρχιτεκτονική από την κατασκευή. Τότε ξεκίνησε η θεώρηση πως οι αρχιτέκτονες ξεχωρίζουν από τους κατασκευαστές και τους χτίστες λόγω της ανώτερης πνευματικής τους εκπαίδευσης. Η αρχιτεκτονική θεωρία ήταν για δίνει νόημα στην αρχιτεκτονική και όχι πρακτικές κατασκευαστικές γνώσεις. Όμως αυτο που ξεκίνησε τον διαχωρισμό ηταν μια απο τις σημαντικότερες εφευρέσεις στον κλάδο, το γραμμικό και προοπτικό σχέδιο, ως μέσο επικοινωνίας πληροφοριών του κτιρίου. Ο μεσαιωνικός αρχιμάστορας χρησιμοποιούσε ελάχιστα σχέδια και μακέτες για να δοκιμάσει και να επικοινωνήσει τις ιδέες του, και βασιζόταν στην άμεση επικοινωνία με τους μάστορες. Κατι που απαιτούσε την συνεχή παρουσία του στο εργοτάξιο αλλα και προσέφερε την απρόσκοπτη επικοινωνία τους σε όλα τα στάδια της κατασκευής. Έτσι με την εισαγωγή του σχεδίου στην διαδικασία κατασκευής, η φυσική παρουσία του αρχιτέκτονα, για την επίβλεψη της, δεν ήταν απαραίτητη.

Το χάσμα μεταξύ αρχιτεκτονικής και κατασκευής έγινε μεγαλύτερο στα μέσα του 19ου αιώνα όταν τα σχέδια της προηγουμένης περιόδου έγιναν νομικά έγγραφα. Έτσι η σχέση μεταξύ αρχιτεκτόνων και άλλων μηχανικών έγινε καθορισμένη βάση συμβάσεων, που είχαν σκοπό να τοποθετηθούν με σαφήνεια τις ευθύνες

και τις υποχρεώσεις των εκάστοτε μερών. Συνέπεια του παραπάνω ήταν ότι οι σχέσεις μεταξύ τους έγιναν καθαρά οικονομικές οδηγώντας στο σημερα οπού αυτή η σχέση κατέληξε ανταγωνιστική και δύσκαμπτη.

Τον 20ο αιώνα αυξήθηκε η πολυπλοκότητα των κτιρίων με την εφεύρεση νέων υλικών και κατασκευαστικών τεχνολογιών, κάτι που έφερε εξειδίκευση. Επίσης το νομικό πλαίσιο και η γραφειοκρατία συρρίκνωσε το χρόνο που αφιερώνεται στον σχεδιασμό. Έτσι με την αύξηση της πολυπλοκότητας και την μείωση του σχεδιαστικού χρόνου οι αρχιτέκτονες προτίμησαν να μειώσουν και τις ευθύνες τους. Ενώ νομικά ο ρόλος του αρχιτέκτονα γινόταν όλο και πιο καθορισμένος, εκείνος όλο και περισσότερο έχανε την ισχύ του, παραδίδοντας έτσι επίσημα την εξουσία του, του συνειδητά διαχωρίστηκε από την υπόλοιπη κατασκευαστική βιομηχανία.

Ως αποτέλεσμα αυτού του σταδιακού διαχωρισμού της αρχιτεκτονικής από την κατασκευή είναι ένα επάγγελμα που με το να αφήσει το υλικό, τις υποχρεώσεις και τις ευθύνες του, ετοιμάζεται να αφήσει και τον ρόλο του στη σύγχρονη κοινωνία. Η ψηφιακή στροφή του σχεδιασμού και της κατασκευής είναι μια ευκαιρία αυτός ο ρόλος να επαναπροσδιοριστεί, για να επανακτήσει ο αρχιτέκτονας την θέση του. (Branko Kolarevic, 2003)



Εικ. 1 Η εξέλιξη του επαγγέλματος του αρχιτέκτονα Kirk McCormack, 2016.

1.2. Η αφαιρετική/εικονική διάσταση του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού

Το σχέδιο διαμόρφωσε την αρχιτεκτονική. Ξεκίνησε ως εργαλείο επικοινωνίας του αρχιτέκτονα και κατέληξε ως ένα φάσμα de facto διαχωριστικών από την κατασκευαστική πραγματικότητα. Είναι κάτι συνυφασμένο με τον σχεδιασμό, και οι αλλαγές στον τρόπο που δημιουργείται η απεικόνιση προκαλεί ένα σύνολο αντιδράσεων και αλλαγών στην αρχιτεκτονική.

Ο Picon (2004) επικεντρώνει τη θεωρητική συζήτηση στην τεκτονική με το ερώτημα "Έχει αναπτυχθεί ένα χάσμα μεταξύ της ψηφιακής αναπαράστασης και της παραδοσιακής τεκτονικής;" και στην ουσία: υπάρχει απώλεια ή αποδυνάμωση της παραδοσιακής σχέσης αρχιτεκτονικής μεταξύ τεκτονικής και υλικού;

> "Όταν συζητάμε για σχέδια από υπολογιστή, από εικόνες έως κόσμους που βασίζονται στον ιστό, ο όρος «εικονικός» εμφανίζεται σχεδόν αμέσως, μαζί με μια κατηγορία αποϋλοποίησης που αντιτίθεται ρητά στην εικονική πραγματικότητα και στην πραγματική πραγματικότητα." (Picon, 2004).

Ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός είναι πράγματι ένα εικονικό αντικείμενο. Τον κάνει ακόμη πιο εικονικό το γεγονός ότι περιγράφει μια μοναδική υλοποίηση αλλά ένα ολόκληρο φάσμα. Δεν υπάρχει αρχιτεκτονικός σχεδιασμός χωρίς κάποιο περιθώριο αβεβαιότητας που να επιτρέπει την έκβαση σε μια σειρά ενδεχόμενων κατασκευών που συνήθως μόνο μία θα πραγματοποιηθεί. Παρά τις προσπάθειες βελτίωσης της κωδικοποίησης των διαδικασιών σχεδιασμού προκειμένου να προβλέψουμε όσο το δυνατόν πιο ακριβές αποτέλεσμα, αυτή η σχετική αβεβαιότητα είναι θεμελιώδης για το αρχιτεκτονικό έργο. "Του δίνει τη δυνατότητα να «μιλήσει» ή μάλλον να λειτουργεί ως μήτρα πιθανών αφηγήσεων σχετικά με την ενσωματωμένη πραγματικότητα που αναμένει, χωρίς την οποία το έργο θα ήταν ένα απλό τεχνικό σχέδιο" (Picon, 2004). Αντίστοιχα τα σχέδια και οι προδιαγραφές προτείνουν μια σειρά υλικών αντί για μια ακριβή, σαφή και μοναδική υλική πραγματικότητα.

Ομοίως, η αρχιτεκτονική αναπαράσταση, ακόμα και οι πιο ρεαλιστικές φωτορεαλιστικές απεικονίσεις δεν αντιστοιχούν πλήρως στην εμπειρία της πραγματικότητας. Ποτέ δεν θα δούμε το κτίριο ως κάτοψη ή όψη. Όπως περιγράφει ο Picon:

> "Η Αρχιτεκτονική αναπαράσταση διαπραγματεύεται αυτές τις αντίθετες τάσεις, την αναζήτηση της αληθοφάνειας και την επιθυμία να διατηρήσουν τα περιθώρια της απροσδιοριστίας. Στην πραγματικότητα, η ανάγκη εξισορρόπησης μεταξύ αυτών των δύο αντικρουόμενων ιδεών θα μπορούσε κάλλιστα να αντιπροσωπεύει ένα εγγενές παράδοξο των αρχιτεκτονικών σχεδίων: όσο πιο συγκεκριμένη είναι η φυσική επίδραση που προορίζεται, τόσο πιο αφηρημένη είναι η αναπαράσταση, σαν αυτή η θεμελιώδης ένταση να μεταφράζεται σε μια ισορροπία μεταξύ της ουσιαστικότητας και της αφαίρεσης." (Picon, 2004).

Με αυτά τα δεδομένα, οι αναπαραστάσεις υπολογιστών δεν έχουν σημαντική απόκλιση από την παραδοσιακή πρακτική. Σε αυτό το στάδιο, η ψηφιοποίηση του σχεδιασμού κάλλιστα μπορεί να είναι μια απλή τεχνολογική πρόοδος, μια συμπληρωματική δύναμη που προσφέρεται στον σχεδιαστή, μια δύναμη που δεν επηρεάζει τη φύση του σχεδιασμού. Η ψηφιοποίηση (CAD) επιτρέπει στον αρχιτέκτονα να χειρίζεται εξαιρετικά πολύπλοκες μορφές και να οραματίζεται πιο ελεύθερα τις σχεδιαστικούς χειρισμούς. Ωστόσο, το ερώτημα είναι αν αυτές οι επεκτάσεις λεξιλογίου και η ικανότητα αλληλεπίδρασης σε κάθε στάδιο του σχεδιασμού είναι πραγματικά επαναστατικές. Αν είναι μια η αλλαγή ποσοτική αλλά όχι ποιοτική, και οι σύγχρονοι αρχιτέκτονες απλώς έχουν ένα πιο ευέλικτο και ποικίλο σετ μολυβιών και χάρακα.

Η απάντηση στο ερώτημά δεν είναι ξεκάθαρη, γιατί ο υπολογιστής σπάει την αμεσότητα της σχεδιαστικής χειρονομίας. Μεταξύ του χεριού και της ψηφιακής αναπαράστασης, ένα στρώμα υλισμικού και λογισμικού εισάγεται. Εγγενείς στο λογισμικό είναι τρόποι λειτουργίας και ρυθμίσεις που περιο-

ρίζουν τον σχεδιαστή. Το μηχάνημα και τα προγράμματά του είναι συνώνυμα με μια “εμμεσότητα”, μια απόσταση που δεν υπάρχει στα παραδοσιακά εργαλεία.

Αυτή η εμμεσότητα μπορεί τελικά να εξαφανιστεί με την ανάπτυξη ολοένα και πιο εξελιγμένων διεπαφών που ενσωματώνουν, σχεδόν απρόσκοπτα, τον υπολογιστή σε τεχνικές σχεδιασμού. Εργαστήρια οπως το Media Lab του MIT, που έχει επενδύσει χρόνια έρευνας σε ψηφιακά γάντια και οθόνες αφής, καθώς και συστήματα με κάμερα και λέιζερ που συνδέουν τη φυσική και ψηφιακή μοντελοποίηση. Ωστόσο, αυτή η διαμεσολάβηση του μηχανήματος και του λογισμικού του θα αργήσει να καταργηθεί.

1.3. Παραλληλισμός του αυτοκινήτου

Η διαφορά μεταξύ σχεδίων στο χέρι και στον υπολογιστή μπορεί να αποτυπωθεί με τον παραλληλισμό που θέτει ο **Antoine Picon** (2004), την αντίθεση μεταξύ ενός περιπάτου και μιας βόλτας με το αυτοκίνητο. Απο την μια μεριά ο άνθρωπος και απο την άλλη το ζεύγος ανθρώπου με τη μηχανή. Τόσο η ισχύς του υπολογιστή, όσο και το **“εμμεσότητα”** του, το καθιστούν πράγματι διαφορετικό από τα παραδοσιακά εργαλεία.)

Ένας άλλος τρόπος να θεωρηθεί η αντίστοιχη διάδραση ανθρώπου και μηχανής ως ένα νέο σύνθετο υποκείμενο, ένα **υβρίδιο σάρκας και μηχανής**, κατι που έχει ήδη πραγματοποιηθεί στον οδηγό του **αυτοκινήτου**. Η σχεδόν **ενστικτώδης σχέση** του χρήστη του υπολογιστή με την οθόνη και το πληκτρολόγιο μπορεί να ερμηνευθεί έτσι ώστε η ψηφιακή αρχιτεκτονική να υποδηλώνει έναν **σχεδιαστή cyborg**.

Η παραδοσιακή αντίθεση του πλούτου του περπατήματος στην υποβίβαση της οδήγησης συνεπάγεται ότι διακυβεύεται η επαφή με την υλικότητα, όπως φαίνεται από την αντίθεση μεταξύ της πλήρους φυσικής εμπειρίας και της αφαίρεσης που παρέχει ένα τεχνολογικά καθορισμένο περιβάλλον. Σχεδόν έναν αιώνα αφότου το αυτοκίνητο έγινε κεντρικό κομμάτι της σύγχρονης κουλτούρας, γνωρίζουμε ότι αυτή η αντίθεση δεν ισχύει πλήρως για την εμπειρία του αυτοκινήτου. Αντί να αποϋλοποιεί τον κόσμο που ζούμε, το αυτοκίνητο έχει αλλάξει την αντίληψή μας για την υλικότητα.

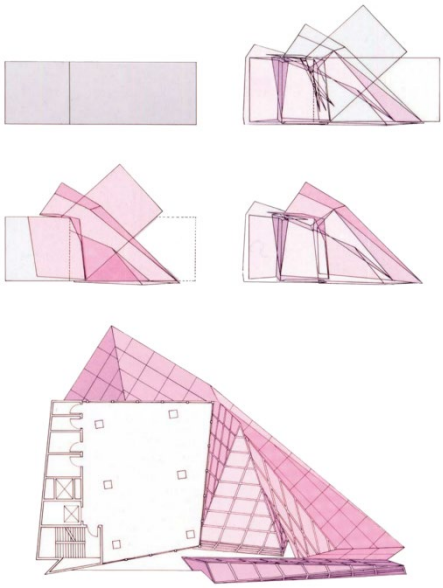
Όταν οδηγούμε, δεν αντιλαμβανόμαστε ακριβώς τα ίδια αντικείμενα όπως όταν περπατάμε. Βλέποντας από έναν αυτοκινητόδρομο, ένα κτίριο είναι διαφορετικό από την όψη που έχουμε όταν περπατάμε. Με την ταχύτητα του αυτοκινήτου, τα αντικείμενα ομαδοποιούνται σχηματίζοντας νέες αντιληπτικές οντότητες. Η κλίμακα και η μορφή του σύγχρονου αστικού ορίζοντα είναι αποτέλεσμα της εποχής των αυτοκινήτων, όπως και τα τοπία που παράγονται από την ταχεία διαδοχή πινακίδων κατά μήκος μεγάλων αυτοκινητοδρόμων.

Οπότε είναι η ψηφιακή αναπαράσταση μια νέα τάξη σχεδιασμού που μας απομακρύνει από τις συμβάσεις του παραδοσιακού ορισμού της πρακτικής και των παραδοσιακών σωμάτων γνώσης; Ή μήπως πρέπει να δούμε αυτήν τη συμβίωση ως «νέο ζευγάρωμα» ανθρώπου και μηχανής;

1.4. Ένα χρονικό των εξελίξεων στον ψηφιακό σχεδιασμό

R. Oxman: Ιστορική εξέλιξη θεωρίας του Ψηφιακού σχεδιασμού

Απο την **πρώιμη ενσωμάτωση** υπολογιστικών συστημάτων στον σχεδιασμού την **δεκαετία του 60**, η εξέλιξη των θεωριών έχει περάσει μια περίοδο επαναστατικών τεχνολογικών και πολιτιστικών **μεταβάσεων**. Οι θεωρίες του ψηφιακού στην αρχιτεκτονική είναι σε μια διαρκή εξέλιξη και αλληλεξάρτηση.Η προϊστορία μιας θεωρίας της ψηφιακής αρχιτεκτονικής βασίζεται στην προσπάθεια της αρχιτεκτονικής κουλτούρας να ξεχωρίσει από την αναπαραστατικότητα ως την κυρία λογική παραγωγής μορφής (Oxman, 2013).



Εικ. 2, 3 Διαγράμματα αναδίπλωσης/πτύχωσής, κάτοψη και μακέτα, Alteka Office Building, Peter Eisenman, Tokyo, 1991.

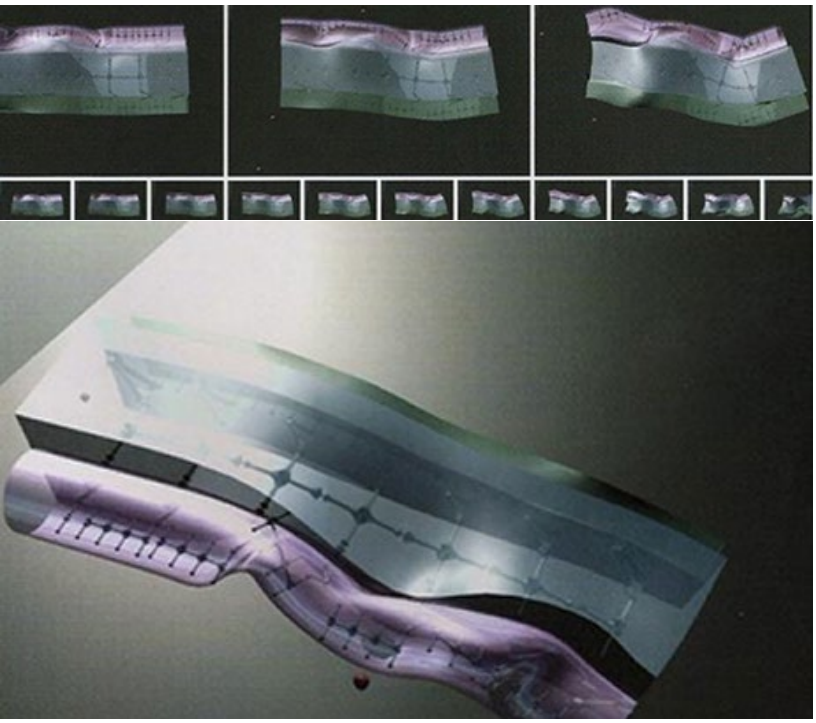
Η Πτύχωση του Lynn

Αυτή η ριζική αναθεώρηση, που επηρεάστηκε από το ενδιαφέρον προς τις έννοιες του Deleuze για την αρχιτεκτονική θεωρία κατά τη δεκαετία του 90, αποτυπώθηκε στη “πτύχωση στην αρχιτεκτονική” του Lynn (1993). Όπως υποστηρίζει ο Carpo (2004), η Πτύχωση στην Αρχιτεκτονική του Lynn, το 1993, κατέχει κεντρική θέση ως θεμέλιο του θεωρητικού λόγου. Η Πτύχωση προσπάθησε να δώσει, τόσο μια θεωρητική, όσο και μια πρακτική λύση σε ένα από τα τότε κυρίαρχα εφαρμοζόμενα ρεύματα της θεωρίας, την Αποδόμηση (Deconstruction). Τα κείμενα του Lynn, απο την μία, έκαναν κριτική στη χρήση “γλωσσολογικού ανάλογου” σαν όμορφη κι θεωρία του σχεδιασμού, προσπαθώντας να λειτουργήσει ως αντίθεση στην Αποδόμηση, και από την άλλη πλευρά προσπάθησε να διατυπώσει μια θεωρία του ψηφιακού σχεδιασμού ως το επίκεντρο της θεωρίας του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, παρουσιάζοντας την πτύχωση σαν μια στροφή της θεωρία και της πράξης στην αρχιτεκτονική.

