

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Δ.Μ.Π.Σ. ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ, ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΙΙ:
ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**‘Αγκυρωμένοι μη Επικαθήμενοι Αγωγοί Φυσικού Αερίου για την
Αποφυγή Υποθαλάσσιων Γεωκινδύνων’**

Ιωάννης Καταβάτης

Επιβλέπων: Δρ. Πρόδρομος Ψαρρόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2023

[This page was intentionally left blank.]

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Πρόδρομο Ψαρρόπουλο για την ανάδειξη και ανάθεση αυτού του ενδιαφέροντος θέματος.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδακτορικό φοιτητή Νικόλα Μακράκη για τη βοήθεια του στο πρόγραμμα Abaqus.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράστασή τους κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Περίληψη

Στις μέρες μας, η παγκόσμια ζήτηση για ενέργεια είναι τεράστια και συνεχώς αυξάνεται με ταχύτατους ρυθμούς. Ο ασφαλέστερος και οικονομικότερος τρόπος για τη μεταφορά της είναι μέσω των αγωγών. Είτε πρόκειται για πετρέλαιο είτε για φυσικό αέριο. Ένας αγωγός μπορεί να διανύει εκατοντάδες χιλιόμετρα, χερσαία ή θαλάσσια, προκειμένου να φτάσει το μεταφερόμενο προϊόν από τη χώρα παραγωγής στη χώρα κατανάλωσης. Κατά τη διαδρομή του, συναντά διαφόρων ειδών γεωκινδύνους οι οποίοι μπορεί να επηρεάσουν δυσμενώς την δομική του ακεραιότητα. Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι να θίξει ορισμένους από τους σημαντικότερους γεωκινδύνους και τον τρόπο με τον οποίο αυτοί μπορεί να επηρεάσουν έναν αγωγό και να προταθεί μία καινοτόμος λύση αποφυγής τους. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η λύση της ανύψωσης ενός τμήματος υποθαλάσσιου αγωγού με τη βοήθεια της άνωσης και τη χρήση τεχνητών πλωτήρων, προκειμένου να αποφευχθεί ενεργό σεισμικό ρήγμα που υπάρχει στην περιοχή διέλευσης του. Αρχικώς υπολογίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις του αγωγού αναλυτικά, για 300 m , 500 m, 700 m μήκος αγωγού και στη συνέχεια τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με την αριθμητική προσομοίωση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Τέλος, προστίθεται η καθίζηση του εδάφους προσομοιώνοντας με αυτόν τον τρόπο μια περίπτωση σεισμικού γεωκινδύνου και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα – συμπεράσματα της εργασίας.

Abstract

Nowadays, global demand for energy is enormous and is constantly increasing with high rates. The safest and most economical way to transport energy is through pipelines, whether it's oil or natural gas. A pipeline can cover hundreds of kilometers, either overland or underwater, to transport the product from the producing to the consuming country. Along its route, it encounters various geohazards that can adversely affect its structural integrity. The aim of this master thesis is to highlight some of the most significant geohazards and how these geohazards can impact a pipeline and proposing an innovative solution to avoid them. Specifically, the solution involves lifting a section of an offshore pipeline using buoyancy and the use of artificial floaters in order to cross with safety active seismic faults that lay in the passage area. Initially, the stresses and deformations of the pipeline are calculated in detail for lengths of 300 m, 500 m, and 700 m. Afterwards, these results are compared with the numerical simulation that comes from the use of the finite element program Abaqus. Finally, soil subsidence is added, simulating with this way a seismic geohazard and the results – conclusions of the study are presented and discussed.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 2: Υποθαλάσσιοι Γεωκίνδυνοι.....	4
2.1 Γεωκίνδυνοι υπό στατικές συνθήκες	5
Κατολισθήσεις	5
Διάβρωση.....	10
2.2 Σεισμική και ηφαιστειακή δραστηριότητα	13
Σεισμικοί γεωκίνδυνοι	13
Ηφαιστειακή δραστηριότητα	20
Σεισμικά θαλάσσια κύματα – τσουνάμι.....	23
Κεφάλαιο 3: Υποθαλάσσιοι Αγωγοί.....	28
3.1 Υποθαλάσσιοι αγωγοί μεταφοράς υδρογονανθράκων στον Παγκόσμιο Χάρτη	28
3.2 Κατασκευή και πόντιση υποθαλάσσιων αγωγών	33
3.3 Αλληλεπίδραση υποθαλάσσιων αγωγών με τον πυθμένα	46
3.4 Κανονισμοί σχεδίασης υποθαλάσσιων αγωγών	47
Κώδικας API RP 1111	48
Κεφάλαιο 4: Μη επικαθήμενοι αγωγοί.....	55
4.1 Τρόπος κατασκευής	55
4.2 Μηχανικό υπόβαθρο	59
Υπολογισμός τάσεων:.....	59
Υπολογισμός βέλους κάμψης	63
Κεφάλαιο 5: Αναλυτική λύση και αριθμητική προσομοίωση μη επικαθήμενου αγωγού έναντι σεισμικών γεωκινδύνων.....	70
5.1 Γεωμετρία αγωγού και υλικό κατασκευής.....	70
5.2 Μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση συναρτήσει βάθους πόντισης.....	73
5.3 Βέλος κάμψης και υπολογισμός μήκους μεταξύ στηρίξεων	80
5.4 Υπολογισμός ελάχιστης απαιτούμενης διαμέτρου τενόντων	90
5.5 Αναλυτική λύση.....	95
5.6 Αριθμητική προσομοίωση	114
5.7 Τελικά αποτελέσματα	135
Κεφάλαιο 6: Γενικά Συμπεράσματα & Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	137

Βιβλιογραφία 138

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1- 1. Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας και τρόποι παραγωγής της, Πηγή: Global Energy Consumption EARTH 104: Earth and the Environment (Development) (psu.edu).....	1
Εικόνα 2- 1. Πιθανοί γεωκίνδυνοι σε μια περιοχή, Πηγή: Science Direct, Ocean Mixing Ch.12: Mixing in the Southern Ocean, Sarah T. Gille, Katy L. Sheen, Sebastian Swart, Andrew F. Thompson.	4
Εικόνα 2- 2. Δυνάμεις σε μια επιφάνεια πρανούς, Πηγή Protecting Onshore Pipelines from the Geohazard of Seismic Slope Instability, Prodromos N. Psarropoulos, 10th Pipeline Conference, 8 June 2015 – Berlin, Germany.	6
Εικόνα 2- 3. Αστοχία πρανούς υπό την παρουσία νερού, Πηγή International Journal of Disaster Risk Reduction, Multi-hazard disaster studies: Monitoring, detection, recovery, and management, based on emerging technologies and optimal techniques, Vol. 47, August 2020. ...	7
Εικόνα 2- 4. Μορφές κατολισθήσεων, Πηγή Kentucky Geological Survey Landslide Inventory: From Design to Application, Matthew M. Crawford, 2014	8
Εικόνα 2- 5. Υποθαλάσσια κατολίσθηση, Πηγή Deep-sea drilling and submarine landslides, at deformation, researchgate.net	9
Εικόνα 2- 6. Διαδρομή Ρεύματος του Κόλπου (Gulf Stream). Πηγή: Πτυχιακή Εργασία Μαρσίδη Κωνσταντίνου, ‘Το Τρίγωνο των Βερμούδων και οι Θεωρίες Εξήγησης αυτού του Μυστηρίου’, Σχολή Εμπορικού Ναυτικού, 2017.	11
Εικόνα 2 -7. Τεκτονικές πλάκες και τρόπος κίνησής τους, Πηγή Nature Geoscience, A record of spontaneous subduction initiation in the Izu–Bonin–Mariana arc, August, 2015.	14
Εικόνα 2 -8. Αποκλίνοντα όρια τεκτονικών πλακών, Πηγή Nature Geoscience, A record of spontaneous subduction initiation in the Izu–Bonin–Mariana arc, August, 2015.	15
Εικόνα 2- 9. Μεσοωκεάνια ράχη στον Ατλαντικό Ωκεανό, Πηγή Source National Earthquake Information Center (NEIC), US Geological Service.	15
Εικόνα 2- 10. Μεσοωκεάνια ράχη στον Ατλαντικό Ωκεανό που διασχίζει την Ισλανδία, Πηγή European Geoscience Union, photo: Stefano Urbani	16
Εικόνα 2-11. Υποθαλάσσια φωτογραφία της Μεσοωκεάνιας ράχης στον Ατλαντικό Ωκεανό. Πηγή Boat&Fishing.gr.....	16
Εικόνα 2- 12. Συγκλίνοντα όρια τεκτονικών πλακών. Πηγή: SciencePhotoLibrary.com.....	17
Εικόνα 2 -13. Δημιουργία οροσειράς Ιμαλαίων. Πηγή: Journal Science: Mountain Building (Orogenesis).....	17
Εικόνα 2-14. Δημιουργία ηφαιστείων και τάφρων. Πηγή: Journal: Nature Geoscience: A record of spontaneous subduction initiation in the Izu–Bonin–Mariana arc.	18
Εικόνα 2- 15. Δημιουργία ρήγματος San Andreas, California. Πηγή: Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών ,Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Τεκτονική Γεωλογία, Διαφάνειες Καθηγητή Στυλιανού Λοΐζου.....	18
Εικόνα 2- 16. Τομή ηφαιστείου. Πηγή: InternetGeography.net, Article: ‘What is a volcano’	20

Εικόνα 2- 17. Τρόπος σχηματισμού γκυγιό (guyot), Πηγή Encyclopaedia Britannica, Inc.	21
Εικόνα 2- 18. Midway Atoll, Hawaii. Πηγή: Harbourmaps.com	21
Εικόνα 2- 19. Σκίτσο ενός Guyot στον Ειρηνικό Ωκεανό σε βάθος μεγαλύτερο των 1000 μέτρων.	22
Εικόνα 2- 20. Τροχιά σωματιδίων νερού σε βαθιά νερά. Πηγή: Natural Hazards Journal, Volume 120, Issue 1, 2023	23
Εικόνα 2- 21. Αλλαγή μορφής τροχιάς σωματιδίων καθώς αυτά πλησιάζουν προς την ακτή. Πηγή: Natural Hazards Journal, Volume 120, Issue 1, 2023	25
Εικόνα 2- 22. Επίδραση τσουνάμι σε θαλάσσια κατασκευή. Πηγή Basic Pressure Concepts and Definitions, Cambridge University Press, 2021.	26
Εικόνα 3- 1. Διαδρομή Nord Stream. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’	28
Εικόνα 3- 2. Διαδρομή Nord Stream 2. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’	29
Εικόνα 3- 3. Διαδρομή Blue Stream. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’	30
Εικόνα 3- 4. Διαδρομή Turk Stream. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’	31
Εικόνα 3- 5. Διαδρομή Green Stream Pipeline. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’	31
Εικόνα 3- 6. Διαδρομή MedGaz Pipeline. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’	32
Εικόνα 3- 7. Διαδρομή TAP Pipeline. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’	33
Εικόνα 3- 8. Χάραξη διαδρομής αγωγού. Πηγή: HydroInternational.com, Satellite Derived Bathymetry.....	34
Εικόνα 3- 9. Κατασκευή τμημάτων αγωγού στο χαλβουργείο. Πηγή: Eastern –Steels.com , Seamless Steel Pipe.....	35
Εικόνα 3- 10. UOE μέθοδος. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’	36

Εικόνα 3- 11. Μέθοδος συγκόλλησης SAW. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγήτριας Άννας Ζερβάκη, ‘Συγκολλήσεις σε Αγωγούς (Εργοστασιακές/Εργοταξιακές)’, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, 2020	36
Εικόνα 3- 12. Μέθοδος συγκόλλησης SAW. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγήτριας Άννας Ζερβάκη, ‘Συγκολλήσεις σε Αγωγούς (Εργοστασιακές/Εργοταξιακές)’, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, 2020	37
Εικόνα 3- 13. Μέθοδος συγκόλλησης SAW. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’	37
Εικόνα 3- 14. Μέθοδος συγκόλλησης SAW. Πηγή: www.kjellberg.de/submerged-arc-welding .	37
Εικόνα 3- 15. Μέθοδος πόντισης ‘S – lay’. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’	38
Εικόνα 3-16. Σκάφος ‘S – lay’. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’	39
Εικόνα 3- 17. Stinger, ‘S – lay’ μέθοδος. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’	39
Εικόνα 3- 18. ‘J – lay’ μέθοδος. Πηγή: James G. Speight, 2014. Handbook of Offshore Oil and Gas Operations. 1 Edition. Gulf Professional Publishing.	40
Εικόνα 3- 19. Σκάφος ‘J – lay’ μεθόδου. Πηγή: Gazprom.com	41
Εικόνα 3- 20. Γερανός φέρνει σε κατακόρυφη θέση τμήμα αγωγού, ‘J – lay’ μέθοδος. Πηγή: Gazprom.com	41
Εικόνα 3- 21. ‘J – lay’, πλευρικό σκάφος στοιβάζει επάνω στο πλοίο τα τμήματα του αγωγού που θα συγκολληθούν. Πηγή: HuismanEquipment.com	42
Εικόνα 3- 22. Κυκλική φόρτιση αγωγού – Reel – lay method. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’	43
Εικόνα 3- 23. Τρόπος πόντισης αγωγού στην μέθοδο Reel – lay. Πηγή: Risk and Reliability Analysis of Deepwater Reel-Lay Installation: A Scenario Study of Pipeline during the Process of Tensioning.....	43
Εικόνα 3- 24. Πλοίο που χρησιμοποιεί την μέθοδο Reel – lay. Πηγή: James G. Speight, 2014. Handbook of Offshore Oil and Gas Operations. 1 Edition. Gulf Professional Publishing.	44
Εικόνα 3- 25. Μέθοδος ρυμούλκησης, με χρήση τεχνητών πλωτήρων. Πηγή: Publication: ‘Selection of offshore production systems considering uncertainties’, Lusilier, 2013.....	45
Εικόνα 3- 26. Μέθοδος ρυμούλκησης, με χρήση αλυσίδων. Πηγή: Publication: ‘Selection of offshore production systems considering uncertainties’, Lusilier, 2013	45
Εικόνα 3- 27. Μέθοδος ρυμούλκησης, πλοίο σύρει τον αγωγό στον πυθμένα. Πηγή: Publication: ‘Selection of offshore production systems considering uncertainties’, Lusilier, 2013	45

Εικόνα 3- 28. Τύποι εδάφους στον υποθαλάσσιο χώρο. Πηγή: en.Wikipedia.com, File: Submarine Pipeline vs Seabed	46
Εικόνα 3- 29. Τοπικός λυγισμός αγωγού. Πηγή: International Journal of Steel Structures, ‘Experimental Study and Finite Element Analysis of Initial Imperfection on 7A04-T6 Aluminum Alloy Circular Hollow Section Column’, Volume 21, 2021	53
Εικόνα 3- 30. Τρόποι αποτροπής διάδοσης του τοπικού λυγισμού, είτε με χρήση δακτυλιδιού είτε με τοπική αύξηση του πάχους. Πηγή: Dynamic Arrest of Propagating Buckles in Offshore Pipelines, Stelios Kyriakides	53
Εικόνα 3- 31. Τρόποι αποτροπής διάδοσης του τοπικού λυγισμού, είτε με χρήση δακτυλιδιού είτε με τοπική αύξηση του πάχους. Πηγή: Publication: ‘Influence of Stiffeners and Buckling Arrestors on the Behaviour of Offshore Pipelines under Bending’, Federico Guarracino, 2018. 53	
Εικόνα 4- 1. Άνωση και βάρος αγωγού.	55
Εικόνα 4- 2. Τρόπος αγκύρωσης τενόντων – αγωγού.	56
Εικόνα 4- 3. Χρήση καμπύλου συνδέσου για εξάλειψη των ροπών στις στηρίξεις	57
Εικόνα 4- 4. Ενδεικτικό σκίτσο πρόσοψης αγωγού – τενόντων.....	57
Εικόνα 4- 5. Οριζόντια μετατόπιση αγωγού από πλευρικά υποθαλάσσια ρεύματα.	58
Εικόνα 4- 6. Τμήμα αγωγού σε πλάγια όψη.	58
Εικόνα 4- 7. Τοποθέτηση πλωτήρων σε διάφορα σημεία ανά μήκος του αγωγού.	58
Εικόνα 4- 8. Κατανομή τάσεων σε λεπτότοιχα μέλη. Πηγή Mechanics of Materials 6 th ed. – Beer_Johnston, 2012.....	60
Εικόνα 4- 9. Κατανομή τάσεων στον αγωγό. Πηγή Mechanics of Materials 6 th ed. – Beer_Johnston, 2012.....	60
Εικόνα 4- 10. Ελεύθερο σώμα για τον προσδιορισμό της περιφερειακής τάσης. Πηγή Mechanics of Materials 6 th ed. – Beer_Johnston, 2012.	60
Εικόνα 4- 11. Ελεύθερο σώμα για τον προσδιορισμό της διαμήκου τάσης. Πηγή Mechanics of Materials 6 th ed. – Beer_Johnston, 2012.....	61
Εικόνα 4- 12. Πείραμα αστοχίας δοκιμίου σωλήνα λόγω περιφερειακής τάσης. Πηγή: Nuclear Corrosion Science and Engineering, Damien Feron, 2012.....	62
Εικόνα 4- 13. Αμφιέριστη δοκός.....	64
Εικόνα 4- 14. Διάγραμμα ελευθέρου σώματος – αμφιέριστη δοκός.	64
Εικόνα 4- 15. Οριακές συνθήκες σε αμφιέριστη δοκό.....	65
Εικόνα 4- 16. Αμφίπακτη δοκός.....	66
Εικόνα 4- 17. Διάγραμμα ελευθέρου σώματος – αμφίπακτη δοκός.....	67
Εικόνα 4- 18. Συνοριακές συνθήκες – αμφίπακτη δοκός.	68
Εικόνα 5- 1. Διάγραμμα ελευθέρου σώματος – Αμφιέριστη δοκός	85
Εικόνα 5- 2. Διάγραμμα ελευθέρου σώματος – αμφίπακτη δοκός.....	87
Εικόνα 5- 3. Τένοντας υπό εφελκυσμό.....	90

Εικόνα 5- 4. Τρόπος στήριξης αγωγού	91
Εικόνα 5- 5. Αγωγός μαζί με τένοντες.....	93
Εικόνα 5- 6. Τμήμα αγωγού 300 μέτρων.....	95
Εικόνα 5- 7. Τμήμα αγωγού 300 μέτρων – Μέθοδος κατανομής ροπών.	96
Εικόνα 5- 8. Τμήμα αγωγού 500 μέτρων.....	103
Εικόνα 5- 9. Τμήμα αγωγού 700 μέτρων.....	108
Εικόνα 5- 10. Αποτελέσματα στο Abaqus για 300 m μήκος.....	115
Εικόνα 5- 11. Αποτελέσματα στο Abaqus για 500μ. μήκος αγωγού.....	117
Εικόνα 5- 12. Αποτελέσματα στο Abaqus για 700 m μήκος αγωγού.....	119
Εικόνα 5- 13. Καθίζηση εδάφους κατά 2 m σε 300 m μήκος αγωγού – Abaqus	123
Εικόνα 5- 14. Καθίζηση εδάφους κατά 4 m σε 300 m μήκος αγωγού – Abaqus	123
Εικόνα 5- 15. Καθίζηση εδάφους κατά 6 m σε 300 m μήκος αγωγού – Abaqus	124
Εικόνα 5- 16. Καθίζηση εδάφους κατά 2 m σε 500 m μήκος αγωγού – Abaqus	127
Εικόνα 5- 17. Καθίζηση εδάφους κατά 4 m σε 500 m μήκος αγωγού – Abaqus	127
Εικόνα 5- 18. Καθίζηση εδάφους κατά 6 m σε 500 m μήκος αγωγού – Abaqus	128
Εικόνα 5- 19. Καθίζηση εδάφους κατά 2 m σε 700 m μήκος αγωγού – Abaqus	131
Εικόνα 5- 20. Καθίζηση εδάφους κατά 4 m σε 700 m μήκος αγωγού – Abaqus	131
Εικόνα 5- 21. Καθίζηση εδάφους κατά 6 m σε 700 m μήκος αγωγού – Abaqus	132

Πίνακας Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3- 1. Διάφορες πιέσεις στον αγωγό με βάση τον Κώδικα του API.....	50
Διάγραμμα 5- 1. Τάση – παραμόρφωση χάλυβα X65	72
Διάγραμμα 5- 2. Τεμνουσών δυνάμεων $V(x)$ – συναρτήσει μήκους – αμφιέριστη.....	86
Διάγραμμα 5- 3. Καμπτικών Ροπών $M(x)$ – συναρτήσει μήκους – αμφιέριστη.....	87
Διάγραμμα 5- 4. Τεμνουσών Δυνάμεων $V(x)$ – συναρτήσει μήκους –.....	89
Διάγραμμα 5- 5. Καμπτικών Ροπών $M(x)$ – συναρτήσει μήκους – αμφίπακτη.	90
Διάγραμμα 5- 6. Τεμνουσών δυνάμεων – μήκους.....	100
Διάγραμμα 5- 7. Καμπτικών ροπών – μήκους.....	100
Διάγραμμα 5- 8. Βέλους κάμψης – μήκους –αναλυτική.	103
Διάγραμμα 5- 9. Τεμνουσών Δυνάμεων – μήκους (500 m) – αναλυτική.....	105
Διάγραμμα 5- 10. Ροπών κάμψεως – μήκους (500 m) – αναλυτική.....	106
Διάγραμμα 5- 11. Βέλους κάμψης – μήκους (500 m) – αναλυτική.....	108
Διάγραμμα 5- 12. Τεμνουσών Δυνάμεων – μήκους (700 m) – αναλυτική.....	110
Διάγραμμα 5- 13. Ροπών κάμψεως – μήκους (700 m) – αναλυτική.....	111
Διάγραμμα 5- 14. Βέλους κάμψης – μήκους (700 m) – αναλυτική.....	114
Διάγραμμα 5- 15. Σεισμικής δραστηριότητας –καθίζησης με βάση τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα από: Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002, August 1994, New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement by Donald L. Wells and Kevin J. Coppersmith.....	122

Πίνακας Πινάκων

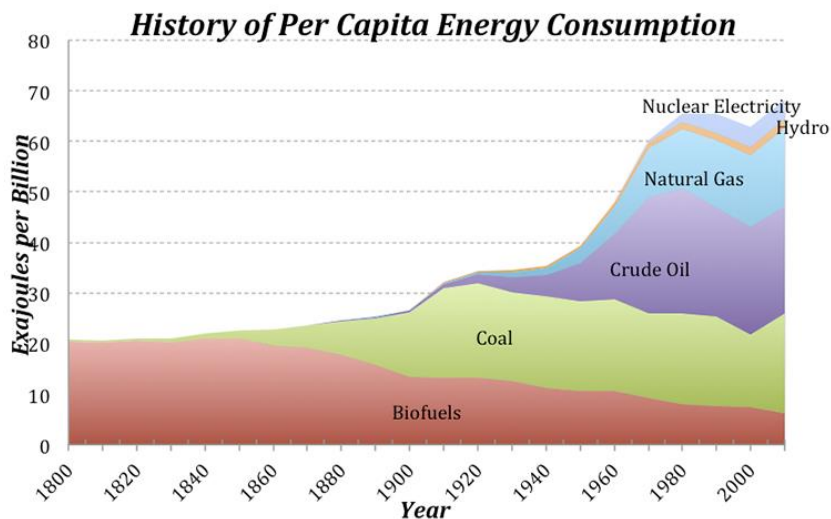
Πίνακας 5- 1. Διάμετρος – πάχος τοιχώματος αγωγού.....	71
Πίνακας 5- 2. Χημική σύνθεση χάλυβα X65.....	71
Πίνακας 5- 3. Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα X65.....	71
Πίνακας 5- 4. Δεδομένα σχεδίασης αγωγού.....	73
Πίνακας 5- 5. Τιμές μέγιστης τροπής συναρτήσεων του βάθους, βάσει API RP1111	79
Πίνακας 5- 6. Βέλη κάμψης για διάφορα μήκη μεταξύ στηρίξεων.....	84
Πίνακας 5- 7. Τέμνουσα δύναμη & ροπή κάμψης σε διάφορα μήκη του αγωγού- αμφιέριστη. 86	
Πίνακας 5- 8. Τέμνουσα δύναμη & ροπή κάμψης σε διάφορα μήκη του αγωγού- αμφίπακτη ...	89
Πίνακας 5- 9. Εύρεση Distribution Factors για κάθε ένα τμήμα του αγωγού	96
Πίνακας 5- 10. Εύρεση ροπών στα άκρα για κάθε ένα τμήμα του αγωγού.....	96
Πίνακας 5- 11. Moment Distribution Method.	97
Πίνακας 5- 12. Ροπές και δυνάμεις από την αναλυτική για τμήμα AB.....	97
Πίνακας 5- 13. Ροπές και δυνάμεις από την αναλυτική για τμήμα BC	98
Πίνακας 5- 14. Ροπές και δυνάμεις από την αναλυτική για τμήμα CD.....	98
Πίνακας 5- 15. Αντιδράσεις στους κόμβους από την αναλυτική	98
Πίνακας 5- 16. Τελικές αντιδράσεις στις στηρίξεις – αναλυτική.....	98
Πίνακας 5- 17. Σταθερές Ολοκλήρωσης - αναλυτική	101
Πίνακας 5- 18. Αντιδράσεις στις στηρίξεις (500 m) – αναλυτική.....	104
Πίνακας 5- 19. Εξισώσεις τεμνουσών δυνάμεων (500 m) – αναλυτική.....	104
Πίνακας 5- 20. Εξισώσεις ροπών κάμψεως (500 m) – αναλυτική	105
Πίνακας 5- 21. Σταθερές ολοκλήρωσης (500 m) – αναλυτική.....	106
Πίνακας 5- 22. Εξισώσεις κλίσης ουδέτερης επιφάνειας (500 m) – αναλυτική.....	107
Πίνακας 5- 23. Εξισώσεις βέλους κάμψης (500 m) – αναλυτική.....	107
Πίνακας 5- 24. Αντιδράσεις στις στηρίξεις (700 m) – αναλυτική.....	109
Πίνακας 5- 25. Εξισώσεις τεμνουσών δυνάμεων (700 m) – αναλυτική.....	109
Πίνακας 5- 26. Εξισώσεις ροπών κάμψεως (700 m) – αναλυτική	110
Πίνακας 5- 27. Σταθερές ολοκλήρωσης (700 m) – αναλυτική.....	111
Πίνακας 5- 28. Εξισώσεις κλίσης ουδέτερης επιφάνειας (700 m) – αναλυτική.....	112
Πίνακας 5- 29. Εξισώσεις βέλους κάμψης (700 m) – αναλυτική.....	113
Πίνακας 5- 30. Χαρακτηριστικές τιμές που θα εισαχθούν στο Abaqus	114
Πίνακας 5- 31. Αποτελέσματα για διάφορα d_tendons για μήκος αγωγού 300m.....	115
Πίνακας 5- 32. Αποτελέσματα για διάφορα d_tendons για μήκος αγωγού 500m.....	117
Πίνακας 5- 33. Αποτελέσματα για διάφορα d_tendons για μήκος αγωγού 700m.....	119
Πίνακας 5- 34. Δεδομένα από δημοσίευμα: Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002, August 1994, New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement by Donald L. Wells and Kevin J. Coppersmith.....	121
Πίνακας 5- 35. Μετατόπιση τενόντων κατά 2 m, 4 m, 6 m – μήκος αγωγού 300 m.	124

Πίνακας 5- 36. Μετατόπιση τενόντων κατά 2 m, 4 m, 6 m – μήκος αγωγού 500 m.	128
Πίνακας 5- 37. Μετατόπιση τενόντων κατά 2 m, 4 m, 6 m – μήκος αγωγού 700 m.	132
Πίνακας 5- 40. Τελικά αποτελέσματα που θα χρησιμοποιηθούν στο project	135

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Στις μέρες μας οι αγωγοί χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη μεταφορά υδρογονανθράκων είτε πρόκειται για αργό πετρέλαιο, είτε για φυσικό αέριο. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά πόσιμου νερού είτε άλλων ρευστών όπως λύματα κτλ. Η ζήτηση για ενέργεια συνεχώς αυξάνεται με ταχύτατους ρυθμούς, οπότε η ανάγκη για κατασκευή νέων αγωγών μεταφοράς προϊόντων πετρελαίου γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική. Μόνο τα τελευταία 50 χρόνια η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας τριπλασιάστηκε από τις 60,000 TWh τη δεκαετία του '70 στις 200,000 TWh το 2023.

Από τα παλιά τα χρόνια, ως κύρια πηγή ενέργειας χρησιμοποιούνταν ο άνθρακας. Οι άνθρωποι κάλυπταν τις βασικές τους ανάγκες σε ενέργεια με την καύση του άνθρακα. Η δεκαετία του '50 όμως υπήρξε μία μεταβατική περίοδος όπου ο άνθρακας δεν αποτελεί πλέον την κύρια πηγή ενέργειας αλλά έχουμε την κυριαρχία του πετρελαίου ως κύρια πηγή ενέργειας. Αυτή τη στιγμή κυρίαρχο ρόλο στον τομέα της ενέργειας έχει το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, χωρίς βέβαια να έχει εξαλείψει ο άνθρακας ο οποίος καλύπτει το 1/4 της παγκόσμιας παραγόμενης ενέργειας. Επίσης έχουν μπει στο παιχνίδι της ενέργειας τα τελευταία χρόνια και οι ‘‘πράσινες’’ πηγές ενέργειας, όπως είναι τα αιολικά πάρκα, ή τα ηλιακά πάνελ. Παρακάτω βλέπουμε μία ενδεικτική εικόνα της παραγόμενης ποσότητας ενέργειας παγκοσμίως, τα μέσα παραγωγής της και πως αυτή αυξάνεται με το πέρασμα των χρόνων.



Εικόνα 1- 1. Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας και τρόποι παραγωγής της, Πηγή: Global Energy Consumption | EARTH 104: Earth and the Environment (Development) (psu.edu).

Αυτή τη στιγμή βρίσκονται σε λειτουργία πάνω από 2,000 αγωγοί φυσικού αερίου και πετρελαίου, οι οποίοι περνούν από περισσότερες από 150 χώρες. Το συνολικό τους μήκος είναι ικανό να κάνει τον κύκλο της Γης πάνω από 30 φορές ξεπερνώντας τα 1 εκατομμύρια χιλιόμετρα.

Οι χώρες με το μεγαλύτερο δίκτυο αγωγών πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι οι παρακάτω:

1. ΗΠΑ: συνολικό μήκος αγωγών πετρελαίου = 91,100km / συνολικό μήκος αγωγών αερίου = 333,400km
2. Ρωσία: συνολικό μήκος αγωγών πετρελαίου = 38,500km / συνολικό μήκος αγωγών αερίου = 92,800km
3. Καναδάς: συνολικό μήκος αγωγών πετρελαίου = 23,400 / συνολικό μήκος αγωγών αερίου = 84,700km
4. Κίνα: συνολικό μήκος αγωγών πετρελαίου = 27,500km / συνολικό μήκος αγωγών αερίου = 76,400km
5. Αυστραλία: συνολικό μήκος αγωγών πετρελαίου = 1,700km / συνολικό μήκος αγωγών αερίου = 23,000km

Η σημασία της εύρυθμης λειτουργίας ενός αγωγού είναι πολύ σημαντική. Οποιαδήποτε βλάβη σε δίκτυο αγωγού πετρελαίου ή αερίου μπορεί να είναι κρίσιμη για τον άνθρωπο αλλά και για την οικονομία μιας χώρας, λόγω μη επαρκούς κάλυψης σε ενέργεια με ότι αυτό συνεπάγεται.

Η ασφάλεια των αγωγών μεταφοράς προϊόντων υδρογονανθράκων αποτελεί προτεραιότητα, κυρίως λόγω της υψηλής επικινδυνότητας των μεταφερόμενων προϊόντων. Απαιτείται μεγάλη προσοχή κατά τη φάση της μελέτης και σχεδιασμού του αγωγού, καθώς και της κατασκευής του. Μπορούν να προκληθούν διαφόρων τύπων ζημιές. Κάποιες από αυτές μπορεί να αφορούν ανθρώπινες δραστηριότητες, είτε αυτές είναι ακούσιες είτε εκούσιες. Παράδειγμα αποτελούν μία εκσκαφή πλησίον του αγωγού, μία εκδήλωση πυρκαγιάς, ένα σαμποτάζ κ.α. Επίσης μπορεί να έχουμε αστοχία υλικού, η οποία αν δεν εντοπιστεί και δεν μπορέσει να αντιμετωπιστεί άμεσα, μπορεί να αποβεί μοιραία για την ακεραιότητα του αγωγού. Τέλος μπορεί να έχουμε φυσικούς παράγοντες οι οποίοι είναι ικανοί να προκαλέσουν βλάβη στον αγωγό.

Ως γεωκίνδυνο μπορούμε να ορίσουμε την γεωλογική κατάσταση εκείνη, η οποία έχει τη δυνατότητα να εξελιχθεί περαιτέρω σε μια κατάσταση η οποία μπορεί να προκαλέσει ανεξέλεγκτες ζημιές στους αγωγούς. Γεωκινδύνους συναντάμε σε όλα τα μέρη της γης, αλλού μεγαλύτερους αλλού μικρότερους, οι οποίοι σχετίζονται πάντα με τις γεωλογικές συνθήκες που υπάρχουν στην περιοχή και τις γεωλογικές διεργασίες του εδάφους (υποθαλάσσιο ή μη), είτε πρόσφατες, είτε προηγούμενων ετών (παρακάτω θα αναπτύξουμε περαιτέρω το θέμα των γεωκινδύνων και κυρίως των υποθαλάσσιων).

Σαν κύριο στόχο η παρούσα εργασία έχει να θίξει το πρόβλημα των γεωκινδύνων και πώς αυτοί μπορεί να επηρεάσουν έναν υποθαλάσσιο αγωγό φυσικού αερίου/πετρελαίου, ο οποίος διασχίζει μία "επικίνδυνη" περιοχή, αλλά και να προταθεί μία καινοτόμος λύση στο πρόβλημα αυτό, η οποία θα αφορά την ανύψωση ενός τμήματος αγωγού που περνά από μία

περιοχή γεωκινδύνου, με τη χρήση της άνωσης και της βοήθειας τεχνητών πλωτήρων και τη συγκράτησή του στο επιθυμητό βάθος με τένοντες. Οι τένοντες θα θηλυκώσουν γύρω από τον αγωγό και στον πυθμένα θα συγκρατούνται με την τοποθέτηση μεγάλων βράχων.

Πιο συγκεκριμένα, η δομή θα έχει ως εξής:

Αρχικά στο 1ο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή και μελετάται το πρόβλημα για το οποίο γίνεται η εργασία.

Στη συνέχεια, στο 2ο κεφάλαιο αναπτύσσονται πιο αναλυτικά πέντε από τους βασικότερους γεωκινδύνους που μπορεί να συναντήσει κανείς σε μια περιοχή ενδιαφέροντος και πως αυτοί μπορούν να επηρεάσουν έναν αγωγό (είτε χερσαίο είτε υποθαλάσσιο).

Στο 3ο κεφάλαιο αναφέρονται οι σημαντικότεροι υποθαλάσσιοι αγωγοί αερίου/πετρελαίου (offshore pipelines) που βρίσκονται σε λειτουργία ή είναι υπό σχεδίαση, παρουσιάζονται τα κύρια στάδια κατασκευής ενός αγωγού, οι τρόποι πόντισης του στον πυθμένα, καθώς και το Κανονιστικό πλαίσιο που διέπει τα διάφορα στάδια κατασκευής ενός αγωγού.

Στο 4ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προτεινόμενη λύση που αφορά την ανύψωση ενός τμήματος αγωγού που περνά από μία περιοχή γεωκινδύνου, με τη χρήση της άνωσης και της βοήθειας τεχνητών πλωτήρων και τη συγκράτησή του στο επιθυμητό βάθος με τένοντες. Γίνεται μία παρουσίαση της ιδέας – concept, στη συνέχεια κατασκευάζεται ένα αναλυτικό μοντέλο, το οποίο στη συνέχεια συγκρίνεται με αριθμητικό, σε υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

Στο 5ο κεφάλαιο γίνεται αριθμητική εφαρμογή του παραπάνω μοντέλου, παίρνοντας ως δεδομένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός τυχαίου αγωγού. Παρουσιάζεται η αναλυτική λύση ενός τμήματος αγωγού για 300 m, 500m και 700m και στη συνέχεια συγκρίνεται με τα αποτελέσματα που δίνει το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.

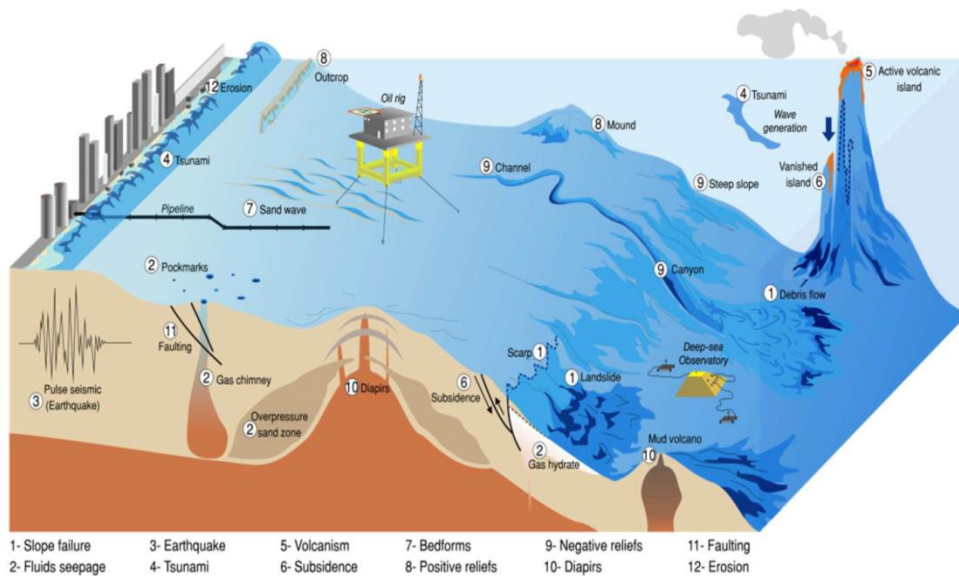
Τέλος, στο 6ο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα γενικά συμπεράσματα της εργασίας, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2: Υποθαλάσσιοι Γεωκίνδυνοι

Όπως είπαμε και παραπάνω ως γεωκίνδυνο μπορούμε να ορίσουμε τη γεωλογική κατάσταση εκείνη η οποία έχει τη δυνατότητα να εξελιχθεί περαιτέρω σε μια κατάσταση η οποία μπορεί να προκαλέσει ανεξέλεγκτες ζημιές στους υποθαλάσσιους αγωγούς.

Γεωκινδύνους συναντάμε σε όλα τα μέρη της γης, αλλού μεγαλύτερους αλλού μικρότερους, οι οποίοι σχετίζονται πάντα με τις γεωλογικές συνθήκες που υπάρχουν στην περιοχή και τις γεωλογικές διεργασίες του υποθαλάσσιου εδάφους, είτε πρόσφατες, είτε προηγούμενων ετών.

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται όλοι οι πιθανοί γεωκίνδυνοι που μπορεί να υπάρξουν σε μια περιοχή:



Εικόνα 2- 1. Πιθανοί γεωκίνδυνοι σε μια περιοχή, Πηγή: Science Direct, Ocean Mixing Ch.12: Mixing in the Southern Ocean, Sarah T. Gille, Katy L. Sheen, Sebastian Swart, Andrew F. Thompson.

Οι παραπάνω γεωκίνδυνοι όπως αποτυπώνονται στην εικόνα είναι οι εξής (με τη σειρά που είναι αριθμημένοι):

1. Αστοχία πρανούς
2. Έκλυση/ διαρροή ρευστών από το υπέδαφος
3. Σεισμική δραστηριότητα
4. Σεισμικά θαλάσσια κύματα (τσουνάμι)
5. Ηφαιστειακή δραστηριότητα

6. Υποχώρηση του εδάφους
7. Μορφή γεωλογικού σχηματισμού (bedforms)
8. Μορφή ανάγλυφου εδάφους (positive reliefs)
9. Μορφή ανάγλυφου εδάφους (negative reliefs)
10. Μορφή γεωλογικού σχηματισμού (diapirs)
11. Ρήγμα
12. Διάβρωση εδάφους

Οι σεισμοί, οι εκρήξεις ηφαιστειών, οι κατολισθήσεις, είναι γεωκίνδυνοι που μπορεί να προκαλέσουν δυναμικές καταπονήσεις. Από την άλλη έχουμε και τους γεωκινδύνους που μπορεί να προκαλέσουν στατικές, προοδευτικά αυξανόμενες, καταπονήσεις. Οπότε ένας γεωκίνδυνος μπορεί να ταξινομηθεί με βάση τη χρονική διάρκεια εκδήλωσής του. Παρακάτω θα αναλύσουμε ορισμένους απ' αυτούς, παραθέτοντας και κάποιες ενδεικτικές φωτογραφίες για κάθε μία μορφή γεωκινδύνου.

2.1 Γεωκίνδυνοι υπό στατικές συνθήκες

Κατολισθήσεις

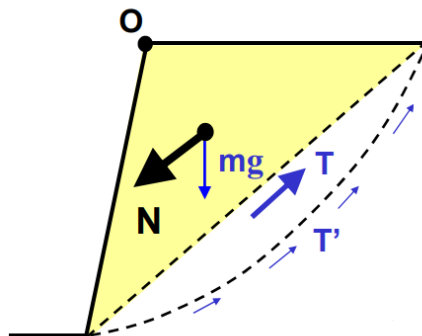
Ως πρηνές ορίζουμε τον φυσικό ή τεχνητό κεκλιμένο σχηματισμό του εδάφους. Επειδή σε κάθε πρηνές υπάρχει κλίση και διαφορά στάθμης του εδάφους, υπάρχουν οι δυνάμεις βαρύτητας οι οποίες θέλουν να εξομαλύνουν το έδαφος μέσω των διατμητικών τάσεων που δημιουργούν στο εσωτερικό του πρηνούς. Μέσω της διατμητικής αντοχής του εδάφους όμως, οι διατμητικές αυτές τάσεις δεν επαρκούν ούτως ώστε να μετακινήσουν μάζα από το έδαφος. Πολλές φορές όμως, κυρίως λόγω παρουσίας νερού, η διατμητική αντοχή του εδάφους μειώνεται σημαντικά. Έτσι οι διατμητικές τάσεις υπερνικούν τη διατμητική αντοχή του εδάφους και είναι σε θέση να προκαλέσουν μετακίνηση μάζας πρηνούς. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε τη λεγόμενη αστοχία πρηνούς.

Η αστοχία πρηνούς μπορεί να προκληθεί είτε από ανθρώπινο παράγοντα όπως με εκσκαφές, κατασκευή τεχνικών έργων κ.α. είτε από φυσικούς παράγοντες όπως με τη φυσική διάβρωση του εδάφους, την αποσάθρωση, με σεισμούς κ.α.

Για να ελέγξουμε την ευστάθεια ενός πρηνούς έναντι κατολίθησης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα συντελεστή ασφαλείας (safety factor) ως εξής:

$$S.F._{ST} = \frac{\text{resistance}}{\text{cause}} = \frac{T}{N} \quad (2.1)$$

Αν η τιμή του παραπάνω συντελεστή ασφαλείας είναι μεγαλύτερη της μονάδας τότε υπάρχει ευστάθεια ($SF > 1 \rightarrow OK$). Αν όμως ο συντελεστής ασφαλείας πέσει κάτω από τη μονάδα τότε έχουμε αστάθεια και προκαλείται ολίσθηση μάζας πρανούς ($SF < 1 \rightarrow$ slope failure).



Εικόνα 2- 2. Δυνάμεις σε μια επιφάνεια πρανούς, Πηγή Protecting Onshore Pipelines from the Geohazard of Seismic Slope Instability, Prodromos N. Psarropoulos, 10th Pipeline Conference, 8 June 2015 – Berlin, Germany.

Όπως βλέπουμε στην παραπάνω εικόνα, σε πλάγια όψη 2D, υπάρχουν δύο δυνάμεις που δρουν σε ένα τμήμα επιφανείας ενός πρανούς. Η δύναμη του βάρους, $W = m * g$, η οποία δρα κατακόρυφα προς το έδαφος και η διατμητική δύναμη T που αντιστέκεται στην ολίσθηση. Η δύναμη του βάρους αναλύεται σε δύο συνιστώσες, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:

Η δύναμη που δρα κατά μήκος του κεκλιμένου επιπέδου και προκαλεί την ολίσθηση είναι η $w * \sin\psi$, ενώ η δύναμη που τείνει να σταθεροποιήσει το πρανές είναι η $w * \cos\psi$.

Η διατμητική αντοχή του εδάφους δίνεται από τη σχέση:

$$\tau = c + \left(\frac{w * \cos\psi}{A} \right) * \tan\phi \quad (2.2)$$

(όπου c η συνοχή του εδάφους).

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη με A , όπου A το εμβαδόν της κεκλιμένης επιφάνειας που εδράζεται το βάρος w , θα έχουμε:

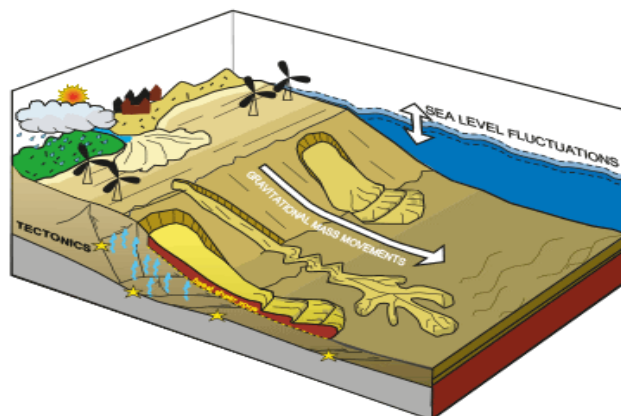
$$\tau * A = c * A + w * \cos\psi * \tan\phi \quad (2.3)$$

Το γινόμενο $\tau * A$ είναι η διατμητική δύναμη R (ή T με βάση την Εικόνα.2.2). Η δύναμη αυτή είναι υπεύθυνη για την ισορροπία του πρανούς καθώς αυτή αντιστέκεται στην ολίσθηση.

