

**Πολυτεχνείο Κρήτης
Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών
Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών
«Χώρος, Σχεδιασμός και Δομημένο Περβάλλον»
Α΄ Θεματική Ενότητα**

«Ψηφιακός σχεδιασμός και κατασκευή δομικής μονάδας από μπετόν για τη συναρμολόγηση κελυφών πολλαπλών μορφών»

**Διπλωματική Εργασία
Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια : Μαρκιανάκη Χρυσάλις
Επιβλέπων καθηγητής : Γιαννούδης Σωκράτης
Σεπτέμβριος 2017**

ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΕΡΕΥΝΑ

Η Μονάδα – Προκατασκευασμένα Στοιχεία

Η μονάδα (module) στην αρχιτεκτονική είναι ένα στοιχείο του οποίου η επανάληψη δημιουργεί μια μορφή, είτε σε χωροταξικό επίπεδο με την επανάληψη μιας μονάδας κατοικίας είτε σε επίπεδο κατασκευής με τη συναρμολόγηση της μονάδας προς την δημιουργία ενός χώρου. Το συνολικό αποτέλεσμα μπορεί να αποτελείται από πανομοιότυπες μονάδες ή από μονάδες με διαφορετικές παραμέτρους, όπως οι διαστάσεις. Για το τελικό αποτέλεσμα απαιτείται ο σχεδιασμός ενός συστήματος συναρμολόγησης των επιμέρους τμημάτων της κατασκευής. Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιείται τόσο για μορφολογικούς λόγους όσο και για την βελτιστοποίηση του χρόνου και των υλικών της κάθε κατασκευής, καθώς η κάθε μονάδα προ-παρασκευάζεται μαζικά σε πιο γρήγορους χρόνους, ελέγχεται πιο εύκολα και έπειτα συναρμολογείται στον χώρο.

Για την κατασκευή αυτής της μονάδας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλα τα υλικά αναλόγως την κάθε κατασκευή και τις μορφολογικές αποφάσεις του αρχιτέκτονα. Στην εργασία αυτή θα μελετηθεί η περίπτωση της κατασκευής με σπλισμένο σκυρόδεμα, προς διερεύνηση των δυνατοτήτων μιας τέτοιας κατασκευής, καθώς οι προκατασκευασμένες μονάδες από μπετό έχουν κάποια πλεονεκτήματα όπως ότι αφαιρείται το πρόβλημα με τις μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες. Αυτός ο καλύτερος έλεγχος σημαίνει καλύτερη συνοχή υλικού και αντοχή. Τα πιο κοινά προκατασκευασμένα στοιχεία είναι προκατασκευασμένοι τοίχοι και όψεις κτιρίων, και μέρη της υποδομής. Όμως η ίδια τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πιο μοναδικές μορφές.

Απο τα πρώτα παραδείγματα όπου χρησιμοποιήθηκαν προκατασκευασμένα μέρη ήταν το Crystal Palace που κατασκευάστηκε μέσα σε λίγους μήνες στο Λονδίνο το 1851. Το σχέδιο του Paxton βασίστηκε σε μια μονάδα 10 x 49 ίντσες που ήταν το μεγαλύτερο γυάλινο στοιχείο που ήταν διαθέσιμο τότε. Το σύστημα συναρμολόγησης αποτελούταν από τρίγωνα που στηριζόντουσαν σε ένα δίκτυο μεταλλικών υποστηλωμάτων και δοκαριών. Έπειτα η κατασκευή αποσυναρμολογήθηκε και μεταφέρθηκε σε άλλο μέρος του Λονδίνου.

Με τον 2ο Παγκόσμιο Πόλεμο όταν χρειάστηκε μια εύκολη λύση για τη διαμονή των πολεμικών δυνάμεων, ξεκίνησε η μαζική παραγωγή προκατασκευασμένων χώρων που μπορούσαν εύκολα να συναρμολογηθούν. Έπειτα, τις δεκαετίες 60'-70' παρατηρείται η εξέλιξη των προκατασκευασμένων στοιχείων από μπετό.

Crystal Palace, 1851



Η ιδέα της μονάδας υπήρχε πάντα στη φύση.

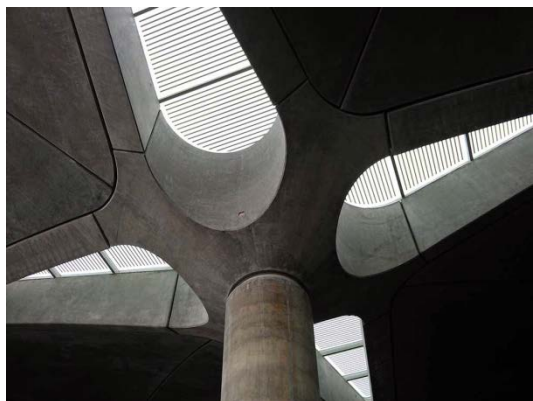




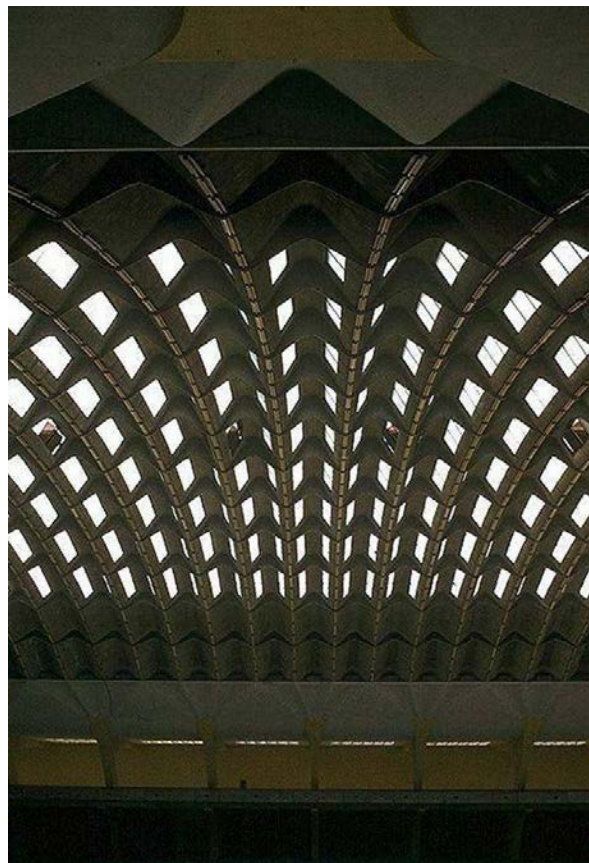
Το Hilton Palacio del Rio Hotel ήταν από τα πρώτα ψηλά κτίρια που κατασκευάστηκαν με τη λογική της μονάδας. Η μονάδα ήταν ένα προκατασκευασμένο δωμάτιο από ελαφρύ σκυρόδεμα. Όλες οι μονάδες τοποθετήθηκαν σε 46 μέρες από έναν ειδικό γερανό και ένα τύπου ελικόπτερο που κρατούσε την ισορροπία των μονάδων ώστε να μην γύρουν στην μεταφορά.



Κατασκευές από προκατασκευασμένα μέλη από σκυρόδεμα έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλά αρχιτεκτονήματα και γίνονται συνεχώς έρευνες σε σχέση με τα υλικά και τον χρόνο κατασκευής.



Queen Alia International Airport , Sir Norman Foster , 2013



“ Grand Solone “B” of the Turin
Exposition Hall
Pier Luigi Nervi , 1948

Τα λεπτά κελυφά από μπετόν είναι κατασκευές που αποτελούνται από ένα κέλυφος με λεπτή στρώση μπετόν συνήθως χωρίς εσωτερικά υποστηλώματα. Οι πιο κοινές μορφές είναι θόλοι αλλά και ελιψοειδή και κυλινδρικά σχήματα ή συνδυασμός αυτών.