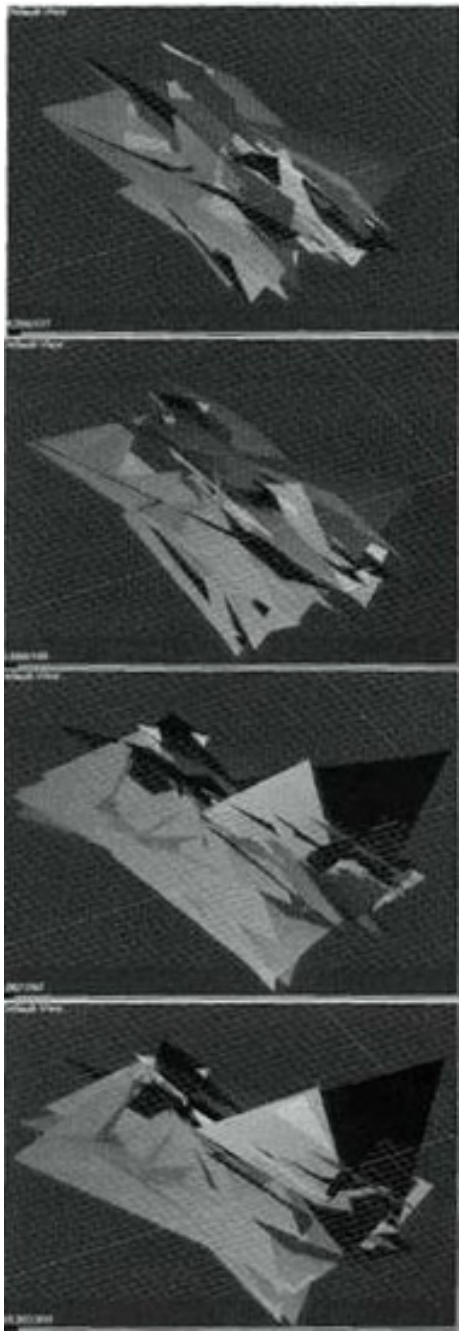
Η δεκαετία έπειτα από την πτύχωση όπως παρουσίασε ο Lynn (2004) σαν μια περίοδο θεωρητικής στροφής. Αυτή η αλλαγή εποχής είχε ως ορόσημο το Guggenheim του Gehry στο Μπιλμπάο, ενα έργο ορόσημο του τέλους του αιώνα. Ένα κτίριο αναλογικό στο σχεδιασμό και ψηφιακό στην κατασκευή, βασισμένο στις αρχές της αποδόμησης ενώ παράλληλα ικανοποιούσε σε αστικό επίπεδο κάποιες από τις προϋποθέσεις τις πτυχώσεις (Rivka, 2013) ως μία ροϊκή λογική σύνδεσης (Lynn,

1993). Κάτι που ξεχώρισε την πτύχωση για τον Lynn σαν μία αντίθεση στην αποδόμηση στην αρχιτεκτονική.

Στην επανέκδοση το 2004 πτύχωσης του Lynn. Πέρα από το γεγονός ότι ήταν πέρα των καμπυλόμορφων μαθηματικών η νέα μετά την πτύχωση αναγνωρίζει την πολυπλοκότητα σαν μία κατάσταση/στοιχείο μορφολογίας του ψηφιακού σχεδιασμού είναι ακόμα φορμαλιστικό. Αναφερόμενος στις πολύπλοκες συνθέσεις ως οργανικές περιέγραψε ένα χαρακτηριστικό της μετα-πτύχωσης σαν τη στροφή από τα μονολιθικά αντικείμενα προς τα στοιχεία με άπειρες κλίμακες". (Lynn, 2004)

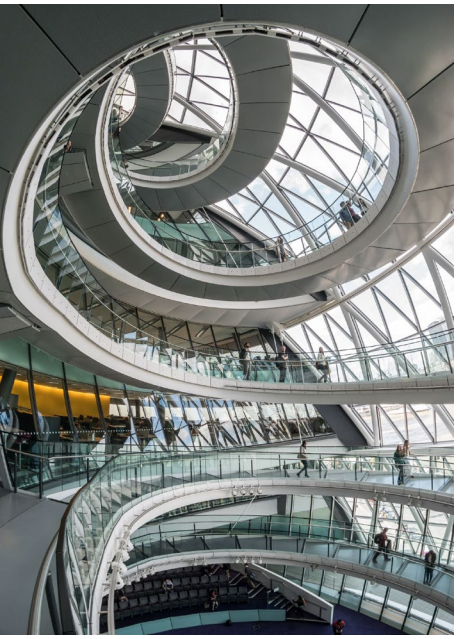


Εικ. 5 Ψηφιακή απεικόνιση που δείχνει περιπτώσεις παραμορφώσεων του μοντέλου, House prototype in long Island, Greg Lynn, 1994



Εικ. 4 Πειράματα με κίνηση, Greg Lynn, 1993

Εικ. 6 Kartal – Pendik Masterplan, ZHA, Κωνσταντινούπολη, Τουρκία, 2007



Εικ. 7 Η σπειροειδής σκάλα του Δημαρχείου του Λονδίνου, Foster…

Η εμφάνιση του Παραμετρικού σχεδιασμού

Παράλληλα με εκείνη την περίοδο, αρχές της χιλιετίας, ο παραμετρικός σχεδιασμός άρχισε να εμφανίζεται σαν ένα στοιχειώδες μέσο του ψηφιακού σχεδιασμού. Πέρα από το να είναι απλώς μία τεχνολογία σχεδιασμού, ο παραμετρικός σχεδιασμός είναι μία νέα λογική του ψηφιακού σχεδιασμού. Η παραμετρική λογική εστιάζει πάνω σε μία λογική συσχετίσεων και σχέσεων αλληλεξάρτησης μεταξύ αντικειμένων και της σχέσεις "μέρους και όλου" τους. Αλλάζοντας τις τιμές των παραμέτρων εντός ενός παραμετρικού μοντέλου συσχετίσεων, όπως γεωμετρικών σχέσεων, δημιουργείται μία ποικιλία μεταβλητών περιπτώσεων του αντικειμένου. Τα παραμετρικά συστήματα επιτρέπουν τον ορισμό κανόνων και διαδικασιών για την δημιουργία παραλλαγών. Έτσι ο παραμετρικός σχεδιασμός στην αρχιτεκτονική αποτελεί μια νέα μορφή σχεδιαστικής λογικής.

Σαν εργαλείο για τον χειρισμό των "λογικών" σχέσεων, παραμετρικός σχεδιασμός επιτρέπει τη δημιουργία και τον έλεγχο "διαφοροποίησης" στα στοιχεία του σχεδιασμού. Η δυνατότητα δημιουργία και κλιμάκωσης της διαφοροποίησης σε ποικίλες κλίμακες, όπως η διαβάθμιση των στοιχείων των όψεων των κτιρίων, έχει αρχίσει να αξιοποιείται ως χαρακτηριστική διευκόλυνση του παραμετρικού σχεδιασμού. Ο Patrick Schumacher έχει ορίσει αυτήν την δυνατότητα ως χαρακτηριστικό της σύγχρονης ψηφιακής αρχιτεκτονικής μορφής, ορίζοντας το με τον ορό "παραμερισμός" (Schumacher, 2009)

Παραμετρικός σχεδιασμός με γνώμονα την απόδοση (Parametric performative design)

Κατά την τελευταία δεκαετία, πρωτοποριακές τεχνολογίες έχουν γίνει η κινητήρια δύναμη της δημιουργίας θεωριών όπως και της παραγωγής μιας νέας μορφής τεκτονικής και μεταχείρισης της υλικής. Από τα πρώτα χρόνια της νέας χιλιετίας, ο παραμετρικός σχεδιασμός, με την υποστήριξη του νέου λογισμικού, άρχισε να γίνεται το προτιμώμενο περιβάλλον σχεδίασης μιας νέας γενιάς σχεδιαστών και ερευνητών που γράφουν κώδικα. Ως βάση ήταν σχεδιαστικά προγράμματα που χειρίζονται γεωμετρίες nurbs, όπως το rhino και αργότερα το plug-in του Grasshopper. Παράλληλα με αυτά

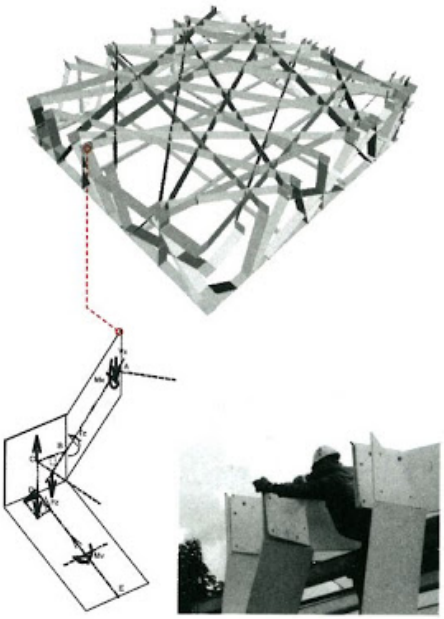
τα λογισμικά εμφανίζεται μία γενιά ενσωματωμένων λογισμικών εξομοίωσης, για ενεργειακούς και στατικούς υπολογισμούς.

Ο πύργος της “Swiss Re” και “Δημαρχείο του Λονδίνου” (βλ. Εικόνα 2) από τους Foster + Partners το 2003 είναι δύο παραδείγματα των δυνατοτήτων της σύνδεσης μεταξύ του παραμετρικού λογισμικού και της προσομοίωσης απόδοσης. Η ψηφιακή αυτή σύνδεση, επίσης, δημιούργησε ένα εξελιγμένο περιβάλλον για μία διαδραστική ψηφιακή σχεδίαση και προσομοίωση απόδοσης, που λειτουργεί ως μοντέλο σχεδιαστικής συνεργασίας μεταξύ αρχιτέκτονα και μηχανικού.

Scripting, χρήση προγραμματισμού στην αρχιτεκτονική

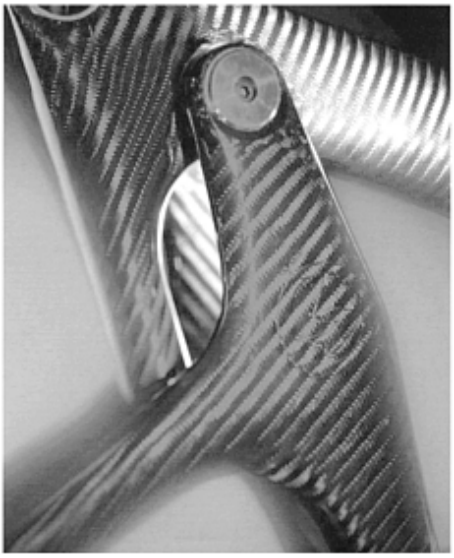
Όπως αναφέρει ο Carpo (2004), η εστίαση θεωρητικού λόγου ήταν στον διαδικαστικό σχεδιασμό και τον κώδικα, μακριά από συνθετική και αναπαραστατική θεωρία. Αυτή η τάση μιας νέας γενιάς αρχιτεκτόνων να βασίζονται στον κώδικα των αλγορίθμων στην δημιουργία αλγορίθμων ως μέσο σχεδιασμού υποστηρίχθηκε από τα ερευνητικά τμήματα κάποιον αρχιτεκτονικών γραφείων. Ανάμεσα στα σημαντικά έργα της περιόδου ήταν το Serpentine Pavilion του Toyo Ito, ένα κτίριο που αναδεικνύει τις δυνατότητες του αλγοριθμικού σχεδιασμού (Sakamoto & Ferré, 2008).

Αυτή την εποχή που εμφανίζεται μία έρευνα βασισμένη στο σχεδιασμό. Σημαντικοί αρχιτέκτονες και πολιτικοί μηχανικοί ξεκίνησαν να δημιουργούν τα δικά τους ερευνητικά τμήματα που αξιοποιούν την υπολογιστική γεωμετρία ως μέσο ανάλυσης και σχεδιασμού. Χαρακτηριστικά παραδείγματα ήταν του AGU του ARUP και το Specialist Modeling Group του Fosters. Σημαντικά έργα, από το 2003 και έπειτα, έχουν σχεδιαστεί υπό τέτοια ψηφιακά περιβάλλοντα, όπου η μορφή προέρχεται από την απόδοση.



Εικ. 8 Λεπτομέρεια κατασκευής του Serpentine Pavilion

Εικ. 9 Serpentine Pavilion, Toyo Ito + Cecil Balmond + Arup, 2002



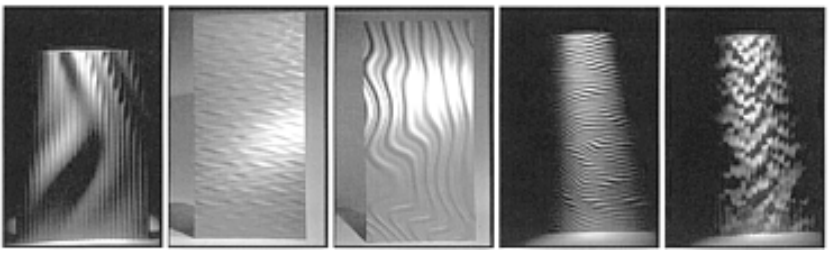
Εικ. 10 Λεπτομέρεια σε πλαίσιο ποδηλάτου από σύνθετο υλικό, ανθρακόνημα.

Η επαναφορά της τεκτονικής ως κυρίαρχο ζήτημα

Η δυνατότητα μοντελοποίησης του υλικού, μέσω του υπολογιστή, το παρέδωσε πίσω στα χέρια του αρχιτέκτονα. Η μεταχείριση του μέσω των ψηφιακών μέσων δημιούργησε μία **ψηφιακή υλικότητα**.

Ως μέρος της ψηφιακής υλικότητας, έχουν αναπτυχθεί νέες συνδέσεις μεταξύ σύλληψης και κατασκευής, μέσω των διαδικασιών "από το αρχείο το εργοστάσιο" και της ψηφιακής κατασκευής (Kolarevic, 2003). Με αυτόν τον τρόπο, η ψηφιακή πληροφορία του σχεδιασμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια σε 3d printer και σε CNC. Σαν αποτέλεσμα, ο σχεδιασμός της διαδικασίας κατασκευής έχει εμφανιστεί σαν κυρίαρχο τεχνολογικό και σχεδιαστικό ζήτημα του ψηφιακού σχεδιασμού.

Εντός αυτού του ανανεωμένου ενδιαφέροντος στην κατασκευή, η έννοια της ψηφιακής υλικότητας, έχει δώσει νέα κατεύθυνση στον σύγχρονο ορισμό του όρου της **ψηφιακής τεκτονικής**. Ένας όρος που, απο την μια μεριά, οι απόψεις επ' αυτού ακολουθούν την ανησυχία του Frampton ότι η σύγχρονη σχεδιαστική κουλτούρα χάνει την δυνατότητα της να εντάξει τεκτονική έκφραση ως "ποιητική της κατασκευής". Δηλώνει έτσι την απώλεια σχεδίασης μορφής συσχετισμένη με τις φέρουσες δυνάμεις.



Εικ. 11 Objectiles, Bernard Cache.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα δούμε πως εξελίσσεται η έννοια της τεκτονικής μέχρι σήμερα. Διότι η ενσωμάτωση της ψηφιακής υλικότητας και της ανάλυσης απόδοσης, σημερα δίνει αυτή τη δυνατότητα στην σύγχρονη “ψηφιακή έκφραση”, να προέρχεται δηλαδή από τις τεχνολογίες της κατασκευής και του σχεδιασμού υλικών. Επομένως, αυτή η τεχνολογία ενδέχεται να λύσει την αντίθεσή που ο Frampton ορίζει ως την “εικονική υλικότητα” του ψηφιακού σχεδιασμού.

2. Ψηφιακή Τεκτονική (Digital Tectonics)

Η τεκτονική προέρχεται από το ελληνικό τέκτων, είναι ο όρος καθορίζει τη φύση της σχέσης μεταξύ του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού και των δομικων και υλικών χαρακτηριστικών του (Oxman, 2012). Σε διαφορετικές περιόδους η έμφαση έχει αλλάξει ανάλογα με τον τόπου και τον πολιτισμό. Η τοπική γνώση αντικατοπτρίζει τις τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες, τις πολιτιστικές αξίες καθώς και τους παραδοσιακούς τρόπους κατασκευής (Schropfer, 2011).

2.1. Παραδοσιακή τεκτονική

Εικ. 12, 13, 14 Παραδοσιακές καλύβες Dorze από πλεκτό μπαμπού στην Chencha της Νότιας Αιθιοπίας

Οι απαρχές της τεκτονικής έκφρασης βρισκονται στην παραδοσιακή οικοδομική. Η παραδοσιακή αρχιτεκτονική αντιπροσωπεύει την βάση των τεχνολογιών υλικού, παρέχοντας άμεση κατανόηση και έκφραση της δομικής και κατασκευαστικής φύσης του υλικού. Κατ' αυτόν τον τρόπο, ορίζει τις μορφικές, δομικές και υλικές σχέσεις, όντας αμεση εκφραση της κατασκευαστικής διαδικασίας. Αυτό έχει ως αποτελεσμα, η επιλογή του τοπικού υλικού να καταλήγει στην εκφραση μορφής και δομής.