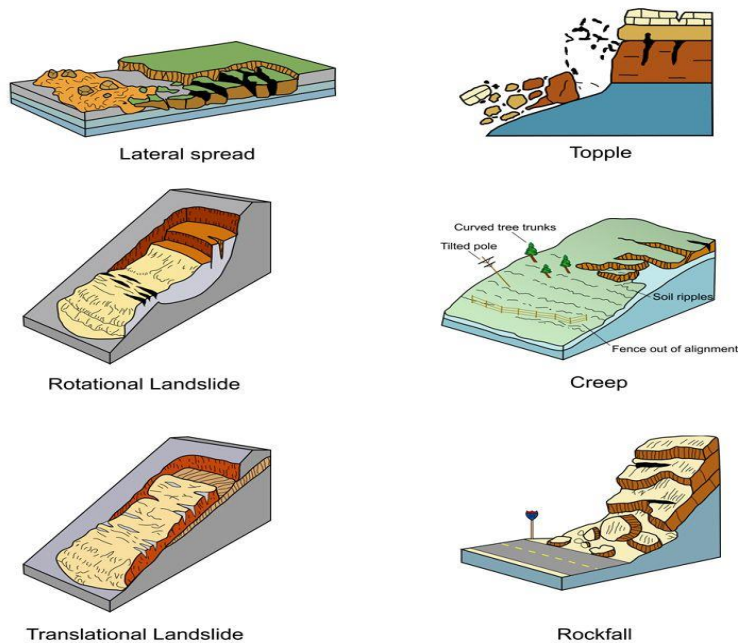
Οπότε για να πέσει ο συντελεστής ασφαλείας κάτω από τη μονάδα $SF < 1$, θα πρέπει στην Εξίσωση (2.1) είτε να μειωθεί η δύναμη αντίστασης T , είτε να αυξηθεί το αίτιο N , είτε να έχουμε ταυτόχρονη μείωση της αντίστασης με παράλληλη αύξηση του αιτίου.

Η μεγάλη ποικιλία των κατολισθήσεων των πρανών μπορεί να ταξινομηθεί ανάλογα με τον τρόπο και τον ρυθμό της μετακίνησης, τη μορφή της επιφάνειας ολίσθησης και τον τύπο του υλικού που μετακινήθηκε. Η συνηθέστερη μετακίνηση υλικού, η οποία όμως είναι ανεπαίσθητη, λόγω του αργού ρυθμού της, ονομάζεται ερπυσμός (creep).

Μια άλλη μεγάλη ομάδα μετακινήσεων των πρανών περιλαμβάνει τις κυρίως κατολισθήσεις (landslides/landslips), δηλαδή απότομες μετακινήσεις εδαφικών υλικών, που αποχωρίζονται από το υποκείμενο σταθερό τμήμα του πρανούς με μια σαφώς καθορισμένη επιφάνεια. Όταν οι μετακινήσεις εμφανίζονται κατά μήκος μιας ασταθούς επιφάνειας, όπου υπάρχει στρώση ή σύστημα διακλάσεων, η κατολίσθηση ορίζεται ως ολίσθηση (glide). Αν στη μετακίνηση ογκολίθων συμπαγών πετρωμάτων λαμβάνει χώρα ελεύθερη πτώση, τότε το φαινόμενο αυτό ονομάζεται κατάπτωση βράχων (rockfall). Οι κατολισθήσεις που εμφανίζονται κατά μήκος πρόσφατα σχηματισμένων καμπύλων επιφανειών ονομάζονται περιστροφικές ολισθήσεις (slumps), ενώ εδαφικές μετακινήσεις στις οποίες αποφασιστικό ρόλο παίζει η υψηλή περιεκτικότητα σε νερό ονομάζονται εδαφοροές (earthflows) και λασποροές (mudflows). Στις απότομες πλαγιές των βουνών, καταρρακτώδεις βροχές μπορεί να προκαλέσουν “χιονοστιβάδες” κορημάτων (debris avalanches), δηλαδή ροή αποσαθρωμένου υλικού. Μια ειδική περίπτωση ροής και ολίσθησης είναι ο ερπυσμός κορημάτων κορεσμένων σε νερό (solifluction), κατά τον οποίο ένα επιφανειακό κορεσμένο στρώμα μετακινείται πάνω σε ένα παγωμένο υπόστρωμα.



Εικόνα 2- 3. Αστοχία πρανούς υπό την παρουσία νερού, Πηγή International Journal of Disaster Risk Reduction, Multi-hazard disaster studies: Monitoring, detection, recovery, and management, based on emerging technologies and optimal techniques, Vol. 47, August 2020.



Εικόνα 2- 4. Μορφές κατολισθήσεων, Πηγή Kentucky Geological Survey Landslide Inventory: From Design to Application, Matthew M. Crawford, 2014

Οι μετακινήσεις των πρανών εξελίσσονται σε σοβαρό οικονομικό πρόβλημα με την έκταση και την αναζωπύρωσή τους, επειδή προκαλούν συχνά μεγάλες καταστροφές στην ανθρώπινη περιουσία και ζωή και μπορούν να αποτελέσουν ανυπέρβλητο εμπόδιο στην ανθρώπινη δραστηριότητα. Είναι γνωστές αρκετές κατολισθήσεις και καταπτώσεις βράχων που προκάλεσαν την καταστροφή ολόκληρων πόλεων και επέφεραν εκατοντάδες θανάτους.

Επίσης οι μετακινήσεις των πρανών συντελούν στην εκτεταμένη καταστροφή της καλλιεργήσιμης γης και των δασών. Οι μεγάλες κατολισθήσεις προκαλούν την πλήρη αναστολή της ανάπτυξης του δάσους, επειδή τα δέντρα ξεριζώνονται ή ξεραίνονται. Οι αυτοκινητόδρομοι και οι σιδηροδρομικές γραμμές που διασχίζουν περιοχές ευπρόσβλητες από κατολισθήσεις υφίστανται πολλές καταστροφές από αυτές, ιδιαίτερα αν η ευστάθεια των πρανών έχει διαταραχθεί κατά την κατασκευή τους. Οι μετακινήσεις των πρανών αποτελούν συχνά σοβαρό πρόβλημα για τα μεγάλα τεχνικά έργα, όπως είναι οι σήραγγες και τα φράγματα.

Κατολισθήσεις συμβαίνουν και στον υποθαλάσσιο χώρο. Σε έναν υποθαλάσσιο αγωγό, μια κατολίσθηση σχετίζεται με εδαφική παραμόρφωση, οπότε αυτό μπορεί να προκαλέσει μια πλευρική μετατόπιση του αγωγού, ή καθίζηση/ ανύψωσή του. Ακόμη, μπορεί να έχουμε πλαστική παραμόρφωση των τοιχωμάτων του, απώλεια της στήριξής του (από τα εδαφικά

στηρίγματα του) καθώς μπορεί να προκληθεί απομάκρυνση εδαφικού υλικού σε μεγάλο μήκος της τάφρου που είναι θαμμένος ο αγωγός. Τέλος μπορεί να έχουμε αύξηση του στατικού και δυναμικού φορτίου που ασκείται στον υποθαλάσσιο αγωγό καθώς αυτός θάβεται κάτω από τα φερτά υλικά που παρασύρει μαζί της η κατολίσθηση. Αύξηση του δυναμικού φορτίου μπορεί να έχουμε και από κατάπτωση βράχων επάνω στον αγωγό.



Εικόνα 2- 5. Υποθαλάσσια κατολίσθηση, Πηγή Deep-sea drilling and submarine landslides, at deformation, researchgate.net

Στην παραπάνω εικόνα, βλέπουμε ένα σκίτσο μιας πιθανούς υποθαλάσσιας κατολίσθησης και τις συνέπειες που αυτή μπορεί να προκαλέσει. Τμήμα μάζας βράχου που αποκολλάται απότομα από τον κυρίως βράχο μπορεί να παρασύρει μαζί του στον πυθμένα, μεγάλη ποσότητα νερού. Επειδή όμως το νερό είναι ασυμπίεστο η ποσότητα της μάζας του νερού που παρασύρθηκε κατά την κατολίσθηση στον πυθμένα, η ίδια ποσότητα μάζας νερού θα αναγκαστεί να ανέβει προς τα πάνω. Η μεγάλη, αλλά και ταυτόχρονα απότομη αυτή αλλαγή της στάθμης του νερού στην επιφάνεια της θάλασσας, είναι πολύ πιθανόν να προκαλέσει με τη σειρά της πολύ μεγάλα κύματα (τσουνάμι), ό,τι αυτό συνεπάγεται.

Για την πρόληψη μιας πιθανούς κατολίσθησης ή για το σταμάτημα ενός πρηνούς που έχει αρχίσει να κινείται προς τα κάτω, ή ακόμη και για την αποφυγή αναζωπύρωσης μια παλιάς κατολίσθησης, λαμβάνονται διάφορα προστατευτικά μέτρα. Η επιλογή του καταλληλότερου μέτρου γίνεται ύστερα από διερεύνηση των αιτιών που μπορεί να προκαλέσουν μια κατολίσθηση. Έτσι, πρέπει να μελετηθούν, με κάθε λεπτομέρεια, διάφορα στοιχεία που σχετίζονται με αυτή, όπως είναι οι γεωλογικές και οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής, η θέση και η μορφολογία της επιφάνειας ολίσθησης (με δειγματοληπτικές γεωτρήσεις ή γεωφυσικές μεθόδους), οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού και η ταχύτητα μετακίνησης της κατολισθαίνουσας μάζας.

Στην ξηρά, τα μέτρα προστασίας από τις κατολισθήσεις περιλαμβάνουν σε γενικές γραμμές την αποστράγγιση, την αφαίρεση υλικού από το πρηνές, την αντιστήριξη, τη βελτίωση

των μηχανικών χαρακτηριστικών, αλλά και διάφορα μέτρα αποφυγής των δυσμενών συνεπειών που προκαλεί η κατολίπηση.

Όσον αφορά όμως τον θαλάσσιο χώρο, το μεγάλο μέγεθος των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων, σε συνδυασμό με την δυσκολία που υπάρχει για την προσομοίωση του φαινομένου (της εδαφικής κίνησης και της τυχαίας φύσης ενεργοποίησής τους) καθιστούν τον γεωκίνδυνο αυτό αρκετά επικίνδυνο και δύσκολο για τη μελέτη – κατασκευή ενός θαλάσσιου αγωγού. Επίσης σε μεγάλα βάθη είναι δύσκολη η διαδικασία επισκευής – συντήρησης.

Διάβρωση

Διάβρωση είναι η διαδικασία απόσπασης επιφανειακών υλικών από τον φλοιό της Γης, κυρίως εδάφη και θραύσματα πετρωμάτων και η μεταφορά τους σε κάποια απόσταση, με φυσικούς παράγοντες όπως είναι ο άνεμος, το νερό, η βαρύτητα.

Στην ευρύτερη εφαρμογή του ο όρος διάβρωση αφορά την καταστροφή και τη δημιουργία όλων των γεωμορφών του γήινου αναγλύφου. Με την πιο γενική του έννοια ο όρος συμπεριλαμβάνει την επιτόπια αποσάθρωση (καταστροφή) του πετρώματος και τη μεταφορά του αποσαθρωμένου υλικού. Η διάβρωση προκαλείται από τη δράση του ανέμου, και από θαλάσσιες, ποτάμιες και παγετωνικές διεργασίες. Οι συμπληρωματικές δράσεις της διάβρωσης και της απόθεσης ή ιζηματογένεσης δρουν διαμέσου γεωμορφολογικών παραγόντων, όπως είναι το κινούμενο νερό, ο άνεμος και ο πάγος, μεταβάλλοντας το υπάρχον ανάγλυφο και δημιουργώντας νέες γεωμορφές.

Η διάβρωση συχνά εμφανίζεται μετά την αποσύνθεση ή αλλοίωση του πετρώματος με την αποσάθρωση. Το αποσαθρωμένο υλικό του πετρώματος απομακρύνεται από την αρχική του θέση με τη δράση κάποιου φυσικού παράγοντα. Ο καλύτερος τρόπος για να διακρίνουμε τη διάβρωση από την αποσάθρωση, δεδομένου ότι και οι δύο διεργασίες γίνονται ταυτοχρόνως, είναι το να διαπιστώσουμε αν γίνεται μεταφορά υλικού.

Το κινούμενο νερό αποτελεί τον πιο σημαντικό φυσικό παράγοντα διάβρωσης. Η παράκτια διάβρωση προκαλείται κυρίως από τη δράση των κυμάτων, αλλά εν μέρει και από την καταστροφή απόκρημνων βραχωδών ακτών από ατμοσφαιρικούς παράγοντες, όπως είναι η βροχή, ο πάγος και η επίδραση της παλίρροιας.

Η πρόσκρουση των θυελλωδών κυμάτων είναι πολύ σημαντικές στην εμφάνιση φαινομένων φυσικής “λατόμευσης” στις βραχώδεις ακτές που αποτελούνται από ευάλωτα πετρώματα με πολλές διακλάσεις ή έντονη στρώση. Ωστόσο, η δράση της άμμου και των χαλικιών που παρασύρονται από τα κύματα προς την ακτογραμμή αποτελεί ενδεχομένως τον σημαντικότερο παράγοντα διάβρωσης. Τα θραύσματα παρασύρονται από και προς τις ακτές και συγκρουόμενα μεταξύ τους μετατρέπονται βαθμιαία σε άμμο, ενώ ταυτόχρονα διαβρώνουν τα πετρώματα του γεωλογικού υποβάθρου των ακτών. Η διάβρωση των ακτών εξαιτίας των κυμάτων προκαλεί υποχώρηση των ακτών προς το εσωτερικό. Με αυτόν τον τρόπο

δημιουργούνται διάφορες χαρακτηριστικές παράκτιες γεωμορφές, όπως απόκρημνες βραχώδεις ακτές, γέφυρες, κ.α., εξαιτίας της διαφορικής αντοχής των πετρωμάτων στη διάβρωση. Επιπλέον, ιζήματα μεταφέρονται από την παράπλευρη κίνηση των κυμάτων παράλληλα προς την ακτή ή από τα παράκτια ρεύματα που δημιουργούνται στα ρηγά νερά και κατόπιν σχηματίζουν αποθέσεις δημιουργώντας τις προελαύνουσες ακτογραμμές, με χαρακτηριστικές μορφές ακτών, όπως είναι τα αμμώδη φράγματα, οι βραχίονες κτλ.

Πέραν όμως της διάβρωσης που συμβαίνει στην ξηρά, υπάρχει και η υποθαλάσσια διάβρωση η οποία είναι υπεύθυνη για τον σχηματισμό του αναγλύφου του πυθμένα. Στον υποθαλάσσιο χώρο συναντάμε διάφορες μορφές αναγλύφων. Όπως είδαμε και παραπάνω υπάρχουν οι μεσοωκεάνιες ράχες, οι τάφροι, οι υφαλοκρηπίδες κ.α. Αυτοί όμως οι σχηματισμοί σε μια θαλάσσια περιοχή δεν παραμένουν οι ίδιοι. Αλλάζουν συνεχώς μορφές με το πέρασ του χρόνου, με την διαδικασία της διάβρωσης και αποσάθρωσης. Οι κύριοι παράγοντες που συντελούν στη διάβρωση του υποθαλάσσιου πυθμένα είναι τα υποθαλάσσια ρεύματα, τα κύματα, οι παλίρροιες, ακόμη και βιολογικές δραστηριότητες.

Τα θαλάσσια ρεύματα παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στη διάβρωση του εδάφους. Είναι ικανά να μεταφέρουν ιζήματα και κομμάτια βράχου, σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Τα μεταφερόμενα αυτά υλικά τρίβονται και προσκολλώνται στον πυθμένα διαμορφώνοντας τον. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Ρεύμα του Κόλπου (Gulf Stream), το οποίο δημιουργείται στον Ατλαντικό Ωκεανό και συγκεκριμένα στον Κόλπο του Μεξικού, κινούμενο παράλληλα προς τις ακτές των ΗΠΑ, στο ανατολικό τους κομμάτι, και εν συνεχεία κατευθυνόμενο προς τον Ωκεανό, τον διασχίζει για να καταλήξει στις ακτές της Δυτικής Ευρώπης. Το ρεύμα αυτό είναι τόσο ισχύρο και γρήγορο που είναι ικανό να μεταφέρει μεγάλες ποσότητες ιζημάτων και βράχων και να τις εναποθέσει σε διάφορα σημεία του πυθμένα από την διαδρομή που περνάει.



Εικόνα 2- 6. Διαδρομή Ρεύματος του Κόλπου (Gulf Stream). Πηγή: Πτυχιακή Εργασία Μαρσίδη Κωνσταντίνου, 'Το Τρίγωνο των Βερμούδων και οι Θεωρίες Εξήγησης αυτού του Μυστηρίου', Σχολή Εμπορικού Ναυτικού, 2017.

Πέραν όμως των θαλασσίων ρευμάτων πολύ σημαντικό ρόλο στη διάβρωση του υποθαλάσσιου εδάφους παίζουν τα κύματα και οι παλίρροιες. Η αέναη δράση τους πλησίον των ακτών συμβάλει στη διάβρωση. Τα κύματα όταν προσκρούουν στα βράχια τα λειαινούν καθώς μεταφέρουν άμμο με ορμή η οποία κάνει στην ουσία “αμμοβολή” επάνω στον βράχο. Επίσης η άνοδος και η πτώση της θάλασσας από την παλίρροια μπορεί να κινητοποιήσει ιζήματα τα οποία μεταφέρονται στον πυθμένα και τον αναδιαμορφώνουν. Τα ιζήματα είναι συστατικά ζωτικής σημασίας για το περιβάλλον του πυθμένα. Μπορούν να μεταφερθούν με διάφορους τρόπους, οδηγώντας σε διάβρωση ή σε εναπόθεσή τους. Η μεταφορά ιζημάτων όχι μόνο επηρεάζει την τοπογραφία του θαλάσσιου πυθμένα αλλά παίζει και καθοριστικό ρόλο στο σχηματισμό διαφόρων αναγλύφων.

Όσον αφορά τις βιολογικές δραστηριότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω, αξίζει να σημειωθεί πως υπάρχουν θαλάσσιοι μικροοργανισμοί οι οποίοι συμβάλλουν στο φαινόμενο της διάβρωσης. Είναι ικανοί να “διαταράξουν” τα ιζήματα που υπάρχουν στον πυθμένα και να ανακαταναείμουν τις διάφορες στρώσεις ιζημάτων αλλάζοντας την μορφή του πυθμένα.

Επίσης, οι γεωκίνδυνοι που αναφέραμε παραπάνω είναι ικανοί να διαβρώσουν το θαλάσσιο πυθμένα. Οι σεισμοί μπορεί να δημιουργήσουν ρήγμα στον υποθαλάσσιο χώρο, το οποίο με τη σειρά του να διαμορφωθεί σε ένα υποθαλάσσιο ηφαίστειο και εκείνο με τη σειρά του, λόγω της ηφαιστειακής του δραστηριότητας να δημιουργήσει νέα ωκεάνια κρούστα (oceanic crust). Ακόμη η κλιματική αλλαγή μπορεί και αυτή με τη σειρά της να συμβάλει στο φαινόμενο της διάβρωσης. Η αύξηση της θερμοκρασίας της θάλασσας καθώς και η ανύψωση της στάθμης του νερού μπορούν να αλλάξουν τα επίπεδα ρυθμού διάβρωσης του θαλασσίου περιβάλλοντος.

Τέλος, έχουμε τον ανθρώπινο παράγοντα ο οποίος μπορεί και αυτός με τη σειρά του να παίζει ρόλο στη διάβρωση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η παράνομη αλιεία με χρήση δυναμίτη ή δίχτυου ψαρέματος το οποίο ακουμπά στον πυθμένα και σέρνεται κατά την κίνηση του σκάφους. Με αυτόν τον τρόπο επιταχύνεται η διάβρωση του πυθμένα καθώς τα δίχτυα καταστρέφουν τους θαλάσσιους μικροοργανισμούς από την περιοχή που περνούν αλλά μεταφέρουν και εναποθέτουν ιζήματα σε μεγάλες αποστάσεις. Πέραν από την αλιεία σημαντικό ρόλο παίζει και η εκμετάλλευση υδρογονανθράκων στον θαλάσσιο χώρο, καθώς με τις διάφορες εκσκαφές του πυθμένα αλλάζει η μορφολογία του.

Σχετικά με τους υποθαλάσσιους αγωγούς, αυτοί θα πρέπει να εξοπλίζονται κατάλληλα για να αντιμετωπίζουν το φαινόμενο αυτό της διάβρωσης. Ο σωστός σχεδιασμός, η εξωτερική επένδυση του αγωγού καθώς και η συνεχής παρακολούθηση του αναγλύφου του πυθμένα μπορούν να δράσουν αποτελεσματικά στην αντιμετώπιση του συγκεκριμένου γεωκινδύνου.

2.2 Σεισμική και ηφαιστειακή δραστηριότητα

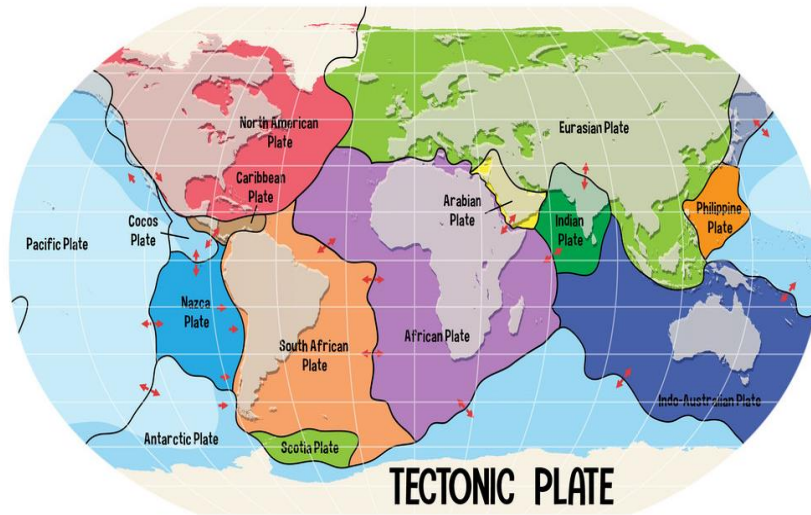
Σεισμικοί γεωκίνδυνοι

Το εσωτερικό της Γης αποτελείται από πολλές στοιβάδες, μέχρι να φθάσουμε στον πυρήνα της. Η εξωτερική στοιβάδα που βρίσκεται στην επιφάνεια της ονομάζεται φλοιός, ο οποίος σε ποσοστό περί το 70% καλύπτεται από νερό. Ο φλοιός όμως της Γης δεν είναι μία ενιαία στερεά στρώση. Αποτελείται από πολλές ξεχωριστές πλάκες, τις επονομαζόμενες τεκτονικές πλάκες. Η κάθε μία τεκτονική πλάκα κινείται με διαφορετική ταχύτητα και διεύθυνση. Έτσι μπορεί να έχουμε σύγκρουση ή απομάκρυνση δύο γειτονικών πλακών. Έτσι όταν έχουμε σύγκρουση δημιουργούνται θλιπτικές τάσεις στα όρια των πλακών ενώ όταν έχουμε απομάκρυνση εφελκυστικές. Από την θλίψη και τον εφελκυσμό δημιουργείται τασικό φορτίο στα όρια των πλακών. Λόγω του τασικού φορτίου δημιουργούνται ρωγμές (ρήγματα) που όμως λόγω της τριβής δεν αναπτύσσονται. Όταν όμως οι τάσεις αυτές ξεπεράσουν το ανώτατο όριο θραύσης, η τριβή δεν είναι πλέον ικανή να συγκρατήσει της πλάκες μεταξύ τους οπότε έχουμε ολίσθηση των πλακών. Λόγω της ολίσθησης, όλη αυτή η συσσωρευμένη ενέργεια που υπάρχει στα όρια των πλακών απελευθερώνεται, και η διάδοσή της γίνεται μέσω των σεισμικών κυμάτων.

Υπάρχουν πολλές τεκτονικές πλάκες στη λιθόσφαιρα της Γης, άλλες μικρές και άλλες πιο μεγάλες. Οι επιστήμονες έχουν ορίσει 7 (άλλοι 8) κύριες μεγάλες τεκτονικές πλάκες. Αυτές είναι οι:

1. Αφρικανική Πλάκα
2. Ανταρκτική Πλάκα
3. Ευρασιατική Πλάκα
4. Βορειο-Αμερικανική Πλάκα
5. Νότιο-Αμερικανική Πλάκα
6. Πλάκα του Ειρηνικού
7. Ινδο-Αυστραλιανή Πλάκα
- (8. Πλάκα του Νάζκα – νότια του Περού)

Παρακάτω βλέπουμε και μία εικόνα που μας δείχνει τον Παγκόσμιο χάρτη με τις τεκτονικές πλάκες αποτυπωμένες και τον τρόπο κίνησής τους.

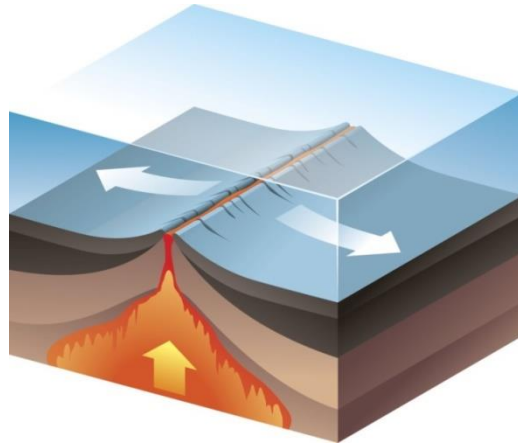


Εικόνα 2 -7. Τεκτονικές πλάκες και τρόπος κίνησής τους, Πηγή Nature Geoscience, A record of spontaneous subduction initiation in the Izu–Bonin–Mariana arc, August, 2015.

Οι τεκτονικές πλάκες βρίσκονται σε μία συνεχή κίνηση, λόγω της αένας ροής μάγματος το οποίο βρίσκεται από κάτω. Η κίνηση των πλακών είναι υπεύθυνη για πολλά γεωλογικά φαινόμενα που συμβαίνουν στη Γη, όπως οι εκρήξεις ηφαιστειών, οι σεισμοί, ο σχηματισμός βουνών (ορογένεση), ακόμα και για την δημιουργία των Ηπείρων.

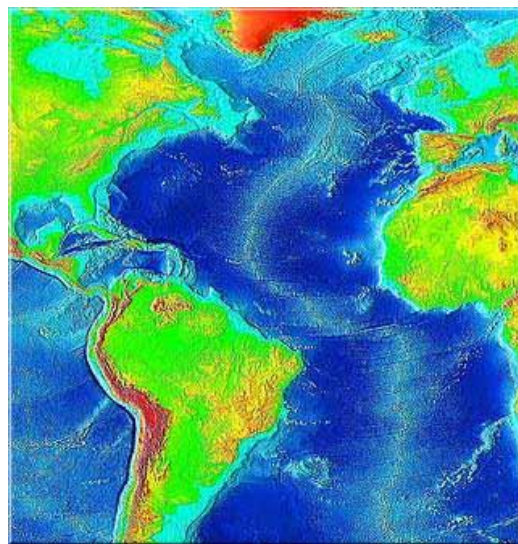
Διακρίνονται τρεις τύποι ορίων των τεκτονικών πλακών, ανάλογα με την κίνησή τους. Αυτά είναι:

Αποκλίνοντα όρια: Στα αποκλίνοντα όρια, οι τεκτονικές πλάκες απομακρύνονται η μία από την άλλη. Έτσι, για να γεμίσει το κενό που δημιουργείται από την απομάκρυνση των δύο πλακών, εισρέει μάγμα από τα κατώτερα στρώματα. Το μάγμα κατά την ψύξη του, στερεοποιείται και αν είναι σε μεγάλο μήκος, δημιουργεί μία κορυφογραμμή.



Εικόνα 2 -8. Αποκλίνοντα όρια τεκτονικών πλακών, Πηγή Nature Geoscience, A record of spontaneous subduction initiation in the Izu–Bonin–Mariana arc, August, 2015.

Παράδειγμα αποκλινόντων πλακών αποτελούν η Αφρικανική και η Ευρασιατική με τις Αμερικανικές πλάκες (βόρεια και νότια) οι οποίες κατά την αποκόλλησή τους, δημιούργησαν την μεσοωκεάνια ράχη στον Ατλαντικό Ωκεανό.



Εικόνα 2- 9. Μεσοωκεάνια ράχη στον Ατλαντικό Ωκεανό, Πηγή Source National Earthquake Information Center (NEIC), US Geological Service.

Η κορυφογραμμή αυτή, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, ξεκινάει από τον Νότιο Ατλαντικό και φθάνει έως το Βόρειο Πόλο. Διασχίζει σε ένα σημείο την Ισλανδία, οπότε το φαινόμενο αυτό είναι ευδιάκριτο από ένα μέρος στην Ισλανδία. Παρακάτω βλέπουμε και δύο ενδεικτικές εικόνες.

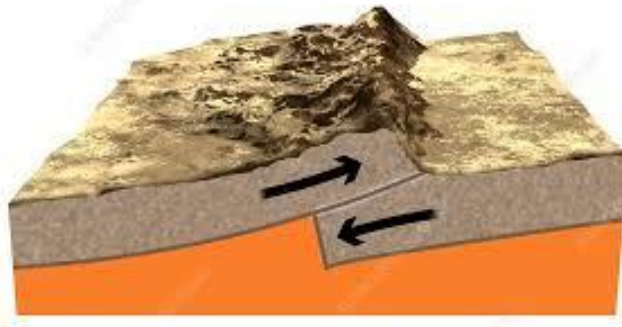


Εικόνα 2- 10. Μεσοωκεάνια ράχη στον Ατλαντικό Ωκεανό που διασχίζει την Ισλανδία, Πηγή European Geoscience Union, photo: Stefano Urbani



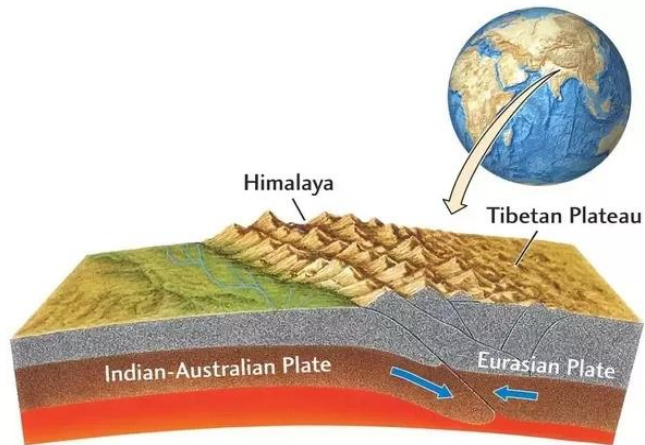
Εικόνα 2-11. Υποθαλάσσια φωτογραφία της Μεσοωκεάνιας ράχης στον Ατλαντικό Ωκεανό. Πηγή Boat&Fishing.gr

Συγκλίνοντα όρια: στην περίπτωση αυτή, οι τεκτονικές πλάκες πλησιάζουν η μία την άλλη. Ουσιαστικά έχουμε μερική βύθιση της μίας πλάκας κάτω από την άλλη, με μερική ανύψωση της δεύτερης.



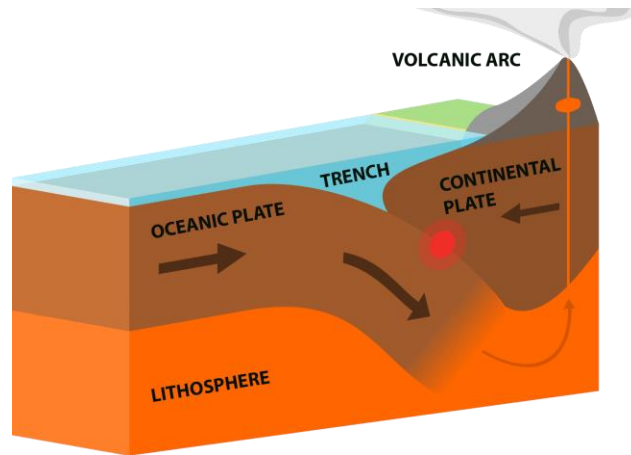
Εικόνα 2- 12. Συγκλίνοντα όρια τεκτονικών πλακών. Πηγή: SciencePhotoLibrary.com

Παράδειγμα συγκλινόντων πλακών αποτελεί η οροσειρά των Ιμαλαΐων όπου η Ινδική Πλάκα ‘συγκρούστηκε’ με την Ευρασιατική Πλάκα.



Εικόνα 2 -13. Δημιουργία οροσειράς Ιμαλαίων. Πηγή: Journal Science: Mountain Building (Orogenesis)

Πέραν όμως των οροσειρών, η σύγκλιση δύο τεκτονικών πλακών μπορεί να δημιουργήσει ηφαίστεια ή και ωκεάνιες τάφρους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η τάφος των Μαριάνων Νήσων, στον δυτικό Ειρηνικό Ωκεανό, που αποτελεί το βαθύτερο σημείο της Γης με μήκος τα 10980 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.



Εικόνα 2-14. Δημιουργία ηφαιστείων και τάφρων. Πηγή: Journal: Nature Geoscience: A record of spontaneous subduction initiation in the Izu–Bonin–Mariana arc.

Πλευρικώς ολισθαίνοντα όρια: Στην περίπτωση αυτή έχουμε παράλληλη μετακίνηση (πλευρική) των τεκτονικών πλακών, καθώς αυτές κινούνται οριζόντια η μία δίπλα στην άλλη. Έτσι δεν έχουμε καταστροφή ή παραγωγή φλοιού, όπως συμβαίνει στις παραπάνω δύο περιπτώσεις. Η πλευρική μετακίνηση πλακών είναι συνήθως η κύρια αιτία για τους περισσότερους σεισμούς.

Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα πλευρικώς ολισθαίνοντων πλακών αποτελεί το ρήγμα του San Andreas στην California, όπου η Ωκεάνια Πλάκα κινείται παράλληλα με την Βορειο-αμερικανική Πλάκα.



Εικόνα 2- 15. Δημιουργία ρήγματος San Andreas, California. Πηγή: Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Τεκτονική Γεωλογία, Διαφάνειες Καθηγητή Στυλιανού Λοΐζου.

Να σημειωθεί πως η κίνηση των τεκτονικών πλακών είναι ένα αργά εξελισσόμενο φαινόμενο, της τάξης μερικών εκατοστών ανά χρόνο. Στο βάθος όμως του χρόνου, οι μικρές αυτές μεταβολές στην επιφάνεια της Γης μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές αλλαγές στο ανάγλυφό της. Άλλωστε εκείνες είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία των ηπείρων και ωκεανών.

Όσον αφορά του σεισμούς, η κίνηση των τεκτονικών πλακών δεν είναι η μόνη αιτία πρόκλησης τους, είναι όμως η επικρατέστερη. Σεισμοί μπορεί επίσης να προκληθούν από ηφαιστειακή δραστηριότητα. Οι ηφαιστειακές εκρήξεις μπορούν να προκαλέσουν σεισμική δραστηριότητα, καθώς το μάγμα εκλύεται στην επιφάνεια της Γης και δημιουργεί μεγάλες πιέσεις. Όμως, σεισμοί από ηφαιστειακή δραστηριότητα είναι συνήθως ασθενείς και δεν έχουν μεγάλη επίδραση παρά μόνον στις κατοικημένες περιοχές πλησίον του ηφαιστείου.

Σχετικά με τους σεισμούς και τους αγωγούς, αυτοί μπορεί να προκαλέσουν πολύ σημαντικές ζημιές στον αγωγό, οι οποίες μπορεί να είναι ακόμη και καταστροφικές. Ιδίως όταν πρόκειται για σεισμό στον υποθαλάσσιο χώρο, τότε υπάρχει ακόμη μεγαλύτερος κίνδυνος αφού θα προκληθεί τσουνάμι. Αν στην υποθαλάσσια περιοχή που προκλήθηκε ο σεισμός περνά αγωγός τότε υπάρχει φόβος για καταστροφή του αγωγού. Αυτή μπορεί να μην προκληθεί από τον σεισμό καθεαυτού αλλά από την αστοχία - παραμόρφωση του εδάφους που εκείνος θα προκαλέσει. Τα χαρακτηριστικά εκείνα που ενδιαφέρουν τον μελετητή είναι η απόσταση από το επίκεντρο του σεισμού έως τον αγωγό, η χρονική του διάρκεια και η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση που αυτός προκάλεσε.

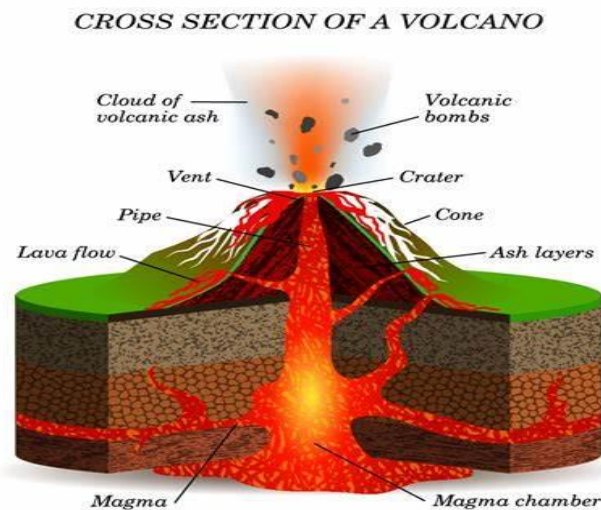
Υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να έχουμε ενίσχυση του σεισμικού κύματος καθώς αυτό κατευθύνεται προς τον αγωγό. Αυτό μπορεί να προκληθεί λόγω της διαφορετικότητας που υπάρχει στα υποστρώματα του εδάφους (πάχος, πυκνότητα στρώσεων) και έτσι το δυναμικό φορτίο που θα δεχθεί ο αγωγός να είναι μεγαλύτερο από αυτό που αρχικά προκλήθηκε στο επίκεντρο του σεισμού.

Επίσης, κατά τη διάδοση του σεισμικού κύματος, μπορεί να προκληθεί αποκόλληση του εδάφους που βρίσκεται περιμετρικά του αγωγού. Θα πρέπει να προτιμώνται μεγάλα βάθη θεμελίωσης του αγωγού διότι σε μικρά βάθη, ο κίνδυνος αποκόλλησης από το έδαφος είναι μεγαλύτερος. Ακόμη θα πρέπει να προτιμώνται μεσαίου ή μεγάλης διαμέτρου αγωγοί ούτως ώστε να μεγαλώνει η ακτίνα καμπυλότητας του αγωγού λόγω σχετικής μετακίνησης του εδάφους και του ρήγματος.

Τέλος, λόγω του σεισμικού κύματος ο αγωγός μπορεί να υποστεί δυσμενείς διατμητικές τάσεις οι οποίες να είναι καταστροφικές για αυτόν.

Ηφαιστειακή δραστηριότητα

Το ηφαίστειο είναι η επιφανειακή απόληξη ενός εκτεταμένου υπόγειου συστήματος μέσω του οποίου διοχετεύεται το μάγμα, από τον χώρο δημιουργίας του, στην επιφάνεια της Γης. Ο φυσικός αγωγός μέσα από τον οποίο γίνεται η άνοδος του διάπυρου υλικού ονομάζεται ηφαιστειακός πόρος και αποτελεί το σημαντικότερο τμήμα της δομής των ηφαιστείων. Το χροανοειδές άνοιγμα στο ανώτερο άκρο του πόρου καλείται κρατήρας του ηφαιστείου. Ο κρατήρας βρίσκεται συνήθως στην κορυφή ενός κωνικού υψώματος, διαστάσεων λόφου ή ακόμη και όρους, το οποίο ονομάζεται ηφαιστειακός κώνος. Ο κώνος αυτός σχηματίζεται από τη συσσώρευση στερεοποιημένων ηφαιστειακών αναβλημάτων, κατά τη διάρκεια παλιότερων διαδοχικών εκχύσεων του ηφαιστείου.

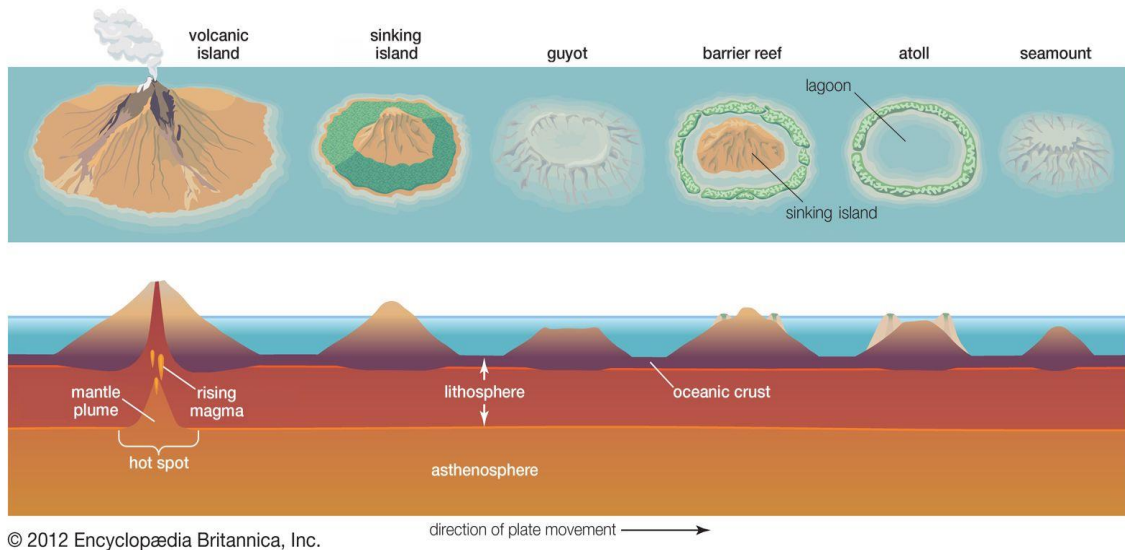


Εικόνα 2- 16. Τομή ηφαιστείου. Πηγή: InternetGeography.net, Article: 'What is a volcano'

Σε όλον τον κόσμο έχουν καταγραφεί πάνω από 700 ηφαίστεια από παλιά έως σήμερα. Τα ηφαίστεια αυτά ονομάζονται ενεργά, σε αντίθεση με τα σβησμένα ή νεκρά, τα οποία έδρασαν σε παλαιότερες γεωλογικές εποχές. Το 62% περίπου των ενεργών ηφαιστείων στον κόσμο βρίσκεται κατά μήκος των περιθωρίων του Ειρηνικού Ωκεανού, το 14% στο Ινδονησιακό νησιωτικό τόξο, το 3% περίπου στα νησιά του Κεντρικού Ειρηνικού, το 1% στα νησιά του Ινδικού Ωκεανού και το 13% στα νησιά του Ατλαντικού. Το υπόλοιπο 7% κατανέμεται στη Μεσόγειο, στη νότια Μικρά Ασία και στο εσωτερικό των ηπείρων, ειδικότερα στο Σύστημα της Ρηξιγενούς Κοιλιάδας της Ανατολικής Αφρικής.

Τα γκυγίο (guyot) είναι από τις πιο γνωστές υποθαλάσσιες ηφαιστειακές δομές. Έχουν συνήθως σχήμα κανονικού κόλουρου κώνου και αποτελούνται από ελαφρώς συγκολλημένο ηφαιστειακό υλικό. Συνήθως είναι κάποιο ηφαίστειο, το οποίο με το πέρασ των χρόνων αρχίζει και διαβρώνεται σιγά σιγά με το νερό και τα κύματα, παίρνοντας τη μορφή νησιού. Στη συνέχεια το νησί αυτό σιγά σιγά βυθίζεται, με παράλληλη διάβρωση του. Γι' αυτό το λόγω κιάλας η επιφάνειά του είναι επίπεδη. Τα γκυγίο αποτελούν σημαντικό κομμάτι της γεωλογικής ιστορίας

καθώς οι επιστήμονες, μελετώντας τα, μπορούν να αντλήσουν στοιχεία για τον σχηματισμό μιας θαλάσσιας περιοχής και του πυθμένα της. Επίσης μπορούν να λειτουργήσουν ως τόπος αναπαραγωγής πολλών υδρόβιων οργανισμών.



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

Εικόνα 2- 17. Τρόπος σχηματισμού γκυγιό (guyot), Πηγή Encyclopaedia Britannica, Inc.

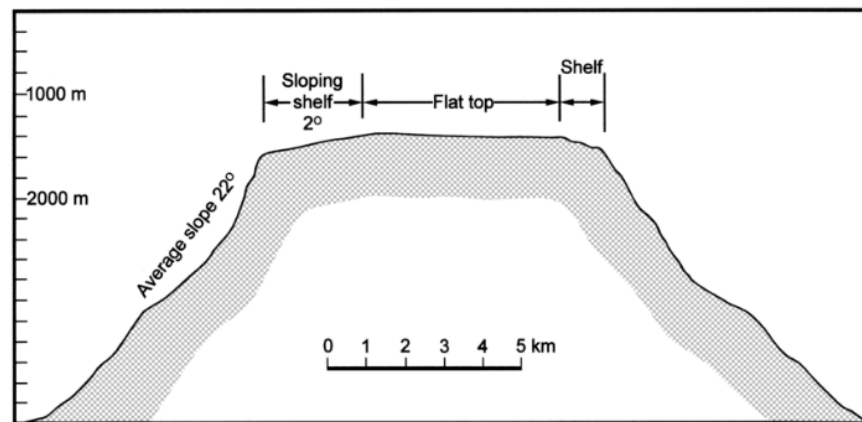
Ένα από τα πιο γνωστά γκυγιό βρίσκεται βορειοδυτικά της Χαβάης, με την ονομασία Midway Atoll. Παρακάτω βλέπουμε και μια φωτογραφία του.



