

ΒΙΟΜΙΜΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

ΜΕΤΑΓΡΑΦΟΝΤΑΣ ΤΗ ΓΝΩΣΗ ΤΗΣ ΦΥΣΗΣ



Επιμέλεια: Νικόλης Σ., Τζαμούσης Γ.
Επιβλέπουσα: Καραμανέα Π.

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΒΙΟΜΙΜΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ: ΜΕΤΑΓΡΑΦΟΝΤΑΣ ΤΗ ΓΝΩΣΗ ΤΗΣ ΦΥΣΗΣ
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΚΠΟΝΗΣΗ:

ΝΙΚΟΛΗΣ ΣΩΤΗΡΙΟΣ
ΤΖΑΜΟΥΣΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ ΚΑΡΑΜΑΝΕΑ

ΧΑΝΙΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2021

Ευχαριστούμε θερμά την κυρία Καραμανέα για την πολύτιμη βοήθειά της,
τις οικογένειές μας και τους φίλους μας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 ΣΤΟΧΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	8
1.2 ΟΡΙΣΜΟΙ.....	9
1.2.1 Ορισμός της βιομίμησης.....	9
1.2.2 Διαχωρισμός της βιομίμησης από άλλες βιο-προσεγγίσεις.....	10
2. ΕΜΠΝΕΥΣΗ ΑΠΟ ΤΗ ΦΥΣΗ ΑΝΑ ΤΑ ΧΡΟΝΙΑ	13
2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	14
2.2 ANTONI GAUDÍ CORNET (1852-1926).....	22
2.3 FREI OTTO (1925 – 2015).....	26
2.3 SANTIAGO CALATRAVA VALLS (1951-).....	30
3. ΤΩΡΙΝΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ	33
3.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΡΙΣΗ.....	34
3.2 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΡΙΣΗ.....	37
3.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ.....	40

4. ΒΙΟΜΙΜΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ.....	42
4.1 ΒΙΟΜΙΜΗΤΙΚΗ ΛΟΓΙΚΗ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ.....	43
4.1.1. Βιομιμητικές στρατηγικές σχεδιασμού.....	43
Από τον σχεδιασμό στη βιολογία.....	43
Από τη βιολογία στον σχεδιασμό.....	45
4.1.2 Επίπεδα μίμησης.....	47
Επίπεδο οργανισμού.....	48
Επίπεδο συμπεριφοράς.....	50
4.2 Η ΦΥΣΗ ΩΣ ΠΡΟΤΥΠΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ.....	61
4.2.1 Οι αποτελεσματικές δομές της φύσης.....	61
Κοίλοι σωλήνες.....	61
Οστά.....	64
Θολωτές Δομές.....	68
4.2.2 Οι δυνατότητες των υλικών.....	69
Ιεραρχία και διασυνδέσεις.....	70
Περιβαλλοντική απόκριση.....	73
Ανάπτυξη με προσαρμοστική επαύξηση και προσθετική κατασκευή.....	75
Αυτό - σύνθεση επηρεασμένη από το περιβάλλον.....	77
Αυτό-αποκαθιστάμενα υλικά.....	78
Μη τοξικά υλικά.....	79
4.2.3 Διαχείριση των φυσικών πόρων.....	85
Θερμική άνεση.....	85
Διαχείριση του φωτός.....	94
Διαχείριση νερού.....	101

5. ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	108
5.1 EDEN PROJECT.....	109
5.2 SAHARA FOREST PROJECT.....	113
6. ΕΠΙΛΟΓΟΣ	116
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	118
7.1 ΒΙΒΛΙΑ	119
7.2 ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ	120
7.3 ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΑΡΘΡΑ.....	123
7.4 ΕΙΚΟΝΟΓΡΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	125



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΤΟΧΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η σύγχρονη κοινωνία έρχεται συνεχώς αντιμέτωπη με ολοένα και περισσότερες προκλήσεις, οι οποίες οφείλονται σε μη βιώσιμες πρακτικές του παρελθόντος. Η κλιματική αλλαγή, η εξάντληση των φυσικών πόρων και η χρήση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν ήδη αφήσει το αρνητικό τους αντίκτυπο στην ανθρωπότητα και υπογραμμίζουν την ανάγκη για την υιοθέτηση πιο βιώσιμων λύσεων. Σε αντίθεση με τους ανθρώπους, η φύση, μετά από δισεκατομμύρια χρόνια εξέλιξης, έχει αναπτύξει αποτελεσματικούς μηχανισμούς για να λειτουργεί βιώσιμα.

Η μίμηση των βιολογικών οργανισμών έχει τη δυνατότητα να προσφέρει πολύτιμη βοήθεια για την επίλυση των ανθρώπινων προκλήσεων. Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της σημασίας της βιομίμησης και του ρόλου που καλείται να διαδραματίσει στην εξέλιξη της αρχιτεκτονικής. Αρχικά, αναφέρονται οι ορισμοί της βιομίμησης και παραπλήσιων όρων, παρατίθεται η ιστορική αναδρομή της έμπνευσης των αρχιτεκτόνων από τη φύση, ενώ στη συνέχεια τονίζεται η αναγκαιότητα εφαρμογής της βιομίμησης στην αρχιτεκτονική, για τη διαχείριση των τωρινών της προβλημάτων. Έπειτα, αναπτύσσονται οι σύγχρονες θεωρητικές προσεγγίσεις της βιομίμησης, οι πρακτικές εφαρμογές της σε διάφορα επίπεδα της αρχιτεκτονικής, καθώς και παραδείγματα ολοκληρωμένων αρχιτεκτονικών έργων.

Λέξεις κλειδιά: Βιομίμηση, φύση, βιωσιμότητα, βιολογία, τεχνολογική εξέλιξη

1.2 ΟΡΙΣΜΟΙ

1.2.1 Ορισμός της βιομίμησης

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον σχετικά με διάφορους τύπους βιο-εμπνεόμενου σχεδιασμού (bio-inspired design), τόσο στην αρχιτεκτονική όσο και σε άλλους επιστημονικούς κλάδους. Όροι όπως η βιομίμηση, η βιοφιλία, ο βιομορφισμός και η βιο-αξιοποίηση συνθέτουν ένα ευρύ φάσμα σχεδιαστικών προσεγγίσεων, που χρησιμοποιούν τη βιολογία ως πηγή έμπνευσης για την εύρεση λύσεων.

Η φύση έχει επηρεάσει πολλούς αρχιτέκτονες και καλλιτέχνες ανά την ιστορία, οι περισσότεροι από τους οποίους χρησιμοποίησαν τη φύση κυρίως ως πηγή αισθητικής έμπνευσης. Αυτό όμως που χαρακτηρίζει τη βιομίμηση δεν είναι η απλή μίμηση των φυσικών μορφών, αλλά η μίμηση των λειτουργιών της φύσης.

Σύμφωνα με τη βιολόγο και συγγραφέα Janine Benyus, «η βιομίμηση έχει να κάνει με την έρευνα και τη μίμηση των μορφών, των διαδικασιών και των οικοσυστημάτων της φύσης για έναν πιο βιώσιμο σχεδιασμό¹. Εάν ψάξουμε για το τι είναι πραγματικά βιώσιμο, το μοναδικό μοντέλο που έχει λειτουργήσει σε μεγάλα χρονικά διαστήματα είναι ο φυσικός κόσμος.²»

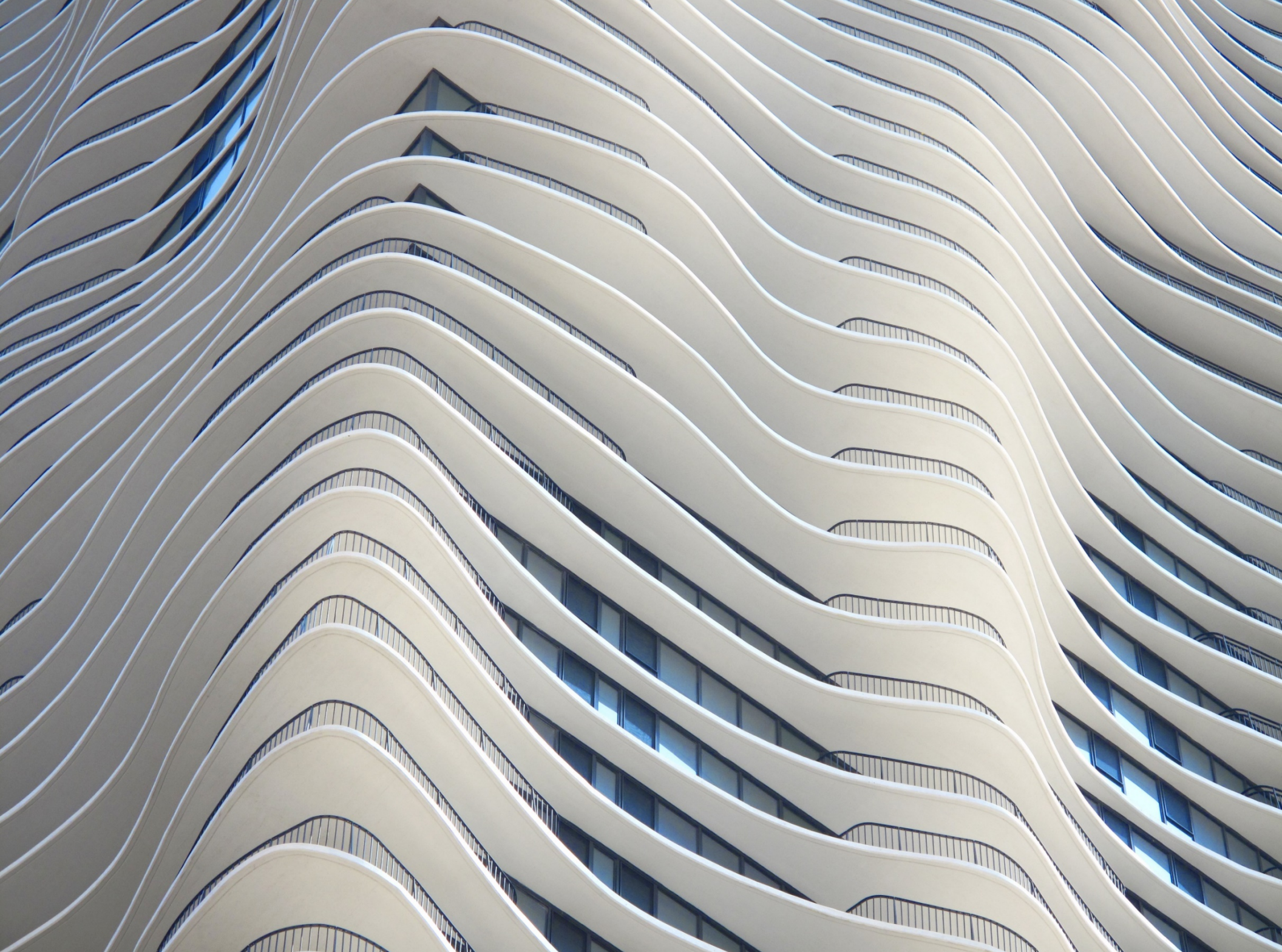
¹ Biomimicry 3.8. What is biomimicry? [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://biomimicry.net/what-is-biomimicry/>

² Biomimicry Institute. What is biomimicry? [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://biomimicry.org/what-is-biomimicry/>

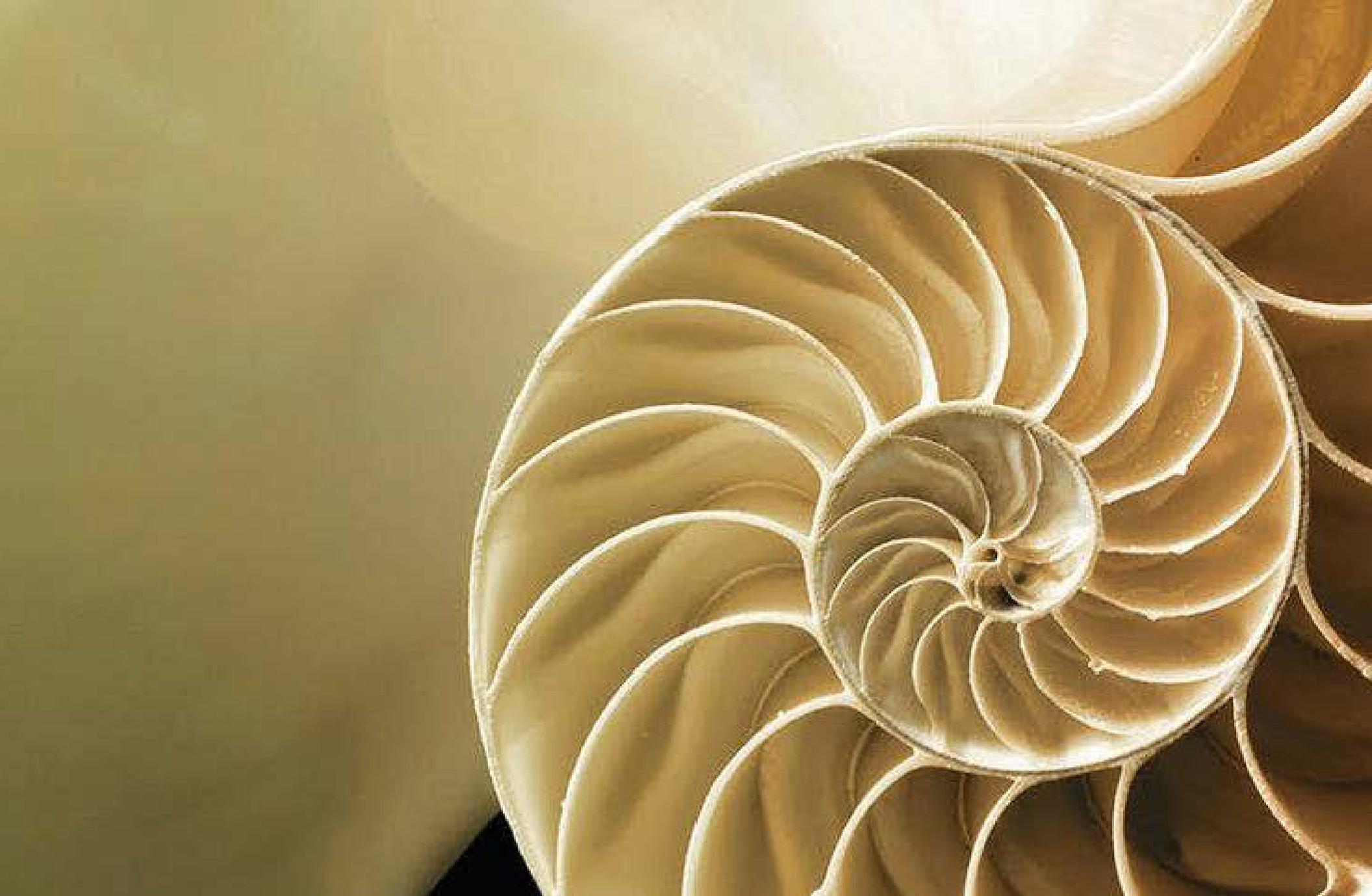
1.2.2 Διαχωρισμός της βιομίμησης από άλλες βιο-προσεγγίσεις

Παρότι η βιομίμηση παρουσιάζει κοινά στοιχεία με άλλες βιο-προσεγγίσεις, είναι αναγκαίος ο διαχωρισμός από αυτές και η υπογράμμιση του διαφορετικού ρόλου που έχει για την αρχιτεκτονική. Αξίζει να αναφερθεί η διαφορά που έχει η βιομίμηση από τον βιομορφισμό. Ενώ ο βιομορφισμός ασχολείται με τη μίμηση φυσικών μορφών και μοτίβων καθαρά για την καλλιτεχνική έκφραση, η βιομίμηση επικεντρώνεται στην αξία των λειτουργικών χαρακτηριστικών της φύσης. Γι' αυτό το λόγο η παρομοίωση με τη φύση δεν είναι απαραίτητα ένδειξη βιομιμητικής σχεδίασης. Παρόλα αυτά, ο βιομορφισμός έχει την δική του ξεχωριστή σημασία, καθώς οι οργανικές μορφές έχουν έμφυτη σχέση με τον άνθρωπο, συμβάλλοντας στην καλύτερη ψυχολογία του και προκαλώντας ποικίλα συναισθήματα. Από αυτή την άποψη, ο βιομορφισμός μπορεί να λειτουργήσει ταυτόχρονα με την πιο τεχνική/επιστημονική προσέγγιση της βιομίμησης και να ενισχύσει τις αρχιτεκτονικές τις αξίες.

Μια παρόμοια διαφορά παρατηρείται και με τη βιο-αξιοποίηση, η οποία αφορά στην άμεση χρήση βιολογικών υλικών ή ζωντανών οργανισμών για λειτουργικούς σκοπούς, όπως για παράδειγμα, τη χρήση του ξύλου για κατασκευές, ή την αξιοποίηση της φύτευσης σε ένα κτήριο για τον καθαρισμό του αέρα ή τον δροσισμό. Αντίστοιχα με τον βιομορφισμό, παρόλο που η βιο-αξιοποίηση μπορεί επιδράσει ενισχυτικά σε μια βιομιμητική προσέγγιση, η ίδια δεν αποτελεί βιομίμηση και δεν πρέπει να συγχέεται με αυτήν.



Εικόνα 1. Ο ουρανοξύστης Aqua Tower στο Σικάγο, επηρεασμένος από τον βιομορφισμό.



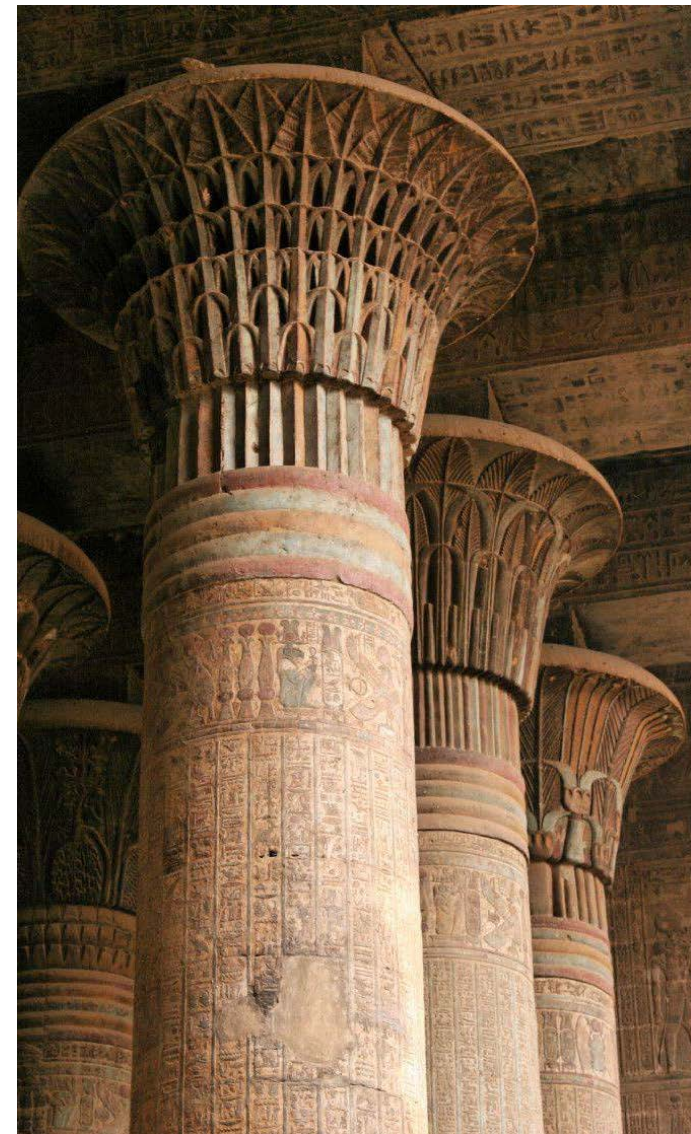
2. ΕΜΠΝΕΥΣΗ ΑΠΟ ΤΗ ΦΥΣΗ ΑΝΑ ΤΑ ΧΡΟΝΙΑ

2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Κατά τη διάρκεια των αιώνων οι αρχιτέκτονες και οι σχεδιαστές συχνά στρέφονταν στη φύση αναζητώντας πηγή έμπνευσης για τη δημιουργία διαφορετικών μορφών και εύρεσης νέων τεχνικών και λειτουργιών. Παραδείγματα από τεχνουργήματα και αρχαία σχέδια που βρέθηκαν σε σπηλιές που κατοικούσαν Ετρούσκοι αποδεικνύουν την έντονη ανάγκη, ήδη των πρώτων κοινωνιών, να αποτυπώνουν και να λατρεύουν την φύση.³ Μορφές φυτικών οργανισμών μπορούν να θεωρηθούν ως ένα από τα σημαντικά διακοσμητικά στοιχεία στα πρώτα παραδείγματα αρχιτεκτονικής, ιδίως στις διακοσμήσεις των αιγυπτιακών ανακτόρων και των πυραμίδων, αλλά μέχρι και των Ιερογλυφικών της αρχαίας περιόδου της Αιγύπτου (3000 π.Χ. έως 600 π.Χ.). Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου υπάρχει πληθώρα αιγυπτιακών στηλών με βασικό χαρακτηριστικό το λάξευμά τους για να μοιάζουν με κορμούς δέντρων, δεσμίδες καλάμων ή μίσχους φυτών και των κιονόκρανων με μοτίβα φυτού κρίνου, λωτού, φοίνικα ή πάπυρου. Η μίμηση των φυσικών μορφών παρατηρείται και σε άλλους μεταγενέστερους πολιτισμούς όπως στην αρχαία Ελλάδα και τη Ρώμη με την αντιγραφή φυτών ως διάκοσμο των κτηρίων (μορφή του φυτού Άκανθας στα κιονόκρανα του κορινθιακού ρυθμού).⁴ Ο Αριστοτέλης τοποθετεί την φύση στο επίκεντρο των επιστημονικών του μελετών. Στο βιβλίο του «Τῶν περὶ τὰ ζῷα ἱστοριῶν» περιγράφει διάφορα ζωολογικά φαινόμενα.

Αιώνες αργότερα, στην αρχή του μεσαίωνα, τον 12ο αιώνα, μεγάλα ανοίγματα και καλύτερη μεταφορά φορτίων στις γοτθικές εκκλησίες επιτεύχθηκε από τους αρχιτέκτονες, επηρεασμένοι από τα δέντρα.

Εικόνα 2: Αιγυπτιακοί κίονες σε σχήμα του φυτού Λωτού



³ Mazzoleni, I., (2013). *Architecture Follows Nature-Biomimetic Principles for Innovative Design*, Florida: CRC Press

⁴ Moheb, S. A., Amr Y., (2016). *Biomimicry as an approach for bio-inspired structure with the aid of computation*. Alexandria Engineering Journal, 55 (1), 707-714, [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016815001702#!>



Κατά τη διάρκεια της εποχής των μεγάλων εξερευνήσεων και ιδίως μετά την ανακάλυψη της Αμερικής (1492), πλήθος Ευρωπαίων νατουραλιστών τεκμηρίωσαν τις παρατηρήσεις τους, δημιουργώντας ακριβή σχέδια που αντέγραφαν την φύση. Ως αποτέλεσμα αυτού, η επιστήμη εξελίχθηκε χρησιμοποιώντας εργαλεία που δανείστηκε από τον κόσμο της τέχνης. Οι σπουδαιότεροι φυσιοδίφες της ιστορίας, όπως ο Leonardo da Vinci (1452-1519), ο Konrad Gessner (1516-1565), και η Ulisse Aldrovandi (1522-1605), μεταξύ άλλων, παρήγαγαν εκπληκτικά ενημερωτικά σχέδια. Το «*Historiae animalium*» του Gessner, που δημοσιεύθηκε στην Ελβετία περίπου το 1555, θεωρείται η πρώτη εγκυκλοπαιδική εργασία αφιερωμένη στην τεκμηρίωση όλων των γνωστών ζώων, το οποίο συμπεριλάμβανε εικονογραφήσεις, που σχεδιάστηκαν κυρίως από τον Lucas Schan. Το βιβλίο είχε τέτοιο αντίκτυπο που λίγα χρόνια αργότερα όλες οι εικόνες του συλλέχθηκαν σε ένα ξεχωριστό βιβλίο, το «*Icones Animalium*» (1560).

Η σημασία που δόθηκε στην επιστημονική παρατήρηση οφείλεται στον Aldrovandi. Οι εικονογραφήσεις του με νερομπογιές και τέμπρα, σε συνδυασμό με μια πλούσια συλλογή σχεδίων που προετοιμάστηκε στο ατελιέ του από καλλιτέχνες που προσέλαβε και επέβλεπε, απεικόνιζαν ρεαλιστικά διάφορους οργανισμούς, μελετημένους με ακρίβεια στις εξωτερικές αλλά και στις εσωτερικές τους λεπτομέρειες.

Εικόνα 3: Ζωγραφιά με νερομπογιές και τέμπρες από το βιβλίο *historiae animalium*

Ο Leonardo Da Vinci ήταν ο πρώτος που αντιμετώπισε τη φύση, όχι μόνο μιμούμενος επιδερμικά τις φυσικές μορφές, αλλά μελετώντας σε βάθος τα στοιχεία της φύσης με απώτερο σκοπό να δώσει λύσεις σε διάφορα προβλήματά του. Η παρότρυνση του μέντορά του να σχεδιάζει φιγούρες από μέσα προς τα έξω τον ώθησε στην μελέτη της ανθρώπινης ανατομίας και όχι μόνο. Επίσης η περίφημη «χρυσή αναλογία», μια μαθηματική αρχή που επαναλαμβάνεται σε όλα, από τη διάταξη των κλαδιών δέντρων έως τα οστά του ανθρώπινου χεριού, φαίνεται να χρησιμοποιείται στο έργο του προκειμένου να επιτευχθεί η αρμονία.

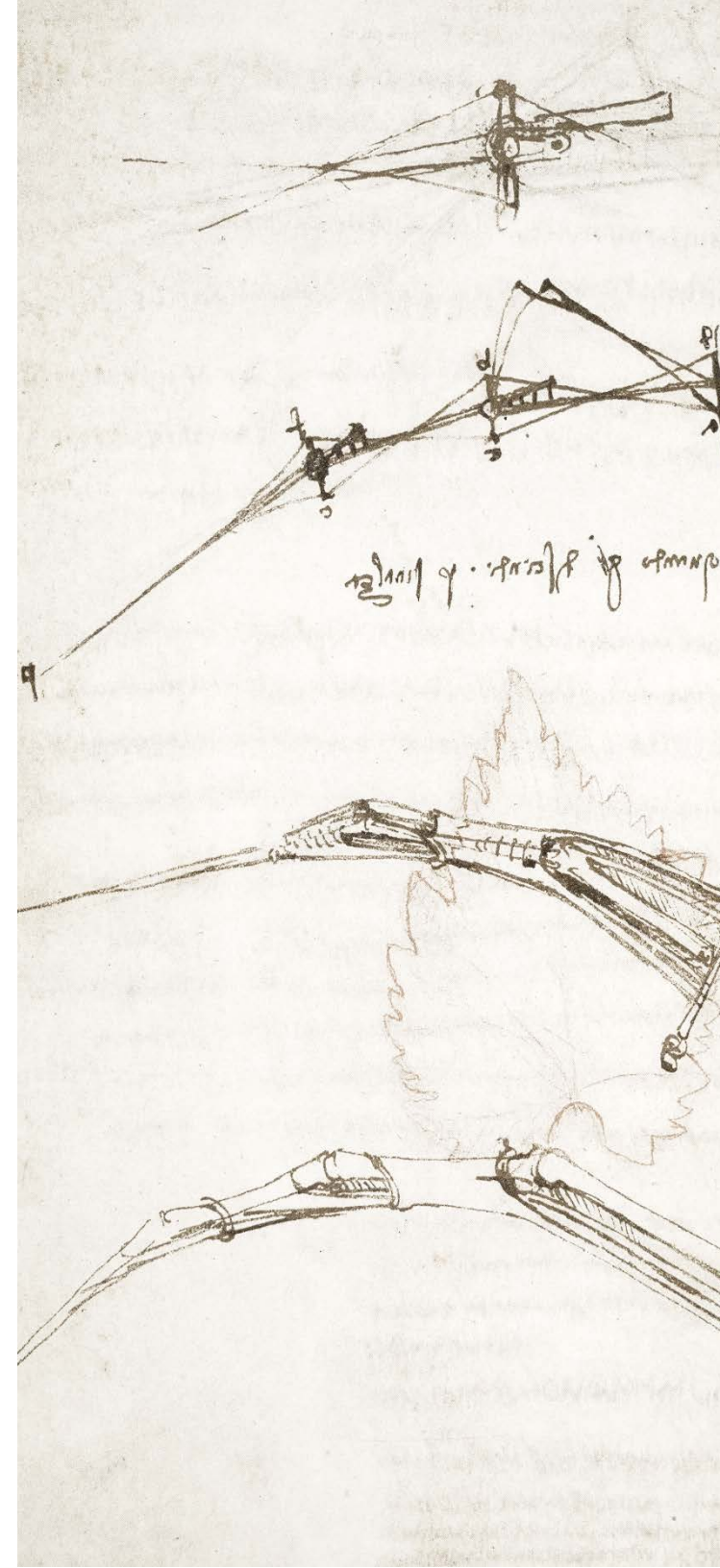
Το 1505, ο Leonardo da Vinci έγραψε το βιβλίο "Sul vol degli uccelli" όπου μελετούσε και ανέλυε τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η πτήση των πουλιών. Όπως περιγράφει ο Werner Nachtigall μια από τις εφευρέσεις του

"τα ελεύθερα φτερά στις φτερούγες των πουλιών κλείνουν λόγω της ιδιαίτερης σύνδεσης και της ασυμμετρίας κατά το κατέβασμα των φτερούγων, ενώ κατά το άνοιγμά τους, ανοίγουν επιτρέποντας την κυκλοφορία του αέρα ανάμεσα τους. Ως αποτέλεσμα ο Leonardo da Vinci πρότεινε φτερά φτιαγμένα από επεξεργασμένα φύλλα ιτιάς καλυμμένα από λινό ύφασμα για την δημιουργία των τεχνητών φτερούγων, που θα μπορούσαν να κλείνουν όταν οι φτερούγες κατεβαίνουν ενώ αντίστοιχα να ανοίγουν όταν οι φτερούγες κινούνται ανοδικά."

Αυτό αποτελεί ένα από τα πρώτα παραδείγματα βιομίμησης, με τον Leonardo να μιμείται μια διαδικασία ύστερα από μελέτη, στην προκύπτουσα περίπτωση το κλείσιμο της επιφάνειας χωρίς κενά και το άνοιγμα της επιφάνειας με τη δημιουργία ροής αέρα.⁵

Εικόνα 4: Κατασκευαστικά σκίτσα του ο Leonardo da Vinci

⁵ Martin K., (2006). Leonardo da Vinci-The Marvellous Works of Nature and Man. Oxford: Oxford University Press



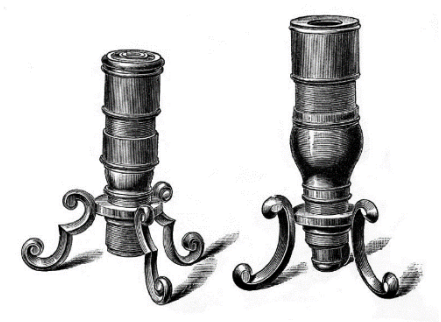
Τον επόμενο αιώνα, κατά την Εποχή του Διαφωτισμού (1650-1800), επιστήμονες, εξερευνητές και ταξιδιώτες όπως ο Alexander von Humboldt (1769-1859), εξερεύνησαν τις ακτές και την ενδοχώρα της Κεντρικής και Νότιας Αμερικής, τεκμηριώνοντας τις ανακαλύψεις του σε όμορφα λεπτομερή σχέδια.

Οι λιγότερο απτές και φαινομενικά αόρατες πτυχές της φύσης επίσης ενέπνευσαν την ανάπτυξη τεχνολογιών που επέτρεψαν την περαιτέρω έρευνα τους. Η εφεύρεση του μικροσκοπίου στα τέλη του 16^{ου} αιώνα στην Ολλανδία και αργότερα του σύνθετου μικροσκοπίου από τον Galileo Galilei (1564-1642), το 1625, επέτρεψαν στους επιστήμονες να μελετήσουν το απίστευτα κοντά και μικρό καθώς και το μακρινό χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνολογία.

Σήμερα, με τη βοήθεια του μικροσκοπίου ηλεκτρονίων, μπορούμε να παρατηρήσουμε τη λεπτή δομή ενός μόνο κυττάρου, και μέσω της Φασματοσκοπίας πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού, μπορούν να παρατηρηθούν οι πρωτεϊνικές δομές. Ο Robert Hooke (1635-1703) θεωρείται ο πρώτος που έφερε στο κοινό εκπληκτικές εικόνες από τη φύση μέσω μικροσκοπίου που ήταν αδύνατο να παρατηρηθούν με γυμνό μάτι.

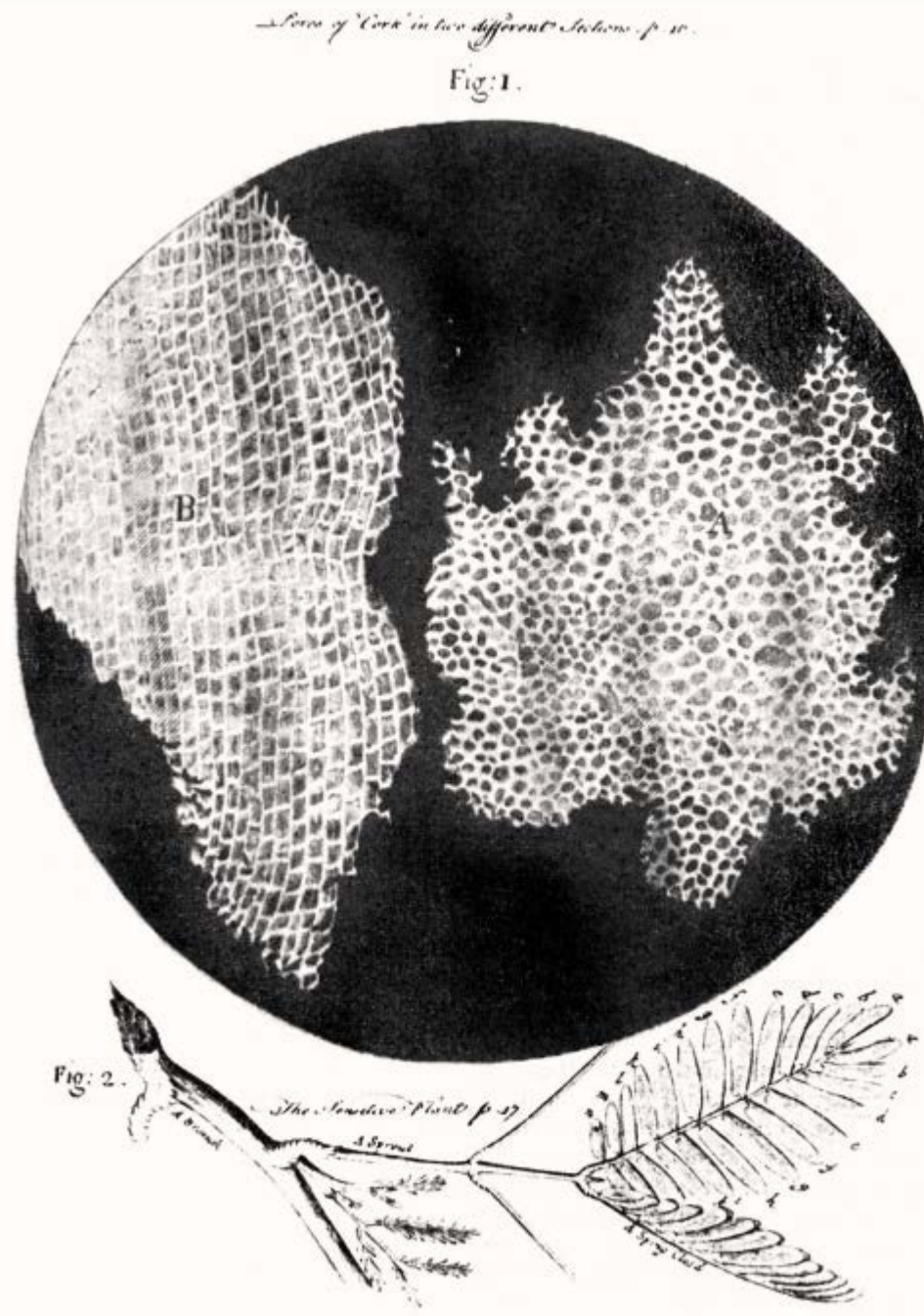
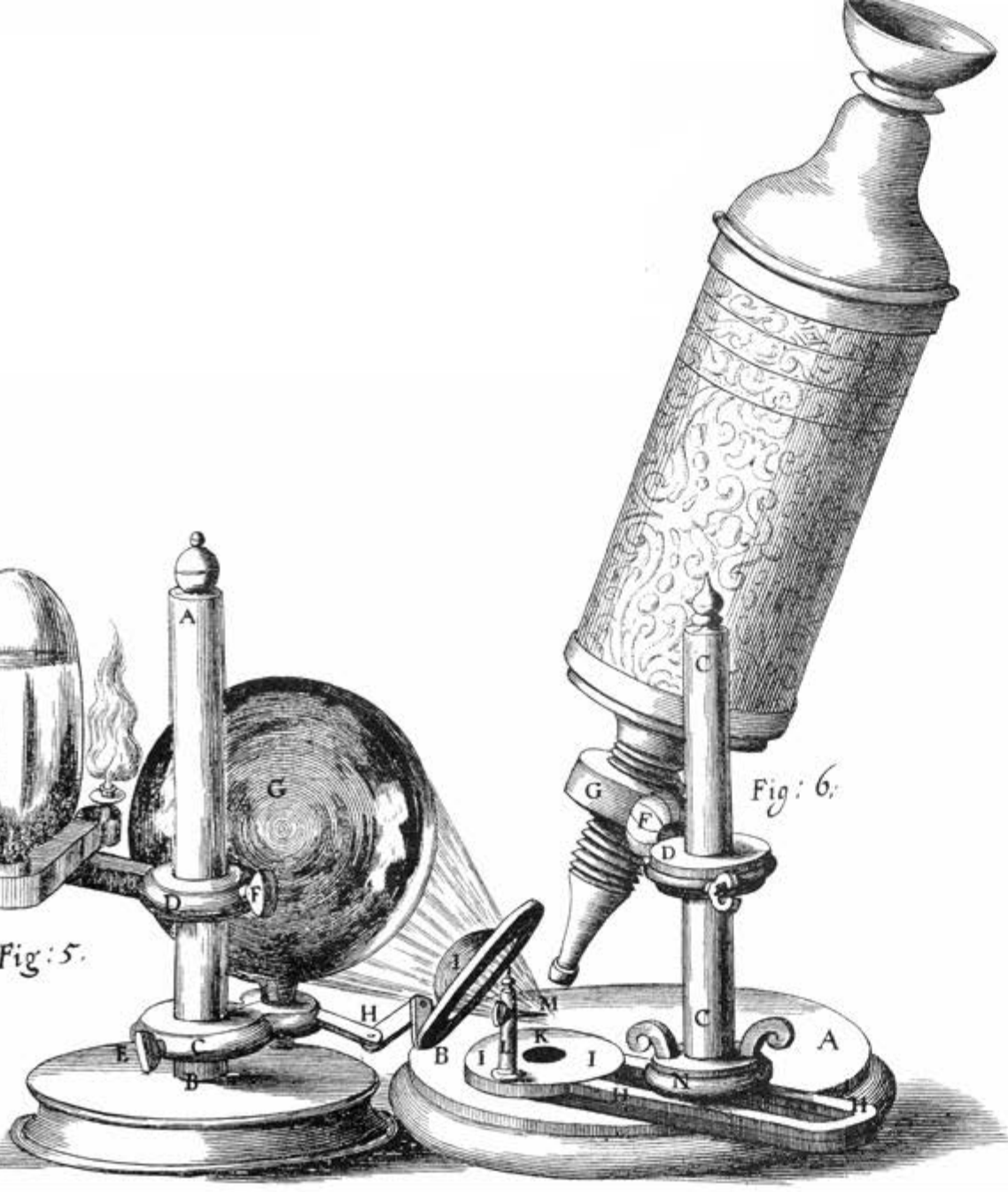
Αυτοί οι πρώτοι φυσιολόγοι και στοχαστές έδειξαν πως μέσω της ανάλυσης και της επιστημονικής έρευνας, είναι δυνατή η μεγαλύτερη ερμηνεία του φυσικού κόσμου.

