

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ
ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΣΤΕΓΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΕ ΜΟΡΦΗ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΣΤΡΕΜΜΕΝΟΥ ΥΠΕΡΒΟΛΙΚΟΥ
ΣΥΝΗΜΙΤΟΝΟΥ ΣΤΟ ΧΩΡΟ

Ευαγγελία Κασσωτάκη

Λεμεσός 2011

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ
ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΣΤΕΓΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΕ ΜΟΡΦΗ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΣΤΡΕΜΜΕΝΟΥ ΥΠΕΡΒΟΛΙΚΟΥ
ΣΥΝΗΜΙΤΟΝΟΥ ΣΤΟ ΧΩΡΟ

Ευαγγελία Κασσωτάκη
Επιβλέπουσα καθηγήτρια

Δρ. Έλια Ταντελέ

Λεμεσός 2011

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Ευαγγελία Κασσωτάκη, 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επιβλέπουσα καθηγήτρια της εργασίας μου κυρία Έλια Ταντελέ, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου αυτή την εργασία, για την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκειά της και κυρίως για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ενδιαφέρον αντικείμενο. Επίσης ευχαριστώ τον καθηγητή κύριο Ευσταθιάδη για τις παρατηρήσεις και τις υποδείξεις τους στη βελτίωση της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρακάτω διπλωματική μελέτη παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για τη δημιουργία μιας μεταλλικής στέγης μορφής σχήματος που αποτελεί τμήμα του περιστρεμμένου υπερβολικού σφηνοειδούς στο χώρο. Επίσης περιγράφεται η μεθοδολογία που απαιτείται για την διαδικασία μελέτης των απαραίτητων ελέγχων που οφείλουν να πραγματοποιούνται κατά το στάδιο της ανάλυσης της δεδομένης κατασκευής. Τα συμπεράσματα που εξάγονται αφορούν τις παραπάνω διαδικασίες μελέτης και αποτελούν τόσο κρίσεις των θεωρητικών δεδομένων όσο και σημεία που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής για την επεξεργασία των προαναφερθέντων στοιχείων.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iv
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	v
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	viii
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	x
ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ.....	xi
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	xii
1. Βιβλιογραφική έρευνα	1
1.1 Επιλογή κατάλληλου σχήματος για δημιουργικό σχεδιασμό.....	1
1.2 Καμπύλες και τόξα	4
1.3 Γνωστές εφαρμογές	19
1.3.1 Antonio Gaudi	19
1.3.2 Καλώδια.....	22
1.4 Είδη στεγών	24
1.5 Μεταλλικές κατασκευές σε στέγες.....	32
1.5.1 Παράδειγμα μεταλλικής στέγης με καμπύλη μορφή μακριού ανοίγματος.....	38
1.5.2 Κτίριο στην Ιαπωνία	42
1.6 Συνδεσμολογίες και ενισχύσεις χάλυβα.....	44
1.7 Αρχική διαστασιολόγηση και μελέτη στεγών	46
1.8 Κοστολόγηση	53
1.9 Διάβρωση μεταλλικών κατασκευών	54
2. Προτεινόμενη λύση.....	55
2.1 Περιγραφή λύσης	55
2.2 Χρήση Maple13.....	58

2.3	Μεθοδολογία Ανάλυσης Κατασκευής	59
3.	Προτάσεις για περαιτέρω εργασία	66
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	68
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	71

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Μεθοδολογία γεωμετρικής λύσης	10
Πίνακας 2: Ενέργεια στα διαφορετικά συστήματα οροφής	27

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1: Αλυσίδα αναλογίας Hooke	5
Εικόνα 2: Επεξηγηματικό σχήμα της καμπύλης του catenary	8
Εικόνα 3: Η δράση των δυνάμεων στο σημείο sag του catenary.	11
Εικόνα 4: Συνιστώσες και δυνάμεις της αλυσίδας υπό συνθήκες χωρίς ροή.....	13
Εικόνα 5: Το κανονικοποιημένο σχοινί της παραμέτρου a ως συνάρτηση του μήκους παρουσιάζει το a / x_1 ως συνάρτηση του L / x_1	13
Εικόνα 6: : Παράλληλες ακτίνες πάνω από την εκθετική καμπύλη	14
Εικόνα 7: Εξελιγμένη του αλυσοειδούς	14
Εικόνα 8: Η evolute του αλυσοειδούς είναι επίσης η tractrix	14
Εικόνα 9: Η ακτινική του αλυσοειδούς	15
Εικόνα 10: Το κατανοειδές.....	15
Εικόνα 11: Αψιδωτές μορφές.....	17
Εικόνα 12: Μοντέλο Gaudi	17
Εικόνα 13: Μοντέλο Colonia Guel.....	18
Εικόνα 14: Στέγη από πλακάκια.....	23
Εικόνα 15: Ξύλινα κεραμίδια	25
Εικόνα 16: Κελία από SMB	26
Εικόνα 17: Τομή πλάκας RC.....	27
Εικόνα 18: Σχεδιασμός φορτίου χιονιού σε οροφή δυο επιπέδων	32
Εικόνα 19: Απεικόνιση του πολιτιστικού κέντρου.....	34
Εικόνα 20: Μοντέλο	35
Εικόνα 21: Γράφημα ταχύτητας	36
Εικόνα 22: Φάσμα ταχύτητας.....	36

Εικόνα 23: Ορισμένη γωνία στις δοκιμές αεροδυναμικής	36
Εικόνα 24: Παρουσίαση κατασκευής.....	38
Εικόνα 25: Σχηματική απεικόνιση συνδεσμολογίας	41
Εικόνα 26: Προτινόμενη μορφή κτιρίου	41
Εικόνα 27: Catanoid	52
Εικόνα 28: Catanoid	52
Εικόνα 29: Πρόσοψη κτιρίου	53
Εικόνα 30: Πραγματική μορφή δοκού	54
Εικόνα 31: Παράδειγμα βιβλιογραφίας.....	54
Εικόνα 32: Η δοκός της στέγης	55
Εικόνα 33: Πρόσοψη στέγης με διαστάσεις.....	56
Εικόνα 34: Διάγραμμα βυθίσεων	58

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

SMB: σταθεροποιημένα μπλοκ λάσπης

RC: οπλισμένο σκυρόδεμα

FRP: ίνες οπλισμένων πολυμερών

ASD: επιτρεπόμενη ένταση σχεδιασμού

LRFD: αντοχή στο παράγοντα του φορτίου σχεδιασμού

ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ

catenoid: κατανοειδές

catenary: αλυσοειδές

helioscopes: ηλιοσκόπια

chainette: αλυσίδα

radiant: ακτινοβόλο

involute: εξελιγμένη

radial: ακτινική

kampyle of Eudoxus: Καμπύλη του Εύδοξου

minimal surface: ελαχιστική ή ελάχιστη επιφάνεια

suspension shells: κοχύλια αναστολής

basked: καλάθωτές

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική μελέτη αφορά την δημιουργία πρότασης για κατασκευή κτιρίου με μεταλλική στέγη. Η ιδιαιτερότητα του προτεινόμενου κτιρίου έγκειται στη μορφή της προτεινόμενης στέγης. Αυτή προτείνεται να έχει σχηματική μορφή που προσδιορίζεται ως μέρος του περιστρεμμένου υπερβολικού συνημίτονου στο χώρο γύρω από τον οριζόντιο άξονα. Η ιδέα της δημιουργίας ενός τέτοιου σχήματος πηγάζει από τις ιδιότητες του υπερβολικού συνημίτονου οι οποίες θέλουμε να μελετήσουμε αν μπορούν να μας παρέχουν κατασκευαστικά προτερήματα. Η βασική ιδιότητα που θα μας απασχολήσει είναι ότι σαν σχήμα το υπερβολικό συνημίτονο, όπως τεκμηριώνεται στην παρακάτω έρευνα, έχει την ιδιότητα να μπορεί να στηρίξει το ίδιο βάρος του. Κατασκευαστικά αυτό αυτόματα μας παρέχει το βασικό προτέρημα του μη υπολογισμού του βάρους της κατασκευής μας τόσο από πλευρά μελέτης ευστάθειας, όσο και από πλευρά μελέτης κόστους. Αναπτύσσοντας αυτή την ιδιότητα του υπερβολικού συνημίτονου μέσω της περιστροφής του στο χώρο όπως προαναφέρθηκε παίρνουμε σχηματικά το λεγόμενο κατανοειδές το οποίο αναλύεται επίσης στην συνέχεια της μελέτης, τόσο αυτό όσο και οι ιδιότητές του. Προτείνεται λοιπόν η χρησιμοποίηση τμήματος αυτού του σχήματος για τη δημιουργία της στέγης της κατασκευής μας. Η εισήγηση που κάνουμε είναι ότι με τη χρήση του υποκείμενου σχήματος για τη στέγη μας θα μειώσουμε τόσο το κόστος κατασκευής όσο και τη διαδικασία της μελέτης αυτής καθώς η προτεινόμενη μορφή της θα μπορεί εξ' ορισμού ήδη να αντέξει το ίδιο βάρος της κατασκευής. Αυτό που επίσης θα μας απασχολήσει στην παρούσα έρευνα είναι το είδος του υλικού που θα μπορούσε θεωρητικά να ανταποκριθεί καλύτερα σε μια κατασκευή τέτοιου είδους. Πιστεύουμε ότι μια μεταλλική κατασκευή στέγης θα αποτελούσε τη βέλτιστη επιλογή. Για την επιλογή του τύπου της στέγης χρειάζεται να μελετηθούν οι ιδιότητες των μεταλλικών στεγών και των μεταλλικών κατασκευών γενικότερα. Χρειάζεται επίσης να γίνει σύγκριση της κατασκευής της προτεινόμενης στέγης όσον αφορά τη συμπεριφορά της και τη δυνατότητα κατασκευής της από λειτουργική και οικονομική άποψη με συγκριτικά υλικά κατασκευής. Για να διεξαχθεί η παραπάνω διαδικασία για την διεκπεραίωση της πρότασης της υποκείμενης κατασκευής αναμένεται στην παρούσα έρευνα να διεξαχθεί αρχικά θεωρητική μελέτη που θα αφορά πρωτίστως το υπερβολικό συνημίτονο και τις ιδιότητες του καθώς και το προαναφερθέν κατανοειδές σχήμα. Αναμένεται επίσης να αναβρεθεί το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά της μεταλλικές κατασκευές και ειδικότερα τις μεταλλικές στέγες για να μπορέσει να τεκμηριωθεί η υποκείμενη πρόταση της στέγης. Αφού εκπονηθεί

το προτεινόμενο σχήμα της κατασκευής θέλουμε να περιγράψουμε τη διαδικασία διεκπεραίωσης των βασικών ελέγχων που πρέπει να γίνουν για τη μόρφωση της μεταλλικής μας στέγης που διέπουν τις μεταλλικές κατασκευές σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3. Σημειώνεται ότι τόσο η αρχική διαστασιολόγηση τόσο του κτιρίου όσο και της ίδιας της στέγης, η οποία αποτελεί το βασικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας έρευνας, καθώς και η στατική και λειτουργική επεξεργασία αυτής θα γίνουν κυρίως σε θεωρητικό επίπεδο και σε καμία περίπτωση η τελική προτεινόμενη λύση δεν θα μελετηθεί ολοκληρωμένα ώστε να μπορεί κανείς να πει ότι μπορεί να κατασκευάσει την δεδομένη πρόταση στηριζόμενος στο παρακάτω έγγραφο και μόνο. Σκοπός μας είναι να κάνουμε μια πρόταση που στηρίζεται σε μια ιδέα που εν τέλει μπορεί να μην είναι εφαρμόσιμη απόλυτα αλλά όπως θα προσπαθήσουμε να τεκμηριώσουμε έχει θεωρητική βάση και υπόβαθρο, τέτοιο που μπορεί κάποιος με πιο παρατεταμένη έρευνα να τεκμηριώσει πλήρως την κατασκευή αυτής ή ακόμα και να την υλοποιήσει. Αναμφισβήτητα πρακτικά για την δημιουργία μιας τέτοιας κατασκευής αναμένονται πολλαπλά προβλήματα τα οποία επίσης θα αναφερθούν στο έγγραφο που ακολουθεί. Επίσης υπάρχουν προτάσεις για περαιτέρω εργασία για το δεδομένο θέμα οι οποίες θα αναφερθούν στο τέλος της έρευνας. Σημειώνεται ότι για τη τεκμηρίωση της δεδομένης πρότασης θα χρησιμοποιήσουμε μόνο επιστημονικά τεκμηριωμένο υλικό από κατά το δυνατό έγκυρες πηγές και βιβλιογραφικές αναφορές. Τελικός μας στόχος είναι η εκπόνηση μιας πρότασης που θα είναι τεκμηριωμένη θεωρητικά όσο το δυνατόν καλύτερα και θα ανταποκρίνεται στις γνώσεις και το επίπεδο σπουδών που έχουμε λάβει μέχρι τώρα.

1. Βιβλιογραφική έρευνα

1.1 Επιλογή κατάλληλου σχήματος για δημιουργικό σχεδιασμό

Όπως φαίνεται από διάφορα παραδείγματα η ανθρώπινη δημιουργικότητα μπορεί να εμπνέεται για την ενσωμάτωση ιδεών από οποιαδήποτε εξωγενή ή μη πηγή. Έτσι συμβαίνει και στη σύλληψη της αρχικής ιδέας για τη μορφή της κατασκευής ενός οικοδομήματος. [Gross, M. (1995)] Αρμοδιότητα του πολιτικού μηχανικού είναι η υλοποίηση με ευσταθή και πραγματοποιήσιμο τρόπο οποιασδήποτε ιδέας μπορεί να αποτελέσει έναυσμα για τη μορφή του σχήματος μιας κατασκευής.

Η σημασία του σχήματος μιας κατασκευής αποδεικνύεται από την ιστορία αν σκεφτεί κανείς τον Παρθενώνα και τον τεράστιο αριθμό μελετών που έχει γίνει για την μαθηματική ερμηνεία των σχημάτων που διέπουν την κατασκευή και των προτερημάτων που παρέχουν αυτά. Μεγάλος λόγος έχει γίνει για της κολώνες του και το σχήμα τους. Αυτές σχηματικά αποτελούν μια λεπτή παραλλαγή του κυλινδρικού προφίλ, που εμφανίζει εξόγκωμα στο ένα τρίτο περίπου της στήλης καθ' ύψος και μείωση διατομής κοντά στο επάνω μέρος της. Η στήλη αυτή χαρακτηρίστηκε ως ιδανική. Η διόγκωση των κιόνων ήταν ένα από τα οπτικά μέσα βελτίωσης που χρησιμοποιούνταν από τους αρχαίους Έλληνες για την αντιμετώπιση των αντιληπτών ατελειών. Η πρακτική αυτή, η οποία κυμάνθηκε σε βαθμό που υπαγορεύεται από το μέγεθος της προτεινόμενης δομής και του περιβάλλοντος, έφθασε στο αποκορύφωμά της στον Παρθενώνα όπου οι λεπτές καμπύλες και κλίσεις του οριζόντιου καθώς και οι κάθετες γραμμές περιλαμβάνουν την αύξηση των καμπυλών που δίδονται στο στυλοβάτη. Προκειμένου να μεταδώσει την αίσθηση της ζωής καμία από τις πλευρές και τις γραμμές των κολώνων δεν είναι απόλυτη ευθεία αλλά παρουσιάζουν όλες μια κυρτότητα και μια κλίση προς την εσωτερική πλευρά, ώστε να δοθεί σε ολόκληρο το κτίριο μια εμφάνιση μεγαλύτερης αντοχής με κατά το δυνατό πιο "ανάλαφρο" τρόπο. Όλα συνεπαγόταν με μαθηματική ακρίβεια στον προσδιορισμό τόσο της εργασίας όσο και στην εκτέλεσή του έργου η οποία είναι ίσως απaráμιλλη στον κόσμο. [Cox, S.(1992)]

Ο Παρθενώνας λοιπόν αποτελεί ένα λαμπρό παράδειγμα όπου τα μαθηματικά και τα σχήματα που προσδιορίζονται μέσα από αυτά μπορούν να βοηθήσουν στη δημιουργία οικοδομημάτων και να αποτελέσουν πηγή έμπνευσης μορφών. Η χρησιμοποίηση των μαθηματικών ιδιοτήτων των σχημάτων στην κατασκευαστική πραγματικότητα συνέβαινε ήδη όπως φαίνεται από την αρχαία Ελλάδα. Όπως υποστήριζαν τόσο οι αρχαίοι Έλληνες όσο

και αργότερα πολλοί διάσημοι αρχιτέκτονες στην φύση δεν υπάρχουν απόλυτες ευθείες. Αν λοιπόν δεχθούμε το γεγονός πως τα οικοδομήματα της φύσης είναι απόλυτα ευσταθή, θα μπορούσε να ισχυριστεί κάποιος πως οι καμπύλες υπερτερούν της ευθείας κατασκευαστικά. Αυτό είναι το επιχείρημα που χρησιμοποιήθηκε θεωρητικά στην πορεία της ιστορίας για τη δημιουργία οικοδομημάτων που τα μέλη τους ή στοιχεία των μελών τους απέχουν από την ευθεία. Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι πάντα υλοποιήσιμο καθώς οι κανονισμοί ευστάθειας που οφείλουν να διέπουν ένα οικοδόμημα βάσει κανονισμών και βασικών αρχών πολλές φορές έρχονται σε σύγκρουση με τη μορφή που μπορεί να ορίζει ένας υποκείμενος σχεδιασμός μορφής διαφορετικής από την τετριμμένη.

Έτσι δημιουργείται η ιδέα να προβλέψεις από την αρχή την ευστάθεια μιας κατασκευής, όχι επαληθεύοντας εκ του αποτελέσματος ένα ορισμένο σχέδιο, αλλά δίνοντας στο σχέδιό σου από την αρχή ευσταθές σχήμα. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εξασφαλιστεί όπως υποστήριξαν πολλοί μεταξύ των οποίων και ο Antonio Gaudi η ευστάθεια μιας κατασκευής εκ των προτέρων. [*Bendsoe, M. (1989)*]

Γεννιέται λοιπόν το ερώτημα για το ποια σχήματα μπορούν να θεωρηθούν ευσταθή και για το πόσο δυνατή είναι η χρήση αυτών στα οικοδομήματα. Για να απαντήσουμε στο παραπάνω ερώτημα πρέπει να ανατρέξουμε στο ορισμό της ευστάθειας από στατική άποψη. Βάση αυτής μπορούμε να πούμε ότι ευστάθεια στις κατασκευές ορίζεται η αποφυγή κάθε ανατροπής στις κατασκευές. Έτσι για να ελέγξουμε το πότε ένα σχήμα είναι ευσταθές ή όχι πρέπει να ελέγξουμε αν έχει τη δυνατότητα να αντιστέκεται σε οποιαδήποτε δύναμη θα μπορούσε να το ανατρέψει και να διαταράξει την ισορροπία του. Για να ορίσουμε εκτενέστερα την παραπάνω διαπίστωση πρέπει αρχικά να ορίσουμε δυο είδη ροπών που δημιουργούνται σε ένα σώμα υπό συνθήκες άσκησης υποτιθέμενης δύναμης. Τη ροπή ανατροπής και τη ροπή επαναφοράς. Ως ροπή ανατροπής ορίζεται αυτή που τείνει να ανατρέψει το σώμα μας από την αρχική του ισορροπία και έχει μέτρο την τιμή που προκύπτει αν πολλαπλασιάσουμε το μέτρο της υποτιθέμενης δύναμης που ασκείται στο σώμα επί την τιμή της απόστασης από το σημείο άσκησης της δύναμης έως την επιφάνεια που βρίσκεται το σώμα και του προσδίδει κινητική στατικότητα. Αντίστοιχα ροπή επαναφοράς ορίζεται ως η ροπή που έχει μέτρο ίσο με το βάρος του σώματος επί την εκκεντρότητα αυτού και πηγάζει από την μορφολογία του σχήματός μας και την φυσική του τάση προς την ισορροπία. Για να μην έχουμε ανατροπή πρέπει η ροπή επαναφοράς να είναι μεγαλύτερη από τη ροπή ανατροπής. Ο συντελεστής που δείχνει πόσες φορές η ροπή επαναφοράς είναι μεγαλύτερη

από τη ροπή ανατροπής ονομάζεται συντελεστής ασφαλείας. Όταν αυτός ισούται με την μονάδα η ισορροπία μας καλείται ως ευσταθής. [Ταντελέ, E. (2008)]

1.2 Καμπύλες και τόξα

Συνήθως τα απλά τρίγωνα, τα ορθογώνια, τα πεντάγωνα ή οι κύκλοι αποτελούν τις πιο συνηθισμένες μορφές σχημάτων που εμφανίζονται στα οικοδομήματα. Όμως αρκετές φορές συναντάμε και μορφές σχημάτων που περιγράφονται από πιο περίπλοκες μαθηματικές σχέσεις, όπως αυτές των καμπυλών. *[Huylebrouck, D. (2007)]*

Ένας αρχιτέκτονας μπορεί να έχει την πρόθεση να κατασκευάσει μια ορισμένη καμπύλη ή επιφάνεια και να συμπεριλάβει τέτοιες ιδέες στα σχέδιά του, αλλά για στατικούς, τεχνικούς ή διάφορους πρακτικούς λόγους, η τελική πραγματοποίηση μπορεί να μην είναι πάντα εφικτή. Οι όροι που πιο συχνά χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του σχήματος που χρησιμοποιείται ως τόξο στις κατασκευές είναι παραβολή, αλυσοειδές και σταθμισμένο αλυσοειδές. Μια παραβολή, όπως την περιέγραψε ο Galileo είναι το σχήμα της διαδρομής ενός βλήματος όταν επιβληθεί μόνο η αρχική ώθηση μαζί με τη δύναμη της βαρύτητας, υπό συνθήκες έλλειψης αντίστασης του αέρα. Το αλυσοειδές είναι το σχήμα που αναλαμβάνει μια κρεμαστή αλυσίδα ή μια ευέλικτη κλωστή ομοιόμορφης πυκνότητας υπό τις ίδιες συνθήκες. Το σταθμισμένο αλυσοειδές είναι το σχήμα που αναλαμβάνει μια κρεμαστή αλυσίδα της οποίας οι δεσμοί ποικίλουν σε μέγεθος ή βάρος. *[Osserman, R. (2010)]*

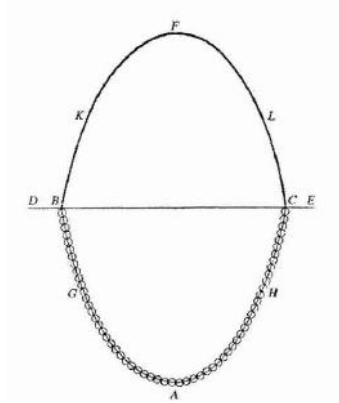
Πολλές φορές πηγή έμπνευσης για τη μορφή μιας κατασκευής αποτελούν καμπύλες ή σπείρες που βρίσκονται στη φύση, όπως παραδείγματος χάριν ο Victor Horta εμπνεύστηκε από τις σπείρες των φυτών για τη δημιουργία της στέγης της οικίας του. *[Huerta, S.(2006)]* Οποιαδήποτε μορφή καμπύλης που μπορεί να περιγραφεί με μαθηματική σχέση δεν σημαίνει ότι αυτόματα μπορεί και να υποστηριχθεί σαν μέρος μιας κατασκευής. Ανασταλτικοί παράγοντες μπορούν να αποτελέσουν λόγοι είτε τεχνικοί είτε λειτουργικοί.

