



Πολυτεχνείο της Κρήτης - Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών - Απρίλιος 2016

# Η Συμβολή του Frei Otto στην Εύρεση (της) Μορφής και στη Σύγχρονη Μορφογένεση



Φιοράκης Κωνσταντίνος

Γιαννούδης Σωκράτης



# Περιεχόμενα

Περιεχόμενα .....	4
Εισαγωγή .....	8
1 Θέμα.....	9
2 Δομή.....	10
3 Μεθοδολογία .....	11
Ο Frei Otto .....	14
1 Η Ζωή του .....	15
2 Η Άποψη του .....	25
3 Η Μορφή .....	28
4 Βέλτιστες Κατασκευές.....	33
Η Έρεση (της) Μορφής.....	38
1 Ελάχιστες Επιφάνειες.....	39
1.1 Πειραματικό Μοντέλο Φιλμ Σαπουνιού.....	39
1.2 Τέντες .....	41
1.3 Δικτυωτές Κατασκευές .....	44
2 Φουσκωτές Επιφάνειες .....	52
2.1 Πειραματικές Συσκευές για τη Δημιουργία Φουσκωτών Μορφών .....	52
2.2 Φουσκωτές Κατασκευές .....	54
3 Κρεμαστές Μορφές.....	59
3.1 Μέθοδοι Εύρεσης Μορφής .....	59
3.2 Κρεμαστές Κατασκευές .....	59
4 Θολωτές Μορφές .....	64
4.1 Μέθοδοι Εύρεσης Μορφής .....	64
4.2 Κατασκευές Καμάρων, Θόλων και Κελυφών .....	66
5 Συστήματα Περιοχών και Δίκτυα Διαδρομών .....	73

Περιεχόμενα	Θέμα
5.1	Στοιβες Άμμου .....73
5.2	Προσομοίωση Εδαφικών Καταλήψεων.....75
5.3	Συστήματα Διαδρομών.....77
5.4	Διακλαδωτές Κατασκευές .....80
5.5	Ανάλυση και Επεξήγηση Οικισμών .....81
Το Σήμερα..... 88	
1	Σύγχρονη Θεωρία .....89
2	Παραδείγματα Αρχιτεκτόνων .....93
3	Material Computation Design .....97
Συμπεράσματα..... 108	
Πηγές Εικόνων..... 114	
1	Frei Otto .....115
2	Η Εύρεση (της) Μορφής .....115
3	Το Σήμερα .....117
Βιβλιογραφία..... 120	



# Εισαγωγή

## 1 Θέμα

Αναρωτώμενοι τι είναι αυτό που αποκαλούμε «φυσική μορφή» εγείρονται πολλά θέματα. Η απάντηση είναι προφανής στις περιπτώσεις των δομών που έχουν δημιουργηθεί «από μόνες τους», από τη μακροκλίμακα των ουράνιων σωμάτων μέχρι τη μικροκλίμακα των μορίων και των ατόμων. Αποκαλούμε φυσικό το ηλιακό μας σύστημα, ένα βουνό ή ένα ποτάμι, έναν μονοκύτταρο και έναν πολυκύτταρο οργανισμό, τον τρόπο με τον οποίο αυτοί οι οργανισμοί συμπεριφέρονται και δημιουργούν κοινότητες, κατασκευές, κοκ. Για παράδειγμα, η φωλιά που δημιουργούν τα πτηνά θεωρείται ως φυσική κατασκευή. Αντιθέτως, μια ανθρώπινη κατασκευή θεωρείται τεχνητή. Σε αυτό το σημείο εντοπίζεται μια εσφαλμένη ερμηνεία. Είναι σαν να θεωρούμε τον άνθρωπο ένα ξένο κομμάτι της φύσης. Επομένως, εγείρει το εξής ερώτημα: υπάρχει κάποια «φυσική» κατασκευή που έχει προκύψει ή να μπορεί να προκύψει από τον άνθρωπο, ώστε να θεωρηθεί και πάλι μέρος της φύσης; Και αν υπάρχει ποια μπορεί να είναι; Εστιάζοντας το ερώτημα στον τομέα της αρχιτεκτονικής προκύπτει το θέμα της ερευνητικής εργασίας.

Η απάντηση του πρώτου ερωτήματος βρίσκεται στο συνολικό έργο του Frei Otto, εγείρει όμως περισσότερα ερωτήματα. Τι ορίζεται ως φυσική κατασκευή; Ποιες είναι οι ανθρώπινες «φυσικές» κατασκευές; Πως μπορεί ο άνθρωπος να σχεδιάσει κατασκευές με «φυσικό» τρόπο; Ποιες είναι οι μεθοδολογίες που παράγουν φυσικές μορφές; Τι αρχιτεκτονικές κατασκευές έχουν δημιουργηθεί με αυτόν τον τρόπο; Γιατί να απασχολήσουν τους αρχιτέκτονες οι φυσικές κατασκευές; Αφού απαντηθούν αυτές οι ερωτήσεις εγείρουν άλλα ερωτήματα σχετικά με τη σύγχρονη εποχή. Έχει αναπτυχθεί κάποια αντίστοιχη θεωρία; Έχουν εξελιχθεί οι μεθοδολογίες του Otto; Αν ναι, από ποιους και πως; Πως τους έχει επηρεάσει το έργο του Otto; Υπάρχει κάποιος που ξεχωρίζει; Αν ναι, με ποιον τρόπο ξεχωρίζει; Το πιο σημαντικό ερώτημα όμως παραμένει το εξής: για ποιο λόγο οι φυσικές κατασκευές αποτελούν πολύτιμη και χρήσιμη πηγή πληροφόρησης και έμπνευσης στην αρχιτεκτονική;

Ο πρώτος αρχιτέκτονας που μελέτησε διεξοδικά όλων των ειδών τις φυσικές μορφές προκειμένου να απαντήσει στο παραπάνω ερώτημα ήταν ο Frei Otto. Η ερευνητική εργασία «ακολουθεί» το έργο του Otto και βρίσκει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με το θέμα. Η φυσική μορφή είναι κάτι που απασχόλησε πολύ τον Otto και αυτό φαίνεται από τον όγκο των βιβλίων που εξέδωσε σε όλη τη διάρκεια της ζωής του. Έγινε πασίγνωστος στο παγκόσμιο στερέωμα για την οροφή του ολυμπιακού σταδίου του Μονάχου και του εκθεσιακού κέντρου στο Mannheim, όμως όσοι γνωρίζουν το έργο του καλύτερα, θαυμάζουν τις μεθόδους εύρεσης (της) μορφής που ανέπτυξε καθώς και την ενδελεχή έρευνα πάνω στους ζωντανούς οργανισμούς. Μετά την ανασκόπηση του έργου του Otto η εργασία συναντά τη σύγχρονη θεωρία σχετικά με τη γένεση της μορφής, στην οποία εντάσσονται απόλυτα οι μεθοδολογίες του Otto, εντοπίζει τους σύγχρονους αρχιτέκτονες που έχουν επηρεαστεί από τον Otto και μας παρουσιάζει τα αντίστοιχα έργα τους. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στο τέλος του κυρίως κειμένου στον Menges καθώς αποτελεί έναν σύγχρονο καθηγητή αρχιτεκτονικής που διευρύνει το πεδίο της μορφογένεσης, στις ίδιες ιδεολογικές βάσεις με τον Otto εφαρμόζοντας όμως μια διαφορετική μεθοδολογία, αξιοποιώντας τις δυνατότητες των σύγχρονων υπολογιστών, των επιστημών της βιολογίας και των υλικών, καθώς και των ρομποτικών βραχιόνων στην κατασκευή.

Η εργασία αυτή παρουσιάζει για αρκετούς λόγους ενδιαφέρον. Πρώτον, οι μέθοδοι σχεδιασμού και εύρεσης μορφής αποτελούν μια οικολογική προσέγγιση στον σχεδιασμό και στην κατασκευή



κιρίων σε αντίθεση με τις καθιερωμένες μεθόδους. Δεύτερον, παρουσιάζονται οκτώ διαφορετικά μοντέλα εύρεσης μορφής αποτελώντας σημαντικά σχεδιαστικά εφόδια στην αρχιτεκτονική δημιουργία. Επιπλέον, τα μοντέλα αυτά είναι εύκολα στην κατασκευή τους, απλά στη λογική τους και βοηθούν στην κατανόηση των σύνθετων εννοιών της εύρεσης μορφής, της αυτό-οργάνωσης, της μορφογένεσης και της ύλης ως δημιουργού μορφής. Τρίτον, βλέπουμε ποια είναι τα σημαντικά μοντέλα και πως αξιοποιούνται από τους σύγχρονους αρχιτέκτονες. Τέταρτον, ερχόμαστε σε επαφή με κάποιες πρωτοποριακές μεθοδολογίες που εφαρμόζονται σήμερα σε διάφορα πανεπιστημιακά ιδρύματα.

## 2 Δομή

Η γνωριμία με τον Otto γίνεται στο πρώτο μέρος του κυρίως μέρους όπου παρουσιάζεται εν συντομία η βιογραφία του και οι βαθύτεροι λόγοι που τον οδήγησαν να ασχοληθεί με τις ελαφριές κατασκευές. Στη συνέχεια παρατίθενται οι κεντρικές ιδέες του, πως αντιλαμβάνεται τη φυσική μορφή, για ποιους λόγους μπορούν οι φυσικές μορφές να βοηθήσουν την αρχιτεκτονική, ποια είναι τα πλεονεκτήματα της και γιατί μια «φυσική αρχιτεκτονική» ευνοεί την ειρηνική συνύπαρξη, με ποιον τρόπο αντιλαμβάνεται τη μορφή και τα χαρακτηριστικά της. Ορίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των βέλτιστων κατασκευών σύμφωνα με το ίδιο τους και παρουσιάζονται οι βασικές βέλτιστες κατηγορίες κατασκευών οι οποίες θα αναλυθούν στην εργασία.

Στο δεύτερο μέρος γίνεται η γνωριμία τις μεθοδολογίες που ανέπτυξε ως υπεύθυνος καθηγητής του Institute of Lightweight Structures (IL) για τον σχεδιασμό «φυσικών» κατασκευών, ενώ παράλληλα αναφέρονται τα σημαντικά έργα που υλοποιήθηκαν με τις αντίστοιχες μεθόδους. Ειδικές περιπτώσεις αποτελούν αναφορές σε μη-αρχιτεκτονικά έργα που όμως επηρέασαν σημαντικά την αρχιτεκτονική θεωρία και πρακτική. Η **πρώτη μεθοδολογία** είναι η πιο γνωστή και αφορά τις ελάχιστες επιφάνειες. Σε αυτή αναλύεται ο τρόπος που λειτουργεί το πειραματικό μοντέλο φιλμ σαπουνιών με το οποίο υπολογίζεται η μορφή των ελαχίστων επιφανειών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πιο σημαντικές κατασκευές του: οι τέντες που απαρτίζονται από μεμβράνη (εξαιτίας αυτού δεν μπορούσαν να εφαρμοστούν σε μεγάλες κλίμακες) και οι μεγάλης κλίμακας δικτυωτές κατασκευές (χάρη στην πλεγματοειδή δομή των επιφανειών). Στη **δεύτερη μεθοδολογία** αναλύονται οι τρόποι με τους οποίους λειτουργούν οι πειραματικές συσκευές για την εύρεση της μορφής των φουσκωτών επιφανειών και παρουσιάζονται τα πιο σημαντικά του έργα, που, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες κατηγορίες, αφορούν περισσότερο συγκεκριμένες εκδόσεις βιβλίων παρά υλοποιημένα έργα. Στη **τρίτη μεθοδολογία** παρουσιάζονται οι κρεμαστές μορφές, στην οποία γίνεται η γνωριμία με τα μοντέλα κρεμαστών αλυσίδων και με τον τρόπο που επιδρά η αλυσοειδής καμπύλη τη συνολική μορφή. Η **τέταρτη μεθοδολογία** αφορά τις θολωτές μορφές. Μας γνωρίζει τον τρόπο που λειτουργεί το μοντέλο των κρεμαστών αλυσίδων και τον τρόπο που οι γυψόγαζες αξιοποιούνται για την εύρεση μορφής των θολωτών κατασκευών και μαθαίνουμε για τα διάφορα έργα του που οδήγησαν στην κατασκευή του πασίγνωστου εκθεσιακού χώρου στο Mannheim. Η **πέμπτη υποενότητα** του δεύτερου μέρους διαφοροποιείται σε δομή από τα προηγούμενα γιατί σε αυτή συμπεριλαμβάνονται διάφορες μέθοδοι που αφορούν την προσομοίωση της διαδικασίας κατάληψης μιας περιοχής και την εύρεση μορφής διαφόρων ειδών δικτύων διαδρομών. Αυτά

τα πειραματικά μοντέλα δεν αξιοποιήθηκαν ποτέ από τον Otto στον σχεδιασμό κάποιου κτιρίου, αλλά χρησιμοποιήθηκαν από τον ίδιο στην διερεύνηση διαφόρων «ασχεδιάστων» οικισμών. Η έρευνα στόχευε στην ανακάλυψη ομοιοτήτων μεταξύ των μορφών που προκύπτουν από τα πειράματα εύρεσης μορφής και των μορφών που δημιουργούνται αυθόρμητα στους ανθρώπινους οικισμούς. Επίσης, ήθελε να εξηγήσει τον τρόπο με τον οποίο οι «ασχεδιάστοι» οικισμοί έχουν προκύψει μέσω της συλλογικής και αυθόρμητης συμπεριφοράς των κατοίκων.

Στο τρίτο μέρος επιχειρείται η σύνδεση με την σύγχρονη εποχή. Παρουσιάζεται η θεωρία της μορφογένεσης όπως την έχει διατυπώσει ο Emanuel De Landa. Στη συνέχεια αναφέρονται συγκεκριμένα έργα σύγχρονων αρχιτεκτόνων που μαρτυρούν την επιρροή που έχουν ασκήσει τα μοντέλα εύρεσης μορφής του Otto. Το τρίτο μέρος κλείνει κάνοντας αναφορά στον καθηγητή αρχιτεκτονικής Achim Menges ο οποίος γνωρίζει πολύ καλά όλο το έργο του Otto και στηρίζεται στην ιδεολογία του εφαρμόζοντας της όμως με εντελώς διαφορετικό τρόπο. Αναλύονται οι έννοιες του “material computation” και του “computational design”, η σχέση τους με τη θεωρία του Otto. Παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μπορεί η ύλη να λειτουργήσει ως κινητήρια δύναμη της δημιουργίας μορφής, πως η διαδικασία αυτή να αξιοποιηθεί από τους σύγχρονους ηλεκτρονικούς υπολογιστές στην παραγωγή μορφής, και τέλος, με ποιόν τρόπο οι ρομποτικοί βραχίονες μπορούν να αποτελέσουν αναπόσπαστο κομμάτι της συνολικής διαδικασίας, προδιαγράφοντας ένα βελτιωμένο διαφορετικό μέλλον από το ήδη υπάρχον.

### 3 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που έχει εφαρμοστεί είναι αποκλειστικά της βιβλιογραφικής έρευνας. Η βιβλιογραφία σχετίζεται με τον Frei Otto, τα πειράματα εύρεσης μορφής που εφηύρε, τη μορφογένεση και τον ψηφιακό σχεδιασμό. Απαρτίζεται από εκδόσεις βιβλίων και επιστημονικών περιοδικών στην Αγγλική γλώσσα, χρονολογίας του 1977 έως και του 2015. Σημαντική ήταν η συμβολή άρθρων και οπτικοακουστικών μέσων από το διαδίκτυο που βρέθηκαν στους επίσημους συνδέσμους αρχιτεκτονικών γραφείων, οργανισμών και πανεπιστημίων. Σπουδαίο υλικό για το έργο του Otto αντλήθηκε από το βιβλίο *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*<sup>1</sup> ενώ επιπρόσθετες πληροφορίες βρέθηκαν στις εκδόσεις του Institute of Lightweight Structures (IL). Στη θεωρία της μορφογένεσης καταλυτικής σημασίας ήταν τα δημοσιευμένα κείμενα και οι διαλέξεις του De Landa, ενώ στους τομείς του ψηφιακού σχεδιασμού και της ψηφιακής μορφογένεσης σημαντικές πληροφορίες παρείχαν το βιβλίο *Digital Tectonics*<sup>2</sup> και οι περιοδικές εκδόσεις του *Architectural Design*.

Η ερευνητική εργασία χρησιμοποιεί το ιστορικό παράδειγμα για να φωτίσει σύγχρονα ζητήματα αλλά και για να αναδείξει την επικαιρότητα και κρισιμότητα του στις σύγχρονες συνθήκες. Πρόκειται για τη μελέτη των μορφογενετικών μεθοδολογιών που ανέπτυξε και εφάρμοσε ο αρχιτέκτονας Frei Otto κατά το δεύτερο μισό του 20<sup>ου</sup> αιώνα, των έργων που υλοποίησε σε αυτό το διάστημα και της θεωρίας και ιδεολογίας που ανέπτυξε. Εξετάζει πως τα παραπάνω ευνόησαν στη δημιουργία της σύγχρονης μορφογένεσης που χρησιμοποιεί τόσο φυσικά όσο και ψηφιακά μέσα, και διερευνά το

---

<sup>1</sup> (Otto & Rasch, *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*, 1996)

<sup>2</sup> (Leach, Turnbull, & Williams, 2004)

είδος της επιρροής που τους ασκήθηκε, τόσο στο άμεσα λειτουργικό επίπεδο όσο και στο έμμεσο εννοιολογικό επίπεδο.



# Ο Frei Otto

## 1 Η Ζωή του

«Η γενική πρόοδος των επιστημών, η πρωτοποριακή μόδα με τη ρητή διαισθητική της, τις οποίες εκείνος έφερε στην αρχιτεκτονική, και η τρέχουσα-σύγχρονη πρωτοπορία, θα μπορούσα να πω ότι δουλεύουμε πάνω σε αυτό το παράδειγμα και εκείνος είναι ο μοναδικός πρόδρομος όλου αυτού του έργου»

Patrick Schumacher, 2014 <sup>3</sup>

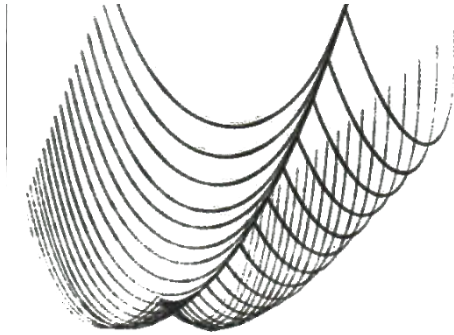
Πριν από μισό αιώνα περίπου ο αρχιτέκτονας και μηχανικός Frei Paul Otto έγινε παγκοσμίως γνωστός ως πρωτοπόρος στον σχεδιασμό εφελκυσμένων κατασκευών. Γεννήθηκε στις 31 Μαΐου του 1925 στο Siegmarsdorf της Chemnitz (Τσέμνιτς) στη Γερμανία, ο πατέρας του ήταν λιθοξόος και γλύπτης. Όσο ήταν μαθητής τα καλοκαίρια δούλευε ως εκπαιδευόμενος λιθοξόος. Ασχολούταν με το σχέδιο και οδηγούσε μικρά ανεμόπτερα. Μεγαλώνοντας, ξεκίνησε μαθήματα αεροπορίας με ανεμόπτερο. Έμαθε να πιλοτάρει και να εκμεταλλεύεται τα θερμά και τα ψυχρά ρεύματα του αέρα ώστε να μπορεί να ίππεται. Απέκτησε μάλιστα και την άδεια πιλότου. Από μικρή ηλικία λοιπόν ο Otto έδειξε ενδιαφέρον στον τρόπο με τον οποίο οι κατασκευές από λεπτές μεμβράνες που περιβάλλουν ελαφριούς σκελετούς μπορούν να ανταποκριθούν σε αεροδυναμικές και μηχανικές δυνάμεις. Όπως έχει πει και ο ίδιος, η κατασκευή ατράκτων για ανεμόπτερα ήταν που τον οδήγησε στα δικτυωτά κελύφη<sup>4</sup>. Στην ηλικία των 18, το 1943, εγγράφεται στο τμήμα αρχιτεκτονικής του πολυτεχνείου του Σαρλότενμπουργκ στο Βερολίνο. Μετά από λίγο όμως, λόγω του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, κατατάχθηκε στην πολεμική αεροπορία στην οποία εκπαιδεύτηκε ως πιλότος μαχητικού αεροσκάφους. Το 1944 όταν τελείωσε την εκπαίδευση μετατέθηκε στο πεζικό. Το 1945 συνελήφθη από τις συμμαχικές δυνάμεις κοντά στη Νυρεμβέργη και έγινε



Εικ. 1.1: Frei Otto και Bodo Rasch, στα εγκαίνια της έκθεσης «Gestalt Finden» στη Villa Stuck στο Μόναχο το 1992, με αφορμή την παρουσίαση του Deutscher Werkbund Bayer Prize.

<sup>3</sup> (Chiu, Hassel, & Paglia, 2014)

<sup>4</sup> (Otto & Songel, A Conversation with Frei Otto, 2010)



Εικ. 1.2: Αναρτώμενες αλυσίδες

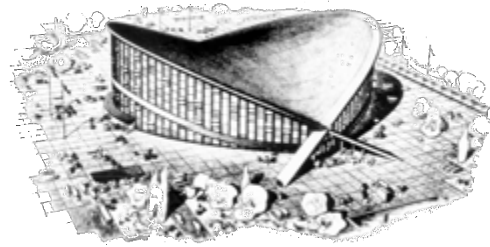
αιχμάλωτος πολέμου. Έμεινε για δυο χρόνια σε στρατόπεδο συγκέντρωσης κοντά Σαρτρ της στο οποίο δούλεψε ως αρχιτέκτονας. Την περίοδο εκείνη ξεκίνησε να φτιάχνει τέντες από σεντόνια και κουβέρτες. Η ανάγκη για στέγη και η περιστασιακή έλλειψη υλών θα αποτελέσει τα εννοιολογικά θεμέλια του. Στο στρατόπεδο συγκέντρωσης που βρισκόταν, αν και δεν είχε αποκτήσει ακόμα τον τίτλο σπουδών του, θα αποκτήσει πολλές γνώσεις γύρω από την αρχιτεκτονική και τη μηχανική. Στην ομάδα εργασίας του στρατοπέδου που εντάχθηκε, γνώρισε έναν μηχανικό που του δίδαξε την απλή λογική της αναρτώμενης αλυσίδας<sup>5</sup> η οποία μπορεί να συντελέσει στη δημιουργία δομών που υπόκεινται αποκλειστικά σε θλιπτικές τάσεις.

Το 1948, κατά τη διάρκεια του Αποκλεισμού του Βερολίνου, κατάφερε να συνεχίσει τις σπουδές του στο πολυτεχνείο όπου παρακολούθησε μαθήματα σχετικά με τη σύγχρονη ιστορία τέχνης και τη μοντέρνα αρχιτεκτονική, όπως επίσης διαλέξεις σχετικά με τη βιολογία, τη μουσική και την ιστορία εντός του προγράμματος των γενικών σπουδών. Το 1950 έγινε ένας από τους πρώτους Γερμανούς φοιτητές μετά τον ΒΒΠ' που δέχτηκε υποτροφία από το Εθνικό Γερμανικό Ακαδημαϊκό Ίδρυμα (Studienstiftung des deutschen Volkes) και ταξίδεψε για σπουδές στις ΗΠΑ, χρονικού ορίου ενός εξαμήνου. Κατά την παραμονή του παρακολούθησε μαθήματα πάνω στην κοινωνιολογία και στον αστικό σχεδιασμό στο Πανεπιστήμιο της Βιρτζίνια. Ακόμα, ήρθε σε επαφή με σημαντικούς αρχιτέκτονες, όπως ο Walter Gropius και ο Mies van der Rohe. Με τους Frank Lloyd Wright, Erich Mendelsohn, Richard Neutra, Eero Saarinen και Fred Severud διατήρησε επαφή μέχρι και τον θάνατο τους, ενώ ο Buckminster Fuller αποτελούσε τον συνοδοιπόρο του στην θεωρητική δομική μηχανική. Εκείνη τη χρονική περίοδο πολλά

<sup>5</sup> (Otto & Songel, A Conversation with Frei Otto, 2010)

σημαντικά αρχιτεκτονικά γραφεία πειραματιζόντουσαν με επιφανειακές κατασκευές κατασκευές που βασίζοντας σε αυστηρές οικονομικές αρχές. Στο αρχιτεκτονικό γραφείο του Severud στη Νέα Υόρκη ήταν όπου ανακάλυψε ο Otto το μοντέλο του Raleigh Arena<sup>6</sup> στη North Carolina. Επρόκειτο για ένα δίκτυο καλωδίων μεταξύ δύο μεγάλων επιφανειών, η πρώτη αναρτώμενη οροφή στην ιστορία της αρχιτεκτονικής. Ο σχεδιαστής της οροφής αυτής, Mathew Nowitzky, μόλις είχε πεθάνει σε ένα αεροπορικό δυστύχημα. Ο Otto ενθουσιάστηκε με την ιδέα αυτή και επιστρέφοντας στην Ευρώπη, η οποία ήταν ακόμα κατεστραμμένη από τον πόλεμο, αποφάσισε να ασχοληθεί με τις αναρτώμενες οροφές στην διδακτορική του διατριβή.

Όταν γύρισε στη Γερμανία το 1952, ολοκλήρωσε τις σπουδές του στο Πολυτεχνείο του Βερολίνου, και ίδρυσε το δικό του γραφείο. Το 1954 ολοκλήρωσε τη διδακτορική του διατριβή με θέμα "The Suspended Roof, Form and Structure"<sup>7</sup> στους πολιτικούς μηχανικούς στην οποία πρότεινε πιο «φυσικές» λύσεις στα οικονομικά και τεχνικά προβλήματα που προκύπτουν στην αρχιτεκτονική. Το διδακτορικό του εκδόθηκε στα Γερμανικά, το Πολωνικά, στα Ισπανικά και στα Ρωσικά. Χρησιμοποίησε δομές από δίκτυα καλωδίων και μεμβράνες ώστε να δημιουργήσει μια λεπτή ανάμειξη του εσωτερικού χώρου και του περιβάλλοντος. Το 1954 ξεκίνησε τη συνεργασία με τον Peter Stromeyer στην L. Stromeyer & Co, η οποία ήταν καταξιωμένη επιχείρηση στην κατασκευή τεντών. Το 1955 είναι η χρονιά που ο Otto, σε συνεργασία με τον Stromeyer, θα δημιουργήσει τα πρώτα σημαντικά του έργα, τρεις ελαφριές, βέλτιστες κατασκευές προσωρινού χαρακτήρα κατασκευασμένες από βαμβακερό ύφασμα για την Ομοσπονδιακή Έκθεση Κηπουρικής (Bundesgartenschau) στη Κάσσελ. Με αυτές τις απλές χειρονομίες, ο Otto υπέταξε τα πλεονεκτήματα των δομών αυτών στην ποίηση της



Εικ. 1.3: Dorton Arena, North Carolina, Η.Π.Α. του Mathew Nowitzky



Εικ. 1.4: Ένα πανί το οποίο στις τέσσερις άκρες του ήταν δεμένο μεταξύ δύο υψηλών και δύο χαμηλών σημείων σχημάτιζε το μουσικό περίπτερο, Federal Garden Exhibition, Κάσσελ, 1955.

<sup>6</sup> Πλέον ονομάζεται Dorton Arena.

<sup>7</sup> Η αρχική ονομασία στα Γερμανικά: "Das Hangende Dach, Gestalt und Struktur"





Εικ. 1.5: Μικρό περίπτερο στην Federal Garden Exhibition στην Κολωνία, 195, που προκύπτει ως συνδυασμός πανιού και μυτερής τέντας.

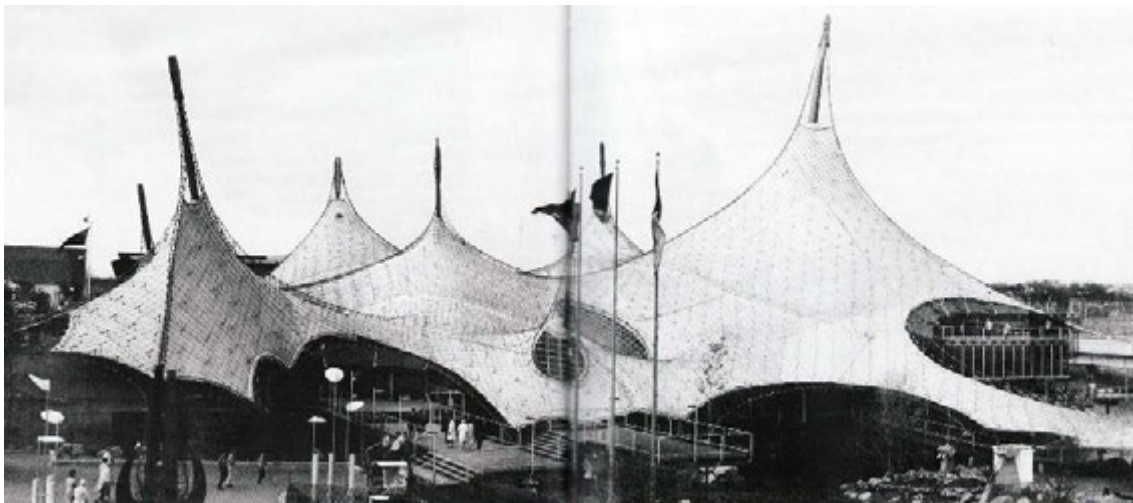
μορφής δίνοντας ένα νέο νόημα στην ιδέα “less is more”. Αυτά ήταν τα πρώτα του έργα που κέρδισαν διεθνή αναγνώριση, εν μέρει επειδή εναρμονιζόντουσαν με τη φύση. Το γεγονός ότι τέντες ήταν προσωρινές ήταν σημαντικό για τον Έβλεπε τις εφήμερες δομές ως ανταπάντηση στη μεγαλομανία του τρίτου ράιχ με τα μεγαλεπήβολα και ογκώδη κτίρια που αποσκοπούσαν στην αιώνια διατήρησή τους. Οι τέντες του Otto από την άλλη, εννοείται ότι θα έστεκαν μόνο για μερικούς μήνες. Με δεδομένη αυτή τη φιλοσοφία, έχει νόημα που ο Otto αναζητούσε αναθέσεις για δομές για διάφορα βραχυπρόθεσμες εκδηλώσεις. Μετά από λίγα χρόνια, το 1957, θα έχει την ευκαιρία να δημιουργήσει μια σειρά από τέντες για μία άλλη ομοσπονδιακή έκθεση κηπουρικής, αυτή τη φορά στην Κολωνία. Ο σχεδιασμός αυτών των δομών προέκυψε από την έρευνα στην εφελκυστική αρχιτεκτονική και βασίζονταν στην ιδέα που είχε υλοποιήσει πρώτη φορά στην Κάσσελ.

Ο Otto πρωτοπόρησε με τη χρήση των μοντέρνων και ελαφριών κατασκευών για πολλές διαφορετικές χρήσεις. Τον προσέλκυε το γεγονός ότι είχαν οικονομικές και οικολογικές αξίες. Από τη δεκαετία του 50' είχε κατασκευάσει πολύπλοκα μοντέλα για να πειραματιστεί και τελειοποιήσει τη μορφή τους. Σε όλη την καριέρα του χρησιμοποιούσε φυσικά μοντέλα για να καθορίσει την ιδανική μορφή και να δοκιμάσει τη συμπεριφορά τους. Επίσης, το γραφείο του ήταν ένα από τα πρώτα στα οποία οι μηχανικοί χρησιμοποίησαν ηλεκτρονικούς υπολογιστές για την στατική ανάλυση των έργων του, αν και τα δεδομένα που χρησιμοποιούσαν προέρχονταν από τα φυσικά μορφογενετικά μοντέλα.

Το 1958, ίδρυσε ένα από τα πρώτα ινστιτούτα τα οποία ασχολούνταν αποκλειστικά με τις ελαφριές κατασκευές, το Ίδρυμα για την Ανάπτυξη των Ελαφριών Κατασκευών (Institute

for Development of Lightweight Construction), το οποίο ήταν ένα μικρό και ιδιωτικό στούντιο στο Zehlendorf του Βερολίνου. Μέσα στα επόμενα χρόνια δίδαξε περιοδικά σε διάφορα πανεπιστήμια στις Η.Π.Α. ως επισκέπτης καθηγητής (visiting professorships) στα πανεπιστήμια της Washington, του St. Louis, του Yale, του Berkeley, του MIT και του Harvard. Η εγκαθίδρυση του Biology and Building research group στο πολυτεχνείο του Βερολίνου το 1961 σηματοδοτεί τη έναρξη των συνεργασιών του με άλλες ειδικότητες όπως αρχιτέκτονες, μηχανικούς και βιολόγους. Εφάρμοσαν τις γνώσεις τους για τις σκηνές, τα δικτυωτά κελύφη και άλλες ελαφριές κατασκευές για την καλύτερη κατανόηση του σχεδιασμού των βιολογικών δομών και μορφών.

Το 1962 έκδωσε τον πρώτο τόμο του σπουδαιού του έργου "*Tensile Structures: Design, Structure and Calculation of Buildings of Cables, Nets and Membranes*" (ο δεύτερος τόμος εκδόθηκε το 1966) στο οποίο παρουσιάζει αναλυτικά όλη τη γνώση και μεθοδολογία των κατασκευών αυτών. Μετά από δυο χρόνια, το 1964, έγινε διευθυντής του νεοσύστατου Ινστιτούτου Ελαφριών Κατασκευών (Institut für



Εικ. 1.6: Γενική οπτική του περιπτέρου για τη Διεθνή Έκθεση του Μόντρεαλ το 1967. Το περίπτερο είχε κατασκευαστεί σύμφωνα με το σχέδιο των Frei Otto και Rolf Gutbrod.

Leichte Flächentragwerke - IL) στο πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης.

Μέχρι και αυτό το σημείο ο Otto ήταν γνωστός σε όλη τη Γερμανία και στους ακαδημαϊκούς κύκλους, όχι όμως στο παγκόσμιο στερέωμα. Αυτό θα αλλάξει ριζικά όμως το 1967. Η Γερμανική κυβέρνηση ανέθεσε στο IL τον σχεδιασμό του γερμανικού περιπτέρου για τη διεθνή έκθεση του Μόντρεαλ (γνωστή ως Expo 67) το 1967<sup>8</sup> στην οποία έγινε παγκοσμίως γνωστός. Η επιλογή της αρχιτεκτονικής του Otto ήταν μια πολιτική κίνηση από την πλευρά των αρχηγών της Γερμανίας προκειμένου να αναδείξουν την μεταπολεμική βιομηχανική και τεχνολογική εξειδίκευση και τις πρωτοπόρες τεχνολογίες του έθνους τους. Η πολύπλοκη μορφή των τεντών που αποτελούσαν το περίπτερο ήταν το αποτέλεσμα πολλών πειραμάτων που διεξήγαγε στο IL, σε συνεργασία με τους Rolf Gutbrod και Fritz Leonhardt. Επιπροσθέτως στο περίπτερο, ο Otto κατασκεύασε μια δομή στο Μόντρεαλ για να στεγάσει το ίδιο το ινστιτούτο, απεικονίζοντας τη δυνατότητα μεταφοράς των σχεδίων του. Τα κτίρια αυτά αποτέλεσαν το πρώτο παράδειγμα κατασκευής παθητικών ηλιακών κτιρίων μεγάλης κλίμακας.

Την επόμενη χρονιά, το 1968, ο Otto ανακηρύχθηκε Honorary Fellow του Αμερικάνικου Ινστιτούτου Αρχιτεκτόνων, και παράλληλα η Olympria Baugesellschaft του Μονάχου ανέθεσε στο IL την ανάπτυξη μετρικών μοντέλων για το στέγαστρο του βασικού σταδίου του Ολυμπιακού Πάρκου. Το έργο, που υλοποιήθηκε τελικά το 1972 σε συνεργασία των Günter Behnisch, Frei Otto, και Fritz Leonhardt, απαρτίζεται από το γιγαντιαίο στέγαστρο των κερκίδων του Ολυμπιακού Σταδίου, το κλειστό αθλητικό κέντρο, την οροφή της Ολυμπιακής πισίνας, και μερικά στέγαστρα από μεμβράνες υπερβολικής γεωμετρίας που συνέδεαν τα κτίρια



Εικ. 1.7: Η οροφή του Institute for Lightweight Structures (IL), στη πανεπιστημιούπολη της Στουτγάρδης στο Vaihingen.

<sup>8</sup> Expo '67 Montreal

και προστάτευαν του επισκέπτες από τον ήλιο και τη βροχή. Το έργο αυτό ήταν που του καθιέρωσε μια θέση στην ιστορία της αρχιτεκτονικής. Πλέον το έργο αυτό θεωρείται ευρέως ως αριστούργημα. Οι Ολυμπιακοί Αγώνες του Μονάχου είχαν ως στόχο να επιδείξουν μια ευημερούσα και δημοκρατική Δυτική Γερμανία, αλλά η εκδήλωση αμαυρώθηκε από την τραγική τρομοκρατική επίθεση στην ομάδα του Ισραήλ. Το στάδιο εξακολουθεί να στέκει μέχρι σήμερα, όχι σαν ανάμνηση της τραγωδίας, αλλά ως απόδειξη του παρατεταμένου θριάμβου της φουτουριστικής ιδιοφυίας του Otto.

Το 1969 ο Otto ιδρύει το Atelier Warmbronn, ένα αρχιτεκτονικό στούντιο κοντά στην Στουτγάρδη. Ο Otto και η ομάδα του ερευνήσαν διάφορες κατασκευαστικές μεθόδους οι οποίες θα μπορούσαν να είναι όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικές με όσο το δυνατό λιγότερο υλικό. Τύχαινε οι μορφές που αποκτούσαν τα έργα του Otto συχνά να θυμίζουν παρόμοιες μορφές που υπάρχουν στη φύση, όπως αυτές των ιστών των αραχνών και τα κranία των πτηνών. Ο Otto έγραφε μανιωδώς σε όλη την καριέρα του. Το 1972 έκδωσε το βιβλίο *Biology and Building* και την επόμενη χρονιά έκδωσε και έναν δεύτερο τόμο. Η μετέπειτα έρευνα τον οδήγησε να γράψει για τις μηχανικές και δομικές ιδιότητες του μπαμπού, των οστρακοειδών και των σαπουνόφουσκων. Το 1994 έκδωσε το βιβλίο *Ancient Architects* στο οποίο ανέφερε τις κατασκευαστικές εφευρέσεις από τις απαρχές της ανθρώπινης ιστορίας.

Το 1975 σχεδίασε και κατασκεύασε το Multihalle στο Μόναχο, για την Federal Garden Exhibition του 1975, στο οποίο εφάρμοσε τις θεωρίες για τα δικτυωτά κελύφη. Οι ιδιαίτερες δομές των δικτυωτών πλεγμάτων καθορίστηκαν μέσω ανεστραμμένων μοντέλων που αποτελούνταν από κυματοειδή δίκτυα αλυσίδων. Στόχος του Otto πάντα είναι τα έργα του να αφήσουν όσο το δυνατόν μικρότερο αποτύπωμα πάνω στη γη. Υπό αυτή τη σκοπιά, δεν είναι παράξενο που ο Otto πίστευε ότι το πτηνοτροφείο Hellabrunn στον ζωολογικό κήπο του Μονάχου, που



Εικ. 1.8: Εσωτερική φωτογραφία του Multihalle στην έκθεση του Μονάχου.



Εικ. 1.9: Εσωτερική φωτογραφία από το πτηνοτροφείο Hellabrunn στον ζωολογικό κήπο του Μονάχου.

ολοκληρώθηκε το 1980, ήταν το μεγαλύτερο επίτευγμα του, διότι μόλις και μετά βίας βρίσκεται

Από το 1964 μέχρι και το 1991 δίδασκε τακτικά στο πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης και το 1991 ανακηρύχθηκε ομότιμος καθηγητής (emeritus professor).

Σε όλα τα χρόνια της ζωής του οι ερευνητικές ομάδες του Otto συμπεριλάμβαναν φιλοσόφους, ιστορικούς, νατουραλιστές και περιβαντολλόγους. Αποτελεί έναν παγκόσμιας φήμης καινοτόμο αρχιτέκτονα και μηχανικό που πρωτοπόρησε στις εφελκυστικές κατασκευές με υφασμάτινες επικαλύψεις αλλά που δούλεψε και με διαφορετικά υλικά και κατασκευαστικά συστήματα όπως είναι τα δικτυωτά κελύφη, το μπαμπού και τα ξύλινα πλέγματα. Έκανε σημαντικές εξελίξεις όσον αφορά τη χρήση του αέρα ως οικοδομικό υλικό και τη θεωρία των αεροπνευματικών κατασκευών, καθώς και στην ανάπτυξη των μεταβαλλόμενων οροφών. Πάντα διέθετε τα αποτελέσματα των ερευνών του σε όλους τους συναδέλφους του. Πάντοτε ο ίδιος ήταν υπέρ της συνεργασίας στην αρχιτεκτονική.

Η πρώτη αναγνώριση για τον ίδιο ήρθε με την μονογραφική έκθεση του 1971 στο Museum of Modern Art (MoMA) της Νέας Υόρκης (μια επανασχεδιασμένη έκθεση του ταξίδεψε από το 1975 μέχρι το 1977 σε διάφορες εκδηλώσεις στην βόρεια Αμερική, στην Ευρώπη, την Ασία και την Αυστραλία). Η έκθεση «Φυσικές Κατασκευές», η οποία περιλάμβανε τα έργα του, διοργανώθηκε από Institute for International Relations στην Στουτγάρδη το 1982 και παρουσιάστηκε στα ινστιτούτα Goethe περίπου 80 χωρών<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> Μεταξύ διαφόρων βραβείων, στον Otto απονεμήθηκαν: το βραβείο Thomas Jefferson και Medal in Architecture από το πανεπιστήμιο της Βιρτζίνια το 1974, το Medaille de la recherche et de la technique από την Ακαδημία Αρχιτεκτονικής του Παρισιού το 1984, το Grand Prize and gold medal από τον Σύνδεσμο Γερμανών Αρχιτεκτόνων επίσης το 1982. Έλαβε, το 1982, το βραβείο Aga Khan Award for Architecture (μαζί με τον Rolf Gutbrod) για το συνεδριακό κέντρο στη Μέκκα της Σαουδικής Αραβίας, όπως πάλι έλαβε το ίδιο βραβείο το

## Η Συμβολή του Frei Otto στην Εύρεση (της) Μορφής και στη Σύγχρονη Μορφογένεση

Ο Otto ενστερνίστηκε τις αναδυόμενες εξελίξεις στα μαθηματικά και τη μηχανική με το μεγαλύτερο μέρος του έργου του να έχει ολοκληρωθεί πριν τη χρήση των υπολογιστικών προγραμμάτων, καθιστώντας τα επιτεύγματα του ακόμη περισσότερο αξιοσημείωτα. Το πρωτοποριακό έργο του Otto συνεχίζει να εμπνέει αρχιτέκτονες, σχεδιαστές και μηχανικούς σε όλη την υφήλιο, και με απόλυτη σιγουριά η επιρροή του θα αυξηθεί στις επόμενες δεκαετίες που θα έρθουν καθώς οι πόροι εξαναντλούνται ενώ παράλληλα η επείγουσα ανάγκη για την ποικιλία των κατασκευών θα αυξάνεται συνεχώς.<sup>10</sup>

“Yes, my architecture is architecture of survival. Very simple. To survive, also, is all what we are doing.”

Frei Otto, 2014<sup>11</sup>

Εικ. 1.10: Το Ολυμπιακό Στάδιο του Μονάχου όπως είναι σήμερα.



1998 (μαζί με τους Omerican και Harrold) για το διπλωματικό Κλάμπ στο Ριάντ της Σαουδικής Αραβίας. Ανακηρύχθηκε Honorary Fellow από το Royal Institute of British Architects στο Λονδίνο το 1982 και Honorary Fellow του Institution of Structural Engineers, στο Λονδίνο, το 1986. Το 1996 έλαβε το Grand Prize από το German Association of Architects and Engineers στο Βερολίνο. Το 2005 του απονεμήθηκε το Royal Gold Medal of the Royal Institute of British Architects (RIBA). Το 2006 η Japan Art Association τον βράβευσε με το Praemium Imperiale in Architecture, και τέλος, το 2014 του απονεμήθηκε το βραβείο Pritzker για το Ιαπωνικό Περίπτερο που σχεδίασε σε συνεργασία με τον Shigeru Ban για το Hannover Expo το 2000. (Biography of Frei Otto, 2015)

<sup>10</sup> (Chiu, Hassel, & Paglia, 2014), (Warmbronn, 2015) και (Serebryakova, 2006)

<sup>11</sup> (Chiu, Hassel, & Paglia, 2014)



## 2 Η Άποψη του

Ο Frei Otto από μικρή ηλικία είχε ανακαλύψει την αξία των ελαφριών κατασκευών και του βέλτιστου σχεδιασμού. Σκοπός του ερευνητικού του έργου ήταν να ανακαλύψει ποια ήταν η ιδανική μορφή που επιδέχεται κάθε κατασκευή αντίστοιχα σε κάθε περίπτωση<sup>12</sup>, να βρει δηλαδή ποιο είναι το ιδεατό, ή έστω ό,τι πιο κοντινό σε αυτό, σε κάθε περίπτωση. Τα πιο γνωστά του έργα ίσως να αποτελούν μόνο την κορυφή του παγόβουνου του συνολικού του έργου που προσέφερε στην αρχιτεκτονική. Στη συγκεκριμένη εργασία θα γίνει μια προσπάθεια να παρουσιαστούν, να αναλυθούν και να κατανοηθούν εκείνες οι έρευνες, οι ανακαλύψεις και τα πειράματα που δημιούργησαν μια νέα τάση στην αρχιτεκτονική. Κάποιοι θα μπορούσαν να την χαρακτηρίσουν προφητική<sup>13</sup>, καθώς έρχονται ως απάντηση στην συνεχόμενη και εκτενή περιβαλλοντική και ενεργειακή κρίση που διανύουμε και προβλέπεται να ενταθεί στο μέλλον.

