

Εκτατικές Δομές: Από την Έρευνα στην Κατασκευή

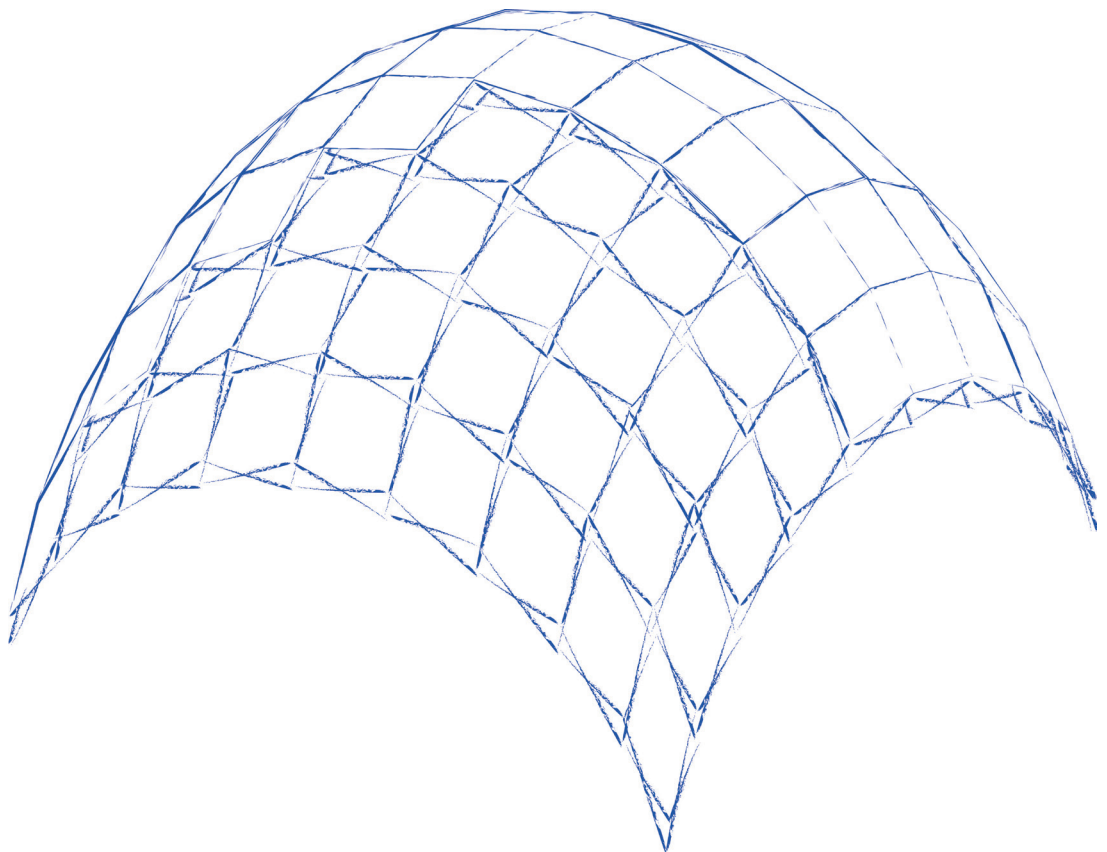
Deployable Structures:
From Research to Construction

Διπλωματική Εργασία, Μάρτιος 2017

Σπουδαστική ομάδα:
Περιγιάννης Αναστάσιος
Σαββοπούλου Ευαγγελία

Επιβλέπων καθηγητής:
Παπαβασιλείου Ματθαίος

Σύμβουλοι καθηγητές:
Καραδήμας Κωνσταντίνος
Μιλτιάδου Ανδρονίκη



Περιεχόμενα

Εισαγωγή	4
Κεφάλαιο 1: Έρευνα συστημάτων εκτατικών δομών	
1.1 Αναζητώντας το άμεσο	8
1.2 Εκτατικές δομές	9
1.3 Σύγχρονες εκτατικές δομές	10
1.3.1 Γεωδαιτικός θόλος	12
1.3.2 Tensegrity	14
1.3.3 Εφελκούμενες μεμβράνες	18
1.3.4 Μηχανικά αναδιπλούμενες δομές	24
Κεφάλαιο 2: Σχεδιασμός συστήματος - Εύρεση γεωμετρίας	
2.1 Αρχές σχεδιασμού	40
2.2 Διαδικασία σχεδιασμού	42
2.3 Συνολική γεωμετρία	45
2.4 Κινητική συμπεριφορά της γεωμετρίας	46
2.5 Παραμετροποίηση γεωμετρικών αρχών	48
2.6 Προκύπτουσες γεωμετρίες	50
Κεφάλαιο 3: Σχεδιασμός της τελικής κατασκευής	
3.1 Ράβδοι	54
3.2 Κόμβοι	56
3.3 Τροχαλίες	60
3.4 Θεμέλια	64
3.5 Μεμβράνες	66
3.6 Αξονομετρικό κλειστής και ανοιχτής κατάστασης της κατασκευής	70
3.7 Διαδικασία ανέγερσης	71
3.8 Παραδείγματα τοποθέτησης της κατασκευής σε διαφορετικούς τόπους και με διαφορετικές λειτουργίες	72
Παράρτημα	75
Βιβλιογραφία	82

Εισαγωγή

Αφορμή για την παρούσα διπλωματική εργασία αποτέλεσε η διερεύνηση της άμεσης και εφήμερης αρχιτεκτονικής σε σχέση με το σύγχρονο τρόπο ζωής. Η ανάγκη για προσαρμογή στις συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες καθώς και η ανάγκη του ανθρώπου να “κινείται”, να είναι δραστήριος, δημιουργικός, να επικοινωνεί, δημιουργώντας “κοινούς τόπους” και εμπειρίες με άλλους ανθρώπους, έπαιξαν καθοριστικό ρόλο για την έρευνα και τον προσδιορισμό του τελικού αποτελέσματος.

Στόχο αποτέλεσε, όχι η δημιουργία μιας κατασκευής που θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις μιας συγκεκριμένης λειτουργίας, αλλά μιας κατασκευής με λειτουργική και κατασκευαστική μορφή ικανή να ανταποκριθεί σε ένα μεγάλο εύρος αναγκών και λειτουργιών. Έτσι, σχεδιάστηκε μια δομή που μπορεί να ικανοποιήσει τις χωρικές συνθήκες που απαιτούνται για διάφορες συλλογικές δραστηριότητες, τόσο σε αστικό όσο και σε εξωαστικό περιβάλλον. Παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων είναι η κάλυψη έκτακτων αναγκών που προκύπτουν από φυσικές ή άλλες καταστροφές, ο περιοδικός αστικός εξοπλισμός, αλλά και διάφορες συλλογικές δραστηριότητες, οποιασδήποτε θεματολογίας, στις οποίες ένας αριθμός ανθρώπων συγκεντρώνεται με σκοπό να λάβει μέρος σε μια δραστηριότητα.

Οι βασικοί παράγοντες για το σχεδιασμό ήταν η ταχύτητα ανέγερσης της κατασκευής που θα προκύψει, η αναστρεψιμότητά της, αφού πρόκειται για μια εφήμερη δομή, και η δυνατότητα προσαρμογής της σε διαφορετικές τοποθεσίες. Κατά συνέπεια, δίνεται μεγάλη έμφαση στα υλικά και στο δομικό σύστημα που θα χρησιμοποιηθεί προκειμένου να υποστηρίζονται οι παραπάνω συνθήκες.

Ο τρόπος με τον οποίο διορθώθηκε η παρούσα διπλωματική χωρίζεται σε τρία στάδια.

Το πρώτο στάδιο αποτέλεσε η έρευνα πάνω στις εκτατικές δομές, καθώς τέτοιου είδους κατασκευές ανταποκρίνονται στην πλειοψηφία των παραμέτρων που είχαν τεθεί εξαρχής. Αντικείμενο της έρευνας αποτέλεσαν κυρίως οι κατασκευές tensegrity, οι κατασκευές από εφελκόμενες μεμβράνες και οι ψαλιδωτές κατασκευές.

Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την κριτική ανάλυση των στοιχείων που συγκεντρώθηκαν από τα παραπάνω συστήματα και την επιλογή των στοιχείων που θα συμβάλλουν στη δημιουργία της τελικής κατασκευής. Κύρια βάση αποτέλεσε το σύστημα του ψαλιδιού, καθώς στη συνέχεια αναπτύχθηκε μια σύνθετη γεωμετρία από ψαλίδια η οποία αποτέλεσε και την τελική πρόταση. Στο στάδιο αυτό, εκτός από τη δημιουργία της κατασκευής (πτυσσόμενος θόλος με τετράγωνη κάτοψη), επιτεύχθηκε ακόμη η παραμετροποίηση του γεωμετρικού συστήματος που χρησιμοποιήθηκε μέσω grasshopper, έτσι ώστε να είναι δυνατό να προκύπτουν διάφορες γεωμετρικές παραλλαγές. Αυτό μπορεί να αποτελέσει την αφετηρία προς μια νέα κατεύθυνση, καθώς δίνεται η δυνατότητα για ένα περισσότερο προσεγγισμένο πεδίο σχεδιασμού στα πλαίσια του D.I.Y..

Το τρίτο στάδιο περιλαμβάνει την υλοποίηση ενός προπλάσματος σε κλίμακα 1:3 από το υλικό της πραγματικής κατασκευής (αλουμίνιο). Στόχος ήταν η παρατήρηση σε μια κλίμακα κοντά στην πραγματικότητα των δυνατοτήτων του υλικού, του τρόπου λειτουργίας του συστήματος, αλλά και τυχόν αστοχιών που δύσκολα γίνονται αντιληπτές μόνο από τα σχέδια. Με τον τρόπο αυτό επιχειρήθηκε μια ολοκληρωμένη πορεία από την έρευνα μέχρι την υλοποίηση της κατασκευής.

Κεφάλαιο 1

Έρευνα συστημάτων εκτατικών δομών

1.1 Αναζητώντας το άμεσο



Αφετηρία της παρούσας διπλωματικής εργασίας υπήρξε η παρατήρηση πως στη σύγχρονη εποχή εμφανίζεται συχνά η ανάγκη για άμεση παραγωγή χώρου, ικανού να καλύψει μια λειτουργία και να στεγάσει έναν αριθμό ανθρώπων με εφήμερο τρόπο. Είτε πρόκειται για μια έκτακτη ανάγκη, είτε για ένα αστικό δρώμενο, είτε ακόμη και για οποιαδήποτε συλλογική δραστηριότητα σε αστικό ή εξωαστικό περιβάλλον, κατασκευές μικρής ή μεσαίας κλίμακας καλούνται να "φιλοξενήσουν" την εκάστοτε λειτουργία με τρόπο που να ανταποκρίνεται στον εφήμερο χαρακτήρα της. Η διάρκεια ζωής μια τέτοιας κατασκευής μπορεί να ποικίλει από μερικές ώρες μέχρι μερικούς μήνες. Ποτέ όμως δεν συναγωνίζεται σε διάρκεια τις συμβατικές κατασκευές που ικανοποιούν τις πιο μόνιμες εξ' ορισμού λειτουργίες. Είναι επομένως λογική η στροφή σε κατασκευές και δομικά συστήματα που βρίσκονται εκτός των ορίων που έχει συνηθίσει να κινείται η "σκληρή" και περισσότερο μόνιμη αρχιτεκτονική. Στόχος ήταν η δημιουργία μιας κατασκευής που θα έχει τη δυνατότητα να ανταποκρίνεται σε ένα πλήθος εφήμερων αναγκών που μπορεί να προκύψουν, με τρόπο αναστρέψιμο.



Έκτακτες ανάγκες



Περιοδικός
αστικός εξοπλισμός



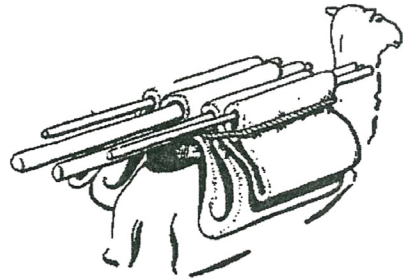
Συλλογικές
δραστηριότητες

1.2 Εκτατικές δομές

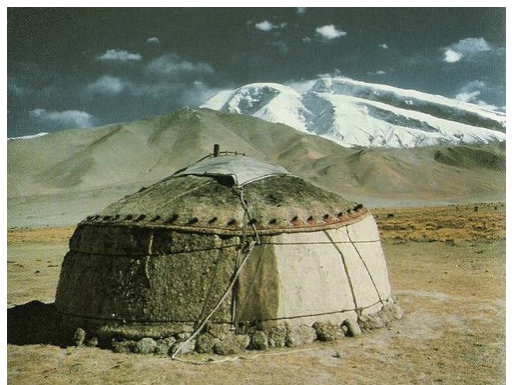
Η πλειοψηφία των κατασκευών που μελετήθηκαν προκειμένου να σχεδιαστεί η τελική κατασκευή ανήκουν στην κατηγορία των εκτατικών δομών. Εκτατικές δομές ορίζονται ως οι κατασκευές που έχουν τη δυνατότητα να μεταβαίνουν από μια κλειστή, συμπαγή κατάσταση σε μια ανοιχτή, διευρυμένη μορφή με άμεσο τρόπο. Τέτοιου είδους κατασκευές συναντώνται συχνά στην ιστορία, καθώς χρησιμοποιούνταν ευρέως από νομαδικές φυλές. Λόγω του μικρού τους βάρους μεταφέρονταν εύκολα από ζώα ενώ μπορούσαν να στηθούν μέσα σε λίγη ώρα χάρη στο ιδιαίτερο δομικό σύστημα της κάθε κατασκευής.



Black Tent, Μεσοποταμία



Τίπι, Βόρεια Αμερική



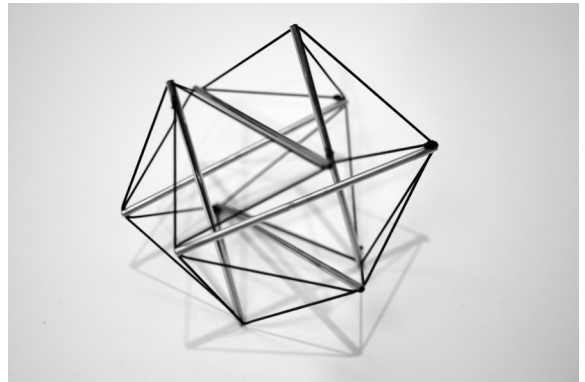
Yurt, Ασία

1.3 Σύγχρονες εκτατικές δομές

Στη σημερινή εποχή, όπου η κατοικία έχει πλέον μόνιμο χαρακτήρα, οι εκτατικές δομές δεν είναι οι κατάλληλες για να στεγάσουν αυτή τη λειτουργία. Συναντώνται όμως σε άλλου είδους περιπτώσεις, καλύπτοντας και πάλι ανάγκες με εφήμερο χαρακτήρα. Τα νέα υλικά, όπως τα μέταλλα, οι μεμβράνες, τα εφελκόμενα καλώδια αλλά και η τυποποίηση των μερών της κατασκευής που προσφέρει η βιομηχανοποίηση της παραγωγής, έχουν δώσει ένα νέο χαρακτήρα στις εκτατικές δομές. Μέσα από τις νέες δυνατότητες των υλικών, τα δομικά συστήματα των εκτατικών δομών εξελίσσονται και παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η μελέτη των συστημάτων των συνηθέστερων εκτατικών δομών οδήγησε στην κατανόηση του τρόπου λειτουργίας τους και των κανόνων που τα διέπουν, όπως και η επιλογή των στοιχείων που θα μπορούσαν να αποτελέσουν εργαλείο για τη σχεδίαση της κατασκευής που έχει τεθεί ως τελικός στόχος.



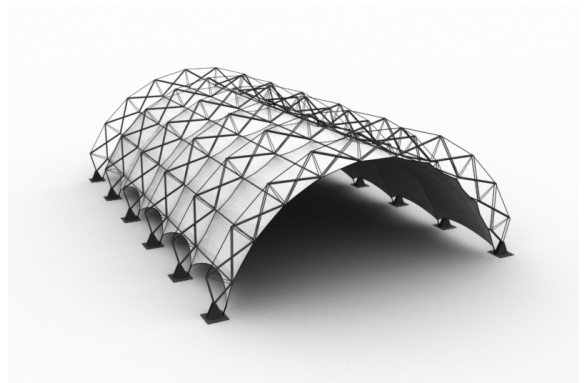
Γεωδαιτικός θόλος



Tensegrity

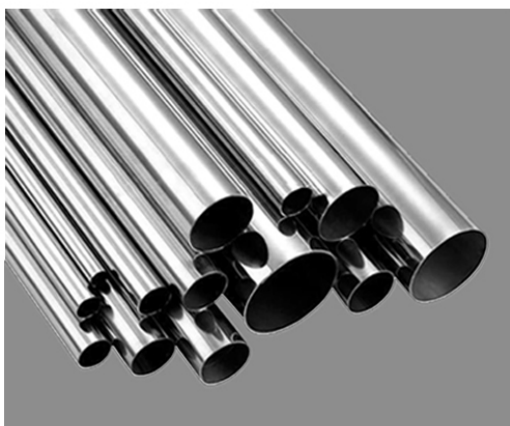


Εφελκόμενες μεμβράνες



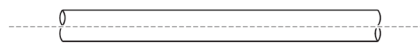
Αρθρωτές κατασκευές

Νέα υλικά



1.3.1 Γεωδαιτικός θόλος

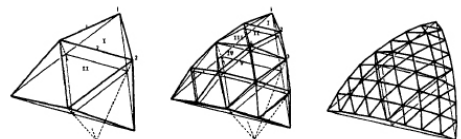
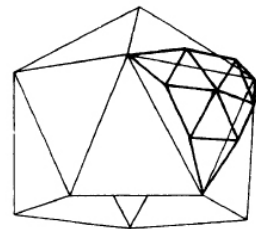
Ο γεωδαιτικός θόλος είναι ένα σύστημα που μελετήθηκε και έγινε ευρέως γνωστό από τον αρχιτέκτονα Richard Buckminster Fuller μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Το πιο γνωστό έργο του είναι το περίπτερο των Ηνωμένων Πολιτειών στην ΕΧΡΟ του Montreal το 1967. Η γεωμετρία της κατασκευής βασίζεται στο πλατωνικό εικοσάεδρο, οι τριγωνικές επιφάνειες του οποίου υποδιαιρούνται σταδιακά σε μικρότερα τρίγωνα προσεγγίζοντας τη σφαίρα. Τα δομικά του στοιχεία είναι ευθύγραμμες ράβδοι, στις οποίες αναπτύσσονται πάντοτε αξονικές δυνάμεις, είτε θλιπτικές είτε εφελκυστικές. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία μιας αυτοφερόμενης δομής με πεντάγωνα και εξάγωνα που καλύπτει τη μέγιστη δυνατή επιφάνεια με το ελάχιστο δυνατό υλικό που απαιτείται.



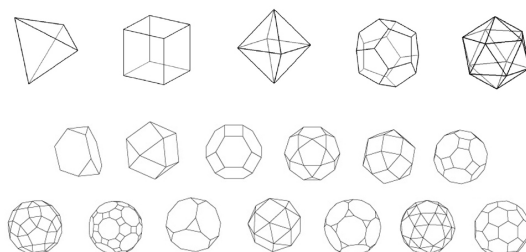
αξονικές δυνάμεις



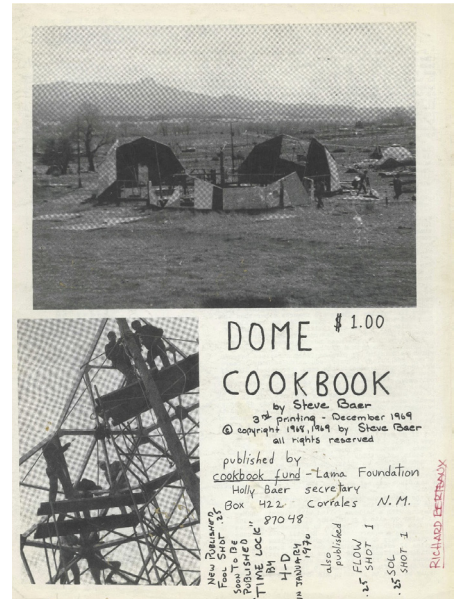
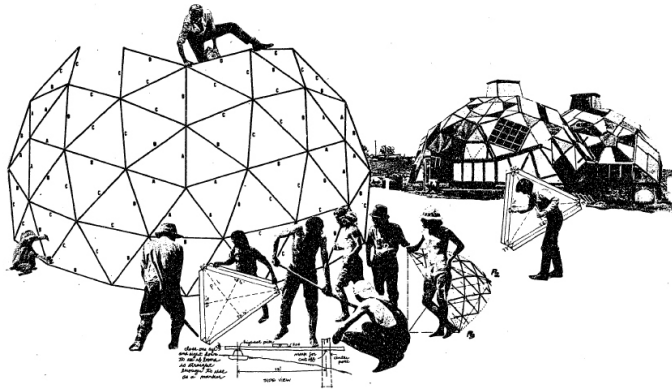
Buckminster Fuller, περίπτερο Ηνωμένων Πολιτειών της ΕΧΡΟ ΤΟΥ 1967, Μόντρεαλ



Διαδικασία σταδιακής υποδιαίρεσης τριγωνικών επιφανειών με αρχή το εικοσάεδρο



Πλατωνικά και Αρχιμήδεια πολύεδρα



Steve Baer, Dome Cookbook, 1970

Είναι σημαντικό να αναφερθεί η επιρροή του συστήματος του γεωδαιτικού θόλου σε μια ομάδα ανθρώπων που το 1967 αποφάσισαν να αφήσουν πίσω τους την αγχώδη καθημερινότητα των αστικών κέντρων, επιλέγοντας έναν πιο φυσικό τρόπο ζωής. Οι πρώτοι κάτοικοι του Drop City αντέγραψαν και κατοίκησαν ένα γεωδαιτικό θόλο, θεωρώντας πως η κατασκευή αυτή, τόσο ως μορφή όσο και ως τρόπος δόμησης θα μπορούσε να αποτελέσει ένα σύμβολο της νέας αντισυμβατικής κοινωνίας που οραματίζονταν. Με ευτελή υλικά έφτιαξαν τις πρώτες τους κατοικίες βασισμένες στο γεωδαιτικό θόλο και σε άλλα γεωμετρικά στερεά. Με την έκδοση του βιβλίου Dome Cookbook του Steve Baer το 1970, η πατέντα του γεωδαιτικού θόλου διαμοιράστηκε σε μεγαλύτερο αριθμό ατόμων, οι οποίοι άρχισαν να πειραματίζονται με ακόμη περισσότερα υλικά και μορφές. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό και για την προσέγγιση της συγκεκριμένης έρευνας, το δομικό σύστημα που τελικά θα σχεδιαστεί να μην είναι κλειστό και απόλυτο. Αντίθετα, είναι επιθυμητό να δίνει αυτήν ακριβώς τη δυνατότητα που έδωσε ο γεωδαιτικός θόλος στον καθένα να το παραλλάξει και να το μεταμορφώσει σε όποια κλίμακα ή μορφή επιθυμεί, θεωρώντας πως η γνώση πρέπει να είναι ανοιχτή, να διαμοιράζεται και να ενισχύεται η αντίληψη της εξατομίκευσης και του Do It Yourself.



Drop City, 1965-1970, Κολοράντο

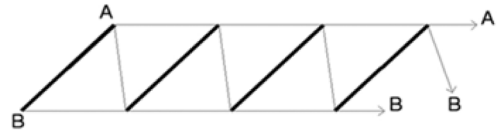
1.3.2 Tensegrity (tensional+integrity)

Βασική ιδέα:

Συνεχής εφελκυσμός - Μη συνεχής θλίψη



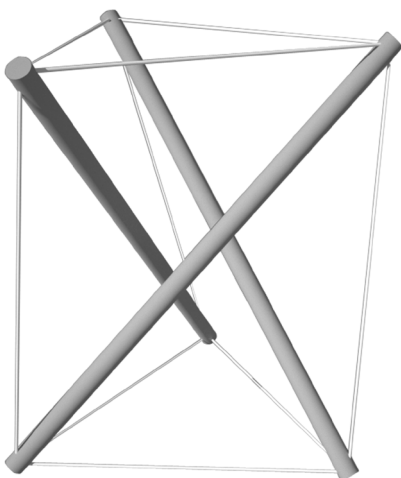
Εφελκυσμός - Θλίψη



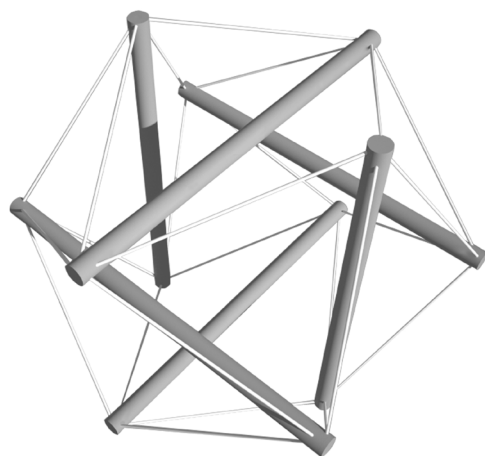
Σύνδεση των στοιχείων της μονάδας (τριγωνικό αντιπρίσμα)

Η ετυμολογία του όρου tensegrity συνίσταται από τη σύμπτυξη των αγγλικών λέξεων tension (ένταση) και integrity (ακεραιότητα) και αναφέρεται σε συστήματα τα οποία εξασφαλίζουν τη δομική τους ακεραιότητα μέσω του εφελκυσμού. Τα tensegrity συστήματα αποτελούνται από διακριτά θλιβόμενα στελέχη (ράβδοι) που αναρτώνται σε ένα συνεχές δίκτυο προεντεταμένων τενόντων (καλώδια), ώστε να δημιουργηθεί μια ευσταθής και ακέραια κατασκευή στο χώρο. Η αυτό-ισορροπία και η σταθερότητα εκφράζουν την αρχική μηχανική κατάσταση του συστήματος πριν από κάθε φόρτιση, ακόμα και τη βαρυτική. Η ισορροπία εξασφαλίζεται μέσω της προέντασης των εφελκυσμένων στοιχείων, καθώς το άθροισμα των θλιπτικών και των εφελκυστικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στο σύστημα είναι μηδενικό. Ο τρόπος με τον οποίο τα μέλη είναι διατεταγμένα επιτυγχάνουν μέγιστα ποσοστά αντοχής με μειωμένη μάζα.