Παρά όλα αυτά οι τοξωτές δομές είναι μια από τις παλαιότερες μορφές που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές μηχανικών και συνεχίζουν να βρίσκουν νέες εφαρμογές σε πολλούς διαφορετικούς τομείς. Σε συγκεκριμένη μορφή και κάτω από κατάλληλες συνθήκες οι μορφές τόξων, στη ουσία δηλαδή καμπυλών, μπορούν να αποτελέσουν τη βέλτιστη λύση σε προβλήματα μηχανικής. Η πιο διαδεδομένη χρήση αυτών βρίσκεται αναμφισβήτητα στην κατασκευή γεφυρών. Η τέχνη της τοξωτής γέφυρας χρησιμοποιείται εδώ και περίπου δύο χιλιάδες χρόνια και ίσως εμπνέεται από υπάρχουσες φυσικές αψιδωτές δομές. Οι Ρωμαίοι ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν τέτοιες δομές στις γέφυρές τους και πολλά παραδείγματα αυτών επιζούν μέχρι και σήμερα. Η εφεύρεση του οπλισμένου

σκυροδέματος έφερε πολλές νέες δυνατότητες για τοξωτές γέφυρες και η Αυστραλία και η Νέα Ζηλανδία βρίσκονταν στο προσκήνιο για την εφαρμογή αυτών των εξελίξεων. Στο γύρισμα του αιώνα κατασκευάστηκε εκεί ένας μεγάλος αριθμός τοξωτών καμάρων. Η κατασκευή αυτών των τόξων έχει πρόσφατα τεκμηριωθεί από το Πανεπιστήμιο του Monash, δίνοντας μια συναρπαστική εικόνα των πρακτικών κατασκευής αυτών στο χρόνο. Στη Νέα Ζηλανδία ολοκληρώθηκε το 1910 η οδική γέφυρα του ‘‘Grafton’’, με έκταση 98 μέτρα και ύψος 45 μέτρων ήταν η μεγαλύτερη από οπλισμένο σκυρόδεμα αψίδα του κόσμου κατά τη στιγμή της ολοκλήρωσής της, και παραμένει ένα επιβλητικό έργο. Η χρήση του οπλισμένο σκυρόδεμα επιτρέπει τη χρήση ανοικτής δομή και την στήριξη αυτής σε διακριτά έδρανα. Η ανθεκτικότητα των δομών τόξου έχει αποδειχθεί από την ιστορία εδώ και 2000 χρόνια. Η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με τα όργανα μέτρησης που υπάρχουν μας έχει βοηθήσει στην κατανόηση της συμπεριφοράς των αψίδων και στη βελτιστοποίηση της δημιουργίας αυτών οικονομικότερα και με κατά το δυνατόν ελαχιστοποίηση των ροπών κάμψης. Το προκατασκευασμένο σκυρόδεμα έχει ορισμένα χαρακτηριστικά σαν υλικό που το καθιστούν ένα ιδιαίτερα κατάλληλο υλικό για την κατασκευή τόξου. Ορισμένα από αυτά είναι η υψηλή αντοχή αυτού σε θλίψη με συγκριτικά χαμηλό κόστος, η ικανότητα του να σχηματίζει κάθε επιθυμητό σχήμα φτηνά και με ακρίβεια, η ανέγερση χωρίς περίτεχνες διαδικασίες του απαιτούμενου καλουπιού, η χαμηλή συντήρηση και η εξαιρετική αντοχή του, ιδιαίτερα κάτω από συμπίεση. Αναμένεται ότι η χρήση των δομών τόξου θα συνεχίσει να αυξάνεται. Για την επίτευξη μεγαλύτερων ανοιγμάτων θα βοηθήσουν οι σύγχρονες τεχνικές ανάλυσης οι οποίες επιπρόσθετα θα βελτιώσουν το οικονομικό κόστος των γεφυρών. Μετά από περισσότερα από 2000 χρόνια, φαίνεται ότι η ιστορία της εξέλιξης του τόξου μόλις έχει αρχίσει. [Jenkins, D. (2001)]

Το ερώτημα είναι γιατί η επιλογή μιας τέτοιας μορφής τοξωτής κατασκευής είναι τόσο αποδοτική. Μία από τις πρώτες απόπειρες να αντλήσουν μια θεωρία του τόξου ήταν από τον Άγγλο επιστήμονα Robert Hooke. Γύρω στο 1670 ο Hooke διατύπωσε το εξής πρόβλημα στο ‘‘Royal society meeting’’, μέλος του οποίου σημειωτέον ήταν και ο Isaac Newton. ‘‘ Ποιό είναι το ιδανικό σχήμα για ένα τόξο και πόση ώθηση επιβάλλει αυτό στις αντηρίδες του’’. Η απάντηση ήρθε από τον ίδιο τον Hooke μέσω ενός συγγράμματος του που περιλαμβάνονταν στο βιβλίο του με τίτλο ‘‘ηλιοσκόπια’’. Υποστήριξε ότι ‘‘ κρεμώντας μια ελαστική γραμμή και αντιστρέφοντάς της προκύπτει η ζητούμενη άκαμπτη αψίδα’’. [Colbert, F. (2003)]

Η αναλογία του Hooke μεταξύ της αλυσίδας και του τόξου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1: Αλυσίδα αναλογίας Hooke

Η ιδέα για να κατανοηθεί η συμπεριφορά των τόξων είναι η αναλογία αυτών με τον τρόπο λειτουργίας κρεμαστών καλωδίων. Αυτή είναι μια από τις πιο λαμπρές ιδέες στην ιστορία της κατασκευαστικής μηχανικής. Το 1697 ο *David Gregory*, Σκωτσέζος μαθηματικός, έγραψε ένα άρθρο για το λεγόμενο “αλυσοειδές”, το σχήμα που παίρνει η κρεμασμένη αλυσίδα, επισημάνοντας και πάλι τη διαπίστωση του Hooke ότι το ιδανικό σχήμα για ένα τόξο είναι αυτό του αντεστραμμένου αλυσοειδούς. Σημείωσε επίσης ότι “όταν ένα οποιοδήποτε άλλο τόξο συγκρατείται είναι επειδή περιέχει στοιχεία της μορφής του αλυσοειδούς. [Huerta, S.(2006)]

Αξίζει να σημειωθεί ότι το σχήμα του δεν συμπίπτει ακριβώς με αυτό της παραβολής όπως συγγέεται αρκετές φορές αφού το αλυσοειδές ακολουθεί τη μορφή του υπερβολικού συνημίτονου όπως υποστήριξε ο *Bernoulli* το 1704. Στην πραγματικότητα αν ζυγιστεί προσεκτικά το βάρος μιας αλυσίδας έτσι ώστε να ισούται με το βάρος των χορδών ανά μονάδα οριζόντιας απόστασης (και όχι ανά μονάδα μήκους), τότε το σχήμα της όντως θα είναι αυτό της παραβολής. Ο *Antonio Gaudí* ανέπτυξε μια τεχνική σχεδιασμού η οποία επιτρέπει σε αρχιτέκτονες να σχεδιάσουν πολύπλοκες δομές που βασίζονται σε αλυσοειδή συστήματα. Οι καμπύλες αυτών των συστημάτων απαρτίζονται από εντελώς ευέλικτες, ομοιόμορφα πυκνές χορδές στηριζόμενες στα τελικά τους σημεία που αναστέλλουν την σταθμισμένη επίδραση της βαρύτητας. Ο *Gaudí* δημιούργησε πολλές εκπληκτικές κατασκευές με τη χρήση κομματιών αλυσοειδών δομών που πολλοί αρχιτέκτονες ακόμα και σήμερα θα δυσκολευόντουσαν να διεκπεραιώσουν ακόμα και χρησιμοποιώντας τα πιο προηγμένα εργαλεία σχεδιασμού στην αγορά. [Team Sixteen. (1996)]

Το αλυσοειδές είναι επίσης γνωστό ως αλυσίδα και ορίζεται ως το γράφημα της συνάρτησης $y = a \cosh (x / a)$. Το υπερβολικό συνημίτονο $\cosh (x)$ ορίζεται ως $(e^x + e^{-x}) / 2$, όπου $e = 2,71828$. . . αποτελεί τη βάση των φυσικών λογαρίθμων. [Ratliff, JR. (1981)]

Επίσης το υπερβολικό συνημίτονο είναι η λύση στο πρόβλημα της περιγραφής της καμπύλης της ιδανικής αλυσίδας που κρέμεται υπό τη βαρύτητα. Αποτελεί επιπλέον και τη λύση της παρακάτω διαφορικής εξίσωσης όπου $c > 0$:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = c\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (1)$$

[Muller, C.]

Με την παραδοχή ότι το σχοινί είναι απόλυτα ευέλικτο έτσι ώστε να μην μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια παραμόρφωσης μεταβολών, το αλυσοειδές αντιστοιχεί στην καμπύλη της ελάχιστης δυναμικής ενέργειας που μπορεί να προκύψει. Ένας άλλος τρόπος παραγωγής αυτού βρίσκεται αν γράψουμε την ισορροπία της έντασης και των βαρυτικών δυνάμεων για ένα απειροελάχιστο τμήμα του σχοινοῦ μας. Η επαρκής συνθήκη για το αλυσοειδές, εκτός από την ευελιξία του είναι ότι η βαρυτική δύναμη είναι σταθερή σε κάθε τμήμα ίσου μήκους αυτού. Προφανώς, όταν η βαρύτητα αντικατασταθεί από μια άλλη δύναμη που πληροί τους ίδιους όρους το αλυσοειδές δεν επηρεάζεται. Όταν η δύναμη είναι διαφορετική υπάρχει η τάση να αναμένεται διαφορετική καμπύλη αν και αυτό δε συμβαίνει πάντα. [Peters, F. (2000)]

Με τον όρο ιδανικό σαν χαρακτηρισμό του αλυσοειδούς υποθέτουμε ότι η ελαστική γραμμή που τεντώνουμε είναι εντελώς ευέλικτη, δεν έχει πάχος και έχει ομοιόμορφη πυκνότητα. Με άλλα λόγια αποτελεί τη μαθηματική περιγραφή των ‘κρεμασμένων σχοινιών’, η οποία προσομοιάζει αρκετά το τι συμβαίνει στην πραγματικότητα σε αντίστοιχες περιπτώσεις σχηματισμών που συναντάμε όπως υπαίθρια καλώδια τηλεπικοινωνίας, κολιέ ή αλυσίδες. [Huerta, S.(2006)]

Για να μοντελοποιήσουμε το τι συμβαίνει σε κάθε περίπτωση πρέπει να ορίσουμε τον παράγοντα a που συναντάμε στην εξίσωση περιγραφής. Διάφορες μέθοδοι προσέγγισης έχουν προταθεί για την εκτίμηση των γεωμετρικών και μηχανικών στοιχείων του αλυσοειδούς. Για την περίπτωση που αυτό στηρίζεται σε διαφορετικά υψόμετρα, η λύση αυτού φαίνεται να παρουσιάζει μαθηματική πολυπλοκότητα και να αποκλείει τη δυνατότητα

μιας ακριβούς επίλυσης. Ωστόσο με στοιχειώδη βασική μαθηματική ακρίβεια, εξισώσεις μπορούν να προσδιορίσουν αλγεβρικά το χειρισμό αυτού με τέτοιο τρόπο ώστε να προκύπτει ένα σχήμα που να προσφέρει εύκολα αποδεκτές λύσεις μέσω μιας σύγχρονης επιστημονικής αριθμομηχανή.

Αν ορίσουμε:

- d = η οριζόντια απόσταση μεταξύ των στηριγμάτων
- v = διαφορά καθ' ύψος μεταξύ των στηρίξεων
- l = μήκος της καμπύλης μεταξύ των στηριγμάτων
- ζ = sag ή ύψος του ανώτερου σημείου στήριξης άνω του χαμηλότερου σημείου της καμπύλης μεταξύ των στηρίξεων
- s = μήκος του τμήματος καμπύλης μεταξύ του χαμηλότερου σημείου της καμπύλης και οποιουδήποτε άλλου σημείου
- x' = οριζόντια απόσταση μεταξύ της ανώτερης στήριξης και του χαμηλότερου σημείου της καμπύλης
- y' = ύψος της ανώτερης στήριξης πάνω από την εκκίνηση μέτρησης
- s' = μήκος του τμήματος καμπύλης μεταξύ της ανώτερης στήριξης και του χαμηλότερου σημείου της καμπύλης
- c = y -τομή ή το ύψος του χαμηλότερου σημείου της καμπύλης πάνω από την εκκίνηση μέτρησης, επίσης γνωστό και ως ‘‘αλυσοειδή σταθερά’’
- w = βάρος ανά μονάδα μήκους του καλωδίου
- T = προκύπτουσα ένταση σε κάθε σημείο του καλωδίου. Αυτό που προκύπτει ενεργεί προς την κατεύθυνση της κλίσης του καλωδίου στο εν λόγω σημείο

Εφόσον ο άξονας y πρέπει να περάσει από το χαμηλότερο σημείο της καμπύλης (η οποία είναι συμμετρική ως προς τον άξονα y) και εφόσον το c είναι πάντα θετικό, η αρχή του συστήματος συντεταγμένων μπορεί να τοποθετηθεί είτε πάνω είτε κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, με το οριζόντιο επίπεδο να περιέχει τον άξονα x ο οποίος είναι απλώς ένα ύψωμα αναφοράς που δίνει τα στοιχεία της καμπύλης που πρέπει να υπολογιστούν. Ο ακριβής προσδιορισμός του c είναι το πρώτο, το πιο σημαντικό, και το πιο δύσκολο βήμα για τον καθορισμό των στοιχείων ενός αλυσοειδούς. Η καθορισμός του δίδεται από τις ακόλουθες βασικές εξισώσεις μπορούν να βρεθούν στα σχολικά εγχειρίδια της θεωρητικής και εφαρμοσμένης μηχανικής:

$$y = c \cosh \frac{x}{c} \quad (2)$$

$$s = c \sinh \frac{x}{c} \quad (3)$$

$$T = wc \cosh \frac{x}{c} \quad (4)$$

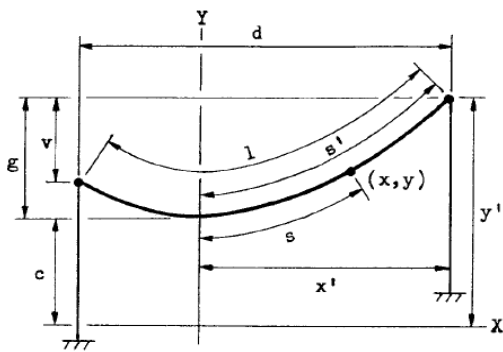
Από τους όρους που ορίσαμε προηγουμένως τέσσερις είναι πρωτογενείς μεταβλητές: οι d , v , l και ζ . Για τον αριθμητικό προσδιορισμό κάθε μιας από αυτές, οι τιμές των άλλων τριών πρέπει να είναι γνωστές, δεδομένου ότι ο καθορισμός των τριών από τις τέσσερις αυτές μεταβλητές συνιστά την αναγκαία και επαρκή προϋπόθεση για να καθοριστεί η μορφή και το μέγεθος της αλυσοειδούς. Η παράμετρος c είναι κάπως αόριστη, η οποία όμως καθορίζει τις σχέσεις μεταξύ των παραπάνω μεταβλητών. Σε κάθε περίπτωση, μια υπολογιστική λύση απαιτεί την αλυσοειδή σταθερά c να προσδιορίζεται ως το πρώτο βήμα.

Εφαρμόζοντας την (2) στα σημεία στήριξης των αποδόσεων:

$$y' = c \cosh \frac{x'}{c} \quad (5) \quad \text{και} \quad y' - v = c \cosh \frac{d - x'}{c} \quad (6)$$

Εφαρμόζοντας την (3) στα ίδια σημεία στήριξης των αποδόσεων

$$s' = c \sinh \frac{x'}{c} \quad (7) \quad \text{και} \quad l - s' = c \sinh \frac{d - x'}{c} \quad (8)$$



Εικόνα 2: Επεξηγηματικό σχήμα της καμπύλης του αλυσοειδούς

Αφαιρώντας την (6) από την (5):

$$v = c \cosh \frac{x'}{c} - c \cosh \frac{d - x'}{c} \quad (9)$$

Προσθέτοντας την (6) και την (7):

$$l = c \sinh \frac{x'}{c} + c \sinh \frac{d-x'}{c} \quad (10)$$

Διαιρώντας την (9) με την (10):

$$\frac{v}{l} = \frac{\cosh(x'/c) - \cosh[(d-x')/c]}{\sinh(x'/c) + \sinh[(d-x')/c]} \quad (11)$$

Εφαρμόζοντας τις ακόλουθες υπερβολικές ταυτότητες:

$$\cosh a - \cosh b = 2 \sinh \frac{1}{2}(a+b) \cdot \sinh \frac{1}{2}(a-b) \quad \text{και}$$

$$\sinh a + \sinh b = 2 \sinh \frac{1}{2}(a+b) \cdot \cosh \frac{1}{2}(a-b)$$

Η (11) γίνεται:

$$\frac{v}{l} = \frac{2 \sinh \frac{1}{2}[x'/c + (d-x')/c] \cdot \sinh \frac{1}{2}[x'/c - (d-x')/c]}{2 \sinh \frac{1}{2}[x'/c + (d-x')/c] \cdot \cosh \frac{1}{2}[x'/c - (d-x')/c]}$$

Η οποία απλοποιείται σε:

$$\frac{v}{l} = \frac{\sinh[(2x' - d)/2c]}{\cosh[(2x' - d)/2c]} = \tanh[(2x' - d)/2c]$$

που αν επιλυθεί ως προς (x'/c) γίνεται:

$$\frac{x'}{c} = \frac{d}{2c} + \tanh^{-1} \frac{v}{l} \quad (12)$$

Αντικαθιστώντας την τιμή της (x'/c) από τη σχέση (11) στην (9) έχουμε:

$$l = c \sinh \left(\frac{d}{2c} + \tanh^{-1} \frac{v}{l} \right) + c \sinh \left(\frac{d}{2c} - \tanh^{-1} \frac{v}{l} \right) \quad (13)$$

που είναι η εξίσωση που θα χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του c όταν η άγνωστη μεταβλητή είναι το g .

Από την Εικόνα 2 βλέπουμε ότι $y' = c + g$. Αντικαθιστώντας την τιμή αυτή στην (4) παίρνουμε:

$$c + g = c \cosh \frac{x'}{c} \quad (14)$$

Μετά τον προσδιορισμό του c από τις (12) και (13) αυτό χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του x' και στη συνέχεια χρησιμοποιείται η (14) για τον υπολογισμό του g . Για τις άλλες τρεις περιπτώσεις των άγνωστων μεταβλητών, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες εξισώσεις για τον προσδιορισμό του c που μπορεί να οριστεί παρόμοια:

Όταν το l είναι ο άγνωστος:

$$v = c + g - c \cosh \left(\frac{d}{c} - \cosh^{-1} \frac{c + g}{c} \right) \quad (15)$$

Όταν το v είναι ο άγνωστος:

$$l = c \sinh \left(\cosh^{-1} \frac{c + g}{c} \right) + c \sinh \left(\frac{d}{c} - \cosh^{-1} \frac{c + g}{c} \right) \quad (16)$$

Όταν το d είναι ο άγνωστος:

$$l = c \sinh \left(\cosh^{-1} \frac{c + g}{c} \right) + c \sinh \left(\cosh^{-1} \frac{c + g - v}{c} \right) \quad (17)$$

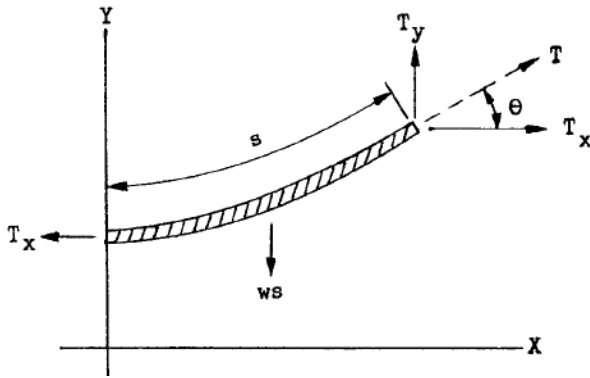
Η παραπάνω περιγραφόμενη μεθοδολογία φαίνεται συγκεντρωτικά στον παρακάτω Πίνακα 1:

Πίνακας 1: Μεθοδολογία γεωμετρικής λύσης

Unknown variable (1)	Procedure (2)
g	<ol style="list-style-type: none"> 1. Determine c from Eq. (12) 2. Calculate x' from Eq. (11) 3. Calculate g from Eq. (13)
l	<ol style="list-style-type: none"> 1. Determine c from Eq. (14) 2. Calculate x' from Eq. (13) 3. Calculate l from Eq. (9)
v	<ol style="list-style-type: none"> 1. Determine c from Eq. (15) 2. Calculate x' from Eq. (13) 3. Calculate v from Eq. (8)
d	<ol style="list-style-type: none"> 1. Determine c from Eq. (16) 2. Calculate x' from Eq. (13) 3. Calculate d from Eq. (11)

Υπολογισμοί εφελκυστικών τάσεων:

Η Εικόνα 3 είναι ένα διάγραμμα ελευθέρου σώματος ενός τμήματος του καλωδίου επέκτασης από τον άξονα y (sag σημείο) σε κάθε σημείο (x, y) .



Εικόνα 3: Η δράση των δυνάμεων στο σημείο sag του catanery

Η ταύτιση των δυνάμεων στην οριζόντια κατεύθυνση αποδόσεων δίδεται από τη σχέση:

$$T_x = T \cos \theta \quad (18)$$

Αντικαθιστώντας την τιμή του T από την εξίσωση (3) στην (17) παίρνουμε τη σχέση:

$$T_x = wc \cosh \frac{x}{c} \cos \theta$$

Στο σημείο sag, για $x = 0$ το $\cosh (x / c) = 1$ και $\cos \theta = 1$ Συνεπώς:

$$T_x = wc \quad (19)$$

Αυτή η οριζόντια συνιστώσα της τάσης παραμένει σταθερή σε όλη την έκταση του ανοίγματος, όπως απαιτείται από τις συνθήκες της στατικής ισορροπίας, αφού είναι η μόνη οριζόντια υπάρχουσα δύναμη. Η κατακόρυφη συνιστώσα της τάσης βρίσκεται αν εξισώσουμε τις δυνάμεις στην κατακόρυφη κατεύθυνση

$$T_y = T \sin \theta = ws \quad (20)$$

Αντικαθιστώντας την τιμή της από την (3) στην (20):

$$T_y = wc \sinh \frac{x}{c} \quad (21)$$

Η μέγιστη εφελκυστική τάση που ορίζεται ως T' θα εμφανιστεί στην επάνω στήριξη και από την εξίσωση (3) και θα ισούται με:

$$T' = wc \cosh \frac{x'}{c} \quad (22)$$

Αντικαθιστώντας την τιμή του $\cosh (x' / c)$ που προκύπτει από την εξίσωση (13) στην εξίσωση (21) έχουμε:

$$c + g = \frac{T'}{w} \quad (23)$$

Η χρήση των παραπάνω εξισώσεων εξαλείφει την ανάγκη του περιορισμού επιλογής του εύρους αποφάσεως. Υποστηρίζει την ίδια ανύψωση και επιτρέπει την ακριβή αξιολόγηση των προφίλ, καθώς τονίζει τις αντιδράσεις σε όλο το μήκος της γραμμής. Παρόλο που στην παραπάνω περιγραφή περιοριζόμαστε στην εξέταση της φόρτωσης λόγω του βάρους του καλωδίου, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του φορτίου λόγω πάγου, επιπόνησης της θερμοκρασίας, εφελκυστικής επιμήκυνση, καθώς και επιβάρυνσης λόγω φορτίου ανέμου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με την παραπάνω μεθοδολογία για τον προσδιορισμό της συνολικής μηχανικής φόρτωσης από του καλωδίου. [Cella, P. (1999)]

Το αλυσοειδές παρουσιάζει επιπρόσθετα πολλές ενδιαφέρουσες ιδιότητες:

Η αρχή των συντεταγμένων συμπίπτει με το χαμηλότερο σημείο του σχοινιού λόγω της απόλυτης ευελιξία που διαθέτει αυτό και ανεξάρτητα από το είδος της δύναμης που ενεργεί στο σχοινί ισχύει πάντα ότι:

$$\tan \alpha = \frac{F_y}{F_x}$$

Υπό την επίδραση της F_y οι επιδράσεις της βαρυτικής δύναμης ασκούνται μεταξύ του σημείου έναρξης και της υποτιθέμενης διατομής του σχοινιού. Οι τιμές τις F_y δίδονται μέσω της εξίσωσης:

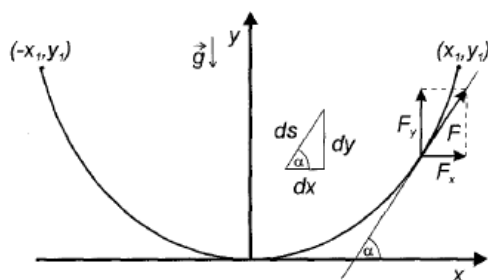
$$F_y = \gamma \int_0^x \sqrt{1 + \tan^2 \alpha} dx$$

Όπου γ είναι η δύναμη της βαρύτητας σε μια μονάδα μήκους του σχοινιού. Δεδομένου ότι η βαρύτητα είναι η μόνη δύναμη που ενεργεί δεν υπάρχει καμία δύναμη να αλλάξει F_x που σημαίνει ότι F_x είναι μια σταθερά. Αυτό ικανοποιείται όταν:

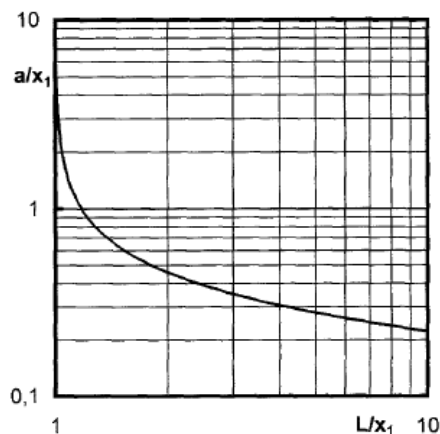
$$\tan \alpha = \sinh \frac{x}{a} \quad \text{ή} \quad \frac{y}{a} = \cosh \left(\frac{x}{a} \right) - 1.$$

Η τιμή του a υπολογίζεται από την εξίσωση

$$\frac{y_1}{a} = \cosh \left(\frac{x_1}{a} \right) - 1$$



Εικόνα 4: Συνιστώσες και δυνάμεις της αλυσίδας υπό συνθήκες χωρίς ροή



Εικόνα 5: Το κανονικοποιημένο σχοινί της παραμέτρου a ως συνάρτηση του μήκους παρουσιάζει το a / x_1 ως συνάρτηση του L / x_1

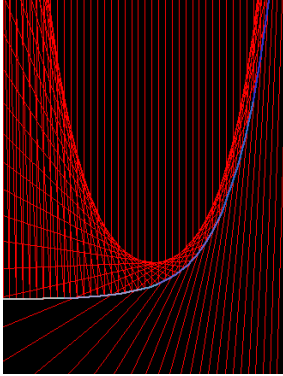
Εναλλακτικά το X_1 και το μισό μήκος του σχοινιού L μπορεί να υπολογιστούν σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{L}{x_1} = \frac{a}{x_1} \sinh \left(\frac{x_1}{a} \right).$$

Η ανάλυση των δυνάμεων ροής μετά από διόγκωση σχοινιού μας δείχνει ως συμπέρασμα ότι η ροή καθορίζει ένα αλυσοειδές. Αυτό είναι κάπως περίεργο δεδομένου ότι το αλυσοειδές συνδέεται συνήθως με τη βαρύτητα ή ισοδύναμη δύναμη. Η έρευνα του νήματος σε διάφορα μήκη σε μια αεροδυναμική σήραγγα επιβεβαιώνει το αλυσοειδές σχήμα. Η συνολική συρτική δύναμη για το σχοινί προέρχεται ως το άθροισμα των πιέσεων και των δυνάμεων τριβής. Περιγράφοντας τι συμβαίνει με τη δύναμη έλξης κατά μήκος του σχοινιού θα μπορούσαμε να πούμε ότι αρχικά μειώνεται με την αύξηση του μήκους, στη συνέχεια παίρνει μια ελάχιστη τιμή εφόσον το μήκος είναι περίπου 2-3 φορές της συνολικής έκτασης. Μετά από αυτό αυξάνει και πάλι. Η πτώση αντιστοιχεί σε μείωση της δύναμης πίεσης, ενώ η αύξηση αντανακλά την αυξανόμενη δύναμη τριβής. [Peters, F(2000)]

Παρακάτω περιγράφονται επιπρόσθετα ορισμένες ακόμα από της σημαντικές ιδιότητες του υπερβολικού συνημίτονου.

1.



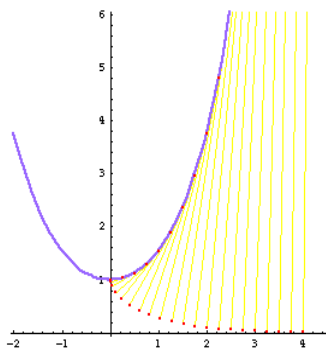
Η “catacaustic” της εκθετική καμπύλη e^x με ακτίνες φωτός από ανωτέρω και παράλληλα προς το y άξονα είναι η αλυσοειδή. Η εκθετική καμπύλη έχει την ιδιότητα να μένει ακίνητη, αφού είναι η μόνη συνάρτηση της οποίας η παράγωγος είναι η ίδια.

