

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΑΘΗΝΑΣ **ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ** ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΞΟΕΙΔΗΣ ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΑ ΜΕ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΑ ΚΑΛΩΔΙΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ



Επιβλέπων: **Λεωνίδας Θ.Σταυρίδης** Καθηγητής Στατικής Ε.Μ.Π Εκπόνηση: **Κακουρίδης Κωνσταντίνος** , Α.Μ. 11021708

Αθήνα, 2019

<u>Ευχαριστίες</u>

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας κ.Λεωνίδα Σταυρίδη, Καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την επιστημονική καθοδήγηση, τις καίριες υποδείξεις του και το ενδιαφέρον που έδειξε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής εργασίας.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω όλους τους συμφοιτητές και φίλους μου, καθώς, χωρίς τη συνεργασία, την αλληλοϋποστήριξη και την ανταλλαγή ιδεών και εμπειριών, θα ήταν αδύνατη η περάτωση ενός τόσο απαιτητικού μεταπτυχιακού.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, που με στήριξαν καθόλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού, πνευματικά και ψυχικά, συμβάλλοντας τα μέγιστα για την ολοκλήρωση του.

Κακουρίδης Κωνσταντίνος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ5
ABSTRACT7
Κεφάλαιο 1°: Ιστορική αναδρομή της γέφυρας τύπου "La Devesa"9
1.1 Ο Santiego Calatrava και η πρώτη γέφυρα La devesa9
1.2 Η σύγχρονη ελευθερία πάνω στην αισθητική του έργου11
Κεφάλαιο 2° : Το τόξο ως σχοινοειδής φορέας12
2.1 Σύλληψη του σχοινοειδούς φορέα12
2.2 Γεωμετρικός προσδιορισμός του τόξου14
2.3 Σημαντικά σενάρια φόρτισης για τα τόξα και κύρια χαρακτηριστικά της φέρουσας λειτουργίας τους
Κεφάλαιο 3° : Οι συνέπειες της μεταφοράς και στροφής του επιπέδου του τόξου βήμα προς βήμα. 20
3.1 Η κρεμαστή γέφυρα με κεντρικό τόξο20
3.1.1 Φορτία και σενάρια φόρτισης21
3.1.2 Δυσμενέστερη περίπτωση φόρτισης για μέγιστη ροπή και βύθιση
3.1.3 Ανακατανομή ροπής μεταξύ τόξου και δοκού25
3.1.4 Σενάριο φόρτισης για μέγιστη στρεπτική ροπή26
3.2 Τοξοτή γέφυρα με κατακόρυφο τόξο μετατοπισμένο στο άκρο
3.2.1 Έλεγχος και σύγκριση βυθίσεων με την γέφυρα που έχει το τόξο στο κέντρο του καταστρώματος
3.2.2 Στατική λειτουργία του καταστρώματος31
3.3 Τοξοτή γέφυρα με τόξο μετατοπισμένο στο άκρο και υπό κλίση
3.3.1 Συνέπειες της κλίσης των καλωδίων34
3.3.2 Κατανομή της ροπής μεταξύ καταστρώματος και τόξου
Κεφάλαιο 4° : Σταδιακή οικοδόμηση, προμελέτη και κατανόηση της φέρουσας λειτουργίας μιας γέφυρας τύπου "La devesa"
4.1 Δεδομένα του προβλήματος37
4.2 Σύλληψη της μορφής του δικτυώματος37
4.2.1 Στρέψη σε λεπτότοιχες κλειστές διατομές39

4.2.2 Επιλογή σχήματος του βασικού δίσκου του δικτυώματος και σταδιακή συναρμολόγησ	ή του
καταστρώματος	39
4.2.3 Τοποθέτηση των διαγώνιων συνδέσμων ακαμψίας	42
4.3 Διαστασιολόγηση των μελών του δικτυώματος	46
4.3.1 Εύρεση ελάχιστης απαιτούμενης στρεπτικής δυσκαμψίας δικτυώματος	46
4.3.2 Εύρεση στρεπτικής δυσκαμψίας του καταστρώματος	60
4.4 Έυρεση της απαιτούμενης δύναμης των καλωδίων	75
4.5 Σχεδιασμός του τόξου και εισαγωγή του στο ROBOT	83
4.5.1 Το φαινόμενο του λυγισμού στα τόξα	83
4.5.2 Διαστασιολόγηση της διατομής του τόξου	86
4.5.3 Εύρεση σχοινοειδούς μορφής του τόξου	88
4.6 Διαδικασία τοποθέτησης και προέντασης των καλωδίων στο λογισμικό ROBOT	93
4.6.1 Εύρεση αρχικού μήκους καλωδίων	93
4.6.2 Εισαγωγή των καλωδίων στο λογισμικό ROBOT	102
Κεφάλαιο 5° : Ανάλυση του φορέα και αποτελέσματα	104
5.1 Επιλογή τύπου και μεθόδου ανάλυσης	104
5.2 Σενάρια φόρτισης	106
5.3 Αποτελέσματα σεναρίου "DL"	108
5.4 Αποτελέσματα σεναρίου "LLsym"	118
5.5 Αποτελέσματα σεναρίου "ULS-sym"	121
5.5.1 Μέγιστη θλιπτική δύναμη τόξου	121
5.5.2 Στρεπτική ροπή τόξου	122
5.5.3 Επαλήθευση του τρόπου λειτουργίας των διαγώνιων συνδέσμων ακαμψίας	128
5.5.4 Επαλήθευση της καμπτικής συμπεριφοράς της δοκού στο πίσω μέρος του καταστρώι	ματος
	130
5.6 Η αντισυμμετρική φόρτιση και τα αποτελέσματα σεναρίου "ULS-antisym"	132
5.7 Έλεγχος επάρκειας των διατομών έναντι συνδυασμένων εντατικών καταστάσεων	ν και
φαινομένων καθολικής αστάθειας	133
Κεφάλαιο 6º : Συμπεράσματα	136
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	139

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σαν πρόσφατο αποτέλεσμα μοντέρνας κατασκευαστικής της τεχνογνωσίας, πολλοί σχεδιαστές επικεντρωμένοι στην αισθητική, οι περισσότεροι εκ των οποίων με χαμηλή τεχνική κατάρτηση αλλά ελάχιστο περιορισμό στην δημιουργική τους ελευθερία, ξεκίνησαν να συνεργάζονται με πολιτικούς μηχανικούς.

Ο ρόλος τους γίνεται ολοένα και περισσότερο σημαντικός σε ομάδες σχεδιασμού έργων όπως γέφυρες μικρού και μεσαίου ανοίγματος, που προορίζονται για αστικό περιβάλλον όπου η αισθητική παίζει σημαντικό έως πρωτεύοντα ρόλο.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εστιάζει στην κατανόηση και προμελέτη της πολύπλοκης κατασκευαστικής συμπεριφοράς μιας απο τις πιό συνηθισμένες μορφές γεφυρών που γεννήθηκε από την παραπάνω συνεργασία : μια γέφυρα αποτελούμενη απο ευθύγραμμο κατάστρωμα, στηριζόμενη με την βοήθεια έκκεντρου κεκλιμένου τόξου στο ένα της άκρο.

Ο συγκεκριμένος τύπος γέφυρας εγκαινιάστηκε από τον Ισπανό μηχανικό και αρχιτέκτονα Santiego Calatrava γνωστή και ως πεζογέφυρα τύπου ''La Devesa''

Η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία απαρτίζεται από 6 κεφάλαια.

Στο **πρώτο** κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική αναδρομή της γέφυρας τύπου ''La Devesa'' και σχολιασμός των συντελεστών που κατέστησαν εφικτή την δημιουργία τέτοιου τύπου ιδιόμορφων κατασκευών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται σχολιασμός του τόξου ως φορέα, της σύλληψης της μορφής του και των σεναρίων φόρτισης που λαμβάνονται υπόψιν κατά τον σχεδιασμό του.

Στο **τρίτο** κεφάλαιο παρατίθενται βήμα προς βήμα οι επιπτώσεις της σταδιακής ''μεταφοράς'' από μια γέφυρα με κεντρικό τόξο, στην γέφυρα τύπου ''La Devesa''. Επίσης γίνεται αναφορά στην συνεργασία τόξου και δοκού καταστρώματος, καθώς και τα δυσμενέστερα σενάρια φόρτισης για κάθε τύπο γέφυρας.

Στο **τέταρτο** κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διαστάσεις του προβλήματος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, τα βήματα που ακολουθήθηκαν

και η συλλογιστική πορεία που απαιτήθηκε για την διαστασιολόγηση, στο στάδιο προμελέτης, μιας γέφυρας τύπου La Devesa. Επίσης σχολιάζεται η μοντελοποίηση του φορέα και ο τρόπος προέντασης των καλωδίων μέσω του λογισμικού ROBOT.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνεται η ανάλυση του τελικού φορέα, η περιγραφή και ο ρόλος των σεναρίων φόρτισης που λήφθηκαν υπόψιν καθώς και σχολιασμός των αποτελεσματων της ανάλυσης για κάθε σενάριο. Επίσης γίνεται έλεγχος των διατομών του φορέα σε συνδυασμένες εντατικές καταστάσεις και εξαιτάζεται η επάρκεια των μελών έναντι φαινομένων καθολικής αστάθειας.

Η εργασία ολοκληρώνεται με το **έκτο** κεφάλαιο, όπου σχολιάζεται η επιλογή της γέφυρας τύπου La Devesa έναντι πιο συνηθισμένου τύπου γεφυρών. Τέλος παρουσιάζονται προτάσεις και κατευθύνσεις για την συνέχιση της εργασίας.

ABSTRACT

As a recent result of the modern structural mastery of developed societies, many designers concerned with aesthetics, most of them with low technical training, but with hardly any technical restriction to their creative freedom, have begun to collaborate with structural engineers.

They play an increasingly important role in design teams, which are now interdisciplinary, mainly for short and medium-span bridges located in urban environments, where aesthetic quality may be a desired, or even the primary objective.

This thesis is focused on understanding the complex structural behaviour of one of the most frequently built types of bridges born from this collaboration: the bridge composed of a straight deck supported by an eccentric inclined arch attached to its edge.

This type of bridge was pioneered by the well-known Spanish engineer and architect Santiago Calatrava, who designed the 'La Devesa' footbridge.

This thesis consists of 6 parts.

In the **first** part there is a historic reference about the "La Devesa" bridge type. Also the factors that made possible the creation of such odd types of structures are presented.

The **second** part emphasizes on the arc element, the procedure of finding its geometry and the load cases that need to be considered during its design.

The **third** part presents step by step the consequences of "moving" from the "classical" arced bridge to the "La Devesa" bridge type. Also there is a reference about the cooperation between the arc and the deck's beam, and the most unfavorable load case scenarios for every bridge type.

The **forth** part includes the basic dimensions of the current thesis's bridge, the steps that've been followed and the procedure that was needed for the sizing, in terms of pre-studying, of a "La Devesa" bridge type. There is also commenting on the modeling of the structure and pretention of the cables through the ROBOT software.

The **fifth** part focuses on the analysis of the final structure, on the description and the role of the load cases that were took into consideration, as well as on pointing out the results of each load case. Furthermore all sections and members of the structure are checked in combined internal forces scenarios and global imbalance phenomena respectively.

In the **sixth** and final part there is commenting on the choice of the "La Devesa" bridge type over other more usual approaches. Lastly proposals and directions are presented for the continuation of the project.

<u>Κεφάλαιο 1° : Ιστορική αναδρομή της γέφυρας τύπου "La</u> <u>Devesa"</u>

1.1 O Santiego Calatrava και η πρώτη γέφυρα La devesa

Ο Santiego Calatrava, γεννημένος κοντά στην Μαδρίτη της Ισπανίας (1951), είναι Ισπανός αρχιτέκτονας και μηχανικός, ίσως ένας από τους πιο διάσημους και με την μεγαλύτερη επιρροή.

Έχει σχεδιάσει κτίρια, σταθμούς, αθλητικά στάδια κτλπ σε όλο τον κόσμο, πολλά από τα οποία πια αποτελούν ορόσημο των πόλεων στις οποίες χτίστηκαν. Στα σημαντικότερα έργα του περιλλαμβάνονται και πολλές γέφυρες, μία από της οποίες είναι και το θέμα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Η γέφυρα τύπου ''La Devesa'' πρόκειται για μια γέφυρα με ευθύγραμμο κατάστρωμα στηριζόμενη με την βοήθεια έκκεντρου κεκλιμένου τόξου στο ένα της άκρο. Η σύνδεση του τελευταίου με το κατάστρωμα γίνεται μέσω καλωδίων ή συμπαγούς μελών διατομής Ι.

Η πρώτη γέφυρα τέτοιου τύπου χτίστηκε μεταξύ 1989 και 1991 στην πόλη Ripoll της Ισπανίας με συνολικό μήκος 65 m. Το μεταλλικό τόξο που την στηρίζει καλύπτει άνοιγμα 44 m, έχει ύψος 6,5 m από την στάθμη του καταστρώματος και κλίση 25° από το κατακόρυφο επίπεδο. Το κατάστρωμα και το τόξο συνδέονται με συμπαγή μέλη διατομής Ι.



Εικόνες 1 & 2. Η πεζογέφυρα La Devesa της πόλης Ripoll.

Το κατάστρωμα αποτελείται από μια κυκλική κοιλοδοκό (CHS) με στόχο την παράλειψη της στρέψης, μια μικρότερη κοιλοδοκό (CHS) στο ελεύθερό του άκρο και εγκάρσιους-χιαστί συνδέσμους μεταξύ των δύο με αποτέλεσμα τον σχηματισμό ενός δικτυώματος. Ο πεζόδρομος έχει πλάτος 3,25 m και αποτελείται απο ξύλινες σανίδες.



Εικόνα 3. Διατομή της πεζογέφυρας La Devesa της πόλης Ripoll.



Εικόνα 4. Όψη του κάτω μέρους του καταστρώματος της γέφυρας La Devessa.

1.2 Η σύγχρονη ελευθερία πάνω στην αισθητική του έργου

Άν και ο ρόλος μιας γέφυρας είναι κυρίως λειτουργικός και πρέπει να πληρεί κάποιες τεχνικές προυποθέσεις, όλες οι γέφυρες του Calatrava είναι εύκολα αναγνωρίσιμες καθώς όλες έχουνε αυτό που κανείς θα μπορούσε ορίσει ως ''στιλ-Calatrava''

Η κύρια συνεισφορά του στον κόσμο τών γεφυρών εστιάζεται στην σκόπιμη εισαγωγή οπτικών ή ακόμη και γλυπτικών ιδεών που καθιστούν τα έργα του πρωτότυπα και αξιοθαύμαστα.

Η τεράστια αυτή ελευθερία πάνω στην αισθητική του έργου που επικρατεί στις μέρες μας, δεν έχει να κάνει με την δομική ανάλυση του, την οικονομία, την κατασκευαστική αποδοτικότητα ή την ευκολία στην εκτέλεση. Με άλλα λόγια δεν είναι αποτέλεσμα μιας ορθόδοξης προσσέγγισης στο σχεδιασμό των γεφυρών.

Αντιθέτως είναι αποτέλεσμα του υψηλού επιπέδου τεχνογνωσίας και των τεράστιων δυνατοτήτων των υλικών που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο των μοντέρνων και εύπορων κοινωνιών.

Η τεχνολογία ανάπτυξης υλικών πολύ υψηλών προδιαγραφών, η ραγδαία ανάπτυξη της δομικής ανάλυσης λόγω της βοήθειας του ηλεκτρονικού υπολογιστή και η δυνατότητα κατασκευής μεγάλων, βαρέων δομικών στοιχείων οδήγησε σε μια προτοφανή κατάσταση. Οι σχεδιαστές δεν είναι πια υποχρεωμένοι να επιλέγουν μία και μοναδική λύση με κύριο γνώμονα την παραλαβή των επιβαλλομένων φορτίων. Αντιθέτως, ξαφνικά έχουν στην διάθεση τους ένα μεγάλο εύρος τεχνικών λύσεων και ελευθερίας στην αισθητική του έργου.

Με άλλα λόγια αν η οικονομία δεν αποτελεί πρόβλημα, σχεδόν οτιδήποτε μπορεί να σχεδιαστεί μπορεί και να κατασκευαστεί.

Κεφάλαιο 2°: Το τόξο ως σχοινοειδής φορέας

Πρωτού προχωρήσουμε στην μελέτη και κατανόηση του ιδιόμορφου τύπου γέφυρας ''La Devesa'', είναι απαραίτητη η αναφορά ενός πολύ σημαντικού συντελεστή για την λειτουργία της, του τόξου.

2.1 Σύλληψη του σχοινοειδούς φορέα

Η ανάπτυξη καμπτικών ροπών σε ένα δομικό στοιχείο προκαλεί την γνωστή γραμμική κατανομή διαμήκων τάσεων. Ως αποτέλεσμα δεν καταπονούνται το ίδιο όλες οι ίνες της διατομής, σε αντίθεση με την ιδεώδη εκμετάλλευση του υλικού που θα ήταν όλες να εντείνονταν ομοιόμορφα, πράγμα που θα σήμαινε ανάπτυξη καθαρής αξονικής έντασης.

Έτσι τέθηκε το ερώτημα, ποια θα πρέπει να είναι η μορφή ενός φορέα που στηρίζεται σε δύο προκαθορισμένα σημεία με απόσταση L, ώστε για μια δεδομένη φόρτιση να αναπτύσσει μόνο αξονική ένταση.

Η λύση προκύπτει εύκολα αν στηρίξουμε ένα απολύτως εύκαμπτο στοιχείο, όπως το σχοινί, στα δεδομένα σημεία και το φορτίσουμε με την δεδομένη φόρτιση. Στην μορφή την οποία θα πάρει μετά την ισσοροπία θα έχουμε μόνο εφελκυστικές δυνάμεις.

Εάν πάρουμε την κατοπτρική στατική εικόνα του προβλήματος και στο τέλος αναστρέψουμε τα φορτία, προκαλείται στο στοιχείο αποκλειστικά θλίψη και προκύπτει το γνωστό μας τόξο.

Ο φορέας αυτός λέγεται ''σχοινοειδής'' και μεταφέρει τα εξωτερικά φορτία προς τις στηρίξεις μέσω μόνο αξονικών θλιπτικών δυνάμεων.



Εικόνα 5. Σύλληψη του σχοινοειδούς φορέα

2.2 Γεωμετρικός προσδιορισμός του τόξου

Για την εύρεση της γεωμετρικής μορφής y(x) ενός τέτοιου τόξου για δεδομένη φόρτιση, παρατηρούμε ότι οι κατακόρυφες συνιστώσες των εντατικών μεγεθών του ισούνται με αυτές της αντίστοιχης αμφιερείστου δοκού. Αυτό έχει ως άμεση συνέπεια η καμπτική ροπή του τόξου σε οποιαδήποτε σημείο του με απόσταση y(x) από την οριζόντια να ισούται με την καμπτική ροπή $M_{\alpha\mu\phi}(x)$ της αμφιέριστης δοκού μειωμένη κατά το μέγεθος H* y(x). Τα παραπάνω προκείπτουνε άμεσα κάνοντας μια στατική τομή σε ένα τυχαίο σημείο του τόξου και παίρνοντας άθροισμα των ροπών ώς προς αυτό.



Εικόνα 6. Κατακόρυφες συνιστώσες τόξου και αμφιέρειστης δοκού.



Εικόνα 7. Στατική τομή τόξου και αμφιέρειστης δοκού, εύρεση της εξίσωσης του τόξου.

Με την απαίτηση η ροπή σε κάθε σημείο του τόξου
$$(x_0 = x)$$
 να είναι
μηδέν θα έχουμε $M_{Toξov}(x) = 0 => y(x) = \frac{M_{\alpha\mu\phi}(x)}{H}$ (1)

Η παραπάνω σχέση δηλώνει οτι η ζητούμενη μορφή του τόξου για δεδομένη φόρτιση, είναι ομοιόθετη προς το διάγραμμα καμπτικών ροπών της αντίστοιχης αμφιέρειστης δοκού κατά τον συντελεστή $\frac{1}{H}$ ο οποίος για αρχή είναι άγνωστος.

Δίνοντας μια συγκεκριμένη τιμή σε μία από τις τεταγμένες του τόξου, ορίζοντας δηλαδή ένα τρίτο σημείο του (πέρα των δύο άκρων του), συνήθως την κορυφή του σε οριζόντια απόσταση x_0 από το ένα του άκρο, τότε προσδιορίζεται η οριζόντια συνιστώσα της εφελκυστικής δύναμης.

του τόξου :
$$H = \frac{M_{\alpha\mu\phi}(x_0)}{y(x_0)}$$
(2) (Η οριζόντια συνιστώσα Η της
θλιπτικής δύναμης του τόξου έχει ίδια τιμή σε κάθε σημείο του, ενώ η

ολιλιτικής συναμής του τόζου εχει ιδια τιμή σε κασε σημείο του, ενώ η κατακόρυφη συνιστώσα της αλλάζει. Ως αποτέλεσμα η θλιπτική δύναμη του τόξου ώς συνισταμένη των δύο αλλάζει σε κάθε σημείο και ισούται με $S = \sqrt{H^2 + V^2}$ παίρνοντας την μέγιστη τιμής της στα άκρα όπου $V = V_{MAX}$)

Kαι τελικά :
$$y(x) = \frac{y(x_0)}{M_{\alpha\mu\phi}(x_0)} M_{\alpha\mu\phi}(x)$$
 (3)

Η καμπύλη y(x) λέγεται και ''γραμμή πιέσεων''. Ένα τόξο διαμορφωμένο κατά τον παραπάνω τρόπο και με ακλόνητες στηρίξεις, αναπτύσσει πρακτικά καθαρή θλιπτική ένταση ασχέτως αν είναι τριαρθρωτό, διαρθρωτό ή πακτωμένο στα άκρα του.

Για ομοιόμορφο κατακόρυφο φορτίο το διάγραμμα ροπών της αμφιέρειστης δοκού είναι παραβολικό άρα παραβολική θα είναι και η γραμμή πιέσεων. Αντίστοιχα για παραλαβή συγκεντρωμένων φορτίων το διάγραμμα ροπών της αμφιέρειστης είναι πολυγωνικό και κατά συνέπεια πολυγωνικός θα είναι και ο σχοινοειδής φορέας (τόξο) που θα προκύψει.

2.3 Σημαντικά σενάρια φόρτισης για τα τόξα και κύρια χαρακτηριστικά της φέρουσας λειτουργίας τους.

Για να μην υπολειτουργεί ο φορέας στο μεγαλύτερο διάστημα της ζωής του, πράγμα αντιοικονομικό, η μόρφωσή του τόξου είναι σκόπιμο να ακολουθεί πάντοτε την γραμμή πιέσεως για τα μόνιμα μόνο φορτία (και όχι για το συνολικό φορτίο μόνιμων και κινητών).

Οποιαδήποτε απόκλιση του τελικού φορέα από την σχοινοειδή του μορφή, για την οποία και σχεδιάστηκε, λόγω παραμόρφωσης είται άσκησης επιπλέων φορτίων (π.χ κινητών p) που αλλάζουν την μορφή του διαγράμματος ροπών της αμφιέρειστης δοκού για την οποία έχει σχεδιαστεί ο φορέας, θα οδηγήσει στην ανάπτυξη κάμψης.

Το μέγεθος της καμπτικής ροπής γεννάται από την ροπή που αναπτύσσουν οι θλιπτικές δυνάμεις της τελικής γραμμής πιέσεως (για τα τελικά φορτία που θα δεχτεί η κατασκευή g+p) ως προς το θεωρούμενο σημείο του υπάρχων τόξου. Το ποιες ίνες θα εφελκυστούν ή θα θλιβούν απο την κάμψη, εξαρτάται από την σχετική θέση της νέας γραμμής πιέσεως ως προς το εξαιταζόμενο σημείο του φορέα.



Εικόνα 8. Η μεταβολή της γραμμής πιέσεως και οι επιπτώσεις της.

Με την συνήθη μορφή των φορτίων να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα, ένα επιπλέον ομοιόμορφα κατανεμημένο κινητό φορτίο p σε όλο το τόξο, προστίθεται με το υπάρχων φορτίο g των μονίμων για το οποίο έχει σχεδιαστεί η γεωμετρία του τόξου. Το τελικό διάγραμμα ροπών της αμφιέρειστης δεν αλλάζει μορφή, παρά αυξάνονται οι τιμές του αναλογικά με αποτέλεσμα να αυξάνεται αντίστοιχα μόνο η θλιπτική δύναμη που θα παραλάβει το τόξο.

