



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΚΑΛΩΔΙΩΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ**

**ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ**

**Δρ. ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΠΑΠΑΛΟΥ**

**ΠΑΤΡΑ 2018**

## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα .....	0
Εισαγωγή .....	5
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> – Καλωδιωτές κατασκευές .....	8
1.1 Ορισμός.....	8
1.2 Συμπεριφορά καλωδίων.....	10
1.3 Συμπεριφορά καλωδιωτών κατασκευών .....	12
1.4 Φάσεις ζωής καλωδίων.....	17
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> – Στέγες από δίκτυα καλωδίων.....	21
2.1 Εισαγωγή .....	21
2.1.1 Απλά αναρτημένες στέγες.....	22
2.1.2 Στέγες με προεντεταμένα καλώδια και δοκούς .....	22
2.1.3 Στέγες από δίκτυο προεντεταμένων καλωδίων.....	23
2.2 Φορτία στις καλωδιωτές στέγες .....	24
2.3 Βασικά στατικά συστήματα καλωδιωτών στεγών .....	26
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> – Καλωδιωτές Γέφυρες.....	28
3.1 Εισαγωγή .....	28
3.2 Ιστορική αναδρομή καλωδιωτών γεφυρών .....	29
3.3 Πυλώνες.....	31
3.4 Διάταξη καλωδίων.....	34
3.4.1 Διάταξη καλωδίων κατά την διαμήκη έννοια.....	34
3.4.2 Διάταξη καλωδίων κατά την εγκάρσια έννοια .....	37
3.4.3 Απόσταση καλωδίων μεταξύ τους.....	37
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> – Δομικά Στοιχεία καλωδιωτών γεφυρών .....	39
4.1 Καλώδια.....	39
4.1.1 Καλώδια παράλληλων ράβδων .....	39
4.1.2 Καλώδια παράλληλων συρμάτων .....	40

4.1.3 Καλώδια με τένοντες .....	40
4.1.4 Καλώδια τύπου locked – coil (κλώνοι κλειστής περιέλιξης) .....	41
4.2 Προστασία των καλωδίων από την διάβρωση .....	41
4.3 Μη γραμμική συμπεριφορά καλωδιωτών γεφυρών .....	42
4.4 Αγκυρώσεις .....	45
4.5 Καταστρώματα .....	47
4.5.1 Κατάστρωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα .....	48
4.5.2 Μεταλλικό κατάστρωμα .....	48
4.5.3 Σύμμικτα καταστρώματα .....	49
4.6 Σύνδεση πυλώνα – καταστρώματος .....	51
Κεφάλαιο 5ο – Φορτία στις καλωδιωτές γέφυρες .....	53
5.1 Εισαγωγή .....	53
5.2 Μόνιμα φορτία .....	54
5.3 Μεταβλητά φορτία .....	55
5.3.1 Δυνάμεις Ανέμου .....	55
5.4 Σεισμικές δράσεις .....	56
5.5 Θερμοκρασιακές μεταβολές .....	58
5.6 Είδη Παραμόρφωσης .....	60
Κεφάλαιο 6 <sup>ο</sup> – Συμπεράσματα .....	62
Βιβλιογραφία .....	64
Βιβλιογραφία από Ελλάδα .....	64
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία .....	65
Εικονογραφία .....	66

## Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Το στάδιο Raleigh στη North Carolina των Η.Π.Α.....	7
Εικόνα 2: Το στάδιο Ειρήνης και Φιλίας στο Φάληρο.....	7
Εικόνα 3: Η γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου στην Πάτρα.....	8
Εικόνα 4: Επίπεδο καλωδιωτά δικτυώματα.....	9
Εικόνα 5: Δίκτυο καλωδίων με τρισδιάστατη λειτουργία.....	10
Εικόνα 6: Καλωδιωτή κατασκευή.....	11
Εικόνα 7: Σύστημα 2 καλωδίων.....	12
Εικόνα 8: Προσαρμογή καλωδίων στα εξωτερικά φορτία.....	13
Εικόνα 9: Μη γραμμική συμπεριφορά καλωδιωτών κατασκευών.....	13
Εικόνα 10: Καταστατικός νόμος του υλικού του καλωδίου.....	14
Εικόνα 11: Λόγω της εξωτερικής φόρτισης αλλάζει η δυσκαμψία του καλωδίου.....	14
Εικόνα 12: Καλωδιωτή γέφυρα.....	15
Εικόνα 13: Πεζογέφυρα στην Α.Κατεχάκη.....	16
Εικόνα 14: Ολυμπιακό Στάδιο Μονάχου.....	16
Εικόνα 15: Φάση αναπτύγματος καλωδίου.....	17
Εικόνα 16: Φάση προέντασης του καλωδίου.....	18
Εικόνα 17: Φάση λειτουργίας καλωδίου.....	18
Εικόνα 18: Κλώνοι και Συρματόσχοινα.....	20
Εικόνα 19: Το στάδιο Raleigh που αποτελεί την πρώτη κατασκευή καλωδιωτής στέγης.....	22
Εικόνα 20: Απλά αναρτημένες στέγες.....	22
Εικόνα 21: Στέγες από δίκτυο προεντεταμένων καλωδίων.....	24
Εικόνα 22: Μονόπλευρο σύστημα ανάρτησης καλωδίων.....	26
Εικόνα 23: Αμφίπλευρο σύστημα ανάρτησης με καλώδια αντίστηριξης.....	27
Εικόνα 24: Σύστημα δύσκαμπτου περιμετρικού δακτυλίου με καλώδια διπλής καμπυλότητας.....	27
Εικόνα 25: Βασικά στατικά συστήματα αναρτημένων γεφυρών.....	30
Εικόνα 26: Η γέφυρα Russki bridge.....	31
Εικόνα 27: Μορφή των πυλώνων.....	33
Εικόνα 28: Πυλώνας γέφυρας Ρίου-Αντιρρίου.....	34
Εικόνα 29: Ακτινωτή διάταξη.....	35

Εικόνα 30: Παράλληλη διάταξη .....	36
Εικόνα 31: Ημιακτινωτή διάταξη .....	36
Εικόνα 32: Ασύμμετρη διάταξη.....	37
Εικόνα 33: Τύποι καλωδίων .....	40
Εικόνα 34: Μη γραμμική συμπεριφορά καλωδιωτών κατασκευών .....	45
Εικόνα 35: Αγκυρώσεις καλωδίων επι του καταστρώματος.....	46
Εικόνα 36: Αγκυρώσεις στην κορυφή του πυλώνα.....	46
Εικόνα 37: Διατομή καταστρώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα.....	48
Εικόνα 38: Μεταλλικό κατάστρωμα καλωδιωτής γέφυρας.....	50
Εικόνα 39: Καταστρώματα με δύο κύριες δοκούς τύπου I.....	52
Εικόνα 40: Σύνδεση καταστρώματος και πυλώνων με αποσβεστήρες .....	52
Εικόνα 41: Συντελεστής δύναμης $c_f z$ για γέφυρες με εγκάρσια κλίση και κλίση ανεμοπίεσης .....	56
Εικόνα 42: Ελαστικό φάσμα.....	58
Εικόνα 43: Συνιστώσες θερμοκρασιακής κατανομής σε διατομή (a) ομοιόμορφη (b) γραμμική περί τον z-z (c) γραμμική περί τον y-y (d) μη γραμμική.....	61

## Εισαγωγή

Καλωδιωτές κατασκευές θεωρούνται οι κατασκευές εκείνες στις οποίες τα μέλη είναι ραβδωτά και καταπονούνται σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

Οι καλωδιωτές κατασκευές μπορούν να διαχωριστούν σε 2 ειδών κατασκευών, στις καλωδιωτές γέφυρες και στις καλωδιωτές στέγες.

Οι καλωδιωτές στέγες ξεκίνησαν να εφαρμόζονται από την δεκαετία του 1960 και μετά ανοίγοντας καινούριους ορίζοντες στην μηχανική, την αρχιτεκτονική αλλά και την αισθητική των κατασκευών. Η ικανότητά των καλωδίων να καλύπτουν πολύ μεγάλα ανοίγματα χωρίς ενδιάμεσες στηρίξεις και να παραλαμβάνουν φορτία πολύ μεγαλύτερα από το ίδιο βάρος, τις καθιστά ιδιαίτερα οικονομικές και πολλές φορές αποτελούν τη μοναδική λύση για τη στέγαση μεγάλων χώρων. Επιπλέον, με τις ασυνήθιστες μορφές τους, δίνουν πολύ όμορφα αισθητικά αποτελέσματα.

Το δρόμο για την ανάπτυξη της μελέτης, της ανάλυσης και της κατασκευής των μοντέρνων εφελκυσόμενων στεγών, άνοιξε η πρώτη στέγη του είδους αυτού, που κατασκευάστηκε στο στάδιο Raleigh στη North Carolina των Η.Π.Α. και ολοκληρώθηκε το 1953 (Εικόνα 1).

Στην Ελλάδα το καλύτερο παράδειγμα καλωδιωτής στέγης αποτελεί η ανηρτημένη στέγη του Σταδίου Ειρήνης και Φιλίας στο Φάληρο, που κατασκευάστηκε το 1983 (Εικόνα 2).

Από την άλλη μεριά, οι καλωδιωτές γέφυρες αποτελούν μια ευρέως χρησιμοποιούμενη κατηγορία γεφυρών στις οποίες η στήριξη του καταστρώματος και των κύριων δοκών πραγματοποιείται μέσω ενός συστήματος καλωδίων. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η ικανότητα γεφύρωσης μεγάλων ανοιγμάτων χωρίς τη χρήση ενδιάμεσων στηρίξεων. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση τους κρίνεται ιδιαίτερα ανταγωνιστική, σε σύγκριση με άλλα στατικά συστήματα γεφυρών, για ανοίγματα εύρους από 200 m έως 2000 m (και πλέον) που αποτελούν το 90 % των ανοιγμάτων που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας.

Στην Ελλάδα το καλύτερο παράδειγμα καλωδιωτής γέφυρας είναι η πρόσφατα κατασκευασμένη (2004) γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου (Εικόνα 3).

Στην παρούσα εργασία, εξετάζονται οι καλωδιωτές κατασκευές και τα χαρακτηριστικά τους ενώ γίνεται και μια αναλυτική αναφορά στα καλώδια, πάνω στα οποία στηρίζονται οι καλωδιωτές κατασκευές.

Η δομή της παρούσης εργασίας είναι η ακόλουθη:

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η γενικότερη συμπεριφορά των καλωδιωτών κατασκευών και των καλωδίων και παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα καλωδιωτών κατασκευών και των 2 κατηγοριών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι καλωδιωτές στέγες και αναλύονται τα φορτία που παραλαμβάνουν τα καλώδια στις καλωδιωτές στέγες. Επιπροσθέτως παρουσιάζονται τα είδη των αναρτήσεων των καλωδιωτών στεγών

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι καλωδιωτές γέφυρες κάνοντας μια μικρή ιστορική αναδρομή σε αυτές. Στην συνέχεια γίνεται μια εισαγωγή στα είδη των αναρτήσεων των καλωδιωτών γεφυρών και παρουσιάζονται και οι πυλώνες των καλωδιωτών γεφυρών που είναι σημαντικό στοιχείο αυτών καθώς από τους πυλώνες εξαρτάται το είδος της ανάρτησης των γεφυρών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δομικά στοιχεία των καλωδιωτών γεφυρών και εξετάζεται ο ρόλος των καλωδίων στις καλωδιωτές γέφυρες. Παράλληλα παρουσιάζονται τα είδη σύνδεσης καλωδίων και πυλώνων ενώ γίνεται αναφορά και στα καταστρώματα των καλωδιωτών γεφυρών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα φορτία που παραλαμβάνουν οι καλωδιωτές γέφυρες, με την διάκριση αυτών σε σταθερά και μεταβλητά φορτία. Επιπροσθέτως παρουσιάζονται και τα σεισμικά φορτία που παραλαμβάνουν οι καλωδιωτές γέφυρες και γίνεται αναφορά στα είδη παραμόρφωσης που υπόκεινται οι καλωδιωτές γέφυρες. Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα μας από την εξέταση των καλωδιωτών κατασκευών και των χαρακτηριστικών τους.



**Εικόνα 1: Το στάδιο Raleigh στη North Carolina των Η.Π.Α.**



**Εικόνα 2: Το στάδιο Ειρήνης και Φιλίας στο Φάλιρο**





**Εικόνα 3: Η γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου στην Πάτρα**

## **Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> – Καλωδιωτές κατασκευές**

### **1.1 Ορισμός**

Καλωδιωτές κατασκευές είναι εκείνες, στις οποίες ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς φορτίων στη θεμελίωση ή το σύστημα στήριξης/ανάρτησης είναι μέσω εφελκυστικών τάσεων, χωρίς να επιτρέπεται θλίψη ή κάμψη. Τα χαρακτηριστικά τους οφείλονται στη γεωμετρία των διατομών τους και στη μέθοδο παραγωγής τους, που τους δίνουν

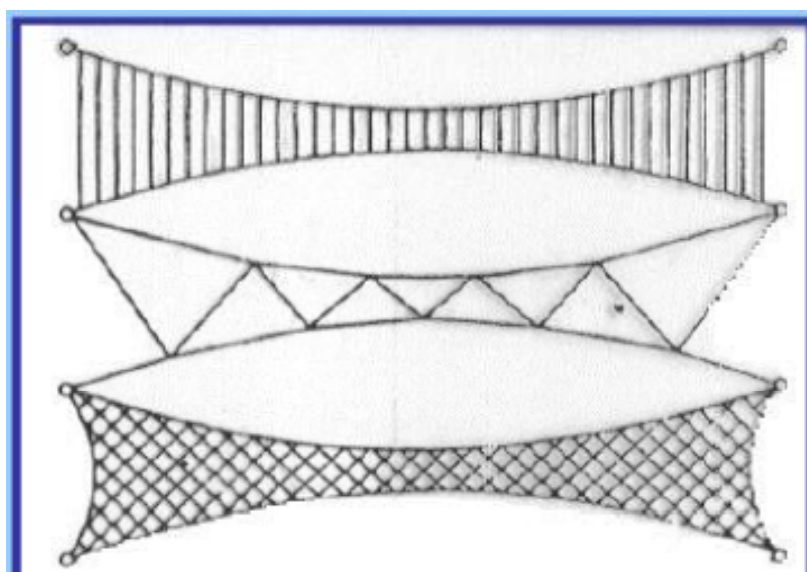
σημαντική εφελκυστική δυσκαμψία, αλλά πολύ μικρή διατμητική και καμπτική δυσκαμψία, καθώς και πολύ μικρή αντίσταση σε λυγισμό. (Γαντές,2011)

Οι καλωδιωτές κατασκευές είναι εκείνες στις οποίες τα μέλη είναι ραβδωτά και καταπονούνται σε μονοαξονικό εφελκυσμό και μπορούν να διακριθούν σε 3 κατηγορίες:

- Μεμονωμένα καλώδια
- Επίπεδα καλωδιωτά δικτύωματα
- Δίκτυα καλωδίων με τρισδιάστατη λειτουργία

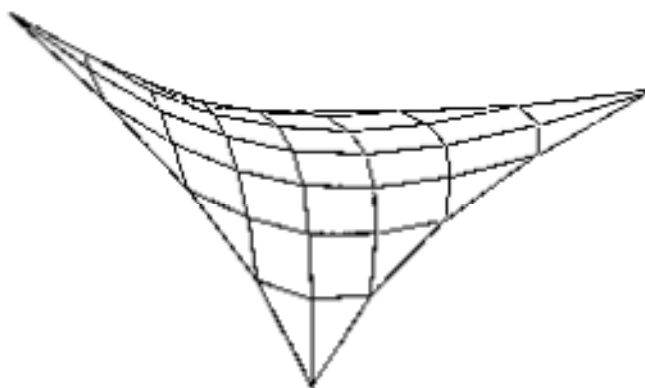
Μεμονωμένα καλώδια είναι οι κατασκευές, όπου απλά καλώδια υποβάλλονται σε φορτία, κυρίως σε ένα επίπεδο. Παραδείγματα είναι τα καλώδια επί των ιστών, καλωδιωτών ή κρεμαστών γεφυρών.

Τα επίπεδα καλωδιωτά δικτύωματα αποτελούνται από προεντεταμένα απλά καλώδια, συνδεδεμένα μεταξύ τους σε ένα επίπεδο, και φορτιζόμενα στο ίδιο αυτό επίπεδο. Παραδείγματα είναι οι κρεμαστές γέφυρες ή δικτύωματα υποστήριξης καλωδιωτών στεγών.



Εικόνα 4: Επίπεδο καλωδιωτά δικτύωματα

Στα δίκτυα καλωδίων με τρισδιάστατη λειτουργία, προεντεταμένα απλά καλώδια σχηματίζουν συνδεόμενα μεταξύ τους ένα χωρικό φορέα που δέχεται φορτία σε όλες τις διευθύνσεις. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στις στέγες. (Γαντές,2011)

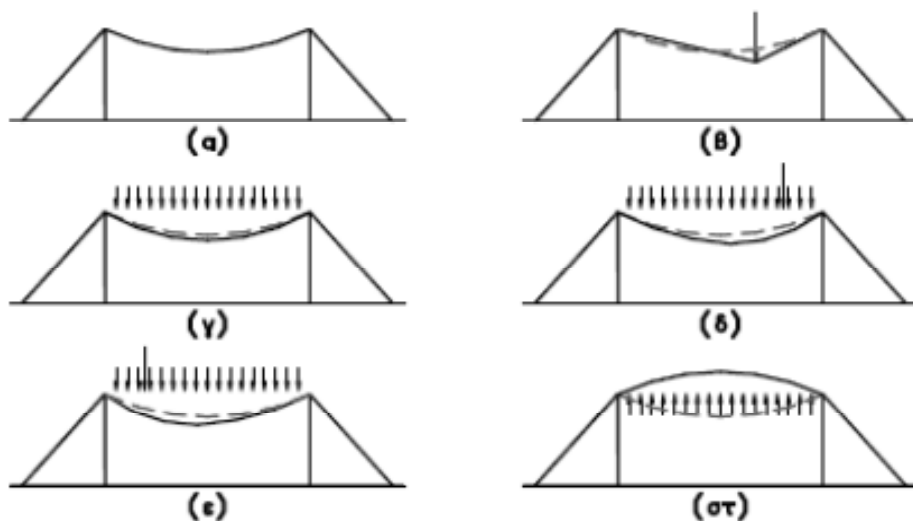


Εικόνα 5: Δίκτυο καλωδίων με τρισδιάστατη λειτουργία

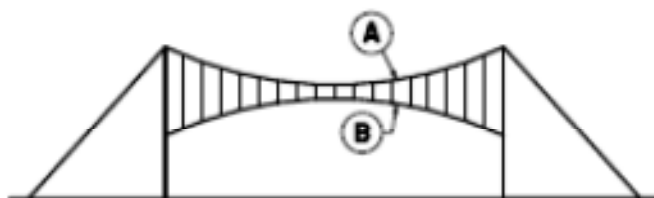
## 1.2 Συμπεριφορά καλωδίων

Ο πιο απλός τρόπος για να κατασκευάσουμε μία καλωδιωτή κατασκευή είναι να κρεμάσουμε ένα καλώδιο από δύο σημεία (Εικόνα 6α). Το σχήμα του καλωδίου δεν διατηρείται σταθερό, αλλά αλλάζει ανάλογα με το φορτίο που ασκείται. Για παράδειγμα αν ασκείται ένα συγκεντρωμένο φορτίο τότε το καλώδιο παίρνει τριγωνική μορφή (Εικ.6β), αν ασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο τότε παίρνει σχήμα παραβολικό (Εικ.6γ), για συνδυασμό των δύο προηγούμενων φορτίσεων το καλώδιο παίρνει τη μορφή των Εικ.6δ και Εικ.6ε, ενώ τέλος για φορτία αντίθετα από την καμπυλότητά του χάνει εντελώς την ισορροπία του και το σχήμα του παραμορφώνεται προς την αντίθετη καμπυλότητα (Εικ.6 στ).

