

1. Καλωδιωτές γέφυρες

1.1 Γενικά

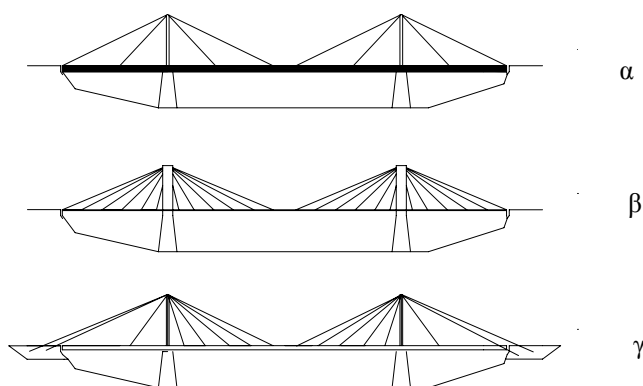
Οι γέφυρες ανέκαθεν αποτέλεσαν κατασκευές – σημείο αναφοράς για τις ανθρώπινες κοινωνίες. Η βασική χρηστική τους ιδιότητα – το να ενώνουν – εντυπώνεται σημειολογικά στην αισθητική της κατασκευής τους από τα αρχαία χρόνια έως σήμερα. Η εξέλιξη στην τεχνολογία της γεφυροποιίας δεν είναι παρά ο καθρέπτης των αναγκών για περαιτέρω ανάπτυξη. 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.

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.

Οι καλωδιωτές γέφυρες έρχονται ουσιαστικά να καλύψουν το κενό μεταξύ των κρεμαστών γεφυρών και των συμβατικά κατασκευασμένων γεφυρών. Η οικονομικότητα της κατασκευής μεγιστοποιείται για ανοίγματα της τάξης των 150 - 800 m. Από εκεί και πάνω (>1500m) επιλέγεται συνήθως κρεμαστός φορέας. Το στατικό σύστημα παίζει πρωταρχικό ρόλο. Εδώ οι εξελίξεις στην τεχνολογία των υλικών είναι ο κρίσιμος παράγοντας επιλογής.

Τα βασικά στατικά συστήματα στις αναρτημένες από ευθύγραμμα καλώδια γέφυρες είναι ουσιαστικά 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)



Σχήμα 1.1 : Βασικοί τύποι μόρφωσης καλωδιωτού φορέα

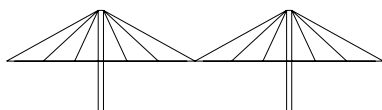
Στην πράξη οι τύποι αυτοί μόρφωσης του βασικού στατικού συστήματος κάθε άλλο παρά δεσμευτικοί είναι για τον μελετητή. Κάθε γέφυρα τέτοιας τάξης μεγέθους αντιμετωπίζεται ξεχωριστά, οπότε ο παραπάνω διαχωρισμός έχει έννοια μόνο ως παράδειγμα της ποικιλίας των λύσεων που προκύπτουν από την επιλογή της μόρφωσης του φορέα ως καλωδιωτού.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται εκτενής αναφορά στα βασικά δομικά στοιχεία και συστήματα των αναρτημένων από ευθύγραμμα καλώδια γεφυρών. Για τις φάσεις κατασκευής και την αεροδυναμική ευστάθεια των καλωδιωτών γεφυρών γίνεται αναφορά σε επόμενα κεφάλαια.

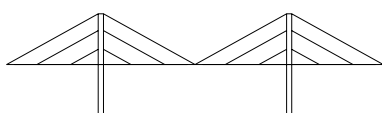
1.2 Διάταξη καλωδίωσης

1.2.1 Διάταξη καλωδίωσης κατά την διαμήκη έννοια

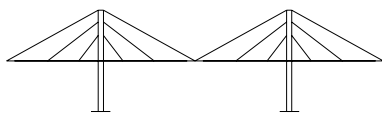
Στις καλωδιωτές γέφυρες η επιλογή της διάταξης των καλωδίων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Η επιλογή των μελετητών επηρεάζει τόσο την στατική λειτουργία του φορέα, την οικονομικότητα, τη μέθοδο κατασκευής όσο και την αισθητική. Κατά την διαμήκη έννοια, η σύνδεση πυλώνων – καταστρώματος επιτυγχάνεται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



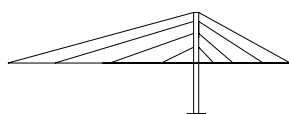
α. Ακτινωτή διάταξη (radial- fan)



β. Παράλληλη διάταξη (harp)



γ. Ημιακτινωτή διάταξη (semi-harp)



δ. Ασύμμετρη διάταξη (assymetric pattern)

Σχήμα 1.2 : Συστήματα διάταξης καλωδίων κατά την διαμήκη έννοια

Ακτινωτή διάταξη (radial –fan)

Ο τύπος αυτός καλωδίωσης 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.

