



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

## Μελέτη εγκατάστασης μεταλλικού υποθαλάσσιου αγωγού



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ειρήνη-Αθηνά Μάτα

Επιβλέπων: Θανόπουλος Παύλος

Αθήνα, Νοέμβριος 2021

ΕΜΚ ΜΕ 2021/10

Μάτα Ε. Α. (2021).  
Μελέτη εγκατάστασης μεταλλικού υποθαλάσσιου αγωγού  
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2021/10  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Mata E. A. (2021).  
Steel offshore pipeline installation methods  
Diploma Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2021/10  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece



Copyright © Ειρήνη Α.  
Μάτα, 2021 Με επιφύλαξη  
παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέως. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς την συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Eirini A.  
Mata, 2021 All Rights  
Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).





# Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη .....	3
Abstract .....	4
Ευχαριστίες .....	5
1 Εισαγωγή .....	7
2 Υποθαλάσσιοι Αγωγοί.....	9
2.1 Ιστορική αναδρομή.....	9
2.2 Αγωγοί.....	9
2.2.1 Κατηγοριοποίηση με βάση τη χρήση.....	9
2.2.2 Κατηγοριοποίηση με βάση το υλικό κατασκευής του αγωγού .....	10
3 Μέθοδοι τοποθέτησης .....	13
3.1 Γενικά.....	13
3.2 Κατηγορίες σκαφών .....	14
3.3 Lay-Methods .....	16
3.3.1 S-lay .....	16
3.3.2 J-lay .....	17
3.3.3 Reel Lay .....	20
3.4 Έλεγχος τάσεων καμπύλων τμημάτων – Φάση τοποθέτησης.....	23
3.4.1 Γενικά.....	23
3.4.2 Τάσεις θετικής καμπύλωσης .....	24
3.4.3 Τάσεις αρνητικής καμπύλωσης.....	25
3.5 Μέθοδοι ρυμούλκησης.....	28
3.5.1 Γενικά.....	28
3.5.2 Ρυμούλκηση στον πυθμένα .....	31
3.5.3 Ρυμούλκηση άνω του πυθμένα .....	32
3.5.4 Ρυμούλκηση ελεγχόμενου βάθους .....	33
3.5.5 Επιφανειακή ρυμούλκηση.....	34
3.6 O-lay Methods.....	35
3.6.1 Γενικά.....	35
4 Κανονιστικά πλαίσια .....	41
4.1 Γενικά κανονιστικά πλαίσια σχεδιασμού υποθαλάσσιου αγωγού .....	41
4.2 Ορολογία .....	42
4.3 Φιλοσοφία ασφάλειας .....	43
5 Προετοιμασία για τοποθέτηση .....	45
5.1 Γενικά.....	45
5.2 Δυσκολίες.....	46
5.3 Εκσκαφές.....	46
5.4 Στηρίξεις.....	48
6 Προσομοίωση μεθόδου S-lay και παραμετρική διερεύνηση.....	51
6.1 Γενικά.....	51
6.2 Μοντελοποίηση.....	51
6.3 Αποτελέσματα .....	61
7 Συμπεράσματα.....	87
7.1 Γενικά.....	87

7.2	Επιλογή μεθόδου .....	87
7.3	Προσομοίωση .....	87
8	Βιβλιογραφία .....	89
8.1	Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία .....	89
8.2	Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία .....	90
Παράρτημα Α	.....	91
A.1	Υπολογισμός υδροστατικής πίεσης.....	91
A.2	Υπολογισμός τάσης στον αγωγό λόγω υδροστατικής πίεσης .....	92
A.3	Υπολογισμός συνολικής αναπτυσσόμενης τάσης στον αγωγό .....	94



## **Μελέτη εγκατάστασης μεταλλικού υποθαλάσσιου αγωγού**

Μάτα Ε. Α. (Επιβλέπων: Θανόπουλος Π.)

### **Περίληψη**

Οι μεταλλικοί αγωγοί είναι αντικείμενο που απασχολεί τον πολιτικό μηχανικό τα τελευταία χρόνια, καθώς η χρήση τους σε ξηρά και θάλασσα αυξάνεται συνεχώς. Ιδιαίτερη είναι η μελέτη της τοποθέτησής τους στην θάλασσα, αντικείμενο που έχει μελετηθεί κυρίως για τις περιοχές του Ατλαντικού, του Ινδικού και Ειρηνικού Ωκεανού, λόγω των κοιτασμάτων που διαθέτουν και λόγω της ανάγκης εκμετάλλευσής τους. Δεν είναι λίγες οι εφαρμογές βέβαια και στη Βόρεια Θάλασσα και τη Μεσόγειο όπου τα τελευταία χρόνια υλοποιείται ο ΤΑΠ.

