

«Cutting edge technologies in high and extra-high voltage underground and submarine cables»



**Κωνσταντίνος Τασταυρίδης PhD, Προϊστάμενος τμήματος σχεδιασμού,
Ελληνικά καλώδια Α.Ε.**

Abstract:

Hellenic Cables S.A. is a major provider of High and Extra High Voltage land and submarine cable turnkey solutions, employing state of the art technologies in design, production and testing.

In the design area, dimensioning of the conductors, considering environmental conditions and the installation characteristics is very important for the reliability and efficiency of the transmission system. Sophisticated tools (numerical modeling, Finite Element Analysis, EMTP etc.) are used for calculating amongst others steady state and transient thermal rating, cable system over- voltages or electromagnetic fields for various cable system layouts and bonding schemes.

In addition to the above, mechanical calculations – again using advanced numerical modeling tools - play a significant role in particular for designing submarine cables.

The HV/EHV land cable plant in Thiva and the submarine cable plant in Fulgor have made significant investments in state of the art production and testing equipment.

Περίληψη:

Η Ελληνικά καλώδια είναι ένας σημαντικός προμηθευτής καλωδίων υψηλής και υπερ-υψηλής τάσεως υπογείων και υποβρυχίων καλωδίων, με τεχνολογίες αιχμής στον σχεδιασμό, στην παραγωγή και στις δοκιμές.

Στον σχεδιασμό, η διαστασιολόγηση των αγωγών, λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά εγκατάστασης, είναι πολύ σημαντική για την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα του συστήματος μετάδοσης. Τα εξελιγμένα εργαλεία (αριθμητική μοντελοποίηση, Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων, EMTP κλπ.) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό, μεταξύ άλλων, της θερμικής ικανότητας σε σταθερή και μεταβατική κατάσταση φόρτισης, υπερτάσεων καλωδίων ή ηλεκτρομαγνητικών πεδίων για διάφορες διατάξεις καλωδίων και συστήματα γείωσης. Εκτός από τα παραπάνω, οι μηχανικοί υπολογισμοί - και πάλι χρησιμοποιώντας προηγμένα εργαλεία αριθμητικής μοντελοποίησης - διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο ειδικότερα για το σχεδιασμό υποβρυχίων καλωδίων.

Η μονάδα χερσαίων καλωδίων HV / EHV στη Θήβα και η υποθαλάσσια εγκατάσταση καλωδίων στην Fulgor έχουν πραγματοποιήσει σημαντικές επενδύσεις σε εξοπλισμό παραγωγή, δοκιμών και ανάπτυξης.

Ο όμιλος Ελληνικά Καλώδια είναι ένας από τους μεγαλύτερους παραγωγούς καλωδίων στην Ευρώπη. Ο όμιλος διατηρεί δυο εργοστάσια παραγωγής καλωδίων στην Ελλάδα και ένα στην Ρουμανία. Δίνεται μεγάλη έμφαση στην ανάπτυξη προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, όπως υποβρύχια καλώδια και καλώδια υψηλής και υπερυψηλής τάσης. Ο όμιλος διαθέτει ευρύ φάσμα προϊόντων που επεκτείνεται σε καλώδια ισχύος με μόνωση PVC, EPR και XLPE (έως 500kV), καλώδια πλοίων και καλώδια ελεύθερα αλογόνων με χαμηλή εκπομπή καπνού, πυράντοχα καλώδια, καλώδια τηλεπικοινωνιών, σηματοδότησης και μεταφοράς δεδομένων με αγωγούς χαλκού ή οπτικές ίνες, καθώς και βραδύκαυστα, ελεύθερα αλογόνων πλαστικά και ελαστικά μείγματα και σύρματα περιελίξεων.

A. Η παραγωγική διαδικασία των καλωδίων περιλαμβάνει τις εξής φάσεις:

1. Παραγωγή σύρματος χαλκού και αλουμινίου

Ο όμιλος διαθέτει μονάδα χύτευσης χαλκού και αλουμινίου για την παραγωγή βέργας Φ8mm και Φ9.6mm. Οι βέργες υποβιβάζονται σε μικρότερες διαμέτρους κατάλληλες για τον σχηματισμό των αγωγών



2. Σχηματισμός του αγωγού

Ο αγωγός μπορεί να είναι χαλκού ή αλουμινίου. Μπορεί να αποτελείται από πολλά συρματίδια (πολύκλωνος) ή να είναι πλήρης (μονόκλωνος). Στις μεγάλες διατομές για να μειωθεί η AC αντίσταση, χρησιμοποιείται ο τύπος Milliken όπου ο αγωγός αποτελείται από επιμέρους κυκλικούς τομείς που διαχωρίζονται μεταξύ τους με ταινίες.



3. Μόνωση

Στα καλώδια υψηλής και υπερυψηλής τάσης, η μόνωση είναι το δικτυωμένο πολυαιθυλένιο (XLPE). Επιτρέπει την συνεχή λειτουργία των καλωδίων στους 90 βαθμούς Κελσίου. Βραχυχρόνια σε περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων, μπορεί να καταπονηθεί σε θερμοκρασία 250 βαθμών.

Δίνεται μεγάλη προσοχή στην καθαρότητα των υλών και στην σωστή διαχείρισή τους σε κατάλληλα διαμορφωμένους χώρους (clean rooms). Επίσης υπάρχουν συστήματα ελέγχου της ποιότητας της παραγωγικής διαδικασίας (on line).



4. Απαερίωση

Κατά την διάρκεια του βουλκανισμού, δηλαδή της διασταύρωσης του πολυαιθυλενίου, δημιουργούνται παρα-προϊόντα μέσα στην μόνωση. Ο μονωμένος αγωγός τοποθετείται σε ειδικούς χώρους όπου με θέρμανση, προκαλείται η απομάκρυνση αυτών των επιβλαβών στοιχείων.



5. Εφαρμογή μεταλλικού και πλαστικού μανδύα

Τα καλώδια υψηλής και υπερυψηλής τάσης σχεδιάζονται ως ξηρού τύπου. Δεν επιτρέπεται να έρθει η μόνωση σε επαφή με το νερό. Στα υποβρύχια υψηλής τάσης, χρησιμοποιείται μανδύας κράματος μολύβδου που λειτουργεί ως μεταλλική θωράκιση, προσφέροντας ακτινική προστασία στην μόνωση έναντι νερού και υγρασίας.

Ο πλαστικός μανδύας προσφέρει μηχανική προστασία στον πόλο.



6. Περιέλιξη των πόλων

Τα υποβρύχια καλώδια συνήθως είναι τριπολικά. Οι πόλοι τοποθετούνται σε ειδικά ταψιά. Η περιέλιξη τους γίνεται σε κάθετες γραμμές παραγωγής. Η συστροφή των πόλων μπορεί να περιλαμβάνει και οπτικά καλώδια ή άλλα καλώδια σηματοδότησης. Για να αυξηθεί το συνεχόμενο μήκος, πραγματοποιούνται εργοστασιακοί σύνδεσμοι των πόλων.



