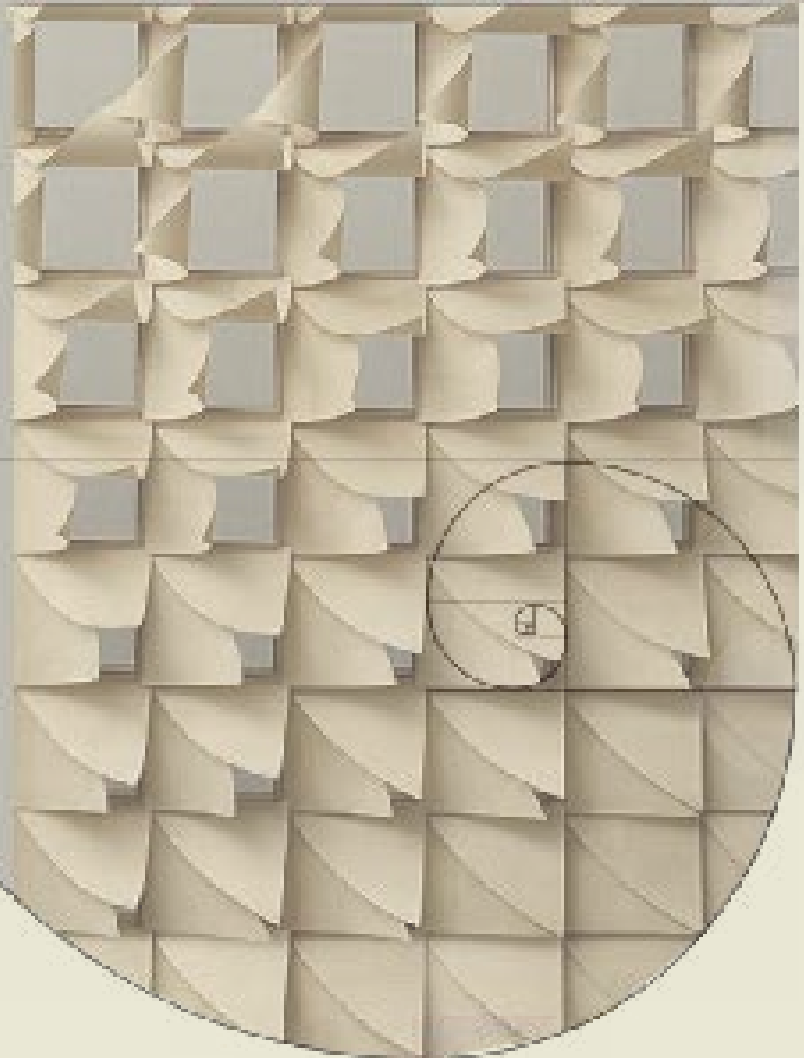


# ΒΙΟΜΙΜΗΤΙΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ\_ Achim Menges

Φοιτήτρια:  
Ραϊτσου Παναγιώτα

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών  
Ιούλιος 2020



Επιβλεπων: Κωσταντίνος-Αλκέτας Ουγγρίνης



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΧΑΝΙΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 2020

**Βιομηχανική Αρχιτεκτονική**

**Achim Menges**

Παναγιώτα Ραϊτσου

Επιβλέπων: Κωσταντίνος- Αλκέτας Ουγγρίνης

Ευχαριστώ τον κ. Ουγγρίνη, για την καθοδήγησή του  
καθ'όλη την διάρκεια εκπόνησης της ερευνητικής μου μελέτης  
όπως και την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την υποστήριξή τους.

## [Περιεχόμενα]

Εισαγωγή . . . . .	9
Κεφάλαιο 1 . . . . .	11
1.1 Ορισμός και αρχές Βιομίμησης . . . . .	12
1.2 Με ποία μέσα μπορούμε να πετύχουμε την βιομίμηση στον σχεδιασμό. . . . .	16
1.2.1 Μαθηματικά, μορφή και μοτίβα. . . . .	20
1.2.2 Καρτεσιανοί μετασχηματισμοί . . . . .	22
1.3 Παραγωγή Δομών στην φύση . . . . .	24
1.4 Μοντελοποίηση και εργαλεία σχεδιασμού στην Αρχιτεκτονική . . . . .	28
1.4.1 Computational Generative Design & Parametric Design . . . . .	29
1.4.2 Αυτο-οργάνωση ( Self-organisation) . . . . .	30
1.4.3 Διαγράμματα Voronoi. . . . .	31
1.4.4 Ριζικό σύστημα σχεδιασμού (L-system modeling). . . . .	32
1.4.5 Μορφογένεση . . . . .	34
1.5 Μέθοδοι διαφορετικών βιομημητικών αναζητήσεων. . . . .	38
1.6 Συμπεράσματα . . . . .	41
Κεφάλαιο 2ο . . . . .	43
2.1 Ιστορική Αναδρομή Βιομιμητικής Αναζήτησης έως τις αρχές του 21ου . . . . .	44
2.2 Αρχιτέκτονες που χρησιμοποίησαν την βιομίμηση σαν συνθετικό στοιχείο στον σχεδιασμό τους. . . . .	49
2.2.1. Frei Otto . . . . .	50
2.2.2. Buckminster Fuller . . . . .	55
2.2.3. Yona Friedman, Το μανιφέστο της κινητικής αρχιτεκτονικής. . . . .	58
2.2.4. Kaas Oosterhuis-"Body- buildings" . . . . .	60
2.2.5. HybGrid/ Sylvia Felipe and Jordi Truco, 2010. . . . .	63
2.3 Οικολογική Προσέγγιση . . . . .	64
2.4 Συμπεράσματα . . . . .	67

Κεφάλαιο 3ο . . . . .	69
3.1 Εισαγωγή . . . . .	70
3.1.1. Χρήσιμοι Ορισμοί . . . . .	75
3.2 Κέλυσος και Κατασκευαστική Λογική. . . . .	76
3.2.1 Υπόβαθρο βιομημητικής αναζήτησης . . . . .	77
3.3 Εφαρμογές . . . . .	78
3.3.1 Ερευνητικό Περίπτερο ICD / ITKE 2010 . . . . .	78
3.3.2 Ερευνητικό Περίπτερο ICD / ITKE 2011 . . . . .	79
3.3.3 Εκθεσιακός χώρος στο Landesgartenschau 2014 . . . . .	80
3.3.4 Ξύλινο Εκθεσιακό Περίπτερο Bundesgartenschau 2019. . . . .	84
3.4 Υλική Σύνθεση: Ένωση του Φυσικού με το Υπολογιστικό . . . . .	88
3.4.1 Υπόβαθρο βιομημητικής αναζήτησης . . . . .	89
3.5 Εφαρμογές . . . . .	92
3.5.1 ICD-ITKE Ερευνητικό Περίπτερο 2013-14 / ICD-ITKE . . . . .	92
Πανεπιστημίου Στουτγκάρδης . . . . .	92
3.5.2 Εκθεσιακό περίπτερο Elytra Filament 2016 στο μουσείο Victoria & Albert στο Λονδίνο. . . . .	94
3.5.3 BUGA Fibre Pavilion   ICD   ITKE University of Stuttgart 2019 . . . . .	98
3.6 Ιδιότητα Υλικού - Κίνηση . . . . .	102
3.6.1 Υπόβαθρο βιομημητικής αναζήτησης . . . . .	103
3.7 Εφαρμογές . . . . .	106
3.6.1 HygroScope: Meteorosensitive Morphology, σε συνεργασία με τον Steffen Reichert, 2012 . . . . .	106
3.7.2 HygroSkin – Μετεωροευαίσθητο Περίπτερο 2013 . . . . .	108
3.7.3 Πύργος Urbach ICD/ITKE Πανεπιστήμιο Στουτγκάρδης 2019. . . . .	112
3.8 Συμπεράσματα . . . . .	115
Επίλογος . . . . .	117
Βιβλιογραφία . . . . .	120

*Come forth into the light of things,  
Let Nature be your teacher.*

*Enough of Science and of Art;  
Close up those barren leaves;  
Come forth, and bring with you a heart  
That watches and receives.*

*-William Wordsworth*

## [Εισαγωγή]

\_Σκοπός της Έρευνας.

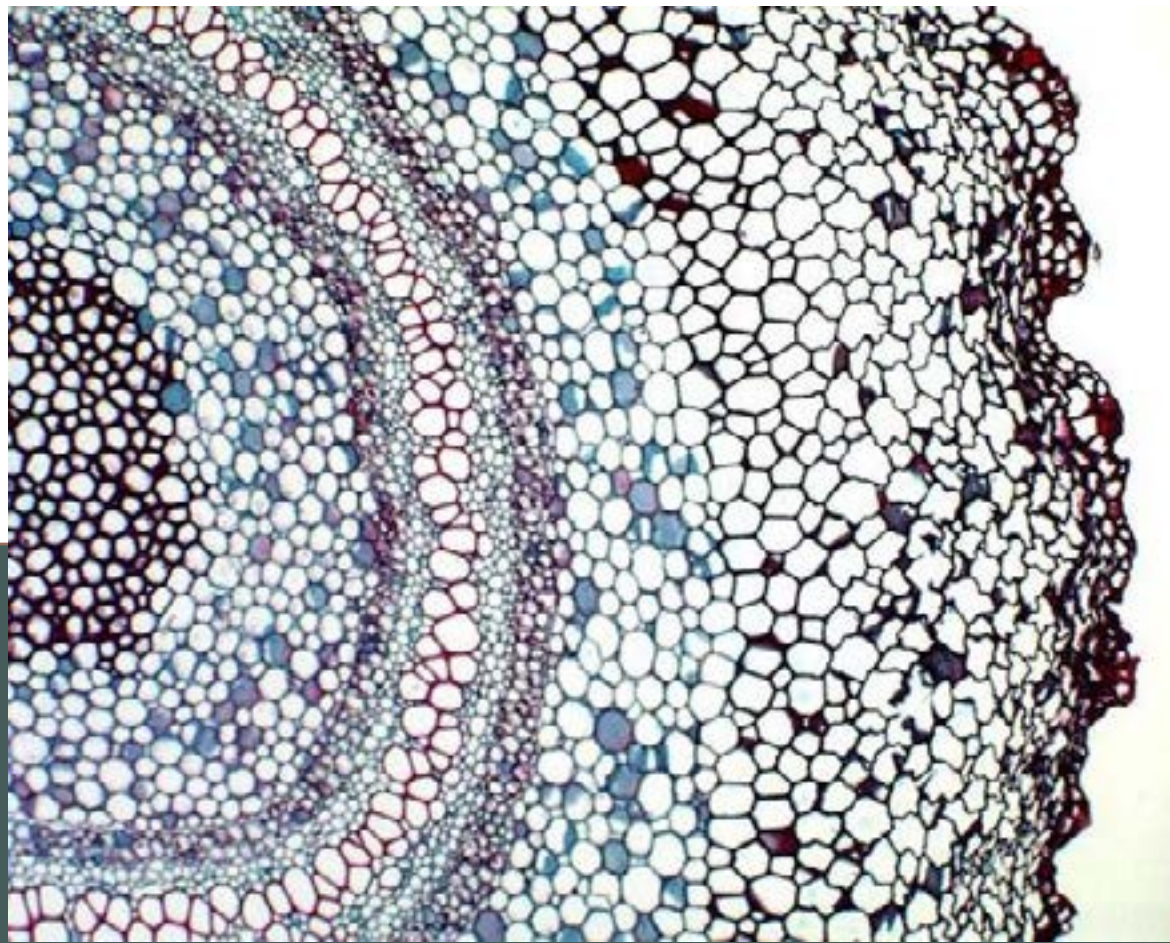
Η φύση έχει υπάρξει αρκετές φορές πηγή έμπνευσης στον σχεδιασμό ανά τον χρόνο. Η μίμηση μορφών της φύσης είναι η κύρια εναλλακτική βιομίμησης που συναντάμε, ωστόσο η παρούσα έρευνα εστιάζει στην κατανόηση των βαθύτερων συστημάτων, την δομή, την “μηχανική” της φύσης, και στους τρόπους που μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε στον σχεδιασμό.

Κίνητρο της έρευνας πέρα από την οικολογική σημασία και την περιβαλλοντική ηθική που συνεπάγεται είναι η αποκωδικοποίηση του τρόπου που η φύση πετυχαίνει με ευκολία την προσαρμοστικότητα, την ευελιξία και την κίνηση με τους ελάχιστους φυσικούς πόρους “survival of the cheapest”.

Πλέον είμαστε σε θέση να το πετύχουμε με διεπιστημονική έρευνα, κυρίως με την βοήθεια της βιολογίας, και με την χρήση ψηφιακών μέσων. Είναι εφικτή η προσομοίωση της ανάπτυξης (growth), της μορφογένεσης (morphogenesis) και της κινητικής (kinetics) των φυσικών στοιχείων μέσω παραμετροποίησης.

Ιστορικά η χρήση των αρχών βιομίμησης στον σχεδιασμό έχει οδηγήσει σε αρχιτεκτονικές καινοτομίες. Κυρίως η έρευνα εστιάζει στην μελέτη και τα έργα του Achim Menges και τον τρόπο που έχει εισάγει την βιομίμηση στον σχεδιασμό, μέσα από την παρατήρηση της φύσης, την αφαιρετική διαδικασία και το computational design.

Στόχος της έρευνας είναι να σκιαγραφήσει το συνολικό πλαίσιο της λογικής της φύσης και τους τρόπους που μπορεί να συνυπάρξει και να συνεργαστεί με την αρχιτεκτονική δημιουργία ενώ στο τέλος, επισημαίνονται μερικά στοιχεία προς βελτίωση για την ανάπτυξη αυτού του σχεδιασμού.



## Κεφάλαιο 1

### Ορισμοί

*'Nature does not strive to be meaningful, it already is'*  
Robert Walser



## 1.1 Ορισμός και αρχές Βιομίμησης

Τόσο για την αρχιτεκτονική, όσο και για τις άλλες επιστήμες, η σημασία της μελέτης της φύσης έγκειται στο γεγονός ότι κάθε φυσικό σύστημα είναι αποδοτικό. Η βιομιμητική είναι η επιστήμη που ασχολείται ακριβώς με αυτό, δηλαδή είναι η μίμηση των μοντέλων, των συστημάτων και των στοιχείων της φύσης, με σκοπό την επίλυση σύνθετων ανθρώπινων προβλημάτων.<sup>1</sup>

Χαρακτηρίζεται ως η προσπάθεια ανάπτυξης τεχνολογικών λύσεων μέσω της μάθησης από την φύση.<sup>2</sup>

Ο όρος βιομίμηση (biomimicry) εισήχθη σχετικά πρόσφατα, το 1997 όταν η επιστήμων και συγγραφέας Janine Benyus εξέδωσε το βιβλίο Biomimicry: Innovation Inspired by Nature.

Τα τελευταία χρόνια οι όροι “βιομίμηση”, “βιομιμητική”, “βιονική”, “βιογνωσία” καθώς και περιφράσεις αυτών έχουν την ίδια σημασία. Ο πρώτος ορισμός της έννοιας δόθηκε από τον Otto Schmitt στο λεξικό Webster's το 1974 και είναι ο εξής:

Η μελέτη σχηματισμού, της δομής, της λειτουργίας των βιολογικώς παραγόμενων ουσιών και υλικών (όπως τα ένζυμα ή το μετάξι) και βιολογικών μηχανισμών και διεργασιών (όπως η σύνθεση πρωτεΐνης ή η φωτοσύνθεση) ειδικά με σκοπό τη σύνθεση παρόμοιων προϊόντων από τεχνητούς μηχανισμούς που μιμούνται φυσικούς.<sup>3</sup>

Ετυμολογικά είναι σύνθετη λέξη και αποτελείται από τις λέξεις **βίος + μίμηση**, ωστόσο δεν είναι μια επιστήμη που μιμείται αυτούσια την φύση αλλά την επεξεργάζεται και χρησιμοποιεί τους μηχανισμούς αυτούς που θεωρεί αποδοτικούς.<sup>4</sup>

Η βιομίμηση είναι μία προσπάθεια να μάθουμε από την φύση. Ασχολείται με την ανάπτυξη της καινοτομίας, έχοντας ως βάση την διερεύνηση της φύσης, τις εξελεγκτικά βελτιστοποιημένες βιολογικές δομές, λειτουργίες διεργασίες και συστήματα.<sup>5</sup> Είναι η διαδικασία αφαίρεσης από την φύση του καλού σχεδιασμού με στόχο την εξομίωση της ευφυΐας της φύσης.

Αναφέρεται σε ανατομικές, εξελεγκτικές και οικολογικές αναλογίες.

Ανατομικές, καθώς μιμείται ανατομικά χαρακτηριστικά των ζωντανών οργανισμών. Εξελεγκτικές, με την έννοια ότι λαμβάνει την εξέλιξη ως μία διαδικασία στην οποία παράγει τις κατάλληλες λύσεις, ακολουθώντας ειδικούς όρους και ερευνώντας βιώσιμα μοντέλα για να προσομοιώσει αυτές τις εξελεγκτικές λύσεις μέσω της βιολογίας.

1 <https://en.wikipedia.org/wiki/Biomimetics>

2 σελ 10 Arnim von Gleigh, Christian Pade, Ulrich Petshow, Eugen Pissarskoi, Potentials and Trends in Biomimetics, London New York, 2009

3 [https://issuu.com/iouliamarouda/docs/marouda\\_biomimicry](https://issuu.com/iouliamarouda/docs/marouda_biomimicry), σ. 18

4 <http://www.merriam-webster.com/dictionary/biomimetics>

5 Arnim von Gleigh, Christian Pade, Ulrich Petshow, Eugen Pissarskoi, Potentials and Trends in Biomimetics, London New York, 2009, σ.18

ας και άλλων φυσικών επιστημών.

Οικολογικές, λόγω της σχέσης ανάμεσα στα κτίρια και το περιβάλλον. Καθώς και για τον λόγο όπου ένα αρχιτεκτονικό έργο μεγάλης κλίμακας μπορεί να επηρεάσει το συνολικό οικοσύστημα του πλανήτη.

Η Benyus κατηγοριοποιεί την προσέγγιση στην βιομίμηση ως εξής:

### 1. Η φύση ως μοντέλο

Βιομίμηση είναι η επιστήμη που μελετά τα μοντέλα της φύσης και έπειτα μιμείται ή εμπνέεται από αυτά, και συνεχίζει με το να λύνει ανθρώπινα προβλήματα.

### 2. Η φύση ως μέτρο.

Η βιομίμηση χρησιμοποιεί οικολογικά πρότυπα για να κρίνει το πόσο “σωστή” είναι μια καινοτομία. Μετά από 3.8 δισεκατομμύρια χρόνια εξέλιξης, η φύση γνωρίζει τι λειτουργεί, τι είναι ταιριαστό και αν θα διαρκέσει.

### 3. Η φύση ως μέντορας

Η βιομίμηση είναι ένας τρόπος ανάγνωσης, αξιολόγησης και εκτίμησης της φύσης. Σε εισάγει σε ένα πεδίο που δεν είναι βασισμένο στο τι μπορείς να “αρπάξεις” από τον φυσικό κόσμο, αλλά στο τι μπορείς να μάθεις από αυτόν.

Συμπερασματικά λοιπόν βιομίμηση ονομάζουμε την λειτουργική αναλογία, η οποία προσπαθεί να μιμηθεί τον τρόπο που η φύση δουλεύει, και όχι την μορφή της.<sup>6</sup>

‘Ο Knippers και ο Speck παρέχουν καθοδήγηση για την επίτευξη της βιομίμησης κατηγοριοποιώντας τις παρακάτω σχεδιαστικές αρχές της φύσης σαν εκκίνηση. Ετερογένεια, η φυσική κατασκευή χαρακτηρίζεται από την γεωμετρική διαφοροποίηση των στοιχείων της όπως και η προσαρμογή της στις φυσικές ή χημικές ιδιότητες. Ανισοτροπία, πολλές φυσικές κατασκευές εμπεριέχουν ενισχυμένα με ίνες σύνθετα υλικά

Ιεραρχία, οι βιολογικές δομές χαρακτηρίζονται από ιεραρχία πολλών επιπέδων από την νάνο- μέχρι την μακρο- κλίμακα. Κάθε επίπεδο περιέχει τα ίδια μοριακά συστατικά-μέρη, αλλά δίνει έγερση στο διαφορετικό και σε κάποιες περιπτώσεις και λειτουργικές ιδιότητες.

Πολυχρηστικότητα, οι βοτανικές ίνες ταυτόχρονα εξυπηρετούν μηχανικές και διαφορετικές φυσικές λειτουργίες.

6 σελ 64 Arnim von Gleigh, Christian Pade, Ulrich Petshow, Eugen Pissarskoi, Potentials and Trends in Biomimetics, London New York, 2009

Καθώς και σαν αρχές της ζωής ξεχωρίζουν τα εξής:

- Προσαρμοστικότητα σε συνθήκες αλλαγής
- Εναρμόνιση και ανταπόκριση με τον τόπο
- Χρήση φιλικής προς την ζωή χημείας
- Απόδοση σε σχέση με τους διαθέσιμους πόρους( υλικούς και ενεργειακούς)
- Ενοποίηση της μορφής με την ανάπτυξη(integrate development with growth)
- Εξέλιξη για επιβίωση

Και φυσικά τα παραπάνω λειτουργούν με βάση τους φυσικούς κανόνες που διέπουν την φύση όπου είναι το φως του ήλιου, το νερό, η βαρύτητα, η δυναμική ανισορροπία, τα διαφορετικά όρια και οι κυκλικές διαδικασίες’7.

“I do not look to nature as inspiration merely to mimic its forms as other architects have done. I am concerned with the profound intelligence of nature, the how's and why's of its designs and living processes, to understand the very mind of nature and the universe to free the heart and mind of man’

**Eugene Tsui’**



Εικόνα 2. Όροι ζωής



## 1.2 Με ποία μέσα μπορούμε να πετύχουμε την βιομίμηση στον σχεδιασμό.

Σημαντικός παράγοντας για την συνέχεια στον σχεδιασμό είναι η κατανόηση των μαθηματικών της γεωμετρίας και των μοτίβων που ακολουθεί η φύση. Πράγμα που μας κάνει να παρατηρούμε ομοιότητες στην δομή σε κάθε τι που διέπει τον φυσικό κόσμο από την νάνο- έως την μακρο κλίμακα.

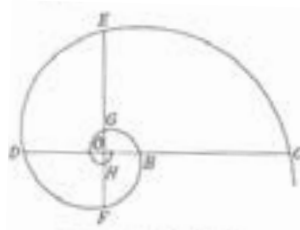
Το μοτίβο που συνδέεται περισσότερο με την ανάπτυξη και την μορφή στην φύση είναι η σπείρα. Σπείρα εν γένει, είναι μια καμπύλη που, ξεκινώντας από ένα αρχικό σημείο, ελαττώνεται συνεχώς ως προς την καμπυλότητα καθώς απομακρύνεται από το σημείο αυτό ή, με άλλα λόγια, μία καμπύλη, η ακτίνα καμπυλότητας της οποίας συνεχώς αυξάνει. Στα στοιχειώδη μαθητικά μιας σπείρας το αρχικό σημείο το αναφέρουμε ως πόλο (Ο). Μια ευθεία γραμμή που έχει το άκρο της στον πόλο και περιστρέφεται γύρω από αυτόν, ονομάζεται διανυσματική ακτίνα, κάτω από καθορισμένες συνθήκες ταχύτητας, θα περιγράψει την σπειροειδή καμπύλη.

Η καμπύλη που σχετίζεται περισσότερο με τα επαναλαμβανόμενα μοτίβα της φύσης είναι η ισογώνια σπείρα.

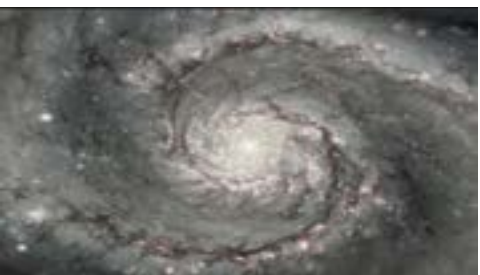
### Ισογώνια ή Λογαριθμική σπείρα

Αν αντί να μετακινείται με ομοιόμορφη ταχύτητα, το σημείο μας κινείται κατά μήκος της διανυσματικής ακτίνας με μια ταχύτητα που αυξάνει ανάλογα με την απόστασή του από τον πόλο, τότε η πορεία του περιγράφεται με αυτό τον τρόπο ονομάζεται ισογώνια σπείρα<sup>8</sup>. Κάθε περιέλιξη που τέμνει η διανυσματική ακτίνα θα είναι πλατύτερη από την προηγούμενη της κατά μια συγκεκριμένη αναλογία. Η διανυσματική ακτίνα θα αυξάνει σε μήκος με γεωμετρική πρόοδο καθώς σαρώνει διαδοχικές ίσες γωνίες και η εξίσωση της γωνίας θα είναι  $r=a^{\theta}$ <sup>8</sup>

‘Σε άλλα παραδείγματα, η σπείρα είναι αποτέλεσμα της επίδρασης κάποιων προσωρινών δυνάμεων στη δομή ενός αντικειμένου που συνήθως έχει κάποια άλλη μορφή.



Εικόνα 3. Ισογώνια ή Λογαριθμική σπείρα.



Εικόνα 4. Σπειροειδής γαλαξίας



Εικόνα 5. Κυκλώνας



Εικόνα 6. Ναυτίλος



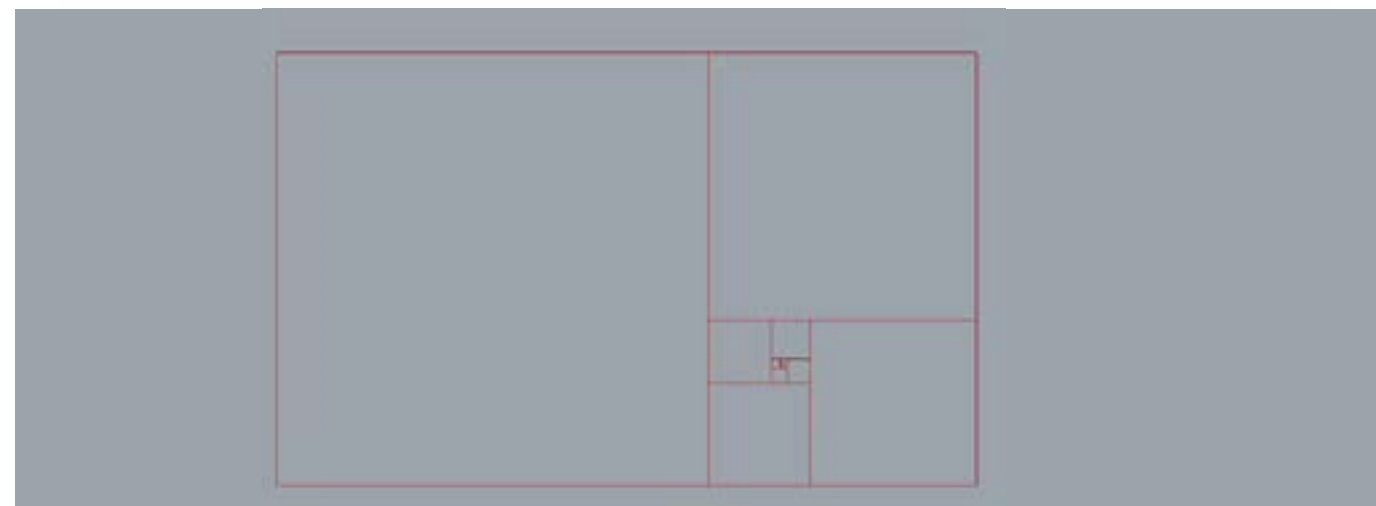
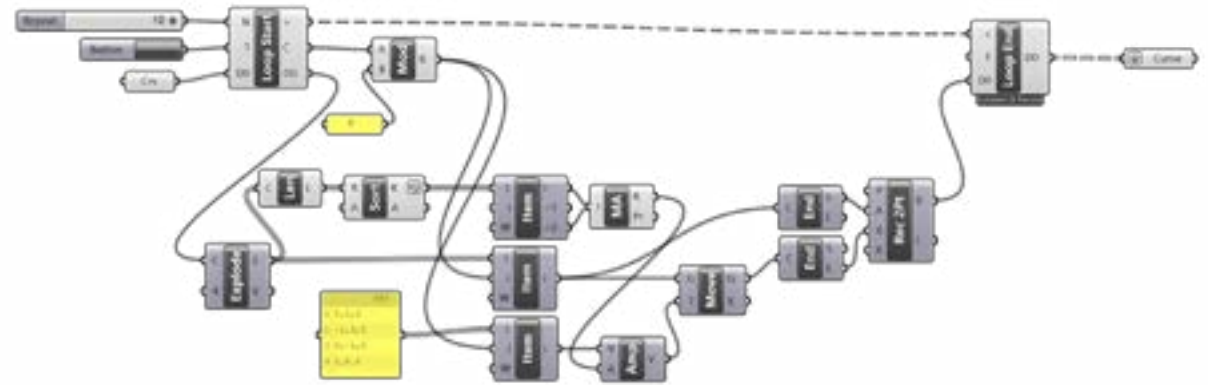
Εικόνα 7. Ουρά

8 D'Archy W. Thompson. Ανάπτυξη και Μορφή στο Φυσικό Κόσμο, Αθήνα 1999, σ.243-250

Στη περίπτωση των κουλουριασμένων φιδιών και της άκρης της ουράς του χαμαιλέοντα, μυικές δυνάμεις ωθούν το ζώο να πάρει σπειροειδείς ή ελικοειδείς σχηματισμούς, για να προσαρμοστεί στην κίνηση και τη ζωή πάνω στα δέντρα. Στους κυκλώνες και τους υδροστροβίλους, λόγω διαφορετικής πίεσης και θερμοκρασίας των ρευστών -αερίων ή υγρών- και της βαρυτικής έλξης της Γης, δημιουργούνται περιστρεφόμενες τρισδιάστατες σπείρες<sup>9</sup>.

‘Στις μηχανικές κατασκευές η καμπυλότητα είναι ουσιαστικά ένα μηχανικό φαινόμενο. Τη συναντάμε στις εύκαμπτες κατασκευές ως αποτέλεσμα κάμψης ή μπορεί να εισαχθεί στην κατασκευή για να την κάνει ανθεκτική σε μια τέτοια ροπή κάμψης.<sup>10</sup>

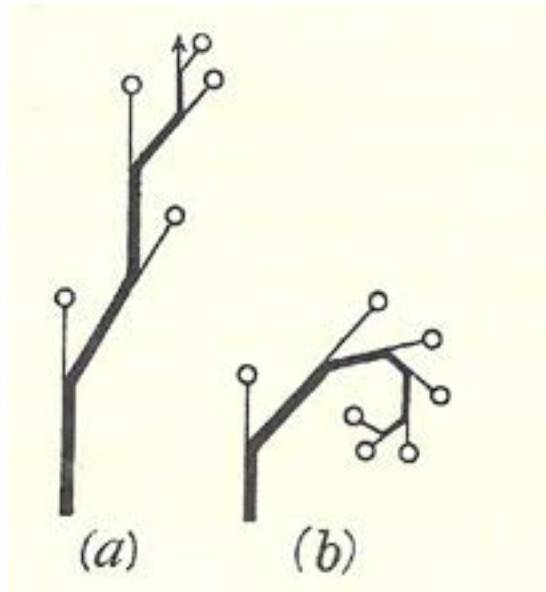
Εικόνα 8. Παραμετρική δημιουργία της λογαριθμικού κανάβου



9 <https://issuu.com/greekarchitects3/docs/180.15.05>, σ. 21

10 D'Archy W. Thompson. Ανάπτυξη και Μορφή στο Φυσικό Κόσμο, Αθήνα 1999, σ. 252

‘Οι γωνίες κατά τις οποίες διακλαδίζονται οι διαδοχικοί βλαστοί είναι όλες ίσες και τα μήκη των κλαδιών μειώνονται σύμφωνα με μια σταθερή αναλογία. Το αποτέλεσμα είναι ότι οι διαδοχικοί βλαστοί ή οι διαδοχικές αυξήσεις ανάπτυξης είναι εφαπτόμενες σε μια καμπύλη και η καμπύλη αυτή είναι μια πραγματική λογαριθμική σπείρα.’<sup>11</sup>



Εικόνα 9.(α) Μια ελικοειδής (β) μια σκορποειδής ταξιανθία

<sup>11</sup> D'Archy W. Thompson. Ανάπτυξη και Μορφή στο Φυσικό Κόσμο, Αθήνα 1999,σ.264

“Ούτε ο μαθηματικός μπορεί να παρουσιάσει κάτι καλύτερο, όταν προσπαθεί να εκφράσει την ομορφιά με μετρήσεις και γεωμετρικούς όρους. Με άλλα λόγια αυτό που ιντριγκάρει σε ένα ζωντανό οργανισμό είναι η ίδια η ζωή του. Μπορεί να μην είναι τόσο ακρινής αυτή η ομορφιά, ή να μην εξαρτάται από μετρήσεις και μαθηματικά μοντέλα, αλλά αυτές οι λεπτές διαφοροποιήσεις στις οποίες οφείλεται η δημιουργία, δεν είναι άλλοι από τους νόμους της ανάπτυξης των ειδών και της επιβίωσης του βέλτιστου. Όταν η ανάπτυξη εκτρέπεται από τον “ίσιο” δρόμο οδηγεί στην δημιουργία της πιο όμορφης καμπύλης, της σπείρας.”

**Theodore Andrea Cook<sup>12</sup>**

<sup>12</sup>σελ 17 <https://issuu.com/greekarchitects3/docs/180.15.05>

### 1.2.1 Μαθηματικά, μορφή και μοτίβα.

Η μελέτη μιας οργανικής μορφής, που ονομάζουμε σύμφωνα με την ονομασία του Γκαίτε Μορφολογία δεν είναι παρά ένα τμήμα εκείνης της ευρύτερης επιστήμης της Μορφής που ασχολείται με τις μορφές που προσλαμβάνει η ύλη κάτω από όλες τις όψεις και τις συνθήκες και, με ακόμη ευρύτερη έννοια, με μορφές που μπορεί κανείς θεωρητικά να φανταστεί.

Οι μαθηματικοί ορισμοί, θεωρούνται πάρα πολύ αυστηροί και άκαμπτοι για την κοινή χρήση, όμως η αυστηρότητά τους συνδυάζεται με ατελείωτη σχεδόν ελευθερία. Ο ακριβής ορισμός μιας έλλειψης μας εισάγει σε όλες τις ελλείψεις του κόσμου, ο ορισμός μιας 'κωνικής τομής' διευρύνει την αντίληψή μας και μια 'καμπύλη ανώτερου βαθμού' επεκτείνει ακόμη περισσότερο την περιοχή της ελευθερίας μας. Με την βοήθεια των μαθηματικών κανόνων και περιορισμών, με αυτή την ελεγχόμενη και ρυθμισμένη ελευθερία, φθάνουμε μέσα από τη μαθηματική ανάλυση στη μαθηματική σύνθεση και ανακαλύπτουμε ομολογίες ή ταυτότητες που δεν ήταν προφανείς προηγουμένως.

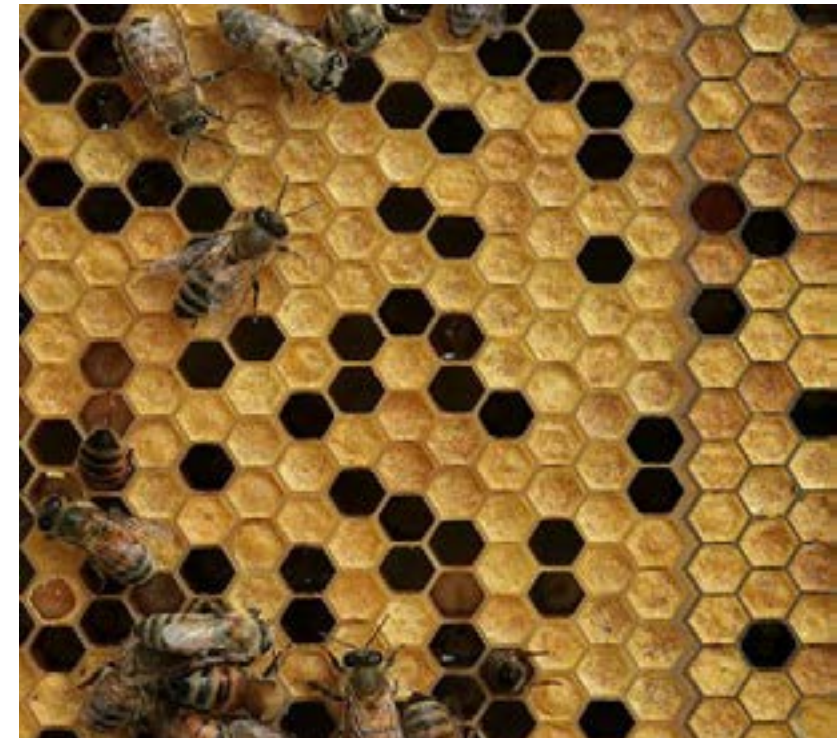
Σαν αποτέλεσμα μπορούμε και περνάμε εύκολα και γρήγορα από την μαθηματική έννοια της μορφής με τη στατική της όψη, στη μορφή με τις δυναμικές της σχέσεις. Ανυψωνόμαστε από την αντίληψη της μορφής σε μια κατανόηση των δυνάμεων που τη δημιουργήσαν. Και στην παράσταση της μορφής, καθώς και στη σύγκριση συγγενών μορφών, βλέπουμε στη μια περίπτωση ένα διάγραμμα δυνάμεων σε ισορροπία και στην άλλη διακρίνουμε το μέγεθος και την κατεύθυνση των δυνάμεων που έχουν επαρκέσει για να μετατρέψουν τη μία μορφή στην άλλη.

Άλλος ένας τρόπος κατά τον Henri Poincare είναι να εξετάσουμε τη λειτουργία των μαθηματικών και να συνειδητοποιήσουμε γιατί οι νόμοι και οι μέθοδοί τους δεσμεύονται να αποτελέσουν την βάση όλης της φυσικής επιστήμης. Κάθε φυσικό φαινόμενο, όσο απλό κι αν είναι, είναι στην πραγματικότητα σύνθετο, και κάθε ορατή δράση και αποτέλεσμα είναι ένα άθροισμα απο αναρίθμητες δευτερεύουσες δράσεις. Εδώ τα μαθηματικά δείχνουν την ιδιόρρυθμη δύναμή τους να συνδυάζουν και να γενικεύουν. Η έννοια του μέσου όρου, η εξίσωση μιας καμπύλης, η περιγραφή ενός αφρού ή ενός κυψελοειδούς ιστού, όλα εμπίπτουν μέσα στο γενικό πλαίσιο των μαθηματικών, όχι για κανέναν άλλο λόγο, αλλά επειδή αποτελούν αθροίσεις πιο στοιχειωδών αρχών ή φαινομένων. Η ανάπτυξη και η μορφή βρίσκονται σε όλη την έκταση της σύνθετης αυτής φύσης. Για αυτό οι νόμοι των μαθηματικών είναι υποχρεωμένοι να αποτελούν τη βάση τους και οι μέθοδοί τους να είναι ιδιαίτερα προσαρμοσμένες για να τις ερμηνεύουν.

Βέβαια, υπάρχουν πολλές οργανικές μορφές που δεν μπορούμε να περιγράψουμε, και να ορίσουμε με μαθηματικούς όρους, ακριβώς όπως υπάρχουν προβλήματα ακόμη και στη φυσική επιστήμη που ξεπερνούν τα μαθηματικά της εποχής μας.

Για παράδειγμα. ποτέ δεν θα αναζητήσουμε μια μαθηματική σχέση που να ορίζει αυτό ή το άλλο ψάρι, αυτό ή το άλλο κρανίο σπονδυλωτού. Μπορούμε όμως να χρησιμοποιήσουμε τη μαθηματική γλώσσα για να περιγράψουμε, και να ορίσουμε με γενικούς όρους, το σχήμα του κελύφους ενός σαλιγκαρού, τη συστροφή ενός κέρατου, το περίγραμμα ενός φύλλου, την υφή ενός οστού, τη συγκρότηση ενός σκελετού, τις ρευματικές γραμμές ενός ψαριού ή ενός πουλιού, τη νεραϊδένια νταντέλα του φτερού ενός εντόμου. Όμως σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να ξέρουμε να παραλείπουμε και να απορρίπτουμε, να διατηρούμε το γενικό τύπο και να απορρίπτουμε την ειδική περίπτωση.<sup>13</sup>

Εικόνα 10. Πολύγωνικά μοτίβα παρατηρούνται σε μεγάλη ποικιλία στην φύση, όπως στο δίχτυ που απλώνουν τα μανιτάρια μπαμπού, στα φτερά της λιβελούλας, σε κελύφη, μικρο οργανισμούς, στο δέρμα της καμηλοπάρδαλης, στις κυψέλες των μελισσών κ.α



13 D'Archy W. Thompson. *Ανάπτυξη και Μορφή στο Φυσικό Κόσμο*, Αθήνα 1999, σ. 378-381



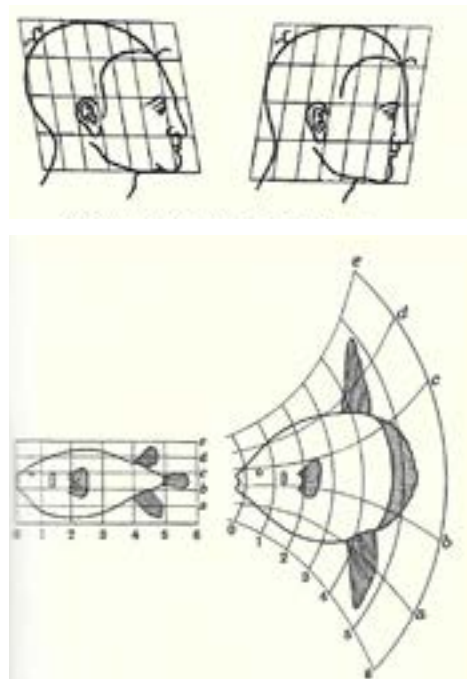
## 1.2.2 Καρτεσιανοί μετασχηματισμοί

‘Σε ένα πολύ μεγάλο μέρος της μορφολογίας, η πιο ουσιαστική μέθοδος έγκειται στη σύγκριση συσχετισμένων μορφών μάλλον παρά στον ακριβή ορισμό της καθεμιάς από αυτές. Και η παραμόρφωση μιας πολύπλοκης εικόνας μπορεί να είναι ένα φαινόμενο εύκολο στην κατανόηση, αν και η ίδια η εικόνα δεν θα πρέπει να αναλυθεί και να οριστεί. Αυτή η μεθοδολογία της σύγκρισης, της αναγνώρισης σε μια μορφή μιας συγκεκριμένης μετάθεσης ή παραμόρφωσης μιας άλλης, εκτός από μια ακριβή και ικανοποιητική αντίληψη του αρχικού “τύπου” ή προτύπου σύγκρισης, ανήκει στην άμεση αρμοδιότητα των μαθηματικών και βρίσκει τη λύση της στη στοιχειώδη χρήση μιας ορισμένης μαθηματικής μεθόδου. Η μέθοδος αυτή είναι η Μέθοδος των Συντεταγμένων, πάνω στην οποία βασίζεται η Θεωρία των Μετασχηματισμών.