Εικόνα 2- 18. Midway Atoll, Hawaii. Πηγή: Harbourmaps.com

Τα φαινόμενα των υποθαλάσσιων εκρήξεων δεν είναι πολύ διαφορετικά από εκείνα των επιφανειακών, με εξαίρεση τις μορφές και τις αποθέσεις των ηφαιστειακών προϊόντων. Οι διαφορές αυξάνονται με το βάθος στο οποίο συμβαίνουν οι ηφαιστειακές εκρήξεις. Σε βάθη

μεγαλύτερα των 2000 μέτρων η πίεση δεν επιτρέπει τη δημιουργία ατμών, με αποτέλεσμα να μη σημειώνονται βίαιες εκρήξεις και ο θαλάσσιος πυθμένας να καλύπτεται από ρεύματα λάβας.



Typical Pacific Ocean guyot. A drawing of the echosounder trace that Hess (1946) obtained from a guyot south of Anewetak Atoll, recorded on 6 October 1944, from USS Cape Johnson.

Εικόνα 2- 19. Σκίτσο ενός Guyot στον Ειρηνικό Ωκεανό σε βάθος μεγαλύτερο των 1000 μέτρων.

Όταν όμως οι εκρήξεις συμβαίνουν σε αβαθείς θάλασσες, η εκλυόμενη λάβα με τα πολύ θερμά αέρια ζεσταίνουν απότομα τα υπερκείμενα στρώματα νερού και τα μετατρέπουν σε ατμό, που εκτονώνεται και δημιουργεί θεαματικές στήλες ατμού. Μερικές φορές αναδύεται από τη θάλασσα ένα βραχύβιο νησί, που έχει τη μορφή ενός κώνου πυροκλαστικών υλικών, το νησί αυτό όμως καταστρέφεται σύντομα από τη δράση των κυμάτων.

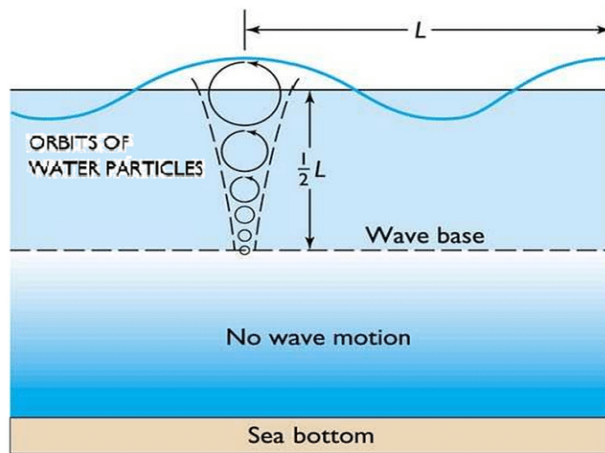
Αυτό συνέβη στη διάρκεια μιας ηφαιστειακής έκρηξης στο νησί Σέρτσου (1963-1964) στον Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό, όταν σχηματίστηκαν σε μικρή απόσταση δύο νέα μικρά νησιά, που εξαφανίστηκαν μέσα σε λίγες μέρες. Όταν συμβαίνουν πάρα πολλές αλληπάλληλες εκρήξεις, μέσα σε μικρά χρονικά διαστήματα, τότε η ηφαιστειακή δραστηριότητα μπορεί να επικρατήσει έναντι της θαλάσσιας διάβρωσης και να σχηματιστεί ένα μόνιμο ηφαιστειακό νησί. Με τον τρόπο αυτό σχηματίστηκε το νησί Ανάκ Κρακατόα στον Πορθμό Σούντα και το Φάλκο των Νήσων Τόνγκα.

Τα ηφαίστεια είναι γνωστό ότι προκαλούν ισχυρές εκρήξεις, οι οποίες καταλήγουν πολλές φορές σε σεισμούς και οι σεισμοί με τη σειρά τους προκαλούν τσουνάμι. Δικαίως επομένως θεωρούνται ως ένα φοβερό και επικίνδυνο φυσικό φαινόμενο, καθώς μπορεί να έχει τρομερές επιπτώσεις τόσο στο φυσικό περιβάλλον αλλά και στην οικονομία γενικότερα. Επομένως είναι θέμα το οποίο θα πρέπει να μελετάται ενδελεχώς στο στάδιο της μελέτης - κατασκευής ενός υποθαλάσσιου αγωγού και προτιμάται η χάραξη της πορείας του αγωγού (αν είναι εφικτό) να γίνεται μακριά από ηφαίστεια.

Σεισμικά θαλάσσια κύματα – τσουνάμι

Το τσουνάμι (ή σεισμικό θαλάσσιο κύμα) αποτελεί ένα καταστροφικό ωκεάνιο κύμα που προκαλείται συνήθως από υποθαλάσσιους σεισμούς, οι οποίοι εκδηλώνονται σε εστιακό βάθος, συνήθως μικρότερο των 50χλμ, κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα και έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από 6.5 της κλίμακας Ρίχτερ. Τα τσουνάμι είναι επακόλουθο των παραπάνω τριών γεωκινδύνων, των σεισμών, των κατολισθήσεων και των ηφαιστειακών εκρήξεων, καθώς αυτοί είναι υπεύθυνοι για τη δημιουργία τους. Πολλές φορές χρησιμοποιείται και ο όρος παλιρροιακό κύμα για να περιγραφεί ένα τέτοιο κύμα, όμως είναι λανθασμένος καθώς το τσουνάμι δεν σχετίζεται με τις παλίρροιες.

Αποτελούν δυναμικά μεγάλα κύματα, τα οποία μπορούν να ταξιδεύουν για μεγάλο χρονικό διάστημα κατά μήκος μιας ωκεάνιας περιοχής και όταν αυτά συναντήσουν ρηχά νερά τότε αυξάνουν κατά πολύ σε ύψος κύματος. Σε βαθιά νερά το μήκος κύματος ενός τσουνάμι είναι πολύ μεγάλο, μήκος που μπορεί να φτάσει έως και 100 με 200 χιλιόμετρα. Ενώ το ύψος κύματος είναι της τάξης μερικών εκατοστών. Έως 60 εκατοστά. Δηλαδή έχουμε έναν λόγο ύψους κύματος προς μήκος κύματος ίσο με $6/1,000,000$. Η διάρκεια του δε (περίοδος T) μπορεί να διαρκέσει από μερικά λεπτά έως κάποιες ώρες. Ενώ η τροχιά που διαγράφουν τα σωματίδια είναι κατακόρυφη, με διάμετρο ίση με το ύψος κύματος. Έτσι ένα πλοίο που βρίσκεται στα ανοικτά ενός ωκεανού, και εκείνη τη στιγμή περάσει ένα τσουνάμι, θα ανυψωθεί έως και 60 εκατοστά από την επιφάνεια του νερού.



Εικόνα 2- 20. Τροχιά σωματιδίων νερού σε βαθιά νερά. Πηγή: *Natural Hazards Journal*, Volume 120, Issue 1, 2023

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε την τροχιά που διαγράφουν τα σωματίδια, κατά τη διέλευση ενός κύματος. Αυτό που παρατηρούμε είναι πως η διάμετρος των σωματιδίων μειώνεται όσο μεγαλώνει το βάθος νερού, ενώ πέραν από κάποιο βάθος η κίνηση των σωματιδίων χάνεται εντελώς.

Όσον αφορά την ταχύτητα που έχει ένα τσουνάμι, η σχέση που συνδέει την ταχύτητα με το βάθος νερού είναι η εξής:

$$v = \sqrt{g * d} \quad (2.4)$$

όπου: v = ταχύτητα, g = επιτάχυνση λόγω της δύναμης της βαρύτητας (9.81m/s^2), d = βάθος νερού (m) . Για παράδειγμα στον Ειρηνικό Ωκεανό όπου το μέσο βάθος είναι στα 4000 μέτρα η ταχύτητα του κύματος θα είναι ίση με περίπου 198m/sec . ή με 700 km/hour .

Η ενέργεια του κύματος διατηρείται (σχεδόν) εξ' ολοκλήρου, καθώς ο ρυθμός απώλειας ενέργειας ενός κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογος με το μήκος του, οπότε το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας θα είναι σταθερό.

$$\frac{dE}{dt} = 0 \quad (2.5)$$

$$Με E = E_{\text{κινητική}} + E_{\text{δυναμική}}$$

όπου:

$$E_{\text{κινητική}} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.6)$$

$$E_{\text{δυναμική}} = \frac{1}{2}m\omega^2y^2 \quad (2.7)$$

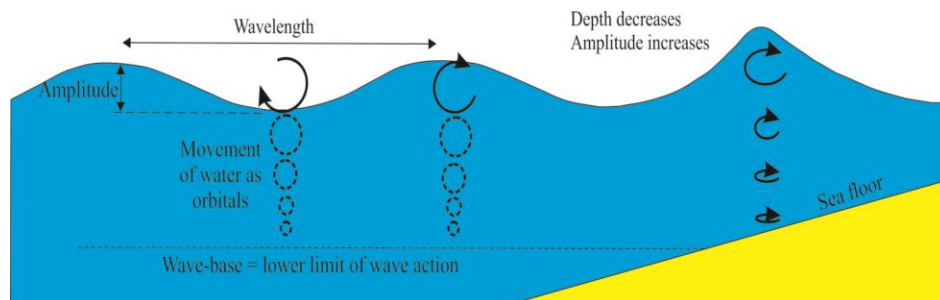
v = ταχύτητα κύματος

ω = κυκλική συχνότητα = $2\pi/Ta$

y = ύψος κύματος

Από τις παραπάνω δύο σχέσεις γίνεται εύκολα αντιληπτό το τεράστιο μέγεθος της ενέργειας που μεταφέρει ένα τσουνάμι (η ταχύτητα είναι υψωμένη στο τετράγωνο στην κινητική ενέργεια).

Όταν όμως το τσουνάμι πλησιάζει προς την ακτή, η τροχιά των σωματιδίων αλλάζει και από κυκλική γίνεται ελλειπτική, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Επειδή τα σωματίδια “τρίβονται” στον πυθμένα δεν μπορούν να κινηθούν ελεύθερα όπως θα ήθελαν. Έτσι, λόγω της τριβής, η ταχύτητα τους μειώνεται σημαντικά. Μείωση όμως της ταχύτητας συνεπάγει και ταυτόχρονη μείωση της κινητικής ενέργειας του τσουνάμι. Επειδή όμως η ενέργεια πρέπει να διατηρηθεί, εφόσον μειώνεται η κινητική ενέργεια, θα πρέπει να αυξηθεί η δυναμική, προκειμένου το άθροισμά τους να παραμείνει σταθερό. Αύξηση όμως της δυναμικής ενέργειας σημαίνει και αύξηση του ύψους κύματος όπως φαίνεται και στον παραπάνω τύπο.



Εικόνα 2- 21. Αλλαγή μορφής τροχιάς σωματιδίων καθώς αυτά πλησιάζουν προς την ακτή. Πηγή: Natural Hazards Journal, Volume 120, Issue 1, 2023

Όλη αυτή η ενέργεια όμως εκτονώνεται στην ακτή έχοντας ολέθριες συνέπειες για τις παράκτιες κατασκευές αλλά και για την ανθρώπινη ζωή. Τα τσουνάμι ανακλώνται και διαθλώνται από τον πυθμένα και αποτελούνται από διαδοχικές κοιλίες και κορυφές (βάθος και ύψος κύματος). Έτσι οι επιδράσεις τους μπορεί να διαφέρουν από σημείο σε σημείο. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το τσουνάμι που έπληξε την Πορτογαλία το 1755, όπου κατά την άφιξη του κύματος στις ακτές της Λισαβόνας, πλήθος κόσμου βγήκε στις ακτές καθώς το πρώτο κύμα που έφτασε αντιστοιχούσε σε κοιλία, αποκαλύπτοντας έτσι τμήμα του θαλάσσιου πυθμένα. Στη συνέχεια όμως κατέφθασε και η κορυφή του κύματος, πνίγοντας με αυτόν τον τρόπο αρκετούς κατοίκους της περιοχής που είχαν βγει να εξερευνήσουν τον φανερωμένο θαλάσσιο πυθμένα. Ένα από τα πιο καταστροφικά τσουνάμι στην ιστορία ήταν αυτό που έπληξε την Ινδονησία (αλλά και άλλες κοντινές χώρες) το 2004. Ένας μεγάλος σεισμός μεγέθους 9.0 της κλίμακας Ρίχτερ, στα ανοιχτά του Ινδικού Ωκεανού, προκάλεσε κύματα πάνω από 9 μέτρα τα οποία έπληξαν τις ακτές της Σουμάτρας σκοτώνοντας συνολικά πάνω από 200,000 άτομα. Το εντυπωσιακό είναι πως τα κύματα δεν έπληξαν μόνο τις ακτές της Σουμάτρας. Μεγάλα κύματα λόγω του σεισμού κατέφθασαν στις ακτές της Ινδίας, της Ταϊλάνδης, της Σρι Λάνκα, ακόμη και σε χώρες της Ανατολικής Αφρικής όπως η Σομαλία, το Μπαγκλαντές, η Βιρμανία που βρίσκονταν σε απόσταση μεγαλύτερη των 2000 χιλιομέτρων από το επίκεντρο του σεισμού.

Σχετικά με τους υποθαλάσσιους αγωγούς, τα τσουνάμι μπορούν να τους επηρεάσουν με πολλούς τρόπους. Ορισμένοι από αυτούς είναι:

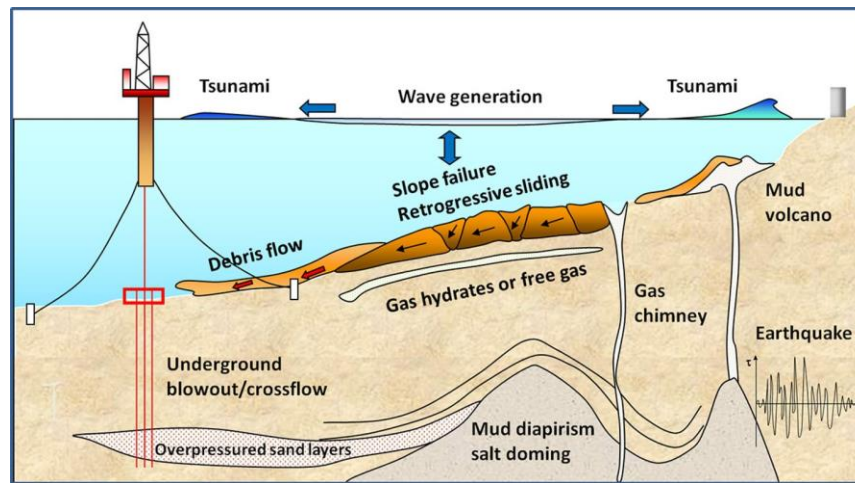
Να προκαλέσουν μετατόπιση τμήματος του αγωγού που βρίσκεται στον πυθμένα. Ένα τσουνάμι λόγω της μεγάλης ενέργειας που μεταφέρει είναι ικανό να προκαλέσει οριζόντια και κατακόρυφη μετατόπιση ενός αγωγού. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη παραμόρφωση του αγωγού (μεγαλύτερη κάμψη από την επιτρεπτή) και να επέλθει αστοχία του. Ακόμη μπορεί να έχουμε και αποκόλληση του αγωγού από το θαλάσσιο υπέδαφος.

Ακόμη, λόγω του ότι τα τσουνάμι δημιουργούν έντονες τυρβώδεις ροές σε συνδυασμό με δυνατά θαλάσσια ρεύματα, μπορεί να προκαλέσουν στον αγωγό ζημιές καταστρέφοντας τις

στηρίξεις του. Επίσης μπορεί να προκαλέσουν φθορές σε υποδομές του αγωγού, οι οποίες συνδέονται μαζί του, όπως είναι ο σταθμός συμπίεσης.

Πολλές φορές τα τσουνάμι μπορεί να μεταφέρουν μαζί τους και διάφορα φερτά υλικά τα οποία να πέσουν με μεγάλη ορμή επάνω στον αγωγό προκαλώντας του ζημιές.

Για τους παραπάνω λόγους θα πρέπει ο μελετητής να λαμβάνει σοβαρά υπ' όψιν του και αυτόν τον γεωκίνδυνο. Θα πρέπει ο αγωγός να είναι ικανός να αντέξει τα δυναμικά φορτία που δημιουργούν τα τσουνάμι, τα φερτά υλικά που μεταφέρουν και τις τυρβώδεις ροές που προκύπτουν. Θα πρέπει επίσης να εξετάζεται η υποθαλάσσια περιοχή ενδιαφέροντος ανά τακτά χρονικά διαστήματα ούτως ώστε να ελέγχεται αν υπάρχουν τυχόν καθιζήσεις ή μεταβολές στη στάθμη του θαλάσσιου πυθμένα από τα φερτά υλικά που μεταφέρουν τα τσουνάμι. Οπότε θα πρέπει να αξιολογούνται οι παραπάνω καταστάσεις και να λαμβάνονται τα αντίστοιχα μέτρα προστασίας.



Εικόνα 2- 22. Επίδραση τσουνάμι σε θαλάσσια κατασκευή. Πηγή Basic Pressure Concepts and Definitions, Cambridge University Press, 2021.

Για την πρόβλεψη των τσουνάμι έχουν δημιουργηθεί διάφοροι οργανισμοί, κυρίως στην Ιαπωνία, τη Σιβηρία, την Αλάσκα και τη Χαβάη. Κλειδί για την επιτυχία αυτού του σκοπού είναι η ανάπτυξη του Συστήματος Προειδοποίησης για τα Σεισμικά Θαλάσσια Κύματα (SSWWS: Seismic Sea Wave Warning System), ενός διεθνούς συστήματος που έχει σχεδιαστεί για τον περιορισμό των απωλειών σε ανθρώπινες ζωές στον Ειρηνικό Ωκεανό. Έχοντας ως βάση τη Χονολουλού σημαίνει συναγερμό, στηριζόμενο σε καταγραφές σεισμολογικών σταθμών που βρίσκονται διασκορπισμένοι γύρω από τον Ειρηνικό.

Συνοψίζοντας, να πούμε πως γεωκινδύνους συναντάμε σε όλα τα μέρη της γης, αλλού μεγαλύτερους αλλού μικρότερους, οι οποίοι σχετίζονται πάντα με τις γεωλογικές συνθήκες που υπάρχουν στην περιοχή και τις γεωλογικές διεργασίες του υποθαλάσσιου εδάφους, είτε πρόσφατες, είτε προηγούμενων ετών.

Παραπάνω αναφέρθηκαν πέντε από τους πιο σημαντικούς γεωκινδύνους που μπορεί να συναντήσει στη διαδρομή του ένας υποθαλάσσιος αγωγός. Επειδή ο αγωγός διασχίζει αρκετά χιλιόμετρα στον υποθαλάσσιο χώρο, μπορεί να συναντήσει παραπάνω του ενός γεωκινδύνου στην πορεία του.

Επίσης οι υποθαλάσσιοι γεωκίνδυνοι μπορούν να προκαλέσουν δυναμικές ή στατικές, προοδευτικά αυξανόμενες, καταπονήσεις. Επομένως μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τη χρονική διάρκεια εκδήλωσής τους. Έχουμε δηλαδή τους ακαριαίους γεωκινδύνους, δηλαδή δυναμικά φαινόμενα όπως είναι οι σεισμοί, οι κατολισθήσεις των υποθαλάσσιων πρανών, οι τυρβώδεις ροές κ.α. και έχουμε και τους μακροχρόνιους γεωκινδύνους που αφορούν φαινόμενα όπως ο σταδιακός ερπυσμός του υποθαλάσσιου εδάφους.

Σε μια περιοχή μελέτης πάντα εξετάζεται η συχνότητα εμφάνισης ενός γεωκινδύνου συναρτήσει της σοβαρότητας που τον χαρακτηρίζει. Μελετάται η έντασή του και αν υπάρχει κάποιος συσχετισμός με κάποιας άλλης μορφής γεωκίνδυνο ή αν συνυπάρχουν περισσότερα του ενός φαινόμενα.

Επίσης οι ανθρώπινες δραστηριότητες σε μια περιοχή μπορούν να προκαλέσουν υποθαλάσσιους γεωκινδύνους καθώς μπορούν να διαταράξουν το υποθαλάσσιο περιβάλλον. Βέβαια μπορούν να ελεγχθούν, καθώς είναι βραδείας εξέλιξης και τελικώς να αποφευχθούν.

Κεφάλαιο 3: Υποθαλάσσιοι Αγωγοί

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε στα βήματα που ακολουθούνται προκειμένου να κατασκευασθεί ένας αγωγός. Θα δούμε τους τρόπους κατασκευής και πόντισης ενός υποθαλάσσιου αγωγού. Θα παρουσιάσουμε ορισμένους από τους σημαντικότερους υποθαλάσσιους αγωγούς μεταφοράς πετρελαίου/ φυσικού αερίου. Τέλος, θα αναφέρουμε το κανονιστικό πλαίσιο που διέπει το σχεδιασμό και την κατασκευή των υποθαλάσσιων αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων και ποιοί είναι οι κύριοι Κανονισμοί που χρησιμοποιούνται. Στο επόμενο κεφάλαιο θα δούμε και πιο αναλυτικά τον Αμερικανικό Κώδικα του Ινστιτούτου Πετρελαίου (API RP 1111) εφαρμόζοντας ένα αριθμητικό παράδειγμα.

3.1 Υποθαλάσσιοι αγωγοί μεταφοράς υδρογονανθράκων στον Παγκόσμιο Χάρτη

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε ορισμένους από τους σημαντικότερους αγωγούς μεταφοράς πετρελαίου/ φυσικού αερίου και τα κύρια χαρακτηριστικά τους.

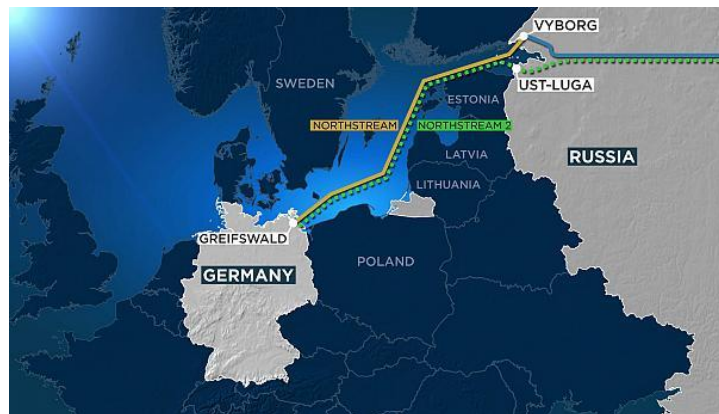
Nord Stream & Nord Stream 2

Ένας από τους σημαντικότερους υποθαλάσσιους αγωγούς παγκοσμίως είναι ο Nord Stream ο οποίος συνδέει τη Ρωσία με τη Γερμανία και μεταφέρει φυσικό αέριο. Έχει μήκος 1224 km και το μέγιστο βάθος φτάνει τα 210μέτρα. Η λειτουργία του ξεκίνησε το 2011 με κόστος κατασκευής περί τα 9 δισεκατομμύρια ευρώ. Διασχίζει τη βαλτική θάλασσα και η διαδρομή που χαράσσει είναι όπως αυτή φαίνεται στον παρακάτω χάρτη:



Εικόνα 3- 1. Διαδρομή Nord Stream. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’

Ένας ακόμα εξίσου σημαντικός υποθαλάσσιος αγωγός είναι ο Nord Stream 2, ο οποίος στην ουσία αποτελεί επέκταση του Nord Stream και η διαδρομή που χαράσσει είναι παράλληλη του Nord Stream. Περνάει δηλαδή και αυτός από την Βαλτική Θάλασσα. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 2011 και ολοκληρώθηκε το Σεπτέμβριο του 2021. Έχει μήκος 1224 μέτρα και βάθος 250μέτρα. Κύριος σκοπός του ήταν ο διπλασιασμός της μεταφερόμενης ποσότητας φυσικού αερίου από την Ρωσία στη Γερμανία αγγίζοντας την ετήσια χωρητικότητα στα 110 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα φυσικού αερίου. Ο Nord Stream 2 δεν έχει τεθεί ακόμη σε λειτουργία καθώς είναι αρκετές οι χώρες εκείνες οι οποίες δεν θέλουν τη λειτουργία του Nord Stream 2. Οι λόγοι κυρίως πολιτικοί καθώς η εξάρτηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης από το Ρωσικό φυσικό αέριο θα είναι μεγαλύτερη. Υπάρχουν ακόμη και χώρες οι οποίες υποστηρίζουν πως αν τεθούν σε παράλληλη λειτουργία δύο τόσο μεγάλοι αγωγοί, η υποθαλάσσια βιοποικιλότητα της Βαλτικής θάλασσας θα καταστραφεί. Αυτή τη στιγμή, λόγω του Ρώσο - Ουκρανικού πολέμου η λειτουργία του Nord Stream 2 έχει ανασταλεί. Υπάρχουν βέβαια σκέψεις από την πλευρά της Γερμανίας για χρήση του αγωγού για μεταφορά υγροποιημένου φυσικού αερίου LNG.



Εικόνα 3- 2. Διαδρομή Nord Stream 2. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’

Blue Stream

Ένας ακόμη σημαντικός υποθαλάσσιος αγωγός είναι ο Blue Stream. Έχει μήκος 430 km και μέγιστο βάθος το οποίο φτάνει τα 2150 m. Ξεκινάει από την Ρωσία και καταλήγει στην Τουρκία. Μεταφέρει φυσικό αέριο και η διαδρομή που χαράσσει είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 3- 3. Διαδρομή Blue Stream. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’

Στόχος της κατασκευής του υποθαλάσσιου αγωγού Blue Stream ήταν η μεταφορά φυσικού αερίου από την Ρωσία στην Τουρκία με σκοπό την αποφυγή παροχής αερίου σε τρίτες χώρες. Ο αγωγός αυτός διασχίζει τη Μαύρη Θάλασσα και έχει χωρητικότητα 16 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα φυσικού αερίου ετησίως. Η διατομή του αγωγού ποικίλει. Ξεκινά από τις 55 inches στο χερσαίο κομμάτι του και φτάνει τις 24 inches στο υποθαλάσσιο τμήμα του. Στο υποθαλάσσιο τμήμα η πίεση στο εσωτερικό του αγωγού είναι 25 MPa. Η λειτουργία του αγωγού Blue Stream ξεκίνησε το έτος 2003.

South Stream Project – Turk Stream Pipeline

Τον Αύγουστο του 2005 προτάθηκε από τον πρόεδρο της Τουρκίας, Ταγίπ Ερντογάν και τον πρόεδρο της Ρωσίας Βλαντιμίρ Πούτιν η επέκταση του αγωγού Blue Stream, έτσι ώστε να τροφοδοτείται η Βόρειο-ανατολική Ευρώπη με ρωσικό φυσικό αέριο. Στόχος ήταν η παροχή φυσικού αερίου στη Βουλγαρία, τη Σερβία, την Κροατία και την Ουγγαρία. Το σχέδιο όμως για την κατασκευή του αγωγού αυτού (με την ονομασία South Stream Project) τελικώς απορρίφθηκε. Αντ’ αυτού κατασκευάστηκε ο υποθαλάσσιος αγωγός Turk Stream Pipeline ο οποίος ξεκινάει από την Ρωσία και καταλήγει στην Τουρκία. Τον Μάιο του 2017 ξεκίνησαν οι εργασίες κατασκευής του και ο αγωγός ολοκληρώθηκε το 2020. Έχει μήκος 1480 km και μέγιστο βάθος στο υποθαλάσσιο κομμάτι, 2250 m. Το κόστος κατασκευής του έφτασε τα 11.4 δισεκατομμύρια ευρώ και η ετήσια χωρητικότητα φτάνει τα 31.5 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα φυσικού αερίου. Η διάμετρος του αγωγού είναι 810mm (32 in.), πάχος τοιχώματος τα 39mm (1.5 in.) και φέρει προστατευτικό περίβλημα από χάλυβα πάχους 80 mm (3.1 in.). Περνά από τη Μαύρη Θάλασσα και η διαδρομή που χαράσσει φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 3- 4. Διαδρομή Turk Stream. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’

Green Stream Pipeline

Ένας ακόμη υποθαλάσσιος αγωγός με μεγάλο ενδιαφέρον είναι ο Green Stream Pipeline. Ο αγωγός αυτός συνδέει τη Λιβύη με την Ιταλία, διασχίζοντας μήκος 520 km. Το μέγιστο βάθος του αγωγού είναι 1130 m. Η ιδέα για μεταφορά φυσικού αερίου από τη Λιβύη στην Ιταλία ξεκίνησε από πολύ παλιά. Ήδη από το 1980 ξεκίνησαν οι πρώτες μελέτες για την κατασκευή του αγωγού. Τελικά η κατασκευή του Green Stream Pipeline πραγματοποιήθηκε τον Οκτώβριο του 2004, και εγκαινιάστηκε από τους τότε προέδρους των δύο χωρών Σίλβιο Μπερλουσκόνι και Μουαμάρ Καντάφι. Η κατασκευή του αγωγού κόστισε 6.6 δισεκατομμύρια ευρώ. Έχει διάμετρο 32 inches (810 mm). Η αρχική χωρητικότητα του αγωγού ήταν 8 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα φυσικού αερίου ετησίως αλλά μετά αυξήθηκε στα 11 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα. Ο αγωγός Green Stream Pipeline διασχίζει τη Μεσόγειο Θάλασσα, καταλήγοντας στην Σικελία και η διαδρομή που χαράσσει φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 3- 5. Διαδρομή Green Stream Pipeline. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’

MedGaz Pipeline

Ένας ακόμη αγωγός του οποίου η ιδέα κατασκευής ξεκίνησε περί το 1970 είναι ο MedGaz. Ο αγωγός αυτός συνδέει την Αλγερία με την Ισπανία. Ο αγωγός αυτός τελικά κατασκευάστηκε το 2009 διότι το έτος 1970 ήταν αδύνατη η κατασκευή ενός τέτοιου αγωγού. Οι τεχνικές γνώσεις ήταν περιορισμένες και δεν υπήρχε το “know how” για την κατασκευή ενός τέτοιου υποθαλάσσιου αγωγού, ο οποίος φτάνει τα 2150 m. βάθος. Το μήκος του είναι 210 km. Η διάμετρος στο χερσαίο κομμάτι του αγωγού είναι 48 inches (1220 mm) ενώ στο υποθαλάσσιο 24 inches (610 mm). Η αρχική χωρητικότητα του αγωγού ήταν 8 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα φυσικού αερίου ετησίως ενώ το έτος 2021 αυξήθηκε στα 10.5 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα. Η διαδρομή που χαράσσει ο MedGaz είναι η ακόλουθη που απεικονίζεται στο σχήμα:

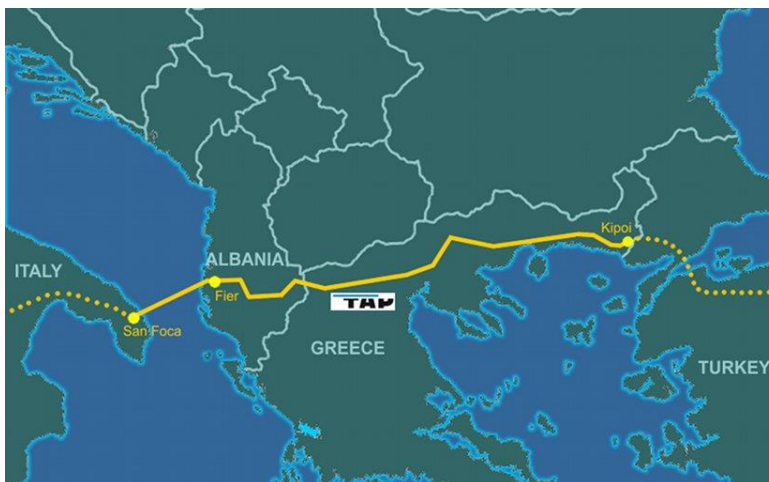


Εικόνα 3- 6. Διαδρομή MedGaz Pipeline. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’

TAP Pipeline (Trans Adriatic Pipeline)

Ένας ακόμη υποθαλάσσιος αγωγός με μεγάλο ενδιαφέρον είναι ο TAP Pipeline. Προτάθηκε το 2003 αλλά η κατασκευή του έγινε το 2016 και τελικώς τέθηκε σε λειτουργία το έτος 2020. Ξεκινά από το Αζερμπαϊτζάν, από την Κασπία Θάλασσα, φτάνει στην Ευρώπη διασχίζοντας την Ελλάδα και την Αλβανία και καταλήγει στην Ιταλία περνώντας την Αδριατική Θάλασσα. Ουσιαστικά ο TAP είναι μια επέκταση του TANAP (Trans Anatolian Pipeline). Το σημείο σύνδεσής τους είναι οι Κήποι στον Έβρο. Το συνολικό μήκος του αγωγού είναι 878 km από τα οποία τα 550 km είναι στον ελλαδικό χώρο, τα 215 km στην Αλβανία, τα 105 km υποθαλάσσια στην Αδριατική Θάλασσα, ενώ τα υπόλοιπα 8 km στην Ιταλία. Το υποθαλάσσιο τμήμα του αγωγού φτάνει τα 810 m. βάθος. Η αρχική χωρητικότητα φυσικού αερίου που μεταφέρεται μέσω του TAP είναι 10 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα, από τα οποία τα 8 δισεκατομμύρια μεταφέρονται στην Ιταλία, το 1 δισεκατομμύριο κυβικά μέτρα στην Ελλάδα και το υπόλοιπο 1 δισεκατομμύριο στην Βουλγαρία. Υπάρχουν βλέψεις για αύξηση της μεταφερόμενης ποσότητας φυσικού αερίου ούτως ώστε να φτάνει τα 20 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα ετησίως. Η διάμετρος του αγωγού στο χερσαίο τμήμα του είναι 48 inches (1200 mm.) για

πίεση 9.5 MPa, ενώ στο υποθαλάσσιο τμήμα του η διάμετρος είναι 36 inches (910 mm) για πίεση 14.5 MPa. Το κόστος κατασκευής ανήλθε περί τα 5.0 δισεκατομμύρια ευρώ. Η διαδρομή που χαράσσει ο αγωγός φαίνεται παρακάτω:



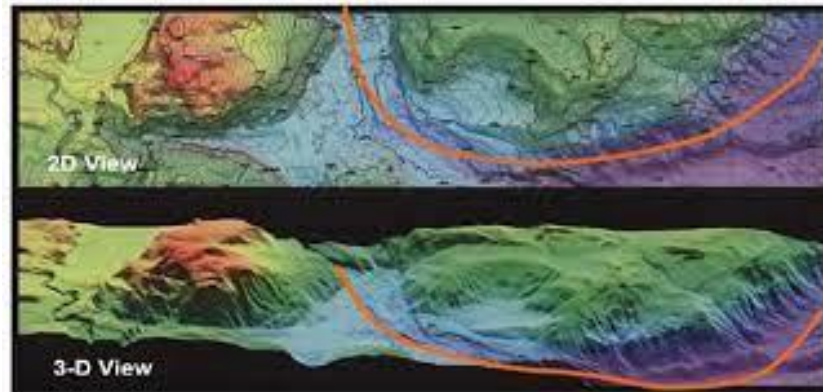
Εικόνα 3- 7. Διαδρομή TAP Pipeline. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’

3.2 Κατασκευή και πόντιση υποθαλάσσιων αγωγών

Για την κατασκευή ενός αγωγού αρχικά χρειάζεται να οριστεί η διαδρομή του. Από πού θα ξεκινάει ο αγωγός, ποιά θα είναι τα κοιτάσματα εκείνα από τα οποία θα γίνεται η άντληση των υδρογονανθράκων και πού τελικώς θα καταλήγουν, ποιά χώρα θα είναι ο τελικός αποδέκτης του πετρελαίου/ φυσικού αερίου. Θα πρέπει να υπάρξει διμερής συμφωνία των δύο χωρών, παραγωγού – παραλήπτη, ούτως ώστε να προχωρήσει η συμφωνία. Αρκετές φορές βέβαια ένας αγωγός διανύει αρκετά χιλιόμετρα, είτε χερσαία είτε θαλάσσια, οπότε μπορεί να περνά και από άλλες χώρες. Τότε θα πρέπει να συμφωνήσουν και οι λοιπές χώρες για την κατασκευή του αγωγού. Επίσης, μπορεί δύο χώρες να μοιράζονται κοινά υποθαλάσσια κοιτάσματα, βλέπε κοιτάσμα Λεβιάθαν Κύπρου – Ισραήλ, οπότε και πάλι θα πρέπει να υπάρξει συμφωνία μεταξύ των δύο αυτών χωρών.

Η επιλογή της βέλτιστης διαδρομής απαιτεί μεγάλη διεργασία και σχεδιασμό. Γίνεται χάραξη και επαναχάραξη μιας πορείας προκειμένου να επιλεγεί η τελική διαδρομή που θα ακολουθήσει ο αγωγός. Υπάρχουν αρκετοί παράμετροι οι οποίοι θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπ’ όψιν, όπως οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η επιρροή που θα έχει στους φυσικούς πόρους μιας περιοχής, η αλληλεπίδραση με ήδη υπάρχουσες υποδομές – κατασκευές, τυχών γεωκίνδυνοι σε μια περιοχή, το κατάλληλο μέγεθος αγωγού που θα χρησιμοποιηθεί κ.α. Θα πρέπει να υπάρχουν εναλλακτικά σενάρια – διαδρομές σε περίπτωση που δεν ευδοκιμήσει το αρχικό πλάνο. Επίσης μόλις γίνει η επιλογή της τελικής διαδρομής, θα πρέπει να ελεγχθεί το

ρυθμιστικό πλαίσιο και οι κανονισμοί που ισχύουν στην εκάστοτε χώρα, από την οποία περνά ο αγωγός.



Εικόνα 3- 8. Χάραξη διαδρομής αγωγού. Πηγή: HydroInternational.com, [Satellite Derived Bathymetry](#)

Αφού γίνει η εκλογή της βέλτιστης διαδρομής, θα πρέπει στη συνέχεια να ελεγχθεί από την αρμόδια ανεξάρτητη ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας. Η Αρχή θα πρέπει να εξετάσει τους Κανονισμούς ούτως ώστε να ελέγξει αν η πορεία που χαράσσει ο αγωγός έχει περιβαλλοντικές συνέπειες στις περιοχές απ' όπου περνά. Έτσι θα πρέπει να προταθούν και εναλλακτικές λύσεις, είτε από την Αρχή, είτε από τις κατασκευάστριες εταιρείες που έχουν αναλάβει το έργο, ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις που θα έχει ο αγωγός στο φυσικό περιβάλλον. Αν η ρυθμιστική Αρχή αποφασίσει πως ο αγωγός δεν θα έχει σημαντικές επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον τότε το έργο προχωρά γρήγορα στα επόμενα βήματα υλοποίησής του. Σε περίπτωση όμως που η Αρχή Ενέργειας δεν εγκρίνει την υφιστάμενη διαδρομή του αγωγού, τότε θα πρέπει να εξετασθούν ξανά και ξανά οι επιπτώσεις του αγωγού και να γίνει μία πιο αναλυτική και σε βάθος μελέτη των επιπτώσεων του (EIS: Environmental Impact Statements) και να προταθούν αλλαγές.

Αφού γίνει η επιλογή της διαδρομής στη συνέχεια περνάμε στο κομμάτι της σχεδίασης. Υπάρχουν σημαντικές διαφορές στους Κανονισμούς οι οποίες αφορούν το μεταφερόμενο προϊόν. Για παράδειγμα άλλα κριτήρια και standards ακολουθεί ένας αγωγός μεταφοράς πόσιμου νερού και άλλα ένας αγωγός μεταφοράς φυσικού αερίου. Αυτές οι διαφορές αφορούν τα υλικά κατασκευής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, τα ζητήματα ασφαλείας και περιβάλλοντος που πρέπει να πληρούνται κ.α. Ένας αγωγός δεν αποτελείται μόνον από τα τμήματα αγωγού (line pipes) που ενώνονται μεταξύ τους και κολλούνται, συνθέτοντας ένα ενιαίο κοίλο κυλινδρικό σώμα. Υπάρχουν οι σταθμοί συμπίεσης και αποσυμπίεσης, τα αντλιοστάσια, οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης, οι βαλβίδες κ.α. Επίσης ένας αγωγός μπορεί να φθάνει τα μερικά μέτρα μήκος αλλά μπορεί να φθάνει και μερικά χιλιάδες χιλιόμετρα. Οπότε θα πρέπει να υπάρχουν Κανονισμοί, όπως είναι ο Αμερικάνικος Κώδικας Πετρελαιοειδών API

RP1111 που θα δούμε παρακάτω, ο οποίος ορίζει ένα ελάχιστο επιτρεπτό όριο σχεδίασης το οποίο θα πρέπει να ικανοποιείται προκειμένου να προχωρήσει η κατασκευή του αγωγού.

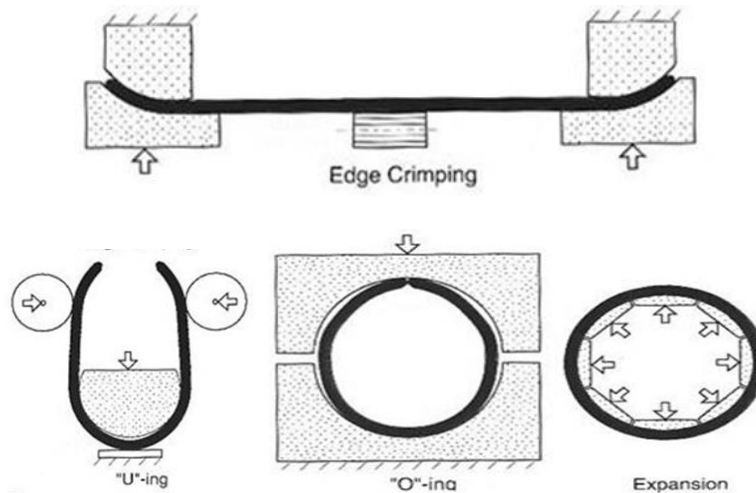
Στη συνέχεια προχωράμε στο κατασκευαστικό σκέλος του αγωγού. Στο ελασματοουργείο – μηχανουργείο φτιάχνονται τα τμήματα του αγωγού. Το κάθε κομμάτι αγωγού (line pipe) έχει μήκος που φθάνει από δώδεκα έως είκοσι τέσσερα μέτρα. Οι διαστάσεις του, το πάχος σωληνώσεως, το υλικό και το πάχος επίστρωσης του, η αντοχή του, όλα αυτά καθορίζονται από τα κριτήρια που υπαγορεύουν οι Κανονισμοί έχοντας ως γνώμονα τις εδαφολογικές και γεωγραφικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής, τα βιομηχανικά πρότυπα σχεδιασμού, τις διατάξεις ασφαλείας κ.α. Οπότε κάθε αγωγός που πρόκειται να κατασκευασθεί έχει τα δικά του σχεδιαστικά κριτήρια.



Εικόνα 3- 9. Κατασκευή τμημάτων αγωγού στο χαλυβουργείο. Πηγή: Eastern –Steels.com , Seamless Steel Pipe

Τα κομμάτια του αγωγού έχουν επιστρωθεί με προστατευτικό υλικό (coating) κατά την κατεργασία και κατασκευή τους στο χαλυβουργείο. Όμως αφήνονται οι άκρες ακάλυπτες ούτως ώστε να πραγματοποιηθεί η συγκόλληση. Όταν όμως τελειώσει η συγκόλληση και αφού ελεγχθεί, τότε καθαρίζεται καλά η ραφή από τυχόν υπολείμματα και στη συνέχεια επιστρώνεται με προστατευτικό υλικό. Η επίστρωση συνήθως είναι από εποξική ρητίνη δύο συστατικών, η οποία δημιουργεί ένα φιλμ μόνωσης γύρω από τον αγωγό. Φυσικά γίνεται έλεγχος και στο coating του αγωγού προτού βυθιστεί στη θάλασσα.

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος που χρησιμοποιείται μέχρι στιγμής για την κατασκευή των υποθαλάσσιων αγωγών είναι η μέθοδος UOE. (U-ing, O-ing, Expansion). Τμήματα του αγωγού, τα λεγόμενα line pipes, κατασκευάζονται από πλάκες χάλυβα οι οποίες τροποποιούνται όπως απεικονίζεται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 3- 10. UOE μέθοδος. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’

Τα πλεονεκτήματα της UOE μεθόδου είναι τα εξής: Η δημιουργία του κάθε line pipe γίνεται σε τέσσερα διαδοχικά στάδια από μία πλάκα χάλυβα. Χρησιμοποιείται διαμήκης συγκόλληση οπότε δεν χρειάζονται ιδιαίτερες απαιτήσεις από τον συγκολλητή, ενώ λόγω της μεγάλης διεισδυτικότητας μπορούν να συγκολληθούν ελάσματα μεγάλου πάχους. Επίσης το ποσοστό αναθυμιάσεων είναι ελάχιστο. Το εύρος διαμέτρων κατασκευής της μεθόδου, ξεκινά από τις 16 inches (≈ 40 cm.) και φτάνει έως και τις 64 inches (≈ 162 cm.) Ενώ τα μήκη των line pipe μπορούν να φτάσουν έως και τα 18 m. Μόλις γίνει η διαμόρφωση των line pipes, στη συνέχεια συγκολλούνται μεταξύ τους με τη μέθοδο SAW - Submerged Arc Welded Method (ή μέθοδος βυθιζόμενου τόξου).