7. Οπλισμός

Για την μηχανική προστασία του υποβρύχιου καλωδίου, εφαρμόζεται συνήθως οπλισμός από σύρματα γαλβανισμένο σιδήρου. Ο οπλισμός σχεδιάζεται έτσι ώστε να παραλαμβάνει τις μεγαλύτερες μηχανικές καταπονήσεις κατά την πόντιση και κατά την διάρκεια της ζωής του καλωδίου.



8. Αποθήκευση

Τα μεγάλα συνεχόμενα μήκη στις ενδιάμεσες και στις τελικές φάσεις τοποθετούνται σε ειδικά περιστρεφόμενα ταψιά.

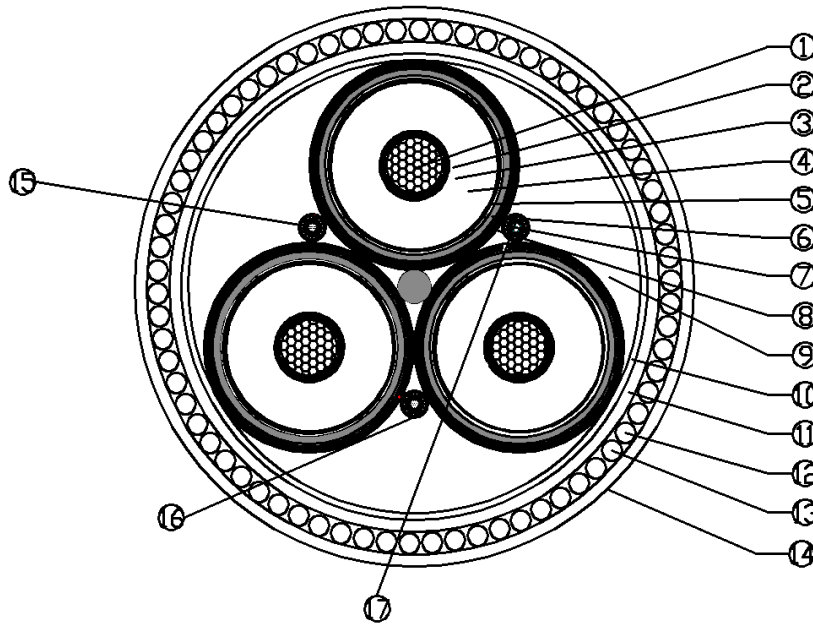


9. Εργαστήριο δοκιμών

Τα καλώδια δοκιμάζονται για την ποιότητα τους σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές και τις ειδικές απαιτήσεις των πελατών. Πραγματοποιούνται δοκιμές ρουτίνας και δειγματοληψίας πριν από κάθε παράδοση. Νέα σχεδιασμοί πιστοποιούνται με δοκιμές τύπου. Για την ανάπτυξη και εξέλιξη νέων σχεδιασμών, ο όμιλος διαθέτει τον απαραίτητο εξοπλισμό δοκιμών και ένα υπερσύγχρονο εργαστήριο πολυμερών.

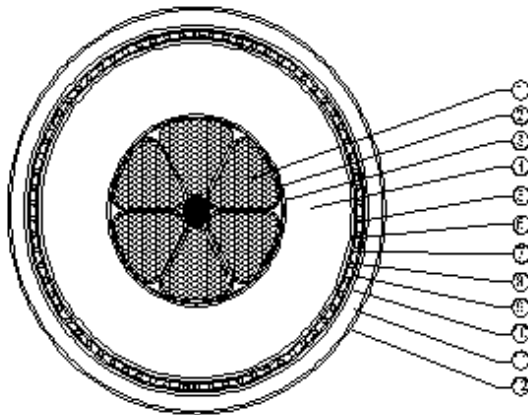


B. Τυπική δομή τριπολικού υποβρυχίου καλωδίου υψηλής τάσεως:



1. Στρόγγυλος πολύκλωνος συμπιεσμένος αγωγός με κατά μήκος υδατοστεγανότητα
2. Ημιαγωγίμες ταινίες
3. Εξωθημένο στρώμα ημιαγωγίμου
4. Μόνωση διασταυρωμένου πολυαιθυλενίου XLPE
5. Εξωθημένο στρώμα ημιαγωγίμου
6. Ημιαγωγίμες ταινίες
7. Μανδύας κράματος μολύβδου
8. Ημιαγωγίμος μανδύας πολυαιθυλενίου
9. Παρεμβύσματα στα διάκενα μεταξύ των πόλων
10. Ταινία περιέδεσης
11. Στρώση σχοινιών πολυπροπυλενίου
12. Σύρματα οπλισμού (γαλβανισμένα)
- 13, 14 Δυο στρώσεις σχοινιών πολυπροπυλενίου
- 15,16,17 Οπτικά καλώδια ή άλλα καλώδια σηματοδότησης

Τυπική δομή μονοπολικού υπόγειου καλωδίου υψηλής τάσεως:



1. Αγωγός Milliken που αποτελείται από κυκλικούς τομείς με κατά μήκος υδατοστεγανότητα
2. Ημιαγώγιμες ταινίες
3. Εξωθημένο στρώμα ημιαγωγίμου
4. Μόνωση διασταυρωμένου πολυαιθυλενίου XLPE
5. Εξωθημένο στρώμα ημιαγωγίμου
6. Ημιαγώγιμες ταινίες
7. Μεταλλική θωράκιση από σύρματα χαλκού ή αλουμινίου
8. Οπτικά στοιχεία για την μέτρηση της θερμοκρασίας (όποτε απατείται)
9. Ημιαγώγιμη ταινία
10. Ταινία αλουμινίου ή χαλκού με κατά μήκος εφαρμογή (με επικάλυψη ή ραφή) για ακτινική υδατοστεγανότητα
11. Μανδύας πολυαιθυλενίου
12. Ημιαγώγιμη εξωθημένη στρώση για δοκιμή τάσης μετά την εγκατάσταση

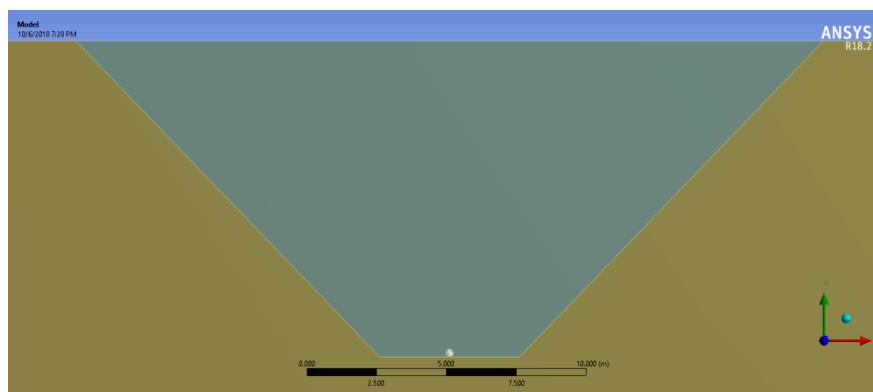
Γ. Υπολογιστικά εργαλεία και μεθοδολογίες για την διαστασιολόγηση και την μελέτη των καλωδίων:

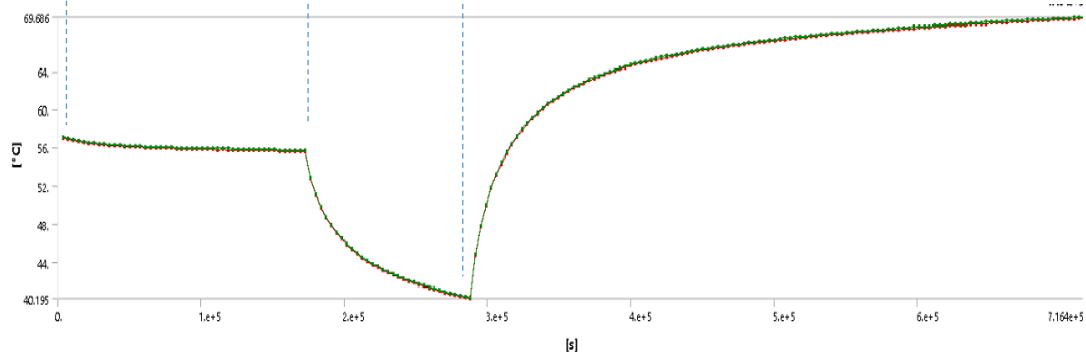
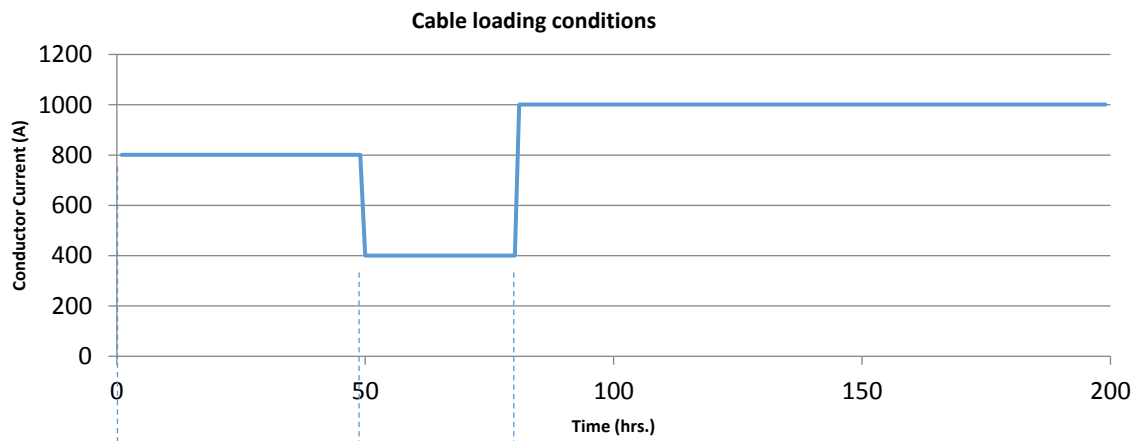
Η μελέτη ενός καλωδιακού συστήματος περιλαμβάνει τα εξής:

- α. Θερμικός υπολογισμός της ικανότητας μεταφοράς ισχύος παίρνοντας υπόψη τις συνθήκες περιβάλλοντος και λειτουργίας.
- β. Διαστασιολόγηση των μεταλλικών στοιχείων του καλωδίου (αγωγός και μεταλλική θωράκιση) βάσει των απαιτήσεων βραχυκύκλωσης
- γ. Μηχανική προστασία των καλωδίων στην εγκατάσταση και στην λειτουργία τους.
- δ. Συστήματα γείωσης των μεταλλικών μανδύων
- ε. Εγκατάσταση των καλωδίων

Γ1. Για τους θερμικούς υπολογισμούς, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα με τις αναλυτικές μεθόδους που περιγράφονται στην IEC 60287 και στην IEC 60853. Σε κάποιες περιπτώσεις που η περιπλοκότητα είναι αυξημένη, έχει παρατηρηθεί ότι οι μέθοδοι αυτοί δεν βγάζουν αποτελέσματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις αναπτύχθηκαν μοντέλα με πεπερασμένα στοιχεία σε ANSYS και COMSOL.

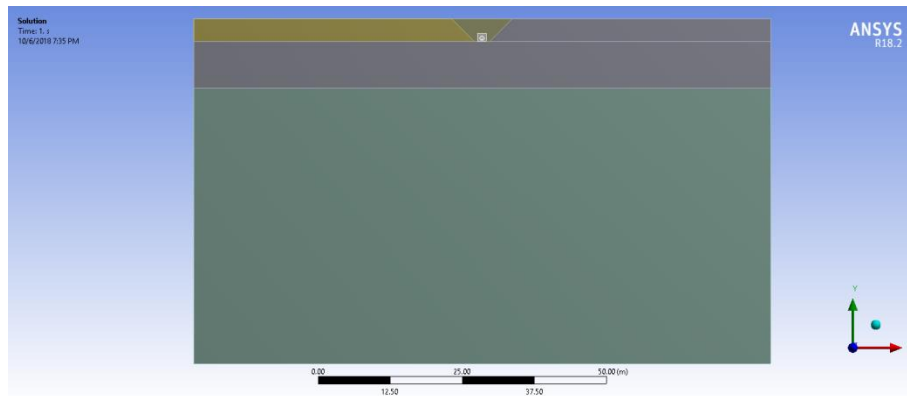
Στην παρακάτω περίπτωση, έχουμε θαμμένο τριπολικό υποβρύχιο καλώδιο. Σε μια τραπεζοειδή περιοχή γύρω από το καλώδιο, έχει αντικατασταθεί το φυσικό χώμα, από άμμο συγκεκριμένης θερμικής αντίστασης (διαφορετική από αυτή του υπόλοιπου εδάφους). Επίσης, η φόρτιση του καλωδίου είναι μια σειρά παλμών.