Παρόλα αυτά εκτός από τη λαμπρή εξαίρεση του Leonardo da Vinci, οι στοχαστές δεν είχαν κάνει μέχρι και τον 19^ο αιώνα το άλμα από την απλή παρατήρηση της φύσης στην εφαρμογή της σε διάφορες κατασκευές.⁶



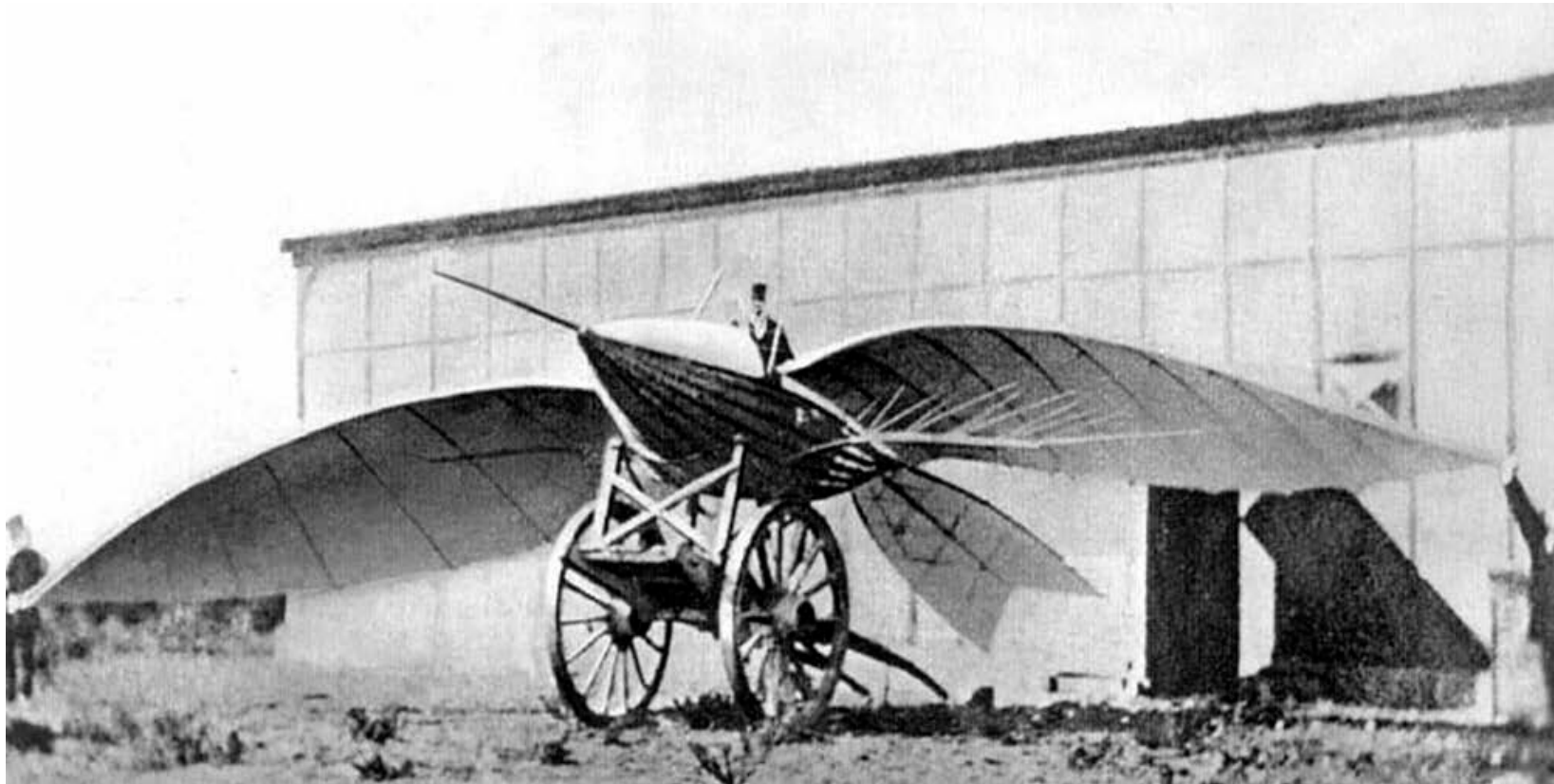
Εικόνα 5: Το μικροσκόπιο του Galileo Galilei

⁶ Mazzoleni, I., (2013). Architecture Follows Nature-Biomimetic Principles for Innovative Design, Florida: CRC Press



Εικόνα 6: Δεξιά το μικροσκόπιο του Robert Hooke. Αριστερά, μία από τις πρώτες φωτογραφίες της φύσης από μικροσκόπιο

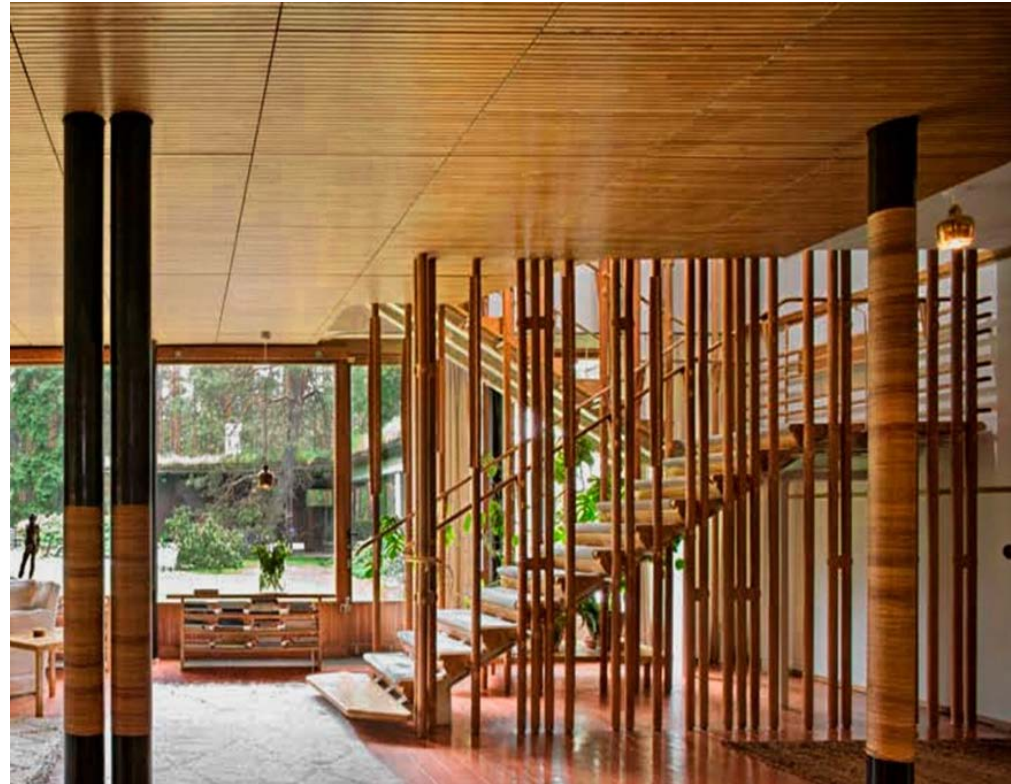
Τον 19^ο αιώνα η μηχανική και οι εφαρμοσμένες επιστήμες σημειώνουν άνοδο με λαμπρά μυαλά να εφαρμόζουν τις προσπάθειές τους στις δοκιμές για την ανακάλυψη νέων συσκευών. Μια μεγάλη αλλαγή συνέβη το 1857, όταν ο Jean-Marie Le Bris κατά την διάρκεια του ταξιδιού του ακολουθώντας το πτηνό albatross, σχεδίασε και κατασκεύασε την πρώτη βιο-εμπνευσμένη ιπτάμενη μηχανή, τον «τεχνητό άλμπατρος».⁷



Εικόνα 7: Φωτογραφία από τον «τεχνητό άλμπατρος»

⁷ Mazzoleni, I., (2013). Architecture Follows Nature-Biomimetic Principles for Innovative Design, Florida, USA: CRC Press

Στην αρχιτεκτονική του 20ου αιώνα υπάρχουν λίγες σχετικές περιπτώσεις μελετών που προέκυψαν από αρχιτέκτονες που μελέτησαν τη φύση. Το έργο του Frank Lloyd Wright (1867-1959) εμπεριείχε το ενδιαφέρον του αρχιτέκτονα για την φύση. Ο ίδιος θεωρούσε τον εαυτό του τον υποκινητή της οργανικής αρχιτεκτονικής. Στο βιβλίο του «An Organic Architecture (1939)», περιγράφει την πίστη του ότι τα κτήρια πρέπει να αναπτύσσονται φυσικά μέσα από το περιβάλλον που τα περικλείει, αλλά και πώς το κτήριο πρέπει να είναι σχεδιασμένο προσεκτικά σαν να ήταν ένας ενοποιημένος οργανισμός, στον οποίο κάθε στοιχείο του σχετίζεται με το άλλο με όμοιο τρόπο όπως συμβαίνει με τα οικοσυστήματα στη φύση. Η Villa Mairea (1939), σχεδιασμένη από τον Φινλανδό Alvar Aalto (1898-1976), είναι ένα από τα σπουδαιότερα παραδείγματα της επιρροής της φύσης στην αρχιτεκτονική. Το δάσος που περιβάλλει το σπίτι μετατρέπεται σε κινητήριο στοιχείο για τη σύλληψη των εσωτερικών χώρων που είναι κατασκευασμένοι από ακανόνιστες κολώνες. Το εσωτερικό αντικατοπτρίζει την ποικιλομορφία και την ομορφιά της φύσης, τόσο στα υλικά όσο και στις μορφές, με την πρόθεση να αμβλυνθεί ο διαχωρισμός μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος, καθώς όπως ο Aalto είχε πει “η φύση είναι ένα σύμβολο ελευθερίας”.⁸

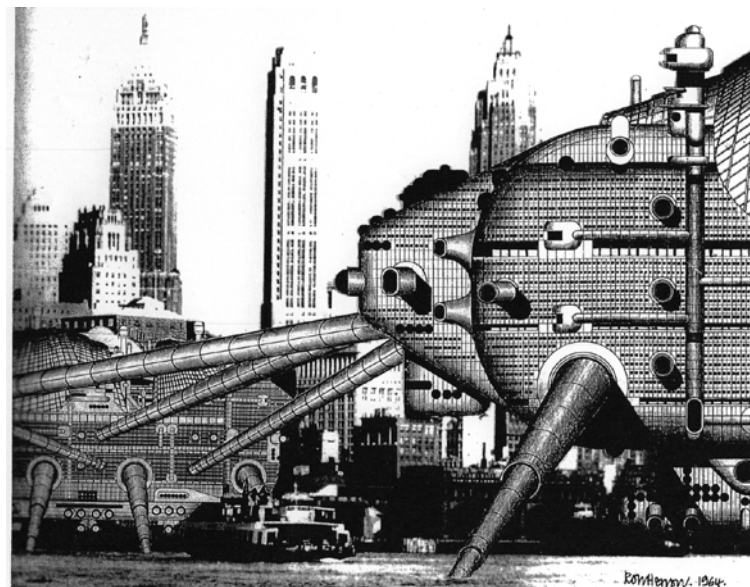


Εικόνα 8: Εσωτερική άποψη της Villa Mairea του αρχιτέκτονα Alvar Aalto

⁸ Mazzoleni, I., (2013). *Architecture Follows Nature-Biomimetic Principles for Innovative Design*, Florida: CRC Press



Εικόνα 9: Ο θόλος του Palazzetto dello Sport στην Ρώμη από τον Pier Luigi Nervi



Εικόνα 10: Η "walking city" από την ομάδα Archigram

Ο Ιταλός αρχιτέκτονας και μηχανικός Pier Luigi Nervi παρουσίασε επίσης πολλές κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, βασιζόμενος σε αρμονίες και ρυθμούς που υπάρχουν στη φύση με σκοπό να ελαχιστοποιήσει το υλικό κατασκευής αλλά ταυτόχρονα και να επιτευχθεί αρμονία.⁹

Στα τέλη του 1950, οι Μεταβολιστές, μια ομάδα από Ιάπωνες αρχιτέκτονες με επικεφαλής τον Kenzo Tange (1913-2005), άρχισαν να κοιτάζουν τις πόλεις και κτίρια ως επεκτάσιμες, ευέλικτες κατασκευές, ικανές οργανικής ανάπτυξης και μετασχηματισμού με την πάροδο του χρόνου. Υπάρχει πληθώρα παραδειγμάτων από τα έργα τους που παρουσιάζουν τις παραπάνω αξίες. Ένα από τα λίγα που πραγματοποιήθηκαν είναι ο πύργος-κάψουλα Nagakin (1971-1972), που αποτελεί πρακτική εφαρμογή της ιδέας της πόλης στον χώρο και της λογικής της διάρθρωσης προκατασκευασμένων κυττάρων, που βρίσκουμε στις ιδέες των Archigram και της ομάδας Metabolism,¹⁰

⁹ Panchuk, N., (2006). An Exploration into Biomimicry and its Application in Digital & Parametric [Architectural] Design. M.SC thesis, University of Waterloo. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/2876/ntpanchu2006.pdf;sequence=1>

¹⁰ Montaner J. M., (2014). Ιστορία της σύγχρονης αρχιτεκτονικής. Αθήνα: εκδοτικός οίκος ΝΕΦΕΛΗ

2.2 ANTONI GAUDÍ CORNET (1852-1926)

Το έργο του Καταλανού αρχιτέκτονα Antoni Gaudí χαρακτηρίζεται από μια αρμονική σχέση μεταξύ της μεσαιωνικής αρχιτεκτονικής και του νεωτεριστικού πνεύματος. Πηγή αδιάκοπης έμπνευσης αποτελούσε το μεσογειακό τοπίο. Είχε βρει το ιδανικό για αυτόν μέρος άντλησης ιδεών στην ακτή κοντά στην πόλη Tarragona ανάμεσα στα ελαιόδεντρα και τις χαρουπιές. Αντιμετώπιζε τη φύση, το έργο του ανώτατου αρχιτέκτονα, όπως το ονόμασε, ως μοντέλο και αρχέτυπο.

Πίστευε ότι η αρχιτεκτονική ήταν μια οργανική δημιουργία, όχι το αυθαίρετο αποτέλεσμα αυτόνομων τμημάτων. Η δομή ήταν το κεντρικό σημείο του έργου του και η μορφή, ο χώρος και η λειτουργία πρέπει να είναι κατάλληλά της. Τα σχέδιά του διατηρούσαν πάντα μια στενή σύνδεση με οικείους σε αυτόν έμβιους και άβιους σχηματισμούς, όπως κόκαλα, μύες, φτερά και πέταλα, και άλλες φορές με σπηλιές, ακόμη και αστέρια και σύννεφα. Οι δομές της φύσης ως δημιουργήματα του Θεού αποτελούνται από καμπύλες γραμμές και επιφάνειες. Έτσι επιλέγει και ο Gaudí να σχεδιάσει. Όλα του τα έργα αποτελούνται από καμπύλες.

Καθώς το έργο του Καταλανού αρχιτέκτονα έφτανε στο τέλος είχε φτάσει στο συμπέρασμα να συσχετίσει την ευθεία γραμμή με τον άνθρωπο ενώ την καμπύλη την έδινε στον Θεό και όλες τις δημιουργίες του.¹¹

Προσπαθώντας να δώσει λύση σε ερωτήματα όπως τι χάριζε στα αιλουροειδή τις διακριτικές τους κινήσεις και τι προσέδιδε στα δέντρα τη σταθερή τους αντοχή, έβγαλε πραγματικά εντυπωσιακά συμπεράσματα, τα οποία έπειτα από διάφορα πειράματα, τα εφάρμοσε για να παράξει νέες αρχιτεκτονικές μορφές με μεγαλύτερη αντοχή.

Εικόνα 11: Λεπτομέρεια από την οροφή της Casa Batlló

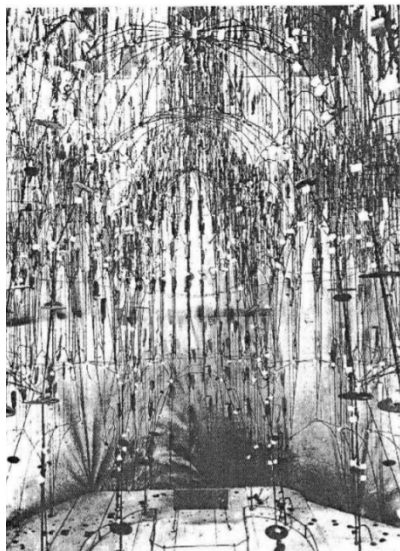
¹¹ Neuman, R., (1996). Grolier Multimedia Encyclopedia. Connecticut: Grolier Electronic Publishing.



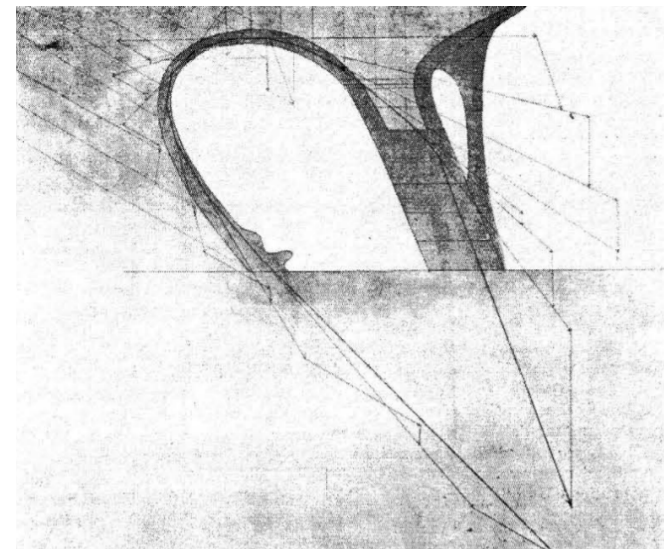
Στα πειράματα αυτά λάμβανε υπόψιν του τις φυσικές δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε αντικείμενο, κατά τη διαδικασία σχεδιασμού.

Αυτές οι εφαρμογές του γίνονται φανερές ήδη από τα πρώτα προπαρασκευαστικά του μοντέλα · μια σειρά τρισδιάστατων μοντέλων που χρησιμοποιούσαν χορδές, βάρη (συνήθως μικρούς σάκους σταθμισμένους με μόλυβδο) και την βαρύτητα. Για να αναπτύξει μια πληρέστερη κατανόηση των αρχιτεκτονικών του δομών, ο Gaudí θα έκανε ανεστραμμένα δομικά μοντέλα χρησιμοποιώντας καλώδια αναρτημένα από την κορυφή του μοντέλου. Η βαρύτητα θα καθόριζε την οργανική μορφή των κρεμασμένων τόξων.

Τα συμπεράσματα που τελικά σχεδίασε ήταν πραγματικά εντυπωσιακά ακόμη και για την σημερινή εποχή, με τους μηχανικούς να αναγνωρίζουν ότι ήταν πολύ μπροστά από την εποχή του. Βρίσκουμε παραδείγματα αυτού σε πολλά από τα σχήματά του, τα οποία υποδηλώνουν τα ελαφριά κελύφη από σκυρόδεμα που γνωρίζουμε σήμερα.¹²



Εικόνα 12: Αριστερά, ανεστραμμένη φωτογραφία κρεμαστού μοντέλου που δείχνει το εσωτερικό του ναού Colonia Güell. Δεξιά, σκίτσα του εσωτερικού του χώρου



Εικόνα 13: Γραφική σχεδίαση του τοίχου αντιστήριξης στο Parque Güell in Barcelona

¹² HK / SK, (2011). Gaudi and catenary models. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://atmosphericfront.wordpress.com/2011/10/30/gaudi-catenary-curves-and-other-sources-of-inspiration/>



Εικόνα 14: Η οροφή της κατοικίας Casa Batlló

Ήδη από τα πρώτα έργα του Gaudí μπορούν να εντοπιστούν υπαινιγμοί από τον φυσικό κόσμο. Στην Casa Batllo οι φυσικές και οι οργανικές μορφές δεν συγκροτούν απλά την όψη του κτιρίου, αλλά αποτελούν βασικά δομικά στοιχεία, όπως στην περίπτωση των κολώνων με την μορφή οστών, όπου από τον σχεδιασμό των οροφών και των κομβίων μέχρι το σχήμα του τζακιού του, ανταποκρίνονται σε μορφές που προέρχονται από στοιχεία της φύσης.

Η Sagrada Familia θα μπορούσε να θεωρηθεί ένα από τα καλύτερα παραδείγματα εφαρμογής πρακτικών επηρεασμένες από τον φυσικό κόσμο στο έργο του Gaudí. Για τη δημιουργία κατασκευαστικών λεπτομερειών στην πρόσοψη της Sagrada Familia, ο Gaudí δημιούργησε καλούπια από πραγματικά φυτά, ζώα και ανθρώπους για να τα σχεδιάσει με ακρίβεια. Ο Gaudí μάλιστα κάλυψε τους πύργους του ναού με μορφές που μοιάζουν με τα κοχύλια της Καταλονίας ελπίζοντας ότι ο άνεμος που θα περνούσε ανάμεσα θα δημιουργούσε θόρυβο. Όμως πολλές από τις μορφές που παρουσίασε, ξεπερνούν την απλή οπτική παρατήρηση φαινομένων. Στην προσπάθειά του να μιμηθεί τη σπειροειδή ανάπτυξη των δέντρων της Καταλανικής εξοχής, ο Gaudí δημιούργησε τη φόρμα για τις κολώνες στη Sagrada Familia υπερθέτοντας δύο πολύγωνα που περιστρέφονται σε αντίθετες κατευθύνσεις καθώς ανεβαίνουν.

Αυτή η μετατροπή των στηλών από μια πολυγωνική βάση σε μια σχεδόν στρογγυλή κορυφή φανερώνει πως ο Gaudí δεν μελετούσε και καταλάβαινε μόνο τις φυσικές μορφές, αλλά και τις διαδικασίες με τις οποίες δημιουργούνται. Οι στήλες έμοιαζαν με δέντρα με κλαδιά στην κορυφή, με τα «κλαδιά» κεκλιμένα στην τέλεια γωνία να στηρίζουν την οροφή χωρίς στηρίγματα. Ο σχεδιασμός με αυτόν τον τρόπο επέτρεψε στον Gaudí να αντικαταστήσει τους ακρογωνιαίους λίθους με φεγγίτες αφήνοντας τον ήλιο να εισχωρήσει και να κυριαρχήσει στον χώρο, ενώ επίσης εξασφάλισε ότι το κτίριο δεν θα κατέρρεε εάν έπεφτε μία στήλη. Χρησιμοποιώντας σχολαστικές δοκιμές και αντλώντας ιδέες από τη φύση, ο Gaudí ανέπτυξε έναν εντελώς νέο τρόπο κατασκευής στηλών.¹³

¹³ HK / SK, (2011). Gaudi and catenary models. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://atmosphericfront.wordpress.com/2011/10/30/gaudi-catenary-curves-and-other-sources-of-inspiration/>

2.3 FREI OTTO (1925 – 2015)

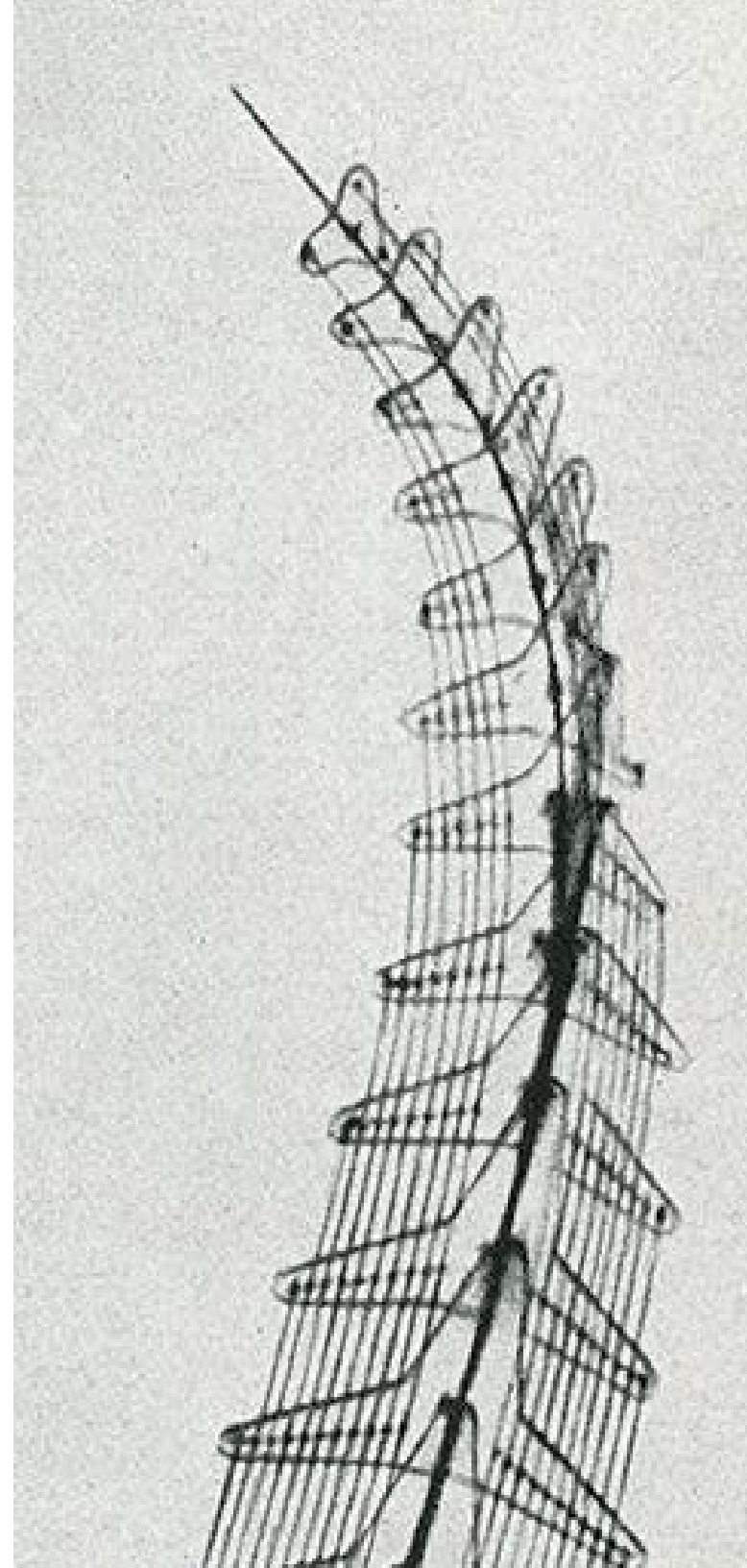
Ο Frei Otto είναι ένας από τους σημαντικότερους αρχιτέκτονες οραματιστές του 20ού αιώνα. Αν και με μια πρώτη ματιά τα κτίριά του όπως το Γερμανικό Περίπτερο για την Παγκόσμια Έκθεση του 1967 στο Μόντρεαλ, σχεδιασμένο με τον Rolf Gutbrod, οι στέγες για τα Ολυμπιακά κτίρια στο Μόναχο που σχεδιάστηκαν από τον Günter Behnisch ή το έργο που αναπτύχθηκε με τον Christoph Ingenhoven για τον νέο κεντρικό σταθμό στη Στουτγάρδη, φαίνεται να ακολουθούν την παράδοση μεγάλων κατασκευαστών αυτού του αιώνα όπως ο Felix Candela και ο Pier Luigi Nervi, το έργο του ξεπερνά την απλή κατασκευή. Είναι μηχανικός, καλλιτέχνης και φιλόσοφος ενώ η κεντρική του ανησυχία αφορά έναν νέο και ολοκληρωμένο σύνδεσμο της φύση με τα κτίρια.

Ο Frei Otto από το 1964 και μετά δίδαξε στην Στουτγάρδη και ήταν επικεφαλής του Institut für leichte Flächentragwerke, το οποίο πραγματοποίησε θεμελιώδη έρευνα τα επόμενα χρόνια. Ήταν από τους λίγους που εκπόνησε εκτεταμένη έρευνα σχετικά με τη βιωσιμότητα, την ενεργειακή απόδοση και την εξοικονόμηση πόρων στα κτήρια, δεκαετίες προτού γίνει φανερή η σημαντικότητα αυτών των θεμάτων στο ευρύ κοινό.

Κατά τις δεκαετίες του '60 και του '70 ο Γερμανός αρχιτέκτονας και μηχανικός πραγματοποίησε εκτεταμένη έρευνα για την εύρεση νέων μορφών (Form-finding) μέσω της παρατήρησης και ανάλυσης μεμβρανών και πλεγμάτων υπό την επήρεια εξωτερικών και εσωτερικών διανυσματικών φορτίων και δυνάμεων.¹⁴

Εικόνα 15: Η "flexible column" έργο του Frei Otto

¹⁴ Pasquale D. P., (2012) FORM FOLLOWS STRUCTURE:BIOMIMETIC EMERGENT MODELS OF ARCHITECTURAL PRODUCTION, Louisiana Tech University. [Τελευταία επίσκεψη: 26/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://www.acsa-arch.org/proceedings/Fall%20Conference%20Proceedings/ACSA.FALL.12/ACSA.FALL.12.45.pdf>



Σύμφωνα με τον Otto, οι διαδικασίες κατασκευής θα πρέπει να πραγματοποιούνται μέσω μιας μεθοδολογίας όπου προγραμματικά και στατικά ζητήματα, συμβιωτικά οργανώνονται προκειμένου να προκύψει μια σαφής μορφογενετική άρθρωση. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την παρουσία συστήματος που ελέγχει συνεχώς για δυναμική απόδοση και δομική ακεραιότητα. Κατά συνέπεια, η μορφή γίνεται το αποτέλεσμα μιας μεθόδου διαδικαστικής ολοκλήρωσης που λαμβάνει υπόψιν τη μορφή, την ιεραρχία, καθώς και τις δομικές τους εκδηλώσεις.

Αντιμέτωπος με τη ραγδαία εξάπλωση των αστικών κέντρων, ο αρχιτέκτονας ήρθε σε επαφή με την Γαλλίδα αρχιτέκτονα Yona Friedman, η οποία ίδρυσε το Groupe d'Etudes d'Architecture Mobile (GEAM) στο Παρίσι, το 1958, σε μια προσπάθεια να βρεθούν λύσεις σε θέματα όπως η κινητικότητα του πληθυσμού, η ανάπτυξη και αλλαγή των πόλεων και πως θα μπορούσαν να μετατραπούν οι πόλεις σε προσαρμοστικές και ελαστικές στις αλλαγές αυτές. Ο Otto συμμετείχε στις πρώτες συναντήσεις της ομάδας. Δεν ενδιαφερόταν τόσο για τις χωρικές τους δομές, αλλά, με βάση τις σκέψεις του Martin Wagner για το «αναπτυσσόμενο σπίτι» (1931), γεννήθηκαν διάφορες δικές του ιδέες για την «αναπτυσσόμενη πόλη». Δημοσίευσε μια πρώτη περίληψη των σκέψεών του το 1959, στο «EL Information» με τον τίτλο «Adaptable Architecture». Μια σημαντική βάση για την ιδέα του Frei Otto για την προσαρμόσιμη αρχιτεκτονική ήταν οι μελέτες του Konrad Wachsmann, και το έργο που δημοσίευσε με όνομα "The Turning Point of Building" (Wendepunkt im Bauen), δείχνοντας τις εντελώς νέες δυνατότητες που ανοίγει η εκβιομηχάνιση της κατασκευής.¹⁵



Εικόνα 16: Αίθουσα στη Διεθνή έκθεση κήπου στο Μόναχο της Γερμανίας

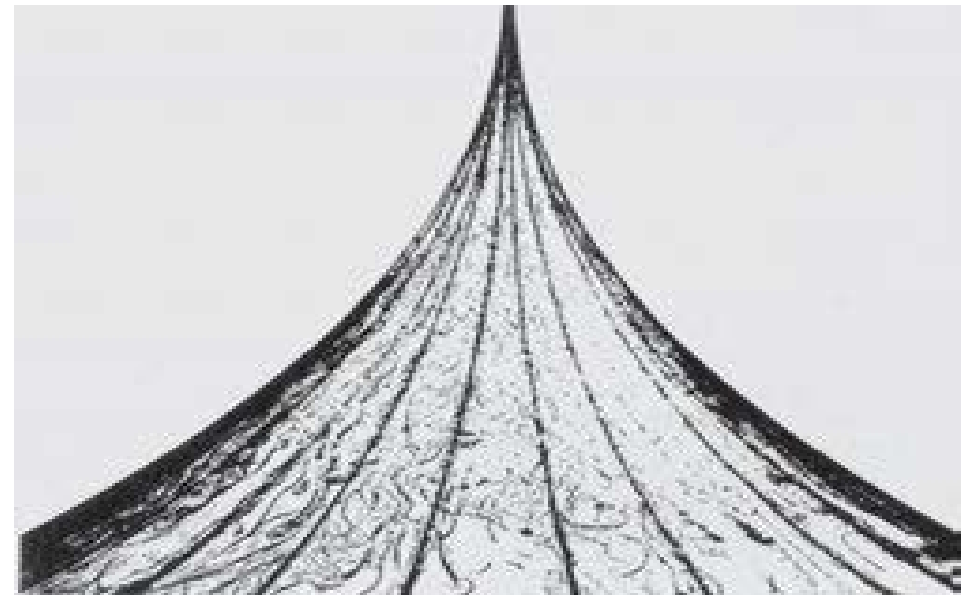
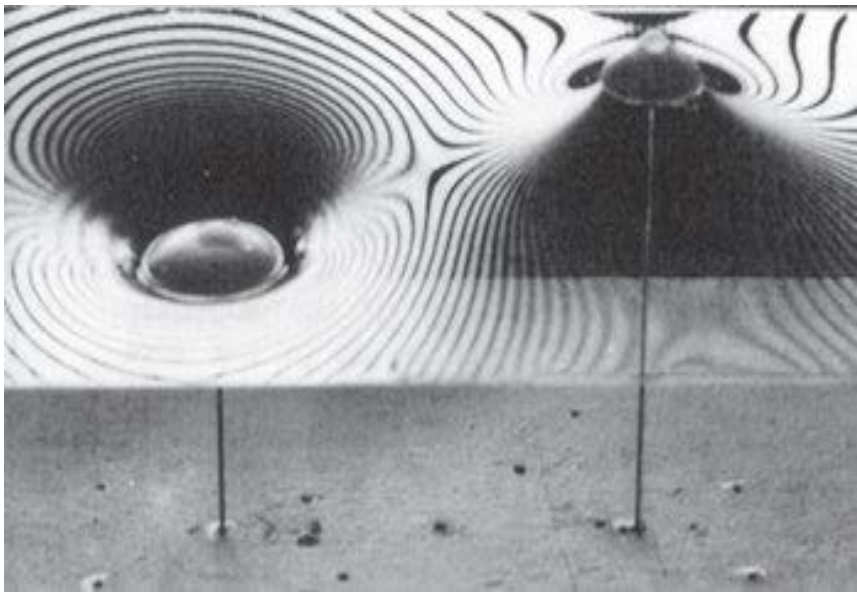
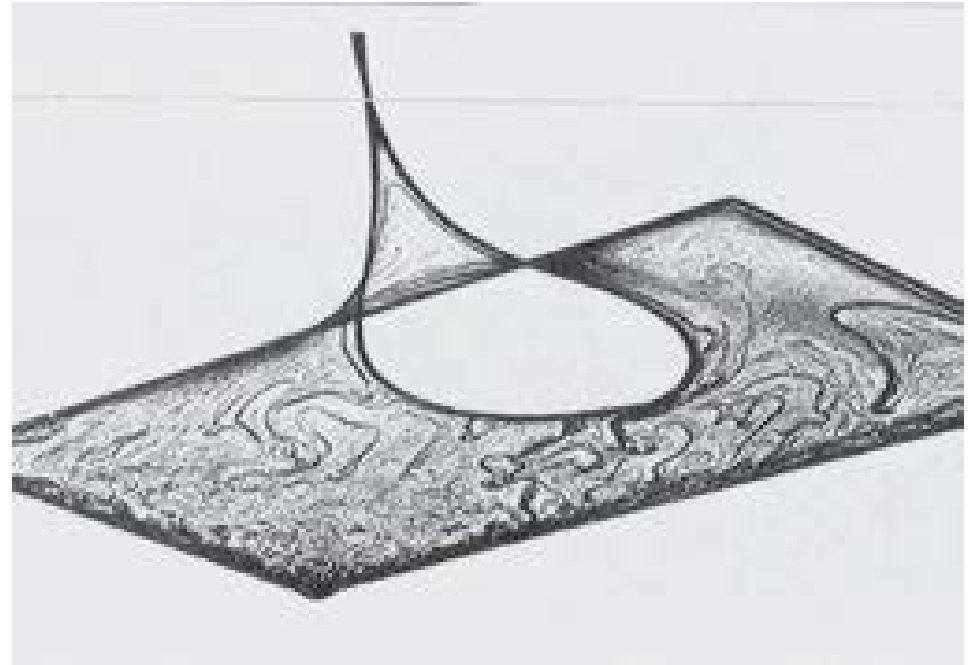
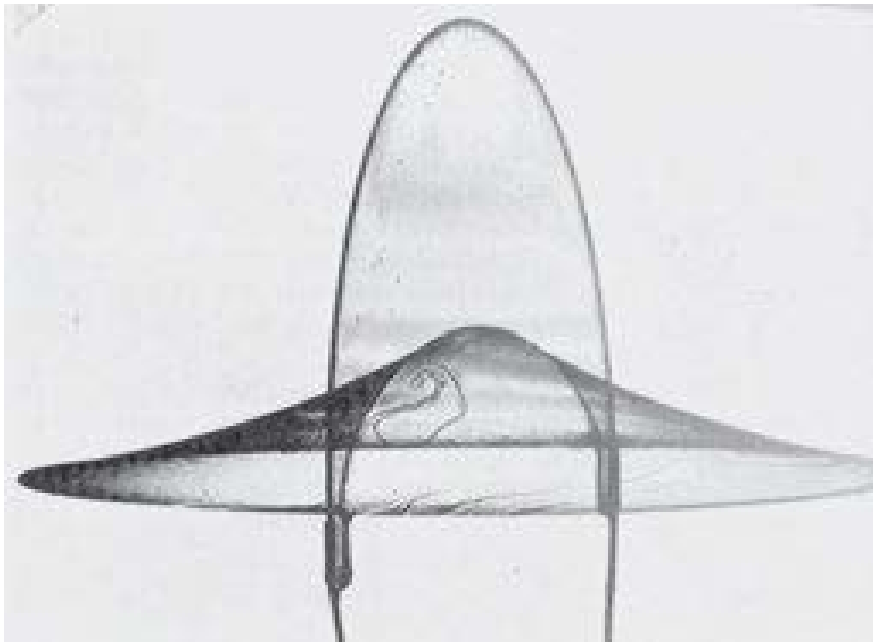
¹⁵ Meissner, I. Möller, E., (2015). Frei Otto - forschen, bauen, inspirieren / a life of research, construction and inspiration. München: Detail

Κατά τη διάρκεια της περαιτέρω ανάπτυξης κατασκευών μεμβρανών και καλωδίων, ο Frei Otto διερεύνησε τόξα, κελύφη πλέγματος και θόλους. Το Multihalle, μια πρωτοποριακή κατασκευή που συνδυάζει τη φυσική διαμόρφωση και την προσαρμοστικότητα δημιουργήθηκε στο Mannheim. Πραγματοποίησε επίσης εκτεταμένες μελέτες σχετικά με τις φυσικές κατασκευές και τις διαδικασίες εύρεσης μορφών, τις δομές διακλάδωσης, τις πνευματικές δομές και τα καλύμματα μεγάλης κλίμακας. Η ανάπτυξη σχημάτων και κατασκευών στη φύση και την τεχνολογία ήταν το κεντρικό θέμα όλων των μελετών που διεξήχθησαν στο IL (Institute for Lightweight Structures). Στα πειράματά του με φιλμ σαπουνιού ο αρχιτέκτονας πειραματίστηκε κυρίως με μοντέλα σύρματος, τα οποία βύθιζε σε αλκαλικό διάλυμα, γνωρίζοντας ότι η μεμβράνη σαπουνιού που καλύπτει τα κενά μεταξύ τους θα έπαιρνε πάντα μια μορφή που θα ελαχιστοποιούσε την επιφάνεια. Ακόμα, όπως και ο Gaudi, εφάρμοσε την αρχή της φυσικής μορφοποίησης στα διχτυωτά καλώδια, τα οποία ένωνε σε στηρίγματα και στη συνέχεια ανέστρεφε όλο το μοντέλο προκύψαντος να προκύψει η μορφή του.

Το έργο του Frei Otto φανερώνει το διαυγές ενδιαφέρον του αρχιτέκτονα για τη βιομίμηση μέσω της προσπάθειάς του να μην υπάρχει διαχωρισμός μεταξύ της μορφής, των υλικών και της δομής. Καθ' όλη τη διάρκεια της καριέρας του, συνεργάστηκε με βιολόγους, χημικούς μηχανικούς και μαθηματικούς καθώς το ενδιαφέρον του για τη διαδικασία αυτοσχηματισμού των φυσικών στοιχείων συνεχώς οξυνόταν. Ο Frei Otto σημείωσε την αναγκαιότητα για διεπιστημονική συνεργασία μεταξύ των διάφορων κλάδων.

Το 1960, ο Frei Otto συνάντησε τον βιολόγο και ανθρωπολόγο Johann-Gerhard Helmcke στο Βερολίνο. Ο επιστήμονας τον εξοικείωσε με οργανικές διαδικασίες αυτοσχηματισμού, οι οποίες του δημιούργησαν μια διαρκή επιθυμία να προσπαθήσει να κατανοήσει τις φυσικές διαδικασίες και κατασκευές και να αναπτύξει φέρουσες κατασκευές με βάση τις αρχές τους. Τα εργαλεία που χρησιμοποίησε περιλάμβαναν μοντέλα καθώς και ειδικά διαμορφωμένες διατάξεις μέτρησης και δοκιμές, επιτρέποντας την προσομοίωση των διαδικασιών διαμόρφωσης και αυτοσχηματισμού. Με στόχο τη διερεύνηση της «εξέλιξης των κατασκευών» στη φύση και την αρχιτεκτονική, ο Frei Otto δημιούργησε ένα άλλο συνεργατικό ερευνητικό κέντρο με τίτλο «Natural Constructions» στο IL το 1984. Η προηγούμενος, πιο επικεντρωμένη στη μηχανική εργασία του, τώρα δέχτηκε συνεισφορές επιστημόνων από μια ποικιλία κλάδων. Ιδέες, πειράματα και ερευνητικά αποτελέσματα μοιράστηκαν σε μια μοναδική συμβίωση και χρησιμοποιήθηκαν στην πράξη παρουσιάζοντας ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Πολυάριθμες συγκεντρώσεις και δημοσιεύσεις έδωσαν ώθηση σε σκέψεις και μετέτρεψαν το Ινστιτούτο του Frei Otto για ελαφριές κατασκευές στο πιο ζωντανό και δημιουργικό κέντρο έρευνας της Γερμανίας με σημαντικό διεθνές αντίκτυπο.¹⁶

¹⁶ Meissner, I. Möller, E., (2015). Frei Otto - forschen, bauen, inspirieren / a life of research, construction and inspiration. München: Detail



Εικόνα 17: Φωτογραφικό υλικό από τα πειράματα που πραγματοποίησε ο Frei Otto με φιλμ σαπουνιού



Εικόνα 18. Πόλη των Τεχνών και των Επιστημών στην Βαλένθια

2.3 SANTIAGO CALATRAVA VALLS (1951-)

Ίσως αυτό που είναι πιο συναρπαστικό για τον γλυπτό δυναμισμό των έργων του Ισπανού αρχιτέκτονα είναι η έμπνευση πίσω από αυτά. Εντυπωσιασμένος από τη βιολογία των ζώων, ο Calatrana κατέκτησε την πρακτική του ζωομορφισμού, χρησιμοποιώντας τις ζωικές μορφές ως βάση για τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Καθοδηγούμενος από την πεποίθηση ότι "η μεταμόρφωση της μορφής λύνεται βέλτιστα σε ζώα και φυτά, με την ικανότητά τους να μεγαλώνουν και να κινούνται", ο Calatrana αφιερώθηκε σε απλές μελέτες παρατήρησης ζωντανών μορφών. Με ποικίλες κινήσεις κάμψης, κωνικές στήλες, στρογγυλεμένες γωνίες και απότομες γεωμετρικές αλλαγές, πολλές από τις δομές του δείχνουν μια σαφή εξάρτηση από βιομορφικές αρχές που μοιάζουν με χαρακτηριστικά παρόμοια με τον φυσικό κόσμο. Κατανοώντας τις ευκαιρίες καθώς και τους περιορισμούς που παρουσιάζονται από τον ζωομορφισμό, τα έργα του Calatrana αντικατοπτρίζουν μια αρμονική σύντηξη της φύσης και μορφών και ρυθμών εμπνευσμένων από ανθρώπους.¹⁷

¹⁷ Saamia, M., (2020). Celebrating Santiago Calatrava Valls' nature inspired architectural feats. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://www.stirworld.com/inspire-people-celebrating-santiago-calatrava-valls-nature-inspired-architectural-feats>

Η διαδικασία μεταγραφής της φύσης τόσο με κυριολεκτικό όσο και με μεταφορικό τρόπο, που παρουσιάζεται στη δουλειά του Calatrava, θυμίζει έργα άλλων καλλιτεχνών όπως ο Francisco Goya, ο Salvador Dali, ο Joan Miro, και ο Antoni Gaudi. Στην αρχιτεκτονική είναι πολύ εύκολο να διακρίνουμε ομοιότητες με κτήρια του Gaudi τόσο στις μορφές, καθώς παρουσιάζουν και οι δύο κτήρια που μοιάζουν με σκελετούς και κόκκαλα ζωντανών οργανισμών όσο και στο γενικότερο ύφος χρησιμοποιώντας θεμελιώδεις αρχιτεκτονικές αρχές με έντονο λυρισμό.¹⁸

Το 1981 ξεκινάει το έργο του αρχιτέκτονα καθώς ανοίγει το δικό του γραφείο στη Ζυρίχη. Η αναγνώριση δεν άργησε να έρθει όμως, καθώς ήδη από το 1989 ο Calatrava ανέλαβε να σχεδιάσει τον σιδηροδρομικό σταθμό της Λυών στη Γαλλία. Η δραματική μορφή του σιδηροδρομικού σταθμού 5.600 τετραγωνικών μέτρων μοιάζει με πουλί που είναι έτοιμο να πετάξει και λειτουργεί ως συμβολική πύλη προς την περιοχή της Λυών. Η οροφή 1.300 τόνων της κύριας αίθουσας είναι 120x100 μέτρα, με μέγιστο ύψος 40 μέτρα και έκταση 53 μέτρα. Η αίθουσα φιλοξενεί γραφεία εισιτηρίων, καταστήματα λιανικής, εγκαταστάσεις εστιατορίων και πρόσβαση μέσω υπερυψωμένης γκαλερί από και προς το αεροδρόμιο.¹⁹



Εικόνα 19: Σιδηροδρομικός σταθμός στη Λυών



Εικόνα 20: Το Μουσείο Τέχνης του Μιλγουόκι στην Ουάσιγκτον



Εικόνα 21: Περίπτερο του Κουβέιτ

¹⁸ McQuaid, M., (1993). Santiago Calatrava: Structure and expression. New York: Harry N. Abrams

¹⁹ Calatrava, S., LYON-SAINT EXUPÉRY AIRPORT RAILWAY STATION. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://calatrava.com/projects/lyon-saint-exupery-airport-railway-station-colombier-saugnieu.html>

Αργότερα στην καριέρα του, άρχισε να ερμηνεύει εκ νέου ζωόμορφα σχήματα σε μια προσπάθεια να εισαγάγει κίνηση στα γλυπτά που σχεδίαζε. Το περίπτερο του Κουβέιτ είναι η τρίτη κατά σειρά προσπάθεια που ο Calatrana εξερευνά στέγες που μπορούν να ανοίγουν και να κλείνουν. Σε αντίθεση με το Swissbau Pavilion του Calatrana που είναι φτιαγμένο από σκυρόδεμα, στο περίπτερο του Κουβέιτ διάλεξε το ξύλο για την κατασκευή των εξαρτημάτων κίνησης. Τα κομμάτια της στέγης είναι διατεταγμένα σε δύο σειρές, μία που αποτελείται από οκτώ και μία από τα εννέα και περιστρέφονται μέσω μιας σωληνοειδούς ράγας που είναι συνδεδεμένη με το πάτωμα από σκυρόδεμα. Τα πλευρά μπορούν να ελιχθούν από μια θέση 45 μοιρών έως 90 μοίρες και είναι μια αφαιρετική απεικόνιση των κλαδιών του φοίνικα που σκιάζουν τους επισκέπτες από τον ήλιο.