Το 1922 οι Dyckerhoff and Widmann κατασκεύασαν το Jena Observatory στη Γερμανία-μια κατασκευή της οποίας η οροφή του είχε πάχος μόλις 3,5 εκατοστά.



Jena Observatory , 1922

Candela ,Chapel Lomas de
Cuernavaca,1958



ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ

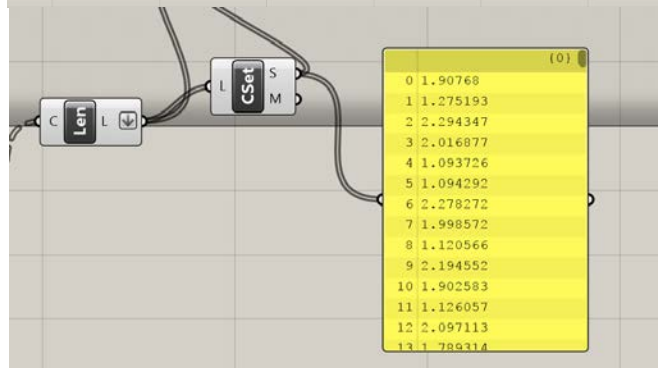
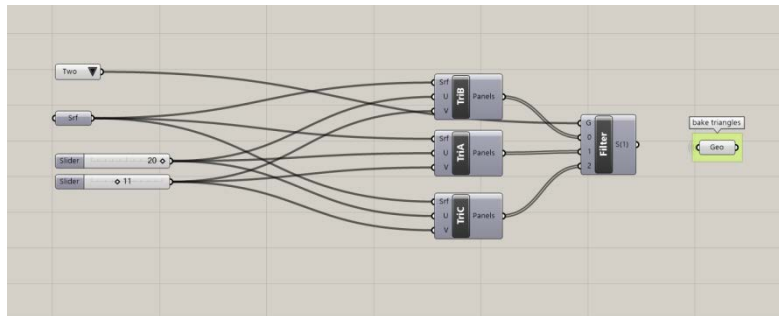
Εύρεση αρχικού σχήματος



Η μορφή της δομικής μονάδας έχει να κάνει με τις μορφολογικές αποφάσεις του κάθε αρχιτέκτονα, αλλά κυρίως με τις ιδιότητες που χρειάζεται να έχει η τελική επιφάνεια που θα προκύψει. Στη συγκεκριμένη εργασία, στόχος της δομικής μονάδας είναι να μπορεί να δημιουργήσει χώρους με δομικό υλικό το μπετό και τη δυνατότητα να συναρμολογούνται-αποσυναρμολογούνται. Οι νέοι αυτοί χώροι θα είναι εφικτό να έχουν μεγάλο ποσοστό κλειστής επιφάνειας, άρα από την συναρμολόγηση να μην προκύπτουν μεγάλα ανοίγματα - να προκύπτουν ποικίλες μορφές, άρα η μονάδα να έχει μια μορφή όχι τόσο μοναδική, και ταυτόχρονα να μπορεί να διαφοροποιηθεί αναλόγως με τις μορφολογικές απαιτήσεις, άρα ποσοστό της δομικής μονάδας να μπορεί να έχει διαφορετικές μορφές χωρίς να επηρεάζεται το σύστημα συναρμολόγησης.

Για όλους τους παραπάνω λόγους επιλέχθηκε το σχήμα του τριγώνου, αλλά και για ένα ακόμη άλλο λόγο : όλες οι μορφές μπορούν να αναλυθούν σε τρίγωνα, και επιπλέον το τρίγωνο είναι η δομική μονάδα όλων των άλλων σχημάτων.

Στη συνέχεια γίνεται μια διερεύνηση στην ψηφιακή ανάλυση των επιφανειών σε τρίγωνα με τη χρήση του προγράμματος grasshopper, με πληροφόρηση από την ανοιχτή κοινότητα για το συγκεκριμένο λογισμικό, grasshopper forum.



ΕΦΑΡΜΟΓΗ 1

Σε αυτή τη περίπτωση, γίνεται μια απλή ανάλυση σε τρίγωνα με την έννοια ότι προκύπτουν πολλαπλά διαφορετικά μήκη ακμών τριγώνων. Σε αυτή τη περίπτωση θα χρειαζόταν κάθε τριγωνική δομική μονάδα να ήταν διαφορετική σε διαστάσεις.

Για να είναι πιο εύκολη η παραγωγή της δομικής μονάδας χρειάζεται στον σχεδιασμό της κάθε επιφάνειας να γίνει κάποια βελτιστοποίηση ώστε η ανάλυση στα τρίγωνα να έχει ως αποτέλεσμα όσο πιο όμοια τρίγωνα γίνεται. Με την παραδοχή ότι η επιφάνεια ίσως αλλάξει λίγο.

Ο γεωδαιτικός θόλος είναι ένας τύπος δομής που αποτελείται από ένα σύνθετο σύμπλεγμα τριγώνων που διαμορφώνουν μια κατά προσέγγιση σφαιρική επιφάνεια. Όσο πιο σύνθετο είναι το σύμπλεγμα των τριγώνων, τόσο περισσότερο ο θόλος προσεγγίζει τη μορφή μιας αληθινής σφαίρας. Ο γεωδαιτικός θόλος σχεδιάστηκε από τον *Richard Buckminster Fuller*.

Εδώ και πολλά χρόνια, όταν έγιναν προσπάθειες να διαιρεθεί η σφαίρα από τον Fuller, έχει γίνει πολύ έρευνα στον ισο διαμοιρασμό του χώρου, με προφανή σκοπό την βιομηχανοποίηση. Μια επιφάνεια μονής καμπυλότητας διαιρείται πολύ εύκολα. Το πρόβλημα είναι με τις επιφάνειες διπλής καμπυλότητας.

Ένας τρόπος που μπορεί αυτό να επιτευχθεί ψηφιακά είναι χρησιμοποιώντας μια **μέθοδο συσταδοποίησης**.

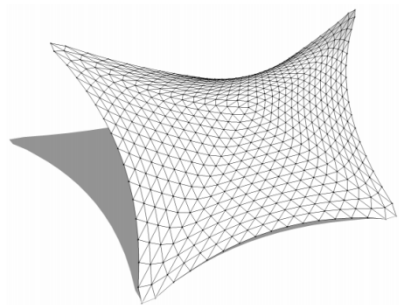
Η συσταδοποίηση είναι η εύρεση ομάδων αντικειμένων έτσι ώστε τα αντικείμενα σε κάθε συστάδα να είναι όμοια ή να σχετίζονται και διαφορετικά από τα αντικείμενα των άλλων συστάδων.

Συγκεκριμένα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο k -means αλγόριθμος κατά τον οποίο κάθε συστάδα συσχετίζεται με ένα κεντρικό σημείο και έπειτα κάθε σημείο ανατίθεται στη συστάδα με το κοντινότερο κεντρικό σημείο.