Όσον αφορά την δυσμενέστερη διάταξη κινητού φορτίου που θα επιφέρει

την μεγαλύτερη ροπή στο τόξο είναι αυτή της φόρτισης του ενός ημίσεως του φορέα με το κινητό φορτίο p.

Η φόρτιση αυτή αναλύεται σε μια συμμετρική p/2 και μια αντισυμμετρική p/2. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η συμμετρική φόρτιση ώς ομοιόμορφα κατανεμημενο φορτίο σε όλο το τόξο δεν προκαλεί καμπτικές ροπές παρά αυξάνει μόνο την αξονική του θλίψη.

Η αντιστυμμετρική φόρτιση με βάση την θεωρία προκαλεί στην κορυφή του τόξου μηδενική βύθιση, ροπή καθώς και αξονική ένταση, με αποτέλεσμα τον μηδενισμό των οριζόντιων συνιστωσών των αντιδράσεων.

Η απουσία των οριζόντεων δυνάμεων στο μέσον και στα άκρα του τόξου για την αντισυμμετρική φόρτιση p/2, επιτρέπει να συναχθεί ότι η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή σε κάθε ήμισυ του τόξου (αμφιαρθρωτό) θα είναι αντίστοιχα :

 $M = \left(\frac{p}{L}\right) * \left(\frac{L}{L}\right)^2 / 8 = nL^2 / 64$

$$H = \frac{Mg_{\alpha\mu\varphi}(L/2)}{f}$$

$$H = \frac{Mg_{\alpha\mu\varphi}(L/2)}{f}$$

$$H = \frac{Mg_{\alpha\mu\varphi}(L/2)}{f}$$

Εικόνα 9. Μόρφωση του τόξου σύμφωνα με την γραμμή πιέσεως.

ī



Εικόνα 10. Λειτουργία και ένταση του τόξου κάτω από επιπρόσθετο κινητό φορτίο.

Με την απόκτηση ροπής λόγω των κινητών μετατοπίζεται η συνισταμένη θλιπτική δύναμη του τόξου (η οποία για καθαρή θλίψη βρισκότανε στο κέντρο της διατομής) προς τα πάνω ή κάτω αναλόγως του προσήμου της ροπής.

Αν η συνισταμένη θλιπτική δύναμη βγει εκτός του πυρήνα της διατομής θα έχουμε την ανάπτυξη εφλεκυστικών τάσεων, που σην περίπτωση υλικού με μικρή αντοχή στον εφελκυσμό (πχ σκυρόδεμα) πρέπει να διατηρούνται εντός των επιτρεπτών ορίων.



Εικόνα 11. Συμπεριφορά του αμφίπακτου τόξου στην αντισυμμετρική φόρτιση.

<u>Κεφάλαιο 3° : Οι συνέπειες της μεταφοράς και στροφής του</u> επιπέδου του τόζου βήμα προς βήμα.

Με στόχο την κατανόηση των αλλαγών που επιφέρει στα εντατικά μεγέθη και τον τρόπο λειτουργίας των μελών της γέφυρας, άρα και στην αντιμετώπιση της κατά την προμελέτη του έργου, ακολουθεί βήμα προς βήμα η μετατροπή μιας τοξοτής γέφυρας, σε γέφυρα τύπου «La Devesa». Οι διαστάσεις του φορέα και τα φορτία όσο προχωράμε θα παραμένουνε ίδια, με μόνη αλλαγή την μετακίνηση και τελικά στροφή του τόξου.

3.1 Η κρεμαστή γέφυρα με κεντρικό τόξο.

Η συγκεκριμένη γέφυρα αποτελείται από ευθύγραμμο κατάστρωμα στηριζόμενο από τόξο, μέσω καλωδίων, του οποίου το επίπεδο είναι κατακόρυφο και χωρίζει το κατάστρωμα στην μέση. Το τόξο στα άκρα του συνδέεται μονολιθικά με το κατάστρωμα (π.χ μέσω συγκολλήσεων αφού συνήθως πρόκειται για μεταλλική κατασκευή). Το σύστημα τόξοκατάστρωμα στηρίζεται στην αρχή και το τέλος του ανοίγματος σε ακρόβαθρα με αρθωτή σύνδεση. Το κατάστρωμα έχει την μορφή δικτυώματος αντίστοιχου της πρώτης πεζογέφυρας τέτοιου τύπου (La Devesa), αποτελείται δηλαδή από μια κύρια κοιλοδοκό που θα αναλάβει την στρεπτική καταπόνηση, η οποία συνδέεται με εγκάρσιους και διαγνώνιους συνδέσμους προς τον σχηματισμό δικτυώματος, πάνω στο οποίο και θα τοποθετηθεί το υλικό του πεζόδρομου (σημειώνεται πως απο δώ και στο εξής οι γέφυρες που θα αναφέρονται πρόκειται για πεζογέφυρες, όπως και η γέφυρα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας). Τα καλώδια συνδέουν το τόξο (έστω κιβωτιοειδούς διατομής) με την κύρια κοιλοδοκό που τρέχει στην διαμήκη έννοια της γέφυρας.

Η γέφυρα καλύπτει άνοιγμα μηκους L, το πλάτος του δικτυώματος (πεζόδρομου) ισούται με b, ενώ η κρέμαση του τόξου με f.



Εικόνα 12. Κρεμαστή γέφυρα με κεντρικό τόξο: (a) Διατομή και (b) Οπτική της γέφυρας.

3.1.1 Φορτία και σενάρια φόρτισης

Όσον αφορά τα φορτία του προβλήματος λαμβάνονται :

Α) Το ίδιο βάρος του καταστρώματος g_K (kN/m^2) το οποίο περιλαμβάνει το ίδιο βάρος τον φέροντων δομικών στοιχείων του

δικτυώματος καθώς και των μή φέροντων στοιχείων όπως επικαλύψεις, κιγκλιδώματα κλπ.

- B) Το ίδιο βάρος του τόξου $g_T(kN/m)$
- C) Το κινητό φορτίο q (kN/m²) το οποίο αντιπροσωπεύει το βάρος των πεζών και από το οποίο προκύπτουν οι τρεις παρακάτω περιπτώσεις φορτίσεων :





Στην πρώτη και δεύτερη περίπτωση φορτίζεται το αριστερό και το δεξί ήμιση αντίστοιχα του πλάτους του καταστρώματος καθόλο το μήκος της γέφυρας, ενώ στην τρίτη ολόκληρο το κατάστρωμα μέχρι την μέση του μήκους της.

Τα καλώδια ως φέροντα στοιχεία έχουν την δυνατότητα ανάλυψης εφελκυστικών μόνο αξονικών δυνάμεων οπότε στις θέσεις σύνδεσης τους με την σύνθετη διατομή του καταστρώματος, μπορεί κανείς να φανταστεί σημειακές στηρίξεις κυλίσεων. Γι αυτό τον λόγο και το καμπτικό διάγραμμα της κύριας δοκού του καταστρώματος μοιάζει με αυτό μιας συνεχής δοκού πολλών ανοιγμάτων.



Εικόνα 14. Καμππτικό διάγραμμα καταστρώματος, όμοιο με αυτό της δοκού πολλών ανοιγμάτων.

Το τόξο όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο μορφώνεται έτσι ώστε η κεντροβαρική του γραμμή να ακολουθεί την γραμμή πιέσεων για τα μόνιμα μόνο φορτία της κατασκευής. Τα καλώδια προεντείνονται με στόχο να αντικρούσουν τις βυθίσεις του καταστρώματος στα σημεία ακγυρώσεως τους υπό την επιβολή των μονίμων φορτίων.

3.1.2 Δυσμενέστερη περίπτωση φόρτισης για μέγιστη ροπή και βύθιση Πολλές φορές σε έργα μεγάλων διαστάσεων, όπως γέφυρες, κυρίαρχο ρόλο στην επιλογή των διαστάσεων και της ακαμψίας των δομικών μελών δεν παίζουνε τόσο τα εντατικά μεγέθη λόγω των φορτίων που φέρει η κατασκευή, αλλά ο περιορισμός των βυθίσεων του φορέα. Έτσι ο δομικός σχεδιασμός μετατρέπεται περισσότερο σε θέμα δυσκαμψιών παρά κατασκευαστικής αστοχίας. Ως αποτέλεσμα ο τελικός φορέας έχει διαστάσεις υπέρ-αρκετές για την ανάλυψη τον φορτίων σχεδιασμού που του ασκούνται.

Από τις τρείς περιπτώσεις φορτίσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω, δυσμενέστερη είναι η τρίτη (q_3), τόσο από άποψη καμπτικων ροπών που αναπτύσσονται στο κατάστρωμα και στο τόξο, όσο και από την πλευρά της παραμόρφωσης του καταστρώματος. Σε αυτό οφείλεται ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος τόξο-κατάστρωμα.

Το κατάστρωμα μεταφέρει τα φορτία στο τόξο μέσω των καλωδίων, τα οποία παίζουν ουσιαστικά μέσω των δυνάμεων που μεταφέρουν τον ρόλο

στηρίξεων για το κατάστρωμα. Βύθιση του τόξου σημαίνει αυτόματα και βύθιση της δοκού του καταστρώματος στο ίδιο σημέιο καθώς μαζί με το τόξο υποχωρούν και τα καλώδια που στηρίζουν την γέφυρα. Βύθιση του τόξου σημαίνει απομάκρυνση του από την γράμμη πιέσεων για την οποια έχει σχεδιασθεί και άρα τον σχηματισμό καμπτικών ροπών στο τόξο, μεγαλύτερων όσο μεγαλύτερη είναι και η απομάκρυνση αυτή.

Αντίστοιχα βύθιση της δοκού του καταστρώματος σημαίνει απομάκρυνση από την μορφή της συνεχούς δοκού, καθώς οι υποθετικές στηρίξεις της υποχωρούν και τα ανοίγματα της ενώνονται προς τον σχηματισμό ενός ενιαίου ανοίγματος (ουσιαστικά τήνει να στηριχθεί στα δύο άκρα της με άνοιγμα όσο και το συνολικό της μήκος).



Εικόνα 15. Αύξηση των καμπτικών ροπών σε τόξο και δοκό καταστρώματος λόγω βυθίσεως του τόξου.

Μέγιστη βύθιση ενός τόξου (όπως και αντίστοιχα ενός ελεύθερου καλωδίου) που θα οδηγήσει στο παραπάνω φαινόμενο προκαλεί όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ένα αντισυμμετρικό φορτίο, φόρτιση δηλαδή του ενός ημίσεως του καταστρώματος (τύπος φόρτισης q_3).

3.1.3 Ανακατανομή ροπής μεταξύ τόξου και δοκού

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δυσμενέστερη περίπτωση φόρτισης για το τόξο όσον αφορά την παραμόρφωση του και την ανάπτυξη καμπτικών ροπών είναι η διάταξη του κινητού φορτίου στο ένα ήμισυ του ανοίγματος της γέφυρας. Από πλευράς παραμορφώσεων η παραπάνω φόρτιση προκαλεί βύθιση του αριστερού τμήματος του τόξου και ανύψωση του δεξιού.

Λόγω της σύνδεσης τόξου-καταστρώματος μέσω των καλωδίων υπάρχει συνεργασία μεταξύ τους, με αποτέλεσμα όπως έχει ήδη αναφερθεί, το κατάστρωμα να ακολουθεί την παραμόρφωση του τόξου. Προκειμένου η δοκός του καταστρώματος να παραμορφωθεί με τον ίδιο τρόπο, απαιτεί στο αριστερό της τμήμα άσκηση δυνάμεων προς τα κάτω, ενώ στο δεξιό προς τα πάνω.

Τις δυνάμεις αυτές θα τις προσφέρει το τόξο, οπότε και εξ αντιδράσεως θα δεχτεί τις αντίθετες, οι οποίες τήνουν να το επαναφέρουν στην αρχική του θέση με αποτέλεσμα να περιορίζεται η καμπτική του ένταση.

Έτσι η καμπτική ένταση του τόξου η οποία οφείλεται στα κινητά φορτία ανακατανέμεται μεταξύ του τόξου και της δοκού ανάλογα με τις ακαμψίες των δύο στοιχείων ως εξής :

$$M_B = M^* \frac{EI_B}{EI_B + EI_A}$$
 όπου I_A η ροπή αδρανείας του τόξου (Arch)

$$M_A = M^* \frac{EI_A}{EI_A + EI_B}$$
 και I_B η ροπή αδρανείας της δοκού του καταστρώματος (Beam)

Στην ακραία περίπτωση όπου το EI_B της δοκού είναι πολλαπλάσιο του EI_A του τόξου, η καμπτική ένταση θα παραληφθεί εξ ολοκλήρου από την

δοκό, ενώ στην αντίθετη περίπτωση σχεδόν ολόκληρη από το τόξο.



Εικόνα 16. Στατική λειτουργία του συστήματος τόξου – δοκού κάτω από κινητό φορτίο

3.1.4 Σενάριο φόρτισης για μέγιστη στρεπτική ροπή

Η μέγιστη στρεπτική ροπή στο κατάστρωμα προκύπτει εάν αυτό φορτιστεί με την μορφή q_1 ή q_2 , δηλαδή με φόρτιση του μισού πλάτους του καταστρώματος καθ'όλο το μήκος της γέφυρας.

Η στρεπτική ροπή τότε θα ισούται με $m_{\tau} = q^*(l)^2/2 = q^*\left(\frac{b}{2}\right)^2/2 \implies$



Εικόνα 17. Φόρτιση καταστρώματος για μέγιστη στρεπτική ροπή.

3.2 Τοξοτή γέφυρα με κατακόρυφο τόξο μετατοπισμένο στο άκρο

Σε αυτόν τον τύπο γέφυρας η διαφορά είναι πως το κατακόρυφο επίπεδο του τόξου μεταφέρεται εκγαρσίως στο άκρο του καταστρώματος.

Όπως και στην προηγόυμενη γέφυρα (κλασσική τοξοτή γέφυρα) καλύπτεται άνοιγμα μηκους L, το πλάτος του δικτυώματος (πεζόδρομου) ισούται με b και η κρέμαση του τόξου είναι f.



Εικόνα 18. Τοξοτή γέφυρα με κατακόρυφο τόξο μετατοπισμένο στο άκρο :(a) Διατομή και (b) Οπτική της γέφυρας.

Από τις σημαντικότερες συνέπειες που επιφέρει η τοποθέτηση του τόξου

στο άκρο του καταστρώματος, είναι πως κάθε κατακόρυφο φορτίο που ασκείται πάνω στο κατάστρωμα, τόσο τα μόνιμα όσο και τα κινητά, προκαλεί πέρα από καμπτικές ροπές και στρεπτικές.

Στον συγκεκριμένο τύπο γέφυρας, η μέγιστη στρεπτική ροπή λόγω κινητού φορτίου προκύπτει για ταυτόχρονη άσκηση των περιπτώσεων φόρτισης q_1 και q_2 , δηλαδή για φόρτιση όλου του πλάτους του καταστρώματος καθ'όλο το μήκος της γέφυρας. Η στρεπτική ροπή θα ισούται με $m_{\tau \prime} = q^*(l)^2/2 = q^*(b)^2/2 \implies m_{\tau \prime} = 4^*m_{\tau}$

(τιμή <u>τετραπλάσια</u> από την κλασσική τοξοτή γέφυρα).



Εικόνα 19. Φόρτιση καταστρώματος για μέγιστη στρεπτική ροπή.

Επειδή οι μέγιστες καμπτικές και στρεπτικές ροπές συμβαίνουν ταυτόχρονα, τα εντατικά μεγέθη του φορέα είναι πολυ μεγαλύτερα από αυτά της γέφυρας με το τόξο στο κέντρο του καταστρώματος.

Η στατική λειτουργία του τόξου παραμένει ίδια με εκείνου που είναι τοποθετημένο στο κέντρο του καταστρώματος.

3.2.1 Έλεγχος και σύγκριση βυθίσεων με την γέφυρα που έχει το τόξο στο κέντρο του καταστρώματος

Όταν το κατάστρωμα σηρίζεται από τόξο τοποθετημένο στο άκρο του, οι βυθίσεις που προκύπτουν είναι πολύ υψηλότερες από τις αντίστοιχες στην γέφυρα με το τόξο στο κέντρο.

Στην παρακάτω εικόνα, οι βυθίσεις του καταστρώματος συγκρίνονται με αυτές της κρεμαστής γέφυρας με τόξο στο κέντρο, όπου και δείχνεται πως οι μέγιστες βυθίσεις προκαλούνται για διαφορετικές περιπτώσεις φορτίσεων.

Στην γέφυρα με το τόξο στο κέντρο η μέγιστη βύθιση προκύπτει για φόρτιση με την περίπτωση q_3 , δηλαδή φόρτιση ολόκληρου του καταστρώματος μέχρι την μέση του ανοίγματος. Στο συγκεκριμένο όμως παράδειγμα, με το τόξο μετατοπισμένο στο άκρο, η μέγιστη βύθιση προκύπτει για συνδυασμό των περιπτώσεων q_1 και q_2 , φόρτιση δηλαδή ολόκληρου του καταστρώματος σε όλο το άνοιγμα της γέφυρας.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρατηρούμε ότι, για ίδιες διαστάσεις φορέα, μελών διατομής και τιμής φορτίων, υπάρχει τεράστια διαφορά σε τάξη μεγέθους στην μέγιστη βύθιση καταστρώματος, για τόξο στο κέντρο και τόξο στο άκρο.

Η βυθίσεις στο ελεύθερο άκρο και των δύο διατομών μπορούν να υπολογιστούν απο τις παρακάτω δύο εξισώσεις όπου η βύθιση δ_A του διαμήκους άξονα της γέφυρας οφείλεται μόνο στην κάμψη που προκαλεί το κινητό φορτίο q και η στροφή θ_A της δοκού του καταστρώματος οφείλεται μόνο στην στρεπτική ροπή που προκαλεί το q.



Εικόνα 20. Βυθίσεις του άξονα της γέφυρας και του άκρου του καταστρώματος για τους δύο τύπους γεφυρών.

Όπως βλέπουμε και από το παραπάνω διάγραμμα, η μεταφορά του τόξου από το κέντρο του καταστρώματος στην άκρη του, δεν επιφέρει αλλαγή στην βύθιση της κύριας δοκού, καθώς εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από της κάμψης της. Οστώσο η βύθιση του άκρου που εξαρτάται πέρα απο την βύθιση της δοκού και από την στρέψη του καταστρώματος αυξάνεται δραματικά στην δεύτερη διατομή λόγω της αυξημένης στρέψης (τετραπλάσια τιμή στρέψης σε συνδυασμό με διπλάσιο πλάτος καταστρώματος οδηγεί σχεδόν σε οχταπλάσια βύθιση για το ελεύθερο άκρο της δεύτερης διατομής)

3.2.2 Στατική λειτουργία του καταστρώματος

Το κατάστρωμα όπως και στην περίπτωση της κρεμαστής γέφυρας με τόξο στο κέντρο της, συμπεριφέρεται σαν μια συνεχής δοκός πολλών ανοιγμάτων, με τα καλώδια να είναι προεντεταμένα έτσι ώστε να αντικρούουν τις βυθίσεις από τα μόνιμα φορτία στα σημεία σύνδεσης τους με την δοκό του καταστρώματος. Για τα κινητά φορτία ισχύουν οι ίδιοι τύποι ανακατανομής της ροπής μεταξύ του τόξου και της δοκού του καταστρώματος.

Όπως και στην τοξοτή γέφυρα με τόξο στο κέντρο της, η στροφή του καταστρώματος λόγω της εκκεντρότητας των κατακόρυφων φορτίων περιορίζεται από τα ακρόβαθρα. Μόνο που στην συγεκριμένη περίπτωση και τα μόνιμα φορτία προκαλούν στρεπτικές ροπές. Οι τιμές των στρεπτικών ροπών που φθάνουν στα ακρόβαθρα ισούνται με :

$$|T|_{x=\pm\frac{L}{2}} = (g_D \cdot e_{gD} + q \cdot e_q) \cdot \frac{L}{2}$$

όπου e_q και e_{gD} είναι αντίστοιχα οι εκκεντρότητες των κινητών φορτίων q και των μονίμων φορτίων g_D από το κέντρο της ακραίας δοκού του καταστρώματος.

3.3 Τοξοτή γέφυρα με τόξο μετατοπισμένο στο άκρο και υπό κλίση

Σε αυτόν τον τύπο γέφυρας το τόξο είναι τοποθετημένο στην άκρη του καταστρώματος και το επίπεδο του στρέφεται με γωνία ω° ως προς την κατακόρυφο.

Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός πως μαζί με το τόξο στρέφεται και η διατομή του, έτσι ώστε οι κύριοι άξονες της να ανήκουν

στο ίδιο επίπεδο με αυτό του τόξου. Ως αποτέλεσμα, το ίδιο βάρος του τόξου μπορεί να αναλυθεί μέσω της προβολής του διανύσματός του, στο επίπεδο του τόξου και στο κάθετο σε αυτό επίπεδο. Οι δύο συνιστώσες που προκύπτουν υπολογίζονται αντίστοιχα ως :

$$g_{A,\pi} = g_A^* \cos(\omega)$$

 $g_{A,\perp} = g_A * \sin(\omega)$

Έτσι η στατική συμπεριφορά του τόξου απλοποιείται αρκετά καθώς μπορεί να αναλυθεί σε μια εντός επιπέδου θλίψη N_A και κάμψη M_A («κλασική συμπεριφορά τόξου») με φορτία το $g_{A,\pi}$ και την δύναμη των καλωδίων , και μιας εκτός επιπέδου συμπεριφορά καμπύλης δοκού με εγκάρσια κάμψη $M_{Z,A}$ και στρέψη T_A με φορτία το $g_{A,\perp}$.



Εικόνα 21. Εντός επιπέδου $(g_{A,\pi})$ και εκτός επιπέδου $(g_{A,\perp})$ προβολές του ίδιου βάρους του τόξου.

Η στρεπτική ροπή T_A εμφανίζεται στους καμπύλους φορείς λόγω κάμψης, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης αντίστοιχου στρεπτικού φορτίου που θα καταπονεί την κατασκευή. Η εμφάνισή της οφείλεται στην διανυσματική μεταβολή της καμπτικής ροπής μεταξύ δύο γειτονικών διατομών όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 22. Ανάπτυξη στρέψης στους καμπύλους φορείς λόγω κάμψης.

Στην τελευταία εικόνα τόσο το άνω όσο και το κάτω κομμάτι μας θυμίζει ελεύθερο σώμα σχοινοειδούς μορφής, που ισσοροπεί σε παραβολική μορφή κάτω από την επίδραση αξονικών δυνάμεων στα άκρα του και ενός ομοιόμορφου φορτίου κάθετου στον άξονά του. Το πάνω τμήμα θυμίζει τόξο με θλιπτική δύναμη στα άκρα του ενώ το κάτω καλώδιο υπό εφελκυσμό. Το ομοιόμορφο αυτό φορτίο q που χρειάζεται για την ισορροπία τόσο του τόξου όσο και του καλωδίου, λόγω δράσης αντίδρασης ασκείται πίσω στην δοκό με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός δυνάμων ζεύγους σχηματίζουν στρεπτική που την ροπή Μ_T. Η τελευταία εμφανίζεται σε κάθε διατομή της δοκού οπότε ουσιαστικά δημιουργείται ένα κατανεμημένο στρεπτικό φορτίο m_T .

Μια γωνία $ω = 0^{\circ}$ αντιστοιχεί σε ένα κατακόρυφο τόξο, με καθαρή εντός επιπέδου συμπεριφορά τόξου χωρίς στρέψη ή εγκάρσια κάμψη, ενώ μια γωνία $ω = 90^{\circ}$ (οριζόντιο τόξο), αντιστοιχεί σε μια καμπύλη σε κάτοψη δοκό χωρίς συμπεριφορά τόξου.

3.3.1 Συνέπειες της κλίσης των καλωδίων

Τα καλώδια όπως έχει αναφερθεί παίζουν τον ρόλο ενδιάμεσων στηρίξεων που προσφέρουν στο κατάστρωμα τις απαραίτητες κατακόρυφες αντιδράσεις με στόχο τον μηδενισμό των κατακόρυφων βυθίσεών του.

