

## ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΛΩΔΙΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Χάρης Ι. Γαντές  
Αναπληρωτής Καθηγητής  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
[chgantes@central.ntua.gr](mailto:chgantes@central.ntua.gr)

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι καλωδιωτές κατασκευές αποτελούν έναν από τους πιο ενδιαφέροντες τύπους κατασκευών, καθώς χαρακτηρίζονται από δυνατότητα οικονομικής κάλυψης μεγάλων ανοιγμάτων, προσφέρουν ιδιαίτερες αρχιτεκτονικές μορφές, ενώ και η στατική τους συμπεριφορά είναι σημαντικά διαφορετική από αυτές που έχει συναντήσει ο μηχανικός στα συνήθη έργα. Στα καλώδια ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς φορτίων στη θεμελίωση είναι μέσω εφελκυστικών τάσεων, χωρίς να επιτρέπεται θλίψη ή κάμψη. Η γεωμετρία των διατομών τους καθώς και οι μέθοδοι παραγωγής τους είναι τέτοιες, ώστε η διατμητική αλλά και η καμπτική δυσκαμψία τους να είναι αμελητέες, ενώ και η αντίσταση σε λυγισμό πολύ μικρή, σε αντίθεση με την εφελκυστική δυσκαμψία, η οποία παρουσιάζεται πολύ σημαντική. Μια βασική τους ιδιότητα είναι η δυνατότητα απόκρισης σε αλλαγές των εξωτερικών φορτίων με προσαρμογή της γεωμετρίας τους και όχι με αύξηση των αναπτυσσόμενων τάσεων.

### ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΑΛΩΔΙΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Οι κατασκευές που κάνουν χρήση καλωδίων διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

**Μεμονωμένα καλώδια:** είναι οι κατασκευές όπου απλά προεντεταμένα καλώδια υποβάλλονται σε φορτία, κυρίως σε ένα επίπεδο. Παραδείγματα είναι τα καλώδια επίτοιχων ιστών ή τα καλώδια για σηματοδρές και άλλες θαλάσσιες εφαρμογές.

**Επίπεδα καλωδιωτά δικτυώματα:** αποτελούνται από προεντεταμένα απλά καλώδια, συνδεδεμένα μεταξύ τους σε ένα επίπεδο και φορτιζόμενα στο ίδιο αυτό επίπεδο. Παραδείγματα είναι οι καλωδιωτές γέφυρες ή καλωδιωτά δικτυώματα που παίζουν ρόλο επίπεδων κύριων φορέων για την υποστήριξη στεγών.

**Δίκτυα καλωδίων με εγκάρσια φορτία:** είναι εκείνα στα οποία προεντεταμένα τμήματα απλών καλωδίων συνδέονται μεταξύ τους ώστε να σχηματίσουν μια καμπύλη επιφάνεια και φορτίζονται κατά κύριο λόγο κάθετα προς αυτήν την επιφάνεια. Παράδειγμα είναι οι ανηρτημένες στέγες.

**Δίκτυα καλωδίων με τρισδιάστατη λειτουργία:** απλά καλώδια σχηματίζουν συνδεδεμένα μεταξύ τους έναν χωρικό φορέα που δέχεται εξωτερικά φορτία.

Παραδείγματα καλωδιωτών κατασκευών στην Ελλάδα φαίνονται στο σχήμα 1.