Για να καταλάβουμε το έργο του Otto, χρειάζεται πρώτα να καταλάβουμε τους προβληματισμούς του, τι ήταν αυτό που τον ενοχλούσε στη σύγχρονη αρχιτεκτονική και ήθελε τόσο να την διορθώσει και να τη βελτιώσει. Μπορεί οι εμπειρίες που απέκτησε στη νεαρή του ηλικία να έπαιξαν έναν σημαντικό ρόλο στον τρόπο σκέψης του, όμως η οξεία κριτική του ήταν αυτή που τον οδήγησε στην ανακάλυψη και στην κατασκευή πρωτοπόρων και σπουδαίων δομών και έργων.

Ο Otto έτρεφε μεγάλο θαυμασμό για την πρωτόγονη αρχιτεκτονική, άντλησε όσο το δυνατόν περισσότερη γνώση και πληροφορία από αυτήν, και αυτό μπορούμε να το καταλάβουμε από το μεγάλο όγκο έρευνας που έχει κάνει πάνω σε αυτή.<sup>14</sup> Έχει αναφέρει ο ίδιος ότι η πρωτόγονη αρχιτεκτονική «είναι μια αρχιτεκτονική της αναγκαιότητας»<sup>15</sup>. Αυτό σημαίνει ότι τα δομικά υλικά χρησιμοποιούνται στην κατάλληλη ποσότητα, ούτε σε υπερβολή αλλά ούτε σε έλλειψη, είτε αυτό είναι πέτρα, πηλός, καλάμια, ξύλο, δέρμα ή γούνα ζώων. **Είναι μηδαμινή**<sup>16</sup>. Μπορεί ακόμα και σε καταστάσεις ανέχειας να είναι όμορφη και ποιοτική. Ο ίδιος ορίζει την «ιδανική πρωτόγονη αρχιτεκτονική» ως αυτή που είναι κατασκευαστική και διακοσμητική ταυτόχρονα. Το συμπέρασμα που εξήγαγε τελικώς είναι ότι «**η διακόσμηση έχει νόημα μόνο όταν είναι ουσιώδης**». Από αυτό συμπεραίνεται ότι ο Otto δίνει σημασία στην αισθητική μόνο όταν η αρχιτεκτονική είναι καλή, δίνοντας προτεραιότητα στην καλή αρχιτεκτονική παρά στην όμορφη. Μάλιστα καταλήγει στο ότι η όμορφη αρχιτεκτονική δεν είναι απαραίτητα καλή. Το ιδανικό είναι μια «**ηθικά καλή αρχιτεκτονική η οποία είναι επίσης και όμορφη**». Τα κτίρια τα οποία επιτυγχάνουν αυτό το ιδανικό, θεωρεί ο Otto ότι είναι σπάνια και μόνο αυτά είναι άξια διατήρησης.

<sup>12</sup> Στο τεύχος *IL 21 Basics: Form, Force, Mass*, ο Otto και η ομάδα του IL επιχειρούν μια πρώτη και γενική κατάταξη των βασικών μορφών και δομών που ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες καταστάσεις. Στα τεύχη IL 22 με IL 25 η ομάδα του IL κάνει μια εκτενέστατη και περιεκτικότερη κατάταξη των δομών αυτών.

<sup>13</sup> Ο Patrick Schumacher, μεταξύ άλλων, μνημονεύει σε αρκετές του συνεντεύξεις και άρθρα τον Frei Otto ως τον πατέρα της πρωτοπόρας αρχιτεκτονικής. Μάλιστα θεωρεί πως και ο ίδιος βαδίζει στον δρόμο τον οποίον χάραξε ο Frei Otto.

<sup>14</sup> Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από την έρευνα που διεξήχθη στο IL πάνω στους πρωτόγονους και παραδοσιακούς οικισμούς διαφόρων ιθαγενών πληθυσμών στα διάφορα μήκη και πλάτη της Γης, η οποία ύστερα εκδόθηκε σε πολλαπλά βιβλία, κάτω από τη στέγη του πανεπιστημίου της Στουτγάρδης. (Rasch, 1980) (Otto, IL 37: Ancient architects, 1994) (Schaer & Otto, 1992)

<sup>15</sup> Παρότι δεν είναι τεχνολογική, σε αντίθεση με ότι έκανε εκείνος, βρίσκει τα πλεονεκτήματα της και τα ενστερνίζεται στον δικό του τρόπο σκέψης και σχεδιασμού.

<sup>16</sup> Ο Otto χρησιμοποιεί την λέξη *minimal* για να περιγράψει έναν ελάχιστο αλλά και ταυτόχρονα ποιοτικό σχεδιασμό, δηλαδή, τον βέλτιστο σχεδιασμό. Ανάλογα την περίπτωση μπορεί να μεταφραστεί ως *μηδαμινή*, *ελάχιστη* και *βέλτιστη*.



«Η εποχή μας απαιτεί ελαφρύτερα, πιο ενεργειακά, πιο ευκίνητα και πιο προσαρμόσιμα, εν ολίγη, πιο φυσικά κτίρια, λαμβάνοντας πάντα υπόψιν τις απαιτήσεις για σιγουριά και έχει αναφέρει<sup>17</sup>. Η παρόρμηση αυτή τον οδήγησε στην ανάπτυξη και βελτίωση περισσοτέρων ελαφριών κατασκευών, στην κατασκευή των σκηνών, κελυφών, σκιάστρων και φουσκωτών μεμβρανών. Επίσης οδήγησε σε μια νέα κινητικότητα και προσαρμοστικότητα. Με μια νέα της φύσης μπορεί να διαμορφωθεί, κατά μια έννοια, μια νέα μορφή που να θεωρείται υψηλών επιδόσεων (η οποία επίσης ονομάζεται κλασική μορφή), η οποία ενοποιεί την αισθητική και την ηθική, δηλαδή τη λειτουργικότητα με την ομορφιά. Με αυτό υπόψιν, αναγνωρίζεται η ποιότητα ιθαγενών κατασκευών και οικισμών<sup>18</sup>.

Ο Frei Otto υπέδειξε τον δρόμο του μέλλοντος αναφέροντας ότι η λύση στα σύγχρονα προβλήματα βρίσκεται σε μια **καινούρια** αρχιτεκτονική η οποία θα είναι **ενσωματωμένη στο οικοσύστημα** της γης, η οποία θα έχει πυκνοκατοικηθεί από τον άνθρωπο. Σύμφωνα με τον Otto, το νέο οικοσύστημα που θα προκύψει θα αξιοποιεί τη διορατικότητα όλων των επιστημών για την εύρεση της ιδανικής μορφής (finding-form), και οι άνθρωποι θα μπορούν να πυκνοκατοικήσουν ειρηνικά τη Γη μέσω συστημάτων αυτό-οργάνωσης (self-setting). Επιμέρους στόχος είναι η μείωση των κτιρίων και των δρόμων που έχουν δημιουργήσει μια κρούστα πάνω από την επιφάνεια της Γης.

Πέρα από τον Otto, πολλοί ελπίζουν πως η αρχιτεκτονική του βέλτιστου<sup>19</sup> θα ενθαρρύνει την ειρηνική συνύπαρξη και θα κάνει εφικτή τις διαδικασίες της κοινωνικής αυτό-οργάνωσης (social self-regulating processes). Οι προδιαγραφές που απαιτούνται για τη νέα εποχή είναι ήδη καλυμμένες διότι οι κατοικίες, τα κτίρια και οι οικισμοί θα μπορούν ξανά να σχεδιαστούν από τους ίδιους τους κάτοικους, προς όφελος της φύσης και της ανθρωπότητας.

Ο Otto παραμένει οπτιμιστής και πιστεύει ότι η αρχιτεκτονική του αύριο θα αποτελέσει ξανά μια αρχιτεκτονική του βέλτιστου, η οποία θα προκύπτει μέσα από τις διεργασίες αυτό-σχηματισμού (self-forming) και αυτό-βελτιστοποίησης (self-optimization) οι οποίες θα προτείνονται από τους ίδιους τους ανθρώπους. Θα γίνει ένα αποτελεσματικό εργαλείο που θα μπορεί να εφαρμοστεί από τον οποιοδήποτε με σκοπό τη συνύπαρξη όλων των ανθρώπων ειρηνικά και σε απόλυτη ισορροπία με το οικοσύστημα. Μια τέτοια αρχιτεκτονική μπορεί να σεβαστεί τις αυθεντικές παραδόσεις και την ποικιλομορφία των μορφών στην έμψυχη και στην άψυχη φύση.

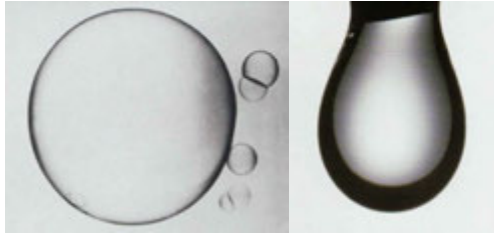
<sup>17</sup> (Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996, σ. 13)

<sup>18</sup> Όπως θα δούμε και παρακάτω, οι ιθαγενείς δομές (πόλεις, χωριά, κατοικίες, εργαλεία και τεχνολογίες) εμπεριέχουν αυτές τις ποιότητες που αναζητεί ο Otto.

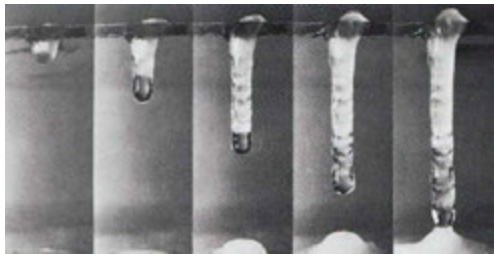
<sup>19</sup> Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, ο όρος χρησιμοποιείται για να εκφράσει τον βέλτιστο σχεδιασμό, την ελάχιστη χρήση υλικών επιτυγχάνοντας τη μέγιστη απόδοση της κατασκευής.



Εικ. 2.1: «Πυλώνες της Δημιουργίας», σχηματισμός νέων πλανητών.



Εικ. 3.1: Αιωρούμενη σαπουνόφουσκα και σταγόνα νερού.



Εικ. 3.2: Σχηματισμός σταλακτιτών πάγου.



Εικ. 3.3: Μικροσφαιρίδια

### 3 Η Μορφή

Μελετώντας το έργο και τις ιδέες του Otto εντοπίζονται πολλές ομοιότητες με τα αντίστοιχα έργα μεταγενέστερων αρχιτεκτόνων και φιλοσόφων, όπως θα φανεί και στη συνέχεια. Μπορούμε να πούμε ότι ο Otto ήταν ο πρώτος που μελέτησε και έγραψε για αυτά τα ζητήματα πριν ακόμα εδραιωθεί μια βασική θεωρία. Κεντρικό θέμα σε όλο το ερευνητικό έργο του Otto είναι πάντα η **εύρεση μορφής**. Αφορμή της έρευνας υπήρξε το γεγονός ότι η ιδανική μορφή των αντικειμένων που χρησιμοποιούν τα δομικά τους υλικά με τον βέλτιστο τρόπο είναι άγνωστη. Μάλιστα, κατέληξε στο ότι η μορφή της πιο απλής θλιπτικής δομής που χρησιμοποιεί το ελάχιστο δυνατό υλικό είναι παντελώς άγνωστη, πόσο μάλλον η μορφή μιας πιο πολύπλοκης δομής. Μια αλλαγή στον τρόπο σκέψης των μηχανικών ήταν αναγκαία διότι οι περισσότεροι σχεδίαζαν μια κατασκευή χρησιμοποιώντας την έμπνευσή τους και ύστερα υπολόγιζαν τη στατικότητα της. Όπου ήταν αδύναμη ενισχυόταν και όπου περίσσευε υλικό αφαιρούσαν. Αυτές οι μεθοδολογίες, πιστεύω, δεν μπορούσαν να ξεπεράσουν τα στενά όρια του σχεδιασμού, πόσο ακόμα να παράγουν νέες, άγνωστες μορφές. Μια νέα αρχιτεκτονική ήταν αναγκαία η οποία μπορεί να κατανοεί τις βασικές αρχές της φύσης και της ύλης ώστε να τις αξιοποιεί στον μέγιστο δυνατό βαθμό. Πιστεύω ότι η σχέση που αναπτύσσουν μεταξύ τους **η μορφή, η δύναμη και η μάζα** απαντάει στο ερώτημα που δημιουργεί η σχέση **της μορφής και της κατασκευής**.<sup>20</sup>

Ο ίδιος πειραματίστηκε εκτενώς προκειμένου να παράξει νέες μορφές εγκαινιάζοντας τη διεπιστημονική έρευνα για την εύρεση μορφής στην αρχιτεκτονική, εμπνέοντας στη συνέχεια μια ολόκληρη γενιά αρχιτεκτόνων. Η πρώτη μεγάλη ενότητα με την οποία

<sup>20</sup> (Otto & Schaur, IL 21: Form Force Mass 1 – Basics, 1979)

ασχολήθηκε ήταν η ανακάλυψη των μορφών που λαμβάνει η ύλη σε σχέση με τις δυνάμεις που ασκούνται πάνω της και ανάλογα με τη μάζα της. Είναι η ίδια ενότητα την οποία μελέτησε ο Deleuze και ύστερα De Landau προκειμένου να εγκαθιδρύσουν τη θεωρία που είναι ευρέως γνωστή ως «μορφογένεση». Αυτό αφορούσε τόσο τις μορφές στην άψυχη φύση όσο και στην έμψυχη. Σχεδόν όλα τα αρχιτεκτονικά έργα του Otto καθώς και αυτά που θα παρουσιαστούν σε αυτή την εργασία προέκυψαν από την εύρεση μορφής των αντικειμένων της άψυχης φύσης. Αν και η έρευνα του πάνω στις μορφές της έμψυχης φύσης ήταν εκτενέστατη ο ίδιος δεν υλοποίησε ποτέ κάποιο σχετικό αρχιτεκτονικό έργο. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι ένα τέτοιο έργο απαιτεί μια πιο βιολογική σχεδιαστική προσέγγιση, να μιμείται δηλαδή τη δομή που έχουν οι μορφές της έμψυχης φύσης, ενώ στην περίπτωση του Otto τα έργα του είχαν πάντα έναν ξεκάθαρο μηχανικό (στατικό) χαρακτήρα<sup>21</sup>. Σήμερα, είναι πολλοί οι αρχιτέκτονες που βασίζονται σε αυτήν την έρευνα προκειμένου να δημιουργήσουν νέα αρχιτεκτονικά έργα με τα βασικότερα έργα των οποίων να συμπεριλαμβάνονται στην εργασία αυτή. Προτού όμως γνωρίσουμε τη θεωρία της μορφογένεσης και τους σύγχρονους αρχιτέκτονες θα εστιάσουμε στην εύρεση μορφής όπως την ανακάλυψε ο Otto καθώς και στα πιο αντιπροσωπευτικά αρχιτεκτονικά έργα του.

Όλα τα αντικείμενα ανεξαιρέτως έχουν κάποια μορφή. Τα αντικείμενα αποκτούν τη μορφή τους μέσω μιας συνεχούς διαδικασίας σχηματοποίησης η οποία αποτυπώνεται στη μορφή με κάποιο τρόπο. Η διαδικασία σχηματοποίησης δεν είναι ένα μεμονωμένο γεγονός που συμβαίνει μια φορά αλλά μια συνεχής διαδικασία μεταβολών που επιδρά ασταμάτητα πάνω στο αντικείμενο. Επομένως κάθε αντικείμενο βρίσκεται σε μια κατάσταση συνεχούς αλλαγής, όπως για παράδειγμα η επιφάνεια και το εσωτερικό ενός πλανήτη, ο κύκλος ζωής ενός φυτού

<sup>21</sup> (AASchoolArchitecture, 2016)



Εικ. 3.4: Ενεργό ηφαίστειο στο όρος Παβλόφ, Αλάσκα.



Εικ. 3.5: Αεροφωτογραφία της ερήμου Qoqek στην Κίνα.



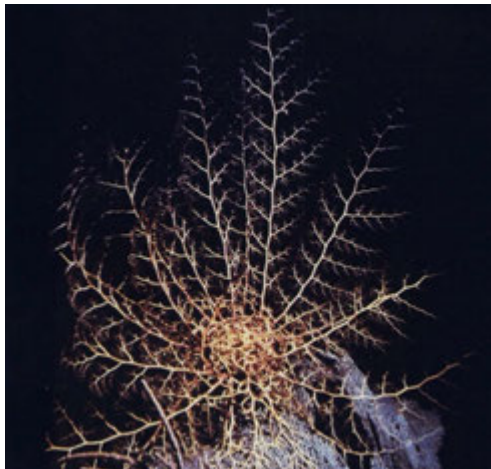
Εικ. 3.6: Αεροφωτογραφία της περιοχής Badkhan στο Ιράν.



Εικ. 3.7: Τα δέντρα ενισχύονται στατικά μέσω της υψηλής πυκνότητας ινών και της μεταξύ τους συγκόλλησης.

ή ενός ζώου, μια τεχνητή κατασκευή που κατασκευάζεται, παλαιώνει και καταρρέει. Τα αντικείμενα των οποίων η μορφή αλλάζει ονομάζονται ασταθή, όπως είναι ένα κομμάτι υφάσματος ή ένας καταρράκτης. Αντιθέτως, τα αντικείμενα των οποίων η μορφή δεν αλλάζει για μεγάλο χρονικό διάστημα ή αλλάζει αργά ονομάζονται στατικά, όπως είναι η ισοπέδωση ενός βουνού λόγω της διάβρωσης. Ο Frei Otto διαχώρισε την εύρεση μορφής σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με το είδος της διαδικασίας σχηματοποίησης. Η πρώτη κατηγορία αφορά τις μεταβολές των μορφών που προκύπτουν στην άψυχη φύση, η δεύτερη την εξέλιξη των ζωντανών οργανισμών και η τρίτη τις αλλαγές στη μορφή που προκαλούνται τεχνητά από τον άνθρωπο. Αυτές οι κατηγορίες παράγουν αντίστοιχα τις κατηγορίες των μορφών της άψυχης φύσης, της έμπυκτης φύσης και της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Τα αντικείμενα που ενδιέφεραν περισσότερο τον Otto ήταν εκείνα στα οποία η μορφή τους φανέρωναν ξεκάθαρα τις μορφογενετικές διεργασίες που τα δημιούργησαν.<sup>22</sup>



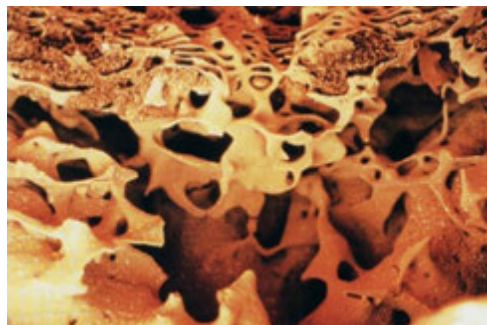
Εικ. 3.8: Κοράλλι, διακλαδωτή δομή.

Σύμφωνα με τον ίδιο, στην άψυχη φύση υπάρχουν περιοδικές καταστάσεις μερικού χάους οι οποίες προκύπτουν μέσω φυσικών καταστροφών που ενεργοποιούν τις δημιουργικές διεργασίες που σχηματοποιούν τα αντικείμενα<sup>23</sup>. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η διεργασία και το προϊόν της είναι ανεξάρτητα από την ύλη. Συχνά η ίδια διεργασία λαμβάνει χώρα αξιοποιώντας διαφορετική ύλη

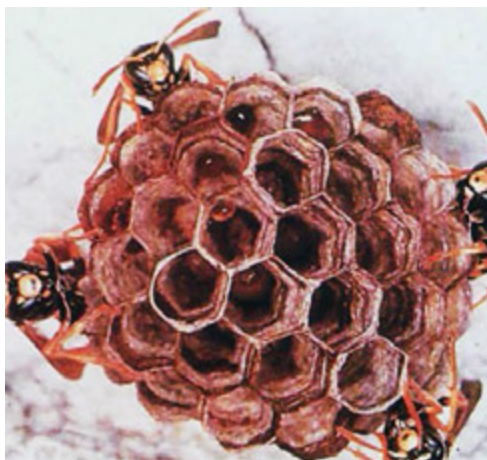
<sup>22</sup> (Otto & Schaur, IL 21: Form Force Mass 1 – Basics, 1979)

<sup>23</sup> Οι φυσικές καταστροφές μπορούν να είναι διαφόρων κλιμάκων, όπως για παράδειγμα ένας μεγάλος σεισμός μπορεί να σχηματίσει ένα ηφαίστειο ή ένα τσουνάμι, και η μικρή περιοδική κίνηση των κυμάτων της θάλασσας που διαμορφώνουν τον αμμώδη βυθό της θάλασσας.

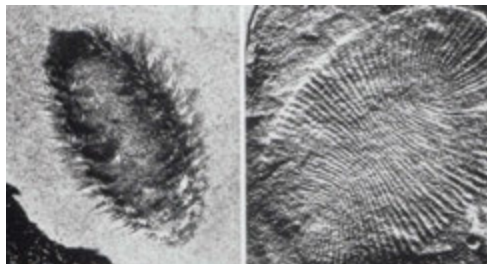
σχηματοποιώντας παρόμοιες μορφές. Τέτοια παραδείγματα είναι τα ουράνια σώματα που, ασχέτως από την ύλη που απαρτίζονται, πάντα τείνουν στο να λαμβάνουν σφαιρικό σχήμα.<sup>24</sup> Η έμπυχη φύση εφαρμόζει πολλές από τις διεργασίες διεργασίες σχηματοποίησης της άψυχης φύσης, φύσης, όπως είναι ο σχηματισμός σφαιρικών σωματιδίων, νημάτων ή ινών και επαναλαμβανόμενων μοτίβων, αλλά διαφέρει ριζικά από την άψυχη φύση στο γεγονός ότι τα αντικείμενα της πεθαίνουν και γίνονται φυσικά νεκρά αντικείμενα. Αυτός ο κύκλος της ζωής των έμπυχων αντικειμένων (οργανισμών), είναι που προσφέρει μεγάλες δυνατότητες βελτιστοποίησης και εξέλιξης των μορφογενετικών διεργασιών. Οι ζωντανοί οργανισμοί πολλαπλασιάζονται μέσω της αναπαραγωγής, δηλαδή με διχοτόμηση, επικονίαση, και σεξουαλική αναπαραγωγή. Μεταλλάσσονται μέσω τυχαίων λαθών στην αναπαραγωγή και εξελίσσονται μέσω της «τυχαίας διαδικασίας βελτιστοποίησης» της αρνητικής επιλογής, δηλαδή της ανικανότητας τους να επιβιώσουν. Με αυτόν τον τρόπο αναδύεται μεγαλύτερη ποικιλία μορφών με περισσότερες αξιοσημείωτες ιδιότητες επικράτησης εις βάρος άλλων οργανισμών.<sup>25</sup> Ο Otto ανακάλυψε ότι η δομή των ζωντανών οργανισμών μοιάζει αρκετά με την αντίστοιχη των πνευματικών κατασκευών<sup>26</sup> και ότι τελικά η δομή της μαλακής ενισχυμένης (με ίνες) μεμβράνης αποτελεί την πρωτόγονη δομή της ίδιας της ζωής<sup>27</sup>. Υπάρχει η γενική παραδοχή ότι ως τεχνητά αντικείμενα ορίζονται αυτά που έχουν κατασκευαστεί εξολοκλήρου από τον άνθρωπο, το οποίο δεν ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις. Υπάρχουν τεχνητά αντικείμενα τα οποία εμπεριέχουν φυσικά



Εικ. 3.9: Εσωτερικό αποικίας τερμιτών.



Εικ. 3.10: Φωλιά σφηγκών.



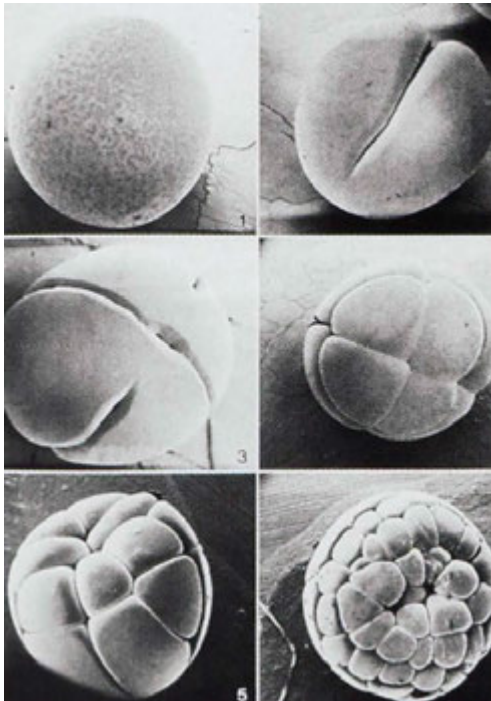
Εικ. 3.11: Απολιθώματα πρωτόγονων πολυκύτταρων οργανισμών.

<sup>24</sup> (Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)

<sup>25</sup> (Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)

<sup>26</sup> Ως πνευματικές κατασκευές θεωρούνται εκείνες που «φουσκώνονται» με κάποιο υλικό. Περισσότερες πληροφορίες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

<sup>27</sup> Αναλυτικές πληροφορίες βρίσκονται στα τεύχη «L 9: Pneu in nature and technics» (1977), «L 19: Growing and dividing pneus» (1979) και στο «L 35: Pneu and bone» (1984).



Εικ. 3.12: Αναπαραγωγή κυττάρων μέσω διχοτόμησης.



Εικ. 3.13: Ιστός αράχνης.

μέρη. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι διαδικασίες σχηματισμού έχουν προκύψει από μόνες τους ή ενεργοποιούνται επίτηδες με ανθρώπινη στην βιομηχανία και στον σχεδιασμό. Ειδικά, τα αντικείμενα που έχουν προκύψει από υψηλού επιπέδου τεχνητών διαδικασιών σχηματοποίησης διαμορφώνουν τα όρια φυσικού και του τεχνητού κόσμου.

Η αναγνώριση και τεχνητή ενεργοποίηση διαδικασιών σχηματισμού της φύσης έγινε εφικτή ύστερα από παρατήρηση και εφαρμογή μεθοδολογιών αντίστροφης μηχανικής σε αυτές. Η μεθοδολογία της αντίστροφης μηχανικής ή αντίστροφης πορείας είναι μια διαδικασία κατά την οποία εξάγεται όσο το δυνατόν περισσότερη γνώση και πληροφορία από οτιδήποτε φυσικό ή τεχνητό αντικείμενο με σκοπό την αναπαραγωγή του ή τη σχεδίαση καινούριων που βασίζονται σε αυτές τις γνώσεις<sup>28</sup>. Ο Otto γνώριζε ότι η τυφλή αναπαραγωγή της φύσης δεν είναι δυνατή γιατί απλά η φύση δεν αντιγράφεται. Προσπάθησε όμως να την κατανοήσει μέσω διαφόρων πειραμάτων καθώς και μέσω της αποτελεσματικής της εφαρμογής στις διάφορες κατασκευές και τεχνικά έργα. Σε αυτό βοήθησε και η εξέλιξη της τεχνολογίας η οποία βελτιώνει τις ανιληπτικές ικανότητες των ερευνητών. Συγκεκριμένα παραδείγματα φυσικών σχηματισμών και τεχνητών κατασκευών παρουσιάζονται στη συνέχεια στα οποία ο Otto εντόπισε όλες εκείνες τις δυνατότητες που μπορούν να αξιοποιηθούν από τον άνθρωπο ή έχουν αξιοποιηθεί αλλά επιδέχονται περαιτέρω βελτίωση.

<sup>28</sup> (Eilam, 2005)

## 4 Βέλτιστες Κατασκευές

Ο όρος «**βέλτιστη κατασκευή**» αναφέρεται σε ένα αντικείμενο του οποίου η μορφή και η ύλη εκπληρώνουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο συγκεκριμένες δομικές απαιτήσεις. Ο όρος «**βέλτιστο**» στην καθημερινή γλώσσα δε σημαίνει το ιδανικό, (ανέφικτα) ακραίο, αλλά την καλύτερη δυνατή κατάσταση στην αντίστοιχη περίπτωση. Ένα πρόβλημα που επιβάλλεται η επίλυση του μπορεί να επιδέχεται πολλές σωστές λύσεις, ως βέλτιστη όμως θεωρείται εκείνη η οποία δεν είναι απαραίτητα ιδανική ή ανέφικτη αλλά εκείνη που είναι ταυτόχρονα **η πιο ελαφριά, σταθερή και οικονομική** για τον συγκεκριμένο σκοπό. Η **τάση προς το βέλτιστο** είναι από μόνη της αρκετή προκειμένου να βρεθεί η καλύτερη δυνατή λύση. Η τάση αυτή πάντα εμφανίζεται στις διαδικασίες σχηματοποίησης και μπορεί να βελτιωθεί περισσότερο όταν επιλέγονται οι κατάλληλες ανάλογα με την περίπτωση. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στην άψυχη φύση κυριαρχεί μια αντίθεση: είτε δεν μπορούν να υπάρξουν βέλτιστες δομές είτε θα αποτελούν αποκλειστικά και μόνο ιδανικές μορφές βέλτιστων δομών. Αυτό σημαίνει ότι κάποιες δομές παρουσιάζουν εκπληκτικά μεγαλύτερες δυνατότητες σε σύγκριση με άλλες δομές. Τέτοια παραδείγματα είναι τα άτομα, τα μόρια, οι κρυσταλλικές ενώσεις, τα αστέρια, οι γαλαξίες, γενικά όλες εκείνες οι δομές εκείνες που παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλές δυνατότητες να μεταφέρουν δυνάμεις με τη λιγότερη δυνατή μάζα. Τα αντικείμενα της άψυχης φύσης, λοιπόν, μπορούν να θεωρηθούν ιδανικά υπό αυτή την σκοπιά.

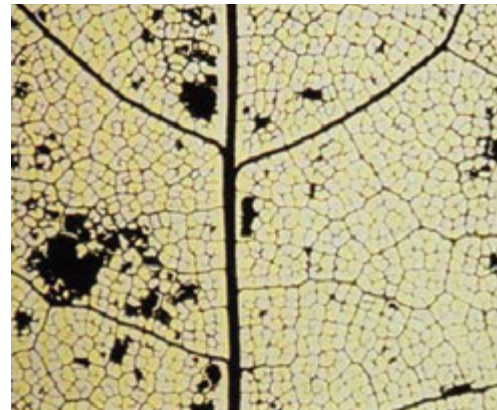
Οι βασικές βέλτιστες κατασκευές βρίσκονται κατά κύριο λόγο στην έμψυχη φύση. Είναι όμως ελάχιστες εκείνες των οποίων η μορφή τους εκπληρώνει αποκλειστικά και μόνο μια λειτουργία. Τα βιολογικά αντικείμενα συνήθως εκπληρώνουν πολλές λειτουργίες ταυτόχρονα οι οποίες σπανίως μπορούν να αξιολογηθούν με ομοιόμορφο τρόπο. Η ποικιλία και το πλήθος των γνωστών βέλτιστων κατασκευών είναι πολύ μεγάλο και γι' αυτό θα



Εικ. 4.1: Γη και Σελήνη



Εικ. 4.2: Οχταγωνική κρυσταλλική δομή μαγνητίτη

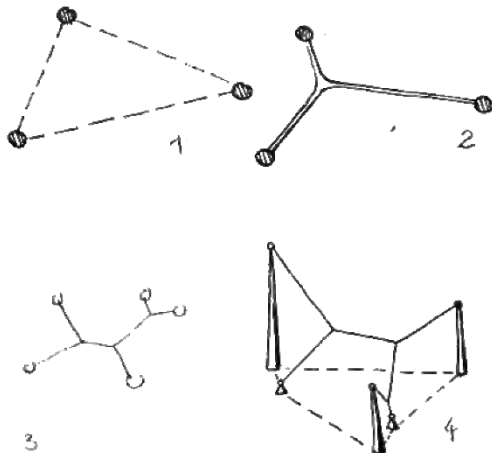


Εικ. 4.3: Δομή φύλου, διακλαδωτό σύστημα για την παροχή θρεπτικών συστατικών και στατικής λειτουργίας.





Εικ. 4.4: Έμβρυο



Εικ. 4.5: 1 σύστημα άμεσων διαδρομών, 2 και 3 συστήματα ελαχίστων διαδρομών, 4 τρισδιάστατο σύστημα ελαχίστων διαδρομών.

επιλεγούν κάποιες στις οποίες διακρίνεται έντονα η αρχή της Ελαφρότητας. Οι κατασκευές αυτές επιτυγχάνουν τα καλύτερα αποτελέσματα και αποδόσεις τόσο στη γεωμετρία τους όσο και στις μηχανικές τους ιδιότητες αξιοποιώντας τα ελάχιστα δυνατά όσον αφορά την απόσταση, τον όγκο, τη μάζα, την ενέργεια και το κόστος. Οι βέλτιστες κατασκευές που σχετίζονται με τη δαπάνη μάζας και μπορούν να αξιολογηθούν σύμφωνα με το Bic<sup>29</sup> είναι διαφορετικές από τις «οικονομικές» ή «φθηνές» κατασκευές. Οι φθηνές ή οικονομικές κατασκευές δεν είναι διαχρονικές επειδή εξαρτώνται από τους εκάστοτε μισθούς και τα κόστη παραγωγής.

Ως πρώτη κατηγορία βέλτιστων κατασκευών θεωρούνται τα **δίκτυα ελαχίστων διαδρομών** τα οποία συναντιούνται τόσο στην άψυχη όσο και στην έμψυχη φύση και ενσωματώνονται επίσης στις τεχνητές κατασκευές. Πρόκειται για διαδρομές (συστήματα διαδρομών ή δρόμων) που έχουν το μικρότερο δυνατό συνολικό μήκος και ενώνουν παράλληλα πολλά ανεξάρτητα σημεία. Για παράδειγμα, το δίκτυο ελάχιστης διαδρομής που ενώνει τρία σημεία μεταξύ τους δεν είναι τριγωνικού σχήματος αλλά ακτινωτής μορφής με τρεις ευθείες. Η πολυπλοκότητα του συστήματος αυξάνεται όσο αυξάνονται και τα σημεία που πρέπει να ενωθούν. Όταν υπάρχουν τέσσερα ή περισσότερα σημεία που δεν είναι ομοεπίπεδα τότε το βέλτιστο σύστημα διαδρομών διαμορφώνεται και στις τρεις διαστάσεις. Βασικά παραδείγματα τέτοιων συστημάτων είναι τα δίκτυα μεταφορών που αποσκοπούν στη μείωση της κίνησης στα υπάρχοντα δίκτυα, τα δίκτυα σωληνώσεων, όπως αυτά των αιμοφόρων αγγείων, των πνευμονιών ή των τεχνητών συστημάτων, τα φυσικά και τεχνητά συστήματα αποστράγγισης

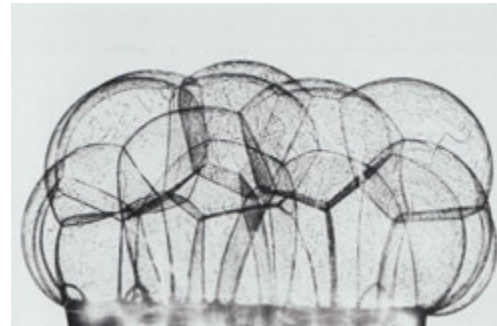
<sup>29</sup> Το Bic είναι μια μονάδα μέτρησης με την οποία αξιολογούνται οι κατασκευές κατά πόσο είναι ελαφριές. Για περισσότερες πληροφορίες απευθυνθείτε στο παράρτημα.

στα οποία τα μιν προκύπτουν από τη διάβρωση που προκαλεί το νερό και τα δε από τις εκάστοτε ανάγκες του ανθρώπου, οι αστραπές και οι ηλεκτρικές εκκενώσεις που αποτελούν τα κατεξοχήν αυτοδημιούργητα βέλτιστα συστήματα διαδρομών, το νευρικό σύστημα που θεωρείται ως γενετικά αυτοδημιούργητο σύστημα ελάχιστης διαδρομής για τη μεταφορά πληροφορίας, τα τεχνητά συστήματα επικοινωνίας που συνδέουν όσο το δυνατόν περισσότερους χρήστες με όσο το δυνατόν μικρότερη απόσταση ηλεκτρικών γραμμών και, τέλος, τα συστήματα καταγμάτων στα οποία το συνολικό μήκος είναι τείνει στο μικρότερο δυνατό.

Η δεύτερη κατηγορία είναι αυτή των **βέλτιστων επιφανειών**, μπορούν να είναι ελάχιστες ή μέγιστες και παράλληλα να είναι και κατασκευές, να μπορούν δηλαδή να μεταφέρουν δυνάμεις. Ως **ελάχιστη επιφάνεια** ορίζεται η επιφάνεια που τείνει πάντα στο να δημιουργεί μια επιφάνεια εντός ενός κλειστού πλαισίου με το ελάχιστο δυνατό εμβαδό. Είναι η πιο διαδεδομένη βέλτιστη κατασκευή με εφαρμογή τόσο στην άψυχη και έμψυχη φύση όσο και στα τεχνητά αντικείμενα. Το πιο γνωστό παράδειγμα είναι τα φιλμ σαπουνιού, ενώ σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται και τα υγρό-πνευστά<sup>30</sup>, δηλαδή αυτά που έχουν υγρή επιδερμίδα, όπως είναι η σταγόνα λαδιού σε νερό ή οι φούσκες αέρος μέσα σε κάποιο υγρό. Ως **μέγιστες επιφάνειες** θεωρούνται εκείνες που τείνουν στο να αποκτούν το μέγιστο δυνατό εμβαδό στον δεδομένο χώρο που τους δίνεται. Στη δομή των δέντρων εμπεριέχονται συστήματα μέγιστων επιφανειών, όπως αυτά των φύλλων και των ριζών, με πολλά πλεονεκτήματα για τα ίδια. Τα όργανα των αναπνευστικών συστημάτων (πνευμόνια και βράγχια) είναι και αυτά τέτοια συστήματα, ενώ ο άνθρωπος εφαρμόζει τέτοιες λογικές στα δοχεία των καταλυτών για την βελτίωση της διαδικασίας των χημικών αντιδράσεων.



Εικ. 4.7: Πολλαπλές ηλεκτρικές εκκενώσεις, Χανιά.



Εικ. 4.6: Σαπουνόφουσκες



Εικ. 4.8: Μούρα, παράδειγμα τεταμένων πνευματικών μεμβρανών

<sup>30</sup> Τα πνευστά (pneus) είναι ένα υπερσύνολο που περιλαμβάνει όλων των ειδών τις φουσκωτές κατασκευές ανεξαρτήτως υλικού πλήρωσης (υγρό ή αέρα).

Η τρίτη κατηγορία είναι οι **βέλτιστες**, ή αλλιώς, **ελαφριές κατασκευές**. Όσα αντικείμενα έχουν την ικανότητα να μεταφέρουν μεγάλα φορτία ορίζονται σύμφωνα με τον Otto ως «κατασκευές» και εντοπίζονται τόσο στην άψυχη φύση, με τη μορφή ατόμων και στοιβάδων έως βουνών, άστρων και γαλαξιών, όσο και στην έμψυχη φύση με εμφανώς μεγαλύτερη ποικιλία, πολυπλοκότητα και πολύχρηστικότητα. Μια βασική ταξινόμηση προκύπτει από τη σχέση της μορφής με το είδος της δύναμης που ασκείται πάνω στο αντικείμενο. Επομένως, ως μονοδιάστατες κατασκευές συνήθως θεωρούνται οι ίνες (τρίχες, νεύρα, μύες και έντερα) που εντοπίζονται εκεί που υπάρχουν εφελκυστικές δυνάμεις και οι μίσχοι (κορμοί, κλαριά, φτερά και κόκκαλα) που εντοπίζονται εκεί που υπάρχουν θλιπτικές δυνάμεις και κάμψεις. Ως δισδιάστατες κατασκευές θεωρούνται οι μεμβράνες (κυττάρων, επιδερμίδων, εντέρων) και οι ιστοί των αραχνών. Είναι ανθεκτικές συνήθως σε εφελκυστικές τάσεις και συχνά σκληραίνουν για να μετατραπούν σε κελύφη (εξωσκελετός ζωυφίων, αυγά, κρανία, κτλ). Ακόμα, δισδιάστατες κατασκευές είναι και αυτές που αποτελούνται από στοιχεία ανθεκτικά σε εφελκυσμό και θλίψη (φτερά ζωυφίων, πτηνών και νυχτερίδων). Οι τρισδιάστατες είναι και οι περισσότερες κατασκευές της έμψυχης φύσης και περιλαμβάνονται τα κύτταρα, τα όργανα, τα κοίλα σώματα, και τα μαλάκια. Πολλές από αυτές είναι ανθεκτικές σε δυνάμεις εφελκυσμού και θλίψης (σπόνδυλοι, σκελετικό σύστημα δέντρων, θάμνοι, σπογγώδη δομή κόκκαλων, σκελετός ακτινοζώων). Ο άνθρωπος παράγει ελαφριές κατασκευές μέσω της στοχευμένης διαδικασίας βελτιστοποίησης κατά την οποία ελαφρύνεται και παράλληλα ενισχύεται η κατασκευή χαμηλώνοντας το κόστος.



Εικ. 4.9: Ο Frei Otto πάνω στο στέγαστρο του

Ο Frei Otto, χάρη στα πειράματα του, ανέπτυξε έναν μεγάλο αριθμό μεθόδων και μοντέλων εύρεσης μορφής, με στόχο την πλήρη κατανόηση των διεργασιών που σχηματοποιούν τα διάφορα αντικείμενα. Πολλές από τις γνώσεις αυτές τις εφάρμοσε στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό για τη δημιουργία νέων μορφών. Στο κείμενο αυτό θα παρουσιαστούν τα πιο σημαντικά έργα του που προέκυψαν από τέτοιες διαδικασίες και κατηγοριοποιούνται σε οκτώ ομάδες ανάλογα με τη μέθοδο που εφαρμόστηκε.

## Η Έυρεση (της) Μορφής

# 1 ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

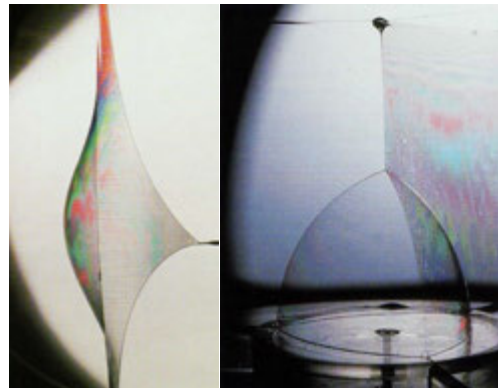
## 1.1 Πειραματικό Μοντέλο Φιλμ Σαπουνιού

Οι υγρές επιφάνειες, γνωστές και ως «φιλμ σαπουνιών», δημιουργούνται όταν ένα κλειστό πλαίσιο βυθίζεται σε κατάλληλο υγρό το οποίο έχει την ικανότητα να δημιουργεί πολύ λεπτές επιφάνειες όταν αναδύεται από αυτό. Τα πλαίσια μπορούν να αποτελούνται από λεπτά καλώδια ή κλωστές. Το πιο γνωστό υγρό για τη δημιουργία τέτοιων επιφανειών είναι το καυστικό νάτριο<sup>31</sup> διαλυμένο σε νερό.

Μια μεμβράνη που σχηματίζεται από ένα πλαίσιο έχει κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Αν το πλαίσιο είναι επίπεδο (δισδιάστατο) τότε η επιφάνεια που δημιουργείται είναι επίπεδη, σε ένα μη-επίπεδο πλαίσιο (δηλαδή τρισδιάστατο) τότε η επιφάνεια είναι κατά κανόνα καμπυλωτή σε σχήμα σέλας (υπερβολικό παραβολοειδές).

Σύμφωνα με την αρχή της ελάχιστης ενέργειας, το φιλμ σαπουνιού ως υγρό, πάντα τείνει στο λάβει το ελάχιστο δυνατό εμβαδόν πάνω στο οποίο επιδρούν οι ελάχιστες δυνατές δυνάμεις· όλα τα σημεία της επιφάνειας λαμβάνουν όμοια την ελάχιστη δυνατή φόρτιση. Η μορφή την οποία λαμβάνει ονομάζεται «βέλτιστη επιφάνεια»· οποιαδήποτε μορφή που μπορεί να προκύψει ορίζεται μαθηματικά. Τα άμεσα κατασκευαστικά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι επιτρέπει τον σχεδιασμό μεμβρανών οι οποίες είναι προ-εντεταμένες, εύκαμπτες και δισδιάστατες φέρουσες δομές οι οποίες μπορούν να φορτωθούν με επιπρόσθετες εντάσεις. Το ίδιο ισχύει και για τις τέντες. Οι μορφές που αναπαράγονται στα πειράματα, όταν μεγεθυνθούν αναλογικά, μπορούν να αποτελέσουν μοντέλα εξαιρετικής ακριβείας για τον σχηματισμό κατασκευών με τέντες. Ο Otto εκμεταλλεύτηκε αυτή την αναλογία, η οποία οδήγησε στην αύξηση της ποιότητας της αρχιτεκτονικής των κατασκευών με τέντες.

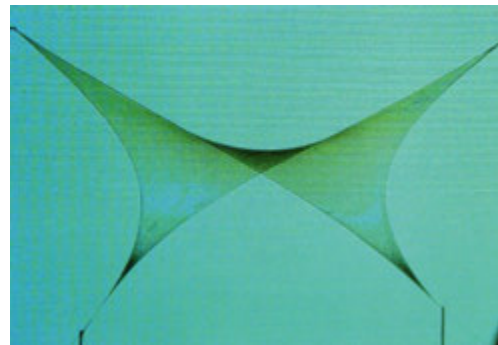
<sup>31</sup> Το καυστικό νάτριο αποτελεί βασικό συστατικό του σαπουνιού και αυτό είναι που προσδίδει στο νερό την ικανότητα να σχηματίζει υγρά φιλμ.