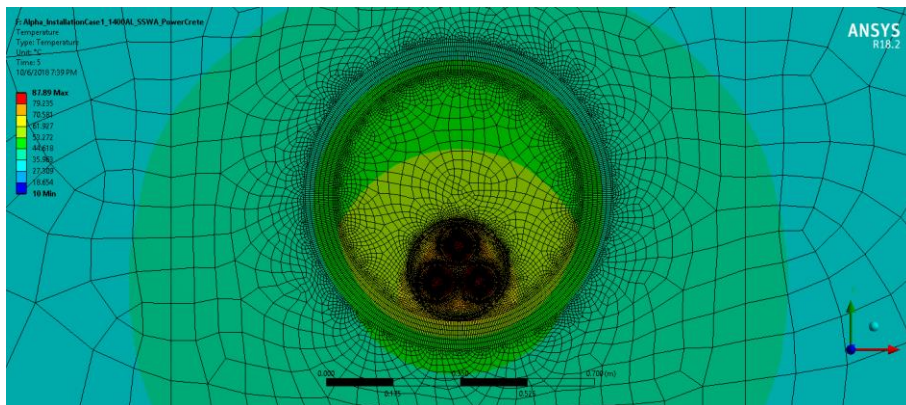
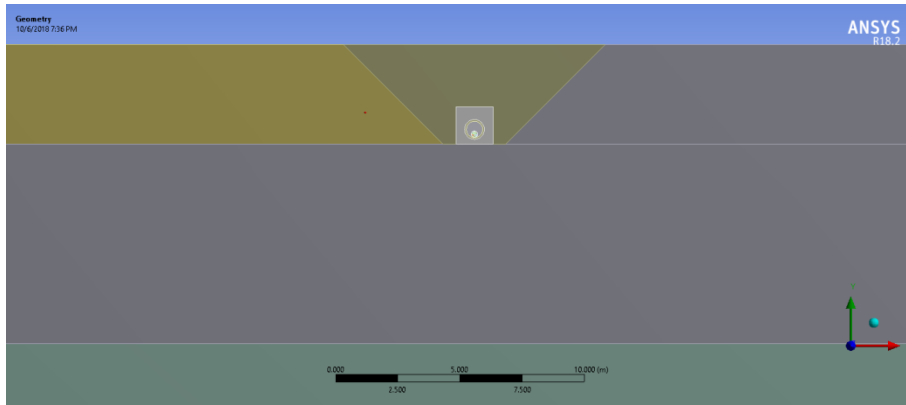




Θερμοκρασία του αγωγού κατά την διάρκεια της παλμοσειράς

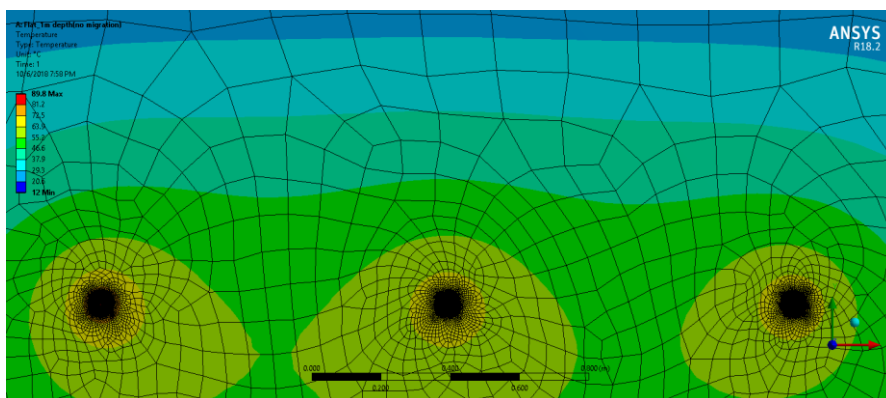
Σε μια άλλη περίπτωση, έχουμε πολυστρωματικό έδαφος με διαφορετικές θερμικές αγωγιμότητες. Επιπλέον το υποβρύχιο καλώδιο βρίσκεται μέσα σε σωλήνα (Horizontal directional drilling).



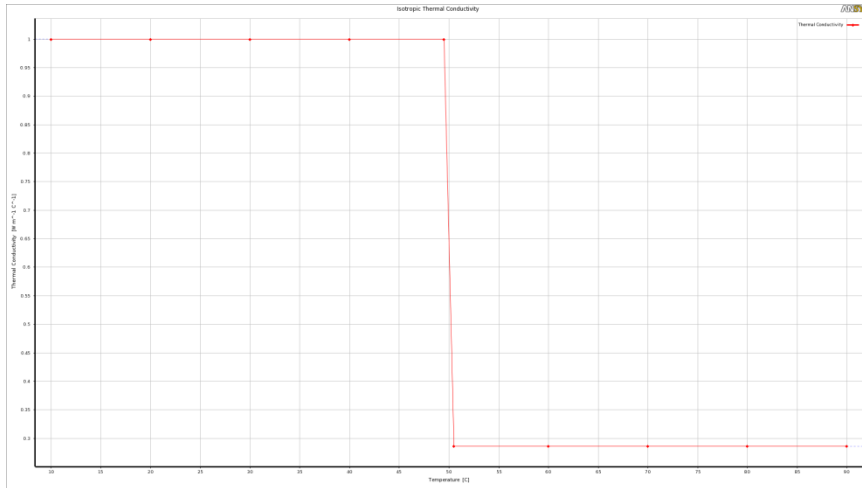


Θερμοκρασιακή κατανομή στο καλώδιο και στον χώρο που το περιλαμβάνει

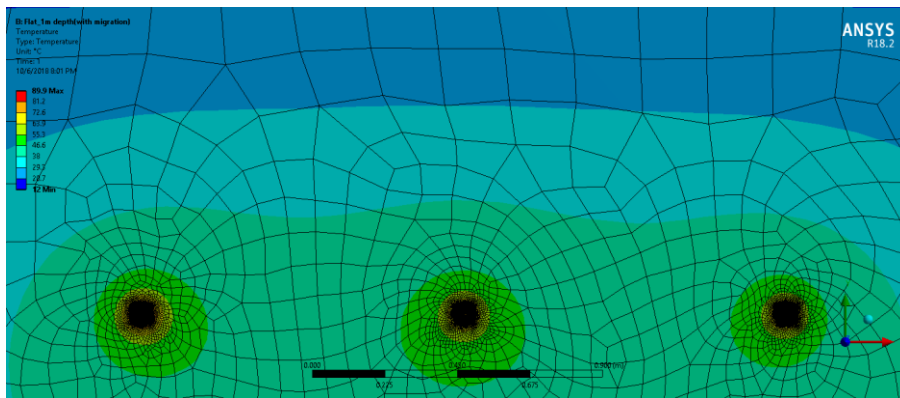
Ένα σημαντικό φαινόμενο που μπορεί να παίζει ρόλο είναι η ξήρανση του εδάφους. Πέρα από την αναλυτική μέθοδο, το αντιμετωπίζουμε με μεγάλη ακρίβεια στο ANSYS.



Μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα 772 A (μη λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της ξήρανσης του εδάφους – μετανάστευση της υγρασίας)



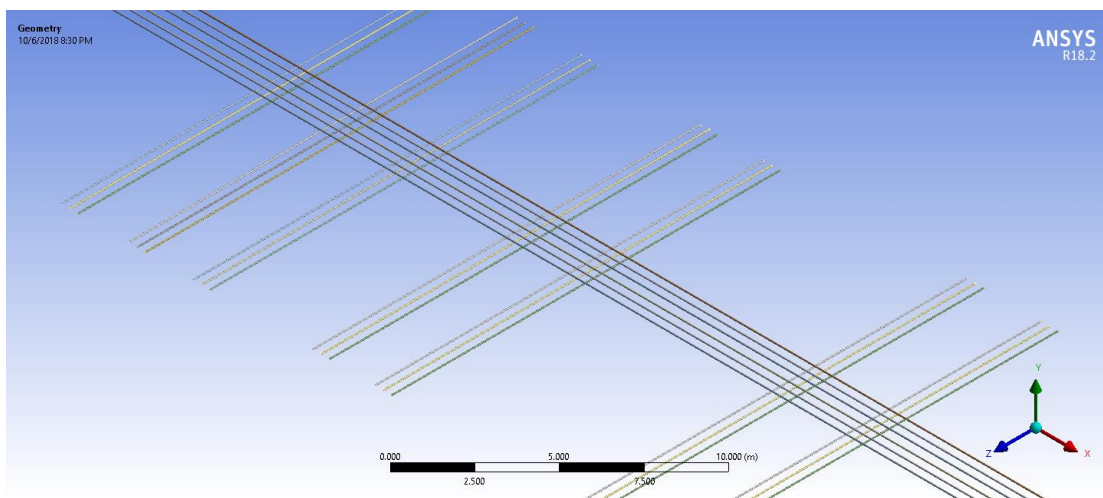
Συσχέτιση της θερμικής αντίστασης με την θερμοκρασία στο έδαφος



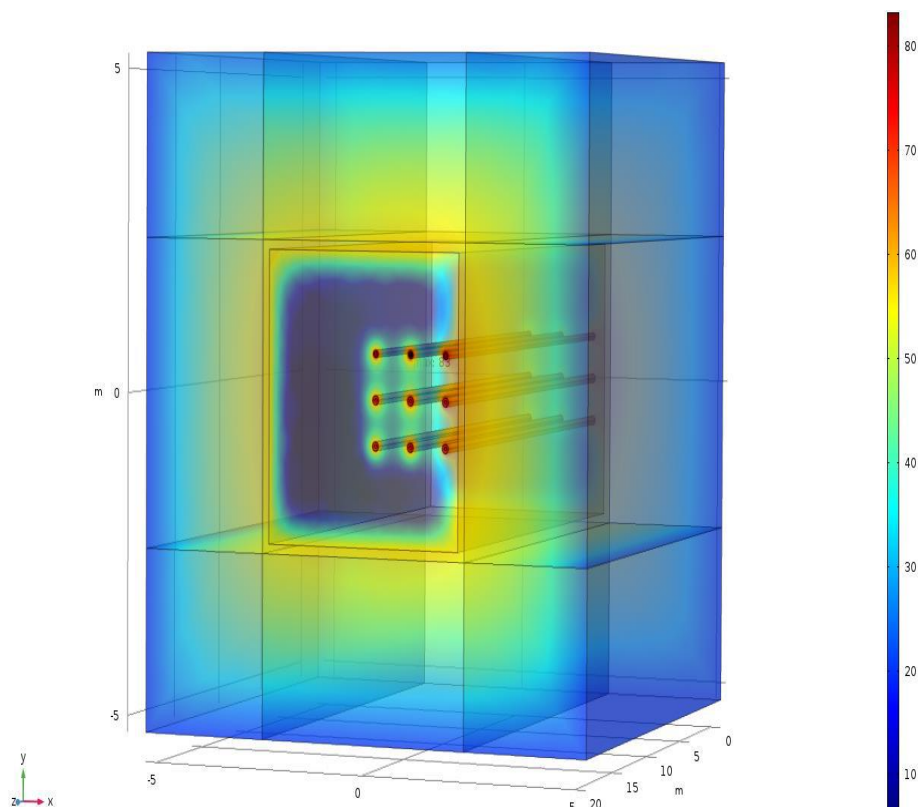
Μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα 634 A (λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της ξήρανσης του εδάφους – μετανάστευση της υγρασίας)

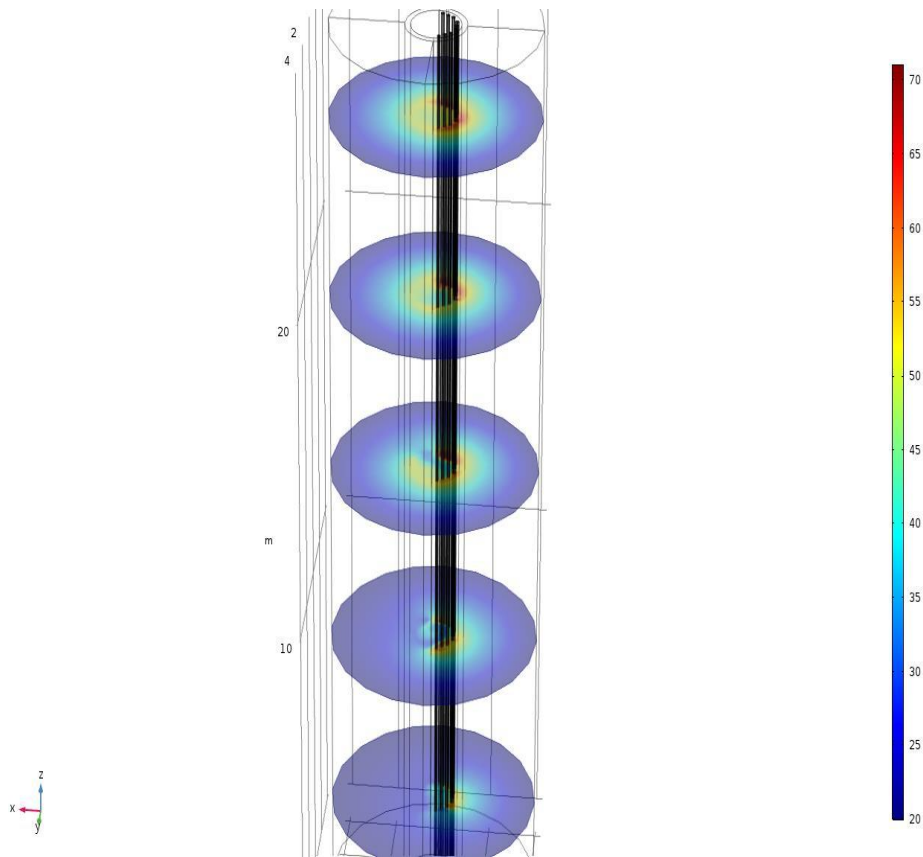
Από τα παραπάνω φαίνεται εάν συμβεί ξήρανση του εδάφους γύρω από τα καλώδια, η επιτρεπτή φόρτιση του καλωδίου μειώνεται.

