ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

'Αντισεισμική και Ενεργειακή Αναβάθμιση Κατασκευών και Αειφόρος Ανάπτυξη'

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΞΟΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

ΛΥΒΕΡΗ ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ ΚΩΝ/ΝΟΣ ΔΗΜΑΚΟΣ, Διευθυντής Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.

Πειραιάς, Μάρτιος 2017

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 6

2.1. Ιστορική Αναδρομή. 6

2.1.2 Οι θολωτές κατασκευές στο πέρασμα του χρόνου 8

2.1.3 Γεωμετρικές μέθοδοι σχεδιασμού θόλων και τόξων 9

2.1.4 Σύγχρονες αψίδες 14

2.2. Διάφορες Προσεγγίσεις στην Κατασκευαστική Βελτιστοποίηση 16

2.3. Δισδιάστατη και τρισδιάστατη βελτιστοποίηση με μονοπάτια φορτίων 17

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ 20

3.1. Περιγραφή του πειράματος 20

3.2 Μελέτη – Βελτιστοποίηση – Επιλογή της γεωμετρίας της καμάρας 21

3.3 Κατασκευή κονιάματος και έλεγχος δοκιμίων 21

3.4 Κατασκευή Καλουπιού 28

3.5 Κατασκευή Φορέα – Ωρίμανση 32

3.6 Φόρτιση του φορέα – Καμάρας υπό ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο (καταστρεπτικός έλεγχος) 38

3.7 Παρουσίαση - Αποτίμηση Αποτελεσμάτων 43

4. Επίλογος 56

Summary 57

Βιβλιογραφία 58

Έντυπη Βιβλιογραφία 58

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η επιστήμη του μηχανικού είχε και έχει ως κύριο σκοπό το σχεδιασμό και την κατασκευή δομικών συστημάτων. Σήμερα η ολοένα και αυξανόμενη κατασκευαστική ανάγκη έχει οδηγήσει σε αισθητή μείωση των κατασκευαστικών υλικών - πόρων και σε αύξηση της ρύπανσης του περιβάλλοντος καθώς το μεγαλύτερο μέρος ενέργειας που καταναλώνεται από τον άνθρωπο είναι για τον κατασκευαστικό τομέα. Γι' αυτούς τους λόγους κρίνεται αναγκαία η εύρεση εναλλακτικών τρόπων κατασκευών με στόχο τη χρήση λιγότερων υλικών αλλά και τη μείωση εκπομπής ρύπων στο περιβάλλον. Για να το πετύχουμε αυτό θα πρέπει να ακολουθήσουμε τους «νόμους» της φύσης, δηλαδή τις καμπύλες και τα κυκλικά σχήματα που υπάρχουν σε αυτή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της Κατασκευαστικής βελτιστοποίησης ή του Κατασκευαστικού Οπτιμισμού (Structural Optimization). Ο σκοπός των τεχνικών βελτιστοποίησης είναι η αναζήτηση και η εύρεση της βέλτιστης σχεδίασης μιας κατασκευής. Θέτοντας κάποιους περιορισμούς, καθώς και έναν στόχο, όπως ο ελάχιστος όγκος της κατασκευής, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη γεωμετρία της κατασκευής που ικανοποιεί τους περιορισμούς και επιτυγχάνει τον στόχο. Σε κάθε αρχή μελέτης βελτιστοποίησης θα πρέπει να ερευνήσουμε τί πραγματικά μπορεί να συμβεί με την κατασκευή, όσον αφορά τη γεωμετρία της, τις ιδιότητές της και τη συμπεριφορά της, έτσι ώστε να γνωρίζουμε το πιθανό αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Στην παρούσα μεταπτυχιακή μελέτη βασιζόμενοι στη χρήση συνάρτησης βέλτιστης καμπύλης και στην επιλογή ενός κονιάματος, πραγματοποιήσαμε την πειραματική κατασκευή και εξέταση παραβολικών καμάρων, χωρίς τη χρήση κατασκευαστικού οπλισμού. Στόχος της μελέτης μας ήταν η πειραματική απόδειξη του θεωρητικού υποβάθρου ως προς την εξοικονόμηση των υλικών και τον κατασκευαστικό έλεγχο σε ομοιόμορφο κατανεμημένο θλιπτικό φορτίο με καταστροφική μέθοδο. Σε ερευνητικό επίπεδο είναι ελάχιστες οι έρευνες που έχουν γίνει ως προς την αντοχή βελτιστοποιημένων κατασκευών κάτω από συνεχές και ελεγχόμενο φορτίο. Θα ήταν πολύ ενδιαφέρον και χρήσιμο για τον κατασκευαστικό κλάδο να συνεχιστούν στο μέλλον οι έρευνες με στόχο την ευρεία χρήση τέτοιων μεθόδων.

ABSTRACT

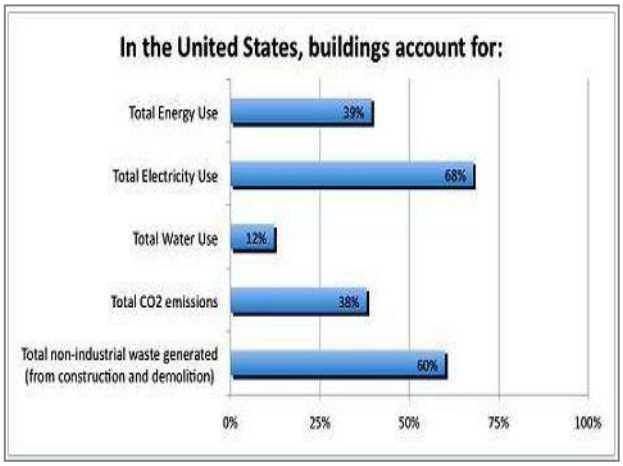
The science of engineering had and continues having as its main objective the design and construction of structural systems. Today the ever growing need for construction has led to a considerable reduction of construction materials - resources and to increased environmental pollution as the largest part of energy consumed by humans is for the construction sector. For these reasons it is necessary to find alternative structures for the use of fewer materials and the emission reduction in the environment. To achieve this we should follow the "laws" of nature, ie curves and circular shapes that exist in it. This is achieved through the Structural Optimization or the Structural optimism. The purpose of optimization techniques is to search and find the optimal design of a structure. By putting some restrictions as well as a goal, as the minimum volume of construction, we can determine the geometry of the structure that satisfies the constraints and achieves the goal. At each start of optimization study we should investigate what really can happen with the construction, in terms of geometry, its properties and its behaviour, so that we know the likely outcome of optimization. In this master study based on using curve-fitting function and the selection of a mortar, we conducted the experimental manufacture and test parabolic arches, without using reinforcing component. The aim of our study was the experimental proof of the theoretical background as to the saving of materials and construction control uniformly distributed compressive load with destructive method. At research level there are few investigations have been made on resistance of optimized structures under continuous and controlled load. It would be very interesting and useful for the construction industry to continue in future investigations aimed at widespread use of such methods.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο κατασκευαστική βελτιστοποιήση εννοούμε το σχεδιασμό μίας κατασκευής, ο οποίος ικανοποιεί τις κατασκευαστικές προδιαγραφές και τις λειτουργικές απαιτήσεις, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια, όπως είναι συνηθέστερα το κόστος και το βάρος της κατασκευής. Η βελτιστοποιήση βοηθά τους μηχανικούς να σχεδιάσουν αποδοτικότερα συστήματα, λιγότερο ακριβά και να αναπτύξουν καινοτόμες μεθόδους για την βελτίωση της επίδοσης υπαρχόντων συστημάτων. Στην παρούσα έρευνα ελέγξαμε την αποτελεσματικότητα της κατασκευαστικής βελτιστοποιήσης με την πειραματική κατασκευή παραβολικών καμάρων σε 2 και 3 διαστάσεις. Η δομή της μελέτης μας είναι η ακόλουθη: στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κίνητρα της έρευνας, οι στόχοι, η συνεισφορά της στις κατασκευές καθώς επίσης και μια περιληπτική περιγραφή του πειράματος που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Οπλισμένων Σκυροδέματος του ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ. Στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο περιλαμβάνονται διάφορες προσεγγίσεις στην κατασκευαστική βελτιστοποιήση καθώς και κάποια πρακτικά παραδείγματα τέτοιων κατασκευών. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται το πειραματικό μέρος της έρευνας καθώς και τα αποτελέσματα-συμπεράσματα του πειράματος που πραγματοποιήσαμε. Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο προτείνονται μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις του πειράματος.

1.1. Κίνητρα Έρευνας

Σύμφωνα με το Αμερικανικό Κέντρο Διαχείρισης Ενεργειακών Πληροφοριών (U.S. Energy Information Administration) ο κατασκευαστικός κλάδος στην Αμερική καταναλώνει περιπού το 50% όλης της ενέργειας της χώρας, καθώς επίσης είναι υπεύθυνος για τις μισές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε ότι τα κτίρια στις Ηνωμένες Πολιτείες



Εικόνα 1. Στις Ηνωμένες Πολιτείες τα κτίρια είναι υπεύθυνα για την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας

είναι υπεύθυνα για το 39% της ενεργειακής κατανάλωσης, το 68% της ηλεκτρικής κατανάλωσης, το 12% της κατανάλωσης νερού, το 38% του Διοξειδίου του Άνθρακα που εκλύεται στην ατμόσφαιρα,το 60% των αποβλήτων που παράγονται από τον κατασκευαστικό κλάδο (http://www.wbdg.org/design/sustainable.php).

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση τα κτίρια ευθύνονται για το 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και ο κατασκευαστικός τομέας στο σύνολό του ευθύνεται για το 40% των συνολικά παραγόμενων αποβλήτων. Η μεγάλη επίπτωση του κατασκευαστικού κλάδου στην ατμόσφαιρα σε συνδιασμό με τη μείωση των οικοδομικών υλικών-πόρων καθιστούν αναγκαία την εύρεση εναλλακτικών μεθόδων κατασκευής. Η ανάγκη για καλύτερη ποιότητα σε συνδυασμό με τη βέλτιστη οικονομία μεταφράζεται στην ανάδειξη νέων μεθόδων. Για αυτόν το λόγο κρίνεται απαραίτητο οι μηχανικοί να αναπτύξουν μια βαθύτερη κατανόηση της σχέσης γεωμετρίας και στατικής με στόχο τη σχεδίαση στατικά εφικτών και ενεργειακά βέλτιστων κατασκευών. Λαμβάνοντας υπόψιν μεγάλους μηχανικούς του παρελθόντος οι οποίοι είχαν καταλήξει στο συμπέρασμα πως όσο πιο «σοφά» ήταν σχεδιασμένη μια η γεωμετρία μιας κατασκευής, τότε η αποτυχία της έρχεται πολύ κοντά στην αποτυχία του υλικού. Με αυτό τον τρόπο δηλαδή είμαστε σε θέση να εξοικονομήσουμε περισσότερο κατασκευαστικό υλικό καθώς επίσης και να αυξήσουμε την αντοχή της κατασκευής στα όρια του υλικού. Για τους παραπάνω λόγους η κατασκευαστική βελτιστοποιήση είναι άξιας έρευνας και μελλοντικής ανάπτυξης.

1.2. Στόχοι και συνεισφορά έρευνας.

Το βασικότερο και συνηθέστερο πρόβλημα και ερώτημα που πρέπει να αντιμετωπίσουν και απαντήσουν οι μηχανικοί είναι ***ποιο είναι το καταλληλότερο σχήμα μιας κατασκευής, ούτως ώστε δεδομένων των φορτίων που ασκούνται να μειωθεί το κατασκευαστικό υλικό που πρέπει να χρησιμοποιηθεί.*** Το παραπάνω ερώτημα έχει απασχολήσει την τελευταία εικοσαετία πολλούς ερευνητές. Μολονότι η απάντηση του παραπάνω ερωτήματος φαίνεται απλή, ωστόσο ενέχει πολλές δυσκολίες και είναι πολύ σημαντική για την κατασκευαστική βελτιστοποιήση. Τα συμπεράσματα των ερευνών του παραπάνω ερωτήματος είναι όμοια τόσο για τις δισδιάστατες όσο και για τις τρισδιάστατες κατασκευές. Δηλαδή μεταλικοί οπλισμοί και σκυρόδεμα παραλαμβάνουν τις καμπτικές και εφελκυστικές καταπονήσεις. Αν υποθέσουμε ότι καταφέρνουμε να μετατρέψουμε τις καταπονήσεις αυτές σε θλιπτικές, τότε η απαίτηση για μεταλλικό οπλισμό είναι μηδενική. Στις δισδιάστατες κατασκευές αυτό μεταφράζεται σε ένα μοναδικό μονοπάτι πλήρως θλιπτικών φορτίων, ενώ στις τρισδιάστατες σε άπειρα τέτοια μονοπάτια φορτίων. Αυτό αποδεικνύεται θεωρητικά με μαθηματική ανάλυση, όπως θα δούμε παρακάτω στο 2.3. Η πειραματική αντοχή βελτιστοποιημένων κατασκευών κάτω από αυστηρά συνεχές και ελεγχόμενο

φορτίο είναι το αντικείμενο μελέτης της παρούσας πτυχιακής. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο συγκεκριμένο αντικείμενο μελέτης, έχει πραγματοποιηθεί ελάχιστη έρευνα.

1.3. Περιληπτική Διατύπωση Πειράματος.

Στην παρούσα έρευνα σε πρώτη φάση κατασκευάστηκαν τέσσερις τοξωτές καμάρες, προκειμένου να ελεγχθούν σε ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο. Αξίζει να σημειωθεί ότι τελικώς το πείραμα πραγματοποιήθηκε στα δυό από τα τέσσερα δοκίμια, λόγω αστοχίας των δύο, στο στάδιο αφαίρεσης των καλουπιών από αυτά. Βασιζόμενοι στο μαθηματικό αλγόριθμο που αναφέρεται παρακάτω (2.2), πρόεκυψε το μήκος βάσης των καμάρων και το μέγιστο ύψος. Στη συνέχεια σύμφωνα με τα αποτελέσματα που πάρθηκαν από τη συνάρτηση και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της κρεμαστής αλυσίδας, προέκυψε η βέλτιστη γεωμετρία των δοκιμίων, όπου και κατασκευάστηκαν.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ – ΕΡΕΥΝΕΣ ΠΕΔΙΟΥ

Το κεφάλαιο αυτό χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος θα κάνουμε μια σύντομη ιστορική αναδρομή στον τομέα των βέλτιστων γεωμετριών και πιο συγκεκριμένα στις θολωτές - τοξωτές κατασκευές στο πέρασμα των χρόνων. Στο δεύτερο θα μέρος θα αναφερθούμε στις διάφορες προσεγγίσεις στην κατασκευαστική βελτιστοποιήση σε δισδιάστατες και τρισδιάστατες κατασκευές.

2.1. Ιστορική Αναδρομή.