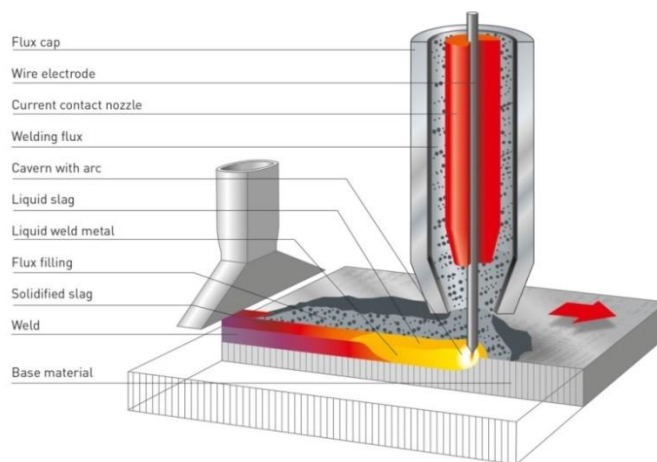
Εικόνα 3- 11. Μέθοδος συγκόλλησης SAW. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγήτριας Άνας Ζερβάκη, ‘Συγκολλήσεις σε Αγωγούς (Εργοστασιακές/Εργοταξιακές)’, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, 2020



Εικόνα 3- 12. Μέθοδος συγκόλλησης SAW. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγήτριας Άννας Ζερβάκη, 'Συγκολλήσεις σε Αγωγούς (Εργοστασιακές/Εργοταξιακές)', Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, 2020



Εικόνα 3- 13. Μέθοδος συγκόλλησης SAW. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα 'Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών'



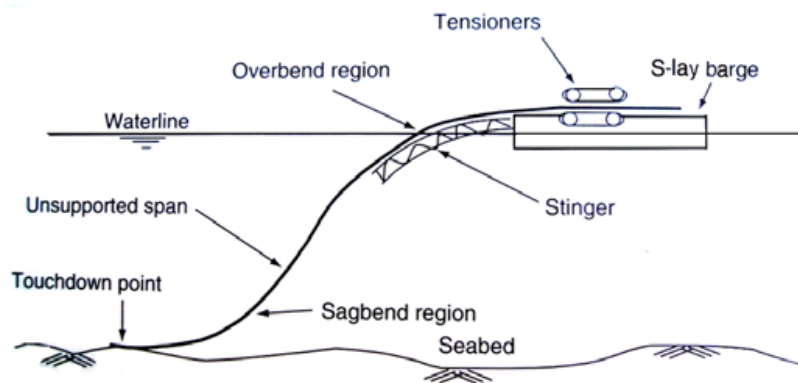
Εικόνα 3- 14. Μέθοδος συγκόλλησης SAW. Πηγή: www.kjellberg.de/submerged-arc-welding.

Υπάρχουν και άλλοι μέθοδοι κατασκευής και συγκόλλησης αγωγών οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευαστική βιομηχανία, δεν χρησιμοποιούνται όμως ακόμη στην κατασκευή υποθαλάσσιων αγωγών.

Σχετικά με τους τρόπους πόντισης ενός αγωγού στον θαλάσσιο πυθμένα, διακρίνουμε τέσσερις περιπτώσεις:

S – Lay Method:

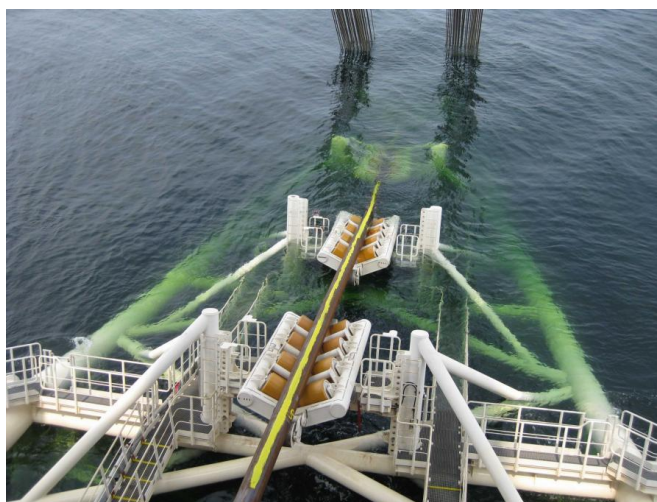
Επάνω στο πλοίο στοιβάζονται τα κομμάτια που συνθέτουν τον αγωγό, συγκολλούνται και επικαλύπτονται επιτόπου. Στη συνέχεια κατεβαίνουν μέσα στο νερό με τη βοήθεια ενός καμπύλου μεταλλικού δικτυώματος, το οποίο είναι προσαρμοσμένο στην πρύμνη του πλοίου και κατά μήκος του οποίου υπάρχουν ράουλα. Η μορφή του μοιάζει με κεντρί – ‘stinger’ και το σχήμα αυτό είναι ουσιαστικά που βοηθά στον έλεγχο της ακτίνας καμπυλότητας του αγωγού ούτως ώστε να αποτραπεί ο λυγισμός του καθώς αυτός κατεβαίνει στον πυθμένα. Στο κατώτερο μέρος του αγωγού, όταν δηλαδή αυτός βρίσκεται κοντά στον πυθμένα (sagbend region), η καμπυλότητα ελέγχεται μέσω εντατήρων. Το ποσοστό εφελκυσμού που μπορεί να ασκήσει ένας εντατήρας είναι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά ενός σκάφους που χρησιμοποιεί την S – lay μέθοδο. Η μέθοδος αυτή πόντισης είναι γρήγορη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορα βάθη. Όμως είναι εφαρμόσιμη κυρίως σε ρηγά νερά, μεταξύ εκατό και πεντακοσίων μέτρων, διότι σε μεγαλύτερα βάθη είναι ασύμφορη, καθώς χρειάζεται μεγαλύτερο ‘stinger’ για να δουλέψει αποτελεσματικά.



Εικόνα 3- 15. Μέθοδος πόντισης ‘S – lay’. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’



Εικόνα 3-16. Σκάφος ‘S – lay’. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’

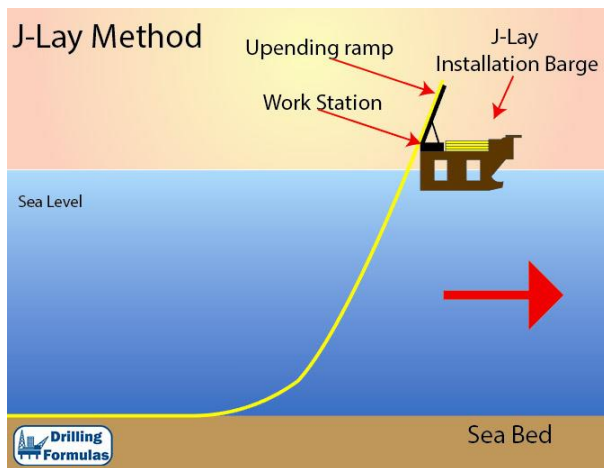


Εικόνα 3- 17. Stinger, ‘S – lay’ μέθοδος. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’

J – Lay Method:

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως σε βαθιά νερά. Ο αγωγός κατεβαίνει από το πλοίο σε σχεδόν κατακόρυφη θέση, ακολουθώντας την μορφή της αλυσοειδούς φτάνοντας στον πυθμένα. Υπάρχει μόνο μία καμπυλότητα κατά την πόντιση του αγωγού και αυτή δημιουργείται στο σημείο που ο αγωγός πατάει στον πυθμένα (seabed). Η μέθοδος είναι παρόμοια με την ‘S-lay’ μέθοδο. Κομμάτια αγωγού στοιβάζονται επάνω στο πλοίο, από πλευρικό σκάφος, στη συνέχεια ανασηκώνονται σε σχεδόν κατακόρυφη θέση και ανυψώνονται. Δαγκάνες συγκρατούν το κομμάτι που έχει ανυψωθεί στο επιθυμητό ύψος, ενώ ένα δεύτερο τμήμα αγωγού ανασηκώνεται με τη σειρά του. Ευθυγραμμίζεται στην κατακόρυφη θέση με το ήδη ανυψωμένο τμήμα του αγωγού και μετά συγκολλούνται μεταξύ τους. Στη συνέχεια τα δύο αυτά συγκολλημένα τμήματα κατεβαίνουν σιγά σιγά μέσα στη θάλασσα, ενώ ένα τρίτο κομμάτι

αγωγού έρχεται με τη σειρά του να ανυψωθεί (πάλι σε κατακόρυφη θέση) και να συγκολληθεί με τα δύο προηγούμενα τμήματα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου να ποντιστούν όλα τα τμήματα του αγωγού που βρίσκονται επάνω στο πλοίο. Με τη μέθοδο αυτή, έχει κατασκευαστεί ο υποθαλάσσιος αγωγός ‘Blue Stream’ ο οποίος διασχίζει τη Μαύρη Θάλασσα και φθάνει σε βάθος έως και 2100 μέτρα. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ο αργός ρυθμός παραγωγής, καθώς υπάρχει μόνο ένα σημείο όπου γίνεται η συγκόλληση, η οποία θα πρέπει να γίνεται με ταχύς ρυθμούς. Επίσης δεν ενδείκνυται για ρηγά νερά, καθώς η γωνία καθέλκυσης του αγωγού με το σκάφος θα πρέπει να είναι σχεδόν οριζόντια. Βέβαια πλεονεκτεί έναντι της ‘S – lay’ μεθόδου στο ότι σχηματίζει μονή καμπυλότητα στον αγωγό κατά την πόντισή του.



Εικόνα 3- 18. ‘J – lay’ μέθοδος. Πηγή: James G. Speight, 2014. Handbook of Offshore Oil and Gas Operations. 1 Edition. Gulf Professional Publishing.



Εικόνα 3- 19. Σκάφος ‘J – lay’ μεθόδου. Πηγή: Gazprom.com



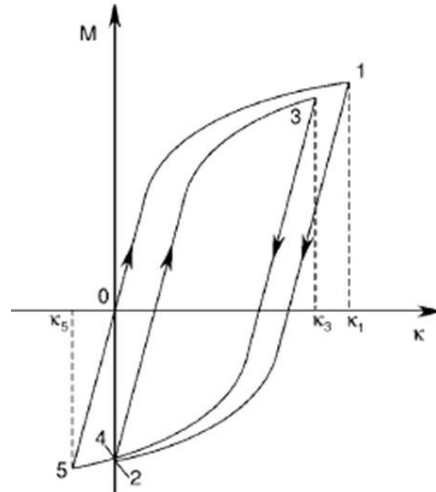
Εικόνα 3- 20. Γερανός φέρνει σε κατακόρυφη θέση τμήμα αγωγού, ‘J – lay’ μέθοδος. Πηγή: Gazprom.com



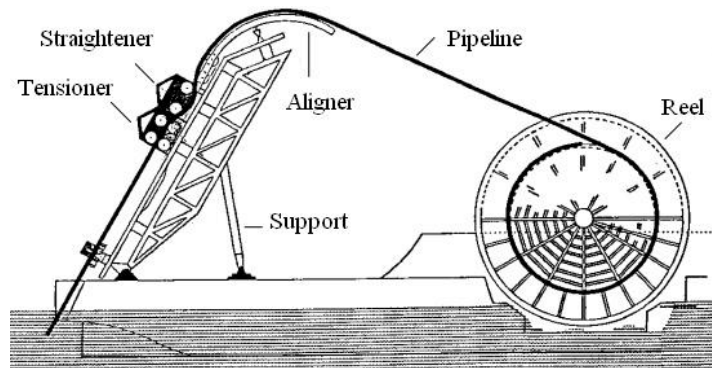
Εικόνα 3- 21. ‘J – lay’, πλευρικό σκάφος στοιβάζει επάνω στο πλοίο τα τμήματα του αγωγού που θα συγκολληθούν. Πηγή: HuismanEquipment.com

Reeling Method:

Στη μέθοδο αυτή, τα τμήματα του αγωγού που πρόκειται να ποντιστούν, συγκολλούνται και επιστρώνονται με προστατευτικό φιλμ (coating) στην ξηρά. Αφού γίνει ο έλεγχος του ενιαίου πλέον αγωγού, τυλιγεται γύρω από μία μεταλλική ανέμη. Στη συνέχεια αυτή μεταφέρεται και τοποθετείται (είτε σε οριζόντια, είτε σε κατακόρυφη θέση) επάνω στο πλοίο το οποίο θα κάνει την πόντιση. Όταν ο αγωγός είναι έτοιμος να πέσει στη θάλασσα, τότε ξετυλιγεται σιγά σιγά από τον τροχό, περνώντας πρώτα από ένα μηχάνημα το οποίο τον ευθυγραμμίζει και στη συνέχεια από έναν εντατήρα ο οποίος τον εφελκύει. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά γρήγορη, υπάρχει μεγάλος ρυθμός παραγωγής, ενώ η διαδικασία συγκόλλησης και επιθεώρησής της γίνεται στην ξηρά. Συνήθως εφαρμόζεται σε αγωγούς με διάμετρο έως και πενήντα εκατοστά, σε μεγάλα βάθη (1000 – 2000 μέτρα). Βέβαια το μειονέκτημα στη μέθοδο αυτή είναι ότι ο αγωγός υπόκειται σε δύο δυσμενείς επαναλαμβανόμενες συνθήκες φόρτισης πριν να πέσει στο νερό, ένας συνδυασμός κάμψης και εφελκυσμού. Η παρακάτω εικόνα ροπής Μ συναρτήσει καμπυλότητας κ είναι ενδεικτική του τρόπου φόρτισης του αγωγού. Στη φάση 0-1 ο αγωγός που είναι τυλιγμένος γύρω από την ανέμη ξετυλιγεται, στη φάση 1-2 ‘ισιώνεται’ από το μηχάνημα, στη φάση 2-3 κάμπτεται ξανά καθώς πέφτει στο νερό, στη φάση 3-4 ευθυγραμμίζεται καθώς βρίσκεται ‘κρεμασμένος’ κάτω από το νερό, στη φάση 4-5 ξανά κάμπτεται στο σημείο που μόλις έχει πατήσει τον πυθμένα, στη φάση 5-0 αποφορτίζεται εφόσον κείτεται στον πυθμένα και μηδενίζεται η καμπυλότητά του.



Εικόνα 3- 22. Κυκλική φόρτιση αγωγού – Reel – lay method. Πηγή: Διδακτικές σημειώσεις καθηγητή Σπύρου Καραμάνου, μεταπτυχιακό μάθημα ‘Δομική Συμπεριφορά και Σχεδιασμός Υποθαλάσσιων Αγωγών’



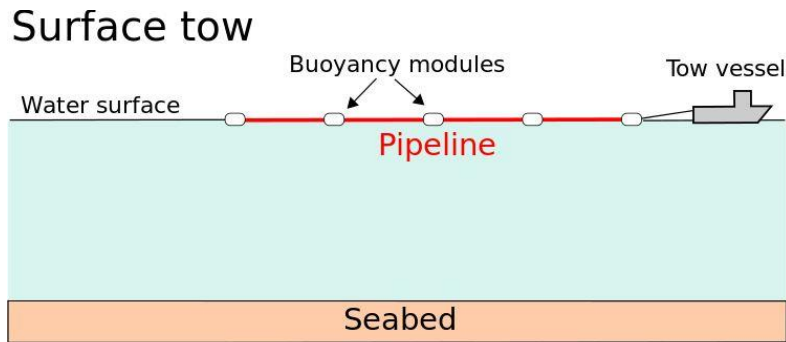
Εικόνα 3- 23. Τρόπος πόντισης αγωγού στην μέθοδο Reel – lay. Πηγή: Risk and Reliability Analysis of Deepwater Reel-Lay Installation: A Scenario Study of Pipeline during the Process of Tensioning



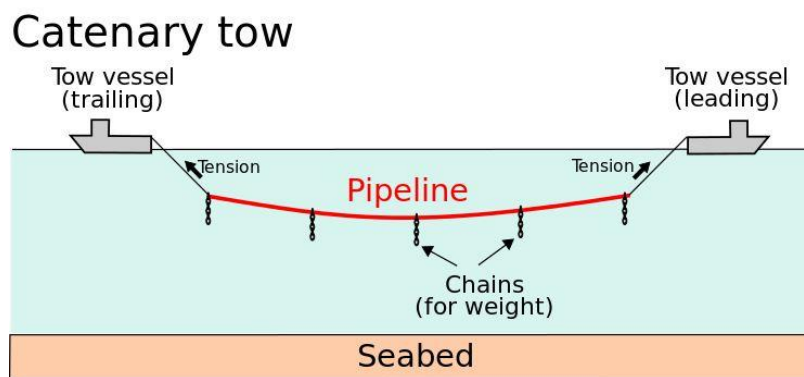
Εικόνα 3- 24. Πλοίο που χρησιμοποιεί την μέθοδο Reel – lay. Πηγή: James G. Speight, 2014. Handbook of Offshore Oil and Gas Operations. 1 Edition. Gulf Professional Publishing.

Towing Method:

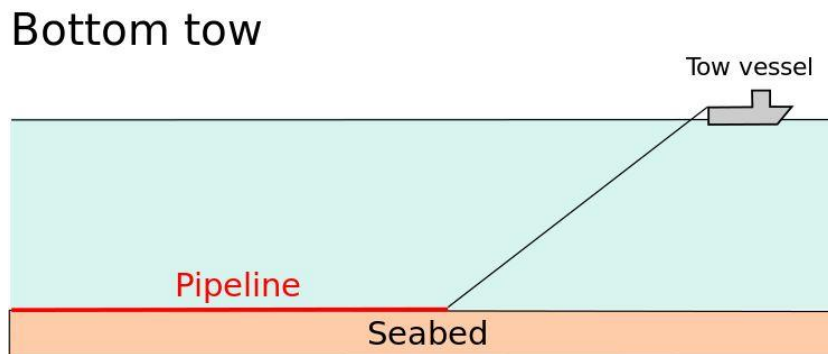
Στη μέθοδο αυτή, ρυμουλκά πλοία μεταφέρουν τον αγωγό. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται η συγκόλληση, το coating, και ο έλεγχος του αγωγού στην ξηρά. Στη συνέχεια ο συγκολλημένος πλέον αγωγός μεταφέρεται με ρυμουλκά πλοία στην επιθυμητή θέση που πρόκειται να ποντιστεί. Η μεταφορά του αγωγού γίνεται είτε με τεχνητούς πλωτήρες, οι οποίοι τοποθετούνται ανά συγκεκριμένα μήκη επάνω στον αγωγό, επιτρέποντάς του να επιπλέει στη στάθμη της θάλασσας μέσω της άνωσης. Υπάρχουν δύο ρυμουλκά πλοία, ένα μπροστά που τραβάει τον αγωγό και ένα πίσω να τον συγκρατεί. Μόλις φτάσουν στο σημείο που πρόκειται να βυθιστεί γίνεται εισροή θαλασσινού νερού μέσα στους πλωτήρες και σιγά σιγά βυθίζεται. Η μεταφορά και βύθιση του αγωγού με αυτόν τον τρόπο γίνεται ελεγχόμενη. Βέβαια όταν υπάρχει θαλασσοταραχή η διαδικασία ρυμούλκησης είναι αρκετά δύσκολη. Ένας άλλος τρόπος είναι, ο αγωγός να είναι μερικώς βυθισμένος μέσα στο νερό με αλυσίδες που τοποθετούνται σε συγκεκριμένα μήκη επάνω στον αγωγό. Οι αλυσίδες, λόγω του βάρους τους, πιέζουν τον αγωγό προς τα κάτω. Όταν ο αγωγός φτάσει στο σημείο πόντισής του κατεβάζεται ελεγχόμενα στον πυθμένα. Και αυτόν τον τρόπο βέβαια επηρεάζουν οι καιρικές συνθήκες καθώς όταν υπάρχουν υποθαλάσσια ρεύματα, υπάρχει δυσκολία στην εγκατάσταση. Ένας άλλος τρόπος πόντισης είναι να κατέβει ο αγωγός στον βυθό της θάλασσας και μετέπειτα ρυμουλκό να τον σύρει επάνω στον πυθμένα. Η μέθοδος αυτή ρυμούλκησης δεν επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες της περιοχής, ούτε από τα θαλάσσια ρεύματα. Υστερεί βέβαια στο γεγονός ότι προαπαιτεί ενδελεχή μελέτη του ανάγλυφου. Θα πρέπει η επιφάνεια του πυθμένα να μην είναι τραχιά, να μην υπάρχουν βράχια και να έχουμε μέτριο ή μαλακό έδαφος.



Εικόνα 3- 25. Μέθοδος ρυμούλκησης, με χρήση τεχνητών πλωτήρων. Πηγή: Publication: ‘Selection of offshore production systems considering uncertainties’, Lusilier, 2013



Εικόνα 3- 26. Μέθοδος ρυμούλκησης, με χρήση αλυσίδων. Πηγή: Publication: ‘Selection of offshore production systems considering uncertainties’, Lusilier, 2013

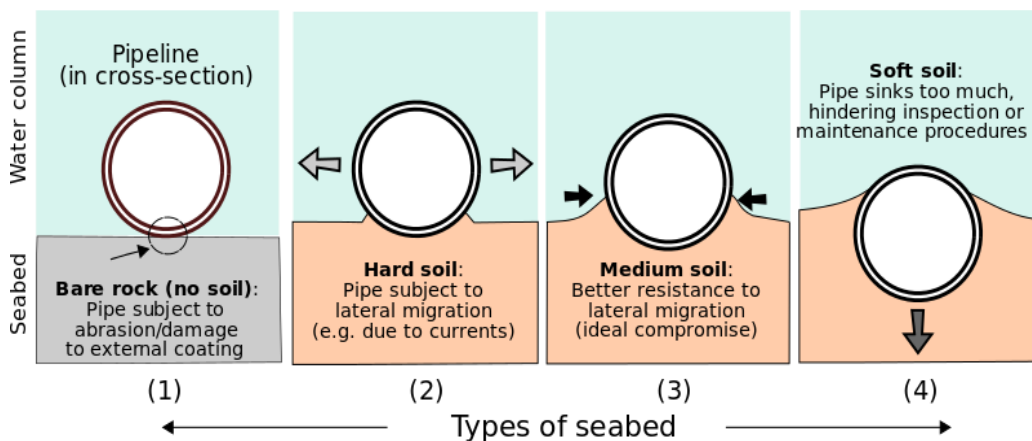


Εικόνα 3- 27. Μέθοδος ρυμούλκησης, πλοίο σύρει τον αγωγό στον πυθμένα. Πηγή: Publication: ‘Selection of offshore production systems considering uncertainties’, Lusilier, 2013

3.3 Αλληλεπίδραση υποθαλάσσιων αγωγών με τον πυθμένα

Η κύρια διαφορά μεταξύ ενός υποθαλάσσιου και ενός χερσαίου αγωγού είναι η εγκατάστασή τους στο έδαφος. Στην ξηρά, τα χωματουργικά μηχανήματα σκάβουν μία τάφρο μέσα στην οποία θάβεται ο αγωγός. Οποιαδήποτε κατάσταση εδάφους και να συναντήσει ο αγωγός στη διαδρομή του, μπορεί να διαχειριστεί π.χ. βράχος στο υπέδαφος. Στον υποθαλάσσιο χώρο όμως, δεν υπάρχει η δυνατότητα εκσκαφής του πυθμένα ή η διαμόρφωσή του. Έτσι, η σύνθεση του εδάφους πάνω στο οποίο θα 'κάτσει' ο αγωγός είναι τυχαία. Έχει γίνει βέβαια προηγουμένως μελέτη της σύστασης του εδάφους, αλλά δεν μπορεί να γίνει οποιαδήποτε τροποποίησή του (πέραν της αφαίρεσης κάποιων βράχων που κείτονται στον πυθμένα και παρεμποδίζουν τη διέλευση του αγωγού). Οπότε ο αγωγός μπορεί να συναντήσει τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις, που σχετίζονται με την σκληρότητα του εδάφους – πυθμένα και την σύστασή του σε άργιλο, άμμο, ιλύ:

- Τελείως βραχώδες έδαφος: Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει μόνο βράχος στον πυθμένα, χωρίς την παραμικρή παρουσία άμμου. Υπάρχει μεγάλη τριβή μεταξύ αγωγού και βράχου οπότε η εξωτερική προστατευτική στρώση του αγωγού (coating) φθείρεται εύκολα.
- Σκληρό έδαφος: Το έδαφος είναι σκληρό, υπάρχει όμως άργιλος και άμμος. Στην περίπτωση αυτή ο αγωγός είναι επιρρεπής στην οριζόντια μετακίνηση λόγω των υποθαλάσσιων ρευμάτων.
- Μέτριο έδαφος: Η περίπτωση αυτή είναι η ιδανική για έναν υποθαλάσσιο αγωγό, καθώς ένα μικρό του μέρος βυθίζεται μέσα στο έδαφος και έτσι προστατεύεται από οριζόντιες μετατοπίσεις.
- Μαλακό έδαφος: Στην περίπτωση αυτή το μεγαλύτερο μέρος του αγωγού βυθίζεται μέσα στο έδαφος και έτσι παρεμποδίζονται οι διαδικασίες επιθεώρησης και συντήρησης.



Εικόνα 3- 28. Τύποι εδάφους στον υποθαλάσσιο χώρο. Πηγή: [en.Wikipedia.com](https://en.wikipedia.com), File: Submarine Pipeline vs Seabed

3.4 Κανονισμοί σχεδίασης υποθαλάσσιων αγωγών

Οι Κανονισμοί υπάρχουν για να εξυπηρετούν διάφορους σκοπούς, κυρίως όμως εστιάζουν στην ασφάλεια, την προστασία του περιβάλλοντος και τη σωστή λειτουργία ενός αγωγού. Συνήθως συντάσσονται από τις κυβερνήσεις των διαφόρων χωρών, ή από ανεξάρτητους φορείς στο χώρο της ενέργειας. Σχετικά με την ασφάλεια: οι Κανονισμοί για τη σχεδίαση αγωγών πρωτίστως εστιάζουν στην ασφάλεια των ανθρώπων, της περιουσίας και του περιβάλλοντος. Ορίζουν συγκεκριμένα σχεδιαστικά κριτήρια με στόχο να ελαχιστοποιήσουν τις πιθανότητες ενός ατυχήματος, όπως μία διαρροή, μία έκρηξη, ή ένα σπάσιμο αγωγού, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια ανθρώπινης ζωής. Σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος: οι αγωγοί μπορεί να μεταφέρουν επικίνδυνα ρευστά τα οποία να προκαλέσουν μόλυνση του νερού ή του εδάφους μια περιοχής, ή καταστροφή του οικοσυστήματος. Γι' αυτό το λόγο οι Κανονισμοί θέτουν σχεδιαστικά κριτήρια τα οποία θα αποτρέψουν μία διαρροή στο δίκτυο του αγωγού και μόλυνση του περιβάλλοντος. Σχετικά με την λειτουργικότητα και την αξιοπιστία του αγωγού: οι Κανονισμοί θέτουν σχεδιαστικά κριτήρια για την εύρυθμη λειτουργία του αγωγού και τη συνεχιζόμενη ροή αερίου ή ρευστού σε μεγάλες αποστάσεις, χρησιμοποιώντας την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια και συντήρηση. Σχετικά με την χωρητικότητα και την απόδοση του αγωγού: οι Κανονισμοί θέτουν κριτήρια για να εξασφαλίσουν ότι ο αγωγός πληροί τις απαιτήσεις της αγοράς ενέργειας και ότι η συμφωνηθείσα ποσότητα πετρελαίου ή φυσικού αερίου που πρέπει να μεταφερθεί, μεταφέρεται κανονικά. Υπάρχουν τα διαγράμματα ροής (flow rate diagrams), πιέσεων, και άλλων παραγόντων που βοηθούν σε αυτόν τον σκοπό. Σχετικά με την αντιμετώπιση μιας έκτακτης ανάγκης: οι Κανονισμοί προβλέπουν σχέδια έκτακτης ανάγκης και τρόπους αντιμετώπισής της, όπως για παράδειγμα η ταχεία διακοπή της λειτουργίας ενός αγωγού σε περίπτωση διαρροής ή η απομόνωση ενός τμήματος του δικτύου. Σχετικά με την παρακολούθηση και την επίβλεψη: οι Κανονισμοί προβλέπουν ώστε να υπάρχουν επιθεωρήσεις του αγωγού ανά τακτά χρονικά διαστήματα και να παρακολουθείται η λειτουργία του κατά τη διάρκεια ζωής του. Έτσι μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά ένας ενδεχόμενος κίνδυνος, ο οποίος μπορεί να εξελισσόταν σε καταστροφικό ατύχημα. Σχετικά με τα διάφορα έγγραφα από τα οποία θα πρέπει να συνοδεύεται ο αγωγός: θα πρέπει να υπάρχουν έγγραφα και να κρατείτε αρχείο σχετικά με τις επιδόσεις του αγωγού, με το κατασκευαστικό του κομμάτι, με τη σχεδίασή του, τις ημερομηνίες συντήρησης κ.α. ούτως ώστε να μπορεί να ελέγχεται εύκολα από τις αρμόδιες αρχές. Σχετικά με τη συμμόρφωση στις νομοθετικές διατάξεις: θα πρέπει να υπάρχει ένα νομοθετικό - κανονιστικό πλαίσιο το οποίο αν δεν πληρείται από την διαχειρίστρια εταιρεία του αγωγού, να υπάρχει ποινή. Η ποινή μπορεί να είναι κάποιο χρηματικό πρόστιμο ή ακόμα και διακοπή της λειτουργίας του αγωγού.

Μερικοί από τους Κανονισμούς που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή υποθαλάσσιων αγωγών είναι ο API RP1111, του Αμερικανικού Ινστιτούτου Πετρελαίου, ο ASME Code for Pressure Piping B31, του Αμερικανικού Συλλόγου Μηχανολόγων Μηχανικών, ο DNVGL – ST – F101, Submarine pipeline systems, του Νορβηγικού Νηογνώμονα DNV, ο EN

1594, Gas Transport, του Ευρωκώδικα, κ.α. Στο παρακάτω κεφάλαιο θα αναπτύξουμε περαιτέρω των Κώδικα API RP1111, παραθέτοντας και ένα αριθμητικό παράδειγμα στο 5ο κεφάλαιο.

Κώδικας API RP 1111

Ο κώδικας του API, RP 1111, σχεδιάστηκε από το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου, για να θέσει τα κριτήρια για το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση υποθαλάσσιων χαλύβδινων αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων. Τα κριτήρια που θέτει ο παραπάνω κώδικας επιτρέπουν τη μεταφορά υδρογονανθράκων με τον πιο οικονομικό τρόπο, προστατεύοντας παράλληλα το περιβάλλον, την ανθρώπινη ζωή και περιουσία. Έτσι, ο Κανονισμός εξασφαλίζει πως ο αγωγός μεταφοράς υδρογονανθράκων θα έχει την απαιτούμενη δομική ακεραιότητα και θα λειτουργεί με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα.

Η σχεδίαση του αγωγού θα πρέπει να ξεκινάει με την επιλογή του χάλυβα που θα χρησιμοποιηθεί, στη συνέχεια να γίνεται μία πρώτη εκλογή των διαστάσεων του αγωγού (πάχος και διάμετρος) και στη συνέχεια μέσω επαναληπτικής διαδικασίας σχεδίασης, να καταλήξουμε στις βέλτιστες διαστάσεις. Η επαναληπτική διαδικασία σχεδίασης λαμβάνει υπ' όψιν τα εξής:

- Έκρηξη αγωγού (burst) λόγω εσωτερικής πίεσης
- Συνδυασμός κάμψης και εφελκυσμού κατά την φάση εγκατάστασης και λειτουργίας του αγωγού
- Κατάρρευση αγωγού (collapse) λόγω εξωτερικής πίεσης, με τον αγωγό είτε άδειο είτε γεμάτο
- Λυγισμός και κατάρρευση αγωγού (buckling and collapse) λόγω συνδυασμού κάμψης και εξωτερικής πίεσης
- Ευστάθεια αγωγού (stability) έναντι κατακόρυφων και οριζόντιων μετατοπίσεων είτε κατά τη φάση λειτουργίας του είτε κατά την πόντισή του
- Φαινόμενα που αφορούν θερμική διαστολή ή συστολή του αγωγού
- Δυνατότητα επισκευής του αγωγού επί τόπου
- Φαινόμενα κοπώσεως αγωγού (fatigue) λόγω υδροδυναμικών και λειτουργικών φορτίων
- Επιδράσεις συνδεσιμότητας από την χάραξη της διαδρομής που θα περνά ο αγωγός (spanning impacts due to route selection)
- Απαιτήσεις που σχετίζονται με τη διαδρομή του αγωγού
- Φαινόμενα κόπωσης στο στάδιο κατασκευής του αγωγού

Ο κανονισμός εφαρμόζει την πρακτική της οριακής κατάστασης αντοχής (limit state design practice) και βασίζεται στην αντοχή του αγωγού για κάθε μία κατάσταση που περιγράφηκε παραπάνω. Στην παρούσα μελέτη έχουμε πάρει ως δεδομένα την εξωτερική διάμετρο και το πάχος τοιχώματος. Κατά τη φάση της σχεδίασης θα πρέπει να λαμβάνονται τα παρακάτω υπ' όψιν:

Σχεδιασμός για εσωτερική πίεση: Τόσο ο αγωγός όσο και τα διάφορα εξαρτήματα που βρίσκονται πάνω σε αυτόν θα πρέπει να είναι σχεδιασμένα ούτως ώστε να αντέχουν στη μέγιστη διαφορά πίεσης (διαφορά εσωτερικής με εξωτερική πίεση) τόσο στο στάδιο της πόντισης όσο και κατά τη φάση λειτουργίας του.

Σχεδιασμός για εξωτερική πίεση: Θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η εξωτερική πίεση καθώς μπορεί να προκαλέσει, σε συνδυασμό με καμπτικό φορτίο, λυγισμό του αγωγού (buckling) σε μεγάλο μήκος του.

Επίδραση θερμοκρασίας: Οι θερμοκρασιακές μεταβολές στις οποίες υπόκειται ο αγωγός θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν στο στάδιο της σχεδίασης καθώς μπορεί να προκαλέσουν διαστολή και συστολή του αγωγού. Όταν αναμένονται θερμοκρασιακές μεταβολές συνήθως χρησιμοποιούνται συσκευές οι οποίες επιτρέπουν στον αγωγό να παραμορφωθεί ελεγχόμενα (slack curves, thermal expansion devices etc.)

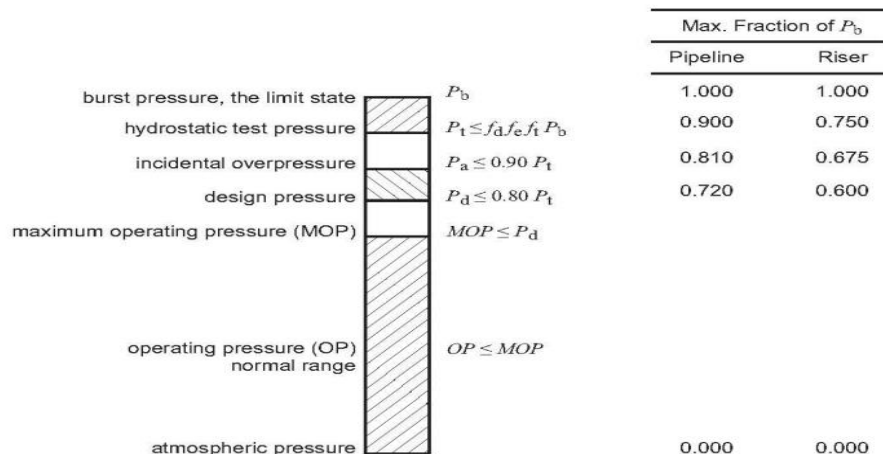
Στατικά φορτία: Ο σχεδιασμός θα πρέπει να λαμβάνει υπ' όψιν τα στατικά φορτία που δέχεται ο αγωγός. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν το ίδιο βάρος του αγωγού, το coating και άλλα προσδεμένα στον αγωγό φορτία, όπως οι τεχνικοί πλωτήρες άνωσης, καθώς επίσης και την εσωτερική υδροστατική πίεση, τα θερμικά φορτία που προκαλούν διαστολή και τις στατικές δυνάμεις που προκαλούνται από την διαφορά στάθμης που υπάρχει στον πυθμένα. Το φορτίο από το ίδιο βάρος του αγωγού θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψιν στη φάση της σχεδίασης ιδίως στα ανυποστήρικτα τμήματα του αγωγού.

Δυναμικά φορτία: Η σχεδίαση θα πρέπει να εξετάζει και τα δυναμικά φορτία που μπορεί να προκύψουν στον αγωγό, όπως φορτία λόγω πρόσκρουσης, φορτία λόγω δόνησης από τυρβώδη υποθαλάσσια ρεύματα, φορτία λόγω σεισμικής δραστηριότητας κ.α.

Σχετική κίνηση συνδεδεμένων μερών: Στο στάδιο της σχεδίασης θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η σχετική κίνηση τυχόν μερών υποστήριξης του αγωγού, που μπορεί να είναι συνδεδεμένα επάνω του. Παράδειγμα αποτελούν τα pipeline risers και τα mooring lines (σχοινιά πρόσδεσης).

Διάβρωση αγωγού: Θα πρέπει να παρθούν μέτρα για την αποφυγή της εσωτερικής και εξωτερικής διάβρωσης του αγωγού. Αυτά μπορεί να είναι καθοδική προστασία, είτε εφαρμογή αντιδιαβρωτικής βαφής (anticorrosion coating and cathodic protection).

Σχετικά με τις πιέσεις, ο Κώδικας ορίζει επτά διαφορετικές πιέσεις, οι οποίες πρέπει να ικανοποιούν το ακόλουθο διάγραμμα. Αυτές είναι η πίεση διάνοιξης του αγωγού (burst pressure) η οποία ορίζει και την οριακή κατάσταση σχεδίασης, η υδροστατική πίεση (hydrostatic test pressure), η στιγμιαία υπερπίεση (incidental overpressure), η πίεση σχεδίασης (design pressure), η μέγιστη πίεση λειτουργίας (Maximum Operating Pressure), η πίεση λειτουργίας (operating pressure) και η ατμοσφαιρική πίεση.



Διάγραμμα 3- 1. Διάφορες πιέσεις στον αγωγό με βάση τον Κώδικα του API.

Οι παραπάνω πιέσεις δίνονται από τους ακόλουθους τύπους:

Πίεση διάρρηξης αγωγού (burst pressure):

$$P_b = 0.45 * (S + U) * \ln\left(\frac{D}{D_i}\right) \quad (3.1)$$

ή

$$P_b = 0.90 * (S + U) * \frac{t}{D - t} \quad (3.2)$$

όπου:

S: το όριο διαρροής του χάλυβα

U: η αντοχή σε εφελκυσμό

D: η εξωτερική διάμετρος του αγωγού

D_i : η εσωτερική διάμετρος του αγωγού = $D - 2t$

t: το πάχος καθ' όλο το μήκος του αγωγού

Υδροστατική πίεση (hydrostatic test pressure):

$$P_t \leq f_d * f_e * f_t * P_b \quad (3.3)$$

όπου:

f_d ο συντελεστής εσωτερικής πίεσης σχεδίασης, ο οποίος εφαρμόζεται σε όλους τους αγωγούς και είναι ίσος με 0.90 για αγωγούς και 0.75 για risers

f_e ο συντελεστής συγκόλλησης. Μόνο τιμές ίσες με τη μονάδα είναι αποδεκτές.

f_t ο συντελεστής μεταβολής της θερμοκρασίας. Ίσος με τη μονάδα για θερμοκρασίες μικρότερες των 121° C.

‘Στιγμαία’ υπερπίεση (incidental overpressure):

$$P_a \leq 0.90 * P_t \quad (3.4)$$

Πίεση σχεδίασης (design pressure):

$$P_d \leq 0.80 * P_t \quad (3.5)$$

Όλα τα παραπάνω αφορούν στην εσωτερική πίεση σχεδίασης του αγωγού. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις που η εξωτερική πίεση του αγωγού είναι μεγαλύτερη της εσωτερικής, όπως για παράδειγμα κατά τη φάση πόντισης του, όπου δεν υπάρχει ροή στο εσωτερικό του, άρα η εσωτερική πίεση είναι μηδέν και υπάρχει μόνο η εξωτερική πίεση του νερού. Αυτή μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση του αγωγού. Οπότε θα πρέπει να γίνεται η σχεδίαση για την εξωτερική πίεση, με τέτοιον τρόπο ώστε ο αγωγός να μπορέσει να αποτρέψει μια κατάρρευση ή έναν τοπικό λυγισμό, λαμβάνοντας υπ’ όψιν παράγοντες όπως η οβαλότητα του αγωγού, οι καμπτικές τάσεις που δημιουργούνται, τα εξωτερικά φορτία.

Πίεση κατάρρευσης αγωγού (collapse pressure):

Η διαφορά πίεσης ($\Delta P = P_{out} - P_{in}$) θα πρέπει να είναι μικρότερη από την πίεση κατάρρευσης του αγωγού καθ’ όλο το μήκος του. Θα πρέπει να ικανοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$f_0 * P_c \geq (P_o - P_i) \quad (3.6)$$

όπου:

f_0 : ο συντελεστής κατάρρευσης (collapse factor);

= 0.7 για αγωγούς χωρίς ραφές ή για ηλεκτροσυγκόλληση με αντίσταση – for seamless or electric resistance welded (ERW) pipe

= 0.6 για αγωγό με συγκόλληση βυθιζόμενου τόξου – double submerged arc welded (DSAW) pipe

Για τον υπολογισμό της πίεσης κατάρρευσης P_c χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$P_c = \frac{P_y * P_e}{\sqrt{P_y^2 + P_e^2}} \quad (3.7)$$

με

$$P_y = 2 * S * \left(\frac{t}{D}\right) \quad (3.8)$$

και

$$P_e = 2 * E * \frac{\left(\frac{t}{D}\right)^3}{(1 - \nu^2)} \quad (3.9)$$

όπου:

E = μέτρο ελαστικότητας σε N/mm²

P_e = η ελαστική πίεση κατάρρευσης του αγωγού σε N/mm²

P_y = η πίεση διαρροής κατάρρευσης σε N/mm²

Συνδυασμός εξωτερικής πίεσης και κάμψης:

Ο συνδυασμός κάμψης - εξωτερικής πίεσης στον αγωγό, πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_b} + \frac{P_0 - P_i}{f_c * P_c} \leq g(\delta) \quad (3.10)$$

όπου:

$$g(\delta) = (1 + 20\delta)^{-1}$$

$$\delta = \text{οβαλότητα} = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}}$$

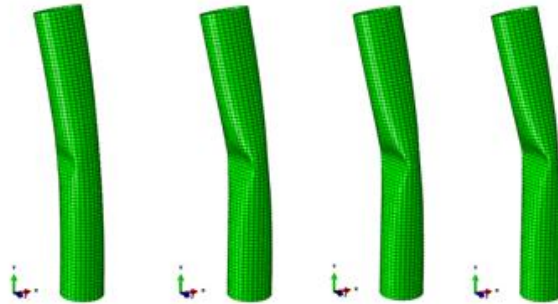
ε = τροπή λόγω κάμψης (bending strain)

$$\varepsilon_b = \text{τροπή λόγω λυγισμού (buckling strain)} = \frac{t}{2D} \quad (3.11)$$

Propagating buckling

Ένας τοπικός λυγισμός, λόγω αυξημένης κάμψης ή κάποιου άλλου συμβάντος, μπορεί να προκαλέσει ανεπανόρθωτη ζημιά στον αγωγό καθώς ο λυγισμός αυτός, λόγω της παρουσίας της υδροστατικής πίεσης, μπορεί να διαδοθεί ταχύτατα σε μεγάλο μήκος του. Για την αποφυγή

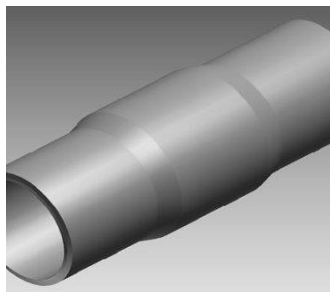
αυτού του φαινομένου, της διάδοσης του τοπικού λυγισμού σε μεγάλο μήκος του αγωγού, ο Κώδικας προβλέπει τη χρήση buckle arrestors. Τα buckle arrestors είναι συσκευές οι οποίες τοποθετούνται σε κάποια απόσταση μεταξύ τους προκειμένου να σταματήσουν τη διάδοση του λυγισμού και να τον περιορίσουν σε ένα τμήμα μονάχα του αγωγού. Αυτά μπορεί να είναι σαν δακτυλίδια που περνιούνται γύρω από τον αγωγό, είτε να είναι κάποια τοπική αύξηση του πάχους του αγωγού.



Εικόνα 3- 29. Τοπικός λυγισμός αγωγού. Πηγή: International Journal of Steel Structures, ‘Experimental Study and Finite Element Analysis of Initial Imperfection on 7A04-T6 Aluminum Alloy Circular Hollow Section Column’, Volume 21, 2021



Εικόνα 3- 30. Τρόποι αποτροπής διάδοσης του τοπικού λυγισμού, είτε με χρήση δακτυλιδιού είτε με τοπική αύξηση του πάχους. Πηγή: Dynamic Arrest of Propagating Buckles in Offshore Pipelines, Stelios Kyriakides



Εικόνα 3- 31. Τρόποι αποτροπής διάδοσης του τοπικού λυγισμού, είτε με χρήση δακτυλιδιού είτε με τοπική αύξηση του πάχους. Πηγή: Publication: ‘Influence of Stiffeners and Buckling Arrestors on the Behaviour of Offshore Pipelines under Bending’, Federico Guarracino, 2018

Το κριτήριο εκείνο που ορίζει αν θα χρησιμοποιηθούν buckle arrestors ή όχι, είναι η γεωμετρία του αγωγού, το πάχος τοιχώματος και τη διάμετρός του. Πρέπει να χρησιμοποιηθούν buckle arrestors υπό την ακόλουθη συνθήκη:

$$P_0 - P_i \geq f_p * P_p \quad (3.12)$$

όπου:

$$P_p = 24 * S * \left(\frac{t}{D}\right)^{2.4} \quad (3.13)$$

f_p = σχεδιαστικός παράγοντας διάδοσης λυγισμού = 0.80

Σχετικά με το ανυποστήρικτο μήκος του αγωγού μεταξύ των στηρίξεων – τενόντων (span), ο Κανονισμός δεν προβλέπει κάποιο ανώτατο όριο στο βέλος κάμψης. Αρκεί να μην δημιουργούνται πολύ μεγάλα φορτία στο ανυποστήρικτο κομμάτι του και να μην υπάρχει πολύ μεγάλη παραμόρφωση του αγωγού.