Λόγω της κλίσης τους, οι δυνάμεις προέντασης αναλύονται σε δύο συνιστώσες, μια κατακόρυφη και μια οριζόντια. Η κατακόρυφη αναλαμβάνει να αντικρούσει τις κατακόρυφες βυθίσεις του καταστρώματος αλλά είναι πια μειωμένη κατά τον συντελεστή cos(ω), με αποτέλεσμα τα καλώδια να πρέπει να προενταθούν παραπάνω σε σχέση με το αν ήταν κατακόρυφα. Αύτο πρακτικά σημαίνει περισσότερο φορτίο για το τόξο, εντός του επιπέδου του.

Η οριζόντια συνιστώσα αποτελεί ουσιαστικά «αναγκαίο κακό» της στροφής του επιπέδου των καλωδίων-τόξου και κάμπτει το κατάστρωμα εκγαρσίως με την ροπή $M_{Z,D}$. Ώς αποτέλεσμα, η δοκός του καταστρώματος τίθεται υπό δυαξονική κάμψη.



Εικόνα 23. Εντός και εκτός επιπέδου κάμψη σε τόξο και δοκό καταστρώματος.

3.3.2 Κατανομή της ροπής μεταξύ καταστρώματος και τόξου

Όταν η γωνία στροφής του τόξου $ω = 0^{\circ}$, τότε αν το συνολικό κατακόρυφο φορτίο που ασκείται πάνω στο κατάστρωμα είναι q, αυτό μοιράζεται μεταξύ του τόξου και του καταστρώματος, με το πρώτο να αναλαμβάνει q*μ φορτίο και το δεύτερο (1-μ)*q. Μπορεί να θεωρηθεί πως η κατακόρυφη παραμόρφωση του τόξου και του καταστρώματος είναι ανάλογη του μ*q και (1-μ)*q αντίστοιχα και αντιστρόφως ανάλογη της κατακόρυφης δυσκαμψίας τους :

$$\delta_{A,Z} = k \cdot \mu \frac{q}{I_A}$$
(3)
$$\delta_{D,Z} = k \cdot (1 - \mu) \frac{q}{I_D}$$
(4)

όπου k είναι μια σταθερά που εξαρτάται απο το άνοιγμα της γέφυρας ,το υλικό και τις συνοριακές συνθήκες των μελών, π.χ οταν το τόξο και το κατάστρωμα είναι αμφιαρθρωτά με άνοιγμα L τότε
$$k = 5*L^4/(384*E*I)$$
.
Θεωρώντας ότι οι κατακόρυφες μετατοπίσεις του τόξου και της δοκού του

Θεωρώντας ότι οι κατακόρυφες μετατοπίσεις του τόξου και της δοκού του καταστρώματος είναι ίσες $\delta_{A,Z} = \delta_{D,Z}$ προκύπτει απο (3) και (4):

$$(1-\mu)\frac{q}{I_D} = \mu \frac{q}{I_A}$$

Επειδή όμως το τόξο είναι πια κεκλιμένο κατά ω° αν αναλαμβάνει κατακόρυφο φορτίο μ*q, το εντός επιπέδου που ασκείται πάνω στο τόξο θα ισούται με μ*q/cos(ω). Άρα η εντός επιπέδου παραμόρφωση του τόξου θα είναι :

$$\delta_{A,\pi} = k \cdot \frac{\mu}{\cos(\omega)} \frac{q}{I_A}$$

και η κατακόρυφη παραμόρφωση του :

$$\delta_{A,Z=}\frac{\delta_{A,\pi}}{\cos(\omega)} = k \cdot \frac{\mu}{\cos^2(\omega)} \frac{q}{I_A}$$

Για $\delta_{A,Z} = \delta_{D,Z}$ προκύπτει :

 $(1-\mu)\frac{q}{I_D} = \frac{\mu}{\cos^2(\omega)}\frac{q}{I_A}$

και η τιμή του μ υπολογίζεται ως :

$$\mu = \frac{I_A \cdot \cos^2(\omega)}{I_A \cdot \cos^2(\omega) + I_D}$$

Υποθέτοντας πως τα καλώδια έχουνε άπειρη ατένια, όταν το τόξο είναι κεκλιμένο η συνεισφορά του μειώνεται και η δυσκαμψία του πολλαπλασιάζεται με [(cos ω)]² :

$$M_A = \mu \cdot M = M \cdot \frac{I_A \cdot \cos^2(\omega)}{I_A \cdot \cos^2(\omega) + I_D}$$

$$M_D = (1 - \mu) \cdot M = M \cdot \frac{I_D}{I_A \cdot \cos^2(\omega) + I_D}$$

όπου M_A είναι η εντός επιπέδου ροπή του τόξου και M_D η διαμήκης καμπτική ροπή της δοκού του καταστρώματος. Παρατηρούμε πως η ροπή που αναλαμβάνει η δοκός του καστρώματος αυξάνεται λόγω της μείωσης
της συνεισφοράς του τόξου.

Κεφάλαιο 4° : Σταδιακή οικοδόμηση, προμελέτη και κατανόηση της φέρουσας λειτουργίας μιας γέφυρας τύπου 'La devesa''.

4.1 Δεδομένα του προβλήματος

Άνοιγμα που απαιτείται να γεφυρωθεί L = 80 m.

Πλάτος πεζόδρομου b = 4 m.

Τύπος γέφυρας : τοξοτή πεζογέφυρα με τόξο μετατοπισμένο στην άκρη και υπό κλίση 25° από την κατακόρυφο.

Τύπος καταστρώματος : χωρικό μεταλλικό δικτύωμα.

Κρέμαση τόξου f = 12 m

4.2 Σύλληψη της μορφής του δικτυώματος.

Για την διαμόρφωση της σύνθετης διατομής του καταστρώματος, ακολουθήθηκε η εξής συλλογιστική πορεία :

Μία απο τις κύριες καταπονήσεις του συγκεκριμένου τύπου γέφυρας, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι η στρέψη. Η τελευταία είναι αναπόφευκτη λόγω της τοποθέτησης του τόξου και των καλωδίων στο άκρο του καταστρώματος. Τα καλώδια παίζουν τον ρόλο ενδιάμεσων στηρίξεων για το κατάστρωμα μέσω τον κατακόρυφων αντιδράσεων που του προσφέρουν. Οι αντιδράσεις τους έχοντας αντίθετη κατεύθυνση απο τα φορτία βαρύτητας και βρισκόμενες στο άκρο, δημιουργούν μαζί με τα φορτία της κατασκευής (τόσο τα κινητά όσο και να μόνιμα) ζεύγη δυνάμεων που τήνουν να στρέψουν την διατομή της γέφυρας.



Εικόνα 24. Ανάπτυξη στρεπτικού φορτίου λόγω του ζεύγους δυνάμεων.

Όπως παρουσιάστηκε και στο κεφάλαιο 3, σε πολλά έργα μεγάλων διαστάσεων, έτσι και στις πεζογέφυρες, κυρίαρχο ρόλο στην επιλογή των διαστάσεων και της ακαμψίας των δομικών μελών δεν παίζουνε τόσο τα εντατικά μεγέθη λόγω των φορτίων που φέρει η κατασκευή, αλλά ο περιορισμός των βυθίσεων του φορέα. Έτσι ο δομικός σχεδιασμός μετατρέπεται περισσότερο σε θέμα δυσκαμψιών παρά κατασκευαστικής αστοχίας, με τους ελέγχους λειτουργικότητας να καθορίζουνε τις διαστάσεις των φερόντων μελών της κατασκευής.

Στην περίπτωση των πεζογεφυρών, ο έλεγχος λειτουργικότητας θέτει όρια για την μέγιστη βύθιση του καταστρώματος. Η μέγιστη τιμή βύθισης για τον συγκεκριμένο τύπο γέφυρας, όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 3, εμφανίζεται στο ελεύθερο άκρο του καταστρώματος και οφείλεται κατά κύριο λόγο στην στρέψη παρά στην κάμψη του.

Διατομές οι οποίες ενδείκνυνται για την δυστρεψία τους, είναι οι

λεπτότοιχες και μάλιστα κλειστές διατομές.

4.2.1 Στρέψη σε λεπτότοιχες κλειστές διατομές

Μια κοίλη λεπτότοιχη διατομή που έχει σταθερό πάχος τοιχωμάτων t, παραλαμβάνει την στρεπτική ροπή M_T με μια περιρρέουσα σταθερή διατμητική τάση τ που ισούται σύμφωνα με την λεγόμενη σχέση του Bredt με :

$$\tau = \frac{M_T}{2*F_k*t}$$

όπου F_k συμβολίζει το εμβαδό που περικλείεται από την μέση γραμμή των τοιχωμάτων. Αξίζει να σημειωθεί πως η δυστρεψία της διατομής I_T είναι ανάλογη του εμβαδού F_k.

Έτσι γίνεται αντιληπτό πως κάθε τοίχωμα της εξεταζόμενης διατομής του ευθύγραμμου στοιχείου βρίσκεται υπό μια σταθερή διατμητική ροή :

$$v = \tau^* t = \frac{M_T}{2 * F_k}$$

ασκούμενη ανά μονάδα μήκους (kN/m), που φυσικά προκαλεί μια συνολική τέμνουσα δύναμη V σε όλο το τοίχωμα.

Η διατμητική ροη ν είναι σταθερή για κάθε τοίχωμα ακόμη και αν τα πάχη τους είναι διαφορετικά.

4.2.2 Επιλογή σχήματος του βασικού δίσκου του δικτυώματος και σταδιακή συναρμολόγησή του καταστρώματος.

Με το τρίγωνο στα δικτυώματα να αποτελεί τον απλούστερο εσωτερικά ισοστατικό στερεό δίσκο, ως σχήμα της κλειστής λεπτότοιχης διατομής που θα παραλάβει την στρέψη του καταστρώματος επιλέχθηκε το τριγωνικό.

Η διατομή που επιλέχθηκε για τις ράβδους που αποτελούν τις πλευρές του

τριγωνικού αυτού δίσκου, είναι η κοίλη τετραγωνική διατομή της οποίας οι διαστάσεις θα προκύψουν βάσει διαδικασίας που θα παρουσιαστεί παρακάτω.



Εικόνα 25. Διατμητική ροή κατα Bredt και η συνισταμένη τέμνουσα δύναμη V στα τοιχώματα της κλειστής τριγωνικής διατομής (δίσκου) του καταστρώματος.



Εικόνα 26. Οι διαστάσεις της βασικής τριγωνικής διατομής (δίσκου) του καταστρώματος και η περιοχή F_K .

Με το κατάστρωμα να παίζει τον ρόλο δοκού σύνθετης διατομής με άνοιγμα 80 m, θεωρήθηκε σκόπιμο να τοποθετηθούν ενδιάμεσες στηρίξεις (καλώδια) ανά 2 m με στόχο τον περιορισμό των ροπών και των βυθίσεων. Έτσι η παραπάνω τριγωνική διατομή τοποθετήθηκε εξίσου ανά 2 m καθόλο το μήκος της γέφυρας, με την αριστερή πλευρά της να έχει ίδια κλίση με αυτή των καλωδίων, έτσι ώστε να μην υπάρχει εκκέντροτητα μεταξύ της δύναμης που μεταφέρουν τα καλώδια στο κατάστρωμα και της διατομής.

Για την συνεργασία κάθε διατομής με την επόμενη και την προηγούμενη τοποθετήθηκαν τρεις δοκοί που τις συνδέουν, μία σε κάθε τους άκρο.



Εικόνα 27. Σταδιακή οικοδόμηση του καταστρώματος της γέφυρας με την μορφή δικτυώματος.

4.2.3 Τοποθέτηση των διαγώνιων συνδέσμων ακαμψίας

Τέλος με στόχο την εξασφάλιση της απαραίτητης δυσκαμψίας του δικτυώματος σε μετακινήσεις κατά μήκος και εκγάρσια του καταστρώματος, προστέθηκαν διαγώνιοι σύνδεσμοι ακαμψίας.

Οι τελευταίοι ώντας διαγώνιοι, αποτελούν τα μέλη του δικτυώματος με το μεγαλύτερο μήκος, γεγονός που απαιτεί ιδιαίτερη μέριμνα ως προς την επιλογή της θέση τους στο δικτύωμα.

Η τοποθέτηση τους πρέπει να αποσκοπεί στον εφελκυσμό και όχι στην

θλίψη τους υπό τα φορτία που καταπονούν την κατασκευή, έτσι ώστε να εξασφαλιστούν από φαινόμενα καθολικής αστάθειας (κυρίως καμπτικό λυγισμό).

Η καταπόνηση η οποία τήνει να «αλλοιώσει» το προφίλ του καταστώματος είναι η στρεπτική. Η μέγιστη στρέψη εμφανίζεται για τοποθέτηση του κινητού φορτίου σε όλο το πλάτος του καταστρώματος καθόλο το μήκος της γέφυρας.



Εικόνα 28. Διάγραμμα μέγιστου στρεπτικού φορτίου της γέφυρας.

Την στρέψη του καταστρώματος την παραλαμβάνουνε τα ακρόβαθρα στην αρχή και στο τέλος της γέφυρας. Έτσι το διάγραμμα στρεπτικών ροπών προκύπτει αντισυμμετρικό.

Κάνοντας μια τομή πριν και μια μετά το μέσο της γέφυρας, την χωρίζουμε σε δύο τμήματα. Στα άκρα του κάθε τμήματος, με βάση το πρόσημο του διαγράμματος στρεπτικών ροπών, εμφανίζεται η κλασική περιρρέουσα διατμητική ροή κατά Bredt στα τοιχώματα της κλειστής τριγωνικής διατομής.

Στην συνέχεια αν θεωρήσουμε πως τα τρία προφίλ της γέφυρας πρόκειται για συμπαγείς ορθογωνικές πλάκες, αποκολλώντας τες παίρνουμε το ελεύθερο σώμα τριών συμπαγών πλακών.

Κάθε πλάκα ισορροπεί κάτω απο τις διατμητικές δράσεις κατά Bredt στα δύο άκρα της και τις διατεταγμένες κατά Cauchy διατμητικές δυνάμεις που ασκούνται στις διαμήκεις πλευρές της.

Έτσι αν πάρουμε ένα οποιοδήποτε στοιχειώδες τμήμα στο εσωτερικό της κάθε πλάκας, παρατηρούμε πως ισορροπεί κάτω από διατμητικές δυνάμεις που ασκούνται στις πλευρές του. Οι δυνάμεις αυτές τήνουν να επιμηκύνουν την διαγνώνιό του και να στρεβλώσουν το σχήμα του.

Εάν στην θέση της επαυξανόμενης αυτής διαγωνίου τοποθετηθεί μια ράβδος, τότε αυτή θα αναπτύξει εφελκυστική δύναμη και με την ατένια της θα μειώσει την στρέβλωση του στοιχειώδους τμήματος και κατ'επέκταση του προφίλ του καταστρώματος.

Τον ρόλο αυτής της ράβδου παίζουν οι διαγώνιου σύνδεσμοι ακαμψίας, οι οποίοι τοποθετήθηκαν στην γέφυρα μεταξύ των τριγωνικών διατομών ανά δύο μέτρα.

44



Εικόνα 29. Τοποθέτηση των διαγώνιων συνδέσμων ακαμψίας με στόχο την αποφυγή παραμόρφωσης του προφίλ του δικτυώματος λόγω στρέψης.

4.3 Διαστασιολόγηση των μελών του δικτυώματος

4.3.1 Εύρεση ελάχιστης απαιτούμενης στρεπτικής δυσκαμψίας δικτυώματος

Όπως έχει αναφερθεί στο τρίτο κεφάλαιο, λόγω των αυστηρών ορίων του κανονισμού στους ελέγχους λειτουργικότητας, σε έργα μεγάλης κλίμακας όπως οι γέφυρες η διαστασιολόγηση του φορέα γίνεται καθαρά με στόχο την απόκτηση επαρκούς ακαμψίας.

Για τις πεζογέφυρες, η Αμερικανική Ένωση Εθνικών Οδών και Μεταφορών θέτει ως όριο βύθισης τον όρο $\frac{L}{1000}$, που σημαίνει για την συγκεκριμένη γέφυρα τα $\frac{80000}{1000} = 80$ mm.

Η μέγιστη βύθιση στο συγκεκριμένο τύπο γέφυρας παρατηρείται στο ελεύθερο άκρο του καταστρώματος και οφείλεται κατα κύριο λόγω στην στρέψη και όχι στην κάμψη του.

Αυτό πρακτικά σημαίνει στρέψη του καταστρώματος κατά :



Εικόνα 30. Μέγιστη επιτρεπτή βύθιση καταστρώματος

Για κάθε στοιχείο η στρεπτική του στιβαρότητα (δυστρεψία) κατά St.Venant ισούται με $\kappa_T = \frac{G*I_T}{L} \left(\frac{kN*m}{rad}\right)$ όπου :

 $G = \mu$ έτρο διάτμησης του υλικού του στοιχείου.

 $I_T = \text{strepting}$ ροπή αδρανείας της διατομής του στοιχείου.

L = µήκος του στοιχείου.

Η στρεπτική ενδοσιμότητα ενός στοιχείου αντίστοιχα ισούται με :

$$\kappa_T^{-1} = f_T\left(\frac{rad}{kN*m}\right)$$

Επίσης από την τεχνική μηχανική ισχύει :

$$\frac{dM_T}{dx} = m_T$$

$$\frac{d\varphi}{dx} = \frac{M_T}{G*I_T} \longrightarrow \frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{dM_T}{dx} * \frac{1}{G*I_T}$$
I)

Η τελευταία σχέση μας θυμίζει την κλασική σχέση από την τεχνική μηχανική $\frac{d^2M}{dx^2} = q$ II)

Από Ι) & ΙΙ) σε συνδυασμό με το σκεπτικό της αναλογίας του Mohr, παρατηρούμε ότι η γωνία στρέψης φ και ο όρος $\frac{m_T}{G*I_T}$ συνδέονται με τον ίδιο τρόπο που συνδέεται η καμπτική ροπή M με το φορτίο q που την προκαλλεί.

Με άλλα λόγια υπάρχει η εξής αντιστοιχία :

$$M \longleftrightarrow \varphi$$
$$q \longleftrightarrow \frac{m_T}{G * I_T}$$

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι, για να βρούμε την στροφή ενός φορέα λόγω στρέψης δεν έχουμε παρά να φορτίσουμε τον συγκεκριμένο φορέα με τον όρο $\frac{m_T}{G*I_T}$ ώς κατακόρυφο φορτίο. Τότε το διάγραμμα ροπών που θα πάρουμε θα αντιστοιχεί στην στροφή φ του φορέα λόγω στρέψης. Για αρθρωτή σύνδεση του δικτυώματος με τα ακρόβαθρα και m_{Tg+q} το στρεπτικό κατανεμημένο φορτίο που καταπονεί την σύνθετη διατομή του καταστρώματος, λόγω μονίμων και κινητών φορτίων βαρύτητας, θα έχουμε :



Εικόνα 31. Εύρεση μέγιστης γωνίας στρέψης του φορέα μέσω της αναλογίας του Mohr.

Η μέγιστη τιμή στο παραπάνω διάγραμμα ροπών εμφανίζεται στο κέντρο του καταστρώματος με τιμή $\frac{q*L^2}{8}$, η οποία θα είναι και η μέγιστη γωνία στροφής του λόγω στρέψης. Οπότε θα έχουμε :

$$M_{max} = \varphi_{max} = \frac{q * L^2}{8} \longrightarrow \frac{q * L^2}{8} \le 1,15$$
$$\varphi_{max} \le 1,15^{\circ}$$

$$= \underbrace{L * L * m_{T_{g+q}}}_{G * I_T * 8} \le 1,15 = \underbrace{\frac{f_T * L * m_{T_{g+q}}}{8} \le 1,15}_{8} = 1,15$$

$$\Longrightarrow f_T \leq \frac{1,15*8}{80*m_{T_{g+q}}} \Longrightarrow f_T \leq \frac{1,15}{10*m_{T_{g+q}}} \left(\frac{degrees^\circ}{kN*m}\right)$$

4.3.1.1 Υπολογισμός στρεπτικού φορτίου λόγω κινητών

Το στρεπτικό κατανεμημένο φορτίο m_T όπως έχουμε αναφέρει, λόγω της μετατόπισης του επιπέδου του τόξου στο άκρο του καταστρώματος, οφείλεται τόσο στο ίδιο βάρος της κατασκευής όσο και στο κινητά φορτία.

Για κινητά φορτία σε πεζογέφυρες, ο Ευρωκώδικας δίνει ένα ομοιόμορφο φορτίο q που αντιπροσωπεύει τον συνωστισμό ατόμων πάνω στην γέφυρα.

Πιο συγκεκριμένα για το κινητό φορτίο πεζογεφυρών ισχύει :

$$q = 2 + \frac{120}{L+30}$$

$$2,5\left(\frac{\kappa N}{m^2}\right) \le q \le 5\left(\frac{\kappa N}{m^2}\right)$$

όπου L το μήκος της γέφυρας σε μέτρα.

Για L = 80 m προκύπτει **q** = 3 κN/ m^2 και στρεπτική ροπή $m_{T,q}$ = q* $b^2/2$

$$\implies m_{T,q} = 3*4^2/2 \implies m_{T,q} = 24 \frac{kN*m}{m}$$

Το παραπάνω αποτέλεσμα προκύπτει αν φορτίσουμε όλο το κατάστρωμα με το κινητό φορτίο q και πάρουμε μια αντιπροσωπευτική λωρίδα ενός μέτρου.



Εικόνα 32. Κατανεμημένο στρεπτικό φορτίο καταστρώματος $m_{T,q}$ λόγω κινητών.

4.3.1.2 Υπολογισμός στρεπτικού φορτίου λόγω ιδίου βάρους

Όσον αφορά το ίδιο βάρος της κατασκευής, αυτό προκύπτει ως άθροισμα του ίδιου βάρους των φερόντων και μή φερόντων μελών.

Στα μή φέροντα μέλη ανήκουν η επικάλυψη, το δάπεδο δηλαδή που θα τοποθετηθεί πάνω στο δικτύωμα για την προσπέλαση των παιζών, καθώς

και τα κιγκλιδώματα ασφαλείας στα ελεύθερα άκρα της γέφυρας.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία το ίδιο βάρος για τα μή φέροντα μέλη, λαμβάνεται με ένα ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο $g_{\varepsilon\pi} = 2,5$ κN/m².

Οπότε σε αντιστοιχία με το κινητό ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο q, ασκεί στο κατάστρωμα στρεπτικό φορτίο $m_{T,g_{e\pi}} = g_{e\pi} * b^2/2 = 2,5*4^2/2$

$$\implies m_{T,g_{\varepsilon\pi}} = 20 \, \frac{kN * m}{m}$$

Για τα φέροντα μέλη του καταστρώματος, δηλαδή τα στοιχεία του δικτυώματος, ακολουθήθηκε η εξής διαδικάσία :

- Για κάθε ράβδο του δικτυώματος, με βάση την διατομή και το υλικό της, υπολογίστηκε το ίδιο βάρος της ως κατανεμημένο φορτίο σε όλο της το μήκος.
- 2) Στην συνέχεια το φορτίο αυτό συγκεντρώθηκε στα άκρα της ράβδου ως σημειακό φορτίο. Με αυτόν τον τρόπο το συνολικό ίδιο βάρος του δικτυώματος, εκφράστηκε με συγκεντρωμένα φορτία στους κόμβους σύνδεσης των μελών.
- 3) Χρησιμοποιώντας τα συγκεντρωμένα φορτία στους κόμβους του δικτυώματος και την εκκεντρότητα τους ως προς το στηριζόμενο άκρο της γέφυρας, υπολογίστηκε η στρεπτική ροπή που ασκεί το ίδιο βάρος του δικτυώματος στο κατάστρωμα.

Ως διατομή για τα στοιχεία του δικτυώματος χρησιμοποιήθηκε η κλειστή κοίλη τετραγωνική διατομή (SHS).

Επίσης κάθε μέλος του δικτυώματος συνδέται με τα υπόλοιπα στον κόμβο μέσω συγκολλήσεως.



Εικόνα 34. Λεπτομέρειες Χαρακτηριστικών κόμβων καταστρώματος.