Για ν' αποφευχθεί η απότομη αυτή αλλαγή του σχήματος του καλωδίου μπορεί να τοποθετηθεί άλλο ένα καλώδιο με αντίθετη καμπυλότητα όπως φαίνεται στην εικόνα 7 και τα δύο αυτά κύρια καλώδια να συνδέονται μεταξύ τους με άλλα δευτερεύοντα κατακόρυφα καλώδια. (Βασιλοπούλου,2001)



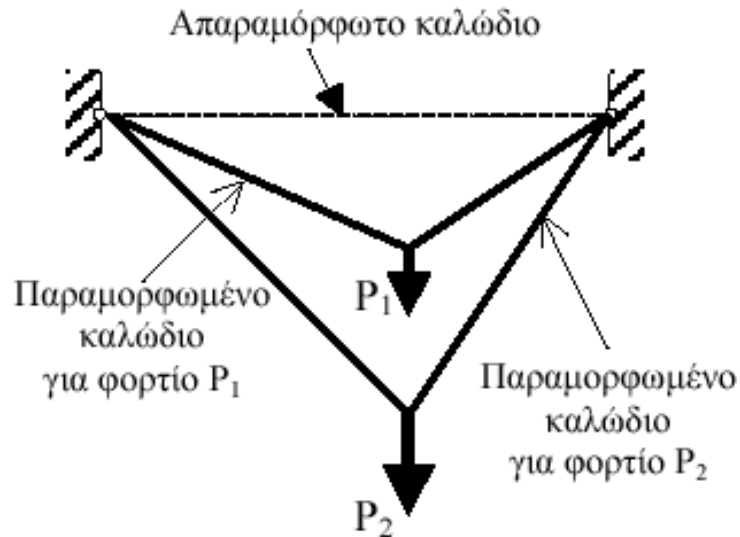
Εικόνα 6: Καλωδιωτή κατασκευή



Εικόνα 7: Σύστημα 2 καλωδίων

Το σύστημα της εικόνας 7 προεντείνεται είτε με τα κατακόρυφα καλώδια, είτε με το A και το B. Έτσι παραλαμβάνουν και τα δύο κύρια καλώδια τις κατακόρυφες φορτίσεις, είτε αυτές είναι προς τα πάνω, οπότε μειώνεται η τάση στο A και αυξάνεται η τάση στο B καλώδιο, είτε προς τα κάτω οπότε συμβαίνει το αντίθετο. (Bucholdt,1999)

Τα καλώδια έχουν επίσης την ιδιότητα να προσαρμόζονται σε αλλαγές των εξωτερικών φορτίων αλλάζοντας τη γεωμετρία τους, παρά αυξάνοντας τις αναπτυσσόμενες τάσεις όπως σημειώνει και ο Γαντές (2011).

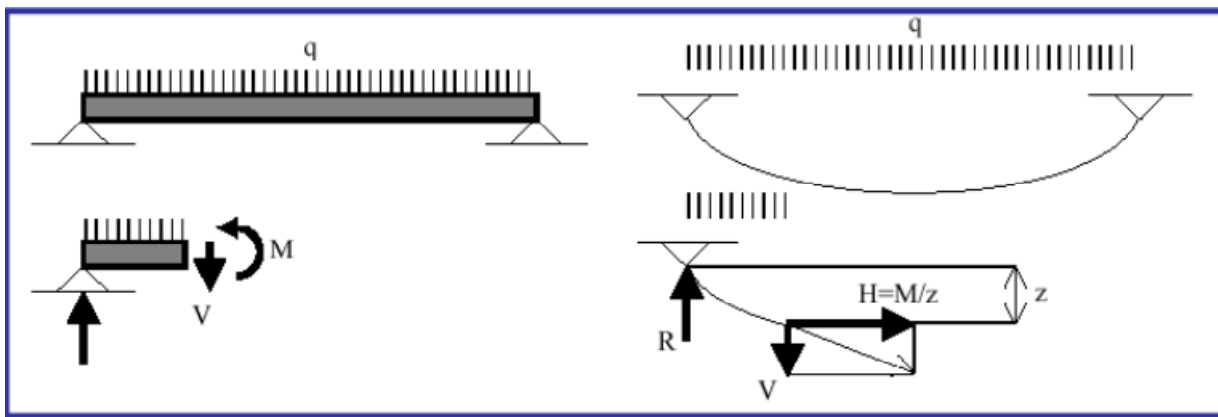


Εικόνα 8: Προσαρμογή καλωδίων στα εξωτερικά φορτία

### 1.3 Συμπεριφορά καλωδιωτών κατασκευών

Οι καλωδιωτές κατασκευές έχουν έρθει στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος του κατασκευαστικού τομέα, λόγω των ασυνήθιστων σχημάτων που μπορούν να παραχθούν χρησιμοποιώντας τες, καθώς επίσης και για την οικονομία του υλικού που μπορεί να επιτευχθεί. Αντίθετα από τις περισσότερες κοινές κατασκευές από σκυρόδεμα ή χάλυβα που παραλαμβάνουν τα κατακόρυφα φορτία με διατμητικές και καμπτικές τάσεις, στις καλωδιωτές κατασκευές αναπτύσσονται μόνο εφελκυστικές δυνάμεις και ταυτόχρονα η παραμόρφωσή τους είναι έντονη, γι' αυτό και η συμπεριφορά τους είναι έντονα μη γραμμική. Έτσι τα καλώδια δεν μπορούν να υπολογιστούν με βάση το αρχικό τους σχήμα. Αντιθέτως η αλλαγή της γεωμετρίας τους θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη. Αυτό σημαίνει ότι οι εσωτερικές δυνάμεις που αναπτύσσονται, δεν μεταβάλλονται γραμμικά με το εξωτερικό φορτίο, αφού η δυσκαμψία του καλωδίου αλλάζει σύμφωνα με το βέλος του. (Βασιλοπούλου, 2001)

Αυτό το εξηγεί παραστατικά ο Γαντές (2011) με το ακόλουθο σχήμα.



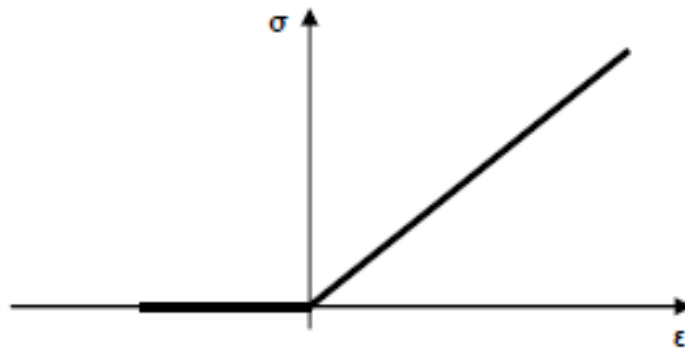
Εικόνα 9: Μη γραμμική συμπεριφορά καλωδιωτών κατασκευών

Σύμφωνα λοιπόν με την εικόνα 6, η δοκός αναπτύσσει διατμητικές και καμπτικές εντάσεις, μέσω των οποίων μεταφέρει τα εγκάρσια φορτία στις στηρίξεις. Το καλώδιο δεν μπορεί, λόγω των χαρακτηριστικών της διατομής του, να αναπτύξει διάτμηση και κάμψη. Ο τρόπος, με τον οποίο μπορεί να εξισορροπήσει τη ροπή που αναπτύσσεται από τα εξωτερικά φορτία, είναι να παραμορφωθεί τόσο, ώστε το εγκάρσιο βέλος, πολλαπλασιαζόμενο με την οριζόντια συνιστώσα της εφελκυστικής έντασης, να δίνει μία ίση και αντίθετη ροπή, ενώ η κατακόρυφη συνιστώσα εξισορροπεί την τέμνουσα.

Συνέπεια των μεγάλων μετατοπίσεων που υφίστανται οι καλωδιωτές κατασκευές όταν φορτίζονται, είναι να διαφέρει σημαντικά η παραμορφωμένη από την απαραμόρφωτη γεωμετρία του φορέα. Με δεδομένο ότι ο φορέας ισορροπεί υπό την επίδραση φορτίων στην παραμορφωμένη γεωμετρία, προκύπτει η ανάγκη να γράφονται οι εξισώσεις καλωδιωτών φορέων στην παραμορφωμένη και όχι στην απαραμόρφωτη γεωμετρία. Η παραμορφωμένη γεωμετρία όμως δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων. (Buchholdt ,1999)

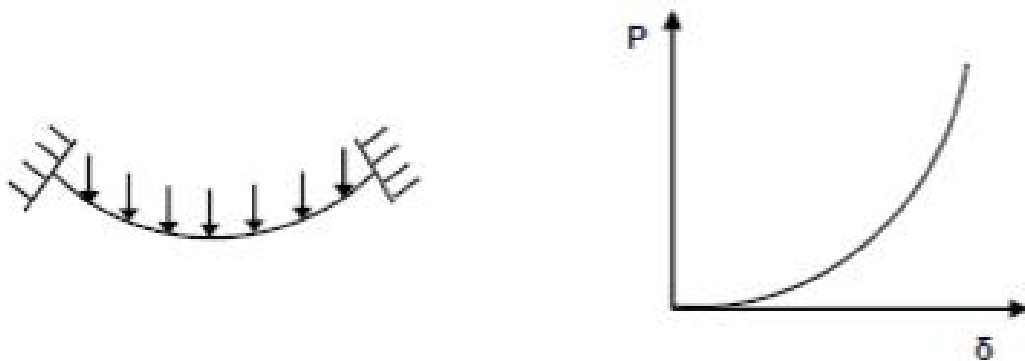
Η μη γραμμικότητα αυτή σύμφωνα με τον Γαντέ(2011) οφείλεται:

Στην μη γραμμικότητα του υλικού: τα καλώδια δεν μπορούν να παραλάβουν θλίψη, γιατί τότε θα χαλαρώσουν και η δυσκαμψία τους θα μηδενιστεί. Η περίπτωση αυτή θα μπορούσε να ληφθεί υπ' όψη εισάγοντας στον καταστατικό νόμο του υλικού πολύ μικρές τιμές του  $EA$  για τα μέλη που θα έπαιρναν θλίψη. Έτσι το διάγραμμα του υλικού θα δινόταν από το παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 10: Καταστατικός νόμος του υλικού του καλωδίου

Στην γεωμετρική μη γραμμικότητα: Όπου η αυξανόμενη φόρτιση προκαλεί μεγάλες παραμορφώσεις, με αποτέλεσμα η δυσκαμψία του καλωδίου να αυξάνεται συνεχώς, . Συνήθως με την αρχική προένταση επιτυγχάνεται μεγάλη δυσκαμψία. Στη συνέχεια με την επιβολή των εξωτερικών φορτίων η συμπεριφορά μπορεί να είναι μη γραμμική αν τα φορτία αυτά είναι σημαντικά σε σχέση με την προένταση, ή σχεδόν γραμμική αν τα φορτία είναι πολύ μικρότερα από την προένταση. Στο ακόλουθο διάγραμμα της εικόνας 8 φαίνεται η μη γραμμική συμπεριφορά των καλωδίων.



Εικόνα 11: Λόγω της εξωτερικής φόρτισης αλλάζει η δυσκαμψία του καλωδίου

Η κατάσταση ισορροπίας που προκύπτει είναι καμπύλη και όχι ευθεία γραμμή, όπως στους φορείς που χαρακτηρίζονται από μικρές μετατοπίσεις

Επομένως δεν ισχύει η αρχή της επαλληλίας και δεν μπορούν να εφαρμοστούν οι κλασσικές μέθοδοι στατικής ανάλυσης. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως

γεωμετρική μη γραμμικότητα και είναι κύριο χαρακτηριστικό της στατικής συμπεριφοράς των εφελκόμενων κατασκευών.

Μερικά από τα πιο γνωστά παραδείγματα των καλωδιωτών κατασκευών είναι τα ακόλουθα:

- Καλωδιωτές γέφυρες
- Καλωδιωτές πεζογέφυρες
- Καλωδιωτές γέφυρες



**Εικόνα 12: Καλωδιωτή γέφυρα**





**Εικόνα 13: Πεζογέφυρα στην Α.Κατεχάκη**



**Εικόνα 14: Ολυμπιακό Στάδιο Μονάχου**

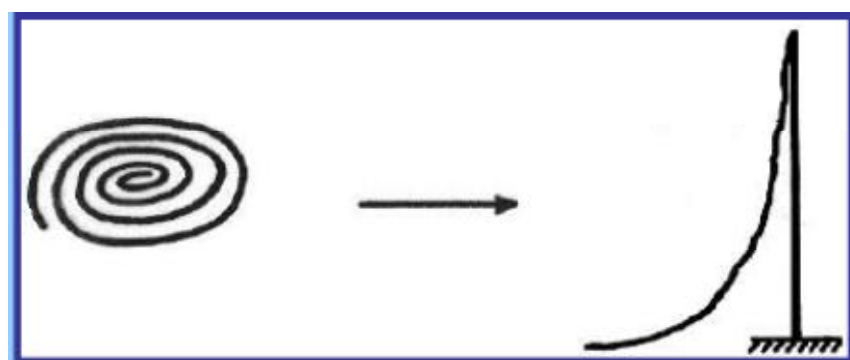
## 1.4 Φάσεις ζωής καλωδίων

Τα καλώδια είναι λοιπόν το κύριο κατασκευαστικό στοιχείο των καλωδιωτών κατασκευών. Οι φάσεις ζωής των καλωδίων διακρίνονται σε 3 σύμφωνα και με όσα αναφέρει και ο Chakar (2001):

- Φάση αναπτύγματος ή ξεδιπλώματος
- Φάση προέντασης
- Φάση λειτουργίας

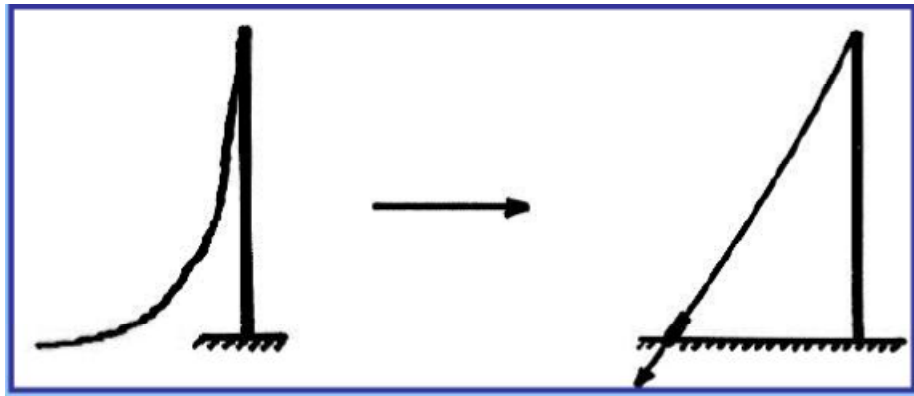
Στην φάση του αναπτύγματος, το καλώδιο ξεδιπλώνεται από μία κατάσταση αποθήκευσης και μεταφοράς, όπου καταλαμβάνει μικρό όγκο, μέσω άσκησης εξωτερικών δυνάμεων που εξισορροπούνται μόνον από το ίδιο βάρος.

Πρόκειται για δυναμική διαδικασία κατά την οποία η κατασκευή είναι ελεύθερη τάσεων και η κινηματική συμπεριφορά της καθορίζεται από τους περιορισμούς που εισάγει ο τρόπος σύνδεσης των διαφόρων τμημάτων. Η συμπεριφορά σε αυτή τη φάση είναι έντονα μη γραμμική και δεν υπάρχει μοναδική λύση στο πρόβλημα προσδιορισμού της γεωμετρίας σε κάθε χρονική στιγμή.



Εικόνα 15: Φάση αναπτύγματος καλωδίου

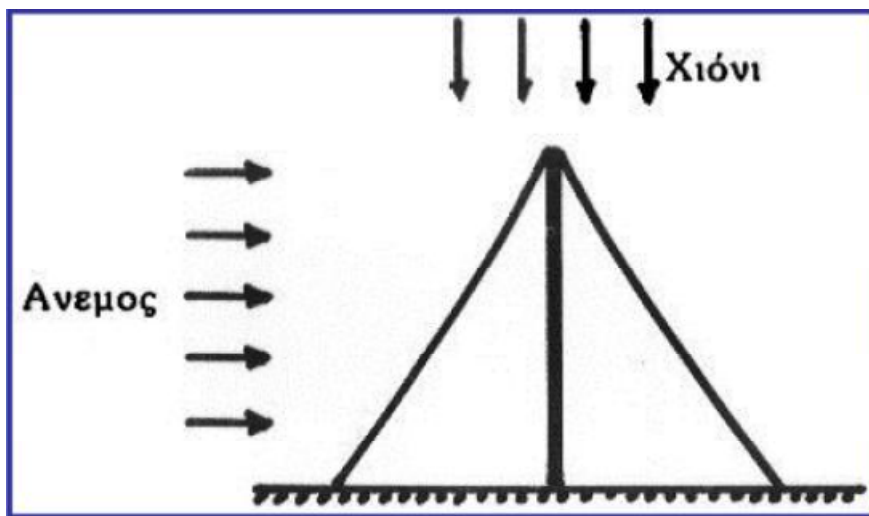
Στην φάση της προέντασης του καλωδίου, η κατασκευή υποβάλλεται σε εξωτερικές δυνάμεις προέντασης που την μετακινούν σε μία νέα γεωμετρία, εξαρτώμενη από την αρχική γεωμετρία και το μέγεθος των δυνάμεων προέντασης, με στόχο να της προσδώσουν αυξημένη δυσκαμψία.



Εικόνα 16: Φάση προέντασης του καλωδίου

Κατά τη φάση αυτή οι μετατοπίσεις είναι μεγάλες, επομένως το πρόβλημα είναι γεωμετρικά μη γραμμικό, είναι όμως δυνατή η εύρεση μοναδικής λύσης για τις μετακινήσεις και τις τάσεις που αναπτύσσονται.