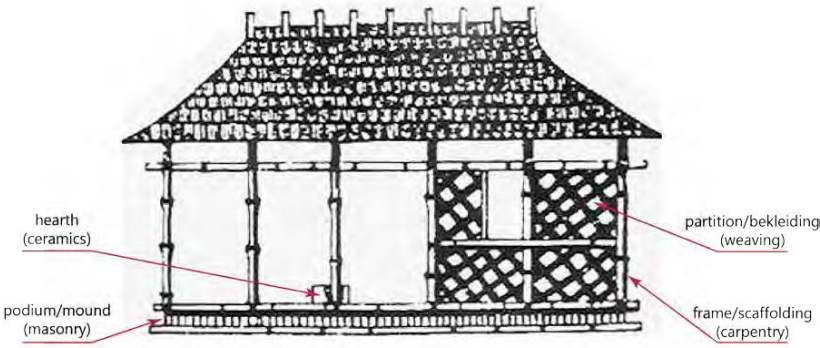
Η επιλογή των δομικών υλικών επηρεάζει, επίσης, την κατασκευαστική διαδικασία. Τέτοιες τεκτονικές αλληλεπιδράσεις γίνονται εξαιρετικά περίπλοκες σε διάφορες παραδοσιακές τεχνολογίες δόμησης, όπως για παράδειγμα οι δυναμικές εφήμερες κατασκευές της παράδοσης των νομάδων. Η παραδοσιακή κατασκευή περιλαμβάνει τόσο το δομικό σύστημα όσο και την κατασκευαστική διαδικασία. Επιπλέον, η παραδοσιακή κατασκευή κτιρίων διαδραματίζεται στην οικοδομή, χωρίς αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, και ήταν συχνά ο καρπός παραδοσιακών τεχνών όπως η ξυλουργική.

Στην παραδοση οι τεχνολογίες υλικών εξελίσσονται σε οικοδομικά συστήματα. Τέτοια συστήματα εκφράζουν άμεσα τόσο την υλική προέλευση όσο και την κατασκευαστική διαδικασία. Παραδοσιακά αυτά αποτελούν βασικά στοιχεία της σχεδιαστικής κουλτούρας (Sennett, 2008). Ειναι αυτη η αμεση εκφραση του υλικού που είναι χαρακτηριστική της παραδοσης και η χαρακτηριστική εμφαση στην ξεκάθαρη τεκτονική εκφραση του υλικού και της διαδικασιας κατασκευής (Oxman, 2012). Η τεκτονική περιγραφει την κατασκευαστική δυνατότητα του υλικού, ένα παράδειγμα είναι το παραδοσιακό ιαπωνικό σπίτι, όπου η κατασκευή είναι ένα βασικό στοιχείο του χώρου, καθώς και η κύρια πηγή της μορφής του. Ως ένας σχεδιασμός που ειναι σε αμεση αλληλεπίδραση με το υλικό και την κατασκευαστική λογική, μπορούμε να πούμε πως η παραδοσιακή αρχιτεκτονική αποτελεί ανάλογο του *σύγχρονου σχεδιασμού με βάση το υλικό* (Oxman, 2012).

2.2. Μοντέρνα τεκτονική

Η έννοια Βρίσκει θέση στον θεωρητικό λόγο τον 19ο αιώνα με την πραγματεία του Karl Bötticher, *"Der Tectonik der Hellenen"* (Η τεκτονική των Ελλήνων), πάνω αρχιτεκτονική των αρχαίων Ελλήνων. Το κύριο σημείο στο έργο του, όσον αφορά την τεκτονική, είναι ο διαχωρισμός κάθε αρχιτεκτονικού έργου σε δυο μέρη, το Kerneform (μορφή πυρήνα) και το Kunstform (καλλιτεχνική μορφή), το στατικό και το διακοσμητικό (Al-Alwan & Mahmood, 2020). Η τεκτονική είναι σύμφωνα με τον Bötticher το εννοιολογικό σύστημα που συνθέτει όλα τα στοιχεία ενός κτιρίου μια ενότητα (Frampton, 1995).

Ο **Gottfried Semper** εισήγαγε μια πολιτιστική ερμηνεία της τεκτονικής. Για αυτόν η χρήση των διαφορετικών υλικών στην αρχιτεκτονική είναι ένα πολιτιστικό φαινόμενο. Ο **Semper**, αντίστοιχα με τον Bötticher, κάνει διαχωρισμό μεταξύ των τεχνικών και των συμβολικών μερών, αλλά δίνει έμφαση στη σημασία της συνοχής μεταξύ υλικού και μεθόδου κατασκευής. Για να υπογραμμίσει την σχέση μεταξύ μορφής, υλικού και κατασκευής, ο Semper συνδέει τα τέσσερα στοιχεία της θεωρίας του, τα τέσσερα θεμελιώδη στοιχεία του κτιρίου, με τέσσερις τεχνικές: το ανάχωμα ως λιθοδομία, την εστία ως κεραμική, την περίφραξη ύφανση και τη στέγη ως ξυλουργική (Al-Alwan & Mahmood, 2020; Πανηγυράκης, 2014). Επιπλέον, ο Semper θεωρεί τον κόμβο ως το παλαιότερο και πιο πρωτότυπο κατασκευαστικό μέρος (Frampton, 1995). Επομένως, ο κόμβος είναι ζωτικής σημασίας για τον Semper, και κατά τη γνώμη του, μέσω των μεταβάσεων μεταξύ των δομικών στοιχείων, έρχεται στην επιφάνεια η ομορφιά της αρχιτεκτονικής.



Εικ. 15 Η καλύβα της καραϊβικής του Semper με επισήμανση στα 4 στοιχεία,

Στην ερμηνεία της τεκτονικής κατα τον **Kenneth Frampton,** η φέρουσα κατασκευή εχει ενεργό ρόλο στην αρχιτεκτονικής μορφής, έτσι ξεπερνά την καθαρά οπτική ή βιωματική λειτουργία της τεκτονικής και την χαρακτηρίζει ως την **"ποιητική της κατασκευής"** (Frampton, 1995). Υποστήριξε ότι η μοντέρνα αρχιτεκτονική αφορά περισσότερο τη δομή και την κατασκευή παρά το χώρο και την αφηρημένη μορφή. Αυτή του η θέση, θεώρησε την τεκτονική ως βασικό στοιχείο στην εξέλιξη της σύγχρονης αρχιτεκτονικής μορφής (Oxman, 2012). Προτείνει την τεκτονική ως ένα μέσο για να αποκαλυφθεί η "ουσία" ενός κτιρίου. Επομένως προτείνει **λογικές κατασκευές**, προκειμένου να ειναι **ευανάγνωστη** η δομή του αρχιτεκτονήματος και να το καταστεί αμέσως κατανοητό. Επίσης, στη θεωρία του Frampton, ο **αρμός** (joint) έχει μια εξέχουσα θέση, είναι όπου συναντώνται τα αρχιτεκτονικά στοιχεία και τα υλικά και, ως εκ τούτου, είναι ένα κρίσιμο σημείο στην αφήγηση της λογικής μιας κατασκευής. Στον αρμό ενσωματώνεται η ιστορία των υλικών, η συνολική δομή και οι νόμοι της φύσης, και ως εκ τούτου το πιο τεκτονικό στοιχείο ενός αρχιτεκτονήματος (Andersson & Kirkegaard, 2006).

2.3. Ψηφιακή Τεκτονική - Digital Tectonics

Αντίθεση

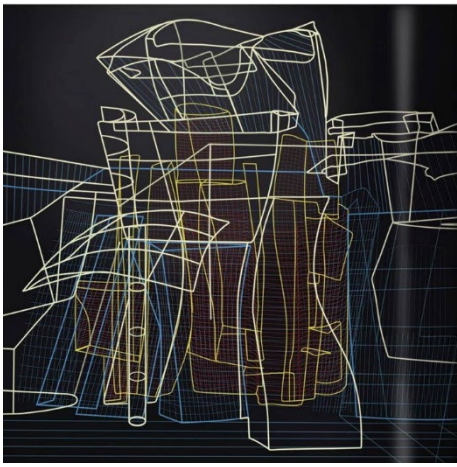
Πολλοί θα υποστήριζαν πώς η ψηφιακότητα χαρακτηρίζει τον άυλο κόσμο των υπολογιστών σε αντίθεση με την τεκτονική που αναφέρεται στον "ξεκάθαρα" υλικό κόσμο της κατασκευής (Leach, Turnbull, & Williams, 2004). Κάτι το ψηφιακό νοείται ως εικονικό, αφηρημένο και απαλλαγμένο από τους νόμους της φύσης. Είναι εμφανής η εγγενής αντίθεση στους δυο αυτούς όρους. Επομένως, είναι δύσκολο αυτομάτως να καταλάβουμε πώς μπορούν να συνδυαστούν.

Οπως με τον όρο τεκτονική, υπάρχουν πολλές διαφορετικές ερμηνείες του όρου της ψηφιακής τεκτονικής. Ένα παράδειγμα είναι η πρόταση του Wassim Jabi (2004) που την προσδιορίζει ως την «η ποιητική της ψηφιακά σχεδιασμένης, δομικά διευκρινισμένης και άμεσα κατασκευασμένης αρχιτεκτονικής». Κατι εμφανώς εμπνευσμένο απο τον χαρακτηρισμό **"ποιητική της κατασκευής"** του Frampton.

Νέες δυνατότητες

Τα ψηφιακά εργαλεία σχεδιασμού εισήχθησαν σταδιακά στην αρχιτεκτονική, πολύ πριν αρχίζει ο όρος ψηφιακή αρχιτεκτονική να αποδίδεται σε κτίρια και αρχιτέκτονες. Τα νέα ψηφιακά εργαλεία και τεχνικές που έγιναν διαθέσιμα μπορούν από τη μία να χρησιμοποιηθούν με αισθητικό τρόπο, για την δημιουργία πολύπλοκων συνθέσεων σχημάτων, και από την άλλη στον τομέα της μηχανικής, καθιστώντας δυνατή την εύρεση ακριβών λύσεων μέσω υπολογισμού σύνθετων μοντέλων του κτιρίου και των συνθηκών του (Andersson & Kirkegaard, 2006). Έτσι ξεκίνησαν παράλληλα δύο κατευθύνσεις έρευνας και εφαρμογής των νέων ψηφιακών δυνατοτήτων, αυτή της εξερεύνησης των μορφικών δυνατοτήτων και αυτή της σχεδίασης με βάση την απόδοση, με την χρήση στατικής και βιοκλιματικής εξομοίωσης.

Οι νέες δυνατότητες της “ψηφιακής” δημιουργίας ελεύθερων μορφών ωθούν αρκετούς αρχιτέκτονες να σχεδιάζουν με καμπύλες. Αυτή η **αισθητική ρήξη** που προκλήθηκε εχει ως αποτέλεσμα μια αρχιτεκτονική που **φαινομενικά** απορρίπτει έννοιες της δομικής τεχνολογίας, συνέχειας και μορφολογίας. Οι αρχιτέκτονες αυτού του κινήματος αντιπροσωπεύουν μια **οπτική και ιδεολογική ρήξη** με την οικοδομική παράδοση (Kolarevic, 2003) και χρησιμοποιούν την **κλασική** προσέγγιση στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Δηλαδή, τα ψηφιακά εργαλεία εισάγονται στο τελευταίο στάδιο, το στάδιο της κατασκευής. Οπότε, μπορεί να επιτρέπουν τη δημιουργία πρότερα αδυνάτων μορφών αλλά δεν αποτελούν μέρος της σύνθεσης και ως εκ τούτου αυτή η αρχιτεκτονική δεν μπορεί να θεωρηθεί καθαρά ψηφιακή.



Εικ. 16 Σχέδιο του Guggenheim στο CATIA, Frank Gehry, 1997

Το (προβληματικό) παράδειγμα του Gehry

Σε αυτή την πρώτη γενιά ψηφιακής αρχιτεκτονικής, αξίζει να περιγραφεί το εμβληματικό παράδειγμα του **Frank Gehry** στο Μπιλμπάο. Διότι, οπως είδαμε προηγουμένως, χαρακτηρίζει το πέρασμα στη νέα αρχιτεκτονική, όμως η μεταχείριση του υλικού είναι αμφιλεγόμενη. Ο Gehry συνθέτει χρησιμοποιώντας μακέτες, δηλαδή απτά, φυσικά μοντέλα, αντί

για τον ψηφιακό χειρισμό επιφανειών ή όγκων σε έναν υπολογιστή. Ως εκ τούτου, η προσέγγιση στην χρήση των ψηφιακών τεχνολογιών μπορεί να θεωρηθεί ως μετάφραση φυσικών μοντέλων σε ψηφιακές πληροφορίες, που θα χρησιμοποιηθούν για την τελική κατασκευή του κτιρίου (Kolarevic, 2003).

Συγκεκριμένα, στο Guggenheim στο Μπιλμπάο (1997), η μορφή έχει σχεδιαστεί γλυπτικά, χωρίς στατική ή κατασκευαστική πρόβλεψη. Για να κατασκευαστούν οι σύνθετες επιφάνειες του, χρειάστηκε να σχεδιαστούν με χρήση το λογισμικό αεροναυπηγικής "CATIA" και ως στατική λογική να "κρυφτεί" εντός τους ένα μεταλλικό χωροδικτύωμα. Κατ' αυτού, κάνοντας την κατασκευαστική λογική ασαφή και ασύνδετη με την μορφή. Παρουσιάζοντας έτσι μια εμφανή απομάκρυνση απο την μοντέρνα τεκτονική λογική.

Εικ. 17 Ενδιάμεση φαση κατασκευής του μουσείου Guggenheim, Frank Gehry, Μπιλμπάο, 1997

Η Κριτική του Kenneth Frampton

Γι' αυτο τον λόγο, η αρχιτεκτονική του Gehry έγινε από πολλούς αντικείμενο κριτικής. Σημαντικός εκφραστής αυτής κριτικής ήταν ο Kenneth Frampton (2005), που κατηγορεί πολλά έργα της ψηφιακής αρχιτεκτονικής ως έντονα φορμαλιστικά. Χαρακτηριστική είναι η συνέντευξη στον K. Frampton, στη οποία ο θεωρητικός καλείται να καθορίσει τα όρια μεταξύ γλυπτικής και τεκτονικότητας στην αρχιτεκτονική, θέτοντας ως παραδείγματα την διαφορά μεταξύ του αρχιτέκτονα Enric Miralles και του Frank Gehry:

> "Σχεδόν σε όλο το έργο του Miralles τα τεκτονικά στοιχεία είναι ενσωματωμένα μετά γλυπτικά. Στην περίπτωση του Gehry, πέραν των πρώτων έργων του, δεν υπάρχει κανένα ενδιαφέρον ως προς την τεκτονική. Αυτός ενδιαφέρεται μόνο για την πλαστικότητα, και Θα έκανε οτιδήποτε ώστε η μορφή του να στηριχτεί, δεν νοιάζεται καθόλου. Αυτό είναι πολύ εμφανές στο

Μπιλμπάο.” ((Frampton, Allen, & Foster, 2003))

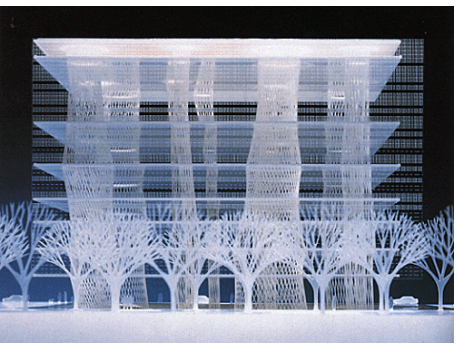
Εν συνεχεία, ο συνεντευκτής και θεωρητικός Stan Allen προσθέτει ότι:

> “Η γλυπτική ενότητα στο έργο του Gehry είναι εξ ορισμού σκηνογραφική στο βαθμό που ο πλαστικός, λαξευμένος χαρακτήρες των σχημάτων του έρχεται σε αντίθεση με την κατανόηση της σε ξεχωριστά μέρη. Στο έργο του Miralles, από την άλλη πλευρά, υπάρχει δυνατότητα να κατανοήσουμε πώς τα επιμέρους κομμάτια συνενώνονται για να δημιουργήσουν φόρμες, όσο περίπλοκα και γλυπτικά κι αν είναι.” (Kenneth Frampton et al., 2003)

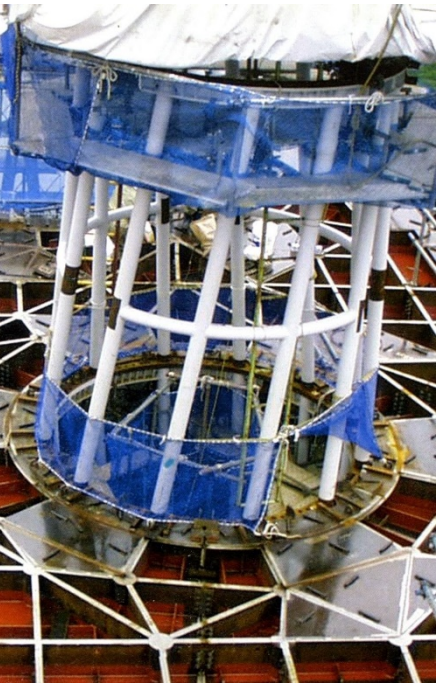
Εικ. 18 Λεπτομέρεια δομής της υποστυλώματος της αγοράς τροφίμων της Βαρκελώνης στη Santa Caterina (1997) από τους Enric Miralles και Benedetta Tagliabue

Αυτή, η πολέμια της ψηφιακής αρχιτεκτονικής, ομάδα θεωρητικών υποστηρίζει πως η παραγωγή “σαγηνευτικών” ψηφιακών απεικονίσεων δεν ανταποκρίνεται στην φύση της αρχιτεκτονικής. Προτάσσουν την έννοια της τεκτονικής, τονίζοντας πως η αρχιτεκτονική δεν προέρχεται από τις δυνατότητες των αλγορίθμων αλλα απο τις τεκτονικές δυνατότητες των υλικών (Leach, 2004). Με αυτόν τον τρόπο, η απομάκρυνση από την τεκτονική για την εύρεση εντυπωσιακό μορφών καταλήγει στην αμφισβήτηση της ειλικρίνειας των υλικών και της κατασκευής. Αυτός είναι ο λόγος που αρκετές αρχιτεκτονικές μορφές παρουσιάζονται χωρίς συγκεκριμένη υλικότητα, με αποτέλεσμα στο επόμενο στάδιο να υποχρεώνεται το ίδιο το υλικό να προσαρμοστεί στην προσομοίωση της κατασκευής (Βίδρου, 2014)

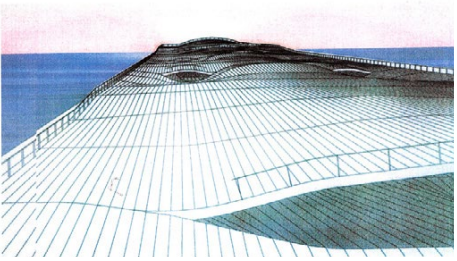
Εικ. 19 Η ανακαίνιση της πρώτης σκεπαστής αγοράς τροφίμων της Βαρκελώνης στη Santa Caterina (1997) από τους Enric Miralles και Benedetta Tagliabue



Εικ. 21 Μακέτα του Sendai Mediatheque, Toyo Ito, 1995



Εικ. 20 Λεπτομέρεια από το στάδιο κατασκευής του Sendai Mediatheque, Toyo Ito, 1995



Εικ. 22 Σχεδιο που αποτυπώνει την κυματοειδή επιφάνεια, FOA, Yokohama International Port Terminal

Sendai Mediatheque - Ito

Ένα αντίστοιχο χάσμα παρουσιάζεται στο Sendai Mediatheque, μία βιβλιοθήκη πολυμέσων και μουσείο, που σχεδίασε ο Toyo Ito και ολοκληρώθηκε το 2001 στο Sendai της Ιαπωνίας. Η ιδέα του, για ένα διάφανο κτίριο, αποτυπώνεται ξεκάθαρα στην φωτεινή του μακέτα για το διαγωνισμό. Ο όγκος αναπαριστά ένα δοχείου όπου ως ελεύθερα, ρευστά στοιχεία, σαν φύκια, σχηματίζουν τις σωληνοειδείς δικτυωτές κολώνες. Όλα αυτα έρχονται σε αντίθεση με τη δομική πραγματικότητα των βαρέων, χαλύβδινων πλακών, 40 εκατοστών, που ηταν απαραίτητα για να πραγματοποιηθεί. Επίλυση που θυμίζει βαριές κατασκευές ναυπηγικής (Picon, 2004).