Παράλληλη Διάταξη (Harp)

Το αισθητικό αποτέλεσμα είναι το κύριο πλεονέκτημα της διάταξης αυτής. 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)

Ημιακτινωτή διάταξη (semi-harp)

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.

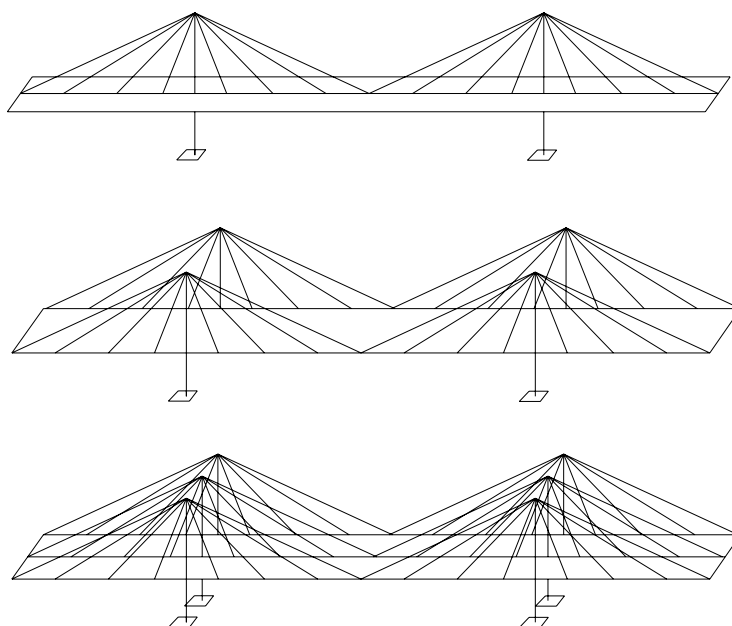
Ασύμμετρη διάταξη (assymetrical pattern)

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° δίνει τα πλέον οικονομικά αποτελέσματα. Γενικά η τάση της μείωσης του ιδίου 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.

1.2.2 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 στροφική δυσκαμψία της κατασκευής στην εγκάρσια διεύθυνση και γι αυτό λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα. Συνήθως σε πεζογέφυρες προτιμάται αυτός ο τύπος καλωδίωσης. 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).



Σχήμα 1.3: Διάταξη καλωδίωσης σε ένα, δύο ή τρία επίπεδα

1.2.3 Διαμήκης απόσταση καλωδίων στον φορέα

Η τακτική που ακολουθούσαν οι μελετητές σε παλιότερες καλωδιωτές γέφυρες ήταν η τοποθέτηση όσο το δυνατόν λιγότερων καλωδίων στον φορέα. Έτσι,

προέκυπταν αναγκαστικά μεγάλες διατομές κυρίων δοκών για να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακαμψία. Η σύγχρονη θεώρηση του προβλήματος είναι η διάταξη περισσοτέρων καλωδίων στο κατάστρωμα, ώστε να προκύπτουν μικρότερα ανοίγματα. Κάτι τέτοιο έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες διατομές και ευκολότερη αγκύρωση. Ταυτόχρονα είναι δυνατή η αντικατάσταση των καλωδίων (ο φορέας μπορεί να ανακαταναείμει τα εντατικά μεγέθη όταν εδράζεται σε πολλές ελαστικές στηρίξεις – καλώδια) και η καλύτερη προστασία τους από διάβρωση σε σχέση με τα καλώδια μεγάλης διαμέτρου.

Η συνήθης απόσταση των αγκυρώσεων στο κατάστρωμα είναι 15 – 25 m. Το υλικό κατασκευής των κυρίων δοκών επηρεάζει κατά πολύ βέβαια (καταστρώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα απαιτούν πιο πυκνή διάταξη καλωδίων εκτός και αν εφαρμόζεται ισχυρή προένταση). Επίσης ο τρόπος κατασκευής του φορέα είναι καθοριστικός για την επιλογή του μήκους των ανοιγμάτων. 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.

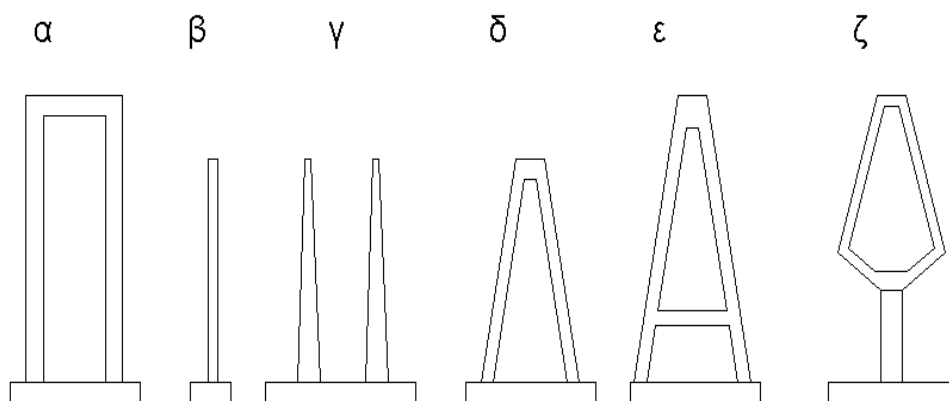
1.3 Πυλώνες

Οι πυλώνες μιας καλωδιωτής γέφυρας αποτελούν πρώτα απ' όλα, το πλέον συμβολικό μέρος –αισθητικά– της κατασκευής. Είναι γενικά αποδεκτό ότι η αισθητική διάσταση της επιλογής της μορφής των πυλώνων είναι η πρωταρχική απαίτηση στο σχεδιασμό τους.