Στην φάση της λειτουργίας του καλωδίου η προεντεταμένη πλέον κατασκευή παραλαμβάνει φορτία λειτουργίας, είτε στατικά (π.χ. ίδια βάρη επικαλύψεων, χιόνι ή πάγο), είτε δυναμικά (π.χ. άνεμο ή θαλάσσιους κυματισμούς).



Εικόνα 17: Φάση λειτουργίας καλωδίου

Η συμπεριφορά σε αυτή τη φάση μπορεί να είναι είτε γραμμική είτε μη γραμμική, ανάλογα με το πόσο μεγάλα είναι τα φορτία λειτουργίας σε σύγκριση με τις δυνάμεις προέντασης. (Γαντές,2011)

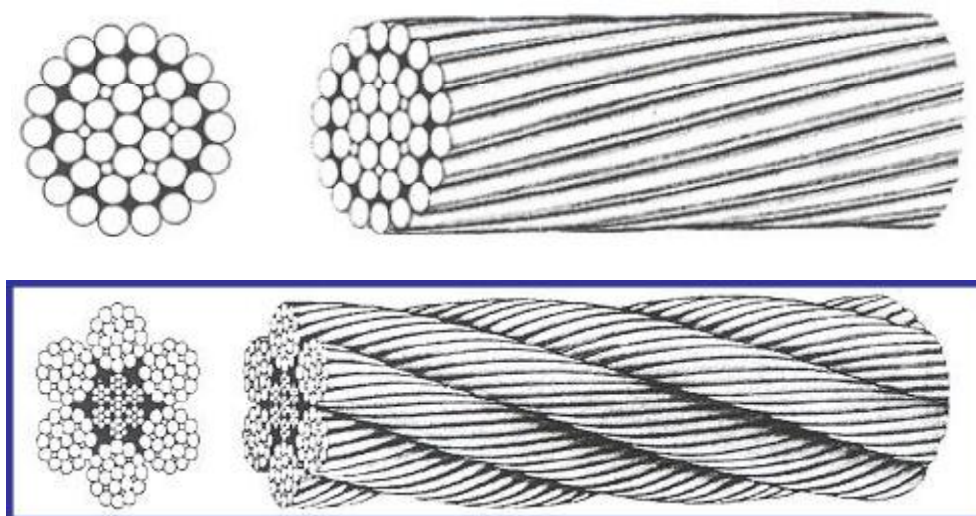
Στόχος του σχεδιασμού καλωδιωτών κατασκευών είναι να επιλεγούν κατάλληλες τιμές διατομών και προέντασης των καλωδίων, ώστε:

- Κανένα καλώδιο να μην χαλαρώσει για κανέναν συνδυασμό φόρτισης σε φάση λειτουργίας
- Κανένα καλώδιο να μην υπερβεί την επιτρεπόμενη εφελκυστική του ένταση για κανέναν συνδυασμό φόρτισης σε φάση λειτουργίας

Τα χαρακτηριστικά που είναι επιθυμητά να έχουν τα καλώδια κατά το στάδιο του σχεδιασμού και της κατασκευής είναι τα ακόλουθα όπως τα αναφέρει και ο Chakar (2001):

- Υψηλή εφελκυστική δυσκαμψία και εφελκυστική αντοχή θραύσης
- Μικρό βάρος
- Ολκιμότητα
- Καλή συμπεριφορά σε κόπωση
- Αντοχή σε διάβρωση
- Ευκαμψία σε καταπονήσεις άλλες εκτός της εφελκυστικής

Τα καλώδια είναι συνήθως σε μορφή κλώνων και συρματόσχοινων όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα 18



Εικόνα 18: Κλώνοι και Συρματόσχοινα

Οι κλώνοι αποτελούνται από σύρματα τα οποία είναι ελικοειδές τυλιγμένα γύρω από ένα κεντρικό σύρμα σε ένα ή περισσότερα στρώματα, ενώ τα συρματόσχοινα αποτελούνται από κλώνους οι οποίοι είναι ελικοειδές τοποθετημένοι γύρω από έναν πυρήνα.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> – Στέγες από δίκτυα καλωδίων

### 2.1 Εισαγωγή

Οι κατασκευές καλωδιωτών στεγών με μεγάλα ανοίγματα ξεκίνησαν να εφαρμόζονται τα τελευταία 40 χρόνια με την τεχνολογική πρόοδο και την επίλυση δύσκολων στατικών πλεγμάτων όπου ήταν βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή τους. Η πρώτη καλωδιωτή στέγη που κατασκευάστηκε ήταν στις ΗΠΑ το 1953 και αφορούσε το κλειστό στάδιο Raleigh στην Βόρεια Καρολίνα όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 19.

Η κύρια κατασκευή αποτελείται από ένα δίκτυο καλωδίων το οποίο αγκυρώνεται σε 2 τόξα από σκυρόδεμα τα οποία τέμνονται μεταξύ τους με κλίση προς το οριζόντιο επίπεδο.



Εικόνα 19: Το στάδιο Raleigh που αποτελεί την πρώτη κατασκευή καλωδιωτής στέγης

Τέτοιες στέγες χρησιμοποιούνται πλέον πολύ συχνά σε στάδια, θέατρα κτλ. Οι κατασκευές κτιρίων με καλωδιωτές στέγες δίνουν πάντα ένα όμορφο αισθητικά αποτέλεσμα ενώ έχουν και μεγάλο κατασκευαστικό και αρχιτεκτονικό ενδιαφέρον. Οι καλωδιωτές στέγες είναι ευσταθείς και οικονομικές κατασκευές. Η Βασιλοπούλου (2011) αναφέρει πως αυτό συμβαίνει γιατί οι δυνάμεις του εφελκυσμού μεταφέρονται στα καλώδια που έχει σαν αποτέλεσμα την καλύτερη αξιοποίηση της διατομής των στοιχείων.

Οι καλωδιωτές στέγες διακρίνονται σε 3 κατηγορίες σύμφωνα και με τους Broughton & Ndumbaro (1994):

- Απλά αναρτημένες στέγες
- Με προεντεταμένα καλώδια και δοκούς σε επίπεδη διάταξη
- Σε δίκτυο προεντεταμένων καλωδίων

### 2.1.1 Απλά αναρτημένες στέγες

Η απλά αναρτημένες στέγες αποτελούνται από απλά καλώδια τα οποία είναι διατεταγμένα σε ορθογωνική ή τραπεζοειδή κάτοψη και αγκυρώνονται σε κατακόρυφα πλαίσια. Άλλες φορές τα καλώδια είναι διατεταγμένα ακτινικά σε κυκλική κάτοψη τα οποία στηρίζονται στην περίμετρο σε ένα θλιβόμενο δακτύλιο.



Εικόνα 20: Απλά αναρτημένες στέγες

### 2.1.2 Στέγες με προεντεταμένα καλώδια και δοκούς

Οι στέγες με προεντεταμένα καλώδια και δοκούς διαμορφώνονται σε πλαίσια που αποτελούνται από εφελκυσόμενα ή θλιβόμενα μέλη και είναι διατεταγμένα σε κάποια απόσταση το ένα από το άλλο.

Η χρήση ενός δεύτερου καλωδίου με αντίθετη καμπυλότητα από το πρώτο είναι αυτό που προσφέρει μεγαλύτερη δυσκαμψία στην κατασκευή. Κατακόρυφα μέλη συνδέονται μεταξύ των δευτέρων καλωδίων τα οποία ανάλογα με τα φορτία που παραλαμβάνουν παίρνουν και τον χαρακτηρισμό τους. Δηλαδή, εφόσον

παραλαμβάνουν θλιπτικές τάσεις τότε είναι θλιβόμενοι ράβδοι ενώ εάν παραλαμβάνουν εφελκυστικές τάσεις τότε είναι καλωδία. (Broughton & Ndumbaro,1994).

### **2.1.3 Στέγες από δίκτυο προεντεταμένων καλωδίων**

Οι στέγες από δίκτυο προεντεταμένων καλωδίων διαμορφώνουν επιφάνειες διπλής καμπυλότητας και επομένως αγκυρώνονται σε διαφορετικό ύψους εάν έχουν ορθογωνική ή ρομβοειδή κάτοψη ή κρέμονται από ένα ψηλό υποστύλωμα και σχηματίζουν κωνική μορφή όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 18.

Η δυσκαμψία του συστήματος επιτυγχάνεται με την προένταση των καλωδίων. Τα καλώδια μπορούν να πάρουν μόνο εφελκυσμό, γι' αυτό και η προένταση θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε, για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης, (συμπεριλαμβανομένου και του ανέμου που μπορεί να προκαλέσει υποπίεση), να μην προκύψει ποτέ θλίψη σε καλώδιο, ή καλύτερα, να υπάρχει σε κάθε περίπτωση ένας ελάχιστος εφελκυσμός. (Γαντές,2011)

Τα καλώδια συνήθως αγκυρώνονται σε περιμετρικό δοκάρι το οποίο είναι αρκετά πιο δύσκαμπτο από τα καλώδια. Στην φάση της μελέτης το περιμετρικό δοκάρι μπορεί να θεωρηθεί τελείως άκαμπτο και στηρίζεται συνήθως σε κεκλιμένους πυλώνες έτσι ώστε οι δυνάμεις που μεταφέρουν τα καλώδια εξαιτίας της προέντασης και των κατακόρυφων φορτίων να μεταφέρονται ως αξόνικη δύναμη στους πυλώνες με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις ροπής στην βάση τους. (Γαντές,2011)

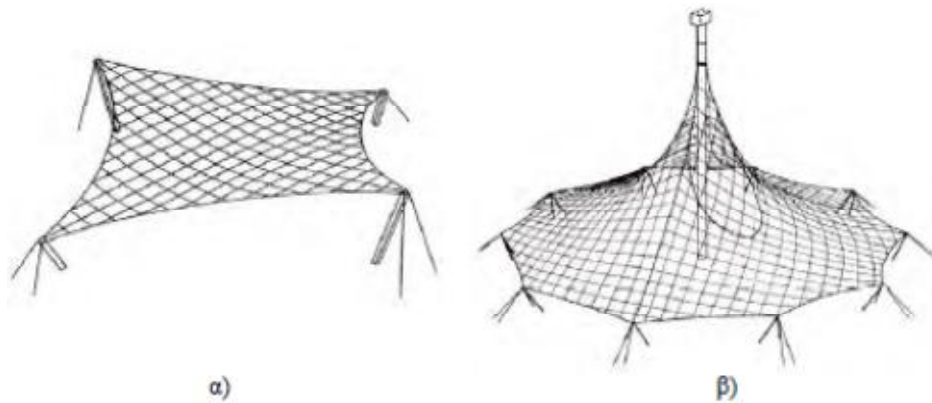
Οι παραμορφώσεις στις καλωδιωτές κατασκευές είναι πολύ μεγάλες εξαιτίας της πολύ μεγάλης αντοχής των καλωδίων και άρα της μεγάλης επιμήκυνσης τους, αλλά και για έναν ακόμα λόγο που είναι η έλλειψη της διατμητικής δυσκαμψίας προκειμένου να παραλάβουν φορτία που θα προκαλούσαν την διάτμηση τους και θα άλλαζαν το σχήμα τους, έτσι ώστε να ισοροπήσουν στην νέα τους θέση χωρίς την διάτμηση τους.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί (Buchholdt,1999) πως ακόμα και πολύ μικρές παραμορφώσεις στον περιμετρικό δακτύλιο θα προκαλέσουν πολύ μεγάλα βέλη κάμψης στα καλώδια και για αυτό τον λόγο η ανάλυση των καλωδιωτών κατασκευών θα πρέπει να είναι μη γραμμική έχοντας υπόψη την μη γραμμικότητα του υλικού και την μη γεωμετρική μη γραμμικότητα.



Το καλωδιωτό σύστημα επιλύεται αρχικά για τα ίδια βάρη και την προένταση θεωρώντας τον περιμετρικό δακτύλιο εντελώς άκαμπτο έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι παραμορφώσεις που προκύπτουν στον περιμετρικό δακτύλιο.

Κατόπιν ακολουθεί η επίλυση για διάφορες φορτίσεις λαμβάνοντας υπόψη τις προηγούμενες παραμορφώσεις ενώ ο δακτύλιος δεν θεωρείται άκαμπτος αλλά ότι έχει μερική δυσκαμψία. (Γαντές,2011)



Εικόνα 21: Στέγες από δίκτυο προεντεταμένων καλωδίων

## 2.2 Φορτία στις καλωδιωτές στέγες

Για την ανάλυση και επίλυση των καλωδιωτών κατασκευών τα φορτία που λαμβάνονται υπόψη είναι όμοια με αυτά που λαμβάνονται για οποιοδήποτε άλλο σύστημα που χρησιμοποιείται για στέγες.

Εκτός όμως από την ιδιαίτερη γεωμετρία των καλωδιωτών στεγών πρέπει να αναφερθούν ορισμένες παρατηρήσεις σχετικά με τα φορτία που λαμβάνονται υπόψη.

Τα φορτία αυτά σύμφωνα και με την Βασιλοπούλου (2001) είναι:

- Τα μόνιμα φόρτια που αποτελούνται από τα ίδια βάρη των καλωδίων, από το βάρος της επικάλυψης και της μόνωσης αλλά και από τις μηχανολογικές εγκαταστάσεις που πιθανόν να κρέμονται από τα καλώδια όπως είναι συστήματα ήχου και φωτισμού.
- Ο άνεμος ο οποίος μπορεί να προκαλέσει και υποπίεση. Η φόρτιση από τον άνεμο μπορεί να μην είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλη την στέγη και για αυτό τον λόγο πραγματοποιούνται δοκιμές σε φυσικά μοντέλα τα οποία

είναι τοποθετημένα σε αεροσήραγγες προκειμένου να προσδιοριστούν οι πιέσεις και η υποπίεσεις που δημιουργεί ο άνεμος στην κατασκευή.

- Το χιόνι σε αντίθεση με τις παραδοσιακές επίπεδες στέγες, στις καλωδιωτές στέγες δεν είναι ομοιόμορφα κατανενημένο σε όλη την κάτοψη της στέγης. Η επιρροή του ανέμου σε συνδυασμό με την γεωμετρία της στέγης μπορεί να προκαλέσει συσσώρευση του χιονιού στις πιο επίπεδες περιοχές της καλωδιωτής στέγης.
- Η προένταση η οποία θα πρέπει να είναι τέτοια έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ένας ελάχιστος εφελκυσμός σε όλα τα καλώδια για οποιονδήποτε συνδυασμό φόρτισης
- Η διαφορά θερμοκρασίας για τον περιμετρικό δακτύλιο και τα καλώδια

Από όλα τα προαναφερόμενα φορτία, το χιόνι, τα μόνιμα φορτία και οι θερμοκρασιακές μεταβολές θεωρούνται ομοιόμορφα κατανεμημένες ενώ ο άνεμος λαμβάνεται ως ανομοιόμορφη φόρτιση.

Μια άλλη σημαντική κατηγορία φορτίσεων που δέχονται τα καλώδια είναι και οι ταλαντώσεις. Οι ταλαντώσεις οφείλονται στον άνεμο και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με την σειρά τους στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Buffeting – λόγω τύρβης της προσπίπτουσας ροής ανέμου .
- Vortex shedding – λόγω στροβιλισμών στην υπήνεμη πλευρά πίσω από το καλώδιο .
- Galloping – λόγω αυτεπαγωγής.
- Wake galloping – λόγω αλληλεπίδρασης γειτονικών καλωδίων
- Αλληλεπίδραση ανέμου, βροχής και καλωδίου
- Parametric excitation – λόγω αλληλεπίδρασης με άλλα μέρη της κατασκευής (π.χ. πυλώνες ή καταστρώματα)

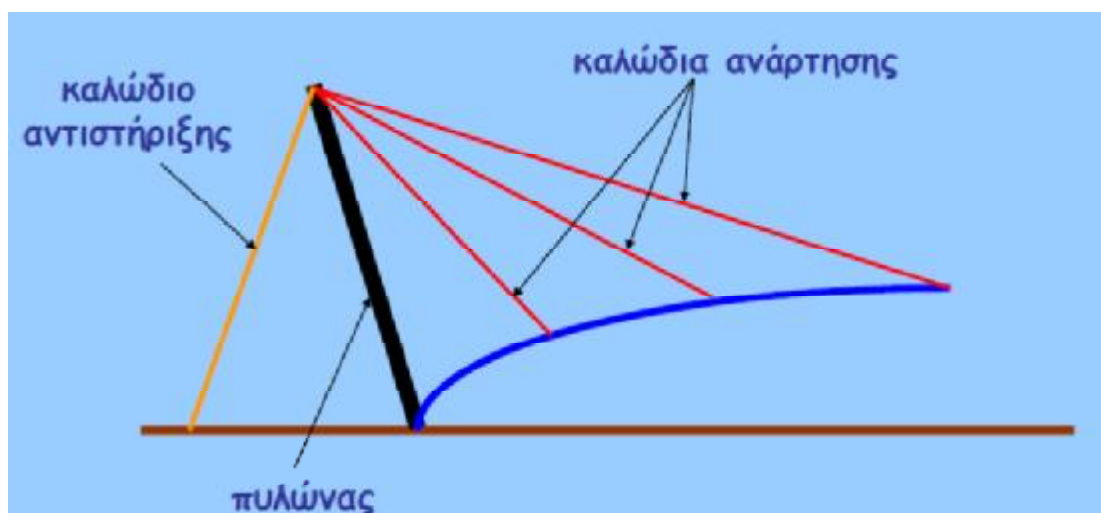
## 2.3 Βασικά στατικά συστήματα καλωδιωτών στεγών

Τα βασικά στατικά συστήματα των καλωδιωτών οροφών διακρίνονται σε 2 κατηγορίες σύμφωνα με τον Γαντέ (2011):

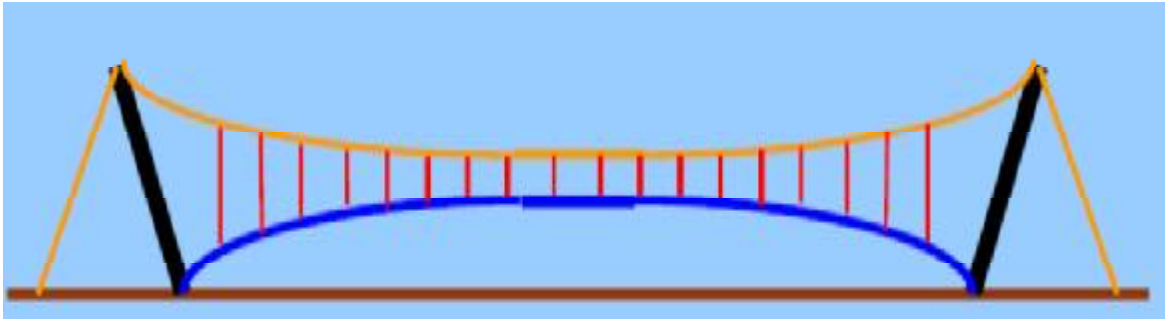
- Συστήματα πυλώνων – καλωδίων ανάρτησης – καλωδίων αντιστήριξης τα οποία διακρίνονται με την σειρά τους στα μονόπλευρα συστήματα και στα αμφίπλευρα.
- Συστήματα δύσκαμπτου περιμετρικού δακτυλίου – δικτύου καλωδίων διπλής καμπυλότητας

Η παραλαβή των εγκάρσιων φορτίων στέγης γίνεται μέσω της αξονικής λειτουργίας των καλωδίων και όχι μέσω κάμψης. Αυτό πραγματοποιείται με τον εφελκυσμό των καλωδίων και την θλίψη πυλώνων και περιμετρικού δακτυλίου.