Yokohama terminal station - FOA

Ομοίως ο τερματικός σταθμός στη Yokohama των **Foreign Office Architects,** έργο των Foreign Office Architects (FOA), φέρει μια παρόμοια αντίθεση μεταξύ της ρευστότητας του αρχικού σχεδιασμού και του τρόπου κατασκευή του. Ο διεθνής αρχιτεκτονικός διαγωνισμός ξεκίνησε το 1996 και το έργο ολοκληρώθηκε το 2002. Λόγω της κυρίας λειτουργίας του, ως επιβατικού σταθμού κρουαζιερόπλοιων, είναι ένα έργο με έντονη κινητικότητα και γι’ αυτό αναπτύχθηκε εξ ολοκλήρου βασισμένο στο διάγραμμα κίνησης. Οι δύο βασικές συνθετικές αρχές των αρχιτεκτόνων ήταν η συνεχής μη επαναλαμβανόμενη κίνηση και η δημιουργία ενός κτιρίου – τοπίο που θα λειτουργούσε ως προέκταση του αστικού ιστού και του δικτύου πρασίνου της πόλης. Στο διάγραμμα κίνησης απεικόνισαν τη ροή των κινήσεων με ατέρμονες βρόχους, και χωρίς συγκεκριμένη αλληλουχία. Επιτυγχάνοντας έτσι μία πληθώρα διαφορετικών κινήσεων, χωρίς να επιβάλλουν στον χρήστη τη συνηθισμένη γραμμική πορεία μιας προβλήτας. Γι’ αυτό το λόγο το ονόμασαν “no-return diagram”, διευκρινίζοντας επίσης πως ο χρήστης δεν θα επαναλαμβάνει την προηγούμενη πορεία του (Κουκλάκη, 2018).

Το αποτέλεσμα, της μετατροπής του δισδιάστατου αυτού διαγράμματος στον τρισδιάστατο χώρο, είναι ο μετασχηματισμός του εδάφους σε μια ρευστή μορφή ακανόνιστων καμπύλων, πτυχώσεων και διακλαδώσεων που συγκροτούν μια κυματοειδή επιφάνεια (Βίδρου, 2016). Αυτή η λεία καμπύλη επιφάνεια που εμφανίζεται στα σχέδια του διαγωνισμού, χωρίς συγκεκριμένη υλικότητα, αποδείχθηκε, εκ των υστέρων, αδύνατη να κατασκευαστεί από χυτό υλικό, όπως το σκυρόδεμα. Ύστερα από μία εκτεταμένη αναζήτηση κατασκευαστικής επίλυσης, πού να ανταποκρίνεται στη ζητούμενη μορφή, το έργο καταλήγει να ολοκληρώνεται αναλύοντας την μορφή σε ένα πλέγμα μεταλλικών στοιχείων που επενδύεται με ξύλινες σανίδες, δηλαδή από μία ροϊκή πρόθεση στον κατακερματισμό.

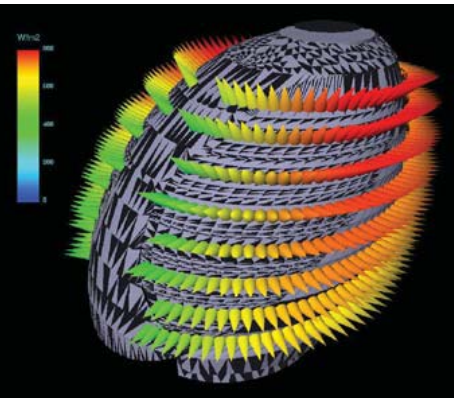
Εικ. 24 Φωτορεαλιστική απεικόνηση από τον διαγωνισμό για τον τερματικός σταθμός στη Yokohama.

Συμπέρασμα

Ο κόσμος των ψηφιακών τεχνολογιών δεν είναι μόνο σύνθετος σε όλα τα επίπεδα, είναι επίσης γεμάτος εκπλήξεις εξαιτίας της απόστασης που συχνά διαχωρίζει τον ψηφιακό σχεδιασμό από την τεκτονική. Η συνθετική απλότητα των μορφών, που προκύπτουν από τον ψηφιακό σχεδιασμό, δημιουργούν μια λανθασμένη εντύπωση για την τεχνική επίλυση, με αποτέλεσμα σε πολλά έργα η ύλη να προσπαθεί παθητικά να υποταχθεί στην προκαθορισμένη μορφή. Η αντιπαράθεση κρητικών όπως ο Frampton είναι άμεσα συνδεδεμένη με την αναγνώριση αυτού του χάσματος μεταξύ της ψηφιακής αναπαράστασης και της συμβατικής τεκτονικής. Όσο ανησυχητικό και αν είναι, ένα τέτοιο χάσμα δεν είναι απαραίτητα συνώνυμο με την “αποϋλοποίηση” της αρχιτεκτονικής (Picon, 2004). Ο υπολογιστής επαναπροσδιορίσει την υλικότητα αντί να την εγκαταλείπει για χάρη της σαγήνης απλών, ιδανικών απεικονίσεων.

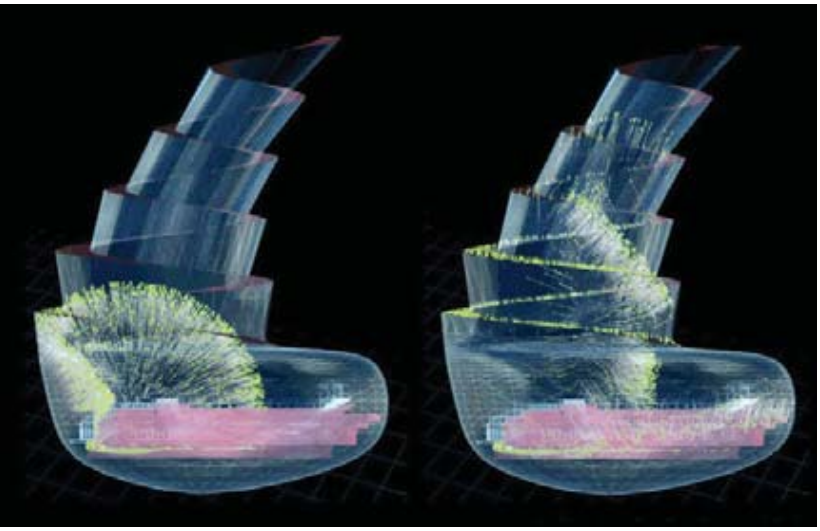
Εικ. 23 Φυτογραφία από την κατασκευή της υποδομής κάτω από το κυματιστό ξύλινο πάτωμα του τερματικούς σταθμού στη Yokohama.

Εστίαση στην απόδοση - Performative Design



Εικ. 25 Ηλιακή προσωμοίωση στο κέλυφος του δημαρχείου του Λονδίνου.

Απο την άλλη σχεδιαστική μεριά, υπάρχει μια νέα έμφαση στην τεχνική πλευρά της διαμόρφωσης ενός έργου σύμφωνα με τη γνώση και τη χρήση νέων τεχνολογιών και εργαλείων. Στον τομέα των τεχνολογικών πτυχών ενός κτιρίου - όπως η κατασκευή, η ακουστική, ο φωτισμός, κ.λπ. - τα ψηφιακά εργαλεία παρέχουν μεγάλες δυνατότητες διερεύνησης και προσομοίωσης μελλοντικών συνθηκών, καθώς και διαδικασιών βελτιστοποίησης. Στο «Δημαρχείο του Λονδίνου», που σχεδίασαν οι Foster and Partners, υπάρχουν, για παράδειγμα, ηλιακές μελέτες, για να διερευνηθεί πώς θα κατανεμηθούν οι ακτίνες στην επιφάνεια του κτιρίου και δοκιμάζονται διαφορετικά σχήματα σε σχέση με την ακουστική του εσωτερικού, πριν βρεθεί το τελικό σχήμα του κτιρίου.



Εικ. 26 Προσομοίωση ακουστικής στην κεντρική αίθουσα του δημαρχείου του Λονδίνου.

Με τέτοιου είδους δυνατότητες σχεδιαστικής διερεύνησης, επαναπροσδιορίζονται οι προσδοκίες στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, αυξάνονται οι απαιτήσεις και υπάρχει μια νέα έμφαση στην τεχνική απόδοση των κτιρίων (Kolarevic, 2003). Μέσω των ψηφιακών εργαλείων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν γεννητικές διαδικασίες, που δίνουν νέες δυνατότητες μορφικής και τεκτονικής εξερεύνησης. Με αυτό τον τρόπο τα ψηφιακά εργαλεία παρέχουν μια μετάβαση από τη δημιουργία της μορφής, form-making, στην εύρεση της μορφής, form-finding (Kolarevic, 2003).

Η χρήση της λέξη “εύρεση” σε αυτό το πλαίσιο, δεν σημαίνει πως το βέλτιστο σχήμα πρέπει να βρεθεί και να αντιγραφεί αυτούσιο από λογισμικό. Μια τέτοια λύση ονομάζεται “μηχανική” λύση, καθώς έτσι ο αρχιτέκτονας δεν επιδρά στο τελικό αποτέλεσμα. Για να επιτευχθεί ένα τεκτονικό αποτέλεσμα, πρέπει να βρεθεί μια “μηχανική” λύση, δηλαδή στη διαδικασία να

περιλαμβάνονται υπολογιστικές διαδικασίες, καθώς και αρχιτεκτονικές αισθητικές επιλογές (Leach, 2004). Ο υπολογιστής σε αυτή την σχέση λειτουργεί ως συνεργάτης, που δίνει στον αρχιτέκτονα τεχνικές οδηγίες μέσω των διαδικασιών.

Αντισταθμίζοντας τόσο στην αισθητική όσο και στην τεχνική σφαίρα, ο Branko Kolarevic (2003) εισάγει την έννοια της αρχιτεκτονικής "με βάση την απόδοση". Ο όρος αυτός περιγράφει την αρχιτεκτονική που ως κεντρικό στοιχείο έχει την απόδοση σε ορισμένους τομείς, όπως η ακουστική, η θερμική απόδοση του χώρου ή η κατασκευή, κατ' αυτού χρήζει την αντίστοιχη ανάλυση, και συνεπώς την προσαρμογή της αρχιτεκτονικής μορφής στο αποτέλεσμα.

Νέα έμφαση στο τεκτονικό

Σήμερα, η προτεραιότητα της υλοποίησης είναι κυρίαρχο πολιτιστικό θέμα. Ως σχεδιαστικό πολιτιστικό φαινόμενο, η σύγχρονη τεκτονική απομακρύνεται από την ερμηνεία της τεκτονικής της μοντέρνας περιόδου. Ενώ ο μοντερνισμός διαχωρίζει τη μορφή, τη δομή και την επιφάνεια, η σύγχρονη σχεδιαστική κουλτούρα, εστιάζοντας στο υλικό, τονίζει την ενσωμάτωση τους. Ως αποτέλεσμα, η ενσωμάτωση της μορφής, της δομής, του υλικού και της διαδικασίας κατασκευής τους τοποθετεί τα χαρακτηριστικά του υλικού και της κατασκευής στον ορισμό του τεκτονικού.

2.4. **Ορισμοί** (Oxman, 2012)

Οι θεωρίες και οι τεχνολογίες του ψηφιακού σχεδιασμού (Oxman, 2006, 2008) έχουν αποδώσει νέα σημασία στον όρο τεκτονική. Τα ψηφιακά μέσα και τις υπολογιστικές τεχνολογίες εξέλιξαν τις τεκτονικές δυνατότητες, κάτι που είχε ως αποτέλεσμα την διαμόρφωση διαφόρων προσεγγίσεων και ορισμών του όρου ψηφιακή τεκτονική την τελευταία δεκαετία. Οι κυριότερες σύμφωνα με την Oxman (2012) είναι οι εξής:

Η *εικονική υλικότητα* του William Mitchell

Ο όρος ψηφιακή τεκτονική εισάγεται από τον William Mitchell στο άρθρο του “Antitectonics: the poetics of virtuality”. Η "ποιητική την εικονικότητας", ένας τίτλος που θυμίζει την "ποιητική της κατασκευής" του Frampton, προτείνει τον όρο, εικονική υλικότητα, για να περιγράψει έναν εικονικό υπολογιστικό χώρο που φιλοξενεί την αναπαράσταση της υλικότητας (Mitchell, 1998). Μία θέση αντίθετη με αυτή του Frampton (1995). Σήμερα η έννοια της ψηφιακής τεκτονικής επεκτείνει τη λειτουργία της υλικότητας στο σχεδιασμό και συμβάλλει σε μια νέα προοπτική των υπολογιστικών μεθόδων της τεκτονικής.

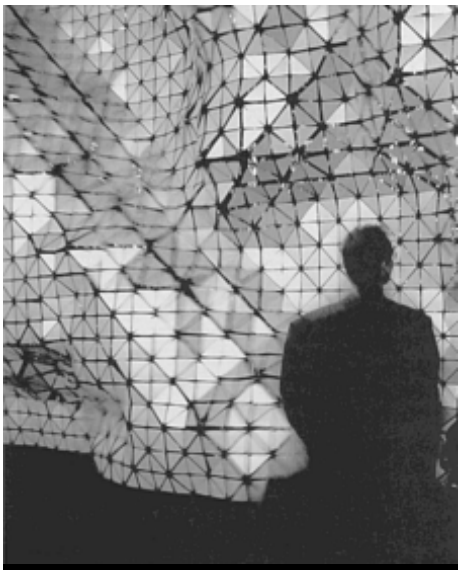
> “Οι εικονικοί χώροι εκπροσωπούν το “less is more” σε ένα προκλητικά ανορεξικό άκρο. Δεν έχουν θεμέλια στο έδαφος, οπότε εξαλείφουν εντελώς το "χωματουργικό έργο" που ο Gottfried Semper αναγνώρισε ως το πρώτο από τα τέσσερα στοιχεία της αρχιτεκτονικής του. Δεν χρειάζονται ούτε το δεύτερο (το τζάκι) ούτε το τρίτο (το πλαίσιο). Στην πραγματικότητα, το μόνο που απομένει είναι μια εξαιρετικά εξασθενημένη έκδοση του τέταρτου στοιχείου του Semper - η ελαφριά μεμβράνη που περικλείει.” (Mitchell, 1998)

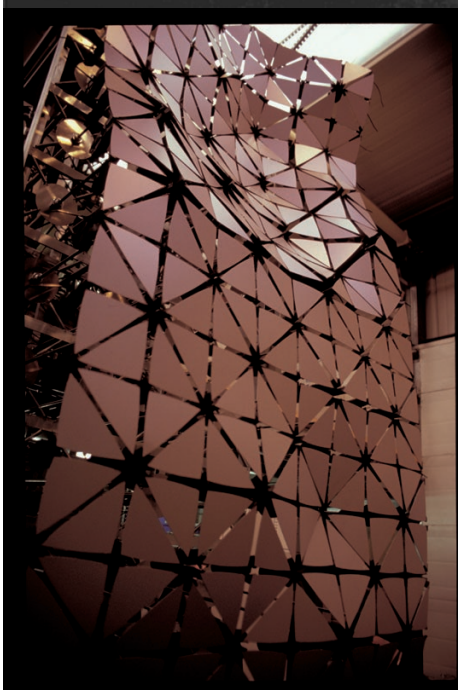
Ψηφιακή τεκτονική ως ενισχυμένη φυσική υλικότητα

Διάφορες θεωρητικές προσεγγίσεις για τον όρο ψηφιακή τεκτονική έχουν προταθεί ως χαρακτηρισμός της επίδρασης των ψηφιακών μέσων και τεχνολογιών κατά την εξερεύνηση και τροποποίηση των συμβατικών αντιλήψεων της τεκτονικής στην αρχιτεκτονική πρακτική.

Οι Liu και Lim (Liu & Lim, 2006) έχουν ταυτοποιήσει την ψηφιακή τεκτονική με δυναμικούς παράγοντες κίνησης, πληροφορίας, παραγωγής μορφής και κατασκευής. Αυτές οι μελέτες ανέλυσαν τις αλλαγές στην παραδοσιακή κατασκευή και παρουσίασαν τη σχέση μεταξύ του σχεδιασμού και των ψηφιακών τεχνολογιών, για παράδειγμα, τον σχεδιασμό διαδραστικών κελυφών (Εικ. 27). Επομένως, η ψηφιακή τεκτονική παιζει διαμορφωτικό ρόλο στην έρευνα και παραγωγή νέων κατασκευαστικών τεχνολογιών.

