



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών

ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΛΩΔΙΩΤΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ



Διπλωματική Εργασία

Τζωρτζόπουλος – Μαρίνης Γεώργιος

Επιβλέπων: Βλάσιος Κουμούσης, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2016

*We built too many walls
and not enough bridges*

Isaac Newton

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας σηματοδοτεί το πέρας της φοίτησής μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με την ευκαιρία αυτή, λοιπόν, θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου ορισμένους ανθρώπους που βοήθησαν σημαντικά (ο καθένας με το δικό του τρόπο) στο να ολοκληρωθεί αυτή η εργασία.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή αυτής της εργασίας τον κ. Βλάση Κουμούση, Καθηγητή, του Τομέα Δομοστατικής, της Σχολής ΠΜ του ΕΜΠ. Οι γνώσεις που μου μετέφερε, αλλά και οι κατευθυντήριες γραμμές που μου έδινε σε κάθε απορία που μου γεννιόταν, με βοήθησαν να ολοκληρώσω την εργασία μου στις γέφυρες, κάτι με το οποίο ήθελα να ασχοληθώ από μικρό παιδί.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τον πατέρα μου Παναγιώτη, τη μητέρα μου Γεωργία και τον αδερφό μου Χάρη, που με στήριξαν στις δύσκολες στιγμές που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου (και νωρίτερα) και με την αγάπη τους που λάμβανα καθημερινά μου έδιναν κουράγιο, δύναμη και έμπνευση να συνεχίζω και να μην τα παρατάω.

Τέλος, ευχαριστώ όλους μου τους συμφοιτητές και φίλους που στάθηκαν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια και έζησαν τις ανησυχίες μου, καθώς και εκείνους που βοήθησαν ουσιαστικά στην πορεία συγγραφής αυτής της εργασίας παραχωρώντας μου ορισμένες υπηρεσίες τους.

Γεώργιος Τζωρτζόπουλος – Μαρίνης
Αθήνα, Νοέμβριος 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
ABSTRACT.....	11
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1^ο Κεφάλαιο: Γενικά στοιχεία γεφυρών	16
1.1 Ιστορικά στοιχεία	17
1.2 Κατάταξη γεφυρών	27
1.2.1 Υλικό Κατασκευής	27
1.2.2 Μήκη ανοιγμάτων	28
1.2.3 Μορφή Δομής.....	29
1.2.4 Είδη ανοιγμάτων.....	43
1.3 Ιστορική εξέλιξη καλωδιωτών γεφυρών	44
2^ο Κεφάλαιο: Το καλώδιο ως μεμονωμένο δομικό στοιχείο	61
2.1 Γενικά.....	62
2.2 Μηχανικές ιδιότητες καλωδίου	63
2.3 Αξονικά φορτισμένο καλώδιο.....	65
2.4 Στατική ανάλυση αξονικά φορτισμένου καλωδίου	72
2.5 Διερεύνηση εξισώσεων καλωδίου	88
2.5.1 Μεταβαλλόμενος λόγος τελικής δύναμης καλωδίου προς τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή του (T / T_u)	89
2.5.2 Μεταβαλλόμενος λόγος τελικής δύναμης καλωδίου προς το αφόρτιστο μήκος του (T / L).....	90
2.5.3 Μεταβαλλόμενος λόγος μέγιστου κατακόρυφου βέλους καλωδίου προς το αφόρτιστο μήκος του (k / L).....	90
2.6 Συμπεράσματα	91

3^ο Κεφάλαιο: Προσομοίωση καλωδιωτής γέφυρας.....93

3.1 Γενικά.....	94
3.2 Προσομοίωση γέφυρας στο πρόγραμμα CSiBridge 2016.....	97
3.2.1 Υλικά κατασκευής της γέφυρας.....	97
3.2.1 Το κατάστρωμα της γέφυρας.....	100
3.2.3 Οι πυλώνες.....	101
3.2.4 Τα καλώδια.....	104
3.2.5 Συνθήκες στήριξης της γέφυρας.....	107
3.3 Επιβαλλόμενα φορτία στη γέφυρα.....	110
3.3.1 Ίδιο βάρος κατασκευής (G).....	110
3.3.2 Πρόσθετα μόνιμα φορτία (G').....	113
3.3.3 Φορτία κυκλοφορίας ($Q = gr1a$).....	114
3.3.4 Σεισμός (E).....	117
3.4 Συνδυασμοί φορτίσεων.....	119

4^ο Κεφάλαιο: Ανάλυση καλωδιωτής γέφυρας.....120

4.1 Γενικά.....	121
4.2 Μέθοδος υλοποίησης του συστήματος των καλωδίων.....	122
4.2.1 Περιορισμός βέλους καταστρώματος υπό τα μόνιμα φορτία.....	123
4.2.2 Σταθερός λόγος μέγιστου βέλους προς μήκος χορδής (k_{max} / L).....	133
4.2.3 Σταθερός λόγος δύναμης καλωδίου προς μήκος χορδής (T / L).....	138
4.2.4 Σταθερή δύναμη χορδής για όλα τα καλώδια ίση με το 10% της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής.....	142
4.2.5 Συμπεράσματα.....	147
4.3 Εκτίμηση του ποσοστού οπλισμού των πυλώνων.....	148
4.3.1 Ποσοστό οπλισμού 1%.....	153
4.3.2 Ποσοστό οπλισμού 2%.....	161
4.3.3 Ποσοστό οπλισμού 3%.....	167
4.3.4 Ποσοστό οπλισμού 4%.....	173
4.3.5 Συμπεράσματα.....	179
4.4 Επίδραση χιαστί συνδέσμων στην κατασκευή.....	182
4.5 Επιρροή των εφεδράνων στη δυναμική απόκριση της κατασκευής σε πραγματικό επιταχυνσιογράφημα.....	187
4.5.1 Διαστασιολόγηση εφεδράνων.....	187

4.5.2	Ιδιομορφική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας.....	188
4.5.3	Έλεγχος ιδιομορφών.....	192
4.5.4	Συμπεράσματα.....	197
5^ο Κεφάλαιο: Τελικά συμπεράσματα εργασίας.....		199
5.1	Συμπεράσματα εργασίας.....	200
5.2	Περαιτέρω έρευνα.....	201
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		202

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι γέφυρες μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους. Μερικοί από αυτούς αποτελούν το υλικό κατασκευής τους, τα μήκη των ανοιγμάτων τους, η μορφή της δομής τους και τα είδη των ανοιγμάτων τους.

Ο πιο σημαντικός, από αυτούς που αναφέρθηκαν, είναι η κατάταξη με βάση τη μορφή της δομής των γεφυρών, δηλ. το κύριο στατικό σύστημα τους. Οι δικτυωτές γέφυρες, οι τοξωτές, οι καλωδιωτές και οι κρεμαστές είναι μερικές από τις πιο γνωστές κατηγορίες σύμφωνα με αυτήν την ιεράρχηση.

Η παρούσα εργασία ασχολείται με τις καλωδιωτές γέφυρες και επιδιώκει την μόρφωση του φορέα τους, την στατική και δυναμική τους ανάλυση. Το βασικό στοιχείο των γεφυρών αυτών, όπως προκύπτει και το όνομα τους, είναι το καλώδιο. Το καλώδιο είναι ένα δομικό στοιχείο η συμπεριφορά του οποίου χαρακτηρίζεται ως μη – γραμμική. Η μη – γραμμικότητα του καλωδίου αναφέρεται, τόσο στο υλικό κατασκευής του όσο και στη γεωμετρία του. Το υλικό κατασκευής του, ο χάλυβας, είναι ένα μη – γραμμικό υλικό, καθώς το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του αποτελείται από μια καμπύλη με συνεχώς μεταβαλλόμενη κλίση. Παρόμοια, η γεωμετρία είναι και αυτή μη – γραμμική, αφού η ισορροπία λαμβάνεται στην παραμορφωμένη θέση του, εξαιτίας των μεγάλων παραμορφώσεων που εκδηλώνει όταν εντείνεται.

Τα καλώδια που εξετάζονται φορτίζονται πέραν του ιδίου βάρους τους μόνο με αξονικά φορτία καθόσον έτσι εμφανίζονται στις καλωδιωτές γέφυρες. Τα αξονικά φορτιζόμενα καλώδια, λοιπόν, μπορούν να παρομοιαστούν με τις εφελκυσόμενες ράβδους των δικτυωμάτων. Έτσι, γίνεται σύγκριση μεταξύ αυτών των δύο στοιχείων ως προς τη δυστένεια τους και τη δυνατότητα παραμόρφωσής τους. Ένας τρόπος να προσομοιωθεί ένα μη – γραμμικό καλώδιο με μία γραμμική ράβδο είναι με την εισαγωγή ενός ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας (εφαπτομενικό μέτρο ή μέτρο διάτμησης).

Στη συνέχεια, καταγράφονται αναλυτικά οι σχέσεις που διέπουν το καλώδιο. Η καμπύλη μορφή του καλωδίου μπορεί να προσομοιωθεί με δύο τρόπους, είτε με τη μορφή μιας αλυσοειδούς καμπύλης, που είναι και πιο ρεαλιστική, είτε με τη

προσεγγιστική μορφή μιας παραβολικής καμπύλης δευτέρας τάξεως. Μετά τη σύγκριση αυτή πραγματοποιείται διερεύνηση των βασικών εξισώσεων του καλωδίου και προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα ως προς τους διάφορους τρόπους προέντασης του.

Αυτή η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για να χρησιμοποιηθούν τα πορίσματά της στην εισαγωγή των καλωδίων της γέφυρας που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία. Η γέφυρα αυτή είναι η Quincy Bayview στο Illinois της Αμερικής. Με τη βοήθεια του προγράμματος ανάλυσης CSiBridge 2016 και μιας ερευνητικής εργασίας που βρέθηκε στο διαδίκτυο, η γέφυρα δημιουργήθηκε στο περιβάλλον εργασίας του προγράμματος. Έγινε προσπάθεια, όσο ήταν δυνατόν, να τηρηθούν τα σχέδια που βρέθηκαν στην ερευνητική εργασία. Λήφθηκαν υπόψη οι βασικές φορτίσεις της ΟΚΑ και της ΟΚΛ, χωρίς βέβαια να ερευνάται η επίδραση των θερμοκρασιακών μεταβολών και του ανέμου.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν τέσσερις βασικές αναλύσεις – διερευνήσεις. Αρχικά, αναζητήθηκε ο βέλτιστος τρόπος εισαγωγής των καλωδίων. Ουσιαστικά, δηλαδή, ερευνήθηκε η αρχική προένταση που πρέπει να έχουν τα καλώδια, έτσι ώστε να ικανοποιούνται κάποια κριτήρια. Οι διάφορες μέθοδοι που εξετάστηκαν και τα κριτήρια που πραγματοποιήθηκαν οι έλεγχοι απορρέουν από την ανάλυση του καλωδίου ως μεμονωμένο δομικό στοιχείο.

Αφού βρέθηκε ο βέλτιστος τρόπος προέντασης των καλωδίων πραγματοποιήθηκε νέα διερεύνηση, με θέμα αυτή τη φορά την εύρεση του ποσοστού του οπλισμού των πυλώνων που εμφανίζει την καλύτερη συμπεριφορά στο σεισμό. Για αυτήν την ανάλυση πραγματοποιήθηκαν μη – γραμμικές στατικές αναλύσεις Pushover χρησιμοποιώντας όλους τους πιθανούς σεισμικούς συνδυασμούς που ορίζουν οι διατάξεις του EC8. Ο έλεγχος των διαφορετικών περιπτώσεων πραγματοποιήθηκε με την αξιολόγηση της κατάστασης των κρίσιμων σημείων (πλαστικών αρθρώσεων) της γέφυρας και την απαίτηση του ΚΑΝ.ΕΠΕ., που λέει ότι η στοχευόμενη μετακίνηση για οικονομικό σχεδιασμό πρέπει να ταυτίζεται σχεδόν με το σημείο επιτελεστικότητας: Προστασία Ζωής.

Έπειτα, εισάγονται χιαστί σύνδεσμοι δυσκαμψίας στους πυλώνες και αναζητείται η επίδρασή τους στη συμπεριφορά της γέφυρας. Η παραμετρική διερεύνηση -

σύγκριση που πραγματοποιήθηκε ήταν μεταξύ της γέφυρας με τον οπλισμό που επαληθεύτηκε στο προηγούμενο βήμα με την ίδια γέφυρα με μειωμένο ποσοστό οπλισμού, αλλά με την εισαγωγή των χιαστί συνδέσμων.

Τέλος, στη γέφυρα που έχει υποστεί όλες αυτές τις αναλύσεις εισάγεται και ένα πραγματικό επιταχυνσιογράφημα για την υλοποίηση της δυναμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας και της εύρεσης της συμπεριφοράς της σε έναν πραγματικό σεισμό. Το επιταχυνσιογράφημα που εισάγεται είναι αυτό του σεισμού Imperial Valley που πραγματοποιήθηκε το 1979 και καταγράφηκε από το σταθμό El Centro Array #4. Η έντασή του ήταν 6,53 βαθμοί της κλίμακας Ρίχτερ. Για αυτήν την ανάλυση έγινε η διαστασιολόγηση των εφεδράνων της γέφυρας. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε σύγκριση της μονωμένης και της μη – μονωμένης γέφυρας σε κρίσιμα εντατικά μεγέθη της κατασκευής και σε κρίσιμες μετακινήσεις.

ABSTRACT

There are a lot of ways to classify bridges. The most important is their structural form. Truss bridges, arch bridges, cable – stayed bridges and suspension bridges distinguish a wide spectrum of

The present diploma thesis deals with cable – stayed bridges and their static and dynamic behaviour. The principal structural element of cable – stayed bridges is the cable and its behaviour. Cable is a non – linear structural element as its response is determined by a non-linear constitutive law and due to its flexibility equilibrium is established on the deformed configuration. Cable – stayed bridges consist of cables loaded only with axial load and their self – weight. An axially loaded cable can be compared with a tensile bar of a truss. This comparison concludes to an important result. A non – linear cable may be approximated by a linear bar -truss with the insertion of an equivalent modulus of elasticity (tangent modulus or secant modulus).

Subsequently, another comparison is performed. There are two ways to simulate the geometry of a cable. The first way is by employing the actual catenary configuration and the second one with an approximate parabolic configuration i.e. a second order curve.

These analyses have been made to find an optimal solution about the prestress of the cables, which is required for the simulation of the examined bridge. Quincy Bayview Bridge of Illinois in USA is the bridge that was analyzed by means of the FEM software CSiBridge 2016.

As the correct prestress force of the cables has been found, the percentage of pylons' reinforcement has been investigated by performing Pushover analyses. Pushover analyses find the plastic hinges condition and evaluate the seismic performance of the bridge.

Then, the influence of stiffening braces added to the pylons of the bridge is investigated. Pushover analysis used again to contrast the seismic performance of the bridge with braces and lower percentage of reinforcement with the bridge without braces and the reinforcement, which was found in the previous step.

Finally, a time history inelastic dynamic analysis is performed and the performance of the bridge in a real seismic event is evaluated. For this analysis, the design of the bearings of the bridge was carried out. A comparison with the isolated and non – isolated bridge has been made.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία επιδιώκεται η μη – γραμμική στατική και δυναμική ανάλυση μιας καλωδιωτής γέφυρας, μέσω της προσομοίωσής της σε εξειδικευμένο πρόγραμμα ανάλυσης. Εξετάζονται διαφορετικές περιπτώσεις με σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων αναφορικά με τη συμπεριφορά της γέφυρας και των επιμέρους στοιχείων της,

Η γέφυρα που επιλέχθηκε για τη παρούσα ανάλυση είναι η καλωδιωτή γέφυρα Quincy Bayview στο Illinois της Αμερικής. Θεωρήθηκε προτιμότερο να εξεταστεί η συγκεκριμένη γέφυρα προκειμένου τα συμπεράσματα να έχουν ρεαλιστικό χαρακτήρα, αλλά συνάμα και γενικό, αφού η δομή της συναντάται συχνά στις καλωδιωτές γέφυρες.

Το πρόγραμμα που προσομοιώθηκε η γέφυρα ήταν το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων CSiBridge 2016 το οποίο αποτελεί προσάρτημα του λογισμικού Sap. Ο λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο πρόγραμμα ήταν η ευκολία που προσφέρει στο χρήστη στην προσομοίωση και στην ανάλυση των γεφυρών.

Έτσι, προέκυψαν τα εξής ερωτήματα προς διερεύνηση τα οποία γίνεται προσπάθεια να απαντηθούν στην παρούσα εργασία. Αρχικά, ποιος είναι ο βέλτιστος τρόπος εισαγωγής των καλωδίων στη γέφυρα; Έπειτα, ποιο είναι το ιδανικό ποσοστό οπλισμού των πυλώνων της γέφυρας προκειμένου να επιτυγχάνεται η καλύτερη συμπεριφορά της ως προς τις σεισμικές δράσεις; Ακόμα, πώς αλλάζει η συμπεριφορά της γέφυρας πάλι ως προς το σεισμό με την εισαγωγή χιαστί συνδέσμων δυσκαμψίας στους πυλώνες; Τι θα συμβεί αν μειωθεί ο οπλισμός στους πυλώνες και εισαχθούν οι χιαστί σύνδεσμοι; Η γέφυρα θα έχει την ίδια συμπεριφορά με τη συμπεριφορά που είχε με τον αρχικό οπλισμό της; Τέλος, πώς επηρεάζει τα στοιχεία της γέφυρας η εφαρμογή δυναμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας με πραγματικό επιταχυνσιογράφημα;

Συνεπώς, στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε ιστορικά στοιχεία τόσο γενικά των γεφυρών όσο και ειδικά των καλωδιωτών γεφυρών. Παράλληλα, παρουσιάζεται

η ιεράρχηση των γεφυρών ως προς κάποια βασικά χαρακτηριστικά τους, όπως το υλικό κατασκευής τους, τη μορφή της δομής τους κ.ά..

Στο 2^ο Κεφάλαιο εξετάζεται το καλώδιο ως μεμονωμένο δομικό στοιχείο. Μέσα από την ανάλυση του, προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα, που επιδρούν στην συνέχεια της εργασίας. Οριστικοποιούνται, δηλαδή, οι διάφοροι τρόποι εισαγωγής των καλωδίων που θα εξεταστούν στη συνέχεια και τα κριτήρια ελέγχου.

Στο 3^ο Κεφάλαιο, εκτελείται η προσομοίωση της καλωδιωτής γέφυρας και παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν τόσο για την εισαγωγή της στο πρόγραμμα όσο και για την μετέπειτα ανάλυσή της. Διευκρινίζονται τα υλικά κατασκευής της, τα χαρακτηριστικά των κύριων στοιχείων της και οι συνθήκες στήριξής της. Στη συνέχεια, αναφέρονται αναλυτικά τα φορτία και οι συνδυασμοί τους που λήφθηκαν υπόψη για την ανάλυση της κατασκευής.

Στο 4^ο Κεφάλαιο διεξάγεται η ανάλυση της γέφυρας. Πρώτα, βρίσκεται ο βέλτιστος τρόπος εισαγωγής των καλωδίων ως προς την προένταση που πρέπει να τους επιβληθεί κατά την αρχική τοποθέτησή τους. Έπειτα, βρίσκεται ο κατάλληλος οπλισμός των πυλώνων ώστε η γέφυρα να παρουσιάζει την επιθυμητή συμπεριφορά ως προς το σεισμό, που ορίζουν οι κανονισμοί. Στη συνέχεια, εισάγονται χιαστί σύνδεσμοι δυσκαμψίας στους πυλώνες και εξετάζεται η επιρροή τους στη συμπεριφορά της γέφυρας. Τέλος, πραγματοποιείται διαστασιολόγηση των εφεδράνων της γέφυρας και γίνεται σύγκριση μεταξύ της μονωμένης και της μη – μονωμένης γέφυρας μέσω της ιδιομορφικής δυναμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας.

Στο 5^ο Κεφάλαιο καταγράφονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν την εργασία αλλά και οι τομείς που θα μπορούσε να υπάρξει κάποια μελλοντική διερεύνηση.

Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι στην εργασία αυτή και στην ανάλυση της εν λόγω γέφυρας δεν λήφθηκε υπόψη η επίδραση των εξωτερικών φορτίσεων των θερμοκρασιακών μεταβολών και του ανέμου. Επίσης, στη προσομοίωση της γέφυρας δεν χρησιμοποιήθηκαν εφέδρανα, αλλά απλές στηρίξεις.

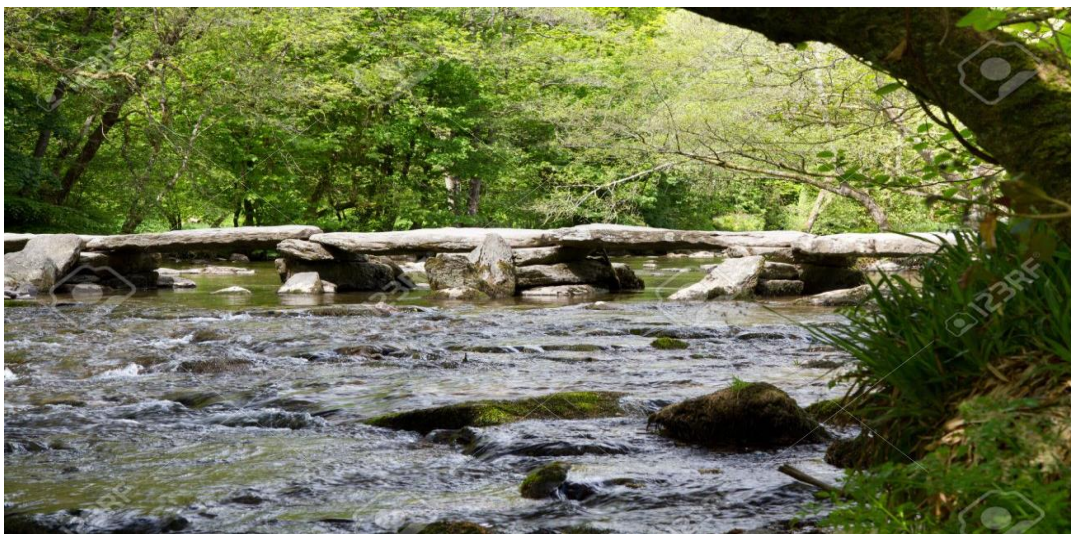
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτήν την εργασία παρουσιάζουν ενδιαφέρον, καθώς μπορούν να φανούν χρήσιμα σε κάποιον που ασχολείται με το καλώδιο ως δομικό στοιχείο γενικότερα. Ωστόσο, είναι δύσκολο να καλυφθούν όλες

οι πτυχές του προβλήματος στο πλαίσιο μιας διπλωματικής εργασίας και έτσι μπορεί κάποιος να ασχοληθεί με περαιτέρω διερεύνηση του όντως ενδιαφέροντος αυτού θέματος.

1ο Κεφάλαιο: Γενικά στοιχεία γεφυρών

1.1 Ιστορικά στοιχεία

Οι γέφυρες εκτιμάται ότι υπήρχαν πριν τον άνθρωπο. Η ίδια η φύση φρόντισε για τη δημιουργία τους, παραδείγματος χάρη με τη ρίψη ενός κορμού δέντρου ή μιας σειράς βράχων μέσα σε ένα ποτάμι. Έτσι, χωρίς να παρεμποδίζεται η ροή του, σχηματιζόταν πέρασμα αιτιολογώντας την αρχαία ετυμολογία της λέξης γέφυρα = γέα + φυράω (φυράω - ὦ = σχηματίζω κάτι για χρήση, διαμορφώνω ανάχωμα). Παρόμοιους τρόπους, βέβαια, χρησιμοποίησε και ο πρωτόγονος άνθρωπος, καθώς δεν είχε τα μέσα ή την τεχνογνωσία για κάτι πιο σύνθετο (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1: Γέφυρα κατασκευασμένη από βράχους

Με το πέρασ των χρόνων, όμως, η ανάγκη για την προσπέλαση μεγαλύτερων φυσικών εμποδίων αυξήθηκε. Έτσι, ο άνθρωπος άρχισε να κατασκευάζει γέφυρες από ξύλο ή πέτρα που υπήρχαν σε αφθονία στο περιβάλλον. Τα πρώτα δείγματα γεφυρών βρέθηκαν στις ανασκαφές που έγιναν στη Βαβυλώνα και τη Κνωσό και χρονολογούνται περί το 2500 π.Χ. Ωστόσο, η πρώτη σημαντική μορφολογική και στατική εξέλιξη των γεφυρών τοποθετείται στη Μυκηναϊκή περίοδο, όπου σώζονται γέφυρες ανοίγματος 1 – 2,5m. Η εξέλιξη των γεφυρών συνεχίστηκε και διαπιστώθηκε αύξηση του γεφυρούμενου ανοίγματος οδηγώντας στην επινόηση του

απλού τόξου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η γέφυρα του Ροδινού στη Ρόδο ανοίγματος 8m που κτίστηκε το 227 π.Χ (Μιχάλτσου, 2005).

Η τεχνογνωσία αυτή του τόξου μεταφέρθηκε στους Ρωμαίους, όπου την τελειοποίησαν κατασκευάζοντας γέφυρες με αψίδες προκειμένου να εξοπλίσουν το οδικό τους δίκτυο με όσο το δυνατόν πιο στέρεες κατασκευές. Χαρακτηριστικά των κατασκευών αποτελούν οι στρογγυλές αψίδες και οι ορθογώνιες πέτρινες πλάκες, τοποθετημένες συμμετρικά. Παραδείγματα τέτοιων γεφυρών στην Ιταλία είναι η Μουλβία γέφυρα (109 π.Χ.) στον ποταμό Τίβερη μήκους 150,9m (Εικόνα 1.2) και η γέφυρα Σεν Μαρτίν (70 - 40 π.Χ.) στην κοιλάδα Αόστα ανοίγματος 31m (Εικόνα 1.3). Τέλος, η γέφυρα Αλκάνταρα (103 - 104 μ.Χ.) στον ποταμό Τάγο στην Ισπανία, με 190m μήκος, αποτελεί ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα ρωμαϊκής αρχιτεκτονικής (Εικόνα 1.4). Η κατασκευαστική αυτή τεχνική των Ρωμαίων για τις γέφυρες, μεταφέρθηκε στη συνέχεια σε ολόκληρη την Ευρώπη.



Εικόνα 1.2: Μουλβία γέφυρα



Εικόνα 1.3: Γέφυρα Σεν Μαρτίβ



Εικόνα 1.4: Γέφυρα Αλκάνταρα

Κατά τον Μεσαίωνα οι γέφυρες ήταν λιθοδομημένες και συχνά φτιάχνονταν με οξυκόρυφες αψίδες, αποκλίνοντας από τις κατασκευαστικές αρχές των Ρωμαίων. Χαρακτηρίζονται από πρωτοτυπία αν και έχουν κάποιες ατέλειες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου συστήματος δόμησης αποτελεί η γέφυρα της Αβινιόν ή αλλιώς Σεν Μπενεζέ (1117 - 1185 μ.Χ., Εικόνα 1.5). Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί η μοναδικότητα της κατασκευής της γέφυρας Άντζι (6^{ος} αιώνα μ.Χ.), στην Κίνα, η οποία κατασκευάστηκε με μία αψίδα από πέτρινους κυβόλιθους χωρίς συνδετικό

υλικό, ενώ εντύπωση προκαλούν τα προηγμένα αετώματα που διαθέτει (Εικόνα 1.6).



Εικόνα 1.5: Γέφυρα Αβινιόν



Εικόνα 1.6: Γέφυρα Αντζι

Ο ρόλος των γεφυρών δεν ήταν απλά λειτουργικός, αλλά συχνά ο κατασκευαστής ενδιαφερόταν για το αισθητικό αποτέλεσμα της κατασκευής του. Οι γέφυρες που κατασκευάστηκαν κατά τον 15^ο και 16^ο αιώνα στη Βενετία και άλλες πόλεις της Ιταλίας είναι αντιπροσωπευτικές της διάθεσης να διακοσμήσουν περισσότερο παρά να δώσουν έμφαση στο στατικό κομμάτι. Η γέφυρα Βέκιο (1345

μ.Χ.) στη Φλωρεντία αποτελεί ένα τέτοιο δείγμα, με μήκος 95m. Οι χαμηλές αψίδες υποστηρίζουν την ανωδομή πάνω στην οποία βρίσκονται καταστήματα, γεγονός που αποτελεί καινοτομία (Εικόνα 1.7). Η γέφυρα του Ριάλτο στη Βενετία (1588 - 1591 μ.Χ.) ξεχωρίζει για την μεγάλη πέτρινη αψίδα της που επιστεγάζεται από μια εντυπωσιακή ανωδομή (Εικόνα 1.8).



Εικόνα 1.7: Γέφυρα Βέκιο



Εικόνα 1.8: Γέφυρα του Ριάλτο

Κατά τον 17^ο και 18^ο αιώνα οι γέφυρες ήταν μέτριας κατασκευής και δεν είχαν ιδιαίτερη πρωτοτυπία στην κατασκευή τους. Η Πον Νεφ, για παράδειγμα, στο

Παρίσι (1578 - 1604) είναι η πιο παλιά της πόλης και αποτελείται από δύο ξεχωριστά χτίσματα που ενώνονται με πεζόδρομο. Το μήκος της ανέρχεται στα 232m (Εικόνα 1.9).



Εικόνα 1.9: Γέφυρα Πον Νεφ

Για την κατάρτιση των μηχανικών που κατασκευάζουν γέφυρες δημιουργήθηκε το Σώμα Γεφυρών και Φραγμάτων (1716), που αντικαταστάθηκε αργότερα από την αντίστοιχη Σχολή (1747), ενώ στη συνέχεια ιδρύθηκε το Πολυτεχνείο (1795). Από τότε θεσμοθετήθηκαν διαδικασίες και τεχνικές για την επεξεργασία της πέτρας. Βασισμένος στη καινούρια μεθοδολογία ο Περονέ έκανε μια νέα αρχή στην κατασκευή γεφυρών στη Γαλλία, ενώ την ίδια εποχή στην Αγγλία, οι μηχανικοί δραστηριοποιούνται στα εργοτάξια (Perino & Faraggiana, 2005).

Με τη Βιομηχανική Επανάσταση άρχισε η χρήση του σιδήρου και κατασκευάστηκε η πρώτη γέφυρα χυτοσιδήρου ανάμεσα στο 1776 και στο 1779 επί του ποταμού Σέβερν (Εικόνα 1.10). Κατά τον 19^ο αιώνα, με την ανάπτυξη των σιδηροδρόμων, οι γέφυρες γνωρίζουν ιδιαίτερη άνθιση. Παράδειγμα αποτελεί η σιδηροδρομική γέφυρα Φορθ Ρέιλ (1883-1890) στη Μεγάλη Βρετανία μήκους 2500m (Εικόνα 1.11).



Εικόνα 1.10: Γέφυρα Κούλ-Μπρουκντεϊλ.



Εικόνα 1.11: Γέφυρα Φορθ Ρέιλ.

Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα εφευρέθηκε και ξεκίνησε η εφαρμογή του οπλισμένου σκυροδέματος. Η χρήση αυτού του νέου υλικού διαδόθηκε στην Ευρώπη και τον 20^ο αιώνα αποδείχθηκε πειραματικά η ορθότητα των θεωρητικών προσεγγίσεων και υπολογισμών που επιτάχυναν την αξιοποίησή του. Παράλληλα, τη εποχή αυτή το μέταλλο αρχίζει να ανταγωνίζεται το οπλισμένο σκυρόδεμα στην κατασκευή μεταλλικών κατασκευών. Χαρακτηριστικές γέφυρες της εποχής εκείνης ήταν η γέφυρα Ζαλγκινατομπελ (1930) από οπλισμένο σκυρόδεμα στην Ελβετία (Εικόνα

1.12) και η γέφυρα Γκόλντεν Γκέιτ (1933 - 1937) στις Η.Π.Α. από χάλυβα (Εικόνα 1.13).



Εικόνα 1.12: Γέφυρα Ζαλγκινατομπέλ



Εικόνα 1.13: Γέφυρα Γκόλντεν Γκέιτ

Από το 1940 και μετά το προεντεταμένο σκυρόδεμα είχε ιδιαίτερη απήχηση ως κατασκευαστικό υλικό και αναγνωρίστηκε επίσημα από τη Διεθνή Ομοσπονδία Προέντασης. Οι γέφυρες που κατασκευάστηκαν στη συνέχεια είναι θεαματικές και οι αρχές κατασκευής τους βελτιώνονται συνεχώς συνδυάζοντας καμπύλες και ευθείες γραμμές. Παράδειγμα γέφυρας από προεντεταμένο σκυρόδεμα αποτελεί η

γέφυρα Μαρακάμπο (Εικόνα 1.14) στη Βενεζουέλα (1958 - 1962). Ωστόσο, το έργο που δηλώνει ξεκάθαρα τις δυνατότητες της γεφυροποιίας σήμερα δεν είναι άλλο από τη γέφυρα Ρίου - Αντιρρίου (1997 - 2004) στην Ελλάδα με συνολικό μήκος 2883m (Εικόνα 1.15).



Εικόνα 1.14: Γέφυρα Μαρακάμπο



Εικόνα 1.15: Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου

Τέλος, από το 1980 παρατηρείται μια έξαρση στην κατασκευή πεζογεφυρών, καθώς οι ανάγκες διάβασης οδών ταχεία κυκλοφορίας για τους πεζούς αυξάνονται σημαντικά. Στην κατασκευή τους υπάρχει ελευθερία ως προς την επιλογή του

υλικού και στόχος είναι η εξυπηρέτηση των αναγκών των ατόμων που θα τη χρησιμοποιούν όσον αφορά τη λειτουργικότητα, όσο και το αισθητικό αποτέλεσμα που μπορούν να προσφέρουν. Στην Ελλάδα, ιδιαίτερα κομψή, αλλά και απαραίτητη για τη προστασία των πεζών είναι η πεζογέφυρα του Καλατράβα (2004) στην Αθήνα ανοίγματος 94m (Εικόνα 1.16).



Εικόνα 1.16: Πεζογέφυρα Καλατράβα



Εικόνα 1.17: Καλωδιωτή Πεζογέφυρα Κολλεγίου επί της Λ. Κηφισίας

1.2 Κατάταξη γεφυρών

Η περιγραφή ενός είδους γέφυρας είναι ένα θέμα διφορούμενο, καθώς θα μπορούσε να μην είναι άμεσα αντιληπτή η πραγματική φύση της κατασκευής ή τα μηχανικά χαρακτηριστικά της γέφυρας. Οι γέφυρες μπορούν να χαρακτηριστούν ή να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους, ανάλογα με το στόχο της ταξινόμησης. Η ανάγκη της ταξινόμησης των γεφυρών έχει αυξηθεί, καθώς οι γέφυρες πλέον έχουν εξελιχθεί από τις απλές γέφυρες δοκού, σε πιο πολύπλοκες, όπως οι καλωδιωτές και οι κρεμαστές γέφυρες. Η κατάταξη γίνεται με βάση την ανωδομή των γεφυρών. Η ανωδομή ταξινομείται σύμφωνα με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (στη συνέχεια παρουσιάζονται μόνο οι βασικές κατηγορίες) (Taly, 1998):

- Το υλικό κατασκευής
- Τα μήκη των ανοιγμάτων
- Τη μορφή της δομής
- Τα είδη των ανοιγμάτων

1.2.1 Υλικό Κατασκευής

Τα υλικά με τα οποία κατασκευάζονται οι γέφυρες είναι το ξύλο, το σκυρόδεμα και ο χάλυβας. Συνήθως, όμως, χρησιμοποιείται και συνδυασμός αυτών των υλικών. Για παράδειγμα, ένας συχνός συνδυασμός είναι η κατασκευή μιας γέφυρας με κατάστρωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα και κύριες δοκούς από χάλυβα.

Γέφυρες από χάλυβα

Οι γέφυρες, οι οποίες είναι αποκλειστικά κατασκευασμένες από χάλυβα, είναι οι δικτυωτές γέφυρες, οι σιδηροδρομικές και μερικές καλωδιωτές και κρεμαστές γέφυρες. Η πλειοψηφία είναι φτιαγμένες από συνδυασμό υλικών, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Γέφυρες από σκυρόδεμα

Οι γέφυρες από σκυρόδεμα είναι γέφυρες οι οποίες είναι κατασκευασμένες από οπλισμένο ή/και προεντεταμένο σκυρόδεμα. Όλα τα στοιχεία μιας γέφυρας από οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελούνται εξ ολοκλήρου από οπλισμένο σκυρόδεμα. Μια απλή γέφυρα μικρού σχετικά ανοίγματος κατασκευασμένη από προενταταμένο σκυρόδεμα αποτελείται από κατάστρωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα που στηρίζεται σε προεντεταμένες δοκούς. Για γέφυρες μεσαίου ανοίγματος χρησιμοποιούνται κιβωτιοειδείς διατομές από προεντεταμένο σκυρόδεμα. Σε αυτή την περίπτωση τα πάνω πέλματα λειτουργούν ως το κατάστρωμα της γέφυρας και μπορούν να καλύψουν όλο το πλάτος που χρειάζεται. Τέλος, τοξωτές γέφυρες χτίζονται επίσης από οπλισμένο σκυρόδεμα και τελευταία ξεκίνησε η κατασκευή καλωδιωτών γεφυρών από προεντεταμένο σκυρόδεμα.

Γέφυρες από ξύλο

Συνηθισμένες ξύλινες γέφυρες είναι οι δικτυωτές. Όλα τα στοιχεία αυτών των γεφυρών είναι αποκλειστικά από ξύλο. Σήμερα, οι ξύλινες γέφυρες χτίζονται σπάνια.

1.2.2 Μήκη ανοιγμάτων

Οι γέφυρες μπορούν να ιεραρχηθούν ανάλογα με το μήκος της (συνεχούς) απόστασης που πρέπει να γεφυρώσουν, σε μικρού, μεσαίου και μεγάλου ανοίγματος. Δεν υπάρχουν συγκεκριμένα κριτήρια που οδηγούν σε αυτόν το διαχωρισμό, ωστόσο μια κοινή πρακτική είναι η εξής:

- Μικρού ανοίγματος γέφυρες 5 – 40 m
- Μεσαίου ανοίγματος γέφυρες 40 – 125 m
- Μεγάλου ανοίγματος γέφυρες > 125 m

Οι γέφυρες με άνοιγμα μικρότερο των 5m χαρακτηρίζονται ως οχετοί ή διαβάσεις.

Η κατάταξη αυτή γίνεται για να προσδιορισθούν ποιες δομικές μορφές (βλ. παρακάτω) είναι κατάλληλες για συγκεκριμένα μήκη ανοιγμάτων. Για παράδειγμα, μια καλωδιωτή ή μια κρεμαστή γέφυρα χρησιμοποιείται μόνο για μεγάλα ανοίγματα και δεν θα προτιμάται για μικρά ανοίγματα. Αντίθετα, μια απλή γέφυρα με δοκούς επιλέγεται για μικρά ανοίγματα και όχι για μεγάλα, καθώς είναι περιορισμένα τα μεγέθη και τα μήκη των δοκών που παράγονται από τη βιομηχανία.

Οι μικρού ανοίγματος γέφυρες είναι είτε ενός ανοίγματος γέφυρες είτε μέρη γεφυρών πολλών μικρών αμφιέρειστων ανοιγμάτων.

1.2.3 Μορφή Δομής

Η κατηγοριοποίηση αυτή είναι από τις πιο σημαντικές, καθώς σύμφωνα με αυτήν έχουν αναπτυχθεί οι μεθοδολογίες ανάλυσης των γεφυρών. Η μορφή της δομής αναφέρεται στο μηχανισμό αυτόν που μεταβιβάζει τα φορτία, που ασκούνται στη γέφυρα, στη θεμελίωση. Έτσι, κάθε δομή ακολουθεί τη δικιά της διαδρομή για να μεταφέρει τα φορτία της. Συνεπώς, οι γέφυρες μπορούν να ταξινομηθούν ως ακολούθως:

Γέφυρες με δοκούς

Η γέφυρα με δοκούς αποτελείται από κατάστρωμα που υποστηρίζεται από δοκούς και αυτές με τη σειρά τους υποστηρίζονται στα βάθρα. Όλα τα φορτία της γέφυρας μεταφέρονται από το κατάστρωμα στις δοκούς και από τις δοκούς στα βάθρα. Το κατάστρωμα, συνήθως, είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα και οι δοκοί από χάλυβα, οπλισμένο ή προεντεταμένο σκυρόδεμα. Οι δοκοί τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε ο διαμήκης άξονας τους να είναι παράλληλος με την κυκλοφορία. Η πλάκα σχεδιάζεται έτσι ώστε να κάμπτεται σε επίπεδο κάθετο από αυτό που κάμπτονται οι δοκοί. Χρησιμοποιείται, κυρίως, για μικρά ανοίγματα, ωστόσο ως κατασκευή αποτελεί το βασικό δομικό στοιχείο όλων των γεφυρών.

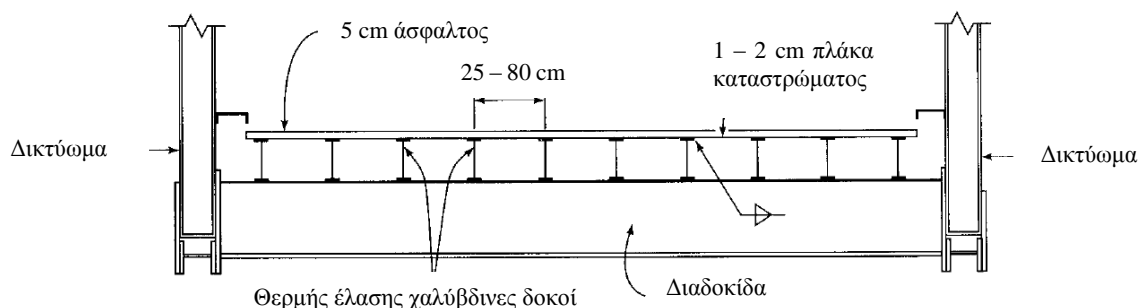
Υπάρχουν και άλλες μορφές δοκών, όπως σχήματος T (μονού ή διπλού) και κιβωτιοειδούς διατομής. Αυτές σχεδιάζονται ως αμφιέρειστα ανοίγματα και η

πλάκα είναι μονολιθικά συνδεδεμένη με τη δοκό. Και αυτές οι γέφυρες είναι για μικρά ανοίγματα, όμως οι προεντεταμένες κιβωτιοειδείς δοκοί μπορούν να κατασκευαστούν τμηματικά (προβολοδρόμηση) για να καλύψουν μεσαία ανοίγματα.

Γέφυρες με ορθότροπη πλάκα καταστρώματος

Οι γέφυρες με ορθότροπη πλάκα καταστρώματος αποτελούνται από πλάκα καταστρώματος η οποία έχει διαφορετική συμπεριφορά όσον αφορά τις ελαστικές ιδιότητές της σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις.

Η τεχνολογία αυτή ξεκίνησε το 1930 από το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Μεταλλικών Κατασκευών δημιουργώντας ένα σύστημα με χαλύβδινη πλάκα καταστρώματος προκειμένου να μειωθεί το ίδιο βάρος στις οδικές γέφυρες. Αυτό το σύστημα αποτελούταν από μία χαλύβδινη πλάκα καταστρώματος, η οποία συγκολλάται πάνω σε διαμήκεις δοκούς διπλού – ταν και υποστηρίζεται ή πλαισιώνεται από εγκάρσιες διαδοκίδες (Σχήμα 1.1). Η πλάκα καταστρώματος προοριζόταν για τη μεταβίβαση των τοπικών φορτίων κυκλοφορίας κατακόρυφα στις δοκούς διπλού – ταν και για την αντίσταση στις τάσεις που αναπτύσσονταν στις διαμήκεις δοκούς λειτουργώντας ως το πάνω πέλμα τους. Ωστόσο, η πλάκα καταστρώματος δεν συμμετείχε στην αντίσταση των τάσεων που αναπτύσσονταν στις διαδοκίδες και συνεπώς δεν αύξανε τη δυσκαμψία και την αντοχή των πρωτευόντων στοιχείων της γέφυρας. Έτσι, το σύστημα αυτό δεν προσέφερε την προβλεπόμενη οικονομία.



Σχήμα 1.1: Διατομή ενός τυπικού συστήματος γέφυρας με ορθότροπο κατάστρωμα

Παρόλα αυτά, η έρευνα πάνω σε αυτό το σύστημα έδειξε ότι η φέρουσα ικανότητα μιας χαλύβδινης πλάκας, φορτισμένης με ένα τροχό αμαξώματος, ήταν πολύ μεγαλύτερη από αυτή που αναμενόταν από την ελαστική θεωρία. Αυτό το σύστημα εξελίχθηκε από Γερμανούς μηχανικούς, οι οποίοι έκαναν μια λεπτή χαλύβδινη πλάκα πιο δύσκαμπτη και στις δύο κατευθύνσεις χρησιμοποιώντας ένα στενό πλέγμα συγκολλημένων ράβδων μεταξύ τους, αντί για την αύξηση της δυσκαμψίας μόνο στην κατεύθυνση των διαμήκων δοκών. Οι μηχανικοί ήξεραν ότι η απαραίτητη οικονομία θα υλοποιούταν μόνο αν η δύσκαμπτη πλάκα βοηθούσε και αυτή στη παραλαβή των κύριων φορτίων της γέφυρας.

Η χρήση ορθότροπου καταστρώματος χρησιμοποιείται σε όλες σχεδόν τις μεγάλου ανοίγματος γέφυρες, όπως κρεμαστές και καλωδιωτές γέφυρες.

Δικτυωτές γέφυρες

Από κατασκευαστική σκοπιά, τα φορτία στο κατάστρωμα μιας γέφυρας παραλαμβάνονται από τις δοκούς καμπτικά ως ροπές. Η ροπή αντοχής των δοκών αυτών είναι περιορισμένη εξαιτίας των προβλημάτων της κατασκευής, της ανέγερσης και της μεταφοράς. Συνήθως, το μέγιστο μήκος μιας δοκού για έναν οικονομικό σχεδιασμό μπορεί να είναι 45m και η διατομή να έχει ύψος έως 3,5m. Όταν απαιτούνται μεγαλύτερα ύψη δοκών οι δικτυωτές γέφυρες πρέπει να προτιμώνται. Τα μέλη ενός δικτυώματος υποβάλλονται μόνο σε ορθές τάσεις και έτσι μπορούν να μεταφέρουν μεγαλύτερο φορτίο με μικρότερη ποσότητα χάλυβα.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το κύριο υλικό των σύγχρονων δικτυωτών γεφυρών είναι ο χάλυβας. Οι δικτυωτές γέφυρες από προεντεταμένο χάλυβα είναι μια σύγχρονη μέθοδος, όπου οι κάτω χορδές προεντείνονται με θλίψη για να ισορροπήσουν τις εφελκυστικές τάσεις που δημιουργούν το ίδιο βάρος και τα φορτία κυκλοφορίας. Ένας τρόπος για την εισαγωγή πρόθλιψης στις κάτω χορδές των δικτυωμάτων είναι η σύνδεσή τους με μέλη από χάλυβα που έχουν προενταθεί σε εφελκυσμό.

Οι δικτυωτές γέφυρες μπορούν να αποτελούνται από αμφιέριστα ή συνεχή ανοίγματα. Στη τελευταία περίπτωση, τα ακραία δικτύωματα λειτουργούν ως πρόβολοι που συγκρατούν το κεντρικό άνοιγμα.

Ακόμα, οι δικτυωτές γέφυρες ταξινομούνται ανάλογα με τη διάταξη των χορδών και την κατεύθυνση των διαγώνιών τους. Οι πάνω χορδές - πέλματα μπορεί να είναι παράλληλες με τις κάτω με αποτέλεσμα δικτύωματα σταθερού ύψους. Οι χορδές ουσιαστικά αποτελούν ένα ζευγάρι που αντιστέκεται στις καμπτικές ροπές που προκαλούνται από τα φορτία. Για μεγαλύτερα ανοίγματα απαιτείται μεγαλύτερη αντοχή και έτσι για οικονομία το ύψος του δικτύωματος γίνεται μεγαλύτερο στα σημεία των μέγιστων ροπών δημιουργώντας ένα δικτύωμα μεταβλητού ύψους. Για μεγαλύτερη οικονομία η πάνω χορδή μπορεί να προσεγγίσει σχηματικά μια παραβολή, όπως ακριβώς είναι και το διάγραμμα ροπών μιας δοκού υπό ομοιόμορφο φορτίο.

Ωστόσο, μεγάλα ανοίγματα απαιτούν μεγάλο ύψος δικτύωματος οδηγώντας σε ανεπίτρεπτες κλίσεις των διαγώνιων του δικτύωματος. Η επιθυμητή κλίση μιας διαγώνιου είναι $45^{\circ} - 60^{\circ}$. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι τα δικτύωματα μορφής Κ. Κάθε φάτνωμα αποτελείται από δύο διαγώνιους που συναντιούνται στο μέσον ενός ορθοστάτη. Έτσι κάθε διαγώνιος έχει τη μισή κλίση από ότι αν υπήρχε μόνο μία στο φάτνωμα.

Άλλη κατηγοριοποίηση γίνεται ανάλογα με τη θέση του καταστρώματος ως προς τους πάνω ή κάτω κόμβους του δικτύωματος. Σε όλες τις δικτυωτές γέφυρες τα φορτία του καταστρώματος μεταφέρονται στους κόμβους του δικτύωματος μέσω των διαδοκίδων που συνδέουν τα δύο δικτύωματα. Υπάρχουν δύο κύριες σχετικές θέσεις. Η 1^η είναι το δικτύωμα να βρίσκεται εξ ολοκλήρου κάτω από το κατάστρωμα της γέφυρας πράγμα που βελτιώνει τη θέα για τους οδηγούς και προτιμάται στις οδικές γέφυρες. Η 2^η είναι το δικτύωμα να βρίσκεται ολόκληρο πάνω από το κατάστρωμα και οι πάνω κόμβοι των δικτυωμάτων να συνδέονται με οριζόντιους συνδέσμους δυσκαμψίας. Αυτή η διάταξη οδηγεί σε μια τρισδιάστατη κατασκευή.

Σε μια δικτυωτή γέφυρα το ίδιο βάρος ενός μέλους της αποτελεί μεγάλο ποσοστό του συνολικού φορτίου που δέχεται το μέλος αυτό.

Τέλος, πέρα από τα θετικά στοιχεία που αναφέρθηκαν υπάρχουν και μειονεκτήματα. Έχουν χτιστεί πολλές λειτουργικές δικτυωτές γέφυρες, αλλά οι περισσότερες υστερούν εμφανισιακά. Μεγάλες διατομές ποικίλων διαστάσεων προς όλες τις κατευθύνσεις δίνουν μια αίσθηση πλήρους αταξίας. Επίσης, επιβάλλεται συχνή συντήρηση και βαφή των μελών του δικτύωματος για την αποφυγή της διάβρωσης, καθώς είναι συνεχώς εκτεθειμένα στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα φαινόμενα κόπωσης των μελών αλλά και των μέσων συνδέσεως αποτελούν επίσης ένα πρόσθετο κρίσιμο πρόβλημα των δικτυωτών γεφυρών. Έτσι, έχει αποδειχθεί ότι το κόστος για όλη τη διάρκεια ζωής μιας δικτυωτής γέφυρας είναι αποτρεπτικά μεγάλο.

Γέφυρες άκαμπτων πλαισίων

Οι γέφυρες άκαμπτων πλαισίων αποτελούνται από ανωδομές που στηρίζονται σε μονολιθικά συνδεδεμένους κατακόρυφους ή λοξούς στύλους και προτιμώνται σε μεσαίου ανοίγματος γέφυρες. Πολλές γέφυρες άκαμπτων πλαισίων έχουν χτιστεί μέχρι σήμερα τόσο από χάλυβα όσο και από σκυρόδεμα.

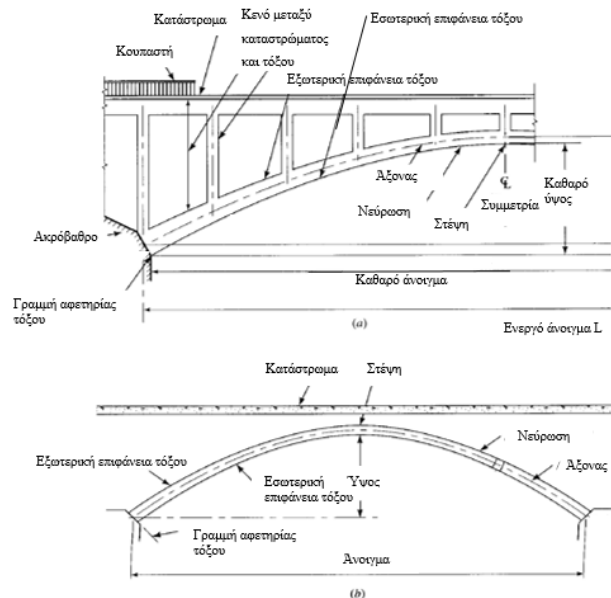
Μια γέφυρα άκαμπτου πλαισίου μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένα αρθρωτό ή πακτωμένο τόξο στα άκρα του. Η μόνη διαφορά είναι ότι το τόξο έχει τη μορφή μιας συνεχούς καμπύλης, ενώ μια γέφυρα άκαμπτου πλαισίου με κεκλιμένους στύλους έχει τη μορφή τραπεζίου και με κατακόρυφους στύλους έχει τη μορφή ορθογωνίου.

Για την υλοποίηση συνεχών γεφυρών χρησιμοποιώντας μια σειρά από δύσκαμπτα χαλύβδινα πλαίσια αντί για μόνο ένα, έχουν αναπτυχθεί καινοτόμες ιδέες. Σε τέτοιες περιπτώσεις τα ακραία ανοίγματα γίνονται ενδιάμεσα ανοίγματα ανάμεσα στα κύρια ανοίγματα. Αυτά τα ενδιάμεσα ανοίγματα μοιάζουν με το ελληνικό γράμμα δέλτα ανεστραμμένο (∇) όταν οι κεκλιμένοι στύλοι είναι στραμμένοι προς τα έξω από το κύριο άνοιγμα και ονομάζονται πλαίσια – δέλτα. Για την κατασκευή αυτού του τύπου των γεφυρών χρησιμοποιείται τόσο το σκυρόδεμα όσο και ο χάλυβας.

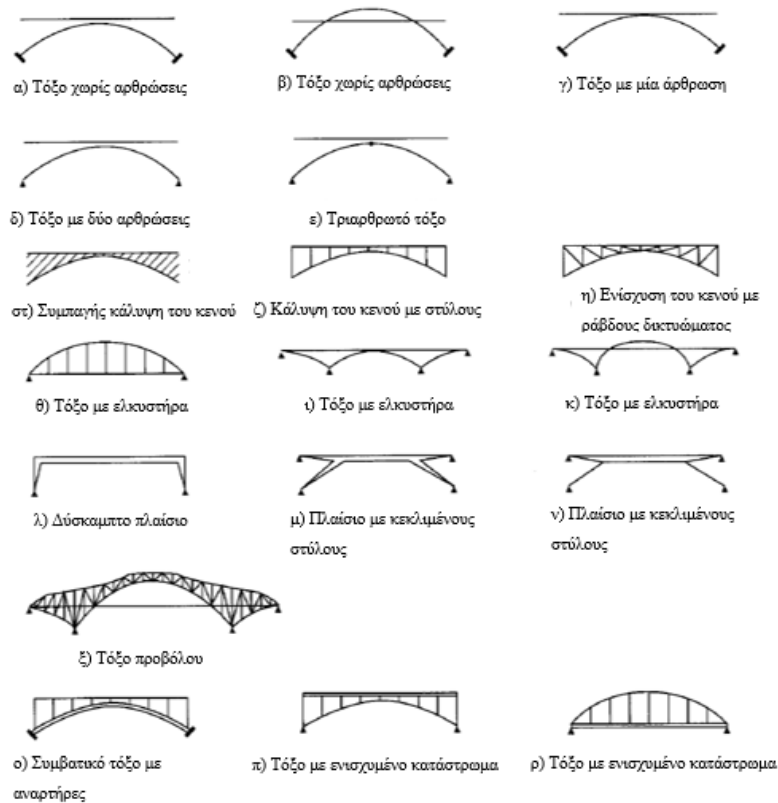
Τοξωτές γέφυρες

Οι τοξωτές γέφυρες αποτελούν τον αρχαιότερο τύπο γεφυρών. Μερικές πέτρινες τοξωτές γέφυρες που είχαν χτιστεί πριν περίπου 2000 χρόνια βρίσκονται ακόμα σε λειτουργία.

Ένα γνήσιο τόξο μεταφέρει τα φορτία στη θεμελίωσή του με καθαρή θλίψη. Όταν τα ανοίγματα των τόξων είναι μικρά, τότε οι αντιδράσεις μπορούν να μεταφερθούν στις αντηρίδες. Όταν τα ανοίγματα είναι μεγάλα, τότε και οι αντιδράσεις θα είναι μεγάλες, παράγοντας έτσι μεγάλη ώθηση (οριζόντια συνιστώσα των αντιδράσεων). Σε αυτήν τη περίπτωση απαιτούνται βαθιές θεμελιώσεις για να μεταφέρουν τις αντιδράσεις στις αντηρίδες. Όταν το υλικό της θεμελίωσης δεν έχει την απαραίτητη φέρουσα ικανότητα, η ώθηση που δημιουργείται μπορεί να απορροφηθεί από μία ράβδο που συνδέει τα δύο άκρα του τόξου δημιουργώντας ένα τόξο με ελκυστήρα. Για την ελαχιστοποίηση της ώθησης για ένα δεδομένο άνοιγμα, το τόξο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ελαφρύ και όσο το δυνατόν πιο ψηλό στη στέψη του. Το Σχήμα 1.2 δείχνει κάποιους όρους σχετικούς με τα τόξα και το Σχήμα 1.3 απεικονίζει διαφορετικούς τύπους τοξωτών γεφυρών.



Σχήμα 1.2: Ορολογία τοξωτών γεφυρών



Σχήμα 1.3: Διάφοροι τύποι τοξωτών γεφυρών

Όπως όλες οι γέφυρες έτσι και οι τοξωτές μπορούν να ιεραρχηθούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Ένας από αυτούς είναι η μορφή του τόξου. Αν το τόξο κατασκευάζεται με δικτύωμα τότε ονομάζεται τόξο δικτύωματος, αν κατασκευάζεται με μία δοκό τότε ονομάζεται συμπαγές τόξο. Άλλος τρόπος ιεράρχησης είναι ο τρόπος στήριξης του τόξου. Ένα τόξο μπορεί να είναι πακτωμένο ή αρθρωμένο στα άκρα του, δημιουργώντας ασαφείς αντιδράσεις στις στηρίξεις του. Για την ανάπτυξη συγκεκριμένων αντιδράσεων στις στηρίξεις του το τόξο πρέπει να στηρίζεται σε τρεις αρθρώσεις, από μία σε κάθε άκρο και μία στη στέψη του.

Επίσης, οι τοξωτές γέφυρες μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τη σχετική θέση του καταστρώματος και του τόξου. Η 1^η περίπτωση είναι το τόξο να βρίσκεται ολόκληρο κάτω από το κατάστρωμα, που είναι και η πιο συνηθισμένη περίπτωση. Τα φορτία του καταστρώματος μεταφέρονται στο τόξο μέσω ορθοστατών. Η 2^η περίπτωση είναι το τόξο να βρίσκεται ολόκληρο πάνω από το κατάστρωμα και ο ελκυστήρας στο επίπεδο του καταστρώματος. Τα φορτία του καταστρώματος

μεταφέρονται στο τόξο μέσω αναρτήρων. Ακόμα, οι τοξωτές γέφυρες μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους σε χαλύβδινα τόξα ή τόξα σκυροδέματος.

Μια τοξωτή γέφυρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με άλλους τύπους γεφυρών. Πολλές γέφυρες έχουν υλοποιηθεί με συνεχές δικτύωμα τριών ανοιγμάτων ως η κύρια κατασκευή με το κεντρικό άνοιγμα να κατασκευάζεται με τόξο με ελκυστήρα.

Στις περιπτώσεις που το τόξο βρίσκεται πάνω από τη γέφυρα, συνήθως χρειάζεται να τοποθετηθούν σύνδεσμοι δυσκαμψίας για να αντέξει το τόξο τις πλευρικές φορτίσεις. Για αισθητικούς λόγους κάποιες τοξωτές γέφυρες δεν έχουν συνδέσμους δυσκαμψίας πράγμα που δεν δημιουργεί δυσμενή επίπτωση στην πλευρική αντίστασή τους.

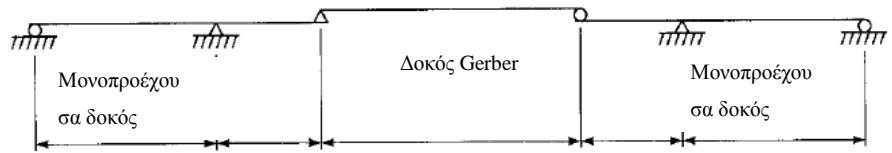
Τέλος, υπάρχουν τοξωτές γέφυρες που δεν αποτελούνται ως συνήθως από δύο κατακόρυφα τόξα. Αντίθετα, αποτελούνται από δύο κεκλιμένα τόξα με τις στέψεις τους να εφάπτονται μεταξύ τους. Οι τοξωτές γέφυρες χρησιμοποιούνται κυρίως για μεσαία και μεγάλα ανοίγματα.

Γέφυρες δοκών Gerber

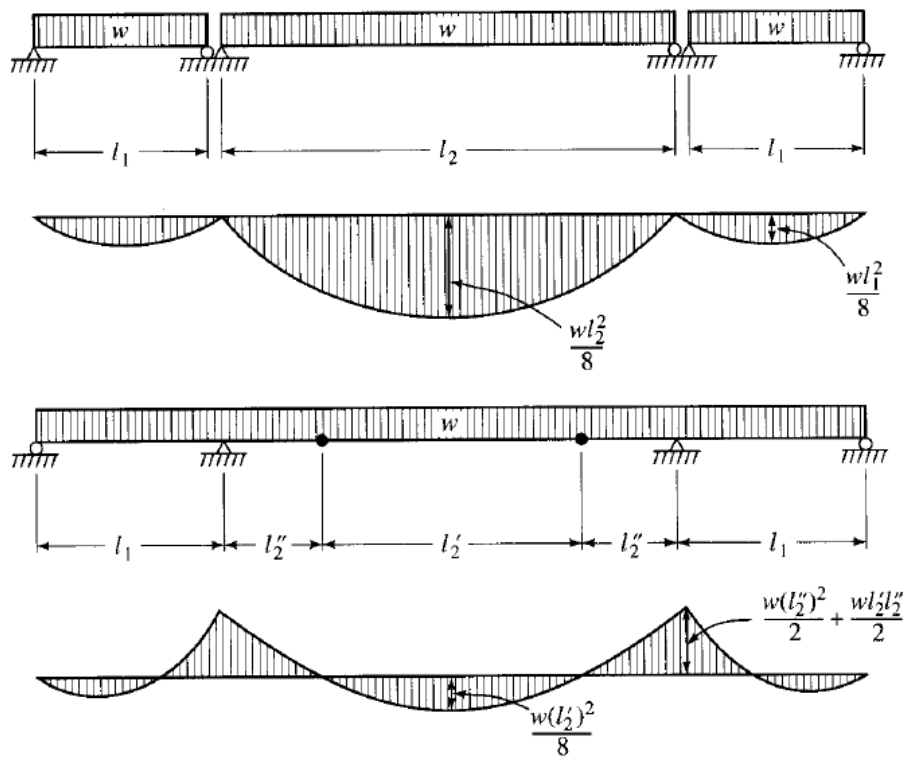
Οι γέφυρες δοκών Gerber άρχισαν να χρησιμοποιούνται για τις μεγάλοι ανοίγματος σιδηροδρομικές γέφυρες. Διαθέτουν την αντοχή, τη δυσκαμψία και την ανθεκτικότητα που απαιτούνται για να μεταφέρουν τα μεγάλα κινητά φορτία του σιδηρόδρομου, που προκαλούσαν μεγάλες αποκλίσεις στις παλαιότερες δικτυωτές γέφυρες.

Ουσιαστικά, μια γέφυρα δοκού Gerber αποτελείται από δύο μονοπροέχουσες δοκούς και ένα αμφιέριστο κρεμαστό άνοιγμα στο μέσον του ποταμού (Σχήμα 1.4). Αυτή η διάταξη οδηγεί σε σημαντική μείωση των ροπών και των τεμνουσών στο κρεμαστό άνοιγμα. Επιπλέον, επειδή το τμήμα που προεξέχει σε μια μονοπροέχουσα δοκό μπορεί να ανεγερθεί χωρίς τη δημιουργία σκαλωσιάς, η ροή του ποταμού δεν παρεμποδίζεται κατά τη διάρκεια της κατασκευής της γέφυρας. Στο Σχήμα 1.5

φαίνονται διάφορες διατάξεις για την στήριξη του κρεμαστού ανοίγματος στις γέφυρες δοκού Gerber.

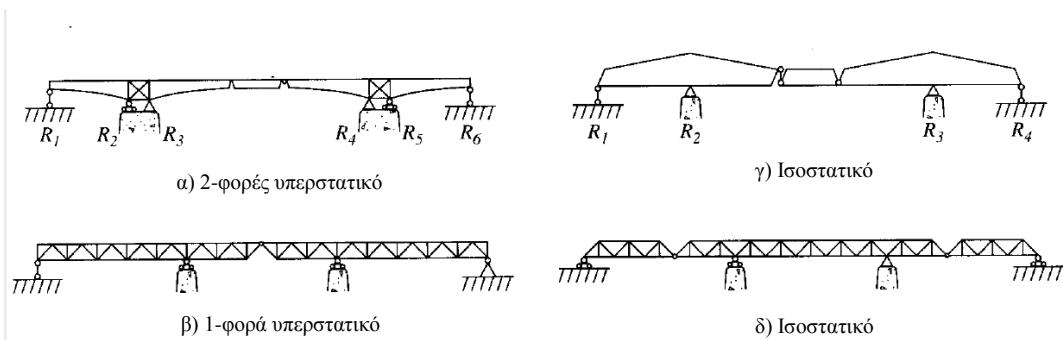


α) Μέλη μιας ισοστατικής γέφυρας προβόλου



β) Σχετικές μέγιστες ροπές – σύγκριση συνεχούς ανοίγματος με δοκό Gerber

Σχήμα 1.4: Γενικές αρχές γέφυρας προβόλου



Σχήμα 1.5: Διάφορες διατάξεις στήριξης του κρεμαστού ανοίγματος στις γέφυρες προβόλου

Καλωδιωτές γέφυρες

Αυτού του είδους οι γέφυρες χρησιμοποιούνται κυρίως για μεσαία και μεγάλα ανοίγματα και μπορούν να κατασκευαστούν με δοκούς είτε από χάλυβα είτε από προεντεταμένο σκυρόδεμα. Οι καλωδιωτές γέφυρες είναι ξεχωριστές καθώς η ανωδομή στηρίζεται (ή κρέμεται) από κεκλιμένα καλώδια που τοποθετούνται σε ενδιάμεσα σημεία. Τα καλώδια αυτά ενώνουν το κατάστρωμα με τους πυλώνες. Στο Σχήμα 1.6 απεικονίζονται οι διαφορετικές διατάξεις των καλωδίων στις καλωδιωτές γέφυρες.

	Μονό	Διπλό	Τριπλό	Πολλαπλό	Μεταβλητό	
	1	2	3	4	5	
1						Ακτινικό
2						Παράλληλο
3						Ημι-ακτινικό
4						Αστέρι

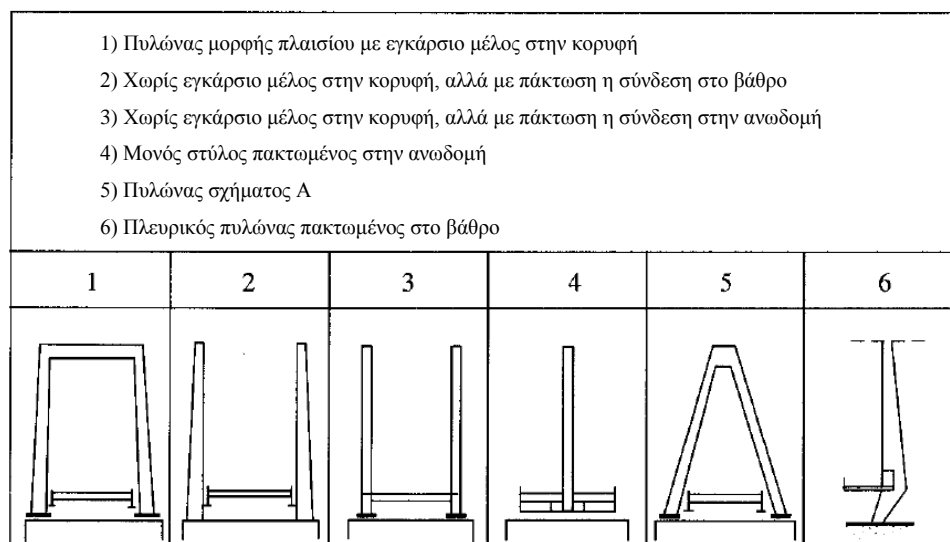
Σχήμα 1.6: Διατάξεις καλωδίων στις καλωδιωτές γέφυρες

Ως δομικό σύστημα, οι καλωδιωτές γέφυρες συμπληρώνουν το κενό ανάμεσα στις γέφυρες δοκού και τις κρεμαστές γέφυρες. Οι καλωδιωτές γέφυρες

αποτελούνται συνήθως από τρία ανοίγματα, δύο ακραία και ένα κεντρικό κύριο άνοιγμα. Οι δύο πυλώνες χωρίζουν τα ακραία ανοίγματα από το κύριο άνοιγμα. Ωστόσο, πέρα από αυτή τη γενική διάταξη που αναφέρθηκε, καλωδιωτές γέφυρες με μόνο δύο ανοίγματα και έναν κεντρικό πυλώνα έχουν επίσης κατασκευαστεί.

Σε αντίθεση με τις κρεμαστές γέφυρες όπου τα φορτία της ανωδομής μεταφέρονται στα καλώδια μέσω κατακόρυφων αναρτήρων, τα φορτία μιας καλωδιωτής γέφυρας μεταφέρονται άμεσα μέσω των κεκλιμένων καλωδίων, που συνδέουν το κατάστρωμα με τους πυλώνες. Το Σχήμα 1.7 δείχνει διάφορες μορφές πυλώνων που χρησιμοποιούνται για τις καλωδιωτές γέφυρες.