Η επιλογή του τύπου των πυλώνων γίνεται –πέραν της αισθητικής– με βάση τις απαιτήσεις του στατικού συστήματος του φορέα και των κατασκευαστικών περιορισμών. Ανάλογα με το σύστημα καλωδίωσης που επιλέγεται, γίνεται η επιλογή της κατά μήκος του φορέα διατομής. Συγκεκριμένα, όταν επιλέγεται παράλληλη καλωδίωση (όπου το μικρό μήκος των κοντινών καλωδίων είναι κρίσιμο), είναι απαραίτητο οι πυλώνες να έχουν μεγάλη ακαμψία ώστε να μην παραμορφώνεται το κατάστρωμα και ταυτόχρονα υψηλή αντοχή (αφού λόγω της μη ενδοτικότητας τα εντατικά μεγέθη παραμένουν υψηλά). Στην περίπτωση ακτινωτής διάταξης, οι πυλώνες δεν αντιμετωπίζουν ιδιαίτερο πρόβλημα κατά τη διαμήκη διεύθυνση, ιδιαίτερα δε αν χρησιμοποιούνται καλώδια που αγκυρώνονται στα ακρόβαθρα.

Κατά την εγκάρσια διεύθυνση οι πυλώνες μπορούν να έχουν διάφορες μορφές (σχήμα 1.4). Η επιλογή γίνεται και εδώ βασιζόμενη σε διάφορους παράγοντες, όπως το αν η καλωδίωση γίνεται σε ένα ή δύο επίπεδα, το απαιτούμενο ελεύθερο ύψος κάτω από το κατάστρωμα κτλ.

Συχνή είναι η χρήση μορφών Α, Π ή ρόμβου οι οποίοι έχουν το πλεονέκτημα της επιπλέον ακαμψίας σε σχέση με τους απλούς προβόλους. Πυλώνες τύπου Π αποτελούν οικονομικότερη λύση για χαμηλά ύψη, ενώ όταν το ύψος είναι μεγάλο (π.χ. θεμελίωση σε βαθύ θαλάσσιο πυθμένα) προτιμάται από οικονομικής και από αισθητικής άποψης η μορφή ρόμβου-διαμαντιού. Διάφοροι τύποι πυλώνων παρατίθενται πιο κάτω.



Σχήμα 1.4 : Τύποι πυλώνων : α) μορφής Π, β) πρόβολου, γ) δύο πρόβολοι, δ) μορφής Λ, ε) μορφής Α, ζ) μορφής ρόμβου

- Πυλώνες τύπου Α

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι πυλώνες αυτού του τύπου λόγω της υψηλής ακαμψίας τους κατά την εγκάρσια έννοια του φορέα. Οι δύο βραχίονες – στύλοι των πυλώνων συνδέονται τόσο στην κορυφή, όσο και κάτω από το ύψος του καταστρώματος. Η απαραίτητη εγκάρσια απόσταση μεταξύ του καταστρώματος και του πυλώνα σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται χωρίς να μειώνεται ιδιαίτερα η εγκάρσια κλίση των καλωδίων. Ωστόσο η κατασκευή πυλώνων τέτοιου τύπου είναι πιο δύσκολη σε σχέση με τους πυλώνες τύπου προβόλου.

Οι πυλώνες κατασκευάζονται από χάλυβα ή σκυρόδεμα. Τα τελευταία χρόνια έχει επικρατήσει η χρήση κυψελοειδών διατομών οπλισμένου σκυροδέματος. Ιδιαίτερη κατασκευαστική δυσκολία παρουσιάζει η υλοποίηση της σύνδεσης των καλωδίων με των πυλώνα, ειδικά στην περίπτωση του ακτινωτού συστήματος καλωδίωσης. Η θεμελίωση των πυλώνων συνήθως υλοποιείται ως πάκτωση, οδηγώντας σε μεγάλες καμπτικές ροπές στη βάση τους.