Στην ακόλουθη εικόνα 19 παρουσιάζεται το μονόπλευρο σύστημα ανάρτησης καλωδίων ενώ στην εικόνα 20 παρουσιάζεται το αμφίπλευρο σύστημα με καλώδια αντιστήριξης.

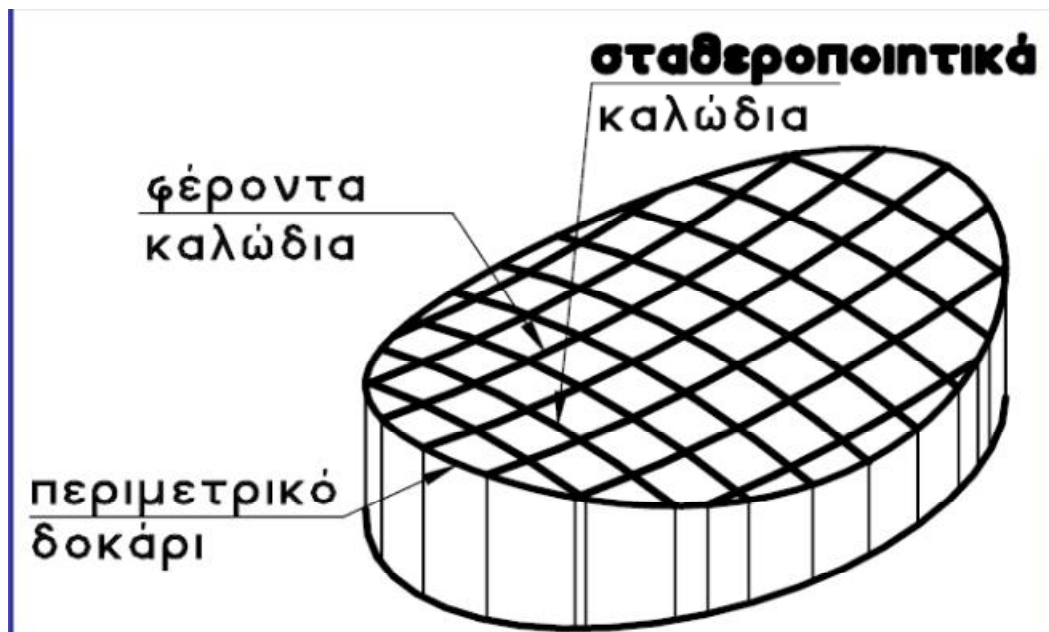


Εικόνα 22: Μονόπλευρο σύστημα ανάρτησης καλωδίων ([www.ergan.gr](http://www.ergan.gr))



Εικόνα 23: Αμφίπλευρο σύστημα ανάρτησης με καλώδια αντίστηριξης (to idio)

Στην ακόλουθη εικόνα 24 παρουσιάζεται το σύστημα δύσκαμπτου περιμετρικού δακτυλίου – δικτύου καλωδίων διπλής καμπυλότητας.



Εικόνα 24: Σύστημα δύσκαμπτου περιμετρικού δακτυλίου με καλώδια διπλής καμπυλότητας (to idio)

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> – Καλωδιωτές Γέφυρες

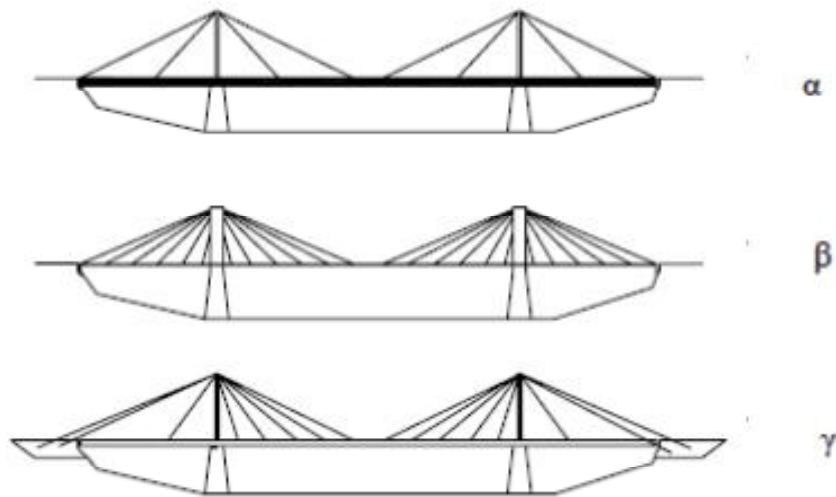
### 3.1 Εισαγωγή

Οι γέφυρες αποτελούν μια από τις αρχαιότερες κατασκευές και πάντοτε αποτελούσαν σημείο αναφοράς για τις ανθρώπινες κοινωνίες. Η αισθητική της κατασκευής τους πάντοτε έπαιξε σημαντικό ρόλο από την αρχαιότητα έως σήμερα σε συνδυασμό με την χρηστική τους ιδιότητα, να ενώνουν. Η γεφύρωση μεγαλύτερων ανοιγμάτων με μεγαλύτερη ασφάλεια οδήγησαν στις σύγχρονες κατασκευές οι οποίες κάνουν χρήση τόσο των θεωρητικών γνώσεων και της εμπειρίας, όσο και των σύγχρονων υλικών και μεθόδων κατασκευής. (Κούκιου,2014)

Οι καλωδιωτές γέφυρες καλύπτουν το κενό μεταξύ των συμβατικά κατασκευασμένων γεφυρών και των κρεμαστών γεφυρών πετυχαίνοντας ανοίγματα της τάξης 150-800 μέτρων. Ο Κωνσταντινίδης (2012) διαχωρίζει τα στατικά συστήματα των αναρτημένων από ευθύγραμμα καλώδια γεφυρών στα ακόλουθα τρία:

- Κατάστρωμα μεγάλης ακαμψίας αναρτώμενο από λίγα καλώδια σε συνδυασμό με μικρών διαστάσεων λυγηρούς πυλώνες (α)
- Πυλώνες μεγάλης ακαμψίας που δύνανται να αναλάβουν μεγάλες ροπές σε συνδυασμό με ελαφρύ κατάστρωμα, στηριζόμενο από πολλά καλώδια (β)
- Αγκυρωμένα σε ακρόβαθρα καλώδια τα οποία διέρχονται από την κορυφή των (εύκαμπτων) πυλώνων και αναρτούν το κατάστρωμα (γ)

Στην ακόλουθη εικόνα 25 παρουσιάζονται αυτά τα 3 συστήματα.



Εικόνα 25: Βασικά στατικά συστήματα αναρτημένων γεφυρών

Κάθε γέφυρα τέτοιας τάξης μεγέθους αντιμετωπίζεται ξεχωριστά, οπότε ο παραπάνω διαχωρισμός έχει έννοια μόνο ως παράδειγμα της ποικιλίας των λύσεων που προκύπτουν από την επιλογή της μάρφωσης του φορέα ως καλωδιωτού. Στην συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται εκτενής αναφορά στα βασικά δομικά στοιχεία και συστήματα των αναρτημένων από ευθύγραμμα καλώδια γεφυρών.

### 3.2 Ιστορική αναδρομή καλωδιωτών γεφυρών

Η κατασκευή καλωδιωτών γεφυρών δεν αποτελεί σύγχρονη σύλληψη. Εδώ και αιώνες ο άνθρωπος ορμώμενος από την πρακτική γνώση του ιδιαίτερου στατικού συστήματος του αναρτώμενου φορέα, έδινε λύσεις χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα μέσα (σχοινιά, κορμούς δέντρων κτλ). Η διάδοση της χρήσης του χάλυβα στις κατασκευές, ήταν αυτή που πριν από ένα περίπου αιώνα έδωσε την ώθηση στην κατασκευή καλωδιωτών και κρεμαστών γεφυρών.

Η ανάπτυξη των καλωδιωτών γεφυρών ξεκίνησε αμέσως μετά τον 2<sup>ο</sup> Παγκόσμιο Πόλεμο στην Γερμανία.

Η εξέλιξη της επιστήμης της γεφυροποιίας και των υλικών κατασκευής έφερε ραγδαία άνοδο στην κατασκευή καλωδιωτών γεφυρών.

Το 1986 ήταν καταγεγραμμένες περίπου 150 καλωδιωτές γέφυρες σε όλο τον κόσμο, το 2012 είχαν καταγραφεί πάνω από 1000.

Η ραγδαία αυτή εξέλιξη αποτυπώνεται και στο μέγιστο άνοιγμα που κατάφεραν να γεφυρώσουν οι καλωδιωτές γέφυρες. Το μέγιστο άνοιγμα, το 1975 ανερχόταν σε 400 μέτρα, το 1995 επεκτάθηκε στα 856 μέτρα ενώ τα 2012 έφτασε στα 1104 μέτρα.



**Εικόνα 26: Η γέφυρα Russki bridge**

Η γέφυρα του Ρίου-Αντιρρίου που είναι η μεγαλύτερη καλωδιωτή γέφυρα του κόσμου με συνολικό μήκος 2883 μέτρα έχει μήκος ανοίγματος 560 μέτρα.

Αυτή η εξέλιξη οφείλεται στην έντονη βιομηχανοποίηση των αναρτήρων, στην τεχνολογική εξέλιξη των μεθόδων ανέγερσης, των μεθόδων ανάλυσης και των υλικών.

### 3.3 Πυλώνες

Οι πυλώνες μιας καλωδιωτής γέφυρας αποτελούν το στοιχείο εκείνο που προσδίδει την αισθητική της γέφυρας και για αυτό τον λόγο κατά την φάση του σχεδιασμού της γέφυρας δίνεται μεγάλη σημασία στην αισθητική διάσταση της επιλογής της μορφής των πυλώνων. (Κούκιου,2014)

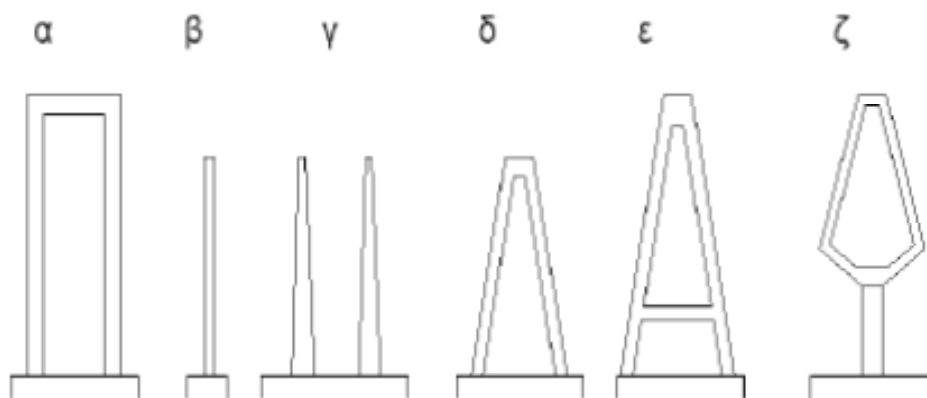
Ένας άλλος παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή των πυλώνων της γέφυρας είναι οι απαιτήσεις του στατικού συστήματος του φορέα καθώς επίσης και των τυχόν κατασκευαστικών περιορισμών που μπορεί να υπάρχουν.

Ο τύπος της καλωδίωσης είναι ένας περιοριστικός παράγοντας κατά την επιλογή των πυλώνων της γέφυρας. Για παράδειγμα οι πυλώνες θα πρέπει να έχουν μεγάλη ακαμψία όταν επιλέγεται η παράλληλη καλωδίωση και το μικρό μήκος των καλωδίων είναι αρκετά κρίσιμο προκειμένου το κατάστρωμα της γέφυρας να μην παραμορφώνεται. Από την άλλη είναι πιο «ελεύθερη» η επιλογή των πυλώνων όταν χρησιμοποιείται καλωδίωση σε ακτινωτή διάταξη. (Κωνσταντινίδης,2012)

Στην ακόλουθη εικόνα 24 παρουσιάζονται οι μορφές των πυλώνων. Οι μορφές αυτές διαχωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες σύμφωνα και με τον Ερμόπουλο (2013):

- A) Μορφής Π
- B) Πρόβολος
- Γ) 2 πρόβολοι
- Δ) Μορφής Λ
- E) Μορφής Α
- Z) Μορφής ρόμβου





**Εικόνα 27: Μορφή των πυλώνων**

Η επιλογή του τύπου των πυλώνων εκτός από την αισθητική πλευρά, εξαρτάται και από το εάν η καλωδίωση γίνεται σε ένα ή δυο επίπεδα καθώς επίσης και από το απαιτούμενο ελεύθερο ύψος κάτω από το κατάστρωμα.

Οι πυλώνες της μορφής Ρόμβου, Π ή Α έχουν το πλεονέκτημα της επιπλέον ακαμψίας σε σχέση με τους προβόλους, ενώ οι πυλώνες τύπου Π, αποτελούν την οικονομικότερη λύση για χαμηλά ύψη ενώ όταν το ύψος είναι μεγάλο, όπως συμβαίνει για παράδειγμα όταν η θεμελίωση πραγματοποιείται σε θαλάσσιο τυθμένα, τότε προτιμάται από αισθητικής και οικονομικής άποψης μορφή πυλώνα τύπου ρόμβου.

Οι πυλώνες τύπου Α παρουσιάζουν ιδιαίτερα ενδιαφέρον εξαιτίας της πολύ υψηλής ακαμψίας που έχουν. Η εγκάρσια απόσταση του καταστρώματος από τον πυλώνα επιτυγχάνεται χωρίς να μειώνεται ιδιαίτερα η εγκάρσια κλίση των καλωδίων, αλλά η κατασκευή τους είναι αρκετά πιο δύσκολη σε σχέση με τους πυλώνες τύπου προβόλου.

Οι πυλώνες κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα ενώ είναι αρκετά περίπλοκη και δύσκολη η σύνδεση των καλωδίων με τους πυλώνες. Η θεμελίωση των πυλώνων πραγματοποιείται ως πάκτωση οδηγώντας σε μεγάλες καμπτικές ροπές στην βάση τους. (Μασούρας,2012)

Στην γέφυρα του Ρίου-Αντιρρίου, κάθε πυλώνας έχει βάρος 170.000 τόνους και ύψος 227 μέτρα. Ο κάθε πυλώνας αποτελείται από τέσσερις βραχίονες από σκυρόδεμα και οι βραχίονες συνδέονται μεταξύ τους στην κορυφή. Η διατομή των βραχιόνων είναι κιβωτιοειδής με διαστάσεις 4 x 4. Στο ύψος του καταστρώματος οι βραχίονες των

πυλώνων πακτώνονται πλήρως πάνω σε τέσσερις προεντεταμένες δοκούς οι οποίες μορφώνουν έναν τετραγωνικό κάνναβο με διαστάσεις 34,50 x 34,50.

Ο πυλώνας και η βάση του στο επίπεδο του καταστρώματος μορφώνουν μια μονολιθική κατασκευή από σκυρόδεμα σύμφωνα με τους Νάκο και Παπαθεωδόρου(2011). Η μονολιθική αυτή κατασκευή εδράζεται στην κεφαλή του βάθρου μέσω διατάξεων στήριξης μια σε κάθε γωνιά του τετραγώνου του κάνναβου. Για τον σχεδιασμό των πυλώνων έγιναν οι παρακάτω παραδοχές και θεωρήσεις:

- Στην κατά μήκος διεύθυνση είναι απαραίτητος ένας άκαμπτος πυλώνας για να παραλάβει τα μη συμμετρικά σεισμικά φορτία
- Ένας άκαμπτος πυλώνας είναι επίσης απαραίτητος και στην εγκάρσια διεύθυνση έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια και να παραλαμβάνονται οι δυνάμεις του ανέμου και της σεισμικής διέγερσης.
- Οι πλάκες ολισθήσεως έχουν μελετηθεί έτσι ώστε να αποκαθίσταται η γεωμετρία της γέφυρας σε περίπτωση μετακίνησης λόγω τεκτονικού σεισμού.

Οι βραχίονες έχουν ορθογωνική κοίλη διατομή με διαστάσεις 4 μ x 4 μ x 0,7 μ και έχουν κατακόρυφο ύψος 80 μέτρα.

Πάνω από το ύψος τον πυλώνα, υπάρχει μια ανεστραμμένη πυραμίδα ύψους περίπου 15 μέτρων με τετράγωνη βάση με πλευρές μήκους 38 μέτρων. Τα καλώδια ανάρτησης είναι κεκλιμένα.

Το κάτω μέρος τους αγκυρώνεται σε μία από τις πλευρές του καταστρώματος και το πάνω μέρος τους στην ύψους 35 μέτρων κεφαλή του πυλώνα. Αποτελούνται από παράλληλα γαλβανισμένα συρματόσχοινα. Το πιο μεγάλο καλώδιο σχηματίζεται από εβδομήντα συρματόσχοινα των 15 χιλιοστών



**Εικόνα 28: Πυλώνας γέφυρας Ρίου-Αντιρρίου**

### **3.4 Διάταξη καλωδίων**

Η διάταξη των καλωδίων στις καλωδιωτές γέφυρες διαχωρίζεται σε 2 τρόπους σύμφωνα και με τον Μασούρα (2012):

- Διάταξη καλωδίωσης κατά την διαμήκη έννοια
- Διάταξη καλωδίων κατά την εγκάρσια έννοια

#### **3.4.1 Διάταξη καλωδίων κατά την διαμήκη έννοια**

Στις καλωδιωτές γέφυρες η επιλογή της διάταξης των καλωδίων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Η επιλογή των μελετητών επηρεάζει τόσο την στατική λειτουργία του φορέα, την οικονομικότητα, τη μέθοδο κατασκευής όσο και την αισθητική. Κατά την διαμήκη έννοια, η σύνδεση πυλώνων – καταστρώματος επιτυγχάνεται μέσω της καλωδίωσης η οποία συνήθως έχει τη μορφή μιας από τις παρακάτω διατάξεις:

- Ακτινωτή διάταξη
- Ημιακτινωτή διάταξη
- Παράλληλη διάταξη

- Ασύμμετρη διάταξη

Η ακτινωτή διάταξη είναι ο τύπος καλωδίωσης που προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα.