Διασταυρώσεις κυκλωμάτων αντιμετωπίζονται με μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων



Τα καλώδια σε πολλές περιπτώσεις εγκαθίστανται σε οριζόντια και κάθετα τούνελ. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα από μοντελοποίηση πολλαπλών κυκλωμάτων με διαφορετικές φορτίσεις, με φυσική συναγωγή, ακτινοβολία και θερμική αλληλεπίδραση μεταξύ των καλωδίων.



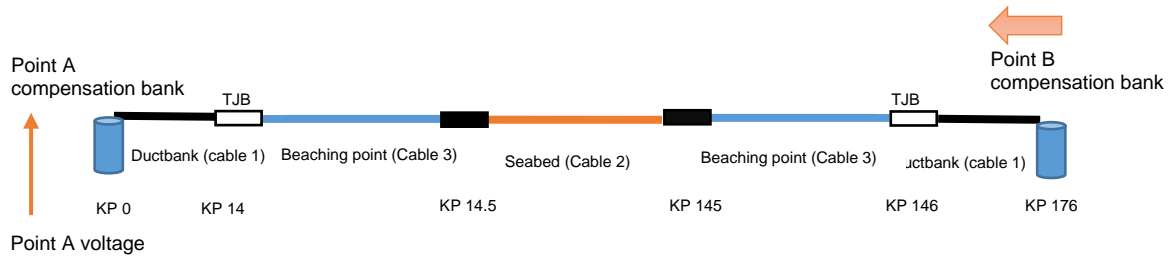


Στην προηγούμενη εικόνα, διακρίνεται ότι η θερμοκρασία είναι αυξημένη στο πάνω μέρος του κάθετου τούνελ αφού θεωρήθηκε ότι είναι κλειστό.

Γ2. Με εργαλεία όπως το EMTP, υπολογίζονται οι επαγόμενες τάσεις σε κανονική λειτουργία και στις περιπτώσεις τριφασικού και μονοφασικού βραχυκυκλώματος. Βάσει αυτών προδιαγράφουμε την ποιότητα του εξωτερικού μανδύα των καλωδίων και τα surge arresters όπου αυτά χρησιμοποιούνται.

Γ3. Σε μεγάλου μήκους γραμμές που μπορεί να περιλαμβάνουν υποβρύχιο και υπόγειο τμήμα, για να βελτιστοποιήσουμε την διαστασιολόγηση των καλωδίων, θα χρειαστούμε να λάβουμε υπόψη κάποιες ηλεκτρικές παραμέτρους όπως το χωρητικό ρεύμα, το σύστημα αντιστάθμισης άεργου ισχύος, η ενεργός και άεργος ισχύος που δίνει το δίκτυο και όλες τι συνοριακές συνθήκες.

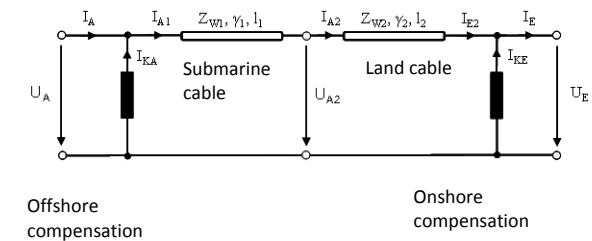
Στο παρακάτω σύστημα φαίνεται ότι στο σημείο B να υπάρχει έγχυση ενεργού και άεργου ισχύος, όπως επίσης και αντιστάθμιση άεργου ισχύος.



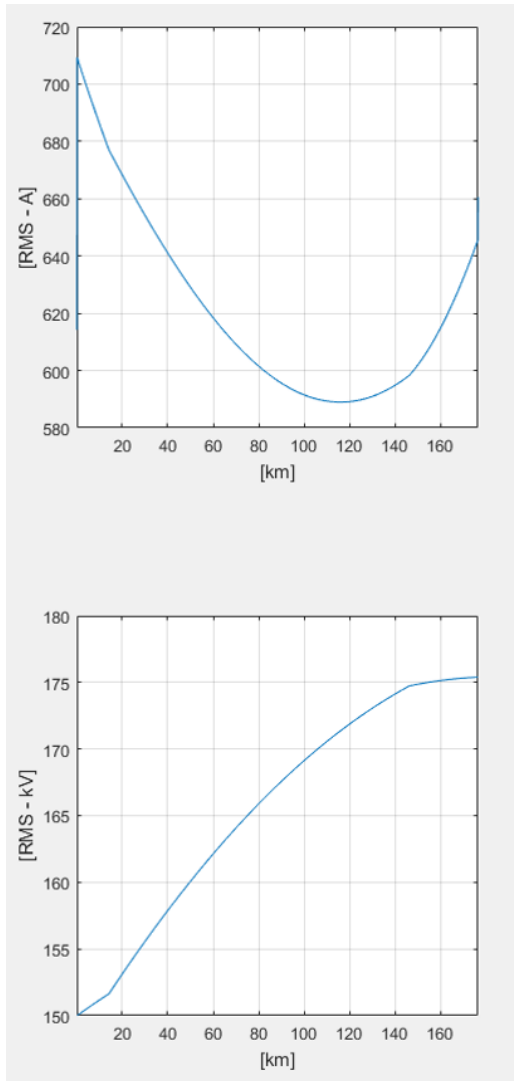
Έχουμε υπόγειο και υποβρύχιο καλώδιο, και στο σημείο A, έχουμε αντιστάθμιση και την συνοριακή συνθήκη η τάση να έχει συγκεκριμένη τιμή. Με ροή ισχύος (Newton-Raphson), υπολογίζουμε στο σημείο A.

$$\underline{U}(z) = \underline{U}_2 \cdot \cosh(\underline{\gamma} \cdot z) + \underline{Z}_W \cdot \underline{I}_2 \cdot \sinh(\underline{\gamma} \cdot z)$$

$$\underline{I}(z) = \underline{I}_2 \cdot \cosh(\underline{\gamma} \cdot z) + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_W} \cdot \sinh(\underline{\gamma} \cdot z)$$

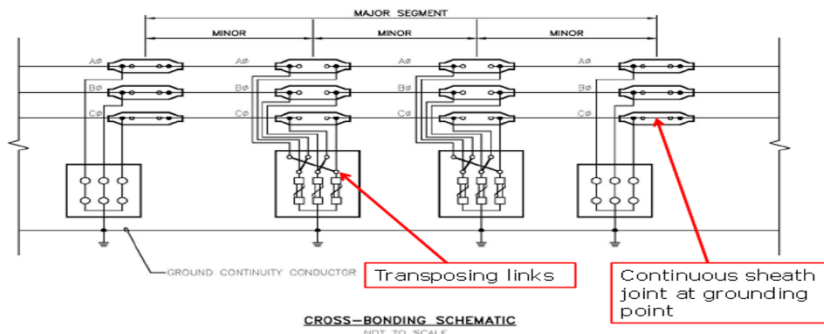


Με τις τηλεγραφικές εξισώσεις, μπορεί να υπολογιστεί το ρεύμα και η τάση ξεκινώντας από το σημείο A. Έτσι προκύπτει το προφίλ του ρεύματος και της τάσης.