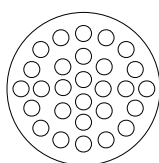
Η επιλογή του μελετητή είναι οικονομοτεχνική, αφού ο συνδυασμός του πυλώνα με την καλωδίωση και τον τύπο καταστρώματος είναι το κρίσιμο στοιχείο. Για παράδειγμα η απαίτηση για ακαμψία στους πυλώνες αναπόφευκτα οδηγεί σε μεγάλες διατομές. Ωστόσο μια τέτοια επιλογή επηρεάζει και τον τύπο του καταστρώματος ο οποίος μπορεί να μορφωθεί πολύ πιο λυγρός (άρα και οικονομικός). Γίνεται λοιπόν σαφές ότι κάθε επιλογή σε κάποιο δομικό στοιχείο επηρεάζει ολόκληρη την κατασκευή και με αυτό το κριτήριο πρέπει να γίνεται ο σχεδιασμός.



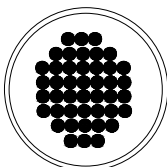
Σχήμα 1.5: Ανέγερση πυλώνα μορφής Α

1.4 Καλώδια

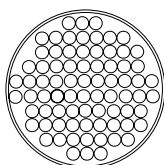
Το βασικό δομικό στοιχείο των καλωδιωτών γεφυρών είναι τα καλώδια. Ολόκληρο το στατικό σύστημα του φορέα σχετίζεται με την δυνατότητα ανάληψης των μόνιμων και κινητών φορτίων του καταστρώματος από τα καλώδια και τη μεταφορά τους στους πυλώνες. Χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι καλωδίων σε γέφυρες αυτής της μορφής. Οι συνήθεις τύποι που χρησιμοποιούνται φαίνονται στο επόμενο σχήμα:



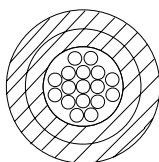
τύπου παράλληλων ράβδων
(parallel - bars cables)



τύπου παράλληλων συρμάτων
(parallel - wires cables)



τύπου συρματοσχοίνων /
τένοντες (stranded cables)



τύπου locked - coil (κλώνοι
κλειστής περιέλιξης)

Σχήμα 1.6: Τύποι καλωδίων

- 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.

- Καλώδια παράλληλων συρμάτων

Χαλύβδινα σύρματα 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.

- Καλώδια με τένοντες

Η ευρέως διαδεδομένη χρήση αυτού του τύπου καλωδίων (χρησιμοποιείται σε προεντεταμένους φορείς) τα καθιστά την πλέον οικονομική αλλά και αξιόπιστη επιλογή. 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.

- Καλώδια τύπου locked – coil (κλώνοι κλειστής περιέλιξης)

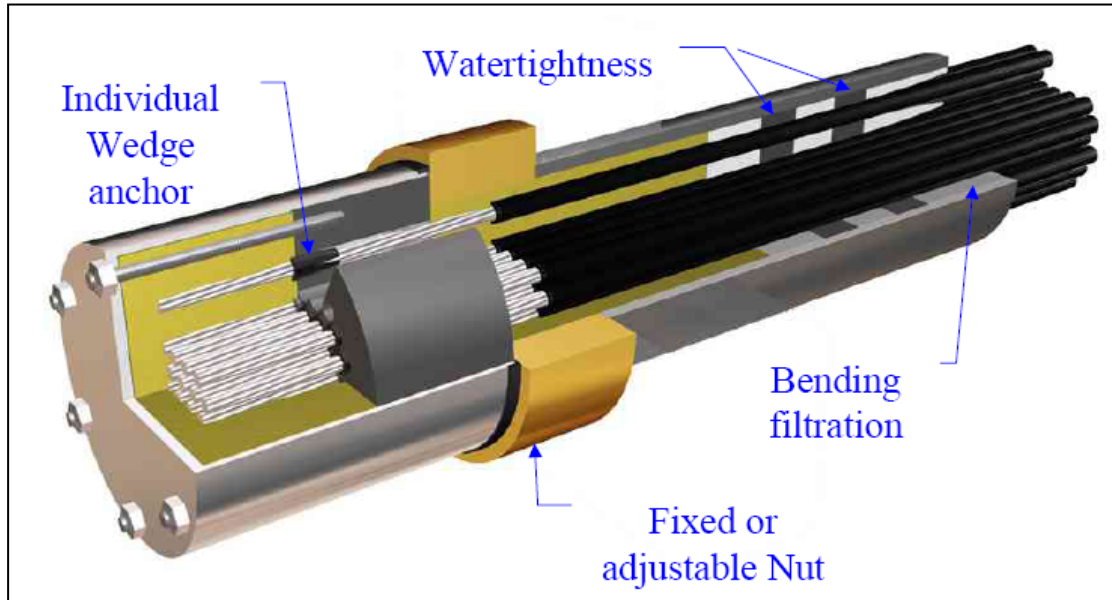
Τα καλώδια αυτά αρχικά είχαν εφαρμογή στις κρεμαστές γέφυρες και συγκεκριμένα στους αναρτήρες. Στον πυρήνα τους τοποθετούνται κυκλικής διατομής σύρματα, ενώ περιμετρικά αυτού του πυρήνα διατάσσονται «στρώσεις» συρμάτων τραπεζοειδούς διατομής και διατομής S. Μπορούν να φέρουν ιδιαίτερα υψηλά αξονικά φορτία 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.