Πιθανώς η μεγαλύτερη σχέση του Calatrana με τον κόσμο της φύσης ήταν μέσω της ερμηνείας και της χρήσης της μορφής του δέντρου. Τα δέντρα είναι ένα ιστορικό μοτίβο που εκμεταλλεύτηκαν επίσης μερικοί από τους σημαντικότερους αρχιτέκτονες και μηχανικούς του εικοστού αιώνα όπως τον Frank Lloyd Wright, ο Luigi Nervi και ο Frei Otto. Όπως και αυτοί οι αρχιτέκτονες έτσι και ο Calatrana δεν χρησιμοποιεί τη μορφή του δέντρου μόνο σαν λύση για την μεταφορά των φορτίων των οροφών μεγάλου βάρους αλλά και επειδή παρουσιάζουν δομική σαφήνεια και ρυθμικές ιδιότητες.²⁰

²⁰ McQuaid, M., (1993). Santiago Calatrava: Structure and expression. New York: Harry N. Abrams



3. ΤΩΡΙΝΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

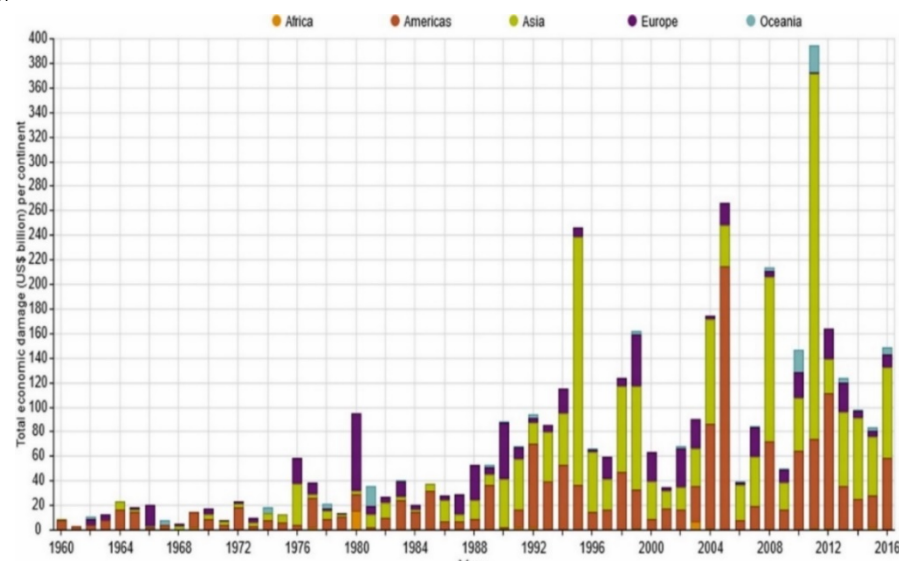
3.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΡΙΣΗ

Η περιβαλλοντική κρίση είναι το κυριότερο και μεγαλύτερο πρόβλημα που πρέπει να λύσει η ανθρωπότητα. Η κλιματική αλλαγή, το φαινόμενο της ερημοποίησης, η λειψυδρία και η έλλειψη της δυνατότητας παροχής τροφίμων σε πάνω από 800 εκατομμύρια ανθρώπους στη Γη αποτελούν ορισμένα προβλήματα των τελευταίων δεκαετιών που πρόκειται να αλλάξουν άρδην τον πλανήτη. Πλέον είμαστε αντιμέτωποι με ολοένα και περισσότερες καταστροφές που οφείλονται κατά κύριο λόγο στις ανθρωπογενείς ενέργειες του παρελθόντος. Οι περισσότεροι επιστήμονες συμφωνούν ότι η κύρια αιτία της τρέχουσας τάσης της υπερθέρμανσης του πλανήτη είναι η επέκταση του φαινομένου του θερμοκηπίου που επέρχεται όταν η ατμόσφαιρα παγιδεύει τη θερμότητα που εκπέμπει από τη Γη προς το διάστημα.

Ορισμένα αέρια στην ατμόσφαιρα εμποδίζουν τη διαφυγή της θερμότητας. Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) είναι ένα από τα αέρια που παγιδεύουν τη θερμοκρασία στην ατμόσφαιρα της Γης και απελευθερώνεται μέσω ανθρώπινων δραστηριοτήτων όπως η αποψίλωση των δασών και η καύση ορυκτών. Τα τελευταία 171 χρόνια οι ανθρώπινες δραστηριότητες αύξησαν τα επίπεδα συγκέντρωσης του CO_2 στην ατμόσφαιρα κατά 48% σε σύγκριση με την προ-βιομηχανική περίοδο. Μια τέτοια αλλαγή, αν δεν είχε επέλθει ο άνθρωπος, θα μπορούσε να γίνει με φυσικό τρόπο σε διάστημα 20,000 χρόνων.²¹



Εικόνα 22: Ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα



Εικόνα 23: Οικονομικές επιπτώσεις λόγω περιβαλλοντικών καταστροφών ανά τα χρόνια

²¹ NASA, (2021). Carbon Dioxide Concentration. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>

Η περίοδος μεταξύ του 2011-2020 ήταν η θερμότερη δεκαετία που καταγράφηκε ποτέ, με τη μέση παγκόσμια θερμοκρασία, το 2019, να φτάνει $1,1^{\circ}\text{C}$ πάνω από τα προ-βιομηχανικά επίπεδα. Η υπερθέρμανση του πλανήτη που προκαλείται από τον άνθρωπο αυξάνεται προς το παρόν με ρυθμό $0,2^{\circ}\text{C}$ ανά δεκαετία. Μια αύξηση 2°C σε σύγκριση με τη θερμοκρασία που επικρατούσε τους προ-βιομηχανικούς χρόνους θα μπορούσε να επιφέρει σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον, την υγεία και την ευημερία του ανθρώπου ενώ ο κίνδυνος για καταστροφικές αλλαγές στο παγκόσμιο περιβάλλον οξύνεται συνεχώς.²²

Τα αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής ήδη γίνονται φανερά, καθώς πληθώρα από καταστροφές γίνονται όλο και πιο συχνές και όλο και πιο επικίνδυνες. Αδιάκοπες έντονες βροχοπτώσεις προκάλεσαν τις καταστροφικές πλημμύρες στη Γερμανία τον Ιούλιο του 2021 βυθίζοντας σε λάσπη μεγάλες εκτάσεις γης την ίδια στιγμή που σε διάφορα μέρη του κόσμου όπως στην Αλάσκα καταγράφονται οι ψιλότερες θερμοκρασίες που έχουν καταγραφεί ποτέ.

Σήμερα πολιτικοί αρχηγοί, επιστήμονες και πλήθος ακτιβιστών εκφράζουν την αναγκαιότητα εύρεσης λύσης και περιορισμού του φαινομένου το συντομότερο δυνατό προκειμένου η αύξηση της θερμοκρασίας να διατηρηθεί κάτω από τους 2°C . Ο αντιπρόεδρος της Κομισιόν, Φρανς Τίμερμανς, αναφέρει χαρακτηριστικά έπειτα από τις καταστροφικές πλημμύρες στην Γερμανία:

«Τα εργαλεία που διαθέτουμε σήμερα δεν επαρκούν. Εάν δεν πολεμήσουμε την κλιματική κρίση, τότε κάποια στιγμή θα βρεθούμε να συμμετέχουμε σε πολέμους για το νερό και την τροφή».

²² European Commission. (2021). Causes of climate change. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: https://ec.europa.eu/clima/change/causes_en

The climate really is getting warmer!

MAN himself may be making the world hotter — and creating the crazy, mixed-up weather like Sydney had this week.

Don't scoff — the world's top scientists are quite serious.

In the U.S. scientists are probing a theory that pollution of the atmosphere is making the earth warmer.

New cities spring up, factories are built, smoke and smog belch everywhere, jet planes and rockets shoot out exhaust fumes — and year by year the pollution gets worse.

Some scientists suspect that increased carbon dioxide and other gases in the atmosphere are acting as a "greenhouse," thus stopping the earth from losing some of its heat to outer space.

The U.S. Government has taken this theory so seriously that its weather experts are taking samples of upper air in the Antarctic and other remote regions to check on it.

The project is among many which nations have undertaken in the 1957-58 Geophysical Year to find out how—and why — the earth is getting warmer.

Two weather experts in Australia, Prof. J. MacDonald Holmes and Dr. E. B. Kraus, this week told me about the project.

They mentioned lots of other theories, too—the earth changing its solar

alignment, increased sun-spot activity, bigger falls of meteorites into the earth's atmosphere, and even that more recent bogey, nuclear weapon tests.

Scotsman Holmes, Professor of Geography at Sydney University, and Czech-born Dr. Kraus, a top-flight weatherman now working for the Snowy Hydro Authority at Cooma, have more than a passing interest in Sydney's recent weird weather.

WITH colleagues all over the world — geographers, geologists, meteorologists, and physicists—they are studying a bewildering pattern of melting glaciers, rising tides, and unpredictable climates.

The research involved has to cover many thousands of years, great gaps in records man has kept, and many, many unexplained factors.

But somehow, somewhere, Sydney's current spell of Indian summer fits into the climatic puzzle.

Today we are still living near the end of the last of the four Ice Ages be-

cause the retreat of ice from Europe didn't begin until 25,000 years ago.

None of these four Ice Ages ever completely covered the earth, though they considerably changed the face of Australia—and its climate.

But just how, and in what cycles, we don't know because, unlike Europe, there were no civilised men here to keep records.

Sydney Weather Bureau records go back only to 1859, and no one there has bothered to keep a comparative check on likely climatic cycles.

About 10,000 years ago—which is as far back as Professor Holmes and his associates are trying to check Australia's climatic variations—the continent was a colder and wetter place than it is today.

Mount Kosciuszko had a perennial ice-cap of at least 3000 feet, says Professor Holmes, though nowadays its annual winter snow may not exceed three or four good falls.

Australia's sea-level at that time was about 73ft. lower than at present, before the melting ice regions sent it higher.

Professor Holmes says there is very definite evidence that in the past 30-35 years glaciers in Cen-

tral Europe, North America, New Zealand, Greenland, and New Guinea have been retreating.

Part evidence of this are greater deposits of moraine — rock and dirt retreating glaciers leave behind.

Scientists are now eagerly awaiting data from the recent Fuchs-Hillary expeditions to the Antarctic, which are expected to show that the massive polar ice-caps there are melting.

Says Professor Holmes:

By Wally Crouch

"All over the world there are other signs of increasing warmth.

"With colored butterflies their 'melanism'—pigmentation—is becoming darker, a sure sign of increased heat.

"In northern Norway fir trees are dying out and giving way to spruce, a warmer weather species.

"Over the top of Europe the pack-ice is retreating, and the Arctic Ocean there is becoming more navigable.

"With a little man-made help from ice-breakers the Russians hope soon to have a clear waterway from the Barents Sea right

round to the Bering Sea, north of the Pacific."

Recent changes in the world's "heat equator" also bear out the "warmer world" theory, says Professor Holmes.

This "heat equator" is a flexible line which traces the highest mean temperatures right round the earth annually.

In northern latitudes the "heat equator" pinpoints "hot spots" over the oceans; south of the Equator it zigzags over the land masses.

And in recent years the "heat equator" has been shifting more and more to the south, including Australia.

And what about Australia? Professor Holmes says that up to recent years it was generally accepted that the continent's weather moved in 35-year cycles.

Some experts have since traced it to 11-year cycles, and now there is a theory that the climate here may be governed by five-year cycles.

For example, this winter appears to be following last year — dry, mild, and with clear skies, and the summers very hot and drought-creating.

In the previous five years—1952-56—eastern Australia had a lot of rain—including some heavy flooding—in both winter and summer, and cold, biting winds and frequent snow

in the winter.

Bad weather invariably passes over Australia from west to east and comes from one of two areas where low-pressure "fronts" originate — the Great Australian Bight-Tasman Sea region, or the tropical waters north of Australia.

Clear, dry weather flows from high pressure "fronts" originating in the desert regions of Western and Central Australia.

Lately, "highs" have extended and moved along paths more to the north and south.

"These so-called 'good' winters should last for at least three more years before the cycle changes," he adds.

DR. KRAUS believes the world's average mean temperature has risen approximately one degree over the past 100 years.

In some parts of the Northern Hemisphere, like Greenland, the extreme tip of Scotland, and the northern tip of Canada, the increase was as much as three degrees, but in Australia it was only a fraction of a degree.

But, according to a survey he made, rainfall in eastern Australia, especially in Queensland's subtropical belt, rose about 20 per cent between 1850-1950. This increased coastal

moisture may justify our complaints about Sydney's summers being more humid.

What happens when the world's average mean temperature rises a degree?

Because the transition is slow — over at least a century, possibly 300-400 years — humans and animals suffer no physical ill effects.

But nature changes; warm weather crops can be grown in regions where previously they would have perished.

Insects, too, invade new areas; sometimes with detrimental effects, like the tsetse fly in Africa, which has been found in areas where it wasn't a century ago.

What about the danger from rising tides? Neither our generation nor the next should have to worry, say Prof. Holmes and Dr. Kraus.

Sydney's present high tides appear to be caused by a general southward movement of tropical waters, which is running late this year.

They're no higher than at Christmas — their normal "highest."

For the world's tidal level to rise 5ft., its average temperature would have to rise 2.3 degrees.

So a catastrophe, like the drowning of all coastal cities, isn't due for about 1000 years—if at all.

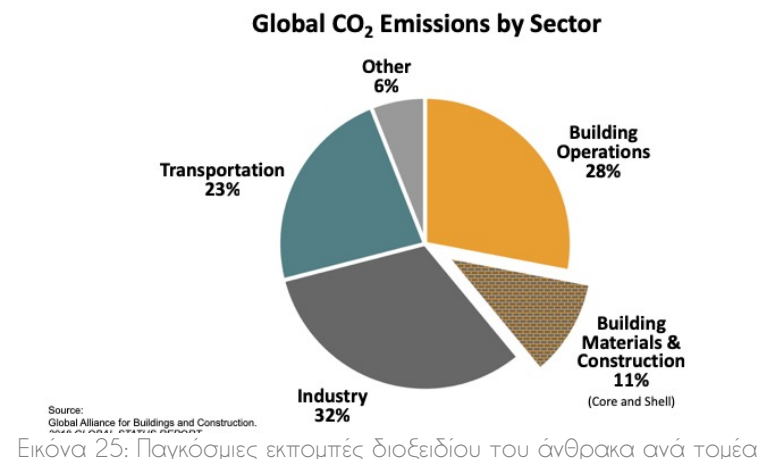
3.2 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΡΙΣΗ

Τα κτίρια είναι ένας από τους πιο προφανείς παράγοντες οικονομικής δραστηριότητας, καθώς η οικονομική ανάπτυξη μιας χώρας θα απαιτήσει περισσότερα γραφεία, κτίρια κατοικιών και εργοστάσια. Κατά τη διάρκεια της ζωής των κτιρίων θα έχει μια επίδραση στο τοπικό και παγκόσμιο περιβάλλον μέσω μιας σειράς διασυνδεδεμένων ανθρώπινων δραστηριοτήτων και φυσικών διεργασιών.

Όλοι οι αρχιτέκτονες γνωρίζουν, ότι τα νέα κτίρια εκμεταλλεύονται τεράστιες εκτάσεις γης (πολύ συχνά, απαραίτητη αρόσιμη γη που απαιτείται για να τροφοδοτήσουν τους αυξανόμενους πληθυσμούς), ενώ μέρος της σχεδόν αφύσικης εξάπλωσης που απαιτεί καταλαμβάνεται προκυμμένου να υπάρξουν οι κατάλληλες υποδομές δρόμων και στάθμευσης για τα αυτοκίνητα.

Οι αρχιτέκτονες κατανοούν επίσης ότι όλα αυτά θα μπορούσαν να γίνουν πολύ πιο σοφά από τώρα. Τα κτίρια καταναλώνουν και μολύνουν τεράστιες ποσότητες από τον ολοένα και πιο πολύτιμο πόρο, το πόσιμο νερό.

Επίσης πολύ λίγοι αρχιτέκτονες φαίνεται να γνωρίζουν ότι η κατασκευή και η λειτουργία των κτιρίων είναι υπεύθυνη για σχεδόν το ήμισυ της ενέργειας που καταναλώνουν οι ανεπτυγμένες χώρες.²³ Σύμφωνα με στοιχεία από το “Architecture 2030” τα κτήρια αποτελούν καθοριστικό παράγοντα στην επιδείνωση της περιβαλλοντικής κρίσης. Από κοινού, τα κτίρια και οι κατασκευές ευθύνονται για το 39% όλων των εκπομπών άνθρακα στον κόσμο, με τις λειτουργικές εκπομπές (από ενέργεια που χρησιμοποιείται σε θερμότητα, δροσισμό και ελαφριά κτίρια) να αντιπροσωπεύουν το 28%.²⁴ Τα κτήρια χρησιμοποιούν πόρους όπως τα ορυκτά καύσιμα και με την καύση τους για κατανάλωση ενέργειας, υποπροϊόντα εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα, επιδεινώνοντας το περιβάλλον. Παίρνουμε πόρους αλλά επιστρέφουμε μόνο μολυσμένο αέρα στον πλανήτη ενώ μόνο το 24% της ενέργειας που παράγεται προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές.²⁵

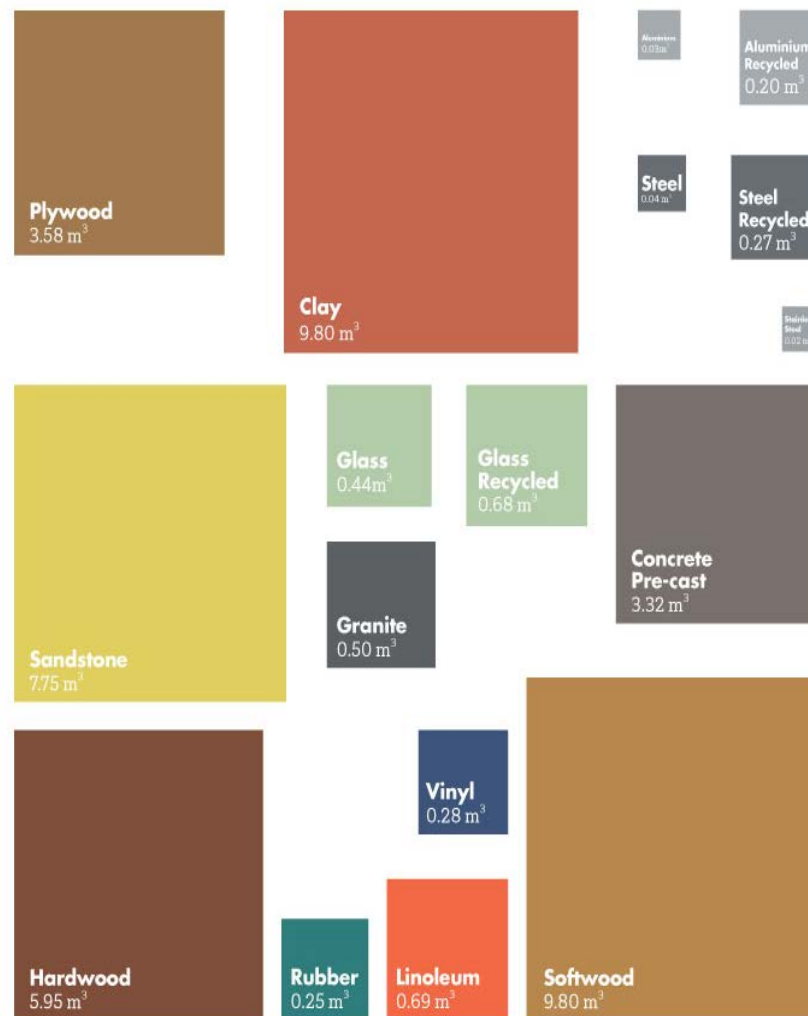


²³ Architecture2030.org. (2021). Why The Building Sector? Architecture 2030. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: https://architecture2030.org/buildings_problem_why/

²⁴ Buchanan, P., (2006). Ten Shades of Green: Architecture and the Natural World. 1st ed. New York: Architectural League of NY

²⁵ Center for Climate and Energy Solutions. (2021). Renewable Energy. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://www.c2es.org/content/renewable-energy/>

Το υπόλοιπο 11% προέρχεται από ενσωματωμένες εκπομπές άνθρακα, ή «εκ των προτέρων» άνθρακα που σχετίζεται με υλικά και κατασκευαστικές διαδικασίες σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του κτιρίου. Όπως επισημαίνει ο Peter Buchanan τα κτίρια περιέχουν πολλά υλικά που είναι τοξικά για την κατασκευή ή τη χρήση (επιβλαβείς αναθυμιάσεις ή ακόμη χειρότερα εύφλεκτα και ρυπογόνα για τα ύδατα και το έδαφος) και ότι μονωτικά υλικά και ψυκτικά μέσα σε μονάδες κλιματισμού ήταν πρωταρχικοί ένοχοι για την καταστροφή της στιβάδας του όζοντος.²⁶ Το γράφημα της εικόνας 26 "In the Scale of Carbon" δείχνει οπτικές αναπαραστάσεις των υλικών σύμφωνα με την ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που παράγεται κατά την κατασκευή τους. Κάθε τετράγωνο απεικονίζει τον όγκο του υλικού που μπορεί να παραχθεί για έναν τόνο εκπομπών CO₂, σε σχέση με άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως για αρχιτεκτονικές κατασκευές. Το γράφημα υπογραμμίζει τον υψηλό αντίκτυπο της κατασκευής με μέταλλο όπως ο χάλυβας και το αλουμίνιο, ενώ φωτίζει τις λιγότερο επιβλητικές πρώτες ύλες στον σύγχρονο αρχιτεκτονικό σχεδιασμό όπως ο πηλός, ο ψαμμίτης και το ξύλο. Ο άργιλος και το μαλακό ξύλο βγαίνουν στην κορυφή μεταξύ των «πράσινων» υλικών: είναι δυνατή η κάλυψη 9,8 κυβικών μέτρων αξιοποιώντας αυτά τα υλικά ανά ένα τόνο CO₂, ενώ μόνο 0,02 κυβικά μέτρα από ανοξείδωτο χάλυβα μπορούν να κατασκευαστούν για τις αντίστοιχες εκπομπές.²⁷



Εικόνα 26: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που παράγονται κατά την παραγωγή και χρήση των κατασκευαστικών υλικών

²⁶ Buchanan, P., (2006). *Ten Shades of Green: Architecture and the Natural World*. 1st ed. New York: Architectural League of NY

²⁷ Architizer, (2021). *How Bad for the Planet Are Your Building Materials?*. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://architizer.com/blog/practice/materials/building-materials-carbon-emissions/>

Ο Peter Buchanan συνεχίζει αναφέροντας πως η σύγχρονη αρχιτεκτονική συμβάλλει στην περιβαλλοντική κρίση και με άλλους, όχι τόσο φανερούς, τρόπους. Κλιματιζόμενα κτίρια, ερμητικά σφραγισμένα με φιμέ τζάμια, καταστέλλουν κάθε είδους επαφή μεταξύ των χρηστών τους και του φυσικού κόσμου έξω. Τέτοια κτίρια τείνουν επίσης να είναι απομονωμένα το ένα από το άλλο, φυσικά και αισθητικά, και εμποδίζουν οποιαδήποτε μορφή κοινοτικής ζωής, τόσο μέσα τους όσο και στο περιβάλλον τους, αποξενώνοντας ανθρώπους από τη βαθύτερη σύνδεσή τους με τη φύση και τον τόπο στον οποίο βρίσκονται. Έτσι, αυτά τα κτίρια όχι μόνο καθρεφτίζουν αλλά και βοηθούν να παγιώσουν αυτή τη νοοτροπία που έχει διαιωνιστεί και οδηγεί στην καταστροφή του φυσικού κόσμου.²⁸

Σύμφωνα με στοιχεία της “Architecture 2030” ο κόσμος έρχεται αντιμέτωπος με το μεγαλύτερο κύμα αστικής ανάπτυξης στην ιστορία του ανθρώπου. Πάνω από το μισό του παγκόσμιου πληθυσμού είναι πλέον συγκεντρωμένο σε αστικές περιοχές, και μέχρι το 2060 υπολογίζεται ότι τα δύο τρίτα του πληθυσμού των 10 δισεκατομμυρίων που προβλέπεται ότι θα υπάρχουν, θα ζουν στις πόλεις. Για τη στέγαση και την απορρόφηση αυτής της τεράστιας ανάπτυξης θα πρέπει να προστεθούν 230 δισεκατομμύρια m² επιφάνειας κτηρίων παγκοσμίως. Αυτό ισοδυναμεί με την προσθήκη ολόκληρης της Νέας Υόρκης κάθε μήνα για τα επόμενα 40 χρόνια.²⁹ Συνεπώς είναι υψίστης σημασίας τόσο οι αρχιτέκτονες όσο και οι άλλοι μηχανικοί και επιστήμονες να αξιοποιήσουν όλες τις τεχνολογικές εξελίξεις και γνώσεις με σκοπό να αλλάξει η αρχιτεκτονική και αντί για να λειτουργεί υποσκάπτοντας τον περιβάλλον, να λειτουργεί προς όφελός του.



Εικόνα 27: Έδαφος ερημοποιημένο από την κλιματική αλλαγή

²⁸ Buchanan, P., (2006). *Ten Shades of Green: Architecture and the Natural World*. 1st ed. New York: Architectural League of NY

²⁹ Architecture2030.org. (2021). *Why The Building Sector?* Architecture 2030. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: https://architecture2030.org/buildings_problem_why/

3.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ

Αν και τα προβλήματα που έχει να λύσει η ανθρωπότητα είναι υψίστης σημασίας, σήμερα περισσότερο από ποτέ έχουμε στην κατοχή μας όλα τα εργαλεία προκυμμένου να επιβραδύνουμε τις καταστροφές που προκαλέσαμε και να δημιουργήσουμε έναν βιώσιμο κόσμο. Ένα σύνολο νέων τεχνολογικών εξελίξεων έρχονται να θέσουν τα θεμέλια για αυτό που πολλοί αποκαλούν 4^η βιομηχανική επανάσταση.

Η Πρώτη Βιομηχανική Επανάσταση χρησιμοποίησε νερό και ατμό για να μηχανοποιήσει την παραγωγή. Η δεύτερη χρησιμοποίησε ηλεκτρική ενέργεια για να δημιουργήσει μαζική παραγωγή ενώ η τρίτη χρησιμοποίησε ηλεκτρονικά και τεχνολογία πληροφοριών για την αυτοματοποίηση της παραγωγής. Τώρα μια Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση βασίζεται στην Τρίτη, την ψηφιακή επανάσταση που συμβαίνει από τα μέσα του περασμένου αιώνα. Χαρακτηρίζεται από ένα συνδυασμό τεχνολογιών που αμβλύνουν τα όρια μεταξύ της φυσικής, της ψηφιακής και της βιολογικής σφαίρας.

Νέες τεχνολογίες όπως οι 3D printers, τα ρομπότ τεχνητής νοημοσύνης, αυτοματοποιημένα συστήματα, το διαδίκτυο των πραγμάτων, προηγμένα υλικά και βιοτεχνολογίες σχετίζονται άμεσα με τις βιώσιμα αναδυόμενες πόλεις. Πολλές από αυτές υπόσχονται ήδη ενδιαφέρουσες αλλαγές όσον αφορά αστικούς τομείς όπως οι μεταφορές, η σχεδίαση των κτηρίων, οι ενεργειακές απαιτήσεις και η διαχείριση των αποβλήτων και του νερού.

Οι πόλεις μπορούν να αξιοποιήσουν αυτές τις πρωτοποριακές τεχνολογίες, σε συνδυασμό μεταξύ τους και με νέα επιχειρηματικά μοντέλα, όχι μόνο για την ενίσχυση της οικονομικής παραγωγικότητας των αστικών περιοχών, αλλά και για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την αύξηση της ευημερίας.³⁰

Εικόνα 28

³⁰ Eitan, T., (2021). The Future of Architecture: 4 Ways Technology Will Change Our Industry [online] Architizer. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://architizer.com/blog/practice/tools/technology-will-change-the-architecture-industry/>



4. ΒΙΟΜΙΜΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

4.1 ΒΙΟΜΙΜΗΤΙΚΗ ΛΟΓΙΚΗ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ

4.1.1. Βιομιμητικές στρατηγικές σχεδιασμού

Οι βιομιμητικές προσεγγίσεις, σχετικά με τη διαδικασία του σχεδιασμού, ανήκουν σε δύο κύριες κατηγορίες οι οποίες έχουν σαν βασική τους διαφορά το σημείο αφετηρίας στον σχεδιασμό.

Στην πρώτη κατηγορία την αφετηρία αποτελεί κάποια σχεδιαστική πρόκληση που θα αναζητήσει μια λύση από τη βιολογία, ενώ η δεύτερη λειτουργεί αντίστροφα, καθώς ξεκινά με την παρατήρηση κάποιου ιδιαίτερου χαρακτηριστικού ενός οργανισμού ή οικοσυστήματος από τον βιολογικό κόσμο και μετέπειτα την εφαρμογή του σε κάποιο σχεδιαστικό πρόβλημα.

Από τον σχεδιασμό στη βιολογία

Καθώς, όπως προαναφέρθηκε, σε αυτή την προσέγγιση τίθεται ως αφετηρία η σχεδιαστική πρόκληση, η διαδικασία ξεκινά από την πλευρά των σχεδιαστών, οι οποίοι θέτουν τους αρχικούς στόχους και παραμέτρους για τον σχεδιασμό, ενώ στη συνέχεια με τη βοήθεια βιολόγων αναζητούνται πιθανές λύσεις από τη βιολογία. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της προσέγγισης αποτελεί το Bionic Car της DaimlerChrysler. Ο σχεδιασμός αυτού του αυτοκινήτου, βασίστηκε στο ψάρι *Ostracion cubicus* ή αλλιώς ψάρι-κουτί, ένα αρκετά αεροδυναμικό ψάρι, παρά το κυβικό του σχήμα. Ο σκελετός του αυτοκινήτου είναι επίσης βιομιμητικός, καθώς έχει βασιστεί στον τρόπο που αναπτύσσονται τα δέντρα για την κατανομή των φορτίων που δέχονται, με μια έξυπνη κατανομή υλικού μόνο στα σημεία που απαιτείται για την αντοχή της δομής τους.



Εικόνα 29. Το Bionic Car, εμπνευσμένο από τη μορφή του ψαριού *Ostracion cubicus*.



Εικόνα 30. Το ψάρι *Ostracion cubicus*.

Παρόλο που ο βιομιμητικός σχεδιασμός μπορεί να λειτουργήσει και χωρίς εκτεταμένες γνώσεις βιολογίας, από την πλευρά των σχεδιαστών, ή τη συνεργασία με επιστήμονες του κλάδου της βιολογίας, η έλλειψη ενός δυνατού επιστημονικού υποβάθρου αυξάνει την πιθανότητα για τον σχεδιασμό να παραμείνει σε ένα πιο επιφανειακό επίπεδο. Για παράδειγμα, ενώ το *Bionic Car* είναι αρκετά πιο περιβαλλοντικά φιλικό χάρη στον αεροδυναμικό σχεδιασμό του και την οικονομική χρήση υλικού στην κατασκευή του, δεν αποτελεί μια νέα λύση στο ζήτημα της μεταφοράς. Αντίστοιχα, η πιο επιφανειακή προσέγγιση της βιομίμησης στην αρχιτεκτονική θα μπορούσε να συμβάλλει στην αύξηση της βιωσιμότητας του δομημένου περιβάλλοντος, αλλά μια βαθύτερη προσέγγιση θα στόχευε στον επαναπροσδιορισμό του τρόπου που προσεγγίζεται ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός σαν σύνολο.

Από τη βιολογία στον σχεδιασμό

Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή κάποιο χαρακτηριστικό του βιολογικού κόσμου επηρεάζει τον ανθρώπινο σχεδιασμό, η σχεδιαστική διαδικασία έχει ως αφετηρία κάποια ήδη υπάρχουσα γνώση από σχετικές έρευνες που θα αποτελέσει έναυσμα για κάποια καινοτομία, και όχι κάποιο συγκεκριμένο σχεδιαστικό πρόβλημα. Ένα παράδειγμα αποτελεί η έρευνα της υδροφοβικής δομής του νούφαρου, που του επιτρέπει να παραμένει καθαρό ακόμη και ελώδεις περιοχές και που οδήγησε σε αρκετές καινοτομίες όπως βαφές τοίχων που τους δίνουν τη δυνατότητα να είναι αυτοκαθαριζόμενοι.

Παρότι το ανθρώπινο είδος συνυπάρχει ήδη για εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια στο ίδιο περιβάλλον με τα υπόλοιπα είδη της φύσης, χρησιμοποιώντας τους ίδιους φυσικούς πόρους, οι ομοιότητες στον τρόπο λειτουργίας τους είναι αρκετά μικρές. Επομένως, το βασικό πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι πως η βιολογική γνώση ως αφετηρία μπορεί να επηρεάσει τους ανθρώπους με τρόπο που ξεφεύγει από ένα προκαθορισμένο σχεδιαστικό πρόβλημα, γεννώντας καινοτόμες τεχνολογικές ιδέες ή σχεδιαστικές προσεγγίσεις. Μια τέτοια προσέγγιση στον βιομιμητικό σχεδιασμό έχει αρκετά περισσότερες προοπτικές να οδηγήσει σε μια ριζική αλλαγή στον τρόπο που σχεδιάζει ο άνθρωπος³¹. Αντιθέτως, ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως οι επιστήμονες που διεξάγουν βιολογικές έρευνες πρέπει να έχουν ταυτόχρονα την ευθύνη να αναγνωρίσουν τις δυνατότητες των ερευνών τους και να τις συσχετίσουν με κάποιο σχεδιαστικό πλαίσιο³².

³¹ Vincent, J. F. V., Bogatyrev, O., Pahl, A.-K., Bogatyrev, N. R. & Bowyer, A., (2005), Putting Biology into TRIZ: A Database of Biological Effects, *Creativity and Innovation Management*, 14 (1), 66-72. [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/publication/227675558_Putting_Biology_into_TRIZ_A_Database_of_Biological_Effects

³² Pedersen Zari, M., (2007). Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability.



Εικόνα 31. Η υδροφοβική επιφάνεια του φύλλου του νούφαρου.

4.1.2 Επίπεδα μίμησης

Στην προσπάθεια δημιουργίας ενός γενικού πλαισίου εφαρμογής της βιομίμησης, έχουν διατυπωθεί τρία επίπεδα εφαρμογής από την Benyus αλλά και την Pedersen Zari.

Αρχικά, τα τρία επίπεδα που αναγνωρίζει η Benyus, έχουν κλιμακούμενη σημασία, ξεκινώντας από την πιο επιφανειακή εφαρμογή της βιομίμησης και καταλήγοντας στην βαθύτερη και πιο ουσιαστική εφαρμογή.

Το πρώτο επίπεδο είναι αυτό της μίμησης της μορφής ενός οργανισμού. Για παράδειγμα, με τη μίμηση της δομής του φτερού της κουκουβάγιας, θα μπορούσε να κατασκευαστεί ένα ύφασμα ικανό να διατηρηθεί οπουδήποτε στην επιφάνειά του.

Στο δεύτερο επίπεδο, βρίσκεται η μίμηση μιας φυσικής διαδικασίας, ή πιο συγκεκριμένα ο τρόπος που κατασκευάζεται κάτι. Το φτερό της κουκουβάγιας αυτο-συναρμολογείται σύμφωνα με τους κανόνες της φύσης, σε θερμοκρασία σώματος και χωρίς χρήση βλαβερών ουσιών ή υπό ισχυρές πιέσεις. Αποτελεί, κατά συνέπεια, πηγή έμπνευσης για χρήση πιο ήπιων περιβαλλοντικά χημικών διαδικασιών από τον άνθρωπο.

Στο τελευταίο και βαθύτερο επίπεδο μίμησης, στόχος είναι η μίμηση ενός ολόκληρου οικοσυστήματος. Το φτερό της κουκουβάγιας αποτελεί μέρος ενός μεγαλύτερου συνόλου σε διάφορες κλίμακες: είναι μέρος της κουκουβάγιας η οποία είναι μέρος ενός δάσους, το οποίο είναι μέρος μιας βιώσιμης βιόσφαιρας. Με τον ίδιο τρόπο το παράδειγμα του βιομιμητικού υφάσματος που προαναφέρθηκε, θα πρέπει να είναι μέρος ενός ευρύτερου κύκλου, διατηρώντας τις ισορροπίες σε όλα τα επίπεδα, αποφεύγοντας την άσκοπη εκμετάλλευση των πόρων της Γης και των κατοίκων της³³.

Με βάση τα τρία επίπεδα μίμησης της Benyus, η Pedersen Zari προτείνει τον διαχωρισμό στο επίπεδο μίμησης οργανισμού, συμπεριφοράς και οικοσυστήματος.

Το πρώτο επίπεδο αφορά τη μίμηση ενός συγκεκριμένου φυσικού οργανισμού, όπως ένα ζώο ή ένα φυτό, ή μέρος αυτού. Το δεύτερο επίπεδο αναφέρεται στη μίμηση της συμπεριφοράς ενός οργανισμού, όπως κάποιον μηχανισμό αντίδρασης σε συγκεκριμένες συνθήκες ή την συμπεριφορά του σε ένα ευρύτερο πλαίσιο.

Το τρίτο επίπεδο στοχεύει στη μίμηση ολόκληρων οικοσυστημάτων και συγκεκριμένα των συνθηκών εκείνων που τα καθιστούν ικανά να λειτουργούν αποτελεσματικά και με βιώσιμο τρόπο³⁴.

³³ Benyus, J.M., A Biomimicry Primer [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21].

Διαθέσιμο στο: https://biomimicry.net/b38files/A_Biomimicry_Primer_Janine_Benyus.pdf

³⁴ Pedersen Zari, M., (2007). Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability.

Σύμφωνα με τη συγγραφέα, σε κάθε ένα από αυτά τα τρία επίπεδα, υπάρχουν άλλες πέντε διαστάσεις μίμησης. Πιο συγκεκριμένα, ο βιομιμητικός σχεδιασμός μπορεί να εμπνευστεί από την μορφή, τα υλικά, την κατασκευή, τις διαδικασίες και τις λειτουργίες.

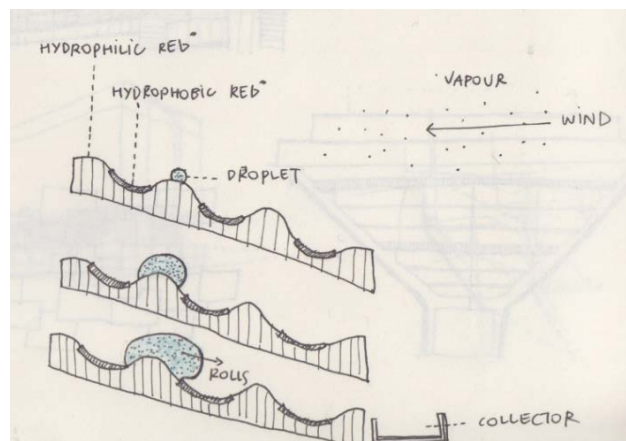
Επίπεδο οργανισμού

Οι ζωντανοί οργανισμοί μπορούν να αποτελέσουν ισχυρή πηγή έμπνευσης, καθώς περνούν συνεχώς από διαδοχικά στάδια εξέλιξης εδώ και εκατομμύρια χρόνια. Οι οργανισμοί εκείνοι που καταφέρνουν να επιβιώνουν μέχρι και σήμερα, έχουν αναπτύξει μηχανισμούς που τους επιτρέπουν να αντιμετωπίζουν τους εξωτερικούς παράγοντες και να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντός τους.

Επομένως, ο άνθρωπος μπορεί να παραδειγματιστεί από την εμπειρία της φύσης για την επίλυση ποικίλων προβλημάτων, καθώς αντίστοιχα προβλήματα πιθανόν να έχουν ήδη διαχειριστεί από φυσικούς οργανισμούς. Ένα παράδειγμα μίμησης στο επίπεδο οργανισμού αποτελεί το σκαθάρι της ερήμου Ναμίμπ (Stenocara gracilipes). Παρότι ζει σε ξηρό περιβάλλον, με ελάχιστη βροχόπτωση, το συγκεκριμένο έντομο καταφέρει να επιβιώνει παγιδεύοντας την υγρασία από την ομίχλη της ερήμου. Χάρη στο ιδιαίτερο ανάγλυφο του κελύφους του, αποτελούμενο από εναλλασσόμενες υδροφοβικές και υδροφιλικές επιφάνειες, σταγονίδια νερού σχηματίζονται πάνω του και κυλούν, μέσω των πτερυγίων του, στο στόμα του³⁵.