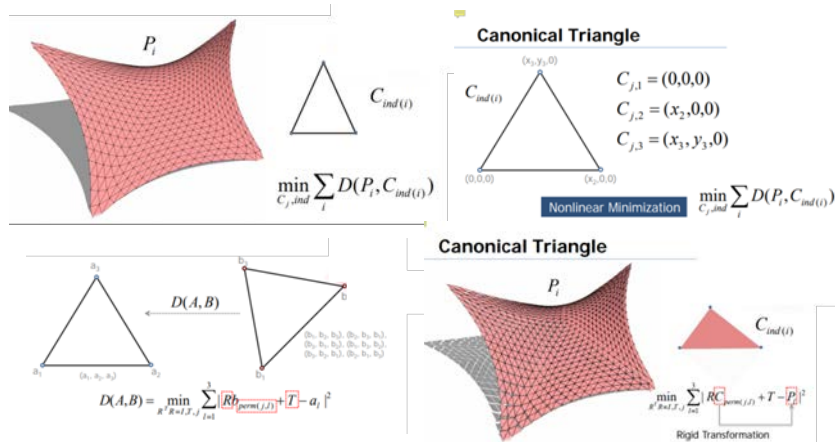
Πιο συγκεκριμένα :

- **Επιλογή K σημείων ως αρχικά κεντρικά σημεία. Η επιλογή συνήθως γίνεται τυχαία.**
- **Ανάθεση όλων των αρχικών σημείων στο κοντινότερο από τα K**
- **Επανα υπολογισμός του κεντρικού στοιχείου κάθε συστάδας**
- **Επανάληψη μέχρι τα κεντρικά σημεία να μην αλλάζουν**

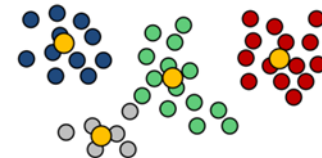
Ο όρος " **k -means**" χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τον James MacQueen το 1967, ενώ ο Stuart Lloyd πρότεινε τον αλγόριθμο το 1957. Είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται σε πολλά επιστημονικά πεδία. Παρακάτω μελετάται ένα παράδειγμα στην αρχιτεκτονική.



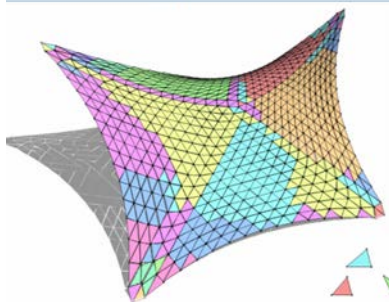
1280 τρίγωνα



Adaptive K-Means Clustering



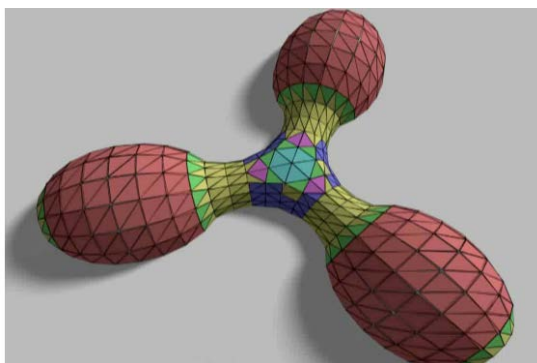
Clustering



1280 triangles | 10 clusters

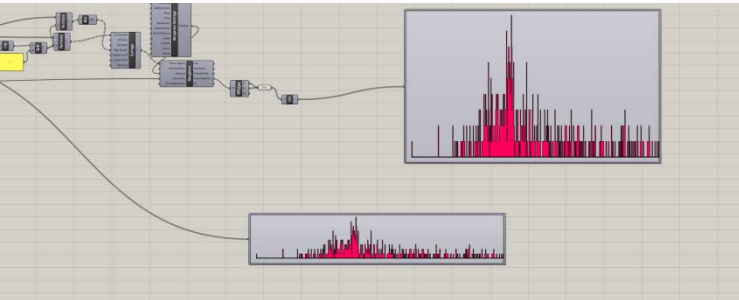
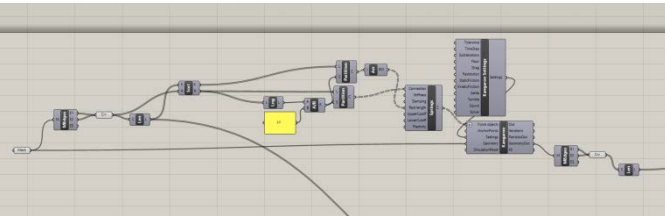
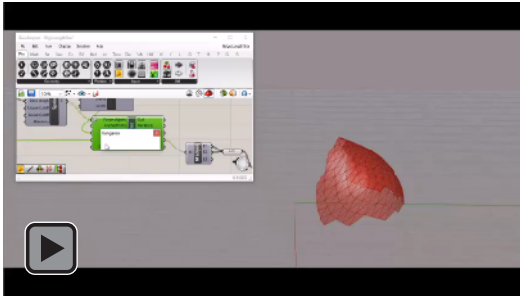


Εφαρμογή k-means clustering
< Triangle Surfaces with Discrete Equivalence Classes >
 Mayank Singh* Texas A&M University
 Scott Schaefer† Texas A&M University

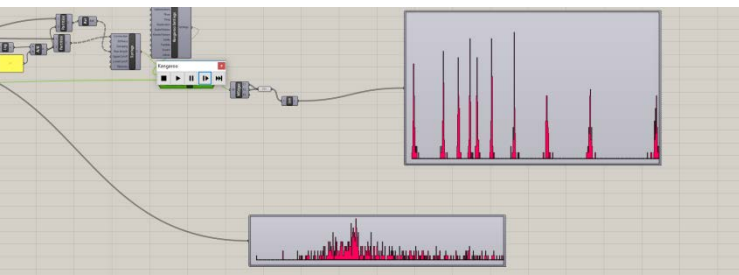


ΕΦΑΡΜΟΓΗ 2 – ΣΥΣΤΑΔΟΠΟΙΗΣΗ

Using definition by Daniel Piker

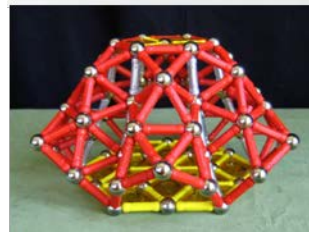
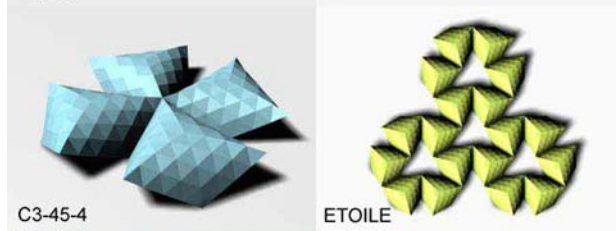
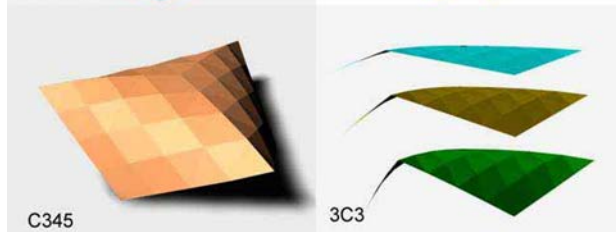
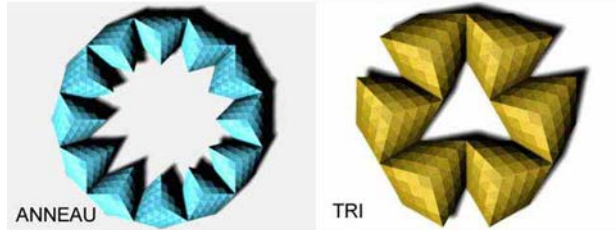
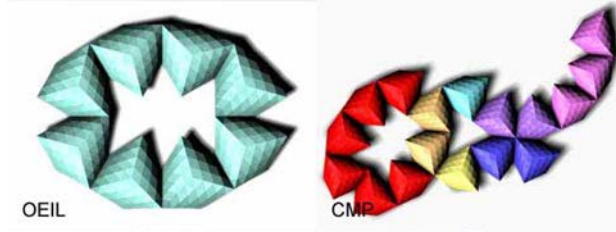


Μήκη τριγώνων πριν



Μήκη τριγώνων μετά

Μία άλλη έρευνα περί ανάλυση επιφανειών σε τρίγωνα είναι αυτή του αρχιτέκτονα Alain LOBEL ο οποίος ακολούθησε την αντίστροφη διαδικασία και ασχολήθηκε με νέες μορφές που μπορούν να βρεθούν αν συναρμολογηθούν μεταξύ τους μόνο ισόπλευρα τρίγωνα, ένα κάθε φορά.