Πολλοί ερευνητές, έχουν καταπιαστεί κατά καιρούς με το πρόβλημα του βέλτιστου σχεδιασμού των κατασκευών. Κατά τον 16ο αιώνα, ο Leonardo da Vinci και ο Γαλιλαίος ερεύνησαν το πρόβλημα της βελτιστοποίησης κατασκευών χρησιμοποιώντας μμοντέλα αλλά και πραγματικές κατασκευές σε κλίμακα 1:1. Κατά τον 17ο και 18ο αιώνα, ερευνητές όπως ο Νεύτωνας (Newton), ο Lagrange και ο Euler παρήγαγαν βέλτιστους σχεδιασμούς κατασκευών χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους βασισμένες σε ένα κριτήριο βελτιστοποίησης το οποίο απαιτούσε η αντοχή να είναι κατά το δυνατόν ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλα τα μέρη της κατασκευής. Ο Maxwell στα τέλη του 19ου και ο Michell στις αρχές του 20ου αιώνα πραγματοποίησαν τις πρώτες αναλυτικές διαδικασίες στη βελτιστοποίηση κατασκευών, με στόχο την ελαχιστοποίηση του βάρους (Maxwell, 1869), (Πλεύρη, 2001). Για πρώτη φορά ο Schmidt (1960) έκανε μία περιεκτική παρουσίαση της χρήσης μαθηματικά προγραμματιζόμενων τεχνικών για την επίλυση μη

γραμμικών – ανισοτικών προβλημάτων με περιορισμούς, για τον σχεδιασμό ελαστικών κατασκευών υπό την επίδραση πολλαπλών φορτίσεων. Από τότε πολλές μέθοδοι και τεχνικές έχουν αναπτυχθεί από διάφορους ερευνητές για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Τα τελευταία είκοσι χρόνια έχουν αναπτυχθεί εργαλεία τα οποία βρίσκουν τη βέλτιστη γεωμετρία έτσι ώστε να μειώνεται η απορροφημένη ενέργεια παραμόρφωσης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των ηλεκτρονικών υπολογιστών και της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων. Σε βάθος χρόνου μπορούμε να εντοπίσουμε πολλά παραδείγματα γεωμετρικής βελτιστοποιήσης.

Μία από τις πιο βασικές γεωμετρίες και από τις πιο επαναστατικές και όμορφες ανακαλύψεις στην μηχανική, με ατελείωτες αρχιτεκτονικές εφαρμογές είναι αναμφισβήτητα το τόξο. Η στατική ευκρίνεια που μεταφράζεται σαν ιδιαίτερη ικανότητα στην παραλαβή των φορτίων καθώς και η αισθητική επάρκεια, είναι χαρακτηριστικά που κάνουν τα τόξα όπου και να εμφανίζονται, να ξεχωρίζουν και να εντυπωσιάζουν ακόμη και σήμερα. Αρχικά, είναι σίγουρα απαραίτητο να παρουσιαστεί και να ξεκαθαριστεί η στατική λειτουργία του τόξου. Πως λειτουργεί ένα τόξο; Είναι μόνο η αρχιτεκτονική του κομψότητα και το εμβληματικό του εκτόπισμα που παρακινεί μηχανικούς και αρχιτέκτονες να το χρησιμοποιούν τόσο συχνά;
Η απάντηση όπως και σε όλα τα αντίστοιχα ερωτήματα δεν μπορεί να είναι μονοσήμαντη. Σίγουρα η ομορφιά και η ελκυστικότητα ενός τόξου οδηγεί στο να διαλέγεται τόσο πολύ από τους σχεδιαστές, είναι όμως και ένας άλλος λόγος, αν όχι παραπάνω, τουλάχιστον εξίσου σημαντικός. Και αυτός είναι, ότι το κυριότερο πλεονέκτημα των τοξοτών κατασκευών είναι η ιδιότητα τους να παραλαμβάνουν τα επιβαλλόμενα φορτία, μεταφράζοντάς τα σχεδόν αποκλειστικά σε αξονικές δυνάμεις.
Όταν άρχισε το τόξο να χρησιμοποιείται για πρώτη φορά , πολλά από τα υλικά της εποχής δεν είχαν την δυνατότητα να παραλαμβάνουν σημαντικές εφελκυστικές τάσεις. Δεν υπήρχε η έννοια του οπλισμένου σκυροδέματος (ούτε καν η έννοια του σκυροδέματος), η δυνατότητα κατασκευής καλωδίων, η δυνατότητα παραγωγής χάλυβα ισχυρών ιδιοτήτων και όλων των υπολοίπων μέσων που χρησιμοποιούν οι μηχανικοί και οι αρχιτέκτονες σήμερα για να παραλάβουν μεγάλες εφελκυστικές τάσεις. Τέτοια εφόδια που σήμερα είναι καθημερινότητα, δεν υπήρχαν στην φαρέτρα τους. Η αδυναμία αυτή οδηγούσε το σύνολο των δημιουργών της εποχής στο σχεδιασμό βαριών φορέων, που δούλευαν κυρίως σε θλίψη και έτσι το τόξο ήταν η ιδανική γεωμετρία, μιας και δημιουργεί μόνο τέτοιες εντάσεις. Το πιο σημαντικό ερώτημα που γεννιέται αυτομάτως βέβαια είναι: έχει οποιαδήποτε τοξωτή γεωμετρία αυτό το χαρακτηριστικό? Ποια είναι η κατάλληλη εξίσωση που περιγράφει αυτή τη γεωμετρία? Όταν λέμε τόξο εννοούμε όντως τόξο κύκλου? Είναι μέρος παραβολής? Είναι κάποια άλλη συνάρτηση? Είναι μία συνάρτηση ή μεταβάλλεται κατά μήκος του?
Μην βιαστείτε να απαντήσετε… ακόμα και ο Γαλιλαίος σε αυτή την ερώτηση έκανε λάθος. Στην πραγματικότητα, η ιστορία περιγράφει ότι στην ερώτηση, «Ποια συνάρτηση δημιουργείται αν κρεμάσουμε μία αλυσίδα από τις δύο άκρες της;», ο Γαλιλαίος απαντούσε με σιγουριά: η παραβολή! Έπρεπε να έρθει ένας εκ των Bernoulli's, περίπου 30 χρόνια μετά, για να ερευνήσει και να αποδείξει τελικά την πραγματική εξίσωση της κρεμάμενης αλυσίδας (ή αλλιώς catenary από το λατινικό catena, δηλαδή το σημερινό καδένα που όλοι χρησιμοποιούμε).
Η φυσική σημασία αυτού του φαινομενικά άσχετου ερωτήματος έμελλε να παίξει τεράστιο ρόλο στην μηχανική έκτοτε. Αποδείχτηκε ότι το τέλειο τόξο, το τόξο δηλαδή που εξαφανίζει οποιοδήποτε καμπτικό φαινόμενο υπό το ίδιο βάρος του, είναι αυτό που ακολουθεί την εξίσωση

της κρεμάμενης αλυσίδας που ο Γαλιλαίος ήθελε ως παραβολή. Ας μην ξεχνάμε ότι την μέθοδο αυτή για να βρίσκει την βέλτιστη γεωμετρία χρησιμοποίησε κατά κόρον και ο Antonio Gaudi, μετά από 250 χρόνια, για να κατασκευάσει το πασίγνωστο Park Güell και φυσικά την πανέμορφη Sagrada Familia. Πολλά από τα τόξα μέσα στο Park Güell είναι προϊόντα αυτής της μεθόδου και ακολουθούν την εξίσωση της κρεμάμενης αλυσίδας. (http://www.greekarchitects.gr)

Ο μεγάλος Ισπανός αρχιτέκτονας Antoni Gaudi (1852) στα έργα του δε χρησιμοποίησε τα γεωμετρικά σχήματα τόσο, όσο μιμήθηκε τον τρόπο που μεγαλώνει κατακόρυφα ένα δέντρο ή ένας άνθρωπος. Τα υπερβολοειδή και παραβολοειδή που δανείστηκε από τη φύση, μπόρεσε να τα στηρίξει κι υποστηρίξει πανεύκολα με ατσάλινες δεσιές, πράμα που προσέδωσε στις κατασκευές του την εντύπωση, πως ήτανε συνέχεια του περιβάλλοντος (Mathstat,2012).

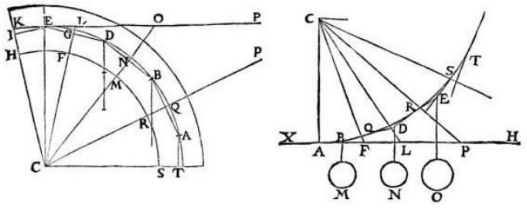
2.1.2 Οι θολωτές κατασκευές στο πέρασμα του χρόνου

Τα τόξα και οι θόλοι δεν ήταν άγνωστα στους αρχαίους ανατολίτικους λαούς (Αιγύπτιους και Ασύριους) ούτε στους Έλληνες που τα εφάρμοζαν σε μέρη αφανή και με μεγάλη φειδώ. Οι Ρωμαίοι όμως τα καθιέρωσαν και πέτυχαν να τα συνδυάσουν με στοιχεία της ελληνικής μορφολογίας με καλά αποτελέσματα. Με τα τόξα και τους θόλους, λύθηκαν πολλά δυσχερή προβλήματα και έγινε δυνατόν να εκτελεσθούν τολμηρά σχέδια στεγάσεως μεγάλων χώρων ή εκτελέσεως τεχνικών έργων με μεγάλα ανοίγματα όπως γέφυρες, έργα υδρεύσεως κτλ (Μπούρας, 1991). Στον Μεσαίωνα, στα προ του έτους 1000 κτήρια στην Ευρώπη, η ξύλινη στέγη ήταν ο κανόνας. Μόνον στη Λομβαρδία υπήρχε παράδοση θολοδομίας, ενώ στην υπόλοιπη Ευρώπη μόνον σε κρύπτες με μικρότατα ανοίγματα τολμούσαν να κατασκευάσουν υποτυπώδεις θόλους. Από τον 11ο αιώνα, προσπαθώντας να ξεπεράσουν το μέγιστο μειονέκτημα των ξύλινων κατασκευών, τον κίνδυνο πυρκαγιάς (στον Μεσαίωνα φαίνεται ότι ήταν συνηθισμένες), άρχισαν να εφαρμόζουν θόλους. Τα πρώτα κατασκευάσματα ήταν σχεδόν πάντοτε αδέξια και βαριά, αλλά προοδευτικά και κατά περιοχές βελτιώθηκαν σημαντικά. Στην Ρωμαϊκή θολοδομία, οι βαρειές ενιαίες μάζες των θόλων έδιναν την στατική αυτάρκεια. Έπειτα οι μεσαιωνικοί οικοδόμοι άρχισαν να εφαρμόζουν συστήματα αντιστηρίξεως των πλάγιων ωθήσεων, τα οποία βελτιώνονταν με το χρόνο, για να φθάσουν στην καταπληκτική τελειότητα της γοτθικής περιόδου. Στην Κρήτη οι Βενετσιάνοι έκτισαν αξιόλογες γοτθικές εκκλησίες, στα Χανιά τον Άγιο Φραγκίσκο, και τον Άγιο Νικόλαο. Οι ναοί είχαν λιτή εμφάνιση αλλά εξαιρετικές αναλογίες. Η μετατροπή τους σε τζαμιά τους υποβάθμισε σημαντικά. Για την κατασκευή των θόλων χρησιμοποιούσαν λαξευμένες πέτρες σχεδόν κατά κανόνα, Η συνήθης μορφή ήταν της κυλινδρικής καμάρας που γινόταν σε ξυλότυπο. Αργότερα θα αρχίσουν να εφαρμόζουν κάτω από τις καμάρες, κατ'αποστάσεις, ενισχυτικά τόξα (τα σφενδόνια των Βυζαντινών) τα οποία κατέληγαν ενίοτε σε αντηρίδες στις εξωτερικές παρειές των τοίχων (Becchi, Corradi, Foci, Pedemonte, 2003) .

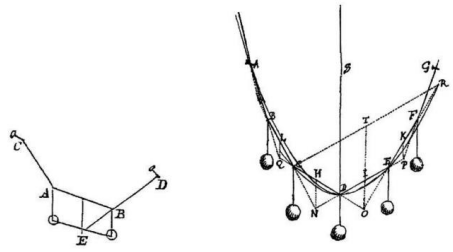
2.1.3 Γεωμετρικές μέθοδοι σχεδιασμού θόλων και τόξων

Ο Βαλενθιανός αρχιτέκτονας, φιλόσοφος, μαθηματικός και αστρονόμος Tomas Vicente Tosca γράφει στη διατριβή του για την αρχιτεκτονική (1707), πως το πιο διακριτικό και εξαίσιο δείγμα αρχιτεκτονικής είναι ο σχηματισμός οποιουδήποτε θόλου ή τόξου, μέσω της λάξευσης και τοποθέτησης κάθε πέτρας με τέτοιο τρόπο, ώστε το βάρος που ειδάλλως θα τις έριχνε στη γη, να τις διατηρεί στον αέρα, υποστηρίζοντας η μία την άλλη μέσω ενός κανόνα, μιας κοινής αρχής, η οποία επιτρέπει το γεφύρωμα ανοιγμάτων με ασφάλεια και αντοχή. Η φράση αυτή διατυπώνει με ελεύθερο τρόπο, πως αυτό που διατηρεί στέρεο έναν πέτρινο θόλο, είναι η κατάλληλη γεωμετρία η οποία θα επιτρέψει την ισορροπία δυνάμεων μέσω της μεταφοράς των φορτίων της κατασκευής στο έδαφος. Πράγματι, οι παραδοσιακοί κανόνες για τον σχεδιασμό πέτρινων θόλων και αντηρίδων ήταν γεωμετρικοί, και καθόριζαν συγκεκριμένες αναλογίες μεταξύ των δομικών στοιχείων (πχ το πάχος μιας αντηρίδας είναι μια υποδιαίρεση του ανοίγματος του θόλου). Αν και αυτοί οι απλοί κανόνες γεωμετρικών αναλογιών δεν αποτελούν επιστημονικές προσεγγίσεις σχεδιασμού ενός στατικού φορέα (οι πρώτες θεωρίες αντοχής υλικών και μηχανικής διατυπώθηκαν τον 18ο αιώνα), αποτελούν την επιτομή της λογικής με την οποία έχουν κτισθεί μεγάλες ιστορικές κατασκευές του Μεσαίωνα. Κρίνοντας εκ του αποτελέσματος, η λογική αυτή έχει αποδείξει ότι λειτουργεί στο βάθος του χρόνου και επομένως εμπεριέχει πολύτιμη γνώση (Huerta, 2001). Επί παραδείγματι ο Derand το 1643 δημοσίευσε τη μέθοδο εύρεσης του πάχους τοιχώματος στήριξης γοτθικού θόλου, η οποία βρισκόταν ήδη σε εφαρμογή για μισό τουλάχιστον αιώνα και από άλλους μηχανικούς. Η μέθοδος εφαρμοζόταν κατά τον 17ο και 18ο αιώνα ενώ βρισκόταν σε εγχειρίδια κατασκευών μέχρι και τη δεκαετία του 1960. Ο κανόνας είχε ως εξής: το τόξο AB χωρίζεται σε 3 ισομήκη μέρη από τα σημεία C και D. Η γραμμή DB προεκτείνεται έως το σημείο E έτσι ώστε BE=BD. Το σημείο E αποτελεί εξωτερικό σημείο του τοιχώματος στήριξης (Huerta, 2006).