Καταρχήν οι οριζόντιες δυνάμεις που εισάγονται στο κατάστρωμα είναι σαφώς μικρότερες σε σχέση με τους άλλους τύπους, αφού αυξάνεται η μέση γωνία καταστρώματος - καλωδίου . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτούνται μικρότερες διατομές καλωδίων και κατά συνέπεια περισσότερη οικονομία στο ακριβότερο υλικό κατασκευής. Επίσης, η ακτινωτή διάταξη έχει το πλεονέκτημα ότι υποβάλει τους πυλώνες σε μέτρια κάμψη κατά την οριζόντια διεύθυνση αφού (συνήθως) η διάταξη των καλωδίων είναι συμμετρική.

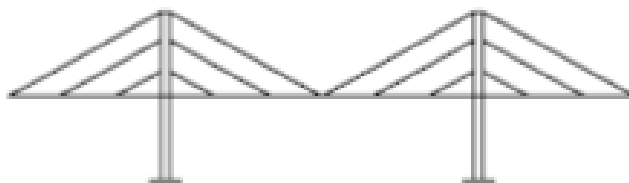
Στον αντίποδα πρέπει να αναφερθεί ότι αισθητικά το ακτινωτό σύστημα υπολείπεται κατά γενική ομολογία της παράλληλης διάταξης καλωδίων. Ταυτόχρονα, ένα σημαντικό κατασκευαστικό πρόβλημα που προκύπτει αφορά στην περιοχή της αγκύρωσης των καλωδίων στην κορυφή του πυλώνα. Οι τάσεις που δημιουργούνται απαιτούν την χρήση ειδικών διατάξεων αγκύρωσης. Η προσομοίωση και μόνο τέτοιων διατάξεων είναι δύσκολη, πόσο μάλλον η κατασκευή τους, ωστόσο το οικονομικό όφελος των μικρότερων καλωδίων πιθανότατα υπερβαίνει αυτή τη δυσχέρεια. (Κούκιου,2014)



Εικόνα 29: Ακτινωτή διάταξη

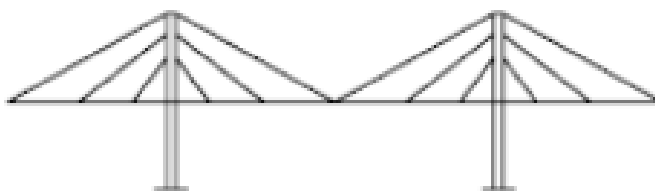
Στην παράλληλη διάταξη το αισθητικό αποτέλεσμα είναι το κυριότερο πλεονέκτημα της. Η μικρή κλίση των καλωδίων έχει ως αποτέλεσμα σημαντικό ποσοστό της δύναμης να «χάνεται» στην οριζόντια διεύθυνση και έτσι απαιτούνται μεγαλύτερες διατομές καλωδίων. Άλλωστε η μεγάλη θλίψη που εισάγεται στις κύριες δοκούς από ένα σημείο και πέρα μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα για την αντοχή τους. Κατασκευαστικά το βασικό πλεονέκτημα είναι η κατανομή καθ' ύψος των καλωδίων στον πυλώνα που δημιουργεί μια καλύτερη κατανομή των τάσεων (μειωμένες

διαστάσεις πυλώνων, ευκολότερη αγκύρωση καλωδίων). (Θεοδωρακόπουλος κ.α.,2003)



**Εικόνα 30: Παράλληλη διάταξη**

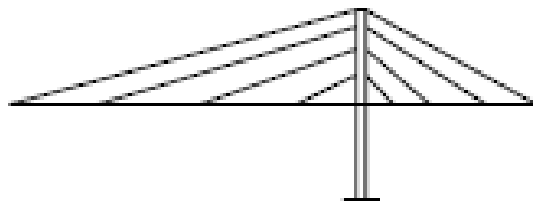
Η ημιακτινωτή διάταξη συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο παραπάνω τύπων κατά μήκος καλωδίωσης. Η καθ' ύψος αγκύρωση των καλωδίων στους πυλώνες και η αυξημένη μέση γωνία καλωδίου καταστρώματος δημιουργεί πολλά πλεονεκτήματα. Η ευκολία στην κατασκευή των αγκυρώσεων και η μικρότερη θλίψη στο κατάστρωμα σε συνδυασμό με την αισθητική αρτιότητα κάνουν την ημιακτινωτή διάταξη την συνηθέστερη επιλογή στις σύγχρονες καλωδιωτές γέφυρες. (Κωνσταντινίδης,2012)



**Εικόνα 31: Ημιακτινωτή διάταξη**

Η ασύμμετρη διάταξη εφαρμόζεται συνήθως σε γέφυρες με ένα πυλώνα. Συνήθως τα καλώδια από τη μία πλευρά αγκυρώνονται σε block από σκυρόδεμα. Μια μέση γωνία καλωδίων της τάξης των  $45^\circ$  δίνει τα πλέον οικονομικά αποτελέσματα. Γενικά η τάση της μείωσης του ίδιου βάρους (λόγω χρήσης σύμμικτων καταστρωμάτων κτλ) έχει ως αποτέλεσμα την δυνατότητα γεφύρωσης μεγαλύτερων ανοιγμάτων με αυτή τη διάταξη. Πρέπει να σημειωθεί ότι η διάταξη αυτή είναι συνήθης σε πεζογέφυρες,

όπου μάλιστα συνδυάζεται με την διάταξη καλωδίων σε ένα μόνο επίπεδο κατά την εγκάρσια έννοια. (Κωνσταντινίδης,2012)



Εικόνα 32: Ασύμμετρη διάταξη

### 3.4.2 Διάταξη καλωδίων κατά την εγκάρσια έννοια

Κατά την εγκάρσια διεύθυνση η καλωδίωση γίνεται σε ένα, δύο ή και τρία επίπεδα, κατακόρυφα ή υπό γωνία. Όταν η ανάρτηση του καταστρώματος γίνεται σε ένα επίπεδο, τότε μειώνεται η στρωφική δυσκαμψία της κατασκευής στην εγκάρσια διεύθυνση και γι αυτό λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα. Συνήθως σε πεζογέφυρες προτιμάται αυτός ο τύπος καλωδίωσης. (Γαντές,2011)

Στις περισσότερες οδικές καλωδιωτές γέφυρες τα καλώδια διατάσσονται σε δύο επίπεδα. Επιτυγχάνεται έτσι, αφενός μεγαλύτερη ευστάθεια του φορέα έναντι εγκάρσιων φορτίσεων (ανεμοπίεση) και αφετέρου η καλύτερη διανομή των τάσεων στα καλώδια. Διάταξη σε τρία επίπεδα έχει εφαρμοστεί σε ελάχιστες περιπτώσεις. Σχετικά με την κλίση των καλωδίων στο κατακόρυφο επίπεδο, αυτή υπαγορεύεται καταρχήν από τον τύπο των πυλώνων. Όταν τα καλώδια βρίσκονται υπό κλίση προφανώς δημιουργούνται επιπλέον εντάσεις τόσο στους πυλώνες όσο και στο κατάστρωμα η παραλαβή των οποίων δεν μπορεί να αγνοηθεί. Ειδικά στις γέφυρες με σύμμικτο κατάστρωμα μπορεί η κλίση αυτή να λειτουργήσει ευνοϊκά, προσφέροντας θλίψη κατά την εγκάρσια διεύθυνση (όταν οι διαδοκίδες είναι σύμμικτες). (Μασσούρας,2012)

### 3.4.3 Απόσταση καλωδίων μεταξύ τους

Στις πρώτες καλωδιωτές κατασκευές, η απόσταση των καλωδίων μεταξύ τους ήταν μεγάλη καθώς οι μελετητές προέβλεπαν την εγκατάσταση όσο το δυνατόν λιγότερων

καλωδίων. Με αυτό τον τρόπο προέκυπταν όμως μεγάλες διατομές προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακαμψία της κατασκευής.

Στην σύγχρονη εποχή όμως των καλωδιωτών κατασκευών, οι μελετητές προτιμούν την δημιουργία μικρότερων ανοιγμάτων και μικρότερων διατομών με την τοποθέτηση περισσότερων καλωδίων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα όπως σημειώνει και ο Μασούρας(2012) τις μικρότερες διατομές και την ευκολότερη αγκύρωση ενώ γίνεται ευκολότερη η συντήρηση και η αντικατάσταση των καλωδίων καθώς η γέφυρα μπορεί να μοιράσει τα εντατικά μεγέθη ευκολότερα όταν εδράζεται σε πολλές μεταλλικές στηρίξεις.

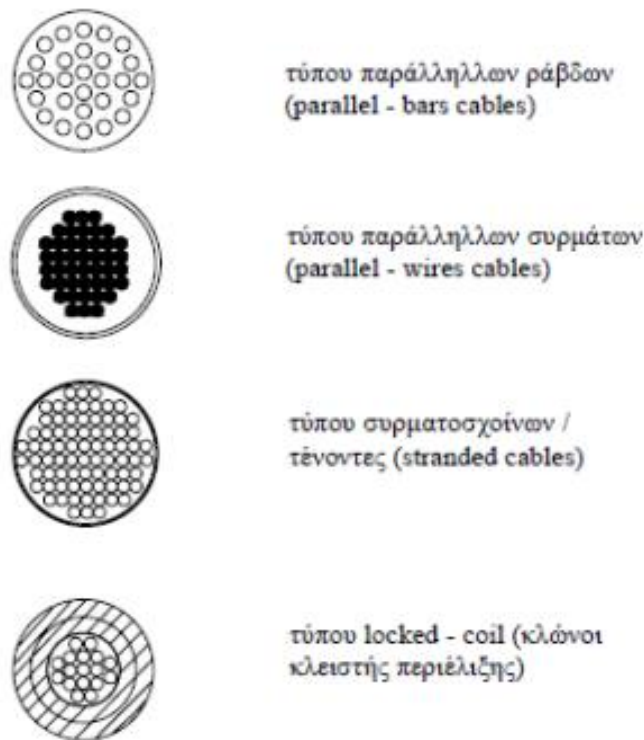
Η συνήθης απόσταση των αγκυρώσεων στο κατάστρωμα των καλωδίων είναι τα 15-25 μέτρα. Το μήκος των ανοιγμάτων και της απόστασης των καλωδίων επηρεάζεται σημαντικά και από τον τρόπο κατασκευής του φορέα σύμφωνα με τον Κωνσταντινίδη.(2012)

Στην περίπτωση που η κατασκευή γίνεται με προβολοδόμηση πρέπει να είναι δυνατή η ανύψωση και η αποκατάσταση της συνέχειας των νέων τμημάτων του καταστρώματος. Αντίθετα όταν ο φορέας κατασκευάζεται παραπλεύρως της θέσης τοποθέτησης και προωθείται στην τελική του θέση μέσω προσωρινών στηρίξεων, είναι δυνατή μια πιο αραιή διάταξη καλωδίωσης.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> – Δομικά Στοιχεία καλωδιωτών γεφυρών

### 4.1 Καλώδια

Το βασικό δομικό στοιχείο των καλωδιωτών γεφυρών είναι τα καλώδια. Όπως και στις καλωδιωτές γέφυρες, ολόκληρο το στατικό σύστημα του φορέα σχετίζεται με την δυνατότητα ανάληψης των μόνιμων και κινητών φορτίων του καταστρώματος από τα καλώδια και τη μεταφορά τους στους πυλώνες. Χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι καλωδίων σε γέφυρες αυτής της μορφής. Οι συνήθεις τύποι καλωδίων που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται παρακάτω σύμφωνα και με τον Γαντέ(2011):



Εικόνα 33: Τύποι καλωδίων

#### 4.1.1 Καλώδια παράλληλων ράβδων

Τα καλώδια παράλληλων ράβδων μορφώνονται από ευθύγραμμες χαλύβδινες ράβδους που τοποθετούνται εντός μεταλλικών σωλήνων. Οι ράβδοι έχουν μήκος 15 - 20 m οπότε είναι αναγκαία η τοποθέτηση παρεμβλημάτων για την ένωσή τους κατά μήκος, πράγμα που κάνει αυτόν τον τύπο καλωδίων ευπαθή σε αστοχία λόγω



κόπωσης. Η συνήθης διάμετρος των ράβδων είναι 16 mm. Το κενό μεταξύ του εξωτερικού σωλήνα και των ράβδων γεμίζεται με ένεμα (πολυαιθυλένιο). Η χρήση των καλωδίων παράλληλων ράβδων είναι αποδοτική κυρίως σε φορείς όπου ο λόγος των μόνιμων φορτίων προς τα κινητά είναι μεγάλος. (Κωνσταντινίδης,2012)

#### **4.1.2 Καλώδια παράλληλων συρμάτων**

Τα καλώδια παράλληλων συρμάτων αποτελούνται από χαλύβδινα σύρματα τα οποία τοποθετούνται σε σωλήνες πολυαιθυλενίου και το εσωτερικό γεμίζεται με ένεμα σκυροδέματος το οποίο κρατά τα σύρματα στη θέση τους. Η αντοχή των καλωδίων αυτών είναι ικανοποιητική σε κόπωση. Τα καλώδια που μορφώνονται με αυτόν τον τρόπο έχουν εφελκυστική αντοχή από 1300 -9000 KN. Η συνήθης διάμετρος των συρμάτων είναι 7 mm. (Τσαρπάλης,2015)

#### **4.1.3 Καλώδια με τένοντες**

Τα καλώδια με τένοντες είναι μια αξιόπιστη και οικονομική επιλογή που χρησιμοποιείται σε προεντεταμένους φορείς. Το καλώδιο αποτελείται από έναν αριθμό τενόντων (ανάλογα με την απαιτούμενη αντοχή τους). Η πλέον διαδεδομένοι τένοντες αποτελούνται από επτά πλεγμένα σύρματα των 0.5 ή 0.7 in (12.7 – 17.78 mm). Τα διάφορα προβλήματα που παρουσιάζει αυτός ο τύπος καλωδίων (αυξημένος κίνδυνος κόπωσης, διάβρωση) έχουν πλέον αντιμετωπιστεί σε ικανοποιητικό βαθμό με κατάλληλα μέτρα προστασίας. (Τσαρπάλης,2015)

#### **4.1.4 Καλώδια τύπου locked – coil (κλώνοι κλειστής περιέλιξης)**

Τα καλώδια αυτού του τύπου είχαν εφαρμογή στις κρεμαστές γέφυρες και συγκεκριμένα στους αναρτήρες. Στον πυρήνα τους τοποθετούνται κυκλικής διατομής σύρματα, ενώ περιμετρικά αυτού του πυρήνα διατάσσονται «στρώσεις» συρμάτων τραπεζοειδούς διατομής και διατομής S. Μπορούν να φέρουν ιδιαίτερα υψηλά αξονικά φορτία και παράλληλα η κατασκευή τους τα κάνει ανθεκτικά στις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά την προένταση. Τα κύρια πλεονεκτήματα είναι η εύκολη τοποθέτησή τους, το γεγονός ότι δεν απαιτείται ένεμα μετά την προένταση και ο περιορισμένος χώρος που απαιτείται για την αγκύρωσή τους. (Κωνσταντινίδης,2012)

## **4.2 Προστασία των καλωδίων από την διάβρωση**

Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται στις γέφυρες θα πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτικά στην διάβρωση. Ο Κεκές(2009) αναφέρει πως χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές για την προστασία των καλωδίων από την διάβρωση.

Οι μέθοδοι προστασίας από την διάβρωση των καλωδίων σύμφωνα και με τον Τσαρπάλη (2015) είναι οι ακόλουθες:

- Χρήση ειδικών καλυμμάτων ή σωλήνων μέσα στους οποίους τοποθετούνται τα καλώδια
- Γαλβανισμός με τον εμποτισμό των συρμάτων μέσα σε διάλυμα ψευδαργύρου

Παράλληλα με την προστασία για την διάβρωση, ειδικά μέτρα λαμβάνονται και για την προστασία από τους κεραυνούς των καλωδίων με την τοποθέτηση αλεξικέραυνων στην κορυφή των πυλώνων για να αποφευχθεί ο κίνδυνος θραύσης του καλωδίου.

Σε κάθε περίπτωση κατά το στάδιο της μελέτης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ανάγκη αντικατάστασης ενός καλωδίου με την δυνατότητα ανακατανομής της έντασης ενός καλωδίου στα γειτονικά του χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η στατικότητα του φορέα.(Τσαρπάλης,2015)

### 4.3 Μη γραμμική συμπεριφορά καλωδιωτών γεφυρών

Τα καλώδια καθώς επίσης και οι πυλώνες είναι οι λόγοι που οι καλωδιωτές γέφυρες παρουσιάζουν έντονη μη γραμμική συμπεριφορά. Η μη γραμμική συμπεριφορά των καλωδιωτών γεφυρών απαιτεί την εφαρμογή μη γραμμικών αναλύσεων όπου οι εξισώσεις ισορροπίας του φορέα λαμβάνονται στην παραμορφωμένη κατάσταση της γέφυρας, ενώ η τελική στατική επίλυση του φορέα προκύπτει μέσω της σύγκλισης μιας επαναληπτικής διαδικασίας. (Μασσούρας,2012)

Η μη γραμμικότητα των καλωδιωτών γεφυρών μπορεί να οφείλεται σε 2 κατηγορίες σύμφωνα και με τον Τσαρπάλη (2015) :

- Λόγω της γεωμετρίας της γέφυρας
- Λόγω του υλικού κατασκευής

Το υλικό παίζει ρόλο στην μη γραμμική συμπεριφορά της γέφυρας εξαιτίας του σχηματισμού των ρηγματώσεων στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι ρωγμές στο σκυρόδεμα σχηματίζονται όταν η εφελκυστική τάση που ασκείται υπερβεί την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος σε οποιοδήποτε σημείο του σκυροδέματος. Ένας άλλος λόγος δημιουργίας των ρηγματώσεων είναι η μη απαιτούμενη πλαστιμότητα του σκυροδέματος προκειμένου να ακολουθήσει τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις. (Κωνσταντινίδης,2012)

Σε μεγάλες τιμές τάσεων, όπως σημειώνει και ο Μασσούρας (2012) τόσο ο χάλυβας όσο και το σκυρόδεμα παρουσιάζουν έντονη μη γραμμική συμπεριφορά.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως στις καλωδιωτές γέφυρες η πιο συνήθης μη γραμμικότητα του νόμου τάσεων – παραμορφώσεων οφείλεται στην χαλάρωση των καλωδίων σε περίπτωση θλίψης.

Στην μη γραμμικότητα της καλωδιωτής γέφυρας λόγω της γεωμετρίας αυτή οφείλεται στην βύθιση του καλωδίου λόγω της επιμήκυνσης και του εφελκυσμού.

Όταν ένα καλώδιο στηρίζεται στα 2 άκρα του, τότε το καλώδιο αυτό υπόκειται στο ίδιο βάρος του αλλά και σε μια εξωτερική επιβαλλόμενη εφελκυστική δύναμη το οποίο το οδηγεί στην παραμόρφωση.