Μια άλλη μεθοδολογία είναι να γίνει προσπάθεια να αναλυθεί η επιφάνεια σε τρίγωνα με συγκεκριμένα μήκη. Η λογική είναι :

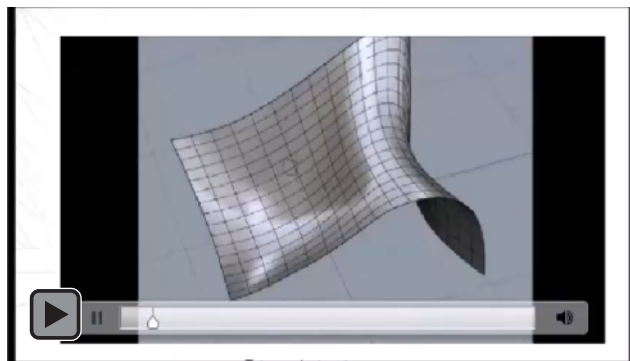
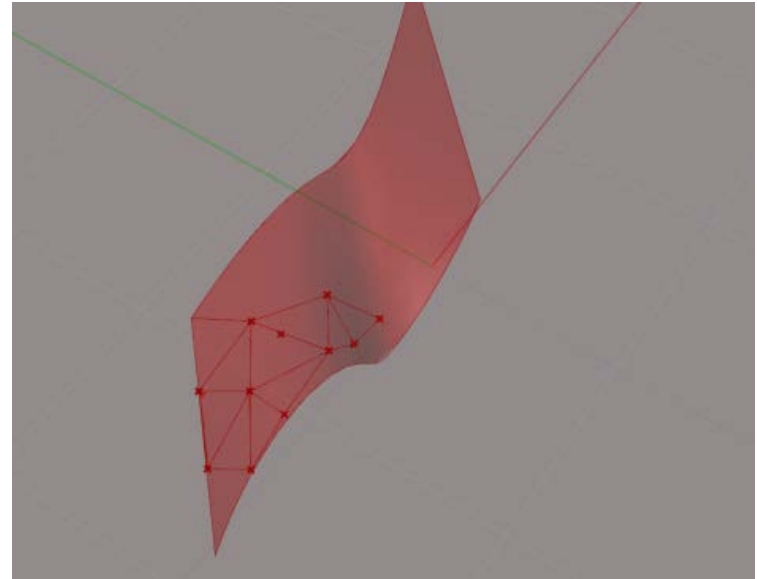
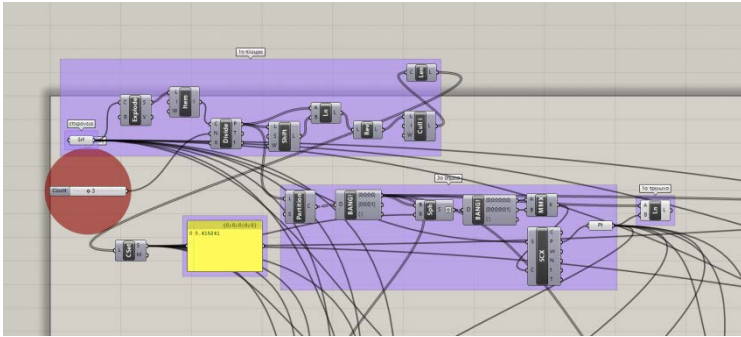
- Χωρίζεται μια πλευρά της επιφάνειας σε ίσα μέρη. Το μήκος αυτό είναι το 1^ο μήκος πλευρών του τριγώνου
- Από τα δύο πρώτα σημεία δημιουργούνται σφαίρες με αυτό το μήκος.
- Το σημείο τομής των 2 σφαιρών με την επιφάνεια είναι το 3^ο σημείο του πρώτου ισόπλευρου τριγώνου
- Διαλέγεται μια πλευρά του τριγώνου τυχαία και γίνεται επανάληψη της διαδικασίας.

Αναλόγως τον αρχικό διαμοιρασμό στο βήμα 1, η επιφάνειά μας θα αλλάξει σχετικά μορφή. Όσο πιο μικρά τα τρίγωνα τόσο πιο κοντά είναι η τελική μορφή στην αρχική.

- Όταν φτάσουμε σε σημείο όπου οι 2 σφαίρες δεν τέμνονται με την επιφάνεια και μεταξύ τους, τότε ορίζουμε ένα άλλο μήκος, παράγωγο του πρώτου, και έτσι δημιουργείται το 2^ο τρίγωνο

Σε αυτό το σημείο πρέπει να ορίσουμε το είδος των τριγώνων που θέλουμε ώστε να κάνουμε επανάληψη της διαδικασίας.

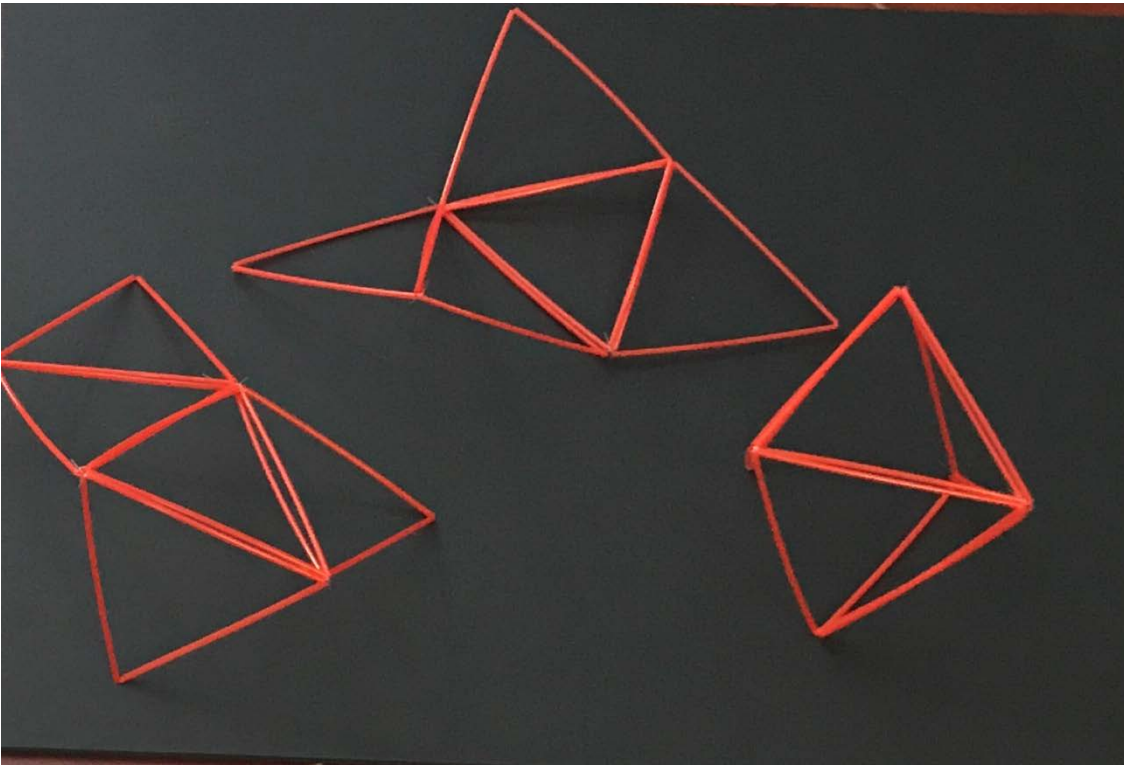
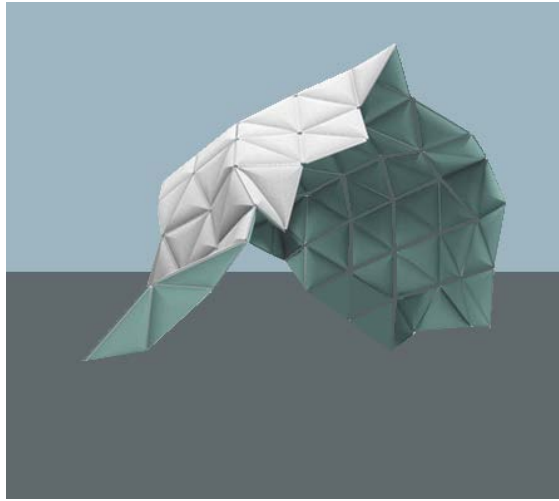
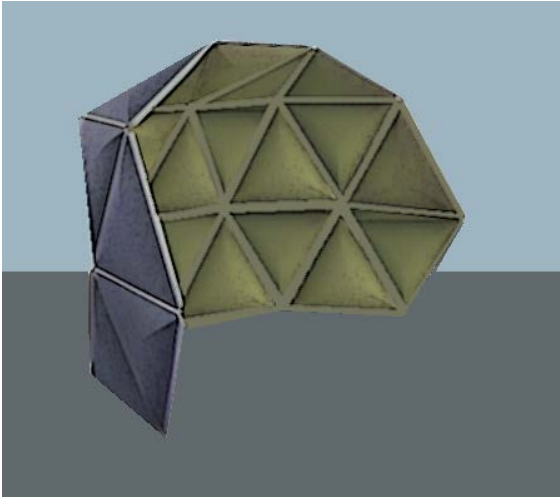
- Στο τέλος είναι πιθανό να χρειαστούν μερικά ακόμα διαφορετικά τρίγωνα για να καλυφθούν τυχόν κενά.