Το πρώτο στάδιο αυτής της μεθόδου είναι να εγγράψουμε σε ένα πλέγμα ορθογωνίων συντεταγμένων το περίγραμμα για παράδειγμα, ενός ψαριού και να το μεταφέρουμε με αυτόν τον τρόπο σε ένα πίνακα αριθμών.

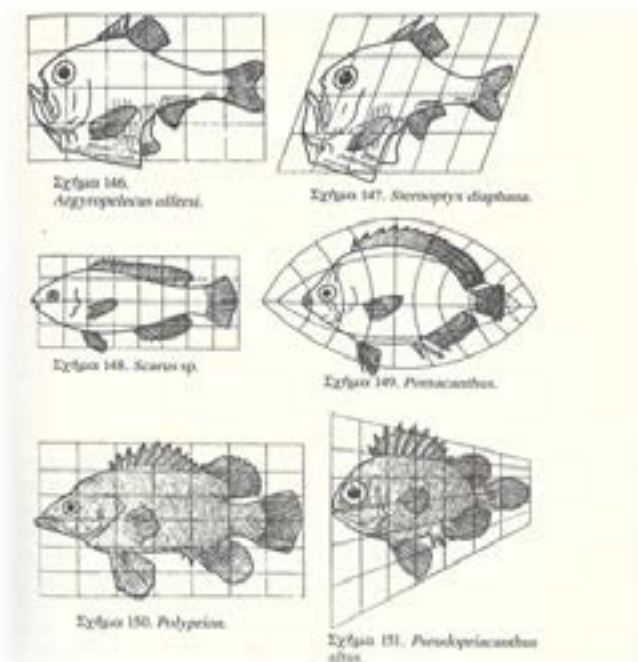
Το δεύτερο στάδιο και αυτό με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον και χρησιμότητα για τον μορφολόγο, είναι η χρησιμοποίηση των συντεταγμένων. Το στάδιο αυτό έγκειται στην αλλοίωση ή την παραμόρφωση του συστήματος των συντεταγμένων μας και στη μελέτη του αντίστοιχου μετασχηματισμού της καμπύλης ή του σχήματος που εγγράφεται στο πλέγμα των συντεταγμένων.

Αν εγγράψουμε σε ένα σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων το περίγραμμα ενός οργανισμού, όσο περίπλοκο κι αν είναι, ή ενός τμήματός του, όπως ένα ψάρι, έναν κάβουρα ή το κρανίο ενός θηλαστικού. Μπορούμε να επεξεργαστούμε αυτό το πολύπλοκο σχήμα γενικώς ως συνάρτηση  $x, y$ . Αν υποβάλουμε αυτό το ορθογώνιο σύστημα σε παραμόρφωση πάνω σε απλές και αναγνωρισμένες γραμμές αλλοιώνοντας, για παράδειγμα, τη διεύθυνση των αξόνων, την αναλογία  $x/y$ , ή αντικαθιστώντας το  $x$  και το  $y$  με κάπως πιο πολύπλοκες εκφράσεις, τότε παίρνουμε ένα νέο σύστημα συντεταγμένων, την παραμόρφωση των οποίων από τον αρχικό θα ακολουθήσει με ακρίβεια το εγγεγραμμένο σχήμα.



Εικόνα 11. Κατά Albrecht Durer

Με άλλα λόγια παίρνουμε ένα νέο σχήμα που παριστάνει το παλιό σχήμα κάτω από μια ομοιογενή καταπόνηση και είναι συνάρτηση των νέων συντεταγμένων, ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που το παλιό σχήμα ήταν συνάρτηση των αρχικών συντεταγμένων  $x$  και  $y$ .<sup>14</sup>



Εικόνα 12. Ιχθύς σε καρτεσιανοί παραμόρφωση

Ανάμεσα στους ιχθείς ανακαλύπτουμε μεγάλη ποικιλία παραμορφώσεων. Μια συγκριτικά απλή περίπτωση, που σχετίζεται με μια απλή διάτμηση είναι η παρά πάνω. Το ένα παριστάνει, σε καρτεσιανές συντεταγμένες, κάποιο μικρό ψάρι του ωκεανού, γνωστό ως *Argyropelecus olfersi*. Το άλλο παριστάνει επακριβώς το ίδιο περίγραμμα, μεταφερόμενο σε ένα σύστημα λοξών συντεταγμένων, οι άξονες του οποίου σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία  $70^\circ$ . Αυτό όμως είναι τώρα μια εικόνα ενός συγγενούς ψαριού που ανήκει σε διαφορετικό γένος και στο ονομάζεται *Sternorhtyx diaphana*. Η παραμόρφωση που απεικονίζεται με την περίπτωση του *Argyropelecus* είναι ακριβώς ανάλογη με το απλούστερο και το πιο κοινό είδος παραμορφώσεων στο οποίο υποβάλλονται τα απολιθώματα ως αποτέλεσμα των διατμητικών τάσεων μέσα στο συμπαγές πέτρωμα.<sup>15</sup>

Τέτοιες παραμορφώσεις είναι δυνατόν πλέον να συμβούν και στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό με την βοήθεια των ψηφιακών μέσων και την παραμετροποίηση των εκάστοτε μοντέλων προς επεξεργασία.

14 D'Archy W. Thompson. *Ανάπτυξη και Μορφή στο Φυσικό Κόσμο*, Αθήνα 1999, σ.381-383

15 σ. 418-419 ο.π.

### 1.3 Παραγωγή Δομών στην φύση

Προκειμένου να καταφέρουμε μια βιομηχανική αρχιτεκτονική πρέπει ακόμα να μελετήσουμε την δομή του φυσικού και οργανικού κόσμου. Οι δυνάμεις που δρουν στην παραγωγή των δομών στην φύση είναι πέντε βασικοί τύποι έντασης(stress): Συμπίεση, Ένταση, Κάμψη, Διάτμηση και Στρέψη.

Προκύπτουν τέσσερις βασικοί τύποι ελαφρών κατασκευών.

- **Δίκτυα καλωδίων, εμπνευσμένα απο τον ιστό αράχνης.**

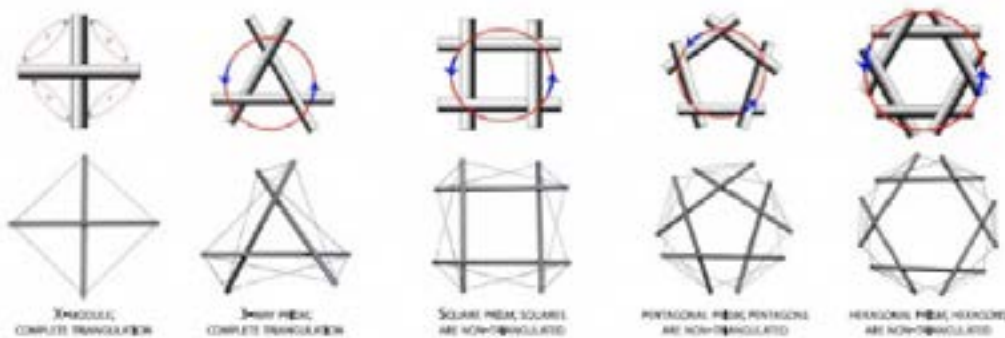
Με βασική υποκατηγορία τις δομές εφελκόμενων συστημάτων ράβδων καλωδίων (tensegrity) όπου ίδιες δυνάμεις υπάρχουν και στην δομή του dna.

- **Τα αεροπνευματικά (φουσκωτά) συστήματα εμπνευσμένα από σαπουνό-φουσκες.**
- **Θόλοι που είναι εμπνευσμένοι απο κοχύλια και αυγά.**
- **Και γεωδαιτικές κατασκευές που είναι εμπνευσμένα από τα ακτινόζωα (radiolarians)**

Το κοινό χαρακτηριστικό όλων είναι το χαμηλό κόστος των υλικών, η ελαφρότητα του βάρους, η δυνατότητα να καλύπτουν μεγάλους χώρους, η απλότητα στην συναρμολόγηση και ο μικρός χρόνος ανέγερσής τους.<sup>16</sup>

Τα συστήματα **tensegrity**, είναι μια εξελιγμένη τεχνική διανομής δυνάμεων μέσω άκαμπτων και εύκαμπτων στοιχείων και την ικανότητα αυτών να αντιδρούν καλύτερα στις μια πό τις δύο τάξεις δυνάμεων. Τα άκαμπτα στοιχεία έχουν καλύτερη συμπεριφορά στις θλιπτικές δυνάμεις ενώ τα ελαστικά στις εφελκυστικές, και με αυτόν το τρόπο γίνεται ακριβής διαμοιρασμός των δυνάμεων στο κατάλληλο στοιχείο οδηγώντας σε οικονομία υλικού.

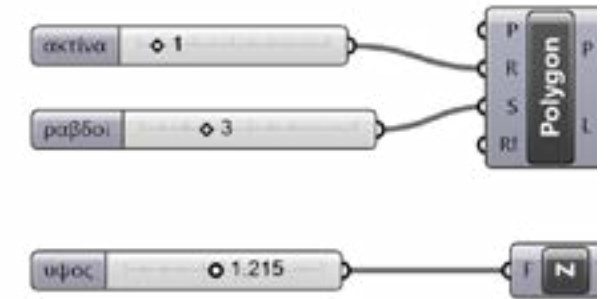
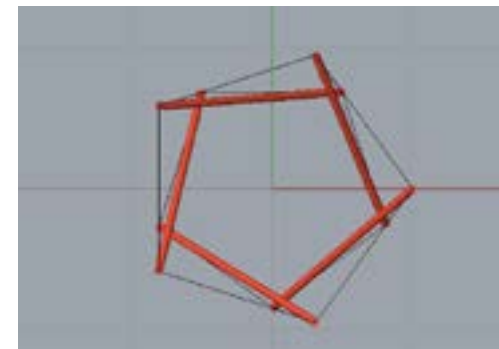
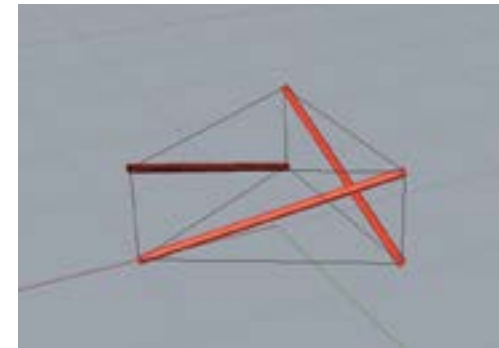
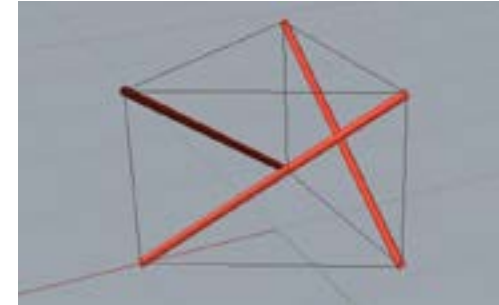
Η κινητική εφαρμογή τους, και η αρχή λειτουργίας τους, μπορεί να περιγραφεί από την εφαρμοσμένη πρακτική των κινούμενων χορδών, σε συνδιασμό με το φαινόμενο των Εκτατικών Πλαισίων Αμοιβαίας Δράσης, αλλάζοντας το λειτουργικό μήκος είτε των άκαμπτων, είτε των εύκαμπτων στοιχείων τους και κατά συνέπεια τη μορφολογία όλης της συνθεθειμένης επιφάνειας/ στερεού.



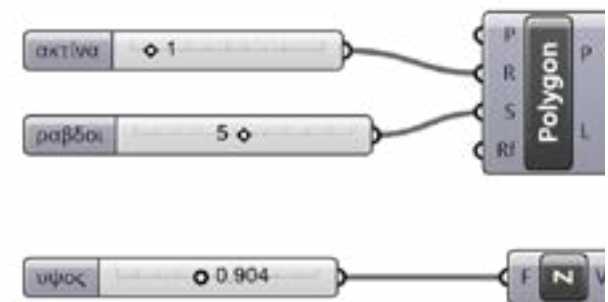
Εικόνα 13. Ανάλυση Tensegrity κατασκευών.

<sup>16</sup> Senosiain Aguilar, Javier, Bio Architecture, Oxford, 2003, σ. 32

Τα συστήματα tensegrity, χρησιμοποιούνται για κατασκευές στέγασης μιας και δύναται να καλύπτουν δομικά μεγάλα ανοίγματα με ελαφρύ, για τα δεδομένα τους σκελετό<sup>17</sup>.



Εικόνα 14. Παραμετρική μοντελοποίηση tensegrity δομής με τρεις ράβδους.



Εικόνα 15. Παραμετρική μοντελοποίηση tensegrity δομής με πέντε ράβδους.

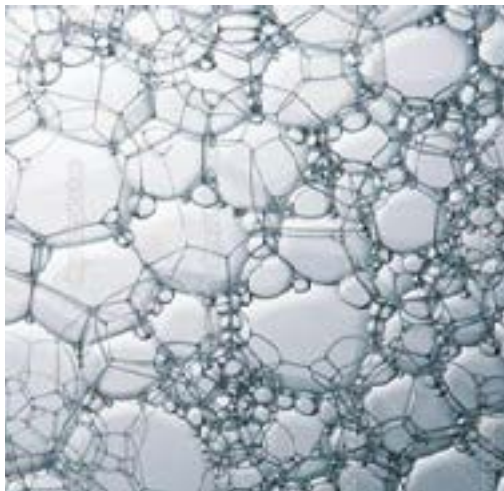
<sup>17</sup> Ουγγρίνης, Κωσταντίνος - Αλκέτας, Μεταβαλλόμενη Αρχιτεκτονική : Κίνηση, Προσαρμογή, Ευελιξία, Αθήνα 2012, σ. 126



Τα **αεροπνευματικά** συστήματα βασίζονται κυρίως στη χρήση αέρα υπό πίεση κλεισμένο μέσα σε αεροστεγείς θαλάμους. Τα στοιχεία της πρώτης κατηγορίας είναι όγκοι που μπορούν να γεμίσουν με αέρα και να συγκρατήσουν ατμοσφαιρική πίεση μεγαλύτερη από την εξωτερική στο εσωτερικό. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να δημιουργήσουν είτε ένα κέλυφος, είτε ένα φέροντα σκελετό, ο οποίος στη συνέχεια καλύπτεται με εφελκυσόμενες μεμβράνες ή μη δομικά αερο-πνευματικά στοιχεία.

Στην περίπτωση του αερο-πνευματικού φέροντα σκελετού ο λειτουργικός χώρος βρίσκεται κάτω απο κανονική πίεση. Επιπλέον, η διάταξη αυτή επιτρέπει μεγαλύτερο βαθμό ελευθερίας στη διαμόρφωση μορφολογίας σε σχέση με τις παραλλαγές θόλου που επιτρέπουν τα φουσκωτά κελύφη.<sup>18</sup>

18 Ουγγρίνης, Κωσταντίνος - Αλκέτας, Μεταβαλλόμενη Αρχιτεκτονική : Κίνηση, Προσαρμογή, Ευελιξία, Αθήνα 2012, σ. 128



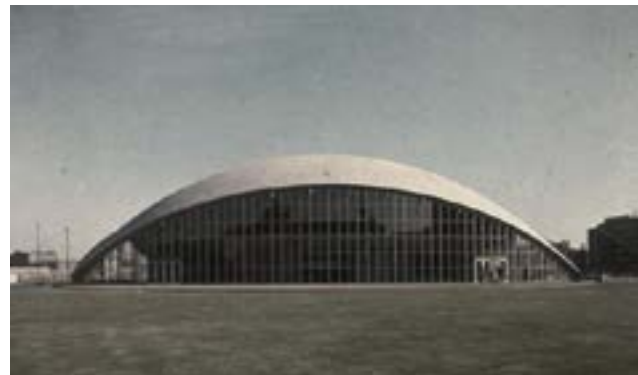
Εικόνα 16. Σαπουνόφουσκες



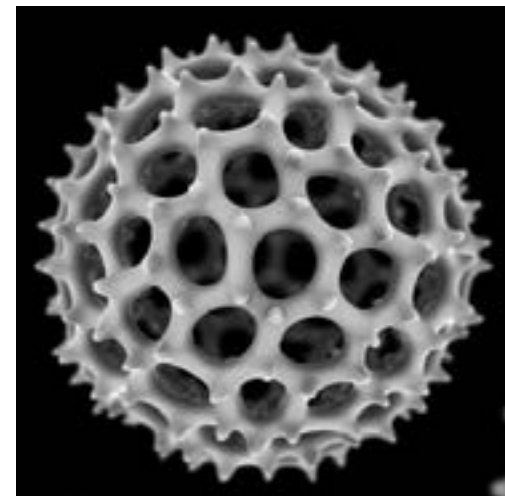
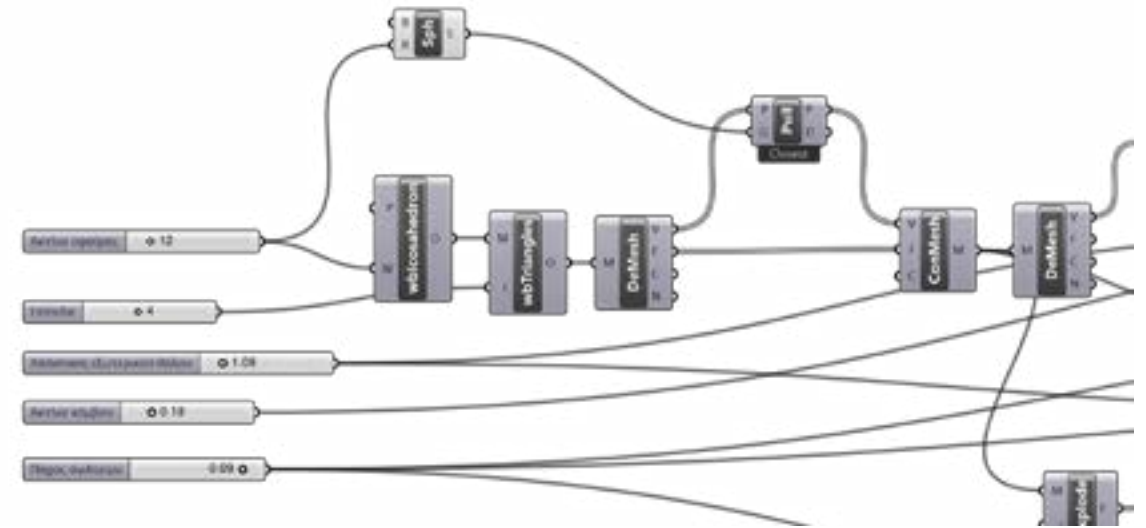
Εικόνα 17. The Water Cube, Bubble-Clad, PTW Architects



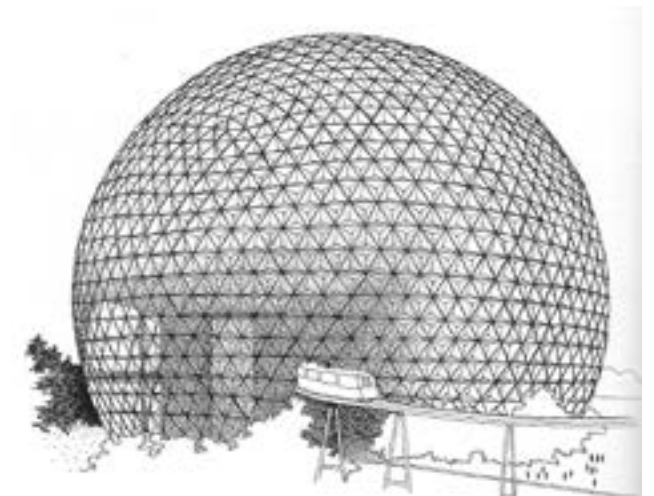
Εικόνα 18. Κέλυφος αυγών



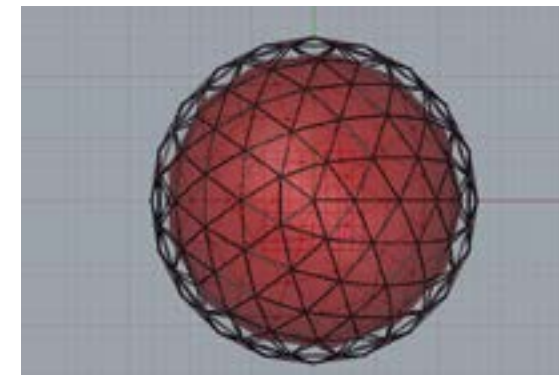
Εικόνα 19. Eero Saarinen, Kresge Auditorium, MIT



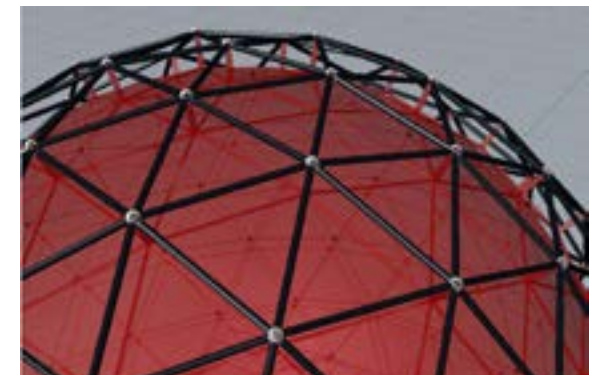
Εικόνα 20. radiolarian



Εικόνα 21. Γεωδαιτικός Θόλος, Αμερική, Εκθεσιακό περίπτερο στο Μοντρεάλ, Buckminster Fuller, 1967



Εικόνα 22. Παραμετρική μοντελοποίηση Γεωδαιτικού θόλου



## 1.4 Μοντελοποίηση και εργαλεία σχεδιασμού στην Αρχιτεκτονική

Ο υπολογιστής στην αρχιτεκτονική, αποτελεί πλέον το πιο βασικό εργαλείο στην σχεδιαστική διαδικασία, το τεχνικό μέρος και την μοντελοποίηση. Είναι ένα εργαλείο, που μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε για την επίλυση πιο σύνθετων προβλημάτων που αντλούν έμπνευση και αναζητούν απαντήσεις στην λογική και την ανάπτυξη του φυσικού κόσμου, χρησιμοποιώντας ως κοινό άξονα τα μαθηματικά και την φυσική.

Παρακάτω αναλύονται οι τρόποι ανάπτυξης και η λογική παραγωγής δομών και μορφών της φύσης και τα αρχιτεκτονικά μέσα που βοηθούν στην προσομοίωση αυτών των διαδικασιών στον ψηφιακό κόσμο, και έπειτα και στον φυσικό.

Το παραμετρικό λογισμικό που χρησιμοποιείται για τα παρακάτω παραδείγματα είναι το Grasshopper του προγράμματος Rhino. Με την βοήθεια αυτής της ψηφιακής τεχνολογίας είμαστε σε θέση να σχεδιάσουμε γεννητικά βιολογικές διαδικασίες ή και μορφές και να τις μεταφέρουμε στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό.

Πιο συγκεκριμένα οι διαδικασίες βιομίμησης που μπορούμε να διακρίνουμε και είμαστε σε θέση να μοντελοποιήσουμε και να χρησιμοποιήσουμε στον σχεδιασμό μας είναι η αυτο-οργάνωση, κυτταρικά διαγράμματα (voronoi), το ριζικό σύστημα (L-system) και η μορφογένεση.

*Η βιολογία είναι η λύση που πετυχαίνει μέσω υπολογισμού την ολοκλήρωση. Στο σχέδιο νομίζουμε ότι μπορούμε να ξεχωρίσουμε την γεωμετρία από την κατασκευή αλλά αν σκεφτείς τα βιολογικά αντίτυπα καταλαβαίνεις ότι δεν μπορείς να ξεχωρίσεις την μορφή, τα υλικά και την δομή.*

**Sanford Kwinter**

### 1.4.1 Computational Generative Design & Parametric Design

Στο πλαίσιο του γεννητικού(generative) υπολογιστικού σχεδιασμού, ο Aghaei Meibodi γράφει ότι ο υπολογιστικός(computation) υποδηλώνει την επεξεργασία της πληροφορία αλλά και πάλι αυτό δεν σημαίνει ότι επιφέρει αποτέλεσμα. Έτσι ο όρος γεννητικός(generative) δηλώνει την ιδιότητα ενός σχεδίου που αυτόματα δημιουργεί το αποτέλεσμα. Οι επαγγελματίες χρησιμοποιούν τις υπολογιστικές διαδικασίες για σχεδιαστική εξερεύνηση.

Τα τελευταία χρόνια ο γεννητικός υπολογιστικός σχεδιασμός αποτελεί σημαντικό παράγοντα για το παρόν και το μέλλον της αρχιτεκτονικής. Υπάρχουν πλέον λογισμικά που είναι απολύτως ικανά να δημιουργήσουν ένα γεννητικό σχέδιο αυτόματα. Αυτά τα λογισμικά δουλεύουν βάση γλωσσών προγραμματισμού.

Σύμφωνα με τον Menges, με το computational design στην αρχιτεκτονική, οι μορφές δεν καθορίζονται μόνο ακολουθώντας κάποια σειρά σχεδιαστικών βημάτων, αλλά χρησιμοποιούνται επίσης κωδικοποιημένοι σύνδεσμοι με γεννητικές διαδικασίες. Σε αντίθεση με τον παραδοσιακό τρόπο σχεδιασμού, το computational design η σχέση μεταξύ μορφής και πληροφορίας είναι πιο ξεκάθαρη. Επίσης επισημαίνει ότι εργαλεία που βρίσκουν συσχετισμούς, που έχουν σχέση με αλγοριθμικά δεδομένα, βοηθά τον γεννητικό σχεδιασμό πέρα από τους περιορισμούς του υλικού και τις αντοχές του. Ο σχεδιασμός αυτός βοηθά στο να γίνουν κατανοητές σημαντικές πτυχές του σχεδιασμού ενός κτιρίου, που είναι συμπεριλαμβανομένου του σχεδίου, η δομή, η μορφή, το υλικό και η κατασκευή, όπως και το ότι μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους. Δίνει λοιπόν την ευκαιρία για απεριόριστες δυνατότητες σχεδιασμού.

Άλλη μια σχεδιαστική επιλογή για generative design είναι ο **παραμετρικός σχεδιασμός** που παρέχει μια δυναμική προσέγγιση, η οποία επιτυγχάνεται μέσω παραμέτρων και μεταβολών. Δημιουργήθηκε από αεροναυτικούς μηχανικούς και κατασκευαστές αυτοκινήτων, και έτσι ο παραμετρικός σχεδιασμός μοντέλων δημιουργεί εικονικές διαστάσεις των γραφικών ιδεών, βελτιώνοντας το σχεδιαστικό αποτέλεσμα.

Ο όρος “παραμετρικός” σχετίζεται με τα αριθμητικά και γραφικά δεδομένα τα οποία ορίζουν μια σειρά παραλλαγών. Η ενημέρωση των μορφών βασίζεται σε νέες τιμές και σύνολο περιγραφικών στοιχείων(αλγόριθμους) του γεωμετρικού στοιχείου και των συσχετισμών. Στο περιβάλλον του παραμετρικού σχεδιασμού περιβάλλον, το μοντέλο δεν έχει κάποια καθορισμένη μορφή ή περιεχόμενο, αλλά μπορεί να τροποποιηθεί και να διερευνηθεί από τις μεταβλητές του.<sup>19</sup>

<sup>19</sup> Amal Elshawi, thesis, Computational Generative Design with Biomimicry Towards Morphogenesis in Digital Architecture, 2018, σ. 13-24



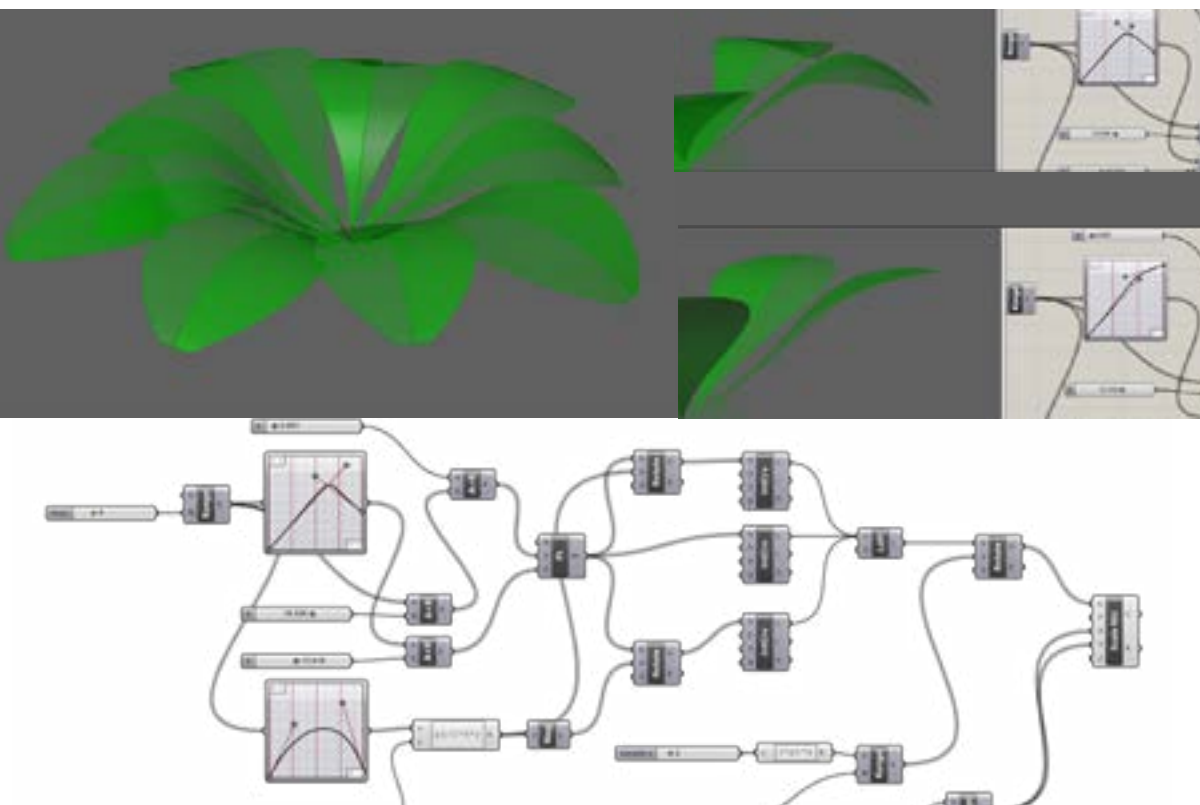
## 1.4.2 Αυτο-οργάνωση ( Self-organisation)

Η αυτο-οργάνωση είναι μια διαδικασία όπου το εσωτερικό ενός συστήματος προσαρμόζεται σε ένα περιβάλλον για να προωθήσει μία συγκεκριμένη λειτουργία χωρίς εξωτερική καθοδήγηση ή διεύθυνση.

Στην βιολογία περιλαμβάνονται οι λειτουργίες όπως βλάστηση και ανάπτυξη των οργανισμών και περιλαμβάνει τον γενετικό έλεγχο της ανάπτυξης των κυττάρων, την διαφορετικότητα και την μορφογένεση.

Η ανάπτυξη των κυττάρων αφορά την αύξηση και του μεγέθους και του αριθμού των κυττάρων. Η διαφοροποίηση περιγράφει την διαδικασία στην οποία τα κύτταρα αποκτούν έναν "τύπο" και η μορφολογία τους μπορεί να έχει δραματική αλλαγή κατά την διαφορετικότητα.

Περικλείει τα σχήματα των ιστών, των οργάνων και την θέση των ειδικών τύπων κυττάρων. Σημαντικό στο modeling growth είναι η επίδραση του περιβάλλοντος που το φιλοξενεί.<sup>20</sup>



Εικόνα 23. Παραμετρική μοντελοποίηση λογικής ανάπτυξης (growth) Γίνετε αλλαγή καμπυλότητας των φύλλων, ελέγχεται η αύξηση και μείωση του αριθμού τους, όπως και η διάμετρός του.

20 Michael Hensel, Achim Menges and Michael Weinstock, Techniques and Technologies in Morphogenetic Design, London, 2006, σ. 13

## 1.4.3 Διαγράμματα Voronoi

Ένα διάγραμμα voronoi περιλαμβάνει ένα γράφημα το οποίο περιέχει κύτταρα, γωνίες και κόμβους. Είναι μια σειρά από κενά και πολύγωνα που περιέχουν σημεία δημιουργίας (generation points).

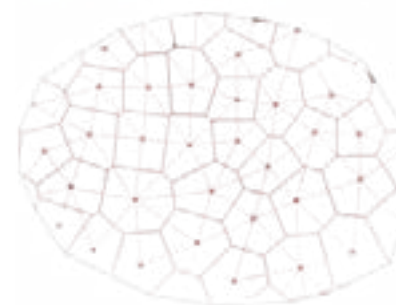
Αποτελεί επίσης έμπνευση για τους αρχιτέκτονες, που δημιουργούν δομικές μορφές. Η πιο πρόσφατη σχεδιαστική διαδικασία εξαρτάται από τις φυσικές αυτο-οργανωτικές αρχές των βιολογικών δομών με την βοήθεια της μαθηματικής μοντελοποίησης.<sup>21</sup>



Εικόνα 24. φτερά λιβελούλας



Εικόνα 25. κέλυφος αχινού



Εικόνα 26. Διάγραμμα voronoi στο πρόγραμμα grasshopper.

21 Amal Elshtwei, thesis, Computational Generative Design with Biomimicry Towards Morphogenesis in Digital Architecture, 2018 σ. 31-32

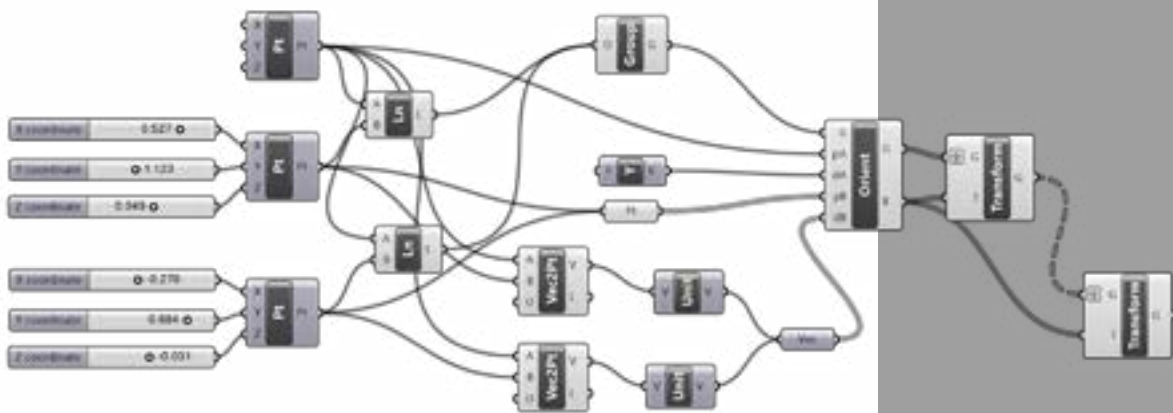
#### 1.4.4 Ριζικό σύστημα σχεδιασμού (L-system modeling)

Τα σχήματα διακλαδώσεων απαντώνται στην φύση σε ποικίλα συστήματα, από την μορφολογία των φυτών ως τις διακλαδώσεις στους βρόγχους των ανθρώπινων πνευμόνων ή στους σχηματισμούς των αστραπών.

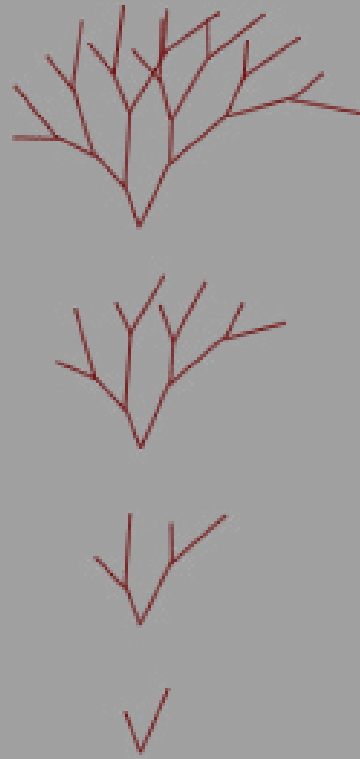
Το 1968, ο Ούγγρος βιολόγος Aristid Lindenmayer, σε συνεργασία με τον καθηγητή Przemyslaw Prusinkiewicz, μελετά τους σχηματισμούς με τους οποίους αναπτύσσονται απλοί πολυκύτταροι οργανισμοί και καταλήγει σε μια αφηρημένη μαθηματική δομή για την ανάπτυξη γεωμετρικών διακλάδωσης.

Τα L- συστήματα καθορίζονται απο κανόνες και δημιουργούν διακλαδωτές δομές χρησιμοποιώντας σύμβολα. Τα συστήματα αυτά όχι μόνο είναι σε θέση να μοντελοποιήσουν μορφές φυτών αλλά βοηθούν στην δημιουργία επιφανειών και κατασκευών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό κτιρίων.<sup>22</sup>

Σύμφωνα με τον καθηγητή Prusinkiewicz, η χρήση υπολογιστικών μοντέλων μπορεί να επιφέρει αφ' ενός ποσοτική κι αφ' ετέρου 'συνθετική' κατανόηση των αναπτυξιακών μηχανισμών, με την έννοια ότι προσφέρει στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό καλύτερη κατανόηση της συνέργειας μεταξύ συστημάτων και περιβάλλοντων, ως προς τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς τους.

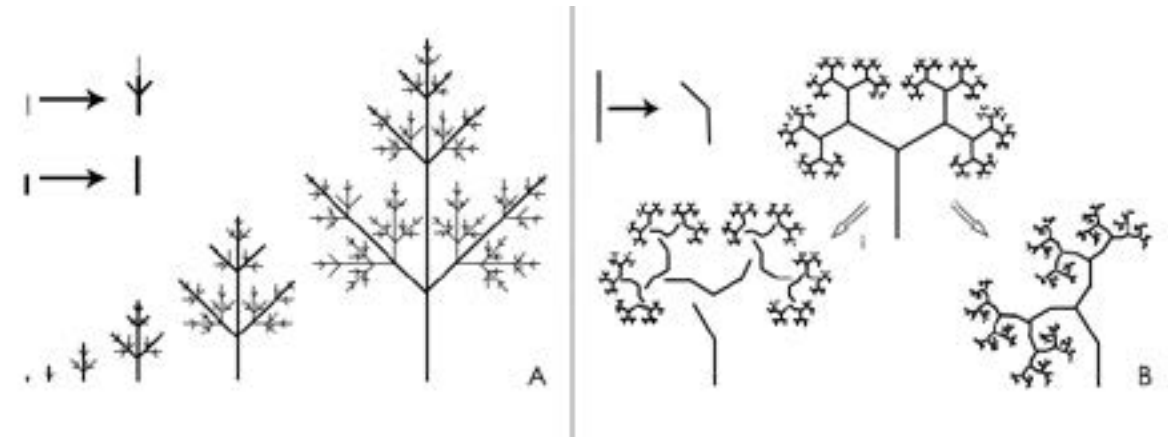


Εικόνα 27. Παραμετρική μοντελοποίηση L-System λογικής.



Όπως διευκρινίζει, είναι δυνατόν τα L-systems να δώσουν το έναυσμα για μια σειρά από γλώσσες προγραμματισμού που αφορούν την προσομοίωση ενός μεγάλου εύρους φυτών. Η ενσωμάτωση της εκ βιομηχανικής στην ανάπτυξη των φυτών, επιτρέπει την εισαγωγή εξωτερικών φυσικών βιολογικών και περιβαλλοντικών πληροφοριών στην μοντελοποίηση. Τέτοιες πληροφορίες είναι οι επιπτώσεις της βαρύτητας, του τροπισμού κ.α.

Αντίστοιχα χρήσιμες μπορούν να αποδειχθούν τέτοιες πληροφορίες στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, με ολόκληρα κτίρια ή περιβλήματα που ενημερώνονται για πολλά διαφορετικά στοιχεία και βελτιστοποιούνται ώστε να επιτυγχάνεται απόδοση σε ποικίλα επίπεδα. Για παράδειγμα, σε ένα κτίριο το δομικό σύστημα μπορεί να λαμβάνει ενημέρωση περί της βαρύτητας και των δυνάμεων που ασκούνται, και να προσλαμβάνει την πιθανώς επιπλέον ενέργεια που χρειάζεται ενεργοποιώντας την εισαγωγή πληροφοριών περιβάλλοντος, και κατά συνέπεια συλλέγοντας ενέργεια από τον ήλιο ή από το νερό της βροχής.<sup>23</sup>



Εικόνα 28. Α. Ανάπτυξη φυτού σαν μια επανεγγραφή της διαδικασίας.

Β. Αναπτυξιακό μοντέλο ενός σύνθετου φύλλου σε σύγκριση με την κατασκευή

<sup>22</sup> Amal Elshtwei, thesis, Computational Generative Design with Biomimicry Towards Morphogenesis in Digital Architecture, 2018. σ. 30-31

<sup>23</sup> [https://issuu.com/iouliamarouda/docs/marouda\\_biomimicry](https://issuu.com/iouliamarouda/docs/marouda_biomimicry), σ. 63-64

### 1.4.5 Μορφογένεση

Μορφογένεση για την βιολογία είναι η διαμόρφωση ενός οργανισμού μέσω εμβρυολογικών διαδικασιών διαφοροποίησης των κυττάρων, ιστών και οργάνων για την ανάπτυξη των συστημάτων οργάνων σύμφωνα με ο γενετικό σχέδιο του πιθανού οργανισμού και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.<sup>24</sup>

Η μορφογένεση των φυτών είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που εμπεριέχει πολλούς τύπους μηχανισμού ελέγχου.

- **Ιεραρχία πολλαπλής κλίμακας**

Τα φυτά οργανώνονται σε διάφορους τύπους και μεγέθη

- **Δυναμική δομή**

Η οργάνωση των φυτών χαρακτηρίζεται ως εξαιρετικά δυναμική τόσο ως προς τη χημική μεταφορά μεταξύ των κυττάρων όσο και την αρχιτεκτονική δυναμική της κυτταρικής εξέλιξης, της ανάπτυξης και του πολλαπλασιασμού.