Στην παρούσα εργασία, δίνεται έμφαση στις μεθόδους τοποθέτησης αγωγών, στα πλεονεκτήματα και τις ιδιαιτερότητες κάθε μεθόδου, καθώς και στη σύγκριση διαφόρων μεθόδων μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στις μεθόδους Lay αλλά και στις Tow και στο ποιες από αυτές ενδείκνυνται για βαθιά ή ρηχά ύδατα και υπό ποιες προϋποθέσεις.

Καταληκτικά παρουσιάζονται δύο παραμετρικές προσομοιώσεις της τοποθέτησης ενός αγωγού με την μέθοδο S-lay σε ρηχά νερά, με την μεν πρώτη επίλυση να εστιάζει σε παραμετροποίηση της διαμέτρου του αγωγού και η δε δεύτερη σε παραμετροποίηση της ακτίνας καμπύλωσης που εφαρμόζεται σύμφωνα με την S-lay μέθοδο. Στόχος αυτών των επιλύσεων είναι να προσδιορισθούν συγκριτικά διαγράμματα σχετικά με τις αναπτυσσόμενες στον αγωγό τάσεις σε κάθε περίπτωση και να δοθεί μία πρόταση που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μία βέλτιστη επίλυση σε παρόμοιες συνθήκες.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS  
EMK ME 2021/10

## **Steel offshore pipeline installation methods**

Mata E. A. (supervised by: Thanopoulos P.)

### **Abstract**

Steel pipelines have been an object of concern for civil engineers in recent years, as their use, on land and at sea, is constantly increasing. The study of placement methods in the sea is really interesting. It's an object that has been studied mainly for the areas of the Atlantic, Indian and Pacific Oceans, due to the extreme need because of the oil fields. Of course, there are many applications in the North Sea and the Mediterranean too, where the ARF has been implemented as it is known.

In the present diploma thesis, we emphasize on the methods of laying pipelines, the advantages and peculiarities of each method, as well as the comparison of different methods with each other. More specifically, reference is made to Lay and Tow Methods and to which of them are suitable for deep or shallow waters and under what conditions.

Finally, two parametric simulations of the placement of a pipeline, with the S-lay method in shallow water, are presented, with the first solution focusing on parameterization of the pipeline diameter and the second on parameterization of the curvature radius applied according to the S-lay method. The purpose of these solutions is to determine comparative diagrams of the stresses developing in the pipeline in each case and to give a proposal that can be used for an optimal solution in similar pipe laying conditions.

## Ευχαριστίες

Με την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ολοκληρώνω τον κύκλο των μεταπτυχιακών σπουδών μου και νιώθω ευγνώμων για όσα έμαθα στη μέχρι σήμερα ακαδημαϊκή πορεία μου. Πέρα από το γνωστικό αντικείμενο, ήταν πολύ σημαντικό για εμένα το γεγονός ότι είχα ανθρώπους δίπλα μου στους οποίους μπορούσα να στηριχτώ για ό,τι και αν με απασχολούσε.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υπεύθυνο καθηγητή μου, κ. Θανόπουλο Παύλο, Λέκτορα της σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο αντικείμενο. Η επιστημονική του καθοδήγηση, οι συμβουλές και το ενδιαφέρον του, αλλά και συνολικότερα ο ανθρώπινος τρόπος προσέγγισής του, συνέβαλαν καθοριστικά στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, αντιμετωπίζοντάς την όχι μόνο ως ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον αντικείμενο, αλλά ως μία ευκαιρία ουσιαστικής μελέτης.

Επίσης δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τους φίλους μου, για όλη την βοήθεια και την στήριξη που μου πρόσφεραν σε αυτό το διάστημα, που ήταν δίπλα μου πάντα για να με βοηθήν να κάνω τις δύσκολες στιγμές, εύκολες και δημιουργικές.

Τέλος ένα μεγάλο 'ευχαριστώ' οφείλω στην οικογένειά μου για την υποστήριξη, την κατανόηση και την ώθηση που μου έδιναν όλα αυτά τα χρόνια να ακολουθώ τα όνειρα μου και να εξελίσσομαι ως άνθρωπος και ως μέλος του ευρύτερου κοινωνικού συνόλου.



# 1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μελέτη των μεθόδων τοποθέτησης μεταλλικών υποθαλάσσιων αγωγών καθώς επίσης παρατίθεται ένα κεφάλαιο στο οποίο γίνεται σύγκριση των εντατικών μεγεθών και των μετακινήσεων κατά την τοποθέτηση του αγωγού με τη μέθοδο S-lay, για διάφορες πιθανές διαμέτρους αγωγού και καμπυλότητες, με τη χρήση υπολογιστικού εργαλείου πεπερασμένων στοιχείων.

Η ανάπτυξη της βιομηχανίας καθώς και οι αυξανόμενες απαιτήσεις του κόσμου σε νερό, προϊόντα υδρογονανθράκων και γενικότερα ρευστών και αέριων υλικών χρήσιμων σε καθημερινή χρήση, οδήγησε στη δημιουργία αγωγών για την κάλυψη των αναγκών σε περιοχές μακρινές από την πηγή του κάθε αγαθού. Υπέργειοι αγωγοί έχουν κάνει την εμφάνισή τους από τη ρωμαϊκή ακόμα περίοδο, τα περίφημα ρωμαϊκά υδραγωγεία.