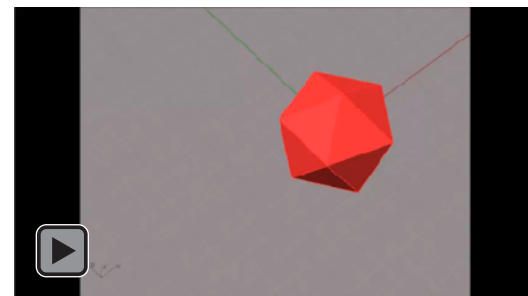
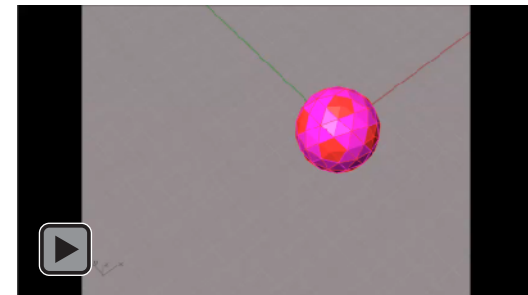
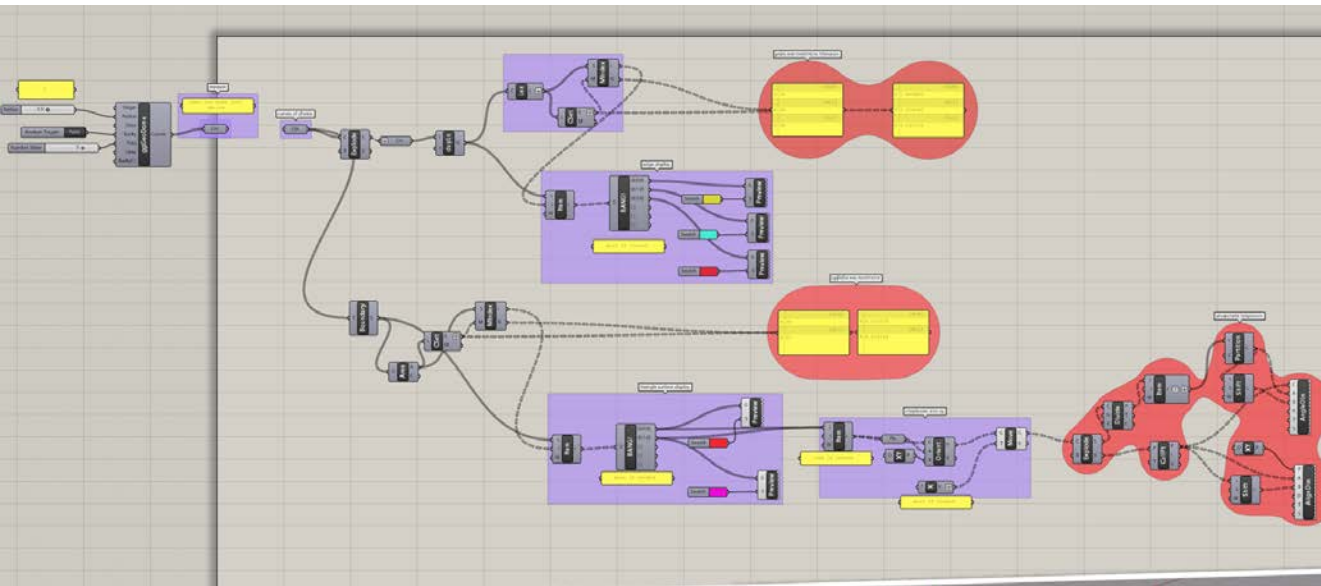
< Bionics in Architecture

Experiments with Multi-Agent Systems in Irregular Folded Structure >

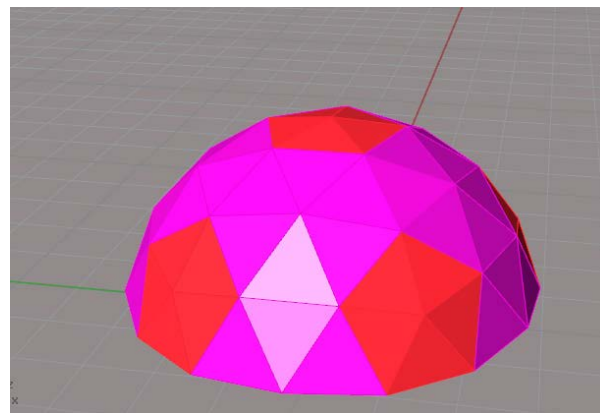
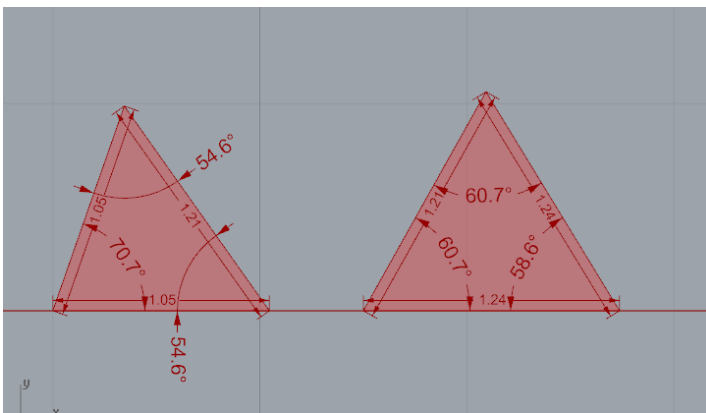
Diploma Thesis submitted at Technische Universität Dresden | Department of Architecture | Chair of Knowledge Architecture | co-mentored by the Institute of Geometry TU Dresden -