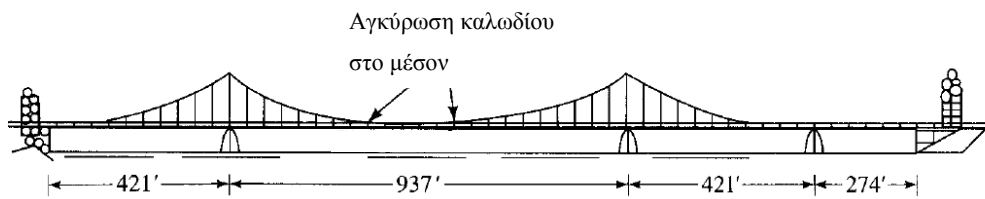
Οι διαφορετικές διατάξεις του συστήματος των καλωδίων (Σχήμα 1.6) και τα ευφάνταστα σχήματα των πυλώνων (Σχήμα 1.7) έχουν κάνει τις καλωδιωτές γέφυρες από τις πιο εντυπωσιακές κατασκευές.



Σχήμα 1.7: Μορφές πυλώνων καλωδιωτών γεφυρών

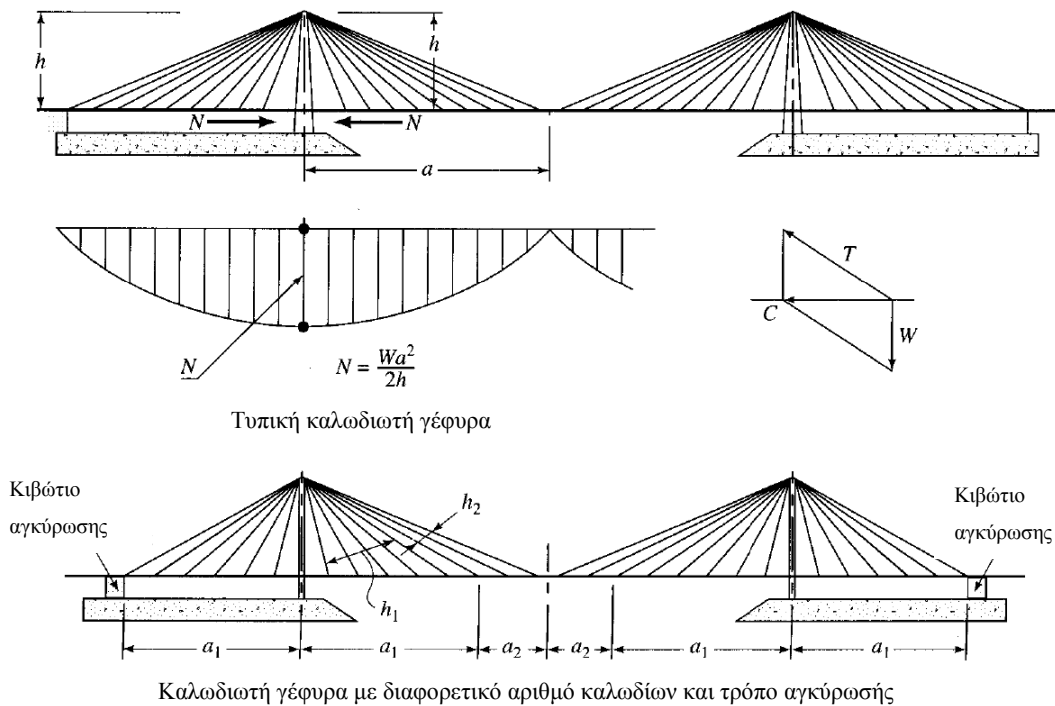
Πολλές παραλλαγές των βασικών αρχών των καλωδιωτών γεφυρών έχουν υιοθετηθεί για τη κατασκευή άλλων γεφυρών. Ένας τύπος γέφυρας παρόμοιος της καλωδιωτής, που είναι κάτι ανάμεσα σε καλωδιωτή και κρεμαστή γέφυρα, αποτελείται από κύρια καλώδια που δεν είναι συνεχή μεταξύ των πυλώνων, αλλά αγκυρώνονται στις διαμήκεις δοκούς στο κύριο άνοιγμα (Σχήμα 1.8). Ωστόσο, όπως

και μια κρεμαστή γέφυρα, και αυτός ο τύπος περιέχει αναρτήρες κατά μήκος των καλωδίων, που παρέχουν περαιτέρω στήριξη στο κατάστρωμα.



Σχήμα 1.8: Γέφυρα όπου το κύριο καλώδιο της δεν είναι συνεχές αλλά αγκυρώνεται στο μέσον του καταστρώματος

Άλλη παραλλαγή των καλωδιωτών γεφυρών περιλαμβάνει κεκλιμένα καλώδια τόσο αγκυρούμενα στη γέφυρα όσο και αγκυρούμενα σε ξεχωριστά βάθρα αγκύρωσης, τα οποία συγκρατούν ολόκληρο το κατάστρωμα. Στο Σχήμα 1.9 αναπαρίσταται η σύγκριση μεταξύ μιας καλωδιωτής γέφυρας και της προαναφερθείσας παραλλαγής. Στο σύστημα της παραλλαγής, τα αγκυρούμενα στη γέφυρα καλώδια (h_1) είναι τοποθετημένα στα ακραία ανοίγματα αλλά και στο κύριο άνοιγμα, όπου κατανέμονται περίπου στην ίδια απόσταση με τα ακραία ανοίγματα από τον πυλώνα (a_1). Τα καλώδια που αγκυρώνονται σε βάθρα αγκύρωσης (h_2) είναι μακρύτερα και αγκυρώνονται στο κατάστρωμα στο υπόλοιπο του κύριου ανοίγματος (a_2). Αυτά τα καλώδια κάμπτουν τις κορυφές των πυλώνων και αγκυρώνονται σε ένα ξεχωριστό βάθρο αγκύρωσης, έξω από τα όρια της γέφυρας. Έτσι, δεν μεταφέρεται επιπλέον θλίψη στο κατάστρωμα της γέφυρας.



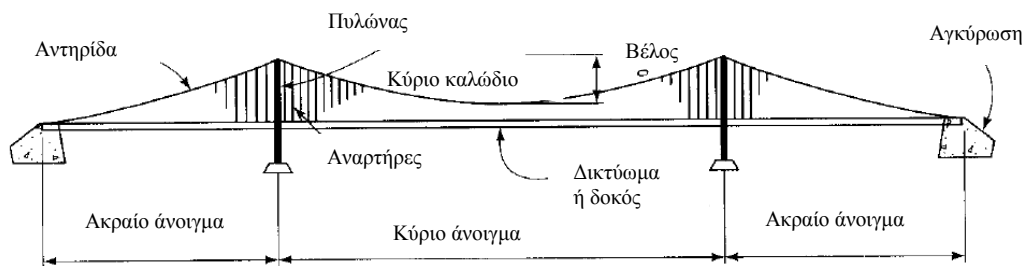
Σχήμα 1.9: Σύγκριση μεταξύ μιας καλωδιωτής γέφυρας και μιας άλλης καλωδιωτής γέφυρας με διαφορετικό αριθμό καλωδίων και διαφορετικό τρόπο αγκύρωσης

Κρεμαστές γέφυρες

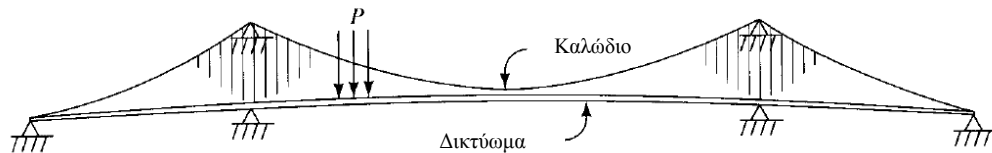
Οι κρεμαστές γέφυρες χαρακτηρίζονται για την ικανότητά τους να γεφυρώνουν μεγάλα ανοίγματα, αλλά και για την υψηλή αισθητική τους. Η αρχή κατασκευής των κρεμαστών γεφυρών είναι πολύ απλή. Αποτελείται από τέσσερα εξίσου σημαντικά μέρη: τους πυλώνες, τα σώματα αγκυρώσεως, τα καλώδια και το κατάστρωμα. Το κατάστρωμα, το οποίο συνήθως στηρίζεται σε δύσκαμπτα δικτυώματα, κρέμεται από τα κύρια καλώδια. Περιλαμβάνει ένα κεντρικό κύριο άνοιγμα, το οποίο πλαισιώνεται σε κάθε πλευρά από ένα ακραίο άνοιγμα, που διαχωρίζεται από το κύριο άνοιγμα με τους πυλώνες. Τα άκρα των κύριων καλωδίων καταλήγουν στις αγκυρώσεις που είναι κατασκευασμένες κυρίως από πέτρα ή σκυρόδεμα σημαντικών διαστάσεων.

Οι κρεμαστές γέφυρες μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με την αγκύρωση των καλωδίων τους σε εξωτερική και σε εσωτερική αγκύρωση. Όταν τα καλώδια αγκυρώνονται σε εξωτερικές αγκυρώσεις, οι κρεμαστές γέφυρες είναι εξωτερικά

αγκυρωμένες (Σχήμα 1.10). Ωστόσο, μπορούν να είναι εσωτερικά αγκυρωμένες, όπου στη περίπτωση αυτή δεν απαιτούνται εξωτερικές αγκυρώσεις. Σε αυτή την περίπτωση, τα καλώδια συνδέονται με τα δύσκαμπτα δικτύωματα στα εξωτερικά άκρα των ακραίων ανοιγμάτων (Σχήμα 1.11). Η κατακόρυφη συνιστώσα της έντασης του καλωδίου στο ακραίο άνοιγμα βοηθά στη μείωση της αντίδρασης λόγω ιδίου βάρους στην ακραία στήριξη, ενώ η οριζόντια συνιστώσα δημιουργεί θλίψη στο δικτύωμα. Τα καταστρώματα συνήθως στηρίζονται σε δύσκαμπτα δικτύωματα από χάλυβα, παρόλα αυτά υπάρχουν και άλλες διατάξεις.



Σχήμα 1.10: Εξωτερικά αγκυρωμένη κρεμαστή γέφυρα



Σχήμα 1.11: Εσωτερικά αγκυρωμένη κρεμαστή γέφυρα

Σε μερικές κρεμαστές γέφυρες, κεκλιμένα καλώδια (ή δευτερεύοντα καλωδιωτά συστήματα) τοποθετούνται επιπλέον των κατακόρυφων αναρτήρων προκειμένου να αυξηθεί η στρεπτική δυσκαμψία των γεφυρών αυτών. Ωστόσο, οι σύγχρονες κρεμαστές γέφυρες δεν χρησιμοποιούν τέτοια κεκλιμένα καλώδια.

Οι συμβατικές κρεμαστές γέφυρες αποτελούνται από δύο παράλληλα κύρια καλώδια, που αποτελούν το κύριο στοιχείο μεταφοράς των φορτίων. Μια καινοτομία σε αυτή τη διάταξη είναι οι κρεμαστές γέφυρες με ένα μόνο κύριο καλώδιο.

Συμπερασματικά, τόσο οι καλωδιωτές όσο και οι κρεμαστές γέφυρες μπορούν να χαρακτηριστούν ως γέφυρες στηριζόμενες σε καλώδια. Η διάταξη των καλωδίων αρκεί για τη διάκριση μεταξύ των δύο αυτών τύπων. Στις κρεμαστές γέφυρες, τα κύρια καλώδια είναι καμπύλα και συνεχή μεταξύ των πυλώνων. Το κατάστρωμα και οι υπόλοιπες κατακόρυφες φορτίσεις παραλαμβάνονται από αυτά τα καλώδια. Τα κύρια καλώδια είναι σχετικά εύκαμπτα στοιχεία και για αυτό παίρνουν μια αλυσοειδή μορφή, που είναι συνάρτηση του μεγέθους αλλά και της θέσης της φόρτισης. Αντίθετα, στις καλωδιωτές γέφυρες τα καλώδια είναι ευθύγραμμα και εκτείνονται από τον έναν πυλώνα ως το κατάστρωμα σε διακεκριμένα σημεία, που υπάρχει άμεση σύνδεση. Τα καλώδια, ως τεντωμένα που είναι, δημιουργούν άκαμπτες στηρίξεις κατά μήκος του ανοίγματος σε διάφορα σημεία και έτσι παρέχουν στη γέφυρα μεγαλύτερη δυσκαμψία από ότι επιτυγχάνεται στις κρεμαστές γέφυρες. Και στους δύο τύπους γεφυρών τα καλώδια είναι κατασκευασμένα από χάλυβα υψηλής αντοχής.

1.2.4 Είδη ανοιγμάτων

Οι γέφυρες μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το είδος του ανοίγματος που χρησιμοποιείται, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες στήριξης, σε αμφιέρειστες ή συνεχείς. Οι μικρού ανοίγματος γέφυρες κατασκευάζονται ως αμφιέρειστες έχοντας απλές στηρίξεις. Στις μεσαίου ή και μεγάλου ανοίγματος γέφυρες, ανάλογα με τις συνθήκες του εδάφους, πολλαπλά αμφιέρειστα ανοίγματα μπορούν να κατασκευαστούν για να γεφυρωθεί η συνολική απόσταση. Μια τέτοια γέφυρα θα αποτελούταν από δύο ακρόβαθρα και ενδιάμεσα βάθρα ως επιπλέον στηρίξεις.

Το Σχήμα 1.4 δείχνει τη συμπεριφορά μιας συνεχούς δοκού υπό ομοιόμορφη φόρτιση. Σε μια αμφιέρειστη δοκό, η ροπή που αναπτύσσεται είναι θετική και μέγιστη στο μέσο του ανοίγματος (υπό τα φορτία βαρύτητας). Σε μια συνεχή δοκό, οι θετικές ροπές είναι σημαντικά μειωμένες στο μέσο του ανοίγματος της δοκού, αλλά αρνητικές ροπές αναπτύσσονται στις στηρίξεις. Αυτές οι αρνητικές ροπές είναι πολύ μεγαλύτερες κατά απόλυτη τιμή από τις θετικές στο μέσον, ωστόσο είναι σημαντικά μικρότερες από τη θετική ροπή που αναπτύσσεται σε μια αμφιέρειστη

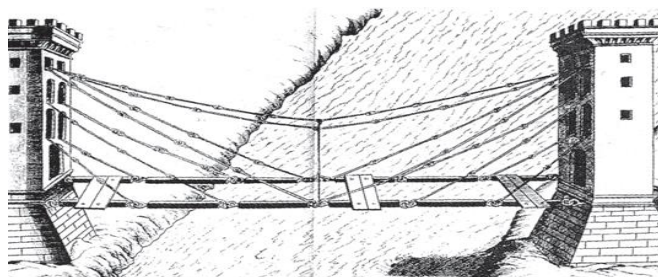
δοκό. Εξαιτίας των μεγαλύτερων αρνητικών ροπών, θεωρητικά θα χρειαζόταν μια μεγαλύτερης διατομής δοκός στις στηρίξεις από ότι στο μέσο του ανοίγματος. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας μια ψηλότερη διατομή στις στηρίξεις από ότι στο μέσον, ωστόσο μια τέτοια πρακτική είναι αντιοικονομική. Τα άκρα μιας συνεχούς δοκού είναι συνήθως απλές στηρίξεις.

Τα πλεονεκτήματα των συνεχών ανοιγμάτων έναντι των αμφιέριστων είναι το μειωμένο βάρος εξαιτίας των μικρότερων διατομών που απαιτούνται, καθώς και η μεγαλύτερη δυσκαμψία, οι μικρότερες εκτροπές, η μείωση του αριθμού των εφεδράνων και των αρμών διαστολής. Τα συνεχή ανοίγματα προσφέρουν επίσης μεγαλύτερη ικανότητα υπερφόρτωσης από ότι τα αμφιέριστα.

Η συνέχεια στις γέφυρες υλοποιείται με διάφορους τρόπους. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3, η βασική αρχή είναι η δημιουργία ενός κρεμαστού αμφιέριστου ανοίγματος που στηρίζεται σε μονοπροέχουσες δοκούς. Αυτός ο σχηματισμός συναντάται σε διάφορα είδη γεφυρών, όπως οι γέφυρες με δοκούς, οι δικτυωτές γέφυρες, οι κιβωτιοειδείς γέφυρες, οι γέφυρες προβόλου και οι καλωδιωτές γέφυρες.

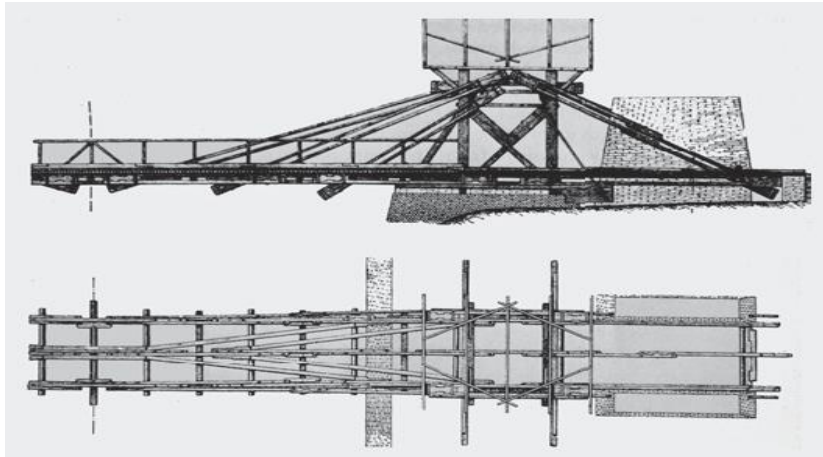
1.3 Ιστορική εξέλιξη καλωδιωτών γεφυρών

Ένα από τα πρώτα παραδείγματα σχεδιασμού καλωδιωτής γέφυρας φαίνεται στο σχέδιο του Faustus Verantius, όπου μια ξύλινη δοκός στηριζόταν άμεσα από κεκλιμένα καλώδια σε συνδυασμό με ένα κρεμαστό καλώδιο (Εικόνα 1.18). Τα παράλληλα καλώδια θυμίζουν κατά κάποιο τρόπο τη νεότερη παράλληλη διάταξη των καλωδίων. Τα κεκλιμένα καλώδια συνδέονταν με αρθρώσεις με τη δοκό, όπως στη σύγχρονη εκδοχή μιας αρθρωτής δοκού (Svensson, 2012).



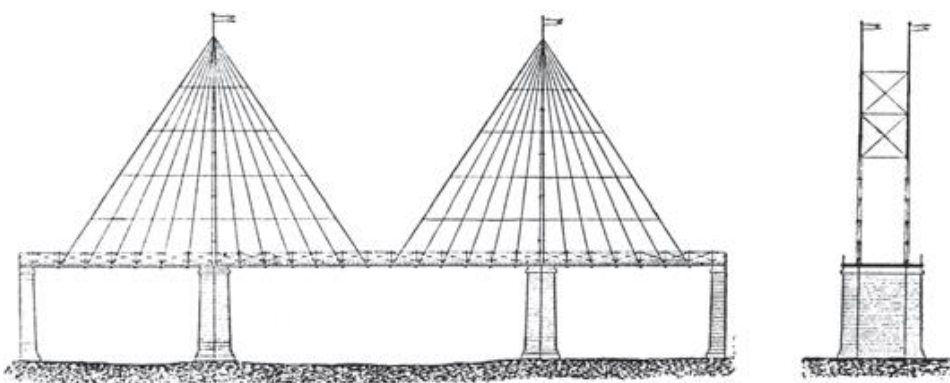
Εικόνα 1.18: Σχέδιο μιας πρώτης μορφής καλωδιωτής γέφυρας από τον Verantius, 1617

Το 1784 ο Γερμανός ξυλουργός Immanuel Loscher, από το Freiburg, σχεδίασε μια γέφυρα κύριου ανοίγματος 44,3m που αναρτιόταν από τρεις ξύλινους ελκυστήρες και αυτοί με τη σειρά τους ακυρώνονταν σε δύο ξύλινους πύργους. Οι πύργοι συγκρατιόντουσαν από ξύλινες αντηρίδες (Εικόνα 1.19).



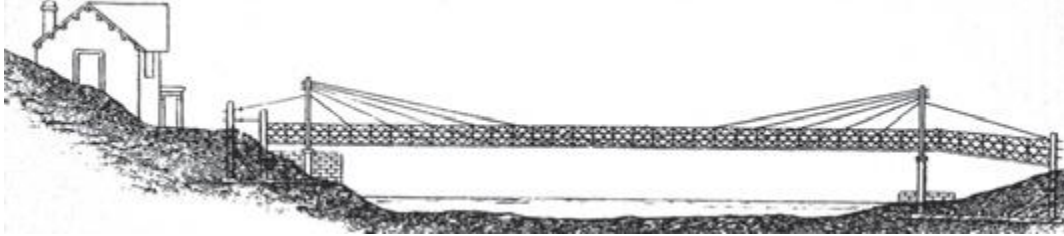
Εικόνα 1.19: Ξύλινη καλωδιωτή γέφυρα από τον Loscher ανοίγματος 44,3m, 1784

Ο Γάλλος μηχανικός Royet παρουσίασε σχέδια καλωδιωτών γεφυρών με ανοίγματα των 50m, το 1787. Πρότεινε τη στήριξη ξύλινων δοκών με σιδερένιες ράβδους που ακυρώνονταν σε ψηλούς πυλώνες (Εικόνα 1.20). Η διάταξη των καλωδίων μοιάζει με την ακτινική. Ωστόσο, οι γαλλικές αρχές δεν ενέκριναν την κατασκευή τους και έτσι κανένα από τα σχέδια δεν υλοποιήθηκε.



Εικόνα 1.20: Καλωδιωτή γέφυρα από τον Royet, 1787

Η πρώτη μόνιμη γέφυρα με κεκλιμένα καλώδια ήταν η Kings Meadow στην Αγγλία το 1817 (Εικόνα 1.21). Οι σχεδιαστές της ήταν δύο Σκωτσέζοι σιδηρουργοί, ο James Redpath και ο John Brown.

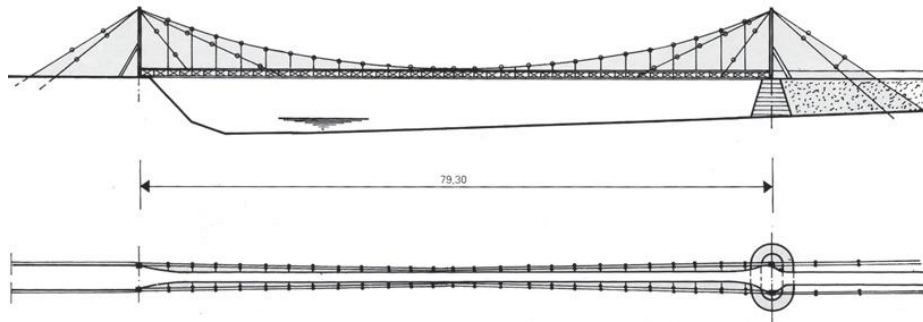


Εικόνα 1.21: Γέφυρα Kings Meadow, 1817

Τα κεκλιμένα καλώδια αποτελούνταν από σιδερένια σύρματα διαμέτρου 8mm και ήταν τοποθετημένα σε ακτινική διάταξη. Αυτά δένονταν πίσω στη θεμελίωση με ράβδους διαμέτρου 19mm και ρυθμίζονταν με βίδες. Δυστυχώς, κατά τη διάρκεια του χειμώνα του 1922/23, η γέφυρα κατέρρευσε τμηματικά και αποκαταστάθηκε η λειτουργία της με την εισαγωγή επιπλέον 16 καλωδίων. Το 1954 η γέφυρα κατέρρευσε ολοκληρωτικά εξαιτίας μιας πολύ δυνατής πλημμύρας.

Η εξέλιξη των καλωδιωτών γεφυρών διακόπηκε λόγω της κατάρρευσης των δύο πρώτων προσπαθειών που επιχειρήθηκαν, την πρώτη γέφυρα Dryburgh Abbey το 1818 και τη γέφυρα Nienburg το 1824.

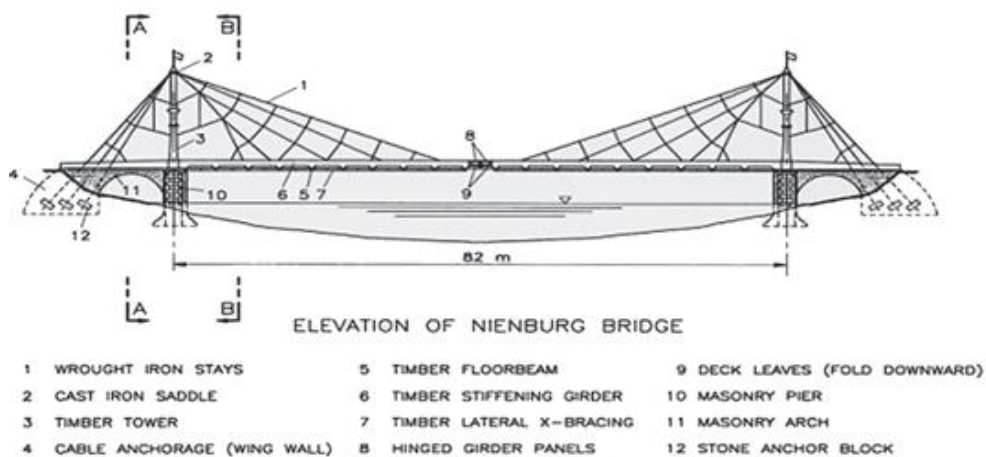
Το 1817 ο John και ο William Smith σχεδίασαν την πρώτη γέφυρα που διέσχισε τον ποταμό Tweed στη Σκωτία, κοντά στο μοναστήρι Dryburgh. Η γέφυρα είχε άνοιγμα 79,3m και παρόμοια χαρακτηριστικά με τη γέφυρα Kings Meadow. Το κατάστρωμα της γέφυρας, με πλάτος μόνο 1,22m, εμφάνιζε ισχυρές ταλαντώσεις από τη διέλευση των πεζών αλλά και από τους ισχυρούς ανέμους. Μετά από μόλις 6 μήνες, η γέφυρα κατέρρευσε το 1818, αφού έσπασε ένα καλώδιο κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας. Την ίδια χρονιά κατασκευάστηκε η δεύτερη γέφυρα Dryburgh Abbey (Εικόνα 1.22), αυτήν τη φορά ως κρεμαστή γέφυρα με διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας στις εξωτερικές πλευρές του ανοίγματος.



Εικόνα 1.22: Δεύτερη γέφυρα Dryburgh Abbey, 1818

Μέχρι τότε, μπορούσαν να υπολογιστούν μόνο οι δυνάμεις των κύριων καλωδίων της κρεμαστής γέφυρας. Τα κεκλιμένα καλώδια προστέθηκαν, μόνο, για κατασκευαστικούς λόγους και δεν προσδιορίστηκε ακριβώς η έντασή τους. Αυτή ήταν μια καινοτομία για τις κρεμαστές γέφυρες με κεκλιμένα καλώδια δυσκαμψίας.

Η πρώτη καλωδιωτή γέφυρα στη Γερμανία σχεδιάστηκε από τον Gottfried Bandhauer, το 1824, και διέσχισε τον ποταμό Saale στο Nienburg (Εικόνα 1.23). Η γέφυρα Nienburg, στην πραγματικότητα, αποτελούνταν από δύο ξεχωριστές καλωδιωτές γέφυρες, με ένα πυλώνα η κάθε μία και συνδέονταν μεταξύ τους με μία κινητή γέφυρα στο κέντρο ανοίγματος 3,5m, η οποία άνοιγε για την εξυπηρέτηση των καραβιών με ψηλά κατάρτια. Αυτός ο συνδυασμός καλωδιωτής και κινητής γέφυρας είναι μοναδικός.



Εικόνα 1.23: Γέφυρα Nienburg, 1824

Το κύριο άνοιγμα είχε μήκος 82m με 7,6m πλάτος δοκού. Κάθε πυλώνας είχε πέντε ζευγάρια από καλώδια που στήριζαν το κύριο άνοιγμα και τρία ζευγάρια από καλώδια που στήριζαν το ακραίο άνοιγμα.

Τα καλώδια, που ήταν φτιαγμένα από ελατό σίδηρο, έδειξαν τη χαμηλή ποιότητά τους από την αρχή της λειτουργίας της γέφυρας. Ελέγχθηκαν ένα προς ένα ξεχωριστά με μηχανές εφελκυσμού που κατασκευάστηκαν από τον Bandhauer για το έργο, αλλά το 40% των καλωδίων δεν έφτασε την απαιτούμενη αντοχή και έπρεπε να επανεξεταστούν. Επίσης, ολόκληρη η γέφυρα δοκιμάστηκε στην παραλαβή των φορτίων αρκετές φορές, με τελευταία αυτή στις 27 Αυγούστου 1825, όπου ένα κάρο με άλογα που ζύγιζε 6 τόνους διέσχισε τη γέφυρα. Από τότε, η γέφυρα λειτούργησε και εξυπηρέτησε την κυκλοφορία χωρίς προβλήματα. Στις 5 Δεκεμβρίου 1825, ο Δούκας του Anhalt – Kothen επισκέφθηκε το Nienburg. Προς τιμήν του, οργανώθηκε λαμπαδηφορία στη γέφυρα, η οποία αποτελούταν από περισσότερα από 300 άτομα. Όταν κάποιοι καλεσμένοι προσπάθησαν να δημιουργήσουν ταλάντωση στη γέφυρα, τρία νότια καλώδια που στήριζαν το ακραίο άνοιγμα αστόχησαν, προκαλώντας την κατάρρευση του νότιου μισού της γέφυρας και 55 άνθρωποι πνίγηκαν στον ποταμό Saale.

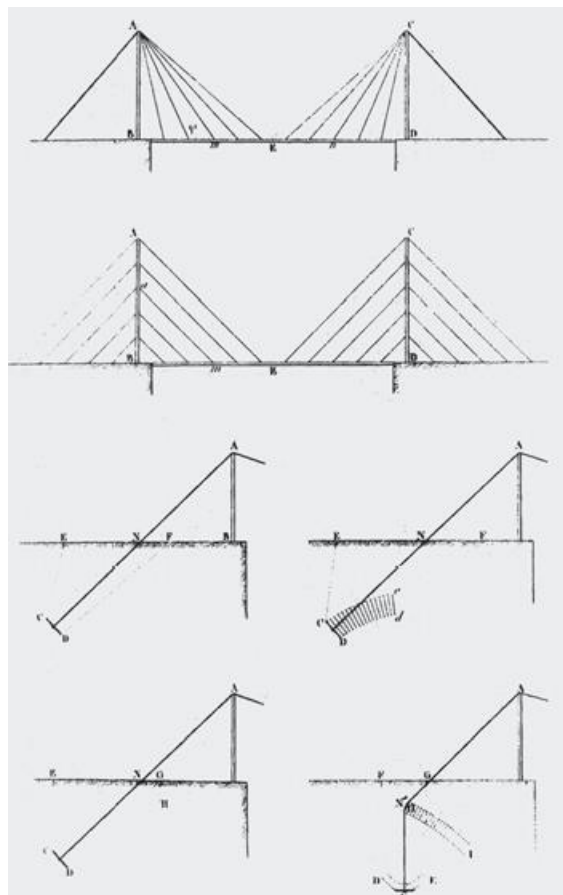
Έρευνα στους κόμβους που αστόχησαν στα καλώδια έδειξε ότι ο σίδηρος περιείχε μια διαταραγμένη μικροδομή, φυσαλίδες αέρα και σκουριά. Τα δυνατά δυναμικά φορτία σε συνάρτηση με τη χαμηλή ποιότητα του σιδήρου των καλωδίων ήταν πιθανόν οι λόγοι της αστοχίας. Ο Bandhauer κατηγορήθηκε ότι εκείνος προκάλεσε το ατύχημα, γιατί ο σχεδιασμός του ήταν καινοτόμος και δεν εμπόδισε την πομπή.

Ο Bandhauer απάντησε στις κατηγορίες με τη δημοσίευση όλων των σχεδίων της γέφυρας. Έρευνα στο βόρειο μισό της γέφυρας δεν έδειξε να υπάρχει κανένα αδύναμο σημείο. Έτσι, ο Bandhauer απαλλάχθηκε οριστικά από τις κατηγορίες του το Μάιο του 1829.

Αυτό το ατύχημα ήταν ο λόγος που η ανάπτυξη των καλωδιωτών γεφυρών καθυστέρησε στη Γερμανία για περίπου 125 χρόνια. μέχρι την Düsseldorf Bridge Family στις αρχές του 1950.

Ο Robert Stephenson στο έργο του «Περιγραφές Κρεμαστών Γεφυρών» (Description of Bridges of Suspension) το 1821, ασχολήθηκε με το τεχνικό κομμάτι των καλωδιωτών γεφυρών και αξιολόγησε την κατάρρευση της First Dry-burgh Abbey Bridge.

Ο διάσημος Γάλλος μαθηματικός και γεφυροποιός Henri Navier βάσισε το σύγγραμμά του «Απομνημονεύματα επί των Κρεμαστών Γεφυρών» (Memoires sur les Ponts Suspendus) στο έργο του Robert Stephenson. Συνέκρινε ακτινικές και παράλληλες διατάξεις των καλωδίων με αποτέλεσμα, για ένα δεδομένο άνοιγμα, οι ποσότητες του χάλυβα που απαιτούνται για τους πυλώνες και τα καλώδια να είναι παρόμοιες (Εικόνα 1.24). Τα κεκλιμένα καλώδια που εξέτασε αγκυρώνονταν στο έδαφος και συνεπώς δεν συμβάδιζε με τη σύγχρονη πρακτική των καλωδιωτών γεφυρών.

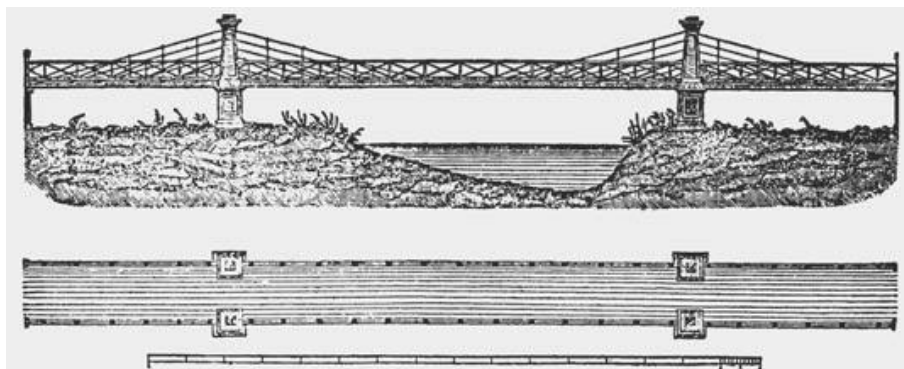


Εικόνα 1.24: Καλωδιωτά συστήματα γεφυρών που μελετήθηκαν από τον Navier

Ο Navier απέδειξε ότι οι καλωδιωτές γέφυρες δεν μπορούν να υποστούν παραμορφώσεις, όπως οι κρεμαστές γέφυρες, ώστε να προσαρμοστούν στις αλλαγές της θέσης του φορτίου, αλλά ότι οι καλωδιωτές γέφυρες είναι ένα δύσκαμπτο σύστημα που μπορεί να αλλάξει σχήμα μόνο με ελαστικές αλλαγές στο μήκος των καλωδίων.

Ακόμα, ο Navier αντιλήφθηκε ότι το πολύ υπερστατικό σύστημα της καλωδιωτής γέφυρας δεν μπορούσε να προσδιοριστεί με τις μεθόδους της εποχής του, σε αντίθεση με την κρεμαστή γέφυρα που αποτελείται από ένα απλό υπερστατικό σύστημα. Επομένως, απέρριψε τις καλωδιωτές γέφυρες και έτσι η ανάπτυξή τους στη Γαλλία διακόπηκε για σχεδόν 50 χρόνια, μέχρι που ο Ferdinand Arnodin σχεδίασε τη γέφυρά του Saint Prize.

Παρ' όλα αυτά, η ανάπτυξη των καλωδιωτών γεφυρών συνεχίστηκε στην Αγγλία. Ο μηχανικός Thomas Motley ανέπτυξε μοντέρνες ιδέες για τη δύσκαμπτη γέφυρα, οι οποίες θα μπορούσαν να είναι κατάλληλες και για τους σιδηροδρόμους και τις πραγματοποίησε το 1837 με τη γέφυρα Twerton (Εικόνα 1.25).



Εικόνα 1.25: Γέφυρα Twerton, 1837

Η δύσκαμπτη δοκός της αποτελείται από ένα δικτύωμα από σίδηρο, που υποστηρίζεται από καλώδια και αναρτήρες κυκλικής διατομής από ελατό σίδηρο. Η δύσκαμπτη δοκός μεταφέρει ένα μεγάλο μέρος των ωφέλιμων φορτίων απευθείας στα ακρόβαθρα. Η γέφυρα αυτή φαίνεται να έχει κάποια χαρακτηριστικά των μοντέρνων «ενισχυμένων» καλωδιωτών γεφυρών.

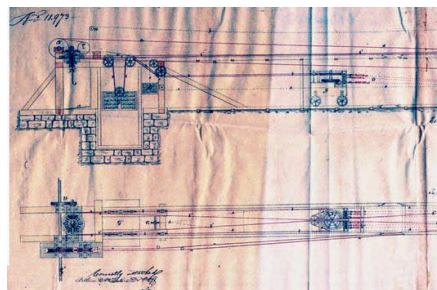
Οι δυνάμεις αντίστασης στα άκρα της γέφυρας αγκυρώθηκαν με σπειροειδείς ράβδους στα ακρόβαθρα. Η κατασκευή επίσης, ακολουθεί σύγχρονες αρχές: απουσία προβόλων από τους κεντρικούς πυλώνες προς τις δύο ακραίες πλευρές της γέφυρας και εγκατάσταση της κεντρικής δοκού με τη βοήθεια ενός ξύλινου βοηθητικού πλαισίου.

Με αυτόν τον τρόπο η ανάπτυξη των καλωδιωτών γεφυρών στην Αγγλία έφτασε στο αποκορύφωμά της και προσωρινά δεν εξελίχθηκε περαιτέρω. Τα νέα καλώδια που αναπτύχθηκαν με μεγαλύτερης αντοχής χαλύβδινα σύρματα, ήταν πιο οικονομικά για τις κρεμαστές γέφυρες και έτσι οι ιδέες του Motley για λίγο καιρό έμειναν ανεκμετάλλευτες.

Μεγαλύτερη πρόοδος σημειώθηκε με τη χρήση δύσκαμπτων καλωδίων στις κρεμαστές γέφυρες.

Ο John Roebling ήταν ένας από τους πιο διορατικούς μηχανικούς του 19^{ου} αιώνα και σπούδασε δομοστατικός μηχανικός στο Πολυτεχνείο του Βερολίνου, όπου ήρθε σε επαφή με τα συγγράμματα του Navier αναφορικά με τις κρεμαστές και τις καλωδιωτές γέφυρες. Λόγω της ανεργίας στη Γερμανία, μετανάστευσε στις Η.Π.Α το 1831.

Αφού ασχολήθηκε μερικά χρόνια με τη γεωργία, αποφάσισε να συνεχίσει την καριέρα του ως πολιτικός μηχανικός. Πρώτα ανέπτυξε την κατασκευή των σπειροειδών καλωδίων και αργότερα των καλωδίων με παράλληλα διατεταγμένα σύρματα αρχικά για την ανύψωση των πλοίων σε διάφορες περιπτώσεις και στη συνέχεια για τη χρησιμοποίησή τους στις καλωδιωτές γέφυρες. Διερεύνησε ο ίδιος τον μηχανικό εξοπλισμό (Εικόνα 1.26) και το εργοστάσιο που ίδρυσε υπάρχει μέχρι σήμερα στο Trenton, Ohio.



Εικόνα 1.26: Καλώδια που ανέπτυξε ο Roebling για τις γέφυρες

Ο Roebling προσπάθησε να κατασκευάσει μεγάλες κρεμαστές γέφυρες, μια ιδέα που είχε ήδη αναπτυχθεί παλαιότερα στη Γερμανία. Το 1841 δημοσίευσε τα βασικά του ευρήματα πάνω στις καλωδιωτές και τις κρεμαστές γέφυρες. Επισήμανε τη μεγαλύτερη αντοχή και ελαστικότητα των καλωδίων με παράλληλα διατεταγμένα σύρματα σε αντίθεση με τις σιδερένιες αλυσίδες που χρησιμοποιούνταν ως τότε. Ως συνέπεια των θαυματικών καταρρεύσεων των κρεμαστών γεφυρών που προκλήθηκαν από ταλαντώσεις λόγω του ανέμου, υποστήριξε τη θέση ότι επιπλέον κεκλιμένα καλώδια θα αύξαναν τη δυσκαμψία στις κρεμαστές γέφυρες, έτσι ώστε να μένουν ανεπηρέαστες από τις ταλαντώσεις που προκαλεί ο άνεμος. Επίσης, οι εκτροπές εξαιτίας βαρέων οχημάτων θα μειωνόντουσαν.

Ύστερα από μερικές επιτυχίες σε μικρότερες γέφυρες έφτασε στη μεγάλη ανακάλυψή του το 1851 με τη γέφυρα του καταρράκτη του Νιαγάρα (Εικόνα 1.27). Το κυριότερο πρόβλημα της εν λόγω κρεμαστής γέφυρας, ανοίγματος 251,5m, ήταν να επιτευχθεί η απαιτούμενη δυσκαμψία για τα μεγάλα κινητά φορτία των σιδηροδρομικών γεφυρών και να αυξήσει τη δυσκαμψία της εκτεθειμένης δοκού ψηλά πάνω από το νερό ώστε να αποφευχθούν οι ταλαντώσεις λόγω του ανέμου. Με δύο τρόπους έδωσε λύση στα παραπάνω προβλήματα. Πρώτον, χρησιμοποίησε ένα ξύλινο δικτύωμα ύψους 6m για να αυξήσει τη δυσκαμψία της δοκού και δεύτερον, χρησιμοποίησε κεκλιμένα καλώδια στις εξωτερικές πλευρές του κύριου ανοίγματος της γέφυρας. Κατά κάποιον τρόπο, δηλαδή, συνέχισε τις ιδέες του Motley.



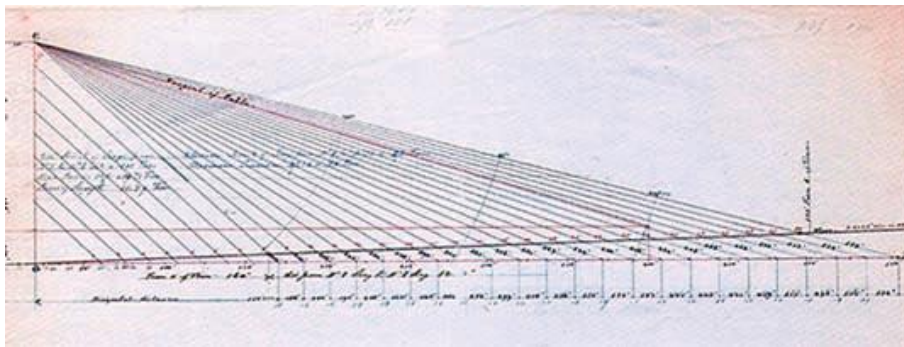
Εικόνα 1.27: Γέφυρα στους καταρράκτες του Νιαγάρα, 1855

Παρόμοια σχέδια δύσκαμπτων κρεμαστών γεφυρών ακολούθησαν, όπως η γέφυρα Allegheni River στο Pittsburgh και η γέφυρα Cincinnati.

Το μεγαλύτερο επίτευγμά του ως γεφυροποιός ήταν η γέφυρα Brooklyn στη Νέα Υόρκη με άνοιγμα 486m (Εικόνα 1.28). Ξεκίνησε το σχεδιασμό το 1865. Στην Εικόνα 1.29 φαίνεται ένα πρωτότυπο σκαρίφημα σχεδιασμού των καλωδίων της γέφυρας αυτής. Προσπάθησε να κατανείμει εξίσου τα μόνιμα φορτία ανάμεσα στα κεκλιμένα και στα κύρια κρεμαστά καλώδια. Ο προσδιορισμός του πολύ υπερστατικού συνδυαστικού συστήματος δεν ήταν δυνατός με τα εργαλεία της εποχής, αλλά οι διαπιστώσεις του για τη ροή των δυνάμεων, είναι αξιοθαύμαστες.



Εικόνα 1.28: Γέφυρα Brooklyn στην Αμερική, 1869

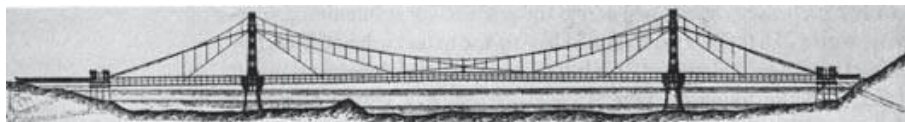


Εικόνα 1.29: Αρχικός σχεδιασμός των καλωδίων της γέφυρας Brooklyn από τον Roebling

Ο John Roebling ολοκλήρωσε το σχεδιασμό της γέφυρας Brooklyn πριν πεθάνει εξαιτίας ενός ατυχήματος στο εργοτάξιο. Η κατασκευή της συνεχίστηκε από το γιο του Washington. Όταν έμεινε παράλυτος, η γυναίκα του Emily Warren Roebling

συνέχισε την επίβλεψη του έργου ως την ολοκλήρωσή του. Για τα επιτεύγματά της γίνεται λόγος στη βιογραφία της «Silent Builder».

Η γέφυρα Franz Josef από τους Ordish και LeFeuvre στην Πράγα, ολοκληρώθηκε το 1868 (Εικόνα 1.30). Χρησιμοποιήθηκε ένα νέο συνδυαστικό σύστημα στο οποίο κεκλιμένοι ράβδοι ξεκινάνε από τα τέταρτα του κυρίου ανοίγματος της κεντρικής δοκού και καταλήγουν στα άκρα του πυλώνα. Αυτά τα εφελκόμενα μέλη υποστηρίζονται από αναρτήρες των κύριων κρεμαστών καλωδίων με σκοπό να μειωθεί το βέλος τους. Τα δύο εσωτερικά καλώδια είναι συνεχή μεταξύ των πυλώνων και έτσι δεν μεταφέρουν την έντασή τους πίσω στα ακρόβαθρα.



Εικόνα 1.30: Γέφυρα Franz Josef στην Πράγα, 1868

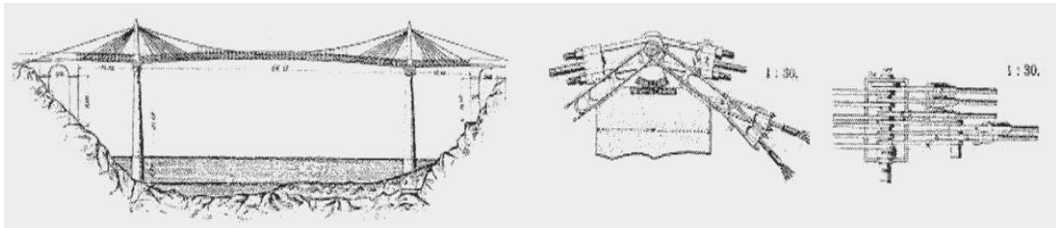
Η γέφυρα Albert κατά μήκος του ποταμού Thames στο Λονδίνο, με άνοιγμα 122m, κατασκευάστηκε και αυτή από τον Ordish (Εικόνα 1.31). Μαζί με τη γέφυρα του Brooklyn συνιστούν τις πιο καλοδιατηρημένες και πιο γνωστές κρεμαστές γέφυρες με δύσκαμπτα καλώδια.



Εικόνα 1.31: Γέφυρα Albert στο Λονδίνο, 1873

Ο Ferdinand Arnodin είναι ένας διάσημος Γάλλος γεφυροποιός που προήγαγε το συλλογισμό της καλωδιωτής κατασκευής με διαφορετικούς τρόπους. Παρόμοια με τον Roebling κατασκεύασε ο ίδιος γέφυρες με σπειροειδή καλώδια.

Στο σχεδιασμό των γεφυρών του χρησιμοποίησε ένα συνδυαστικό σύστημα στο οποίο τα εξωτερικά τέταρτα της δοκού της γέφυρας υποστηρίζονται από καλώδια και μόνο το κεντρικό μισό άνοιγμα υποστηρίζεται από κρεμαστά καλώδια. Το πιο πρόσφατο παράδειγμα είναι η γέφυρα του Saint Pirize το 1879 (Εικόνα 1.32).

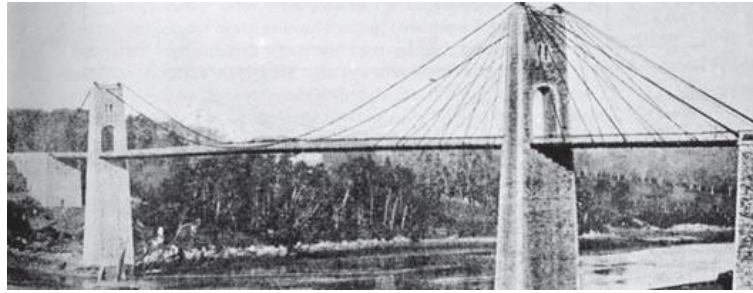


Εικόνα 1.32: Γέφυρα Saint Pirize στη Γαλλία, 1879

Τρεις επιπλέον μεγάλες γέφυρες σχεδιάστηκαν σύμφωνα με αυτή την αρχή. Η γέφυρα κατά μήκος του ποταμού Saone στη Λιόν, έχει άνοιγμα 121m (Εικόνα 1.33). Η γέφυρα κατά μήκος του ποταμού Rhône στην Αβινιόν δείχνει πιο κλασική, αλλά ακολουθεί τις ίδιες αρχές. Η γέφυρα του Bonhomme κατά μήκος του ποταμού Blavet με κύριο άνοιγμα 163m, παρουσιάζει ποικιλία στο σύστημα μεταφοράς των φορτίων, καθώς το κεντρικό άνοιγμα χωρίζεται σε τρία τμήματα, εκ των οποίων τα δύο εξωτερικά κρέμονται από κεκλιμένα καλώδια (Εικόνα 1.34).

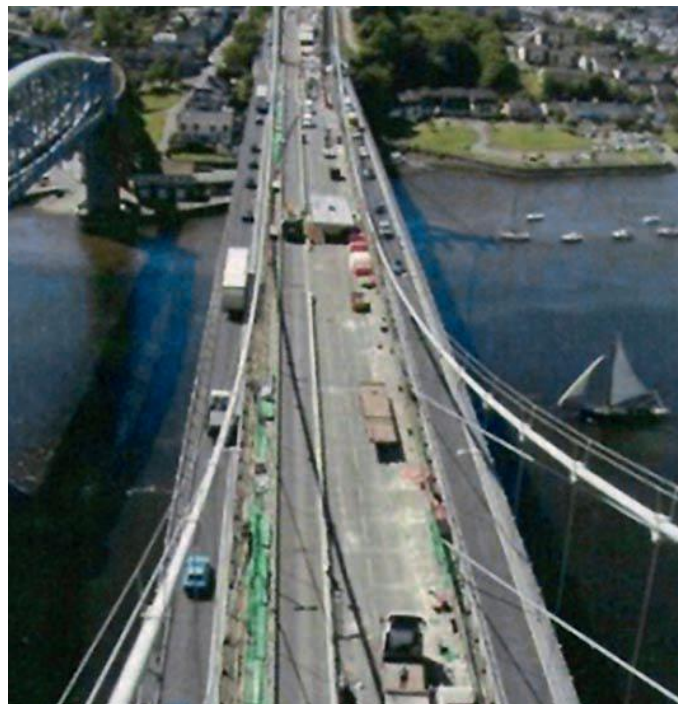


Εικόνα 1.33: Γέφυρα στον ποταμό Saone στη Λιόν της Γαλλίας, 1888



Εικόνα 1.34: Γέφυρα Bonhomme κατά μήκος του ποταμού Blavet, 1904

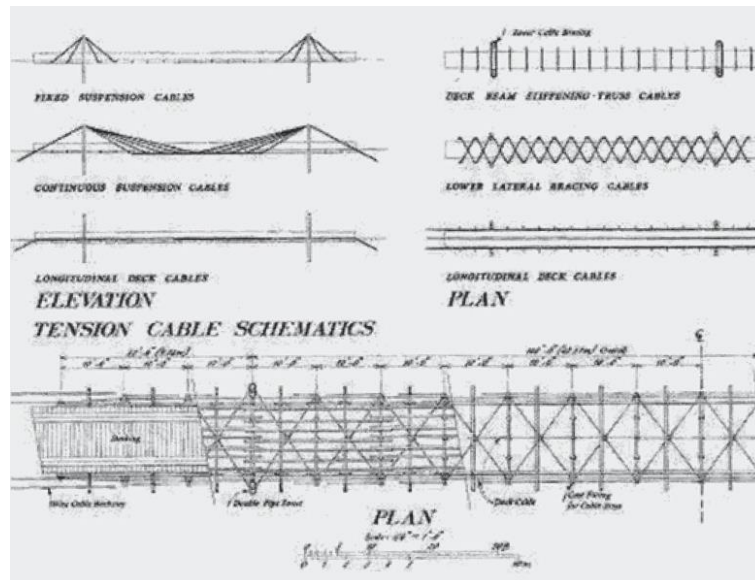
Επίσης, πιο πρόσφατα τα κεκλιμένα καλώδια χρησιμοποιήθηκαν για να αυξήσουν τη δυσκαμψία στις κρεμαστές γέφυρες. Η γέφυρα Tamar διευρύνθηκε προσθέτοντας δύο εξωτερικές λωρίδες κυκλοφορίας. Για να αναλάβει η γέφυρα τα επιπλέον φορτία, εγκαταστάθηκαν κεκλιμένα καλώδια με τη χρήση σύγχρονων και έγκυρων στατικών υπολογισμών για την ακριβή προσομοίωσή τους (Εικόνα 1.35).



Εικόνα 1.35: Η γέφυρα Tamar μετά τη διαπλάτυνση

Μια ελαφριά καλωδιωτή γέφυρα με εύκολο τρόπο ανέγερσης δημιουργήθηκε από τους Αμερικανούς μηχανικούς Edwin Runyon και William Flinn (Εικόνα 1.36). Για να κρατήσουν τη διαμήκη δοκό ελαφριά τα κεντρικά καλώδια δεν

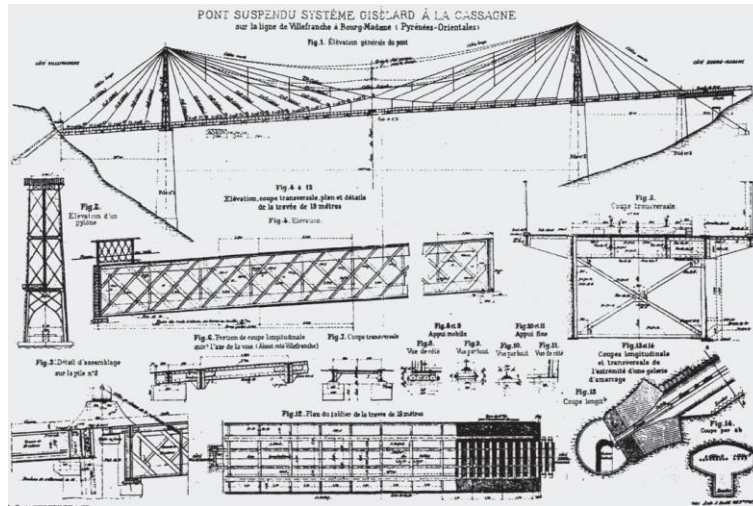
αγκυρώνονταν στη δοκό, αλλά δένονταν από κάτω από το κατάστρωμα μέχρι τον επόμενο πυλώνα. Έτσι, οι θλιπτικές δυνάμεις στη δοκό μειώνονται και ένα συνεχές οριζόντιο καλώδιο βοηθά την κατασκευή της ελαφριάς ανωδομής. Δεν υπάρχει η ανάγκη για κρεμαστά καλώδια πια.



Εικόνα 1.36: Γέφυρα Bluff Dale, 1899

Ο πρώτος σχεδιασμός καλωδιωτών γεφυρών που αποτελούσαν από επαρκώς δύσκαμπτες και οικονομικές κατασκευές, πραγματοποιήθηκε από τον Γάλλο μηχανικό Albert Gisclard το 1899. Το δομικό του σύστημα συνίσταται από κεκλιμένα και οριζόντια καλώδια που δημιουργούν ένα γεωμετρικά σταθερό δικτύωμα από καλώδια. Τα καλώδια αυτά μεταφέρουν τις οριζόντιες συνιστώσες τους στο έδαφος όχι επιβάλλοντας θλίψη στη δοκό της γέφυρας αλλά επιβάλλοντας εφελκυσμό στα γειτονικά καλώδια. Ακριβολογώντας, τα υποσυστήματα είναι τριαρθρωτά τόξα με εφελκυσόμενες διαγωνίους, τα καλώδια.

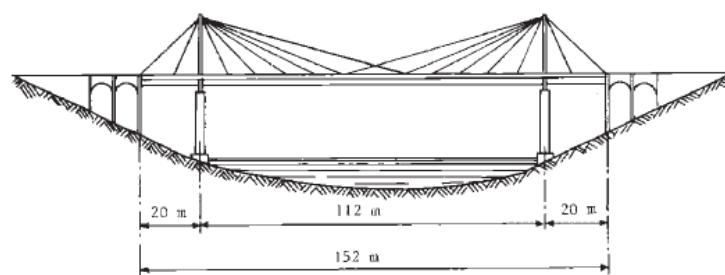
Το σύστημα του Gisclard είναι κατάλληλο για σιδηροδρομικές γέφυρες και χρησιμοποιήθηκε αρκετά στη Γαλλία και στις αποικίες της. Ένα τυπικό παράδειγμα είναι η γέφυρα Cassagne, με άνοιγμα 156m (Εικόνα 1.37).



Εικόνα 1.37: Γέφυρα Cassagne, 1909

Κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής αντοχής που έγινε λίγες μέρες πριν το άνοιγμα της γέφυρας το 1909, το τρένο εκτροχιάστηκε και σκότωσε έξι ανθρώπους συμπεριλαμβανομένου και του Gisclard. Ο γαμπρός του Gisclard, ο Gaston Leinekugel Lecocq, σώθηκε πηδώντας τελευταία στιγμή από το τρένο.

Ο Leinekugel Lecocq εξέλιξε περισσότερο το σύστημα του Gisclard αγκυρώνοντας τα καλώδια προς τα πίσω, εισάγοντας έτσι θλίψη στη δοκό. Μόνο τα κεντρικά καλώδια αγκυρώνονται στον άλλον πυλώνα εισάγοντας εφελκυσμό. Ένα τυπικό παράδειγμα είναι η γέφυρα Lézardrieux στη Γαλλία, που ολοκληρώθηκε το 1925 (Εικόνα 1.38).

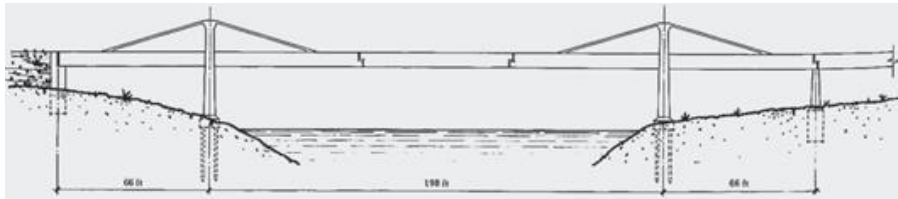


Εικόνα 1.38: Γέφυρα, Lezardrieux στη Γαλλία, 1925

Το τελικό βήμα έγινε από τον Ισπανό μηχανικό Eduardo Torroja με την γέφυρα Tempul Aqueduct το 1926. Αυτή η γέφυρα είχε σχεδιαστεί αρχικά ως μια συνεχής δοκός με δύο βάθρα στο κυρίως άνοιγμα. Όταν ξεκαθαρίστηκε ότι αυτά τα βάθρα

δεν μπορούσαν να κατασκευαστούν λόγω της κακής ποιότητας του εδάφους, τα αντικατέστησε με καλώδια.

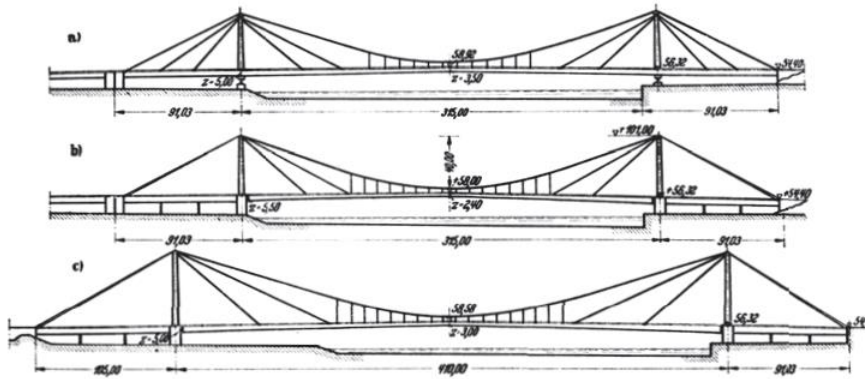
Για πρώτη φορά χρησιμοποίησε υψηλής αντοχής προεντεταμένες ράβδους για τα καλώδια και τις τάνυσε με τις δυνάμεις που είχαν υπολογιστεί ανεβάζοντας τις στις κορυφές των πυλώνων με υδραυλικά συστήματα. Τελικά τα καλώδια περιβλήθηκαν από σκυρόδεμα για να προστατευτούν από τη διάβρωση (Εικόνα 1.39).



Εικόνα 1.39: Γέφυρα Tempul Aqueduct, 1929, 60m

Το 1938 ο Γερμανός μηχανικός Franz Dischinger σχεδίασε μια υψηλού επιπέδου σιδηροδρομική γέφυρα κατά μήκος του ποταμού Elbe κοντά στο Hamburg. Διαπίστωσε και αυτός ότι μια κρεμαστή γέφυρα θα ήταν πολύ εύκαμπτη για τα μεγάλα σιδηροδρομικά φορτία.

Η τελική του λύση είναι αντίστοιχη με αυτή του Roebling και των υπολοίπων. Προσέθεσε δηλαδή καλώδια και στις δύο πλευρές του κεντρικού ανοίγματος (Εικόνα 1.40). Δημοσίευσε τα αποτελέσματά του το 1949, επισημαίνοντας τη μεγάλη επιρροή των καλωδίων στα παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά των γεφυρών και επινόησε μεθόδους υπολογισμού της μειωμένης δυσκαμψίας τους εξαιτίας της αλλαγής του βέλους. Επιπλέον, αναγνώρισε το πλεονέκτημα των υψηλής αντοχής χαλύβδινων καλωδίων και την αναγκαιότητα της τάνυσης των καλωδίων στις καθορισμένες δυνάμεις τους. Ακόμα, επιβεβαίωσε ότι ο Roebling είχε ήδη ανακαλύψει, ότι δηλαδή τα επιπλέον καλώδια συνεισφέρουν στην αεροδυναμική σταθερότητα της γέφυρας.



Εικόνα 1.40: Γέφυρα Elbe River στο Hamburg

Με τις δημοσιεύσεις του Dischinger, πάνω στα χαρακτηριστικά των καλωδίων των καλωδιωτών γεφυρών, ολοκληρώθηκε η ανάπτυξη των καλωδιωτών γεφυρών πριν από τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο.

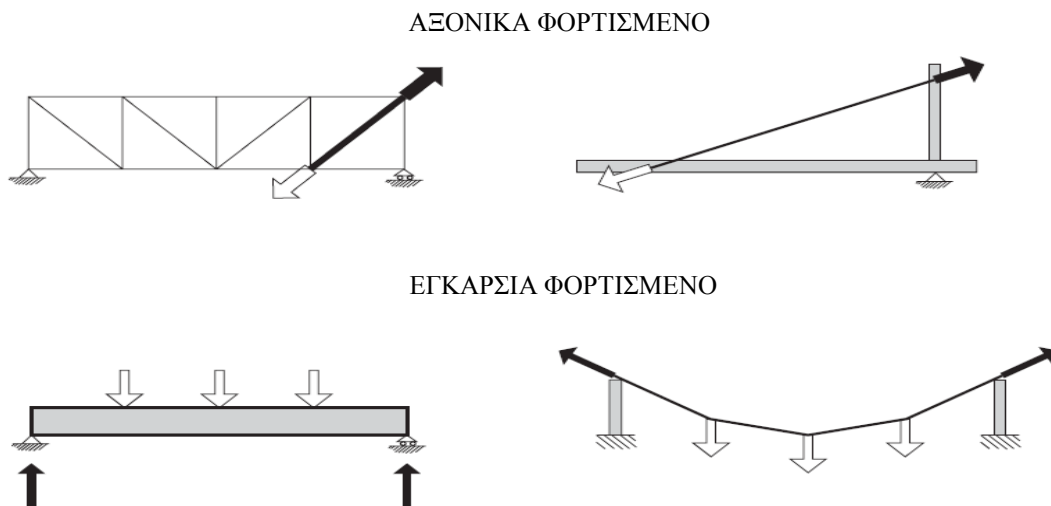
2ο Κεφάλαιο: Το καλώδιο ως μεμονωμένο δομικό στοιχείο

2.1 Γενικά

Για την κατανόηση της συμπεριφοράς των γεφυρών που στηρίζονται σε καλώδια απαιτείται η γνώση της απόκρισης του βασικού τους στοιχείου, του καλωδίου, υποβαλλόμενου σε διάφορες φορτίσεις. Διαισθητικά το καλώδιο μπορεί να συνδεθεί με την απόκριση των δοκών και των στύλων. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις το καλώδιο επιδεικνύει πολύ διαφορετική συμπεριφορά από αυτή των δοκών και των υποστυλωμάτων (Gimsing & Georgakis, 2012).

Στις καλωδιωτές κατασκευές, το καλώδιο χρησιμοποιείται για να παραλάβει είτε αξονικού φορτίου είτε εγκάρσιου φορτίου. Ένα απλό παράδειγμα ενός αξονικά φορτιζόμενου καλωδίου είναι εκείνο μιας καλωδιωτής γέφυρας. Η μεταφορά των φορτίων σε αυτή τη περίπτωση μπορεί να προσεγγισθεί από την εφελκόμενη διαγώνιο ενός δικτυώματος (Σχήμα 2.1). Ένα απλό παράδειγμα ενός εγκάρσια φορτισμένου καλωδίου είναι το κύριο καλώδιο μιας κρεμαστής γέφυρας. Η συμπεριφορά του μοιάζει με αυτή της δοκού (Σχήμα 2.1).

Η παρούσα εργασία ασχολείται μόνο με τις καλωδιωτές γέφυρες, οπότε στη συνέχεια θα παρουσιαστεί η συμπεριφορά του αξονικά φορτισμένου καλωδίου.



Σχήμα 2.1: Αξονικά και εγκάρσια φορτισμένο καλώδιο σε σύγκριση με διαγώνιο δικτυώματος και δοκό, αντίστοιχα

2.2 Μηχανικές ιδιότητες καλωδίου

Στην ενότητα αυτή θα εξεταστούν οι ιδιότητες της αντοχής και της χαλάρωσης του χάλυβα που χρησιμοποιείται για την παρασκευή των καλωδίων.

Οι πιο χαρακτηριστικές παράμετροι, που απαιτούνται για το σχεδιασμό ενός τυπικού γαλβανισμένου σύρματος, το οποίο αποτελεί τμήμα ενός καλωδίου, φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης (Σχήμα 2.2).

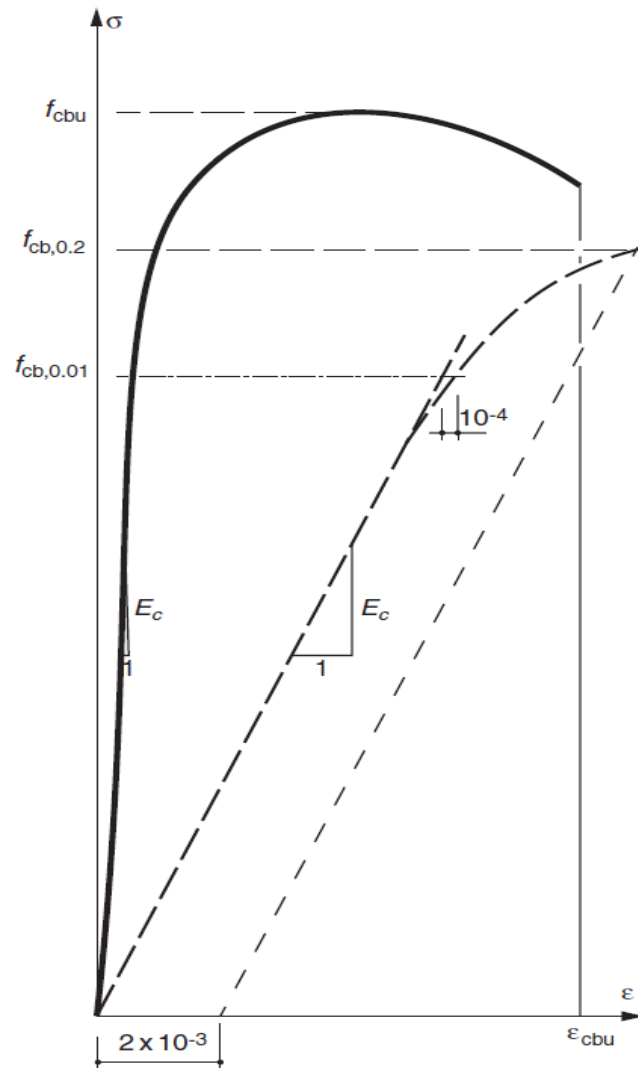
Αυτές οι παράμετροι είναι:

- το μέτρο ελαστικότητας E_c
- το συμβατικό όριο διαρροής για παραμόρφωση 0,2% $f_{cb,0.2}$
- το όριο αναλογίας (για παραμόρφωση 0,01%) $f_{cb,0.01}$
- η αντοχή στον εφελκυσμό f_{cbu}
- η συνολική επιμήκυνση κατά τη θραύση ϵ_{cbu}

Το μέτρο ελαστικότητας είναι ελαφρώς μικρότερο από ένα συνηθισμένο δομικό χάλυβα. Έτσι, για το σχεδιασμό λαμβάνεται η τιμή $E_c = 205\text{GPa}$.

Για τα σύρματα που χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατασκευή καλωδίων η ελάχιστη αντοχή σε εφελκυσμό λαμβάνεται ίση με 1570MPa και το συμβατικό όριο διαρροής για παραμόρφωση 0,2% ίσο με 1180MPa. Το όριο αναλογίας είναι περίπου το 65 – 70% της εφελκυστικής αντοχής. Για το σχεδιασμό, το όριο αναλογίας υποδεικνύει το ανώτερο όριο των τάσεων στην κατάσταση λειτουργίας, καθώς είναι ανεπίτρεπτο για τα σύρματα να παρουσιάζουν μόνιμες παραμορφώσεις για τα φορτία που επαναλαμβάνονται πολλές φορές κατά τη διάρκεια λειτουργίας μιας γέφυρας.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης του Σχήματος 2.2, ο χάλυβας του καλωδίου δεν εμφανίζει μεγάλη πλαστιμότητα και έτσι η επιμήκυνση στη θραύση είναι σημαντικά μικρότερη από εκείνη του δομικού χάλυβα. Οι διαθέσιμες πλαστικές παραμορφώσεις επαρκούν για να επιτρέψουν μια τοπική ανακατανομή των δυνάμεων μεταξύ των συρμάτων με διαφορετικές αρχικές τάσεις λόγω των ατελειών κατά τη διάρκεια της ανέγερσης.