Εικόνα 35. Λεπτομέρεια 1: ενδιάμεσος κόμβος στο ελεύθερο άκρο του καταστρώματος.

$L_{\#1}$	2 m	$L_{\#4} \longrightarrow$	4 m
$L_{\#2}$	3,66 m	$L_{\#5} \longrightarrow$	4,17 m
$L_{\#3}$	4,47 m	$L_{\#6} \longrightarrow$	2 m

Άρα σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο στο ελεύθερο άκρο της γέφυρας, συγκεντρώνεται λόγω ιδίου βάρους των φερόντων μελών σημειακό φορτίο ίσο με :

$$\frac{(L_{\#1}+L_{\#2}+L_{\#3}+L_{\#4}+L_{\#5}+L_{\#6})*A}{2}*\gamma =$$

$$=\frac{(2+3,66+4,47+4+4,17+2)*A}{2}*77 = \frac{20,3*A}{2}*77 =$$

$$\frac{\Gamma_{12}\delta_{12}\tau_{0}\mu_{1}SHS \ 400x400x16}{A=0,024576\ m^{2}}=\frac{20,3*0,024576}{2}*77 = \boxed{19,20\ kN}$$
iδιο βάρος χάλυβα γ = 77 kN/m³



Εικόνα 36. Λεπτομέρεια 2: κόμβος στο ελεύθερο άκρο του καταστρώματος πάνω στον άξονα συμμετρίας της γέφυρας.

$L_{\#1} \longrightarrow 2 \text{ m}$	$L_{\#4} \longrightarrow 4 \text{ m}$
<i>L</i> _{#2} → 3,66 m	<i>L</i> _{#5} → 4,47 m
<i>L</i> _{#3} → 4,47 m	$L_{\#6} \longrightarrow 2 \text{ m}$

Άρα για τον κόμβο στο ελεύθερο άκρο της γέφυρας πάνω στον άξονα συμμετριάς (μέσο του ανοίγματος), συγκεντρώνεται λόγω ιδίου βάρους των φερόντων μελών, σημειακό φορτίο ίσο με :

$$\frac{(L_{\#1}+L_{\#2}+L_{\#3}+L_{\#4}+L_{\#5}+L_{\#6})*A}{2}*\gamma =$$

$$=\frac{(2+3,66+4,47+4+4,47+2)*A}{2}*77 = \frac{21,11*A}{2}*77 =$$

$$\frac{\Gamma_{12}\delta_{12}\tau_{02}}{A=0,024576} = \frac{21,11*0,024576}{2}*77 = 19,49 \text{ kN}}{2}$$

$$i\delta_{10}\beta_{10}\beta_{10}\beta_{10}\gamma = 77 \text{ kN/m}^{3}$$



Εικόνα 37. Δεπτομέρεια 3: κάτω κόμβος της τριγωνικής διατομής σε ενδιάμεσο σημείο της γέφυρας.

<i>L</i> _{#1} → 4,17 m	$L_{\#4} \longrightarrow 2,98 \text{ m}$
$L_{\#2} \longrightarrow 2 \text{ m}$	$L_{\#5} \longrightarrow 2 \text{ m}$
$L_{\#3} \longrightarrow 2,21 \text{ m}$	<i>L</i> _{#6} → 3,66 m

Άρα για τον κάτω κόμβο της τριγωνικής διατομής σε ενδιάμεσο σημείο της γέφυρας, συγκεντρώνεται λόγω ιδίου βάρους των φερόντων μελών σημειακό φορτίο ίσο με :

$$\frac{(L_{\#1}+L_{\#2}+L_{\#3}+L_{\#4}+L_{\#5}+L_{\#6})*A}{2}*\gamma =$$

$$=\frac{(4,17+2+2,21+2,98+2+3,66)*A}{2}*77 = \frac{17,02*A}{2}*77 =$$

$$\frac{\Gamma_{12}\delta_{12}\alpha_{12}\gamma_{13}}{A=0,024576}*77 = \frac{17,02*0,024576}{2}*77 = \frac{16,10 \text{ kN}}{2}$$

$$i\delta_{10}\beta_{10}\beta_{10}\beta_{10}\gamma_{10}=77 \text{ kN/m}^{3}$$



Εικόνα 38. Λεπτομέρεια 4: κάτω κόμβος τριγωνικής διατομής στον άξονα συμμετρίας της γέφυρας.

$L_{\#1} \longrightarrow 4,17 \text{ m}$	$L_{\#4} \longrightarrow 2 \text{ m}$
$L_{\#2} \longrightarrow 2 \text{ m}$	$L_{\#5} \longrightarrow 4,17 \text{ m}$
$L_{\#3} \longrightarrow 2,21 \text{ m}$	<i>L</i> _{#6} → 3,66 m

Άρα για τον κάτω κόμβο της τριγωνικής διατομής στον άξονα συμμετρίας (μέσον) της γέφυρας, συγκεντρώνεται λόγω ιδίου βάρους των φερόντων μελών σημειακό φορτίο ίσο με :

$$\frac{(L_{\#1}+L_{\#2}+L_{\#3}+L_{\#4}+L_{\#5}+L_{\#6})*A}{2}*\gamma =$$

$$=\frac{(4,17+2+2,21+2+4,17+3,66)*A}{2}*77 = \frac{18,21*A}{2}*77 =$$

$$\frac{\Gamma_{\iota\alpha}\delta_{\iota\alpha\tau}}{A=0,024576} \frac{SHS}{2} \frac{400x400x16}{2} = \frac{18,21*0,024576}{2}*77 = \boxed{17,23} \text{ kN}$$
iδιο βάρος χάλυβα γ = 77 kN/m³



Εικόνα 39. Λεπτομέρεια 5: κόμβος στο πίσω άκρο του καταστρώματος, σε ενδιάμεσο σημείο της γέφυρας

$L_{\#1} \longrightarrow 2 \text{ m}$	$L_{\#4} \longrightarrow 4 \text{ m}$
$L_{\#2} \longrightarrow 2 \text{ m}$	$L_{\#5} \longrightarrow 2,21 \text{ m}$
<i>L</i> _{#3} → 4,47 m	$L_{\#6} \longrightarrow 2,98 \text{ m}$

Άρα για τον κόμβο στο πίσω άκρο του καταστρώματος, σε ενδιάμεσο σημείο της γέφυρας, συγκεντρώνεται λόγω ιδίου βάρους των φερόντων μελών σημειακό φορτίο ίσο με :

$$\frac{(L_{\#1}+L_{\#2}+L_{\#3}+L_{\#4}+L_{\#5}+L_{\#6})*A}{2}*\gamma =$$

$$=\frac{(2+2+4,47+4+2,21+2,98)*A}{2}*77 = \frac{17,66*A}{2}*77 =$$

$$\frac{\Gamma_{12}\delta_{12}\tau_{2}\gamma_{13}}{A=0,024576}m^{2} = \frac{17,66*0,024576}{2}*77 = 16,71 \text{ kN}$$

ίδιο βάρος χάλυβ
α $\gamma=77~{\rm kN}/m^3$



Εικόνα 40. Λεπτομέρεια 6: κόμβος στο πίσω άκρο του καταστρώματος, στον άξονα συμμετρίας (μέσον) της γέφυρας,

$L_{\#1} \longrightarrow 2 \text{ m}$	$L_{\#4} \longrightarrow 4 \text{ m}$
$L_{\#2} \longrightarrow 2 \text{ m}$	$L_{\#5} \longrightarrow 2,21 \text{ m}$
$L_{\#3} \longrightarrow 2,98 \text{ m}$	$L_{\#6} \longrightarrow 2,98 \text{ m}$

Άρα για τον κόμβο στο πίσω άκρο του καταστρώματος, στον άξονα συμμετρίας (μέσον) της γέφυρας, συγκεντρώνεται λόγω ιδίου βάρους των φερόντων μελών σημειακό φορτίο ίσο με :

$$\frac{(L_{\#1}+L_{\#2}+L_{\#3}+L_{\#4}+L_{\#5}+L_{\#6})*A}{2}*\gamma =$$

$$=\frac{(2+2+2,98+4+2,21+2,98)*A}{2}*77 = \frac{16,17*A}{2}*77 =$$

$$\frac{\Gamma_{12}\delta_{12}\tau_{2}}{A=0,024576}m^{2} = \frac{16,17*0,024576}{2}*77 = 15,30 \text{ kN}$$
iδιο βάρος χάλυβα γ = 77 kN/m³

Με βάση τα παραπάνω, τα σημειακά φορτία που προκύπτουν από το ίδιο βάρος των φερόντων μελών του καταστρώματος, στους κόμβους του τριγωνικού δίσκου είναι :



Εικόνα 41. Σημειακά συγκεντρωμένα φορτία ιδίου βάρους μελών του δικτυώματος πάνω στους κόμβους (α) ενδιάμεσου τριγωνικού δίσκου και (β) δίσκου πάνω στον άξονα συμμετριας

Επειδή τα αποτελέσματα μεταξύ μιας τυχαίας ενδιάμεσης διατομής και της διατομής πάνω στον άξονα συμμετρίας της γέφυρας διαφέρουν λίγο (και είναι μόνο μία η διατομή απο της 39 συνολικά που διαφέρει από τις υπόλοιπες),προσεγγιστικά θεωρούμε πως σε κάθε τριγωνική διατομή ασκούνται λόγω ιδίου βάρους των μελών, τα φορτία του σχήματος (α).



Εικόνα 42. Ίδιο βάρος μελών του καταστρώματος συγκεντρωμένο στου κόμβους τριγώνικού δίσκου

Άρα λόγω ιδίου βάρους δικτυώματος θα έχουμε :

$$m_{T,\iota\beta} = 19,2*4+16,10*0,93 = 91,77 \frac{\kappa N * m}{2m} = 45,89 \frac{\kappa N * m}{m} \implies$$
$$m_{T,\iota\beta} = 45,89 \frac{\kappa N * m}{m}$$

Εν τέλει προκύπτει συνολικό στρεπτικό φορτίο :

$$m_{T,g+q} = m_{T,q} + m_{T,g_{\varepsilon\pi}} + m_{T,\iota\beta} = 24 + 20 + 45,89 = 89,89 \frac{\kappa N * m}{m}$$

Άρα απαιτείται στρεπτική δυσκαμψία :

$$\kappa_T \ge \frac{10*m_T}{1,15} \implies \kappa_T \ge \frac{10*89,89}{1,15} \implies \kappa_T \ge 762,26 \frac{\kappa N*m}{degrees^\circ}$$

4.3.2 Εύρεση στρεπτικής δυσκαμψίας του καταστρώματος4.3.2.1 Μοντελοποίηση του καταστρώματος στο λογισμικό ROBOT

Για την εύρεση της στρεπτικής δυσκαμψίας κ_T ενός στοιχείου, δεν έχουμε παρά να το φορτίσουμε στα άκρα του με μοναδιαία στρεπτική ροπή και να υπολογίσουμε την μέγιστη γωνία στροφής της διατομής του, λόγω της στρέψης που του επιβάλλαμε.

Η μοντελοποίηση του καταστρώματος πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό **ROBOT.**

Αρχικά με την εντολή **nodes** εισήχθηκαν οι συντεταγμένες για την δημιουργία των τριών κόμβων του τυπικού τριγωνικού δίσκου του καταστρώματος.

Στην συνέχεια με την εντολή **bars**, επιλέχθηκαν οι επιθυμητοί κόμβοι και δημιουργήθηκαν οι τρεις δοκοί της τριγωνικής διατομής. Αξίζει να σημειωθεί πως υπάρχει αυτόματη προεπιλογή στο ROBOT, στα σημεία που συναντιούνται δύο δοκοί να συνδέονται μονολιθικά. Υπάρχει δηλαδή πλήρη εξασφάλιση της συνέχειας των στοιχείων στους δημιουργούμενους

κόμβους (μεταφορά δύναμης και ροπής σαν να έχει πραγματοποιηθεί συγκόλληση).



Εικόνα 43. Δημιουργία κόμβων και δοκών στο λογισμικό ROBOT.

Με την εντολή **Bar Sections** δόθηκαν οι διαστάσεις για την δημιουργία της διατομής των δοκών του καταστρώματος.

		Nev	v Section		
⊕ ⊕	ſ	Sections	-		
			•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	3 %	🖬 🖻
, → Bar	sections	DELET B 30x50 C R45x I HEA 36 I IPE 100 SHS 20 Ilines/Bars Lines/Bars Apply	E) 45 (0) 0x200x25	SHS SHS SHS SHS SHS SHS	300x300x16 300x300x25 350x350x16 350x350x20 350x350x25 400x400x10 ▶ Help
	New Section	n			
Γ	Standard Pa	arametric Tapere	d Compound	Special A	x, Iy, Iz
	Label: SHS 400x4	00x16	b = h =	400	
	Color:	Auto 👻	t =	16	
			Solid	to-plastic a	nalysis
	Gamma angle:	0 🔻 (Deg)	Section type:	Steel	•
	Add	Close	Help	S275	

Εικόνα 44. Δημιουργία της επιθυμητής διατομής των δοκών του δικτυώματος (SHS 400x400x16).

Στην συνέχεια για να δοθεί η συγκεκριμένη διατομή στις δοκούς που φτιάξαμε, τις επιλέγουμε μία προς μία (με αριστερό click, διατηρώντας πατημένο το πλήκτρο control) και κάτω αριστερά στο κουτί Properties επιλέγουμε το όνομα της επιθυμητής διατομής.



Εικόνα 45. Αλλαγή της διατομής και του υλικού των δοκών.

6

Bracket - begin.

Bracket - end

Bars

Ομοίως για να δοθεί συγκεκριμένο υλικό στα μέλη που θέλουμε, επιλέγουμε ακριβώς από κάτω στο κουτί Material το επιθυμητό υλικό. Το ROBOT έχει έτοιμη βιβλιοθήκη υλικών από τα οποία μπορούμε να επιλέξουμε. Αν το υλικό που θέλουμε δεν υπάρχει, μπορούμε να προσθέσουμε νέο υλικό από :

Tools \rightarrow Job Preferences \rightarrow Materials \rightarrow Modification όπως θα δείξουμε

παρακάτω.

Έχοντας δημιουργήσει τον θεμελιώδη τριγωνικό δίσκο του καταστρώματος, στην συνέχεια τον αντιγράφουμε ανα δύο μέτρα κατά μήκος του ανοίγματος της γέφυρας με την εντολή Edit→Edit→Move/Copy



Εικόνα 46. Αντιγραφή στοιχείων με την εντολή copy.

f_{++}^{-1} Translation	_ _ ×
Translation vector (m)	
dX; dY; dZ = 020	
Numbering increment	
Nodes:	
Elements:	
Edit mode	
Opy	Drag
Move	E Didg
Number of repetitions:	40
Execute Close	Help

	AAA	
1L		

Εικόνα 47. Αντιγραφή του τριγωνικού δίσκου της γέφυρας κατα μήκος του ανοίγματος, ανά δύο μέτρα με την εντολή copy.

Με τις 40 νέες τριγωνικές διατομές (σύνολο 41), με απόσταση 2 m η κάθε μία από την επόμενη, καλύψαμε το άνοιγμα 80 m.

Στην συνέχεια με την εντολή **bars** επιλέγουμε τους κόμβους των δύο ακρέων διατομών, στα 0 και στα 80 m, δημιουργώντας έτσι τις τρείς δοκούς που συνδέουν όλες τις διατομές μεταξύ τους.



Εικόνα 48. Σύνδεση των τριγωνικών δίσκων του δικτυώματος με τις τρεις διαμήκεις δοκούς.

Τέλος με τον ίδιο τρόπο τοποθετούνται οι διαγώνιοι σύνδεσμοι ακαμψίας, στις θέσεις και με την διεύθυνση που ορίστηκε στο τρίτο κεφάλαιο.

Με την εντολή **bars** δημιουργείται σε κάθε προφίλ ένας διαγώνιος σύνδεσμος, ο οποίος στην συνέχεια προωθείται στον χώρο ανά δύο μέτρα και συμπληρώνει τις υπόλοιπες θέσεις με την εντολή **Move/Copy**.

Έχοντας δημιουργήσει πια το κατάστρωμα μένει η εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών στα άκρα του και τα φορτία που θα του ασκηθούν.

Για την εισαγωγή των φορτίων, πρώτα δημιουργούμε τα πιθανά σενάρια φόρτισης με την εντολή **Load Types.**

æ	Í	표 Load Types				X
5.4		Case descrip Number: Nature: Name:	tion 1 MONIMO Torsion	Label: Subnature:	T1 Structural Modify	•
I P	Load Type	List of define	d cases: Case name		Nature	A
目目		▶ 1	Torsion		Structural	St
		٠				۴
				Delete	Delete all	
				Close	Help	

Εικόνα 49. Δημιουργία των πιθανών σεναρίων φόρτισης.

Ο τύπος προέλευσης του φορτίου και το είδος του δεν έχουνε σημασία, παρά μόνο αν στους συνδυασμούς φόρτισης χρησιμοποιήσουμε τους αυτόματους συνδυασμούς του ROBOT. Εμείς θα δημιουργήσουμε τους δικούς μας χειροκίνητους συνδυασμούς οπότε δεν θα παίξουν ρόλο στα αποτελέσματα.

Έχοντας επιλέξει το σενάριο φόρτισης που αντιστοιχεί στο φορτίο που θέλουμε να εισάγουμε, επιλέγουμε την εντολή Load Definition.



					Auto	desk F	Robot	Struct	ural An	alysis Pro	ofess	ional 20	14 - P	roject:	_STRU	CTUR
PRO	File	Edit	View	Geo	metry	Lo	ads	Ana	lysis	Results	5	Design	To	ools	Add-	Ins
	2		i 🎼	<u>ک</u>	T	×	X	L)	à	\$					Q	-
\ ?			-	?				•	? 4	1	Ŧ	? 1:T	orsion		-	2

Όνομα σεναρίου φόρτισης

(A)	III Load Definition
0 Ť	Case No: 1 : Torsion Selected:
<u>۲</u>	Self-weight and mass Node Bar Surface
P	
I J	Nodal Force
Load Definition	Apply to
副	Apply Close Help

Εικόνα 50. Επιλογή σεναρίου φόρτισης και του είδος του φορτίου που θα επιβάλλουμε.

Επειδή το φορτίο που θέλουμε να εισάγουμε είναι μια μοναδιαία στρεπτική ροπή στα δύο άκρα του καταστρώματος, δεν έχουμε από το να βάλουμε ένας ζεύγος ίσων και αντίθετων σημειακών δυνάμεων στο ένα του άκρο, και το άλλο του άκρο να το πακτώσουμε. Ως μοχλοβραχίωνας του ζεύγους χρησιμοποιήθηκε το πλάτος του καταστρώματος.

Για την τοποθέτηση των σημειακών φορτίων επιλέχθηκε η εντολή **Nodal Force,** αφού πρώτα επιλέχθηκε ο επιθυμητός κόμβος άσκησης του φορτίου. Στην συνέχεια εισήχθει η τιμή του φορτίου (0,25 κN) με σωστό πρόσημο, με βάση τους Global άξονες του φορέα.





Εικόνα 51. Επιλογή των ακραίων κόμβων και εισαγωγή του ζεύγους των σημειακών δυνάμεων, προς τον σχηματισμό μοναδιαίας στρεπτικής ροπής στο άκρο του καταστρώματος.

Για την εισαγωγή τέλος των συνοριακών συνθηκών επιλέχθηκαν οι τρείς κόμβοι της τριγωνικής διατομής στην αρχή του καταστρώματος και με την εντολή **Supports** δεσμεύθηκαν σε μετακίνηση και στροφή ως προς τους τρείς άξονες (πάκτωση-fixed).



Εικόνα 52. Εισαγωγή τον συνοριακών συνθηκών πάκτωσης στο άλλο άκρο του δικτυώματος (σχηματισμός προβόλου).



Εικόνα 53. Οπτική του καταστρώματος και αντιστοιχία του με στοιχείο στο οποίο ασκείται μοναδιαία στρεπτική ροπή στα δύο του άκρα.

Για να ξεκινήσει η ανάλυση του φορέα πάμε Analysis → Analysis Types και επιλέγουμε για το συγκεκριμένο σενάριο φόρτισης τον τύπο ανάλυσης

ως static-elastic (στατική γραμμική ανάλυση). Τέλος πατάμε calculations.

📕 Analysis Type			
Analysis Type	es Structure Model Load to Mass C	onversion Combination Sign Result I	4 >
No.	Name	Analysis Type	
1	DL1	Static - Linear (auxiliary)	
2	LL2	Static - Linear	
3	LL3	Static - Linear (auxiliary)	-
4	DL4	Static - Linear (auxiliary)	=
6	Pisw	Static - Linear (auxiliary)	
7	Mesh	Static - Linear (auxiliary)	
8	Akrh	Static - Linear (auxiliary)	
9	Torsion	Static - Linear	
10	Claddings	Static - Linear	
11	DL1+CLADDINGS+LL2	Linear Combination	
12	COMB1 Shmeiaka	Linear Combination	-
•		4	
New	Parameters Cha	nge analysis type Delete	
Operations on selection of cases			
Case list			
Set parameters Change analysis type Delete			
Model generation Calculations Close Help			

Εικόνα 33. Ορισμός του τύπου ανάλυσης.`

Για να δούμε τις μετακινήσεις του φορέα πάμε Results→Displacements


Γνωρίζουμε πως όσο απομακρινόμαστε από την στήριξη, η στροφή της διατομής αυξάνεται με μέγιστη στροφή στο άκρο του προβόλου-γέφυρας. Έτσι επιλέγουμε τα δύο ακραία σημεία στο τέλος του καταστρώματος, επιλέγουμε το σενάριο φόρτισης που μας ενδιαφέρει και διαβάζουμε τα αποτελέσματα από Results->Displacements.



	•	e 🎻?	9: 🔒	Torsion	- 🕌 🗳		
ΚΟΜΒΟΣ ΡΙΠΤΩΣ	e/Ne Eh	UX (mm)	UY (mm)	UZ (mm)	RX (Deg)	RY (Deg)	RZ (Deg)
1/	9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2/	9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3/	9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4/	9	0,0215	-0,0000	0,0231	0,000	0,001	-0,000
5/	9	0,0217	0,0000	-0,0691	-0,000	0,001	-0,000
6/	9	-0,0243	0,0000	0,0016	0,000	0,001	0,000
7/	9	0,0003	-0,0000	-0,0012	-0,000	0,000	-0,000
8/	9	0,0005	-0,0001	0,0005	0,000	0,000	-0,000
9/	9	0,0008	-0,0001	-0,0029	-0,000	0,000	-0,000
10/	9	0,0010	-0,0001	0,0011	0,000	0,000	-0,000
11/	9	0,0014	-0,0002	-0,0046	-0,000	0,000	-0,000
12/	9	0,0016	-0,0002	0,0016	0,000	0,000	-0,000
42/	0	0.0019	0.0002	0.0064	0.000	0.000	-0.000

Εικόνα 54. Επιλογή των σημείων που μας ενδιαφέρει και προβολή των μετακινήσεων με την εντολή Displacements.



Εικόνα 55. Παραμορφωμένος φορέας υπό το μοναδιαίο στρεπτικό φορτίο στο άκρο του με την εντολή Results→Diagrams for bars→Deformation→Exact Deformation.

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα η άκρη του καταστρώματος στράφηκε κατά $\varphi_T = \tanh^{-1} \left(\frac{0,0231+0,0691}{4000} \right) = 0,001320668°$

$$A \rho \alpha \, \boldsymbol{\varphi}_T = \boldsymbol{M}_T * (\mathbf{L}/\mathbf{G}\boldsymbol{I}_T) \implies \frac{\boldsymbol{G} * \boldsymbol{I}_T}{\boldsymbol{L}} = \frac{\boldsymbol{M}_T}{\boldsymbol{\varphi}_T} = \frac{1 \, \kappa N * \boldsymbol{m}}{0,001320668^\circ} = 757,19$$

$$\boldsymbol{k}_T = 757,19 \left(\frac{kN * \boldsymbol{m}}{degrees^\circ}\right) \cong 762,26 \left(\frac{\kappa N * \boldsymbol{m}}{degrees^\circ}\right) = k_{T,\alpha\pi\alpha\iota\tau}$$

Με την παρπάνω διαδικασία εξασφαλίσαμε ότι η βύθιση του καταστρώματος λόγω στρέψης δεν θα ξεπερνάει το όριο των 80 mm του κανονισμού για διατομή μελών καταστρώματος την SHS 400x400x16.