[3d-xploremath project]

Εικόνα 6: Παράλληλες ακτίνες πάνω από την εκθετική καμπύλη

Μια “catacaustic” είναι μια καμπύλη που αποτελεί το φάκελο των ακτινών που προέρχονται από ένα συγκεκριμένο σημείο (ή ένα σημείο σε άπειρη απόσταση που παράγουν ακτίνες παράλληλες) για ένα συγκεκριμένο σχήμα καθρέφτη. Το σημείο από το οποίο προέρχονται οι ακτίνες ονομάζεται ακτινοβόλο σημείο. [mathworld.wolfram]

2.



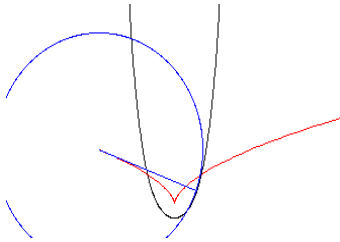
Η “εξελιγμένη” του αλυσοειδούς που ξεκινούν από την κορυφή είναι η καμπύλη “tractrix”. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι εξελιγμένες μεταξύ τους είναι παράλληλες καμπύλες και αυτό αποτελεί θεώρημα. [3d-xploremath project]

Εικόνα 7: Εξελιγμένη του αλυσοειδούς

“Εξελιγμένη” είναι μια καμπύλη που προκύπτει από μια άλλη δεδομένο καμπύλη συνδέοντας μια φανταστική τεντωμένη χορδή με την δεδομένη καμπύλη και ανιχνεύοντας τα ελεύθερα άκρα της σαν να αποτελούν κομμάτι επάνω σε εκείνη την δεδομένη καμπύλη. Είναι μια ρουλέτα όπου η τρέχουσα καμπύλη είναι μια ευθεία γραμμή που περιέχει το σημείο παραγωγής. “Tractrix” ονομάζεται η καμπύλη κατά μήκος της οποίας ένα μικρό αντικείμενο κινείται, υπό την επίδραση της τριβής, όταν σύρεται σε οριζόντιο επίπεδο με ένα κομμάτι

νήμα και ένα κορδόνι που κινείται σε ορθή γωνία προς την αρχική γραμμή μεταξύ του αντικειμένου και των σύρων με μια απειροελάχιστη ταχύτητα. [wikipedia]

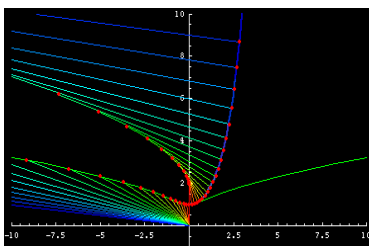
3.



Εικόνα 8: Η εξελιγμένη του αλυσοειδούς είναι επίσης η tractrix.

4.

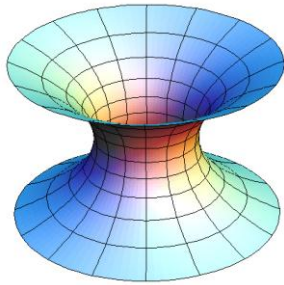
Η ακτινική του αλυσοειδούς είναι η ‘Καμπύλη του Εύδοξου’. Στο σχήμα που ακολουθεί, η μπλε καμπύλη είναι το μισό του αλυσοειδούς. Η πράσινη καμπύλη είναι η ‘Καμπύλη του Εύδοξου’. Οι γραμμές ουράνιου τόξου είναι ακτίνες από ‘osculating κύκλους’. Ως ‘Καμπύλη του Εύδοξου’ ορίζεται η παραμετρική καμπύλη $x = -\cosh(t) \sinh(t)$, $y = \cosh(t)$. Η osculating κύκλος της C καμπύλης σε δεδομένο σημείο P είναι ο κύκλος που έχει την ίδια εφαπτομένη της C στο σημείο P καθώς και την ίδια καμπυλότητα. Ακριβώς όπως η εφαπτομένη γραμμή είναι η γραμμή που αποτελεί την καλύτερη προσέγγιση μιας καμπύλης σε ένα σημείο P , η osculating κύκλος είναι ο καλύτερος κύκλος που προσεγγίζει την καμπύλη στο P . [mathworld.wolfram]



Εικόνα 9: Η ακτινική του αλυσοειδούς

5.

Εάν περιστρέψουμε το γράφημα του $x = \cosh(y)$ για τον άξονα y , η επιφάνεια που προκύπτει από την περιστροφή είναι μια ελάχιστικη επιφάνεια, που ονομάζεται κατανοειδές. Αν κοιτάξουμε προσεκτικά βλέπουμε ότι κατά τη διάρκεια της περιστροφής αυτής οι κατασκευαστικές αρχικές αποστάσεις και οι γωνίες στην επιφάνεια διατηρούνται.



Εικόνα 10: Το κατανοειδές

[3d-xploremath project]

Το κατανοειδές είναι η μόνη ελάχιστη επιφάνεια που προκύπτει από ιδιοπεριστροφή ενός και μόνο σχήματος. Η καμπύλη της επιφάνειας αυτής, ενδεχομένως μετά από αλλαγή της παραμέτρου, είναι της μορφής $\cosh(cx)/c$ για ορισμένες τιμές του c διάφορες 0. Αποδεικνύεται ότι το κατανοειδές είναι η Christoffel διπλή εκθετική της Φ ο $(u + iv)$ όπου Φ η στερεογραφική προβολή του μιγαδικού επιπέδου στην μοναδιαία σφαίρα. [Muller, C.]

$$\Phi(u + iv) = \frac{1}{u^2 + v^2 + 1}(u^2 + v^2 - 1, 2u, 2v)$$

Οι ελαχιστικές επιφάνειες ορίζονται ως επιφάνειες με μηδενική μέση καμπυλότητα. Μια ελαχιστική επιφάνεια ορίζεται μέσω παραμέτρων ως $x=(u,v,h(u,v))$ και ως εκ τούτου ικανοποιεί εξίσωση του Lagrange $(1+h_v^2)h_{uu}-2h_{uh_{vh}}(uv)+(1+h_u^2)h_{vv}=0$. Η εύρεση μιας ελαχιστικής επιφάνειας δηλαδή ενός ορίου που καθορίζεται με περιορισμούς είναι ένα πρόβλημα στο λογισμό των μεταβολών και είναι μερικές φορές γνωστό ως πρόβλημα Plateau's. Ως ελάχιστη επιφάνεια μπορεί επίσης να χαρακτηριστεί η επιφάνεια της ελάχιστης έκτασης για δεδομένες οριακές συνθήκες. Ένα αεροπλάνο είναι μια τετριμμένη ελάχιστη επιφάνεια και το πρώτο μη τετριμμένο παράδειγμα. Το κατανοειδές και το ελικοειδές βρέθηκαν από τον Meusnier το 1776. Το πρόβλημα της εύρεσης της ελάχιστης επιφάνειας οριοθέτησης των λοξών τετραπλεύρου λύθηκε από τον Schwarz το 1890. Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ η σφαίρα είναι μια ελάχιστη επιφάνεια κατά την έννοια ότι ελαχιστοποιεί την επιφάνεια των εκτάσεων ως ποσοστό του όγκου, δεν χαρακτηρίζεται ως μια ελάχιστη επιφάνεια, με την έννοια που χρησιμοποιείται από μαθηματικούς. Ο Euler απέδειξε ότι μια ελάχιστη επιφάνεια είναι επίπεδη αν και μόνο αν η Gaussian καμπυλότητα της είναι μηδέν σε κάθε σημείο, ώστε να είναι τοπικά επίπεδα σχηματισμένη. Η μόνη γνωστή πλήρης και ενσωματωμένη ελάχιστη επιφάνεια των πεπερασμένων σε τοπολογία σχημάτων που είναι γνωστή εδώ και 200 χρόνια είναι το κατανοειδές, το ελικοειδές, και το αεροπλάνο.

Το catenoid μπορεί να δοθεί από τις παραμετρικές εξισώσεις:

$$x = c \cosh\left(\frac{v}{c}\right) \cos u \quad (24)$$

$$y = c \cosh\left(\frac{v}{c}\right) \sin u \quad (25)$$

$$z = v, \quad (26)$$

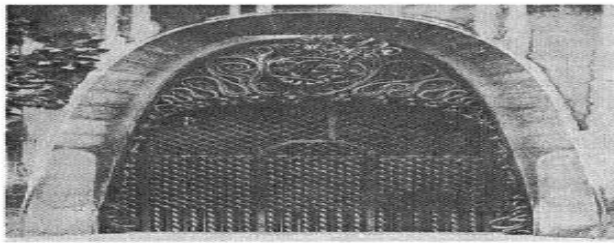
όπου $u \in [0, 2\pi)$

[*Wolfram Mathworld*]

1.3 Γνωστές Εφαρμογές

1.3.1 Antonio Gaudi

Από τα πρώτα έργα του ο Gaudi έδειξε την πρωτοτυπία και την ανεξαρτησία του. Ειδικότερα, άρχισε να χρησιμοποιεί συστηματικά ένα είδος αψίδας. Αντί της χρησιμοποίησης τόξων με τμήμα σχήματος που προέρχεται από κύκλο, χρησιμοποίησε τόξα που προέρχονται είτε από την παραβολή είτε από το επονομαζόμενο κατανοειδές. [Huerta, S.(2006)]



(α)



(β)

Εικόνα 11: Αψιδωτές μορφές

Το έργο του Gaudi στηρίζεται σε φυσικές προηγούμενες σχέσεις της ανάπτυξης και της επίδραση στη μορφή. Φαίνεται σα να δοκιμάζει τη σχέση των μαθηματικών και της γεωμετρίας με την ζωντανή πραγματικότητα των υπερβολικών επιφανειών περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο αρχιτέκτονα. Ο σχεδιασμός για την εκκλησία Sagrada Familia στη Βαρκελώνη, προς την ολοκλήρωση της οποίας αφιέρωσε την τελική φάση της καριέρας του, βασίζεται στο συνδυασμό αυτών των επιφανειών καθ 'όλη τη σύνθεση του κτιρίου.



Εικόνα 12: Μοντέλο Gaudi

Ο Gaudi εργάστηκε για την εκκλησία Sagrada Familia για 43 χρόνια σχεδόν δηλαδή για όλη την καριέρα του. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 12 χρόνων ανέπτυξε ένα κώδικα, ένα σχέδιο «modus operandi» με το οποίο οι μελλοντικοί συνεργάτες θα μπορούσαν να

συνεχίσουν με βεβαιότητα το έργο του. Ο κώδικας βασίζεται σε αποκλειστικά συνδυασμό επιφανειών και αποτελεί πρόκληση για τους ερευνητές να εξετάσουν τους συνδυασμούς αυτούς των επιφανειών από διάφορες οπτικές γωνίες. [Burry, M. (2001)]

Δεν ήταν μόνο ένας οραματιστής αρχιτέκτονας, αλλά και ένας σπουδαίος μηχανικός. Δημιουργώντας μια αναλογική στατική μέθοδο υπολογισμού για το σχεδιασμό ενός έργου, ήταν πολύ μπροστά από την εποχή του. Η στερεοστατικό μοντέλο της Colonia Güell προκαλεί έκπληξη τόσο για το σχεδιασμό του, όσο και για τις τρέχουσες συνθήκες, με τις διαστάσεις και λεπτομέρειες της. Λόγω του Α Παγκοσμίου Πολέμου μόνο την κρύπτη χτίστηκε. Το μοντέλο και όλα τα έγγραφα για αυτήν δυστυχώς καταστράφηκε.



Εικόνα 13: Μοντέλο Colonia Guel

Χρειάστηκαν δέκα χρόνια δουλειάς σε μελέτες για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη μιας νέας μεθόδου για τις διαρθρωτικούς υπολογισμούς του Ισπανού αρχιτέκτονα που βασίζονται σε ένα στερεοστατικό μοντέλο. Το μοντέλο χτίστηκε με κορδόνια και μικρά σακιά. Τα κορδόνια ήταν κρεμασμένα από τα σημεία όπου στήλες του υποκείμενου κτιρίου επρόκειτο να τοποθετηθούν. Οι μικρό σάκοι γεμίζονταν με σφαιρίδια, που ζύγιζαν το ένα δέκα-χιλιοστό του πραγματικού βάρους των τόξων που θα πρέπει να υποστηρίζουν και στη συνέχεια κρεμιούνται από κάθε κατανοειδή ασίδα που σχηματίζονταν από τα καλώδια. Μετά ο Ισπανός έπαιρνε φωτογραφίες του μοντέλου που προέκυπτε από διάφορες οπτικές γωνίες, και το ακριβές σχήμα της δομής του οικοδομήματος προέκυπτε από την αντιστροφή των καμπύλων αυτών. Έτσι ο Gaudí μπορούσε να αποδείξει τη μορφή των καμπύλων που θα είχε το κτίριο του σε κατακόρυφα τμήματα, στηριζόμενος στην ευστάθεια του σχήματος του αλυσοειδούς. [Moser M. (2006)]

Ο Gaudí γνώριζε ότι η προκύπτουσα από τα μοντέλα του γεωμετρία ενός κτιρίου, θα μπορούσε να λειτουργήσει αμιγώς σε θλίψη όταν αυτά αναστρεφόντουσαν. Είχε επίσης μια αρκετά ακριβή εκτίμηση των φορτίων σε διάφορα μέλη της κατασκευής του. Ως εκ τούτου, μπορούσε να κατασκευάσει κτίρια που δεν θα κατέρρεαν ή θα απαιτούσαν επιπλέον δομές

στήριξης. Πέρα από το κατασκευαστικό κομμάτι, χρησιμοποίησε επίσης την αλυσοειδή μέθοδο για να προσδιορίσει τα εσωτερικά και τα εξωτερικά σχήματα των κτιρίων. [*Team Sixteen*]

1.3.2 Καλώδια

Η μοντελοποίηση καλωδίων έχει εκτεταμένες εφαρμογές στον σχεδιασμό και την ανάλυση των τεχνικών έργων. Καλώδια συναντώνται σε πολλούς διαφορετικούς τύπους δομών, όπως καλωδιωτές και κρεμαστές γέφυρες, ‘‘κοχύλια αναστολής’’ και καλαθωτές δομές. Καλώδια μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν με μεγάλη ακρίβεια για κυρτές δομές κατασκευών όπως μεμβράνες και κοχύλια ανάρτησης, γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καλωδιωτά συστήματα μεταφοράς και στέγες καλωδίων. Επιπλέον, τα καλώδια και τα δίκτυα καλωδίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της ισορροπίας της τοιχοποιίας ή του σκυροδέματος υπό μορφή καμάρων καθώς και σε θόλους που βρίσκονται υπό θλίψη. Η υπολογιστική μοντελοποίηση των επιμέρους καλωδίων και των καλωδιακών συστημάτων παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες λόγω της άκρως μη γραμμική φύση του προβλήματος. Οι περισσότερες διαθέσιμες λύσεις για καλώδια παρουσιάζουν αριθμητική αστάθεια ή κακή απόδοση. Οι πιο απλουστευμένες λύσεις παρέχουν πολύ ανακριβή αποτελέσματα. Αυτά τα προβλήματα γίνονται πολύ εμφανή όταν οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για το μοντέλο του συστήματος μας αποτελείται από πολλά καλώδια. [Andreu, A. (2006)]

Λόγω της αποτελεσματικότητας και της αισθητικής τους, οι δομές καλωδίων έγιναν αρκετά δημοφιλείς από το 1950 και μετά. Από τη δεκαετία του '60 μέχρι το τέλος της δεκαετίας του '70 ένας σημαντικός αριθμός άρθρων που αφορούσαν τις δομές καλωδίων δημοσιεύθηκαν. Τα μέλη των δομών αυτών είναι ελαφριά, πολύ ευέλικτα και δεν υπόκεινται σε κάμψη και σε ακαμψία συμπίεσης. Έτσι εξηγείται και η μη γραμμική συμπεριφορά τους. Άλλο σημαντικό πρόβλημα των δομών καλωδίων είναι ο αρχικός καθορισμός της αρχικής διαμόρφωσης ισορροπίας τους. Η τοπική συμπεριφορά συγκεκριμένων τύπων καλωδίων είναι ένα άλλο αρκετά δύσκολο πρόβλημα που η μοντελοποίηση των δομών καλωδίων θα πρέπει να αντιμετωπίζει. Ελικοειδείς μορφές καλωδίων εμφανίζουν εσωτερική τριβή, η οποία μπορεί να επηρεάσει την αξονική δυσκαμψία. Τα καλώδια μπορούν να εμφανίσουν φαινόμενα στρέβλωσης που ως αποτέλεσμα της στρεπτικής σταθερότητας των μονών και διπλών συστημάτων σχοινιών. Για παράδειγμα, τέτοια προβλήματα παρουσιάζονται στον τομέα της μηχανικής συμπεριφοράς των απλών ευθύγραμμων κλάδων οι οποίοι αποτελούν στρώματα των ελικοειδών καλωδίων που τυλίγονται γύρω από ένα κεντρικό ευθύγραμμο αγωγίμο σύρμα. Σε γενικές γραμμές, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση των δομών καλωδίων μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες ομάδες. Αυτές είναι η μη γραμμική μέθοδος μετατόπισης και η μέθοδος της πυκνότητας ισχύος. Η

μέθοδος της μη-γραμμικής μετατόπιση βασίζεται σε μια επαναληπτική διαδικασία η οποία τροποποιεί βήμα προς βήμα τη γεωμετρία από ένα καλώδιο διαμόρφωσης σε ένα άλλο τα οποία μεταξύ τους πληρούν τις εξισώσεις ισορροπίας. Αυτή η μέθοδος εφαρμόστηκε στη σχεδίαση της οροφής καλωδίων του Ολυμπιακού Σταδίου του Μονάχου, αντικαθιστώντας τα πραγματικά καλώδια με αντηρίδες ζευκτών. Η μέθοδος της δυναμικής χαλάρωσης με κινητική απόσβεση χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αρχικής διαμόρφωσης ισορροπίας και ανάλυσης των προεντεταμένων δικτυωμάτων και μεμβρανών. [Such, M. (2009)]

Παρόλο που η γεωμετρία του αλυσοειδούς διαφέρει από αυτό της παραβολής, δεδομένου της μικρής καμπυλότητας των καλωδίων μπορεί στις κατασκευές αυτές να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις που διέπουν τις παραβολικές μορφές δομών. Για να περιγραφούν επαρκώς οι καμπύλες των καλωδίων ξεπερνώντας τους περιορισμούς των ισχυόντων σκευασμάτων, πρέπει αρχικά να γίνουν οι ακόλουθες παραδοχές. Όσον αφορά την ισορροπία του παραμορφωμένου στοιχείου, μόλις αυτό παραμορφωθεί, το αλυσοειδές εγκρίνει την ισορροπία διαμόρφωσης που αντιστοιχεί στην τελική διανομή των δυνάμεων από το καλώδιο. Επίσης οι μικρές παραμορφώσεις επιτρέπουν τον υπολογισμό της γενικής επιμήκυνσης του στοιχείου με απλή ένταξη των παραμορφώσεων σε όλο το μήκος της αρχικής διαμόρφωσης. Επιπλέον υπάρχει διατήρηση του συνολικού βάρους της μονάδας μετά την παραμόρφωση ή ισοδύναμα διατήρηση της μάζας του καλωδίου. Αυτές οι υποθέσεις συνδυάζονται για να εξεταστεί η κατά προσέγγιση λύση σε ένα παραμορφώσιμο καλώδιο επαληθεύοντας την ακριβή ισορροπία στην παραμορφωμένη διαμόρφωση. Στην προσέγγιση προτείνεται, το βάρος ανά μονάδα μήκους να θεωρείται πάντα ομοιόμορφο σε όλο το μήκος του καλωδίου. Ωστόσο, η τιμή του βάρους ανά μονάδα μήκους μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την επιμήκυνση που αντιμετωπίζει το στοιχείο. [Andreu, A. (2006)]

1.4 Είδη στεγών

Μια οροφή που θα διασφαλίζει την προστασία της κατασκευής μας από τις καιρικές συνθήκες είναι η βασική απαίτηση μας για τη διατήρηση της δομής της κατασκευής μας, ανεξάρτητα από την ηλικία, το μέγεθος ή τον τρόπο σχεδιασμού αυτής. Η επίτευξη του παραπάνω επιτρέπει σε ένα κτίριο να λειτουργήσει ως καταφύγιο. Η οροφή αποτελεί επιφάνεια κύλισης για τις κατακρημνίσεις, παρέχει σκίαση από τον ήλιο και προστατεύει από τις καιρικές συνθήκες. Κατά τη διάρκεια ορισμένων περιόδων στην ιστορία της αρχιτεκτονικής, η οροφή προσδίδει επίσης ένα μεγάλο μέρος στον αρχιτεκτονικό χαρακτήρα του κτιρίου. Καθορίζει το στυλ και συμβάλλει στην αισθητική του κτιρίου. Ανεξάρτητα από τη σημασία της στέγης μας ως διακοσμητικό είναι σίγουρα ένα ιδιαίτερα ευάλωτο στοιχείο του κτιρίου μας, που αν σχεδιαστεί λανθασμένα θα έχουμε αναπόφευκτα αστοχία ολόκληρης της κατασκευής. Μια στέγη κακής κατασκευής θα επιτρέψει την επιταχυνόμενη επιδείνωση των δομικών υλικών (τοιχοποιία, ξύλο, γύψο, βαφής) και θα προκαλέσει γενική κατάρρευση της βασικής δομής. Επιπλέον συνήθως το κόστος επισκευής μιας στέγης που έχει αποτύχει στο λειτουργικό της ρόλο είναι σχεδόν απαγορευτικό. Αυτό γιατί παρά το γεγονός ότι συνήθως μπορεί να υποστεί προσωρινή επιδιόρθωση, πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά ο τρόπος αυτής ώστε να αποτραπεί η ακούσια ζημιά στον ήχο ή το ιστορικό υλικό κατασκευής της σκεπής μας και τα συναφή χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Πριν από κάθε εργασία επισκευής πρέπει να υπολογιστεί η ιστορική αξία των υλικών που χρησιμοποιούνται για τη στέγη και να γίνει κατανοητή αυτή. Στη συνέχεια μια πλήρη εσωτερική και εξωτερική επιθεώρηση της στέγης θα πρέπει να πραγματοποιηθεί καθορίζοντας όλα τα αίτια της αποτυχίας και να προσδιορίζοντας τις εναλλακτικές λύσεις για την επισκευή ή την αντικατάσταση της στέγης. [Sweetser, S. (1978)]

Οι στέγες αποτελούν μια κατασκευαστική κατηγορία που αναπτύσσεται ακόμα σε ορισμένους τομείς των δραστηριοτήτων τους. Σήμερα οι κατασκευαστικές εταιρίες στεγών παρουσιάζουν πολλές νέες και καινοτόμες λύσεις και ιδέες για την κάλυψη της σταθερή τους ζήτηση ή ακόμη και για αύξηση της ζήτησης τους σε ορισμένα τμήματα. [Fanjoy, R. (2007)]

Μια συμβατική οροφή αποτελείται από ένα σύστημα τεγίδων. Είναι γνωστό γενικότερα ότι η στέγη συγκρατείται από πλάγια κύρτωση μέσω του συστήματος των τεγίδων που την επενδύουν. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια σε σύγκριση με το παρελθόν η απαιτήσεις για αυξημένο πάχος μόνωσης, για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας έχει οδηγήσει σε

πολλαπλασιασμό των συστημάτων στέγης. Οι σύγχρονες στέγες είναι πιθανό να συμπεριφερθούν με διαφορετικό τρόπο σε σχέση με αυτόν των τεγίδων που αποτελούνται από συμβατικά τραπεζοειδή φύλλα με σχετικά λεπτή μόνωση. Στη χειρότερη περίπτωση, το σύστημα συγκράτησης που παρέχουν οι τεγίδες μπορεί να μην είναι επαρκές και ενδέχεται να αποτύχουν κάτω από το βαρύ φορτίο χιονιού ή από την αναρρόφησης του αέρα (αρνητική πίεση). [Chung, F. (1996)]

Οι περισσότεροι κατασκευαστές σήμερα επιθυμούν τη δημιουργία στεγών από προϊόντα που μπορεί να χαρακτηριστούν ως "πράσινα". Υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον για την επονομαζόμενη αειφορία, που αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα δημιουργίας πράσινων στεγών. Με τον όρο αειφορία και αειφόρο ανάπτυξη ή βιώσιμη ανάπτυξη αναφερόμαστε στην οικονομική ανάπτυξη που σχεδιάζεται και υλοποιείται λαμβάνοντας υπόψη την προστασία του περιβάλλοντος και τη βιωσιμότητα. Γνώμονας της αειφορίας είναι η μέγιστη δυνατή απολαβή αγαθών από το περιβάλλον, χωρίς όμως να διακόπτεται η φυσική παραγωγή αυτών των προϊόντων σε ικανοποιητική ποσότητα και στο μέλλον. Η βιώσιμη ανάπτυξη προϋποθέτει ανάπτυξη των παραγωγικών δομών της οικονομίας παράλληλα με τη δημιουργία υποδομών για μία ευαίσθητη στάση απέναντι στο φυσικό περιβάλλον και στα οικολογικά προβλήματα (όπως ορίζουν παραδοσιακές επιστήμες σαν τη γεωγραφία). Η βιωσιμότητα υπονοεί ότι οι φυσικοί πόροι υφίστανται εκμετάλλευση με ρυθμό μικρότερο από αυτόν με τον οποίον ανανεώνονται, διαφορετικά λαμβάνει χώρα περιβαλλοντική υποβάθμιση. Θεωρητικά, το μακροπρόθεσμο αποτέλεσμα της περιβαλλοντικής υποβάθμισης είναι η ανικανότητα του γήινου οικοσυστήματος να υποστηρίξει την ανθρώπινη ζωή (οικολογική κρίση). [Shakhov, I. (2007)]