Οι δύο βασικές κατηγορίες tensegrity

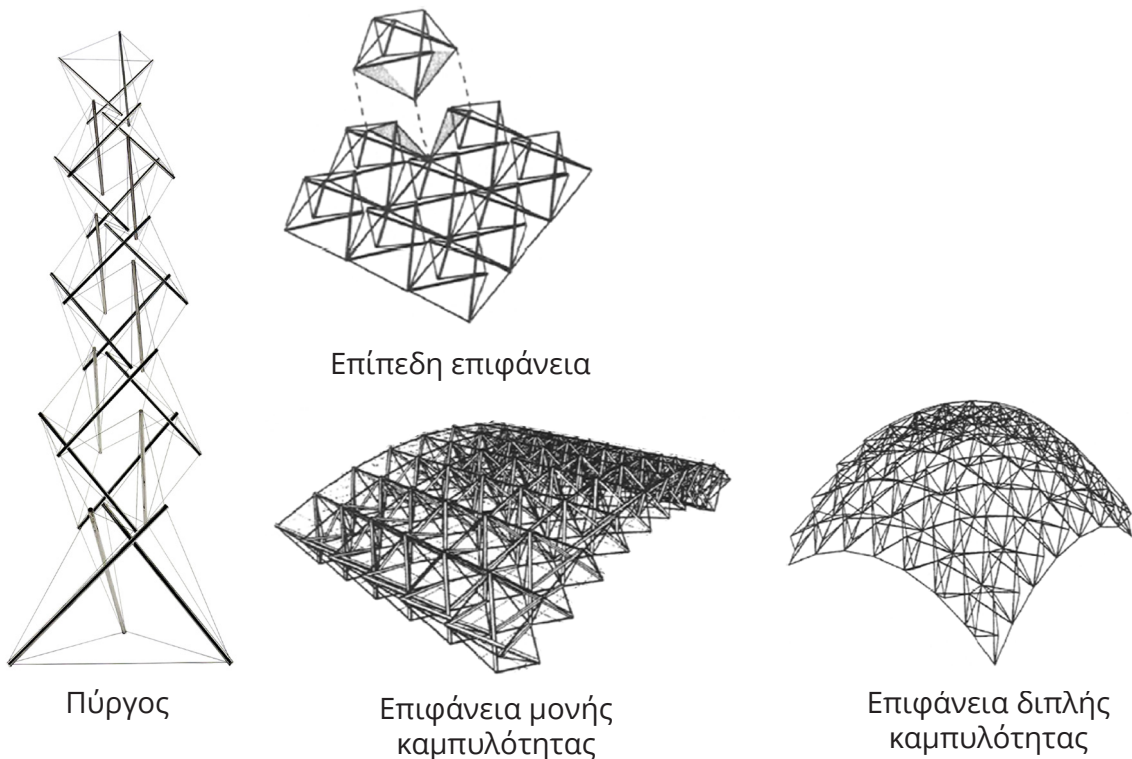


Tensegrity μονάδα
τριγωνικό αντιπρίσμα



Tensegrity μονάδα βασισμένη στο
πλατωνικό εικοσάεδρο

Γεωμετρίες που προκύπτουν από την ένωση tensegrity μονάδων

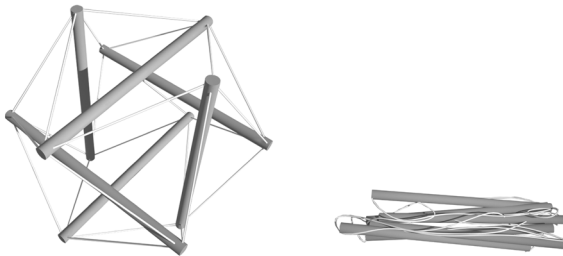


Η μορφή των tensegrities προκύπτει από τη στατική και δυναμική ισορροπία μεταξύ ράβδων και τενόντων. Επομένως, η σταθερότητα των tensegrity συστημάτων επιτυγχάνεται μόνο μέσω της αυστηρής αντιστοιχίας μιας γεωμετρίας και μιας κατάστασης στατικής αυτό-ισορροπίας. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για την εύρεση της μορφής των tensegrity συστημάτων είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

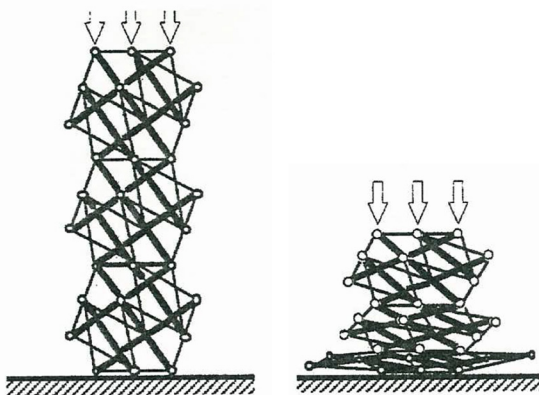
Η γεωμετρία των tensegrity μονάδων προσεγγίζει συνήθως τη γεωμετρία της σφαίρας. Διακρίνονται δύο βασικές κατηγορίες: τα πολύεδρα και τα αντιπρίσματα. Και οι δύο κατηγορίες διέπονται από πολύ αυστηρούς γεωμετρικούς κανόνες προκειμένου να εξασφαλίζεται η ισορροπία και η σταθερότητα του τελικού σχήματος. Από τη συναρμολόγηση των μονάδων μπορούν να προκύψουν επιφάνειες επίπεδες, μονής καμπυλότητας ή διπλής καμπυλότητας. Μπορούν όμως και να υιοθετήσουν πιο πολύπλοκα σχήματα που προκύπτουν από το συνδυασμό, τη σύνδεση και την παραλλαγή αναγνωρίσιμων μονάδων. Η συναρμολόγηση των μονάδων μπορεί να γίνει είτε με μονοδιάστατο τρόπο (ένας υπερισχύον άξονας που καθορίζει τη γεωμετρία της κατασκευής), είτε με δυσδιάστατο τρόπο (ράβδος σε καλώδιο, σημείο με σημείο).

Δυνατότητα αναδίπλωσης των tensegrities

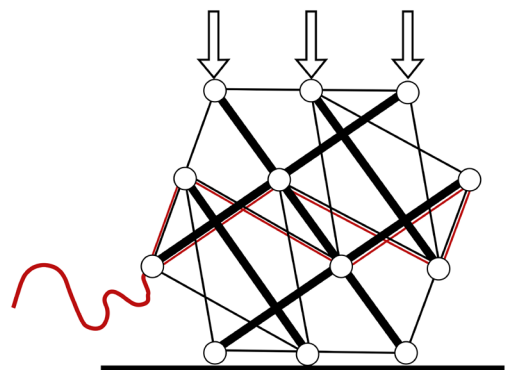
Τα tensegrity συστήματα έχουν τη δυνατότητα να αναδιπλώνονται με μεταβολή του μήκους των θλιβόμενων ή/και των εφελκυσόμενων στοιχείων τους. Στην περίπτωση της αλλαγής του μήκους των ράβδων, χρησιμοποιούνται τηλεσκοπικές ράβδοι και το μέγεθος της συμπαγούς κατάστασης της κατασκευής προκύπτει από το ελάχιστο μήκος των ράβδων. Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι κατά τη διαδικασία του ξεδιπλώματος είναι πιθανό να προκύψει αδιέξοδο “μπέρδεμα” των καλωδίων. Στην περίπτωση της αλλαγής του μήκους των καλωδίων, επιλέγεται ένα συνεχόμενο καλώδιο που ονομάζεται active cable και το οποίο περνάει από ένα και μόνο σημείο κάθε ράβδου και έχει τη δυνατότητα να διπλώσει το σύστημα σε μια δυσδιάστατη επιφάνεια, επιδιώκοντας τη μικρότερη δυνατή που επιτρέπει η γεωμετρία. Η θεωρία γραφημάτων βοηθά στην αναπαράσταση ενός tensegrity συστήματος και στην εύρεση της κατάλληλης διαδρομής του active cable. Συνήθως η διαδικασία αυτή απαιτεί την προσθήκη επιπλέον καλωδίων. Για να διπλώσει η κατασκευή, αρκεί να τραβήξει κανείς το active cable από τη μια άκρη του.



Αναδίπλωση tensegrity συστήματος μέσω της μεταβολής του μήκους των ράβδων

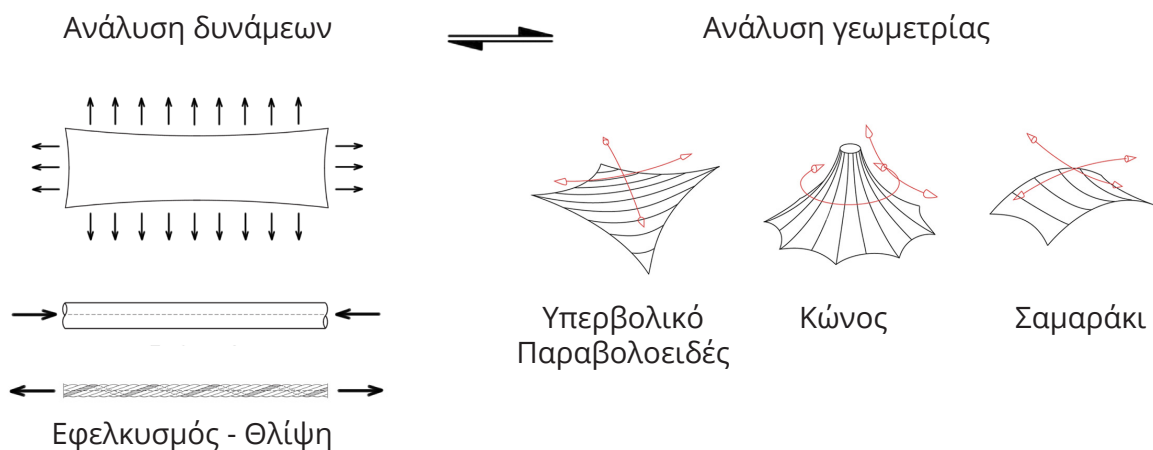


Αναδίπλωση tensegrity συστήματος μέσω της μεταβολής του μήκους των καλωδίων



Διαδρομή “ενεργού καλωδίου”

1.3.3 Εφελκυόμενες μεμβράνες



Οι κατασκευές από εφελκυόμενες μεμβράνες αποτελούνται από το κύριο υλικό, που είναι η μεμβράνη, και έναν υποστηρικτικό σκελετό, ο οποίος αποτελείται από τόξα ή στύλους. Τις περισσότερες φορές είναι απαραίτητη και η χρήση προεντεταμένων καλωδίων. Οποιαδήποτε προεντεταμένη επιφάνεια μεμβράνης χαρακτηρίζεται από την άμεση αλληλεπίδραση ανάμεσα στη μορφή και στη δομή. Η δομική ακεραιότητα του συστήματος εξασφαλίζεται από τη γεωμετρία της μεμβράνης σε συνδυασμό με την κατανομή των δυνάμεων στα στοιχεία της κατασκευής.

Γεωμετρία

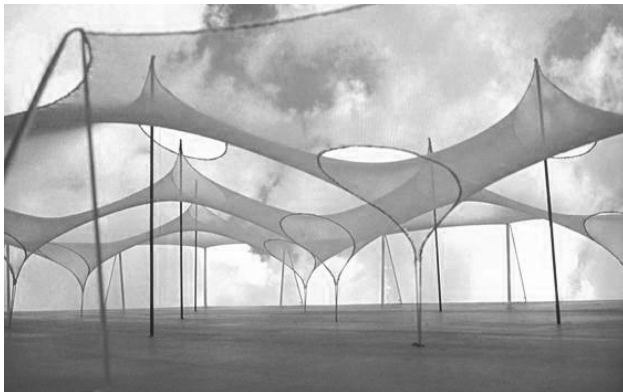
Η βασική αρχή σχεδιασμού της γεωμετρίας μιας κατασκευής από εφελκυόμενη μεμβράνη είναι ότι το ύφασμα πρέπει να είναι καμπυλωμένο, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ακαμψία της. Οι εφελκυόμενες μεμβράνες συνήθως σχηματίζουν αντικλαστικές επιφάνειες. Αυτό σημαίνει ότι τα κέντρα των ακτινών των δύο κύριων καμπυλοτήτων της γεωμετρίας της μεμβράνης βρίσκονται σε διαφορετικές πλευρές, όπως στον κώνο, το σαμαράκι και το υπερβολικό παραβολοειδές. Οι αντίθετες κατευθυντήριες δυνάμεις που εισάγονται στο ύφασμα από την προένταση και στις δύο κατευθύνσεις αντισταθμίζουν η μια την άλλη.

Δυνάμεις

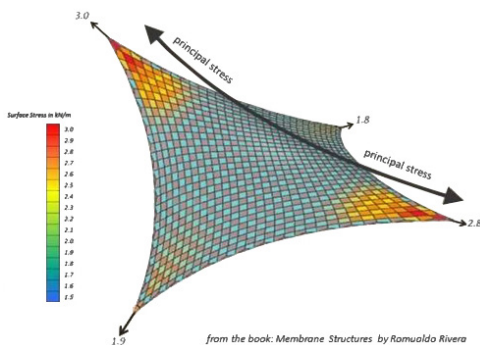
Η στατική λειτουργία των κατασκευών αυτών χαρακτηρίζεται από την ισορροπία των δυνάμεων θλίψης και εφελκυσμού που αναπτύσσονται στο σύστημα και από τον σαφή διαχωρισμό των στοιχείων που καλούνται να παραλάβουν τις δυνάμεις αυτές. Συνεπώς, η θλίψη παρουσιάζεται στα στοιχεία στήριξης της κατασκευής (τόξα και στύλοι), ενώ ο εφελκυσμός αναπτύσσεται στην επιφάνεια της μεμβράνης και στα καλώδια. Απαραίτητη είναι η προένταση των μεμβρανών προκειμένου να δημιουργηθεί η κατάλληλη ακαμψία στην κατασκευή. Ο υποστηρικτικός σκελετός εξισορροπεί και διατηρεί τις δυνάμεις από την προένταση της μεμβράνης.

Φυσικά μοντέλα και χρήση υπολογιστή

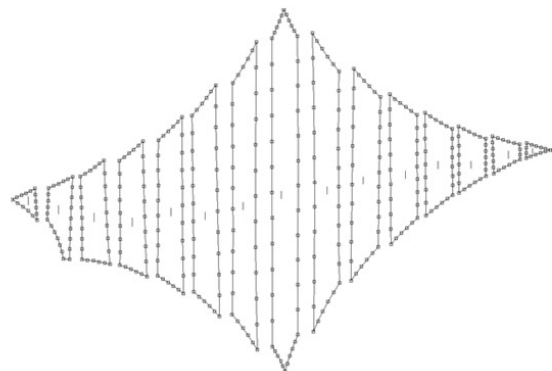
Τα πρώτα χρόνια, για το σχεδιασμό εφελκόμενων κατασκευών από μεμβράνη, υπήρχε άμεση εξάρτηση από τα φυσικά μοντέλα. Η έρευνα και οι πειραματισμοί με μοντέλα από σαπουνόφουσκες του αρχιτέκτονα Frei Otto υπήρξε καταλυτική για την μετέπειτα ανάλυση των εφελκόμενων μεμβρανών με τη χρήση του υπολογιστή. Οι σαπουνόφουσκες τεντώνονται μεταξύ των στηρίξεων και το τελικό σχήμα τους είναι αυτό που έχει τη μικρότερη δυνατή ενέργεια, ελαχιστοποιώντας την ένταση στο σύστημα. Επομένως το ελάχιστο εμβαδό επιφάνειας έχει βρεθεί. Ο Frei Otto συσχέτισε τα αποτελέσματα από αυτή τη διαδικασία με τις κατασκευές από μεμβράνη και μπορούσε να βρει την πιο σταθερή και ομοιόμορφα προεντεταμένη μορφή μιας μεμβράνης ανάμεσα σε οποιοδήποτε σύνολο τόξων και πυλώνων.



Frei Otto, μοντέλο από το γερμανικό περίπτερο της EXPO του 1967



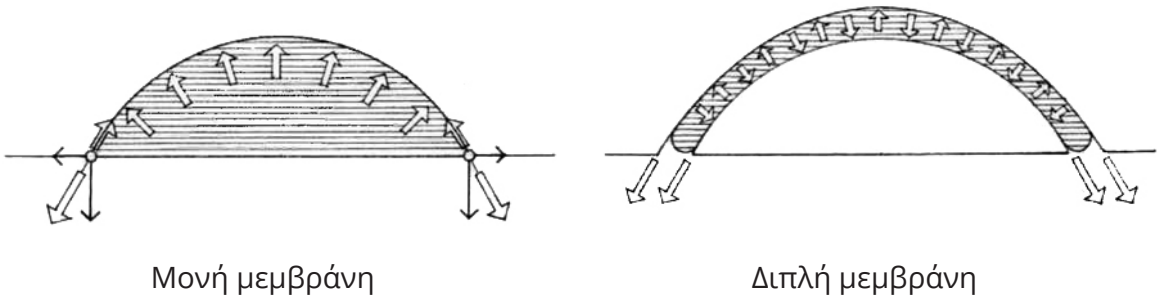
Ανάλυση Τάσεων



Patterning

Σήμερα, τα φυσικά μοντέλα περιορίζονται στα αρχικά στάδια σχεδίασης, ενώ για τον ακριβέστερο υπολογισμό των διαστάσεων των στοιχείων και την ανάλυση των τάσεων που αναπτύσσονται στη μεμβράνη, απαιτείται η χρήση ειδικών προγραμμάτων σε υπολογιστή. Για την ανάλυση των τάσεων, χρησιμοποιείται συνήθως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια, δημιουργείται ένα μοντέλο ανάλυσης των δυνάμεων της κατασκευής, στο οποίο η θλίψη και ο εφελκυσμός παρουσιάζονται με χρώματα. Βρίσκονται με αυτό τον τρόπο τα ευπαθή σημεία της κατασκευής και ενισχύονται κατάλληλα. Για την εύρεση της τελικής γεωμετρίας της κατασκευής χρησιμοποιούνται προγράμματα εύρεσης της μορφής. Στο τελικό στάδιο, υπολογίζεται πόσο ύφασμα χρειάζεται και καθορίζεται το pattern του, αλλά και οι διαστάσεις των άλλων δομικών στοιχείων.

Πνευματικές κατασκευές



Οι πνευματικές κατασκευές αποτελούν υποκατηγορία των εφελκυσόμενων μεμβρανών. Στις κατασκευές αυτές, η πίεση του αέρα λειτουργεί σαν θλιβόμενο στοιχείο για να φουσκώσει την περικλείουσα μεμβράνη και να σταθεροποιήσει τη μορφή της κατασκευής. Η μεμβράνη παραλαμβάνει τις εφελκυστικές δυνάμεις ενώ ο αέρας τις θλιπτικές. Η εσωτερική πίεση πρέπει να είναι σταθερή και πάντοτε μεγαλύτερη από τις εξωτερικές πιέσεις πάνω στη μεμβράνη.

Οι πνευματικές κατασκευές διαιρούνται σε 2 κατηγορίες:

- Σύστημα κελύφους μεμβράνης ελεγχόμενο από την πίεση εσωτερικά (πίεση, υποπίεση, συνδυασμός)
- Σύστημα διπλής μεμβράνης (αεροθαλάμων, αερομαξιλαριών) (πίεση, υποπίεση, συνδυασμός)

Στην πρώτη κατηγορία, οι κατασκευές αποτελούνται από μία δομική μεμβράνη και το υποστηρικτικό τους μέσο είναι ο συμπιεσμένος αέρας. Ο εσωτερικός όγκος της κατασκευής βρίσκεται σε μια πίεση ελαφρώς υψηλότερη από την ατμοσφαιρική. Μέσω αυτής της διαφοράς δημιουργούνται εφελκυστικές τάσεις στη μεμβράνη, με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται η αντοχή και η σταθερότητα της κατασκευής. Η κατασκευή απαιτεί ένα σύστημα συνεχούς συμπίεσης το οποίο ισορροπεί την διαρροή του αέρα. Το μπαλόνη είναι η πιο γνωστή πνευματική κατασκευή αυτής της κατηγορίας.

Στη δεύτερη κατηγορία, ο αέρας περιέχεται σε μια κλειστή διπλή μεμβράνη για να δημιουργήσει σωληνωτά δομικά στοιχεία, ή κυψελωτά κυτταρικά τμήματα. Ο χώρος που χρησιμοποιείται από ανθρώπους δεν είναι πεπιεσμένος. Η έλλειψη αέρα είναι μικρότερη, αλλά είναι απαραίτητη η περιοδική αναπλήρωσή του.

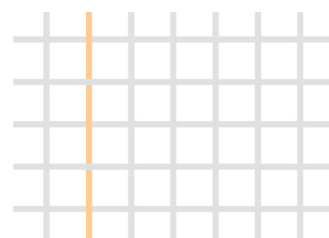
Σύσταση της μεμβράνης

Η επιλογή του υλικού της μεμβράνης είναι σημαντική για τον επιτυχή σχεδιασμό της κατασκευής εντεταμένου υφάσματος. Το υλικό συμβάλλει στην δομική λειτουργία του συστήματος, όπως και σε άλλες ιδιότητες συμπεριλαμβανομένων των μηχανικών ιδιοτήτων (εφελκυστική αντοχή, αντοχή στο σκίσιμο και ελαστικές ιδιότητες όπως η ακαμψία), της διάρκειας, της μόνωσης (προστασίας από τα καιρικά φαινόμενα), της μετάδοσης του φωτός, της προστασίας από την UV ακτινοβολία και της προστασίας από τη φωτιά.

Οι μεμβράνες είναι συνήθως συνδυασμός υφάσματος και επένδυσης πολυμερούς. Το ύφασμα καθορίζει κυρίως τις φυσικές ιδιότητες, ενώ το στρώμα του πολυμερούς επηρεάζει κυρίως τις χημικές ιδιότητες. Τα στρώματα και ο συνδυασμός τους σχεδιάζονται προσεκτικά προκειμένου να καθορίσουν τις απαραίτητες ιδιότητες για τη μεμβράνη.

Τα περισσότερα υφάσματα που χρησιμοποιούνται για αρχιτεκτονικές κατασκευές είναι ανισοτροπικά (οι φυσικές ιδιότητες των σωμάτων διαφέρουν προς διαφορετικές κατευθύνσεις) και μπορούν να διαιρεθούν σε 3 τύπους σύμφωνα με τη φύση της κατασκευής τους:

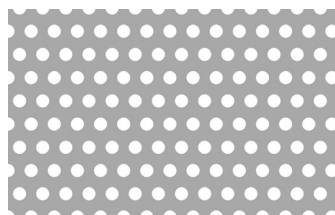
- υφασμένες δομές
- πλεκτές δομές
- μη υφασμένες δομές



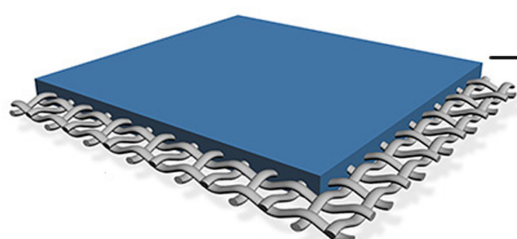
Υφανση



Πλέξη



Film



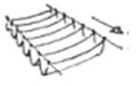


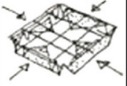
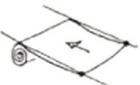
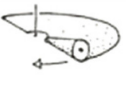


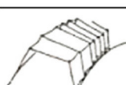
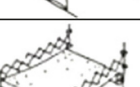



Επικάλυψη (PVC, PTFE, καουτσούκ, κ.α.)

Υφασμα (Πολυεστέρας, Γαλόνημα, PTFE, ETFE, κ.α.)

Ανάμεσά τους, οι υφασμένες δομές είναι οι πιο συνηθισμένες για αρχιτεκτονική χρήση, χάρη στις ικανότητές τους να διασπείρουν τα φορτία. Οι διαφορετικές μέθοδοι παρασκευής υφάσματος παίζουν σημαντικό ρόλο στην ικανότητα τους να εκτείνονται και να κάμπτονται. Τα σύγχρονα υφάσματα από γυαλί και πολυεστέρα, σύνθετα και φθοροπλαστικά είναι τα πιο δημοφιλή.

Ο σκοπός της επένδυσης είναι να βελτιώσει τη λειτουργικότητα του υφάσματος, τη διάρκεια ζωής του και τις αισθητικές του αξίες. Η επένδυση γίνεται εφαρμόζοντας ένα άμεσο θερμοπλαστικό πολυμερές το οποίο απλώνεται πάνω στο ύφασμα. Τα πιο συνηθισμένα υλικά επικάλυψης είναι για παράδειγμα το PVC, PVCD, PTFE, φυσικό και συνθετικό καουτσούκ, νεοπρένιο, καουτσούκ σιλικόνης και πολυουρεθάνη.

Δυνατότητα αναδίπλωσης των εφελκόμενων μεμβρανών

Είδος κίνησης	Διεύθυνση κίνησης			
	Παράλληλη	Κεντρική	Κυλινδρική	Περιφερειακή
Μάζεμα σε δεσμίδες				
Κύλιση				
Ολισθήση				
Πτύχωση				
Περιστροφή				

Δυνατότητα αναδίπλωσης των μεμβρανών σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του Frei Otto

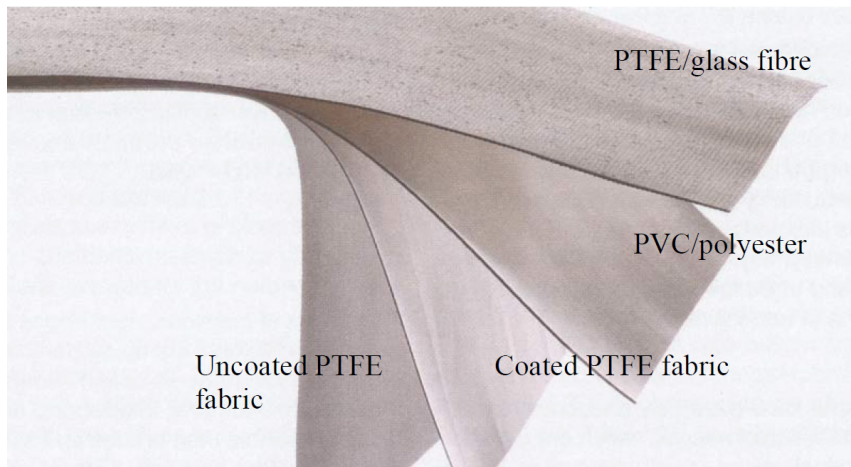
Ο Frei Otto κατηγοριοποίησε τις κατασκευές από αναδιπλούμενες μεμβράνες με βάση την κίνηση. Διέκρινε 2 διαφορετικούς τύπους: έναν με σταθερό υποστηρικτικό σκελετό και έναν με κινητό υποστηρικτικό σκελετό.