Επειδή όπως είδαμε και στο δεύτερο κεφάλαιο, η βύθιση του άκρου της γέφυρας οφείλεται κατά κύριο λόγω στην στρέψη, η παραπάνω διαδικασία και ας μην περιλαμβάνει την βύθιση λόγω κάμψης, οδηγεί σε επαρκή στιβαρότητα καταστρώματος ώστε να επαληθεύεται ο έλεγχος λειτουργικότητας που θα γίνει αργότερα με το σύνολο των φορτίων.

4.4 Έυρεση της απαιτούμενης δύναμης των καλωδίων

Έχοντας ορίσει πια διατομή για τα στοιχεία του καταστρώματος (SHS 400x400x16), προχωράμε στην προσθήκη των καλωδίων και του τόξου.

Τα καλώδια όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο τρία, θα τοποθετηθούν ανά δύο μέτρα και θα προενταθούν με στόχο τον μηδενισμό των βυθίσεων του καταστρώματος λόγω των μονίμων φορτίων. Αυτό επομένως που αναζητούμε είναι οι κατακόρυφες αντιδράσεις που πρέπει να προσφερθούν από τα καλώδια ώστε να επιτευχθεί το παραπάνω αποτέλεσμα.

Για να βρούμε τις αντιδράσεις αυτές, τοποθετούμε ανά δύο μέτρα στα σημεία σύνδεσης των καλωδίων με το κατάστρωμα κατακόρυφες κυλίσεις. Αρχικά επιλέγουμε όλους τους ενδιάμεσους κόμβους στο πίσω μέρος του καταστρώματος.



Εικόνα 56. Επιλογή των σημείων στήριξης των καλωδίων στο πίσω άκρο του καταστρώματος.

Έπειτα με την εντολή **supports** δημιουργούμε την επιθυμητή στήριξη και την εφαρμόζουμε στα επιλεγμένα σημεία. Με τον ίδιο τρόπο τοποθετούμε αρθρωτές στηρίξεις στα δύο άκρα του καταστρώματος, που συμβολίζουνε τα σημεία στήριξης του με τα ακρόβαρθα.

Supports	Support Definition × Rigid Elastic Friction Gap Nonl Label: Κύλιση Fixed Uplift directions: UX None UX None × UY None × UZ None × RX None × RY None × Angle × × Support directions are compatible with the global coordinate system Direction Add Close Help
Z	

Εικόνα 57. Δημιουργία του επιθυμητού τύπου στήριξης και εισαγωγή τους στα άκρα (αρθρώσεις) και τα πίσω ενδιάμεσα σημεία (κυλίσεις) της γέφυρας.

3D Z = 0,00 m - Base

۲×۲

Στην συνέχεια επιλέγουμε όλο τον φορέα με **control**+**A** και με την εντολή Load Definition \rightarrow Self-weight and mass \rightarrow Self-weight –PZ for the whole structure προσθέτουμε το ίδιο βάρος όλης της κατασκευής.

I Load Definition	Load Definition
Case No: 1 : DL1 Selected:	Case No: 1 : DL1 Selected:
Self-weight and mass Node Bar Surface	Node Bar Surface Self-weight and mass
	Self-weight –PZ for the whole structure
Apply to all	Apply to all
Apply Close Help	Apply Close Help

Εικόνα 58. Εισαγωγή ιδίου βάρης της κατασκευής

Τέλος για την προσθήκη της επικάλυψης $g_{\epsilon\pi} = 2,5 \text{ kN/}m^2$ (ίδιο βάρος δαπέδου κ.λ.π), θα χρησιμοποιήσουμε την εντολή Geometry **>claddings.**

Geometry Loads Analysis R	🖉 Claddings 📃 🗖 💻 🔀
Important Structure Type off: Axis Definition Stories Important	Object No. 368
<u>∧</u> <u>N</u> odes <u>B</u> ars Objects	Load distribution:
Structure	Definition method
 <u>Beams</u> ∠ Claddings 	P1 O Contour
Materials Prop <u>e</u> rties	P2 O Circle
 Supports Keleases Additional Attributes Phases 	Geometry Parameters
<u>n</u> Number <u>i</u> ng <u>A-1</u> Names o <u>f</u> Bars/Objects	Apply Close Help

Εικόνα 59. Εισαγωγή επικαλύψεων με την εντολή claddings.

Με την εντολή αυτή ορίζουμε μία επιφάνεια επιλέγοντας έναν αριθμό σημείων, την τιμή του φορτίου που θα επιβληθεί στην επιφάνεια, και τον τρόπο κατανομής του φορτίου αυτού στα στοιχεία που εντοπίζονται στην περίμετρο της επιφάνειας αυτής.

Εμείς επιλέξαμε επιφάνειες εμβαδού 2m x 4m έτσι ώστε το φορτίο να κατανεμηθεί μεταξύ των διαμήκων δοκών που συνδέουν τους τριγωνικούς δίσκους, και της πάνω δοκού των δίσκων αυτών.

Επιλέξαμε για την κατανομή του φορτίου **Two-way** (δύο διεθύνσεων), ως μέθοδο ορισμού της επιφάνειας **contour** και από το **Geometry** επιλέξαμε τα τέσσερα σημεία που ορίζουνε την επιφάνεια μας.



Εικόνα 60. Επιλογή τεσσάρων σημείων για την δημιουργία επιφάνειας 2m x 4m, επανάληψη της διαδικασίας καθόλο το μήκος της γέφυρας.

Έχοντας δημιουργήσει τις επιφάνειες που θέλουμε δεν μένει παρά να εφαρμόσουμε το επιφανειακό φορτίο των 2,5 kN/ m^2 .

Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή Load definition→Surface→Uniform planar load και επιλογή της επιφάνειας που θέλουμε να ασκηθεί το φορτίο.

Load Definition	🖽 Uniform Planar Load
Case No: 1 : DL1 Selected: Node Bar Surface Surface Definition of the selected	Values p (kPa) X: 0,00 Y: 0,00 Z: 2,5 Coord. system: Global Cocal Projected load Geometrical limits Add Close Help
pZ=.2	2.50 pZ=-2.50



Έχοντας στο ίδιο σενάριο φόρτισης το ίδιο βάρος του καταστρώματος και των επικαλύψεων, πραγματοποιούμε στατική γραμμική ανάλυση του φορέα.

Για την προβολή των αντιδράσεων των στηρίξεων, επιλέγουμε τους κόμβους των στηρίξεων που μας ενδιαφέρουν και πατάμε Results→Reactions. Δεν ξεχνάμε να επιλέξουμε προβολή αποτελεσμάτων για το σενάριο φόρτισης που μας ενδιαφέρει.



Εικόνα 62. Συμμετρική κατανομή των αντιδράσεων των κυλίσεων, που τοποθετήθηκαν στο πίσω μέρος του καταστρώματος στους κόμβους σύνδεσης του με τα καλώδια.

Επειδή η φόρτιση είναι συμμετρική, και οι αντιδράσεις θα είναι συμμετρικές. Άρα μας αρκούνε από τις 39 αντιδράσεις οι 19 δηλαδή από το σημείο 3 έως το 21.

•	?	1:DL1	-
Node/Case	FX (kN)	FZ (kN)	MY (kNm)
3/ 1	0,0	77,020	0,000
4/ 1	0,0	65,482	0,000
5/1	0,0	68,573	-0,000
6/1	0,0	67,745	0,000
7/1	0,0	67,967	0,000
8/ 1	0,0	67,907	0,000
9/ 1	0,0	67,923	-0,000
10/ 1	0,0	67,919	-0,000
11/ 1	0,0	67,920	-0,000
12/ 1	0,0	67,920	-0,000
13/ 1	0,0	67,920	0,000
14/ 1	0,0	67,920	0,000
15/ 1	0,0	67,920	0,000
16/ 1	0,0	67,920	0,000
17/ 1	0,0	67,920	0,000
18/ 1	0,0	67,920	0,000
19/ 1	0,0	67,920	0,000
20/ 1	0,0	67,920	0,000
21/ 1	0,0	67,920	-0,000
22/ 1	0,0	67,920	0,0
23/ 1	0,0	67,920	0,0
24/ 1	0,0	67,920	0,0
25/ 1	0,0	67,920	0,0
26/ 1	0,0	67,920	0,000
27/ 1	0,0	67,920	-0,000
28/ 1	0,0	67,920	-0,000
29/ 1	0,0	67,920	0,0
30/ 1	0,0	67,920	0,000
31/ 1	0,0	67,920	-0,000
32/ 1	0,0	67,920	-0,000
33/ 1	0,0	67,920	0,000
34/ 1	0,0	67,919	-0,000
35/ 1	0,0	67,923	0,000

Εικόνα 63. Αντιδράσεις κυλίσεων (κΝ).

Εφόσον έχουμε τις κατακόρυφες αντιδράσεις των καλωδίων, μπορούμε

να βρούμε και τις δυνάμεις τους, διαιρώντας με $\cos(\omega)$ ($\omega = 25^{\circ}$)



Εικόνα 64. Έυρεση συνισταμένης δύναμης καλωδίων.

/

Αριθμός	Αντιδράσεις	Δυνάμεις
Κόμβου	Κυλίσεων (kN)	καλωδίων (kN)
3	77,020	84,98
4	65,482	72,25
5	68,573	75,70
6	67,745	74,80
7	67,967	74,99
8	67,907	74,93
9	67,923	74,94
10	67,917	74,94
11	67,92	74,94
12	67,92	74,94
13	67,92	74,94
14	67,92	74,94
15	67,92	74,94
16	67,92	74,94
17	67,92	74,94
18	67,92	74,94
19	67,92	74,94
20	67,92	74,94
21	67,92	74,94
22	67,92	74,94
23	67,92	74,94

Έχοντας πια τις δυνάμεις των καλωδίων λόγου του ιδίου βάρους του καταστρώματος, έχουμε και τα φορτία για την εντός επιπέδου λειτουργία του τόξου που θα καθορίσουν την σχοινοειδή του μορφή.

4.5 Σχεδιασμός του τόξου και εισαγωγή του στο ROBOT

Η στατική συμπεριφορά του κεκλιμένου τόξου, όπως έχει υποθεί και στο κεφάλαιο 2, απλοποιείται αρκετά καθώς μπορεί να αναλυθεί σε :

- Μια εντός επιπέδου θλίψη N_A και κάμψη M_A (''κλασική συμπεριφορά τόξου'') υπό τα φορτία g_{A,π} και την δύναμη των καλωδίων
- Μια εκτός επιπέδου συμπεριφορά καμπύλης δοκού με εγκάρσια κάμψη $M_{Z,A}$ και στρέψη T_A υπό το φορτίο $g_{A,\perp}$.



Εικόνα 65. Συνιστώσες ιδίου βάρους του τόξου εντός $(g_{A,\pi})$ και εκτός $(g_{A,\perp})$ επιπέδου

Λόγω της εκτός επιπέδου συμπεριφοράς του τόξου και την στρέψη που την ακολουθεί, επιλέγεται κοίλη ορθογωνική διατομή SHS λόγω της υψηλής της δυστρεψίας. Όσον αφορά τις διαστάσεις της διατομής, μπορούν αρχικά να προκαθοριστούν με βάση το κρίσιμο φορτίο λυγισμού του τόξου.

4.5.1 Το φαινόμενο του λυγισμού στα τόξα.

Το τόξο βασίζει την φέρουσα ικανότητά του στην ανάπτυξη μεγάλων θλιπτικών δυνάμεων. Απόκλιση απο την αρχική γραμμή πιέσεως για την οποία έχει σχεδιαστεί το τόξο, είτε λόγω επιπλέον φορτίου που αλλάζει την γραμμή πιέσεως είτε λόγω παραμορφώσεως του τόξου, οδηγεί στην ανάπτυξη ροπής. Το μέγεθος της τελευταίας γεννάται από την ροπή που αναπτύσσουν οι θλιπτικές δυνάμεις της τελικής γραμμής πιέσεως (για τα ισχύοντα φορτία), ως προς την θέση του ισχύοντος τόξου.

Αν π.χ ένα τόξο έχει σχεδιασθεί για φορτίο g, τότε ένα αντισυμμετρικό φορτίο q προκαλλεί νοητή μετατόπιση της γραμμής πιέσεως κατά e. Η εκκεντρότητα αυτή επί την θλιπτική δύναμη της νέας γραμμής πιέσεως προκαλεί στο τόξο ροπή, η οποία με την σειρά της παραμορφώνει το τόξο κατά (w_1) απομακρύνοντας το ακόμη περισσότερο με αποτέλεσμα περαιτέρω αύξηση της ροπής κ.ο.κ. $(w_2, w_3...)$

Όταν το θλπιτικό φορτίο του τόξου φτάσει την τιμή H_{cr} η παραπάνω διαδικασία δεν συγκλίνει και οδήγει σε κατάρρευση.



Εικόνα 66. Μετατόπιση της γραμμής πιέσεως (e) λόγω κινητού φορτίου, ανάπτυξη ροπής στο τόξο και βύθιση του (w).



Εικόνα 67. Ολοένα αυξανόμενη βύθιση τόξου λόγω φαινομένων δευτέρας τάξης.

Μια συντηρητική (προς την πλευρά της ασφαλέιας) εκτίμηση της κρίσιμης θλιπτικής δύναμης S_{cr} του τόξου προκύπτει από την έκφραση :

$$S_{cr} = C* \frac{E*I}{(L/2)^2}$$
 όπου :

E=Mέτρο ελαστικότητας του υλικού του τόξου.

Ι = Καμπτική ροπή αδρανείας της διατομής του τόξου.

L = Hοριζόντια απόσταση των στηρίξεων του τόξου.

 $C = \Sigma$ υντελεστής του οποίου η τιμή εξαρτάται από τον λόγο f/L (f η κρέμαση του τόξου) και τον τρόπο στήριξής του τόξου.

Ένα αμφίπακτο τόξο αναπτύσσει περίπου διπλάσια κρίσιμη θλιπτική δύναμη από ένα διαρθρωτό, ενώ η δύναμη αυτή αυξάνεται όσο ο λόγος f/L μειώνεται.

f/L	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Αμφίπακτο	19.60	17.60	14.40	11.00	8.20
Διαρθρωτό	9.25	7.70	6.00	4.50	3.50

To κατασκευαστικό ύψος των τόξων επιλέγεται συνήθως μεταξύ του 1/5 και 1/10 του ανοίγματος προς κάλυψη. Για την παρούσα μετ/κή εργασία: $L/10 \le f \le L/5$ → 80/10 ≤ f ≤80/5 → 8 m ≤ f ≤ 16 m

En τέλει επιλέχθηκε f = 12 m.

4.5.2 Διαστασιολόγηση της διατομής του τόξου

Επειδή το φαινόμενο του λυγισμού του τόξου είναι ένα από τα σημαντικότερα σενάρια που πρέπει να αποκλειστεί πλήρως, η επιλογή των διαστάσεων τις διατομής είναι σκόπιμο να αφήνει αρκετά αποθέματα στην διατομή υπό τη μέγιστη θλιπτική ένταση σχεδιασμού.

Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε μεταξύ μεγίστου θλιπτικού φορτίου σχεδιασμού του τόξου και κρίσιμου φορτίου λυγισμού ο λόγος 1/2, δηλαδή συντελεστής ασφαλείας 2.

Αρχικά η συνιστώσα του βάρους του τόξου $g_{A,\pi}$ αγνοείται καθώς δεν είναι γνωστές οι διαστάσεις της διατομής. Όσον αφορά τα μόνιμα και κινητά φορτία της κατασκευής, έστω ότι το τόξο παραλαμβάνει το σύνολο των φορτίων αυτών, δηλαδή πρέπει να αντικρούσει ένα φορτίο :

 $\mathbf{p} = 1.35^* g_{\delta\iota\kappa\tau} + 1.35^* \text{claddings} + 1.35^* \mathbf{q}$

Απαρίθμηση μελών δικτυώματος :

3 Διαμήκεις δοκοί μήκους 80 m

41 Τριγωνικές διατομές περιμέτρου Π =
$$(3,66m+2,21m+4m) = 9,87 m$$

40 Διαγώνιοι πίσω όψης μήκους 2,98 m

40 Διαγώνιοι κάτω όψης μήκους 4,17 m

40 Διαγώνιοι πάνω όψης μήκους 4.47 m

$$φ_{\delta \iota \kappa \tau} = (3*80m+41*9,87m+40*2,98m+40*4.17m+40*4.47m)* *γ*A/80 = 1109,47(m)*77 (kN/m3)*0.024576(m2) /80(m)= = 2099,51 (kN)/80(m) = 26.24 kN/m claddings = 2.5 kN/m2*4m = 10 kN/m q = 3 kN/m2*4m = 12 kN/m Aρα p = 1.35*26.24+1.35*10+1.35*12 → p ≈ 65 kN/m$$

Επειδή το τόξο είναι κεκλιμένο και το συγκεκριμένο φορτίο θα μεταφερθεί μέσω των κεκλιμένων καλωδίων, εν τέλει παραλαμβάνει $p_{25^\circ}=p/cos(25)$

 $\implies p_{25^{\circ}}=65/\cos(25) \implies p_{25^{\circ}} \cong 72 \text{ kN/m}$ Για κρέμαση τόξου f = 12 m ροπή στο μέσο M = $p_{25^{\circ}} * L^2/8 = 57600 \text{kN}*\text{m}$, η θλιπτική δύναμη στην κορυφή του τόξου θα είναι $S_{\kappa o \rho v \varphi \eta \varsigma} = \text{H} = \text{M/f} = 57600/12 = 4800 \text{ kN}.$

Σύμφωνα με το δεύτερο κεφάλαιο, η μέγιστη θλιπτική δύναμη θα εμφανισθεί στην στήριξη του τόξου και θα ισούται με $S = \sqrt{H^2 + V^2} =$

$$\sqrt{4800^2 + (p_{25^\circ} * L/2)^2} = \sqrt{4800^2 + (72 * 80/2)^2}$$

Εφόσον στοχεύουμε για συντελεστή ασφαλείας 2 θα έχουμε :

$$\frac{S_{cr}}{s} \ge 2 \implies S_{cr} \ge 2^*S = 2^*5598 \implies S_{cr} \ge 11196 \text{ kN}.$$

Ισχύει $S_{cr} = C^* \frac{E^*I}{(L/2)^2} \implies I \ge \frac{11196^*(L/2)^2}{E^*C}$

 ${\rm E}=200^*10^6~{\rm kN}/m^2$ για χάλυβα

C = 8.475 με γραμμική παρεμβολή από πίνακα, για f/L = 1.5 και διαρθρωτό τόξο.

Κανονικά επειδή το τόξο συνδέεται μονολιθικά με το κατάστρωμα στα άκρα του, είναι κάτι μεταξύ αρθρωμένου και πακτωμένου, ανάλογα με την σχετική δυσκαμψία τόξου-καταστρώματος. Οπότε για να είμαστε προς την μεριά της ασφαλείας το λαμβάνουμε ως διαρθρωτό.

Άρα προκύπτει :

$$I \ge \frac{11196*(80/2)^2}{200*10^6*8.475} \implies I \ge 1056849.558 \ cm^4$$

Εν τέλει ως διατομή τόξου επιλέχθηκε η SHS 900x900x25 με I =1117447 cm^4 . Επίσης δεν ξεχνάμε να στρίψουμε την διατομή κατά 25° ώστε οι κύριοι άξονες της διατομής να ανήκουν στο ίδιο επίπεδο με του τόξου.



Γωνία στροφής της διατομής

Εικόνα 68. Χαρακτηριστικά της διατομής του τόξου.

4.5.3 Εύρεση σχοινοειδούς μορφής του τόξου

Η σχοινοειδής μορφής του τόξου προκύπτει από την εντός επιπέδου συμπεριφορά του.

Τα φορτία που καταπονούνε το τόξο στο επίπεδό του είναι :

- Οι δυνάμεις των καλωδίων τα οποία έχουν προενταθεί με στόχο να αντικρούσουν τις βυθίσεις του καταστρώματος λόγω ιδίου βάρους του (υπολογίστηκαν πριν).
- Η συνιστώσα του βάρους του τόξου που είναι παράλληλη με το επίπεδό του $g_{A,\pi} = g_A * \cos(\omega) = A_{\tau \circ \xi o v} * \gamma * \cos(\omega) = 0.0875 m^2 * 77 k N/m^3 * \cos(25)$

Ασκώντας τα παραπάνω φορτία στην αντίστοιχη αμφιαρθρωτή δοκό ανοίγματος όσο και το τόξο (L = 80 m), λαμβάνουμε το παρακάτω διάγραμμα ροπών:



Εικόνα 69. Φόρτιση και διάγραμμα ροπών της αντίστοιχης αμφιαρθρωτής δοκού.

Έχοντας γνωστό το διάγραμμα ροπών για το οποίο θα σχεδιαστεί η σχοινοειδής μορφή του τόξου και την τεταγμένη του μέσου του (κρέμαση f = 12 m), είναι πλέον γνωστή η εξίσωση της καμπύλης του :

$$y(x) = k^* M_g^{\alpha \mu \varphi}(x) \implies y(x) = \frac{f}{M_g^{\alpha \mu \varphi}(L/2)} * M_g^{\alpha \mu \varphi}(x) \implies$$

$$y(x) = \frac{12}{34932} * M_g^{\alpha \mu \varphi}(x) \qquad (i)$$

$$H = \frac{1}{k} = \frac{M_g^{\alpha \mu \varphi}(L/2)}{f} = \frac{34932}{12} = 2911 \text{ kN}$$

$$\implies$$

$$H = 2911 \text{ kN}$$

Από την εξίσωση (i) προκύπτουν οι συντεταγμένες για το τόξο στο επίπεδό του και στην συνέχεια μετατρέπονται σε global συντεταγμένες για να περαστούν στο λογισμικό ROBOT. Όπως και πριν λόγω συμμετρίας δίνονται τα σημεία μέχρι το μέσο του τόξου.

Σημεία	Ροπές	Συντεταγμένη	Z	X	Y
τόξου	Αμφιέρειστης (kN*m)	τόξου στο επίπεδό του	global	global	global
		y _{local} (m)	(m)	(m)	(m)
1°	0	0.00	0.00	0.00	0
2°	3432,8	1.18	1.06	0.50	2
3°	6665,2	2.28	2.07	0.96	4
4°	9725,2	3.33	3.02	1.41	6
5°	12606,8	4.32	3.92	1.83	8
6°	15312	5.25	4.76	2.22	10
7°	17840,8	6.12	5.55	2.59	12
8°	20195,2	6.93	6.28	2.93	14
9°	22375,2	7.68	6.96	3.25	16
10°	24380,8	8.37	7.59	3.54	18
11°	26212	9.00	8.16	3.80	20
12°	27868,8	9.57	8.67	4.04	22
13°	29351,2	10.08	9.14	4.26	24
14º	30659,2	10.53	9.54	4.45	26
15	31792,8	10.92	9.90	4.62	28
16°	32752	11.25	10.20	4.75	30
17°	33536,8	11.52	10.44	4.87	32
18°	34147,2	11.73	10.63	4.96	34
19°	34583,2	11.88	10.77	5.02	36
20°	34844,8	11.97	10.85	5.06	38
21°	34932	12.00	10.88	5.07	40



Εικόνα 70. Μετατροπή τοπικών συντεταγμένων τόξου σε global συντεταγμένες του λογισμικού ROBOT .

 $Z \text{ global} = Y \text{ local} * \cos(25)$

 $X \text{ global} = Y \text{ local}*\sin(25)$

Στην κατα μήκος διεύθυνση της γέφυρας Y global, τα σημεία του τόξου τοποθετούνται ανά δύο μέτρα (από 0 έως 80 m), όπως και τα καλώδια.

Όπως και με τα υπόλοιπα στοιχεία, έτσι και με το τόξο τοποθετούνται οι κόμβοι του με την εντολή **Nodes** και στην συνέχεια συνδέονται με την εντολή **Bars** προσδίδοντας τους την κατάλληλη διατομή και υλικό.

Εικόνα 71. Δημιουργία των κόμβων του τόξου με την εντολή Nodes και σύνδεση τους με την εντολή Bars.