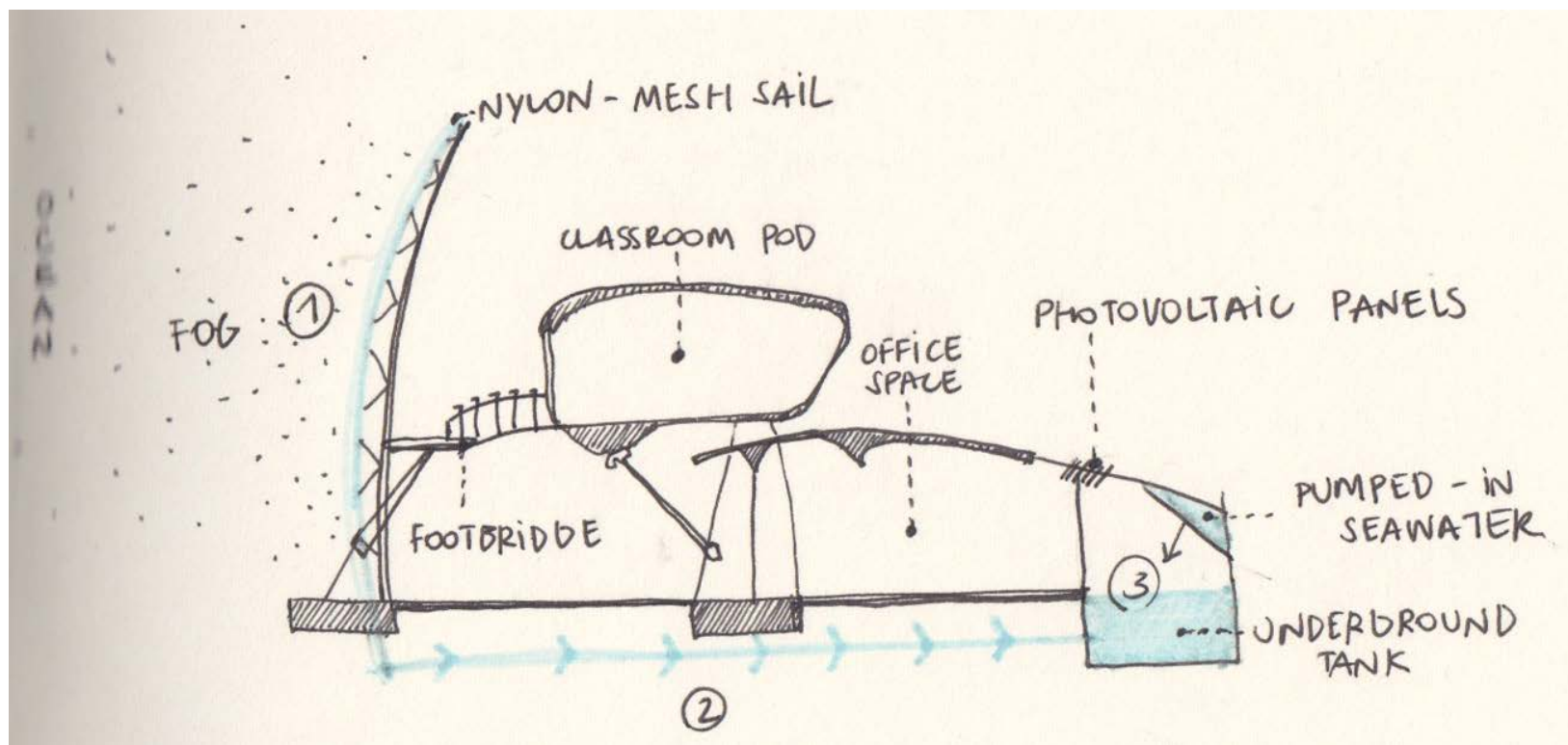
Εικόνα 32. Το σκαθάρι της ερήμου Ναμίμπ.



Εικόνα 33. Η διαδικασία δημιουργίας των σταγονιδίων στην επιφάνεια του σκαθαριού.

³⁵ Pedersen Zari, M., (2007). Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability.

Το έντομο αυτό αποτέλεσε πηγή έμπνευσης για τον βρετανό αρχιτέκτονα Matthew Parkes, στον σχεδιασμό ενός μηχανισμού συλλογής νερού για το Κέντρο Υδρολογίας του Πανεπιστημίου της Ναμίμπια. Πρόκειται για μια μεγάλου ύψους κυρτή κατασκευή που αποτελείται από νάιλον πλέγματα, στραμμένη προς τον ωκεανό, η οποία συγκρατεί την υγρασία από την ομίχλη που τη διαπερνά. Τα πλέγματα είναι διαμορφωμένα όπως το ανάγλυφο του κελύφους του σκαθαριού. Τα σταγονίδια που δημιουργούνται πάνω σε αυτά, μεταφέρονται μέσω υδρορροών σε υπόγειες δεξαμενές, με τη βοήθεια της βαρύτητας, όπου και φυλάσσονται. Ένας επιπλέον τρόπος συλλογής νερού που έχει ενταχθεί στο κτήριο, επιτυγχάνεται με την άντληση θαλασσινού νερού, και την αφαλάτωσή του με τη χρήση της ηλιακής ενέργειας³⁶.



Εικόνα 34. Ο τρόπος λειτουργίας του Κέντρο Υδρολογίας του Πανεπιστημίου της Ναμίμπια, εμπνευσμένος από το σκαθάρι της ερήμου Ναμίμπι.

³⁶ Duygunur Koç, A. and Semra Arslan, S., (2018), A Biomimetic Approach to Rainwater Harvesting. Eurasian Journal of Civil Engineering and Architecture, 2 (1), 27 - 39,

Επίπεδο συμπεριφοράς

Σε αυτό το επίπεδο μίμησης, στόχος δεν είναι η μίμηση του οργανισμού αλλά της συμπεριφοράς του, ή των σχέσεων ή αλληλεπιδράσεων που μπορεί να έχει με άλλους οργανισμούς. Οι περισσότεροι έμβιοι οργανισμοί αντιμετωπίζουν τις ίδιες κλιματολογικές συνθήκες με τον άνθρωπο, επομένως τα προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν είναι επίσης κοινά. Οι οργανισμοί λειτουργούν συνήθως σε συνθήκες όπου οι διαθέσιμοι πόροι είναι περιορισμένοι, όσον αφορά την ενέργεια και τα υλικά. Αυτοί οι περιορισμοί έχουν σαν αποτέλεσμα την εξέλιξη και την επιβίωση εκείνων των ειδών τα οποία έχουν καταφέρει να προσαρμοστούν στις ανάλογες συνθήκες, αναπτύσσοντας συγκεκριμένες συμπεριφορές και σχέσεις με άλλους οργανισμούς.

Πιο αναλυτικά, οι οργανισμοί μπορούν και διαμορφώνουν το περιβάλλον τους είτε μέσω της δικής τους δομής, είτε χρησιμοποιώντας μηχανικά μέσα. Ο άνθρωπος, επομένως, έχει τη δυνατότητα να εξάγει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο άλλα έμβια όντα διαχειρίζονται τις διάφορες προκλήσεις τους, χωρίς ταυτόχρονα να ζημιώνουν το περιβάλλον στο οποίο ζουν.

Η μίμηση στο επίπεδο συμπεριφοράς, σύμφωνα με την Zari, χρειάζεται μια προσοχή όσον αφορά την καταλληλότητα της συμπεριφοράς που πρόκειται να μιμηθεί σε σχέση με τον άνθρωπο. Ενώ συγκεκριμένες συμπεριφορές του φυσικού κόσμου μπορούν να επιφέρουν θετικά αποτελέσματα, κάποιες άλλες δεν είναι αρκετά κατάλληλες για παραδειγματισμό από τους ανθρώπους. Ειδικότερα, η συγγραφέας επισημαίνει πως είναι προτιμότερο να εστιάσουμε στη μίμηση συμπεριφορών που έχουν να κάνουν με κατασκευαστικές πρακτικές ή μηχανισμούς επιβίωσης που θα ενισχύσουν την βιωσιμότητα, παρά σε εκείνες που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε κοινωνικοοικονομικούς τομείς της ανθρώπινης ζωής.

Για παράδειγμα, ενώ η μίμηση των κατασκευαστικών πρακτικών των τερμιτών θα μπορούσε να ενισχύσει τις βιοκλιματικές δυνατότητες ενός κτηρίου, η μίμηση της κοινωνικής δομής μιας αποικίας τερμιτών δεν θα ήταν το ίδιο κατάλληλη³⁷.

³⁷ Pedersen Zari, M., (2007). Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability.



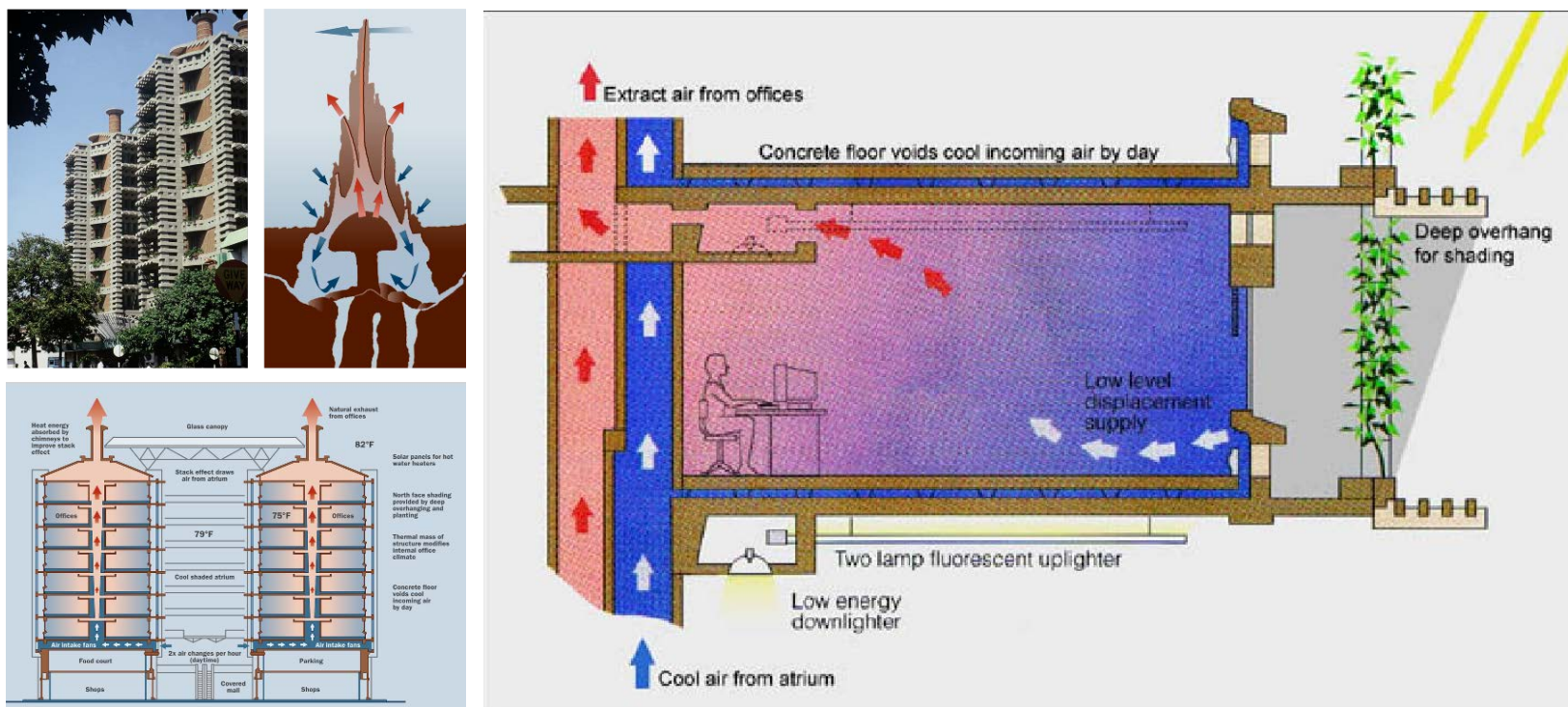
Eastgate Centre

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής στην αρχιτεκτονική αυτού του επιπέδου βιομίμησης είναι το κτήριο Eastgate Centre στην Χαράρε της Ζιμπάμπουε, από τον αρχιτέκτονα Mick Pearce, εμπνευσμένο από τις φωλιές τερμιτών.

Με τη βοήθεια του καινοτόμου βιομιμητικού σχεδιασμού του, το κτήριο προσφέρει συνθήκες θερμικής άνεσης στο εσωτερικό του καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, χωρίς την εξάρτηση από τεχνητά μέσα.

Στο εσωτερικό των γιγαντιαίων φωλιών τους, οι τερμίτες της Ζιμπάμπουε παράγουν έναν μύκητα που αποτελεί την βασική πηγή τροφής τους. Η πρόκληση που αντιμετωπίζουν είναι η διατήρηση του περιβάλλοντος καλλιέργειας του μύκητα στους 30°C, ενώ η εξωτερική θερμοκρασία κυμαίνεται από 2°C τη νύχτα έως και 40°C την ημέρα. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, οι φωλιές διαθέτουν αρκετούς αεραγωγούς για τον αερισμό της δομής, τους οποίους χρησιμοποιούν οι τερμίτες για τη ρύθμιση της εσωτερικής θερμοκρασίας, αναλόγως και με τις εξωτερικές συνθήκες. Ταυτόχρονα, ενώ εξωτερικά μοιάζουν εντελώς συμπαγείς, οι φωλιές διαθέτουν μικροσκοπικούς πόρους, που επιτρέπουν στον αέρα να τις διαπερνά.

Το κτήριο Eastgate χρησιμοποιεί ένα παρόμοιο σύστημα παθητικού αερισμού, για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας των εσωτερικών του χώρων. Το κτήριο αποτελείται από δύο βασικούς όγκους, οι οποίοι διαχωρίζονται από ένα αίθριο, και ενοποιούνται με γυάλινη οροφή. Είναι κατασκευασμένο από σκυρόδεμα και τούβλα, υλικά τα οποία έχουν μεγάλη θερμική μάζα, όπως και το χώμα των φωλιών τερμιτών, απορροφώντας μεγάλες ποσότητες θερμότητας, με μικρές αλλαγές στην θερμοκρασία τους. Επιπλέον, η ύπαρξη μικρών ανοιγμάτων, που αυξάνουν την εξωτερική επιφάνεια του κτηρίου, σε συνδυασμό με προεξέχοντα λίθινα στοιχεία στις όψεις, που προσφέρουν επιπλέον προστασία από τον ήλιο, βοηθούν στην ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών κατά τη διάρκεια της νύχτας και των θερμικών κερδών κατά τη διάρκεια της ημέρας.



Εικόνα 36. Η λειτουργία του κτηρίου Eastgate Centre.

Στον πρώτο όροφο του κτηρίου έχουν τοποθετηθεί ανεμιστήρες, οι οποίοι συνεχώς τραβούν αέρα από το αίθριο και τον διοχετεύουν στους χώρους γραφείων των επάνω ορόφων, για τη ρύθμιση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι ανεμιστήρες διοχετεύουν τον ψυχρό εξωτερικό αέρα στους χώρους, μέσω αεραγωγών που βρίσκονται στα δάπεδα, απομακρύνοντας τη θερμότητα που έχει απορροφηθεί κατά τη διάρκεια της ημέρας από την μάζα του κτηρίου. Έτσι, την επόμενη μέρα, ο θερμός εξωτερικός αέρας ψυχραίνεται από την ήδη ψυχρή μάζα του κτηρίου στους 3°C , πριν εισέλθει στους εσωτερικούς χώρους. Στη συνέχεια όταν ο αέρας στο εσωτερικό θερμανθεί, ανεβαίνει προς τις οροφές και διοχετεύεται μέσω αεραγωγών σε κεντρικές καπνοδόχους, όπου διαφεύγει εκτός του κτηρίου.



Εικόνα 37. Η λειτουργία του κτηρίου Eastgate Centre.

Μέσω αυτής της καινοτόμας σχεδίασης, οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό διατηρούνται στους 24°C την ημέρα, και στους 20°C τη νύχτα. Ακόμη, το κτήριο χρησιμοποιεί 35% λιγότερη ενέργεια από τα αντίστοιχα κτήρια γραφείων στο Χαράρε, ενώ το κόστος κατασκευής του ήταν 10% λιγότερο.

Σύμφωνα με τον αρχιτέκτονα, το έργο αυτό “ήταν μια προσπάθεια σχεδίασης ενός κτηρίου εμπνευσμένο από έναν ζωντανό οργανισμό · μια φωλιά τερμιτών. Είναι ένα οικοσύστημα, όχι μια τυπική “μηχανή κατοίκησης”³⁸.

³⁸ Mick Pearce, Eastgate Development Harare [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <http://www.mickpearce.com/Eastgate.html>

Επίπεδο οικοσυστήματος

Το τρίτο και τελευταίο επίπεδο βιομίμησης αφορά τη μίμηση ενός ολόκληρου οικοσυστήματος. Το επίπεδο αυτό αποτελεί ίσως τη σημαντικότερη μορφή βιομίμησης που μπορεί να υπάρξει, όπως υποστηρίζει και η Bezyus. Απώτερος σκοπός αυτού του είδους μίμησης είναι η ευημερία τόσο των οικοσυστημάτων όσο και των ανθρώπων, και όχι η ικανοποίηση οικονομικών συμφερόντων.

Όπως υπογραμμίζει η Zari, ένα ισχυρό πλεονέκτημα του σχεδιασμού σε αυτό το επίπεδο μίμησης είναι πως μπορεί να συνδυαστεί με τα δύο προηγούμενα, αλλά και να εντάξει άλλου είδους βιώσιμες κατασκευαστικές πρακτικές, όχι απαραίτητα βιομιμητικές. Ακόμη, μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικές χρονικές και χωρικές κλίμακες, και να αποτελέσει το έναυσμα για την μετάβαση σε έναν πραγματικά βιώσιμο σχεδιασμό.

Το ισχυρότερο όμως πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι μπορεί να είναι περιβαλλοντικά ευεργετική τόσο σε μεταφορικό όσο και σε κυριολεκτικό επίπεδο.

Σε μεταφορικό επίπεδο, οι γενικές σχεδιαστικές αρχές της φύσης, μπορούν να εφαρμοστούν ακόμη και χωρίς ειδικές γνώσεις οικολογικού σχεδιασμού. Η επίδραση του δομημένου περιβάλλοντος στο φυσικό περιβάλλον θα ήταν πολύ πιο θετική, αν αυτό σχεδιαζόταν σαν ένα σύστημα με ισχυρές αλληλεπιδράσεις και αλληλοσυσχετίσεις, όπως ένα οικοσύστημα, ακόμη και σε μεταφορικό επίπεδο.

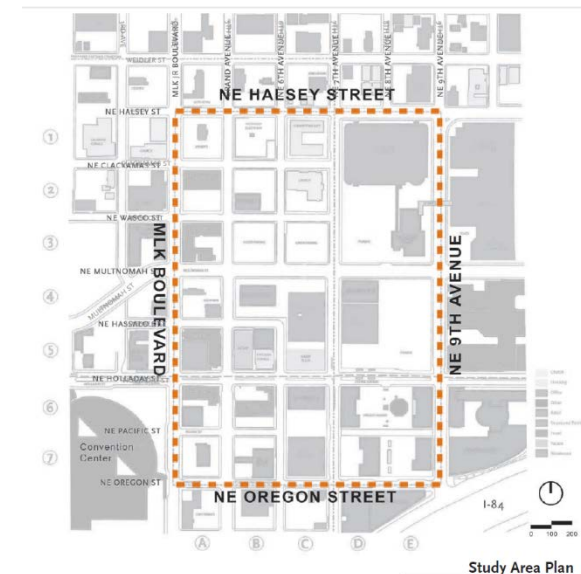
Σε πρακτικό επίπεδο, η μίμηση στο επίπεδο οικοσυστήματος, αφορά τον σχεδιασμό του δομημένου περιβάλλοντος με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι μέρος των πολύπλοκων βιολογικών διεργασιών της φύσης, ενισχύοντας και όχι καταστρέφοντάς τις. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού είναι απαραίτητη η βαθύτερη κατανόηση και γνώση στον τομέα της οικολογίας, αλλά και η συνεργασία μεταξύ των διαφορετικών επιστημονικών κλάδων που εμπλέκονται στην διαδικασία του σχεδιασμού, όπως αρχιτεκτόνων, βιολόγων και οικολόγων³⁹.

³⁹ Pedersen Zari, M., (2007). Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα σε αυτό το επίπεδο μίμησης αποτελεί το Lloyd Crossing Sustainable Design Plan στο Πόρτλαντ των ΗΠΑ, που ξεκίνησε το 2004.



Εικόνα 38. Απεικόνιση του Lloyd Crossing Sustainable Design Plan.



Εικόνα 39. Η περιοχή μελέτης του έργου.

Στόχος του έργου ήταν η περιβαλλοντική και οικονομική αναβάθμιση μιας ήδη δομημένης περιοχής, με κύριο γνώμονα την επαναφορά της περιβαλλοντικής κατάστασής της στο επίπεδο που βρισκόταν πριν δομηθεί. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, τέθηκαν συγκεκριμένοι στόχοι και βιώσιμες στρατηγικές, που εκτείνονται σε μια περίοδο 45 χρόνων, σε τομείς όπως το φυσικό περιβάλλον, τη διαχείριση του νερού, της ενέργειας και των αναπτυξιακών δυνατοτήτων της περιοχής.

Η υφιστάμενη περιοχή απαρτίζονταν από 35 οικοδομικά τετράγωνα, με συνολικά 260.000 τ.μ. δομημένου χώρου. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, στην περιοχή αναμένεται να προστεθούν επιπλέον 750.000 τ.μ. νέων χρήσεων, τα επόμενα 45 χρόνια (έως το 2050). Επομένως, μέρος της μελέτης αποτέλεσε και η κατάλληλη ένταξη των νέων αυτών κτηρίων, ενσωματώνοντας βιώσιμες στρατηγικές και διατηρώντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμά τους στο επίπεδο προ της ανέγερσής τους.

Κατά τη διάρκεια του έργου, δημιουργήθηκε ένα σύστημα περιβαλλοντικών μετρήσεων σχετικά με την κατάσταση της περιοχής πριν αυτή δομηθεί. Έχοντας υπ' όψιν πως η περιοχή αποτελούσε μικτό δάσος κωνοφόρων, πριν την οικοδόμησή της, πραγματοποιήθηκαν κάποιες εκτιμήσεις σχετικά με το φυσικό περιβάλλον και την κάλυψη από βλάστηση, τα επίπεδα βροχοπτώσεων και τις ροές τους στην περιοχή, την ποσότητα ηλιακής ενέργειας, και τα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα. Αυτές οι μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια σαν εργαλείο για την καλύτερη οργάνωση των στρατηγικών στόχων του έργου, με απώτερο σκοπό την επαναφορά των παλαιότερων περιβαλλοντικών επιπέδων της περιοχής, παράλληλα με την μελλοντική ανοικοδόμησή της.

Φυσικό περιβάλλον

Στην πρώιμη κατάστασή της, η περιοχή θα αποτελούνταν από 220 στρέμματα μικτού δάσους κωνοφόρων, με 90% κάλυψη από βλάστηση και μεγάλη ποικιλία άγριας ζωής. Στην κατάσταση που βρισκόταν το 2004, μόνο το 14,5% της περιοχής ήταν καλυμμένο με βλάστηση, όντας αφιλόξενο στα άγρια είδη πτηνών, θηλαστικών και υδρόβιων ζώων. Μέχρι το 2050, βασικός στόχος σε αυτόν τον τομέα είναι η καλύτερη διασύνδεση της περιοχής με σημαντικούς εγγείς βιότοπους, μέσω γραμμικών πράσινων συνδέσεων.

Επιπλέον, η κάλυψη από βλάστηση προβλέπεται να αυξηθεί στο 25-30% της περιοχής, προσφέροντας αυξημένη δενδροσκίαση, η οποία σε συνδυασμό με φυτεμένες στέγες, θα δημιουργήσουν καταλληλότερες συνθήκες για την

2004 Existing Habitat Conditions

Tree cover 14.5%

Tree species include: red maple, scarlet oaks, sweet gum, tulip tree

Existing On-Site Conditions

Lack of tree canopy and middle story provide little habitat for birds or arboreal mammals.

Virtually no habitat for terrestrial mammals such as beaver, deer and raccoon.

Virtually no habitat is left for invertebrates because of the large percentage of impervious surfaces in the study area.

No aquatic habitat such as streams, creeks or wetlands remain from pre-development condition.

Natural predator/prey relationships have been replaced by urban adapted species such as starling, raven pigeon, seagull, squirrels, rats and feral cats.

Existing Off-Site Conditions

Increased water temperatures from stormwater harms aquatic and amphibious species

Sediments and pollution carried in stormwater runoff harm aquatic and amphibious species



2050 Habitat Conditions

Tree cover 25-30%

Potential native tree species include: Douglas fir, red alder, bigleaf maple/gum

2050 Primary Goals

Establish wildlife connectivity through the creation of wildlife corridors linking the Lloyd Crossing area with significant adjacent habitats such as the Willamette River and Sullivan's Gulch.

2050 Secondary Goals

On-site:

Creation of a habitat corridor, providing avian, aquatic and invertebrate habitat.
Rooftop gardens providing avian and insect habitat.
Increased Tree Canopy providing avian habitat.
Understory planting along greenway providing avian habitat.

Stormwater treatment and detention facilities providing avian, invertebrate and possibly aquatic habitat.
Use of conifers wherever possible.

Note: this concept plan is not intended to represent specific planned or required development proposals



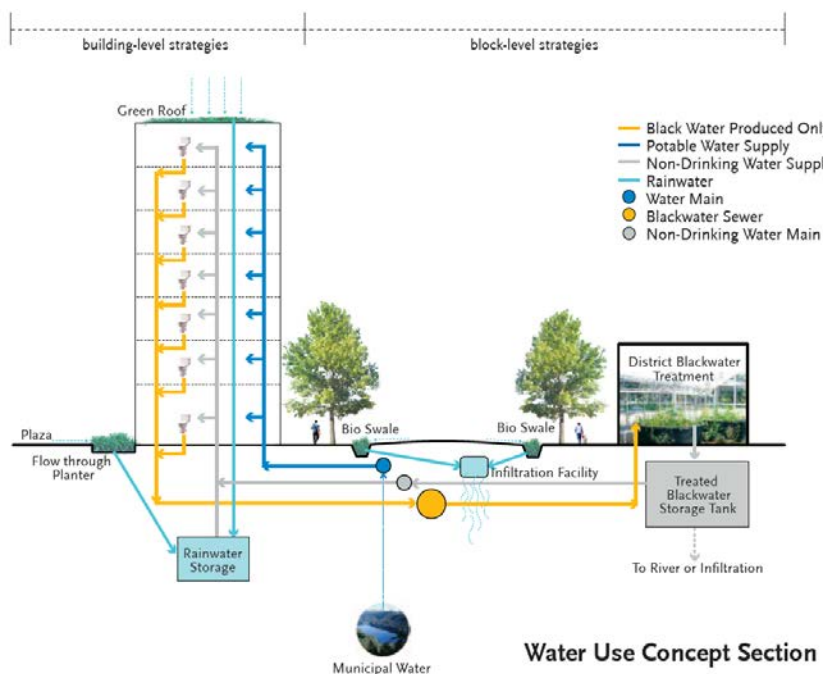
Off-site Recommendations:
Sullivan's Gulch Wildlife Corridor providing avian, terrestrial and insect habitat.
Stream Restoration along Sullivan's Gulch providing avian, invertebrate and aquatic habitat.

Εικόνα 40. Η υφιστάμενη κατάσταση και οι στόχοι της πρότασης, όσον αφορά το φυσικό περιβάλλον.

φιλοξενία των άγριων ζώων. Ακόμη, η καλύτερη διαχείριση των ομβρίων υδάτων θα δημιουργήσει συνθήκες για την ανάπτυξη υδροβίων ζώων.

Διαχείριση υδάτων

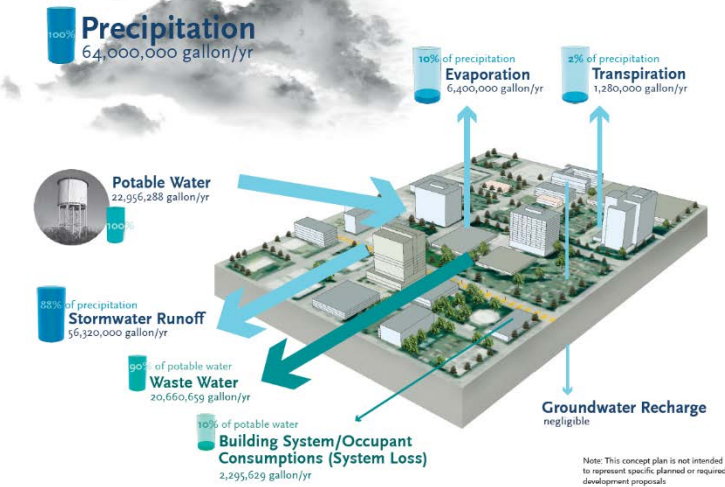
Η περιοχή δέχεται 240.000 κ.μ. βροχόπτωσης ετησίως, από τα οποία το 50% θα κατέληγε σε υπόγεια ύδατα, το 10% θα εξατμιζόταν, το 2% θα χανόταν μέσω διαπνοής, ενώ το 30% θα αντιστοιχούσε στην απορροή ομβρίων υδάτων. Η βασική πρόκληση στον τομέα της διαχείρισης υδάτων είναι η μίμηση, όσο το δυνατόν περισσότερο, των πρώιμων φυσικών χαρακτηριστικών της περιοχής, παράλληλα με την ικανοποίηση των αναγκών των κατοίκων αλλά και την αυξανόμενη αστική πυκνότητα σε αυτήν.



Οι κύριες στρατηγικές που αναπτύχθηκαν στοχεύουν στην διαχείριση του βρόχινου νερού της περιοχής και χρήση του εξ' ολοκλήρου, για τις ανάγκες κατανάλωσης, πόσιμου νερού από τους κατοίκους, ελαχιστοποιώντας έτσι την εξάρτηση από εξωτερικούς φορείς για την τροφοδοσία νερού. Επιπλέον, τα όμβρια ύδατα αλλά και τα λύματα επεξεργάζονται σε εγκαταστάσεις καθαρισμού εντός της περιοχής και επαναχρησιμοποιούνται στη συνέχεια από τους κατοίκους για τις ανάγκες μη πόσιμου νερού. Η διαχείριση των ομβρίων υδάτων που έχει προβλεφθεί μιμείται τα φυσικά χαρακτηριστικά μιας λεκάνης απορροής, με ένα σύστημα τεχνητών "κοιλάδων", τοποθετημένων σε διασταυρώσεις δρόμων εντός της περιοχής, όπου θα συλλέγονται τα ύδατα, μέσω της φυσικής κλίσης του εδάφους. Το αποτέλεσμα όλων αυτών των στρατηγικών είναι η μείωση της χρήσης πόσιμου νερού κατά 62%, και του σχετικού συνολικού κόστους κατά 89%.

Εικόνα 41. Η προτεινόμενες στρατηγικές διαχείρισης των υδάτων.

2004 Existing Water Use Conditions



2050 Per Plan Water Use Conditions



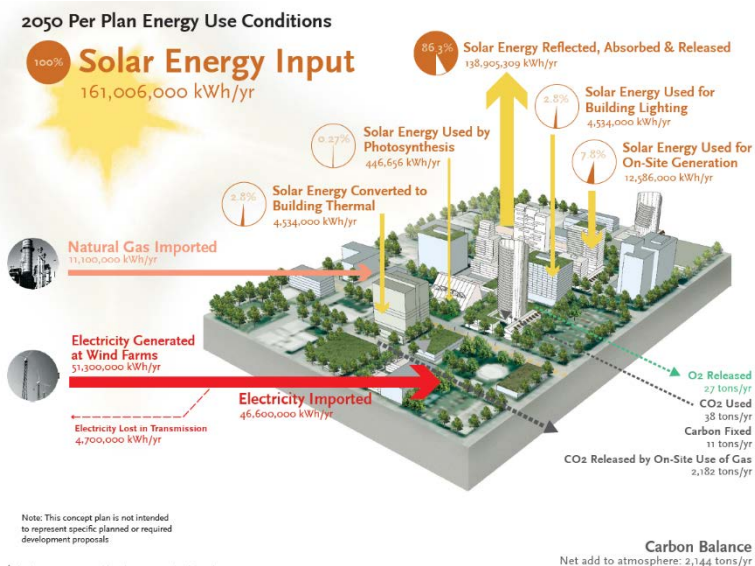
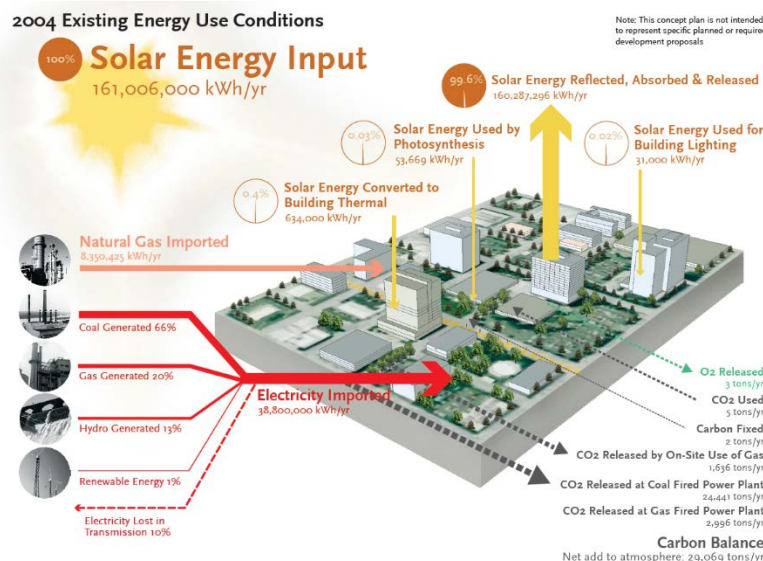
Εικόνα 42. Η υφιστάμενη κατάσταση και οι στόχοι της πρότασης, όσον αφορά τη διαχείριση των υδάτων.

Ενέργεια

Ο βασικός στόχος του έργου στον τομέα της ενέργειας ήταν η επίτευξη ουδέτερου ισοζυγίου άνθρακα στην περιοχή, μέσω διάφορων καινοτόμων στρατηγικών, που προωθούν την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την μεγαλύτερη εκμετάλλευση της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας.

Στην κατάσταση του 2004, οι κύριες πηγές ενέργειας ήταν η ενέργεια με καύση άνθρακα (66%), ενέργεια από φυσικό αέριο (20%) και ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές (14%).

Επιπλέον, ενώ στην πρώιμη κατάστασή της η περιοχή κατανάλωνε 681 τόνους διοξειδίου του άνθρακα ετησίως, στην υπάρχουσα κατάσταση προτίθενται πάνω από 29,000 τόνοι ετησίως, οι περισσότεροι από τους οποίους παράγονται εκτός της περιοχής, στα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας τα οποία την τροφοδοτούν⁴⁰.



Εικόνα 43. Η υφιστάμενη κατάσταση και οι στόχοι της πρότασης, όσον αφορά τη διαχείριση της ενέργειας.

⁴⁰ The American Institute of Architects. Lloyd Crossing Sustainable Design Plan [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://www.aiatopten.org/node/159>

Για τη βελτίωση της κατάστασης, ο στόχος του σχεδίου είναι μέχρι το 2050, η ενέργεια που καταναλώνεται στην περιοχή να προέρχεται εξ' ολοκλήρου από αιολικά πάρκα. Ακόμη, η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας εντός της περιοχής προβλέπεται να αυξηθεί στο 13,7% ,από μόλις 2% το 2004.

Όσον αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, πρόκειται να μειωθούν στους 2.100 τόνους ετησίως, προερχόμενους από χρήση φυσικού αερίου.

Επιπλέον, άλλες στρατηγικές που πρόκειται να εφαρμοστούν έχουν να κάνουν με:

- Πιο αποτελεσματικές πρακτικές στα υπάρχοντα κτήρια που θα βοηθήσουν στην εξοικονόμηση ενέργειας κατά 23% συνολικά,
- Αποτελεσματικότερος σχεδιασμός των νέων κτηρίων, με χρήση βιοκλιματικών πρακτικών, για την καλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητά τους,
- Εγκατάσταση θερμικού συστήματος υπογείως, μέσω του οποίου θα ανακτάται χαμένη θερμότητα από διάφορες πηγές, όπως συστήματα εξαερισμού, και θα επανατροφοδοτείται στα κτήρια,
- Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων και ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλιακής και αιολικής ενέργειας,
- Εγκατάσταση σταθμού επεξεργασίας οργανικών αποβλήτων για την παραγωγή βιοαερίου⁴¹.

⁴¹ Lloyd Crossing Sustainable Urban Design Plan & Catalyst Project, (2004) [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://prosperportland.us/wp-content/uploads/2016/07/Lloyd-Crossing-Plan.pdf>.

4.2 Η ΦΥΣΗ ΩΣ ΠΡΟΤΥΠΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

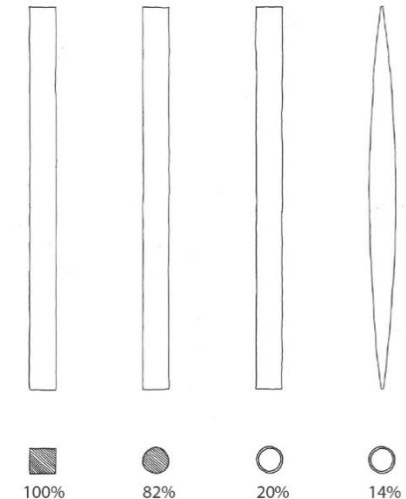
4.2.1 Οι αποτελεσματικές δομές της φύσης

Συνήθως οι φυσικοί οργανισμοί χρησιμοποιούν τα διαθέσιμα υλικά και ενέργεια με οικονομία, ώστε να εκτελούν τις απολύτως απαραίτητες λειτουργίες που προκύπτουν σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον, αλλά και να καταφέρνουν να προσαρμόζονται σε αυτό με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως μέσω εξελιγμένων μορφών οι οποίες παρουσιάζουν εξαιρετική αποτελεσματικότητα. Ιδιαίτερη σημασία έχει το ότι η μορφή και η συμπεριφορά ενός οργανισμού είναι συχνά αλληλοσυνδεόμενες, καθώς η μορφή ενός οργανισμού επηρεάζει τον τρόπο που αυτό συμπεριφέρεται σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον, και μια συγκεκριμένη συμπεριφορά θα έχει διαφορετικό αποτέλεσμα σε διαφορετικές συνθήκες.

Κοίλοι σωλήνες

Η ανάπτυξη κοίλων σωλήνων, όπως οστά ή κορμοί φυτών, αποτελεί έναν πολύ αποτελεσματικό τρόπο δομικής αντοχής, ο οποίος έχει εφαρμοστεί κατά κόρον στη φύση.

Η αποτελεσματικότητα της ανακατανομής υλικού και της αναδιαμόρφωσης μιας δομής μπορεί να απεικονιστεί, στην Εικόνα 44. Ένα συμπαγές υλικό τετράγωνης διατομής, με πλευρά 24 χιλιοστών, έχει την ίδια αντίσταση σε κάμψη με ένα υλικό κυκλικής διατομής, διαμέτρου 25 χιλιοστών, χρησιμοποιώντας μόνο το 81,7% του υλικού. Αντίστοιχα, την ίδια αντοχή επιδεικνύει και ένας κοίλος σωλήνας αποτελούμενος από μόλις το 20% του συμπαγούς υλικού τετράγωνης διατομής. Παρατηρούμε, λοιπόν, πως με την διατήρηση υλικού μόνο σε περιοχές όπου μπορεί να προσφέρει καλύτερη αντοχή, επιτυγχάνεται το ίδιο αποτέλεσμα με σημαντικά λιγότερη ποσότητα υλικού⁴².



Εικόνα 44. Τέσσερα στοιχεία ίσης αντοχής με διαφορετική μορφή και χρήση υλικού.

⁴² Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα οργανισμού που χρησιμοποιεί αυτή την μορφή είναι το φυτό bamboo. Η ανάπτυξή του, σε αντίθεση με τα περισσότερα δέντρα, συμβαίνει κυρίως καθ' ύψος με σχετικά μικρή ακτινική ανάπτυξη · παρόλ' αυτά το bamboo καταφέρνει να φτάσει έως και τα 30m σε ύψος.

Παρεμβάλλοντας διαχωριστικά διαφράγματα εσωτερικά, κάθετα στη γραμμική ανάπτυξή του, το φυτό καταφέρνει να είναι πιο ανθεκτικό στην καμπτική καταπόνηση. Μεταξύ δύο διαφραγμάτων ο κορμός είναι αρκετά άκαμπτος, καθώς το μήκος του είναι μικρό σε σχέση με την διάμετρό του, έτσι αθροιστικά αποκτά ισχυρή ανθεκτικότητα και ευλυγισία στο σύνολό του, παρά το πολύ μεγάλο μήκος του σε σχέση με τη διάμετρό του.

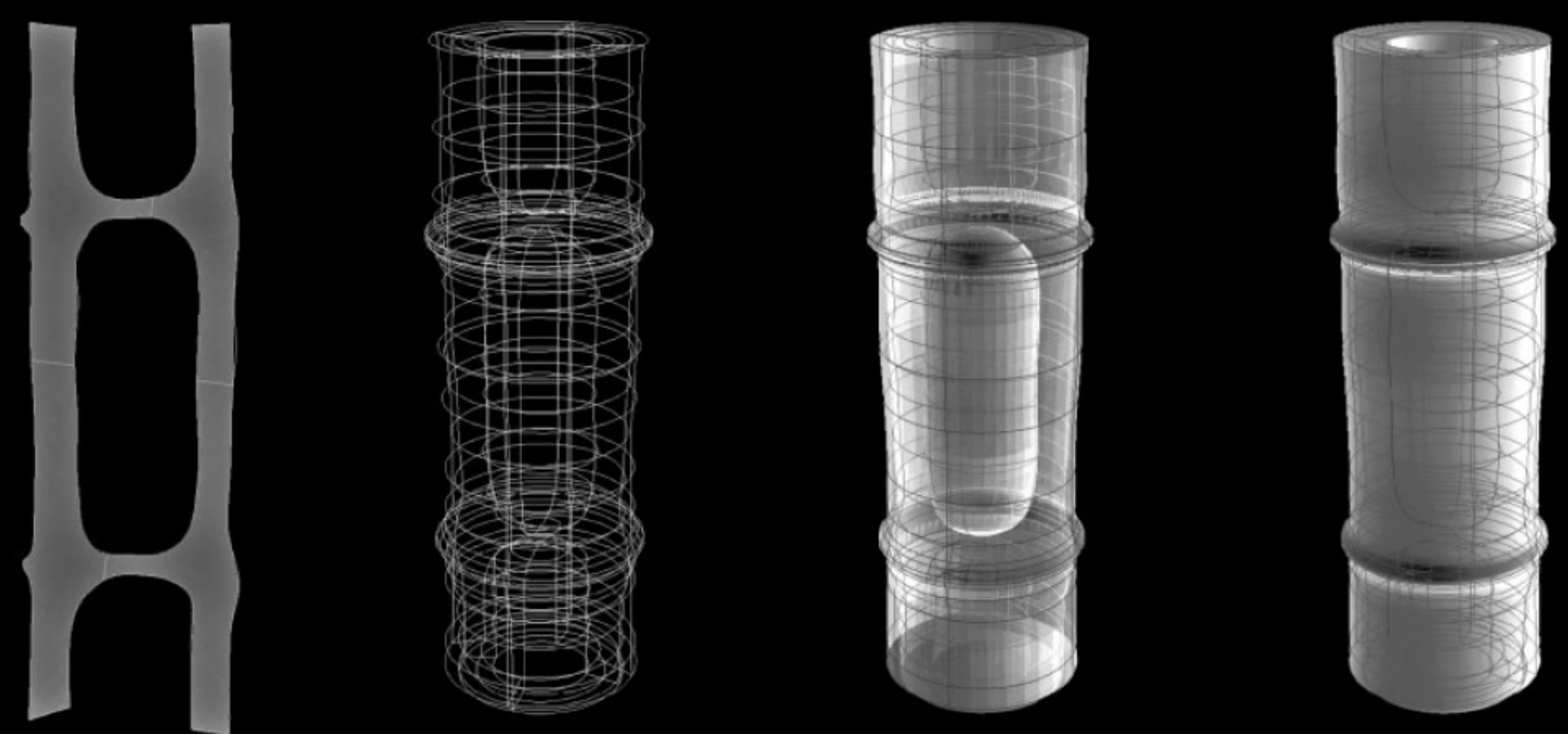
Επιπλέον, σε όλα τα είδη bamboo παρατηρείται μια διαφορετική κατανομή των γραμμικών κυλινδρικών ινών από τις οποίες αποτελείται το φυτό, τόσο καθ' ύψος όσο και κατά πλάτος, με σκοπό την καλύτερη στατική ενίσχυσή του. Πιο συγκεκριμένα, η πυκνότητα των ινών είναι μεγαλύτερη στο εξωτερικό τμήμα του τοιχώματος του κορμού του φυτού, όπως επίσης και στο ανώτερο μέρος του, το οποίο δέχεται και τις μεγαλύτερες καταπονήσεις από τους ανέμους.