Με την αντιστάθμιση και τα χαρακτηριστικά του καλωδίου, μπορεί να μετατοπιστεί η καμπύλη με τέτοιο τρόπο που να μπορούμε να αποφύγουμε θερμικά εμπόδια που μπορεί να προκαλέσουν την αύξηση της διατομής του αγωγού.

Γ4. Στα υπόγεια δίκτυα υψηλής τάσης, για να μειώσουμε τις θερμικές απώλειες, εφαρμόζουμε διασταύρωση των μεταλλικών θωρακίσεων.



Με το παραπάνω σύστημα γείωσης, υπάρχει ακύρωση των επαγόμενων τάσεων με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιηθούν τα κυκλοφορούντα ρεύματα στις μεταλλικές θωρακίσεις των καλωδίων.

Αυτό ισχύει όταν έχει την απόλυτη συμμετρία. Στην πραγματικότητα, κατά μήκος της διαδρομής έχουμε αλλαγές στις διατάξεις των καλωδίων (τριγωνική και επίπεδη διάταξη).

Για παράδειγμα, έχουμε ένα κύριο μέρος (major section) που αποτελείται από 3 δευτερεύοντα μήκη (minor sections). Εξετάζουμε την μεταφορική ικανότητα σε διάφορες περιπτώσεις:

A. Συμμετρική κατάσταση, κάθε δευτερεύον μήκος είναι 1 χλμ και τα καλώδια είναι τοποθετημένα σε τριγωνική διάταξη

B. Στο πρώτο δευτερεύον μήκος, για τα 900μ τα καλώδια είναι τριγωνική διάταξη και 100μ είναι σε επίπεδη διάταξη

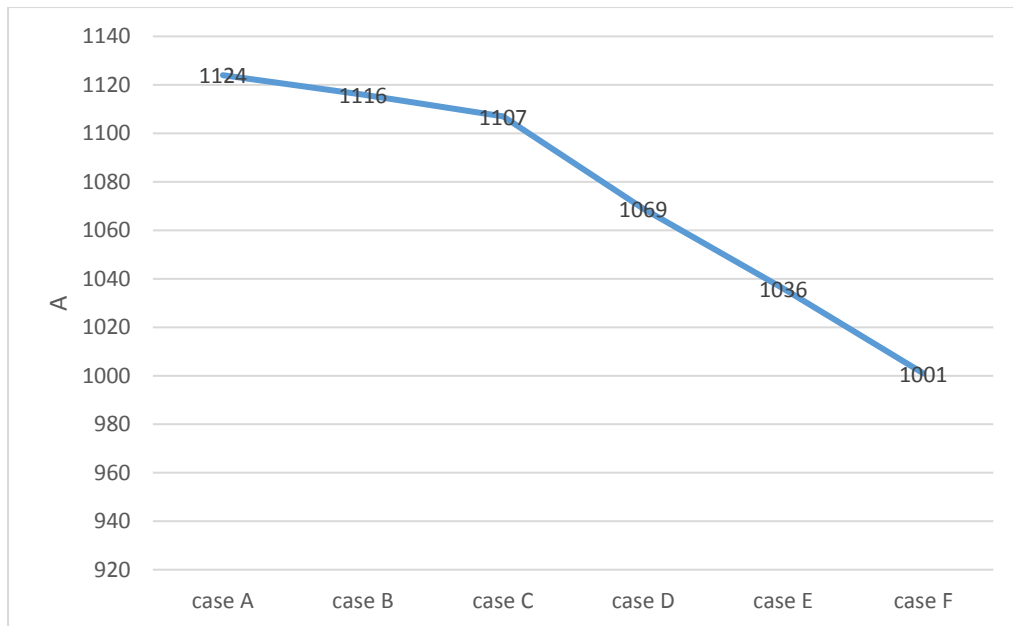
C. Στο πρώτο δευτερεύον μήκος, για τα 800μ τα καλώδια είναι τριγωνική διάταξη και 200μ είναι σε επίπεδη διάταξη

D. Στο πρώτο δευτερεύον μήκος, για τα 700μ τα καλώδια είναι τριγωνική διάταξη και 300μ είναι σε επίπεδη διάταξη

E. Στο πρώτο δευτερεύον μήκος, για τα 600μ τα καλώδια είναι τριγωνική διάταξη και 400μ είναι σε επίπεδη διάταξη

F. Στο πρώτο δευτερεύον μήκος, για τα 500μ τα καλώδια είναι τριγωνική διάταξη και 500μ είναι σε επίπεδη διάταξη

Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:



Όσο μεγαλώνει η ασυμμετρία, παρατηρούμε ότι η αύξηση των κυκλοφορούντων ρευμάτων, μειώνει την επιτρεπόμενη μεταφορική ικανότητα των καλωδίων.

Έχει αναπτυχθεί ένα μοντέλο βασισμένο στο CIGRE TB 283 που με ένα γρήγορο τρόπο υπολογίζει τα ρεύματα στις θωρακίσεις. Το μοντέλο έχει πιστοποιηθεί με το EMTP.

Γ5. Πέρα από την διαστασιολόγηση των καλωδίων, μελετούμε την εγκατάστασή τους με στόχο την μείωση των μηχανικών καταπονήσεων. Η μέθοδος που φαίνεται στην εικόνα ονομάζεται “snaking”.