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που δημιουργούσε η έκθεση των αγωγών στο φυσικό περιβάλλον, (έντονη φθορά λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών, κατάληψη μεγάλων τμημάτων γης, προβλήματα ρύπανσης κατά τη χρήση για μεταφορά λυμάτων) έκαναν την εμφάνισή τους οι υπόγειοι αγωγοί. Ιδιαίτερης σημασίας ήταν η κατασκευή υποθαλάσσιων αγωγών, καθώς κατάφεραν να μεταφέρουν το εκάστοτε υλικό σε περιοχές, όπου η μεταφορά γινόταν μέχρι προσφάτως με τη χρήση ειδικών πλοιαρίων, κάτι ιδιαίτερα δύσκολο και κοστοβόρο.

Κατά τη μελέτη για την κατασκευή ενός υποθαλάσσιου αγωγού, είναι απαραίτητη η εξασφάλιση μίας ορθής χάραξης, ώστε να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη λειτουργικότητα και η αποφυγή όσο το δυνατόν περισσότερων γεωκινδύνων οι οποίοι προκαλούν παραμένουσες εδαφικές παραμορφώσεις και πιθανόν αλλοιώσεις στον ίδιο τον αγωγό. Επιπλέον είναι εμφανές ότι ο σχεδιασμός πρέπει να οδηγεί στην ανεμπόδιση και ασφαλή λειτουργία του αγωγού.

Είναι εμφανές επομένως το πόσο σημαντικό είναι να μελετάται η τοποθέτηση του αγωγού, καθώς κατά τη διαδικασία αυτή αναπτύσσονται στον αγωγό τάσεις διαφορετικές από αυτές που αναπτύσσονται κατά την φάση της λειτουργίας του και οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στο σχηματισμό αλλοιώσεων επικίνδυνων για το περιβάλλον, κυρίως αν οι αγωγοί μεταφέρουν πετρέλαιο.



## 2 Υποθαλάσσιοι Αγωγοί

### 2.1 Ιστορική αναδρομή

Όπως αναφέρθηκε και εισαγωγικά, η ανάπτυξη της βιομηχανίας και η γενικότερη εξέλιξη της κοινωνίας δημιούργησε απαιτήσεις για την κάλυψη των οποίων δημιουργήθηκαν οι αγωγοί, θαλάσσιοι και μη. Από τα τέλη του 1890 ξεκίνησαν οι πρώτες προσπάθειες για εξόρυξη και μεταφορά πετρελαίου στις θαλάσσιες περιοχές. Οι υπεράκτιοι αγωγοί θεωρούνται, με τον καιρό, κατασκευές αναγκαίες για την μείωση της εξάρτησης από τα πετρελαιοφόρα, τα οποία καλούνται να αντιμετωπίσουν κακές καιρικές συνθήκες ή ακόμα και πειρατεία, καθυστερώντας έτσι τη μεταφορά ή ακόμα και κάνοντάς την αδύνατη. Ο πρώτος θαλάσσιος αγωγός πετρελαίου παγκοσμίως, κατασκευάζεται το 1944 στην περιοχή μεταξύ Γαλλίας και Ηνωμένου Βασιλείου, έχει την ονομασία Pluto και είναι έργο που ανέλαβαν βρετανοί μηχανικοί, πετρελαϊκές εταιρείες και οι βρετανικές ένοπλες δυνάμεις, κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, προς υποστήριξη της επιχείρησης Όβερλορντ για την απόβαση των Συμμάχων στην Νορμανδία τον Ιούνιο του ίδιου έτους.

Άλλα σημαντικά έργα θαλάσσιων αγωγών στην ευρύτερη περιοχή της βορειοδυτικής Ευρώπης είναι οι αγωγοί North Stream. Ο πρώτος κατασκευάστηκε το 2011 ενώ ο δεύτερος βρίσκεται ακόμα υπό κατασκευή έχοντας ολοκληρωθεί οι εργασίες του 90% του αγωγού με άγνωστη όμως, μέχρι τώρα, την ημερομηνία παράδοσης του έργου. Στο τμήμα της νοτιοανατολικής Ευρώπης, στην περιοχή της Αδριατικής σημαντική είναι η ύπαρξη του αγωγού Trans Adriatic Pipeline (TAP) για γεωπολιτικούς και βιομηχανικούς λόγους. Το νεότερο και ιδιαίτερα σημαντικό έργο υπεράκτιου και χερσαίου αγωγού φυσικού αερίου, είναι αυτό του αγωγού East Med ή αλλιώς αγωγός Ανατολικής Μεσογείου, το οποίο έχει στόχο την ένωση των ενεργειακών πηγών της Ανατολικής Μεσογείου με την ηπειρωτική Ελλάδα μέσω Κύπρου και Κρήτης. Θα συνδεθεί με υφιστάμενους αγωγούς της περιοχής της Μεσογείου όπως τον Poseidon και τον IGB και θα έχει μήκος περίπου 1900[km] θα φτάνει σε βάθος 3 [km] και θα έχει χωρητικότητα 10δισ [m<sup>3</sup>].

