

ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ

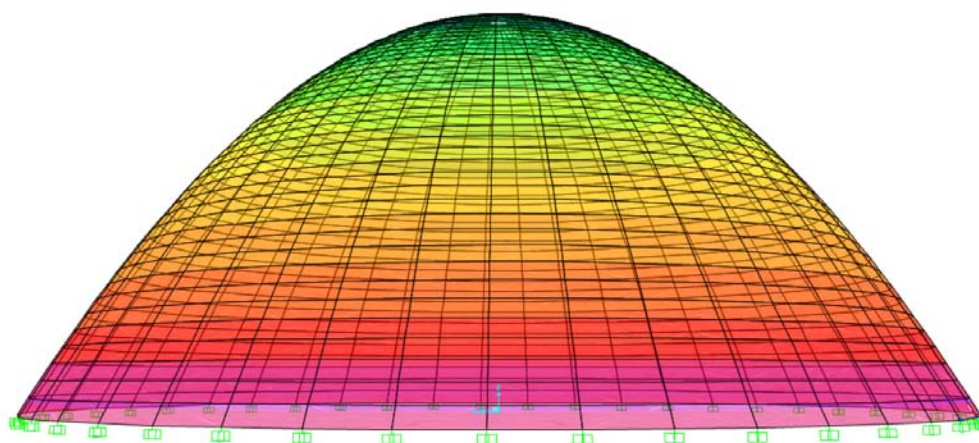
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

*‘Αντισεισμική και Ενεργειακή Αναβάθμιση Κατασκευών και
Αειφόρος Ανάπτυξη’*

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ-ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ
ΕΛΕΓΧΟΣ ΘΟΛΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»**



Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

ΠΑΓΩΝΑΚΗ ΓΙΑΝΝΗ

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΔΗΜΑΚΟΣ

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ABSTRACT	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
1.1. Κίνητρα Έρευνας.....	4
1.2. Στόχοι και συνεισφορά έρευνας.	5
1.3. Περιληπτική Διατύπωση Πειράματος.	6
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ – ΕΡΕΥΝΕΣ ΠΕΔΙΟΥ.....	7
2.1. Ιστορική Αναδρομή.	7
2.2. Διάφορες Προσεγγίσεις στην Κατασκευαστική Βελτιστοποίηση.....	15
2.3. Δισδιάστατη και τρισδιάστατη βελτιστοποίηση με μονοπάτια φορτίων.....	17
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	21
3.1. Περιγραφή του πειράματος.	21
3.3 Μελέτη – Βελτιστοποίηση – Επιλογή της γεωμετρίας του τρούλου.	22
3.4 Κατασκευή κονιάματος και έλεγχος δοκιμίων.....	23
3.5 Κατασκευή Καλουπιού.....	31
Καλούπι τριών διαστάσεων.....	32
3.6 Κατασκευή Φορέα – Ωρίμανση.....	43
3.7 Φόρτιση του φορέα – Τρούλου υπό ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο (καταστρεπτικός έλεγχος)	50
3.8 Παρουσίαση – Αποτίμηση Αποτελεσμάτων	57
4 ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	72

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις μέρες μας η ανάγκη για κατασκευαστικά υλικά μεγαλώνει καθημερινά συγχρόνως όμως το περιβάλλον μοιάζει να στερεύει από πόρους και να καταπονείται ολοένα και περισσότερο από τις δικές μας ανάγκες. Είναι πολύ σημαντικό, καθώς το μεγαλύτερο τμήμα της ενέργειας που καταναλώνεται από τον ανθρώπινο πληθυσμό είναι για τον κατασκευαστικό τομέα, να ερευνώνται και να επιλέγονται εναλλακτικοί τρόποι κατασκευών - όχι μόνο ως προς την εκπομπή ρύπων και ενέργειας προς το περιβάλλον - αλλά και ως προς την ανάγκη για πρώτες ύλες μιας και το περιβάλλον μας μοιάζει να στερεύει από τις όλο και μεγαλύτερες απαιτήσεις μας από αυτό. Προκειμένου να επιτύχουμε αυτόν το σκοπό πρέπει να φύγουμε από την λογική των ορθογωνίων – τετραγώνων σχημάτων και να περάσουμε σε κυκλικά σχήματα που ακολουθεί και η ίδια η φύση. Σε αυτή την νοοτροπία βασίζεται και η έννοια της Κατασκευαστικής Βελτιστοποίησης ή του Κατασκευαστικού Οπτιμισμού (Structural Optimization). Όπως και στους προηγούμενους αιώνες μεγάλοι μηχανικοί επέλεξαν βελτιστοποιημένα σχήματα με σκοπό τις καλύτερες και ανθεκτικότερες κατασκευές με γνώμονα την μεγάλη οικονομία σε υλικά αλλά και τα ιδιαίτερα σχήματα αυτών, σχήματα που η ίδια η φύση με τις δυνάμεις της (βαρυτικές) προκαλούσε. Αυτή η μεταπτυχιακή εργασία μελετάει αυτό ακριβώς σε πειραματικό επίπεδο καθώς κατασκευάζεται ένας θόλος χρησιμοποιώντας την Κατασκευαστική Βελτιστοποίηση για το σχήμα του και χωρίς να χρησιμοποιηθεί καθόλου κατασκευαστικός οπλισμός. Στην συνέχεια η κατασκευή ελέγχεται πειραματικά σε ομοιόμορφα κατανεμημένο θλιπτικό φορτίο με καταστροφική μέθοδο.

ABSTRACT

In our days the need for construction materials grows daily, but at the same time the environment seems to run out of resources and being overworked more and more from our needs. It is very important that, while the biggest part of energy consumed by human is consumed for construction sector, alternative ways of construction must be chosen, not only for the pollutants to the environment, but also for the need of raw materials since the planet seems to run out of it due to our continuous growing requirements. In order to succeed this cause, we must leave the rectangle-shape mentality and move to the round-shape mentality that nature itself follows. In this exact mentality is based the mentality of Structural Optimization . Just like in the past centuries the Great Architects of our times chosen optimized shapes in order to succeed better and stronger constructions with the biggest economy in raw materials, and with structural shapes that nature with its own forces (gravity) would cause. This post-graduate thesis studies this exact theory in experimental level, as it is constructed a shell or membrane using Structural Optimization for the shape of it and without using any steel reinforcements. Then our constructions are being tested experimentally in simulated uniformly distributed load until it collapses. The results are compared with the simulated model of the shell in SAP200 and shown in the last chapter

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατασκευαστική βελτιστοποίηση είναι ο κλάδος ο οποίος επιχειρεί να βρει την ιδανική κατασκευή υπό δεδομένες συνθήκες-περιορισμούς έτσι ώστε να εξασφαλίσει κάποιους επιθυμητούς στόχους, όπως μείωση κόστους, ελαχιστοποίηση υλικών ή ενισχυμένη αντοχή της κατασκευής. Η κατασκευαστική Βελτιστοποίηση είναι ένας ανερχόμενος κλάδος λόγω των πολλαπλών πλεονεκτημάτων που αποφέρει. Στην παρακάτω έρευνα ελέγχθηκαν πειραματικά κατασκευές στις 2 και στις 3 διαστάσεις που αξιολογούν την αποτελεσματικότητα της κατασκευαστικής βελτιστοποίησης. Η έρευνα είναι δομημένη ως ακολούθως: Στο κεφάλαιο 1, παρουσιάζονται τα κίνητρα της έρευνας, οι στόχοι και η συνεισφορά της στις κατασκευές καθώς και μία περιληπτική διατύπωση του εκπονηθέντος πειράματος. Το κεφάλαιο 2 καλύπτει την υπάρχουσα έρευνα που έχει γίνει σε αυτόν τον τομέα συμπεριλαμβανομένων διαφόρων προσεγγίσεων στην κατασκευαστική βελτιστοποίηση καθώς και κάποια πρακτικά παραδείγματα τέτοιων κατασκευών. Στο κεφάλαιο 3 καλύπτεται το πειραματικό μέρος και η εστίαση αυτής της έρευνας καθώς και τα αποτελέσματα-συμπεράσματα του πειράματος αυτού. Η διατριβή ολοκληρώνεται με το κεφάλαιο 4, στο οποίο προτείνονται μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις του πειράματος που πραγματοποιήθηκε.

1.1. Κίνητρα Έρευνας

Στις μέρες μας το συνεχώς αυξανόμενο κόστος και η ενεργειακή ένταση των κατασκευαστικών υλικών καθιστά απαραίτητο στους μηχανικούς να εφεύρουν καινούριες μεθόδους κατασκευών που εκτελούνται με ποιο οικονομικούς και αποδοτικούς τρόπους. Βάση του U.S. Energy Information Administration (Αμερικάνικο Κέντρο Διαχείρισης Ενεργειακών Πληροφοριών), ο κατασκευαστικός τομέας καταναλώνει περίπου το 50% όλης της ενέργειας που καταναλώνεται στις Η.Π.Α. Επιπλέον ο κατασκευαστικός τομέας θεωρείται υπεύθυνος για σχεδόν τις μισές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε ολόκληρες τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, ενώ οι συγκοινωνίες έρχονται δεύτερες με μόλις το ένα τρίτο των ολικών εκπομπών. Επομένως δεδομένης της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής-κρίσης, σπανιότητας των πόρων και των οικονομικών προκλήσεων που αντιμετωπίζει η κοινωνία μας, η ανάγκη για πιο βιώσιμες κατασκευές δεν μπορεί να παραμεληθεί. Γι' αυτό το λόγο οι μηχανικοί πρέπει να αναπτύξουν μια βαθύτερη κατανόηση της σχέσης γεωμετρίας και στατικής, ούτως ώστε να σχεδιάζουν κατασκευές, οι οποίες θα είναι στατικά εφικτές αλλά και ενεργειακά βέλτιστες.

Πράγματι, η εύρεση τρόπων ελαχιστοποίησης της ποσότητας των κατασκευαστικών υλικών, και όθεν του κόστους κατασκευής μπορεί να τελέσει μία μερική λύση στα προαναφερθέντα προβλήματα. Πολλοί μεγάλοι μηχανικοί του παρελθόντος είχαν συμπεράνει πως **όταν η**

γεωμετρία της κατασκευής είναι ‘σοφά’ σχεδιασμένη, τότε η αποτυχία της κατασκευής έρχεται πολύ κοντά στην αποτυχία του υλικού. Με άλλα λόγια, οι ‘έξυπνες’ γεωμετρίες μπορούν να φέρουν την αντοχή μίας κατασκευής στα όρια του υλικού και παράλληλα να σώσουν μεγάλες ποσότητες κατασκευαστικού υλικού. Συνολικά, η κατασκευαστική βελτιστοποίηση είναι άξια έρευνας και ανάπτυξης.

1.2. Στόχοι και συνεισφορά έρευνας.

Ένα από τα κλασικά προβλήματα κατασκευαστικής βελτιστοποίησης είναι το εξής: **“Ποιο είναι το ιδανικό σχήμα μιας κατασκευής, ούτως ώστε δεδομένων των φορτίων που ασκούνται, το κατασκευαστικό υλικό ελαχιστοποιείται;”**. Αν και αρχικά η ερώτηση φαίνεται απλή, η απάντησή της είναι ένα σύνθετο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Την τελευταία εικοσαετία, πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να μελετήσουν αυτό το πρόβλημα. Τα κύρια συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν, δεν διαφέρουν για τις δισδιάστατες και τις τρισδιάστατες κατασκευές. Πιο συγκεκριμένα, είναι γνωστό ότι οι μεταλλικοί οπλισμοί χρησιμοποιούνται στις κατασκευές ούτως ώστε, μέσω της συνεργασίας τους με το σκυρόδεμα να παραλαμβάνουν τις καμπτικές και εφελκυστικές καταπονήσεις. Αν επομένως καταφέρουμε, έστω θεωρητικά, να μετατρέψουμε τις καταπονήσεις αυτές σε θλιπτικές τότε η απαίτηση για μεταλλικό οπλισμό¹ καθίσταται μηδενική. Στις δισδιάστατες κατασκευές αυτό μεταφράζεται σε ένα μοναδικό μονοπάτι πλήρως θλιπτικών φορτίων, ενώ στις τρισδιάστατες κατασκευές σε άπειρα τέτοια μονοπάτια φορτίων. Αυτό σημαίνει ότι, δεδομένης της φόρτισης υπάρχει μία μοναδική κατασκευή σε πλήρη θλίψη στις δύο διαστάσεις και άπειρες τέτοιες κατασκευές στις τρεις διαστάσεις. Αυτό μπορεί εύκολα να αποδειχθεί θεωρητικά με μαθηματική ανάλυση όπως και θα γίνει στο θεωρητικό μέρος. Σε πειραματικό επίπεδο πολύ λίγη έρευνα έχει πραγματοποιηθεί για να εξακριβώσει αυτές τις υποθέσεις. Στην πλειοψηφία της αυτό που έχει ερευνηθεί αφορά είτε σημειακά φορτία είτε διακριτές φορτίσεις². Επομένως οι πειραματική αντοχή βελτιστοποιημένων κατασκευών κάτω από αυστηρά συνεχές και ελεγχόμενο φορτίο έχει μεγάλο ενδιαφέρον. Αυτό θα είναι και το αντικείμενο μελέτης αυτής της διατριβής.

¹ Αξίζει να σημειωθεί ότι ο οπλισμός είναι το πιο κοστοβόρο υλικό στις κατασκευές.

² Διακριτές φορτίσεις είναι οι φορτίσεις οι οποίες δεν γίνονται κάτω από συνεχές αυξανόμενο φορτίο όπως οι φορτίσεις στην πρέσα θλίψης.

1.3. Περιληπτική Διατύπωση Πειράματος.

Σε αυτή την έρευνα ελέγχθηκαν πειραματικά μία δισδιάστατη και μία τρισδιάστατη κατασκευή, οι οποίες θεωρητικά βρίσκονταν σε κατάσταση πλήρης θλιπτικής καταπόνησης κάτω από ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο. Η γεωμετρία και των δύο κατασκευών πηγάζει από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης που αναπτύσσεται αναλυτικά στο θεωρητικό μέρος. Οι προκλήσεις στο να επιτευχθούν πειραματικά οι θεωρητικές συνθήκες του αλγορίθμου ήταν πολλαπλές και η απόκλιση από τα θεωρητικά αποτελέσματα αναμενόμενη. Τελικώς κατασκευάστηκαν δύο δισδιάστατα δοκίμια - καμάρες και δύο τρισδιάστατα δοκίμια – θόλοι, και ελέγχθηκαν σε προσομοιωμένο ‘ομοιόμορφα’ κατανεμημένο φορτίο συμπίεσης. Τα συμπεράσματα του στατικού ελέγχου παραδίδονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ – ΕΡΕΥΝΕΣ ΠΕΔΙΟΥ

Το κεφάλαιο αυτό καλύπτει μία σύντομη εισαγωγή στον τομέα της κατασκευαστικής βελτιστοποίησης, και συγκεκριμένα στις επιφανειακές – θολωτές κατασκευές. Αρχικά αναφέρεται μία ιστορική αναδρομή στον τομέα των βέλτιστων γεωμετριών των κατασκευών και μετέπειτα καλύπτονται τεχνικά χαρακτηριστικά στις δύο και τρεις διαστάσεις κάποιων προσεγγίσεων κατασκευαστικής βελτιστοποίησης.

2.1. Ιστορική Αναδρομή.