Για το λόγο αυτό υπάρχει η ανάγκη πλέον για ενσωμάτωση των αρχών της αειφόρου ανάπτυξης στην ανθρώπινη δραστηριότητα και κατ' επέκταση και στην ανθρώπινη οικοδομική δραστηριότητα. Ο τομέας των στεγών όπως προαναφέρθηκε επηρεάζεται και αυτός από την παραπάνω προαναφερθείσα τάση ανάπτυξης. Σίγουρα βλέπουμε πολλούς καταναλωτές να επιλέγουν στέγες από την πράσινη κατηγορία επειδή ενδιαφέρονται να βοηθήσουν το περιβάλλον, πρώτα από όλα. Αλλά επιπλέον θέλουν να προσθέσουν αξία στα σπίτια τους περιορίζοντας τους λογαριασμούς ενέργειας μέσω του τρόπου κατασκευής και διαχείρισης αυτών. Επίσης στο παρελθόν, σε αντίθεση με το τι συμβαίνει σήμερα, τα τρέχοντα προγράμματα παροχής κινήτρων μέσω των κυβερνήσεων και των τοπικών επιχειρήσεων ήταν σχεδόν ανύπαρκτα. Μια πολύ καλή οικολογική επιλογή στέγης είναι αυτή

της ηλιακής αντανακλαστικής στέγης βότσαλων. Σε αυτήν οι κόκκοι αντανακλούν την ηλιακή ενέργεια και ακτινοβολούν θερμότητα πολύ καλύτερα από ότι μια παραδοσιακά ασφαλοστρωμένη στέγη, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση του κτιριακού κόστους ενέργειας. [Fanjoy, R. (2007)]

Στέγες με πήλινα πλακάκια: Ευρωπαίοι άποικοι χρησιμοποιούσαν πήλινα κεραμίδια για στέγες ήδη από τα μέσα του 17ου αιώνα. Σε μερικές πόλεις όπως η Νέα Υόρκη και η Βοστώνη, ο πηλός χρησιμοποιήθηκε ως προφύλαξη έναντι των πυρκαγιών, όπως αυτές που κατέστρεψαν το Λονδίνο το 1666 και τη Βοστώνη το 1679. Τα κεραμίδια στεγών που βρέθηκαν στα μέσα του 18ου αιώνα σε οικισμούς της Μοραβίας στην Πενσυλβανία έμοιαζαν με εκείνα που βρίσκονται στη Γερμανία. Αυτά συνήθως είχαν μήκος 1415" και πάχος 67" και παρουσίαζαν καμπυλότητα στο πίσω τους η οποία τους επιτρέπεται να κρατηθούν στο σανίδωμα χωρίς καρφιά ή μανταλάκια. Η επιφάνεια του κεραμιδιού λόγω της μορφής της επέτρεπε την προώθηση των υδάτων προς την αποχέτευση. Επίπεδα ορθογώνια πλακίδια χρησιμοποιήθηκαν περισσότερο από το 17 μέχρι τα μέσα του 19ου αιώνα. Αυτά είχαν δύο τρύπες στο ένα άκρο για ένα καρφί ή πάσσαλο συνδετήρα. Μερικές φορές κονίαμα εφαρμόστηκε μεταξύ αυτών για να εξασφαλίσει την ευστάθεια των κεραμιδιών σε περίπτωση δυνατού αέρα. Στα μέσα του 19ου αιώνα, οι κεραμοσκεπές συχνά αντικαταστήθηκαν από στέγες από λαμαρίνα, οι οποίες ήταν ελαφρύτερες και πιο εύκολες στην εγκατάσταση και τη διατήρηση της κατασκευής τους. Ωστόσο, από το τέλος του αιώνα, η αυξημένη ζήτηση για κτίρια με παραδοσιακό στυλ αύξησε ξανά τη δημοτικότητα για αυτό το γραφικό υλικό στεγών. [Sweetser, S. (1978)]



Εικόνα 14: Στέγη από πλακάκια

Slate: Μια πρακτική που έφεραν οι έποικοι στο Νέο Κόσμο ήταν αυτή των στέγων από σχιστόλιθο. Αποδεικτικά στοιχεία χρήσης αυτών έχουν βρεθεί, ανάμεσα στα ερείπια στα μέσα του 17ου αιώνα. Όμως, λόγω του κόστους και του χρόνου που απαιτείται για την απόκτηση του υλικού, το οποίο ως επί το πλείστον εισάγονταν από την Ουαλία, η χρήση του

σχιστόλιθου ήταν αρχικά περιορισμένη. Πηγές από σχιστόλιθο ήταν γνωστό ότι υπάρχουν κατά μήκος της ανατολικής ακτής στη Βιρτζίνια, αλλά υπήρχαν δυσκολίες στον τομέα των εσωτερικών μεταφορών λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας στις πόλεις. Ουαλικής προέλευσης σχιστόλιθοι συνέχισαν να εισάγονται στην Αμερική μέχρι την ανάπτυξη των καναλιών και των σιδηροδρόμων στα μέσα του 19ου αιώνα που ο αμερικάνικος σχιστόλιθος έγινε πλέον πιο προσιτή και οικονομική λύση. Ο σχιστόλιθος ήταν δημοφιλής για την αντοχή του, καθώς αποτελεί πυρίμαχο ποιοτικό υλικό με ανεπτυγμένες αισθητικές δυνατότητες. Επειδή ο σχιστόλιθος ήταν διαθέσιμος σε διάφορα χρώματα (κόκκινο, πράσινο, μοβ, και μπλε-γκρι), αποτελούσε ένα αποτελεσματικό υλικό για διακοσμητικά μοτίβα σε πολλές στέγες του 19ου αιώνα. Σχιστόλιθος συνέχισε να χρησιμοποιείται και τον 20ο αιώνα, κυρίως για αναβίωση κτιρίων αρχιτεκτονικής μορφής Tudor (Tudor αρχιτεκτονική είναι η τελική εξέλιξη της μεσαιωνικής αρχιτεκτονικής κατά τη διάρκεια της περιόδου 1485-1603). [Sweetsers, S. (1978)]

Ξύλο: Το ξύλο ήταν δημοφιλές στην Αμερική σε όλες τις περιόδους της ιστορίας των κτιρίων της. Το μέγεθος και το σχήμα του ξύλου, καθώς και η ανάλυση της στέγη σε επιμέρους ξύλινα στοιχεία και η μορφή αυτών διέφεραν ανάλογα με την περιοχή που αναφερόμαστε. Οι άνθρωποι σε συγκεκριμένες περιφέρειες ανέπτυξαν τις προτιμήσεις τους για το τοπικό είδος ξύλου το οποίο ταίριαζε καλύτερα στους σκοπούς τους. Στη Νέα Αγγλία και την Delaware Valley χρησιμοποιήθηκε κυρίως λευκό πεύκο, αντίθετα στο νότο χρησιμοποιήθηκε κυρίως ως υλικό το κυπαρίσσι και η βελανιδιά. Στην μακρινή δύση χρησιμοποιήθηκε ο κόκκινος κέδρος γνωστός ως ‘κόκκινο ξύλο’. Μερικές φορές μια προστατευτική επικάλυψη εφαρμόζονταν για την αύξηση της ανθεκτικότητας των τμημάτων του ξύλου, όπως ένα μείγμα σκόνης τούβλου με λάδι ψαριού είτε σε ένα χρώμα από κόκκινο οξειδίο σιδήρου και λινέλαιο. Συνήθως στις αστικές περιοχές οι ξύλινες στέγες αντικαταστάθηκαν με πιο πυρίμαχα υλικά σε αντίθεση με τις αγροτικές περιοχές όπου συνέχισε να χρησιμοποιείται το ξύλο αφού δεν ήταν τόσο ανεπτυγμένος ο φόβος μιας ενδεχόμενης πυρκαγιάς. Σε πολλά βικτοριανού τύπου σπίτια, η πρακτική του ξύλο επέζησε παρά την τεχνολογική πρόοδο των μεταλλικών στεγών του 19ου αιώνα, και κοντά στην καμπή του αιώνα αυτές απολαμβάνουν πλήρη αναβίωση του ομώνυμο στυλ με ξύλινα τμήματα. [Sweetsers, S. (1978)]



Εικόνα 15: Ξύλινα κεραμίδια

Μέταλλο: Μεταλλικές στέγες άρχισαν να χρησιμοποιούνται κυρίως τον 19^ο αιώνα. Μέχρι τότε το μόνο μέταλλο που χρησιμοποιούνται συνήθως ήταν ο μόλυβδος και ο χαλκός. Ο μόλυβδος καθώς και ο χαλκός που κάλυπτε τις ταράτσες όπου κυριαρχούσε μέχρι πριν ξύλο, πλακάκι ή βότσαλα από σχιστόλιθο ήταν ακατάλληλα λόγω της πίσσας που περιείχαν ή λόγω του σχήματος της οροφής που δεν μπορούσαν να καλύψουν. Χαλκός με ραφές κάλυπτε ορισμένες από τις πιο αξιοσημείωτες αμερικάνικες στέγες συμπεριλαμβανομένων και πολλών εκκλησιαστικών στεγών, όπως η Christ Church (1727-1744) στη Φιλαδέλφεια. Επίπεδος χαλκός χρησιμοποιήθηκε σε πολλούς θόλους και τρούλους. Αργότερα αυτά αντικαταστήθηκαν από φύλλα σιδήρου. Η μέθοδος για κυματοειδές χαρτόνι σιδήρου είναι αρχικά κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στην Αγγλία το 1829. Το κυματοειδές χαρτόνι σκληραίνει τα φύλλα, και επιτρέπει την κάλυψη μεγαλύτερης έκτασης πάνω από ένα ελαφρύτερο πλαίσιο, καθώς και τη μείωση του χρόνου εγκατάστασης και εργασίας. Το 1834 ο Αμερικανός αρχιτέκτονας William Strickland πρότεινε τη λύση για χρήση αυλακωτού σιδήρου για να καλύψει τις σχεδιαστικές απαιτήσεις της κατασκευής της αγοράς στη Φιλαδέλφεια. Γαλβανισμός με ψευδάργυρο για την προστασία του μετάλλου από τη σκουριά αναπτύχθηκε για πρώτη φορά στη Γαλλία. Tin-πλάκες σιδήρου που κοινώς ονομάζονται "στέγες κασσίτερου" χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς στον Καναδά τον 18^ο αιώνα, αλλά δεν ήταν τόσο διαδεδομένες στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ο Τόμας Τζέφερσον ήταν πρώτος συνήγορος της στέγης κασσίτερου και εγκατέστησε μια τέτοια στο "Monticello" (1770-1802). Ωστόσο, μόλις ιδρύθηκαν ελασματοουργεία το χαμηλό κόστος, το μικρό βάρος, και το χαμηλό κόστος συντήρησης του λευκοσιδήρου, τον έκανε το πιο διαδεδομένο υλικό κατασκευής σκεπής. Στέγες από κασσίτερο χρησιμοποιήθηκαν επίσης, οι οποίες ήταν καλά χρωματισμένες, συνήθως με κόκκινο χρώμα ή ανάλογα με την πρόταση του αρχιτέκτονα. Η Terne πλάκα διέφερε από το λευκοσίδηρο στο ότι το σίδηρο ήταν βουτηγμένο σε ένα κράμα του μολύβδου και του κασσίτερου, το οποίο του έδινε ένα πιο θαμπό φινίρισμα. Ο ψευδάργυρος μπήκε στη χρήση κατά το 1820, την ίδια δηλαδή χρονική στιγμή που ο λευκοσίδηρος γινόταν

δημοφιλής. Αν και λιγότερο δαπανηρό υποκατάστατο μολύβδου, τα πλεονεκτήματά του ήταν αμφιλεγόμενα και ποτέ δε χρησιμοποιήθηκε ευρέως.

[Sweetser, S. (1978)]

Άλλα Υλικά: Η άσφαλτος χρησιμοποιήθηκε επίσης για στέγες τη δεκαετία του 1890. Πολλές στέγες αμιάντου, αλουμίνιου, ανοξειδωτού χάλυβα, γαλβανισμένου χάλυβα μπορεί να έχουν μελλοντικά ιστορική αξία. *[Sweetser, S. (1978)]*

Η επιλογή των υλικών και τεχνολογιών για την κατασκευή μιας στέγης πρέπει να πληρούν τις αισθητές ανάγκες του χρήστη, καθώς και τις αναπτυξιακές ανάγκες της κοινωνίας, χωρίς να προκαλεί δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον. Τα τελευταία χρόνια, η ευαισθητοποίηση των περιβαλλοντικών πτυχών έχει αυξηθεί όσον αφορά τον κατασκευαστικό τομέα. Οι διαδικασίες κατασκευής του κτιρίου περιλαμβάνουν υλικά τα οποία συμβάλλουν με τα αέρια που εκπέμπουν στην ατμόσφαιρα, όπως το CO₂, στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Οι ενεργειακές ανάγκες για την παραγωγή και την επεξεργασία των διαφόρων δομικών υλικών και οι εκπομπές CO₂ που επιφέρουν αρνητικές συνέπειες για το περιβάλλον χρήζουν ιδιαίτερης ανησυχίας τα τελευταία χρόνια. Υπάρχουν ποικίλες εναλλακτικές λύσεις για την κατασκευή της οροφής ενός κτιρίου με ενεργειακές εκπομπές ευνοϊκότερες προς το περιβάλλον. *[Venkatarama, B. (2001)]*

Ένας από αυτούς επιτυγχάνεται με σταθεροποιημένα μπλοκ λάσπης (SMB) για πλήρωση της πλάκας οροφής. Στερεά πλάκα τύπου RC χρησιμοποιείται πολύ συχνά ως πλάκα δαπέδου καθώς και ως πλάκα οροφής κατασκευής. Ένα μέρος του υλικού κάτω από τον ουδέτερο άξονα σε μια σταθερή πλάκα μπορεί να αντικατασταθεί από κατάλληλο υλικό πληρώσεως. Η χρήση αυτού του υλικού πλήρωσης μπορεί να προκαλέσει μείωση του νεκρού βάρους της πλάκας RC, με αποτέλεσμα εξοικονόμηση τόσο στο κόστος όσο και στην ενέργεια της οροφής. Το συνολικό ενεργειακό περιεχόμενο των συστατικών υλικών SMB πλήρωσης πλάκα είναι 590 MJ/m² της συνολικής περιοχής του σχεδίου της πλάκας. *[Venkatarama, B. (2001)]*



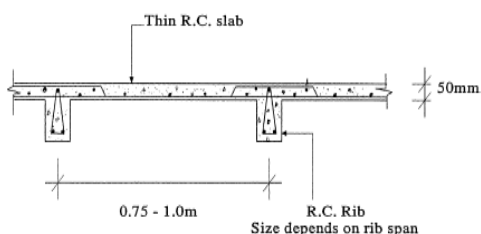
Εικόνα 16: Κελία από SMB

Ένας άλλος τρόπος είναι τα σύνθετα πάνελ οροφής με τούβλα . Αυτή η οροφή αποτελείται από ένα ενισχυμένο πάνελ πλινθοδομής που υποστηρίζουν τα RC δοκάρια. Το ενεργειακό περιεχόμενο μιας τέτοιας πλάκας οροφής για 3,6 μέτρα ανοίγματος είναι περίπου 560 MJ/m² της προβλεπόμενης περιοχής του σχεδίου της πλάκας. [Venkatarama, B. (2001)]



Εικόνα 16: Σύνθετο πάνελ οροφής με τούβλα

Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε οπλισμένο σκυρόδεμα (RC) με ραβδώσεις πλάκας οροφής. Λεπτές RC πλάκες πάχους 50-60 χιλιοστών υποστηρίζονται από μικρά RC δοκάρια, όπως φαίνεται στην εικόνα 17. Η απόσταση από τις RC δοκούς είναι της τάξης των 0,75 - 1 m και το μέγεθος των δοκών εξαρτάται από την οροφή. Αυτό το είδος της οροφής μπορεί να έχει ενεργειακό περιεχόμενο 491 MJ/m² της πλάκας τομέα για 3,6 μέτρα ανοίγματος [Venkatarama, B. (2001)]



Εικόνα 17: Τομή πλάκας RC

Ενδεικτικές τιμές ενέργειας των διαφόρων τύπων οροφής παρατίθενται στον πίνακα 2. Ο πίνακας δίνει ενέργεια ανά m² του σχεδίου περιοχής της οροφής και την αντίστοιχη τιμή της τυπικής RC πλάκας ενέργειας. [Venkatarama, B. (2001)]

Πίνακας 2: Ενέργεια στα διαφορετικά συστήματα οροφής

Energy in different roofs/floor systems (span = 3.6 m)

Number	Type of roof/floor	Energy/m ² of plan area (MJ)	Equivalent of RC solid slab energy (%)
1	RC slab	730	100.0
2	SMB filler slab roof	590	80.8
3	RC ribbed slab roof	491	67.3
4	Composite brick panel roof	560	76.7
5	Burnt clay brick masonry vault roof	575	78.8
6	SMB masonry vault roof	418	57.3
7	Mangalore tile roof	227	31.1
8	Ferroconcrete roof	158	21.6

Σκοπός μας πλέον όπως προαναφέρθηκε είναι να κάνουμε τις στέγες μας όσο το δυνατόν πιο φιλικές προς το περιβάλλον. Ένα σημαντικό ίσως τμήμα αυτών το οποίο επηρεάζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που επιφέρει η κατασκευή αυτών, αφορά τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται στις οροφές για λόγους μόνωσης τα οποία θα μπορούσαν να αντικατασταθούν με αντίστοιχα ενισχυμένα με ίνες πολυμερή FRP σύνθετα υλικά που όπως έχει ερευνηθεί εκτενώς αποτελούν μια πιθανή εναλλακτική λύση στην παραδοσιακά δομικά υλικά. Σήμερα, η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά FRP αποτελούνται από μια βάση του πετρελαίου, όπως ο πολυεστέρας, ή ο βινυλεστέρας και από συνθετικές ίνες όπως το γυαλί, ο άνθρακας και το αραμίδιο. Πρόκειται κατά κανόνα για υλικά που συνδέονται με υψηλό περιβαλλοντικό κόστος και υψηλό κόστος κατασκευής. Τα βιο-σύνθετα είναι ένα νέο, καινοτόμο, και περιβαλλοντικά προσφιλές υλικό που κατασκευάζεται κατά κύριο λόγο από φυσικά υλικά. Προέρχονται κυρίως από καλλιεργημένες ή ανακυκλωμένες ίνες κυτταρίνης, δεν βασίζονται στο πετρέλαιο, και δεν καταστρέφουν ως πρώτη ύλη την ξυλεία. Επιπλέον είναι λιγότερο ακριβά από τα συνθετικά σύνθετα. [Hu, B. (2007)]

1.5 Μεταλλικές κατασκευές σε στέγες

Στην αρχαιότητα τόσο οι αρχαίοι Έλληνες όσο και οι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν τα μέταλλα μόνο για να συνδέσουν τα επιμέρους δομικά στοιχεία. Μετά τη βιομηχανική επανάσταση υπάρχει έξαρση της μόρφωσης σιδηρών κατασκευών, αρχικά με χρήση κυρίως χυτοσίδηρου και σφυρηλατημένου σιδήρου και αργότερα με χρήση χάλυβα. Περί τα τέλη του 18^{ου} αιώνα ξεκινάει η κατασκευή γεφυρών και κτιρίων από κατεργασμένο σίδηρο. Μετά από έναν αιώνα αρχίζει η παραγωγή χάλυβα σε τιμές και ποσότητες αρκετά ανταγωνιστικές για το σίδηρο, στοιχεία τέτοια που τον καθιστούν κυρίαρχο σαν επιλογή για την ανέγερση σιδηρών κατασκευών. Ο χάλυβας είναι κράμα σιδήρου και άνθρακα με περιεκτικότητα στη χημική του σύνθεση 0,15-1,8% σε άνθρακα. Έχει χαρακτηριστική ιδιότητα ότι είναι ελατός χωρίς περεταίρω επεξεργασία. Παρουσιάζει βελτιωμένες ιδιότητες αντοχής σε σχέση με το σίδηρο, λόγω της διαφοράς που έχουν σε περιεκτικότητα σε άνθρακα. Αυτές οι ιδιότητες σε συνδυασμό με το μειωμένο κόστος παραγωγής του τον κατέστησαν ικανό να αντικαταστήσει πλήρως τον σίδηρο στην κατασκευαστική πραγματικότητα των μεταλλικών κατασκευών. Κατά την τελευταία δεκαετία του δέκατου ένατου αιώνα, η κατασκευή κτιρίων, γραφείων, εκθεσιακών χώρων και άλλων κατασκευών από χάλυβα άρχισε να γίνεται ιδιαίτερα δημοφιλής. Οι θεωρητικές γνώσεις των μηχανικών της εποχής για τη συμπεριφορά του χάλυβα περιορίζονταν στο νόμο της ελαστικότητας (Hooke, 1676), στη θεωρία λυγισμού ράβδων (Euler, 1744) και στις διαφορικές εξισώσεις λυγισμού πλακών (Navier, 1823). Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές της εποχής προχώρησαν στην κατασκευή πρωτοποριακών οικοδομημάτων για τα δεδομένα των γνώσεων τους, με επιτυχία κατά κύριο λόγο αποτελέσματα, αντιλαμβανόμενοι τις δυνατότητες που μπορούσε να τους παρέχει ο χάλυβας ως δομικό υλικό. Τα πρώτα χαλύβδινα κτίρια κατασκευάστηκαν στηριζόμενα στη θεωρία κατασκευής του στατικού τους συστήματος, πράγμα που δεν απέχει πολύ από τη σημερινή πραγματικότητα. Ο φορέας του αποτελούνταν είτε από ένα πολυώροφο πλαίσιο με ενισχυμένους τους κόμβους με ενισχυμένους τους κόμβους σύνδεσης ορόφων υποστυλωμάτων, είτε υπήρχε καθ' ύψος ανεπτυγμένο δικτύωμα με ηλώσεις με το οποίο συνδέονταν οι όροφοι. Έτσι εξασφαλιζόνταν ότι θα παραλαμβάνονταν με τον επιθυμητό τρόπο οι ροπές που αναπτύσσονταν στην κατασκευή λόγω πλευρικών οριζόντιων ωθήσεων (ανέμου, σεισμού). [Μπανιωτόπουλος, Κ. (2009)]

Με τη βοήθεια της ανάπτυξης της τεχνολογίας μετά τις τελευταίες δεκαετίες άρχισαν να κατασκευάζονται πολύ ψηλά χαλύβδινα κτίρια τα οποία ονομάστηκαν ουρανοξύστες.

Ορόσημο αποτέλεσε η κατασκευή του κτιρίου Empire State (Νέα Υόρκη, ΗΠΑ) , με αρχιτεκτονική μορφή art deco (διεθνές καλλιτεχνικό κίνημα, το οποίο επικράτησε από το 1925 μέχρι τη δεκαετία του 1940) του οποίου η κατασκευή διήρκησε μόλις 14 μήνες και κατασκευάστηκε το 1931. Το κτίριο αυτό διατήρησε τον τίτλο του υψηλότερου κτιρίου της γης για 41 χρόνια. Γενικότερα θα μπορούσε να πει κανείς με σιγουριά ότι η χρήση των χαλύβδινων κατασκευών είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε πολλά ειδικά έργα όπως είναι οι χαλύβδινοι πύργοι ανεμογεννητριών, οι χαλύβδινες καπνοδόχοι, οι πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι χαλύβδινες δεξαμενές και το σιλό. Οι κατασκευή των παραπάνω μπορεί να γίνει αποκλειστικά με χρήση χάλυβα. Αξίζει να σημειωθεί η εφαρμογή του χάλυβα στις αναστηλώσεις κτιρίων, αφού αυτή η μέθοδος αποτελεί τη σημαντικότερη εφαρμογή ως τρόπο αναβάθμισης και ενίσχυσης ιστορικών κτιρίων. [Salmon, C. (2009)]

Πολλές φορές προτείνεται η χρήση μεταλλικών κατασκευών ακόμα και σε περιπτώσεις όπου δυνητικά θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε άλλο υλικό κατασκευής. Παρόλο που το κόστος ανέγερσης τέτοιων οικοδομημάτων είναι σχετικά υψηλό, ο χάλυβας μας παρέχει αναμφισβήτητα επιθυμητές κατασκευαστικές ιδιότητες που τον καθιστούν καλή επιλογή για χρήση. Το μικρό ίδιο βάρος αυτού ιδιαίτερα συγκριτικά με το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ίσως το βασικότερο προτέρημα που παρέχει και χρήζει εκμετάλλευσης για την ανέγερση των κατασκευών μας. [Sherief, S. (2002)]

Η συγκρότηση μεταλλικών στεγών διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον κατασκευαστικό τομέα του χάλυβα. Υπάρχουν πολλές μεταβλητές σχεδιασμού που πρέπει να ληφθούν υπόψη σε αυτές για να τεθεί ο σωστός συνδυασμός για την επίτευξη ενός καλύτερου σχεδίου. Τα κτίρια που έχουν χαλύβδινο πλαισιωτό φορέα χρησιμοποιούν συχνά για κατάστρωμα στέγης απλώς ένα φύλλο μετάλλου. Αυτό το κατάστρωμα μετάλλου κατά κανόνα επικαλύπτεται από τα υλικά κατασκευής σκεπής για να παράσχει ένα σφιχτό περίβλημα για την προστασία της κατασκευής από τις καιρικές συνθήκες. Τα μεταλλικά καταστρώματα οροφής που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι μη συνδυαζόμενα. Το φύλλο χάλυβα αποτελείται από μέταλλο μορφοποιημένο υπό συνθήκες ψύξης που κατασκευάζεται από λαμαρίνα, που συνήθως έχει αντοχή διαρροής τουλάχιστον 230 MPa. Συνήθως διατίθεται σε 38 και 75 χιλιοστά βάθους. Τα πάχη του φύλλου του καταστρώματος του μετάλλου κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 22 και 16gage, αν και εκτός αυτού του εύρους μερικές φορές χρησιμοποιούνται και άλλα πάχη. Γενικά, είναι σύνηθες να χρησιμοποιείται ένα βαθύτερο κατάστρωμα έτσι ώστε να μπορεί να εκτείνεται σε μεγαλύτερες αποστάσεις

μεταξύ των στηριγμάτων, μειώνοντας έτσι τον αριθμό των δοκών που απαιτούνται για τη μόρφωση της κατασκευής μας. Εντούτοις, κάθε έργο πρέπει να αξιολογείται σε ατομική για τον καθορισμό του πιο αποτελεσματικού συνδυασμού της κατασκευής του καταστρώματος όσον αφορά το βάθος και την απόσταση της δέσμης. Για ειδικές εφαρμογές, είναι διαθέσιμα καταστρώματα οροφής που μπορούν να καλύψουν μεγάλα ανοίγματα και αυτά διατίθεται με τα βάθη των 114, 152, και 190 χιλιοστά από ορισμένους κατασκευαστές. Τυπικά ανοίγματα που καλύπτονται κυμαίνονται μεταξύ 0,90 και 2,40 μέτρα. Πολλά συστήματα οροφής από δομικό χάλυβα διαμόρφωσης είναι διαθέσιμα στην κατασκευαστική πραγματικότητα. Τα θερμής έλασης σχήματα χάλυβα είναι αυτά τα οποία χρησιμοποιούνται πιο συχνά για τα μέλη στεγαστρου πλαισιωμένης μεταλλικής κατασκευής. Αυτά τα σχήματα, τα οποία είναι σχετικά εύκολο να κατασκευαστούν, είναι οικονομική λύση ως δοκάρια και αποτελούν καλή λύση για να γεφυρωθούν μέτρια ανοίγματα. Δοκοί open-web χρησιμοποιούνται πιο συχνά για μέτριας έως μεγάλης έκτασης διαμόρφωση στέγη. Όταν εμπλέκονται σχετικά μεγάλα ανοίγματα, επιλέγονται συχνά δικτύωματα ως λύση για το σύστημα δαπέδου-πλαισίου. Τα φορτία σχεδιασμού στέγης καθορίζονται από: (i) το νεκρό φορτίο της οροφής (ii) το ελάχιστο ωφέλιμο φορτίο οροφής για να αντέξει το βάρος των εργαζομένων και τον εξοπλισμό κατά τη συντήρηση και επισκευή και (iii) τα αναμενόμενα φορτία χιονιού. Ο προσδιορισμός των φορτίων χιονιού για τις στέγες συχνά βασίζεται στο μέγιστο φορτίο χιονιού σε χρονική διάρκεια μελέτης 50 χρόνια, ως επανάληψη περιόδου επαναφοράς. Χάρτες στους οποίους αναφέρεται φορτία χιονιού εδάφους για διάφορες περιφέρειες παρουσιάζονται στο μοντέλο των προδιαγραφών για τα κτίρια και πρότυπα της κάθε χώρας βάση του Ευρωκώδικα 1. Το φορτίο χιονιού σχεδιασμού για επίπεδες οροφές υποτίθεται ότι είναι ένα ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο. Η οροφή μπορεί να επηρεάζεται από το υψηλότερο τμήμα της ίδια της δομής ή από άλλη δομή ή ακόμα και από χαρακτηριστικό έδαφος κοντά της, αν ο διαχωρισμός της από αυτό είναι 6,10 μέτρα ή λιγότερο. Δεδομένου ότι οι περισσότερες βλάβες που συνδέονται με την οροφή από φορτία χιονιού σε στέγες δεν προκαλούνται συνήθως από μέτριες υπερφορτώσεις για κάθε τετραγωνικό πόδι της οροφής, αλλά μάλλον από την εντοπισμένη σημαντική υπερφόρτωση που προκαλείται από τον παρασυρμό του χιονιού, είναι εξαιρετικά σημαντικό να εξετάσουμε τις εντοπισμένες φορτίσεις από τα παρασυρόμενα φορτία αυτού στο σχεδιασμό της στέγης. Ένα τυπικό σχήμα φορτίου χιονιού σχεδιασμού που ενεργεί για μια επίπεδη οροφή ενός κτίριο που έχει δύο διαφορετικά επίπεδα στέγης παρουσιάζεται στην Εικόνα 18. [Sherief, S. (2002)]

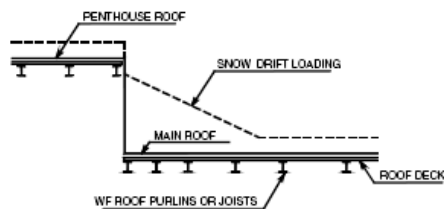


Fig. 2. Design snow load on a two-level roof.