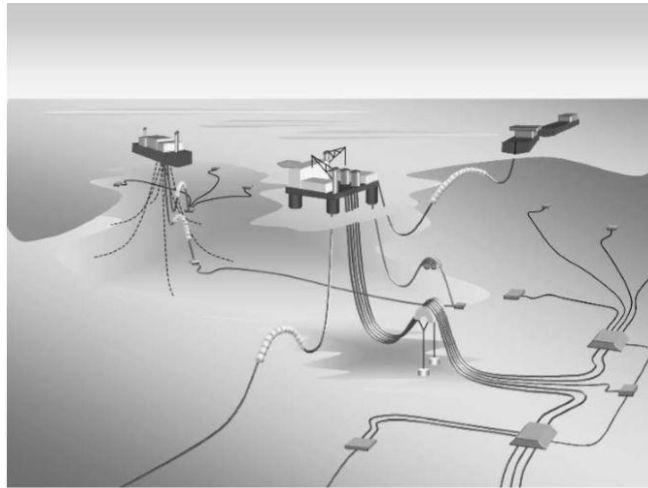
### 2.2 Αγωγοί

#### 2.2.1 Κατηγοριοποίηση με βάση τη χρήση

Όλοι οι αγωγοί, υποθαλάσσιοι και χερσαίοι χρησιμοποιούνται για την κάλυψη ορισμένων απαιτήσεων. Οι πιο συνήθεις χρήσεις τους αφορούν τη μεταφορά νερού και υδρογονανθράκων όπως το αργό πετρέλαιο και τα τελευταία χρόνια το φυσικό αέριο. Κάθε αγωγός μπορεί να λαμβάνει άλλη «θέση» στην παραγωγική αλυσίδα ανάλογα με το τι ανάγκες καλείται να καλύψει. Η χρήση των αγωγών και το υλικό που καλούνται να μεταφέρουν δημιουργούν κάποιες γενικές κατηγορίες κατάταξής τους Σχήμα 2.1 :

- Αγωγοί διανομής υδρογονανθράκων αερίου από τα διάφορα υποθαλάσσια σημεία εξόρυξης (κοιτάσματα) σε υποθαλάσσιους συλλέκτες.
- Αγωγοί μεταφοράς υδρογονανθράκων αερίου από τους υποθαλάσσιους συλλέκτες στις υπεράκτιες πλατφόρμες επεξεργασίας (jackets).

- Αγωγοί διανομής υδρογονανθράκων μεταξύ των jacket.
- Κεντρικοί αγωγοί μεταφοράς των υδρογονανθράκων από τα jacket σε χερσαίους συλλέκτες.
- Αγωγοί διανομής νερού ή χημικών ουσιών από τις πλατφόρμες παραγωγής, διαμέσου υποβρυχίων συλλεκτών σε φρεάτια έγχυσης.



Σχήμα 2.1: Υποθαλάσσιοι αγωγοί διαφόρων χρήσεων.

### 2.2.2 Κατηγοριοποίηση με βάση το υλικό κατασκευής του αγωγού

Αρκετά διαδεδομένη είναι η χρήση υλικών όπως το PVC και η Πολυεθυλένη (PE) για την κατασκευή αγωγών καθώς η PE είναι αρκετά μαλακό ως υλικό και συνεπώς εύκολα μεταχειρίσιμο με μεγάλη διάρκεια ζωής καθώς επίσης και το PVC έχει πολύ μικρό κόστος Σχήμα 2.2. Εντούτοις, η πλειοψηφία των αγωγών παγκοσμίως που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά πετρελαίου, φυσικού αερίου ή νερού είναι κατασκευασμένοι από ανθρακικό χάλυβα και ανοξείδωτο ατσάλι. Οι καλές μηχανικές του ιδιότητες σε συνδυασμό με τη δυνατότητα ενίσχυσης της αντοχής του σε διάβρωση με χρήση ειδικών μεθόδων και υλικών αλλά και με την εύκολη και οικονομική πρόσβαση σε αυτόν συνεισφέρουν σημαντικά στην επιλογή του ως κατασκευαστικό υλικό. Επίσης το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα είναι σαφώς μικρότερο από αυτό του πλαστικού Σχήμα 2.2. Επίσης, υπάρχουν και οι αγωγοί από σύνθετα υλικά τα λεγόμενα εύκαμπτα καλώδια.



Σχήμα 2.2: Είδη αγωγών από PVC και χάλυβα αντίστοιχα.