Η κύρια δυσκολία που αφορά στις κατασκευές από αναδιπλούμενη μεμβράνη είναι η σταθεροποίηση της μεμβράνης σε όλους τους δυνατούς σχηματισμούς (κλειστή κατάσταση, κατά τη διαδικασία της ανέγερσης, ανοιχτή κατάσταση). Στην εκτεταμένη θέση, η μεμβράνη μπορεί να ασφαλιστεί με προένταση, η οποία επιτυγχάνεται είτε από το ίδιο το σύστημα του οδηγού, είτε από ειδικές συσκευές έντασης στα άκρα της οροφής. Το φαινόμενο του "χτυπήματος" του ανέμου κατά τη διαδικασία της ανέγερσης, το οποίο μπορεί να προκαλέσει αρκετά μεγάλες παραμορφώσεις με μικρές δυνάμεις, είναι μια ακόμη σημαντική δυσκολία.

Οι μετακινούμενες ή κινητές κατασκευές έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις ως προς το υλικό του υφάσματος που χρησιμοποιείται. Το μικρό βάρος, η δυνατότητα αναδίπλωσης και η αντοχή στο σπάσιμο από κάμψη είναι οι καθοριστικοί παράγοντες για το σχεδιασμό της αναδιπλούμενης μεμβράνης.

Οι 3 τυπικές περιπτώσεις μεμβρανών είναι:

- fluoropolymer coated PTFE ύφασμα (1) το πιο ελαστικό υλικό
- PVC coated πολυεστέρας (2)
- PTFE coated ίνες γυαλιού (3)



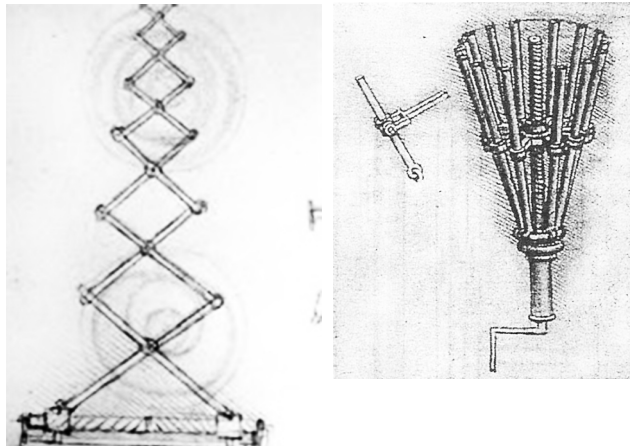
Σύγκριση της δυνατότητας αναδίπλωσης διαφορετικών μεμβρανών

Από τον συγκριτικό πίνακα γίνεται εμφανές ότι τα υφάσματα από υαλονήματα έχουν μικρή αντοχή στην κάμψη και είναι πολύ ευαίσθητα στην αναδίπλωση. Αυτή η κατηγορία μεμβρανών καθώς και οι ταινίες ETFE φαίνεται να έχουν τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, όμως κοστίζουν περισσότερο συγκριτικά με τα υπόλοιπα. Συνεπώς δεν κρίνονται θετικά για κατασκευές με αναδιπλούμενες μεμβράνες.

Από την άλλη, οι ίνες PET και PTFE έχουν μεγάλη ελαστικότητα και πολύ καλή αντοχή στην αναδίπλωση, έτσι χρησιμοποιούνται περισσότερο σε κατασκευές αντίστοιχων απαιτήσεων. Οι πιο διαδεδομένες μεμβράνες είναι τα PTFE υφάσματα, με ή χωρίς επικάλυψη και ο PVC coated πολυεστέρας. Το ύφασμα από PTFE έχει υψηλότερη αντοχή στο σπάσιμο από κάμψη από ότι ένα πολυεστερικό ύφασμα επικαλυμμένο με PVC. Ακόμα και μετά από 10.000 κύκλους αναδίπλωσης, δεν παρουσιάζει σχεδόν κανένα σημείο φθοράς. Παρόλα αυτά, είναι ακριβό και έχει μόνο τη μισή από την αντοχή του PVC coated πολυεστέρα. Το ύφασμα από PTFE τείνει να "σακουλιάζει" σημαντικά εξαιτίας της μόνιμης φόρτισης. Επομένως η προεντακτική δύναμη και το μήκος του ανοίγματος πρέπει να διατηρούνται μικρά. Ο PVC coated πολυεστέρας υπολογίζεται ότι διατηρεί τις ιδιότητές του για 15-25 χρόνια. Καθώς είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό στην αναδίπλωση, τελικά δείχνει να χρησιμοποιείται συχνότερα από κάθε άλλο υλικό σε μετακινούμενες και προσωρινές κατασκευές.

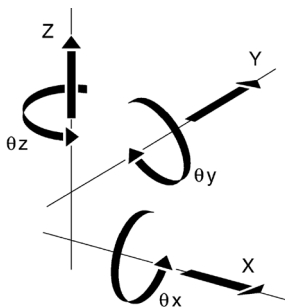
1.3.4 Μηχανικά αναδιπλούμενες δομές

Οι μηχανικά αναδιπλούμενες δομές εμφανίζονται ήδη από την Αναγέννηση, με τον Leonardo da Vinci να σχεδιάζει διάφορους μηχανισμούς, όπως αυτός του παντογράφου. Στη συνέχεια εξελίσσονται και πλέον βρίσκουν εφαρμογή σε πολλά αντικείμενα της καθημερινότητας του ανθρώπου, όπως η ομπρέλα ή το πτυσσόμενο κρεβάτι, αλλά και σε μεγαλύτερης κλίμακας μηχανήματα.

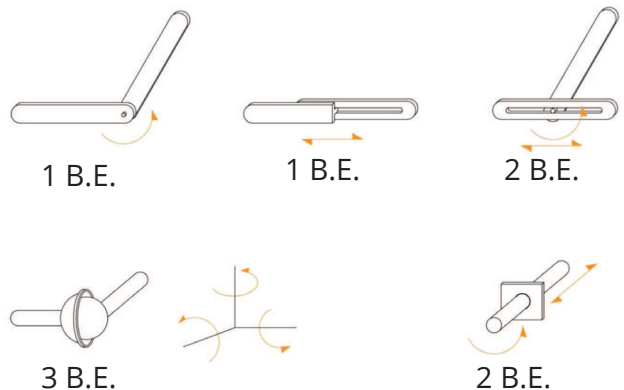


Μηχανισμοί κίνησης και βαθμοί ελευθερίας

βαθμοί ελευθερίας στο χώρο

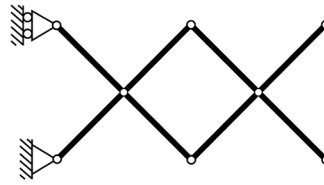
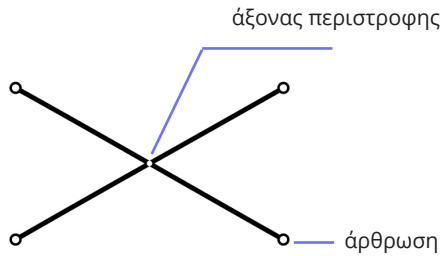


ζεύγη στοιχείων



Τα μηχανικά συστήματα χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα κίνησης. Κάθε πιθανή κίνηση ενός μηχανικού συστήματος δεσμεύεται από τους βαθμούς ελευθερίας του. Ο βαθμός αυτός είναι ίσος με τον αριθμό των ανεξάρτητων παραμέτρων που απαιτούνται για τον καθορισμό της θέσης του μηχανισμού στο χώρο με μοναδικό τρόπο οποιαδήποτε στιγμή. Ο βαθμός ελευθερίας που αναπτύσσεται μεταξύ των στοιχείων καθορίζεται από τις αρθρώσεις. Κατά συνέπεια ως άρθρωση ορίζεται η σύνδεση που επιτρέπει την κίνηση μεταξύ δύο ή περισσότερων στοιχείων.

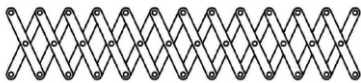
Μηχανισμός ψαλιδιού



$$3n_R - 2n_K - R$$

$$3 \times 4 - 2 \times 4 - 3 = 1$$

$$12 - 8 - 3 = 1 \text{ B.E.}$$

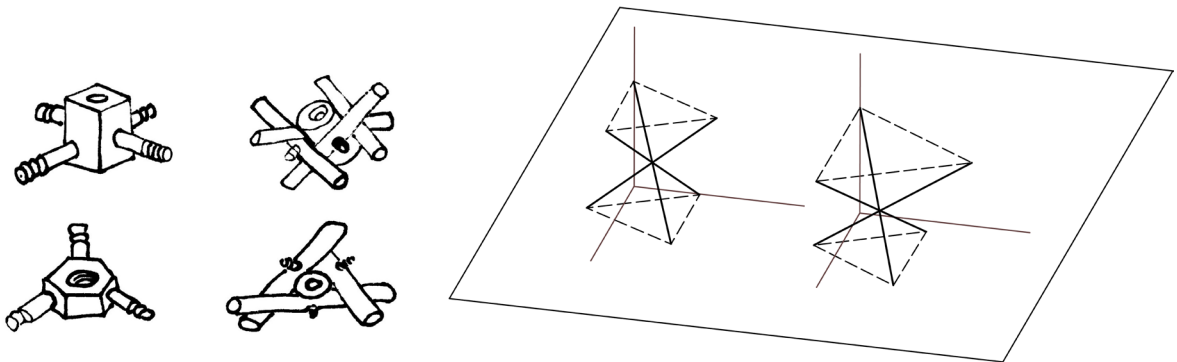


Ο μηχανισμός του ψαλιδιού αποτελεί κύριο αντικείμενο της έρευνας σε ότι αφορά τις αρθρωτές κατασκευές. Ένα σύστημα ψαλιδιών αποτελείται από ράβδους και κόμβους. Κάθε ράβδος συνδέεται με τους κόμβους σε τρία σημεία που λειτουργούν σαν αρθρώσεις. Οι κόμβοι που βρίσκονται στα άκρα των ράβδων τις συνδέουν με τις γειτονικές ράβδους, ενώ ο κόμβος που βρίσκεται σε ένα ενδιάμεσο σημείο στο μήκος της ράβδου συνδέεται αντίστοιχα με το ενδιάμεσο σημείο μιας άλλης ράβδου προκειμένου να σχηματίσουν τη μονάδα του ψαλιδιού. Αυτό το σημείο ονομάζεται ρινότ. Η συγκεκριμένη άρθρωση επιτρέπει την ελεύθερη περιστροφή μεταξύ των δύο ράβδων σε σχέση με τον άξονα που είναι κάθετος στο επίπεδο του παντογράφου, αλλά περιορίζει όλους τους άλλους βαθμούς ελευθερίας. Αυτό σημαίνει ότι ο συνολικός αριθμός των ράβδων του συστήματος δεν επηρεάζει τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας του, ο οποίος είναι πάντοτε ένας. Στο σχήμα βλέπουμε το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα μηχανισμού από ψαλίδια, με το σημείο της άρθρωσης που ενώνει τις δυο ράβδους να βρίσκεται στη μέση του μήκους τους, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα ευθύγραμμο πλαίσιο από ψαλίδια.

Emilio Perez Pinero

Πειραματισμοί και πρώτες αρθρωτές χωροκατασκευές

Συνδεσμολογία

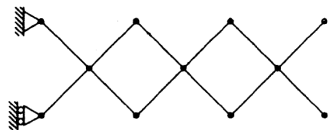
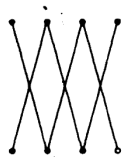


Ο Ισπανός αρχιτέκτονας Emilio Perez Pinero υπήρξε από τους πρώτους μελετητές των αρθρωτών χωροκατασκευών. Πειραματίστηκε με τη μορφή των κόμβων, τη γεωμετρία της κατασκευής αλλά και τις δυνάμεις που αναπτύσσονται σε κάθε στάδιο της μετάβασης από την αρχική στην τελική θέση.

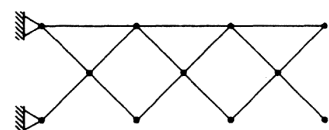
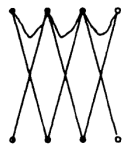
Το σύστημα που ανέπτυξε ο Pinero απομακρύνθηκε από την κλασική διάταξη του ψαλιδιού. Στις προτάσεις του συνήθως τρεις ή τέσσερις ράβδοι διαρθρώνονται γύρω από έναν κεντρικό κόμβο. Όταν ο κεντρικός κόμβος χωρίζει τη ράβδο σε δύο τμήματα με ίσα μήκη, τότε η επιφάνεια που δημιουργείται είναι επίπεδη. Αν τα μήκη αυτά δεν είναι ίσα, τότε δημιουργείται καμπύλη επιφάνεια. Ο Pinero χρησιμοποίησε στις κατασκευές του και τους δύο τύπους.

Οι κατασκευές του Pinero παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς είναι ελαφριές, λειτουργούν ομαλά στις διαδικασίες διπλώματος και ξεδιπλώματος και είναι εύκολο να σχεδιαστούν γεωμετρικά. Παρουσιάζουν εντούτοις δυο πολύ σημαντικά προβλήματα: στην τελική τους θέση δεν έχουν εξασφαλίσει την ακαμψία τους, επομένως δεν είναι ικανές να αντισταθούν σε εξωτερικά φορτία, και επίσης οι ράβδοι επηρεάζουν τους κόμβους με κάποια εκκεντρότητα, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες καταπονήσεις των κόμβων.

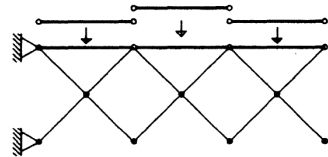
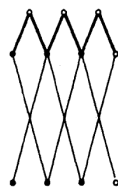
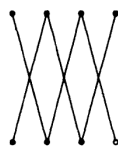
Συστήματα σταθεροποίησης



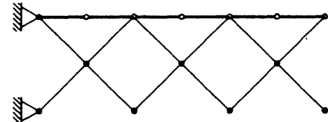
Malla sin arriostramiento



Malla arriostrada con cables



Malla arriostrada con barras añadidas tras el despliegue

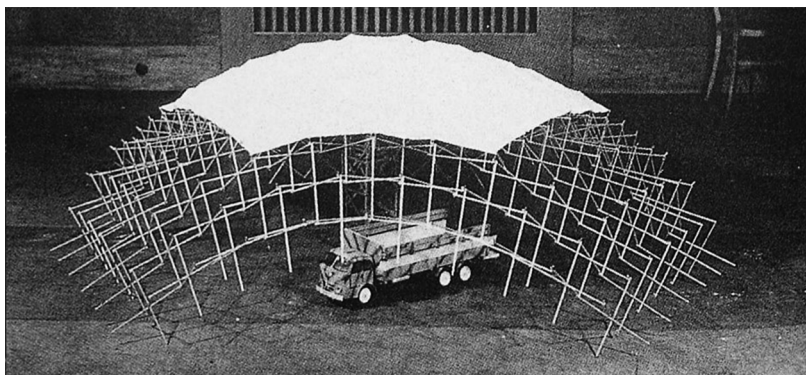


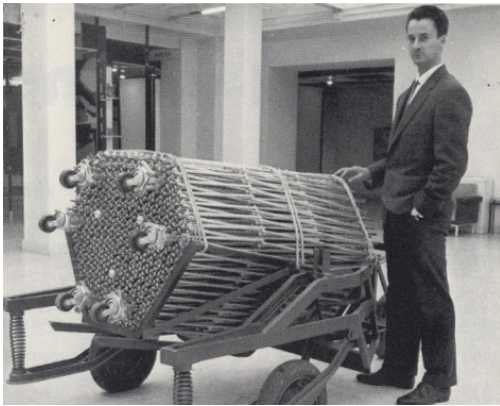
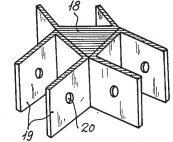
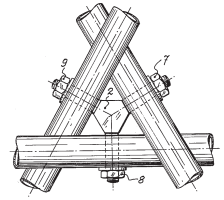
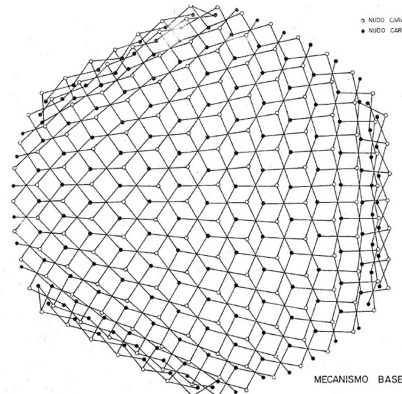
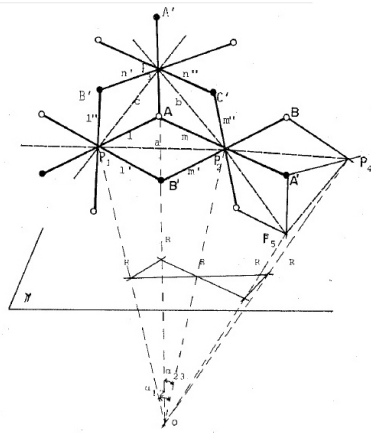
Malla arriostrada con barras con articulaciones bloqueables

Ο Pinero ασχολήθηκε εκτενώς με την επίλυση του ζητήματος της σταθεροποίησης των ψαλιδωτών κατασκευών προκειμένου να γίνουν ακέραιες δομές, ικανές να παραλάβουν φορτία. Στην εικόνα εμφανίζονται ορισμένα προτεινόμενα συστήματα σταθεροποίησης. Στο πρώτο σχήμα φαίνεται το σύστημα χωρίς σταθεροποιητικά στοιχεία, το οποίο σημαίνει ότι μπορεί ανεμπόδιστα να επιστρέψει στην αρχική του θέση ή να φτάσει σε μια ακόμη μετέπειτα θέση. Επίσης, δεν μπορεί να αντισταθεί σε εξωτερικά φορτία και είναι ιδιαίτερα παραμορφώσιμο. Συνεχίζει επομένως να αποτελεί μηχανισμό. Για να αποφευχθεί αυτό στην τελική θέση, προτείνεται αρχικά η χρήση καλωδίων, η οποία φαίνεται στο δεύτερο σχήμα. Τα καλώδια προϋπάρχουν στο σύστημα, αναδιπλώνονται ακολουθώντας την κίνηση των ράβδων και όταν φτάσουν στην τελική θέση εμποδίζουν το σύστημα να εκταθεί περαιτέρω. Αυτή είναι μια ικανοποιητική λύση, λειτουργεί όμως μόνο στην περίπτωση που τα καλώδια εφελκούνται, ενώ σε αντίθετη περίπτωση παύουν να προσφέρουν ακαμψία στην κατασκευή. Μια αποτελεσματικότερη λύση αποτελούν οι ράβδοι που απεικονίζονται στο τρίτο σχήμα, καθώς λειτουργούν τόσο σε εφελκυστικές όσο και σε θλιπτικές καταπονήσεις. Το μειονέκτημά τους βέβαια είναι ότι δεν μπορούν να βρίσκονται ενσωματωμένες στην κατασκευή από την αρχική της θέση, καθώς αυτό δεν θα επέτρεπε την αναδίπλωσή της. Τέλος, στο τέταρτο σχήμα, στο πάνω μέρος των ψαλιδιών έχουν προσαρτηθεί ράβδοι με κλειδωμένες αρθρώσεις οι οποίες μπορούν να συμπεριληφθούν στην κατασκευή από την αρχική, διπλωμένη θέση, ενώ στην τελική θέση σχηματίζουν ευθύγραμμο τμήμα και μπορούν να παραλάβουν είτε θλιπτικές είτε εφελκυστικές δυνάμεις.

Το μεταφερόμενο θέατρο

Το γνωστότερο δείγμα της δουλειάς του Pinero είναι το μεταφερόμενο θέατρο, μοντέλο του οποίου παρουσίασε για πρώτη φορά το 1961. Πρόκειται για μια δικτυωτή μεταφερόμενη κατασκευή, η οποία αποτελείται από ράβδους και καλώδια. Η κατασκευή αυτή έχει αρχικά τη μορφή δέσμης ράβδων, η οποία στη συνέχεια εκτείνεται στο χώρο για να δημιουργήσει σε πλήρη ανάπτυξη μια διευρυμένη και σταθερή δομή. Σε όλα τα στάδια της ανέγερσης, δηλαδή πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την αναδίπλωσή της, τα στοιχεία της κατασκευής δεν δέχονται καταπονήσεις εκτός από το ίδιο το βάρος τους, επομένως το σύνολο συμπεριφέρεται συνεχώς σαν μηχανισμός. Προκειμένου να διασφαλιστεί η ακαμψία της κατασκευής, είναι απαραίτητη η χρήση στοιχείων σταθεροποίησης. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνουν τα καλώδια, ορισμένα από τα οποία είναι μόνιμα συνδεδεμένα στην κατασκευή, ενώ τα υπόλοιπα προστίθενται και εντείνονται στην τελική θέση. Τα καλώδια που βρίσκονται στο πάνω μέρος της κατασκευής μπορούν να αντικατασταθούν από ύφασμα, το οποίο έχει επίσης σταθεροποιητικό ρόλο, ενώ λειτουργεί ταυτόχρονα και ως σκίαστρο. Ακόμη, ο Pinero είχε σχεδιάσει τις καρέκλες του θεάτρου που ήταν επίσης πτυσσόμενες ανά σειρά προκειμένου να εξοικονομήσει χώρο κατά τη μεταφορά. Τέλος, συμπεριέλαβε στην πρότασή του έναν ειδικό μηχανισμό για την ανέγερση της κατασκευής ο οποίος θα τοποθετούνταν σε ένα φορτηγό και θα άνοιγε σταδιακά την κατασκευή μέχρι την τελική της θέση.

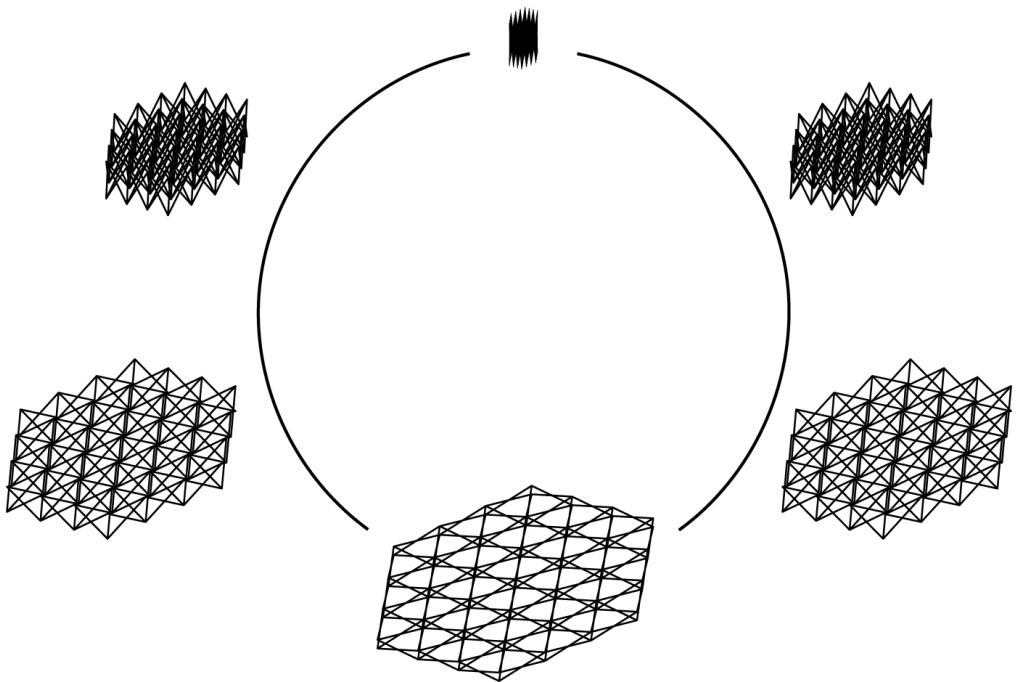




Παρά τα προβλήματα των ψαλιδωτών κατασκευών, ο Pinero κατάφερε να θεμελιώσει αυτές τις δομές ως χωρικές αρχιτεκτονικές κατασκευές. Έδωσε αφορμή σε πολλούς ερευνητές να ασχοληθούν με το συγκεκριμένο πεδίο, επιδιώκοντας να ξεπεράσουν τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι κατασκευές αυτές, να εξελίξουν το σύστημα του ψαλιδιού και να δημιουργήσουν νέες προοπτικές για την εφαρμογή του στη σύγχρονη εποχή.

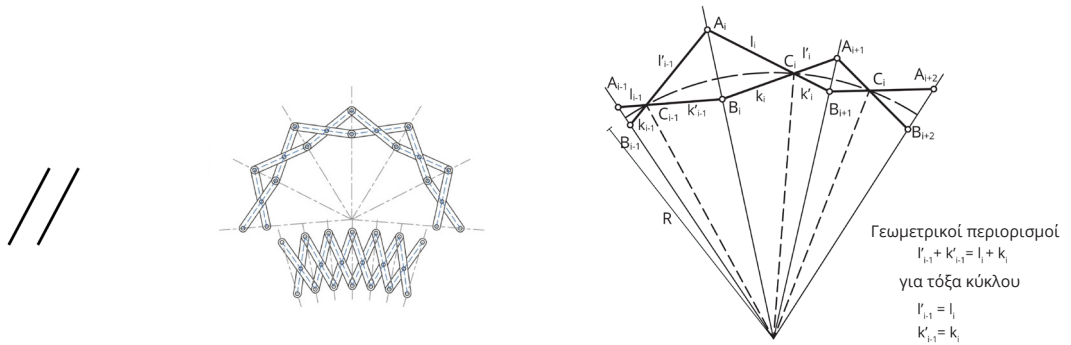
Επιμέρους ζητήματα αρθρωτών χωροκατασκευών

- Κλειστή, συμπαγής θέση
 - ενεργοποίηση της κίνησης
(μηχανισμός ενεργοποίησης, άσκηση δύναμης και αντίδρασης της κατασκευής)
 - Συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της κίνησης
(γεωμετρικές ασυμβατότητες στις ενδιάμεσες θέσεις, τυχόν ασυνέχειες και παραμορφώσεις)
 - Σταθεροποίηση στην επιθυμητή θέση (τελική)
(διαφραγματοποίηση της κατασκευής και ικανότητα παραλαβής φορτίων)
- Ανοιχτή, τελική θέση
 - Επιστροφή



Η κατηγοριοποίηση των ψαλιδωτών κατασκευών στη συνέχεια γίνεται με βάση τη γεωμετρία των στοιχείων που συγκροτούν τη μονάδα του ψαλιδιού και χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: ευθείες και τεθλασμένες ράβδους.