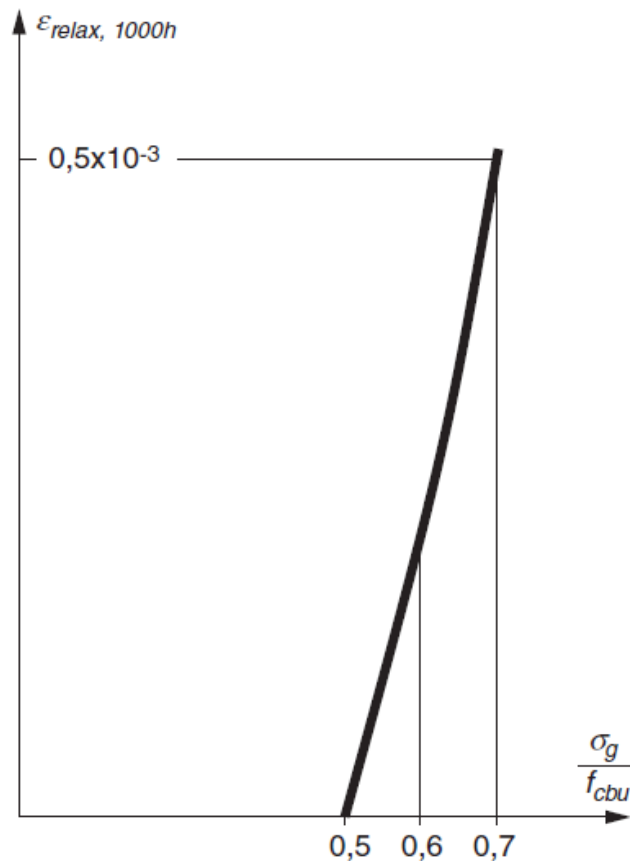


Σχήμα 2.2: Τυπική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης ενός σύρματος καλωδίου (η διακεκομμένη γραμμή έχει 10-φορές μεγαλύτερη κλίμακα κατά τον οριζόντιο άξονα από την κανονική καμπύλη)

Το φαινόμενο της χαλάρωσης πρέπει να ληφθεί υπόψη για τον ορισμό του επιτρεπόμενου επιπέδου των τάσεων του χάλυβα του καλωδίου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, η χαλάρωση επιταχύνεται σημαντικά όταν η μόνιμη τάση σ_g επιλέγεται να πάρει μια τιμή μεγαλύτερη του 50% της εφελκυστικής αντοχής. Οι τάσεις από τα μόνιμα φορτία πρέπει επομένως να μην υπερβαίνουν το $0,45f_{cbu}$ εκτός αν χρησιμοποιηθεί ένας χαμηλής χαλάρωσης χάλυβας.

Πρέπει να τονιστεί ότι με το συντελεστή ασφαλείας έναντι θραύσης στο 2.2, η απαίτηση μιας τάσης από μόνιμα φορτία να είναι κάτω από το 45% της μέγιστης

αντοχής θα ικανοποιείται αυτόματα καθώς η συνολική τάση από τα μόνιμα και τα κινητά φορτία θα πρέπει να είναι κάτω από $f_{cbu} / 2,2 \approx 0,45f_{cbu}$. Παρ' όλα αυτά, αν οι συντελεστές ασφαλείας μειωθούν, τότε η χαλάρωση θα γίνει καθοριστική για τη διαστασιολόγηση.

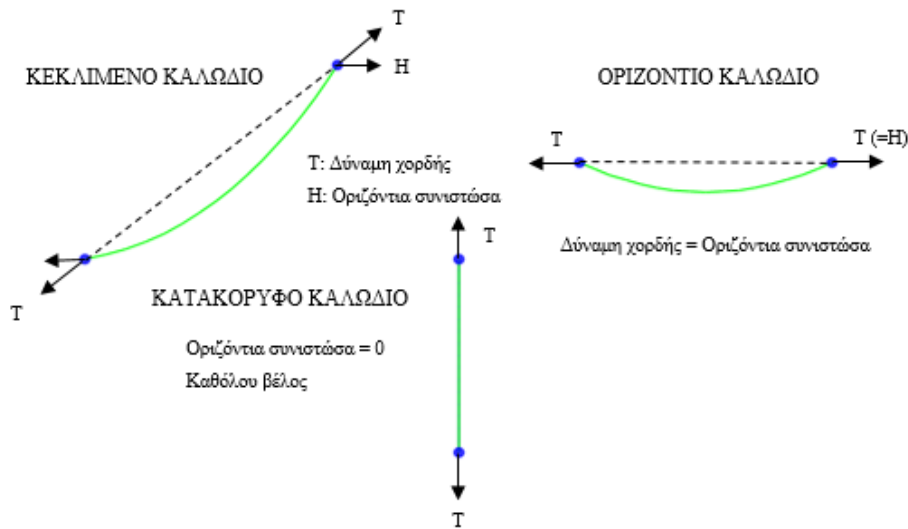


Σχήμα 2.3: Μόνιμη παραμόρφωση εξαιτίας της χαλάρωσης ενός σύρματος καλωδίου υποβαλλόμενο σε μια μόνιμη τάση σ_g για 1000 ώρες

2.3 Αξονικά φορτισμένο καλώδιο

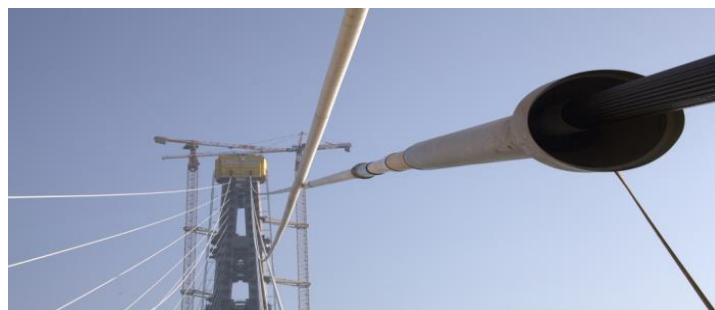
Το βέλος ενός εγκάρσια φορτισμένου καλωδίου είναι απαραίτητο για τη μεταφορά του φορτίου, καθώς η δύναμη του καλωδίου στα άκρα του είναι αντιστρόφως ανάλογη του βέλους. Έτσι, ένα μικρό βέλος ισοδυναμεί με μεγάλες δυνάμεις καλωδίου και συνεπώς με υπερδιαστασιολόγηση του.

Αντίθετα, το βέλος ενός αξονικά φορτισμένου καλωδίου δεν είναι απαραίτητο για τη μεταφορά του φορτίου και συνεπώς είναι ανεπιθύμητο. Στην πραγματικότητα όμως, μόνο όταν το καλώδιο είναι κατακόρυφο δεν παρουσιάζει βέλος, καθώς σε αντίθετη περίπτωση (κεκλιμένο ή οριζόντιο καλώδιο) δημιουργείται βέλος λόγω του ίδιου βάρους του (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Κεκλιμένο, οριζόντιο και κατακόρυφο καλώδιο φορτισμένα με το ίδιο βάρος τους και μια δύναμη χορδής T

Σε ένα αξονικά φορτισμένο καλώδιο, το βέλος που δημιουργείται λόγω του ίδιου βάρους του δεν είναι εύκολα αντιληπτό αν παρατηρηθεί από μακρινή απόσταση εξαιτίας της μέτριας έντασης του. Συνεπώς, τα καλώδια των καλωδιωτών γεφυρών φαίνονται ίσια από τις περισσότερες οπτικές γωνίες. Μόνο αν το καλώδιο παρατηρείται κατά μήκος της χορδής του, το βέλος του θα είναι ορατό. (Εικόνα 2.1).



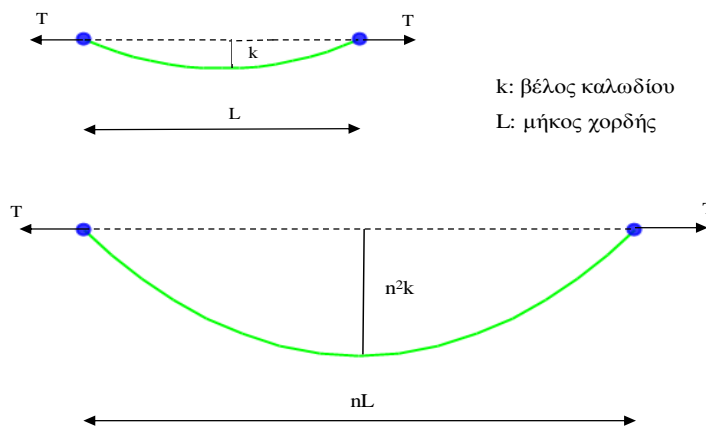
Εικόνα 2.1: Ορατό βέλος καλωδίων καλωδιωτής γέφυρας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στα αξονικά φορτισμένα καλώδια, το βέλος δημιουργείται εξαιτίας του βάρους τους. Έτσι, το βέλος ενός καλωδίου είναι ανάλογο της πυκνότητας του υλικού του και αντιστρόφως ανάλογο της αντοχής του. Επομένως, για να κρατηθεί το βέλος ενός καλωδίου σχετικά μικρό θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί υλικό με μεγάλο λόγο αντοχής προς πυκνότητα.

Για ένα καλώδιο δεδομένης διατομής και αξονικής δύναμης, το βέλος του (k) θα είναι ανάλογο του τετραγώνου του μήκους χορδής του (L) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Έτσι, ο λόγος του μέγιστου βέλους προς το μήκος χορδής του καλωδίου k / L (λόγος βέλους) είναι ανάλογος του μήκους χορδής του.

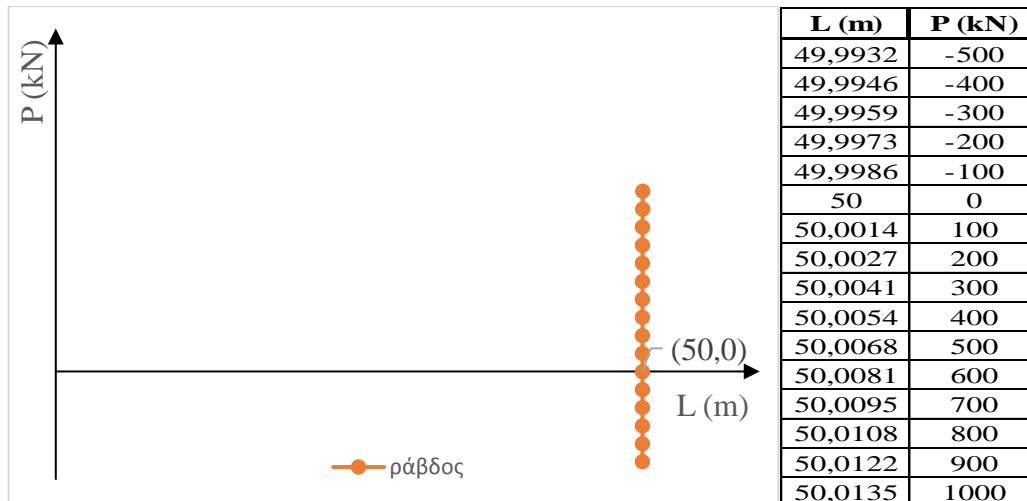
Σε προηγούμενη παράγραφο, τονίστηκε ότι η συμπεριφορά ενός αξονικά φορτισμένου καλωδίου μοιάζει με εκείνη μιας ράβδου δικτυώματος. Στη συνέχεια, θα γίνει σύγκριση μεταξύ αυτών των δύο στοιχείων για να εντοπιστούν οι διαφορές στη συμπεριφορά τους.

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στη σύγκριση ήταν ένας υψηλής αντοχής χάλυβας με όριο διαρροής $f_y = 1180\text{MPa}$, εφελκυστική αντοχή $f_u = 1570\text{MPa}$ και μέτρο ελαστικότητας $E = 205\text{GPa}$. Το καλώδιο είχε διατομή $A = 0,0176\text{m}^2$ και απαραμόρφωτο μήκος $L_0 = 50\text{m}$. Όμοια, η ράβδος είχε διατομή κιβωτοειδή σχήματος τετραγώνου με πλευρά $a = 0,138\text{m}$, πάχος $t = 0,05\text{m}$ (άρα $A = 0,0176\text{m}^2$) και απαραμόρφωτο μήκος $L_0 = 50\text{m}$.



Σχήμα 2.5: Σχέση βέλους με μήκος αξονικά φορτισμένου καλωδίου

Η καμπύλη δύναμης – παραμορφωμένου μήκους μιας οριζόντιας ράβδου δίνεται στο Σχήμα 2.6. Παρατηρείται ότι η ράβδος για μηδενική δύναμη θα έχει το αρχικό της απαραμόρφωτο μήκος L_0 και για μια εφελκυστική δύναμη θα επιμηκύνεται, ενώ για μια θλιπτική δύναμη θα βραχύνεται.

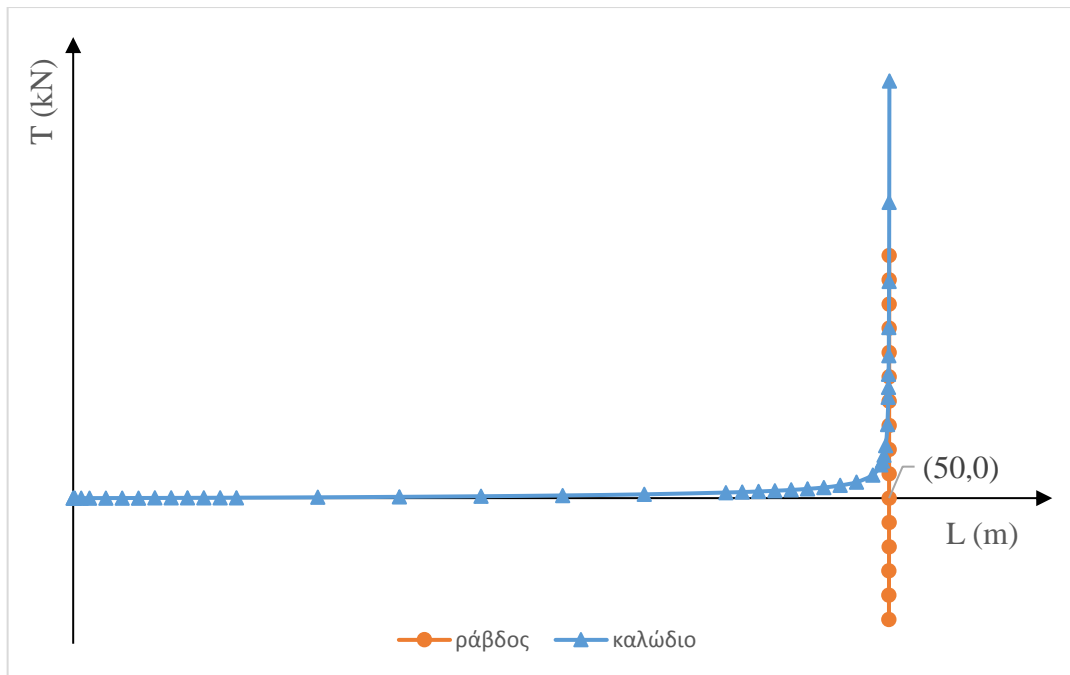


Σχήμα 2.6: Καμπύλη δύναμης – παραμορφωμένου μήκους ευθύγραμμης ράβδου

Η καμπύλη δύναμης – μήκους χορδής του καλωδίου είναι αρκετά διαφορετική από εκείνη της ευθύγραμμης ράβδου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Για μηδενική δύναμη η απόσταση μεταξύ των ακραίων στηρίξεων του καλωδίου ουσιαστικά θα είναι μηδενική, καθώς το καλώδιο θα κρέμεται χαλαρό κάτω από τις στηρίξεις (είναι ουσιαστικά το ίδιο σημείο οι στηρίξεις του). Στη συνέχεια, όταν το καλώδιο υποβάλλεται σε εφελκυσμό, ακόμα και για μικρού μεγέθους δυνάμεις, θα αρχίσει να τεντώνεται και να παίρνει αλυσοειδή μορφή. Για μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις, η καμπύλη αρχίζει να γίνεται πιο απότομη και τελικά καταλήγει ασυμπτωτικά στην αντίστοιχη καμπύλη της ευθύγραμμης ράβδου.

L (m)	0,001	0,01	0,1	0,5	1	2	3	4	5	6	7
T (kN)	7,645E-05	0,00076	0,00782	0,0467	0,1051	0,241	0,3965	0,5685	0,7556	0,9569	1,1721
L (m)	8	9	10	15	20	25	30	35	40	41	42
T (kN)	1,4011	1,6438	1,9004	3,403	5,3278	7,8077	11,0953	15,715	22,9971	25,0552	27,4465
L (m)	43	44	45	46	47	48	49	49,5	49,6	49,7	49,8
T (kN)	30,2816	33,7324	38,0839	43,855	52,1241	65,6679	95,4449	136,675	153,11	177,029	216,685
L (m)	49,9	49,95	49,96	49,97	49,98	49,99	50	50,01	50,02		
T (kN)	303,3424	415,541	456,204	510,404	586,765	702,444	892,795	1218,58	1719,27		

Πίνακας 2.1: Δεδομένα καμπύλης δύναμης – μήκους χορδής καλωδίου



Σχήμα 2.7: Καμπύλη δύναμης – μήκους χορδής καλωδίου

Από την καμπύλη δύναμης – μήκους χορδής του καλωδίου παρατηρείται ότι για οποιαδήποτε απόσταση μεταξύ των σημείων στήριξης, το καλώδιο θα βρίσκεται σε εφελκυσμό. Συνεπώς, το καλώδιο δεν θα είναι αφόρτιστο ακόμα και αν βραχυνθεί σε τέτοιο σημείο όπου θα προκαλέσει σημαντική θλίψη στην αντίστοιχη ευθύγραμμη ράβδο.

Επίσης, από το Σχήμα 2.7 φαίνεται ότι η καμπύλη του καλωδίου είναι αρκετά οριζόντια μέχρι και τα 30m περίπου πράγμα που ισοδυναμεί με σχεδόν μηδενική δύναμη καλωδίου. Συνεπώς, σε αυτό το εύρος, το καλώδιο θα είναι πολύ εύκαμπτο και θα παρουσιάζει μεγάλες επιμηκύνσεις για μικρές προσαυξήσεις της δύναμης του καλωδίου.

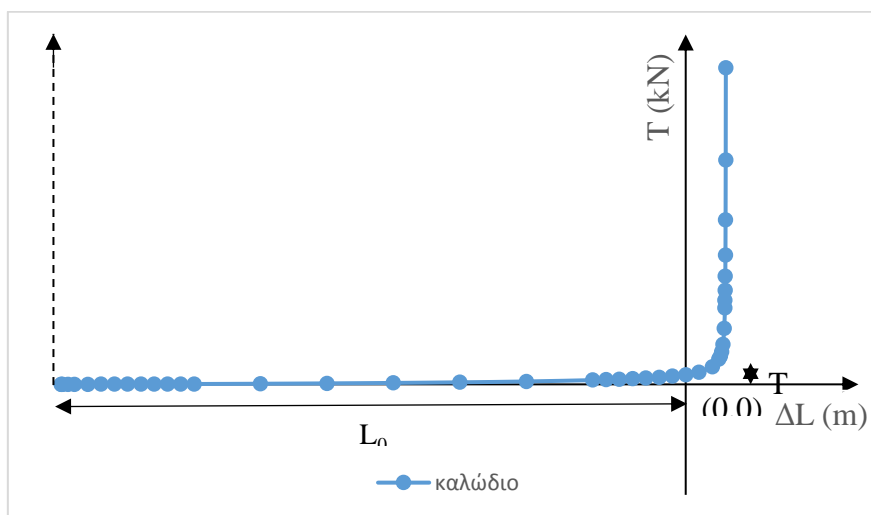
Οι καμπύλες των Σχημάτων 2.6 και 2.7 έχουν για αρχή των αξόνων το $L = 0$. Ωστόσο, στην πράξη είναι καλύτερα να συνδέεται η δύναμη με την επιμήκυνση από μια αρχική κατάσταση από ότι με το συνολικό μήκος του μέλους. Στα ευθύγραμμα μέλη με αξονική δύναμη, η επιμήκυνση μετριέται από το απαραμόρφωτο μήκος έτσι ώστε να συνδέεται με την παρακάτω γραμμική σχέση:

$$P = EA \frac{\Delta l}{l} \xrightarrow[\sigma = \frac{P}{A} \text{ και } \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}]{\sigma = E \times \varepsilon} \sigma = E \times \varepsilon \quad (\text{Νόμος του Hooke}) \quad (2.1)$$

όπου E = το μέτρο ελαστικότητας του πραγματικού υλικού.

Στα καλώδια οι επιμήκυνσεις μετριοούνται από μια αρχική κατάσταση που δρουν μόνο τα μόνιμα φορτία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8. T_0 είναι η δύναμη του καλωδίου υπό τα μόνιμα φορτία και L_0 το αντίστοιχο μήκος της χορδής του καλωδίου. Για μια δύναμη $T > T_0$ το μήκος της χορδής θα αυξηθεί κατά ΔL και το βέλος k θα μειωθεί κατά Δk . Αυτή η αλλαγή του βέλους είναι ουσιαστικά η εξήγηση της καμπύλης μορφής του διαγράμματος δύναμης – επιμήκυνσης του καλωδίου.

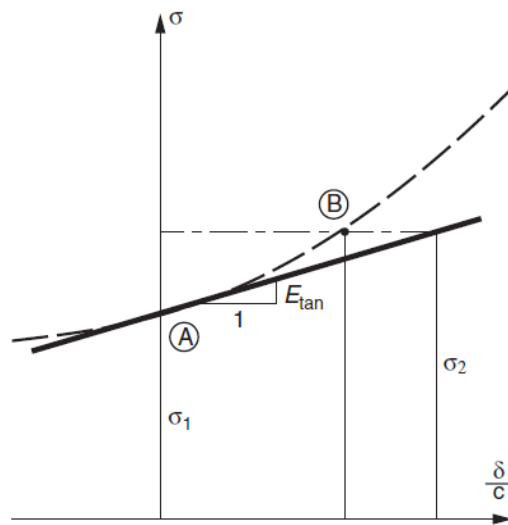
Η μη-γραμμική συμπεριφορά του καλωδίου δυσκολεύει τους υπολογισμούς, ειδικά αν τα διαθέσιμα προγράμματα ανάλυσης βασίζονται στην ελαστική συμπεριφορά κάθε μέλους. Σε αυτές τις περιπτώσεις προτιμότερο θα ήταν να γραμμικοποιηθεί η σχέση δύναμης – επιμήκυνσης του καλωδίου. Μια απλή γραμμικοποίηση μπορεί να γίνει αντικαθιστώντας την καμπύλη με την εφαπτομένη που αντιστοιχεί στο σημείο της αρχικής κατάστασης υπό τα μόνιμα φορτία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9. Με αυτήν τη γραμμικοποίηση το καλώδιο αντικαθίσταται από μια ευθύγραμμη ράβδο με μέτρο ελαστικότητας E_{tan} , που αντιστοιχεί στην κλίση ενός διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης.



Σχήμα 2.8: Καμπύλη δύναμης - επιμήκυνσης καλωδίου με αρχική κατάσταση εκείνη της απόκρισης υπό τα μόνιμα φορτία

Το εφαπτομενικό μέτρο E_{tan} θα δίνει επαρκή αποτελέσματα όταν ο λόγος των κινητών προς τα μόνιμα φορτία είναι μικρός, έτσι ώστε οι τάσεις του καλωδίου να μην ξεπερνάνε πολύ τις τάσεις λόγω μόνιμων φορτίων. Ωστόσο, αν ο λόγος αυτός είναι μεγάλος η προσέγγιση μέσω του εφαπτομενικού μέτρου υπερεκτιμά την ευκαμψία των καλωδίων με αυξημένη ένταση και την υποτιμά με μειωμένη.

Όπου υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις σε σύγκριση με την πραγματική συμπεριφορά του καλωδίου, η δυσκαμψία του καλωδίου προσεγγίζεται από το τέμνον μέτρο – secant stiffness.

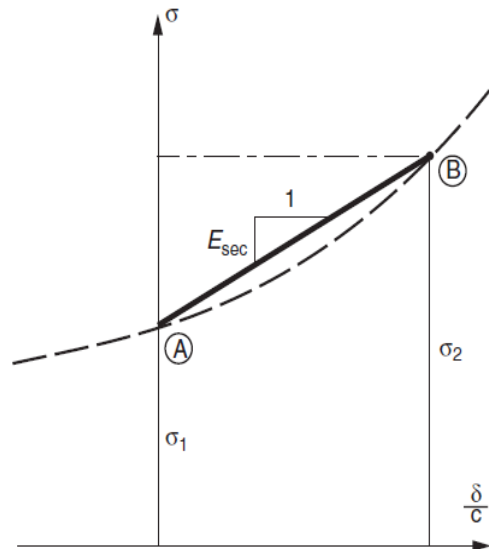


Σχήμα 2.9: Ορισμός εφαπτομενικού μέτρου για τη δυσκαμψία του καλωδίου

Με τη προσέγγιση μέσω του τέμνοντος μέτρου, η καμπύλη που ξεκινά από το σημείο A (αντιστοιχεί στην αρχική τάση λόγω μόνιμων φορτίων σ_1) και καταλήγει στο σημείο B (αντιστοιχεί στην τάση λόγω μόνιμων και κινητών φορτίων σ_2) αντικαθίσταται από μια ευθεία που περνάει από αυτά τα δύο σημεία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Έτσι, προσδιορίζεται ακριβώς η επιμήκυνση του καλωδίου και δεν εμπεριέχονται λάθη στους μετέπειτα υπολογισμούς. Ωστόσο, οι υπολογισμοί μέσω του τέμνοντος μέτρου είναι πιο περίπλοκοι από εκείνους μέσω του εφαπτομενικού μέτρου.

Το εφαπτομενικό μέτρο απαιτεί τη γνώση μόνο της κατάστασης υπό τα μόνιμα φορτία για να προσδιοριστεί, ενώ το τέμνον μέτρο απαιτεί τη γνώση τόσο της

αρχικής κατάστασης υπό τα μόνιμα φορτία όσο και της τελικής υπό τα μόνιμα και τα κινητά φορτία. Ωστόσο, η τάση υπό τα μόνιμα και τα κινητά φορτία προσδιορίζεται μετά την εφαρμογή της ανάλυσης, η οποία για να πραγματοποιηθεί πρέπει να είναι γνωστό το μέτρο ελαστικότητας των καλωδίων.



Σχήμα 2.10: Ορισμός τέμνοντος μέτρου δυσκαμψίας του καλωδίου

Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα είναι απαραίτητη η εφαρμογή μιας επαναληπτικής διαδικασίας σε όλα τα καλώδια ξεχωριστά και για όλες τις καταστάσεις φόρτισης. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις αρκεί ο υπολογισμός του τέμνοντος μέτρου, που αντιστοιχεί στη μέγιστη δύναμη του καλωδίου. Έπειτα, αυτή η τιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες καταστάσεις φόρτισης, παρόλο που μπορεί να αναπτυχθούν μικρότερες δυνάμεις από τη μέγιστη.

2.4 Στατική ανάλυση αξονικά φορτισμένου καλωδίου

Στις καλωδιωτές γέφυρες, όπου τα καλώδια υποβάλλονται σε αξονική ένταση, το κυρίαρχο παραμορφωσιακό μέγεθος που εξετάζεται είναι η σχέση της δύναμης χορδής T και του μήκους χορδής L .

Το ίδιο βάρος του καλωδίου κατανέμεται ομοιόμορφα κατά μήκος της καμπύλης του. Η μορφή αυτής της καμπύλης είναι η αλυσοειδής, ωστόσο μπορεί να προσομοιωθεί χωρίς τη δημιουργία μεγάλου σφάλματος και με μια παραβολική καμπύλη.

Αρχικά, η γενική εξίσωση της αλυσοειδούς καμπύλης ενός οριζόντιου καλωδίου είναι:

$$y = \frac{T}{g_{cb}} \left(\cosh \left(\frac{g_{cb}}{T} x + C_1 \right) \right) + C_2 \quad (2.2)$$

ενώ η αντίστοιχη εξίσωση της παραβολής είναι:

$$y = \frac{g_{cb} x^2}{2T} + C_1 x + C_2 \quad (2.3)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την αρχή των αξόνων στο σημείο που παρουσιάζεται το μέγιστο βέλος (στο μέσον του καλωδίου) προκύπτουν οι εξής αρχικές συνθήκες:

$$y(0) = 0 \text{ και}$$

$$y'(0) = 0$$

Έτσι οι εξισώσεις (2.2) και (2.3) γίνονται:

$$y = \frac{T}{g_{cb}} \left(\cosh \left(\frac{g_{cb}}{T} x \right) - 1 \right) \quad (2.4)$$

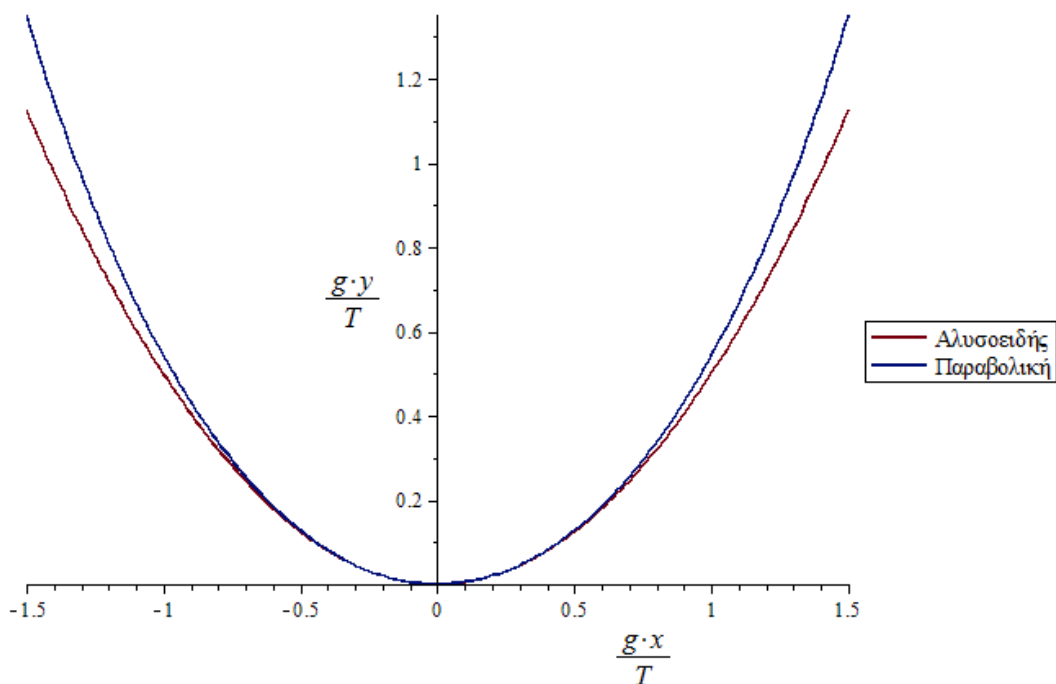
$$y = \frac{g_{cb} x^2}{2T} \quad (2.5)$$

Για να συγκριθούν οι δύο εξισώσεις πρέπει πρώτα να αδιαστοποιηθούν. Αυτό συμβαίνει με πολλαπλασιασμό και των δύο μελών και των δύο εξισώσεων με τον παράγοντα g_{cb}/T . Συνεπώς, προκύπτει:

$$\frac{g_{cb}}{T} y = \cosh\left(\frac{g_{cb}}{T} x\right) - 1 \quad (2.6)$$

$$\frac{g_{cb}}{T} y = \frac{1}{2} \left(\frac{g_{cb}}{T} x\right)^2 \quad (2.7)$$

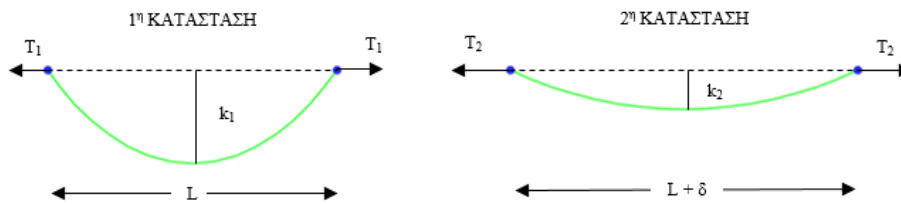
Η γραφική παράσταση των εξισώσεων (2.6) και (2.7) παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.11. Παρατηρείται ότι υπάρχει πολύ μικρή απόκλιση ανάμεσα στις δύο καμπύλες ειδικά για τις τιμές όπου $g_{cb}y/T < 1$ (Κουμούσης, 2008). Έτσι θα ήταν λογικό στη συνέχεια να χρησιμοποιήσουμε μόνο την εξίσωση της παραβολικής μορφής λόγω της απλοϊκής της μορφής. Ωστόσο, εξαιτίας του διαφορικού και ολοκληρωτικού λογισμού που θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω η εξίσωση της παραβολής δεν δίνει εύχρηστους τύπους και συνεπώς θα προτιμηθεί η χρήση της αλυσοειδούς καμπύλης. Η μετατροπή της σε παραβολική μορφή θα γίνει στο τελικό στάδιο των υπολογισμών. Θα δοθεί, λοιπόν, η δυνατότητα σύγκρισης των δύο καμπύλων με τον τρόπο που παρουσιάζεται στη συγκεκριμένη ενότητα.



Σχήμα 2.11: Σύγκριση εξισώσεων αλυσοειδούς και παραβολικής καμπύλης

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι ως δύναμη T ορίζεται η δύναμη χορδής του καλωδίου η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί για την εφαπτομενική δύναμη N χωρίς μεγάλο σφάλμα για τα περισσότερα μήκη καλωδίων. Ωστόσο, αυτό θα αποδειχθεί στο τέλος της ενότητας που θα έχει ολοκληρωθεί η ανάλυση του καλωδίου (βλ. σελ.64).

Συνεπώς, η σύγκριση της αλυσοειδούς με την παραβολική καμπύλη γίνεται θεωρώντας και πάλι ένα οριζόντιο καλώδιο. Λαμβάνονται δύο καταστάσεις φόρτισης με δυνάμεις χορδής T_1 και T_2 , αντίστοιχα (Σχήμα 2.12).



Σχήμα 2.12: Δύο καταστάσεις φόρτισης ενός οριζόντιου καλωδίου με αξονικές δυνάμεις T_1 και T_2

Στην πρώτη κατάσταση η εξίσωση της αλυσοειδούς καμπύλης δίνεται από τον τύπο (η αρχή των αξόνων θεωρείται ότι βρίσκεται στο αριστερό άκρο του καλωδίου):

$$y = \frac{T_1}{g_{cb}} \left[\cosh \left(\frac{g_{cb}}{T_1} \left(x - \frac{1}{2} L \right) \right) - \cosh \left(\frac{g_{cb} \times L}{2T_1} \right) \right] \quad (2.8)$$

και στη δεύτερη κατάσταση:

$$y = \frac{T_2}{g_{cb}} \left[\cosh \left(\frac{g_{cb}}{T_2} \left(x - \frac{L + \delta}{2} \right) \right) - \cosh \left(\frac{g_{cb} \times (L + \delta)}{2T_2} \right) \right] \quad (2.9)$$

όπου g_{cb} είναι το ίδιο βάρος του καλωδίου ανά μέτρο μήκους και δ είναι η επιμήκυνση του καλωδίου, που ορίζεται ως η αύξηση της απόστασης μεταξύ των σημείων στήριξης.

Τα μήκη του καλωδίου s_1 και s_2 ορίζονται ως:

$$s_1 = \int_0^L \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = 2 \frac{T_1}{g_{cb}} \sinh\left(\frac{g_{cb} \times L}{2T_1}\right) \quad (2.10)$$

$$s_2 = 2 \frac{T_2}{g_{cb}} \sinh\left(\frac{g_{cb} \times (L + \delta)}{2T_2}\right) \quad (2.11)$$

Η ελαστική παραμόρφωση $\varepsilon(x)$ ενός σημείου πάνω στο καλώδιο με συντεταγμένες (x, y) δίνεται από τον τύπο:

$$\varepsilon(x) = \frac{N(x)}{EA} = \frac{T}{EA} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad (2.12)$$

έτσι οι συνολικές επιμηκύνσεις από την αφόρτιστη κατάσταση, Δs_1 και Δs_2 , βρίσκονται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \Delta s_1 &= \int_0^L \varepsilon_1(x) \frac{\partial s_1}{\partial x} dx = \frac{T_1}{EA} \int_0^L \left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right] dx \\ &= \frac{T_1^2}{2EA g_{cb}} \left[\sinh\left(\frac{g_{cb} \times L}{T_1}\right) + \frac{g_{cb} \times L}{T_1} \right] \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\Delta s_2 = \frac{T_2^2}{2EA g_{cb}} \left[\sinh\left(\frac{g_{cb} \times (L + \delta)}{T_2}\right) + \frac{g_{cb} \times (L + \delta)}{T_2} \right] \quad (2.14)$$

Επειδή όμως $\delta \ll L$ η σχέση (2.14) για τη δεύτερη κατάσταση γίνεται:

$$\Delta s_2 = \frac{T_2^2}{2EA g_{cb}} \left[\sinh\left(\frac{g_{cb} \times L}{T_2}\right) + \frac{g_{cb} \times L}{T_2} \right] \quad (2.15)$$

Με την ίδια λογική η έκφραση του s_2 (2.11) μπορεί να γίνει:

$$s_2 = 2 \frac{T_2}{g_{cb}} \sinh\left(\frac{g_{cb} \times L}{2T_2}\right) + \delta \cosh\left(\frac{g_{cb}}{2T_2}\right) \quad (2.16)$$

Ισχύει όμως η εξίσωση $s_2 - s_1 = \Delta s_2 - \Delta s_1$ για το καλώδιο και συνεπώς προκύπτει η παρακάτω έκφραση για το δ :

$$\delta = \frac{\frac{(T_2 - T_1)L}{2EA} + \frac{1}{2EA g_{cb}} \left[T_2^2 \sinh\left(\frac{g_{cb}L}{T_2}\right) - T_1^2 \sinh\left(\frac{g_{cb}L}{T_1}\right) \right]}{\cosh\left(\frac{g_{cb}L}{2T_2}\right)} + \frac{\frac{2}{g_{cb}} \left[T_1 \sinh\left(\frac{g_{cb}L}{2T_1}\right) - T_2 \sinh\left(\frac{g_{cb}L}{2T_2}\right) \right]}{\cosh\left(\frac{g_{cb}L}{2T_2}\right)} \quad (2.17)$$

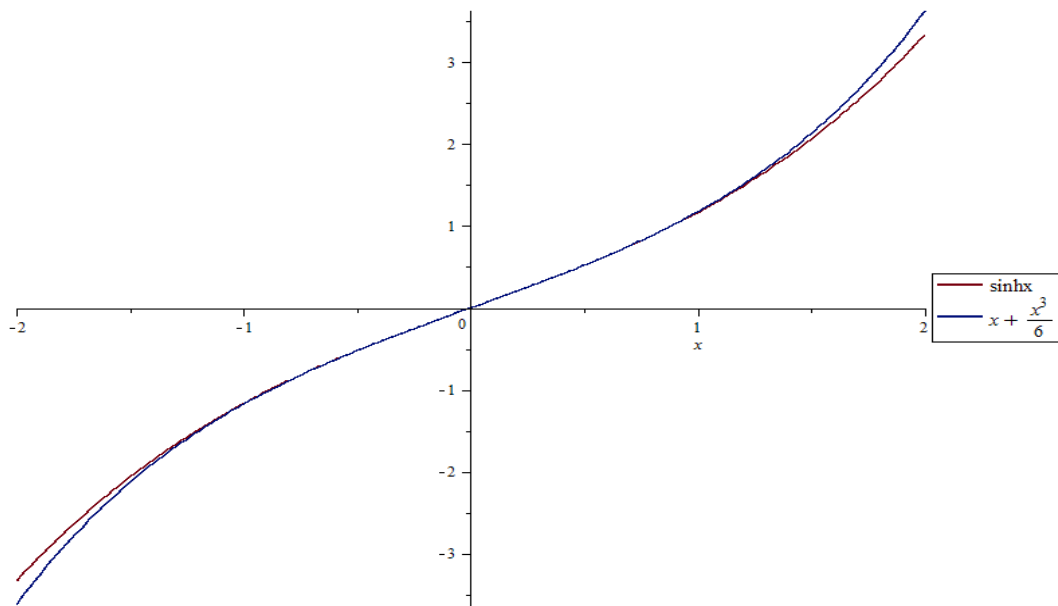
Λαμβάνοντας υπόψη ότι $T_1 = A \times \sigma_1$, $T_2 = A \times \sigma_2$ και $g_{cb} = A \times \gamma_{cb}$ προκύπτει:

$$\frac{\delta}{L} = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)\gamma_{cb} + \frac{1}{L} \left[\sigma_2^2 \sinh\left(\gamma_{cb} \frac{L}{\sigma_2}\right) - \sigma_1^2 \sinh\left(\gamma_{cb} \frac{L}{\sigma_1}\right) \right]}{2E\gamma_{cb} \cosh\left(\gamma_{cb} \frac{L}{2\sigma_2}\right)} + \frac{4 \frac{E}{L} \left[\sigma_1 \sinh\left(\gamma_{cb} \frac{L}{2\sigma_1}\right) - \sigma_2 \sinh\left(\gamma_{cb} \frac{L}{2\sigma_2}\right) \right]}{2E\gamma_{cb} \cosh\left(\gamma_{cb} \frac{L}{2\sigma_2}\right)} \quad (2.18)$$

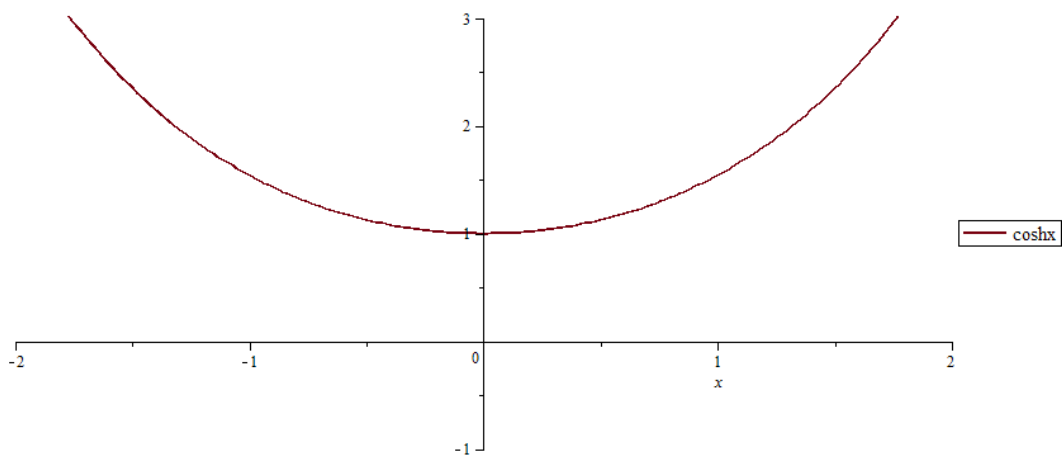
όπου σ_1 είναι η τάση του καλωδίου στην κατάσταση 1, σ_2 είναι η τάση στην κατάσταση 2 και γ_{cb} η πυκνότητα του υλικού του καλωδίου.

Η σχέση (2.18) εκφράζει την ανηγμένη παραμόρφωση του καλωδίου με βάση το μοντέλο της αλυσοειδούς καμπύλης. Σε αυτό το στάδιο εισάγεται η προσεγγιστική λύση της παραβολής, μετατρέποντας το $\sinh x$ σε $x + x^3/6$ και το $\cosh x$ σε 1. Από το Σχήμα 2.13 φαίνεται ότι η καμπύλη της παραβολής $x + x^3/6$ ταυτίζεται σχεδόν με αυτή της $\sinh x$. Επίσης, επειδή το $\cosh x$ βρίσκεται στον παρονομαστή της σχέσης (2.18), το κλάσμα μεγιστοποιείται όταν το $\cosh x$ γίνεται ελάχιστο δηλαδή 1 (Σχήμα 2.14). Έτσι, η σχέση (2.18) γίνεται:

$$\frac{\delta}{L} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E} + \frac{\gamma_{cb}^2 L^2}{24} \left(\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_2^2} \right) + \frac{\gamma_{cb}^2 L^2}{12E} \left(\frac{1}{\sigma_2} - \frac{1}{\sigma_1} \right) \quad (2.19)$$



Σχήμα 2.13: Σύγκριση $\sinh x$ και $x + x^3/6$



Σχήμα 2.14: Εύρεση ελάχιστου της $\cosh x$

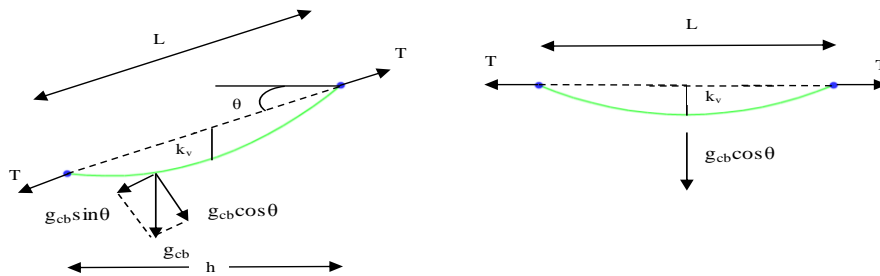
Καθώς ισχύει $E \gg \sigma$, ο τελευταίος όρος μπορεί να παραληφθεί:

$$\frac{\delta}{L} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E} + \frac{\gamma_{cb}^2 L^2}{24} \left(\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_2^2} \right) \quad (2.20)$$

Όπως έχει τονιστεί και νωρίτερα, η λύση της παραβολής (2.20) οδηγεί σε απλούστερους υπολογισμούς από την λύση της αλυσοειδούς καμπύλης (2.18).

Όσον αφορά τώρα το κεκλιμένο καλώδιο, η ένταση που δέχεται το καλώδιο λόγω ιδίου βάρους είναι $g_{cb} \cos \theta$ (Σχήμα 2.15). Τα παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά του κεκλιμένου καλωδίου είναι ισοδύναμα με αυτά του οριζόντιου με το ίδιο μήκος χορδής L και υποβαλλόμενο φορτίο $g_{cb} \cos \theta$. Αντικαθιστώντας στην (2.20) το g_{cb} με $g_{cb} \cos \theta$ και το L με $h/\cos \theta$ προκύπτει:

$$\frac{\delta}{L} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{E} + \frac{\gamma_{cb}^2 h^2}{24} \left(\frac{1}{\sigma_1^2} - \frac{1}{\sigma_2^2} \right) \quad (2.21)$$



Σχήμα 2.15: Κεκλιμένο καλώδιο και ισοδύναμο οριζόντιο καλώδιο με ισοδύναμα παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά

Σε αυτήν την εξίσωση ο $1^{ος}$ όρος αντιπροσωπεύει την ελαστική παραμόρφωση του καλωδίου και ο $2^{ος}$ την επίδραση της μεταβολής του βέλους.

Στο Σχήμα 2.16 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της (2.21). Το καλώδιο που χρησιμοποιήθηκε είναι ίδιο με εκείνο που εξετάστηκε στα παραδείγματα της προηγούμενης ενότητας. Ως $1^{η}$ κατάσταση ορίζεται η κατάσταση όπου στην κατασκευή δρουν μόνο τα ίδια βάρη και για παράδειγμα στο καλώδιο ασκείται αξονική δύναμη $T=704\text{kN}$. Συνεπώς τα δεδομένα της σχέσης (2.21) είναι:

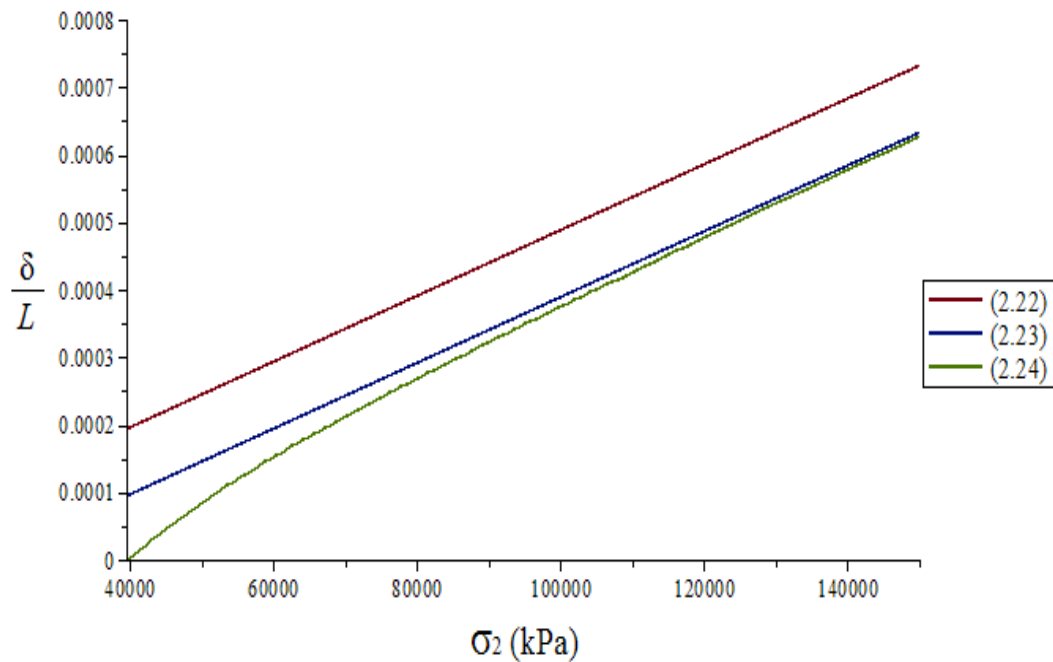
$$\sigma_1 = \frac{T_1}{A} = \frac{704\text{kN}}{0,0176\text{m}^2} = 40000\text{kPa}$$

$$E = 205\text{GPa}$$

$$\gamma_{cb} = \frac{w_{cb}}{A} = \frac{1,36 \text{ kN/m}}{0,0176 \text{ m}^2} = 77,27 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$h = 25 \text{ m}$$

$$\frac{\delta}{L} = \frac{\sigma_2 - 40000}{205000000} + \frac{77,27^2 25^2}{24} \left(\frac{1}{40000^2} - \frac{1}{\sigma_2^2} \right) \quad (2.22)$$



Σχήμα 2.16: Διάγραμμα οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης - τάσης τελικής κατάστασης καλωδίου

Παρατηρείται ότι για μεγάλες τιμές του σ_2 , η καμπύλη που περιγράφεται από την (2.22) προσεγγίζει μια ασύμπτωτη με εξίσωση:

$$\frac{\delta}{L} = \frac{\sigma_2 - 40000}{205000000} + \frac{77,27^2 25^2}{24 \times 40000^2} \quad \text{ή και} \quad (2.23)$$

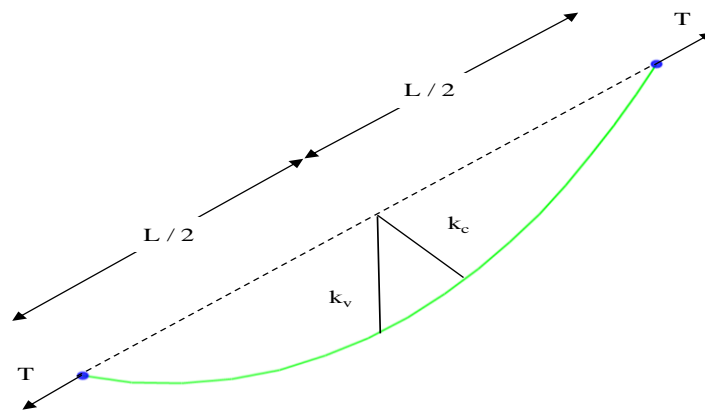
$$\frac{\delta}{L} = \frac{\sigma_2}{E} = \frac{\sigma_2}{205000000} \quad (2.24)$$

η οποία είναι η σχέση τάσης – παραμόρφωσης μιας ευθύγραμμης ράβδου ίδιου μήκους με το καλώδιο. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το βέλος είναι αντιστρόφως ανάλογο της τάσης του καλωδίου, είναι εύκολα αντιληπτό ότι για μεγάλες τιμές του σ_2 το βέλος σχεδόν θα εξαφανίζεται και το καλώδιο θα συμπεριφέρεται όλο και πιο πολύ σαν μια ράβδος.

Το κατακόρυφο βέλος k ενός οριζώντιου καλωδίου ορίζεται από τη σχέση:

$$k = \frac{g_{cb}L^2}{8T} = \frac{\gamma_{cb}L^2}{8\sigma} \quad (2.25)$$

Παρατηρείται ότι ο λόγος βέλους k / L είναι ανάλογος του μήκους χορδής του καλωδίου L με συντελεστή αναλογίας $\gamma_{cb}/8\sigma$.



Σχήμα 2.17: Βέλος καλωδίου μετρούμενο κάθετα στη χορδή (k_c) και κατακόρυφα (k_v)

Για ένα κεκλιμένο καλώδιο (Σχήμα 2.17), το βέλος k_c κάθετα στη χορδή δίνεται από τη σχέση:

$$k_c = \frac{g_{cb}L^2 \cos \theta}{8T} = \frac{\gamma_{cb}L^2}{8\sigma} \cos \theta \quad (2.26)$$

και το κατακόρυφο βέλος k_v :

$$k_v = \frac{k_c}{\cos \theta} = \frac{\gamma_{cb} L^2}{8\sigma} \quad (2.27)$$

Παρατηρείται ότι το κατακόρυφο βέλος k_v είναι ανεξάρτητο της κλίσης του καλωδίου.

Το φαινόμενο της μεταβολής του βέλους του καλωδίου για διαφορετικές καταστάσεις φόρτισης ερμηνεύεται από τη μη-γραμμική σχέση μεταξύ τάσης – παραμόρφωσης (2.21) και παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.7 και 2.16. Ωστόσο, στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκε η δυνατότητα γραμμικοποίησης της σχέσης αυτής εισάγοντας το μέτρο διάτμησης E_{sec} , που ορίζεται ως:

$$E_{sec} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\delta} L \quad (2.28)$$

Αντικαθιστώντας την τιμή του δ / L από τη σχέση (2.21) στη (2.28) προκύπτει:

$$\frac{1}{E_{sec}} = \frac{1}{E} + \frac{\gamma_{cb} h^2}{24} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_1^2 \sigma_2^2} \right) \quad (2.29)$$

Στις καλωδιωτές γέφυρες με μικρό λόγο κινητών προς μόνιμων φορτίων, το τέμνον μέτρο μπορεί να αντικατασταθεί από το εφαπτομενικό μέτρο E_{tan} , που υπολογίζεται από τη σχέση (2.29) για $\sigma_2 = \sigma_1$:

$$\frac{1}{E_{tan}} = \frac{1}{E} + \frac{\gamma_{cb}^2 h^2}{12\sigma_1^3} \quad (2.30)$$

Γενικά, είναι ευκολότερη η χρήση του εφαπτομενικού μέτρου έναντι του τέμνοντος μέτρου, καθώς όπως φαίνεται το εφαπτομενικό μέτρο για να προσδιοριστεί χρειάζεται να είναι γνωστή μόνο η αρχική κατάσταση φόρτισης. Από την άλλη πλευρά, το εφαπτομενικό μέτρο μπορεί να δώσει λανθασμένα αποτελέσματα για μεγάλου μήκους χορδής καλώδια και μεγάλο λόγο κινητών προς μόνιμων φορτίων.

Με βάση τις σχέσεις (2.29) και (2.30), προκύπτουν οι παρακάτω εκφράσεις του συντελεστή καμπύλωσης K του καλωδίου:

$$K = \begin{cases} \frac{\gamma_{cb}^2 (\sigma_1 + \sigma_2)}{24\sigma_1^2 \sigma_2^2} E \times 10^6 & \text{για το τέμνον μέτρο} \\ \frac{\gamma_{cb}^2}{12\sigma_1^3} E \times 10^6 & \text{για το εφαπτομενικό μέτρο} \end{cases} \quad (2.31)$$

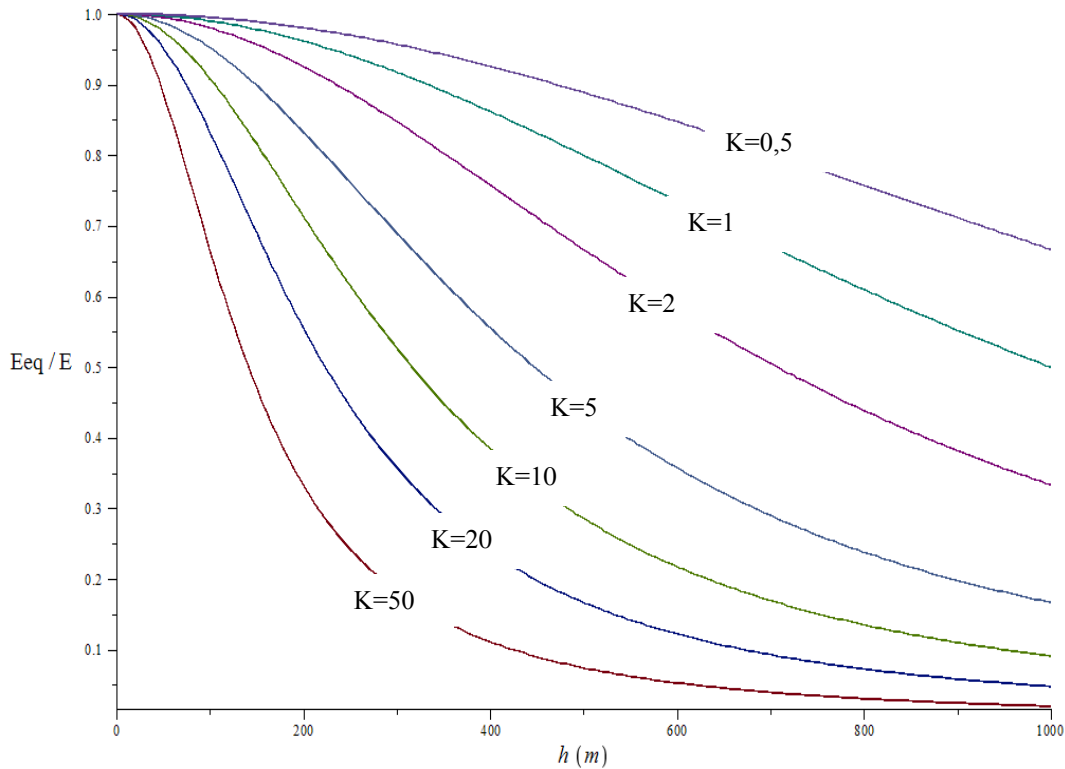
Έτσι με την εισαγωγή αυτού του συντελεστή μπορεί να προκύψει μια ενιαία εξίσωση που συνδέει το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας (είτε το τέμνον μέτρο είτε το εφαπτομενικό μέτρο) και το μήκος της οριζόντιας προβολής του καλωδίου. Η σχέση αυτή είναι:

$$\frac{E_{eq}}{E} = \frac{1}{1 + \frac{Kh^2}{10^6}} \quad (2.32)$$

Η γραφική παράσταση της σχέσης (2.32) παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.18 για διάφορες τιμές του K . Τα σύγχρονα καλώδια έχουν συντελεστή καμπύλωσης K περίπου ανάμεσα στο 0,5 και στο 1,0.

Αν το καλώδιο ήταν από συνηθισμένο χάλυβα ο συντελεστής καμπύλωσης θα αυξανόταν περίπου στο 20. Αυτό θα οδηγούσε σε δραστική μείωση του E_{eq} αυξανόμενου του μήκους του καλωδίου. Για $h=300\text{m}$ ο λόγος E_{eq} / E είναι ίσος με 0,96 αν $K=0,5$, αλλιώς είναι 0,36 αν $K=20$.

Το γεγονός ότι το K είναι αντιστρόφως ανάλογο με τον κύβο του επιπέδου των τάσεων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μεγαλύτερη αξονική δυσκαμψία στο καλώδιο επιτυγχάνεται όταν εφαρμόζεται το υψηλότερο δυνατό επίπεδο τάσεων. Ωστόσο, η αξονική δυσκαμψία δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τα μέτρα ελαστικότητας, αλλά από το γινόμενο $E_{eq}A_{cb}$ και, καθώς το A_{cb} αυξάνεται μειώνοντας το επίπεδο των τάσεων, το γινόμενο $E_{eq}A_{cb}$ θα μπορούσε κάλλιστα να αυξηθεί, παρόλο που το E_{eq} μειώνεται (Chen & Duan, 2014).



Σχήμα 2.18: Μεταβολή του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας E_{eq} σε σχέση με το μήκος της οριζόντιας προβολής του h και το συντελεστή καμπύλωσης K

Η ανηγμένη παραμόρφωση του καλωδίου $\varepsilon_c = \delta/L = (\sigma_2 - \sigma_1)/E_{sec}$ βρίσκεται από τη σχέση (2.29), όπου μετά την εισαγωγή του λόγου των τάσεων $\sigma_1/\sigma_2 = \kappa$ γίνεται:

$$\varepsilon_c = \frac{\delta}{L} = \frac{1 - \kappa}{E} \sigma_2 + \frac{\gamma_{cb}^2 h^2}{24} \left(\frac{1}{\kappa^2} - 1 \right) \frac{1}{\sigma_2^2} \quad (2.33)$$

Η ελάχιστη ε_c βρίσκεται από την εξίσωση $\partial \varepsilon_c / \partial \sigma_2 = 0$:

$$\frac{\partial \varepsilon_c}{\partial \sigma_2} = \frac{1 - \kappa}{E} - \frac{\gamma_{cb}^2 h^2}{12} \left(\frac{1}{\kappa^2} - 1 \right) \frac{1}{\sigma_2^3} = 0$$

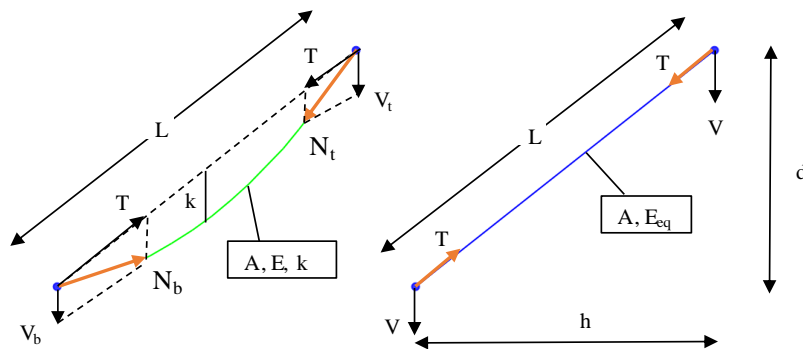
από όπου βρίσκεται η τάση $\sigma_{2,ex}$ που δίνει τη μέγιστη αξονική δυστένεια:

$$\sigma_{2,ex} = \left(\frac{1}{12} \gamma_{cb}^2 h^2 E \frac{1 + \kappa}{\kappa^2} \right)^{1/3} \quad (2.34)$$

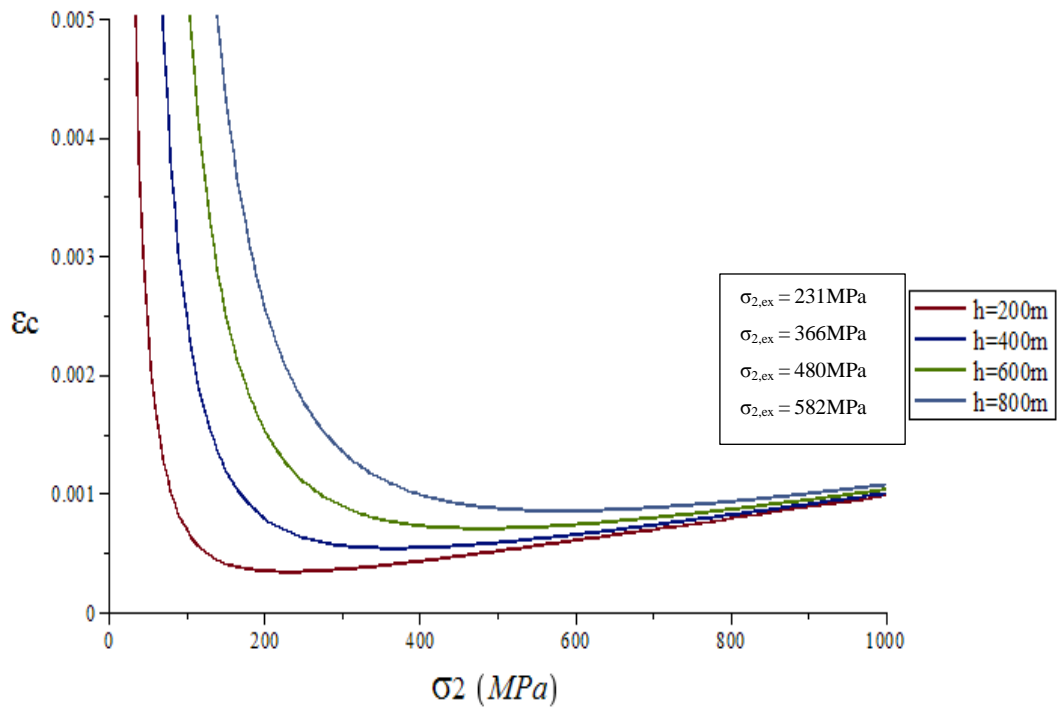
Η μεταβολή της ε_c με την τάση σ_2 παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.20 και 2.21 για διάφορα μήκη καλωδίου και για λόγους τάσεων $\kappa = 0,8$ και $0,5$, αντίστοιχα.

Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι η αυξημένη αξονική δυστένεια που μπορεί να επιτευχθεί επιλέγοντας ένα χαμηλότερο επίπεδο τάσεων οδηγεί σε μια πιο ακριβή κατασκευή εξαιτίας της αυξημένης ποσότητας του χάλυβα των καλωδίων. Μόνο αν το χαμηλότερο επίπεδο τάσεων καταφέρει να χρησιμοποιεί φθηνότερους χάλυβες για τα καλώδια θα ήταν οικονομική η αύξηση της δυσκαμψίας μεγαλώνοντας τη διατομή του καλωδίου.

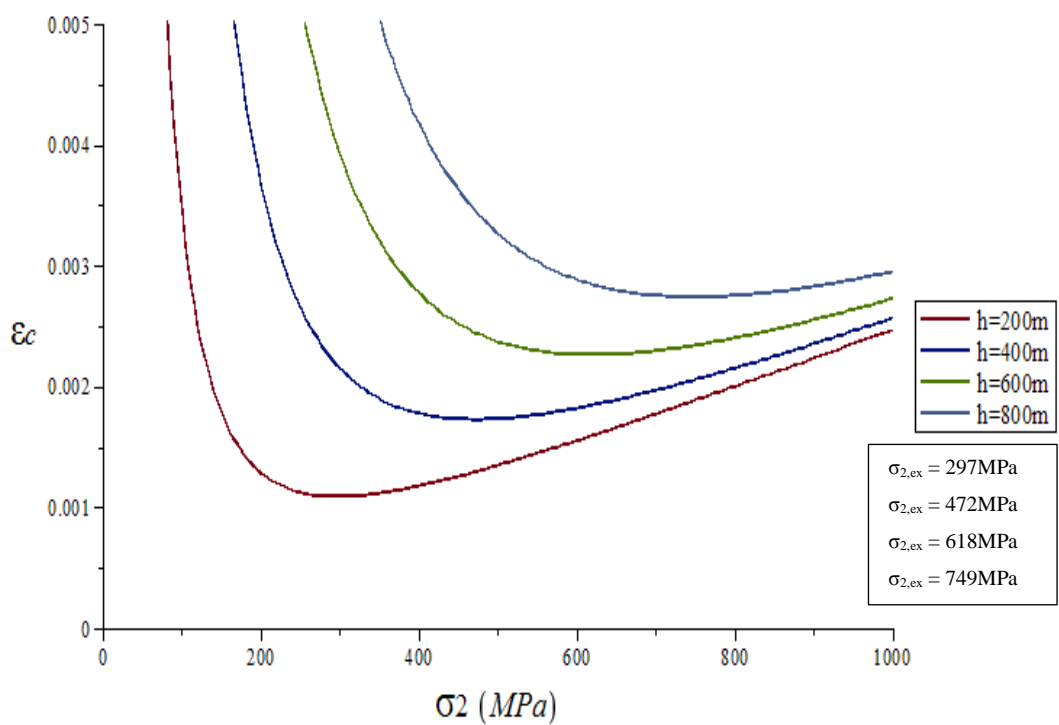
Η διευκόλυνση που προσφέρει το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας αποτυπώνεται στο Σχήμα 2.19. Το καλώδιο που χαρακτηρίζεται από το εμβαδόν της διατομής του A_{cb} , το μέτρο ελαστικότητας E και το βέλος κ αντικαθίσταται από ένα γραμμικό στοιχείο με την ίδια διατομή A_{cb} , αλλά με ένα ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας E_{eq} (E_{sec} ή E_{tan}). Έτσι το εξιδανικευμένο στοιχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια συμβατική ανάλυση που απαιτεί ελαστική συμπεριφορά όλων των μελών.



Σχήμα 2.19: Πραγματικό και εξιδανικευμένο καλώδιο



Σχήμα 2.20: Σχέση μεταξύ της ανώτερης τάσης σ_2 και της ανηγμένης παραμόρφωσης ϵ_c του καλωδίου για λόγω τάσεων $\kappa=0,8$ για διάφορα μήκη καλωδίου



Σχήμα 2.21: Σχέση μεταξύ της ανώτερης τάσης σ_2 και της ανηγμένης παραμόρφωσης ϵ_c του καλωδίου για λόγω τάσεων $\kappa=0,5$ για διάφορα μήκη καλωδίου

Στο πραγματικό καλώδιο η εφαπτομενική δύναμη N που δρα στα σημεία στήριξης μπορεί να αναλυθεί σε δύο δυνάμεις, τη δύναμη χορδής T και την κατακόρυφη δύναμη V . Η κατακόρυφη δύναμη μιας στήριξης βρίσκεται παίρνοντας ροπές ως προς το άλλο σημείο στήριξης:

$$V = \frac{1}{2} g_{cb} L = \frac{1}{2} \gamma_{cb} A_{cb} L \quad (2.35)$$

Παρατηρείται ότι κάθε κατακόρυφη δύναμη V ισούται με το ήμισυ του βάρους του καλωδίου, καθώς ο όρος $g_{cb}L$ αντιπροσωπεύει το συνολικό ίδιο βάρος του καλωδίου.