Το bamboo έχει διπλάσια αντοχή σε θλίψη από το σκυρόδεμα και περίπου την ίδια αναλογία αντοχής σε εφελκυσμό προς βάρος με τον χάλυβα⁴³.

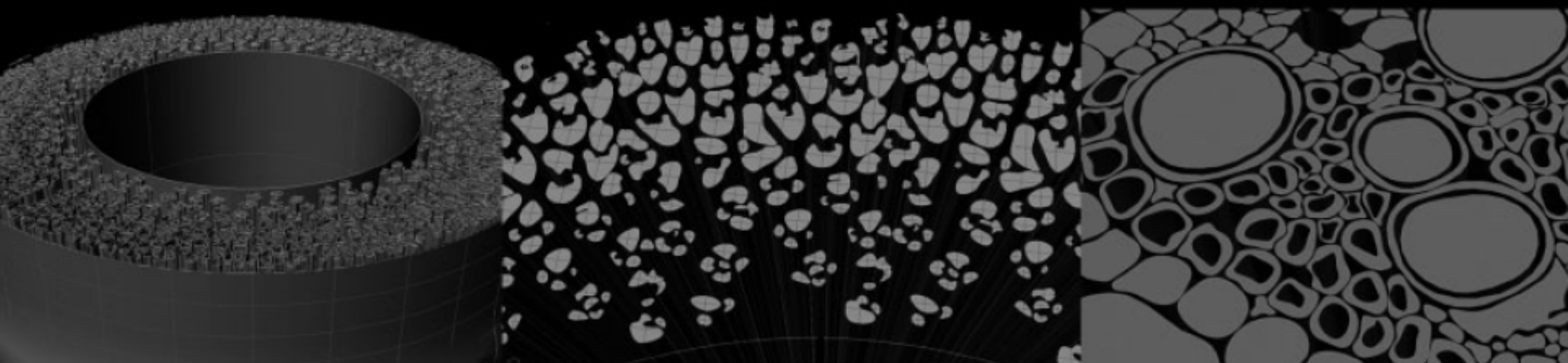
Εικόνα 45 (Δεξιά). Οι κορμοί του φυτού bamboo.

⁴³ Weinstock, M., (2006), Self-organisation and the structural dynamics of plants. Architectural Design. **76**(2),26 – 33.





Εικόνα 46. Τριοδιάστατα μοντέλα που απεικονίζουν την μορφολογία και την αρχιτεκτονική των ινών εσωτερικά του κορμού του bamboo.

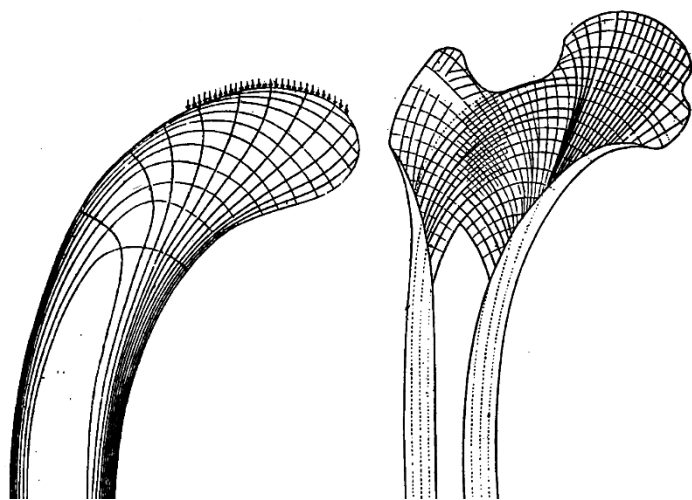


Οστά

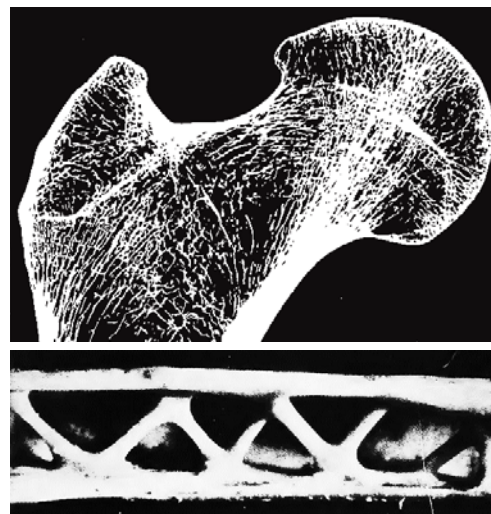
Τα οστά των έμβιων οργανισμών έχουν αναπτυχθεί από τη φύση με τέτοιο τρόπο ώστε να αντιμετωπίζουν πολυαξονικές φορτίσεις, καθώς κινούνται στο περιβάλλον στο οποίο κατοικούν.

Στο βιβλίο του *On Growth and Form*, ο σπουδαίος μαθηματικός-βιολόγος D'Arcy Wentworth Thompson αναφέρεται στις μηχανικές ιδιότητες των οστών, φέρνοντας ως παράδειγμα το ανθρώπινο μηριαίο οστό. Η ανατομική διάρθρωση των ιστών στο οστό αυτό, ταυτίζεται ακριβώς με τις διευθύνσεις των εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων που δέχεται. Αποδεικνύεται λοιπόν πως η φύση, με ιδιαίτερα ευφυή τρόπο, φρόντισε να ενισχύσει την αντοχή του οστού ακριβώς στα σημεία εκείνα που απαιτούνταν ενίσχυση.

Ακόμη ένα σημαντικό παράδειγμα αποτελεί και το μετακάρπιο οστό του γύπα. Παρατηρώντας τη δομή του, βλέπουμε πως έχει εκπληκτική ομοιότητα με το γνωστό δικτύωμα Warren. Επιπλέον, παρότι τα μέρη του δικτυώματος Warren αναπτύσσονται μονοδιάστατα, στο μετακάρπιο οστό ακολουθείται μια τρισδιάστατη διάταξη, δίνοντάς του ακόμα μεγαλύτερη αντοχή⁴⁴.

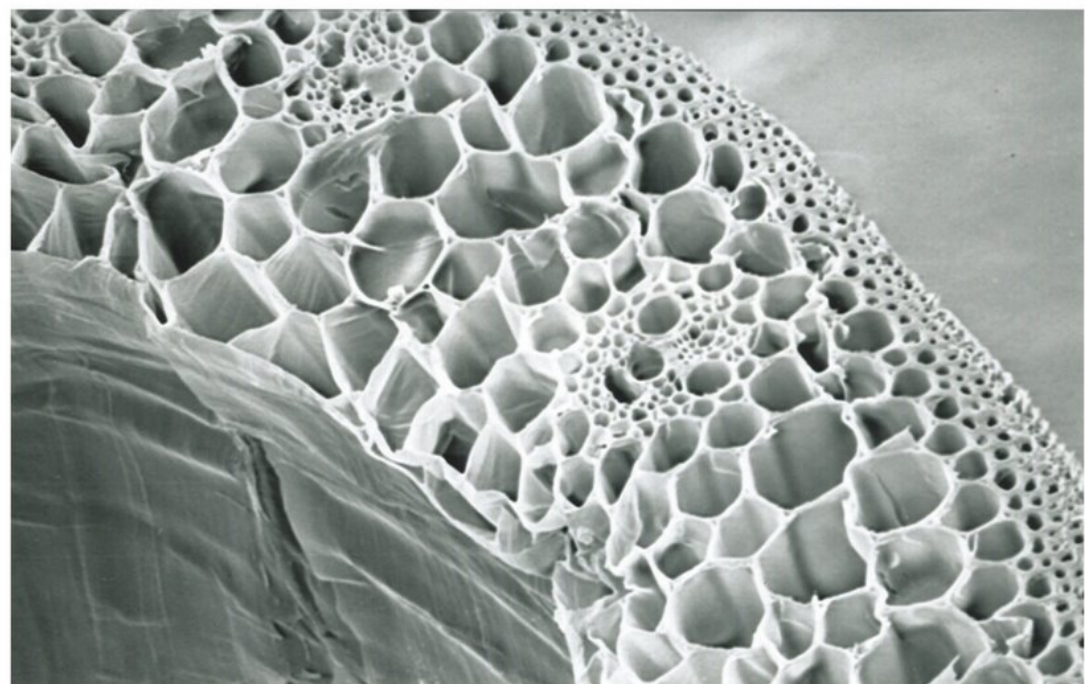
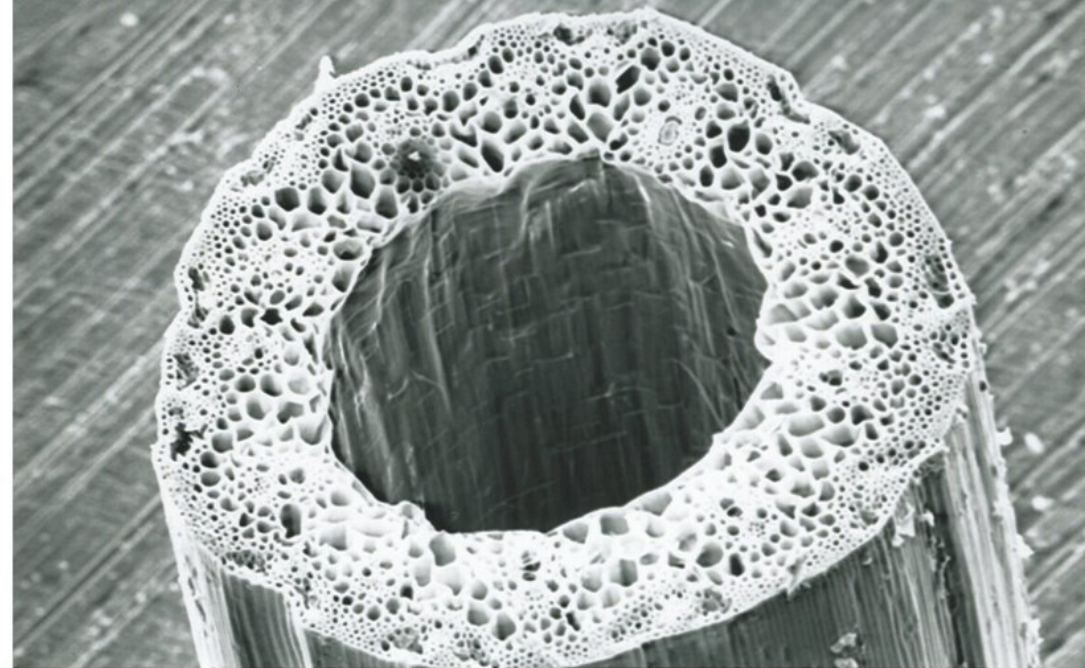
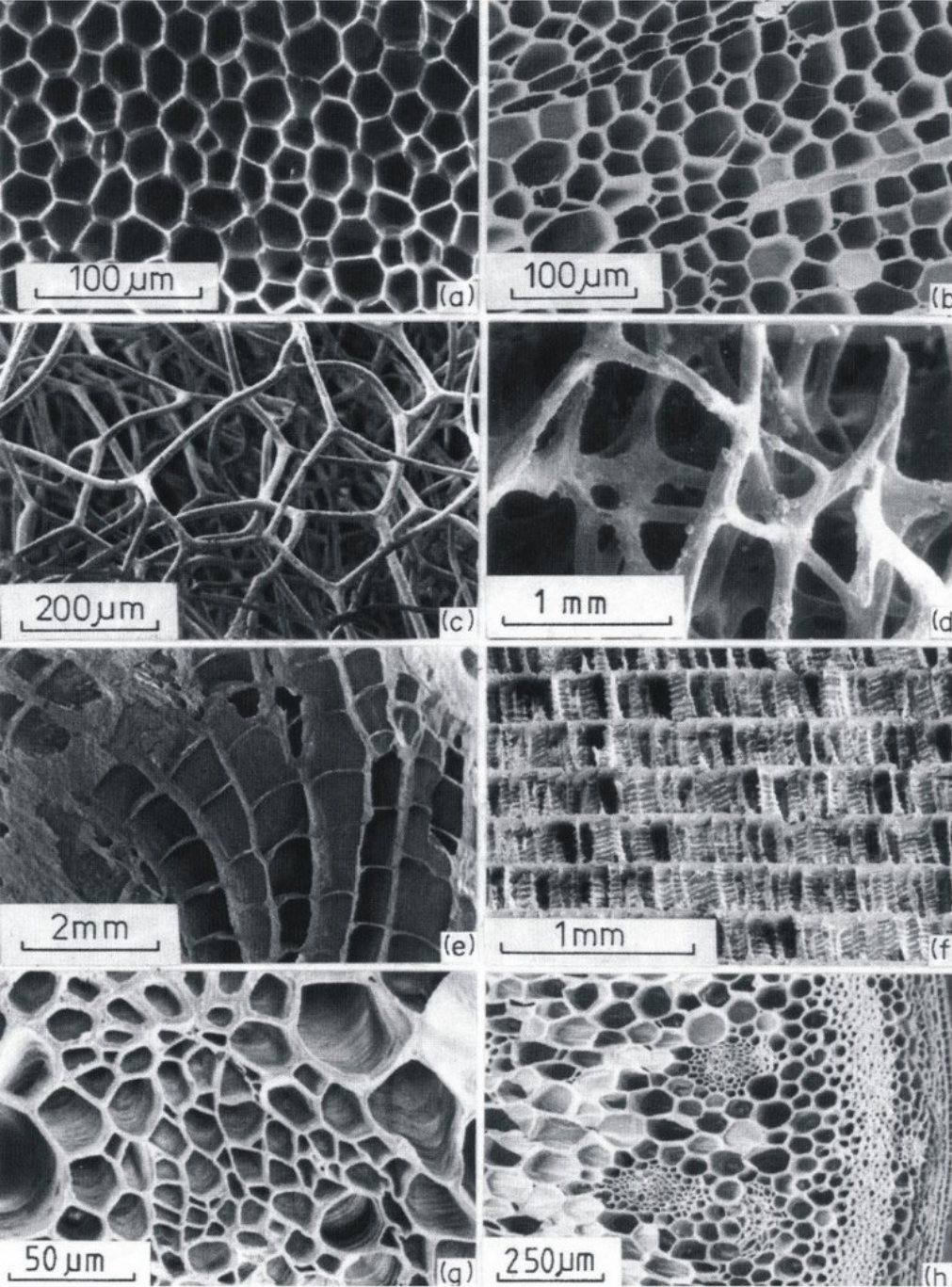


Εικόνα 47. Το ανθρώπινο μηριαίο οστό και οι διευθύνσεις των φορτίων που δέχεται.



Εικόνα 48. Η δομή του μετακάρπιου οστού του γύπα.

⁴⁴ Thompson, D., (1917). *On Growth and Form*. Cambridge: Cambridge University Press.

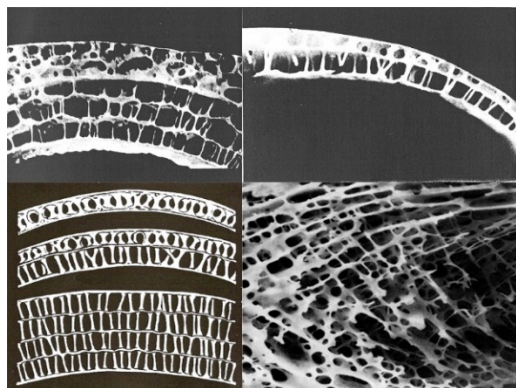


Εικόνα 49. Η αρχιτεκτονική των οστών, κάτω από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

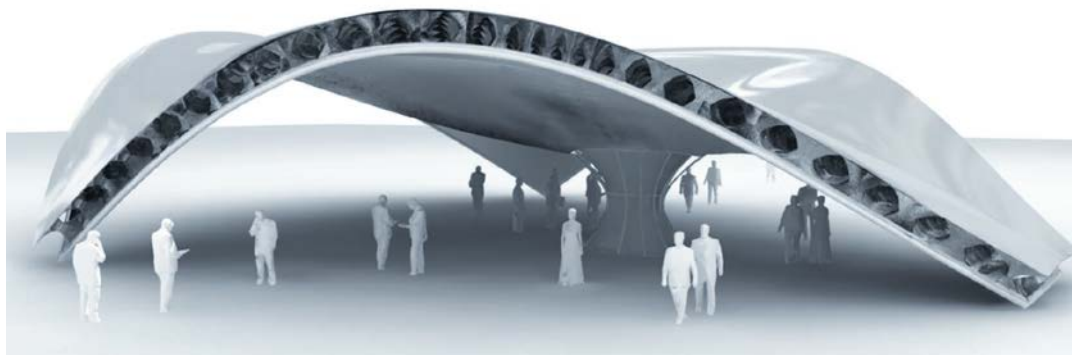
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν τα οστά των πτηνών, καθώς εκείνα δέχονται αρκετά έντονες δυνάμεις κατά τη διάρκεια της ζωής τους.

Τα οστά των κρανίων τους αποτελούνται από εξαιρετικά ελαφρές κατασκευές οι οποίες τα καθιστούν πολύ ανθεκτικά στις συγκρούσεις, καθώς προστατεύουν τα ζωτικά όργανα του ζώου. Οι λεπτές εξωτερικές επιφάνειες των οστών, ενώνονται με σπογγώδεις ιστούς στο εσωτερικό τους. Τα κενά που δημιουργούνται από αυτή τη σπογγώδη διάρθρωση των ιστών, μειώνουν το βάρος του οστού χωρίς να επηρεάζεται η δομική αντοχή του.

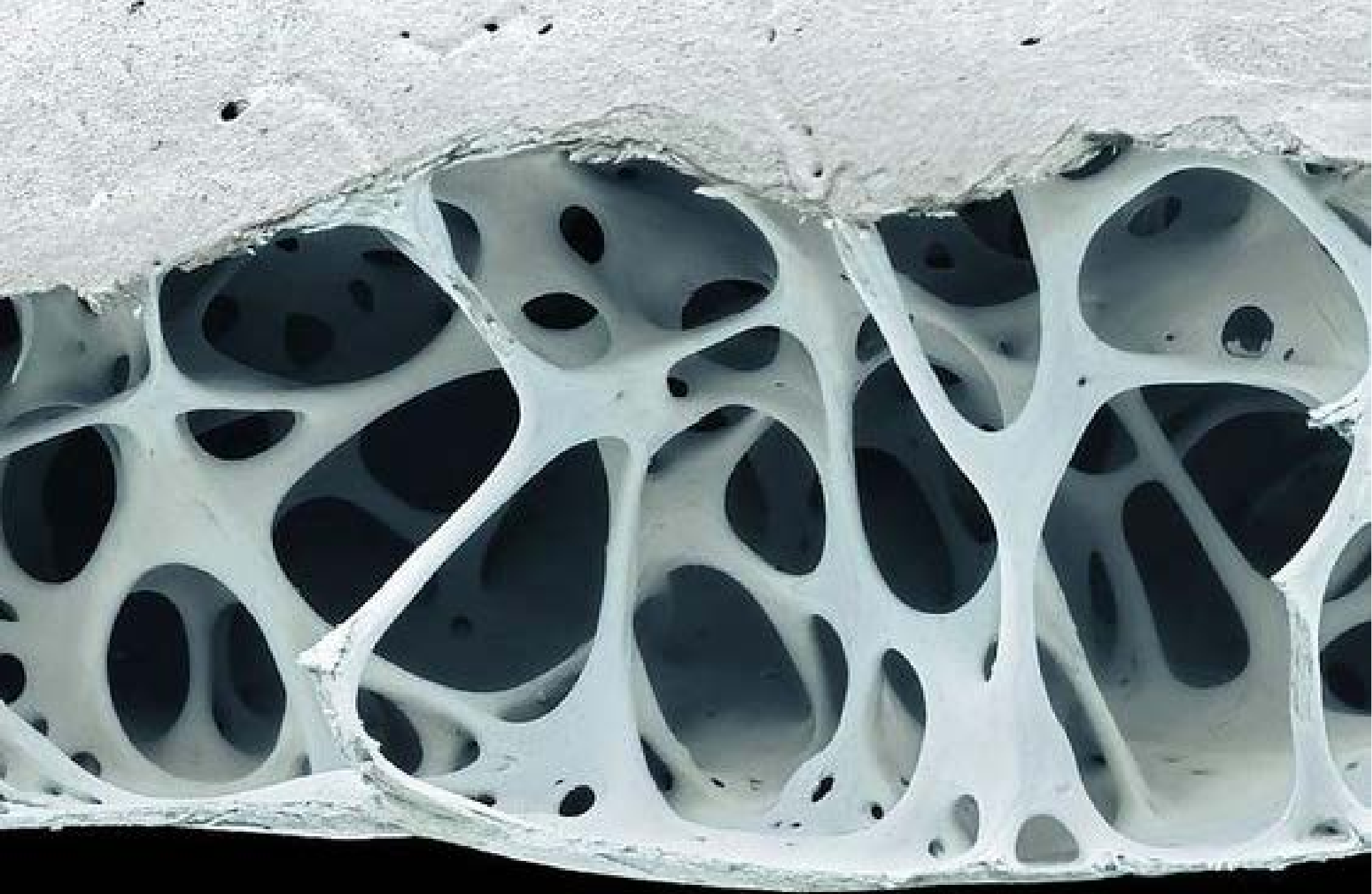
Οι δομές αυτές αποτέλεσαν ερέθισμα για τον αρχιτέκτονα Andres Harris, για το σχεδιασμό του Desert Pavillion. Το έργο προέκυψε έπειτα από εκτεταμένη έρευνα σχετικά με τις μορφολογικές και μηχανικές ιδιότητες των οστών των πτηνών και τον τρόπο που αυτές μπορούν να μεταφραστούν και να εφαρμοστούν στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό.



Εικόνα 50. Οστά των κρανίων πτηνών.



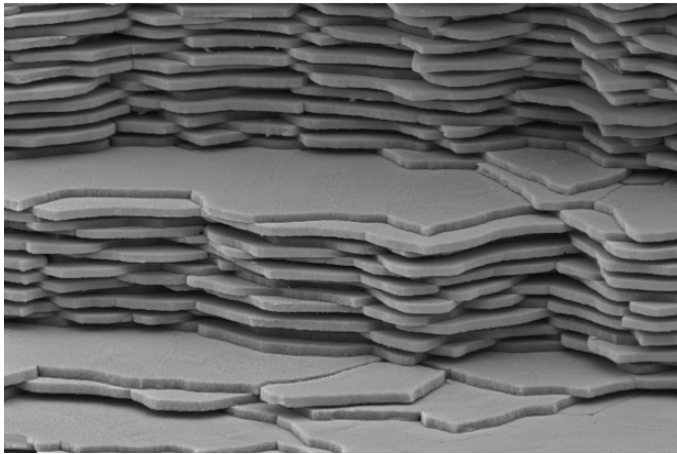
Εικόνα 51. Η πρόταση Desert Pavillion του αρχιτέκτονα Andres Harris, εμπνευσμένη από τις ιδιότητες των οστών των πτηνών.



Εικόνα 52. Δομή του κρανιακού οστού του πτηνού ψαρόνι (*Sturnus vulgaris*)

Θολωτές Δομές

Ακόμη μια ενδιαφέρουσα σχεδιαστική προσέγγιση της φύσης αφορά τα κελύφη και τους θόλους, από τα οποία έχουν εμπνευστεί αρκετοί αρχιτέκτονες του παρελθόντος. Το κέλυφος του μαλακίου Αλιώτις (*Haliotis tuberculata*) παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον ως προς τις κατασκευαστικές του ιδιότητες. Αποτελείται από πολυγωνικές πλάκες ανθρακικού ασβεστίου, οι οποίες συνδέονται με ένα πολυμερές υλικό. Το υλικό που προκύπτει είναι 3.000 πιο ισχυρό από το ανθρακικό ασβέστιο από το οποίο αποτελείται το κέλυφος κατά 95%.



Εικόνα 53. Η δομή του κελύφους του Αλιώτις, κάτω από το μικροσκόπιο.

Η διάρθρωση αυτής της δομής παρουσιάζει επίσης εξαιρετική αντοχή στο ράγισμα, καθώς η ρωγμή σε μια από τις πλάκες σταματά εκεί, ενώ αντίθετα στα περισσότερα ομοιογενή υλικά που κατασκευάζει ο άνθρωπος, μια ρωγμή στο υλικό μπορεί εύκολα να εξαπλωθεί περαιτέρω. Ακόμη, το πολυμερές συνδετικό υλικό έχει ένα βαθμό ελαστικότητας που βοηθά στην καλύτερη κατανομή των φορτίων σε μεγαλύτερο τμήμα του κελύφους.

Μια παρόμοια κατασκευαστική τεχνική χρησιμοποιείται ήδη από τον 19^ο αιώνα, δίνοντας τη δυνατότητα κατασκευής πολύ ανθεκτικών θολωτών δομών, με μεγάλο άνοιγμα και ποικίλες μορφές⁴⁵.

⁴⁵ Pawlyn, M., (2016). *Biomimicry in architecture*. 2nd ed. London: Riba Publishing.

4.3.2 Οι δυνατότητες των υλικών

Για να παράγουν ισχυρές ίνες, οι αράχνες φτιάχνουν το μετάξι τους μέσω του spinneret και παράγουν μια ευθυγραμμισμένη ροή πολυμερών τα οποία στη συνέχεια περιστρέφονται σε ένα νήμα με τα πίσω πόδια της αράχνης. Όταν στεγνώσει, το μετάξι είναι ισχυρότερο ακόμα και από Kevlar (ίνες αραμιδίου, πριν από το γραφένιο, την ισχυρότερη συνθετική ίνα που καταφέραμε να κατασκευάσουμε μέχρι σήμερα). Η παραγωγή ινών αραμιδίου απαιτεί πετρέλαιο βρασμένο σε θετικό οξύ στους περίπου 750 ° C. Το μίγμα στη συνέχεια υποβάλλεται σε υψηλή πίεση για να τοποθετηθούν τα μόρια στη θέση τους, παράγοντας μεγάλες ποσότητες τοξικών αποβλήτων. Οι αράχνες καταφέρνουν να κάνουν το ίδιο σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος με πρώτες ύλες νεκρών μυγών και νερού.

Η χρήση των πόρων από τους ανθρώπους μπορεί να χαρακτηριστεί ως γραμμική, σπάταλη και ρυπογόνα, ενώ οι πόροι που παράγει η φύση διατηρούνται σε κύκλους κλειστού βρόγχου. Οι διαδικασίες μας παράγουν τακτικά τοξικές εκπομπές, οι οποίες πολλές φορές δεν διασπώνται και μένουν στο περιβάλλον επ' αόριστον την στιγμή που στον φυσικό κόσμο, στις λίγες περιπτώσεις στις οποίες οι τοξίνες χρησιμοποιούνται στη βιολογία, βιοαποικοδομούνται λίγο μετά την εξυπηρέτηση των συγκεκριμένων σκοπών τους.

Οι διαφορές μεταξύ της μηχανικής και της φύσης γίνονται ακόμη πιο ευδιάκριτες όταν βλέπει κανείς ποια στοιχεία του περιοδικού πίνακα χρησιμοποιούνται στις δύο προσεγγίσεις. Περίπου το 96% όλων των ζωντανών υλών αποτελούνται από τέσσερα στοιχεία: άνθρακα, οξυγόνο, υδρογόνο και άζωτο. Ακόμα, επτά στοιχεία αποτελούν σχεδόν όλα τα υπόλοιπα 4 τοις εκατό: ασβέστιο, φώσφορος, κάλιο, θείο, νάτριο, χλώριο και μαγνήσιο. Υπάρχει τότε ένας μικρός αριθμός ιχνοστοιχείων που χρησιμοποιούνται σε απολύτως μικρές ποσότητες. Έτσι, η φύση χρησιμοποιεί πολύ περιορισμένο υποσύνολο του περιοδικού πίνακα, ενώ οι άνθρωποι χρησιμοποιούμε σχεδόν κάθε στοιχείο που υπάρχει, συμπεριλαμβανομένων και ορισμένων από αυτά που θα ήταν καλύτερα να μείνουν στο εργαστήριο. Παρακάτω παρατίθενται επτά βασικές διακρίσεις για την καθοδήγηση της βιομιμητικής σκέψης προκειμένου να γίνει αντιληπτό πώς σχεδιάζει η φύση και πως αυτά μπορούν να μεταφερθούν στην αρχιτεκτονική.⁴⁶

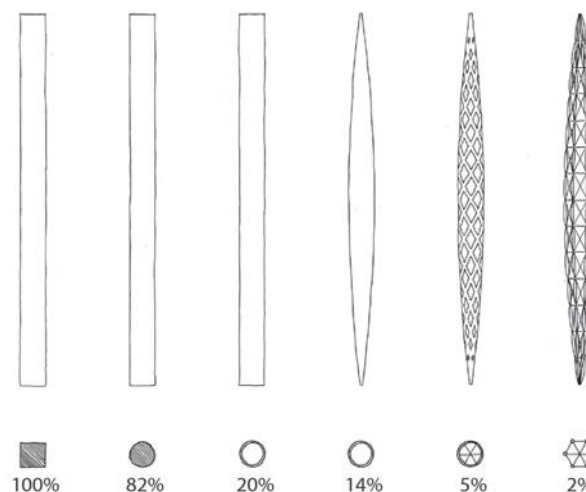
⁴⁶ Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing.

Ιεραρχία και διασυνδέσεις

Οι δομές και τα υλικά δεν είναι διακριτά στη φύση. Ένας απλός τρόπος να κατανοηθεί το πώς λειτουργεί η ιεραρχία, είναι να οπτικοποιήσουμε ένα εύρος σχεδίων από γέφυρες. Ένας τρόπος να γεφυρωθεί μια μέτρια απόσταση θα ήταν η αξιοποίηση δύο χαλύβδινων συμπαγών δοκών. Αυτό θα αντιπροσώπευε μία μονολυθική προσέγγιση χωρίς ιεραρχία. Μια αποτελεσματικότερη μέθοδος θα ήταν η αντικατάσταση των στερεών δοκών με μεταλλικά ζευκτά. Σε αυτή την περίπτωση θα είχαμε μια γέφυρα με ένα επίπεδο ιεραρχίας. Αν την θέση των ζευκτών έπερναν τετραγωνικά ζευκτά και των εφελκυσμένων μερών ατσάλινα καλώδια τότε η κατασκευή θα αποτελούσε δύο επίπεδα ιεράρχησης. Όσο πιο πολλά επίπεδα ιεράρχησης εντοπίζονται σε μία κατασκευή τόσο πιο αποτελεσματική είναι η αξιοποίηση της ποσότητας των υλικών.

Ο πύργος του Eiffel παρουσιάζει τρία επίπεδα ιεραρχίας, ενώ οι ανθρώπινες κατασκευές ως επί το πλείστον χρησιμοποιούν μόνο ένα. Στη βιολογία, δεν είναι ασυνήθιστο να εμφανίζονται έξι επίπεδα ιεραρχίας και αναλογικά υψηλότερη αποδοτικότητα, από τη στιγμή που η δομή επωφελείται από δεσμούς σε κάθε επίπεδο, από τα άτομα στα μόρια, τα κύτταρα, τους οργανισμούς κ.ο.κ.

Στο προαναφερθέν παράδειγμα της γέφυρας το υλικό κατασκευής μειώνεται σε ποσότητα και αλλάζει παράλληλα μορφή (τμήματα από στερεό ατσάλι μετατρέπονται σε ατσάλινα καλώδια). Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι στη βιολογία η έννοια της δομής πλησιάζει αυτή του υλικού, αφού η φύση φτιάχνει καθετί από κάτω προς τα πάνω, δηλαδή ό,τι θεωρούμε βιολογικό υλικό είναι ουσιαστικά μια δομή. Για παράδειγμα τα κόκκαλα είναι μια ιεραρχημένη δομή μορίων φωσφορικού ασβεστίου και κολλαγόνου σε ινώδη, στρωματοειδή και πορώδη μορφή.⁴⁷



Εικόνα 54: Το αξιοποιήσιμο υλικό μειώνεται δραστικά καθώς η κατασκευή ανεβαίνει επίπεδα ιεραρχίας

⁴⁷ Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing.

Οι ιεραρχημένες δομές προσφέρουν επιπλέον ακαμψία και περιορίζουν τις αστοχίες μέσω των διεπιφανειών ανάμεσα και μέσα σε κάθε ιεραρχικό επίπεδο. Το κέλυφος της αβαλόνης είναι φτιαγμένο από δισκία αραγωνίτη (τύπος ανθρακικού ασβεστίου) δεσμευμένα με ένα ελαστικό πολυμερές κονίαμα. Το πολυμερές δημιουργεί τη διεπιφάνεια και το υλικό που χρησιμοποιείται σε αυτά τα σημεία είναι μαλακότερο από τα γειτονικά υλικά. Ο J.E. Gordon, ειδικός στα υλικά, εξηγεί ότι: «αυτό δεν συμβαίνει επειδή η Φύση είναι ανίκανη να τα κολλήσει, αλλά επειδή οι πιο μαλακές διεπιφάνειες δυναμώνουν το υλικό και τελικά το κάνουν σκληρότερο». Η σκληρότητα, ως όρος της μηχανικής, είναι η αντίσταση σε αστοχίες. Παρόλο που το 95% του κελύφους αβαλόνης είναι κατασκευασμένο από το ίδιο ακατέργαστο υλικό που αποτελεί την κιμωλία, επιτυγχάνει 3.000 φορές τη σκληρότητα εξαιτίας της ιεραρχικής δομής και των διεπιφανειών. Τεχνητό μάργαρο έχει ήδη κατασκευαστεί, με έρευνες να στοχεύουν στη δημιουργία κεραμικών υλικών και σύνθετων μορίων με περισσότερη αντοχή από αυτή των συμβατικών μεθόδων. Πρόσφατα, αυτές οι πειραματικές διαδικασίες ανέρχονται σε μικρή κλίμακα, αλλά θα μπορούσαν να βελτιώσουν τις ιδιότητες κατασκευής των αψίδων Guastavino και άλλων σχετικών δομών⁴⁸.

Το Institute for Computational Design σε συνεργασία με το Institute of Building Structures and Structural Design με επικεφαλής τον Καθηγητή Achim Menges στη Στουτγάρδη πραγματοποιούν εκτεταμένη έρευνα τα τελευταία χρόνια βασιζόμενοι στις αρχές της φύσης. Παρατήρησαν ότι στη βιολογία, οι περισσότερες φέρουσες δομές είναι σύνθετες ίνες. Είναι κατασκευασμένες από ίνες, όπως για παράδειγμα η κυτταρίνη, η χιτίνη ή και το κολλαγόνο. Η εκπληκτική και η ασυναγώνιστη απόδοση των πόρων των βιολογικών δομών πηγάζουν από αυτά τα ινώδη συστήματα. Η οργάνωσή τους, η κατεύθυνση και η πυκνότητά τους είναι λεπτομερώς συντονισμένες και ποικίλουν τοπικά, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι το υλικό τοποθετείται μόνο εκεί που χρειάζεται.

Το BUGA Fiber Pavilion κατάφερε να μεταφέρει αυτή την βιολογική αρχή των προσαρμοσμένων στο φορτίο, σύνθετων συστημάτων ινών στην αρχιτεκτονική. Το Pavilion σχεδιάστηκε με πολυμερή όπως ίνες γυαλιού και ίνες άνθρακα, με την βοήθεια ρομπότ, επιτυγχάνοντας ακόμα καλύτερη αντοχή από την αντίστοιχη μεταλλική κατασκευή αλλά ταυτόχρονα και εξαιρετική μείωση του βάρους της κατασκευής.⁴⁹

⁴⁸ Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing.

⁴⁹ Achimmenges, BUGA Fibre Pavilion 2019. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <http://www.achimmenges.net/?p=21027>



Εικόνα 55: Το Elytra Pavilion από την ομάδα του Institute for Computational Design

Περιβαλλοντική απόκριση

Υλικά που μπορούν να ανιχνεύσουν και να ανταποκριθούν σε αλλαγές στο περιβάλλον τους, αναφέρονται συχνά ως «έξυπνα». Στην αρχιτεκτονική υπάρχουν πολλά συστήματα που το κάνουν αυτό στο επίπεδο ενός κτιρίου. Στα περισσότερα από τα συστήματά μας θα υπάρχει ένας αισθητήρας, ένας επεξεργαστής και ένας ενεργοποιητής. Σε ένα πραγματικά «έξυπνο» υλικό, ο αισθητήρας και ο ενεργοποιητής είναι το ίδιο πράγμα και δεν υπάρχει επεξεργαστής. Ένα παράδειγμα που μελετήθηκε αρχικά στο Centre for Biomimetics του Reading University είναι το κουκουνάρι, που παραμένει σταθερά κλειστό όταν βρίσκεται πάνω στο δέντρο. Όταν πέφτει, αρχίζει να στεγνώνει και να ανοίγει, απελευθερώνοντας τελικά τους σπόρους που βρίσκονται μέσα του. Το άνοιγμα συμβαίνει επειδή οι κλίμακες του κώνου πεύκου είναι «σάντουιτς» κατασκευές από δύο υλικά που αντιδρούν διαφορετικά στην υγρασία. Ένα από αυτά συρρικνώνεται περισσότερο από το άλλο και το αποτέλεσμα κάμψης είναι παρόμοιο με μια διμεταλλική ταινία.

Ερευνητές στο εργαστήριο του MIT μιμούμενοι την παραπάνω διαδικασία της υγροσκοπικής ενεργοποίησης, κατασκεύασαν πολυεπίπεδα υφάσματα με πολλά μικρά πτερύγια που ανοίγουν όταν ο φορέας άρχισε να ιδρώνει και κλείνουν ξανά όταν το δέρμα κάτω είχε κρυώσει.

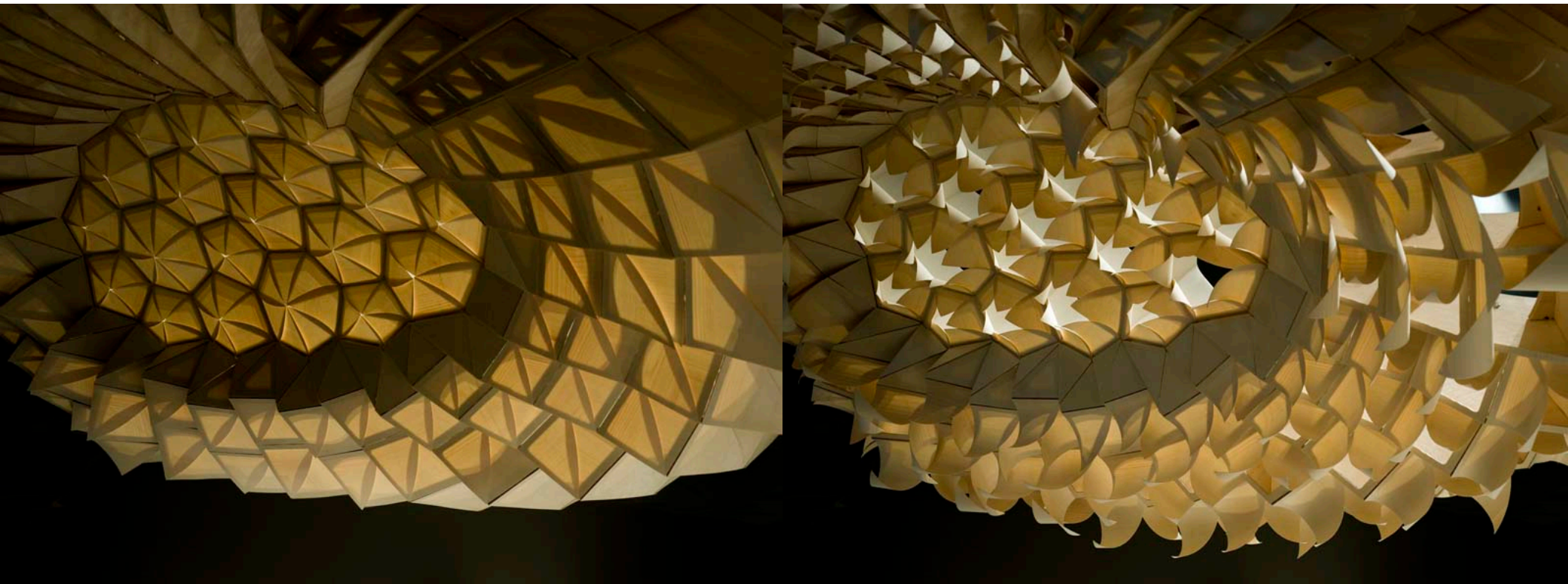
Παρόμοια ιδέα, εμπνευσμένη επίσης από κουκουνάρια, αναπτύχθηκε από τους Achim Menges και τον Steffen Reichert και τους συνεργάτες του στο Ινστιτούτο Computational Design του Πανεπιστημίου της Στουτγάρδης χρησιμοποιώντας ένα σύνθετο καπλαμά που είτε ανοίγει είτε κλείνει ανάλογα επίπεδα υγρασίας. Το περιγράφουν ως «μετεωροευαίσθητη αρχιτεκτονική», με την έννοια ότι μπορεί να ανταποκριθεί άμεσα σε αλλαγές των ατμοσφαιρικών συνθηκών.⁵⁰



Εικόνα 56: Ύφασμα που αντιδρά στις κλιματολογικές συνθήκες κατασκευασμένο στο MIT

⁵⁰ Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing.

Το έργο διερευνά έναν νέο τρόπο ανταποκρινόμενης αρχιτεκτονικής που βασίζεται στον συνδυασμό της εγγενούς συμπεριφοράς του υλικού και της υπολογιστικής μορφογένεσης. Η διαστασιακή αστάθεια του ξύλου σε σχέση με το περιεχόμενο υγρασίας χρησιμοποιείται για την κατασκευή μιας αρχιτεκτονικής μορφολογίας που ανταποκρίνεται στο κλίμα. Τοποθετημένο μέσα σε γυάλινη θήκη ελεγχόμενης υγρασίας, το μοντέλο ανοίγει και κλείνει ως απόκριση των κλιματικών αλλαγών χωρίς να απαιτείται τεχνικός εξοπλισμός ή ενέργεια. Απλές διακυμάνσεις στη σχετική υγρασία πυροδοτούν τις αλλαγές της υλικής-έμφυτης κίνησης. Συνεπώς η ίδια η δομή του υλικού είναι το μηχάνημα.⁵¹



Εικόνα 57: Το HygroScope ανοίγει και κλείνει ανάλογα με τα επίπεδα υγρασίας

⁵¹ Achim, M., Reichert, S., (2012). HygroScope: Meteorosensitive Morphology. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <http://www.achimmenges.net/?p=5083>

Ανάπτυξη με προσαρμοστική επαύξηση και προσθετική κατασκευή

Η ιεράρχηση στη φύση όμως αρχίζει από κάτω προς τα πάνω, δηλαδή ήδη από μοριακό επίπεδο. Οι τρόποι που οι άνθρωποι δημιουργούν πράγματα στηρίζεται σε βασικούς παραδοσιακούς τρόπους. Αυτοί είτε είναι η μέθοδος της αφαίρεσης (λάξευση ξύλου), είτε της χύτευσης, όπως ο πηλός, τα χυτά πλαστικά και τα χυτά μέταλλα, είτε της παραμόρφωσης μέσω της κάμψης και της σφυρηλάτησης.