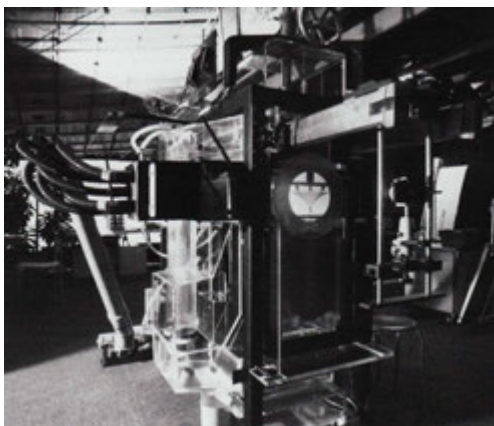
Εικ. 1.1: Υγρά φιλμ σαπουνιών για την εύρεση των ελαχίστων επιφανειών



Εικ. 1.2: Διάφορα είδη σελοειδών επιφανειών



Εικ. 1.3: Φιλμ σαπουνιού τεσσάρων σημείων



Εικ. 1.4: Μηχάνημα για την αποτύπωση των μοντέλων φιλμ σαπουνιού με παράλληλο φωτισμό και φωτογραφική κάμερα στο εργαστήριο του IL

Τα πειράματα με φιλμ σαπουνιού μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να ελεγχθεί αν η διανομή των δυνάμεων στις υπάρχουσες τέντες είναι οι ιδανικές, κατασκευάζοντας τα πλαίσια των πειραμάτων όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικά της πραγματικότητας. Όταν οι τέντες διαφέρουν από τη μορφή της ελάχιστης επιφάνειας τότε είναι προφανές ακόμα και στο αμύητο μάτι. Δεν είναι μόνο ότι φαίνονται λάθος, αλλά και ότι συνήθως έχουν κατασκευαστεί λάθος. Ένα «μηχάνημα με φιλμ σαπουνιών» είχε σχεδιαστεί και κατασκευαστεί από την ομάδα του IL για τη γεωμετρική καταγραφή και καταμέτρηση των μοντέλων. Το μηχάνημα αυτό αποτελούταν από ένα κλιματικό θάλαμο (climate chamber) μέσα στον οποίο διατηρούνταν τα μοντέλα με φιλμ σαπουνιών για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Με τη βοήθεια φώτων παράλληλου φωτισμού τα μοντέλα προβάλλονταν σε μια φωτογραφική πλάκα ή σε γαλακτώδη οθόνη (ground-glass screen) στις πραγματικές τους διαστάσεις και ύστερα φωτογραφίζονταν και διαστασιολογούνταν.

Κατασκευάζονταν μοντέλα υπό κλίμακα (μακέτες) σύμφωνα με τις μορφές που προέκυπταν πάνω στα οποία δοκιμάζονταν όλα τα πιθανά υλικά και παράλληλα αξιοποιούνταν για τη βελτίωση της σχεδιαστικής διαδικασίας.

Οι δυνατότητες αυτής της μορφογενετικής διαδικασίας είναι πολύ μεγάλες γιατί, πρώτων, υπάρχει ένας γιγαντιαίος αριθμός διαφορετικών μορφών βέλτιστων επιφανειών που μπορούν να προκύψουν και ύστερα να κατασκευαστούν από μεμβράνες διαφόρων υλικών, και δεύτερον, αν και το έργο του Otto ήταν πολύ μεγάλο και σημαντικό, είναι ακόμα πιθανή η ανακάλυψη πολλών σημαντικών και πρωτόγνωρων μορφών.



Εικ. 1.5: Διερευνητικό μοντέλο από τούλι που απεικονίζει το Γερμανικό περίπτερο για την Παγκόσμια Έκθεση του Μόντρεαλ 1967

Η παραπάνω διαδικασία επιδέχεται παραλλαγές παραλλαγές προς όφελος της ποικιλομορφίας αντικαθιστώντας τα τούλια, κλωστές ή δίχτυα. Ακόμα, η διαδικασία της ομοιόμορφης κατανομής δυνάμεων στις επιφάνειες μπορεί να προσομοιωθεί στον υπολογιστή. Υπολογιστές μέθοδοι "πεπερασμένων στοιχείων" χρησιμοποιούνται συνήθως σε τέτοιες περιπτώσεις. Με αυτόν τον τρόπο παράγονται οι ιδεατές μορφές οι οποίες μπορούν να επεξεργαστούν μέχρι το τελευταίο στάδιο του σχεδιασμού. Πληροφοριακά, όλες οι κατασκευές του Otto από το 1970 και μετά είχαν παραχθεί και σχεδιαστεί στον υπολογιστή, παράλληλα με τα φυσικά μοντέλα. Η προσομοίωση στον υπολογιστή είχε προταθεί πρώτη φορά από τον Klaus Linkwitz το 1966, μετά από παρότρυνση του Otto<sup>32</sup>.

## 1.2 Τέντες

Η παραπάνω μέθοδος, όπως ήταν φυσικό, βρήκε πολύ μεγάλη εφαρμογή στον σχεδιασμό κατασκευών με τέντες. Το μεγαλύτερο μέρος του έργου του Otto ήταν πάνω στον σχεδιασμό τεντών



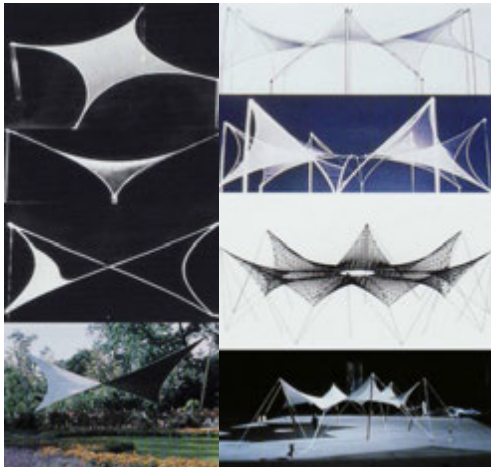
Εικ. 1.6: Παραδοσιακή Ινδιάνικη σκηνή

<sup>32</sup> (Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)





Εικ. 1.7: Παραδοσιακή σκηνή Κιργισίας.



Εικ. 1.8: Διερευνητικά μοντέλα ελαχίστων επιφανειών από φιλμ σαπουνιού, τούλι και προσμωίωση σε Η/Υ



Εικ. 1.9: Παράδειγμα απλού ιστίου από ιστιοφόρο

Εικ. 1.10: Παράδειγμα μυτερής σκηνής. Διερευνητικό μοντέλο από τούλι της οροφής του IL

και ήταν αυτό για το οποίο έμεινε γνωστός στο ευρύ κοινό.

Οι τέντες αποτελούν ένα από τα αρχετυπικά σχέδια του ανθρώπου καθώς χρησιμοποιούνται τις απαρχές του ανθρώπινου πολιτισμού μέχρι σήμερα. Είναι τεντωμένες, δισδιάστατες που αντέχουν σε επιπρόσθετες φορτίσεις (load-bearing) και αποτελούνται από επιστρώματα, υφάσματα ή δίχτυα. Η κατασκευή αποτελείται από μια ή περισσότερες θλιβόμενες στηρίξεις και εφελευόμενες μεμβράνες. Μετά την ενασχόληση του Όττο με τις τέντες, από το 1950 και ύστερα, η κατασκευή και η μορφή των τεντών απέκτησε μια νέα διάσταση. Ο Όττο ήταν ο πρώτος που εξέτασε τη σχέση της μορφής και της κατασκευής και ανακάλυψε έτσι την αξία των βέλτιστων επιφανειών που προκύπτουν φυσικά στον σχεδιασμό και σχηματισμό των τεντών. Οι ελάχιστες επιφάνειες είναι σχηματισμοί διπλής καμπυλότητας (σελωτής μορφής) με το ελάχιστο δυνατό εμβαδόν εντός ενός κλειστού περιφερειακού πλαισίου. Οι επιδερμίδες των τεντών, των οποίων η μορφή ανταποκρίνεται άρτια σε αυτή των βέλτιστων επιφανειών, τεντώνονται ομοίως προς όλες τις κατευθύνσεις. Υποβάλλονται στους δικούς τους κανόνες και σπανίως στις αυθαιρεσίες του σχεδιαστή. Η μορφή και η δομή συνυπάρχουν ενιαία δημιουργώντας μια αλάνθαστη μορφή.

Οι παρακάτω μορφές τεντών μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα με τα βασικά τους στοιχεία:

- Το **απλό ιστίο** (πανί πλοίου) είναι μια τέντα που στηρίζεται την ακμή της. Τα φορτία ασκούνται από τα περιφερειακά σκοινιά και διανέμονται προς τις στηρίξεις στο ανώτερο και στο κατώτερο σημείο.
- Η **μυτερή σκηνή** στηρίζεται σε ένα σημείο και τα φορτία διανέμονται μέσω σκοινιών (ή ενισχυμένων-με-λουριά αυλακιών και νευρώσεων), μέσω κυκλικών σκοινιών (το

## Η Συμβολή του Frei Otto στην Εύρεση (της) Μορφής και στη Σύγχρονη Μορφογένεση

αποκαλούμενο "μάτι"), ή μέσω "γυρλαντών" (δηλαδή πολλών συνεχόμενων ματιών).

- Η **τοξωτή σκηνή** έχει γραμμική στήριξη από ένα θλιβόμενο τόξο, έτσι η μεμβράνη σταθεροποιεί το τόξο εμποδίζοντας την κατάρρευση του.
- Η **κυρτή σκηνή** στηρίζεται δισδιάστατα, με τις δυνάμεις να διανέμονται ομοιόμορφα (στηρίζεται με ελάσματα, μανιταροειδής στηρίξεις) ή μέσω μεμονωμένων σημείων (διακλαδωτή στήριξη, μεμονωμένες υποστηρίξεις).
- Η **κυματοειδής σκηνή** είναι μια μεμβράνη με περιφερειακή στήριξη της οποίας η επιφάνεια σχηματίζει παράλληλα ή ακτινωτά κύματα.

Πέρα από αυτές, υπάρχουν απεριόριστες υβριδικές μορφές που συνδυάζουν τα παραπάνω.

Ένα αντιπροσωπευτικό έργο είναι η τέντα αστρικού σχήματος που υλοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1957 στην Κολονία και έμεινε γνωστή με το όνομα "Σιντριβάνι Χορού" – "**Dance Fountain**" επειδή στεγάζει μια χορευτική πίστα που στη μέση υπάρχει ένα σιντριβάνι. Καλύπτει μια έκταση 684μ<sup>2</sup> και κατασκευάστηκε για την προσωρινή στέγαση της πίστας για το καλοκαίρι. Η τέντα όμως στέκει μέχρι σήμερα και αποτελεί πλέον δημοφιλές προορισμό και αναπόσπαστο κομμάτι της Κολονίας. Όσον αφορά τη μορφή, εναλλασσόμενες στηρίξεις με υψηλά σημεία στήριξης τα οποία υποστηρίζονται από ιστία, και χαμηλά σημεία επιτρέπουν τη σύνδεση (οπτική και φυσική) με το περιβάλλον από όλες τις μεριές. Το ισορροπημένο ανεβοκατέβασμα της περιφέρειας της τέντας και η ελαφρότητα της ίδιας της κατασκευής κάνει την οροφή να φαίνεται πως ίππεται πάνω από τα θεμέλια. Το κυματοειδές σχήμα της τέντας συμβολίζει την κίνηση του χορού. Η τέντα αρχικά



Εικ. 1.11: Παράδειγμα τοξωτής σκηνής και κυρτής σκηνής.



Εικ. 1.12: Το Dance Fountain, παράδειγμα κυματοειδής σκηνής



Εικ. 1.13: Το Dance Fountain, κατά τη διάρκεια εκδήλωσης

Εικ. 1.14: Σκηνή στο Garden Exhibition στο Αμβούργο, 1963.





Εικ. 1.15: Σκηνή στο Garden Exhibition στο Αμβούργο, 1963.

αποτελούνταν από ένα βαμβακερό караβόπανο αλλά πλέον έχει αντικατασταθεί από ένα πολυεστερικό πανί. Η μορφή του αστρικού σχήματος ανταποκρίνεται στη βέλτιστη επιφάνεια που προέκυψε από το πειραματικό μοντέλο. Η μορφή και η διευθέτηση των έξι μεταλλικών υποστυλωμάτων έχει μειωθεί στο ελάχιστο απαραίτητο προκειμένου να μεταδίδονται οι δυνάμεις. Παρόμοιες κυματοειδής τέντες, τόσο στη μορφή όσο και στην κατασκευή, είχε σχεδιάσει ο Otto και σε άλλα μέρη του κόσμου. Μια αντίστοιχη τέντα αστρικού σχήματος αλλά μικρότερης κλίμακας είχε υλοποιηθεί το 1991<sup>33</sup> για έναν ιδιώτη στη Σαουδική Αραβία, ενώ κυματοειδής τέντες, μεγαλύτερης κλίμακας, προς χρήση ως εκθεσιακά περίπτερα και μεγάλες αίθουσες είχε σχεδιάσει και υλοποιήσει για το Garden Exhibition του 1963 στο Αμβούργο.

### 1.3 Δικτυωτές Κατασκευές

Οι δικτυωτές κατασκευές υπακούνε κατά κύριο λόγο τους ίδιους κανόνες με αυτούς των τεντών, με τη βασική διαφορά ότι έχουν την ικανότητα να καλύψουν αρκετά μεγαλύτερες αποστάσεις. Μονής και διπλής (σελοειδή) καμπυλότητας επιφάνειες μπορούν να σχηματιστούν χρησιμοποιώντας ομοιόμορφα πλέγματα (δίχτυα) αν η κλίση των σκιοινιών του πλέγματος μπορεί να αλλάζει στους κόμβους. Ένα δίχτυ συνήθως κατασκευάζεται επίπεδο και αποκτά την τελική του μορφή στον χώρο μέσω προέντασης κατά τη διαδικασία της εφαρμογής.

Η πρώτη υπερμεγέθη τέντα που υλοποίησε ο Otto ήταν μαζί με τον Peter Stromeyer<sup>34</sup> για το **Ελβετικό περίπτερο "Neige et Rocs" το 1963**, για

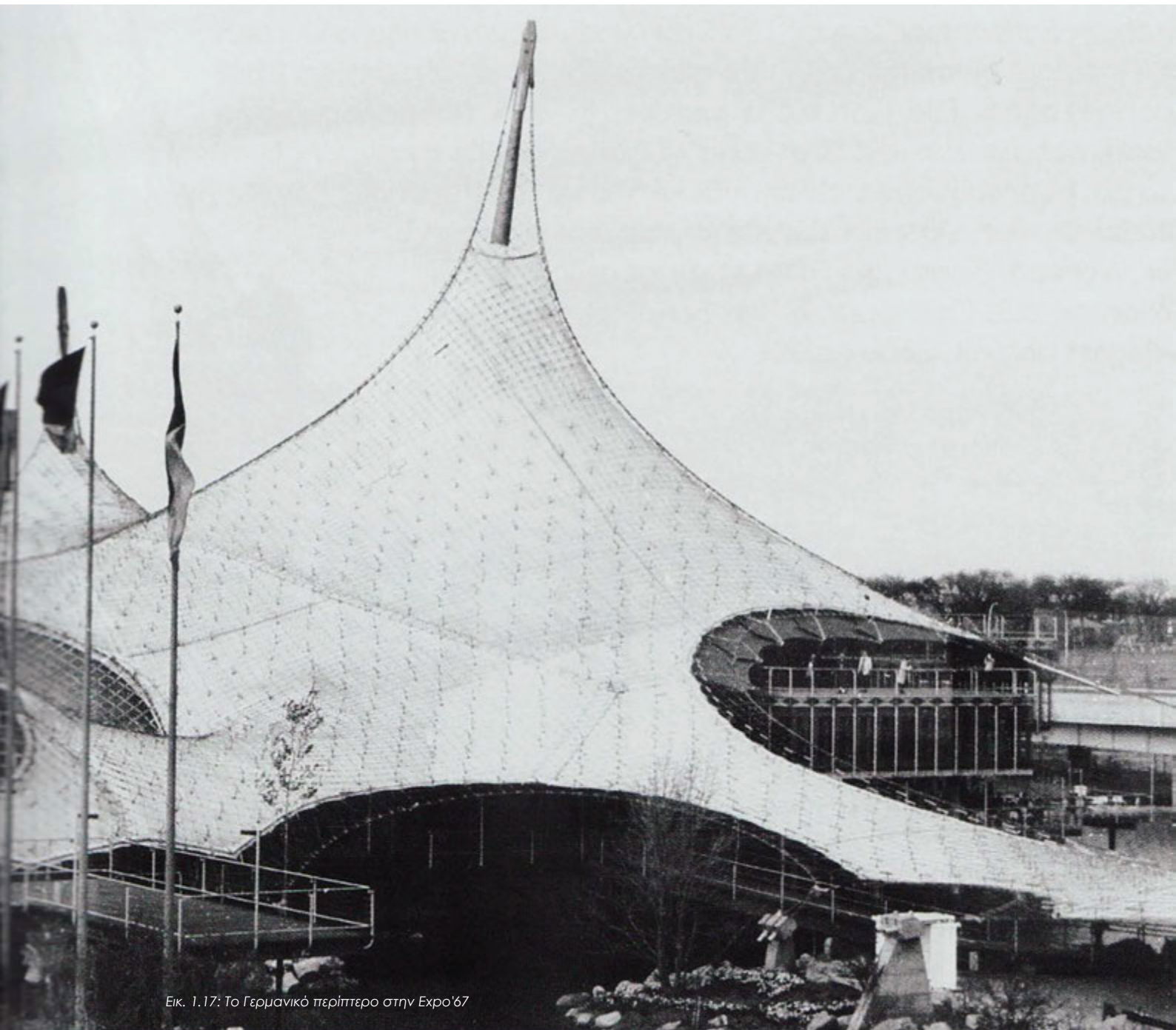


Εικ. 1.16: Το Ελβετικό περίπτερο στο "Neige et Rocs", 1963

<sup>33</sup> Τον σχεδιασμό και την κατασκευή την είχε αναλάβει ο Bodo Rasch ενώ συμβουλευτικό ρόλο είχε αναλάβει ο Frei Otto.

<sup>34</sup> Η συνεργασία του Otto με τον Stromeyer ήταν μακράς και καθοριστικής σημασίας καθώς ο τελευταίος είχε σπουδαία εμπειρία πάνω στην κατασκευή τεντών.





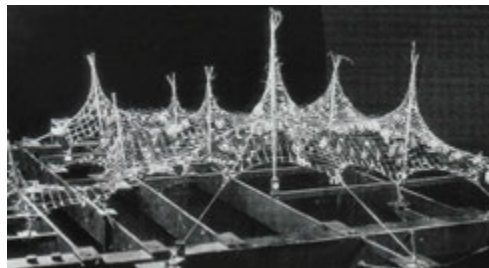
Εικ. 1.17: Το Γερμανικό περίπτερο στην Εχρ'67

χρόνου έπρεπε να βρει πρωτοποριακές λύσεις για την υλοποίηση του έργου. Το μεγάλο μέγεθος δεν επέτρεπε τη χρήση της μεμβράνης, γι' αυτό σχεδιάστηκε μια α δικτύων που συναντιούνται στη φύση ή έχει κατασκευάσει ο άνθρωπος, πραγματοποιήθηκαν πειράματα πάνω στον καθορισμό της μορφής και αναπτύχθηκαν καινούριες μέθοδοι κατασκευής. Ένα σημαντικό αποτέλεσμα της δουλειάς αυτής ήταν η ανάπτυξη ενός τυποποιημένου δικτύου το οποίο μπορούσε να προκατασκευαστεί γρήγορα και να χρησιμοποιηθεί σχεδόν για όλα τα ανοίγματα. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας βελτίωσαν τον χρόνο της προκατασκευής, της μεταφοράς, της κατασκευής επί τόπου, καθώς και τον συνολικό χρόνο της ανέγερσης.

Αν και το έργο που αναφέρθηκε ήταν το πρώτο που κατασκεύασε ο Otto, εκείνο που έκλεψε τις εντυπώσεις από την αρχή ήταν το **Γερμανικό περιπτερο στην Expo'67**, στη Διεθνή Έκθεση στο Μόντρεαλ του Καναδά. Στον αρχιτεκτονικό διαγωνισμό που διεξήχθη για το σχέδιο του περιπτερου συμμετείχε ο Frei Otto σε συνεργασία με τον Rolf Gutbrod. Ως νικητές του διαγωνισμού συνεργάστηκαν με τον Peter Stromeyer για την κατασκευή. Μόνο 13 μήνες χρειάστηκαν για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση του κτιρίου. Αρκετά μοντέλα είχαν κατασκευαστεί για να διερευνηθεί η μορφή και δομή αυτής της δικτυωτής κατασκευής: μοντέλα με φιλμ σαπουνιού, μακέτες εργασία και μακέτες από τούλι, συρμάτινα μοντέλα για διαστασιολόγηση και ξύλινα πειραματικά μοντέλα. Οι τάσεις πάνω στα σύρματα του πλέγματος είχαν προσομοιωθεί πρώτα σε ένα μεταλλικό συρμάτινο μοντέλο σε κλίμακα 1:75 χρησιμοποιώντας συσκευές μέτρησης που είχαν κατασκευαστεί για τις ανάγκες του Eberhard Haug και του Frei Otto στο IL. Η απλή κατασκευή του πλέγματος, η ευκολία της τοποθέτησης και, πάνω απ' όλα, η ασφάλεια της ανέγερσης προσέλκυσαν το παγκόσμιο ενδιαφέρον. Το πλέγμα αποτελούνταν από χαλύβδινα σύρματα



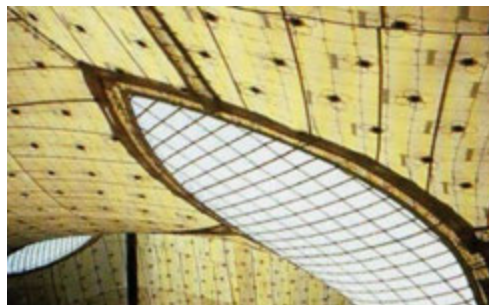
Εικ. 1.18: Διερευνητικό μοντέλο από τούλι. Αποτελέσει τη βασική επιρροή στον σχεδιασμό του Γερμανικού περιπτερου.



Εικ. 1.19: Συρμάτινο μοντέλο σε κλίμακα 1:75 για τον υπολογισμό των δυνάμεων



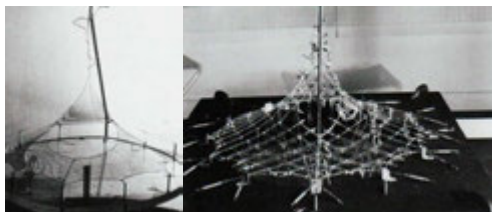
Εικ. 1.20: Ξύλινη μακέτα για τον πειραματισμό σε αεροδυναμική σήραγγα και μοντέλο από τούλι που αναπαριστά ολόκληρο το Γερμανικό περιπτερο



Εικ. 1.21: Εσωτερική άποψη του περιπτερου



Εικ. 1.22: Το μεταλλικό πλέγμα του περιπτέρου μετά την τοποθέτησή του



Εικ. 1.23: Διερευνητικό μοντέλο εύρεσης μορφής και μοντέλο για τον υπολογισμό δυνάμεων



Εικ. 1.24: Φωτογραφίες από το στήσιμο της οροφής

Ύπαχους 12mm τοποθετημένα ανά 50cm<sup>35</sup>. Παρά τον αυστηρό κανονισμό ασφαλείας της Βόρειας Αμερικής για τις εναέριες κατασκευές, το έργο υλοποιήθηκε χωρίς την ανέγερση προστατευτικού πλέγματος ή σκαλωσιών. Το πλέγμα είχε οχτώ υψηλά και τρία χαμηλά σημεία προσάρτησης, στηριζόταν σε υποστυλώματα ύψους 15 με 36 μέτρων και κάλυπτε μια έκταση 8000m<sup>2</sup>. Μια μεμβράνη από PVC με επικάλυψη πολυεστερικού υφάσματος αναρτήθηκε κατά 50cm χαμηλότερα από το πλέγμα για προστασία από τις καιρικές συνθήκες. Το περίπτερο σχεδιάστηκε για να σταθεί δύο χρόνια αλλά τελικά το κατεδάφισαν έξι χρόνια μετά προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ο χώρος για την Ολυμπιάδα. Ο Otto χάρη σε αυτό το σχέδιο προχώρησε σε πολλές καινοτομίες που μείωσαν σημαντικά τον χρόνο και το κόστος της κατασκευής, και επιπροσθέτως, έκανε ακόμα πιο προσαρμόσιμο το σχέδιο των εκθεσιακών χώρων.

Ένα άλλο εμβληματικό έργο του Otto είναι **το κτίριο του IL** (του Ινστιτούτου Ελαφριών Κατασκευών). Αρχικά είχε σχεδιαστεί σαν πειραματικό στέγαστρο προκειμένου να δοκιμαστεί η κατασκευή και η συναρμολόγηση του περιπτέρου του Μόντρεαλ το 1966. Η έκταση που κάλυπτε ήταν 460m<sup>2</sup>. Η κατασκευή της αντικλαστικής οροφής έχει μειωθεί στο απολύτως απαραίτητο. Αποτελείται από ένα εφελκυσμένο μεταλλικό ομοιόμορφο πλέγμα, που στηρίζεται σε ένα σωληνοειδές υποστυλώμα με αρθρωτή στήριξη, και σε δώδεκα σημεία της ακμής του που δένουν με σύρματα στο έδαφος. Η ανέγερση του επιτεύχθηκε σύντομα και με ευκολία. Μετά από δυο χρόνια η κατασκευή αποσυναρμολογήθηκε και επανατοποθετήθηκε δύο χιλιόμετρα πιο μακριά για να στεγάσει το IL. Η ανέγερση

<sup>35</sup> Το άνοιγμα του πλέγματος είχε σχεδιαστεί ηθελημένα τόσο μικρό προκειμένου να μην χωράει εύκολα ένας άνθρωπος να περάσει ώστε, κατά την ανέγερση, να είναι περιπτώσεις οι όποιες σκαλωσιές.

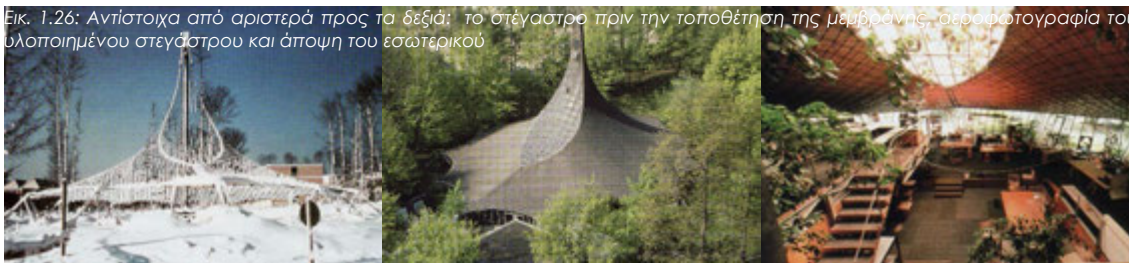
## Η Συμβολή του Frei Otto στην Εύρεση (της) Μορφής και στη Σύγχρονη Μορφογένεση

διήρκησε μια μέρα ενώ η οροφή καλύφθηκε και το εσωτερικό εγκλείστηκε με μια περιμετρική γυάλινη όψη ώστε να εγκλεισθεί ο χώρος του ινστιτούτου. Το κτίριο αυτό αποτελεί μια από τις λίγες τέντες που βρίσκονται σε διαχρονική χρήση και καταλαμβάνει μια σημαντική και ειδική θέση στα έργα του Frei Otto και σε όλη την αρχιτεκτονική του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Έχει αποτελέσει χώρο έρευνας και εκπαίδευσης για πάνω από 30 χρόνια· έχει γίνει διάσημο ως μέρος συζητήσεων και κοιτίδα των ελαφριών κατασκευών υπό την καθοδήγηση του Otto, και έχει προσφερθεί πολλές φορές ως χώρος σεμιναρίων, συνεδρίων και μεγάλων τελετών με συμμετέχοντες από όλον τον κόσμο.



Εικ. 1.25: Φωτογραφία από την τοποθέτηση της μεμβράνης

Εικ. 1.26: Αντίστοιχα από αριστερά προς τα δεξιά: το στέγαστρο πριν την τοποθέτηση της μεμβράνης, αερόφωτογραφία του υλοποιημένου στέγαστρου και άποψη του εσωτερικού



Στο τρίτο και τελευταίο έργο της κατηγορίας αυτής που θα γίνει αναφορά είναι η **Οροφή του Ολυμπιακού Σταδίου του Μονάχου**. Αν και η προκαταρκτική μελέτη δεν έγινε από τον ίδιο, εκείνος ανέλαβε την μελέτη εφαρμογής και τις στατικές αναλύσεις και, καθότι το έργο ήταν απαιτητικότατο, εξέλιξε τις μεθοδολογίες και δημιούργησε νέες που αφορούσαν τον υπολογισμό των μαθηματικών και γεωδαιτικών αναλύσεων, καθώς και νέων συμπληρωματικών μοντέλων. Ακόμα, ήταν το πρώτο έργο στο οποίο ο Otto χρησιμοποίησε ηλεκτρονικούς υπολογιστές για τον υπολογισμό των τάσεων που



Εικ. 1.27: Η οροφή του Ολυμπιακού Σταδίου μετά την κατασκευή του το 1972



Εικ. 1.28: Εικόνα του Ολυμπιακού Σταδίου όπως είναι σήμερα.





Εικ. 1.29: Διερευνητικό μοντέλο από τούλι του στέγαστρου

ασκούσαν στο πολύπλοκο σχέδιο. Το σχέδιο έγινε από τον Behnisch und Partner για τον διαγωνισμό της στέγης του Ολυμπιακού σταδίου του Μονάχου και το 1968 ο Otto ανέλαβε την υλοποίησή του. Το σχέδιο ήταν βασισμένο στο πρότυπο του Γερμανικού περιπτέρου στο Μόντρεαλ και ήταν περισσότερο από αναγκαία η ανάμιξη του Otto για την ολοκλήρωση του έργου. Ο Otto έφτιαξε πολλές και λεπτομερείς μακέτες και διεξήγαγε στατικά πειράματα. Η τελική απόφαση για την κατασκευή ελήφθη τον Μάιο του 1968 και βασιζόταν σε μια μακέτα από τούλι που αναπαριστούσε όλο το στέγαστρο, αν και ύστερα έγιναν κάποιες σχεδιαστικές τροποποιήσεις.

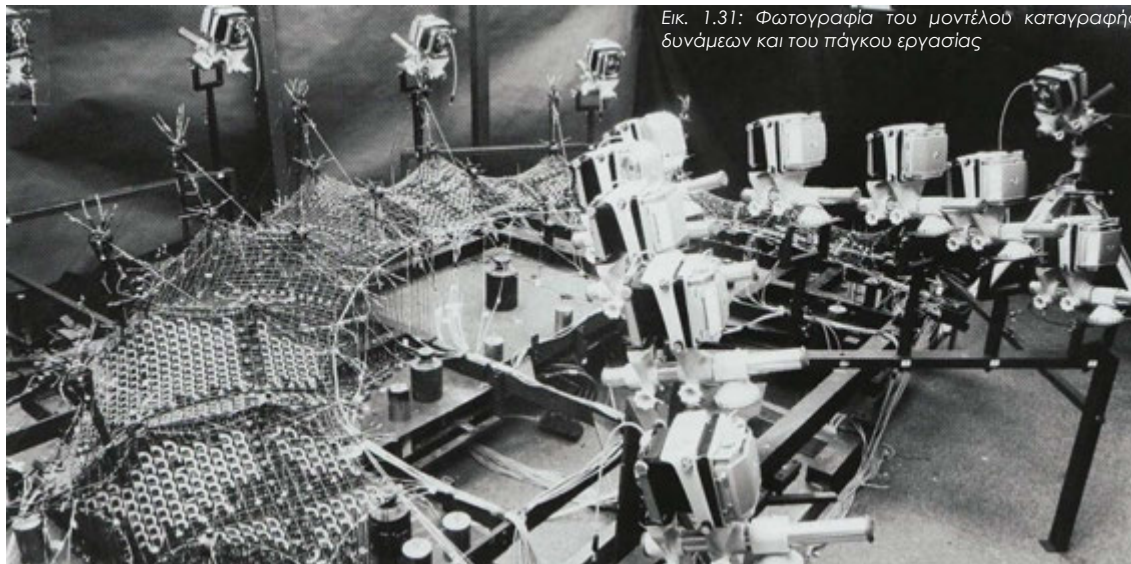


Εικ. 1.30: Φωτογραφίες απλής και διπλής έκθεσης αντίστοιχα που απεικονίζουν την παραμόρφωση του μοντέλου υπολογισμού δυνάμεων όταν σε αυτό ασκούνται φορτία

Κατασκευάστηκαν μακέτες καταμέτρησης<sup>36</sup> σε κλίμακα 1:125 που στηρίζονταν στους πρώτους υπολογισμούς των δυνάμεων που ασκούσαν στα δίκτυα, στα στηρίγματα και στα καλώδια, όπως και στους λεπτομερείς υπολογισμούς των διαστάσεων που προέκυψαν από τα γεωμετρικά δεδομένα των σχεδιαστικών μοντέλων. Οι δυνάμεις και οι τάσεις που προέκυψαν από το μοντέλο καταγραφής ανταποκρίνονταν στα υπό κλίμακα πραγματικά μεγέθη που επρόκειτο να ασκηθούν. Χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για να βρεθεί εκείνη η μορφή που προκύπτει μέσα από τη συνολική στατική συμπεριφορά του κτιρίου, συμπεριλαμβανομένων των επιθυμητών επιφανειακών τάσεων, των δυνάμεων στις στηρίξεις και στις αγκυρώσεις, και των φορτίων και των τάσεων που προκύπτουν από το ίδιο το βάρος του κτιρίου, τα νεκρά φορτία και από τα χιόνια και τους ανέμους. Τα φορτία στο κάθε σύρμα ξεχωριστά του πλέγματος (κάθε 4<sup>ο</sup> σύρμα αναπαριστανόταν) μετριόταν μηχανικά μεταξύ δύο κόμβων, πρώτα με τον μηχανισμό μέτρησης που είχαν ανακατασκευάσει, και

<sup>36</sup> μακέτες που προσομοίωσαν με ακρίβεια σε κλίμακα το τελικό κτίριο και γίνονταν στατικές δομικές πάνω του

ύστερα με μετρητές (dial gauges) που είχαν αναπτυχθεί επίσης από τον Jürgen Henniscke και τον τον Frei Otto στο IL. Τα μοντέλα μετρήθηκαν με την την τεχνική της στερεοφωτογραμμετρίας<sup>37</sup> και με τη τη βοήθεια ενός τρισδιάστατου πάγκου μέτρησης το οποίο κατέγραφε την χωρική τοποθέτηση των επιλεγμένων περιοχών σε συντεταγμένες. Αρκετές κάμερες Linhof, που ήταν τοποθετημένες με συγκεκριμένο τρόπο, χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη φωτογραφιών διπλής έκθεσης στην φορτωμένη και στην αφόρτιστη κατάσταση του μοντέλου. Από αυτές τις φωτογραφίες μπορούσαν να βρεθούν οι δυνάμεις που προκαλούνταν από τα επιπρόσθετα φορτία. Χάρη στις μετρήσεις αυτές ήταν δυνατή η ανάπτυξη ενός ψηφιακού μοντέλου για την στατική του επαλήθευση, εφαρμόζοντας για πρώτη φορά την μέθοδο της πυκνότητας ισχύως (Force Density Method)<sup>38</sup>.



Εικ. 1.31: Φωτογραφία του μοντέλου καταγραφής δυνάμεων και του πάγκου εργασίας

<sup>37</sup> Η στερεοφωτογραμμετρία είναι μια τεχνική με την οποία υπολογίζεται η θέση ενός σημείου στον τρισδιάστατο χώρο χρησιμοποιώντας μετρήσεις που έγιναν από δύο ή και περισσότερες διαφορετικές φωτογραφίες που απεικονίζουν το συγκεκριμένο αντικείμενο.

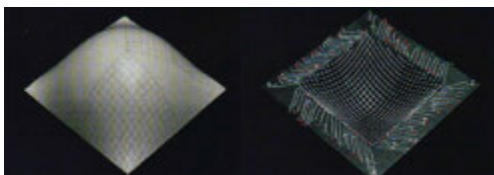
<sup>38</sup> (Wanda, 2003)

## 2 Φουσκωτές Επιφάνειες

Το αξιοσημείωτο με την έρευνα πάνω στην μορφογένεση των φουσκωτών επιφανειών είναι ότι προσφέρει γνώσεις και τροφή για σκέψη σε περισσότερους επιστημονικούς κλάδους πέραν του κατασκευαστικού και μπορεί να φανεί αυτό από το εύρος και την ποικιλία των ευρημάτων αλλά και των έργων που δημιούργησε ο Otto.

### 2.1 Πειραματικές Συσκευές για τη Δημιουργία Φουσκωτών Μορφών

Για την μορφογένεση των φουσκωτών χώρων<sup>39</sup> αποδείχτηκε πολύ χρήσιμη μια πειραματική συσκευή που κατασκευάστηκε στο IL με την οποία δημιουργούνται διάφορες διαφανείς φουσκωτές κατασκευές. Το πείραμα αυτό περιλαμβάνει μια λεπτή πλαστική επιφάνεια (συνήθως από PVC ή από ακρυλικό γυαλί) η οποία προσκολλάται σε ένα πλαίσιο, θερμαίνεται μέχρι να μαλακώσει και ύστερα φουσκώνεται με πεπιεσμένο αέρα. Το πλαίσιο μπορεί να είναι οποιοδήποτε σχήματος, και μπορεί για παράδειγμα, να δημιουργηθεί κόβοντας δυο επιφάνειες κόντρα πλακέ σε CNC router (compass saw). Στη συνέχεια, το πλαστικό φύλλο τοποθετείται ανάμεσα στα δυο περιγράμματα και αυτή η κατασκευή με τη σειρά της τοποθετείται σε μια ειδικά διαμορφωμένη βάση από την οποία θα διοχετευτεί ζεστός αέρας ώστε να φουσκώσει η επιφάνεια. Μια ισχυρή ηλεκτρική σκούπα ή ένας ανεμιστήρας ζεστού αέρα είναι αρκετά για τη διοχέτευση του αέρα προκειμένου να επιτευχθεί το φούσκωμα. Πάνω από το μοντέλο υπάρχουν λάμπες θέρμανσης που διατηρούν την επιφάνεια ζεστή μέχρι το μοντέλο να αποκτήσει την επιθυμητή μορφή. Ύστερα οι λάμπες αφαιρούνται και η



Εικ. 2.1: Σύγκριση μεταξύ μιας φουσκωμένης επιφάνειας και ενός μοντέλου αναρτώμενων αλυσιδών



Εικ. 2.2: Μοντέλο με φιλμ σαπουνιού. Η κάτοψη δύο σφαιρών που ενώνονται μέσω ενός στενού σημείου παράγει δύο θόλους που ενώνονται με μια σελοειδή επιφάνεια στο μέση.



Εικ. 2.3: Φουσκωτή ακρυλική μορφή. Μελέτη στέγασης μιας περιοχής στον βόρειο Καναδά χρησιμοποιώντας μια διάφανη μεμβράνη.

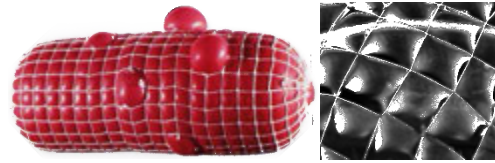
<sup>39</sup> Πρόκειται για αεροστεγείς χώρους οι οποίοι στεγάζονται με τη βοήθεια μιας επιφάνειας η οποία στηρίζεται χάρη στη διαφορά πίεσης του εξωτερικού και εσωτερικού χώρου, ο αέρας αποτελεί δηλαδή τον στατικό μηχανισμό της κατασκευής.

φουσκωμένη πλέον επιφάνεια ψεκάζεται με κρύο νερό και αφαιρείται από τη βάση.

Μια άλλη μέθοδος η οποία είναι κατάλληλη για για την εύρεση μορφής των φουσκωτών επιφανειών επιφανειών χρησιμοποιεί λαστιχένιες επιφάνειες οι οποίες ενισχύονται με διάφορα είδη πλαστικών. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιείται χρησιμοποιείται μια λαστιχένια μεμβράνη, η οποία φουσκώνεται στην επιθυμητή μορφή και στη συνέχεια τοποθετείται απάνω της ένα υαλοϋφασμα το οποίο είναι εμποτισμένο με υγρό πολυεστέρα.

Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται μια λαστιχένια επιφάνεια η οποία επικαλύπτεται με υγρό γύψο. Πιο αναλυτικά, η λαστιχένια επιφάνεια έχει τεντωθεί και τοποθετηθεί στην κάτω πλευρά ενός φύλλου (ξύλου ή μετάλλου), το οποίο μπορεί να είναι οποιοδήποτε σχήματος, με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι υδατοστεγές. Στη συνέχεια η μεμβράνη παράλληλα καλύπτεται και γεμίζει με υγρό γύψο μέσω μιας οπής που έχει δημιουργηθεί στο φύλλο. Ο γύψος δημιουργεί μια επιφάνεια, σκληραίνει και ύστερα από 45 λεπτά το μοντέλο μπορεί να αναστραφεί και να αφαιρεθεί η μεμβράνη. Η σταθεροποιημένη μορφή που έχει προκύψει είναι σχεδόν πανομοιότυπη με μια σαπουνόφουσκα. Αυτό σημαίνει ότι η επιφανειακή τάση στη λαστιχένια μεμβράνη είναι περίπου η ίδια προς όλες τις διευθύνσεις.

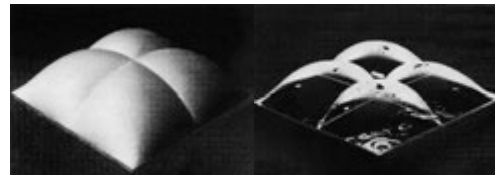
Όταν κατασκευάζεται ένας φουσκωτός χώρος, ο οποίος έχει προκύψει από μια διαδικασία όπως αυτές που προαναφέρθηκαν, τότε προβλέπονται ομοιόμορφες τάσεις στην επιφάνεια του. Τα πλεονεκτήματα είναι διπλά γιατί δεν εγγυάται μόνο ότι η μεμβράνη δεν θα ζαρώσει ποτέ αλλά ακόμα ότι επιτυγχάνεται η μέγιστη αξιοποίηση του χρησιμοποιημένου υλικού. Βέβαια είναι αναγκαίες παραπάνω δοκιμές πριν κατασκευαστεί το έργο, όπως μεγαλύτερης κλίμακας φουσκωτές μακέτες, στατικοί και δυναμικοί υπολογισμοί, δοκιμές σε αεροδυναμικές σήραγγες, κτλ. Αυτή η μεθοδολογία είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την εύρεση της μορφής των φουσκωτών χώρων και των δεξαμενών που αποτελούνται από μεμβράνες. Επίσης βοηθάει



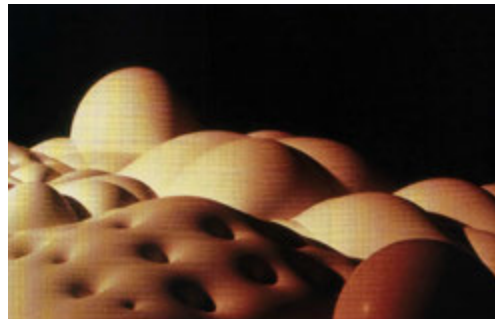
Εικ. 2.4: Αριστερά: Φουσκωτή κατασκευή εγκλωβισμένη εντός πλέγματος. Δεξιά: Αναπαραγωγή αντίστοιχης επιφάνειας μέσω φιλμ σαπουνιών.



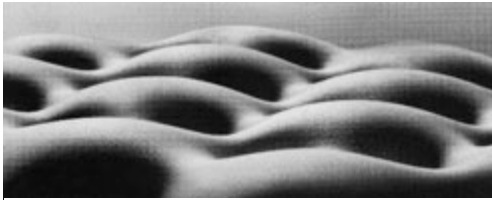
Εικ. 2.5: Φουσκωτή κατασκευή από γύψο



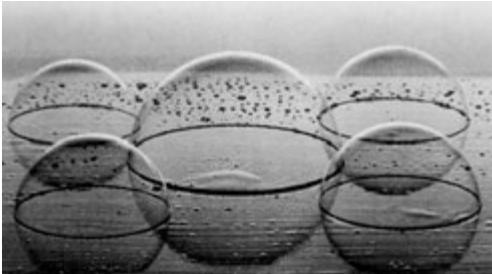
Εικ. 2.6: Αριστερά: Φουσκωτή κατασκευή από γύψο με στραυρωτό δέσιμο. Δεξιά: Φουσκωτή επιφάνεια με σταυρωτό δέσιμο.



Εικ. 2.7: Μοφή που έχει προκύψει μέσω εγκλωβισμού της επιφάνειας εντός πλέγματος και αγκιστρόσεων της σε συγκεκριμένα σημεία.



Εικ. 2.8: Μοντέλο από γύψο. Μελέτη για τη δημιουργία ενός φουσκωτού χώρου με εσωτερικό σύστημα απορροής υδάτων.



Εικ. 2.9: Μοντέλο από φιλμ σαπουνιού



Εικ. 2.10: Εκθεσιακό περίπτερο "Penta-dome", 1958

στην εξέλιξη της μεθοδολογίας διότι επιτρέπει τον σχεδιασμό της τελικής μεμβράνης (η οποία θα αποτελείται από λωρίδες) πάνω στην επιφάνεια του γύψινου μοντέλου που δημιουργήθηκε, η οποία αποτελεί τελικά τον καμβά του τρισδιάστατου χωρικού σχεδίου των καμπυλών.

## 2.2 Φουσκωτές Κατασκευές

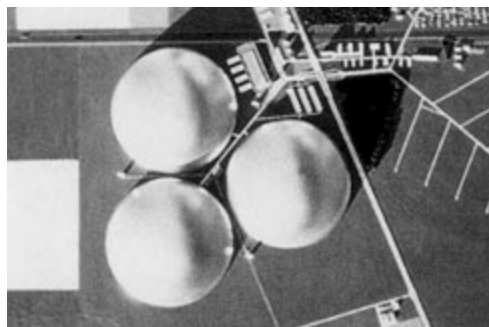
Οι αέρας αποτελεί το βασικό στατικό στοιχείο οι φουσκωτοί χώροι αποτελούν την πιο ελαφριά κατασκευή που έχει σχεδιαστεί ποτέ<sup>40</sup>. Τεχνικά μιλώντας, αποτελούν τέντες των οποίων οι μεμβράνες στηρίζονται από την πίεση του αέρα αντί υποστυλωμάτων. Η ιδέα του να λειτουργήσει ο αέρας ως το στατικό στοιχείο και σαν σοβαρό οικοδομικό υλικό δεν είχε πότε συλληφθεί παλαιότερα. Οι φουσκωτοί χώροι αποτελούν μια από τις ελάχιστες καινοτομίες στην οικοδομική τεχνολογία του τελευταίου αιώνα. Είναι αμφίβολο αν θα υπάρξει, πέραν της τέντας, του θόλου (συμπεριλαμβανομένου και του κελύφους) και του δοκού επί στύλου άλλη κατασκευή η οποία θα μπορέσει να θεωρηθεί ως συγκρίσιμη καινοτομία στην οικοδόμηση.