Όταν αντικαθίσταται το καλώδιο από το εξιδανικευμένο ευθύγραμμο μέλος με δύναμη ίση με τη δύναμη χορδής T , οι κατακόρυφες δυνάμεις V πρέπει την ίδια στιγμή να εφαρμοστούν στα σημεία στήριξης. Στη συνέχεια, αυτές οι κατακόρυφες δυνάμεις θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση της κατασκευής όπως και τα υπόλοιπα μόνιμα φορτία.

Με την ανάλυση της κατασκευής και τον καθορισμό των δυνάμεων T των εξιδανικευμένων καλωδιωτών στοιχείων, πρέπει να βρεθεί η μέγιστη αξονική δύναμη του πραγματικού καλωδίου για την εύρεση του εμβαδού του καλωδίου A_{cb} .

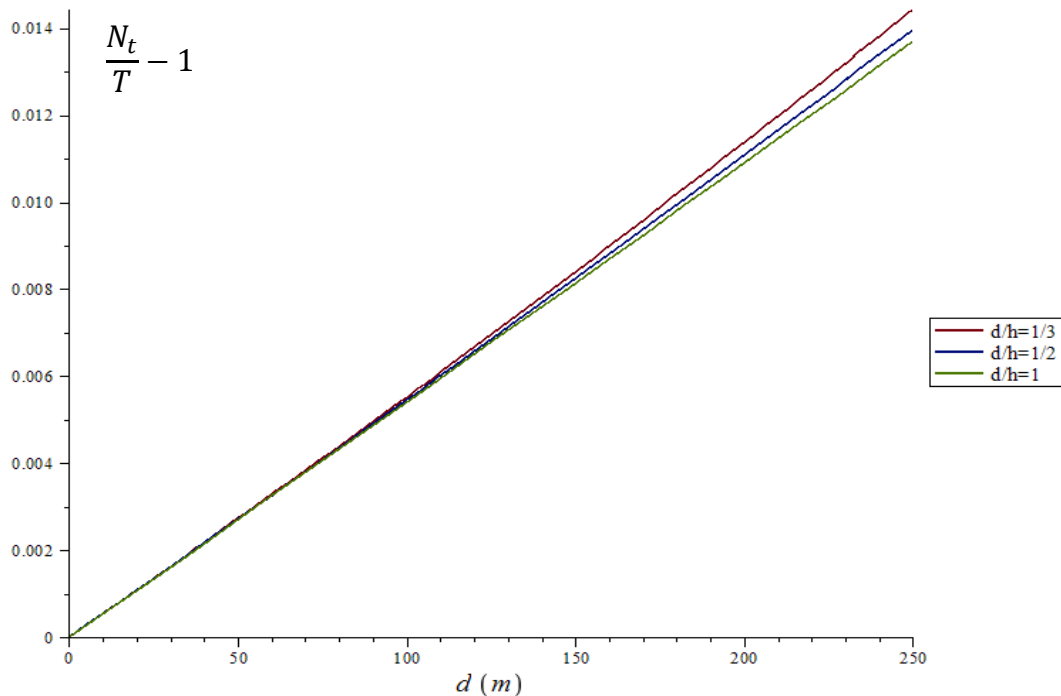
Η σχέση που ισχύει για τη μέγιστη εφαπτομενική δύναμη N_t , που δρα στη πάνω στήριξη είναι:

$$N_t = \sqrt{T^2 + V^2 + 2TV \frac{d}{\sqrt{h^2 + d^2}}} \quad (2.36)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι $V = \frac{1}{2} \gamma_{cb} A_{cb} \sqrt{h^2 + d^2}$ και $A = \frac{N_t}{\sigma}$ προκύπτει:

$$\frac{N_t}{T} = \left(\sqrt{4 - \frac{\gamma_{cb}^2}{\sigma^2} h^2 + \frac{\gamma_{cb}}{\sigma} d} \right) \left(2 - \frac{\gamma_{cb}^2 (h^2 + d^2)}{2\sigma^2} \right)^{-1} \quad (2.37)$$

Στο Σχήμα 2.22 υπολογίζεται το σφάλμα ($N_t / T - 1$) χρησιμοποιώντας τη δύναμη χορδής T αντί για τη μέγιστη εφελκυστική δύναμη N_t για το σχεδιασμό του καλωδίου. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν $\gamma_{cb} = 77,27 \text{ kN/m}^3$, $\sigma = 720000 \text{ kPa}$ και $\frac{d}{h} = \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1$. Παρατηρείται ότι για καλώδια με μήκος κατακόρυφης προβολής μέχρι και 190m, το σφάλμα είναι τόσο μικρό που επιτρέπεται η χρήση της δύναμης χορδής T για το σχεδιασμό τους.



Σχήμα 2.22: Σφάλμα ($N_t / T - 1$) από την εφαρμογή της δύναμης χορδής T αντί της μέγιστης αξονικής δύναμης N_t για καλώδια με κλίση $d/h=1/3, 1/2, 1$

2.5 Διερεύνηση εξισώσεων καλωδίου

Πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των εξισώσεων (2.20) και (2.25), χρησιμοποιώντας το οριζόντιο καλώδιο των παραδειγμάτων της προηγούμενης ενότητας, αυτή τη φορά με μεταβαλλόμενο αρχικό αφόρτιστο μήκος $L=40, 50, 100$ και 150m.

Ως 1^η κατάσταση ορίζεται η κατάσταση στην οποία το καλώδιο έχει το αφόρτιστο μήκος του (δηλ. $\sigma_1 = 0$). Η 2^η κατάσταση καθορίζεται από τη συνθήκη

που κάθε φορά εξετάζεται. Σκοπός της διερεύνησης είναι η εύρεση της παραμόρφωσης του καλωδίου (δ), και κατά συνέπεια, το τελικό μήκος χορδής του (L') και του μέγιστου κατακόρυφου βέλους του (k).

2.5.1 Μεταβαλλόμενος λόγος τελικής δύναμης καλωδίου προς τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή του (T / T_u)

Σε αυτήν την περίπτωση εξετάστηκε ο λόγος T / T_u παίρνοντας τις τιμές 5%, 10%, 15% και 20%. Από τη σχέση (2.20) βρίσκεται το L' , από τη συνθήκη το T και από τη σχέση (2.25) το k . Τα αποτελέσματα της διερεύνησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2.

L (m)	T/T _u	L' (m)	T (kN)	k (m)
40	0,05	40,0127	1381,6	0,1970
	0,1	40,03	2763,2	0,0986
	0,15	40,0457	4144,8	0,0658
	0,2	40,0611	5526,4	0,0494

L (m)	T/T _u	L' (m)	T (kN)	k (m)
50	0,05	50,0141	1381,6	0,3078
	0,1	50,037	2763,2	0,1540
	0,15	50,0569	4144,8	0,1028
	0,2	50,0763	5526,4	0,0771

L (m)	T/T _u	L' (m)	T (kN)	k (m)
100	0,05	99,9979	1381,6	1,2304
	0,1	100,066	2763,2	0,6160
	0,15	100,11	4144,8	0,4110
	0,2	100,151	5526,4	0,3085

L (m)	T/T _u	L' (m)	T (kN)	k (m)
150	0,05	149,921	1381,6	2,7655
	0,1	150,081	2763,2	1,3857
	0,15	150,157	4144,8	0,9247
	0,2	150,221	5526,4	0,6942

Πίνακας 2.2: Αποτελέσματα διερεύνησης λόγου T / T_u για διάφορες τιμές του αφόρτιστου μήκους του καλωδίου

Παρατηρείται ότι για λόγο $T / T_u = 5\%$, το L' είναι περίπου ίσο με το L . Σε κάποιες περιπτώσεις, όμως, επειδή $L' < L$, το k που υπολογίστηκε είναι αρκετά μεγάλο και ανεπιθύμητο. Αντίθετα, για λόγο $T / T_u = 10\%$, πάντα ισχύει $L' > L$ και ως εκ τούτου, εξαιτίας της μεγαλύτερης δύναμης που αναπτύχθηκε, το βέλος μειώθηκε σε ικανοποιητικά επίπεδα.

2.5.2 Μεταβαλλόμενος λόγος τελικής δύναμης καλωδίου προς το αφόρτιστο μήκος του (T / L)

Σε αυτήν την περίπτωση εξετάστηκε ο λόγος T / L παίρνοντας τις τιμές 10, 15, 20, 40 και 60kN/m. Από τη σχέση (2.20) βρίσκεται το L' , από τη συνθήκη το T και από τη σχέση (2.25) το k . Τα αποτελέσματα της διερεύνησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.

L (m)	T/L (kN/m)	L' (m)	T (kN)	k (m)
40	10	39,9736	400	0,6791
	15	39,993	600	0,4532
	20	40,0012	800	0,3400
	40	40,0158	1600	0,1701
	60	40,0258	2400	0,1135

L (m)	T/L (kN/m)	L' (m)	T (kN)	k (m)
50	10	49,9684	500	0,8489
	15	49,9933	750	0,5665
	20	50,0042	1000	0,4251
	40	50,0253	2000	0,2127
	60	50,0405	3000	0,1419

L (m)	T/L (kN/m)	L' (m)	T (kN)	k (m)
100	10	99,9507	1000	1,6983
	15	100,007	1500	1,1335
	20	100,036	2000	0,8506
	40	100,106	4000	0,4259
	60	100,164	6000	0,2843

L (m)	T/L (kN/m)	L' (m)	T (kN)	k (m)
150	10	149,947	1500	2,5481
	15	150,042	2250	1,7009
	20	150,096	3000	1,2766
	40	150,242	6000	0,6395
	60	150,371	9000	0,4271

Πίνακας 2.3: Αποτελέσματα διερεύνησης λόγου T / L για διάφορες τιμές του αφόρτιστου μήκους του καλωδίου

Παρατηρείται ότι για λόγο $T / L = 15\text{kN/m}$, το L' είναι περίπου ίσο με το L . Σε κάποιες περιπτώσεις, όμως, επειδή $L' < L$, το k που υπολογίστηκε είναι αρκετά μεγάλο και ανεπιθύμητο. Αντίθετα, για λόγο $T / L = 20\text{kN/m}$, πάντα ισχύει $L' > L$ και ως εκ τούτου, εξαιτίας της μεγαλύτερης δύναμης που αναπτύχθηκε, το βέλος μειώθηκε σε ικανοποιητικά επίπεδα.

2.5.3 Μεταβαλλόμενος λόγος μέγιστου κατακόρυφου βέλους καλωδίου προς το αφόρτιστο μήκος του (k / L)

Σε αυτήν την περίπτωση εξετάστηκε ο λόγος k / L παίρνοντας τις τιμές 0,5%, 1%, 2%, 3% και 4%. Από τη σχέση (2.25) βρίσκεται το T , από τη σχέση (2.20) το L' και από τη συνθήκη το k . Τα αποτελέσματα της διερεύνησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.4.

L (m)	k/L	T (kN)	L' (m)	k (m)
40	0,005	1359,95	40,0124	0,2
	0,01	679,976	39,9969	0,4
	0,02	339,988	39,9611	0,8
	0,03	226,659	39,9065	1,2
	0,04	169,994	39,8312	1,6

L (m)	k/L	T (kN)	L' (m)	k (m)
50	0,005	1699,94	50,0202	0,25
	0,01	849,97	49,9984	0,5
	0,02	424,985	49,9526	1
	0,03	283,323	49,8839	1,5
	0,04	212,493	49,7896	2

L (m)	k/L	T (kN)	L' (m)	k (m)
100	0,005	3399,88	100,088	0,5
	0,01	1699,94	100,02	1
	0,02	849,97	99,9169	2
	0,03	566,647	99,7757	3
	0,04	424,985	99,5851	4

L (m)	k/L	T (kN)	L' (m)	k (m)
150	0,005	5099,82	150,202	0,75
	0,01	2549,91	150,066	1,5
	0,02	1274,96	149,893	3
	0,03	849,97	149,675	4,5
	0,04	637,478	149,387	6

Πίνακας 2.4: Αποτελέσματα διερεύνησης λόγου k/L για διάφορες τιμές του αφόρτιστου μήκους του καλωδίου

Παρατηρείται ότι για λόγο $k/L = 1\%$, το L' είναι περίπου ίσο με το L . Σε κάποιες περιπτώσεις, όμως, επειδή $L' < L$, το k που υπολογίστηκε είναι αρκετά μεγάλο και ανεπιθύμητο. Αντίθετα, για λόγο $k/L = 0,5\%$, πάντα ισχύει $L' > L$ και ως εκ τούτου, εξαιτίας της μεγαλύτερης δύναμης που αναπτύχθηκε, το βέλος μειώθηκε σε ικανοποιητικά επίπεδα.

2.6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται το αξονικά φορτισμένο καλώδιο, που συναντάται στις καλωδιωτές γέφυρες. Το καλώδιο αυτό, για τους συνδυασμούς Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας - ΟΚΛ, δεν θα πρέπει να ξεπερνάει το όριο διαρροής του υλικού του, καθώς δεν επιτρέπεται η εμφάνιση μόνιμων παραμορφώσεων για τα φορτία λειτουργίας που επιβάλλονται στη γέφυρα από την πρώτη μέχρι την τελευταία στιγμή.

Επίσης, για τα καλώδια μέχρι και 190m κατακόρυφης προβολής μπορεί να χρησιμοποιηθεί η δύναμη χορδής τους T , αντί για την εφαπτομενική δύναμη N με σφάλμα μικρότερο του 1%.

Ακόμα, υπάρχουν δύο τρόποι προσομοίωσης της καμπύλης μορφής του καλωδίου, η πραγματική αλυσοειδής καμπύλη και η προσεγγιστική παραβολική καμπύλη 2^{ου} βαθμού. Συμπεραίνεται ότι για τιμές του λόγου $g_{cb} \cdot \frac{y}{T} < 1$, οι δύο

καμπύλες έχουν πολύ μικρή απόκλιση και μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξίσου παρέχοντας την ίδια ακρίβεια.

Εξαιτίας της μη – γραμμικής σχέσης της παραμόρφωσης του καλωδίου και της τάσης που ασκείται στα άκρα του (Σχήμα 2.16), προκύπτει το συμπέρασμα ότι για μεγάλες τιμές τάσεως, το καλώδιο θα συμπεριφέρεται όλο και πιο πολύ σαν μια ράβδος δικτυώματος, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η τάση στα άκρα του τόσο μικρότερο το βέλος που δημιουργείται.

Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι υπάρχουν δύο τρόποι γραμμικοποίησης της συμπεριφοράς ενός καλωδίου, με την εισαγωγή είτε του τέμνοντος μέτρου είτε του εφαπτομενικού μέτρου. Για μεγάλου μήκους καλώδια, αλλά και μεγάλο λόγο κινητών προς μόνιμων φορτίων χρησιμοποιείται το τέμνον μέτρο για μεγαλύτερη ακρίβεια, παρόλο που για τον υπολογισμό του χρειάζεται να είναι γνωστό το αρχικό και το τελικό επίπεδο των τάσεων και να ακολουθηθεί μια επαναληπτική διαδικασία.

Ανεξάρτητα από το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας που τελικά επιλέγεται, ορίστηκε η σχέση του με το συντελεστή καμπύλωσης K και το μήκος της οριζόντιας προβολής του. Από την αναπαράσταση της σχέσης αυτής (Σχήμα 2.18), συμπεραίνεται ότι όσο μειώνεται το K , δηλαδή αυξάνεται το επίπεδο των τάσεων, αυξάνεται και το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας. Ωστόσο, αυτό δεν ισοδυναμεί αυτόματα και με αύξηση της δυστένειας του καλωδίου, καθώς αυτή εξαρτάται και από το εμβαδόν της διατομής του. Έτσι, παρόλο που αύξηση του εμβαδού θα προκαλέσει μείωση του επιπέδου των τάσεων, θα προκληθεί αύξηση του συντελεστή καμπύλωσης K και τελικά μείωση του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας, οπότε το γινόμενο EA (=δυστένεια) μπορεί εν τέλει να αυξηθεί.

Τέλος, πολλά συμπεράσματα προκύπτουν από τη διερεύνηση των εξισώσεων του καλωδίου, βρίσκοντας τους βέλτιστους τρόπους διάταξης και προφόρτισής του. Ένα καλώδιο θεωρείται ότι τοποθετήθηκε με τον βέλτιστο τρόπο, όταν το τελικό μήκος χορδής του είναι σχεδόν ίσο με το αφόρτιστο μήκος του και ταυτόχρονα το βέλος που παρουσιάζεται είναι σχετικά μικρό. Συνεπώς, προέκυψε ότι αυτό συμβαίνει όταν $T / T_u = 10\%$ ή $T / L = 20\text{kN/m}$ ή $k / L = 0,5\%$.

3ο Κεφάλαιο: Προσομοίωση καλωδιωτής γέφυρας

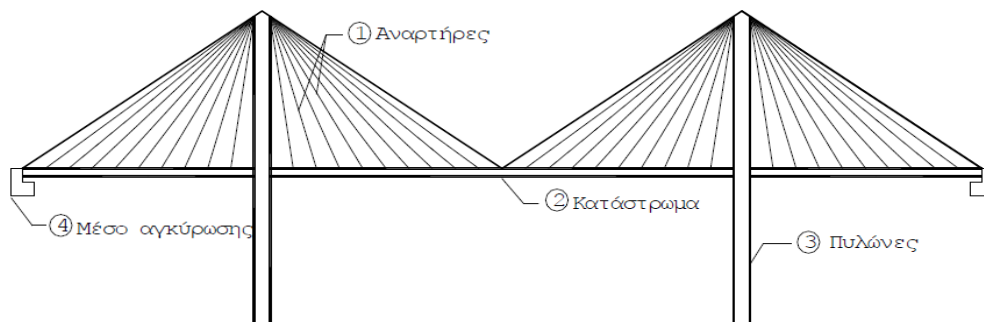
3.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η προσομοίωση της καλωδιωτής γέφυρας που επιλέχθηκε για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας.

Η γέφυρα, λοιπόν, που εξετάστηκε είναι η καλωδιωτή γέφυρα Quincy Bayview στο Illinois της Αμερικής που φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Η γέφυρα αυτή είναι μια συνεχής γέφυρα τριών ανοιγμάτων μήκους 128,1 – 285,6 – 128,1m, αντίστοιχα. Το κατάστρωμα είναι σύμμικτο, αποτελούμενο από πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος και δοκούς – διαδοκίδες από χάλυβα. Οι πυλώνες είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα και έχουν μορφή Η. Τα καλώδια είναι κατασκευασμένα από υψηλής αντοχής χάλυβα και είναι τοποθετημένα σε ημι – ακτινική διάταξη (Σχήμα 3.1).

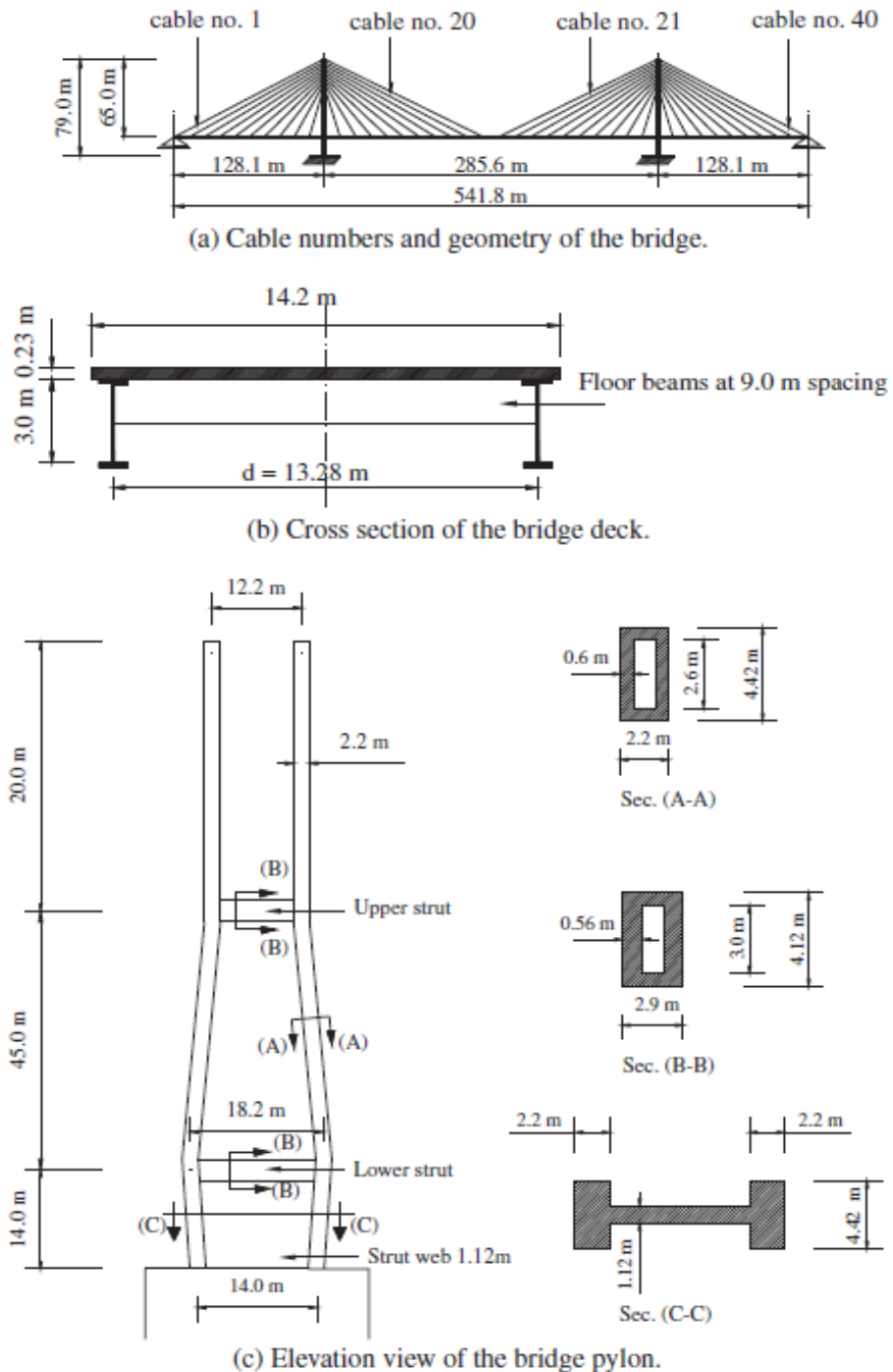


Εικόνα 3.1: Η καλωδιωτή γέφυρα Quincy Bayview στο Illinois της Αμερικής



Σχήμα 3.1: Στατικό σύστημα ημι - ακτινικής διάταξης των καλωδίων

Τα σχέδια της γέφυρας που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της στο πρόγραμμα ανάλυσης βρέθηκαν στην ερευνητική εργασία (Hassan, et al., 2012) και παρατίθενται παρακάτω (Σχήμα 3.2).



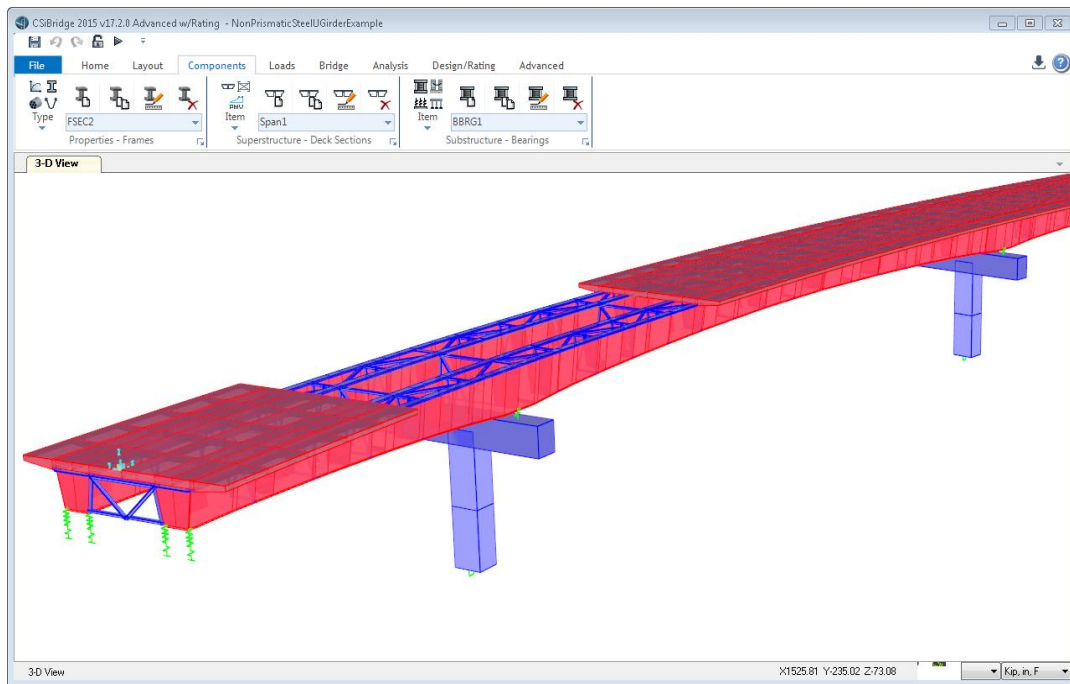
Σχήμα 3.2: Σχέδια εξατζόμενης γέφυρας όπως παρατίθενται στην εργασία (Hassan, et al., 2012)

Ο βασικός λόγος επιλογής αυτής της γέφυρας ήταν επειδή έχει τη μορφή μιας τυπικής καλωδιωτής γέφυρας (συνεχής γέφυρα 3 ανοιγμάτων με ημι – ακτινική διάταξη καλωδίων σε δύο επίπεδα). Επίσης, όπως παρατηρείται αποτελείται από απλά δομικά στοιχεία που μπορούν εύκολα να προσομοιωθούν στο πρόγραμμα ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε. Έτσι, τα συμπεράσματα που θα προκύψουν από την ανάλυσή της αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο εύρος καλωδιωτών γεφυρών.

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση και την ανάλυση της γέφυρας είναι το CSiBridge 2016 (Εικόνα 3.2). Είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με πολύ καλό και εύχρηστο περιβάλλον εργασίας (Εικόνα 3.3). Ο χρήστης με αυτό το πρόγραμμα έχει πλήρη εποπτεία των βημάτων που ακολουθεί. Οι λόγοι, λοιπόν, που χρησιμοποιήθηκε αυτό το πρόγραμμα ήταν η ευκολία που προσφέρει στο χρήστη και η εκμάθηση ενός νέου προγράμματος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων από την αρχή.



Εικόνα 3.2: Οθόνη έναρξης προγράμματος CSiBridge 2016



Εικόνα 3.3: Περιβάλλον εργασίας προγράμματος CSiBridge 2016

3.2 Προσομοίωση γέφυρας στο πρόγραμμα CSiBridge 2016

Παρακάτω ακολουθεί συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας προσομοίωσης των βασικών μελών της γέφυρας που εξετάζεται.

3.2.1 Υλικά κατασκευής της γέφυρας

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της γέφυρας είναι τα συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται στις γέφυρες, καθώς δεν βρέθηκαν περισσότερες αναλυτικές πληροφορίες για αυτά στην εργασία (Hassan, et al., 2012).

Τα υλικά αυτά είναι:

- Οπλισμένο σκυρόδεμα C35/45 (Σχήμα 3.3)
- Χάλυβας οπλισμού (ορίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα, Σχήμα 3.4)
- Δομικός χάλυβας S355 (Σχήμα 3.5)
- Χάλυβας υψηλής αντοχής καλωδίου, όπως ορίζεται στο 2^ο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας (Σχήμα 3.6)

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: C35/45 ■

Material Type: Concrete

Material Notes:

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 24,9926

Mass per Unit Volume: 2,5485

Units

Units: KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 34000000,

Poisson, U: 0,2

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1,000E-05

Shear Modulus, G: 14166667,

Other Properties for Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f_c : 35000,

Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

Switch To Advanced Property Display

Σχήμα 3.3: Σκυρόδεμα προσομοίωσης γέφυρας

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: Rebar ■

Material Type: Rebar

Material Notes:

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 76,9729

Mass per Unit Volume: 7,849

Units

Units: KN, m, C

Uniaxial Property Data

Modulus of Elasticity, E: 1,999E+08

Poisson, U: 0,3

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1,170E-05

Shear Modulus, G: 76903069,

Other Properties for Rebar Materials

Minimum Yield Stress, F_y : 413685,5

Minimum Tensile Stress, F_u : 620528,2

Expected Yield Stress, F_{ye} : 455054,

Expected Tensile Stress, F_{ue} : 682581,

Switch To Advanced Property Display

Σχήμα 3.4: Χάλυβας οπλισμού προσομοίωσης γέφυρας

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: S355

Material Type: Steel

Material Notes:

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 76,9729

Mass per Unit Volume: 7,849

Units: KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 2,100E+08

Poisson, U: 0,3

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1,170E-05

Shear Modulus, G: 80769231,

Other Properties for Steel Materials

Minimum Yield Stress, Fy: 355000,

Minimum Tensile Stress, Fu: 510000,

Effective Yield Stress, Fye: 390500,

Effective Tensile Stress, Fue: 561000,

Switch To Advanced Property Display

Σχήμα 3.5: Δομικός χάλυβας προσομοίωσης γέφυρας

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: Cable Steel

Material Type: Tendon

Material Notes:

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 77,2727

Mass per Unit Volume: 7,8796

Units: KN, m, C

Uniaxial Property Data

Modulus of Elasticity, E: 2,100E+08

Poisson, U: 0,

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1,170E-05

Shear Modulus, G: 0,

Other Properties for Tendon Materials

Minimum Yield Stress, Fy: 1180000,

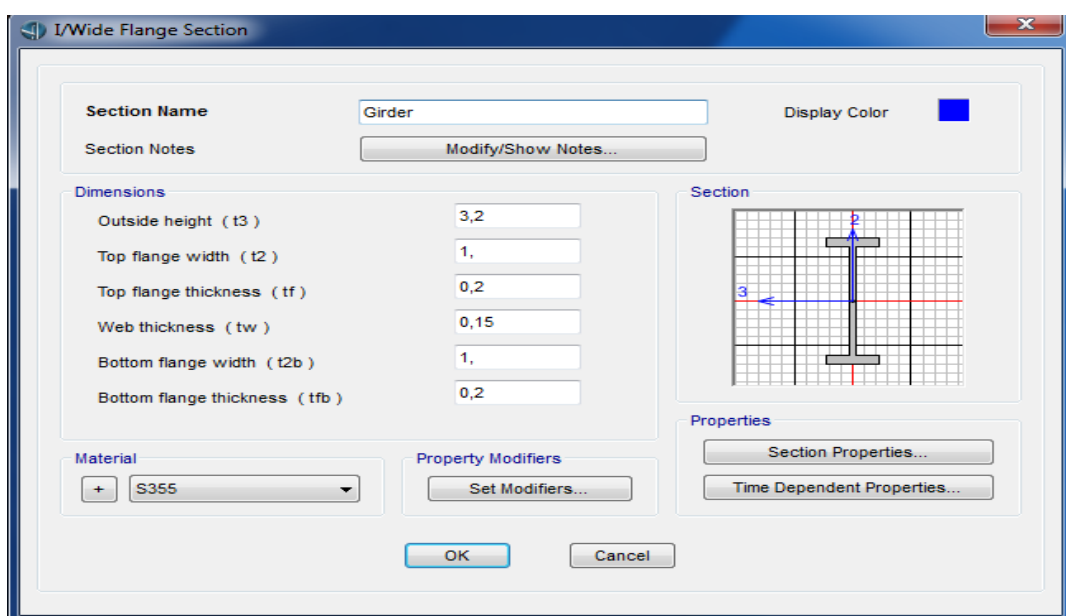
Minimum Tensile Stress, Fu: 1570000,

Switch To Advanced Property Display

Σχήμα 3.6: Χάλυβας καλωδίου προσομοίωσης γέφυρας

3.2.1 Το κατάστρωμα της γέφυρας

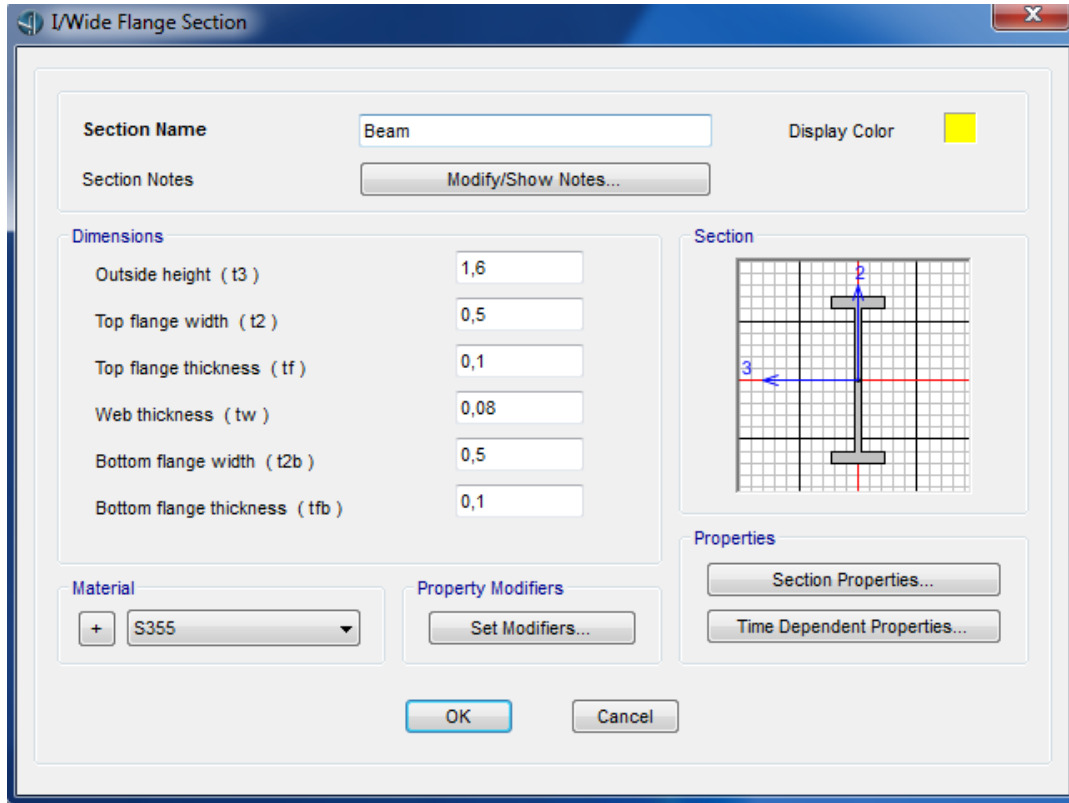
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η γέφυρα είναι συνεχής τριών ανοιγμάτων μήκους 128,1 – 285,6 – 128,1m, αντίστοιχα και πλάτους 14,2m. Το κατάστρωμα της γέφυρας είναι σύμμικτο. Αποτελείται από πλάκα καταστρώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα C35/45 με πάχος 0,23m. Κάτω από την πλάκα υπάρχουν δύο διαμήκεις δοκοί σχήματος διπλού ταυ από χάλυβα S355. Οι διαστάσεις των δοκών εξήχθησαν με μέτρηση επί του σχεδίου με τη βοήθεια της κλίμακας του και φαίνονται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Η διατομή διπλού ταυ των διαμήκων δοκών του καταστρώματος

Οι διαμήκεις δοκοί συνδέονται εγκάρσια με διαδοκίδες οι οποίες αποτελούνται από δομικό χάλυβα S355 και έχουν διατομή διπλού ταυ. Οι διαστάσεις τους προέκυψαν από εκτίμηση μέσω των διαθέσιμων σχεδίων (Σχήμα 3.8). Στην εργασία (Hassan, et al., 2012) οι διαδοκίδες τοποθετούνται ανά 9m. Ωστόσο, επειδή επιλέχθηκε τα καλώδια να συνδέονται στο κατάστρωμα στο σημείο σύνδεσης της διαδοκίδας με την κύρια δοκό, οι διαδοκίδες στην παρούσα εργασία τοποθετήθηκαν ανά 13,4m (η πρώτη διαδοκίδα τοποθετείται 0,8m από την αρχή του ακραίου ανοίγματος). Αυτή η λύση προσφέρει συμμετρία στην κατασκευή και τον

απαραίτητο αριθμό καλωδίων σε κάθε φάτνωμα. Επίσης, για τον ίδιο λόγο οι κύριες δοκοί τοποθετήθηκαν σε απόσταση 1m από το άκρο της διατομής του καταστρώματος.

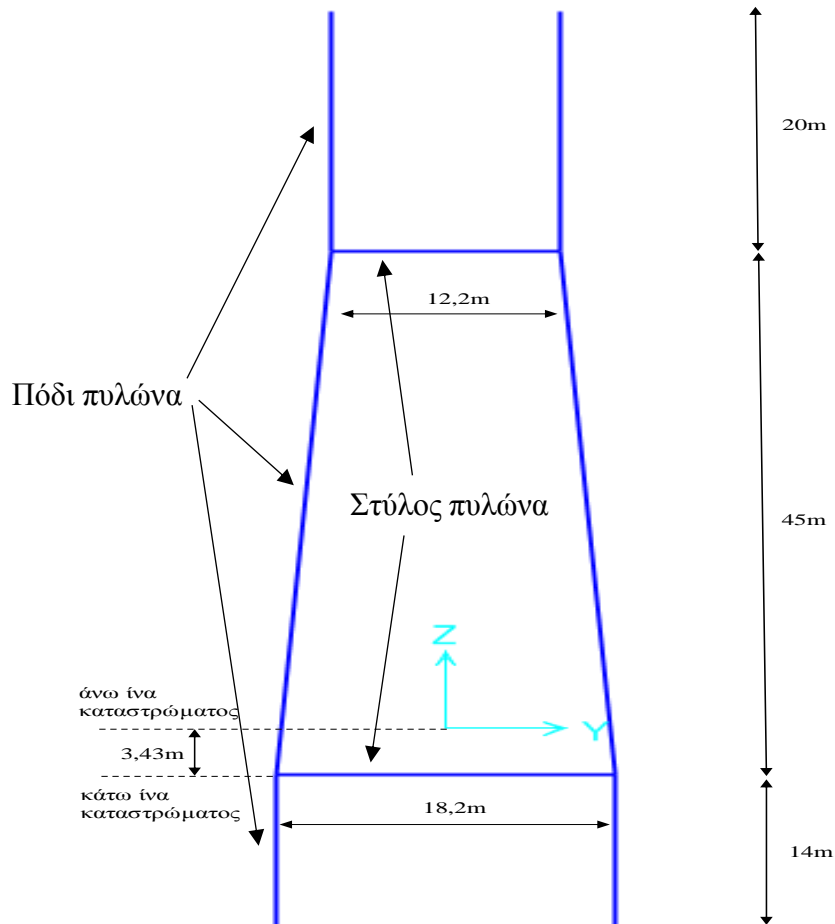


Σχήμα 3.8: Η διατομή της διαδοκίδας του καταστρώματος

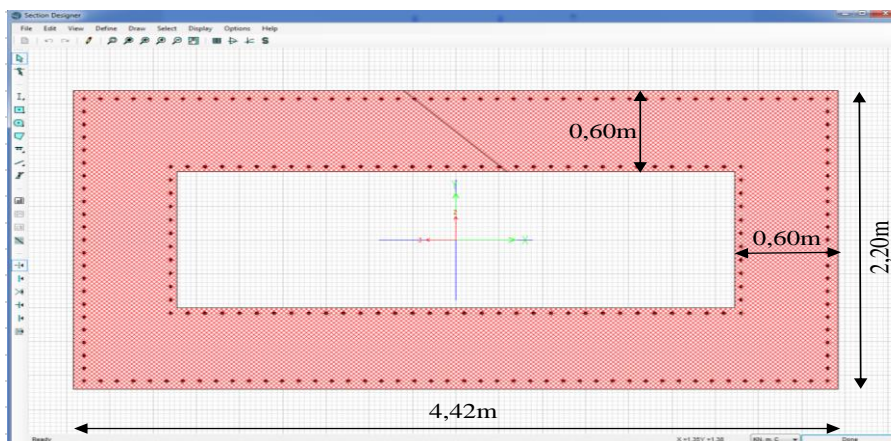
3.2.3 Οι πυλώνες

Οι πυλώνες προσομοιώθηκαν ακριβώς όπως υποδεικνύουν τα σχέδια της εργασίας (Hassan, et al., 2012). Αποτελούνται από σκυρόδεμα C35/45 και έχουν συνολικό ύψος 79m. Τα 14m βρίσκονται κάτω από το κατάστρωμα και τα άλλα 65m από πάνω. Ο κάθε πυλώνας αποτελείται από δύο πόδια που ενώνονται σε δύο σημεία με εγκάρσιους στύλους. Τα ακριβή γεωμετρικά στοιχεία του πυλώνα φαίνονται στο Σχήμα 3.9. Στο ψηλότερο τμήμα του πυλώνα που έχει μήκος 20m τοποθετούνται τα καλώδια. Το 1^ο καλώδιο τοποθετείται 1m από την κορυφή του πυλώνα και κάθε

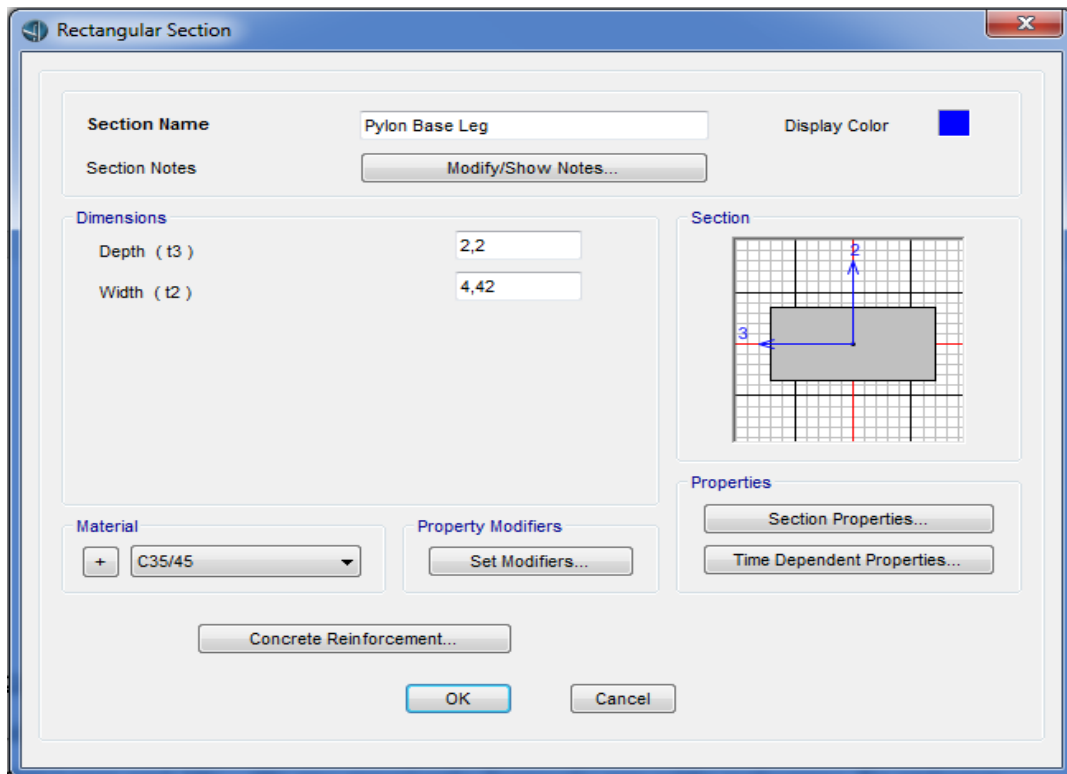
επόμενο αγκυρώνεται 2m κάτω από το προηγούμενο. Οι διατομές των τμημάτων του πυλώνα φαίνονται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 3.10, 3.11 και 3.12).



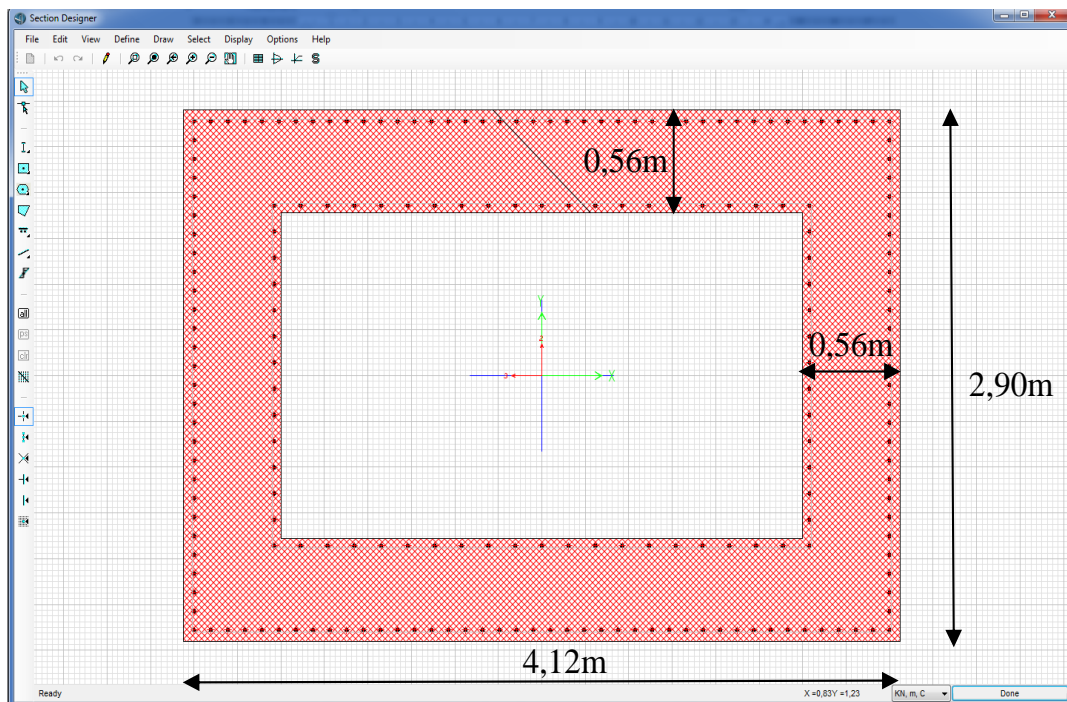
Σχήμα 3.9: Εγκάρσια τομή του πυλώνα της γέφυρας



Σχήμα 3.10: Διατομή του ποδιού του πυλώνα που βρίσκεται πάνω από το κατάστρωμα



Σχήμα 3.11: Διατομή του ποδιού του πύλωνα που βρίσκεται κάτω από το κατάρσιωμα



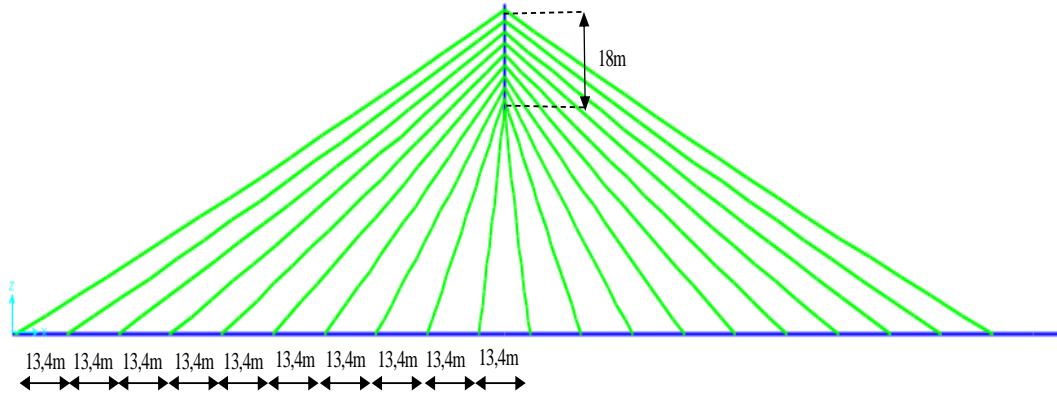
Σχήμα 3.12: Διατομή του στύλου του πύλωνα

Ωστόσο, ακόμα δεν έχει αναφερθεί τίποτα σχετικά με τον οπλισμό των τμημάτων του πυλώνα, παρόλο που παρουσιάζεται στα παραπάνω σχήματα. Στην παρούσα εργασία, ο οπλισμός κάθε στοιχείου του πυλώνα μεταβάλλεται από 1% - 4% της συνολικής επιφάνειας του κάθε στοιχείου (το μέγιστο και το ελάχιστο ποσοστό που ορίζει ο EC2 για τα υποστυλώματα). Εκτενέστερη ανάλυση περί του θέματος αυτού θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο.

Τέλος, στην εργασία (Hassan, et al., 2012) κάτω από το κατάστρωμα παρατηρείται ότι υπάρχει ένα τοίχωμα από σκυρόδεμα που καλύπτει το κενό ανάμεσα στα πόδια του πυλώνα. Η γέφυρα όμως αρχικά προσομοιώθηκε χωρίς την εισαγωγή του τοιχίου αυτού. Μετά την εύρεση του κατάλληλου οπλισμού του πυλώνα θα εισαχθεί το τοίχιο με τη μορφή χιαστί συνδέσμων. Και σε αυτή τη περίπτωση, περαιτέρω ανάλυση θα πραγματοποιηθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

3.2.4 Τα καλώδια

Τα καλώδια είναι από χάλυβα υψηλής αντοχής με $f_y = 1180\text{MPa}$ και $f_u = 1570\text{MPa}$ όπως μελετήθηκαν δηλαδή και στο 2^ο Κεφάλαιο. Η διατομή του καλωδίου είναι κυκλική με εμβαδόν $A = 0,0176\text{m}^2$. Τοποθετούνται 10 καλώδια σε κάθε φάτνωμα. Συνολικά υπάρχουν 80 καλώδια. Τα καλώδια έχουν ημι – ακτινική διάταξη, δηλαδή είναι καλώδια με διαφορετική κλίση μεταξύ τους. Όσο πιο κοντά στο πυλώνα βρίσκεται ένα καλώδιο, τόσο πιο κατακόρυφο είναι. Η αλλαγή της κλίσης δικαιολογείται από την πύκνωση των σημείων στήριξης των καλωδίων στο πυλώνα. Τα σημεία στήριξης στο κατάστρωμα είναι ανά 13,4m ενώ στο πυλώνα ανά 2m (Σχήμα 3.13).

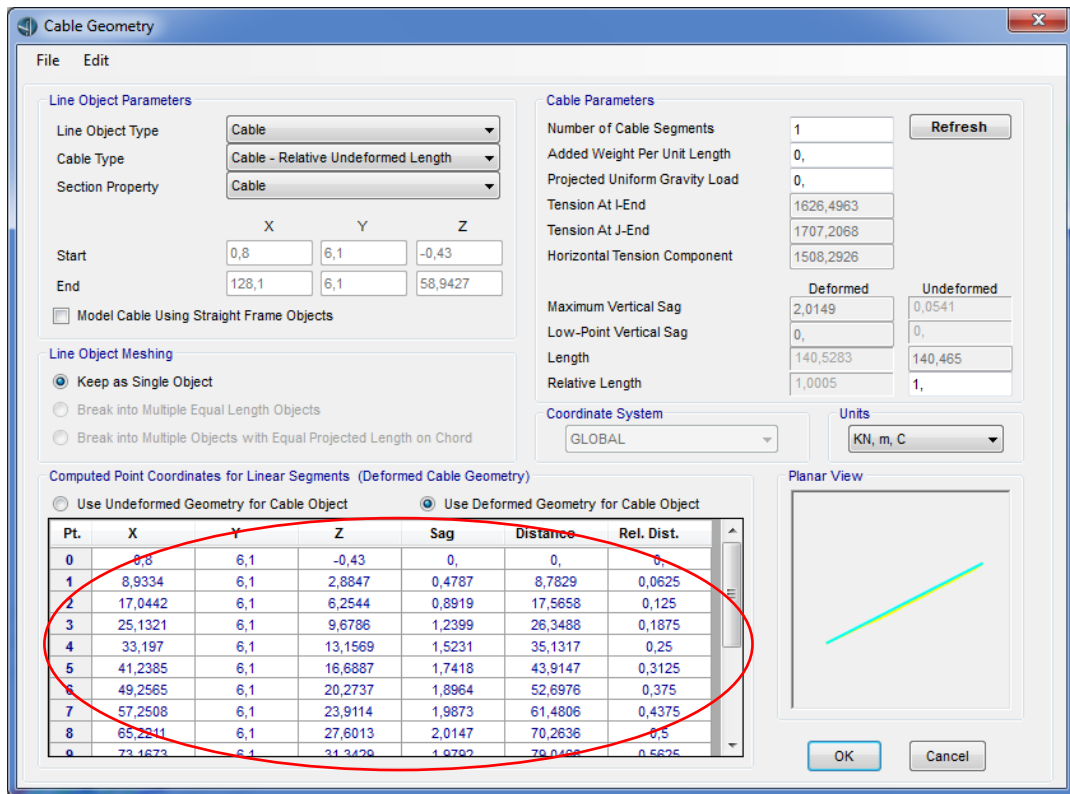


Σχήμα 3.13: Ημι - ακτινική διάταξη καλωδίων

Το ζήτημα που δημιουργείται με τα καλώδια είναι η προένταση με την οποία θα τοποθετηθούν, έτσι ώστε να είναι μόνιμα τεντωμένα, χωρίς να παρουσιάζουν μεγάλο βέλος, αλλά και να μην φτάσουν στη θραύση υπό τις φορτίσεις της Οριακής Κατάστασης Αστοχίας (ΟΚΑ). Για το λόγο αυτό, στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του τρόπου εισαγωγής των καλωδίων. Λαμβάνονται 4 πιθανοί τρόποι εισαγωγής και 5 κριτήρια ελέγχου των τρόπων αυτών. Ο τρόπος που ικανοποιεί και τα 5 κριτήρια θα είναι και αυτός που θα χρησιμοποιηθεί για την περαιτέρω ανάλυση της γέφυρας.

Η καρτέλα εισαγωγής των στοιχείων ενός τυπικού καλωδίου φαίνεται στο Σχήμα 3.14. Κάτω αριστερά υπάρχει ένας πίνακας που χωρίζει το καλώδιο σε 17 σημεία και υπολογίζει για κάθε σημείο τις συντεταγμένες του στη παραμορφωμένη θέση και το βέλος του. Στον Πίνακα 3.1 γίνεται σύγκριση μεταξύ της μεθόδου που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα και της μεθόδου που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις (2.8) και (2.36) που υπολογίζουν το βέλος και την εφελκυστική δύναμη του καλωδίου, αντίστοιχα. Τέλος, στο Σχήμα 3.15 παρατίθενται οι αντίστοιχες καμπύλες.

Παρατηρείται ότι οι δύο μέθοδοι που εξετάστηκαν έχουν πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ τους και συνεπώς τα αποτελέσματα του προγράμματος θεωρούνται έγκυρα.



Σχήμα 3.14: Καρτέλα εισαγωγής δεδομένων ενός τυπικού καλωδίου

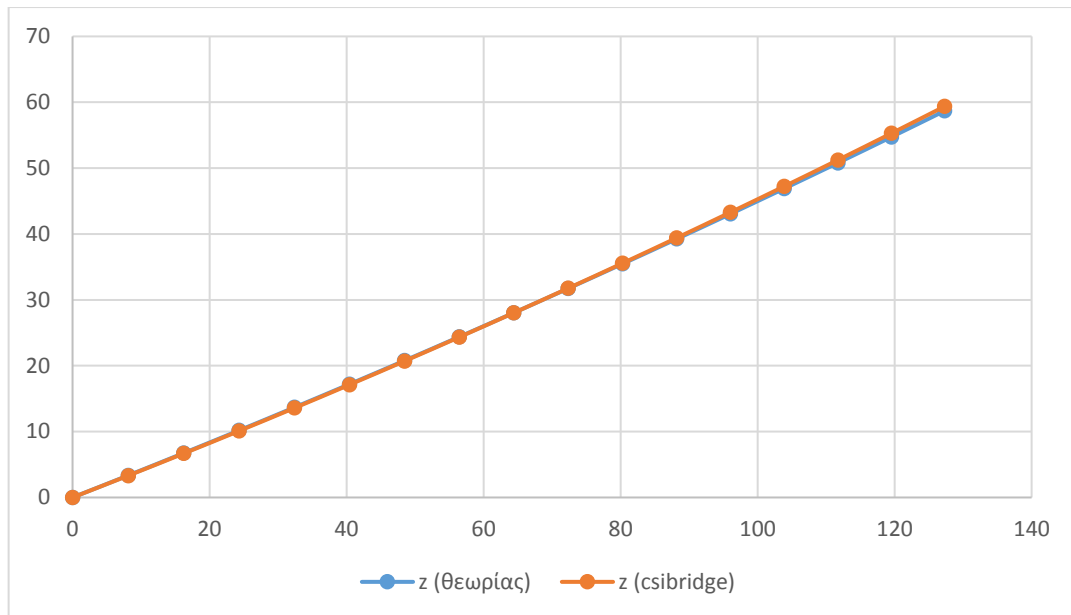
Εύρεση της δύναμης χορδής από τη δύναμη του καλωδίου στην πάνω στήριξη

N_t	T	V	d	h
1707,2068	1664,6389	95,5128	59,3727	127,3

Σύγκριση του βέλους του καλωδίου που υπολογίζει το πρόγραμμα με αυτό που δίνει η θεωρία

x	z (θεωρίας)	z (csibridge)	απόκλιση
0	0	0	0,0%
8,1334	3,3535	3,3147	1,2%
16,2442	6,7517	6,6844	1,0%
24,3321	10,1938	10,1086	0,8%
32,397	13,6794	13,5869	0,7%
40,4385	17,2077	17,1187	0,5%
48,4565	20,7784	20,7037	0,4%
56,4508	24,3909	24,3414	0,2%
64,4211	28,0444	28,0313	0,0%
72,3673	31,7385	31,7729	0,1%
80,2891	35,4727	35,5657	0,3%
88,1865	39,2463	39,4093	0,4%
96,0591	43,0590	43,3033	0,6%
103,907	46,9101	47,2471	0,7%
111,7298	50,7989	51,2402	0,9%
119,5276	54,7250	55,2823	1,0%
127,3	58,6878	59,3727	1,2%

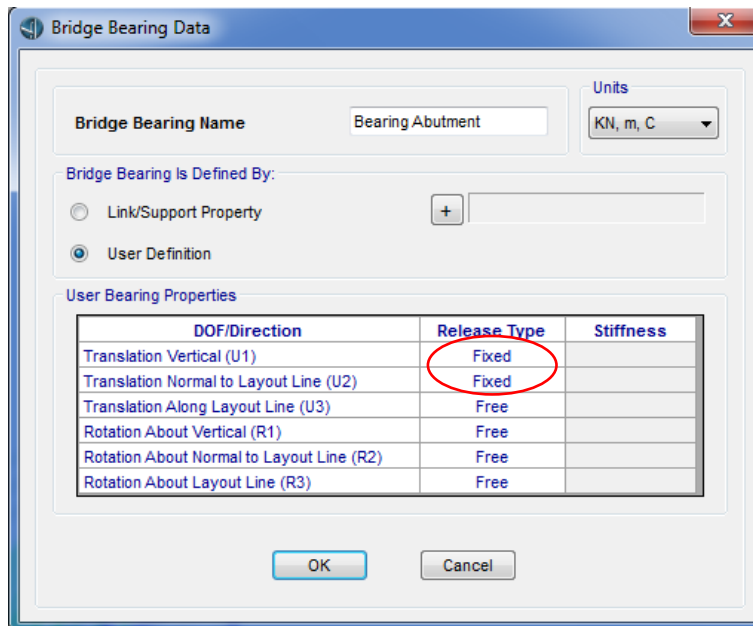
Πίνακας 3.1: Σύγκριση του βέλους που δίνει η θεωρία με αυτό που υπολογίζει το πρόγραμμα ανάλυσης



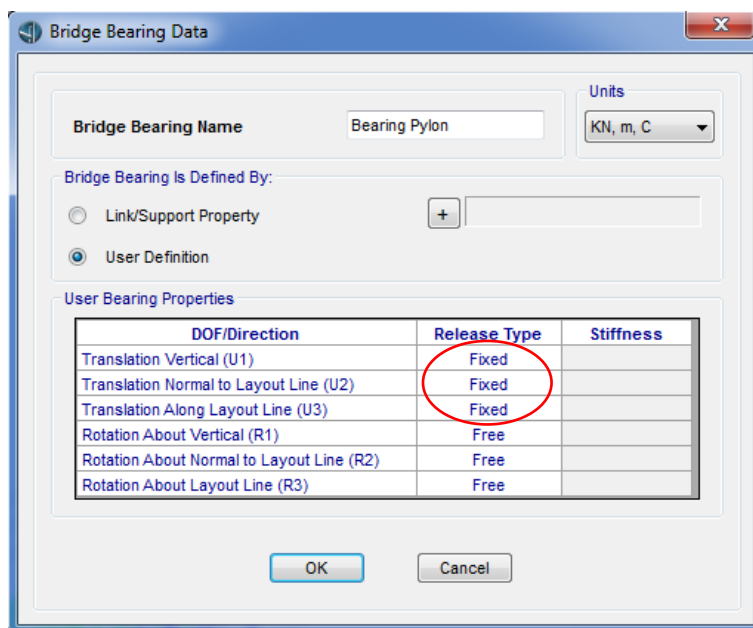
Σχήμα 3.15: Σύγκριση καμπύλων καλωδίου με βάση τη θεωρία και με βάση το πρόγραμμα ανάλυσης

3.2.5 Συνθήκες στήριξης της γέφυρας

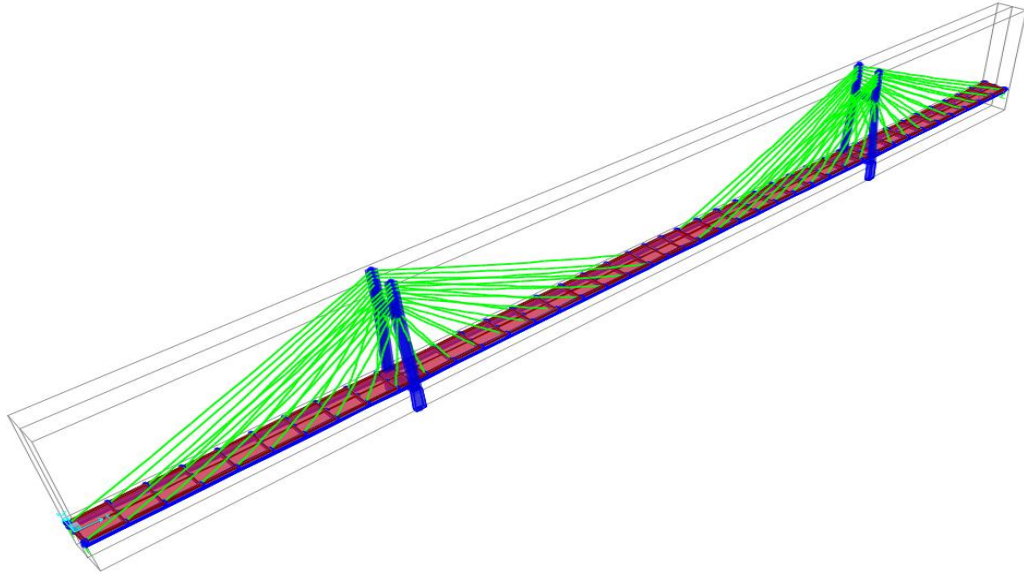
Το κατάστρωμα θεωρείται ότι στηρίζεται στα άκρα του σε ακρόβαθρα που λειτουργούν ως κυλίσεις κατά την διαμήκη διεύθυνση (Σχήμα 3.16). Οι πυλώνες αποτελούν τα μεσόβαθρα της γέφυρας και έτσι στηρίζουν το κατάστρωμα αρθρωτά (Σχήμα 3.17). Οι στηρίξεις αυτές υλοποιούνται με εφέδρανα που προσομοιώνονται στο πρόγραμμα ως μη – γραμμικά ελατήρια. Τα ελατήρια ως προς τις διευθύνσεις που θεωρείται ότι δεν επιτρέπεται μετακίνηση έχουν άπειρη δυσκαμψία. Αντίθετα, εκείνα τα οποία στη διεύθυνσή τους επιτρέπεται η μετακίνηση έχουν μηδενική δυσκαμψία. Τα εφέδρανα με ενεργό δυσκαμψία λαμβάνονται υπόψη στο κομμάτι της δυναμικής ανάλυσης της γέφυρας. Τέλος, οι πυλώνες θεωρούνται πακτωμένοι στη βάση τους.



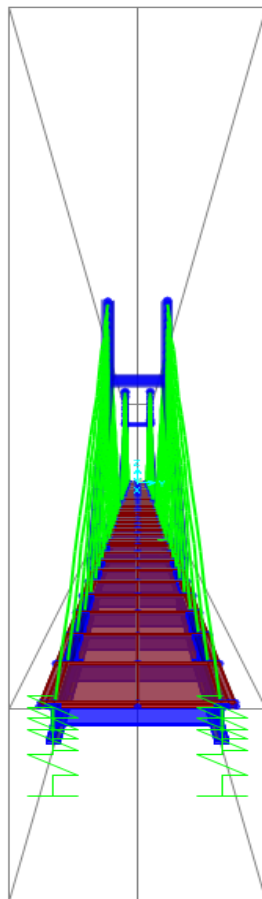
Σχήμα 3.16: Εφέδρανα ακροβάθρων



Σχήμα 3.17: Εφέδρανα μεσοβάθρων



Εικόνα 3.4: Τρισδιάστατη άποψη της γέφυρας που εξετάζεται



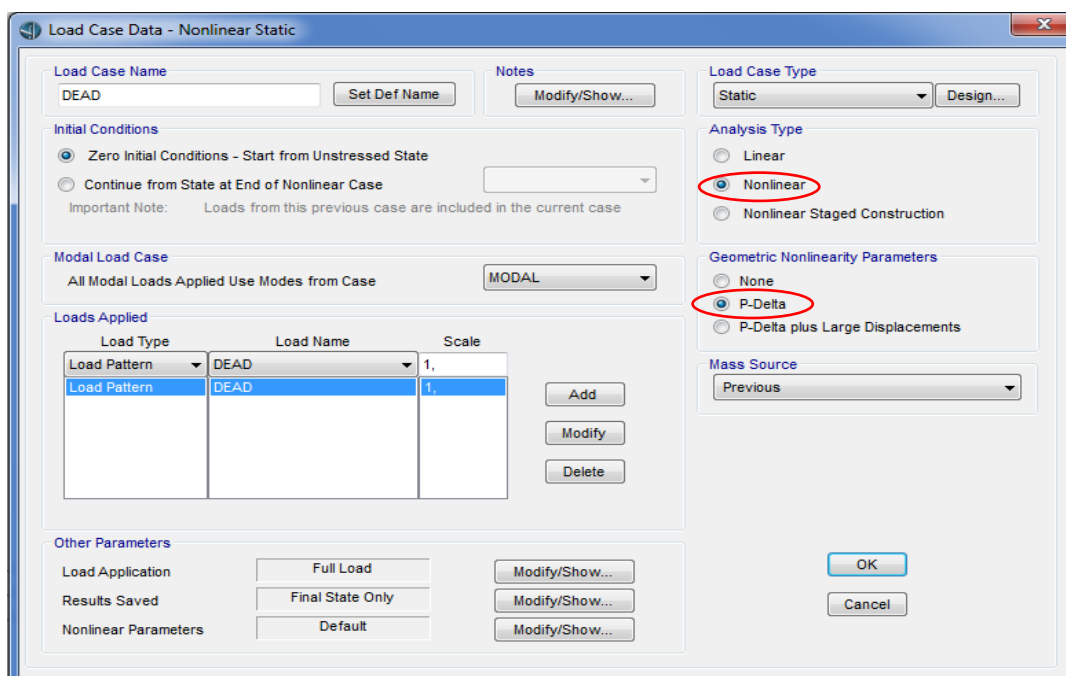
Εικόνα 3.5: Κατά μήκος άποψη της γέφυρας που εξετάζεται

3.3 Επιβαλλόμενα φορτία στη γέφυρα

Στη συνέχεια παρατίθενται οι φορτίσεις και οι συνδυασμοί τους που λήφθηκαν υπόψη για την ανάλυση της γέφυρας μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων CSiBridge 2016.

3.3.1 Ίδιο βάρος κατασκευής (G)

Το ίδιο βάρος της κατασκευής λαμβάνεται αυτόματα από το πρόγραμμα. Το πρόγραμμα υπολογίζει μόνο του το ίδιο βάρος μέσω των δεδομένων των διατομών και των υλικών που έχουν εισαχθεί. Ωστόσο, κατά τον υπολογισμό του πρέπει να ληφθεί μη – γραμμική ανάλυση και γεωμετρική μη -γραμμικότητα P – Delta (Σχήμα 3.18), αφού το προσομοίωμα περιλαμβάνει καλώδια, τα οποία είναι μη γραμμικά στοιχεία και ως προς τη γεωμετρία και ως προς το υλικό κατασκευής τους. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι για το σκυρόδεμα έχει ληφθεί υπόψη ο ερπυσμός C και η συστολή ξήρανσης S του.



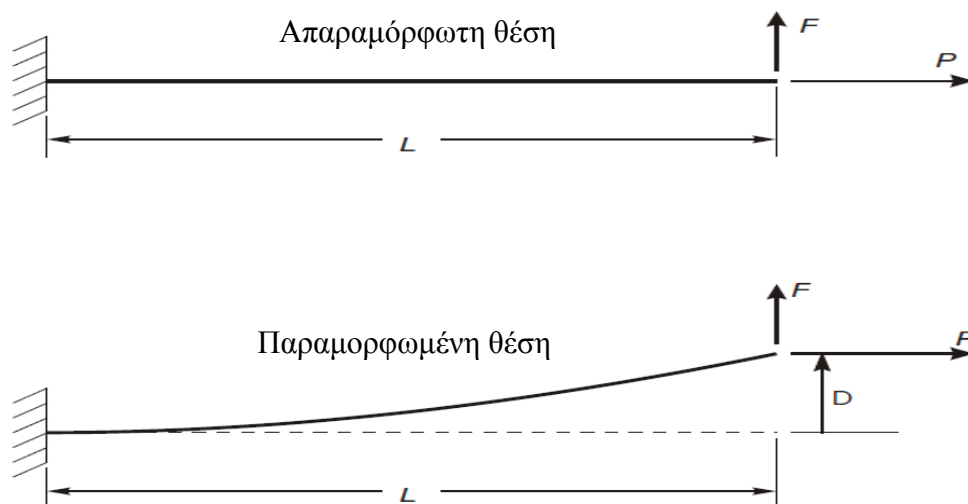
Σχήμα 3.18: Η καρτέλα της φόρτισης του ίδιου βάρους λαμβάνοντας υπόψη τη μη – γραμμικότητα των καλωδίων

Φαινόμενο P – Delta

Το φαινόμενο P – Delta αναφέρεται, κυρίως, στη μη – γραμμική γεωμετρική επίδραση μιας μεγάλης εφελκυστικής ή θλιπτικής τάσης στην εγκάρσια καμπτική και διατμητική συμπεριφορά ενός στοιχείου. Μια θλιπτική τάση κάνει ένα δομικό στοιχείο πιο εύκαμπτο στην εγκάρσια κάμψη και διάτμηση, ενώ μια εφελκυστική τάση κάνει το στοιχείο πιο δύσκαμπτο στην εγκάρσια παραμόρφωση.