Για την επιλογή του αγωγού που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι διάφοροι παράγοντες που τον επηρεάζουν.

- Νερό: ενώ η ύπαρξη του πετρελαίου έχει την ιδιότητα να δημιουργεί ένα ιξώδες φιλμ στην μεταλλική επιφάνεια παρέχοντας έτσι ένα βαθμό αναστολής της



διάβρωσης, η παρουσία νερού αλλάζει το μεταλλικό επιφανειακό περιβάλλον οδηγώντας σε απότομη αύξηση του ρυθμού διάβρωσης. Το ποσοστό εισχώρησης του νερού που προκαλεί αυτή την αύξηση δεν είναι αυστηρά καθορισμένο αλλά έχει λαμβάνεται περίπου 30%. Γνωρίζοντας λοιπόν την περιεκτικότητα σε νερό στον αγωγό αλλά και την στάθμη του, αξιολογώντας παράλληλα και την αναμενόμενη διάρκεια ζωής μπορεί κανείς να καταλήξει στην καλύτερη τεχνο-οικονομική επιλογή.

- **Αέρια:** τέσσερα είναι τα κύρια αέρια τα ποσοστά των οποίων μπορούν να επηρεάζουν την επιλογή υλικού. Το οξυγόνο, το διοξείδιο του άνθρακα, το υδρογόνο και το υδρόθειο. Το οξυγόνο όπως είναι γνωστό επιταχύνει σημαντικά τη διαδικασία της διάβρωσης και επιθυμητός είναι ο περιορισμός του εκτός αγωγού. Το διοξείδιο του άνθρακα κατά την αντίδρασή του με το υφιστάμενο νερό παράγει ανθρακικό οξύ αυξάνοντας έτσι τη διάβρωση από τη δημιουργία όξινου pH. Ο κύριος κίνδυνος τόσο με το υδρόθειο όσο και με το υδρογόνο είναι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα που μπορεί να επιφέρει η απελευθέρωσή τους. Με το υδρόθειο πιο συγκεκριμένα υπάρχει κίνδυνος για την υγεία καθώς η τοξικότητά του είναι τέτοια που μπορεί να προκαλέσει θάνατο ακόμη και σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Παρόλο λοιπόν που η ανεξέλεγκτη απελευθέρωσή του στην ατμόσφαιρα πρέπει να αποφεύγεται με κάθε κόστος, η ύπαρξή του στον αγωγό δρα θετικά καθώς συμβάλλει στη δημιουργία ενός προστατευτικού φιλμ θείουχου σιδήρου στη μεταλλική επιφάνεια.
- **Πίεση και Θερμοκρασία:** αύξηση της πίεσης λειτουργίας οδηγεί σε αύξηση και της μερικής πίεσης του περιεχόμενου στον αγωγό αερίου, ενισχύοντας έτσι τη διαβρωτική ικανότητα του ίδιου του αερίου. Αντίστοιχα, στις περισσότερες περιπτώσεις, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί στην ένταση του φαινομένου της διάβρωσης. Σε αυτή την περίπτωση όμως είναι σημαντικό να γνωρίζουμε και τη χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας καθώς είναι πιθανή η απαίτηση υλικών ανθεκτικών σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπως ο χάλυβας χαμηλής θερμοκρασίας, για την αποφυγή ρηγματώσεων λόγω αστοχίας του υλικού.
- **Ρυθμός Ροής:** σημαντική επίδραση έχει η ροή του υλικού που θα περιέχεται στον αγωγό, καθώς και η υψηλή αλλά και η χαμηλή, έως στάσιμη, ταχύτητα ροής μπορεί να προκαλέσει ένταση του φαινομένου της διάβρωσης.
- **pH:** τρία είναι τα κύρια συστατικά που επηρεάζουν περισσότερο το pH, το διοξείδιο του άνθρακα και το υδρόθειο, τα οποία προκαλούν μείωσή του και τα διττανθρακικά άλατα που προκαλούν αύξησή του. Οι ακραίες τιμές του pH είναι αυτές που εντείνουν και τη διαδικασία της διάβρωσης.
- **Ζωή σχεδιασμού:** αυτός ο παράγοντας επηρεάζει κυρίως το κόστος της επιλογής υλικού καθώς είναι πιθανό για το ίδιο περιβάλλον εάν δεν απαιτείται μεγάλη διάρκεια ζωής να επιτραπεί η χρήση ανθρακικού χάλυβα, χωρίς επιπλέον μελέτη του φαινομένου της διάβρωσης ενώ η απαίτηση μεγάλης διάρκειας ζωής να οδηγήσει όχι μόνο σε εφαρμογή μέτρων, ελέγχου της διάβρωσης, αλλά ακόμη και σε ένα υλικό υψηλότερης ποιότητας.