Κεφάλαιο 4: Μη επικαθήμενοι αγωγοί

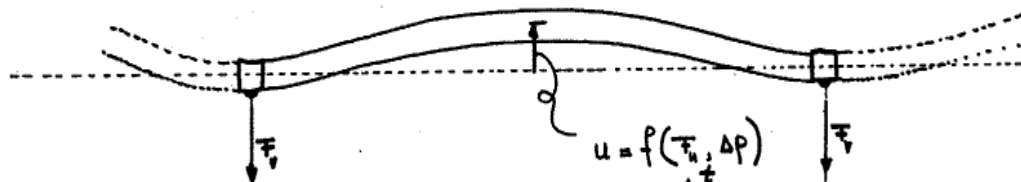
Στα προηγούμενα κεφάλαια αναφέραμε τους γεωκινδύνους που μπορεί να συναντήσουμε σε μια περιοχή μελέτης, τις επιπτώσεις που μπορεί να έχουν σε έναν υποθαλάσσιο (ή χερσαίο) αγωγό, τον τρόπο κατασκευής και πόντισης ενός αγωγού, καθώς και το Κανονιστικό πλαίσιο που διέπει τη σχεδιάσή του. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε το κυρίως θέμα της παρούσας εργασίας που είναι οι αγκυρωμένοι μη επικαθήμενοι αγωγοί φυσικού αερίου για την αποφυγή υποθαλάσσιων γεωκινδύνων.

Πιο συγκεκριμένα θα μελετηθεί ένας αγωγός, (που στα επόμενα κεφάλαια θα ορίσουμε και τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά) και θα δούμε πώς ο αγωγός αυτός μπορεί να γίνει πλωτός αποφεύγοντας έτσι ενεργό ρήγμα που υπάρχει στην περιοχή διέλευσής του. Αρχικά θα δούμε πιο αναλυτικά την ιδέα ενός πλωτού αγωγού συμπεριλαμβανοντας και κάποια σκίτσα και στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε το μηχανικό υπόβαθρο.

4.1 Τρόπος κατασκευής

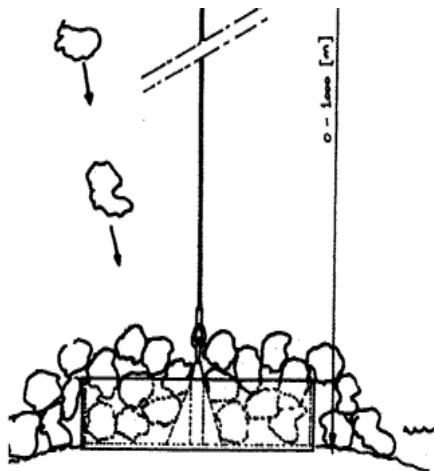
Η ιδέα για έναν πλωτό αγωγό μεταφοράς υδρογονανθράκων είναι μία καινοτόμος ιδέα. Μέχρις στιγμής δεν έχει κατασκευαστεί παρόμοιος αγωγός μεταφοράς πετρελαίου ή φυσικού αερίου με αυτόν τον τρόπο. Όλοι οι αγωγοί που είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι επικαθήμενοι στον πυθμένα της θάλασσας. Στην περίπτωση αυτή όμως, ο αγωγός θα επιπλέει σε κάποιο βάθος κάτω από το νερό λόγω της παρουσίας άνωσης, η οποία οφείλεται στη διαφορά πυκνότητας του θαλασσινού νερού με τον χάλυβα. Εμείς θέλουμε η άνωση B (Buoyancy) να είναι οριακά μεγαλύτερη από το βάρος W (Weight). Έτσι θα δημιουργηθεί ένα ομοιόμορφα καταναμημένο φορτίο στον αγωγό το οποίο θα τείνει να τον μετατοπίσει προς τα πάνω.

Η άνωση εξαρτάται από τον όγκο νερού που εκτοπίζει ο αγωγός. Οπότε οι συγκεκριμένες διαστάσεις που θα έχει ο αγωγός μπορεί να μην δημιουργούν άνωση που να είναι μεγαλύτερη από το βάρος του. Στην περίπτωση αυτή θα χρησιμοποιήσουμε τεχνητούς πλωτήρες, οι οποίοι θα εγκατασταθούν στα σημεία που θα βρίσκονται οι τένοντες και θα παρέχουν πρόσθετη άνωση στον αγωγό. Ένα ικανοποιητικό ποσοστό άνωσης θα ήταν το 10% του βάρους ανά μονάδα μήκους. Αν για παράδειγμα το βάρος του αγωγού είναι 10 kN/m, η δύναμη της άνωσης θέλουμε να είναι 1 kN/m (με φορά προς τα πάνω).



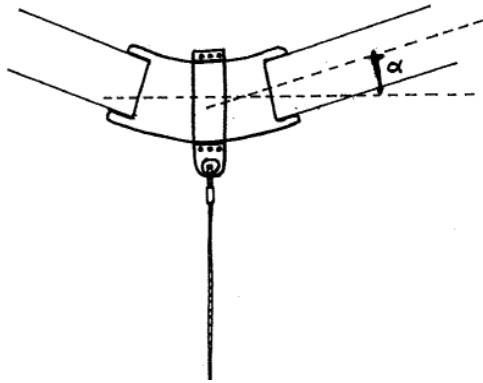
Εικόνα 4- 1. Άνωση και βάρος αγωγού.

Επίσης ο αγωγός θέλουμε να είναι σταθερός σε μία συγκεκριμένη θέση. Επειδή δεν πατάει στον πυθμένα είναι πιο επιρρεπής σε μετατοπίσεις λόγω θαλασσίων ρευμάτων. Η συγκράτησή του στην επιθυμητή στάθμη θα γίνεται από τένοντες οι οποίοι μπορούν να εφελκύνονται (δεν δέχονται θλίψη). Οι τένοντες μπορούν να αγκυρωθούν στον πυθμένα είτε με πασσάλους έμπηξης είτε με βαρίδια. Επειδή όμως σε μεγάλα βάθη οι πάσσαλοι έμπηξης δεν μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά, θα προτιμηθούν είτε χαλύβδινα ογκώδη βαρίδια είτε μεταλλικά πλέγματα τα οποία θα γεμίσουν με βράχους.



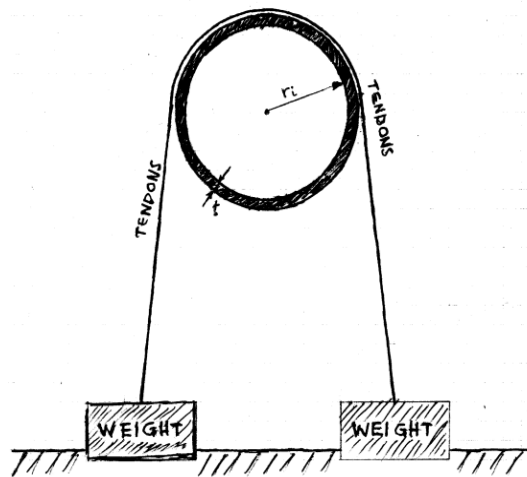
Εικόνα 4- 2. Τρόπος αγκύρωσης τενόντων – αγωγού.

Κοντά στο σημείο ένωσης του αγωγού με τους τένοντες θα έχουμε συγκεντρώσεις τάσεων (καμπτικές τάσεις). Σε περίπτωση που οι καμπτικές ροπές είναι πολύ μεγάλες και τείνουν σε μία κρίσιμη τιμή αστοχίας, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλες διατάξεις στον αγωγό ούτως ώστε να αποφευχθούν οι μεγάλες καμπτικές παραμορφώσεις στις στηρίξεις. Μία μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως είναι η χρήση ενός καμπύλου συνδέσμου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, ο οποίος παραλαμβάνει τις καμπτικές ροπές και έτσι ο αγωγός μπορεί να συμπεριφερθεί ως καλώδιο.

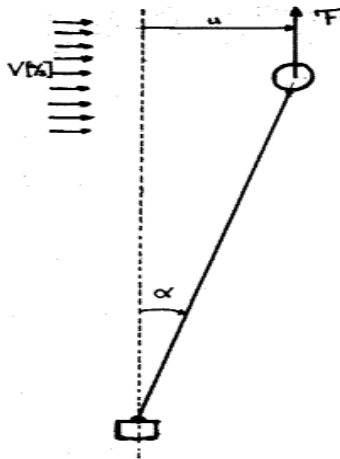


Εικόνα 4- 3. Χρήση καμπύλου συνδέσου για εξάλειψη των ροπών στις στηρίξεις

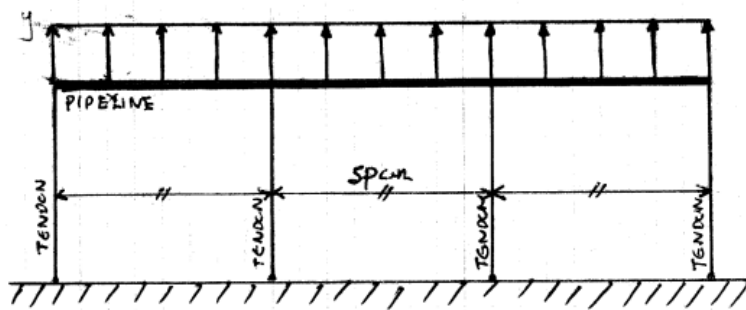
Βέβαια, από κατασκευαστικής απόψεως δε γνωρίζουμε αν κάτι τέτοιο θα ήταν εφικτό. Καθώς μιλάμε για χαλύβδινο σωλήνα μεγάλης διαμέτρου, ο οποίος θα βρίσκεται σε βάθος το οποίο μπορεί να ξεπερνά και τα 500 μέτρα. Οπότε ως λύση προτείνεται, οι τένοντες να τοποθετηθούν γύρω από τον αγωγό και λόγω της παρουσίας άνωσης, η οποία τείνει να τον ανυψώσει, εκείνος να θηλυκώνει γύρω τους και στην ουσία να τους “ενεργοποιεί” εφελκύνοντας τους. Παρακάτω φαίνεται ένα ενδεικτικό σκίτσο πρόσοψης για το πώς θα τοποθετηθούν τένοντες – αγωγός, αλλά και πώς φαίνεται ο αγωγός σε πλάγια όψη και με την τοποθέτηση πλωτήρων.



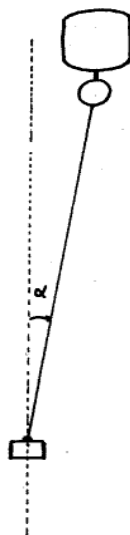
Εικόνα 4- 4. Ενδεικτικό σκίτσο πρόσοψης αγωγού – τενόντων.



Εικόνα 4- 5. Οριζόντια μετατόπιση αγωγού από πλευρικά υποθαλάσσια ρεύματα.



Εικόνα 4- 6. Τμήμα αγωγού σε πλάγια όψη.



Εικόνα 4- 7. Τοποθέτηση πλωτήρων σε διάφορα σημεία ανά μήκος του αγωγού.

Τέλος, θα πρέπει να επισημάνουμε πως ο αγωγός δε θα είναι πλωτός καθ' όλο το μήκος του στον υποθαλάσσιο χώρο. Θα είναι επικαθήμενος στο μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής του και θα ανυψώνεται μονάχα στην περιοχή εκείνη όπου υπάρχει ρήγμα ούτως ώστε να περνά από πάνω του. Τα ρήγματα συνήθως βρίσκονται κοντά στις ακτές οπότε τα βάθη δεν είναι πολύ μεγάλα.

4.2 Μηχανικό υπόβαθρο

Υπολογισμός τάσεων:

Η δυσμενέστερη κατάσταση καταπόνησης του αγωγού είναι στη φάση της πόντισής του καθώς υπόκειται σε έναν συνδυασμό κάμψης, εφελκυσμού και υδροστατικής πίεσης. π.χ. περιοχή sagbend. Στην τρισδιάστατη εντατική κατάσταση οι τάσεις και οι τροπές δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} * [\sigma_x - \nu * (\sigma_y + \sigma_z)] \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} * [\sigma_y - \nu * (\sigma_x + \sigma_z)] \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} * [\sigma_z - \nu * (\sigma_x + \sigma_y)] \quad (4.3)$$

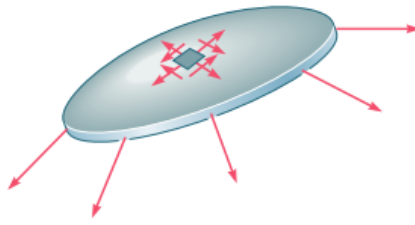
Ενώ στην μονοδιάστατη κατάσταση, η σχέση που μας δίνει την τάση και την τροπή είναι η εξίσωση του Hooke:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (4.4)$$

Εμείς θεωρούμε πως ο αγωγός παραμορφώνεται στην ελαστική περιοχή οπότε ισχύει ο Νόμος του Hooke. Αν λύσουμε την παραπάνω εξίσωση ως προς την τροπή ε θα έχουμε:

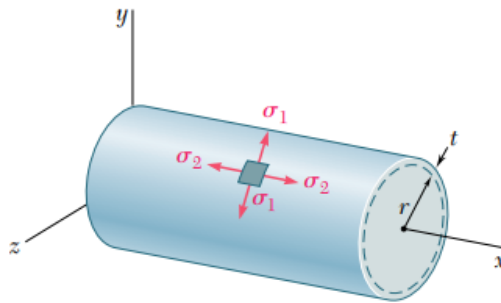
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (4.5)$$

Το μέτρο ελαστικότητας E θεωρούμε πως είναι σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του αγωγού. Ενώ για τον υπολογισμό της τάσης σ θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κάποιο κριτήριο διαρροής αφού επάνω στα τοιχώματα του αγωγού, αναπτύσσεται μία διαζονική επίπεδη εντατική κατάσταση. Τα τοιχώματα του αγωγού είναι αρκετά λεπτά, επομένως προσφέρουν μικρή αντίσταση σε κάμψη και έτσι μπορεί να θεωρηθεί πως οι εσωτερικές δυνάμεις που ασκούνται σε κάποιο τμήμα του αγωγού είναι εφαπτόμενες στην επιφάνεια του τοιχώματος. Επομένως αν εξετάσουμε ένα πολύ μικρό στοιχείο του τοιχώματος του αγωγού θα δούμε ότι οι τάσεις που προκύπτουν βρίσκονται σε ένα επίπεδο εφαπτόμενο στην επιφάνεια του αγωγού. Έτσι οι υπολογισμοί μας θα απλουστευτούν αρκετά.



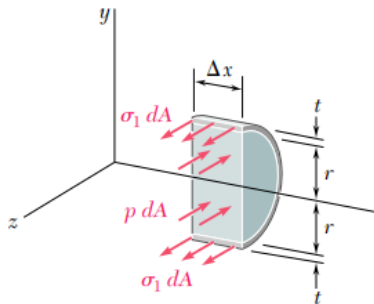
Εικόνα 4- 8. Κατανομή τάσεων σε λεπτότοιχα μέλη. Πηγή Mechanics of Materials 6th ed. – Beer_Johnston, 2012.

Επάνω στα τοιχώματα του αγωγού αναπτύσσονται δύο τάσεις. Η περιφερειακή και η διαμήκης τάση. Οι μαθηματικοί τύποι επίλυσής τους προκύπτουν παίρνοντας ένα τμήμα του αγωγού, βλέποντας τις δυνάμεις που ασκούνται πάνω σ' αυτό και εφαρμόζοντας ισορροπία δυνάμεων.



Εικόνα 4- 9. Κατανομή τάσεων στον αγωγό. Πηγή Mechanics of Materials 6th ed. – Beer_Johnston, 2012.

Για την περιφερειακή τάση:



Εικόνα 4- 10. Ελεύθερο σώμα για τον προσδιορισμό της περιφερειακής τάσης. Πηγή Mechanics of Materials 6th ed. – Beer_Johnston, 2012.

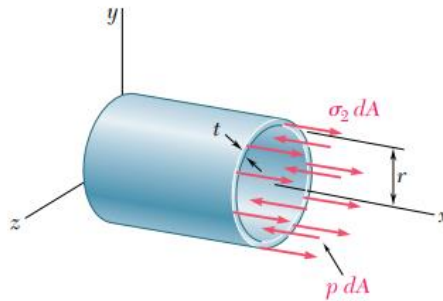
Από ισορροπία δυνάμεων:

$$\Sigma F_z = 0: \rightarrow \sigma_1 * (2 * t * \Delta\chi) - p * (2 * r * \Delta\chi) = 0$$

και λύνοντας ως προς σ_1 :

$$\sigma_1 = \frac{p * r}{t} \quad (4.6)$$

Για την διαμήκη τάση:



Εικόνα 4- 11. Ελεύθερο σώμα για τον προσδιορισμό της διαμήκουσ τάσης. Πηγή *Mechanics of Materials 6th ed. – Beer_Johnston, 2012.*

Από ισορροπία δυνάμεων:

$$\Sigma F_x = 0: \rightarrow \sigma_2 * (2\pi * r * t) - p * (\pi * r^2) = 0$$

και λύνοντας ως προς σ_2 :

$$\sigma_2 = \frac{p * r}{2t} \quad (4.7)$$

Δηλαδή,

$$\sigma_1 = 2 * \sigma_2 \quad (4.8)$$

Από τον παραπάνω τύπο συμπεραίνουμε ότι αν ο αγωγός αστοχήσει, θα αστοχήσει λόγω της περιφερειακής τάσης σ_1 , η οποία προκαλεί σχισμή όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4- 12. Πείραμα αστοχίας δοκιμίου σωλήνα λόγω περιφερειακής τάσης. Πηγή: Nuclear Corrosion Science and Engineering, Damien Feron, 2012

Άρα στα τοιχώματα του αγωγού θα αναπτυχθούν περιφερειακές τάσεις ή αλλιώς hoop stresses και διαμήκης τάσεις ή αλλιώς longitudinal – axial stresses.

$$\sigma_{\text{hoop}} = \frac{pr}{t} \quad (4.9)$$

&

$$\sigma_{\text{axial}} = \frac{pr}{2t} \quad (4.10)$$

Το κριτήριο διαρροής που θα χρησιμοποιήσουμε για τον υπολογισμό της ισοδύναμης τάσης $\sigma_{\text{equivalent}}$, είναι αυτό του Von Mises, το οποίο δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\sigma_{\text{hoop}}^2 + \sigma_{\text{axial}}^2 - \sigma_{\text{hoop}} * \sigma_{\text{axial}}} \quad (4.11)$$

Θα πρέπει η ισοδύναμη τάση του Von Mises να είναι μικρότερη της τάσης διαρροής για να είμαστε στην ελαστική περιοχή. Πρέπει:

$$\sigma_{\text{eq}} < \sigma_{\text{yield}}$$

Στο σημείο αυτό να αναφερθεί πως επειδή ο αγωγός υπόκειται σε μόνιμη τάση, άρα και τροπή δεν μπορεί να προσδιοριστεί εύκολα ένα ανώτατο όριο τάσης, πέραν του οποίου ο αγωγός θα έχει πρόβλημα, διότι έχουμε το φαινόμενο της κόπωσης και ερπυσμού (creep) όπου η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση συνεχώς θα μειώνεται με το πέρασ του χρόνου. Για το λόγο αυτό είναι προτιμότερο και πιο εύκολο να ορίσουμε ένα ανώτατο όριο τροπής και με βάση αυτό να γίνει ο σχεδιασμός. Γι' αυτό το λόγο επιλύσαμε το Νόμο του Hooke παραπάνω ως προς την τροπή ϵ .

Υπολογισμός βέλους κάμψης

Ένα άλλο μέγεθος που μας ενδιαφέρει αρκετά είναι το βέλος κάμψης. Ενθυμούμενοι πως η καμπυλότητα της ουδέτερης επιφάνειας σε μία δοκό που υπόκειται σε καθαρή κάμψη δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (4.12)$$

Εντούτοις, η καμπτική ροπή όσο και η καμπυλότητα της ουδέτερης επιφάνειας μεταβάλλονται από διατομή σε διατομή. Οπότε αν συμβολίσουμε με x την απόσταση της διατομής από το αριστερό άκρο της δοκού, η παραπάνω εξίσωση γράφεται:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M(x)}{EI} \quad (4.13)$$

Από τα μαθηματικά, ο τύπος που μας δίνει την καμπυλότητα μιας επίπεδης καμπύλης σε ένα σημείο (x,y) είναι ο εξής:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (4.14)$$

και επειδή σε μία δοκό ο λόγος dy/dx είναι αρκετά μικρός και άρα το τετράγωνό του αμελητέο $\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \rightarrow 0$, η παραπάνω σχέση απλουστεύεται ως εξής:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (4.15)$$

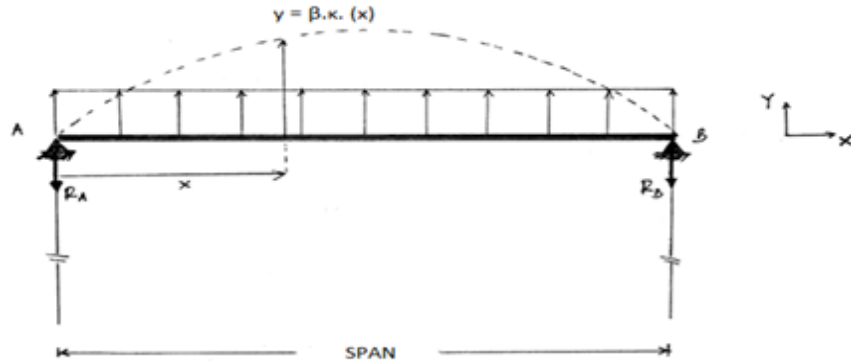
Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις καταλήγουμε στην:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (4.16)$$

Η παραπάνω γραμμική διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης αποτελεί την εξίσωση ελαστικής γραμμής. Οπότε έχοντας βρει την εξίσωση για την καμπτική ροπή $M(x)$, μπορούμε να αντικαταστήσουμε στην παραπάνω σχέση. Αν ολοκληρώσουμε μία φορά την παραπάνω σχέση θα πάρουμε τον λόγο dy/dx που είναι η κλίση της ουδέτερης επιφάνειας του αγωγού σε ένα σημείο x . Αν ολοκληρώσουμε και δεύτερη φορά θα πάρουμε την κατακόρυφη απόσταση y σε ένα σημείο x . Επειδή κατά την ολοκλήρωση θα προκύψουν δύο σταθερές, έστω $C1$ και $C2$, θα πρέπει να τις υπολογίσουμε μέσω των συνοριακών συνθηκών στα σημεία στήριξης.

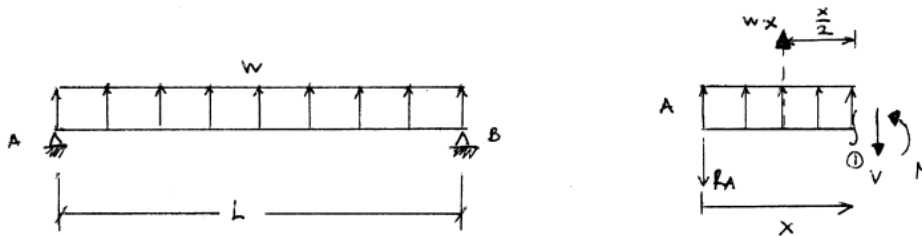
Παρακάτω θα επιλύσουμε δύο περιπτώσεις όπου ο αγωγός προσομοιώνεται σαν μία δοκός η οποία δέχεται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο προς τα πάνω. Στην πρώτη περίπτωση, το ανυποστήρικτο μήκος του αγωγού θα έχει κυλίσεις στα άκρα του (αμφιέρειστη δοκός), ενώ στη δεύτερη περίπτωση θα έχει πακτώσεις (αμφίπακτη δοκός).

Υπολογισμός βέλους κάμψης για αμφιέρειστη δοκό:



Εικόνα 4- 13. Αμφιέρειστη δοκός

Για να βρούμε την εξίσωση της ελαστικής γραμμής, αρχικά σχεδιάζουμε το διάγραμμα ελευθέρου σώματος της δοκού κάνοντας μία τομή στο σημείο (1), βλέπε παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 4- 14. Διάγραμμα ελευθέρου σώματος – αμφιέρειστη δοκός.

Παίρνοντας τις ροπές ως προς το σημείο (1), έχουμε:

$$CCW(+)\ \Sigma M_1 = 0: M + R_A * x - w * x * \left(\frac{x}{2}\right) = 0$$

$$Με\ R_A = \frac{1}{2} w * L$$

$$M = -\frac{1}{2}w * L * x + w * \frac{x^2}{2} \quad (4.17)$$

Οπότε έχοντας βρει την εξίσωση για την καμπτική ροπή $M(x)$, μπορούμε να αντικαταστήσουμε στην εξίσωση της ελαστικής γραμμής:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{-\frac{1}{2}w * L * x + w * \frac{x^2}{2}}{EI} \quad (4.18)$$

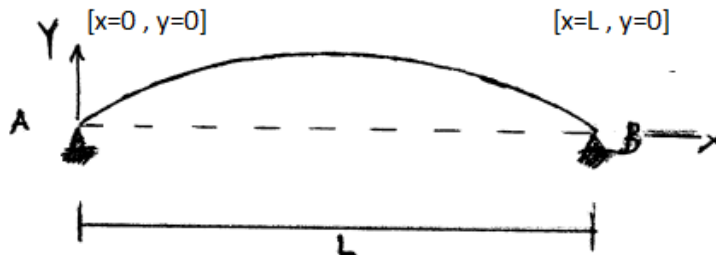
1^η ολοκλήρωση:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\left[-\frac{1}{4} * w * L * x^2 + \frac{w}{6} * x^3 + C1\right]}{EI} \quad (4.19)$$

2^η ολοκλήρωση:

$$y = \frac{\left[-\frac{1}{12} * w * L * x^3 + \frac{w}{24} * x^4 + C1 * x + C2\right]}{EI} \quad (4.20)$$

Παίρνοντας τις οριακές συνθήκες στα σημεία στήριξης:



Εικόνα 4- 15. Οριακές συνθήκες σε αμφιέρειστη δοκό.

μπορούμε να υπολογίσουμε τις σταθερές ολοκλήρωσης $C1$, $C2$ που προέκυψαν από τις παραπάνω δύο εξισώσεις:

Παίρνοντας την δεύτερη εξίσωση και αντικαθιστώντας όπου $x = 0$ και $y = 0$ θα πάρουμε:

$$EI * 0 = -\frac{1}{12} * w * L * 0 + \frac{w}{24} * 0 + C1 * 0 + C2$$

$$C2 = 0 \quad (4.21)$$

Παίρνοντας ξανά την δεύτερη εξίσωση και αντικαθιστώντας όπου $x = L$ και $y = 0$ θα πάρουμε:

$$EI * 0 = -\frac{1}{12} * w * L * L^3 + \frac{w}{24} * L^4 + C1 * L + 0$$

$$C1 = +\frac{1}{24} w * L^3 \quad (4.22)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές των C1 και C2 στις παραπάνω δύο εξισώσεις θα έχουμε:

Για την κλίση dy/dx:

$$dy/dx = -\frac{w}{24 * EI} * (-4 * x^3 + 6 * L * x^2 - L^3) \quad (4.23)$$

Για το βέλος κάμψης y:

$$y = \frac{w}{24 * EI} * (+x^4 - 2 * L * x^3 + L^3 * x) \quad (4.24)$$

Το μέγιστο βέλος κάμψης παρατηρείται εκεί που μηδενίζεται η κλίση, δηλαδή για $x = L/2$, ενώ η μέγιστη κλίση παρατηρείται στα άκρα της δοκού:

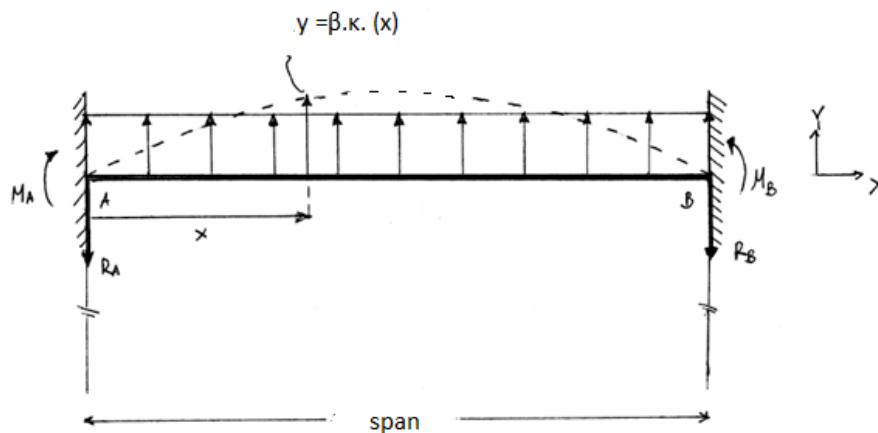
Max κλίση (στα άκρα):

$$\frac{dy}{dx} = \mp \frac{w * L^3}{24 * EI} \quad (4.25)$$

Max βέλος κάμψης (στο μέσον):

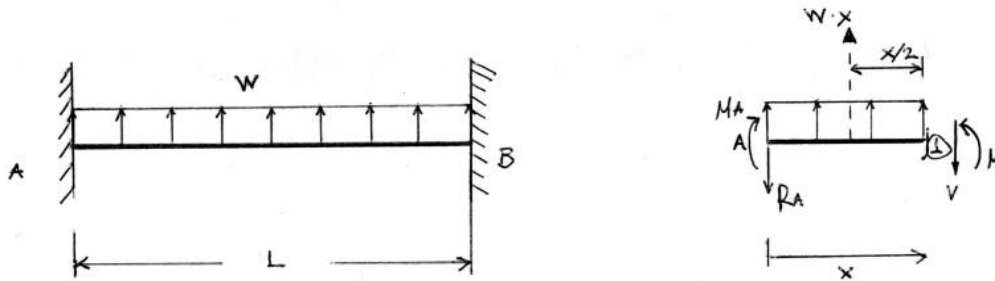
$$y_{\max} = \frac{5 * w * L^4}{384 * EI} \quad (4.26)$$

Υπολογισμός βέλους κάμψης για αμφίπακτη δοκό:



Εικόνα 4- 16. Αμφίπακτη δοκός

Παίρνοντας τις ροπές ως προς ένα τυχαίο σημείο (1) σε απόσταση x από το αριστερό άκρο της δοκού:



Εικόνα 4- 17. Διάγραμμα ελευθέρου σώματος – αμφίπακτη δοκός

$$\text{CCW}(+) \Sigma M_1 = 0: M + R_A * x - w * x * \left(\frac{x}{2}\right) - M_A = 0$$

$$\text{Με } R_A = \frac{1}{2} w * L$$

$$M = -\frac{1}{2} w * L * x + w * \frac{x^2}{2} + M_A \quad (4.27)$$

Το πρόβλημα στην περίπτωση αυτή είναι υπερστατικό. Οι εξισώσεις δηλαδή στατικής ισορροπίας δεν επαρκούν για να προσδιοριστούν όλες οι αντιδράσεις στις στηρίξεις. Από την παραπάνω σχέση βλέπουμε πως υπάρχει η ροπή M_A , την τιμή της οποίας δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε μόνο από την στατική.

Για να προσδιορίσουμε την τιμή της M_A θα βρούμε πρώτα την εξίσωση ελαστικής γραμμής και στη συνέχεια θα προσδιορίσουμε τις σταθερές ολοκλήρωσης $C1$, $C2$, καθώς και τις αντιδράσεις M_A , M_B μέσω των συνοριακών συνθηκών. Επειδή ο φορέας είναι συμμετρικός ως προς τον άξονα Y , θα ισχύει $M_A = M_B$ (όπως αντίστοιχα ισχύει $R_A = R_B$).

Από την εξίσωση ελαστικής γραμμής:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\left[-\frac{1}{2} w * L * x + w * \frac{x^2}{2} + M_A\right]}{EI} \quad (4.28)$$

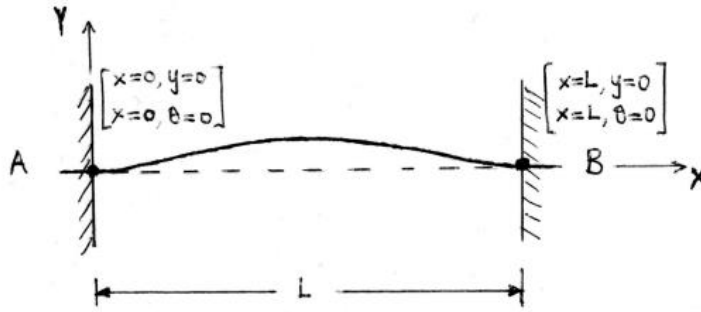
1^η ολοκλήρωση:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\left[-\frac{1}{4} * w * L * x^2 + \frac{w}{6} * x^3 + M_A * x + C1\right]}{EI} \quad (4.29)$$

2^η ολοκλήρωση:

$$y = \frac{\left[-\frac{1}{12} * w * L * x^3 + \frac{w}{24} * x^4 + \frac{M_A}{2} * x^2 + C1 * x + C2 \right]}{EI} \quad (4.30)$$

Χρησιμοποιώντας τις παρακάτω συνοριακές συνθήκες, όπως αυτές φαίνονται στο σχήμα, μπορούμε να γράψουμε:



Εικόνα 4- 18. Συνοριακές συνθήκες – αμφίπακτη δοκός.

Για $x = 0 \rightarrow \theta = 0$, από την πρώτη εξίσωση dy/dx θα πάρουμε:

$$C1 = 0 \quad (4.31)$$

Για $x = 0 \rightarrow y = 0$, από την δεύτερη εξίσωση y θα πάρουμε:

$$C2 = 0 \quad (4.32)$$

Οπότε έχοντας τις σταθερές $C1 = C2 = 0$, οι παραπάνω δύο εξισώσεις μπορούν να γραφούν ως:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\left[-\frac{1}{4} * w * L * x^2 + \frac{w}{6} * x^3 + M_A * x \right]}{EI} \quad (4.33)$$

και αντίστοιχα

$$y = \frac{\left[-\frac{1}{12} * w * L * x^3 + \frac{w}{24} * x^4 + \frac{M_A}{2} * x^2 \right]}{EI} \quad (4.34)$$

Χρησιμοποιώντας τη συνοριακή συνθήκη $x = L \rightarrow y = 0$ μπορούμε να προσδιορίσουμε την ροπή M_A , ως εξής:

$$0 = \frac{\left[-\frac{1}{12} * w * L * L^3 + \frac{w}{24} * L^4 + \frac{M_A}{2} * L^2 \right]}{EI}$$

$$M_A = +\frac{1}{12} * w * L^2 \quad (4.35)$$

Με αντικατάσταση στις εξισώσεις βέλους κάμψης και κλίσης θα έχουμε:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\left[-\frac{1}{4} * w * L * x^2 + \frac{w}{6} * x^3 + \frac{1}{12} * w * L^2 * x \right]}{EI} \quad (4.36)$$

και αντίστοιχα:

$$y = \frac{\left[-\frac{1}{12} * w * L * x^3 + \frac{w}{24} * x^4 + \frac{1}{24} * w * L^2 * x^2 \right]}{EI} \quad (4.37)$$

Μax βέλος κάμψης παρατηρείται στο μέσον ($x = L/2$):

$$y_{\max} = \frac{wL^4}{384} \quad (4.38)$$

Παρατήρηση:

Το βέλος κάμψης για αμφιέρειστη δοκό είναι πενταπλάσιο από εκείνο για αμφίπακτη δοκό.

Κεφάλαιο 5: Αναλυτική λύση και αριθμητική προσομοίωση μη επικαθήμενου αγωγού έναντι σεισμικών γεωκινδύνων

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τη μελέτη του τμήματος του αγωγού το οποίο δεν επικάθεται στον πυθμένα. Αρχικά, ορίζοντας γεωμετρία και υλικό κατασκευής θα βρούμε την μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση ενός υποθαλάσσιου αγωγού, συναρτήσει του βάθους πόντισης του, εφαρμόζοντας τον Κώδικα του API RP1111. Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε το μήκος μεταξύ των στηρίξεων, καθώς και την ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρο τενόντων. Σχετικά με τη διατομή τους, αυτή θα υπολογιστεί από τη σχέση που συνδέει την αξονική δύναμη με την παραμόρφωση. Όσων αφορά το μήκος, δεν γνωρίζουμε αν σε μεγάλα βάθη, μπορούν να κατασκευαστούν και να ποντιστούν τένοντες πολύ μεγάλου μήκους. Έτσι, ως μήκος τενόντων θα πάρουμε τα 100 m.

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, το κομμάτι του αγωγού το οποίο θα είναι μη επικαθήμενο, θα είναι μικρό, καθότι θέλουμε απλώς να διασχίζει από πάνω το ενεργό ρήγμα της περιοχής. Οπότε, θα εξετασθούν τρεις περιπτώσεις: για μήκος αγωγού 300 m, 500 m, 700 m. Θα συγκρίνουμε την αναλυτική λύση με την αριθμητική προσομοίωση, θα εξετάσουμε το ενδεχόμενο καθίζησης του εδάφους και πως αυτό επηρεάζει τον αγωγό.

5.1 Γεωμετρία αγωγού και υλικό κατασκευής

Όπως θα δούμε παρακάτω στον Κώδικα του API, υπάρχουν πολλοί παράμετροι που μπορούν να τροποποιηθούν προκειμένου να καλύπτονται οι απαιτήσεις που θέτει ο Κανονισμός. Μπορούμε για παράδειγμα να επιλέξουμε ένα σταθερό βάθος πόντισης και με βάση το βάθος αυτό, να επιλέξουμε μέσω επαναληπτικής διαδικασίας, τη βέλτιστη γεωμετρία του αγωγού που θα πληροί τις απαιτήσεις του Κανονισμού. Επίσης, μπορούμε να ορίσουμε μία γεωμετρία για τον αγωγό, κρατώντας σταθερές τις κύριες διαστάσεις του (διάμετρος και πάχος τοιχώματος), και να βρούμε το βάθος εκείνο που καλύπτει τις απαιτήσεις του Κώδικα για τις διαστάσεις αυτές. Ένα άλλος τρόπος είναι να ορίσουμε την εσωτερική πίεση λειτουργίας του αγωγού και με βάση αυτήν να βρούμε τις βέλτιστες διαστάσεις του και το βάθος πόντισης.

Εμείς θα επιλέξουμε να ορίσουμε ως σταθερές, την εξωτερική διάμετρο και το πάχος τοιχώματος και με βάση τις τιμές αυτές να βρούμε το μέγιστο βάθος πόντισης που μπορεί να λειτουργήσει ο αγωγός. Βρίσκοντας το βάθος του αγωγού βρίσκουμε αυτομάτως και την εξωτερική πίεση που του ασκείται από το θαλασσινό νερό, ενθυμούμενοι τον τύπο: εξωτερική πίεση = (πυκνότητα θαλασσινού νερού) * (επιτάχυνση βαρύτητας) * (βάθος νερού). $P = \rho * g * h$.

Ως εξωτερική διάμετρο αγωγού θα πάρουμε τα 0.6604 μέτρα και ως πάχος τοιχώματος τα 37 χιλιοστά. Οι τιμές αυτές δεν είναι αυθαίρετες, αλλά επιλέχθηκαν βάσει δεδομένων σχεδίασης από εν λειτουργία υποθαλάσσιους αγωγούς.

Πίνακας 5- 1. Διάμετρος – πάχος τοιχώματος αγωγού

D _{ext}	660.4 mm
t	37 mm
h	?

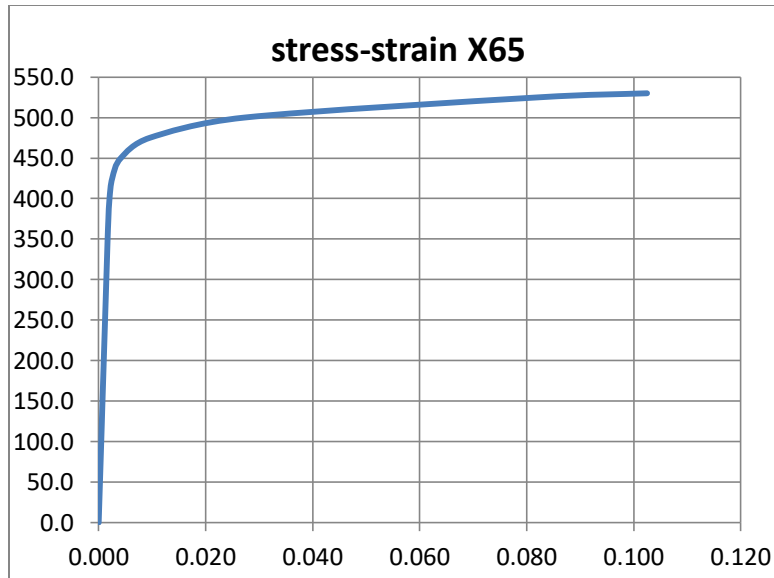
Σαν υλικό κατασκευής θα χρησιμοποιήσουμε χάλυβα X65 τόσο για τον αγωγό όσο και για τους τένοντες. Η κατηγορία αυτή του χάλυβα χρησιμοποιείται κατά κόρον στην κατασκευή υποθαλάσσιων αγωγών με πολύ καλά αποτελέσματα. Παρακάτω φαίνεται η χημική σύνθεσή του, οι μηχανικές του ιδιότητες, καθώς και το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων:

Πίνακας 5- 2. Χημική σύνθεση χάλυβα X65

Χημική σύνθεση χάλυβα X65 κατά API (% κ.β.)												
	C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	Cu	Cr	Ni	V	Ti
X65 Steel 5L API Standard	0.04	1.4	0.25	0.01	0.002	0.04	0.04	0.09	0.02	0.5	0.06	0.01

Πίνακας 5- 3. Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα X65.

Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα		
Πυκνότητα ρ	7800	[kg/ m ³]
Μέτρο ελαστικότητας E	210000	[MPa]
Όριο διαρροής S	450	[MPa]
Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό U	530	[MPa]
Λόγος Poisson ν	0.3	[-]



Διάγραμμα 5- 1. Τάση – παραμόρφωση χάλυβα X65

Το παραπάνω διάγραμμα κατασκευάστηκε με βάση την σχέση των Ramberg-Osgood η οποία είναι η παρακάτω:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 * \left(\frac{\sigma}{S_{ty}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5.1)$$

όπου:

σ = η τιμή της τάσης σε MPa

E = μέτρο ελαστικότητας

S_{ty} = όριο διαρροής χάλυβα = 450 MPa

n = strain hardening exponent = 0.04183

Οπότε για διάφορες τιμές τάσης παίρνουμε την αντίστοιχη τροπή ε . Η τροπή διαρροής για τον χάλυβα X65 είναι:

$$\varepsilon_{yield} = 0.004143 \text{ (στα 450 MPa όριο διαρροής)}$$

Το όριο αυτό όπως θα δούμε και παρακάτω θα αλλάξει και θα γίνει αρκετά μικρότερο, καθώς εξαρτάται από το βάθος του νερού που θα βρίσκεται ο αγωγός.

5.2 Μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση συναρτήσει βάθους πόντισης

Στο σημείο αυτό θα δούμε στην πράξη των Κώδικα του API που αναλύθηκε στο 3ο κεφάλαιο, με αριθμητική εφαρμογή. Σαν δεδομένα θα πάρουμε την εξωτερική διάμετρο του αγωγού, το πάχος τοιχώματος, το υλικό κατασκευής και την εσωτερική πίεση λειτουργίας. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι τιμές αυτές που θα χρησιμοποιήσουμε δεν είναι τελείως αυθαίρετες, αλλά βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα από υποθαλάσσιους αγωγούς μεταφοράς υδρογονανθράκων.

Πίνακας 5- 4. Δεδομένα σχεδίασης αγωγού

Δεδομένα σχεδίασης		
Εξωτερική διάμετρος	660.4	mm
Πάχος τοιχώματος	37	mm
Υλικό κατασκευής	Χάλυβας X65	βλ. Πιν. 5.3 για ιδιότητες
Εσωτερική πίεση	14.5	MPa (=145 bar)

Σχετικά με εσωτερική πίεση σχεδίασης:

Υπολογισμός πίεσης διάρρηξης αγωγού (burst pressure):

$$P_b = 0.90 * (S + U) * \frac{t}{D - t}$$
$$P_b = 0.90 * (450 + 530) * \frac{37}{660.4 - 37}$$
$$P_b = 52.35 \text{ MPa}$$

Υπολογισμός υδροστατικής πίεσης (hydrostatic pressure):

$$\text{Πρέπει: } P_t \leq f_d * f_e * f_t * P_b$$

Με συντελεστές:

$f_d = 0.9$ Internal pressure (burst) design factor for pipelines

$f_e = 1.0$ Weld joint factor (only materials with a factor of 1.0 are acceptable)

$f_t = 1.0$ Temperature derating factor (for temperatures less than 121°C)

$$f_d * f_e * f_t * P_b = (0.90 * 1.0 * 1.0) * 52.35 = 47.11$$

$$P_t \leq 47.11 \text{ MPa}$$

Υπολογισμός ‘στιγμαιαίας’ υπερπίεσης (incidental overpressure):

Πρέπει: $P_a \leq 0.90 * P_t$

$$0.9 * P_t = 0.9 * 47.11 = 42.4$$

$$P_a \leq 42.4 \text{ MPa}$$

Υπολογισμός πίεσης σχεδίασης (design pressure):

Πρέπει: $P_d \leq 0.80 * P_t$

$$0.80 * P_t = 0.80 * 47.11 = 37.7$$

$$P_d \leq 37.7 \text{ MPa}$$

Υπολογισμός μέγιστης πίεσης λειτουργίας:

Πρέπει: $MOP \leq P_d$

$$MOP \leq 37.7 \text{ MPa}$$

Υπολογισμός πίεσης λειτουργίας:

Πρέπει: $OP \leq MOP$

$$OP \leq 37.7 \text{ MPa}$$

Από τους παραπάνω υπολογισμούς παρατηρούμε ότι η πίεση λειτουργίας των 14.5 MPa που επιλέξαμε, είναι αρκετά μικρότερη από τα 37.7 MPa που προβλέπει ο Κανονισμός ως μέγιστη πίεση λειτουργίας. Οπότε η πίεση λειτουργίας που τελικώς θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να αυξηθεί. Παρακάτω θα υπολογίσουμε και το βάθος πόντισης οπότε αυτομάτως θα βρούμε και την εξωτερική πίεση που ασκείται στον αγωγό, αφού $P_{ext} = \rho * g * h$. Το γεγονός ότι υπάρχει και εξωτερική πίεση μέσα στο νερό, δρα ευεργετικά για τον αγωγό διότι τελικώς η πίεση σχεδίασης θα είναι ίση με $P_{design} = |P_{in} - P_{out}|$. Οπότε η πίεση λειτουργίας μπορεί να αυξηθεί παραπάνω στην θάλασσα απ’ ότι αν ο αγωγός βρισκόταν στην ξηρά.