Εδώ και αιώνες, έχουν παρατηρηθεί διάφορες μορφές βελτιστοποίησης στις κατασκευές στο πέρασμα των χρόνων. **Από τον 16^ο αιώνα, τέκτονες είχαν αναπτύξει εμπειρικές μεθόδους κατασκευής για πέτρινες καμάρες έτσι ώστε να βρίσκονται σε πλήρη θλίψη αλλά και σε μεγάλη οικονομία υλικού.** Ο πρώτος που μελέτησε μαθηματικά τη σχέση μεταξύ γεωμετρίας και στατικής ήταν ο Maxwell (**Maxwell, 1869**) [1]. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα ο Michell Truss ανέπτυξε μία μέθοδο η οποία βρίσκει την βέλτιστη γεωμετρία μιας κατασκευής σε μορφή δικτυώματος έτσι ώστε το ίδιο βάρος να ελαχιστοποιείται λόγω οικονομίας στο υλικό. “Ο βέλτιστος σχεδιασμός, είναι το αντικείμενο έρευνας κάθε μηχανικού ο οποίος στοχεύει στη σχεδίαση ενός μηχανήματος, ενός εξαρτήματος ή ενός κτιρίου το οποίο καλείται να εξυπηρετήσει κάποιες λειτουργικές ανάγκες. Βέλτιστος ονομάζεται ένας σχεδιασμός ο οποίος ικανοποιεί τις κατασκευαστικές προδιαγραφές και τις λειτουργικές απαιτήσεις, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια, όπως είναι το κόστος, το βάρος, και τα υλικά της κατασκευής” (**Πλεύρη, 2001**) [2]. Ως βελτιστοποίηση κατασκευών ή Κατασκευαστική Βελτιστοποίηση, μπορεί να οριστεί η λογική διαδικασία διερεύνησης κάποιου σχεδιασμού ο οποίος να υπερτερεί από κάθε άλλη λύση μέσα σε ένα πλαίσιο αντικειμενικών, γεωμετρικών και χαρακτηριστικών περιορισμών. Την τελευταία εικοσαετία με την χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών και της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων έχουν αναπτυχθεί εργαλεία τα οποία βρίσκουν τη βέλτιστη γεωμετρία έτσι ώστε να μειώσει την απορροφώμενη ενέργεια παραμόρφωσης. Δύο τέτοιες αναλυτικές μέθοδοι βελτιστοποίησης περιγράφονται παρακάτω. Στο πέρασμα των χρόνων μπορούμε να εντοπίσουμε πολλά παραδείγματα γεωμετρικής βελτιστοποίησης σε μικρές αλλά και σε πολύ μεγάλες κλίμακες. Αρχικά μπορούμε να την

εντοπίσουμε σε παλαιές πέτρινες παραδοσιακές κατοικίες που στήριζαν τις ανωδομές τους σε



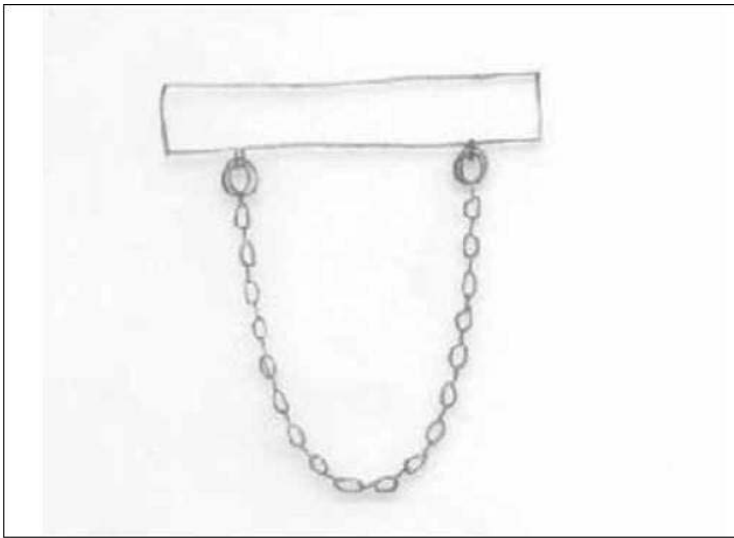
πολύ καλά μελετημένες πέτρινες καμάρες.

Εικόνα 1.Κατασκευή πέτρινου τόξου

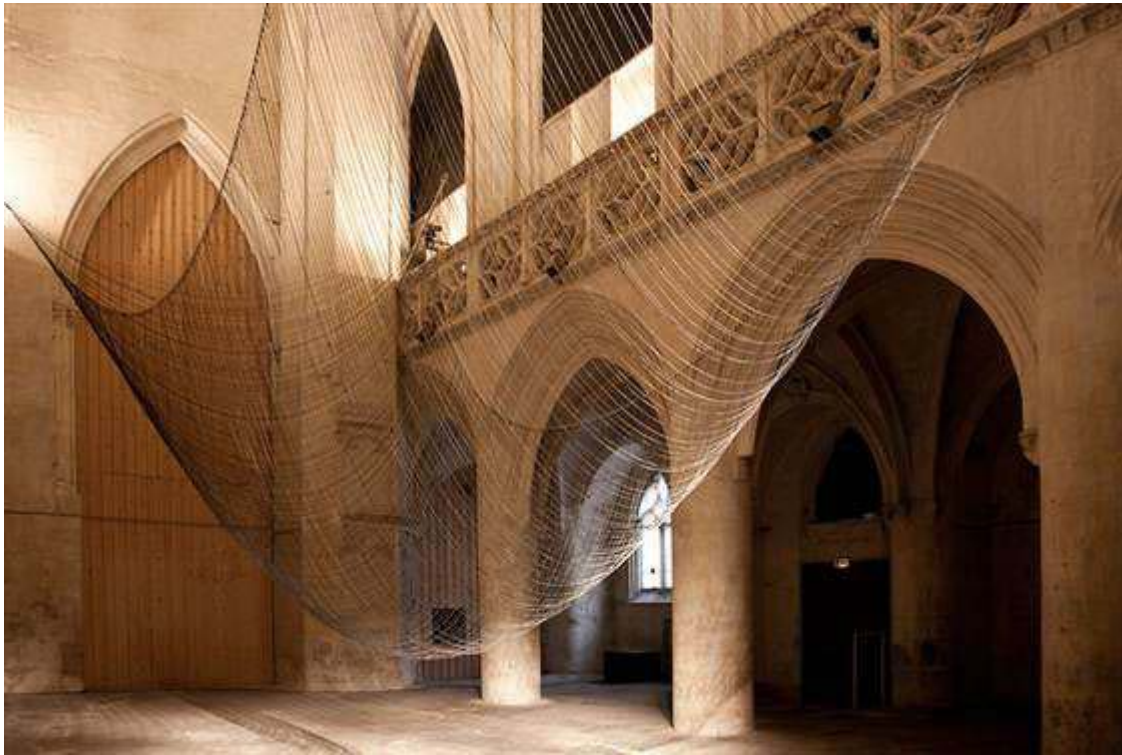
Στην Ισπανία ο μεγάλος και επιβλητικός ναός La Sagrada Familia (1889-σήμερα) αν και δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμα στην πλειοψηφία του έχει μελετηθεί από τον μεγάλο Αρχιτέκτονα Gaudi εξολοκλήρου με την λογική της κατασκευαστικής βελτιστοποίησης όπως φαίνεται και παρακάτω. [3],(Mathstat,2012)



Εικόνα 2.Προσομοίωση αλυσιδωτού τόξου Gaudi



Εικόνα 3.Βέλτιστο σχήμα με χρήση κρεμαστής αλυσίδας



Εικόνα 4.Προσομοίωση τρούλου με κρεμαστές αλυσίδες

Ο Gaudí ήταν γνωστό ότι για την σχεδίαση των τρούλων της εκκλησίας χρησιμοποίησε μικρής κλίμακας προσομοιώσεις αλυσιδωτών τόξων αφήνοντας την βαρύτητα να κάνει την δουλειά της και να το δώσει αυτή τα ιδανικά για την κατασκευή σχήματα. Ο Gaudí χρησιμοποίησε δύο

μεθόδους προσομοίωσης της Βελτιστοποίησης. Ο ένας τρόπος είναι η κατασκευή παραβολοειδών τόξων χρησιμοποιώντας αλυσίδες στις οποίες είχε σταθερές τις άκριές τους και τις άφηνε να κρεμάσουν στο ύψος που ήθελε η κατασκευή του παίρνοντας έτσι το ιδανικό σχήμα που ήθελε από το σχήμα που έπαιρνε η αλυσίδα. Η μέθοδος αυτή ελέγχεται πειραματικά στον έλεγχο της διαστάσεως της καμάρας.



Εικόνα 5.Βέλτιστοποιημένο σχήμα με σημειακά φορτισμένες αλυσίδες



Εικόνα 6.Ανεστραμένο τελικό σχήμα αλυσίδων με φορτίσεις



Εικόνα 7.Βελτιστοποιημένα τόξα με τη μέθοδο των κρεμαστών φορτίων

Ο δεύτερος τρόπος που χρησιμοποιούσε ο Gaudí ήταν η κατασκευή παραβολικών τρούλων ή τόξων πάλι κρεμώντας αλυσίδες ή πανιά αυτή τη φορά όμως φορτίζοντάς τα με μικρά συγκεντρωμένα ή κατανεμημένα φορτία παίρνοντας έτσι το σχήμα της καμπύλης που δημιουργούνται. Στην συνέχεια και στις δύο αυτές μεθόδους απλά γυρνώντας ανάποδα πια την καμπύλη που δημιουργούσε η κάθε κρέμαση έπαιρνε το τελικό σχήμα της κατασκευής του.

Εικόνα 8.Προσομοίωση τρούλων La Sagrada Familia, Gaudi



Εικόνα 9. La Sagrada Família, Gaudí

Με τις ίδιες τεχνικές πολλά άλλα έργα – κατασκευές του Gaudí μελετήθηκαν και διαμορφώθηκαν με τον ίδιο τρόπο, όπως η Casa Mila (1906-1912). (Huerta, 2006) [4]



Εικόνα 10. Casa Mila, Βαρκελώνη

Αντίστοιχες μελέτες και κατασκευές συναντώνται στο πέρασμα των χρόνων όπως το παλάτι Ταq-I Kisra στη Βαγδάτη στην αρχαία πόλη «Κτησιφών» όπου ο τεράστιος κυριολεκτικά τρούλος του είναι ακόμα σταθερός και ακλόνητος. [5](Vereycken, 2007-2013)



Εικόνα 11.Ταq-i Kisra, Βαγδάτη



Εικόνα 12.Ταq-i Kisra, Βαγδάτη

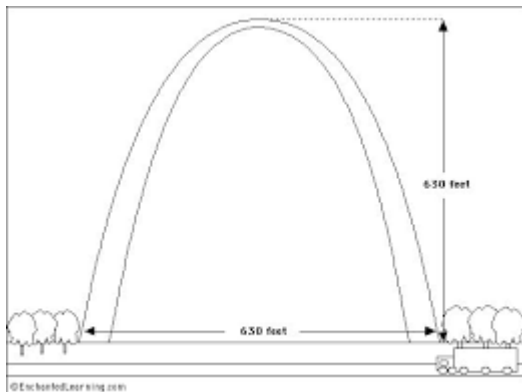


Εικόνα 13.Παραβολικά τόξα, La Sagrada Familia

Στις μέρες μας παρόμοιες κατασκευές και σχήματα συναντώνται σε γέφυρες αλλά και σε αγίδες όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες παρακάτω.



Εικόνα 14.The Gateway Arch, St. Louis, Missouri



Εικόνα 15.The Gateway Arch, St. Louis



Εικόνα 16.The Gateshead Millenium Bridge, Newcastle

2.2. Θεωρητικές Προσεγγίσεις στην Κατασκευαστική Βελτιστοποίηση

Η απορροφώμενη ενέργεια παραμόρφωσης είναι η ενέργεια που αποθηκεύει ένα υλικό μέχρι το όριο θραύσης και ισούται με το γινόμενο της παραμόρφωσης της κατασκευής επί το μητρώο ακαμψίας της κατασκευής. Με την ελαχιστοποίηση της εσωτερικής ενέργειας παραμόρφωσης μιας κατασκευής, ελαχιστοποιείται η παραμόρφωση που δέχεται. Ο Sigmund ανέπτυξε το πρόγραμμα **TopOpt** [6], (Sigmund, 2003) το οποίο μέσω πεπερασμένων στοιχείων βρίσκει τη βέλτιστη γεωμετρία μιας κατασκευής, με τις ελάχιστες παραμορφώσεις. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης του Sigmund παίρνει την εξής μορφή :

$$\begin{aligned} \min c(t) &= UKU \\ \text{έτσι ώστε } KU(t) &= F \\ Mt &\leq d \\ t \geq 0, \quad u &\in R^N, \quad t \in R^M \end{aligned}$$

εξ. 1

όπου, $u = \text{diag}(U)$ το διάνυσμα μετατοπίσεων κάθε στοιχείου,

K : πίνακας Μητρώου Ακαμψίας

F : το διάνυσμα εξωτερικών δυνάμεων

t : το διάνυσμα όγκου κάθε δικτύωματος

M, d : άνω οριακοί συντελεστές που περιορίζουν τον όγκο του συστήματος.

Το πρόβλημα της επίλυσης του Sigmund είναι ότι ο χρήστης ορίζει την μέγιστη αποδεκτή ποσότητα του υλικού και επομένως δεν γίνεται πραγματική βελτιστοποίηση του υλικού της κατασκευής.

Μία άλλη μέθοδος βελτιστοποίησης η οποία ελαχιστοποιεί το υλικό είναι η **βελτιστοποίηση των διαδρομών των φορτίων**. Ο καθηγητής Philippe Block του πανεπιστημίου ETH της Ζυρίχης ανέπτυξε ένα στατικό μοντέλο, όπου μια οποιαδήποτε κατασκευή μπορεί να παρασταθεί ως ένα τρισδιάστατο δίκτυωμα, στο οποίο οι εξωτερικές δυνάμεις εφαρμόζονται στις κορυφές, και οι σύνδεσμοι μεταφέρουν τα φορτία στην βάση [7] (P.Block, 2007)



Εικόνα 17. Εργαστηριακά πειράματα κατασκευαστικής βελτιστοποίησης, ΕΤΗ Phillipe Block

Το μονοπάτι δυνάμεων μίας φόρτισης δίδεται από $\sum_i |F_i|l_i$, όπου F_i και l_i η εσωτερική δύναμη και το μήκος κάθε δικτυώματος. Εύκολα μπορεί να δει κάποιος πως η ελαχιστοποίηση του ολικού μονοπατιού δυνάμεων είναι ισοδύναμη της ελαχιστοποίησης του ολικού όγκου και επομένως υλικού. Ειδικότερα αν V_i ο όγκος κάθε στοιχείου i , τότε :

$$\min \sum_i V_i = \min \sum_i A_i l_i = \frac{1}{\sigma} \min \sum_i |F_i| l_i \quad \text{εξ.2}$$

Ο Maxwell επίσης απέδειξε το ακόλουθο σημαντικό αποτέλεσμα[1] (Maxwell, 1869):

Έστω P_i τα εξωτερικά φορτία στο σημείο i , και r_i η απόσταση από το σημείο εφαρμογής του φορτίου P_i σε οποιοδήποτε σημείο αναφοράς. Τότε:

$$\sum_i |F_i| l_i = \sum_i \vec{P}_i \cdot \vec{r}_i \quad \text{εξ.3}$$

Η παραπάνω εξίσωση βασίζεται στον κανόνα ότι η εσωτερική ενέργεια πρέπει να ισούται την εξωτερική. Αυτή η εξίσωση μπορεί περαιτέρω να αναλυθεί ως:

$$\left(\sum F l \right)_{\text{θλίψη}} + \left(\sum F l \right)_{\text{εφελκυσμός}} = \left(\sum \vec{P} \cdot \vec{r} \right)_{\text{φόρτιση}} + \left(\sum \vec{P} \cdot \vec{r} \right)_{\text{αντιδράσεις}} \quad \text{εξ.4}$$

Στην οποία η αριστερή μεριά αντιπροσωπεύει τις εσωτερικές καταπονήσεις από τις θλίψεις και τους εφελκυσμούς που αναπτύσσονται, και η δεξιά μεριά έχει τις εξωτερικές συνεισφορές από τις φορτίσεις και τις αντιδράσεις.

Τα πλεονεκτήματα της προσέγγισης με βελτιστοποίηση των μονοπατιών των φορτίων είναι πολλαπλά. Καταρχήν, σε αντίθεση με τον Sigmund, η βελτιστοποίηση γίνεται πρωταρχικά συναρτήσει του υλικού. Έπειτα, το πρόβλημα βρίσκει το βέλτιστο σχήμα ανεξαρτήτως υλικού, εφόσον το υλικό αποκτά την μέγιστη αντοχή ως θλίψη και όχι ως εφελκυσμό, και τελικώς, δεν χρειάζονται πολύπλοκοι υπολογισμοί στον υπολογιστή, εφόσον δεν έχουν γίνει υποθέσεις πεπερασμένων στοιχείων. Επομένως αυτό το μοντέλο έχει επιλεγθεί ως το ιδανικό για πειραματικό έλεγχο.