Για την προστασία των καλωδίων από την διάβρωση χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές. Γίνεται χρήση ειδικών καλυμμάτων ή σωλήνων μέσα στους οποίους τοποθετούνται τα καλώδια. Παράλληλα, διαδεδομένη τακτική για την προστασία των καλωδίων είναι ο γαλβανισμός. Ο εμποτισμός δηλαδή των συρμάτων σε διάλυμα ψευδαργύρου. Εκτός της διάβρωσης, κατάλληλα μέτρα λαμβάνονται και για την προστασία από κεραυνούς. Τοποθετούνται αλεξικέραυνα στην κορυφή των πυλώνων, ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος θραύσης του καλωδίου. Σε κάθε περίπτωση, είναι αναγκαίο να προβλέπεται η δυνατότητα αντικατάστασης ενός καλωδίου που έχει φθαρεί, λαμβάνοντας τα απαραίτητα μέτρα κατά την μελέτη (δυνατότητα ανακατανομής της έντασης ενός καλωδίου στα γειτονικά του χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η στατικότητα του φορέα).

1.5 Αγκυρώσεις

Η σύνδεση των βασικών δομικών στοιχείων μιας καλωδιωτής γέφυρας, των καλωδίων, με τους πυλώνες και το κατάστρωμα επιτυγχάνεται μέσω των αγκυρώσεων. Σε πολλές περιπτώσεις τα ακραία καλώδια αγκυρώνονται στο έδαφος προσδίδοντας επιπλέον ακαμψία στους πυλώνες. Η αγκύρωση αυτού του τύπου επιτυγχάνεται μέσω της σύνδεσης των κλώνων ή των ράβδων του καλωδίου σε σταθερά μπλοκ σκυροδέματος (κιβώτιο αγκύρωσης) στα άκρα του φορέα επί του εδάφους ή σε ακρόβαθρα. Η προένταση στα καλώδια επιβάλλεται μόνο από την αγκύρωση στους πυλώνες και όχι από το κατάστρωμα, όπου οι αγκυρώσεις είναι σταθερές. Όπως είναι φυσικό, ανάλογα με τον τύπο καλωδίου που χρησιμοποιείται, η διάταξη της αγκύρωσης είναι διαφορετική. Στο κατάστρωμα η αγκύρωση γίνεται στις διαδοκίδες ή τις κύριες δοκούς. Για διάταξη καλωδίων σε δύο επίπεδα οι αγκυρώσεις γίνονται στο πλάτος του πεζοδρομίου και σε απόσταση τέτοια ώστε να μην επηρεάζουν το περιτύπωμα του οδοστρώματος. 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. Επίσης, η τοποθέτηση ειδικά κατασκευασμένων για την κάθε περίπτωση μεταλλικών «υποδοχών» αγκυρώσεων οι οποίες προσαρτώνται στην κορυφή των

πυλώνων είναι συνηθισμένη τακτική. Οι διάφορες εταιρίες κατασκευής καλωδίων (DINA, VSL, FREYSSINET, STRONGHOLD κ.α.) έχουν αναπτύξει τα δικά τους συστήματα αγκυρώσεων (τα οποία βέβαια ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές που τίθενται από τον κύριο του έργου). Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται κάποιες διατάξεις αγκυρώσεων.



Σχήμα 1.7: Αγκύρωση καλωδίων τύπου τενόντων



Σχήμα 1.8: Αγκυρώσεις καλωδίων επί του καταστρώματος
1.6 Κατάστρωμα

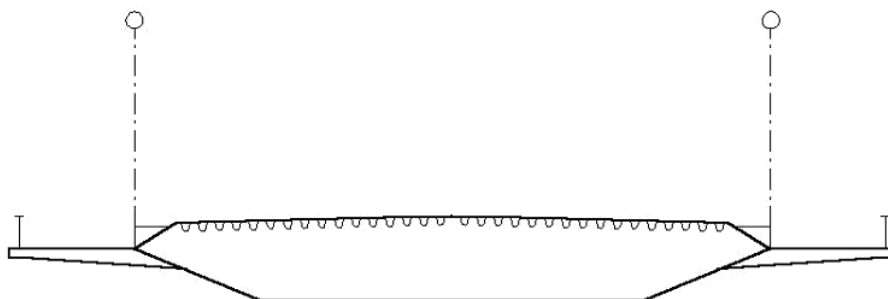
Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω ο τύπος καταστρώματος που επιλέγεται (εύκαμπτο – άκαμπτο, βαρύ –ελαφρύ) παίζει σημαντικό ρόλο στο στατικό σύστημα του φορέα, οπότε και στην επιλογή των λοιπών δομικών στοιχείων. Στις καλωδιωτές γέφυρες χρησιμοποιούνται καταστρώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα, αμιγώς μεταλλικά αλλά και σύμμικτα. Κάθε τύπος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Γενικά η ακαμψία του καταστρώματος καθορίζει σε σημαντικό βαθμό και τα εντατικά μεγέθη στους πυλώνες. Μέσω παραμετρικών αναλύσεων έχει αποδειχτεί ότι όσο πιο εύκαμπτο είναι ένα κατάστρωμα, τόσο μειώνονται οι ροπές (κατά τη διεύθυνση της γέφυρας) 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.