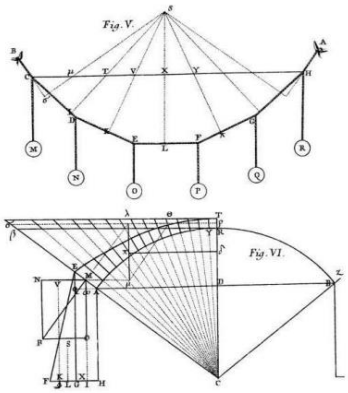
Πληθώρα γραφικών μεθόδων σχεδιασμού τόξων, θόλων, γεφυρών, αλλά και χρήση της θεωρίας της κρεμαστής αλυσίδας με παράλληλη εξάρτηση φορτίων ανά διαστήματα του μήκους της επινοήθηκαν, μεταξύ άλλων, από τους de la Hire (Σχ.3), Huygens (Σχ.4), Couplet (Σχ.5&6)



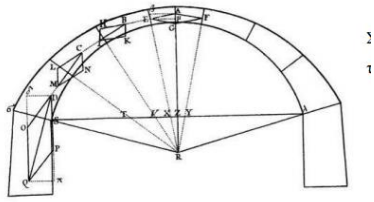
Εικόνα 2. Μελέτες του de la Hire για τη μορφή του βέλτιστου θόλου και τη μορφή της αλυσοειδούς καμπύλης



Εικόνα 3. Αρχικό και Μεταγενέστερο σχεδιάγραμμα του Huygens κατά την μελέτη της αλυσοειδούς καμπύλης



Εικόνα 4. εφαρμογή του γραφικού νόμου του de la Hire από τον Couplet

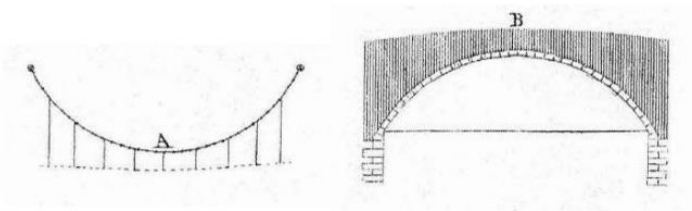


Εικόνα 5. Σχεδιάγραμμα του Couplet για τη μελέτη ευστάθειας θόλων

Το 1670 ο Hooke βρήκε την απάντηση για την ιδανική μορφή ενός τόξου. Η απάντηση ήταν η αντιστροφή του σχήματος μιας κρεμασμένης αλυσίδας και αντίστοιχη αντιστροφή της φοράς των εσωτερικών δυνάμεων (ο εφελκυσμός του καλωδίου/αλυσίδας γίνεται θλίψη του θόλου). Το 1679 ο Gregory πάει ένα βήμα πιο πέρα την ανακάλυψη αυτή λέγοντας ότι όταν ένα τόξο στέκεται γεφυρώνοντας ένα άνοιγμα, τότε από μέσα του θα πρέπει οπωσδήποτε να διέρχονται κάποιες αλυσοειδείς καμπύλες. Σημειώνεται ότι η αλυσοειδής καμπύλη δεν είναι παραβολή αλλά συνημιτονοειδής υπερβολή (Huerta, 2006). Πρόκειται για την ανακάλυψη της γραμμής ωθήσεων των δυνάμεων. Ως γραμμή ωθήσεων ορίζουμε το γεωμετρικό τόπο των σημείων εφαρμογής των

συνισταμένων (Σχ.7) των εσωτερικών (θλιπτικών) δυνάμεων για ένα δεδομένο αριθμό θολιτών (κλειδιών) ή οποιωνδήποτε ενώσεων (Huerta, 2005).

Άγγλοι μηχανικοί του 18ου αιώνα, όπως ο John Robison, χρησιμοποίησαν κατά κόρον την ανακάλυψη αυτή στον υπολογισμό τόξων γεφυρών κτλ (Σχ.8). Επίσης ο Young μελέτησε και ανέπτυξε την τεχνική της ανεστραμμένης αλυσίδας σε διαλέξεις του (το 1807) για τη φιλοσοφία της φύσης και την τέχνη της μηχανικής, και την εφάρμοσε στην κατασκευή γεφυρών.



Εικόνα 6. Σχεδίαση τοξωτής γέφυρας με τη βοήθεια της ανεστραμμένης αλυσίδας αναρτημένων ράβδων (Robison 1801)

Μια θεωρία γραμμής ωθήσεων διατυπώθηκε αξιωματικά από τον Moseley το 1835 ενισχύοντας τον ενστικτώδη πειραματισμό των Άγγλων μηχανικών.Στη Γαλλία καθ'όλη τη διάρκεια του 18ου αιώνα άρχισε να διατυπώνεται μια πλήρης θεωρία για τις τοξωτές κατασκευές η οποία συνένωνε γραμμές ωθήσεων και μηχανισμούς κατάρρευσης. Ο Culmann το 1866 στο βιβλίο του Graphische Static προτείνει τη χρήση κυρίως γραφικών μεθόδων, όμως το θεωρητικό υπόβαθρο αυτής της μεθόδου έχει διατυπωθεί ήδη το 1858 από τον Rankine και το 1864 από τον Maxwell. Οι θεωρίες αυτές εφαρμόστηκαν από τον Antonio Gaudi ο οποίος ενσωμάτωνε στον αρχιτεκτονικό του σχεδιασμό τη σύνθεση του στατικού φορέα των κατασκευών του. Μέσω των τριδιάστατων μοντέλων που έφτιαχνε με κρεμαστές αλυσίδες, δεν εξέταζε τους θόλους απλά για τη στατική τους επάρκεια, αλλά επαλήθευε και τη σύνθεση των κτιριακών όγκων που είχε αρχικά συλλάβει. Χαρακτηριστικό και το μοντέλο διερεύνησης και σχεδιασμού της εκκλησίας Sagrada Familia του οποίου η πολυπλοκότητα φανερώνει τη διεξοδική μελέτη της ισορροπίας των τρούλων. Τα μικρά σακίδια περιέχουν μικρά μολύβδινα σφαιρίδια, τα οποία ζυγίζουν περίπου 1:104 του βάρους το οποίο καλείται να υποστηρίξει η πραγματική κατασκευή (Huerta, 2006).

Εικόνα 7. Μοντέλο από κρεμαστή αλυσίδα, για τη διερεύνηση και τον σχεδιασμό της εκκλησίας Colònia Güell (ανεστραμμένο)

Εικόνα 8. Μοντέλο διερεύνησης και σχεδιασμού της εκκλησίας Sagrada Familia (ανεστραμμένο)

Στα μέσα του 20ου αιώνα είχαν ήδη αρχίσει να δίδονται μαθηματικές πλέον απαντήσεις στα προβλήματα διαστασιολόγησης των θόλων και των τόξων, περνώντας σταδιακά στη σύγχρονη θεώρηση των προβλημάτων μηχανικής όπως από τον sir Charles Inglis το 1951 .

Εκτός από τη La Sagrada Familia μελετήθηκε και η Casa Milla στη Βαρκελώνη καθώς διαμορφώθηκε με τον ίδιο τρόπο (http://lacanea.files.wordpress.com/2008/02/air-photo1.jpg).

Εικόνα 9. Casa Milla, Βαρκελώνη

Εικόνα 10. Κάζα Μιλά (*Casa Milà*) στην Βαρκελώνη

2.1.4 Σύγχρονες αψίδες

Στις μέρες μας παρόμοιες κατασκευές και σχήματα συναντώνται σε διάφορα μέρη του κόσμου. Παρακάτω παρατίθονται εικόνες από αψίδες από όλο τον κόσμο (https://el.wikipedia.org/αψίδα).

Εικόνα 11. Η αψίδα στο Σαιντ Λιούις (*Gateway Arch)*

Εικόνα 12. Αψίδες στην μονή της Αλκομπάσα, Πορτογαλία

Εικόνα 13. Στο Μπιλμπάο της Ισπανίας

Εικόνα 14. Στον σιδηροδρομικό σταθμό της Λουκέρνης, Ελβετία

Εικόνα 15. Η αψίδα στο νέο γήπεδο του Ουέμπλευ, Αγγλία

2.2. Διάφορες Προσεγγίσεις στην Κατασκευαστική Βελτιστοποίηση

Στη μηχανική, η δράση εξωτερικών δυνάμεων σε ένα δομικό στοιχείο που συμπεριφέρεται ελαστικά έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή εσωτερικού έργου, το οποίο «αποθηκεύεται» στο παραμορφωμένο στοιχείο ως εσωτερική ελαστική ενέργεια που ονομάζεται και ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης. Το έργο γενικά ισούται με το γινόμενο εσωτερικής δύναμης, δηλαδή ουσιαστικά τάσης επί επιφάνεια, επί τη μετακίνηση της δύναμης. Με την ελαχιστοποιήση της εσωτερικής ενέργειας παραμόρφωσης μιας κατασκευής, ελαχιστοποιείται η παραμόρφωση που δέχεται. Ο Sigmund μέσω του προγράμματος TopOpt και με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων, κατάφερε να βρίσκει τη βέλτιστη γεωμετρία μιας κατασκευής, με τις ελάχιστες παραμορφώσεις αυτής (Sigmund, 2003). Το πρόβλημα βελτιστοποιήσης του Sigmund παίρνει την εξής μορφή:

$$min\, c(t) = UKU$$

$$\text{έτσι ώστε } KU(t) = F$$

$$Mt \leq d$$

$$t \geq 0, \qquad u \in R^N, \qquad t \in R^M$$

όπου, u = diag(U) το διάνυσμα μετατοπίσεων κάθε στοιχείου,

K : πίνακας Μητρώου Ακαμψίας

F : το διάνυσμα εξωτερικών δυνάμεων

t : το διάνυσμα όγκου κάθε δικτυώματος

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

Το βασικό μειονέκτημα στο πρόβλημα επίλυσης του Sigmund ήταν ότι η μέγιστη αποδεκτή ποσότητα υλικού έπρεπε να οριστεί από το χρήστη του προγράμματος. Ουσιαστικά δηλαδή δεν γινόταν πραγματική βελτιστοποιήση του υλικού της κατασκευής.

Ο Philippe Block από το πανεπιστήμιο ETH της Ζυρίχης ανέπτυξε ένα στατικό μοντέλο, στο οποίο οποιαδήποτε κατασκευή μπορούσε να απεικονιστεί ως ένα τρισδιάστατο δικτύωμα, στο οποίο οι εξωτερικές δυνάμεις εφαρμόζονται στις κορυφές και οι σύνδεσμοι μεταφέρουν τα φορτία στη βάση. Αυτή η μέθοδος είναι γνωστή ως βελτιστοποιήση των διαδρομών φορτίων και επιτυγχάνει την ελαχιστοποιήση του υλικού. Το μονοπάτι δυνάμεων μίας φόρτισης δίδεται από , όπου Fi και li 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 Vi ο όγκος κάθε στοιχείου i, τότε :

Ο Maxwell επίσης απέδειξε το ακόλουθο σημαντικό αποτέλεσμα:

Έστω Pi τα εξωτερικά φορτία στο σημείο i, και ri η απόσταση από το σημείο εφαρμογής του φορτίου Pi σε οποιοδήποτε σημείο αναφοράς (Maxwell, 1869). Τότε:

$$\sum_i |F_i| l_i = \sum_i \vec{P_i} \cdot \vec{r_i}$$

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

$$\left(\sum Fl\right)_{\theta\lambda\acute{\iota}\psi\eta} + \left(\sum Fl\right)_{\varepsilon\varphi\varepsilon\lambda\kappa\upsilon\sigma\mu\acute{o}\varsigma} = \left(\sum \vec{P} \cdot \vec{r}\right)_{\varphi\acute{o}\rho\tau\iota\sigma\eta} + \left(\sum \vec{P} \cdot \vec{r}\right)_{\alpha\nu\tau\iota\delta\rho\acute{\alpha}\sigma\varepsilon\iota\varsigma}$$

Στην αριστερή μεριά της εξίσωσης αντιπροσωπεύονται οι εσωτερικές καταπονήσεις από τις θλίψεις και τους εφελκυσμούς που αναπτύσσονται, και στη δεξιά μεριά υπάρχουν οι εξωτερικές συνεισφορές από τις φορτίσεις και τις αντιδράσεις.

Τα πλεονεκτήματα της προσέγγισης με βελτιστοποίηση των μονοπατιών των φορτίων είναι πολλαπλά. Σε αντίθεση με τη μέθοδο που ανέπτυξε ο Sigmund, η βελτιστοποιήση γίνεται συναρτήσει του υλικού, κάτι το οποίο δεν ήταν εφικτό με το πρόγραμμα TopOpt του Sigmund. Επιπλέον, το πρόβλημα βρίσκει το βέλτιστο σχήμα ανεξαρτήτως υλικού, καθώς 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. Για αυτούς τους λόγους επιλέχθηκε το συγκεκριμένο μοντέλο ως ιδανικό για τον πειραματικό έλεγχο.

2.3. Δισδιάστατη και τρισδιάστατη βελτιστοποίηση με μονοπάτια φορτίων

Βάσει των μονοπατιών φορτίων και έχοντας τις εξισώσεις που είναι απαραίτητες για τη βελτιστοποιήση κατασκευών, μπορούμε να βρούμε το κατάλληλο σχήμα, για ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στις δύο διαστάσεις. Η γεωμετρία μιας καμάρας η οποία δέχεται ομοιόμορφα γραμμικά κατανεμημένα φορτία σε πλήρη θλίψη, παίρνει το σχήμα της παραβολής. Αυτό μπορεί να αποδειχθεί λύνοντας της παραμετρική εξίσωση ροπών μιας καμάρας με μηδενικά όλα τα σημεία. Στόχος μας για να επιτευχθεί βελτιστοποιήση είναι η ελαχιστοιποιήση του υλικού. Για να το καταφέρουμε αυτό θα πρέπει να βρούμε την κατάλληλη γεωμετρία της καμάρας, και πιο συγκεκριμένα την ιδανική αναλογία ανοίγματος της καμάρας ως προς το υψολότερο σημείο της.

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

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

$$V = \frac{wL}{2} \text{ και } H = \frac{wL^2}{8h}$$

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

$$\left(\sum Fl\right)_{\theta\lambda\acute{\iota}\psi\eta} = \left(\sum \vec{P}\cdot\vec{r}\right)_{\varphi\acute{o}\rho\tau\iota\sigma\eta} + \left(\sum \vec{P}\cdot\vec{r}\right)_{\alpha\nu\tau\iota\delta\rho\acute{\alpha}\sigma\epsilon\iota\varsigma}$$

Η δεξιά πλευρά αυτής της εξίσωσης γράφεται:

$$\left(\sum \vec{P}\cdot\vec{r}\right)_{\varphi\acute{o}\rho\tau\iota\sigma\eta} = \int_0^L (-w)4h\left(\frac{x}{L}-\frac{x^2}{L^2}\right)dx = -4hw\left(\frac{x}{L}-\frac{x^2}{L^2}\right)(0|L) = -\frac{2}{3}hwL$$

και

$$\left(\sum \vec{P}\cdot\vec{r}\right)_{\alpha\nu\tau\iota\delta\rho\acute{\alpha}\sigma\epsilon\iota\varsigma} = (-H)L = -\frac{wL^2}{8h}$$

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

$$\left(\sum Fl\right)_{\theta\lambda\acute{\iota}\psi\eta} = -\frac{2}{3}hwL - \frac{wL^2}{8h}$$

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

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

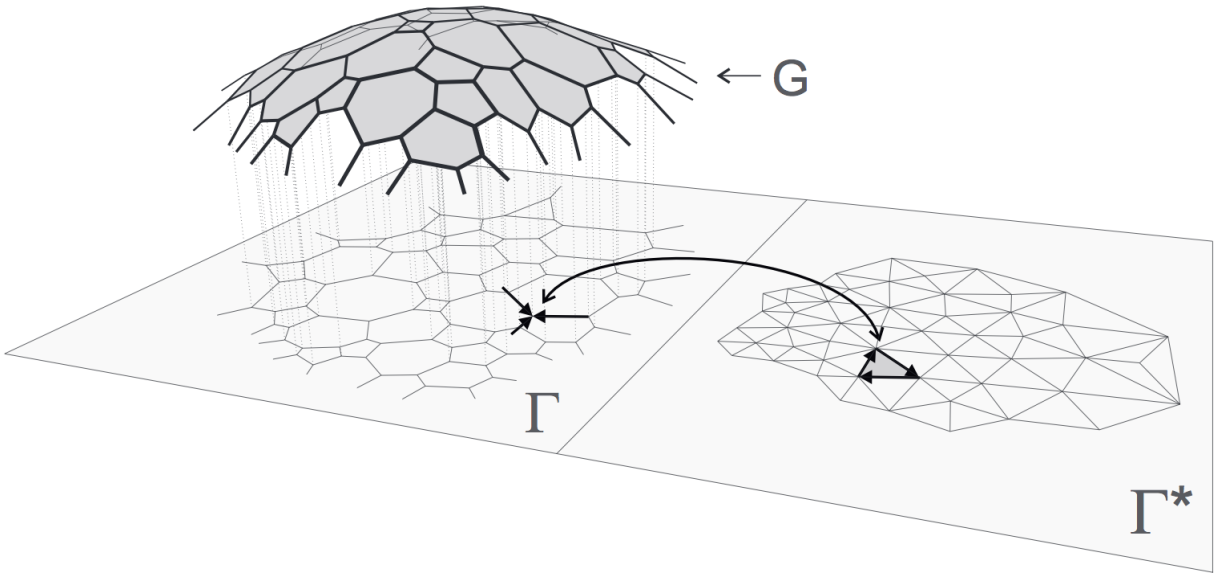
Επομένως ,

$$\boxed{\frac{d\sum Fl}{dh} = -\frac{wL^2}{8h^2}hw + \frac{2w\mathrm{L}}{3} = 0 \leftrightarrow \mathbf{\frac{h}{L} = \frac{\sqrt{3}}{4}}}$$

Ιδανική σχέση ύψους-ανοίγματος βέλτιστης παραβολής, (Pagonakis, May 2015), (Lewis, 2016)

Το παραπάνω είναι το ιδανικό ύψος ως προς το άνοιγμα του τόξου στις δύο διαστάσεις και είναι γνωστό βιβλιογραφικά, ωστόσο η προσέγγιση που θα ακολουθήσουμε 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 (βλ. Εικόνα).