Σχετικά με εξωτερική πίεση σχεδίασης:

Υπολογισμός πίεσης κατάρρευσης αγωγού (collapse pressure):

Πρέπει: $f_0 * P_c \geq (P_o - P_i)$

με

$f_0 = 0.6$ για αγωγό με συγκόλληση βυθιζόμενου τόξου

$$P_c = \frac{P_y * P_e}{\sqrt{P_y^2 + P_e^2}}$$

με

$$P_y = 2 * S * \left(\frac{t}{D}\right)$$

$$P_y = 2 * 450 * \left(\frac{37}{660.4}\right)$$

$$P_y = 50.42 \text{ MPa}$$

και

$$P_e = 2 * E * \frac{\left(\frac{t}{D}\right)^3}{(1 - \nu^2)}$$

$$P_e = 2 * 210,000 * \frac{\left(\frac{37}{660.4}\right)^3}{(1 - 0.3^2)}$$

$$P_e = 81.17 \text{ MPa}$$

Οπότε,

$$P_c = \frac{50.42 * 81.17}{\sqrt{50.42^2 + 81.17^2}}$$

$$P_c = 42.83 \text{ MPa}$$

και τελικώς:

$$f_0 * P_c = 0.6 * 42.83 = 25.70 \text{ MPa}$$

Η δυσμενέστερη περίπτωση όπως είπαμε και παραπάνω είναι κατά το στάδιο της πόντισης του αγωγού όπου ο αγωγός είναι άδειος. Δηλαδή $P_{in} = 0$. Οπότε $\Delta P = P_{out}$.

Δηλαδή θα πρέπει να ισχύει:

$$f_0 * P_c \geq P_{out}$$

$$25.70 \text{ MPa} \geq P_{out}$$

$$25.70 \text{ MPa} \geq (\rho * g * h)$$

Το βάθος εκείνο που ικανοποιεί την παραπάνω σχέση είναι τα 2550 μέτρα ($\cong 2500 \text{ m.}$).

Υπολογισμός συνδυασμού εξωτερικής πίεσης και κάμψης:

$$\text{Πρέπει: } \frac{\varepsilon}{\varepsilon_b} + \frac{P_0 - P_i}{f_c * P_c} \leq g(\delta)$$

με:

θεωρούμε οβαλότητα ίση με 1.5%. Δηλαδή $\delta = 0.015$

$$g(\delta) = (1 + 20\delta)^{-1} = (1 + 20 * 0.015)^{-1} = 0.769$$

$$\varepsilon_b = \frac{t}{2D} = \frac{37}{2 * 660.4} = 0.028$$

$f_c * P_c = 25.70 \text{ MPa}$ (υπολογίστηκε παραπάνω)

για $h = 2500\text{m} \rightarrow P_0 - P_i = 25.14 \text{ MPa}$ (με $P_i = 0$)

Οπότε λύνοντας την παραπάνω σχέση ως προς ε :

$$\varepsilon \leq \varepsilon_b * \left[g(\delta) - \frac{P_0 - P_i}{f_c * P_c} \right]$$

$$\varepsilon \leq 0.028 * \left[0.769 - \frac{25.14}{25.70} \right]$$

$$\varepsilon \leq -0.005853$$

Υπολογισμός τροπής ε :

Όπως είδαμε παραπάνω, υπάρχουν δύο τάσεις που ασκούνται στον αγωγό. Η αξονική και η περιφερειακή. Οπότε από αυτές τις δύο προκύπτει μία ισοδύναμη τάση $\sigma_{equivalent}$, η οποία υπολογίζεται με βάση το κριτήριο διαρροής του Von Misses. Επίσης υποθέτουμε πως ο αγωγός 'λειτουργεί' στην ελαστική περιοχή. Οπότε ισχύει ο Νόμος του Hooke με βάση τον οποίο θα βρούμε την τροπή.

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{eq}}{E}$$

Για την περιφερειακή τάση:

$$\sigma_{hoop} = \frac{pr}{t} = \frac{P * D}{2 * t}$$

$$\sigma_{hoop} = \frac{25.14 * 660.4}{2 * 37}$$

$$\sigma_{hoop} = 224.34 \text{ MPa}$$

Για τη διαμήκη τάση:

$$\sigma_{axial} = \frac{pr}{2t} = \frac{\sigma_{hoop}}{2}$$

$$\sigma_{axial} = \frac{224.34}{2}$$

$$\sigma_{axial} = 112.17 \text{ MPa}$$

Με βάση το κριτήριο του Von Misses:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{hoop}^2 + \sigma_{axial}^2 - \sigma_{hoop} * \sigma_{axial}}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{224.34^2 + 112.17^2 - 224.34 * 112.17}$$

$$\sigma_{eq} = 194.28 \text{ MPa}$$

Οπότε η τροπή θα είναι ίση με

$$\varepsilon = \frac{194.28}{210000} = 0.0009252 > -0.005853$$

Οπότε η συνθήκη του Κανονισμού δεν ικανοποιείται. Για να ικανοποιείται η παραπάνω συνθήκη που ορίζει ο Κώδικας, θα πρέπει είτε να μειώσουμε το βάθος πόντισης είτε να βάλουμε και εσωτερική πίεση στον αγωγό ($P_{in} \neq 0$), θεωρώντας πως κατά την πόντισή του μπορούμε να τον γεμίσουμε με νερό, το οποίο στη συνέχεια θα εξέλθει απ' αυτόν.

Από το υπολογιστικό φύλλο του Excel βρήκαμε πως το μέγιστο βάθος πόντισης είναι τα 1900 μέτρα (με $P_{in} = 0$).

Ενώ αν βάλουμε εσωτερική πίεση ίση με 14.5 MPa τότε

$$\varepsilon \leq \varepsilon_b * \left[g(\delta) - \frac{P_0 - P_i}{f_c * P_c} \right] = 0.00994$$

$$\sigma_{hoop} = 95.13 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{axial} = 47.60 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eq.} = 82.40 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = \frac{82.40}{210000} = 0.0003924 < 0.00994$$

Άρα ικανοποιείται η συνθήκη και το βάθος πόντισης μπορεί να παραμείνει στα 2500 μέτρα.

Τα ενεργά ρήγματα όπως αναφέραμε και στο πρώτο κεφάλαιο, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν δυσμενώς έναν αγωγό, συνήθως παρατηρούνται σε μικρότερα βάθη. Οπότε το βάθος των 2500 μέτρων απορρίπτεται σαν πρόταση, ακόμα και αν ικανοποιείται η απαίτηση του Κανονισμού. Θα συνεχίσουμε τους υπολογισμούς μας παίρνοντας ως βάθος πόντισης τα 1900 μέτρα. Επίσης, στα 1900 μέτρα βάθος, η αντίστοιχη εξωτερική πίεση είναι περίπου 19 MPa. Οπότε η πίεση σχεδίασης που προκύπτει έχοντας ως εσωτερική πίεση τα 14.5 MPa είναι 4.5MPa << 52.35 MPa (burst pressure). Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η μέγιστη τροπή με βάση τον Κώδικα, για κάθε βάθος πόντισης h.

Πίνακας 5- 5. Τιμές μέγιστης τροπής συναρτήσει του βάθους, βάσει API RP1111

Depth (m)	ε_{\max} (API RP1111)
1000	0.010588
1050	0.010040
1100	0.009492
1150	0.008944
1200	0.008396
1250	0.007848
1300	0.007300
1350	0.006752
1400	0.006204
1450	0.005656
1500	0.005108
1550	0.004560
1600	0.004012
1650	0.003464
1700	0.002916
1750	0.002368
1800	0.001819
1850	0.001271
1900	0.000723

Σχετικά με buckle arrestors:

Για το εάν θα χρησιμοποιηθούν buckle arrestors ή όχι, αυτό εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού, το πάχος τοιχώματος και τη διάμετρό του. Πρέπει να χρησιμοποιηθούν buckle arrestors υπό την ακόλουθη συνθήκη:

$$P_0 - P_i \geq f_p * P_p$$

με

$$f_p = 0.80 \text{ (σχεδιαστικός παράγοντας διάδοσης λυγισμού)}$$

Propagating Pressure:

$$P_p = 24 * S * \left(\frac{t}{D}\right)^{2.4}$$

$$P_p = 24 * 450 * \left(\frac{37}{660.4}\right)^{2.4}$$

$$P_p = 10.705 \text{ MPa}$$

και

$$f_p * P_p = 0.80 * 10.705 = 8.564$$

Άρα

$$P_0 - P_i > f_p * P_p$$

(με $P_0 - P_i = 19.10 \text{ MPa}$ στα 1900 m βάθος)

Επομένως η χρήση buckle arrestors είναι αναγκαία.

5.3 Βέλος κάμψης και υπολογισμός μήκους μεταξύ στηρίξεων

Παρακάτω θα υπολογίσουμε τις διατμητικές δυνάμεις και καμπτικές ροπές, θα φτιάξουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα τους και στη συνέχεια θα υπολογίσουμε το μέγιστο βέλος κάμψης με την εξίσωση ελαστικής γραμμής. Αυτό θα γίνει για ένα άνοιγμα, δηλαδή για ένα ανυποστήρικτο μήκος μεταξύ στηρίξεων. Ως σημεία στηρίξεων εννοούνται οι τένοντες που συγκρατούν τον αγωγό στο επιθυμητό ύψος. Έτσι όπως θα γίνει η σχεδίαση, όπου θηλυκώνουν οι τένοντες γύρω από τον αγωγό, επιτρέπεται η περιστροφική κίνηση του αγωγού περί τον άξονα Z (ο οποίος είναι κάθετος στο επίπεδο που φαίνεται ο αγωγός σε πλάγια όψη). Βέβαια δεν γνωρίζουμε επ' ακριβώς το ποσοστό ελευθερίας της περιστροφικής κίνησης. Οπότε για αυτόν τον λόγο αλλά και για λόγους πληρότητας θα επιλύσουμε το πρόβλημα του ανυποστήρικτου τμήματος αγωγού για δύο περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση είναι να προσομοιώσουμε τον αγωγό ως μία δοκό με κυλίσεις στα άκρα του (πιο κοντά στο πρόβλημά μας) και η δεύτερη περίπτωση είναι να προσομοιώσουμε τον αγωγό ως μία δοκό με πακτώσεις στα άκρα του.

Επίσης, θα πρέπει αρχικά να υπολογίσουμε το βάρος του αγωγού και τη δύναμη της άνωσης που του ασκείται. Εμείς θέλουμε η άνωση να είναι λίγο μεγαλύτερη του βάρους. Επειδή δρα σε όλο το μήκος του αγωγού θα πάρουμε την άνωση ως ένα ομοιόμορφα κατανομημένο φορτίο, με φορά προς τα πάνω. Ως ανυποστήρικτο μήκος δοκού θα πάρουμε διάφορα μεγέθη και ανάλογα με το αντίστοιχο βέλος κάμψης που θα προκύψει για κάθε ένα μήκος δοκού, θα διαλέξουμε το βέλτιστο, ώστε να μην προκύπτει πολύ μεγάλη παραμόρφωση όπως ορίζει ο Κανονισμός.

Υπολογισμός βάρους – άνωσης:

Για να δούμε όμως αν ο αγωγός χρειάζεται "τεχνητή" επιπρόσθετη άνωση για να επιπλεύσει, θα πρέπει να υπολογίσουμε το βάρος του και την άνωση που δρα επάνω του. Έχοντας την εξωτερική διάμετρο $D_{ext} = 660.4 \text{ mm}$ και το πάχος τοιχώματος $t = 37 \text{ mm}$, ο εκτοπιζόμενος όγκος νερού θα είναι:

$$V_{\text{disp}} = \left(\pi * \frac{D_{\text{ext}}^2}{4} \right) * L \quad (5.2)$$

για μήκος αγωγού $L = 1 \text{ m}$.

Με αριθμητική αντικατάσταση θα έχουμε:

$$V_{\text{disp}} = \left(\pi * \frac{0.6604^2}{4} \right) * 1\text{m}$$

$$V_{\text{disp}} = 0.3425 \text{ m}^3$$

Ο όγκος του αγωγού θα είναι:

$$V = \frac{\pi}{4} * (D_{\text{ext}}^2 - D_{\text{in}}^2) * L \quad (5.3)$$

για μήκος αγωγού $L = 1 \text{ m}$.

Με αριθμητική αντικατάσταση θα έχουμε:

$$V = \frac{\pi}{4} * (D_{\text{ext}}^2 - (D_{\text{ext}} - 2 * t)^2) * L$$

$$V = \frac{\pi}{4} * (0.6604^2 - (0.6604 - 2 * 37)^2) * 1\text{m}$$

$$V = 0.0725 \text{ m}^3$$

Οπότε η άνωση ανά μέτρο αγωγού θα είναι ίση με:

$$B = \rho_{\text{water}} * g * V_{\text{disp}} \quad (5.4)$$

Με αριθμητική αντικατάσταση:

$$B = 1025 * 9.81 * 0.3425$$

$$\mathbf{B = 3444.27 \frac{N}{m}}$$

Ομοίως, το βάρος του αγωγού ανά μέτρο αγωγού θα είναι:

$$W = \rho_{\text{steel}} * g * V \quad (5.5)$$

Με αριθμητική αντικατάσταση:

$$W = 7800 * 9.81 * 0.0725$$

$$W = 5544.75 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Από τους παραπάνω υπολογισμούς παρατηρούμε πως το βάρος του αγωγού είναι μεγαλύτερο από την άωση. Έτσι δημιουργείται ένα καταναμημένο φορτίο στον αγωγό ίσο με:

$$q = 5544.75 - 3444.27$$

$$q = 2100 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Το φορτίο αυτό των 2100 N/m έχει φορά προς τα κάτω, οπότε η δύναμη της άωσης δεν επαρκεί. Επομένως η χρήση τεχνητών πλωτήρων είναι αναγκαία. Οι τεχνητοί πλωτήρες θα πρέπει να δώσουν συνολικά, δύναμη άωσης μεγαλύτερη από 2100 N/m. Έτσι θα εξασφαλίσουμε ότι ο αγωγός, και με την βοήθεια των τενόντων οι οποίοι θα εφελκυστούν, θα παραμείνει στο επιθυμητό βάθος. Ως δύναμη άωσης θα πάρουμε το 10% του βάρους του αγωγού. Έτσι, για βάρος ίσο με 5544.75 N/m, η δύναμη της άωσης που θέλουμε τελικά να προκύψει με τη χρήση των πλωτήρων είναι ίση με 554.475 N/m. Οπότε ως ομοιόμορφα καταναμημένο φορτίο, με φορά προς τα πάνω, θα θεωρήσουμε το φορτίο:

$$q = 10\% * (\text{βάρος αγωγού}) = 10\% * 5544.75 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 554.475 \text{ N/m}$$

$$q = 554.475 \text{ N/m}$$

ή

$$q = 0.5545 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Υπολογισμός μήκους μεταξύ στηρίξεων

Θεωρώντας ομοιόμορφα καταναμημένο φορτίο με φορά προς τα πάνω και μέτρο ίσο με $w = 0.5545 \text{ kN/m}$, οι εξισώσεις ελαστικής γραμμής που μας δίνουν το μέγιστο βέλος κάμψης στο μέσον της δοκού, δίνονται από τους τύπους:

Για αμφιέρειστη δοκό:

$$y_{\max} = (5 * w * L^4)/(384 * E * I)$$

Για αμφίπκατη δοκό:

$$y_{\max} = (w * L^4)/(384 * E * I)$$

Το γινόμενο $E \cdot I$ είναι η ακαμψία της δοκού, όπου I η ροπή αδρανείας της διατομής της. Για κυκλική διατομή η ροπή αδρανείας δίνεται από τη σχέση:

$$I = \frac{1}{4} \pi * r^4 \quad (5.6)$$

Η οποία τροποποιείται ως εξής για τον αγωγό:

$$I = \frac{1}{4} \pi * (r_{\text{ext}}^4 - r_{\text{int}}^4) \quad (5.7)$$

Με αριθμητική αντικατάσταση για $D = 660.4\text{mm}$ και $t = 37\text{mm}$

$$I = \frac{1}{4} \pi * \left(\left(\frac{660.4}{2} \right)^4 - \left(\frac{660.4 - 2 * 37}{2} \right)^4 \right)$$
$$I = 3,532,557,047 \text{ mm}^4$$

Οπότε η ακαμψία EI θα είναι:

$$EI = 210,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 3,532,557,047 \text{ mm}^4$$

$$EI = 7.4183698 * 10^{14} \text{ N} * \text{mm}^2$$

ή

$$EI = 741,836.98 \text{ kN} * \text{m}^2$$

Τα μέγιστα βέλη κάμψης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5- 6. Βέλη κάμψης για διάφορα μήκη μεταξύ στηρίξεων

	$y_{max} = (5*w*L^4)/(384*E*I)$	$y_{max} = (w*L^4)/(384*E*I)$
	αμφιέρειστη δοκός	αμφίπακτη δοκός
L (m)	y_max (mm)	y_max (mm)
50	60.826	12.165
100	973.223	194.645
150	4926.941	985.388
200	15571.566	3114.313
250	38016.518	7603.304
300	78831.052	15766.210
350	146044.257	29208.851
400	249145.055	49829.011
450	399082.203	79816.441
500	608264.294	121652.859
550	890559.753	178111.951
600	1261296.840	252259.368
650	1737263.649	347452.730
700	2336708.111	467341.622
750	3079337.987	615867.597
800	3986320.876	797264.175
850	5080284.208	1016056.842
900	6385315.250	1277063.050
950	7926961.103	1585392.221
1000	9732228.700	1946445.740

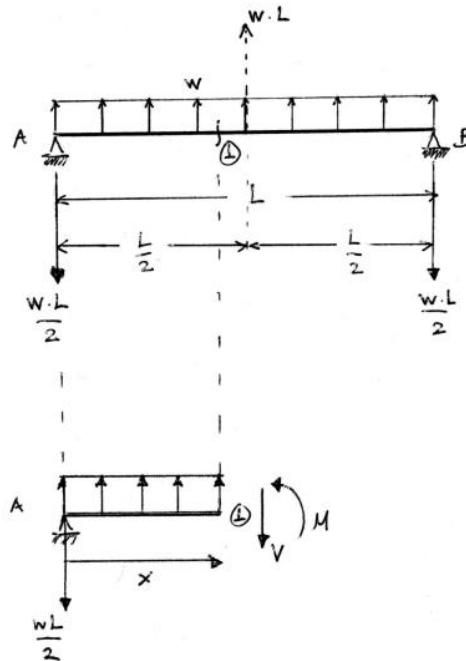
Για να μην υπάρξει μεγάλη παραμόρφωση στον αγωγό, θα επιλέξουμε μήκος μεταξύ τενόντων ίσο με 100 μέτρα.

$$l = 100 \text{ m.}$$

Διαγράμματα Τεμνουσών Δυνάμεων – Καμπτικών Ροπών για δοκό μήκους 100 μέτρων:

α. Για αμφιέρειστη δοκό:

Με βάση το διάγραμμα ελευθέρου σώματος παρακάτω, μπορούμε να υπολογίσουμε τις εξισώσεις και να φτιάξουμε τα διαγράμματα Καμπτικών Ροπών $M(x)$ και Τεμνουσών Δυνάμεων $V(x)$.



Εικόνα 5- 1. Διάγραμμα ελευθέρου σώματος – Αμφιέρειστη δοκός

Οπότε από συνθήκες στατικής ισορροπίας θα έχουμε:

$$(+)\uparrow \Sigma F_y = 0: -\frac{w * L}{2} + w * x - V = 0 \rightarrow$$

$$V = -\frac{w * L}{2} + w * x$$

Για $L = 100\text{m}$ και $w = 0.5545 \text{ kN/m}$:

$$V(x) = 0.5545 * x - 27.7 \quad \text{για } 0 \leq x \leq 100 \text{ m.} \quad (5.8)$$

Αντιστοίχως παίρνοντας τις ροπές ως προς την τομή (1):

$$(+)\text{ c. c. w. } \Sigma M_1 = 0: \frac{w * L}{2} * x - w * x * \frac{x}{2} + M = 0 \rightarrow$$

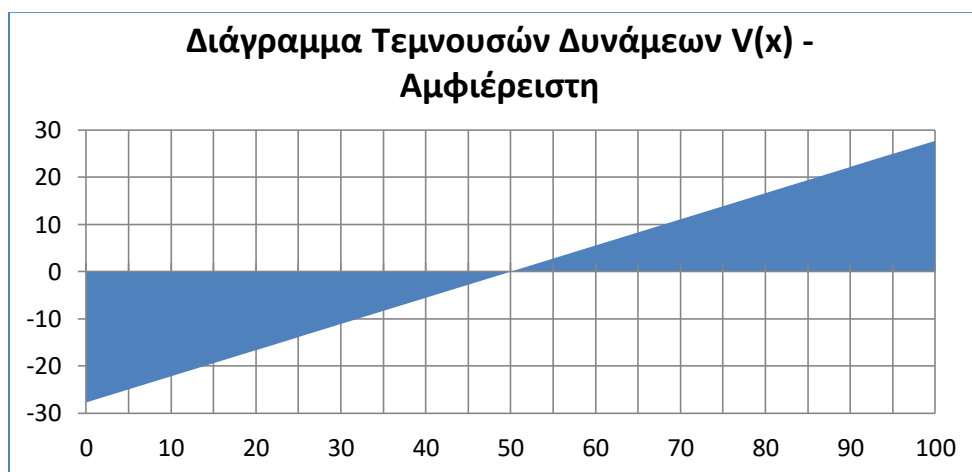
$$M = w * \frac{x^2}{2} - \frac{w * L}{2} * x$$

Για $L = 100\text{m}$ και $w = 0.5545 \text{ kN/m}$:

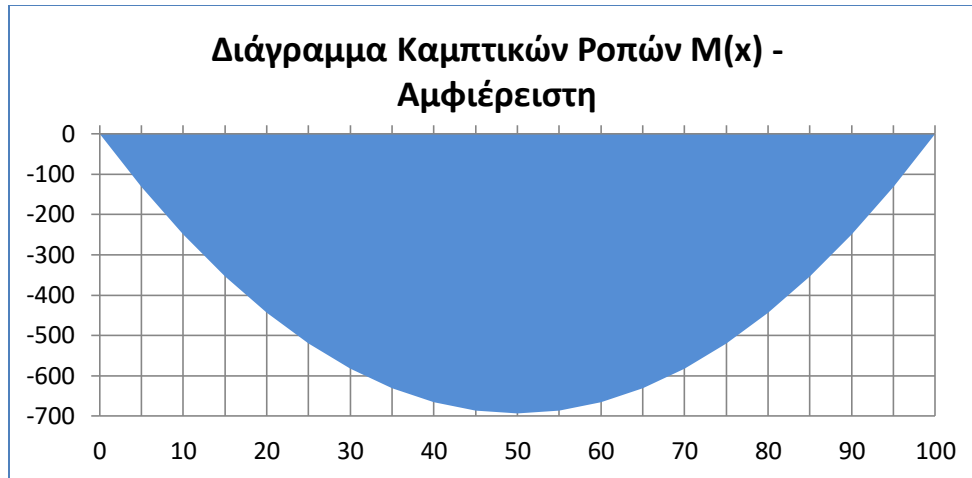
$$M(x) = \frac{0.5545}{2} * x^2 - 27.7 * x \quad \text{για } 0 \leq x \leq 100 \text{ m.} \quad (5.9)$$

Πίνακας 5- 7. Τέμνουσα δύναμη & ροπή κάμψης σε διάφορα μήκη του αγωγού- αμφιέρειστη

Αμφιέρειστη		
x (m)	V(x) - [kN]	M(x) - [kN*m]
0	-27.725	0
5	-24.9525	-131.69375
10	-22.18	-249.525
15	-19.4075	-353.49375
20	-16.635	-443.6
25	-13.8625	-519.84375
30	-11.09	-582.225
35	-8.3175	-630.74375
40	-5.545	-665.4
45	-2.7725	-686.19375
50	0	-693.125
55	2.7725	-686.19375
60	5.545	-665.4
65	8.3175	-630.74375
70	11.09	-582.225
75	13.8625	-519.84375
80	16.635	-443.6
85	19.4075	-353.49375
90	22.18	-249.525
95	24.9525	-131.69375
100	27.725	0



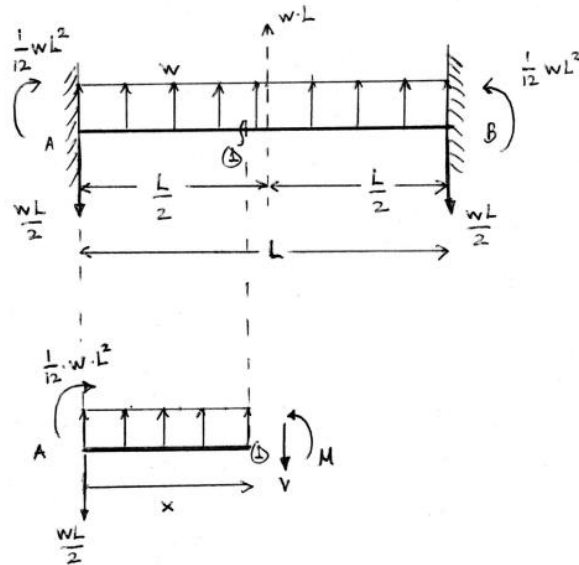
Διάγραμμα 5- 2. Τεμνουσών δυνάμεων V(x) – συνάρτησι μήκους – αμφιέρειστη.



Διάγραμμα 5- 3. Καμπτικών Ροπών $M(x)$ – συνάρτησει μήκους – αμφιέρειστη.

β. Για αμφίπακτη δοκό:

Με βάση το διάγραμμα ελευθέρου σώματος παρακάτω, μπορούμε να υπολογίσουμε τις εξισώσεις και να φτιάξουμε τα διαγράμματα Καμπτικών Ροπών $M(x)$ και Τεμνουσών Δυνάμεων $V(x)$.



Εικόνα 5- 2. Διάγραμμα ελευθέρου σώματος – αμφίπακτη δοκός.

Οπότε από συνθήκες στατικής ισορροπίας θα έχουμε:

$$(+)\uparrow \Sigma F_y = 0: -\frac{w * L}{2} + w * x - V = 0 \rightarrow$$

$$V = -\frac{w * L}{2} + w * x$$

Για $L = 100\text{m}$ και $w = 0.5545 \text{ kN/m}$:

$$V(x) = 0.5545 * x - 27.7 \quad \text{για } 0 \leq x \leq 100 \text{ m.} \quad (5.10)$$

Αντιστοίχως παίρνοντας τις ροπές ως προς την τομή (1) και έχοντας βρει παραπάνω ότι η ροπή M_A ισούται με:

$$M_A = \frac{1}{12} * w * L^2$$

$$(+)\text{ c. c. w. } \Sigma M_1 = 0: -\frac{1}{12} * w * L^2 + w * \frac{L}{2} * x - w * x * \frac{x}{2} + M = 0 \rightarrow$$

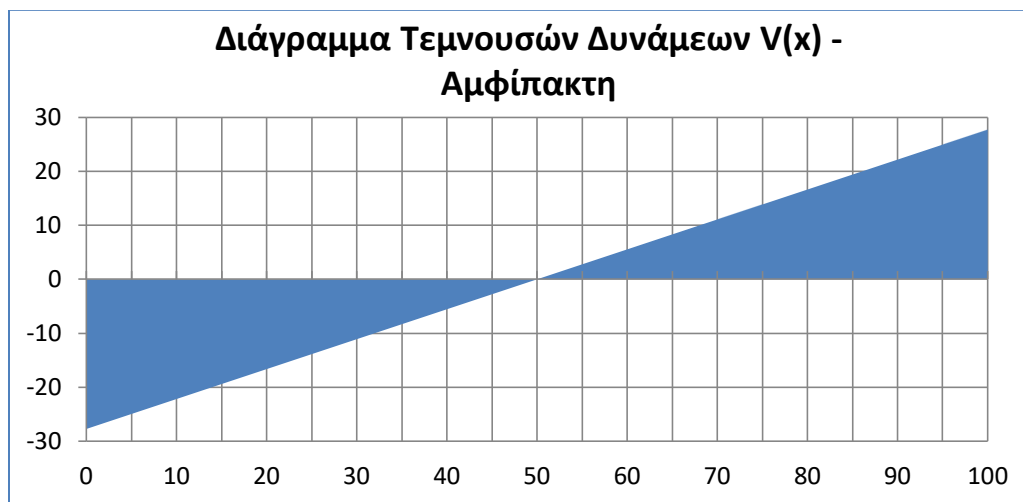
$$M = w * \frac{x^2}{2} - w * \frac{L}{2} * x + \frac{1}{12} * w * L^2$$

Για $L = 100\text{m}$ και $w = 0.5545 \text{ kN/m}$:

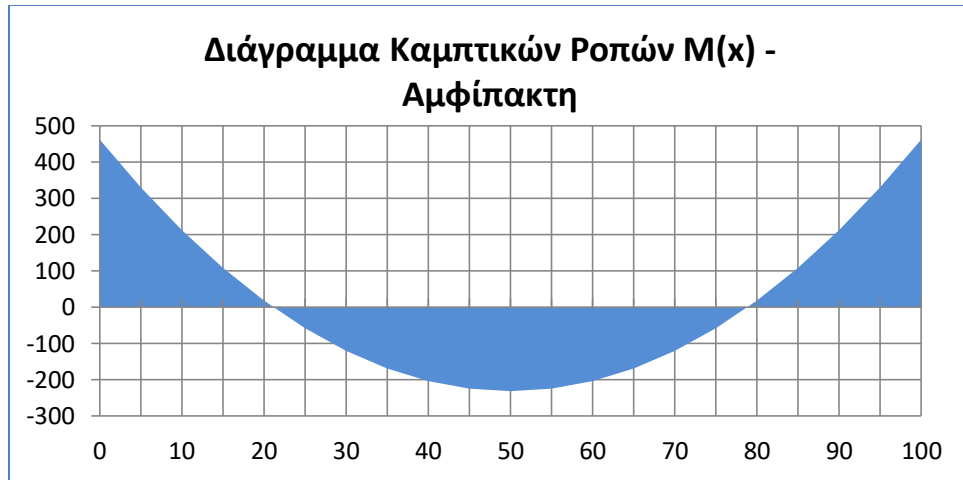
$$M(x) = \frac{0.5545}{2} * x^2 - 27.7 * x + 462 \quad \text{για } 0 \leq x \leq 100 \text{ m.} \quad (5.11)$$

Πίνακας 5- 8. Τέμνουσα δύναμη & ροπή κάμψης σε διάφορα μήκη του αγωγού- αμφίπακτη

x (m)	Αμφίπακτη	
	V(x) - [kN]	M(x) - [kN*m]
0	-27.725	462.0833333
5	-24.9525	330.3895833
10	-22.18	212.5583333
15	-19.4075	108.5895833
20	-16.635	18.48333333
25	-13.8625	-57.76041667
30	-11.09	-120.1416667
35	-8.3175	-168.6604167
40	-5.545	-203.3166667
45	-2.7725	-224.1104167
50	0	-231.0416667
55	2.7725	-224.1104167
60	5.545	-203.3166667
65	8.3175	-168.6604167
70	11.09	-120.1416667
75	13.8625	-57.76041667
80	16.635	18.48333333
85	19.4075	108.5895833
90	22.18	212.5583333
95	24.9525	330.3895833
100	27.725	462.0833333



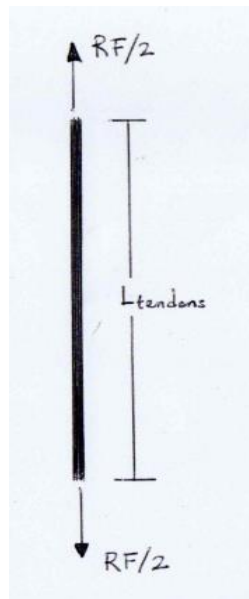
Διάγραμμα 5- 4. Τεμνουσών Δυνάμεων V(x) – συνάρτησει μήκους –



Διάγραμμα 5- 5. Καμπτικών Ροπών $M(x)$ – συνάρτησε μήκους – αμφίπακτη.

5.4 Υπολογισμός ελάχιστης απαιτούμενης διαμέτρου τενόντων

Το υλικό κατασκευής των τενόντων θα είναι και αυτό χάλυβας X65. Ως μήκος τενόντων θα πάρουμε τα 100 m καθώς μεγαλύτερο από αυτό δεν γνωρίζουμε αν είναι εφικτό να ποντιστεί σε μεγάλο βάθος. Η διατομή τους θα είναι κυκλική και η διάμετρος θα εξαρτηθεί από την τάση εφελκυσμού που δέχονται.



Εικόνα 5- 3. Τένοντας υπό εφελκυσμό.

Ο τένοντας μπορεί να δεχθεί μόνο εφελκυσμό και όπως βλέπουμε και στην παραπάνω εικόνα η δύναμη εφελκυσμού που δέχεται στα άκρα, του δημιουργεί τάση στο εσωτερικό του ίση με

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (5.12)$$

όπου:

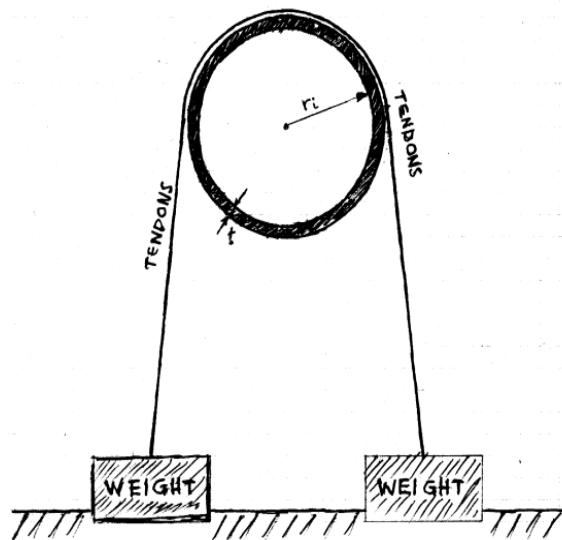
P: η δύναμη εφελκυσμού, όπου στην προκειμένη περίπτωση η δύναμη αυτή θα είναι ίση με τη δύναμη αντίδρασης στη στήριξη. Η δύναμη αντίδρασης βρέθηκε ίση με 105 kN (και στην αμφιέριστη και στην αμφίπακτη δοκό).

A το εμβαδόν διατομής του αγωγού. Για κυκλική διατομή:

$$A = \frac{\pi * d_{\text{tendon}}^2}{4} \quad (5.13)$$

Γνωρίζοντας το όριο διαρροής του χάλυβα X65 $\sigma_{\text{yield}} = 450 \text{ MPa}$, μπορούμε να λύσουμε την (Εξ. 5.13) ως προς d_{tendon} για να βρούμε την ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρο που πρέπει να έχει ο τένοντας ούτως ώστε να λειτουργήσει στην ελαστική περιοχή.

Επειδή όμως ο αγωγός στηρίζεται ουσιαστικά σε δύο τένοντες σε κάθε άκρο του, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, η δύναμη αντίδρασης που θα παραλάβει ο κάθε τένοντας θα είναι ίση με $RF/2 = 27.73/2 = 14 \text{ kN}$.



Εικόνα 5- 4. Τρόπος στήριξης αγωγού

Έτσι θα έχουμε:

$$\sigma = \frac{RF}{\frac{\pi d^2}{4}} \quad (5.14)$$

$$450 = \frac{14 * 10^3}{\frac{\pi d^2}{4}}$$

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{4 * 14 * 10^3}{450 * \pi}}$$

$$d_{\min} = 6.30 \text{ mm}$$

Άρα για ανυποστήρικτο μήκος αγωγού ίσο με 100 m, η ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρος των τενόντων θα πρέπει να είναι 6.30 χιλιοστά. Επειδή ο ρόλος των τενόντων είναι πολύ σημαντικός, αφού εκείνοι είναι που συγκρατούν τον αγωγό στην επιθυμητή στάθμη, θα ορίσουμε μεγάλο συντελεστή ασφαλείας. Με συντελεστή ασφαλείας $SF = 2.5$, $d_{\min} = 16.0$

Άρα,

$$d_{\min} = 16.0 \text{ mm}$$

Στο πρόγραμμα Abaqus όμως, όπου η σχεδίαση του αγωγού και των τενόντων θα είναι διδιάστατη, το πρόγραμμα ‘‘βλέπει’’ μόνο δύο τένοντες στην πλάγια όψη αντί για τέσσερις. Έναν στο $L = 0$ m. και άλλον έναν στο $L = 100$ m. Δηλαδή ο κάθε τένοντας θα παραλαμβάνει δύναμη ίση με $RF = 28$ kN, οπότε το $d_{\min} = \sqrt{\frac{4 * 28 * 10^3}{450 \pi}} = 8.90$ mm ή με συντελεστή ασφαλείας 2.5, $d_{\min} \cong 22.0$ mm

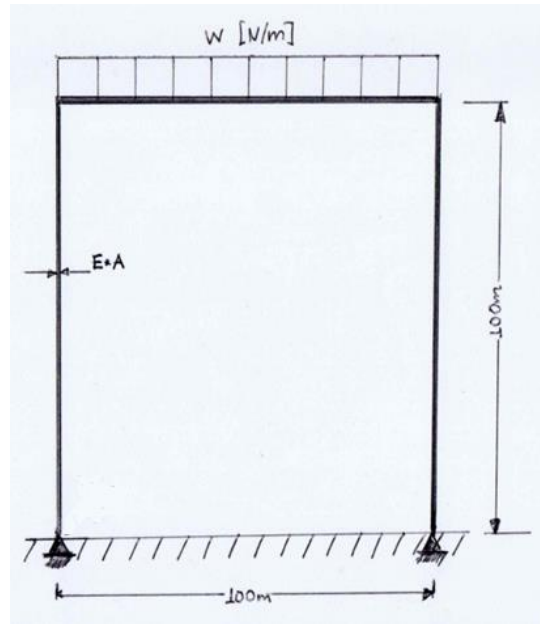
Οπότε στο Abaqus θα πρέπει να εισάγουμε διάμετρο τενόντων ίση με 22.0 mm, για να γίνει σωστή σύγκριση των αποτελεσμάτων, παρόλο που στην πραγματικότητα θα έχουμε τένοντες με διάμετρο 16.0 mm.

Αν θέλουμε να υπολογίσουμε την αξονική μετατόπιση δ του κάθε τένοντα θα χρησιμοποιήσουμε τον τύπο

$$\delta = \frac{P * L}{A * E} \quad (5.15)$$

Από τον παραπάνω τύπο μπορούμε να διαπιστώσουμε πως το γινόμενο $A * E$ είναι αυτό που θα καθορίσει πόσο μεγάλη ή μικρή θα είναι η επιμήκυνση του τένοντα. Αν η επιμήκυνση δ είναι αρκετά μικρή τότε έχουμε έναν αρκετά άκαμπτο τένοντα. Στην αντίθετη περίπτωση όπου η επιμήκυνση του τένοντα είναι μεγάλη, λόγω της μικρής ακαμψίας, σε μια επικείμενη καθίζηση

του εδάφους λόγω σεισμικής δραστηριότητας, ο τένοντας θα επιμηκυνθεί αρκετά, απορροφώντας το μεγαλύτερο μέρος της σεισμικής ενέργειας και έτσι η επίδραση της σεισμικής δραστηριότητας στον ίδιο τον αγωγό θα είναι μικρότερη.



Εικόνα 5- 5. Αγωγός μαζί με τένοντες.

Για παράδειγμα, στο Abaqus όπου ορίσαμε $d = 22.0 \text{ mm}$, η παραμόρφωση που θα δεχθεί ο τένοντας με βάση την (Εξ. 5.4) θα είναι:

$$\delta = \frac{P * L}{A * E} = \frac{(28 * 10^3 \text{ N}) * (100 * 10^3 \text{ mm})}{\left(\frac{\pi * 22.0^2}{4} \text{ mm}^2\right) * (210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2})} = 35 \text{ mm}$$

$$\delta = 35 \text{ mm.}$$

Οπότε για μετατόπιση τένοντα ίση με $\delta = 35 \text{ mm.}$, η τροπή ϵ θα είναι ίση με $\Delta L/L$ ή δ/L . Έτσι θα έχουμε:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{35}{100 * 10^3} = 0.00035$$

Βλέποντας τον πίνακα 4.5 απ' το κεφάλαιο 4, παρατηρούμε ότι η τιμή αυτή $\epsilon = 0.00035$ είναι μικρότερη από την μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση που προβλέπει ο API για βάθος 1900 m.

Επιλύοντας ξανά την (Εξ. 5.4) με $d = 16.0 \text{ mm}$, $P = RF/2 = 14 \text{ kN}$, θα πάρουμε παραμόρφωση δ ίση με:

$$\delta = \frac{P * L}{A * E} = \frac{(14 * 10^3 \text{ N}) * (100 * 10^3 \text{ mm})}{\left(\frac{\pi * 16.0^2}{4} \text{ mm}^2\right) * (210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2})} = 33 \text{ mm}$$

$$\varepsilon = \frac{33}{100 * 10^3} = 0.00033$$

Υπολογισμός βάρους τενόντων

Αφού υπολογίσαμε παραπάνω την ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρο που πρέπει να έχει ο κάθε τένοντας για να λειτουργεί στην ελαστική περιοχή, θα πρέπει να βρούμε και το βάρος του κάθε ενός.

Έτσι, για $d_{\min} = 16.0 \text{ mm}$ και κυκλική διατομή, το βάρος του κάθε τένοντα θα ισούται με:

$$w_{\text{tendon}} = \left(\frac{\pi d^2}{4}\right) * l_{\text{tendon}} * \rho_{x65}$$

$$w_{\text{tendon}} = \left(\frac{\pi * 0.016^2}{4}\right) * 100 * \rho_{x65}$$

$$w_{\text{tendon}} = \left(\frac{\pi * 0.016^2}{4}\right) * 100 * 7800$$

$$w_{\text{tendon}} = 157 \text{ kg}$$

ή

$$w_{\text{tendon}} = 1540 \text{ N}$$

Για τμήμα αγωγού 300 m, με 100 m ισαπόσταση μεταξύ τενόντων, ο συνολικός αριθμός τενόντων που θα χρειαστούν είναι 8. Οπότε το συνολικό τους βάρος θα είναι:

$$w_{8\text{tendons}} = 8 * 1540 = 12,320 \text{ N}$$

Όπως είπαμε παραπάνω, η τεχνητή άνωση που θα προσδίδουν οι πλωτήρες θα είναι ίση με το 10% του βάρους του αγωγού. Δηλαδή η άνωση θα είναι ίση με $B = 554.5 \text{ N/m}$. Οπότε για 300 μέτρα μήκος αγωγού θα έχουμε:

$$B_{300\text{m pipeline}} = 166,350 \text{ N}$$

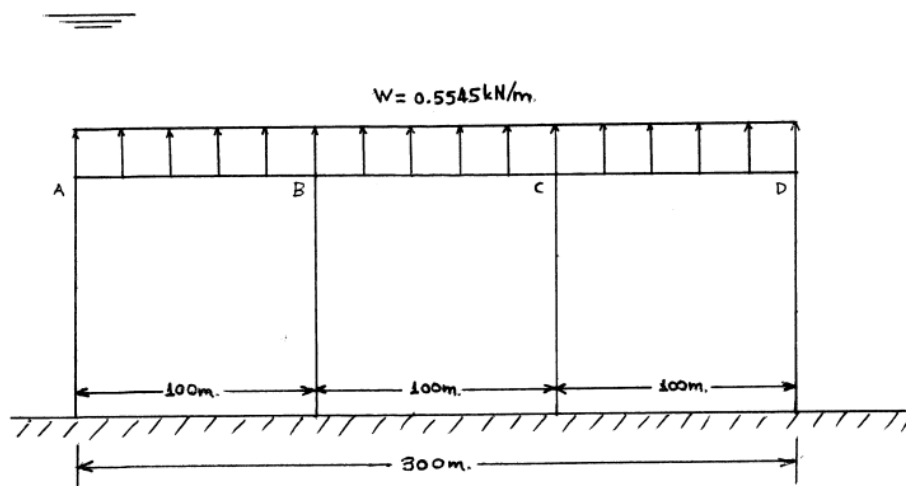
Οπότε βλέπουμε πως η τιμή αυτή επαρκεί και για να συγκρατήσει το βάρος των τενόντων.

Πρώτα θα γίνει η αναλυτική λύση, με τη μέθοδο κατανομής των ροπών (moments distribution method) για το τμήμα του αγωγού των 300 m. Στη συνέχεια, με τη χρήση του Abaqus θα επιλύσουμε το ίδιο πρόβλημα έτσι ώστε να ελέγξουμε αν συγκλίνουν τα αποτελέσματα. Τέλος, αφού δούμε ότι τα αποτελέσματα μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης συγκλίνουν, θα προσομοιώσουμε συνθήκη σεισμού στο Abaqus, μετατοπίζοντας ορισμένους από τους τένοντες που συγκρατούν τον αγωγό.

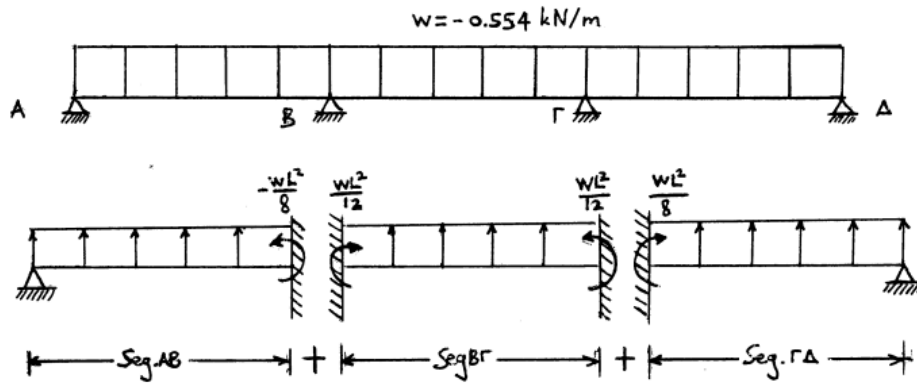
5.5 Αναλυτική λύση

Επίλυση για 300m. μήκος αγωγού

Παρακάτω θα δούμε την αναλυτική λύση για μήκος αγωγού 300 m, με στηρίξεις – τένοντες ανά 100 m. Οπότε θα έχουμε 4 στηρίξεις, στις θέσεις $x = 0$ m, $x = 100$ m, $x = 200$ m, $x = 300$ m, τις οποίες θα προσομοιάσουμε ως κυλίσεις. Επειδή το πρόβλημα που έχουμε να επιλύσουμε είναι υπερστατικό, οι εξισώσεις στατικής ισορροπίας δεν επαρκούν για να προσδιορίσουμε τις δυνάμεις στις στηρίξεις. Θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος κατανομής των ροπών (moment distribution method) με την οποία αρχικά θα βρούμε τις αντιδράσεις στις στηρίξεις, στη συνέχεια θα φτιάξουμε τα διαγράμματα ροπών και τεμνουσών δυνάμεων και τέλος επιλύοντας τις εξισώσεις ελαστικής γραμμής θα βρούμε τα αντίστοιχα βέλη κάμψης. Παρακάτω βλέπουμε και ένα σκίτσο από το τμήμα του αγωγού που θα επιλύσουμε.