- **Διαδικαστική συνέχεια**

Η βιολογική μορφογένεση είναι συνεχόμενη. Οι διαδικασίες της συμβαίνουν σε ποικίλες ταχύτητες αλλά ποτέ δεν παύουν ολοκληρωτικά. Μόλις ο οργανισμός ενηλικιωθεί, οι αλλαγές συνεχίζονται στο φαινότυπό του, δηλαδή τα παρατηρήσιμα χαρακτηριστικά ενός ατόμου που απορρέουν από την αλληλεπίδραση του γενότυπου του με το περιβάλλον. Όταν αυτή η διαδικασία ολοκληρωθεί, μεταβολές όπως αναγέννηση, επιδιόρθωση και πιθανή περαιτέρω ανάπτυξη συνεχίζουν να συμβαίνουν στο γονιδίωμα. Αυτή η συνέχεια δίνει στο φυτό ιδιαίτερη προσαρμοστικότητα.

Η διαδικασία της μορφογένεσης είναι δυνατό να μελετηθεί με την χρήση μαθηματικών μοντέλων που μέσα από την προσομοίωση κατανοούν και προβλέπουν τους μηχανισμούς ανάπτυξης.



Εικόνα 29. Φυλλοταξία (Phyllotaxis) είναι η μελέτη της επαναλαμβανόμενης οργάνωσης των ενότητων και μοτίβων των φυτών σύμφωνα με μία ευθυγράμμιση. Συμπεριλαμβάνει τον τρόπο που οργανώνονται τα φύλλα γύρω από τον κορμό του δέντρου, το δέρμα του ανανά, τα πέταλα της μαργαρίτας, και οι σπόροι στο ηλιοτρόπιο. Η φυλλοταξική σπείρα είναι ένα μοτίβο όπου τα στοιχεία οργανώνονται σαν σπειροτό πλέγμα, μια οργάνωση σημείων σε συγκεντρικούς κύκλους υποκλίση.

Η αντίστοιχη μορφογένεση για την αρχιτεκτονική είναι η ψηφιακή μορφογένεση ή υπολογιστική μορφογένεση και νοείται ως ένα σύνολο μεθόδων που χρησιμοποιούν τα ψηφιακά μέσα ως παραγωγικά εργαλεία για την εύρεση της μορφής και των μετασχηματισμών της.

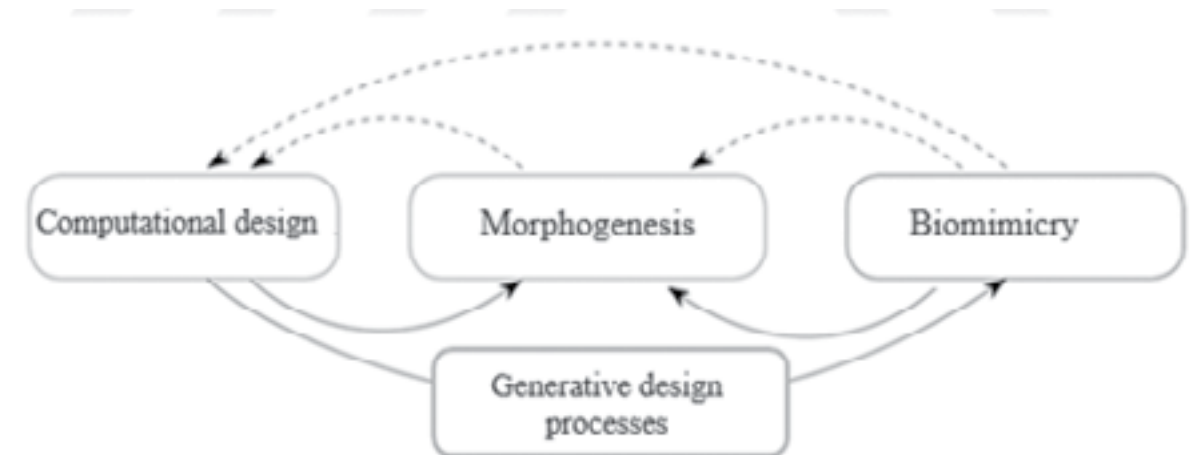
Η σημασία της μορφογένεσης στην αρχιτεκτονική διατηρεί μια ανάλογη ή μεταφορική σχέση με αυτή των διαδικασιών μορφογένεσης της φύσης.

Τα βιολογικά συστήματα παρουσιάζουν υψηλή αποδοτικότητα και μεγάλη προσαρμοστικότητα καθώς χρησιμοποιούν την στρατηγική του πλεονασμού, δηλαδή διατηρούν περισσότερα κύτταρα στο εκάστοτε σύστημα από όσα χρειάζονται για την τέλεση μιας εργασίας. Έτσι, καταφέρνουν να μεταβάλλονται ανάλογα με τις με τις μεταβολές του περιβάλλοντός τους και να αυτό-επιδιορθώνονται όποτε χρειαστεί.

Στη μακρά πορεία της εξέλιξης των ειδών, οι οργανισμοί που διατηρούν περισσότερες ιδιότητες, προσαρμόζονται στις αλλαγές.

Η σημαντικότερη αρχή της είναι μια μικρή τυχαία μετάλλαξη που επαναλαμβάνεται με το χρόνο. Καθώς οι μηχανισμοί της φύσης λειτουργούν στοχαστικά, δεν θα εμφανίσουν ποτέ ένα πανομοιότυπο αποτέλεσμα. Είναι αυτές οι τυχαίες μεταλλάξεις μετά από πολλές επαναλήψεις, που συνθέτουν την εξέλιξη στη φύση και για πολλούς και στην αρχιτεκτονική.

Στο σχεδιασμό, καθώς τα υπολογιστικά συστήματα που διαθέτουμε σήμερα διαχειρίζονται δεδομένα μεγάλου όγκου και εξίσου στοχαστικά με τα φυσικά συστήματα, μπορούμε να επωφεληθούμε από αυτά στην αναζήτηση της μορφής και της συμπεριφοράς.



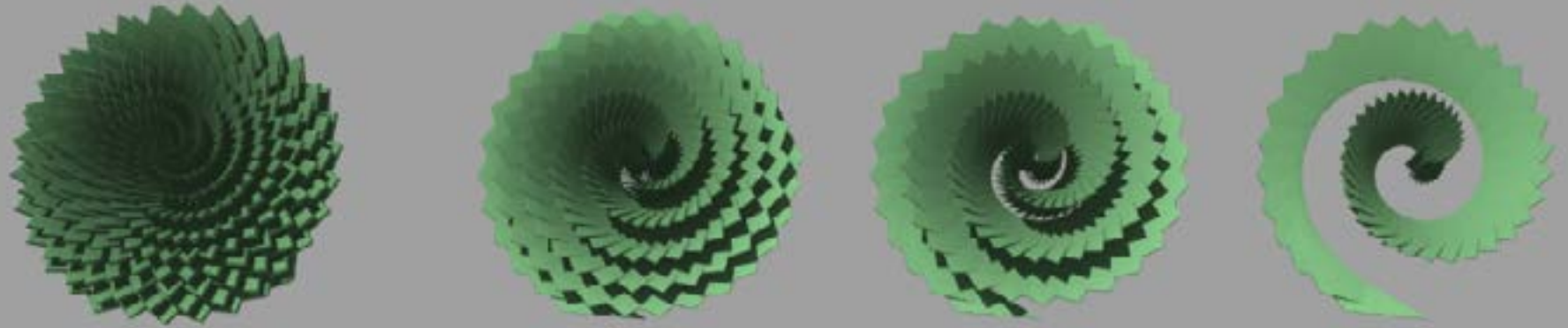
Εικόνα 30. Διάγραμμα της σχέσης μεταξύ την διαδικασία της Μορφογένεσης και του γενετικού σχεδιασμού.

<sup>24</sup> <https://www.britannica.com/science/morphogenesis>

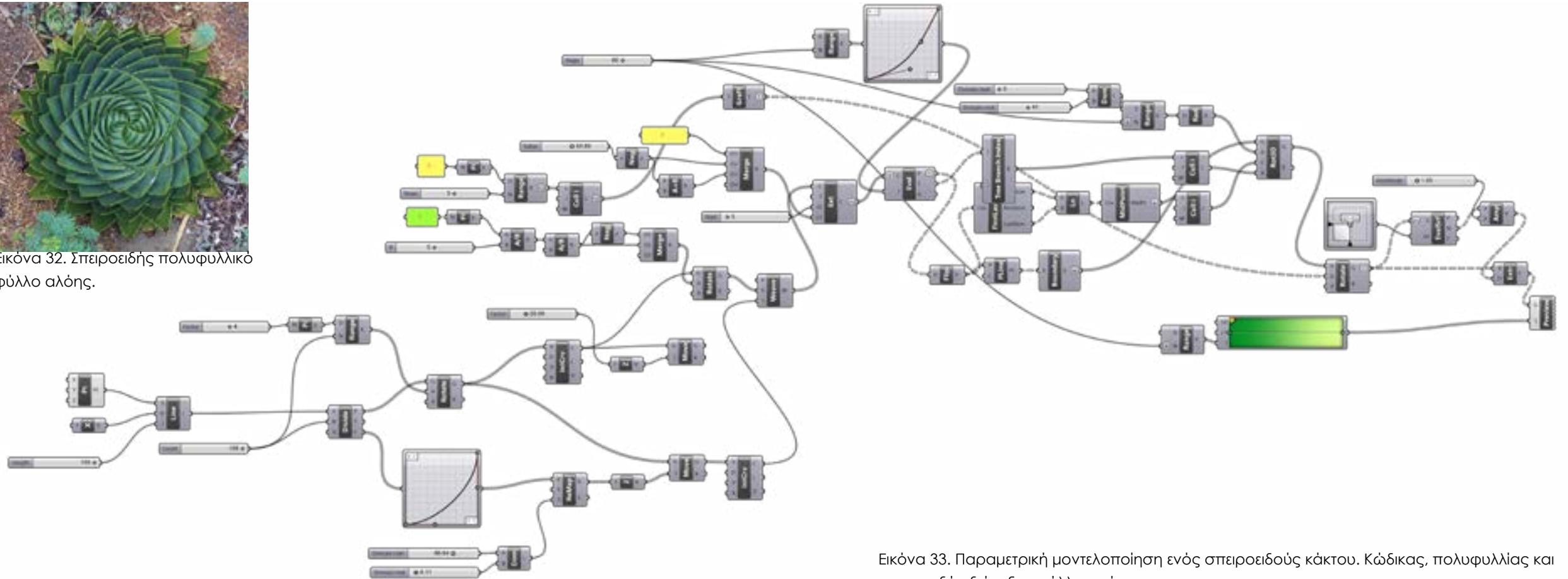




Εικόνα 31. Σπειροειδής διάταξη φύλλων.



Εικόνα 32. Σπειροειδής πολυφυλλικό φύλλο αλόης.



Εικόνα 33. Παραμετρική μοντελοποίηση ενός σπειροειδούς κάκτου. Κώδικας, πολυφυλλίας και σπειροειδής διάταξης φύλλων κάκτου.

## 1.5 Μέθοδοι διαφορετικών βιομιμητικών αναζητήσεων

Διαχωρισμοί διαδικασιών βιομιμησης από τους T. Speck και O. Speck :

**Bottom-up:** Στην bottom-up προσέγγιση, η διαδικασία ξεκινά από τη βιολογία και καταλήγει στην τεχνική εφαρμογή του μελετημένου μοντέλου. Το πρώτο βήμα είναι η ανάλυση της δομικής και λειτουργικής μορφολογίας του βιολογικού συστήματος. Επόμενο βήμα είναι η αφαίρεση, που θεωρείται συχνά το σημαντικότερο και δυσκολότερο στάδιο ενός βιομιμητικού εγχειρήματος, είναι το βήμα στο οποίο πραγματοποιείται ο διαχωρισμός των βιομιμητικών αρχών που ανακαλύφθηκαν από το βιολογικό μοντέλο. Το επόμενο στάδιο αφορά την τεχνική εφαρμογή, που αρχικά υλοποιείται σε κλίμακα εργαστηρίου και έπειτα σε κλίμακα μηχανικής. Οι μέθοδοι και τεχνικές παραγωγής που χρησιμοποιούνται κατά την εφαρμογή, είναι οι ήδη καθιερωμένες από την βιομηχανία. Ένα ακόμα βήμα της διαδικασίας, είναι η βελτιστοποίηση του προϊόντος σύμφωνα με τις ανάγκες και το κόστος της παραγωγής, κάτι που συχνά γίνεται σε συνεργασία με τους βιομηχανικούς συνεργάτες. Ένας παράγοντας που τονίζεται ιδιαίτερα κατά αυτή την προσέγγιση είναι η διεπιστημονικότητα καθώς χρειάζεται την επεξήγηση των λεπτομερειών του εκάστοτε βήματος στους επιστήμονες των άλλων ειδικοτήτων. Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω επαναλαμβάνεται πολλές φορές για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

**Top-down:** Η top-down προσέγγιση ξεκινά με τη δουλειά του μηχανικού. Οι βελτιώσεις και καινοτομίες που επιφέρει η βιομιμητική έρευνα γίνονται σε τεχνικά προϊόντα που έχουν ήδη παραχθεί και είναι σε τελικό στάδιο της βιομηχανικής ανάπτυξης ή βρίσκονται ήδη στην αγορά. Εδώ κρίνεται απαραίτητη η εις βάθος τεχνογνωσία όλων των ερευνητών και η μεταξύ τους συνεννόηση.

**Διευρυμένη top-down:** Στην περίπτωση της διευρυμένης (extended) top-down διαδικασίας, τα στάδια ξεκινούν όπως και αυτά της “απλής” top-down, με την αναζήτηση λύσεων από φυσικά μοντέλα για τη βελτιστοποίηση υφιστάμενων προϊόντων. Ωστόσο, ενώ η αναζήτηση βιολογικών παραδειγμάτων επιφέρει αρκετά αποδεκτά αποτελέσματα, πολλές φορές επιδεικνύει και μια σημαντική έλλειψη γνώσεων π.χ βασικών βιολογικών δεδομένων. Έτσι αποφασίζεται η περαιτέρω βιολογική έρευνα και συνεπώς έχουμε επανάληψη του πρώτου κύκλου ερευνών έως ότου αποκτηθούν οι γνώσεις και βρεθεί το βιολογικό πρότυπο που θα οδηγήσει σε μια ολοκληρωμένη επίλυση.

Οι θεμελιωδώς διαφορετικές μεθοδολογίες που αναπτύσσονται είναι ουσιαστικά δύο:

Η πρώτη η bottom - up έχει ως έναυσμα την έρευνα του βιολόγου. Καθώς ξεκινά από το βιολογικό πρότυπο, θεωρείται ότι μπορεί να υποστηρίξει πολύ περισσότερες εφαρμογές. Ωστόσο, από την ανάλυση της βιολογικής λειτουργίας ως τη βιομηχανική παραγωγή του προϊόντος, έχουμε μια σειρά διαδικασιών που διαρκεί χρόνια, από τρία έως επτά.

Η top - down λογική από την άλλη, ξεκινά από την αναζήτηση του μηχανικού για βελτιστοποίηση του προϊόντος και για επίλυση ενός συγκεκριμένου ζητήματος. Καθώς η έρευνα γίνεται πιο στοχευμένα, διαρκεί και λιγότερο, σε ένα εύρος από έξι ως δεκαοκτώ μήνες. Δεν θεωρείται, όμως, ότι μπορεί να απαντήσει σε περισσότερες τεχνικές εφαρμογές από αυτή πάνω στην οποία γίνεται η έρευνα. Η διευρυμένη top - down προσέγγιση, προσθέτει σε αυτό κύκλους επανάληψης των διαδικασιών με σκοπό την ολοκληρωμένη ανάλυση των βιολογικών παραδειγμάτων και την εύρεση του βέλτιστου δυνατού προτύπου, πράγμα που την καθιστά πιο χρονοβόρα από την απλή top- down λογική -από ένα έως πέντε έτη- και εξίσου περιοριστική στις εφαρμογές που μπορεί να λάβει.<sup>25</sup>

<sup>25</sup> [https://issuu.com/iouliamarouda/docs/marouda\\_biomimicry](https://issuu.com/iouliamarouda/docs/marouda_biomimicry). σ. 107-108

## 1.6 Συμπεράσματα

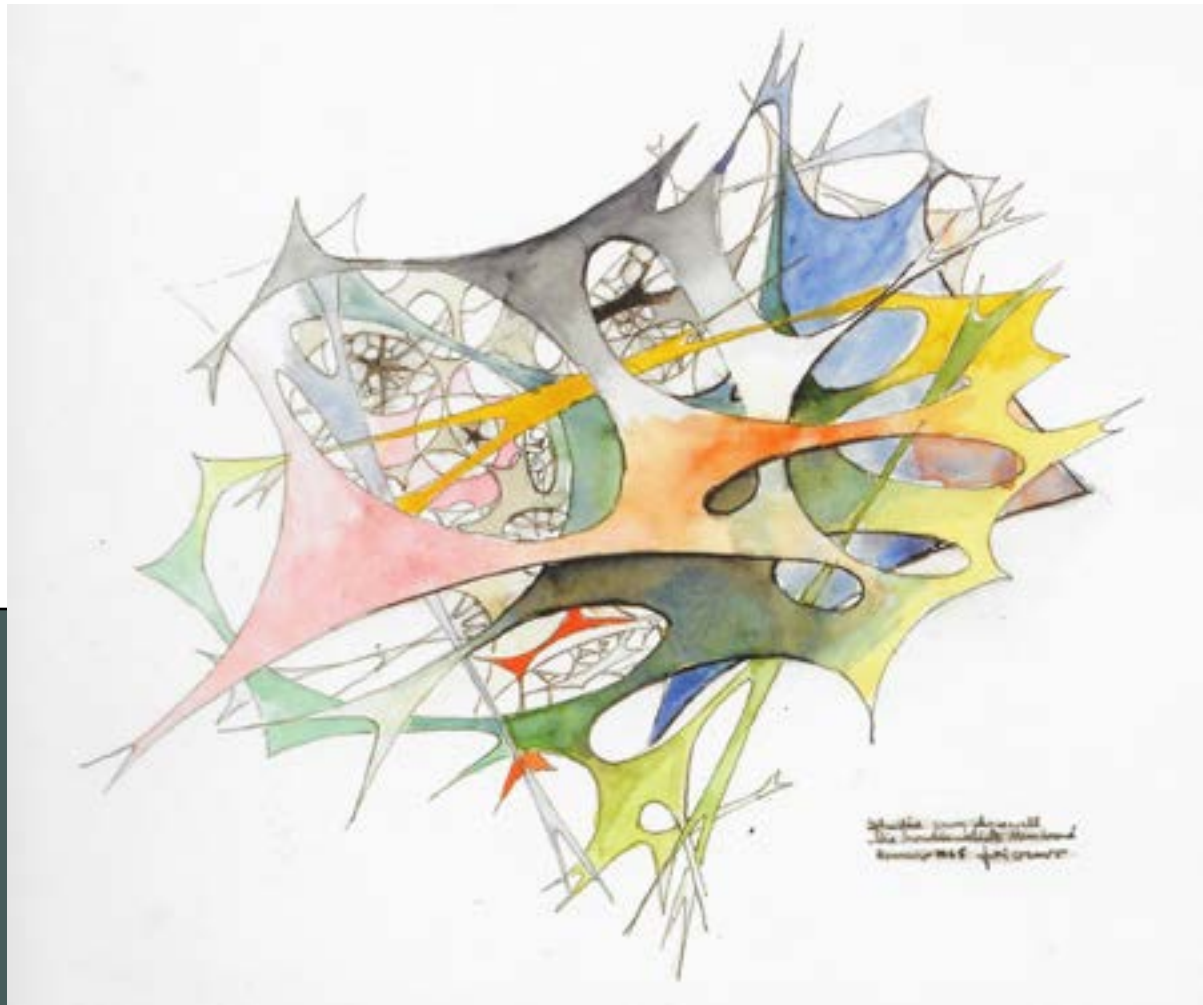
Βιομίμηση λοιπόν, είναι η προσπάθεια μίμησης των μηχανισμών της φύσης και όχι η απλή αντιγραφή της μορφολογίας.

Ο φυσικός και ο τεχνητός κόσμος διέπεται από τις ίδιες αρχές, την εξωτερική επίδραση (ηλιακή φωτεινότητα), την τροφοδοσία (νερό) και την βαρύτητα. Η προσαρμοστικότητα του φυσικού και οργανικού κόσμου στο περιβάλλον τους, όπου αφορά την αλλαγή στην δομή και στην μορφή τους προκύπτει να επιβιώσουν, όπως φαίνεται στους καρτεσιανούς μετασχηματισμούς, συνδέεται με την αρχιτεκτονική ως προς την προσαρμογή των κτιρίων στην εκάστοτε τοπολογία. Με την βοήθεια των μαθηματικών και των μοτίβων που συναντούμε στην φύση και των συστημάτων ανάπτυξης (I-systems και Voronoi) έχουμε στην διάθεσή μας μια μαθηματική λογική που μπορεί να μεταφραστεί στον σχεδιασμό ενός κτιρίου.

Η βιομιμητική λογική μπορεί σήμερα να μεταφερθεί στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό με μεγαλύτερη ευκολία, μέσω της ψηφιακής τεχνολογίας και του παραμετρικού και υπολογιστικού (computational) σχεδιασμού, παράγοντας τις δομές της φύσης και υπολογίζοντας ταυτόχρονα τους διάφορους εξωτερικούς παράγοντες που την επηρεάζουν πριν προχωρήσουν στο τελικό στάδιο της κατασκευής.

Τέλος, οι διαφορετικές βιομιμητικές αναζητήσεις προσφέρουν μια χαρτογράφηση της διαδικασίας, ωστόσο πρακτικά είναι δύσκολο να διαχωριστεί το βιολογικό έναυσμα από το μηχανικό μέρος. Λόγω της πολυπλοκότητας του έργου είναι συχνό φαινόμενο αυτές οι διαδικασίες (bottom-up και top-down) να χρησιμοποιούνται παράλληλα.





## Κεφάλαιο 2ο

### Ιστορική Αναδρομή

## 2.1 Ιστορική Αναδρομή Βιομηχανικής Αναζήτησης έως τις αρχές του 21ου

1500

1900

2000

### Πρωτόγονες Κατασκευές



Εικόνα 36. Καλύβες

### Αναγέννηση



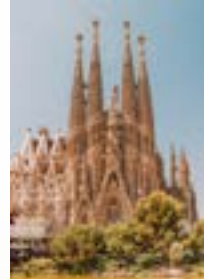
Εικόνα 38. Ιπτάμενες κατασκευές, Leonardo Da Vinci

### Baroque



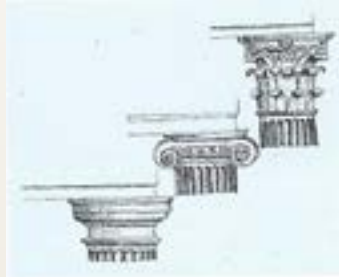
Εικόνα 40. Francesco Borromini, San Carlo alle quattro fontane, Ρώμη, 1641

### Art Nouveau



Εικόνα 42. Antoni Gaudí, Sagrada Família, Φυσικές μορφές σαν διάκοσμοι

### Κλασσική Αρχιτεκτονική



Εικόνα 37. Διάκοσμος κίωνων με φυσική επιρροή. Κέλυφος αχινού-Δωρικός Ρυθμός, Κέλυφος σαλιγκαριού-Ιωνικός Ρυθμός, Φύλλα ακάνθου-Κορινθιακός Ρυθμός.

### Γοτθική Αρχιτεκτονική



Εικόνα 39. Φιλίππο Μπρουνελλέσκι, Santa Maria Della Fiore, 1436, Φλωρεντία, Ιταλία. Το σχέδιο του τρούλλου (από αριστερά στα δεξιά: Εξωτερικό κέλυφος, Εσωτερικό Κέλυφος, Δακτυλωτά δομικά στοιχεία).

### Αυτόματα



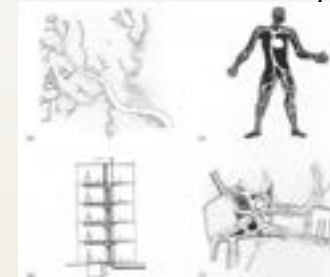
Εικόνα 41. μηχανική πάπια, Jacques de Vaucanson

### Frank Lloyd Wright



Εικόνα 43. Johnson Wax Headquarters, 1936-1939, μανιτάρι

### Le Corbusier



Εικόνα 44. Σύγκριση αρχιτεκτονικής λειτουργίας με αυτή του ανθρώπινου σώματος

### Frei Otto



Εικόνα 45. Προεντεταμένη μεμβράνη

### Buckminster Fuller



Εικόνα 46. Γεωδαιτικός θόλος

### Archigram



Εικόνα 47. One of Ron Herron's 'insect-like' Walking Cities, 1964.

### Bionics



Εικόνα 48. Ο όρος 'βιονικό' παρουσιάστηκε στον Jack E. Steele το 1958, ενώ δούλευε πάνω σε ένα αεροναυτικό διαμέρισμα

### Santiago Calatrava



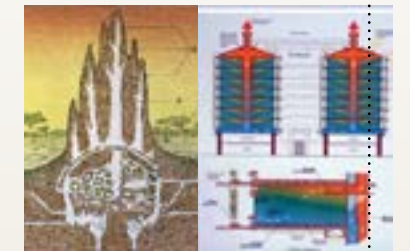
Εικόνα 49. City of Arts and Science, Valencia, 1998

### Felix Candela



Εικόνα 50. L'Oceanogràfic, Valencian, 2003

### Eco-Architecture



Εικόνα 51. Εξαερισμός τερμιτών έμπνευση για το Eastgate office building.

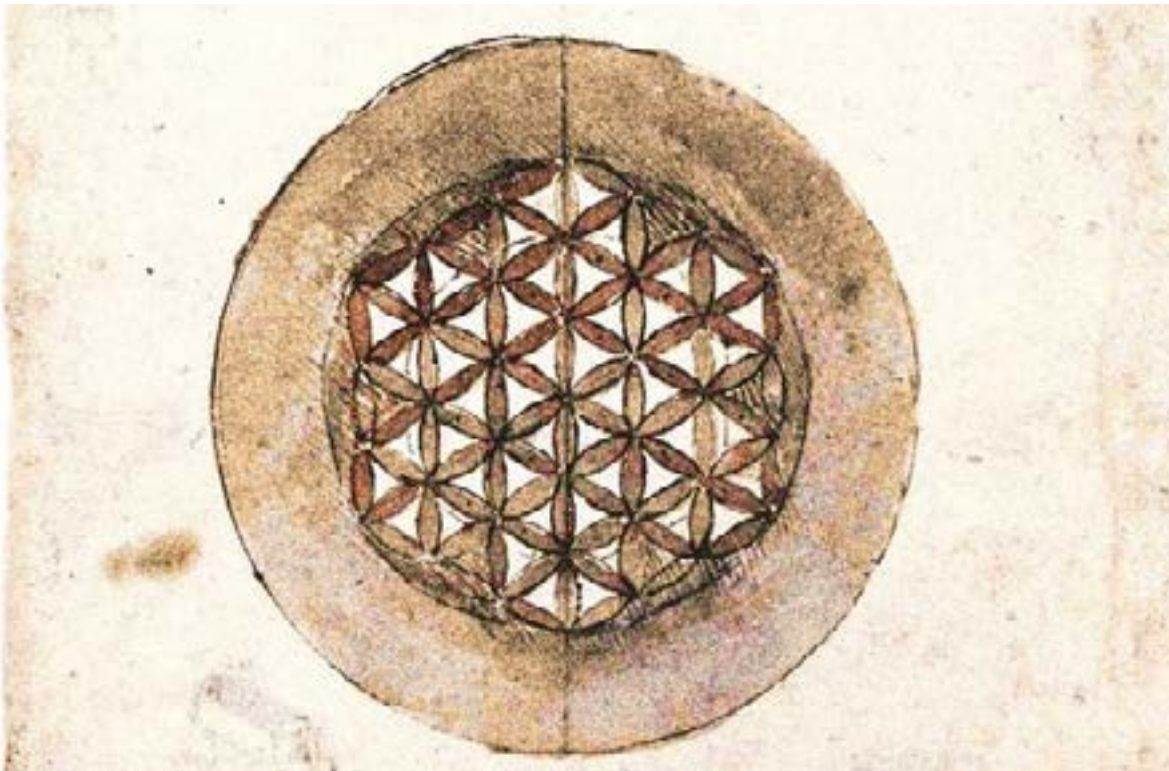


Η αναζήτηση του ανθρώπου για λύσεις στην αρχιτεκτονική και την τεχνολογία μέσα από την φύση ξεκινά από τις απαρχές του. Με την νομαδική ζωή και τις εφήμερες κατασκευές καλυβών που είναι εμπνευσμένες απο φωλιές ζώων μέχρι την σημερινή ρομποτική τεχνολογία. Κατά πλειοψηφία στην ιστορική αναδρομή η επιρροή της φύσης στον σχεδιασμό ήταν είτε διακοσμητική είτε καθαρά μορφολογική.

‘Παρατηρείται έντονη χρήση της αψίδας και των θολωτών κατασκευών. Η αψίδα γεννήθηκε με την κατανόηση της κάλυψης των φυτών και των ζώων και κατασκευάστηκε σαν νευρώσεις σε ένα δίκτυο κλαδιών ή σαν μία μπερδεμένη αταξία ενός φτερού ή ενός πτερύγιου. Ο θόλος εκπροσωπεί την νίκη του ανθρώπου στην κυριαρχία του χώρου χωρίς το πρόβλημα των βαριών υλικών και της δύναμης της βαρύτητας. Οι θολωτές κατασκευές ήταν κύριο χαρακτηριστικό στην Ρωμαϊκή, Βυζαντινή, Ρομανική, Γοτθική και Αναγεννησιακή εποχή και στο Μπαρόκ στυλ. Και συνήθως εκπροσωπεί το υπερφυσικό και την θείκη παρουσία σε χώρους λατρείας.<sup>26</sup>

*‘ I always begin with a circular shape because it is more perfect than any other’*

**Leonardo Da Vinci**



Εικόνα 52. Leonardo Da Vinci, Flower of Life.

26 Senosiain Aguilar, Javier, Bio Architecture, Oxford, 2003, σ. 77-78

Τα αυτόματα του 18ου αιώνα υπήρξαν σαν πειράματα κατανόησης των ζωντανών οργανισμών και εξέφρασαν τη διαμάχη μεταξύ μηχανιστικών και μη ερμηνειών της ζωής. Σκοπός τους ήταν να δοκιμάσουν τα όρια μεταξύ τεχνητής και φυσικής ζωής. Το πιο γνωστό παράδειγμα είναι η μηχανική πάπια του Jacques de Vaucanson, όπου αναπαριστούσε την λειτουργία πέψης μίας πάπιας. Σκοπός αυτής της τεχνολογίας των αυτομάτων δεν ήταν η μορφολογική αναπαράσταση αλλά η μίμηση των ζωτικών λειτουργιών. (τροφή, κατάποση, πέψη και αφόδευση).<sup>27</sup>

Έπειτα στον μοντέρνο κίνημα ο Frank Lloyd Wright και ο Le Corbusier αντιπροσωπεύουν τις δύο βασικές κατευθύνσεις στην προσπάθεια σύνδεσης της αρχιτεκτονικής με τον οργανισμό και τη μηχανή αντίστοιχα. Ο Wright θα πει ότι *“Οποιοδήποτε σπίτι είναι ένα πολύ πιο περίπλοκο, αδέξιο, ιδιότροπο, μηχανικό πλαστογράφημα του ανθρώπινου σώματος”*.

Ο Le Corbusier θα χρησιμοποιήσει βιολογικές συγκρίσεις μεταξύ της φυσιολογίας της αναπνοής και του αερισμού των κτιρίων, του νευρικού συστήματος και των δικτύων ηλεκτρικών παροχών ή ακόμα και μεταξύ της κυκλοφορίας του αίματος και της κυκλοφορίας των ανθρώπων και των αυτοκινήτων στην πόλη. Στόχος του ήταν η αρμονική ένταξη της αρχιτεκτονικής στο περιβάλλον.

Μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο η βιομηχανική στην αρχιτεκτονική ακολούθησε μια πιο κυριολεκτική κατεύθυνση καθώς συνδέθηκε με το αίτημα για προσαρμοστικότητα στην αλλαγή και στην απροσδιοριστία. Το 1970 ο Peter Cook θεώρησε ότι τα κτήρια και ο αστικός σχεδιασμός θα πλεονεκτούσαν αν ενσωμάτωναν χαρακτηριστικά βιολογικών οργανισμών. Οι Archigram δανείστηκαν από την βιολογία τον όρο της “μεταμόρφωσης”, όπου την όρισαν ως την συνεχή εξέλιξη από μία κατάσταση σε μία άλλη. Πάντοτε ζωντανή, αλλά ποτέ ίδια. Πάντοτε σε μια μεταβατική κατάσταση.<sup>28</sup>

Στην συνέχεια ο Frei Otto με την αρχιτεκτονική καινοτομία των ελαφρών κατασκευών και τα στερεά διπλής καμπυλότητας, εμπνευσμένα απο φυσικούς μηχανισμούς. Ακολουθώντας ο Buckminster Fuller πρόσθεσε στην αρχιτεκτονική του δομές που συναντάμε στη φύση.

‘Ο Calatrana εντάσσεται στην βιομηχανική αρχιτεκτονική όχι επειδή αντιγράφει τις μορφές της φύσης, αλλά επειδή χρησιμοποιεί τις ίδιες κατασκευαστικές λύσεις που υιοθετεί από την φύση.

*‘Working with isostatic structures almost inevitably takes you into the schematic diagrams of nature.’<sup>29</sup>*

27 Γιαννούδης Σωκράτης, Προσαρμόσιμη αρχιτεκτονική: δυνατότητες και παράγοντες σχεδιασμού μεταβαλλόμενων και “ευφών” χώρων, Αθήνα, 2012, σ. 258

28 ο.π σ. 216-217

29 Senosiain Aguilar, Javier, Bio Architecture, Oxford, 2003, σ. 123

‘Στο δεύτερο μισό του 20ου αιώνα, όπου η τεχνολογία και οι μηχανές καταλαμβάνουν μεγάλο μέρος της ζωής των ανθρώπων, στόχος πλέον είναι να δωθεί στα κτίρια η ευαισθησία και η ευελιξία των ζωντανών συστημάτων. Το οποίο έγινε εφικτό με την βοήθεια της τεχνολογία όπου θα μπορούμε πλέον να μιλάμε για κτίρια που μιμούνται ζωντανά συστήματα για να αντιλαμβάνονται και να αντιδρούν σε περιβαλλοντικά ερεθίσματα. Μια τέτοια προσπάθεια ήταν το έργο Ada intelligent space. Στόχος ήταν μια ζωντανή αρχιτεκτονική ένα περιβάλλον που θα μπορεί να συνομιλεί με τον επισκέπτη και να αλληλεπιδρά.<sup>30</sup>

Κατά τον 21ο αιώνα και με στόχο την αντιμετώπιση της περιβαλλοντικής απειλής και την μόλυνση του περιβάλλοντος αναπτύχθηκε μια οικολογική και βιοκλιματική, η ‘πράσινη’ αρχιτεκτονική.

Τα τελευταία χρόνια όμως και με την διαθέσιμη τεχνολογία έχουν γίνει προσπάθειες αποκωδικοποίησης των μηχανισμών της φύσης και ουσιαστική ένταξη αυτών σε υλοποιημένα έργα.

‘Η πιο πρόσφατη προσέγγιση βιομίμησης που θα μελετηθεί στην συνέχεια είναι αυτή του Achim Menges, όπου θεωρεί πως για να δημιουργηθεί η βιομηχανική γενετική διαδικασία χρειάζεται αλληλεπίδραση με το υλικό και το περιβάλλον. Και για αυτό προτρέπει τους ερευνητές να μελετήσουν μοτίβα συμπεριφοράς σε σχέση με το περιβάλλον. Χρειάζεται διαμόρφωση που περιλαμβάνει την φωτεινότητα, την θερμοδυναμική, τον ήχο και άλλους παράγοντες με παρόμοιες ιδιότητες. Η βιομίμηση περιλαμβάνει και κάποια επιπλέον στοιχεία τα οποία είναι στην φυσική τους μορφή, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, οι εσωτερικές δυνάμεις και συχνότητες.<sup>31</sup>

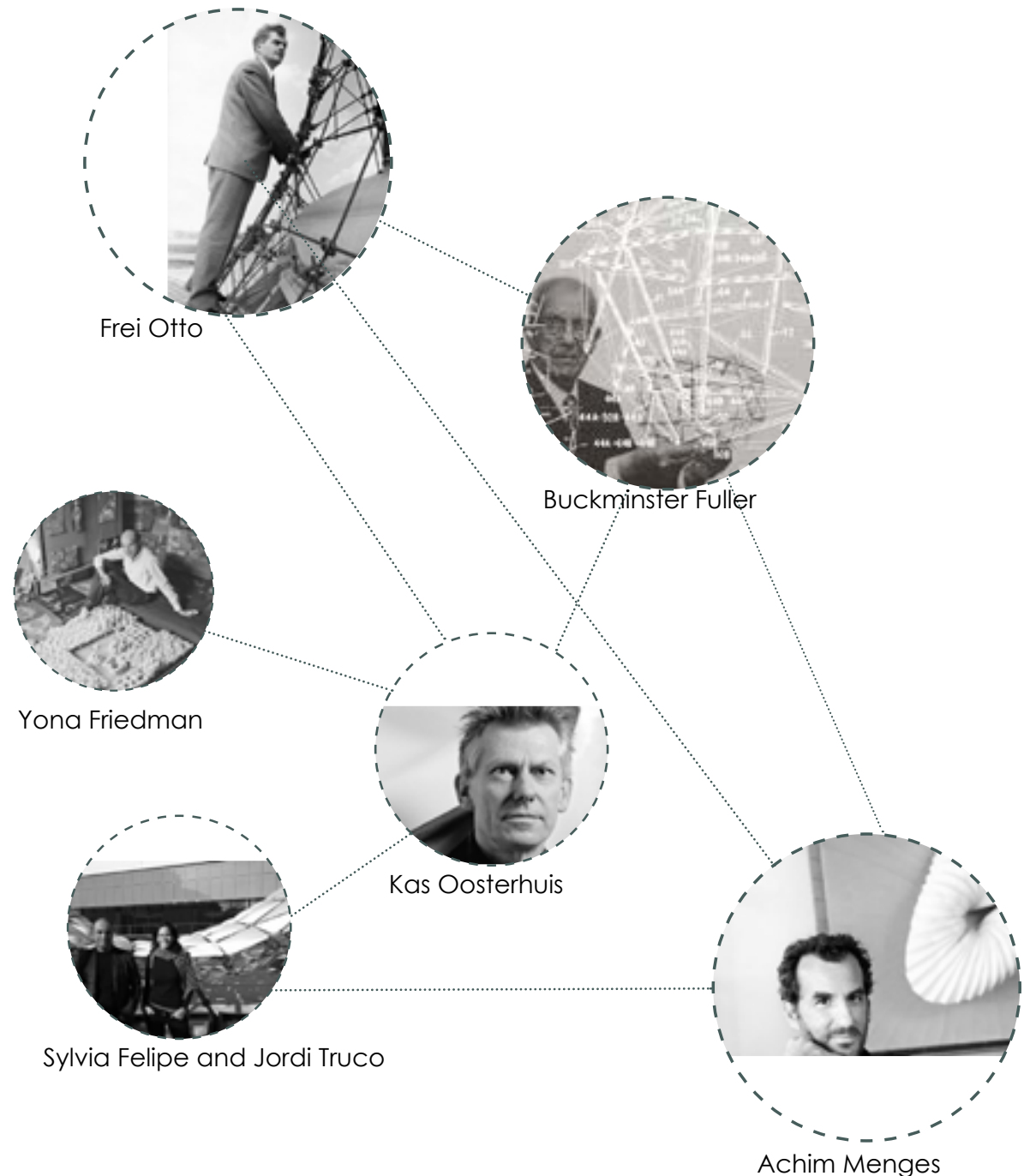


Εικόνα 53. ADA The Intelligent Room

<sup>30</sup> Γιαννούδης, Σωκράτης, Προσαρμόσιμη αρχιτεκτονική : δυνατότητες και παράγοντες σχεδιασμού μεταβαλλόμενων και “ευφυών” χώρων, Αθήνα, 2012, σ 219

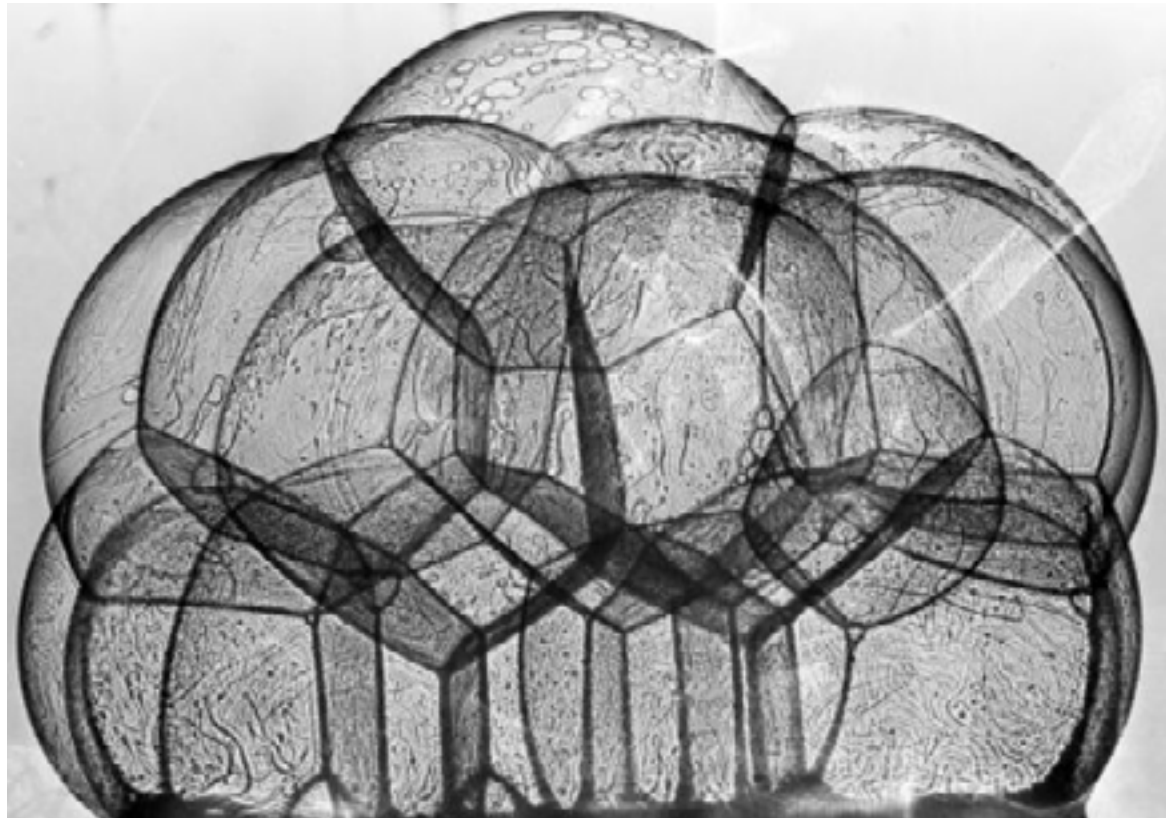
<sup>31</sup> Michael Hensel, Achim Menges and Michael Weinstock, Techniques and Technologies in Morphogenetic Design, London, 2006, σ. 45

## 2.2 Αρχιτέκτονες που χρησιμοποίησαν την βιομίμηση σαν συνθετικό στοιχείο στον σχεδιασμό τους.



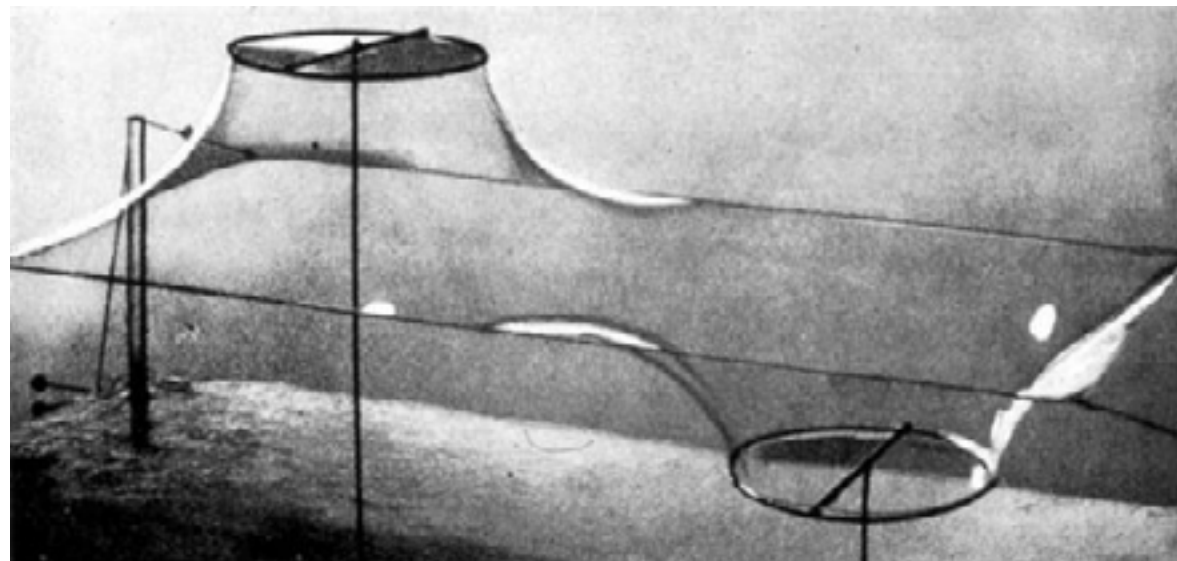


### 2.2.1. Frei Otto



Εικόνα 60. Σαπουνόφουσες.