Ο Μασσούρας (2012) αναφέρει πως όταν η αξονική δύναμη αυξηθεί, τότε δεν αυξάνεται μόνο η αξονική παραμόρφωση του καλωδίου αλλά και η μείωση της βύθισης του, γεγονός που μας οδηγεί σε μη γραμμική σχέση δύναμης-μετακίνησης.

Για την αντιμετώπιση της αξονικής δυσκαμψίας εξαιτίας της επιρροής της βύθισης του καλωδίου προτείνεται η χρήση ενός ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας όπου θα λαμβάνεται υπόψη η επιρροή του βέλους και της εφελκυστικής τάσης επί της μεταβλητής ακαμψίας του καλωδίου.

Η παρακάτω σχέση μας δίνει το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας  $E_{eq}$

$$E_{eq} = E / [ 1 + ( w L )^2 E / ( 12 \sigma^3 ) ]$$

Όπου:

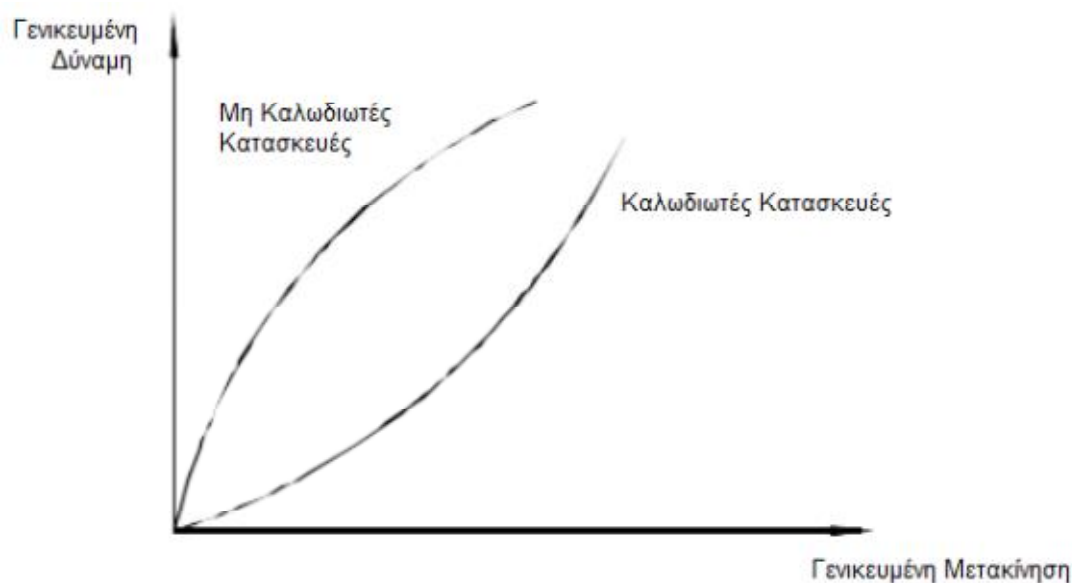
$E$  : μέτρο ελαστικότητας του ευθύγραμμου καλωδίου

$w$  : ειδικό βάρος καλωδίου

$L$  : οριζόντια προβολή του μήκους του καλωδίου

$\sigma$  : εφελκυστική τάση του καλωδίου

Είναι ενδιαφέρον να σημειώσουμε ότι η παραπάνω μη γραμμική συμπεριφορά του καλωδίου οδηγεί σε αύξηση της δυσκαμψίας της γέφυρας καθώς οι δυνάμεις μεγαλώνουν σε μέγεθος. Η συμπεριφορά αυτή λόγω γεωμετρικής μη γραμμικότητας απεικονίζεται στην ακόλουθη εικόνα 34 που ακολουθεί όπου γίνεται εμφανής η διαφορά στη συμπεριφορά των καλωδιωτών φορέων σε σχέση με τις υπόλοιπες κατασκευές.



Εικόνα 34: Μη γραμμική συμπεριφορά καλωδιωτών κατασκευών

Η μη γραμμικότητα των καλωδιωτών γεφυρών οφείλεται επίσης και στην δράση των θλιπτικών δυνάμεων στους πυλώνες και στο κατάστρωμα της γέφυρας η οποία οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην ταυτόχρονη δράση των καμπτικών ροπών και των θλιπτικών αξονικών δυνάμεων. (Γαντές και Καλοχαιρέτης, 2011):

Ο βαθμός της μη γραμμικότητας καθορίζεται από το μέγεθος της θλιπτικής δύναμης σε σύγκριση με το φορτίο λυγισμού καθώς και την προκαλούμενη παραμόρφωση των μελών από την καμπτική δράση. Η θλιπτική αυτή δύναμη δημιουργεί δευτερογενείς καμπτικές ρωγμές στο στοιχείο με αποτέλεσμα τη μη γραμμική σχέση φορτίου – μετακίνησης του μέλους. Για αυτόν το λόγο, σε κάθε βήμα της μη γραμμικής ανάλυσης του φορέα υπολογίζεται η τροποποιημένη καμπτική και αξονική δυσκαμψία των μελών ώστε να ληφθεί υπόψη η μη γραμμική συμπεριφορά τους. (Κούκιου,2014)

Σημαντική δυσκολία στην ανάλυση των καλωδιωτών γεφυρών οφείλεται στην έντονη γεωμετρική μη γραμμικότητα που χαρακτηρίζει τα καλώδια, λόγω της μεγάλης ευκαμψίας τους, ιδιαίτερα για χαμηλά επίπεδα προέντασης. Εάν αυξηθεί η προένταση των καλωδίων τότε αυξάνεται η δυσκαμψία τους και μειώνεται η μη γραμμικότητα τους , αλλά οδηγεί σε αύξηση της θλιπτικής έντασης του πυλώνα, με ενδεχομένως αυξημένο κίνδυνο λυγισμού. (Τσαρπάλης,2015)

Κατά το σχεδιασμό τέτοιων μελών προκύπτουν διάφορα ερωτηματικά που αφορούν το μήκος λυγισμού εντός και εκτός του επιπέδου καλωδίωσης, καθώς και τη μεταλυγισμική συμπεριφορά και την ευπάθεια σε αρχικές ατέλειες.

#### 4.4 Αγκυρώσεις

Οι αγκυρώσεις είναι εκείνες οι διατάξεις στην γέφυρα που επιτρέπουν την σύνδεση των καλωδίων με τους πυλώνες και το κατάστρωμα της γέφυρας.

Σε κάποιες περιπτώσεις, όπως σημειώνει και ο Κεκές (2009) προτιμάται τα ακραία καλώδια να αγκυρώνονται στο έδαφος προκειμένου να προσδίδεται μεγαλύτερη ακαμψία στους πυλώνες. Για την επίτευξη αυτού του είδους της αγκύρωσης κατασκευάζονται μπλοκ σκυροδέματος στα ακρόβαθρα της γέφυρας και σε αυτά αγκυρώνονται τα καλώδια της γέφυρας.

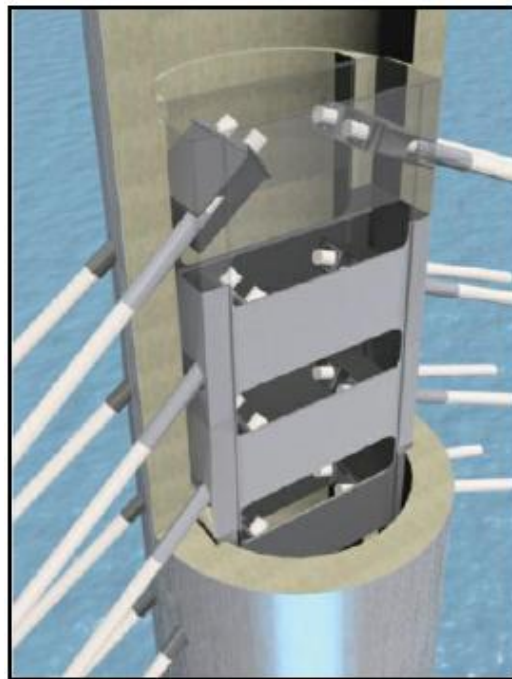
Η διάταξη της αγκύρωσης διαφέρει από τύπο σε τύπο καλωδίου. Για παράδειγμα, στο κατάστρωμα της γέφυρας η αγκύρωση γίνεται στις διαδοκίδες ή τις κύριες δοκούς της γέφυρας, ενώ για διάταξη καλωδίων σε 2 επίπεδα οι αγκυρώσεις πραγματοποιούνται στο πλάτος του πεζοδρομίου και σε τέτοια απόσταση έτσι ώστε να μην επηρεάζεται το περιτύπωμα του οδοστρώματος. (Τσαρπάλης,2015)

Προένταση στα καλώδια επιβάλλεται μόνο από την αγκύρωση στους πυλώνες και όχι από το κατάστρωμα, όπου οι αγκυρώσεις είναι σταθερές. Στους πυλώνες, η δυσκολία που παρουσιάζεται είναι η διάταξη των αγκυρώσεων αφού αφ' ενός ο χώρος είναι περιορισμένος και αφ' ετέρου οι τάσεις που δημιουργούνται ιδιαίτερα υψηλές. Η διάταξη των αγκυρώσεων καθ' ύψος μπορεί σαφώς να αποτελέσει λύση σε αυτό το πρόβλημα. Μια τακτική που ακολουθείτε πολύ συχνά είναι η τοποθέτηση ειδικά κατασκευασμένων μεταλλικών υποδοχών των αγκυρώσεων στην κορυφή των πυλώνων.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται ορισμένες υποδοχές των αγκυρώσεων στο κατάστρωμα και στους πυλώνες.



**Εικόνα 35: Αγκυρώσεις καλωδίων επί του καταστρώματος**



**Εικόνα 36: Αγκυρώσεις στην κορυφή του πύλωνα**

## 4.5 Καταστρώματα

Ο τύπος καταστρώματος που επιλέγεται (εύκαμπτο – άκαμπτο, βαρύ –ελαφρύ) παίζει σημαντικό ρόλο στο στατικό σύστημα του φορέα, οπότε και στην επιλογή των λοιπών δομικών στοιχείων. Στις καλωδιωτές γέφυρες χρησιμοποιούνται καταστρώματα από

- οπλισμένο σκυρόδεμα,
- αμιγώς μεταλλικά
- αλλά και σύμμικτα.

Κάθε τύπος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του.

Η επιλογή του καταστρώματος παίζει σημαντικό ρόλο καθώς από την ακαμψία του καταστρώματος εξαρτώνται τα εντατικά μεγέθη στους πυλώνες. Για παράδειγμα, όπως σημειώνει και ο Γαντές (2011) ότι όσο πιο εύκαμπτο είναι ένα κατάστρωμα τόσο μειώνονται οι ροπές στους πυλώνες.

Από στατικής άποψης ο φορέας του καταστρώματος ανεξάρτητα από το υλικό και την μόρφωση του, αποτελεί μια συνεχή δοκό επί ελαστικών στηρίξεων. Στην περίπτωση που στις διατομές των πυλώνων και στα άκρα του καταστρώματος υπάρχει πρόβλεψη για άκαμπτη σύνδεση – έδραση, τότε οι αντίστοιχες στηρίξεις θεωρούνται ακλόνητες. Οι ελαστικές στηρίξεις έχουν δυσκαμψία ανάλογη του μήκους και της κλίσης του αναρτήρα.

Ο Μασσούρας(2012) σημειώνει πως οι κύριες δοκοί και το κατάστρωμα αποτελούν τα στοιχεία του φέροντος οργανισμού της γέφυρας που υπόκεινται στο μεγαλύτερο τμήμα των εξωτερικά επιβαλλόμενων φορτίων. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι η οδική κυκλοφορία δρα στο κατάστρωμα της γέφυρας και ότι η φόρτιση λόγω ανέμου δημιουργεί δυσμενέστερη εντατική κατάσταση στις κύριες δοκούς σε σχέση με τα καλώδια.

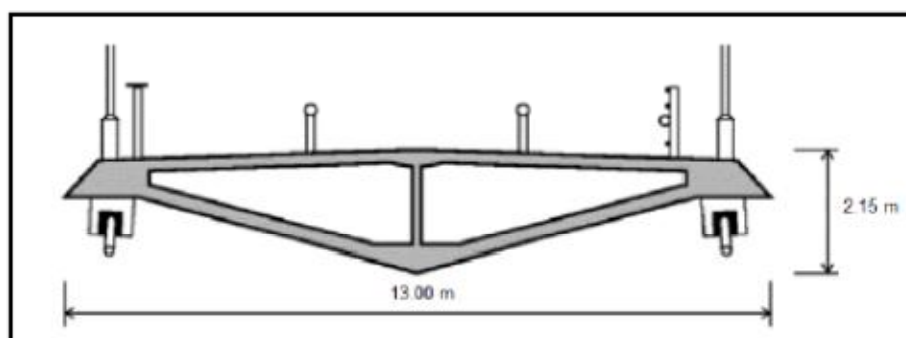
Σε αντίθεση με το σύστημα καλωδίωσης όπου όλα τα καλώδια πρέπει να βρίσκονται σε εφελκυσμό, οι κύριες δοκοί θα πρέπει να μπορούν να αναλαμβάνουν τόσο θλιπτικές όσο και εφελκυστικές δυνάμεις. Στις σύγχρονες καλωδιωτές γέφυρες οι κύριες δοκοί συνεργάζονται με το κατάστρωμα προκειμένου να πετύχουμε την απαιτούμενη αντοχή και δυσκαμψία του φορέα.



#### 4.5.1 Κατάστρωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα

Η πυκνή διάταξη των καλωδίων στις γέφυρες οδήγησε στην ευρεία χρήση καταστρώματων από σκυρόδεμα. Σε σύγκριση με τα αντίστοιχα από χάλυβα, τα καταστρώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν αρκετά μεγαλύτερο ίδιο βάρος ενώ απαιτούν μικρότερο κόστος κατασκευής. Συνήθως, οι κύριες δοκοί έδρασης μορφώνονται ως κιβωτιοειδείς διατομές από οπλισμένο ή προεντεταμένο σκυρόδεμα. Οι διατομές αυτές είναι δυνατό να προκατασκευαστούν στο εργοτάξιο και να αποκατασταθεί η συνέχειά τους μέσω προέντασης. Το μέσο πάχος των τοιχωμάτων των κιβωτίων κυμαίνεται γύρω στα 50 cm. Ο λόγος μονίμων προς κινητών φορτίων είναι βέβαια υψηλότερες απ' ό τι στην περίπτωση της χρήσης του χάλυβα.

Τέλος, λόγω του μεγάλου ιδίου βάρους του καταστρώματος, η αεροδυναμική συμπεριφορά του φορέα είναι πολύ καλύτερη σε σχέση με τα ελαφρύτερα χαλύβδινα καταστρώματα. Γαντές και Καλοχαιρέτης (2011):



Εικόνα 37: Διατομή καταστρώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα

#### 4.5.2 Μεταλλικό κατάστρωμα

Όταν επιλέγεται η λύση του μεταλλικού καταστρώματος γίνεται χρήση κύριων δοκών έδρασης μορφής διπλού ταυ ή κιβωτίου ενώ τοποθετείται μια σχετικά λεπτή μεταλλική πλάκα πάχους μεγαλύτερου ή ίσου των 12 mm, η οποία είναι ενισχυμένη με διαμήκεις νευρώσεις, ανοικτές ή κλειστές. Αυτός ο τύπος καταστρώματος χαρακτηρίζεται από μικρό ίδιο βάρος σε σύγκριση με το αντίστοιχο από σκυρόδεμα, γεγονός που συνεπάγεται μικρότερες αδρανειακές δυνάμεις λόγω σεισμού και

τελικώς οδηγούμαστε σε μικρότερες διατομές των υπόλοιπων μελών της γέφυρας με σημαντικό οικονομικό όφελος.

. Η αραιή διάταξη καλωδίων επέβαλε άκαμπτα καταστρώματα σε συνδυασμό με χαμηλό ίδιο βάρος φορέα. Ωστόσο η επιλογή αυτή σίγουρα δεν είναι η πλέον οικονομική αφού το αντίστοιχο κόστος για κατάστρωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα - αν και το ίδιο βάρος είναι μεγαλύτερο - είναι ιδιαίτερα χαμηλότερο.

Οι διατομές που χρησιμοποιούνται στα μεταλλικά καταστρώματα είναι συνήθως μορφής I για τις κύριες δοκούς και τις διαδοκίδες ή κιβωτιοειδούς διατομής. Το ίδιο βάρος είναι της τάξης των 2.5 – 3.5 KN/m<sup>2</sup>. Ο λόγος ύψους καταστρώματος προς μήκος ανοίγματος συνήθως κυμαίνεται από 1/50 για φορείς με αραιή καλωδίωση έως και 1/500. (Μασσούρας,2012)



Εικόνα 38: Μεταλλικό κατάστρωμα καλωδιωτής γέφυρας

#### 4.5.3 Σύμμικτα καταστρώματα

Η χρήση σύμμικτων διατομών καταστρωμάτων αποτελεί κατά πολλούς την χρυσή τομή μεταξύ των δύο παραπάνω τύπων καταστρωμάτων.

Στην περίπτωση όπου η καλωδιωτή γέφυρα φέρει σύμμικτο κατάστρωμα, η πλάκα του καταστρώματος μορφώνεται από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους μεταξύ 18 ~ 25 cm ενώ συνεργάζεται διατμητικά με τις χαλύβδινες δοκούς έδρασης. Εκτός από τη

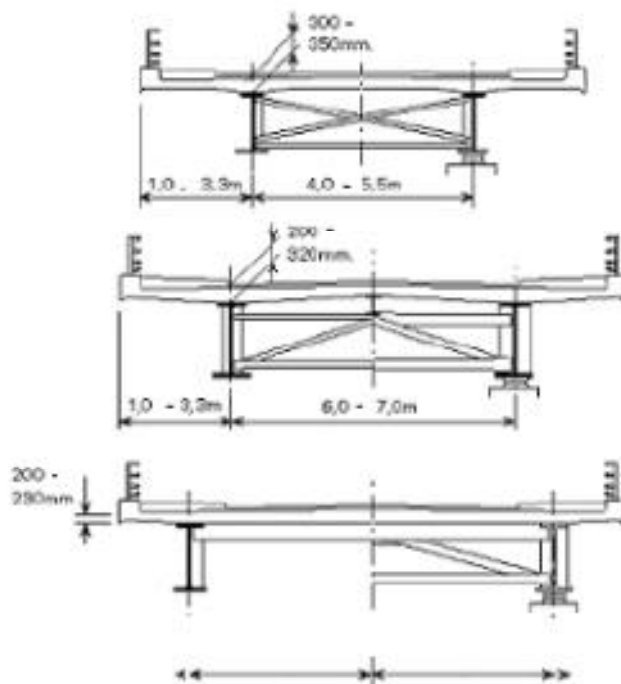
μεταφορά των φορτίων, το κατάστρωμα συνεισφέρει στην αντοχή του φορέα παραλαμβάνοντας τόσο καμπτικές ροπές όσο και αξονικές δυνάμεις, οι οποίες είναι σημαντικού μεγέθους στις καλωδιωτές γέφυρες.