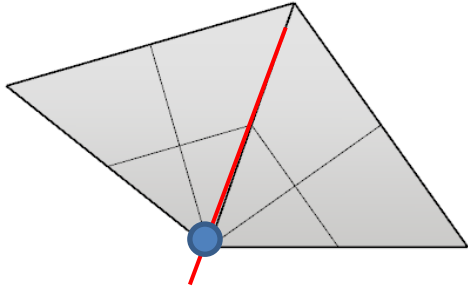
ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΗΣ ΣΦΑΙΡΑΣ



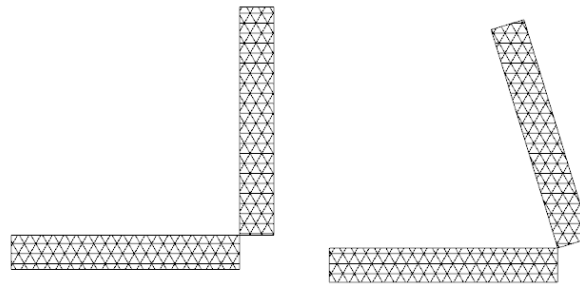
Εφαρμογή σε γεωδαιτικό θόλο ύψους 3μ.



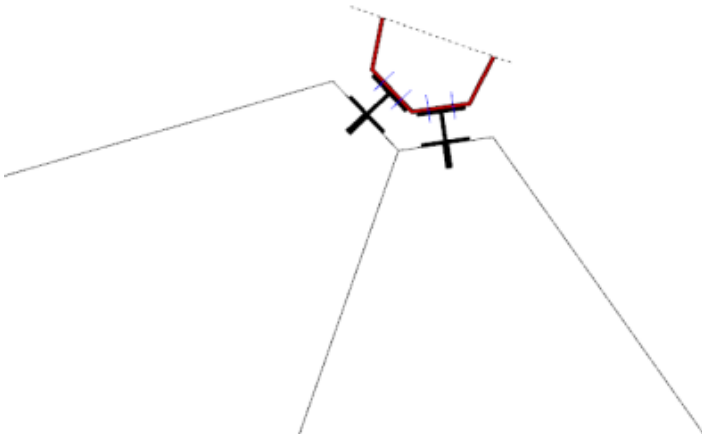
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΠΟ ΜΠΕΤΟ



1. Ένα αρχικό θέμα προς επίλυση είναι η επιφάνεια επαφής της μιας μονάδας με την άλλη. Καθώς ο στόχος είναι αυτές οι μονάδες να είναι τυποποιημένες για διάφορες τελικές μορφές, δεν πρέπει να εξαρτιούνται από τις συγκεκριμένες γωνίες τις κάθε περίπτωσης. Αποτέλεσμα είναι, η επιφάνεια επαφής να είναι στην ουσία μηδενική και να μην υπάρχει σύνδεση στα συγκεκριμένα σημεία.

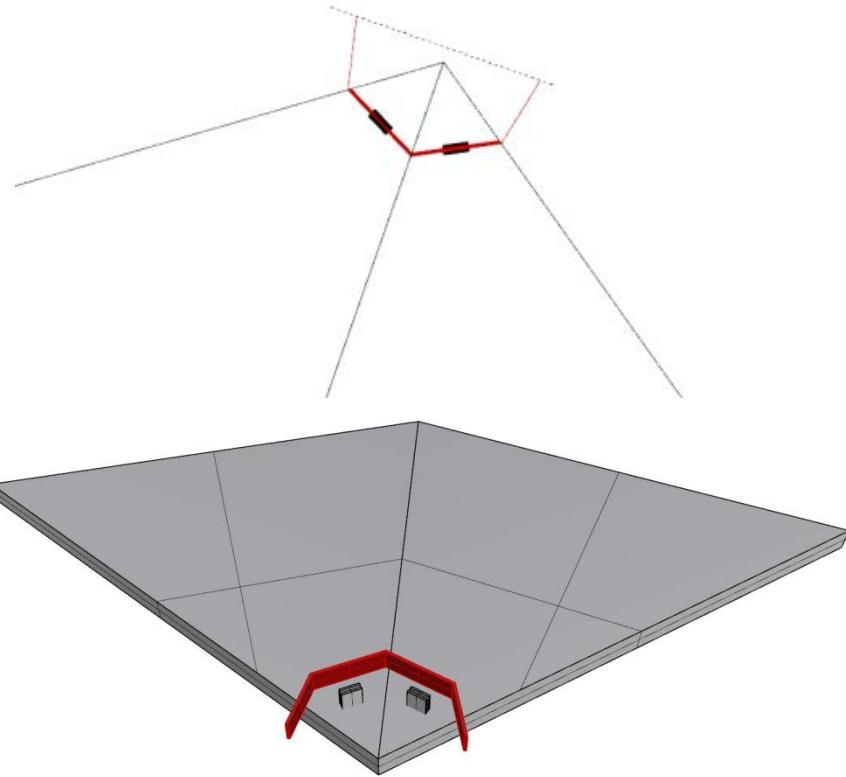


2. Το 2^ο θέμα προς επίλυση είναι ο σύνδεσμος μεταξύ των μονάδων με στόχο τη στατικότητα όλης της κατασκευής, σε συνδυασμό με το προηγούμενο θέμα και τις μορφολογικές αποφάσεις.

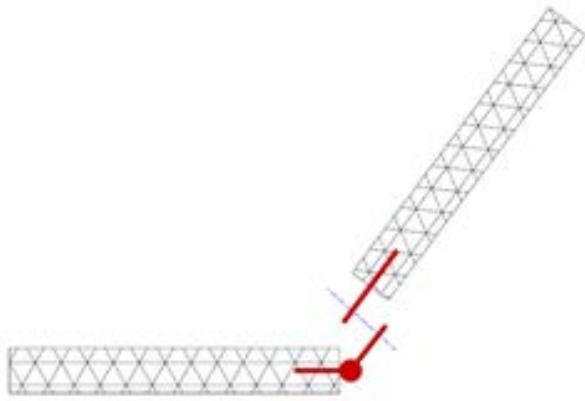


Σκαρίφημα α' : πακτωμένος σύνδεσμος στο μπετό, αγκυρωμένος, διατομής Η , και ειδικός δακτύλιος με φάλτσα για να πάρει τις κλίσεις. Έτσι η μονάδα είναι τυποποιημένη, προκατασκευασμένη, και χρειάζονται οι ειδικοί σύνδεσμοι για κάθε διαφορετική μορφή.

Αφήνει κενό στις κορυφές που έπειτα χρειάζεται επιπλέον κάλυψη.



Σκαρίφημα β' : πακτωμένη μεταλλική διατομή Π στο μπετό, αγκυρωμένη και ειδικός δακτύλιος. Ομοίως με το σκαρίφημα α' αλλά διατηρεί τις κορυφές του τριγώνου μορφολογικά



Σκαρίφημα γ' : κατασκευή με ράβδο με περιστροφική κίνηση (όπως η κίνηση του μεντεσε) πακτωμένη στο μπετό.