Εικόνα 5- 6. Τμήμα αγωγού 300 μέτρων.



Εικόνα 5- 7. Τμήμα αγωγού 300 μέτρων – Μέθοδος κατανομής ροπών.

Η μέθοδος κατανομής των ροπών, για κυλίσεις στις στηρίξεις, έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα, εφαρμόζοντας 23 επαναλήψεις:

Πίνακας 5- 9. Εύρεση Distribution Factors για κάθε ένα τμήμα του αγωγού

Joint	Members	k		Sum_k	DF (=k/Sum_k)
B	BA	$3EI/L$	$2.22551E+13$	$5.19286E+13$	0.43
	BC	$4EI/L$	$2.96735E+13$		0.57
C	CB	$4EI/L$	$2.96735E+13$	$5.19286E+13$	0.5714
	CD	$3EI/L$	$2.22551E+13$		0.4286

Για $w = - 0.5545 \text{ kN/m}$

Πίνακας 5- 10. Εύρεση ροπών στα άκρα για κάθε ένα τμήμα του αγωγού.

	Segment AB			
έδραση - πάκτωση	$M_{FBA} =$	$-(w \cdot L^2) / 8 =$	693.125	kN*m
	Segment BC			
πάκτωση - πάκτωση	$M_{FBC} =$	$(w \cdot L^2) / 12 =$	-462.0833333	kN*m
πάκτωση - πάκτωση	$M_{FCB} =$	$-(w \cdot L^2) / 12 =$	462.0833333	kN*m
	Segment CD			
πάκτωση - έδραση	$M_{FCD} =$	$(w \cdot L^2) / 8 =$	-693.125	kN*m

Πίνακας 5- 11. Moment Distribution Method.

Moment Distribution Method						
	A	B		C		D
		BA	BC	CB	CD	
Reps/ DF	-	0.4286	0.5714	0.5714	0.4286	-
1	0	693.1250	-462.0833	462.0833	-693.1250	0
2	0	-99.0179	-132.0238	132.0238	99.0179	0
3	0	0.0000	66.0119	-66.0119	0.0000	0
4	0	-28.2908	-37.7211	37.7211	28.2908	0
5	0	0.0000	18.8605	-18.8605	0.0000	0
6	0	-8.0831	-10.7775	10.7775	8.0831	0
7	0	0.0000	5.3887	-5.3887	0.0000	0
8	0	-2.3095	-3.0793	3.0793	2.3095	0
9	0	0.0000	1.5396	-1.5396	0.0000	0
10	0	-0.6598	-0.8798	0.8798	0.6598	0
11	0	0.0000	0.4399	-0.4399	0.0000	0
12	0	-0.1885	-0.2514	0.2514	0.1885	0
13	0	0.0000	0.1257	-0.1257	0.0000	0
14	0	-0.0539	-0.0718	0.0718	0.0539	0
15	0	0.0000	0.0359	-0.0359	0.0000	0
16	0	-0.0154	-0.0205	0.0205	0.0154	0
17	0	0.0000	0.0103	-0.0103	0.0000	0
18	0	-0.0044	-0.0059	0.0059	0.0044	0
19	0	0.0000	0.0029	-0.0029	0.0000	0
20	0	-0.0013	-0.0017	0.0017	0.0013	0
21	0	0.0000	0.0008	-0.0008	0.0000	0
22	0	-0.0004	-0.0005	0.0005	0.0004	0
23	0	0.0000	0.0002	-0.0002	0.0000	0
SUM:	0	554.5001	-554.4999	554.4999	-554.5001	0
	FEM_A	FEM_BA	FEM_BC	FEM_CB	FEM_CD	FEM_D

Οπότε οι ροπές στα άκρα των τριών τμημάτων AB, BC, CD είναι οι εξής απ' όπου προκύπτουν και οι αντίστοιχες αντιδράσεις στις στηρίξεις:

Πίνακας 5- 12. Ροπές και δυνάμεις από την αναλυτική για τμήμα AB

Segment AB			
$\Sigma M_A =$	$-w_1 * L * (L/2) + FEM_A + FEM_{BA} =$	3327.00	kN*m
$\Sigma M_B =$	$w * L * (L/2) + FEM_A + FEM_{BA} =$	-2217.99	kN*m
$V_A * L = \Sigma M_B \rightarrow$	$V_A = \Sigma M_B / L =$	-22.18	kN
$-V_B * L = \Sigma M_A \rightarrow$	$V_B = -\Sigma M_A / L =$	-33.27	kN

Πίνακας 5- 13. Ροπές και δυνάμεις από την αναλυτική για τμήμα BC

Segment BC			
$\Sigma M_B =$	$-w*L*(L/2) + FEM_{BC} + FEM_{CB} =$	2772.50	kN*m
$\Sigma M_C =$	$+ w*L*(L/2) + FEM_{BC} + FEM_{CB} =$	-2772.50	kN*m
$V_B * L = \Sigma M_C \rightarrow$	$V_B = \Sigma M_C / L =$	-27.73	kN
$-V_C * L = \Sigma M_B \rightarrow$	$V_C = - \Sigma M_B / L =$	-27.73	kN

Πίνακας 5- 14. Ροπές και δυνάμεις από την αναλυτική για τμήμα CD

Segment CD			
$\Sigma M_C =$	$-w*L*(L/2) + FEM_{CD} + FEM_{D} =$	2217.99	kN*m
$\Sigma M_D =$	$+ w*L*(L/2) + FEM_{CD} + FEM_{D} =$	-3327.00	kN*m
$V_C * L = \Sigma M_D \rightarrow$	$V_C = \Sigma M_D / L =$	-33.27	kN
$-V_D * L = \Sigma M_C \rightarrow$	$V_D = - \Sigma M_C / L =$	-22.18	kN

Πίνακας 5- 15. Αντιδράσεις στους κόμβους από την αναλυτική

REACTIONS	
R_A	-22.18
R_B	-33.27
R_B	-27.73
R_C	-27.73
R_C	-33.27
R_D	-22.18

Αθροίζοντας, προκύπτουν οι τελικές αντιδράσεις στις στηρίξεις:

Πίνακας 5- 16. Τελικές αντιδράσεις στις στηρίξεις – αναλυτική

FINAL REACTIONS			
R_A	-22.18	kN	↓
R_B	-61.00	kN	↓
R_C	-61.00	kN	↓
R_D	-22.18	kN	↓

Έχοντας τις αντιδράσεις στις στηρίξεις μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε, με τη μέθοδο των τομών, τις εξισώσεις ροπών για κάθε ένα από τα τρία τμήματα καθώς και τις εξισώσεις τεμνουσών δυνάμεων και να κατασκευάσουμε στη συνέχεια τα αντίστοιχα διαγράμματα. Έτσι προκύπτει:

Τμήμα AB:

$$0 \leq x \leq l_1 = 100 \text{ m}$$

$$V(x) = R_A + w * x$$

&

$$M(x) = w * \frac{x^2}{2} + R_A * x$$

και για $w = 0.5545 \text{ kN/m}$

$$V_{AB}(x) = 0.5545 * x - 22.18$$

&

$$M_{AB}(x) = \frac{0.5545}{2} * x^2 - 22.18 * x$$

Τμήμα BC:

$$l_1 = 100 \text{ m} \leq x \leq l_2 = 200 \text{ m}$$

$$V(x) = R_A + w * x + R_B$$

&

$$M(x) = w * \frac{x^2}{2} + R_A * x + R_B * (x - l_1)$$

και για $w = 0.5545 \text{ kN/m}$

$$V_{BC}(x) = 0.5545 * x - 83.18$$

&

$$M_{BC}(x) = \frac{0.5545}{2} * x^2 - 83.18 * x + 6100$$

Τμήμα CD:

$$l_2 = 200 \text{ m} \leq x \leq l_3 = 300 \text{ m}$$

$$V(x) = R_A + w * x + R_B + R_C$$

&

$$M(x) = w * \frac{x^2}{2} + R_A * x + R_B * (x - 11) + R_C * (x - 11 - 12)$$

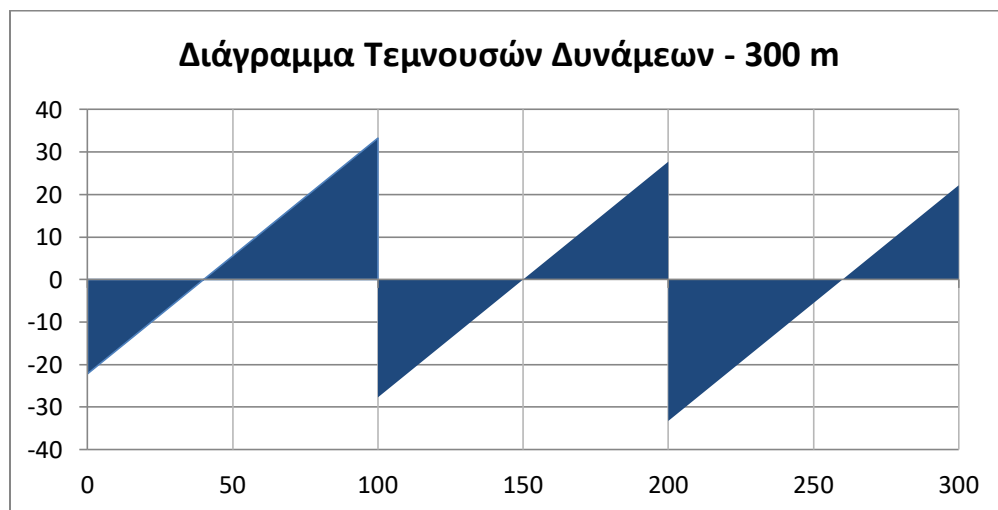
και για $w = 0.5545 \text{ kN/m}$

$$V_{CD}(x) = 0.5545 * x - 144.18$$

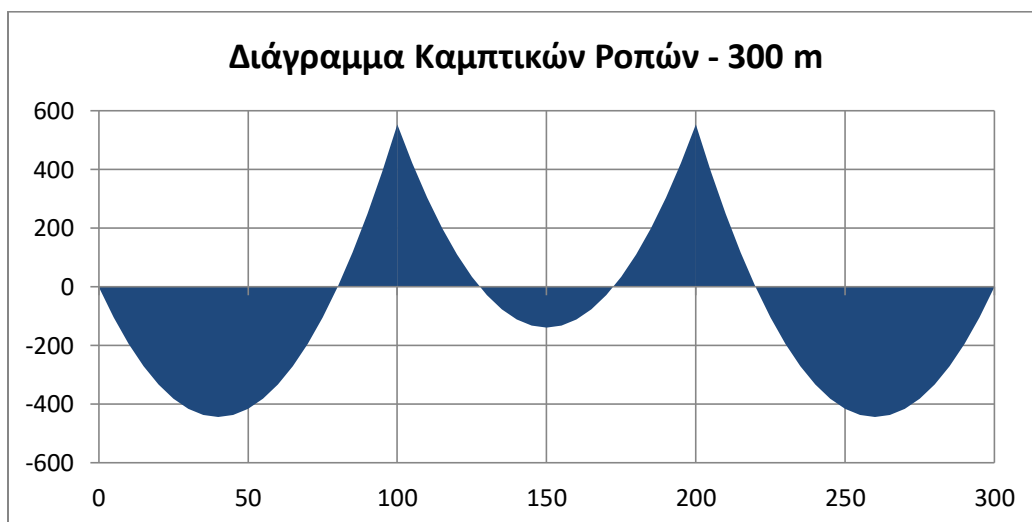
&

$$M_{CD}(x) = \frac{0.5545}{2} * x^2 - 144.18 * x + 18300$$

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις φτιάχνουμε τα διαγράμματα καμπτικών ροπών και τεμνουσών δυνάμεων όπως φαίνονται παρακάτω:



Διάγραμμα 5- 6. Τεμνουσών δυνάμεων – μήκους



Διάγραμμα 5- 7. Καμπτικών ροπών – μήκους

Έχοντας τις εξισώσεις των καμπτικών ροπών για τα τρία τμήματα AB, BC, CD, μπορούμε να καταστρώσουμε τις εξισώσεις ελαστικής γραμμής για τα αντίστοιχα τμήματα, επιλύοντας τη σχέση:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI}$$

Παραγωγίζοντας την παραπάνω σχέση δύο φορές καταλήγουμε στην εξίσωση του βέλους κάμψης της δοκού για τα αντίστοιχα τμήματα. Επειδή θα προκύψουν δύο σταθερές ολοκλήρωσης για κάθε μία από τις τρεις εξισώσεις θα πρέπει να εφαρμόσουμε τις οριακές συνθήκες που υπάρχουν σε κάθε στήριξη για να βρούμε τις σταθερές. Έτσι, με αντίστοιχο τρόπο όπως κάναμε παραπάνω, προκύπτουν οι εξής τιμές για τις σταθερές ολοκλήρωσης:

Πίνακας 5- 17. Σταθερές Ολοκλήρωσης - αναλυτική

Σταθερές ολοκλήρωσης	
C1	13862.50
C2	0.00
C3	-291112.52
C4	10165834.77
C5	-1511012.56
C6	91492505.74

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές στις εξισώσεις ελαστικής γραμμής, προκύπτουν οι εξισώσεις για τα βέλη κάμψης και κλίσης της δοκού ως ακολούθως:

Τμήμα AB:

$$0 \leq x \leq 100 \text{ m}$$

Κλίση ουδέτερης επιφάνειας:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{w}{2} * \frac{x^3}{3} + R_A * \frac{x^2}{2} + C1}{EI}$$

Βέλος Κάμψης:

$$y = \frac{\frac{w}{24} * x^4 + \frac{R_A}{6} * x^3 + C1 * x + C2}{EI}$$

Τμήμα BC:

$$100 \leq x \leq 200 \text{ m}$$

Κλίση ουδέτερης επιφάνειας:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{w}{2} * \frac{x^3}{3} + R_A * \frac{x^2}{2} + R_B * \left(\frac{x^2}{2} - l_1 * x\right) + C_3}{EI}$$

Βέλος Κάμψης:

$$y = \frac{\frac{w}{24} * x^4 + \frac{R_A}{6} * x^3 + R_B * \left(\frac{1}{6} * x^3 - \frac{l_1}{2} * x^2\right) + C_3 * x + C_4}{EI}$$

Τμήμα CD:

$$200 \leq x \leq 300 \text{ m}$$

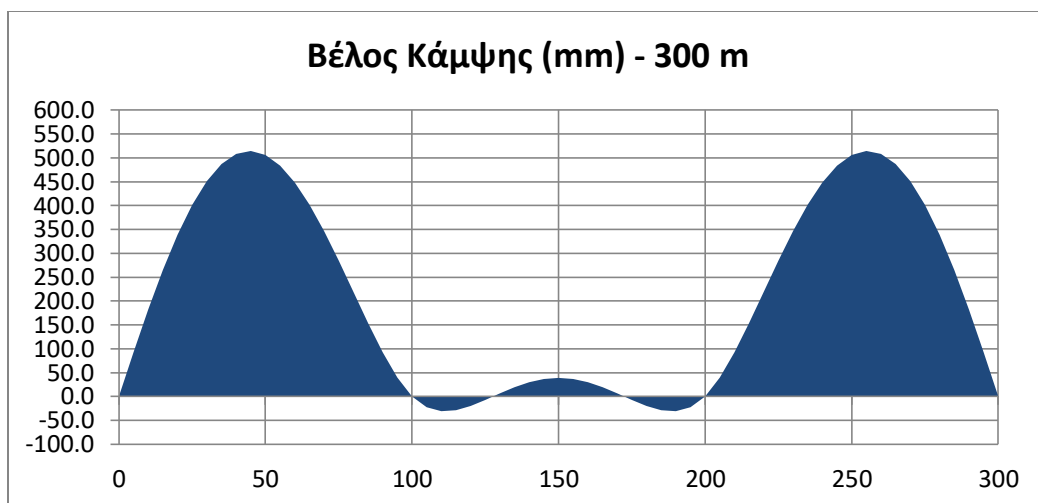
Κλίση ουδέτερης επιφάνειας:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{w}{2} * \frac{x^3}{3} + R_A * \frac{x^2}{2} + R_B * \left(\frac{x^2}{2} - l_1 * x\right) + R_C * \left(\frac{x^2}{2} - l_1 * x - l_2 * x\right) + C_5}{EI}$$

Βέλος Κάμψης:

$$y = \frac{\frac{w}{24} x^4 + \frac{R_A}{6} x^3 + R_B * \left(\frac{1}{6} x^3 - \frac{l_1}{2} x^2\right) + R_C * \left(\frac{1}{6} x^3 - \frac{l_1}{2} x^2 - \frac{l_2}{2} x^2\right) + C_5 * x + C_6}{EI}$$

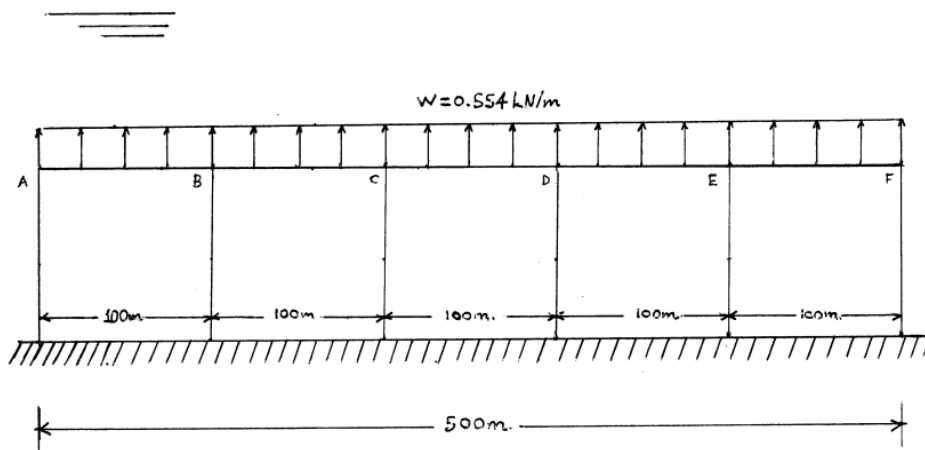
Με αντικατάσταση στις παραπάνω σχέσεις για $w = 0.5545 \text{ kN/m}$, $EI = 741836.98 \text{ kN} * \text{m}^2$ και τις αντίστοιχες τιμές που βρήκαμε για τις σταθερές ολοκλήρωσης και για τις αντιδράσεις στις στηρίξεις, κατασκευάζουμε το διάγραμμα βέλους κάμψης – μήκους, στο υπολογιστικό πρόγραμμα excel:



Διάγραμμα 5- 8. Βέλος κάμψης – μήκους –αναλυτική.

Επίλυση για 500 m μήκος αγωγού

Η ίδια ακριβώς διαδικασία όπως περιγράφηκε παραπάνω, με τη μέθοδο κατανομής των ροπών, εφαρμόζεται για μήκος αγωγού 500 m, με στήριξη – κύλιση ανά 100 m. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα παρακάτω:



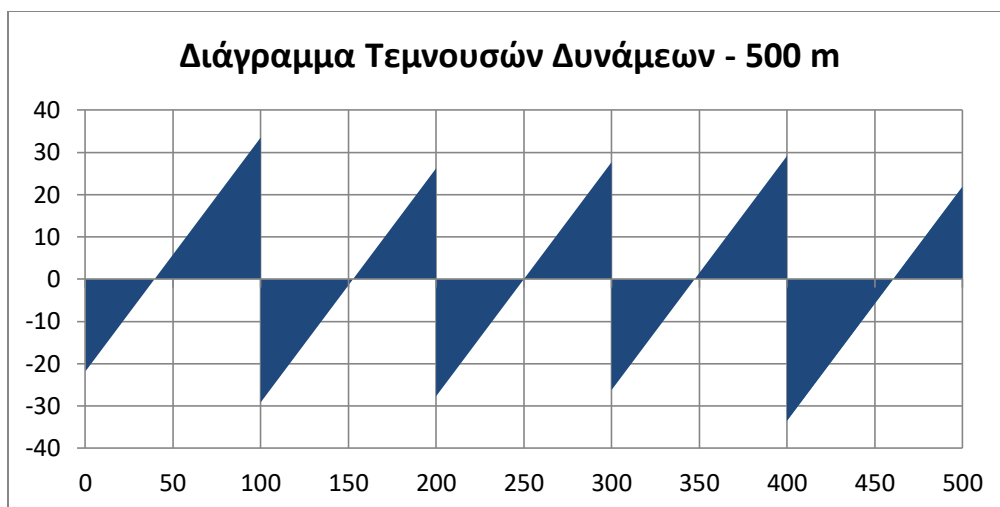
Εικόνα 5- 8. Τμήμα αγωγού 500 μέτρων

Πίνακας 5- 18. Αντιδράσεις στις στηρίξεις (500 m) – αναλυτική

Reaction Forces – 500 m			
R_A	21.868	kN	↓
R_B	62.689	kN	↓
R_C	53.942	kN	↓
R_D	53.942	kN	↓
R_E	62.689	kN	↓
R_F	21.868	kN	↓

Πίνακας 5- 19. Εξισώσεις τεμνουσών δυνάμεων (500 m) – αναλυτική

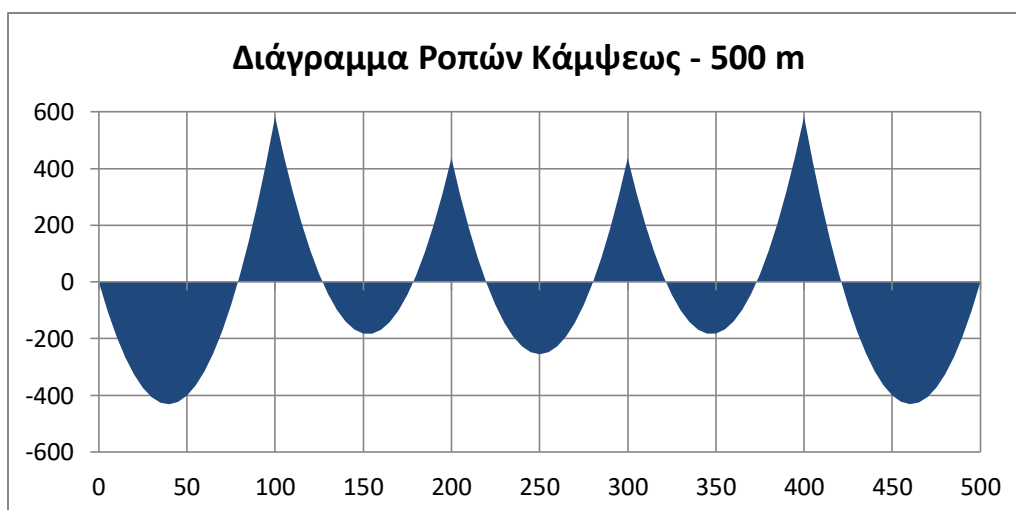
Εξισώσεις τεμνουσών δυνάμεων – 500 m		
V_AB(x) =	$0.554 * x - 21.868$	$0 \leq x \leq 100$
V_BC(x) =	$0.554 * x - 84.557$	$100 \leq x \leq 200$
V_CD(x) =	$0.554 * x - 138.499$	$200 \leq x \leq 300$
V_DE(x) =	$0.554 * x - 192.441$	$300 \leq x \leq 400$
V_EF(x) =	$0.554 * x - 255.13$	$400 \leq x \leq 500$



Διάγραμμα 5- 9. Τεμνουσών Δυνάμεων – μήκους (500 m) – αναλυτική

Πίνακας 5- 20. Εξισώσεις ροπών κάμψεως (500 m) – αναλυτική

Εξισώσεις ροπών κάμψεως – 500 m		
$M_{AB}(x) =$	$\frac{0.5545}{2} * x^2 - 21.868x$	$0 \leq x \leq 100$
$M_{BC}(x) =$	$\frac{0.5545}{2} * x^2 - 84.557x + 6268.9$	$100 \leq x \leq 200$
$M_{CD}(x) =$	$\frac{0.5545}{2} * x^2 - 138.499x + 17057.3$	$200 \leq x \leq 300$
$M_{DE}(x) =$	$\frac{0.5545}{2} * x^2 - 192.441x + 33239.9$	$300 \leq x \leq 400$
$M_{EF}(x) =$	$\frac{0.5545}{2} * x^2 - 255.13x + 58315.5$	$400 \leq x \leq 500$



Διάγραμμα 5- 10. Ροπών κάμψεως – μήκους (500 m) – αναλυτική

Πίνακας 5- 21. Σταθερές ολοκλήρωσης (500 m) – αναλυτική

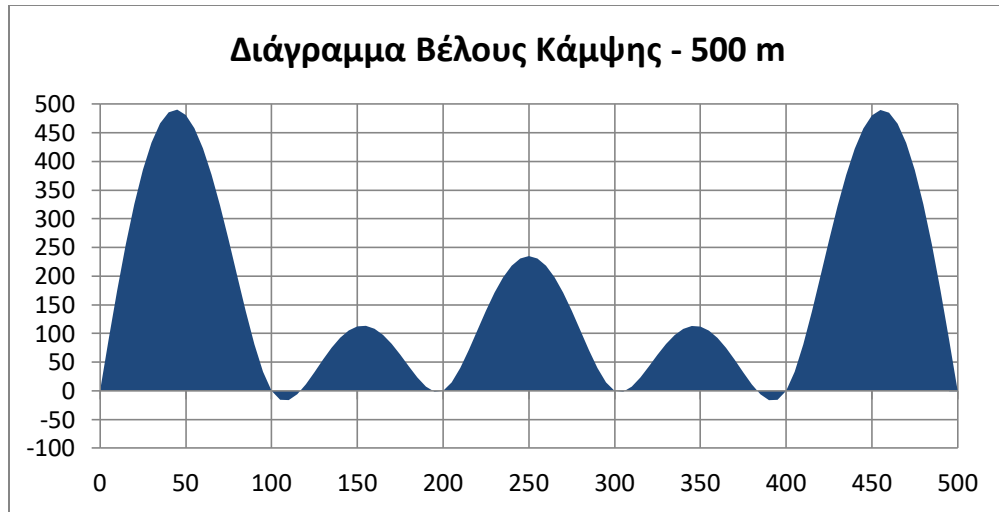
Σταθερές Ολοκλήρωσης – 500 m	
C1	13363.3
C2	0
C3	-300081.7
C4	10448666.7
C5	-1378921.7
C6	82374000
C7	-3806311.7
C8	325120000
C9	-8821431.7
C10	993816666.7

Πίνακας 5- 22. Εξισώσεις κλίσης ουδέτερης επιφάνειας (500 m) – αναλυτική

Κλίση ουδέτερης επιφάνειας dy/dx	
Τμήμα AB: $0 \leq x \leq 100$ m	$= \frac{\frac{w}{2} * \frac{x^3}{3} - 21.868 * \frac{x^2}{2} + C1}{EI}$
Τμήμα BC: $100 \text{ m} \leq x \leq 200$ m	$= \frac{\frac{w}{2} * \frac{x^3}{3} - 84.557 * \frac{x^2}{2} + 6268.9 * x + C3}{EI}$
Τμήμα CD: $200 \text{ m} \leq x \leq 300$ m	$= \frac{\frac{w}{2} * \frac{x^3}{3} - 138.499 * \frac{x^2}{2} + 17057.3 * x + C5}{EI}$
Τμήμα DE: $300 \text{ m} \leq x \leq 400$ m	$= \frac{\frac{w}{2} * \frac{x^3}{3} - 192.441 * \frac{x^2}{2} + 33239.9 * x + C7}{EI}$
Τμήμα EF: $400 \text{ m} \leq x \leq 500$ m	$= \frac{\frac{w}{2} * \frac{x^3}{3} - 255.13 * \frac{x^2}{2} + 58315.5 * x + C9}{EI}$

Πίνακας 5- 23. Εξισώσεις βέλους κάμψης (500 m) – αναλυτική

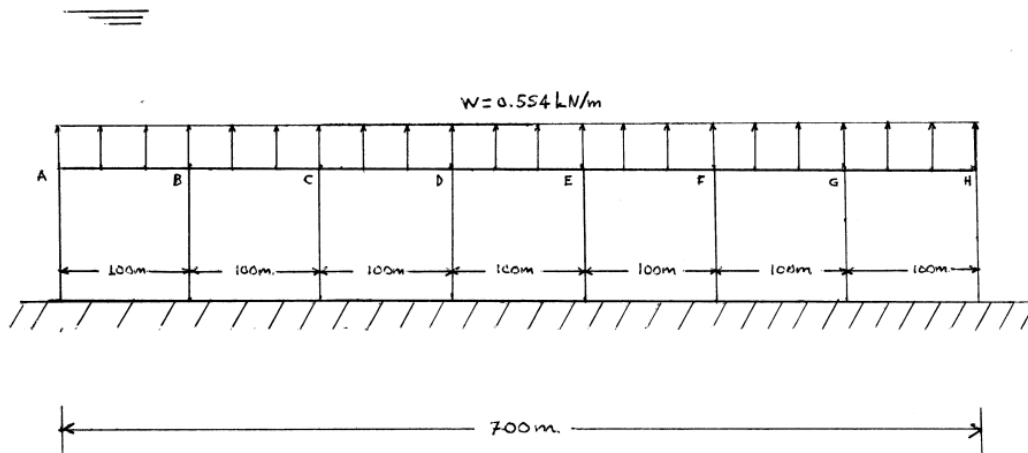
Βέλος κάμψης y	
Τμήμα AB: $0 \leq x \leq 100$ m	$= \frac{\frac{w}{6} * \frac{x^4}{4} - \frac{21.868}{2} * \frac{x^3}{3} + C1 * x + C2}{EI}$
Τμήμα BC: $100 \text{ m} \leq x \leq 200$ m	$= \frac{\frac{w}{6} * \frac{x^4}{4} - \frac{84.557}{2} * \frac{x^3}{3} + 6268.9 * \frac{x^2}{2} + C3 * x + C4}{EI}$
Τμήμα CD: $200 \text{ m} \leq x \leq 300$ m	$= \frac{\frac{w}{6} * \frac{x^4}{4} - \frac{138.499}{2} * \frac{x^3}{3} + 17057.3 * \frac{x^2}{2} + C5 * x + C6}{EI}$
Τμήμα DE: $300 \text{ m} \leq x \leq 400$ m	$= \frac{\frac{w}{6} * \frac{x^4}{4} - \frac{192.441}{2} * \frac{x^3}{3} + 33239.9 * \frac{x^2}{2} + C7 * x + C8}{EI}$
Τμήμα EF: $400 \text{ m} \leq x \leq 500$ m	$= \frac{\frac{w}{6} * \frac{x^4}{4} - \frac{255.13}{2} * \frac{x^3}{3} + 58315.5 * \frac{x^2}{2} + C9 * x + C10}{EI}$



Διάγραμμα 5- 11. Βέλους κάμψης – μήκους (500 m) – αναλυτική

Επίλυση για 700 m μήκος αγωγού

Η ίδια ακριβώς διαδικασία όπως περιγράφηκε παραπάνω, με τη μέθοδο κατανομής των ροπών, εφαρμόζεται και για μήκος αγωγού 700 m, με στήριξη – κύλιση ανά 100 m. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα παρακάτω:



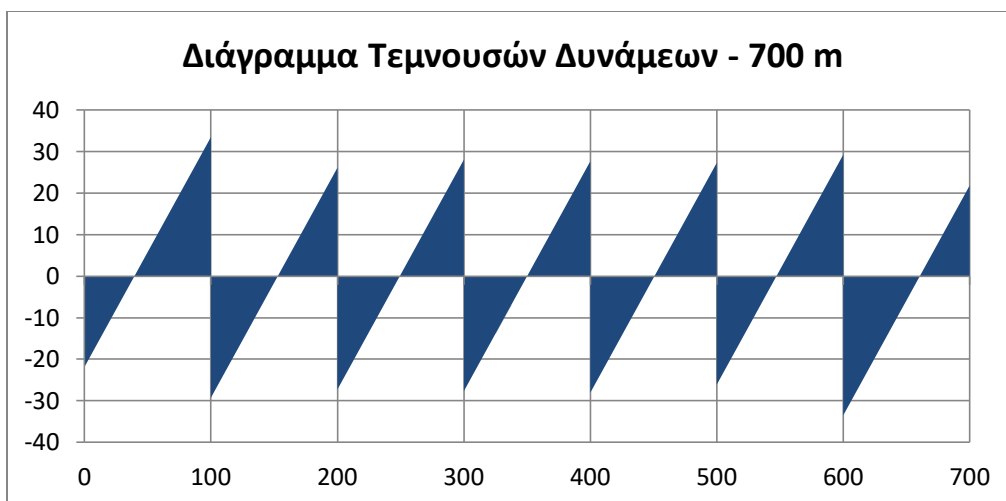
Εικόνα 5- 9. Τμήμα αγωγού 700 μέτρων

Πίνακας 5- 24. Αντιδράσεις στις στηρίξεις (700 m) – αναλυτική

Reaction Forces – 500 m			
R_A	21.848	kN	↓
R_B	62.813	kN	↓
R_C	53.449	kN	↓
R_D	55.79	kN	↓
R_E	55.79	kN	↓
R_F	53.449	kN	↓
R_G	62.813	kN	↓
R_H	21.848	kN	↓

Πίνακας 5- 25. Εξισώσεις τεμνουσών δυνάμεων (700 m) – αναλυτική

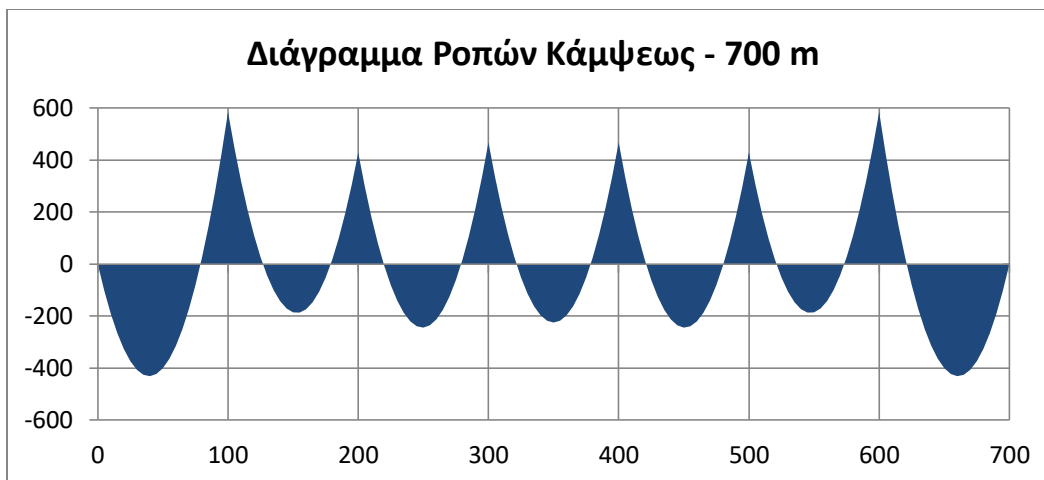
Εξισώσεις τεμνουσών δυνάμεων – 700 m		
$V_{AB}(x) =$	$0.554 * x - 21.848$	$0 \leq x \leq 100$
$V_{BC}(x) =$	$0.554 * x - 84.661$	$100 \leq x \leq 200$
$V_{CD}(x) =$	$0.554 * x - 138.11$	$200 \leq x \leq 300$
$V_{DE}(x) =$	$0.554 * x - 193.9$	$300 \leq x \leq 400$
$V_{EF}(x) =$	$0.554 * x - 249.69$	$400 \leq x \leq 500$
$V_{FG}(x) =$	$0.554 * x - 303.139$	$500 \leq x \leq 600$
$V_{GH}(x) =$	$0.554 * x - 365.952$	$600 \leq x \leq 700$



Διάγραμμα 5- 12. Τεμνουσών Δυνάμεων – μήκους (700 m) – αναλυτική

Πίνακας 5- 26. Εξισώσεις ροπών κάμψεως (700 m) – αναλυτική

Εξισώσεις ροπών κάμψεως – 700 m		
$M_{AB}(x) =$	$w/2 * x^2 - 21.848 * x$	$0 \leq x \leq 100$
$M_{BC}(x) =$	$w/2 * x^2 - 84.661 * x + 6281.3$	$100 \leq x \leq 200$
$M_{CD}(x) =$	$w/2 * x^2 - 138.11 * x + 16971.1$	$200 \leq x \leq 300$
$M_{DE}(x) =$	$w/2 * x^2 - 193.9 * x + 33708.1$	$300 \leq x \leq 400$
$M_{EF}(x) =$	$w/2 * x^2 - 249.69 * x + 56024.1$	$400 \leq x \leq 500$
$M_{FG}(x) =$	$w/2 * x^2 - 303.139 * x + 82748.6$	$500 \leq x \leq 600$
$M_{GH}(x) =$	$w/2 * x^2 - 365.952 * x + 120436.4$	$600 \leq x \leq 700$



Διάγραμμα 5- 13. Ροπών κάμψεως – μήκους (700 m) – αναλυτική

Πίνακας 5- 27. Σταθερές ολοκλήρωσης (700 m) – αναλυτική

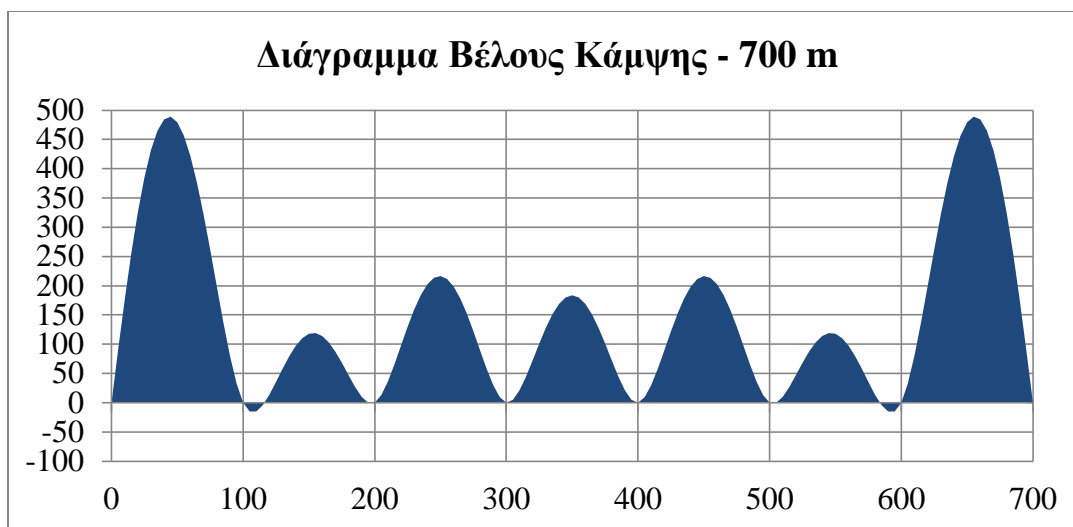
Σταθερές Ολοκλήρωσης – 700 m	
C1	13330
C2	0
C3	-300733.3
C4	10468666.7
C5	-1369708.3
C6	81733000
C7	-3880251.7
C8	332786000
C9	-8343445
C10	927876666.7
C11	-15024565
C12	2041395000
C13	-26330903.3
C14	4302662000

Πίνακας 5- 28. Εξισώσεις κλίσης ουδέτερης επιφάνειας (700 m) – αναλυτική

Κλίση ουδέτερης επιφάνειας dy/dx	
Τμήμα AB: $0 \leq x \leq 100$ m	$= \frac{\frac{w}{2} * \frac{x^3}{3} - 21.848 * \frac{x^2}{2} + C1}{EI}$
Τμήμα BC: $100m. \leq x \leq 200$ m	$= \frac{\frac{w}{2} * \frac{x^3}{3} - 84.661 * \frac{x^2}{2} + 6281.3 * x + C3}{EI}$
Τμήμα CD: $200m. \leq x \leq 300$ m	$= \frac{\frac{w}{2} * \frac{x^3}{3} - 138.11 * \frac{x^2}{2} + 16971.1 * x + C5}{EI}$
Τμήμα DE: $300m. \leq x \leq 400$ m	$= \frac{\frac{w}{2} * \frac{x^3}{3} - 193.9 * \frac{x^2}{2} + 33708.1 * x + C7}{EI}$
Τμήμα EF: $400m. \leq x \leq 500$ m	$= \frac{\frac{w}{2} * \frac{x^3}{3} - 249.69 * \frac{x^2}{2} + 56024.1 * x + C9}{EI}$
Τμήμα FG: $500m. \leq x \leq 600$ m	$= \frac{\frac{w}{2} * \frac{x^3}{3} - 303.139 * \frac{x^2}{2} + 82748.6 * x + C11}{EI}$
Τμήμα GH: $600m. \leq x \leq 700$ m	$= \frac{\frac{w}{2} * \frac{x^3}{3} - 365.952 * \frac{x^2}{2} + 120436.4 * x + C13}{EI}$

Πίνακας 5- 29. Εξισώσεις βέλους κάμψης (700 m) – αναλυτική

Βέλος κάμψης y	
Τμήμα AB: $0 \leq x \leq 100$ m	$= \frac{\frac{w}{6} * \frac{x^4}{4} - \frac{21.848}{2} * \frac{x^3}{3} + C1 * x + C2}{EI}$
Τμήμα BC: $100m. \leq x \leq 200$ m	$= \frac{\frac{w}{6} * \frac{x^4}{4} - \frac{84.661}{2} * \frac{x^3}{3} + 6281.3 * \frac{x^2}{2} + C3 * x + C4}{EI}$
Τμήμα CD: $200m. \leq x \leq 300$ m	$= \frac{\frac{w}{6} * \frac{x^4}{4} - \frac{138.11}{2} * \frac{x^3}{3} + 16971.1 * \frac{x^2}{2} + C5 * x + C6}{EI}$
Τμήμα DE: $300m. \leq x \leq 400$ m	$= \frac{\frac{w}{6} * \frac{x^4}{4} - \frac{193.9}{2} * \frac{x^3}{3} + 33708.1 * \frac{x^2}{2} + C7 * x + C8}{EI}$
Τμήμα EF: $400m. \leq x \leq 500$ m	$= \frac{\frac{w}{6} * \frac{x^4}{4} - \frac{249.69}{2} * \frac{x^3}{3} + 56024.1 * \frac{x^2}{2} + C9 * x + C10}{EI}$
Τμήμα FG: $500m. \leq x \leq 600$ m	$= \frac{\frac{w}{6} * \frac{x^4}{4} - \frac{303.139}{2} * \frac{x^3}{3} + 82748.6 * \frac{x^2}{2} + C11 * x + C12}{EI}$
Τμήμα GH: $600m. \leq x \leq 700$ m	$= \frac{\frac{w}{6} * \frac{x^4}{4} - \frac{365.952}{2} * \frac{x^3}{3} + 120436.4 * \frac{x^2}{2} + C13 * x + C14}{EI}$



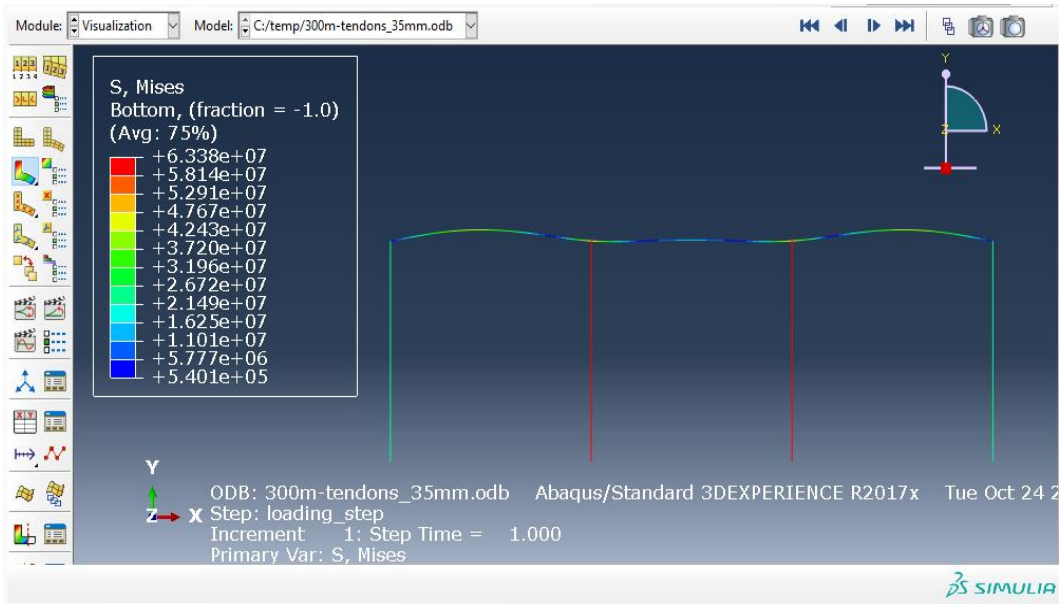
Διάγραμμα 5- 14. Βέλους κάμψης – μήκους (700 m) – αναλυτική

5.6 Αριθμητική προσομοίωση

Παραπάνω εξετάσαμε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις τμήματος αγωγού το οποίο δεν είναι επικαθήμενο στον πυθμένα. Στο κεφάλαιο αυτό θα εισάγουμε το πρόβλημα στο Abaqus, τοποθετώντας και τους τένοντες για να δούμε τα αποτελέσματα που μας δίνει το πρόγραμμα. Παραπάνω υπολογίσαμε την ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρο που πρέπει να έχει ο κάθε τένοντας. Η τιμή αυτή υπολογίστηκε ίση με 22.0 mm. για το Abaqus. Οπότε θα ξεκινήσουμε με $d = 22.0$ mm. Οι τιμές που θα χρειαστεί να εισάγουμε στο Abaqus είναι οι εξής:

Πίνακας 5- 30. Χαρακτηριστικές τιμές που θα εισαχθούν στο Abaqus

Μήκος αγωγού (m)	300
Διάμετρος αγωγού (εξωτερική) (m)	0.6604
Πάχος αγωγού (m)	0.037
Άνοιγμα μεταξύ τενόντων (m)	100
Μήκος τενόντων (m)	100
Υλικό αγωγού	Steel X65
Υλικό τενόντων	Steel X65
Φορτίο (άνωσης) (kN/m)	0.554



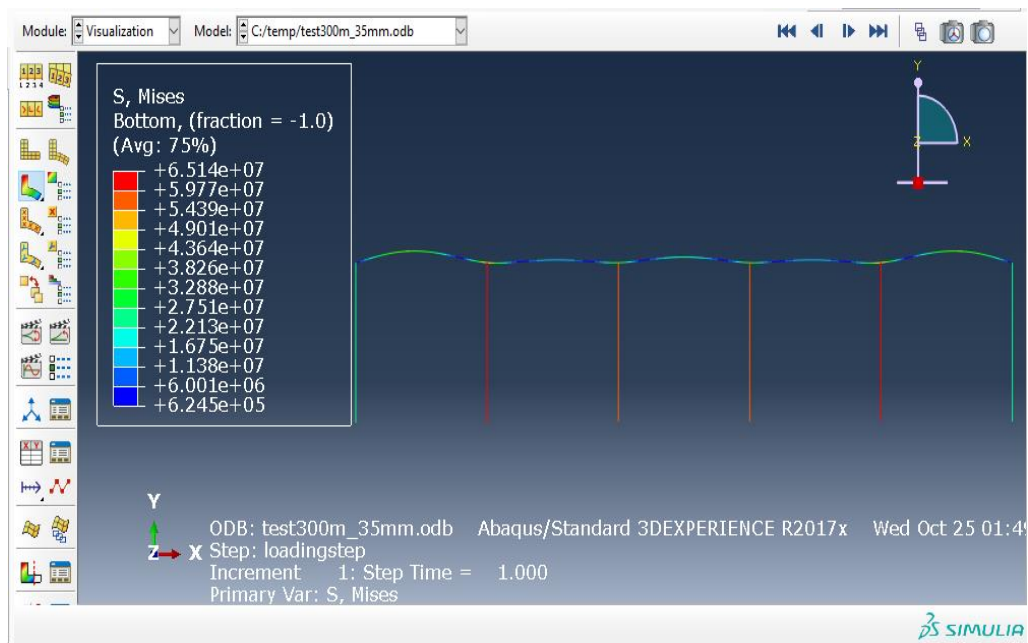
Εικόνα 5- 10. Αποτελέσματα στο Abaqus για 300 m μήκος

Τα αποτελέσματα που παίρνουμε είναι τα εξής:

Πίνακας 5- 31. Αποτελέσματα για διάφορα d_tendons για μήκος αγωγού 300m.