1.6.1 Μεταλλικά καταστρώματα

Η μόρφωση του καταστρώματος από χαλύβδινες κύριες δοκούς (διατομής I ή κιβωτίου) και η χρήση ορθότροπων χαλύβδινων καταστρωμάτων αποτέλεσε την πρώτη επιλογή στις καλωδιωτές γέφυρες για δεκαετίες. 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 ι.β. 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/m². Ο λόγος ύψους καταστρώματος προς μήκος ανοίγματος συνήθως κυμαίνεται από 1/50 για φορείς με αραιή καλωδίωση έως και 1/500.



Σχήμα 1.9: Κιβωτιοειδής σιδηρά διατομή με ορθότροπη πλάκα σε κρεμαστή γέφυρα

1.6.2 Καταστρώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα

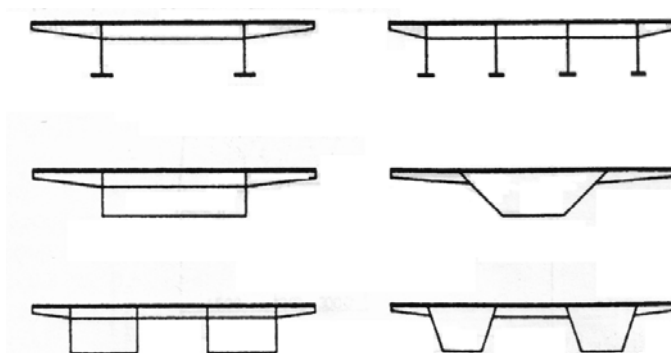
Η χρήση τους στις καλωδιωτές γέφυρες διευρύνθηκε καθώς η τακτική της χρήσης πυκνής καλωδίωσης άρχισε να εφαρμόζεται. Σε σύγκριση με τα χαλύβδινα καταστρώματα, τα καταστρώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν αρκετά

υψηλότερο ίδιο βάρος (10 -15 KN/m²). Συνήθως οι δοκοί μορφώνονται ως κιβωτιοειδείς διατομές. Το μέσο πάχος των τοιχωμάτων των κιβωτιών κυμαίνεται γύρω στα 50 cm. Ο λόγος μονίμων προς κινητών φορτίων είναι βέβαια υψηλότερες απ' ότι στην περίπτωση της χρήσης του χάλυβα. Οι διατομές είναι δυνατό να προκατασκευαστούν στο εργοτάξιο και να αποκατασταθεί η συνέχειά τους με προένταση αμέσως μετά την σύνδεση με το προηγούμενο μέλος του καταστρώματος. Λόγω του υψηλού ίδιου βάρους του καταστρώματος, η αεροδυναμική συμπεριφορά του φορέα είναι πολύ καλύτερη σε σχέση με τα ελαφρύτερα χαλύβδινα καταστρώματα.

1.6.3 Σύμμικτα καταστρώματα

Η χρήση σύμμικτων διατομών καταστρωμάτων αποτελεί κατά πολλούς την χρυσή τομή μεταξύ των δύο παραπάνω τύπων καταστρωμάτων. Αν και ήδη έχουν κατασκευαστεί πολλές σύμμικτες γέφυρες ανά τον κόσμο τα πλεονεκτήματα της ταυτόχρονης χρήσης χάλυβα και σκυροδέματος για τη μόρφωση του κύριου φορέα δεν έχουν πλήρως διερευνηθεί.

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 διατμητικά 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).

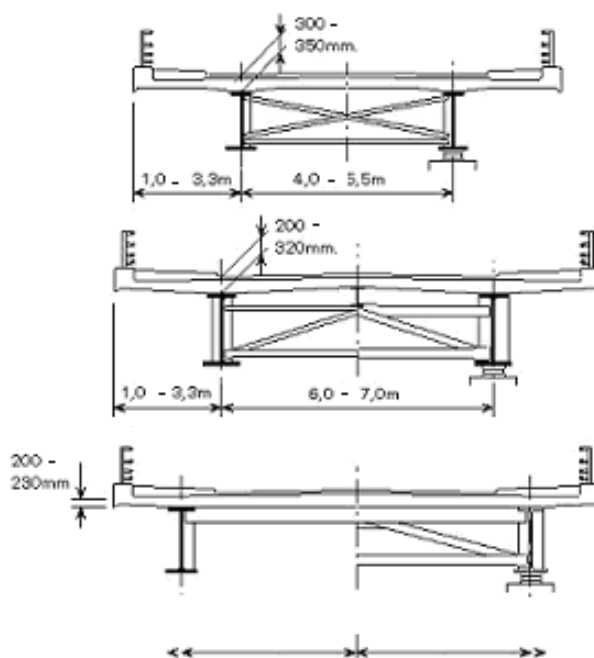


Σχήμα 1.10: Μορφές διατομής σύμμικτων καταστρωμάτων

Η μόρφωση του καταστρώματος μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Τα εντατικά μεγέθη και τα ανοίγματα κατά τη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση

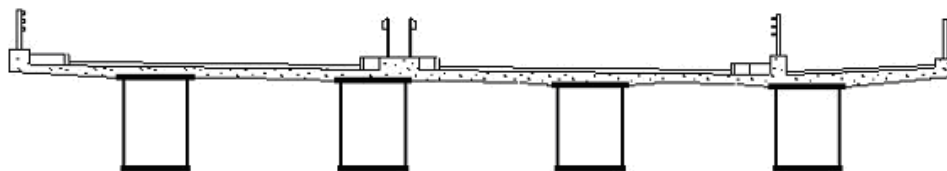
καθορίζουν τον τύπο που θα χρησιμοποιηθεί. Οι συνήθεις μορφές είναι οι ανοικτές με χρήση διατομών διπλού ταυ και οι κιβωτιοειδείς.

Αν επιλεγεί χρήση διατομών διπλού ταυ το κατάστρωμα μορφώνεται ως εσχάρα δοκών. Κατά την διαμήκη έννοια τοποθετούνται 2 ή περισσότερες κύριες δοκοί οι οποίες εγκάρσια ενώνονται με διαδοκίδες (οι οποίες και αυτές συνεργάζονται με την πλάκα σκυροδέματος). Οι σιδηροδοκοί που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι συγκολλητές και συχνά μεταβαλλόμενων διαστάσεων κατά μήκος του φορέα, ανάλογα με τα εντατικά μεγέθη. Οι συγκολλητές βέβαια έχουν μεγαλύτερο κόστος κατασκευής, ωστόσο είναι ελαφρύτερες από τις ελατές και δεν υπάρχει ο περιορισμός στην διαβάθμιση. Στην πράξη οι ελατές χρησιμοποιούνται μόνο για μικρά ανοίγματα όπου διατάσσονται περισσότερες από μία κύριες δοκοί. Στην περίπτωση της πυκνής διάταξης κύριων δοκών δεν απαιτούνται συνήθως διαδοκίδες. Όταν διατάσσονται διαδοκίδες, αυτές συνήθως είναι διατομές I ή χιαστί σύνδεσμοι μεταξύ των δοκών.



Σχήμα 1.11: Καταστρώματα με δύο κύριες δοκούς τύπου I

Εκτός από εσχάρες δοκών, συνήθης είναι η χρήση κιβωτιοειδών διατομών. Έχουν ορθογωνικό ή τραπεζοειδές σχήμα και συνδέονται διατμητικά με την πλάκα σκυροδέματος με ήλους που τοποθετούνται στα ανώτερο τοίχωμά τους. Διακρίνονται σε αεροστεγή μικροκιβώτια και επισκέψιμα κιβώτια. Οι διατομές αυτές παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυστρεψία (καλύτερη παραλαβή των έκκεντρων φορτίων κυκλοφορίας) και καλή συμπεριφορά σε αεροδυναμικά φαινόμενα.



Σχήμα 1.12: Σύμμικτο κατάστρωμα με κλειστά κιβώτια

1.7 Σύνδεση πυλώνα – καταστρώματος

Η απόξευση της κίνησης του καταστρώματος από αυτή των πυλώνων υπό την επίδραση δυναμικών φορτίσεων είναι βασικό χαρακτηριστικό των καλωδιωτών γεφυρών. Σε πολλές καλωδιωτές γέφυρες υιοθετείται η λύση της ακλόνητης σύνδεσης των δομικών αυτών στοιχείων η οποία όμως έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλη αύξηση των εντατικών μεγεθών τόσο στους πυλώνες όσο και στις δοκούς του καταστρώματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις κρίνεται αναγκαία μια – τύπου ελατηρίου – σύνδεση μεταξύ του πυλώνα και του καταστρώματος είτε για την απόσβεση αεροδυναμικών ταλαντώσεων που μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο των φορέα, είτε για τον περιορισμό του εύρους των ταλαντώσεων αυτών από κάποιο όριο και πάνω ώστε να αποφευχθεί σύγκρουση του καταστρώματος με τους πυλώνες κατά την εγκάρσια έννοια. 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.