Αυτό το φαινόμενο χρησιμοποιείται για την ανάλυση των καλωδιωτών κατασκευών, όπως κρεμαστές και καλωδιωτές γέφυρες.

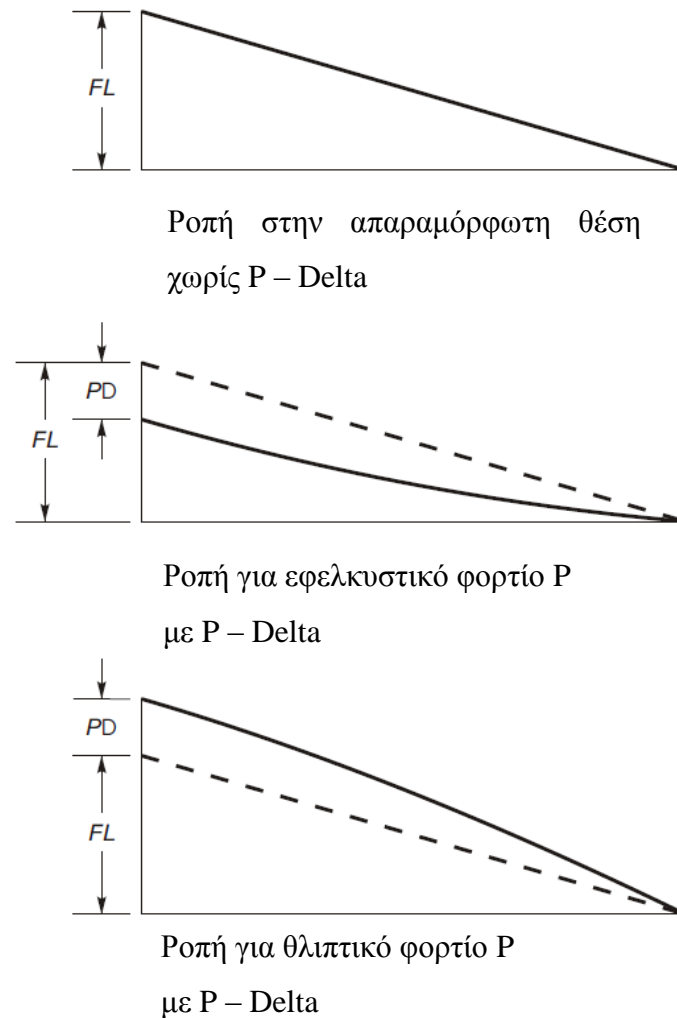
Η βασική λογική του φαινομένου P – Delta παρουσιάζεται στο επόμενο παράδειγμα. Λαμβάνεται υπόψη ένας πρόβολος, ο οποίος υποβάλλεται σε αξονικό φορτίο P και σε εγκάρσιο φορτίο F στο άκρο του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.19. Η εσωτερική αξονική δύναμη κατά μήκος του μέλους είναι ίση με P.



Σχήμα 3.19: Γεωμετρία παραδείγματος προβόλου

Αν ληφθεί η ισορροπία στην απαραμόρφωτη θέση, η ροπή στην πάκτωση είναι $M = FL$ και μειώνεται γραμμικά στο 0 στο φορτισμένο άκρο. Αν, τώρα, ληφθεί η ισορροπία στην παραμορφωμένη θέση, υπάρχει μια επιπλέον ροπή που προκαλείται από το αξονικό φορτίο P, που δρα λόγω της εγκάρσιας μετατόπισης του άκρου κατά D. Η ροπή, πλέον, δεν μεταβάλλεται γραμμικά κατά μήκος του προβόλου, αλλά

εξαρτάται από το παραμορφωμένο σχήμα. Η ροπή στη πάκτωση σε αυτή την περίπτωση είναι $M = FL - PD$. Διαγράμματα ροπών για διάφορες περιπτώσεις φαίνονται στο Σχήμα 3.20.



Σχήμα 3.20: Διαγράμματα ροπών για το παράδειγμα του προβόλου

Σημειώνεται ότι μόνο η εγκάρσια εκτροπή λαμβάνεται στην παραμορφωμένη θέση. Οποιαδήποτε αλλαγή στο μήκος του μέλους αμελείται.

Αν η δοκός είναι σε εφελκυσμό, η ροπή μειώνεται από την πάκτωση και κατά μήκος του προβόλου, για αυτό και η εγκάρσια καμπτική εκτροπή D, επίσης μειώνεται. Έτσι, το μέλος γίνεται πιο δύσκαμπτο για την παραλαβή του εγκάρσιου φορτίου F.

Αντίστροφα, αν η δοκός είναι σε θλίψη, η ροπή κατά μήκος του μέλους και ως εκ τούτου και η εγκάρσια καμπτική εκτροπή D αυξάνονται. Το μέλος γίνεται πιο εύκαμπτο για την παραλαβή του εγκάρσιου φορτίου F .

Αν η θλιπτική δύναμη είναι αρκετά μεγάλη, η εγκάρσια δυσκαμψία μηδενίζεται και συνεπώς η εκτροπή D απειρίζεται. Σε αυτή την περίπτωση η κατασκευή «έχει λυγίσει». Η θεωρητική τιμή του P , όπου αυτό συμβαίνει, ονομάζεται φορτίο λυγισμού του Euler για τη δοκό. Συμβολίζεται με P_{cr} και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_{cr} = -\frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad (3.1)$$

όπου EI είναι η καμπτική δυσκαμψία της διατομής της δοκού.

Το ακριβές φαινόμενο $P - \Delta$ του αξονικού φορτίου στην εγκάρσια εκτροπή και δυσκαμψία είναι μια σύνθετη συνάρτηση του λόγου της δύναμης P και του φορτίου λυγισμού P_{cr} . Το ορθό παραμορφωμένο σχήμα της δοκού και η επίδρασή του στο διάγραμμα ροπών περιγράφεται από συναρτήσεις 3^{ου} βαθμού υπό μηδενικό αξονικό φορτίο, υπερβολικές συναρτήσεις υπό εφελκυσμό και τριγωνομετρικές συναρτήσεις υπό θλίψη.

Το φαινόμενο $P - \Delta$ μπορεί να εμφανιστεί σε οποιαδήποτε παραλλαγή των στηρίξεων της δοκού που εξετάστηκε προηγουμένως. Μπορεί να εφαρμοστεί είτε τοπικά σε ξεχωριστά μέλη είναι σε ολόκληρη την κατασκευή.

Σημαντικό στοιχείο είναι ότι μια μεγάλη αξονική δύναμη, που δρα σε μια μεγάλη εγκάρσια εκτροπή, παράγει μια μεγάλη ροπή που επιδρά στη συμπεριφορά του μέλους ή της κατασκευής. Αν η εκτροπή είναι μικρή, τότε η ροπή που αναπτύσσεται είναι ανάλογη της εκτροπής αυτής.

3.3.2 Πρόσθετα μόνιμα φορτία (G')

Στην παρούσα εργασία τα πρόσθετα μόνιμα φορτία δεν λήφθηκαν υπόψη, καθώς σκοπός της δεν είναι η έκδοση μια προμελέτης σχεδιασμού, αλλά μιας προμελέτης που παρακολουθεί τη συμπεριφορά των μελών της γέφυρας (κυρίως

των καλωδίων) υπό διάφορες φορτίσεις, έτσι ώστε να εξάγει ασφαλή – γενικά συμπεράσματα.

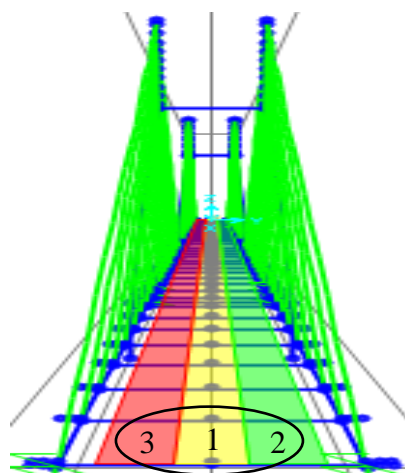
3.3.3 Φορτία κυκλοφορίας (Q = gr1a)

Η φόρτιση που χρησιμοποιήθηκε είναι η πρότυπη φόρτιση 1 του EC1 για τις οδικές γέφυρες. Το κατάστρωμα της γέφυρας χωρίστηκε σε 3 λωρίδες κυκλοφορίας με πλάτος 3m η κάθε μία, σύμφωνα με το διαχωρισμό που γίνεται στον EC1. Οι συντεταγμένες των λωρίδων κυκλοφορίας φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 3.2.

	y (m)	
	Από	Έως
Λωρίδα 1	2,6	5,6
Λωρίδα 2	5,6	8,6
Λωρίδα 3	8,6	11,6

Πίνακας 3.2: Συντεταγμένες λωρίδων κυκλοφορίας με σημείο αναφοράς το αριστερό άκρο της διατομής του καταστρώματος

Να αναφερθεί ότι ο διαχωρισμός σε αυτή τη φάση των λωρίδων σε 1, 2 και 3 είναι τυχαίος. Απλά προσδιορίστηκαν τα όρια των λωρίδων. Στο Σχήμα 3.21 φαίνονται οι λωρίδες κυκλοφορίας επί του οδοστρώματος της γέφυρας με την αρίθμηση που έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα.



Σχήμα 3.21: Λωρίδες κυκλοφορίας επί του οδοστρώματος της γέφυρας

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή των συγκεντρωμένων και των κατανεμημένων φορτίων. Το πρόγραμμα περιέχει βιβλιοθήκες με τα οχήματα του EC1. Έτσι, έγινε εισαγωγή στο πρόγραμμα των οχημάτων της πρότυπης φόρτισης 1 για της χαρακτηριστικές τιμές των λωρίδων 1, 2 και 3. Να αναφερθεί ότι το πιο βαρύ όχημα με τα μεγαλύτερα συγκεντρωμένα φορτία τοποθετείται στην εκάστοτε λωρίδα 1 κάθε φορά (2 άξονες με φορτίο κάθε άξονα 300kN), το αμέσως ελαφρύτερο στη λωρίδα 2 (2 άξονες με φορτίο κάθε άξονα 200kN) και το πιο ελαφρύ με τα μικρότερα συγκεντρωμένα φορτία στη λωρίδα 3 (2 άξονες με φορτίο κάθε άξονα 100kN). Τα οχήματα διασχίζουν τη γέφυρα σε όλο το μήκος της.

Τα κατανεμημένα επιφανειακά φορτία τοποθετούνται χειροκίνητα στη γέφυρα στις περιοχές των λωρίδων κυκλοφορίας. Στη λωρίδα 1 αντιστοιχεί επιφανειακό φορτίο 9kN/m², ενώ για τις λωρίδες 2 και 3 αντιστοιχεί 2,5kN/m².

Ωστόσο, δεν υπάρχει μια συγκεκριμένη διάταξη για τις λωρίδες κυκλοφορίας 1, 2 και 3. Έτσι, προκύπτουν 6 διαφορετικού συνδυασμοί που καλύπτουν όλες τις πιθανές περιπτώσεις. Αυτοί οι συνδυασμοί περιλαμβάνουν και συγκεντρωμένα (TS) και κατανεμημένα (UDL) φορτία, ταυτόχρονα (Πίνακας 3.3). Η περιβάλλουσα αυτών των περιπτώσεων δίνει τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές του μεγέθους που εξετάζεται κάθε φορά. Στην εργασία αυτή, αναλύθηκαν και οι 6 περιπτώσεις και οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των βασικών εντατικών μεγεθών που αναπτύχθηκαν στην κατασκευή σε κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4.

TS1	Όχημα 1	Λωρίδα 3	TS2	Όχημα 1	Λωρίδα 1	TS3	Όχημα 1	Λωρίδα 2
	Όχημα 2	Λωρίδα 1		Όχημα 2	Λωρίδα 2		Όχημα 2	Λωρίδα 1
	Όχημα 3	Λωρίδα 2		Όχημα 3	Λωρίδα 3		Όχημα 3	Λωρίδα 3
TS4	Όχημα 1	Λωρίδα 3	TS5	Όχημα 1	Λωρίδα 1	TS6	Όχημα 1	Λωρίδα 2
	Όχημα 2	Λωρίδα 2		Όχημα 2	Λωρίδα 3		Όχημα 2	Λωρίδα 3
	Όχημα 3	Λωρίδα 1		Όχημα 3	Λωρίδα 2		Όχημα 3	Λωρίδα 1

Πίνακας 3.3: Διαφορετικές πιθανές διατάξεις κινητών φορτίων

Παρατηρείται ότι τα εντατικά μεγέθη με τίτλο “Envelope” είναι ουσιαστικά η περιβάλλουσα των 6 διαφορετικών διατάξεων των φορτίων κυκλοφορίας. Έτσι, με πράσινο σημειώθηκαν οι τιμές των διατάξεων που αντιστοιχούν στην περιβάλλουσα. Τις πιο πολλές ταυτίσεις τις έχουν οι φορτίσεις TS1 και TS3. Ωστόσο, τα εντατικά μεγέθη που ταυτίζονται, είναι η εγκάρσια διάτμηση V_3 , η ροπή στρέψης T και η εγκάρσια καμπτική ροπή M_2 που δεν είναι τα δυσμενέστερα για την κατασκευή. Συνεπώς, αν παρατηρηθούν οι διατάξεις TS2 και TS5 έχουν πιο ουσιώδη κοινά σημεία με την περιβάλλουσα. Αυτά είναι η αξονική δύναμη P , η κατακόρυφη διάτμηση V_2 και η κατακόρυφη καμπτική ροπή M_3 .

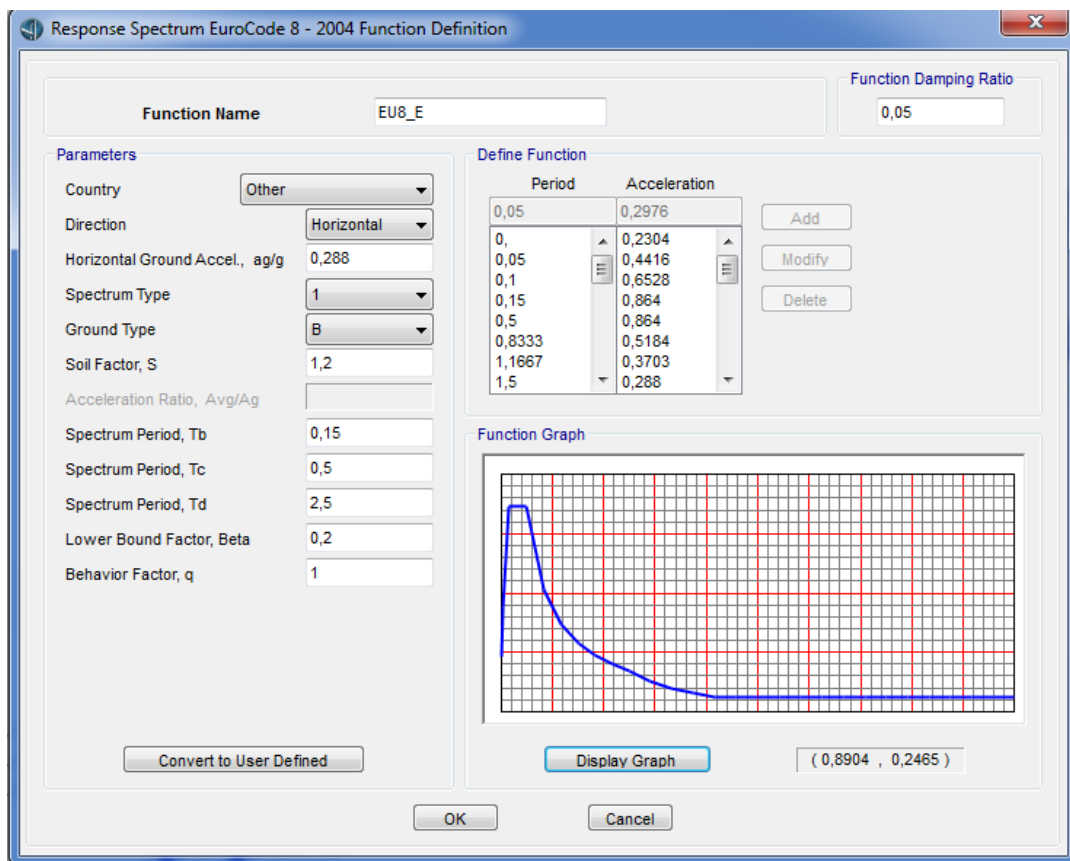
Συμπερασματικά, λόγω της σπουδαιότητας των εντατικών μεγεθών που είναι κρίσιμων για την κατασκευή, αλλά και εξαιτίας της συμμετρίας που παρέχει η συγκεκριμένη διάταξη, επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια μόνο η διάταξη TS5 σε όλες τις αναλύσεις.

TS1	P	min	-9107,1200	TS2	P	min	-9108,5500	TS3	P	min	-9107,1200					
		max	95,0879			max	93,5272			max	95,0879					
	V2	min	-2076,0130		V2	min	-2076,4370		V2	min	-2076,0130					
		max	2076,1320			max	2076,4370			max	2076,0132					
	V3	min	-66,8919		V3	min	-5,0124		V3	min	-66,8919					
		max	66,8919			max	5,0124			max	66,8919					
	T	min	-2538,9910		T	min	-587,0759		T	min	-2538,9910	Envelope	P	min	-9108,5500	
		max	2538,9910			max	587,0759			max	2538,9910			max	95,1101	
	M2	min	-4506,2800		M2	min	-405,0829		M2	min	-6916,1300		V2	min	-2076,4370	
		max	6916,1255			max	371,8798			max	4506,2841			max	2076,4370	
	M3	min	-20816,2900		M3	min	-20806,1800		M3	min	-20816,2900		V3	min	-66,8919	
		max	43374,3700			max	43390,7800			max	43374,3700			max	66,8919	
													T	min	-2538,9910	
TS4	P	min	-9107,1300	TS5	P	min	-9108,5500	TS6	P	min	-9107,1300			max	2538,9910	
		max	95,1101			max	93,5272			max	95,1101			M2	min	-6916,1300
	V2	min	-2076,1000		V2	min	-2076,4370		V2	min	-2076,1000			max	6916,1255	
		max	2076,0999			max	2076,4370			max	2076,0999			M3	min	-20817,6100
	V3	min	-61,8795		V3	min	-5,0124		V3	min	-61,8795			max	43390,7800	
		max	61,8795			max	5,0124			max	61,8795					
	T	min	-1979,1980		T	min	-587,0759		T	min	-1979,1980					
		max	1979,1980			max	587,0759			max	1979,1980					
	M2	min	-4135,8900		M2	min	-371,8798		M2	min	-6511,0400					
		max	6511,0426			max	405,0829			max	4135,8890					
	M3	min	-20817,6100		M3	min	-20806,1800		M3	min	-20817,6100					
		max	43372,9200			max	43390,7800			max	43372,9200					

Πίνακας 3.4: Ελάχιστα και μέγιστα εντατικά μεγέθη κατασκευής που αναπτύχθηκαν με την επιβολή των 6 διαφορετικών διατάξεων των κινητών φορτίων

3.3.4 Σεισμός (E)

Το φάσμα απόκρισης που λήφθηκε υπόψη ήταν το ελαστικό φάσμα του EC8 ($q=1,0$). Ο σεισμός δρα στην κατασκευή κατά τις οριζόντιες διευθύνσεις, είτε τη διαμήκη είτε την εγκάρσια. Για το φάσμα αυτό, θεωρήθηκε ότι το έδαφος της περιοχής ανήκει στην κατηγορία B ($S = 1,2$, $T_B = 0,15s$, $T_c = 0,50s$ και $T_D = 2,50s$), η κατηγορία σπουδαιότητας της γέφυρας είναι υψηλή ($\gamma_i = 1,20$) και η ζώνη σεισμικής επικινδυνότητάς της είναι η 2 ($a_{gR} = 0,24g$). Η απόσβεση ζ λαμβάνεται ίση με 5% (λόγω των πυλώνων που είναι από σπλισμένο σκυρόδεμα), άρα $\eta = 1,0$. Στο Σχήμα 3.22 φαίνεται η καρτέλα εισαγωγής των δεδομένων του φάσματος απόκρισης του EC8.

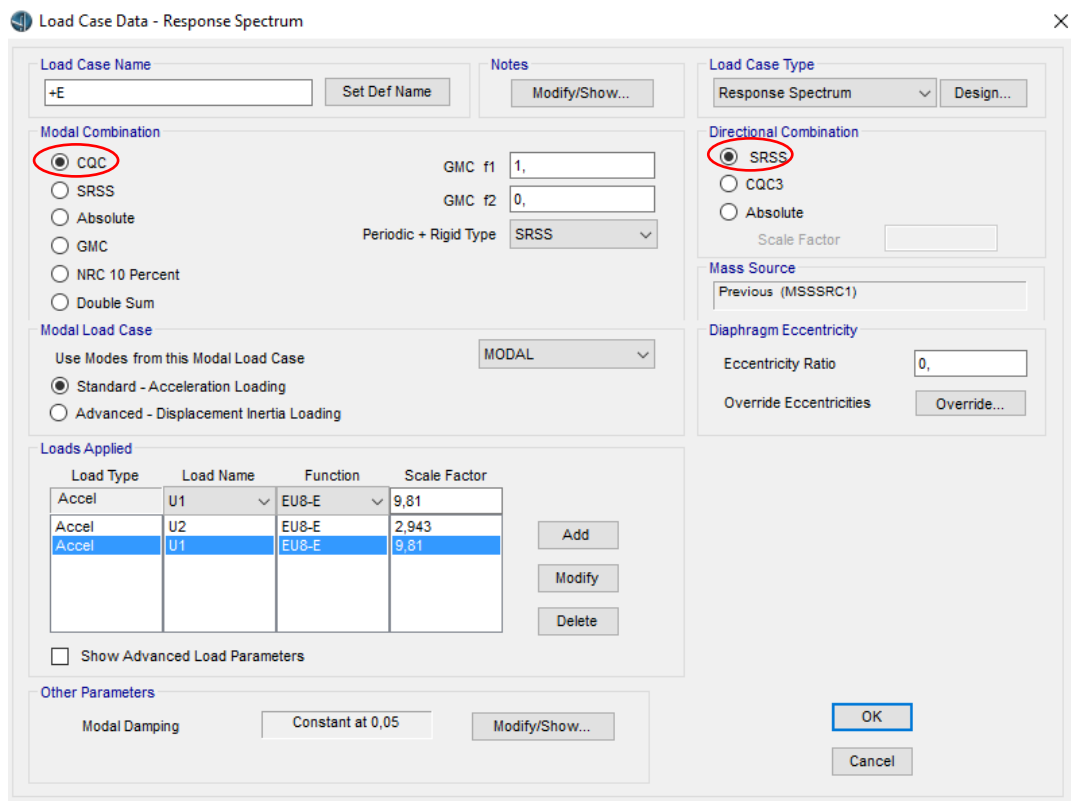


Σχήμα 3.22: Καρτέλα εισαγωγής δεδομένων φάσματος απόκρισης

Σε κάθε διεύθυνση που επιβάλλεται το φάσμα απόκρισης, οι μέγιστες μετακινήσεις, δυνάμεις και τάσεις υπολογίζονται για την κατασκευή για κάθε μία από τις ιδιομορφές που συμμετέχουν. Αυτές οι ιδιομορφικές τιμές συνδυάζονται για να αποδώσουν μια θετική τιμή για τη δοσμένη διεύθυνση της επιβολής του φάσματος. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για το συνδυασμό των τιμών αυτών σε αυτήν την εργασία είναι η CQC (Complete Quadratic Combination). Η μέθοδος CQC είναι γενική και χρησιμοποιείται ευρέως στην πράξη.

Για κάθε μετακίνηση, δύναμη ή τάση στην κατασκευή, ο ιδιομορφικός συνδυασμός δίνει μια θετική τιμή για κάθε διεύθυνση επιβολής του σεισμού. Αυτές οι τιμές για κάθε διεύθυνση συνδυάζονται για να αποδώσουν μια νέα θετική τιμή με την μέθοδο SRSS.

Στο Σχήμα 3.23 παρατηρείται η επιλογή των μεθόδων αυτών στο πρόγραμμα. Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις μεθόδους αυτές βλ. [12].



Σχήμα 3.23: Εισαγωγή του φάσματος στο πρόγραμμα κατά το σεισμικό συνδυασμό $x + 0,3y$

3.4 Συνδυασμοί φορτίσεων

Υπάρχουν δύο κατηγορίες για το συνδυασμό των φορτίσεων, η Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) και η Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ).

Η ΟΚΑ σχετίζεται με την ασφάλεια των ανθρώπων και / ή την ασφάλεια του φορέα. Αφορά την απώλεια ισορροπίας του, θεωρούμενου ως άκαμπτου, σώματος του φορέα ή οποιουδήποτε μέρους του (κατάσταση EQU) και την αντοχή και ευστάθεια της ανωδομής (κατάσταση STR).

Η ΟΚΛ σχετίζεται με τη λειτουργία ενός φορέα ή ενός δομικού μέλους υπό συνθήκες φυσιολογικής χρήσης, την άνεση των χρηστών και την εξωτερική εμφάνιση των κατασκευών. Αφορά τις τάσεις του χάλυβα, το σκυρόδεμα και τον οπλισμό, την διατμητική σύνδεση, τις παραμορφώσεις και τις ταλαντώσεις.

Οι συνδυασμοί που λήφθηκαν υπόψη για την ΟΚΑ είναι 1 βασικός με κινητά φορτία εκείνα της πρότυπης φόρτισης 1 του EC1 (gr1a):

$$1) 1,35 \cdot G + 1,35 \cdot Q$$

Οι συνδυασμοί που λήφθηκαν υπόψη για την ΟΚΛ είναι 1 χαρακτηριστικός και 1 συχνός:

$$1) 1,0 \cdot G + 1,0 \cdot Q$$

$$2) 1,0 \cdot G + (0,75 \cdot TS + 0,40 \cdot UDL)$$

4ο Κεφάλαιο: Ανάλυση καλωδιωτής γέφυρας

4.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται λεπτομερής περιγραφή των μεθόδων ανάλυσης που πραγματοποιήθηκαν στην καλωδιωτή γέφυρα που εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

Αρχικά, διερευνήθηκε η κατάλληλη μέθοδος εισαγωγής των καλωδίων. Υπάρχει ένας εμπειρικός κανόνας που ορίζει την αρχική προένταση των καλωδίων στο 10% της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής τους. Αυτός ο κανόνας μαζί με άλλες μεθόδους, όπως προκύπτουν από την ενασχόληση με το καλώδιο ως μεμονωμένο δομικό στοιχείο στο 2^ο Κεφάλαιο, θα ελεγχθούν με τα κριτήρια που ορίζονται στη συνέχεια.

Έπειτα, εκτιμήθηκε το ιδανικό ποσοστό οπλισμού των πυλώνων, έτσι ώστε η γέφυρα να παρουσιάζει την καλύτερη δυνατή συμπεριφορά στο σεισμό. Το ποσοστό του οπλισμού κυμάνθηκε από 1% - 4%. Για αυτό το σκοπό πραγματοποιήθηκαν μη – γραμμικές στατικές αναλύσεις Pushover.

Αφού βρέθηκε ο κατάλληλος οπλισμός για τους πυλώνες, έγινε εισαγωγή χιαστί συνδέσμων σε αυτούς κάτω από το κατάστρωμα. Πάλι με αναλύσεις Pushover, ελέγχθηκε η επιρροή τους στη κατασκευή στο σεισμό. Έπειτα, εξετάστηκε η περίπτωση χρησιμοποίησης χαμηλότερου ποσοστού οπλισμού στους πυλώνες ταυτόχρονα με τη χρησιμοποίηση χιαστί συνδέσμων. Έγινε σύγκριση μεταξύ των δύο περιπτώσεων (αρχικό ποσοστό χωρίς χιαστί συνδέσμους με μειωμένο ποσοστό με χιαστί συνδέσμους).

Τέλος, πραγματοποιήθηκε μια δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας, εισάγοντας ένα πραγματικό επιταχυνσιογράφημα και εκτιμήθηκε η τελική συμπεριφορά της καλωδιωτής γέφυρας και ως προς αυτού του είδους την ανάλυση.

4.2 Μέθοδος υλοποίησης του συστήματος των καλωδίων

Οι μέθοδοι που λήφθηκαν υπόψη για την εισαγωγή των καλωδίων στη γέφυρα είναι οι εξής:

- 1) Το βέλος στο κατάστρωμα λόγω μόνο των μόνιμων φορτίων να είναι περίπου 0
- 2) Σταθερός λόγος δύναμης χορδής προς μήκος χορδής (T / L) ίσος με 20kN/m
- 3) Σταθερός λόγος βέλους προς μήκος χορδής (k / L) ίσος με 0,5%
- 4) Σταθερή δύναμη χορδής (T) για όλα τα καλώδια ίση με το 10% της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής (T_u)

Στο στάδιο αυτό οι πυλώνες θεωρείται ότι περιέχουν οπλισμό το 1% της συνολικής επιφάνειας σε κάθε διατομή τους. Τα κριτήρια με τα οποία εξετάστηκαν οι παραπάνω μέθοδοι προέρχονται από λογικούς κανόνες εφαρμογής και από κάποια συμπεράσματα που εξήχθησαν στο 2^ο Κεφάλαιο. Αυτά τα κριτήρια είναι:

- 1) Η δύναμη κάθε καλωδίου να μη ξεπερνάει τη δύναμη διαρροής του υλικού του για το χαρακτηριστικό συνδυασμό φόρτισης στην ΟΚΛ ($T_j \leq T_y$, όπου $j =$ το σημείο στήριξης του καλωδίου που βρίσκεται στον πυλώνα)
- 2) Το αρχικό απαραμόρφωτο (=αφόρτιστο) μήκος κάθε καλωδίου να είναι το πολύ ίσο με τη γεωμετρική απόσταση των σημείων στηρίξεών του (μήκος χορδής) ($L' \leq L$)
- 3) Η δύναμη κάθε καλωδίου να μη μειώνεται στο χαρακτηριστικό συνδυασμό φόρτισης της ΟΚΛ ($T' \geq T$). Αν, όμως, μειωθεί σε κάποιο καλώδιο, τότε η δύναμη που ασκείται σε αυτό, μετά την επιβολή του συνδυασμού φόρτισης πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τη δύναμη που αναπτύσσεται αν $L' = L$
- 4) Να ικανοποιείται ο έλεγχος παραμορφώσεων στην ΟΚΛ ($\delta_{\max} \leq L_{\text{ανοίγιμ.}} / 300$)
- 5) Ο λόγος μέγιστου βέλους προς μήκος χορδής (k_{\max} / L) να μην ξεπερνάει το 1,5% σε οποιοδήποτε στάδιο φόρτισης της γέφυρας ($k_{\max} / L \leq 1,5\%$).

4.2.1 Περιορισμός βέλους καταστρώματος υπό τα μόνιμα φορτία

Ο πρώτος τρόπος εισαγωγής των καλωδίων που εξετάζεται, βασίζεται στον περιορισμό του βέλους, όταν δρουν τα μόνιμα φορτία. Οι γέφυρες συνήθως κατασκευάζονται με αντιβέλος, προκειμένου να ικανοποιούν τον έλεγχο παραμορφώσεων στην ΟΚΛ. Το αντιβέλος μιας γέφυρας ουσιαστικά είναι η τεχνητά επιβαλλόμενη παραμόρφωση στο κατάστρωμα, έτσι ώστε όταν δρουν μόνο τα ίδια βάρη της κατασκευής το κατάστρωμα να είναι όσο το δυνατόν οριζόντιο (περίπου μηδενικό βέλος).

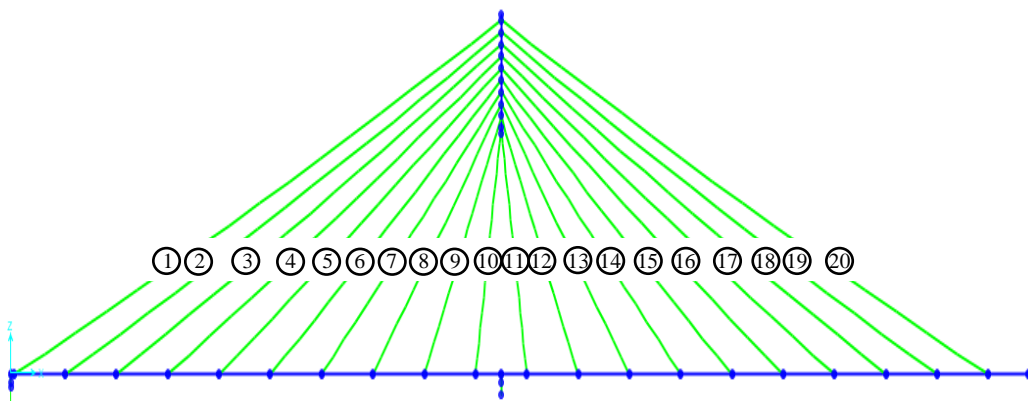
Έτσι, κατασκευάστηκε μια επαναληπτική διαδικασία η οποία προσπαθεί να ικανοποιήσει αυτήν τη συνθήκη. Η διαδικασία είναι επαναληπτική, γιατί η γέφυρα είναι καλωδιωτή και τα καλώδια παρουσιάζουν μη – γραμμική συμπεριφορά. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούν να υπολογιστούν οι αρχικές τους συνθήκες με μία μόνο επανάληψη, αφού δεν θα ικανοποιείται ο περιορισμός του μηδενικού βέλους υπό τα μόνιμα φορτία.

Το αντιβέλος, γενικά, σχεδιάζεται από τον μελετητή της κάθε γέφυρας και υλοποιείται κατά τη φάση ανέγερσής της. Στην καλωδιωτή γέφυρα που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, το κατάστρωμα κατασκευάζεται οριζόντιο. Εισάγοντας τις απαραίτητες αρχικές συνθήκες για κάθε καλώδιο χωριστά, στο κατάστρωμα δημιουργείται το επιθυμητό αντιβέλος. Έτσι, όταν δράσουν τα μόνιμα φορτία, το κατάστρωμα θα γίνει και πάλι περίπου οριζόντιο.

Αρχικά, στο πρόγραμμα τοποθετούνται τα καλώδια με απαραμόρφωτο μήκος ίσο με τη γεωμετρική απόσταση μεταξύ των σημείων στήριξης τους (1^η επανάληψη). Στο Σχήμα 4.1 παρακάτω φαίνεται η αρίθμηση των καλωδίων, που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία για την εύκολη αναφορά σε αυτά. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα αρχικά απαραμόρφωτα μήκη των καλωδίων.

A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L (m)	140,465	127,534	114,745	102,152	89,8379	77,9343	66,6617	56,3998	47,8038	41,9117
A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
L (m)	41,9117	47,8038	56,3998	66,6617	77,9343	89,8379	102,152	114,745	127,534	140,465

Πίνακας 4.1: Αρχικά απαραμόρφωτα μήκη καλωδίων για την 1^η μέθοδο



Σχήμα 4.1: Αρίθμηση καλωδίων δύο φατνωμάτων

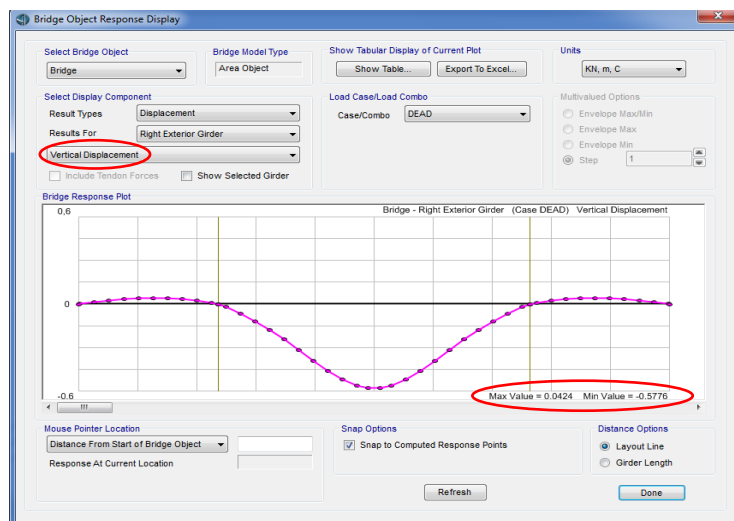
Εξαιτίας της συμμετρίας της γέφυρας και ως προς τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις, μόνο αυτά τα 20 καλώδια θα εξετάζονται κάθε φορά, καθώς τα υπόλοιπα καλώδια επιδεικνύουν ακριβώς την ίδια συμπεριφορά. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται μια τυπική καρτέλα εισαγωγής δεδομένων, όπως είναι αυτή του καλωδίου 5.

Computed Point Coordinates for Linear Segments (Deformed Cable Geometry)

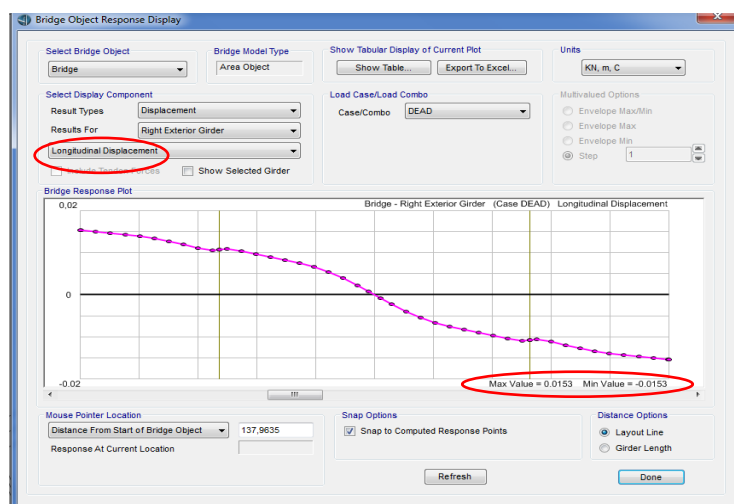
Pt.	X	Y	Z	Sag	Distance	Rel. Dist.
0	54,4	-6,1	-0,43	0,	0,	0,
1	59,1364	-6,1	2,5886	0,2829	5,6166	0,0625
2	63,8556	-6,1	5,6342	0,5268	11,2331	0,125
3	68,5574	-6,1	8,7065	0,732	16,8497	0,1875
4	73,2419	-6,1	11,8051	0,8987	22,4663	0,25
5	77,909	-6,1	14,9298	1,0272	28,0829	0,3125
6	82,5588	-6,1	18,0804	1,1178	33,6995	0,375
7	87,1912	-6,1	21,2564	1,1707	39,3161	0,4375
8	91,8062	-6,1	24,4577	1,1863	44,9327	0,5
9	96,4038	-6,1	27,684	1,1649	50,5494	0,5625

Σχήμα 4.2: Καρτέλα εισαγωγής αρχικών δεδομένων του καλωδίου 5 για την 1^η μέθοδο

Στη συνέχεια, γίνεται η μη – γραμμική στατική ανάλυση της γέφυρας υπό τα μόνιμα φορτία και προκύπτουν οι παρακάτω κατακόρυφες και διαμήκεις μετατοπίσεις των σημείων της γέφυρας κατά μήκος των δοκών (Σχήματα 4.3 και 4.4). Οι μετατοπίσεις των σημείων αναφοράς εισάγονται σε ένα φύλλο του Excel και γίνεται η επεξεργασία τους με τον τρόπο που περιγράφεται στη συνέχεια. Ως σημεία αναφοράς, ορίζονται τα σημεία στήριξης των 20 καλωδίων (20 σημεία στο κατάστρωμα + 10 σημεία στον πυλώνα).



Σχήμα 4.3: Κατακόρυφες μετατοπίσεις των σημείων της δοκού υπό τα μόνιμα φορτία μετά την 1^η επανάληψη της 1^{ης} μεθόδου



Σχήμα 4.4: Διαμήκεις μετατοπίσεις των σημείων της δοκού υπό τα μόνιμα φορτία μετά την 1^η επανάληψη της 1^{ης} μεθόδου

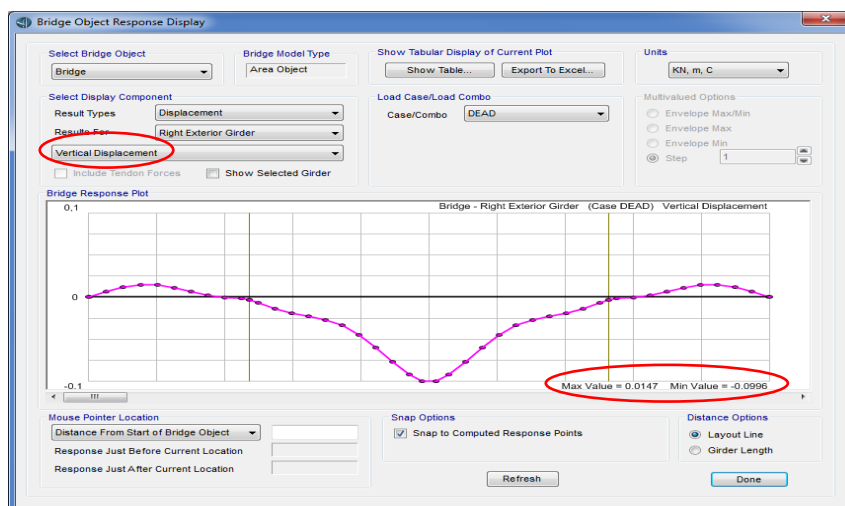
Στο φύλλο του Excel, σε κάθε επανάληψη, εισάγονται οι αρχικές συντεταγμένες x_d , z_d , x_p και z_p των σημείων στήριξης (που είναι σταθερές πάντα για όλες τις επαναλήψεις) και οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις των σημείων αναφοράς dx_d , dz_d , dx_p και dz_p (ο δείκτης d υποδεικνύει το κατάστρωμα και ο δείκτης p τον πυλώνα). Το άθροισμα των αντίστοιχων τιμών μεταξύ τους, ορίζει τη νέα θέση των σημείων αναφοράς μετά την επιβολή των μόνιμων φορτίων. Ωστόσο, έχει αναφερθεί ότι απαιτείται η δημιουργία αντιβέλους. Κάθε σημείο του καταστρώματος, όμως, μετατοπίζεται κατά dx και dz , το οποίο είναι ανεπιθύμητο καθώς υπό τα ίδια βάρη δεν πρέπει να παρουσιάζονται μεγάλες μετατοπίσεις. Άρα, αφού κάθε σημείο μετατοπίζεται κατά dx και dz , αν αρχικά οι συντεταγμένες του καταστρώματος ήταν $x'_d = x_d - dx_d$ και $z'_d = z_d - dz_d$, μετά την ανάλυση των μόνιμων φορτίων το κατάστρωμα θα είναι θεωρητικά οριζόντιο. Η ίδια λογική ισχύει και για τα σημεία αναφοράς που βρίσκονται στον πυλώνα, με μόνη διαφορά ότι επειδή σε κάθε σημείο συντρέχουν 2 καλώδια, οι μετατοπίσεις μοιράζονται σε κάθε καλώδιο ($dx_p / 2$ και $dz_p / 2$). Έτσι, προκύπτουν οι νέες θέσεις των σημείων του πυλώνα x'_p και z'_p .

Έχοντας υπολογίσει τις νέες θέσεις των σημείων αναφοράς, λαμβάνοντας υπόψη το αντιβέλος, υπολογίζονται τα νέα απαραμόρφωτα μήκη L' των καλωδίων που ενώνουν τα μετατοπισμένα σημεία αναφοράς. Η 1^η επανάληψη συνοψίζεται στον Πίνακα 4.2. Αυτά τα μήκη εισάγονται εκ νέου στο πρόγραμμα και πραγματοποιείται πάλι η ανάλυση λόγω των μόνιμων φορτίων. Η θεώρηση των μετατοπισμένων σημείων του καταστρώματος και του πυλώνα για τη δημιουργία του αντιβέλους είναι καθαρά λογιστική, καθώς όπως έχει αναφερθεί το κατάστρωμα θεωρείται οριζόντιο σε όλες τις φάσεις λειτουργίας του. Τα καλώδια που εισάγονται με το νέο απαραμόρφωτο μήκος τους, τεντώνονται και παραμορφώνονται έτσι ώστε να καλύψουν τις αποστάσεις που ορίστηκαν στον Πίνακα 4.1. Η τάση των καλωδίων στα άκρα είναι αυτή που μετατοπίζει τα σημεία αναφοράς για τη δημιουργία του επιθυμητού αντιβέλους.

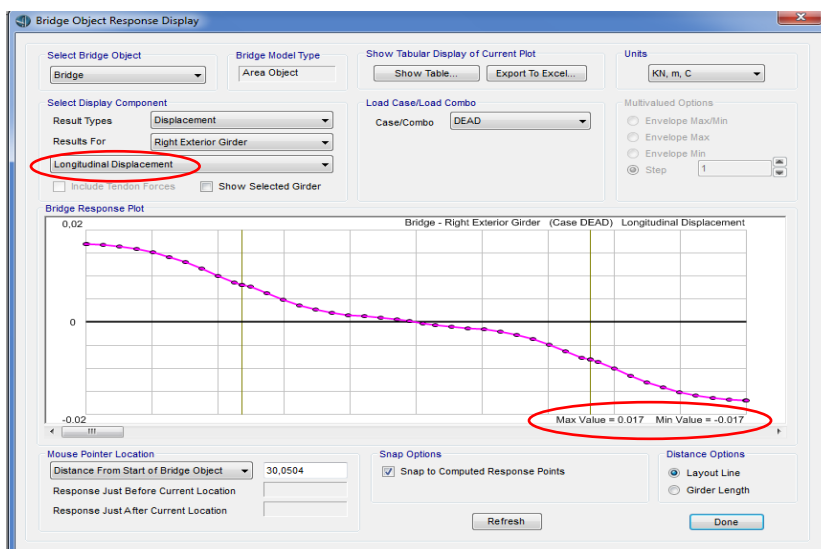
A/A	x _d	z _d	x _p	z _p	dx _d	dz _d	dx _p	dz _p	x' _d	z' _d	x' _p	z' _p	L' ₁	L	L'/L
1	0,8	-0,43	128,1	58,943	0,015334	0,000391	0,07582	-0,0055	0,78467	-0,4304	128,024	58,9485	140,4128	140,465	0,9996
2	14,2	-0,43	128,1	56,943	0,015037	0,011323	0,07306	-0,0055	14,185	-0,4413	128,027	56,9485	127,4895	127,534	0,9997
3	27,6	-0,43	128,1	54,943	0,014696	0,022525	0,07029	-0,0054	27,5853	-0,4525	128,03	54,9484	114,7098	114,745	0,9997
4	41	-0,43	128,1	52,943	0,014305	0,032368	0,06751	-0,0054	40,9857	-0,4624	128,032	52,9484	102,1266	102,152	0,9998
5	54,4	-0,43	128,1	50,943	0,013858	0,039369	0,06472	-0,0053	54,3861	-0,4694	128,035	50,9483	89,8219	89,8379	0,9998
6	67,8	-0,43	128,1	48,943	0,013332	0,042419	0,06191	-0,0052	67,7867	-0,4724	128,038	48,9482	77,9271	77,9343	0,9999
7	81,2	-0,43	128,1	46,943	0,012696	0,041013	0,05909	-0,0051	81,1873	-0,471	128,041	46,9481	66,6621	66,6617	1,0000
8	94,6	-0,43	128,1	44,943	0,011936	0,035252	0,05626	-0,005	94,5881	-0,4653	128,044	44,948	56,4061	56,3998	1,0001
9	108	-0,43	128,1	42,943	0,01113	0,025307	0,05343	-0,0048	107,989	-0,4553	128,047	42,9478	47,8136	47,8038	1,0002
10	121,4	-0,43	128,1	40,943	0,010627	0,009482	0,05059	-0,0047	121,389	-0,4395	128,049	40,9477	41,9196	41,9117	1,0002
11	134,8	-0,43	128,1	40,943	0,010853	-0,020706	0,05059	-0,0047	134,789	-0,4093	128,049	40,9477	41,9026	41,9117	0,9998
12	148,2	-0,43	128,1	42,943	0,01037	-0,065883	0,05343	-0,0048	148,19	-0,3641	128,047	42,9478	47,7668	47,8038	0,9992
13	161,6	-0,43	128,1	44,943	0,009632	-0,118874	0,05626	-0,005	161,59	-0,3111	128,044	44,948	56,3362	56,3998	0,9989
14	175	-0,43	128,1	46,943	0,008931	-0,178622	0,05909	-0,0051	174,991	-0,2514	128,041	46,9481	66,5741	66,6617	0,9987
15	188,4	-0,43	128,1	48,943	0,008264	-0,244935	0,06191	-0,0052	188,392	-0,1851	128,038	48,9482	77,8244	77,9343	0,9986
16	201,8	-0,43	128,1	50,943	0,007532	-0,316351	0,06472	-0,0053	201,792	-0,1136	128,035	50,9483	89,7076	89,8379	0,9985
17	215,2	-0,43	128,1	52,943	0,006627	-0,38948	0,06751	-0,0054	215,193	-0,0405	128,032	52,9484	102,0041	102,152	0,9986
18	228,6	-0,43	128,1	54,943	0,005467	-0,459083	0,07029	-0,0054	228,595	0,02908	128,03	54,9484	114,5837	114,745	0,9986
19	242	-0,43	128,1	56,943	0,004014	-0,518587	0,07306	-0,0055	241,996	0,08859	128,027	56,9485	127,3656	127,534	0,9987
20	255,4	-0,43	128,1	58,943	0,002266	-0,560853	0,07582	-0,0055	255,398	0,13085	128,024	58,9485	140,2980	140,465	0,9988

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα 1^{ης} επανάληψης της 1^{ης} μεθόδου

Μετά την ανάλυση, λοιπόν, των μόνιμων φορτίων προκύπτουν νέες κατακόρυφες και διαμήκεις μετατοπίσεις των δοκών. Αυτές φαίνονται στα Σχήματα 4.5 και 4.6. Παρατηρείται ότι οι μετατοπίσεις μειώθηκαν αισθητά, αλλά ακόμα δεν είναι κοντά στο μηδέν. Έτσι πραγματοποιείται και 2^η επανάληψη ακολουθώντας ακριβώς την ίδια διαδικασία, μόνο που το νέο απαραμόρφωτο μήκος των καλωδίων προκύπτει από την εξής σχέση: $L'_2 = L' + L'_1 - L$. Αυτή η σχέση λαμβάνει υπόψη της το τελικό απαραμόρφωτο μήκος των καλωδίων της προηγούμενης επανάληψης. Τα αποτελέσματα της 2^{ης} επανάληψης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.



Σχήμα 4.5: Κατακόρυφες μετατοπίσεις των σημείων της δοκού υπό τα μόνιμα φορτία μετά τη 2^η επανάληψη της 1^{ης} μεθόδου



Σχήμα 4.6: Διαμήκεις μετατοπίσεις των σημείων της δοκού υπό τα μόνιμα φορτία μετά τη 2η επανάληψη της 1ης μεθόδου

A/A	x_d	z_d	x_p	z_p	dx_d	dz_d	dx_p	dz_p	x'_d	z'_d	x'_p	z'_p	L'_s	L	L'/L
1	0,8	-0,43	128,1	58,943	0,017012	0,000465	0,05842	-0,0055	0,78299	-0,4305	128,042	58,9485	140,3779	140,465	0,9994
2	14,2	-0,43	128,1	56,943	0,016726	0,008745	0,05635	-0,0055	14,1833	-0,4387	128,044	56,9485	127,4607	127,534	0,9994
3	27,6	-0,43	128,1	54,943	0,016395	0,015972	0,05427	-0,0055	27,5836	-0,446	128,046	54,9485	114,6871	114,745	0,9995
4	41	-0,43	128,1	52,943	0,015943	0,020258	0,05219	-0,0054	40,9841	-0,4503	128,048	52,9484	102,1093	102,152	0,9996
5	54,4	-0,43	128,1	50,943	0,01532	0,020783	0,05009	-0,0054	54,3847	-0,4508	128,05	50,9484	89,8085	89,8379	0,9997
6	67,8	-0,43	128,1	48,943	0,014485	0,017705	0,04798	-0,0053	67,7855	-0,4477	128,052	48,9483	77,9159	77,9343	0,9998
7	81,2	-0,43	128,1	46,943	0,013404	0,012092	0,04587	-0,0052	81,1866	-0,4421	128,054	46,9482	66,6517	66,6617	0,9999
8	94,6	-0,43	128,1	44,943	0,012054	0,005805	0,04375	-0,0051	94,5879	-0,4358	128,056	44,9481	56,3962	56,3998	0,9999
9	108	-0,43	128,1	42,943	0,010475	0,001094	0,04163	-0,0049	107,99	-0,4311	128,058	42,9479	47,8063	47,8038	1,0001
10	121,4	-0,43	128,1	40,943	0,008986	-0,001143	0,03953	-0,0048	121,391	-0,4289	128,06	40,9478	41,9186	41,9117	1,0002
11	134,8	-0,43	128,1	40,943	0,008128	-0,006852	0,03953	-0,0048	134,792	-0,4231	128,06	40,9478	41,9058	41,9117	0,9999
12	148,2	-0,43	128,1	42,943	0,00674	-0,016032	0,04163	-0,0049	148,193	-0,414	128,058	42,9479	47,7717	47,8038	0,9993
13	161,6	-0,43	128,1	44,943	0,005299	-0,02317	0,04375	-0,0051	161,595	-0,4068	128,056	44,9481	56,3446	56,3998	0,9990
14	175	-0,43	128,1	46,943	0,004142	-0,029864	0,04587	-0,0052	174,996	-0,4001	128,054	46,9482	66,5861	66,6617	0,9989
15	188,4	-0,43	128,1	48,943	0,00331	-0,039202	0,04798	-0,0053	188,397	-0,3908	128,052	48,9483	77,8377	77,9343	0,9988
16	201,8	-0,43	128,1	50,943	0,00275	-0,053587	0,05009	-0,0054	201,797	-0,3764	128,05	50,9484	89,7190	89,8379	0,9987
17	215,2	-0,43	128,1	52,943	0,002361	-0,073796	0,05219	-0,0054	215,198	-0,3562	128,048	52,9484	102,0111	102,152	0,9986
18	228,6	-0,43	128,1	54,943	0,002017	-0,098491	0,05427	-0,0055	228,598	-0,3315	128,046	54,9485	114,5847	114,745	0,9986
19	242	-0,43	128,1	56,943	0,00159	-0,124123	0,05635	-0,0055	241,998	-0,3059	128,044	56,9485	127,3613	127,534	0,9986
20	255,4	-0,43	128,1	58,943	0,000979	-0,145311	0,05842	-0,0055	255,399	-0,2847	128,042	58,9485	140,2912	140,465	0,9988

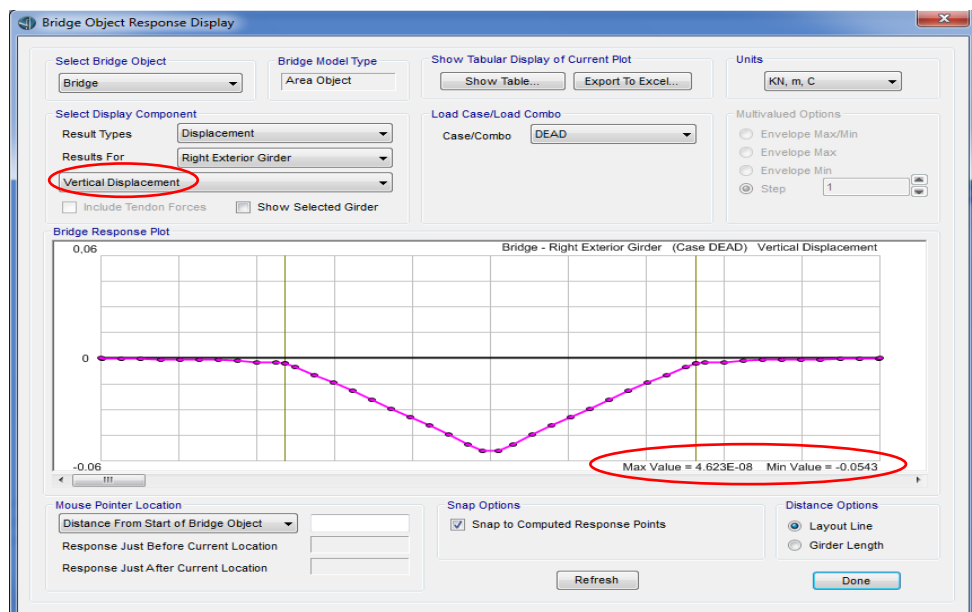
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα 2ης επανάληψης της 1ης μεθόδου

Τα νέα απαραμόρφωτα μήκη των καλωδίων εισάγονται στο πρόγραμμα και πραγματοποιείται η ανάλυση των μόνιμων φορτίων. Παρατηρείται και πάλι ότι το κατάστρωμα δεν είναι οριζόντιο, οπότε πραγματοποιείται και 3η επανάληψη. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι οι κατακόρυφες μετατοπίσεις των σημείων της δοκού να είναι σχεδόν μηδενικές υπό τα μόνιμα φορτία. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 21 επαναλήψεις. Τα αποτελέσματα της τελευταίας επανάληψης φαίνονται στον Πίνακα 4.4.

A/A	x_d	z_d	x_p	z_p	dx_d	dz_d	dx_p	dz_p	x'_d	z'_d	x'_p	z'_p	L'_{21}	L	L'/L
1	0,8	-0,43	128,1	58,943	0,0172	-2,90E-05	0,0203	-0,0056	0,7828	-0,43	128,08	58,9486	140,3077	140,465	0,9989
2	14,2	-0,43	128,1	56,943	0,016825	4,30E-05	0,01979	-0,0056	14,1832	-0,43	128,08	56,9486	127,4138	127,534	0,9991
3	27,6	-0,43	128,1	54,943	0,016298	-3,60E-05	0,01927	-0,0056	27,5837	-0,43	128,081	54,9486	114,6595	114,745	0,9993
4	41	-0,43	128,1	52,943	0,015536	-0,000432	0,01876	-0,0055	40,9845	-0,4296	128,081	52,9485	102,0910	102,152	0,9994
5	54,4	-0,43	128,1	50,943	0,014576	-0,00066	0,01824	-0,0055	54,3854	-0,4293	128,082	50,9485	89,7906	89,8379	0,9995
6	67,8	-0,43	128,1	48,943	0,013476	-0,000621	0,01772	-0,0054	67,7865	-0,4294	128,082	48,9484	77,8970	77,9343	0,9995
7	81,2	-0,43	128,1	46,943	0,012279	-0,000646	0,01719	-0,0053	81,1877	-0,4291	128,083	46,9483	66,6317	66,6617	0,9995
8	94,6	-0,43	128,1	44,943	0,010996	-0,001201	0,01667	-0,0051	94,589	-0,4288	128,083	44,9481	56,3736	56,3998	0,9995
9	108	-0,43	128,1	42,943	0,009538	-0,00217	0,01613	-0,005	107,99	-0,4278	128,084	42,948	47,7907	47,8038	0,9997
10	121,4	-0,43	128,1	40,943	0,008035	-0,002318	0,0156	-0,0048	121,392	-0,4277	128,084	40,9478	41,9438	41,9117	1,0008
11	134,8	-0,43	128,1	40,943	0,007063	-0,00501	0,0156	-0,0048	134,793	-0,425	128,084	40,9478	41,9360	41,9117	1,0006
12	148,2	-0,43	128,1	42,943	0,005783	-0,010004	0,01613	-0,005	148,194	-0,42	128,084	42,948	47,7758	47,8038	0,9994
13	161,6	-0,43	128,1	44,943	0,00457	-0,014304	0,01667	-0,0051	161,595	-0,4157	128,083	44,9481	56,3535	56,3998	0,9992
14	175	-0,43	128,1	46,943	0,00352	-0,019131	0,01719	-0,0053	174,996	-0,4109	128,083	46,9483	66,6076	66,6617	0,9992
15	188,4	-0,43	128,1	48,943	0,002541	-0,02443	0,01772	-0,0054	188,397	-0,4056	128,082	48,9484	77,8076	77,9343	0,9992
16	201,8	-0,43	128,1	50,943	0,001653	-0,029595	0,01824	-0,0055	201,798	-0,4004	128,082	50,9485	89,7620	89,8379	0,9992
17	215,2	-0,43	128,1	52,943	0,000915	-0,03436	0,01876	-0,0055	215,199	-0,3956	128,081	52,9485	102,0585	102,152	0,9991
18	228,6	-0,43	128,1	54,943	0,0004	-0,039112	0,01927	-0,0056	228,6	-0,3909	128,081	54,9486	114,6217	114,745	0,9989
19	242	-0,43	128,1	56,943	0,000144	-0,044604	0,01979	-0,0056	242	-0,3854	128,08	56,9486	127,3748	127,534	0,9988
20	255,4	-0,43	128,1	58,943	8,30E-05	-0,050727	0,0203	-0,0056	255,4	-0,3793	128,08	58,9486	140,2797	140,465	0,9987

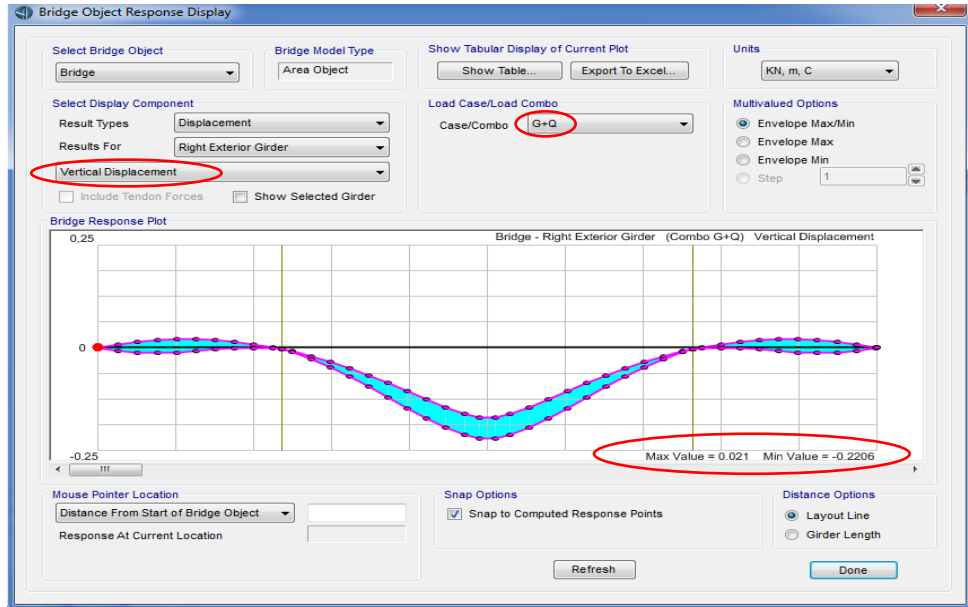
Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα 21^{ης} και τελευταίας επανάληψης της 1^{ης} μεθόδου

Τέλος, εισάγονται τα απαραμόρφωτα μήκη στο πρόγραμμα και πραγματοποιείται μη – γραμμική επίλυση λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα ίδια βάρη της κατασκευής. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι ικανοποιητικά, καθώς στο Σχήμα 4.7 παρατηρείται μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση στο μέσον της δοκού ίση με 0,0543m που είναι πολύ κοντά στο 0 και μηδενική σχεδόν κατακόρυφη μετατόπιση στα δύο ακραία ανοίγματα.



Σχήμα 4.7: Κατακόρυφες μετατοπίσεις των σημείων της δοκού υπό τα μόνιμα φορτία μετά την τελευταία επανάληψη της 1^{ης} μεθόδου

Στη συνέχεια γίνεται η ανάλυση της κατασκευής με την επιβολή των ιδίων βαρών και των κινητών φορτίων και προκύπτουν οι παρακάτω μετακινήσεις για το κατάστρωμα (Σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.8: Κατακόρυφες μετατοπίσεις καταστρώματος με την επιβολή του χαρακτηριστικού συνδυασμού της ΟΚΛ της 1^{ης} μεθόδου

Τέλος, πραγματοποιείται ο έλεγχος της ορθότητας της μεθόδου που παρουσιάστηκε σύμφωνα με τα κριτήρια που έχουν αναφερθεί στην ενότητα 4.1.

- 1) Η εφελκυστική δύναμη στην οποία διαρρέει ένα καλώδιο είναι:

$$T_y = 1180000kPa \cdot 0,0176m^2 = 20768kN$$

Οι μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα καλώδια στο χαρακτηριστικό συνδυασμό της ΟΚΛ φαίνονται στο Σχήμα 4.9.

e	Station m	OutputCase	CaseType Text	StepType Text	P KN
01	140,47406	G+Q	Combination	Max	5714,55
20	140,47179	G+Q	Combination	Max	5306,912
19	127,53925	G+Q	Combination	Max	5040,901
02	127,54274	G+Q	Combination	Max	4998,769
18	114,75007	G+Q	Combination	Max	4397,219
03	114,75438	G+Q	Combination	Max	4216,136
17	102,15682	G+Q	Combination	Max	3780,842
04	102,1613	G+Q	Combination	Max	3626,84
16	89,8414	G+Q	Combination	Max	3424,656
05	89,84528	G+Q	Combination	Max	3373,137
15	77,93653	G+Q	Combination	Max	3177,17
06	77,93962	G+Q	Combination	Max	3149,726
14	66,66292	G+Q	Combination	Max	2964,247
07	66,66502	G+Q	Combination	Max	2922,369
13	56,4003	G+Q	Combination	Max	2788,936
08	56,40126	G+Q	Combination	Max	2744,646
12	47,80412	G+Q	Combination	Max	1744,163
09	47,80502	G+Q	Combination	Max	1629,759
11	41,93678	G+Q	Combination	Max	98,896
10	41,94443	G+Q	Combination	Max	97,051

Σχήμα 4.9: Μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις που ασκούνται στα καλώδια για το χαρακτηριστικό συνδυασμό της ΟΚΛ στην 1^η μέθοδο

Παρατηρείται ότι $\max P = 5714,55 \text{ kN} < T_y = 20768 \text{ kN}$, άρα το κριτήριο αυτό ικανοποιείται.

- 2) Στον παρακάτω Πίνακα 4.5 γίνεται σύγκριση του αρχικού απαραμόρφωτου μήκους κάθε καλωδίου με το μήκος χορδής του.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L'	140,308	127,414	114,66	102,091	89,7906	77,897	66,6317	56,3736	47,7907	41,9438
L	140,465	127,534	114,745	102,152	89,8379	77,9343	66,6617	56,3998	47,8038	41,9117
απόκλιση	0,11%	0,09%	0,07%	0,06%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%	0,03%	-0,08%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
L'	41,936	47,7758	56,3535	66,6076	77,8706	89,762	102,058	114,622	127,375	140,28
L	41,9117	47,8038	56,3998	66,6617	77,9343	89,8379	102,152	114,745	127,534	140,465
απόκλιση	-0,06%	0,06%	0,08%	0,08%	0,08%	0,08%	0,09%	0,11%	0,12%	0,13%

Πίνακας 4.5: Σύγκριση απαραμόρφωτου μήκους κάθε καλωδίου με το μήκος χορδής του στην 1^η μέθοδο

Οι κυκλωμένες αρνητικές τιμές υποδηλώνουν ότι στα καλώδια αυτά το απαραμόρφωτο μήκος τους είναι μεγαλύτερο από το μήκος χορδής τους. Συνεπώς, το κριτήριο αυτό δεν ικανοποιείται.

- 3) Ο επόμενος Πίνακας 4.6 δείχνει τη σύγκριση μεταξύ της αρχικής δύναμης του καλωδίου στη στήριξη στο πυλώνα και της δύναμης που αναπτύσσεται μετά την επιβολή του χαρακτηριστικού συνδυασμού της ΟΚΛ.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T'	5714,55	4998,77	4216,14	3626,84	3373,14	3149,73	2922,37	2744,65	1629,76	97,051
T	4424,14	3780,93	3097,84	2583,22	2287,27	2057,24	1881,44	1844,71	1137,47	99,372
απόκλιση	29,17%	32,21%	36,10%	40,40%	47,47%	53,10%	55,33%	48,78%	43,28%	-2,34%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T'	98,896	1744,16	2788,94	2964,25	3177,17	3424,66	3780,84	4397,22	5040,9	5306,91
T	108,27	2220,62	3100,31	3102,45	3163,51	3305,01	3597,89	4178,03	4811,81	5102,54
απόκλιση	-8,66%	-21,46%	-10,04%	-4,45%	0,43%	3,62%	5,08%	5,25%	4,76%	4,01%

Πίνακας 4.6: Σύγκριση αρχικής δύναμης κάθε καλωδίου με την τελική δύναμη που αναπτύσσεται μετά την επιβολή του χαρακτηριστικού συνδυασμού της ΟΚΛ στην 1^η μέθοδο

Οι τιμές που είναι κυκλωμένες είναι οι αρνητικές τιμές που υποδεικνύουν ότι η δύναμη σε αυτά τα καλώδια έχει μειωθεί μετά την επιβολή του χαρακτηριστικού συνδυασμού της ΟΚΛ.

Έτσι, εξετάζονται περαιτέρω τα καλώδια 10, 11, 12, 13 και 14 που δεν ικανοποιούν αυτό το κριτήριο. Ο Πίνακας 4.7 περιέχει τις δυνάμεις των καλωδίων όταν $L' = L$.

A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T₁	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905
A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T₁	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207

Πίνακας 4.7: Δυνάμεις καλωδίων όταν $L' = L$

Παρατηρείται ότι για τα καλώδια 10 και 11 ισχύει $T' < T_1$. Συνεπώς το κριτήριο αυτό δεν ικανοποιείται.

4) Πρέπει να ισχύει στην ΟΚΛ:

$$\delta_{max} < \frac{L_{span} \text{ (Σχήμα 4.8)}}{300} \rightarrow 0,2206 < \frac{285,6}{300} \rightarrow 0,2206 < 0,952$$

Η ανισότητα είναι ορθή, συνεπώς το κριτήριο αυτό ικανοποιείται.