2.3. Δισδιάστατη και τρισδιάστατη βελτιστοποίηση με μονοπάτια φορτίων

Έχοντας παρουσιάσει τις εξισώσεις κλειδιά που είναι απαραίτητες για την κατασκευαστική βελτιστοποίηση βάσει των μονοπατιών φορτίων, μπορεί να βρεθεί το ιδανικό σχήμα, για ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στις δύο διαστάσεις. Το σχήμα μιας καμάρας το οποίο βρίσκεται σε πλήρη θλίψη υπό ομοιόμορφα γραμμικά κατανεμημένο φορτίο είναι η παραβολή.



Εικόνα 18. Παραβολικό σχήμα καμάρας

Αυτό μπορεί να φανεί εύκολα αν λύσουμε την παραμετρική εξίσωση των ροών μιας καμάρας και τις ζητήσουμε να μηδενίζονται σε όλα τα σημεία. Το ερώτημα τώρα, είναι **ποιά είναι η ιδανική αναλογία ανοίγματος της καμάρας ως προς το ύψος της (ψηλότερο σημείο της καμάρας), ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο όγκος και επομένως το υλικό της.**[1],(Maxwell, 1869)

Η εξίσωση της παραβολικής καμάρας μπορεί να γραφεί συναρτήσει του ύψους της h και του ανοίγματος της L :

$$y = 4h \left(\frac{x}{L} - \frac{x^2}{L^2} \right) \quad \{1.1\}$$

εξ.5. Εξίσωση βέλτιστης παραβολής

Αν ασκείται γραμμικό ομοιόμορφο φορτίο, οι κάθετες και οριζόντιες αντιδράσεις είναι αντίστοιχα:

$$V = \frac{wL}{2} \text{ και } H = \frac{wL^2}{8h} \quad , \text{όπου } w: \text{ ομοιόμορφο φορτίο}$$

Εφόσον η παραβολική καμάρα βρίσκεται σε πλήρη θλίψη, δεν έχει καθόλου εφελκυσμούς και επομένως η εξίσωση του Maxwell μπορεί να γραφεί:

$$\left(\sum Fl \right)_{\text{θλίψη}} = \left(\sum \vec{P} \cdot \vec{r} \right)_{\text{φορτίση}} + \left(\sum \vec{P} \cdot \vec{r} \right)_{\text{αντιδράσεις}} \quad \text{εξ.6}$$

Η δεξιά πλευρά αυτής της εξίσωσης γράφεται:

$$\left(\sum \vec{P} \cdot \vec{r} \right)_{\text{φορτίση}} = \int_0^L (-w) 4h \left(\frac{x}{L} - \frac{x^2}{L^2} \right) dx = -4hw \left(\frac{x}{L} - \frac{x^2}{L^2} \right) (0|L) = -\frac{2}{3} hwL$$

και

$$\left(\sum \vec{P} \cdot \vec{r} \right)_{\text{αντιδράσεις}} = (-H)L = -\frac{wL^2}{8h}$$

Επομένως το ολικό μονοπάτι φορτίων $(\sum Fl)$ είναι:

$$\left(\sum Fl \right)_{\text{θλίψη}} = -\frac{2}{3} hwL - \frac{wL^2}{8h} \quad \text{εξ.7}$$

Το ελάχιστο υλικό αποκτάται όταν η παράγωγος του ολικού όγκου του τόξου ως προς το ύψος μηδενίζεται. Έχουμε :

$$V = \frac{\sum Fl}{\sigma} = \frac{wL}{24h} (3L^2 + 16h^2)$$

Επομένως ,

$$\frac{d \sum Fl}{dh} = -\frac{wL^2}{8h^2} hw + \frac{2wL}{3} = 0 \Leftrightarrow \frac{h}{L} = \frac{\sqrt{3}}{4}$$

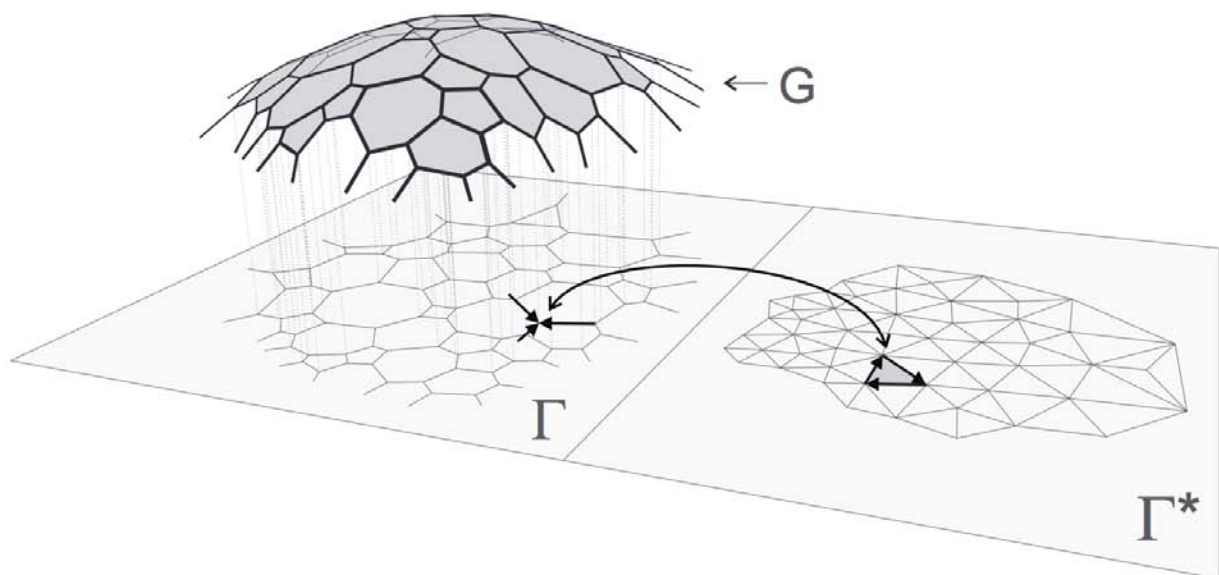
εξ.8- Ιδανική σχέση ύψους-ανοίγματος βέλτιστης παραβολής

[8] ,(Pagonakis, May 2015)

[9], (Lewis, 2016)

Αυτό είναι το ιδανικό ύψος ως προς το άνοιγμα του τόξου στις δύο διαστάσεις. Αυτό το αποτέλεσμα είναι ευρέως γνωστό στην βιβλιογραφία, ωστόσο η προσέγγιση αυτή είναι πρωτοφανής.

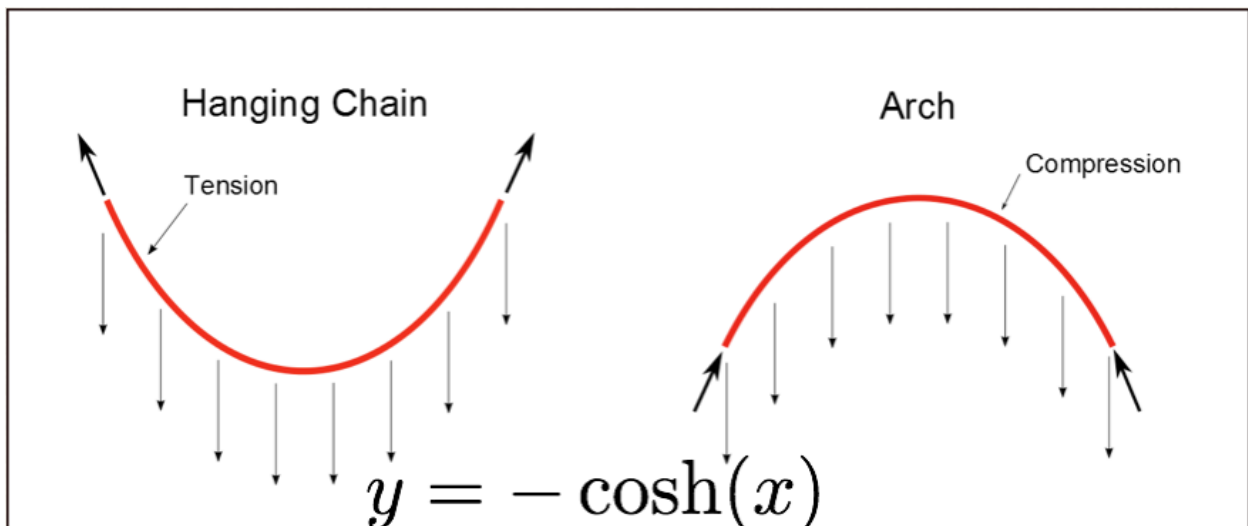
Η ίδια προσέγγιση με τα μονοπάτια των δυνάμεων μπορεί να εφαρμοστεί και στις τρεις διαστάσεις. Η βασική υπόθεση στις τρεις διαστάσεις είναι ότι ο θόλος-κατασκευή μπορεί να προσεγγιστεί ως ένα δικτύωμα κορυφών-συνδέσμων, στις οποίες κορυφές ασκούνται όλα τα φορτία και στους συνδέσμους μεταφέρονται οι δυνάμεις στην βάση (Εικ. 19). [8],(Pagonakis, May 2015)



Εικόνα 19. Προσέγγιση τρισδιάστατου μοντέλου σε δισδιάστατο δικτύωμα

Στην περίπτωση της συγκεκριμένης διατριβής επιλέγεται μια απλή περίπτωση δισδιάστατου παραβολικού τόξου υπό κατανεμημένο φορτίο, και ενός τρισδιάστατου θόλου, ο οποίος κατασκευάζεται από την συμμετρική ως προς το κέντρο περιστροφή της προαναφερθείσας δισδιάστατης παραβολής.

Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται εκτενώς η διαδικασία κατασκευής του παραπάνω τόξου και θόλου, όπως και επίσης αναλυτική περιγραφή του πειράματος.



Εικόνα 20. Η λογική των ανάποδων εφελκυσμών

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Το εν λόγω πείραμα πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Ε.Ι. Πειραιά Τεχνολογικής Τομέα. Σκοπός του πειράματος ήταν ο πραγματικός και ουσιαστικός έλεγχος της βελτιστοποίησης της γεωμετρίας των κατασκευών με απώτερο σκοπό την απαίτηση για ποιο οικονομικές κατασκευές αλλά και ποιο απλοποιημένες διαδρομές φορτίων

3.1. Περιγραφή του πειράματος.

Όπως προαναφέρθηκε και στο θεωρητικό – ερευνητικό μέρος η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας ενός κτιρίου, στην ουσία, ο σκοπός που υπηρετεί δεν είναι άλλος από το να βρίσκει ένα εναλλακτικό μονοπάτι φορτίων (load path), διαφορετικό από τα γνωστά και καθιερωμένα. Ποιο συγκεκριμένα, όπως και προαναφέραμε σε μία κατασκευή, τουλάχιστον θεωρητικά, όταν καταφέρουμε με κάποιο τρόπο να μετατρέψουμε τα μονοπάτια των φορτίων από τα συνηθισμένα (θλίψεις – εφελκυσμοί – κάμψεις – ροπές) σε νέα μονοπάτια με μοναδικές καταπονήσεις τις θλίψεις, τότε και πάλι θεωρητικά, μιας και το σκυρόδεμα σαν κύριο κατασκευαστικό υλικό έχει τις μεγάλες του αντοχές στην θλίψη- η απαίτησή μας για οπλισμό στο σκυρόδεμα σταματάει να υπάρχει μιας και όπως είναι γνωστό ο μεταλλικός οπλισμός στο σκυρόδεμα παραλαμβάνει όλες τις άλλες καταπονήσεις πέραν της θλίψης. Το ζητούμενο λοιπόν πλέον είναι η αναζήτηση των μονοπατιών αυτών. Ακολουθώντας αυτήν την ιδέα επιλέξαμε το σχήμα της κατασκευής μας να είναι παραβολικό με μοναδικό σκοπό την διαμόρφωση – βελτιστοποίηση του νέου μονοπατιού των φορτίων που θα ασκούνται στον φορέα. Έτσι καταλήξαμε στον θόλο – τρούλο για τρισδιάστατο φορέα και στην καμάρα για τον δισδιάστατο. Το σχήμα όμως καθώς και οι διαστάσεις του φορέα είναι αυτά που θα επηρεάσουν την στατικότητα του. Ειδικότερα, όπως προαναφέραμε στο θεωρητικό μέρος οι διαστάσεις του φορέα θα πρέπει να ακολουθούν τον λόγο $\frac{\text{ύψος}}{\text{βάση}} = \sqrt{3/4}$, όμως το σχήμα της παραβολής είναι εξίσου σημαντικό. Βρεθήκαμε λοιπόν αντιμέτωποι με το εξής πρόβλημα, πώς θα κατασκευάσουμε ένα παραβολικό σχήμα ενός τρούλου έτσι ώστε να μετατρέπει το μονοπάτι των φορτίων σε καθαρά θλιπτικά φορτία. Η απάντηση είναι απλή και περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο που αναφέρεται στην κατασκευή του καλουπιού. Η γενική ιδέα πάντως που στηρίζεται είναι ότι αν έχουμε ένα εύκαμπτο – εύπλαστο υλικό που η δύναμη της βαρύτητας το εφελκύνει καθαρά προς τα κάτω, αν καταφέρουμε και κρατήσουμε αυτό το σχήμα άθικτο τότε θεωρητικά αν το περιστρέψουμε 180 μοίρες (δηλ. ανάποδα) τότε οι καθαρές εφελκυστικές τάσεις που ασκούνταν στο υλικό αυτό, τώρα πια μετατρέπονται σε καθαρές θλιπτικές. Έτσι

αφού κατασκευάστηκε το καλούπι μας σειρά έχει το υλικό που χρησιμοποιήσαμε και οι καταστρεπτικοί έλεγχοι που πραγματοποιήσαμε ούτως ώστε να καταλήξουμε στις μηχανικές του ιδιότητές του. Η διαδικασία κατασκευής του κονιάματος που χρησιμοποιήσαμε καθώς και των ελέγχων των αντοχών του περιγράφονται σε παρακάτω παράγραφο που αναφέρεται μόνο για το υλικό. Στην συνέχεια σειρά είχε η κατασκευή του φορέα μας – τρούλου με όλη την διαδικασία κατασκευής και τις τεχνικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες να περιγράφονται στην αντίστοιχη παράγραφο. Τέλος, αυτό που έμεινε ήταν η φόρτιση του φορέα - τρούλου μας στην πρέσα θλίψης του εργαστηρίου, κάτω από ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο, μία διαδικασία με ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς σε πειραματικό επίπεδο ήταν άκρως καινοτόμα, αλλά και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που πήραμε.

Στην προσπάθεια λοιπόν να κατατάξουμε τις εργασίες που πραγματοποιήσαμε, αυτές ακολούθησαν την παρακάτω σειρά :

- Μελέτη – Βελτιστοποίηση – Επιλογή της γεωμετρίας του τρούλου.
- Κατασκευή κονιάματος σύμφωνα με τον κανονισμό και έλεγχος δοκιμίων για τον υπολογισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού.
- Κατασκευή καλουπιού
- Κατασκευή Τρούλου (ρίξιμο κονιάματος) – Ωρίμανση του Φορέα μας
- Κατασκευή-Επέκταση της πρέσας θλίψης του εργαστηρίου
- Φόρτιση του φορέα – Τρούλου (καταστρεπτικός έλεγχος)
- Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

3.3 Μελέτη – Βελτιστοποίηση – Επιλογή της γεωμετρίας του τρούλου.