Εικόνα 61. Πείραμα με Σαπούνι.

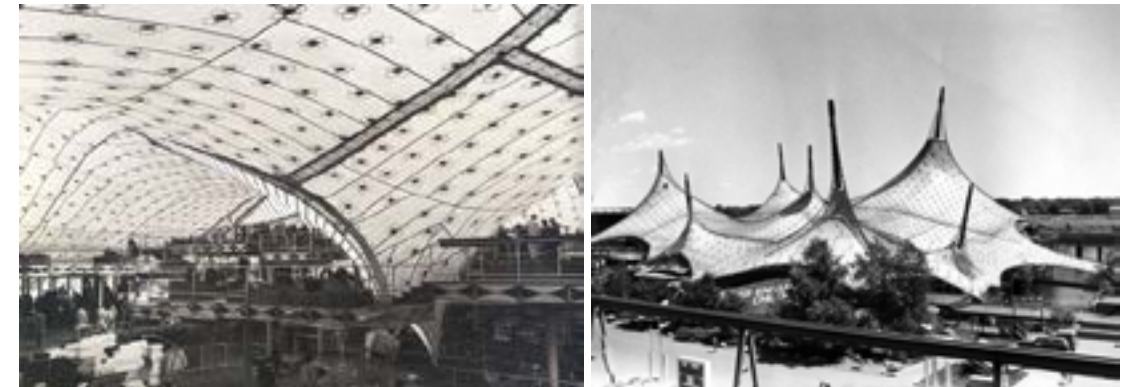


Ο πρώτος που εισήγαγε την λογική της φύσης στον σχεδιασμό ήταν ο Frei Otto με τις ελαφρές κατασκευές.

Η ιδέα των ελαφρών κατασκευών ξεκίνησε και από την μοντέρνα αρχιτεκτονική της δεκαετίας του '20 με τα αεροπλάνα, τα πλοία και τις νομαδικές τέντες αλλά και από το τέλος του 2ου παγκοσμίου πολέμου.

Ο Frei Otto ανέπτυξε την θεωρία του η οποία ήταν και κοινωνικής φύσης στην αρχιτεκτονική, με το μότο “ *with lightness against brutality*”

Η Γερμανική ρανβίλιον στο Μόντρεαλ το 1976 ήταν η πρώτη ευκαιρία να καταλάβει το όραμά του στην μεγάλη κλίμακα.



Εικόνα 62. Frei Otto, German Pavilion, 1967, Montreal World Expo, 'Εμπνευση της κατασκευής είναι ο ιστός αράχνης.

Εικόνα 63. Προοπτική όψη του περιπτέρου.

Οι ελαφρές κατασκευές και οι κατασκευές με την χρήση λιγότερων υλικών άρχισαν να συζητούνται, ειδικά μετά την βιομηχανοποίηση και την αυξημένη χρήση μετάλλου και γυαλιού, που αποτελούσαν ένδειξη μοντερνισμού. Η διαφάνεια που πρόσφεραν αυτές οι κατασκευές ήταν μια νέα πρόταση που τα διαφοροποιούσε από τα βαριά συμπαγή κτίρια την Ναζιστικής εποχής.<sup>32</sup>

Το βασικό για τον Frei Otto δεν ήταν να εντυπωσιάσει με την κλίμακα και την διαφάνεια των ελαφρών κατασκευών, το θεμελιώδες για εκείνον ήταν η σύνδεση της κατασκευής με τους ανθρώπους και οι ποιότητες που τους προσφέρει αυτή η λύση.

*“Buildings are ‘human’ only when they promote peaceful human co-existence”*

Αυτός ήταν και ο λόγος για τον οποίο ο Frei Otto δεν ήταν ευχαριστημένος με τις λύσεις που πρόσφερε και ο λόγος που τον έκανε να αναζητήσει απαντήσεις στην φύση.<sup>33</sup>

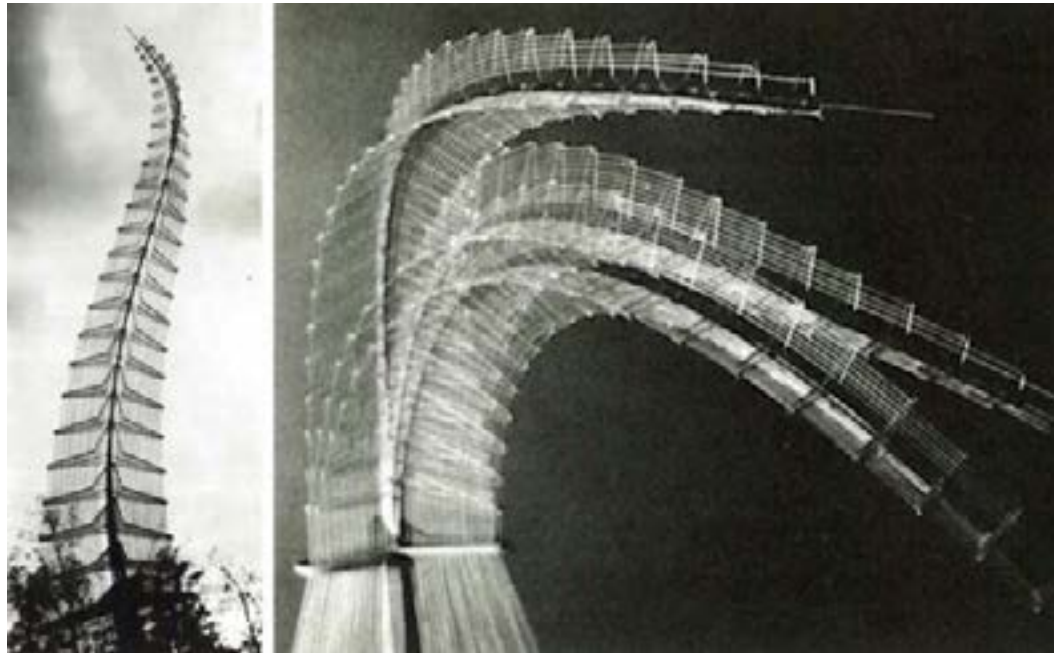
32 Winfried Nerdinger, Frei Otto : complete works : lightweight construction, natural design, Basel Boston, 2005, σ. 11

33 ο.π, σ. 12

‘Έστρεψε, λοιπόν την έρευνά του στην κατανόηση των “φυσικών κατασκευών”, με σκοπό να κατανοήσει πλήρως την διαδικασία της αυτο-οργάνωσης και της οικονομικής αρχής της φύσης. Εστίασε κυρίως στην κατασκευή και στην δομή.”natural constructions”

“Αυτό που με ενδιαφέρει είναι το βασικό θέμα της αρχιτεκτονικής. Και η δομή είναι η βάση για κάθε αρχιτεκτονική”

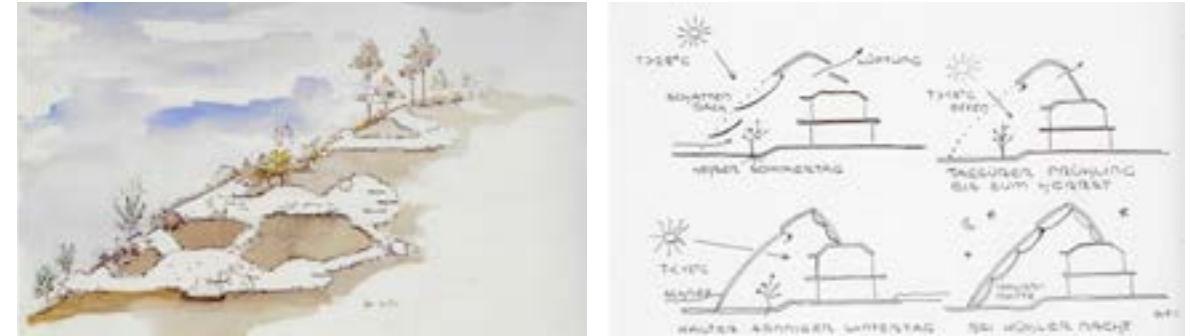
Το όραμά του στόχευε στις εφελκυσόμενες τέντες με την ελάχιστη δυνατή κάλυψη επιφάνειας. Για εκείνον, η δουλειά του στις φυσικές κατασκευές είναι ένα μέρος της αναζήτησης της μορφής που ακολουθεί τους φυσικούς νόμους, αλλά είναι επίσης και μέρος ενός μεγαλύτερου οράματος, που στόχος είναι η ειρηνική και ελεύθερη κοινωνία που βρίσκεται σε αρμονία με την φύση.



Eikóna 64.flexible tower or monumental column, 1936.

Στο έργο του flexible tower (ελαστικός πύργος), 1963 σχηματίστηκε από δίσκους που μοιάζουν με σπονδύλους σε συμπίεση, και αυτό που το κρατά στην σωστή θέση είναι τα καλώδια. Με το να μακραίνει ή να κονταίνει αυτά τα καλώδια η κατασκευή μπορεί να καμπυλώνει και να περιστρέφεται, όπως ακριβώς και ο ανθρώπινος σπόνδυλος, ή όπως ο σπόνδυλος οποιουδήποτε θηλαστικού ζώου.<sup>34</sup>

34 George Hersey, *The Monumental Impulse: Architecture's Biological Roots*, The MIT Press, 1999, σ.



Εικόνα 65. Σκίτσο ιδέας για κατοικία που αναπτύσσεται εντός του λόφου

Εικόνα 66. Σκίτσα ενέργειας για κατοικία με γυάλινα κινητά στοιχεία

Ακόμα, ήταν από τους πρώτους που χρησιμοποίησε την ηλιακή ενέργεια. Το να χτίζεις οικολογικά για εκείνον σήμαινε πάνω απ' όλα, την βελτίωση του περιβάλλοντος και την δημιουργία ποιότητας ζωής με και μέσα σε κήπους. Σήμαινε προσαρμοστικότητα σε ατομικούς χώρους των ανθρώπων και την μελλοντική δυνατότητα για ενεργειακή χρήση.<sup>35</sup>

Η μέθοδος δουλειάς του είναι βασισμένη στην κλασική τριάδα της επιστημονικής δουλειάς: τον ουσιαστικό συνδυασμό της εμπειρίας, του πειραματισμού και των μαθηματικών.

Άλλη μια πρωτοποριακή αρχή για τον σχεδιασμό του ήταν η αναθεώρηση της άποψης ότι κανένα κτίριο δεν πρέπει να σχεδιάζεται για προσωρινή χρήση. Λαμβάνοντας όμως υπόψιν τον παράγοντα του δυναμισμού και της αρμονίας του κύκλου της ζωής, όπως και τις συνεχείς αλλαγές της κοινωνίας, που χρειάζεται διαφορετικές κατασκευές για διαφορετικές χρήσεις, καταλήγει στην λύση μιας προσωρινής, κτιριακής λύσης.

Ο Frei Otto, λοιπόν “διστάζει να επιδιώξει ένα project αν δεν είναι σίγουρος ότι η πραγματοποίησή του θα είναι αρκετά προσωρινή έτσι ώστε να μην αποτελέσει εμπόδιο για τους ανθρώπους.”

Αυτή του η άποψη δηλώνει μια ευγενή αναρχία μέσω του θανάτου. Μια ντελικάτη επανάσταση ενάντια στην μνημειακή αρχιτεκτονική αναζήτηση. Ένα κτίριο που διαρκεί αιώνια μπορεί να αποδεικνύει για χρόνια πως ένας άνθρωπος ή μια ομάδα ανθρώπων είχαν το δικαίωμα να κυβερνούν τους υπόλοιπους μέσω της διακήρυξης της μονιμότητας.

Η απροθυμία του να 'γεμίσει την επιφάνεια της γης με κτίρια που διαρκούν' επιτρέποντας στις επόμενες γενιές να μεταχειριστούν την γή όπως εκείνοι επιθυμούν και να μην υποχρεώνονται σε διεκδικήσεις κυριαρχίας των παλαιότερων γενεών<sup>36</sup> τον οδήγησε στη δημιουργία εφήμερων και πειραματικών κατασκευών.

35 Winfried Nerdinger, *Frei Otto : complete works : lightweight construction, natural design*, Basel Boston, 2005 σ. 59-61

36 <https://magazine.sangbleu.com/2014/04/29/dead-loads/>



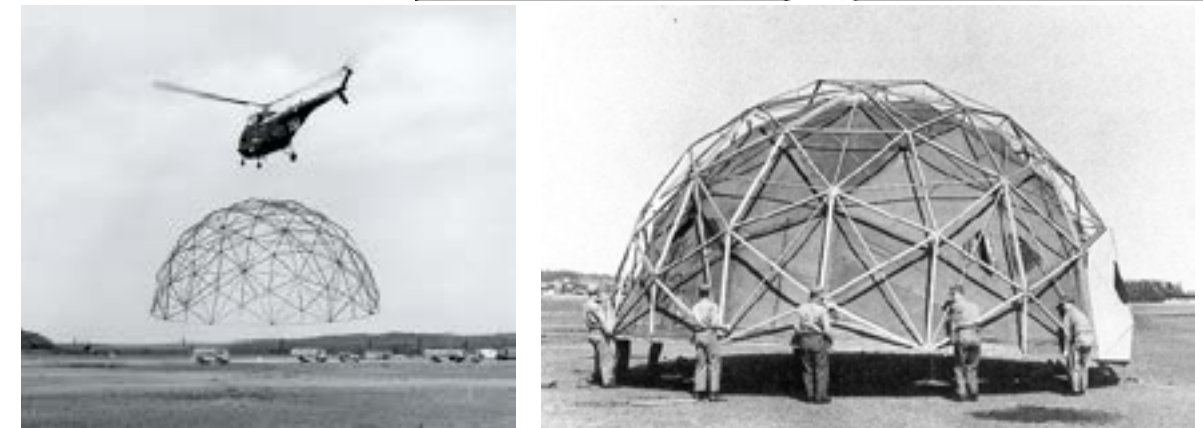
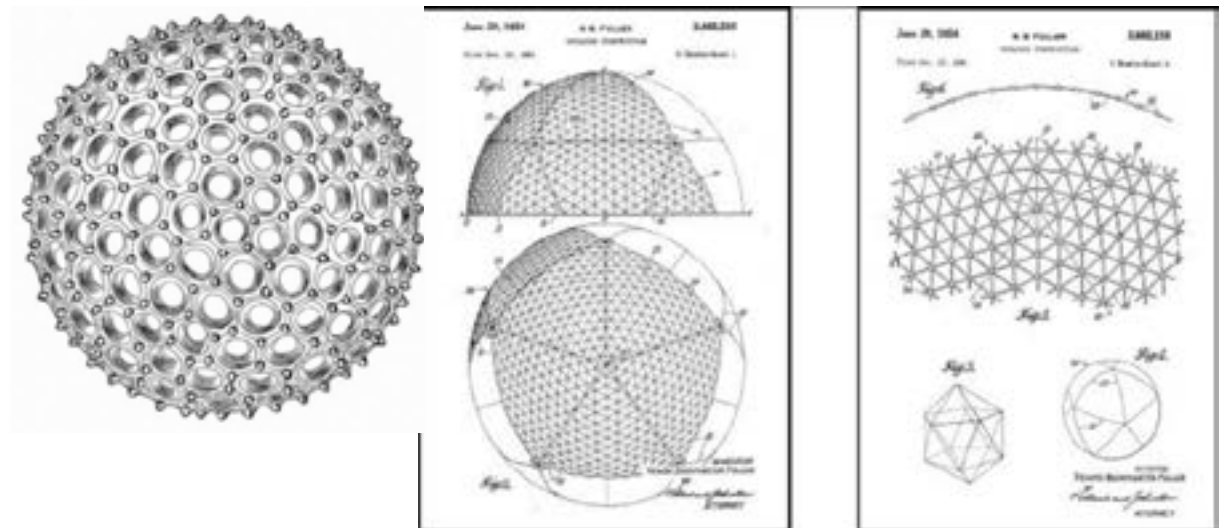
Επομένως, συμπεραίνουμε πως το αντικείμενο μελέτης του Frei Otto είναι οι κατασκευές εκείνες που αποδεικνύουν με ιδιαίτερη σαφήνεια την φυσική, βιολογική και τεχνική διεργασία που αυτά συνεπάγονται. Επιπλέον, σημαντικό είναι και το κοινωνικό κίνητρο που τον ωθεί στην δημιουργία φυσικών κατασκευών (natural constructions) που είναι προσαρμόσιμα, και ελαφριά με την ελάχιστη δυνατή χρήση υλικών.

Ελάχιστοι ήταν εκείνοι που ανέπτυξαν την “φιλοσοφία” του Frei Otto για τις ελαφρές κατασκευές, με τους αντίστοιχους κοινωνικούς συσχετισμούς.<sup>37</sup>

Ένας από αυτούς ήταν ο Buckminster Fuller που όρισε το βάρος των κτιρίων σαν μέτρο για το πρότυπο ανάπτυξης, όχι μόνο της βιομηχανοποίησης αλλά και του ανθρώπινου είδους.

### 2.2.2. Buckminster Fuller

“Τα σχέδια στη φύση κάνουν θαυμάσια μοντέλα.”



37 Winfried Nerdinger, Frei Otto : complete works : lightweight construction, natural design, Basel Boston, 2005, σ. 17



Ο Buckminster Fuller, είναι ο πιο γνωστός αρχιτέκτονας στον σχεδιασμό κατασκευών εμπνευσμένων από την φύση.

Σύμφωνα με τον Fuller, αυτό που κάνει δυναμική τη φύση, λειτουργική και με ανά-λαφρη τεχνολογία είναι ουσιαστικά η “βέλτιστη απόδοση.” Το πιο γνωστό έργο του, ο γεωδαιτικός θόλος είναι εμπνευσμένο από τα μικροσκοπικά πλάσματα γνωστά ως radiolarians(ακτινόζωα) που μελετούσε για αρκετό καιρό.

Ο γεωδαιτικός θόλος (20πλευρο), προκύπτει από τον συνδυασμό εξάγωνων και πεντάγωνων τα οποία συνδέονται δημιουργώντας πλέγμα για να επιτευχθεί η καμπυλότητα.

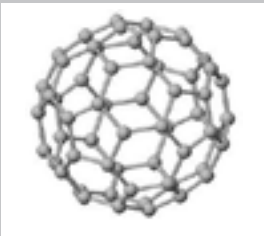
Όσο μεγαλύτερος ο θόλος τόσο οικονομικότε-ρος. Όπως και ο ιστός της αράχνης έχει έναν πολύ μεγάλο λόγο αντοχής προς μάζα υλικού. Ο θόλος πάνω από το Μανχάταν, με δύο μίλια διάμετρο (≈3,2 χιλιόμετρα), απαιτούσε λιγότερο ατσάλι από το πλοίο Queen Mary. Είχε υπολογιστεί πως θα γινόταν απόσβεση του κόστους κατασκευής μέσα σε δέκα χρόνια, μόνο από την εξάλειψη του κόστους του εκχιονισμού των οδών.

Τόσο ελαφριές είναι αυτές οι κατασκευές, που οι μικρότερες από αυτές γίνεται να συναρμολογη-θούν και να μεταφέρονται εναερίως.

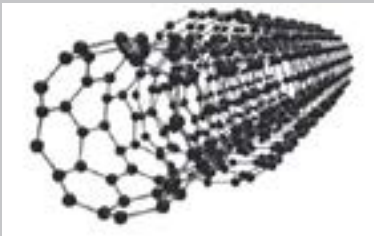


Εικόνα 72. Montreal Biosphere, 1967

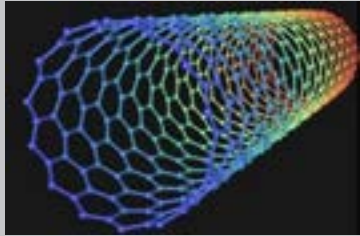
‘Αξίζει ακόμα να αναφερθεί, πως η μελέτη αυτής της δομής της φύσης οδήγησε στην ανακάλυψη ανθρακικών δομών(όπως είναι ο γραφίτης ή οι νανοσωλήνες άνθρακα). Αυτά τα άτομα άνθρακα ονομάστηκαν προς τιμήν του φουλερένια.<sup>38</sup>



Εικόνα 73. C<sub>60</sub>.

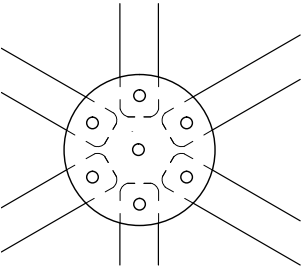
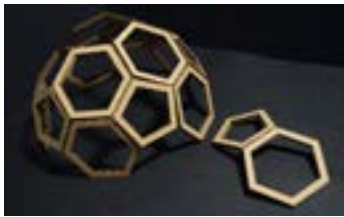
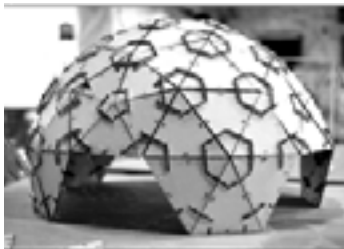


Εικόνα 74. Φουλερένιο σε επέκταση



Εικόνα 75. Νανοσωλήνας

Μελέτη και ανέγερση Γεωδαιτικού θόλου στην πλατεία Κατεχάκη στα Χανιά στα πλαίσια του μαθήματος Ελαφρές Κατασκευές (2017&2018).



Εικόνα 76. Προσωπικό αρχείο

Διάμετρος: 6μ  
Ύψος: 3μ  
Βάρος: 69,8 κιλά  
Αριθμός ξύλινων Μελών :226 τμ.  
Αριθμός Μεταλλικών Εξαρτημάτων: 1260 τμ.

38 <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CE%BF%CF%85%CE%BB%CE%B5%CF%81%CE%AD%CE%B-D%CE%B9%CE%BF>

### 2.2.3. Yona Friedman, Το μανιφέστο της κινητικής αρχιτεκτονικής



Εικόνα 77.Mobile Architecture, 1958

Ο Yona Friedman υποστήριζε, ότι τα κτίρια θα έπρεπε να διαρκούν λιγότερο από τους ανθρώπους, ώστε η κάθε γενιά να κατασκευάζει την δική της εκδοχή. Έτσι προέκυψε η κινητική αρχιτεκτονική.

Για τον Yona Friedman αρχιτεκτονική σημαίνει να ξέρεις πώς να κατασκευάζεις. Όχι μόνο κτίρια: το πεδίο δράσης είναι ευρύ. Μπορούμε να μιλήσουμε για αρχιτεκτονική σε μία ιστορία, σε ένα λογοτεχνικό βιβλίο, σε ένα μουσικό κομμάτι ή και στο ανθρώπινο σώμα. Η χρήση της λέξης αρχιτεκτονική είναι επίσης συχνή και κοινή στο υπολογιστικό επιστημονικό πεδίο "Αρχιτεκτονική" επίσης σημαίνει έλλειψη προκαθορισμένων κανόνων: η ίδια η αρχιτεκτονική σε καθοδηγεί μέσω της δημιουργίας των κανόνων.

*Η "Αρχιτεκτονική" υπονοεί μια αρθρωτή κατασκευή, μια κατασκευή που είναι αρκετή για τον εαυτό της"*

Η προσέγγισή του στην αρχιτεκτονική σύνθεση ήταν top-down. Και υποστήριζε πως κάθε νέα δημιουργία που στηρίζεται σε αιώνιους κανόνες πρέπει να υπόκειται σε μετασχηματισμό και ανανέωση. Μεγάλη σημασία έδινε στο άτομο και το απρόβλεπτο της συμπεριφοράς του.

Σύμφωνα με την θεωρία του υπάρχουν δύο θεμελιώδεις τρόποι να βλέπει κανείς τον κόσμο:

Ο αναλυτικός, που υποστηρίζει πως ο κόσμος είναι μία κανονική συσσώρευση στοιχείων,

και ο ολιστικός, που βλέπει τον κόσμο ως ένα αδιαίρετο σύνολο.

Η "αρχιτεκτονική", ως ανθρώπινο σύστημα, είναι ένας συνδυασμός και των δύο προσεγγίσεων. Είναι αναλυτική για τον τρόπο δημιουργίας μιας κατασκευής και ολιστική για την αξιολόγηση της.

Συνεπώς, για τον δημιουργό η αρχιτεκτονική είναι αναλυτική, ενώ για τον παρατηρητή, χρήστη, είναι ολιστική, είναι ένα έργο τέχνης.

Στόχος του Friedman ήταν να γεφυρώσει αυτούς τους δύο κόσμους και ο παρατηρητής ή χρήστης να πάρει τον ρόλο του δημιουργού, μέσω της διαδικασίας δοκιμής και λάθους (trial and error).<sup>39</sup>

39 Λιονάκη Ελένη, (Απο)κωδικοποιώντας το απρόβλεπτο σύμπαν του Yona Friedman, 2013



## 2.2.4. Kaas Oosterhuis-"Body- buildings"

Ο Oosterhuis θεωρεί πως η ανακάλυψη της μορφής των κτιρίων δεν μπορεί να συνεχίσει να ακολουθεί τα παραδείγματα και τους κανόνες μιας κλασικής πειθαρχίας σε συνδυασμό με απαρχωμένους κώδικες και καθιερωμένες παραδόσεις.

Απορρίπτοντας την κυριαρχία της Πλατωνικής γεωμετρίας με τους απλούς όγκους κύβου, σφαίρας, κυλίνδρου και κώνων σαν βασικά στοιχεία αρχιτεκτονικής, οραματίζεται την αρχιτεκτονική σαν μια εξελικτική, με τεχνολογικά ενισχυμένα μέσα οργάνωσης εκλεπτυσμένων χωρικών δεδομένων και προγραμματισμένων πληροφοριών σε κατασκευαστικά μέσα που συνθέτουν πολύπλοκες γεωμετρίες και πτυχές της ανθρώπινης δράσης.

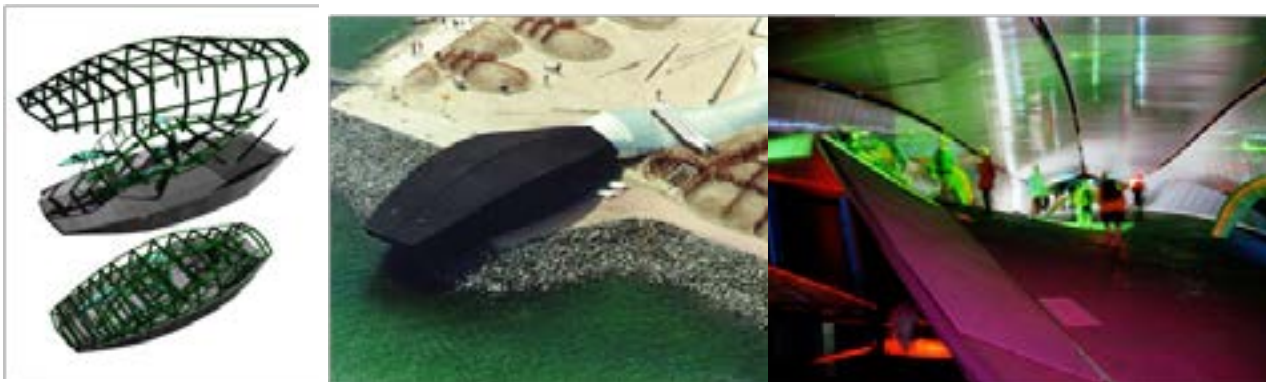
Αυτά τα "body- buildings" ενσωματώνουν κανόνες συμπεριφοράς που απορρέουν από την ενσωμάτωση της μορφής και της πληροφορίας και γίνονται περιβάλλοντα που μπορούν να αναπτύξουν την δική τους νοημοσύνη.

Τα κτίρια γίνονται κατασκευές δεδομένων που δεν μπορούμε να ελέγξουμε ολοκληρωτικά και που μπορούν να επηρεάσουν άμεσα (και ίσως παγκόσμια) το γενικό πλαίσιο σύμφωνα με μια απρόβλεπτη και άγνωστη συμπεριφορά.<sup>40</sup>

Η Saltwater Pavilion ήταν το πρώτο έργο του Oosterhuis που χρησιμοποιεί τις θεωρίες του για co-evolving sentient technologies, techno- ecologies και body-buildings. Όπου αναπτύχθηκε από "γενετικούς" (genetic) χωρικούς κανόνες.<sup>41</sup>

Τον γοήτευε το άγνωστο και το τυχαίο και θεωρούσε τον απόλυτο έλεγχο και την προβλεψιμότητα ως κάτι που ανήκει στο παρελθόν.

Οι κατασκευές που προτείνει ο Oosterhuis και ονομάζει Hyperbodies καθοδηγούνται από πληροφορίες εξωτερικών και εσωτερικών παραγόντων (τοπικούς χρήστες, άλλα Hyperbodies και διαδικτυακούς χρήστες) και είναι ικανές να μεταμορφώνονται σε πραγματικό χρόνο. Είναι δηλαδή κόμβοι ενός ευρύτερου δικτύου αλλαγής και επεξεργασίας πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο.

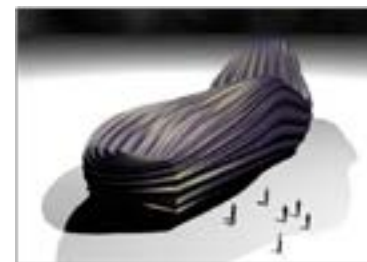


Εικόνα 78. Salt Water Pavilion ,1997

40 Zellner Peter, Hybrid Space: New Forms in Digital Architecture, London, 1999, σ. 70

41 ο.π, σ.74

## \_Hyperbodies. Trans-PORT, Muscle NSA Tower II και Muscle Reconfigured.



Εικόνα 79. TransPORT, proactive Building concept, 1999



Εικόνα 80. Muscle nsa, 2003



Εικόνα 81. Muscle reconfigured, 2003



Ο χρόνος, για τον Oosterhuis, παίζει έναν εξέχων και σημαντικό ρόλο στην αρχιτεκτονική, ως στοιχείο της διαδικασίας του σχεδιασμού, της κατασκευής και της λειτουργίας των κατασκευών.

Η έννοια του "πραγματικού χρόνου" εισάγεται στο έργο του project Trans-Ports, το 1999, το περίπτερο αλλάζει μορφή και περιεχόμενο σε πραγματικό χρόνο. Από τότε αντιμετωπίζει ακόμη πιο συνειδητά το γεγονός ότι η αρχιτεκτονική, που είναι η τέχνη του κτίζειν, και η κατασκευή πρέπει να θεωρούνται ως διαδικασίες που εκτυλίσσονται σε πραγματικό χρόνο, διαδικασίες που δεν σταματούν ποτέ, διαδικασίες που είναι εκτελέσιμες. Η σχεδιαστική διαδικασία, για τον Oosterhuis, μετατρέπεται σε ένα ειδικά σχεδιασμένο συνθετικό παιχνίδι που παίζεται από τους εμπλεκόμενους σε πραγματικό χρόνο.<sup>42</sup>

Το Muscle NSA, είναι η υλοποιημένη εκδοχή του Trans-PORT, είναι μία προσαρμοσμένη εκδοχή που εκτέθηκε στην Μπιενάλε της Βενετίας το 2000 και στο Pompidou στο Παρίσι το 2003. Πρόκειται για ένα εύκαμπτο κέλυφος περιβεβλημένο με ένα δίκτυο αεροπνευματικών ενεργοποιητών, που μπορούν να μεταβάλλουν το μήκος τους υπό την πίεση αέρα αλλάζοντας έτσι το συνολικό σχήμα της κατασκευής.

Όπως φαίνεται και από το όνομά του η κατασκευή έχει στόχο να μιμηθεί την κίνηση των μυών. Σύμφωνα με τον Oosterhuis το Muscle NSA είναι ένα πρότυπο για ένα περιβάλλον που είναι ελαφρά εκτός ελέγχου. Ένα κτήριο που είναι προ- ενεργό, που παίρνει δηλαδή πρωτοβουλίες (έχοντας προγραμματισμένα κίνητρα και συμπεριφορές) και όχι ανταποκριτικό και υπάκουο στον χρήστη.<sup>43</sup>

42 Λιονάκη Ελένη, (Απο)κωδικοποιώντας το απρόβλεπτο σύμπαν του Yona Friedman, 2013, σ. 85.



## \_Muscle Tower II

Το επόμενο έργο του ήταν το Muscle Tower II του Research Group στο TUDelft. Πρόκειται για έναν εύκαμπτο κινητικό πύργο, που ενσωματώνει ένα δίκτυο αερο-πνευματικών ενεργοποιητών Festo Muscle στα σημεία ακαμψίας των πλαισίων του. Κάθε ενεργοποιητής μπορεί να τεντωθεί ή να συρρικνωθεί όταν δείχνει πίεση αέρα και έτσι να κάνει την κατασκευή συνολικά να καμφθεί, να ταλαντωθεί ή να συστραφεί.

Και εισήγαγε την Υβριδική (Hybrid) αρχή που είναι, νέοι τύποι κατασκευών που εγείρονται απο τα απτά και ενστικτώδης στοιχεία στον δημόσιο και ιδιωτικό χώρο με το να αντιλαμβάνονται φυσικές και νοητικές αντιδράσεις.

Θα μπορούσε να θεωρηθεί και ως η εξέλιξη του flexible tower του Frei Otto με την προσθήκη μιας ρομποτικής τεχνολογίας για αυτόματη λειτουργία.

Το έργο φτιάχτηκε για διαφημιστικούς σκοπούς, μπορεί να αντιλαμβάνεται την παρουσία του ανθρώπου που βρίσκεται σε κοντινή απόσταση, στρέφεται και "σκύβει" (κάμπτεται) προς το μέρος του.

Ο Oosterhuis αναφέρει:

*"Δεν σχεδιάζουμε κτήρια όπως το Muscle και τα Trans\_Ports για να ενοχλήσουμε τους ανθρώπους, αλλά μάλλον για να προσφέρουμε ένα φυσικό αίσθημα αργά μεταβαλλόμενων συνθηκών. Το κτίριο μεταμορφώνεται αργά, όπως ο καιρός. Κάποια στιγμή μπορεί να εκραγεί όπως μια καταιγίδα, αλλά αυτό λειτουργεί έτσι ώστε να εκτιμήσουμε περισσότερο τη σιωπή μετά από την καταιγίδα."*<sup>44</sup>

Η Υβριδική (Hybrid) αρχή είναι: νέοι τύποι κατασκευών που εγείρονται απο τα απτά και ενστικτώδης στοιχεία στον δημόσιο και ιδιωτικό χώρο με το να αντιλαμβάνονται φυσικές και νοητικές αντιδράσεις.



Εικόνα 82. Muscle Tower II, Hyperbody Research group, 2004.

<sup>43</sup> Γιαννούδης, Σωκράτης, Προσαρμόσιμη αρχιτεκτονική : δυνατότητες και παράγοντες σχεδιασμού μεταβαλλόμενων και "ευφυών" χώρων, Αθήνα 2012, σ144-148

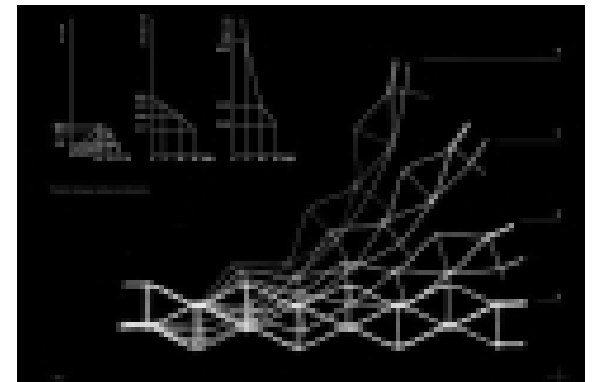
<sup>44</sup> ο.π σ. 239-242

## 2.2.5. HybGrid/ Sylvia Felipe and Jordi Truco, 2010.

Η Hybgrid έρευνα εστίασε στην ανάπτυξη μιας μεθόδου αναζήτησης μορφής της οποίας η τελική μορφή θα είναι αποτέλεσμα της τάσης συμπεριφοράς και της τοπικής κίνησης των διασυνδεδεμένων στοιχείων. Πρόκειται για ένα χωροδικτυωματικό σύστημα ανταλλαγής φορτίων που στόχο έχει να δημιουργηθεί ένα διαδραστικό κέλυφος.

Στόχος της έρευνας ήταν η κατασκευή να μεταβάλλεται και να μην ορίζεται ως μια συγκεκριμένη μορφή, επίσης σημαντικό ήταν να χρησιμοποιεί πλήρως τις δυνατότητες των υλικών.

Με την επέκταση και των βιδωτών κινητών ράβδων επιτρέπεται η μεταβολή και η καμπυλότητα του υλικού.<sup>45</sup>



Εικόνα 83. AA Emergent Technologies and Design (M. Hensel, A. Menges, M. Weinstock), Sylvia Felipe and Jordi Truco, Architectural Association, London, 2002-03

<sup>45</sup> <http://www.achimmenges.net/?p=4407>

### 2.3 Οικολογική Προσέγγιση

‘Δεδομένου της ανεξέλεγκτης κλιματικής αλλαγής μοιάζει επιτακτική η αναζήτηση δραστικών λύσεων και απο την πλευρά της αρχιτεκτονικής.

Έως τώρα οι προσπάθειες για περιβαλλοντικό σχεδιασμό, με την ονομασία βιώσιμος σχεδιασμός, αφορούν μια μεταγενέστερη επεξεργασία και βελτιστοποίηση και δεν αποτελούν μέρος της παραγωγικής διαδικασίας. Ο Michael Hensel και ο Achim Menges στο άρθρο *Differentiation & Performance: Multi- Performance Architectures and Modulated Environments* εξηγούν την ανάγκη για μια οικολογική νόηση της αρχιτεκτονικής που προάγει τη διαφοροποίηση των περιβαλλοντικών συνθηκών μέσα από μια «μορφολογική νοημοσύνη» αποδίδοντας έτσι όχι μόνο ένα νέο χωρικό παράδειγμα αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, αλλά και πολύ πιο βιώσιμο.

Τις τελευταίες δεκαετίες η αρχιτεκτονική έχει μεταφερθεί από τον ομογενοποιημένο καθολικό χώρο προς τον ετερογενή και διασπασμένο. Αυτό αφορά είτε την διαφοροποίηση του χώρου με βάση τις ανάγκες των ενοίκων, είτε την αναζήτηση μιας ‘‘εξωτικής μορφής’’ διαφοροποιημένης σε έκφραση και χωρητικότητα. Παρ’ ότι οδηγούμαστε σε μια διαφορετική οργάνωση χώρου, καμία από τις παραπάνω σύγχρονες προσεγγίσεις δεν τείνει να επαναπροσδιορίσει τα υλικά και οικοδομικά συστήματα όπως και τις ανάγκες του εσωτερικού κλίματος, στοιχεία τα οποία έχουν διατηρήσει τις εγκαθιδρυμένες αρχές της εποχής του Neufert. Ως παράδειγμα χρησιμοποιείται το open-plan, μια οργάνωση εσωτερικού χώρου κτιρίων γραφείων που έφτασε στο απόγειό της στα τέλη της δεκαετίας του 1950, αλλά κατέληξε μέσα από την ομογενοποίηση να είναι η κυρίαρχη διάταξη πολλών ακόμα τύπων κτιρίων, δημόσιων και ιδιωτικών.

Αυτή η τυποποίηση και η καθολική χρήση μόνο-λειτουργικών συστημάτων κάθε άλλο παρά εξυπηρετεί τις ανάγκες των χρηστών. Ταυτόχρονα, αυτού του είδους οι τυποποιημένοι χώροι χρειάζονται μια πληθώρα από συστήματα θέρμανσης, ψύξης, εξαερισμού, φωτός και συντήρησης. Καταλήγουμε, λοιπόν, στο εξής φαινόμενο: ενώ η ενέργεια που απαιτείται για την κατασκευή του κτιρίου -μέσα από τα υλικά και τις διαδικασίες οικοδόμησης- διατηρείται σχετικά χαμηλή, η ενέργεια που δαπανάται για τη λειτουργία του κτιρίου είναι εξαιρετικά υψηλή. Είναι επίσης κατανοητό ότι οι μέχρι τώρα προσπάθειες για βιώσιμη αρχιτεκτονική ακολουθούν μια αδιέξοδη πορεία, καθώς δεν συμπορεύονται με το σχεδιασμό, αλλά αποτελούν μια μεταγενέστερη διαδικασία που έρχεται να δράσει αναδρομικά, επιδιορθώνοντας και βελτιστοποιώντας τα ήδη σχεδιασμένα μη αποδοτικά συστήματα.