Εικόνα 16. Προσέγγιση τρισδιάστατου μοντέλου σε δισδιάστατο δικτύωμα

Στην περίπτωση της συγκεκριμένης μελέτης επιλέγεται μια απλή περίπτωση παραβολικού τόξου υπό κατανεμημένο φορτίο. Παρακάτω θα περιγράψουμε αναλυτικά τη διαδικασία κατασκευής του τόξου, καθώς επίσης και την αναλυτική περιγραφή του πειράματος.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Το εν λόγω πείραμα πραγματοποιήθηκε του εργαστηρίου οπλισμένου σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Ε.Ι. Πειραιά. 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 έχουμε αναφέρει σε προηγούμενες ενότητες, σκοπός της βελτιστοποιήσης της γεωμετρίας ενός σχήματος, είναι να βρίσκει ένα εναλλακτικό μονοπάτι φορτίων, διαφορετικό από τα καθιερωμένα. Πιο συγκεκριμένα όταν καταφέρουμε να μετατρέψουμε τις δυνάμεις (θλίψεις – εφελκυσμούς – κάμψεις – ροπές) που ασκούνται σε μία κατασκεή, σε νέα μονοπάτια με μοναδικό φορτίο τις θλιπτικές δυνάμεις, τότε ο οπλισμός στο σκυρόδεμα καθίσταται περιττός, καθώς από μόνο του το σκυρόδεμα αποτελεί ένα υλικό με μεγάλες αντοχές στις θλίψεις, ενώ επίσης ο μεταλλικός οπλισμός αυτού παραλαμβάνει όλες τις υπόλοιπες δυνάμεις πέρα των θλιπτικών (εφελκυσμούς – κάμψεις – ροπές). Ακολουθώντας τη παραπάνω μέθοδο, καταλήξαμε στην κατασκευή παραβολικής καμάρας, με σκοπό τη βελτιστοποιήση του νέου μονοπατιού των φορτίων που θα ασκούνται στο φορέα. Παρ' όλα αυτά το σχήμα και οι διαστάσεις είναι αυτά που επηρεάζουν τη στατικότητα της κατασκευής. Οι διαστάσεις του φορέα ακολούθησαν τον τύπο **ύψος/βάση= *√3/4*** και το σχήμα της παραβολής. Το βασικότερο ερώτημα που έπρεπε να απαντηθεί ήταν με πιο τρόπο πρέπει να κατασκευάσουμε το παραβολικό σχήμα της καμάρας, ούτως ώστε όλα τα φορτία να μετατραπούν σε θλιπτικά. Βασιζόμενοι στη μέθοδο της αναστραμμένης αλυσίδας, χρησιμοποιήσαμε μια αλυσίδα της οποίας τις άκρες τις τοποθετήσαμε σε απόσταση τέτοια με σκοπό να είναι εφικτή η τοποθέτηση του δοκιμίου στην πρέσσα. Στη συνέχεια αφού η αλυσίδα μας πήρε τη μορφή που επιθυμούσαμε, σχεδιάστηκε η γεωμετρία της και αναστράφηκε σε 180 μοίρες. Με αυτό τον τρόπο καταφέραμε να μετατρέψουμε όλες τις εφελκυστικές δυνάμεις που ασκούνταν στο υλικό σε καθαρά θλιπτικές. Αφου κατασκευάσαμε το καλούπι μας έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε το υλικό και να πραγματοποιήσουμε τους καταστρεπτικούς ελέγχους σε αυτό, με σκοπό να καταλήξουμε στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Έπειτα σειρά είχε η κατασκευή των δοκιμίων μας, δηλαδή οι παραβολικές καμάρες. Στο τέλος τα δοκίμια μας τοποθετήθηκαν στην πρέσσα θλίψης του εργαστηρίου, κάτω από ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο. Η παραπάνω διαδικασία παρουσίασε ιδιαίτερο ενδιαφέρον τόσο στην πειραματική της φάση όσο και στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Παρακάτω παραθέτουμε τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση του πειράματος:

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

3.2 Μελέτη – Βελτιστοποίηση – Επιλογή της γεωμετρίας της καμάρας

Όπως αναλύθηκε στις προηγούμενες ενότητες, το σχήμα της κατασκευής παίζει το σημαντικότερο ρολό στη στατικότητα του φορέα. Ιδανικότερα είναι τα κοίλα σχήματα, δηλαδή οι καμπύλες. Επομένως μέσα από τη συνάρτηση 1.1 που αναπτύξαμε στο 2.3 και μέσα από το λόγο ύψος/βάση=√3/4 καταλήξαμε στην ιδανική γεωμετρία της καμάρας μας. Η παραβολική εξίσωση είναι συμμετρική ως προς το κέντρο της περιστροφής της προαναφερθείσας τοξωτής παραβολής. Θέτοντας ως περιορισμό τον όγκο της κατασκευής μας, λόγω των χωρικών περιορισμών του εργαστηρίου καταλήξαμε σε μέγιστο μήκος 70 cm και 30 cm μέγιστου ύψους. Στην κλίμακα 1:25 μιας κατασκευής αυτό θα σήμαινε 17,5 m και μέγιστο ύψος 7,5 m. Το πάχος του υλικού επιλέχθηκε στα 8 mm, λόγω κατασκευαστικών περιορισμών. Δηλαδή λόγω αδυναμίας και έλλειψης εργαστηριακού εξοπλισμού ήταν αδύνατη η κατασκευή των δοκιμιών σε πάχος μικρότερο των 8 mm. Η αντιστοιχία του πάχους της κατασκευής σε κλίμακα 1:1 θα ήταν 20cm. Ωστόσο υπάρχει δυνατότητα και μικρότερου πάχους σε κλίμακα 1:1. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι τα σχήματα επιλέχθηκαν με βάση της υπάρχουσες οικονομικές και τεχνικές δυνατότητες. Ωστόσο θα ήταν ιδιαίτερα ενδιαφέρον να πραγματοποιηθεί αντίστοιχη μελέτη και σε άλλες γεωμετρίες και κονιάματα. Αφού ολοκληρώθηκε η επιλογή της ιδανικότερης γεωμετρίας των κατασκευών, εκκρεμούσε η κατασκευή των καλουπιών η οποία θα γινόταν βασιζόμενη στην αρχική εξίσωση της παραβολής και τις διαστάσεις που επιλέχθηκαν.

3.3 Κατασκευή κονιάματος και έλεγχος δοκιμίων

Στην κατασκευαστική βελτιστοποίηση, όπως αναλύσαμε και παραπάνω πρωταρχικό ρόλο παίζει η γεωμετρία του σχήματος και στη συνέχεια το υλικό. Βασική προϋπόθεση δηλαδή για την επίτευξη βελτιστοποίησης της κατασκευής αποτελεί η επιλογή της καταλληλότερης γεωμετρίας του δοκιμίου, δηλαδή το καλύτερο μονοπάτι φορτίων. Το τσιμέντο κονίαμα είναι το υλικό που επιλέξαμε για την πραγματοποίηση του πειράματος που θα αναλύσουμε παρακάτω. Αξίζει να σημειωθεί πως θα ήταν ιδιαίτερα ενδιαφέρον μελλοντικά να πραγματοποιηθεί το ίδιο πείραμα και με άλλα υλικά όπως για παράδειγμα αργιλικά κονιάματα, με σκοπό τη μελέτη της αντοχής μιας

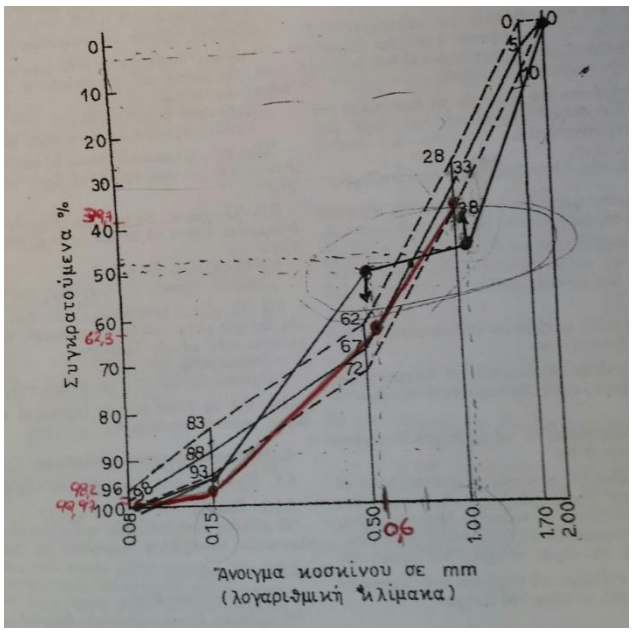
κατασκευής στα πλαίσια αντοχής του υλικού, καθώς επίσης και για να έχουμε κατασκευές με ελάχιστο υλικό. Στο πείραμα μας επιλέξαμε λοιπόν να χρησιμοποιήσουμε άοπλο τσιμεντοκονίαμα, το οποίο πληρούσε και παράχθηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Ελληνικού Κανονισμού. Αποτελείται δηλαδή, από τις γενικές αναλογίες 1 μέρος τσιμέντο, 3 μέρη άμμο, και 0,5 μέρος νερό. Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό για τα δοκίμια 450gr+/-2gr τσιμέντο(ταχείας πήξεως), 1350gr+/-5gr άμμου(ιδανικής κοκομετρίας), 225gr+/-2gr νερό.

Χρησιμοποιήσαμε νταμαρίσια άμμο την οποία αρχικά την τοποθετήσαμε σε φούρνο, με σκοπό την πλήρη ξήρανσή της, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιήσαμε κοκομετρική ανάλυσή της σύμφωνα με τον Ελληνικό κανονισμό και χρησιμοποιώντας κόσκινα μεγεθών No16, No30, No100 και No200. Στην πορεία, ακολουθώντας και πάλι τον κανονισμό, επιλέξαμε από κάθε κόσκινο τα αντίστοιχα ποσοστά, ούτως ώστε η κοκομετρική καμπύλη της άμμου να ακολουθεί την κοκομετρική καμπύλη του κανονισμού. Πιο συγκεκριμένα τα ποσοστά που συλλέχθηκαν 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 17.Μηχανή κοσκίνων για κοκομετρική ανάλυση

Εικόνα 18.Διαφορετικές κοκομετρίες Άμμου

Εικόνα19.Ζυγαριά ακριβείας



Εικόνα 20.Κοκομετρική καμπύλη της άμμου που χρησιμοποιήθηκε

Βασιζόμενοι και πάλι στον Ελληνικό κανονισμό παρήγαμε και το τσιμεντοκονίαμα, εκτελώντας όλα τα βήματα και όλες τις απαραίτητες ενέργειες με ιδιαίτερη προσοχή και ακρίβεια. Στο αμέσως επόμενο σημείο θα γίνει εκτενής περιγραφή της διαδικασίας παρασκευής του τσιμεντοκονιάματος. Αρχικά θέσαμε σε λειτουργία τη μηχανή ανάδευσης και ρίξαμε μέσα το νερό. Έχοντας τη μηχανή σε χαμηλή ταχύτητα, προσθέσαμε αμέσως το τσιμέντο αναμένοντας για τριάντα δευτερόλεπτα. Μόλις ολοκληρώθηκε το πρώτο στάδιο πρόσθεσαμε την άμμο με σταθερό

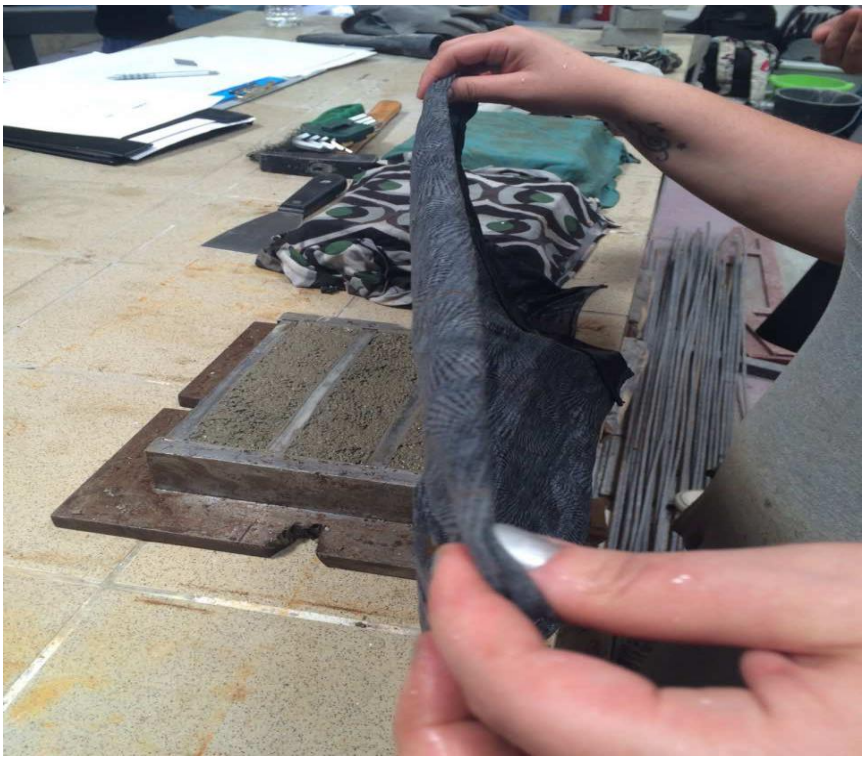
ρυθμό για τα επόμενα τριάντα δευτερόλεπτα. Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι σημαντική λεπτομέρεια σε αυτό το στάδιο αποτελεί, η άμμος να έχει προστεθεί μέσα στον κουβά στο χρονικό όριο των τριάντα δευτερόλεπτων. Στη συνέχεια αυξήσαμε την ταχύτητα της μηχανής στο No2 και περιμέναμε για τα επόμενα τριάντα δεύτερα. Αφού ολοκληρώθηκε η ανάδευση, κλείσαμε τον αναδευτήρα για ενάμιση λεπτό, καθαρίζοντας τα τοιχώματα της μηχανής από κολλημένο τσιμέντο. Τέλος θέσαμε τον αναδευτήρα στην υψηλή ταχύτητα για το επόμενο ένα λεπτό.