Στάδιο Ειρήνης και Φιλίας



Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου



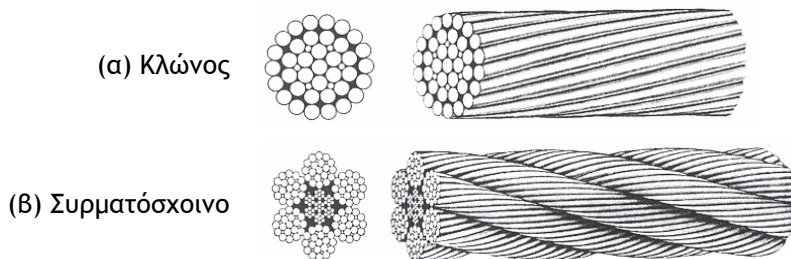
Ιστός στον Μαραθώνα Αττικής

Σχήμα 1 : Παραδείγματα καλωδιωτών κατασκευών στην Ελλάδα

### ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

Τα δομικά υλικά για καλώδια πρέπει να έχουν υψηλή εφελκυστική αντοχή θραύσεως, μικρό βάρος, ολκιμότητα, καλή συμπεριφορά σε κόπωση, αντοχή σε διάβρωση και ευκαμψία σε εγκάρσια φορτία. Λόγω αυτών των απαιτήσεων ο χάλυβας είναι σχεδόν το μόνο υλικό που θέτει υποψηφιότητα για τη μόρφωση διατομών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για καλώδια. Για τη μόρφωση καλωδίων το βασικό συστατικό είναι χαλύβδινα σύρματα τυλιγμένα ελικοειδώς γύρω από ένα κεντρικό σύρμα σε ένα ή περισσότερα στρώματα, που αποτελούν έναν κλώνο. Πολλοί κλώνοι τοποθετημένοι ελικοειδώς γύρω από έναν κεντρικό κλώνο που λέγεται πυρήνας αποτελούν ένα συρματόσχοινο (Σχήμα 2). Ανάλογα με το σχήμα της διατομής των ακραίων συρμάτων,

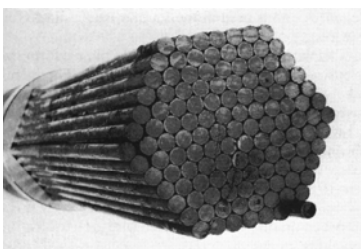
οι κλώνοι μπορεί να είναι απλοί (κυκλική διατομή όλων των συρμάτων) ή κλειστής περιέλιξης (full-locked), όπου τα ακραία σύρματα είναι σιγμοειδούς διατομής, και οι οποίοι υπερτερούν από άποψη αντιδιαβρωτικής προστασίας και αντοχής σε φθορά (Σχήμα 3). Η τελευταίες εξελίξεις της τεχνολογίας μόρφωσης καλωδίων έχουν οδηγήσει στην δυνατότητα κατασκευής κλώνων και συρματοσχοίνων που αποτελούνται από παράλληλα διατεταγμένα μεταξύ τους σύρματα, που έχουν βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά δυσκαμψίας και αντοχής.



Σχήμα 2 : Κλώνος και συρματοσχοίνο



Σχήμα 3 : Απλοί κλώνοι και κλώνοι κλειστής περιέλιξης



Σχήμα 4 : Δέσμη παράλληλων συρμάτων

### ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ

Ιδιαίτερη σημασία για την καλή συμπεριφορά καλωδιωτών κατασκευών έχουν τα ακραία τεμάχια (Σχήμα 5) που χρησιμοποιούνται για τη συνδεσμολογία των καλωδίων, και οι αντίστοιχες κατασκευαστικές λεπτομέρειες (Σχήμα 6), που πρέπει να εξασφαλίζουν ελευθερία στροφής, ώστε να αποφεύγεται η συγκέντρωση τάσεων. Τα ακραία τεμάχια μπορεί να είναι είτε ενεργητικά, μέσω των οποίων μπορεί να ασκηθεί προένταση στο καλώδιο, είτε παθητικά, τα οποία απλώς παρέχουν στήριξη.



Σχήμα 5 : Χαρακτηριστικά ακραία τεμάχια καλωδίων

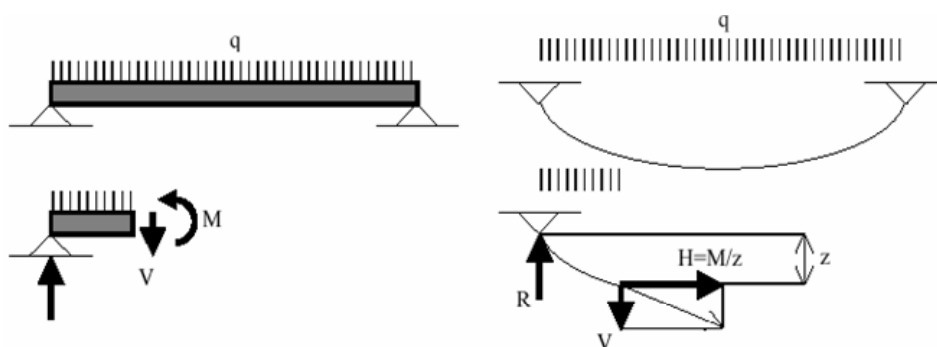


Σχήμα 6 : Χαρακτηριστικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες καλωδιωτών κατασκευών

## ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ

Οι καλωδιωτές κατασκευές λειτουργούν σε καθαρό εφελκυσμό, και επομένως αναπτύσσουν ομοιόμορφο διάγραμμα τάσεων σε όλη τη διατομή, την οποία και εκμεταλλεύονται πλήρως, χωρίς κάμψη και κίνδυνο λυγισμού. Λόγω αυτού δεν απαιτούν ειδικά σχήματα διατομών, όπως τα καμπτόμενα μέλη, και υπερέχουν σημαντικά από άποψη τόσο αντοχής όσο και αξονικής δυσκαμψίας. Επιπλέον, προσαρμόζονται σε αλλαγές φορτίων αλλάζοντας τη γεωμετρία τους κυρίως παρά το επίπεδο των αναπτυσσόμενων τάσεων. Για τους λόγους αυτούς παρέχουν πολύ οικονομικές, από άποψη βάρους και κόστους, λύσεις, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μεγάλων ανοιγμάτων, όπου η μείωση του ίδιου βάρους αποκτά καθοριστική σημασία.

Ο μελετητής όμως πρέπει να έχει υπόψη του, ότι η στατική τους συμπεριφορά κυριαρχείται από τη μικρή τους εγκάρσια δυσκαμψία, και κατά συνέπεια τις μεγάλες μετατοπίσεις τους, όταν καταπονούνται από φορτία που δρουν κάθετα προς το διαμήκη τους άξονα. Μια δοκός αναπτύσσει διατμητικές και καμπτικές εντάσεις, μέσω των οποίων μεταφέρει τα εγκάρσια φορτία στις στηρίξεις (σχήμα 7). Αντίθετα, ένα 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 εγκάρσια εξωτερικά φορτία, είναι να παραμορφωθεί τόσο, ώστε το εγκάρσιο βέλος, πολλαπλασιαζόμενο με την οριζόντια συνιστώσα της εφελκυστικής έντασης, να δώσει μία ίση και αντίθετη ροπή, ενώ η κατακόρυφη συνιστώσα εξισορροπεί την τέμνουσα (σχήμα 7). Λόγω αυτών των μεγάλων παραμορφώσεων, η συμπεριφορά των καλωδίων υπό εγκάρσια φορτία είναι γεωμετρικά μη γραμμική, και κατά την ανάλυσή τους πρέπει να εφαρμόζονται ειδικές μέθοδοι.



Σχήμα 7 : Μηχανισμοί ανάληψης εγκάρσιων φορτίων από δοκούς και καλώδια

## ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Η μελέτη καλωδιωτών κατασκευών διέπεται, πέραν των άλλων γνωστών κανονισμών για το σχεδιασμό κατασκευών στον ελληνικό χώρο, και από το Μέρος 1-11 του Ευρωκώδικα 3: *EN 1993-1-11: 2006, Eurocode 3 : Design of steel structures, Part 1-11 : Design of structures with tension components*, το οποίο αυτή την περίοδο μεταφράζεται και στα ελληνικά. Για τα φορτία ανεμοπίεσης σε καλώδια ιστών, αλλά κατ' επέκταση και άλλων καλωδιωτών κατασκευών, ο μελετητής μπορεί να χρησιμοποιήσει το Μέρος 7-1 του Ευρωκώδικα 3: *draft prEN 1993-7-1: 2002, Eurocode 3 : Design of steel structures, Part 7-1 : Towers, masts and chimneys*. Το θέμα των ταλαντώσεων υπό φορτία ανέμου, το οποίο είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για καλώδια μεγάλου μήκους, αντιμετωπίζεται στο Μέρος 1-4 του Ευρωκώδικα 1: *prEN 1991-1-4: 2003, Eurocode 1 : Actions on structures – Part 1-4: General actions - Wind actions*.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. H. M. Irvine, Cable Structures. MIT Press (1981).
2. J. W. Leonard, Tension Structures : Behavior and Analysis. McGraw-Hill (1988).
3. Otto, F., «Tensile structures: Design, Structure and Calculation of Buildings of Cables, Nets and Membranes», MIT Press, (1982).
4. Berger, H., «Light Structures - Structures of Light: The Art and Engineering of Tensile Architecture», Birkhauser, (1996).
5. Levy, R. And Spillers, W.R., «Analysis of Geometrically Nonlinear Structures», Chapman and Hall, (1995).