Οι Hensel και Menges προτείνουν σε αυτό μια οικολογική προσέγγιση της αρχιτεκτονικής, που να εμπεριέχει δυναμικές σχέσεις και επαναδιαμόρφωση των υλικών συστημάτων, των συνθηκών του μάκρο- και μικρο-περιβάλλοντος καθώς και της ατομικής ή συλλογικής κατοίκησης. Η εν λόγω πρόταση βασίζεται στη μελετημένη διαφοροποίηση των υλικών συστημάτων και στοιχείων του κτιρίου, πέρα από τα

τυποποιημένα. Η ανάπτυξη ενός εύρους συστημάτων μπορεί να προσδώσει νέες χωρικές διαμορφώσεις και κλιματικές εντάσεις ανάλογες με τις ανάγκες της χρήσης, αλλά και τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά των ίδιων των στοιχείων που απαρτίζουν το κτίριο. Σε αυτή την προσέγγιση η αποδοτικότητα αποτελεί ένα δυναμικό χαρακτηριστικό, που στηρίζεται στη χρήση του πλεονασμού ως μια λανθάνουσα ιδιότητα για την πραγματοποίηση πολλαπλών στόχων και όχι ως μέτρο ασφαλείας.

Ο χειρισμός αυτών των πολύ-λειτουργικών συστημάτων πρέπει να γίνει με γνώμονα τη συμπεριφορά και τις ιδιότητες ανάλογα με το σκοπό που υπηρετούν τοπικά αλλά και ως μέρος μεγαλύτερων συστημάτων. Ο βιώσιμος σχεδιασμός στις μέρες μας οργανώνεται με βάση την ενεργειακή κατανάλωση, τον κύκλο ζωής των υλικών και τη διαχείριση αποβλήτων. Ωστόσο, μια οργανική προσέγγιση της διαμόρφωσης χώρου απαιτεί μια επανεξέταση των αναλυτικών και παραγωγικών μεθόδων και τεχνικών και της μεταξύ τους σχέσεις κατά τη σχεδιαστική διαδικασία.

Σύμφωνα με τους συγγραφείς, μια τέτοιου είδους προσέγγιση είναι δυνατόν να επωφεληθεί από τη μελέτη της φύσης, κυρίως από το γεγονός ότι τα περισσότερα βιολογικά συστήματα αρθρώνονται μέσα από μια υψηλού επιπέδου πού-λειτουργική ενσωμάτωση σε τουλάχιστον οκτώ κλίμακες μεγέθους. Η αρχιτεκτονική μπορεί να λάβει μαθήματα από τη φύση σε πολλά επίπεδα, αφ’ ενός στην ιεράρχηση σε κλίμακες και αφ’ ετέρου στις σταδιακές συνδέσεις μεταξύ κόκαλου και τένοντα στον άνθρωπο, θα δούμε πόσο απέχουν λειτουργικά οι ανθρώπινες κατασκευές, οι οποίες παρουσιάζουν ως επί το πλείστον ασυνέχειες ανάμεσα στα διαφορετικά στοιχεία του, αντιμετωπίζοντας τα σαν διαχωριστικές συναρμογές παρά σαν μέρη ενός όλου.

Μια τέτοια αντιμετώπιση της αρχιτεκτονικής απαιτεί κυρίως ισχυρά εργαλεία και μεθόδους ανάλυσης τόσο της συνολικής συμπεριφοράς των συστημάτων, όσο και των τοπικών χαρακτηριστικών τους, όπου με μηχανισμούς ανάδρασης θα επανατροφοδοτούν το σχεδιασμό. Μια αρχιτεκτονική που βασίζεται στην ανάλυση είναι ικανή να αποδώσει ένα συνδυασμό μιας οργανωμένης δομής με έναν εφήμερο χώρο που παρουσιάζει πολύπλοκες ιδιότητες και συμπεριφορά.<sup>46</sup>

46 [https://issuu.com/iouliamarouda/docs/marouda\\_biomimicry](https://issuu.com/iouliamarouda/docs/marouda_biomimicry), σ. 34-35

## 2.4 Συμπεράσματα

Μετά απο μία συνοπτική ιστορική αναδρομή με επιλεγμένα παραδείγματα, φαίνεται πως η επιρροή της φύσης χρησιμοποιείται κυρίως για την αρχιτεκτονική σημαντικών κτιρίων που συνήθως εκφράζουν το υπερφυσικό ή την ύπαρξη εξουσίας.

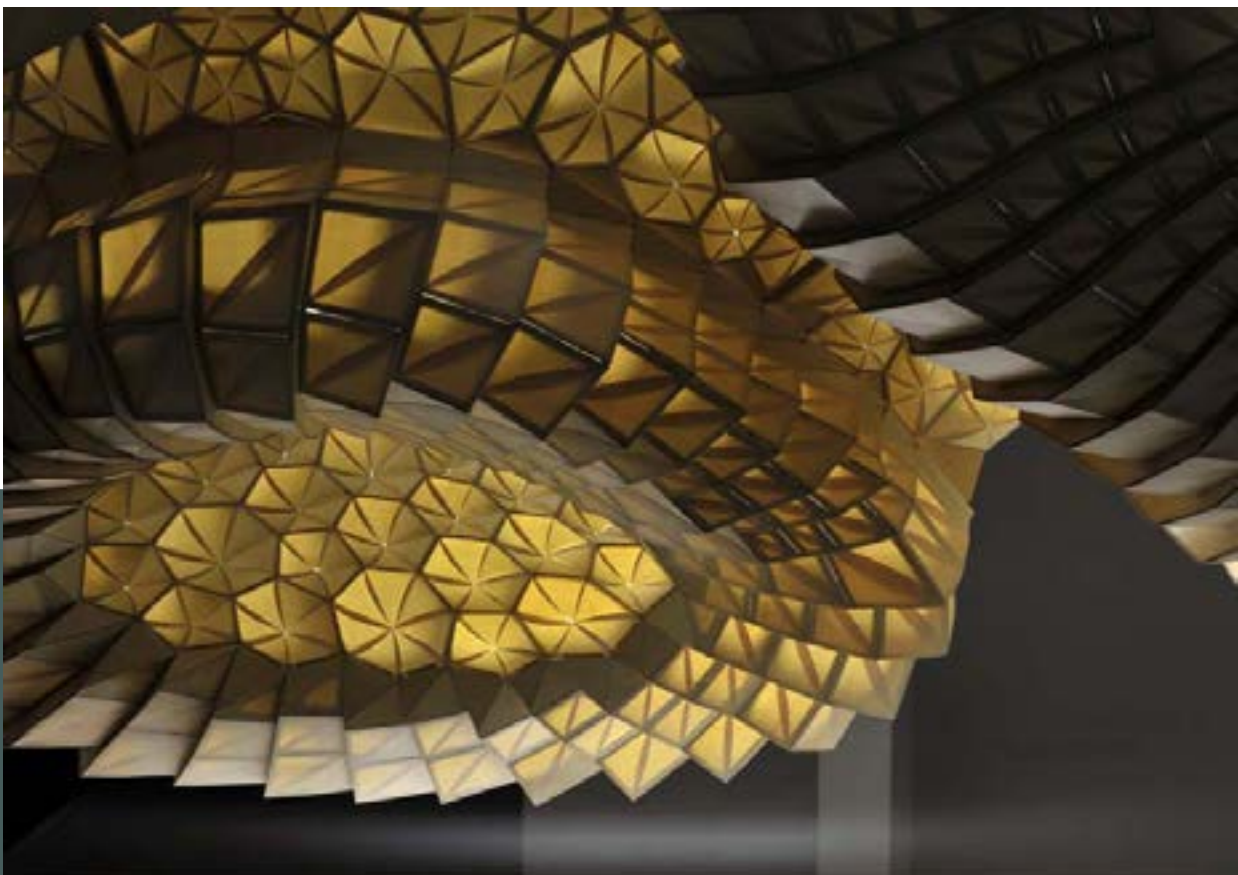
Έπειτα με την ανάπτυξη των High-Tech και BIO- Structures με πρωτοπόρο τον Frei Otto και στην συνέχεια τον Buckminster Fuller, και σε πιο σύγχρονες υβριδικές και ανταποκροτικές κατασκευές του Kas Oosterhuis παρατηρείται μια σημασιολογική αλλαγή όπου η φύση αποτελεί έμπνευση για έναν βιώσιμο σχεδιασμό και οι κατασκευές είναι ευέλικτες και προσαρμόσιμες όπως ακριβώς συμβαίνει και στον φυσικό κόσμο.

Κοινό στοιχείο των προηγούμενων παραδειγμάτων στην αρχιτεκτονική του 20ου αιώνα είναι η ελαφρά κατασκευή, η κοινωνική διάσταση όπου ο άνθρωπος είναι το επίκεντρο του ενδιαφέροντος και η εφημερότητα, πράγμα που θυμίζει τον αρχικό τρόπο κατοίκησης στην νομαδική ζωή με τις εφήμερες καλύψεις.

Τέλος, μια νέα οικολογική προσέγγιση στην αρχιτεκτονική είναι επιτακτικός παράγοντας που δεν πρέπει να αψηφούμε δεδομένου της περιβαλλοντικής και κλιματικής πρόκλησης που αντιμετωπίζουμε.







Κεφάλαιο 3ο  
Achim Menges

### 3.1 Εισαγωγή

‘Για τον Achim Menges προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια βιομηχανική δημιουργική διαδικασία, απαιτείται αλληλεπίδραση του υλικού με το περιβάλλον, και για αυτό οι ερευνητές πρέπει να μελετήσουν μοτίβα συμπεριφοράς και το περιβάλλον. Χρειάζονται διαμορφώσεις που περιλαμβάνουν την φωτεινότητα, την θερμοδυναμική, τον ήχο και άλλες με παρόμοιες ιδιότητες. Η βιομηχανική περιλαμβάνει και κάποια επιπλέον στοιχεία τα οποία είναι φυσικές καταστάσεις, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, οι εσωτερικές δυνάμεις και συχνότητες. Προσθέτοντας στην φυσική κατάσταση την ανάλυση της στρατηγικής και των συμπεριφοράς των στοιχείων κάνουν το αποτέλεσμα όλο και πιο περίπλοκο, για αυτό στα έργα του ξεχώρισαν τις εξής βιομηχανικές αρχές.

- **Προσαρμοστικότητα (Adaptation)**

Μείωση της ταχύτητας ανέγερσης νέων κτιρίων και προσαρμογή της αρχιτεκτονικής σύμφωνα με το περιβάλλον, βοηθώντας στην μείωση των αρνητικών επιδράσεων του ανθρώπινου πληθυσμού στον πλανήτη.

- **Υλικά ως Συστήματα (Materials as Systems)**

Οι φυσικές μορφές έχουν ιεραρχίες στις οποίες μερικά στοιχεία και οικοδομικά συγκροτήματα εξυπηρετούν τα άλλα και υλικά έχουν διαφορετική αντίδραση κάτω από άλλα σενάρια. Τα βιολογικά συστήματα είναι αλληλένδετα και αλληλοεξαρτώμενα, είναι φτιαγμένα από εύθραυστα υλικά, τα οποία απαρτίζουν ανθεκτικές και δυναμικές κατασκευές. Οι ιδιότητες των φυσικών υλικών διαφέρουν κατά πολύ αν τις συγκρίνεις με τις ιδιότητες των τεχνητά κατασκευασμένων υλικών.

- **Εξέλιξη (Evolution)**

Η εξέλιξη ωθεί τα οικοσυστήματα να επιβιώσουν, χρησιμοποιώντας ένα συνεχώς δυναμικό περιβάλλον. Κάθε είδος έχει δύο κοινά χαρακτηριστικά: Πρώτον, λειτουργεί μέσω διαφοροποιημένων χρονικών πλαισίων, και Δεύτερον, η ύπαρξή τους οφείλεται στην ταχύτερη εμβρυολογική αναπτυξιακή διαδικασία που τα μετατρέπει από ένα και μοναδικό κύτταρο σε ένα πλήρως διαμορφωμένο ενήλικο, και αυτό συνεχίζεται από γενιά σε γενιά.

- **Ανάδυση (Emergence)**

Τα δυναμικά φυσικά συστήματα συμπεριλαμβανομένου των βιο-μορφών, του κλίματος, και της τοπολογικής μορφής, φανερώνουν πολλαπλά χαρακτηριστικά, τα οποία είναι σημαντικά για την μελέτη της διαδικασίας της ανάπτυξης. Οι περισσότερες έρευνες δείχνουν πως οι μορφές ζωής, οι κλιματικές συνθήκες και χαρακτηριστικά της γης σταδιακά εμφανίζουν πως η τωρινή τους μορφή και διεργασία δεν έχει φτάσει στο τέλος της. Αρκετοί ορισμοί της αναπτυξιακής διαδικασίας και των εξελικτικών σταδίων του βιολογικού κόσμου γύρω μας έχει αποκαλυφθεί. Επιστήμονες έχουν βρει αποδείξεις για πράγματα που πιστευόνταν πριν μισό αιώνα. Σε αυτό το πλαίσιο, μια σημαντική συνεισφορά είναι αυτή του De Wolf και του Holvoet όπου όρισαν την ανάπτυξη ως σύστημα, το οποίο λαμβάνει χώρα με την παρουσία ως

“συναφής αναδεδύσεις”-που περιλαμβάνει την ιδιότητα, την συμπεριφορά και την δομή- σε μακρο- κλίμακα, τα οποία δυναμικά προκύπτουν από τα αμοιβαία αλληλεπιδρούμενα της μικρο-κλίμακας. Αυτός ο τύπος ανάπτυξης είναι μοναδικός και απαρτίζεται από μοναδικά ξεχωριστά μέρη του συστήματος.

Ο Fromm υποστηρίζει πως η διαδικασία της ανάπτυξης δημιουργεί ένα βασικό ερώτημα “ πως δημιουργούνται τα πράγματα;”.

Αυτό που θέλουμε να μάθουμε είναι η λογική πίσω από αυτό, επειδή κυρίως, τα πράγματα που αναδύονται είναι χωρίς προφανής λόγους. Επιπρόσθετα σε αυτό ο Hensel ορίζει πως αυτή η ανάπτυξη των ποικίλων βιολογικών μορφών πρέπει να τα εξετάσουμε διαφορετικά από την κατασκευή τους και των υλικών τους. Η εκτέλεση της ανάπτυξης προκύπτει από περίπλοκες ιεραρχίες υλικών. Όταν οι μορφές, οι δομές και τα υλικά αλληλεπιδρούν, η συμπεριφοράς τους δεν μπορούν να προβλεφθούν από την ανάλυση μόνο του ενός από αυτά.

- **Σχήμα και Συμπεριφορά (Form & Behavior)**

Ο Hensel πιστεύει ότι οι βιολογικές συμπεριφορές και μορφές είναι επακόλουθο μιας διαδικασίας η οποία δημιουργεί, επεξεργάζεται και διατηρεί την δομή όπως και την μορφή των ειδών -και μη-βιολογικών ειδών επίσης- και δημιουργεί περίπλοκες ανταλλαγές οργανισμού-περιβάλλοντος. Επιπλέον, σχεδόν κάθε είδος μπορεί να συνεχίσει την αναπαραγωγή με το να αλλάξει την συμπεριφορά του, για αυτό, η συμπεριφορά και η μορφή είναι πρακτικά αλληλένδετα.

Ο Badarnah & ο Kadri συμπληρώνουν, ότι επιβεβαιωμένα το σχήμα και η μορφολογία είναι στοιχεία μεταφερόμενα από την φύση στην αρχιτεκτονική. Επιπλέον το σχήμα κάθε οργανισμού επηρεάζει την συμπεριφορά του, πράγμα που προσφέρει διαφορετικά αποτελέσματα κάτω από διαφορετικές περιστάσεις. Οι συμπεριφορές είναι γενικώς μη-γραμμικές και ειδικώς ανάλογες σε κάθε κατάσταση. Κατά τον Kniprers και τον Speckan οι κανόνες της μορφής και της λειτουργίας έχουν την δυνατότητα να ωθήσει του σχεδιαστές, τους μηχανικούς και τους αρχιτέκτονες να δημιουργήσουν καινοτόμες αρχιτεκτονικές σχεδιαστικές στρατηγικές και να τις εφαρμόσουν τεχνικά.

Προσδιορίζοντας ανθρώπινες ανάγκες ή σχεδιαστικά προβλήματα και βρίσκοντας λύσεις με πειραματισμό σε βιολογικά είδη είναι δύο βασικά στάδια της διαδικασίας του βιομηχανικού σχεδιασμού. Λόγω του ότι τα είδη έχουν ειδικές συμπεριφορές, χαρακτηριστικά, και λειτουργίες η προσαρμογή τους στον ανθρώπινο σχεδιασμό δημιουργεί την εστίαση σε βασικούς βιολογικούς κανόνες, για αυτό επιλέγονται κάποιες ειδικές αρχές για την ανάπτυξη υπολογιστικών στρατηγικών. Οι σχεδιαστές της βιομίμησης λοιπόν ακολουθούν αυτούς τους βιολογικούς κανόνες, οι οποίοι επιφέρουν αρκετά ιδανικά αποτελέσματα.

Η βιομηχανική μέθοδος περιλαμβάνει μια σειρά περιστατικών, τα οποία πρέπει να ακολουθούνται κατά την διάρκεια της σχεδιαστικής φάσης. Βοηθά στην δημιουργία αρχιτεκτονικής χρησιμοποιώντας τα καλύτερα διαθέσιμα υλικά και ορθότερα σε σχέση με την τοποθεσία και την περιβαλλοντική κατάσταση.

Βοηθά στο να φανταστείς βαθύτερα, το οποίο έχει σαν συνέπεια απρόσμενα αποτελέσματα που ανήκουν σε αλγοριθμική ανάπτυξη. Με την έναρξη κάποιου νέου project, οι ειδικοί ξεκινούν με το να ορίζουν τους στόχους, αναλύουν την κατάσταση που είναι σε εξέλιξη και την διαθεσιμότητα των υλικών, προσδιορίζοντας τις κορυφαίες προτεραιότητες, και μελετώντας ειδικά είδη προκειμένου να αλλάξουν τα απαραίτητα για υπολογιστικές στρατηγικές. Έπειτα, καταγράφεται το αποτέλεσμα και γνωρίζουμε μέσω της εκτέλεσης. Τέλος, οι ειδικοί φτάνουν στο επιθυμητό αποτέλεσμα.<sup>47</sup>

Επιπλέον, η δουλειά του Achim Menges είναι στενά συνδεδεμένη με την τεχνολογία. Για τον Menges η τεχνολογία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί απλά για να βελτιστοποιήσει και να διευκολύνει τις ήδη υπάρχουσες διαδικασίες-όπως το αρχιτεκτονικό σχέδιο σε ψηφιακό περιβάλλον ή το χτίσιμο με τούβλα από ρομποτικό εξοπλισμό- αλλά μπορούν να προσφέρουν κάτι νέο, κάτι που δεν ήταν εφικτό μέχρι τώρα. Η άποψη του είναι ότι οι υπολογιστές είναι κάτι παραπάνω από ένα εργαλείο, είναι μία βασική αλλαγή που επεκτείνει τις αισθήσεις και τον τρόπο αντίληψης του σχεδιαστή σε μεγάλο βαθμό.

Ένας παραλληλισμός αυτής της άποψης είναι, το παράδειγμα του Sanford Kwinter που συσχετίζει την μεγάλη αλλαγή που έφερε το μικροσκόπιο και το τηλεσκόπιο στην αντίληψη του ανθρώπου για το πώς φαίνονται τα πράγματα από πολύ κοντά-μόρια- και από που μακριά-ουράνια σώματα-. Επίσης συνεχίζει την μεγάλη έρευνα των φυσικών κατασκευών που ξεκίνησε ο Frei Otto για την ενσωμάτωση του τρόπου που οι φυσικές μορφές βρίσκουν το σχήμα τους στον χώρο, στον σχεδιασμό και στην κατασκευή.

*“Η χαρακτηριστική μορφολογία στην φύση προκύπτει από την οργάνωση της ύλης στον χώρο, την διάταξη των στοιχείων σύμφωνα με τους κανόνες που ενσωματώνουν”*

**Frei Otto**

Άλλος ένας παράγοντας στον σχεδιασμό ακολουθώντας τις αρχές της φύσης σύμφωνα με τον Menges είναι οι περίπλοκες μορφές.

*“Στην βιολογία τα υλικά είναι ακριβά αλλά η μορφή φθηνή. Ωστόσο το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση της τεχνολογίας έως σήμερα.”*

**Julian Vincent.**

Αυτό σημαίνει πως η βιολογία συνήθως επενδύει στην δημιουργία περίπλοκων μορφών που έχουν υψηλή αποδοτικότητα παρά στο να προσθέσει περισσότερα υλικά. Επειδή η μορφή είναι πιο εύκολο να κατασκευαστεί. Πράγμα, πολύ διαφορετικό από τον τρόπο που κατασκευάζουμε τα περισσότερα από τα κτίρια μας.

47 Amal Elstwei, thesis, Computational Generative Design with Biomimicry Towards Morphogenesis in Digital Architecture, 2018, σ. 45-49

Εξίσου σημαντικός παράγοντας είναι και ο πειραματισμός με τα υλικά.

*“Ο πειραματισμός ξεπερνά την μελέτη. Η καινοτομία είναι ο σκοπός( η ειδικότητα επαγγέλματος είναι ένα εργαλείο και για αυτό είναι και δευτερεύον). Οι οδηγίες των επαγγελματιών τεχνικών αναστέλλουν την εμβάθυνση, έτσι το πρώτο που πρέπει να κάνουμε είναι να αναζητήσουμε την εμβάθυνση ενός πιο γενικού στοιχείου -το υλικό.”*

**Joseph Albers**

Αναφέρεται σε νέους τρόπους κατασκευής και καινοτομίας, ενώ είναι προφανές ότι η σύλληψη για την έρευνά του πάνω στα υλικά δεν ήταν αποτέλεσμα μοντέλων σε κλίμακα ή αναπαραστάσεις προϋπαρχόντων ιδεών αλλά ήταν το προσωρινό ' ξεδίπλωμα' της συμπεριφοράς του υλικού στον χώρο και στον χρόνο, το οποίο αποκάλυψε ο σχεδιασμός.<sup>48</sup>

Η μεθοδολογία λοιπόν που προτείνει ο Menges να ακολουθείται είναι αυτή του Co-design (συνεργατικού σχεδιασμού).

Πριν ξεκινήσει η σχεδιαστική διαδικασία ενός project πρέπει η σύνθεση να έχει σαν αρχή την συνεργασία μεταξύ των σχεδιαστικών και μηχανικών μεθόδων ανάμεσα στην διαδικασία ρομποτικής κατασκευής της δομής (fabrication construction process) και στα συστήματα των υλικών (material building systems) έτσι ώστε να πλησιάσεις την πιθανότητα του computation design για ένα υψηλό επίπεδο ενσωμάτωσης.

Αυτό που θα ερευνηθεί στα επόμενα παραδείγματα είναι πως η βιομίμηση σαν αρχή θα συνδυαστεί με την τεχνολογία και με υλικά 'παλιά', όπως το ξύλο και 'νέα', όπως οι ίνες άνθρακα και γυαλιού.

48 [https://www.youtube.com/watch?v=PbgArau\\_4vI&list=PL4TaNvnmk5POyQ\\_DRd-cGlcXrS6VqX8B-c&index=10&t=3379s](https://www.youtube.com/watch?v=PbgArau_4vI&list=PL4TaNvnmk5POyQ_DRd-cGlcXrS6VqX8B-c&index=10&t=3379s)



3.1.1. Χρήσιμοι Ορισμοί

Υπολογιστικός σχεδιασμός(Computational design) :

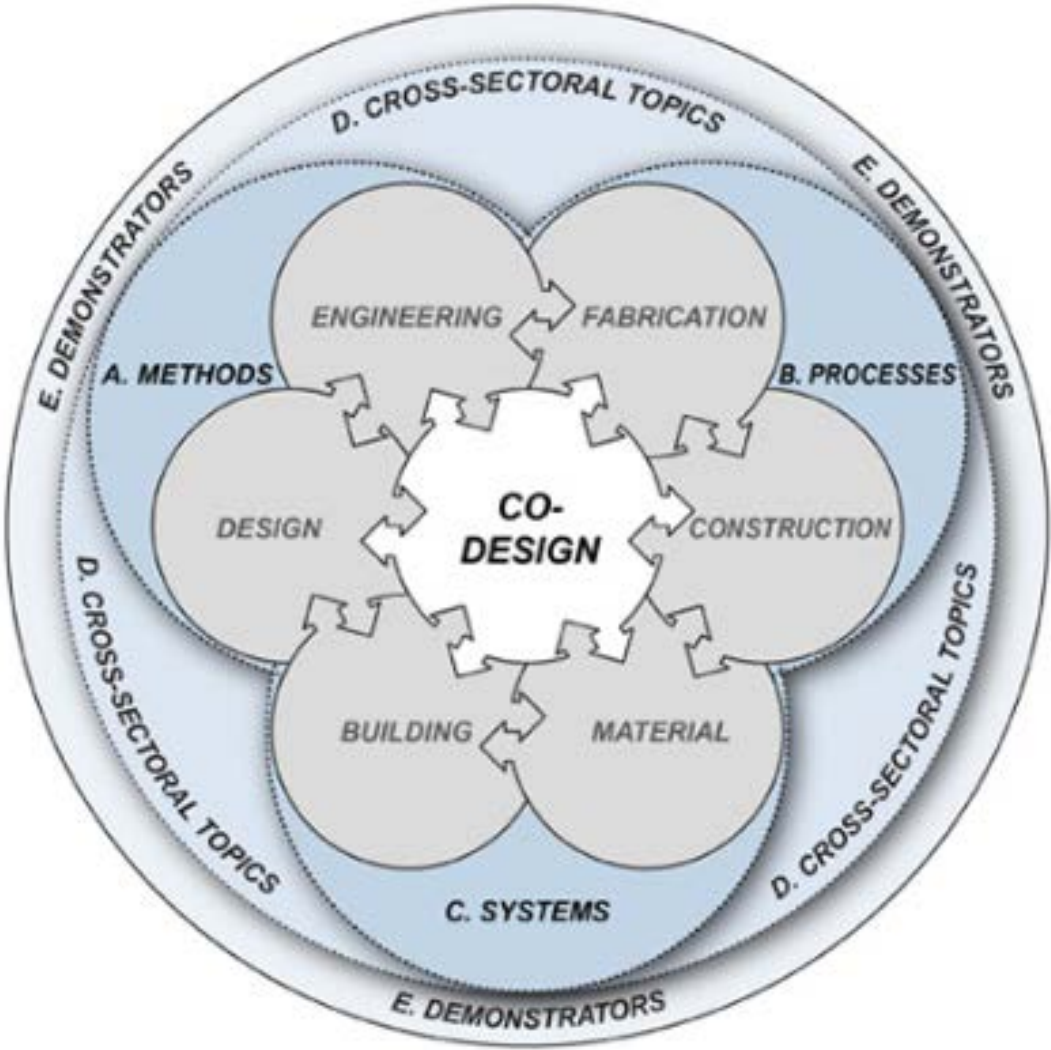
Είναι η χρήση υπολογιστών και μαθηματικών προσεγγίσεων στην δημιουργία γεωμετρικών αντικειμένων και αρχιτεκτονικής. Δεν είναι ακριβώς παραμετρικός σχεδιασμός που σημαίνει σχεδιασμός βάση παραμέτρων που επηρεάζουν το αποτέλεσμα της μορφής. Καθώς ο υπολογιστικός σχεδιασμός εστιάζει στην σχεδιαστική διαδικασία και όχι στον σχεδιασμό αντικειμένων. Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Ρομποτική κατασκευή ( fabrication):

Είναι ένας τρόπος κατασκευαστικής διαδικασίας όπου το μηχάνημα που χρησιμοποιείται, ελέγχεται από έναν υπολογιστή.<sup>49</sup>

Co-Design:

Συνεργατικός σχεδιασμός που περιλαμβάνει την ενεργή αλληλεπίδραση της ρομποτικής κατασκευής, των υλικών, της μηχανικής και του σχεδιασμού.



Εικόνα 86. Αλληλοεξαρτώμενη σχέση σχεδιασμού, Co-Design μεθόδου.

49 <https://www.igi-global.com/dictionary/transiting-between-representation-technologies-and-teachinglearning-descriptive-geometry/53850>

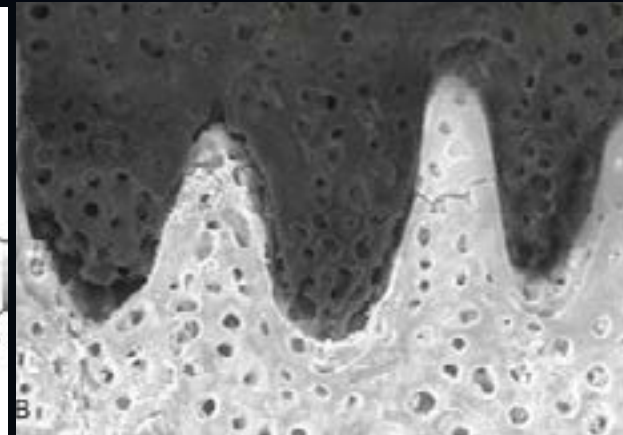
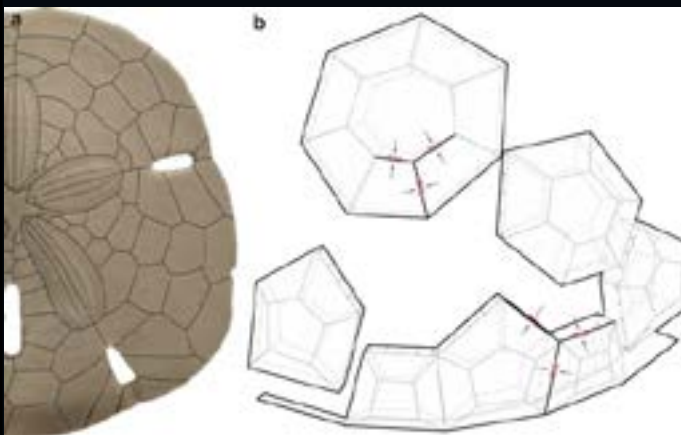
### 3.2 Κέλυφος και Κατασκευαστική Λογική

#### Στόχος:

Έρευνα για την βέλτιστη επίτευξη κάλυψης χώρου με τους λιγότερους δυνατούς πόρους.

#### Βιομημητική συνθετική αρχή:

Μορφολογία και συνδεσμολογία εμπνευσμένη από τον σκελετό του αχινού (sand dollar).



#### 3.2.1 Υπόβαθρο βιομημητικής αναζήτησης

Η δομική λύση για την επίτευξη αυτού του στόχου ήρθε από την έρευνα και την μελέτη του sand dollar.

Το sand dollar είναι θαλάσσιος αχινός όπου το κέλυφός του αποτελείται από πολυγωνικές επιφάνειες, που μπορούν να αφαιρεθούν και να ξανά συναρμολογηθούν. Ενώ η σύνδεσή τους γίνεται με προεξοχές ασβεστίου το φυσικό αντίστοιχο των πτυχωτών αρθρώσεων (finger joints). Και αυτό σημαίνει ότι αυτό το αχινοειδές έχει βρει την μορφολογία που καταφέρνει μεγάλη αντοχή σε δυνάμεις σύγκρουσης όπως αυτές της ακτής, με το να μεταφέρει τις διατμητικές δυνάμεις στην άκρη αυτών των πολυγωνικών επιφανειών και αυτό ακριβώς, μέσω αφαιρετικής διαδικασίας έχει μεταφέρει ο Menges στον σχεδιασμό, μετά από έρευνα μαζί με ειδικούς στην βιομηχανική.

Στην συνέχεια αναλύονται παραδείγματα που χρησιμοποιούν τις αρχές της δομής του sand dollar ως συνθετική αρχή στην δημιουργία περιπτερών. Τα κοινά στοιχεία που διακρίνονται είναι η περιπλοκότητα της μορφής, η ρομποτική κατασκευή, και το αρθρωτό σύστημα της μεταξύ τους σύνδεσης.

Ακολουθούν επίσης και τις αρχές της βιομίμησης:

Την ετερογένεια, καθώς καμία από τις επιφάνειες δεν είναι απολύτως όμοια μεταξύ τους και με αυτό τον τρόπο πετυχαίνεται η προσαρμογή τους στην τοπική καμπυλότητα.

Την ανισοτροπία, καθώς η δομή έχει κατεύθυνση και προσανατολισμό ανάλογα τις μηχανικές καταπονήσεις,

Και την ιεραρχία καθώς υπάρχουν επίπεδα εξωτερικά και εσωτερικά που συνδέονται αρθρωτά.

Εικόνα 87. Κατασκευή και πτυχωτών αρθρώσεων (finger joints)

Εικόνα 88. Σχέδιο σύνδεσης

Εικόνα 89. Τομή





### 3.3 Εφαρμογές

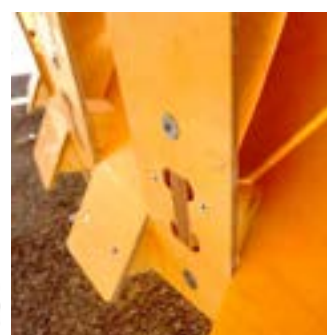
Τα ερευνητικά περίπτερα από ξύλο που κατασκευάστηκαν μαζί με φοιτητές στο Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης στα πλαίσια των ετήσιων ερευνητικών περιπτέρων που πραγματοποιείται από το Institute for Computation Design (ICD) και το Institute of Buildings Structures and Structural Design (ITKE).

Αυτά τα έργα προηγήθηκαν και οδήγησαν στην αποκωδικοποίηση του τρόπου δομής και να οδήγησαν στο πιο πρόσφατο αποτέλεσμα της έρευνας και είναι εν συντομία τα παρακάτω.

#### 3.3.1 Ερευνητικό Περίπτερο ICD / ITKE 2010



Εικόνα 90. ICD/ITKE Research Pavilion 2010 .



Αυτό που επηρέασε την σύνθεση της δομής είναι ότι λαμβάνει υπ' όψιν τις εξωτερικές δυνάμεις που αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της δημιουργίας γεωμετρικής μορφής στον φυσικό κόσμο και πιο συγκεκριμένα την μορφή του αχινού. Και εκμεταλεύτηκε τις ιδιότητες του υλικού. Το αποτέλεσμα είναι μια ενεργά καμπυλωμένη δομή κατασκευασμένη εξ ολοκλήρου από λεπτές, ελαστικά λυγισμένες λωρίδες κόντρα πλακέ.<sup>50</sup> Η διάμετρος του είναι δώδεκα μέτρα, και χρησιμοποιήθηκαν 6,5 χιλιοστά λεπτών φύλλων κόντρα πλακέ, σημύδας.

<sup>50</sup> <http://www.achimmenges.net/?p=4443>

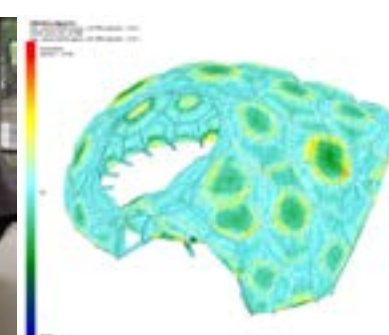
#### 3.3.2 Ερευνητικό Περίπτερο ICD / ITKE 2011

Το έργο διερευνά την αρχιτεκτονική μεταφορά των βιολογικών αρχών της μορφολογίας του σκελετού της πλάκας σε αυτή την περίπτωση του θαλάσσιου αχινού.

Εστίαση δόθηκε στην ανάπτυξη ενός αρθρωτού συστήματος που επιτρέπει υψηλό βαθμό προσαρμοστικότητας και απόδοσης λόγω της γεωμετρικής διαφοροποίησης των εξαρτημάτων πλάκας και των ρομποτικά κατασκευασμένων συνδετών αρθρώσεων. Τρία άκρα πλάκας συναντώνται πάντοτε μαζί σε ένα μόνο σημείο, πετυχαίνοντας την καμπυλότητα. Κανένα επίπεδο δεν είναι απόλυτα όμοιο, τα επίπεδα παίρνουν την αντίστοιχη μορφή για να πετύχουν την καμπύλη στην τελική μορφή. Επίσης χρειάστηκε αγκύρωση του περιπτέρου στο έδαφος για να αντισταθεί φορτία αναρρόφησης ανέμου.



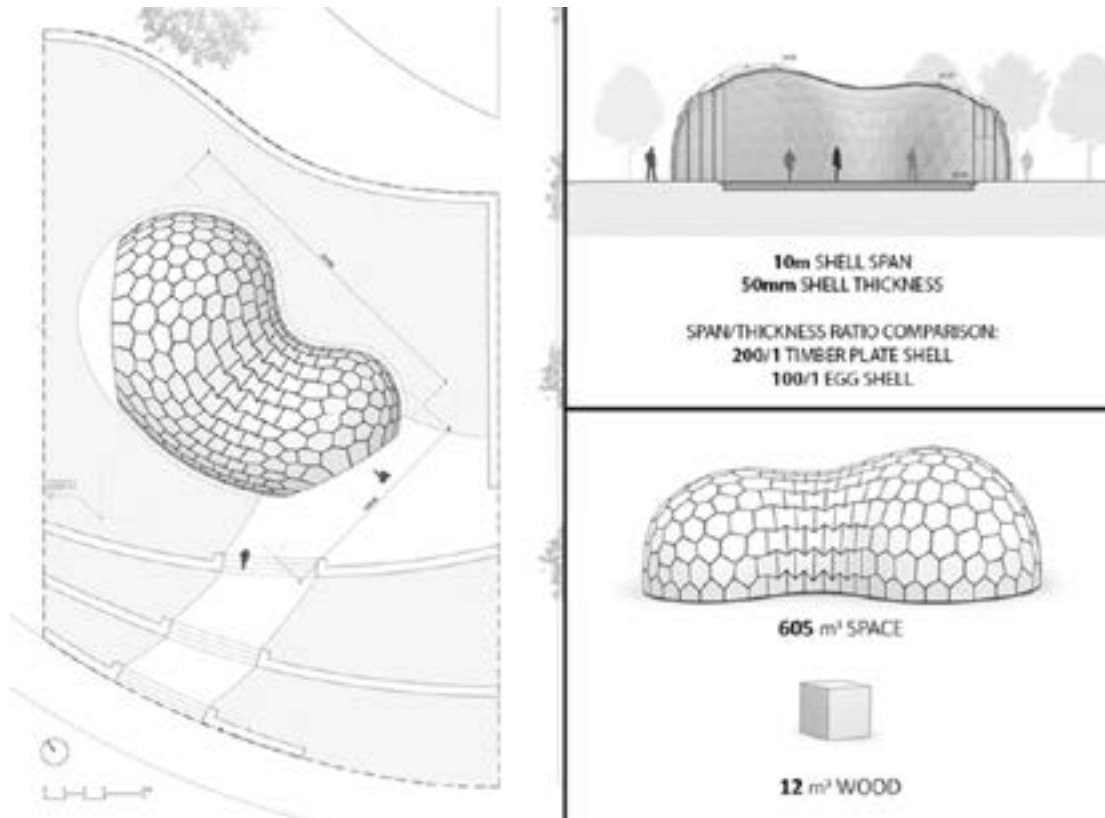
Εικόνα 91. ICD/ITKE Research Pavilion 2011.



Υλικό: λεπτά φύλλα κόντρα πλακέ (6,5 mm).



### 3.3.3 Εκθεσιακός χώρος στο Landesgartenschau 2014



Εικόνα 92. Landesgartenschau Exhibition Hall 2014

Εικόνα 93. Κάτοψη, Τομή και Κάλυψη σε σχέση με το υλικό

Σαν εξέλιξη της έρευνας λαμβάνοντας υπ' όψιν τα προηγούμενα ερευνητικά παραδείγματα και με αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκε, ο εκθεσιακός χώρος στο Landesgartenschau.

Ακολούθησε η μέθοδος υπολογιστικού σχεδιασμού (computational design) και ρομποτική κατασκευή (fabrication) για ελαφριές ξύλινες κατασκευές. Ολόκληρη η βασική δομή του κατασκευάστηκε από ρομποτικά διαμορφωμένες ξύλινες πλάκες. Η κατασκευή δεν προσφέρει απλά καινοτόμες αρχιτεκτονικές δυνατότητες αλλά είναι επαρκής όσων αφορά τους πόρους, με την φέρουσα κατασκευή να φτάνει τα 50 χιλιοστά πάχους.

Η σύλληψη προήλθε από το πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης στα πλαίσια της έρευνας "Ρομποτικοί μέθοδοι για ξύλινες κατασκευές". Το έργο επιδεικνύει τις νέες δυνατότητες που προκύπτουν μέσα από τον ψηφιακό σχεδιασμό, την προσομοίωση και την ρομποτική κατασκευαστική μέθοδο.<sup>51</sup>

Επιπλέον σκοπός του έργου, ήταν να χρησιμοποιηθούν τα δύο πράγματα που βρίσκονταν ήδη στην Στουτγάρδη. Την εξελεγχόμενη τεχνολογία δηλαδή την ρομποτική παραγωγή και την ξυλεία. -που είναι ο μόνος πόρος που παράγεται στην Νότια Γερμανία-.

Στην συνέχεια για την ρομποτική κατασκευή (fabrication) ανέπτυξαν ένα σύστημα, ξύλινων πάνελ. Αυτά τα ρομπότ δεν είναι ακριβώς CNC μηχανήματα που ακολουθούν μια προκαθορισμένη διαδρομή, αλλά έχουν την ικανότητα να αυτο-διορθώνονται -το ρομπότ παρακολουθεί τις διαφορές από την ιδανική διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει και το διορθώνει σε πραγματικό χρόνο-, επομένως με αυτόν τον τρόπο επιτεύχθηκε η υψηλή ακρίβεια με ένα μικρού μεγέθους μηχανήμα.

Οι άκρες του πάνελ χρησιμοποιούνται σε διεπαφή μεταξύ των χιζόμενων στοιχείων, όπως ακριβώς συναντάμε και στην δομή του sand dollar. Τα πάνελ συνδέονται μέσω των δυνάμεων και την μορφή των πτυχωτών συνδέσμων (finger joints) και χιτίζεται η δομή που φέρει τα φορτία. Με αυτόν τον τρόπο, το τελικό έργο μπορεί να αντισταθεί στις καμπτικές δυνάμεις και τις τάσεις που θεωρούνται πρόκληση για τέτοιας γεωμετρίας μοντέλα, χωρίς την βοήθεια μεταλλικών στοιχείων.