5) Ο Πίνακας 4.8 περιέχει τους λόγους μέγιστου βέλους προς μήκος χορδής (k_{max} / L) των καλωδίων που εξετάζονται.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k	0,76441	0,73838	0,73105	0,69628	0,609	0,51011	0,40842	0,29803	0,35062	4,40268
L	140,465	127,534	114,745	102,152	89,8379	77,9343	66,6617	56,3998	47,8038	41,9117
k / L	0,54%	0,58%	0,64%	0,68%	0,68%	0,65%	0,61%	0,53%	0,73%	10,50%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
k	3,87135	0,17721	0,17604	0,24587	0,32965	0,41927	0,49769	0,54009	0,57868	0,66181
L	41,9117	47,8038	56,3998	66,6617	77,9343	89,8379	102,152	114,745	127,534	140,465
k / L	9,24%	0,37%	0,31%	0,37%	0,42%	0,47%	0,49%	0,47%	0,45%	0,47%

Πίνακας 4.8: Υπολογισμός λόγου k / L των καλωδίων στην 1^η μέθοδο

Παρατηρείται ότι τα καλώδια 10 και 11 έχουν λόγο $k / L > 1,5\%$, άρα και αυτό το κριτήριο δεν ικανοποιείται.

Τελικά, αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί καθώς μόνο το 1^ο και το 4^ο από τα κριτήρια ικανοποιούνται.

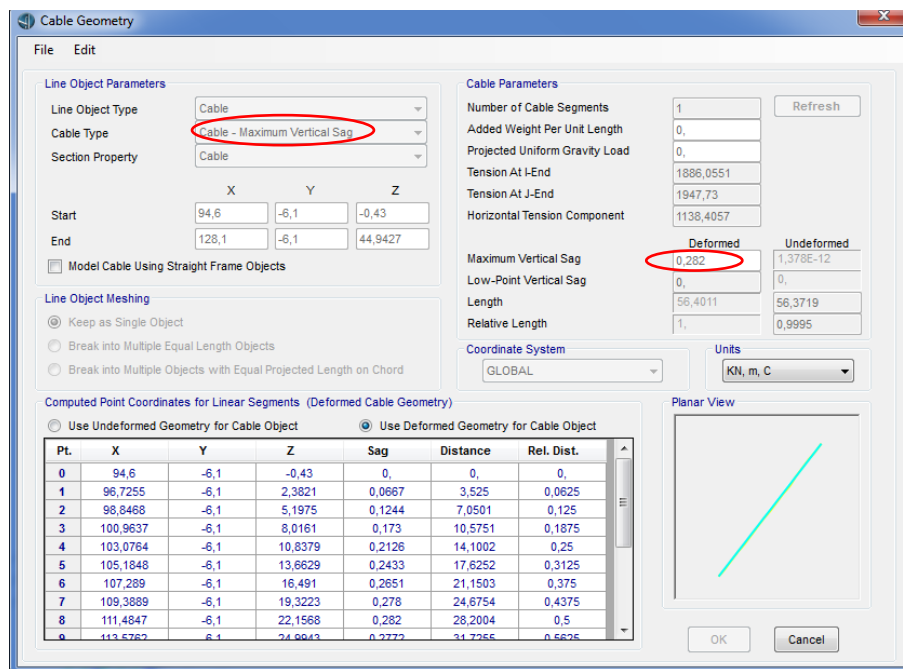
4.2.2 Σταθερός λόγος μέγιστου βέλους προς μήκος χορδής (k_{max} / L)

Στη μέθοδο αυτή, τα καλώδια τοποθετούνται με σταθερό λόγο μέγιστου βέλους προς μήκος χορδής (k_{max} / L) ίσο με 0,5%. Δεδομένου ότι το μήκος χορδής όλων των καλωδίων είναι η γεωμετρική απόσταση μεταξύ των σημείων στήριξής τους (Πίνακας 4.1), το μέγιστο βέλος για κάθε καλώδιο προκύπτει (Πίνακας 4.9):

A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L	140,465	127,534	114,745	102,152	89,8379	77,9343	66,6617	56,3998	47,8038	41,9117
k_{max}	0,70233	0,63767	0,57372	0,51076	0,44919	0,38967	0,33331	0,282	0,23902	0,20956
A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
L	41,9117	47,8038	56,3998	66,6617	77,9343	89,8379	102,152	114,745	127,534	140,465
k_{max}	0,20956	0,23902	0,282	0,33331	0,38967	0,44919	0,51076	0,57372	0,63767	0,70233

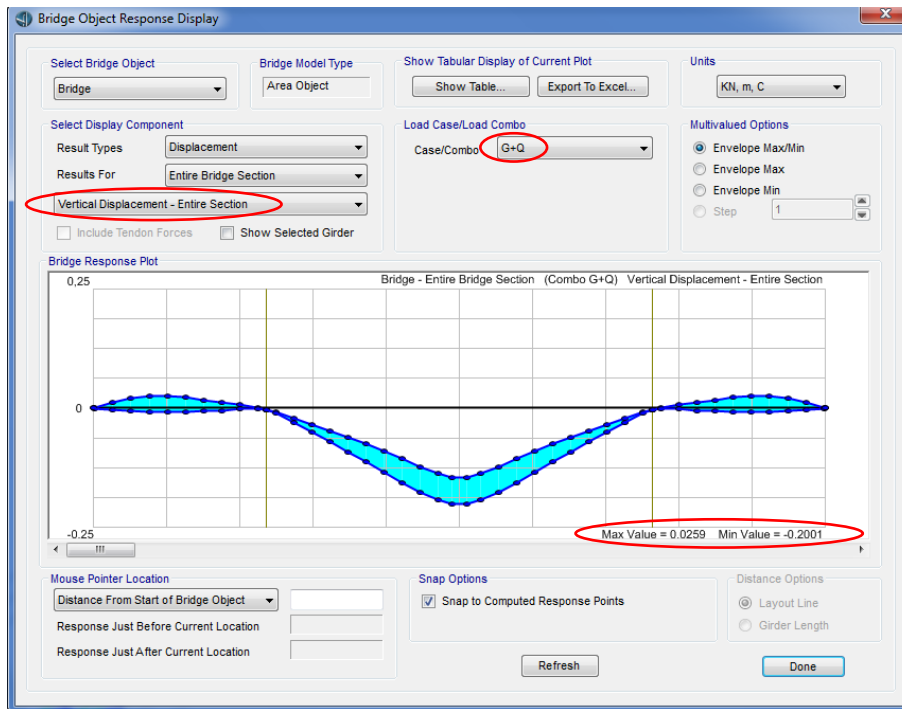
Πίνακας 4.9: Μέγιστο βέλος καλωδίων για την 2^η μέθοδο

Τα βέλη αυτά εισάγονται στο πρόγραμμα μέσω της καρτέλας εισαγωγής δεδομένων του καλωδίου που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ένα τυπικό παράδειγμα εισαγωγής του βέλους στο 8^ο καλώδιο φαίνεται στο Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10: Τυπικό παράδειγμα εισαγωγής μέγιστου βέλους στο 8^ο καλώδιο της 2^{ης} μεθόδου

Στη συνέχεια γίνεται η ανάλυση της κατασκευής με την επιβολή των ιδίων βαρών και των κινητών φορτίων και προκύπτουν οι παρακάτω μετακινήσεις για το κατάστρωμα (Σχήμα 4.11).



Σχήμα 4.11: Κατακόρυφες μετατοπίσεις καταστρώματος με την επιβολή του χαρακτηριστικού συνδυασμού της ΟΚΛ στην 2^η μέθοδο

Τέλος, πραγματοποιείται ο έλεγχος της ορθότητας της μεθόδου που παρουσιάστηκε, σύμφωνα με τα κριτήρια που έχουν αναφερθεί στην ενότητα 4.1.

- 1) Η εφελκυστική δύναμη στην οποία διαρρέει ένα καλώδιο είναι:

$$T_y = 1180000kPa \cdot 0,0176m^2 = 20768kN$$

Οι μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα καλώδια στο χαρακτηριστικό συνδυασμό της ΟΚΛ φαίνονται στο Σχήμα 4.12.

e	Station m	OutputCase	CaseType Text	StepType Text	P KN
01	140,47265	G+Q	Combination	Max	5562,114
02	127,54044	G+Q	Combination	Max	5002,505
03	114,75074	G+Q	Combination	Max	4432,691
04	102,15707	G+Q	Combination	Max	3903,598
05	89,84192	G+Q	Combination	Max	3508,365
06	77,93741	G+Q	Combination	Max	3125,73
07	66,66392	G+Q	Combination	Max	2740,4
08	56,4011	G+Q	Combination	Max	2303,806
09	47,80437	G+Q	Combination	Max	1708,423
10	41,91181	G+Q	Combination	Max	921,841
11	41,91181	G+Q	Combination	Max	940,906
12	47,80437	G+Q	Combination	Max	1741,272
13	56,4011	G+Q	Combination	Max	2340,785
14	66,66392	G+Q	Combination	Max	2786,556
15	77,93741	G+Q	Combination	Max	3189,035
16	89,84192	G+Q	Combination	Max	3596,397
17	102,15707	G+Q	Combination	Max	4020,276
18	114,75074	G+Q	Combination	Max	4456,91
19	127,54044	G+Q	Combination	Max	4896,973
20	140,47265	G+Q	Combination	Max	5321,789

Σχήμα 4.12: Μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις που ασκούνται στα καλώδια για το χαρακτηριστικό συνδυασμό της ΟΚΛ στην 2^η μέθοδο

Παρατηρείται ότι $\max P = 5562,114 \text{ kN} < T_y = 20768 \text{ kN}$, άρα το κριτήριο αυτό ικανοποιείται.

- 2) Στον παρακάτω Πίνακα 4.10 γίνεται σύγκριση του αρχικού απαραμόρφωτου μήκους κάθε καλωδίου με το μήκος χορδής του.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L'	140,29161	127,39117	114,62988	102,06126	89,7678	77,88162	66,6231	56,37187	47,78337	41,89566
L	140,465	127,5337	114,7449	102,1521	89,8379	77,9343	66,6617	56,3998	47,8038	41,9117
απόκλιση	0,12%	0,11%	0,10%	0,09%	0,08%	0,07%	0,06%	0,05%	0,04%	0,04%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
L'	41,89566	47,78337	56,37187	66,6231	77,88162	89,7678	102,06126	114,62988	127,39117	140,29161
L	41,9117	47,8038	56,3998	66,6617	77,9343	89,8379	102,1521	114,7449	127,5337	140,465
απόκλιση	0,04%	0,04%	0,05%	0,06%	0,07%	0,08%	0,09%	0,10%	0,11%	0,12%

Πίνακας 4.10: Σύγκριση απαραμόρφωτου μήκους κάθε καλωδίου με το μήκος χορδής του στην 2^η μέθοδο

Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει καμία αρνητική τιμή, συνεπώς το κριτήριο ικανοποιείται.

- 3) Ο επόμενος Πίνακας 4.11 δείχνει τη σύγκριση μεταξύ της αρχικής δύναμης του καλωδίου στη στήριξη στο πυλώνα και της δύναμης που αναπτύσσεται μετά την επιβολή του χαρακτηριστικού συνδυασμού της ΟΚΛ.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T'	5562,114	5002,505	4432,691	3903,598	3508,365	3125,73	2740,4	2303,806	1708,423	921,841
T	4810,982	4370,934	3935,625	3506,867	3087,462	2681,906	2297,691	1947,73	1654,306	1452,735
απόκλιση	15,61%	14,45%	12,63%	11,31%	13,63%	16,55%	19,27%	18,28%	3,27%	-36,54%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T'	940,906	1741,272	2340,785	2786,556	3189,035	3596,397	4020,276	4456,91	4896,973	5321,789
T	1452,735	1654,306	1947,73	2297,691	2681,906	3087,462	3506,867	3935,625	4370,934	4810,982
απόκλιση	-35,23%	5,26%	20,18%	21,28%	18,91%	16,48%	14,64%	13,25%	12,03%	10,62%

Πίνακας 4.11: Σύγκριση αρχικής δύναμης κάθε καλωδίου με την τελική δύναμη που αναπτύσσεται μετά την επιβολή του χαρακτηριστικού συνδυασμού της ΟΚΛ στην 2^η μέθοδο

Οι τιμές που είναι κυκλωμένες είναι οι αρνητικές τιμές που υποδεικνύουν ότι η δύναμη σε αυτά τα καλώδια έχει μειωθεί μετά την επιβολή του χαρακτηριστικού συνδυασμού της ΟΚΛ.

Έτσι, εξετάζονται περαιτέρω τα καλώδια 10 και 11 που δεν ικανοποιούν αυτό το κριτήριο. Ο Πίνακας 4.7 περιέχει τις δυνάμεις των καλωδίων όταν $L' = L$. Παρατηρείται ότι και για τα δύο καλώδια ισχύει $T' > T_1$, συνεπώς το κριτήριο αυτό ικανοποιείται.

4) Πρέπει να ισχύει στην ΟΚΛ:

$$\delta_{max} < \frac{L_{span}}{300} \xrightarrow{\text{(Σχήμα 4.11)}} 0,2001 < \frac{285,6}{300} \rightarrow 0,2001 < 0,952$$

Η ανισότητα είναι ορθή, συνεπώς το κριτήριο αυτό ικανοποιείται.

5) Το κριτήριο αυτό ικανοποιείται αυτόματα, καθώς η αρχική προϋπόθεση τοποθέτησης των καλωδίων ήταν ο λόγος k_{max} / L να είναι ίσος με 0,5%.

Συμπεραίνουμε ότι αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί, καθώς πληροί όλα τα κριτήρια.

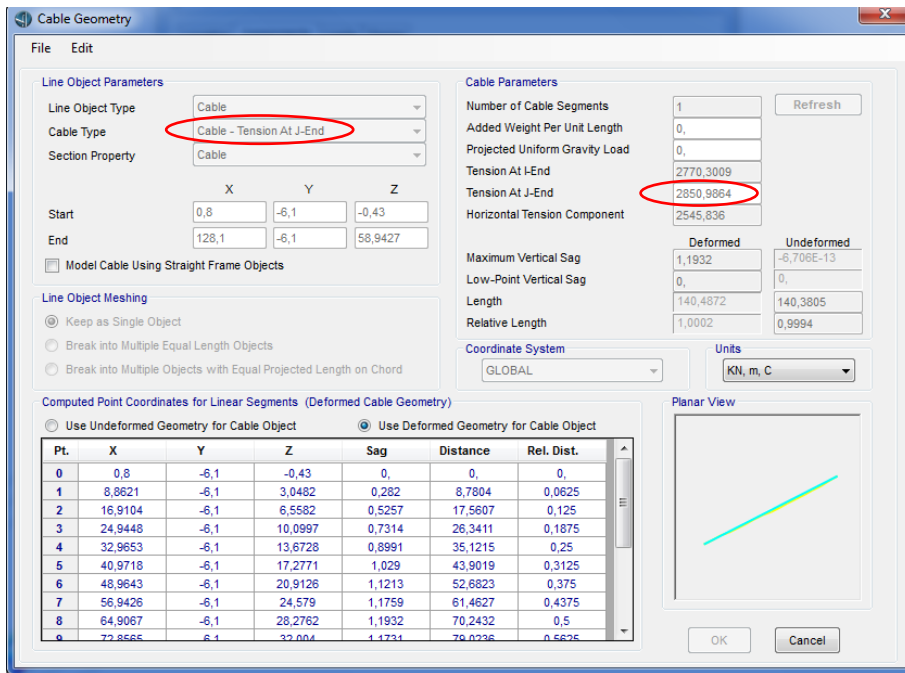
4.2.3 Σταθερός λόγος δύναμης καλωδίου προς μήκος χορδής (T / L)

Στη μέθοδο αυτή, τα καλώδια τοποθετούνται με σταθερό λόγο δύναμης καλωδίου προς μήκος χορδής (T / L) ίσο με 20kN/m. Δεδομένου ότι το μήκος χορδής όλων των καλωδίων είναι η γεωμετρική απόσταση μεταξύ των σημείων στήριξής τους (Πίνακας 4.1), η δύναμη κάθε καλωδίου στην πάνω στήριξη του σύμφωνα με τη σχέση (2.36) προκύπτει (Πίνακας 4.12):

A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L	140,4650	127,5337	114,7449	102,1521	89,8379	77,9343	66,6617	56,3998	47,8038	41,9117
T	2850,986	2590,844	2333,551	2080,177	1832,376	1592,786	1365,819	1159,072	985,663	866,378
A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
L	41,9117	47,8038	56,3998	66,6617	77,9343	89,8379	102,1521	114,7449	127,5337	140,465
T	866,378	985,663	1159,072	1365,819	1592,786	1832,376	2080,177	2333,551	2590,844	2850,986

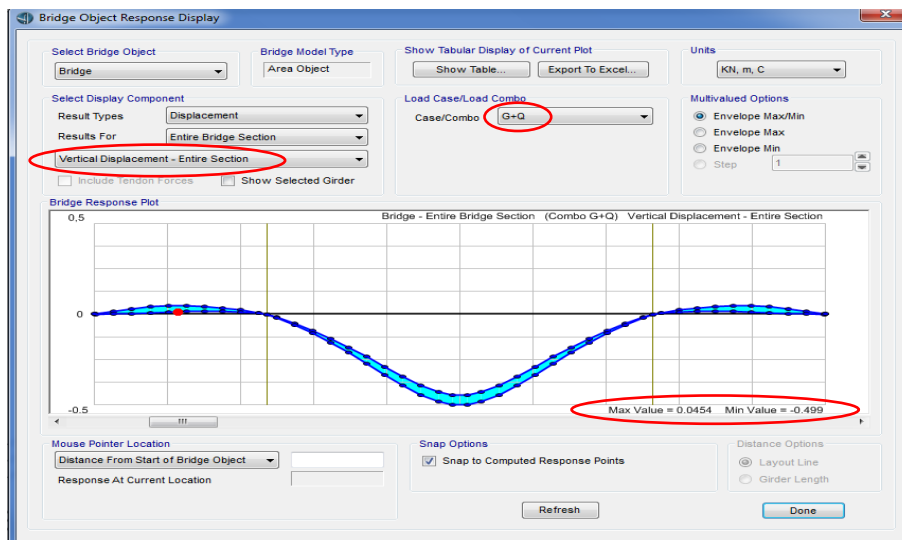
Πίνακας 4.12: Μέγιστο βέλος καλωδίων για την 3η μέθοδο

Οι δυνάμεις αυτές εισάγονται στο πρόγραμμα μέσω της καρτέλας εισαγωγής δεδομένων του καλωδίου που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ένα τυπικό παράδειγμα εισαγωγής της προέντασης στο 1^ο καλώδιο φαίνεται στο Σχήμα 4.13.



Σχήμα 4.13: Τυπικό παράδειγμα εισαγωγής προέντασης στο 1ο καλώδιο της 3ης μεθόδου

Στη συνέχεια γίνεται η ανάλυση της κατασκευής με την επιβολή των ιδίων βαρών και των κινητών φορτίων και προκύπτουν οι παρακάτω μετακινήσεις για το κατάστρωμα (Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14: Κατακόρυφες μετατοπίσεις καταστρώματος με την επιβολή του χαρακτηριστικού συνδυασμού της ΟΚΛ στην 3η μέθοδο

Τέλος, πραγματοποιείται ο έλεγχος της ορθότητας της μεθόδου που παρουσιάστηκε, σύμφωνα με τα κριτήρια που έχουν αναφερθεί στην ενότητα 4.1.

- 1) Η εφελκυστική δύναμη στην οποία διαρρέει ένα καλώδιο είναι:

$$T_y = 1180000kPa \cdot 0,0176m^2 = 20768kN$$

Οι μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα καλώδια στο χαρακτηριστικό συνδυασμό της ΟΚΛ φαίνονται στο Σχήμα 4.15.

e	Station m	OutputCase	CaseType Text	StepType Text	P KN
01	140,4871	G+Q	Combination	Max	5006,401
02	127,55319	G+Q	Combination	Max	4646,289
03	114,76177	G+Q	Combination	Max	4252,723
04	102,16638	G+Q	Combination	Max	3857,087
05	89,8495	G+Q	Combination	Max	3554,443
06	77,94326	G+Q	Combination	Max	3213,81
07	66,66806	G+Q	Combination	Max	2811,587
08	56,4036	G+Q	Combination	Max	2282,332
09	47,80544	G+Q	Combination	Max	1497,277
10	41,91194	G+Q	Combination	Max	496,743
11	41,91194	G+Q	Combination	Max	529,052
12	47,80544	G+Q	Combination	Max	1566,259
13	56,4036	G+Q	Combination	Max	2384,921
14	66,66806	G+Q	Combination	Max	2970,188
15	77,94326	G+Q	Combination	Max	3437,761
16	89,8495	G+Q	Combination	Max	3832,064
17	102,16638	G+Q	Combination	Max	4153,543
18	114,76177	G+Q	Combination	Max	4389,185
19	127,55319	G+Q	Combination	Max	4527,902
20	140,4871	G+Q	Combination	Max	4560,965

Σχήμα 4.15: Μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις που ασκούνται στα καλώδια για το χαρακτηριστικό συνδυασμό της ΟΚΛ στην 3^η μέθοδο

Παρατηρείται ότι $\max P = 5006,401 \text{ kN} < T_y = 20768 \text{ kN}$, άρα το κριτήριο αυτό ικανοποιείται.

2) Στον παρακάτω Πίνακα 4.13 γίνεται σύγκριση του αρχικού απαραμόρφωτου μήκους κάθε καλωδίου με το μήκος χορδής του.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L'	140,38046	127,46528	114,69061	102,10998	89,80588	77,91044	66,64405	56,38641	47,79308	41,90244
L	140,465	127,5337	114,7449	102,1521	89,8379	77,9343	66,6617	56,3998	47,8038	41,9117
απόκλιση	0,06%	0,05%	0,05%	0,04%	0,04%	0,03%	0,03%	0,02%	0,02%	0,02%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
L'	41,90244	47,79308	56,38641	66,64405	77,91044	89,80588	102,10998	114,69061	127,46528	140,38046
L	41,9117	47,8038	56,3998	66,6617	77,9343	89,8379	102,1521	114,7449	127,5337	140,465
απόκλιση	0,02%	0,02%	0,02%	0,03%	0,03%	0,04%	0,04%	0,05%	0,05%	0,06%

Πίνακας 4.13: Σύγκριση απαραμόρφωτου μήκους κάθε καλωδίου με το μήκος χορδής του στην 3^η μέθοδο

Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει καμία αρνητική τιμή, συνεπώς το κριτήριο ικανοποιείται.

3) Ο επόμενος Πίνακας 4.14 δείχνει τη σύγκριση μεταξύ της αρχικής δύναμης του καλωδίου στη στήριξη στο πυλώνα και της δύναμης που αναπτύσσεται μετά την επιβολή του χαρακτηριστικού συνδυασμού της ΟΚΛ.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T'	5006,401	4646,289	4252,723	3857,087	3554,443	3213,81	2811,587	2282,332	1497,277	496,743
T	2850,986	2590,844	2333,551	2080,177	1832,376	1592,786	1365,819	1159,072	985,663	866,378
απόκλιση	75,60%	79,33%	82,24%	85,42%	93,98%	101,77%	105,85%	96,91%	51,91%	-42,66%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T'	529,052	1566,259	2384,921	2970,188	3437,761	3832,064	4153,543	4389,185	4527,902	4560,965
T	866,378	985,663	1159,072	1365,819	1592,786	1832,376	2080,177	2333,551	2590,844	2850,986
απόκλιση	-38,94%	58,90%	105,76%	117,47%	115,83%	109,13%	99,67%	88,09%	74,77%	59,98%

Πίνακας 4.14: Σύγκριση αρχικής δύναμης κάθε καλωδίου με την τελική δύναμη που αναπτύσσεται μετά την επιβολή του χαρακτηριστικού συνδυασμού της ΟΚΛ στην 3^η μέθοδο

Οι τιμές που είναι κυκλωμένες είναι οι αρνητικές τιμές που υποδεικνύουν ότι η δύναμη σε αυτά τα καλώδια έχει μειωθεί μετά την επιβολή του χαρακτηριστικού συνδυασμού της ΟΚΛ.

Έτσι, εξετάζονται περαιτέρω τα καλώδια 10 και 11 που δεν ικανοποιούν αυτό το κριτήριο. Ο Πίνακας 4.7 περιέχει τις δυνάμεις των καλωδίων όταν $L' = L$. Παρατηρείται ότι και για τα δύο καλώδια ισχύει $T' > T_1$, συνεπώς το κριτήριο αυτό ικανοποιείται.

4) Πρέπει να ισχύει στην ΟΚΛ:

$$\delta_{max} < \frac{L_{span}}{300} \xrightarrow{\text{(Σχήμα 4.14)}} 0,499 < \frac{285,6}{300} \rightarrow 0,499 < 0,952$$

Η ανισότητα είναι ορθή, συνεπώς το κριτήριο αυτό ικανοποιείται.

5) Ο Πίνακας 4.15 περιέχει τους λόγους μέγιστου βέλους προς μήκος χορδής (k_{max} / L) των καλωδίων που εξετάζονται.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k	1,1932	1,08344	0,97487	0,86795	0,76338	0,66229	0,56654	0,47937	0,40634	0,35628
L	140,465	127,534	114,7449	102,1521	89,8379	77,9343	66,6617	56,3998	47,8038	41,9117
k / L	0,85%	0,85%	0,85%	0,85%	0,85%	0,85%	0,85%	0,85%	0,85%	0,85%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
k	0,35628	0,40634	0,47937	0,56654	0,66229	0,76338	0,86795	0,97487	1,08344	1,1932
L	41,9117	47,8038	56,3998	66,6617	77,9343	89,8379	102,1521	114,7449	127,5337	140,465
k / L	0,85%	0,85%	0,85%	0,85%	0,85%	0,85%	0,85%	0,85%	0,85%	0,85%

Πίνακας 4.15: Υπολογισμός λόγου k / L των καλωδίων στην 3^η μέθοδο

Παρατηρείται ότι για όλα τα καλώδια ισχύει η συνθήκη $k / L < 1,5\%$.

Συμπεραίνουμε ότι αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί, καθώς πληροί όλα τα κριτήρια.

4.2.4 Σταθερή δύναμη χορδής για όλα τα καλώδια ίση με το 10% της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής

Η μέγιστη εφελκυστική αντοχή του υλικού του καλωδίου είναι $T_u = 27632\text{kN}$ (βλ. το 2^ο Κεφάλαιο). Η δύναμη χορδής κάθε καλωδίου, λοιπόν, θα είναι:

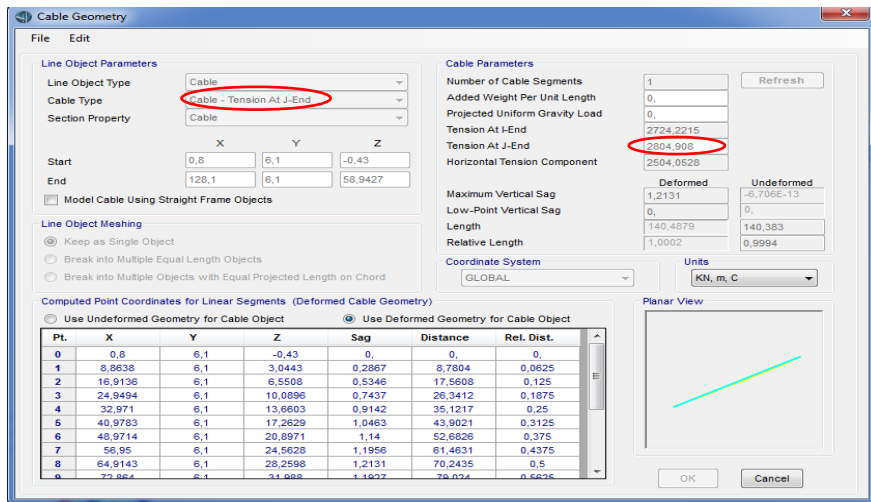
$$T = 0,10 \cdot 27632 = 2763,2kN$$

Το πρόγραμμα, όμως, δέχεται τις δυνάμεις του καλωδίου και όχι τις δυνάμεις χορδής. Η εύρεση της δύναμης του καλωδίου στην πάνω στήριξη κάθε καλωδίου βρίσκεται με τη βοήθεια του τύπου (2.36). Στον Πίνακα 4.16 υπολογίζεται η δύναμη κάθε καλωδίου στην πάνω στήριξή του.

A/A	T	L	V	d	h	Nt
1	2763,2	140,4650	95,5128	59,3727	127,3	2804,9080
2	2763,2	127,5337	86,7199	57,3727	113,9	2803,2822
3	2763,2	114,7449	78,0238	55,3727	100,5	2801,6857
4	2763,2	102,1521	69,4610	53,3727	87,1	2800,1186
5	2763,2	89,8379	61,0876	51,3727	73,7	2798,5809
6	2763,2	77,9343	52,9935	49,3727	60,3	2797,0728
7	2763,2	66,6617	45,3284	47,3727	46,9	2795,5942
8	2763,2	56,3998	38,3505	45,3727	33,5	2794,1452
9	2763,2	47,8038	32,5054	43,3727	20,1	2792,7259
10	2763,2	41,9117	28,4990	41,3727	6,7	2791,3362
11	2763,2	41,9117	28,4990	41,3727	6,7	2791,3362
12	2763,2	47,8038	32,5054	43,3727	20,1	2792,7259
13	2763,2	56,3998	38,3505	45,3727	33,5	2794,1452
14	2763,2	66,6617	45,3284	47,3727	46,9	2795,5942
15	2763,2	77,9343	52,9935	49,3727	60,3	2797,0728
16	2763,2	89,8379	61,0876	51,3727	73,7	2798,5809
17	2763,2	102,152	69,4610	53,3727	87,1	2800,1186
18	2763,2	114,745	78,0238	55,3727	100,5	2801,6857
19	2763,2	127,534	86,7199	57,3727	113,9	2803,2822
20	2763,2	140,465	95,5128	59,3727	127,3	2804,9080

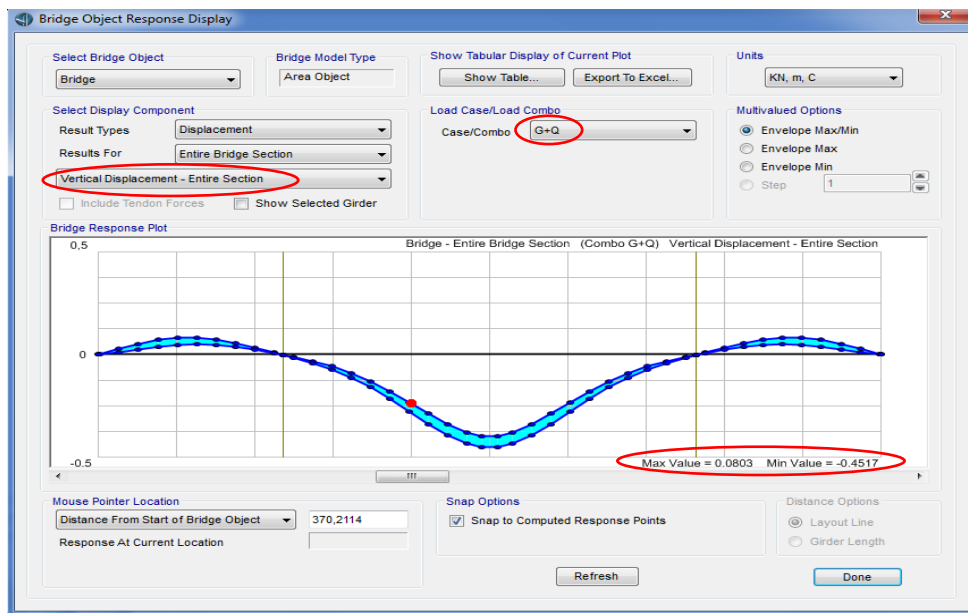
Πίνακας 4.16: Αρχικές δυνάμεις καλωδίου στην 4^η μέθοδο

Οι δυνάμεις αυτές εισάγονται στο πρόγραμμα μέσω της καρτέλας εισαγωγής δεδομένων του καλωδίου που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ένα τυπικό παράδειγμα εισαγωγής της προέντασης στο 1^ο καλώδιο φαίνεται στο Σχήμα 4.16.



Σχήμα 4.16: Τυπικό παράδειγμα εισαγωγής προέντασης στο 1ο καλώδιο της 4^{ης} μεθόδου

Στη συνέχεια γίνεται η ανάλυση της κατασκευής με την επιβολή των ιδίων βαρών και των κινητών φορτίων και προκύπτουν οι παρακάτω μετακινήσεις για το κατάστρωμα (Σχήμα 4.17).



Σχήμα 4.17: Κατακόρυφες μετατοπίσεις καταστρώματος με την επιβολή του χαρακτηριστικού συνδυασμού της ΟΚΛ στην 4^η μέθοδο

Τέλος, πραγματοποιείται ο έλεγχος της ορθότητας της μεθόδου που παρουσιάστηκε, σύμφωνα με τα κριτήρια που έχουν αναφερθεί στην ενότητα 4.1.

1) Η εφελκυστική δύναμη στην οποία διαρρέει ένα καλώδιο είναι:

$$T_y = 1180000kPa \cdot 0,0176m^2 = 20768kN$$

Οι μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα καλώδια στο χαρακτηριστικό συνδυασμό της ΟΚΛ φαίνονται στο Σχήμα 4.18.

e	Station m	OutputCase	CaseType Text	StepType Text	P KN
01	140,48784	G+Q	Combination	Max	4720,559
02	127,5503	G+Q	Combination	Max	4551,05
03	114,75653	G+Q	Combination	Max	4287,315
04	102,15992	G+Q	Combination	Max	3959,056
05	89,8428	G+Q	Combination	Max	3678,817
06	77,93716	G+Q	Combination	Max	3334,424
07	66,6632	G+Q	Combination	Max	2951,243
08	56,40042	G+Q	Combination	Max	2567,545
09	47,80401	G+Q	Combination	Max	2227,212
10	41,91175	G+Q	Combination	Max	1978,715
11	127,5503	G+Q	Combination	Max	4398,077
12	114,75653	G+Q	Combination	Max	4413,343
13	102,15992	G+Q	Combination	Max	4266,042
14	89,8428	G+Q	Combination	Max	3975,448
15	77,93716	G+Q	Combination	Max	3578,312
16	66,6632	G+Q	Combination	Max	3125,406
17	56,40042	G+Q	Combination	Max	2678,237
18	47,80401	G+Q	Combination	Max	2297,653
19	41,91175	G+Q	Combination	Max	2016,665
20	140,48784	G+Q	Combination	Max	4216,624

Σχήμα 4.18: Μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις που ασκούνται στα καλώδια για το χαρακτηριστικό συνδυασμό της ΟΚΛ στην 4^η μέθοδο

Παρατηρείται ότι $\max P = 4720,559kN < T_y = 20768kN$, άρα το κριτήριο αυτό ικανοποιείται.

- 2) Στον παρακάτω Πίνακα 4.17 γίνεται σύγκριση του αρχικού απαραμόρφωτου μήκους κάθε καλωδίου με το μήκος χορδής του.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L'	140,38296	127,45506	114,67084	102,08362	89,7757	77,87894	66,61341	56,35829	47,7683	41,88044
L	140,465	127,5337	114,7449	102,1521	89,8379	77,9343	66,6617	56,3998	47,8038	41,9117
απόκλιση	0,06%	0,06%	0,06%	0,07%	0,07%	0,07%	0,07%	0,07%	0,07%	0,07%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
L'	41,88044	47,7683	56,35829	66,61341	77,8789	89,7757	102,0836	114,6708	127,4551	140,383
L	41,9117	47,8038	56,3998	66,6617	77,9343	89,8379	102,1521	114,7449	127,5337	140,465
απόκλιση	0,07%	0,07%	0,07%	0,07%	0,07%	0,07%	0,07%	0,06%	0,06%	0,06%

Πίνακας 4.17: Σύγκριση απαραμόρφωτου μήκους κάθε καλωδίου με το μήκος χορδής του στην 4^η μέθοδο

Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει καμία αρνητική τιμή, συνεπώς το κριτήριο ικανοποιείται.

- 3) Ο επόμενος Πίνακας 4.18 δείχνει τη σύγκριση μεταξύ της αρχικής δύναμης του καλωδίου στη στήριξη στο πυλώνα και της δύναμης που αναπτύσσεται μετά την επιβολή του χαρακτηριστικού συνδυασμού της ΟΚΛ.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T'	4720,56	4551,05	4287,32	3959,06	3678,82	3334,42	2951,24	2567,55	2227,21	1978,72
T	2804,91	2803,28	2801,69	2800,12	2798,58	2797,07	2795,59	2794,15	2792,73	2791,34
απόκλιση	68,30%	62,35%	53,03%	41,39%	31,45%	19,21%	5,57%	-8,11%	-20,25%	-29,11%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T'	2016,67	2297,65	2678,24	3125,41	3578,31	3975,45	4266,04	4413,34	4398,08	4216,62
T	2791,34	2792,73	2794,15	2795,59	2797,07	2798,58	2800,12	2801,69	2803,28	2804,91
απόκλιση	-27,75%	-17,73%	-4,15%	11,80%	27,93%	42,05%	52,35%	57,52%	56,89%	50,33%

Πίνακας 4.18: Σύγκριση αρχικής δύναμης κάθε καλωδίου με την τελική δύναμη που αναπτύσσεται μετά την επιβολή του χαρακτηριστικού συνδυασμού της ΟΚΛ στην 4^η μέθοδο

Οι τιμές που είναι κυκλωμένες είναι οι αρνητικές τιμές που υποδεικνύουν ότι η δύναμη σε αυτά τα καλώδια έχει μειωθεί μετά την επιβολή του χαρακτηριστικού συνδυασμού της ΟΚΛ.

Έτσι, εξετάζονται περαιτέρω τα καλώδια 8, 9, 10, 11, 12 και 13 που δεν ικανοποιούν αυτό το κριτήριο. Ο Πίνακας 4.7 περιέχει τις δυνάμεις των καλωδίων

όταν $L' = L$. Παρατηρείται ότι για όλα τα καλώδια ισχύει $T' > T_1$, συνεπώς το κριτήριο αυτό ικανοποιείται.

4) Πρέπει να ισχύει στην ΟΚΛ:

$$\delta_{max} < \frac{L_{span}}{300} \xrightarrow{\text{(Σχήμα 4.17)}} 0,4517 < \frac{285,6}{300} \rightarrow 0,4517 < 0,952$$

Η ανισότητα είναι ορθή, συνεπώς το κριτήριο αυτό ικανοποιείται.

5) Ο Πίνακας 4.19 περιέχει τους λόγους μέγιστου βέλους προς μήκος χορδής (k_{max} / L) των καλωδίων που εξετάζονται. Παρατηρείται ότι όλοι οι λόγοι είναι μικρότερη από 2% και έτσι το κριτήριο αυτό ικανοποιείται.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k	1,21313	1,00003	0,80951	0,64157	0,4962	0,37342	0,2732	0,19556	0,14049	0,10799
L	140,465	127,534	114,7449	102,1521	89,8379	77,9343	66,6617	56,3998	47,8038	41,9117
k / L	0,86%	0,78%	0,71%	0,63%	0,55%	0,48%	0,41%	0,35%	0,29%	0,26%
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
k	0,10799	0,14049	0,19556	0,2732	0,37342	0,4962	0,64157	0,80951	1,00003	1,21313
L	41,9117	47,8038	56,3998	66,6617	77,9343	89,8379	102,1521	114,7449	127,5337	140,465
k / L	0,26%	0,29%	0,35%	0,41%	0,48%	0,55%	0,63%	0,71%	0,78%	0,86%

Πίνακας 4.19: Υπολογισμός λόγου k / L των καλωδίων στην 4^η μέθοδο

Συμπεραίνουμε ότι αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί, καθώς πληροί όλα τα κριτήρια.

4.2.5 Συμπεράσματα

Από τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε σε αυτήν την ενότητα συμπεραίνεται ότι μόνο η 1^η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Ωστόσο, αν εξεταστούν καλύτερα οι άλλες τρεις μέθοδοι, τότε αυτή που επιλέγεται για να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια είναι η 4^η μέθοδος. Αυτό συμβαίνει, γιατί στο 3^ο κριτήριο, που ουσιαστικά καμία μέθοδος δεν το ικανοποιεί από την αρχή, παρουσιάζονται μικρότερες αποκλίσεις, σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους, από τις

αρχικές δυνάμεις. Επίσης, οι αρχικές δυνάμεις T είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις T_1 σε περίπτωση που βρεθεί κάποια φόρτιση να τη μειώσει περισσότερο, οπότε υπάρχει μεγάλο περιθώριο. Έτσι, επιβεβαιώνεται ο εμπειρικός κανόνας που θέλει την τοποθέτηση των καλωδίων με δύναμη χορδής ίση με το 10% της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής.

4.3 Εκτίμηση του ποσοστού οπλισμού των πυλώνων

Αρχικά, παρουσιάζεται ο ακριβής οπλισμός όλων των στοιχείων των πυλώνων (διάμετρος διαμήκων ράβδων, αποστάσεις μεταξύ τους, επικαλύψεις). Έπειτα, ελέγχονται οι κατασκευαστικές διατάξεις τους, σύμφωνα με τον EC2 και EC8 (Πίνακας 4.20). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται έλεγχος αντοχής τόσο των χαλύβδινων μελών όσο και των μελών από σκυρόδεμα για τις φορτίσεις της ΟΚΑ και της ΟΚΛ που αναφέρθηκαν στο 3^ο Κεφάλαιο.

$s_{min} = \max\{\Phi; d_g + 5mm; 20\} (mm)$		
d_g (mm)	Φ (mm)	s_{min} (cm)
18	20	2,3
18	25	2,5
18	28	2,8
18	32	3,2

Πίνακας 4.20: Ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ διαμήκων ράβδων σύμφωνα με τις διατάξεις των ευρωκωδίκων

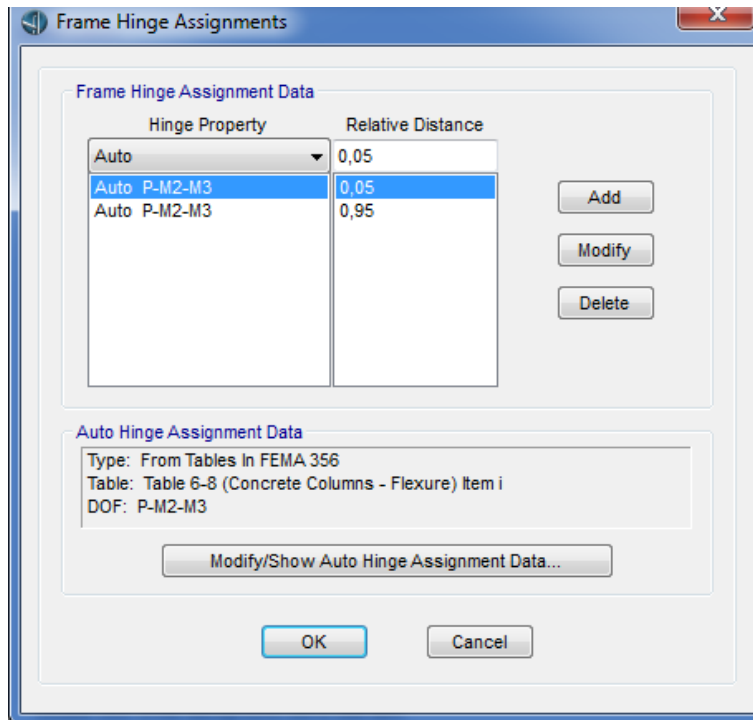
Τέλος, εκτιμάται το βέλτιστο ποσοστό οπλισμού των πυλώνων, ελέγχοντας τη συμπεριφορά της γέφυρας στο σεισμό με βάση τη μη – γραμμική ανάλυση Pushover. Οι περιπτώσεις που εξετάζονται είναι ποσοστό οπλισμού 1%, 2%, 3% και 4% της συνολικής επιφάνειας κάθε διατομής των στοιχείων των πυλώνων. Τα καλώδια έχουν εισαχθεί με τη μέθοδο που επιλέχθηκε στην προηγούμενη ενότητα, δηλαδή με δύναμη χορδής ίση με το 10% της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής τους..

Η στατική μη – γραμμική ανάλυση Pushover εφαρμόζεται για τον καθορισμό των μετακινήσεων και των εντατικών μεγεθών που θα προκληθούν σε μία κατασκευή για το σεισμό σχεδιασμού, λαμβάνοντας υπόψη τη μη – γραμμική συμπεριφορά των φερόντων στοιχείων. Σκοπός μιας τέτοιας ανάλυσης είναι ο έλεγχος της κατασκευής για την αντίστοιχη στάθμη επιτελεστικότητας (Ψυχάρης, 2016).

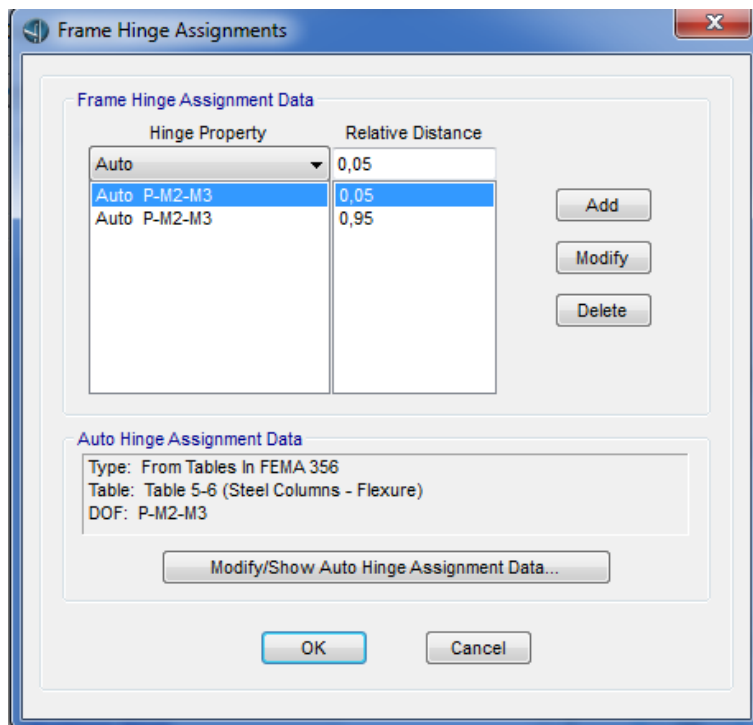
Το πρώτο βήμα της ανάλυσης Pushover είναι η κατασκευή της καμπύλης ικανότητας, η οποία εκφράζει τη μη-γραμμική σχέση μεταξύ του συνολικού επιβαλλόμενου οριζόντιου φορτίου F_b και της μετατόπισης δ_r κάποιου σημείου αναφοράς.

Η κατασκευή της καμπύλης ικανότητας γίνεται με υπολογισμό της ανελαστικής μετακίνησης δ_r του σημείου αναφοράς για σταδιακά αυξανόμενα οριζόντια φορτία με δεδομένη κατανομή, η οποία συνήθως ακολουθεί κάποια ιδιομορφή. Για την κατασκευή αυτής της καμπύλης γίνεται ανελαστική στατική επίλυση για τα φορτία κάθε βήματος και υπολογισμός της μετακίνησης δ_r του σημείου αναφοράς (μεθοδολογία Pushover) λαμβάνοντας υπόψη τη μειωμένη δυσκαμψία των στοιχείων που έχουν διαρρεύσει. Ως σημείο αναφοράς στη συγκεκριμένη γέφυρα επιλέχθηκε το κέντρο μάζας - Κ.Μ. του καταστρώματος (κόμβος #8 στο πρόγραμμα ανάλυσης).

Για την κατασκευή της καμπύλης ικανότητας πρέπει να οριστούν ποιοι κόμβοι είναι δυνατόν να αναπτύξουν πλαστικές αρθρώσεις. Πλαστικές αρθρώσεις, λοιπόν, ορίστηκαν στα άκρα όλων των στοιχείων της γέφυρας (μεταλλικές δοκοί και διαδοκίδες και πυλώνες από σκυρόδεμα), εκτός δηλαδή των καλωδίων, και συγκεκριμένα σε απόσταση 5% του μήκους των μελών από αυτά. Οι ιδιότητες των πλαστικών αρθρώσεων ορίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα σύμφωνα με τον κανονισμό FEMA – 356. Στα Σχήματα 4.19 και 4.20 παρουσιάζονται οι καρτέλες για τη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων ενός μέλους από σκυρόδεμα και ενός από χάλυβα, αντίστοιχα.

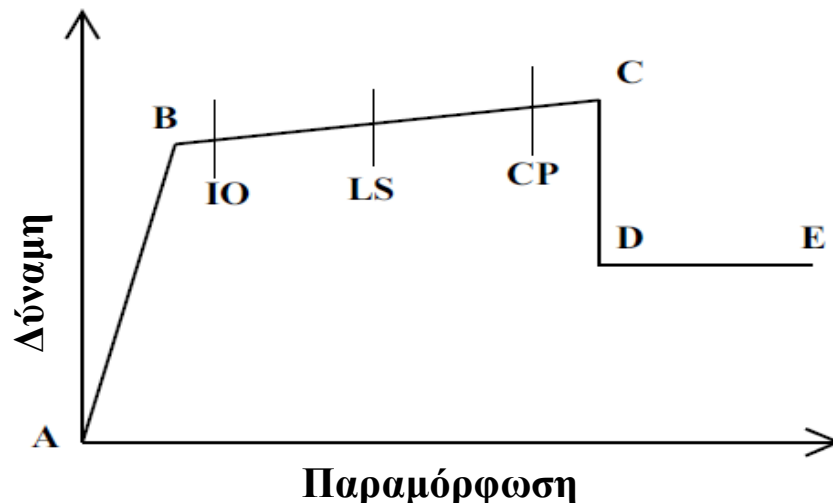


Σχήμα 4.19: Καρτέλα δημιουργίας αρθρώσεως στα άκρα ενός μέλους από σκυρόδεμα



Σχήμα 4.20: Καρτέλα δημιουργίας αρθρώσεων στα άκρα ενός μέλους από χάλυβα

Η αλληλεπίδραση που λαμβάνονται υπόψη σε όλους τους κόμβους των πλαστικών αρθρώσεων είναι οι $P - M_2 - M_3$. Για κάθε έναν βαθμό ελευθερίας ορίζεται μια καμπύλη δύναμης – παραμόρφωσης (ή ροπής – στροφής), που καθορίζει το όριο διαρροής του και την πλαστιμότητά του (Σχήμα 4.21).



Σχήμα 4.21: Καμπύλη δύναμης – παραμόρφωσης ενός βαθμού ελευθερίας μιας πλαστικής άρθρωσης (το ίδιο διάγραμμα χρησιμοποιείται και στη σχέση ροπής - στροφής)

Αυτή η καμπύλη προορίζεται για την ανάλυση Pushover. Σε αυτήν την καμπύλη έχουν τοποθετηθεί τα εξής πέντε σημεία:

- Σημείο A: είναι πάντα η αρχή των αξόνων
- Σημείο B: δηλώνει τη διαρροή. Καμία παραμόρφωση μέχρι το σημείο B δεν λαμβάνεται υπόψη, παρόλο που το σημείο B εμφανίζει κάποια παραμόρφωση. Η παραμόρφωση (στροφή) στο σημείο B θα αφαιρείται από τις παραμορφώσεις των σημείων C, D και E. Μόνο η πλαστική παραμόρφωση πέρα από το σημείο B θα υπολογίζεται για την πλαστική άρθρωση κάθε φορά.
- Σημείο C: αντιπροσωπεύει την μέγιστη αντοχή για την ανάλυση Pushover. Ωστόσο, μπορεί να παρατηρηθεί μια θετική κλίση από το C στο D για άλλους λόγους.

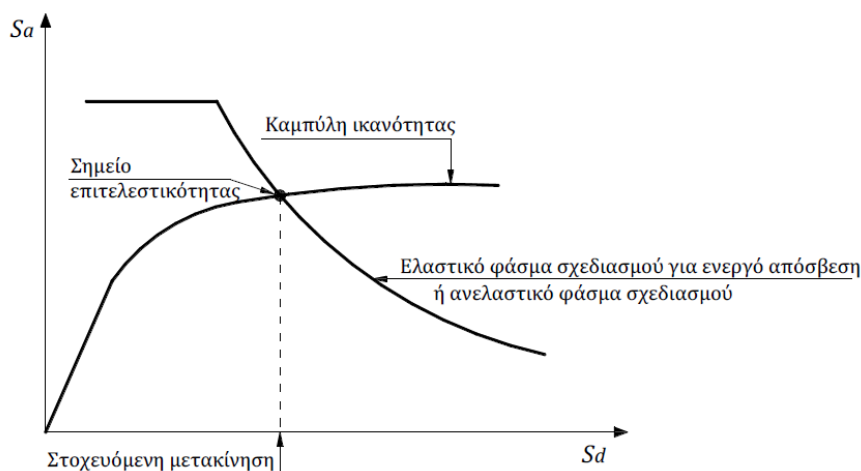
- Σημείο D: αντιπροσωπεύει μια παραμένουσα αντοχή για την ανάλυση Pushover. Ωστόσο, μπορεί να παρατηρηθεί μια θετική κλίση από το C στο D ή από το D στο E για άλλους λόγους.
- Σημείο E: αντιπροσωπεύει την ολοκληρωτική αστοχία. Πέρα από το σημείο E η πλαστική άρθρωση θα ρίξει το φορτίο στο σημείο F (δεν απεικονίζεται), ακριβώς κάτω από το σημείο E στον οριζόντιο άξονα.

Ακόμα, παρατηρούνται και άλλες στάθμες επίδοσης στα σημεία IO (immediate occupancy), LS (life safety) και CP (collapse prevention). Αυτές οι στάθμες δεν έχουν καμιά επίδραση στη συμπεριφορά της γέφυρας, ωστόσο είναι χρήσιμες για την αποτίμηση της κατάστασής της μετά από τον εξεταζόμενο σεισμό.

Κάθε σημείο πάνω στην καμπύλη ικανότητας αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο βαθμό βλάβης κάθε μέλους της κατασκευής. Επομένως, ο προσδιορισμός του σημείου που αντιστοιχεί στο σεισμό σχεδιασμού μας δίνει πληροφορίες για τη συμπεριφορά όλων των μελών σε αυτό το σεισμό. Το σημείο πάνω στην καμπύλη ικανότητας που αντιστοιχεί στην αναμενόμενη μετακίνηση της κατασκευής (στοχευόμενη μετακίνηση) σε κάποιο σεισμό ελέγχου ονομάζεται σημείο επιτελεστικότητας αφού καθορίζει τις βλάβες που θα συμβούν σε κάθε μέλος της κατασκευής στο συγκεκριμένο σεισμό.

Η στοχευόμενη μετακίνηση μπορεί να υπολογιστεί με διάφορες προσεγγιστικές μεθόδους, στην παρούσα εργασία και με βάση τις δυνατότητες του προγράμματος ανάλυσης επιλέγεται η μέθοδος ATC-40.

Η φιλοσοφία του προσδιορισμού του σημείου επιτελεστικότητας βασίζεται στον υπολογισμό του σημείου που αντιστοιχεί στην εξισορρόπηση της απαίτησης, σύμφωνα με το επιθυμητό φάσμα σχεδιασμού, και της ικανότητας της κατασκευής (Σχήμα 4.22). Σε διάγραμμα ADRS, η εξισορρόπηση αυτή για το ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα συμβαίνει στο σημείο τομής της καμπύλης ικανότητας και του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού που αντιστοιχεί στην ενεργό απόσβεση για τη μέγιστη μετακίνηση (η ενεργός απόσβεση υπολογίζεται με βάση την πλαστιμότητα που αντιστοιχεί στη μέγιστη μετακίνηση) ή του αντίστοιχου ανελαστικού φάσματος.



Σχήμα 4.22: Προσδιορισμός της στοχευόμενης μετακίνησης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος

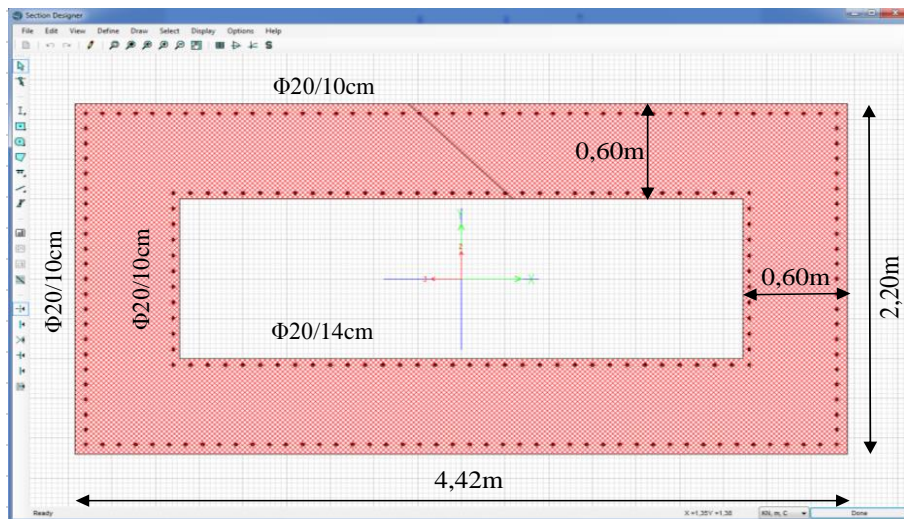
Το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις Pushover είναι το φάσμα του EC8 που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επίσης, οι συνδυασμοί του σεισμού που λήφθηκαν υπόψη είναι οι E_x , E_y , $E_x + 0,3E_y$ και $E_y + 0,3E_x$. Λόγω της συμμετρίας της κατασκευής και ως προς τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις δεν λαμβάνονται οι αντίθετες σεισμικές δράσεις. Τέλος, η ανάλυση Pushover ξεκινά από το σημείο που δρα ο συχνός συνδυασμός της ΟΚΛ.

4.3.1 Ποσοστό οπλισμού 1%

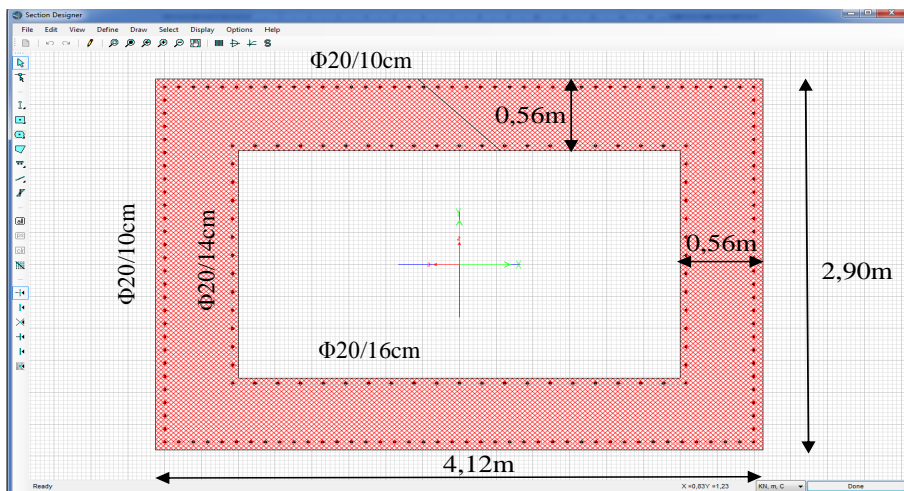
Στο πόδι του πυλώνα που βρίσκεται πάνω από το κατάστρωμα, εξαιτίας της κιβωτιοειδούς διατομής, τοποθετείται διαμήκης οπλισμός τόσο στην εξωτερική περίμετρο της διατομής με επικάλυψη 5cm όσο και στην εσωτερική πάλι με την ίδια επικάλυψη (Σχήμα 4.23). Τα 2/3 του συνολικού ποσοστού του οπλισμού τοποθετούνται στην εξωτερική περίμετρο ενώ το 1/3 στην εσωτερική. Συνεπώς, στην εξωτερική περίμετρο στην πλευρά μήκους 2,2m τοποθετούνται $\Phi 20/10\text{cm}$ και στην πλευρά μήκους 4,42m τοποθετούνται $\Phi 20/10\text{cm}$. Στην εσωτερική περίμετρο στην πλευρά μήκους 1m τοποθετούνται $\Phi 20/10\text{cm}$ και στην πλευρά μήκους 3,22m τοποθετούνται $\Phi 20/14\text{cm}$.

Στο στύλο του πυλώνα που ενώνει τα πόδια κάθε πυλώνα μεταξύ τους, εξαιτίας της κιβωτιοειδούς διατομής, τοποθετείται διαμήκης οπλισμός τόσο στην εξωτερική

περίμετρο της διατομής με επικάλυψη 5cm όσο και στην εσωτερική πάλι με την ίδια επικάλυψη (Σχήμα 4.24). Τα 2/3 του συνολικού ποσοστού του οπλισμού τοποθετούνται στην εξωτερική περίμετρο ενώ το 1/3 στην εσωτερική. Συνεπώς, στην εξωτερική περίμετρο στην πλευρά μήκους 2,9m τοποθετούνται $\Phi 20/10\text{cm}$ και στην πλευρά μήκους 4,12m τοποθετούνται $\Phi 20/10\text{cm}$. Στην εσωτερική περίμετρο στην πλευρά μήκους 1,78m τοποθετούνται $\Phi 20/14\text{cm}$ και στην πλευρά μήκους 3m τοποθετούνται $\Phi 20/16\text{cm}$.

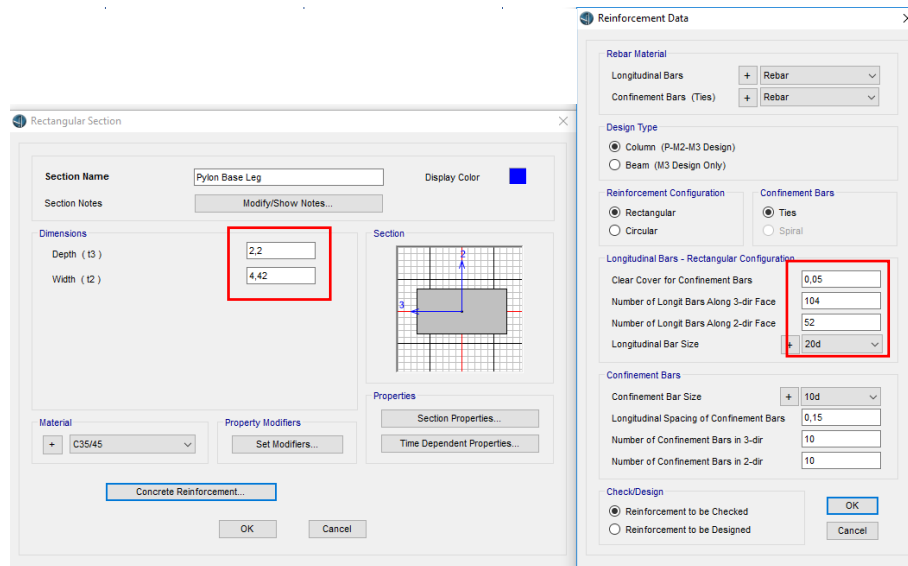


Σχήμα 4.23: Οπλισμός διατομής ποδιού πυλώνα που βρίσκεται πάνω από το κατάστρωμα



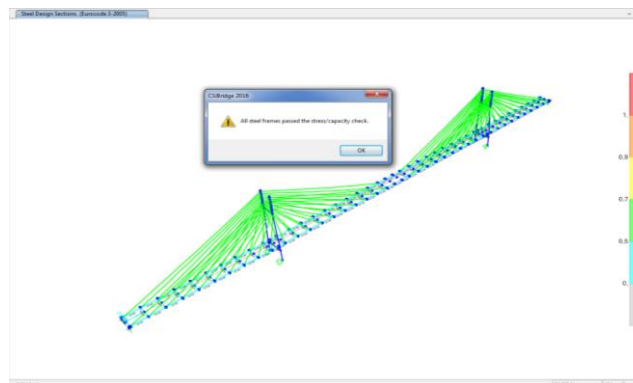
Σχήμα 4.24: Οπλισμός διατομής στύλου πυλώνα

Στο πόδι του πυλώνα που βρίσκεται κάτω από το κατάστρωμα της γέφυρας, τοποθετείται διαμήκης οπλισμός κανονικά στην περίμετρο της διατομής με επικάλυψη 5cm, αφού η διατομή είναι μια συμπαγής ορθογωνική (Σχήμα 4.25). Συνεπώς, στην πλευρά μήκους 2,2m τοποθετούνται $\Phi 20/4\text{cm}$ και στην πλευρά μήκους 4,42m τοποθετούνται $\Phi 20/4\text{cm}$.

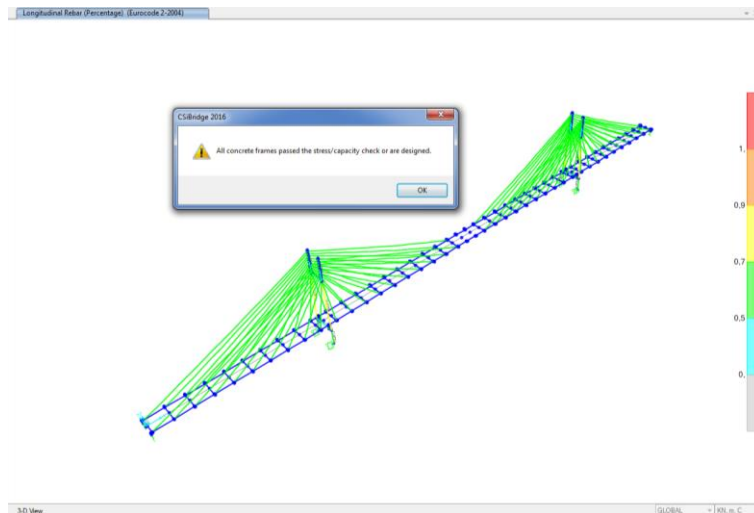


Σχήμα 4.25: Οπλισμός διατομής ποδιού πυλώνα που βρίσκεται κάτω από το κατάστρωμα

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος στον συνδυασμό της ΟΚΑ στη γέφυρα, σύμφωνα με την αυτόματη λειτουργία που παρέχει το πρόγραμμα CSiBridge 2016 τόσο για τα χαλύβδινα μέλη όσο και για τα μέλη από σκυρόδεμα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όλα τα μέλη επαρκούν (Σχήματα 4.26 και 4.27).

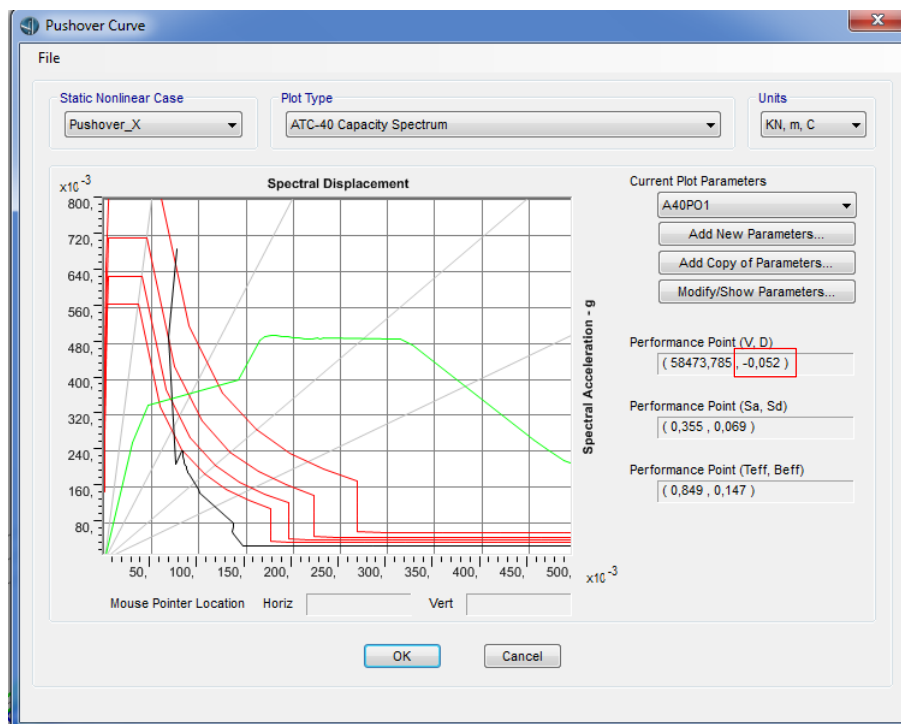


Σχήμα 4.26: Έλεγχος χαλύβδινων μελών στην ΟΚΑ

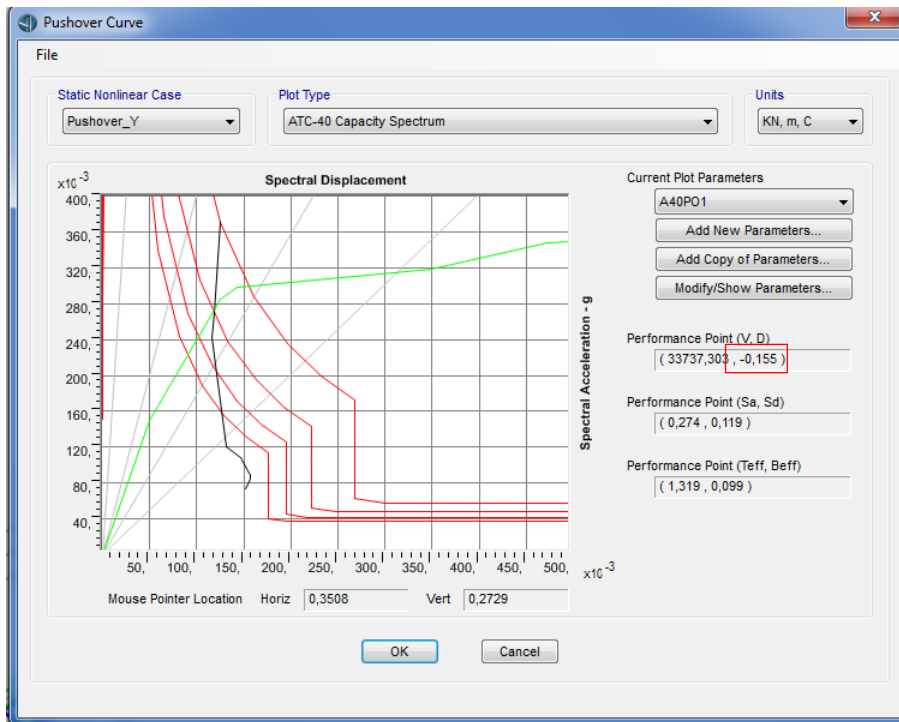


Σχήμα 4.27: Έλεγχος μελών από σκυρόδεμα στην ΟΚΑ

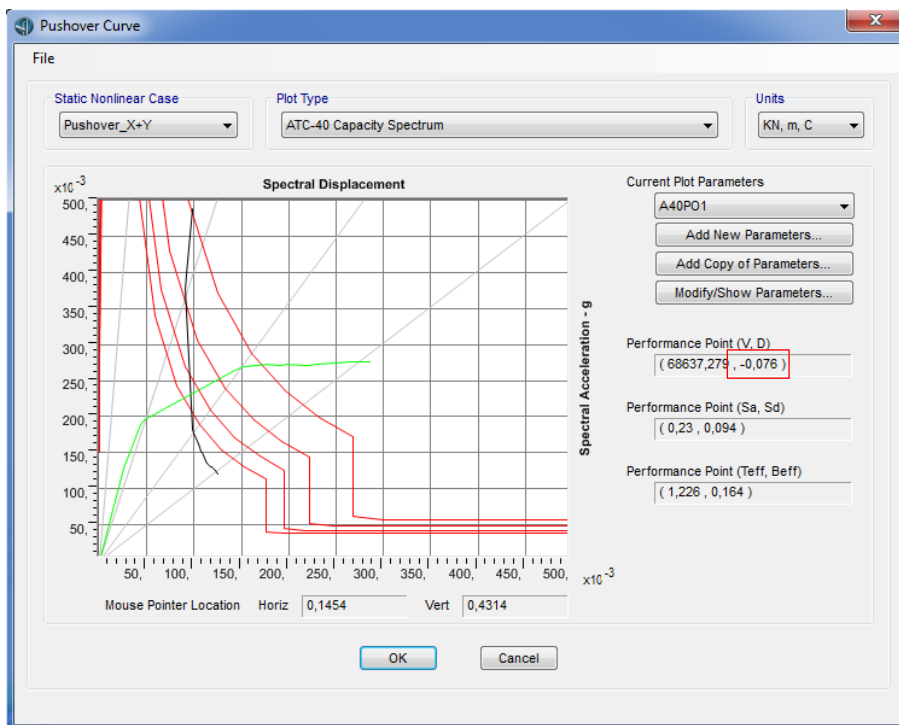
Έπειτα πραγματοποιήθηκε η μη – γραμμική στατική ανάλυση Pushover και με τους 4 σεισμικούς συνδυασμούς. Οι καμπύλες ικανότητας μαζί με τα ελαστικά φάσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω στα Σχήματα 4.28, 4.29, 4.30 και 4.31.