Όπως προαναφέρθηκε στο θεωρητικό μέρος της έρευνας, το σχήμα – η Γεωμετρία του φορέα είναι πλέον αυτό που παίζει τον σημαντικότερο ρόλο στην στατικότητα του φορέα μας. Στα πλαίσια της βελτιστοποίησης της γεωμετρίας του φορέα, ιδανικότερα σχήματα για τα εναλλακτικά μονοπάτια φορτίων (μόνο θλιπτικά) είναι τα κοίλα, δηλαδή καμπύλες. Μέσα από την συνάρτηση που αναπτύχθηκε στο 1.1 και μέσα από τον λόγο (ύψος/βάση= $\sqrt{3/4}$) που αποτελεί γενικό λόγο για βελτιστοποιημένες καμπύλες καταλήξαμε στη γεωμετρία του τρούλου και της καμάρας μας. Η εξίσωση της παραβολής για δισδιάστατο φορέα ισχύει αυτούσια και για τον τρισδιάστατο ως η συμμετρική ως προς το κέντρο περιστροφή της προαναφερθείσας δισδιάστατης παραβολής. Μέσα από τους ‘χωρικούς’ περιορισμούς του εργαστηρίου (μέγεθος

και δυνατότητες πρέσας θλίψης) καταλήξαμε ότι η κατασκευή μας μπορεί να έχει μία βάση με μέγιστο μήκος 80 cm και μέγιστο ύψος τα 35 cm. Στην 1:25 κλίμακα αυτό θα σήμαινε ένα κτίριο με μέγιστο μήκος βάσης 20 m και μέγιστο ύψος 8,75 m. Στα πλαίσια λοιπόν της ‘χωροταξίας’ του εργαστηρίου επιλέξαμε μήκος βάσης 70 cm και μέσα από τον ιδανικό λόγο (ύψος/βάση= $\sqrt{3/4}$) το ύψος ήταν 30 cm. Λόγω χρονικών οικονομικών και τεχνικών περιορισμών επιλέξαμε τα σχήματα που κατασκευάστηκαν, όμως είναι άξιο προς μελέτη και άλλες γεωμετρίες φορέων που βάση της θεωρητικής βελτιστοποίησης πιθανόν να είχαν αντίστοιχα ή και καλύτερα αποτελέσματα. Έχοντας λοιπόν τις διαστάσεις βάσης και του ύψους επιλέξαμε για πάχος υλικού τα 8 mm, που στην 1:25 κλίμακα θα σήμαινε πάχος υλικού 20 cm. Ο λόγος που επιλέξαμε αυτό το πάχος ήταν ο περιορισμός σε κατασκευή του φορέα μας λόγω κλίμακας, δηλαδή ήταν σχεδόν αδύνατο να κατασκευάσουμε την καμάρα και τον τρούλο με μικρότερο πάχος από τα 8mm χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι στην 1:1 κλίμακα (πραγματικό μέγεθος) η διατομή του υλικού μας δεν μπορεί να κατασκευαστεί με μικρότερο πάχος των 20 cm, αντιθέτως, ιδανικά ίσως ήταν καλύτερη επιλογή. Αφού καταλήξαμε στην Γεωμετρία (διαστάσεις) του κτιρίου αυτό που έμενε ήταν η κατασκευή των καλουπιών που θα ακολουθούσαν την αρχική εξίσωση της παραβολής και τις διαστάσεις που επιλέξαμε. Πιο συγκεκριμένα για την τρισδιάστατη κατασκευή θεωρήσαμε ότι η μέγιστη τομή της αποτελούσε το ίδιο σχήμα με την δισδιάστατη κατασκευή μας.

3.4 Κατασκευή κονιάματος και έλεγχος δοκιμίων

Στην Κατασκευαστική Βελτιστοποίηση όπως και έχουμε προαναφέρει το υλικό της κατασκευής έχει δευτερεύοντα ρόλο. Αυτό συμβαίνει διότι η βαρύτητα του ελέγχου δίνεται στην γεωμετρία της ίδιας της κατασκευής, δηλαδή σε ένα καλύτερο μονοπάτι φορτίων παρά στο υλικό που κατασκευάζεται. Στο πείραμα που πραγματοποιήσαμε επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε τσιμεντοκονίαμα. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημάνουμε πως αξίζει να μελετηθεί το εν λόγω πείραμα και με άλλα υλικά όπως π.χ. αργιλικά κονιάματα, ούτως ώστε να μελετηθεί η ουσία της κατασκευαστικής βελτιστοποίησης, που είναι η αντοχή της κατασκευής μας να πλησιάζει τις αντοχές του υλικού, αλλά και να έχουμε κατασκευές με το ελάχιστο δυνατόν υλικό. Στο πείραμα μας επιλέξαμε λοιπόν να χρησιμοποιήσουμε άοπλη τσιμεντοκονία η οποία πληρούσε και παράχθηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Ελληνικού Κανονισμού, δηλαδή αποτελείται από τις γενικές αναλογίες 1 μέρος τσιμέντο, 3 μέρη άμμο, και 0,5 μέρος νερό. Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό για τα δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν οι

παρακάτω αναλογίες υλικών, 450gr+/-2gr τσιμέντο(ταχείας πήξεως), 1350gr+/-5gr άμμου(ιδανικής κοκομετρίας), 225gr+/-2gr νερό.



Εικόνα 21.Μηχανή κοσκίνων για το διαχωρισμό της άμμου

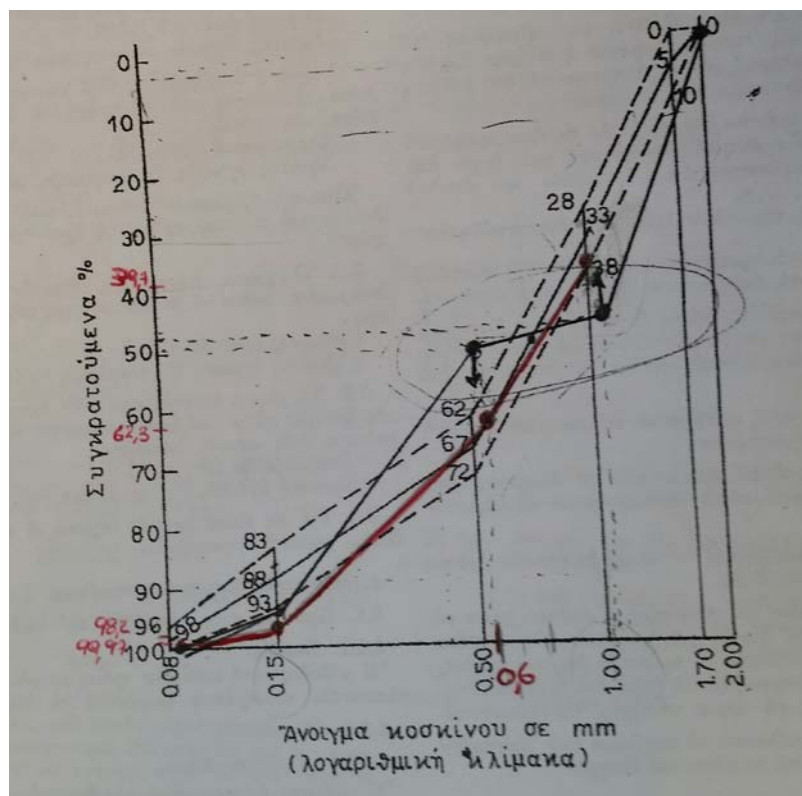
Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε ήταν νταμαρίσια η οποία αρχικά τοποθετήθηκε σε φούρνο έτσι ώστε να έχουμε την πλήρη ξήρανση της, στην συνέχεια έγινε κοκομετρική ανάλυση της άμμου σύμφωνα με τον Ελληνικό κανονισμό χρησιμοποιώντας κόσκινα μεγεθών No16, No30, No100, No200. Μετά από αυτήν την διαδικασία συλλέξαμε τα αντίστοιχα ποσοστά από κάθε κόσκινο σύμφωνα με τον κανονισμό ώστε η κοκομετρική καμπύλη της άμμου που θα προκύψει να βρίσκεται εντός της κοκομετρικής καμπύλης του κανονισμού. Συγκεκριμένα τα ποσοστά που συλλέχτηκαν από κάθε κόσκινο είναι τα εξής: Από το No16 συλλέχτηκε το 39.7%, από το No30 το 67.3%, από το No100 το 98.2% και από το No200 το 99.97%.



Εικόνα 22. Διαφορετικές κοκομετρίες Άμμου



Εικόνα 23. Ζύγισμα του κάθε κοσκίνου



Εικόνα 24.Κοκομετρική καμπύλη της άμμου που χρησιμοποιήθηκε

Για την παραγωγή του τσιμεντοκονιάματος κινηθήκαμε πάλι βάσει του Ελληνικού Κανονισμού όπου εκτελέστηκαν όλες οι ενέργειες βήμα βήμα με ακρίβεια και ιδιαίτερη προσοχή. Στην συνέχεια γίνεται πλήρης περιγραφή της διαδικασίας παρασκευής του τσιμεντοκονιάματος της παραγωγής των δοκιμίων και η ωρίμανση αυτών. Αρχικά βάζουμε σε λειτουργία τη μηχανή ανάδευσης και ρίχνουμε το νερό .Η μηχανή τίθεται σε χαμηλή ταχύτητα και αμέσως προσθέτουμε το τσιμέντο περιμένοντας για 30 δευτερόλεπτα. Μόλις τελειώσει το πρώτο στάδιο προσθέτουμε την άμμο με σταθερό ρυθμό για τα επόμενα 30 δευτερόλεπτα, σημαντική λεπτομέρεια σε αυτό το στάδιο είναι η άμμος να έχει πέσει όλη μέσα στον κουβά στα 30 δευτερόλεπτα. Στην συνέχεια αυξάνουμε την ταχύτητα της μηχανής στο Νο2 και περιμένουμε ακόμα 30 δεύτερα. Μετά το πέρας της ανάδευσης κλείνουμε τον αναμεικτήρα για 1:30 λεπτά και καθαρίζουμε τα τοιχώματα της μηχανής από τυχόν κολλημένο τσιμέντο πάνω σε αυτήν. Έπειτα θέτουμε τον αναδευτήρα στην υψηλή ταχύτητα για το επόμενο 1 λεπτό .



Εικόνα 25.Ανάδευση τσιμεντοπολτού για το τελικό κονίαμα

Σε συνέχεια του Ελληνικού κανονισμού παραλαμβάνουμε τα καλούπια διαστάσεων 4cm*4cm*16cm και αφού τα καθαρίσουμε και τα λιπάνουμε με λάδι τοποθετούμε μέσα σε αυτό το κονίαμα μέχρι την μέση. Τα καλούπια τοποθετούνται στην μηχανή συμπύκνωσης και την θέτουμε σε λειτουργία για ένα λεπτό έτσι ώστε να κάνει 60 χτύπους. Στην συνέχεια ξαναγεμίζουμε τα καλούπια μέχρι πάνω και επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία για 1 λεπτό δηλαδή για 60 χτύπους.

Στο τελικό στάδιο της παρασκευής των κονιαμάτων τα καλούπια σκεπάζονται ολόκληρα με βρεγμένα πανιά για μια-δύο μέρες και αφού τα ξεκαλουπώσουμε τα διατηρούμε μέσα σε νερό **για 28 μέρες** μέχρι να ωριμάσουν και να επιβληθούν σε θλιπτικό και καμπτικό έλεγχο.



Εικόνα 26. Τοποθέτηση βρεγμένων πανιών πάνω στα φρέσκα δοκίμια για την αποφυγή αφυδάτωσης και αστοχίας αυτών



Εικόνα 27. Ωρίμανση δοκιμίων σε νερό

Το δοκίμιο επιβάλεται σε έλεγχο κάμψης μέσω της ειδικής μηχανής που έχει την δυνατότητα άσκησης φορτίων έως 10 KN. Η μηχανή πρέπει να είναι εφοδιασμένη με διάταξη κάμψης, η οποία αποτελείται από δυο χαλύβδινα κυλινδρικά στηρίγματα διαμέτρου 100 \pm 0.5mm και ένα τρίτο χαλύβδινο φόρτισης ίδιας διαμέτρου τοποθετημένο στο κέντρο ανάμεσα στους άλλους δυο. Το μήκος αυτών των κυλίνδρων πρέπει να είναι 45mm έως 50mm.



Εικόνα 28. Έλεγχος κάμψης ορθογωνικών δοκιμίων (Πριν την θραύση)



Εικόνα 29. Έλεγχος κάμψης ορθογωνικών δοκιμίων (Μετά την θραύση)

Αμέσως μετά τον έλεγχο της κάμψης, το κάθε κομμάτι του ορθογωνικού δοκιμίου το χρησιμοποιούμε σαν κυβικό πλέον δοκίμιο και προχωράμε στον έλεγχο της θλίψης. Η μηχανή δοκιμής σε θλίψη πρέπει να έχει κατάλληλη δυνατότητα φόρτισης για την δοκιμή με ακρίβεια +/-1.0%. Παρακάτω στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που πήραμε από τα δοκίμια σε έλεγχο κάμψης αλλά και θλίψης.



Εικόνα 30. Έλεγχος θλίψης κυβικών δοκιμίων στην COM-TECHNIK

ANTOXH ΔΟΚΙΜΙΩΝ(02/06/2016)					
α/α	Βάρος(gr)	Γεωμετρία(mm)	Κάμψη(kN)	Θλίψη(kN)	Παραμόρφωση ε(mm)
Δ1	584.0	40.32x39.9	37,30	A)88.1	A)0.40
				B)91.5	B)0.39
Δ2	593.5	40.5x40.35	39,00	A)90.7	A)0.41

				B)92.5	B)0.41
Δ3	592.5	40.2x40.9	41,00	A)90.7	A)0.40
				B)92.5	B)0.41

Πίνακας 1.Αντοχή Δοκιμίων σε Κάμψη και Θλίψη

Χαρακτηριστική Αντοχή σε Κάμψη :

$$R_f = (1,5 * F_f * L) / b^3 \rightarrow R_f = 10,08 \text{ Nt/mm}^2$$

Χαρακτηριστική Αντοχή σε Θλίψη :

$$R_c = F_c / A \rightarrow R_c = 91 * 1000 / 1600 \rightarrow R_c = 56,87 \text{ Nt/mm}^2$$

Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ταχείας πήξεως οπότε η χαρακτηριστική αντοχή της τσιμεντοκονίας είναι **52,5 R**

3.5 Κατασκευή Καλουπιού

Ένα από τα σημαντικότερα αλλά και δυσκολότερα κομμάτια του εν λόγω πειράματος ήταν η κατασκευή των καλουπιών. Το σημαντικότερο ίσως κομμάτι όλου του πειράματος ήταν το καλύτερα δυνατό πραγματικό σχήμα που μπορούσαμε να κατασκευάσουμε, ούτως ώστε να μπορούμε να επιτύχουμε τα καλύτερα αποτελέσματα, δηλαδή τις καλύτερες αντοχές των δοκιμίων σε ομοιόμορφα κατανεμημένα θλιπτικά φορτία. Η λογική που ακολουθήθηκε ήταν η εξής: το ίδιο το σχήμα της κατασκευής, δισδιάστατης και τρισδιάστατης δεν ήταν τίποτα άλλο από το διάγραμμα ροπών (δισδιάστατο και τρισδιάστατο αντίστοιχα) ανεστραμμένο, δηλαδή γυρισμένο ανάποδα. Πιο συγκεκριμένα, η λογική του σχήματος ήταν ότι για να πάρουμε το ιδανικότερο σχήμα των φορέων – την ιδανική καμπύλη – αυτό που έπρεπε να κάνουμε ήταν να αφήσουμε την βαρύτητα να μας δώσει εκείνη το ιδανικότερο σχήμα. Δηλαδή, για την **δισδιάστατη κατασκευή** (καμάρα) αυτό που κάναμε ήταν: Πήραμε μία αλυσίδα μεταλλική την κρατήσαμε σταθερή σε δύο σημεία που είχαν αποσταση μεταξύ τους 70 cm και την αφήσαμε να κρεμάσει από το ίδιο το βάρος της (βαρύτητα) έως ότου η κρέμαση να φτάσει στα 30 cm. Αφού σημαδέψαμε με ένα σπρέι το σχήμα μιας καμπύλης που δημιουργήθηκε με ένα φύλλο μετάλλου και 2 κομμάτια φενιζόλ (πλάτους 10cm) σχηματίσαμε τρία καλούπια του ίδιου σχήματος της καμπύλης που μας έδωσε η αλυσίδα και η βαρύτητα.