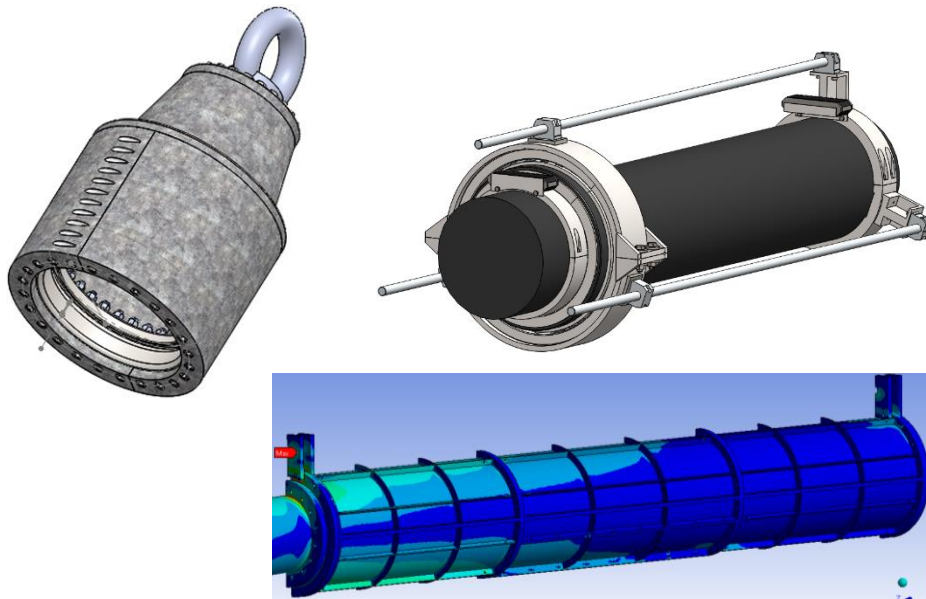


Μπορεί να εφαρμοστεί σε οριζόντια ή κάθετη εγκατάσταση. Με τον τρόπο αυτόν, η ελεύθερη μετατόπιση του καλωδίου κατά την διάρκεια των διαστολών και των συστολών, μειώνεται η ώθηση, και προστατεύει τις συσκευές στήριξης και τους συνδέσμους.

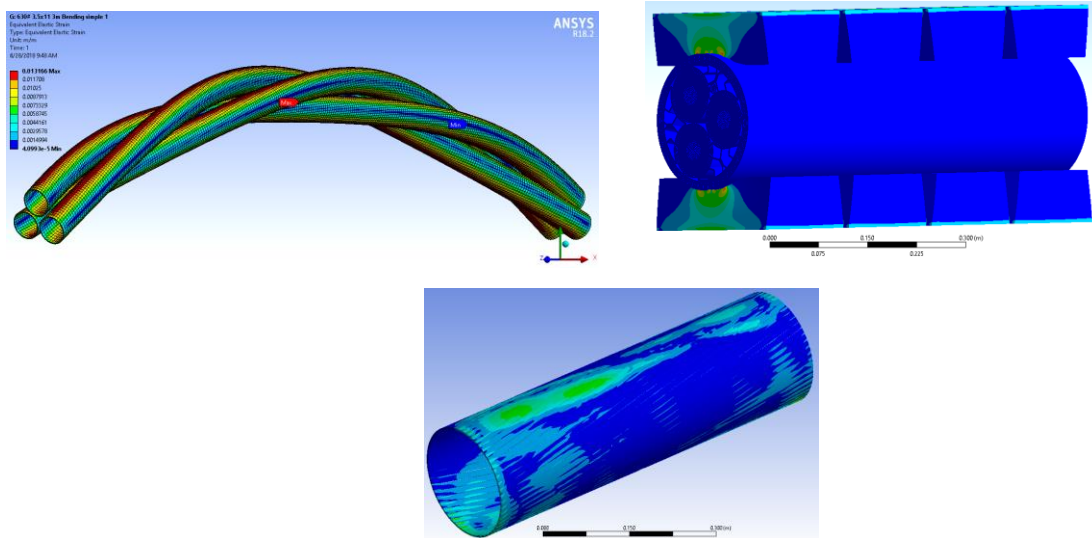




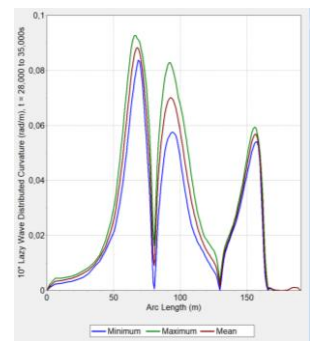
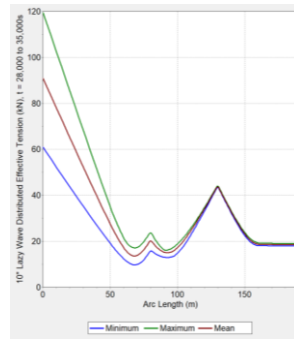
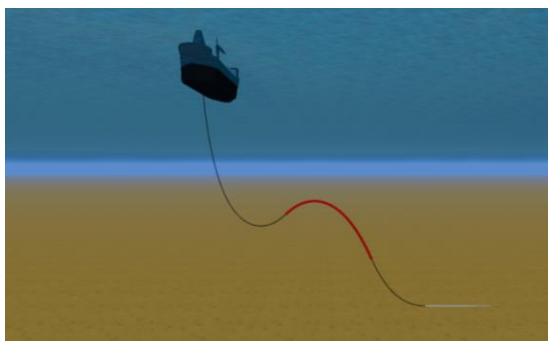
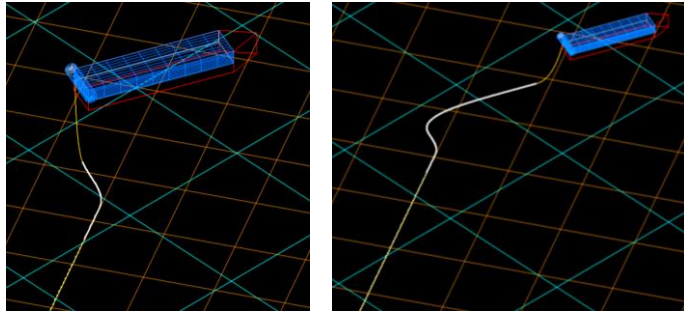
Γ6.Μια άλλη δραστηριότητα είναι ο σχεδιασμός εξαρτημάτων και εξοπλισμού όπως είναι ο σύνδεσμος επισκευής στα υποβρύχια καλώδια.



Γ7. Με εργαλεία όπως το solidworks και το ANSYS, υπολογίζουμε με μεγάλη ακρίβεια τα μηχανικά χαρακτηριστικά των καλωδίων, όπως την στοιβαρότητα σε εφελκυσμό, κάμψη και στρέψη. Επίσης υπολογίζουμε τον καταμοιρασμό των τάσεων σε καλώδια και εξαρτήματα. Μελετούμε επίσης τις καταπονήσεις σε όλες τις φάσεις της ζωής του καλωδίου.



Γ8. Πολύ σημαντικό πεδίο μελέτης είναι η πόντιση στα υποβρύχια καλώδια. Χρησιμοποιούμε το εμπορικό πρόγραμμα Orcaflex για να υπολογίζουμε τις μέγιστες τάσεις που δέχεται το καλώδιο ή ο σύνδεσμος επισκευής, μέγιστες κάμψεις, ροπές και την κόπωση.



Η ανάπτυξη εργαλείων και νέων προϊόντων συνεχίζεται με γοργό ρυθμό. Τα αναπτυξιακά μας προγράμματα περιλαμβάνουν υψηλής τάση DC καλωδιακά συστήματα, umbilical και δυναμικά υποβρύχια καλώδια υψηλής τάσης.