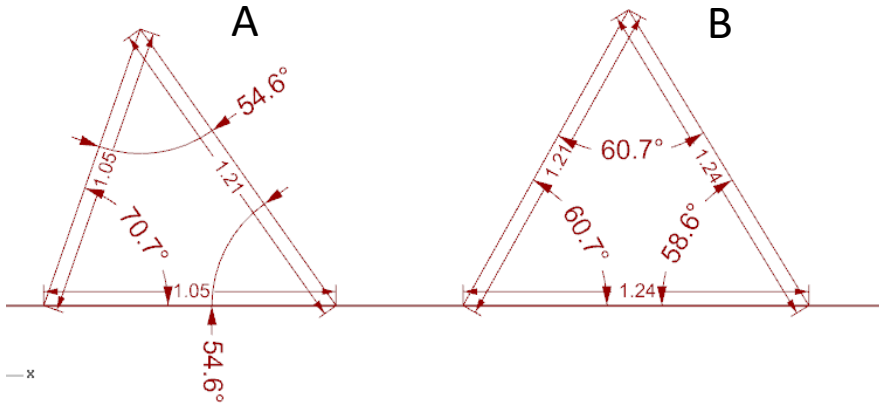
Αυτή η λύση συνδέει τις μονάδες στις ακμές του κάθε τριγώνου και όχι στην κορυφή. Δίνεται η δυνατότητα προσαρμογής της μονάδας αλλά και του συνδέσμου σε οποιαδήποτε γωνία. Αφού επιτευχθεί η γωνία που θέλουμε, η περιστροφική κίνηση της ράβδου σταματάει με βίδωμα.

Κάθε τρίγωνο έχει στη μία ακμή του την ράβδο και στις άλλες την λάμα, όπως φαίνεται στο σκαρίφημα

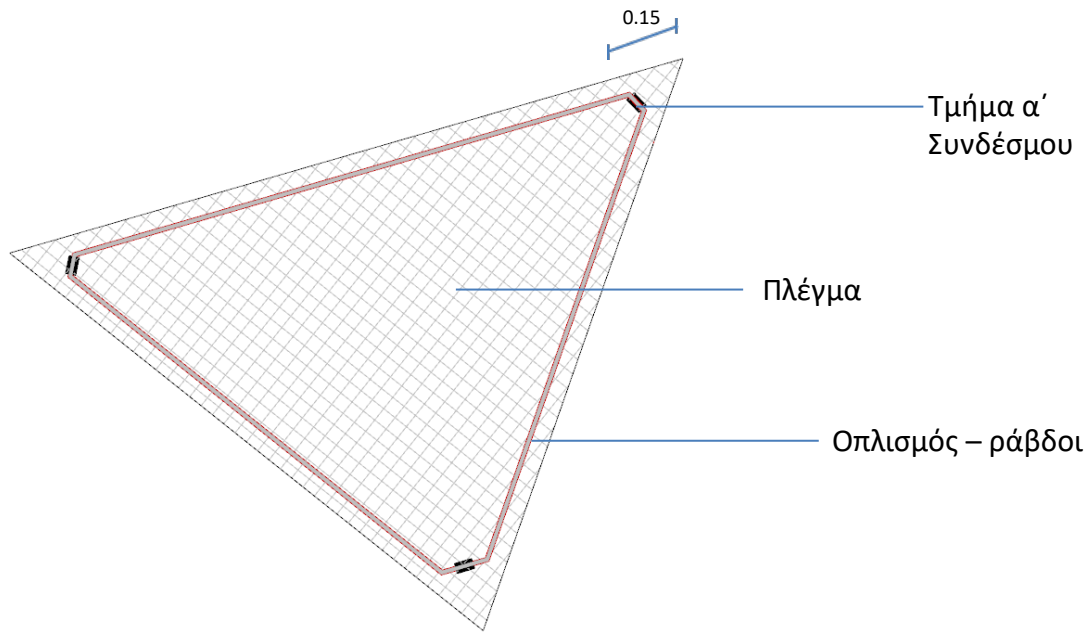
Αυτή η περίπτωση έχει το πλεονέκτημα της κίνησης, οπότε θα ήταν πολύ χρήσιμη σε μια κινητική κατασκευή

Έπειτα από τις συγκρίσεις των ιδεών για την συνδεσμολογία, οι μορφολογικές απαιτήσεις αποκλείουν την περίπτωση α', ενώ αποκλείεται και η περίπτωση γ' λόγω περιττής πολυπλοκότητας αφού η τελική κατασκευή είναι σταθερή. Η βιομηχανική παραγωγή ειδικών δακτυλίων είναι ιδιαίτερα εύκολη.

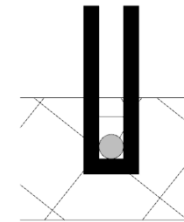
Γεωδαιτικός θόλος ύψους 3μ –
εμβαδόν 27,81 m²



30 τρίγωνα A
45 τρίγωνα B



ΚΑΤΟΨΗ



Τομή στο σημείο του συνδέσμου

Μεταλλικό στοιχείο διατομής Π πακτώνεται μέσα στο μπετό από το στάδιο της χύτευσής του, προεξέχει από την δομική μονάδα κατά 4 πόντους, όπου έχει τρύπες ώστε να βιδωθεί το τμήμα β' του συνδέσμου.

Διαστάσεις (3 cm x 0,9 cm x 7 cm ύψος)

Εσωτερικά του τριγώνου μπορεί κανείς να παίξει με την μορφολογία και να κάνει διαφορετικές μορφές όπως φαίνεται παρακάτω



Τομή μονάδας

Για τη κατασκευή της δομικής μονάδας χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί ειδικό προϊόν- μείγμα μπετό, ενισχυμένο και ελαφρύ, ώστε να επιτύχουμε μικρό πάχος της μονάδας και να ελαχιστοποιήσουμε το συνολικό της βάρος. Στις κατασκευές λεπτών κελυφών, υπάρχουν παραδείγματα από πολύ μικρά πάχη.

Έτσι κοντά στις ακμές του τριγώνου που είναι και οι σπλισμοί, η μονάδα μπορεί να έχει πάχος 4 cm αλλά μετά να μειωθεί στα 2,5cm.

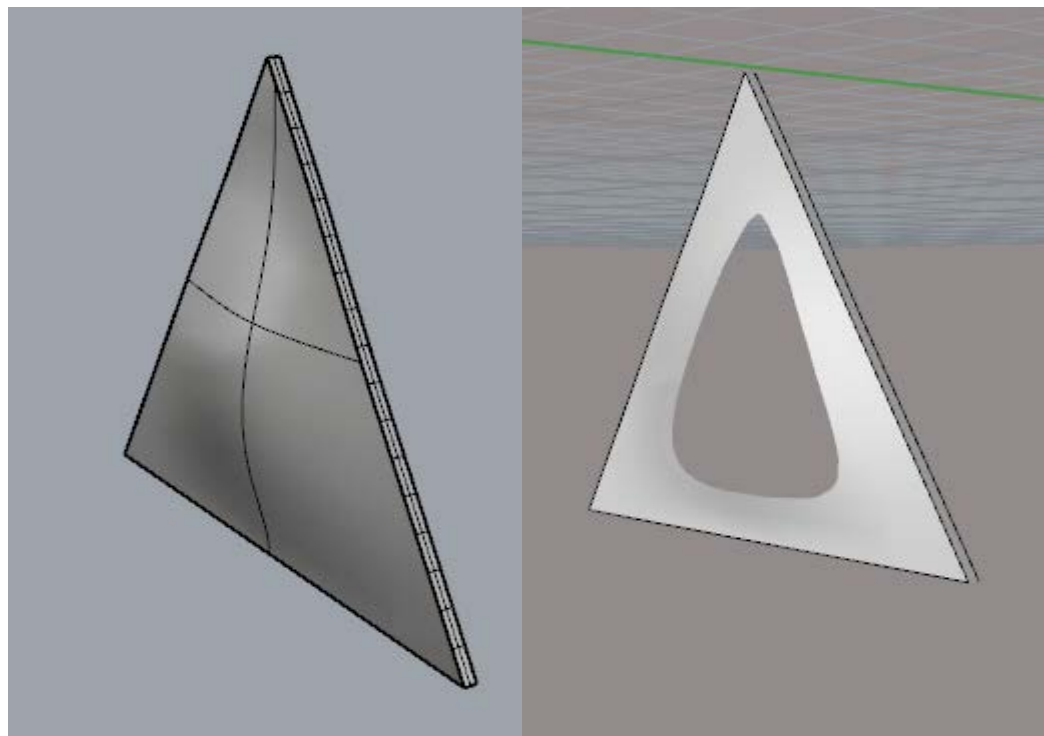
Η μονάδα μας έχει επιφάνεια 0,65 m² αρα ο όγκος είναι περίπου 0,018 m³.