Εικόνα 21.Μηχανή ανάδευσης

Στο αμέσως επόμενο βήμα παραλάβαμε τα καλούπια διαστάσεων 4cm*4cm*16cm τα οποία είχαν καθαριστεί και λιπανθεί με λάδι και τοποθετήσαμε μέχρι τη μέση αυτών το κονίαμα. Τοποθετήσαμε τα καλούπια στη μηχανή συμπύκνωσης, θέτοντάς την σε λειτουργία για ένα λεπτό, έτσι ώστε να κάνει εξήντα χτύπους. Στη συνέχεια τα καλούπια ξαναγεμίστηκαν μέχρι πάνω αυτή τη φορά επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία.

Εικόνα 22 Μηχανή συμπύκνωσης δοκιμίων

Στο τελικό στάδιο της παρασκευής των κονιαμάτων σκεπάσαμε τα καλούπια με βρεγμένα πανιά για μία-δύο μέρες και αφού τα ξακαλουπώσαμε τα διατηρήσαμε μέσα σε νερό για 28 μέρες, με σκοπό την ωρίμανσή τους και τον καμπτικό και θλιπτικό έλεγχο τους.



Εικόνα 23.Τοποθέτηση βρεγμένων πανιών πάνω στα φρέσκα δοκίμια

Εικόνα 24.Ωρίμανση δοκιμίων σε νερό

Μέσω της ειδικής μηχανής η οποία έχει τη δυνατότητα άσκησης φορτίων έως 5.9kN, πραγματοποιήσαμε τον έλεγχο κάμψης. Η μηχανή έπρεπε να είναι εφοδιασμένη με διάταξη κάμψης, η οποία αποτελείται από δυο χαλύβδινα κυλινδρικά στηρίγματα διαμέτρου 100+/-0.5mm και ένα τρίτο χαλύβδινο φόρτισης ίδιας διαμέτρου τοποθετημένο στο κέντρο ανάμεσα στους άλλους δυο. Το μήκος αυτών των κυλίνδρων έπρεπει να είναι 45mm έως 50mm.

Εικόνα 25. Μηχανή ελέγχου κάμψης

Εικόνα 26.Έλεγχος κάμψης ορθογωνικών δοκιμίων

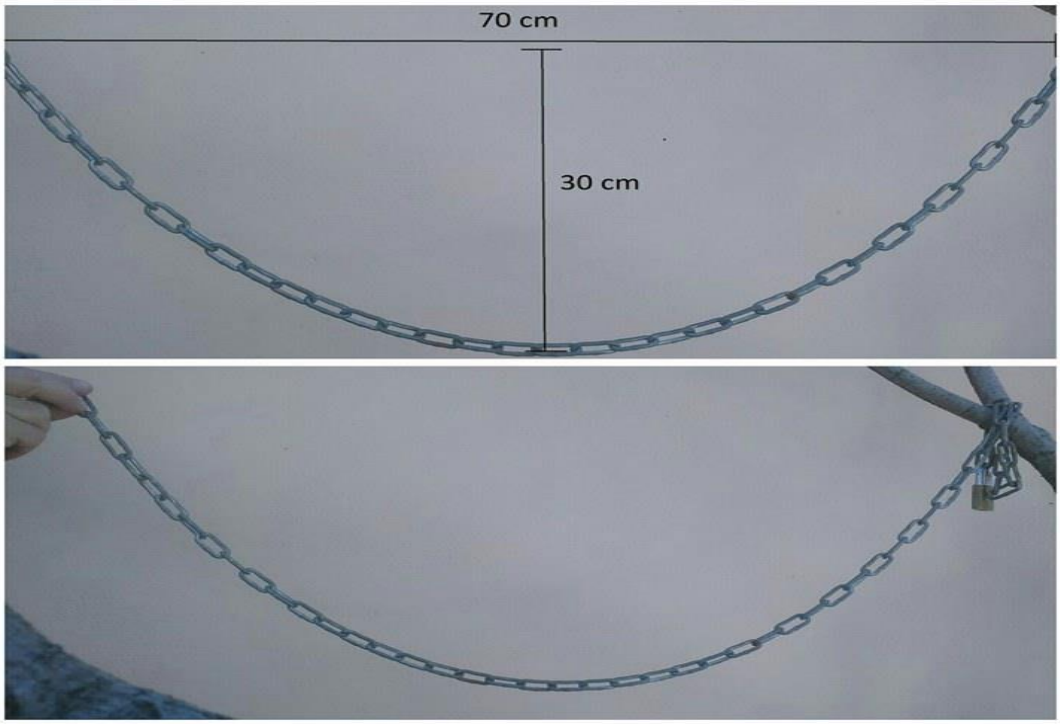
Αφού πραγματοποιήσαμε τον έλεγχο κάμψης, το κάθε κομμάτι του ορθογωνικού δοκιμίου το χρησιμοποιήσαμε σαν κυβικό πλέον και προχωρήσαμε στον έλεγχο της θλίψης.

Η μηχανή δοκιμής έπρεπε να έχει την κατάλληλη δυνατότητα φόρτισης για τη δοκιμή με ακρίβεια +/- 1.0%. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα δύο δοκίμια σε έλεγχο κάμψης και θλίψης. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του τσιμεντοκονιάματος ήταν ταχείας πήξεως και σύμφωνα με το εμβαδό της διατομής αλλά και το μέσω όρο της θλιπτικής αντοχής [Rc=Fc(Nt)/A(mm^2)] καταλήγουμε πως η ονομαστική κατηγορία αντοχών του τσιμεντοκονιάματος είναι 52.5R

ΑΝΤΟΧΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ(02/06/2016)					
α/α	**Βάρος(gr)**	**Γεωμετρία(mm)**	**Κάμψη(Kn)**	**Θλίψη(Kn)**	**Παραμόρφωση ε(mm)**
Δ1	584.0	40.32x39.9	3.730	A)88.1	A)0.40
				B)91.5	B)0.39
Δ2	593.5	40.5x40.35	3.900	A)90.7	A)0.41
				B)92.5	B)0.41
Δ3	592.5	40.2x40.9	4.100	A)90.7	A)0.40
				B)92.5	B)0.41

3.4 Κατασκευή Καλουπιού

Το πιο δύσκολο και απαιτητικό κομμάτι στο πείραμα μας ήταν η κατασκευή των καλουπιών. Για να καταφέρουμε να επιτύχουμε τις καλύτερες αντοχές των δοκιμίων κατά την διαδικασία ασκήσεως ομοιόμορφων θλιπτικών φορτίων, έπρεπε να πετύχουμε την ιδανικότερη γεωμετρία σχήματος αυτών. Αποφασίσαμε λοιπόν να ακολουθήσουμε το διάγραμμα ροπών ανεστραμμένο , δηλαδή με τη βοήθεια της βαρύτητας πήραμε το ιδανικότερο σχήμα των φορέων, δηλαδή την ιδανική καμπύλη. Πιο συγκεκριμένα για την κατασκευή των δοκιμίων της καμάρας, πήραμε μια μεταλλική αλυσίδα, την κρατήσαμε σταθερή σε δύο σημεία με μεταξύ τους απόσταση 70 cm και την αφήσαμε να κρεμάσει (βαρύτητα) με μέγιστο ύψος τα 30 cm. Στη συνέχεια σημαδέψαμε την κλίση του σχήματός μας (παραβολική καμπύλη). Σύμφωνα με το σχήμα που πήραμε κατασκευάστηκαν δύο ειδών καλούπια, ένα από φύλλο μετάλλου και δύο από φελιζόλ, πλάτους 10 cm.



Εικόνα 27. Διαδικασία εύρεσης βέλτιστου σχήματος της καμάρας

Εικόνα 28. Βελτιστοποίηση σχήματος καμάρας

Εικόνα 29. Βελτιστοποίηση σχήματος καμάρας.

Εικόνα 30. Καλούπι καμάρας από φύλλο μετάλλου.

Εικόνα 31. Καλούπι καμάρας από φύλλο μετάλλου

Εικόνα 32. Καλούπια από φελιζόλ

Εικόνα 33. Καλούπια από φελιζόλ

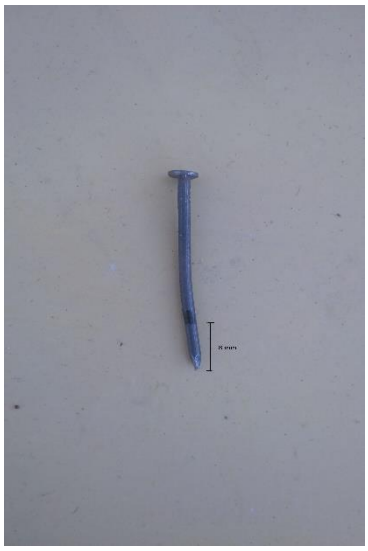
3.5 Κατασκευή Φορέα – Ωρίμανση

Για να κατασκευαστούν οι φορείς βασική προυπόθεση ήταν η κατάλληλη ρευστότητα παραγωγής του κονιάματος, έτσι ώστε να μπορεί να συνδιαστεί ρευστότητα και σταθερότητα, με αποτέλεσμα να μην κυλάει προς τα κάτω το τσιμεντοκονίαμα. Αρχικά τόσο για τα καλούπια από φύλλο μετάλλου, όσο και για το φελιζόλ, χρησιμοποιήθηκε ζελατίνη για να καλυφθούν τα καλούπια και πάνω από αυτό τοποθετήσαμε με πινέλο μια στρώση λαδιού, με σκοπό τη διευκόλυνση κατά τη διαδικασία ξεκαλουπώματος. Σημαντικό είναι επίσης να αναφέρουμε ότι για τη θεμελίωση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε μία ξύλινη βάση, όπου πάνω βιδώθηκαν τα καλούπια.

Εικόνα 34. Προεργασία λαδώματος καλουπιών

Εικόνα 35. Δοκιμαστική προσομοίωση ξεκαλουπώματος καμάρας

Στη συνέχεια πήραμε πρόκες τις οποίες είχαμε χαράξει-σημαδέψει στα 8 χιλιοστά, τα οποία χρησιμοποιήσαμε για να ελέγχουμε καθόλη τη διάρκεια κατασκευής των φορέων το πάχος τους, το οποίο θα έπρεπε να είναι ομοιόμορφο στα 8 mm.



Εικόνα 36. Πρόκες για έλεγχο πάχους των δοκιμίων

Αφού όλα ήταν έτοιμα ξεκίνησε η σκυροδέτηση. Η σκυροδέτηση πραγματοποιήθηκε με μυστρί και νερό στο χέρι και σε στρώσεις με συνεχή ρυθμό. Για να επιτευχθεί το ομοιόμορφο πάχος καρφώναμε τα μεταλικά συρματάκια στο κονίαμα, καθ'όλη τη διάρκεια της σκυροδέτησης, και όπου κρινόταν ότι είναι απαραίτητο προστίθαμε ή αφαιρούσαμε υλικό. Στο τέλος με βρεγμένο μυστρί καταφέραμε να κάνουμε λεία και ομαλή την επιφάνεια.

Εικόνα 37. Διαδικασία κατασκευής καμάρας

Εικόνα 38. Διαδικασία κατασκευής καμάρας

Εικόνα 39. Διαδικασία κατασκευής καμάρας

Εικόνα 40. Επιφάνια καμάρας

Εικόνα 41. Δοκίμιο καμάρας

Εικόνα 42. Δοκίμιο καμάρας

Αφού ολοκληρώθηκε η σκυροδέτηση των δοκιμίων, τοποθετήθηκαν επάνω βρεγμένα πανιά σε όλο το μήκος των φορέων, τα οποία βρέχονταν, μέχρι τη σταθεροποίηση του κονιάματος. Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετήθηκαν ολόκληρα μέσα σε δεξαμενή νερού του εργαστηρίου και αφέθηκαν εκεί 28 ημέρες, μέχρι δηλαδή την ωρίμανσή τους.

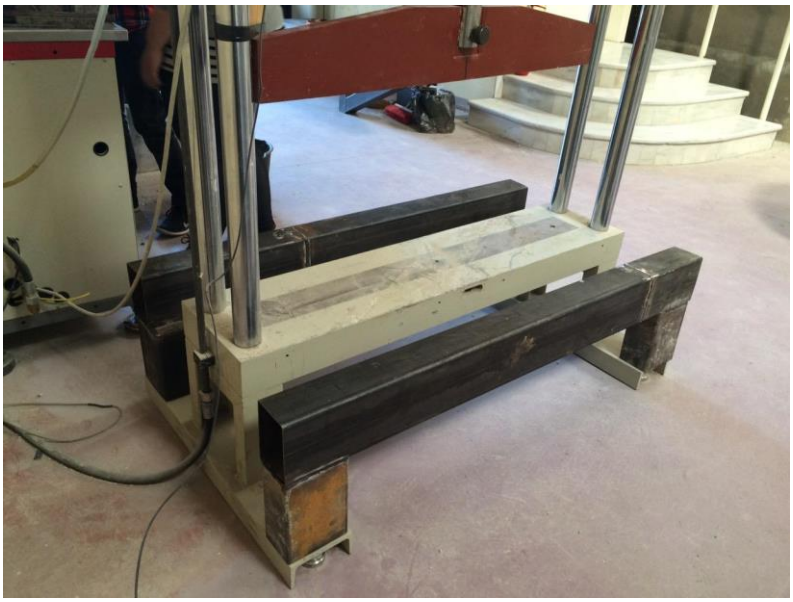
Εικόνα 43. Διαδικασία σταθεροποίησης δοκιμίου με βρεγμένα πανιά

Τέλος είναι σημαντικό να επισημάνουμε ότι κατά τη διαδικασία του ξεκαλουπώματος, λόγω αστοχίας στην αφαίρεση των φορέων από τα δοκίμια, καταστράφηκαν 2 από τα 4 δοκίμια.