Πλέον όμως έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες που διευρύνουν τους ορίζοντες και επιτρέπουν την προσέγγιση βιολογικών μηχανισμών. Η τεχνολογία πλέον επιτρέπει την ανάμιξη υλικών, με την βοήθεια μηχανημάτων που προσομοιάζουν εκτυπωτές ψεκασμού, χρησιμοποιώντας νανοσωματίδια σε διάλυμα. Η πολύ μικρή κλίμακα του νανοϋλικού καθιστά δυνατή την ανάπτυξη δεσμών χαμηλής ενέργειας (όπως δυνάμεις van der Waals), για την ένωση των σωματιδίων.

Εάν ένα υλικό που στεγνώνει έχοντας σκληρό φινίρισμα συνδυαστεί με ένα άλλο που αποκτά ελαστικότητα, τότε είναι δυνατόν να παραχθεί ένα νέο υλικό που μπορεί να είναι είτε σκληρό, είτε ελαστικό, ή ακόμη οι ιδιότητες αυτές να ποικίλουν κατά μήκος του.⁵²

Στο εργαστήριο 'Mediated Matter' του MIT Media Lab, η Neri Oxman με την ομάδα της κατάφεραν να εκτυπώσουν με χιτοζάνη (ένας τύπος χυτίνης από το οποίο είναι φτιαγμένα τα καβούκια εντόμων, τα κελύφη των γαρίδων και τα καβούρια) δημιουργώντας νέα υλικά με επιθυμητές ιδιότητες που ποικίλουν σε διαφάνεια, ελαστικότητα και απόχρωση και είναι βιοδιασπώμενα καθώς προέρχονται από ακατέργαστα βιολογικά υλικά⁵³

Εικόνα 58: 3D εκτυπωμένη μάσκα για το project LAZARUS

⁵² Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing.

⁵³ Oxman. (2020). AGUAHOJA. [online] [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021].

Διαθέσιμο στο: <https://oxman.com/projects/aguahoja>





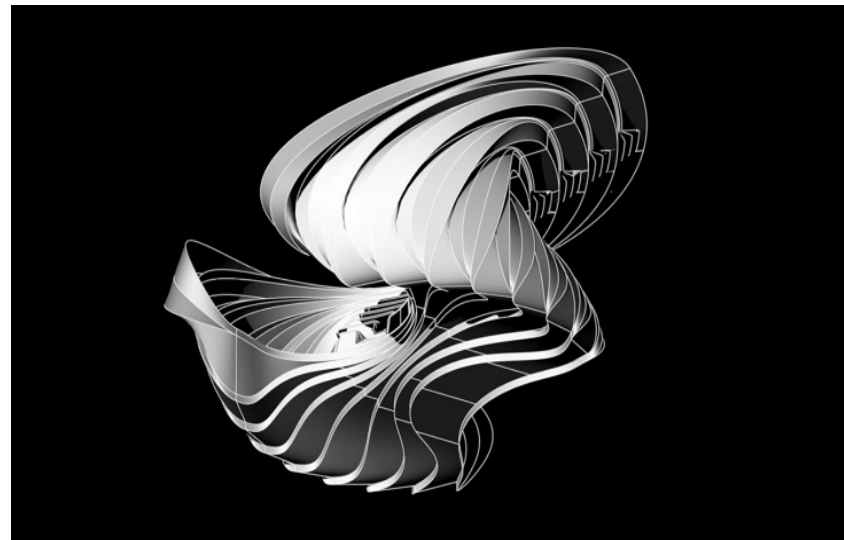
Εικόνα 59: Το Biopolymer pavilion που δημιουργήθηκε από το εργαστήριο 'Mediated Matter' του MIT

Αυτό – σύνθεση επηρεασμένη από το περιβάλλον

Ακόμα μια φυσική διεργασία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από την αρχιτεκτονική είναι η επιγένεση, κατά την οποία η ανάπτυξη μίας δομής καθορίζεται από το φυσικό περιβάλλον. Παραδείγματος χάριν τα δέντρα αναπτύσσονται εν μέρη σε ανταπόκριση στις δυνάμεις που ασκούνται πάνω τους. Ένα κλαδί συνδεδεμένο στον κορμό δέντρου που υπόκειται τάση από τον άνεμο, ως απόκριση, θα αναπτυχθεί παχύτερο στα πιο ευάλωτα σημεία.

Το Biorock Pavilion by Exploration του βιολόγου Thomas J. Goreau και του αρχιτέκτονα Wolf Hilbertz, είναι ένα από τα ελάχιστα παραδείγματα επιγένεσης στην κατασκευή κτηρίου. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρο-εναπόθεση σε θαλασσινό νερό για τον σχηματισμό ορυκτών δομών με επαύξηση. Ένα ηλεκτρικό ρεύμα αρκετά χαμηλής ισχύος προκειμένου να είναι αβλαβής για την θαλάσσια ζωή, διαρρέει ένα ατσάλινο πλαίσιο βυθισμένο στο νερό που βοηθάει στην εναπόθεση διαλυμένων μεταλλικών στοιχείων στην κατασκευή. Μέχρι σήμερα αυτή η τεχνολογία έχει χρησιμοποιηθεί στην αποκατάσταση κοραλλιογενών υφάλων πάνω στα οποία έχουν εγκατασταθεί και ευδοκιμούν τα κοράλλια.

Το Pavilion αυτό θα αναπτυχθεί υποθαλάσσια και στην συνέχεια θα μεταφερθεί σε μια αστική περιοχή όπου θα χρησιμοποιηθεί ως μικρή αμφιθεατρική αίθουσα. Ρυθμίζοντας την παροχή ρεύματος σε κάθε περιοχή καθορίζεται η διαδικασία ανάπτυξης ως διαδικασία επιγένεσης. Από τη στιγμή που ο ρυθμός επαύξησης σχετίζεται από το ρεύμα, οι περιοχές στις οποίες ασκείται μεγαλύτερη τάση, θα είναι αυτές που θα αναπτυχθούν περισσότερο. Ο ρυθμός επαύξησης μπορεί να φτάσει και τα 50 mm ανά χρόνο και ανάλογα την ταχύτητα της καθίζησης η αντοχή μπορεί να ξεπεράσει και αυτή του οπλισμένου σκυροδέματος. Τα μεταλλικά στοιχεία συνεχίζουν να εναποτίθενται για όσο καιρό η κατασκευή διαρρέεται από ρεύμα και επομένως περιοχές που έχουν υποστεί βλάβη αυτοεπισκευάζονται.⁵⁴



Εικόνα 60: Το Biorock Pavilion

⁵⁴ Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing.

Αυτό-αποκαθιστάμενα υλικά

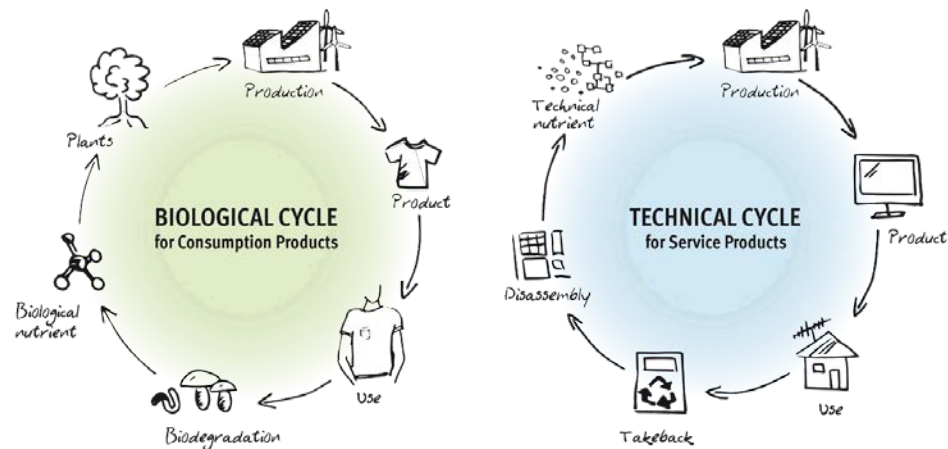
Όπως έχει επισημάνει η Petra Gruber η αυτό-αποκατάσταση είναι χρήσιμη σε περιπτώσεις που μία τοπική αστοχία μπορεί να οδηγήσει σε ολική καταστροφή του συστήματος. Η ταχύτητα της αποκατάστασης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο. Η Olga Spreck και η ομάδα της έχουν αναπτύξει μερικές αποτελεσματικές λύσεις αυτό-αποκατάστασης για κατασκευές από μεμβράνη, βασιζόμενοι στο αναρριχητικό φυτό *Aristolochia macrophylla*. Παρατήρησαν ότι το φυτό αυτό επουλώνεται γρήγορα πρώτα μέσω της διεύρυνσης παρεγχυματικών κυττάρων γύρω από το σημείο της κάκωσης για να το σφραγίσουν προσωρινά και έπειτα με μια σταδιακή αυτό-αποκατάσταση του ιστού μέσω λιγνιοποίησης των κυτταρικών τοιχωμάτων. Έτσι μετέφρασαν αυτή την ιδέα σε ένα πολυμερές με πολλαπλές στιβάδες πεπιεσμένων κυττάρων στην κάτω πλευρά (σαν πυκνό αεροπλάστ). Σε περίπτωση ρήξης, τα πεπιεσμένα κύτταρα αντιδρούν ακριβώς όπως αυτά το αναρριχητικού φυτού, αλλά ακόμα ταχύτερα, μέσα σε κλάσματα δευτερολέπτου.

Η αυτό-αποκατάσταση είναι ένα πεδίο στο οποίο το χάσμα μεταξύ βιολογίας και μηχανικής παραμένει μεγάλο, κυρίως επειδή κανένα κτήριο δεν είναι πραγματικά «ζωντανό». Ωστόσο, πολλά υποσχόμενα πρωτοποριακά υλικά αποτελούν παραδείγματα αυτό-αποκατάστασης αντίστοιχα της βιολογίας και όχι απλά εμπνευσμένα από βιολογικές μορφές ή διαδικασίες). Η Carolyn Dry του Πανεπιστημίου του Illinois ανέπτυξε ένα είδος σκυροδέματος, το οποίο περιέχει ίνες γεμάτες με συγκολλητικό υλικό, έτσι ώστε, αν παρουσιαστεί ρωγμή, οι ίνες διαρρηγνύονται και η «κόλλα» γεμίζει τη ρωγμή. Ο Henk Jonkers του Πολυτεχνείου του Delft δημιούργησε «βιοσκυρόδεμα» που περιέχει βακτήρια που παράγουν ασβεστόλιθο, τα οποία ενεργοποιούνται όταν εμφανιστεί ρωγμή, για να την σφραγίσουν. Πολλά συστήματα αυτό-αποκατάστασης στη βιολογία εξαρτώνται από αγγειακά δίκτυα και είναι δυνατόν να οραματιστούμε τον σχεδιασμό μιας μηχανικής κατασκευής που θα έχει ένα αντίστοιχο σύστημα «επιδιορθωτικού υγρού» που αποκαθιστά με την παρουσία οξυγόνου και φωτός.⁵⁵

⁵⁵ Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing.

Μη τοξικά υλικά

Ακολουθώντας τη φύση και επιλέγοντας να χρησιμοποιήσουμε μικρότερη παλέτα από τον περιοδικό πίνακα προκειμένου να δημιουργήσουμε νέα υλικά, σημαίνει επίσης ότι πρέπει να λάβουμε υπόψιν και τον κύκλο ζωής τους. Τα περισσότερα από τα υλικά που κατασκευάζουμε μπορεί ανεξαρτήτως της διάρκειας ζωής τους είναι καταδικασμένα να καταλήξουν στη χωματερή. Ακόμα και τα υλικά που θεωρούνται ανακυκλώσιμα, στην πραγματικότητα σταδιακά υποβαθμίζονται μέχρι που γίνονται πια απόβλητα. Ο William McDonough και ο Michael Braungart στο βιβλίο τους *Cradle to Cradle (C2C)* περιγράφουν ότι η φιλοσοφία C2C θεωρεί όλα τα υλικά ως πολύτιμους πόρους, που επιστρέφουν πλήρως στους βιολογικούς ή τεχνικούς κύκλους χωρίς καμία απώλεια της ποιότητας. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχουν απόβλητα. Τα προϊόντα και οι διαδικασίες παραγωγής είναι συνεπώς σχεδιασμένα "από λίκνο σε λίκνο" από την παραγωγή και τη χρήση έως την αποσυναρμολόγηση, την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση. Η ανακυκλωσιμότητα χωρίς απώλεια της ποιότητας αποτελεί βασική παράμετρο. Τα προϊόντα C2C δοκιμάζονται ως προς την απουσία ρύπων και παράγονται με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.⁵⁶ Το όραμα των William McDonough και Michael Braungart είναι σταδιακά να εξαλειφθεί εντελώς η έννοια των αποβλήτων ακολουθώντας τις αρχές των φυσικών συστημάτων και η διατήρηση όλων των υλικών σε δύο κύκλους, τον «βιολογικό» και τον «τεχνικό».



Εικόνα 61: Διάγραμμα βιολογικού και τεχνικού κύκλου

⁵⁶Engelhard, A., *Cradle to Cradle Sustainable from the outset*. [online] [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://www.schueco.com/gr/investors/sustainability/sustainability/cradle-to-cradle>

Λύσεις βιολογικού κύκλου

Ξύλο

Στον βιολογικό κύκλο, όπου περιλαμβάνονται υλικά όπως το ξύλο, φυτικές ίνες κ.α., όλα τα υλικά καλλιεργούνται και χρησιμοποιούνται με τρόπο ώστε να μπορούν να βιοδιασπαστούν πλήρως αφού ολοκληρωθεί η χρήση τους και έπειτα να απορροφηθούν από το περιβάλλον ως θρεπτικά συστατικά για την καλλιέργεια νέων υλικών.

Το ξύλο είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως στην αρχιτεκτονική. Παρόλα αυτά η χρήση διαφόρων χρωμάτων και επικαλύψεων προκειμένου να συντηρηθεί το υλικό, το καθιστούν ανίκανο να απορροφηθεί μετέπειτα από τη φύση.

Το Thermowood είναι ένα νέο και καινοτόμο προϊόν ξύλου, που παράγεται με τη χρήση θερμότητας και ατμού, χωρίς τη χρήση επιβλαβών χημικών ουσιών ή αντιδραστηρίων. Το τελικό προϊόν είναι εξαιρετικά σταθερό, είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό στην υγρασία, σε ποικίλες καιρικές συνθήκες και αιφνίδιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, καθώς και σε ενδεχόμενο κίνδυνο προσβολής από μικροοργανισμούς-έντομα του ξύλου. Το θερμικά τροποποιημένο ξύλο είναι ένα φιλικό προς το περιβάλλον και πλήρως ανακυκλώσιμο προϊόν.⁵⁷

Παρόμοια αποτελέσματα επιτυγχάνονται και μέσω της ακετυλίωσης της ξυλείας. Το προϊόν αυτό παράγεται με χημική τροποποίηση του ξύλου μετά από χημική αντίδραση με οξικό ανυδρίτη σε υψηλή θερμοκρασία. Και τα δύο αυτά παραδείγματα επιτρέπουν την επιστροφή του ξύλου στον βιολογικό κύκλο όταν το ξύλο σταματήσει να χρησιμοποιείται.

⁵⁷ Wands.gr. Εξωτερική Επένδυση Thermowood. [online] [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://www.wands.gr/el/product/exoteriki-ependysi-thermowood>

Πλαστικό

Τα πλαστικά μπορούν να παρασκευαστούν από φυτικές ρητίνες και εάν είναι μη τοξικά και αποφευχθούν διάφορες επικαλύψεις τότε είναι δυνατό για το υλικό να επιστραφεί στο έδαφος ως βιολογικά θρεπτικό συστατικό. Ερευνητές στο Ινστιτούτο Wyss του Χάρβαρντ έχουν αναπτύξει ένα πλήρως λιπασματοποιήσιμο βιοπλαστικό χρησιμοποιώντας μια ουσία που ονομάζεται χιτοζάνη . Είναι μια μορφή χιτίνης που βρίσκεται σε κελύφη γαρίδας, εξωσκελετών εντόμων, μυκητιακών κυττάρων και φτερών πεταλούδας. Οι ερευνητές του Χάρβαρντ εξήγαγαν τη χιτοζάνη από κοχύλια γαρίδας (ένα εύκολα διαθέσιμο απόβλητο της βιομηχανίας θαλασσινών) και χρησιμοποίησαν συμβατικές τεχνικές κατασκευής για την παραγωγή φθηνών αλλά πλήρως βιοαποικοδομήσιμων προϊόντων όπως κινητά τηλέφωνα, χαρτοκιβώτια αυγών και ακόμη και πiónια σκακιού.⁵⁸

Συμπιεσμένο χώμα

Ένα υλικό που χρησιμοποιείται ήδη από τα αρχαία χρόνια και οι περιβαλλοντικές του επιπτώσεις είναι εξαιρετικά χαμηλές είναι το συμπιεσμένο χώμα. Το συμπιεσμένο χώμα δημιουργείται πιέζοντας το χώμα μέσα σε έναν ξυλότυπο. Η τεχνική αυτή όμως χρησιμοποιείται συχνά και από διάφορα ζώα στην φύση . Η σφήκα *Trigonoopsis* επιλέγει λάσπη με την σωστή πυκνότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία, κρατά ένα σφαιρίδιο στον τοίχο που χτίζει και στη συνέχεια εκμεταλλεύεται την θιξοτροπία της λάσπης δονώντας την κοιλιά της. Μερικά πουλιά δημιουργούν ένα σύνθετο υλικό από λάσπη συνδυάζοντας φυτικές ίνες επιτυγχάνοντας αντοχή σε εφελκυσμό καθώς και σε θλίψη, παρόμοια στη λειτουργία που εκτελείται από χαλύβδινες ράβδους σε ενισχυμένο σκυρόδεμα. Η ιταλική εταιρία WASP παίρνοντας έμπνευση από την σφήκα *Trigonoopsis*, κατασκεύασε τον πρώτο εκτυπωτή πηλού και σε συνεργασία με τον αρχιτέκτονα Mario Cucinella σχεδίασαν το πρώτο σπίτι που τυπώθηκε 3D από ακατέργαστη γη. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στο Tecla είναι φιλική προς το περιβάλλον καθώς η παραγωγή είχε μηδενικά απόβλητα, ενώ δεν υπήρξε επίσης η ανάγκη μεταφοράς υλικών αφού χρησιμοποιήθηκε χώμα τοπικής προέλευσης. Χρειάστηκαν μόλις 200 ώρες για να εκτυπωθεί η πρωτότυπη κατασκευή 60τ.μ στην Ravenna της Ιταλίας.⁵⁹

⁵⁸Wyss Institute, (2014). Manufacturing a solution to planet-clogging plastics. [online]] [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://wyss.harvard.edu/news/manufacturing-a-solution-to-planet-clogging-plastics/>

⁵⁹Jenny, B., (2021). This is the first house to be 3D printed from raw earth. [online]] [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://www.itsnicethat.com/news/tecla-house-mario-cucinella-wasp-architecture-270421>



Εικόνα 62: 3D εκτυπωμένο σπίτι από ακατέργαστο χώμα από την εταιρία WASP

Λύσεις τεχνικών κύκλων

Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα είναι το καθολικό υλικό της εποχής μας. Παγκοσμίως 15 δισεκατομμύρια τόνοι σκυροδέματος χύνονται κάθε χρόνο χωρίς προοπτικές διακοπής της εκτεταμένης χρήσης του. Το τσιμέντο που εμπεριέχει το σκυρόδεμα αποτρέπει την επανάληψη του τεχνικού κύκλου με αποτέλεσμα τη συνεχή αύξηση των αδρανών στον πλανήτη. Στις μέρες μας έχουν δημιουργηθεί μορφές σκυροδέματος με τη δυνατότητα να απορροφηθούν από το περιβάλλον χρησιμοποιώντας γεο-πολυμερή και ποζολανικά τσιμέντα.

Ο ειδικός βιομεταποίησης Brent Constantz του Πανεπιστημίου του Στάνφορντ εμπνεόμενος από τον τρόπο με τον οποίο τα κοράλλια χτίζουν υφάλους, εφηύρε έναν νέο τύπο τσιμέντου για κτίρια. Η διαδικασία κατασκευής αυτού του τσιμέντου στην πραγματικότητα απομακρύνει το διοξείδιο του άνθρακα από τον αέρα σε αντίθεση με το κλασικό τσιμέντο που το απελευθερώνει στην ατμόσφαιρα.

Αυτό είναι ένα παράδειγμα ενός αναδυόμενου πεδίου, που θα μπορούσαν να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στην άμβλυνση της κλιματικής αλλαγής με τη μείωση, και τελικά αντιστροφή, της συσσώρευσης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.⁶⁰

⁶⁰ Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing.

Γυαλί

Το γυαλί είναι ένα άλλο πανταχού παρόν υλικό στη σύγχρονη κατασκευή. Ο Graham Dodd από την Arup πρότειναν πώς ένας τρόπος κατασκευής C2C διπλών τζαμιών θα ήταν η δημιουργία τζαμιών που θα τα διαπερνούσαν επιλεκτικά ορισμένα φάσματα. Πολλά χρωματικά εφέ στη φύση, όπως τα ιριδίζοντα φτερά της μπλε πεταλούδας, επιτυγχάνονται όχι μέσω χρωστικών ή επικαλύψεων αλλά μέσω του «δομικού χρώματος», που είναι μια μικροδομή που διαθλά και διασκορπίζει το φως παρά να το αντανακλά. Για το γυαλί, μπορεί να είναι δυνατό να δημιουργηθεί μια νανοδομή από το ίδιο το γυαλί που θα μπορούσε να αποδώσει, με παρόμοιο τρόπο με τα επιχρίσματα χαμηλής εκπομπής που εφαρμόζονται τώρα σαν ξεχωριστά υλικά.

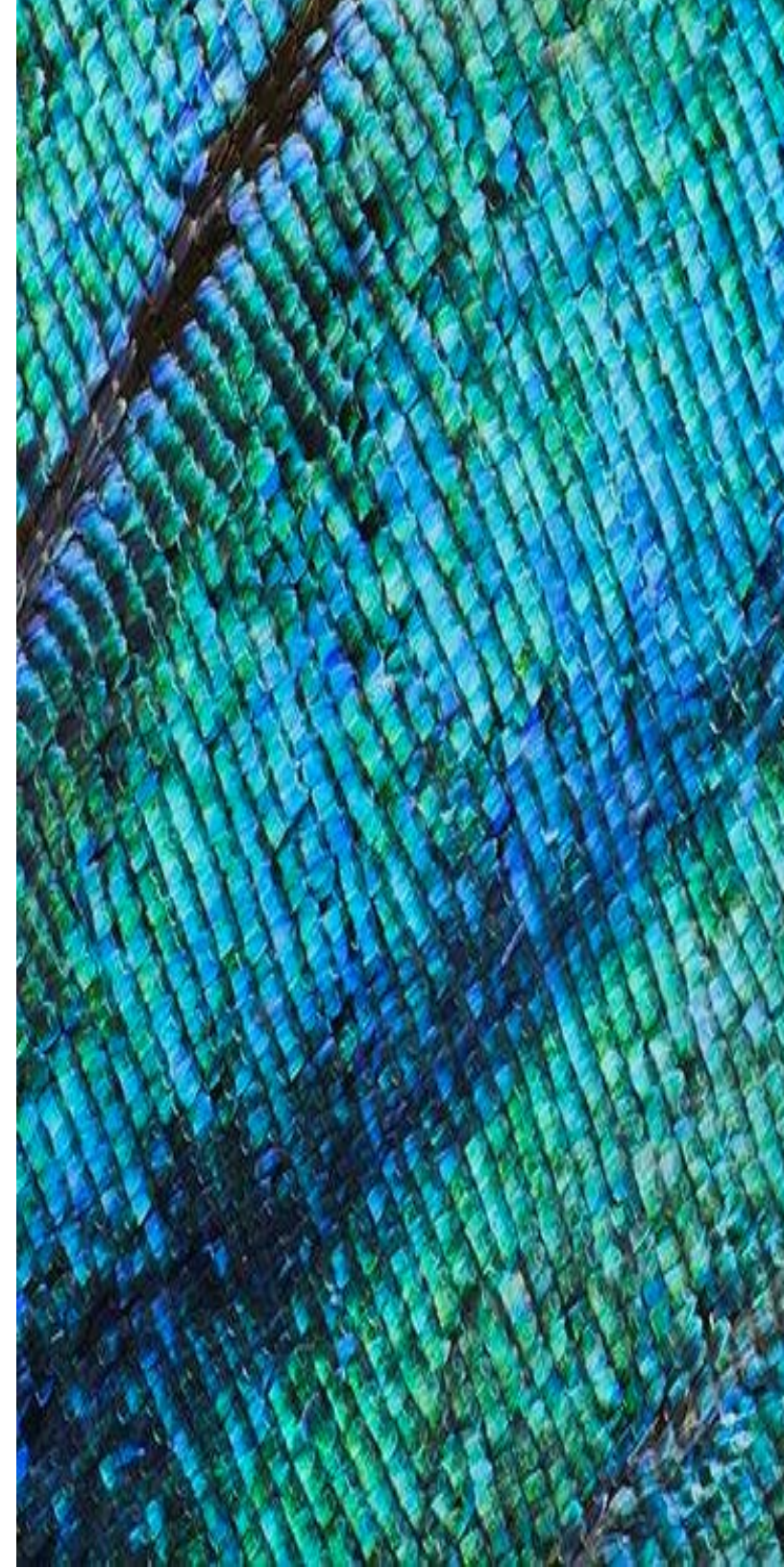
Μέταλλο

Όπως και στην περίπτωση της ξυλείας, πολλά τυποποιημένα υλικά στο δομημένο περιβάλλον είναι τελειωμένα με χρώματα, σφραγίδες και άλλα επιχρίσματα, τα οποία μπορεί να μειώσουν την επαναχρησιμοποίηση ή την ανακύκλωση των υλικών.

Στην τρέχουσα πρακτική, είναι καλύτερο να προωθηθεί η αυξανόμενη χρήση των μετάλλων που είναι εγγενώς ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες, όπως το αλουμίνιο, ο ανοξείδωτος χάλυβας και το Corten. Μπορούμε επίσης να αξιοποιήσουμε σημαντικές εξελίξεις στην τεχνολογία, όπως ο αφρώδη μέταλλα και κηρηθρικές μορφές, που επιτυγχάνουν αξιοσημείωτα αυξήσεις στην αποδοτικότητα των πόρων.⁶¹

Εικόνα 63: Λεπτομέρεια από τα φτερά
της morpho butterfly

⁶¹ Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing.



4.2.3 Διαχείριση των φυσικών πόρων

Θερμική άνεση

Ένα βασικός κοινός παρονομαστής που συνδέει τα κτήρια με τους βιολογικούς οργανισμούς, είναι η τάση της διατήρησης σταθερών συνθηκών, ανεξάρτητα από τις μεταβολές του εξωτερικού περιβάλλοντος. Η ανάγκη των ανθρώπων να ζουν σε εσωτερικούς χώρους οι οποίοι εξασφαλίζουν άνετες συνθήκες διαβίωσης, έρχεται σε αντιπαράθεση με την ανάγκη των έμβιων οργανισμών να επιβιώνουν στο περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο αυτών πλευρών, έγκειται στον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτή η κοινή ανάγκη.

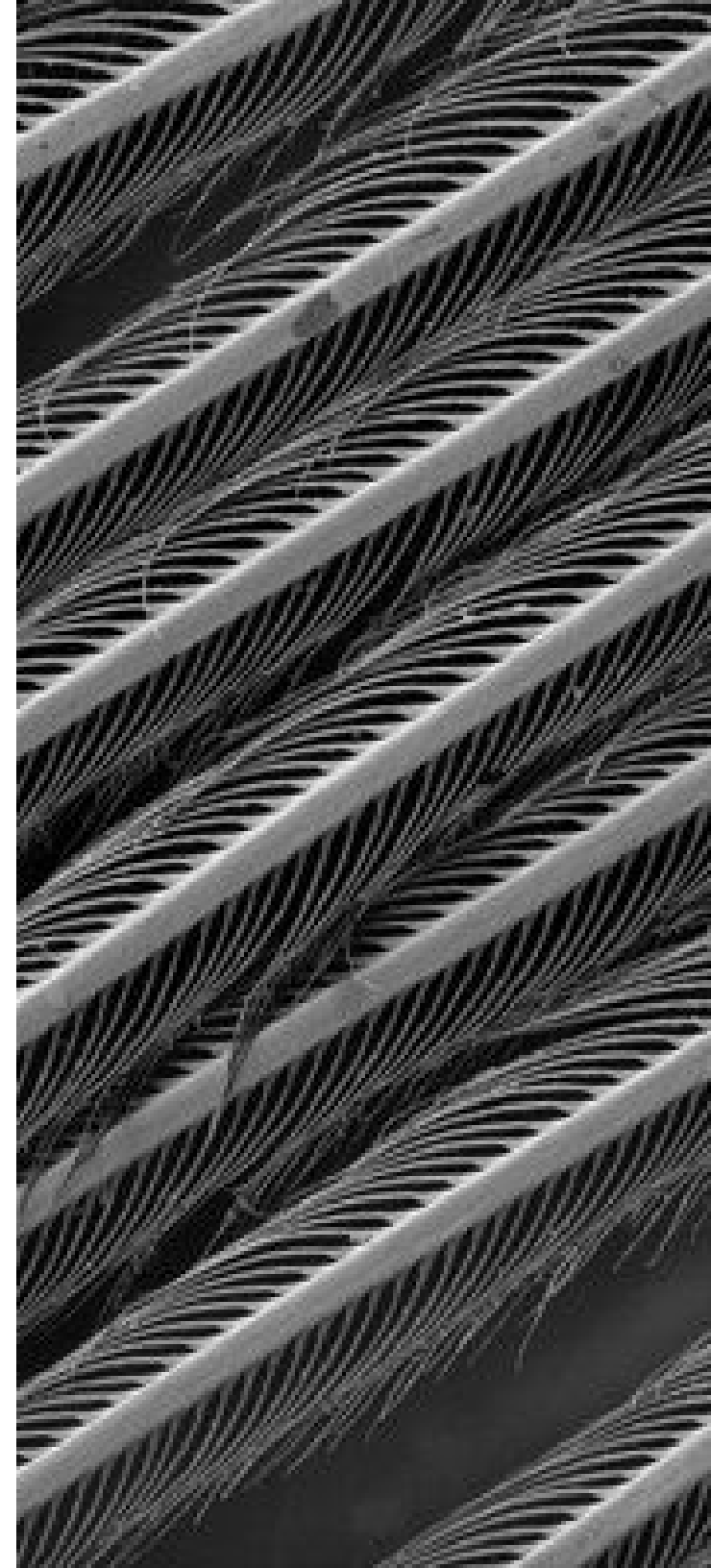
Οι οργανισμοί του ζωικού βασιλείου επιδίδονται σε μια συνεχή αναδιαμόρφωση είτε των δομών είτε των συμπεριφορών τους, ούτως ώστε να χρησιμοποιούν όσο το δυνατόν καλύτερα τους διαθέσιμους πόρους και ενέργεια, σε αντίθεση με τους ανθρώπους, οι οποίοι συνήθως κατασκευάζουν συμβατικά κτήρια που σπαταλούν μεγάλα ποσά ενέργειας για να διατηρήσουν άνετες συνθήκες μέσα σε αυτά.

Βασική πηγή θερμότητας για τους φυσικούς οργανισμούς αποτελεί η ηλιακή ακτινοβολία, είτε έμμεσα, όταν παράγεται θερμότητα μέσω του μεταβολισμού της τροφής είτε από άμεσα ηλιακά κέρδη.

Η πρώτη παράμετρος, της παραγωγής θερμότητας από το μεταβολισμό της τροφής, έχει οδηγήσει σε βιολογικές λύσεις για την αποφυγή των θερμικών απωλειών, μια από τις οποίες είναι η ανάπτυξη μηχανισμών μόνωσης. Το πυκνό τρίχωμα αλλά και το μονωτικό στρώμα υποδόριου λίπους δίνει τη δυνατότητα στα χερσαία θηλαστικά να διατηρούν την εσωτερική τους θερμοκρασία. Εκείνα τα οποία ζουν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, όπως η πολική αρκούδα ή ο τάρανδος, έχουν αναπτύξει μερικές ακόμη τεχνικές, όπως κούφια τρίχες για επιπλέον μόνωση. Ειδικότερα το τρίχωμα του τάρανδου περιλαμβάνει ένα πολύ πυκνό υπόστρωμα τριχώματος, το οποίο παγιδεύει αέρα πάνω στο δέρμα του ζώου, ώστε να μειωθεί η μετάδοση της θερμότητας προς το περιβάλλον.

Τα φτερά των πιγκουίνων είναι σχεδιασμένα ώστε να τους επιτρέπουν να ανταποκρίνονται σε πολύ διαφορετικές συνθήκες. Ενώ κατά τη διάρκεια της κολύμβησης τα φτερά του ζώου μένουν κολλημένα, παράλληλα στο σώμα του για την μείωση της αντίστασης του νερού και την καλύτερη κίνησή του, πάνω στη στεριά σηκώνονται κάθετα προς το σώμα του, ώστε να δημιουργούν μια πυκνή χνουδωτή μάζα που βοηθά στον εγκλωβισμό του αέρα, και κατ' επέκταση σε μια αποτελεσματική μόνωση. Με αυτόν τον τρόπο, το πτηνό καταφέρνει να διατηρεί μια διαφορά θερμοκρασίας 60°C μεταξύ του σώματός του και του εξωτερικού περιβάλλοντος μόνο με τη χρήση μιας μονωτικής στρώσης φτερών πάχους 20mm.

Εικόνα 64 (Δεξιά). Η δομή των φτερών των πιγκουίνων.



Παράδειγμα προς μίμηση αποτελεί και η συνήθεια των πιγκουίνων να συνωστιζονται σε μεγάλες ομάδες, μειώνοντας την συνολική τους επιφάνεια για την μείωση των θερμικών απωλειών.

Ενώ τα κελύφη των συμβατικών κτηρίων τείνουν να είναι μη ανταποκρίσιμα στις διαφορετικές καιρικές συνθήκες, μια παρόμοια τακτική ένωσης μιας ομάδας όμορων κτηρίων μεταξύ τους με αίθρια θα μπορούσε να προσφέρει μια αντίστοιχη διατήρηση θερμότητας, όταν αυτά θα είναι κλειστά τον χειμώνα, αλλά και τον καλύτερο αερισμό τους όταν εκείνα θα ανοίγουν το καλοκαίρι.



Η φωλιά της ανατολίτικης σφήκας (*Vespa orientalis*) χρησιμοποιεί έναν ιδιαίτερο μηχανισμό για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας, βασισμένο στην ηλιακή ενέργεια.

Τα εξάγωνα κελιά που σχηματίζονται στο εσωτερικό της φωλιάς της, καλύπτονται από μεταξωτές επιφάνειες, οι οποίες προσφέρουν την απαραίτητη μόνωση από των εξωτερικό αέρα, για την προστασία των νυμφών, αλλά λειτουργούν και ως θερμορυθμιστές. Λόγω των θερμοηλεκτρικών του ιδιοτήτων, το μετάξι μπορεί να αποθηκεύσει τη θερμότητα του ήλιου με τη μορφή ηλεκτρικού φορτίου. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, το φορτίο αυτό απελευθερώνεται με τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος, προσφέροντας θέρμανση. Ταυτόχρονα, το μετάξι απορροφά υγρασία από το ψυχρό νυχτερινό περιβάλλον, η οποία εξατμίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, βοηθώντας στην ψύξη του κελιού⁶².

Εικόνα 65. Η φωλιά της ανατολίτικης σφήκας.

⁶² Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing.

Όσον αφορά τον δροσισμό, η πιο συνηθισμένη τακτική που ακολουθείται από τη φύση είναι η αποφυγή της ηλιακής ακτινοβολίας εκ των προτέρων. Πολλοί οργανισμοί που ζουν σε ζεστό κλίμα έχουν αναπτύξει μηχανισμούς και συμπεριφορές ώστε να αποτρέπεται η μετάδοση θερμότητας σε αυτούς από το περιβάλλον. Κατ' επέκταση, η βασική στρατηγική που πρέπει να αποτελεί προτεραιότητα και για την αρχιτεκτονική είναι η αποφυγή των θερμικών κερδών εξ αρχής, παρά η προσπάθεια δροσισμού ενός κτηρίου εκ των υστέρων.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας αλλά και η μεγαλύτερη ευαισθητοποίηση σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος, έχουν στρέψει το ενδιαφέρον του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού τα τελευταία χρόνια στην έρευνα και την ανάπτυξη ενεργειακών κελυφών.

Η ενέργεια που καταναλώνεται από τα συμβατικά κτήρια εξακολουθεί να αποτελεί ένα μείζον ζήτημα, καθώς αντιστοιχεί στο 23% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται παγκοσμίως, ενώ το 60% της ενέργειας που χρησιμοποιείται σε ένα κτήριο, αντιστοιχεί στην θέρμανση και ψύξη των εσωτερικών του χώρων⁶³.

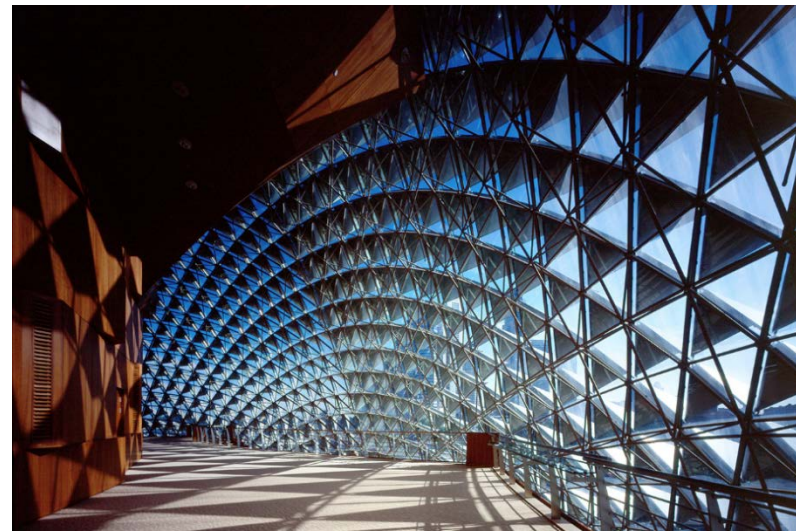
Η ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου που οδηγεί την υπερθέρμανση του πλανήτη, προβλέπεται να προκαλέσει ακόμα μεγαλύτερη αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας μέσα στις επόμενες δεκαετίες. Παρότι το κτηριακό κέλυφος διαδραματίζει τον μεγαλύτερο ρόλο στην ενεργειακή συμπεριφορά ενός κτηρίου, τα περισσότερα από αυτά αποτελούν ένα στατικό όριο μεταξύ των εξωτερικών περιβαλλοντικών συνθηκών και των εσωτερικών ανθρωπίνων δραστηριοτήτων. Επομένως, η ανάπτυξη κελυφών τα οποία προσαρμόζονται στις εναλλασσόμενες κλιματικές μεταβλητές είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για την βέλτιστη ενεργειακή απόδοση ενός κτηρίου, χωρίς την εξάρτηση από τεχνητά μέσα.

Εφόσον οι βιολογικοί οργανισμοί έχουν αναπτύξει μηχανισμούς και συμπεριφορές αίσθησης και ανταπόκρισης, ώστε να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες κλιματολογικές συνθήκες, η αξιοποίηση της βιομίμησης μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική σαν σχεδιαστικό εργαλείο στον τομέα των ενεργειακών κελυφών.

⁶³ Karam M., A., Muhammad, A., Hazreena, H., Abdul Malik, A., (2017). Biomimetic building skins: An adaptive approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **79** (2017): 1472-1491. [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021].
Διαθέσιμο στο: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117306640>

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα βιομίμησης σε αυτή την κατηγορία αποτελεί το Esplanade -Theatres on the Bay, ένα κέντρο παραστατικών τεχνών που σχεδιάστηκε με τη συνεργασία των Michael Wilford & Partner, του Atelier One και των DP Architects, στη Σιγκαπούρη, το 2002.

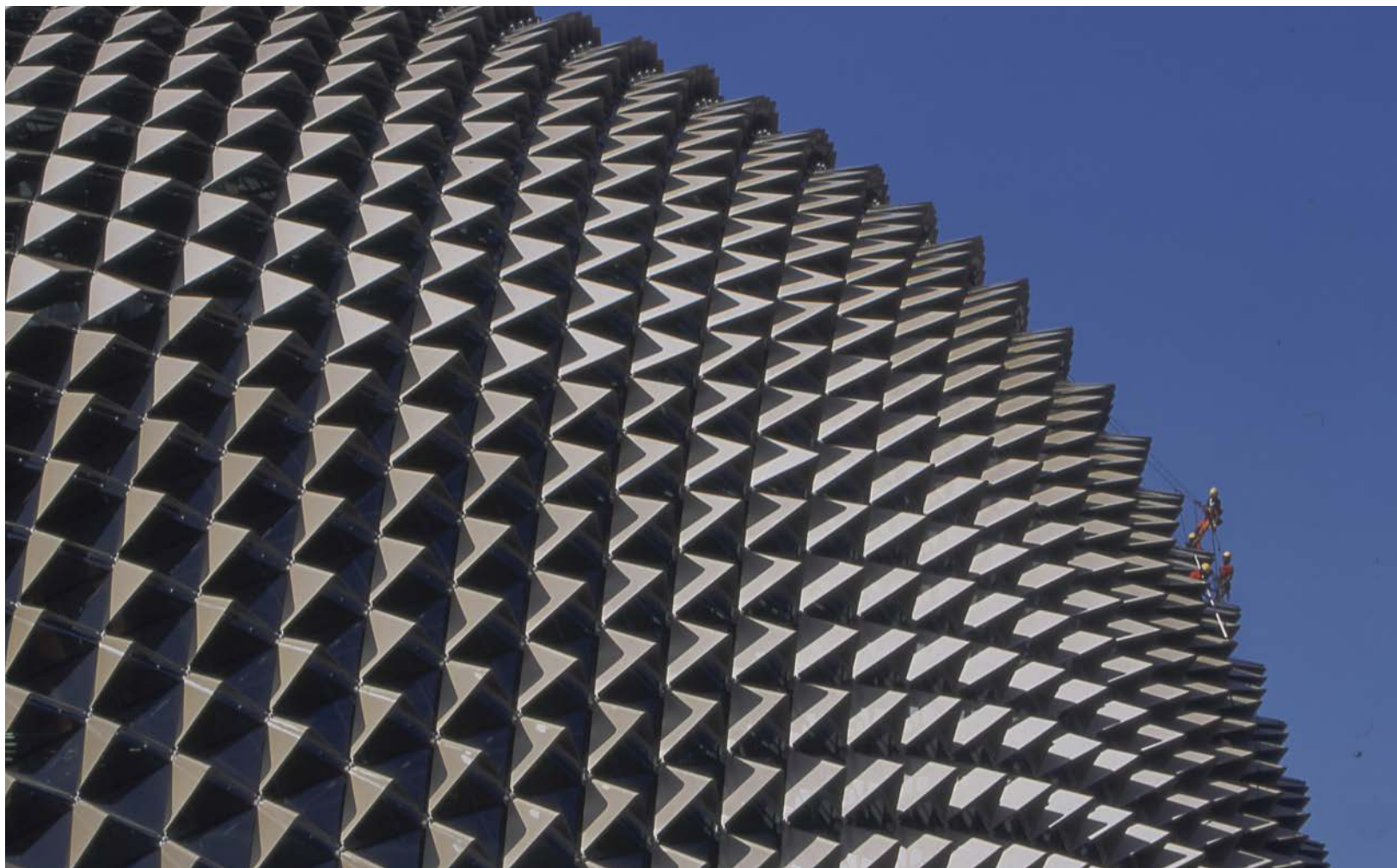
Σήμα κατατεθέν του αρχιτεκτονήματος αποτελούν τα δύο κελύφη που καλύπτουν τους δύο κύριους χώρους εκδηλώσεων, εμπνευσμένα από το τροπικό φρούτο durian, που ευδοκιμεί στη νοτιοανατολική Ασία. Το durian χρησιμοποιεί το αγκαθωτό περίβλημά του ως μια ασπίδα προστασίας των καρπών στο εσωτερικό του. Με μια παρόμοια λογική λειτουργούν και τα κελύφη του Esplanade, αποτελούμενα από έναν καμπύλο μεταλλικό σκελετό, επενδυμένο με ένα σύστημα τριγωνικών σκιάστρων, προστατεύοντας τους εσωτερικούς χώρους από την υπερθέρμανση ενώ ταυτόχρονα προσφέρουν επαρκή φυσικό φωτισμό και πανοραμικές θεάσεις προς τα έξω⁶⁴.