## 3 Μέθοδοι τοποθέτησης

### 3.1 Γενικά

Όπως στα περισσότερα έργα του μηχανικού, έτσι και στους περισσότερους υπεράκτιους αγωγούς, ο σχεδιασμός του πραγματοποιείται σε τρία στάδια, αυτό της προμελέτης, της οριστικής μελέτης και τέλος καταλήγει στο στάδιο της μελέτης εφαρμογής που είναι και το τελικό στάδιο, σύμφωνα με τους λεπτομερείς υπολογισμούς του οποίου εκτελούνται όλες οι απαραίτητες εργασίες. Στο στάδιο της προμελέτης οι μηχανικοί αλλά και όσοι εμπλέκονται στο έργο, καλούνται να αντιμετωπίσουν θέματα όπως η τεχνική σκοπιμότητα και οι περιορισμοί που δημιουργούνται, είτε λόγω των απαιτήσεων του εργοδότη είτε λόγω των γεωμορφολογικών συνθηκών.

Σε αυτό το στάδιο μελετώνται όλες οι πιθανές λύσεις ώστε να επιλεγεί στο τέλος αυτού η βέλτιστη, σύμφωνα με τα δεδομένα του εκάστοτε έργου. Στο στάδιο της οριστικής μελέτης ορίζεται, με κάποια μεγαλύτερη λεπτομέρεια, ο σχεδιασμός του αγωγού λαμβάνοντας υπόψη πάντα τους κύριους πυλώνες σχεδιασμού, την ασφάλεια την λειτουργικότητα, την οικονομία και την αισθητική, όπου αυτό είναι δυνατόν, αλλά και τηρώντας όλα τα απαιτούμενα κανονιστικά πλαίσια. Στην φάση πλέον της μελέτης εφαρμογής καλείται η ομάδα σχεδιασμού να παραδώσει ένα ολοκληρωμένο πακέτο της κατασκευής του αγωγού με επαρκείς λεπτομέρειες για την αποφυγή σφαλμάτων κατά την κατασκευή.

Η ορθή χάραξη του αγωγού, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, εξυπηρετεί όχι μόνο στην κάλυψη των απαιτήσεων του αγαθού αλλά και στην ανεμπόδιστη λειτουργία του ίδιου του αγωγού. Υπάρχουν ορισμένες προτάσεις που καλό θα ήταν να εφαρμόζονται και οι οποίες εξασφαλίζουν την αποτελεσματικότητα του έργου. Σε περίπτωση απουσίας εγκάρσιων στηρίξεων, λόγω πιθανών γεωλογικών ή οικονομικών περιορισμών, η μέγιστη οριζόντια καμπυλότητα εξαρτάται από την τριβή του εδάφους και την εφαρμοσμένη ένταση. Προτείνεται η απόσταση μεταξύ δύο αντίθετων καμπυλοτήτων να είναι τουλάχιστον ίση με το βάθος του νερού καθώς επίσης στην λήξη του ο αγωγός θα πρέπει να είναι ευθύγραμμος για τουλάχιστον 500-1000[m].

Από το στάδιο της προμελέτης ακόμα ο μηχανικός καλείται να αποφασίσει την μέθοδο τοποθέτησης του αγωγού στον πυθμένα καθώς οι διαφορές των μεθόδων είναι ιδιαίτερες και τα κόστη τους διαφορετικά. Οι πιο κοινές μέθοδοι τοποθέτησης των υποθαλάσσιων αγωγών είναι οι λεγόμενες Lay-Methods οι οποίες χωρίζονται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες:

- S-lay (συνήθης εφαρμογή σε αβαθή νερά)
- J-lay (συνήθης εφαρμογή σε μεσαίου και μεγάλου βάθους νερά)
- Reel lay (συνήθης εφαρμογή σε βαθιά νερά και με μεγάλες πιέσεις)

Αβαθείς χαρακτηρίζονται οι περιοχές με βάθος πυθμένα περί των 500[m], μεσαίου βάθους θα χαρακτηρίζαμε τις περιοχές των 1000[m] ενώ βαθιά νερά όσα υπερβαίνουν τα 2[km].

Άλλες μέθοδοι κατασκευής λιγότερο διαδεδομένες αλλά εξίσου σημαντικές είναι οι Tow-Methods οι οποίες και αυτές κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Bottom tow
- Off-Bottom tow
- Mid-Depth tow
- Surface tow

Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλα τα βάθη νερών με την προϋπόθεση ότι έχουν υπολογιστεί οι εκάστοτε απαιτήσεις κατά τον σχεδιασμό.

### 3.2 Κατηγορίες σκαφών

Τα σκάφη που χρησιμοποιούνται κατά την τοποθέτηση ενός αγωγού ποικίλουν ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες και τις απαιτήσεις της κάθε μεθόδου αλλά και των επικρατουσών συνθηκών, και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις βασικές γενιές.