Καλούπι τριών διαστάσεων

Την ίδια λογική ακολουθήσαμε και για τον τρούλο αλλά σε τρισδιάστατο μοντέλο. Αρχικά κατασκευάσαμε ένα μεταλικό τσέρκι διαμέτρου 80 cm στο οποίο και κολλήσαμε με ηλεκτροκόλληση τέσσερα σιδεράκια (πατήματα για στήριξη)-εικ.32,33-



Εικόνα 31.Αλφάδιασμα τσερκιού βάσης του τρούλου



Εικόνα 32. Τσέρκι βάσης του τρούλου

στην συνέχεια δέσαμε και πιάσαμε με πιάστρες στο μεταλλικό τσέρκι τρεις στρώσεις ελαστικού υφάσματος το οποίο ήταν τεντωμένο κατά μήκος όλου του τσερκιού-εικ.34,35-



Εικόνα 33. Τοποθέτηση ελαστικού πανιού στο τσέρκι βάσης



Εικόνα 34. Δέσιμο ελαστικού πανιού στο τσέρκι



Εικόνα 35. Αλφάδιασμα ελαστικής βάσης

. Η ιδέα ήταν να παραμορφώσουμε εφελκυστικά αλλά και ομοιόμορφα ένα υλικό ελαστικό όπως το συγκεκριμένο ύφασμα με φορτία βαρύτητας τόσο ώστε να πάρουμε την τρισδιάστατη καμπύλη που χρειαζόμασταν. Στη συνέχεια λοιπόν,

- αρχίσαμε να γεμίζουμε το πανί με άμμο όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα και πιο συμπυκνωμένα μπορούσαμε φορτίζοντάς το έτσι σταδιακά με σκοπό να μην δημιουργούνται ανωμαλίες στο σχήμα της καμπύλης. εικ.40,41

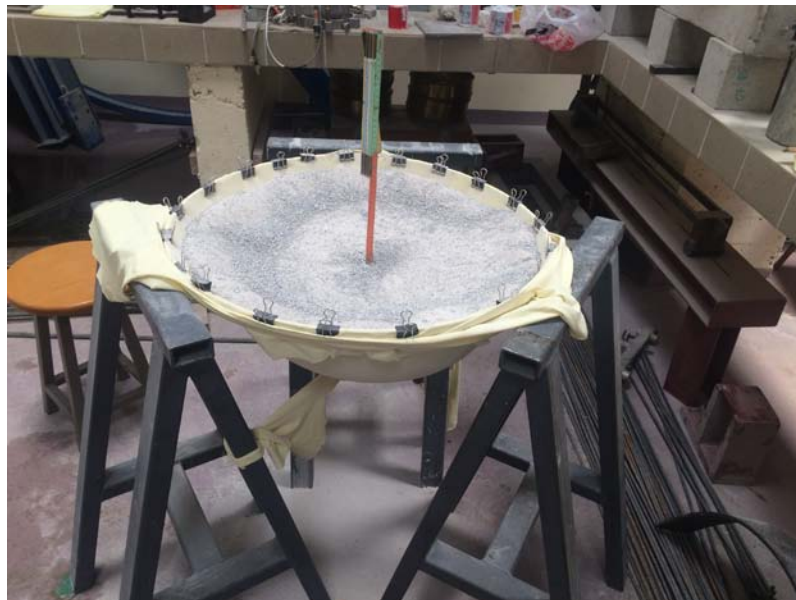


Εικόνα 36.Σταδιακό ισογέμισμα της ελαστικής βάσης με άμμο

και μέχρι η καμπύλη που δημιουργούνται να φτάσει στο επιθυμητό ύψος των 30 εκατοστών που και είχαμε σημαδέψει.



Εικόνα 37.Συνεχής έλεγχος ύψους της κορυφής του τρούλου



Εικόνα 38.Έλεγχος βάθους του τρούλου



Εικόνα 39.Γέμισμα και χτύπημα της ελαστικής βάσης για το καλύτερο δυνατό-βέλτιστο σχήμα



Εικόνα 40.Τελικό βέλτιστο σχήμα παραβολικού τόξου

Αφού το σχήμα είχε δημιουργηθεί έπρεπε να το σταθεροποιήσουμε.

- Επιλέξαμε να κολλήσουμε γάζες με γύψο σε όλο το πανί οι οποίες λόγω της ευκαμψίας τους μπορούσαν να ακολουθούν πιστά το σχήμα του τρούλου που είχε παρουσιαστεί, **(εικ.42)**, και το αφήσαμε να στεγνώσει για να σφίξει, **(εικ.43)** Έτσι πήραμε σε πρώτο στάδιο το αρχικό μας σχήμα στο χώρο.



Εικόνα 41. Πέρασμα ελαστικού πανιού με γάζες γύψου για σκλήρυνση του καλουπιού



Εικόνα42.Στέγνωμα γύψινου καλουπιού



Εικόνα 44.Αδειασμα της άμμου από το ελαστικό πανί



Εικόνα 45.Διορθώσεις σε ατέλειες του καλουπιού

- Στη συνέχεια περάσαμε ένα χέρι ρητίνη για να σφίξει και να γίνει πιο δυνατό και αφού η ρητίνη ήταν έτοιμη (εικ.44).



Εικόνα 44.Στέγνωμα ρητίνης στο καλούπι, πλέον σχεδόν ολοκληρωμένο



Εικόνα 43.Στοκάρισμα καλουπιού

- Στην συνέχεια περάσαμε το καλούπι με μία στρώση στόκο νερού τον οποίο και τρίψαμε για να γίνει λεία η επιφάνεια του καλουπιού χωρίς ανωμαλίες και ατέλειες, (εικ.47-50).



Εικόνα 44.Στοκάρισμα του καλουπιού



Εικόνα 45. Το τελικό καλούπι μετά απο τρίψιμο των στόκων

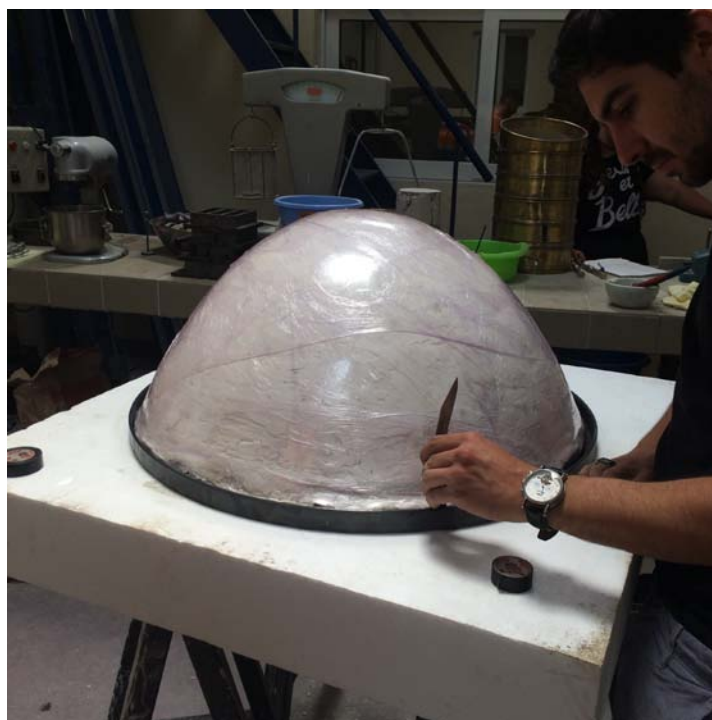


Εικόνα 46. Το τελικό καλούπι

3.6 Κατασκευή Φορέα – Ωρίμανση

Για να κατασκευαστεί ο φορέας έπρεπε να υπάρχει συνεχής ροή παραγωγής του κονιάματος ούτως ώστε να είναι στην κατάλληλη ρευστότητα για να μπορεί μεν να σταθεί πάνω στο καλούπι αλλά συγχρόνως αρκετά στερεός ώστε να μην κυλάει προς τα κάτω. Αρχικά το πρώτο καλούπι καλύφθηκε με ζελατίνη και πάνω από αυτό περάστηκε με πινέλο μια στρώση λάδι που θα βοηθούσε στο ξεκαλούπωμα. Το δεύτερο καλούπι το καλύψαμε με ταινία όπου μας έδινε καλύτερη επιφάνεια/ποιο λεία και πάνω από αυτό περάστηκε ένα στρώμα γράσο για μεγαλύτερη ευκολία στο ξεκαλούπωμα.

Σημαντικό είναι επίσης η προσομοίωση της θεμελίωσης που πραγματοποιήθηκε. Επιλέξαμε να θεμελιώσουμε την κατασκευή μας με πλήρη πάκτωση, όπως και θα γινόταν πραγματικά σε προηγούμενα χρόνια, δηλαδή η κατασκευή μας θα συνεχιζόταν μέσα στο έδαφος για κάποιο βάθος. Προστέθηκε ένα περιμετρικό τσέρκι με διατομή ανάποδο Γ στην βάση όπως φαίνεται και στην **εικόνα 51** διαστάσεων 3,0 x 3,0 εκ. με το οποίο στην ουσία κατασκευάσαμε ένα περιμετρικό δοκάρι στο οποίο εδράστηκε όλος ο φορέας



Εικόνα 47. Τοποθέτηση καλουπιού στο περιμετρικό τσέρκι θεμελίωσης



Εικόνα 48.Πέρασμα ταινίας και γράσσου για ευκολία στο ξεκαλούπωμα

Κόψαμε επίσης μικρά κομμάτια (3,0cm) από χοντρό σύρμα(2,0 mm) το οποίο είχαμε χαράξει – σημάδεψει στα 8 χιλιοστά τα οποία χρησιμοποιήσαμε για να ελέγχουμε διαρκώς το πάχος του φορέα που έπρεπε να είναι 8 mm και ομοιόμορφο. Αυτά τα χρησιμοποιήσαμε όπως ακριβώς χρησιμοποιούνται τα πασαλάκια όταν αλφαδιάζουμε κάποιο επίπεδο και τα καρφώνουμε σαν σημάδια, για να ρίξουμε τσιμεντοκονίες με ρύσεις σε μία πλάκα. Τα καρφώναμε δηλαδή διαρκώς στον φρέσκο φορέα μας για να βλέπουμε το πάχος της διατομής αυτού. Όπου το σημάδι ήταν πάνω από την στρώση της τσιμεντοκονίας προσθέταμε υλικό, ενώ όπου βυθιζόταν μέσα στο φορέα τότε στρώναμε το υλικό ξανά αφαιρώντας. Αφού όλα ήταν έτοιμα ξεκίνησε η σκυροδέτηση. Η σκυροδέτηση του φορέα μας πραγματοποιήθηκε με μυστρί και νερό στο χέρι και σε στρώσεις με συνεχή ρυθμό (εικ.53-56).



Εικόνα 49.Σταδιακή σκυροδέτηση του τρούλου από κάτω προς τα πάνω



Εικόνα 50.Σταδιακή σκυροδέτηση του τρούλου



Εικόνα 51.Σταδιακή σκυροδέτηση και έλεγχος πάχους της διατομής του φορέα



Εικόνα 52.Σκυροδέτηση φορέα

Καθ'όλη τη διάρκεια της σκυροδέτησης καρφώναμε τα μεταλλικά συρματάκια στο κονίαμα για να ελέγχουμε το πάχος της διατομής και συμπληρωνόταν ή αφαιρούταν υλικό από όποιο σημείο κρινόταν ότι απαιτείται με σκοπό την ομοιομορφία στο πάχος του υλικού. Η διαδικασία αυτή συνεχίστηκε έως ότου ολοκληρώθηκε ο τρούλος. Στο τέλος με βρεγμένο μυστρί η επιφάνεια του φορέα έγινε λεία και ομαλή.



Εικόνα 53.Ο τρούλος τελειωμένος



Εικόνα 54.Ο τρούλος από όλες τις πλευρές



Εικόνα 55.Ο τρούλος από όλες τις πλευρές

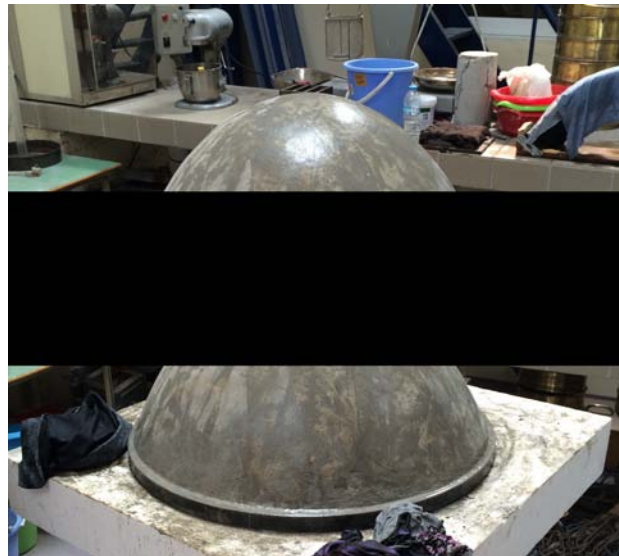
Αφού ολοκληρώθηκε η σκυροδέτηση τοποθετήθηκαν μουσκεμένα πανιά πάνω σε όλο τον τρούλο τα οποία και ποτίζονταν σε όλη την διάρκεια της ωρίμανσης κρατώντας το δοκίμιο βρεγμένο όσο το δυνατόν περισσότερο (εικ.55). Ακόμα και ειδικές κατασκευές επινοήθηκαν ούτως ώστε το δοκίμιο να μην ξεραθεί ακόμα και τις μέρες που το εργαστήριο ήταν κλειστό (εικ.56). Το δεύτερο δοκίμιο τοποθετήθηκε ολόκληρο μέσα στη δεξαμενή νερού του εργαστηρίου προκειμένου να αποφευχθούν συνθήκες καύσωνα. Η ωρίμανση ολοκληρώθηκε στις 28+ ημέρες.



Εικόνα 56.Κάλυψη του τρούλου με μουσκεμένες πετσέτες για διατήρηση της υγρασίας



Εικόνα 57.Αυτοσχέδιος τρόπος ποτίσματος τρούλου με μπουκάλι



Εικόνα 58.Ο τρούλος μετά την ωρίμανση από διαφορετικές όψεις



3.7 Φόρτιση του φορέα – Τρούλου υπό ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο (καταστρεπτικός έλεγχος)

Το στάδιο της φόρτισης, ήταν ένα από τα σημαντικότερα σημεία του πειράματος μιας και επιχειρήθηκε η καλύτερη δυνατή προσομοίωση ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου σε τρεις διαστάσεις. Για να προσομοιωθεί καλύτερα η φόρτιση θεωρήσαμε καλύτερο το δοκίμιο να τοποθετηθεί σε σταθερό περιορισμένο χώρο και για την μεταφορά του φορτίου από την πρέσα ομοιόμορφα στο δοκίμιο επιλέξαμε να χρησιμοποιηθεί ένα ψαθυρό υλικό μικρής κοκκομετρίας σχετικά. Αρχικά κατασκευάστηκαν δύο μεταλλικά πλαίσια με κοιλοδοκούς διατομών 15x15 εκ. για όρθια στοιχεία και 15x10 εκ. για τα οριζόντια. Το κάθε πλαίσιο τοποθετήθηκε στα άκρα της σταθερής βάσης της πρέσας, και πάνω από αυτά τοποθετήθηκε φύλλο μετάλλου πάχους 0,4 εκατοστών όπως φαίνονται και στην (εικ. 59) φτιάχνοντας έτσι μία ακλόνητη αλλά και άκαμπτη επέκταση της βάσης έδρασης του μηχανήματος. Με αυτό θέλαμε η ίδια η επέκταση να μην μπορεί να επηρεάσει καθόλου τη διαδικασία των φορτίσεων και των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 59.Επέκταση της βάσης της πρέσας θλίψης με κοιλοδοκούς

Ο χώρος που θα εμπεριείχε τον τρούλο επιλέχθηκε να κατασκευαστεί από φύλλο μετάλλου 0,2 εκατοστών πάχους και 45 εκατοστών ύψος. Για την καλύτερη κατανομή του ψαθυρού υλικού αλλά και μετέπειτα των φορτίων χωρίς να υπάρχουν κρατύνσεις και όσο το δυνατόν λιγότερες

τριβές επιλέχθηκε κυλινδρικό σχήμα πλαισίου διαμέτρου 85 εκατοστών. Για το υλικό που θα μετέφερε ομοιόμορφα το φορτίο με τόσες πολλές σημειακές και ίσες φορτίσεις στην επιφάνεια του τρούλου έτσι ώστε συνολικά να θεωρηθεί ομοιόμορφο φορτίο επιλέξαμε την άμμο (νταμαρίσια και μικρής κοκκομετρίας για να έχουμε όσο το δυνατόν μικρότερα κενά). Αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμα καλύτερα θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε ακόμα πιο λεπτόκοκκα υλικά ή ακόμα πιο ιδανικά κάποιο παχύρευστο υγρό αλλά αυτό θα προϋπόθετε στεγανοποιήσεις και άλλα πολλά οπότε και επιλέξαμε τον ευκολότερο και οικονομικότερο τρόπο.