Μαζί με τις αναπτυσσόμενες τεχνολογίες, υπάρχει ένα όλο και πιο έντονο ενδιαφέρον στην ενσωμάτωση δυναμικών χαρακτηριστικών, όπως η κίνηση, τα συστήματα μεταβλητότητας και ενσωμάτωση πληροφοριών σε συστήματα κτιρίων, χαρακτηριστικά τα οποία είναι δυναμικά. Εδώ, η ψηφιακή τεκτονική σχετίζεται με πολυμέσα που υποστηρίζουν τετραδιάστατης διαδικασίες σχεδιασμού, δηλαδή με την ικανότητα διάδρασης κατα την χρονική διάσταση.





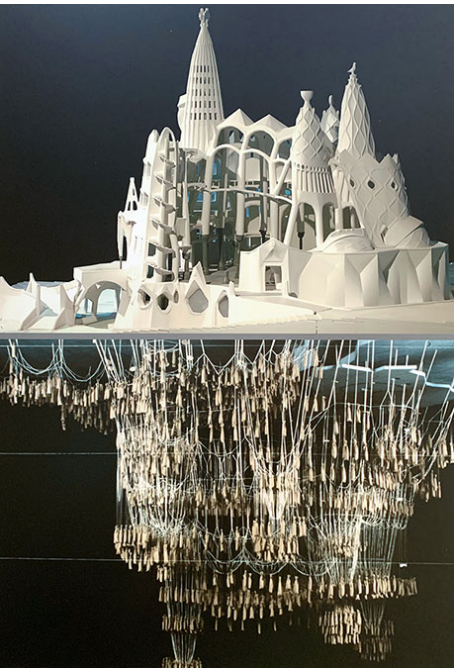
Εικ. 27, 28 Aegis Hypo-Surface(c) (1999), architect Mark Goulthorpe/dECOi.

Ψηφιακή τεκτονική ως κατασκευασμένη υλικότητα

Άλλοι θεωρητικοί προτείνουν την ψηφιακή τεκτονική ως μια μετατόπιση της Αρχιτεκτονικής σκέψης στον σχεδιασμού, που μπορεί να χαρακτηριστεί ως στροφή προς την δόμηση (Leach, 2004). Περιγράφουν την αυξανόμενη σημασία της δομής και των υλικών στον σύγχρονο σχεδιασμό και τη νέα σύνθεση της αρχιτεκτονικής και της δομικής μηχανικής. Αναφέρονται επίσης στις τεχνολογικές δυνατότητες που προσφέρονται από τον ψηφιακό χώρο.

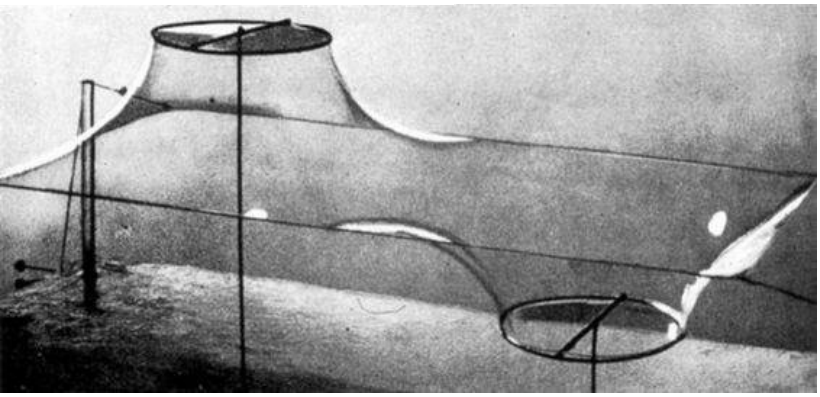
Συγκεκριμένα στο έργο τους οι Kolarevic και Klinger (Kolarevic & Klinger, 2008) συζητούν τις αλλαγές που επιφέρει στις συμβατικές μεθόδους κατασκευής. Επίσης, δίνουν μεγάλη σημασία στις

επιπτώσεις που εχει στην ψηφιακά ελεγχόμενη κατασκευή η σχέσης της με τον ψηφιακό σχεδιασμού. Έννοιες όπως το “one-stop shop”, ένας συνδυασμός αρχιτεκτονικού γραφείου και εργοστασίου όπου ο σχεδιασμός, η μελέτη και η κατασκευή λαμβάνει χώρα σε ένα μέρος, (Suare, 2008). Σε τέτοια μοντέλα υπολογιστικά ενημερωτικές διαδικασίες μεταξύ σχεδιασμού και κατασκευής «δένουν» σχεδιασμό και κατασκευή, προσφέροντας, πέραν από τα οικονομικά και χρονικά οφέλη, την στενότερη συνεργασία διαφόρων επαγγελμάτων και την ταχύτερη εκμάθηση και συμμετοχή σε διαφορετικούς κλάδους σε όλη την διαδικασία παραγωγής.



Εικ. 29 Πάνω: Ανάστροφο μοντελο δυνάμεων της εκκλησίας της Colònia Güell, Gaudi, 1898

Εικ. 30 Κάτω: Πειραματισμός με φιλμ σαπουνιού, Frei Otto

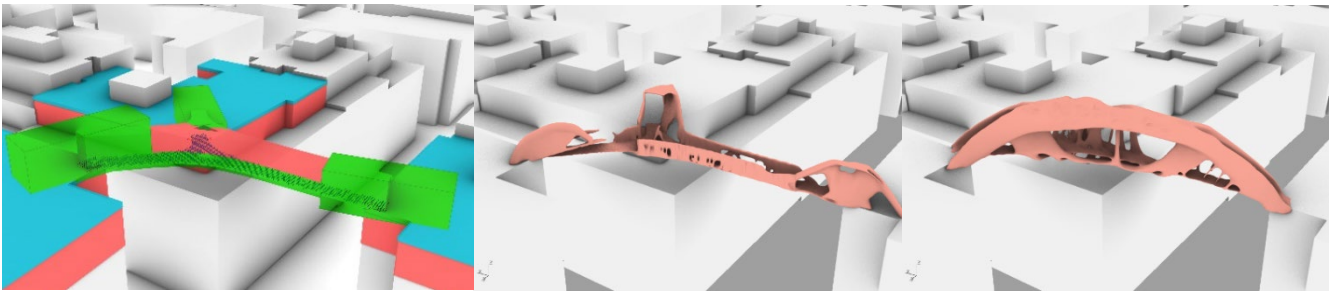


Ψηφιακή τεκτονική ως ψηφιακή εύρεση μορφής

Η παραγωγή μορφής παίρνοντας πληροφορίες από τον "σχεδιασμό με βάση την απόδοση", ηλεκτρονικά τεκτονικά μοντέλα και την ψηφιακή υλικότητα στον ψηφιακό σχεδιασμό παίρνει τη μορφή ενσωματωμένων διαδικασιών. Στην διερεύνηση και τη δημιουργία τέτοιων συστημάτων με σχέσεις ενσωμάτωσης μεταξύ αυτών των εννοιών σημαντική πηγή γνώσης υπάρχει στις σχεδιαστικές αρχές της φύσης. Ερευνητές και πρωτοπόροι σχεδιαστές σχεδίασαν με βάση τη φύση όπως ο Gaudi και ο Frey Otto έχουν γίνει πρότυπα της νέας γενιάς θεωρητικών και σχεδιαστών.

Ο Gaudi (1852-1926), με την χρήση της φυσικής μοντέλων για την εύρεση μορφής, εισήγαγε τη μέθοδο του πειραματισμού εύρεσης φορμών ως διαδικασία σχεδιασμού. Έτσι συνέβαλε στην εμφάνιση μιας μεθόδου δομικής τεκτονικής, Όπου η μοντελοποίηση των δυνάμεων επιτρέπει τη μελέτη της δομικής επίδρασης των τεκτονικών σχέσεων. Ο επέκτεινε αυτές τις κλασσικές σχέσεις μεταξύ μορφής και δομής, στην πρωτοποριακή του πειραματική προσέγγιση, στην εύρεση στατικής μορφής μέσω υλικών (Zexin & Mei, 2017). Αυτές οι μελέτες της τεκτονικής μοντελοποίησης αποτελούν

προκάτοχος στις τρέχουσες προσεγγίσεις ψηφιακής προσομοίωσης στην ψηφιακή τεκτονική. Επομένως, η μετάβαση της μοντελοποίησης της υλικής συμπεριφοράς από αναλογικά σε ψηφιακά μοντέλα αποτελεί την πηγή της σύγχρονης ψηφιακής μοντελοποίησης και την ενσωμάτωσή της στο σχεδιασμό.



Εικ. 31 Εύρεση μορφής γεφυρώσεων με την μέθοδο "topology optimization", Στέλιος Πάσσος, διπλωματική εργασία, 2020

Ο όρος μορφογένεση καθορίζει τη σχέση μεταξύ τεκτονικών υλικών εννοιών στις διαδικασίες διαμόρφωσης και στη φύση (R. Oxman, 2010). Πολλά σύγχρονα σχέδια αρχιτεκτονικής έχουν χρησιμοποιήσει ψηφιακή τεκτονική στην ψηφιακή μορφογένεση. Πρωτοποριακές πειραματικές και μεθοδολογικές διαδικασίες που σχετίζονται με την ψηφιακή μορφογένεση μπορούν να βρεθούν, μεταξύ άλλων, στο έργο του ιαπωνικού μηχανικού Sasaki (2007) και του Βρετανού μηχανικού (2006).

Η εύρεση και η εφαρμογή βιομιμητικών αρχών σχεδιασμού έχει τη δυνατότητα σημαντικής συμβολής στη γνώση του σχεδιασμού. Η ψηφιακή μορφογένεση μπορεί να συνδυάσει την τεκτονική των ψηφιακών υλικών και την εξομοίωση απόδοσης για να δημιουργήσει φυσικά οικολογικά συστήματα. Με την υπολογιστική μοντελοποίηση των αρχών του φυσικού σχεδιασμού με βάση την απόδοση των υλικών συστημάτων που μπορούμε (ενδεχομένως) να δημιουργήσουμε μία δεύτερη φύση ή μία πιο ήπια αρχιτεκτονική με σεβασμό στην οικολογία των υλικών (R Oxman & Oxman, 2014).

Εικ. 32 Aquahoja, Biopolymer pavilion, Mediated Matter Group, 2019

Ψηφιακή τεκτονική ως προσαρμόσιμη ύλη

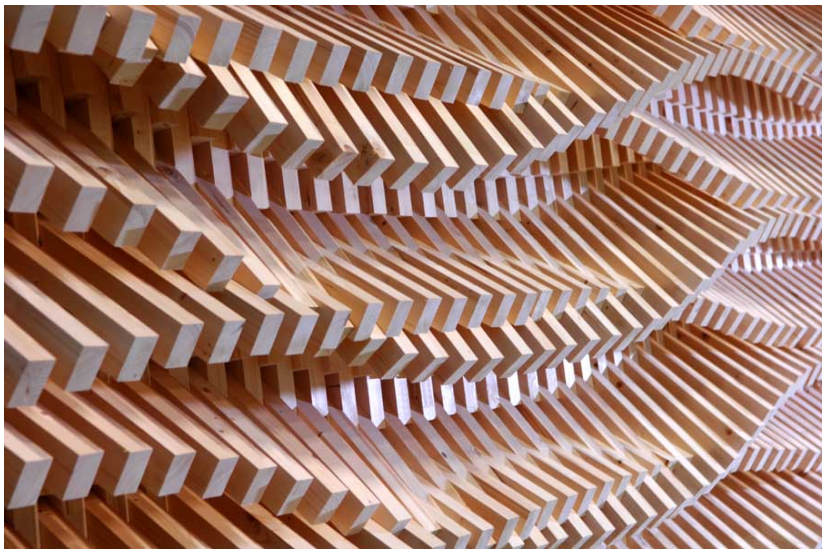
Τα προσαρμόσιμα κτίρια συνδέονται σήμερα με τον τομέα των «έξυπνων υλικών». Η προσαρμοστική συμπεριφορά αντικαθιστά τις μηχανικές αρχές με την συμπεριφορά των έξυπνων υλικών, εισάγοντας νέα χαρακτηριστικά σε προσαρμοστικά αρχιτεκτονικά συστήματα (Kennedy, 2011). Ο σχεδιαστής σε τέτοια συστήματα καθίσταται υπεύθυνος να σχεδιάσει ένα προσαρμοστικό σύστημα υλικών ως ένα σύνολο επιθυμητών επιδράσεων που παράγονται από την απόδοση του συστήματος υλικών με ελάχιστο υλικό και ενέργεια.

Ένα παράδειγμα πειραματικής αρχιτεκτονικής είναι η κατασκευή «Hygroscope-Meteorosensitive Morphology» (2012) του Achim Menges, που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της μόνιμης έκθεσης Multiversités Créatives στο Centre Pompidou στο Παρίσι. Αυτή η κατασκευή εξερευνά στην έμφυτη συμπεριφορά του υλικού, και με τη βοήθεια της υπολογιστικής μορφογένεσης παράγει ένα κέλυφος που ανταποκρίνεται στις κλιματικές αλλαγές. Το μοντέλο της έκθεσης, αναρτημένο σε ειδική γυάλινη προθήκη, χωρίς την υποστήριξη κάποιου τεχνικού εξοπλισμού, αντιδρά σε διακυμάνσεις στα επίπεδα της υγρασίας, πυροδοτώντας έτσι την αλλαγή στο σχήμα του υλικού. Το αποτέλεσμα είναι ενα ξύλινο κατασκεύασμα που λειτουργεί από μόνο του, ως μια ανεξάρτητη μηχανή (Βίδρου, 2014).

Ενήμερη Τεκτονική “Informed Tectonics”

Στο σύγχρονο λογισμικό πραγματοποιείται μια ροή πληροφορίας από το στάδιο της σύλληψη μεχρι την κατασκευή, δημιουργώντας νέες τεκτονικές σχέσεις. Αυτές “οι εξελισσόμενες διαδικασίες της πληροφορίας έχουν οριστεί από τους ερευνητές σε αυτόν τον τομέα ως μια υπολογιστική διαδικασία ενημέρωσης, που ενισχύει τις τεκτονικές σχέσεις μεταξύ της μορφής, της δομής και των ιδιοτήτων των υλικών, εντός της λογικής της κατασκευής και των ρομποτικών τεχνολογιών” (Oxman, 2017). Είναι μια παραμετρική διαδικασία, που πραγματοποιείται σε πολλαπλά στάδια, με κεντρικό ρόλο τον αρχιτέκτονα, και έχει ονομαστεί Ενήμερη Τεκτονική - “Informed Tectonics” (Oxman, 2012).

Για παράδειγμα, στους Gramazio και Kohler, τα δεδομένα του προγραμματισμού της διαδικασίας κατασκευής, δημιουργούν μια ενσωμάτωση του σχεδιασμό με τη διαδικασία υλοποίησης. Συνεπώς, τα χαρακτηριστικά των υλικών και η λογική συναρμολόγησης είναι ενσωματωμένα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για το σχεδιασμό. Η Ψηφιακή Υλικότητα είναι τώρα διαθέσιμη για τον σχεδιαστή ως νέες μορφές τεκτονικών δομών στις οποίες τα επιμέρους στοιχεία βρίσκονται σε αλληλεξάρτηση κατά τη διαδικασία σχεδιασμού (Gramazio, Kohler, & Oesterle, 2010).



Εικ. 33 The Sequential Wall, Gramazio & Kohler, Architektur und Digitale Fabrikation, ETH Zürich, 2008

2.5. **Ανακεφαλαίωση:** Ψηφιακή τεκτονική και υλικότητα

Η ψηφιακή τεκτονική επιτρέπει την ανακατεύθυνση της εστίασης της μοντερνιστικής τεκτονικής απο μια λογική τάξης και αισθητικής σε νέες δομικές διαδικασίες και μοντέλα συμπεριφοράς της μορφής, της δομής και του υλικού. Ενώ ο μοντερνισμός διαχωρίζει το φέροντα οργανισμό από το κέλυφος, η ψηφιακή τεκτονική τείνει να επαναδιατυπώνει τις σχέσεις μεταξύ των στοιχείων. Οι τρέχουσες προσεγγίσεις της ψηφιακής τεκτονικής εκφράζουν συχνά την υλικότητα μέσω της ενοποίησης της επιφάνειας με το φέρον υλικό, αυτό ενισχύει το ρόλο του υλικού ως μέρος της αισθητικής της τεκτονικής.

Ο ψηφιακός σχεδιασμός με βάση το υλικό γίνεται μια διαδικασία στην οποία η σύνθεση των ρόλων του αρχιτέκτονα, του μηχανικού και του κατασκευαστή εχει και πάλι την ευθύνη για την συνολική διαδικασία σύλληψης και υλοποίησης (Oxman, 2011). Αυτή η αλλαγή παρέχει έναν συνδυασμό ψηφιακής τεκτονικής με τα επιχειρήματα του Frampton και του Semper. Ο μεταβαλλόμενος ορισμός της τεκτονικής σχέσης μπορεί να θεωρηθεί ένα από τα κυρίαρχα χαρακτηριστικά ψηφιακής τεκτονικής (Oxman, 2012).

Στο ακόλουθο κεφάλαιο αναλύεται ο «σχεδιασμός υλικής κατασκευής», μια εξειδικευμένη ψηφιακή μεθοδολογία αρχιτεκτονικού σχεδιασμού όπου το υλικό, από δομική και τεκτονική πλευρά μπαίνει στο πρώτο πλάνο.