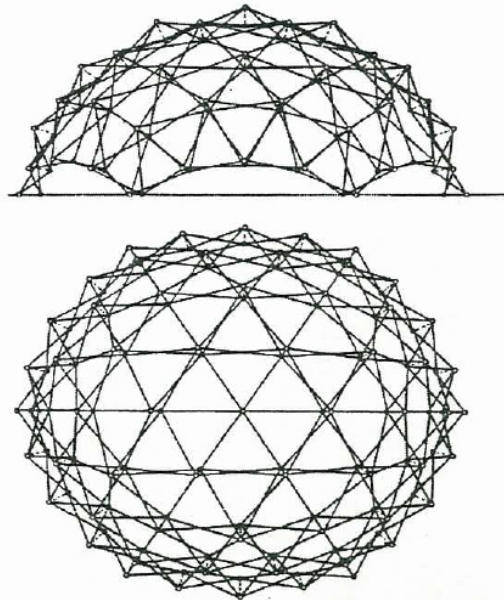
Ευθείες ράβδοι



Ο σχεδιασμός κάθε επιφάνειας από ψαλίδια υπόκειται σε ορισμένους γεωμετρικούς περιορισμούς. Στην περίπτωση που τα ψαλίδια συγκροτούνται από ευθείες ράβδους, πρέπει το άθροισμα των μηκών των ράβδων από τα ρινοί μέχρι την άκρη τους να είναι ίσο με το αντίστοιχο άθροισμα των ράβδων του γειτονικού του ψαλιδιού. Σε ένα τόξο από ψαλίδια, οι ράβδοι τοποθετούνται έτσι ώστε οι νοητές γραμμές που ενώνουν τα άνω και τα κάτω σημεία τους να σχηματίζουν μια γωνία. Η γωνία αυτή αλλάζει από την τιμή 0 (θεωρητικά) στην κλειστή κατάσταση έως τη μέγιστη τιμή που έχει δοθεί στην τελική θέση. Ενώνοντας αυτά τα ψαλίδια, μια σχεδόν επίπεδη δέσμη μπορεί να αναδιπλωθεί σε μια επιφάνεια με συνεχή καμπυλότητα. Ακόμη πιο τυχαία καμπύλα σχήματα μπορούν να δημιουργηθούν από τη χρήση ράβδων με διαφορετικά μήκη στα ψαλίδια. Οι κανόνες αυτοί μπορούν να επεκταθούν και σε τρισδιάστατες ψαλιδωτές κατασκευές.

Σφαιρικές υποδιαιρέσεις (τρίγωνα)

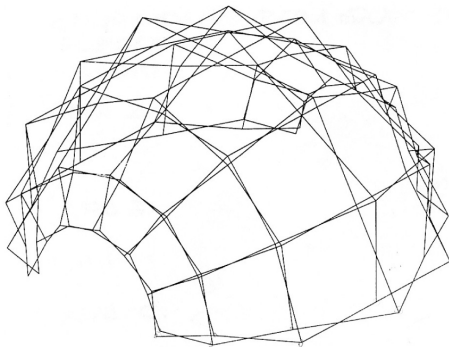
Υπακούοντας στους παραπάνω περιορισμούς, είναι εφικτός ο σχεδιασμός χωρικών κατασκευών μονής ή διπλής καμπυλότητας. Το πιο συνηθισμένο παράδειγμα είναι ο θόλος, ο οποίος μπορεί να προκύψει από τη διαίρεση της σφαίρας σε τρίγωνα με βάση τις αρχές του γεωδαιτικού θόλου. Στην περίπτωση αυτή, οι ακμές των πολυγώνων αντικαθίστανται από μια μονάδα ψαλιδιού με εκκεντρότητα στο ριν-οτ. Όπως είναι προφανές, δεν είναι απλό να δημιουργηθεί ένα ομαλά ανοιγόμενο σύστημα, καθώς δεν έχουν όλες οι ακμές το ίδιο μήκος. Για το λόγο αυτό προκύπτουν ορισμένες γεωμετρικές ασυμβατότητες, οι οποίες επιλύονται είτε με διάφορα τεχνάσματα τα οποία δημιουργούν περισσότερους βαθμούς ελευθερίας, είτε με ελεγχόμενη παραμόρφωση του υλικού. Παρόλα αυτά, το μεγάλο πλεονέκτημα είναι πως τα συστήματα αυτού του είδους στην τελική θέση προσφέρουν μια περισσότερο σταθερή δομή, καθώς έχουν τριγωνισμούς, και ελαχιστοποιούν τους εξωτερικούς μηχανισμούς σταθεροποίησης.



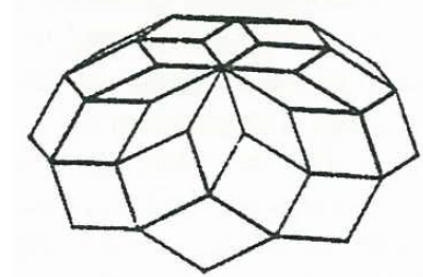
προβολή τριγωνικού
πλέγματος σε σφαίρα

Σφαιρικές υποδιαιρέσεις (τετράπλευρα)

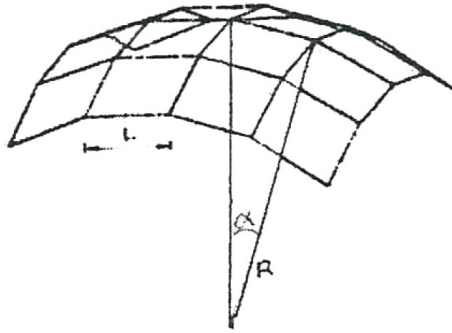
Πέρα από τις κατασκευές που στηρίζονται στο γεωδαιτικό θόλο, μπορούν να προκύψουν ακόμη διάφορες παραλλαγές ψαλιδωτών κατασκευών με ευθείες ράβδους, με προϋπόθεση πάντοτε να ικανοποιούνται οι γεωμετρικοί περιορισμοί που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Πάνω σε σφαιρικές ή κυλινδρικές επιφάνειες σχεδιάζονται τετράπλευρα, κάθε πλευρά των οποίων αντικαθίσταται με ένα ψαλίδι. Σε αυτή την περίπτωση βέβαια δημιουργείται το πρόβλημα της αστάθειας στην τελική θέση εξαιτίας της έλλειψης τριγωνισμών. Για το λόγο αυτό απαιτούνται επιπλέον ράβδοι για τη σταθεροποίηση του συστήματος. Στην περίπτωση των κυλινδρικών θόλων, απλά τόξα με ψαλίδια ενώνονται κατάλληλα προκειμένου να δημιουργήσουν ανοιγόμενες κυλινδρικές δομές, όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα. Μια ακόμη περίπτωση είναι οι θόλοι lamella. Πρόκειται για ένα σύστημα διαμοιρασμού της σφαίρας σε ρομβικά pattern ώστε να δημιουργηθούν οι ψαλιδωτές δομές. Οι κατασκευές αυτές δεν παρουσιάζουν γεωμετρικές ασυμβατότητες και είναι εύκολο να σχεδιαστούν.



Κυλινδρικός θόλος



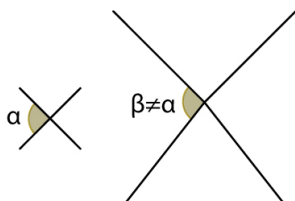
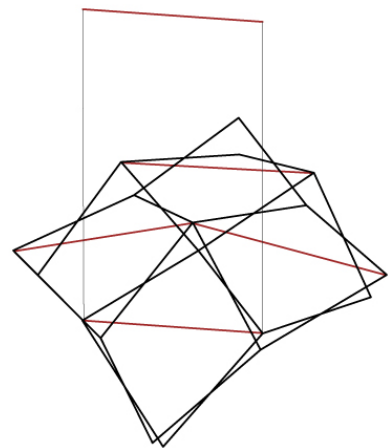
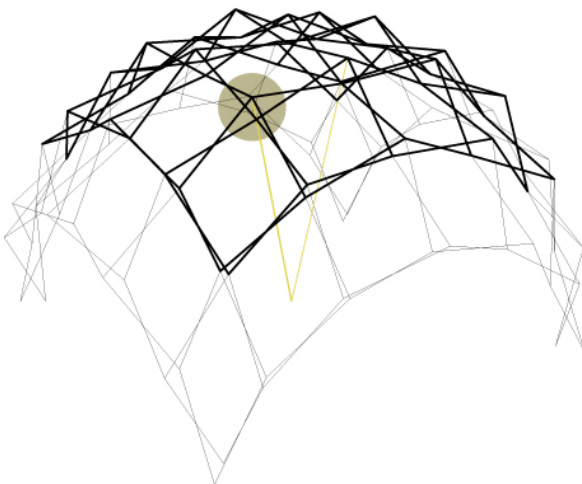
Lamella dome



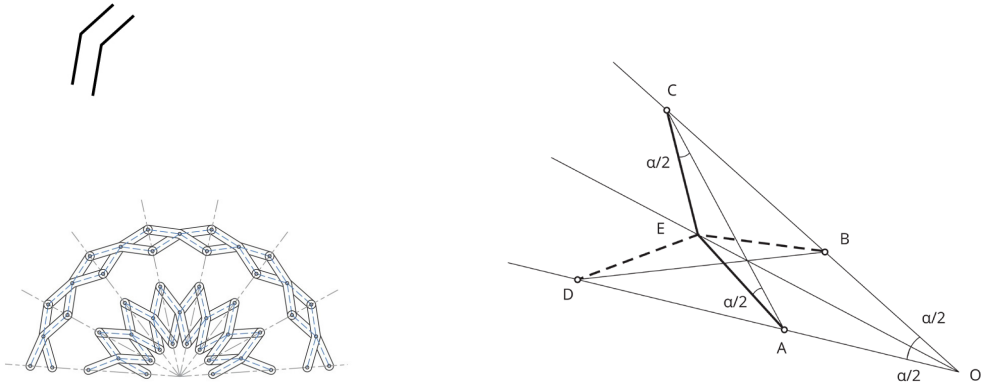
Το σύστημα της προβολής τετράπλευρων σε σφαιρική επιφάνεια έχει χρησιμοποιηθεί αρκετές φορές σε ψαλιδωτές κατασκευές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το ανοιγόμενο στέγαστρο που σχεδίασε ο ισπανός αρχιτέκτονας Felix Escrig για την κάλυψη μιας αθλητικής πισίνας. Για την κατασκευή αυτή σχεδιάστηκαν ρόμβοι πάνω στην επιφάνεια μιας σφαίρας. Οι πλευρές τους στη συνέχεια αντικαταστάθηκαν με ψαλίδια με έκκεντρο ρινοί. Οι ράβδοι που αποτελούν τα ψαλίδια έχουν όλες το ίδιο μήκος.

Η κατασκευή αυτή, παρόλο που γεωμετρικά φαίνεται να μπορεί να ανοίξει και να κλείσει χωρίς να υπάρχει πρόβλημα, παρουσιάζει ορισμένα ζητήματα. Το πρώτο είναι πως ενώ οι κόμβοι ενώνουν τα ψαλίδια σχηματίζοντας μεταξύ τους ορθή γωνία, αυτό δεν ισχύει συνεχώς. Η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στα ψαλίδια δεν είναι σταθερή καθ' όλη τη διαδικασία της ανέγερσης, αλλά μεταβάλλεται. Επίσης, παρόλο που η κατασκευή δεν δέχεται καμία φόρτιση κατά τη διαδικασία της ανέγερσης πέρα από το βάρος της, στην τελική θέση, λόγω έλλειψης τριγωνισμών, απαιτούνται επιπρόσθετα στοιχεία για να σταθεροποιηθεί. Έτσι, τοποθετείται ο απαραίτητος αριθμός ράβδων στις διαγώνιους των ρόμβων όπου αυτό προβλέπεται.

Ο τρόπος με τον οποίο ξεπεράστηκαν τα ζητήματα αυτά είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός και τελικά το στέγαστρο αυτό αποτελεί ένα καλό παράδειγμα υλοποίησης ανοιγόμενης ψαλιδωτής κατασκευής.

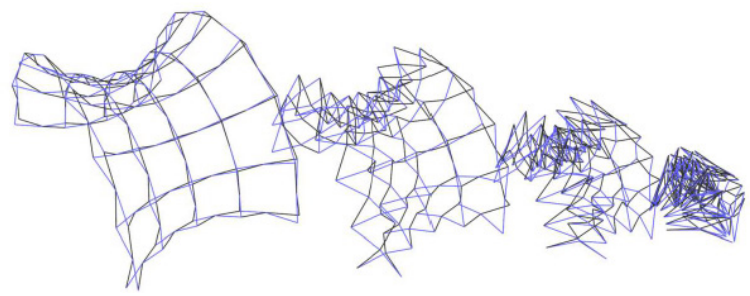
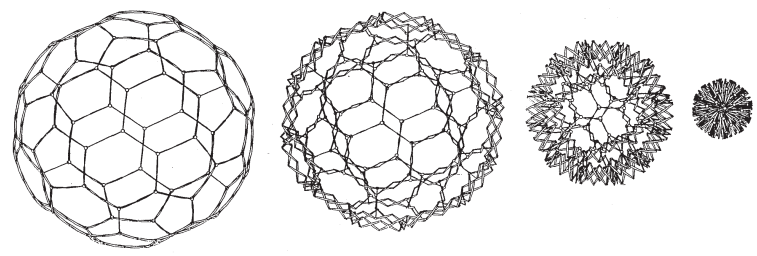
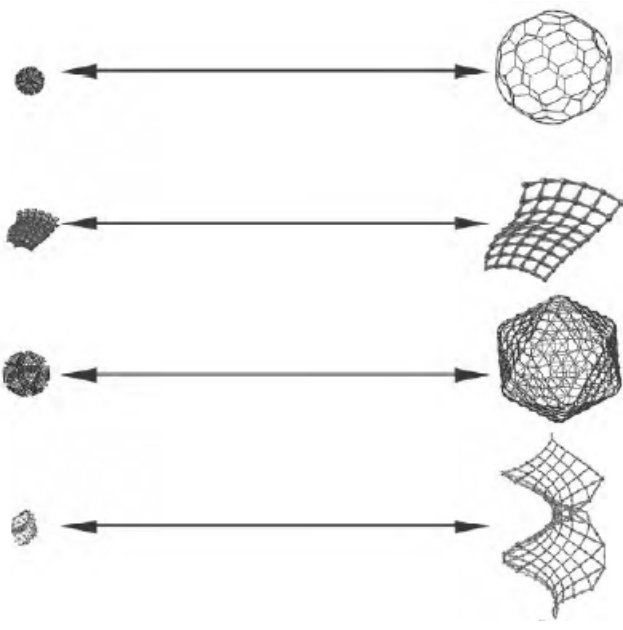


Τεθλασμένες ράβδοι



Στην περίπτωση που τα ψαλίδια σχηματίζονται από τεθλασμένες ράβδους, ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος αλλάζει. Οι τεθλασμένες ράβδοι σχηματίζουν καθεμία στο μέσο της γωνία ϵ , ενώ μεταξύ τους σχηματίζουν γωνία γ , η οποία είναι σταθερή καθ' όλη τη διαδικασία της αναδίπλωσης. Οι γεωμετρίες που σχηματίζονται έχουν σχήμα δακτυλίου, καθώς ανοίγουν και κλείνουν γύρω από ένα κεντρικό σημείο O . Αυτή η κεντρική αναδίπλωση έχει μικρότερη δυνατότητα να μαζεύει συμπαγώς από ότι τα ψαλίδια με ευθείες ράβδους, καθώς η ελάχιστη θέση περιορίζεται από τη συνέχεια των συνδεδεμένων στοιχείων. Εισάγοντας περισσότερα σημεία σπασίματος στις τεθλασμένες ράβδους μπορεί να δημιουργηθεί ένα πολυγωνιώδες στοιχείο. Και σε αυτή την περίπτωση η γεωμετρία αναδιπλώνει σύμφωνα με ένα ακτινωτό σύστημα, το οποίο όμως είναι πυκνότερο και συνεπώς μπορεί να παραλάβει μεγαλύτερα φορτία και να έχει μεγαλύτερο άνοιγμα.

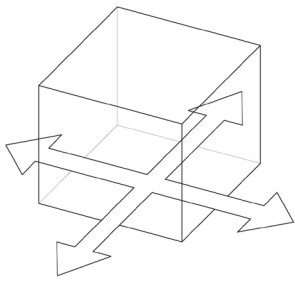
Μια μεγάλη ποικιλία τρισδιάστατων γεωμετριών μπορεί να δημιουργηθεί είτε αποκλειστικά με τεθλασμένες ράβδους είτε με συνδυασμό τεθλασμένων και ευθύγραμμων ράβδων, έχοντας οι μηχανισμοί και σε αυτή την περίπτωση μόνο έναν βαθμό ελευθερίας. Πλατωνικά στερεά ή σφαιρικές επιφάνειες δημιουργούνται μέσω της υποδιαίρεσης της γεωμετρίας σε πεντάγωνα και εξάγωνα. Αντικλαστικές επιφάνειες δημιουργούνται χρησιμοποιώντας ψαλίδια τεθλασμένων ράβδων αλλάζοντας τόσο το συνολικό τους μήκος όσο και τη γωνία ϵ που σχηματίζουν. Έτσι, οποιαδήποτε αυθαίρετη συνεχής επιφάνεια μπορεί να περιγραφεί γεωμετρικά με το μηχανισμό του ψαλιδιού. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να βελτιστοποιήσει οποιαδήποτε τρισδιάστατη γεωμετρία σε μέγιστη συμπαγή μορφή. Οι κατασκευές αυτές διατηρούν το σχήμα τους τόσο στην αρχική όσο και στην τελική τους μορφή. Πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι ο σχεδιασμός ελεύθερων γεωμετριών σχεδόν πάντοτε οδηγεί στην έλλειψη ύπαρξης συγκεκριμένων μονάδων των απαρτιζόμενων στοιχείων (μονάδων).



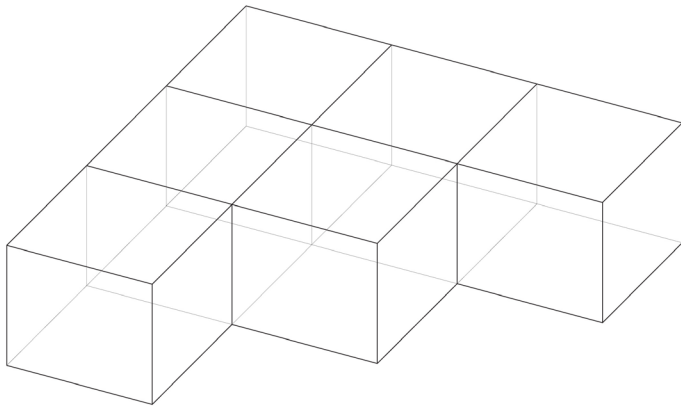
Κεφάλαιο 2

Σχεδιασμός συστήματος - Εύρεση γεωμετρίας

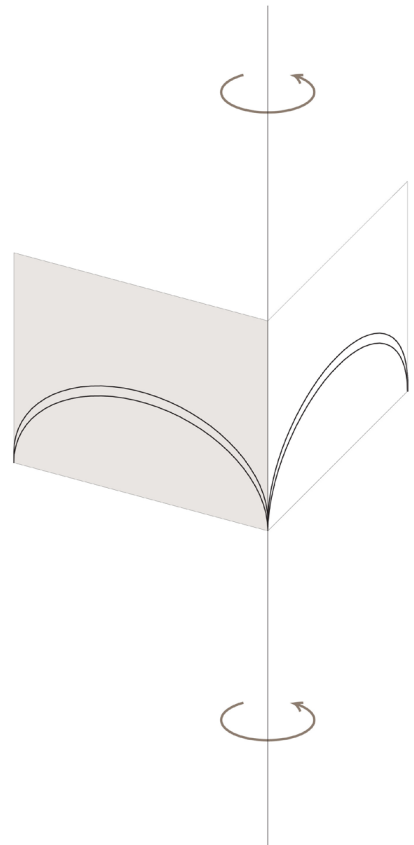
2.1 Αρχές σχεδιασμού



1. Διαμπερής κίνηση

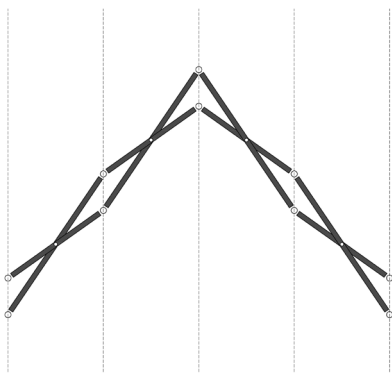
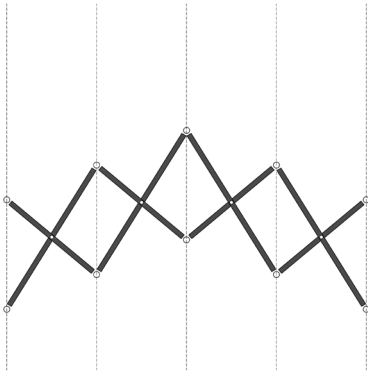
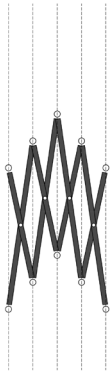


2. Δυνατότητα ένωσης



3. Ένωση κάθετων επιπέδων

Για την εύρεση γεωμετρίας της κατασκευής θέσαμε εξ αρχής ορισμένες βασικές προϋποθέσεις. Αρχικά, είναι πολύ σημαντική η διαμπερής κίνηση στην κατασκευή, καθώς δεν ορίζεται αυστηρά μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, αλλά η είσοδος και η κυκλοφορία μέσα σε αυτή γίνεται ελεύθερα ή διαμορφώνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις της λειτουργίας που φιλοξενεί κάθε φορά. Για το λόγο αυτό η τετράγωνη κάτοψη θεωρήθηκε καταλληλότερη σαν σχήμα. Ταυτόχρονα, η διαμπερής κίνηση δίνει τη δυνατότητα ένωσης πολλών μονάδων μεταξύ τους προκειμένου να καλυφθούν λειτουργίες που απαιτούν συγκέντρωση μεγαλύτερου αριθμού ατόμων, αλλά και λειτουργίες που απαιτούν συγκεκριμένο τρόπο στην οργάνωση της κάτοψης. Για να επιτευχτεί αυτό βέβαια είναι απαραίτητο τα όρια της κατασκευής να είναι κάθετα στο επίπεδο του εδάφους, το οποίο συνεπάγεται και την ομαλή ένωση των μονάδων μεταξύ τους. Έτσι σχηματίζονται τα πρώτα δεδομένα για τη μορφή της κατασκευής, η οποία έχει τετράγωνη κάτοψη, ελεύθερη είσοδο και από τις τέσσερις πλευρές και τα επίπεδα που ορίζουν τα άκρα της είναι κάθετα στο έδαφος.



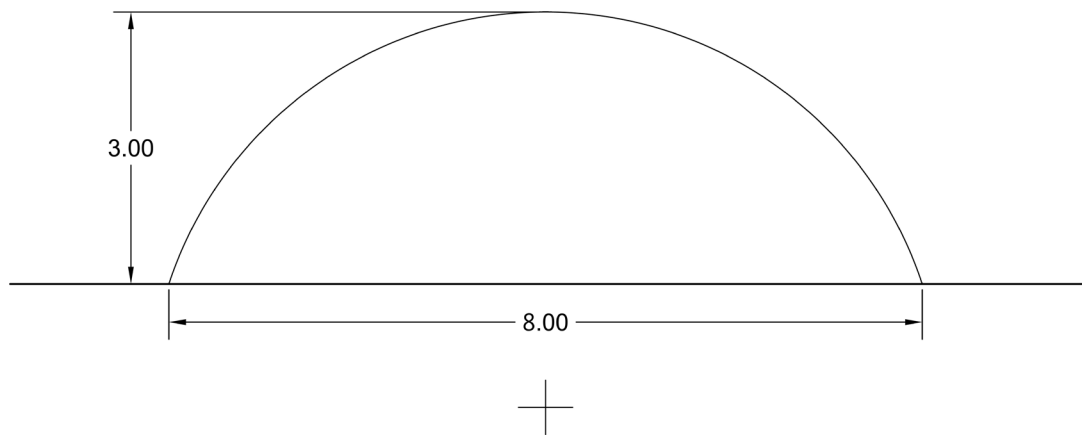
Η βασική μονάδα η οποία αποτελεί την κατασκευή είναι ένα τόξο αποτελούμενο από ψαλίδια, σχήμα που χρησιμοποιείται σε πολλές ψαλιδωτές κατασκευές. Στην πλειοψηφία τους όμως οι κατασκευές αυτές αποτελούνται από τόξα που εγγράφονται στην επιφάνεια μιας σφαίρας και έχουν τα κέντρα τους στο κέντρο αυτής της σφαίρας, με αποτέλεσμα το επίπεδο του τόξου που βρίσκεται στο άκρο της κατασκευής να μην είναι κάθετο στο επίπεδο του εδάφους.

Προκειμένου να αποφευχθεί αυτή η κατάσταση, η τελική επίλυση της γεωμετρίας απομακρύνθηκε από τη συνηθισμένη αυτή περίπτωση των ψαλιδωτών κατασκευών. Στο σύστημα που τελικά χρησιμοποιήθηκε, τα άκρα των ράβδων τα οποία σχηματίζουν τα ψαλίδια δεν "κοιτούν" προς το κέντρο μιας σφαίρας. Αντιθέτως βρίσκονται πάντοτε σε ευθείες παράλληλες μεταξύ τους και κάθετες στο επίπεδο του εδάφους.