Εικόνα 60.Κυκλικό τσέρκι για την φόρτιση του τρούλου στο εσωτερικό του

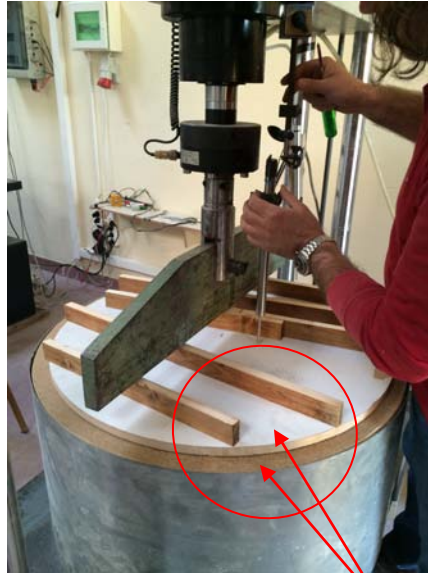
Το δοκίμιο – τρούλος τοποθετήθηκε μέσα στο μεταλλικό πλαίσιο και σταδιακά το γεμίσαμε με άμμο που χτυπούσαμε κατά την διάρκεια ώστε να ‘κάτσει’ όσο το δυνατόν περισσότερο και καλύτερα (εικ.61).



Εικόνα 61.Σταδιακό γέμισμα του εξωτερικού τσερκιού με άμμο για καλύτερη κατανομή των φορτίων



Στην κορυφή τοποθετήθηκαν δύο φύλλα ξύλου σαν καπάκια, (εικ.62) και πάνω από αυτά και κάθετα στη διεύθυνση του ψαλιδιού της πρέσας τοποθετήθηκαν 4 μεταλλικές δοκοί διατομής U πλήρως άκαμπτοι (εικ.63). Τέλος τοποθετήθηκε ηλεκτρονικό βελόμετρο στην κάθετη διεύθυνση που μετρούσε την παραμόρφωση – το βέλος κάμψης δηλαδή του φορέα κατά την διεύθυνση της φόρτισης (εικ.63).



Εικόνα 62.Κλείσιμο του περιμετρικού τσερκιού με διπλό καπάκι ξύλινο και τοποθέτηση ηλεκτρονικού βελόμετρου για μέτρηση του βέλους κάμψης.



Εικόνα 63.Κλείσιμο περιμετρικού τσερκιού με διπλό καπάκι ξύλινο και τοποθέτηση μεταλλικών δοκών U κάθετα στο ψαλίδι της πρέσας

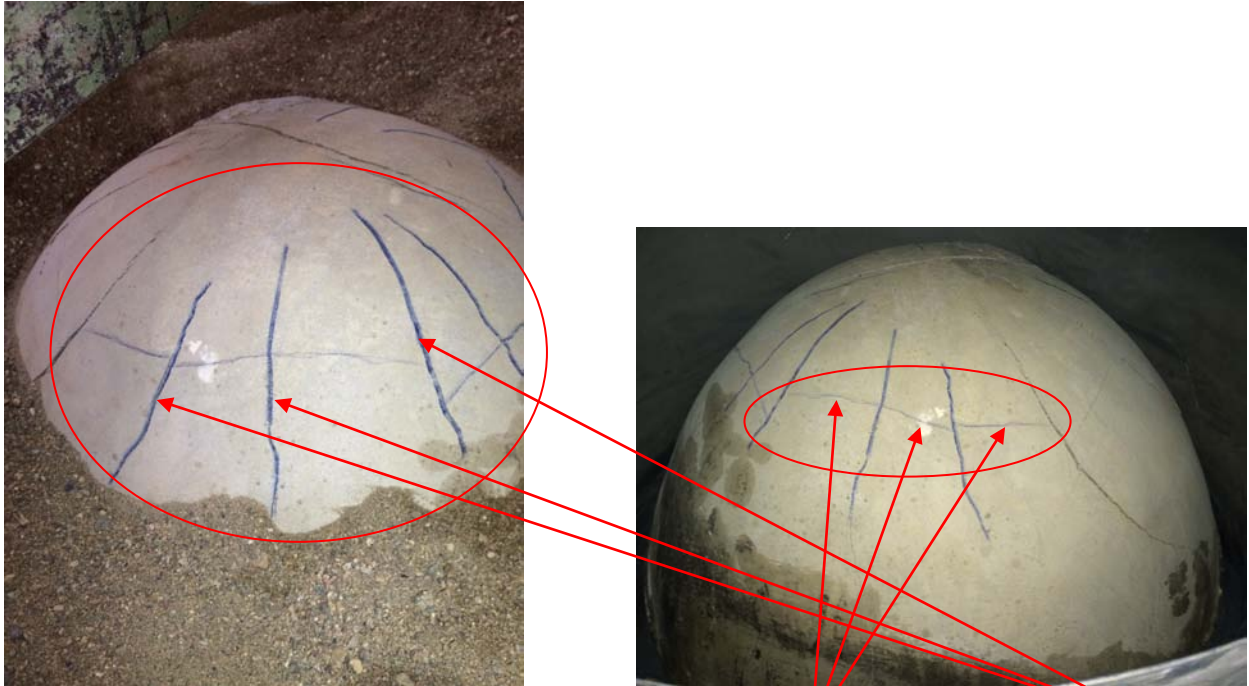
Στην συνέχεια η πρέσα θλίψης τέθηκε σε λειτουργία και η φόρτιση ξεκίνησε. Αρχικά θέσαμε την μηχανή σε λειτουργία έως ότου η άμμος αποβάλλει τον αέρα που διατηρούνταν ανάμεσα στα κενά της. Τις πρώτες αυτές μετρήσεις δεν τις λάβαμε καθόλου υπ' όψιν και ξαναξεκινήσαμε απτήν αρχή την φόρτιση. Τα αποτελέσματα της φόρτισης φαίνονται στον πίνακα παρακάτω μαζί με την καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων. Η κατασκευή μας άντεξε και έσπασε υπό συγκεντρωμένο φορτίο από την πρέσα, το οποίο ασκήθηκε σαν «ομοιόμορφα» κατανεμημένο φορτίο στο φορέα μας στα 39,68kN. Η άμμος σταδιακά απομακρύνθηκε και το δοκίμιο καθώς και τα αποτελέσματα της φόρτισης ήταν πλέον εμφανή.



Εικόνα 63.Αδειασμα άμμου και εμφάνιση των πρώτων ρωγμών



Εικόνα 64.Εμφάνιση και σημάδεμα των ρωγμών του γ'γ άξονα(όρθιες ρωγμές)



Εικόνα 65.Εμφάνιση και σημάδεμα των ρωγμών του $x'x$ άξονα(οριζόντιες ρωγμές) και του yy' (κάθετες ρωγμές)



Εικόνα 66.Εμφάνιση και σημάδεμα των ρωγμών του $x'x$ άξονα(οριζόντιες ρωγμές)

Πρώτη – Αρχική ρωγμή

3.8 Παρουσίαση – Αποτίμηση Αποτελεσμάτων



Εικόνα 67.Ο τρούλος μετά την φόρτιση με σηματομεμένες όλες τις ρωγμές

Η κατασκευή μας έσπασε υπό τριαξονική κάμψη στους τοπικούς άξονες σχεδόν ακριβώς όπως θα περιμέναμε θεωρητικά να σπάσει. Αν θεωρήσουμε τον κάθετο στην βάση έδρασης άξονα τον yy' , από την κάμψη σε αυτόν οφείλονται οι ρωγμές κατά την γενέτειρα που φαίνονται και στην εικόνα. Αν ο άξονας xx' είναι ο οριζόντιος άξονας τότε οι ρωγμές κατά της οριζόντιας διεύθυνσης που φαίνονται και στις εικόνες 65,66 και επεκτείνονται ανάμεσα στις κάθετες ρωγμές, οφείλονται σε κάμψη που δημιουργήθηκε σε αυτόν τον άξονα.. Ο τρίτος τοπικός άξονας καμπτικής αστοχίας είναι ο άξονας που είναι κάθετος σε κάθε σημείο της διατομής του φορέα από όπου ξεκινάνε και όλες οι ρωγμές στο πρώτο τους στάδιο.

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναφερθεί ότι η αστοχία του φορέα μας ήταν σχεδόν ομοιόμορφη. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αυτό που θεωρητικά θέλαμε να επιτύχουμε, δηλαδή ένα εναλλακτικό μονοπάτι φορτίων σε ένα άοπλο και ελάχιστου πάχους φορέα, αλλά συνάμα και μία όσον το δυνατόν πλησιέστερη πειραματική προσομοίωση ομοιόμορφα κατανεμημένου θλιπτικού φορτίου. Από τη στιγμή που δεν υπάρχει οπλισμός και το υλικό είναι τσιμεντοκονίαμα είναι δεδομένο ότι μόλις τα φορτία ξεφύγουν από το μονοπάτι που τους δώσαμε να ακολουθήσουν, δηλαδή το θλιπτικό, θα δημιουργηθούν κάμψεις και εφελκυσμοί τοπικά οι οποίες και θα αστοχήσουν το υλικό καθώς και δεν είναι κατασκευασμένο για να τις παραλάβει και να τις ισοκατανέμει. Ακόμα πιο συγκεκριμένα φαίνεται να υπάρχει κάποια αναλογία μεταξύ της παραμόρφωσης του φορέα και του μονοπατιού των φορτίων. Αυτό σημαίνει ότι η βέλτιστη γεωμετρία του κτιρίου μπορεί να λειτουργεί κανονικά δηλαδή να μετατρέπει τα φορτία σε θλιπτικά μέχρι ένα σημείο παραμόρφωσης του φορέα. Αφού η κατασκευή περάσει αυτό το σημείο του βέλους κάμψης (περίπου στο **1,55%** του ύψους ή ακόμα πιο συγκεκριμένα **5,43mm** βύθισης) το μονοπάτι πλέον σταματάει να μεταφέρει μόνο θλιπτικά τα φορτία και παράλληλα τοπικά αρχίζουν να εμφανίζονται οι πρώτες ρωπές μέσα από τους εφελκυσμούς αλλά και τις κάμψεις. Από αυτό το σημείο και έπειτα ο φορέας θα σπάσει μόλις το υλικό έρθει στο όριό του πλέον (Όριο Ελαστικότητας Υλικού).

Αυτό θα μπορούσε επίσης να αποδειχθεί και με τα τελικά αποτελέσματα των φορτίσεων του φορέα μας σε σύγκριση με αυτά των δοκιμίων που κατασκευάστηκαν στην διαδικασία ελέγχου του υλικού μας. **Ο φορέας** έσπασε όταν δημιουργήθηκαν τριαξονικές κάμψεις υπό φορτίο **39,68kN**. **Τα ορθογωνικά δοκίμια** του κονιάματος που παρασκευάσαμε είχαν μέσω όρο αντοχής σε κάμψη μόλις **40 kN** κάτι το οποίο σημαίνει ότι ο φορέας μας πλησίασε τις αντοχές των δοκιμίων σε κάμψη σε ποσοστό της τάξης του **99,2%!!**, ενώ η αντοχή των κυβικών δοκιμίων σε θλίψη ήταν σε μέσο όρο 90 KN κάτι που σημαίνει ότι ο φορέας μας στα μόλις 0,8cm πάχους έφτασε στο **44,08%** της θλιπτικής αντοχής των κυβικών δοκιμίων, δηλαδή του υλικού.

Από το λογισμικό της πρέσας πήραμε τα δεδομένα της φόρτισης όπου από την επεξεργασία αυτών προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα Φορτίου – Βέλους κάμψης του φορέα μας. Το φορτίο δεν ξεκινάει από το μηδέν (0) για τον λόγο ότι έχει προστεθεί το φορτίο της άμμου.

Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας με τα αποτελέσματα από την πρέσσα φόρτισης

ΥΨΟΣ: 35cm , ΒΑΣΗ: 80cm , ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ: 7.865,47cm²			
Load (kN)	Elapsed time	Φορτίο+Άμμο (kN)	Disp (mm)
1,83	00:00,0	3,6932635	0
3,24	00:11,1	5,1032635	0,01
3,71	00:11,6	5,5732635	0,2
3,43	00:12,1	5,2932635	0,24
3,71	00:12,6	5,5732635	0,25
4,01	00:13,1	5,8732635	0,31
4,1	00:13,5	5,9632635	0,36
4,12	00:14,0	5,9832635	0,36
4,01	00:14,5	5,8732635	0,37
4,03	00:15,0	5,8932635	0,37
4,27	00:15,5	6,1332635	0,39
4,33	00:16,0	6,1932635	0,41
4,48	00:16,5	6,3432635	0,44
4,46	00:16,9	6,3232635	0,47
4,56	00:17,4	6,4232635	0,5
4,65	00:17,9	6,5132635	0,52
4,84	00:18,4	6,7032635	0,55
4,88	00:18,9	6,7432635	0,57
4,95	00:19,4	6,8132635	0,6
5,03	00:19,8	6,8932635	0,62
5,2	00:20,3	7,0632635	0,65
5,27	00:20,8	7,1332635	0,67
5,42	00:21,3	7,2832635	0,69
5,46	00:21,8	7,3232635	0,72
5,57	00:22,3	7,4332635	0,75
5,74	00:22,8	7,6032635	0,77
5,8	00:23,2	7,6632635	0,79
5,82	00:23,7	7,6832635	0,81
5,95	00:24,2	7,8132635	0,84
6,12	00:24,7	7,9832635	0,86
6,19	00:25,2	8,0532635	0,88
6,27	00:25,6	8,1332635	0,9
6,44	00:26,1	8,3032635	0,92
6,44	00:26,6	8,3032635	0,94
6,66	00:27,1	8,5232635	0,96
6,61	00:27,6	8,4732635	0,99
6,72	00:28,1	8,5832635	1,01
6,89	00:28,6	8,7532635	1,02
6,87	00:29,0	8,7332635	1,04
7,08	00:29,5	8,9432635	1,06
7,3	00:30,0	9,1632635	1,08

7,34	00:30,5	9,2032635	1,1
7,32	00:31,0	9,1832635	1,12
7,51	00:31,5	9,3732635	1,14
7,66	00:32,0	9,5232635	1,16
7,76	00:32,4	9,6232635	1,17
7,68	00:32,9	9,5432635	1,19
7,89	00:33,4	9,7532635	1,21
7,91	00:33,9	9,7732635	1,23
8,17	00:34,4	10,0332635	1,25
8,28	00:34,8	10,1432635	1,27
8,28	00:35,3	10,1432635	1,29
8,38	00:35,8	10,2432635	1,3
8,51	00:36,3	10,3732635	1,32
8,51	00:36,8	10,3732635	1,34
8,58	00:37,3	10,4432635	1,36
8,7	00:37,8	10,5632635	1,37
8,81	00:38,2	10,6732635	1,39
8,96	00:38,7	10,8232635	1,41
9	00:39,2	10,8632635	1,42
9,15	00:39,7	11,0132635	1,44
9,3	00:40,2	11,1632635	1,46
9,39	00:40,7	11,2532635	1,47
9,49	00:41,1	11,3532635	1,49
9,45	00:41,6	11,3132635	1,51
9,58	00:42,1	11,4432635	1,52
9,58	00:42,6	11,4432635	1,54
9,75	00:43,1	11,6132635	1,56
9,96	00:43,6	11,8232635	1,57
9,98	00:44,1	11,8432635	1,59
10,22	00:44,5	12,0832635	1,61
10,28	00:45,0	12,1432635	1,63
10,28	00:45,5	12,1432635	1,64
10,35	00:46,0	12,2132635	1,66
10,58	00:46,5	12,4432635	1,68
10,54	00:47,0	12,4032635	1,69
10,75	00:47,5	12,6132635	1,71
10,75	00:47,9	12,6132635	1,73
10,81	00:48,4	12,6732635	1,74
11,05	00:48,9	12,9132635	1,76
11,05	00:49,4	12,9132635	1,77
11,26	00:49,9	13,1232635	1,79
11,35	00:50,4	13,2132635	1,81
11,39	00:50,8	13,2532635	1,82
11,54	00:51,3	13,4032635	1,84
11,69	00:51,8	13,5532635	1,86
11,75	00:52,3	13,6132635	1,88