Εικόνα 44. Δοκίμια που αστόχησαν κατά την διαδικασία ξεκαλουπώματος

3.6 Φόρτιση του φορέα – Καμάρας υπό ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο (καταστρεπτικός έλεγχος)

Το σημαντικότερο σημείο του πειράματός μας, ήταν το σημείο της φόρτισης, καθώς επιχειρήθηκε καλύτερη δυνατή προσομοίωση ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου. Για να πετύχουμε καλύτερη προσομοίωση τοποθετήσαμε το δοκίμιο σε σταθερό περιορισμένο χώρο. Για τη μεταφορά του φορτίου από την πρέσα στο δοκίμιο, επιλέξαμε να χρησιμοποιηθεί ένα ψαθυρό υλικό μικρής κοκομετρίας σχετικά. Για τη διευκόλυνση του πειράματος και για την εξαγωγή καλύτερων αποτελεσμάτων, κατασκευάστηκε ειδική διαμόρφωση επέκτασης της βάσης, με σκοπό το μη επηρεασμό της διαδικασίας των φορτίσεων και των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 45. Ενίσχυση της βάσης μηχανής πρέσας του εργαστηρίου σκυροδέματος

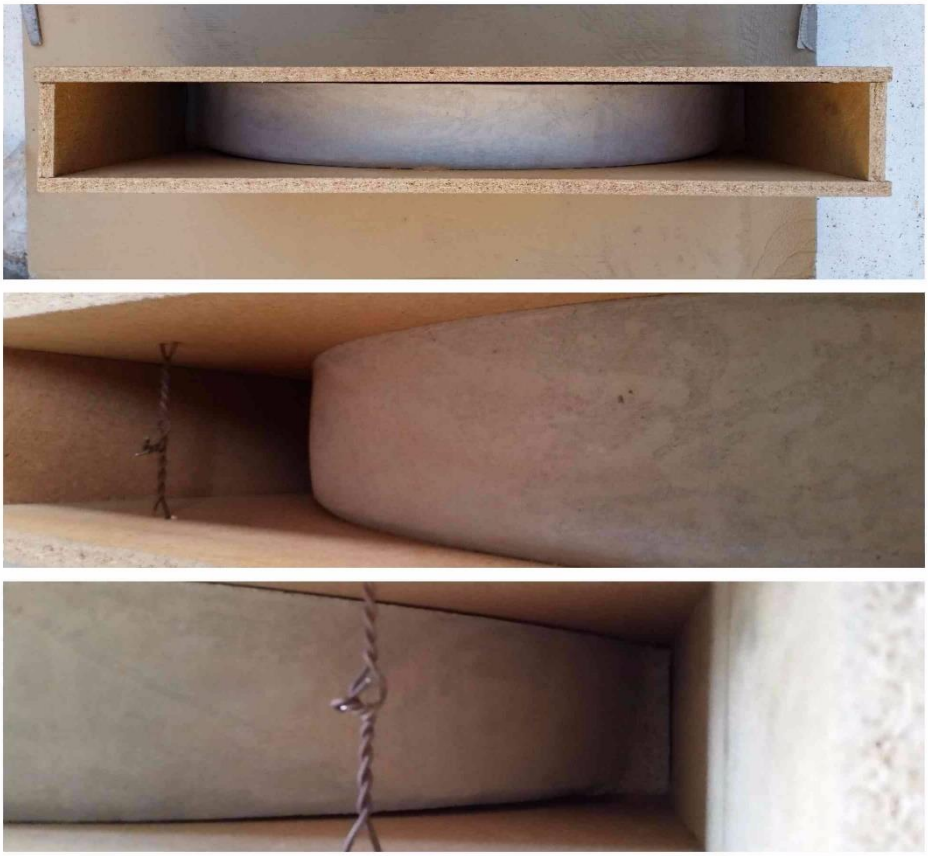
Εικόνα 46. Ενίσχυση έδρασης μηχανής πρέσας του εργαστηρίου σκυροδέματος

Εικόνα 47. Τοποθέτηση κατάλληλου μαχαιριού σε μηχανή πρέσας

Η κατασκευή που θα τοποθετούνταν οι καμάρες, κατασκευάστηκε από ξύλινα φύλλα πάχους 1,6 εκατοστών, τα οποία σχεδιάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να πάρουν το σχήμα κουτιού, με σκοπό να εφάπτουν στη βάση και στα πλαινά μέρη των καμάρων. Πιο συγκεκριμένα δόθηκαν οι εξής διαστάσεις στα κουτιά: για το δοκίμιο CEM/ARCH 1 μήκος 80 cm, ύψος 38 cm και πλάτος 10 cm, ενώ για το CEM/ARCH 2 μήκος 79 cm, ύψος 38 cm και πλάτος 10 cm. Για την βέλτιστη κατανομή ομοιόμορφου φορτίου με πολλές σημειακές και ίσες φορτίσεις στην επιφάνεια των καμαρών, επιλέχθηκε ως καταλληλότερο ένα ψαθυρό λεπτόκοκκο υλικό. Καταλήξαμε στην επιλογή νταμαρίσιας άμμου, καθώς αποτελούσε τον ευκολότερο και οικονομικότερο τρόπο. Ακόμα καλύτερα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί πιο λεπτόκοκκο υλικό ή ακόμα και παχύρευστο υγρό, το οποίο όμως θα προυπόθετε στεγανοποιήσεις.

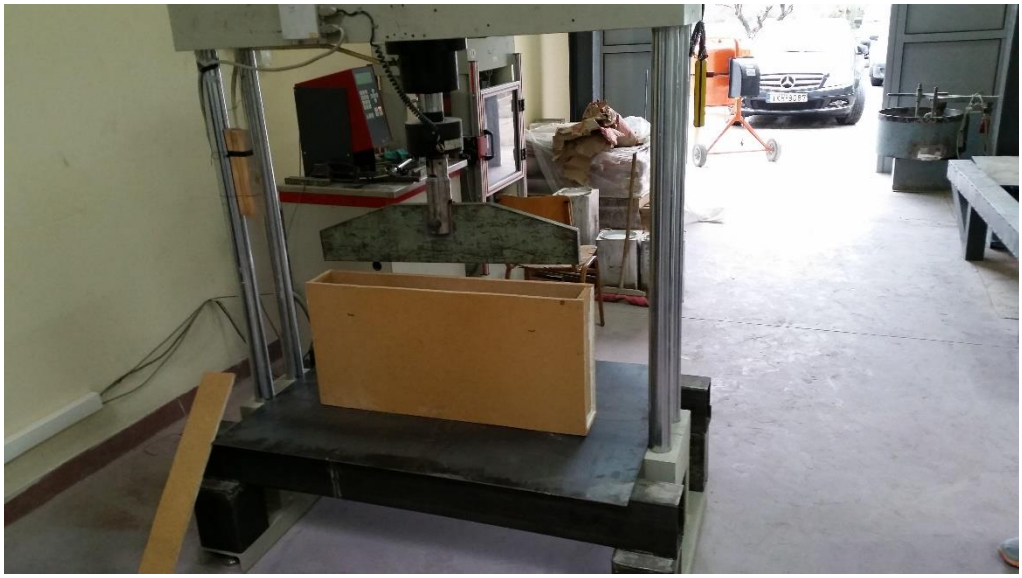
Εικόνα 48. Διαδικασία κατασκευής ξύλινου κουτιού τοποθέτησης δοκιμίου πειράματός

Στη συνέχεια τοποθετήσαμε τα δοκίμια μέσα στα ξύλινα πλαίσια και ενισχύσαμε την κατασκευή μας με ντίζες στα δύο άκρα του πλαισίου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 49. Τοποθέτηση ντίζας στα άκρα στης κατασκευής

Πριν την εκτέλεση του πειράματος μας, και αφού είχαν τοποθετηθεί τα δοκίμια εντός πλαισίου έγιναν οι πρώτες δοκιμές στη μηχανή της πρέσσας, ώστε να ελέγξουμε τη βέλτιστη εφαρμογή του μαχαιριού της πρέσσας στο πάνω μέρος του πλαίσιου.



Εικόνα 50. Δοκιμές πριν το πείραμα

Εικόνα 51. Δοκιμές πριν το πείραμα

Μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών, γεμίσαμε τα ξύλινα πλαίσια σταδιακά με άμμο. Έπειτα για την αποφυγή κενών σημείων της άμμου μέσα στα πλαίσια τα "χτυπήσαμε" με σκοπό την καλύτερη συμπύκνωσή της. Στην κορυφή των πλαισίων τοποθετήθηκαν ξύλινα καπάκια στο άνοιγμα των κατασκευών κάθετα στη διεύθυνση του ψαλιδιού της πρέσας. Τέλος τοποθετήθηκε αποστασιοποιητής στην κάθετη διεύθυνση του φορέα, που μετρούσε την παραμόρφωση – το βέλος κάμψης, δηλαδή κάθετα στον άξονα κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

Εικόνα 52. Τοποθέτηση άμμου πάνω από τα δοκίμια για ομοιόμορφη φόρτιση

Το επόμενο βήμα ήταν η λειτουργία της πρέσας θλίψης, ώστε να ξεκινήσει η φόρτιση.

Εικόνα 53. Πειραματική διαδικασία δοκιμίου CEM ARCH 1

Εικόνα 54. Πειραματική διαδικασία δοκιμίου CEM ARCH 1

Εικόνα 55. Πειραματική διαδικασία δοκιμίου CEM ARCH 2

Εικόνα 56. Πειραματική διαδικασία δοκιμίου CEM ARCH 2

Τα αποτελέσματα της φόρτισης παρατίθονται παρακάτω στην ενότητα των αποτελεσμάτων, μαζί με την καμπύλη δύναμης φορτίου και άμμου (kN) προς το βέλος κάμψης (mm). Τα δύο δοκίμια έπσασαν από ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο. Στην περίπτωση του δοκιμίου CEM/ARCH 1: 22,38 kN και αντίστοιχα το CEM/ARCH 2: 20,58 kN. Στη συνέχεια της διαδικασίας απομακρύναμε σταδιακά την άμμο από τα δοκίμια και έγιναν εμφανή τα αποτελέσματα της φόρτισης.

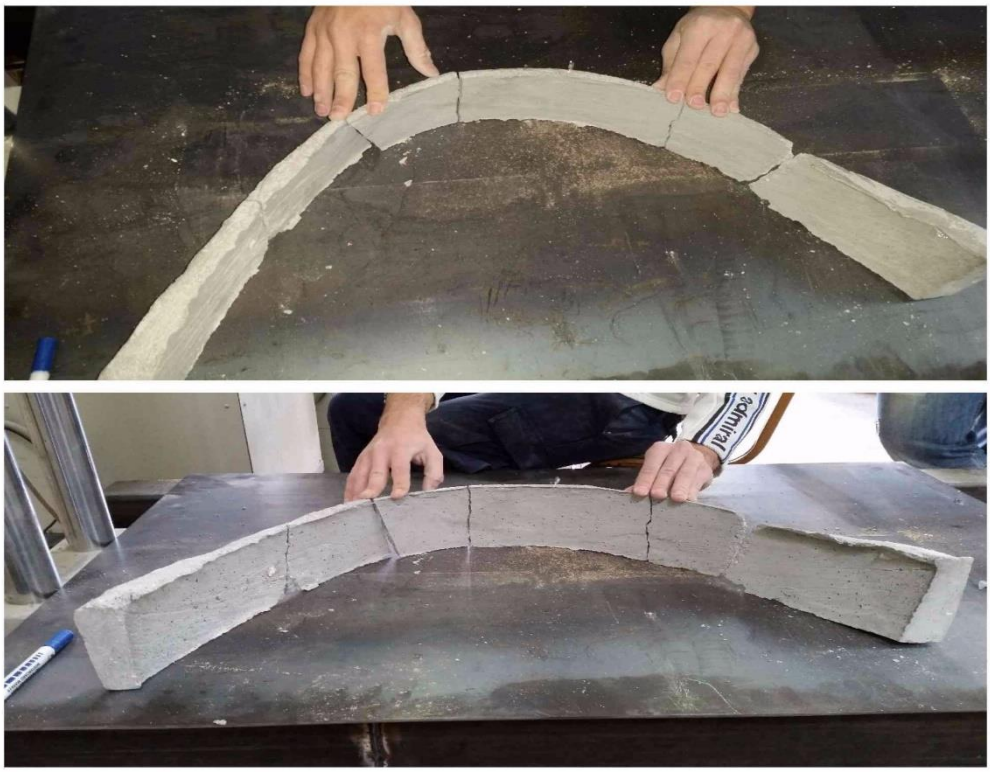
3.7 Παρουσίαση - Αποτίμηση Αποτελεσμάτων

Οι κατασκευές μας καταστράφηκαν υπό τριαξονική κάμψη στους τοπικούς άξονες, όπως ήταν αναμενόμενο από το θεωρητικό υπόβαθρο της μελέτης μας. Αυτό οφείλεται σε κάμψη που δημιουργήθηκε στον άξονα.

Αξιοσημείωτο είναι ότι η αστοχία των φορέων μας ήταν σχεδόν ομοιόμορφη. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα, ότι καταφέραμε να δημιουργήσουμε ένα εναλλακτικό μονοπάτι φορτίων σε ένα άοπλο και μικρού πάχους φορέα. Εφόσον καταλήξαμε στην επιλογή τσιμεντοκονιάματος, χωρίς οπλισμό, γνωρίζαμε ότι μόλις τα φορτία ξεφύγουν από το μονοπάτι που τους δώσαμε, δηλαδή το θλιπτικό, θα είχαμε τη δημιουρία κάμψεων και εφελκυσμών τοπικά, οι οποίες θα είχαν σαν αποτέλεσμα στην αστοχία του υλικού, διότι δεν έχουν την ιδιότητα να παραλαμβάνουν και να ισοκατανέμουν αυτές τις δυνάμεις. Ακόμα παρατηρούμε ότι υπάρχει μια αναλογία του βέλους κάμψης του φορέα ως προς το μονοπάτι των φορτίων. Από αυτό κατανοούμε ότι η βέλτιστη γεωμετρία της κατασκευής μπορεί να μετατέψει τα φορτία σε θλιπτικά μέχρι ένα σημείο παραμόρφωσης του φορέα. Από τη στιγμή που η κατασκευή περάσει το σημείο του βέλους κάμψης (Στο δικό μας πείραμα τα όρια είναι: 0,588% του ύψους της καμάρας ή 1,764cm της βύθισης της για το πρώτο δοκίμιο και αντίστοιχα για το δεύτερο δοκίμιο 0,934% του ύψους της καμάρας ή 2,803cm της βύθισης της), το μονοπάτι σταματάει να μεταφέρει μόνο θλιπτικά φορτία

και παράλληλα αρχίζουν να εμφανίζονται τοπικά οι πρώτες ροπές μέσα από τους εφελκυσμούς και τις κάμψεις. Από αυτό το σημείο και έπειτα αναμένεται η κατάρρευση του φορέα μόλις το υλικό έρθει στο όριο ελαστικότητας του υλικού.

Τα τελικά αποτελέσματα των φορτίσεων του φορέα σε σύγκριση με αυτά των δοκιμίων κατά τη διαδικασία ελέγχου του υλικού μας αποδεικνύουν το ίδιο. Πιο συγκεκριμένα οι δύο φορείς έσπασαν όταν δημιουργήθηκαν κανονίσεις φορτίου 22,53kN για το πρώτο δοκίμιο και φορτίου 20,73 kN για το δεύτερο δοκίμιο. Η αντοχή των κυβικών δοκιμίων σε θλίψη ήταν σε μέσο όρο 90 kN, κάτι που σημαίνει ότι οι δικοί μας φορείς με μόλις πάχος 0,8 cm έφτασε περίπου στο 24,03% της θλιπτικής αντοχής των κυβικών δοκιμίων, δηλαδή του υλικού που χρησιμοποιήσαμε και εμείς στις κατασκευές μας