Ο Frei Otto, χωρίς να γνωρίζει αρχικά το έργο του Bird<sup>41</sup>, μελετούσε παράλληλα την ιδέα των φουσκωτών χώρων και παρήγαγε ένα μεγάλο έργο που ξεπερνούσε κατά πολύ τα όρια της κατασκευής. Ήδη από το 1952 είχε εκπονήσει μελέτες πάνω σε φουσκωτές μεμβράνες αλουμινίου. Ανέπτυξε και κατασκεύασε αρκετές τέντες για τον Stromeyer Zelte στις οποίες παρατήρησε ότι οι τέντες που στηρίζονται σε υποστυλώματα μπορούν να σταθούν και χωρίς αυτά αν υπάρχει αυξημένη εσωτερική πίεση και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι είναι πιθανό να

<sup>40</sup> (Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)

<sup>41</sup> Ο Walter Bird ήταν ο πρώτος ξεχώρισε στις ΗΠΑ όταν σχεδίασε ένα νέο τύπο ραντάρ, που ονομάστηκε Radom, το οποίο ήταν στην ουσία ένα γιγαντιαίο μπαλόνι που περιέκλειε το ραντάρ και αγκυρωνόταν στο έδαφος ώστε να προστατεύει το ραντάρ από τις καιρικές συνθήκες.

επιτευχθεί αυτό διατηρώντας την εσωτερική πίεση αυξημένη εκμεταλλευόμενος την απορρόφηση του αέρα, και όταν δεν υπάρχει αέρας, να γίνεται τεχνητά με ανεμιστήρες. Το πρώτο του σχέδιο χρονολογείται στο 1956/57 στο οποίο πρότεινε την πρώτη αερόστηριζόμενη (air-supported) τέντα για ένα εργοστάσιο η οποία θα αποτελούνταν από τρεις τρεις θόλους διαμέτρου 800 μέτρων ο καθένας. Το δεύτερο σχέδιο έγινε το 1958 για ένα έργο του Stromeeyer το οποίο ήταν ένα εκθεσιακό περίπτερο για μια έκθεση κηπουρικής στο Rotterdam, το οποίο όμως δεν υλοποιήθηκε.



Εικ. 2.11: Πρόταση για βιομηχανική μονάδα που αποτελείται από τρεις φουσκωτούς θόλους, 1958

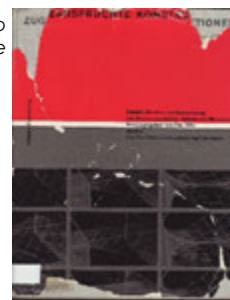


Εικ. 2.12: Εκθεσιακό περίπτερο, έκθεση κηπουρικής στο Rotterdam, 1958. Φουσκωτή κατασκευή, ενισχυμένη με εξαγωνικό πλέγμα.

Η σημαντικότερη παρακαταθήκη του Otto στην οικοδόμηση των φουσκωτών κατασκευών βρίσκεται στο βιβλίο του **“Tension-loaded Structures volume I”**<sup>42</sup>. Στο βιβλίο αυτό εμπεριέχονται έργα και ιδέες για σχεδόν όλες τις γνωστές φουσκωτές κατασκευές: τετράγωνης, παραλληλόγραμμης και οποιοδήποτε σχήματος κάτοψης, πλωτά θερμοκήπια ή πισίνες, με εσωτερικό σύστημα αποχέτευσης, για απεριόριστα μεγάλους χώρους, όπως είναι η κάλυψη ολόκληρων πολιτειών, και επίσης για φουσκωτές κατασκευές που πληρώνονται είναι με νερό είτε με χώμα αναλόγως αν πρόκειται για φράγματα, προστασία από καταστροφές, και πολλά άλλα.

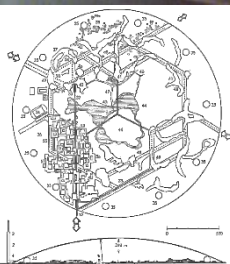
Το έργο του Otto που ξεχωρίζει είναι το **αμερικάνικο περίπτερο στην Expo 70'** στην Οσάκα λόγω του ότι ήταν το πρώτο κτίριο που κατασκεύασε και εφάρμοσε πολλές από τις τεχνικές και

Εικ. 2.13: Εξώφυλλο του Zugbeanspruchte Konstruktionen



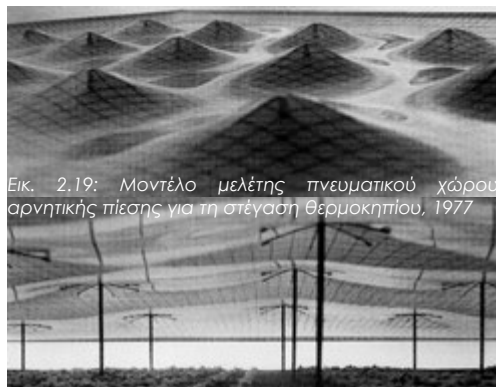
Εικ. 2.14: Αμερικάνικο περίπτερο, Expo 1970 Osaka

<sup>42</sup> Zugbeanspruchte Konstruktionen Band I - Εκδόθηκε το 1962 ύστερα από εκτενή έρευνα 3 ετών σε συνεργασία με τους Siegfried Lohs, Dieter Frank, Ewald Buhner και τον μαθηματικό και πολιτικό μηχανικό Rudolf Trostel.



Εικ. 2.17: Πόλη στην Ανταρκτική, 1971. Κάτοψη. Μελέτη φουσκωτού χώρου για την προστασία από τις καιρικές συνθήκες μιας συνοικίας.

Εικ. 2.18: Αναρτώμενες μεταβλητές δεξαμενές διαφόρων υγρών



Εικ. 2.19: Μοντέλο μελέτης πνευματικού χώρου αρνητικής πίεσης για τη στέγαση θερμοκηπίου, 1977

σχεδιαστικές δυνατότητες που είχε αναπτύξει ο ίδιος. Επρόκειτο για μια μεμβράνη που κάλυπτε έναν οβάλ χώρο μήκος 142m και πλάτους 83m.

Το 1970-71 το εργαστήριο του Otto studio) συνεργάζεται με τους Kenzo Tange και Arup and Partners για την ανάπτυξη της «**Πόλη Ανταρκτικής**», ένα φιλόδοξο σχέδιο για μια φουσκωτή κατασκευή η οποία θα στέγαζε μια κατοικημένη πόλη πλάτους 2km, αλλά δεν υλοποιήθηκε ποτέ. Το σχέδιο αυτό αποτέλεσε τον πρόδρομο του “58° North” στην περιοχή των ορυκτών ελαίων της Αλμπέρτα στον Καναδά, το οποίο προοριζόταν για να υλοποιηθεί αλλά ομοίως δεν έγινε ποτέ.

Πέραν του αέρα, το **νερό** και άλλα υγρά μπορούν να χρησιμοποιηθούν **για τη στήριξη και το τέντωμα** των μεμβρανών. Πρόκειται για δεξαμενές νερού, πύργους νερών, φράγματα, κινητές μονάδες επεξεργασίας λυμάτων και εύκαμπτα αναχώματα τα οποία κατασκευάζονται εφαρμόζοντας αντίστοιχες λογικές.

Οι επιστεγάσεις χώρων με μεμβράνες μπορούν να στηριχθούν εφαρμόζοντας **αρνητική πίεση** στο εσωτερικό τους. Θεωρητικά λειτουργεί σύμφωνα με τους ίδιους κανόνες που ισχύουν και για τις κατασκευές που υποστηρίζονται από θετικές πιέσεις στο εσωτερικό τους. Η εσωτερική ενίσχυση, η στήριξη, τα πλαίσια, τα υποστυλώματα και τα καλώδια διαμορφώνουν τα δομικά στοιχεία. Αυτές οι κατασκευές προτιμώνται κυρίως για χρήση ως θερμοκήπια διότι όταν πακτωθούν στο έδαφος, η εσωτερική αρνητική πίεση τα προστατεύει από την απορρόφηση που προκαλεί ένας ισχυρός άνεμος.

Ο Otto δεν άφησε εκτός της έρευνας του και την αεροναυπηγική καθώς διερεύνησε τη μορφή και τη δομή των αερόπλοιων<sup>43</sup> ως μέρος

<sup>43</sup> Τα αερόπλοια επί της ουσίας είναι πηδαλιουχούμενα αερόστατα, έχουν δηλαδή κινητήρες προώθησης και κατάλληλα συστήματα

του έργου **“Airfish”** και συνέλαβε διαφόρους τύπους αεροδυναμικών μορφών. Ο Otto σχεδίασε τρία εύκαμπτα αερόπλοια στα οποία τα άκαμπτα μέρη μειώνονται όσο το δυνατόν περισσότερο. Το περικάλυμμα και στις τρεις περιπτώσεις φτιάχνεται από μεμβράνες ενώ στο Airfish 1 τα πίσω πτερύγια και η καμπίνα είναι άκαμπτα, στο Airfish 2 τα πίσω πτερύγια είναι εύκαμπτα και στο Airfish 3, το οποίο σχεδιάστηκε με τη λογική του αερόστατου, ακόμα και η καμπίνα σχεδιάστηκε ως εύκαμπτη κατασκευή. Το Airfish 3 ανατέθηκε σε μια αεροναυπηγική εταιρία για να διερευνηθεί κατά πόσο είναι πιθανή η αξιοποίηση του ως «ιπτάμενο ξενοδοχείο» για μεγάλων αποστάσεων τουριστικών πτήσεων. Όλα τα μέρη του αερόπλοιου, με μοναδική εξαίρεση τους κινητήρες, συμπεριλαμβανομένου και της καμπίνας έχουν σχεδιαστεί ώστε να είναι εύκαμπτα και τεντωμένα λόγω του φουσκώματος.<sup>44</sup>

Η μεγαλύτερη ανακάλυψη του Otto πέραν των κατασκευών βρίσκεται στην έμψυχη φύση. Επέκτεινε την έρευνα των φουσκωτών κατασκευών στις δομές που είναι «φουσκωμένες» με κάποιο υγρό, ή όπως έχει ονομάσει ο ίδιος όλη την κατηγορία αυτή, των **πνευματικών δομών**<sup>45</sup>. Η έρευνα αυτή αποτέλεσε μέρος του ομοσπονδιακού προγράμματος 230 «Φυσικές Δομές», και στόχευε στην καλύτερη κατανόηση της έμψυξης φύσης. Η συστηματική έρευνα και ανάπτυξη της μορφογενετικής διαδικασίας των πνευματικών δομών εξέλιξε σημαντικά τη γνώση γύρω από την προέλευση της ζωής και των αυτό-σχηματικών διαδικασιών της φύσης. Τα κύτταρα, τα όργανα και οι ζωντανοί οργανισμοί μπορούν να επεξηγηθούν μέσω των

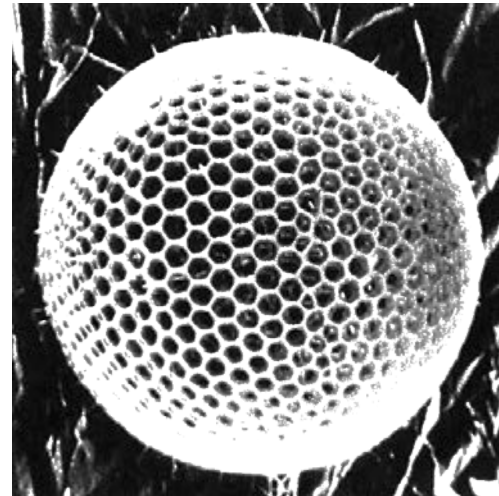
διεύθυνσης και ευστάθειας ώστε να ελέγχεται αναλόγως με τις επιθυμίες του εκάστοτε πιλότου. Τα βασικά του μέρη είναι το περικάλυμμα (μπαλόνι) που γεμίζει με κάποιο ελαφρύ αέριο, τα οριζόντια και κάθετα πτερύγια τα οποία μπορεί να είναι κινητά ή σταθερά, οι χώροι με τους κινητήρες και, τέλος, ο θάλαμος των επιβατών (καμπίνα). Υπάρχουν τρεις τύποι αερόπλοιων, τα εύκαμπτα, τα ημιάκαμπτα και τα άκαμπτα. (Pneumatic structure, 2015)

<sup>44</sup> Το 1982 εκδόθηκε το “IL 15: Air Hall Handbook” στο οποίο περιλαμβάνεται η προμελέτη του έργου.

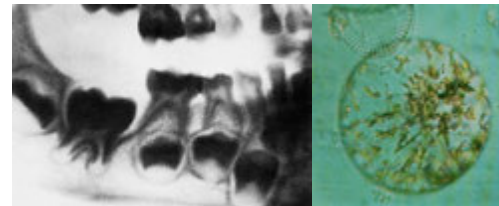
<sup>45</sup> (Otto, Bach, & Schaur, IL 9: Pneus in nature and technics, 1977)



Εικ. 2.20: Μοντέλα μελέτης των Airfish 1, 2 και 3. 1978, 1979, 1988 αντίστοιχα.

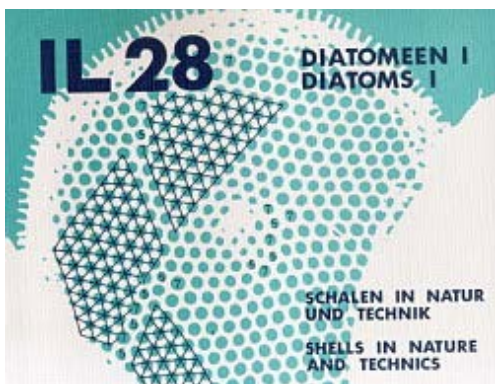


Εικ. 2.21: Ακτινόζωο. Φυσική δομή εξαγωνικού πλέγματος σε σφαιρική μορφή..



Εικ. 2.22: Πνευστά σφαιρικής μορφής στη δημιουργία των δοντιών της γνάθου. Εικ. 2.23: Κύτταρο





πνευματικών δομών. Τα σκληρά μέρη των ζωντανών και αναπτυσσόμενων οργανισμών αποκτούν τη μορφή τους πριν σκληρύνουν, όταν ακόμα είναι μαλακά κύτταρα. Αυτό ισχύει για παράδειγμα στα δέντρα, στα καβούρια, στα οστρακοειδή και στα κόκκαλα, τα οποία δημιουργούνται από μαλακά κύτταρα και στη συνέχεια σκληραίνουν αποκτώντας την χαρακτηριστική δομή τους. Γενικότερα, η δομή του "ρνευ" ως δομικό σύστημα καθιστά δυνατή επεξήγηση των μορφών των ζωντανών. Η έρευνα πάνω στα πνευστά καθώς και η και περιγραφή των μηχανισμών της έμφυτης φύσης άνοιξε τον δρόμο του βιομιμητισμού στην αρχιτεκτονική. Όλη η γνώση συσσωρεύτηκε μέσα σε αρκετά τεύχη που εκδόθηκαν από το IL. Τα πιο σημαντικά από αυτά ("IL 28: Diatomeen", "IL 33: Radiolaria" και "IL 38: Diatomeen 2"<sup>46</sup>) αποτελούν πλέον τα βιβλία αναφοράς όλων των σύγχρονων μηχανικών και επιστημόνων που ασχολούνται με τον βιομιμητισμό στην αρχιτεκτονική.



Εικ. 2.24: Εξώφυλλα των τευχών "IL28: Diatoms I", "IL33: Radiolaria" και "IL28 Diatoms II".

<sup>46</sup> (Bach & Burkhardt, 1984), (Otto, IL 33: Radiolaria (Shells in nature and technics II), 1990) και (Helmcke, Kull, & Bach, 2004)

### 3 Κρεμαστές Μορφές

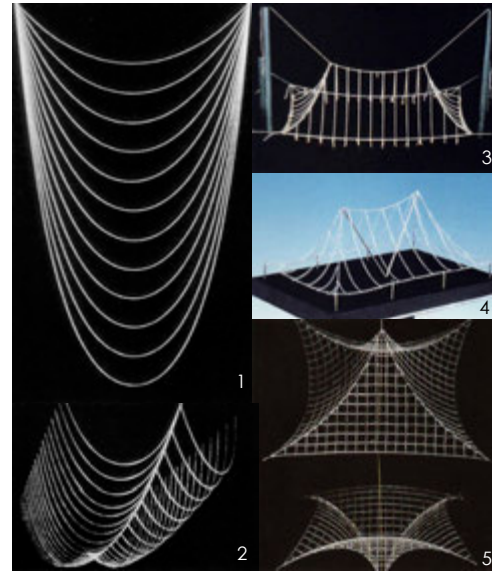
#### 3.1 Μέθοδοι Εύρεσης Μορφής

Η μορφή των κρεμαστών σκοινιών ή καλωδίων (π.χ. καλώδια ρεύματος) μπορεί να αναπαρασταθεί με μεγάλη ακρίβεια χρησιμοποιώντας μικρές κρεμαστές αλυσίδες. Ακόμα, ένα πυκνός κάναβος (δίχτυ) κρεμαστών αλυσίδων μπορεί να μιμηθεί απόλυτα τη μορφή των αναρτώμενων οροφών που σταθεροποιούνται από το ίδιο τους το βάρος (π.χ. χαλαρές τέντες). Πολλές οροφές τέτοιου τύπου εντοπίζονται ανά τον κόσμο που η μορφή τους καθορίστηκε από αντίστοιχα μοντέλα αναρτώμενων αλυσίδων. Είναι γνωστό από τα αρχαία χρόνια ότι η καμπύλη που δημιουργείται από την κρεμαστή αλυσίδα (ημιτονοειδής παραβολή - hyperboloid cosine) αποτελεί την ιδανική μορφή με την οποία μπορεί να κατασκευαστεί μια μεγάλη ελεύθερη καμάρα (γέφυρες) ή ένας πλατύς θόλος από πέτρα ή τούβλο. Επομένως, τα **μοντέλα κρεμαστών αλυσίδων** είναι τα πλέον κατάλληλα για την αναπαραγωγή και μίμηση των καμάρων και των θόλων

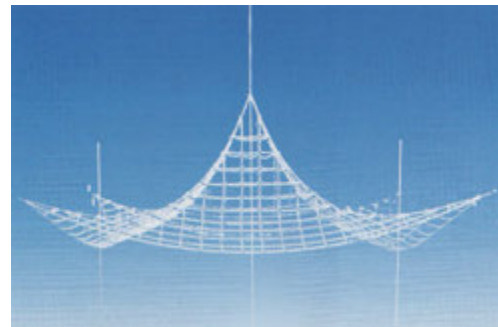
Τα δίκτυα κρεμαστών αλυσίδων παρουσιάζουν σημαντικά πιο πολύπλοκη μορφή σε σύγκριση με τις απλές κρεμαστές αλυσίδες. Κατασκευάζονται από μικρά τμήματα αλυσίδων ή μικρών δοκών που συνδέονται μεταξύ τους με χαλαρές αρθρώσεις.

#### 3.2 Κρεμαστές Κατασκευές

Οι κρεμαστές κατασκευές αναφέρονται κατά κύριο λόγο στις αναρτώμενες οροφές. Σε αντίθεση με τις κατασκευές που είναι προεντεταμένες, διπλής καμπυλότητας ή ανθεκτικές σε θλιπτικά φορτία οι αναρτώμενες οροφές είναι μονής καμπυλότητας και σταθεροποιούνται από το ίδιο τους το βάρος χωρίς να έχουν την ανάγκη της προέντασης. Η επιφάνεια της οροφής αποκτάει την καμπυλότητα της ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν και η κατασκευή σταθεροποιείται από το ίδιο της το βάρος, είτε από τη σκλήρυνση της, είτε δένοντας τη με σκοινιά ή σύρμα.



Εικ. 3.1: 1) Μορφή μονής κρεμαστής αλυσίδας.  
2) Πολλές κρεμαστές αλυσίδες σε σειρά σχηματίζοντας ανάποδη θολωτή μορφή.  
3 και 4) Διερευνητικό μοντέλο οροφής χρησιμοποιώντας κρεμαστές αλυσίδες σε σειρά.  
5) Διερευνητικό μοντέλο οροφής χρησιμοποιώντας πλέγμα αλυσίδων.



Εικ. 3.2: Αναπαράσταση οροφής παγόδας με μοντέλο κρεμαστού πλέγματος αλυσίδων.



Εικ. 3.3: Διερευνητικό μοντέλο εύρεσης μορφής κρεμαστής οροφής χρησιμοποιώντας αλυσίδες σε σειρά.



Εικ. 3.4: Εσωτερικός χώρος συνεδριακού κέντρου στη Μέκκα.



Εικ. 3.5: 1) Μοντέλο κρεμαστών αλυσίδων της επέκτασης του εργοστασίου.  
2) Φωτογραφία των υλοποιημένων κτιρίων.

Η μορφή των κρεμαστών οροφών, που είναι γνωστές και ως βαριές οροφές, ποικίλει πολύ. Οι παγόδες και οι οροφές των ναών της Άπω Ανατολής είναι φτιαγμένες από ελεύθερα αναρτώμενα πλέγματα, που αρχικά φτιαχνόντουσαν από πλέγματα μπαμπού. Οι δοκοί οργανικής προέλευσης, όπως είναι το ξύλο και το μπαμπού, που είναι ανθεκτικοί σε εφελκυστικές τάσεις χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των κρεμαστών οροφών όπως επίσης και σκοινιά από φυτικές ίνες ή από σίδερο. Η έρευνα που έκανε ο Otto με τα μοντέλα των κρεμαστών κατασκευών αποκάλυψε όλο τον μορφολογικό κόσμο των ιστορικών κρεμαστών οροφών, όπως επίσης αποτελεί ένα βασικό στοιχείο στον σχεδιασμό των κρεμαστών κατασκευών που οικοδομούνται από δίκτυα, σκοινιά και ράβδους ανθεκτικούς σε εφελκυσμό.

Στο μοντέλα με πιο σημαντικά ένα **συνεδριακό κέντρο στη Μέκκα** που το σχεδίασε σε συνεργασία με τον Rolf Gutbrod το 1965 και κατασκευάστηκε το 1972 και μια **επέκταση του εργοστάσιου της Wilkhahn** στο Bad Mündler που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε το 1987. Το πρώτο έργο αποτελείται από ένα ξενοδοχείο και αρκετούς συνεδριακούς χώρους οι οποίοι είναι διαταγμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν στη μέση μια εσωτερική αυλή. Η στέγαση γίνεται με κρεμαστές οροφές που στηρίζονται σε μεταλλικά σύρματα και απαρτίζονται από ξύλινη επικάλυψη, θερμομόνωση και εξωτερική επίστρωση με κυματοειδής λαμαρίνα. Το δεύτερο έργο αποτελείται από τέσσερις όμοιες κατασκευές στις οποίες ένα κεντρικό πλαίσιο παρέχει φωτισμό στο εσωτερικό των χώρων και παράλληλα στηρίζει την οροφή που αναρτάται από αυτή. Ο φέρων οργανισμός είναι ξύλινος και η μορφή του προέκυψε από το αναρτώμενο μοντέλο.

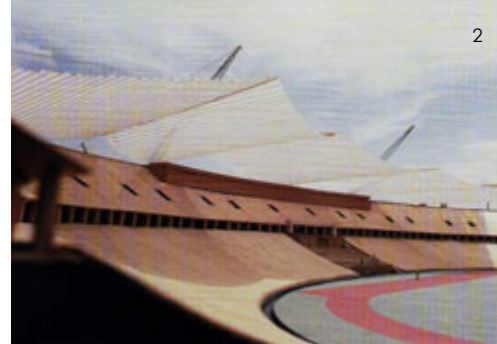
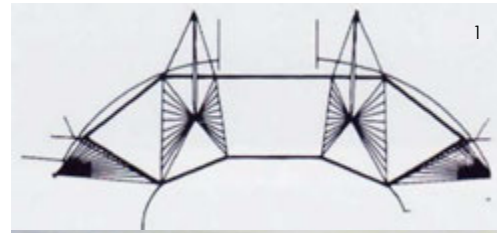


Εικ. 3.6: Ο Frei Otto φωτογραφίζει τη μακέτα του στεγαστρου για το Ολυμπιακό στάδιο του Βερολίνου.



## Η Συμβολή του Frei Otto στην Εύρεση (της) Μορφής και στη Σύγχρονη Μορφογένεση

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον έχει μορφολογικά τα στέγαστρα που σχεδίασε το 1969/70 για τον διαγωνισμό του **στεγάστρου για το στάδιο Neckarstadion** στην Στουτγάρδη και του **στεγάστρου για το ολυμπιακό στάδιο του Βερολίνου**. Πρόκειται για αναρτώμενες οροφές που αποτελούνται από παράλληλες μεταλλικές ράβδους που στηρίζονται σε μεταλλικά σύρματα και όλο αυτό το σύστημα κρεμιέται από μεγάλους πυλώνες μέσω άλλων συρμάτων. Η επικάλυψη που προτάθηκε ήταν από ημιδιάφανες ακρυλικές επιστρώσεις. Μάλιστα, έγινα πειράματα σε αεροδυναμική σήραγγα προκειμένου να καθοριστεί η δυναμική της οροφής σε υψηλές ταχύτητες αέρος και να βελτιωθούν τα απαραίτητα βάρη στην οροφή που θα της προσέφεραν την επιθυμητή σταθερότητα. Αν και τα δύο σχέδια ήταν αποτελεσματικά σε σχετικά χαμηλό κόστος κανένα από τα δύο σχέδια δεν υλοποιήθηκαν.



Εικ. 3.7: Πρόταση για τον διαγωνισμό του στεγάστρου του Ολυμπιακού σταδίου του Βερολίνου.

1) Κάτοψη πρότασης. 2) Μακέτα πρότασης. 3) Κολάζ του στεγάστρου σε φωτογραφία του σταδίου.

3



## 4 Θολωτές Μορφές

### 4.1 Μέθοδοι Εύρεσης Μορφής

Μια μέθοδος εύρεσης μορφής χρησιμοποιεί **γυψόγαζες** για την παραγωγή θολωτών μορφών. Είναι μια εύκολη και γρήγορη διαδικασία αλλά στερείται ακρίβειας. Σύμφωνα με την διαδικασία αυτή γυψόγαζες βυθίζονται ή ψεκάζονται με νερό προκειμένου να μαλακώσουν, ύστερα κρεμιούνται, αφήνονται να στεγνώσουν ώστε να σκληρύνουν και τελικά αναποδογυρίζονται διατηρώντας τη μορφή τους. Με τον ίδιο τρόπο που τα κρεμαστά πλέγματα κλωστών σχηματίζουν την ιδανική μορφή των δικτυωτών κελυφών όταν αναποδογυριστούν, έτσι και οι γυψόγαζες αποκτούν την ιδανική μορφή των συμπαγών κελυφών. Διαπιστώνεται με ευκολία ότι οι γυψόγαζες δεν παράγουν τις ιδανικές μορφές διότι όταν αναποδογυριστούν δεν είναι ικανές να διατηρήσουν τη μορφή τους και καταρρέουν από το ίδιο τους το βάρος. Μπορούν όμως οι μορφές αυτές να κατασκευαστούν σε μεγαλύτερη κλίμακα από ανθεκτικά υλικά όπως το ξύλο και στο σκυρόδεμα. Επίσης, ο πειραματισμός με τις γυψόγαζες επιτρέπει την εύκολη εισαγωγή στη μορφογένεση κελυφών, φερουσών τοιχοποιιών και γεφυρώσεων χρησιμοποιώντας καμάρες, θόλους και κελύφη, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις μπορούν να υλοποιηθούν με τη χρήση μη οπλισμένου σκυροδέματος ή λιθοδομής, διότι υπάρχουν από ελάχιστες έως μηδαμινές εφελκυστικές δυνάμεις.

Εκτός ης προηγούμενης υπάρχουν και άλλες μέθοδοι με τις οποίες μπορούν να αναπαραχθούν αντίστοιχες μορφές με μεγαλύτερη ακρίβεια, όπως είναι τα δίκτυα αλυσίδων, οι λαστιχένιες επιφάνειες και η προσομοίωση στον υπολογιστή.

Τα μοντέλα από **κρεμαστές αλυσίδες** είναι τα καταλληλότερα για την εύρεση της ιδανικής



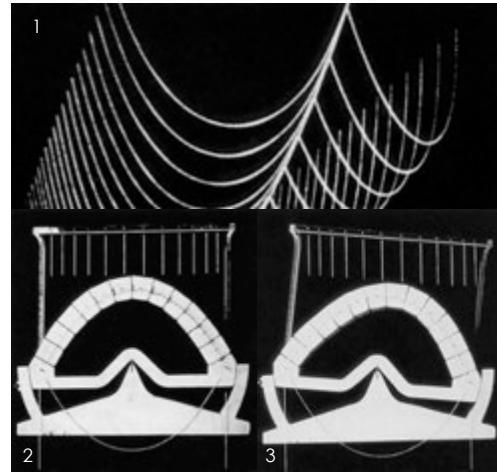
Εικ. 4.1: Αναπαράσταση καμαρωτών μορφών με τη βοήθεια γυψόγαζων.



Εικ. 4.2: Αναπαράσταση θολωτών μορφών με τη βοήθεια γυψόγαζων.

μορφής των θολωτών κατασκευών διότι εφαρμόζουν απόλυτα τις ιδιότητες της αλυσοειδούς αλυσοειδούς καμπύλης. Μια αλυσίδα που αναρτάται από τις άκρες τις αποκτάει την ιδανική καμπύλη χάρη στο ίδιο της το βάρος. Η καμπύλη που προκύπτει ονομάζεται **αλυσοειδής**. Όταν η αλυσίδα κρέμεται ασκούνται πάνω της μόνο εφελκυστικές δυνάμεις. Όταν περιστραφεί κατά 180° στον οριζόντιο άξονα τότε διαμορφώνει τη καμπύλη πίεσεως της θολωτής μορφής στην οποία ασκούνται αποκλειστικά θλιπτικές δυνάμεις. Το πλεονέκτημα της μορφής αυτής είναι ότι για την οικοδόμηση απαιτούνται μικρές ποσότητες υλικών όπως και μικρή μάζα, που δημιουργούν τις προϋποθέσεις για την επίτευξη μεγάλων ανοιγμάτων.

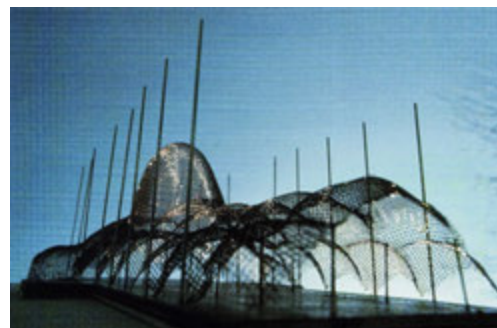
Αντίστοιχα, η μέθοδος της αντιστροφή της αλυσοειδούς καμπύλης μπορεί να εφαρμοστεί σε πλέγματα αλυσίδων για τη μορφογένεση απλών ή πολύπλοκων κελυφών. Τα κρεμαστά πλέγματα αλυσίδων (μπορούν να είναι και κρεμαστά δίκτυα από μεταλλικές δοκούς) αναπαριστούν τις επιφανειακές κατασκευές που είναι καμπυλωτές, άκαμπτες και ανθεκτικές στα θλιπτικά φορτία. Ονομάζονται επίσης δικτυωτοί θόλοι, πλεγματοειδής θόλοι ή άκαμπτα κελύφη<sup>47</sup>. Τα πλέγματα που αποτελούνται από αρθρωτούς δοκούς προκειμένου να αντιστραφούν και να μετατραπούν σε κελύφη πρώτα ακινητοποιούνται με σκληρυντικές κόλλες ή με συγκόλληση στις αρθρώσεις και ύστερα, όταν αντιστρέφονται, παραμένουν ιδιαίτερος σταθερά. Βέβαια αυτή η μεθοδολογία δημιουργεί μια ιδεατή μορφή που δεν ανταποκρίνεται πλήρως στο τελικό κτίριο που θα κατασκευαστεί, είναι όμως μια χρήσιμη και σχετικά εύκολη μεθοδολογία για την εύρεση των ισορροπιών μεταξύ της μορφής, των δυνάμεων και της μάζας.



Εικ. 4.3: 1) Κρεμαστές αλυσίδες. 2 και 3) Αναπαράσταση της αλυσοειδούς καμπύλης σε μορφή γέφυρας και και αναπαραγωγή της συμπεροφοράς της.



Εικ. 4.4: Σχηματισμός θολωτών μορφών με τη βοήθεια μοντέλου κρεμαστών αλυσίδων.



Εικ. 4.5: Σχηματισμός θολωτών μορφών με τη βοήθεια μοντέλου κρεμαστού πλέγματος αλυσίδων.

<sup>47</sup> Δεν αναπτύσσονται δηλαδή σε αυτά υπολογίσιμες δυνάμεις κάμψεων.

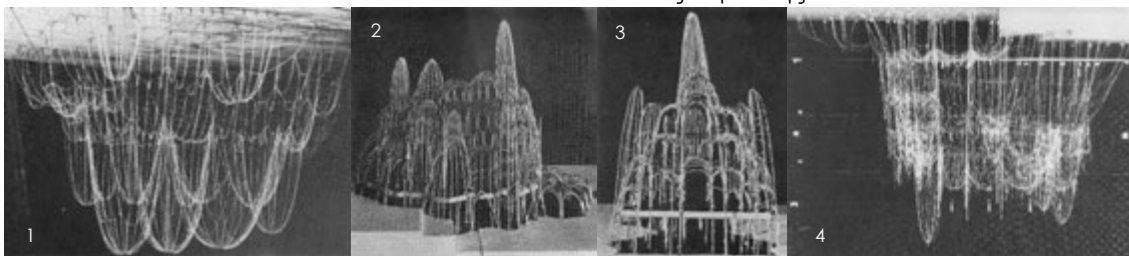


## 4.2 Κατασκευές Καμάρων, Θόλων και Κελυφών

Ιστορικά οι θολωτές κατασκευές κατασκευάζονταν με βάση γεωμετρικά σχήματα, όπως είναι ο κύκλος ή η ακτίνα του κύκλου. Ακόμα αρκετοί θόλοι πλησίαζαν μορφολογικά την αλυσοειδή καμπύλη χωρίς ωστόσο να έχουν σχεδιαστεί με βάση την αλυσοειδή. Τέτοια παραδείγματα είναι οι θόλοι από πηλό των ιθαγενών κατασκευών. Η ανακάλυψη της σύνδεσης της αλυσοειδούς καμπύλης και της γραμμής πίεσης έγινε τον 17<sup>ο</sup> αιώνα. Ο Gaudí ήταν ένας από τους πρώτους αρχιτέκτονες που εφάρμοσε στον σχεδιασμό τη λογική της αλυσοειδούς καμπύλης.

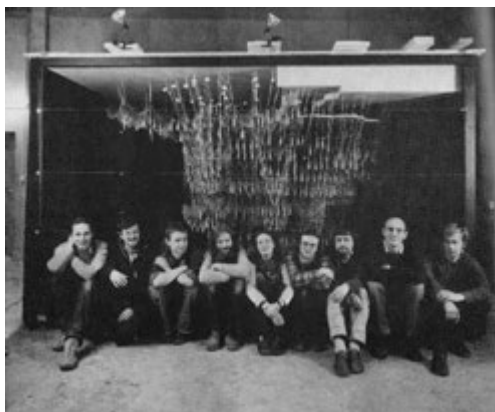


Εικ. 4.6: Μελέτη του θόλου του ναού του Αγ. Πέτρου στο Βατικανό χρησιμοποιώντας μοντέλο κρεμαστών αλυσίδων.



Εικ. 4.7: Αναπαραγωγές του μοντέλου των κρεμαστών κλωστών από διάφορους μελετητές:

- 1) Μοντέλο κρεμαστών αλυσίδων, Ruig.
- 2 και 3) Μοντέλο κρεμαστών συρμάτων, Matsuka.
- 4) Μοντέλο των κρεμαστών κλωστών χωρίς βαρίδια, IL.



Εικ. 4.8: Το μοντέλο των κρεμαστών κλωστών μαζί με την ομάδα κατασκευής.

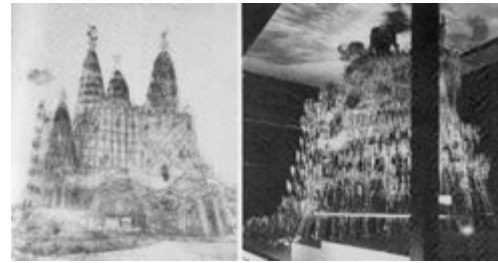
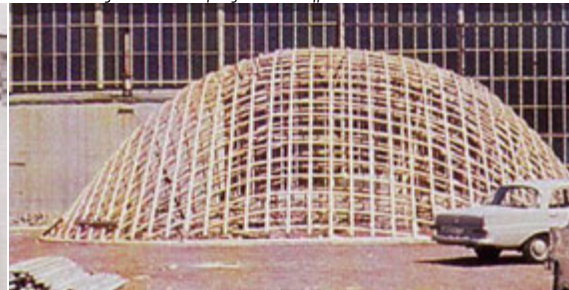
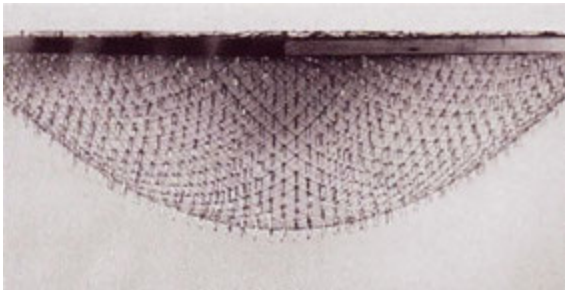
Στην προσπάθεια του ο Otto να ξανά-ανακαλύψει τη συνθετική μέθοδο που εφάρμοσε ο Gaudí στην **εκκλησία της Colonia Güell**, εκείνος και η ομάδα του έφτιαξαν από την αρχή το πολύπλοκο μοντέλο των κρεμαστών αλυσίδων μιμούμενοι όσο το δυνατόν περισσότερο το αυθεντικό μοντέλο<sup>48</sup>. Το αυθεντικό μοντέλο κατασκευάστηκε μεταξύ του 1898 και 1908. Κατά τη διάρκεια του Ισπανικού εμφυλίου, το 1936, καταστράφηκαν μαζί με τον μοντέλο όλα σχεδόν τα αρχεία του έργου. Ιδιαίτερη εντύπωση προκαλούν τα διασωθέντα αρχεία διότι παρουσιάζουν τον πρωτοποριακό τρόπο με τον οποίο ο Gaudí χειριζόταν τη φωτογραφική μηχανή. Εκμεταλλεύονταν τις

<sup>48</sup> Το 1989 εξέδωσε το βιβλίο «IL 34 The model» στο οποίο περιγράφει διεξοδικά όλη τη διαδικασία και τις δυσκολίες της κατασκευής του μοντέλου των κρεμαστών αλυσίδων. (Tomlow, 1989)

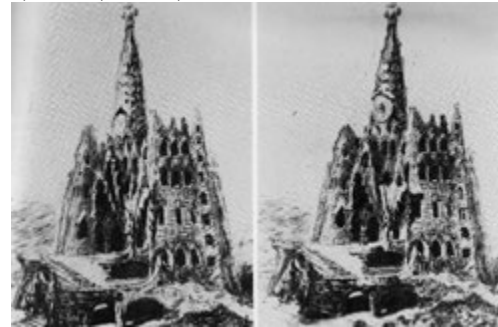
## Η Συμβολή του Frei Otto στην Εύρεση (της) Μορφής και στη Σύγχρονη Μορφογένεση

φωτογραφίες του μοντέλου των κρεμαστών αλυσίδων ζωγραφίζοντας από πάνω τους την τελική τελική μορφή της εκκλησίας, τους εξωτερικούς και και εσωτερικούς χώρους. Όσον αφορά το μοντέλο, ο μοντέλο, ο Gaudí επενέβη στη μορφή της εκάστοτε εκάστοτε καμπύλης προσθέτοντας βαρίδια με επακόλουθο να επηρεάζει τη συνολική μορφή του έργου. Στατικά έφτασε σε προσοδευτικές λύσεις όπως οι διακλαδωμένες κολώνες ενώ, χάρη στο μοντέλο, κατάφερε να παράξει μορφές που στατικά δεν θα μπορούσαν να υπολογιστούν με τα μέσα, τη γνώση ή τη τεχνολογία της εποχής. Λόγω της εμμονής του αρχιτέκτονα στην πιστότητα των μορφών που παρήγαγε το μοντέλο οδηγήθηκε στην εφαρμογή για πρώτη φορά στην ιστορία της αρχιτεκτονικής της μορφής της υπερβολικής παραβολοειδής επιφάνειας (hyperbolic paraboloid), ή αλλιώς της σελοειδής μορφής, που εξυπηρετούσε στη βέλτιστη στατική επάρκεια των υλικών. Δυστυχώς μόνο ένα μικρό μέρος της εκκλησίας υλοποιήθηκε, ενώ το μοντέλο αποτελεί μια προσοδευτική σπουδή πάνω στη μορφογένεση που χάρη στον Frei Otto και στην ομάδα του IL αναδείχθηκε.

Όσον αφορά τα υλοποιημένα έργα του Otto, το πρώτο έργο που κατασκεύασε χρησιμοποιώντας την παραπάνω μεθοδολογία ήταν το **δικτυωτό κέλυφος για το DEUBAU** στο Essen το 1962, το οποίο αποτέλεσε πρότυπο για αρκετά κτίρια που κατασκευάστηκαν. Το μοντέλο εύρεσης μορφής του κτιρίου αποτελούνταν από κρεμαστές κλωστές στις οποίες είχαν αναρτηθεί σύρματα συρραπτικού που αναπαριστούσαν τα φορτία.



Εικ. 4.9: Αριστερά: Αυθεντικό σκίτσο πάνω σε φωτογραφία από τον Gaudí. Δεξιά: Η αντίστοιχη προοπτική από το μοντέλο του IL.



Εικ. 4.10: Αυθεντικά σκίτσα πάνω σε φωτογραφία από τον Gaudí που απεικονίζουν την τελική μορφή του ναού.

Εικ. 4.11: Αριστερά: Μοντέλο κρεμαστών αλυσίδων με βαρίδια του κελύφους για το DEUBAU. Δεξιά: Το κέλυφος υλοποιημένο.



Εικ. 4.12: Το μοντέλο κρεμαστών αλυσίδων του Multifihalle.



Εικ. 4.13: Το μοντέλο κρεμαστών αλυσίδων του Multifihalle.



Εικ. 4.14: Το μοντέλο κρεμαστών αλυσίδων του Multifihalle.

Το προηγούμενο έργο ήταν και ο λόγος που η αρχιτεκτονική επιτροπή της Ομοσπονδιακής Έκθεσης Κηπουρικής της Γερμανίας το 1971 ζήτησε από τον Frei Otto να συνδράμει στον σχεδιασμό και στην κατασκευή του πολυχώρου που έμεινε γνωστό ως το **Multihalle του Mannheim**<sup>49</sup>. Οι αρχιτέκτονες Carlfried Mutschler και Joachim Langner πρότειναν ως σχέδιο ένα μεγάλο ενιαίο κέλυφος που χωρίς τις τεχνικές γνώσεις του Otto δεν θα μπορούσε να υλοποιηθεί. Το σχέδιο αποτελούταν από δύο μεγάλους θόλους που στεγάζουν τον χώρο πολλαπλών χρήσεων και το εστιατόριο. Οι δυο θόλοι συνδέονται από μια ανυψωμένη διαδρομή που στεγάζεται από την ίδια επιφάνεια που καλύπτει και τους υπόλοιπους χώρους. Η μεμβράνη αποτελείται από PVC<sup>50</sup> και είναι ενισχυμένη με δικτυωτό πολυεστερικό ύφασμα ενώ ο φέρον οργανισμός, το πλέγμα, αποτελείται από ξύλινες δοκούς σε μορφή τετραγωνικού πλέγματος που εξυπηρετούν τόσο στατικούς όσο και αισθητικούς λόγους. Το Multifihalle έχει συνολικό εμβαδόν 7400 μ<sup>2</sup>, μέγιστο μήκος 85 μέτρων, μέγιστο πλάτος 60 μέτρων και μέγιστο ύψος που φτάνει τα 20 μέτρα, ενώ το πάχος του κελύφους είναι μικρότερο από μισό μέτρο.

Στο εργαστήριο του ο Otto κατασκεύασε ένα μοντέλο του κτιρίου σε κλίμακα 1:500. Αποτελούταν από ένα πλέγμα κρεμαστών κλωστών που αντιπροσώπευαν το ξύλινο

<sup>49</sup> Το IL εξέδωσε ειδική έκδοση στην οποία περιγράφεται με κάθε λεπτομέρεια όλη η διαδικασία της μελέτης και της κατασκευής του κτιρίου. (Bacher & Otto, 1978)

<sup>50</sup> Polyvinylchloride

πλέγμα με το οποίο επρόκειτο να υλοποιηθεί. Οι αρχιτέκτονες μπορούσαν να προσαρμόσουν το μήκος των κλωστών πάνω στο μοντέλο ώστε να πετύχουν την επιθυμητή μορφή καταλήγοντας παράλληλα στα τελικά μήκη και πλάτη τους. Το επόμενο βήμα ήταν η κατασκευή ενός πιο ακριβές μοντέλου από το οποίο και θα γινόταν η καταγραφή και διαστασιολόγηση του τελικού κτιρίου. Σε αυτό αναπαριστανόταν κάθε τρίτη ξύλινη δοκός χρησιμοποιώντας ένα απλοϊκό μεταλλικό πλέγμα. Το πλέγμα αποτελούταν από μεταλλικές δοκούς 15 χιλιοστών που αγκιστρώνονταν από τις άκρες τους πάνω σε μεταλλικά δαχτυλίδια διαμέτρου 2,5 χιλιοστών. Οι δοκοί αντιπροσώπευαν τις δοκούς ενώ τα δαχτυλίδια τους κόμβους. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τη δημιουργία οποιουδήποτε πλέγματος και ταυτόχρονα εξασφαλίζει την ελευθερία στις αρθρώσεις παράγοντας με αυτόν τον τρόπο οποιαδήποτε καμπυλωτή επιφάνεια από ένα ομοιόμορφο τετραγωνισμένο πλέγμα.