Εικόνα 18: Σχεδιασμός φορτίου χιονιού σε οροφή δύο επιπέδων

Μια κοινή πρακτική μεταξύ των σχεδιαστών είναι η τοποθέτηση των τεγίδων σε ίσα διαστήματα όταν η σκεπή υποβάλλεται σε ομοιόμορφο φορτίο. Αυτό εξασφαλίζεται με τη χρήση τεγίδων ίσου μεγέθους καθώς και από το ότι το τελικό μέγεθος όλου του καταστρώματος της οροφής θα είναι το ίδιο, όπως επίσης και το ότι οι αρνητικές κάμψεις στο κατάστρωμα στέγης στα ενδιάμεσα των στηρίξεων θα είναι σχεδόν ίσες. Σε περιοχές που η στέγη υπόκειται σε χιονοστιβάδα φόρτωσης, το φορτίο σχεδιασμού δεν είναι πλέον ένα ενιαίο φορτίο. Υπάρχουν δύο φιλοσοφίες σχεδιασμού που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το πρόβλημα της στέγης του καταστρώματος, αυτή της επιτρεπόμενης έντασης σχεδιασμού (ASD) και αυτή της αντοχής στο παράγοντα του φορτίου σχεδιασμού (LRFD). Η ASD προσέγγιση είναι ακόμη η πιο δημοφιλής μεταξύ των εν ενεργεία μηχανικών και βρίσκεται σε ευρεία χρήση στη βιομηχανία. Στην προσέγγιση ASD, η επιτρεπόμενη τάση κάμψης περιορίζεται στα 140 MPa. Τα ακόλουθα κριτήρια σχεδιασμού πρέπει να πληρούνται:

1. Η αλληλεπίδραση των διατμητικών δυνάμεων και ροπές κάμψης στο κατάστρωμα στέγης σε οποιοδήποτε εσωτερική στήριξη πρέπει να ελέγχεται με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

$$\left(\frac{M_{\text{applied}}}{M_{\text{allowable}}} \right)^2 + \left(\frac{V_{\text{applied}}}{V_{\text{allowable}}} \right)^2 \leq 1 \quad (27)$$

2. Η παραμόρφωση του καταστρώματος στέγης λόγω των φορτίων περιορίζεται στο 1 / 240 της έκτασης που εξετάζεται.
3. Οι αντιδράσεις στο τέλος και στο εσωτερικό δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα τέλη και τις εσωτερικές αντιδράσεις, όπως υπολογίζεται ανά τις προδιαγραφές.
4. Για να ληφθούν υπόψη για την κατασκευή τα φορτία συντήρησης, απαιτείται η απόσταση μεταξύ των παρακείμενων τεγίδων να διέπεται από ένα ανώτατο όριο έντασης των 180 MPa και ένα ανώτατο όριο παραμόρφωσης του $L = 240$ με $0,89$ KN συγκεντρωμένο φορτίο να

εφαρμόζεται στο μέσο διάστημα σε μια έκταση 300 χιλιοστών του τμήματος του καταστρώματος. Οι τεγίδες αντιμετωπίζονται ως απλά δοκάρια που έχουν σχεδιαστεί για αντοχή σε κάμψη και για τις προβλεπόμενες απαιτήσεις συντήρησης. [Sherief, S. (2002)]

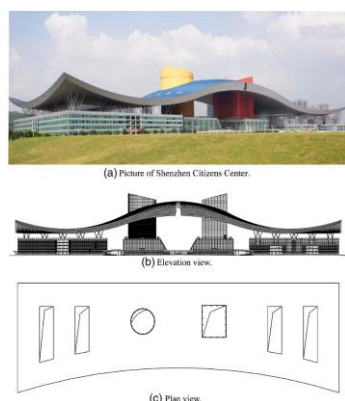
Η συμπεριφορά των βαρέων μετάλλων (Cd, Cu, Zn, Cr, Pb), καθώς και των θρεπτικών ουσιών (οργανικά C, P και N παράμετροι) επηρεάζει την ισορροπία του εδάφους κατά τη διάρκεια της διήθησης του νερού μέσω της οροφής απορροής καθώς διεισδύει σε αυτό. Οι συγκεντρώσεις των διαφόρων στοιχείων προσδιορίζονται στα όμβρια ύδατα που προέρχονται από την απορροή της στέγης. Έτσι το είδος του μεταλλικού υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η στέγη είναι σημαντικό λόγω των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που μπορεί να προκαλέσει η απορροή των όμβριων υδάτων μέσω της πορείας τους από τη στέγη. [Yaelmason, A (1999)]

Οι οροφές των κατασκευών, όπως κτιρίων και σπιτιών εκτίθενται συστηματικά στις καιρικές συνθήκες γεγονός που προκαλεί φθορές τόσο στην ίδια τη στέγη όσο και σε ολόκληρη την κατασκευή. Για να αντιμετωπιστεί αυτή ακριβώς η φθορά οι στέγες καλύπτονται από υλικά που είναι ανθεκτικά στην έκθεση στις καιρικές επιπονήσεις. Το ξύλο και τα κεραμικά είναι υλικά που συνήθως επιλέγονται για αυτή τη χρήση. Αυτά τοποθετούνται συνήθως στη στέγη με οριζόντια μόρφωση ώστε να επιτρέπουν την κύλιση των κατακρημνίσεων. Επιπρόσθετα επιζητείται εκτός από προστασία από τις καιρικές συνθήκες και παροχή πυρασφάλειας μέσω του επιλεγόμενου υλικού κατασκευής στέγης. Το μεγαλύτερο ίσως μειονέκτημα που παρουσιάζουν τόσο τα κεραμικά υλικά όσο και το ξύλο σαν επιλεγόμενα για μόρφωση οροφής είναι ότι φθείρονται ουσιαστικά λόγω της έκθεσης τους στις επιπονήσεις τόσο των κατακρημνίσεων όσο και της θερμοκρασίας και του αέρα. Οι αντικατάσταση αυτών σε τέτοια περίπτωση είναι αρκετά ακριβή και δύσκολη στην πραγματοποίησή της. Επιπλέον συγκεκριμένα το ξύλο δεν παρέχει πυρασφάλεια. Πολλά από αυτά τα προβλήματα μπορούν να ξεπεραστούν μέσω της αντικατάστασης των προαναφερθέντων υλικών με αντίστοιχα μεταλλικά. Το μέταλλο είναι σαφώς πιο ανθεκτικό στο χρόνο και παρέχει ασφάλεια σε περίπτωση φωτιάς. Παρόλα αυτά οι μεταλλικές στέγες παρουσιάζουν δυο βασικά μειονεκτήματα. Αρχικά λόγω της δυσκολίας κατασκευής και κοπής τους και λόγω της αυξημένης κατασκευαστικής εξειδίκευσης που απαιτείται για χρήση αυτών εμφανίζουν αυξημένο κατασκευαστικό κόστος. Επίσης η τυπική μορφή που συναντάται δεν είναι αισθητικά αποδεκτές από το μέσο χρήστη και για το λόγο αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται για τη στέγαση εργοστασιακών και τεχνικών εγκαταστάσεων. Εάν όμως χρησιμοποιηθούν με

ειδικό σχεδιασμό και μελέτη μπορούν σίγουρα να αποτελέσουν μια εξαιρετική επιλογή για στέγαση ιδιότυπων κατασκευών που παρέχουν εξαιρετικά αποδεκτό αισθητικό αποτέλεσμα.
[Nadel, R. (1992)]

1.5.1 Παράδειγμα μεταλλικής στέγης με καμπύλη μορφή μακριού ανοίγματος

Το πολιτιστικό κέντρο του Shenzhen, όπως φαίνεται στην Εικόνα 19, βρίσκεται στο κεντρική περιοχή της πόλης Shenzhen στην Κίνα.



Εικόνα 19: Απεικόνιση του πολιτιστικού κέντρου

Το κέντρο αυτό καλύπτει περίπου 210.000 m² μικτή επιφάνεια κτιρίου. Ολόκληρη η οροφή αποτελείται από τρία μέρη. Ένα κεντρικό τμήμα και δύο συμμετρικές πτέρυγες. Η οροφή του πολιτιστικού κέντρου είναι μια χωρική δομή πλέγματος που υποστηρίζεται από ατσάλινες στήλες και από δύο πύργους κάτω από αυτές. Οι δύο πύργοι βρίσκονται στο κεντρικό τμήμα. Ο ένας έχει μορφή κυκλικού σχήματος πύργου με διάμετρο 36 μέτρα ενώ ο άλλος είναι ορθογώνιου σχήματος πύργου με περιοχή επί του σχεδίου διαστάσεων 36 μέτρα επί 45 μέτρα. Η οροφή είναι συνολικά 486 μέτρα και αλλάζει πλάτος από το 120 μέτρο της στο κεντρικό τμήμα έως το 154 μέτρο της στα δύο άκρα της, ενώ το βάθος της κυμαίνεται από 2,25 έως 9,00 μέτρα. Το ύψος από το έδαφος μέχρι την κορυφή της στέγης είναι 80 μέτρα. Τα επάνω μέρη και οι χαμηλότερες επιφάνειες της οροφής είναι όλα καμπύλου σχήματος και η χαμηλότερη επιφάνεια καλύπτεται με πάνελ οροφής με 13,6% κοίλο χώρο. Η δύο συμμετρικές πτέρυγες έχουν ένα διπλό στρώμα τετραεδρικού χωρικού πλέγματος δομής με βιδωτές συνδεδεμένες αρθρώσεις που υποστηρίζονται από 17 στήλες. Οι ράβδοι των χωρικών πλεγμάτων είναι κυκλικές σωλήνες από χάλυβα και οι συνδέσεις μεταξύ των ράβδων γίνονται με μπουλόνια. Το κεντρικό τμήμα της οροφής είναι ένα σύνθετο δομικό σύστημα που αποτελείται από τρία υποσυστήματα 1. Βασικές ζεύξεις γύρω από το κυκλικό σχήμα πύργου και ορθογώνιο σχήμα πύργου. 2. Χωρικά δικτυωτά πλέγματα μεταξύ των κύριων ζεύξεων και 3. Χωρικά δικτυωτά πλέγματα που συνδέονται με το κύριο δικτύωμα και τα υποστυλώματα στα δύο άκρα της. Τα 486 μέτρα μήκους της οροφής του πολιτιστικού

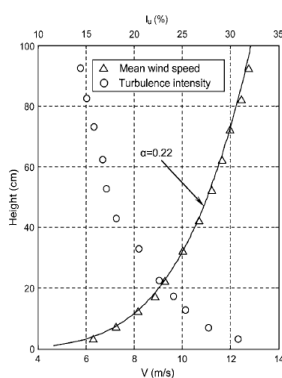
κέντρου την καθιστούν ίσως τη μεγαλύτερη χωρική δομή πλέγματος στον κόσμο και τα κριτήρια σχεδιασμού της δομής της οροφής λόγω του μεγάλου ανοίγματός της δεν καλύπτονται πλήρως από κάποιο κώδικα ή πρότυπο στον κόσμο. Από την άλλη πλευρά, η πόλη Shenzhen είναι κοντά στην πιο ενεργή περιοχή παραγωγής τυφώνα στον κόσμο. Ως εκ τούτου, αυτή η δομή οροφής είναι δυνατό να δεχθεί σοβαρές δυνάμεις ανέμου λόγω των ισχυρών τυφώνων. Όλα αυτά τα γεγονότα κάνουν μια λεπτομερή μελέτη των επιπτώσεων ανέμου αυτής της μεγάλης ανοίγματος οροφής ιδιαίτερη σημαντική και αναγκαία. Δεδομένου ότι το όριο της αεροσήραγγας στοιβάδας είναι το βασικό εργαλείο της μηχανικής ανέμου της έρευνα για τις επιδράσεις του ανέμου στα κτίρια και τις κατασκευές είναι πολύ χρήσιμα τα στοιχεία της έρευνας για την αεροδυναμική σήραγγα που εκτιμά τις επιπτώσεις του ανέμου στη μεγαλύτερη χωρική δομή πλέγματος του κόσμου.

Στα πειράματα που διεξάχθηκαν χρησιμοποιήθηκε ένα άκαμπτο μοντέλο κατασκευασμένο με μια γεωμετρική κλίμακα 1:400 που εκπροσωπούσε το πολιτιστικό κέντρο όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



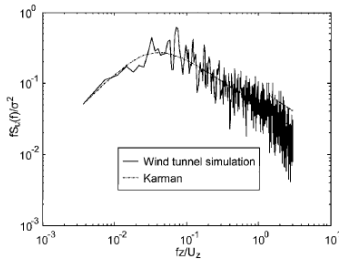
Εικόνα 20: Μοντέλο

Η μετρούμενη μέση ένταση του ανέμου καθώς και οι ταχύτητες και οι εντάσεις των αναταράξεων των πειραμάτων σε διάφορα ύψη κατά τη διάρκεια της δοκιμής σε τμήμα του μοντέλου απεικονίζεται στην Εικόνα 21.



Εικόνα 21: Γράφημα ταχύτητας

Το φάσμα ταχύτητας του διαμήκου αέρα στο ύψος των 90 μέτρων, στο μοντέλο στα 0,225 μέτρα πάνω από το τεστ της αεροδυναμική σήραγγας φαίνεται στην Εικόνα 22.



Εικόνα 22: Φάσμα ταχύτητας

Για να συγκεντρωθούν οι διαφορές πίεσης μεταξύ των δύο πλευρών της στέγης, χρειάστηκαν 348 ζεύγη των μετρητών πίεσης που εγκαταστάθηκαν στα ίδια σημεία σχετικά με την άνω και την κάτω επιφάνεια οροφής, τα οποία επισημαίνονται με ανοιχτό κύκλο στην Εικόνα 22. Οι δοκιμές πιέσεων της αεροδυναμικής σήραγγας μετρήθηκαν ταυτόχρονα από όλους τους μετρητές και στις δύο επιφάνειες της στέγης. Τα δεδομένα συχνότητας της δειγματοληψίας ήταν 312,5 Hz με δειγματοληψία μήκος 20.480. Η κατεύθυνση του ανέμου ορίστηκε ως μια γωνία από τα ανατολικά κατά μήκος αριστερόστροφα και κυμαινόταν από 0 - 360 ° με οριακό βήμα 15 ° στις δοκιμές αεροδυναμική σήραγγα, όπως φαίνεται επίσης στην Εικόνα 22 που ακολουθεί.

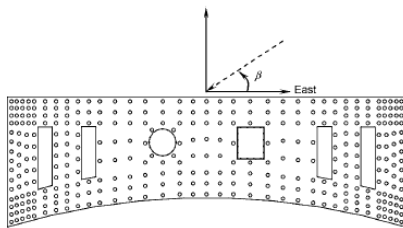


Fig. 5. Layout of pressure taps on both upper and lower roof surfaces

Εικόνα 23: Ορισμένη γωνία στις δοκιμές αεροδυναμικής

Οι μετρήσεις πίεσης έγιναν με ταχύτητα ανέμου $U_{ref} = 7,5$ m/s σε ύψος αναφοράς $z_{ref} = 0,6$ m. Η πίεση του συντελεστή του i μετρητή πίεσης στην επιφάνεια της στέγης ορίζεται ως:

$$C_{pi}(t) = \frac{p_i(t) - p_\infty}{p_0 - p_\infty}$$

όπου $p_i(t)$ η μετρούμενη πίεση επιφάνειας στον i μετρητή και p_0 και p_∞ η ολική πίεση και η στατική πίεση στο ύψος αναφοράς αντίστοιχα. Κατά σύμβαση η πίεση οροφής και οι

αντίστοιχοι συντελεστές πίεσης είναι θετικοί είτε στην άνω ή στην κάτω επιφάνεια της στέγης. Οι πιέσεις για την άνω και κάτω επιφάνεια οροφής που ορίζεται ως θετική στην καθοδική κατεύθυνση δίδεται από τη σχέση:

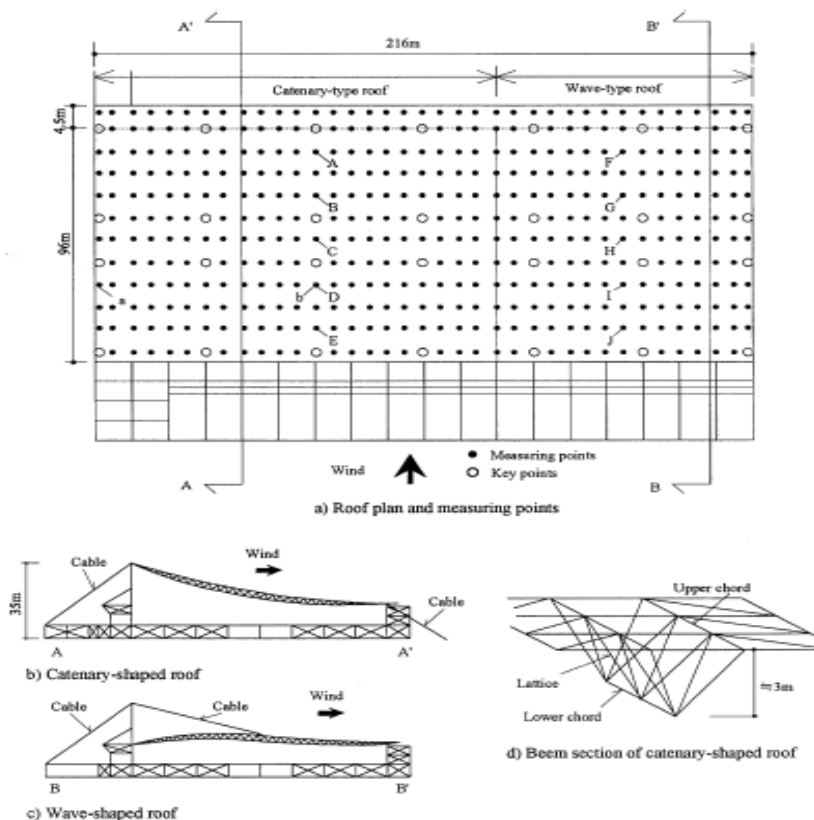
$$C_{pi}^{net}(t) = C_{pi}^u(t) - C_{pi}^l(t) = \frac{p_i^u(t) - p_i^l(t)}{p_0 - p_\infty}$$

όπου $C_{net}^{pi}(t)$ η καθαρή διαφορά συντελεστών πίεσης του i μετρητή μεταξύ της άνω και της κάτω επιφάνειας οροφής και $p_i^u(t)$ και $p_i^l(t)$ η αντικειμενικά μετρούμενη τιμή στην άνω και κάτω επιφάνεια πιέσεις μετρητή i αντίστοιχα. Στη συνέχεια ακολουθείται ειδική διαδικασία και κανονικοποίηση για να εξαχθούν βάση μεθοδολογίας τα ζητούμενα αποτελέσματα που παρουσιάζουν τη συμπεριφορά της στέγης στις διάφορες πιέσεις αφού μεταφερθούν τα αποτελέσματα από βάση αναφορά το μοντέλο μας στο πραγματικό σύστημα μελέτης. [Jiyang F.]

1.5.2 Κτίριο στην Ιαπωνία

Μια σειρά μεγάλων ανοιγμάτων δομών έχουν πρόσφατα κατασκευαστεί στην Ιαπωνία. Το νεκρό φορτίο οροφής μιας δομής μακριού ανοίγματος είναι κατά κανόνα μικρού μεγέθους, αλλά είναι σημαντική η ακριβής εκτίμηση του ανέμου για το σχεδιασμό αυτών. Ωστόσο, οι οροφές σχημάτων με δομές μεγάλων ανοιγμάτων διαφέρουν πολύ από περίπτωση σε περίπτωση και έχουν πολλές σύνθετες λειτουργίες δόνησης. Κατά συνέπεια, είναι αδύνατο να εκτιμηθεί η αιολική επαγόμενη αντίδραση της οροφής μιας δομής μεγάλου ανοίγματος όσον αφορά την χαμηλότερη συχνότητα τρόπων δόνησης και μόνο, όπως είναι κανονικά επαρκής για την ανάλυση των πολυώροφων κτιρίων. Επιπλέον, η ανάλυση των ανεμογενών αντιδράσεων των δομών αυτών πρέπει να βασίζονται σε ανάλυση χρονολογικών σειρών με πραγματικά δεδομένα πίεση του αέρα που λαμβάνονται ταυτόχρονα από πολλαπλά σημεία σε όλη την οροφή. Η προσομοίωση που απαιτείται για να γίνει αυτό πραγματοποιείται με μια μέθοδο που βασίζεται στη δεσμευμένη πιθανότητα ότι η πίεση του αέρα από τα δεδομένα του πειράματος που λαμβάνονται ταυτόχρονα σε 28 σημεία χρησιμοποιήθηκαν στην αρχική μορφή τους. Στην Εικόνα 23 της οροφής της δομής αυτής της μελέτης, όπου αυτή ήταν μια τρισδιάστατη χάλυβα-πλαισιωμένη οροφή μήκους 216 μ. και 96 μ. πλάτους, με μέγιστο ύψος 35 m από το έδαφος. Αυτή η οροφή αποτελείται από δύο ιδιότυπα μέρη με ιδιότυπα σχήματα. Το ένα τμήμα είναι μια οροφή ανόδου που υποστηρίζεται με ένα καλώδιο κυματοειδούς σχήματος και το άλλο είναι μια sag στέγη μορφής αλυσοειδούς. Τα δοκάρια του κυματοειδούς σχήματος οροφής είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με την πλάγια κατεύθυνση κοντά στο κέντρο της οροφής, ενώ εκείνες του αλυσοειδούς σχήματος στέγη συνδέονται μόνο στην ανώτερη χορδή. Για να αποφευχθεί η παραμόρφωση στέγης τα δύο άκρα και το κέντρο του κυματοειδούς σχήματος οροφής και τα δύο τέλη του αλυσοειδούς σχήματος οροφής υποστηρίζονται με καλώδια. Οι δύο επάνω χορδές τους και η μία κάτω χορδή σχηματίζουν ένα τρίγωνο, και αυτές οι χορδές συνδέονται με μια τριγωνική δομή πλέγματος. Το μέγιστο βάθος της δοκού που σχηματίζεται από το τρίγωνο είναι 3 μ. Το ένα τμήμα είναι μια οροφή ανόδου που υποστηρίζεται με ένα καλώδιο κυματοειδούς σχήματος και το άλλο είναι μια sag στέγη μορφής αλυσοειδούς. Τα δοκάρια του κυματοειδούς σχήματος οροφής είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με την πλάγια κατεύθυνση κοντά στο κέντρο της οροφής, ενώ εκείνες του αλυσοειδούς σχήματος στέγη συνδέονται μόνο στην ανώτερη χορδή. Για να αποφευχθεί η παραμόρφωση στέγης τα δύο άκρα και το κέντρο του κυματοειδούς σχήματος οροφής και τα δύο τέλη του αλυσοειδούς

σχήματος οροφής υποστηρίζονται με καλώδια. Οι δύο επάνω χορδές τους και η μία κάτω χορδή σχηματίζουν ένα τρίγωνο, και αυτές οι χορδές συνδέονται με μια τριγωνική δομή πλέγματος. Το μέγιστο βάθος της δοκού που σχηματίζεται από το τρίγωνο είναι 3 μ. Για τον υπολογισμό του φορτίου του ανέμου διεξήχθησαν πειράματα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο προηγούμενο παράδειγμα αναφοράς. Το ένα τμήμα είναι μια οροφή ανόδου που υποστηρίζεται με ένα καλώδιο κυματοειδούς σχήματος και το άλλο είναι μια sag στέγη μορφής αλυσοειδούς. Τα δοκάρια του κυματοειδούς σχήματος οροφής είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με την πλάγια κατεύθυνση κοντά στο κέντρο της οροφής, ενώ εκείνες του αλυσοειδούς σχήματος στέγη συνδέονται μόνο στην ανώτερη χορδή. Για να αποφευχθεί η παραμόρφωση στέγης τα δύο άκρα και το κέντρο του κυματοειδούς σχήματος οροφής και τα δύο τέλη του αλυσοειδούς σχήματος οροφής υποστηρίζονται με καλώδια. Οι δύο επάνω χορδές τους και η μία κάτω χορδή σχηματίζουν ένα τρίγωνο, και αυτές οι χορδές συνδέονται με μια τριγωνική δομή πλέγματος. Το μέγιστο βάθος της δοκού που σχηματίζεται από το τρίγωνο είναι 3 μ. Για τον υπολογισμό του φορτίου του ανέμου διεξήχθησαν πειράματα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο προηγούμενο παράδειγμα αναφοράς.