Φυσικά υπάρχουν βέβαια και γεωμετρικοί περιορισμοί, ως προς την μορφή και την καμπυλότητα της κατασκευής. Όμως κατάφεραν να τους εξαλείψουν με τον υπολογιστικό σχεδιασμό (computation design), και τις νέες τεχνολογίες.

Αυτό το σύστημα ξύλινων πάνελ ακολουθεί τον παραδοσιακό τρόπο της ξυλουργίας, ενώ προϋπόθεση για να γίνει εφικτό ήταν η υψηλή αντοχή.

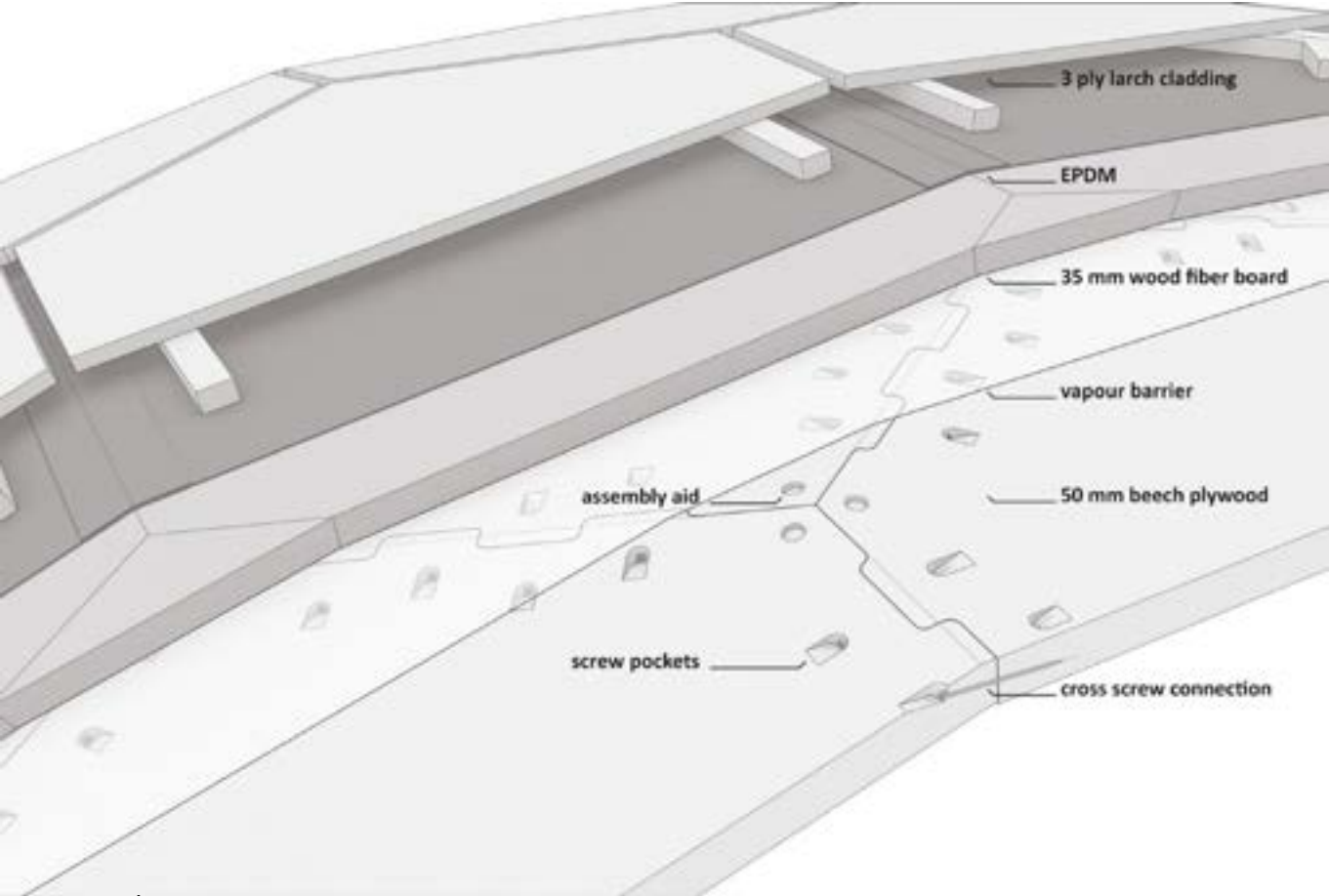
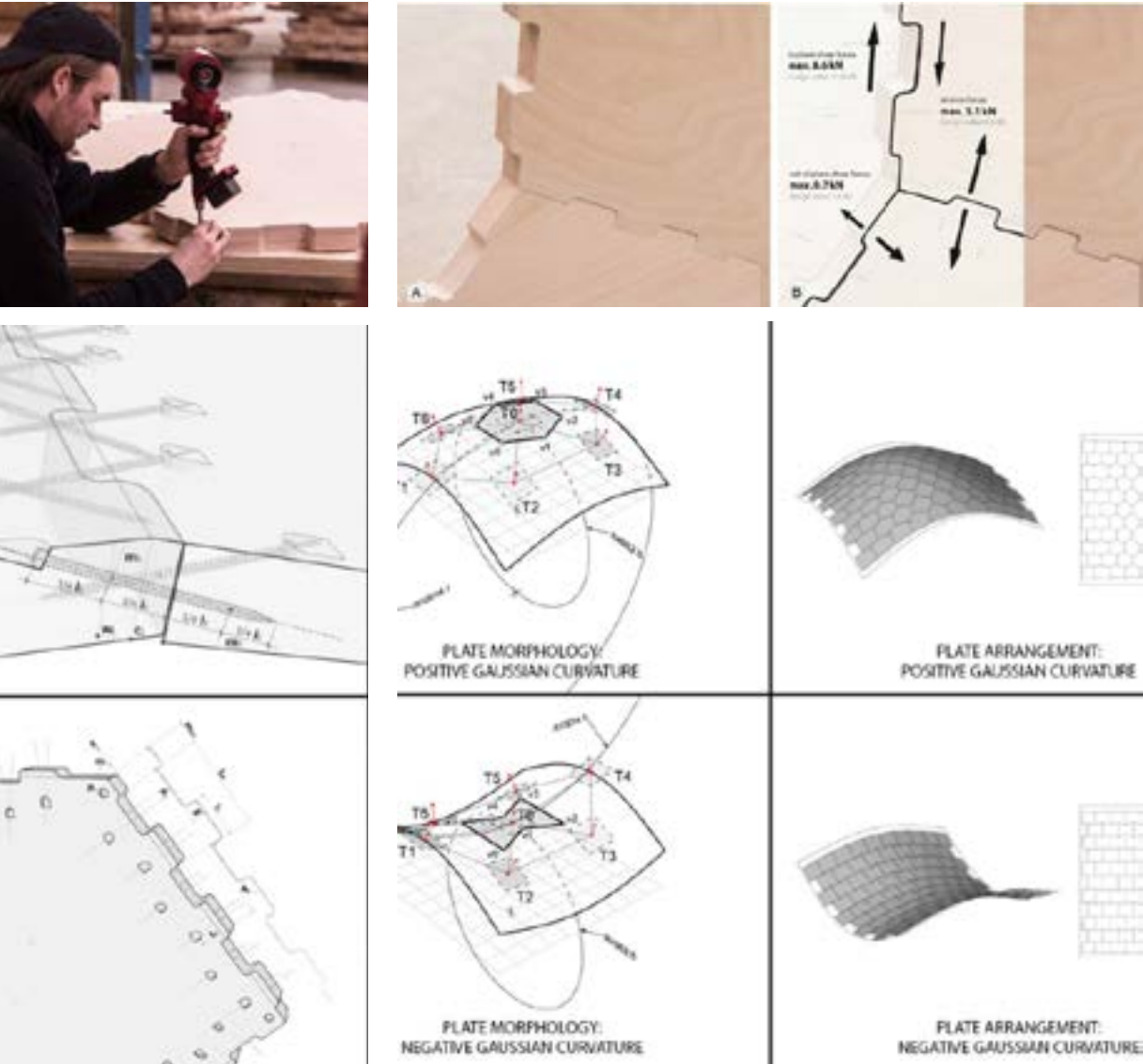
Χρησιμοποιήθηκαν **12m<sup>2</sup>** ξύλου για την δημιουργία του και ο συνολική κάλυψη ήταν :

**10 μέτρα πλάτος x 20 μέτρα μήκος**

<sup>51</sup><http://www.achimmenges.net/?p=5731>

Κατά την κατασκευή δεν έμεινε κανένα υλικό ανεκμετάλλευτο. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε, ξύλο κόντρα πλακέ. Ενώ το γεγονός ότι προήλθε απο την γύρω περιοχή το καθιστά ιδιαίτερα σημαντικό, όχι μόνο για περιβαλλοντικούς λόγους αλλά και για κοινωνικούς καθώς ό,τι χτίστηκε προήλθε από τον ίδιο τόπο. Θυμίζει ένα πρωτόγονο τρόπο κατασκευής όπως αυτή της καλύβας, αλλά με τεχνολογικά εμπλουτισμένη διαδικασία σύνθεσης.

Εικόνα 94. Ανταλλαγή δυνάμεων στις πτυχωτές αρθρώσεις



Εικόνα 95. Η λύση για την σχεδιαστική δυσκολία της κορυφής του κελύφους με θετική καμπυλότητα όπου δεν ήταν δυνατό να υπάρξει ολόκληρη μια εξαγωνική πλάκα, ήρθε με την αλλαγή της καμπυλότητας σε αρνητική και την αντικατάσταση του εξαγώνου με ένα μέρος του.  
Εικόνα 96. Κατασκευαστική ανάλυση.

Ένα πιο πρόσφατο και ακόμα πιο εξελιγμένο έργο αυτής της πρακτικής είναι το ξύλινο περίπτερο στο Bundesgartenschau.



3.3.4 Ξύλινο Εκθεσιακό Περίπτερο Bundesgartenschau 2019.



Το ξύλινο περίπτερο στο Bundesgartenschau, είναι ένας εκθεσιακός χώρος με αρχιτεκτονική καινοτομία, όπου χρησιμοποιείται ακόμα και σαν χώρος εκδηλώσεων για συναυλίες.

Η κατασκευή έχει πετύχει εξαιρετική ακουστική σε διάμετρο μόλις 30 μέτρων.

Για την κατασκευή χρησιμοποιείται ακριβώς ο ίδιος αριθμός υλικών με το προηγούμενο περίπτερο του 2014, αλλά με την διαφορά ότι πετυχαίνει την τριπλάσια διάμετρο και καλύπτει τον εξαπλάσιο χώρο.

Η αλλαγή που οδήγησε σε αυτό το αποτέλεσμα ήταν ότι δεν χρησιμοποιούσε πια συμπαγή στοιχεία αλλά άλλαξαν σε ένα σύστημα όπου τα στοιχεία είναι περισσότερα σε αριθμό, πιο λεπτά και με καμπυλότητα.

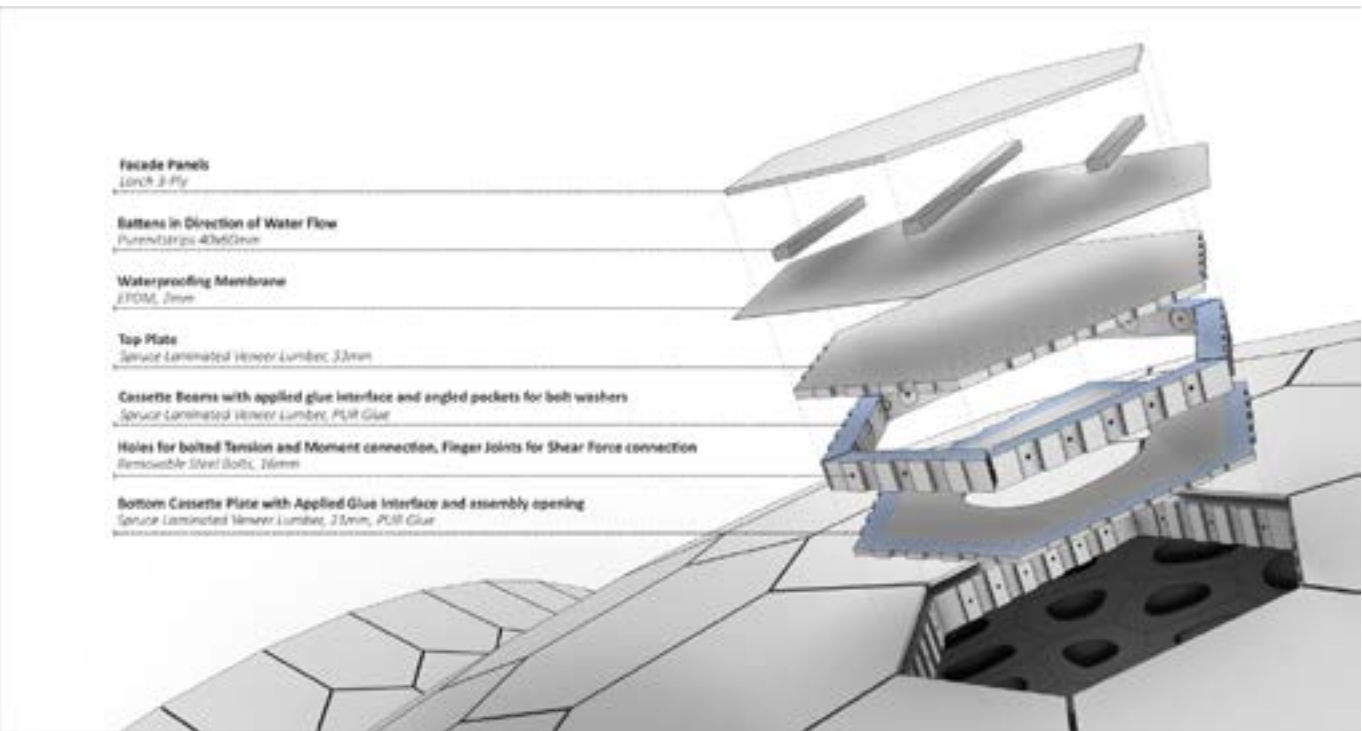
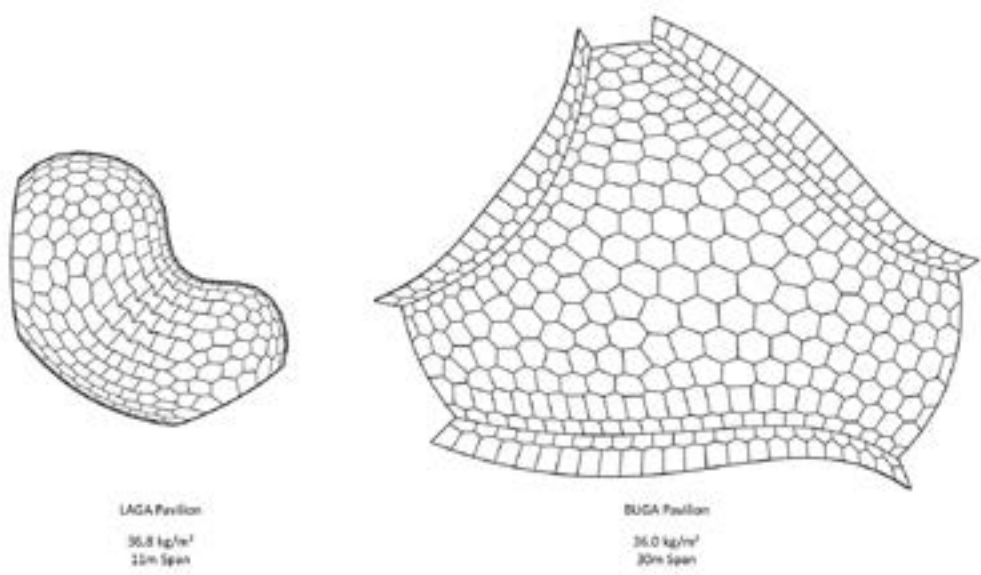
Το κάτω πανέλο το οποίο έχει αυτά τα ανοίγματα, ακολουθεί μία κορνίζα και έπειτα το στοιχείο της κορυφής. Όλα είναι κολλημένα μεταξύ τους και συνδιαστικά αποτελούν τον λόγο που οδήγησε στην μείωση των υλικών.

Βέβαια η παρατήρηση που προκύπτει είναι ότι παρόλο που χρησιμοποιήθηκαν λιγότεροι πόροι για την δημιουργία του, το κόστος παραγωγής του είναι αρκετά μεγαλύτερο.

Εικόνα 97. BUGA Wood Pavilion / ICD/ITKE University of Stuttgart. 2019

Εικόνα 98. Σύγκριση Κατόψεων με τον εκθεσιακό χώρο στο Landesgartenschau

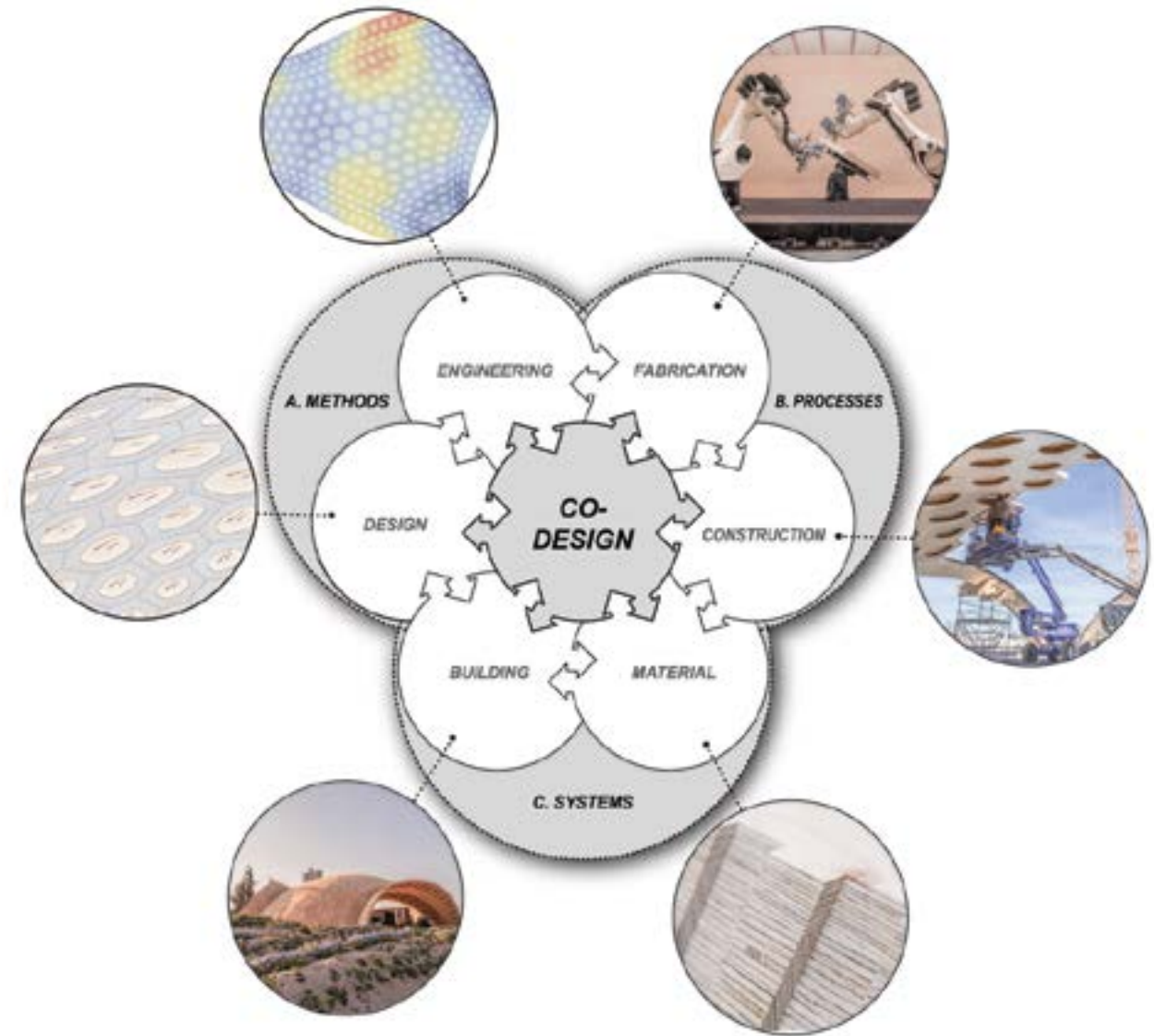
Εικόνα 99.Αναλυτικό κατασκευαστικό διάγραμμα





Αυτός ήταν λόγος που αναπτύχθηκε μία ψηφιακή ρομποτική ρύθμιση κατασκευής (digit robotic fabrication setup) το οποίο αποτελεί παράδειγμα co-design, γιατί σχεδιάζει μαζί με το κτιριακό σύστημα, το δομικό σύστημα και ταυτόχρονα το σύστημα παραγωγής και λειτουργίας, όπου λειτουργεί μόνο σε συνεργασία όλων αυτών των παραγόντων.

Επιπλέον αυτή η νέα γενιά ρομποτικών μηχανημάτων επεξεργασίας ξύλου είναι και φορητή, γεγονός που βοηθά στην τοπική παραγωγή.



Εικόνα 100. Fabrication.

Εικόνα 101. Co-design διάγραμμα του έργου.

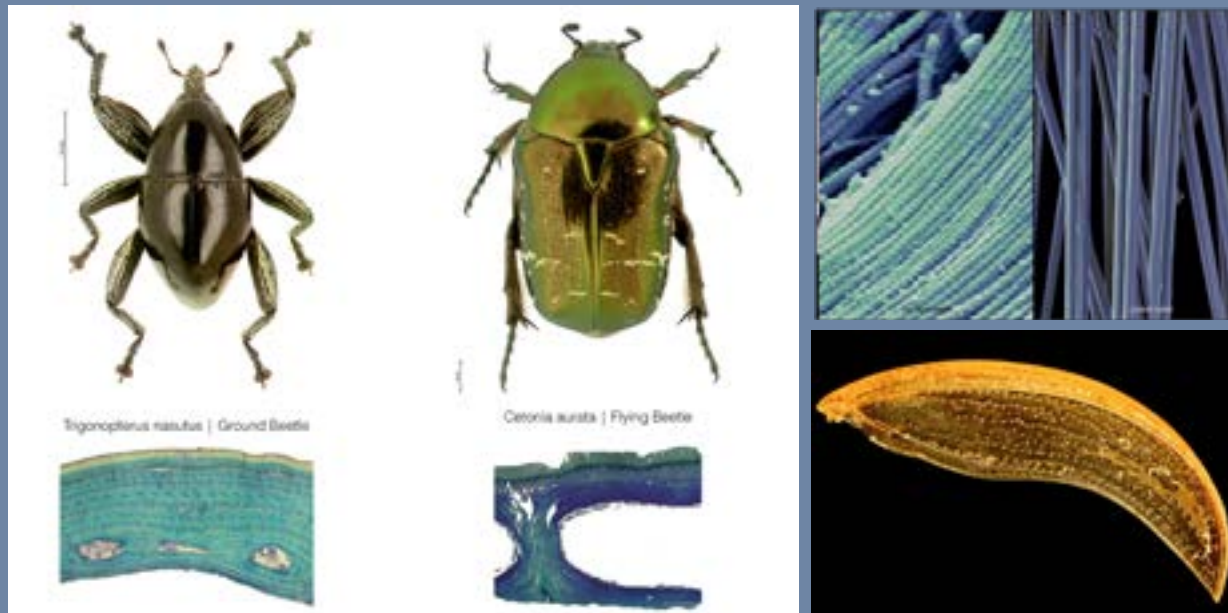
### 3.4 Υλική Σύνθεση: Ένωση του Φυσικού με το Υπολογιστικό

#### Στόχος:

Η δημιουργία ακόμα πιο ευέλικτων συνθετικών υλικών και δομών στην κατασκευή.

#### Βιομιμητική συνθετική αρχή:

Η τεχνική δομής από συνεχόμενες ίνες όπως παρατηρείται στο προστατευτικό κέλυφος φτερών (elytra) του ιπτάμενου σκαθαριού (electron).



Στα σκαθάρια τα οποία έρπονται υπάρχει ένα πυκνό κομμάτι υλικού αλλά για τα 'ιπτάμενα σκαθάρια (rotato beetle) υπάρχει ένα πολύ λεπτό κέλυφος δύο επιπέδων (elytra).<sup>52</sup>

Μετά από την ανάλυσή τους σε πολλά διαφορετικά είδη χρησιμοποιώντας μοριακό επιταχυντή για να σκανάρουν αυτές τις κατασκευές μαζί με βιολόγους, ανακάλυψαν ότι η φύση "ντύνει" (dresses) όλα τα είδη σχεδιαστικών προκλήσεων με το ίδιο υλικό.

Επίσης η παρατήρησή τους ήταν ότι τόσο το εξωτερικό επίπεδο όσο και το εσωτερικό επίπεδο του κελύφους είναι συνεχόμενο, και αυτό είναι που κάνει την δομή να έχει υψηλή αποδοτικότητα.

Το επόμενο βήμα ήταν η αφαιρετική μέθοδος. Αφαίρεσαν αυτή την αρχή και την εισήγαγαν σε ένα στοιχείο κτιρίου όπου οι ίνες άνθρακα και γυαλιού είναι συνεχόμενες στην ανώτερη και κατώτερη επιφάνεια, προκειμένου να πετύχει αυτή την υψηλή αποδοτικότητα της φύσης.

<sup>52</sup> Bharat Bhushan, Harald Fuchs, Applied Scanning Probe Methods XII Biomimetics and Industrial Applications, 2008, σ. 51

### 3.4.1 Υπόβαθρο βιομημητικής αναζήτησης

#### Fibrous Structures

"Η βιολογία χρησιμοποιεί έναν αξιοσημείωτο μικρό αριθμό υλικών, και σχεδόν όλα τα φορτία φέρονται από ινώδη σύνθετα υλικά. Είναι πετυχημένη μέθοδος, όχι τόσο λόγω υλικού, αλλά επειδή η τοποθέτησή τους γίνεται με τον βέλτιστο τρόπο"

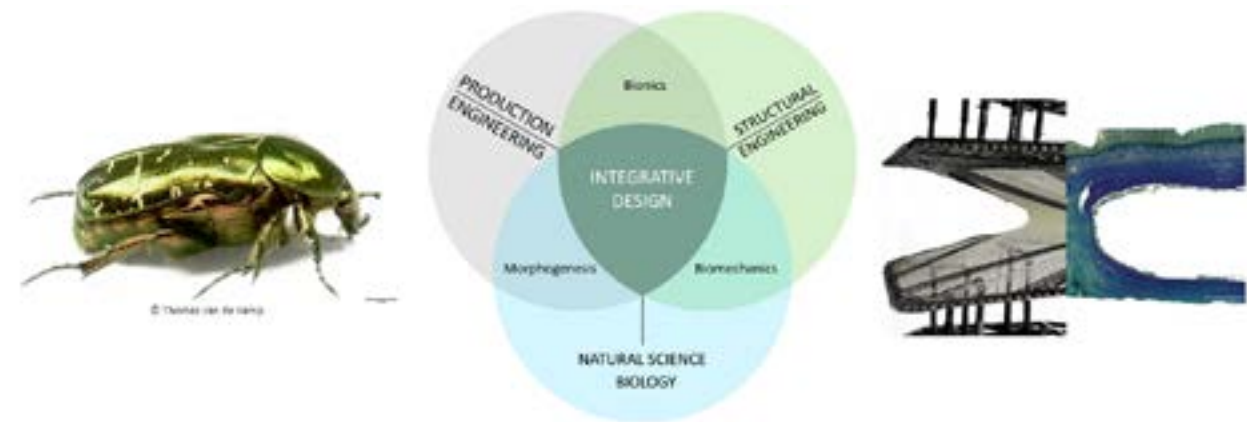
George Jeronimidis

Παρατήρησαν, πως και τα ξύλα που χρησιμοποιούνται στα προηγούμενα project αποτελούνται κατά βάση από ίνες. Το ενδιαφέρον είναι ότι η φύση δεν έχει ποικιλία υλικών. Για παράδειγμα το βασικό υλικό των φυτών είναι η κυτταρίνη, η χιτίνη για τα έντομα και οστρακόδερμα και το κολλαγόνο στα ζώα. Αυτά τα βασικά υλικά δεν χαρακτηρίζονται για την υψηλή απόδοσή τους σαν δομές αλλά ο σημαντικότερος παράγοντας είναι ο τρόπος όπου αυτά τα υλικά οργανώνονται στον χώρο. Οπότε ο προσανατολισμός, η πυκνότητα και η οργάνωση στον χώρο είναι αυτά που πετυχαίνουν την υψηλή απόδοση στις φυσικές δομές και με βάση αυτή την αρχή δημιουργούν τις παρακάτω αρχιτεκτονικές καινοτομίες.

Εξίσου ενδιαφέρον σε αυτές τις φυσικές ίνες είναι ότι οι βασικές αρχές τους είναι αρκετά όμοιες με τις συνθετικές ίνες που διαθέτουμε όπως είναι οι ίνες άνθρακα και γυαλιού. Και μπορούμε έτσι να αναζητήσουμε τις θεμελιώδεις αρχές για τον σχεδιασμό κτιριακών κατασκευών από την φύση.

Υλικό: 50k toning όπου 1 χιλιόμετρο υλικού ζυγίζει 1 κιλό

Είναι ένα αρκετά διαφορετικό υλικό αν το συγκρίνουμε με τα βαριά υλικά που χρησιμοποιούμε για μια συμβατική κατασκευή κτιρίου.



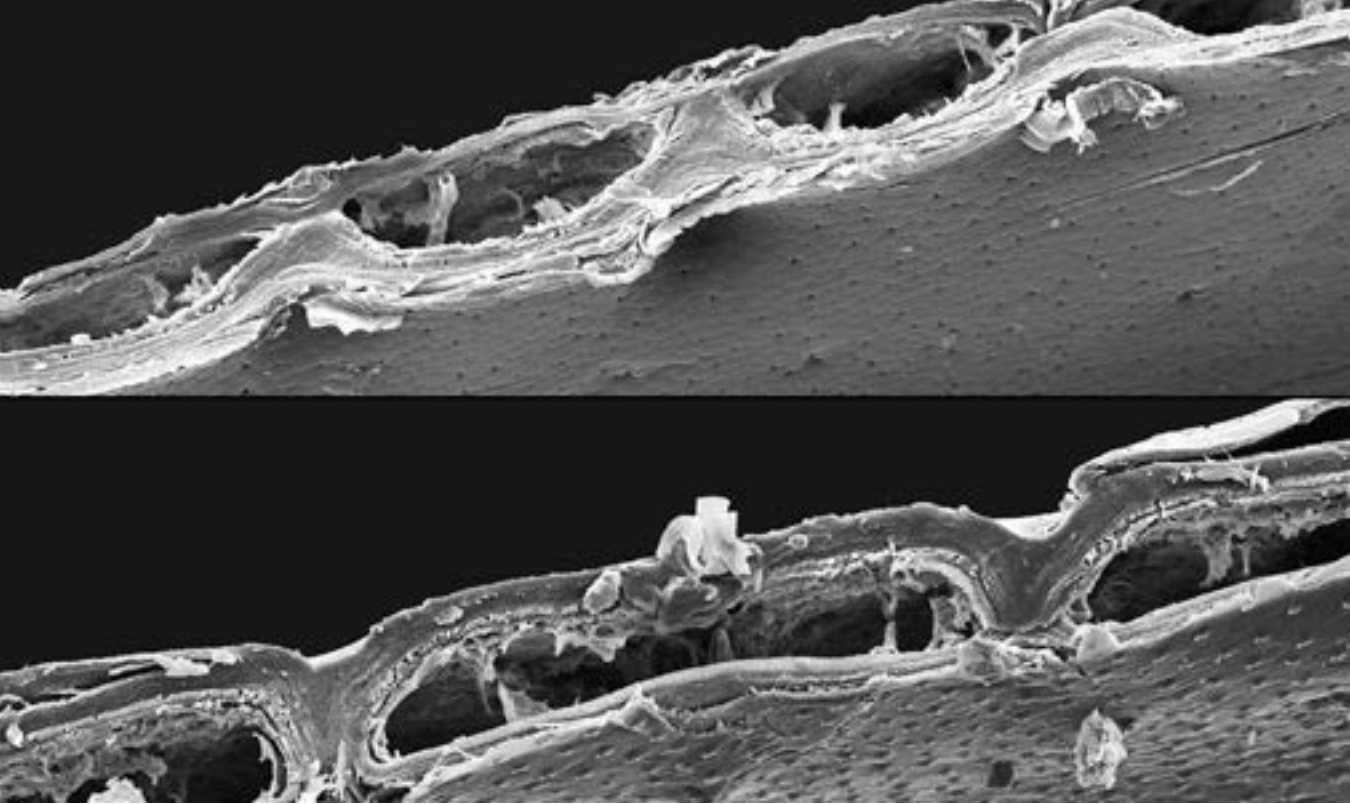
Εικόνα 102. Δομή ιπτάμενου και έρποντα σκαθαριού.

Εικόνα 103. Ίνες στο μικροσκόπιο

Εικόνα 104. Ελύτρα.

Εικόνα 105. Διάγραμμα ολοκληρωμένου σχεδιασμού με βασική αρχή την βιομίμηση





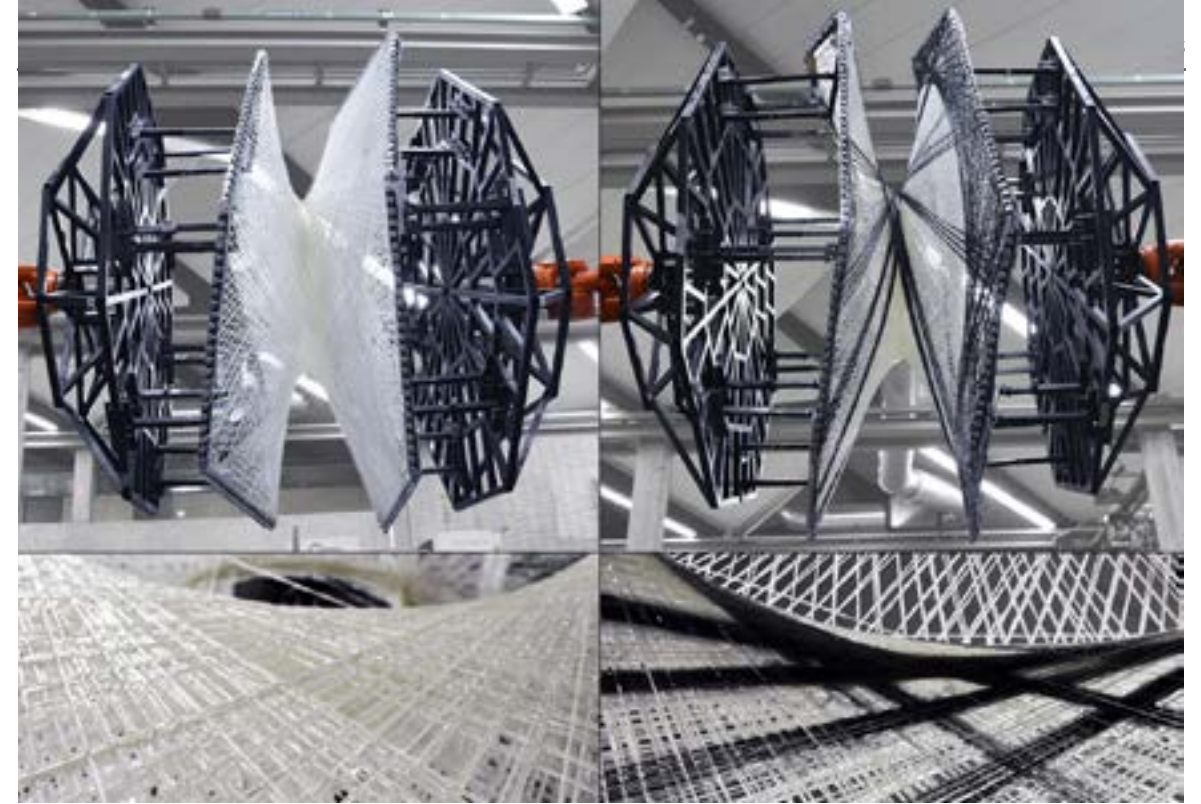
Εικόνα 106. Μικροσκοπική απόδοση σε τομή της δομής του κελύφου ελύτρα.

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα της χρήσης των ινών άνθρακα σαν συνθετικό υλικό στην κατασκευή είναι ότι απαιτείται να υπάρχει ένα καλούπι. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούν να δώσουν μορφή στον εαυτό τους και χρειάζονται μια μηχανή για να τους προσφέρει σχήμα.

Και προκειμένου να είναι επωφελής το project ένα καλούπι πρέπει να χρησιμοποιείται για όλα.

Επομένως, για να μειωθεί ο αριθμός των καλουπιών, η λύση ήταν ένα εύκολο ικρίωμα(scaffold) όπου επιτρέπει στις ίνες να βρουν μόνες τους το σχήμα μέσω της αλληλεπίδρασης στην διαδικασία κατασκευής.

Το spider ρομπότ αφήνει τις ίνες πάνω στο scaffold και ενώ εκείνο περιστρέφεται γύρω του προκύπτει η μορφή. Είναι ένας αρκετά διαφορετικός τρόπος να δουλεύεις με αυτά τα υλικά και το αποτέλεσμα που προκύπτει δεν είναι μια επιφανειακή αλλά μία χωρική δομή.



Εικόνα 107. Fabrication.



3.5 Εφαρμογές

3.5.1 ICD-ITKE Ερευνητικό Περίπτερο 2013-14 / ICD-ITKE Πανεπιστημίου Στουτγκάρδης



Εικόνα 108. ICD-ITKE Research Pavilion 2013-14 / ICD-ITKE University of Stuttgart

Το περίπτερο βασίζεται στην αρχή των βιολογικών ελαφρών κατασκευών. Αποτελεί παράδειγμα της ενσωματωμένης ανάπτυξης της διαδικασίας του υπολογιστικού σχεδιασμού, της προσομοίωσης και της ρομποτικής κατασκευής, επιτρέπει την ταυτόχρονη αναζήτηση ενός πιθανού καινοτόμου αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, την κατασκευαστική αποδοτικότητα και την ευρωστία της έκφρασης μέσω των χαρακτηριστικών των υλικών.

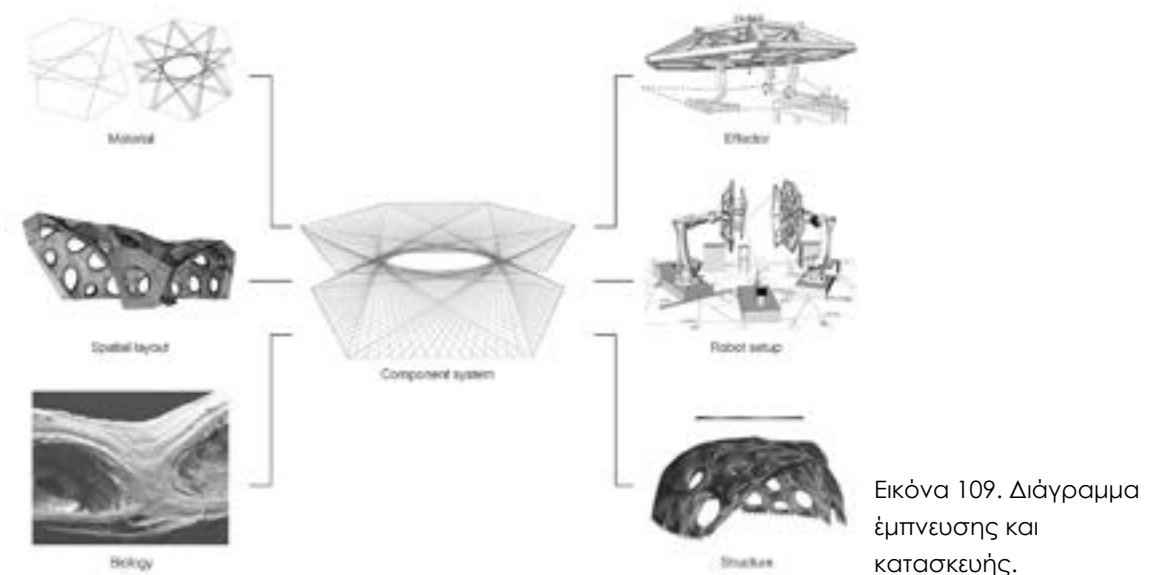
Σαν αποτέλεσμα του ερευνητικού σχεδιασμού, τα διαφορετικά συνθετικά στοιχεία του συναρμολογούμενου κελύφους που κατασκευάστηκε από διαφανές γυαλί και ίνες άνθρακα, προσφέρουν μια μοναδική υλική έκφραση και χωρική εμπειρία.

Οι αρχές της κατασκευαστικής διαφοροποίησης των περιορισμών της ρομποτικής κατασκευής και της συμπεριφοράς των υλικών που έπειτα έγιναν οδηγοί της ανάπτυξης της διαδικασίας του υπολογιστικού σχεδιασμού, έφεραν το αποτέλεσμα μιας παραστατικής αρχιτεκτονικής μορφολογίας.

Αποτελείται από 36 συνθετικά στοιχεία, που διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους σε μέγεθος, γεωμετρία και στην τοποθέτηση των ινών, και είναι ο λόγος που το αποτέλεσμα έχει υψηλή απόδοση, ανθεκτικότητα και πολύ ελαφρά κατασκευαστικά στοιχεία.

Η διάμετρός φτάνει τα 2,6 μέτρα και ζυγίζει μόλις 24,1 κιλά, ενώ ολόκληρη η κατασκευή 593 κιλά.

Η μορφή προέκυψε μέσω της αλληλεπίδρασης των ινών που τοποθετούνται από το κενό μεταξύ των ρομπότ. Όσο περιστρέφεται ο τροχός, που είναι καθοριστικός για την αλληλεπίδραση που επιτρέπει την παραγωγή επιφανειών διπλής καμπυλότητας από τις ίνες που εκτείνονται ευθεία από σημείο σε σημείο, αυτό συνιστά το καθοριστικό μέρος του υπολογιστικού σχεδιασμού σαν εργαλείο.<sup>53</sup>



53 Achim Menges, Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational, Massachusetts, 2015, σ. 56-59



### 3.5.2 Εκθεσιακό περίπτερο Elytra Filament 2016 στο μουσείο Victoria & Albert στο Λονδίνο.



Εικόνα 110. Elytra Filament Pavilion Outdoor Installation at the "Hello, Robot." Exhibition / Vitra Design Museum

**Στόχος** του έργου ήταν ο σχεδιασμός στεγάστρου που θα προσφέρει προστασία από καιρικά φαινόμενα όπως βροχή ή ηλιοφάνεια.

Οι **περιορισμοί** που κλήθηκαν να αντιμετωπίσουν είναι ότι η κατασκευή θα πρέπει να έχει λεπτή θεμελίωση.