Bürgi Garden Center, Heinz Isler, 1973

Διαστάσεις 27 x 27 m

Πάχος κελύφους 8 cm

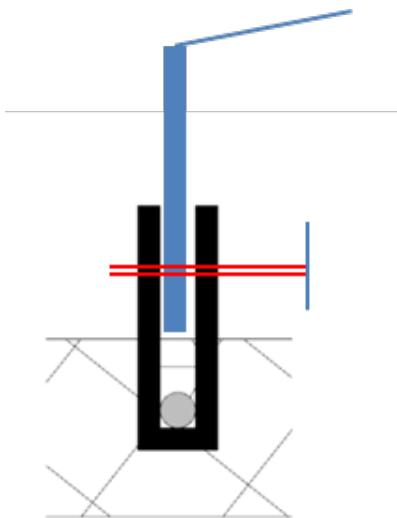


ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ

Ειδικά κατασκευασμένος σύνδεσμος , μορφή πολυγωνικού δακτύλιου με φάλτσα

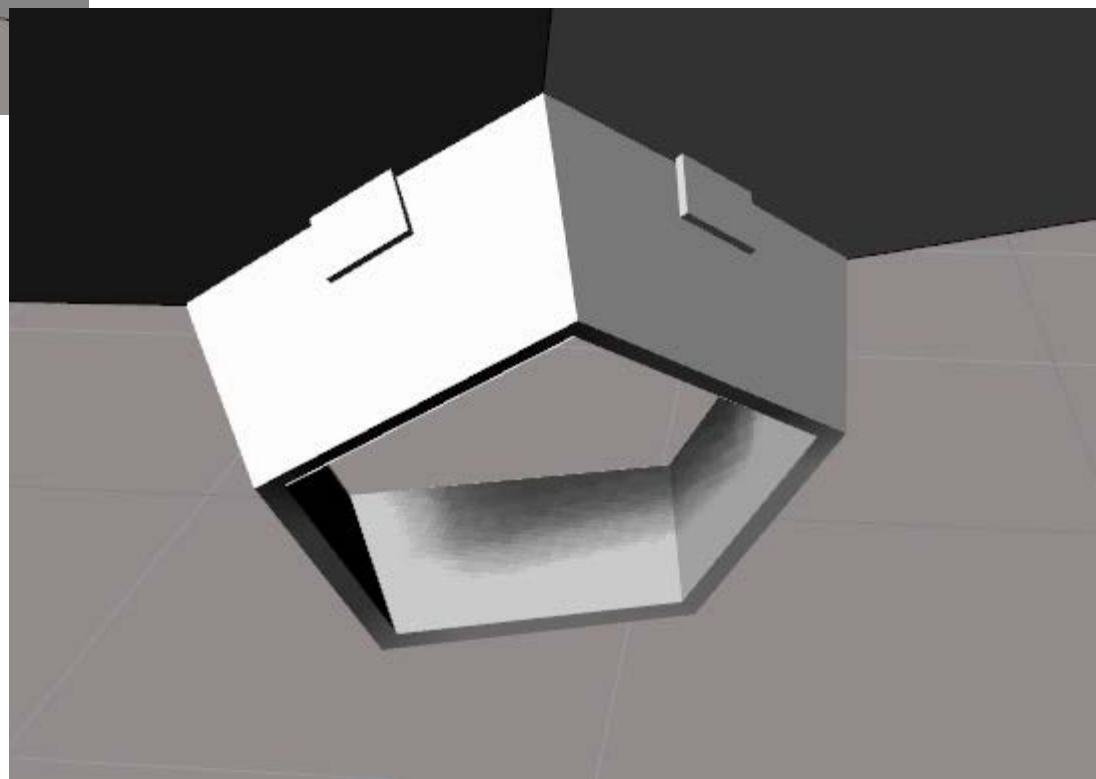
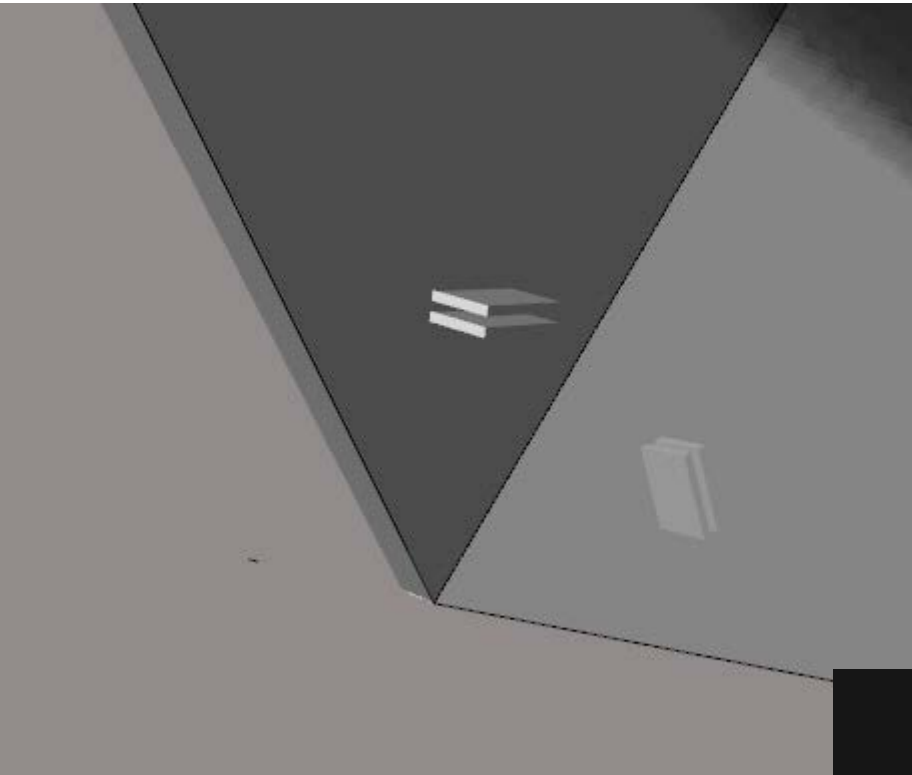


3d printed - Commons Lab - Ηράκλειο



Τομή στον σύνδεσμο : βιδώνονται τα δύο στοιχεία με παξιμάδια και έτσι όλοι οι σύνδεσμοι με το σπλισμένο σκυρόδεμα γίνονται ένα φερόμενο στοιχείο





Η κατασκευή στο συνολό της χρειάζεται να βιδωθεί στο έδαφος. Γι αυτό το λόγο, κατασκευάζεται ένα μικρό θεμέλιο, όπως φαίνεται στην τομή. Η σύνδεση αυτή γίνεται σε κάθε κόμβο που ακουμπάει στο έδαφος. Οι σύνδεσμοι σε αυτά τα σημεία λοιπόν είναι διαφορετικοί.

Όσο αφορά λοιπόν τον τρόπο συναρμολόγησης στην πράξη ακολουθούνται τα εξής βήματα.

- Κατασκευάζεται το θεμέλιο και βιδώνονται η πρώτη σειρά συνδέσμων.
- Σε αυτούς τους συνδέσμους βιδώνονται οι μονάδες της πρώτης σειράς καθ' ύψος.
- Βιδώνονται σε αυτές οι σύνδεσμοι της 2^{ης} σειράς και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