Μήκος αγωγού : 300 m			
(Αναλυτική: max_deflection= 0.5056 m, @ x=45 m & x=255 m)			
d_tendon (mm)	max_stress (MPa) @ x =100 m & x=200 m	max_ε (10 ⁻⁴) @ x= 100 m & x=200 m	max_deflection (m) @ x=45m & x=255 m
22	160.34	7.635	0.5697
25	124.19	5.914	0.5577
30	86.25	4.107	0.5451
35	63.38	3.018	0.5376
40	48.53	2.311	0.5326

		max_ε (10 ⁻⁴) @ x= 45 m & x=255 m	
45	39.02	1.858	0.5285
50	39.02	1.858	0.5260
55	39.02	1.858	0.5243
60	39.02	1.858	0.5229
70	39.00	1.857	0.5210
80	39.00	1.857	0.5198
90	39.00	1.857	0.5189
100	39.00	1.857	0.5183
125	39.00	1.857	0.5174
150	39.00	1.857	0.5169
175	39.00	1.857	0.5166
200	39.00	1.857	0.5164
225	39.00	1.857	0.5163
250	39.00	1.857	0.5162
275	39.00	1.857	0.5161
300	39.00	1.857	0.5160



Εικόνα 5- 11. Αποτελέσματα στο Abaqus για 500μ. μήκος αγωγού

Πίνακας 5- 32. Αποτελέσματα για διάφορα d_tendons για μήκος αγωγού 500m.

Μήκος αγωγού : 500 m.			
(Αναλυτική: max_deflection= 0.4858 m, @ x=40 m & x=460 m)			
d_tendon (mm)	max_stress (MPa) @ x =100 m & x=400 m	max_ε (10 ⁻⁴) @ x= 100 m & x= 400 m	max_deflection (m) @ x=40 m & x=460 m
22	164.60	7.838	0.5494
25	127.55	6.074	0.5367
30	88.64	4.221	0.5233
35	65.14	3.102	0.5153
40	49.90	2.376	0.5101
45	39.40	1.876	0.5061

		max_ε (10 ⁻⁴) @ x= 45 m & x= 455 m	
50	38.26	1.822	0.5035
55	38.24	1.821	0.5017
60	38.24	1.821	0.5002
70	38.22	1.820	0.4982
80	38.22	1.820	0.4969
90	38.22	1.820	0.4961
100	38.22	1.820	0.4954
125	38.22	1.820	0.4945
150	38.20	1.819	0.4939
175	38.20	1.819	0.4936
200	38.20	1.819	0.4934
225	38.20	1.819	0.4933
250	38.20	1.819	0.4932
275	38.20	1.819	0.4931
300	38.20	1.819	0.4930



Εικόνα 5- 12. Αποτελέσματα στο Abaqus για 700 m μήκος αγωγού

Πίνακας 5- 33. Αποτελέσματα για διάφορα d_tendons για μήκος αγωγού 700m.

Μήκος αγωγού : 700 m.			
(Αναλυτική: max_deflection= 0.4793 m, @ x= 45 m & x= 655 m)			
d_tendon (mm)	max_stress (MPa) @ x = 100 m & x=600 m	max_ε (10 ⁻⁴) @ x= 100 m & x= 600 m	max_deflection (m) @ x= 45m & x= 655m
22	164.87	7.851	0.5481
25	127.76	6.084	0.5353
30	88.79	4.228	0.5219
35	65.27	3.108	0.5138
40	49.98	2.380	0.5086
45	39.50	1.881	0.5050

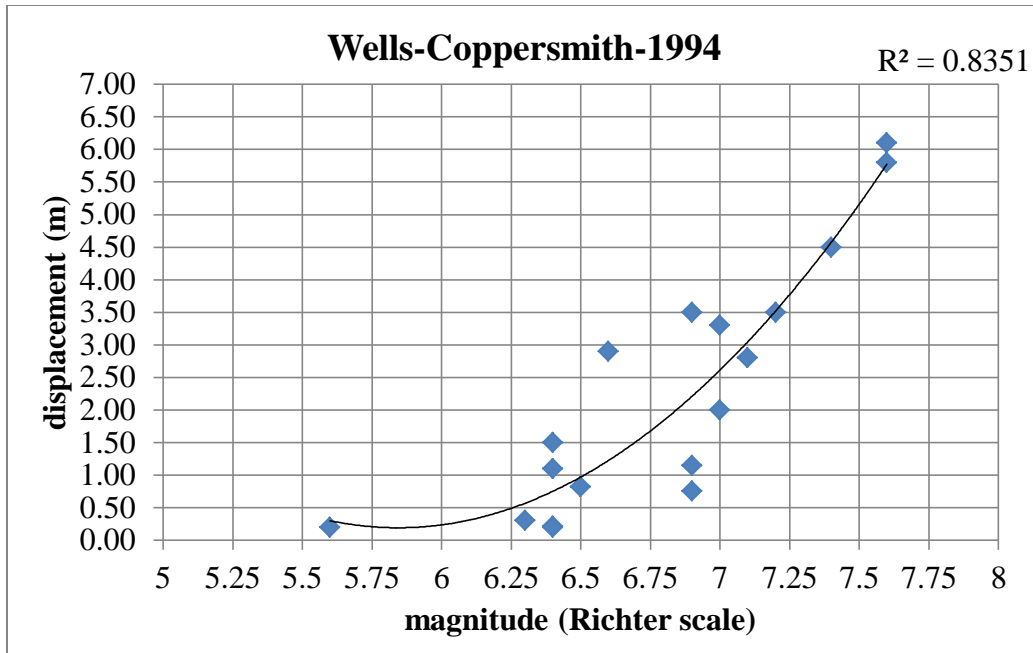
		max_ε (10 ⁻⁴) @ x= 45 m & x= 655 m	
50	38.22	1.820	0.5024
55	38.22	1.820	0.5017
60	38.20	1.819	0.4991
70	38.20	1.819	0.4971
80	38.18	1.818	0.4958
90	38.18	1.818	0.4949
100	38.18	1.818	0.4942
125	38.18	1.818	0.4933
150	38.18	1.818	0.4927
175	38.18	1.818	0.4924
200	38.18	1.818	0.4922
225	38.18	1.818	0.4921
250	38.18	1.818	0.4920
275	38.18	1.818	0.4919
300	38.18	1.818	0.4918

Στο σημείο αυτό θα προσομοιώσουμε τη συνθήκη ενεργού ρήγματος, όπου υποθέτουμε σεισμική δραστηριότητα στον χώρο διέλευσης του τμήματος του μη επικαθήμενου αγωγού, η οποία συνεπάγεται διαφορική καθίζηση του πυθμένα και επακόλουθη μετατόπιση των τενόντων στην κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση. Θα εξετάσουμε την περίπτωση όπου έχουμε μόνο κατακόρυφη μετατόπιση των τενόντων από επικείμενη καθίζηση του εδάφους.

Παρακάτω έχουμε φτιάξει ένα διάγραμμα μεγέθους σεισμού συναρτήσει καθίζησης εδάφους το οποίο κατασκευάστηκε από δεδομένα που δίνουν σε δημοσίευμα τους οι Well – Coppersmith. Στον οριζόντιο άξονα έχουμε το μέγεθος του σεισμού στην κλίμακα Ρίχτερ, ενώ στον κατακόρυφο έχουμε την μέγιστη κατακόρυφη καθίζηση που παρατηρήθηκε σε μέτρα. Οι μετρήσεις είναι 18 και φτιάχτηκε πολυώνυμο 2ου βαθμού που περνάει από τα σημεία.

Πίνακας 5- 34. Δεδομένα από δημοσίευμα: Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002, August 1994, New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement by Donald L. Wells and Kevin J. Coppersmith

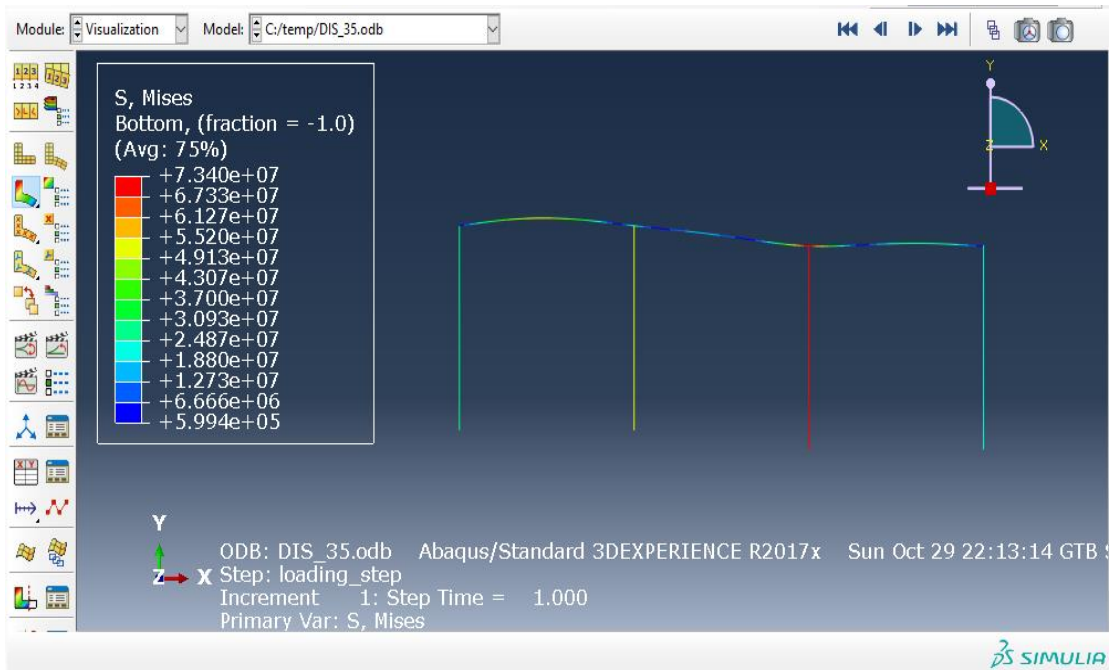
No	Location of Earthquake	Date	Type of slip	Magnitude Richter Scale	Max displacement (m)
1	Mexico Pitaycachi	05/03/1887	Normal	7.4	4.50
2	Italy Avezzano	01/13/1915	Normal	7	2.00
3	USA, Nevada Pleasant Valley	10/3/1915	Normal	7.6	5.80
4	Kenya Laikipia	1/6/1928	Normal	7	3.30
5	Bulgaria Papazili	04/18/1928	Normal	6.9	3.50
6	Peru Ancash	11/10/1946	Normal	7.2	3.50
7	USA,CA Fort Sage Mtns.	12/14/1950	Normal	5.6	0.20
8	USA, Nevada Rainbow Mountain	7/6/1954	Normal	6.3	0.31
9	USA, Nevada Stillwater	08/24/1954	Normal	6.9	0.76
10	USA, MT Hebgen Lake	08/18/1959	Normal	7.6	6.10
11	Turkey Alasehir Valley	03/28/1969	Normal	6.5	0.82
12	Turkey Gediz	03/28/1970	Normal	7.1	2.80
13	Greece Thessaloniki	06/20/1978	Normal	6.4	0.22
14	Greece Almyros	7/9/1980	Normal	6.4	0.20
15	Italy South Apennines	11/23/1980	Normal	6.9	1.15
16	Greece Corinth	02/25 /198 1	Normal	6.4	1.50
17	Greece Corinth	3/4/1981	Normal	6.4	1.10
18	New Zealand Edgecumbe	3/2/1987	Normal	6.6	2.90



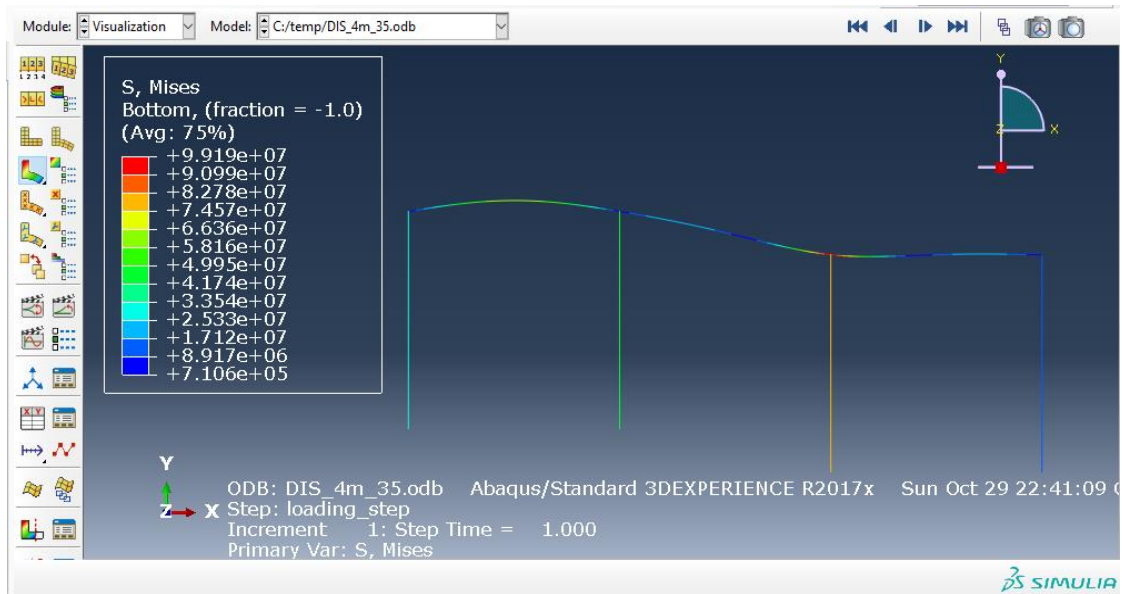
Διάγραμμα 5- 15. Σεισμικής δραστηριότητας –καθίζησης με βάση τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα από: Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002, August 1994, New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement by Donald L. Wells and Kevin J. Coppersmith

Στο πρόγραμμα Abaqus θα εξετάσουμε τρεις (3) περιπτώσεις. Για κατακόρυφη απόσταση ίση με 2.0 m που αντιστοιχεί σε μέγεθος σεισμού 6.8, για κατακόρυφη απόσταση ίση με 4.0 m που αντιστοιχεί σε μέγεθος σεισμού 7.3 και για κατακόρυφη απόσταση 6.0 m. που αντιστοιχεί σε μέγεθος σεισμού 7.6.

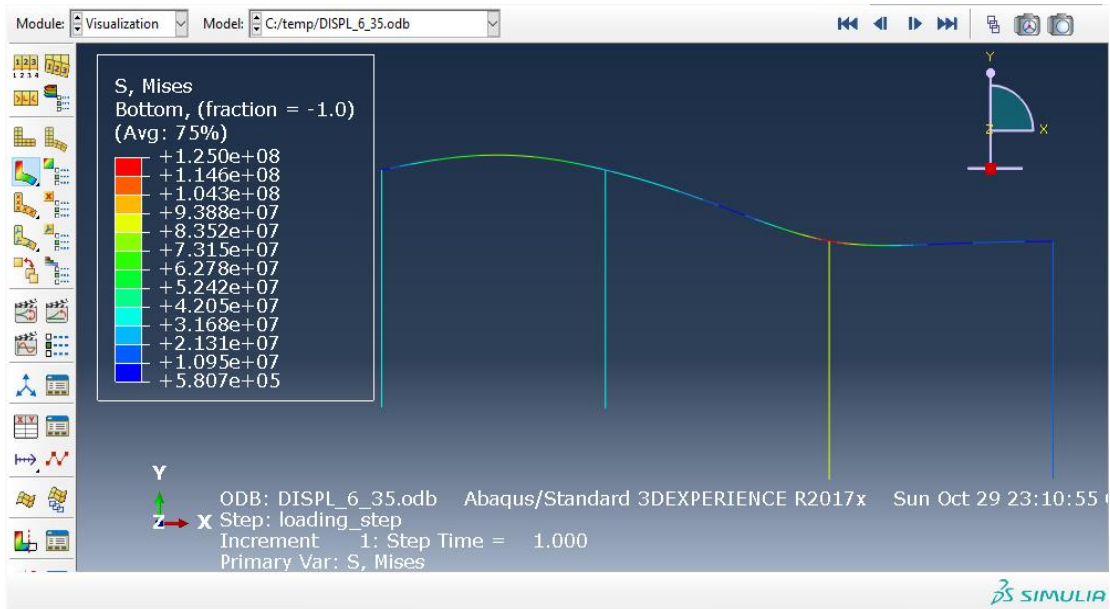
Για μήκος αγωγού 300 m θα μετατοπίσουμε κατακόρυφα τις 2 από τις 4 στηρίξεις. Για μήκος αγωγού 500 m θα μετατοπίσουμε τις 3 από τις 6 στηρίξεις. Για μήκος αγωγού 700 m θα μετατοπίσουμε τις 4 από τις 8 στηρίξεις.



Εικόνα 5- 13. Καθίζηση εδάφους κατά 2 m σε 300 m μήκος αγωγού – Abaqus



Εικόνα 5- 14. Καθίζηση εδάφους κατά 4 m σε 300 m μήκος αγωγού – Abaqus



Εικόνα 5- 15. Καθίζηση εδάφους κατά 6 m σε 300 m μήκος αγωγού – Abaqus

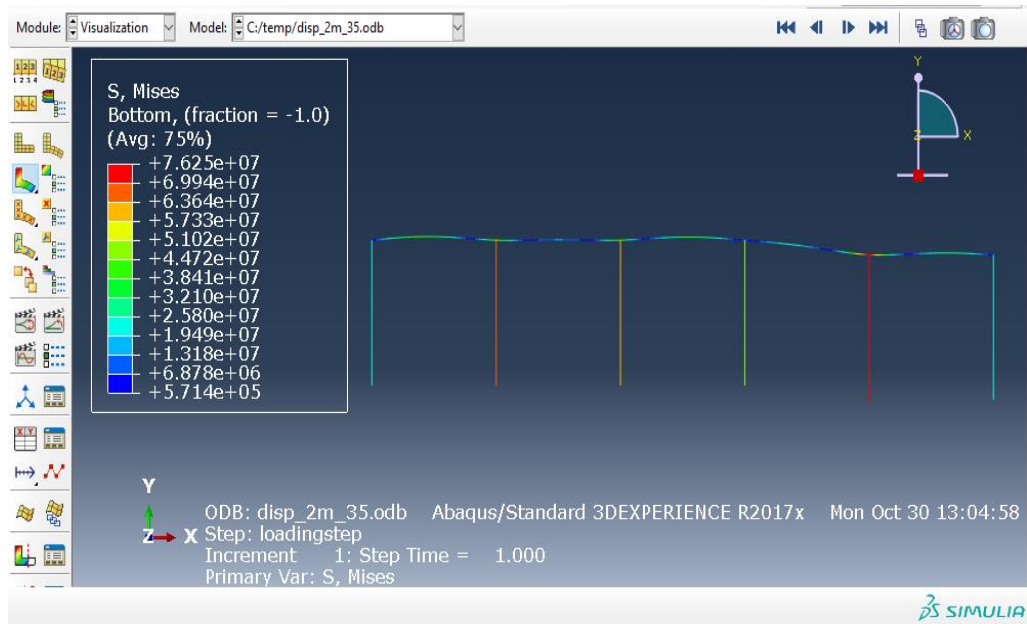
Για 300 μέτρα μήκος αγωγού:

Πίνακας 5- 35. Μετατόπιση τενόντων κατά 2 m, 4 m, 6 m – μήκος αγωγού 300 m.

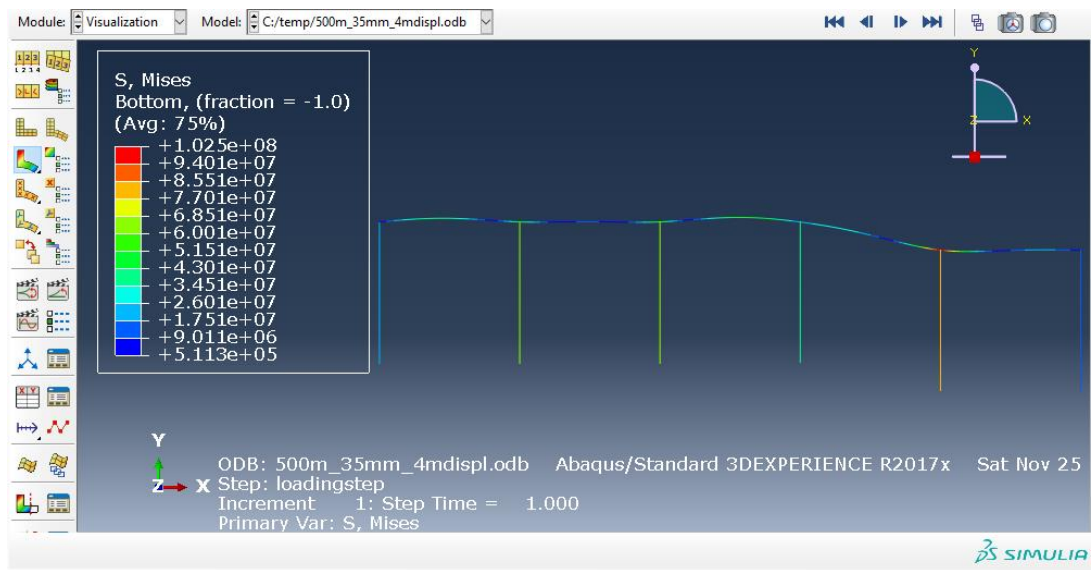
Καθίζηση εδάφους = 2 m/ μετατόπιση τενόντων C,D κατά 2 m /300 m μήκος αγωγού			
d_tendon (mm)	max_stress (MPa) @ x = 200 m	max_ε (10 ⁻⁴) @ x= 200 m	max_deflection (m) @ x= 49 m
22	183.25	8.726	0.5842
25	142.0	6.762	0.5714
30	98.68	4.699	0.5495
35	72.53	3.454	0.5401
40	55.55	2.645	0.5395
		max_ε (10 ⁻⁴) @ x= 45 m	
45	50.42	2.401	0.5332

50	50.42	2.401	0.5301
55	50.42	2.401	0.5254
60	50.42	2.401	0.5236
70	50.44	2.402	0.5223
80	50.44	2.402	0.5221
90	50.44	2.402	0.5219
100	50.44	2.402	0.5217
Καθίζηση εδάφους = 4m/ μετατόπιση τενόντων C,D κατά 4m /300m μήκος αγωγού			
d_tendon (mm)	max_stress (MPa) @ x = 200 m	max_ε (10 ⁻⁴) @ x= 200 m	max_deflection (m) @ x= 50 m
22	206.2	9.817	0.7068
25	164.75	7.845	0.6985
30	111.11	5.291	0.6835
35	81.69	3.890	0.6794
		max_ε @ x= 50 m	
40	62.92	2.996	0.6702
45	62.94	2.997	0.6666
50	62.94	2.997	0.6614
55	62.96	2.998	0.6612
60	62.96	2.998	0.6611
70	62.98	2.999	0.6609
80	62.98	2.999	0.6604
90	62.98	2.999	0.6601

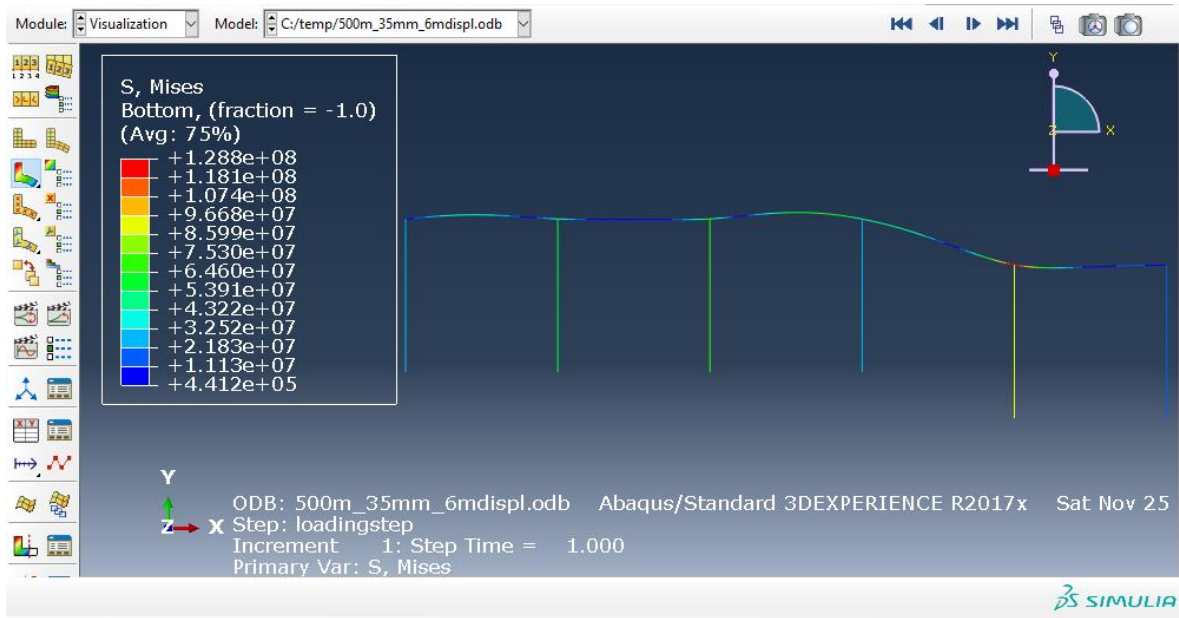
100	62.98	2.999	0.6601
Καθίζηση εδάφους = 6m/ μετατόπιση τενόντων C,D κατά 6m. /300m. μήκος αγωγού			
d_tendon (mm)	max_stress (MPa) @ x = 200 m	max_ε (10 ⁻⁴) @ x= 200 m	max_deflection (m) @ x= 50 m
22	229.11	10.91	0.9056
25	177.62	8.458	0.8997
30	123.52	5.882	0.8854
35	90.83	4.325	0.8745
		max_ε (10 ⁻⁴) @ x= 56 m	
40	76.78	3.656	0.8711
45	76.82	3.658	0.8665
50	76.86	3.660	0.8643
55	76.88	3.661	0.8612
60	76.88	3.661	0.8600
70	76.88	3.661	0.8568
80	76.92	3.663	0.8559
90	76.92	3.663	0.8535
100	76.94	3.664	0.8521



Εικόνα 5- 16. Καθίζηση εδάφους κατά 2 m σε 500 m μήκος αγωγού – Abaqus



Εικόνα 5- 17. Καθίζηση εδάφους κατά 4 m σε 500 m μήκος αγωγού – Abaqus



Εικόνα 5- 18. Καθίζηση εδάφους κατά 6 m σε 500 m μήκος αγωγού – Abaqus

Για 500 μέτρα μήκος αγωγού:

Πίνακας 5- 36. Μετατόπιση τενόντων κατά 2 m, 4 m, 6 m – μήκος αγωγού 500 m.

Καθίζηση εδάφους = 2m/ μετατόπιση τενόντων E,F κατά 2m. /500m. μήκος αγωγού			
d_tendon (mm)	max_stress (MPa) @ x = 400 m	max_ε (10 ⁻⁴) @ x= 400 m	max_deflection (m) @ x= 45 m
22	182.16	8.674	0.5635
25	141.89	6.757	0.5514
30	97.43	4.640	0.5386
35	71.25	3.470	0.5309
40	54.36	2.602	0.5259

45	49.41	2.380	0.5225
50	49.41	2.380	0.5201
55	49.41	2.380	0.5183
60	49.41	2.380	0.5169
70	49.42	2.381	0.5149
80	49.42	2.381	0.5137
90	49.42	2.381	0.5129
100	49.42	2.381	0.5122
Καθίζηση εδάφους = 4m/ μετατόπιση τενόντων E,F κατά 4m. /500m. μήκος αγωγού			
d_tendon (mm)	max_stress (MPa) @ x = 400 m	max_ε (10 ⁻⁴) @ x= 400 m	max_deflection (m) @ x= 256 m
22	205.35	9.779	0.6967
25	163.52	7.787	0.6852
30	110.90	5.281	0.6732
35	80.94	3.854	0.6661
40	60.79	2.895	0.6613
45	60.81	2.896	0.6581
50	60.81	2.896	0.6555
55	60.83	2.897	0.6542
60	60.83	2.897	0.6529
70	60.85	2.898	0.6511
80	60.85	2.898	0.6499
90	60.85	2.898	0.6491
100	60.85	2.898	0.6486

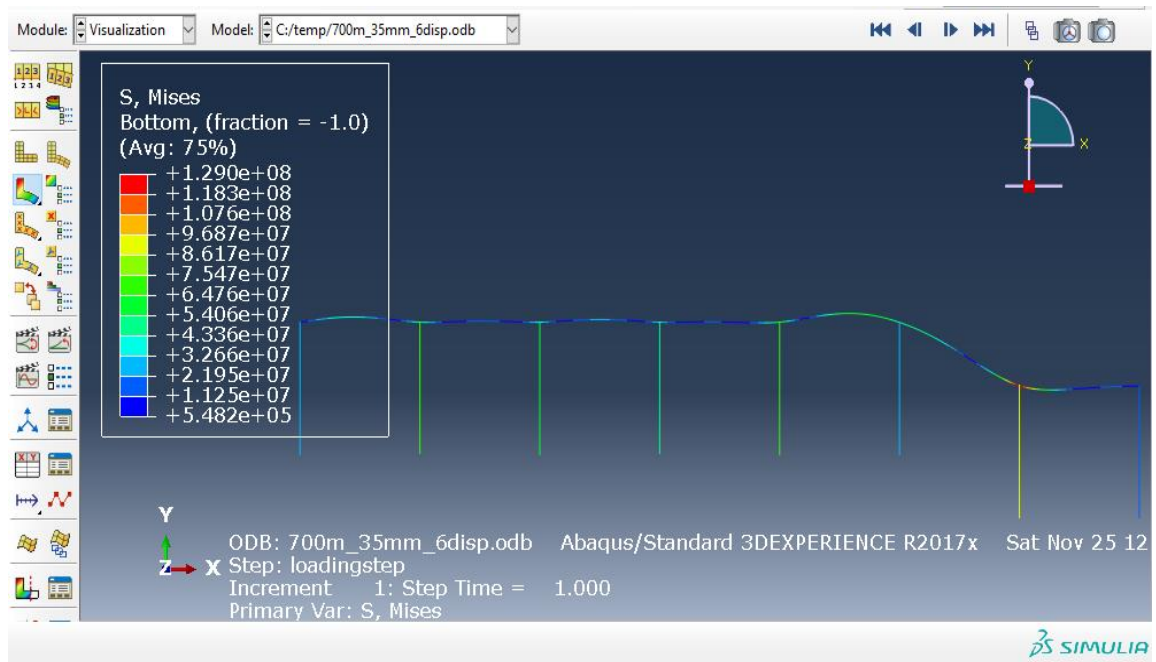
Καθίζηση εδάφους = 6 m/ μετατόπιση τενόντων Ε,Ε κατά 6 m /500 m μήκος αγωγού			
d_tendon (mm)	max_stress (MPa) @ x = 400 m	max_ε (10 ⁻⁴) @ x= 400 m	max_deflection (m) @ x= 50 m
22	228.01	10.86	0.8981
25	176.56	8.408	0.8881
30	122.92	5.853	0.8776
35	90.01	4.286	0.8713
40	75.88	3.613	0.8673
45	75.90	3.614	0.8645
50	75.93	3.616	0.8625
55	75.96	3.617	0.8621
60	75.96	3.617	0.8599
70	75.96	3.617	0.8584
80	75.99	3.619	0.8574
90	75.99	3.619	0.8567
100	76.01	3.620	0.8562



Εικόνα 5- 19. Καθίζηση εδάφους κατά 2 m σε 700 m μήκος αγωγού – Abaqus



Εικόνα 5- 20. Καθίζηση εδάφους κατά 4 m σε 700 m μήκος αγωγού – Abaqus



Εικόνα 5- 21. Καθίζηση εδάφους κατά 6 m σε 700 m μήκος αγωγού – Abaqus

Για 700 m μήκος αγωγού:

Πίνακας 5- 37. Μετατόπιση τενόντων κατά 2 m, 4 m, 6 m – μήκος αγωγού 700 m.

Καθίζηση εδάφους = 2m/ μετατόπιση τενόντων G,H κατά 2 m /700 m μήκος αγωγού			
d_tendon (mm)	max_stress (MPa) @ x = 600 m	max_ε (10 ⁻⁴) @ x= 600 m	max_deflection (m) @ x= 45 m
22	182.01	8.667	0.5482
25	141.32	6.730	0.5355
30	97.02	4.620	0.5222
35	70.98	3.380	0.5141
40	54.21	2.581	0.5089

45	49.21	2.343	0.5053
50	49.21	2.343	0.5028
55	49.21	2.343	0.5008
60	49.21	2.343	0.4994
70	49.22	2.344	0.4974
80	49.22	2.344	0.4961
90	49.22	2.344	0.4952
100	49.22	2.344	0.4945
Καθίζηση εδάφους = 4 m/ μετατόπιση τενόντων G,H κατά 4 m /700 m μήκος αγωγού			
d_tendon (mm)	max_stress (MPa) @ x = 600 m	max_ε (10 ⁻⁴) @ x= 600 m	max_deflection (m) @ x= 455 m
22	205.19	9.771	0.6808
25	163.22	7.772	0.6686
30	110.70	5.271	0.6560
35	80.62	3.839	0.6484
40	60.51	2.881	0.6434
45	60.53	2.882	0.6400
50	60.53	2.882	0.6376
55	60.55	2.883	0.6358
60	60.55	2.883	0.6345
70	60.57	2.884	0.6326
80	60.57	2.884	0.6313
90	60.57	2.884	0.6305
100	60.57	2.884	0.6299

Καθίζηση εδάφους = 6 m/ μετατόπιση τενόντων G,H κατά 6 m /700 m μήκος αγωγού			
d_tendon (mm)	max_stress (MPa) @ x = 600 m	max_ε (10 ⁻⁴) @ x= 600 m	max_deflection (m) @ x= 455 m
22	227.63	10.840	0.8808
25	176.03	8.382	0.8701
30	122.32	5.825	0.8589
35	89.65	4.269	0.8522
40	75.21	3.581	0.8478
45	75.23	3.582	0.8449
50	75.25	3.583	0.8427
55	75.25	3.583	0.8411
60	75.25	3.583	0.8399
70	75.25	3.583	0.8383
80	75.27	3.584	0.8372
90	75.27	3.584	0.8365
100	75.27	3.584	0.8359

5.7 Τελικά αποτελέσματα

Συνοψίζοντας τα παραπάνω αποτελέσματα της μελέτης, καταλήγουμε στα ακόλουθα δεδομένα:

Πίνακας 5- 38. Τελικά αποτελέσματα που θα χρησιμοποιηθούν στο project

<u>Για τον αγωγό:</u>
Dext = 660.4 mm
t = 37 mm
Steel X65
Συνολικό μήκος μη επικαθήμενου αγωγού = 500 m

<u>Για τους τένοντες:</u>
$l_{\text{tendon}} = 100 \text{ m}$
$d_{\text{tendon}} = 30 \text{ mm}$
Steel X65
Τρόπος αγκύρωσης στον πυθμένα: βαρίδια

<u>Λοιπά χαρακτηριστικά project:</u>
Μήκος μεταξύ στηρίξεων – τενόντων = 100 m
Βάθος πόντισης μη επικαθήμενου αγωγού = 1550 m
Μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση στα 1550 m : $\varepsilon_{\text{max}(h=1550\text{m})} = 0.004560$
Εσωτερική πίεση ρευστού = 15.5 MPa

Εξωτερική πίεση ($h = 1550 \text{ m}$) = 15.5 MPa
$P_{in} - P_{out} = 0$
Τρόπος πόντισης: Catenary Tow

Κεφάλαιο 6: Γενικά Συμπεράσματα & Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Όπως είδαμε παραπάνω, μελετήθηκαν διάφορες περιπτώσεις, με διαφορετικά μήκη ανυψωμένου αγωγού, διαφορετικές τιμές διαμέτρων τενόντων και διαφορετικά σενάρια καθίζησης εδάφους.

Όσον αφορά τις μετατοπίσεις των τενόντων αυτές δεν έγιναν τυχαία. Δοκιμάστηκαν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί μετατοπίσεων και παραπάνω παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα για τη δυσμενέστερη περίπτωση (πχ για μήκος αγωγού 700 m, μετατοπίστηκαν αρχικά οι 3 δεξιοί τένοντες, στη συνέχεια οι 4, στη συνέχεια οι 5, κτλ.).

Επίσης τα αποτελέσματα αφορούν μετατοπίσεις τενόντων κατά 2 m, 4 m, 6 m μόνο κατά τον κατακόρυφο άξονα y. Για ενδιάμεσες τιμές μετατοπίσεων θα γίνει γραμμική παρεμβολή.

Σχετικά με τη διάμετρο των τενόντων, δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές διαμέτρου. Ξεκινήσαμε με τη μικρότερη δυνατή διάμετρο που ήταν τα 22 mm, βρήκαμε τα αποτελέσματα, εν συνεχεία προχωρήσαμε στα 25 mm και προχωρήσαμε την επαναληπτική διαδικασία με βήμα τα 5 mm έως τα 60 mm και στη συνέχεια προχωρήσαμε με βήμα τα 10 mm φτάνοντας τα 100 mm. Τέτοιες τιμές βέβαια, άνω των 60 mm, είναι αρκετά μεγάλες και δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στο πρότζεκτ. Παρόλα αυτά η μελέτη των διαμέτρων αυτών έγινε καθαρά σε θεωρητικό πλαίσιο, για να δούμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Παρατηρούμε ότι από κάποια τιμή διαμέτρου και μετά, η επιλογή μεγαλύτερης διαμέτρου δεν παίζει κάποιο ουσιαστικό ρόλο. Οι προκύπτουσες μέγιστες τάσεις σταθεροποιούνται και αντίστοιχα και οι παραμορφώσεις. Π.χ. για μήκος αγωγού 700 m και μετατόπιση τενόντων 4 m, οι τιμές των τροπών για διαμέτρους από 35 mm και άνω είναι σχεδόν ίσες.

Επίσης, όσον αφορά το μέγιστο βέλος κάμψης που παρατηρείται σε ένα ανυποστήρικτο μήκος μεταξύ τενόντων, αυτό φθίνει όσο μεγαλώνει το μήκος αγωγού. Βέβαια, και στις 3 περιπτώσεις που εξετάσαμε, για μήκος αγωγού 300, 500, 700 m, η τιμή αυτή είναι μέσα σε λογικά πλαίσια, αφού δεν ξεπερνά το 1 m.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε και μελετήθηκε η ιδέα ενός μη επικαθήμενου πλωτού αγωγού. Όσον αφορά το κομμάτι της σχεδίασης, παραλείφθηκαν ορισμένα τμήματα τα οποία θα μπορούσαν να μελετηθούν επιπλέον. Αυτά είναι τα περιβαλλοντικά δεδομένα, όπως οι καταστάσεις θάλασσας και οι επιδράσεις της στον αγωγό, το προφίλ των υποθαλάσσιων ρευμάτων, οι θερμοκρασιακές μεταβολές, η ανάπτυξη θαλάσσιων μικροοργανισμών επάνω στα εξωτερικά τοιχώματα του αγωγού κ.α. Επίσης δε μελετήθηκαν φαινόμενα υποπίεσης στον αγωγό και πως θα μπορούσαν να αντιμετωπισθούν, καθώς και δυναμικά φαινόμενα όπως η πρόσκρουση βράχων επάνω στον αγωγό. Τα θέματα αυτά όπως και άλλα παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον και θα μπορούσαν να αναπτυχθούν σε μία επικήριμη, σχετική με το θέμα εργασία.

Βιβλιογραφία

1. Gerwick, Ben C. Construction of Marine and Offshore Structures. CRC Press, 2007.
2. Design, Construction, Operation and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines (Limit State Design), API recommended practice 1111, Fourth edition, December 2009
3. Spyros A. Karamanos, Arnold M. Gresnigt, Gert J. Dijkstra - Geohazards and Pipelines_ State-of-the-Art Design Using Experimental, Numerical and Analytical Methodologies, 2021
4. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement by Donald L. Wells and Kevin J. Coppersmith, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002, August 1994
5. Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston, Jr., John T. DeWolf, David F. Mazurek – Mechanics of Materials 8th ed., 2018
6. Papyrus Larousse Britannica, 2007
7. Stelios Kyriakides & Edmundo Corona, Mechanics of Offshore Pipelines, Vol.1: Buckling and Collapse, 2007
8. E.T. Richard, Dean – Offshore Geotechnical Engineering, 2009
9. “SP 6 - Offshore Geohazards.” NGI,
www.ngi.no/en/projects/icg---international-center-for-geohazards/sp-6---offshore-geohazards/
10. Hawari, S.A. Ahmad, et al. “Depth Prognosis in a Brown Field: When 6m Certainty Is Inadequate.” EarthDoc, European Association of Geoscientists & Engineers, 12 Apr. 2021,
www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.202170018
11. “Verdict Media Limited.” Hydrocarbons Technology,
www.hydrocarbons-technology.com/projects/bluestream-pipeline/.
12. Offshore Geohazards Industry Implications and Geoscientist Role,
www.researchgate.net/publication/279177545_Offshore_Geohazards_Industry_Implications_and_Geoscientist_Role
13. Multi-hazard disaster studies: Monitoring, detection, recovery, and management, based on emerging technologies and optimal techniques, International Journal of Disaster Risk Reduction.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212420919310398>

14. On the Structural Integrity of S-Lay Method of Pipeline Installation, [On the Structural Integrity of S-Lay Method of Pipeline Installation \(sciepub.com\)](#).
15. DrillingFormulas.Com. “Pipeline Towing Method for Pipeline Installation.” Drilling Formulas and Drilling Calculations, 31 July 2016
www.drillingformulas.com/pipeline-towing-method-for-pipeline-installation/#:~:text=Pipeline%20towing%20method%20is%20useful,and%20towed%20into%20the%20sea .
16. Swart, Pieter. “Dry Precommissioning Offers Subsea Pipeline Testing Alternative.” Offshore, Offshore, 20 Nov. 2020,
www.offshore-mag.com/pipelines/article/14185083/sealeopard-engineering-dry-precommissioning-offers-subsea-pipeline-testing-alternative
17. Kentucky Geological Survey Landslide Inventory: From Design to Application, Matthew M. Crawford, 2014
18. “Reel-Lay.” Huisman Equipment,
www.huismanequipment.com/en/products/pipelay/reel_lay#:~:text=Another%20method%20for%20the%20installation,reel%2C%20in%20one%20continuous%20length
19. Kitsati, Christine. “Γνώρισε Τα Υποθαλάσσια Καλώδια Που Συνδέουν Τον Κόσμο.” Digital Life!, 5 Aug. 2012,
www.digitallife.gr/undersea-cables-that-connect-the-world-96802
20. “1.6. Pipelines - 1. Introduction to Offshore Pipelines.” Offshore Engineering, 11 Oct. 2021,
www.offshoreengineering.com/oil-gas-pipelines/1-introduction-to-offshore-pipelines/ .
21. Gas Supply Changes in Turkey - Oxford Institute for Energy Studies,
www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2018/01/Gas-Supply-Changes-in-Turkey-Insight.
22. Bai Y. & Bai Q. (2010) Subsea Engineering Handbook.