4.6 Διαδικασία τοποθέτησης και προέντασης των καλωδίων στο λογισμικό ROBOT

4.6.1 Εύρεση αρχικού μήκους καλωδίων

Αυτό που έμεινε είναι η τοποθέτηση των καλωδίων και η προένταση τους με τις αντιδράσεις των ενδιάμεσων στηρίξεων που έχουμε υπολογίσει για το ίδιο βάρος του καταστρώματος.

Στο ROBOT όπως και σε πολλά άλλα λογισμικά, η προένταση μπορεί να εισαχθεί μέσω αρχικού μήκους καλωδίου ή αλλιώς ''initial cable length''. Ο όρος αυτός ουσιαστικά εκφράζει το μήκος που έχει το καλώδιο πριν την προένταση του, δηλαδή απλωμένο στο έδαφος απαραμόρφωτο.

Η διαδικασία προέντασης του καλωδίου μέσω του λογισμικού λειτουργεί ώς εξής :

Αρχικά επιλέγουμε δύο σημεία που θέλουμε να συνδέσουμε μέσω καλωδίου. Έπειτα δίνουμε το αρχικό μήκος καλωδίου που είναι το μήκος απαραμόρφωτου και αφόρτιστου καλωδίου απλωμένου στο έδαφος. Η κατάσταση αυτή στην οποία βρίσκεται το καλώδιο ονομάζεται φάση 1.

Αμέσως μετά, κατά την ανάλυση, το καλώδιο περνάει στην φάση 2 όπου φορτίζεται με το ίδιο βάρος του, ενεργοποιούνται όλα τα φορτία του σεναρίου φόρτισης και αγκυρώνεται στα σημεία που είχαμε ορίσει να συνδέσει, με αποτέλεσμα να αλλάξει το μήκος του. Αν το αρχικό μήκος που εισηγάγαμε ήτανε μικρότερο από τα σημεία αγκύρωσης του, τότε το μήκος του κατά την φάση δύο θα αυξηθεί και το καλώδιο θα προενταθεί εφελκυστικά.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην παραμόρφωση του τόξου μετά την προένταση των καλωδίων. Την στιγμή που τα καλώδια θα αρχίσουν να προεντείνονται και να μεταφέρουν δυνάμεις στο τόξο, αυτό θα υποστεί

βύθιση δ^{arch}. Η τελευταία πρέπει να ληφθεί υπόψιν και να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς, καθώς μεταβάλλει την απόσταση των σημείων αγκύρωσης των καλωδίων, επιρρεάζοντας έτσι την τελική προένταση τους. Ως αποτέλεσμα αλλάζει και η τιμή που πρέπει να εισάγουμε στο ''initial cable length'' για να πετύχουμε την επιθυμητή δύναμη προέντασης.

Εικόνα 72. Διαδικασία υπολογισμού του αρχικού μήκους καλωδίου.

όπου :

Pi είναι οι δυνάμεις των καλωδίων, που ισούνται με τις αντιδράσεις των ενδιάμεσων στηρίξεων από την συνεχή δοκό που υπολογίσαμε παραπάνω, για το ίδιο βάρος του καταστρώματος.

 δ_i^{arch} είναι η βύθιση του τόξου (και ουσιαστικά του πάνω σημείου του καλωδίου) στο επίπεδό του, λόγω της δράσης των καλωδίων και της συνιστώσας $g_{A,\pi}$ του ίδιου βάρους του.

 L_i είναι η αρχική τετμημένη του τόξου στο επίπεδό του, πριν την παραμόρφωσή του.

 L_i -δ είναι το αρχικό μήκος των καλωδίων πριν την προέντασή τους.

δ είναι η απόσταση του κάτω άκρου των καλωδίων (πριν την προέντασή τους) από το σημείο ακγύρωσής τους με το κατάστρωμα.

Με βάση τα παραπάνω θα πρέπει :

$$\delta = \delta^{arch} + \frac{P*(L_i - \delta)}{E*A_{\kappa\alpha\lambda\omega\delta}} \longrightarrow \frac{P*\delta}{E*A_{\kappa\alpha\lambda\omega\delta}} + \delta = \delta^{arch} + \frac{P*L_i}{E*A_{\kappa\alpha\lambda\omega\delta}}$$

$$\implies \delta^* \left(1 + \frac{P}{E^* A_{\kappa \alpha \lambda \omega \delta}} \right) = \delta^{arch} + \frac{P^* L_i}{E^* A_{\kappa \alpha \lambda \omega \delta}}$$

$$\delta = \frac{\delta^{\operatorname{arch}_{*E*A_{\kappa\alpha\lambda\omega\delta}+P*L_i}}}{E*A_{\kappa\alpha\lambda\omega\delta}+P}$$
 (4)

Ουσιαστικά ο όρος $\frac{P*(L_i-\delta)}{E*A_{\kappa\alpha\lambda\omega\delta}}$ είναι η επιμήκυνση που θα υποστεί το καλώδιο μετά την προένταση του με δύναμη P, αφού από την στατική είναι γνωστό πως η ευτένια ενός ευθύγραμμου μέλους ισούται με $\frac{L}{EA}\left(\frac{m}{kN}\right)$.

Όσον αφορά τα καλώδια, επιλέχθηκε αντοχή καλωδίων ίση με F=1600 Mpa και E = 200 Gpa.

Επειδή τα καλώδια έχουν εντελώς ψαθυρή συμπεριφορά στη οριακή κατάσταση αστοχίας τους, η διατομή τους επιλέγεται με στόχο να φορτίζονται με το 40% της μέγιστης αντοχής τους, αφήνοντας τους μεγάλο περιθώριο επιπλέον φόρτισης. Επίσης η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων

τους είναι εντελώς γραμμική.

Άρα για την διατομή τους θα ισχύει :

$$A_{\kappa\alpha\lambda\omega\delta} = \frac{P}{40\%*1600\frac{N}{mm^2}}$$
 (5)

Αρχικά για την εύρεση της εντός επιπέδου παραμόρφωσης του τόξου δ^{arch} , το φορτίζουμε με την δύναμη των καλωδίων και το ίδιο βάρος του. Την δύναμη των καλωδίων στην παρούσα φάση θα την περάσουμε σαν σημειακό φορτίο στο σημείο σύνδεσης του κάθε καλωδίου με το τόξο. Δεν ξεχνάμε τα σημειακά αυτα φορτία να ανήκουν στο ίδιο επίπεδο με αυτό του τόξου.

Εικόνα 73. Εισαγωγή των δυνάμεων που μεταφέρουν τα καλώδια στο τόξο, με την μορφή σημειακών φορτίων υπό κλίση 25° από την κατακόρυφο.

Εικόνα 74. Φορτιση του τόξου με το ίδιο βάρος του και τις δυνάμεις των καλωδίων, με στόχο τον υπολογισμό της εντός επιπέδου παραμόρφωσης του '' δ^{arch} ''.

Ύστερα αφού τρέξουμε την ανάλυση επιλέγουμε όλα τα σημεία σύνδεσης των καλωδίων με το τόξο και πατάμε Results → Displacements επιλέγοντας πάντα το σωστό σενάριο φόρτισης.

Οι μετακινησεις των κόμβων του τόξου δίνονται με βάση το global σύστημα του ROBOT, οπότε θα πρέπει να υπολογίσουμε την αλλαγή της τοπικής τεταγμένης ''*y*_{local}'' του τόξου εντός του επιπέδου του, που είναι

	11 62 60956	1/56= F				
140	}¶ ² °	1545352		Re	sults Design	Tools Add-I
138		1 ³ 151 ₅₀			🚯 Res <u>u</u> lts Freeze	
137			149		P <u>r</u> operties	•
135			-148 147	~	Diagrams for Pars	
134			1471	46	Mans on Pars	
<mark>1</mark> 33			•	145	iviaps on bars	
1 32				144	Rea <u>c</u> tions	
131				<u>/1</u>	D <u>i</u> splacements	
130				T	D <u>e</u> flections	
129				tt	<u>F</u> orces	
128				<u>/</u> E	<u>S</u> tresses	
127				14	Diagrams for build	ings
126		Z			Detailed Analysis	-
1 20		+ _Y		N	Global Analysis - B	ars
125					Advanced	•
124					-	
					Stress Ana <u>l</u> ysis	•
Node/Case	UX (mm)	UY (mm)	UZ (mm)	RX (Deg)	RY (Deg)	RZ (Deg)
124/ 1	-10,1379	0,4893	-6,6408	-0,160	-0,193	0,238
125/ 1	-23,1675	1,0019	-14,7138	-0,188	-0,245	0,294
126/ 1	-38,5770	1,4049	-23,9851	-0,209	-0,291	0,339
127/ 1	-55,8045	1,7822	-34,0553	-0,224	-0,331	0,372
128/ 1	-74,2704	2,0959	-44,6466	-0,234	-0,367	0,396
129/ 1	-93,5680	2,3103	-55,5704	-0,238	-0,398	0,411
130/ 1	-113,1954	2,4571	-66,5384	-0,238	-0,426	0,417
131/ 1	-132,8318	2,5050	-77,4155	-0,234	-0,449	0,415
132/ 1	-152,1199	2,5347	-87,9522	-0,226	-0,470	0,405
133/ 1	-170,6703	2,5157	-98,0056	-0,215	-0,488	0,389
134/ 1	-188,2202	2,3839	-107,5193	-0,201	-0,503	0,367
135/ 1	-204,6977	2,2167	-116,3636	-0,185	-0,516	0,340
136/ 1	-219,6034	1,9898	-124,3545	-0,166	-0,527	0,308
13// 1	-233,0112	1,7440	-131,4871	-0,145	-0,536	0,271
138/ 1	-244,3097	1,0274	-137,3127	-0,124	-0,344	0,231
139/ 1	-234,1011	1,2174	-142,0307	-0,100	-0,550	0,109
141/ 1	-267 2897	0,5151	-149,5160	-0,078	-0,557	0,143
147/ 1	-270 5885	0,3119	-151 2689	-0.026	-0.559	0.049
143/ 1	-271.7235	0.0001	-151.8212	0,020	-0.560	0,000
144/ 1	-10,1379	-0,4893	-6,6407	0,160	-0,193	-0,238
145/ 1	-23,1675	-1,0018	-14,7136	0,188	-0,245	-0,294
146/ 1	-38,5770	-1,4048	-23,9850	0,209	-0,291	-0,339
147/ 1	-55,8045	-1,7821	-34,0551	0,224	-0,331	-0,372
148/ 1	-74,2705	-2,0957	-44,6464	0,234	-0,367	-0,396
149/ 1	-93,5681	-2,3102	-55,5701	0,238	-0,398	-0,411
150/ 1	-113,1954	-2,4569	-66,5381	0,238	-0,426	-0,417
151/ 1	-132,8319	-2,5049	-77,4152	0,234	-0,449	-0,415
152/ 1	-152,1199	-2,5345	-87,9519	0,226	-0,470	-0,405
153/ 1	-170,6703	-2,5155	-98,0053	0,215	-0,488	-0,389
154/ 1	-188,2202	-2,3837	-107,5190	0,201	-0,503	-0,367
155/ 1	-204,6977	-2,2165	-116,3633	0,185	-0,516	-0,340
156/ 1	-219,6034	-1,9897	-124,3543	0,166	-0,527	-0,308

Εικόνα 75. Επιλογή των κόμβων του τόξου και προβολή των μετακινήσεών τους. Έχοντας την μετακίνηση κάθε σημείου του τόξου στο global σύστημα υπολογίζουμε :

Σημεία	Ux (mm)	Uz (mm)	Z global	X global	Z global	X global
Τόξου	global	global	Αρχικό	Αρχικό	Τελικό	Τελικό
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
124	-10,1379	-6,64	1070.00	-500.00	1063,36	-510,14
125	-23,1675	-14,71	2070.00	-960.00	2055,29	-983,17
126	-38,577	-23,99	3020.00	-1410.00	2996,01	-1448,58
127	-55,8045	-34,06	3920.00	-1830.00	3885,94	-1885,80
128	-74,2704	-44,65	4760.00	-2220.00	4715,35	-2294,27
129	-93,568	-55,57	5550.00	-2590.00	5494,43	-2683,57
130	-113,195	-66,54	6280.00	-2930.00	6213,46	-3043,20
131	-132,832	-77,42	6960.00	-3250.00	6882,58	-3382,83
132	-152,12	-87,95	7590.00	-3540.00	7502,05	-3692,12
133	-170,67	-98,01	8160.00	-3800.00	8061,99	-3970,67
134	-188,22	-107,52	8670.00	-4040.00	8562,48	-4228,22
135	-204,698	-116,36	9140.00	-4260.00	9023,64	-4464,70
136	-219,603	-124,35	9540.00	-4450.00	9415,65	-4669,60
137	-233,011	-131,49	9900.00	-4620.00	9768,51	-4853,01
138	-244,57	-137,51	10200.00	-4750.00	10062,49	-4994,57
139	-254,161	-142,66	10440.00	-4870.00	10297,34	-5124,16
140	-261,764	-146,67	10630.00	-4960.00	10483,33	-5221,76
141	-267,29	-149,52	10770.00	-5020.00	10620,48	-5287,29
142	-270,589	-151,27	10850.00	-5060.00	10698,73	-5330,59
143	-271,724	-151,82	10880.00	-5070.00	10728,18	-5341,72
Όποτ	u Z glob	al τελικό	= Z glo	obal αρχικό	ó + Uz	global
και	Х	global τελικ	$ \dot{o} = X \text{ glob} $	al αρχικό	+ Ux g	global

Σημεία	Τελική Τεταγμένη	Αρχική Τεταγμένη	δ arch (mm)
Τόξου	τόξου "y" στο	τόξου "y" στο	
	επίπεδό του (mm)	επίπεδό του (mm)	
124	1179,395381	1180	0,604618781
125	2278,337046	2280	1,662953607
126	3327,834222	3330	2,165778475
127	4319,354677	4320	0,645323237
128	5243,875891	5250	6,124109477
129	6114,760326	6120	5,239674363
130	6918,680748	6930	11,31925167
131	7668,997352	7680	11,00264789
132	8361,367744	8370	8,632256056
133	8986,766734	9000	13,23326569
134	9549,550869	9570	20,44913111
135	10067,74749	10080	12,2525145
136	10509,97508	10530	20,02492415
137	10907,59194	10920	12,40805747
138	11233,84961	11250	16,15038596
139	11501,83745	11520	18,1625456
140	11711,83023	11730	18,16976721
141	11863,81527	11880	16,18472978
142	11953,15945	11970	16,8405471
143	11984,4829	12000	15,51710272

όπου Τελική τεταγμένη τόξου y = $\sqrt{Z \text{ global Τελικό}^2 + X \text{ global Τελικό}^2}$ και δ arch = Αρχική τεταγμένη τόξου - Τελική τεταγμένη τόξου

Λόγω συμμετρίας μας αρκούν τα αποτελέσματα μέχρι το μέσο του τόξου.

Έχοντας τις δυνάμεις των καλωδίων με βάση την (5) υπολογίζουμε το εμβαδό διατομής των καλωδίων, έπειτα με την (4) το δ και τελικα το L_i -δ (Αρχικό μήκος καλωδίου):

Αριθμός καλωδίου	Δυνάμεις καλωδίων (kN)	Εμβαδό διατομής καλωδίων	Μέτρο ελαστικότητα ς καλωδίων	δ (mm)	Αρχική Τεταγμένη τόξου "ν" στο επίπεδό	Αρχικό μήκος καλωδίου
		(mm^2)	(Mpa)		του (L_i)(mm)	L_i - δ (mm)
1°	84,98	1,33	200000	4,37	1180	1,175633
2°	72,25	1,13	200000	8,93	2280	2,271070
3°	75,70	1,18	200000	12,78	3330	3,317219
4°	74,80	1,17	200000	14,42	4320	4,305577
5°	74,99	1,17	200000	22,85	5250	5,227149
6°	74,93	1,17	200000	24,74	6120	6,095256
7 °	74,94	1,17	200000	33,39	6930	6,896612
8°	74,94	1,17	200000	35,47	7680	7,644535
9°	74,94	1,17	200000	35,30	8370	8,334697
10°	74,94	1,17	200000	41,90	9000	8,958101
11°	74,94	1,17	200000	50,91	9570	9,519090
12°	74,94	1,17	200000	44,37	10080	10,035633
13°	74,94	1,17	200000	53,55	10530	10,476450
14°	74,94	1,17	200000	47,20	10920	10,872799
15°	74,94	1,17	200000	51,98	11250	11,198016
16°	74,94	1,17	200000	54,85	11520	11,465149
17°	74,94	1,17	200000	55 <i>,</i> 53	11730	11,674472
18°	74,94	1,17	200000	54,03	11880	11,825972
19°	74,94	1,17	200000	54,97	11970	11,915031
20°	74,94	1,17	200000	53,75	12000	11,946255

4.6.2 Εισαγωγή των καλωδίων στο λογισμικό ROBOT

Έχοντας το ''initial cable length'' (αρχικό μήκος καλωδίου) για κάθε καλώδιο προχωράμε στην τοποθέτηση τους στο λογισμικό. Η εισαγωγή των καλωδίων γίνεται με την εντολή **Bars** και την επιλογή στο Bar type ως ''**cable**''. Έπειτα ακριβώς από κάτω στο ''**Section**'' εισάγουμε το εμβαδό της διατομής και το **initial cable length** του καλωδίου. Επειδή το αρχικό μήκος των καλωδίων εισάγεται σε μέτρα, πρέπει να εισάγουμε τουλάχιστον 6 σημαντικά ψηφία καθώς στην επιμήκυνση των καλωδίων τα χιλιοστά παίζουνε σημαντικό ρόλο στην τάση που θα προκύψει. Για την αύξηση της ακρίβειας των υπολογισμών στα 6 σημαντικά ψηφία πάμε Tools→Job preferences→Units and formats→Dimensions

🛰 Bars 💶 💷 🗮	New Cable
Number: 368 Step: 1 Name: Cable_368 Properties Bar type: Cable Bar type: Cable Section: 18.39 Default material: Thesis Default material: Thesis Node coordinates (m) Beginning: 27.35; 31.02; -26.03 Beginning: 27.35; 31.02; -26.03 End: Δημιουργία νέας διατομής Axis position None	Label: 1839 Color: Auto \checkmark L $\Upsilon \lambda \iota \kappa \dot{\diamond}$ Section AX: 1.33 (cm2) Material: Thesis \checkmark Assembling parameters $E \mu \beta \alpha \delta \dot{\delta} \delta \iota \alpha \tau o \mu \dot{\eta} \varsigma$ Assembling parameters δ Stress SIGMA (MPa) \bigcirc Force Fo (kN) \bigcirc Length L 1.175633 (m) \bigcirc Elongation dl \bigcirc Relative initial cable length
Add Close Help	Add Close Help

Εικόνα 76. Εισαγωγή του καλωδίου, του υλικού και της διατομής του.

Όσον αφορά τις ιδιότητες του υλικού του καλωδίου, δημιουργούμε το δικό μας υλικό με την εντολή :

Tools \rightarrow Job Preferences \rightarrow Materials \rightarrow Modification

	Add-Ins Window Dimension Lines Snap Settings Units and Formats Units and Formats Point Coordinates Cost Estimation Cost Estimation Section Definition Section Definition Section Database Label Manager Building Soils - Calculator Editor Calculator Password Protection Preferences Lob Preferences Calculation Note Preferences Customize Customize	Help C
Have Job Preferences		?
DEFAULT	Interials:	Basic set Steel: Steel Concrete: C12/15 Aluminum: ALUM Timber: C24 OK Cancel Help
Material Definition	Other	? <mark>- x -</mark>
Name: Thesis -	Description: 1600	Mpa
Elasticity Young modulus, E: Poisson ratio, v: Shear modulus, G: Force density (unit weight): Thermal expansion coefficient: Damping ratio:	200000 (MPa) 0.3 81000,00 (MPa) 77,01 (kN/m3) 0,000012 (1/°C) Ar	e
Add	Delete	Cancel Help

Εικόνα 77. Δημιουργία νέου υλικού στο λογισμικό ROBOT.

Κεφάλαιο 5° : Ανάλυση του φορέα και αποτελέσματα

5.1 Επιλογή τύπου και μεθόδου ανάλυσης

Από την στιγμή που εισάγουμε στοιχείο καλωδίου, η ανάλυση μετατρέπεται σε μη γραμμική ανάλυση (μή γραμμικότητα γεωμετρίας) λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων των καλωδίων. Επίσης δεν ξεχνάμε να συμπεριλάβουμε φαινόμενα δευτέρας τάξης καθώς είναι σημαντικά για τον λυγισμό του τόξου όπως ήδη έχει αναφερθεί. Τα παραπάνω εισάγονται μέσω της εντολής Analysis → Analysis types → Parameters

		Analysis Results Design Tools Add-					
		Save Seismic Combination Results Calculation <u>R</u> estart					
		Calculation Messages Calculation Notes					
		<u>V</u> erification <u>G</u> eneration of computational model					
🕻 Analysis T	уре						
Analysis Type	es Stru	cture Model Load to Mass Conversion Combination Sign Result					
No.	Name	Analysis Type					
1	DL1	Static - Nonlin.PD					
2		Static - Nonlin.PD					
		Επιλογή των σεναρίων φόρτισης που μας ενδιαφέρουν					
New	on selec	Parameters Change analysis type Delete Delete					
Case list							
Case list	rameter	s Change analysis type Delete					

Εικόνα 78. Αλλαγή τύπου και παραμέτρων ανάλυσης.

📕 Nonlinear Analysis Parameters 📃	×						
Case: DL1 Auxiliary case Μη γραμμική ανάλ: Non-linearity μεγάλες μετακινήσ Von-linear analysis P-delta analysis P-delta analysis Parameters OK Cancel	υση και εις						
Non-linear Analysis Algorithm Options							
Method Additional oritorione to a	top analysis						
⊘ Arc-length							
Parameters of incremental method	Parameters of incremental method						
Load increment number:	10						
Maximum iteration number for one increment:	40						
Increment length reduction number:	3						
Increment length reduction factor:	0,5						
Maximum number of line searches:	0						
Control parameter for line-search method:	0,5						
Maximum number of BFGS corrections:	0						
Matrix update after each subdivision							
Matrix update after each iteration	ton-Raphson						
Save results after each increment iteration m	ethod						
Relative code tolerance for residual forces:	0,0001						
Relative code tolerance for displacements:	0,0001						
Get settings from preferences							
Save settings in preferences OK	Cancel						

Εικόνα 79. Προσθήκη μεγάλων μετακινήσεων, επιλογή βήματος εισαγωγής φορτίου και μεθόδου Full Newton-Raphson.

Στο Load increment επιλέγουμε σε πόσα βήματα θα εισαχθεί το φορτίο στην κατασκευή. Για τα φορτία της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας τα 10 βήματα ήταν αρκετά για σύγκλιση της μεθόδου.

5.2 Σενάρια φόρτισης

Για τον τελικό φορέα έχουν δημιουργηθεί τρία σενάρια φόρτισης :

Το πρώτο σενάριο με όνομα "DL" (Dead load), περιέχει μόνο το ίδιο βάρος της κατασκευής (ίδιο βάρος τόξου, καταστρώματος και επικαλύψεων) χωρίς επαυξητικούς συντελεστές ασφαλείας. Επίσης συμπεριλαμβάνει τις προεντάσεις των καλωδίων καθώς το πρώτο σενάριο στο ROBOT όταν συμπεριλαμβάνονται στοιχεία καλωδίων, αποτελεί το λεγόμενο 'assembling stage''. Στο σενάριο αυτό το καλώδιο από το αρχικό του μήκος ως αφόρτιστο, περνάει στο μήκος αγκύρωσης και Επίσης τα αποτελέσματα του προεντείνεται. σεναρίου αυτού (μετακινήσεις, στροφές) αποτελούν τις αρχικές συνθήκες για τα επόμενα σενάρια.

Με άλλα λόγια, **στο δεύτερο σενάριο** με όνομα **''LLsym''** (live load symmetrical), όπου περιλαμβάνονται μόνο τα κινητά φορτία της κατασκευής (q = 3kN/m²), ήδη ο φορέας μεταφέρει τα αποτελέσματα (μετακινήσεις, στροφές και εντασιακά μεγέθη) από τα φορτία του πρώτου σεναρίου. Έτσι δεν χρειάζεται να εισαχθούν πάλι τα βαρυτικά φορτία λόγω ιδίου βάρους. Όπως και στο πρώτο έτσι και στο δεύτερο σενάριο τα φορτία έχουνε εισαχθεί χωρίς επαυξητικούς συντελεστές ασφαλείας. Το κινητό φορτίο q = 3kN/m² έχει τοποθετηθεί καθόλο το μήκος της γέφυρας σε όλο το πλάτος του καταστρώματος, με στόχο την μέγιστη βύθιση του. Το σενάριο αυτό θα χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο σε οριακή κατάσταση λειτουργικότητας.