Εικόνα 66. Το κτήριο Esplanade -Theatres on the Bay.

⁶⁴ DP Architects, Esplanade – Theatres on the Bay [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://dpa.com.sg/projects/esplanadetheatresonthebay/>

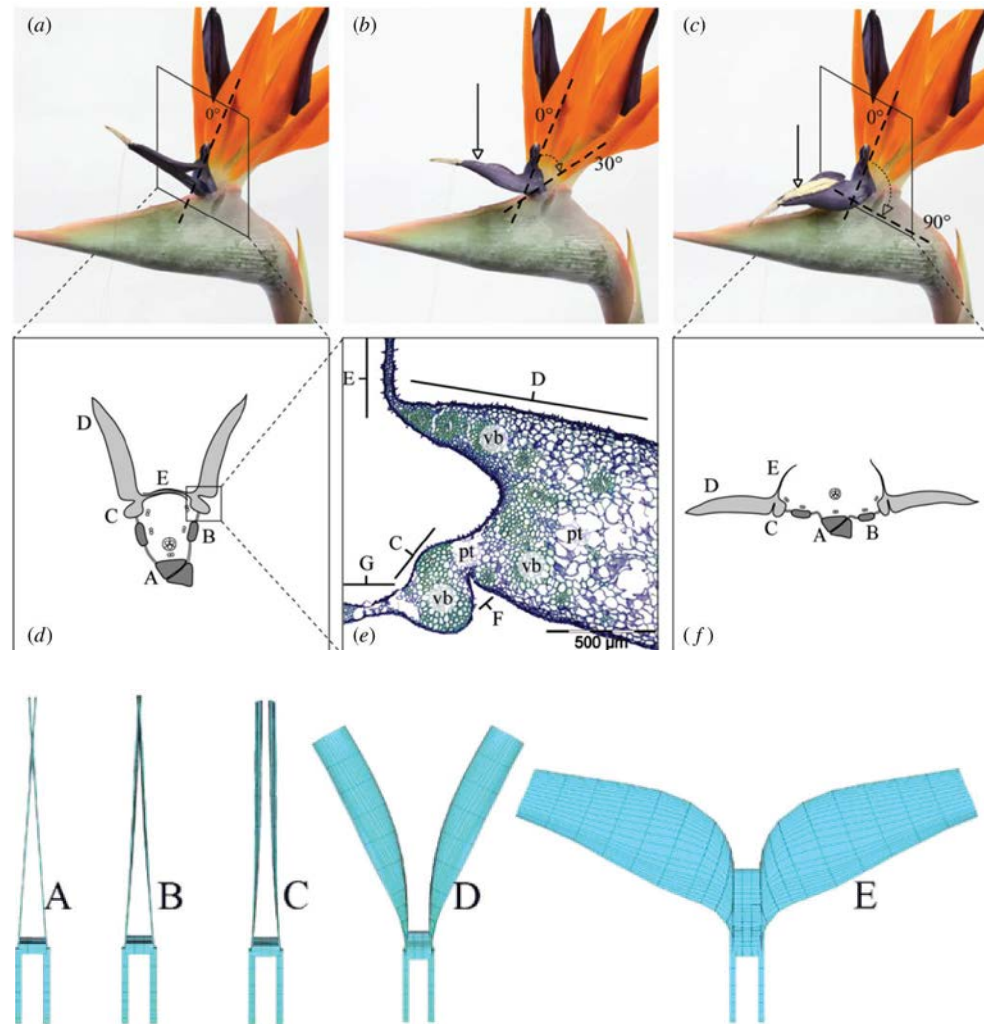
Ιδιαίτερη σημασία έχει η δυναμικότητα του συστήματος, καθώς τα σκίαστρά του κινούνται με βάση την πορεία του ήλιου, ώστε η σκίαση των εσωτερικών χώρων να είναι η βέλτιστη καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Εκτός από λειτουργικό, το τελικό αποτέλεσμα προσφέρει και μια ιδιαίτερη αισθητική αρχιτεκτονικά, καθώς δημιουργεί διαφορετικές ποιότητες όσον αφορά τις σκιάσεις και τις υφές, κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το έργο έχει αποσπάσει δύο βραβεία για τον ενεργειακό σχεδιασμό του (2004 BCA Award – Energy Efficient Building Award, 1999 Bentley Awards – Proactive Engineering) και ταυτόχρονα έχει καταφέρει να εδραιωθεί ως ένα σύγχρονο τοπόσημο στον αστικό ιστό της Σιγκαπούρης, δίνοντας ένα ισχυρό βήμα στην βιομιμητική σκέψη.



Εικόνα 67. Το βιομιμητικό κέλυφος του κτηρίου Esplanade -Theatres on the Bay, εξωτερικά.

Πηγή έμπνευσης για το σχεδιασμό του σκιάστρου Flectofin αποτέλεσε το φυτό Πουλί του Παραδείσου (*Strelitzia reginae*), μετά από συνεργασία του ΙΤΚΕ (Πανεπιστημίου της Στουτγάρδης), της Plant Biomechanics Group (Πανεπιστήμιο του Φράιμπουργκ) και του Institute for Textile Technologies (ITV).

Το φυτό διαθέτει ένα είδος μοχλού ο οποίος κάμπτεται όταν κάθονται σε αυτόν τα πτηνά που πρόκειται να επικονιάσουν το φυτό, μετακινώντας τα πέταλά του και αποκαλύπτοντας τους ανθήρες που θα εναποθέσουν γύρη στα άκρα των πτηνών. Η ιδέα που γεννήθηκε από αυτή την βιολογική συμπεριφορά ήταν ένα σκιάστρο το οποίο θα μπορούσε να κινηθεί έως και 90°, προσφέροντας την απαραίτητη σκίαση με όσο το δυνατόν λιγότερη παρεμπόδιση της θέασης, ανάλογα με την κίνηση του ήλιου⁶⁵.



Εικόνα 68. Το φυτό Πουλί του Παραδείσου ως πηγή έμπνευσης για το σχεδιασμό του σκιάστρου Flectofin.

⁶⁵ Lienhard, J. et al., (2011). Flectofin: A hingeless flapping mechanism inspired by nature. *Bioinspiration and Biomimetics* [online]. **6** (4). [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/publication/51839563_Flectofin_A_hingeless_flapping_mechanism_inspired_by_nature

Η προσέγγιση αυτή εφαρμόστηκε σε ένα σύστημα σκίασης μεγάλης κλίμακας στο One Ocean, Thematic Pavilion από τους αρχιτέκτονες soma στην Expo Yeosu 2012, στη Νότια Κορέα.

Ο πρωτεύων στόχος του σχεδιασμού ήταν να δημιουργηθεί ένα έργο το οποίο θα αντιπροσωπεύει τις ποιότητες του ωκεανού, όπως τον αντιλαμβάνονται οι αρχιτέκτονες, ως μία ατέρμονη επιφάνεια αλλά και ως βάθος. Οι κύριοι χώροι του κτηρίου ορίζονται από συνεχόμενες επιφάνειες των οποίων οι κατευθύνσεις εναλλάσσονται από κάθετες σε οριζόντιες. Με βάση αυτή την λογική σχεδιάστηκε και το κινούμενο κέλυφος του κτηρίου, το οποίο αποτελεί και το βασικότερο χαρακτηριστικό του.

Το κέλυφος αποτελείται από 108 κατακόρυφα ελάσματα, κατασκευασμένα από πολυμερή ενισχυμένα με υαλοβάμβακα, τα οποία λυγίζουν με μηχανικά μέσα δημιουργώντας έτσι ανοίγματα στην όψη του κτηρίου. Τα ελάσματα αυτά με πάχος μόλις 9mm, εκτείνονται σε ύψος από 3 έως 13m, ενώ καλύπτουν μια επιφάνεια μήκους 140m. Με τη βοήθεια θλιπτικών δυνάμεων στις άκρες των ελασμάτων, επιτυγχάνεται μια ελεγχόμενη διπλή κάμψη, η οποία ελέγχεται από ηλιακά πάνελ στην οροφή του κτηρίου. Η υψηλή αντοχή των ινών του γυαλιού σε συνδυασμό με εύκαμπτη εποξική ρητίνη, δίνουν ιδιότητες μερικής κάμψης στα ελάσματα, ενώ ταυτόχρονα τους προσφέρουν την απαραίτητη δομική αντοχή ενάντια στα φορτία των ανέμων.



Εικόνα 69. Το μεταβαλλόμενο σύστημα σκίασης του One Ocean, Thematic Pavilion

Η κίνηση των ελασμάτων χρησιμοποιείται για τον καλύτερο έλεγχο του φωτισμού και της σκίασης στους εσωτερικούς χώρους, ενώ αισθητικά παραπέμπει στον κυματισμό του ωκεανού αλλά και στα βράγχια των ψαριών. Όπως αναφέρουν οι αρχιτέκτονες του έργου, “Η μορφή, τα υλικά, η κίνηση και το φως είναι απρόσκοπτα συνδεδεμένα. Όσο μακρύτερο είναι ένα έλασμα, τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το άνοιγμα που δημιουργείται, επιρρεάζοντας κατ' επέκταση τον χώρο που θα φωτίζεται εσωτερικά. Ταυτόχρονα, η βιομιμητική προσέγγιση του σχεδιασμού ενσωματώνει τον οικολογικό ρόλο της Έκθεσης, με έναν καινοτόμο και διερευνητικό τρόπο”⁶⁶.



Εικόνα 70. Το μεταβαλλόμενο σύστημα σκίασης του One Ocean, Thematic Pavilion

⁶⁶ Tokuz, A., Özkaban, F., Çakır, Ö., (2018). Biomimetic Facade Applications for a More Sustainable Future. Interdisciplinary Expansions in Engineering and Design With the Power of Biomimicry. [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/publication/324093262_Biomimetic_Facade_Applications_for_a_More_Sustainable_Future

Διαχείριση του φωτός

Σήμερα έχουμε αποκτήσει πολλές γνώσεις όσων αφορά το πώς το φως επιδρά στην ανθρώπινη ευημερία σε σύγκριση με την εποχή που ο Le Corbusier έγραφε για αυτό. Γνωρίζουμε ότι το φως επιδρά πάνω μας με τρεις διαφορετικούς τρόπους: ως ακτινοβολία, μέσω του οπτικού μας συστήματος και μέσω του δικού μας κερκαδικού συστήματος. Δεν θα ήταν εύλογο συνεπώς να εστιάζουμε μόνο στο πως το φως λειτουργεί μέσω της άμεσης οπτικής αντίληψής μας καθώς θα κινδυνεύαμε να παραβλέψουμε κρίσιμες πτυχές του. Έχουν σχεδιαστεί ήδη έργα που έχουν εμβαθύνει στη σχεδίαση τεχνητού φωτός που ποικίλει σε χρώμα και σε ένταση καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας για να συμβαδίζει με τους ανθρώπινους κερκαδικούς ρυθμούς. Θα ήταν αποτελεσματικότερο όμως αν γινόταν καλύτερη αξιοποίηση του φωτός της ημέρας μιας και θα μπορούσαν να μειωθούν τεράστια ποσά ενέργειας.

Ο έλεγχος του φωτός στα κτήρια τις περισσότερες φορές γίνεται από τελείως διακριτά συστήματα, είτε αυτό είναι το καθαρό γυαλί, προκειμένου να περάσει το φως μέσα στο κτήριο, είτε στοιχεία όπως οι περσίδες για τον έλεγχο του φωτισμού, ή και των «light selves» για να εισχωρήσει το φως βαθιά μέσα στο κτήριο. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν διάφορα προβλήματα, μιας και δεν ανταποκρίνονται στα δυναμικά χαρακτηριστικά του φυσικού φωτισμού.

Μαζί με το φως είναι συνετό να συμπεριλάβουμε και το χρώμα, καθώς στην φύση τις περισσότερες φορές οι δύο αυτές πτυχές πηγαίνουν μαζί. Οι οργανισμοί έχουν εξελιχθεί και έχουν αναπτύξει διάφορους τρόπους για να συλλέγουν, να διανέμουν, να εστιάζουν, να αντανakλούν και να διαθλούν το φως. Μελετώντας τις διάφορες αυτές ενέργειες θα αποκτούσαμε νέες καινοτομίες στην αρχιτεκτονική, επιτρέποντας μας να χτίσουμε κατασκευές με πιο υγιές περιβάλλον για τον άνθρωπο και που θα απαιτούν λιγότερη ενέργεια⁶⁷

⁶⁷ Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing.

Εικόνα 71: Λεπτομέρεια από μάσκα του εργαστηρίου της ομάδας Mediated Matter

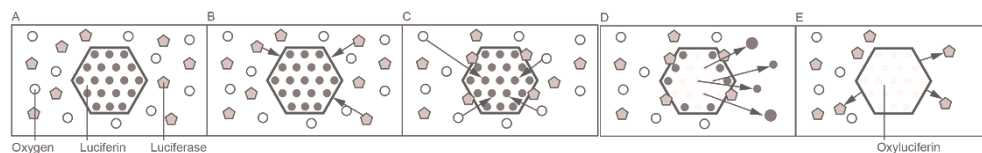


Δημιουργία φωτός

Για την παραγωγή του φωτός οι άνθρωποι εδώ και αρκετά χρόνια αξιοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια.

Παρόλα αυτά έχει παρατηρηθεί ότι πληθώρα οργανισμών στη Γη είναι ικανοί να παράξουν φως άλλοτε υψηλής συχνότητας και ορατό από το ανθρώπινο μάτι και άλλοτε όχι. Ακόμα και οι άνθρωποι παράγουν μικρές ποσότητες φωτός.

Σήμερα γνωρίζουμε ότι η βιοφωταύγεια είναι γενικά το αποτέλεσμα της οξείδωσης ενός μορίου που εκπέμπει φως (λουσιφερίνη) μαζί με ένα καταλυτικό ένζυμο, είτε μια λουσιφεράση είτε μια φωτοπρωτεΐνη, η οποία είναι μια παραλλαγή λουσιφεράσης που συνδυάζει παράγοντες που απαιτούνται για την εκπομπή φωτός σε ένα μονάδα. Η αντίδραση είναι πολύ αποτελεσματική, μετατρέποντας το 98% της ενέργειας σε φως και χάνοντας μόνο 2% ως θερμότητα. Τόσο η λουσιφερίνη όσο και η λουσιφεράση είναι γενικοί όροι και όχι τα ονόματα ορισμένων χημικών ουσιών, πράγμα που σημαίνει ότι πολλές διαφορετικές ουσίες μπορούν να οδηγήσουν στην αντίδραση και εκτιμάται ότι η βιοφωταύγεια έχει εξελιχθεί ανεξάρτητα τουλάχιστον 40 έως 50 φορές μεταξύ των υπάρχοντων οργανισμών. Τα πιο εμφανή επίγεια περιστατικά έχουν παρατηρηθεί μεταξύ εντόμων, μανιταριών και βακτηρίων.⁶⁸



Εικόνα 72: Διαδικασία παραγωγής της βιοφωταύγειας

Εικόνα 73: Αποικίες φωσφορούχων σκουληκιών εκπέμπουν φως

⁶⁸ Kretzer, M., (2013). BIOLUMINESCENCE. [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <http://materiability.com/bioluminescence/>

Αρκετοί επιστήμονες έχουν ήδη αρχίσει να κάνουν πειράματα προκειμένου να μιμηθούν αυτούς τους μηχανισμούς παραγωγής φωτός. Η γαλλική εταιρεία βιοτεχνολογίας Glowee προωθεί την ιδέα της χρήσης βιοφωταύγειας ως μια φυσική εναλλακτική λύση για τον ηλεκτρικό φωτισμό. Χρησιμοποιώντας τη συνθετική βιολογία, η ομάδα εισάγει τη γενετική κωδικοποίηση των καλαμαριών που έχουν την δυνατότητα της βιοφωταύγειας σε κοινά βακτήρια προκυμμένου να τα κάνουν να παράξουν φως. Μόλις κατασκευαστεί το βακτήριο, συλλέγεται και εγκλωβίζεται μέσα σε διαφανή δοχεία που μεταφέρουν τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για να ανάβουν τα βακτήρια. Μέχρι σήμερα, η ομάδα είναι σε θέση να παράγει βακτήρια που λάμπουν επι τρεις συνεχόμενες ημέρες και σύμφωνα με την εταιρεία, αυτή η πηγή φωτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί εσωτερικά ή εξωτερικά, σε διάφορες εφαρμογές όπως βιτρίνες, δημόσιους χώρους και εξωτερικούς χώρους κτιρίων.⁶⁹ Η Glowee υποστηρίζει ότι η φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση φωτισμού θα μπορούσε να συμβάλει στη μείωση του παγκόσμιου ποσοστού κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας κατά 19% και των συνολικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά 5%. Η ομάδα ελπίζει ότι σύντομα θα είναι σε θέση να διαχειρίζεται και το χρώμα τους μέσω χειριστηρίων.⁷⁰



Εικόνα 74: Πρόταση της εταιρείας Glowee για τον φωτισμό των πόλεων



Εικόνα 75: Philips Bio-light

⁶⁹ARCHITECT STAFF, (2017). This Week in Tech: Will Bioluminescent Organisms Help Illuminate Our Future Buildings? [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: https://www.architectmagazine.com/technology/this-week-in-tech-will-bioluminescent-organisms-help-illuminate-our-future-buildings_o

⁷⁰ Glowee (2021). Enlightened by the sea [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://www.glowee.eu/>

Σκίαση

Αρκετές είναι επίσης οι λύσεις που μπορεί να μας δώσει η φύση όσον αφορά τη διαχείριση του φωτός. Οι φυσικοί οργανισμοί έχουν αναπτυχθεί έτσι ώστε να μπορούν να εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία με τον βέλτιστο τρόπο. Η επαναλαμβανόμενη σπείρα που ορίζει τη διάταξη των φύλλων των φυτών δημιουργεί συνθήκες προκειμένου αυτά να εκμεταλλεύονται τον ήλιο χωρίς τα φύλλα που βρίσκονται σε πιο ψηλά σημεία να δημιουργούν σκιές προς τα κατώτερα. Εμπνευσμένος από αυτή την διάταξη που ονομάζεται φιλοτακτική, ο αρχιτέκτονας Saleh Masoumi από το Verk Studio στο Ιράν προτείνει μια νέα λύση σε κατοικημένους ουρανοξύστες. Τα σχέδιά του χρησιμοποιούν δομή παρόμοια με τα φυτά για τη δημιουργία ζωντανών εργασιακών μονάδων που παρέχουν «αυλές» για κάθε μεμονωμένη μονάδα. Γνωστή ως φυλλοταξία στη βοτανική, τα βασικά μοτίβα των φύλλων μπορεί να είναι αντίθετα ή εναλλακτικά σε μια σπείρα γύρω από το στέλεχος του φυτού. Ο Masoumi δανείζεται αυτή την ιδέα για το όραμά του για μονάδες διαμερισμάτων που προβάλλουν σε σπείρα από έναν πυρήνα εξυπηρέτησης ή στέλεχος. Κάθε μονάδα είναι διώροφη, με το ανώτερο επίπεδο να αποτελείται από μια υπαίθρια, φυτεμένη αυλή.⁷¹



Εικόνα 76: Το Arab World Institute στη Γαλλία



Εικόνα 77: Ο Phyllotactic Tower

Διάφορα συστήματα αυτοματοποιημένης σκίασης έχουν αναπτυχθεί επίσης βασιζόμενα σε μηχανισμούς της φύσης. Στο κτήριο Arab World Institute στη Γαλλία, ο Ζαν Νουβέλ σχεδίασε την νότια όψη καλύπτοντας την με αυτοματοποιημένους πίνακες, που λειτουργούν όπως η ίριδα του ματιού, επιτρέποντας ή αποτρέποντας την ηλιακή ακτινοβολία.⁷²

⁷¹ Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing.

⁷² Jean Nouvel. Arab World Institute. [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <http://www.jeanouvel.com/en/projects/institut-du-monde-arabe-ima/>

Η ομάδα Mediated Matter της Neri Oxman από το MIT έχει σχεδιάσει διάφορα εκθέματα, τα TOTEMS, αξιοποιώντας τα οφέλη που μπορεί να προσδώσει η μελανίνη στην αρχιτεκτονική. Ενώ είναι γνωστό ότι η μελανίνη προστατεύει τους ανθρώπους από την υπεριώδη ακτινοβολία του ήλιου, η ουσία έχει επίσης ευρύτερες προστατευτικές ιδιότητες. Οι βιολόγοι έχουν παρατηρήσει ότι προστατεύει τους μικροοργανισμούς από υψηλές θερμοκρασίες, χημικές καταπονήσεις και βιοχημικές απειλές. Η ομάδα εξετάζει πώς τα βιολογικά υλικά μπορούν να ενσωματώσουν κτίρια και αντικείμενα στα ζωντανά συστήματα γύρω τους, χρησιμοποιώντας φυσικές διεργασίες για την εκτέλεση λειτουργιών όπως η παραγωγή ενέργειας και η ανακύκλωση αποβλήτων. Τα γλυπτά Totems που σχηματίζονται με την έγχυση υγρής μελανίνης σε περίπλοκα κανάλια μέσα σε ένα τρισδιάστατα τυπωμένο τούβλο παρουσιάστηκαν στην 22^η Triennale di Milano.

Εκτός από τα Totems, η ομάδα παρουσίασε μια αρχιτεκτονική πρόταση για μια πρόσοψη που θα μεταφέρει την ιδέα των Τοτέμ σε μεγαλύτερη κλίμακα. Η ομάδα προβλέπει μια γυάλινη δομή πολλών ορόφων η οποία θα περιέχει πολλούς τύπους μελανίνης, συμπεριλαμβανομένων ορισμένων τύπων που θα λαμβάνονται από ζώα που βρίσκονται στην περιοχή που τοποθετείται η εγκατάσταση. Μόλις κατασκευαστεί, θα βοηθούσε στην προστασία των απειλούμενων ειδών από την υπεριώδη ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας.⁷³



Εικόνα 78: Πειράματα με την μελανίνη

⁷³Oxman. (2019). Totems. [online] [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://oxman.com/projects/totems>.

Εικόνα 79: 3D εκτυπωμένα κανάλια με μελανίνη





Εικόνα 80: Πρόταση περιπτέρου από την ομάδα Mediated Matter

Διαχείριση νερού

Παρόλο που η ποσότητα του καθαρού πόσιμου νερού έχει μείνει σχετικά σταθερή ανά του αιώνες, ο πληθυσμός της γης έχει αυξηθεί ραγδαία. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τις ολοένα και πιο έντονες επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής, προκαλεί παγκόσμιο ανταγωνισμό για πόσιμο, καθαρό νερό, απαραίτητο αγαθό για την επιβίωσή μας, ο οποίος προβλέπεται να ενταθεί ακόμη περισσότερο στις επόμενες δεκαετίες.

Σύμφωνα με τον ΟΗΕ, ο ρυθμός αύξησης της κατανάλωσης του νερού είναι τουλάχιστον διπλάσιος από εκείνον της αύξησης του πληθυσμού τον τελευταίο αιώνα⁷⁴, ενώ έως το 2025 υπολογίζεται πως 1.8 δις του πληθυσμού θα ζουν σε περιοχές πληττόμενες από λειψυδρία.⁷⁵

Ενδεικτικά, κάποια από τα προβλήματα που επιφέρει η κλιματική αλλαγή είναι η μείωση της αγροτικής παραγωγής σε τροπικά εδάφη, λόγω της αύξησης των θερμοκρασιών και της μείωσης των βροχοπτώσεων, αλλά και ο κίνδυνος πλημμυρών στις εύκρατες περιοχές όπου πιθανόν να υπάρξουν αυξημένες βροχοπτώσεις.

Επομένως, η πρόκληση που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα είναι το πόσο έξυπνα και αποτελεσματικά θα μπορέσει να διατηρήσει, να διαχειριστεί και διανέμει τους διαθέσιμους πόρους νερού. Η βιομιμητική λογική έχει τη δύναμη να προσφέρει λύσεις στην αποτελεσματικότερη διαχείριση του νερού, τόσο σε περιπτώσεις έλλειψης όσο και σε περιπτώσεις περίσσειας νερού, καθώς πολλοί φυσικοί οργανισμοί έχουν ήδη αντιμετωπίσει παρόμοια προβλήματα, αναπτύσσοντας διάφορους μηχανισμούς.

Εικόνα 81.

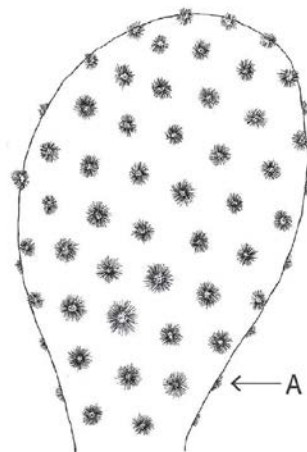
⁷⁴ Water Scarcity [online]. United Nations. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21].

Διαθέσιμο στο: <https://www.unwater.org/water-facts/scarcity>

⁷⁵ Freshwater Crisis [online]. National Geographic. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21].

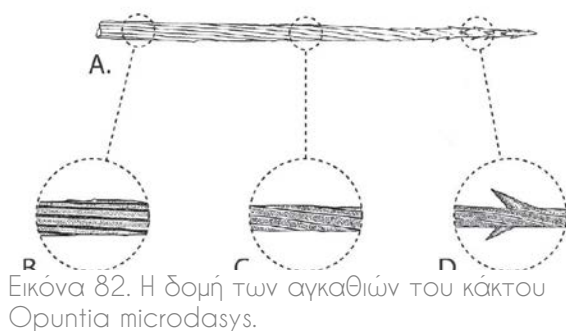
Διαθέσιμο στο: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/freshwater-crisis>





Η πρακτική συλλογής νερού από την ατμόσφαιρα παρατηρείται σε διάφορους οργανισμούς, όπως για παράδειγμα το σκαθάρι της ερήμου Ναμίμπ, που προαναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Χάρη στη μορφολογία του δέρματός της καταφέρει να συλλέγει νερό και η σαύρα γνωστή ως Αγκαθωτός δράκος (*Moloch horridus*). Όταν εκείνη βρεθεί σε υγρό περιβάλλον, οι τριχοειδείς αυλακώσεις που σχηματίζονται στο δέρμα της βοηθούν το νερό να κατευθυνθεί ανοδικά από τα πόδια της καταλήγοντας στο στόμα της, λόγω του φαινομένου της τριχοειδούς αναρρίχησης. Ταυτόχρονα, σταγόνες νερού σχηματίζονται και στην πλάτη της, λόγω της αγκαθωτής της επιφάνειας, οι οποίες καταλήγουν και πάλι στο δίκτυο των αυλακώσεων του δέρματός της.

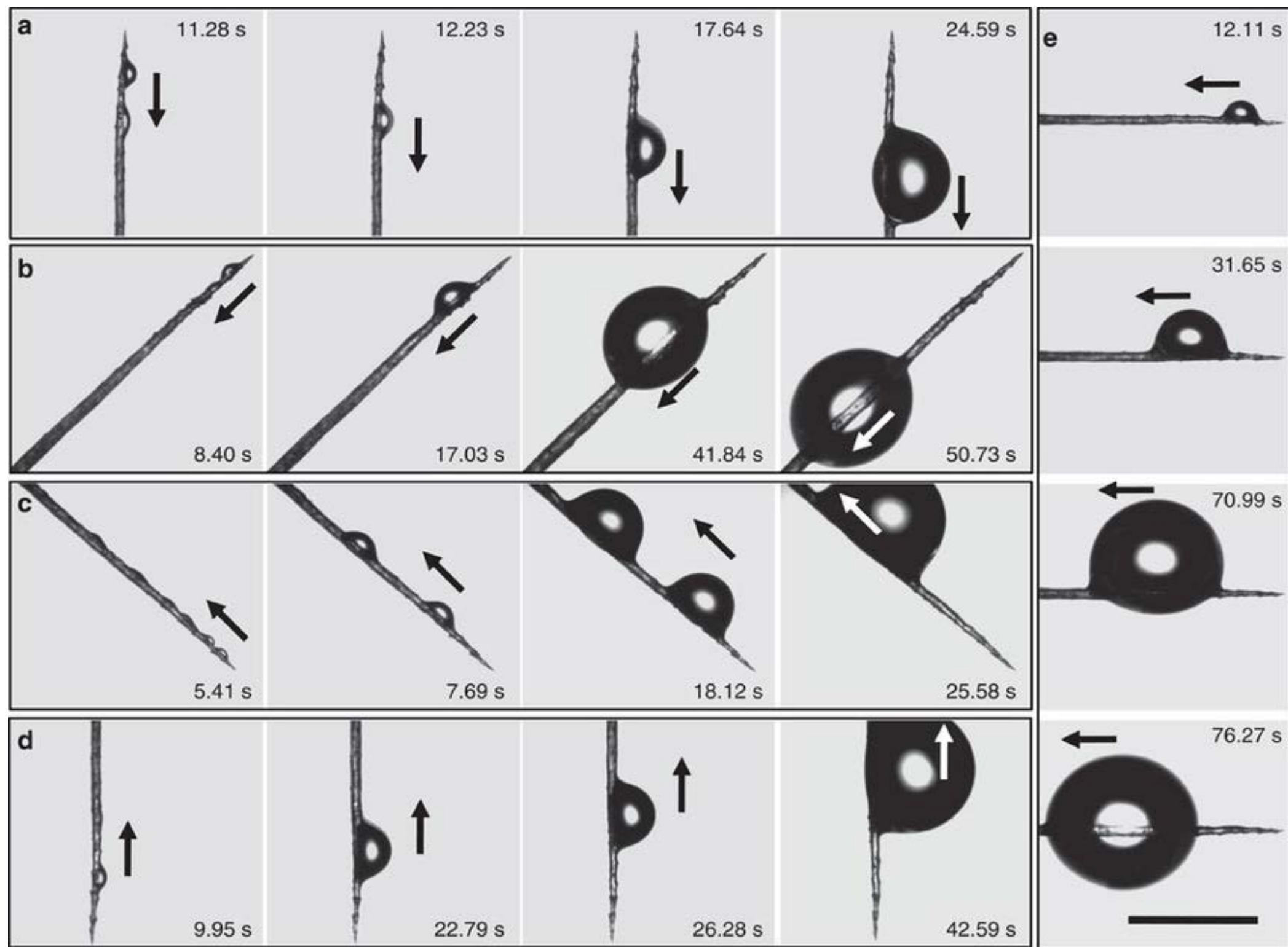


Εικόνα 82. Η δομή των αγκαθιών του κάκτου *Opuntia microdasys*.

Πολλά είδη κάκτων ευδοκούν σε περιοχές με ξηρό κλίμα, επιδεικνύοντας εξαιρετική αντοχή σε συνθήκες έλλειψης νερού. Ο κάκτος της ερήμου Τσιουάουα (*Opuntia microdasys*), καταφέρει να επιβιώνει έχοντας αναπτύξει έναν ιδιαίτερο μηχανισμό συλλογής νερού από την ομίχλη, ο οποίος λειτουργεί ακόμη και ενάντια στη βαρύτητα. Το σύστημα βασίζεται σε συστάδες κωνικών αγκαθιών και τριχωμάτων κατανεμημένων στον κορμό του φυτού. Κάθε αγκάθι έχει τρεις διαφορετικές μορφολογικές ιδιότητες, οι οποίες βοηθούν την διαδικασία συλλογής του νερού. Οι σταγόνες νερού που σχηματίζονται στην επιφάνεια των άκρων των κωνικών αγκαθιών, δέχονται πιέσεις, οι οποίες τις κατευθύνουν προς την βάση του αγκαθιού.

Στην κίνηση αυτή των σταγόνων συμβάλλουν και οι αυλακώσεις που υπάρχουν στην επιφάνεια του αγκαθιού, οι οποίες φαρδαινούν στη βάση του. Τέλος, οι σταγόνες καταλήγουν στη βάση όπου ενώνονται όλα τα αγκάθια, και απορροφώνται από το φυτό⁷⁶.

⁷⁶ Ju, K. et al, (2012). A multi-structural and multi-functional integrated fog collection system in cactus. Nature Communications 3(1): 1247. [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/publication/233849188_A_multi-structural_and_multi-functional_integrated_fog_collection_system_in_cactus

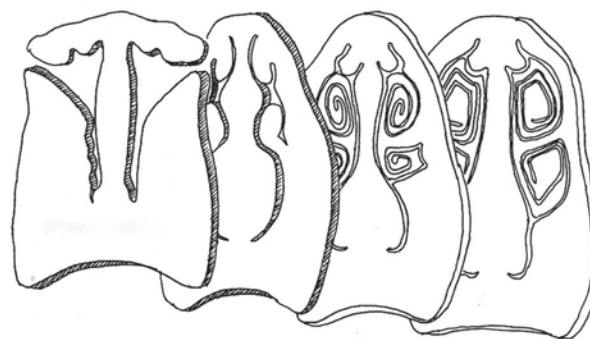
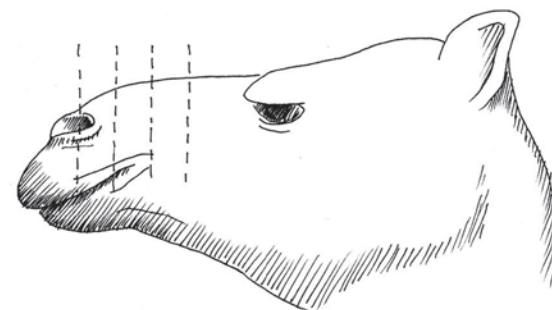


Εικόνα 83. Παρατήρηση του τρόπου συλλογής νερού από τα αγκάθια του κάκτου, στις γωνίες 90°, 45°, -45°, -90° και 0° (α-ε). Τα σταγονίδια οδηγούνται από την άκρη των αγκαθιών προς τη βάση τους, ακόμη και στην περίπτωση όπου το αγκάθι βρίσκεται κατακόρυφα με την άκρη προς τα κάτω (d).

Καθώς ζουν σε θερμό και ξηρό περιβάλλον, οι καμήλες έχουν αναπτύξει ιδιαίτερα πολύπλοκες ρινικές κοιλότητες για να ελαχιστοποιούν την απώλεια νερού κατά τη διαδικασία της εκπνοής. Αυτό συμβαίνει με δύο μηχανισμούς: ψυχραίνοντας τον αέρα που εκπνέεται και απορροφώντας την υγρασία που εκείνος περιέχει.

Πιο συγκεκριμένα, όταν ο θερμός ξηρός αέρας που εισπνέει η καμήλα, περνά από την πολύ μεγάλη υγρή επιφάνεια της ρινικής της κοιλότητας, κατακρατά την υγρασία από τους ιστούς της και ταυτόχρονα την ψυχραίνει. Κατά την εκπνοή, ο αέρας που έχει θερμανθεί από το σώμα του ζώου περνά από τις ίδιες ψυχρές κοιλότητες, οι οποίες λόγω των υγροσκοπικών τους ιδιοτήτων κατακρατούν την υγρασία που έχει αποκτηθεί. Λόγω αυτής της κατακράτησης, η καμήλα επιτυγχάνει εξοικονόμηση νερού στον οργανισμό της κατά 60%⁷⁷.

Η πολυπλοκότητα της ρινικής κοιλότητας, δημιουργεί πολύ μεγάλες επιφάνειες, και πολύ μικρές αποστάσεις μεταξύ αυτών και του αέρα, αυξάνοντας έτσι τη δυνατότητα της ανταλλαγής θερμότητας και υγρασίας. Επιπλέον, η ψύξη που δημιουργείται από την παραπάνω διαδικασία μεταφέρεται μέσω των αιμοφόρων αγγείων στον εγκέφαλο, διατηρώντας τον ψυχρότερο από το υπόλοιπο σώμα κατά 6 °C, προστατεύοντας τον από τις ακραίες εξωτερικές θερμοκρασίες.



Εικόνα 84. Η πολύπλοκη μορφολογία των ρινικών κοιλοτήτων της καμήλας.

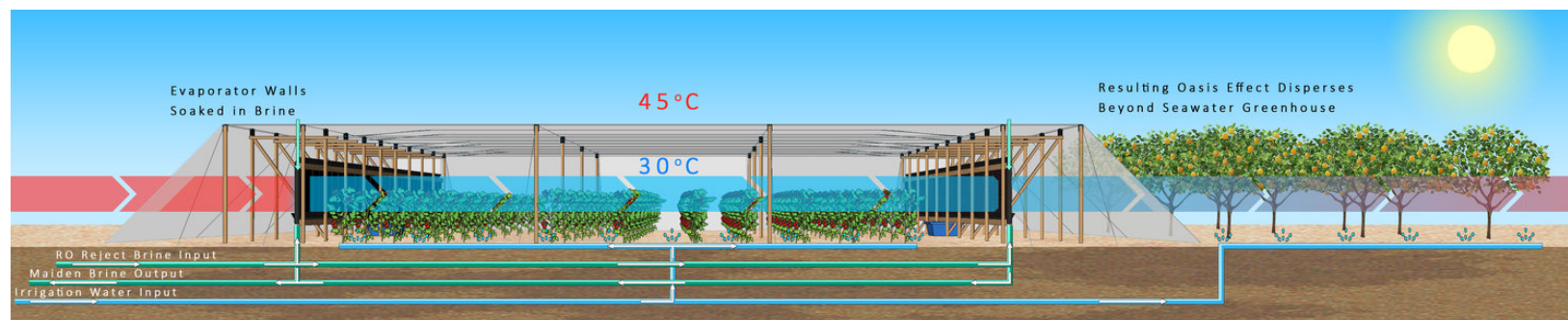
⁷⁷ Schmidt-Nielsen K. et al, (1981). Desaturation of exhaled air in camels. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B.* **211**(1184):305-19. [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021].

Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/publication/17074113_Desaturation_of_Exhaled_Air_in_Camels

Μια πρακτική εφαρμογή βιομίμησης σχετικά με τη συλλογή νερού αποτελεί το Seawater Greenhouse, στο Ομάν. Το έργο, που κατασκευάστηκε το 2004 από τον Charlie Paton και την ομάδα του, χρησιμοποιεί ένα σύστημα εξάτμισης του θαλασσινού νερού με σκοπό να δημιουργήσει πιο βιώσιμες συνθήκες για την ανάπτυξη καλλιεργειών, σε μια περιοχή με θερμό και ξηρό κλίμα.

Στη μια πλευρά της κατασκευής υπάρχει μια επιφάνεια εμποτισμένη με θαλασσινό νερό την οποία διαπερνά ο άνεμος, αυξάνοντας την υγρασία και μειώνοντας τη θερμοκρασία του αέρα, ο οποίος στη συνέχεια εισέρχεται στον χώρο των καλλιεργειών. Ταυτόχρονα, στην αντίθετη πλευρά υπάρχει μια δεύτερη επιφάνεια, η οποία εμποτίζεται με θαλασσινό νερό που έχει θερμανθεί στην οροφή από τον ήλιο, δημιουργώντας θερμό, κορεσμένο αέρα, ο οποίος περνά από σωλήνες που έχουν ψυχθεί από ψυχρό θαλασσινό νερό. Λόγω της απότομης αλλαγής της θερμοκρασίας οι υδρατμοί υγροποιούνται και το νερό που δημιουργείται συλλέγεται για την άρδευση των καλλιεργειών. Η χρήση μετεωρολογικών δεδομένων σχετικά με την θερμοκρασία, την υγρασία, την ηλιοφάνεια και τους ανέμους της περιοχής, μπορεί να ακόμη να αυξήσει την αποτελεσματικότητα του συστήματος.

Η τεχνολογία που χρησιμοποιεί το σύστημα δημιουργεί ένα πιο ευνοϊκό μικροκλίμα που ευνοεί την ανάπτυξη καλλιεργειών τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό της κατασκευής, μετατρέποντας άγονες εκτάσεις σε γόνιμες, δίνοντας την δυνατότητα αγροτικής παραγωγής καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου⁷⁸.

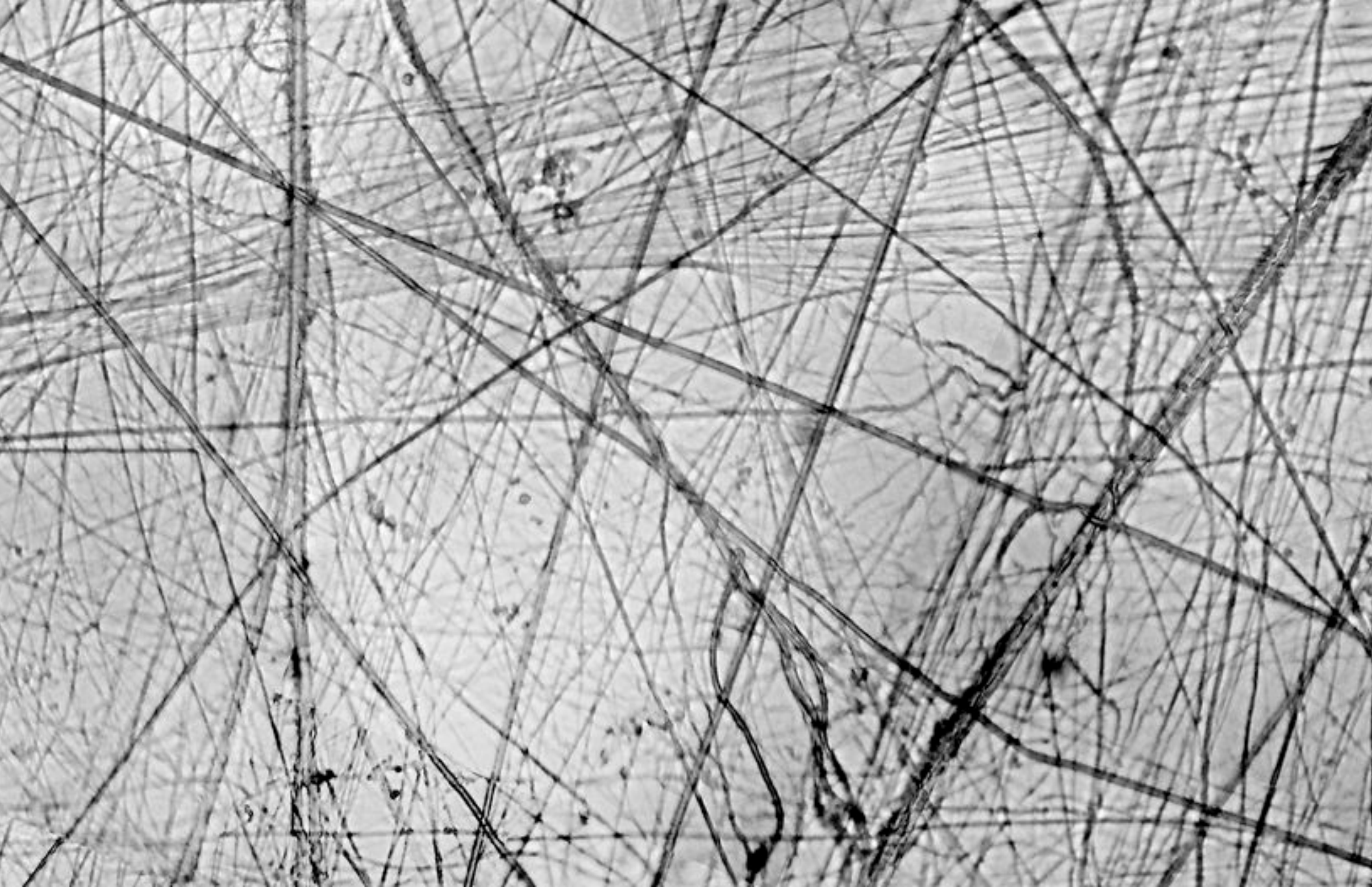


Εικόνα 85. Η λειτουργία του Seawater Greenhouse.