Εικόνα 57. Αποτελέσματα πειράματος δοκιμίου CEM ARCH 1

Εικόνα 58. Αποτελέσματα πειράματος δοκιμίου CEM ARCH 1

Εικόνα 59. Αποτελέσματα πειράματος δοκιμίου CEM ARCH 2

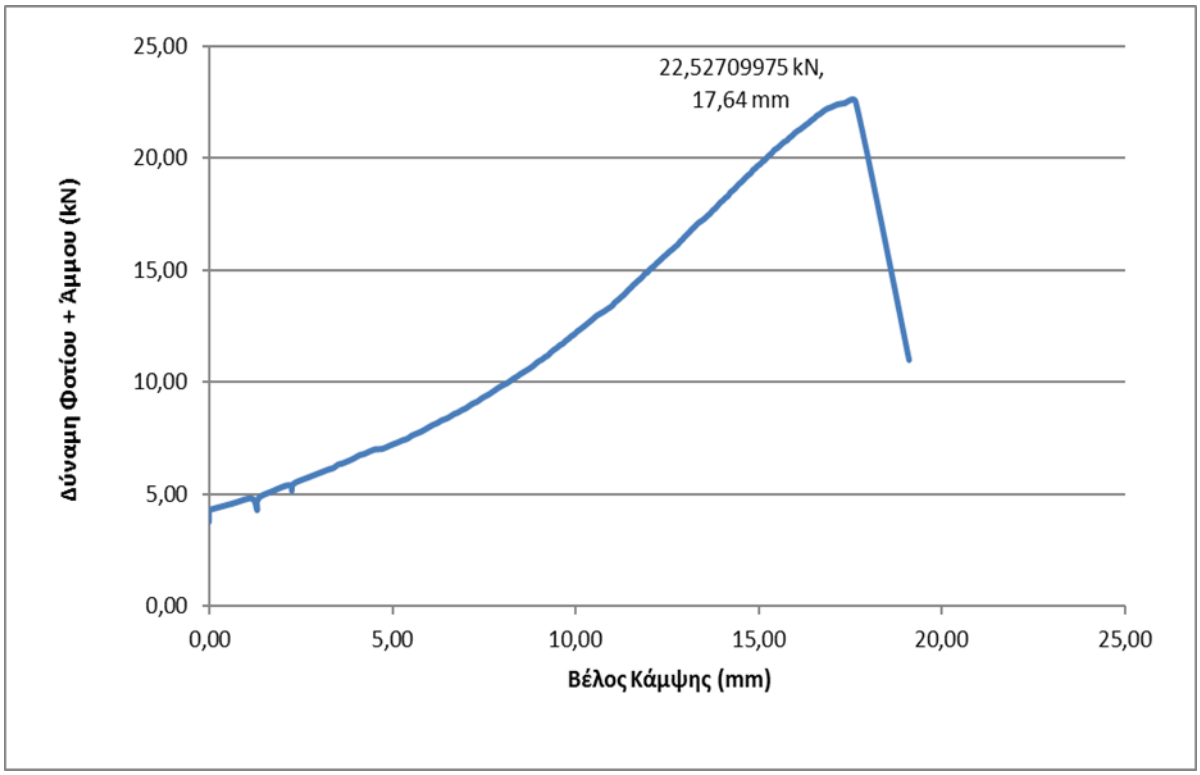
CEM/ARCH 1:		Αρχικό Ύψος L:300mm, Ακτίνα:350mm	
Disp (mm)	Load (kN)	Φορτίο + Άμμο (kN)=Laoad+0,015*9,80665	Elapsed time
0	3,78	3,92709975	00:21,3
0	3,65	3,79709975	00:21,8
0	4,12	4,26709975	00:22,3
0	4,12	4,26709975	00:22,8
0	4,16	4,30709975	00:23,2
0,04	4,18	4,32709975	00:23,7
0,62	4,44	4,58709975	00:24,2
1,17	4,67	4,81709975	00:24,7
1,31	4,16	4,30709975	00:25,2
1,31	4,54	4,68709975	00:25,7
1,42	4,78	4,92709975	00:26,1
1,74	5,01	5,15709975	00:26,6
2,1	5,25	5,39709975	00:27,1
2,25	5,25	5,39709975	00:27,6
2,26	5,1	5,24709975	00:28,1
2,26	5,03	5,17709975	00:28,6
2,27	5,25	5,39709975	00:29,1
2,35	5,38	5,52709975	00:29,5
2,49	5,48	5,62709975	00:30,0
2,73	5,63	5,77709975	00:30,5
2,96	5,78	5,92709975	00:31,0
3,14	5,89	6,03709975	00:31,5
3,26	5,97	6,11709975	00:32,0
3,4	6,04	6,18709975	00:32,5
3,52	6,19	6,33709975	00:32,9
3,62	6,23	6,37709975	00:33,4
3,79	6,34	6,48709975	00:33,9
3,95	6,46	6,60709975	00:34,4
4,11	6,61	6,75709975	00:34,9
4,23	6,66	6,80709975	00:35,3
4,39	6,78	6,92709975	00:35,8
4,54	6,87	7,01709975	00:36,3
4,73	6,89	7,03709975	00:36,8
4,94	7,04	7,18709975	00:37,3
5,14	7,17	7,31709975	00:37,8
5,28	7,27	7,41709975	00:38,3
5,41	7,34	7,48709975	00:38,8
5,52	7,47	7,61709975	00:39,2
5,66	7,57	7,71709975	00:39,7
5,79	7,66	7,80709975	00:40,2
5,88	7,74	7,88709975	00:40,7
5,99	7,85	7,99709975	00:41,2

6,11	7,96	8,10709975	00:41,6
6,23	8,04	8,18709975	00:42,1
6,33	8,15	8,29709975	00:42,6
6,46	8,23	8,37709975	00:43,1
6,57	8,32	8,46709975	00:43,6
6,69	8,45	8,59709975	00:44,1
6,79	8,51	8,65709975	00:44,6
6,9	8,62	8,76709975	00:45,0
7,01	8,7	8,84709975	00:45,5
7,12	8,83	8,97709975	00:46,0
7,21	8,92	9,06709975	00:46,5
7,32	9	9,14709975	00:47,0
7,43	9,13	9,27709975	00:47,5
7,52	9,22	9,36709975	00:47,9
7,64	9,32	9,46709975	00:48,4
7,75	9,45	9,59709975	00:48,9
7,85	9,56	9,70709975	00:49,4
7,92	9,64	9,78709975	00:49,9
8,02	9,73	9,87709975	00:50,4
8,12	9,81	9,95709975	00:50,8
8,22	9,92	10,06709975	00:51,3
8,31	10,03	10,17709975	00:51,8
8,4	10,11	10,25709975	00:52,3
8,49	10,22	10,36709975	00:52,8
8,59	10,32	10,46709975	00:53,3
8,66	10,39	10,53709975	00:53,8
8,76	10,49	10,63709975	00:54,3
8,84	10,58	10,72709975	00:54,7
8,91	10,69	10,83709975	00:55,2
8,99	10,79	10,93709975	00:55,7
9,09	10,88	11,02709975	00:56,2
9,17	10,99	11,13709975	00:56,7
9,24	11,05	11,19709975	00:57,2
9,33	11,2	11,34709975	00:57,6
9,41	11,31	11,45709975	00:58,1
9,49	11,39	11,53709975	00:58,6
9,56	11,5	11,64709975	00:59,1
9,65	11,58	11,72709975	00:59,6
9,73	11,71	11,85709975	01:00,1
9,81	11,8	11,94709975	01:00,5
9,87	11,9	12,04709975	01:01,0
9,96	11,99	12,13709975	01:01,5
10,04	12,12	12,26709975	01:02,0
10,11	12,2	12,34709975	01:02,5
10,18	12,29	12,43709975	01:03,0

10,26	12,39	12,53709975	01:03,5
10,34	12,5	12,64709975	01:03,9
10,41	12,59	12,73709975	01:04,4
10,48	12,69	12,83709975	01:04,9
10,57	12,82	12,96709975	01:05,4
10,72	12,97	13,11709975	01:05,9
10,79	13,03	13,17709975	01:06,4
10,86	13,12	13,26709975	01:06,8
10,94	13,2	13,34709975	01:07,3
11,01	13,29	13,43709975	01:07,8
11,06	13,4	13,54709975	01:08,3
11,13	13,5	13,64709975	01:08,8
11,2	13,59	13,73709975	01:09,3
11,25	13,67	13,81709975	01:09,8
11,32	13,76	13,90709975	01:10,2
11,39	13,89	14,03709975	01:10,7
11,45	13,99	14,13709975	01:11,2
11,51	14,08	14,22709975	01:11,7
11,57	14,19	14,33709975	01:12,2
11,64	14,29	14,43709975	01:12,6
11,71	14,4	14,54709975	01:13,1
11,76	14,46	14,60709975	01:13,6
11,83	14,57	14,71709975	01:14,1
11,89	14,7	14,84709975	01:14,6
11,96	14,76	14,90709975	01:15,1
12,01	14,87	15,01709975	01:15,6
12,08	14,97	15,11709975	01:16,0
12,15	15,06	15,20709975	01:16,5
12,21	15,17	15,31709975	01:17,0
12,27	15,25	15,39709975	01:17,5
12,34	15,36	15,50709975	01:18,0
12,41	15,47	15,61709975	01:18,5
12,46	15,53	15,67709975	01:19,0
12,53	15,64	15,78709975	01:19,4
12,6	15,74	15,88709975	01:19,9
12,67	15,83	15,97709975	01:20,4
12,72	15,91	16,05709975	01:20,9
12,79	16	16,14709975	01:21,4
12,86	16,15	16,29709975	01:21,9
12,92	16,23	16,37709975	01:22,3
12,97	16,34	16,48709975	01:22,8
13,04	16,45	16,59709975	01:23,3
13,11	16,57	16,71709975	01:23,8
13,16	16,66	16,80709975	01:24,3
13,23	16,77	16,91709975	01:24,8

13,29	16,87	17,01709975	01:25,3
13,36	16,98	17,12709975	01:25,7
13,42	17,04	17,18709975	01:26,2
13,48	17,11	17,25709975	01:26,7
13,55	17,21	17,35709975	01:27,2
13,62	17,32	17,46709975	01:27,7
13,67	17,38	17,52709975	01:28,1
13,73	17,51	17,65709975	01:28,6
13,8	17,6	17,74709975	01:29,1
13,86	17,7	17,84709975	01:29,6
13,91	17,81	17,95709975	01:30,1
13,98	17,92	18,06709975	01:30,6
14,04	18	18,14709975	01:31,1
14,09	18,09	18,23709975	01:31,5
14,16	18,17	18,31709975	01:32,0
14,22	18,32	18,46709975	01:32,5
14,28	18,41	18,55709975	01:33,0
14,33	18,47	18,61709975	01:33,5
14,4	18,6	18,74709975	01:34,0
14,46	18,71	18,85709975	01:34,5
14,52	18,79	18,93709975	01:34,9
14,58	18,88	19,02709975	01:35,4
14,65	19,01	19,15709975	01:35,9
14,72	19,11	19,25709975	01:36,4
14,79	19,2	19,34709975	01:36,9
14,84	19,33	19,47709975	01:37,4
14,91	19,41	19,55709975	01:37,8
14,97	19,52	19,66709975	01:38,3
15,03	19,58	19,72709975	01:38,8
15,09	19,69	19,83709975	01:39,3
15,16	19,77	19,91709975	01:39,8
15,23	19,9	20,04709975	01:40,3
15,29	19,99	20,13709975	01:40,8
15,36	20,09	20,23709975	01:41,2
15,42	20,22	20,36709975	01:41,7
15,49	20,29	20,43709975	01:42,2
15,55	20,37	20,51709975	01:42,7
15,62	20,48	20,62709975	01:43,2
15,69	20,58	20,72709975	01:43,7
15,77	20,65	20,79709975	01:44,1
15,83	20,76	20,90709975	01:44,6
15,91	20,86	21,00709975	01:45,1
15,99	20,99	21,13709975	01:45,6
16,06	21,08	21,22709975	01:46,1
16,13	21,14	21,28709975	01:46,6

16,21	21,25	21,39709975	01:47,0
16,29	21,35	21,49709975	01:47,5
16,35	21,42	21,56709975	01:48,0
16,42	21,52	21,66709975	01:48,5
16,51	21,63	21,77709975	01:49,0
16,59	21,76	21,90709975	01:49,5
16,66	21,82	21,96709975	01:50,0
16,76	21,95	22,09709975	01:50,4
16,86	22,06	22,20709975	01:50,9
16,99	22,14	22,28709975	01:51,4
17,14	22,25	22,39709975	01:51,9
17,35	22,31	22,45709975	01:52,4
17,64	**22,38**	**22,52709975**	**01:52,9**
19,1	10,86	11,00709975	01:53,3



Εικόνα 60. Διάγραμμα CEM_ARCH_1 δύναμης φορτίου + άμμου (kN) προς βέλος κάμψης (mm)

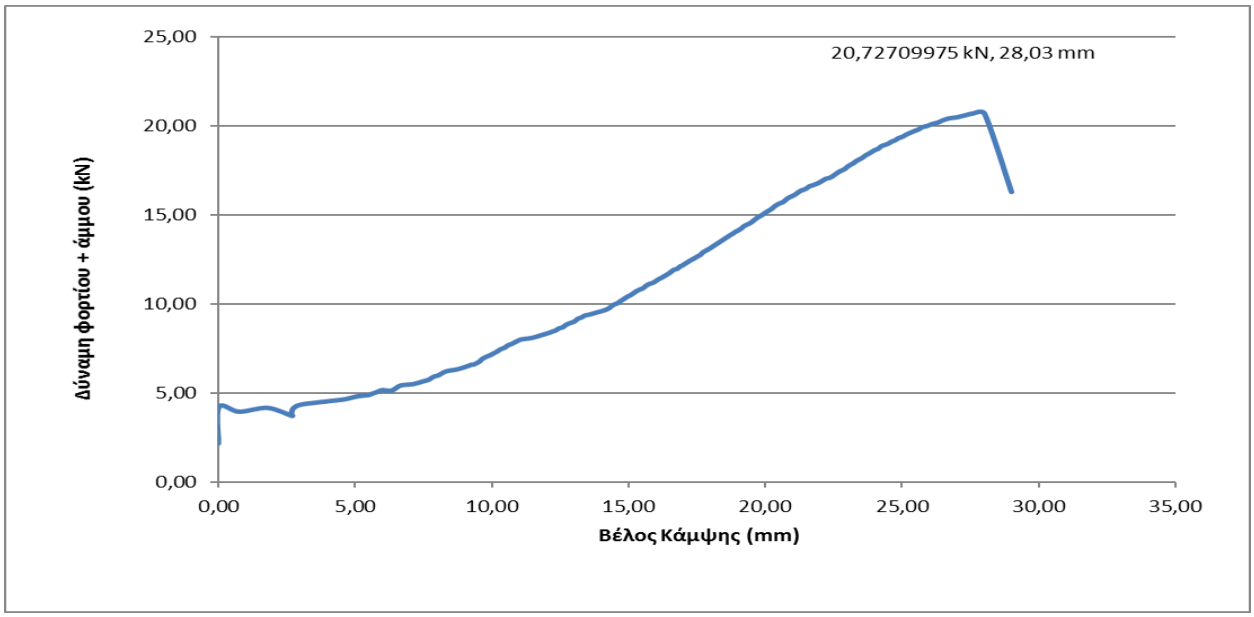
CEM/ARCH 2: Αρχηκό Ύψος L:300mm, Ακτίνα:350mm			
Disp (mm)	Load (kN)	Φορτίο + Άμμο (kN)=Laoad+0,015*9,80665	Elapsed time
0	2,05	2,19709975	00:15,0
0	2,07	2,21709975	00:15,5
0	2,07	2,21709975	00:16,0
0	2,07	2,21709975	00:16,5
0	2,05	2,19709975	00:16,9
0	2,07	2,21709975	00:17,4
0	2,03	2,17709975	00:17,9
0	2,05	2,19709975	00:18,4
0	2,03	2,17709975	00:18,9
0	2,01	2,15709975	00:19,4
0	2,03	2,17709975	00:19,8
0	2,03	2,17709975	00:20,3
0	2,03	2,17709975	00:20,8
0	2,01	2,15709975	00:21,3
0	2,09	2,23709975	00:21,8
0,02	4,07	4,21709975	00:22,3
0,76	3,8	3,94709975	00:22,8
1,81	4,01	4,15709975	00:23,2
2,7	3,56	3,70709975	00:23,7
2,67	3,67	3,81709975	00:24,2
2,75	4,01	4,15709975	00:24,7
3,03	4,2	4,34709975	00:25,2
3,58	4,31	4,45709975	00:25,7
4,19	4,42	4,56709975	00:26,1
4,63	4,5	4,64709975	00:26,6
5,04	4,65	4,79709975	00:27,1
5,33	4,71	4,85709975	00:27,6
5,51	4,74	4,88709975	00:28,1
5,64	4,82	4,96709975	00:28,6
5,81	4,91	5,05709975	00:29,1
5,99	5,01	5,15709975	00:29,5
6,34	4,99	5,13709975	00:30,0
6,66	5,27	5,41709975	00:30,5
7,12	5,35	5,49709975	00:31,0
7,47	5,5	5,64709975	00:31,5
7,68	5,59	5,73709975	00:32,0
7,77	5,67	5,81709975	00:32,5
7,9	5,78	5,92709975	00:32,9
8,04	5,84	5,98709975	00:33,4