106

Εικόνα 80. Σενάριο φόρτισης ''LLsym'', συμμετρική τοποθέτηση κινητού φορτίου.

Στο **τρίτο σενάριο** φόρτισης **'LLantisym''** (live load antisymmetrical), περιλαμβάνονται πάλι μόνο τα κινητά φορτία της κατασκευής (q = $3kN/m^2$) χωρίς επαυξητικούς συντελεστές, με την διαφορά πως το φορτίο q ασκείται σε όλο το πλάτος του καταστρώματος, μέχρι την μέση του ανοίγματος. Η τοποθέτηση αυτή στοχεύει σε μέγιστη παραμόρφωση και κάμψη του τόξου.

Εικόνα 81. Σενάριο φόρτισης ''LLantisym'', αντισυμμετρική τοποθέτηση κινητού φορτίου.

Στο τέταρτο σενάριο με όνομα ''ULS-sym'' (ultimate limite state symmetrical), περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα που θα πέρναμε αν είχαμε βάλει συντελεστή ασφαλείας 1,35 στα μόνιμα φορτία του πρώτου σεναριού ''DL'' και 1,35 στα κινητά φορτία του δεύτερου σεναρίου ''LLsym''. Πρόκειται δηλαδή για non linear combination του σεναρίου 1 και 2 με με στόχο την μέγιστη φόρτιση των διαγώνιων συνδέσμων ακαμψίας, καθώς πετυχαίνουμε την μέγιστη στρέψη καταστρώματος και την μέγιστη θλιπτική δύναμη στο τόξο.

Το πέμπτο σενάριο με όνομα ''ULS-antisym'' (ultimate limite state antisymmetrical), σε αντιστοιχία με το τέταρτο σενάριο, περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα που θα πέρναμε αν είχαμε βάλει συντελεστή ασφαλείας 1,35 στα μόνιμα φορτία του πρώτου σεναριού ''DL'' και 1,35 στα κινητά φορτία του δεύτερου σεναρίου ''LLantisym''. Πρόκειται δηλαδή για non linear combination του σεναρίου 1 και 3 με στόχο την μέγιστη καμπτική ροπή στο τόξο.

5.3 Αποτελέσματα σεναρίου "DL"

Το πρώτο σενάριο, "**DL**", θα χρησιμοποιηθεί για έλεγχο των βυθίσεων της δοκού του καταστρώματος, υπό τα μόνιμα φορτία, με στόχο την επαλήθευση της σωστής προέντασης των καλωδίων.

Για την προβολή των δυνάμεων των καλωδίων Results→Diagrams for bars →Fx force και Apply




Εικόνα 82. Απαρίθμηση καλωδίων μέχρι τον άξονα συμμετρίας.



Εικόνα 83. Επαλήθευση της δύναμης των καλωδίων (κΝ) για το ίδιο βάρος της κατασκευής (σενάριο **DL**).

Λόγω της συμμετρίας στην φόρτιση και την γεωμετρία του φορέα, αρκεί η προβολή των αποτελεσμάτων για τα πρώτα 20 καλώδια.

Απ'ότι παρατηρούμε υπάρχει μια μικρή διαφορά ≈1κΝ μεταξύ των δυνάμεων των καλωδίων και των αντιδράσεων των ενδιάμεσων στηρίξεων της συνεχής δοκού που στοχεύαμε. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι για την εύρεση του δ^{arch} τα σημειακά φορτία σε αντίθεση με τα καλώδια δεν αλλάζουν διεύθυνση κατά την παραμόρφωση του τόξου, οπότε και η τελευταία θάνε διαφορετική (το ίδιο και η δ, ως απόρροια της δ^{arch} , και με την σειρά του το αρχικό μήκος καλωδίων).

Αριθμός	Δυνάμεις καλωδίων	Αντιδράσεις Συνεχούς	Διαφορά
καλωδίου	(κN)	Δοκού	(ĸN)
		(ĸN)	
1°	87,01	84,98	2,03
2°	72,99	72,25	0,74
3°	76,01	75,7	0,31
4º	74,98	74,8	0,18
5°	75,02	74,99	0,03
6°	73,97	74,93	0,96
7°	74,03	74,94	0,91
8°	73,97	74,94	0,97
9°	74,04	74,94	0,9
10°	73,96	74,94	0,98
11°	74,04	74,94	0,9
12°	73,96	74,94	0,98
13°	74,05	74,94	0,89
14°	73,95	74,94	0,99
15°	74,05	74,94	0,89
16°	73,95	74,94	0,99
17°	74,05	74,94	0,89
18°	73,95	74,94	0,99
19°	74,05	74,94	0,89
20°	73,95	74,94	0,99

Για τον έλεγχο των βυθίσεων της δοκού του καταστρώματος στα σημεία σύνδεσης της με τα καλώδια, πρώτα επιλέγουμε τα σημεία και έπειτα πάμε Results→Displacements.



to275 27 👻 🎻?		1 : DL1	-	4	Ŧ	℗℆
Node/Case	UX (mm)	UY (mm)	UZ (mm)	RX (Deg)	RY (Deg)	RZ (Deg)
8/ 1	-0,6501	-0,5240	0,3745	0,030	0,018	-0,006
9/ 1	-1,2820	1,4928	-5,0490	-0,066	0,097	0,026
10/ 1	-1,0694	-1,0505	1,4717	0,013	0,086	0,031
11/ 1	-2,3870	2,0340	-7,9243	-0,069	0,147	0,037
12/ 1	-2,1988	-1,4788	2,2951	0,010	0,141	0,044
13/ 1	-3,9455	2,4621	-10,7550	-0,067	0,197	0,049
14/ 1	-3,7568	-1,8231	2,9918	0,007	0,192	0,05
15/ 1	-5,8687	2,7881	-13,4852	-0,065	0,245	0,05
16/ 1	-5,6771	-2,0902	3,5581	0,005	0,239	0,06
17/ 1	-8,0679	3,0186	-16,1124	-0,063	0,288	0,06
18/ 1	-7,8727	-2,2851	4,0045	0,002	0,284	0,07
19/ 1	-10,4628	3,1602	-18,6260	-0,060	0,329	0,06
20/ 1	-10,2629	-2,4126	4,3423	0,000	0,325	0,07
21/ 1	-12,9778	3,2197	-21,0159	-0,057	0,367	0,07
22/ 1	-12,7728	-2,4774	4,5815	-0,002	0,363	0,07
23/ 1	-15,5437	3,2039	-23,2724	-0,054	0,401	0,07
24/ 1	-15,3335	-2,4840	4,7320	-0,003	0,398	0,07
25/ 1	-18,0964	3,1195	-25,3857	-0,051	0,432	0,07
26/ 1	-17,8814	-2,4371	4,8036	-0,005	0,430	0,07
27/ 1	-20,5778	2,9734	-27,3464	-0,047	0,460	0,06
28/ 1	-20,3588	-2,3410	4,8058	-0,006	0,458	0,07
29/ 1	-22,9356	2,7724	-29,1450	-0,043	0,485	0,06
30/ 1	-22,7134	-2,2002	4,7480	-0,007	0,483	0,06
31/ 1	-25,1227	2,5231	-30,7726	-0,039	0,506	0,05
32/ 1	-24,8987	-2,0193	4,6394	-0,007	0,506	0,06
33/ 1	-27,0980	2,2325	-32,2205	-0,034	0,525	0,05
34/ 1	-26,8735	-1,8025	4,4888	-0,008	0,525	0,05
35/ 1	-28,8259	1,9073	-33,4805	-0,029	0,540	0,04
36/ 1	-28,6026	-1,5545	4,3046	-0,008	0,540	0,04
37/ 1	-30,2765	1,5542	-34,5445	-0,024	0,552	0,03
38/ 1	-30,0562	-1,2796	4,0946	-0,008	0,553	0,03
39/ 1	-31,4254	1,1800	-35,4051	-0,019	0,561	0,02
40/ 1	-31,2099	-0.9821	3.8666	-0.007	0,562	0.03

42/ 1	-32,0452	-0,6666	3,6276	-0,007	0,569	0,021
43/ 1	-32,7479	0,3948	-36,4901	-0,009	0,569	0,009
44/ 1	-32,5540	-0,3375	3,3793	-0,007	0,572	0,011
45/ 1	-32,9128	0,0000	-36,6786	-0,000	0,569	-0,000
46/ 1	-32,7135	-0,0000	3,1721	-0,000	0,571	-0,000

Εικόνα 84. Βυθίσεις των κόμβων της πίσω δοκού του καταστρώματος υπό τα μόνιμα φορτία της κατασκευής (σενάριο ''DL'').

Παρατηρούμε πως οι βυθίσεις των σημείων είναι σχεδόν μηδενικές, από 0,3mm έως 4,8mm, που ήτανε και ο στόχος μας για τις βυθίσεις της πίσω δοκού του καταστρώματος υπό τα μόνιμα φορτία

Επίσης όσον αφορά το τόξο υπό τα μόνιμα φορτία της κατασκευής, προκύπτουν τα εξής εντατικά μεγέθη για την εντός επιπέδου λειτουργία του.





Εικόνα 85. Εντατικά μεγέθη αξονικής δύναμης (κΝ) και ροπής του τόξου (κΝ*m).

275 27 👻 🧭	§?	🐘 🔜 🕹 🕹	•	and the second
Bar/No	ode/Case	FX (kN)	MY (kNm)	
247/ 1	1/ 1	3356,80	-189,56	$Z \rightarrow$
247/ 1	124/ 1	3349,59	-154,55	
248/ 1	124/ 1	3306,21	-140,81	y • 143
248/ 1	125/ 1	3299,47	-79,55	143
249/ 1	125/ 1	3263,95	-77,55	
249/ 1	126/ 1	3257,55	-45,97	
250/ 1	126/ 1	3223,06	-38,94	
250/ 1	127/ 1	3216,99	-22,48	and the second
251/ 1	127/ 1	3184,43	-17,35	
251/ 1	128/ 1	3178,77	13,20	and the second
252/ 1	128/ 1	3147,77	15,29	and the second
252/ 1	129/ 1	3142,45	22,95	
253/ 1	129/ 1	3113,81	25,41	
253/ 1	130/ 1	3108,89	49,93	
254/ 1	130/ 1	3081,86	50,35	
254/ 1	131/ 1	3077,28	54,56	
255/ 1	131/ 1	3052,48	55,43	
255/ 1	132/ 1	3048,23	50,90	Εικόνα 86. Τοπικό σύστημα
256/ 1	132/ 1	3025,15	50,54	αξόνων του τόξου και κόμβος της
256/ 1	133/ 1	3021,31	64,26	κορυφής του.
257/ 1	133/ 1	2999,83	62,66	
257/ 1	134/ 1	2996,39	83,41	
258/ 1	134/ 1	2977,21	82,48	
258/ 1	135/ 1	2974,04	57,82	
259/ 1	135/ 1	2956,80	55,68	
259/ 1	136/ 1	2954,10	76,54	
260/ 1	136/ 1	2939,01	75,28	
260/ 1	137/ 1	2936,58	51,37	
261/ 1	137/ 1	2923,80	49,60	
261/ 1	138/ 1	2921,78	57,59	
262/ 1	138/ 1	2910,57	55,69	
262/ 1	139/ 1	2908,95	59,81	
263/ 1	139/ 1	2900,30	58,56	
263/ 1	40/ 1	2899,02	56,82	
264/ 1	140/ 1	2892,51	55,77	
264/ 1	41/ 1	2891,56	48,40	
266/ 1	41/ 1	2887,12	47,53	Θλιπτική δύναμη και ροπή
266/ 1	42/1	2886,58	48,65	ζ στην στέιμη του τόξου
267/ 1	42/1	2884,40	48,27	
267/ 1	43/ 1	2884,20	43,98	
268/ 1	43/ 1	2884,20	43,97	

Εικόνα 87. Θλιπτική δύναμη και ροπή στην κορυφή του τόξου για το σενάριο DL.

Η αξονική δύναμη στην κορυφή του τόξου ισούται με S = H = 2884,20 kN πολύ κοντά στην 2911 κN (0,92% διαφορά) που περιμέναμε, αν λάβουμε υπόψιν την διαφορά του 1 κN μεταξύ της τελικής δύναμης των καλωδίων και των αντιδράσεων της συνεχούς δοκού που είχαμε υπολογίσει.

Όσον αφορά την ροπή του τόξου για την εντός επιπέδου λειτουγία του, παρατηρούμε πως δεν είναι μηδενική όπως περιμέναμε από την σχοινοειδή του μορφή. Παρ'όλα αυτά, η ύπαρξη ροπής ήταν αναμενόμενη καθώς :

Λόγω του ίδιου βάρους, η πραγματική ανηγμένη φόρτιση σε οριζόντια προβολή δεν είναι ομοιόμορφη όπως και την πήραμε αλλά (λόγω της κλίσεως) επαυξημένη προς τα άκρα. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε γραμμή πιέσεων διαφορετική από την παραβολή δευτέρου βαθμού για την οποία σχεδιάσαμε το τόξο, με αποτέλεσμα το τελευταίο να αναπτύσσει κάμψη που μειώνεται όσο ο λόγος f/L γίνεται μικρότερος (το τόξο τήνει σε ευθεία γραμμή).



Ρεαλιστική κατανομή του ιδίου βάρους

- Οι μεγάλες θλιπικές δυνάμεις του τόξου προκαλούν ελαστική βράχυνση του μήκους του με αποτέλεσμα :
 - Παραμόρφωση και απόκλιση απο την γραμμή πιέσεως για την οποία σχεδιάστηκε.

2. Η βράχυνση του μήκους του τόξου θα απαιτήσει οριζόντιες αντιδράσεις προς το εξωτερικό του τόξου, προκειμένου να αποκατασταθεί το αμετακίνητο των σημείων στηρίξεως, ίδιας φοράς με τις αντιδράσεις που αναπτύσσονται λόγω σχετικής απομάκρυνσης των στηρίξεων. Ως αποτέλεσμα μειώνεται η οριζόντια ώθηση του τόξου και συνεπώς η αντίστοιχη γραμμή πιέσεως θα πρέπει να υπερυψωθεί σε σχέση με την αρχική της θέση προκειμένου να αντιστοιχεί στην μειωμένη αυτή Η.



Η γραμμή πιέσεων συμπίπτει με τον κεντροβαρικό άξονα

Εικόνα 88. Μείωση οριζόντιας ώθησεως του τόξου λόγω βράχυνσης.



Εικόνα 89. Υπερύψωση της γραμμής πιέσεως λόγω μείωσης της οριζόντιας συνιστώσας του τόξου

Οι μετακινήσεις της κορυφής του τόξου για το σενάριο '**'DL''**, μόνιμα φορτία, είναι :



Εικόνα 90. Απαρίθμηση των κόμβων του τόξου μέχρι τον άξονα συμμετρίας.

🅭 Node Propert	ties : 143 - 1	(DL1)	
Geometry Disp	lacements	Reactions	
Node no.:	143		
UX (mm)	UY (mm)	UZ (mm)	
-271,7235	0,0001	-151,8212	
RX (Deg)	RY (Deg)	RZ (Deg)	
0,000	-0,560	0,000	
Close	Printout		Help

Εικόνα 91. Μετακίνηση του κόμβου 143 στην κορυφή του τόξου.

Που σημαίνει βύθιση ''w'' της κορυφής του τόξου στο επίπεδό του ίση με:

Ux (mm)	Uz (mm)	Z global	X global	Z global	X global
		Αρχικό	Αρχικό	Τελικό	Τελικό
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
-271,72	-151,82	10880,00	-5070,00	10728,18	-5341,72

Όπου	Ζ	global	τελικό	=	Ζ	global	αρχικό	+	Uz	global
και	Х	global	τελικό	=	Х	global	αρχικό	+	Ux	global

Αρχική Τεταγμένη τόξου	Βύθιση ''w'' κορυφής
"γ" στο επίπεδό του	τόξου
(mm)	(mm)
12000,00	15,52
	Αρχική Τεταγμένη τόξου "y" στο επίπεδό του (mm) 12000,00

όπου Τελική τεταγμένη τόξου = $\sqrt{Z \text{ global Τελικό}^2 + X \text{ global Τελικό}^2}$ και βύθιση w = Αρχική Τεταγμένη τόξου - Τελική Τεταγμένη τόξου Η βύθιση στην κορυφή του τόξου λόγω ελαστικής βράχυνσης του, μπορεί επίσης να υπολογιστεί προσεγγιστικά βάσει του τύπου :

w =
$$\frac{H}{E*A} * \frac{L*(1+3(f/L)^2)}{4*(f/L)} =$$

$$=\frac{2884000}{200000*87500}*\frac{80000*(1+3(12000/80000)^2)}{4*(12000/80000)}$$

 $w = 22,34 \text{ mm} > 15,52 \text{ mm} \pi$ ου βρήκαμε με το λογισμικό ROBOT.

Με βάση την βύθιση της κορυφής του τόξου μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά η ροπή που αναπτύσσει σύμφωνα με τον τύπο :

$$M = \frac{16*E*I}{L^2} * w \longrightarrow M = \frac{16*200*10^6*1117447}{80^2*100^4} * 15,52$$
$$\longrightarrow M = 43,36 \text{ kN*m} \cong 43,98 \text{ kN*m πou βρήκαμε μέσω του λογισμικού ROBOT.}$$

5.4 Αποτελέσματα σεναρίου ''LLsym''

Aπό το σενάριο "LLsym" ελέγχουμε την μέγιστη βύθιση καταστρώματος και την μετακίνηση στην κορυφή του τόξου για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας. Για την προβολή του παραμοφωμένου φορέα Results→Diagrams for bars→Deformation→Exact deformation for bars→Apply. Επίσης για την προσθήκη των διαγραμμάτων πάνω στον παραμορφωμένο φορέα επιλέγουμε Diagrams for bars →Parameters→Text



Εικόνα 92. Διαδικασία προβολής παραμορφωμένου φορέα.



Εικόνα 93. Λεπτομέρειες παραμόρφωσης τόξου (2) και ελευθέρου άκρου

καταστρώματος (1).



Εικόνα 94. Λεπτομέρεια βύθισης ελευθέρου άκρου καταστρώματος στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (σενάριο **LL**: 1,35*g+1,35*q).

Βλέπουμε πως η μέγιστη βύθιση του καταστρώματος παρατηρείται στο

μέσο του ανοίγματος (όπως και περιμέναμε απο την αναλογία του Mohr) και είναι οριακά μέσα στην απαίτηση των $80mm = \frac{L}{1000} = \frac{80m}{1000}$ βάσει του ελέγχου σε οριακή κατάσταση λειτουργικότητας.



Εικόνα 95. Λεπτομέρεια μετακίνησης τόξου στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (σενάριο **LL**: 1,35*g+1,35*q).

Η μέγιστη παραμόρφωση του τόξου στην κορυφή του υπό τα κινητά και μόνιμα φορτία στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας φτάνει τα 319mm. Αυτό πρακτικά σημαίνει αύξηση της κλίσης του τόξου κατά $\frac{U*180^{\circ}}{f*\pi} = \frac{319 \, mm*180^{\circ}}{12000 \, mm*\pi} \cong 1,52^{\circ} \pi$ ου είναι σχετικά αποδεχτή.

5.5 Αποτελέσματα σεναρίου "ULS-sym"

5.5.1 Μέγιστη θλιπτική δύναμη τόξου

Για το σενάριο ''**ULS-sym''**, η μέγιστη θλιπτική δύναμη του τόξου παρατηρείται στην στήριξη του και ισούται με 5234 kN έναντι της συντηρητικής τιμής των 5598 κN, όπου και θεωρήσαμε ότι το σύνολο του φορτίου της γέφυρας παραλαμβάνεται εξ ολοκλήρου από το τόξο, πράγμα που φυσικά δεν συμβάινει καθώς συμμετέχουνε και οι τρεις διαμήκεις ράβδοι του καταστρώματος με την δυσκαμψία τους.



Εικόνα 96. Μέγιστη θλιπτική δύναμη τόξου (5234 kN) για το σενάριο ULS.

Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού με βάση την διατομή του τόξου SHS 900x900x25 και την συντηρητική υπόθεση της αμφιαρθρωτής στήριξης

ισούται με
$$S_{cr} = C*\frac{E*I}{(L/2)^2} = 8,475*\frac{200*10^6*1117447}{(80/2)^2*100^4} = 11837$$
 kN

Επομένως ο συντελεστής ασφαλείας ως προς το κρίσιμο φορτίο λυγισμού ισούται με :

$$\frac{S_{cr}}{s} = \frac{11837}{5234} = 2,26$$

Χρησιμοποιείται δηλαδή το 44% του αποθέματος σε θλιπτική δύναμη λυγισμού. Επειδή όμως υπάρχουνε έλεγχοι συνδυασμένης καταπόνησης με καθολική αστάθεια όπως καμπτικός και πλαγιοστρεπτικός λυγισμός υπό συνδυασμό θλίψης-διαξονικής κάμψης, τα αποθέματα αυτά μειώνονται ακόμη περισσότερο. Οπότε ο παραπάνω συντελεστής αφαλείας ίσως να μην είναι τοσο συντηρητικός όσο φαίνεται.

5.5.2 Στρεπτική ροπή τόξου

Όσον αφορά την στρεπτική ροπή του τόξου λόγω της εκτός επιπέδου λειτουργίας του, η εύρεση της μπορεί να γίνει προσσεγιστικά στα πλαίσια προμελέτης, δίχως την βοήθεια του υπολογιστή.

Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αλληλεξάρτησης μεταξύ της αναπτύξεως καμπτικών και στρεπτικών ροπών που εμφανίζεται στις καμπύλες δοκούς υπό εγκάρσιο φορτίο.



Εικόνα 97. Τυπική καμπύλη δοκός σε κάτοψη υπό κατακόρυφο και στρεπτικό κατανεμημένο φορτίο, με τα εντατικά της μεγέθη σε τυχαία τομή.

Έστω καμπύλη δοκός υπό κατακόρυφο κατανεμημένο φορτίο q και στρετικό φορτίο m_T .

Για ένα οποιοδήποτε απειροστό τμήμα της μήκους ds έχουμε τις εξής συνθήκες ισσοροπίας :

- (1) $\frac{dV}{ds} = -q$ (Ισορροπία κατακόρυφων δυνάμεων)
- (2) $\frac{dM_T}{ds} = -m_T \frac{M_B}{R}$ (Ισορροπία διανυσματικών ροπών, εφαπτομενικά του άξονα)
 (3) $\frac{dM_B}{ds} = -V \frac{M_T}{R}$ (Ισορροπία διανυσματικών ροπών, κάθετα προς τον άξονα)

Όπως φαινεται από την δεύτερη εξίσωση αλλά και το παρακάτω σχήμα, η διανυσματική μεταβολή της καμπτικής ροπής μεταξύ δυο γειτονικών διατομών, ισοδυναμεί με την άσκηση ενός κατανεμημένου στρεπτικού φορτίου $\frac{M_B}{R}$. Με ανάλογο τρόπο φαίνεται από την τρίτη εξίσωση, ότι η διανυσματική μεταβολή της στρεπτικής ροπής M_T συνδέεται με την ανάπτυξη κάμψεως.



Εικόνα 98. Απειροστό τμήμα μήκους ds καμπύλης δοκού και ανάπτυξη στρεπτικού κατανεμημένου φορτίου m_T λόγω μεταβολής της καμπτικής ροπής μεταξύ γειτονικών διατομών.