3. Σχεδιασμός Υλικής Κατασκευής (MFD)

Η σύγκλιση του σχεδιασμού, της μηχανικής και των αρχιτεκτονικών τεχνολογιών δημιουργεί μια νέα μεταχείριση των υλικών σε πειραματικούς τομείς σχεδιασμού όπως στην αρχιτεκτονική. Ενα απο τα νέα χαρακτηριστικά αυτού του νέου σχεδιασμού είναι η ικανότητα αλλαγής της συμβατικής σειράς της συνθετικής διαδικασίας στην αρχιτεκτονική, από μορφή->δομή->υλικό, σε υλικό->δομή->μορφή. Αυτή η αντιστροφή της κλασικής αλληλουχίας έχει αλλάξει το παραδοσιακό σχεδιαστικό μοντέλο. Στο παραδοσιακό μοντέλο αρχιτεκτονικής, η υλοποίηση ακολουθεί τον σχεδιασμό της αφαιρετικής μορφής και της στατικής δομής. Σήμερα, λόγω της αυξανόμενης σημασίας της ψηφιακής κατασκευής, η επιλογή της τεχνικής υλοποίησης μπορεί να αποτελέσει κύριο μέρος της σύλληψης του σχεδιασμού.

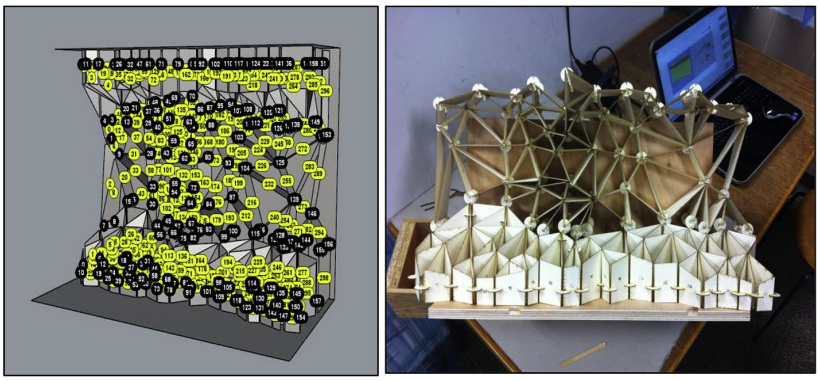
3.1. Σχεδιάζοντας με βάση το υλικό (MFD)

Η προτεραιότητα που έχει δοθεί σημερα στις διαδικασίες υλοποίησης και στις τεχνολογίες κατασκευής στην αρχιτεκτονική γεννά ένα νέο τομέα έρευνας στον σχεδιασμό που ονομάζεται: Σχεδιασμού υλικής κατασκευής (Material Fabrication Design - MFD) (Oxman, 2012, 2016). Όπως παρουσιάζεται στα ακόλουθα παραδείγματα αρχιτεκτονικών έργων, ο MFD ορίζεται από την Oxman (2017) ως μια “ενημερωτική υπολογιστική διαδικασία που ενισχύει τις τεκτονικές σχέσεις μεταξύ μορφής, δομής και υλικού, μέσα στη λογική των τεχνολογιών υλοποίησης και κατασκευής”[2]. Σε αυτή την ενημερωτική υπολογιστική διαδικασία, οι πληροφορίες μεταφράζονται απευθείας στα στοιχεία ελέγχου που οδηγούν τις διαδικασίες υλοποίησης. Οι βασικές έννοιες του MFD περιγράφονται εν συντομία παρακάτω:

[2] Ενημερωτική υπολογιστική διαδικασία (computational informing process) ορίζεται ως μία διαδικασία όπου τα στάδια της επικοινωνούν, ανατροφοδοτούνται, με την βοήθεια ψηφιακών υπολογιστικών μέσων.

Σχεδιασμός με βάση την κατασκευή

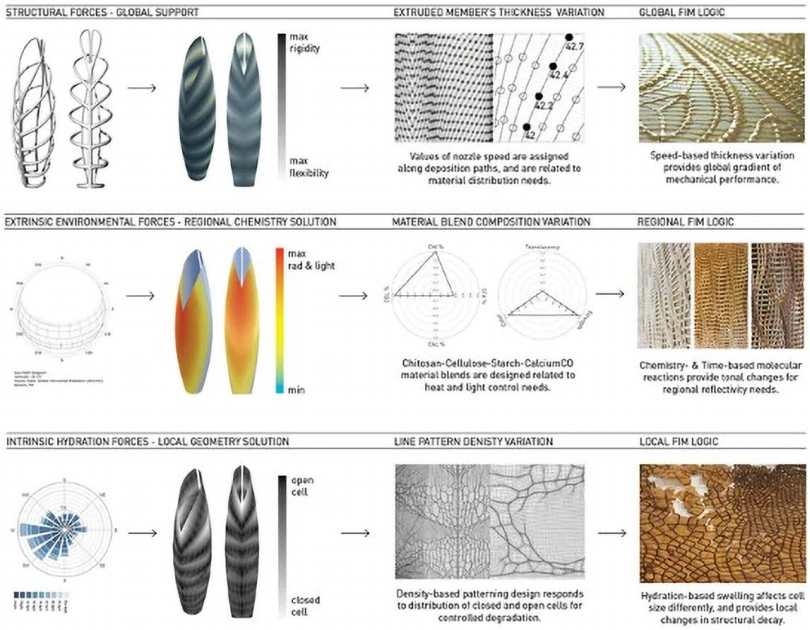
Η προέλευση των τρεχουσών τεχνολογιών κατασκευής μπορεί να ανιχνευθεί στις τεχνολογικές εξελίξεις που έφεραν οι υπολογιστών στον τομέα του αυτοματισμού της κατασκευής και στα πρώτα συστήματα CAD / CAM. Οι Τεχνολογίες κατασκευής που αναπτύχθηκαν αρχικά ως μέσα ταχείας πρωτοτύπησης (RP), δηλαδή μιας ομάδας τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την γρήγορη κατασκευή μακετών ή μερών με συστήματα CAM χρησιμοποιώντας τρισδιάστατα δεδομένα από μοντέλα CAD. Σήμερα, οι σχέσεις μεταξύ καινοτόμων τεχνολογιών σχεδιασμού και τεχνικών κατασκευής δημιουργούν συνεχώς νέες σχεδιαστικές λογικές στον τομέα της αρχιτεκτονικής. Οι σχεδιαστές επεκτείνουν τον τυπικό αρχιτεκτονικό σχεδιασμό λαμβάνοντας αποφάσεις που σχετίζονται με την επιλογή της τεχνολογίας και της μεθόδου παραγωγής. Μέσω των παραμετρικών σχεδιαστικών εργαλείων δίνεται η δυνατότητα να αξιοποιηθούν αυτές τις διαδικασίες κατασκευής. Διαδικασίες που τα δεδομένα για την ψηφιακή κατασκευή των αποκτώνται απευθείας από το παραμετρικό μοντέλο. (R. Oxman, 2016)



Εικ. 34 Παραμετρική τεχνική συναρμολόγησης και μοντέλο απο laser cutter, Liz Leibovitch, Michael Weizmann, Anais Siman, Digital Experimental Studio, Technion

Ένα παράδειγμα νέας σχεδιαστικής λογικής είναι το Material Ecology, ένας τομέας που αφορά τον ψηφιακός σχεδιασμός και η κατασκευή εμπνευσμένη από τη φύση. Αυτό το νέο ερευνητικό πεδίο που αναπτύχθηκε από τη Neri Oxman (N. Oxman, 2012), διερευνά διαδικασίες παραγωγής μορφών απο διάφορα υλικά συστήματα, όπως ύφανση, αναδίπλωση και οι επιστρώσεις σε μικροκλίμακες και μακροκλίμακες.

Οι ποικίλες **διαδικασίες κατασκευής** έχουν γίνει πηγή δημιουργίας **νέων σχεδιαστικών εννοιών** στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Όχι μόνο σχεδιάζουμε **μέσα στο δυναμικό** της κατασκευής, αλλά τα κτίρια σχεδιάζονται συχνά **μέσα στο σκεπτικό** της κατασκευής (Gramazio et al., 2010)



Εικ. 35 Aquahoja, Biopolymer pavilion, Mediated Matter Group, 2019

Υλικός σχεδιασμός

Ο "υλικός σχεδιασμός" ορίζεται από την Oxman (2017) ως η κατανόηση και η αξιοποίηση των ιδιοτήτων και της στατικής συμπεριφοράς των υλικών, στη διαδικασία σχεδιασμού. Στο πλαίσιο αυτού του σχεδιασμού, εξηγεί πως αναπτύσσονται σχέσεις μεταξύ της μορφής, τη δομής και την κατασκευής. Ως αποτέλεσμα αναδεικνύεται η σύνθεση σύνθετων διατάξεων αρχιτεκτονικών στοιχείων, όπως φέρουσες κατασκευές, προσόψεις κτιρίων και κελύφη.

Στη σύγκλιση του ψηφιακού σχεδιασμού, των μεθόδων και των τεχνολογιών κατασκευής επεκτείνεται η έρευνας σχεδιασμού υλικών και πρακτικών στην αρχιτεκτονική. Ο σύγχρονος σχεδιασμός υλικών προήλθε από την τεχνολογική συνέχεια και επέκταση των παραδοσιακών μοντέλων σχεδιασμού. Μοντέλα που βασίζονται σε καλά κατανοητά παραδοσιακά υλικά όπως το ξύλο, ο χάλυβας κ.ά. και στις σχέσεις τους με τη μορφή, τη δομή και την κατασκευή. Η εκτεταμένη χρήση ψηφιακών τεχνικών στο σχεδιασμό με βάση το υλικό γίνεται ένα κυρίαρχο μοντέλο σχεδιασμού μεταξύ των πειραματικών πρακτικών σχεδιασμού. Στην αρχιτεκτονική συγκεκριμένα, ο πειραματισμός υλικών σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με το σχεδιασμό του κελυφών και με δομικά συστήματα που προέρχονται από μεθόδους κατασκευής (Rivka Oxman, 2016).

Μοντελοποίηση υλικών και τεκτονική των συστημάτων υλικών

Σημαντικός είναι ο ρόλος της δυνατότητας μοντελοποίησης της δομής των υλικών, με τη μορφή τεκτονικών συστημάτων. Το γεγονός αυτό έδωσε νέες δυνατότητες στην μεταχείριση τους, κατι που μείζονα συμβολή στη σύγχρονη έρευνα του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού. Επομένως, ήρθε η αρχιτεκτονική πιο κοντά στο υλικό και απέκτησε τα μέσα για τον χειρισμό της ψηφιακής υλικότητας στον σχεδιασμό.

Η μοντελοποίηση του υλικού ως τεκτονικό σύστημα είναι ένα σημαντικό εργαλείο για τον σχεδιασμό υλικού όπως και τον σχεδιασμό συστημάτων με τον συνδυασμό διαφορετικών υλικών με γνώμονα την απόδοση. Αυτή η εξέλιξη έκανε το σχεδιασμό υλικού ένα σημαντικό κομμάτι της σχεδιαστικής διαδικασίας της ψηφιακής αρχιτεκτονικής. Επανάφερε τον παραδοσιακό ρόλο του αρχιτέκτονα ως αρχιμάστορα ενισχυμένο με την κατανόηση και την δυνατότητα να δημιουργεί, με ψηφιακό τρόπο, έναν υλικό κόσμο. Το υλικό είναι και πάλι υπό τον έλεγχο του αρχιτέκτονα. Επίσης, αυτή η πολιτιστική τεχνολογική στροφή έχει ανανεώσει την δημιουργική συνεργασίας μεταξύ του αρχιτέκτονα και των άλλων κλάδων των μηχανικών σαν ένα ενιαίο κλάδο πρακτικής έρευνας. (Oxman, 2014)

Υλικότητα

Η υλικότητα εντός του MDF ορίζεται ως το “ψηφιακό τεκτονικό περιεχόμενο που εκφράζεται μέσω της κατασκευής και των ρομποτικών τεχνικών”. Οι διάφορες κατηγορίες κατασκευής αντιπροσωπεύουν τις τεχνολογικές επεκτάσεις, τόσο συμβατικών όσο και σε νέων υλικών, και των σχέσεων τους με τη μορφή, τη δομή και την κατασκευή. Η Ψηφιακή Υλικότητα θεωρείται ως μια σειρά από ψηφιακές διαδικασίες υλοποίησης που συμβάλλουν σε νέους τύπους ψηφιακής τεκτονικής (Rivka Oxman, 2010, 2012)

Συστήματα υλικών

Την τελευταία δεκαετία ο σχεδιασμός συστημάτων υλικών μέσω πειραματισμού, με τη μοντελοποίηση των τεκτονικών δυνατοτήτων νέων υλικών, οπως υβριδικών, έξυπνων και άλλων, έχει γίνει ένας αναπτυσσόμενος τομέας έρευνας. Ένα από τα ερευνητικά πεδία που εμφανίστηκαν στην αλληλοτομία του παραμετρικού σχεδιασμού με τα συστήματα υλικών είναι η μοντελοποίηση της τεκτονικής των υφασμάτων. Συγκεκριμένα, αυτός ο ευρύς τομέας συμπεριλαμβάνει την έρευνα σχετικά με την ύφανση, τους κόμπους και την πλέξη, όπου οι τεχνικές απο την παράδοση της χειροτεχνίας αντιμετωπίζονται ως τεχνολογίες υλικών.

Η κατασκευή συστημάτων υλικών αντικατοπτρίζει τις σχέσεις μεταξύ των ιδιοτήτων, της απόδοσης και της συμπεριφοράς τους, όπως και των στρατηγικών και τεχνικών της υλοποίησης. Βασική ιδέα της προσέγγισης του MFD είναι το είδος σχεδιασμού υλικών συστημάτων που βασίζεται στην κατασκευή. Για να κατανοήσουμε τα μοντέλα MFD, υπάρχει ανάγκη να εκτιμήσουμε τις επιθυμητές σχέσεις μεταξύ του συστήματος υλικού, των στρατηγικών απόδοσης και της τεχνικής κατασκευής της επιλεγμένης τεχνολογίας κάθε μοντέλου.

Στις διαδικασίες MFD, η συμπεριφορά και οι μορφικές δυνατότητες των υλικών είναι βασικό στοιχείο της σύλληψης του σχεδιασμού. Η αντιστροφή της συμβατικής ροής πληροφοριών της διαδικασίας σχεδιασμού έχει δώσει την προτεραιότητα στις τεχνικές ψηφιακής κατασκευής στον παραμετρικού σχεδιασμού. Οι αρχές των τεχνικών παραμετρικής κατασκευής μπορούν να επηρεάσουν την μορφή και την δομική συμπεριφορά των υλικών, που γίνονται κυρίαρχο μέρος τόσο του σταδίου σύλληψης όσο και του σταδίου υλοποίησης, κατι που γίνεται φανερό στα παραδείγματα που ακολουθούν.

3.2. Παραδείγματα

Παρακάτω παρουσιάζονται 3 παραδείγματα που περιγράφουν εφαρμογές σχεδιασμού με βάση το υλικό. Τα παραδείγματα επιλέχθηκαν με βάση την ευρύτητα των εφαρμογών και την προσβασιμότητα στα εργαλεία. Το Metropol Parasol επιλέχθηκε λόγω της αναγνωριστικότητας του και της αρκετά διαδεδομένης, στον τομέα της ταχείας πρωτοτυπήσεις, κατασκευαστικής τεχνικής των κάθετων τομών, (βάφλα). Το Armadillo Vault είναι ένα παράδειγμα εύρεσης μορφής που τα εργαλεία που αναπτύχθηκαν είναι ανοιχτά και μόνο ένα στάδιο δυσκολότερα από το προηγούμενο παράδειγμα. Το τελευταίο, είναι το project που σχεδίασε η ομάδα μου στο μάθημα του Παραμετρικού Σχεδιασμού ΙΙ.

3.2.1. Metropol Parasol

Seville, Spain
Jürgen Mayer-Hermann and Arup Engineering (2011)

Εικ. 36 Συνολική άποψη του Metropol Parasol, Jürgen Mayer, 2011,

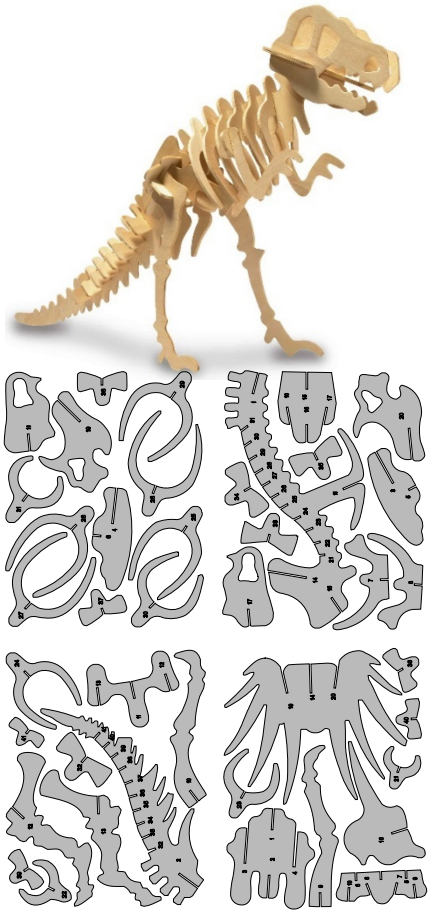
Το Metropol Parasol σχεδιάστηκε από τους Jürgen Mayer-Hermann και Arup Engineering (Εικόνα 20) είναι ένα μερικής κάλυψης πολλαπλών χρήσεων αστική πλατεία στην Σεβίλλη της Ισπανίας. Ο σχεδιασμός Associates παρέχει τρεις κατακόρυφες ζώνες λειτουργιών: μία υ-

περυψωμένη πλατεία, ένα ισόγειο με αρχαιολογικά ευρήματα και το κυρίαρχο οπτικά, κεντρικό στοιχείο, την ομπρέλα κάθε που είναι συγχρόνως ένα σκίαστρο αστικής κλίμακας και μία πλατφόρμα παρατηρήσεις υψωμένη πάνω σε έξι μεγάλες κολώνες σε σχήμα μανιταριού.