Η βασική διαφορά των σύμμικτων από τις σιδηρές γέφυρες έγκειται στον διαφορετικό τύπο πλάκας καταστρώματος. Στις σιδηρές γέφυρες χρησιμοποιείται ορθότροπη πλάκα, η οποία παρουσιάζει διάφορα μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα, οι ορθότροπες πλάκες έχουν ιδιαίτερα υψηλό κόστος, χαμηλή θερμοχωρητικότητα και είναι ιδιαίτερα ευπαθείς στην κόπωση. Σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος η συνάφεια μεταξύ της πλάκας και της ασφάλτου μειώνεται, ενώ σε χαμηλές θερμοκρασίες δημιουργείται πάγος. Πέραν αυτού, η ορθότροπη μεταλλική πλάκα δεν συνεισφέρει στην αντοχή των κύριων δοκών, παρά μόνο μεταφέρει σε αυτές τα φορτία κυκλοφορίας. Στις σύμμικτες γέφυρες η πλάκα μορφώνεται από οπλισμένο σκυρόδεμα και συνεργάζεται διαμητικά με τις σιδηροδοκούς. Εκτός από τη μεταφορά των φορτίων, συνεισφέρει στην αντοχή του φορέα παραλαμβάνοντας τόσο καμπτικές ροπές, όσο και αξονικές δυνάμεις (οι οποίες στην περίπτωση του καλωδιωτού φορέα είναι σημαντικές). Η οικονομικότητα της χρήσης σύμμικτου καταστρώματος μπορεί εύκολα να αποδειχτεί. Για την παραλαβή των ίδιων φορτίων, μια αμιγώς σιδηρά διατομή πρέπει να έχει πολύ μεγαλύτερες διαστάσεις σε σχέση με την αντίστοιχη σύμμικτη (δεδομένου ότι ο χάλυβας είναι πολύ πιο ακριβό υλικό από το σκυρόδεμα). (Μασσούρας,2012)

Οι συνήθεις μορφές μόρφωσης του καταστρώματος είναι αυτές με τις χρήση διατομών με διπλό ταυ ή οι κιβωτιοειδείς μορφές.

Στην χρήση διατομών διπλού ταυ το κατάστρωμα μορφώνεται ως εσχάρα δοκών και κατά την διαμήκη έννοια τοποθετούνται 2 ή περισσότερες δοκοί οι οποίες ενώνονται εγκάρσια με διαδοκίδες οι οποίες με την σειρά τους συνεργάζονται με την πλάκα σκυροδέματος. (Θεοδωρακόπουλος κ.α,2003)

Στην περίπτωση που υπάρχει πυκνή διάταξη των κύριων δοκών δεν απαιτούνται διαδοκίδες.



Εικόνα 39: Καταστρώματα με δύο κύριες δοκούς τύπου I

Στα σύμμικτα καταστρώματα είναι συνήθης η χρήση κιβοτιοειδών διατομών που έχουν ορθογωνικό ή τραπεζοειδές σχήμα και συνδέονται διατμηματικά με την πλάκα σκυρόδεματος με ήλους που τοποθετούνται στο ανώτερο τοίχωμα τους.

Οι διατομές αυτές όπως σημειώνει και ο Τσαρπάλης(2015) παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυστρεψία (καλύτερη παραλαβή των έκκεντρων φορτίων κυκλοφορίας) και καλή συμπεριφορά σε αεροδυναμικά φαινόμενα.

#### 4.6 Σύνδεση πυλώνα – καταστρώματος

Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά των καλωδιωτών γεφυρών είναι η απόζευξη της κίνησης του καταστρώματος από αυτό των πυλώνων υπό την επίδραση των δυναμικών φορτίσεων.

Σε αρκετές καλωδιωτές γέφυρες, επιλέγεται η λύση της σύνδεσης των πυλώνων με το κατάστρωμα μονολιθικά και ακλόνητα αλλά αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των εντατικών μεγεθών τόσο στις δοκούς του καταστρώματος όσο και στους πυλώνες.

Σε άλλες περιπτώσεις υιοθετείτε η σύνδεση με ελατήρια μεταξύ του καταστρώματος και των πυλώνων για την απόσβεση των αεροδυναμικών ταλαντώσεων ή την μείωση του εύρους αυτών των ταλαντώσεων.

Σε ορισμένες καλωδιωτές γέφυρες έχουν τεθεί ειδικά στοιχεία σύνδεσης τα οποία εμποδίζουν την μετατόπιση του καταστρώματος από κάποιο σημείο και πέρα. Για παράδειγμα στην γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου τέθηκαν ειδικοί αποσβεστήρες με τη μορφή εμβόλων οι οποίοι αφήνουν ελεύθερη την εγκάρσια κίνηση του καταστρώματος σε συνήθεις συνθήκες λειτουργίας του φορέα, αρχίζουν και αποσβένουν όμως την ταλάντωση κατά την διάρκεια σεισμικής διέγερσης ή ισχυρών ανέμων που προκαλούν διαφορικές μετατοπίσεις στα στοιχεία του φορέα. (Μασσούρας, 2012)



**Εικόνα 40: Σύνδεση καταστρώματος και πυλώνων με αποσβεστήρες**

## Κεφάλαιο 5ο – Φορτία στις καλωδιωτές γέφυρες

### 5.1 Εισαγωγή

Μια καλωδιωτή γέφυρα θα πρέπει να σχεδιάζεται και να κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε με αρκετά μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας αλλά και οικονομικό τρόπο να αντιμετωπίζει όλες τις δράσεις, τα φορτία και τις περιβαλλοντικές επιδράσεις τις οποίες είναι πιθανό να αντιμετωπίσει κατά την διάρκεια ζωής της. Ανάλογα με την μορφή της καλωδιωτής γέφυρας, προσδιορίζονται οι δράσεις από τον μελετητή με βάση τις οποίες θα προβεί στην ανάλυση του φορέα προκειμένου να προσδιοριστούν τα δυσμενέστερα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη των μελών του. (Βαρδακούλιας,2012)

Ο Τσαρπάλης(2015) αναφέρει πως οι τιμές των φορτίων αλλά και οι συντελεστές ασφαλείας αυτών προκύπτουν από στατιστική ανάγνωση των αποκλίσεων των δυσμενέστερων καταστάσεων, που μπορεί να προκύψουν τόσο από πλευράς καταπονήσεων όσο και από πλευράς αντοχής των μελών. Σκοπός όλης αυτής της διαδικασίας είναι η σωστή μεταφορά των φορτίων, που δρουν στη γέφυρα, με ασφάλεια στη θεμελίωση.

Οι κατηγορίες φορτίων είναι οι εξής :

#### **Μόνιμα Φορτία ( G )**

- Ιδία βάρη κατασκευής  $G_{IB}$
- Ιδία βάρη επικαλύψεων  $G_{επικ}$
- Ιδία βάρη κυκλιδωμάτων  $G_{κικλ}$
- Δυνάμεις προέντασης  $P$

#### **Ομοιόμορφα διανεμημένο κατακόρυφο φορτίο $q_{fk}$**

- Συγκεντρωμένο φορτίο για γενικές και τοπικές επιδράσεις  $Q(fwk)$
- Οριζόντιο φορτίο που δρα κατά μήκος του άξονα της γέφυρας  $Q(flk)$

- Δράσεις Ανέμου  $F_w$
- Φορτίο Χιονιού  $F_s$
- Θερμοκρασιακές Μεταβολές  $T$

### **Τυχηματικά Φορτία ( F )**

- Πρόσκρουση οχήματος σε βάθρο  $F_{προσκρ}$

### **Σεισμικά Φορτία ( E )**

- Σεισμική δύναμη κατά τις 3 διευθύνσεις  $E$

### **Ταλάντωση**

- Αρμονική διέγερση επί του καταστρώματος

## **5.2 Μόνιμα φορτία**

Τα μόνιμα φορτία που ασκούνται σε μια καλωδιωτή γέφυρα, είναι εκείνα τα φορτία που δρουν σε όλη την διάρκεια ζωής του έργου και τέτοια φορτία είναι τα ίδια βάρη της κατασκευής, οι δυνάμεις της προέντασης και οι θερμοκρασιακές μεταβολές που εκφράζονται ως συστολές και διαστολές των στοιχείων. (Βαρδακούλιας,2012)

Στα μόνιμα φορτία κατατάσσονται οι καταπονήσεις, που έχουν μεγάλο χρόνο επιβολής στη γέφυρα και εφαρμόζονται σε όλη τη διάρκεια ζωής του έργου. Ο Βαρδακούλιας(2012) σημειώνει πως τα μόνιμα φορτία είναι:

- Το ίδιο βάρος των Διατομών προκύπτει από το ειδικό βάρος του χάλυβα,
- Βάρος επικάλυψης θεωρείται ένα φορτίο  $1\text{KN/m}^2$  , το οποίο περιλαμβάνει τα βάρη επιχρίσεων, λοιπών εξοπλισμών, μονώσεων κτλ.
- Τα κιγκλιδώματα προσθέτουν ένα κατακόρυφο φορτίο  $1\text{KN/m}$  , σε μορφή λωρίδας κατά μήκος των κύριων δοκών.
- Πιθανές δυνάμεις προέντασης, είτε καλωδίων είτε τμημάτων κατά την περίοδο ανέγερσης.

## 5.3 Μεταβλητά φορτία

Τα μεταβλητά φορτία είναι τα κατακόρυφα φορτία που προκύπτουν από την χρήση της καλωδιωτής γέφυρας και αυτά μπορεί να είναι η παρουσία ανθρώπων, κινητού εξοπλισμού, οχημάτων κλπ. Λόγω της φύσεως των φορτίων αυτών, δεν είναι επακριβές το βάρος και η θέση τους, γι' αυτό και προσδιορίζονται στατιστικά, οι δε τιμές εφαρμογής τους (χαρακτηριστικές τιμές) δίνονται από τους κανονισμούς. Μια ξεχωριστή κατηγορία μεταβλητών φορτίων είναι και οι δυνάμεις του ανέμου.

### 5.3.1 Δυνάμεις Ανέμου

Οι δυνάμεις του ανέμου παίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στις καλωδιωτές γέφυρες και σε πολλές περιπτώσεις αποτελούν την βασική φόρτιση της γέφυρας ανεξάρτητα από τον τύπο κατασκευής της καλωδιωτής γέφυρας. (Μασσούρας,2012)

Τα φορτία ανέμου κατατάσσονται στις μεταβλητές ελεύθερες δράσεις και μπορεί να προκαλέσουν ταλαντώσεις, για πολλές όμως κατασκευές η δυναμική αυτή επίδραση είναι μικρή, οπότε τα φορτία ανέμου μπορεί να θεωρηθούν ως στατικά.

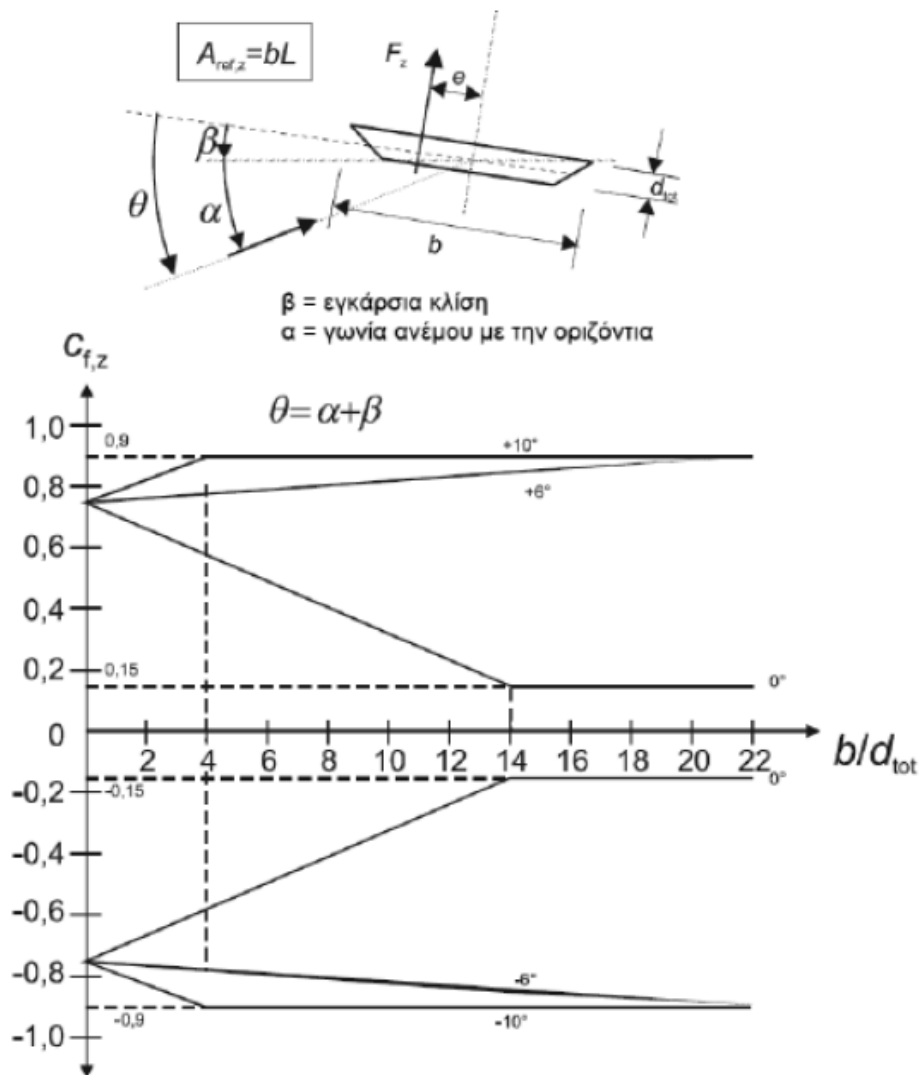
Προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός των δυνάμεων που προέρχονται από την ανεμοπίεση, προτείνονται από τον Ευρωκώδικα δύο μέθοδοι, η απλή και η λεπτομερής. Η λεπτομερής μέθοδος εφαρμόζεται σε κατασκευές οι οποίες είναι ευαίσθητες σε δυναμική διέγερση και ο δυναμικός συντελεστής  $c_d$  είναι μεγαλύτερος από 1.2.

Η απλή μέθοδος εφαρμόζεται σε κατασκευές οι οποίες δεν είναι ευαίσθητες σε δυναμική διέγερση. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κτίρια, καπνοδόχους με ύψος μικρότερο από 200m, καθώς και για γέφυρες με άνοιγμα μικρότερο από 200m, με την προϋπόθεση πάντα ότι ο συντελεστής  $C_d$  είναι μικρότερος του 1.2.

Για τη δράση του ανέμου στα καταστρώματα των γεφυρών κατά τη διεύθυνση  $z$ , τόσο προς τα άνω όσο και προς τα κάτω, ο συντελεστής δύναμης  $C_{f,z}$ , καθορίζεται και λαμβάνεται από την εικόνα 38 του μέρους 2.4 του Ευρωκώδικα. Η επιφάνεια αναφοράς  $A_{ref,z}$  είναι ίση με την επιφάνεια κάτοψης  $A_{ref,z} = b \times L$ , ενώ το ύψος



αναφοράς είναι ίδιο με τη διεύθυνση y. Η δύναμη της ανεμοπίεσης  $F_z$  λαμβάνεται με εκκεντρότητα  $e=b/4$ .



Εικόνα 41: Συντελεστής δύναμης  $c_{fz}$  για γέφυρες με εγκάρσια κλίση και κλίση ανεμοπίεσης

Για ολόσωμες γέφυρες οι δυνάμεις ανέμου κατά την διαμήκη διεύθυνση x λαμβάνονται ίσες με το 25% των δυνάμεων του ανέμου κατά την διεύθυνση y.

## 5.4 Σεισμικές δράσεις

Οι σεισμικές δράσεις είναι και αυτές ένα είδος μεταβλητών φορτίων. Οι οριζόντιες και κατακόρυφες επιταχύνσεις που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια ενός σεισμού

δημιουργούν αδρανειακές δυνάμεις στις καλωδιωτές γέφυρες. Ο Τσαρπάλης(2015) αναφέρει πως οι οριζόντιες θεωρούνται οι πλέον σοβαρές, χωρίς αυτό να σημαίνει, ότι και οι κατακόρυφες δεν μπορεί να αποβούν καταστροφικές υπό ορισμένες συνθήκες.

Ως σεισμικές δράσεις σχεδιασμού θεωρούνται οι ταλαντώσεις της κατασκευής λόγω του σεισμού, οι οποίες ονομάζονται και σεισμικές διεγέρσεις ή σεισμικές δονήσεις. Οι σεισμικές δράσεις κατατάσσονται στις τυχηματικές και δε συνδυάζονται με άλλες τυχηματικές δράσεις, όπως επίσης δε συνδυάζονται με τις δράσεις λόγω ανέμου.

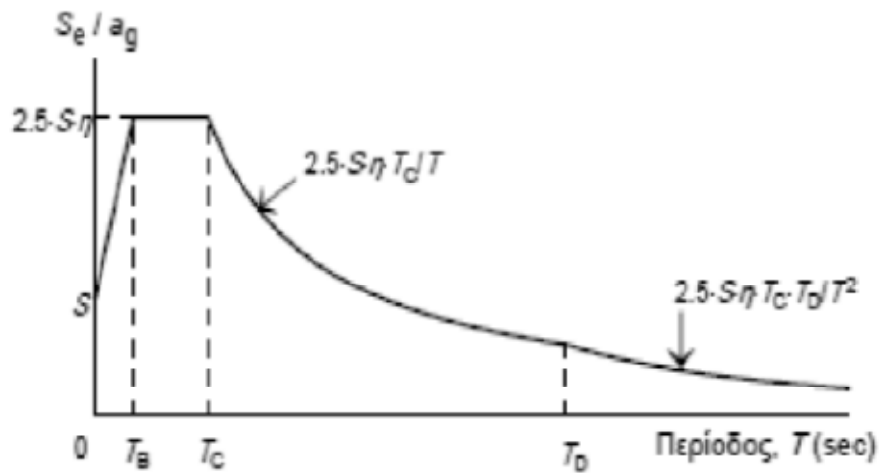
Για την ανάλυση των σεισμικών δράσεων που ασκούνται στον φορέα χρησιμοποιείται η μέθοδος φασματικής απόκρισης ή αλλιώς φασματική δυναμική μέθοδος. Μέσω αυτής μελετάται η δυναμική συμπεριφορά της γέφυρας έναντι σεισμού, χρησιμοποιώντας τις ιδιομορφές και τις αντίστοιχες ιδιοπεριόδους της κατασκευής και εντάσσοντάς τες στο συνολικό προσομοίωμα. Κατά την ανάλυση φασματικής απόκρισης γίνεται ελαστική ανάλυση των μέγιστων δυναμικών αποκρίσεων όλων των σημαντικών ιδιομορφών του φορέα, με τη χρήση των τεταγμένων του τοπικού φάσματος απόκρισης σχεδιασμού.