Στο σχήμα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο το τόξο από ψαλίδια μεταβαίνει από την αρχική, κλειστή θέση στην τελική, ανοιχτή θέση. Είναι εμφανές ότι σε όλες τις ενδιάμεσες θέσεις τα άκρα των ράβδων βρίσκονται πάντα σε ευθείες παράλληλες μεταξύ τους και κάθετες στην επιφάνεια του εδάφους.

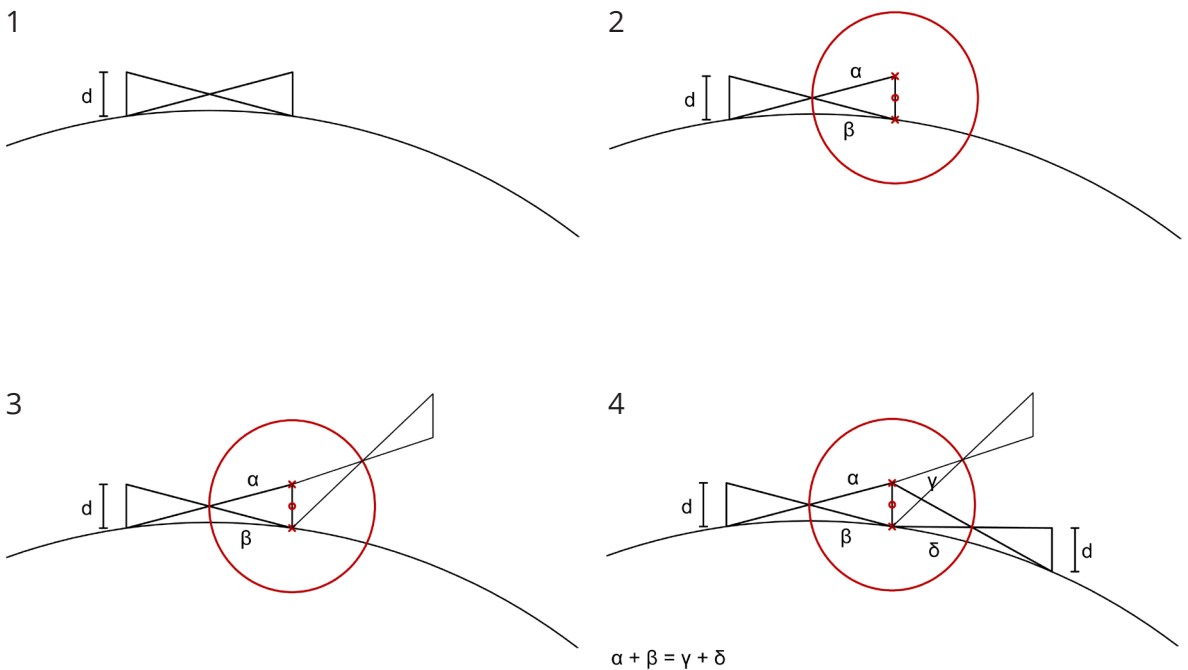
2.2 Διαδικασία σχεδιασμού

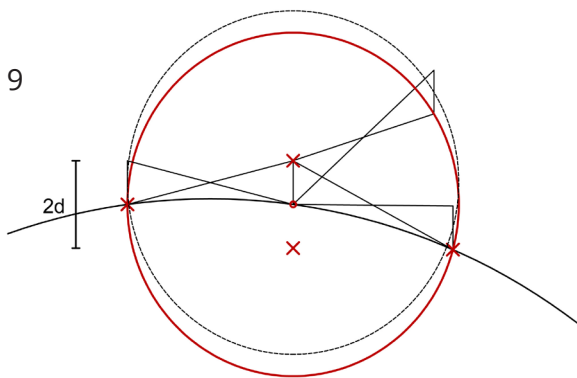
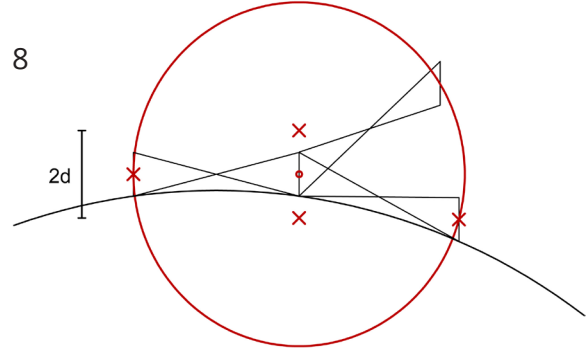
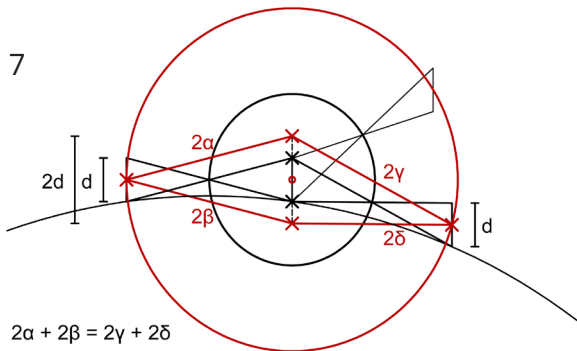
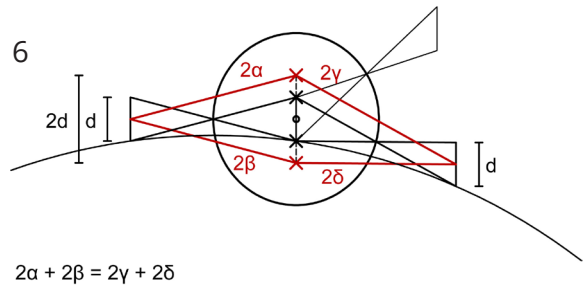
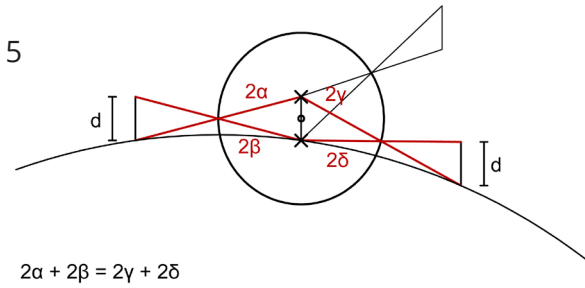
A. Βασικό τόξο



Ξεκινώντας τη διαδικασία του σχεδιασμού ορίζονται οι διαστάσεις του βασικού τόξου. Για άνοιγμα τόξου 8 μέτρα δημιουργείται ένας χώρος με κάτοψη 8x8 μέτρα, επομένως με εμβαδό 64 τετραγωνικά μέτρα. Ως μέγιστο ύψος του τόξου ορίζονται τα 3 μέτρα για την άνετη είσοδο του ανθρώπου στην κατασκευή.

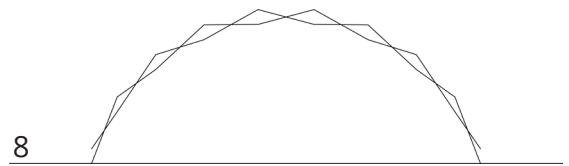
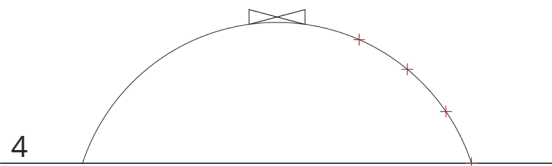
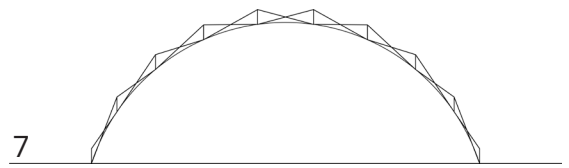
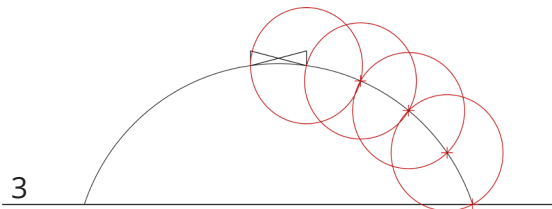
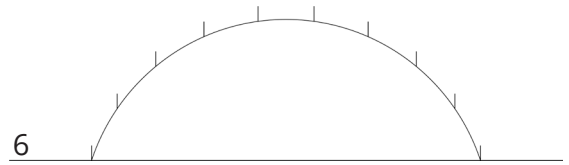
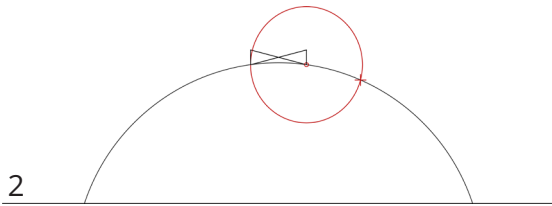
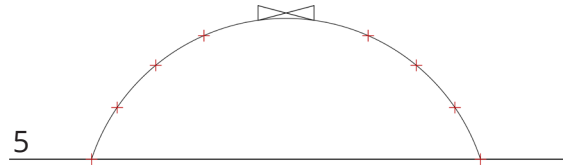
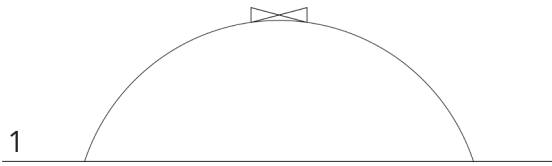
B. Γεωμετρική ανάλυση του σχεδιασμού του τόξου





Για τη γεωμετρική ανάλυση του σχεδιασμού του τόξου τοποθετείται αρχικά ένα ψαλίδι στην κορυφή του τόξου και ορίζεται η απόσταση d : πάχος της κατασκευής στην τελική θέση. Έπειτα, από τα άκρα των ράβδων του ψαλιδιού ορίζονται εστίες μιας έλλειψης που περνά από το ρινοτ, το οποίο βρίσκεται στη μέση κάθε ράβδου. Αυτή είναι η έλλειψη που θα ορίσει όλα τα ψαλίδια του τόξου. Για τις αποστάσεις α και β που ορίζουν τη θέση του ρινοτ σε σχέση με τα κέντρα της έλλειψης βρίσκονται οι αντίστοιχες αποστάσεις γ και δ ώστε να ισχύει $\alpha + \beta = \gamma + \delta$ για να οριστεί το επόμενο ψαλίδι. Στη συνέχεια ορίζονται οι αποστάσεις 2α , 2β , 2γ και 2δ και μεταφέρονται καθ' ύψος, όπως φαίνεται στο σχήμα 6. Δημιουργούνται έτσι δυο νέα σημεία που εμφανίζονται με κόκκινο. Ισχύει $2\alpha + 2\beta = 2\gamma + 2\delta$. Ορίζεται τώρα μια δεύτερη έλλειψη με κέντρα τα σημεία με κόκκινο χρώμα, η οποία όπως φαίνεται στο σχήμα 7 τέμνει την απόσταση d στο μέσο της. Μετατοπίζοντας την μεγάλη έλλειψη κατακόρυφα από το μέσο του d στο σημείο τομής του με το βασικό τόξο βρίσκεται το σημείο στο οποίο τοποθετείται το επόμενο d που ορίζει το άκρο του επόμενου ψαλιδιού.

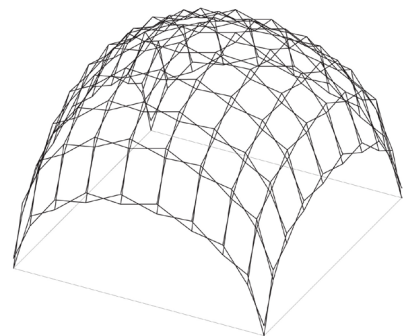
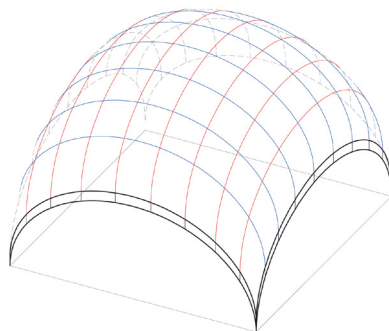
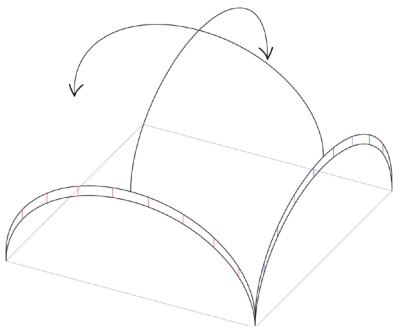
Γ. Εφαρμογή της γεωμετρικής ανάλυσης στο βασικό τόξο



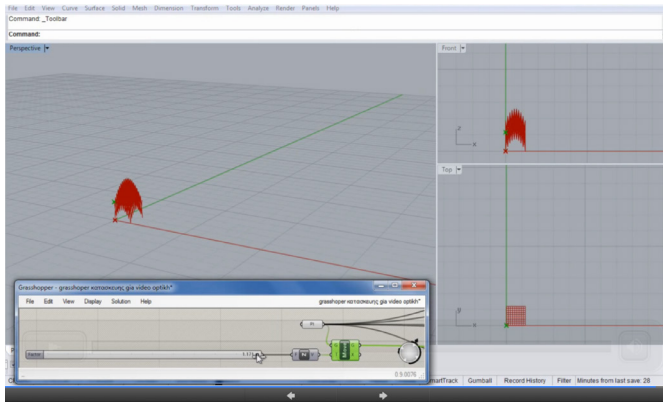
Έχοντας δημιουργήσει τον τρόπο με τον οποίο βρίσκονται τα σημεία που ορίζουν τα ψαλίδια πάνω στο τόξο, επαναλαμβάνεται η διαδικασία για να βρεθούν τα σημεία στο μισό τόξο και έπειτα συμμετρικά τοποθετούνται τα σημεία και στο άλλο μισό τόξο. Τοποθετούνται οι αποστάσεις d , οι οποίες είναι ίσες και πάντοτε παράλληλες μεταξύ τους και κάθετες στο επίπεδο του εδάφους, και στη συνέχεια σχεδιάζονται τα ψαλίδια. Έτσι, το βασικό τόξο που είχε οριστεί στην αρχή είναι πλέον σχεδιασμένο με ψαλίδια όπως αυτά θα είναι στην τελική - ανοιχτή θέση της κατασκευής. Αποτελείται από 9 υποδιαιρέσεις και από 18 συνολικά ράβδους που έχουν ανά δύο μεταξύ τους ίδιο μήκος. Τα ρινοτ των ψαλιδιών βρίσκονται πάντοτε στο μέσο της ράβδου.

2.3 Συνολική γεωμετρία

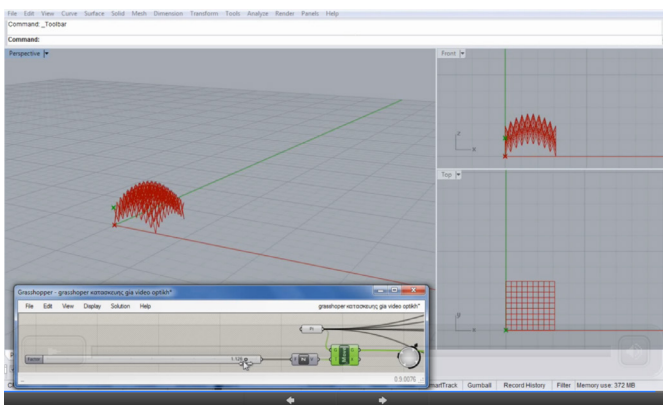
Η μορφή της κατασκευής που σχηματίζεται δεν ταυτίζεται με κάποιο γνωστό γεωμετρικό σχήμα, αφού πλέον απομακρύνεται από την εγγραφή στην επιφάνεια μιας σφαίρας. Η συνολική γεωμετρία προκύπτει από την επανάληψη του βασικού τόξου με ψαλίδια 10 φορές τόσο στη μία διεύθυνση όσο και στην κάθετη. Σχηματίζεται έτσι στην τελική της μορφή μια θολωτή επιφάνεια με τετράγωνη κάτοψη, η οποία έχει τη δυνατότητα να μεταβαίνει από μια κλειστή, συμπαγή κατάσταση σε μια ανοιχτή, τελική μορφή και το αντίστροφο.



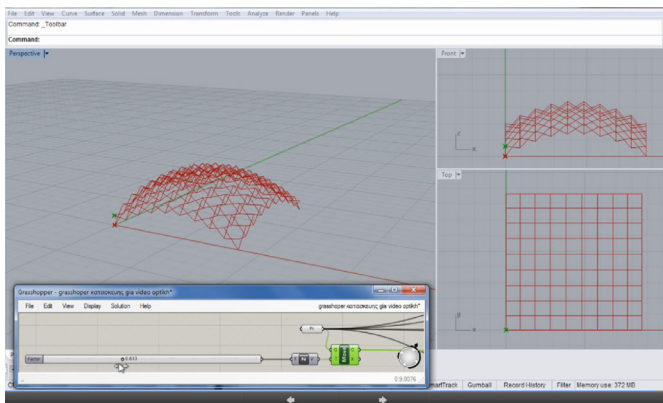
2. 4 Κινητική συμπεριφορά της γεωμετρίας



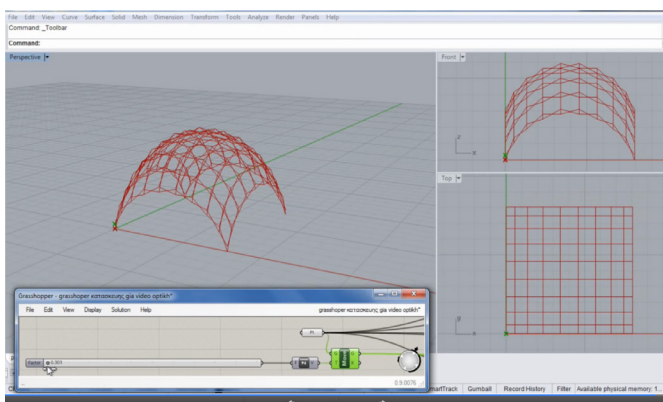
Κλειστή θέση





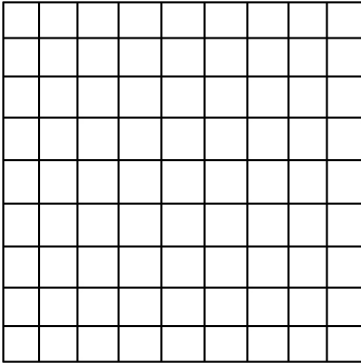
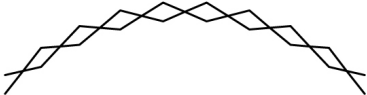
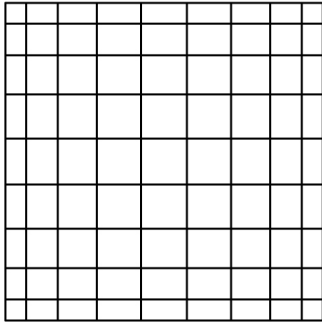
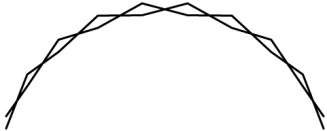
Ενδιάμεση θέση



Μέγιστη ενδιάμεση θέση



Τελική θέση

	Κάτοψη	Όψη
Κλειστή		
Μέγιστη		
Ανοιχτή		

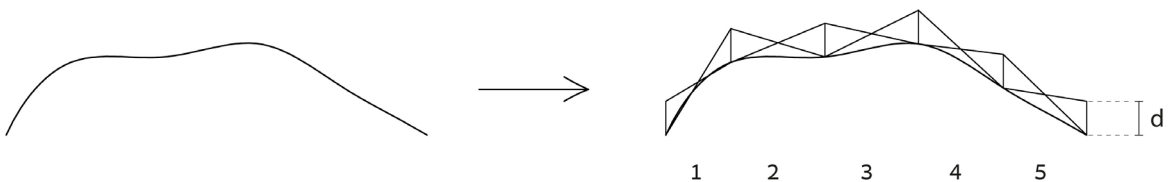
Η κινητική συμπεριφορά της γεωμετρίας εμφανίζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς κατά τη διαδικασία της ανέγερσης, η γεωμετρία δεν εκτείνεται με ομαλό τρόπο καθ' όλη τη διάρκεια. Όπως φαίνεται και στις εικόνες, οι οποίες δείχνουν τη γεωμετρία σε Grasshopper, από την αρχική κλειστή θέση, η γεωμετρία εκτείνεται συνεχώς σε όλες τις ενδιαμέσες θέσεις κατά μήκος και κατά πλάτος, χωρίς να αναπτύσσει ιδιαίτερο ύψος. Ωστόσο, μόλις φτάσει σε μια μέγιστη θέση, οι διαστάσεις της κάτοψης αρχίζουν και πάλι να μικραίνουν, ενώ το ύψος αυξάνεται δραματικά, έως ότου φτάσει στην τελική ανοιχτή θέση, όπου τελικά η γεωμετρία αποκτά τις διαστάσεις που έχουν οριστεί από τη διαδικασία σχεδιασμού. Το γεγονός αυτό αποτελεί την αφετηρία για μια σειρά ζητημάτων που προκύπτουν για την υλοποίηση και την ανέγερση της πραγματικής κατασκευής.

2. 5 Παραμετροποίηση γεωμετρικών αρχών

Σημαντικό σημείο στην έρευνα αυτή αποτελεί η γενίκευση του γεωμετρικού συστήματος που αναπτύχθηκε και οι περαιτέρω δυνατότητες του, οι οποίες προκύπτουν με αφορμή την προτεινόμενη κατασκευή.

Μετά την ολοκλήρωση της γεωμετρικής ανάλυσης του συστήματος με τα ψαλίδια για τον σχεδιασμό της συγκεκριμένης κατασκευής, προχωρήσαμε στην παραμετροποίηση των γεωμετρικών του αρχών έτσι ώστε να εφαρμόζονται σε οποιαδήποτε τυχαία καμπύλη. Ουσιαστικά, πρόκειται για έναν κώδικα στο Grasshopper στον οποίο με την είσοδο τριών μεταβλητών (τυχαία καμπύλη, "μήκος του σχοινοίου" της αρχικής έλλειψης, απόσταση d του "πάχους" της κατασκευής), η καμπύλη μπορεί να μετατραπεί σε ψαλίδια. Θεωρούμε πως αυτή η γενίκευση είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς δίνεται η δυνατότητα στον καθένα να μπορεί να πειραματιστεί και να δημιουργήσει τελικά οποιαδήποτε γεωμετρία επιθυμεί. Ανοίγεται με τον τρόπο αυτό το πεδίο του D.I.Y., και κατά συνέπεια όσοι σχεδιάζουν με αυτό το σύστημα μπορούν να το εξελίσσουν, να το βελτιώσουν και τελικά να το θέσουν και πάλι στη διάθεση όλων, μέσα στο πλαίσιο διαμοιρασμού της γνώσης.