11,88	00:52,8	13,7432635	1,89
11,88	00:53,3	13,7432635	1,91
11,97	00:53,7	13,8332635	1,92
12,05	00:54,2	13,9132635	1,94
12,14	00:54,7	14,0032635	1,95
12,27	00:55,2	14,1332635	1,97
12,39	00:55,7	14,2532635	1,98
12,5	00:56,2	14,3632635	1,99
12,56	00:56,7	14,4232635	2,01
12,67	00:57,1	14,5332635	2,03
12,82	00:57,6	14,6832635	2,04
12,86	00:58,1	14,7232635	2,06
12,97	00:58,6	14,8332635	2,07
13,08	00:59,1	14,9432635	2,09
13,23	00:59,6	15,0932635	2,11
13,23	01:00,0	15,0932635	2,12
13,31	01:00,5	15,1732635	2,14
13,5	01:01,0	15,3632635	2,15
13,52	01:01,5	15,3832635	2,17
13,69	01:02,0	15,5532635	2,18
13,76	01:02,5	15,6232635	2,2
13,78	01:02,9	15,6432635	2,21
13,95	01:03,4	15,8132635	2,23
14,1	01:03,9	15,9632635	2,25
14,14	01:04,4	16,0032635	2,26
14,23	01:04,9	16,0932635	2,28
14,33	01:05,4	16,1932635	2,29
14,46	01:05,8	16,3232635	2,31
14,55	01:06,3	16,4132635	2,32
14,61	01:06,8	16,4732635	2,34
14,74	01:07,3	16,6032635	2,35
14,8	01:07,8	16,6632635	2,37
14,95	01:08,3	16,8132635	2,38
15	01:08,8	16,8632635	2,39
15,1	01:09,3	16,9632635	2,41
15,25	01:09,7	17,1132635	2,42
15,34	01:10,2	17,2032635	2,44
15,42	01:10,7	17,2832635	2,46
15,55	01:11,2	17,4132635	2,47
15,59	01:11,7	17,4532635	2,49
15,64	01:12,2	17,5032635	2,5
15,78	01:12,6	17,6432635	2,52
15,91	01:13,1	17,7732635	2,53
16,02	01:13,6	17,8832635	2,56
16,06	01:14,1	17,9232635	2,57
16,19	01:14,6	18,0532635	2,59

16,28	01:15,1	18,1432635	2,6
16,4	01:15,5	18,2632635	2,61
16,47	01:16,0	18,3332635	2,63
16,57	01:16,5	18,4332635	2,64
16,68	01:17,0	18,5432635	2,66
16,7	01:17,5	18,5632635	2,67
16,83	01:18,0	18,6932635	2,69
16,94	01:18,5	18,8032635	2,71
17,02	01:18,9	18,8832635	2,72
17,19	01:19,4	19,0532635	2,73
17,3	01:19,9	19,1632635	2,75
17,41	01:20,4	19,2732635	2,77
17,53	01:20,9	19,3932635	2,78
17,51	01:21,4	19,3732635	2,79
17,68	01:21,8	19,5432635	2,81
17,77	01:22,3	19,6332635	2,82
17,85	01:22,8	19,7132635	2,84
17,96	01:23,3	19,8232635	2,85
18,05	01:23,8	19,9132635	2,86
18,17	01:24,3	20,0332635	2,89
18,15	01:24,8	20,0132635	2,89
18,28	01:25,2	20,1432635	2,91
18,45	01:25,7	20,3132635	2,92
18,54	01:26,2	20,4032635	2,94
18,62	01:26,7	20,4832635	2,96
18,69	01:27,2	20,5532635	2,97
18,86	01:27,7	20,7232635	2,98
18,94	01:28,1	20,8032635	3
18,94	01:28,6	20,8032635	3,01
19,05	01:29,1	20,9132635	3,03
19,2	01:29,6	21,0632635	3,04
19,33	01:30,1	21,1932635	3,06
19,43	01:30,6	21,2932635	3,07
19,54	01:31,0	21,4032635	3,09
19,58	01:31,5	21,4432635	3,1
19,73	01:32,0	21,5932635	3,11
19,77	01:32,5	21,6332635	3,13
19,9	01:33,0	21,7632635	3,14
20,01	01:33,5	21,8732635	3,16
20,05	01:34,0	21,9132635	3,17
20,2	01:34,4	22,0632635	3,19
20,33	01:34,9	22,1932635	3,2
20,37	01:35,4	22,2332635	3,22
20,52	01:35,9	22,3832635	3,22
20,54	01:36,4	22,4032635	3,24
20,65	01:36,9	22,5132635	3,26

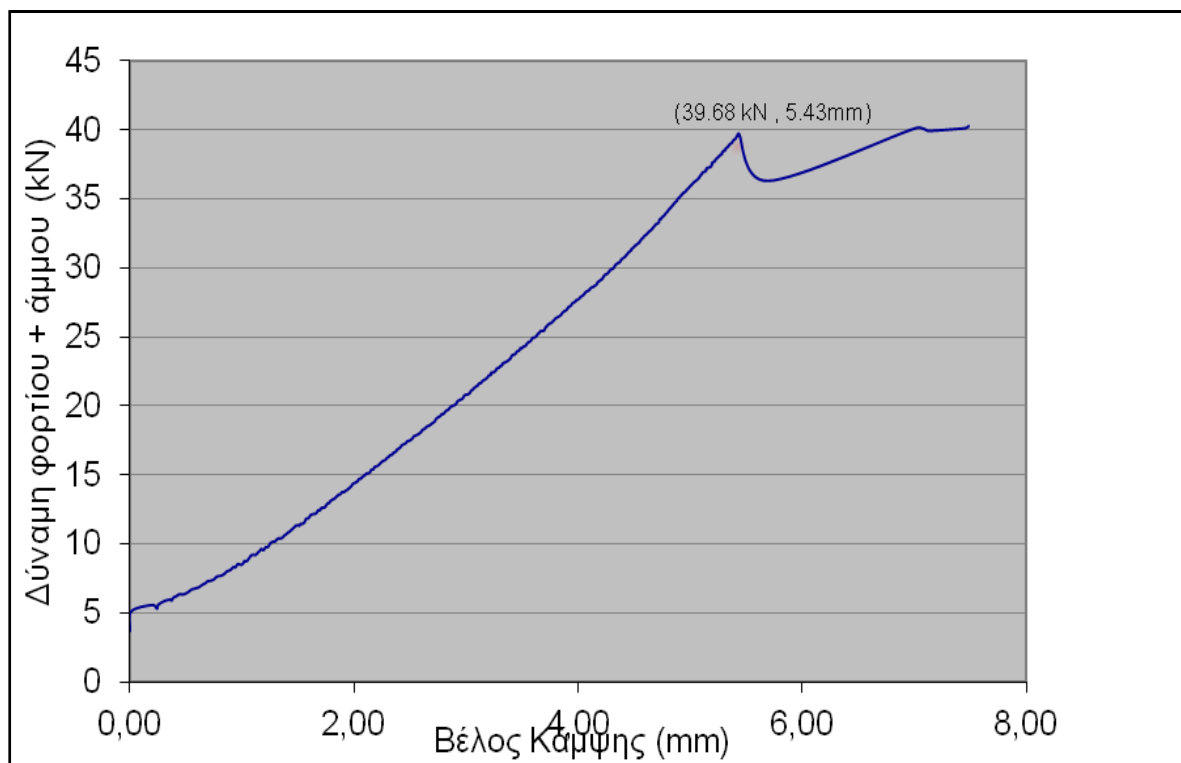
20,82	01:37,3	22,6832635	3,27
20,88	01:37,8	22,7432635	3,29
20,97	01:38,3	22,8332635	3,3
21,08	01:38,8	22,9432635	3,32
21,18	01:39,3	23,0432635	3,32
21,25	01:39,8	23,1132635	3,34
21,33	01:40,3	23,1932635	3,36
21,46	01:40,7	23,3232635	3,38
21,52	01:41,2	23,3832635	3,39
21,67	01:41,7	23,5332635	3,4
21,8	01:42,2	23,6632635	3,41
21,84	01:42,7	23,7032635	3,43
21,91	01:43,2	23,7732635	3,44
22,06	01:43,6	23,9232635	3,45
22,12	01:44,1	23,9832635	3,47
22,29	01:44,6	24,1532635	3,48
22,27	01:45,1	24,1332635	3,49
22,42	01:45,6	24,2832635	3,51
22,48	01:46,1	24,3432635	3,53
22,63	01:46,5	24,4932635	3,54
22,7	01:47,0	24,5632635	3,55
22,8	01:47,5	24,6632635	3,57
22,89	01:48,0	24,7532635	3,58
23,04	01:48,5	24,9032635	3,59
23,08	01:49,0	24,9432635	3,61
23,14	01:49,5	25,0032635	3,62
23,36	01:49,9	25,2232635	3,64
23,4	01:50,4	25,2632635	3,65
23,53	01:50,9	25,3932635	3,66
23,55	01:51,4	25,4132635	3,69
23,72	01:51,9	25,5832635	3,7
23,83	01:52,4	25,6932635	3,71
23,91	01:52,8	25,7732635	3,72
24,08	01:53,3	25,9432635	3,74
24,13	01:53,8	25,9932635	3,76
24,25	01:54,3	26,1132635	3,77
24,3	01:54,8	26,1632635	3,78
24,42	01:55,3	26,2832635	3,79
24,53	01:55,8	26,3932635	3,81
24,57	01:56,2	26,4332635	3,82
24,68	01:56,7	26,5432635	3,84
24,77	01:57,2	26,6332635	3,85
24,89	01:57,7	26,7532635	3,86
25	01:58,2	26,8632635	3,88
25,04	01:58,6	26,9032635	3,89
25,15	01:59,1	27,0132635	3,9

25,28	01:59,6	27,1432635	3,91
25,36	02:00,1	27,2232635	3,93
25,49	02:00,6	27,3532635	3,94
25,58	02:01,1	27,4432635	3,95
25,66	02:01,6	27,5232635	3,97
25,77	02:02,0	27,6332635	3,98
25,85	02:02,5	27,7132635	4
25,92	02:03,0	27,7832635	4,01
26,02	02:03,5	27,8832635	4,02
26,13	02:04,0	27,9932635	4,04
26,22	02:04,5	28,0832635	4,05
26,32	02:05,0	28,1832635	4,06
26,39	02:05,4	28,2532635	4,07
26,47	02:05,9	28,3332635	4,09
26,56	02:06,4	28,4232635	4,1
26,66	02:06,9	28,5232635	4,11
26,73	02:07,4	28,5932635	4,13
26,79	02:07,8	28,6532635	4,14
26,9	02:08,3	28,7632635	4,16
27,05	02:08,8	28,9132635	4,17
27,13	02:09,3	28,9932635	4,18
27,24	02:09,8	29,1032635	4,2
27,3	02:10,3	29,1632635	4,21
27,43	02:10,8	29,2932635	4,22
27,56	02:11,3	29,4232635	4,23
27,62	02:11,7	29,4832635	4,24
27,71	02:12,2	29,5732635	4,26
27,82	02:12,7	29,6832635	4,27
27,92	02:13,2	29,7832635	4,28
28,01	02:13,7	29,8732635	4,29
28,07	02:14,2	29,9332635	4,31
28,2	02:14,6	30,0632635	4,32
28,33	02:15,1	30,1932635	4,33
28,39	02:15,6	30,2532635	4,34
28,5	02:16,1	30,3632635	4,36
28,54	02:16,6	30,4032635	4,37
28,69	02:17,1	30,5532635	4,38
28,78	02:17,5	30,6432635	4,39
28,88	02:18,0	30,7432635	4,41
28,97	02:18,5	30,8332635	4,42
29,07	02:19,0	30,9332635	4,43
29,16	02:19,5	31,0232635	4,44
29,27	02:20,0	31,1332635	4,45
29,37	02:20,5	31,2332635	4,47
29,44	02:20,9	31,3032635	4,47
29,59	02:21,4	31,4532635	4,49

29,69	02:21,9	31,5532635	4,5
29,74	02:22,4	31,6032635	4,51
29,82	02:22,9	31,6832635	4,52
29,93	02:23,3	31,7932635	4,54
30,06	02:23,8	31,9232635	4,55
30,18	02:24,3	32,0432635	4,56
30,25	02:24,8	32,1132635	4,57
30,33	02:25,3	32,1932635	4,58
30,44	02:25,8	32,3032635	4,59
30,55	02:26,3	32,4132635	4,61
30,57	02:26,8	32,4332635	4,61
30,74	02:27,2	32,6032635	4,63
30,8	02:27,7	32,6632635	4,64
30,87	02:28,2	32,7332635	4,65
30,97	02:28,7	32,8332635	4,66
31,08	02:29,2	32,9432635	4,67
31,16	02:29,7	33,0232635	4,68
31,27	02:30,1	33,1332635	4,69
31,34	02:30,6	33,2032635	4,71
31,46	02:31,1	33,3232635	4,72
31,59	02:31,6	33,4532635	4,72
31,68	02:32,1	33,5432635	4,74
31,74	02:32,6	33,6032635	4,74
31,87	02:33,0	33,7332635	4,76
31,98	02:33,5	33,8432635	4,77
32,08	02:34,0	33,9432635	4,78
32,15	02:34,5	34,0132635	4,79
32,27	02:35,0	34,1332635	4,8
32,38	02:35,5	34,2432635	4,81
32,44	02:36,0	34,3032635	4,82
32,55	02:36,4	34,4132635	4,83
32,64	02:36,9	34,5032635	4,84
32,74	02:37,4	34,6032635	4,85
32,85	02:37,9	34,7132635	4,86
32,98	02:38,4	34,8432635	4,88
33,04	02:38,9	34,9032635	4,88
33,15	02:39,3	35,0132635	4,89
33,19	02:39,8	35,0532635	4,9
33,34	02:40,3	35,2032635	4,91
33,45	02:40,8	35,3132635	4,93
33,53	02:41,3	35,3932635	4,93
33,6	02:41,8	35,4632635	4,95
33,7	02:42,3	35,5632635	4,96
33,81	02:42,7	35,6732635	4,97
33,87	02:43,2	35,7332635	4,98
33,98	02:43,7	35,8432635	4,99

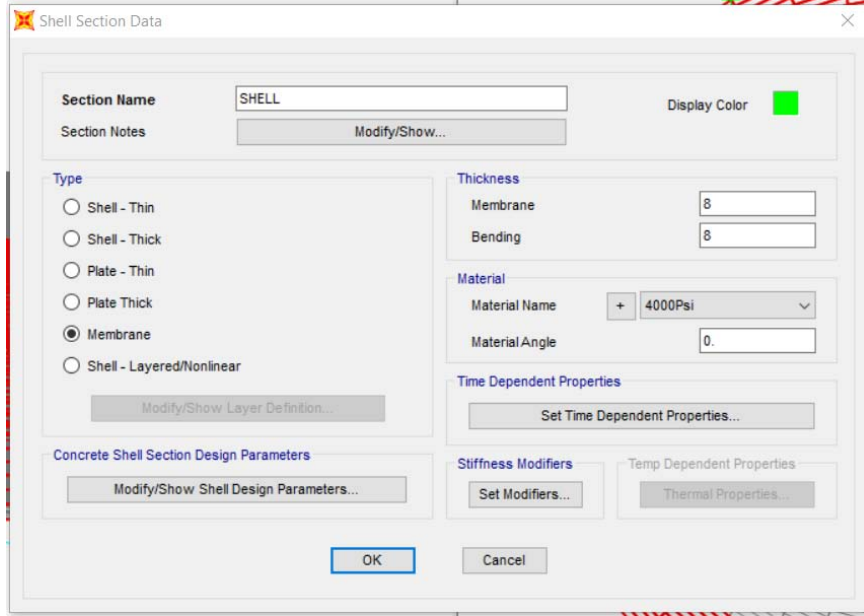
34,04	02:44,2	35,9032635	5
34,15	02:44,7	36,0132635	5,01
34,22	02:45,2	36,0832635	5,02
34,32	02:45,6	36,1832635	5,03
34,43	02:46,1	36,2932635	5,05
34,51	02:46,6	36,3732635	5,06
34,58	02:47,1	36,4432635	5,07
34,71	02:47,6	36,5732635	5,08
34,81	02:48,1	36,6732635	5,09
34,92	02:48,5	36,7832635	5,1
35,03	02:49,0	36,8932635	5,11
35,09	02:49,5	36,9532635	5,13
35,15	02:50,0	37,0132635	5,14
35,3	02:50,5	37,1632635	5,14
35,39	02:51,0	37,2532635	5,17
35,45	02:51,4	37,3132635	5,18
35,56	02:51,9	37,4232635	5,19
35,71	02:52,4	37,5732635	5,19
35,79	02:52,9	37,6532635	5,21
35,88	02:53,4	37,7432635	5,22
35,92	02:53,9	37,7832635	5,22
36,09	02:54,4	37,9532635	5,24
36,16	02:54,8	38,0232635	5,25
36,26	02:55,3	38,1232635	5,26
36,35	02:55,8	38,2132635	5,28
36,45	02:56,3	38,3132635	5,28
36,56	02:56,8	38,4232635	5,29
36,63	02:57,3	38,4932635	5,31
36,73	02:57,7	38,5932635	5,31
36,86	02:58,2	38,7232635	5,33
36,95	02:58,7	38,8132635	5,34
36,99	02:59,2	38,8532635	5,34
37,12	02:59,7	38,9832635	5,36
37,18	03:00,2	39,0432635	5,37
37,33	03:00,6	39,1932635	5,38
37,41	03:01,1	39,2732635	5,39
37,46	03:01,6	39,3232635	5,4
37,61	03:02,1	39,4732635	5,41
37,69	03:02,6	39,5532635	5,42
37,82	03:03,1	39,6832635	5,43
34,41	03:03,6	36,2732635	5,69
38,23	03:04,0	40,0932635	7,01
38,03	03:04,5	39,8932635	7,12
38,18	03:05,0	40,0432635	7,39
38,2	03:05,5	40,0632635	7,44
38,29	03:06,0	40,1532635	7,47