Οι καλωδιωτές γέφυρες έχουν την ικανότητα να παρουσιάζουν αντοχή σε σεισμικές δράσεις στην μη-γραμμική περιοχή και αυτό επιτρέπει στον σχεδιασμό τους την ανάληψη σεισμικών δυνάμεων μικρότερων από εκείνες που αντιστοιχούν στην γραμμική ελαστική απόκριση.

Η ικανότητα του φορέα για απόδοση ενέργειας μέσω της πλάστιμης συμπεριφοράς των στοιχείων του που ονομάζεται «φάσμα σχεδιασμού» είναι η εκτέλεση της ελαστικής ανάλυσης βασισμένη σε φάσμα απόκρισης το οποίο είναι μειωμένο σε σχέση με το ελαστικό φάσμα απόκρισης. (Κεκές,2009)

Η μείωση αυτή επιτυγχάνεται μέσω του δείκτη συμπεριφοράς  $q$ . Ο δείκτης συμπεριφοράς  $q$  εισάγει τη μείωση των σεισμικών επιταχύνσεων της πραγματικής κατασκευής λόγω μετελαστικής συμπεριφοράς, σε σχέση με τις επιταχύνσεις που προκύπτουν υπολογιστικά σε ελαστικό σύστημα. Παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται ο δείκτης συμπεριφοράς, είναι η διαθέσιμη πλαστιμότητα, η υπερστατικότητα, η υστερητική απόσβεση και άλλοι.

Στην παρακάτω εικόνα 39 παρουσιάζεται ο υπολογισμός του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού.



$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2.5 - 1) \right]$$

για  $0 \leq T \leq T_B$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5$$

για  $T_B \leq T \leq T_C$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C}{T}$$

για  $T_C \leq T \leq T_D$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T^2}$$

για  $T_D \leq T \leq 4 \text{ sec}$

όπου:

$$a_g = \gamma \cdot a_{gk}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{\zeta + 5}} \geq 0.55 = \text{συντελεστής απόσβεσης (το } \zeta \text{ τίθεται επί τοις εκατό)}$$

Εικόνα 42: Ελαστικό φάσμα

Οι Νάκου και Παπαθεοδώρου(2010) σημειώνουν χαρακτηριστικά πως για την καλωδιωτή γέφυρα του Ρίου-Αντιρρίου, οι υπολογισμοί του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού επιτρέπουν στην γέφυρα να αντέχει μέγιστη επιτάχυνση εδάφους ίση με 0,48 g και η μέγιστη φασματική επιτάχυνση ισούται με 1,2 g για περιόδους μεταξύ 0,2 s και 1,0 s. Το φάσμα αυτό θεωρείται ότι αντιστοιχεί σε σεισμό με περίοδο επαναφοράς 2.000 ετών ή σε σεισμικό γεγονός με 5% πιθανότητα υπέρβασης για τη διάρκεια ζωής των 120 ετών.

## 5.5 Θερμοκρασιακές μεταβολές

Οι θερμοκρασιακές μεταβολές κατατάσσονται στα μεταβλητά φορτία όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο και θα πρέπει να προσδιορίζονται για κάθε κατάσταση σχεδιασμού της καλωδιωτής γέφυρας.

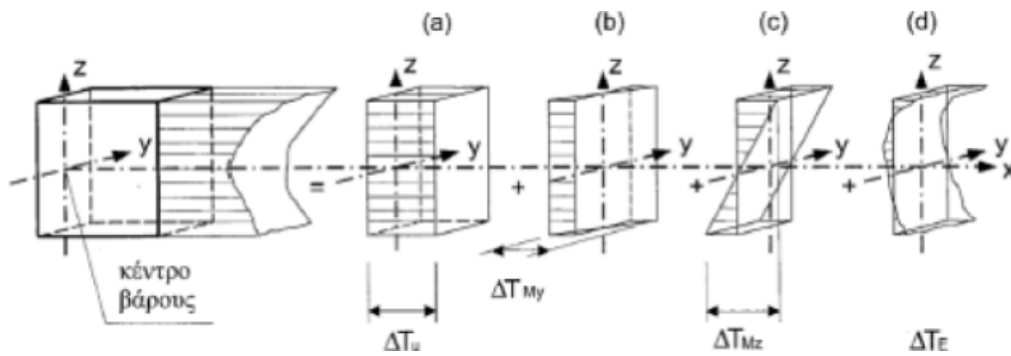
Η κατανομή της θερμοκρασίας μέσα σε μία διατομή ενός στοιχείου οδηγεί στην παραμόρφωση του στοιχείου και η παρεμπόδιση της παραμόρφωσης αυτής (με οποιοδήποτε τρόπο) οδηγεί στην ανάπτυξη τάσεων που πρέπει να ληφθούν υπόψη για καταστάσεις διάρκειας και παροδικές. (Τσαρπάλης,2015)

Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών τιμών των θερμοκρασιακών μεταβολών, τα καταστρώματα των γεφυρών κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες σύμφωνα και με τον Μασσούρα(2012):

- Χαλύβδινο κατάστρωμα επί κιβωτοειδών ή ανοικτών δοκών ή δικτυωτών δοκών από χάλυβα
- Κατάστρωμα από σκυρόδεμα επί κιβωτοειδών ή ανοικτών δοκών ή δικτυωτών δοκών από χάλυβα
- Κατάστρωμα από σκυρόδεμα επί ανοικτών ή κιβωτοειδών δοκών από σκυρόδεμα

Οι συνιστώσες της θερμοκρασιακής κατανομής σε μια διατομή (εικόνα 40) μπορεί να είναι :

- α) ομοιόμορφη,
- β) γραμμική περί τον z-z,
- γ) γραμμική περί τον y-y,
- δ) μη γραμμική



Εικόνα 43: Συνιστώσες θερμοκρασιακής κατανομής σε διατομή (a) ομοιόμορφη (b) γραμμική περί τον z-z (c) γραμμική περί τον y-y (d) μη γραμμική

## 5.6 Είδη Παραμόρφωσης

Τα είδη παραμόρφωσης των καλωδιωτών γεφυρών από όλα τα παραπάνω μόνιμα και μεταβλητά φορτία κατατάσσονται σε 3 κατηγορίες σύμφωνα και με τους Γαντέ και Καλοχαιρέτη(2011):

- Γραμμική Παραμόρφωση

Η παραμόρφωση ενός μέλους καλείται γραμμική όταν ισχύει η αρχή της επιπεδότητας των διατομών. Σύμφωνα με την παραπάνω αρχή, η παραμόρφωση του μέλους θα χαρακτηρίζεται από μία (συνήθως) μεσαία γραμμή του ολικού όγκου του, που όλες οι κάθετες σε αυτήν επίπεδες τομές παραμένουν και μετά την παραμόρφωση επίπεδες και κάθετες στην παραμορφωμένη μεσαία γραμμή. Η παραπάνω μεσαία γραμμή ονομάζεται άξονας της γραμμικής παραμόρφωσης και οι κάθετες σε αυτήν τομές, διατομές του γραμμικού μέλους.

- Επιφανειακή Παραμόρφωση

Κατά την επιφανειακή παραμόρφωση ενός μέλους, η παραμόρφωσή του χαρακτηρίζεται από μία μεσαία επιφάνεια, που όλα τα κάθετα σε αυτήν ευθύγραμμα τμήματά παραμένουν και μετά την παραμόρφωση ευθύγραμμα και κάθετα στην παραμορφωμένη μέση επιφάνεια. Τα κάθετα στην μέση επιφάνεια τμήματα ονομάζονται πάχη της πλάκας.

- Χωρική Παραμόρφωση

Η παραμόρφωση ενός μέλους καλείται χωρική, όταν ο τρόπος παραμόρφωσης του δεν χαρακτηρίζεται από τις προαναφερθέντες μορφές παραμόρφωσης.

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> – Συμπεράσματα

Οι καλωδιωτές κατασκευές που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία είναι κατασκευές υψηλής αρχιτεκτονικής και αισθητικής αλλά παράλληλα ικανοποιούν όλα τα κριτήρια της στατικής μηχανικής και παραλαμβάνουν με ασφάλεια όλα τα φορτία, κινητά και μόνιμα που τις καταπονούν.

Ιδιαίτερα στις καλωδιωτές γέφυρες, ο γεωμετρικός σχεδιασμός αυτών έχει σαν στόχο την αρμονική συνύπαρξη βασικών κριτηρίων, όπως είναι η λειτουργική ικανότητα και ασφάλεια, η προσαρμογή της γέφυρας με το περιβάλλον, η ποιότητα της κατασκευής, η οικονομία και ασφαλώς η αισθητική.

Ιδιαίτερα για τις καλωδιωτές γέφυρες, η βιβλιογραφική έρευνα και μελέτη που πραγματοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσης εργασίας έδειξαν πως η αύξηση της διαμέτρου των κεκλιμένων καλωδίων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της δυσκαμψίας της γέφυρας, ιδιαίτερα όσον αφορά στην ταλάντωσή της κατά τον κατακόρυφο άξονα.

Από την άλλη μεριά η αύξηση της διατομής των κεκλιμένων καλωδίων συντελεί στην καταπόνηση των τελευταίων με υψηλότερες αξονικές δυνάμεις και την αντίστοιχη μείωση της αξονικής έντασης του κύριου παραβολικού καλωδίου και των αναρτήρων. Το μεγαλύτερο τμήμα της φόρτισης του καταστρώματος από τα μεταβλητά φορτία παραλαμβάνεται από το στατικό σύστημα των αναρτήρων και του παραβολικού καλωδίου.

Ο σκοπός κατασκευής μιας καλωδιωτής γέφυρας είναι πάντα να χρησιμοποιείται και να βελτιστοποιείται η χρησιμότητα του. Αυτό αναφέρεται διότι πολλές φορές οι καλωδιωτές πεζογέφυρες δεν χρησιμοποιούνται λόγω της απόστασης, που οι διερχόμενοι άνθρωποι έχουν να διανύσουν και αυτό εξαιτίας της αρχιτεκτονικής και αισθητικής που ακολουθείται.

Η τεχνολογική πρόοδος που έχει συντελεστεί τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει στην χρησιμοποίηση υλικών με λιγότερο βάρος σε σχέση με το παρελθόν. Άρα έχει μειωθεί το ίδιο βάρος των κατασκευών και τα σταθερά φορτία που καταπονούν τις κατασκευές. Από την άλλη μεριά, ακριβώς εξαιτίας της μείωσης του βάρους, έχει αυξηθεί το πρόβλημα των ταλαντώσεων καθώς οι κατασκευές είναι πιο εύκαμπτες.

Οι μορφές των καλωδιωτών στεγών εξαρτάται από το επίπεδο προέντασης στο οποίο υποβάλλονται και τις συνθήκες που επικρατούν. Έτσι ξεκινώντας από μία αρχική γεωμετρία, χρησιμοποιώντας επαναληπτικές μεθόδους, και λαμβάνοντας υπ' όψη η μη γραμμική συμπεριφορά των καλωδίων, επιτυγχάνεται στατική ισορροπία σε κάθε μέρος της κατασκευής. Συνήθως η ανάλυση για την εύρεση σχήματος γίνεται για τα μόνιμα φορτία και την προένταση, έτσι ώστε το σχήμα που θα προκύψει να αντιστοιχεί στα φορτία που θα φέρει η κατασκευή κατά το μεγαλύτερο μέρος της ζωής της και να ικανοποιεί τις αρχιτεκτονικές απαιτήσεις. Το σχήμα αυτό, χρησιμοποιείται έπειτα για την ανάλυση με τα φορτία λειτουργίας, δηλαδή τα κινητά φορτία και τον άνεμο.



## Βιβλιογραφία

### Βιβλιογραφία από Ελλάδα

- 1) Θεοδωρακόπουλος Δ,- Μπούσιας Ε,- Γιαννόπουλος Π.,(2003) Ανάλυση και σχεδιασμός κατασκευών, Πάτρα
- 2) Κωνσταντινίδης Δ.,(2012) Γεφυροποιία, Σημειώσεις τμήματος Πολιτικών Έργων Υποδομής, ΑΤΕΙ Αθήνας, Αθήνα
- 3) Τσαρπάλης Π.,(2015) Σχεδιασμός Καλωδιωτής γέφυρας επι της Λεωφόρου Ποσειδώνος, ΕΜΠ, Αθήνα
- 4) Κούκιου Ε.,(2014) Αρχιτεκτονική των γεφυρών από άποψη μορφολογίας και αισθητικής, ΕΜΠ, Αθήνα
- 5) Νάκου Σ,-Παπαθεοδώρου Κ.,(2010) Επιθεώρηση και συντήρηση της γέφυρας Ρίου-Αντιρρίου, ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη
- 6) Μασσούρας Π.,(2012) Παραμετρική διερεύνηση της συμπεριφοράς καλωδιωτών γεφυρών μικτού συστήματος, ΕΜΠ, Αθήνα,2012
- 7) Κεκές Δ.,(2009) Μεταλλικές Δικτυωτές Γέφυρες, ΑΤΕΙ Αθήνας, Αθήνα
- 8) Βαρδακούλιας Ι.,(2012) Μελέτη μεταλλικής πεζογέφυρας, ΕΜΠ, Αθήνα
- 9) Γαντές, Χ.Ι. και Καλοχαιρέτης, Κ.Ε.,(2011) “Μη γραμμική ανάλυση μελών Timoshenko υπό εγκάρσια φόρτιση και εφαρμογή σε σύνθετα υποστυλώματα με ράβδους δικτύωσης”, 7<sup>ο</sup> Εθνικό Συνέδριο Μεταλλικών Κατασκευών, Βόλος,
- 10) Γαντές Χ.,(2011) Καλωδιωτές κατασκευές, ΙΕΚΕΜ ΤΕΕ, Αθήνα
- 11) Βασιλοπούλου Ι.,(2011) Συμπεριφορά και Μελέτη Δικτύων Καλωδίων,ΕΜΠ, Αθήνα

## **Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία**

- 1) H.A.Buchholdt,. (1999) An introduction to cable roof structures, Thomas Telford – London,UK
- 2) Peter Broughton, Paul Ndumbaro (1994) The analysis of cable and catenary structures, Thomas Telford – London,UK
- 3) Chakar J.P.,(2000) Design of Cable Systems for Cable Suspended Bridges, Massachusetts Institute of Technology, USA

## Εικονογραφία

- Εικόνα 1 από [www.pinterest.co.uk](http://www.pinterest.co.uk)
- Εικόνα 2 από [www.tovima.gr](http://www.tovima.gr)
- Εικόνα 3 από [www.ert.gr](http://www.ert.gr)
- Εικόνα 4 από [www.ergan.gr](http://www.ergan.gr)
- Εικόνα 5 από [www.ergan.gr](http://www.ergan.gr)
- Εικόνα 6 από  
[www.researchgate.net/publication/314119219\\_Behavior\\_and\\_analysis\\_of\\_cable\\_net\\_roofs](http://www.researchgate.net/publication/314119219_Behavior_and_analysis_of_cable_net_roofs)
- Εικόνα 7 από  
[www.researchgate.net/publication/314119219\\_Behavior\\_and\\_analysis\\_of\\_cable\\_net\\_roofs](http://www.researchgate.net/publication/314119219_Behavior_and_analysis_of_cable_net_roofs)
- Εικόνα 8 από [www.ergan.gr](http://www.ergan.gr)
- Εικόνα 9 από [www.ergan.gr](http://www.ergan.gr)
- Εικόνα 10 από  
[www.researchgate.net/publication/314119219\\_Behavior\\_and\\_analysis\\_of\\_cable\\_net\\_roofs](http://www.researchgate.net/publication/314119219_Behavior_and_analysis_of_cable_net_roofs)
- Εικόνα 11 από  
[www.researchgate.net/publication/314119219\\_Behavior\\_and\\_analysis\\_of\\_cable\\_net\\_roofs](http://www.researchgate.net/publication/314119219_Behavior_and_analysis_of_cable_net_roofs)
- Εικόνα 12 από [www.patras.gr](http://www.patras.gr)
- Εικόνα 13 από [https://el.wikipedia.org/wiki/Λεωφόρος\\_Κατεχάκη](https://el.wikipedia.org/wiki/Λεωφόρος_Κατεχάκη)
- Εικόνα 14 από [www.pixabay.com](http://www.pixabay.com)
- Εικόνα 15 από [www.ergan.gr](http://www.ergan.gr)
- Εικόνα 16 από [www.ergan.gr](http://www.ergan.gr)
- Εικόνα 17 από [www.ergan.gr](http://www.ergan.gr)
- Εικόνα 18 από [www.ergan.gr](http://www.ergan.gr)
- Εικόνα 19 από  
[www.researchgate.net/publication/314119219\\_Behavior\\_and\\_analysis\\_of\\_cable\\_net\\_roofs](http://www.researchgate.net/publication/314119219_Behavior_and_analysis_of_cable_net_roofs)

- Εικόνα 20 από [www.researchgate.net/publication/314119219](http://www.researchgate.net/publication/314119219) Behavior and analysis of cable\_net\_roofs
- Εικόνα 21 από [www.researchgate.net/publication/314119219](http://www.researchgate.net/publication/314119219) Behavior and analysis of cable\_net\_roofs
- Εικόνα 22 από [www.ergan.gr](http://www.ergan.gr)
- Εικόνα 23 από [www.ergan.gr](http://www.ergan.gr)
- Εικόνα 24 από [www.ergan.gr](http://www.ergan.gr)
- Εικόνα 25 από <http://dspace.lib.ntua.gr>
- Εικόνα 26 από [www.amusingplanet.com](http://www.amusingplanet.com)
- Εικόνα 27 από <http://dspace.lib.ntua.gr>
- Εικόνα 28 από [www.2steps.gr](http://www.2steps.gr)
- Εικόνα 29 από <http://dspace.lib.ntua.gr>
- Εικόνα 30 από <http://dspace.lib.ntua.gr>
- Εικόνα 31 από <http://dspace.lib.ntua.gr>
- Εικόνα 32 από <http://dspace.lib.ntua.gr>
- Εικόνα 33 από <http://dspace.lib.ntua.gr>
- Εικόνα 34 από <http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/6842>
- Εικόνα 35 από <http://dspace.lib.ntua.gr>
- Εικόνα 36 από <http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/6842>
- Εικόνα 37 από <http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/6842>
- Εικόνα 38 από <http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/6842>
- Εικόνα 39 από <http://dspace.lib.ntua.gr>
- Εικόνα 40 από <http://dspace.lib.ntua.gr>
- Εικόνα 41 από «Διπλωματική Πεζογέφυρας Παναγιώτης Τσαρπάλης»
- Εικόνα 42 από «Διπλωματική Πεζογέφυρας Παναγιώτης Τσαρπάλης»
- Εικόνα 43 από «Διπλωματική Πεζογέφυρας Παναγιώτης Τσαρπάλης»