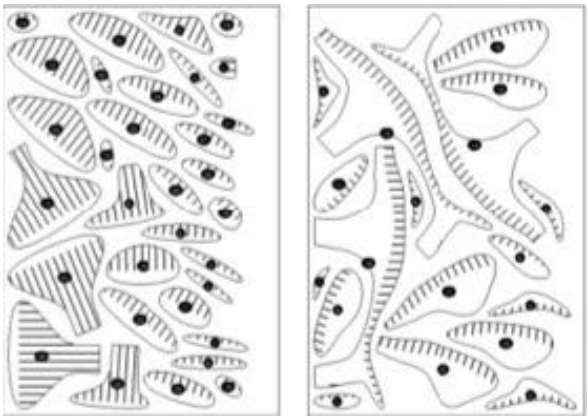
Το στατικό αυτό δικτύωμα που μοιάζει με σύννεφο επηρεάστηκε από τις στατικές φορτίσεις, τις ζητούμενες χρήσεων και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Το υλικό του στατικού συστήματος έχει επιλεχθεί και διαμορφωθεί μετά από την επιλογή της κατασκευαστικής τεχνικής. Εντέλει, η μορφή και οι διατομές των στοιχείων προκύπτουν απο το στατικό υπολογιστικό μοντέλο έτσι προκύπτει μια οπτικοποίηση της ροής των δυνάμεων στη μορφή των κάθετων επιπέδων.Αυτή η ομπρέλα αστικής κλίμακας έχει σχεδιαστεί σαν ενα ξύλινο πλέγμα, σχεδιασμένο με μια παραμετρική κατασκευαστική τεχνική για να δημιουργήσει μια οργανική, ρέουσα μορφή που ανταποκρίνεται στις στατικές φορτίσεις.

Η μέθοδος κατασκευής, γνωστή και ως “βάφλα”, είναι απλή σαν ιδέα. Αφότου καθοριστεί ένας κλειστός όγκος, κάθετες τομές προκύπτουν από την αλληλοτομία του με κάθετα, μεταξύ τους, επίπεδα, συνήθως στα κατακόρυφα επίπεδα «X-Z» και «Y-Z», ανά τακτές αποστάσεις. Η δυσκολία της εγγυείται στον ακριβή καθορισμό εγκοπών σύμφωνα με το πάχος του υλικού. Η κατασκευή σε μικρές κλίμακες συγγραφτείτε μέσω της τριβής, έτσι δεν χρειάζεται περεταίρω υλικά. Στην αστική κλίμακα που την εφάρμοσε ο Mayer-Hermann απαιτήθηκαν επιπλέον συνδέσεις στις αρθρώσεις.

Εικ. 37 Φωτογραφία εντός της υπερυψωμένης διαδρομής στο Metropol Parasol, Jürgen Mayer, 2011,



Εικ. 39, 40 Πάνω :Διαδεδομένο παράδειγμα χρήσης της τεχνικής, συναρμολογούμενη κατασκευή τυραννόσαυρου και τα αντίστοιχα σχεδια.

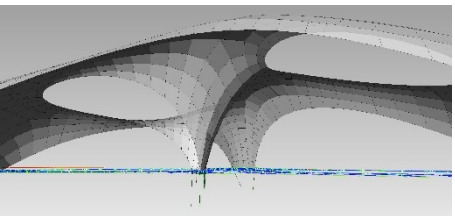


Εικ. 40 Αριστερά: Metropol Parasol, Jürgen Mayer, 2011, σχέδιο διάταξης κοπής σε laser cutter

3.2.2. Armadillo Vault

Venice Architecture Biennale 2016
Philippe Block - Block Research Group, ETH Zurich

Εικ. 41 Armadillo Vault, Philippe Block - Block Research Group, Venice Architecture Biennale, 2016



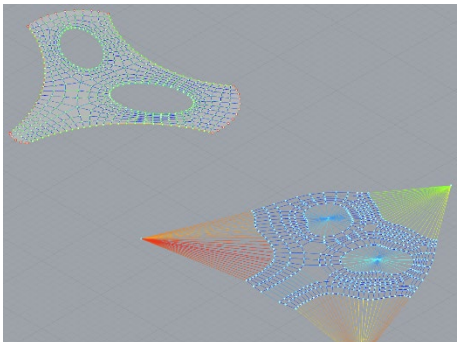
Εικ. 42 Ψηφιακά υπολογισμένο μοντέλο του Armadillo Vault, σε αντίστοιχη οπτική γωνία με την προηγουμένη φωτογραφία.

Το BRG Block Research Group με επικεφαλής τον Philippe Block στο ETH Ζυρίχη έχει γίνει γνωστό για τον πειραματικό στατικό σχεδιασμό του, χρησιμοποιώντας παραμετρικό σχεδιασμό ως βάση για μια νέα προσέγγιση σχεδιασμού που υπερβαίνει τις τυπολογικές και υπολογιστικές προσεγγίσεις των τυπικών στατικών κατασκευών. Η προσέγγισή του εκμεταλλεύεται παραμετρικές στατικές μεθόδους εύρεσης μορφής, μέσω ψηφιακών παραμετρικών διαδικασιών και μοντέλων σχεδιασμού στατικής απόδοσης. Τα παραμετρικά μοντέλα μπορούν να δημιουργήσουν μορφές αλλάζοντας γεωμετρικά συσχετιζόμενες παραμέτρους, σύμφωνα με τις δεδομένες φορτίσεις και τις ιδιότητες των υλικών, σε διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος. Αυτό επιτυγχάνεται τόσο μέσω της ψηφιακής προσομοίωσης όσο και του πειραματισμού μέσω φυσικών μοντέλων. Κάτι που ακολουθεί το πρωτοποριακό έργο πρωτο-παραμετρικών δομικών σχεδιαστών όπως οι Gaudi, Frei Otto και,

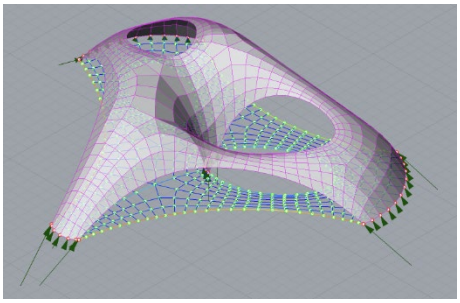
στην περίπτωση της μελέτης, οι δομές κελύφους των Felix Candela και Heinz Isler (Block et al., 2016).

Αυτή η κατασκευή στη Μπιενάλε της Βενετίας του 2016 (Εικ. 41) απεικονίζει ένα παράδειγμα πειραματικής θολωτής δομής που παραπέμπει στην παράδοση των αυτοφερόμενων Καταλανικών θόλων. Το μοντέλο αυτό αντικαθιστά τα παραδοσιακά υλικά τοιχοποιίας και τις παραδοσιακές μεθόδους θολοποιίας με ραβδώσεις με νέες μεθόδους και τεχνικές υλικής κατασκευής. Το έργο δείχνει πώς νέες δομικές γεννητικές διαδικασίες εύρεσης μορφής και μέθοδοι βελτιστοποίησης μπορούν να δημιουργήσουν μια γεωμετρία αυτοφερόμενων θόλων, από μέλη που συνδέονται μέσω της τριβής. Ακολουθώντας ιστορικά προηγούμενα, αυτά οι θόλοι καταδεικνύουν μια νέα προσέγγιση στην παραμετρική λογική σχεδιασμού θόλων και την κατασκευή που εξοικονομεί βάρος κατασκευής και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η συγκεκριμένη γεωμετρία μπορεί να παραχθεί χρησιμοποιώντας το λογισμικό RhinoVault. Το RhinoVault, plug-in του Rhino, ομοίως, αναπτύχθηκε στο Block Research Group. Εν συντομία, ο τρόπος χρήσης του ξεκινάει με τον καθορισμό του περιγράμματος, της τοπολογίας του (pattern) και τον ορισμό των συνθηκών στα σημεία του, όπως αν είναι ελεύθερο ή αποτελεί στήριξη. Αυτό δημιουργεί το διάγραμμα δυνάμεων που με τον καθορισμό των συνθήκων είναι σε θέση να τεθεί σε μια διαδικασία εύρεσης οριζόντιας και κατακόρυφης ισορροπίας. Μέσω της επέμβασης, σε κάθε στάδιο, με την αλλαγή και ρύθμιση παραμέτρων, ο σχεδιαστής καταλήγει στην επιθυμητή μορφή.

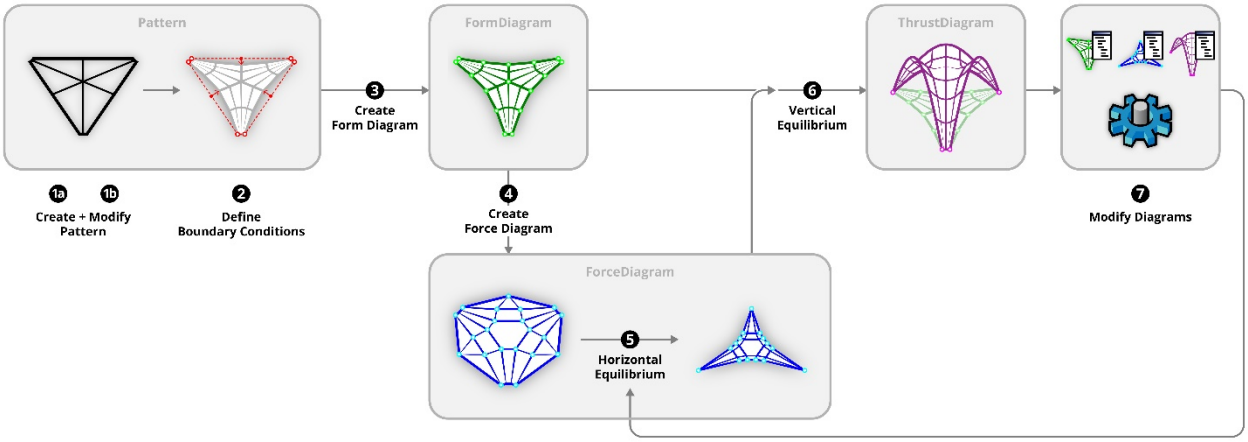


Εικ. 43 Η αρχική, "μη ισορροπημένοο" διάγραμμα μορφής και οριζόντια «ισορροπημένο» διάγραμμα.



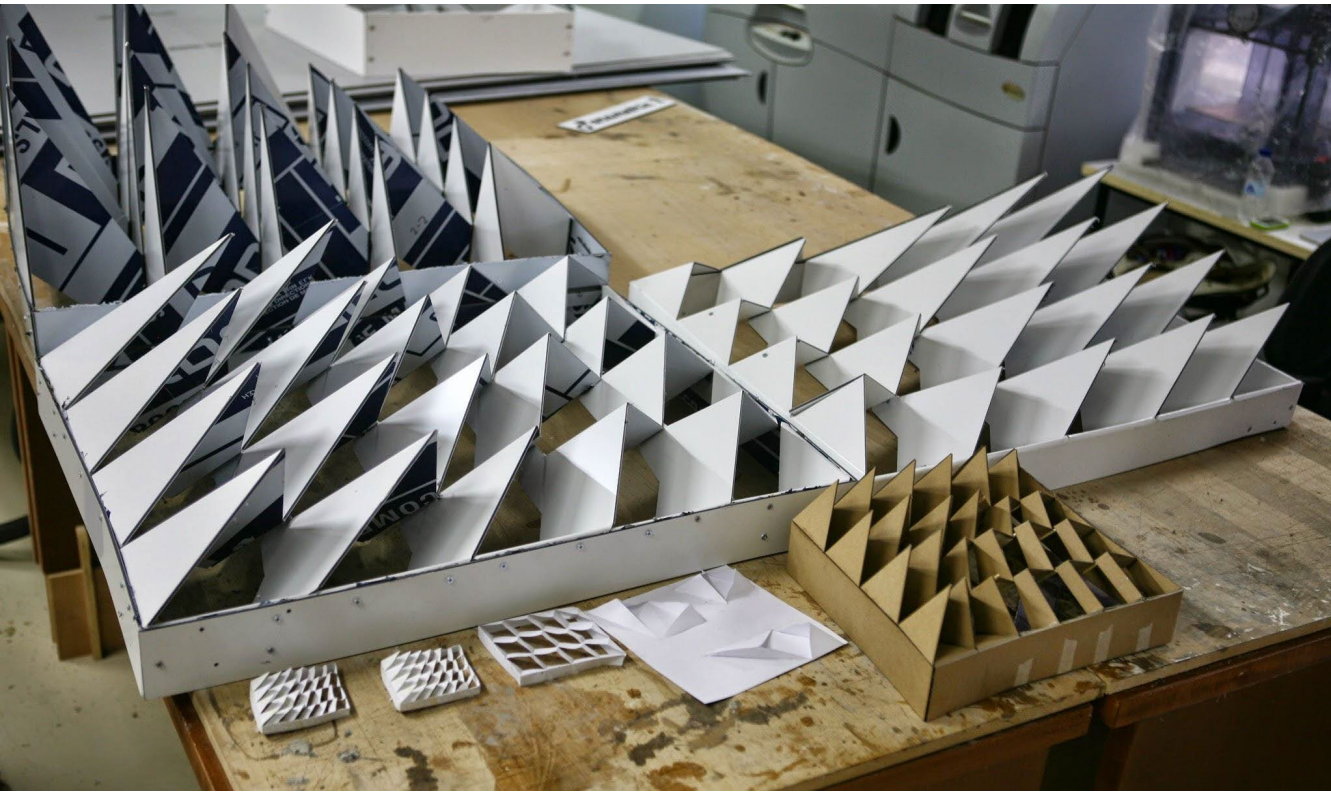
Εικ. 45 κατακόρυφα και οριζόντια «ισορροπημένο» διάγραμμα με στόχο ύψους 7,5 μετρα

Εικ. 44 Διάγραμμα λειτουργίας RhinoVault 2



3.2.3. Παραμετρικός ΙΙ

Παραμετρικός Σχεδιασμός ΙΙ, Αλέξανδρος Βαζάκας - Πολυτεχνείο Κρήτης 2014
Στέλιος Πάσσος, Γιάννης Λιόφαγος, Laura Catra



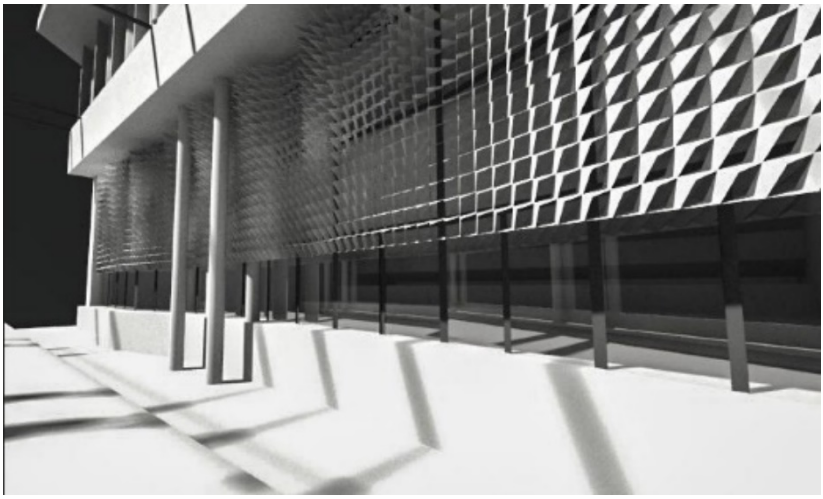
Εικ. 46 3 τελικά 1:1 module του σκίαστρου, μαζί με μακέτες συνθεσης.

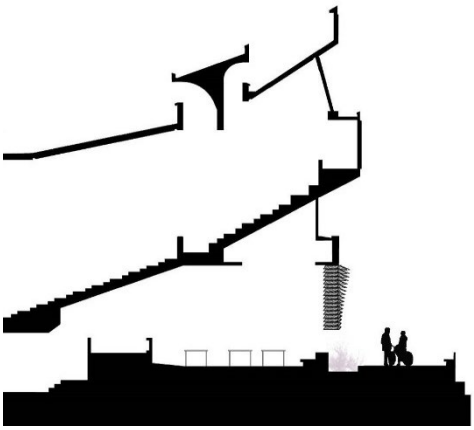
Εικ. 47 Εσωτερική φωτορεαλιστική απεικόνιση για 21 Δεκεμβρίου, όπου ο ήλιος ειναι στο χαμηλότερο σημείο, κατα συνέπεια εχει την μέγιστη διείσδυση. Παρατηρούμε πως το τμήμα του σκίαστρου παρέχεται πλήρης σκίαση.

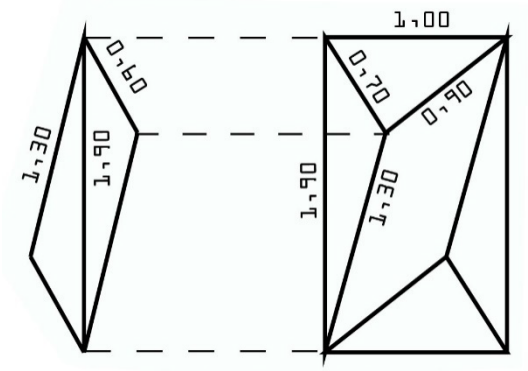
Στα πλαίσια του μαθήματος επιλογής Παραμετρικός σχεδιασμός ΙΙ, με στόχο την σκίαση του ισογείου του αμφιθέατρου Α2 στο Κάμπους του Πολυτεχνείου Κρήτης, σχεδιάστηκε ένα παραμετρικό σκίαστρο. Είναι ένα σταθερό σύστημα που ακολουθεί την γεωμετρία της πρόσοψης. Το οποίο παρέχει στο ισόγειο σταδιακή σκίαση τις ώρες 10πμ με 4μμ και συνεχόμενη σκίαση στους τοίχους για την διεξαγωγή προβολών. Το ονομάσαμε “Ανανά” λόγο της αγκαθωτής φολιδωτής γεωμετρίας του.

Αυτό το ροϊκό παραμετρικό σύστημα, διαδραματίζεται πανω σε παραλληλόγραμμο κάναβο και καλύπτει το υαλοστάσιο του ισογείου. Το υλικό είναι βασικό κομμάτι του εργαστηρίου, κάθε χρονο γίνεται η επιλογή ενός διαφορετικού και πανω σε αυτο βασίζεται όλη η

διεξαγωγή του μαθήματος και των εκάστοτε σχεδίων της κάθε ομάδας φοιτητών. Το συγκεκριμένο εξάμηνο το υλικό ηταν το Etalbond®, ενα υλικό σάντουιτς με πυρήνα πλαστικού σε δύο φύλλα αλουμινίου. Λόγο της σχετικά λεπτής διατομής του υλικού και της ευκολίας κάμψης μετα απο χάραξη απο μηχάνημα CNC χρησιμοποιήθηκε μεθοδολογία απο την παράδοση του Origami στην σχεδίαση της δομής. Κεντρικό στοιχείο είναι η “φολίδα”, μια παραλληλόγραμμη μονάδα πόλωσης του φωτός, η οποία επαναλαμβάνεται και διαφοροποιείται με βάση τις ηλιακές ανάγκες κάθε σημείου. Στην τελική μορφή δόθηκε μια επιπρόσθετη διακύμανση, ακολουθώντας την κυματιστή λογική των άνωθεν τμημάτων της υπάρχουσας όψης.