38,37	03:06,5	40,2332635	7,48
38,5	03:07,0	40,3632635	7,49
38,59	03:07,4	40,4532635	7,51
38,69	03:07,9	40,5532635	7,52
38,8	03:08,4	40,6632635	7,52
38,87	03:08,9	40,7332635	7,53
38,97	03:09,4	40,8332635	7,54
39,08	03:09,9	40,9432635	7,55
39,14	03:10,3	41,0032635	7,56
39,29	03:10,8	41,1532635	7,56
39,36	03:11,3	41,2232635	7,57
39,46	03:11,8	41,3232635	7,58
39,55	03:12,3	41,4132635	7,59
39,63	03:12,8	41,4932635	7,6
39,74	03:13,2	41,6032635	7,61
39,83	03:13,7	41,6932635	7,61
40	03:14,2	41,8632635	7,62

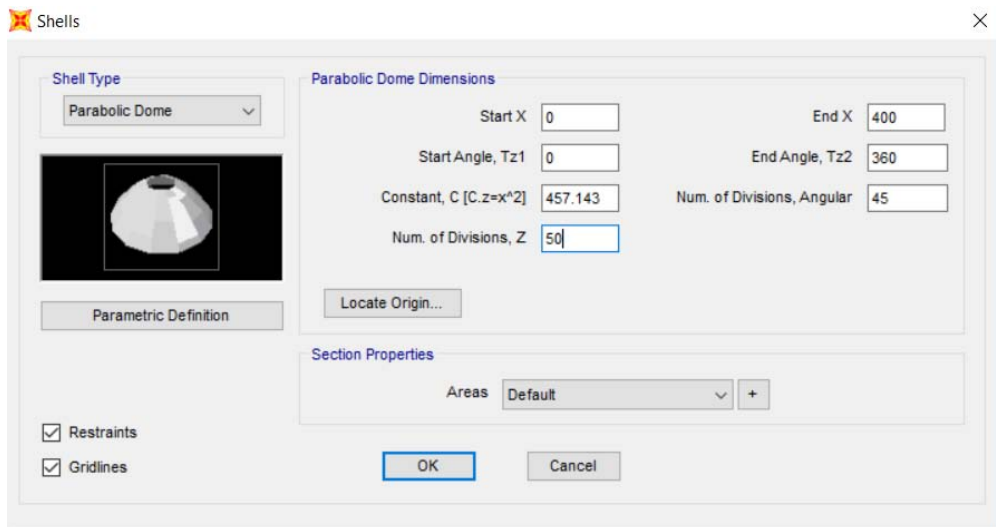


Εικόνα 68.Πίνακας Δύναμης-Βέλους Κάμψης του Φορέα

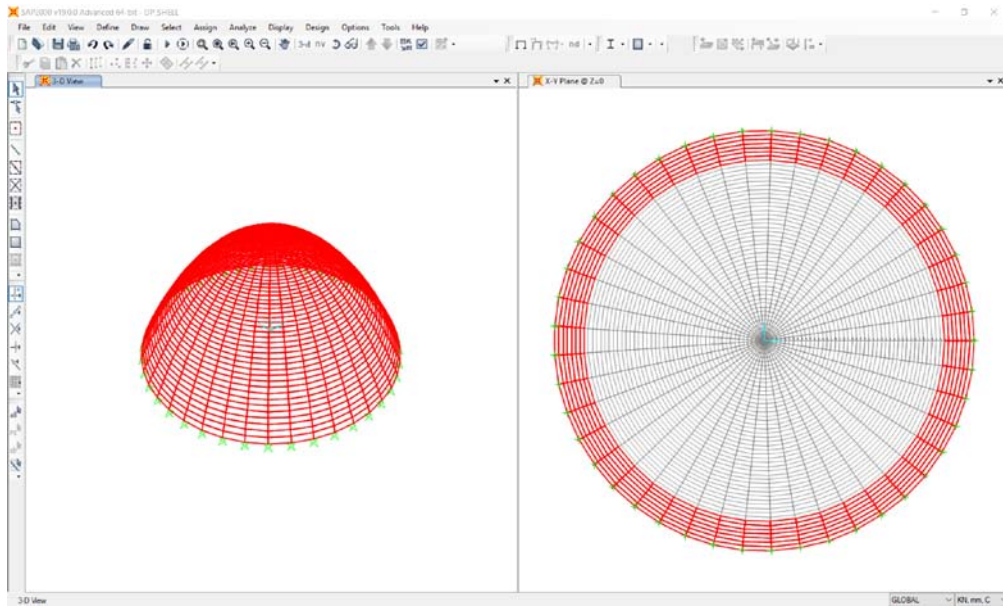
Τέλος πραγματοποιήθηκε μία στατική προσομοίωση του φορέα μας με χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων στο λογισμικό SAP 2000 με αρκετές δυσκολίες όμως καθώς ήταν δύσκολο αρχικά να προσομοιωθεί το ακριβές σχήμα του τρούλου για άοπλη τσιμεντοκονία αλλά ακόμα πιο δύσκολο να προσομοιωθεί ομοιόμορφα καταναμημένο φορτίο στην επιφάνεια του τρούλου. Παρόλα αυτά μια προσέγγιση της διαδικασίας ήρθε εις πέρας με όσο το δυνατόν τον καλύτερο τρόπο.



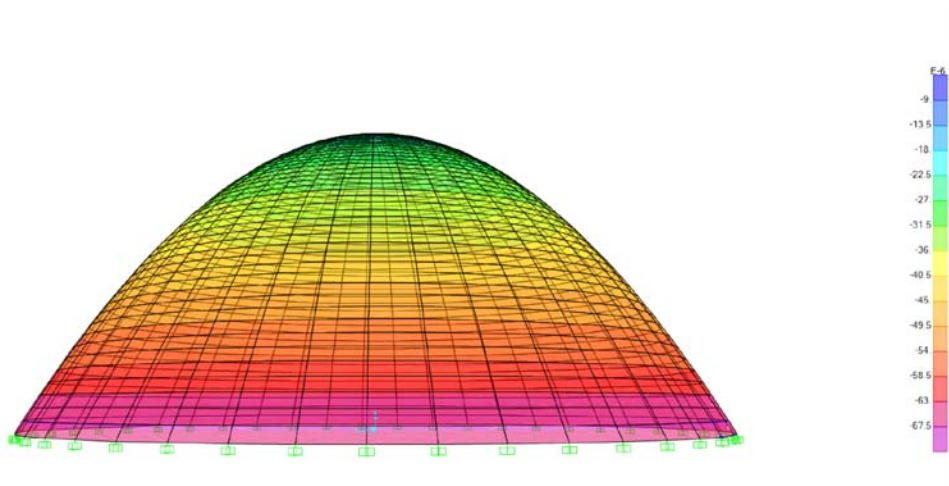
Εικόνα 69.Προσομοίωση με SAP 2000



Εικόνα 70.Στοιχεία προσομοίωσης



Εικόνα71.Τρισδιάστατο μοντέλο



Εικόνα 72.Τρισδιάστατο μοντέλο με περιοχές καταπόνησης

Assign Area Uniform Loads

General

Load Pattern: DEAD

Coordinate System: Local

Load Direction: 3

Uniform Load

Load: -0.000051 kN/mm²

Options

Add to Existing Loads
 Replace Existing Loads
 Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Εικόνα 73.Αποτελέσματα φόρτισης καταναμημένου φορτίου

Object Model - Area Information

Location Assignments Loads

Identification

Label: 29

Load Pattern	LIVE
Uniform Load	
Coordinate System	Local
Load Direction	3
Force/Area	-5.100E-05

Assign Load...

KN, mm, C

Reset All

Update Display

Modify Display

OK

Cancel

Double click white background cell to edit item.

Εικόνα 74.Αποτελέσματα φόρτισης

Το λογισμικό μας έδωσε μία αστοχία στα 51 kN/m² (εικ.73,74) χωρίς να μπορεί να δώσει στον φορέα μας καμία εναπομείνασα αντοχή. Το εμβαδόν του τρούλου μας μέσα από τον τύπο του παραβολοειδούς τρούλου είναι :

$$SA = (\pi/6) * (r/h^2)[(r^2 + 4*h^2)^{3/2} - r^3] = 7865,47 \text{ cm}^2 = 0,786 \text{ m}^2$$

Επομένως το φορτίο ήταν 40,11 kN.

Η αντοχή των δοκιμίων ήταν 39,68 kN το οποίο σημαίνει ότι τα αποτελέσματα του πειράματος έφτασαν στο 98,9% της προσομοίωσης σε λογισμικό, το οποίο και είναι παραπάνω από αποδεκτό παρόλο που το στατικό πρόγραμμα είχε αρκετές ατέλειες λόγω έλλειψης γνώσεων στο συγκεκριμένο κομμάτι.

4 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Είναι αρκετά σημαντικό όταν σε ένα πείραμα προσπαθείς να ερευνήσεις ή να μελετήσεις κάτι να μπορείς να καταλήγεις κάπου που θα μπορείς να πατήσεις πάνω σε αυτό και μαζί με αυτό να συνεχίσεις τη μελέτη και την έρευνα σε δυσκολότερα μονοπάτια με μεγαλύτερα μυστικά. Θέλω να πιστεύω ότι στο εν λόγω πείραμα αυτό το καταφέραμε με όλες τις δυσκολίες αλλά και τις εκπλήξεις που θα μπορούσε να έχει. Αυτό που έχει σημασία αλλά και ουσία όμως, είναι ότι καταφέραμε να κατασκευάσουμε ένα άοπλο φορέα από απλό τσιμεντοκονίαμα, με το ελάχιστο πάχος της διατομής του, στο ελάχιστο υλικό που θα μπορούσε να φτιαχτεί και με μία αρχιτεκτονική 'Βέλτιστη', ένα ιδανικό δηλαδή σχήμα που θα μπορούσε να διαχειριστεί φορτία σε κάθε σημείο της επιφανείας του και να τα μεταφέρει κατά την γενέτειρα του, στην θεμελίωσή του χωρίς όχι μόνο να καταρρεύσει υπό το ίδιο βάρος του αλλά αντίθετα να μπορεί να φέρει ιδιαίτερα μεγάλα φορτία που μόνο έκπληξη μας προκάλεσαν. Το νόημα και η ουσία του πειράματός μας ήταν να ελέγξουμε την Κατασκευαστική Βελτιστοποίηση πειραματικά και τα αποτελέσματα μας δείχνουν ότι, σε αρχικό στάδιο τουλάχιστον καταφέραμε να αποδείξουμε ότι μία κατασκευή μπορεί να φέρει τα όρια της αντοχής της πολύ κοντά στα όρια αντοχής του υλικού. Είναι όμως πολύ σημαντικό το εν λόγω πείραμα αλλά και η ίδια η έρευνα να μην σταματήσει εδώ αλλά να συνεχιστεί σε βάθος και με μεγάλη ποικιλία επιλογών καθώς η εποχή και οι καιροί που ζούμε πλέον το επιβάλλουν. Ο πλανήτης μας αρχίζει να στερεύει από τις πρώτες ύλες που είναι άμμεσα απαραίτητες για εμάς. Η λύση όμως δεν μπορεί να είναι συνεχιζόμενη και αυξανόμενη ζήτηση για τα ίδια. Αυτό που είναι υποχρέωση όλων είναι η διαρκής έρευνα και μελέτη για εναλλακτικότερες επιλογές σπατάλης ενέργειας και πόρων (πρώτων υλών) ούτως ώστε να μπορέσουμε να συμβιώσουμε με τον πλανήτη μας και όχι να ζούμε εις βάρος του φτάνοντάς τον στην καταστροφή. Πιο συγκεκριμένα στο πείραμά μας, όπως έχουμε προαναφέρει ο οπτιμισμός των κατασκευών ή αλλιώς η Βελτιστοποίηση των κατασκευών μελετάει αυτό ακριβώς. Πως με το ελάχιστο υλικό και με το Βέλτιστο σχήμα μπορούμε να φτιάξουμε μία κατασκευή που να πληρεί τις ανάγκες μας. Η μελέτη λοιπόν και η έρευνα του εν λόγω πειράματος πρέπει να συνεχιστεί σε διάφορα πεδία όπως είναι τα διαφορετικά και εναλλακτικά σχήματα, αλλά και ακόμα πιο σημαντικά τα διαφορετικά υλικά, οι διαφορετικές διατομές αλλά και οι ποικίλες φορτίσεις. Είναι άξιο να μελετηθεί το εν λόγω πείραμα σε διαφορετικά υλικά αλλά με το ίδιο σχήμα, όπως και δοκίμια με ίδια υλικά αλλά με ποικίλα σχήματα υπό κλίμακα αλλά και χωρίς. Οι καιροί το απαιτούν και δεν μπορούμε να φανούμε ανάξιοι.

Βιβλιογραφία

- [1] Maxwell, J., 1869. *Reciprocal diagrams in space and their relation to Airy's function of stress.*, London: Proceedings of the London Mathematical Society Vol.2.
- [2] Πλεύρη, Ε. Ε., 2001. *Βέλτιστος σχεδιασμός κατασκευών με πολλαπλά κριτήρια.* [Ηλεκτρονικό].
- [3] Mathstat, 2012. *The Geometry Of Antoni Gaudi, Catenary Arches and Catenoids.* [Ηλεκτρονικό]
Available at: http://mathstat.slu.edu/escher/index.php/The_Geometry_of_Antoni_Gaudi
- [4] Huerta, S., 2006. *Structural Design in the Work of Gaudi* , Sydney: University of Sydney.
- [5] Vereycken, K., 2007-2013. *The Schiller Institute, The Secrets of the Florentine Dome.* [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://schillerinstitute.org/educ/pedagogy/2013/vereycken-dome-1.html>
- [6] Sigmund, O., 2003. *Topology Optimization, State-of-the-Art and Future Perspectives*, Copenhagen: Technical University of Denmark (DTU).
- [7] P.Block, J. O., 2007. *Thrust Network Analysis : A new Method for three dimensional equilibrium Journal of the International Accosiation for Shell and Spatial Structures*
- [8] Pagonakis, Dimitrios, May 2015. *Discrete and Continuous Optimization of Structural Forms*, Boston, Massachusets: MIT.
- [9] Lewis, W. J., 2016. *Mathematical model of a moment-less arch*, s.l.: rspa.royalsocietypublishing.org, Lewis, W. J..
- [10] Rafael Gomez-Moriana, 2016. *Gaudi's Hanging Chain Models : Parametric design*
- [11] Peter W. Christensen, 2010. *An Introduction to Structural Optimization (Solid Mechanics and Its Applications)*
- [12] <http://www.block.arch.ethz.ch/>