Το επόμενο βήμα ήταν η καταμέτρηση του μοντέλου χρησιμοποιώντας την τεχνική της στερεοφωτογραμμετρίας. Ένα βασικό πρόβλημα του μοντέλου είναι ότι παρά την προσπάθεια να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβές δεν μπορεί να είναι, όπως επίσης εμπεριέχονται σφάλματα τόσο στη κατασκευή του πλέγματος όσο και στην καταμέτρηση του. Πιο αναλυτικά, στο ξύλινο πλέγμα που τελικά κατασκευάστηκε, πέραν των υπολοίπων δυνάμεων, ασκούνται και ροπές κάμψεων ενώ στο κρεμαστό μοντέλο δεν συμπεριλαμβάνονται αυτές. Επομένως, και σε αυτή την περίπτωση θεωρήθηκε απαραίτητη η εφαρμογή της Force Density Method<sup>51</sup>. Ένα ψηφιακό μοντέλο του κτιρίου δημιουργήθηκε στο οποίο προσομοιώθηκαν οι προβλεπόμενες δυνάμεις. Το πρώτο πλεονέκτημα του ψηφιακού μοντέλου ήταν η ακριβέστερη αναπαράσταση του τελικού κτιρίου χάρη στις ομαλοποιημένες καμπύλες<sup>52</sup>. Το δεύτερο



Εικ. 4.15: Το μοντέλο κρεμαστών αλυσίδων του Multihalle.



Εικ. 4.16: Αεροφωτογραφία του ολοκληρωμένου Multihalle.



Εικ. 4.17: Φωτογραφία από το εσωτερικό του κελύφους που φαίνονται οι σκαλωσιές που χρησιμοποιήθηκαν για την ανέγερση του.

<sup>51</sup> Με τον ίδιο τρόπο που εφαρμόστηκε και στην τέντα του ολυμπιακού σταδίου στο Μόναχο.

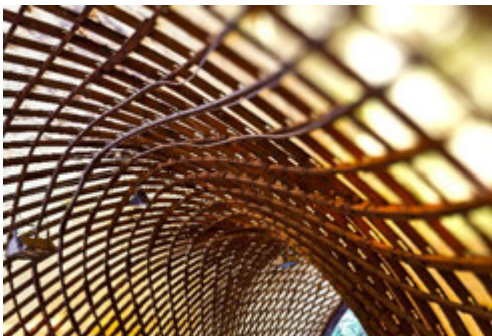
<sup>52</sup> Σε αντίθεση με του κρεμαστού μοντέλου που η συνολική μορφή είναι το αποτέλεσμα μικρών ευθύγραμμων δοκών.



Εικ. 4.18: Φωτογραφία κατά τη διάρκεια της κατασκευής του Multifihalle.



Εικ. 4.19: Εσωτερική φωτογραφία από την φάση της κατασκευής στην οποία φαίνονται τα βάρη που χρησιμοποιήθηκαν για τον στατικό έλεγχο του κελύφους.



Εικ. 4.20: Σύγχρονη φωτογραφία του εσωτερικού του κελύφους.

και πιο ουσιαστικό πλεονέκτημα ήταν η ενίσχυση του ξύλινου πλέγματος ώστε να ανταποκρίνεται πλήρως στους κανονισμούς ασφαλείας.

Η ανέγερση του κτιρίου ήταν ένα από τα πιο ενδιαφέροντα και μοναδικά χαρακτηριστικά του καθώς ήταν πολύ πιο σύντομη και οικονομική με συμβατές τεχνικές ανέγερσης κτιρίων της εποχής. Το ξύλινο πλέγμα αρχικά συναρμολογήθηκε στο έδαφος, χωρίς να σταθεροποιηθούν οι κόμβοι ακόμα. Ύστερα, το πλέγμα υψωνόταν σε συγκεκριμένα σημεία με ειδικούς πύργους ανύψωσης και ταυτόχρονα πιεζόταν στις ακμές του χρησιμοποιώντας γρούλους. Η ανέγερση διήρκησε μόλις ένα χρόνο. Όταν το κέλυφος έλαβε την τελική του μορφή οι κόμβοι σφίχθηκαν και επιπρόσθετα ξύλινα τούβλα τοποθετήθηκαν ενδιάμεσα των παράλληλων ξύλινων δοκών και συρμάτινες συνδέσεις τοποθετήθηκαν διαγώνια στο ξύλινο πλέγμα προκειμένου να ενισχυθεί η ακαμψία του κελύφους, σύμφωνα πάντα με τη στατική ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου.

Αν και στον αρχικό σχεδιασμό είχε προβλεφθεί να κατεδαφιστεί μετά από δύο χρόνια στέκει ακόμα μέχρι σήμερα χάρη στις υψηλές στατικές του απαιτήσεις. Λόγω του ότι οι ξύλινες σανίδες του σκελετού δεν προδιαγράφονταν για μακροχρόνια χρήση ο χώρος πολλαπλών χρήσεων είναι κλειστός για τους επισκέπτες και μόνο ο χώρος του εστιατορίου λειτουργεί κανονικά. Το κέλυφος πάντως έμεινε στην ιστορία χάρη στην ασυνήθιστη μορφή του, στο μεγάλο άνοιγμα και στην πρωτοποριακή χρήση του ξύλου για τη δημιουργία του ευέλικτου πλέγματος που αποτέλεσε απaráμιλλη αρχιτεκτονική σύλληψη ξύλινης κατασκευής.



Εικ. 4.21: Σύγχρονη φωτογραφία του εσωτερικού χώρου του Multihalle



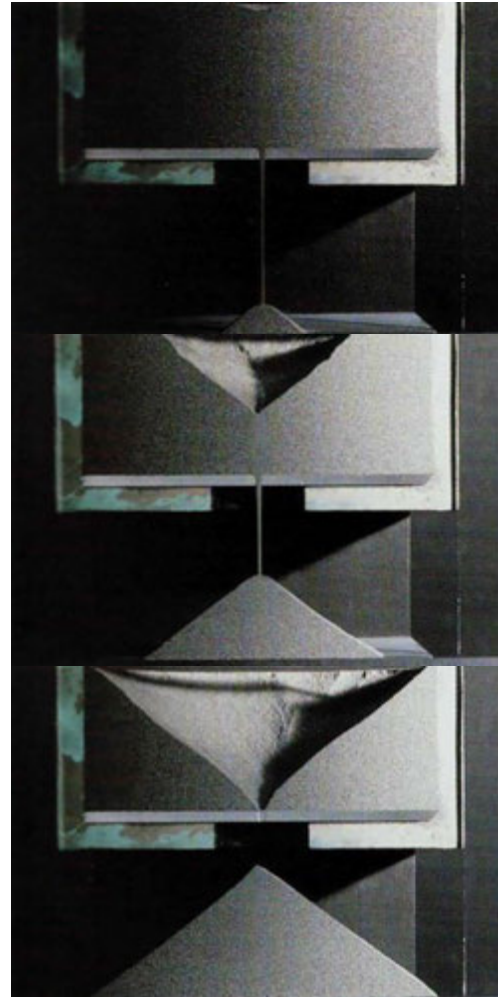
Εικ. 4.22: Αεροφωτογραφία που φαίνεται ολόκληρο το Multihalle τη νύχτα.

## 5 Συστήματα Περιοχών και Δίκτυα Διαδρομών

Ο Otto ανέπτυξε μεθόδους εύρεσης μορφής, όχι μόνο για την ανάπτυξη ελαφριών κατασκευών, αλλά για την επεξήγηση φαινομένων που παρατηρούνται στη φύση και στον άνθρωπο.

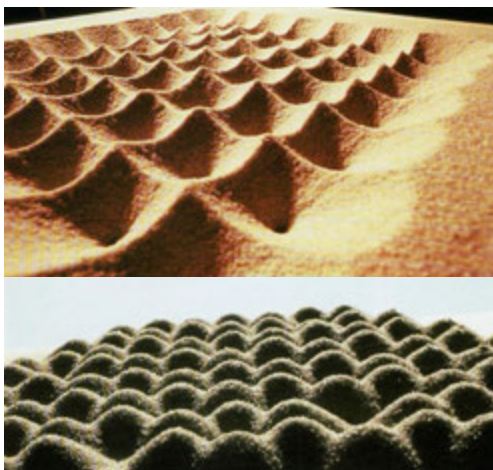
### 5.1 Στοιβες Άμμου

Το σχήμα των ηφαιστειών, οι κατολισθήσεις στα βουνά ή οι σωροί των εκσκαφών των ορυχείων είναι μεταξύ τους παρόμοια. Ανήκουν στην βασική κατηγορία των κωνικών σωρών. Όταν οι επάλξεις, τα αναχώματα, τα φράγματα, οι κορυφές των εκσκαφών, του εδάφους και των απορριμμάτων σχεδιάζονται και κατασκευάζονται τότε η γνώση για την αυτό-σχηματοποίηση των σωρών είναι μια αναγκαία προϋπόθεση. Οποιοδήποτε κοκκώδες υλικό που πέφτει από ένα συγκεκριμένο σημείο σχηματίζει έναν κώνο στην επιφάνεια από κάτω. Αν ένα μέρος από αυτό το αμμώδες υλικό ελευθερωθεί από μια τρύπα στη βάση του τότε ένα χωνί σχηματίζεται εντός του αμμώδους υλικού με την ίδια κλίση ηρεμίας, τη «φυσική» κλίση ηρεμίας. Η επιφάνεια ενός κώνου ή χωνιού με τη φυσική κλίση ηρεμίας είναι σχετικά ασταθής. Οι δονήσεις (σεισμοί, αέρας, βροχή, κίνηση) προκαλούν στη στοιβα ολισθήσεις και κατακυλήσεις. Αυτό μειώνει τη κλίση της ηρεμίας, κάνοντας τη πλαγιά πιο ρηχή και τη δομή του εδάφους πιο σταθερή. Η φυσική κλίση ηρεμίας παίζει καθοριστικό ρόλο στο έργο των πολιτικών μηχανικών επί ή υπό του επιπέδου του εδάφους, στη γη και στα θεμέλια των κτιρίων καθώς και στον σχεδιασμό των κήπων. Όταν, για παράδειγμα, σε μια εκσκαφή για τη διαμόρφωση δρόμου η πλαγιά γίνει πιο απότομη από ότι είναι η φυσική της κλίση ηρεμίας τότε είναι πολύ πιθανό η επιφάνεια να ολισθήσει αν διαβρωθεί από το χιόνι, τη ζέστη ή τη βροχή. Υπάρχει ένας απεριόριστος αριθμός μορφών κωνικών μορφών, τόσο με τη μορφή στοιβών όσο και χωνιών. Όλες οι μορφές που δημιουργούνται στη φύση και



Εικ. 5.1: Συσκευή αδιάσματος άμμου. Τα στάδια της εκκένωσης και δημιουργίας αμμόλοφου στην κάτω μεριά.

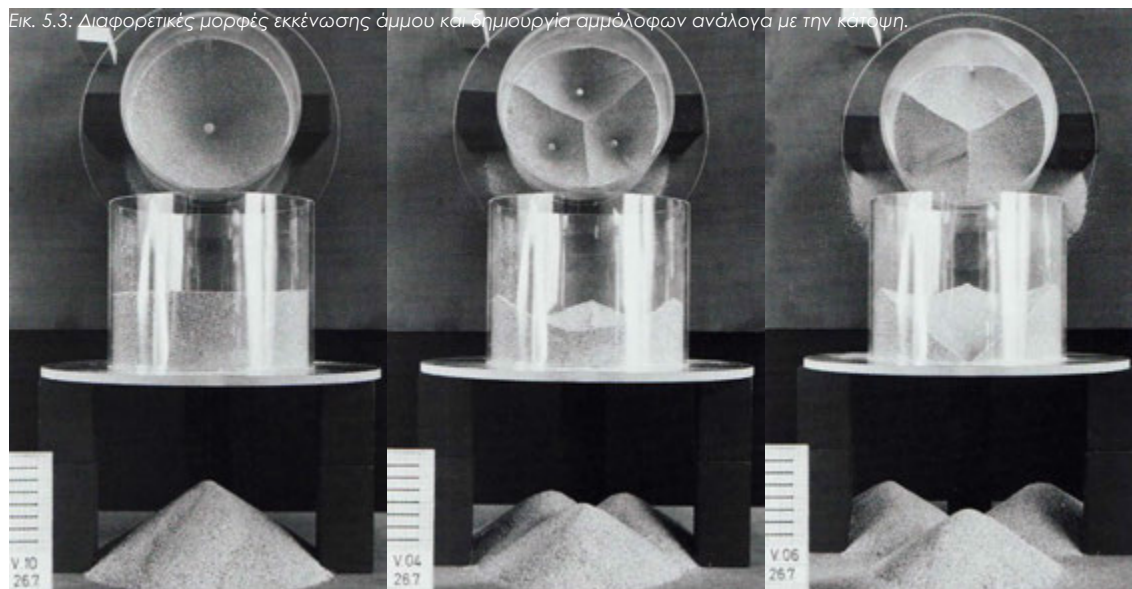




Εικ. 5.2: Πάνω: Μορφή εκκένωσης άμμου ομοιόμορφης κάτοψης.  
Κάτω: Αμμόλοφοι που δημιουργήθηκαν από την εκκένωση.

από τον άνθρωπο μπορούν να δημιουργηθούν πειραματικά.

Τα κατάλληλα πειραματικά υλικά είναι η άμμος, το ψιλό χαλίκι ή τα θραύσματα, το αλάτι, η ζάχαρη και ένας αριθμός άλλων αντικειμένων. Μορφές τέτοιου είδους μπορούν να δημιουργηθούν χωρίς κόπο με έναν πολύ απλό μηχανισμό που αποτελείται από μια ανώτερη και μια κατώτερη πλάκα που διευθετούνται παράλληλα μεταξύ τους. Η άμμος αδειάζει μέσω μικρών οπών από την πάνω πλάκα και έτσι αρχίζει να σχηματίζεται το χωνί στο πάνω κομμάτι και ακριβώς από κάτω να σχηματίζεται η στοιβα σε σχήμα κώνου. Η απαλή δόνηση ή η στρέψη της βάσης κάνει τη μορφή που έχει σχηματιστεί να γίνει πιο επίπεδη και επομένως να γίνει πιο σταθερή. Ο μηχανισμός είναι χρήσιμος για την επιστημονική έρευνα πάνω στις φυσικές δομές, όπως είναι για παράδειγμα η πληροφόρηση σχετικά με τη σεισμική σταθερότητα των ηφαιστειών, των πλαγιών, των αμμολόφων και των λόφων. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων από τη συσκευή αυτή είναι μεταξύ των πιο σημαντικών για τον σχεδιασμό



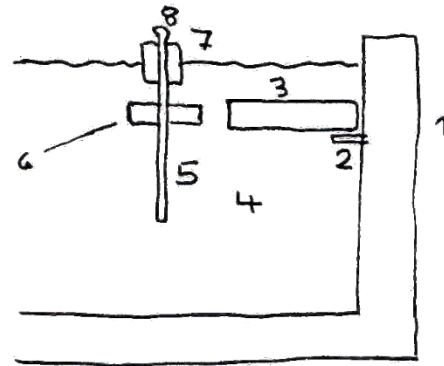
Εικ. 5.3: Διαφορετικές μορφές εκκένωσης άμμου και δημιουργία αμμόλοφων ανάλογα με την κάτοψη.

του εδάφους, των θεμελίων και της υδραυλικής μηχανικής. Επίσης, όπως οι σωροί από άμμο χρησιμοποιούνται στη τέχνη μεγάλης κλίμακας (Land art) έτσι και η συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον καλλιτεχνικό σχεδιασμό.

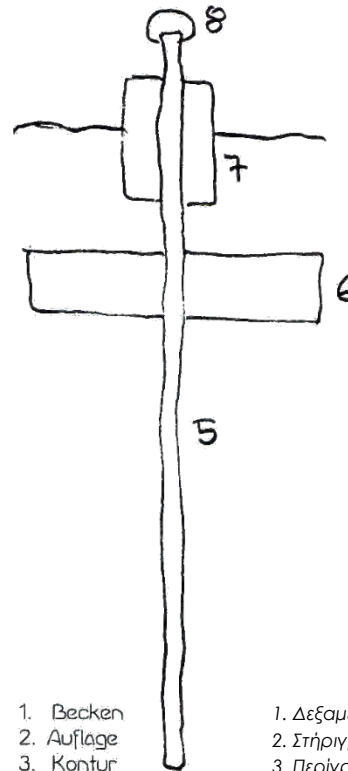
## 5.2 Προσομοίωση Εδαφικών Καταλήψεων

Πολλά ζώα, περιλαμβανομένου και του ανθρώπου, επιδεικνύουν εδαφική συμπεριφορά. Αυτό σημαίνει ότι καταλαμβάνουν εκτάσεις τις οποίες υπερασπίζονται σαν δικές τους. Αν για παράδειγμα μια μεγάλη έκταση κατοικείται από έναν μόνο κάτοχο (ζώο ή άνθρωπο) τότε η περιοχή μπορεί να επιλεγεί τυχαία. Αν υπάρχουν δύο κάτοχοι τότε οι περιοχές μεταφέρονται στην περιφέρεια, με τη μεγαλύτερη δυνατή απόσταση μεταξύ τους. Αν υπάρχουν πολλοί κάτοχοι τότε σχηματίζονται απολύτως σαφή μοτίβα. Οι μηχανισμοί της κατάληψης των ελευθέρων εκτάσεων παρατηρούνται, για παράδειγμα, στις παραλίες, στα λιβάδια και στα εστιατόρια. Είναι επίσης γνώριμη η κατοχή επιφάνειας μέσω πύκνωσης, όταν δηλαδή οι κάτοχοι μετακινούνται όσο το δυνατόν πιο κοντά ο ένας στον άλλον. Αυτή η διαδικασία μπορεί να προσομοιωθεί πολύ εύκολα, αλλά χωρίς μεγάλη ακρίβεια, χρησιμοποιώντας σαπουνόφουσκες που επιπλέουν σε νερό, και σχηματίζοντας πυκνές ομάδες με κατόψεις που συνήθως είναι πενταγωνικές, εξαγωνικές, ή επιταγωνικές.

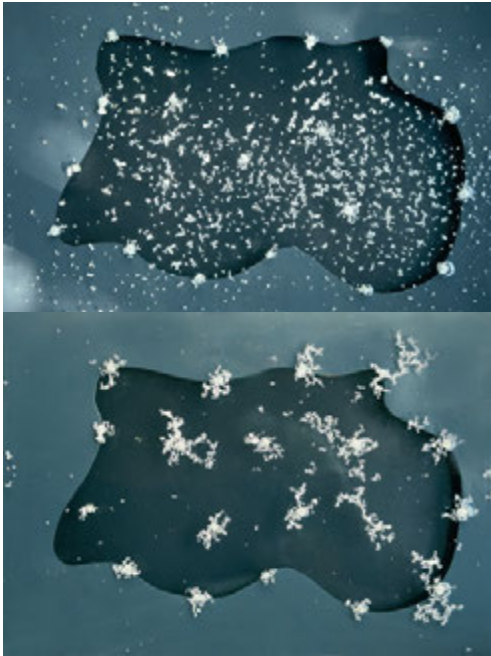
Στην περίπτωση του σχεδιασμού και της ανάπτυξης του αστικού ιστού είναι απαραίτητη η ανάπτυξη μιας διαδικασίας στην οποία η απωθητική και η ελκτική χωρική κατάληψη μπορεί να προσομοιωθεί σε οποιαδήποτε πυκνότητα για κάθε πιθανό χώρο. Για την προσομοίωση της διαδικασίας κατασκευάστηκε μια συσκευή με **μαγνήτες που επιπλέουν**, στην οποία χρησιμοποιείται ένα πλεξιγκλάς το οποίο έχει κοπεί σύμφωνα με το περίγραμμα της περιοχής που μελετάται και τοποθετείται μέσα σε ένα ρηχό δοχείο με νερό. Στην



Εικ. 5.4: Περιγραφή των μαγνητών που επιπλέουν.



- |                        |  |
|------------------------|--|
| 1. Becken              | 1. Δεξαμενή                                |
| 2. Auflage             | 2. Στήριγμα                                |
| 3. Kontur              | 3. Περίγραμμα                              |
| 4. Wasser              | 4. Νερό                                    |
| 5. magnetisierte Nadel | 5. Μαγνητισμένη<br>Καρφίτσα                |
| 6. runde Scheibe       | 6. Κυκλικός δίσκος<br>(z.B. PS Hartschaum) |
| 7. Schwimmer           | 7. Φλοτέρ                                  |
| 8. Leuchtkopf          | 8. Φωτεινή κεφαλή                          |



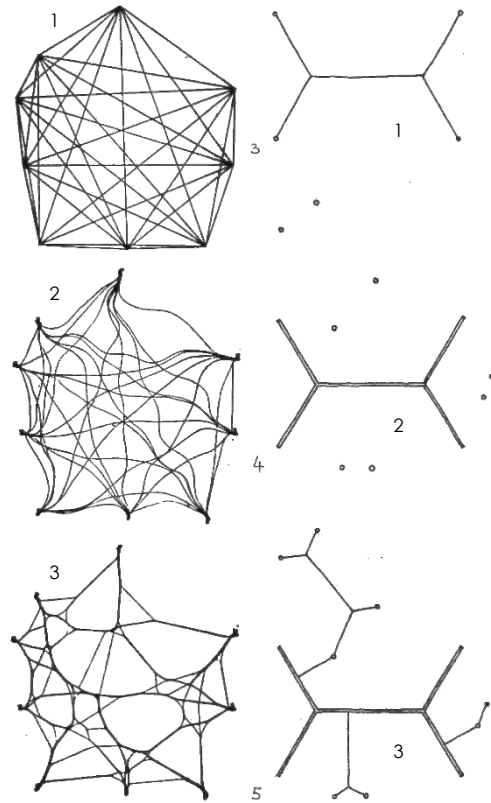
Εικ. 5.5: Μοντέλο μαγνητών. Μαγνήτες που επιπλέουν έχουν τοποθετηθεί σε συγκεκριμένα σημεία ενώ κομμάτια πολυστερνίου έχουν απλωθεί σε όλη την έκταση τα οποία έλκονται από τους μαγνήτες διατηρώντας παράλληλα απόσταση μεταξύ τους.

επιφάνεια του νερού αφήνονται ελεύθεροι κάποιοι μικροί μαγνήτες. Πρόκειται για μικρούς μαγνήτες σε μορφή ράβδους, όπως μαγνητισμένες βελόνες, οι οποίοι είναι κάθετοι ως προς την επιφάνεια του νερού, στηρίζονται σε μικρά φλοτέρ και είναι τοποθετημένοι έτσι ώστε οι όμοιοι πόλοι των μαγνητών να βρίσκονται ταυτόχρονα στην κορυφή ή στην βάση. Οι μαγνήτες απωθούνται μεταξύ τους και καταλαμβάνουν τις θέσεις με τη μέγιστη απόσταση μεταξύ τους. Οι θέσεις στις οποίες καταλήγουν οι μαγνήτες προκύπτουν από «μόνες τους», με αρκετούς «κατόχους» στο μέσον της περιοχής με ακρίβεια χιλιοστού και χωρίς την παρεμβολή εξωτερικής βοήθειας. Οι πιο ισχυροί μαγνήτες ή τα σύνολα μαγνητών καταλαμβάνουν μεγαλύτερες «περιοχές» σε σχέση με τους ανίσχυρους μαγνήτες ή μονάδες μαγνητών. Αυτή η πειραματική προσέγγιση καθιστά δυνατή την προσομοίωση της κατοχής μια περιοχής με ελκτικές και απωθητικές δυνάμεις, του είδους που παρατηρείται για παράδειγμα στις ομάδες των ανθρώπων στα χωριά, οι οποίοι κατοικούν κοντά ο ένας στον άλλον για οικονομικούς λόγους ή για ασφάλεια αλλά παράλληλα διατηρούν αποστάσεις από άλλες ομάδες. Σε αυτήν την περίπτωση η ελκτική κατοχή επιτυγχάνονται με την επαναπόλωση κάποιων μαγνητών έτσι ώστε οι αντίθετοι πόλοι να έλκονται μεταξύ τους.

### 5.3 Συστήματα Διαδρομών

Ο πιο απλός και εύκολος τρόπος για να συνδεθούν μεταξύ τους όλα τα σημεία σε μια περιοχή είναι με το **σύστημα άμεσων διαδρομών**. Σε αυτό συνδέονται με μια ευθεία όλα τα εναρκτήρια σημεία με τα τελικά. Μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας νήματα, λαστιχάκια, κ.α. Από την οπτική της κυκλοφορίας το άμεσο σύστημα διαδρομής είναι το ιδανικό διότι δεν υπάρχουν παρακάμψεις, όμως το μεγάλο μειονέκτημα του είναι ότι το συνολικό μήκος και εμβαδό που χρησιμοποιείται είναι υπερμέγεθες, άρα και ασύμφορο.

Τα ιδανικά συστήματα για τα δίκτυα κυκλοφορίας (πεζόδρομοι και ποδηλατοδρόμοι, δρόμοι, σιδηρόδρομοι, αυτοκινητόδρομοι, κτλ.) πρέπει να είναι βέλτιστα. Αν ο στόχος είναι η εύρεση της μορφής με τις ελάχιστες απαιτήσεις για την κατασκευή, τη συντήρηση, τη χρήση και την κίνηση των διαδρομών τότε το καταλληλότερο μοντέλο είναι το **σύστημα των ελαχιστοποιημένων παρακάμψεων**, που ονομάζεται επίσης «μοντέλο βρεγμένων κλωστών» ή όπως το αποκαλεί ο Spruybroek "wet grid"<sup>53</sup>. Μπορεί να θεωρηθεί σαν έναν συμβιβασμό μεταξύ των άμεσων συστημάτων και των ελαχίστων συστημάτων διαδρομής. Σε αυτό οι κλωστές τεντώνονται μεταξύ του αρχικού και το τελικού σημείου δημιουργώντας το άμεσο σύστημα διαδρομών. Ύστερα οι κλωστές χαλαρώνουν ώστε να τους δοθεί περισσότερο μήκος, περίπου κατά 8% του αρχικού μήκους<sup>54</sup>, και βυθίζονται σε νερό<sup>55</sup>. Τότε οι κλωστές δεσμεύονται από την επιφανειακή τάση του νερού με αποτέλεσμα να παράγονται νέες «διαδρομές κίνησης» οι οποίες είναι στο σύνολο τους κατά 8% μεγαλύτερες σε μήκος σε σχέση με το άμεσο σύστημα, αλλά το συνολικό εμβαδόν που απαιτείται για την κατασκευή τους όπως και το συνολικό τους μήκος είναι εξαιρετικά μειωμένο. Αποτελεί συνήθως το

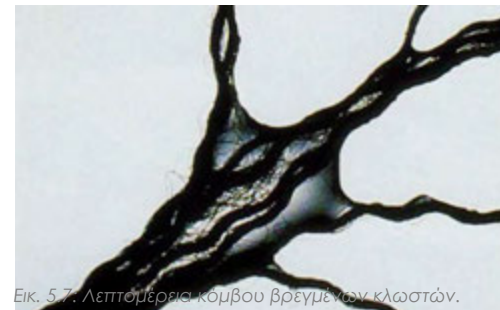


Εικ. 5.6: Αριστερά Μοντέλο Κλωστών:

1. Σύστημα άμεσων διαδρομών.
2. Αύξηση των αποστάσεων κατά 8%.
3. Βρέξιμο κλωστών και δημιουργία του συστήματος ελαχίστων παρακάμψεων.

Δεξιά: Μοντέλο ελάχιστων αποστάσεων πολλαπλών γενεών:

1. Δημιουργία πρώτης γενιάς ελαχίστων διαδρομών.
2. Ενίσχυση με άκαμπτες επιφάνειες της πρώτης γενιάς..
3. Δημιουργία δεύτερης γενιάς ελαχίστων διαδρομών..

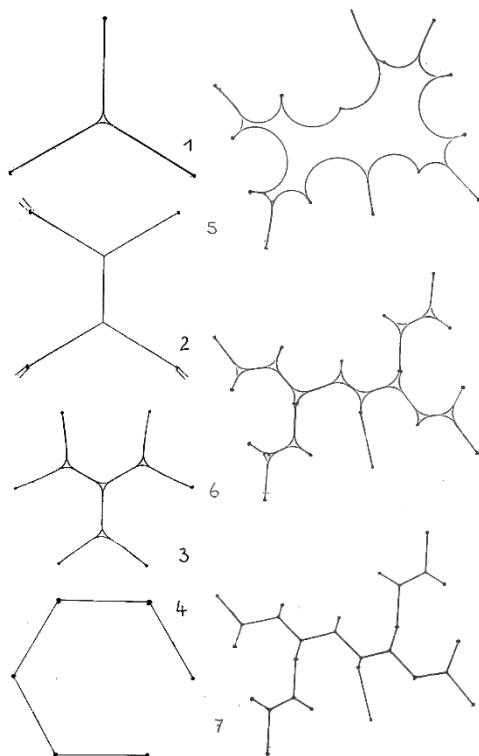


Εικ. 5.7: Λεπτομέρεια κόμβου βρεγμένων κλωστών.

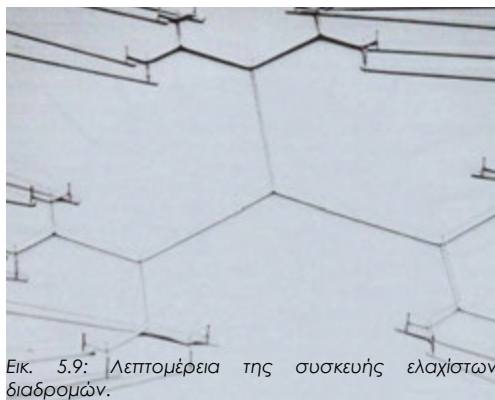
<sup>53</sup> (Spruybroek, NOX: Machining Architecture, 2004)

<sup>54</sup> Η τιμή αυτή είναι που έχει προκύψει ως η καταλληλότερη από τα πειράματα που διεξήχθησαν στο Ινστιτούτο Ελαφρών Κατασκευών.

<sup>55</sup> Να σημειωθεί ότι σε αυτό το πείραμα το νερό που χρησιμοποιείται είναι καθαρό και δεν περιέχει απορρυπαντικά ή άλλες ουσίες.



Εικ. 5.8: Συσσκευή ελαχίστων διαδρομών.  
 1 και 2: Ελάχιστες διαδρομές μεταξύ 3 και 4 σημείων αντίστοιχα.  
 3 και 4: Διαφορετικές μορφές ελαχίστων διαδρομών για 6 σημεία.  
 5-7: Συρρίκνωση των επιφανειών από φιλμ σαπουνιού στην ελάχιστη διαδρομή όσο η επιφάνεια του γυαλιού πλησιάζει την επιφάνεια του νερού.



Εικ. 5.9: Λεπτομέρεια της συσκευής ελαχίστων διαδρομών.

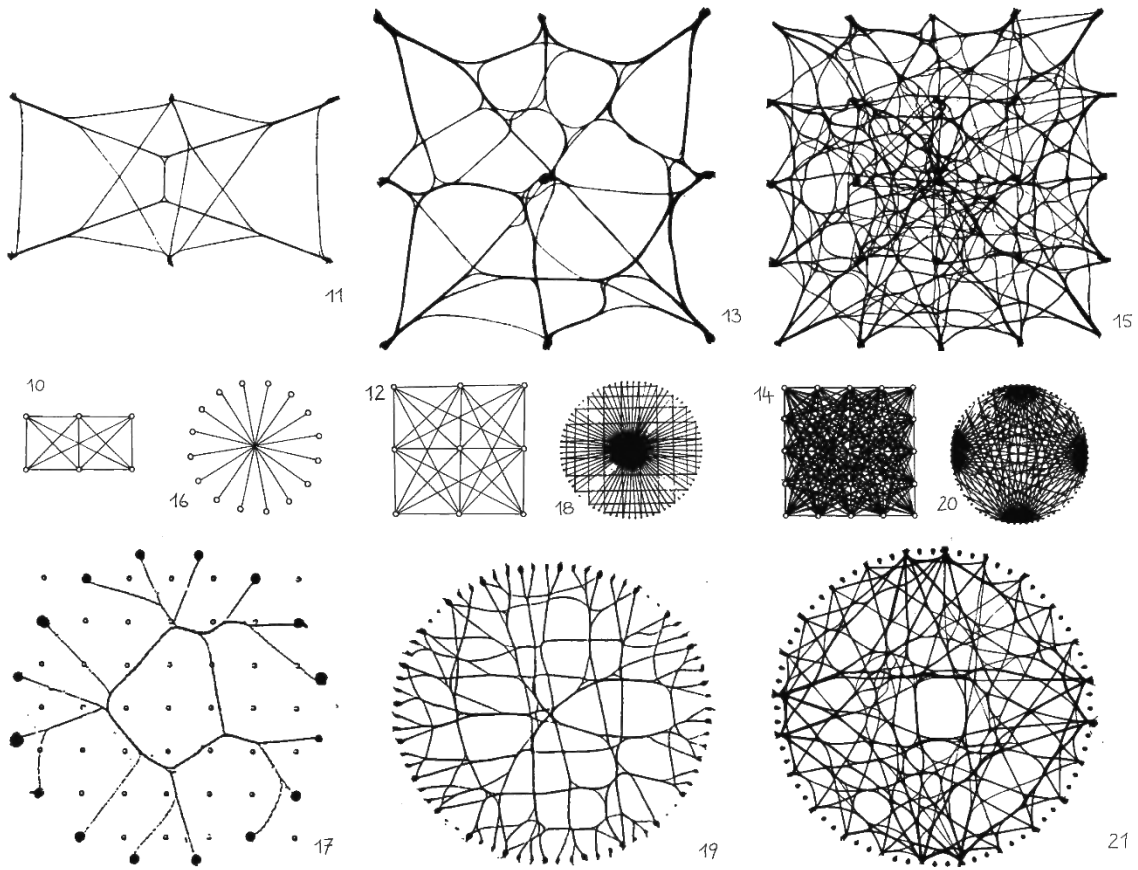
30% με 50% του άμεσου συστήματος. Αυτό που προκύπτει επικεντρώνεται στην καλύτερη δυνατή αξιοποίηση της απαιτούμενη ενέργειας για την κατασκευή, τη συντήρηση των διάδρομων, και κίνηση στο σύνολο της. Μάλιστα, πολλοί αρχιτέκτονες χρησιμοποιούν παρόμοια μοντέλα τον υπολογισμό και άλλων δικτύων πέραν των διαδρομών.<sup>56</sup>

Μια δεύτερη συσκευή, η αποκαλούμενη **συσσκευή ελαχίστων διαδρομών**, μπορεί αξιόπιστα να καθορίσει ένα βέλτιστο σύστημα διαδρομών μεταξύ πολλών σημείων διευθετημένα με οποιοδήποτε τρόπο μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα. Το βασικό χαρακτηριστικό της συσκευής είναι μια επιφάνεια γυαλιού η οποία τοποθετείται με ακρίβεια οριζοντίως πάνω από μια δεξαμενή σαπουνονερού. Αρχικά ψεκάζεται με νερό στην κάτω της πλευρά. Μετά το γυαλί τοποθετείται πάνω σε λεπτές μετακινούμενες βελόνες και έρχεται σε επαφή με το νερό. Οι βελόνες στη μια τους άκρη είναι φτιαγμένες έτσι ώστε να ρυθμίζεται θέση τους από την άκρη της δεξαμενής. Όταν το επίπεδο του νερού μειωθεί αργά, σχηματίζονται λεπτές επιφάνειες σαπουνονερού μεταξύ της επιφάνειας του γυαλιού, του νερού και των βελονιών. Τα φιλμ σαπουνιού πάντοτε θα συρρικνωθούν στην ελάχιστη δυνατή επιφάνεια, επομένως προκύπτει ο αποκαλούμενος σχηματισμό της ελάχιστης επιφάνειας. Όσο η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας του γυαλιού και του νερού διατηρείται, τότε οι γραμμές επαφής των φιλμ σαπουνιού έχουν το ελάχιστο συνολικό μήκος. Οι γραμμές αυτές είναι ορατές από την πάνω πλευρά του γυαλιού. Μπορούν να μετρηθούν φωτογραφικά και να εισαχθούν σε ηλεκτρονικό σύστημα δεδομένων. Η συσκευή αυτή αναπτύχθηκε το 1958 στο Atelier Frei Otto

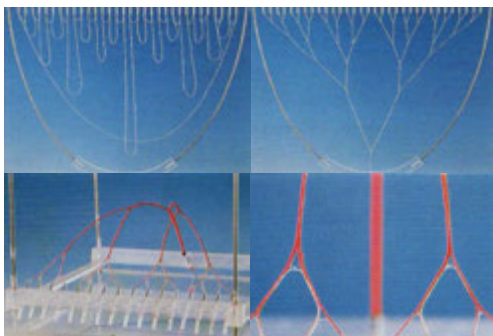
<sup>56</sup> Θα δούμε αργότερα πως χρησιμοποιείται και για ποιους λόγους, καθώς και για τον λόγο που η κατασκευή αυτή αποτελεί μια από τις σπουδαιότερες εφευρέσεις του Otto.

Berlin και χρησιμοποιείται έκτοτε από το Institute for Lightweight Structures του πανεπιστημίου της Στουτγάρδης από το 1964.<sup>57</sup>

Εικ. 5.10: Διάφορα παραδείγματα σύνδεσης πολλαπλών σημείων μέσω συστημάτων άμεσων διαδρομών και αντίστοιχων συστημάτων ελαχιστοποιημένων παρακάμψεων.



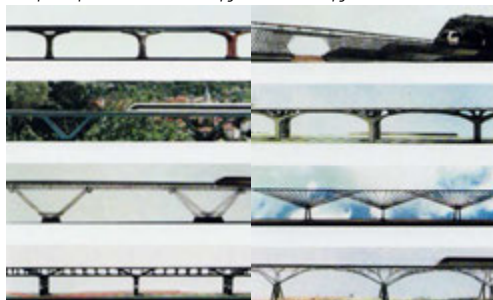
<sup>57</sup> (Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)



Εικ. 5.11: Δημιουργία διακλαδωτών μορφών χρησιμοποιώντας βρεγμένες κρεμαστές κλωστές.



Εικ. 5.12: Αριστερά: Ανεστραμμένο μοντέλο κρεμαστών βρεγμένων κλωστών που έχει σκληρυνθεί χρησιμοποιώντας πολυεστέρα. Δεξιά: Μακέτα στεγάστρου διακλαδωτής κατασκευής.



Εικ. 5.13: Διάφορες μακέτες που δείχνουν την πορεία εργασίας του μαγνητικού σιδηροδρομικού δικτύου από συμπαγείς μορφές σε ελαφριά χωροδικτυώματα.

## 5.4 Διακλαδωτές Κατασκευές

Οι διακλαδωτές κατασκευές είναι τρισδιάστατα συστήματα στήριξης που μπορούν να κατασκευαστούν με ξύλο, σίδερο ή οπλισμένο σκυρόδεμα. Η προέλευση τους είναι αρχαιότητα και βρίσκεται στις πρώτες κατασκευές δοκού επί στύλου. Γνώρισαν μεγάλη ακμή κατά τον μεσαίωνα χάρη στους ξυλουργούς της εποχής. Στη γοτθική αρχιτεκτονική κατασκευάζονταν διακλαδωτές κατασκευές από πέτρα. Σήμερα, μετά από πολλά χρόνια εξέλιξης ακόμα κατασκευάζονται εφαρμόζοντας νέες τεχνικές και τεχνολογίες που αποσκοπούν στην ενδυνάμωση και ταυτόχρονα στην ελάφρυνση της κατασκευής. Ένας αποτελεσματικός τρόπος για την εύρεση της μορφής αυτών των κατασκευών μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τη συσκευή εύρεσης της ελάχιστης διαδρομής ή τη συσκευή για την του Υπουργείου Έρευνας και Τεχνολογίας<sup>58</sup>. Μετά από αρκετή μελέτη πάνω στην αισθητική, στην οικολογία, στην τεχνολογία, στην στατικότητα και στην κατασκευή των γραμμών κατέληξε σε δέκα διαφορετικές κατασκευαστικές μορφές. Αξιοσημείωτο είναι ότι χρησιμοποίησε τις μεθόδους εύρεσης μορφής των συστημάτων άμεσων διαδρομών, των ελαχίστων διαδρομών και των ελαχιστοποιημένων παρακάμψεων για τον καθορισμό των διαφόρων μορφών.<sup>59</sup>

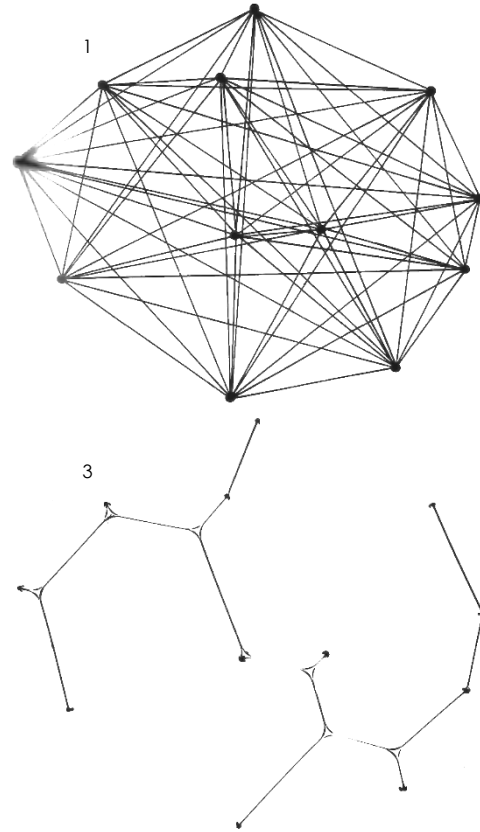
<sup>58</sup> Πλέον έχει συγχωνευτεί με το Υπουργείο Παιδείας και Επιστήμης υπό την ονομασία Υπουργείο Παιδείας και Έρευνας.

<sup>59</sup> (Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)

## 5.5 Ανάλυση και Επεξήγηση Οικισμών

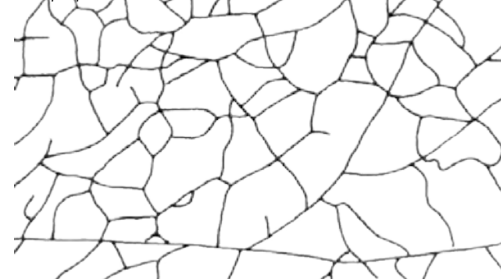
Στο τεύχος IL 39 Non-Planned Settlements<sup>60</sup> ο Schaur επεξηγεί τις αρχές και τις μεθόδους που κρύβονται πίσω από την ανάπτυξη των ασχεδιαστων οικισμών, αυτών δηλαδή που προέκυψαν αυθόρμητα και αναπτύχθηκαν σύμφωνα με τις ανάγκες της κοινότητας. Προσπαθεί να φωτίσει την γκρίζα περιοχή στην οποία μια ανθρώπινη κατασκευή δεν μπορεί να χαρακτηριστεί προσχεδιασμένη, ή τεχνητή, που μπορεί όμως να χαρακτηριστεί ως «φυσική», δηλαδή ως κάτι που έχει προκύψει από μόνη της. Ο Otto αναφέρει πως στην ανάπτυξη των ασχεδιαστων οικισμών, αυτό που φαίνεται αρχικά ως ανεξήγητο υπό το πολεοδομικό πρίσμα, εγκυμονεί τα τυπικά χαρακτηριστικά μιας διαδικασίας αυτό-δημιουργίας. Τα χαρακτηριστικά αυτά αποτυπώνονται στην μορφή των οικισμών αυτών, παραμένουν σε γενικές γραμμές τα ίδια σε όλη την ανθρώπινη ιστορία και αντιπροσωπεύουν μια ανεξάρτητη οικογένεια μορφών που συνεχίζουν να είναι όμοια παρά τις ισχυρές επιρροές από τους διαφορετικούς πολιτισμούς.<sup>61</sup> Ενώ φαίνονται ότι έχουν αναπτυχθεί οργανικά και φυσικά, στην πραγματικότητα έχουν σχεδιαστεί με κάθε λεπτομέρεια και είναι προσαρμοσμένοι σε ρεαλιστικές ανάγκες. Αυτό που επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ των διαδικασιών αυτό-δημιουργίας της φύσης και των οικισμών είναι τα χαρακτηριστικά του οικισμού που δημιουργούνται από μόνα τους, δηλαδή η κατάληψη της έκτασης και η σύνδεση αυτών μέσω μονοπατιών και δρόμων.

Στη μελέτη αυτή επιλέχθηκαν και αναλύθηκαν 18 οικισμοί από την Ευρώπη, την Ασία και την Αφρική και συγκρίθηκαν με 5 διαφορετικές μεθόδους εύρεσης μορφής τις οποίες επινόησε ο Otto. Οι αεροφωτογραφίες των οικισμών διαδραμάτισαν σπουδαίο ρόλο καθώς αυτές ήταν που αποκάλυψαν αυτές τις ιδιότητες των οικισμών. Ακόμα, οι εντυπωσιακές ομοιότητες μεταξύ των οικισμών και των αυτό-δημιουργητων κατασκευών δεν



Εικ. 5.14: Αριστερή και δεξιά σελίδα: Σύνδεση πολλαπλών σημείων χρησιμοποιώντας τα συστήματα των άμεσων διαδρομών (1), των ελαχιστοποιημένων παρακάμψεων (2), των ελαχίστων διαδρομών (3) και των ελαχίστων διαδρομών σε γενιές (4).