Σε αυτό το project οι ίνες γυαλιού που βρίσκονται σε υγρή μορφή κατά την ρομποτική διαδικασία κατασκευής προσφέρουν την ολοκληρωμένη μορφολογία και οι ίνες άνθρακα τοποθετούνται πάνω τους ακριβώς εκεί που πρέπει, σύμφωνα με τους υπολογισμούς και είναι αυτές που αποτελούν τα δομικά στοιχεία και φέρουν τα φορτία της κατασκευής

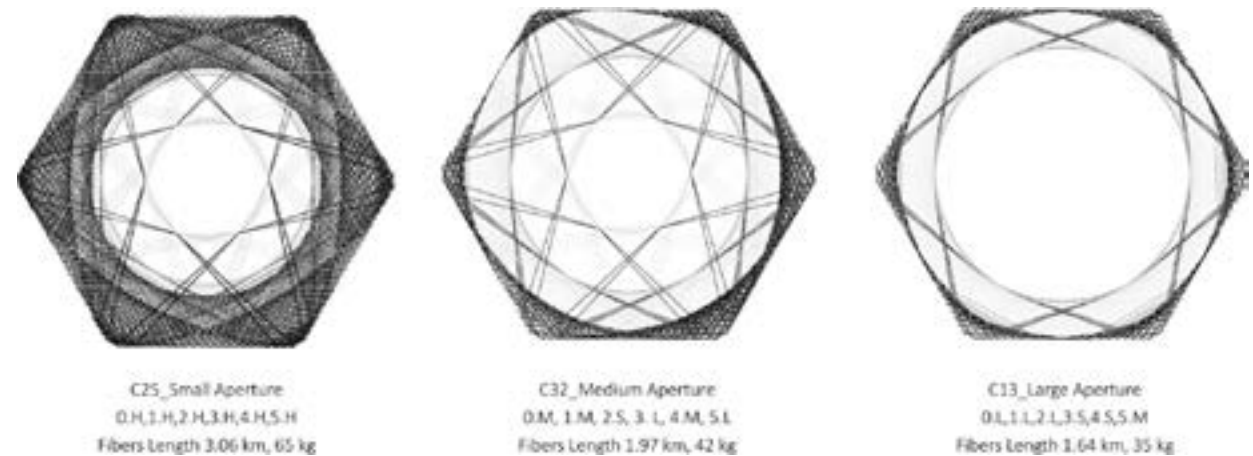
Αυτός ο τρόπος δείχνει επίσης την ποικιλία της μορφής που προσφέρει η συγκεκριμένη ρομποτική τεχνολογία.

Η κατασκευή απαρτίζεται από σαράντα(40) εξαγωνικά συνθετικά μέρη όπου ζυγίζουν περίπου 45 κιλά το καθένα και χρειάζονται περίπου τρεις ώρες για να ολοκληρωθεί η κατασκευή τους.

Το Kuka, το υπολογιστικά προγραμματισμένο ρομπότ δημιούργησε ολόκληρη την κατασκευή, και τις εξαγωνικές επιφάνειες της οροφής του στεγάστρου και τις κολώνες.<sup>54</sup>

Με αυτή την κατασκευαστική προσέγγιση έχουμε την δυνατότητα να πετύχουμε εξαιρετικά ελαφριά συνθετικά στοιχεία, όπου το καθένα από αυτά είναι περίπου 5 μ<sup>2</sup> και ζυγίζει περίπου 35 με 85 κιλά. Σαν μέσο όρο αντιστοιχούν 9,6 κιλά για κάθε τετραγωνικό μέτρο. Επαναπροσδιορίζει με αυτόν τον τρόπο την προοπτική και την μέθοδο στον τρόπο που χτίζουμε τα κτίρια.

Για να δημιουργηθεί αυτή η οροφή χρειάστηκαν 6 μ<sup>2</sup>, ένα ρομπότ και ένας περιστρεφόμενος τροχός, ένας κουβάς ρητίνη και ένα πηνίο με ίνες γυαλιού και άνθρακα, και με αυτά μπορείς να δημιουργήσεις ολόκληρες κατασκευές. Σημαντικό ήταν επίσης, ότι η παραγωγή γινόταν στον ίδιο χώρο καθώς όλα τα εξαρτήματα όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, μεταφέρονται.



Εικόνα 111. Τα δομικά στοιχεία χωρίζονται σε αυτά με μεγάλο, μεσαίο και μικρό άνοιγμα αντίστοιχα.

<sup>54</sup> <https://www.archisearch.gr/design/elytra-filament-pavilion-vitra-museum/>



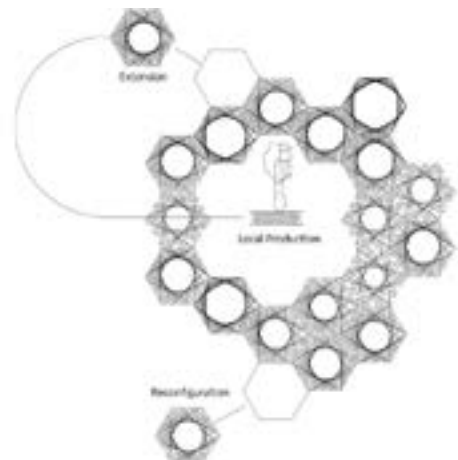


Εικόνα 112. Τοπική κατασκευή.

Ενδιαφέρον είναι επίσης το γεγονός πως, δεν υπήρχε ολοκληρωμένο σχέδιο της κατασκευής. Το σχέδιο προέκυψε από την παρακολούθηση του τρόπου που κινούνταν οι άνθρωποι στον χώρο. Μέσω αισθητήρων, εντόπιζαν την ανθρώπινη παρουσία ενώ την ίδια στιγμή ελέγχονταν και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες μέσω του παγκόσμιου κλιματικού δείκτη και στην συνέχεια συσχετίστηκαν τα αποτελέσματα, και αποφασίστηκε το πως η κατασκευή θα αναπτυχθεί(grow) θα επεκταθεί ή θα στενέψει.

Δεν υπάρχει κανένα μεταλλικό στοιχείο στο στέγαστρο,αποτελείται εξ ολοκλήρου από ίνες άνθρακα και γυαλιού με αποτέλεσμα να καταφέρνει τόσο τεχνολογική αλλά ταυτόχρονα και αρχιτεκτονική καινοτομία.

Με τον εμπλουτισμό αυτής της έρευνας και με μια ελάχιστα διαφορετική προσέγγιση δημιουργήθηκε το επόμενο project, ο θόλος για το Buddha's garden show το 2019.

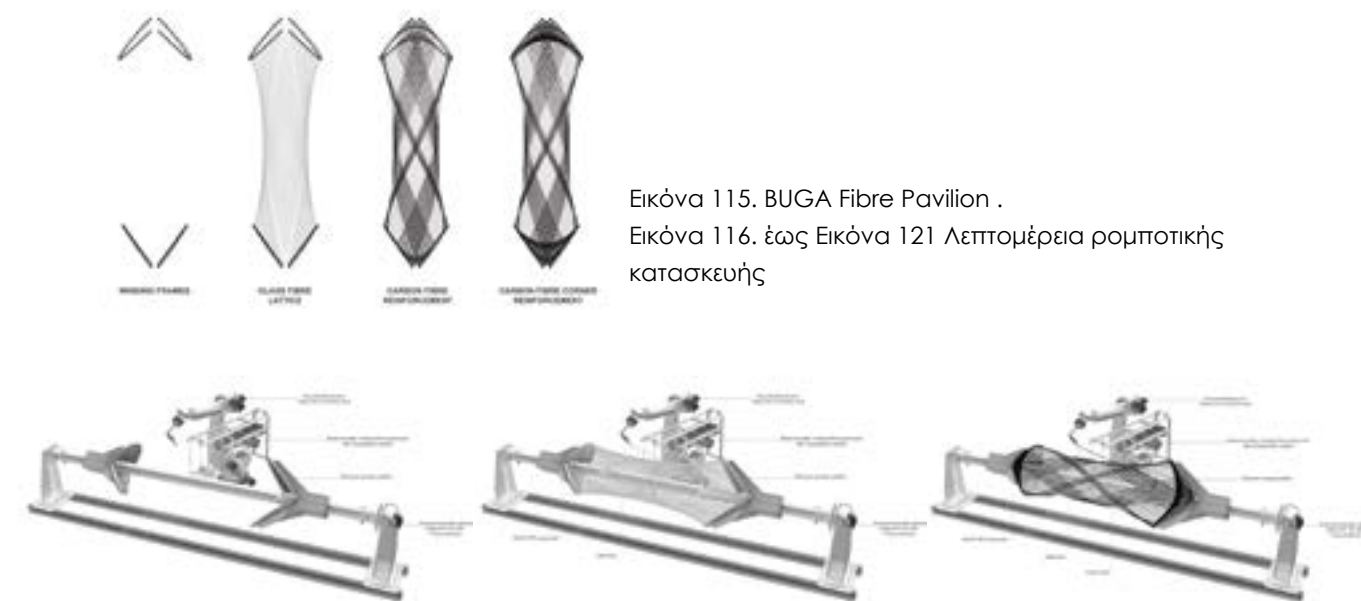


Εικόνα 114. Σχέδιο ανάπτυξης του στεγάστρου με την βοήθεια αισθητήρων.





3.5.3 BUGA Fibre Pavilion | ICD | ITKE University of Stuttgart 2019



Εικόνα 115. BUGA Fibre Pavilion .  
Εικόνα 116. έως Εικόνα 121 Λεπτομέρεια ρομποτικής κατασκευής

Το περίπτερο, Buga Fibre στόχο είχε την δημιουργία μιας εξαιρετικά ελαφριάς κατασκευής ενός σύνθετου θόλου, που βασίζεται πάνω στην έρευνα των κατασκευαστικών συστημάτων υψηλής απόδοσης, μακράς διάρκειας και των ενισχυμένων ινών με πολυμερές(FRP).<sup>55</sup>

Πιο συγκεκριμένα,έμφαση δίνεται στην αναζήτηση μιας σχεδιαστικής στρατηγικής και η έκθεσή τους σε πολυδιάστατες ροές πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών ειδικοτήτων.

Ο θόλος έχει διάμετρο 25 μέτρα, αποτελείται από 60 στοιχεία από ίνες γυαλιού και άνθρακα τα οποία κάνουν εμφανή την δομή του. Πρόκειται για ένα πειραματικό περίπτερο, που έχει πολύ λιγότερα συνδετικά σημεία από το προηγούμενο project και ταχύτερη διαδικασία παραγωγής.

Η βασική κατασκευαστική αρχή παραμένει ίδια, υπάρχει μόνο ένα βασικό ικρίωμα(scaffold) για όλα τα στοιχεία και το μόνο που αλλάζει είναι η γωνία.

Στην συνέχεια τοποθετούνται οι ίνες γυαλιού που βρίσκουν μόνες τους την μορφή του στοιχείου και πάνω σε αυτή την μορφή συνεχίζουν να τοποθετούνται οι ίνες άνθρακα οι οποίες αποτελούν το δομικό στοιχείο της κατασκευής.



Εικόνα 120. Κάτοψη



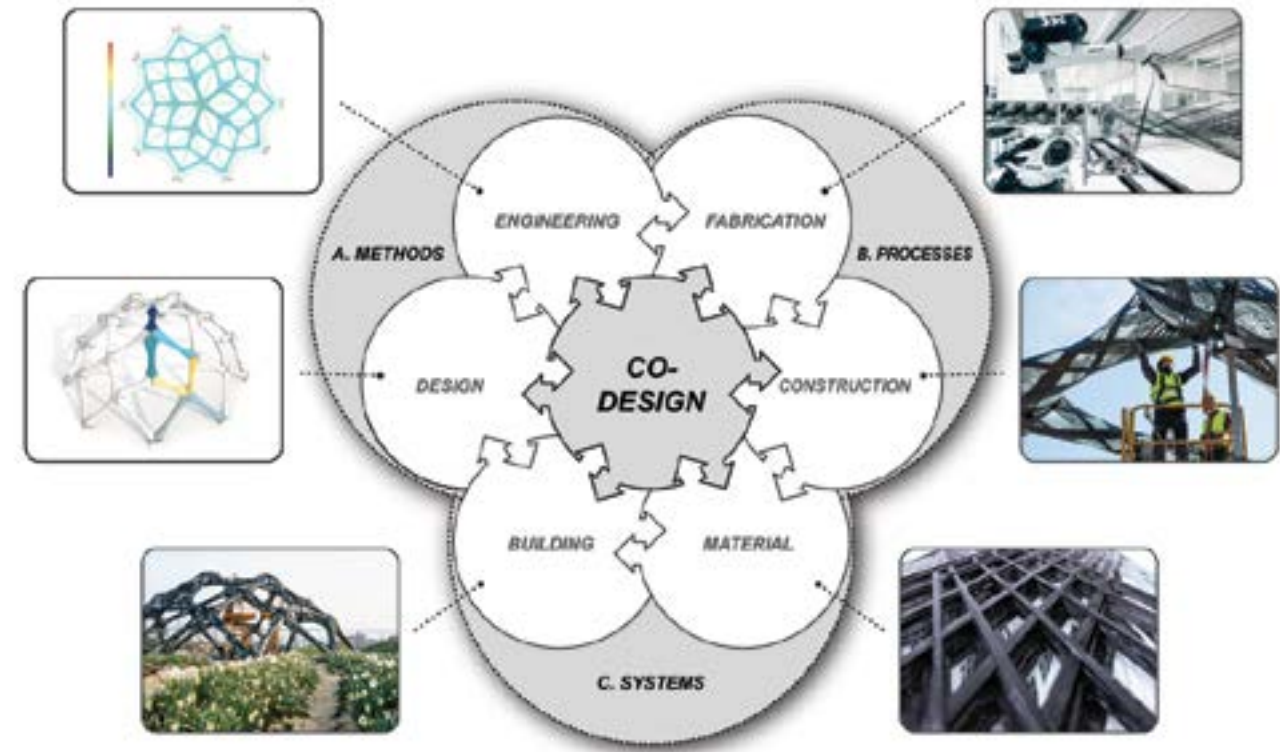
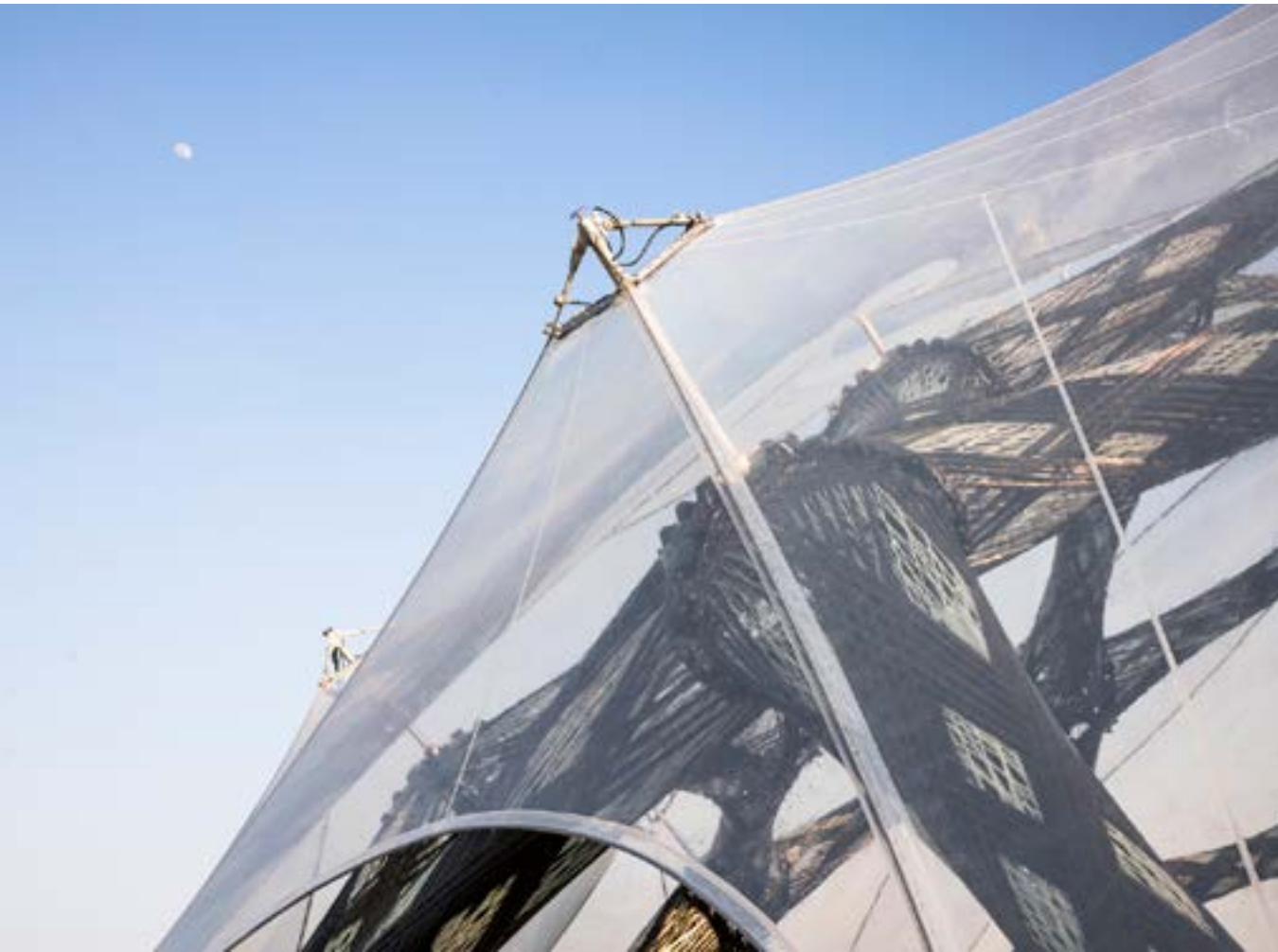
Εικόνα 121. Τομή

55 [http://papers.cumincad.org/data/works/att/acadia19\\_140.pdf](http://papers.cumincad.org/data/works/att/acadia19_140.pdf)

Και στο τέλος τοποθετείται η διαφανής μεμβράνη που είναι μηχανικά πεπιεσμένη και προσθέτει στο περίπτερο την διαφάνεια, επιτρέποντας να φανούν και να γίνουν κατανοητά τα δομικά στοιχεία, δίνοντας ένα καινοτόμο αποτέλεσμα αλλά επίσης και πολύ αυθεντικό.

Από αρχιτεκτονικής άποψης, σημαίνει φυσικά ότι μπορείς να χτίσεις με ένα υλικό που εκπέμπει το φως, το οποίο είναι ένα αρκετά συναρπαστικό αρχιτεκτονικό χαρακτηριστικό και σημαίνει και πάλι ότι υπάρχει αλλαγή στον τρόπο αντίληψης του φωτισμού. Καθώς το φυσικό φως την ημέρα από έξω, το διαπερνά, ενώ το τεχνητό φως από μέσα το βράδυ, το εκπέμπει.

Εικόνα 122. Λεπτομέρεια μεμβράνης



Εικόνα 123. Co-design διάγραμμα



### 3.6 Ιδιότητα Υλικού - Κίνηση

#### Στόχος:

Η δημιουργία “επιδερμίδων”(skins) κτιρίων που χρειάζονται μηδενική ενέργεια για να λειτουργήσουν. Χρησιμοποιώντας την έμφυτη συμπεριφορά του ξύλου να αντιδρά στην υγρασία του άμεσου περιβάλλοντός του.

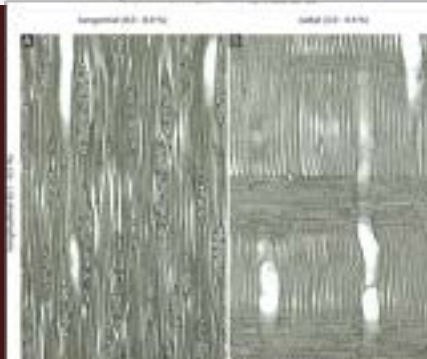
#### Βιομημητική συνθετική αρχή:

Η αλλαγή διάστασης του κώνου ελάτης (plant cone) που οδηγεί στην μορφολογική αλλαγή του και οφείλεται σε κλιματικούς παράγοντες.



Το ξύλο αποτελείται από ίνες.

**Υλικό:** Καπλαμάς/λεπτός φλοιός ξύλου 2 χιλιοστών



### 3.6.1 Υπόβαθρο βιομημητικής αναζήτησης

#### Material Cultures

“Είναι πιθανό να βρισκόμαστε σε θέση να σκεφτούμε την πηγή της μορφής και της δομής, όχι σαν κάτι που επιβάλλεται από εξωτερικούς παράγοντες σε μια αδρανή ύλη, όχι σαν ιεραρχική εντολή, αλλά σαν κάτι που μπορεί να έρχεται από μέσα από τα υλικά, μια μορφή που ‘βγάζουμε’ από αυτά όσο τους επιτρέπουμε να επηρεάζουν τις κατασκευές που δημιουργούμε

**Manuel Delande**

Η συγκεκριμένη έρευνα προσπαθεί να αναζητήσει την εμφάνιση μιας καινούργιας υλικής κουλτούρας στην αρχιτεκτονική.

Ακολουθεί την λογική πως οι ίνες δεν είναι μόνο το στοιχείο που φέρει τα φορτία της κατασκευής αλλά μπορεί επίσης να δώσει το έναυσμα της κίνησης. Μας επιτρέπει να αντιληφθούμε το υλικό όχι σαν παθητικό υποδοχέα μιας προκαθορισμένης ή προσχεδιασμένης μορφής αλλά σαν κάτι ενεργά δημιουργικό στον σχεδιασμό.<sup>56</sup> Ένα διαφορετικό είδος κίνησης, που δεν απαιτεί κάποιο μηχανισμό, ούτε μύς, και λειτουργεί απλά μέσω του υλικού.

Ένα φυσικό παράδειγμα είναι ο κώνος ελάτης, όπου αλλάζει μορφή μεταφέροντας μια αλλαγή διάστασης σε μία μορφολογική αλλαγή. Η αλλαγή αυτή οφείλεται σε κλιματικούς παράγοντες και συγκεκριμένα στα επίπεδα υγρασίας που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.

“Αυτό υποδηλώνει την ύπαρξη των ετερογενών υλικών, με μεταβλητές ιδιότητες και ιδιοσυγκρασίες τις οποίες ο σχεδιαστής πρέπει να λάβει υπόψιν και να το κάνει αναπόσπαστο κομμάτι του σχεδίου και ακολούθως δεν μπορεί να ρουτινοποιηθεί!”

Τις ίδιες ιδιότητες μοιράζεται και το ξύλο. Το ξύλο, είναι ένα υλικό που διατηρεί την περιεκτικότητα της υγρασίας του εσωτερικού του σε σχετική ισορροπία με την υγρασία που υπάρχει στο περιβάλλον του, και αυτή η προσρόφηση και εκφόρηση των μορίων έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή διάστασης που παρατηρούμε, και είναι ο λόγος που θεωρούμε το ξύλο σαν ένα ασταθές υλικό, και επενδύουμε περισσότερο από 70% ενέργειας για την επεξεργασία του, προκειμένου να καταπιέσουμε αυτή την έμφυτη συμπεριφορά του υλικού, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η περιεκτικότητα υγρασίας του υλικού προκειμένου να εξασφαλίσει την μέγιστη σταθερότητά του.

Εικόνα 124. Κίνηση του κώνου ελάτης, φτερού και ξύλου, ανάλογα με τα επίπεδα υγρασίας

Εικόνα 125. Ίνες ξύλου στο μικροσκόπιο.

56 [https://www.youtube.com/watch?v=PbgArau\\_4vI&list=PL4TaNvnmk5POyQ\\_DRd-cGlcXrS6VqX8B-c&index=10&t=3379s](https://www.youtube.com/watch?v=PbgArau_4vI&list=PL4TaNvnmk5POyQ_DRd-cGlcXrS6VqX8B-c&index=10&t=3379s)



Σε αυτήν την έρευνα λοιπόν εφαρμόστηκε ακριβώς το αντίθετο. Αναπτύχθηκε μία επιφάνεια(skin) που ανταποκρίνεται στο κλίμα, και αυτή η ανταπόκριση οφείλεται εξ ολοκλήρου στις ιδιότητες του υλικού της κατασκευής. Όπως ακριβώς και στον κώνο ελάτης.

Ο κώνος ελάτης, μεγαλώνει σε μια κλειστή μορφή πάνω στο δέντρο όπου υπάρχει υγρασία, και όταν πέφτει στο έδαφος όταν έρθουν οι κατάλληλες συνθήκες, ανοίγει εντελώς μόνο του και ελευθερώνει τους σπόρους.

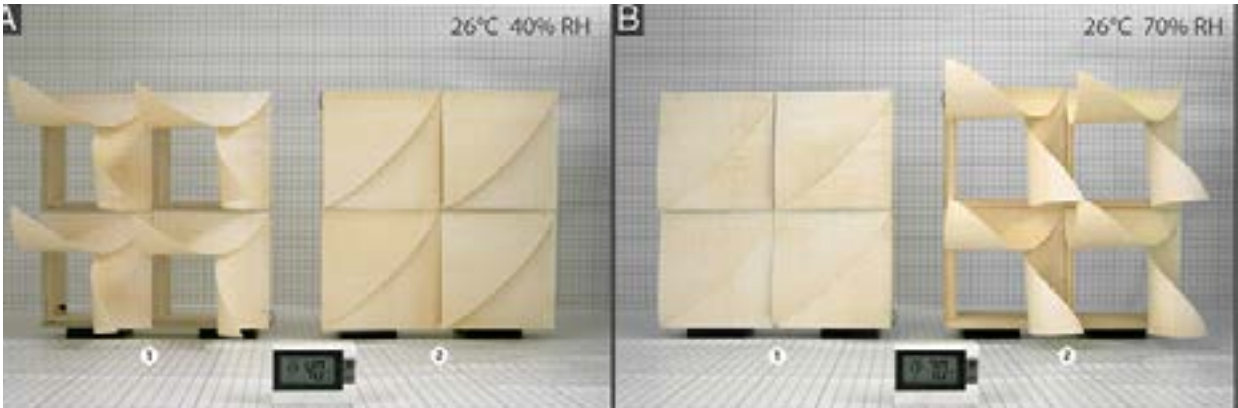
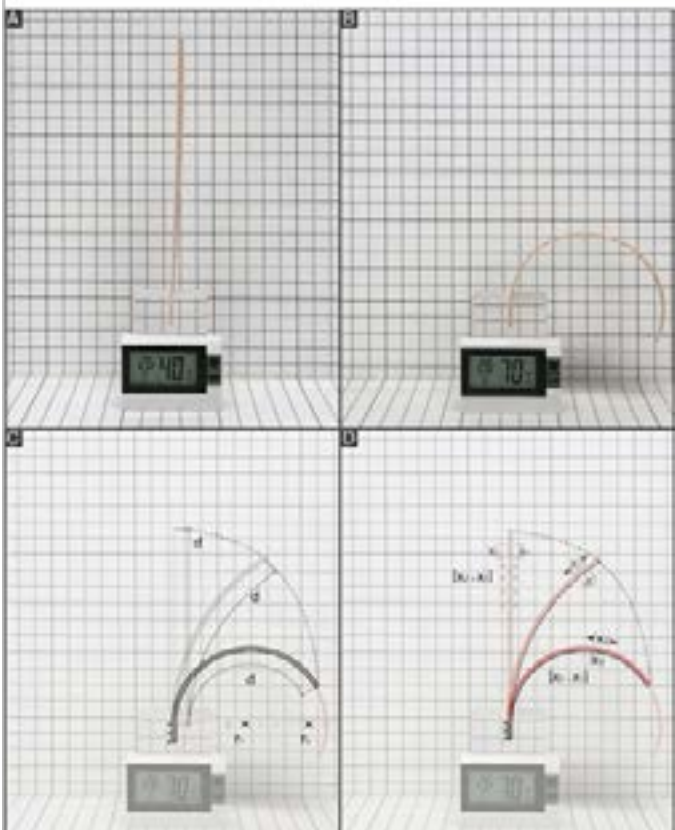
Ακόμη πιο ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι εκείνη την στιγμή το κουκουνάρι είναι ένας νεκρός φυτικός οργανισμός, κάνοντας αυτή την έμφυτη λειτουργία, μία μεταβολική διαδικασία.

Βασισμένοι σε αυτή την αρχή και με την αφαιρετική διαδικασία, ανέπτυξαν την ίδια συμπεριφορά χρησιμοποιώντας καπλαμά που είναι ευαίσθητος στην υγρασία και μετά από έρευνα 2 χρόνων στο υλικό διέκριναν τρόπους όπου τα δείγματα ίδιου υλικού αντιδρούσαν με εντελώς διαφορετικό τρόπο, όπου το ένα ανοίγει όσο αυξάνεται η υγρασία και το άλλο να κλείνει.

Μετά από έλεγχο σε αρκετά μοντέλα 1:1 κλίμακας που δοκίμασαν στην οροφή του πανεπιστημίου στην Στουτγκάρδη, κατέληξαν σε αλάνθαστα αποτελέσματα.

Εικόνα 126. Πειραματικός έλεγχος της μεταβολής ξύλου ανάλογα με τα επίπεδα υγρασίας

Εικόνα 127. Πειραματική κινητική επιδερμίδα



Εικόνα 128. Επίτευξη διαφορετικών αποτελεσμάτων ανταπόκρισης του υλικού, κάτω από τις ίδιες εξωτερικές συνθήκες

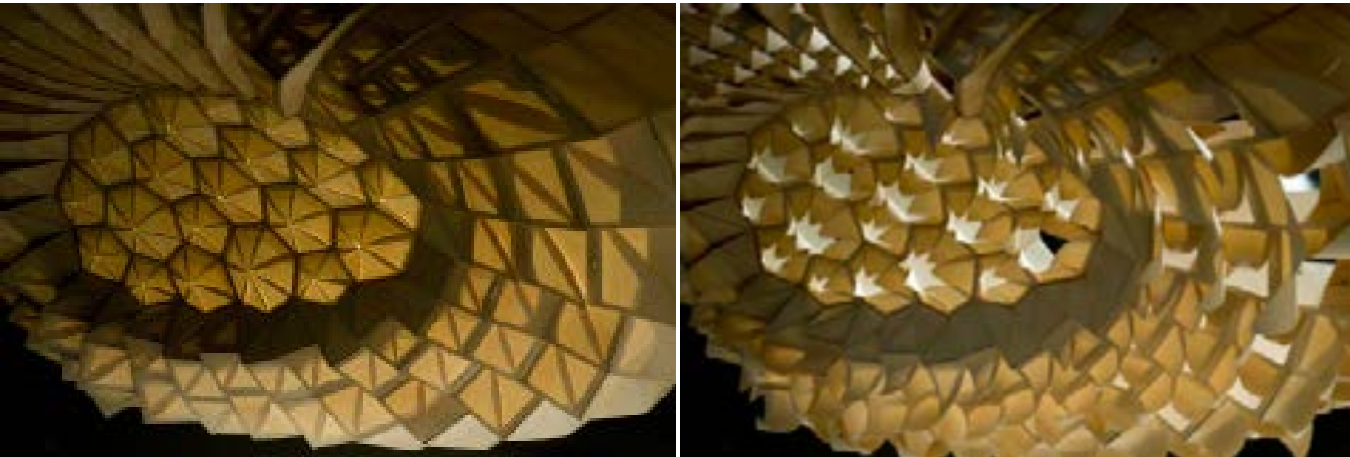
Κάθε φορά που πλησίαζε η βροχή και τα επίπεδα υγρασίας αυξάνονταν το σύστημα έκλεινε ολοκληρωτικά μόνο του, χωρίς την χρήση κάποιου πρόσθετου ηλεκτρονικού ή μηχανικού εξοπλισμού και το πετυχαίνει ακόμα και μετά από χιλιάδες δοκιμές, χωρίς κούραση ή φθορά.

Ταυτόχρονα ανέπτυξαν υπολογιστικές διαδικασίες σχεδιασμού που επιτρέπουν να ενσωματώσουν τα ανατομικά χαρακτηριστικά του υλικού και της συμπεριφοράς του στην διαδικασία του computation design, και η έρευνα σε αυτή του την ιδιότητα ανταπόκρισης στην υγρασία, προσφέρει την δυνατότητα να διερευνηθούν νέες ικανότητες πάνω σε ένα από τα πιο παλιά κατασκευαστικά υλικά που υπάρχουν, ενώ ο Μένγκες προσθέτει ότι είναι το πρότζεκτ με το λιγότερο κόστος.

Τους δόθηκε η ευκαιρία να υλοποιήσουν αυτή την έρευνα το 2012 μαζί με τον Steffen Reichert όπου είχε την ευκαιρία να διερευνήσει το σύστημα στο Sancho Pompidou στο Παρίσι όπου έγινε η συνεισφορά του installation στην μόνιμη συλλογή τους.

### 3.7 Εφαρμογές

#### 3.6.1 HygroScope: Meteorosensitive Morphology, σε συνεργασία με τον Steffen Reichert, 2012



Εικόνα 129. Αντίδραση σε χαμηλά επίπεδα υγρασίας

Εικόνα 130. Αντίδραση σε υψηλά επίπεδα υγρασίας

Το κτίριο Pompidou ήταν το αρχιτεκτονικό αντίθετο της αρχιτεκτονικής προσέγγισης του Achim Menges που αναζητά την δέσμευση της δυναμικής του περιβάλλοντος.

Σε αντίθεση, το κτίριο στοχεύει στην διατήρηση των εσωτερικών συνθηκών που είναι όσο πιο ομογενής όσο είναι δυνατόν ενάντια στις συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος. Στην πραγματικότητα, η τεχνολογία που απαιτείται για την επίτευξη αυτών των συνθηκών είναι ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία που χαρακτηρίζουν τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό του.

Σκοπός της εγκατάστασης του HygroScope ήταν να αμφισβητήσει αυτή την κατάσταση με το να εισάγει μια εικονική επέκταση του εξωτερικού κλίματος μέσα στο εσωτερικό του Pompidou, με την μορφή μιας μεγάλης προσθήκης η οποία αναπαριστά την διακύμανση του εξωτερικού κλίματος του Παρισιού. Βρίσκεται σε μία γυάλινη θήκη, η μετεωρολογικά ευαίσθητη μορφολογία αντιδρά συνεχώς στις μεταβολές στα εξωτερικά επίπεδα υγρασίας με την κίνηση των στοιχείων στην επιφάνειά του.

Αποτελείται από 4000 επιφάνειες γεωμετρικά μοναδικών στοιχείων καπλαμά.

Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη ανταποκριτών στοιχείων σε όλο το σύστημα: Τα κυτταρικά ανοίγματα βασισμένα από τετράεδρα σε εφτάεδρα πολύγωνα που παρουσιάζουν ένα κεντρικό άνοιγμα και κλείσιμο, και τα ορθογώνια ανοίγματα τοποθετημένα στο πλάι, με κίνηση που μοιάζει με φτερούγισμα. Η υπολογιστική σχεδιαστική διαδικασία δημιουργεί και προσαρμόζει αυτά τα στοιχεία βασισμένα σε ένα εσωτερικό σύστημα περιορισμών και εξωτερικών δυνάμεων της ετερογενούς διανομής της υγρασίας μέσα στην εκθεσιακή θήκη, οδηγώντας σε μία συνολική

μορφολογία με κυτταρικά ανοίγματα που είναι συνδεδεμένα σε μία ακτινωτή επιφάνεια.

Η ανταποκριτική επιφάνεια του στοιχείου ανοίγει όταν υπάρχει αύξηση της σχετικής υγρασίας στην εκθεσιακή θήκη, και κλείνει ξανά όταν τα επίπεδα υγρασίας πέφτουν. Το σύστημα κατατάσσεται σε μικρο κλιματικές ζώνες μέσω τοπικά ειδικών αντιφάσεων, με αποτέλεσμα την συσσωρευμένη απόδοση της συναρμολόγησης της κατάστασης των επιφανειών και τη εμφάνισής, χωρίς την ανάγκη επιπρόσθετου τεχνικού εξοπλισμού ή ενεργειακής τροφοδοσίας.<sup>57</sup>

Η μορφολογία και η αλληλεπίδραση με την υγρασία του αέρα του installation προσφέρει μια οπτική εμπειρία της λεπτής διακύμανσης της υγρασίας που διαμορφώνει μέρος της καθημερινότητας αλλά συνήθως διαφεύγει την χωρική μας αντίληψη για εκείνη

*“Στην ύλη που έχει ήδη μια μορφή ή στην μορφοποιήσιμη, πρέπει να προσθέσουμε ένα ενεργό υλικό σε κίνηση, μεταφέροντας όλες τις ιδιαιτερότητες ή ετερότητες του που ήδη φαίνεται να υπονοούν κάποια μορφή.(...) Είναι ένα ζήτημα παράδοσης στο ξύλο, και μετά στο να το ακολουθήσεις εκεί που σε οδηγεί με το να συνδέεις λειτουργίες για υλοποίηση, αντί να επιβάλλεις την μορφή πάνω στην ύλη.”*

**Gilles Deleuze and Felix Guattari**



Εικόνα 131. κλίμακα HygroScope

Εικόνα 132. HygroSkin: Meteor-



### 3.7.2 HygroSkin – Μετεωροευαίσθητο Περίπτερο 2013



sensitive Pavilion

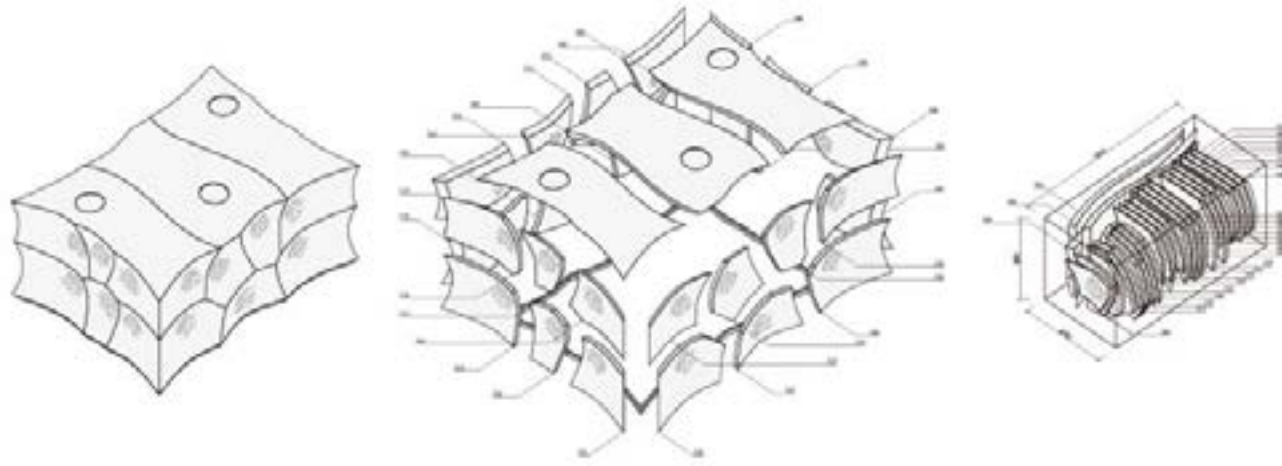
Το σχήμα του περιπτέρου είναι ο αρχετυπικός κύβος που όμως ορίζεται από ένα 'ανορθόδοξο' κέλυφος που λειτουργεί και ως φέρουσα κατασκευή, αποτελούμενο από λεπτά φύλλα κόντρα πλακέ με πολύπλοκα ανοίγματα που αλληλεπιδρούν με τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Η μορφή καθορίστηκε υπολογιστικά σύμφωνα με την ιδιότητα του ξύλου να κάμπτεται δημιουργώντας κωνικές επιφάνειες. Έτσι, παράχθηκαν 28 γεωμετρικός διαφοροποιημένα φύλλα με 1100 ανοίγματα που αντιδρούν στην υγρασία. Χρησιμοποιείται και εδώ η κίνηση του κώνου ελάτης, που εντάσσεται στο σύστημα μέσω μιας δομής δύο επιπέδων. Το εξωτερικό επίπεδο αποτελείται από παράλληλα, μακριά και πυκνά κύτταρα και αντιδρά υγροσκοπικά με την αυξομείωση της υγρασίας, μέσω της διαστολής και συστολής, ενώ το εσωτερικό επίπεδο παραμένει σταθερό. Η τελική διαφορά στις διαστάσεις των δύο επιπέδων μεταφράζεται σε κίνηση στα πτερύγια του κώνου. Στο περίπτερο, τα ανοίγματα αλληλεπιδρούν με τη μεταβολή της υγρασίας σε εύρος από 30% ως 90%, το οποίο αντιστοιχεί στο εύρος υγρασίας από τον ηλιόλουστο σε βροχερό καιρό σε ένα μέσο κλίμα. Αυτή η διαρκής αλληλεπίδραση με το μικρόκlima, αλλάζει συνεχώς τα όρια, την πρόσληψη φωτός και την εξωστρέφεια του περιπτέρου. Η χωρική εμπειρία εντείνεται από αυτή τη λεπτή και σιωπηλή κίνηση του κελύφους, το οποίο μπορεί να διαισθάνεται, να ενεργοποιείται και να αντιδρά.<sup>58</sup>

Η διαφορά αυτού του περιπτέρου με το προηγούμενο παράδειγμα είναι ότι λειτουργεί με ακριβώς τον αντίθετο τρόπο. Τα λεπτά φύλλα ξύλου, ανοίγουν με την μείωση της υγρασίας. Αυτό σημαίνει ότι σε μία ηλιοφανή μέρα ανοίγουν και όταν πλησιάζει η βροχή κλείνουν. Και αυτή η οικολογική ενσωμάτωση επιτρέπει έναν μοναδικό συνδυασμό υλικής και χωρικής εμπειρίας που είναι βασισμένη σε αυτή την αθόρυβη και λεπτή κίνηση της διαφάνειας/ημιδιαφάνειας των υλικών.