Εικόνα 24: Παρουσίαση κατασκευής

[Yasui, H. (1999)]

1.6 Συνδεσμολογίες και ενισχύσεις χάλυβα

Οι συνδέσεις των μεταλλικών κατασκευών προσδιορίζουν τόσο την ποιότητα του σχεδιασμού όσο και την απαιτούμενη ασφάλεια της υποκείμενης κατασκευής. Ακολουθώντας την τεχνολογική ανάπτυξη των μεταλλικών κατασκευών, με την πάροδο του χρόνου οι συνδέσεις εξελίχθηκαν από αρχικά ηλωτές, σε συγκολλητές και σε επιτόπου κοχλιωτές συνδέσεις. [Μπανιωτόπουλος, Κ. (2003)]

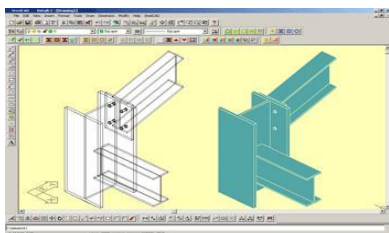
Το είδος του συγκολλητικού υλικού που χρησιμοποιείται για την ενίσχυση των δομικών στοιχείων έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών μελετών τα τελευταία χρόνια λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων που μπορούν να προσφέρουν αυτά. Η υψηλή αντοχή το υψηλό μέτρο ελαστικότητας και το μικρό βάρος είναι μερικά μόνο από τα ζητούμενα προτερήματα που επιθυμείται να παρέχουν τα υλικά αυτά για ενίσχυση της υφιστάμενης ασφάλινης πλάκας. Επιπλέον επιζητείται η τεχνική να είναι εύκολη στην εφαρμογή της και να προσθέτει στην πλάκα βελτιωμένη συμπεριφορά κόπωσης. Αυτά τα πλεονεκτήματα μπορούν να κάνουν μια εναλλακτική τεχνική συγκόλλησης προτιμότερη από μια συμβατική τεχνική όπως η κλασική σύνδεση που χρησιμοποιεί μπουλόνια για τη συνδεσμολογία των στοιχείων. [Carbon-fibre composites]

Επιπλέον η ποιότητα των συγκολλήσεων διασφαλίζεται σήμερα λόγω της υψηλής ποιότητας των υλικών που επιτυγχάνεται με συνεχή χύτευση και χρήση αυτόματων μηχανών συγκόλλησης. [Μπανιωτόπουλος, Κ. (2003)]

Σε σύγκριση με τις κατασκευές από σκυρόδεμα, στις οποίες η αστοχία ως επί το πλείστον συμβαίνει λόγω της κακής συμπεριφοράς του σκυροδέματος σε εφελκυσμό, οι λόγοι αστοχίας των κόμβων και των μελών των μεταλλικών κατασκευών είναι πιο περίπλοκοι. Η αντοχή του χάλυβα είναι συνήθως ανώτερη από αυτοί των συγκολλητικών που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση και την συνένωση των μελών. Για το λόγω αυτό η αποκόλληση των μελών είναι μια από τις βασικότερες αιτίες αστοχίας αυτών των κατασκευών και για αυτό πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη συνδεσμολογία της κατασκευής. Η πειραματική εργασία δείχνει ότι η ισχύς και οι επιδόσεις των αρθρώσεων των μεταλλικών κατασκευών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των επιφανειών προετοιμασίας και τον τρόπο εργασίας του ανθρώπινου δυναμικού. Είναι δυνατό να αποφευχθεί αποτυχία που σχετίζεται με αποκόλληση εξασφαλίζοντας καλή προετοιμασία της επιφάνειας και χρήση συμβατών υλικών. [Carbon-fibre composites]

Όσον αφορά τους παραδοσιακούς κοχλίες ο διαχωρισμός τους γίνεται με δύο τρόπους. Ο ένας είναι ο διαχωρισμός βάσει της ποιότητα της αντοχής που αυτοί προσφέρουν. Έτσι χωρίζονται σε συνήθους ποιότητας (4.5, 4.6, 5.6) και σε υλικό υψηλής αντοχής (8.8, 10.9, 12.9). Δεύτερος τρόπος διαχωρισμού αποτελεί ο τρόπος παραγωγής αυτών ο οποίος εξελίχτηκε από “ σχεδίαση και σημείωση των οπών με το χέρι πριν από το κόψιμο και τη διάτρηση, σε παραγωγή με τη βοήθεια τεχνολογικά προηγμένων μηχανών NC, κοπή με τεχνολογία λέιζερ και τεχνολογία συνδέσεων με πριτσίνια ή κοχλίες μερικής διάτρησης για τυφλές κοχλιώσεις.”. Οι σωστές συνδέσεις στις μεταλλικές κατασκευές, οδηγούν σε ένα επιθυμητό αισθητικό αποτέλεσμα και στη ζητούμενη επαρκή ασφάλεια. Η τεχνολογία των συνδέσεων έχει αναπτυχθεί ιδιαίτερα και για το λόγο αυτό έχουν συγκεντρωθεί οι πιο προηγμένες τεχνικές ευρωπαϊκών συνδέσεων καθώς και οι πλέον εξειδικευμένες γνώσεις ειδικών για την εξαγωγή του Ευρωκώδικα 3. Σήμερα η περιγραφή των συνδέσεων περιλαμβάνει την αρχική δυσκαμψία και την ικανότητα παραμόρφωσης σε αντιδιαστολή με παλαιότερα που περιλάμβανε μόνο την αντίσταση των συνδέσεων. [Μπανιωτόπουλος, Κ. (2003)]

Για να γίνει έλεγχος της συνδεσμολογίας στην πράξη χρειάζεται μελέτη οποιουδήποτε κόμβου της μεταλλικής κατασκευής. Η απαιτούμενη κανναβοποίηση γίνεται με στοιχεία κελύφους, τα οποία περιλαμβάνουν drilling βαθμό ελευθερίας (6 βαθμοί ανά κόμβο) και αυτά επιλύονται από πρόγραμμα. Η φορτική κατάσταση των κόμβων για την οποία επιλύονται προσδιορίζεται από τα συντρέχοντα μέλη με τρόπο που οι παραμορφώσεις στον κόμβο να είναι συμβατές με τις παραμορφώσεις των μελών. Ελέγχονται ορθές και διατμητικές τάσεις. Οι έλεγχοι αυτοί εξασφαλίζουν το κριτήριο επάρκειας των τάσεων. Για την εξασφάλιση της αστοχίας από λυγισμό, για κάθε συνδυασμό φόρτισης, υπολογίζεται το γεωμετρικό μητρώο ακαμψίας του φορέα (εξαρτώμενο από τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης και τα γεωμετρικά δεδομένα) και γίνεται ιδιομορφική ανάλυση. [Linghoff, D. (2009)]



Εικόνα 25: Σχηματική απεικόνιση συνδεσμολογίας

1.7 Αρχική διαστασιολόγηση και μελέτη στεγών

Στη φάση του σχεδιασμού του σχεδιασμού της χαλύβδινης στέγης μας είναι απαραίτητος ο καθορισμός και η διερεύνηση όλων εκείνων των παραγόντων που επηρεάζουν τη διαδικασία σχεδιασμού τόσο από οικονομικής όσο και από κατασκευαστικής άποψης. Επίσης οφείλουμε να καθορίσουμε όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόκριση και τη λειτουργία της υποκείμενης στέγης και κατ' επέκταση του κτιρίου που τελικά θα κατασκευαστεί με αναφορά στην περιβαλλοντική επιβάρυνση δηλαδή η κατασκευή μας να είναι ορισμένη σε ένα πλαίσιο βιώσιμου σχεδιασμού. Η χαλύβδινη στέγη μας πρέπει να ικανοποιεί τόσο τις απαιτήσεις του χρηματοδότη-ιδιοκτήτη, όσο και του μελλοντικού της χρήστη. Πρέπει να είναι οικονομική ως προς το κόστος κατασκευής, ποιοτικά καλή από πλευρά εργασιών και υλικών χρήσης, εύκολα και οικονομικά συντηρούμενη κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της, να διαθέτει υψηλή αισθητική και να παρέχει ασφάλεια σε όλη τη διάρκεια τόσο της κατασκευής της όσο και της λειτουργίας της. [Μπανιωτόπουλος, Κ. (2009)]

Για να κάνουμε μια αρχική διαστασιολόγηση της υποκείμενης στέγης που θέλουμε να κατασκευάσουμε πρέπει πρώτον και κύριο να μετρήσουμε την κάλυψη της επιφάνειας της στέγης και να την μετατρέψουμε στις επονομαζόμενες πλατείες στέγες που χρησιμοποιείται ως μονάδα μέτρησης για τις στέγες. Φαίνεται ο όρος αυτός, πλατείες στέγες, να είναι αρκετά μπερδεμένος, στην πραγματικότητα όμως είναι αρκετά απλός και ξεκάθαρος. Σε ένα τετράγωνο στέγης, πλατεία στέγης. Αντιστοιχούν ακριβώς εκατό τετραγωνικά πόδια. Για παράδειγμα, μια περιοχή 10 επί 10 πόδια, θα δώσει ακριβώς ένα τετράγωνο της επιφάνειας στέγης. Για να γίνει αυτό πρέπει να πάρουμε κάποιες επίγειες μετρήσεις. Ο τρόπος αυτός είναι συγκεκριμένος και περιγράφεται παρακάτω. Το πρώτο πράγμα που πρέπει να λάβουμε για τις διαστάσεις του εδάφους στο επίπεδο της κατοικίας είναι η περίμετρος του κτιρίου μας. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια ταινία μέτρο για να μετρήσουμε το μήκος και το πλάτος των εξωτερικών τοίχων του κτιρίου μας ή σε περίπτωση που αυτό βρίσκεται ακόμα στα χαρτιά να υπολογίσουμε τη ζητούμενη περίμετρο από τις δοσμένες διαστάσεις στα σχέδια. Στη συνέχεια Πολλαπλασιάζοντας το πλάτος με το μήκος που έχουμε παίρνουμε το εμβαδόν του δαπέδου επίπεδο της κατοικίας σε τετραγωνικά πόδια, ουσιαστικά το εμβαδόν του δαπέδου που θέλουμε να καλύψει η στέγη μας. Μετά την εκτέλεση αυτού του εύκολου πολλαπλασιασμού έχουμε τον αριθμό που μας δίνει την πεδινή περιοχή του επιπέδου κάτω από τη στέγη, σε τετραγωνικά πόδια. Πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι τα σπίτια σπάνια

αποτελούνται πλέον από τέλειες ορθογώνιες μορφές και μάλιστα πολλές φορές τα κτίρια περιλαμβάνουν ιδιόρρυθμες αρχιτεκτονικές δομές. Έτσι, αν το κτίριο σας μοιάζει με ένα πολύπλοκο γεωμετρικό σχήμα πρέπει να αναλύσουμε αυτό το περίεργο σχήμα σε μικρότερα απλούστερα των οποίων το εμβαδόν μπορεί να υπολογιστεί με ευκολία. Στη συνέχεια αφού εξάγουμε τα επιμέρους εμβαδά των σχημάτων μας, τα αθροίζουμε προς εύρεση του ζητούμενου συνολικού εμβαδού που είναι το αρχικό μας σχήμα. Ως παράδειγμα ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα ορθογώνιο σπίτι, το οποίο είναι 50 μέτρα μήκος και 30 μέτρα πλάτος, μετά τον πολλαπλασιασμό των δύο πλευρών θα έχουμε 1.500 τετραγωνικά πόδια για το χώρο του σπιτιού. Στη βιομηχανία των στεγών θέλουμε να διατηρήσουμε τα πράγματα όσο το δυνατόν πιο απλά και να μιλάμε με δεδομένα μικρών αριθμών. Γι' αυτό θέλουμε να μετατρέψουμε τους μεγάλους αριθμούς που εκφράζονται σε τετραγωνικά πόδια της επιφάνειας στέγης σε έναν απλό αριθμό που να εκφράζει τα τετράγωνα αυτών των μετρήσεων της στέγης. Η μετατροπή της περιοχής από τετραγωνικά πόδια σε πλατείες στέγης επιτυγχάνεται με τη διαίρεση του συνόλου των πρώτων, που εξάγαμε από τον παραπάνω περιγραφόμενο πολλαπλασιασμό, με το 100. Για παράδειγμα, εάν επρόκειτο να διαιρέσει 1500 τετραγωνικών ποδιών με 100, τότε έχουμε ένα μέγεθος επιφάνεια περιοχή 15 τετραγώνων για τις μετρήσεις εδάφους. Αφού εξάγουμε τις διαστάσεις των μετρήσεων μας από το έδαφος, θα πρέπει να τις μετατρέψουμε σε τρισδιάστατες μετρήσεις στέγης. Αυτό είναι ένα βήμα στο οποίο μπορούν να γίνουν πολλά λάθη, ιδίως όταν μελετάμε μια σύνθετη στέγη. Αυτό γίνεται μέσω της εξαγωγής της κλίσης της στέγης μας. Έτσι βάση της περιοχής που θέλουμε να καλύψει η στέγη μας και της υπολογιζόμενης κλίσης μπορούμε να κάνουμε μια αρχική διαστασιολόγηση αυτής που δεν θα είναι μεν ακριβής αλλά θα μας βοηθήσει στους υπολογισμούς και τους ελέγχους αστοχίας και λειτουργικότητας που θέλουμε να κάνουμε για την οροφή μας. [Μπανιωτόπουλος, Κ. (2009)]

Για να ικανοποιήσουμε όλες τις προαναφερθέντες απαιτήσεις σχεδιασμού μιας μεταλλικής οροφής χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε ένα μεγάλο αριθμό μεταβλητών. Παρόλο που τα τελευταία χρόνια η έρευνα σε συναφή θέματα έχει προχωρήσει ικανοποιητικά συχνά στη μελέτη τέτοιων κατασκευών εμφανίζονται προβλήματα τα οποία για να αντιμετωπιστούν απαιτούν ειδική μελέτη για τη λήψη των ζητούμενων αποφάσεων. Παρακάτω περιγράφονται οι παράγοντες που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής καθώς επηρεάζουν σημαντικά το σχεδιασμό του υποκείμενου έργου. [Μπανιωτόπουλος, Κ. (2009)]

Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι η χωροθέτηση του ίδιου του έργου μας είναι το πρωταρχικό πράγμα που πρέπει να οριστεί ορθά καθώς παίζει σημαντικό ρόλο στην ικανοποίηση των απαιτήσεων σχεδιασμού και λειτουργικότητας. Πρέπει σίγουρα να υπάρχει οδική προσβασιμότητα στο σημείο κατασκευής του έργου για να μπορεί αυτό να είναι προσβάσιμο εύκολα τόσο κατά το στάδιο κατασκευής του όσο και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Επίσης οφείλουμε να επιλέξουμε τοποθεσία κατασκευής που να εξασφαλίζει τη σύνθεση του κτιρίου μας με τα υφιστάμενα δίκτυα παροχής ύδρευσης, αποχέτευσης και ηλεκτρικής ενέργειας. Πρέπει να έχει διερευνηθεί το έδαφος θεμελίωσης της κατασκευής μας μέσω της διεξαγωγής των απαραίτητων γεωτεχνικών πειραμάτων και τη μελέτη των υπαρχόντων γεωλογικών χαρτών της περιοχής. Βάση αυτών θα οριστεί και το είδος της θεμελίωσης που θα θεωρηθεί κατάλληλο για την δημιουργία της επιθυμητής ευσταθούς κατασκευής μας. Τέλος πρέπει να υπάρχει έλεγχος για το αναμενόμενο ύψος βροχόπτωσης στην περιοχή καθώς και έλεγχος για τις αποστάσεις από τα μελλοντικά κτίρια που πρόκειται να κατασκευαστούν στην επιλεγόμενη περιοχή. *[Μπανιωτόπουλος, Κ. (2009)]*

Όσον αφορά τη χρήση της μεταλλικής μας στέγης τα κριτήρια σχεδιασμού καθορίζονται με βάση την τελική χρήση του κτιρίου. Η στέγη μας μπορεί να καλύπτει είτε κτίριο αποθήκευσης, είτε συναρμολόγησης βιομηχανικών προϊόντων, είτε κτίριο παραγωγής βιομηχανικών προϊόντων, είτε ειδικές κατασκευές έργων που έχει επιλεγεί σαν λύση στέγασης η χαλύβδινη οροφή, όπως γήπεδα ή αρχιτεκτονικά ιδιότυπες κατασκευές. Σε κάθε περίπτωση οι απαιτήσεις και οι ζητούμενες ανάγκες σχεδιασμού των παραπάνω περιπτώσεων διαφέρουν καθώς διαφέρει η μελλοντική χρήση της κατασκευής μας. Σίγουρα κοινή απαίτηση ανεξαρτήτως χρήσης του οικοδομήματος είναι η διασφάλιση του καλού φυσικού φωτισμού και αερισμού του κτιρίου μας που διασφαλίζεται με τον ορθό προσανατολισμό τόσο της υπερκείμενης στέγης όσο και γενικότερα του ίδιου του κτιρίου, καθώς και με την πρόβλεψη των απαιτούμενων ανοιγμάτων. Επίσης σημαντική σε κάθε περίπτωση είναι η μελέτη του τελικού ανερχόμενου ελεύθερου ύψους του κτιρίου ώστε να μην παρεμποδίζει τη διαδικασία κατασκευής της στέγης αλλά ούτε τις λειτουργικές ανάγκες της αναπτυσσόμενης κατασκευής μας. *[Μπανιωτόπουλος, Κ. (2009)]*

Από τις πλέον σημαντικές φάσεις στο σχεδιασμό της μεταλλικής μας οροφής αποτελεί η επιλογή του στατικού συστήματος της στέγης μας. Η επιτυχής επιλογή στατικού συστήματος απαιτεί εξ αρχής καθορισμό της κύριας φόρτισης. Στις ελαφριές χαλύβδινες στέγες για

παράδειγμα τα φορτία βαρύτητας σε συνδυασμό με τη φόρτιση του ανέμου αποτελούν την πλέον κρίσιμη φόρτιση. Είναι ευνόητο ότι για το στατικό καθώς και το δυναμικό σχεδιασμό και υπολογισμό της οροφής μας πρέπει να μελετάται η απόκριση με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια υπολογισμού. Αυτό μπορεί να γίνει με τη βοήθεια είτε ενός τρισδιάστατου, είτε ενός κατάλληλα διαμορφωμένου δυσδιάστατου υπολογιστικού προσομοιώματος. Γενικά πρέπει να διερευνηθούν όλοι οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την επιλογή του στατικού συστήματος. Όταν για παράδειγμα αναφερόμαστε στις απαιτήσεις συντήρησης θα μπορούσαμε να πούμε ότι το στατικό σύστημα επηρεάζεται από την επίδραση των μέγιστων εμφανιζόμενων μετατοπίσεων στα στοιχεία επικάλυψης ή από μελλοντικές αλλαγές χρήσεις που μπορούν να επιφέρουν νέες φορτίσεις. *[Μπανιωτόπουλος, Κ. (2009)]*

Ίσως το πιο ουσιαστικό στάδιο της μελέτης της κατασκευής μιας χαλύβδινης στέγης είναι αυτό της επιλογής του είδους και του μεγέθους φόρτισής της. Βάσει των παραπάνω γίνεται τόσο η επιλογή του στατικού συστήματος μελέτης, όσο και ο απαιτούμενος αρχικός προϋπολογισμός του έργου αφού τα εξεταζόμενα φορτία αποτελούν ένδειξη των δυσκολιών και των επιπλοκών που θα δεχτεί η στέγη μας καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του έργου μας. Στη φάση του προκαταρκτικού σχεδιασμού καθορίζονται τα μόνιμα και τα μεταβλητά φορτία τα οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στους ακριβείς υπολογισμούς της οριστικής μελέτης. Στα μόνιμα φορτία περιλαμβάνονται όλα τα αμετάβλητα κατά θέση και μέγεθος φορτία της στέγης μας, όπως για παράδειγμα το ίδιο βάρος αυτής. Στα μεταβλητά φορτία κατατάσσονται όλα τα μεταβλητά κατά θέση ή μέγεθος φορτία που επιπουν τη στέγη μας. Σε μια μη βατή στέγη τα μεταβλητά φορτία τα οποία πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν είναι η αναφόρτιση και το βάρος του χιονιού και μάλιστα οι δυσμενέστεροι συνδυασμοί τους με το μόνιμο φορτίο, δηλαδή το ίδιο βάρος και το βάρος επιστεγάσματος της στέγης. *[Μπανιωτόπουλος, Κ. (2009)]*

Η πρόβλεψη των φορτίων ανέμου όταν αναφερόμαστε σε ιδιότυπες κατασκευές στεγών όπως για παράδειγμα στέγες με μορφή κατανοειδούς καθώς και η κατανομή αυτών δεν είναι πάντα εύκολη καθώς δεν υπόκειται πάντα σε σαφή παραδείγματα που βρίσκονται στους αντίστοιχους κανονισμούς, Ευρωκώδικας 1. Στην πραγματικότητα κάθε μελέτη φορτίου ανέμου μιας τέτοιας κατασκευής είναι μια ξεχωριστή περίπτωση μελέτης για να εξαχθεί μια προσεκτική ανάλυση των απαιτούμενων σχεδιαζόμενων φορτίων, που για να πραγματοποιηθεί απαιτεί πολλές φορές δοκιμές σήραγγας. Σε αυτές τις δοκιμές

εμπεριέχονται χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τις παρακάτω δύο πτυχές: πρώτον, τις πραγματικές πιέσεις των εκτεθειμένων επιφανειών (συμπεριλαμβανομένων των "καθαρών αξιών", στην περίπτωση των ανοικτών επιφανειών όπου ο άνεμος μπορεί να δράσει σε δύο αντίθετες πλευρές) και δεύτερον, τη δομή συσχέτισης του τομέα της αιολικής ενέργειας, η οποία επιτρέπει την αριθμητική προσέγγιση ενός αυθαίρετου αριθμού των σειρών πίεσης στον ίδιο χρόνο σε αντιστοιχία με το χώρο όπως ακριβώς συμβαίνει και στην μοντελοποίηση αεροδυναμικής σήραγγας. Αυτές οι πιέσεις πεδίων μπορούν τελικά να χρησιμοποιηθούν ως εισροή (δυνάμεις διέγερση) ενός δυναμικού προβλήματος, του οποίου η έξοδος (προκαλούμενη μετατόπιση) μπορεί να ληφθεί με την ενσωμάτωση ενός συστήματος εξισώσεων. Για τον υπολογισμό των φορτίων ανέμου τέτοιων κατασκευών, που συναντάται συχνά σε οροφές γηπέδων, γίνεται βάση πειραμάτων σε προσομοιωμένα κατασκευασμένα μοντέλα που έχουν κατασκευαστεί υπό κλίμακα βάση της ζητούμενης αντίστοιχης πραγματικής κατασκευής που θέλουμε να υλοποιήσουμε. Το πρώτο πράγμα που πρέπει να γίνει όταν κατασκευάσουμε το μοντέλο είναι να υπολογίσουμε τη ζητούμενη μέση ταχύτητα του ανέμου που. Αυτή υπολογίζεται βάση του τύπου:

$$U(z) = U(z_0) \left(\frac{z}{z_0} \right)^a$$

Όπου $U(z_0)$ είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου στο σημείο αναφοράς z_0 , το οποίο μπορεί να είναι για παράδειγμα το μέγιστο ύψος της οροφής, ενώ το a είναι το προφίλ του εκθέτη που δίνεται από πίνακες. Ως εκ τούτου, πριν από την έναρξη των δοκιμών, πρέπει κανείς να αναπαράγει το σωστό προφίλ της ταχύτητας του ανέμου. Στον ορισμό του προφίλ του αέρα για τη στέγη μας το λεγόμενο αναπόσπαστο μήκος κλίμακας ορίζεται από το ακόλουθο νόμο:

$$L_u = U(z) \int_0^\infty \frac{R_{uu}(\tau)}{\sigma_u^2} d\tau$$

Ο οποίος πρέπει να αποδίδεται σωστά βάσει κλίμακας και να μπορεί να εκτιμηθεί από την αυτοσυσχέτιση λειτουργίας του $R_{uu}(t)$ και της ταχύτητας του ανέμου. Η κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται για την αναπαραγωγή της προσομοίωσης της πραγματικής αεροδυναμικής συμπεριφοράς που συμβαίνει στην κατασκευή αποτελείται πραγματοποιείται μέσω μιας τεχνητής τραχύτητας που επιτυγχάνεται με ειδικές συσκευές που βρίσκονται στο πάτωμα. Με αυτόν τον τρόπο, η ροή έχει την απαραίτητη διάρκεια για την ανάπτυξη του προφίλ ανέμου στον στόχο. Στην πράξη, τα μοντέλα οροφής είναι πλήρως εξοπλισμένα με τον απαραίτητο αριθμό μετρητών πίεσης, αλλά κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής, μόνο 126 σημεία μέτρησης