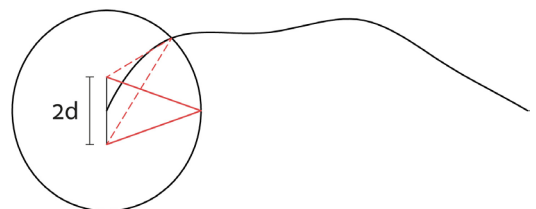
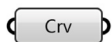
Τυχαία καμπύλη



Μεταβλητές



τυχαία καμπύλη

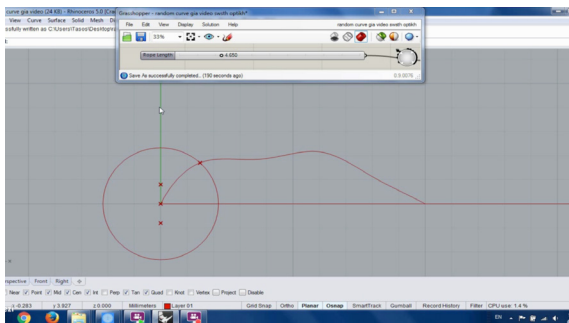


"μήκος σχοινοίου" αρχικής έλλειψης

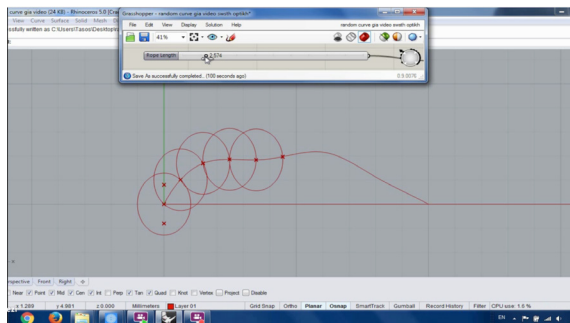


"πάχος" κατασκευής

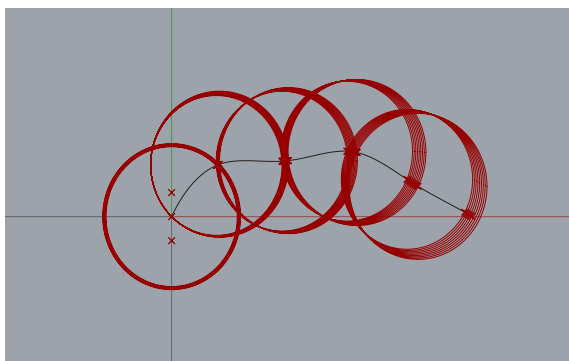




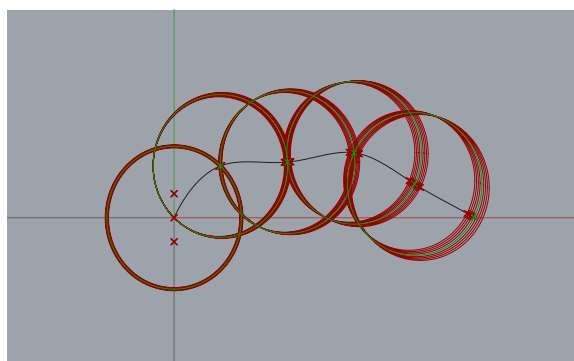
1. Σχεδιασμός της αρχικής έλλειψης στο πρώτο άκρο της τυχαίας καμπύλης



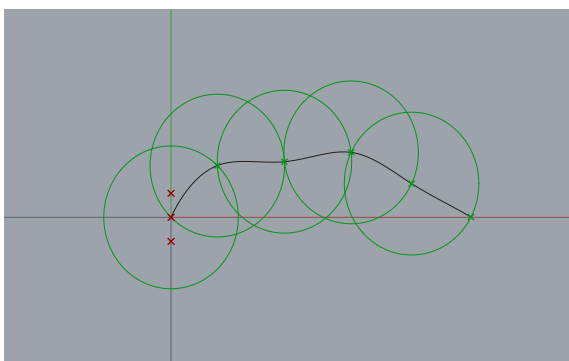
2. Καθορισμός του αριθμού των ελλίψεων, δηλαδή του τελικού αριθμού των ψαλιδιών



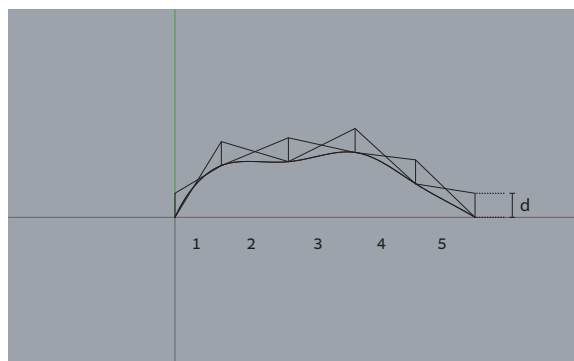
3. Δημιουργία ενός εύρους πιθανών λύσεων που προσεγγίζουν το δεύτερο άκρο της καμπύλης



4. Επιλογή της έλλειψης που βρίσκεται πιο κοντά στην επιθυμητή θέση



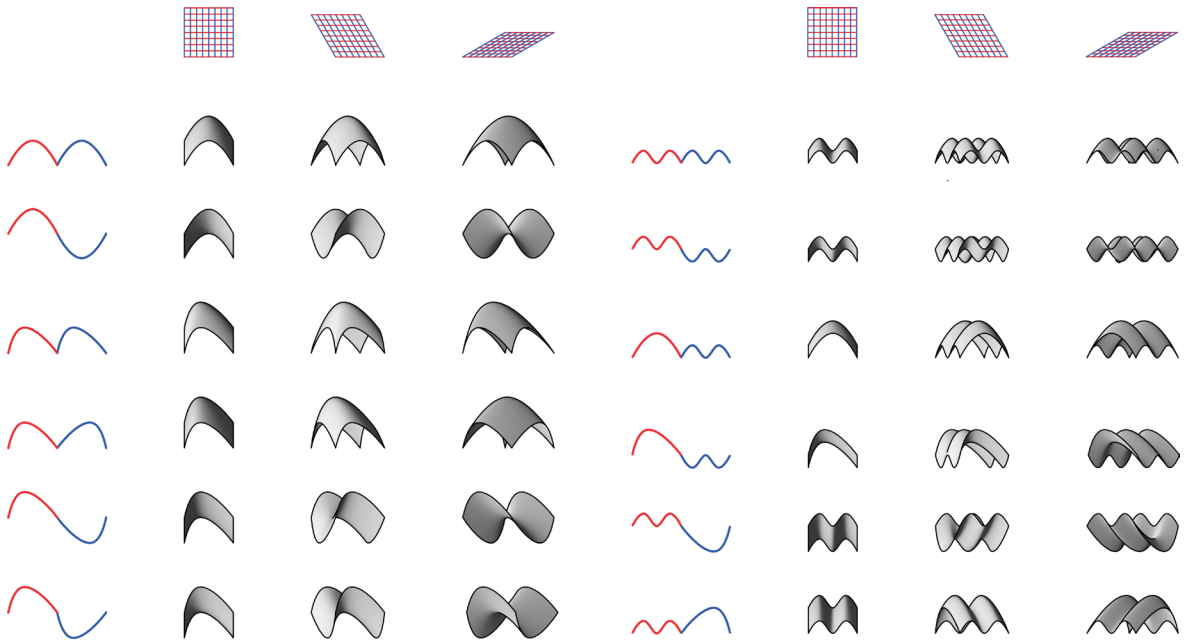
5. Εύρεση των σημείων που οι αποστάσεις d τέμνουν την τυχαία καμπύλη



6. Τελικός σχεδιασμός των ψαλιδιών πάνω στην τυχαία καμπύλη

2. 6 Προκύπτουσες γεωμετρίες

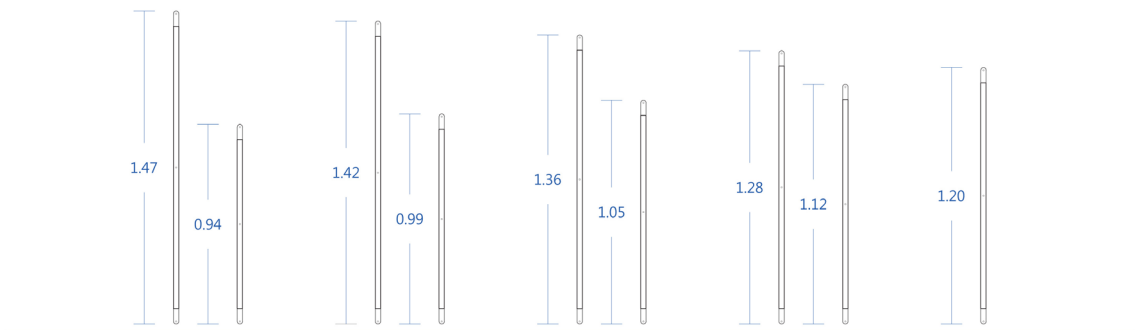
Από την προηγούμενη διαδικασία γίνεται δυνατό να “εκφραστεί” σε ψαλίδια οποιαδήποτε τυχαία καμπύλη. Έτσι, μπορούν να προκύψουν τρισδιάστατες γεωμετρίες, αποτελούμενες από δυο ίδιες ή και διαφορετικές καμπύλες, οι οποίες σχηματίζουν τις όψεις της εκάστοτε κατασκευής. Επαναλαμβάνοντας την καμπύλη στις δυο διευθύνσεις τόσες φορές όσες και οι υποδιαιρέσεις της αρχικής καμπύλης, προκύπτει η τελική μορφή, η οποία μπορεί να είναι απλή ή και ιδιαίτερα σύνθετη. Η μια καμπύλη “ακολουθεί” την άλλη και η ένωσή τους μπορεί να γίνει όχι μόνο για ορθή γωνία, αλλά για οποιαδήποτε. Η τελική κατασκευή θα έχει και πάλι τη δυνατότητα να μεταβαίνει από μια συμπαγή κατάσταση σε μια διευρυμένη μορφή και το αντίστροφο.



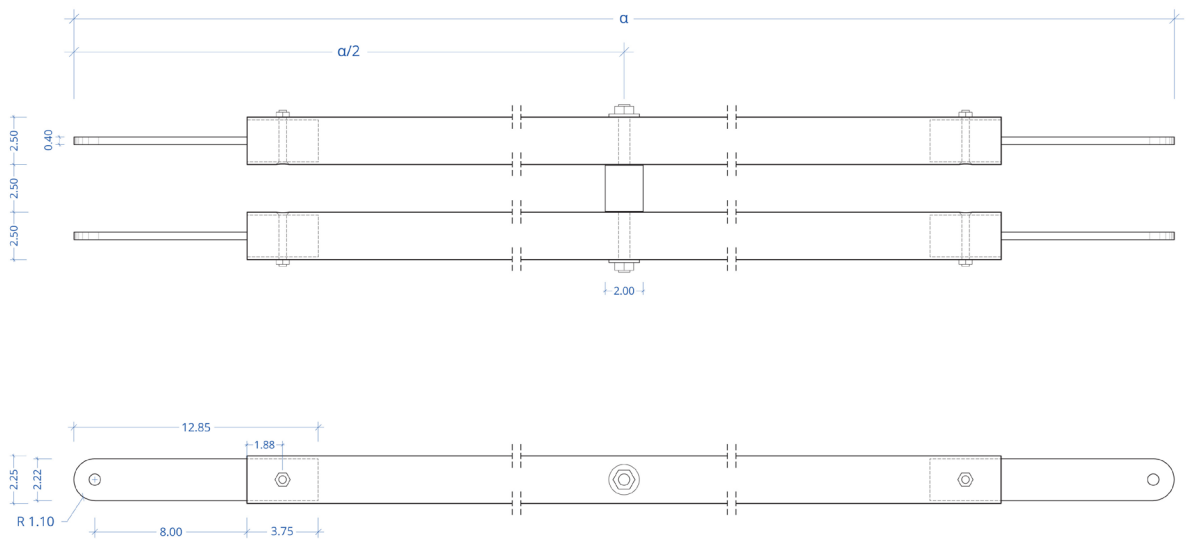
Κεφάλαιο 3

Σχεδιασμός της τελικής κατασκευής

3.1 Ράβδοι

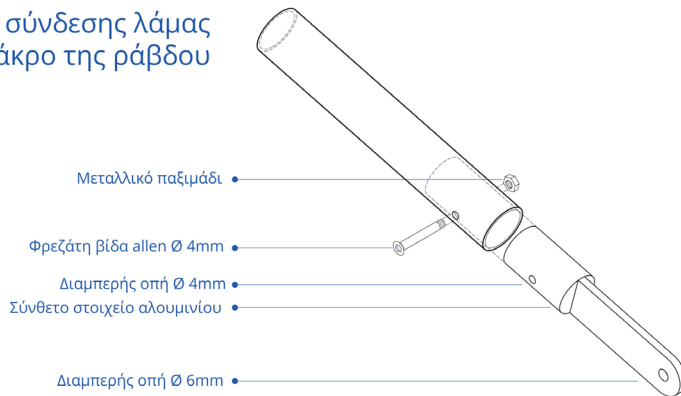


Ράβδοι αλουμινίου \varnothing 25mm εξωτερικό
 \varnothing 22mm εσωτερικό

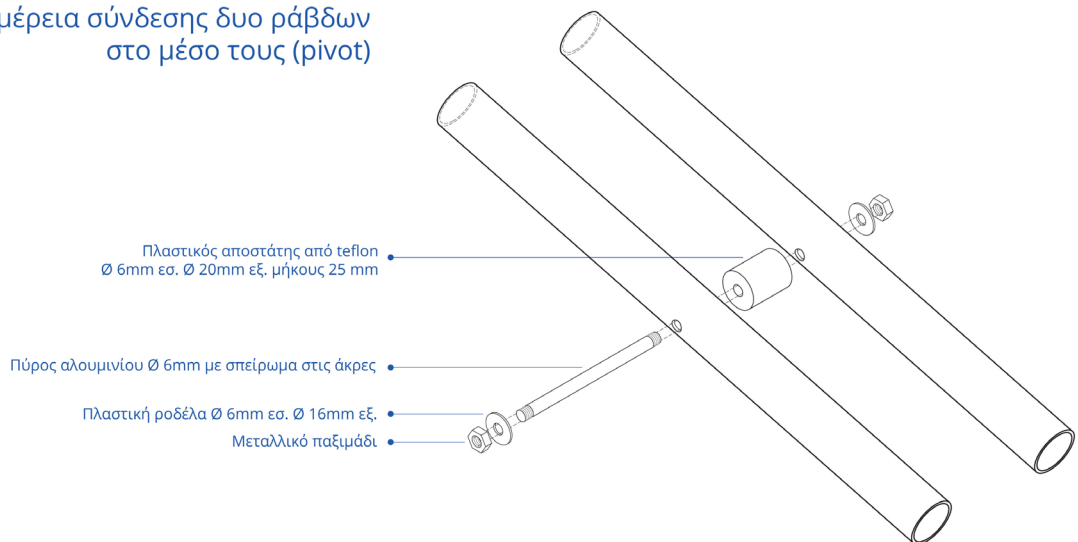


Όψεις ράβδων

Λεπτομέρεια σύνδεσης λάμας στο άκρο της ράβδου

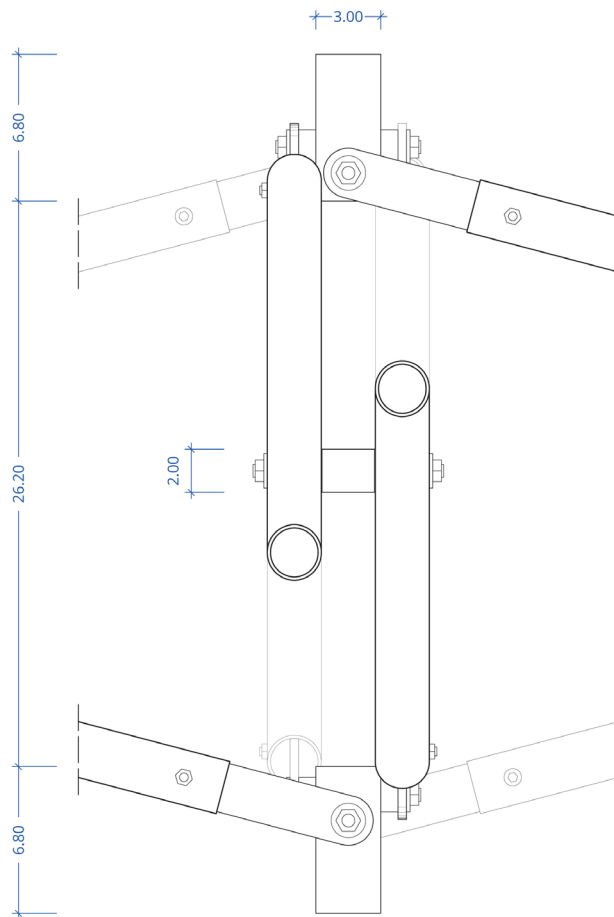


Λεπτομέρεια σύνδεσης δυο ράβδων στο μέσο τους (ρίνοτ)

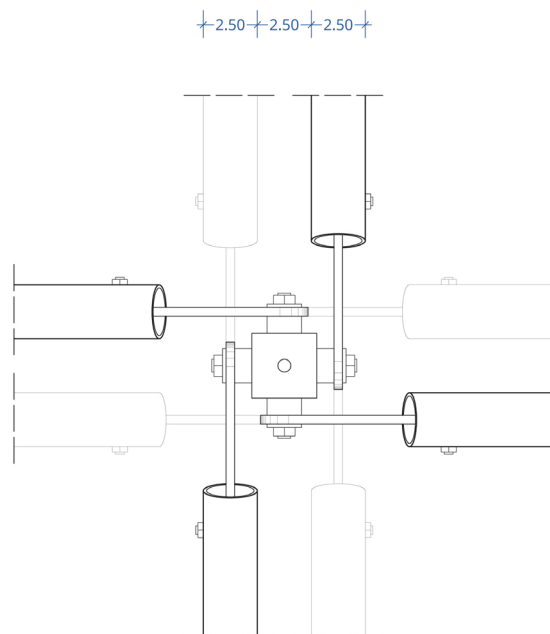


Οι ράβδοι που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή έχουν 9 διαφορετικά μήκη, τα οποία επαναλαμβάνονται 40 φορές το καθένα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η τυποποίηση στο μέγεθος των στοιχείων, η οποία ήταν από την αρχή επιθυμητή. Οι ράβδοι είναι κατασκευασμένες από αλουμίνιο και η διατομή τους \varnothing 25mm εξωτερικό και \varnothing 22mm εσωτερικό. Όλες έχουν οπή στη μέση και ανά δύο ενώνονται κατάλληλα με πλαστικό αποστάτη από Teflon. Στα άκρα τους οι ράβδοι ενώνονται με ένα σύνθετο στοιχείο αλουμινίου, το οποίο εξυπηρετεί την οικονομία του χώρου αλλά και την καλύτερη προσάρτηση της ράβδου στους κόμβους.

3.2 Κόμβοι

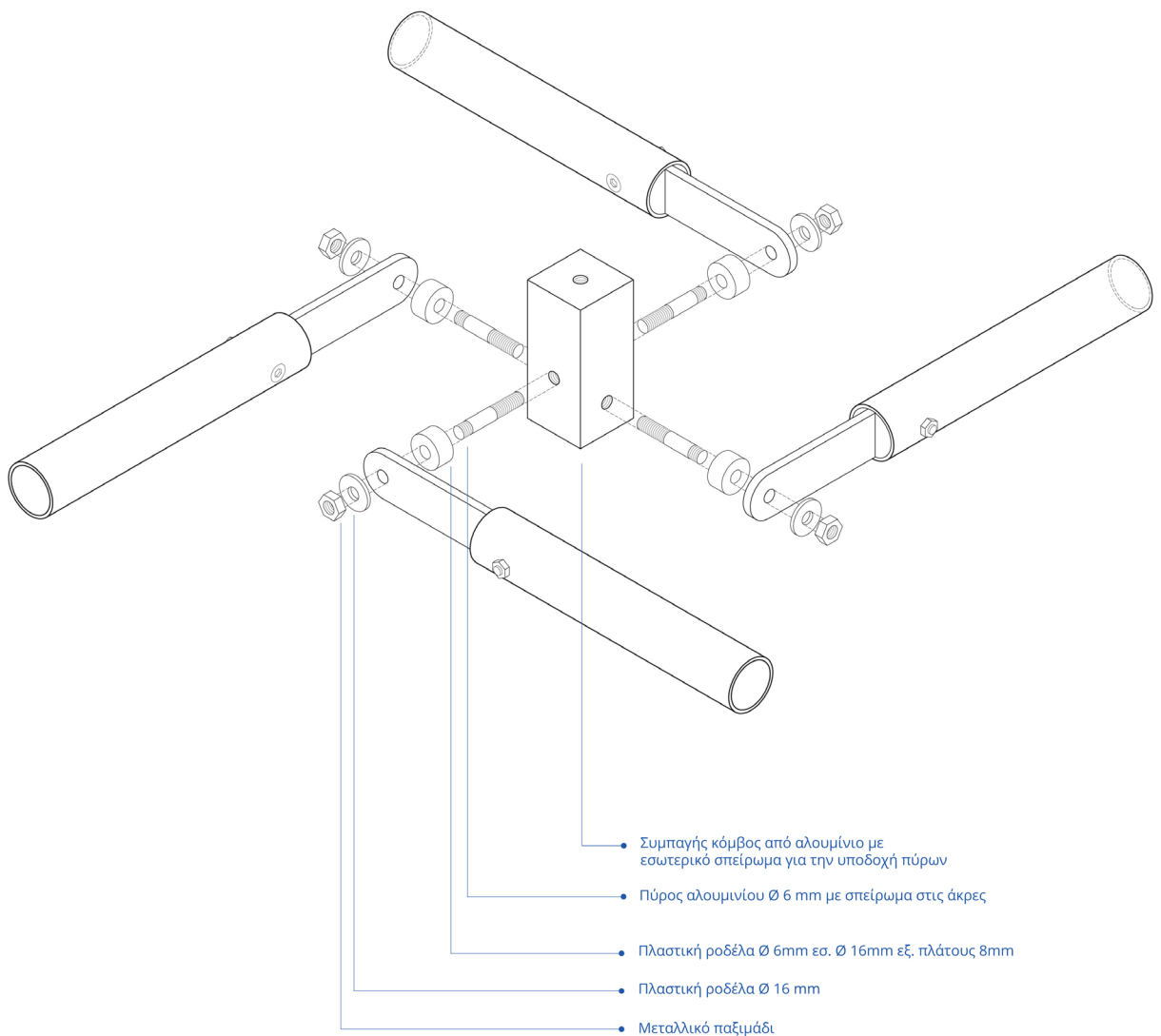


Όψη σύνδεσης
ράβδων στον κόμβο

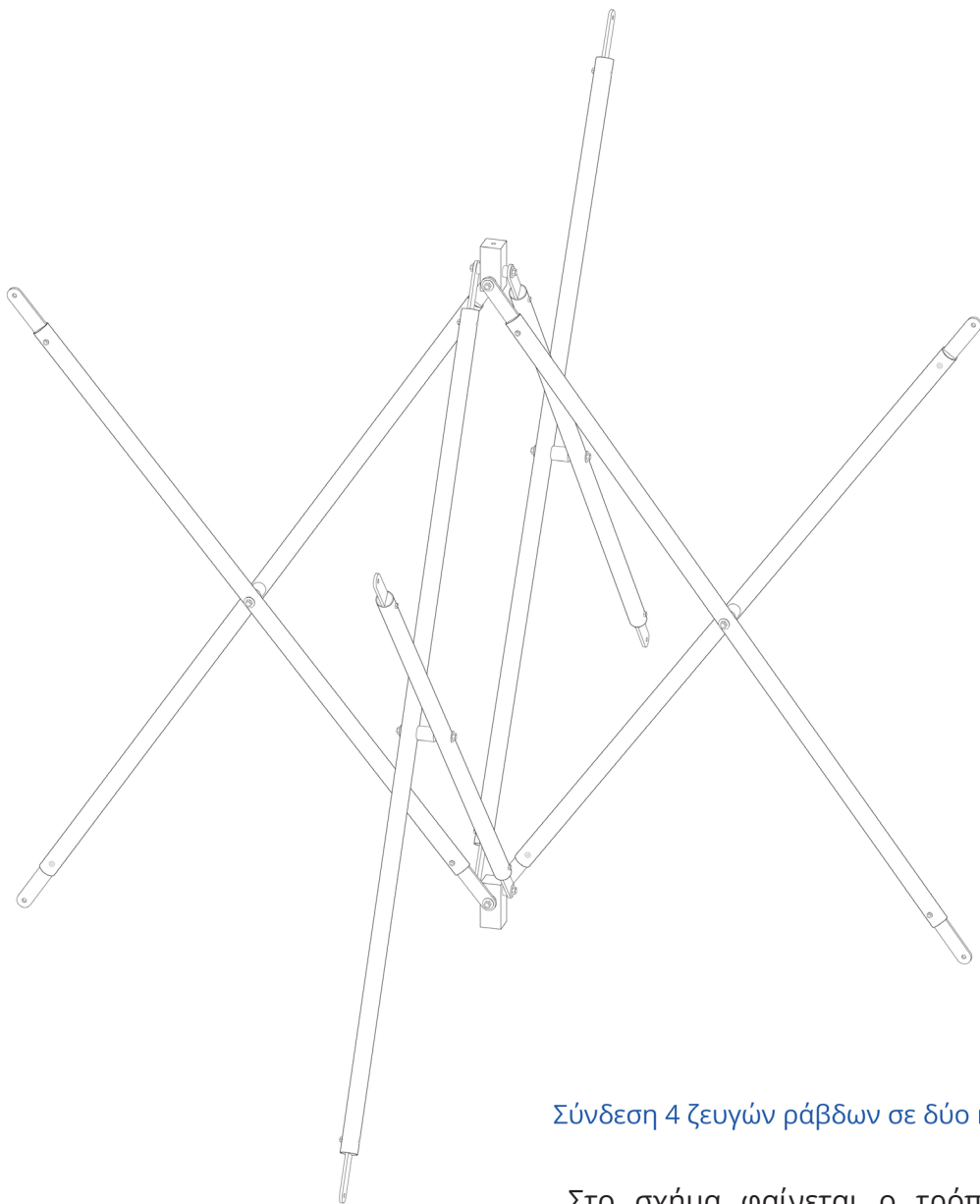


Κάτοψη σύνδεσης
ράβδων στον κόμβο

Αξονομετρική αναπαράσταση κόμβου και ανάλυση της σύνδεσής του με τις ράβδους



Οι κόμβοι είναι συμπαγείς από αλουμίνιο, έχουν τετράγωνη κάτοψη 3x3cm, ενώ το ύψος τους είναι 6.8cm, το οποίο εξυπηρετεί την μετέπειτα προσαρμογή της μεμβράνης στην πάνω ή κάτω πλευρά του κόμβου αντίστοιχα. Στις τέσσερις πλευρές του προσαρτώνται αλουμινένιοι πύροι με σπείρωμα. Στον κατακόρυφο άξονα οι πύροι έχουν μικρή απόσταση μεταξύ τους για να μην αδυνατίζει στο σημείο αυτό η διατομή του κόμβου. Σε κάθε έναν από αυτούς τους πύρους ενσωματώνεται μια ράβδος με πλαστικούς αποστάτες δίπλα της για να ελαχιστοποιούνται οι τριβές. Έτσι τελικά σε κάθε κόμβο ενώνονται τέσσερις ράβδοι.

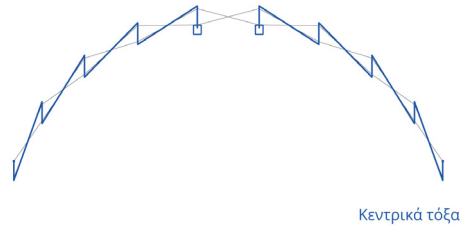
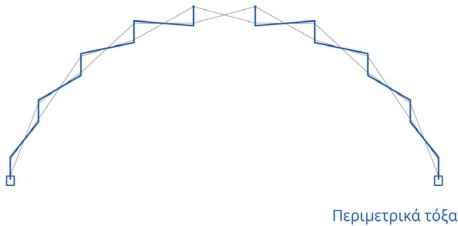


Σύνδεση 4 ζευγών ράβδων σε δύο κόμβους

Στο σχήμα φαίνεται ο τρόπος που συνδέονται τέσσερα ζεύγη ψαλιδιών σε δύο κόμβους σε μια ενδιάμεση θέση κατά τη διάρκεια του ανοίγματος της κατασκευής.