- Πρώτης γενιάς
- Δεύτερης γενιάς
- Τρίτης γενιάς
- Τέταρτης γενιάς

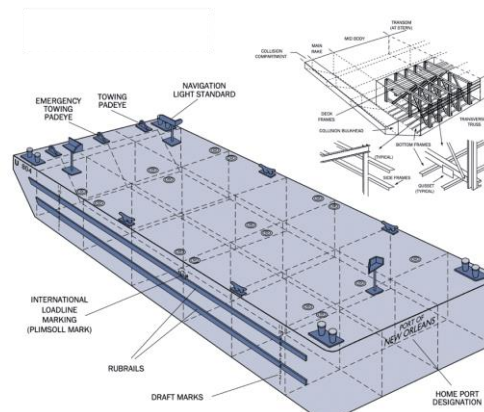
Στην πρώτη γενιά ανήκουν τα πλοία με επίπεδη καρίνα, έχουν μορφή πλωτής πλατφόρμας, και ενδείκνυνται για χρήση σε πολύ ρηχά νερά σε θαλάσσιες και μη περιοχές αλλά ακόμη και βαλτώδεις. Σχήμα 3.1



Σχήμα 3.1: Πλοίο πρώτης γενιάς.

Τα πλοία που ανήκουν στη δεύτερη γενιά, είναι τα πιο ευρέως διαδεδομένα για την εφαρμογή της μεθόδου τοποθέτησης S-lay και μορφολογικά είναι πανομοιότυπα με αυτά της πρώτης γενιάς, έχουν όμως το χαρακτηριστικό ότι φέρουν οπωσδήποτε τέσσερις έως δεκατέσσερις θέσεις προσάρτησης εξαρτημάτων αγκυροβόλησης για την εξασφάλιση της ευστάθειάς τους. Οι χρήσεις τους ποικίλουν στη γραμμή κατασκευής του εκάστοτε αγωγού και για τον λόγο αυτό θα μπορούσε κανείς να ορίσει τέσσερις κύριες κατηγορίες σύμφωνα με τη θέση τους στην παραγωγική διαδικασία.

- Σκάφη χειρισμού αγκυρίων
- Σκάφη εξασφάλισης προμηθειών και πρώτων υλών
- Σκάφη που φέρουν μεμονωμένα τμήματα αγωγού
- Ρυμουλκά σκάφη

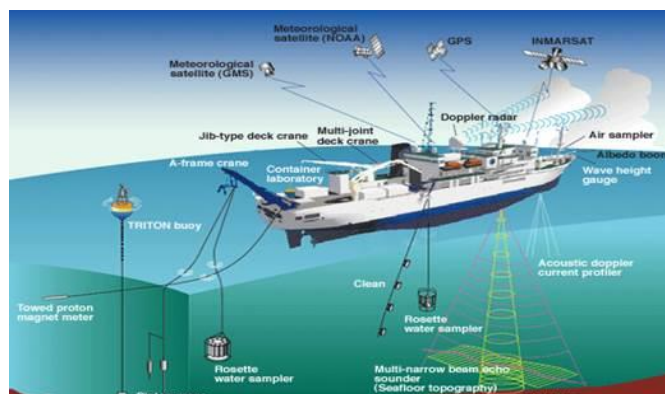


Τα πλοία της τρίτης γενιάς είναι τα πιο σπάνια αυτή τη στιγμή καθώς χρησιμοποιούνται ελάχιστα παγκοσμίως. Είναι πλοία ημι-υποβρύχια τα οποία είχαν αρχίσει να κατασκευάζονται το 1975 για χρήση στον Ατλαντικό Ωκεανό. Το πρώτο πλοίο αυτής τη γενιάς ήταν το Viking Piper το οποίο χρησιμοποιήθηκε στη Βόρεια θάλασσα για μικρό μόνο χρονικό διάστημα. Σχήμα 3.2



Σχήμα 3.2: Πλοίο τρίτης γενιάς.

Τέλος έχουμε τα πλοία της τέταρτης γενιάς τα οποία είναι και τα πιο σύγχρονα πλοία καθώς όλα τους διαθέτουν DP System (Dynamic Positioning). (Σχήμα 3.3) Το DP system είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα διατήρησης της θέσης ενός πλοίου το οποίο μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή και με την χρήση ειδικών προπελών και προωθητήρων εξασφαλίζει την ακριβή θέση του. Τέτοιου είδους πλοία χρησιμοποιούνται κυρίως σε βαθιά νερά γι' αυτό και είναι ευρέως διαδεδομένη η χρήση τους κατά τη μέθοδο τοποθέτησης J-lay. Για παράδειγμα το πλοίο Solitaire της εταιρείας Allseas μπορεί να συγκριθεί με τη μέθοδο J-lay το οποίο σε ίδιες συνθήκες βάθους πυθμένα και διαμέτρου αγωγού, έχει το πλεονέκτημα της ταχύτερης παραγωγικής διαδικασίας που προσφέρει η μέθοδος S-lay. Μειονέκτημα βέβαια θα μπορούσε να θεωρηθεί το γεγονός ότι η χρήση της μεθόδου S-lay σε μεγάλα βάθη έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγαλύτερων τάσεων οι οποίες στην περιοχή της άνω καμπύλης είναι έως και 0.45% αυξημένες σε σχέση με τη μέθοδο J-lay.