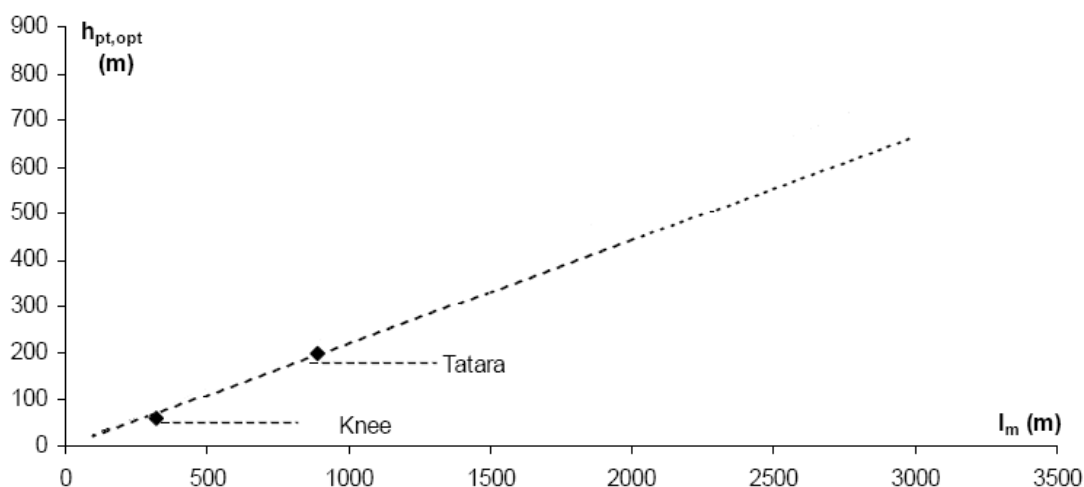
Σχήμα 1.13 : Σύνδεση καταστρώματος-πυλώνων στη γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου

1.8 Μεθοδολογία βελτιστοποίησης σχεδιασμού

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως ο σχεδιασμός μιας καλωδιωτής γέφυρας δεν περιορίζεται στην επιλογή των κατάλληλων διατομών και μεθόδου κατασκευής βάσει κανονισμών όπως σε άλλα έργα. Η διαδικασία σχεδιασμού προϋποθέτει έναν καλά καταστρωμένο αλγόριθμο βελτιστοποίησης ώστε να προκύψει ο πλέον οικονομικός φορέας ο οποίος ταυτόχρονα θα ικανοποιεί τα κριτήρια της αισθητικής και φυσικά της ασφάλειας. Η επιλογή του συστήματος καλωδίωσης, του φορέα του καταστρώματος, των διατομών των πυλώνων, της αγκύρωσης ή μη στα ακρόβαθρα των ακραίων καλωδίων και άλλων παραμέτρων γίνεται θεωρώντας τα παραπάνω δεδομένα ως παραμέτρους του προβλήματος.

Η επιλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δομικών στοιχείων αποτελεί το βασικότερο πρόβλημα. Το ύψος των πυλώνων, για παράδειγμα, καθορίζεται από τη σχέση του κόστους των καλωδίων, της γωνίας αγκύρωσης στο κατάστρωμα και του κόστους ανά μονάδα ύψους του πυλώνα. Στο ακτινωτό σύστημα καλωδίωσης για παράδειγμα, η αύξηση του ύψους των πυλώνων σημαίνει μεγαλύτερη γωνία αγκύρωσης, άρα και καλύτερο βαθμό απόδοσης της αντοχής των καλωδίων (μικρότερες διαμέτροι). Ταυτόχρονα όμως το μήκος τους αυξάνεται, όπως και το κόστος των πυλώνων. Γίνεται έτσι αντιληπτό ότι η επιλογή ενός δομικού μέλους εξαρτάται από πλήθος άλλων παραγόντων πέραν της συμβατικής του αντοχής. Σε μια πιο αρχική του μορφή το πρόβλημα αφορά στην επιλογή του πλήθους των ανοιγμάτων (άρα και των πυλώνων) σε γέφυρες μεγάλου μήκους, καθώς και της μορφής της καλωδίωσης και του τύπου πυλώνων που θα επιλεγούν. Προφανώς, οι παράγοντες που επιβάλλουν τον τελικό σχεδιασμό είναι συχνά ανεξάρτητοι από το καθαρά στατικό μέρος της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Γεωλογικοί – τοπογραφικοί παράγοντες συχνά επιβάλλουν τη θέση και το πλήθος των πυλώνων, ενώ η αισθητική διάσταση σε έργα συμβολικής αξίας, όπως είναι τα έργα του μεγέθους των καλωδιωτών γεφυρών περιορίζει τις δυνατές λύσεις.

Στο παράδειγμα της βελτιστοποίησης του ύψους του πυλώνα σε σχέση με το άνοιγμα του φορέα σε καλωδιωτές γέφυρες με ακτινωτή διάταξη καλωδίωσης, η στατιστική ανάλυση των ήδη κατασκευασμένων καλωδιωτών γεφυρών δίνει την βέλτιστη σχέση μεταξύ τους .



Σχήμα 1.14: Βέλτιστο ύψος πυλώνων σε σχέση με το άνοιγμα του φορέα