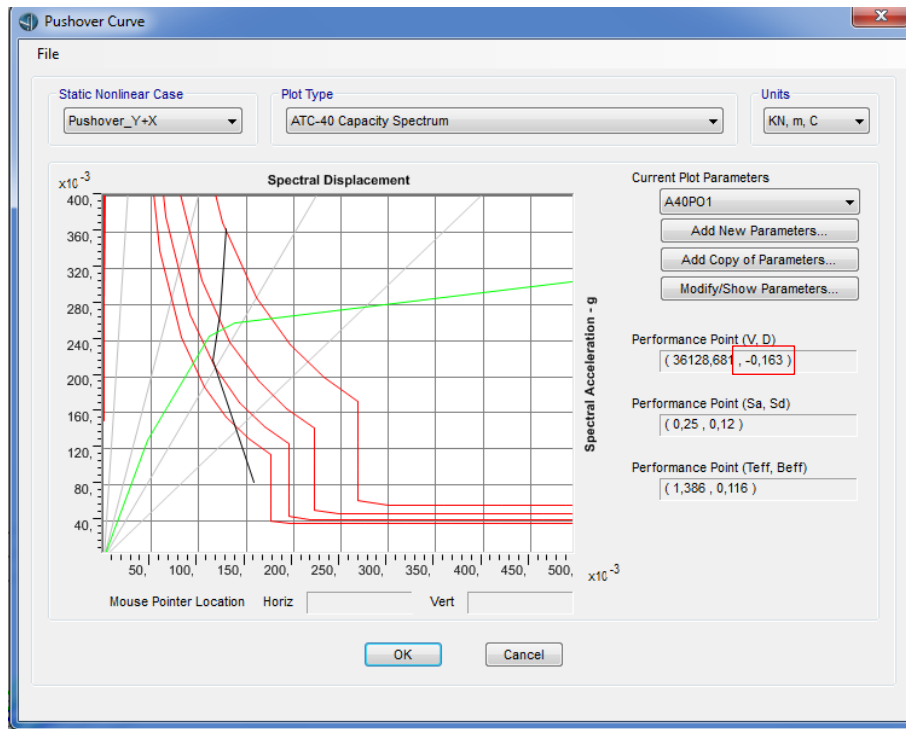
Σχήμα 4.28: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά x με 1% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες



Σχήμα 4.29: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά y με 1% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες



Σχήμα 4.30: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά x+0,3y με 1% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες



Σχήμα 4.31: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά $y+0,3x$ με 1% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες

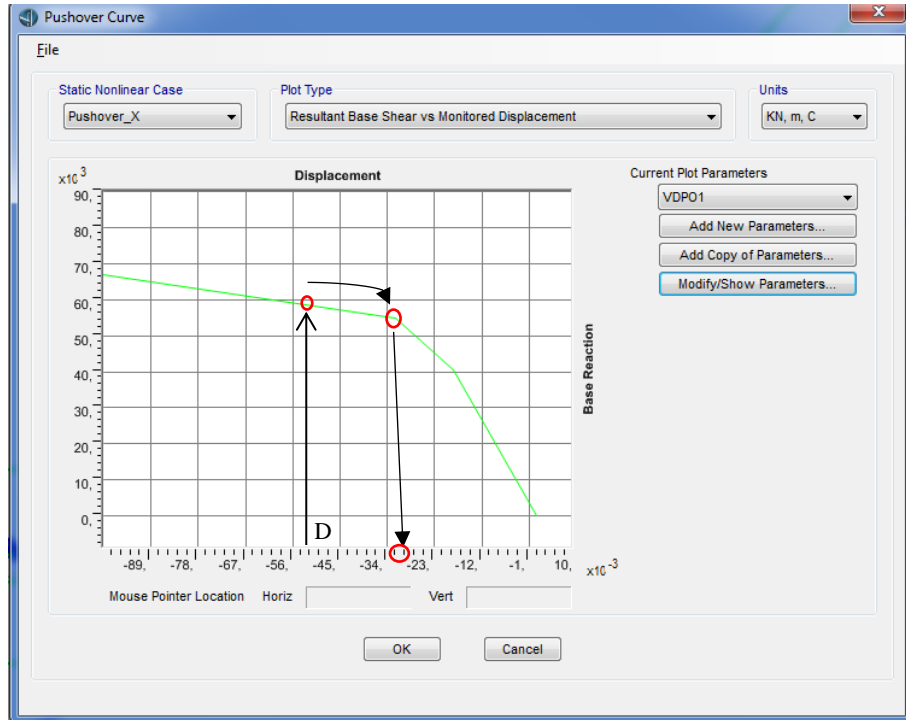
Προκειμένου να βρεθεί ο δυσμενέστερος συνδυασμός και συνεπώς η δυσμενέστερη κατάσταση στη γέφυρα ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία για κάθε ένα σεισμικό συνδυασμό ξεχωριστά. Η διαδικασία θα περιγραφεί αναλυτικά μόνο για τον πρώτο συνδυασμό, ενώ για του υπόλοιπους θα παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα.

Αρχικά, το πρόγραμμα μετατρέπει αυτόματα την καμπύλη ικανότητας του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος σε καμπύλη μετατόπισης σημείου αναφοράς – τέμνουσα βάσης του πολυβάθμιου συστήματος (Σχήμα 4.32).

Στο Σχήμα 4.28 αναφέρεται η μετατόπιση του σημείου αναφοράς για το σημείο επιτελεσματικότητας. Αυτή η μετατόπιση θα χρησιμοποιηθεί για να βρεθούν οι αξονικές δυνάμεις στα καλώδια και η κατάσταση των σημείων, στα οποία μπορεί να δημιουργηθεί πλαστική άρθρωση, όπως έχουν οριστεί προηγουμένως.

Συνεπώς, σε ποιο βήμα της μεθόδου εμφανίζεται αυτή η μετατόπιση; Η απάντηση είναι ότι αυτή η μετατόπιση δεν εμφανίζεται σε κάποιο συγκεκριμένο βήμα, αλλά ανάμεσα από δύο τέτοια βήματα. Έτσι, βρίσκεται από το Σχήμα 4.32

ποια είναι η μετατόπιση του προηγούμενου βήματος (ένα βήμα ξεχωρίζει λόγω της αλλαγής της κλίσης που παρουσιάζεται λίγο πριν και λίγο μετά από αυτό). Για αυτήν την μετατόπιση αναζητείται σε ποιο βήμα της μεθόδου ανήκει.

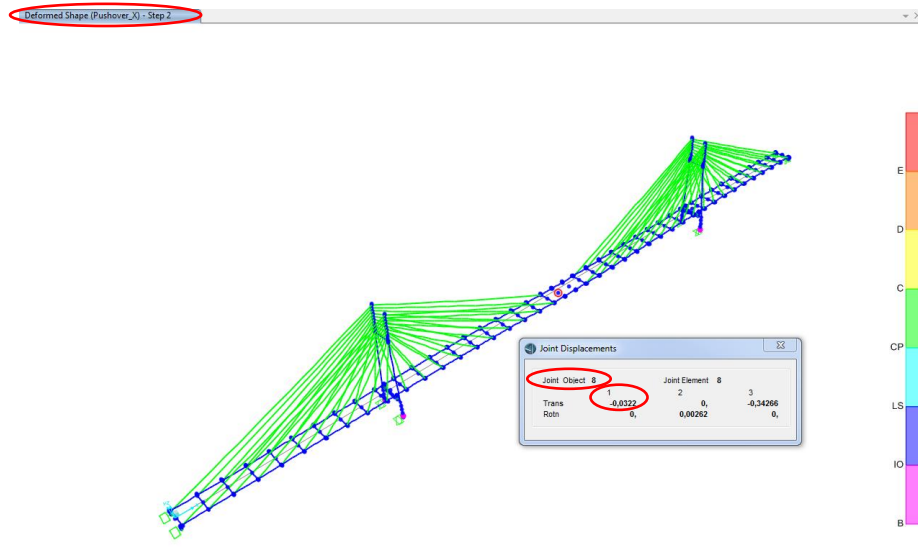


Σχήμα 4.32: Καμπύλη μετατόπισης σημείου αναφοράς - τέμνουσα βάσης πολυβάθμιου συστήματος

Για κάθε βήμα ελέγχεται το σημείο αναφοράς (κόμβος #8) αν έχει μετατοπιστεί όσο βρέθηκε προηγουμένως. Αν όχι, ελέγχεται το επόμενο βήμα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η μετατόπιση βρέθηκε στο 2^ο βήμα (Σχήμα 4.33).

Συνεπώς για το 2^ο αλλά και το 3^ο βήμα της συγκεκριμένης μεθόδου θα εξαχθούν τα στοιχεία που αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή οι αξονικές δυνάμεις των καλωδίων και η κατάσταση των κρίσιμων κόμβων.

Αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για τους υπόλοιπους συνδυασμούς και προέκυψε ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων (Πίνακες 4.21 και 4.22).



Σχήμα 4.33: Εύρεση του βήματος εμφάνισης της μετατόπισης που βρίσκεται κοντά στην μετατόπιση του σημείου επιτελεστικότητας

X (2° βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905		Κάτω Πόδι (1)	B to C
T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336		Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
T' (kN)	3457,914	3442,023	3383,653	3268,432	3089,057	2847,437	2558	2255,882	2013,847	1937,182		Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207				
T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908				
T' (kN)	1968,988	2024,532	2274,206	2651,953	3070,877	3469,939	3804,099	4038,067	4145,56	4111,152				

X (3° βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905		Κάτω Πόδι (1)	B to C
T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336		Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
T' (kN)	3024,394	3058,617	3079,048	3056,007	2965,936	2795,897	2548,754	2254,577	2000,077	1960,46		Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207		Πάνω Πόδι (1)	B to C	A to IO
T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908		Πάνω Πόδι (1)	B to C	A to IO
T' (kN)	2123,802	2130,186	2304,655	2647,173	3069,814	3502,899	3893,74	4199,236	4383,686	4419,654				

Y (1° βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905		Κάτω Στόλος (1)	B to C
T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336		Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
T' (kN)	3982,177	3872,513	3690,818	3444,745	3146,611	2815,12	2479,667	2191,366	2037,622	2085,13				
A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20				
T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207				
T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908				
T' (kN)	2112,829	2104,338	2298,536	2630,814	2997,771	3329,729	3581,808	3725,237	3745,143	3641,655				

Y (2° βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905		Κάτω Στόλος (1)	B to C
T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336		Κάτω Στόλος (2)	B to C	A to IO
T' (kN)	3938,021	3821,345	3631,709	3378,555	3076,557	2748,155	2430,272	2190,103	2139,666	2323,487		Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207		Κάτω Στόλος (2)	B to C	A to IO
T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908		Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
T' (kN)	2340,376	2193,313	2284,339	2564,467	2907,044	3228,827	3479,967	3630,396	3664,882	3582,669		Πάνω Στόλος (1)	B to C	A to IO
												Πάνω Στόλος (2)	B to C	A to IO
												Πάνω Στόλος (1)	B to C	A to IO
												Πάνω Στόλος (2)	B to C	A to IO

Πίνακας 4.21: Αποτελέσματα αναλύσεων Pushover για τους σεισμικούς συνδυασμούς x και y

	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	X+Y (3 ^ο βήμα)	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Στόλος (1)	B to C
T (kN)		2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
T* (kN)		3425,206	3401,917	3335,085	3212,189	3028,102	2787,726	2510,808	2242,767	2070,038	2078,912	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
A/A		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
T ₁ (kN)		262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
T (kN)		2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
T* (kN)		2105,358	2077,114	2258,114	2597,283	2994,721	3381,145	3708,725	3941,978	4055,261	4033,59			
X+Y (4 ^ο βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Στόλος (2)	B to C	A to IO
	T* (kN)	2905,349	2936,668	2956,764	2936,771	2854,328	2699,391	2482,512	2251,226	2117,366	2226,513	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908	Κάτω Στόλος (2)	B to C	A to IO
	T* (kN)	2368,829	2215,347	2269,771	2552,459	2949,494	3376,322	3775,057	4101,187	4318,193	4396,666	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
												Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
												Πάνω Πόδι (1)	B to C	A to IO
											Πάνω Πόδι (1)	B to C	A to IO	

	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	Y+X (2 ^ο βήμα)	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Στόλος (1)	B to C
T (kN)		2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Στόλος (2)	B to C	A to IO
T* (kN)		3830,555	3732,013	3565,767	3337,186	3057,5	2746,328	2438,202	2197,711	2133,757	2295,396	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
A/A		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
T ₁ (kN)		262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207	Κάτω Στόλος (2)	B to C	A to IO
T (kN)		2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
T* (kN)		2312,307	2176,803	2275,57	2561,473	2911,332	3243,526	3508,251	3674,377	3724,717	3655,755	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
											Πάνω Στόλος (1)	B to C	A to IO	
											Πάνω Στόλος (1)	B to C	A to IO	

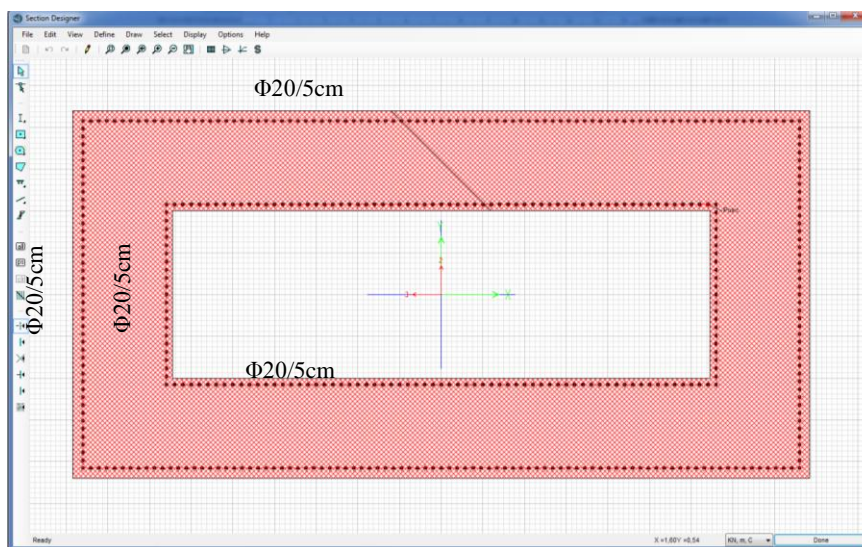
	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	Y+X (3 ^ο βήμα)	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Στόλος (1)	B to C
T (kN)		2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Στόλος (2)	B to C	A to IO
T* (kN)		3809,447	3712,693	3548,957	3323,185	3046,436	2738,707	2436,136	2207,543	2169,225	2367,6	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
A/A		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
T ₁ (kN)		262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
T (kN)		2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908	Κάτω Στόλος (2)	B to C	A to IO
T* (kN)		2382,081	2207,835	2281,197	2556,113	2901,686	3232,095	3495,923	3661,584	3711,908	3643,555	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
											Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO	
											Πάνω Στόλος (1)	B to C	A to IO	
											Πάνω Στόλος (2)	B to C	A to IO	
											Πάνω Στόλος (1)	B to C	A to IO	
											Πάνω Στόλος (2)	B to C	A to IO	

Πίνακας 4.22: Αποτελέσματα αναλύσεων Pushover για τους σεισμικούς συνδυασμούς x+0,3y και y+0,3x

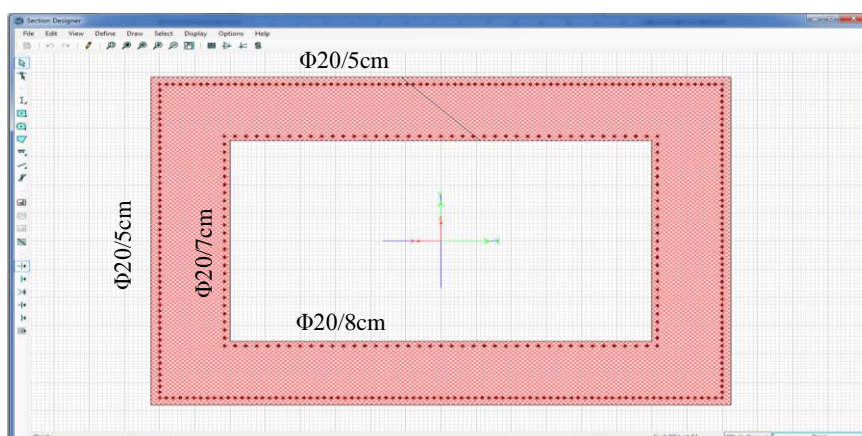
4.3.2 Ποσοστό οπλισμού 2%

Στο πόδι του πυλώνα που βρίσκεται πάνω από το κατάστρωμα, εξαιτίας της κιβωτοειδούς διατομής, τοποθετείται διαμήκης οπλισμός τόσο στην εξωτερική περίμετρο της διατομής με επικάλυψη 5cm όσο και στην εσωτερική πάλι με την ίδια επικάλυψη (Σχήμα 4.34). Τα 2/3 του συνολικού ποσοστού του οπλισμού τοποθετούνται στην εξωτερική περίμετρο ενώ το 1/3 στην εσωτερική. Συνεπώς, στην εξωτερική περίμετρο στην πλευρά μήκους 2,2m τοποθετούνται Φ20/5cm και στην πλευρά μήκους 4,42m τοποθετούνται Φ20/5cm. Στην εσωτερική περίμετρο στην πλευρά μήκους 1m τοποθετούνται Φ20/5cm και στην πλευρά μήκους 3,22m τοποθετούνται Φ20/5cm.

Στο στύλο του πυλώνα που ενώνει τα πόδια κάθε πυλώνα μεταξύ τους, εξαιτίας της κιβωτοειδούς διατομής, τοποθετείται διαμήκης οπλισμός τόσο στην εξωτερική περίμετρο της διατομής με επικάλυψη 5cm όσο και στην εσωτερική πάλι με την ίδια επικάλυψη (Σχήμα 4.35). Τα 2/3 του συνολικού ποσοστού του οπλισμού τοποθετούνται στην εξωτερική περίμετρο ενώ το 1/3 στην εσωτερική. Συνεπώς, στην εξωτερική περίμετρο στην πλευρά μήκους 2,9m τοποθετούνται $\Phi 20/5\text{cm}$ και στην πλευρά μήκους 4,12m τοποθετούνται $\Phi 20/5\text{cm}$. Στην εσωτερική περίμετρο στην πλευρά μήκους 1,78m τοποθετούνται $\Phi 20/7\text{cm}$ και στην πλευρά μήκους 3m τοποθετούνται $\Phi 20/8\text{cm}$.

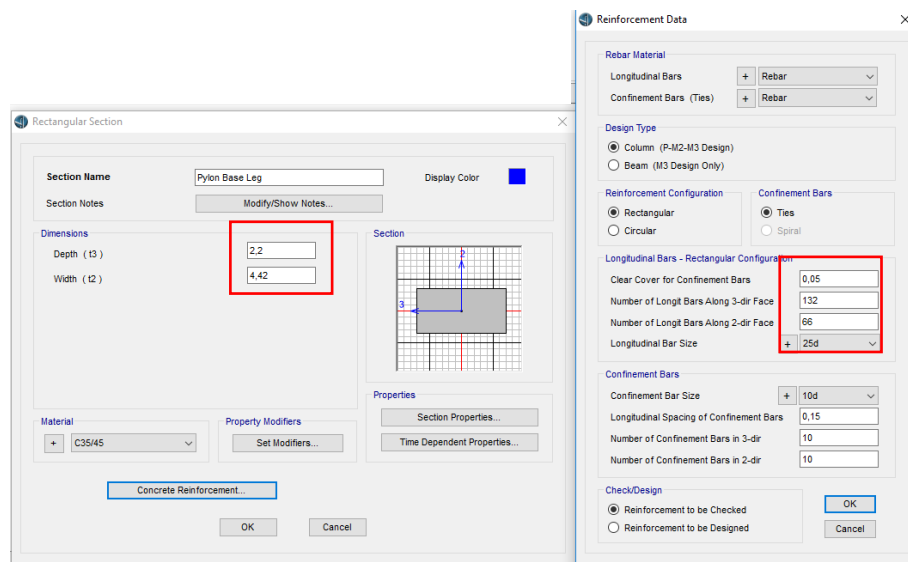


Σχήμα 4.34: Οπλισμός διατομής ποδιού πυλώνα που βρίσκεται πάνω από το κατάστρωμα



Σχήμα 4.35: Οπλισμός διατομής στύλου πυλώνα

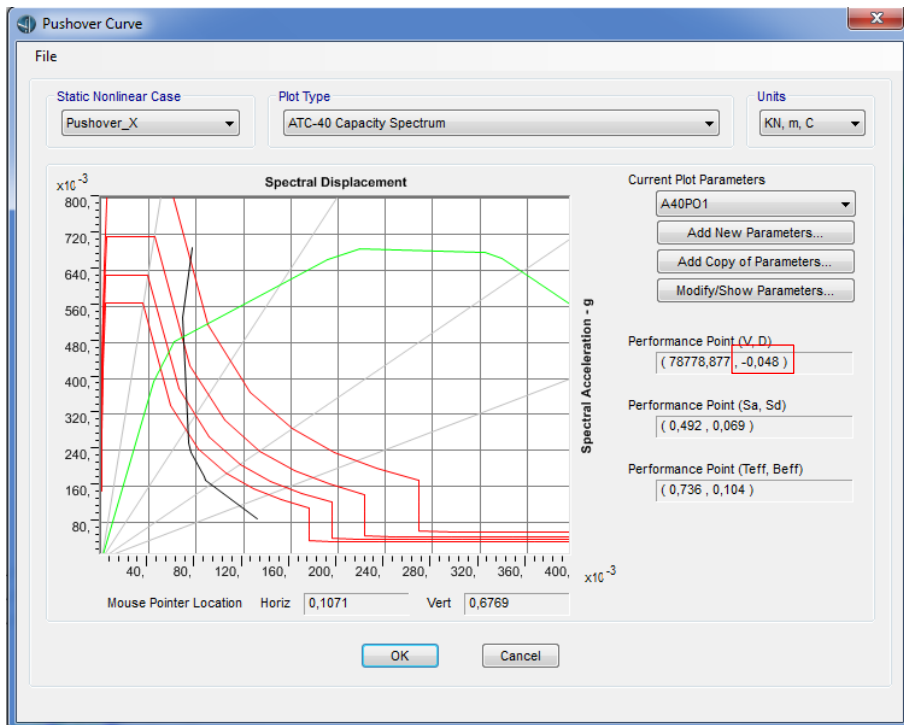
Στο πόδι του πυλώνα που βρίσκεται κάτω από το κατάστρωμα της γέφυρας, τοποθετείται διαμήκης οπλισμός κανονικά στην περίμετρο της διατομής με επικάλυψη 5cm, αφού η διατομή είναι μια συμπαγής ορθογωνική (Σχήμα 4.36). Συνεπώς, στην πλευρά μήκους 2,2m τοποθετούνται $\Phi 25/3\text{cm}$ και στην πλευρά μήκους 4,42m τοποθετούνται $\Phi 25/3\text{cm}$.



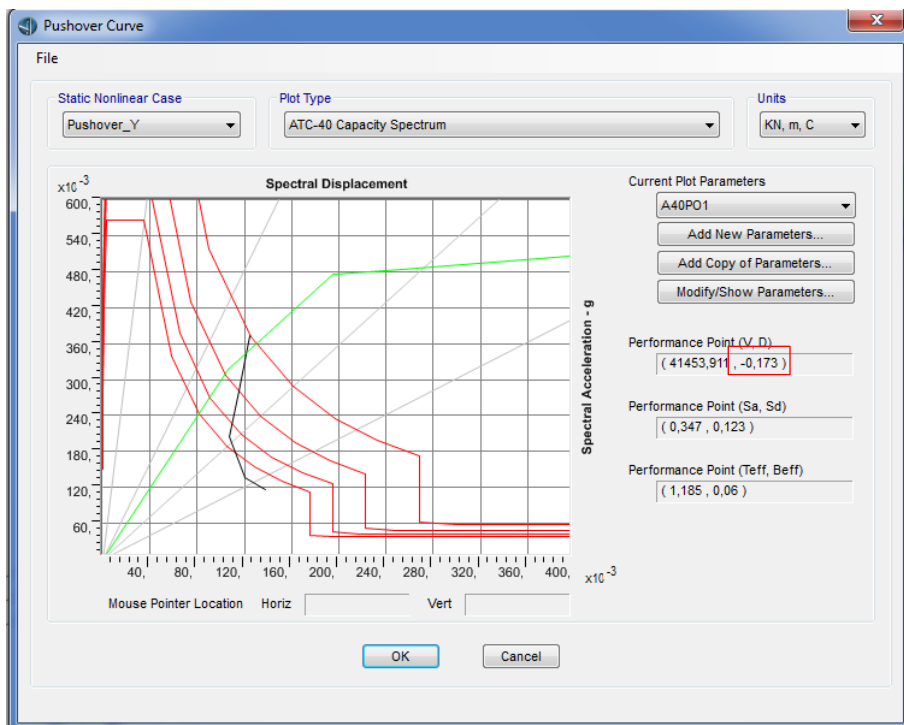
Σχήμα 4.36: Οπλισμός διατομής ποδιού πυλώνα που βρίσκεται κάτω από το κατάστρωμα

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος στον συνδυασμό της ΟΚΑ στη γέφυρα, σύμφωνα με την αυτόματη λειτουργία που παρέχει το πρόγραμμα CSiBridge 2016 τόσο για τα χαλύβδινα μέλη όσο και για τα μέλη από σκυρόδεμα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όλα τα μέλη επαρκούν.

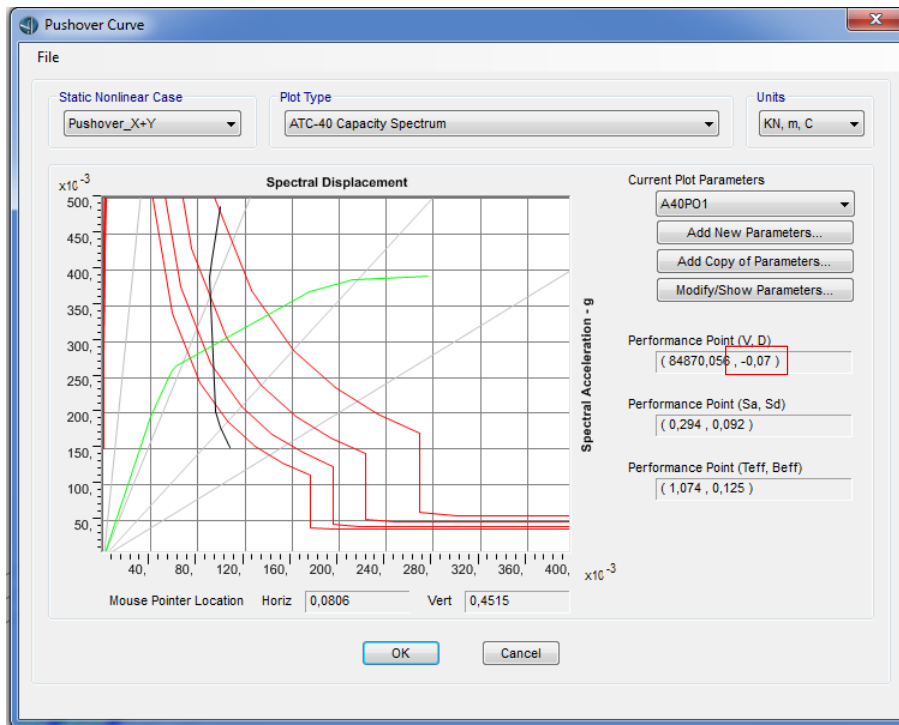
Έπειτα πραγματοποιήθηκε η μη – γραμμική στατική ανάλυση Pushover και με τους 4 σεισμικούς συνδυασμούς. Οι καμπύλες ικανότητας μαζί με τα ελαστικά φάσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω στα Σχήματα 4.37, 4.38, 4.39 και 4.40.



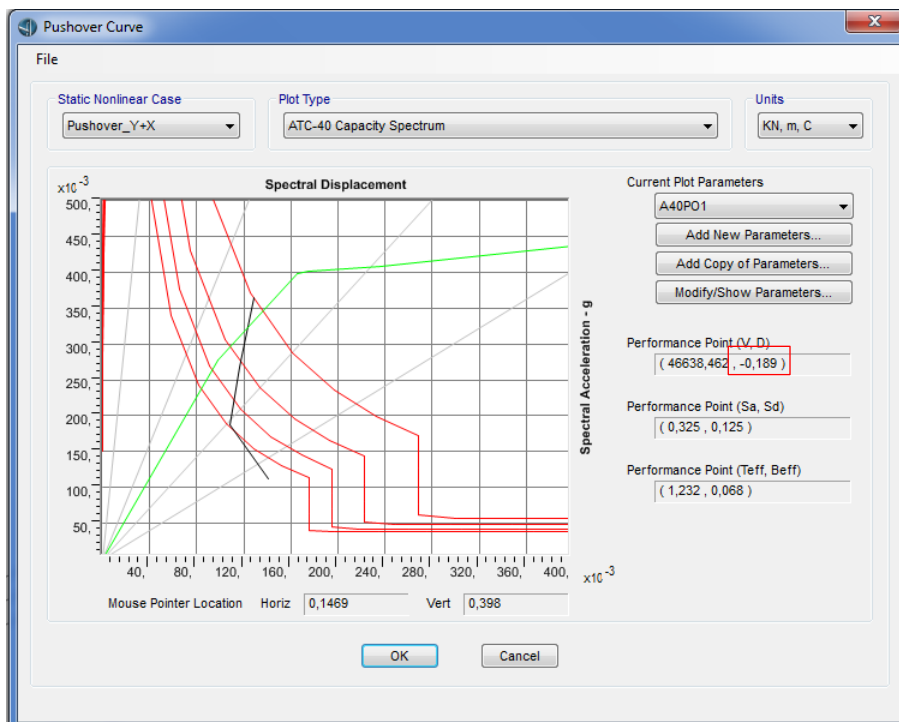
Σχήμα 4.37: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά x με 2% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες



Σχήμα 4.38: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά y με 2% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες



Σχήμα 4.39: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά x+0,3y με 2% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες



Σχήμα 4.40: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά y+0,3x με 2% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες

Προκειμένου να βρεθεί ο δυσμενέστερος συνδυασμός και συνεπώς η δυσμενέστερη κατάσταση στη γέφυρα ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως για κάθε ένα σεισμικό συνδυασμό ξεχωριστά. Έτσι, προκύπτει ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν (Πίνακες 4.23 και 4.24).

X (2 ^ο βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T' (kN)	3246,087	3259,624	3242,795	3173,864	3038,491	2832,771	2567,07	2274,432	2028,04	1940,456	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	1971,116	2015,513	2256,706	2634,598	3063,647	3483,081	3846,996	4117,82	4265,391	4268,605				
X (3 ^ο βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	T' (kN)	2537,587	2618,667	2722,292	2805,58	2824,984	2747,265	2558,499	2275,976	1980,532	1878,046	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207	Πάνω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908	Πάνω Πόδι (1)	B to C	A to IO
T' (kN)	2068,613	2088,616	2258,367	2605,04	3052,358	3534,594	3998,142	4394,888	4680,2	4813,646				
Y (1 ^ο βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T' (kN)	3919,843	3804,653	3617,092	3366,329	3066,719	2740,145	2422,231	2176,917	2109,627	2262,779			
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	2280,34	2164,146	2271,354	2556,142	2898,739	3219,245	3469,14	3618,866	3653,385	3571,99				
Y (2 ^ο βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Στόλος (2)	B to C	A to IO
	T' (kN)	3873,73	3748,976	3550,551	3290	2984,59	2660,521	2361,774	2170,204	2218,536	2521,225	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908	Κάτω Στόλος (2)	B to C	A to IO
T' (kN)	2525,227	2255,814	2247,531	2474,048	2789,602	3099,227	3348,92	3507,587	3559,624	3503,159	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO	
												Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
X+Y (3 ^ο βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T' (kN)	3226,549	3226,658	3193,498	3108,708	2961,78	2753,584	2502,174	2254,746	2102,846	2132,301	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	2155,554	2087,099	2236,378	2562,72	2962,412	3363,336	3715,776	3982,021	4133,083	4149,032				
X+Y (4 ^ο βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Στόλος (2)	B to C	A to IO
	T' (kN)	2532,342	2592,134	2666,376	2718,232	2712,51	2625,957	2459,116	2254,71	2126,953	2238,035	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908	Κάτω Στόλος (2)	B to C	>CP
T' (kN)	2409,497	2221,204	2232,179	2496,285	2900,249	3357,054	3806,122	4198,834	4492,361	4648,169	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS	
												Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
												Πάνω Πόδι (1)	B to C	A to IO
												Πάνω Πόδι (1)	B to C	A to IO

Πίνακας 4.23: Αποτελέσματα αναλύσεων Pushover για τους σεισμικούς συνδυασμούς x, y και x+0,3y

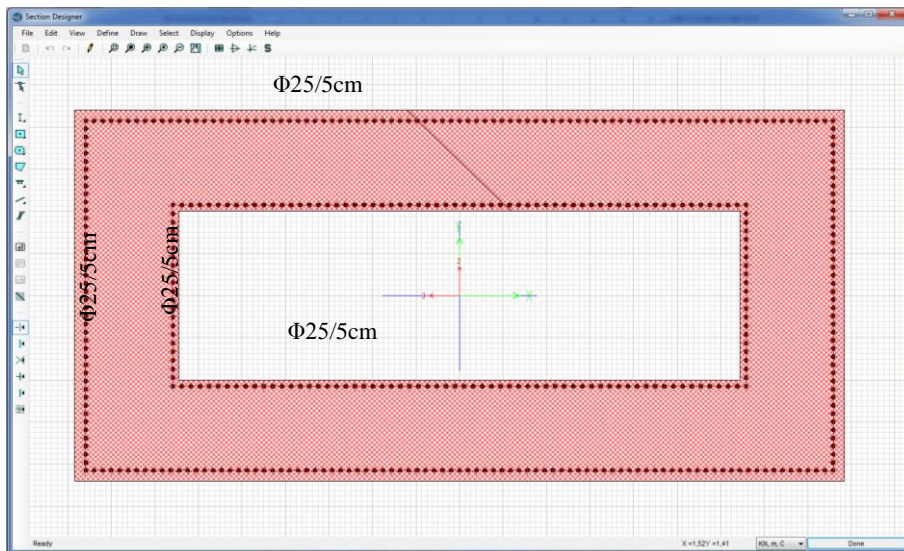
Y+X (1 ^ο βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Στόλος (2)	B to C	A to IO
	T' (kN)	3805,99	3709,016	3545,022	3319,096	3042,222	2733,726	2427,56	2186,842	2116,995	2263,834			
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
Y+X (2 ^ο βήμα)	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
	T' (kN)	2280,637	2159,297	2262,964	2548,681	2897,182	3228,548	3493,624	3661,464	3714,794	3649,764			
	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Στόλος (2)	B to C	A to IO
	T' (kN)	3700,832	3605,991	3446,227	3226,288	2957,668	2661,843	2378,802	2186,014	2210,949	2476,982	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
Y+X (2 ^ο βήμα)	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207	Κάτω Στόλος (2)	B to C	A to IO
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T' (kN)	2481,433	2231,368	2237,55	2475,155	2803,761	3130,976	3402,805	3586,401	3663,046	3626,597	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO

Πίνακας 4.24: Αποτελέσματα αναλύσεων Pushover για το σεισμικό συνδυασμό γ+0,3x

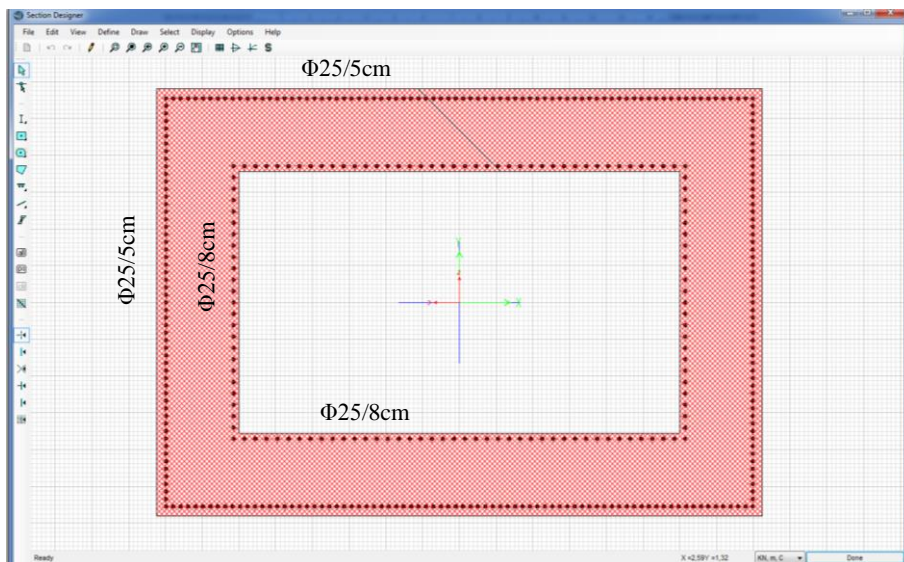
4.3.3 Ποσοστό οπλισμού 3%

Στο πόδι του πυλώνα που βρίσκεται πάνω από το κατάστρωμα, εξαιτίας της κιβωτοειδούς διατομής, τοποθετείται διαμήκης οπλισμός τόσο στην εξωτερική περίμετρο της διατομής με επικάλυψη 5cm όσο και στην εσωτερική πάλι με την ίδια επικάλυψη (Σχήμα 4.41). Τα 2/3 του συνολικού ποσοστού του οπλισμού τοποθετούνται στην εξωτερική περίμετρο ενώ το 1/3 στην εσωτερική. Συνεπώς, στην εξωτερική περίμετρο στην πλευρά μήκους 2,2m τοποθετούνται Φ25/5cm και στην πλευρά μήκους 4,42m τοποθετούνται Φ25/5cm. Στην εσωτερική περίμετρο στην πλευρά μήκους 1m τοποθετούνται Φ25/5cm και στην πλευρά μήκους 3,22m τοποθετούνται Φ25/5cm.

Στο στύλο του πυλώνα που ενώνει τα πόδια κάθε πυλώνα μεταξύ τους, εξαιτίας της κιβωτοειδούς διατομής, τοποθετείται διαμήκης οπλισμός τόσο στην εξωτερική περίμετρο της διατομής με επικάλυψη 5cm όσο και στην εσωτερική πάλι με την ίδια επικάλυψη (Σχήμα 4.42). Τα 2/3 του συνολικού ποσοστού του οπλισμού τοποθετούνται στην εξωτερική περίμετρο ενώ το 1/3 στην εσωτερική. Συνεπώς, στην εξωτερική περίμετρο στην πλευρά μήκους 2,9m τοποθετούνται Φ25/5cm και στην πλευρά μήκους 4,12m τοποθετούνται Φ25/5cm. Στην εσωτερική περίμετρο στην πλευρά μήκους 1,78m τοποθετούνται Φ25/8cm και στην πλευρά μήκους 3m τοποθετούνται Φ25/8cm.

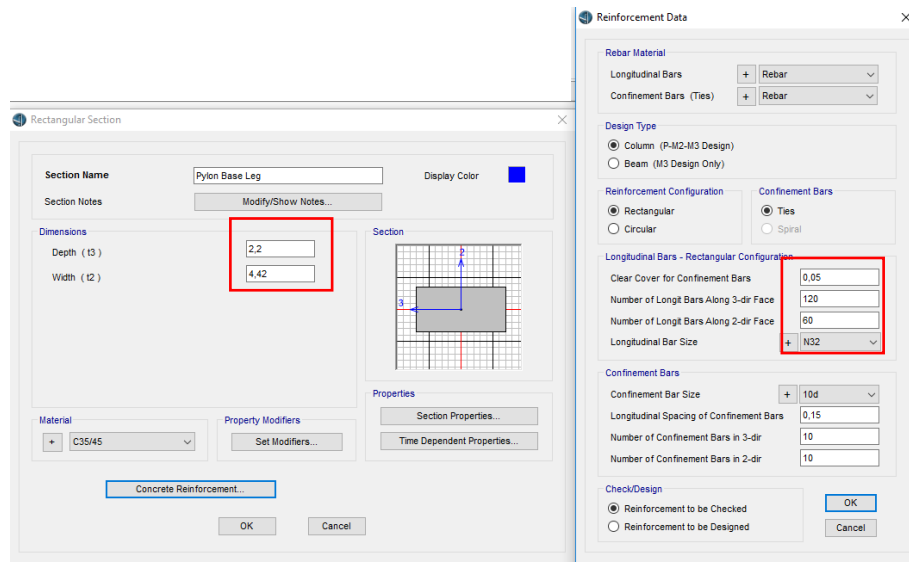


Σχήμα 4.41: Οπλισμός διατομής ποδιού πυλώνα που βρίσκεται πάνω από το κατάστρωμα



Σχήμα 4.42: Οπλισμός διατομής στύλου πυλώνα

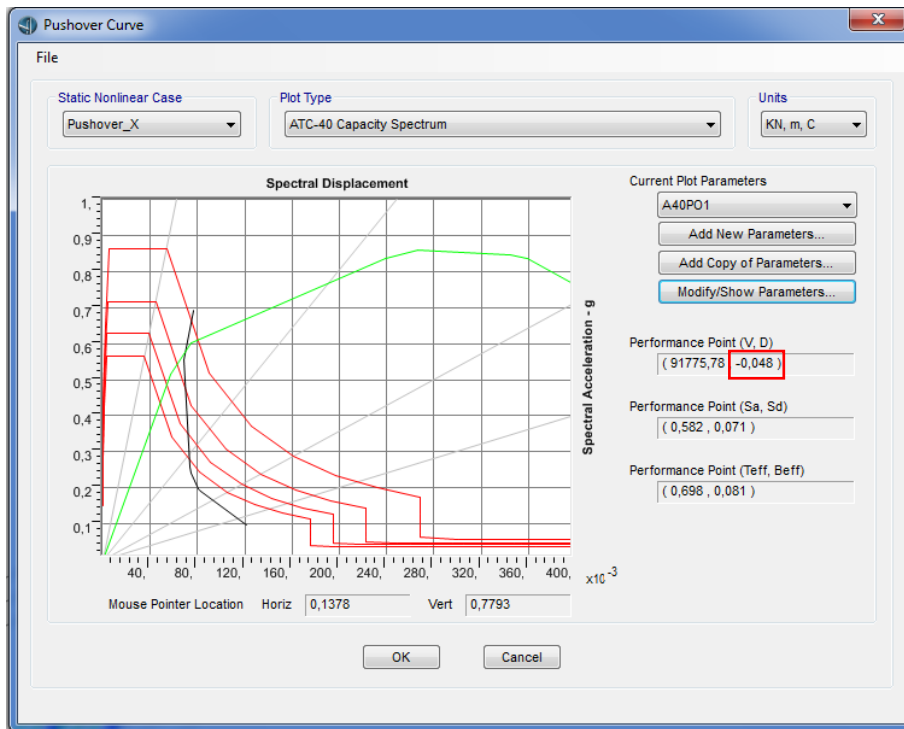
Στο πόδι του πυλώνα που βρίσκεται κάτω από το κατάστρωμα της γέφυρας, τοποθετείται διαμήκης οπλισμός κανονικά στην περίμετρο της διατομής με επικάλυψη 5cm, αφού η διατομή είναι μια συμπαγής ορθογωνική (Σχήμα 4.43). Συνεπώς, στην πλευρά μήκους 2,2m τοποθετούνται $\Phi 32/3,6\text{cm}$ και στην πλευρά μήκους 4,42m τοποθετούνται $\Phi 32/3,6\text{cm}$.



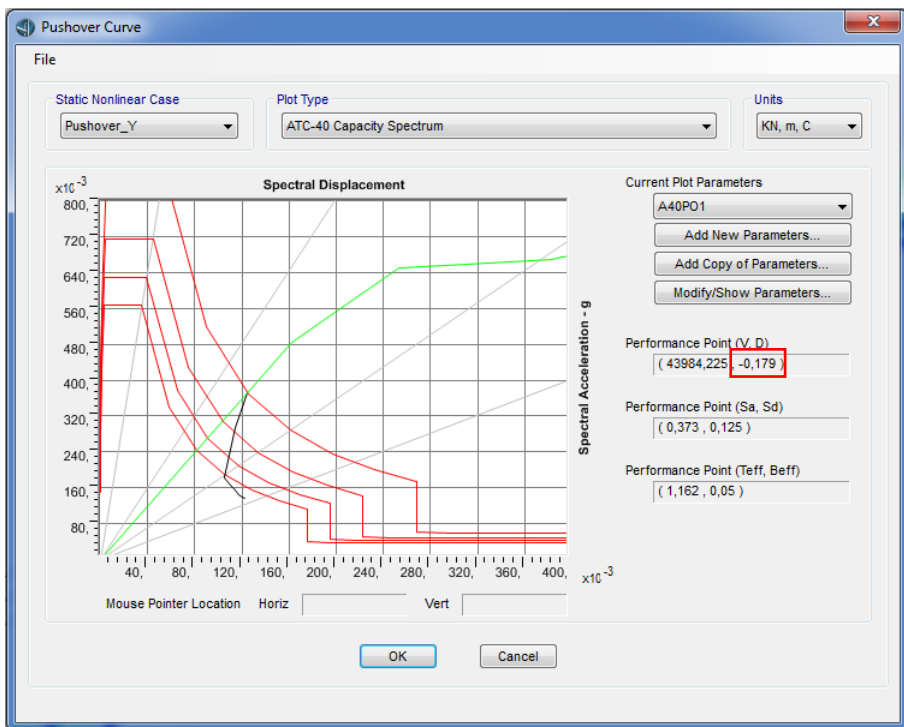
Σχήμα 4.43: Οπλισμός διατομής ποδιού πυλώνα που βρίσκεται κάτω από το κατάστρωμα

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος στον συνδυασμό της ΟΚΑ στη γέφυρα, σύμφωνα με την αυτόματη λειτουργία που παρέχει το πρόγραμμα CSiBridge 2016 τόσο για τα χαλύβδινα μέλη όσο και για τα μέλη από σκυρόδεμα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όλα τα μέλη επαρκούν.

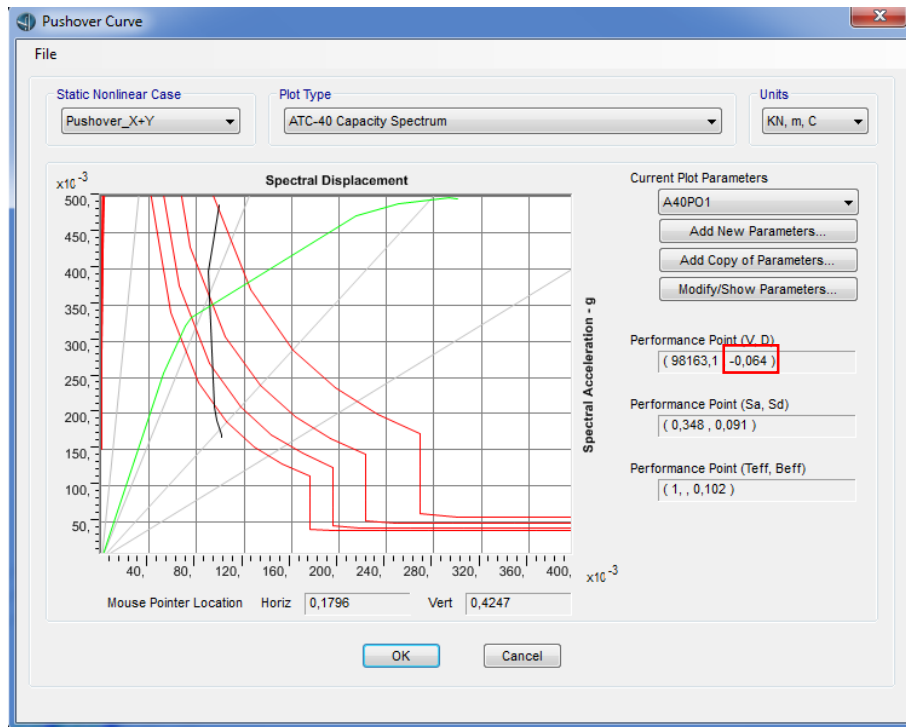
Έπειτα πραγματοποιήθηκε η μη – γραμμική στατική ανάλυση Pushover και με τους 4 σεισμικούς συνδυασμούς. Οι καμπύλες ικανότητας μαζί με τα ελαστικά φάσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω στα Σχήματα 4.44, 4.45, 4.46 και 4.47.



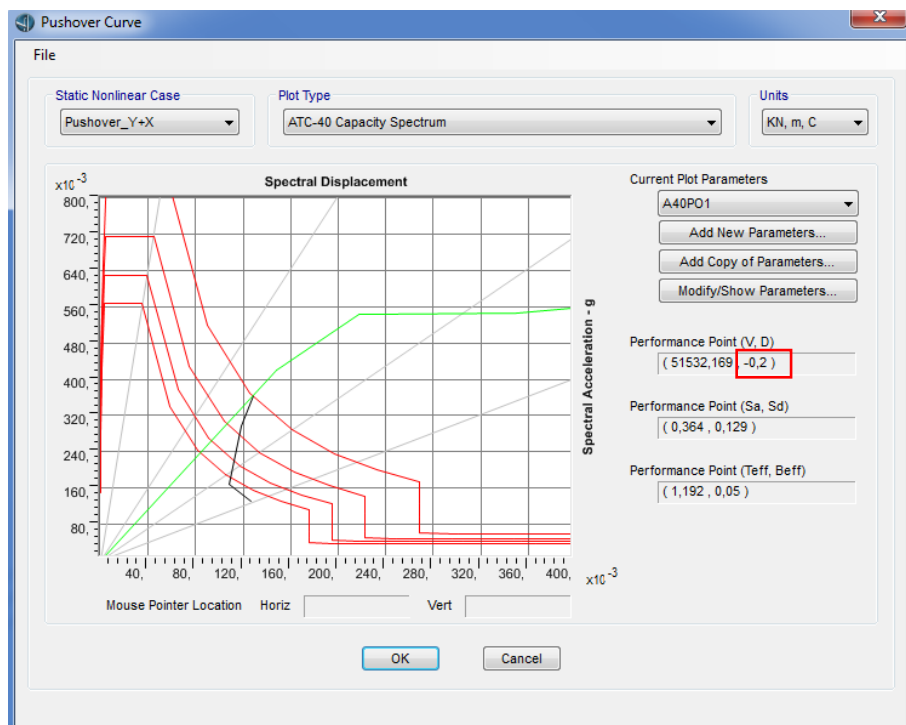
Σχήμα 4.44: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά x με 3% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες



Σχήμα 4.45: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά y με 3% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες



Σχήμα 4.46: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά x+0,3γ με 3% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες



Σχήμα 4.47: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά y+0,3x με 3% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες

Προκειμένου να βρεθεί ο δυσμενέστερος συνδυασμός και συνεπώς η δυσμενέστερη κατάσταση στη γέφυρα ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως για κάθε ένα σεισμικό συνδυασμό ξεχωριστά. Έτσι, προκύπτει ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν (Πίνακες 4.25 και 4.26).

	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	X (1 ^ο βήμα)	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Πόδι (1)	B to C
T (kN)		2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
T' (kN)		3243,602	3257,956	3241,858	3173,477	3038,395	2832,641	2566,538	2273,171	2026,173	1939,464			
A/A		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
T ₁ (kN)		262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
T (kN)		2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	1972,188	2018,396	2259,36	2636,108	3063,908	3482,466	3846,261	4118,03	4267,782	4274,375				
X (2 ^ο βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T' (kN)	3066,948	3103,412	3120,684	3090,964	2993,606	2819,3	2574,595	2290,549	2040,671	1943,787	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908				
T' (kN)	1973,17	2007,403	2241,005	2618,959	3056,82	3494,062	3884,051	4187,281	4370,301	4407,211				
Y (0 βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905			
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336			
	T' (kN)	4039,197	3934,16	3757,361	3515,142	3218,046	2881,961	2530,77	2204,431	1975,076	1930,233			
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908				
T' (kN)	1966,266	2051,164	2321,44	2696,066	3085,339	3428,321	3683,196	3821,713	3828,974	3705,737				
Y (1 ^ο βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T' (kN)	3860,351	3739,417	3545,74	3290,03	2988,674	2666,691	2365,835	2162,967	2182,107	2440,903			
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908				
T' (kN)	2447,715	2222,922	2243,159	2481,453	2800,882	3111,089	3359,79	3516,461	3565,714	3505,894				
X+Y (3 ^ο βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T' (kN)	3042,417	3062,266	3059,166	3009,574	2897,726	2720,305	2493,353	2265,338	2132,279	2179,936	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908				
T' (kN)	2201,174	2096,183	2216,128	2530,564	2932,31	3346,688	3722,304	4019,458	4206,166	4258,065				
X+Y (4 ^ο βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Στόλος (2)	B to C	A to IO
	T' (kN)	2208,813	2280,167	2390,214	2500,881	2565,885	2547,133	2433,662	2264,086	2158,282	2293,294	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908	Κάτω Στόλος (2)	B to C	A to IO	
T' (kN)	2489,322	2243,068	2197,658	2438,916	2849,174	3336,911	3838,303	4300,529	4674,547	4912,929	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS	
												Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
												Πάνω Πόδι (1)	B to C	A to IO
												Πάνω Πόδι (1)	B to C	A to IO

Πίνακας 4.25: Αποτελέσματα αναλύσεων Pushover για τους σεισμικούς συνδυασμούς x, y και x+0,3y

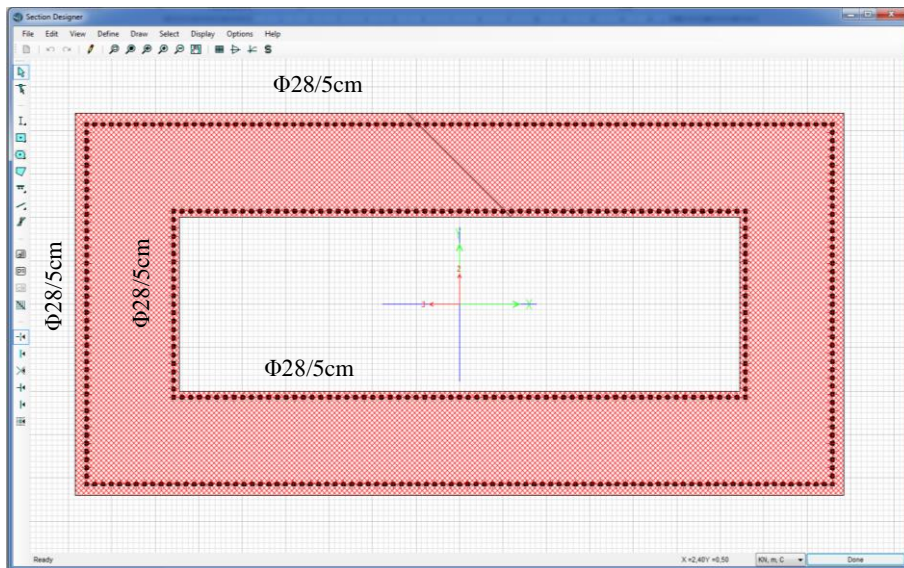
Y+X (0 βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905			
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336			
	T' (kN)	4039,197	3934,16	3757,361	3515,142	3218,046	2881,961	2530,77	2204,431	1975,076	1930,233			
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	1966,266	2051,164	2321,44	2696,066	3085,339	3428,321	3683,196	3821,713	3828,974	3705,737				
Y+X (1° βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T' (kN)	3688,982	3595,295	3437,028	3218,73	2951,689	2657,043	2374,016	2178,174	2193,251	2441,931			
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	2447,287	2215,076	2230,573	2470,827	2799,551	3126,347	3397,979	3581,839	3659,224	3623,891				

Πίνακας 4.26: Αποτελέσματα αναλύσεων Pushover για το σεισμικό συνδυασμό $\gamma+0,3x$

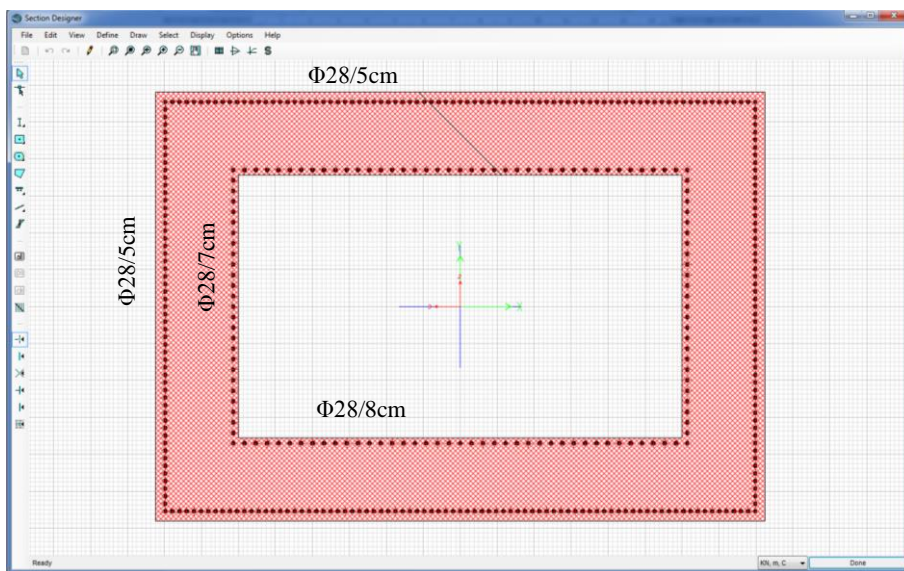
4.3.4 Ποσοστό οπλισμού 4%

Στο πόδι του πυλώνα που βρίσκεται πάνω από το κατάστρωμα, εξαιτίας της κιβωτοειδούς διατομής, τοποθετείται διαμήκης οπλισμός τόσο στην εξωτερική περίμετρο της διατομής με επικάλυψη 5cm όσο και στην εσωτερική πάλι με την ίδια επικάλυψη (Σχήμα 4.48). Τα 2/3 του συνολικού ποσοστού του οπλισμού τοποθετούνται στην εξωτερική περίμετρο ενώ το 1/3 στην εσωτερική. Συνεπώς, στην εξωτερική περίμετρο στην πλευρά μήκους 2,2m τοποθετούνται $\Phi 28/5\text{cm}$ και στην πλευρά μήκους 4,42m τοποθετούνται $\Phi 28/5\text{cm}$. Στην εσωτερική περίμετρο στην πλευρά μήκους 1m τοποθετούνται $\Phi 28/5\text{cm}$ και στην πλευρά μήκους 3,22m τοποθετούνται $\Phi 28/5\text{cm}$.

Στο στύλο του πυλώνα που ενώνει τα πόδια κάθε πυλώνα μεταξύ τους, εξαιτίας της κιβωτοειδούς διατομής, τοποθετείται διαμήκης οπλισμός τόσο στην εξωτερική περίμετρο της διατομής με επικάλυψη 5cm όσο και στην εσωτερική πάλι με την ίδια επικάλυψη (Σχήμα 4.49). Τα 2/3 του συνολικού ποσοστού του οπλισμού τοποθετούνται στην εξωτερική περίμετρο ενώ το 1/3 στην εσωτερική. Συνεπώς, στην εξωτερική περίμετρο στην πλευρά μήκους 2,9m τοποθετούνται $\Phi 28/5\text{cm}$ και στην πλευρά μήκους 4,12m τοποθετούνται $\Phi 28/5\text{cm}$. Στην εσωτερική περίμετρο στην πλευρά μήκους 1,78m τοποθετούνται $\Phi 28/7\text{cm}$ και στην πλευρά μήκους 3m τοποθετούνται $\Phi 28/8\text{cm}$.

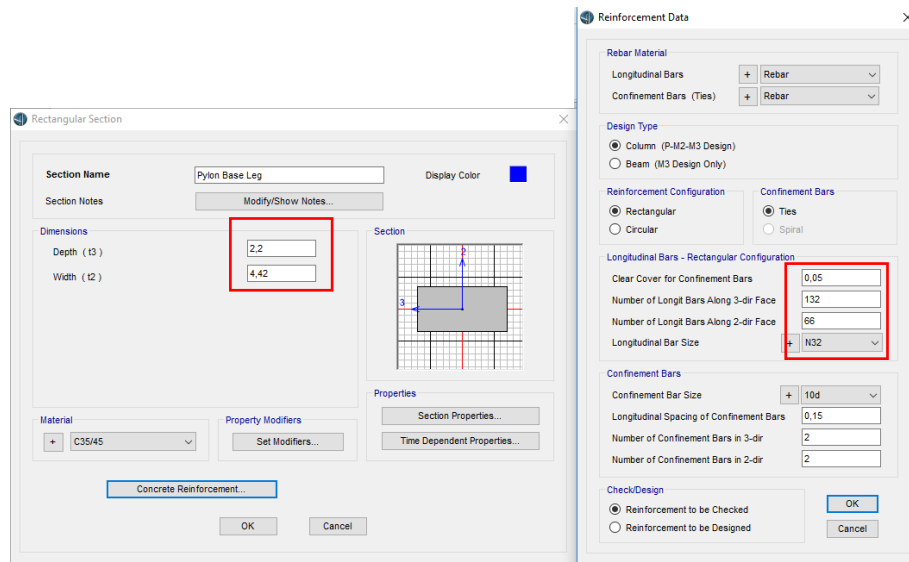


Σχήμα 4.48: Οπλισμός διατομής ποδιού πυλώνα που βρίσκεται πάνω από το κατάστρωμα



Σχήμα 4.49: Οπλισμός διατομής στύλου πυλώνα

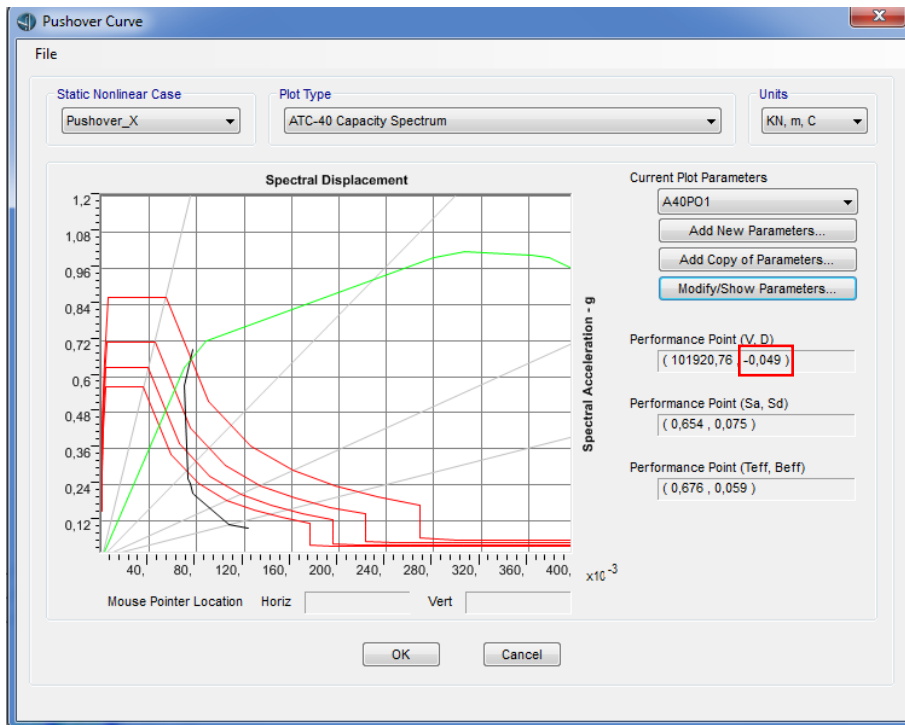
Στο πόδι του πυλώνα που βρίσκεται κάτω από το κατάστρωμα της γέφυρας, τοποθετείται διαμήκης οπλισμός κανονικά στην περίμετρο της διατομής με επικάλυψη 5cm, αφού η διατομή είναι μια συμπαγής ορθογωνική (Σχήμα 4.50). Συνεπώς, στην πλευρά μήκους 2,2m τοποθετούνται Φ28/3cm και στην πλευρά μήκους 4,42m τοποθετούνται Φ28/3cm.



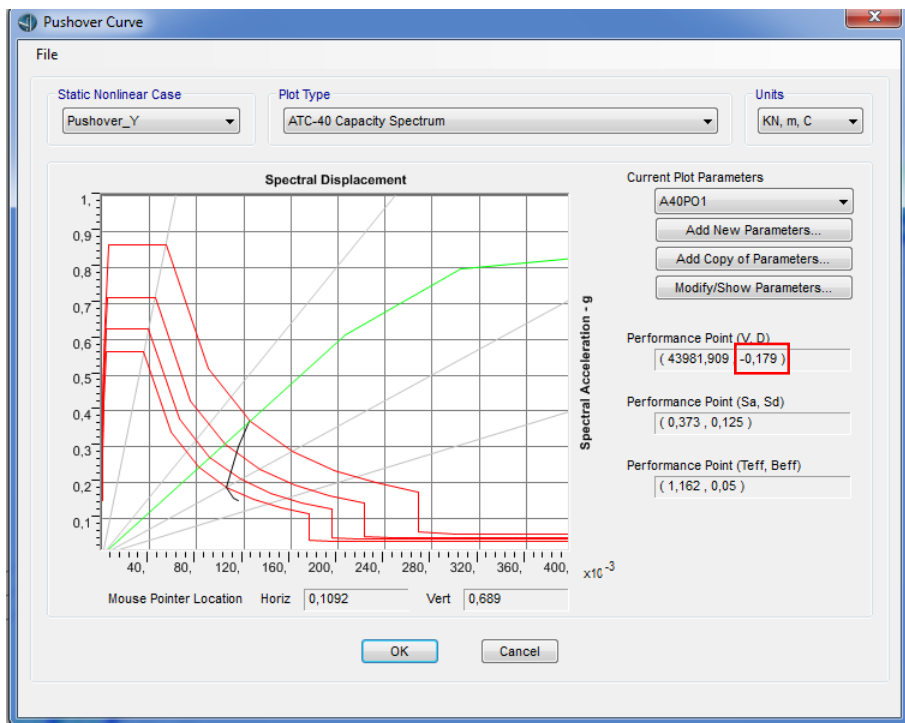
Σχήμα 4.50: Οπλισμός διατομής ποδιού πυλώνα που βρίσκεται κάτω από το κατάστρωμα

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος στον συνδυασμό της ΟΚΑ στη γέφυρα, σύμφωνα με την αυτόματη λειτουργία που παρέχει το πρόγραμμα CSiBridge 2016 τόσο για τα χαλύβδινα μέλη όσο και για τα μέλη από σκυρόδεμα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όλα τα μέλη επαρκούν.

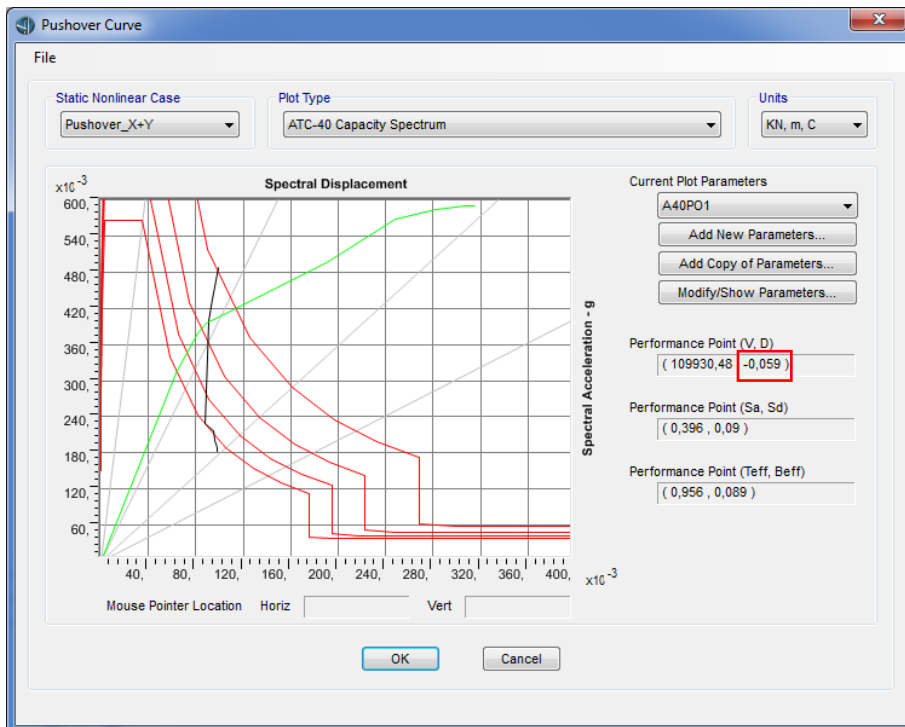
Έπειτα πραγματοποιήθηκε η μη – γραμμική στατική ανάλυση Pushover και με τους 4 σεισμικούς συνδυασμούς. Οι καμπύλες ικανότητας μαζί με τα ελαστικά φάσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω στα Σχήματα 4.51, 4.52, 4.53 και 4.54.