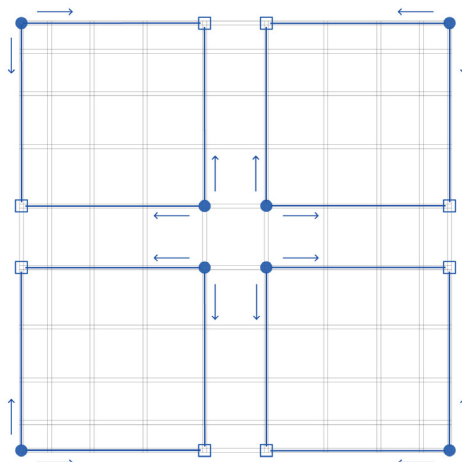
3.3 Τροχαλίες

"Διαδρομές" τροχαλίας

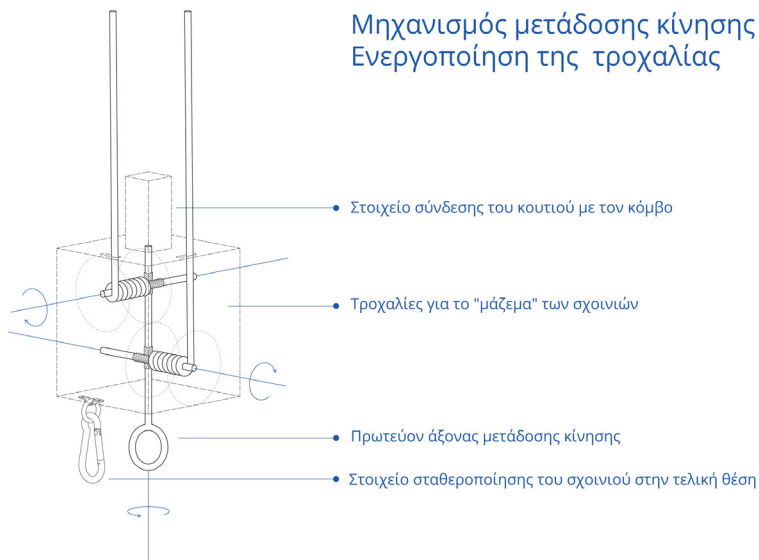


Για την ανέγερση της κατασκευής ήταν εξ αρχής προϋπόθεση να μην απαιτείται ειδικός εξοπλισμός. Για το λόγο αυτό εφαρμόστηκε ένα σύστημα με τροχαλίες και σχοινιά το οποίο εξυπηρετεί τη διαδικασία ανέγερσης και σταθεροποίησης. Τα σχοινιά προσαρτώνται κατάλληλα στα 4 κεντρικά και στα 4 περιμετρικά τόξα της κατασκευής. Κάθε ένα από αυτά τα τόξα έχει ενσωματωμένα δυο σχοινιά που ξεκινούν από το μεσαίο ψαλίδι και καταλήγουν στο άκρο του, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η διαδρομή που ακολουθούν τα σχοινιά στα κεντρικά τόξα είναι αυτή που ορίζουν οι μεγαλύτερες σε μήκος ράβδοι, ενώ η διαδρομή που ακολουθούν τα σχοινιά στα περιμετρικά τόξα ορίζεται από τις μικρότερες ράβδους. Αυτό συμβαίνει για να καταλήξουν σε 8 κουτιά, τα οποία βρίσκονται στα κεντρικά σημεία των περιμετρικών τόξων, από όπου και δίνεται η εντολή της κίνησης της κατασκευής και η σταθεροποίησή της στην τελική θέση.

Θέση σχοινιών στην κατασκευή και διευθύνσεις ενεργοποίησης της κίνησης

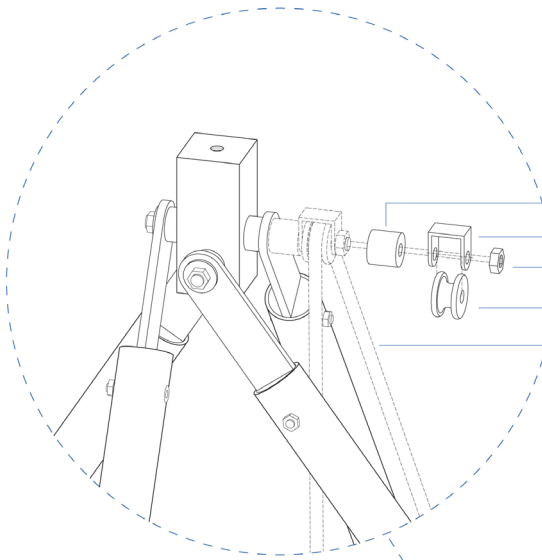


Μηχανισμός μετάδοσης κίνησης Ενεργοποίηση της τροχαλίας

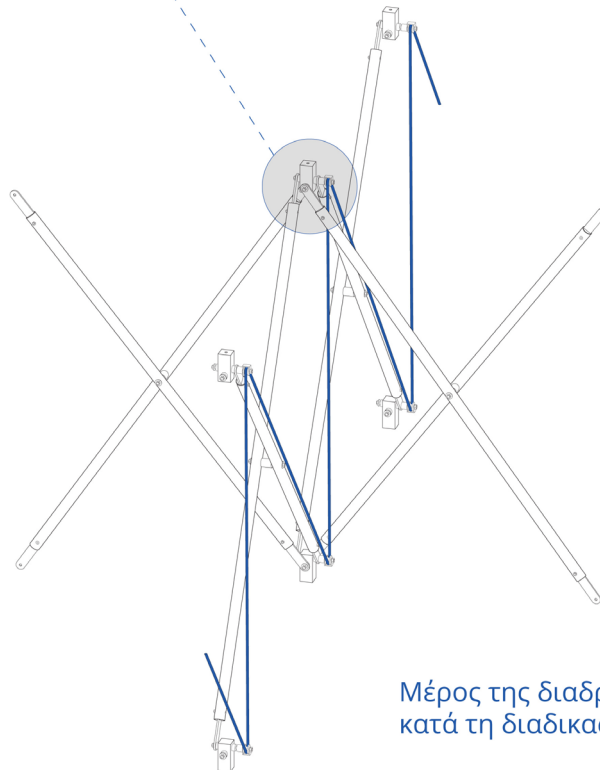


Το σχήμα αναπαριστά διαγραμματικά το σύστημα που υπάρχει μέσα στο κουτί. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα σύστημα κίνησης τριών αξόνων με σπείρωμα. Οι δύο παράλληλοι στο έδαφος άξονες συνδέονται με τα σχοινιά ενός κεντρικού και ενός περιμετρικού τόξου και λειτουργούν σαν τροχαλίες που γύρω τους θα μαζευτεί το σχοινί. Ο τρίτος άξονας είναι κατακόρυφος στο έδαφος και λειτουργώντας όπως ο μηχανισμός της τέντας θα δώσει εντολή για την κίνηση του συστήματος. Οι άξονες θα περιστραφούν μέχρι της προκαθορισμένη τελική θέση της κατασκευής, όπου τότε θα περαστεί ο γάντζος του σχήματος και θα μπλοκάρει το περεταίρω άνοιγμα ή κλείσιμο της κατασκευής.

Λεπτομέρεια σύνδεσης τροχαλίας στον κόμβο



- Μεταλλικό στοιχείο σταθεροποίησης \varnothing 6mm εσ. \varnothing 16mm εξ. πλάτους 14mm
- Μεταλλικό στοιχείο ασφαλείας σχοινού
- Μεταλλικό παξιμάδι
- Πλαστική τροχαλία από teflon \varnothing 6mm εσ. \varnothing 20mm εξ.
- Σχοινί \varnothing 6 mm



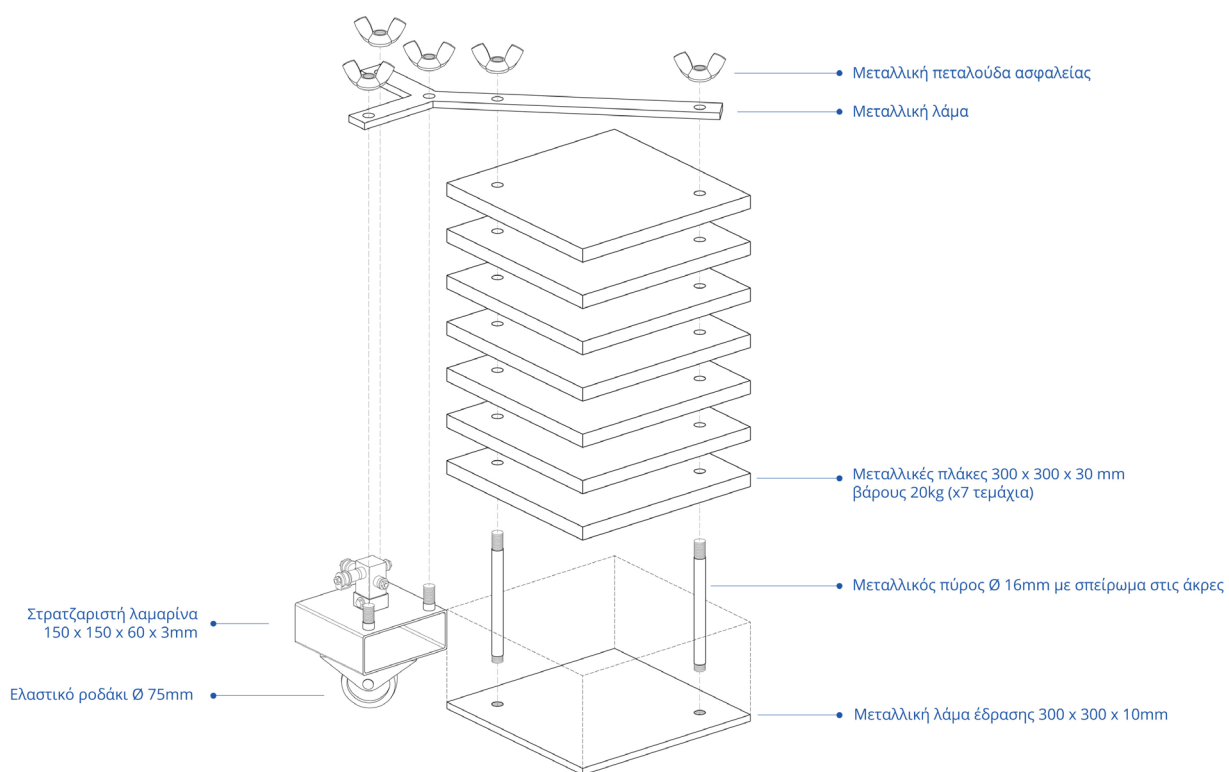
Μέρος της διαδρομής ενός σχοινού κατά τη διαδικασία ανέγερσης

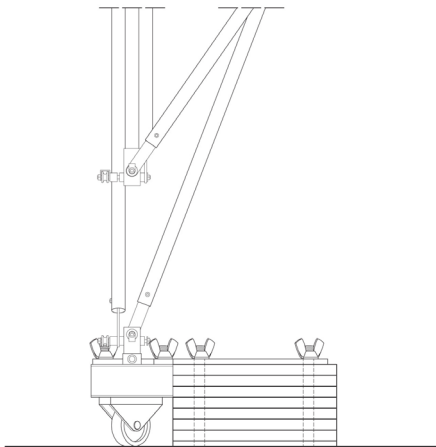
Οι κόμβοι από τους οποίους περνάει η διαδρομή του σχοινού διαφοροποιούνται από τους υπόλοιπους. Ο ένας από τους τέσσερις πύρους είναι μεγαλύτερος σε μήκος έτσι ώστε μετά την προσάρτηση της ράβδου να προστεθεί το σύστημα της τροχαλίας. Παρεμβάλλεται λοιπόν ένας αποστάτης και στη συνέχεια τοποθετείται μια τροχαλία από την οποία περνά το σχοινί και ένα μικρό μεταλλικό στοιχείο που λειτουργεί ως σύστημα ασφαλείας του σχοινού.

Στο κάτω σχήμα φαίνεται πως αναπτύσσεται η διαδρομή του σχοινού σε ένα ενδιάμεσο στάδιο της κατασκευής κατά τη διαδικασία της ανέγερσης.

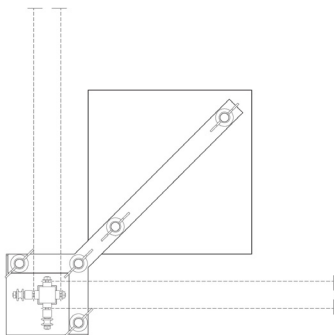
3.4 Θεμέλια

Αξονομετρικό θεμελίου





Όψη θεμελίου



Κάτοψη θεμελίου

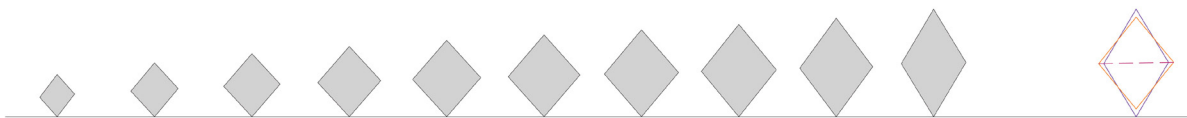
Για να μπορέσει η κατασκευή να ανοίξει με το σύστημα της τροχαλίας που αναφέρθηκε, σε κάθε έναν από τους τέσσερις γωνιακούς κόμβους που ακουμπούν στο έδαφος είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα ροδάκι για την κύλιση της κατασκευής. Στα τέσσερα αυτά σημεία θα γίνει και η θεμελίωση της κατασκευής.

Οι τέσσερις γωνιακοί κόμβοι είναι ενωμένοι με μια στραντζαριστή λαμαρίνα και στο κάτω μέρος της βρίσκεται ένα ροδάκι \varnothing 75 mm. Το πάνω μέρος της λαμαρίνας φέρει πύρους με σπείρωμα ως αναμονή για την ένωση με το θεμέλιο.

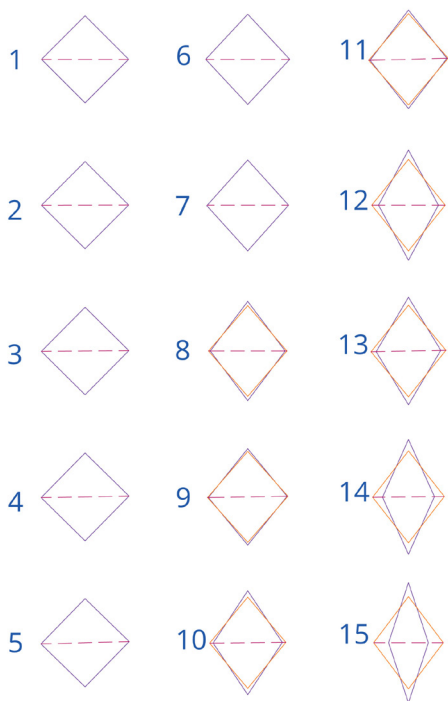
Το θεμέλιο αντί για ένα συμπαγή όγκο είναι σπασμένο σε μικρότερα στοιχεία προκειμένου να μπορεί ένας άνθρωπος να σηκώσει το βάρος τους. Αναπτύσσεται ως εξής: Πάνω σε μια μεταλλική λάμα έδρασης τοποθετούνται δυο μεταλλικοί πύροι με σπείρωμα στις άκρες και έπειτα τοποθετούνται διαδοχικά 7 μεταλλικές πλάκες διατομής 300 x 300 x 30 mm και βάρους 20 kg η καθεμία*. Στη συνέχεια η μεταλλική λάμα με τη σύνθετη γεωμετρία που φαίνεται στο σχήμα ενώνει το θεμέλιο με το στοιχείο που φέρει τον κόμβο και το ροδάκι. Η ένωση γίνεται με τους πύρους αναμονής στη λαμαρίνα του κόμβου και με τους πύρους του θεμελίου. Οι πεταλούδες ασφαλείας ολοκληρώνουν το σύστημα της θεμελίωσης.

* Το βάρος των θεμελίων υπολογίστηκε από το συνολικό βάρος της κατασκευής πολλαπλασιάζοντας με 1.5 συντελεστή ασφαλείας και έπειτα διαιρώντας το σε τέσσερα μέρη, όσα και τα θεμέλια.

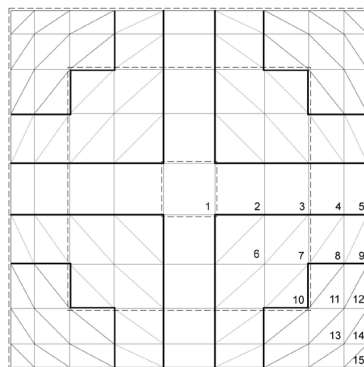
3.5 Μεμβράνες



Διαδοχικές γεωμετρίες ενός ρόμβου κατά τη διαδικασία ανέγερσης



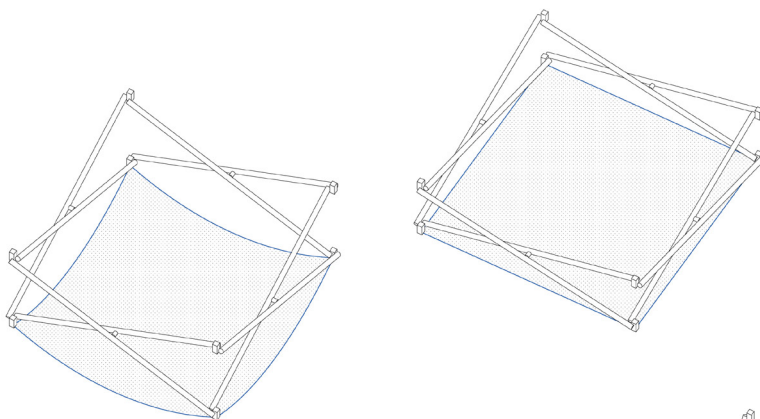
Μεταβολή των διαγωνίων στους ρόμβους της κατασκευής



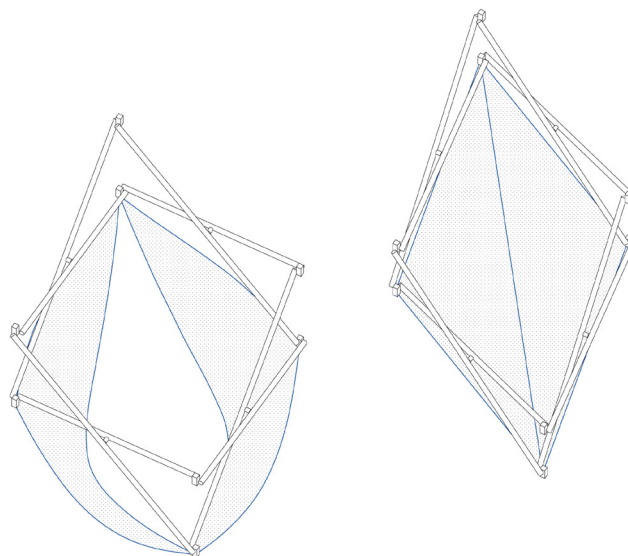
Εντοπισμός ρόμβων με τις μεγαλύτερες μεταβολές στις διαγωνίους

Το ζήτημα της κάλυψης της κατασκευής αποτέλεσε ένα από τα δυσκολότερα κομμάτια αυτής της εργασίας. Λόγω των γεωμετρικών ασυμβατοτήτων που παρατηρούνται κατά τη διαδικασία της ανέγερσης, κάθε ρόμβος που σχηματίζεται ανάμεσα σε τέσσερις κόμβους παρουσιάζει επίσης γεωμετρικές ασυμβατότητες. Στις εικόνες παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο οι ρόμβοι, οι οποίοι ανήκουν πάντοτε σε ένα επίπεδο, μεταβάλλουν το σχήμα τους. Φαίνεται πως οι δύο διαγώνιες των ρόμβων μεγαλώνουν μέχρι ένα σημείο, διαφορετικό για τον κάθε ρόμβο, ενώ από εκείνη τη θέση και μετά η μια διαγώνιος συνεχίζει να μεγαλώνει, ενώ η άλλη αρχίζει να μικραίνει. Αυτό προφανώς αποτελεί σημαντικό πρόβλημα, καθώς η μεμβράνη που καλύπτει την κατασκευή πρέπει να βρίσκεται εξαρχής προσαρτημένη σε αυτήν, ενώ στην τελική θέση πρέπει να είναι τεντωμένη.

Από τη μελέτη των διαγωνίων κάθε ρόμβου που σχηματίζεται στην κατασκευή, διαμορφώθηκαν δυο περιπτώσεις για την προσάρτηση της μεμβράνης. Στην πρώτη περίπτωση ανήκουν οι ρόμβοι που βρίσκονται κοντά στο κέντρο της κατασκευής. Οι συγκεκριμένοι δεν παρουσιάζουν μεγάλη μεταβολή της διαγωνίου και επομένως θα μπορούσε η απόκλιση που προκύπτει να καλυφθεί μέσω της ελαστικότητας της μεμβράνης. Έτσι οι ρόμβοι αυτοί καλύπτονται από ένα ενιαίο τμήμα μεμβράνης με διαστάσεις αυτές που θα έχει ο ρόμβος στην τελική θέση. Στη δεύτερη περίπτωση ανήκουν οι ρόμβοι που βρίσκονται προς τα άκρα της κατασκευής, καθώς παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση στις ακραίες τιμές των διαγωνίων τους. Στους ρόμβους αυτούς προσαρτώνται δυο τμήματα μεμβράνης όπως φαίνονται στο σχήμα, τα οποία δημιουργούν ένα άνοιγμα κατά τη διαδικασία της ανέγερσης προκειμένου να αντεπεξέλθουν στην αυξομείωση της διαγωνίου και στην τελική θέση τεντώνουν, με το ένα τμήμα να επικαλύπτει μερικώς το άλλο.

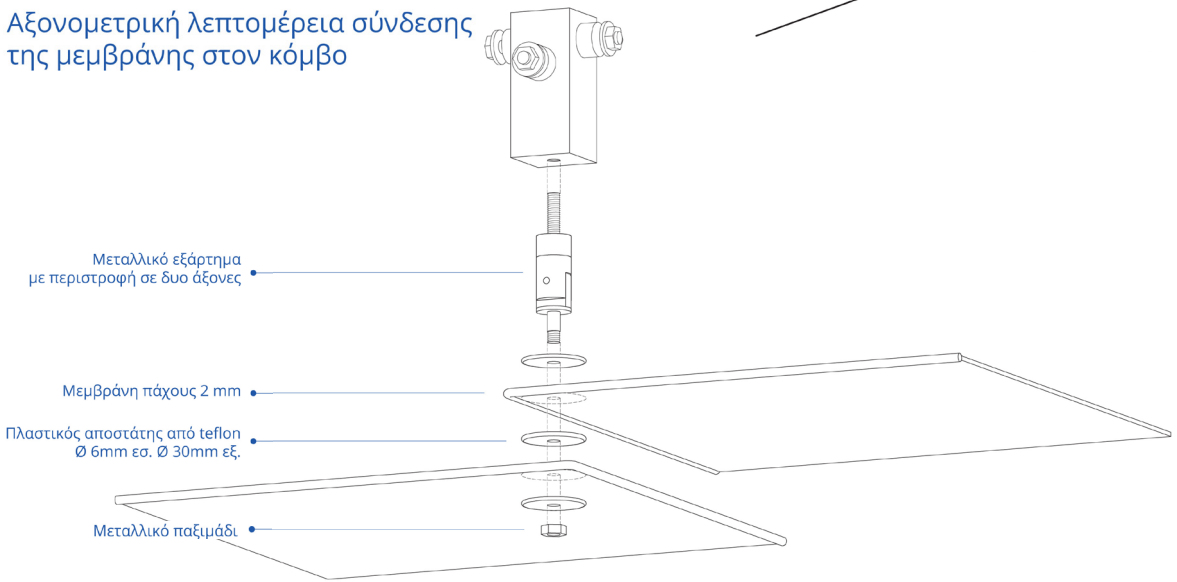


Περίπτωση 1



Περίπτωση 2

Άξονομετρική λεπτομέρεια σύνδεσης της μεμβράνης στον κόμβο

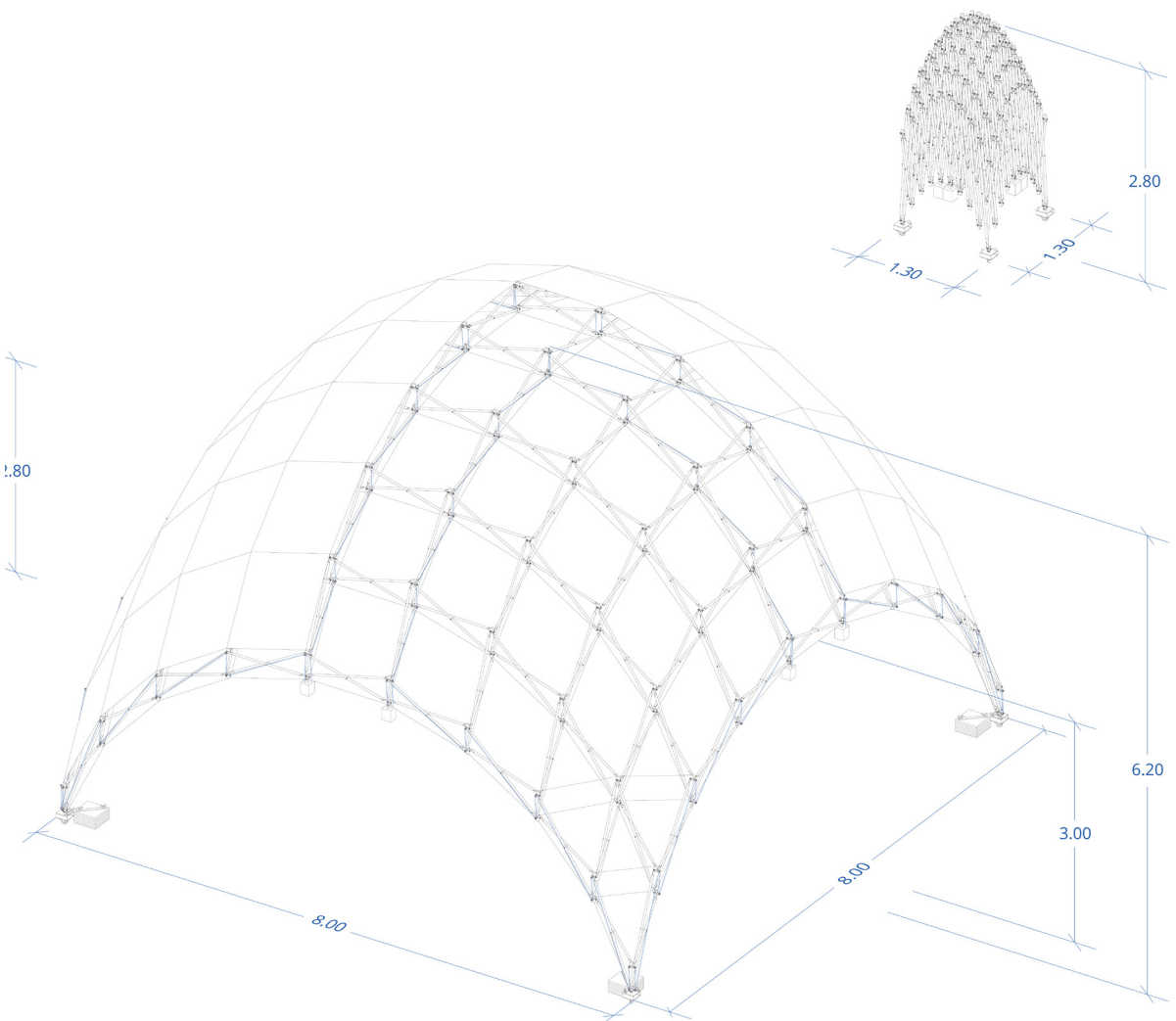


Κάθε ρόμβος καλύπτεται με το δικό του ανεξάρτητο τμήμα μεμβράνης καθώς στην περίπτωση που ολόκληρη η κατασκευή καλυπτόταν με μια ενιαία μεμβράνη, θα ήταν ιδιαίτερα επιρρεπής στο φαινόμενο της υφαρπαγής. Για το λόγο αυτό κάθε κομμάτι μεμβράνης έχει μια μικρή απόσταση καθ' ύψος από το γειτονικό του ώστε να εκτονώνεται ο αέρας. Παράλληλα είναι τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο σαν σύνολο ώστε να επικαλύπτονται κατάλληλα και να μην μπαίνει νερό στην κατασκευή. Ωστόσο, τόσο κατά τη διαδικασία της ανέγερσης όσο και στην τελική θέση, η μεμβράνη δεν βρίσκεται παράλληλα σε σχέση με τον κόμβο, αλλά πάντοτε παρουσιάζει μια στροφή ως προς αυτόν. Επομένως ο τρόπος με τον οποίο ενώνεται η μεμβράνη στον κόμβο πρέπει να εξασφαλίζει τη σωστή θέση της στο χώρο, χωρίς να παραμορφώνεται ή να κινδυνεύει να σκιστεί. Αυτό επιτυγχάνεται με το μεταλλικό εξάρτημα που φαίνεται στο σχήμα, το οποίο έχει τη δυνατότητα να περιστρέφεται σε δυο άξονες ακολουθώντας την κίνηση της μεμβράνης κατά το άνοιγμα της κατασκευής. Η απόσταση μεταξύ των μεμβρανών για την αποφυγή της υφαρπαγής εξασφαλίζεται από έναν πλαστικό αποστάτη.