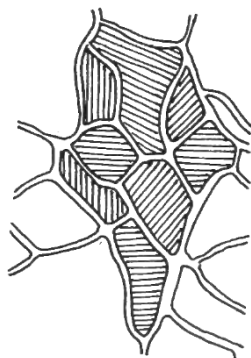
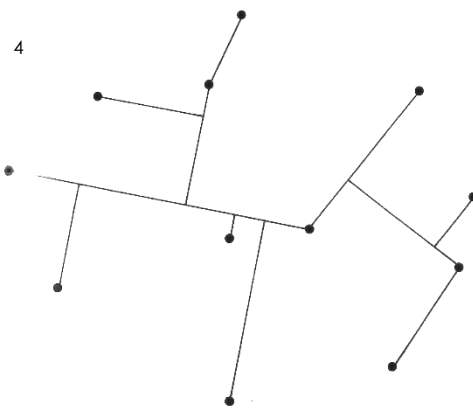
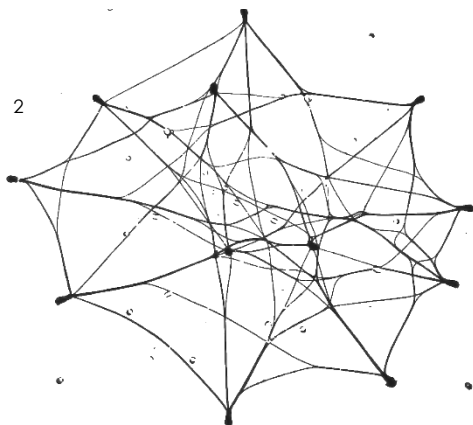
Εικ. 5.15: Σκίτσο μελέτης ανοικτού συστήματος διαδρομών.



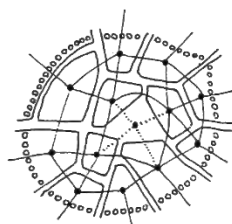
<sup>60</sup> (Schaur & Otto, 1992)

<sup>61</sup> (Schaur & Otto, 1992, σ. 8)





Εικ. 5.16: Αριστερά: Σκίτσο μελέτης υποπεριοχών. Κάτω: Σκίτσο μελέτης σχέσεων υποπεριοχών και συστημάτων διαδρομών.



εντοπίζονται από τη σύγκριση των ιδιοτήτων της ύλης ή από τη διαδικασία του σχηματισμού αλλά από τις αρχές που οδηγούν στις συγκεκριμένες κατασκευές, και τότε μόνο μπορούν να συγκριθούν.

Για να επιτευχθεί αυτό η δομή των οικισμών, παρά την πληθώρα στοιχείων που παρουσίαζαν, απλοποιήθηκαν σε δύο βασικά στοιχεία, στις **υποπεριοχές** και στο **σύστημα διαδρομών**. Τρεις είναι οι βασικές αρχές σχεδιασμού που λαμβάνουν χώρα στην ανάπτυξη ενός οικισμού, ο συλλογικός σχεδιασμός (collective planning), ο αυτό-σχεδιασμός (self-planning) και η αυτό-οργάνωση (self-organization). Τα προηγούμενα μπορούν να ενταχθούν στα τοπολογικά στοιχεία<sup>62</sup> του οικισμού, όμως για τη σωστή περιγραφή τους είναι απαραίτητα και τα μετρικά στοιχεία του. Πιο απλά, αφορούν τη σχέση που δημιουργούν οι υποπεριοχές μεταξύ τους (γειτονιές) και το είδος των κόμβων του συστήματος διαδρομών, ενώ τα μετρικά το εμβαδό των υποπεριοχών και το μήκος μεταξύ των κόμβων.

Αντίστοιχα οι μέθοδοι εύρεσης μορφής χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, σε αυτές που δημιουργούν ανοιχτά δίκτυα και σε αυτές που δημιουργούν κλειστά. Στα ανοιχτά ανήκουν τα συστήματα άμεσων διαδρομών, τα συστήματα ελαχίστων διαδρομών (καθώς και τα αντίστοιχα των πολλαπλών γενεών) και τα συστήματα των ελαχιστοποιημένων παρακάμψεων. Στα κλειστά ανήκουν τα πειράματα με τις σαπουνόφουσκες καθώς και οι πειραματικές συσκευές άμμου.<sup>63</sup>

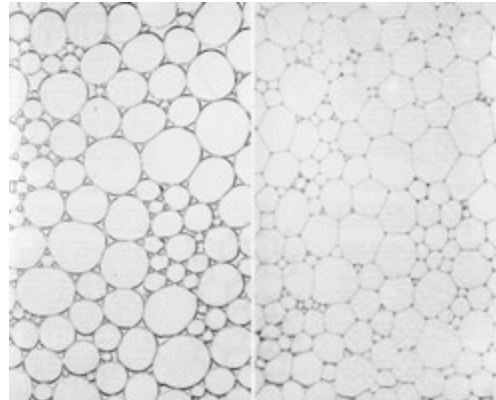
Επιπρόσθετα, μελετήθηκαν τα μοτίβα που δημιουργούν οι ρωγμές, το διακλαδωτό σύστημα των αρτηριών των φύλλων, η δομή των φτερών της λιβελούλας, τα ομογενή δίκτυα και τα συστήματα διαδρομών που δημιουργούν

<sup>62</sup> Περισσότερες πληροφορίες στην τοπολογία υπάρχουν στο επόμενο κεφάλαιο.

<sup>63</sup> Όλα τα παραπάνω έχουν αναλυθεί και παρουσιαστεί νωρίτερα.

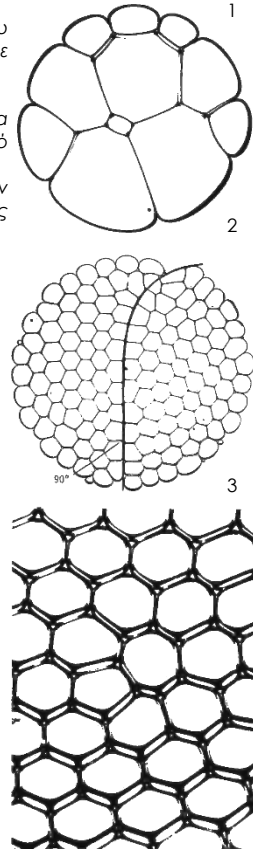
τα ζώα. Οι φυσικές κατασκευές μελετήθηκαν με τον ίδιο τρόπο όπως οι οικισμοί και εφαρμόστηκαν τα αντίστοιχα τοπολογικά και μετρικά στοιχεία.

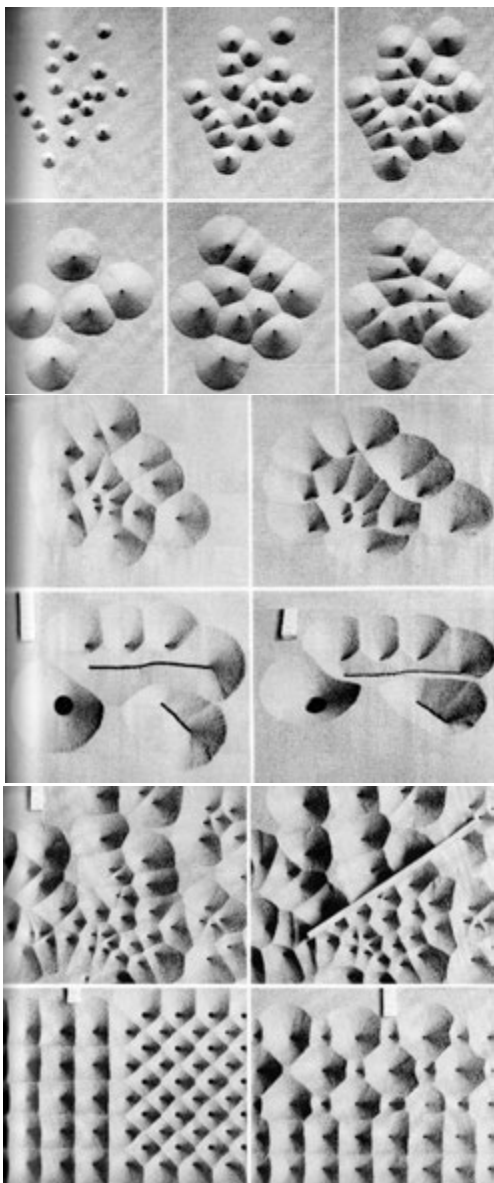
Στα συμπεράσματα της έρευνας βρίσκονται κάποια σημαντικά στοιχεία για τη χρησιμότητα των μεθόδων εύρεσης μορφής. Όσον αφορά τα ελάχιστα συστήματα διαδρομών δεν είναι αρκετά για να περιγράψουν τη δομή των οικισμών, πρώτον γιατί σχηματίζουν ανοιχτά δίκτυα σε αντίθεση με τα κλειστά δίκτυα διαδρομών των οικισμών, και δεύτερον, αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση του συνολικού μήκους, σε αντίθεση με τα δίκτυα των οικισμών που αποσκοπούν στην πολλαπλή πρόσβαση σε κάθε περιοχή. Ομοιότητες βρέθηκαν σε κάποιες περιπτώσεις μικρών οικισμών που οι βασικές διαδρομές μπορούν να ταυτιστούν με τα βέλτιστα συστήματα διαδρομών. Αυτό σημαίνει ότι τα χαρακτηριστικά των ελαχίστων διαδρομών προκύπτουν στους οικισμούς ιεραρχικά και όχι συνολικά. Όσον αφορά τα άμεσα συστήματα διαδρομών και τα συστήματα των ελαχιστοποιημένων παρακάμψεων ταιριάζουν περισσότερο διότι δημιουργούν κλειστά δίκτυα, άρα και υποπεριοχές. Τα άμεσα συστήματα βέβαια δεν ανταποκρίνονται σε καμία δομή των μελετημένων οικισμών, όμως τα συστήματα ελαχιστοποιημένων παρακάμψεων παρουσιάζουν αρκετά κοινά χαρακτηριστικά με έναν συγκεκριμένο οικισμό, ο οποίος είναι πιο αραιοκατοικημένος από τους άλλους. Με την εξαίρεση του τελευταίου παραδείγματος, κανένα από τα συστήματα διαδρομών δεν μπορεί να συσχετιστεί δομικά με κάποιο σύστημα των οικισμών. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι οι οικισμοί αναπτύσσονται πρώτα με την εγκατάσταση των κατοίκων σε διάφορα σημεία και ύστερα επεκτείνουν τις εκτάσεις τους μέχρι να μείνει ένα κοινόχρηστο μέρος μεταξύ των εκτάσεων που θα αποτελέσει τον δρόμο. Δηλαδή η εγκατάσταση και η «δισδιάστατη» εξάπλωση καθορίζουν τη δομή και ύστερα προκύπτουν οι διαδρομές. Γι' αυτόν το λόγο οι κατασκευές που δημιουργούν κλειστές περιοχές αρμόζουν καλύτερα



Εικ. 5.17: Σύστημα φιλμ σαπουνιών για την μελέτη κλειστών συστημάτων.

Εικ. 5.18: Λεπτομέρειες του συστήματος σε διαφορετικές περιπτώσεις.  
1. Κυκλικό περίγραμμα.  
2. Άκαμπτη επιφάνεια (διαδρομή) σε κυκλικό περίγραμμα.  
3. Κυψελωτή μορφή στην περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής.





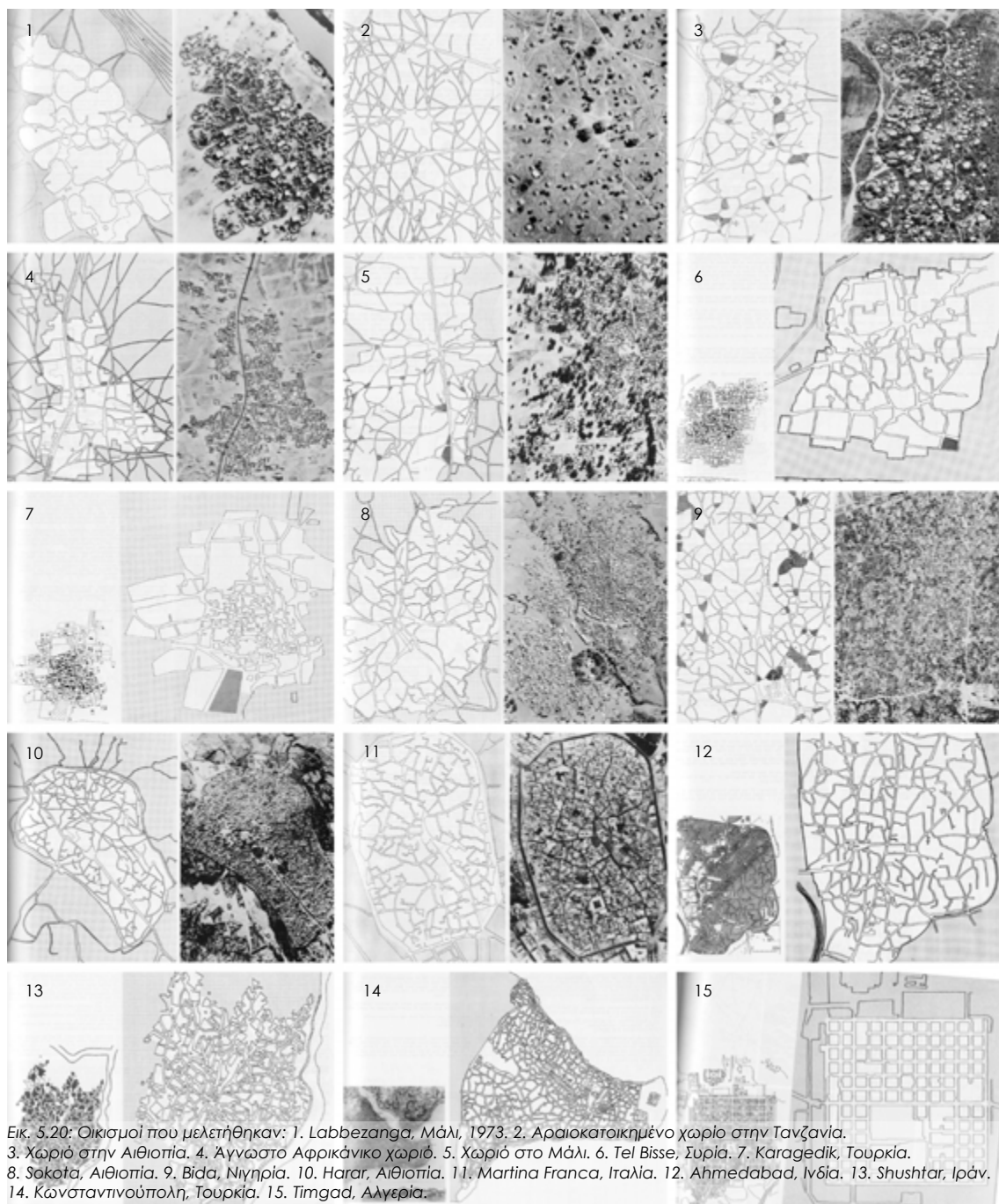
Εικ. 5.19: Μοντέλο άμμου. Διαφορετικές περιπτώσεις σχηματισμού ανάλογα με την τοποθεσία των οπών τόσο σε μήκος και πλάτος όσο και σε ύψος.

στους οικισμούς αυτούς από τι τα συστήματα διαδρομών. Τα πειράματα με τις δεν αρμόζουν ιδανικά με τη δομή των οικισμών διότι δημιουργούν ομοιογενείς δομές<sup>64</sup> που, αν και τείνουν μέχρι ένα σημείο, δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Από την άλλη, τα μοντέλα με το άδειασμα της άμμου ταιριάζουν καλύτερα με τη διάταξη των κατοικιών και της ανάπτυξης τους καθώς και με τα τοπολογικά χαρακτηριστικά της γενικής δομής των οικισμών.

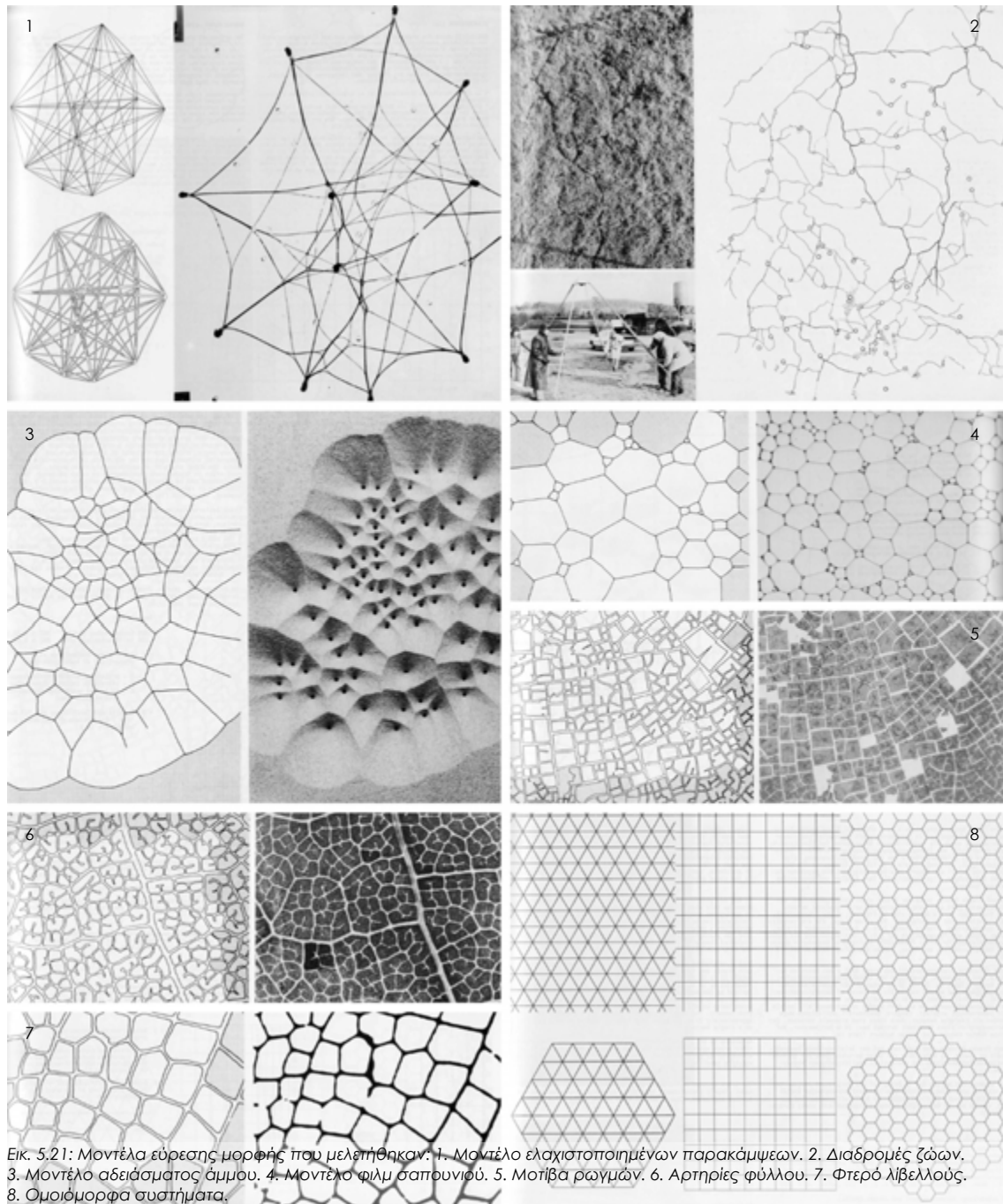
Αρκετά ερωτήματα παραμένουν αναπάντητα που αφορούν την ανάπτυξη των οικισμών, όμως σε ότι αφορά τις πειραματικές συσκευές εύρεσης μορφής, φάνηκε ποιες είναι οι κατάλληλες και ποιες όχι, σε ποιο βαθμό μπορούν να συμβάλουν στον καλύτερο σχεδιασμό μιας περιοχής και με ποιο τρόπο.

<sup>64</sup> Με τον όρο δομή αναφέρομαι στα τοπολογικά και στα μετρικά χαρακτηριστικά.

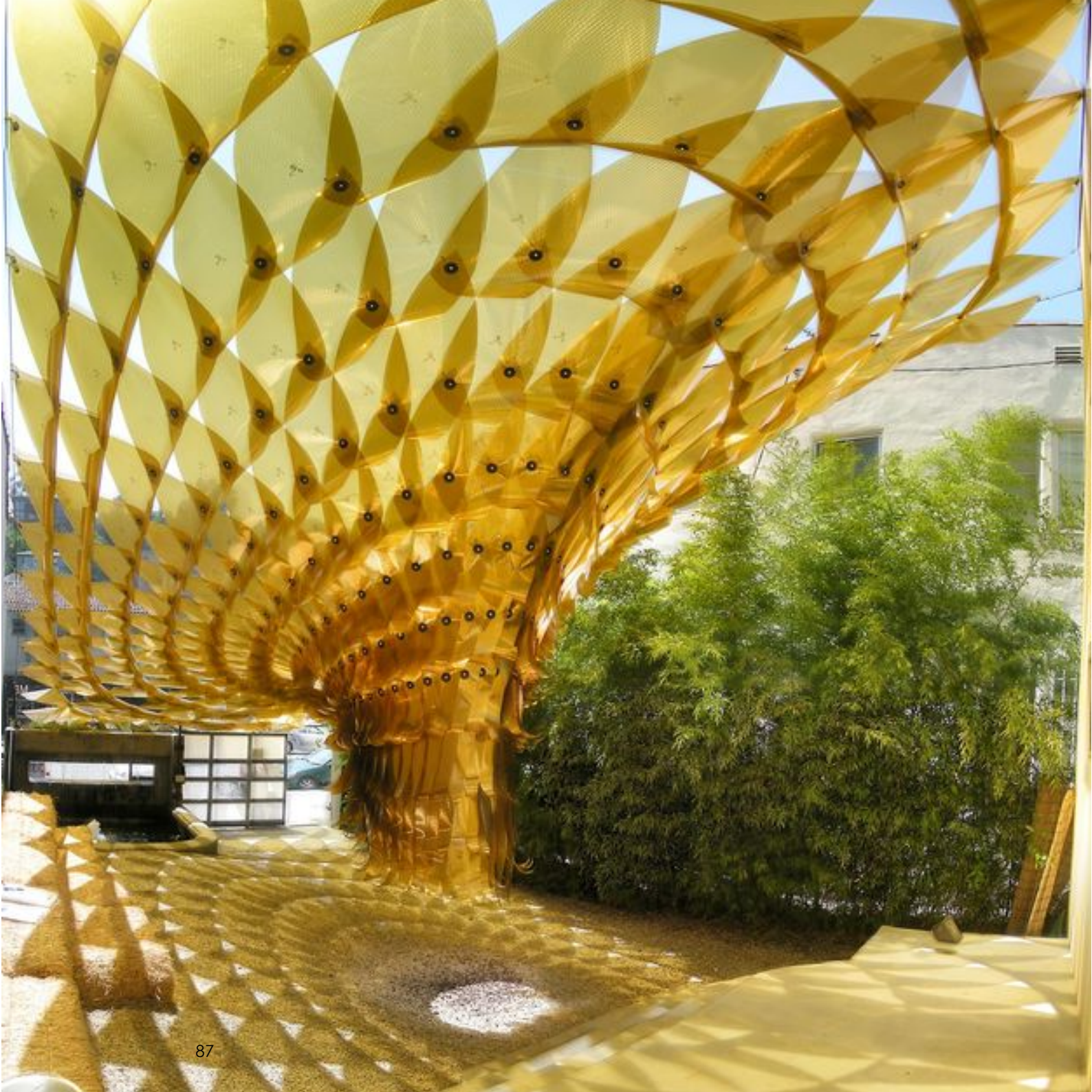
Η Συμβολή του Frei Otto στην Εύρεση (της) Μορφής και στη Σύγχρονη Μορφογένεση



Εικ. 5.20: Οικισμοί που μελετήθηκαν: 1. Labbezanga, Μάλι, 1973. 2. Αραιοκατοικημένο χωριό στην Τανζανία. 3. Χωριό στην Αιθιοπία. 4. Άγνωστο Αφρικάνικο χωριό. 5. Χωριό στο Μάλι. 6. Tel Bisse, Συρία. 7. Karagedik, Τουρκία. 8. Σοκοτά, Αιθιοπία. 9. Βίδα, Νιγηρία. 10. Harar, Αιθιοπία. 11. Martina Franca, Ιταλία. 12. Ahmedabad, Ινδία. 13. Shushtar, Ιράν. 14. Κωνσταντινούπολη, Τουρκία. 15. Τίμγκατ, Αλγερία.



Εικ. 5.21: Μοντέλα εύρεσης μορφής που μελετήθηκαν: 1. Μοντέλο ελαχιστοποιημένων παρακάμψεων. 2. Διαδρομές ζώνων. 3. Μοντέλο αδεισάματος άμμου. 4. Μοντέλο φιλμ σαπουνιού. 5. Μοτίβα ρωγμών. 6. Αρτηρίες φύλλου. 7. Φτερό λιβελλού. 8. Ομοιόμορφα συστήματα.



# Το Σήμερα

Το έργο και η έρευνα του Otto άνοιξαν έναν νέο δρόμο στην αρχιτεκτονική, και σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλές θεωρίες και μεθοδολογίες που πηγάζουν από αυτή την παρακαταθήκη. Εκείνα που αφορούν περισσότερο τη συγκεκριμένη εργασία είναι η σύγχρονη διατύπωση της θεωρίας γύρω από την εύρεση (της) μορφής, που είναι γνωστή ως **μορφογένεση**, η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών για την **προσομοίωση** των διαδικασιών με τις οποίες παράγεται μορφή και η ανάπτυξη του **computational design**, που αξιοποιώντας τις ιδιότητες της ύλης δημιουργεί νέα δεδομένα στην αρχιτεκτονική.



## 1 Σύγχρονη Θεωρία

Ο De Landa<sup>65</sup> είναι ο πρώτος σύγχρονος θεωρητικός που δημιούργησε μια ολοκληρωμένη θεωρία γύρω από τη μορφογένεση και τις διάφορες μεθοδολογίες της. Καθώς την περίοδο που δρούσε ο Otto δεν υπήρχε κάποια σχετική θεωρία θα επιχειρηθεί τώρα να επανεξεταστεί η μεθοδολογία του υπό τη θεωρητική σκοπιά του de Landa. Επιπροσθέτως, η θεωρία αυτή αποτελεί τη βάση αρκετών αρχιτεκτόνων που θα μελετηθούν στη συνέχεια και οι οποίοι έχουν σχετιστεί με το έργο του Otto. Πρέπει να σημειωθεί ότι η θεωρία του De Landa βασίζεται στη νέο-υλιστική<sup>66</sup> θεωρία του Deleuze. Το εύρος της είναι αρκετά μεγάλο και η πολυπλοκότητα της επιτρέπει μόνο τη παράθεση των πολύ βασικών εννοιών.<sup>67</sup>

Η βασικότερη ιδέα γύρω από την οποία περιστρέφεται όλη η θεωρία του De Landa είναι ότι η **ύλη** (matter) περιέχει **μορφογενετικές ιδιότητες**. Αυτό σημαίνει ότι όταν ασκηθούν στην ύλη οι κατάλληλες δυνάμεις ενεργοποιούνται τότε αυτές οι ιδιότητες παράγοντας μορφή. Υπάρχει ανάδυση μορφής. Ο σχεδιαστής μπορεί να εκμεταλλευτεί αυτή την ιδιότητα προκειμένου να παράξει νέες μορφές, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν έχει ενεργητικό ρόλο στη διαδικασία. Πρέπει να δημιουργήσει μια σχέση εμπιστοσύνης με την ύλη στην οποία θα υποβάλει κάποιες δεσμεύσεις ώστε να την οδηγήσει προς τα εκεί που θέλει χωρίς όμως να της υποτάξει τη μορφή

Για να επεξηγήσει καλύτερα την ιδέα του αναφέρεται στον Frei Otto καθώς τον θεωρεί το καλύτερο παράδειγμα. Όπως λέει ο ίδιος, ο Otto είχε ανακαλύψει τις μορφογενετικές δυνατότητες των φιλμ σαπουνιού που, αν και πολύ απλές, προσέφεραν ένα ισχυρότατο υπολογιστικό εργαλείο για τη δημιουργία των πολύπλοκων μορφών που επιθυμούσε. Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα, η ιδιαίτερη ιδιότητα των φιλμ σαπουνιών είναι ότι ελαχιστοποιούν την επιφανειακή τάση, που οφείλεται στο ότι τα μόρια κατανέμονται με τέτοιο τρόπο ώστε οι μοριακοί δεσμοί να απαιτούν την ελάχιστη δυνατή ενέργεια. Με άλλα λόγια, όλα τα μόρια ελκύονται σε μια **ιδιαιτερότητα** (singularity) της κατανομής της ενέργειας.<sup>68</sup> Ο Otto επέβαλε κάποιους χωρικούς περιορισμούς στα φιλμ σαπουνιού και ύστερα αξιοποιούσε τις μορφογενετικές τους δυνατότητες. «*Ξυνάντησε την ύλη στο μέσον της διαδικασίας. Την μετέτρεψε σε συνεργάτη*».<sup>69</sup>

Ο Deleuze, προκειμένου να διαμορφώσει μια θεωρητική βάση για τη μορφογένεση δανείζεται από τρεις διαφορετικές επιστήμες τρεις αντίστοιχες συλλογιστικές μεθόδους. Αυτές είναι ο πληθυσμιακός συλλογισμός (population thinking) που προέρχεται από τη βιολογία, ο εντατικός συλλογισμός (intensive thinking) που προέρχεται από τη θερμοδυναμική και ο τοπολογικός

<sup>65</sup> Ο De Landa είναι Μεξικανός- Αμερικανός συγγραφέας, καλλιτέχνης και φιλόσοφος. Αναφέρεται σε ένα ευρύ θεματολόγιο επιστημονικού και πολιτισμικού περιεχομένου και έχει συντάξει πολλά κείμενα με πολλές θεματολογίες από τις οποίες η αρχιτεκτονική, η εξελικτική θεωρία, η θεωρία του χάους, η αυτό-οργάνωση της ύλης και οι μη-γραμμικές δυναμικές είναι αυτές που μας ενδιαφέρουν. Βασίζεται ιδιαίτερα στο έργο του Γάλλου φιλόσοφου Gilles Deleuze, και πολλά κείμενα του επιχειρούν να εκθέσουν τη χρησιμότητα της θεωρίας του Deleuze ως προς τον τρόπο σκέψης πάνω στα σύγχρονα επιστημονικά και φιλοσοφικά προβλήματα.

<sup>66</sup> Έτσι την αποκαλεί ο De Landa διότι προσθέτει μια νέα, πιο σύγχρονη και ολοκληρωμένη βάση στη θεωρία διαφοροποιώντας της από αυτή του υλισμού.

<sup>67</sup> Τα κείμενα από τα οποία αντλούνται οι παρακάτω πληροφορίες είναι τα «*Deleuze and the Use of the Genetic Algorithm in Architecture*» (DeLanda, Deleuze and the Use of the Genetic Algorithm in Architecture, 2002) και «*Deleuze and the Genesis of Form*» (DeLanda, Deleuze and the Genesis of Form, 1998), καθώς και δύο διαλέξεις που είχε δώσει στο Columbia University (Columbia University, 2004) και στο Southern California Institute of Architecture (SCI-Arc Media Archive, 2006).

<sup>68</sup> Η γενικότερη ιδέα είναι ότι υπάρχει ένας πληθυσμός μορίων τα οποία ελκύονται σε μια ιδιαιτερότητα όπου και εμφανίζουν τις μορφογενετικές τους ιδιότητες.

<sup>69</sup> (SCI-Arc Media Archive, 2006)



συλλογισμός (topological [non-metric] thinking) που προέρχεται από τα μαθηματικά. Σύμφωνα με τον De Landa, μόνο όσοι ασχολούνται με την οικολογία εμπλέκονται με όλες τις επιστήμες γιατί ασχολούνται με διεπιστημονικά ζητήματα που αφορούν όλο το οικοσύστημα, όπως τις ροές της ενέργειας και της ύλης μέσω των τροφικών αλυσίδων, τη γενετική και την εξέλιξη των ειδών, κτλ. Τέτοια ήταν και η περίπτωση του Otto, που όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, διερεύνησε ιδιαίτερα τη φύση προκειμένου να βρει τους οικολογικούς τρόπους που μπορεί να κατοικήσει ο άνθρωπος τον πλανήτη. Γι' αυτόν τον λόγο χρειάστηκε να συνδυάσει τις παραπάνω συλλογιστικές μεθόδους καθιστώντας τον έναν από τους πρώτους που το επιχείρησε αυτό.

Ο πρώτος τρόπος σκέψης, ο **πληθυσμιακός λογισμός** (population thinking) έχει ως γενική ιδέα ότι για οποιοδήποτε πληθυσμό αναπαραγόμενων μεταβλητών που συνδυάζονται με κάποια μέθοδο ταξινόμησης προκύπτει μια διαδικασία αναζήτησης. Πρώτο βασικό συστατικό του είναι ότι τα είδη και οι οργανισμοί που έχουν προκύψει και θα προκύψουν πρέπει να γίνονται αντιληπτοί, όχι ως το αποτέλεσμα της αναπαραγωγής ενός ζεύγους – πρότυπου, αλλά από την ικανότητα της πληθυσμιακής ομάδας να αναπαραχθεί. Αναδιατυπώνοντας την προηγούμενη πρόταση, ο **πληθυσμός των μεταβλητών** είναι που καθορίζει το είδος τελικά. Μεταβλητές είναι τα χρωμοσώματα και τα γονίδια, οι ικανότητες των οργανισμών, οι συμπεριφορές, και γενικά οτιδήποτε μπορεί να αναπαραχθεί. Ακόμα, υπάρχουν πολλοί μηχανισμοί με τους οποίους αναπαράγονται αυτές οι μεταβλητές πέραν της μετάδοσης των γονιδίων, όπως είναι η εκμάθηση συμπεριφορών, η βελτίωση των ικανοτήτων, η μίμηση, η συναισθηματική υποχρέωση (στον άνθρωπο) κτλ. Το πιο σημαντικό είναι στον πληθυσμό να υπάρχουν πολλές διαφορετικές μεταβλητές, ειδικά η ετερομορφία και, τελικά, η εξέλιξη σταματάει. Το κρίσιμο σημείο στο οποίο οι μεταβλητές τείνουν να αφομοιωθούν ονομάζεται όριο πυρηνοποίησης (nucleation threshold), είναι το κρίσιμο σημείο δηλαδή στο οποίο η αναπαραγωγική κοινότητα παύει να είναι αποτελεσματική. Οι διαφορές, λοιπόν, είναι που τροφοδοτούν την εξέλιξη των ειδών. Το δεύτερο βασικό συστατικό του λογισμού είναι η **μέθοδος ταξινόμησης**, το φίλτρο δηλαδή, που καθορίζει πόσες και ποιες μεταβλητές θα αναπαραχθούν και ποιες όχι. Τέτοια παραδείγματα είναι η πιθανότητα της αναπαραγωγής ενός χρωμοσώματος στην επόμενη γενιά, η επιλογή των γονέων που θα συμμετάσχουν στην αναπαραγωγή (εκτροφείας), κτλ. Όλα τα παραπάνω πλέον έχουν προσομοιωθεί στον υπολογιστή με τη μορφή των γενετικών αλγορίθμων ή του γενετικού προγραμματισμού. Επί της ουσίας, είναι ένας εξαιρετικά ισχυρός μηχανισμός αναζήτησης (αλγόριθμος) που έχει στόχο την εύρεση όλων των δυνατών συνδυασμών του συνόλου του αναπαραγωγικού πληθυσμού. Στα χέρια ενός καλλιτέχνη ή ενός αρχιτέκτονα, οι οποίοι έρχονται αντιμέτωποι με τα πιθανά σενάρια που θα ακολουθήσουν κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού, αποτελούν σπουδαίο εργαλείο. Μπορεί να υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί (χωρικοί, νομικοί, κτλ) ανάλογα την περίπτωση, τα πιθανά σενάρια όμως είναι πάντα πολυάριθμα και η αποτελεσματική διερεύνηση όλων είναι πολύ σημαντική. Τα πιθανά σενάρια, ή οι πιθανές λύσεις αποκαλούνται από τον De Landa ως το **πεδίο των πιθανοτήτων**. Ο ρόλος του χρήστη των γενετικών αλγορίθμων, λοιπόν, είναι να σχεδιάσει το πεδίο των πιθανοτήτων το οποίο κυριεύεται από τοπολογικές σχέσεις. Είναι πολύ σημαντικό το πεδίο των πιθανοτήτων να είναι πλήρες ειδικά η αναζήτηση θα ολοκληρωθεί σύντομα χωρίς να μπορέσει να παράξει πολλές διαφορετικές μορφές.

Ο δεύτερος τρόπος σκέψης, ο **εντατικός λογισμός** (intensive thinking), τοποθετεί στο επίκεντρο του σχεδιασμού τις εντατικές (intensive) ιδιότητες. Οι φυσικές ιδιότητες των αντικειμένων και συστημάτων χωρίζονται στις εντατικές και στις εκτενής ιδιότητες. Οι εντατικές είναι οι φυσικές ιδιότητες οι οποίες δεν εξαρτώνται από το μέγεθος ή από τη ποσότητα της ύλης του συστήματος. Τέτοιες είναι η πυκνότητα, η θερμοκρασία και η πίεση. Αντιθέτως οι εκτενής ιδιότητες είναι προσθετικές και εξαρτώνται άμεσα από την ποσότητα της ύλης του συστήματος και είναι αναλογικές ως προς αυτό. Τέτοιες είναι ο όγκος, η μάζα και το μήκος. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός λίτρου νερού στους 90°C αν χωριστεί στη μέση τότε θα προκύψουν δύο συστήματα μισού λίτρου νερού αλλά και στα δύο η θερμοκρασία θα είναι στους 90°C. Αυτός όμως είναι ο ορισμός όπως δίνεται από την επιστήμη της φυσικής. Ο Deleuze εντοπίζει άλλο ένα χαρακτηριστικό των εντατικών ιδιοτήτων σύμφωνα με το οποίο όταν εντοπίζεται διαφορά σε μια εντατική ιδιότητα τότε αυθόρμητα τείνει στο να εξισορροπήσει αυτή τη διαφορά. Με άλλα λόγια, οι **διαφορές σε μια εντατική ιδιότητα** είναι παραγωγικές διαφορές διότι τροφοδοτούν τις διαδικασίες με τις οποίες οι τελικές μορφές παράγονται. Για παράδειγμα, η ατμομηχανή αποτελεί μια «εντατική μηχανή» διότι εκμεταλλεύεται τη διαφορά της θερμοκρασίας (φωτιάς – νερού) για την παραγωγή κίνησης, ενώ στη διαδικασία της εμβρυογένεσης από την οποία προκύπτει ένα ανθρώπινο σώμα από ένα γονιμοποιημένο ωάριο, η διαδικασία τροφοδοτείται από τις διαφορετικές εντάσεις των χημικών συγκεντρώσεων, των πυκνοτήτων και των επιφανειακών τάσεων. Για να επιστρέψουμε στα μορφογενετικά του μοντέλα του Otto, η επιφανειακή τάση του φιλμ σαπουνιού οδηγεί τη διαδικασία της εύρεσης μορφής. Όσον αφορά την αρχιτεκτονική, πέραν της επιφανειακής τάσης, οποιαδήποτε άλλη δύναμη αποτελεί εντατική ιδιότητα, όπως οι δυνάμεις συμπίεσης και ροπών. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι τα **εντατικά όρια**, δηλαδή το σημείο στο οποίο το υλικό αλλάζει φάση. Τέτοιες είναι η αλλαγή του στερεού σε αέριο, του στερεού σε υγρό, του υγρού σε αέριο, κ.ο.κ. Όλες αυτές οι αλλαγές προκύπτουν σε ένα συγκεκριμένο σημείο των εντατικών μεγεθών. Αυτή είναι και η μοναδική περίπτωση που η διαφορά στα εντατικά μεγέθη επιτρέπει τη μετατροπή της ποιοτικής αλλαγής σε ποσοτική αλλαγή, που αλλάζει τη φύση του υλικού. Σε εκείνη τη στιγμή είναι που αναδύονται καινούριες μορφές και γι' αυτό το λόγο είναι πολύ σημαντική για τη μορφογένεση.

Ο τρίτος τρόπος σκέψης, ο **τοπολογικός λογισμός**, υιοθετεί τη μη-μετρική γεωμετρία για τη περιγραφή ενός αφηρημένου διαγράμματος. Ο De Landa βασιζόμενος στη μεγάλη ποικιλομορφία των ζώων, και ιδιαίτερα στην υποσυσνομοταξία των σπονδυλωτών, αναπτύσσει τη θεωρία του **διαγραμματικού σώματος** ("abstract body") σύμφωνα με την οποία, όλα τα σπονδυλωτά μοιράζονται ένα κοινό διαγραμματικό σώμα από το οποίο προκύπτουν. Όλα έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά, ή όπως τα αποκαλεί ο ίδιος, «αφηρημένα σπονδυλωτά» σχεδιαστικά στοιχεία τα οποία σε κάθε περίπτωση μπορούν να πάρουν αρκετά διαφορετικό σχηματισμό, όπως για παράδειγμα, το πόδι ενός τετράποδου που στη μια περίπτωση γίνεται πόδι σκύλου ή αλόγου, φτερό ενός πτηνού, ή το χέρι ενός ανθρώπου. Με άλλα λόγια, ενώ η μορφή που προκύπτει (του αλόγου, του πτηνού ή του ανθρώπου) έχει συγκεκριμένο μήκος, εμβαδό και όγκο, το διαγραμματικό σώμα δεν μπορεί να καθοριστεί από αυτά τα μεγέθη γιατί ταυτόχρονα πρέπει να τόσο αφηρημένο ώστε να ανταποκρίνεται στους αμέτρητους συνδυασμούς αυτών των εκτενών ποιοτήτων. Ο Deleuze χρησιμοποιεί τον όρο **«αφηρημένο διάγραμμα»** ("abstract diagram") για να αναφέρεται σε έννοιες όπως αυτή του σπονδυλωτού αφηρημένου σώματος, αλλά η αντίληψη του επεκτείνεται και στα «διαγραμματικά σώματα» των ανόργανων οντοτήτων όπως είναι τα βουνά και τα σύννεφα. Τα

αφηρημένα διαγράμματα, λοιπόν, μπορούν να γίνουν κατανοητά εφαρμόζοντας μόνο μη-μετρικές έννοιες μαθηματικών<sup>70</sup>, όπως η διαφορική γεωμετρία και η τοπολογία. Έτσι διατηρούνται οι ιδιότητες του διαγράμματος κατά τη διάρκεια της εμβρυογένεσης από την οποία μπορεί να παραχθεί ένας μεγάλος αριθμός τελικών σωμάτων, 'οπου καθένα θα έχει τη μοναδική του μετρική κατασκευή.

Συνοψίζοντας λοιπόν, οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται ως μια διαδικασία εύρεσης όλων των πιθανών μορφών. Όμως το πιο συχνό πρόβλημα τους είναι ότι ξεμένουν σύντομα από μορφές. Το πεδίο των πιθανοτήτων που θα αναζητήσει ο αλγόριθμος πρέπει να είναι πλούσιο, και χρειάζεται βαθιά σκέψη και σωστό σχεδιασμό. Όπως ειπώθηκε, το πεδίο δεν μπορεί να είναι μετρικό διότι κατά την εξελικτική διαδικασία τα μετρικά μεγέθη μεταβάλλονται, ενώ τα εντατικά μεγέθη παραμένουν σταθερά, είναι αυτά δηλαδή που καθορίζουν το αφαιρετικό διάγραμμα. Σε κάθε τοπολογική διάσταση αντιστοιχεί ένα εντατικό μέγεθος. Αυτές οι αντιστοιχίες δίνουν ενέργεια στο ανενεργό πεδίο σημείων μετατρέποντας το στο πεδίο πιθανοτήτων. Χάρη στις ιδιαιτερότητες της κατανομής της ενέργειας θα σχηματιστούν οι μορφές.

Ο Όττο γνώριζε εμπειρικά ότι τα μόρια του φιλμ σαπουνιού ελκύονται σε μια κατάσταση ελάχιστης ενέργειας, χωρίς όμως να γνωρίζει ότι η επιφανειακή τάση ήταν μια τοπολογική διάσταση που αποτελούσε μια ισχυρή ιδιαιτερότητα η οποία μονοπωλούσε το πεδίο των πιθανοτήτων. Το ίδιο ισχύει και για άλλα πεδία πιθανοτήτων πέραν αυτού των φιλμ σαπουνιών, όπως για παράδειγμα στους κρυστάλλους που η ιδιαιτερότητα της ελαχιστοποίησης των μοριακών δεσμών οδηγεί σε κυβικούς σχηματισμούς, στις διπλωμένες πρωτεΐνες που για τον ίδιο λόγο αποκτούν τρισδιάστατο, κτλ. Υπάρχουν πολλών ειδών ιδιαιτερότητες και πέραν των στερεών καταστάσεων υπάρχουν οι περιοδικές ελκυστήρες, οι χαοτικοί ελκυστήρες, κ.α. Πέραν της ποικιλίας των μέσων (των υλικών) για την κατασκευή του πεδίου των πιθανοτήτων και της εφαρμογής του γενετικού αλγορίθμου για την αναζήτηση, αυτό που έχει σημασία είναι η δομή του πεδίου αναζήτησης να έχει καθοριστεί με αμετάβλητες τοπολογικές σχέσεις και οι διαστάσεις του να έχουν εντατικό χαρακτήρα.

<sup>70</sup> Η μετρική γεωμετρία περιέχει την ευκλείδεια γεωμετρία και τις κωνικές τομές, στις οποίες τα μεγέθη (μήκος, εμβαδό και όγκος) παραμένουν αναλογικά μεταξύ τους όσο και να παραμορφωθεί το αντικείμενο. Στη μη-μετρική γεωμετρία συγκαταλέγονται η προβολική και διαφορική γεωμετρία και η τοπολογία, με κοινό χαρακτηριστικό ότι τα μεγέθη της μετρικής γεωμετρίας (μήκος, εμβαδό και όγκος) δεν διαδραματίζουν κανένα ρόλο διότι οι γεωμετρίες αυτές είναι αποδεσμευμένες από οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς. Η προβολική γεωμετρία μελετάει τις γεωμετρικές ιδιότητες οι οποίες είναι αμετάβλητες όσον αφορά τις προβολικές μεταμορφώσεις. Πιο απλά θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι η γεωμετρία των σκιών κατά την οποία η σκιά που δημιουργείται από ένα αντικείμενο μπορεί να αλλάζει τις διαστάσεις της και το εμβαδό της ανάλογα με τη θέση της φωτεινής πηγής αλλά δεν αλλάζει ποτέ η σχέση της (των προβολικών ιδιοτήτων της) με το αντικείμενο. Η διαφορική γεωμετρία λαμβάνοντας υπόψη την παράγωγο μια συνάρτησης ως την εφαπτόμενη της καμπύλης της ερμηνεύει γεωμετρικά το ολοκλήρωμα της συνάρτησης ως το εμβαδόν που περικλείουν οι άξονες τις γραφικής παράστασης της συνάρτησης. Βασίζεται στον διαφορικό λογισμό ο οποίος μελετάει τον ορισμό, τις ιδιότητες και τις εφαρμογές των παραγώγων μιας συνάρτησης. Η ίδια η διαδικασία της εύρεσης της παραγώγου ονομάζεται «διαφοροποίηση» ("differentiation"). Πιο απλά, μελετάει τον ρυθμό με τον οποίο αλλάζει κάτι καθώς και τα όρια που επιδέχονται οι αλλαγές αυτές. Η τοπολογία είναι μια πιο αφαιρετική, πιο γενική και απλοποιημένη έννοια της διαφορικής γεωμετρίας.