⁷⁸ Seawater Greenhouse | Technology [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://seawatergreenhouse.com/>



Εικόνα 86. Μετά την εγκατάσταση της κατασκευής, η αλλαγή του μικροκλίματος έχει ευνοήσει την ανάπτυξη καλλιεργειών ακόμη και στον εξωτερικό περιβάλλοντα χώρο.



5. ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ



5.1 EDEN PROJECT

Το Eden Project, από τους Grimshaw Architects, αποτελεί ένα μεγάλης κλίμακας έργο, με όγκους σφαιρικής μορφής, στο οποίο εφαρμόστηκαν αρκετές βιομημητικές λύσεις για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που παρουσιάστηκαν.

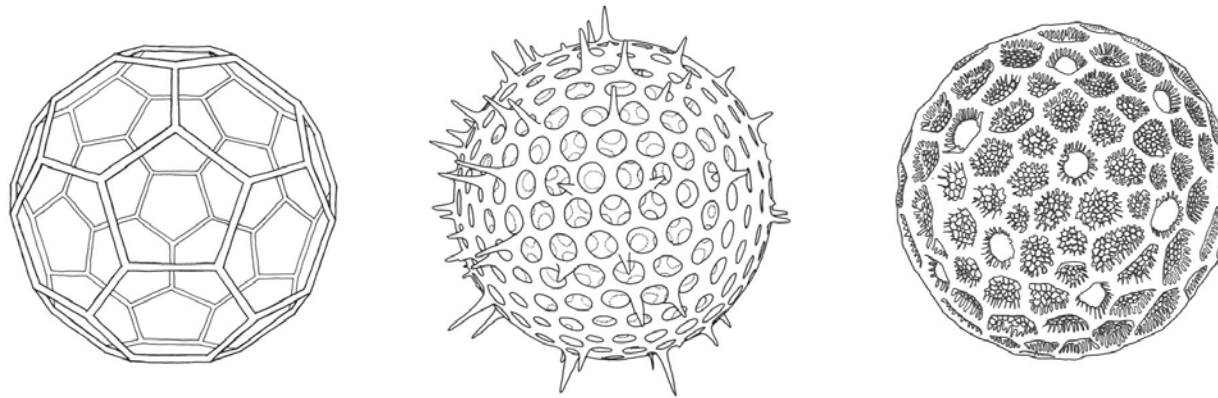
Η πρώτη από αυτές ήταν το ασταθές έδαφος της περιοχής που αποτελούνταν από πηλό, και βρισκόταν ακόμη υπό λατόμευση, κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του έργου. Αυτή η αβεβαιότητα και αστάθεια του εδάφους, εξαιτίας της οποίας δεν μπορούσε να υποστηριχθεί μια συμβατική κατασκευή, οδήγησε σε μια καινοτόμα πρόταση εμπνευσμένη από τις μορφές των σαπουνόφουσκων. Το αποτέλεσμα ήταν μια σειρά φούσκες διαφορετικών διαμέτρων, που προσφέρουν τα απαραίτητα ύψη για την καλλιέργεια φυτών σε διαφορετικά σημεία του χώρου, ενωμένες μεταξύ τους, οι οποίες θα μπορούσαν να προσαρμοστούν στο ανώμαλο ανάγλυφο του εδάφους.

Η επόμενη πρόκληση ήταν η δημιουργία μιας όσο το δυνατόν ελαφρύτερης κατασκευής, αν αναλογιστούμε και το μέγεθος του έργου. Μετά από μια σειρά ερευνών πάνω σε βιολογικές μορφές (Εικόνα 88), η ομάδα κατέληξε στην χρήση του γεωδαιτικού πλέγματος, που έγινε γνωστό από τον αρχιτέκτονα Buckminster Fuller. Το γεωδαιτικό σύστημα, αποτελούμενο από πεντάγωνα και εξαγωνα, θα ήταν ικανό να προσφέρει το λιγότερο δυνατό βάρος, με την μεγαλύτερη δυνατή επιφάνεια κάλυψης της σφαιρικής μορφής του έργου.

Η κάλυψη των μεγάλων εξάγωνων της κατασκευής, δημιούργησε ακόμη μια πρόκληση, καθώς η χρήση του γυαλιού ήταν περιοριστική τόσο λόγω του βάρους του, όσο και των μεγάλων επιφανειών που θα έπρεπε να κατασκευαστούν. Εμπνευσμένη από τα πολύ ανθεκτικά, εύκαμπτα υλικά που χρησιμοποιούνται στη φύση, όπως τους ιστούς της αράχνης ή τις μεμβράνες των κυττάρων, η ομάδα επέλεξε να χρησιμοποιήσει το ETFE · ένα υλικό το οποίο, μέχρι εκείνη τη στιγμή, είχε χρησιμοποιηθεί μόνο σε έργα μικρής κλίμακας. Το ETFE είναι ένα πολυμερές υψηλής αντοχής με το οποίο μπορούν να κατασκευαστούν εξαιρετικά ελαφρές επιφάνειες. Σε κάθε εξάγωνο τοποθετήθηκαν τρία στρώματα τέτοιων επιφανειών, τα οποία φουσκώθηκαν με αέρα για ενισχυμένη ανθεκτικότητα, δημιουργώντας «μαξιλάρια» βάθους 2 μέτρων. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτού του υλικού ήταν πως ενώ ζυγίζει μόλις το 1% του γυαλιού, μπορεί να αντέξει το βάρος ενός αυτοκινήτου, να κατασκευαστεί σε πολύ μεγαλύτερες επιφάνειες από το μεγαλύτερο διαθέσιμο μέγεθος γυάλινης επιφάνειας, ενώ ταυτόχρονα είναι αυτοκαθαριζόμενο.

Η καινοτομία του ETFE υποστήριξε μια ευρύτερη αποτελεσματικότητα στη δομή του έργου · μεγαλύτερες επιφάνειες κάλυψης, οδήγησαν, σε λιγότερη χρήση χαλύβδινων κουφωμάτων, οδηγώντας σε περισσότερο εισερχόμενο φως στον εσωτερικό χώρο, μειώνοντας την ανάγκες θέρμανσής του κατά τους χειμερινούς μήνες.

Η τελική κατασκευή κατάφερε να ζυγίζει λίγο παραπάνω από το βάρος του αέρα που περιέχει ο εσωτερικός της χώρος⁷⁹.



Εικόνα 88. Γεωδαιτικά πλέγματα βιολογικών μορφών, που αποτέλεσαν έμπνευση για το Eden Project.

⁷⁹ Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing.



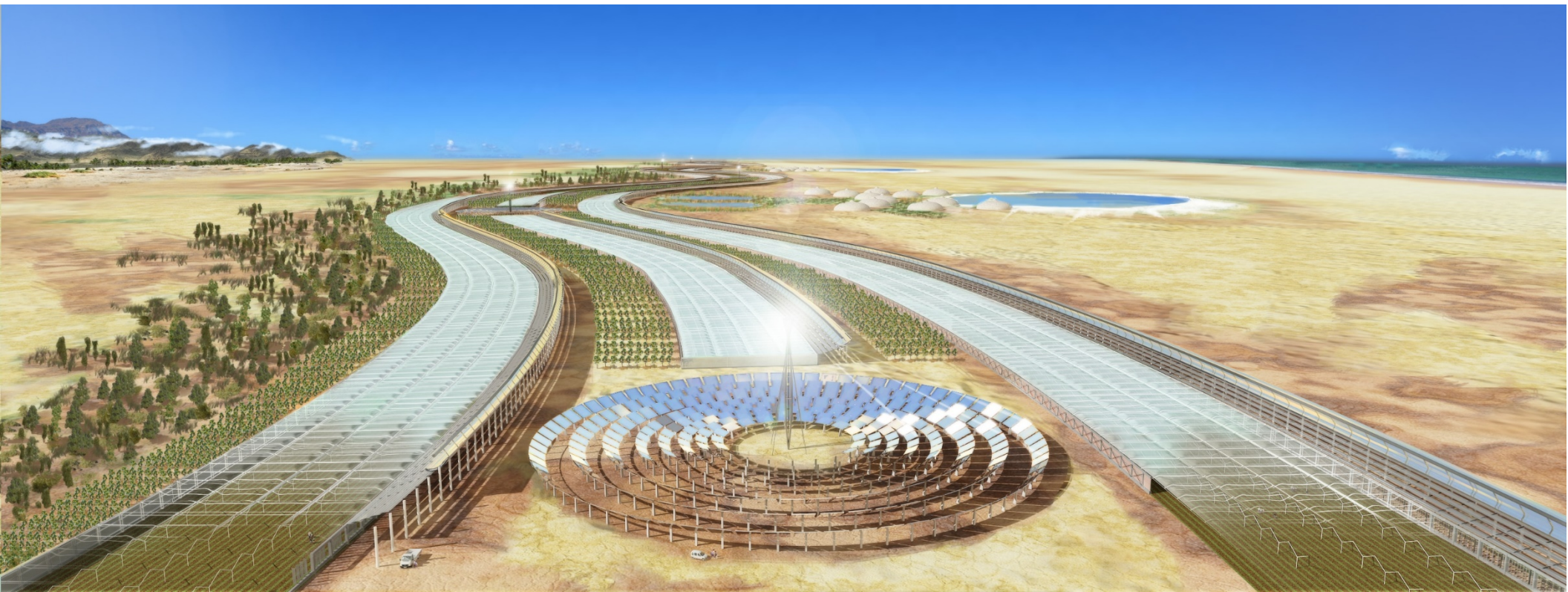
Εικόνα 89. Το κέλυφος του Eden Project, με τις εξάγωνες επιφάνειες



Εικόνα 90. Ο χώρος του Eden Project εσωτερικά.

5.2 SAHARA FOREST PROJECT

Το Sahara Forest Project είναι ένα καινοτόμο πρόγραμμα που έχει εφαρμοστεί τα τελευταία χρόνια σε περιοχές ερήμων στο Κατάρ, την Τυνησία και την Ιορδανία. Χρησιμοποιώντας ήδη υπάρχουσες τεχνολογικές καινοτομίες, και με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας και του θαλασσινού νερού, το πρόγραμμα στοχεύει στη δημιουργία συνθηκών για την καλλιέργεια τροφίμων, νερού και ενέργειας σε ξηρό κλίμα, αντιστρέφοντας σε τοπικό επίπεδο την αυξανόμενη τάση της ερημοποίησης.



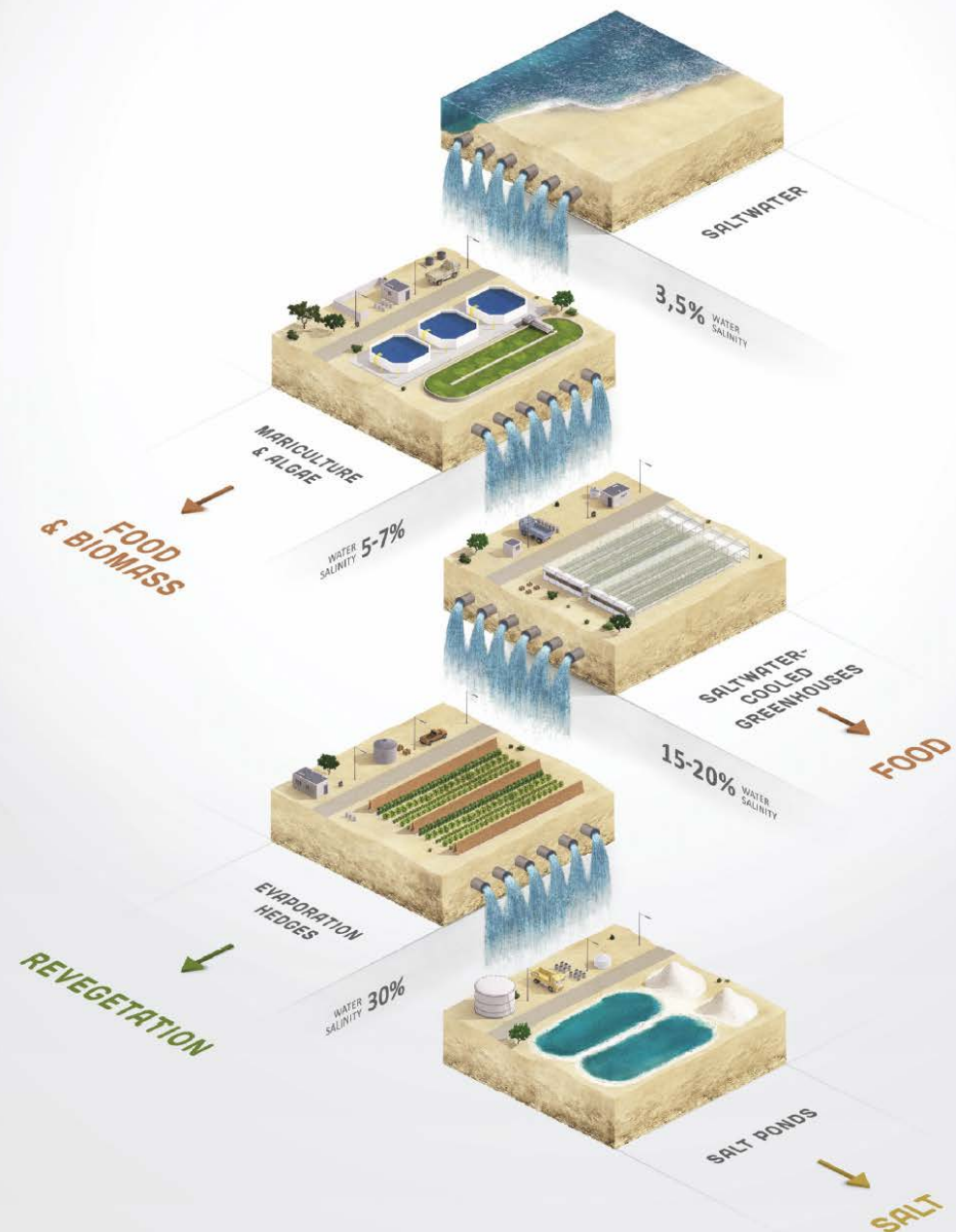
Εικόνα 91. Φωτορεαλιστική απεικόνιση του Sahara Forest Project.

The Saltwater Infrastructure

Πιο συγκεκριμένα, οι τρεις βασικές λειτουργίες του έργου είναι:

- Θερμοκήπια που χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό για την ψύξη των εσωτερικών τους χώρων. Μέσω ενός συστήματος εξάτμισης του θαλασσινού νερού, που λειτουργεί με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας, δημιουργούνται κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας για την ανάπτυξη καλλιεργειών, ενώ ταυτόχρονα παράγονται 10.000 λίτρα νερού την ημέρα για την άρδευσή τους⁸⁰. Έτσι, ακόμη και σε συνθήκες ερήμου, δίνεται η δυνατότητα καλλιέργειας καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου.
- Εκμετάλλευσή της άφθονης ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ενέργειας και θερμότητας.
- Εφαρμογή τεχνολογιών και πρακτικών για τη δημιουργία συνθηκών καλλιέργειας ακόμη και σε εξωτερικούς χώρους, στο ξηρό περιβάλλον της ερήμου⁸¹.

Εικόνα 92 (Δεξιά). Η διαδικασία εκμετάλλευσης του θαλασσινού νερού στο Sahara Forest Project



⁸⁰Sahara Forest Project uses seawater and sunlight to produce drinking water and food [online]. Table Dates. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: www.tabledebates.org/research-library/sahara-forest-project-uses-seawater-and-sunlight-produce-drinking-water-and-food

⁸¹ Sahara Forest Project | Technologies [online]. Sahara Forest Project. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://www.saharaforestproject.com/technologies>

Το έργο αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα βιομίμησης σε επίπεδο οικοσυστήματος, καθώς όπως υπογραμμίζουν και οι δημιουργοί του «η δυνατότητα των οικοσυστημάτων να είναι αναγεννητικά αποτέλεσε πηγή έμπνευσης για την ομάδα, ώστε να σχεδιάσει λύσεις που περνούν από το επίπεδο της βιωσιμότητας στο επίπεδο της αποκατάστασης του περιβάλλοντος».

Το Sahara Forest Project αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα που στηρίζεται στην ανάγκη της ανθρωπότητας να βρει ολιστικές λύσεις για τη διαχείριση προκλήσεων σχετικά με την ενέργεια, την τροφή και το νερό. Επιπλέον, καταφέρνει να προσαρμόζεται στις τοπικές κοινωνίες, καθώς η λειτουργία του βασίζεται στην εργασία διαφόρων επιπέδων εργαζομένων, ενώ μέσω προγραμμάτων εκπαίδευσης εδραιώνει μακροπρόθεσμα κοινωνικο-οικονομικά οφέλη για την τοπική κοινωνία⁸².



Εικόνα 93. Οι χώροι θερμοκηπίων του Sahara Forest Project.

Ολοκληρωμένα έργα όπως τα παραπάνω, αλλά και πολλά άλλα τα οποία βρίσκονται ακόμη σε πειραματικό στάδιο, σηματοδοτούν μια στροφή της αρχιτεκτονικής προς τη βιωσιμότητα, αποδεικνύοντας τον ωφέλιμο ρόλο της βιομίμησης. Ολοένα και περισσότεροι αρχιτέκτονες συνειδητοποιούν την αναγκαιότητα εύρεσης καινοτόμων λύσεων και νέων διεξόδων στην αρχιτεκτονική σκέψη, αναζητώντας νέες τεχνολογίες και νέα υλικά εμπνευσμένα από τη φύση.

⁸² Sahara Forest Project | Restorative Growth [online]. Sahara Forest Project. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://www.saharaforestproject.com/technologies>



6. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Όπως είδαμε σε αρχικό κεφάλαιο της εργασίας, το δομημένο περιβάλλον είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνο για διάφορα περιβαλλοντικά ζητήματα που εντείνουν την κλιματική αλλαγή, με μεγάλα ποσά ενέργειας, υλικών και πόρων να σπαταλούνται εξ 'αίτιας αυτού, οδηγώντας στην περιβαλλοντική παρακμή. Η ανάγκη επαναπροσδιορισμού και επαναξιολόγησης των τρόπων που δημιουργούμε και διατηρούμε το δομημένο χώρο γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική.

Η σχέση της αρχιτεκτονικής με τη φύση υπάρχει εδώ και πολλούς αιώνες, με πολυάριθμους αρχιτέκτονες να έχουν εμπνευστεί από βιολογικές μορφές στο παρελθόν. Ο ρόλος όμως που καλείται να διαδραματίσει η δύναμη της φύσης στην αρχιτεκτονική στη σημερινή εποχή είναι αρκετά πιο ουσιαστικός. Η βιομίμηση έχει ως στόχο να εξυγιάνει την προβληματική σχέση του δομημένου περιβάλλοντος με τη φύση και τον άνθρωπο, και ιδανικά να δώσει τη δυνατότητα στα κτήρια να δρουν ευεργετικά στο περιβάλλον. Οι φυσικοί οργανισμοί, οι συμπεριφορές τους και οι πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους αλλά και μεταξύ των οικοσυστημάτων που τα απαρτίζουν, αποτελούν μια άμεση πηγή γνώσης και παραδειγματισμού για τον άνθρωπο με πολλά υποσχόμενα θετικά αποτελέσματα. Όπως εξετάσαμε, η βιομίμηση μπορεί να λειτουργήσει σε πολλά επίπεδα και κλίμακες, είτε πιο επιφανειακά είτε βαθύτερα, αξιοποιώντας την ευφυΐα του βιολογικού κόσμου προς όφελος της αρχιτεκτονικής και του ανθρώπου.

Παρότι υπάρχουν αρκετά αξιόλογα αρχιτεκτονικά παραδείγματα που έχουν στηριχθεί σε βιομιμητικές πρακτικές, μπορούμε να συμπεράνουμε πως η βιομίμηση δεν έχει κερδίσει αρκετό έδαφος ακόμη στην αρχιτεκτονική σκέψη. Ενώ η βιώσιμη αρχιτεκτονική και ο βιοκλιματικός σχεδιασμός μπορούν να δώσουν ικανοποιητικές μεμονωμένες λύσεις σε νέα αλλά και ήδη υπάρχοντα κτήρια για τη βελτίωση της ενεργειακής τους αποδοτικότητας, η βιομιμητική λογική θέλει να κάνει ένα βήμα παραπέρα, και να λάβει υπόψιν τις πολύπλοκες αλληλοσυσχετίσεις των κτηρίων με τη φύση και τους ανθρώπους, ώστε όχι μόνο να μην λειτουργεί εις βάρος τους, αλλά αντίθετα να λειτουργεί αναγεννητικά προς αυτούς. Η τεχνολογική εξέλιξη, η εξέλιξη των ψηφιακών μέσων που έχουμε στη διάθεσή μας αλλά και οι νέοι τρόποι δόμησης και δημιουργίας υλικών μπορούν σήμερα περισσότερο από ποτέ να αναδείξουν τη δύναμη της βιομίμησης και να βοηθήσουν στην εξέλιξή της.



7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

7.1 ΒΙΒΛΙΑ

- Benyus, J.M., (1997). Biomimicry Innovation Inspired by Nature. New York: Morrow
- Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing
- Thompson, D., (1917). On Growth and Form. Cambridge: Cambridge University Press
- Gruber, P., (2011). Biomimetics in architecture | Architecture of life and buildings. Mörlenbach: Springer-Verlag/Wien
- Buchanan, P., (2006). Ten Shades of Green: Architecture and the Natural World. 1st ed. New York: Architectural League of NY
- Martin K., (2006). Leonardo da Vinci-The Marvellous Works of Nature and Man.
- Oxford: Oxford University Press
- Mazzoleni, I., (2013). Architecture Follows Nature-Biomimetic Principles for Innovative Design, Florida: CRC Press
- McQuaid, M., (1993). Santiago Calatrava: Structure and expression. New York: Harry N. Abrams
- Meissner, I. Möller, E., (2015). Frei Otto - forschen, bauen, inspirieren / a life of research, construction and inspiration. München: Detail
- Montaner J. M., (2014). Ιστορία της σύγχρονης αρχιτεκτονικής. Αθήνα: εκδοτικός οίκος ΝΕΦΕΛΗ
- Neuman, R., (1996). Grolier Multimedia Encyclopedia. Connecticut: Grolier Electronic Publishing

7.2 ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

- Achim, M., Reichert, S., (2012). HygroScope: Meteorosensitive Morphology. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <http://www.achimmenges.net/?p=5083>
- Achimmenges, (n.d). BUGA Fibre Pavilion 2019. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <http://www.achimmenges.net/?p=21027>
- ARCHITECT STAFF, (2017). This Week in Tech: Will Bioluminescent Organisms Help Illuminate Our Future Buildings? [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: https://www.architectmagazine.com/technology/this-week-in-tech-will-bioluminescent-organisms-help-illuminate-our-future-buildings_o
- Architecture2030.org. (2021). Why The Building Sector? Architecture 2030. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: https://architecture2030.org/buildings_problem_why/
- Architizer, (2021). How Bad for the Planet Are Your Building Materials?. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://architizer.com/blog/practice/materials/building-materials-carbon-emissions/>
- Benyus, J.M., A Biomimicry Primer [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: https://biomimicry.net/b38files/A_Biomimicry_Primer_Janine_Benyus.pdf
- Biomimicry 3.8. What is biomimicry? [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://biomimicry.net/what-is-biomimicry/>
- Biomimicry Institute. What is biomimicry? [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://biomimicry.org/what-is-biomimicry/>
- Calatrava, S., LYON-SAINT EXUPÉRY AIRPORT RAILWAY STATION. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://calatrava.com/projects/lyon-saint-exupery-airport-railway-station-colombier-saugnieu.html>
- Center for Climate and Energy Solutions. (2021). Renewable Energy. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://www.c2es.org/content/renewable-energy/>
- DP Architects, Esplanade – Theatres on the Bay [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://dpa.com.sg/projects/esplanadetheatresonthebay/>

- Eitan, T., (2021). The Future of Architecture: 4 Ways Technology Will Change Our Industry [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://architizer.com/blog/practice/tools/technology-will-change-the-architecture-industry/>
- Engelhard, A., Cradle to Cradle Sustainable from the outset. [online] [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://www.schueco.com/gr/investors/sustainability/sustainability/cradle-to-cradle>
- European Commission. (2021). *Causes of climate change*. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: https://ec.europa.eu/clima/change/causes_en
- Freshwater Crisis [online]. National Geographic. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/freshwater-crisis>
- Glowee (2021). Enlightened by the sea! [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://www.glowee.eu/>
- HK / SK, (2011). Gaudí and catenary models. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://atmosphericfront.wordpress.com/2011/10/30/gaudi-catenary-curves-and-other-sources-of-inspiration/>
- Jean Nouvel. Arab World Institute. [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <http://www.jeannouvel.com/en/projects/institut-du-monde-arabe-ima/>
- Jenny, B., (2021). This is the first house to be 3D printed from raw earth. [online]] [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://www.itsnicethat.com/news/tecla-house-mario-cucinella-was-architecture-270421>
- Kretzer, M., (2013). BIOLUMINESCENCE. [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <http://materiability.com/bioluminescence/>
- Lloyd Crossing Sustainable Urban Design Plan & Catalyst Project, (2004) [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://prosperportland.us/wp-content/uploads/2016/07/Lloyd-Crossing-Plan.pdf>.
- Mick Pearce, Eastgate Development Harare [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <http://www.mickpearce.com/Eastgate.html>
- NASA, (2021). Carbon Dioxide Concentration. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>

- Oxman. (2019). Totems. [online] [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://oxman.com/projects/totems>.
- Oxman. (2020). AGUAHOJA. [online] [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://oxman.com/projects/aguahoja>
- Saamia, M., (2020). Celebrating Santiago Calatrava Valls' nature inspired architectural feats. [online]. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://www.stirworld.com/inspire-people-celebrating-santiago-calatrava-valls-nature-inspired-architectural-feats>
- Sahara Forest Project | Restorative Growth [online]. Sahara Forest Project. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://www.saharaforestproject.com/technologies>
- Sahara Forest Project | Technologies [online]. Sahara Forest Project. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://www.saharaforestproject.com/technologies>
- Sahara Forest Project uses seawater and sunlight to produce drinking water and food [online]. Table Dates. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: www.tabledebates.org/research-library/sahara-forest-project-uses-seawater-and-sunlight-produce-drinking-water-and-food
- Seawater Greenhouse | Technology [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://seawatergreenhouse.com/>
- The American Institute of Architects. Lloyd Crossing Sustainable Design Plan [online]. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://www.aiatopten.org/node/159>
- Wands.gr. Εξωτερική Επένδυση Thermowood. [online] [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://www.wands.gr/el/product/exoteriki-ependysi-thermowood>
- Water Scarcity [online]. United Nations. [Τελευταία επίσκεψη 27/8/21]. Διαθέσιμο στο: <https://www.unwater.org/water-facts/scarcity>
- Wyss Institute, (2014). Manufacturing a solution to planet-clogging plastics. [online]] [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://wyss.harvard.edu/news/manufacturing-a-solution-to-planet-clogging-plastics/>

7.3 ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΑΡΘΡΑ

- Duygunur Koç, A. and Semra Arslan, S., (2018), A Biomimetic Approach to Rainwater Harvesting. Eurasian Journal of Civil Engineering and Architecture, 2 (1), 27 - 39. [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://dergipark.org.tr/en/pub/ejcar/issue/38247/421981>
- Ju, K. et al, (2012). A multi-structural and multi-functional integrated fog collection system in cactus. Nature Communications 3(1): 1247. [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/publication/233849188_A_multi-structural_and_multi-functional_integrated_fog_collection_system_in_cactus
- Karam M., A., Muhammad, A., Hazreena, H., Abdul Malik, A., (2017). Biomimetic building skins: An adaptive approach. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 79 (2017): 1472-1491. [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117306640>
- Lienhard, J. et al., (2011). Flectofin: A hingeless flapping mechanism inspired by nature. Bioinspiration and Biomimetics [online]. 6 (4). [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/publication/51839563_Flectofin_A_hingeless_flapping_mechanism_inspired_by_nature
- Moheb, S. A., Amr Y., (2016). Biomimicry as an approach for bio-inspired structure with the aid of computation. Alexandria Engineering Journal, 55 (1), 707-714, [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016815001702#!>
- Panchuk, N., (2006). An Exploration into Biomimicry and its Application in Digital & Parametric [Architectural] Design. M.SC thesis, University of Waterloo. [Τελευταία επίσκεψη: 22/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/2876/ntpanchu2006.pdf;sequence=1>
- Pasquale D. P., (2012) FORM FOLLOWS STRUCTURE:BIOMIMETIC EMERGENT MODELS OF ARCHITECTURAL PRODUCTION, Louisiana Tech University. [Τελευταία επίσκεψη: 26/08/2021]. Διαθέσιμο στο: <https://www.acsa-arch.org/proceedings/Fall%20Conference%20Proceedings/ACSA.FALL.12/ACSA.FALL.12.45.pdf>

- Pedersen Zari, M., (2007). Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability.
- Schmidt-Nielsen K. et al, (1981). Desaturation of exhaled air in camels. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B.* 211(1184):305-19. [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021].
Διαθέσιμο στο:
https://www.researchgate.net/publication/17074113_Desaturation_of_Exhaled_Air_in_Camels
- Tokuç, A., Özkaban, F., Çakır, Ö., (2018). Biomimetic Facade Applications for a More Sustainable Future. *Interdisciplinary Expansions in Engineering and Design With the Power of Biomimicry*. [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο:
https://www.researchgate.net/publication/324093262_Biomimetic_Facade_Applications_for_a_More_Sustainable_Future
- Vincent, J. F. V., Bogatyrev, O., Pahl, A.-K., Bogatyrev, N. R. & Bowyer, A., (2005), Putting Biology into TRIZ: A Database of Biological Effects, *Creativity and Innovation Management*, 14 (1), 66-72. [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο:
https://www.researchgate.net/publication/227675558_Putting_Biology_into_TRIZ_A_Database_of_Biological_Effects
- Vincent, J. F. V., (2009). Biomimetic Patterns in Architectural Design. *Architectural Design* 79(6):74 - 81. [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021]. Διαθέσιμο στο:
https://www.researchgate.net/publication/229907363_Biomimetic_Patterns_in_Architectural_Design
- Weinstock, M., (2006), Self-organisation and the structural dynamics of plants. *Architectural Design*. 76(2),26 - 33. [Τελευταία επίσκεψη: 27/08/2021].
Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/publication/227893651_Self-organisation_and_the_structural_dynamics_of_plants

7.4 ΕΙΚΟΝΟΓΡΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

Εικόνα εξωφύλλου:

https://images.adsttc.com/media/images/5837/ee5d/e58e/ce83/5000/011c/slideshow/31_Mask_5_close.jpg?1480060494&fbclid=IwAR1nyn1ImUZSiNR8bLPq2vl-hV5_FH7_a0InvLW9FMd2ZLR_weiM54sZ8PE

Εικόνα κεφαλαίου 1: https://i.dailymail.co.uk/i/pix/2012/12/18/article-2250006-169063CD0000005DC-22_634x423.jpg

Εικόνα κεφαλαίου 2: http://www.iaacblog.com/wp-content/uploads/2020/06/looking-through-natures-eyes-presentation_page_1.jpg

Εικόνα κεφαλαίου 3: https://files.readvid.com/file/site-uploads/readvid/images/air-pollution-101/featured/air-pollution-101_webp.jpg

Εικόνα κεφαλαίου 4: <https://i.pinimg.com/564x/1b/34/1e/1b341e3bd1481719b842c9bad7073462.jpg>

Εικόνα κεφαλαίου 5: <https://www.arch2o.com/wp-content/uploads/2015/08/Arch2O-icditke-research-pavilion-2014-2015-university-of-stuttgart-14.jpg>

Εικόνα κεφαλαίου 6: https://static.scientificamerican.com/sciam/cache/file/B7E980C5-B182-4A2E-80369F2AC535EB35_source.jpg?w=2000&h=1123&18382C88-60B0-48A0-8368A7A449778311

Εικόνα κεφαλαίου 7: <https://oxman.imgix.net/3a9dd72e-477f-4b94-b4bd-f2e9f3061915/vespersi-web-1as1.jpg?auto=compress%2Cformat&fit=min&fm=jpg&q=80&rect=0%2C153%2C4499%2C2532&w=1919>

Εικόνα 1: <https://virginiaduran.files.wordpress.com/2013/11/virginia-duran-blog-chicago-best-buildings-for-architects-aqua-tower-by-studio-gang-corner.jpg>

Εικόνα 2: <https://www.voyagevirtuel.co.uk/egypt/bigphotos/esna-6834.jpg>

Εικόνα 3: https://www.nlm.nih.gov/exhibition/historicalanatomies/Images/1200_pixels/peacock_43.jpg

Εικόνα 4: <https://editions.covecollective.org/sites/default/files/gallery/codex.jpg>

Εικόνα 5: <https://bitesizebio.com/43796/simple-and-compound-microscopes/>

Εικόνα 6:

<https://assets.atlasobscura.com/media/W1siZiZlslVwbG9hZHMvYXNzZXRzLzA1YzNiOTgyLWlwZWUuNGE2Ny1iYjU2LTg4NmFmOWRlYzUzMDc5ZjA2ZGE3YjVhYzYzYzAyZV9VbnRpdGxIZCBjb2xsYWdlICg0MykucG5nIl0sWyJwliwiY29udmVydClslJdLFsicClslmNvbnZlcnQiLCItcXVhbGl0eSA4MSAtYXV0by1vcmlbnQiXSxblnAiLCJOaHVtYilsljEyODB4PiJdXQ/Untitled%20collage%20%2843%29.png>

Εικόνα 7: <https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5e1e5ef4c84b953ac52564ba/1585069368694-XM2RA1DKOB8KNBX3SIF6/1868-Jean-Marie+LeBris-Albatrossll.jpg>

Εικόνα 8: <https://visit.alvaraalto.fi/en/destinations/villa-mairea/>

Εικόνα 9: <https://www.flickr.com/photos/eduardopompeo/5434935256>

Εικόνα 10: <https://arquiscopio.com/archivo/2012/07/01/ciudad-caminante/?lang=en>

Εικόνα 11: <https://thehappysnapper.org/spain-barcelona-gaudis-casa-batllo/>

Εικόνα 12: http://oa.upm.es/703/1/Huerta_Art_002.pdf

Εικόνα 13: http://oa.upm.es/703/1/Huerta_Art_002.pdf

Εικόνα 14: <https://www.gushiciku.cn/dl/0znB4>

Εικόνα 15: <https://diagst.com/post/113389677306/frei-ottos-flexible-column-c-1963-via-rndrd>

Εικόνα 16: https://www.architectmagazine.com/design/nine-projects-by-pritzker-prize-winning-architect-frei-otto_o

Εικόνα 17: Meissner, I. Möller, E., (2015). Frei Otto - forschen, bauen, inspirieren / a life of research, construction and inspiration. München: Detail

Εικόνα 18: https://it.m.wikipedia.org/wiki/File:Sciences_museum_of_valencia.jpg

Εικόνα 19: <https://en.wikiarquitectura.com/building/tgv-station-lyon-saint-exupery/>

Εικόνα 20: <https://tile.loc.gov/image-services/iiif/service:pnnp:highsm:40100:40190/full/pct:25/0/default.jpg>

Εικόνα 21: <https://calatrava.com/files/projects/sevilla-kuwait-pavillion/sevilla-kuwait-pavillion-08.jpg>

Εικόνα 22: <https://ourworldindata.org/>

Εικόνα 23: https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S221242091830712X-fx5_lrg.jpg

Εικόνα 24: <https://moonviewsustainability.blogspot.com/p/climate.html>

Εικόνα 25: https://architecture2030.org/buildings_problem_why/

Εικόνα 26: <https://architizer.com/blog/practice/materials/building-materials-carbon-emissions/>

Εικόνα 27: <https://www.coe.int/fr/web/world-forum-democracy/-/limate-change-and-forced-migration-a-crisis-in-the-making>

Εικόνα 28: <https://thepatterncollective.com/products/marianas-whistler>

Εικόνα 29: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Taking-its-clues-from-nature--Mercedes-Benz-bionic-car.xhtml?oid=9361190>

Εικόνα 30: <https://slivkisineta.ru/wp-content/uploads/2020/11/kuzovok-kubik-5.jpg>

Εικόνα 31: www.jeremyjordan.me/content/images/2016/09/nature-sunny-water-summer.jpg

Εικόνα 32: www.sciencemag.org/sites/default/files/styles/article_main_image_-_1280w__no_aspect_/public/Minden_90679648-1280x720.jpg?itok=Nn_-khsJ

Εικόνα 33: <https://nocloudinthesky.files.wordpress.com/2013/02/namib-desert-beetle-1.png>

Εικόνα 34: <https://nocloudinthesky.files.wordpress.com/2013/02/namib-desert-beetle-2.png>

Εικόνα 35: http://s.kaskus.id/images/2015/03/22/7578147_201503221013460342.png

Εικόνα 36: <http://www.mickpearce.com/assets/images/eastgate5-1400x685-40.jpg>

Εικόνα 37: <https://www.youtube.com/watch?v=62OomdSZzBs>

Εικόνα 38: <https://mithun.com/project/lloyd-crossing-sustainable-urban-design-plan>

Εικόνα 39: <https://prosperportland.us/wp-content/uploads/2016/07/Lloyd-Crossing-Plan.pdf>

Εικόνα 40: <https://prosperportland.us/wp-content/uploads/2016/07/Lloyd-Crossing-Plan.pdf>

Εικόνα 41: <https://prosperportland.us/wp-content/uploads/2016/07/Lloyd-Crossing-Plan.pdf>

Εικόνα 42: <https://prosperportland.us/wp-content/uploads/2016/07/Lloyd-Crossing-Plan.pdf>

- Εικόνα 43: <https://prosperportland.us/wp-content/uploads/2016/07/Lloyd-Crossing-Plan.pdf>
- Εικόνα 44: Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing
- Εικόνα 45: <https://www.gardeningknowhow.com/wp-content/uploads/2009/07/control-bamboo.jpg>
- Εικόνα 46: Self-Organisation and the Structural Dynamics of Plants
- Εικόνα 47: Thompson, D., (1917). On Growth and Form. Cambridge: Cambridge University Press
- Εικόνα 48: Thompson, D., (1917). On Growth and Form. Cambridge: Cambridge University Press
- Εικόνα 49: <http://scadesign.blogspot.com/2009/02>
- Εικόνα 50: Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing
- Εικόνα 51: <https://andres.harris.cl/about/32-2/>
- Εικόνα 52: https://www.endocrinologyadvisor.com/wp-content/uploads/sites/9/2020/08/bone-tissue_G_1133641727-1024x711.jpg
- Εικόνα 53: <https://nanohub.org/app/site/resources/2011/10/12273/3077/4.png>
- Εικόνα 54: Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing.
- Εικόνα 55: <http://www.achimmenges.net/?p=21027>
- Εικόνα 56: <https://www.mentalfloss.com/article/501178/these-cooling-workout-clothes-respond-your-sweat>
- Εικόνα 57: <http://www.achimmenges.net/?p=5083>
- Εικόνα 58: <https://oxman.com/projects/lazarus>
- Εικόνα 59: <https://oxman.com/projects/aguahoja>
- Εικόνα 60: Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London, UK: Riba Publishing..
- Εικόνα 61: https://www.dreso.com/fileadmin/user_upload/c2cen.png
- Εικόνα 62: <https://www.wallpaper.com/architecture/tecla-3d-printed-house-mario-cuccinella-italy>
- Εικόνα 63: <http://www.bbc.com/earth/story/20140909-life-in-blue?ocid=twert>

Εικόνα 64: <https://i.pinimg.com/564x/e6/f4/d3/e6f4d3b366f600fcf13585dd8f01ace6.jpg>

Εικόνα 65: https://www.bees.gr/wp-content/uploads/2007/10/vespa_Crabro_Nest.jpg

Εικόνα 66:

www.dpa.com.sg/sites/dpa/img/DPA%20Singapore%20Projects/Esplanade%20Theatres%20on%20the%20Bay/DPA_TheEsplanade_Carousel_20180702041020.jpg

Εικόνα 67: https://www.mero.de/images/Bausysteme/Referenzen/arts_centre_singapore/4_arts_centre.jpg

Εικόνα 68: Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing

Εικόνα 69: Biomimetic Facade Applications for a More Sustainable Future

Εικόνα 70: <http://www.soma-architecture.com/pool/images/soma-EXPO-Kim-01.jpg>

Εικόνα 71: <https://oxman.com/projects/vespers-ii>

Εικόνα 72: <http://materiability.com/>

Εικόνα 73: <https://inhabitat.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2015/06/Luminosity-by-Joseph-Michael-12.jpg>

Εικόνα 74: <https://www.glowee.eu/>

Εικόνα 75: <http://materiability.com/>

Εικόνα 76: <http://www.jeannouvel.com/en/projects/institut-du-monde-arabe-ima/>

Εικόνα 77: <https://www.solaripedia.com/images/large/6201.jpg>

Εικόνα 78: <https://oxman.com/projects/totems>

Εικόνα 79: <https://oxman.com/projects/totems>

Εικόνα 80: <https://oxman.com/projects/totems>

Εικόνα 81: <https://www.flickr.com/photos/oxfam/8655301546>

Εικόνα 82: Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing

Εικόνα 83: <https://www.researchgate.net/profile/Jie-Ju/publication/233849188/figure/fig4/AS:281304793927683@1444079697183/In-situ-optical-microscopic-observation-of-the-directional-water-collection-on-the-cactus.png>

Εικόνα 84: Pawlyn, M., (2016). Biomimicry in architecture. 2nd ed. London: Riba Publishing

Εικόνα 85: <https://seawatergreenhouse.com/technology>

Εικόνα 86: <https://seawatergreenhouse.com/oman>

Εικόνα 87: <https://cdn.archilovers.com/projects/8cb414b0-5243-4ed9-b85e-e7aa7f631e44.jpg>

Εικόνα 88: Biomimicry in Architecture, Michael Pawlyn

Εικόνα 89: <https://im0-tub-com.yandex.net/i?id=70ee910a1a656102b44236126414d01a&n=13&exp=1>

Εικόνα 90: https://divisare-res.cloudinary.com/images/c_limit,f_auto,h_2000,q_auto,w_3000/v1/project_images/4837600/96008_N12/grims-haw-architects-the-edden-project.jpg

Εικόνα 91: <https://atlasofthefuture.org/wp-content/uploads/2015/07/SFP-Vision.jpg>

Εικόνα 92: https://www.saharaforestproject.com/wp-content/uploads/2015/03/synergies_illustration_01.jpg

Εικόνα 93: https://atlasofthefuture.org/wp-content/uploads/2021/01/37079916805_9964f9e358_c.jpg