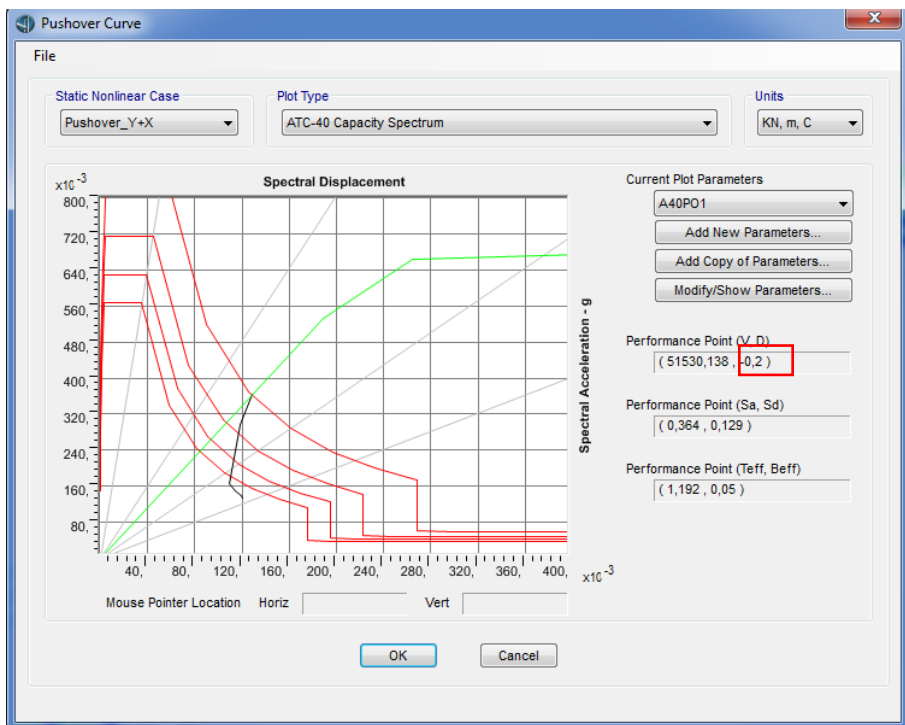
Σχήμα 4.51: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά x με 4% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες



Σχήμα 4.52: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά y με 4% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες



Σχήμα 4.53: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά x+0,3y με 4% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες



Σχήμα 4.54: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά y+0,3x με 4% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες

Προκειμένου να βρεθεί ο δυσμενέστερος συνδυασμός και συνεπώς η δυσμενέστερη κατάσταση στη γέφυρα ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως για κάθε ένα σεισμικό συνδυασμό ξεχωριστά. Έτσι, προκύπτει ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν (Πίνακες 4.27 και 4.28).

X (1° βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T' (kN)	3072,204	3108,468	3124,981	3094,106	2995,392	2819,699	2573,691	2288,551	2038,208	1942,572			
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	1974,123	2010,738	2244,562	2621,454	3057,719	3493,283	3881,929	4184,558	4368,057	4406,741				
X (2° βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T' (kN)	2899,599	2955,445	3003,437	3010,386	2949,385	2805,542	2581,417	2305,992	2053,05	1947,415	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	1975,329	1999,474	2225,612	2603,511	3049,749	3504,067	3919,189	4253,816	4471,416	4541,602				
Y (0 βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905			
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336			
	T' (kN)	4039,197	3934,16	3757,361	3515,142	3218,046	2881,961	2530,77	2204,431	1975,076	1930,233			
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	1966,266	2051,164	2321,44	2696,066	3085,339	3428,321	3683,196	3821,713	3828,974	3705,737				
Y (1° βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T' (kN)	3814,275	3688,657	3489,993	3230,228	2927,365	2608,891	2321,394	2152,193	2240,674	2584,318			
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	2582,134	2269,573	2220,098	2421,807	2723,431	3026,054	3274,337	3436,899	3497,971	3455,083				
X+Y (3° βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T' (kN)	2874,288	2910,191	2933,273	2915,603	2836,408	2688,171	2484,836	2276,042	2162,116	2228,171	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	2246,071	2104,775	2196,412	2499,631	2903,515	3330,844	3728,632	4055,317	4276,153	4362,703				
X+Y (4° βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	T' (kN)	2224,688	2296,909	2405,909	2513,603	2574,596	2551,95	2434,654	2257,355	2127,012	2201,224	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	2356,472	2165,147	2165,689	2427,048	2842,326	3327,724	3823,234	4278,125	4644,801	4877,121				

Πίνακας 4.27: Αποτελέσματα αναλύσεων Pushover για τους σεισμικούς συνδυασμούς x, y και x+0,3y

Y+X (0 βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905			
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336			
	T' (kN)	4039,197	3934,16	3757,361	3515,142	3218,046	2881,961	2530,77	2204,431	1975,076	1930,233			
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	1966,266	2051,164	2321,44	2696,066	3085,339	3428,321	3683,196	3821,713	3828,974	3705,737				
Y+X (1° βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T' (kN)	3597,977	3506,534	3352,444	3139,869	2880,353	2596,48	2331,668	2171,608	2255,09	2585,776			
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	2581,392	2259,368	2204,161	2408,717	2722,349	3046,06	3323,316	3520,122	3616,588	3604,584				

Πίνακας 4.28: Αποτελέσματα αναλύσεων Pushover για το σεισμικό συνδυασμό $\gamma+0,3x$

4.3.5 Συμπεράσματα

Οι πίνακες των αποτελεσμάτων των αναλύσεων, όπως έχει ήδη αναφερθεί ελέγχουν δύο βασικούς παράγοντες που έχουν επίδραση στη συμπεριφορά της γέφυρας ως προς το σεισμό. Πρώτον, ελέγχουν τις δυνάμεις των καλωδίων που αναπτύσσονται στα βήματα που περιέχουν τη στοχευόμενη μετακίνηση και δεύτερον εξετάζουν την εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων και το στάδιο στο οποίο βρίσκονται σύμφωνα με το Σχήμα 4.21 στα βήματα αυτά.

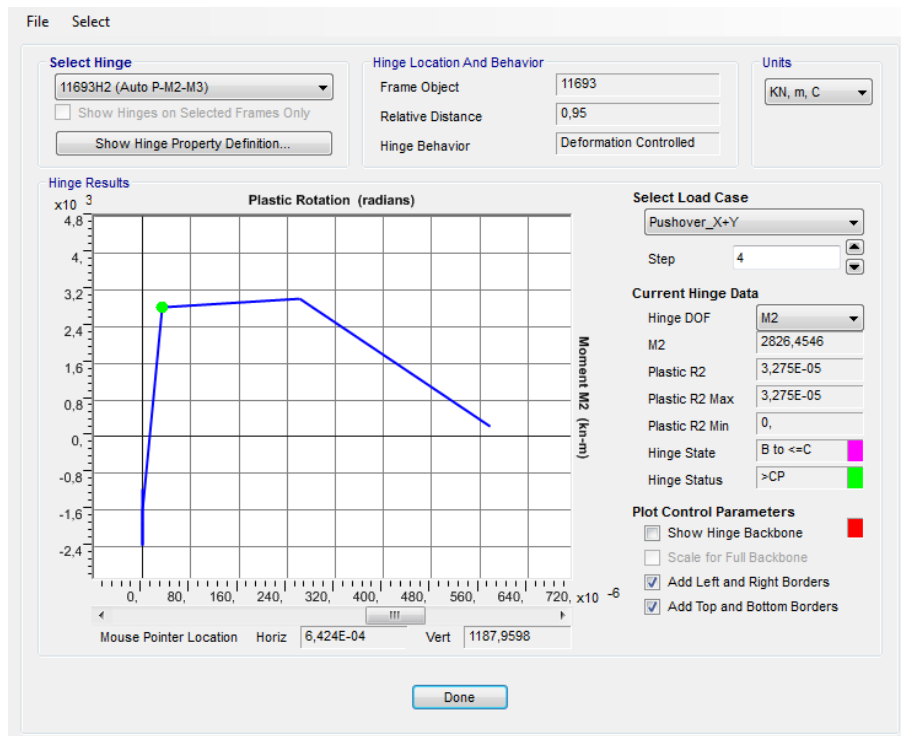
Από όλα τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι κανένα χαλύβδινο μέλος δεν διαρρέει. Όλα λειτουργούν στην ελαστική περιοχή. Συνεπώς τα μέλη που εξετάζονται για τη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων είναι τα μέλη από σκυρόδεμα των πυλώνων.

Το σημαντικότερο ρόλο στην επιλογή του κατάλληλου οπλισμού των πυλώνων της γέφυρας έχει η δημιουργία των πλαστικών αρθρώσεων. Παρατηρείται, ως επί το πλείστον, ότι και στις 4 περιπτώσεις διαφορετικού οπλισμού, ο δυσμενέστερος σεισμικός συνδυασμός είναι ο $X+0,3Y$. Σε αυτούς τους συνδυασμούς παρουσιάζονται οι περισσότερες και πιο προχωρημένες πλαστικές αρθρώσεις. Μόνο στην 1^η περίπτωση με ποσοστό 1% ο συνδυασμός αυτός έχει ανταγωνισμό. Τον ανταγωνίζεται ο έτερος συνδυασμός $Y+0,3X$ με τη διαφορά ότι εμφανίζονται περισσότερες πλαστικές αρθρώσεις από τον συνδυασμό $X+0,3Y$, ωστόσο όλες ανήκουν μεταξύ του σημείου Διαρροής (B) και του σημείου επιτελεστικότητας Άμεση Χρήση (IO).

Αφού, λοιπόν, βρέθηκε ο δυσμενέστερος σεισμικός συνδυασμός για κάθε περίπτωση όπλισης των πυλώνων, στη συνέχεια θα βρεθεί αυτός ο συνδυασμός που η γέφυρα παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά (είτε ως προς τη λειτουργία είτε ως προς την οικονομία). Η περίπτωση του οπλισμού με ποσοστό 4% της συνολικής επιφάνειας κάθε μέλους απορρίπτεται καθώς αν παρατηρηθούν οι αναλύσεις Pushover η στοχευόμενη μετακίνηση βρίσκεται πάντα στον ελαστικό κλάδο. Αυτό ναί μεν είναι επιθυμητό καθώς η κατασκευή δεν έχει επηρεαστεί από το σεισμό και όλες οι παραμορφώσεις είναι ελαστικές και άρα εξαλείφονται με την αποφόρτιση αλλά από την άλλη είναι αντιοικονομικό. Από τη στιγμή που έχουν αναπτυχθεί θεωρίες πλαστικοποίησης των διατομών με ανακατανομή των δυνάμεων στη γύρω περιοχή χωρίς την κατάρρευση του φορέα, αυτές πρέπει να αξιοποιηθούν προκειμένου να επιτευχθεί κάποια οικονομία. Για να είναι όλες οι στοχευόμενες μετακινήσεις στον ελαστικό κλάδο σημαίνει ότι ο φορέας είναι πολύ δύσκαμπτος, πράγμα που είναι ακριβό για να επιτευχθεί. Έτσι ο παραπάνω οπλισμός (4%) θεωρείται περιττός και αντιοικονομικός.

Η περίπτωση με ποσοστό οπλισμού 1% παρουσιάζει την εμφάνιση πολλών πλαστικών αρθρώσεων σχεδόν σε όλα τα μέλη του πυλώνα και στη περίπτωση του παραπάνω βήματος και στα δύο άκρα κάποιων μελών. Η δυσμενέστερη πλαστική άρθρωση που εμφανίζεται είναι αυτή που βρίσκεται ανάμεσα από τις στάθμες επιτελεστικότητας Άμεση Χρήση (IO) και Προστασία Ζωής (LS). Εξαιτίας της δημιουργίας τόσο πολλών πλαστικών αρθρώσεων η κατάσταση της γέφυρας κρίνεται οριακή και επιλέχθηκε η αποφυγή χρησιμοποίησης αυτού του ποσοστού.

Παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση είναι και αυτή με το ποσοστό στο 2%. Εδώ η συνολική εικόνα είναι λίγο καλύτερη από την άποψη των πλαστικών αρθρώσεων, ωστόσο στο δυσμενέστερο συνδυασμό $X+0,3Y$ παρατηρείται μια πλαστική άρθρωση που ξεπερνάει τη στάθμη επιτελεστικότητας Οιονεί Κατάρρευση (CP). Έτσι και αυτή η περίπτωση απορρίπτεται (Σχήμα 4.55).



Σχήμα 4.55: Διάγραμμα ροπής - στροφής κρίσιμης πλαστικής άρθρωσης για ποσοστό οπλισμού 2%

Έτσι επιλέγεται η περίπτωση με ποσοστό οπλισμού το 3%. Αυτή εμφανίζει τον ίδιο αριθμό πλαστικών αρθρώσεων στον κρίσιμο συνδυασμό, ωστόσο η δυσμενέστερη κατάσταση που παρουσιάζεται βρίσκεται ανάμεσα από την IO και την LS. Το πιο σημαντικό κριτήριο επιλογής του είναι η ικανοποίηση της διάταξης του ΚΑΝ.ΕΠΕ., που επιδιώκει η στοχευόμενη μετακίνηση της κατασκευής να βρίσκεται στη στάθμη ελεγχόμενων βλαβών κοντά στη στάθμη επιτελεστικότητας Προστασία Ζωής (LS). Έτσι σε αυτήν την περίπτωση η κατασκευή έχει αναπτύξει τη μέγιστη πλαστιμότητα προκειμένου να μην υπάρξουν θανάσιμα ατυχήματα, άρα θεωρείται και οικονομική σχεδίαση. Η μετακίνηση της LS του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος προκύπτει (για τις μετακινήσεις διαρροής και αστοχίας βλ. Σχήμα 4.46):

$$d_{LS} = \frac{d_y + d_u}{2\gamma_{Rd}} = \frac{0,052 + 0,02564}{2 \cdot 1,5} = 0,103m > S_d = 0,091m$$

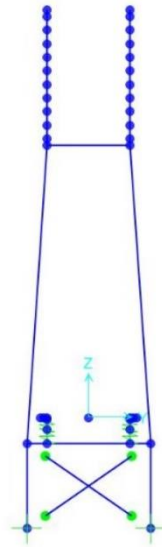
Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι οι δυνάμεις των καλωδίων σε αυτή την κρίσιμη περίπτωση είναι μειωμένες σχεδόν σε όλα τα καλώδια και στα 2 βήματα. Η μείωση της δύναμης και συνεπώς η μείωση του μήκους του καλωδίου και η αύξηση του βέλους είναι όμως ανεκτή. Κανένα καλώδιο δεν έχει μήκος μικρότερο από το γεωμετρικό μήκος της απόστασης των στηριξεών του. Επιβεβαιώνεται σε αυτό το σημείο η σωστή επιλογή της μεθόδου προέντασης των καλωδίων που πραγματοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, αφού και σε αυτό το στάδιο ικανοποιούνται τα κριτήρια ελέγχου (βλ. 4.2).

4.4 Επίδραση χιαστί συνδέσμων στην κατασκευή

Στη συγκεκριμένη ενότητα γίνεται σύγκριση ανάμεσα στη γέφυρα όπως έχει προκύψει μέχρι στιγμής (10% αρχική προένταση και 3% οπλισμός στους πυλώνες) με μια άλλη διάταξη της γέφυρας. Αυτή η διάταξη περιλαμβάνει την αρχική προένταση του 10%, αλλά ο οπλισμός στους πυλώνες θεωρείται κατά 1% μικρότερος, δηλαδή λαμβάνεται ποσοστό 2%, και εισάγονται χιαστί σύνδεσμοι δυσκαμψίας ανάμεσα από τα πόδια των πυλώνων που βρίσκονται κάτω από το κατάστρωμα. Οι χιαστί σύνδεσμοι είναι από το ίδιο υλικό που είναι και οι πυλώνες (C35/45) και αποτελούνται από λογιστική ορθογωνική διατομή $2 \times 3 \text{m}^2$ ώστε να προσδώσουν μεγάλη οριζόντια δυσκαμψία. Όπως είχε αναφερθεί στο 3^ο Κεφάλαιο σε αυτή τη θέση από τα σχέδια που έχουν βρεθεί υπάρχει ένα τοιχίο. Αντί αυτού σε αυτήν την ενότητα εισάγονται οι χιαστί σύνδεσμοι που περιγράφηκαν παραπάνω με μεγάλη διατομή. Οι χιαστί σύνδεσμοι είναι αρθρωτά συνδεδεμένοι στους κόμβους του πλαισίου και στα άκρα τους θεωρήθηκε ότι μπορούν να εμφανισθούν πλαστικές αρθρώσεις (Σχήμα 4.56).

Σκοπός της σύγκρισης είναι να βρεθεί ποια από τις δύο περιπτώσεις παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά στο σεισμό (ανάλυση Pushover) και, επίσης, να βρεθεί η πιο οικονομική λύση.

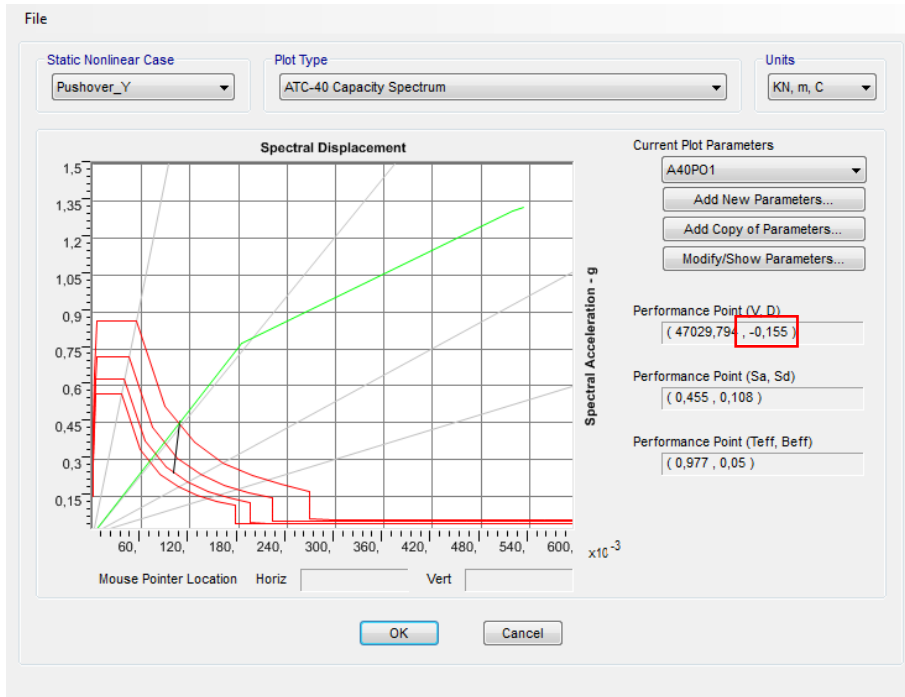
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τους χιαστί συνδέσμους για ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες 2% για όλους του σεισμικούς συνδυασμούς φαίνονται στα παρακάτω Σχήματα 4.57, 4.58, 4.59 και 4.60,



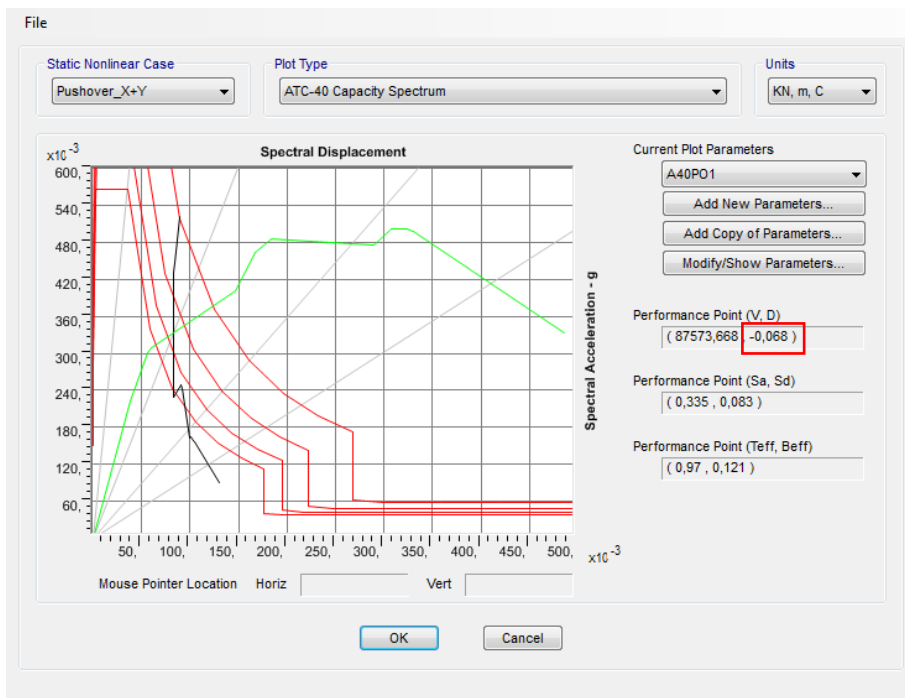
Σχήμα 4.56: Χιαστί σύνδεσμοι δυσκαμψίας στους πλώνες



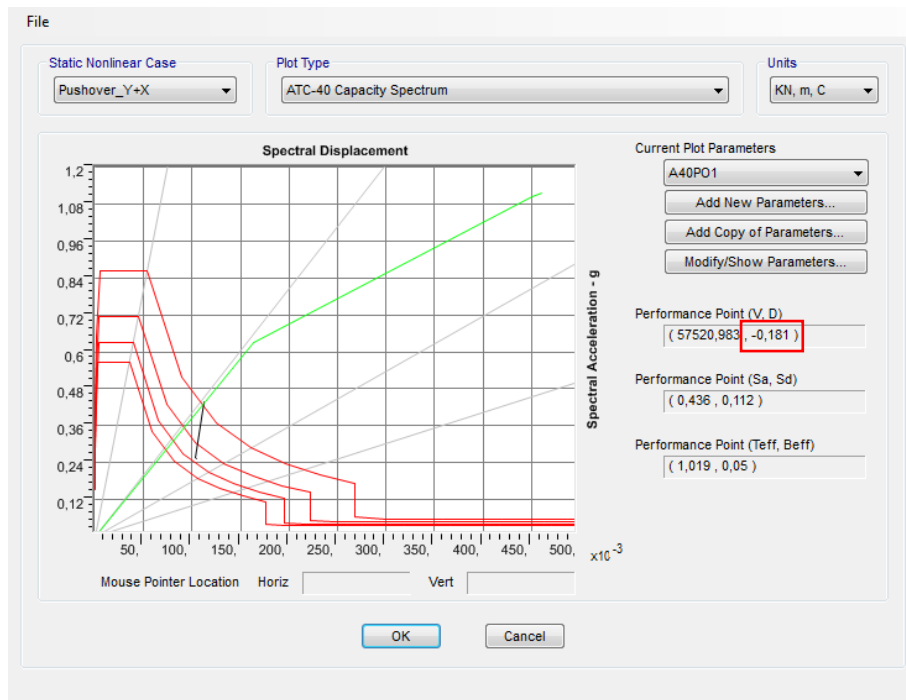
Σχήμα 4.57: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά x με 2% ποσοστό οπλισμού στους πλώνες και χιαστί συνδέσμους



Σχήμα 4.58: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά y με 2% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες και χιαστί συνδέσμους



Σχήμα 4.59: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά x+0,3y με 2% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες και χιαστί συνδέσμους



Σχήμα 4.60: Καμπύλη ικανότητας για σεισμική δράση κατά $y+0,3x$ με 2% ποσοστό οπλισμού στους πυλώνες και χιαστί συνδέσμους

Προκειμένου να βρεθεί ο δυσμενέστερος συνδυασμός και συνεπώς η δυσμενέστερη κατάσταση στη γέφυρα ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως για κάθε ένα σεισμικό συνδυασμό ξεχωριστά. Έτσι, προκύπτει ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν (Πίνακες 4.29 και 4.30).

X (2 ^ο βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T' (kN)	3274,276	3284,43	3262,586	3187,773	3046,517	2835,669	2566,09	2270,938	2023,186	1935,495	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	1969,026	2017,25	2260,111	2637,718	3064,85	3480,929	3840,303	4105,791	4247,78	4245,906				
X (3 ^ο βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	T' (kN)	2569,185	2647,829	2746,497	2822,915	2834,871	2750,517	2556,876	2271,549	1975,064	1872,73	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207	Πάνω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908	Πάνω Πόδι (1)	B to C	A to IO
T' (kN)	2065,551	2089,859	2261,952	2608,799	3054,356	3532,95	3991,103	4381,044	4658,748	4784,68				

Πίνακας 4.29: Αποτελέσματα αναλύσεων Pushover για το σεισμικό συνδυασμό x

Y (0 βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905			
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336			
	T' (kN)	4039,309	3934,272	3757,472	3515,252	3218,148	2882,02	2530,676	2203,887	1973,442	1926,82			
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	1962,841	2049,51	2320,876	2695,95	3085,369	3428,387	3683,268	3821,791	3829,067	3705,853				
Y (1° βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Πάνω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Πάνω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T' (kN)	3795,386	3670,287	3472,688	3214,365	2913,27	2597,189	2313,811	2153,375	2260,273	2628,901			
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	2628,718	2291,521	2222,736	2415,247	2712,98	3013,936	3261,459	3423,674	3484,686	3442,055				
X+Y (3° βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T' (kN)	3190,259	3194,36	3167,27	3089,547	2949,593	2747,394	2500,517	2256,278	2107,086	2139,647	Κάτω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Πόδι (1)	B to C	>CP
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	2164,812	2090,073	2233,702	2557,852	2958,188	3361,955	3718,956	3990,961	4148,307	4170,161				
X+Y (4° βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Κάτω Πόδι (1)	B to C	>CP
	T' (kN)	2686,97	2737,033	2791,18	2815,053	2778,35	2663,055	2473,444	2253,516	2116,786	2226,133	Κάτω Πόδι (1)	B to C	IO to LS
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Κάτω Πόδι (1)	B to C	>CP
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207	Πάνω Πόδι (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	2403,782	2238,517	2268,04	2537,898	2935,475	3374,014	3793,375	4146,49	4393,619	4501,171				
Y+X (0 βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905			
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336			
	T' (kN)	4039,309	3934,272	3757,472	3515,252	3218,148	2882,02	2530,676	2203,887	1973,442	1926,82			
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	1962,841	2049,51	2320,876	2695,95	3085,369	3428,387	3683,268	3821,791	3829,067	3705,853				
Y+X (1° βήμα)	A/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Hinge	Hinge State	Hinge Status
	T ₁ (kN)	1707,207	1586,638	1461,307	1330,342	1192,549	1046,203	888,632	715,232	516,505	262,905	Πάνω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T (kN)	2804,908	2803,282	2801,686	2800,119	2798,581	2797,073	2795,594	2794,145	2792,726	2791,336	Πάνω Στόλος (1)	B to C	A to IO
	T' (kN)	3571,121	3481,372	3329,977	3120,638	2864,584	2584,465	2324,636	2173,556	2274,884	2629,686			
	A/A	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			
	T ₁ (kN)	262,905	516,505	715,232	888,632	1046,203	1192,549	1330,342	1461,307	1586,638	1707,207			
	T (kN)	2791,336	2792,726	2794,145	2795,594	2797,073	2798,581	2800,119	2801,686	2803,282	2804,908			
T' (kN)	2627,6	2280,892	2206,297	2401,86	2712,135	3035,042	3312,672	3510,423	3608,104	3597,404				

Πίνακας 4.30: Αποτελέσματα αναλύσεων Pushover για τους σεισμικούς συνδυασμούς $y, x+0,3y$ και $y+0,3x$

Παρατηρείται ότι, παρόλο που οι χιαστί σύνδεσμοι δυσκαμψίας αποδέσμευσαν τον κάτω στύλο από τα μεγάλα φορτία μεταφέροντάς τα στον πάνω στύλο, στο δυσμενή σεισμικό συνδυασμό που και πάλι είναι ο $X+0,3Y$ εμφανίζονται 1 πλαστική άρθρωση στο προηγούμενο βήμα και 2 στο επόμενο που ξεπερνά τη στάθμη επιτελεστικότητας CP. Συνεπώς, η λύση αυτή απορρίπτεται και η γέφυρα θα συνεχίσει στη δυναμική ανάλυση χωρίς χιαστί συνδέσμους.

4.5 Επιρροή των εφεδράνων στη δυναμική απόκριση της κατασκευής σε πραγματικό επιταχυνσιογράφημα

Σε αυτήν την ενότητα γίνεται σύγκριση μεταξύ της γέφυρας, που έχει προκύψει μέχρι την έως τώρα διερεύνηση και της ίδιας γέφυρας, αλλά με την εισαγωγή εφεδράνων αντί για τις απλές στηρίξεις. Η σύγκριση αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω μιας ιδιομορφικής δυναμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας. Στο πρόγραμμα εισάχθηκε το επιταχυνσιογράφημα του σεισμού Imperial Valley που πραγματοποιήθηκε το 1979 και καταγράφηκε από το σταθμό El Centro Array #4. Η έντασή του ήταν 6,53 βαθμοί της κλίμακας Ρίχτερ. Τέλος, πραγματοποιείται έλεγχος των ιδιομορφών σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις.

4.5.1 Διαστασιολόγηση εφεδράνων

Επιλέχθηκαν ελαστομεταλλικά εφέδρανα τύπου B (με πολλές πλάκες ενίσχυσης) δύο σε κάθε βάθρο. Στα ακρόβαθρα, τα εφέδρανα έχουν διαστάσεις 600X700 με 8 πλάκες ενίσχυσης, ενώ στους πυλώνες έχουν διαστάσεις 400X500 με 10 πλάκες ενισχύσεις (S235).

Το κάθε εφέδρανο προσομοιώνεται στο πρόγραμμα CSiBridge 2016 ως δύο οριζόντια ελατήρια και ένα κατακόρυφο με τις δυσκαμψίες που υπολογίστηκαν παραπάνω. Ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τα αναλυτικά χαρακτηριστικά των εφεδράνων παρουσιάζεται στη συνέχεια (Πίνακας 4.31). Ο πίνακας έχει κατασκευαστεί με τη βοήθεια του λογιστικού προγράμματος EXCEL και με κίτρινο χρώμα παρουσιάζονται οι τιμές που εισάγονται από τους πίνακες της εταιρείας των εφεδράνων (GUMBA). Περιλαμβάνονται μόνο τα δύο εφέδρανα του ακρόβαθρου και τα δύο του πυλώνα, καθώς τα άλλα τέσσερα που δεν αναφέρονται έχουν ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά, λόγω της συμμετρίας της γέφυρας.

Εφεδράνο	a (mm)	b (mm)	Tb (mm)	n	ti (mm)	ts (mm)	e (mm)	c (mm)	G (kPa)	Gmin (kPa)	Gmax (kPa)
1	600	700	170	8	15	5	2,5	10	900	990	1485
2	600	700	170	8	15	5	2,5	10	900	990	1485
3	400	500	159	10	11	4	2,5	10	900	990	1485
4	400	500	159	10	11	4	2,5	10	900	990	1485

Εφεδράνο	Tq (mm)	Te (mm)	a' (cm)	b' (cm)	A1 (cm2)	Ip (cm)	S	Kz (kN/m)	Kx (kN/m)	Ky (kN/m)	Eb (Mpa)
1	125	125	59	69	4071	256	10,60	1314717,1	3024,00	3024,00	2000
2	125	125	59	69	4071	256	10,60	1314717,1	3024,00	3024,00	2000
3	115	115	39	49	1911	176	9,87	597587,6	1565,22	1565,22	2000
4	115	115	39	49	1911	176	9,87	597587,6	1565,22	1565,22	2000

Πίνακας 4.31: Χαρακτηριστικά εφεδράνων

Η επιλογή των εφεδράνων έγινε με επαναληπτική διαδικασία. Αρχικά, τοποθετήθηκαν εφεδράνα με διαστάσεις 450x600x159 για τις ακραίες στηρίξεις και 500x600x159 για τις ενδιάμεσες υπολογίζοντας τις δυσκαμψίες τους. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση του βασικού συνδυασμού της ΟΚΑ (1,35G+1,35Q). Έπειτα, ελέγχθηκαν κάποια κριτήρια που ορίζονται για τη διαστασιολόγηση των εφεδράνων. Τέλος, μετά από επαναλήψεις βρέθηκαν τα εφεδράνα εκείνα που ικανοποιούν όλα τα κριτήρια.

Η επαναληπτική μέθοδος και τα κριτήρια ελέγχου των εφεδράνων δεν παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία.

4.5.2 Ιδιομορφική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας

Η διαφορική εξίσωση που ελέγχει την απόκριση ενός πολυβάθμιου συστήματος σε σεισμικά επιβαλλόμενη εδαφική κίνηση $\ddot{u}_g(t)$ είναι:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -mr\ddot{u}_g(t)$$

όπου m = μητρώο μάζας, k = μητρώο δυσκαμψίας, r = διάνυσμα επιρροής και c = μητρώο απόσβεσης που δεν λαμβάνεται υπόψη για αυτού του είδους την ανάλυση.

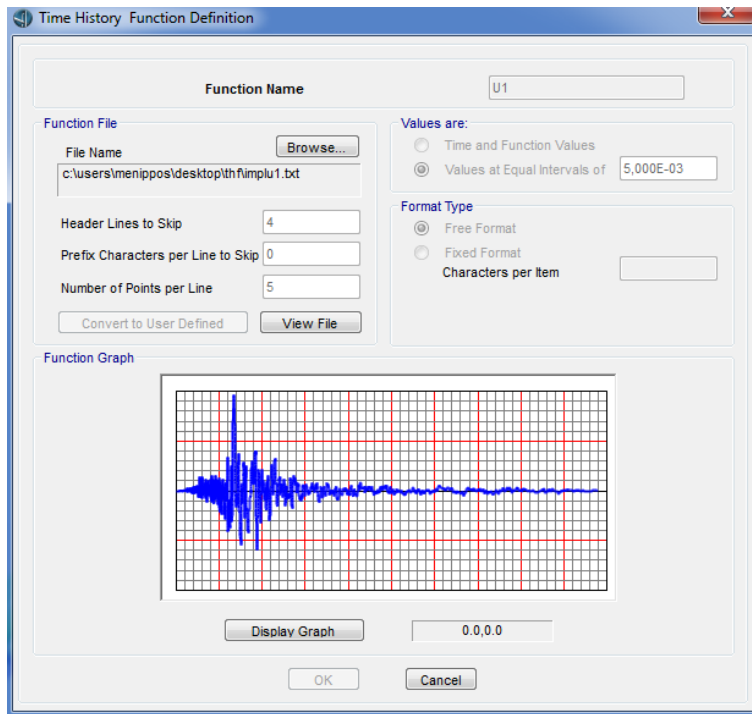
Η μετατόπιση u ενός N – βάρθμιου συστήματος μπορεί να εκφρασθεί ως η επαλληλία των συνεισφορών των ιδιομορφών:

$$u(t) = \sum_{n=1}^N \varphi_n q_n(t)$$

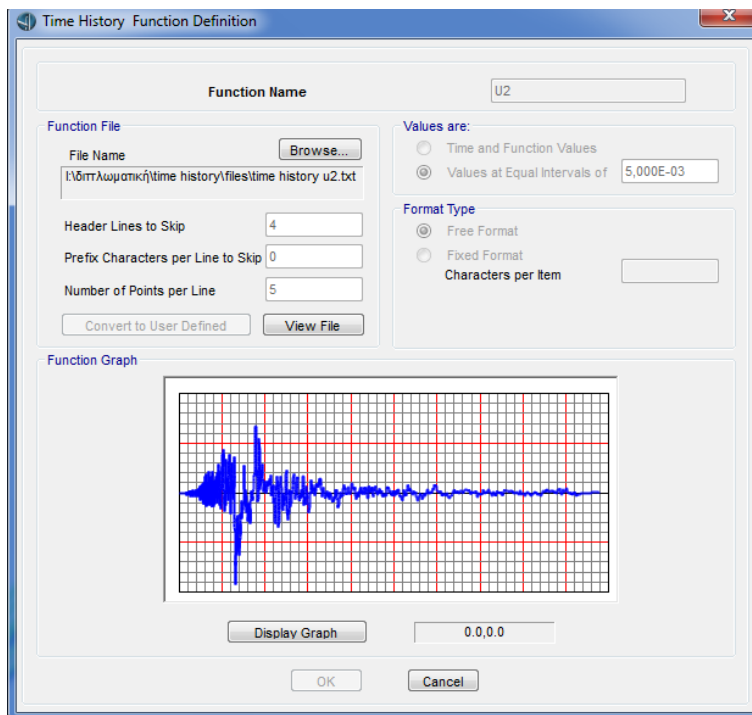
όπου $\varphi_n = \eta_n$ – οστη ιδιομορφή του συστήματος και $q_n = \delta$ συντελεστής κλίμακας της n ιδιομορφής.

Παρατηρείται, λοιπόν, ότι η μετατόπιση ενός πολυβάθμιου συστήματος εξαρτάται από τις ιδιομορφές ταλάντωσής του. Σκόπιμο κρίθηκε να δοθεί ο ορισμός της ιδιομορφής. Έτσι, αν ένα σύστημα διεγερθεί με αρμονική διέγερση που έχει συχνότητα ίση με μία από τις ιδιοσυχνότητές της θα αποκριθεί με μία συγκεκριμένη μορφή ταλάντωσης η οποία ονομάζεται ιδιομορφή. Ταλάντωση μιας κατασκευής σε μία από τις ιδιομορφές της σημαίνει ότι το σχήμα της παραμορφωμένης κατασκευής παραμένει σταθερό στο χρόνο και μόνον το εύρος των μετακινήσεων αλλάζει κάθε χρονική στιγμή. Με άλλα λόγια, ο λόγος των μετακινήσεων δύο οποιονδήποτε βαθμών ελευθερίας παραμένει σταθερός, ανεξάρτητος του χρόνου. Αυτό ισχύει μόνον όταν η κατασκευή διεγείρεται σε κάποια ιδιομορφή της, ενώ για οποιαδήποτε άλλη διέγερση, το σχήμα της απόκρισης αλλάζει με το χρόνο. Ο όρος ιδιο- χαρακτηρίζει τις φυσικές ιδιότητες της ελεύθερης ταλάντωσης και συνεπώς εξαρτώνται από τις ιδιότητες της μάζας και της δυσκαμψίας.

Στη παρούσα εργασία η εξωτερική σεισμική διέγερση που λήφθηκε υπόψη είναι αυτή του σεισμού Imperial Valley που πραγματοποιήθηκε το 1979 και καταγράφηκε από το σταθμό El Centro Array #4. Η έντασή του ήταν 6,53 βαθμοί της κλίμακας Ρίχτερ. Εξετάστηκαν δύο επιταχυνσιογραφήματα για τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις (Σχήματα 4.61 και 4.62).

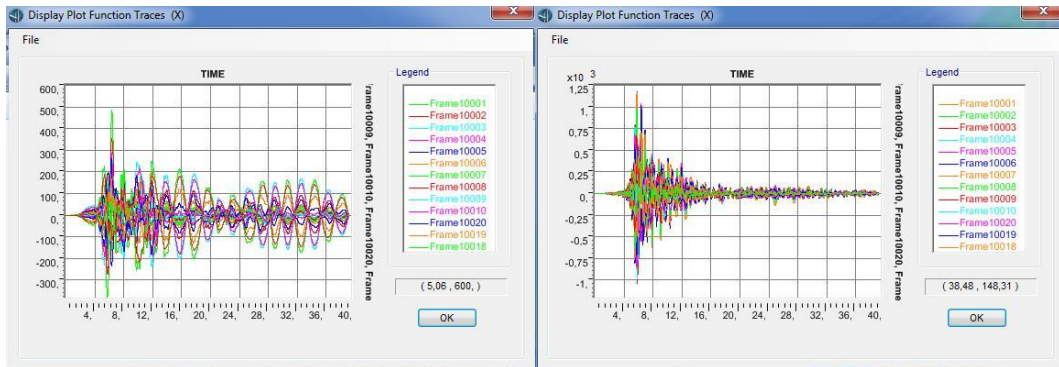


Σχήμα 4.61: Επιταχυνσιογράφημα σεισμού κατά τη διαμήκη διεύθυνση

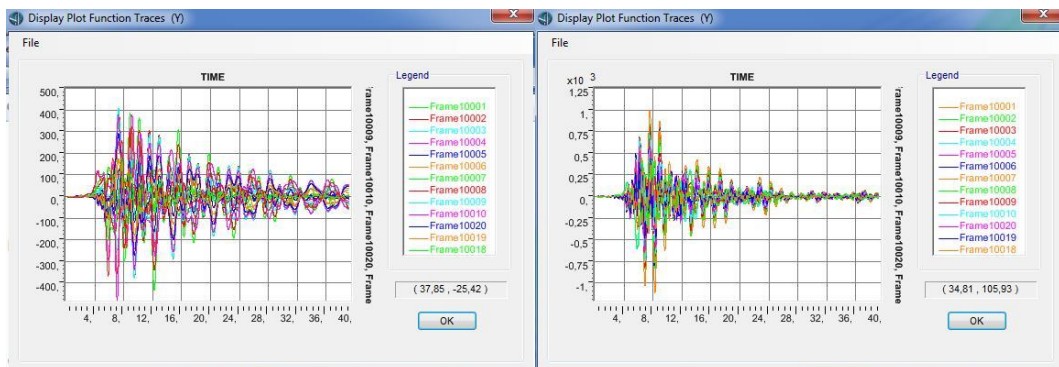


Σχήμα 4.62: Επιταχυνσιογράφημα σεισμού κατά την εγκάρσια διεύθυνση

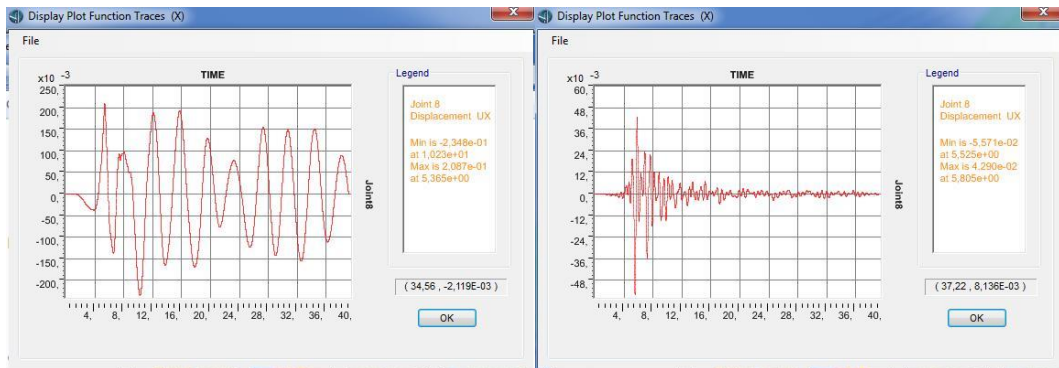
Τα στοιχεία που θα συγκριθούν ανάμεσα στις δύο γέφυρες, που αναφέρθηκαν προηγουμένως, είναι οι αξονικές δυνάμεις των καλωδίων, η ροπή στη βάση του πύλου του πυλώνα (κατά y) και οι μετατοπίσεις του κέντρου μάζας (Κ.Μ) του καταστρώματος στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις (x και y). Σε κάθε ένα από τα Σχήματα 4.63, 4.64, 4.65, 4.66 και 4.67 παρακάτω αριστερά παρουσιάζεται η μονωμένη γέφυρα και δεξιά η γέφυρα χωρίς τα εφέδρανα.



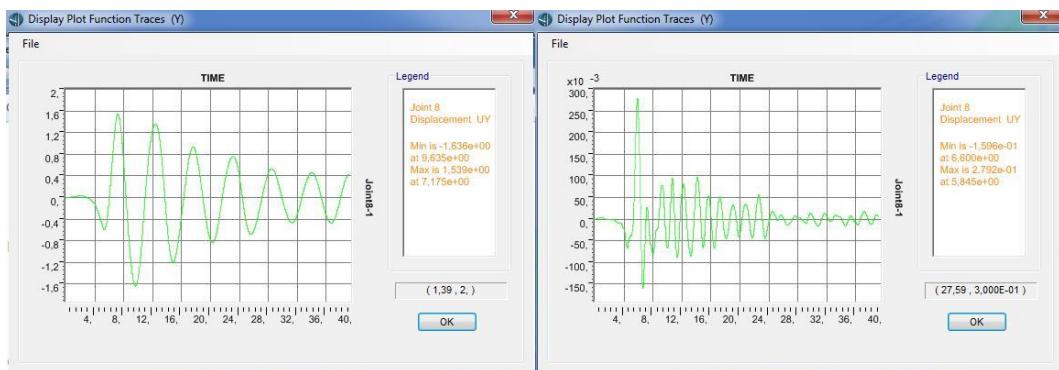
Σχήμα 4.63: Αξονικές δυνάμεις καλωδίων για σεισμό κατά x και για τις δύο περιπτώσεις



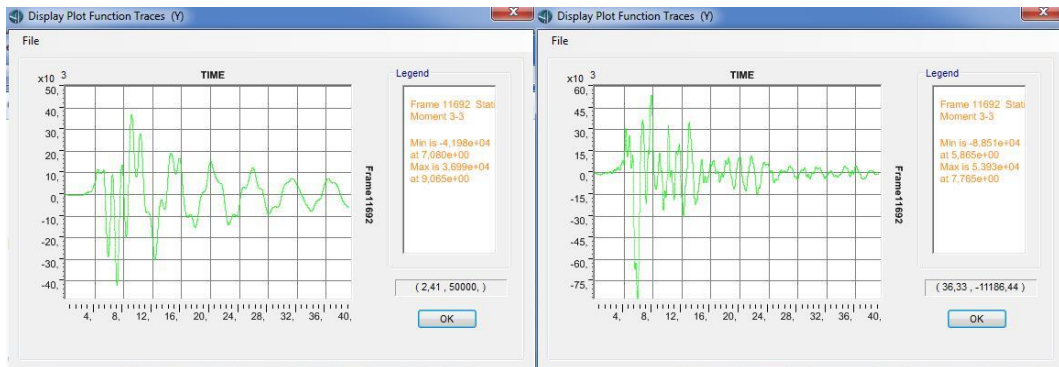
Σχήμα 4.64: Αξονικές δυνάμεις καλωδίων για σεισμό κατά y και για τις δύο περιπτώσεις



Σχήμα 4.65: Οριζόντια μετατόπιση κόμβου αναφοράς για σεισμό κατά x και για τις δύο περιπτώσεις



Σχήμα 4.66: Οριζόντια μετατόπιση κόμβου αναφοράς για σεισμό κατά y και για τις δύο περιπτώσεις

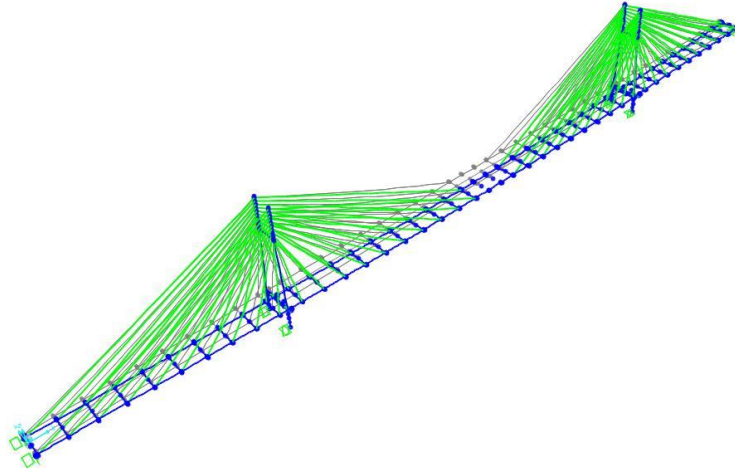


Σχήμα 4.67: Ροπή στη βάση του ποδιού του πυλώνα για σεισμό κατά y και για τις δύο περιπτώσεις

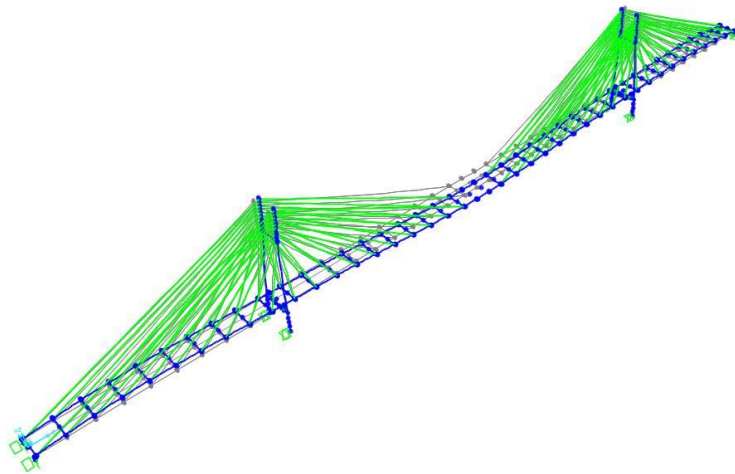
4.5.3 Έλεγχος ιδιομορφών

Στα Σχήματα 4.68 και 4.69 φαίνονται ενδεικτικά οι τρεις πρώτες ιδιομορφές της γέφυρας και για τις δύο περιπτώσεις που εξετάζονται. Πρώτα παρουσιάζεται η μονωμένη γέφυρα και στη συνέχεια αυτή χωρίς τα εφάδρανα.

Deformed Shape (MODAL) - Mode 1; T = 5,45534; f = 0,18331

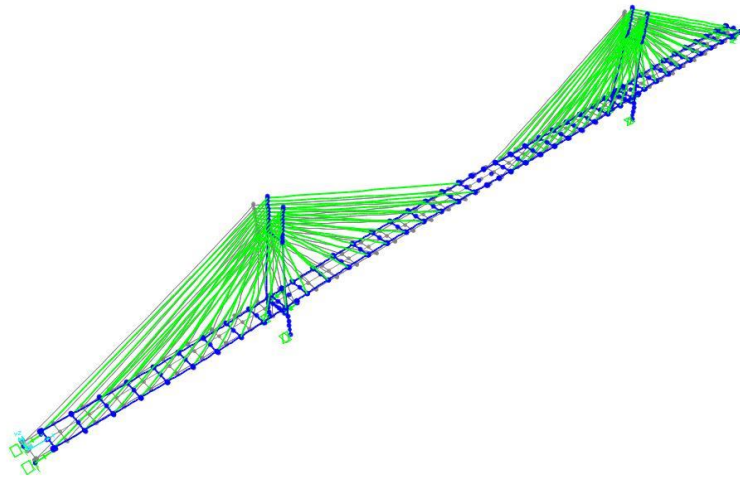


Deformed Shape (MODAL) - Mode 1; T = 1,93252; f = 0,51746

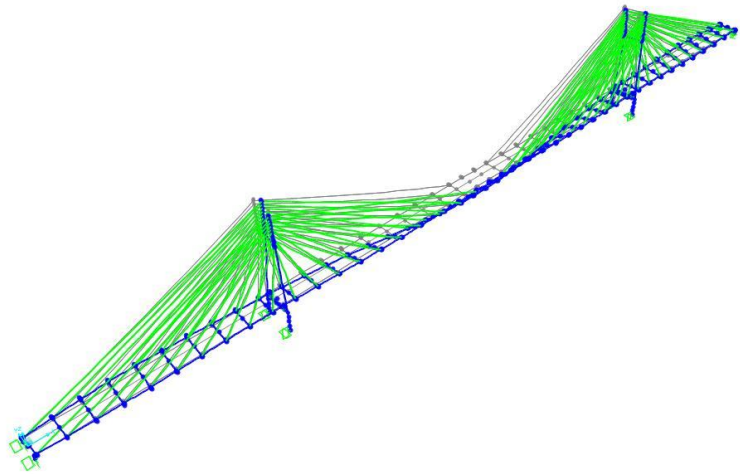


Σχήμα 4.68: 1^η ιδιομορφή και των δύο περιπτώσεων

Deformed Shape (MODAL) - Mode 2; T = 3,72838; f = 0,26821

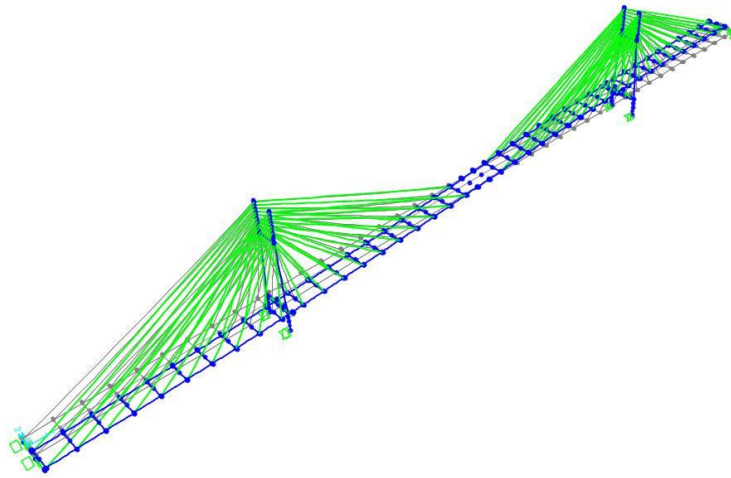


Deformed Shape (MODAL) - Mode 2; T = 1,67055; f = 0,59861

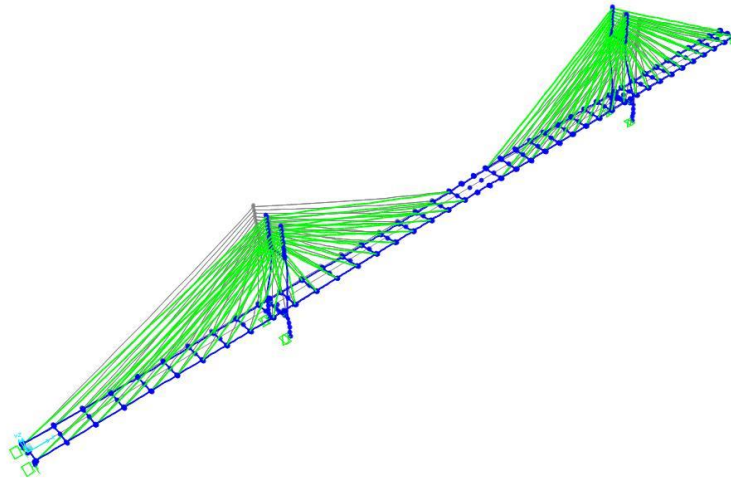


Σχήμα 4.69: 2^η ιδιομορφή και των δύο περιπτώσεων

Deformed Shape (MODAL) - Mode 3; T = 2.9654; f = 0.33722

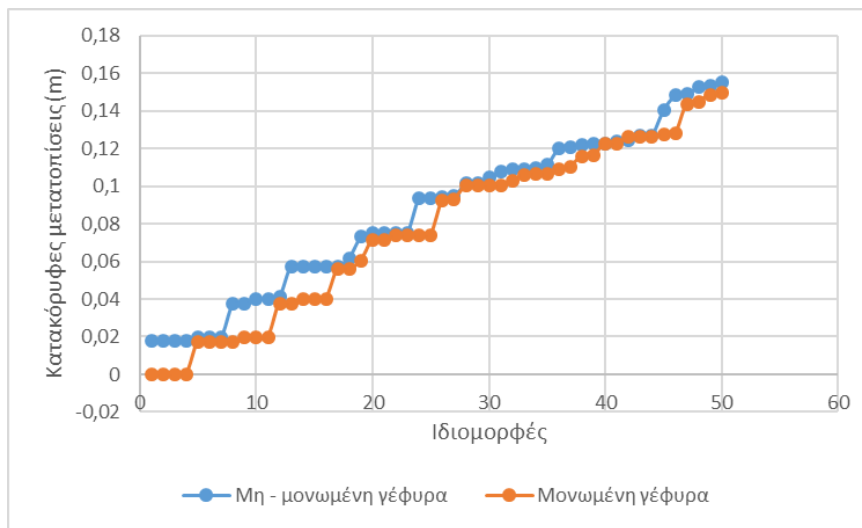


Deformed Shape (MODAL) - Mode 3; T = 1.37359; f = 0.72802

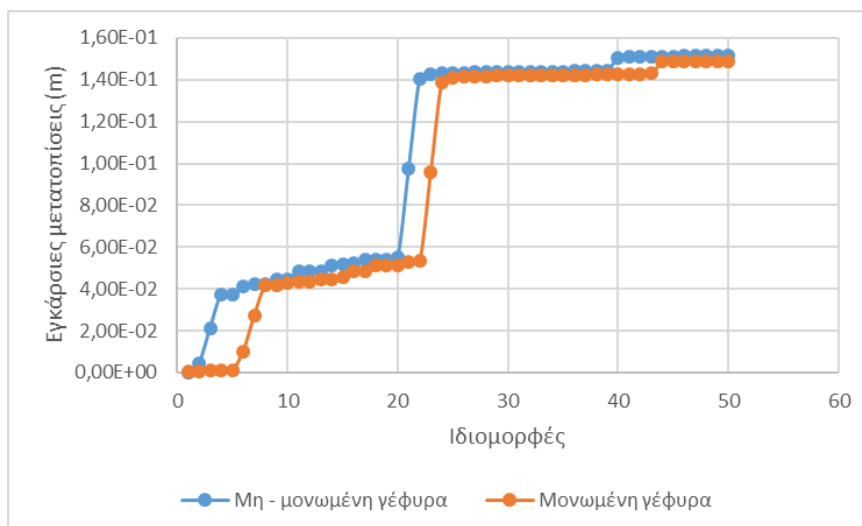


Σχήμα 4.70: 3^η ιδιομορφή και των δύο περιπτώσεων

Στην ενότητα αυτή γίνεται σύγκριση των ιδιομορφών σε κάθε περίπτωση με τις μετατοπίσεις δύο κόμβων αναφοράς. Ως κόμβοι αναφοράς ορίζονται το Κ.Μ του καταστρώματος και η κορυφή ενός πυλώνα. Σε αυτούς τους κόμβους εξετάζεται η κατακόρυφη και η εγκάρσια μετατόπιση των σημείων, αντίστοιχα. Έτσι προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα, όπου στον οριζόντιο άξονα βρίσκονται οι ιδιομορφές κάθε κατασκευής και στον κατακόρυφο η εκάστοτε μετατόπιση της ιδιομορφής του σημείου που εξετάζεται (Σχήματα 4.71 και 4.72).



Σχήμα 4.71: Διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων του Κ.Μ. του καταστρώματος και για τις δύο περιπτώσεις



Σχήμα 4.72: Διάγραμμα εγκάρσιων μετατοπίσεων της κορυφής του πυλώνα και για τις δύο περιπτώσεις

4.5.4 Συμπεράσματα

Από την δυναμική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε αυτήν την ενότητα προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα. Αρχικά, από τα Σχήματα 4.63 και 4.64 παρατηρείται ότι οι μέγιστες δυνάμεις που θα αναπτυχθούν από το σεισμό που εξετάζεται μειώνονται περίπου στο μισό. Πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλο περιθώριο για τα καλώδια να συμπεριφερθούν με τον τρόπο που έχει περιγραφεί. Δηλαδή, τα καλώδια ακόμα και όταν θα χρειαστεί να μειώσουν την έντασή τους δεν θα μειώσουν το μήκος τους περισσότερο από το μήκος της χορδής τους, αποτρέποντας τη δημιουργία μεγάλους βέλους και μικρών τάσεων.

Αντίθετα, στα Σχήματα 4.65 και 4.66 οι μετατοπίσεις του Κ.Μ του καταστρώματος φαίνονται να είναι μεγαλύτερες στη γέφυρα με τα εφέδρανα. Βέβαια, είναι φυσιολογικό αυτό από τη στιγμή που οι στηρίξεις αντικαταστάθηκαν με εφέδρανα με ενεργό δυσκαμψία κατά τις οριζόντιες διευθύνσεις επιτρέποντας μεγαλύτερες μετακινήσεις στο κατάστρωμα.

Στο Σχήμα 4.67 και πάλι η ροπή είναι μικρότερη επιβεβαιώνοντας την αρχική υπόθεση ότι τα εφέδρανα βελτιώνουν τη συμπεριφορά στο σεισμό. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση η διαφορά δεν είναι πολύ μεγάλη αλλά δεν είναι και αμελητέα.

Ως προς τις ιδιομορφές της κατασκευής στις δύο περιπτώσεις από τα Σχήματα 4.68, 4.69 και 4.70 συμπεραίνεται ότι υπάρχει μια διαφοροποίηση. Αυτή αιτιολογείται από την απελευθέρωση των οριζόντιων βαθμών ελευθερίας στις στηρίξεις, δημιουργώντας έτσι νέους τρόπους ταλάντωσης.

Πιο αναλυτικά, όμως, κάποιες κρίσιμες μετακινήσεις, όπως είναι αυτές που εξετάζονται στην προηγούμενη ενότητα, ενεργοποιούνται από διαφορετικές ιδιομορφές. Δηλαδή, στο Σχήμα 4.71 η 1^η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση εμφανίζεται στην 1^η ιδιομορφή για τη μη – μονωμένη γέφυρα, ενώ για τη γέφυρα με τα εφέδρανα εμφανίζεται στην 5^η. Το ίδιο και στο Σχήμα 4.72, η 1^η μέγιστη εγκάρσια μετατόπιση του πυλώνα εμφανίζεται στην 3^η ιδιομορφή για τη γέφυρα χωρίς εφέδρανα, ενώ για τη μονωμένη γέφυρα παρατηρείται στην 7^η ιδιομορφή.

Οι πρώτες ιδιομορφές έχουν μεγαλύτερο ποσοστό συμμετοχής. Αυτό σημαίνει ότι επιδρούν περισσότερο στην τελική τιμή του εντατικού μεγέθους που κάθε φορά

εξετάζεται. Όσο πιο μικρή ιδιοπερίοδο έχει η ιδιομορφή τόσο πιο μικρή είναι η επιρροή της στην κατασκευή. Έτσι, στις δύο κρίσιμες μετακινήσεις που εξετάστηκαν παρατηρήθηκε η ενεργοποίηση των μετακινήσεων αυτών σε ιδιομορφές με μικρές ιδιοπεριόδους που επηρεάζουν λιγότερο την μονωμένη γέφυρα και αναπτύσσουν έτσι μικρότερα εντατικά μεγέθη.

5ο Κεφάλαιο: Τελικά συμπεράσματα εργασίας

5.1 Συμπεράσματα εργασίας

Η εργασία μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη. Το κομμάτι της ανάλυσης του καλωδίου, τη στατική και τη δυναμική ανάλυση.

Ξεκινώντας από το καλώδιο, βρέθηκαν οι βέλτιστοι τρόποι τοποθέτησής του. Κριτήρια βελτιστοποίησης είναι το μήκος χορδής του να είναι περίπου ίσο με το αφόρτιστο μήκος του και το βέλος που δημιουργείται να είναι σχετικά μικρό. Έτσι, εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, αυτές των $T / T_u = 10\%$ ή $T / L = 20\text{kN/m}$ και $k / L = 0,5\%$.

Από τη διερεύνηση αυτών των περιπτώσεων και την εισαγωγή μιας ακόμη, που ικανοποιεί το κριτήριο του μηδενικού βέλους στο κατάστρωμα υπό τα μόνιμα φορτία, προέκυψε ότι η καλύτερη δυνατή λύση είναι αυτή όπου ο λόγος της δύναμης χορδής του καλωδίου προς τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή του είναι 10%. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε με τον έλεγχο κάποιων κριτηρίων που απαιτούν, η τάση του καλωδίου να μη μειωθεί περισσότερο από τη τάση που ασκείται στο καλώδιο αν έχει αφόρτιστο μήκος ίσο με το γεωμετρικό και το βέλος του να είναι μικρότερο από την ελάχιστη τιμή του 1,5%. Συνεπώς, ο εμπειρικός αυτός κανόνας επιβεβαιώθηκε.

Οι αναλύσεις Pushover, στη συνέχεια, που πραγματοποιήθηκαν με το ελαστικό φάσμα του EC8 και για τους τέσσερις πιθανούς σεισμικούς συνδυασμούς έδειξαν ότι το ιδανικό ποσοστό οπλισμού των πυλώνων είναι το 3%. Για τον κρίσιμο σεισμικό συνδυασμό η γέφυρα εισέρχεται στην πλαστική της περιοχή και εμφανίζει μικρό αριθμό πλαστικών αρθρώσεων. Αν ήταν στην ελαστική περιοχή θα προέκυπτε μια αντιοικονομική κατασκευή λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας της. Επίσης, η γέφυρα βρίσκεται κοντά στη στάθμη επιτελεστικότητας Προστασία Ζωής, όπως ορίζουν οι διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ.. Τέλος, οι δυνάμεις του καλωδίου στη δυσμενή περίπτωση ικανοποιούν τα κριτήρια που έχουν αναφερθεί προηγουμένως.

Με την εισαγωγή των χιαστί συνδέσμων, δεν παρατηρήθηκε καλύτερη συμπεριφορά της γέφυρας στο σεισμό παρόλο που κάνουν πιο δύσκαμπτο το κάτω μέρος του πυλώνα. Ίσα ίσα που κάποιες πλαστικές αρθρώσεις ξεπέρασαν τη στάθμη επιτελεστικότητας Οιονεί Κατάρρευση, με κίνδυνο της κατασκευής να αστοχήσει.

Ως προς τη δυναμική ανάλυση, ο σχεδιασμός των εφεδράνων βελτίωσε κατά πολύ τη σεισμική συμπεριφορά της γέφυρας ως προς τα εντατικά της μεγέθη, αλλά όχι ως προς τις μετακινήσεις. Εξαιτίας της αποδέσμευσης κάποιων βαθμών ελευθερίας στην περιοχή των στηρίξεων, οι μετακινήσεις αυξήθηκαν σε σχέση με τη μη μονωμένη γέφυρα. Αυτό, βέβαια, δεν επηρεάζει τη λειτουργία της κατασκευής, ούτε τη θέτει σε κίνδυνο.

Τέλος, από την ιδιομορφική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε συμπεραίνεται ότι η μόνωση μιας γέφυρας με εφέδρανα βοηθά τις κατασκευές σε κάποια παραμορφωσιακά μεγέθη να εμφανίζονται με μικρότερη ένταση καθώς παρατηρούνται σε μικρότερες ιδιοπεριόδους με μικρότερο συντελεστή συμμετοχής.

5.2 Περαιτέρω έρευνα

Μερικά πεδία που μπορεί να συνεχιστεί αυτή η διερεύνηση παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Αρχικά, μπορεί να γίνει έλεγχος των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας σε άλλες καλωδιωτές γέφυρες που έχουν παρόμοια μορφή με αυτήν που εξετάστηκε. Δηλαδή να είναι καλωδιωτή με δύο επίπεδα καλωδίων σε ημι – ακτινική διάταξη και συνεχές κατάστρωμα.

Σε διαφορετικές μορφές των πυλώνων, του καταστρώματος και των στηρίξεων της γέφυρας μπορεί να γίνει παραμετρική ανάλυση. Π.χ. να ληφθούν υπόψη πυλώνες σχήματος Α ή κατάστρωμα περισσότερων ανοιγμάτων.

Τέλος, ενδιαφέρων τομέας έρευνας είναι η περαιτέρω διερεύνηση της δυναμικής απόκρισης των καλωδιωτών γεφυρών ως προς τον άνεμο (δυναμική φόρτιση) και ο έλεγχος των ταλαντώσεων που δημιουργούνται στα καλώδια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Chen, W. - F. & Duan, L., 2014. *Bridge Engineering Handbook: Superstructure Design*. 2nd ed. London: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Chopra, A. K., 2010. *Δυναμική των Κατασκευών: Θεωρία και Εφαρμογές στη Σεισμική Μηχανική*. 2η ελληνική επιμ. Αθήνα: Μόσχος Γκιούρδας.
- EN 1990, 2002. *Eurocode: Basis of Structural Design*. Brussels: CEN.
- EN 1991 - 2, 2003. *Eurocode 1: Actions on Structures - Part 2: Traffic Loads on Bridges*. Brussels: CEN.
- EN 1992 - 1 - 1, 2004. *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules, and rules for buildings*. Brussels: CEN.
- EN 1993 - 2, 2006. *Eurocode 3 - Design of Steel Structures - Part 2: Steel Bridges*. Brussels: CEN.
- EN 1994 - 2, 2005. *Eurocode 4 - Design of Composite Steel and Concrete Structures - Part 2: General Rules and Rules for Bridges*. Brussels: CEN.
- EN 1998 - 1, 2004. *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels : CEN.
- EN 1998 - 2, 2005. *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 2: Bridges*. Brussels: CEN.
- Fleming, J. F., Zenk, J. D. & Wethyavivorn, B., 1988. Seismic Analysis of Cable - Stayed Bridges. pp. 207-214.
- Gimsing, N. J. & Georgakis, C. T., 2012. *Cable Supported Bridges: Concept and Design*. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Hassan, M. M., Nassef, A. O. & El Damatty, A. A., 2012. Determination of Optimum Post - Tensioning Cables Forces of Cable - Stayed Bridges. *Engineering Structures*, 13 July, pp. 248-259.
- Perino , A. S. & Faraggiana, G., 2005. *Γέφυρες*. Αθήνα: Καρακώτσογλου.
- Svensson, H., 2012. *Cable - Stayed Bridges 40 Years of Experience Worldwide*. Berlin: Ernst & Sohn A Wiley Company.
- Taly, N., 1998. *Design of Modern Highway Bridges*. New York: The McGraw - Hill Companies, Inc..

Βάγιας , Ι. & Ηλιόπουλος, Ά., 2006. *Σύμμικτες Γέφυρες - Οδηγός Σχεδιασμού με Βάση τα DIN - Fachberichte και τους Ευρωκώδικες*. Αθήνα: Κλειδάριθμος.

EN 1990, 2002. *Eurocode - Basis of Structural Design*. Brussels: CEN.

Κατσιαδέλης, Ι. Θ., 2012. *Δυναμική Ανάλυση των Κατασκευών: Θεωρία και Εφαρμογές*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.

Κουμούσης, Β., 2008. *Σχοινοειδής Φορέας: Στοιχεία Γραφοστατικής*. Αθήνα, ΕΜΠ.

Μιχάλτσου, Γ. Θ., 2005. *Προβλήματα Δυναμικής των Σιδηρών Γεφυρών*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετών.

Ψυχάρης , Γ. Ν., 2016. *Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας: Τεύχος 1*. Αθήνα, ΕΜΠ.

Ψυχάρης, Γ. Ν., 2015. *Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας: Τεύχος 2*. Αθήνα, ΕΜΠ.

Ψυχάρης, Γ. Ν., 2016. *Αντισεισμικός Σχεδιασμός Γεφυρών*. Αθήνα, ΕΜΠ.