## 2 Παραδείγματα Αρχιτεκτόνων

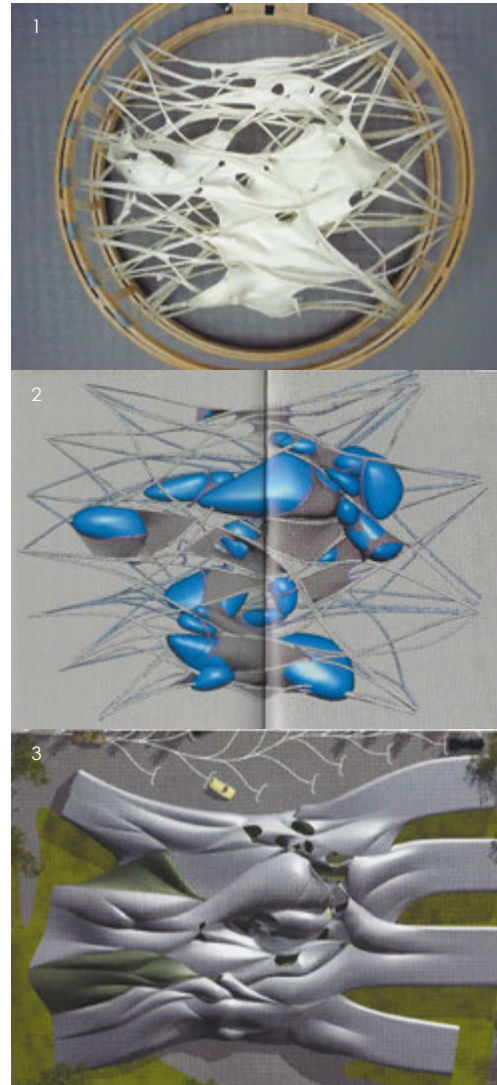
Πολλοί σύγχρονοι αρχιτέκτονες που έχουν επηρεαστεί από το έργο του Otto και έχοντας υπόψη τη θεωρία του De Landa στρέφονται πλέον σε πιο εξελιγμένες μεθοδολογίες εύρεσης μορφής. Αξιοποιούν την ευκολία που προσφέρουν οι σύγχρονοι ηλεκτρονικοί υπολογιστές στη διαχείριση του μεγάλου όγκου πληροφοριών που προκύπτουν από τις μορφογενετικές διαδικασίες, όπως και την υπολογιστική τους δύναμη για την προσομοίωση των πολύπλοκων διαδικασιών της αναπαράστασης, της παραγωγής (μορφής), της αξιολόγησης και της απόδοσης<sup>71</sup>. Παράγουν μια νέα αρχιτεκτονική με μεγάλο εύρος και ποικιλία, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις τα όρια μεταξύ της τέχνης και της αρχιτεκτονικής χάνονται.

Ο **Lars Suybroek (NOX)** αναλύοντας τον τρόπο σκέψης και λειτουργίας της πρακτικής του έχει βασίσει τη θεωρία του σε διάφορους επιστήμονες και φιλοσόφους, όπως τον De Landa, ενώ εντοπίζει την υλοποίηση της θεωρίας του στο μορφογενετικό μοντέλο των δικτύων ελαχιστοποιημένων παρακάμψεων<sup>72</sup>, ή αλλιώς, του WetGrid όπως το αποκαλεί ο ίδιος. Αναφέρεται στις συσκευές που ανέπτυξε ο Otto στο IL ως «αναλογικούς υπολογιστές» προκειμένου να αναδείξει τα σπουδαία υπολογιστικά τους χαρακτηριστικά, αναλύει τις αρετές του WetGrid τόσο στη συνέπεια του με το σύνολο της θεωρίας όσο και στις μορφογενετικές του ιδιότητες οι οποίες συνδυάζουν ταυτόχρονα ευκλείδειες και τοπολογικές μορφές<sup>73</sup>. Σε ένα από τα έργα του ανέπτυξε ένα δικό του WetGrid προκειμένου να υπολογίσει τον ωφέλιμο χώρο κίνησης και τελικώς

<sup>71</sup> Μια ή και περισσότερες από τις λειτουργίες αυτές μπορούν να προσομοιωθούν στον υπολογιστή, ενώ σε κάποιες ιδιαίτερες περιπτώσεις όλες οι διαδικασίες εκτελούνται στον υπολογιστή. (Oxman, 2006)

<sup>72</sup> Περισσότερες πληροφορίες βρίσκονται στο κείμενο του "Machining Architecture" (Suybroek, NOX: Machining Architecture, 2004, σσ. 6-13)

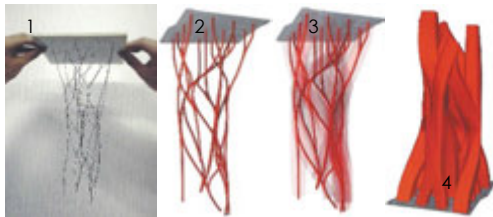
<sup>73</sup> Περισσότερες πληροφορίες βρίσκονται στο κείμενο του "The Structure of Vagueness" (Suybroek, NOX: Machining Architecture, 2004, σσ. 352-359)



Εικ. 2.1: 1. Η συσκευή WetGRID.

2. Τρισδιάστατο μοντέλο που βασίζεται στο WetGRID

3. Τρισδιάστατη εικόνα του SoftOffice.



Εικ. 2.2: 1. WetGRID. 2. 3D μοντέλο του WetGrid. 3. Δημιουργία όγκων για τον σχηματισμό κτιρίου. 4. Τρισδιάστατο μοντέλο ουρανοξύστη που βασίζεται στο WetGrid.



Εικ. 2.3: Μελέτη παρέμβασης στο κέντρο του Παρισιού χρησιμοποιώντας το WetGRID.



Εικ. 2.4: Προσομοίωση του μοντέλου ελαχιστοποιημένων παρακάμψεων στο Μαγ.

τη μορφή του κτιρίου για το SoftOffice, που όπως φαίνεται από τον τίτλο, αφορά έναν χώρο γραφείων με ευέλικτο λειτουργικό πρόγραμμα και ένα χώρο δημιουργικής απασχόλησης παιδιών. Σύμφωνα με τη μελέτη του, το σχέδιο των γραφείων καταλαμβάνει κατά 32% λιγότερο χώρο σε σύγκριση με μια συμβατική μελέτη χάρη στην αποτελεσματική αξιοποίηση του χώρου ανάλογα με την κίνηση των εργαζομένων.<sup>74</sup> Σε μια άλλη μελέτη εφάρμοσε το WetGrid για την εύρεση της μορφής του φέροντα οργανισμού ενός ουρανοξύστη, μεταλλάσσοντας έτσι το μοντέλο του Otto από τον υπολογισμό διαδρομών και στον υπολογισμό στατικών οργανισμών<sup>75</sup>. Παραλλαγές του WetGrid χρησιμοποίησε και σε άλλες μελέτες για τη δημιουργία νέων μορφών που στηρίζονταν σε τοπολογικά δεδομένα.<sup>76</sup>

Τόσο η **Zaha Hadid** όσο και ο **Patrik Schumacher** θεωρούν τον Otto ως έναν από τους μεγαλύτερους πρωτοπόρους της αρχιτεκτονικής<sup>77</sup>. Ιδιαίτερη βάρος δίνει ο Schumacher στα συστήματα δικτύων διαδρομών και κατάληψης περιοχών που ανέπτυξε για τον σχεδιασμό και επεξήγηση των οικισμών. Από αυτά ξεχωρίζει τα άμεσα συστήματα και τα ελάχιστα συστήματα διαδρομών, τα συστήματα ελαχιστοποιημένων παρακάμψεων, καθώς και το μοντέλο των επιπλεόντων μαγνητών για την προσομοίωση της εδαφικής κατοχής γιατί, όπως αναφέρει ο ίδιος, εντοπίζονται στα σύγχρονα αστικά τοπία. Μάλιστα, το σύστημα των ελαχιστοποιημένων παρακάμψεων θα εφαρμοστεί ψηφιακά για τον σχεδιασμό της πρώην βιομηχανικής περιοχής

<sup>74</sup> (Spuybroek, SoftOffice, 2004)

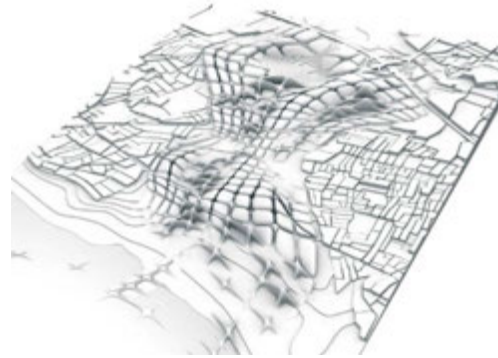
<sup>75</sup> (Spuybroek, NOX: Machining Architecture, 2004, σσ. 260-269)

<sup>76</sup> Η μια μελέτη αφορά το ParisBrain στην οποία διάφορες τοπολογικές έννοιες συντίθενται για τη δημιουργία ενός νέου υπέρ-κτιρίου στο κέντρο του Παρισιού, και η άλλη αφορά το obliqueWTC, μια πρόταση για το νέο World Trade Center (Spuybroek, NOX: Machining Architecture, 2004, pp. 246-259).

<sup>77</sup> (Colorado Public Television CPT12 PBS, 2014)

Kartal-Pendik της Κωνσταντινούπολης. Στη μελέτη αυτή το μοντέλο των ελαχιστοποιημένων παρακάμπσεων θα προσομοιωθεί ψηφιακά με τη βοήθεια των hair-dynamics του Maya για τον σχεδιασμό του συστήματος διαδρομών της περιοχής, διαμορφώνοντας έτσι τα οικοδομικά τετράγωνα, καθιστώντας το ένα από τα πιο σημαντικά μορφογενετικά εργαλεία της μελέτης.<sup>78</sup> μελέτης.<sup>78</sup>

Ο **Mike Cook**, όταν μιλάει για μια πιο βιώσιμη αρχιτεκτονική, μας παροτρύνει να παραδειγματιστούμε από τη φύση η οποία χρησιμοποιεί όλα τα υλικά της στην ελάχιστη δυνατή ποσότητα, και δεν βρίσκει καλύτερο εκφραστή αυτής της λογικής πέρα από τον Otto. Μάλιστα, τον κατατάσσει ένα βήμα πιο μπροστά από τον Buckminster Fuller διότι οι θόλοι του τελευταίου είχαν πάντα σφαιρικό σχήμα ενώ τα έργα του Otto ακολουθούσαν μια πιο «φυσική» μορφή. Η ταυτόχρονη μελέτη της αποτελεσματικότητας της μορφής και της πραγματικότητας της κατασκευής είναι, σύμφωνα με τον ίδιο, η ουσία του σωστού μηχανικού. Στα σύγχρονα παραδείγματα εκφραστή αυτής της ιδέας βρίσκει τους **Foster & Partners** και συγκεκριμένα για την καινούρια οροφή του Βρετανικού Μουσείου στην οποία έπρεπε να στεγαστεί ο χώρος μεταξύ ενός παραλληλογράμμου περιγράμματος και ενός κυκλικού πυρήνα με ένα ελαφρύ στέγαστρο που η κατασκευή του θα υλοποιούνταν με τη μορφή ενός ενιαίου «φυσικού» πλέγματος. Για την εύρεση της μορφής χρησιμοποιήθηκε ένα αναλογικό μοντέλο फिल्म σαπουνιών και με τις κατάλληλες παρεμβάσεις βρέθηκε η επιθυμητή μορφή, η οποία όμως δεν ικανοποιούσε πλήρως την μορφολογική αισθητική και βελτιώθηκε σχεδιαστικά στη συνέχεια. Όσον αφορά την κατασκευή, όλα τα μέλη του στεγάστρου που προέκυψαν ήταν μοναδικά, δηλαδή κάθε δοκός και γυάλινη επιφάνεια είχε τις δικές του διαστάσεις. Χάρη όμως στο γεγονός ότι όλες οι πληροφορίες βρίσκονταν στον υπολογιστή του κατασκευαστή, η



Εικ. 2.5: Πρόταση σχεδιασμού της περιοχής Kartal-Pendik στην Κωνσταντινούπολη.



Εικ. 2.6: Το στέγαστρο στο αίθριο του Βρετανικού Μουσείου.

<sup>78</sup> (Schumacher, 2009)



Εικ. 2.7: Το στέγαστρο στο αίθριο του Smithsonian Institute.



Εικ. 2.8: Εξωτερική άποψη του Maximilian's Schell.

απουσία της τυποποίησης δεν δημιούργησε κανένα πρόβλημα στην υλοποίηση.<sup>79</sup> Μια αντίστοιχη λογική εφαρμόστηκε στο στέγαστρο για το Smithsonian Institute με μια πολύ πιο εξελιγμένη μεθοδολογία. Στην περίπτωση αυτή όλη η διαδικασία έλαβε μέρος με τη μορφή κώδικά στον ηλεκτρονικό υπολογιστή επιτρέποντας έναν πολύ μεγάλο αριθμό υπολογισμών να γίνει μέσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Ο σχεδιασμός εκτιμήθηκε ταυτόχρονα στατικά, περιβαλλοντολογικά, ακουστικά και αισθητικά και επέτρεπε την άμεση απεικόνιση του στεγαστρού σε κάθε φάση του.<sup>80</sup>

Ένα αρχιτεκτονικό γραφείο θολώνει τα όρια μεταξύ της αρχιτεκτονικής και της τέχνης είναι το **Ball-Nogues Studio**. Το συνολικό τους έργο αποτελείται από εντυπωσιακές εγκαταστάσεις που σε κάποιες περιπτώσεις είναι διακοσμητικού χαρακτήρα ενώ άλλες φορές λειτουργούν ως έπιπλα, γλυπτά και στέγαστρα. Πολλά έργα τους έχουν σχεδιαστεί χρησιμοποιώντας μεθόδους εύρεσης μορφής, όπως κρεμαστές αλυσίδες και ελάχιστες επιφάνειες, με εντυπωσιακά αποτελέσματα κάθε φορά. Εκείνο που ξεχωρίζει είναι το Maximilian's Schell, μια προσωρινή κατασκευή (πλέον δεν υφίσταται) που είναι ταυτόχρονα στέγαστρο και εγκατάσταση εξωτερικού χώρου, σε σχήμα δίνης που αναπαριστά μια κοσμική μαύρη τρύπα και παράλληλα «παραμορφώνει τη ροή του χώρου»<sup>81</sup>. Πρόκειται για μια επιφανειακή κατασκευή που αποτελείται από ένα εφελκυστικό πλέγμα, κατασκευασμένο από 504 μοναδικά και αλληλένδετα αντίγραφα (instances) ενός παραμετρικού δομικού στοιχείου που θυμίζει πέταλο λουλουδιού. Κάθε αντίγραφο συνδέεται

<sup>79</sup> (Cook, 2004)

<sup>80</sup> (Whitehead, Peters, & Aish, 2006)

<sup>81</sup> Χρησιμοποιείται με μεταφορική σημασία για την επεξήγηση του έργου από τους ίδιους τους αρχιτέκτονες.

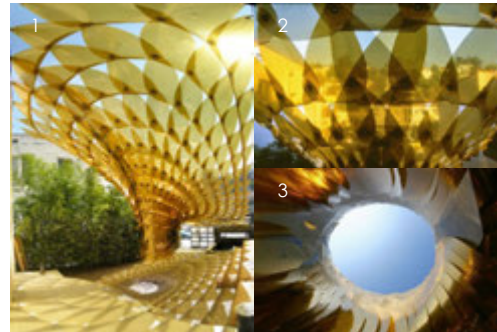
με τα γειτονικά του σε τρία σημεία διαμορφώνοντας τη δίνη. Το πλέγμα αυτό αποτελεί ουσιαστικά ένα συνδυασμό κατασκευής και μεμβράνης που συμπεριφέρεται σαν μια ελάχιστη επιφάνεια, δηλαδή, βρίσκεται σε προ-ένταση και είναι καθορισμένη μαθηματικά. Η μορφή της κατασκευής προέρχεται από τις επιφάνειες που δημιουργούσε ο Otto με τα φιλμ σαπουνιών, η οποία όμως στην περίπτωση αυτή έγινε ψηφιακά χρησιμοποιώντας πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εύρεσης μορφής ο σχεδιαστής επηρέασε τη μορφή λαμβάνοντας υπόψη τις παραμορφωτικές δυνάμεις της βαρύτητας και επιτρέποντας στο τελικό στέγαστρο να βρίσκεται πάντοτε σε εφελκυσμό σε κάθε σημείο της επιφάνειάς του.<sup>82</sup>

### 3 Material Computation Design

Ο **Achim Menges** είναι καθηγητής αρχιτεκτονικής που αναθεωρεί και εκσυγχρονίζει τη θεωρία και την πρακτική του σχεδιασμού. Η απλή αναφορά στα έργα που έχει υλοποιήσει στα πλαίσια του Integrative Technologies and Architectural Design Research (ITECH) Master of Science Program<sup>83</sup> του πανεπιστημίου της Στουτγάρδης είναι αρκετή προκειμένου να έρθουμε σε επαφή με τον νέο κόσμο της σχεδιαστικής θεωρίας και πράξης του computational design που αναπτύσσεται τα τελευταία χρόνια. Το πρόγραμμα υλοποιείται υπό τη διδασκαλία των Institute of Computational Design (ICD), που διευθύνει ο Menges, και του Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE), που

<sup>82</sup> (Ball-Nogues Studio, 2005) και (Ball & Nogues, 2008)

<sup>83</sup> Είναι ένα πρωτοποριακό μεταπτυχιακό πρόγραμμα που ανταποκρίνεται στη νέα εποχή όπου οι τομείς του σχεδιασμού, της μηχανικής, της παραγωγής και των φυσικών επιστημών συγχωνεύονται. Προσεγγίζοντας τον υπολογιστικό σχεδιασμό, τις προσομοιώσεις των διαδικασιών και την παραγωγή με εντατικό, κριτικό και αναλυτικό τρόπο επικεντρώνεται στο να δοκιμάσει τα όρια του σύγχρονου και πολυδιάστατου σχεδιασμού. Με αυτόν τον τρόπο θέλει να εγείρει ερωτήματα γύρω από τις τεχνικές, τις πρακτικές και τις θεωρίες του σχεδιασμού σε συνάρτηση με τους τομείς της μηχανικής, της ρομποτικής, της ψηφιακής παραγωγής, της επιστήμης των υλικών και της βιολογίας. (ICD/ITKE, 2016)



Εικ. 2.9: Maximilian's Schell: 1. Εσωτερική όψη. 2. Λεπτομέρεια της κατασκευής. 3. Η «μαύρη τρύπα» (singularity)



Εικ. 3.1: ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15 Ελαφριά κατασκευή από fiberglass και ανθρακόνημα που κατασκευάζεται αποκλειστικά από τομποτικό βραχίονα.. Μέθοδος κατασκευής που μιμείται τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάζει η αράχνη του νερού (Agryponeda Aquatica) τη φωλιά της.





Εικ. 3.2: ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14. Ελαφριά κατασκευή από fiberglass και ανθρακόνημα. Αποτελείται από αλληλένδετες κυψέλες που κατασκευάζονται από δυο ρομποτικούς βραχίονες. Η κατασκευή μιμείται την κυτταρική δομή του έλυτρου.



Εικ. 3.3: ICD/ITKE Research Pavilion 2012. Ελαφριά κατασκευή από fiberglass και ανθρακόνημα που μιμείται τη μοριακή δομή του εξώσκελετού των μαλακόστρακων. Υλοποιείται αποκλειστικά από ρομποτικό βραχίονα.

διευθύνει ο Jan Knippers<sup>84</sup>. Πριν όμως αναφερθούμε στα έργα πρέπει να γνωρίσουμε κάποιες βασικές έννοιες που στηρίζονται τόσο στην πρακτική και στην μεθοδολογία που ανέπτυξε ο Otto όσο και στη σύγχρονη θεωρία της μορφογένεσης.

Ο Menges, βασιζόμενος στη νέο-υλιστική θεωρία του De Landa επεξηγεί μια νέα μορφή σχεδιασμού που ξεφεύγει από τις παραδοσιακές μεθόδους, το **computational** (υπολογιστικό σχεδιασμό), κατά τον οποίο η πληροφορία που εμπεριέχεται σε κάθε υλικό, το **material information**, λειτουργεί ως η κύρια δημιουργική μορφογενετική δύναμη.<sup>85</sup> Η γενική είναι παρόμοια με αυτή που εφάρμοζε ο Otto στα μορφογενετικά του μοντέλα, για παράδειγμα οι ελκτικές δυνάμεις των μορίων του σαπουνόνηρου λειτουργούν μορφογενετικά στα μοντέλα των φιλμ σαπουνιών, με τη διαφορά ότι η ίδια μορφογενετική ύλη που μελετάται αποτελεί το δομικό υλικό της κατασκευής. Όπως έχει αναφέρει ο ίδιος ο Menges, ο Frei Otto προσπαθούσε να αντιληφθεί τη φύση όχι μέσω της απλής εξαγωγής συμπερασμάτων από αυτήν αλλά μέσα από τις κατασκευαστικές της αρχές. Με παρόμοιο τρόπο αλλά προσαρμοσμένο στη σύγχρονη εποχή του υπολογιστικού σχεδιασμού, της προσομοίωσης στους Η/Υ και των κατασκευαστικών δυνατοτήτων, προσπαθεί να επαναπροσδιορίσει την άπλετη τεχνολογία που υφίσταται στην αρχιτεκτονική, μετακινούμενος από τον πληροφοριακό σχεδιασμό που βασίζεται στις μηχανικές ιδιότητες της ύλης (όπου εφάρμοζε ο Otto) σε έναν πιο βιολογικό, που βασίζεται στη σύνθεση της μορφής, της

<sup>84</sup> (ICD, University of Stuttgart, 2016) και (ITKE, University of Stuttgart, 2016) αντίστοιχα.

<sup>85</sup> (Menges, Material Resourcefulness: Activating Material Information in Computational Design, 2012)

ύλης της κατασκευής και της απόδοσης, μετουσιώνοντας την παραδοσιακή ιεραρχία του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού.<sup>86</sup> Αυτό σημαίνει ότι η έρευνα του σχεδιαστή επικεντρώνεται πλέον στις ιδιότητες της ύλης και στον τρόπο που συμπεριφέρεται.

Η έρευνα αυτή εμπεριέχει απεριόριστες δυνατότητες όταν γίνει αντιληπτό ότι τόσο η ύλη σε μικρό-κλίμακα (στη σύνθεσης της) όσο και τα υλικά συστήματα στη μακρό-κλίμακα (ως ένα σύνολο αλληλένδετων υλικών) αποτελούν μια φυσική συνέχεια με αμοιβαίες σχέσεις, και επίσης, ότι τα περισσότερα υλικά είναι πολύπλοκα και παρουσιάζουν μη-γραμμική συμπεριφορά όταν εκτεθούν σε μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές επιρροές και δυνάμεις. Αυτού του είδους ο σχεδιασμός βοηθάει στη διερεύνηση νέων, άγνωστων στοιχείων ανακαλύπτοντας κάθε φορά τη ταυτότητα του εκάστοτε υλικού και το εύρος των δυνατοτήτων του. Επιπρόσθετα, συμβάλει στην σχεδιαστική θεωρία με το να αμφισβητεί, να επαναπροσδιορίζει και να ελευθερώνεται από όλες τις ιδεαλιστικές και θετικιστικές προκαταλήψεις που είναι φορτωμένη η αντίληψη της υλικότητας στην αρχιτεκτονική.

Μπορεί οποιοδήποτε υλικό να αξιοποιηθεί για το material computation, όπως για παράδειγμα τα τούβλα, οι ίνες ή τα συνθετικά υλικά. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα γίνει αναφορά στο ξύλο με το οποίο στο ICD/ITKE έχουν αναπτύξει πολύ ιδιαίτερες κατασκευές και πρωτοπóρες μεθοδολογίες. Το ξύλο αποτελεί ένα από τα πιο «παρεξηγημένα» υλικά. Οι ανομοιομορφες φυσικές ιδιότητες του ξύλου στη σύγχρονη βιομηχανία θεωρούνται ως μειονέκτημα, για αυτόν το λόγο το ξύλο επεξεργάζεται και μετατρέπεται σε κόντρα πλακέ φύλλα, που αποτελούν στην ουσία ένα ξύλινο υλικό με ομοιόμορφες μηχανικές δυνάμεις και δομή. Στην πραγματικότητα όμως οι φυσικές ιδιότητες του ξύλου όταν αξιοποιηθούν αποτελεσματικά συμβάλουν στη



Εικ. 3.4: ICD/ITKE Research Pavilion 2011. Ελαφριά κατασκευή από ξύλο που μιμείται την κυτταρική δομή των εχινοειδών.



Εικ. 3.5: ICD/ITKE Research Pavilion 2010. Ελαφριά κατασκευή από ξύλο που βασίζεται στις ελαστικές ιδιότητες του ξύλου.

<sup>86</sup> (AASchoolArchitecture, 2016)

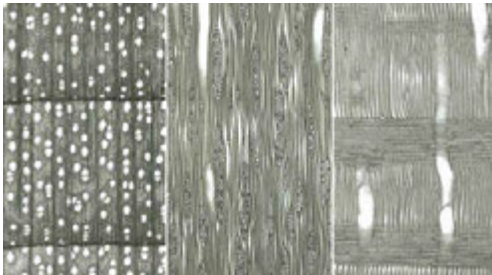


Εικ. 3.6: Εσωτερικό του ICD/ITKE Research Pavilion 2010.

δημιουργία καινοτόμων σχεδίων και στη διεύρυνση των σχεδιαστικών μεθοδολογιών.

Πέρα από τα πολλαπλά οικολογικά του πλεονεκτήματα, η εσωτερική δομή και σύνθετη συμπεριφορά του ξύλου αποτελούν ιδανική αφορμή για την διερεύνηση των υλικών και των δυνατοτήτων του στον υπολογιστικό σχεδιασμό. Το ξύλο ως υλικό είναι ετερογενές, ανισοτροπικό, εμπεριέχει φυσικές ανωμαλίες στη δομή του και έχει ενδιαφέρουσα βιολογική μεταβλητότητα. Κάθε ένα χαρακτηριστικό από αυτά μπορεί να αξιοποιηθεί με μοναδικό τρόπο για την παραγωγή νέων μορφών. Ως ανισοτροπία ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο η ιδιότητα ενός υλικού εμφανίζει διαφορετικές τιμές όταν μετρείται κατά μήκος των αξόνων διαφόρων διευθύνσεων. Τα ανισοτροπικά χαρακτηριστικά είναι αποτέλεσμα της κατανομής και του προσανατολισμού των κυττάρων και των ινών, με αποτέλεσμα ο προσανατολισμός του ξύλου να καθορίζει τις αντοχές του και τη δυσκαμψία του. Η ινώδης σύνθεση του ξύλου επιτρέπει στο ξύλο να λαμβάνει υψηλές τιμές αντοχής ενώ παράλληλα διατηρεί χαμηλές τιμές ακαμψίας, προσφέροντας υψηλή δυνατότητα κάμψης χωρίς να αστοχεί το υλικό.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό του ξύλου που μπορεί να αξιοποιηθεί βρίσκεται στη μικροσκοπική κλίμακα και αφορά τις κυτταρικές δομές. Σύμφωνα με αυτήν, οι θλιπτικές αντοχές του ξύλου οφείλονται κυρίως στις όψιμες κυτταρικές ομάδες. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι πρώιμες μπορούν μερικώς να αφαιρεθούν χωρίς να επηρεαστεί η συνολική στατική αντοχή, ενεργοποιώντας έτσι τις μορφογενετικές διαδικασίες του ξύλου.<sup>87</sup> Με αφορμή αυτό ξεκίνησε μια διαδικασία υπολογιστικού σχεδιασμού η οποία βασιζόταν στην εξαγωγή πληροφοριών από την ανατομία των εκάστοτε ξύλινων κομματιών, επηρεάζοντας



Εικ. 3.7: Κυτταρική δομή του ξύλου σε κάθε μια από τις τρεις διευθύνσεις. Βασικό ρόλο διαδραματίζει η διεύθυνση των ινών.



Εικ. 3.8: Κατασκευή σπιτιών αξιοποιώντας τις ελαστικές ιδιότητες του ξύλου. Madan people, Mudhif houses, Southern Iraq

<sup>87</sup> (Menges, Material Resourcefulness: Activating Material Information in Computational Design, 2012)

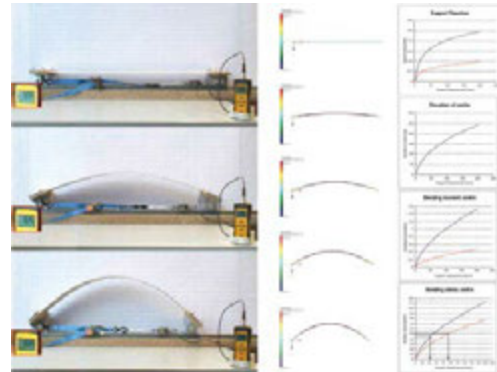
τον ψηφιακό σχεδιασμό, που στο τέλος κατέληγε στην τελική μορφή μέσω της στοχευμένης αφαίρεσης αφαιρέσεων των πρώιμων κυττάρων.

Οι ελαστικές ιδιότητες του ξύλου οδήγησαν στην κατασκευή του **ICD/ITKE Research Pavilion 2010**, του πρώτου περιπτερου που σχεδιάστηκε στο ITECH. Ο συνολικός σχεδιασμός του περιπτερου βασίστηκε στην **ελαστική κάμψη**<sup>88</sup>. Η μελέτη ήθελε να αναδείξει ότι αυτή η απλή συμπεριφορά μπορεί να οδηγήσει σε καινοτόμα σχέδια συστημάτων ενεργών κάμψεων τα οποία είναι ευέλικτα, σύνθετα και αποτελεσματικά στην κατασκευή τους. Επιπλέον, στόχευε στη διερεύνηση των σχεδιαστικών δυνατοτήτων μέσω του computational design, των μηχανικών προσομοιώσεων και της ρομποτικής παραγωγής. Κατά τη διαδικασία αυτή ενσωματώθηκαν στον υπολογιστικό σχεδιασμό (computational design) οι φυσικές ιδιότητες και συμπεριφορές των ξύλινων υλικών συστημάτων με τη προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων (FEMs)<sup>89</sup>. Στο τελευταίο στάδιο χρησιμοποιήθηκε ένας βιομηχανικός ρομποτικός βραχίονας ο οποίος αξιοποιώντας τη συμπεριφορά του ξύλου κατασκεύασε επί τόπου το περιπτερο, του οποίου είχε σύνθετη μορφολογία και αποτελούνταν αποκλειστικά από επίπεδα ξύλινα φύλλα. Σε αντίθεση με τις σημαντικές αλλά χρονοβόρες διαδικασίες του computational design, των προσομοιώσεων και του προγραμματισμού του ρομπότ, η διαδικασία συναρμολόγησης ήταν άμεση και γρήγορη, χωρίς την ανάγκη για σκαλωσιές ή επιπρόσθετο εξοπλισμό διότι τα φύλλα συνδεόντουσαν με ευκολία και αποκτούσαν αυτομάτως τη μορφή τους. Με άλλα λόγια, η επί τόπου συμπεριφορά του υλικού υπολόγισε τη μορφή του περιπτερου.<sup>90</sup>

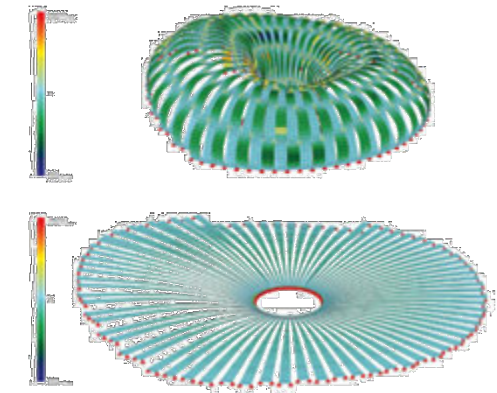
<sup>88</sup> Ως «ελαστική καμπύλη» θεωρείται ο τυπικός άξονας καμπύλης ενός αρθρωτού γραμμικού στοιχείου από την αρχική αλύγιστη κατάσταση του έως τη μέγιστη καμπύλωση του εντός του ελαστικού του πεδίου.

<sup>89</sup> Finite Elements Methods

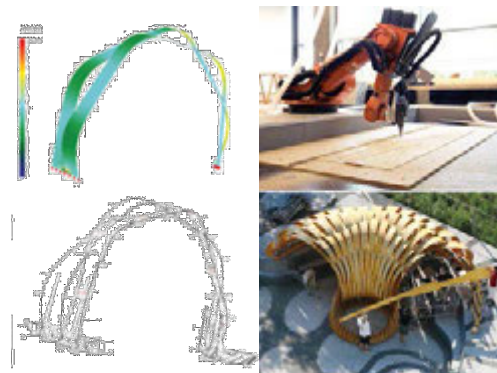
<sup>90</sup> (Fleischmann, Knippers, Lienhard, Menges, & Schleicher, 2012)



Εικ. 3.9: Έρευνα πάνω στη μορφή του περιπτερου χρησιμοποιώντας φιλμ σαπουνιού.



Εικ. 3.10: Τρισδιάστατη αναπαραγωγή του περιπτερου και ανάπτυγμα των συστατικών του μερών.



Εικ. 3.11: Ανάλυση του εκάστοτε κομματιού για την κατασκευή του από ρομποτικό βραχίονα και συναρμολόγηση επί τόπου του περιπτερου.



Εικ. 3.13: Λεπτομέρεια του ICD/ITKE Research Pavilion 2010.

Συγκρίνοντας την αποτελεσματικότητα του παραπάνω έργου με αυτή του Multihalle<sup>91</sup> να προκύψουν κάποια ιδιαίτερα και οι μορφογενετικές διαδικασίες είναι πολύ διαφορετικές, οι κατασκευές συγκλίνουν στην αξιοποίηση των ιδιοτήτων του ξύλου για την δημιουργία μιας ελαφριάς κατασκευής, με μια διαφορά: στην περίπτωση του περιπτερου αξιοποιούνται πλήρως όλες οι δυνατότητες της ύλης χωρίς την ανάγκη επιπρόσθετων στηριγμάτων, είναι οι δυνάμεις ροπής που σχηματίζουν τη μορφή, ενώ στην περίπτωση του Multihalle οι ροπές που δημιουργήθηκαν από την καμπύλωση του ξύλινου πλέγματος επιδρούσαν αρνητικά στην κατασκευή και χρειάστηκαν επιπρόσθετα στηρίγματα για την επίτευξη της ακαμψίας του κελύφους. Αυτό οφειλόταν στο γεγονός ότι το μοντέλο κρεμαστών αλυσίδων που χρησιμοποιήθηκε υπολόγιζε μόνο τις θλιπτικές δυνάμεις και αγνοούσε τις ροπές που προέκυψαν στην πραγματικότητα. Υπό τη σκοπιά της αποτελεσματικότητας της κατασκευής η μικρή ασυμφωνία μεταξύ της μορφής και του κατασκευαστικού υλικού είναι ο λόγος που το Multihalle υστερεί σε σχέση με το περίπτερο του ICD.



Εικ. 3.12: Ανάλυση της συμπεριφοράς του κουκουναριού σε διαφορετικές συνθήκες υγρασίας.

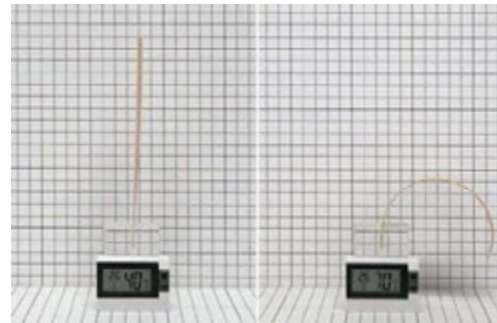
Μια ακόμα ενδιαφέρουσα ιδιότητα του ξύλου που μπορεί να προσφέρει σπουδαίες σχεδιαστικές δυνατότητες είναι η **υγροσκοπική συμπεριφορά** του. Η υγροσκοπικότητα αναφέρεται στην ικανότητα του υλικού να απορροφάει υγρασία από την ατμόσφαιρα ανάλογα με το ποσοστό που υπάρχει στην ατμόσφαιρα, παραμένοντας πάντα σε μια σχετική ισορροπία με το περιβάλλον. Κατά τη διαδικασία της απορρόφησης και της

<sup>91</sup> Ίσως να ήταν καταλληλότερο το δικτυωτό κέλυφος για το DEUBAU που κατασκεύασε ο Otto στο Essen το 1962, κυρίως λόγω της αντιστοιχίας στην κλίμακα και στον πειραματικό χαρακτήρα, όμως η απουσία τεχνικών λεπτομερειών οδηγεί στην επιλογή του Multihalle.

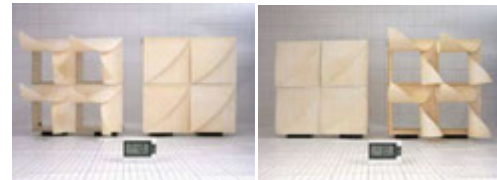
απόδοσης υγρασίας το υλικό μεταβάλλεται φυσικά διότι τα μόρια του νερού δημιουργούν δεσμούς με τα μόρια του υλικού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα κουκουνάρια των δέντρων που χρησιμοποιούν τον μηχανισμό αυτό για τη διασπορά των σπόρων τους, αρκετές φορές, ακόμα και όταν έχουν αποξηραθεί τελείως και δεν περιέχουν κανένα καρπό. Η συμπεριφορά αυτή αποτέλεσε την αφορμή για τα ανάπτυξη διαδραστικών υλικών στοιχείων διπλής στρώσης που βασίζονται σε αυτή την αρχή από το Department for Form Generation and Materialisation του HFG Offenbach και του ICD.<sup>92</sup>

Με αφορμή τα κουκουνάρια, διερευνήθηκε η έμφυτη υδροσκοπικότητα και ανισοτροπία των ξύλινων υλικών σε συνδυασμό με σύνθετα υλικά. Το αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία ενός ευαίσθητου στην υγρασία σύνθετου ξύλινου υλικού, τριγώνου σχήματος, το οποίο του να ανταποκρίνεται στις κλιματικές αλλαγές ενώ αποτελεί ταυτόχρονα αισθητήριο, φυσικό κινητήριο και ρυθμιστικό στοιχείο. Επιπρόσθετα, όλα τα ξύλινα σύνθετα στοιχεία είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Η τελική τους συμπεριφορά είναι αποκεντρωμένη και ταυτόχρονα συλλογική, ευαίσθητη στην αλλαγή και την ίδια στιγμή γεμάτη ενέργεια.

Η αλλαγή των διαστάσεων του ξύλου είναι ευθέως ανάλογη με την περιεκτικότητα της υγρασίας. Επομένως, μια συγκεκριμένη αύξηση της περιεκτικότητας της υγρασίας πάντα καταλήγει στην ίδια αύξηση των διαστάσεων του κομματιού. Ωστόσο, αν συνδυαστεί με κάποιο άλλο σύνθετο υλικό τότε αυτή η γραμμική εξάρτηση μπορεί να επεκταθεί ώστε να αποκτηθούν αρκετά συγκεκριμένες αλλά διαφορετικές αλλαγές στη μορφή. Με άλλα λόγια, τα σύνθετα ξύλινα υλικά μπορούν να προγραμματιστούν με φυσικό τρόπο ως υλικά συστήματα προκειμένου να αποκτούν διαφορετικές μορφές όταν ανταποκρίνονται στις διακυμάνσεις της



Εικ. 3.14: Υδροσκοπικό κομμάτι ξύλου που ανταποκρίνεται στην μεταβολή της υγρασίας.

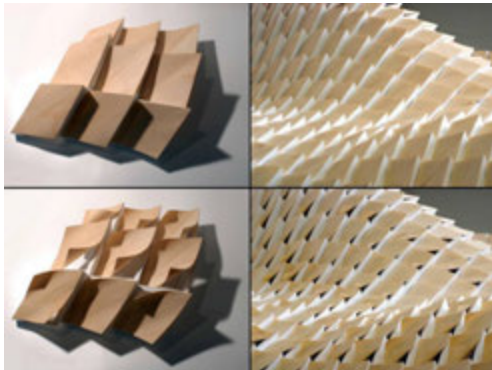


Εικ. 3.16: Υδροσκοπικά Ξύλινα φύλλα που έχουν προγραμματιστεί έτσι 'ώστε να ανταποκρίνονται με συγκεκριμένο τρόπο στις διαφορετικές συνθήκες υγρασίας.

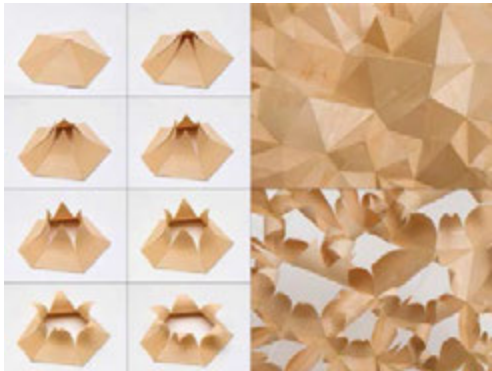


Εικ. 3.15: Κατασκευή τεχνητών υδροσκοπικών φύλλων χρησιμοποιώντας 3D-εκτυπωτή που μιμούνται απόλυτα τη συμπεριφορά των αντίστοιχων ξύλινων φύλλων.

<sup>92</sup> Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας βρίσκονται στο άρθρο "Material Capacity: Embedded Responsiveness" του AD: Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design.



Εικ. 3.17: *Responsive Surface Structure I*, 2006-07. Υδροσκοπική επιφανειακή κατασκευή.



Εικ. 3.18: *Responsive Surface Structure II*, 2008. Υδροσκοπική επιφανειακή κατασκευή.



Εικ. 3.19: *FAZ Pavilion Frankfurt*, 2010.

υγρασίας. Τέτοιες ουσιαστικές αλλαγές στη τις διαφορετικές μορφές εντός ενός εύρους ανταπόκρισης στην υγρασία, αλλάζοντας τις πέντε παραμέτρους: τη διεύθυνση των ινών, τη διάταξη των φυσικών και των συνθετικών συστατικών, την αναλογία του μήκους και του πλάτους, τη γεωμετρία του στοιχείου, και το πιο σημαντικό, τον έλεγχο της υγρασίας κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Αυτά επιτρέπουν την παραγωγή στοιχείων τα οποία είτε ανοίγουν ή κλείνουν όταν η περιβαλλοντική υγρασία αυξάνεται, όπως επιτρέπουν και την ιδιαίτερη χωρογραφία του εύρους ανταπόκρισης και συμπεριφοράς.<sup>93</sup>

Οι πρώτες μελέτες που υλοποίησαν την παραπάνω τεχνολογία είναι τα *Responsive Surface Structure I (2006-07)* και *Responsive Surface Structure II*<sup>94</sup> (2008) που αποτελούν διαδραστικές επιφάνειες που ανταποκρίνονται στην υγρασία του περιβάλλοντος, στη θερμοκρασία και στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Στις δύο προηγούμενες μελέτες βασίστηκε το *FAZ Summer Pavilion (2010)* που αποτελεί ένα διαδραστικό στέγαστρο αντίστοιχης τεχνολογίας. Μια άλλη μελέτη, το *HygroScope – Meteorosensitive Morphology (2012)*, είναι μια εγκατάσταση, βρίσκεται στη μόνιμη συλλογή του Centre Pompidou, και ανταποκρίνεται στην υγρασία του εξωτερικού κλίματος ενημερώνοντας τον επισκέπτη με αυτόν τον ιδιαίτερο τρόπο για τον καιρό που υπάρχει εκτός του κτιρίου. Τέλος, το *HygroSkin: Meteorosensitive Pavilion (2013)* αποτελεί ένα περίπτερο με επιφανειακές κατασκευές που ανταποκρίνονται στην αλλαγή του καιρού. Οι διαδραστικές επιφάνειες του είναι έτσι προγραμματισμένες ώστε να κλείνουν στην υψηλή συσσώρευση υγρασίας και να ανοίγουν

<sup>93</sup> (Menges & Reichert, *Material Capacity: Embedded Responsiveness*, 2012)

<sup>94</sup> (Reichert, *Responsive Surface Structure I*) και (Reichert, *Responsive Surface Structure II*)

στην αντίθετη περίπτωση. Επομένως τις ηλιόλουστες ημέρες παραμένουν ανοιχτά επιτρέποντας στην ηλιακή ακτινοβολία να εισέλθει στο εσωτερικό του περιπέτρου, ενώ τις βροχερές ημέρες κλείνουν προστατεύοντας τον εσωτερικό του χώρο.<sup>95</sup>

Εν κατακλείδι, το ICD/ITKE ασχολείται με μελέτες που αφορούν τις ολοκληρωμένες διαδικασίες παραγωγής και υλοποίησης, από την ανάπτυξη της μεθοδολογίας του υπολογιστικού σχεδιασμού, στην διερεύνηση του δομικού υλικού, την ανάπτυξη των κατάλληλων προγραμμάτων προσομοίωσης, στον προγραμματισμό του ρομπότ για την δημιουργία της εκάστοτε κατασκευής και της επαλήθευσης όλων των διαδικασιών με την λεπτομερή αποτύπωση του κατασκευασμένου έργου. Η αφορμή για τη εκκίνηση αυτών των διαδικασιών βρίσκεται πλέον στον βιομιμητισμό. Πρώτο βήμα της διαδικασίας είναι ο εντοπισμός μιας ενδιαφέρουσας και πολλά υποσχόμενης διαδικασίας ή μηχανισμού ή υλικού που εντοπίζεται στους ζωντανούς οργανισμούς. Αφού μελετηθεί διεξοδικά, επιλέγεται το κατάλληλο υλικό που μπορεί να υλοποιήσει μορφογενετικά τον αντίστοιχο μηχανισμό για τη δημιουργία αρχιτεκτονικού έργου. Μερικά από τα πλεονεκτήματα της μεθοδολογίας αυτής είναι ότι μας δίνει την ευκαιρία να κατανοήσουμε τα συστήματα της φύσης άμεσα αναγνωρίζοντας την πραγματική τους αξία, να ανακαλύπτουμε και να αξιοποιούμε νέες δυνατότητες σε υλικά που ήδη υπάρχουν, τα παραγόμενα κτίρια να είναι οικολογικά και να βρίσκονται σε αρμονία με το φυσικό περιβάλλον, ενώ χρησιμοποιώντας ρομποτικούς βραχίονες στην κατασκευή των κτιρίων να έρθουμε ένα βήμα πιο κοντά σε αυτό που αποκαλεί ο Menges ως την «Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση»<sup>96</sup>, κατά την οποία η παραπάνω διαδικασία, από το ψηφιακό σχέδιο απευθείας στην κατασκευή μέσω των ρομπότ, θα αποτελεί τη συνήθη πρακτική.