8,17	5,95	6,09709975	00:33,9
8,35	6,08	6,22709975	00:34,4
8,76	6,19	6,33709975	00:34,9
9,11	6,36	6,50709975	00:35,3
9,25	6,44	6,58709975	00:35,8
9,35	6,46	6,60709975	00:36,3
9,45	6,53	6,67709975	00:36,8
9,56	6,63	6,77709975	00:37,3
9,66	6,78	6,92709975	00:37,8
9,8	6,89	7,03709975	00:38,3
9,95	6,98	7,12709975	00:38,8
10,09	7,1	7,24709975	00:39,2
10,2	7,19	7,33709975	00:39,7
10,33	7,32	7,46709975	00:40,2
10,47	7,4	7,54709975	00:40,7
10,59	7,53	7,67709975	00:41,2
10,74	7,62	7,76709975	00:41,6
10,89	7,74	7,88709975	00:42,1
11,04	7,85	7,99709975	00:42,6
11,18	7,89	8,03709975	00:43,1
11,49	7,96	8,10709975	00:43,6
11,91	8,15	8,29709975	00:44,1
12,14	8,26	8,40709975	00:44,6
12,24	8,32	8,46709975	00:45,0
12,35	8,38	8,52709975	00:45,5
12,46	8,49	8,63709975	00:46,0
12,6	8,55	8,69709975	00:46,5
12,71	8,68	8,82709975	00:47,0
12,87	8,79	8,93709975	00:47,5
13,02	8,87	9,01709975	00:47,9
13,14	9,02	9,16709975	00:48,4
13,29	9,11	9,25709975	00:48,9
13,42	9,22	9,36709975	00:49,4
13,56	9,26	9,40709975	00:49,9
13,86	9,39	9,53709975	00:50,4
14,09	9,49	9,63709975	00:50,8
14,21	9,56	9,70709975	00:51,3
14,31	9,64	9,78709975	00:51,8
14,39	9,75	9,89709975	00:52,3
14,51	9,85	9,99709975	00:52,8
14,62	9,92	10,06709975	00:53,3
14,74	10,05	10,19709975	00:53,8
14,84	10,15	10,29709975	00:54,3
14,95	10,26	10,40709975	00:54,7
15,07	10,35	10,49709975	00:55,2

15,17	10,45	10,59709975	00:55,7
15,29	10,58	10,72709975	00:56,2
15,41	10,67	10,81709975	00:56,7
15,54	10,75	10,89709975	00:57,2
15,64	10,88	11,02709975	00:57,6
15,76	10,99	11,13709975	00:58,1
15,89	11,05	11,19709975	00:58,6
16,01	11,16	11,30709975	00:59,1
16,11	11,26	11,40709975	00:59,6
16,23	11,35	11,49709975	01:00,1
16,34	11,45	11,59709975	01:00,5
16,46	11,56	11,70709975	01:01,0
16,56	11,67	11,81709975	01:01,5
16,68	11,8	11,94709975	01:02,0
16,79	11,84	11,98709975	01:02,5
16,89	11,97	12,11709975	01:03,0
17	12,05	12,19709975	01:03,5
17,11	12,16	12,30709975	01:03,9
17,22	12,27	12,41709975	01:04,4
17,31	12,35	12,49709975	01:04,9
17,42	12,44	12,58709975	01:05,4
17,53	12,54	12,68709975	01:05,9
17,64	12,63	12,77709975	01:06,4
17,72	12,76	12,90709975	01:06,8
17,83	12,86	13,00709975	01:07,3
17,94	12,95	13,09709975	01:07,8
18,04	13,05	13,19709975	01:08,3
18,13	13,14	13,28709975	01:08,8
18,24	13,25	13,39709975	01:09,3
18,34	13,35	13,49709975	01:09,8
18,43	13,44	13,58709975	01:10,2
18,54	13,55	13,69709975	01:10,7
18,64	13,65	13,79709975	01:11,2
18,73	13,74	13,88709975	01:11,7
18,82	13,82	13,96709975	01:12,2
18,92	13,93	14,07709975	01:12,6
19,03	14,01	14,15709975	01:13,1
19,14	14,12	14,26709975	01:13,6
19,22	14,23	14,37709975	01:14,1
19,34	14,33	14,47709975	01:14,6
19,44	14,4	14,54709975	01:15,1
19,56	14,53	14,67709975	01:15,6
19,64	14,63	14,77709975	01:16,0
19,74	14,74	14,88709975	01:16,5
19,85	14,83	14,97709975	01:17,0

19,93	14,91	15,05709975	01:17,5
20,03	15,02	15,16709975	01:18,0
20,14	15,12	15,26709975	01:18,5
20,24	15,21	15,35709975	01:19,0
20,32	15,32	15,46709975	01:19,4
20,43	15,44	15,58709975	01:19,9
20,54	15,53	15,67709975	01:20,4
20,65	15,59	15,73709975	01:20,9
20,74	15,7	15,84709975	01:21,4
20,85	15,83	15,97709975	01:21,9
20,96	15,91	16,05709975	01:22,3
21,08	16	16,14709975	01:22,8
21,17	16,1	16,24709975	01:23,3
21,3	16,23	16,37709975	01:23,8
21,42	16,3	16,44709975	01:24,3
21,51	16,36	16,50709975	01:24,8
21,63	16,49	16,63709975	01:25,3
21,76	16,55	16,69709975	01:25,7
21,99	16,7	16,84709975	01:26,2
22,11	16,81	16,95709975	01:26,7
22,24	16,92	17,06709975	01:27,2
22,36	16,96	17,10709975	01:27,7
22,48	17,06	17,20709975	01:28,1
22,58	17,17	17,31709975	01:28,6
22,7	17,3	17,44709975	01:29,1
22,81	17,38	17,52709975	01:29,6
22,93	17,47	17,61709975	01:30,1
23,02	17,6	17,74709975	01:30,6
23,13	17,7	17,84709975	01:31,1
23,24	17,79	17,93709975	01:31,5
23,33	17,9	18,04709975	01:32,0
23,45	18	18,14709975	01:32,5
23,56	18,09	18,23709975	01:33,0
23,67	18,22	18,36709975	01:33,5
23,77	18,3	18,44709975	01:34,0
23,89	18,41	18,55709975	01:34,5
24,01	18,52	18,66709975	01:34,9
24,14	18,6	18,74709975	01:35,4
24,24	18,73	18,87709975	01:35,9
24,37	18,81	18,95709975	01:36,4
24,5	18,88	19,02709975	01:36,9
24,64	19,01	19,15709975	01:37,4
24,75	19,07	19,21709975	01:37,8
24,89	19,2	19,34709975	01:38,3
25,04	19,28	19,42709975	01:38,8

25,16	19,39	19,53709975	01:39,3
25,31	19,5	19,64709975	01:39,8
25,47	19,6	19,74709975	01:40,3
25,62	19,69	19,83709975	01:40,8
25,76	19,82	19,96709975	01:41,2
25,93	19,88	20,02709975	01:41,7
26,11	19,99	20,13709975	01:42,2
26,32	20,07	20,21709975	01:42,7
26,5	20,2	20,34709975	01:43,2
26,74	20,31	20,45709975	01:43,7
27,01	20,37	20,51709975	01:44,1
27,32	20,48	20,62709975	01:44,6
27,6	20,58	20,72709975	01:45,1
28,03	**20,58**	**20,72709975**	**01:45,6**
29,02	16,17	16,31709975	01:46,1



Εικόνα 61. Διάγραμμα CEM_ARCH_2 δύναμης φορτίου + άμμου (kN) προς βέλος κάμψης (mm)

4. Επίλογος

Ξεκινώντας ένα πείραμα ή μία μελέτη στόχος του κάθε ερευνητή είναι η απόδειξη ή μη του ερευνητικού ερωτήματος που έχει θέσει. Μεγάλο ενδιαφέρον στην όλη διαδικασία της μελέτης-έρευνας έχει το τελικό αποτέλεσμα και πιο συγκεκριμένα τα συμπεράσματα που θα εξάγει ο ερευνητής. Πόσο μάλλον όταν πάνω σε αυτά τα αποτελέσματα μπορεί να στηριχθεί ολόκληρη η ερευνητική κοινότητα με στόχο την εξέλιξη και ανάπτυξη νέων τρόπων, τεχνικών, μεθόδων για τη συνεχής ανάπτυξη και εξέλιξη του κλάδου. Ανάλογος ήταν και ο στόχος μας στην παρούσα διατριβή, να καταφέρουμε δηλαδή, μέσω του πειράματος που εφαρμόσαμε, να ανοίξουμε το δρόμο για νέες μελέτες και έρευνες σε έναν τόσο σημαντικό και συνεχώς εξελισσόμενο κλάδο, όπως αυτός της κατασκευαστικής. Πιο συγκεκριμένα κατασκευάσαμε δύο άοπλους φορείς (παραβολικές καμάρες) από τσιμεντοκονίαμα, με ελάχιστο πάχος διατομής και με «βέλτιστη» γεωμετρία σχήματος. Πρωταρχικός μας στόχος ήταν η εύρεση της ιδανικής γεωμετρίας σχήματος των δοκιμίων μας, η οποία θα μπορούσε να διαχειριστεί τα φορτία σε κάθε σημείο των επιφανειών τους με αποτέλεσμα τη θεμελίωσή τους και της μη κατάρρευσή τους από το ίδιο τους το βάρος. Αφού πραγματοποιήσαμε με επιτυχία τον πρώτο μας στόχο, δευτερεύων στόχος μας και ιδιαίτερα ενδιαφέρον ήταν η μεταφορά μεγάλων φορτίων στους φορείς μας. Καταφέραμε με αυτό τον τρόπο να αποδείξουμε ότι μία κατασκευή μπορεί να φέρει τα όρια αντοχής της πολύ κοντά στα όρια αντοχής του υλικού. Ζώντας σε ένα περιβάλλον στο οποίο οι πρώτες ύλες, οι οποίες είναι απαραίτητες για εμάς, στερεύουν, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ζήτηση για τέτοια υλικά, κρίνεται απαραίτητο και αναγκαίο η εύρεση εναλλακτικότερων επιλογών σπατάλης ενέργειας και πόρων (πρώτες ύλες). Με αυτό τον τρόπο θα καταφέρουμε να πετύχουμε μια υγιή συμβίωση στον πλανήτη μας, χωρίς να ζούμε εις βάρος του, «καταπονώντας τον» και φτάνοντας τον στην καταστροφή. Μέσω του κατασκευαστικού οπτιμισμού ή αλλιώς της κατασκευαστικής βελτιστοποίησης, μπορούμε να θέσουμε τα πρώτα θεμέλια για την εξοικονόμηση πόρων. Χρησιμοποιώντας, δηλαδή ελάχιστα υλικά και το κατάλληλο σχήμα-γεωμετρία μπορούμε να προβούμε στη δημιουργία διάφορων κατασκευών που να πληρούν τις ανάγκες μας. Με τη μελέτη και έρευνα του συγκεκριμένου πειράματος, προσπαθήσαμε και εμείς να συνδράμουμε στην απόδειξη ότι μέσω της βέλτιστης γεωμετρίας σχήματος αλλά και της επιλογής κατάλληλου υλικού, μπορούμε να μειώσουμε τα υλικά που χρειάζονται για οποιαδήποτε κατασκευή. Είναι απαραίτητο το πείραμα αυτό να εξελιχθεί και να ερευνηθεί και σε άλλα πεδία, όπως τα διαφορετικά και εναλλακτικά σχήματα, καθώς επίσης να πραγματοποιηθεί αντίστοιχη μελέτη με διαφορετικά υλικά, διαφορετικές διατομές και ποικίλες φορτίσεις. Η εποχή μας απαιτεί τη συνεχής έρευνα, μελέτη και εύρεση εναλλακτικών τρόπων-μεθόδων σε όλους τους τομείς και πόσο μάλλον στον κατασκευαστικό τομέα.

Summary

Starting an experiment or a study, the goal of any researcher is to prove or not the research question, which has been put. What has a great interest in the whole process of the study-research is the final result and in particular the conclusions will be exported by the researcher. Especially when the entire research community can be based on these results for the development and evolution of new ways, techniques, methods for the continuous growth and development of the industry. Our goal was similar in this thesis, ie to achieve through the experiment we implemented, to open the way for new studies and research in such an important and constantly evolving industry, such as that of construction. More specifically, we constructed two unarmed vectors (parabolic arches) of cement mortar with a minimum cross-sectional thickness and a "best" shaped geometry. Our primary goal was to find our ideal specimens shaped geometry, which could manage the loads at any point of their surfaces resulting in the foundation and not their collapse of their own weight. After we had successfully achieved our first goal, our secondary and particularly interesting target was the transportation of large loads on our vectors. We were able in this way to prove that a structure can bear its endurance limits very close to the material endurance limits. Living in an environment in which the raw materials, which are essential for us, dry up, combined with the growing demand for such materials, it is essential and necessary to find more alternative energy wastage options and resources (raw materials). In this way, we will manage to achieve a healthy coexistence on our planet and not live against it, by harassing it and leading it to the disaster. Through the Structural optimism or otherwise Structural Optimization, we can lay the first foundations for savings. Using ie a minimum of materials and the appropriate shape-geometry, we can create various structures to meet our needs. Through the study and research of the particular experiment, we tried to assist in proving that through optimal shape geometry and the selection of suitable material, we can reduce the material needed for any construction. This experiment is necessary to be developed and investigated in other fields too, such as different alternative shapes, as well as a corresponding study should be carried out with different materials, different cross-sections and varying loads. Our time requires continuous research, study and finding of alternative ways-methods in all areas and mainly in construction sector.

Βιβλιογραφία

Έντυπη Βιβλιογραφία

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.

Πλεύρη, Ε. Ε., 2001. Βέλτιστος σχεδιασμός κατασκευών με πολλαπλά κριτήρια. [Ηλεκτρονικό].

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

Huerta, S., 2006. Structural Design in the Work of Gaudi , Sydney: University of Sydney.

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

Sigmund, O., 2003. Topology Optimization, State-of-the-Art and Future Perspectives, Copenhagen: Technical University of Denmark (DTU).

P.Block, J. O., 2007. Thrust Network Analysis : A new Method for three dimentional equilibrium Journal of the International Accosiation for Shell and Spatial Structures

Pagonakis, Dimitrios, May 2015. Discrete and Continuous Optimization of Structural Forms, Boston, Massachusets: MIT.

Lewis, W. J., 2016. Mathematical model of a moment-less arch, s.l.: rspa.royalsocietypublishing.org, Lewis, W. J..

Rafael Gomez-Moriana, 2016. Gaudi’s Hanging Chain Models : Parametric design

Peter W. Christensen, 2010. An Introduction to Structural Optimization (Solid Mechanics and Its Applications)

Μπούρας Χ. (1994). Ιστορία Αρχιτεκτονικής τόμος Β’. Εκδοτικός οίκος Μέλισσα.

Μπούρας Χ. (1991). Ιστορία Αρχιτεκτονικής τόμος Α’. Εκδόσεις Συμμετρία.

Santiago Huerta. (2001). Mechanics of masonry vaults, the equilibrium approach. Universidad Politécnica de Madrid.

Huerta S. (2006). Geometry and equilibrium: The gothic theory of structural design. Publication on the journal “The Structural Engineer” on 17 January.

Becchi A. Corradi M. Foce F. Pedemonte O. (2003). Essays on the History of Mechanics. Birkhauser Verlag AG.

Huerta S. (2006). Structural Design in the Work of Gaudi. Universidad Politécnica de Madrid. 119 [19]

Huerta S. (2005). Thomas Young's theory of the arch, Essays in the history of the theory of structures in honour of Jacques Heyman. Universidad Politécnica de Madrid.

Διαδικτυακή Βιβλιογραφία

http://www.greekarchitects.gr

http://lacanea.files.wordpress.com/2008/02/air-photo1.jpg

http://www.block.arch.ethz.ch/

el.wikipedia.org/αψίδα.