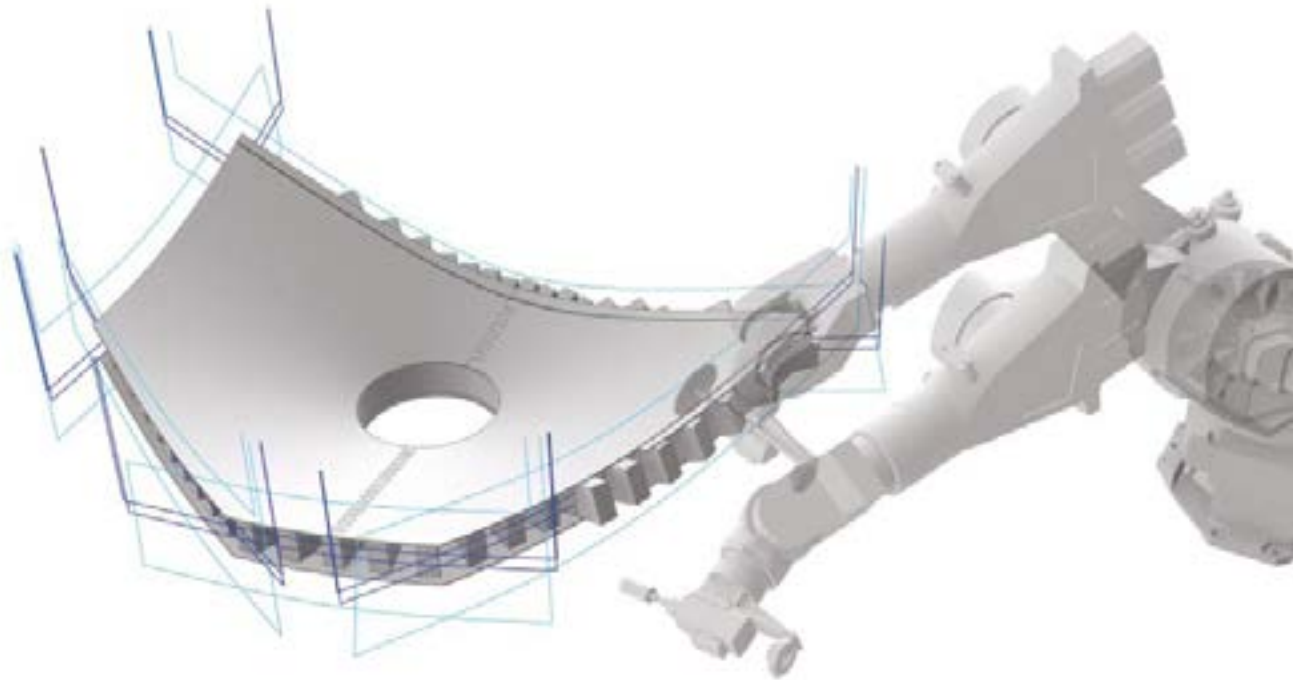


Εικόνα 133. Κίνηση ανοιγμάτων χωρίς την βοήθεια τεχνολογικού εξοπλισμού

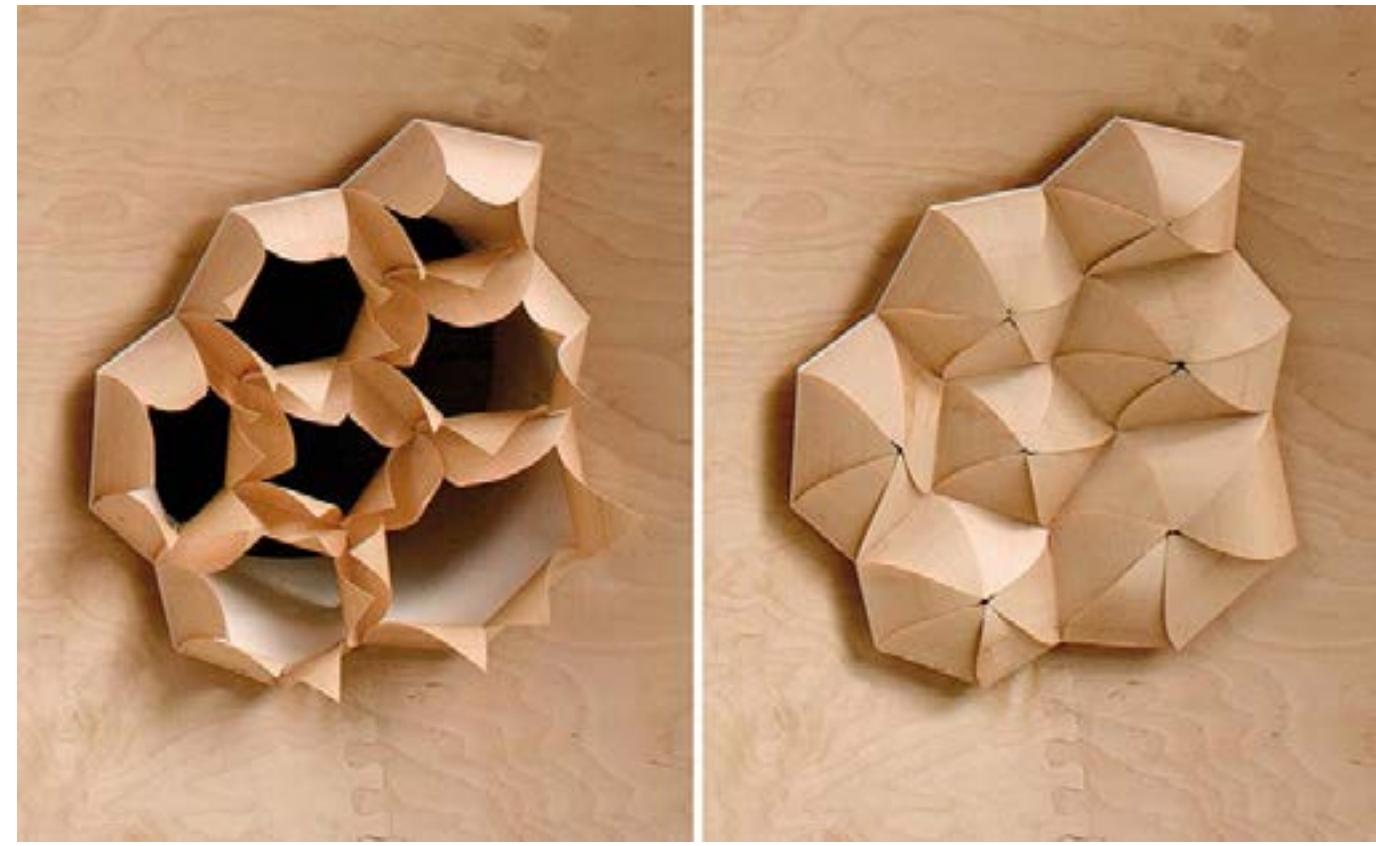




Εικόνα 134. Σκίτσο κατασκευαστικής ιδέας αρθρωτών στοιχείων



Εικόνα 135. Προσομοίωση ρομποτικού μηχανήματος για την κοπή των πτυχωτών αρθρώσεων



3.7.3 Πύργος Urbach ICD/ITKE Πανεπιστήμιο Στουτγκάρδης 2019



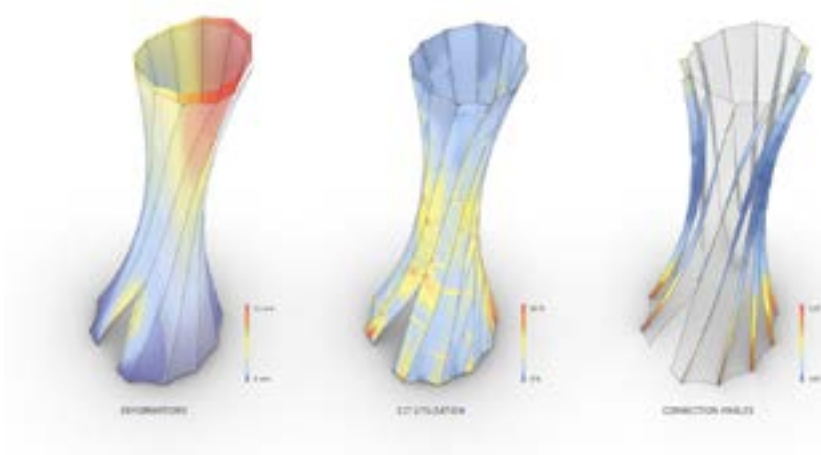
Εικόνα 137. Urbach Tower / ICD/ITKE University of Stuttgart

Εικόνα 138. Καμπύλωση ξύλου λόγω υγρασίας

Το σχέδιο του πύργου αναδύθηκε από μία νέα αυτοδιαμορφωμένη διαδικασία απο συνθετικά στοιχεία καμπυλωμένων ξύλινων στοιχείων. Αυτή η πρωτοποριακή ανάπτυξη αποτελεί ένα παράδειγμα αλλαγής της ξύλινης κατασκευής από μία λεπτομερή και ενεργειακή εντατική μηχανική διαδικασία που απαιτεί βαριά μηχανήματα σε μια διαδικασία όπου το υλικό παίρνει μορφή ολοκληρωτικά από μόνο του.

Η μορφολογική αλλαγή οδηγείται μόνο από το χαρακτηριστικό του ξύλου που είναι να συρρικνώνεται κατά την διάρκεια της μείωσης της περιεκτικότητας της υγρασίας. Τα συνθετικά στοιχεία του πύργου που φτάνει τα 14 μέτρα, έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σε μία επίπεδη κατάσταση και μετατρέπεται αυτόνομα σε μία τελική προβλέψιμη καμπυλότητα της μορφής κατά την διάρκεια του βιομηχανικού προτύπου τεχνικής ξήρανσης.

Πράγμα που ανοίγει μια νέα και απροσδόκητη αρχιτεκτονική πιθανότητα στις ξύλινες κατασκευές, χρησιμοποιώντας βιώσιμα, ανανεώσιμα και τοπικά προερχόμενα κτιριακά υλικά.<sup>59</sup>



Εικόνα 141. Ανάλυση σχεδίου



Εικόνα 139. Λεπτομέρεια Κορυφής



Εικόνα 140. Καμπύλωση ξύλινων στοιχείων

59 <https://www.archdaily.com/917581/urbach-tower-icd-itke-university-of-stuttgart>



### 3.8 Συμπεράσματα

Μετά την ανάλυση της εν συνεχεία διερεύνησης και της αρχιτεκτονικής σύνθεσης του Achim Menges παρατηρούνται τα εξής βασικά χαρακτηριστικά:

- Η **έμπνευση απο φυσικά μοντέλα**. Με την αφαιρετική μέθοδο χρησιμοποιεί τα στοιχεία που χρειάζεται για να πετύχει την υψηλή αποδοτικότητα στον σχεδιασμό και έπειτα στο φυσικό μοντέλο.
- Η **ψηφιακή τεχνολογία**, που επιτρέπει την παραμετροποίηση και την αλληλεπίδραση πολλών παραγόντων (είτε ανθρώπινου, είτε περιβαλλοντικού, είτε κλιματικού) στην τελική μορφή του μοντέλου(co-design).
- Η **ρομποτική τεχνολογία**, που βελτιστοποιεί την παραγωγή και συγκεκριμένα την τοπική παραγωγή μιας και τα ρομπότ μπορούν να μεταφερθούν.
- Τα **υλικά**. Νέα υλικά που απαιτούν ρομποτική τεχνολογία για να πάρουν μορφή. 'Παλιά' υλικά που εξαντλεί τις ιδιότητές τους. Και στις δύο περιπτώσεις αλλάζει τον τρόπο αντίληψης μας για τα υλικά καθώς έχουν κυρίαρχο ρόλο στην τελική μορφή.

Και συνδιαστικά δημιουργούν νέες χωρικές εμπειρίες. Ενώ αποτελούν παραδείγματα μιας αρχιτεκτονικής που είναι ταυτόχρονα αποδοτική και αποτελεσματική αλλά και εκφραστική.

Τέλος, το πιο σημαντικό για την επίτευξη αυτής της έρευνας του Achim Menges είναι, η συνεργασία πολλών επιστημονικών κλάδων:

Δομικοί Μηχανικοί(structural engineers), βιολόγοι, επιστήμονες υπολογιστών (computer scientists), επιστήμονες υλικών (material scientists ) και φυσικά αρχιτέκτονες. όπου όλα συνδέονται με τον υπολογιστικό σχεδιασμό (computational design).



ΕΠΙΛΟΓΟΣ





Σε όλη την πορεία της βιομιμητικής αναζήτησης στην αρχιτεκτονική παρατηρείται μια αργή αλλά βαθιά αλλαγή στον τρόπο προσέγγισης, τόσο στη δομή όσο και στην μέθοδο που ακολουθεί η ανέγερση ενός κτιρίου, το ανάλογο της μορφογένεσης.

Η βιομίμηση δεν είναι επιστήμη αλλά παίρνει μορφή με την βοήθεια των σχετικών επιστημών και με την μελέτη των φυσικών παραδειγμάτων, πετυχαίνοντας την διεπιστημονική έρευνα, την αλληλεπίδραση και συνεργασία (co- design) διαφορετικών ειδικοτήτων.

Σε πρακτικό επίπεδο, η βιομίμηση βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο και αποτελεί μια έρευνα σε εξέλιξη, που μια μεγαλύτερη ενημέρωση θα βοηθούσε στην ανάπτυξη της και με την βοήθεια των ψηφιακών μέσων μπορεί να προσφέρει ένα μεγάλο εύρος καινοτόμων αρχιτεκτονικών λύσεων.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό της βιομίμησης που έρχεται κόντρα στην αρχιτεκτονική φιλοδοξία για κτίρια που διαρκούν είναι η εφημερότητα. Η οποία συμπληρώνει κατα μια έννοια την βιολογική αρχή της ζωής, που είναι ότι όπως ένας ζωντανός οργανισμός, έτσι και το κτίριο αναπτύσσεται (grow), ανταποκρίνεται και προσαρμόζεται στο γύρω περιβάλλον, “πεθαίνει” και ανακυκλώνεται. Καθώς όπως και ο φυσικός έτσι και τεχνητός κόσμος κυριαρχείται απο κοινά μαθηματικά και φυσικές δυνάμεις.

Σημαντική πλέον είναι η ανάπτυξη μιας οικολογικής προσέγγισης και ο αναπροσδιορισμός της σχέσης που αντιμετωπίζει ο άνθρωπος το φυσικό. Η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής με έναν φιλικό προς το περιβάλλον σχεδιασμό, μαθαίνοντας απο την πολυπλοκότητα της φύσης, θα βοηθήσει στην ανάπτυξη ενός σχεδιασμού με την φύση και όχι ενάντια σε αυτή.

Τέλος, η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας ωθεί στον επαναπροσδιορισμό του ρόλου της αρχιτεκτονικής, όπου στόχος θα είναι να υπηρετείτε μια συλλογική αξία που μεταβάλλεται δυναμικά σε σχέση με το ευρύτερο πλαίσιο στο οποίο αναπτύσσεται. Η καινοτομία σε ένα τέτοιο πλαίσιο μπορεί να γεννηθεί μέσα απο μια διαφορετική θεώρηση των πραγμάτων, ένα διαφορετικό τρόπο σκέψης, όπου η φύση θα λειτουργεί ως μέντορας. Ενώ, το πετυχημένο αποτέλεσμα, κρίνεται απο το πόσο καλά έχουν κατανοηθεί οι αρχές της φύσης και η διαφορά ανάμεσα στην οικοδόμηση στον φυσικό και τεχνητό κόσμο, αν έχει χρησιμοποιηθεί ένα επαρκές επίπεδο αφαίρεσης πριν την υλοποίηση, καθώς και αν η έρευνα έχει χρησιμοποιήσει επαρκής πληροφορίες απο την επιστήμη της βιολογίας.

## [Βιβλιογραφία]

### Βιβλία

- Γιαννούδης, Σωκράτης, Προσαρμόσιμη αρχιτεκτονική : δυνατότητες και παράγοντες σχεδιασμού μεταβαλλόμενων και "ευφυών" χώρων, Αθήνα 2012
- Ουγγρίνης, Κωσταντίνος - Αλκέτας, Μεταβαλλόμενη Αρχιτεκτονική : Κίνηση, Προσαρμογή, Ευελιξία, Αθήνα 2012
- D' Archy W. Thompson, Ανάπτυξη και Μορφή στον Φυσικό Κόσμο, Αθήνα 1999
- Menin, Sarah, Nature and space : Aalto and Le Corbusier, London New York, 2003
- Michael Fox, Interactive architecture : adaptive world, New York, 2016
- Michael Hensel, Achim Menges and Michael Weinstock, Techniques and Technologies in Morphogenetic Design, London, 2006
- Oosterhuis, Kas, Hyperbodies : toward an e-motive architecture, Basel Boston, 2003
- Senosiain Aguilar, Javier, Bio Architecture, Oxford, 2003
- Winfried Nerdinger, Frei Otto : complete works : lightweight construction, natural design, Basel Boston, 2005

### Διαδικτυακά Βιβλία και Άρθρα

- Achim Menges<sup>1</sup>, Steffen Reichert<sup>2</sup>, Oliver David Krieg, Meteorosensitive Architectures, University of Stuttgart ,2014, [https://www.researchgate.net/publication/293827076\\_Meteorosensitive\\_Architectures](https://www.researchgate.net/publication/293827076_Meteorosensitive_Architectures).
- Arnim von Gleigh, Christian Pade, Ulrich Petshow, Eugen Pissarskoi, Potentials and Trends in Biomimetics, London New York, 2009
- George Hersey, The Monumental Impulse: Architecture's Biological Roots, The MIT Press, 1999
- Nosonovsky.M, Bhushan.B, Nanoscience and Technoogy : Multiscale Dissipative Mechanisms and Hierarchical Surfaces, Friction, Superhydrophobicity, and Biomimetics, Berlin, 2008
- Steffen Reinert, Achim Menges, David Correa, Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness, Germany, 2014
- [http://papers.cumincad.org/data/works/att/acadia19\\_140.pdf](http://papers.cumincad.org/data/works/att/acadia19_140.pdf)

### Έρευνητικές Εργασίες

- Λιονάκη Ελένη, (Απο)κωδικοποιώντας το απρόβλεπτο σύμπαν του Yona Friedman, 2013
- Amal Elshtwei, thesis, Computational Generative Design with Biomimicry Towards Morphogenesis in Digital Architecture, 2018.
- Satu Niemi Master thesis, Biomimicry in Architecture, 2017

- <https://issuu.com/greekarchitects3/docs/180.15.05>
- [https://issuu.com/iouliamarouda/docs/marouda\\_biomimicry](https://issuu.com/iouliamarouda/docs/marouda_biomimicry)

### Ιστοσελίδες

- <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CE%BF%CF%85%CE%B5%CE%B5%CF%81%CE%AD%CE%BD%CE%B9%CE%BF>
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Biomimetics>
- <https://magazine.sangbleu.com/2014/04/29/dead-loads/>
- <https://www.archdaily.com/917581/urbach-tower-icd-itke-university-of-stuttgart>
- <https://www.archisearch.gr/design/elytra-filament-pavilion-vitra-museum/>
- <https://www.britannica.com/science/morphogenesis>
- <https://www.igi-global.com/dictionary/transiting-between-representation-technologies-and-teaching-learning-descriptive-geometry/53850>
- [https://www.youtube.com/watch?v=PbgArau\\_4vI&list=PL4TaNvnmk5POyQ\\_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=10&t=3379s](https://www.youtube.com/watch?v=PbgArau_4vI&list=PL4TaNvnmk5POyQ_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=10&t=3379s)
- [https://www.youtube.com/watch?v=PbgArau\\_4vI&list=PL4TaNvnmk5POyQ\\_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=10&t=3379s](https://www.youtube.com/watch?v=PbgArau_4vI&list=PL4TaNvnmk5POyQ_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=10&t=3379s)
- <http://www.achimmenges.net/?p=4407>
- <http://www.achimmenges.net/?p=4443>
- <http://www.achimmenges.net/?p=5731>
- <http://www.merriam-webster.com/dictionary/biomimetics>

### Βίντεο και Διαλέξεις

- Ι. Ρήγος, Διάλεξη μαθήματος, Ελαφρών Κατασκευών, Πολυτεχνείο Κρήτης
- [https://www.youtube.com/watch?v=zJUboHAbZB4&list=PL4TaNvnmk5POyQ\\_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=2](https://www.youtube.com/watch?v=zJUboHAbZB4&list=PL4TaNvnmk5POyQ_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=2)
- [https://www.youtube.com/watch?v=bVVNQ5-3tjw&list=PL4TaNvnmk5POyQ\\_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=4](https://www.youtube.com/watch?v=bVVNQ5-3tjw&list=PL4TaNvnmk5POyQ_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=4)
- [https://www.youtube.com/watch?v=zZoE5Xbnso0&list=PL4TaNvnmk5POyQ\\_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=5](https://www.youtube.com/watch?v=zZoE5Xbnso0&list=PL4TaNvnmk5POyQ_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=5)
- [https://www.youtube.com/watch?v=yFh8ALTjwTY&list=PL4TaNvnmk5POyQ\\_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=6](https://www.youtube.com/watch?v=yFh8ALTjwTY&list=PL4TaNvnmk5POyQ_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=6)
- [https://www.youtube.com/watch?v=ggx0TZ3BPIY&list=PL4TaNvnmk5POyQ\\_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=7](https://www.youtube.com/watch?v=ggx0TZ3BPIY&list=PL4TaNvnmk5POyQ_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=7)
- [https://www.youtube.com/watch?v=o3mPmUnSR2c&list=PL4TaNvnmk5POyQ\\_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=2&t=0s](https://www.youtube.com/watch?v=o3mPmUnSR2c&list=PL4TaNvnmk5POyQ_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=2&t=0s)
- [https://www.youtube.com/watch?v=7Hcn7VgzdPc&list=PL4TaNvnmk5POyQ\\_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=3](https://www.youtube.com/watch?v=7Hcn7VgzdPc&list=PL4TaNvnmk5POyQ_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=3)
- [https://www.youtube.com/watch?v=elb0NxjM3PE&list=PL4TaNvnmk5POyQ\\_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=8](https://www.youtube.com/watch?v=elb0NxjM3PE&list=PL4TaNvnmk5POyQ_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=8)



- [https://www.youtube.com/watch?v=PbgArau\\_4vI&list=PL4TaNvnmk5POyQ\\_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=9](https://www.youtube.com/watch?v=PbgArau_4vI&list=PL4TaNvnmk5POyQ_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=9)
- [https://www.youtube.com/watch?v=\\_3\\_7sDce6ME](https://www.youtube.com/watch?v=_3_7sDce6ME)
- <https://www.youtube.com/watch?v=KxMGWGcmMNI&list=PL4TaNvnmk5PNP-wvAMYDfxnbOafCCJvz6a&index=25&t=0s>
- <https://www.youtube.com/watch?v=Ctd6ljFiDfI&t=1s>
- <https://parametrichouse.com/the-golden-section/>
- <https://parametrichouse.com/the-golden-section/>
- [https://www.youtube.com/watch?v=0MJib\\_Dovp8&list=PL4TaNvnmk5PNPw-vAMYDfxnbOafCCJvz6a&index=93&t=0s](https://www.youtube.com/watch?v=0MJib_Dovp8&list=PL4TaNvnmk5PNPw-vAMYDfxnbOafCCJvz6a&index=93&t=0s)
- <https://www.youtube.com/watch?v=LjKL-tev8T8&list=PL4TaNvnmk5PNPw-vAMYDfxnbOafCCJvz6a&index=98>
- <https://www.youtube.com/watch?v=Y6njchZ5Yfc&list=PL4TaNvnmk5PM-bRJ9h4NRw2F8enRrT8Ro9&index=3&t=106s>

### Πηγές Εικόνων

- Εικόνα 1 <https://www.pinterest.at/pin/600808406516073748/>
- Εικόνα 2 Satu Niemi Master thesis, Biomimicry in Architecture.
- Εικόνα 3 έως Εικόνα 7 <http://users.sch.gr/esiros/wordpress/?p=2294>
- Εικόνα 8 Προσωπικό αρχείο
- Εικόνα 9 D' Archy W. Thompson, Ανάπτυξη και Μορφή στον Φυσικό Κόσμο, Αθήνα 1999, σελ 264
- Εικόνα 10 <https://gr.pinterest.com/pin/430375308118931800/>
- Εικόνα 11 έως Εικόνα 12 D' Archy W. Thompson, Ανάπτυξη και Μορφή στον Φυσικό Κόσμο, Αθήνα 1999
- Εικόνα 13 <http://www.iaacblog.com/programs/tensegrity-chair/>
- Εικόνα 14 έως Εικόνα 15 Προσωπικό αρχείο
- Εικόνα 16 <https://www.pinterest.es/pin/598556606695001507/>
- Εικόνα 17 <https://www.treehugger.com/sustainable-product-design/the-water-cube-bubble-clad-olympic-wonder.html>
- Εικόνα 18 Senosiain Aguilar, Javier, Bio Architecture, Oxford, 2003
- Εικόνα 19 <https://www.pinterest.jp/pin/42784265180783880>
- Εικόνα 20 <https://www.flickr.com/photos/equinoxgraphics/4499142567>
- Εικόνα 21 Winfried Nerdinger, Frei Otto : complete works : lightweight construction, natural design, Basel Boston, 2005
- Εικόνα 22 έως 23 Προσωπικό αρχείο
- Εικόνα 24 <http://miriamrogers.co.uk/wp-content/uploads/2012/09/dragon-fly-wing.jpg>
- Εικόνα 25 [https://www.123rf.com/photo\\_27537097\\_sea-urchin-shell-showing-intricate-pattern-details.html](https://www.123rf.com/photo_27537097_sea-urchin-shell-showing-intricate-pattern-details.html)
- Εικόνα 26 έως Εικόνα 27 Προσωπικό αρχείο

- Εικόνα 28 Amal Elshtwei, thesis, Computational Generative Design with Biomimicry Towards Morphogenesis in Digital Architecture, 2018.
- Εικόνα 29 Michael Hensel, Achim Menges and Michael Weinstock, Techniques and Technologies in Morphogenetic Design, London, 2006
- Εικόνα 30 Amal Elshtwei, thesis, Computational Generative Design with Biomimicry Towards Morphogenesis in Digital Architecture, 2018.
- Εικόνα 31 έως 32 <http://dailyarticle.gr/2015/05/07/i-panemorfi-geometria-ton-fyton/>
- Εικόνα 33 Προσωπικό αρχείο
- Εικόνα 34 <https://gr.pinterest.com/pin/6333255703759563/>
- Εικόνα 35 Winfried Nerdinger, Frei Otto : complete works : lightweight construction, natural design, Basel Boston, 2005
- Εικόνα 36 Διάλεξη 3. Προτόγονες Κατασκευές\_B\_2015-07-23 Ι. Πήγος
- Εικόνα 37 Senosiain Aguilar, Javier, Bio Architecture, Oxford, 2003
- Εικόνα 38 <http://derrickmccarson.blogspot.com/2016/07/heaven-and-lost-opportunities-of-earth.html> και <https://edition.cnn.com/2011/11/04/living/da-vinci-inventions/index>
- Εικόνα 39 <http://alexioarchitects.blogspot.com/2015/04/filippo-brunelleschi.html> και <https://sites.google.com/site/wwwbrunelleschisworldcom/architecture>
- Εικόνα 40 [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0e/San\\_Carlo\\_alle\\_Quattro\\_Fontane.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0e/San_Carlo_alle_Quattro_Fontane.jpg)
- Εικόνα 41 [https://1gymkomotrobotics.files.wordpress.com/2013/04/duck\\_of\\_vaucanson.jpg](https://1gymkomotrobotics.files.wordpress.com/2013/04/duck_of_vaucanson.jpg)
- Εικόνα 42 <https://handluggageonly.co.uk/2015/11/30/10-picture-esque-gaudi-buildings-in-barcelona/>
- Εικόνα 43 <https://www.atlasofplaces.com/architecture/johnson-wax-head-quarters/#figure-28> και Senosiain Aguilar, Javier, Bio Architecture, Oxford, 2003
- Εικόνα 44 Senosiain Aguilar, Javier, Bio Architecture, Oxford, 2003
- Εικόνα 45 Winfried Nerdinger, Frei Otto : complete works : lightweight construction, natural design, Basel Boston, 2005
- Εικόνα 46 [https://www.researchgate.net/publication/325992089\\_Octahedron-based\\_spatial\\_bar\\_structures\\_-\\_the\\_form\\_of\\_large\\_areas\\_covers/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/325992089_Octahedron-based_spatial_bar_structures_-_the_form_of_large_areas_covers/figures?lo=1)
- Εικόνα 47 <https://www.theguardian.com/artanddesign/2018/nov/18/archigram-60s-architects-vision-urban-living-the-book#img-3>
- Εικόνα 48 <https://www.thedailybeast.com/how-close-are-we-to-a-fully-bionic-body>
- Εικόνα 49 <http://alapontasins.com/index.php/en/component/easyblog/entry/viaje-empresas-farmaceuticas-alemania?Itemid=101>
- Εικόνα 50 <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/64/L%27Ocean>

- ografic%2C\_Valencia%2C\_Spain\_1\_-\_Jan\_07.jpg
- Εικόνα 51 <https://inhabitat.com/building-modelled-on-termites-eastgate-centre-in-zimbabwe/> Eastgate office building mimicking termite mound (Paul 2013) [https://www.researchgate.net/publication/319405350\\_Strategies\\_for\\_ideal\\_indoor\\_environments\\_toward\\_lowzero\\_carbon\\_buildings\\_through\\_a\\_biomimetic\\_approach/figures](https://www.researchgate.net/publication/319405350_Strategies_for_ideal_indoor_environments_toward_lowzero_carbon_buildings_through_a_biomimetic_approach/figures)
  - Εικόνα 52 <https://gr.pinterest.com/pin/350225308500096482/>
  - Εικόνα 53 <http://www.playart.org/viewimage.php?galleryImageID=1964>
  - Εικόνα 54 <https://www.dezeen.com/2015/03/11/frei-otto-a-life-in-projects/>
  - Εικόνα 55 <https://www.dezeen.com/2018/08/27/richard-buckminster-fuller-inventions-models-exhibition-edward-cella-art-architecture-los-angeles-gallery/>
  - Εικόνα 56 <https://gr.pinterest.com/pin/237213105358277817/>
  - Εικόνα 57 <https://www.signify.com/global/specifier/interviews/kas-oosterhuis>
  - Εικόνα 58 <https://www.pinterest.ie/pin/50665564533636623/>
  - Εικόνα 59 <https://www.architecturaldigest.com/story/german-architect-achim-menges>
  - Εικόνα 60 <https://www.pinterest.at/pin/161988917830963472/>
  - Εικόνα 61 <https://gr.pinterest.com/pin/383368987003514998/>
  - Εικόνα 62 <https://gr.pinterest.com/pin/10836855330873111/>
  - Εικόνα 63 <https://worldarchitecture.org/architecture-news/ccngp/alvar-adalto-academy-lecture-frei-otto-%E2%80%93-lightweight-construction-natural-design-by-winfried-nerd.html>
  - Εικόνα 64 <https://gr.pinterest.com/pin/383368987003514994/>
  - Εικόνα 65 έως Εικόνα 66 Winfried Nerdinger, Frei Otto : complete works : lightweight construction, natural design, Basel Boston, 2005
  - Εικόνα 67 <https://www.laetusinpraesens.org/musings/corona.php>
  - Εικόνα 68 [https://www.researchgate.net/publication/331207074\\_A\\_METALLIC\\_1928\\_GODESIC\\_DOME\\_IN\\_ROME\\_CARLINI\\_Alessandra\\_IT\\_TEDESCHINI\\_LALL\\_Laura\\_IT/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/331207074_A_METALLIC_1928_GODESIC_DOME_IN_ROME_CARLINI_Alessandra_IT_TEDESCHINI_LALL_Laura_IT/figures?lo=1)
  - Εικόνα 69 <https://www.navalhistory.org/wp-content/uploads/2016/01/bucky1954.jpg>
  - Εικόνα 70 <https://www.pinterest.cl/pin/35465915787376815/>
  - Εικόνα 71 έως Εικόνα 72 <https://www.daniellaondesign.com/blog/born-on-january-9th-r-buckminster-fuller>
  - Εικόνα 73 [http://www.chem.uoi.gr/sites/default/files/mathimata/nano\\_ilika.pdf](http://www.chem.uoi.gr/sites/default/files/mathimata/nano_ilika.pdf)
  - Εικόνα 74 <https://www.ossila.com/products/double-walled-carbon-nanotubes?variant=35273834305>
  - Εικόνα 75 <https://www.printedelectronicsworld.com/articles/19375/new-production-method-for-carbon-nanotubes-gets-green-light>
  - Εικόνα 77 SALT WATER PAVILION ,1997

- Εικόνα 76 Προσωπικό αρχείο
- Εικόνα 77 <https://archeyes.com/yona-friedman/>
- Εικόνα 78 <http://onl.eu/projects/salt-water-pavilion>
- Εικόνα 79 <http://onl.eu/projects/trans-ports>
- Εικόνα 80 [http://www.oosterhuis.nl/?page\\_id=534](http://www.oosterhuis.nl/?page_id=534)
- Εικόνα 81 έως Εικόνα 82 [http://archtctr2.0.viernulvier.nl/sensory\\_enhanced\\_bamboostic/Sensory%20enhanced%20Bamboostic.htm](http://archtctr2.0.viernulvier.nl/sensory_enhanced_bamboostic/Sensory%20enhanced%20Bamboostic.htm)
- Εικόνα 83 <http://www.achimmenges.net/?p=4407>
- Εικόνα 84 Winfried Nerdinger, Frei Otto : complete works : lightweight construction, natural design, Basel Boston, 2005
- Εικόνα 85 <http://www.achimmenges.net/?p=5083>
- Εικόνα 86 <https://www.itke.uni-stuttgart.de/research/current-research-projects/cluster-of-excellence-integrative-computational-design-and-construction-for-architecture/>
- Εικόνα 87 [https://www.researchgate.net/publication/271745380\\_Biomimetic\\_Lightweight\\_Timber\\_Plate\\_Shells\\_Computational\\_Integration\\_of\\_Robotic\\_Fabrication\\_Architectural\\_Geometry\\_and\\_Structural\\_Design/figures](https://www.researchgate.net/publication/271745380_Biomimetic_Lightweight_Timber_Plate_Shells_Computational_Integration_of_Robotic_Fabrication_Architectural_Geometry_and_Structural_Design/figures)
- Εικόνα 88 [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-46374-2\\_11](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-46374-2_11)
- Εικόνα 89 <http://www.achimmenges.net/?p=5822>
- Εικόνα 90 <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icditke-research-pavilion-2010/>
- Εικόνα 91 <http://www.achimmenges.net/?p=5123>
- Εικόνα 92 [https://www.researchgate.net/publication/271745380\\_Biomimetic\\_Lightweight\\_Timber\\_Plate\\_Shells\\_Computational\\_Integration\\_of\\_Robotic\\_Fabrication\\_Architectural\\_Geometry\\_and\\_Structural\\_Design/figures](https://www.researchgate.net/publication/271745380_Biomimetic_Lightweight_Timber_Plate_Shells_Computational_Integration_of_Robotic_Fabrication_Architectural_Geometry_and_Structural_Design/figures)
- Εικόνα 93 <https://www.itke.uni-stuttgart.de/research/built-projects/landesgartenschau-exhibition-hall-2014/>
- Εικόνα 94 έως Εικόνα 95 <https://www.itke.uni-stuttgart.de/research/built-projects/landesgartenschau-exhibition-hall-2014/>
- Εικόνα 96 <https://www.arch2o.com/landesgartenschau-exhibition-hall-icd-itke-iigs-university-of-stuttgart/>
- Εικόνα 97 <https://www.archdaily.com/916758/buga-wood-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart>
- Εικόνα 98 <https://www.archdaily.com/916758/buga-wood-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd4a52e284dd1d22b0000f2-buga-wood-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart-laga-vs-buga>
- Εικόνα 99 <https://www.archdaily.com/916758/buga-wood-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd4a4e7284dd1d22b0000ef-buga-wood-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart-explosion-diagram>
- Εικόνα 100 <https://www.archdaily.com/916758/buga-wood-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd4a565284dd103960000a2-buga-wood-pavil>



- ion-icd-itke-university-of-stuttgart-fabrication-diagram?next\_project=no
- Εικόνα 101 [https://www.archdaily.com/916758/buga-wood-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd4a469284dd1039600009c-buga-wood-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart-design-diagram?next\\_project=no](https://www.archdaily.com/916758/buga-wood-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd4a469284dd1039600009c-buga-wood-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart-design-diagram?next_project=no)
  - Εικόνα 102 <https://www.archdaily.com/781521/achim-menges-to-create-robotic-pavilion-for-v-and-a/56b24f05e58ecefad3000791-achim-menges-to-create-robotic-pavilion-for-v-and-a-photo>
  - Εικόνα 103 [https://www.youtube.com/watch?v=PbgArau\\_4vI&list=PL4TaNvn-mk5POyQ\\_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=10&t=3379s](https://www.youtube.com/watch?v=PbgArau_4vI&list=PL4TaNvn-mk5POyQ_DRd-cGlcXrS6VqX8Bc&index=10&t=3379s)
  - Εικόνα 104 <https://www.archdaily.com/522408/icd-itke-research-pavilion-2015-icd-itke-university-of-stuttgart/53b2149bc07a80790f0001ce-icd-itke-research-pavilion-2015-icd-itke-university-of-stuttgart-image>
  - Εικόνα 105 <http://moritzdoerstelmann.com/portfolio/1424/>
  - Εικόνα 106 <https://www.archdaily.com/522408/icd-itke-research-pavilion-2015-icd-itke-university-of-stuttgart/53b214dbc07a80790f0001d2-icd-itke-research-pavilion-2015-icd-itke-university-of-stuttgart-image>
  - Εικόνα 107 <https://www.archdaily.com/522408/icd-itke-research-pavilion-2015-icd-itke-university-of-stuttgart/53b215d4c07a80790f0001dc-icd-itke-research-pavilion-2015-icd-itke-university-of-stuttgart-image>
  - Εικόνα 108 <https://www.archdaily.com/522408/icd-itke-research-pavilion-2015-icd-itke-university-of-stuttgart/53b212a2c07a806b4b0001b3-icd-itke-research-pavilion-2015-icd-itke-university-of-stuttgart-image>
  - Εικόνα 109 <https://www.archdaily.com/522408/icd-itke-research-pavilion-2015-icd-itke-university-of-stuttgart/53b2150cc07a80eb1c000206-icd-itke-research-pavilion-2015-icd-itke-university-of-stuttgart-image>
  - Εικόνα 110 <https://www.archisearch.gr/design/elytra-filament-pavilion-vitra-museum/>
  - Εικόνα 111 <http://moritzdoerstelmann.com/portfolio/1424/>
  - Εικόνα 112 <http://moritzdoerstelmann.com/wp-content/uploads/2016/08/localproduction.jpg>
  - Εικόνα 113 <https://www.archisearch.gr/design/elytra-filament-pavilion-vitra-museum/>
  - Εικόνα 114 <http://moritzdoerstelmann.com/portfolio/1424/>
  - Εικόνα 115 <https://www.archdaily.com/916650/buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd2f144284dd1fd6300001a-buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart-image>
  - Εικόνα 116 [https://www.archdaily.com/916650/buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd2ed11284dd1e63e00001c-buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart-diagram-6?next\\_project=no](https://www.archdaily.com/916650/buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd2ed11284dd1e63e00001c-buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart-diagram-6?next_project=no)
  - Εικόνα 117 [https://www.archdaily.com/916650/buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd2ee6a284dd1fd6300000b-buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart-diagram-7?next\\_project=no](https://www.archdaily.com/916650/buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd2ee6a284dd1fd6300000b-buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart-diagram-7?next_project=no)

- ke-university-of-stuttgart-diagram-7?next\_project=no
- Εικόνα 118 [https://www.archdaily.com/916650/buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd2ee84284dd1e63e00001e-buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart-diagram-8?next\\_project=no](https://www.archdaily.com/916650/buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd2ee84284dd1e63e00001e-buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart-diagram-8?next_project=no)
  - Εικόνα 119 [https://www.archdaily.com/916650/buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd2eea9284dd1fd6300000c-buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart-diagram-9?next\\_project=no](https://www.archdaily.com/916650/buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd2eea9284dd1fd6300000c-buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart-diagram-9?next_project=no)
  - Εικόνα 120 <https://www.archdaily.com/916650/buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd2eeef284dd1fd6300000e-buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart-plan>
  - Εικόνα 121 [https://www.archdaily.com/916650/buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd2ef14284dd1fd6300000f-buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart-section?next\\_project=no](https://www.archdaily.com/916650/buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd2ef14284dd1fd6300000f-buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart-section?next_project=no)
  - Εικόνα 122 <https://www.archdaily.com/916650/buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd2f0e8284dd1fd63000018-buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart-image>
  - Εικόνα 123 <https://www.archdaily.com/916650/buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart/5cd2ecb9284dd1fd63000009-buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart-diagram-1>
  - Εικόνα 124 <http://www.achimmenges.net/index.php/nggallery/page/1?p=5612>
  - Εικόνα 125 <https://www.semanticscholar.org/paper/Meteorosensitive-architecture%3A-Biomimetic-building-Reichert-Menges/08845600b752391cc95ace-ee3b2865319e048785/figure/1>
  - Εικόνα 126 έως Εικόνα 127 <http://s3.amazonaws.com/arena-attachments/1501073/8cf9a7e4e62ad52f2f3bd65faed19824.pdf?1513037335>
  - Εικόνα 128 <https://www.semanticscholar.org/paper/Meteorosensitive-architecture%3A-Biomimetic-building-Reichert-Menges/08845600b752391cc95ace-ee3b2865319e048785/figure/6>
  - Εικόνα 129 έως Εικόνα 130 <http://www.achimmenges.net/?p=5083>
  - Εικόνα 131 έως Εικόνα 136 <http://www.achimmenges.net/?p=5612>
  - Εικόνα 137 <https://www.archdaily.com/917581/urbach-tower-icd-itke-university-of-stuttgart/5ce4ac82284dd10204000623-urbach-tower-icd-itke-university-of-stuttgart-photo>
  - Εικόνα 138 [https://www.archdaily.com/917581/urbach-tower-icd-itke-university-of-stuttgart/5ce4aaaf284dd14bfd0000fa-urbach-tower-icd-itke-university-of-stuttgart-process?next\\_project=no](https://www.archdaily.com/917581/urbach-tower-icd-itke-university-of-stuttgart/5ce4aaaf284dd14bfd0000fa-urbach-tower-icd-itke-university-of-stuttgart-process?next_project=no)
  - Εικόνα 139 <https://www.archdaily.com/917581/urbach-tower-icd-itke-university-of-stuttgart/5ce4acfb284dd14bfd000106-urbach-tower-icd-itke-university-of-stuttgart-photo>

- Εικόνα 140 <https://www.archdaily.com/917581/urbach-tower-icd-itke-university-of-stuttgart/5ce4aaa5284dd1020400061b-urbach-tower-icd-itke-university-of-stuttgart-photo>
- Εικόνα 141 [https://www.archdaily.com/917581/urbach-tower-icd-itke-university-of-stuttgart/5ce4abb4284dd14bfd0000ff-urbach-tower-icd-itke-university-of-stuttgart-proccess?next\\_project=no](https://www.archdaily.com/917581/urbach-tower-icd-itke-university-of-stuttgart/5ce4abb4284dd14bfd0000ff-urbach-tower-icd-itke-university-of-stuttgart-proccess?next_project=no)
- Εικόνα 142 <https://gr.pinterest.com/pin/540502392777105624/>
- Εικόνα 143 <https://gr.pinterest.com/pin/374643262733986715/>
- Εικόνα 144 <https://gr.pinterest.com/pin/497014508858610157/>
- logo Πολυτεχνείου Κρήτης <http://hostileocean.blogspot.com/2010/12/blog-post.html?m=0>