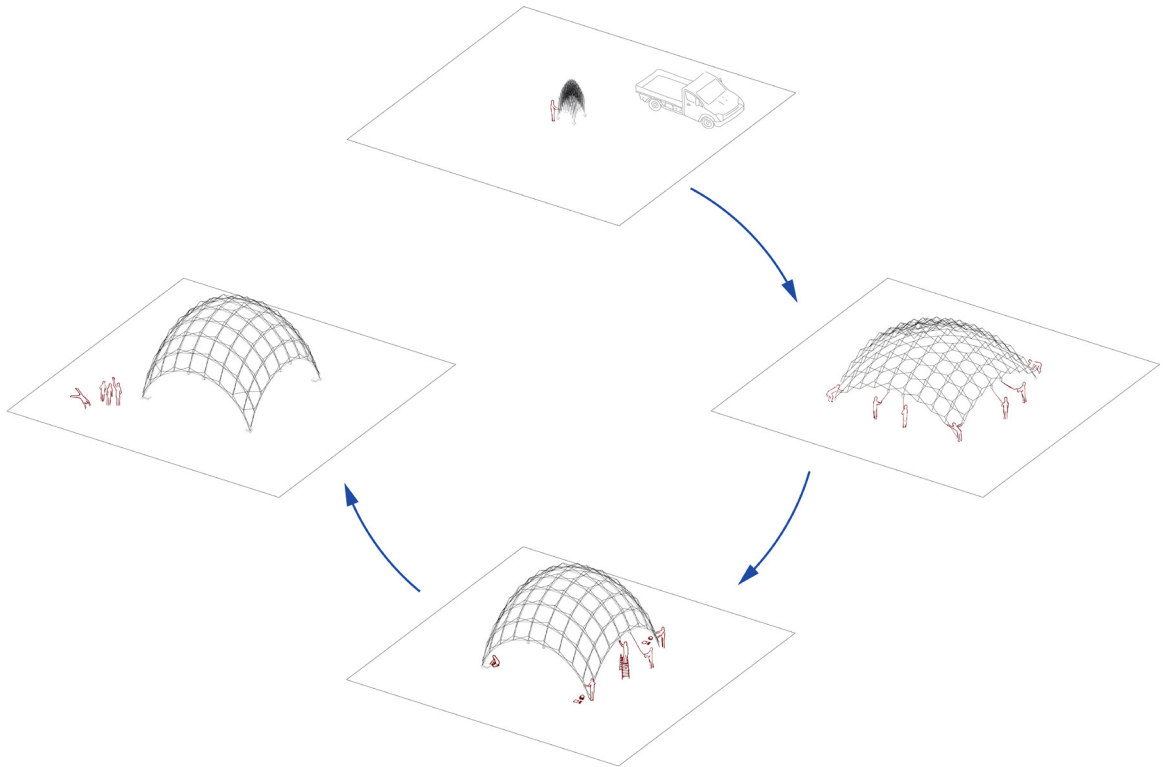
3. 6 Αξονομετρικό κλειστής και ανοιχτής κατάστασης της κατασκευής

Η κατασκευή που προκύπτει τελικά έχει στην κλειστή θέση διαστάσεις 1.30 x 1.30 x 2.80 m και στην ανοιχτή θέση 8.00 x 8.00 x 6.20 m στο μέγιστο ύψος της. Αυτό σημαίνει ότι η τελική μορφή της κατασκευής είναι περίπου 6 φορές μεγαλύτερη σε κάτοψη και 2 φορές μεγαλύτερη σε ύψος από ότι ήταν στην κλειστή θέση. Επιτυγχάνεται επομένως ο αρχικός στόχος για οικονομία χώρου, ευκολία στη μεταφορά και στην αποθήκευση.

Σαν πρόσθετη βελτίωση της σταθεροποίησης της κατασκευής, προτείνεται η τοποθέτηση ράβδων στις διαγωνίους των τριών γωνιακών ρόμβων, όπως φαίνονται στο σχέδιο. Οι συγκεκριμένοι ρόμβοι, καθώς δέχονται αρκετή φόρτιση από το βάρος της κατασκευής, τείνουν να διαστρεβλωθούν. Προσθέτοντας τις ράβδους δημιουργούνται τριγωνισμοί και το σύνολο ενισχύεται σημαντικά σε αντοχή. Επίσης, η τοποθέτηση των διαγωνίων είναι εφικτή μετά την ανέγερση της κατασκευής στην τελική θέση, αφού τα σημεία αυτά βρίσκονται πολύ κοντά στο έδαφος.



3.7 Διαδικασία ανέγερσης



Για τη διαδικασία της μεταφοράς και του στησίματος της κατασκευής στο πεδίο, είναι απαραίτητο να υπάρχουν:

- ένα μικρό φορτηγό με καρότσα, για τη μεταφορά της κατασκευής και των υπολοίπων στοιχείων που την αποτελούν (πλάκες θεμελίων, ράβδοι για τις διαγώνιες, μηχανισμός τροχαλίας, κ.α.)
- 8 άτομα για το άνοιγμα της κατασκευής και την τοποθέτηση των θεμελίων
- μια μικρή σκάλα

Η κατασκευή μεταφέρεται σε μια τοποθεσία με μηδενική ή ελάχιστη κλίση. Σημειώνονται στο έδαφος τα τέσσερα σημεία που οριοθετούν την κατασκευή. Οκτώ άτομα (δυο σε κάθε πλευρά) ξεκινούν ταυτόχρονα να περιστρέφουν τον άξονα που περιέχει το κουτί με τις τροχαλίες και τα σχοινιά. Η κατασκευή εκτείνεται μέχρι τη μέγιστη ανοιχτή θέση και έπειτα φτάνει στην τελική της θέση. Οι μισοί μένουν να στηρίζουν την κατασκευή έως ότου οι άλλοι μισοί τοποθετήσουν τα θεμέλια και τα ενώσουν με τους τέσσερις γωνιακούς κόμβους. Έπειτα ένα άτομο ανεβαίνει στη σκάλα και σταθεροποιεί τις τροχαλίες στα κουτιά. Τέλος, τοποθετούνται οι ράβδοι στις διαγώνιους. Η κατασκευή είναι έτοιμη! Για τη διαδικασία του κλεισίματος ακολουθείται ακριβώς η αντίστροφη διαδικασία.

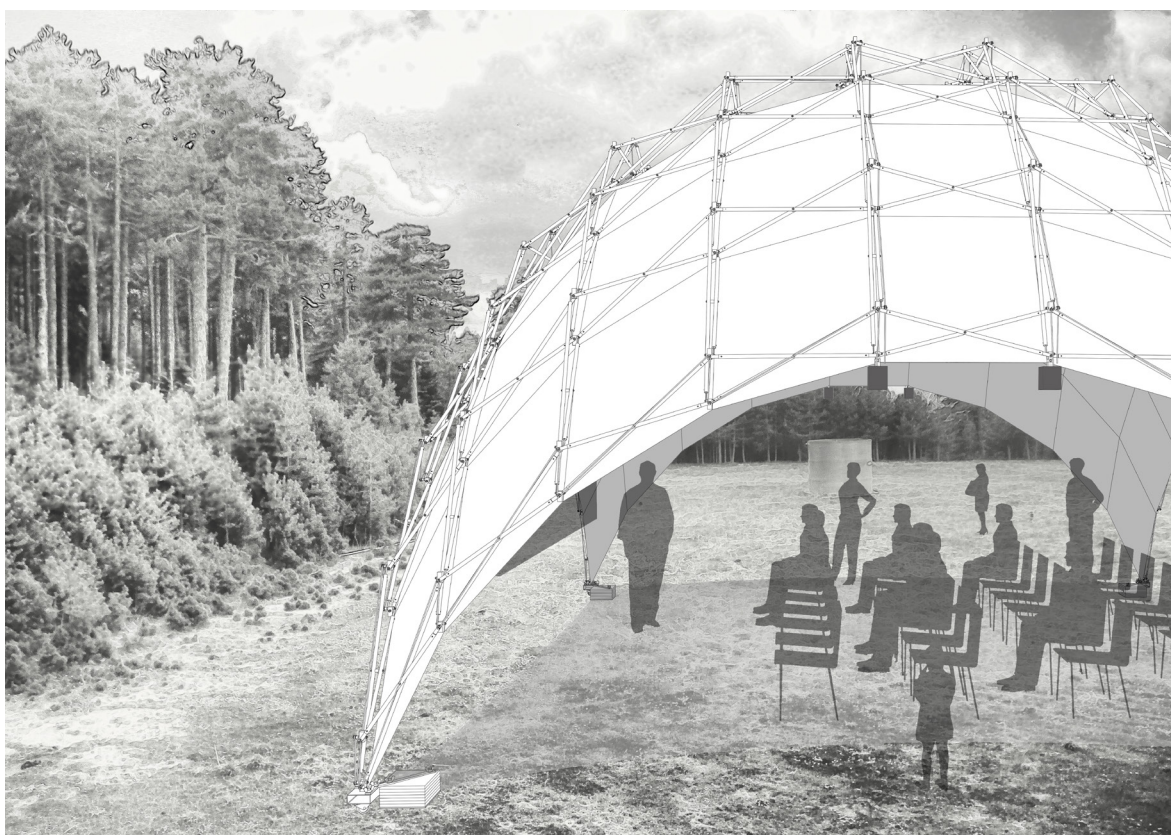
3.8 Παραδείγματα τοποθέτησης της κατασκευής σε διαφορετικές τόποθεσίες και με διαφορετικές λειτουργίες



Ένωση μονάδων σε σειρά για τη δημιουργία υπαίθριας έκθεσης προϊόντων στην πλατεία Αγίου Γεωργίου στην Πάτρα.



Μονάδες σε σειρά αλλά και ανεξάρτητες για την προσωρινή φιλοξενία λειτουργιών μέριμνας για τους πρόσφυγες στην περιοχή του Σκαρμαγκά.



Τοποθέτηση μιας κεντρικής μονάδας για τη φιλοξενία ομιλιών και άλλων δραστηριοτήτων στα πλαίσια ετήσιας εκδήλωσης στον Πάρνωνα.

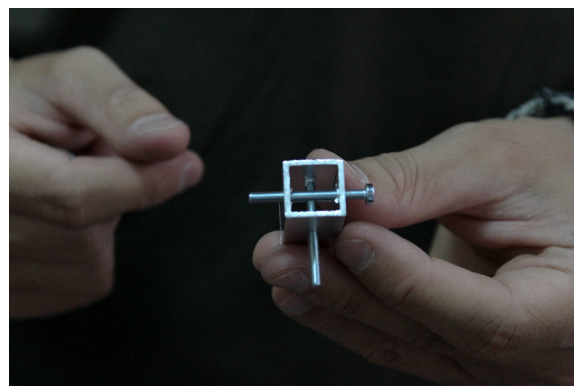
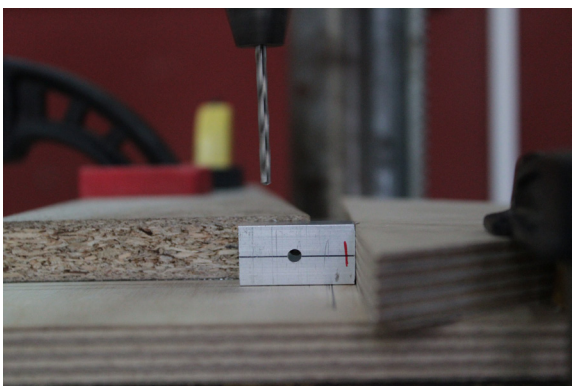
Παράρτημα

Φωτογραφίες από τη διαδικασία κατασκευής της μακέτας

Κοπή κόμβων



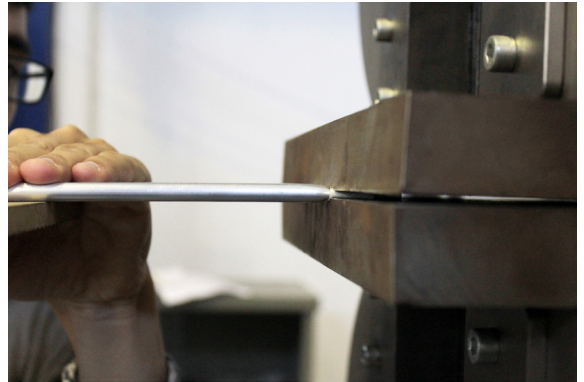
Τρύπημα κόμβων



Τρύπημα της ράβδου στη μέση



Πάτημα των άκρων της ράβδου



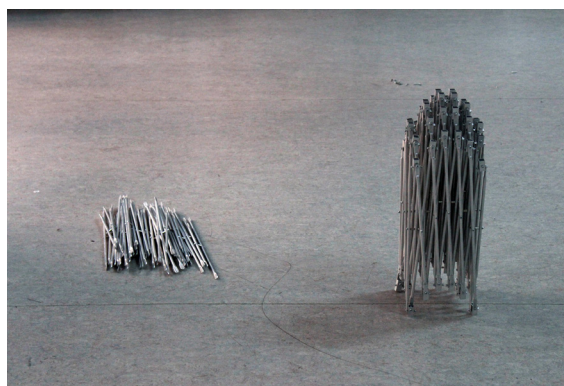
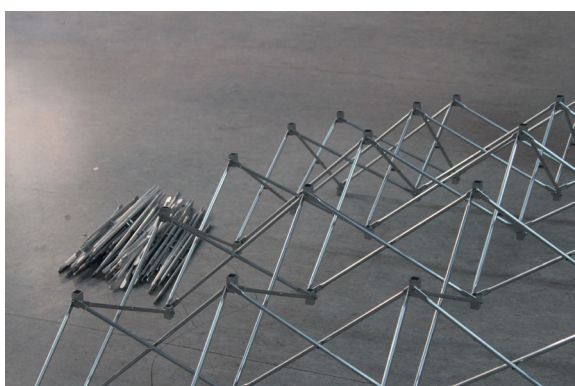
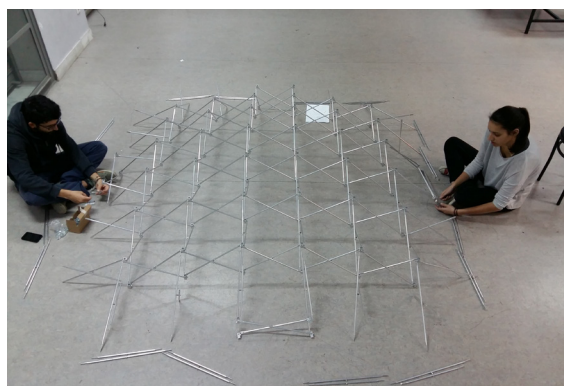
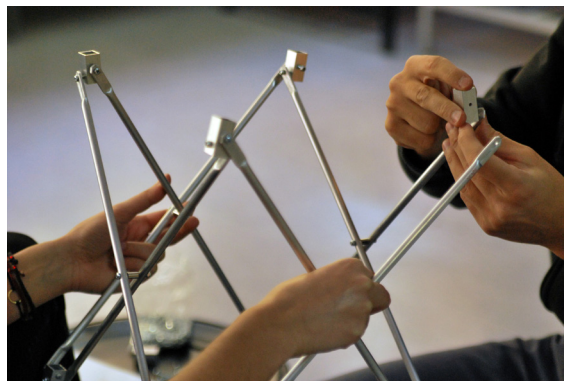
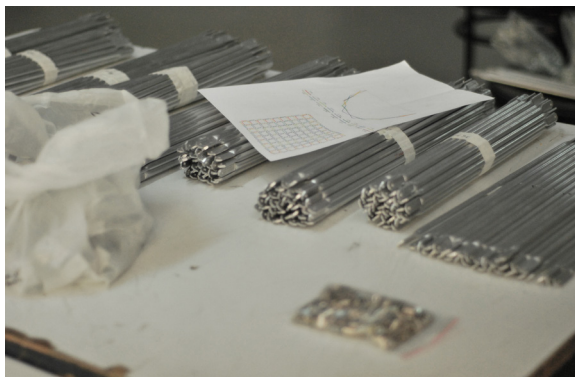
Τρύπημα των άκρων της ράβδου



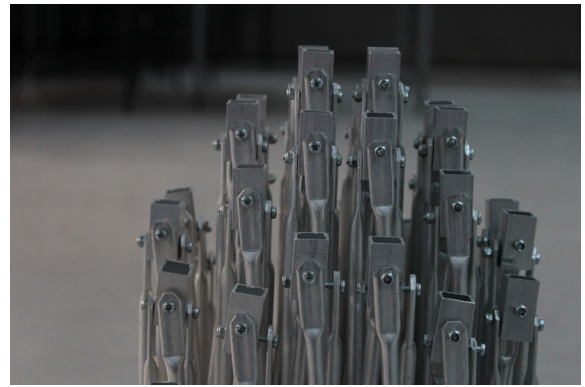
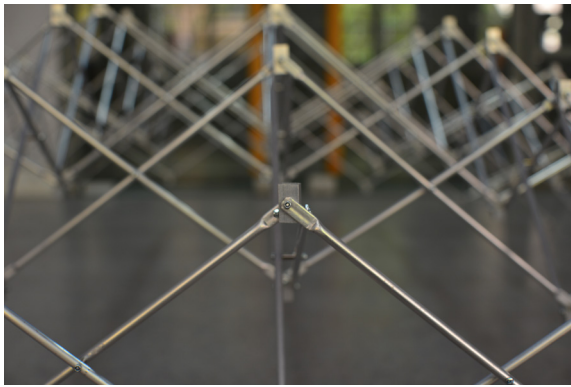
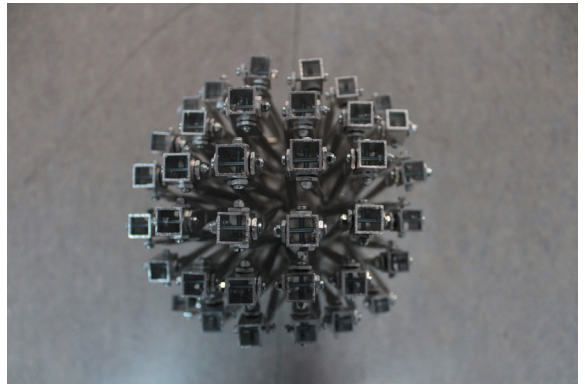
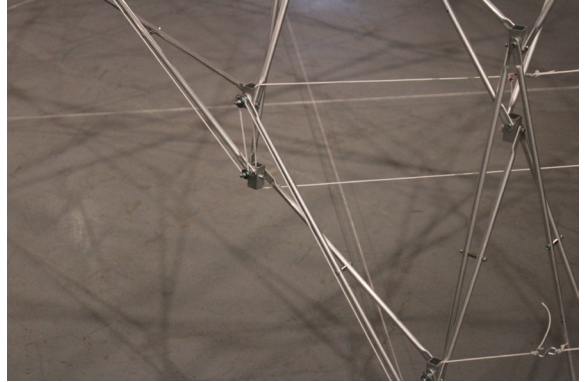
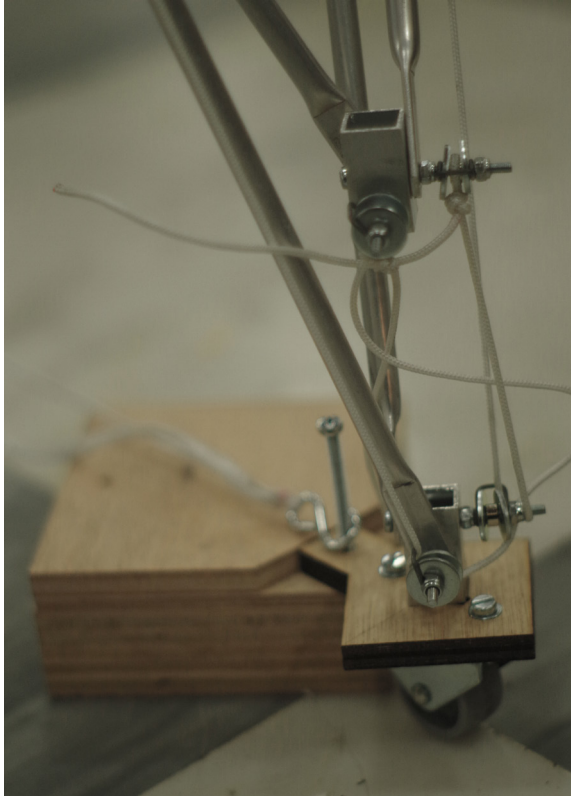
Κοπή των άκρων της ράβδου



Φωτογραφίες από τη συναρμολόγηση της μακέτας



Διάφορες εικόνες της μακέτας



Φωτογραφίες από το άνοιγμα του μοντέλου της κατασκευής σε κλίμακα 1:3 κατά τη διάρκεια της παρουσίασης της διπλωματικής στο κτήριο Αβέρωφ (7-3-2017).





Επιλεγμένη Βιβλιογραφία

Bouten, Sam : Transformable Structures and their Architectural Application , Ghent University, Department of Structural Engineering, Faculty of Engineering and Architecture , Supervisor: Prof. dr. ir.-arch. Jan Belis, (Academic year 2014-2015)

Ματθαίου, Μαρία : Κινητικές Υβριδικές Δομικές Κατασκευές, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Κύπρου, Τμήμα Αρχιτεκτονικής, Επιβλέπων: Φωκάς Μάριος, (2014)

Friedman, Noémi : Investigation of highly flexible, deployable structures: Review, modelling, control, experiments and application, Doctoral Thesis, École normale supérieure de Cachan and Budapest University of Technology and Economics, Domain: Civil Engineering, Supervisors: Prof. Farkas György and Prof. Imbrahimbegovic Adnan, (2012)

Son, Miriam Euni : The Design and Analysis of Tension Fabric Structures, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Supervisor: Jerome J. Connor, (2007)

Ανδρίτσου, Ευανθία : Μελέτη και ανάλυση tensegrity κατασκευών, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων και Συστημάτων, Επιβλέπων: Παπανίκος Παρασκευάς (2010)

Αδαμόπουλος, Γεώργιος, Παππάς, Φίλιππος : Ο "απελευθερωμένος" χρήστης, ο "ευγενικός" ειδικός, η "τέλεια" μηχανή. Τεχνολογικές Ουτοπίες Εκδημοκρατισμού του Σχεδιασμού στο Προ-Διαδικτυακό Παράδειγμα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Επιβλέπων: Παπαλεξόπουλος Δημήτρης, (2016)

Masubuchi, Motoi : Conceptual and Structural Design of adaptive membrane structures with spoked wheel principle - folding to the perimeter, Doctoral Thesis, Technical University of Berlin, Institute of Civil Engineering, Faculty of Planning Building Environment, Supervisor: Klaus Rückert, (2013)

Kuusisto, Terhi Kristiina : Textile in Architecture, Tampere University of Technology, Faculty of Built Environment, School of Architecture, Supervisor: Salonen Kari, (2010)

Τσινίκας, Νίκος : Αρχιτεκτονική ενάντια στη Βαρύτητα, Θεσσαλονίκη, εκδόσεις University Studio Press, (2001)

Motro, Rene : Tensegrity, Structural Systems for the Future, London and Sterling, press Kogan Page Science, (2003)

Seidel, Michael : Tensile Surface Structures: A Practical Guide to Cable and Membrane Construction, Berlin, press Ernst & Sohn (2009)

Skelton, Robert, de Oliveira, Mauricio : Tensegrity Systems, London and New York, press Springer, (2009)

Gantes, Charis: Deployable Structures: Analysis and Design, Southampton, Boston, WIT press, (2001)

Hernandez-Ros, Ricardo Aroca : Estructuras espaciales desmontables y desplegadas, estudio de la obra del arquitecto Emilio Perez Pinero, Doctoral Tesis, Superior Technical School of architecture of Madrid, Department of building structures, Supervisor Ripoll, Valentin Quintas, (1989)

Δημοσιεύσεις

Valcarcel, J. P., Escrig, F. : «La obra arquitectonica de Emilio Perez Pinero», (1993)

Escrig, Felix, Valcarcel, Juan Perez, Sanchez, Jose : «Deployable cover on a swimming pool in Seville», published on *Journal of the International Association for shell and spatial structures*, (vol.37 n.120 p.39-70) (1996)

Tsutomu, Kokawa : «Cable Scissors Arch - Marionettic Structure»

Escrig, Felix, Sanchez, Jose : «New design and geometries of deployable scissor structures», Adaptables2006, TU/e, International Conference On Adaptable Building Structures, Eindhoven, The Netherlands, 03-05 July 2006

Tsutomu, Kokawa : «Scissors Arch with Zigzag-cable through pulley-joints»

Ιστοσελίδες

SMIA, Structural Morphology in Architecture, Universitat Politecnica de Catalunya, BarcelonaTECH (www.smia-experimental.com)