Διαφορίζοντας ως προς s τις εξισώσεις (2) και (3) παίρνουμε τις δύο παρακάτω τελικές εξισώσεις, που περιγράφουν την αλληλεξάρτηση

μεταξύ καμπτικών και στρεπτικών ροπών :

(a)
$$\frac{d^2 M_B}{ds^2} = -\left(q - \frac{1}{R} * \frac{dM_T}{ds}\right)$$
(Καμπτική Ισσοροπία)
(b)
$$\frac{dM_T}{ds} = -\left(\frac{M_B}{R} + m_D\right)$$
(Στρεπτική Ισσοροπία)

Από την εξίσωση (a) ο όρος $\frac{1}{R} * \frac{dM_T}{ds}$ αν αντικαταστήσουμε το $\frac{dM_T}{ds}$ με βάση την (b) θα ισούται με :

$$\frac{1}{R}*\frac{dM_T}{ds} = \frac{M_B}{R^2} + \frac{m_D}{R}$$
 όπου για $M_B = q*L^2/c$

$$\implies \frac{1}{R}*\frac{dM_T}{ds} = \frac{q*L^2}{R^2*c} + \frac{m_D}{R}$$
 (c αριθμός της τάξεως του 10)

και διαιρώντας με το q τελικά

$$\implies (\frac{1}{R} * \frac{dM_T}{ds})/q = \frac{L^2}{R^2 * c} + \frac{m_D}{R * q}$$

Για L<< R και m_D << R*q η εξίσωση (a) τήνει στην :

 $\frac{d^2 M_B}{ds^2} = -q$ δηλαδή όπως η σχέση ισσοροπίας της ευθύγραμμης δοκού μεταξύ καμπτικών ροπών και φορτίου. Αυτό σημαίνει ότι υπό τις παραπάνω προυποθέσεις, οι καμπτικές ροπές του καμπύλου φορέα μπορούν να προσεγγιστούν με τις καμπτικές ροπές ενός ευθύγραμμου φορέα, με μήκος L όσο το μήκος του τόξου του καμπύλου φορέα.

Προσεγγίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις M_B , το δεξί μέλος της εξίσωσης (b) αποκτά συγκεκριμένη τιμή. Έτσι η εξίσωση (b) παραπέμπει πια στην σχέση ισσοροπίας της ευθύγραμμης δοκού μεταξύ φορτίων και τέμνουσας dQ/ds = -p. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως οι στρεπτικές ροπές M_T μπορούν να προκύψουν σαν οι τέμνουσες δυνάμεις της ευθύγραμμης δοκού με μήκος L που φορτίζεται με το φορτίο ($M_B/R + m_D$).

124

Εάν δεν συντρέχουν οι προυποθέσεις για τους όρους L/R και $\frac{m_D}{R*q}$ και χρειάζεται μια καλύτερη προσσέγγιση μπορεί να γίνει επιστροφή στην πρώτη εξίσωση (α) παίρνοντας πια τον όρο $\frac{1}{R}*\frac{dM_T}{ds}$ για φόρτιση της ευθύγραμμής δοκού ανοίγματος L, υπολογισμό της ''διορθωμένης'' M_B και στην συνέχεια μέσω της εξίσωσης (b) εκ νέου υπολογισμό της M_T σαν τεμνουσών δυνάμεων για την φόρτιση ($M_{B,\delta \iota o \rho \theta}/R + m_D$). Η διαδικασία συγκλίνει γρήγορα.

Στην δική μας περίπτωση $m_D = 0$ και L/R = 80/66,67 = 1,2 > 1 όπου



Για την εκτος επιπέδου λειτουργία του τόξου έχουμε $g_{A,\perp} = A^* \gamma^* \sin(\omega) = 0,0875m^2 * 77 \frac{kN}{m^3} * \sin(26,52) = 3 \text{ kN/m}$

Άρα για τόξο μήκους 84,6 m (''τεντωμένο'' τόξο) και πακτώσεις στα άκρα θα έχουμε :

 $M_{\dot{\alpha}\kappa\rho\sigma\upsilon} = g_{A,\perp} * L^2/12 = 3*84,6^2/12 = 1789,23$ kN*m $\cong 1787,48$ kN*m που προέκυψε από τους υπολογισμούς του υπολογιστή.

ενώ στην μέση $M_{\mu \acute{e} \sigma \eta \varsigma} = g_{A,\perp} * L^2/24 = 3*84,6^2/24 = 894,62$ κN*m<1121,79 kN*m που προέκυψε από τους υπολογισμούς του υπολογιστή.

Άμα με την επαναληπτική διαδικασία διορθωθεί η M_B (εως ότου γίνει ίδια με αυτή από τον υπολογιστή) και ασκηθεί ως φορτίο q στην αντίστοιχη ευθύγραμμη δοκό μήκους L = 84,6 m, το διάγραμμα των τεμνουσών που θα πάρουμε προσεγγίζει πολύ ικανοποιητικά το ακριβές διάγραμμα στρεπτικών ροπών του τόξου.



Εικόνα 99. Στρεπτική και καμπτική ροπή με την ακριβή μέθοδο του ROBOT.

Το κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο M_B/R έχει φορά προς τα κάτω αν η καμπτική ροπή M_B εφελκύει τις κάτω ίνες ή προς τα πάνω αν εφελκύει τις πάνω ίνες.



Εικόνα 100. Φόρτιση του ''τεντωμένου'' τόξου με M_B/R .



Εικόνα 101. Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων ''τεντωμένου'' τόξου υπό το φορτίο M_B/R που ισοδυναμεί με την στρεπτική ροπή του τόξου.

Αν και οι τιμές των στρεπτικών ροπών στα άκρα διαφέρουνε, το διάγραμμα έχει ίδια μορφή ποιοτικά με το αντίστοιχο του υπολογιστή και σημειώνει ίδια μέγιστη στρεπτική ροπή (**269 kN*m** \cong **261 kN*m**), που είναι και το πιο σημαντικό για τον έλεγχο σε οριακή κατάσταση αστοχίας, όπου ελέγχουμε την διατομή με τα μεγαλύτερα εντασιακά μεγέθη.

5.5.3 Επαλήθευση του τρόπου λειτουργίας των διαγώνιων συνδέσμων ακαμψίας.

Οι διαγώνιοι σύνδεσμοι του δικτυώματος, έχοντας το μεγαλύτερο μήκος σε σχέση με τα υπόλοιπα στοιχεία του, τοποθετήθηκαν με στόχο να λειτουργούν εφελκυστικά ώστε να αποφευχθεί η περίπτωση του λυγισμού τους.

Παρακάτω ακολουθεί το διάγραμμα αξονικών δυνάμεων των διαγωνίων συνδέσμων καθενός από τα τρία προφίλ του καταστρώματος, για το σενάριο "ULS-sym". Λόγω συμμετρίας φορτίου και γεωμετρίας προβάλλονται οι διαγώνιοι μέχρι τον άξονα συμμετρίας.



Εικόνα 102. Διαγράμματα αξονικών δυνάμεων των διαγωνίων καθενός απο τα τρία προφίλ του καταστρώματος (αύξουσα τιμή αξονικών δυνάμεων όσο πλησιάζουμε προς το κόκκινο χρώμα).

Όπως παρατηρούμε, όλοι οι διαγώνιοι λειτουργούν εφελκυστικά (στο ROBOT ο εφελκυσμός προσημένεται με αρνητικό πρόσημο), με την αξονική δύναμη να αυξάνεται όσο πλησιάζουμε προς το άκρο της γέφυρας. Αυτό είναι λογικό καθώς και η στρεπτική ροπή του καταστρώματος, η οποία μέσω της διατμητικής ροής του Breddt τήνει να παραμορφώσει τα προφίλ του καταστρώματος εντείνοντας έτσι τους διαγώνιους συνδέσμους, λαμβάνει μέγιστη τιμή στο άκρο και μηδενική στο μέσο της γέφυρας



Εικόνα 103. Κατανομή της στρεπτικής ροπής του καταστρώματος λόγω μονίμων και κινητών φορτίων.

5.5.4 Επαλήθευση της καμπτικής συμπεριφοράς της δοκού στο πίσω μέρος του καταστρώματος

Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα ροπών M_y και M_z της κύριας δοκού στο πίσω μέρος του καταστρώματος για το σενάριο ULS-sym. Όπως παρατηρούμε, στα σημεία σύνδεσης της δοκού με τα καλώδια, λόγω των δυνάμεών τους υπάρχει αλλαγή της διεύθυνσης του διαγράμματος των ροπών, με αποτέλεσμα το διάγραμμα να θυμίζει εκείνο της συνεχούς δοκού, πράγμα που στοχεύαμε. Έτσι οι ροπές στο άνοιγμα της δοκού είναι περιορισμένες.



Εικόνα 104. Τοπικοί άξονες της κύριας δοκού στο πίσω μέρος του καταστρώματος.



Εικόνα 105. Καμπτική ροπή M_y της κυριας δοκού στο πίσω μέρος του καταστρώματος για το σενάριο ULS (1,35*g+1,35*q).



Εικόνα 106. Καμπτική ροπή M_z της κυριας δοκού στο πίσω μέρος του καταστρώματος για το σενάριο ULS (1,35*g+1,35*q).

Στους ακραίους κόμβους παρατηρείται άλμα της τιμής της ροπής σε σχέση με το άνοιγμα. Αυτό το άλμα ίσως να οφείλεται στην στροφή του ακραίου κόμβου λόγω σύνδεσης του τόξου και του διαγώνιου συνδέσμου ακαμψίας με την κύρια δοκό στο συγκεκριμένο σημείο.



Εικόνα 107. Σύνδεση τόξου, κύριας δοκού και διαγώνιου συνδέσμου στον ακραίο κόμβο.

5.6 Η αντισυμμετρική φόρτιση και τα αποτελέσματα σεναρίου ''ULS-antisym''

Για την αντισυμμετρική φόρτιση, όπως βλέπουμε παρακάτω για τα σενάρια LLsym και LLantisym, η διαφορά στην καμπτική ροπή για την εντός επιπέδου λειτουργία του τόξου είναι αισθητή. Στην περίπτωση της αντισυμμετρικής φόρτισης παρατηρούμε στο τόξο μέγιστη θετική ροπή **183,21κN*m** (κοντά στα 1/4 του ανοίγματος του τόξου), έναντι της τιμής **124,52 κN*m** (στο μέσον του τόξου) για την συμμετρική φόρτιση.



Εικόνα 108. Φόρτιση του μισού ανοίγματος (αντισυμμετρική φόρτιση κινητου φορτίου q = $3kN/m^2$).



Εικόνα 109. Καμπτικές ροπές My για τα σενάρια LLsym και LLantisym για την εντός επιπέδου λειτουργία του τόξου.

Όσον αφορά την μέγιστη ροπή του τόξου για την οριακή κατάσταση αστοχίας, τα αποτελέσματα για το σενάριο ''ULS-antisym'' δίνουν τιμή ροπής 267,72κN*m



Εικόνα 110. Καμπτική ροπή για την εντός επιπέδου λειτουργία του τόξου για το σενάριο ULS-antisym.

5.7 Έλεγχος επάρκειας των διατομών έναντι συνδυασμένων εντατικών καταστάσεων και φαινομένων καθολικής αστάθειας.

Το ROBOT πραγματοποιεί αυτόματα όλους τους ελέγχους των διατομών ένταντι εντατικών μεγεθών και φαινομένων καθολικής αστάθειας, βάσει του EC3.

Πιο συγκεκριμένα, επειδή τα περισσότερα στοιχεία της κατασκευής υπόκεινταν σε δυαξονική κάμψη με αξονική δύναμη, πραγματοποιήθηκε έλεγχος σε :

- Θλίψη/Εφελκυσμό
- Διαξονική κάμψη
- Συνδυασμό αξονικής δύναμης διαξονικής κάμψης
- Πλαγιο-στρεπτικό λυγισμό υπό συνδυασμό εφελκυσμού διαξονικής κάμψης
- Καμπτικού και πλαγιο-στρεπτικού λυγισμού υπό συνδυασμό θλίψης
 διαξονικής κάμψης
- Αλληλεπίδραση αξονικής δύναμης διάτμησης

- Αλληλεπίδραση αξονικής δύναμης διαξονικής κάμψης διάτμησης
- Αλληλεπίδραση διατμητικού λυγισμού αξονικής δύναμης διαξονικής κάμψης

Σημαντικό για την πραγματοποίηση των ελέγχων σε λυγισμό είναι η εισαγωγή του μήκους λυγισμού των μελών του φορέα.

Σε όλα τα μέλη επιλέχθηκε συντηρητικά ως μήκος λυγισμού όλο το μήκος τους (περίπτωση ελαστικής γραμμής που αντιστοιχεί σε αμφιαρθρωτό σύστημα) άν και όλα τα μέλη είναι συνδεδεμένα μονολιθικά στους κόμβους (πρόκειται δηλαδή κάτι μεταξύ άρθρωσης και πάκτωσης).

Για της διαμήκεις δοκούς του καταστρώματος θεωρήθηκε πως έχουνε πλευρικές αντιστηρίξεις εντός και εκτός επιπέδου στα σημεία σύνδεσής τους με τους διαγώνιους συνδέσμους ακαμψίας.

Όπως βλέπουμε και στην εικόνα που ακολουθεί, τα 242 στοιχεία της γέφυρας ελέγθηκαν σε όλους τους παραπάνω ελέγχους σε 50 διαφορετικά σημεία καθόλο το μήκος τους, καθώς και στα σημεία μέγιστων εντάσεων για όλα τα σενάρια φόρτισης ξεχωριστά.

Όλα τα μέλη κρίθηκαν επαρκή στου ελέγχους αντοχής, ενώ στην στήλη του συντελεστή χρησιμοποίησης της διατομής, όπου έχει επιλεχθεί φθίνουσα διάταξη, παρατηρούμαι μέγιστη τιμή την 0.91 η οποία παρατηρείται για την πίσω δοκό του καταστρώματος.

Η τιμή αυτή οφείλεται στο άλμα της ροπής, που παρατηρήσαμε παραπάνω στους ακραίους κόμβους της δοκού, λόγω του τρόπου σύνδεσης της με το τόξο στο σημείο αυτό. Ίσως μια διαφορετική (και πιο ρεαλιστική) συνδεσιμολογία γέφυρας-καταστρώματος να απέτρεπε το συγκεκριμένο φαινόμενο. Πέρα από την υψηλή τιμή του συντελεστή χρησιμοποίησης για την πίσω δοκό, για τα υπόλοιπα μέλη της γέφυρας παρατηρούμε ότι η τιμή του είναι αρκετά χαμηλή (από 0.36 και κάτω).

sults Messag	es								Calc. Note	Close
Member		Section	Material	Lay	Laz	Ratio	Case	-		Help
1 10	ОК	SHS 400x400x16	S 450	12.75	12.75	0.91	3 ULS		Dette	Tiop
6 10	OK.	SHS 400x400x16	S 450	25.49	25.49	0.56	3 ULS		Ratio	
46 10	СК	SHS 400x400x16	S 450	25.49	25.49	0.56	3 ULS	=	Analysis	Мар
126 10	Ж	SHS 400x400x16	S 450	14.06	14.06	0.47	3 ULS		- Calculation po	ninte
4 10	ОК	SHS 400x400x16	S 450	14.06	14.06	0.47	3 ULS		Division:	n = 50
3 10	СК	SHS 400x400x16	S 450	12.75	12.75	0.43	3 ULS	1	Extremes:	Fx,Fy,Fz,My,M
2 10	ОК	SHS 400x400x16	S 450	12.75	12.75	0.36	3 ULS		Additional:	n = 10
128 10	ОК	SHS 400x400x16	S 450	28.50	28.50	0.26	1 DL1			
127 10	ОК	SHS 400x400x16	S 450	28.50	28.50	0.26	1 DL1			
84 10	СК	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.24	3 ULS			
48 10	СК	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.24	3 ULS			
47 10	СК	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.24	3 ULS	1		
85 10	OK	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.24	3 ULS	1		
83 10	OK	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.22	3 ULS	1		
49 10	OK	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.22	3 ULS	1		
82 10	СК	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.21	3 ULS			
50 1o	OK	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.21	3 ULS	1		
81 10	СК	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.20	3 ULS	1		
51 10	OK	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.20	3 ULS	1		
80 10	OK	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.18	3 ULS	1		
52 10	OK	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.18	3 ULS	1		
208 10	Ж	SHS 400x400x16	S 450	26.60	26.60	0.17	3 ULS			
207 10	СК	SHS 400x400x16	S 450	26.60	26.60	0.17	3 ULS			
5 10	СК	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.17	3 ULS			
86 10	ОК	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.17	3 ULS			
79 10	OK	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.17	3 ULS			
53 10	OK	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.17	3 ULS			
78 10	OK	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.16	3 ULS			
54 10	ОК	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.16	3 ULS			
125 10	ок	SHS 400x400x16	S 450	14.06	14.06	0.15	3 ULS			
87 10	ОК	SHS 400x400x16	S 450	14.06	14.06	0.15	3 ULS	1		
77 10	ОК	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.15	3 ULS	1		
55 10	OK	SHS 400x400x16	S 450	23.35	23.35	0.15	3 ULS	1		

Εικόνα 111. Επαλήθευση αντοχής μελών γέφυρας για τους ελέγχους του Ευρωκώδικα

FRESULTS - Code - EN 1993-1	:2005/AC:2009			
SHS 400x400x16	Bar: 1 1o x = (Load case: 3 UL	0.00 L = 0.00 m _S (1+2)*1.35	Section OK	ок •
Simplified results Detailed results	3			Change
FORCES N,Ed = 896.80 kN Nc,Rd = 11059.20 kN Nb,Rd = 11059.20 kN	My,Ed = 682.43 kN*m My,Ed,max = 682.43 kN*m My,c.Rd = 1593.45 kN*m MN,y,Rd = 1593.45 kN*m Mb,Rd = 1593.45 kN*m	Mz,Ed = 946.29 kN*m Mz,Ed,max = 946.29 kN*m Mz,c,Rd = 1593.45 kN*m MN,z,Rd = 1593.45 kN*m	Vy.Ed = 653.33 kN Vy.T,Rd = 2924.73 kN Vz.Ed = 495.06 kN Vz.T,Rd = 2690.75 kN Tt,Ed = -147.75 kN*m Class of section = 1	Forces Detailed
LATERAL BUCKLING 같 = 0.00 Lcr.upp=2.00	Mcr = 171650.74 kN*n m Lam_LT = 0.10	n Curve,LT - d fi,LT = 0.47	XLT = 1.00	
BUCKLING y Ly = 80.00 m Lcry = 2.00 m Lamy = 12.75	Lam_y = 0.19 Xy = 1.00 kzy = 0.59	BUCKLING z Lz = 80.00 m Lcr.z = 2.00 m Lamz = 12.75	Lam_z = 0.19 Xz = 1.00 kzz = 0.98	Calc. Note Parameters Help
SECTION CHECK (My,Ed/MN,y,Rd) [^] 1.67 + (Mz Vy,Ed/Vy,T,Rd = 0.22 < 1.00	,Ed/MN,z,Rd)^1.67 = 0.66 < 1.0 (6.2.6-7)	0 (6.2.9.1.(6))		
MEMBER STABILITY CHECK Lamy = 12.75 < Lam.max = 21 N,Ed/(Xz*N,Rk/gM1) + kzy*M	0.00 Lamz = 12.75 < Lam,n y,Ed,max/(XLT*My,Rk/gM1) + k	nax = 210.00 STABLE zz*Mz,Ed,max/(Mz,Rk/gM1) = (0.91 < 1.00 (6.3.3.(4))	

Εικόνα 112. Στοιχεία του ελέγχου της δυσμενέστερης διατομής, για την πίσω δοκό του καταστρώματος.

<u>Κεφάλαιο 6° : Συμπεράσματα</u>

Όπως παρατηρήσαμε από τα αποτελέσματα της ακριβής μεθόδου του υπολογιστή, η συλλογιστική πορεία που ακολουθήθηκε για την σύνθεση και την προδιαστασιολόγηση του φορέα, οδήγησε σε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά τα αναμενόμενα εντατικά μεγέθη αλλά και τον τον τρόπο λειτουργίας και συνεργασίας των μελών του φορέα.

Όσον αφορά τον συντελεστή χρησιμοποίησης των μελών, με βάση τους ελέγχους των διατομών που γίνανε στο κεφάλαιο 5, είναι φανερό πως ο φορέας είναι υπέρ επαρκής έναντι των φορτίων που τον καταπονούν. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα είχε σχολιασθεί και στο τρίτο κεφάλαιο, όπου σημειώθηκε πως σε πολλά έργα μεγάλων διαστάσεων κυρίαρχο ρόλο στην επιλογή των διαστάσεων και της ακαμψίας των δομικών μελών δεν

παίζουνε τόσο τα εντατικά μεγέθη λόγω των φορτίων που φέρει η κατασκευή, αλλά ο περιορισμός των βυθίσεων του φορέα.

Ο συγκεκριμένος τύπος γέφυρας εντείνει το παραπάνω φαινόμενο λόγω της μεγάλης στρεπτικής καταπόνησης που αναπόφευκτα έχει, εξαιτίας της τοποθέτησης του τόξου στο άκρο του καταστρώματος, παρουσιάζοντας σχεδόν οκταπλάσια μέγιστη βύθιση καταστρώματος σε σχέση με τους πιο συνηθισμένους τύπους γεφυρών.

Έτσι ο δομικός σχεδιασμός μετατρέπεται περισσότερο σε θέμα δυσκαμψιών παρά κατασκευαστικής αστοχίας, με τις διατομές να είναι υπερ διαστασιολογημένες.

Επίσης η κλίση του τόξου από την κατακόρυφο συνοδεύεται από τα εξής μειωνεκτήματα :

- Μειώνεται η συνολική δυσκαμψία του φορέα ως σύνολο, ως προς την κατά μήκος κάμψη του.
- Το τόξο καταπονείται σε στρέψη λόγω της εκτός επιπέδου λειτουργίας του, ως καμπλυλη δοκός υπό εγκάρσιο φορτίο.
- Το κατάστρωμα λόγω της οριζόντιας συνιστώσας των καλωδίων κάμπτεται και εγκάρσια στο επίπεδό του. Ως αποτέλεσμα χρειάζεται επαρκή δυσκαμψία στην εγκάρσια διέυθυνση την οποία την προσφέρει η πάνω όψη του καταστρώματος με την μορφή δικτυώματος.

Με βάση τα παραπάνω, θα μπορούσε κανείς να καταλήξει πως ο συγκεκριμένος τύπος τοξοτής γέφυρας είναι πολύ πιο αντιοικονομικός και λιγότερο αποτελεσματικός σε σχέση με τους πιο «κλασικούς». Ίσως για πιο στενό πλάτος καταστρώματος και μικρότερο άνοιγμα, η χρήση της 'La Devesa' τύπου λύσης να είναι εξίσου προσιτή με τις υπόλοιπες.

Ένας τέτοιος τύπος γέφυρας ενδείκνυται περισσότερο για αστικά περιβάλλοντα όπου η αρχιτεκτονική και αισθητική του έργου παίζει σημαντικό ρόλο.

Εξάλου σύμφωνα και με τα λόγια του Calatrava :

''...Αυτό που προσπάθησα να εξερευνήσω είναι [ακριβώς] το φαινόμενο της στρέψης, για παράδειγμα, να δόσω έμφαση στην θέση της γέφυρας σε σχέση με την πόλη γύρω της – ή με την κατεύθυνση του νερού ή ακόμα με την θέση του ήλιου – και να ευαισθητοποιήσω την γέφυρα σαν φαινόμενο ενταγμένο στο περιβάλλον τοπίο''.

Εκτός από την περαιτέρω εξερεύνηση του συγκεκριμένου τύπου γέφυρας για μικρότερα ανοίγματα και πλάτη καταστρώματος, ενδιαφέρον θα αποτελούσε η ένταξη σεισμικών φορτίων προς εξέταση της δυναμικής της συμπεριφοράς.

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>

- ΣΤΑΤΙΚΗ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕΡΟΣ Α` Λεωνίδας
 Θ.Σταυρίδης
- ΣΤΑΤΙΚΗ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕΡΟΣ Β` Λεωνίδας
 Θ.Σταυρίδης
- Paper του Juan José Jorquera-Lucerga πάνω στις γέφυρες Calatrava με τίτλο Understanding Calatrava's bridges: A conceptual approach to the 'La Devesa-type' footbridges
- 4. Κατασκευές από Χάλυβα τόμος Ι ΧΡ.Ν.ΚΑΛΦΑΣ Αν.Καθηγητής Δ.Π.Θ
- 5. Eurocode 1: Actions on structures Part 2: Traffic loads on bridges
- 6. Eurocode 0 Basis of structural design
- 7. Eurocode 3 Design of steel structures Part 2: Steel Bridges