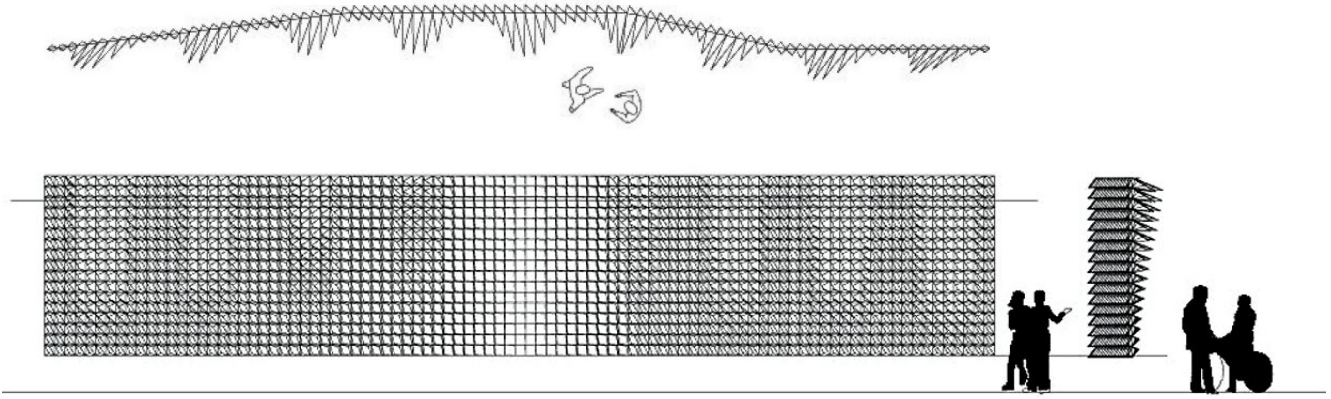






Εικ. 48, 49, 50, 51 Από πάνω προς τα κάτω: Εξωτερική φωτορεαλιστική απεικόνιση, Συνολική Τομή, Κάτοψη, Όψη – Τομή.

Εικ. 52 Αριστερά: Σχέδιο φολίδας (μονάδας)



4. Συμπεράσματα

Είδαμε πως σταδιακά ο αρχιτέκτονας έχασε τη σχέση με το εργοτάξιο και συνεπώς την άμεση σχέση με το υλικό, κατι που νέα επαγγέλματα δημιουργήθηκαν για να καλύψουν. Με τις επιλογές του εκδίωξε τον εαυτό του από την υλική πραγματικότητα της κατασκευής. Συγκεκριμένα, το σχέδιο είναι από τη μία το βασικό εργαλείο του σύγχρονου αρχιτέκτονα και από την άλλη το εμπόδιο που υψώνει μεταξύ αυτού και του υλικού. Αυτό καθιστά τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό κάτι το ιδεατό, το άυλο, το εικονικό. Οπότε, το βασικό χαρακτηριστικό και αντικείμενο κριτικής των ψηφιακών μέσων, και κατ' επέκταση του ψηφιακού σχεδιαστικού χώρου, η εικονικότητα, ήταν αδιαχώρητο χαρακτηριστικό της αρχιτεκτονικής από την αναγέννηση.

Σήμερα, τα ψηφιακά εργαλεία δίνουν την ευκαιρία να ανατραπεί «προσπερνώντας» το μεσάζοντα, αντικαθιστώντας τον μέσω νέων ψηφιακών εργαλείων. Συνεπώς, συρρικνώνουν τις διαφορές μεταξύ αρχιτεκτόνων και μηχανικών δίνοντας εργαλεία από τον κόσμο τους στον αρχιτέκτονα. Επίσης μειώνοντας την ανάγκη παραγωγής σχεδίων, με την χρήση του ίδιου αρχείου «από τον σχεδιασμό στην κατασκευή, μειώνεται ένα μεγάλο μέρος λαθών, μεσαζόντων επαγγελμάτων, γραφειοκρατίας και κόστους.

Η ιδέα πώς ένα εργαλείο όπως τα ψηφιακά, όσο ραγδαία και αν εξελίσσεται, όσο ανατρεπτικό κι αν είναι, παρασέρνει την αρχιτεκτονική σε ένα κόσμο άυλο είναι εσφαλμένη. Όπως η χρήση του αυτοκίνητου, δίνει μια νέα οπτική γωνία, που διευρύνει την αντίληψη και φανερώνει νέα χαρακτηριστικά του χώρου, έτσι και τα ψηφιακά εργαλεία μετασχηματίζουν την οπτική μας πανω στον χώρο και τα αρχιτεκτονικά στοιχεία, δίνοντας έτσι νέες δυνατότητες.

Από την πρώτο θεωρητικό λόγο πάνω στην ψηφιακή αρχιτεκτονική, εμπνευσμένη από την πτύχωση, ως τα επιμέρους πεδία που αναπτύχθηκαν, όπως ο παραμετρικός σχεδιασμός, η απόδοση, η κωδικοποίηση και η μοντελοποίηση, στόχος ήταν η παραγωγή μορφής αποφεύγοντας την διακοσμητική αναπαράσταση. Όλα αυτά έχουν συντελέσει με μια σύγχρονη εστίαση στην κατασκευή, που επαναπροσδιορίζει με την σειρά της την σχέση της ψηφιακής αρχιτεκτονικής με το υλικό.

Η σχέση της ύλης με την δομή και μορφή στην αρχιτεκτονική υπό το πρίσμα της τεκτονικής εκδηλώνει την σύνδεση του αφαιρετικού κόσμου ιδεών με την πραγματικότητα. Η θεωρητική μελέτη της τεκτονικής δεν είναι κάτι καινούργιο όμως μέσα σε 2 δεκαετίες οι ψηφιακές τεχνολογίες ήρθαν να ανατρέψουν την αντίληψη μας προς την ύλη και τις συνθετικές μας δυνατότητες.

Νέες ψηφιακές τεχνολογίες σχεδίασης επεκτείνουν τις δυνατότητες σύνθεσης μορφής και οι τεχνολογίες κατασκευής επεκτείνουν τις υλοποιήσιμες μορφές. Από τις εύπλαστες, καμπύλες, συνεχείς μορφές, η σχεδίαση των οποίων θα ήταν αδύνατη χωρίς τις μεθόδους που προσφέρονται από τη χρήση των ψηφιακών υπολογιστικών προγραμμάτων. Τώρα βρισκόμαστε στην εποχή όπου ο υπολογιστής γίνεται ενεργό μέλος του σχεδιασμού, παράγοντας μορφές, μέσα απο τις ιδιότητες της ύλης με μορφογενετικούς αλγορίθμους. Απελευθερώνει με αυτό τον τρόπο την αρχιτεκτονική από την συνθήκη της μοναδικής σύλληψης του αρχιτέκτονα, όταν ο υπολογιστής συμμετέχει σε τέτοιο βαθμό που το αποτέλεσμα δεν είναι πρότερα προβλέψιμο. Χάνεται η συνθήκη του διακριτού υλικού με την δυνατότητα μοντελοποίησης του και ένταξης του σε πολύπλοκα συστήματα υλικών. Και εν τέλει σπάει η αλληλουχία από την σύνθεση στην δομή την κατασκευή και το υλικό με ενημερωτικές διαδικασίες όπου τα στάδια αλληλεξαρτώνται παραμετρικά. Ο ρόλος του αρχιτέκτονα επαναπροσδιορίζεται, με την μετακίνηση από τον σχεδιασμό στατικών οντοτήτων, στον σχεδιασμό σχέσεων που καθορίζουν μια δυναμική υπολογιστική μορφογένεση.

Είναι καθοριστική η συμβολή του υλικού και των στην σύγχρονη ψηφιακή αρχιτεκτονική σύνθεση. Το υλικό αναλαμβάνει τον πιο δυναμικό και ενεργητικό ρόλο που έχει διαδραματίσει ποτέ. Στη διαδικασία αυτή το υλικό δεν παρίσταται ως τελικό μέσο απόδοσης του σχεδιασμού, αλλά μετέχει ως κινητήριο στοιχείο του. Όπως είδαμε, μέσω της παραμετροποίησης και των διαδικασιών προσομοίωσης του, το υλικό αναλύεται σε συνιστώσες από τις οποίες προκύπτουν πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά

και τις ιδιότητες του. Έτσι προκύπτει μια ψηφιακά ενισχυμένη υλικότητα, που εστιάζει την σύγχρονη έρευνα σε ένα επίπεδο το οποίο αφορά τη σύγχρονη έννοια των υλικών και φέρνει στο προσκήνιο νέες διαδικασίες σχεδίασης στα πλαίσια του ψηφιακού σχεδιασμού. Δίνει με αυτόν τον χώρο σε μια νέα μεθοδολογία σχεδιασμού, που η μορφή μπαίνει σε δεύτερη μοίρα, ώστε να ξεκινήσει το υλικό την συνθετική αναζήτηση. Επιστρέφοντας τον αρχιτέκτονα ως επικεφαλή ενός high-tech εργοταξίου, ένα κράμα αρχιτέκτονα μαζί με μηχανολόγο, πολιτικό μηχανικό και προγραμματιστή, έναν ψηφιακό Αρχιμάστορα.

Βιβλιογραφία

Al-Alwan, H., & Mahmood, Y. B. (2020). The Connotation of Tectonics in Architectural Theory. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *745*. https://doi.org/10.1088/1757-899X/745/1/012161

Andersson, I. K., & Kirkegaard, P. H. (2006). A discussion of the term digital tectonics. *Digital Architecture and Construction*. Southampton, UK: WIT Press. https://doi.org/10.2495/DARC060041

Block, P., Rippmann, M., van Mele, T., Popescu, M., Augustynowicz, E., Méndez Echenagucia, T., … Frick, U. (2016). The Armadillo Vault: Computational design and digital fabrication of a freeform stone shell. *Advances in Architectural Geometry 2016*, 344–363. https://doi.org/10.3218/3778-4_23

Frampton, K. (1995). *Studies in Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture*. Graham Foundation for Advanced Studies in the Fine Arts. Retrieved from https://books.google.gr/books?id=j2dL02m1AMEC

Frampton, Kenneth, Allen, S., & Foster, H. (2003). A Conversation with Kenneth Frampton. *October*, *106*, 35–58. Retrieved from http://www.jstor.org/stable/3397631

Gramazio, F., Kohler, M., & Oesterle, S. (2010). Encoding material. *Architectural Design*, *80*(4). https://doi.org/10.1002/ad.1114

Jabi, W. (2004). Digital Tectonics: The intersection of the physical and the virtual. In S. Williamson, P. Beesley, & N. Chang (Eds.), *Fabrication Proceedings: Digital Fabrications, Digital Tools, Assocation for Computer-Aided Design in Architecture*.

Kolarevic, B. (2003). Information master builders. In *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing* (pp. 56–62).

Kolarevic, B., & Klinger, K. R. (2008). *Manufacturing material effects : rethinking design and making in architecture*. London; New York: Routledge.

Leach, N., Turnbull, D., & Williams, C. (2004). *Digital tectonics*. Chichester: Wiley-Academy.

Liu, Y.-T., & Lim, C.-K. (2006). New tectonics: a preliminary framework involving classic and digital thinking. *Design Studies*, *27*(3). https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.008

Oxman, N. (2012). Towards a material ecology. *ACADIA 2012 - Synthetic Digital Ecologies: Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*, *2012-October*.

Oxman, R, & Oxman, R. (2014). Vitruvius Digitalis. In *Theories of the Digital in Architecture* (pp. 1–9). Routledge. Retrieved from https://books.google.gr/books?id=OcLOJwAACAAJ

Oxman, Rivka. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, *27*(3), 229–265. https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002

Oxman, Rivka. (2010). MORPHOGENESIS IN THE THEORY AND METHODOLOGY OF DIGITAL TECTONICS. In *JOURNAL OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES: J. IASS*.

Oxman, Rivka. (2012). Informed tectonics in material-based design. *Design Studies*, *33*(5), 427–455. https://doi.org/10.1016/j.destud.2012.05.005

Oxman, Rivka. (2016). *MFD: Material-based Design Informed by Digital Fabrication*.

Oxman, Rivka. (2017). Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. *Design Studies*, *52*, 4–39. https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.06.001

Picon, A. (2021). *The Materiality of Architecture*. University of Minnesota Press. Retrieved from https://books.google.gr/books?id=CYQUEAAAQBAJ

Picon, Antoine. (2004). Architecture and the virtual: towards a new materiality. *Praxis: Journal of Writing+ Building*, (6).

Picon, Antoine. (2010). *Digital Culture in Architecture*. Birkhäuser.

Sakamoto, Tomoko., & Ferré, Albert. (2008). *From control to design: parametric/algorithmic architecture*. Barcelona: Actar.

Schumacher, P. (2009). Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design. *Architectural Design*, *79*(4). https://doi.org/10.1002/ad.912

Suare, R. (2008). INNOVATION THROUGH ACCOUNTABILITY IN THE DESIGN AND MANUFACTURING OF MATERIAL EFFECTS. In B. KOLAREVIC & K. KLINGER (Eds.), *MANUFACTURING MATERIAL EFFECTS: RETHINKING DESIGN AND MAKING IN ARCHITECTURE* (pp. 47–60). Ney York: Routledge.

Zexin, S., & Mei, H. (2017). Robotic Form-Finding and Construction Based on the Architectural Projection Logic. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *216*. https://doi.org/10.1088/1757-899X/216/1/012058

Βίδρου, Κ. (2014). *ΥΛΙΚΟ + ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ: Η αντίστροφη θεώρηση της υλικότητας*. Αθήνα: Ερευνητική εργασία, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.

Πανηγυράκης, Φ. (2014). *Εκδοχές Στυλ*. Πάτρα.

Πηγές Εικόνων

Εικ. 1 https://www.linkedin.com/pulse/who-were-gothic-master-builders-really-how-did-work-kirk-mccormack 2
Εικ. 2, 3 https://eisenmanarchitects.com/Alteka-Office-Building-1991 2
Εικ. 4 Greg Lynn, Animate Form. New York: Princeton Architectural Press, 1999 2
Εικ. 5 ibid 2
Εικ. 6 https://www.zaha-hadid.com/masterplans/kartal-pendik-masterplan/ 2
Εικ. 7 https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Interior_of_City_Hall,_London 2
Εικ. 8 Sakamoto, Tomoko., & Ferré, Albert. (2008). From control to design: parametric/algorithmic architecture. Barcelona: Actar. 2
Εικ. 9 idib 2
Εικ. 10 Kolarevic, B. (2003). Information master builders. In Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing 2
Εικ. 11 Cache, B., Speaks, M., & Boyman, A. (2001). Earth moves: The furnishing of territories. Cambridge: MIT Press. 2
Εικ. 12, 13, 14 https://www.nomads.org/Galleries.html 2
Εικ. 15 https://courses.cit.cornell.edu/arch262/notes-t/images/08b-primitivehut01.jpg 2
Εικ. 16 https://www.dosde.com/en/guggenheim-museum-bilbao-original-gehry-deluxe.html 2
Εικ. 17 https://www.guggenheim-bilbao.eus/en/the-building/the-construction 2
Εικ. 18 http://www.mirallestagliabue.com/project/santa-caterina-market-renovation/ 2
Εικ. 19 ibid 2
Εικ. 20 Sakamoto, Tomoko., & Ferré, Albert. (2008). From control to design: parametric/algorithmic architecture. Barcelona: Actar. 2
Εικ. 21 ibid 2
Εικ. 22 Βίδρου, Κ. (2014). ΥΛΙΚΟ + ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ: Η αντίστροφη θεώρηση της υλικότητας. Αθήνα: Ερευνητική εργασία, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕ-ΧΝΕΙΟ. 2
Εικ. 23 Picon, Antoine. (2004). Architecture and the virtual: towards a new materiality. Praxis: Journal of Writing+ Building, (6). 2
Εικ. 24 ibid 2
Εικ. 25 Kolarevic, B., & Malkawi, A. (2005). Performative architecture: Beyond instrumentality. New York: Spon Press. 2
Εικ. 26 ibid 2
Εικ. 27, 28 Liu, Y.-T., & Lim, C.-K. (2006). New tectonics: a preliminary frame-work involving classic and digital thinking. Design Studies, 27(3). https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.008 2
Εικ. 29 https://exchange.prx.org/pieces/218780-99-invisible-281-la-sagrada-familia-director-s/floating_piece 2

Εικ. 30 Zexin, S., & Mei, H. (2017). Robotic Form-Finding and Construction Based on the Architectural Projection Logic. IOP Conference Se-ries: Materials Science and Engineering, 216. https://doi.org/10.1088/1757-899X/216/1/012058 2
Εικ. 31 Προσωπικό αρχείο 2
Εικ. 32 https://oxman.com/projects/aguahoja 2
Εικ. 33 https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/lehre/148.html 2
Εικ. 34 Oxman, Rivka. (2017). Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. Design Studies, 52, 4–39. https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.06.001 2
Εικ. 35 https://oxman.com/projects/aguahoja 2
Εικ. 36 Oxman, Rivka. (2017). Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. Design Studies, 52, 4–39. https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.06.001 2
Εικ. 37 https://en.wikiarquitectura.com/building/metropol-parasol/ 2
Εικ. 38, 39 https://3axis.co/t-rex-3d-puzzle-dxf-file/91jdn81m/ 2
Εικ. 40 Oxman, Rivka. (2016). MFD: Material-based Design Informed by Digital Fabrication. 2
Εικ. 41 https://blockresearchgroup.gitbook.io/rv2/examples-1/armadillo-vault 2
Εικ. 42 ibid 2
Εικ. 43 ibid 2
Εικ. 44 ibid 2
Εικ. 45 ibid 2
Εικ. 46 Προσωπικό αρχείο 2
Εικ. 47 ibid 2
Εικ. 48, 49, 50, 51 ibid 2
Εικ. 52 ibid 2