της πίεσης συνδέονται ταυτόχρονα για τις μετρήσεις. Αυτό δίνει τη δυνατότητα να αυξηθεί το σήμα πίεση της συχνότητας δειγματοληψίας μέχρι 250 Hz. Η αξία των συντελεστών πίεσης ως εκ τούτου προκύπτει από την κανονικοποίηση της μετρούμενης πίεσης, βάσει του γενικού μετρητή πίεσης, σε σχέση με την κινητική πίεση στο ύψος αναφοράς βάση της σχέσης:

$$c_p(t) = \frac{p(t) - p_0}{\frac{1}{2}\rho \bar{U}_{ref}^2}$$

όπου c_p είναι ο συντελεστής πίεσης, $p(t)$ είναι η στιγμιαία τιμή της πίεσης στο γενικό μετρητή πίεσης, p_0 είναι η πίεση αναφοράς με απρόσκοπτη ροή και ο όρος του παρονομαστή είναι η αναφορά της κινητικής πίεσης στο επίπεδο της στέγης. Όταν η ιστορία της c_p στην εξωτερική και εσωτερική επιφάνεια του μοντέλου μας είναι γνωστή μπορεί κανείς να αξιολογήσει την καθαρή αξία του συντελεστή πίεσης βάση της σχέσης:

$$c_{p_{net}}(t) = c_{p_{sup}}(t) - c_{p_{inf}}(t).$$

[Biagini, P. (2007)]

Πολλές φορές οι δυσμενέστεροι συνδυασμοί φόρτισης δεν είναι προφανείς και προκύπτουν από διερεύνηση όλων των εναλλακτικών συνδυασμό φόρτισης οι οποίοι βασίζονται στους Ευρωκώδικες 1 και 3. Σε περίπτωση που οι σεισμικές φορτίσεις είναι μεγαλύτερες από τις φορτίσεις των δυσμενέστερων των αντίστοιχων οριζόντιων ωθήσεων, θα πρέπει να λαμβάνονται και αυτές υπόψη. [Μπανιωτόπουλος, Κ. (2009)]

Άλλο κομμάτι το οποίο πρέπει να διερευνάται στον αρχικό σχεδιασμό της χαλύβδινης οροφής είναι η διαθεσιμότητα των διατομών που υπάρχουν στην αγοραστική πραγματικότητα. Πριν την οριστική μελέτη πρέπει ο μελετητής να γνωρίζει όλα τα γεωμετρικά στοιχεία και τις παραμέτρους αντοχής των διατομών που διατίθενται στην αγορά. Ακόμα και αν οι απαιτήσεις σχεδιασμού όμως επιβάλουν τη χρήση διατομών μη άμεσα διαθέσιμων, μπορεί να γίνει ειδική παραγγελία αυτών για εξυπηρέτηση των αναγκών της κατασκευής μας. Αυτή η παραγγελία δε είναι απαραίτητη αν επιβάλλεται βάση σχεδιασμού οι χρήσιμες μη διαθέσιμες διατομές για λόγους οικονομίας και ασφάλειας. Εάν επιλέγουμε διατομές οι οποίες συντίθενται από επιμέρους μικρότερα ελάσματα είναι απαραίτητος ο έλεγχος του κόστους κατασκευής και σύνθεσής τους. Οπότε πρακτικά είναι

πιο συμφέρον να επιλέγονται διατομές που είναι ήδη διαθέσιμες προς πώληση από τους κατασκευαστές. [Μπανιωτόπουλος, Κ. (2009)]

1.8 Κοστολόγηση

Ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός μιας χαλύβδινης στέγης πρέπει να εμπεριέχει και ολοκληρωμένο κόστος ανέγερσης και συντήρησής του καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της στέγης. Για παράδειγμα οι λύσεις με συγκολλητές διατομές είναι περίπλοκες και απαιτούν υψηλό κόστος εργατικών σε αντίθεση με τη χρήση εν θερμώ εξηλασμένων διατομών που είναι διαθέσιμες στη αγορά σε συνδυασμό με απλές συνδέσεις. Πρέπει επίσης να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα για τη συντήρηση και το κόστος αυτής. Πρέπει να σημειωθεί ότι επειδή οι χαλύβδινες κατασκευές χρειάζονται συντήρηση σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα έναντι των συμβατικών και δεδομένου ότι επιπλέον η συντήρηση αυτών είναι ευκολότερη και πιο οικονομική, η κοστολόγηση μια χαλύβδινης στέγης με βάση αναφοράς όλο τον κύκλο ζωής της στέγης μπορεί να δείξει ότι η επιλογή μιας τέτοιας κατασκευής αποτελεί μια ανταγωνιστικά οικονομική λύση σε σχέση με μια εκτίμηση κόστους που υπολογίζει μόνο το καθαυτό κατασκευαστικό κόστος. *[Μπανιωτόπουλος, Κ. (2009)]*

1.9 Διάβρωση μεταλλικών κατασκευών

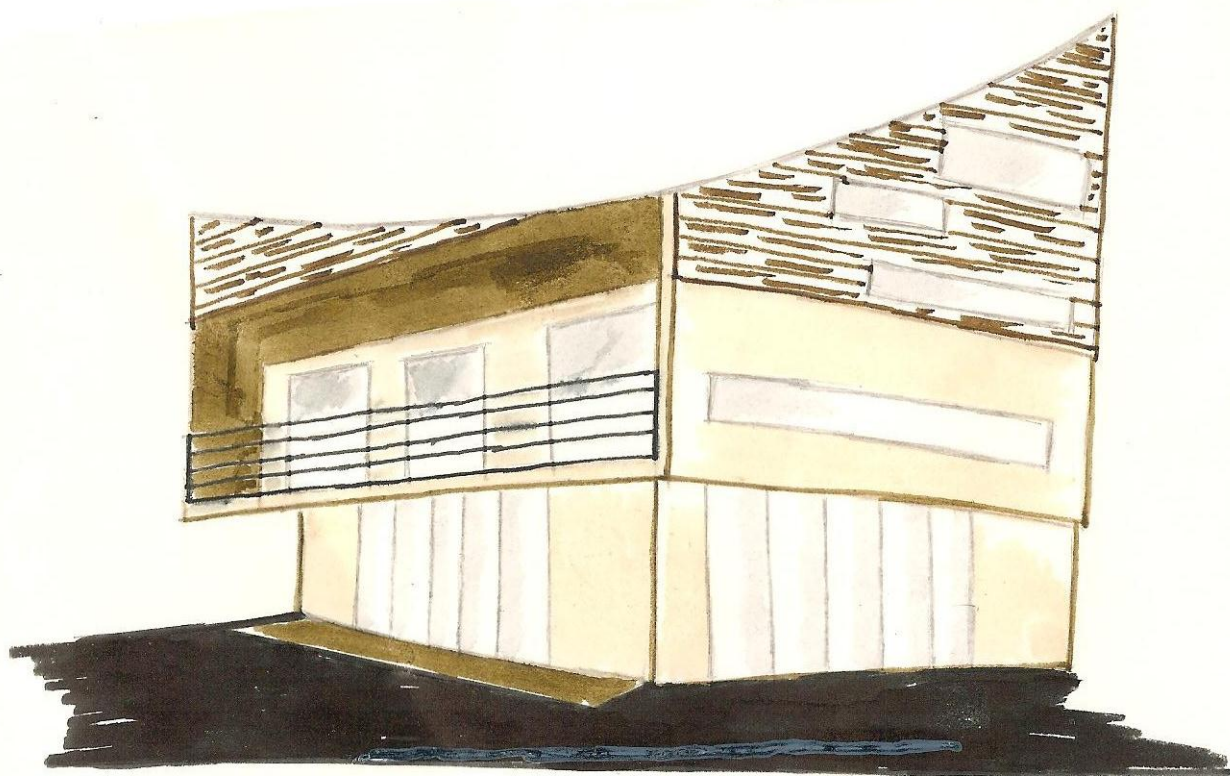
Οι μηχανικές αποφάσεις σχετικά με την απόδοση των υφισταμένων δομών πρέπει να γίνεται υπολογιζόμενης και της αβεβαιότητας. Η απομένουσα μεταφορική ικανότητα των διαβρωμένων μεταλλικών κατασκευών αποτελεί ένα καλό παράδειγμα που αναφέρεται σε πτυχές της αβεβαιότητας. Σε αυτές περιλαμβάνονται: μια άγνωστη ή μερικώς γνωστή έκταση της ζημίας που παρουσιάζει διακυμάνσεις ως προς τη φόρτωση και ένα αβέβαιο αποθεματικό της διαρθρωτικής παραγωγικής ικανότητας ανάλογα με τον τρόπο της αποτυχίας. Η θεωρία της διαρθρωτικής αξιοπιστίας έχει αναπτυχθεί για να παρέχει μια μέθοδο ανάλυσης για δομική ασφάλεια. Οι χαλύβδινες κατασκευές υπόκεινται σε διάβρωση λόγω της περιβαλλοντικής τους έκθεσης. Ως αποτέλεσμα, η φέρουσα ικανότητα και συνεπώς το επίπεδο της ασφάλειας των δομών αυτών μειώνεται με το χρόνο λόγω της συσσώρευση της βλάβης διάβρωσης. Το ποσοστό της διάβρωσης είναι συχνά μη ομοιόμορφο και σίγουρα δύσκολο να προβλεφθεί. Εξαρτάται τόσο από τα επιβαλλόμενα φορτία όσο και από την αντίσταση των δομών. Αυτές οι παράμετροι εξαρτώνται από τον τρόπο λειτουργίας πολλών βασικών τυχαίων μεταβλητών, όπως οι ιδιότητες των υλικών, οι διαστάσεις των τμημάτων και άλλα. Δεδομένου ότι το φορτίο και η αντίσταση είναι τυχαία κάθε χρονική στιγμή, καθώς και ο ρυθμός και η θέση της διάβρωσης, η μείωση της ασφάλειας λόγω διάβρωσης που έχουν υποστεί οι δομές του χάλυβα μπορεί να εκφραστεί βάση της υπολογιζόμενης αξιοπιστίας. Υπάρχουν πολλές διαθέσιμες μέθοδοι για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των δομικών στοιχείων και συστημάτων και για τον υπολογισμό της πιθανότητας αποτυχίας των δομικών συστημάτων. [Sarveswaran, V. (1998)]

2. Προτεινόμενη λύση

2.1 Περιγραφή λύσης

Βάση της μελέτης του παραπάνω θεωρητικού υπόβαθρου προτείνεται η παρακάτω κατασκευή. Πρόκειται για ένα κτίριο που θα αποτελέσει εκθεσιακό χώρο. Μια τέτοιου είδους κατασκευή για πρακτικούς και λειτουργικούς λόγους δεν θα ήταν πρακτικό να αποτελούσε μια απλή κατοικία. Συνήθως ιδιότυπες κατασκευές στεγάζουν χώρους που θέλουμε να τραβήξουν το ενδιαφέρον του κοινού και να αποτελέσουν λόγω της μορφής τους από μόνοι τους πόλο έλξης επισκεπτών. Ένας εκθεσιακός χώρος για παράδειγμα επιθυμείται να προσελκύει κόσμο με όλους τους δυνατούς τρόπους και να διαφημίζεται. Η ιδιόρρυθμη μορφή του κτιρίου αποτελεί από μόνη της διαφήμιση του χώρου. Επιπλέον λόγω του αυξημένου κόστους κατασκευής του προτεινόμενου κτιρίου καλό θα ήταν για λόγους απόσβεσης να στεγάσει χώρο που για να εισέλθει κόσμος να απαιτείται πληρωμή αντίστοιχου αντίτυπου εισιτηρίου, όχι άμεσα για τον καθεαυτό χώρο αλλά έμμεσα για αυτό που περιέχει. Η μορφή του κτιρίου μας φαίνεται στην εικόνα 26 που ακολουθεί. Το κτίριο προτείνεται να κατασκευαστεί από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η ιδιαιτερότητά του εμφανίζεται στη μορφή της στέγης του. Αυτή αποτελεί μια μεταλλική κατασκευή και το σχήμα της μορφώνεται από τμήμα του επονομαζόμενου κατανοειδούς. Η επιλογή του σχήματος βασίζεται στις ιδιότητες τόσο του υπερβολικού συνημίτονου που αναπτύχθηκαν παραπάνω, όσο και του ίδιου του κατανοειδούς που όπως επίσης προαναφέρθηκε αποτελεί ελαχιστική επιφάνεια. Πιστεύουμε ότι δεδομένων των προσφιλών κατασκευαστικών ιδιοτήτων των δύο αυτών σχημάτων μια στέγη τέτοιας μορφής θα μπορούσε να προσφέρει τόσο ένα επιθυμητό οπτικό αποτέλεσμα όσο και μια στατικά και μηχανικά ευσταθή κατασκευή. Αυτό βασίζεται στην αξιοποίηση της ιδέας του να δίνουμε εκ των προτέρων στην κατασκευή μας ευσταθή μορφή εξασφαλίζοντας έτσι στατική επιτυχία του συστήματός μας. Σκοπός μας είναι η μελέτη των δυνατοτήτων που υπάρχουν για κατασκευή μορφών κατασκευής πέραν των τετριμμένων, καθώς και η εύρεση της μεθοδολογίας αντιμετώπισης μελέτης τέτοιων ιδιότυπων κατασκευών που ξεφεύγουν από τις συνηθισμένες μορφές που συναντάμε. Η επιλογή του μεταλλικού υλικού για τη μόρφωση της στέγης μας έγινε βάση των ιδιοτήτων των μεταλλικών κατασκευών. Θεωρητικά θα μπορούσε να κατασκευαστεί μια τέτοια στέγη είτε από οπλισμένο σκυρόδεμα είτε ακόμα και από ξύλο. Όμως η ευκολία που παρέχουν οι μεταλλικές κατασκευές στην μόρφωση διαφόρων κατασκευαστικών σχημάτων, καθώς και το

μικρό συγκριτικά βάρος αυτών πιστεύουμε ότι καθιστούν την επιλογή για μεταλλική εφαρμογή λύσης ως βέλτιστη από κατασκευαστική άποψη. Σίγουρα το κόστος μιας τέτοιας κατασκευής αναμένεται να είναι υψηλό αλλά το πλεονέκτημα των μεταλλικών συστημάτων είναι η εξοικονόμηση κόστους υπολογιζόμενου του κόστους αυτών καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του αφού απαιτούν συντήρηση ανά μεγάλα χρονικά διαστήματα και επιπλέον αυτή είναι τόσο εύκολη όσο και οικονομική. Συγκρίνοντας μια αντίστοιχη κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα σίγουρα το μεγάλο βάρος της κατασκευής θα αποτελούσε πρόβλημα. Το μεγαλύτερο όμως πρόβλημα θα ήταν στη απόδοση της επιθυμητής κατανοειδούς μορφής καθώς θα αντιμετωπίζονταν κατασκευαστικές δυσκολίες. Μια ξύλινη στέγη θα μπορούσε να αποτελέσει μια καλή ίσως και οικονομική λύση. Το βασικό μειονέκτημα αυτής θα ήταν η έλλειψη παροχής πυρασφάλειας στην κατασκευή μας. Επίσης λόγω έλλειψης της απαραίτητης ξυλείας οι ξύλινες κατασκευές δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες στη χώρα μας. Για τους παραπάνω λόγους πιστεύουμε ότι η μεταλλική στέγη θα αποτελούσε την πιο ρεαλιστική κατασκευαστική επιλογή για την εγχώρια πραγματικότητα. Οι ελαχιστικές επιφάνειες έχουν την ιδιότητα να καλύπτουν το ελάχιστο δυνατά αναπτυσσόμενο εμβαδόν. Έτσι για δεδομένη έκταση μια ελαχιστική επιφάνεια λόγω της μορφής της καλύπτει τον ίδιο χώρο με λιγότερο εμβαδόν υλικού. Αυτό αυτόματα σημαίνει ότι βάση του σχήματος της στέγης εξοικονομούμε υλικό, καθώς η ελαχιστική επιφάνειά μας είναι αυτή που έχει την ελάχιστη έκταση. Η σύγκριση αυτή αναφέρετε σε όμοιες κατασκευές, δηλαδή το τμήμα του κατανοειδούς θα έχει το ελάχιστο εμβαδόν σε σύγκριση με αντίστοιχες επιφάνειες που προκύπτουν από ιδιοπεριστροφή άλλων τυχαίων καμπύλων. Έτσι η μη συμβατική στέγη που επιθυμούμε να μελετήσουμε δεν έχει απλά ένα ιδιότυπο σχήμα, αλλά πιστεύουμε ότι μπορεί να υποστηριχθεί κατασκευαστικά και αυτό που αναζητάμε είναι η μεθοδολογία επίλυσης αυτού του συστήματος.



Εικόνα 26: Προτεινόμενη μορφή κτιρίου

2.2 Χρήση Maple13

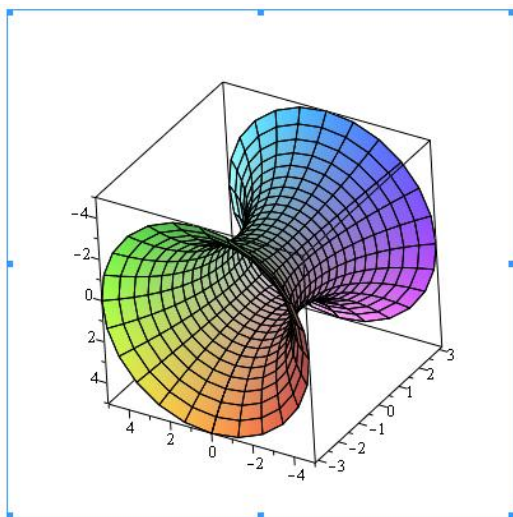
Για το σχηματισμό του επονομαζόμενου κατανοειδούς και την εύρεση της ζητούμενης μορφής της στέγης μας χρησιμοποιήθηκε το μαθηματικό πρόγραμμα maple13. Βάση της παραπάνω αναλυόμενης βιβλιογραφίας ορίστηκαν οι συναρτήσεις που απαιτούνται για τον χωρικό προσδιορισμό αυτού όπως φαίνεται παρακάτω:

```
=  
> restart :  
  
x := (u, v) → 2 cos(u) cosh(v/2);  
y := (u, v) → 2 sin(u) cosh(v/2);  
z := (u, v) → v;
```

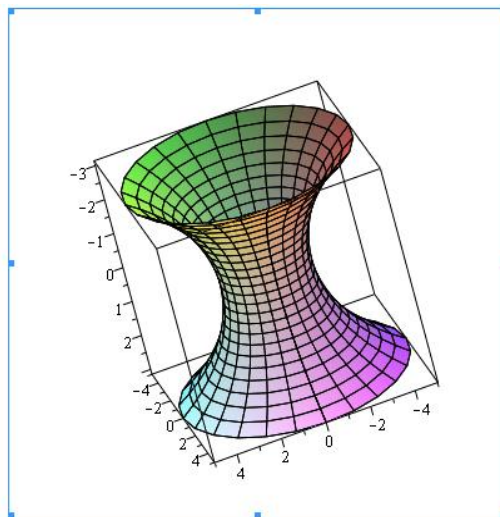
Στη συνέχεια μέσω του προγράμματος σχεδιάσαμε το περιστρεμμένο γύρω από τον άξονα $χχ'$ υπερβολικό σφημίτονο. Η εντολές που χρειάστηκαν για αυτό καθώς και τα αποτελέσματα του προγράμματος φαίνονται στη συνέχεια.

```
plot3d([x(u, v), y(u, v), z(u, v)], u = 0..2·Pi, v = -Pi..Pi, axes = boxed)
```

$$x := (u, v) \rightarrow 2 \cos(u) \cosh\left(\frac{1}{2} v\right)$$
$$y := (u, v) \rightarrow 2 \sin(u) \cosh\left(\frac{1}{2} v\right)$$
$$z := (u, v) \rightarrow v$$



Εικόνα 27: catenoid



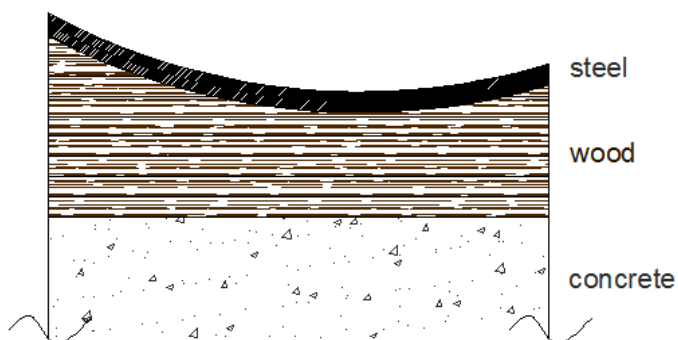
Εικόνα 28: catenoid

2.3 Μεθοδολογία Ανάλυσης Κατασκευής

Ο αναλυτικός ποσοτικός υπολογισμός των απαιτούμενων δεδομένων που απαιτούνται για την στατική και κατασκευαστική τεκμηρίωση και διαστασιολόγηση της στέγης μας προϋποθέτει τη χρήση εξειδικευμένων μηχανικών προγραμμάτων ανάλυσης κατασκευών η γνώση των οποίων είναι ιδιαίτερα εξειδικευμένη και αποτελεί αντικείμενο μελέτης από μόνη της. Λόγω της ιδιομορφίας της στέγης μας ο υπολογισμός των απαιτούμενων ελέγχων που υπόκεινται τέτοιου είδους κατασκευές δεν προσδιορίζεται επακριβώς από τους υφιστάμενους αντίστοιχους κανονισμούς. Όπως προαναφέρθηκε οι μελέτη τέτοιων κατασκευαστικών περιπτώσεων αντιμετωπίζονται μεμονωμένα σαν ξεχωριστά προβλήματα και εξάγονται αντίστοιχα αποτελέσματα σύμφωνα με τα δεδομένα της εκάστοτε κατασκευής. Παρ' όλα αυτά αναμφισβήτητα το γενικό πλαίσιο που ακολουθείται για μια τέτοια μελέτη είναι κοινό καθώς ακόμα και μια ιδιότυπη κατασκευή δεν παύει να είναι αντικείμενο μελέτης της μηχανικής και κατ' επέκταση να διέπεται από τις ίδιες κατασκευαστικές απαιτήσεις με οποιαδήποτε άλλη κατασκευή. Για το λόγο αυτό παρακάτω περιγράφεται σε συστηματοποιημένη μορφή βημάτων η μεθοδολογία που πρέπει να ακολουθηθεί για την ανάλυση της κατασκευής της στέγης μας βάσει των υπάρχοντων κανονισμών, Ευρωκώδικας 0, Ευρωκώδικας 1 και Ευρωκώδικας 3, καθώς και του θεωρητικού υπόβαθρου που έχει ανευρεθεί σε σχέση με τον τρόπο διερεύνησης και μελέτης αντίστοιχων κατασκευών.

Βήμα 1

Αρχικά πρέπει να προσδιορίσω τις διαστάσεις που επιθυμώ να έχει η στέγη μου. Έστω ότι θέλω να κατασκευάσω κτίριο διαστάσεων 12m*10m συνολικού εμβαδού ανά όροφο δηλαδή περίπου 120m². Σε πρόσοψη η στέγη απλουστευμένα έχει την παρακάτω μορφή:



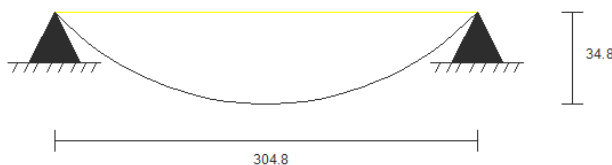
Εικόνα 29: Πρόσοψη κτιρίου

Για να γίνει η απαραίτητη διαστασιολόγηση δεδομένου ότι δεν έχουμε στην προκειμένη περίπτωση μέτρημα αρχιτεκτονικά σχέδια που να μας υποδηλώνουν τις υποκείμενες διαστάσεις αλλά προσπαθούμε να κάνουμε μια ανάλυση μεθοδολογίας επιλέγουμε βάσει της βιβλιογραφίας μας το στατικό σύστημα που θεωρούμε ότι μπορεί να προσομοιάσει καλύτερα τη μορφή της στέγης μας. Ο τρόπος στήριξης των άκρων του φορέα μας αποτελεί το πρώτο πράγμα που πρέπει να αποφασιστεί. Βιβλιογραφικά γνωρίζουμε ότι τοξωτές κατασκευές στηρίζονται συνήθως είτε έχοντας και τα δύο άκρα αρθρωτά είτε έχοντας το ένα αρθρωτό και το άλλο πακτωμένο. Κανονικά θα πρέπει να γίνει έλεγχος και για τις δύο περιπτώσεις. Επιλέγουμε να εξετάσουμε την περίπτωση των δύο αρθρώσεων γιατί βάσει βιβλιογραφίας έχουμε περισσότερα στοιχεία για τέτοιες περιπτώσεις. Έτσι το στατικό σύστημα που έχω να μελετήσω αποτελείται από κύριο φορέα δοκού στέγης της παρακάτω μορφής:



Εικόνα 30: Πραγματική μορφή δοκού

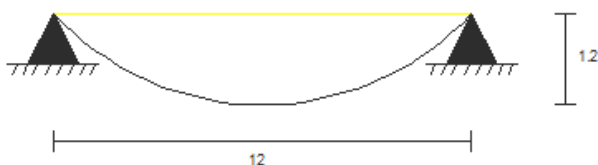
Μεταξύ των στηρίξεων A και B υπάρχει υψομετρική διαφορά για να αποφεύγεται η συγκέντρωση και συσσώρευση των κατακρημνίσεων. Το παράδειγμα της βιβλιογραφίας μας είναι το ακόλουθο:



Εικόνα 31: Παράδειγμα βιβλιογραφίας

Δεδομένου ότι επιθυμούμε άνοιγμα 12m για τη δικιά μας δοκό, αγνοώντας την προαναφερθείσα κλίση θα ισχύει ότι αφού για 304,8 μέτρα άνοιγμα η δοκός έχει ανύψωση 30,48 μέτρα και εφόσον έχω στήριξη της ίδιας μορφής, στη δικιά μας περίπτωση που έχουμε άνοιγμα 12 μέτρων θα έχω αναλογικά ανύψωση 1,2 μέτρων. Έτσι η μέγιστη ανύψωση της στέγης μας θα έχει τιμή ίση με 1,2 m.