<sup>95</sup> (Menges & Reichert, Performative Wood: Physically Programming the Responsive Architecture of the HygroScope and HygroSkin Projects, 2015)

<sup>96</sup> (Menges, The New Cyber-Physical Making in Architecture: Computational Construction, 2015)



Εικ. 3.20: HygroScope: Meteorosensitive Morphology, 2012. Υδροσκοπική κατασκευή στο Centre Pompidou που ανταποκρίνεται στις εκάστοτε εξωτερικές καιρικές συνθήκες του Παρισιού.



Εικ. 3.21: HygroSkin: Meteorosensitive Pavilion, 2013. Υδροσκοπικό περίπτερο στο FRAC Centre Orleans της Γαλλίας.







# Συμπεράσματα

Ο Frei Otto επιθυμούσε να δημιουργήσει μια κοινότητα ειρηνική που να συνυπάρχει με τη φύση ως αναπόσπαστο κομμάτι της με εφόδιο την αρχιτεκτονική. Αυτό τουλάχιστον ήταν το όνειρο του, η κινητήρια δύναμη του. Δεν είχε σημασία για τον ίδιο αν θα ήταν αυτός που θα το πετύχαινε αυτό, γι' αυτό το λόγο πάντοτε δημοσιοποιούσε τα αποτελέσματα των ερευνών του καθώς και τις μεθοδολογίες του. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής γνωρίσαμε τις μορφογενετικές μεθόδους που ανέπτυξε και τις ελαφριές κατασκευές που κατασκεύασε ως απόρροια των μεθοδολογιών αυτών. Μάλιστα, στις πιο σημαντικές είδαμε με περισσότερη λεπτομέρεια πως η μορφή που προέκυψε στο μοντέλο έγινε τεχνικό σχέδιο, μετά μακέτα καταγραφής και τελικώς ολοκληρωμένο κτίριο.

Είδαμε με ποιον τρόπο τα μοντέλα με फिल्म σαπουνιών δημιούργησαν τις μεμβρανοειδείς τέντες και τις δικτυωτές κατασκευές, με το στέγαστρο του ολυμπιακού σταδίου του Μονάχου αν ξεχωρίζει, στο οποίο διδαχθήκαμε πιο αναλυτικά τη διαδικασία από το μοντέλο, στη μακέτα καταγραφής, καθώς και την εφαρμογή για πρώτη φορά προγράμματος προσομοίωσης για την στατική επαλήθευση του σχεδίου. Γνωρίσαμε τον τρόπο που λειτουργούν οι συσκευές για την εύρεση των φουσκωτών μορφών και τα έργα που παρήγαγαν. Μάθαμε πως χρησιμοποιούνται οι κρεμαστές αλυσίδες για την κατασκευή βαρέων οροφών, ενώ στη συνέχεια είδαμε πως η αλυσοειδής καμπύλη και οι γυψόγαζες χρησιμοποιούνται στα μοντέλα εύρεσης των θολωτών μορφών παράγοντας σπουδαία έργα με το Mulfihalle να ξεχωρίζει. Ανακαλύψαμε τη δομή των, τελικά, «όχι και τόσο» ασχεδιάστων οικισμών, τις φυσικές μορφές που τις διέπουν, τα κοινά και τις διαφορές με τις μεθόδους εύρεσης μορφής που ανέπτυξε ο Otto για την ανάλυση τους. Αυτές είναι η πρώτη συσκευή «προσομοίωσης» της εδαφικής κατοχής χρησιμοποιώντας στοιβές άμμου, η δεύτερη που χρησιμοποιεί επιπλέοντες μαγνήτες, τα μοντέλα εύρεσης μορφής συστημάτων διαδρομών, των ελαχιστοποιημένων παρακάμψεων και των ελαχίστων διαδρομών, ενώ είδαμε πως το μοντέλο των ελαχίστων διαδρομών χρησιμοποιείται για την παραγωγή διακλαδωτών μορφών. Δυστυχώς ο Otto δεν είχε την ευκαιρία να υλοποιήσει κάποιο έργο που να προέκυπτε από το μοντέλο δημιουργίας διακλαδωτών μορφών παρά μόνο τη μελέτη για τον μαγνητικό σιδηρόδρομο.

Στο τρίτο μέρος της εργασίας έγινε η σύνδεση με τη σύγχρονη εποχή. Γνωρίσαμε τη θεωρία της μορφογένεσης όπως την ορίζει ο De Landa, με την οποία μας επεξηγεί τη θεωρία του «νέο-υλισμού» δίνοντας το παράδειγμα των फिल्म σαπουνιού, αναλύει την ιδέα ότι η ύλη εμπεριέχει μορφογενετικές ιδιότητες, δηλαδή πως μέσα από την αυτό-οργάνωση της ύλης και μέσω των επιρροών των φυσικών δυνάμεων προκύπτουν μορφές. Παράλληλα εκσυγχρονίζει τη μεθοδολογία προσθέτοντας τον πληθυσμιακό λογισμό, τον εντατικό λογισμό και τον τοπολογικό λογισμό καθιερώνοντας έτσι τη σύγχρονη τάση της ψηφιακής μορφογένεσης. Είδαμε μερικά παραδείγματα σύγχρονων αρχιτεκτόνων που εφαρμόζουν τις μεθοδολογίες του Otto με τον δικό τους ιδιαίτερο τρόπο. Ο Menges όμως ξεχωρίζει από τους αρχιτέκτονες που αναφέρθηκαν διότι έδωσε μια νέα διάσταση στην νέο-υλιστική θεωρία με τον «υπολογιστικό σχεδιασμό». Βάζει το ίδιο το οικοδομικό υλικό, όποιο και να είναι αυτό, στο επίκεντρο της έρευνας και επιδιώκει ενεργοποιώντας τις μορφογενετικές του ιδιότητες να δημιουργήσει την τελική μορφή του κτιρίου. Συνδυάζει την διαδικασία αυτή με σχετικές πληροφορίες έχουν προκύψει από τον κλάδο του βιομιμητισμού, δημιουργώντας πολλαπλά οφέλη. Ό,τι πληροφορία εξάγεται από την έρευνα την αξιοποιεί μέσω προγραμμάτων προσομοίωσης στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και σε συνδυασμό με τη διαδικασία κατασκευής, δημιουργεί μια ολοκληρωμένη διαδικασία «υπολογιστικού σχεδιασμού», που ξεκινάει από την επιλογή του κατασκευαστικού υλικού και φτάνει μέχρι την κατασκευή μέσω ρομποτικού βραχίονα.

Ολοκληρώνεται το κυρίως κείμενο με την παρουσίαση συγκεκριμένων μελετών που αφορούν την ενεργοποίηση των μορφογενετικών ιδιοτήτων του ξύλου, παράγοντας ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν τόσο πολύ σημαντικά κτίρια όσο και μοντέλα εύρεσης μορφής, κάποια από τα οποία όμως θεωρώ πως ξεχωρίζουν σε σχέση με τα υπόλοιπα.

Αρχικά ειδική μνεία πρέπει να αποδοθεί στο Multihalle του Mannheim για τους λόγους ότι πέρα από τη σπουδαία διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής που περιγράφηκε υποβόσκει μια ενδιαφέρουσα ειρωνεία: το κτίριο είχε σχεδιαστεί ως ελαφριά κατασκευή που θα στεκόταν μόνο για δύο χρόνια, και γι' αυτόν το λόγο το προσδόκιμο αντοχής των ξύλινων σανίδων του δικτυωτού κελύφους προβλεπόταν για βραχυχρόνια χρήση, κάτι που σήμερα δημιουργεί πρόβλημα στη διατήρηση του κτιρίου. Επομένως, το κτίριο ξεπέρασε τον αρχικό του στόχο, που ήταν η διεξαγωγή των εκδηλώσεων κατά τα δύο χρόνια της προβλεπόμενης λειτουργίας του, καταφέρνει και βρίσκεται μέχρι σήμερα, 55 χρόνια μετά την κατασκευή του ενώ είχε σχεδιαστεί ως προσωρινή κατασκευή. Παρόλα αυτά, αναζητούνται σήμερα οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να διατηρηθεί και να αποφύγει την αναπόφευκτη κατάρρευση του. Έχει πετύχει περισσότερους στόχους από όσους είχαν τεθεί αρχικά αποτελώντας εμβληματικό κτίριο τόσο για το Mannheim όσο και στην κατασκευή κελυφών γενικότερα.

Από όλα τα μοντέλα εύρεσης μορφής του Otto, εκείνο που είχε τη μεγαλύτερη επιρροή είναι το μοντέλο των συστημάτων διαδρομών ελαχιστοποιημένων παρακάμψεων. Το μοντέλο αυτό επανειλημμένα έχει χρησιμοποιηθεί από τον Sruybroek με διαφορετικούς τρόπους, ενώ το γραφείο της Zaha Hadid το είχε αξιοποιήσει στον σχεδιασμό μιας αστικής περιοχής. Είναι το πιο δημοφιλές μοντέλο εύρεσης μορφής που έχει «κληρονομηθεί» στη σύγχρονη γενιά των αρχιτεκτόνων.

Οι νέες δυνατότητες των ηλεκτρονικών υπολογιστών θέτουν σε αμφισβήτηση τη φυσική υπόσταση των μορφογενετικών μοντέλων καθώς είναι πολύ εύκολο να προσομοιωθούν σε αυτούς. Διάφορα παραμετρικά προγράμματα μπορούν πλέον να μιμηθούν με μεγάλη ακρίβεια τη λειτουργία τους, ενώ σε μερικές περιπτώσεις είναι ικανά να παράγουν πολύ πιο πολύπλοκες μορφές<sup>97</sup>. Ειδικότερα, οι παραμετρικές δυνατότητες και η προσομοίωση των φυσικών δυνάμεων χρησιμοποιώντας το Grasshopper και το Kangaroo Physics στο Rhino καθιστούν τη χρήση ηλεκτρονικών προσομοιώσεων πολύ πιο εύκολη υπόθεση από τη δημιουργία και χρήση του φυσικού μοντέλου. Επιπρόσθετα, τα φυσικά μοντέλα καταλαμβάνουν σημαντικό χώρο στον τόπο εργασίας και προκαλούν την αναστάτωση και τη ρύπανση του άμεσου χώρου χρήσης, κάτι που με τη χρήση των υπολογιστών αποφεύγεται. Στον αντίποδα, τα φυσικά μορφογενετικά μοντέλα προσφέρουν κάποια ασυναγώνιστα πλεονεκτήματα: είναι απτές κατασκευές, απαιτούν τη φυσική ενασχόληση του χρήστη, η ανάδυση της μορφής προκύπτει άμεσα κατά την παρουσία του χρήστη, η χωρική αίσθηση της μορφής είναι άμεσα κατανοητή αφού υπάρχει στον πραγματικό (τρισιδιάστατο) χώρο και, τελευταίο, η υπολογιστή δύναμη του μοντέλου είναι ασύγκριτα καλύτερη από αυτή των ηλεκτρονικών υπολογιστών, είναι η καλύτερη

---

<sup>97</sup> Για τις διαφορές μεταξύ του physical form-finding και του computational form-finding μιλάνε οι Ahlquist και Menges στο κείμενο τους *Physical Drivers* (Ahlquist & Menges, 2012).

δυνατή, διότι βασίζεται στην αλληλεπίδραση των μορίων του μορφογενετικού υλικού. Συμπερασματικά, ο καλύτερος τρόπος αξιοποίησης των μορφογενετικών μοντέλων είναι ο συνδυασμός των χρήσεων τόσο των φυσικών όσο και των ψηφιακών στο ποσοστό και στο πεδίο που απαιτεί το καθένα.

Συνοψίζοντας, όλα τα ερωτήματα που σχετίζονται με τις ανθρώπινες «φυσικές» κατασκευές βρίσκουν την απάντησή τους στις βέλτιστες κατασκευές. Σύμφωνα με τον Otto, ως βέλτιστες θεωρούνται εκείνες των οποίων η μορφή και η ύλη εκπληρώνουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις εκάστοτε δομικές απαιτήσεις. Αυτός ο ορισμός εφαρμόζεται απόλυτα για τους λόγους που περιεγράφηκαν στο κείμενο τόσο στις πρωτόγονες κατασκευές, στη δομή των «ασχεδιάστων» οικισμών, στα κτίρια που κατασκεύασε ο ίδιος, όσο και στα περίπτερα που υλοποιήθηκαν από το ICD. Παρουσιάστηκε και ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάστηκαν, καθώς και τα κρίσιμα μέρη των μεθοδολογιών, όσον αφορά στον σχεδιασμό και στη δημιουργία της μορφής.

Το δεύτερο σημαντικό ερώτημα είναι ο ρόλος των «φυσικών» κατασκευών. Σε μια εποχή που το κλιματολογικό πρόβλημα και η καταστροφή του περιβάλλοντος ολοένα και αυξάνεται, είναι παραπάνω από αναγκαία η ανάπτυξη μεθοδολογιών, τεχνικών, υλικών και κατασκευών που να μην επιβαρύνουν το φυσικό περιβάλλον και να βρίσκονται σε ισορροπία με αυτό, ή ακόμα καλύτερα, να το ευνοούν με την ύπαρξή τους. Ο Frei Otto είχε προβλέψει από τα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα το πρόβλημα που πλησίαζε και με το συνολικό του έργο χάραξε έναν δρόμο που σήμερα αποτελεί μονόδρομο αν θέλουμε να ζήσουμε σε ισορροπία με τη φύση. Η διεπιστημονική συνεργασία είναι αναγκαία για την ανάπτυξη τέτοιων μεθοδολογιών και ο ρόλος του αρχιτέκτονα αποτελεί ένα μόνο από τα πολλά συστατικά της. Τα σύγχρονα διερευνητικά προγράμματα, όπως αυτό του ICD/ITKE, αποτελούν τη σύγχρονη μορφή έρευνας όπως αυτή που διεξήγαγε ο Otto στο IL.

Το τρίτο σημαντικό ερώτημα έχει να κάνει με τη σύγχρονη εποχή. Ο Otto άφησε πίσω του μια σπουδαία κληρονομιά και πλέον το βάρος πέφτει στα χέρια των σύγχρονων αρχιτεκτόνων και επιστημών. Ευτυχώς υπάρχουν πολλοί αρχιτέκτονες που αντιλαμβάνονται τον ρόλο αυτό, που λόγω χρόνου και χώρου, συμπεριλήφθηκαν στο κείμενο μόνο οι απολύτως σχετικοί με το θέμα. Ο Sruybroek και ο Schumacher χρησιμοποίησαν τις μεθοδολογίες του Otto για τη λύση των χωρικών τους προβλημάτων, ενώ στο γραφείο των Ball και Nogues αξιοποιήθηκαν για αισθητικούς λόγους. Ο Menges, που αποτελεί έναν από τους πολλούς του τομέα αυτού, αξιοποίησε μια άλλη ιδέα από την κληρονομιά αυτή, την εκμετάλλευση της ύλης, όχι απλά για να ανακαλύψει και να αναπαραστήσει μια μορφή αλλά και για να αποτελέσει το ίδιο το δομικό υλικό της κατασκευής. Η μεθοδολογία και οι τεχνικές που ανέπτυξε στα πλαίσια του ICD/ITKE αποτελούν το αποτέλεσμα μιας μεγάλης διεπιστημονικής συνεργασίας με πολλές ειδικότητες πέραν των κλάδων της αρχιτεκτονικής, της μηχανικής, των θετικών επιστημών, κτλ. Σε αυτή επιχειρείται η ανάγνωση του τρόπου χρήσης ενός υλικού στη φύση, όπως είναι η δομή του ξύλου στην παρούσα περίπτωση, ή γενικά η αξιοποίηση των ινών ως δομικού υλικού των έμβιων οργανισμών γενικότερα, όπως στην περίπτωση του εξωσκελετού ενός σκαθαριού ή του κελύφους ενός υδρόβιου μικροοργανισμού<sup>98</sup>. Στη συνέχεια αξιοποιούνται οι καρποί της έρευνας για την παραγωγή μορφής μέσω προσομοιώσεων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και στη συνέχεια κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας ρομποτικούς

<sup>98</sup> Αυτές είναι δομές που δεν συμπεριλήφθηκαν στην εργασία βρίσκονται όμως στο *Architectural Design: Material Synthesis Fusing the Physical and the Computational*, Sept-Oct 2015, pr.n. 237.

βραχίονες. Αποτελεί δηλαδή μια ολοκληρωμένη σχεδιαστική μεθοδολογία στην οποία εμπεριέχονται ολοκληρωμένες τεχνικές βιομιμητισμού, ανάδυσης μορφής, αξιοποίηση των δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών καθώς και τη χρήση ρομποτικών συστημάτων στην διαδικασία κατασκευής. Βρίσκεται στην επιτομή των σχεδιαστικών μεθοδολογιών ερευνώντας τα συστήματα που ίσως θα χρησιμοποιούνται στην καθημερινότητα του αύριο<sup>99</sup>.

---

<sup>99</sup> Αναφέρομαι στην περίπτωση της «4<sup>ης</sup> βιομηχανικής επανάστασης» (Menges, *The New Cyber-Physical Making in Architecture: Computational Construction*, 2015)





# Πηγές Εικόνων

## 1 Frei Otto

Εικ. 1.1 μέχρι Εικ. 1.2	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)
Εικ. 1.3	(Wyatt, 2016)
Εικ. 1.4 μέχρι Εικ. 1.9	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)
Εικ. 1.10	(Shaw, 2013)
Εικ. 2.1	(NASA)
Εικ. 3.1 μέχρι Εικ. 3.3	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)
Εικ. 3.4	(NASA)
Εικ. 3.5 μέχρι Εικ. 3.6	(Digital Globe, 2014 )
Εικ. 3.7 μέχρι Εικ. 3.13	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)
Εικ. 4.1	(NASA)
Εικ. 4.2	(Betz, 2014)
Εικ. 4.3 μέχρι Εικ. 4.4	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)
Εικ. 4.5	(Otto & Schaur, IL 21: Form Force Mass 1 – Basics, 1979)
Εικ. 4.6	(Miki)
Εικ. 4.7 μέχρι Εικ. 4.9	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)

## 2 Η Εύρεση (της) Μορφής

Εικ. 1.1	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)
Εικ. 1.2	(Otto & Schleyer, Zugbeanspruchte Konstruktionen: Gestalt, Struktur und Berechnung von Bauten aus Seilen, Netzen und Membranen, 1966)
Εικ. 1.3 μέχρι Εικ. 1.4	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)
Εικ. 1.5	(Otto & Schleyer, Zugbeanspruchte Konstruktionen: Gestalt, Struktur und Berechnung von Bauten aus Seilen, Netzen und Membranen, 1966)
Εικ. 1.6 μέχρι Εικ. 1.8	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)
Εικ. 1.9	(Team Code Zero GS42R, 2014)
Εικ. 1.10	(Otto & Schleyer, Zugbeanspruchte Konstruktionen: Gestalt, Struktur und Berechnung von Bauten aus Seilen, Netzen und Membranen, 1966)
Εικ. 1.11 μέχρι Εικ. 1.27	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)

Εικ. 1.28	(Rankin, 2014)
Εικ. 1.29 μέχρι Εικ. 2.12	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)
Εικ. 2.13	(Otto & Schleyer, Zugbeanspruchte Konstruktionen: Gestalt, Struktur und Berechnung von Bauten aus Seilen, Netzen und Membranen, 1966)
Εικ. 2.14 μέχρι Εικ. 2.23	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)
Εικ. 2.24	(Verein zur Förderung des Leichtbaus e.V.)
Εικ. 3.1 μέχρι Εικ. 3.5	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)
Εικ. 3.6	(Uncube Magazine)
Εικ. 3.7 μέχρι Εικ. 4.6	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)
Εικ. 4.7 μέχρι Εικ. 4.10	(Tomlow, 1989)
Εικ. 4.11	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)
Εικ. 4.14	(Elser, 2015)
Εικ. 4.12	(Geuder, 2015)
Εικ. 4.13	(Deutsches Architekturmuseum, 2013)
Εικ. 4.15 μέχρι Εικ. 4.19	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)
Εικ. 4.20	(Lieberwirth, 2011)
Εικ. 4.21	(Krause, 2013)
Εικ. 4.22	(準建築人手札網站 Forgemind ArchiMedia, 2015)
Εικ. 5.1 μέχρι Εικ. 5.4	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)
Εικ. 5.5	(Schumacher, 2009)
Εικ. 5.6	(Schaur & Otto, 1992)
Εικ. 5.7	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)
Εικ. 5.8	(Schaur & Otto, 1992)
Εικ. 5.9	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)
Εικ. 5.10	(Schaur & Otto, 1992)
Εικ. 5.11 μέχρι Εικ. 5.13	(Otto & Rasch, Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal, 1996)
Εικ. 5.14 μέχρι Εικ. 5.21	(Schaur & Otto, 1992)

### 3 Το Σήμερα

Εικ. 2.1 μέχρι Εικ. 2.3	(Spuybroek, NOX: Machining Architecture, 2004)
Εικ. 2.4 μέχρι Εικ. 2.5	(Schumacher, 2009)
Εικ. 2.6 μέχρι Εικ. 2.7	(Foster + Partners)
Εικ. 2.8 μέχρι Εικ. 2.9	(Ball-Nogues Studio, 2005)
Εικ. 3.1 μέχρι Εικ. 3.5	(Institute for Computational Design)
Εικ. 3.6	(Fleischmann, Knippers, Lienhard, Menges, & Schleicher, 2012)
Εικ. 3.7	(Menges & Reichert, Material Capacity: Embedded Responsiveness, 2012)
Εικ. 3.8 μέχρι Εικ. 3.11	(Fleischmann, Knippers, Lienhard, Menges, & Schleicher, 2012)
Εικ. 3.12	(Institute for Computational Design)
Εικ. 3.13	(Menges & Reichert, Material Capacity: Embedded Responsiveness, 2012)
Εικ. 3.14 μέχρι Εικ. 3.15	(Institute for Computational Design)
Εικ. 3.16	(Menges & Reichert, Performative Wood: Physically Programming the Responsive Architecture of the HygroScope and HygroSkin Projects, 2015)
Εικ. 3.17	(Reichert, Responsive Surface Structure I)
Εικ. 3.18	(Reichert, Responsive Surface Structure II)
Εικ. 3.19	(Menges, FAZ Pavilion Frankfurt)
Εικ. 3.20 μέχρι Εικ. 3.21	(Institute for Computational Design)





# Βιβλιογραφία

Η Συμβολή του Frei Otto στην Εύρεση (της) Μορφής και στη Σύγχρονη Μορφογένεση

1. AASchoolArchitecture. (2016, 02 19). *2016 02 19 Antoine Picon Achim Menges Francis Aish*. Ανάκτηση από [www.youtube.com](http://www.youtube.com/watch?v=7H0ITzsBH68):  
<https://www.youtube.com/watch?v=7H0ITzsBH68>
2. Ahlquist, S., & Menges, A. (2012). Physical Drivers: Synthesis of Evolutionary Developments and Force-Driven Design. *Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design*, σσ. 60-67.
3. Bach, K., & Burkhardt, B. (1984). *IL 28: Diatomeen 1 (Shells in nature and technics)*. Stuttgart: Karl Krämer.
4. Bacher, M., & Otto, F. (1978). *IL 13 Multihalle Mannheim*. Stuttgart: Institut für Leichte Flachentragwerke.
5. Ball Nogues Studio. (n.d.). *Maximilian's Schell*. Ανάκτηση Apr 12, 2016, από [www.ball-nogues.com/](http://www.ball-nogues.com/): <http://www.ball-nogues.com/#project-105>
6. Ball, B., & Nogues, G. (2008, 03 19). *Ball Benjamin And Gaston Nogues-clip\_2223*. Ανάκτηση από <http://sma.sciarc.edu/>: [http://sma.sciarc.edu/subclip/ball-benjamin-and-gaston-nogues-clip\\_2223/](http://sma.sciarc.edu/subclip/ball-benjamin-and-gaston-nogues-clip_2223/)
7. Ball-Nogues Studio. (2005). *Maximilian's Shell*. Ανάκτηση από <http://www.ball-nogues.com/>: <http://www.ball-nogues.com/#project-105>
8. Betz, V. (2014). *Magnetite : Fe<sub>2</sub>+Fe<sub>3</sub>+2O<sub>4</sub>*. Ανάκτηση από [www.mindat.org](http://www.mindat.org/):  
<http://www.mindat.org/photo-645573.html>
9. *Biography of Frei Otto*. (2015). Ανάκτηση από Pritzker Prize Website:  
<http://www.pritzkerprize.com/2015/biography>
10. Chiu, S. K., Hassel, J. V., Paglia, M. (Παραγωγοί), Paglia, M. (Συγγραφέας), & Hassel, J. V. (Σκηνοθέτης). (2014). *Trailer for [Frei Otto: Spanning the Future]* [Ταινία]. Ανάκτηση 4 24, 2015
11. Colorado Public Television CPT12 PBS. (2014, 06 22). *[ FREI OTTO: SPANNING THE FUTURE (2014) ] Trailer update V.2*. Ανάκτηση από [www.youtube.com](http://www.youtube.com/watch?v=vWo-ifNoQ98):  
<https://www.youtube.com/watch?v=vWo-ifNoQ98>
12. Columbia University. (2004, 04 09). *Manuel Delanda, "Deleuze and the Use of the Genetic Algorithm in Architecture"*. Ανάκτηση από [youtube.com](http://www.youtube.com/watch?v=50-d_J0hKz0):  
[https://www.youtube.com/watch?v=50-d\\_J0hKz0](https://www.youtube.com/watch?v=50-d_J0hKz0)
13. Cook, M. (2004). Digital Tectonics: Historical Perspective - Future Prospect. Στο N. Leach, D. Turnbull, & C. Williams, *Digital Tectonics* (σσ. 41-49). Wiley.
14. DeLanda, M. (1998). *Deleuze and the Genesis of Form*. Ανάκτηση από [www.artnode.se](http://www.artnode.se/artorbit/issue1/f_deleuze/f_deleuze_delanda.html):  
[http://www.artnode.se/artorbit/issue1/f\\_deleuze/f\\_deleuze\\_delanda.html](http://www.artnode.se/artorbit/issue1/f_deleuze/f_deleuze_delanda.html)
15. DeLanda, M. (2002). Deleuze and the Use of the Genetic Algorithm in Architecture. Στο N. Leach, *Designing for a Digital World* (σσ. 117 - 122). New York: Wiley.



16. Deutsches Architekturmuseum. (2013, Feb 15). *MULTIHALLE MANNHEIM: Hängemodell zur Bestimmung der Gitterschale des Hallendaches*. Ανάκτηση από [archiv.dam-online.de/](http://archiv.dam-online.de/): <http://archiv.dam-online.de/handle/11153/187-011-001>
17. Digital Globe. (2014 ). *Earth View*. Ανάκτηση από [earthview.withgoogle.com](http://earthview.withgoogle.com): <https://earthview.withgoogle.com>
18. Eilam, E. (2005). *Reversing: Secrets of Reverse Engineering*. John Wiley & Sons.
19. Elser, O. (2015, Mar 19). *FAREWELL TO FREI: UNEXPECTED INSIGHTS ON THE KING OF TENSILE*. Ανάκτηση από <http://www.uncubemagazine.com/>: <http://www.uncubemagazine.com/blog/15396157>
20. Fleischmann, M., Knippers, J., Lienhard, J., Menges, A., & Schleicher, S. (2012). Material Behaviour: Embedding Physical Properties in Computational Design Processes. *Architectural Design: Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design*, σσ. 44-51.
21. Foster + Partners. (n.d.). *Great Court at the British Museum - London, UK 1994 - 2000*. Ανάκτηση Apr 12, 2016, από [www.fosterandpartners.com/](http://www.fosterandpartners.com/): <http://www.fosterandpartners.com/projects/great-court-at-the-british-museum/>
22. Foster + Partners. (n.d.). *Smithsonian Institution - Washington DC, USA 2004 - 2007*. Ανάκτηση Apr 12, 2016, από [www.fosterandpartners.com/](http://www.fosterandpartners.com/): <http://www.fosterandpartners.com/projects/smithsonian-institution/>
23. Geuder, T. (2015, Jun 10). *Gestaltsucher und Gestaltfinder*. Ανάκτηση από [www.german-architects.com/](http://www.german-architects.com/): [http://www.german-architects.com/pages/meldungen/201524\\_Gestaltsucher-und-Gestaltfinder](http://www.german-architects.com/pages/meldungen/201524_Gestaltsucher-und-Gestaltfinder)
24. Helmcke, J. G., Kull, U., & Bach, K. (2004). *IL 38: Diatomeen 2 (Shells in nature and technics III)*. Stuttgart: Karl Krämer.
25. ICD, University of Stuttgart. (2016). *ICD: Team*. Ανάκτηση από Institute for Computational Design: <http://icd.uni-stuttgart.de/?cat=20>
26. ICD/ITKE. (2016). *New International M.Sc. Programme: ITECH*. Ανάκτηση από ICD: Institute for Computational Design: <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=6111>
27. ILEK. (2016). *ILEK: Home*. Ανάκτηση από ILEK: Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design: <http://www.uni-stuttgart.de/ilek/>
28. Institute for Computational Design. (n.d.). *3D Printed Hygroscopic Programmable Material Systems*. Ανάκτηση Apr 13, 2016, από [icd.uni-stuttgart.de](http://icd.uni-stuttgart.de): <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=11933>
29. Institute for Computational Design. (n.d.). *Biomimetic Responsive Surface Structures*. Ανάκτηση Apr 13, 2016, από [icd.uni-stuttgart.de](http://icd.uni-stuttgart.de): <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=5655>
30. Institute for Computational Design. (n.d.). *HygroScope: Meteorosensitive Morphology*. Ανάκτηση Apr 13, 2016, από [icd.uni-stuttgart.de](http://icd.uni-stuttgart.de): <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=7291>

Η Συμβολή του Frei Otto στην Εύρεση (της) Μορφής και στη Σύγχρονη Μορφογένεση

31. Institute for Computational Design. (n.d.). *HygroSkin: Meteorosensitive Pavilion*. Ανάκτηση Apr 13, 2016, από [icd.uni-stuttgart.de](http://icd.uni-stuttgart.de): <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=9869>
32. Institute for Computational Design. (n.d.). *ICD/ITKE Research Pavilion 2010*. Ανάκτηση Apr 13, 2016, από [icd.uni-stuttgart.de](http://icd.uni-stuttgart.de): <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=4458>
33. Institute for Computational Design. (n.d.). *ICD/ITKE Research Pavilion 2011*. Ανάκτηση Apr 13, 2016, από [icd.uni-stuttgart.de](http://icd.uni-stuttgart.de): <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=6553>
34. Institute for Computational Design. (n.d.). *ICD/ITKE Research Pavilion 2012*. Ανάκτηση Apr 13, 2016, από [icd.uni-stuttgart.de](http://icd.uni-stuttgart.de): <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=8807>
35. Institute for Computational Design. (n.d.). *ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14*. Ανάκτηση Apr 13, 2016, από [icd.uni-stuttgart.de](http://icd.uni-stuttgart.de): <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=11187>
36. Institute for Computational Design. (n.d.). *ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15*. Ανάκτηση Apr 13, 2016, από [icd.uni-stuttgart.de](http://icd.uni-stuttgart.de): <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=12965>
37. ITKE, University of Stuttgart. (2016). *ITKE*. Ανάκτηση από ITKE: Team: <http://www.itke.uni-stuttgart.de/mitarbeiter.php?lang=en>
38. Krause, T. (2013, Jul). *Multihalle 1975 Mannheim, Germany Frei Otto*. Ανάκτηση από [www.flickr.com](http://www.flickr.com): <https://www.flickr.com/photos/tatsuya-krause/10332813266/in/photolist-gK5noS-6SxTDo-85RHbn-gK5p33-gK68Mt-4tzp5r-78NpWP-79is8s-8c63PP-aqDcyv-79eDs6-8c63HR-4vDQE9-6xTaqJ-6xTaxW-8c641n-6xP2Dp-6xTauU-8eRgrg-85U87V-5TcBfY-8eRxEv-6xTakd-6StNXK-8eRxET-86195E-6xT>
39. Leach, N., Turnbull, D., & Williams, C. (2004). *Digital Tectonics*. Wiley.
40. Lieberwirth, R. (2011, Sep 24). *Form and Function*. Ανάκτηση από [www.flickr.com](http://www.flickr.com): <https://www.flickr.com/photos/lanier67/6186064849/in/photolist-aqDcyv-79eDs6-8c63HR-4vDQE9-6xTaqJ-6xTaxW-8c641n-6xP2Dp-6xTauU-8eRgrg-85U87V-5TcBfY-8eRxEv-6xTakd-6StNXK-8eRxET-86195E-6xTafw-6xP2FB-6xP2uK-6SxRY3-8eRxEX-6xTaiJ-8eRgra-8eRxEV-8eRgqZ-6SxT7C-8eR>
41. Menges, A. (2012, 02). Material Resourcefulness: Activating Material Information in Computational Design. *Architectural Design: Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design*, σσ. 34-43.
42. Menges, A. (2015, September/October). The New Cyber-Physical Making in Architecture: Computational Construction. *Architectural Design: Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational*, σσ. 28-33.
43. Menges, A. (n.d.). *FAZ Pavilion Frankfurt*. Ανάκτηση Apr 13, 2016, από [www.achimmenges.net](http://www.achimmenges.net): <http://www.achimmenges.net/?p=4967>
44. Menges, A., & Reichert, S. (2012). Material Capacity: Embedded Responsiveness. *Architectural Design: Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design*, σσ. 52-59.

45. Menges, A., & Reichert, S. (2015). Performative Wood: Physically Programming the Responsive Architecture of the HygroScope and HygroSkin Projects. *Architectural Design: Material Synthesis Fusing the Physical and the Computational*, σσ. 66-73.
46. Miki, O. (n.d.). *Thunder Chania*. Ανάκτηση από 500px.com/: <https://500px.com/photo/87495523/thunder-chania-by-orestis-miki>
47. NASA. (n.d.). *NASA Goddard Space Flight Center*. Ανάκτηση από [www.flickr.com](http://www.flickr.com): <https://www.flickr.com/photos/gsfcc>
48. Otto, F. (1990). *IL 33: Radiolaria (Shells in nature and technics II)*. Stuttgart: Karl Krämer.
49. Otto, F. (1994). *IL 37: Ancient architects*. Stuttgart: Karl Krämer.
50. Otto, F., & Rasch, B. (1996). *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. Edition Axel Menges.
51. Otto, F., & Schaur, E. (1979). *IL 21: Form Force Mass 1 – Basics*. Stuttgart, West-Germany: Institut für leichte Flächentragwerke (IL).
52. Otto, F., & Schleyer, F.-K. (1966). *Zugbeanspruchte Konstruktionen: Gestalt, Struktur und Berechnung von Bauten aus Seilen, Netzen und Membranen*. Berlin, Frankfurt/M, Wien: Ullstein Fachverlag .
53. Otto, F., & Songel, J. (2010). *A Conversation with Frei Otto*. New York: Princeton Architectural Press.
54. Otto, F., Bach, K., & Schaur, E. (1977). *IL 9: Pneus in nature and technics*. Stuttgart: Karl Krämer.
55. Oxman, R. (2006, May). Theory and Design in the First Digital Age. *Design Studies* 27, σσ. 229-265.
56. *Pneumatic structure*. (2015). Ανάκτηση 10 26, 2015, από [britannica.com](http://www.britannica.com): <http://www.britannica.com/technology/pneumatic-structure>
57. Rankin, B. (2014, Dec 9). *Olympic Stadium: Block H*. Ανάκτηση από [www.flickr.com](http://www.flickr.com): <https://www.flickr.com/photos/rankinb/15855696360/in/photolist-qa7A8b-9WsNdY-gNgKyF-qrEpXB-qpoow3-fW3QDf-qrupMn-bXcRHb-8LXPRo-atK7FP-5N6u4S-pWmJVH-82gkZw-bAYL81-8DrSj9-eLfQZP-bPTqfe-puUyk8-pDRFCv-pDTfr5-pE9c4n-pVX2cx-7zaWmy-pVX27H-pWwugr-qadTpc-pDQxUC-61r>
58. Rasch, B. (1980). *IL 29: The tent cities of the Hajj*. Stuttgart: Institut für Leichte Flächentragwerke.
59. Reichert, S. (n.d.). *Responsive Surface Structure I*. Ανάκτηση Apr 13, 2016, από [www.achimmenges.net/](http://www.achimmenges.net/): <http://www.achimmenges.net/?p=4411>
60. Reichert, S. (n.d.). *Responsive Surface Structure II*. Ανάκτηση Apr 13, 2016, από [www.achimmenges.net](http://www.achimmenges.net/): <http://www.achimmenges.net/?p=4638>
61. Schaur, E., & Otto, F. (1992). *IL 39: Non-planned settlements*. Stuttgart: Karl Krämer.


Η Συμβολή του Frei Otto στην Εύρεση (της) Μορφής και στη Σύγχρονη Μορφογένεση

62. Schumacher, P. (2009). Parametricism. *Architectural Design: Digital Cities*, 14-23.
63. SCI-Arc Media Archive. (2006, 10 18). *Manuel De Landa, "Gilles Deleuze and Science"*. Ανάκτηση από SCI-Arc Media Archive: <http://sma.sciarc.edu/video/manuel-de-landa-gilles-deleuze-and-science/>
64. Serebryakova, K. (2006, 10 04). *Captivated by nature: Frei Otto, architect*. Ανάκτηση 04 07, 2015, από Universität Stuttgart: <http://www.uni-stuttgart.de/impulse/imp/alles.php?id=6&lang=en>
65. Shaw, D. (2013, May 25). *Damien Shaw: Olympic Stadium*. Ανάκτηση από [www.flickr.com](http://www.flickr.com/photos/damien_shaw/8881421622/in/photolist-ewPzPu-ewLme8-ewLkCp-ewPx8u-ewPAfJ-ewPzmd-ewPBe1-ewLrkZ-ewPvF5-ewLnUT-ewLonZ-ewLnYH-ewPxyh-ewPAwU-ewPCry-ewPDX5-ewPv8f-ewLiZc-ewPDKC): [https://www.flickr.com/photos/damien\\_shaw/8881421622/in/photolist-ewPzPu-ewLme8-ewLkCp-ewPx8u-ewPAfJ-ewPzmd-ewPBe1-ewLrkZ-ewPvF5-ewLnUT-ewLonZ-ewLnYH-ewPxyh-ewPAwU-ewPCry-ewPDX5-ewPv8f-ewLiZc-ewPDKC](https://www.flickr.com/photos/damien_shaw/8881421622/in/photolist-ewPzPu-ewLme8-ewLkCp-ewPx8u-ewPAfJ-ewPzmd-ewPBe1-ewLrkZ-ewPvF5-ewLnUT-ewLonZ-ewLnYH-ewPxyh-ewPAwU-ewPCry-ewPDX5-ewPv8f-ewLiZc-ewPDKC)
66. Spuybroek, L. (2004). *NOX: Machining Architecture*. Thames & Hudson.
67. Spuybroek, L. (2004). SoftOffice. Στο N. Leach, D. Turnbull, & C. Williams, *Digital Tectonics* (σσ. 50-61). Wiley.
68. Team Code Zero GS42R. (2014). ZAGA8790. Ανάκτηση από [www.flickr.com](http://www.flickr.com/photos/62060574@N05/23937468423/in/photolist-CYEYe3-CtgJqL-DosAg1-Dgc6nY-DqHcpr-CScpEp-CfbDsj-CSaGEF-CtgMoP-DqJbUM-DopCvC-DiumnR-CSfUKc-Dgbpvd-CSf25i-Ctm8gr-DqHHoe-CYAV7u-Dg9ka3-Diryv4-CSduQx-CtcLwC-CSn73v-DovWsh-CtfvWj-Doy8GC-DghBL): <https://www.flickr.com/photos/62060574@N05/23937468423/in/photolist-CYEYe3-CtgJqL-DosAg1-Dgc6nY-DqHcpr-CScpEp-CfbDsj-CSaGEF-CtgMoP-DqJbUM-DopCvC-DiumnR-CSfUKc-Dgbpvd-CSf25i-Ctm8gr-DqHHoe-CYAV7u-Dg9ka3-Diryv4-CSduQx-CtcLwC-CSn73v-DovWsh-CtfvWj-Doy8GC-DghBL>
69. Tomlow, J. (1989). *IL 34: The Model: Antoni Gaudi's hanging model and its reconstruction - New light on the design of the church of Colonia Guell*. Stuttgart, Federal Republic of Germany: Institut fur leichte Flachentragwerke (IL).
70. Uncube Magazine. (n.d.). *Magazine No. 33: Frei Otto*. Ανάκτηση Apr 08, 2016, από [www.uncubemagazine.com](http://www.uncubemagazine.com/magazine-33-15508949.html#!/page1): <http://www.uncubemagazine.com/magazine-33-15508949.html#!/page1>
71. Verein zur Förderung des Leichtbaus e.V. (n.d.). *LIST & PRICES*. Ανάκτηση March 08, 2016, από <http://www.leichtbauverein.de/>: <http://www.leichtbauverein.de/en/publications/list-prices/index.htm>
72. Wanda, J. L. (2003). *Tension Structures: Form and Behaviour*. Thomas Telford.
73. Warmbronn, A. F. (2015). *Biography*. Ανάκτηση 04 07, 2015, από Selected Works of Frei Otto and his Teams: <http://www.freiotto.com/FreiOtto%20ordner/FreiOtto/HauptseiteGross.html>
74. Whitehead, H., Peters, B., & Aish, F. (2006, March/April). SMG Foster and Partners, Specialist Modelling Group, Smithsonian Institute Courtyard Enclosure, Washington DC, 2004. *Architectural Design: Techniques and Technologies in Morphogenetic Design*, σσ. 48-49.
75. Wyatt, W. (2016, March 19). *Extended history of the J.S. Dorton Arena*. Ανάκτηση από North Carolina Department of Agriculture and Consumer Services: <http://www.ncstatefair.org/facilities/dortonhistory.htm>

76. 準建築人手札網站 Forgemind ArchiMedia. (2015, Apr 10). *Frei Otto - Roof for the Mannheim Multihalle 06*. Ανάκτηση από [www.flickr.com](https://www.flickr.com/photos/eager/16906814530/in/photolist-6SxRKh-8eRxEM-6StQRK-6StQqa-8eRgqV-6SxTiN-6SxSNb-6StQLi-6StQkR-6SxRsJ-6StPu4-6StPRZ-6SxSaJ-6SxTcm-6SuiJF-6StQWg-6StQgX-6StQ7D-6SymkS-6SxSwE-6SxRnQ-6SxS4A-6SxSj7-6StPDn-6StNui-6StNAX-6SxRDS-6SxRN):  
<https://www.flickr.com/photos/eager/16906814530/in/photolist-6SxRKh-8eRxEM-6StQRK-6StQqa-8eRgqV-6SxTiN-6SxSNb-6StQLi-6StQkR-6SxRsJ-6StPu4-6StPRZ-6SxSaJ-6SxTcm-6SuiJF-6StQWg-6StQgX-6StQ7D-6SymkS-6SxSwE-6SxRnQ-6SxS4A-6SxSj7-6StPDn-6StNui-6StNAX-6SxRDS-6SxRN>







Η ανάγκη για πιο φυσικές και οικολογικές κατασκευές οδήγησε τον Frei Otto στην ανάπτυξη σπουδαίων μεθοδολογιών για τον σχεδιασμό ελαφριών κατασκευών που λειτουργούν ως στέγαστρα, κελύφη και κτίρια. Η εργασία ακολουθεί το έργο του Otto, εστιάζει στις πιο σημαντικές μεθόδους εύρεσης μορφής και παρουσιάζει τον τρόπο που λειτουργούν. Παράλληλα αναφέρει τα σημαντικότερα έργα που έχουν προκύψει από κάθε μεθοδολογία καθώς και τον τρόπο με τον οποίο η μορφή του εκάστοτε φυσικού μοντέλου μεταμορφώνεται σχεδιαστικά στην αντίστοιχη κατασκευή. Επιπλέον αναφέρονται και οι περιπτώσεις που τα μοντέλα λειτούργησαν διερευνητικά για την επεξήγηση διαφόρων φυσικών δομών. Έπειτα επιχειρείται η σύνδεση με την σύγχρονη εποχή. Πρώτα παρουσιάζεται η θεωρία της μορφογένεσης ενώ αναφέρεται η σχέση της με τη μεθοδολογία του Otto και στη συνέχεια εντοπίζονται οι αρχιτέκτονες που χρησιμοποιούν κάποιο από τα μορφογενετικά μοντέλα του Otto ως το βασικό σχεδιαστικό εργαλείο τους. Τέλος, γίνεται ειδική αναφορά στο material computation και στο computational design τα οποία αποτελούν μια πρωτοποριακή μεθοδολογία σχεδιασμού που εμπεριέχει πολλά κοινά με τις μεθόδους form-finding του Otto.