Θεωρώντας και πάλι τη δοκό ως



Εικόνα 32: Η δοκός της στέγης

Η εξίσωση που περιγράφει το σχήμα της δικού μας είναι αυτή του υπερβολικού συνημίτονου:

$$y = a \cosh\left(\frac{x}{a}\right)$$

Για συγκεκριμένες τιμές (x_0, y_0) δεν έχει συγκεκριμένες ακριβείς λύσεις παρά μόνο προσεγγιστικές. Ουσιαστικά η εξίσωσή μας είναι της μορφής:

$$1, 2 = a \cosh\left(\frac{6}{a}\right)$$

αν δεχθούμε ότι το μέγιστο ύψος συμβαίνει στο μέσο της δοκού των 12 μέτρων.

Αναζητώ τώρα τις τιμές του a για τις οποίες επαληθεύεται η παραπάνω εξίσωση. Αυτές μπορώ να τις βρω όπως προαναφέρθηκε μόνο προσεγγιστικά. Έτσι βλέπω ότι για $x=0$ όπου:

$$f(x) = a \cosh\left(\frac{x}{a}\right)$$

Βλέπω ότι $f(0) = a$

Αυτό σημαίνει ότι $f(6) = a + 1.2$ για τη δικιά μας περίπτωση.

Αναπτύσσοντας το υπερβολικό συνημίτονο έχουμε:

$$a \cosh\left(\frac{6}{a}\right) = \frac{a \left(e^{\left(\frac{6}{a}\right)} + e^{\left(-\frac{6}{a}\right)} \right)}{2}$$

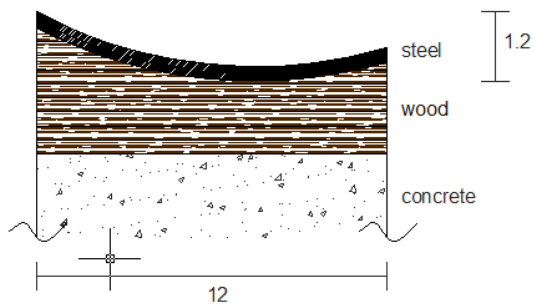
και ισχύει βάσει Euler ότι:

$$e^{\left(\frac{6}{a}\right)} = 1 + \frac{6}{1!a} + \frac{6^2}{2!a^2} \quad \text{και} \quad e^{\left(-\frac{6}{a}\right)} = 1 - \frac{6}{1!a} + \frac{6^2}{2!a^2}$$

αν αναπτύξουμε την εκθετική μέχρι τον πρώτο τετραγωνικό όρο για ευκολία στους υπολογισμούς. Αυξάνοντας τους όρους ανάπτυξης αυτής αυξάνουμε και την ακρίβεια προσέγγισης. Αντικαθιστώντας στο ανάπτυγμα του υπερβολικού συνημίτονου τα παραπάνω και δεδομένου την προαναφερθείσα συνθήκη για το $f(6)$ παίρνουμε ότι:

$$1, 2 + a = a \left(1 + \frac{6^2}{2a^2} \right)$$

Επιλύοντας ως προς a βρίσκουμε ότι αυτό ισούται με 15 κατά προσέγγιση.



Εικόνα 33: Πρόσοψη στέγης με διαστάσεις

Βήμα 2

Αφού έχουμε προσδιορίσει πλήρως την εξίσωση που περιγράφει τη μορφή της δοκού μας πρέπει τώρα να προσδιορίσουμε τα φορτία που ασκούνται σε αυτήν καθώς και τον τρόπο κατανομής τους. Συγκεκριμένα πρέπει να προσδιορίσουμε το φορτίο λόγο του ίδιου βάρους της κατασκευής μας, το φορτίο λόγο ανέμου και λόγο χιονιού καθώς και το φορτίο της επικάλυψης της μεταλλικής μας κατασκευής. Για να προσδιορίσουμε το φορτίο λόγο του βάρους της κατασκευής μας ξέρουμε ότι το ειδικό βάρος του χάλυβα είναι 7,85. Αυτό σημαίνει ότι το 1cm^3 χάλυβα ζυγίζει 7,85gr. Για να δούμε πόσο ζυγίζει η δικιά μας κατασκευή πρέπει να βρούμε τον όγκο αυτής. Και κατά αναλογία να υπολογίσουμε το βάρος της. Στη συνέχεια συνέχεια για να βρω το πώς κατανέμεται το βάρος αυτό πρέπει να το διαιρέσω με την επιφάνεια του σχήματος της οροφής μας αφού το πολλαπλασιάσω με $g=9.81\text{KN/Kg}$

Για να βρω το φορτίο ανέμου δεν μπορώ να χρησιμοποιήσω της εξισώσεις που υπάρχουν στους υφιστάμενους κανονισμούς. Για το λόγο αυτό πρέπει αρχικά να κατασκευάζω μια μακέτα προσομοίωσης της κατασκευής μου υπό κλίμακα. Μέσω αυτής υπολογίζουμε βάσει εξισώσεων τη μέση ταχύτητα του ανέμου στο μέγιστο ύψος της οροφής. Μέσω ειδικών μηχανημάτων παρέχεται ανεμοπίεση η οποία μετράται από ειδικούς μετρητές που έχουν ενσωματωθεί σε διάφορα σημεία της οροφής μας. Έτσι προσδιορίζεται ο συντελεστής πίεσης δεδομένης της χρονοϊστορίας που μας δίνουν οι μετρητές τόσο στην εσωτερική όσο και στην εξωτερική επιφάνεια της στέγης βάσει ειδικών γραφημάτων που εξάγονται. Στη συνέχεια τα δεδομένα κοινοποιούνται και τελικά εξάγεται ο συντελεστής πίεσης ανέμου που χρειάζεται για τον προσδιορισμό του φορτίου του ανέμου βάσει του EN1991 του μέρους 1-4.

Για να βρω το φορτίο του χιονιού χρειαζόμαστε τον αντίστοιχο συντελεστή χιονιού s_x του EN1991 όπου $s_x = \mu_i * c_e * c_t * s_k$. Ως μ_i ορίζεται ο συντελεστής σχήματος της στέγης μας που

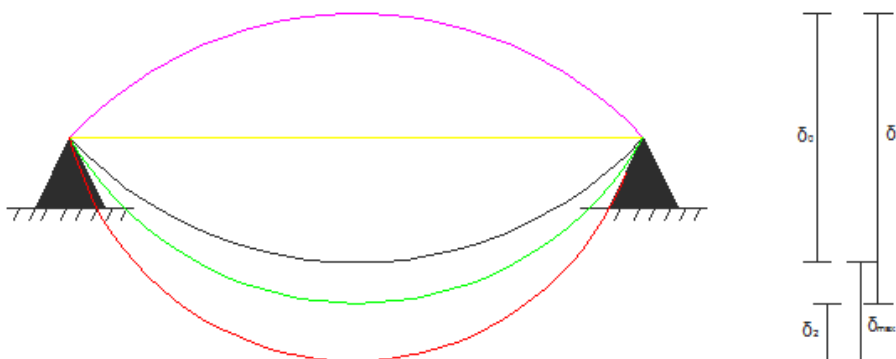
προσδιορίζεται από το σχήμα στη σελίδα 25 του EN1991 για καμπύλες κατασκευές μη βατές στέγες. Ως c_e ορίζεται ο συντελεστής εκθέσεως που στην περίπτωση μας είναι ίσος με 1 και ως c_t ο θερμικός συντελεστής ο οποίος και πάλι είναι ίσος με ένα αφού τον λαμβάνω υπόψη κυρίως σε γυάλινες στέγες όπου έχει λόγο επιρροής. Ως S_k ορίζεται η χαρακτηριστική τιμή φορτίου επί του εδάφους, με ετήσια πιθανότητα υπέρβασης 2% η οποία εξαρτάται από το υψόμετρο και την περιοχή αναφοράς μελέτης της κατασκευής μας και κατ' επέκταση η τιμή της εξαρτάται από τη χώρα στην οποία πρόκειται να κατασκευαστεί το έργο. Σίγουρα επειδή το σχήμα μας είναι διαφορετικό και για την εύρεση κάποιων από τους παραπάνω συντελεστές θα χρειαστεί ίσως και εδώ διεξαγωγή πειραμάτων

Η εύρεση του φορτίου της επικάλυψης εξαρτάται και πάλι από το σχήμα της οροφής και χρειάζεται εξειδικευμένη διαδικασία για την εξαγωγή του.

Βήμα 3

Σε επόμενο στάδιο χρειάζεται να κάνω έλεγχο για οριακή κατάσταση λειτουργικότητας δηλαδή για τις οριακές καταστάσεις πέραν των οποίων δεν ικανοποιούνται τα κριτήρια λειτουργικότητας της κατασκευής μας. Για τις χαλύβδινες κατασκευές είναι εκείνες οι παραμορφώσεις ή τα βέλη κάμψης τα οποία επηρεάζουν αρνητικά την εμφάνιση ή την αποτελεσματικότητα χρήσης της κατασκευής. Για να γίνει αυτός ο έλεγχος πρέπει βάσει των υπολογιζόμενων παραπάνω φορτίων να βρεθεί η μέγιστη βύθιση της δοκού δ_{max} γνωρίζοντας ότι

$\delta_{max} = \delta_1 + \delta_2 - \delta_0$ όπου η τιμή που αντιπροσωπεύουν οι παραπάνω βυθίσεις φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 34: Διάγραμμα βυθίσεων

Ορίζουμε ως:

δ_0 : τη θέση της προανυψωμένης αφόρτιστης δοκού

δ_1 : το βέλος της δοκού αμέσως μετά τα μόνιμα μόνιμα φορτία

δ_2 : το βέλος λόγω κινητών φορτίων και παραμορφώσεων οι οποίες είναι συναρτήσεις του χρόνου

δ_{\max} : τη βύθιση στο τελικό στάδιο

Η εύρεση του δ_{\max} γίνεται για τον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης των φορτίων καταπόνησης της δοκού στέγης.

Αφού βρούμε το δ_{\max} ο έλεγχος που πρέπει να κάνουμε είναι ότι $\delta_{\max} < L/200$ που είναι ο έλεγχος βάση EN1993 για μη βατές στέγες. Ο βασικός έλεγχος για όλες τις περιπτώσεις είναι για $\delta_{\max} = L/250$. Συγκρίνοντας τις δύο τιμές δ_{\max} που βρίσκω το I (ροπή αδράνειας) της δοκού μου και έτσι από υπάρχοντες πίνακες επιλέγω βάσει αυτού το είδος και τις διαστάσεις της μεταλλικής διατομής που θα χρησιμοποιήσω.

Βήμα 4

Στη συνέχεια χρειάζεται να κάνουμε έλεγχο της δοκού μας σε οριακές καταστάσεις αστοχίας για την παραπάνω επιλεγόμενη διατομή μου. Για να γίνει αυτό πρέπει αρχικά να εξάγω διαγράμματα ροπών και τεμνουσών για τη δεδομένη δοκό μελέτης μου τα οποία και πάλι εξάγονται για τη δυσμενέστερη των περιπτώσεων συνδυασμού φόρτισης των φορτίων καταπόνησης της δοκού μας. Για να εξάγω τα ζητούμενα διαγράμματα επειδή η δοκός μου δεν είναι ευθεία χρειάζεται να χρησιμοποιήσω τη θεωρία που διέπει τα καλώδια που περιγράφηκαν στη βιβλιογραφική έρευνα. Επειδή όμως αναφερόμαστε σε δοκό και όχι σε καλώδιο αμελητέου πάχους πρέπει να εφαρμόσουμε τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την εξεύρεση των ζητούμενων γραφημάτων. Για να γίνει αυτή η εφαρμογή χρειαζόμαστε χρήση ειδικού υπολογιστικού λογισμικού καθώς οι υπολογισμοί είναι ιδιαίτερα πολύπλοκοι. Αφού μέσω υπολογιστικών προγραμμάτων εξάγουμε τα απαιτούμενα γραφήματα από αυτά βρίσκουμε την τιμή της μέγιστης ροπής τόσο στις στηρίξεις όσο και στο άνοιγμα της δοκού μας καθώς και τη μέγιστη τιμή της τέμνουσας αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται βάση EN1993 αρχικά κατατάσσω την επιλεγόμενη διατομή σε κλάσεις.

Στη συνέχεια πρέπει να ελέγξω τη δοκό μου για αστοχία σε διάτμηση και κάμψη. Για τον έλεγχο σε διάτμηση πρέπει να ελέγξουμε ότι ο λόγος της τέμνουσας σχεδιασμού βάση των γραφημάτων που εξάγαμε προς την τέμνουσα που αναπτύσσεται στην επιλεγόμενη διατομή μας και υπολογίζεται από EN1993 είναι μικρότερος της μονάδας. Για έλεγχο σε κάμψη πρέπει να ελέγξουμε αντίστοιχα ότι ο λόγος της ροπής σχεδιασμού της δοκού που υπολογίζεται από τα γραφήματα προς τη ροπή που αναπτύσσεται σε αυτή βάσει EN1993 είναι επίσης μικρότερος της μονάδας. Όταν αυτοί οι δύο έλεγχοι επαληθευτούν σημαίνει ότι η επιλεγόμενη δοκός μας επαρκεί σε θλίψη και διάτμηση.

3. Προτάσεις για περαιτέρω εργασία

Η παραπάνω διπλωματική μελέτη παρουσιάζει το αντικείμενο μελέτης σε καθαρά θεωρητικό και επεξηγηματικό στάδιο. Δίνει το θεωρητικό υπόβαθρο και τη μεθοδολογία σχεδιασμού που θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει κάποιος για την υλοποίηση της προαναφερθείσας κατασκευής. Σε επόμενο στάδιο θα μπορούσε σε υψηλότερο επίπεδο μελέτης κάποιος βάσει των παραπάνω να αναπτύξει παραπάνω τους ακόλουθους τομείς που βασίζονται στο δεδομένο έγγραφο.

1. Θα μπορούσε κάποιος να εντυπώσει σε παραπάνω παραδείγματα εφαρμογών αναφορικά με τη χρήση του ιδιότυπων σχημάτων σε κατασκευές και ειδικότερα του σχήματος του υπερβολικού σνημίτονου είτε για δημιουργία στεγών είτε και άλλων τμημάτων κατασκευών.
2. Θα μπορούσε επίσης κάποιος ενδιαφερόμενος να επισέλθει σε περαιτέρω σχεδιασμό και εξαγωγή συγκεκριμένης σχηματικής μορφής με όλα τα δεδομένα που απαιτούνται για τη δημιουργία της παραπάνω περιγραφόμενης κατασκευής.
3. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία σχεδιασμού που παρατέθηκε θα μπορούσαν να γίνουν οι απαραίτητοι έλεγχοι που απαιτούνται για τη μελέτη της κατασκευής ποσοτικά πλέον και όχι μόνο ποιοτικά όπως περιγράφηκαν. Αυτού του είδους η μελέτη θα αποτελούσε ίσως από μόνη της μια αυτοτελή διπλωματική εργασία αφού απαιτεί τη χρήση τόσο εξειδικευμένων προγραμμάτων όσο και εξειδικευμένων γνώσεων.
4. Επιπλέον η παρούσα εργασία προτείνει τη δημιουργία της περιγραφόμενης στέγης ως βάση υλικού κατασκευής το χάλυβα. Ένας ενδιαφερόμενος θα μπορούσε να μελετήσει είτε σε θεωρητικό είτε σε πρακτικό επίπεδο τη δημιουργία της δεδομένης ή παρόμοιας μορφής στέγης από άλλο υλικό, είτε σκυρόδεμα είτε ακόμα και ξύλο, και να εξάγει ακόμα και συγκριτικά συμπεράσματα βάσει των δεδομένων που θα συναντήσει στη μελέτη του.
5. Τέλος θα μπορούσε στηριζόμενος στην παραπάνω ιδέα κάποιος αν ενδιαφερόταν ακόμα και να υλοποιήσει την παραπάνω περιγραφόμενη κατασκευή.

Αναμφισβήτητα σε επόμενο στάδιο θα ενδιαφερόμουν και εγώ η ίδια να επισέλθω σε βαθύτερους υπολογισμούς που αφορούν την διεκπεραίωση της δεδομένης στέγης αφού σαν θέμα μου προσέλκυσε ιδιαίτερα το ενδιαφέρον και καθώς ασχολήθηκα με αυτό καθ' όλη τη

διάρκεια της εργασίας βρήκα πολλά κομμάτια και δεδομένα που θεωρώ ότι χρήζουν μελέτης και θα με ενδιέφερε να την διεκπεραιώσω σε ανώτερο στάδιο.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βάσει της παραπάνω διπλωματικής εργασίας και των δεδομένων που συγκεντρώσαμε συμπερασματικά θα μπορούσαμε να αναφέρουμε τα ακόλουθα:

1. Η χρήση των καμπύλων στην κατασκευαστική πραγματικότητα δεν συνηθίζεται κατά κύρια βάση αλλά χρησιμοποιείται σε πολλές περιπτώσεις λόγω της ιδιαίτερης μορφής και άποψης που αυτές προσδίδουν σε ένα οικοδόμημα.
2. Από όλες τις υπάρχουσες μορφές καμπύλων που υπάρχουν αυτή του υπερβολικού συνημίτονου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των ιδιοτήτων της και για αυτό το λόγο έχει μελετηθεί εκτενώς κατά τη διάρκεια της ερευνητικής ιστορίας.
3. Οι ελαχιστικές επιφάνειες όπως αυτή του κατανοειδούς χρησιμοποιούνται εκτενώς στη μηχανική και όχι μόνο και παρέχουν τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά που αναμφισβήτητα είναι επιθυμητά στις κατασκευές και όχι μόνο.
4. Υπάρχουν πολλές κατασκευαστικές επιλογές όσον αφορά την υλική πραγματοποίηση ενός οικοδομήματος και για το λόγο αυτό πριν από τη διεκπεραίωση μιας μελέτης έργου πρέπει να μελετώνται όλες οι επιλογές αυτών και τα εκάστοτε προτερήματα που παρέχει κάθε ένα από αυτά.
5. Το βασικό προτέρημα του χάλυβα έναντι του σκυροδέματος και του ξύλου είναι η αντοχή του στο χρόνο και η ευκολία που παρέχεται για τη συντήρηση αυτού.
6. Για την επιλογή του υλικού που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η συμπεριφορά αυτού καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής που επιθυμούμε να έχει το οικοδόμημά μας και η έρευνά άμα να μην περιορίζεται αυστηρά στο χρονικό διάστημα της μελέτης και της κατασκευής. Συγκεκριμένα στην περίπτωση μας παρά το γεγονός ότι η μεταλλική μας στέγη έχει αυξημένο

κατασκευαστικό κόστος μπορεί να γίνει απόσβεση αυτού αν αναλογιστούμε το χαμηλό κόστος συντήρησης που απαιτείται.

7. Κατά το στάδιο της μελέτης μιας υποκείμενης πρότασης είναι πολύ σημαντική η συστηματοποίηση της μεθοδολογίας που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση αυτής καθώς έτσι γνωρίζουμε τη διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί ανά στάδια και το τι απαιτεί καθένα από τα στάδια αυτά. Έτσι μπορούμε να αναζητήσουμε τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε για τον τρόπο διεκπεραίωσης αυτών.
8. Η μελέτη κατασκευών μορφής διαφορετικής από αυτήν των συμβατικών απαιτεί εξειδικευμένη έρευνα και διαδικασία υλοποίησης καθώς για οποιαδήποτε καινοτομία δεν υπάρχουν πάντα συγκεκριμένες οδηγίες υλοποίησης. Σε κάθε περίπτωση αυτό που πρέπει να γίνει αρχικά έρευνα για τον τρόπο που έχουν αντιμετωπιστεί στο παρελθόν παρεμφερείς περιπτώσεις καθώς αυτές μπορούν να μας παρέχουν ιδέες και λύσεις για το δικό μας πρόβλημα.
9. Επειδή κάθε ιδιότυπη κατασκευή αποτελεί ένα διαφορετικό πρόβλημα πολλές φορές για την υλοποίηση αυτής απαιτείται η εξεύρεση πρωτοποριακών λύσεων και μηχανισμών για την πραγμάτωση αυτής καθώς μπορεί να μην υπάρχουν τεχνικές για να πραγματοποιηθεί είτε η μελέτη αλλά είτε ακόμα και η κατασκευή αυτών.
10. Σε κάθε περίπτωση το στάδιο της μελέτης διαφέρει από αυτό της κατασκευής και για αυτό πρέπει να αντιμετωπίζεται ξεχωριστά και εξειδικευμένα καθένα από αυτά. Σκοπός της μελέτης είναι η κάλυψη όλων των τυχών δυσκολιών που ενδέχεται να προκύψουν κατά το στάδιο της κατασκευής καθώς και η πλήρης τεκμηρίωση της επιτυχίας της υλοποίησης της υποκείμενης κατασκευής.
11. Σκοπός μιας έρευνας δεν είναι απαραίτητα η εξεύρεση συγκεκριμένης λύσης αλλά η συλλογή κατά το δυνατόν πιο χρήσιμων πληροφοριών για την πορεία της λύσης και η ορθή καταγραφή αυτών. Έτσι παρέχεται η δυνατότητα στο μέλλον σε κάποιον ενδιαφερόμενο με βάση τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν να προχωρήσει το

αντικείμενο μελέτης ένα βήμα παραπάνω με τελικό στόχο την κατά το δυνατό πιο ορθή συλλογική αντιμετώπιση ενός θέματος.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- F. Peters (2000). Shape and drag of a bulging rope in uniform cross Flow. 139, 161-170, Acta Mechanica
- H. Yasui, H. Marukawa, J. Katagiri, A. Katsumura, Y. Tamura, K. Watanabe (1999). Study of wind-induced response of long-span structure. 83, 277-288, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics
- B.V. Venkatarama Reddy, K.S. Jagadish (2003). Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. 35, 129–137, Energy and Buildings
- K. F. Chung & D. St Quinton (1996). Structural Performance of Modern Roofs with Thick Over-purlin Insulationm Experimental Investigation. 17-38, J. Construct. Steel
- P. Cella (1999). Methodology for Exact Solution of Catenary. 0733- 9445/99/0012-1451 1453, Journal of Structural Engineering
- R. Osserman (2010). How the Gateway Arch Got its Shape. 167–189, Nexus Network Journal 12
- M. Sweetser (1978). Roofing for Historic Buildings, Journal of the Society of Architectural Historians
- S. Sakla, E. Elbeltagi (2003). Design of steel roofs subjected to drifted snow using genetic optimization. 339–348, Computers and Structures
- V. Sarveswaran, J.W. Smith, D.I. Blockley (1998). Reliability of corrosion-damaged steel structures using interval probability theory. 237-255, Structural Safety
- Yaelmason, A. Ammann, A. Ulrch, A. Laurasigg (1999). Behavior of Heavy Metals, Nutrients, and Major Components during Roof Runoff Infiltration. 1588-1597, Environmental Science and Technology
- R. Fanjoy (2009). Raising the Roof even in a downturn, roofing manufacturers are looking up, Product Trends
- P. Biagini, C. Borri, L. Facchini (2007). Wind response of large roofs of stadiums and arena. 871–887, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics
- I.Shakhov, N. Kalinina, A. Belkin, and V. Kurnosov (2007). 23 – 27, Refractories and Industrial Ceramics
- David Surry, Ralph R. Sinno, Bert Nail, T. C. Eric H, Steven Farquhar, and Gregory A. Kopp (2007). Structurally Effective Static Wind Loads for Roof Panels. 0733-9445, Journal of Structural Engineering

- M. Shakeel Virk, and A.E Holdo (2008). Numerical study of wind loads on a low-rise pitched roof building with spirelet. 687–694, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*
- D. Linghoff, R. Haghani, M.A Emrani (2009). Carbon-fibre composites for strengthening steel structures. 1048–1058, *Thin-Walled Structures*
- B. Hu, M. Dweib, R. P. Wool, and Harry W. Shenton (2007). Bio-Based Composite Roof for Residential Construction. 1076-0431, *Journal of Architectural Engineering*
- P. Wei, S. Bingnan, T. Jinchun (1999). A Catenary Element for the Analysis of Cable Structures. 310027, *Applied Mathematics and Mechanics*
- M. Such, Jesus R. J. Octavio, A. Carnicero, O. Lopez-Garcia (2009). An approach based on the catenary equation to deal with static analysis of three dimensional cable structures. 2162-2170, *Engineering Structures*
- A.Andreu, L. Gil, P. Roca (2006). A new deformable Catenary element for the analysis of cable net structures. 1882–1890, *Computers and Structures*
- D.A. Jenkins (1998). *Arch Structures Spanning Past Present And Future*, Reinforced Earth Pty Ltd
- E. Do and M. Gross (1995). *Shape Based Reminding as an aid to Creative Design*, National University of Singapore
- M.P. BendsOe (1989). Optimal shape design as a material distribution problem. 193-202, *Structural Optimization*
- J. Semple Kerr (2003). *Sydney Opera House* Sydney Opera House Trust
- F. Colbert (2001). *The Sydney Opera House: An Australian Icon*. Volume 5. Number 2, Company Profile
- D. Huylebrouck (2007). Curve Fitting in Architecture. 59-70, *Nexus Network Jour*
- M. Moser, K. Hanke (2006). Digital 3D Reconstruction of Antonio Gaudi’s Lost Design for a Church Near Barcelona, Spain, XXI International CIPA Symposium
- M.C. Burry, J.R. Burry, G.M. Dunlop & A. Maher (2001). Drawing Together Euclidean and Topological Threads, the 13th Annual Colloquium of the Spatial Information Research Centre University of Otago, Dunedin, New Zealand
- L. J. Ratliff, Jr. (2010). A Brief History and Survey of the Catenary Chain Conjectures. 169-178, *The American Mathematical Monthly*
- Mark Schenk (2009). On the shape of Cables, Arches, Vaults and Thin Shells. 2007.160.1.3, the double-curvature masonry vaults of eladio dieste *Structures & Buildings*

S. Huerta (2006). Structural Design in the Work of Gaudi. 324-339, Architectural Science Review

Team Sixteen, D. Chak, M. Galbraith, A. Kilian (1999). CatenaryCAD: An Architectural Design Tool. 6.837 Computer Graphics

R.W. Naden (1991). Steel Tile Roof. 683,289, United States Patent

C.G Salmon, J. Johnson, F.A Malhas (2009). Steel Structures Design and Behavior, Pearson International Edition

X.K. Μπανιωτόπουλος (2009). Κατασκευές από χάλυβα, Εκδόσεις Ζήτη

X.K. Μπανιωτόπουλος (2003). Συνδέσεις Μεταλλικών Κατασκευών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

E. Ταντελέ (2008). Σημειώσεις Τεχνικής Μηχανικής-Στατικής. Κεφάλαιο 4. (ΠΟΜ 116)