Σχήμα 3.3: Πλοίο τέταρτης γενιάς.

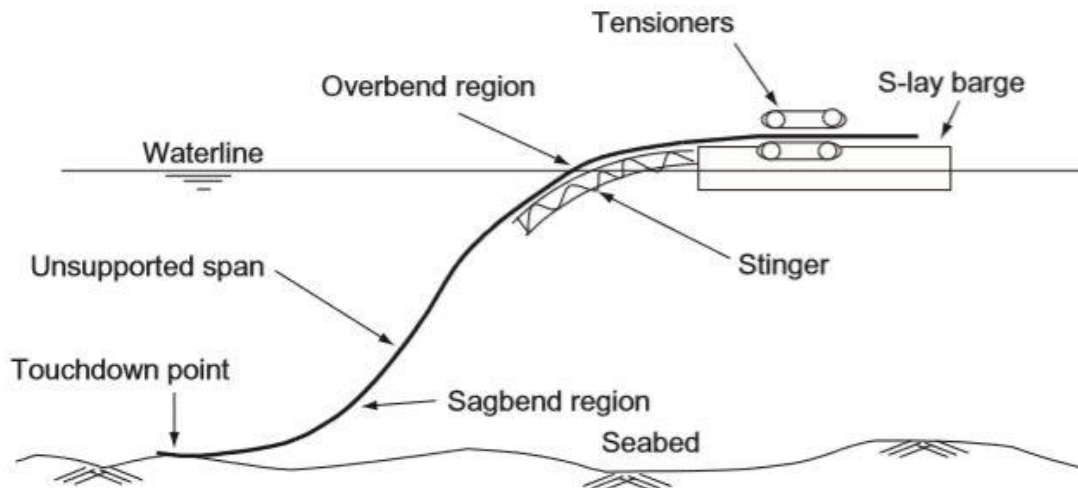
### 3.3 Lay-Methods

#### 3.3.1 S-lay

##### 3.3.1.1 Γενικά

Ίσως η πιο διαδεδομένη μέθοδος τοποθέτησης υποθαλάσσιων αγωγών για αβαθή νερά. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βάθη έως 700[m]. Οι επιμέρους αγωγοί συγκολλούνται σε πλωτή γραμμή παραγωγής, επί τόπου, συνήθως πάνω σε κάποιο βοηθητικό πλοίο, φορτηγίδα. Τα συγκολλημένα πλέον τμήματα υποβοηθούμενα από συστήματα τροχαλιών και το ρύγχος (stringer) το οποίο βρίσκεται προσαρμοσμένο στο μέρος του πλοίου απ' όπου ο αγωγός θα εισέλθει στο νερό, σχηματίζουν την πρώτη, κοίλη, καμπύλη (overbend region). Έπειτα, ο αγωγός, με ελεγχόμενη πάντα ένταση, αφήνεται να ακουμπήσει στον πυθμένα σχηματίζοντας έτσι τη δεύτερη, κυρτή αυτή τη φορά λόγω του ιδίου βάρους του αγωγού, καμπύλη. Έχουμε έτσι, τη δημιουργία ενός σχήματος που θυμίζει το αγγλικό γράμμα S απ' όπου παίρνει και το όνομά της η μέθοδος. Κατά τη γραμμή παραγωγής του αγωγού ελέγχεται πάντα με τη χρήση μη καταστρεπτικών μεθόδων η ορθή συγκόλληση των τμημάτων του αγωγού.

Για την εξασφάλιση της συνεχούς εφαρμογής τάσης καθ' όλο το μήκος αυτού του σχηματισμού S τοποθετούνται πάνω στο πλοίο εντατήρες, οι οποίοι μαζί με το προαναφερθέν ρύγχος είναι υπεύθυνοι και για τη διαμόρφωση της γεωμετρίας του αγωγού. Η σταθεροποίηση και απορρόφηση αυτής της έντασης επιτυγχάνεται με τη χρήση ειδικών πλωτών και μη αγκυρίων. Σχήμα 3.4



Σχήμα 3.4: Σχεδιάγραμμα επιμέρους τμημάτων φορέα για τοποθέτηση κατά την μέθοδο S-lay.

##### 3.3.1.2 Διαδικασία προώθησης

Τα μεμονωμένα τμήματα του αγωγού ετοιμάζονται βιομηχανικά στη ξηρά σε εξειδικευμένα και πιστοποιημένα κέντρα παραγωγής μεταλλικών στοιχείων και μεταφέρονται στη θέση χάραξης του εκάστοτε αγωγού με τη βοήθεια βοηθητικών πλοίων. Στο κυρίως πλοίο το οποίο χρησιμοποιείται για την όλη διαδικασία βύθισης του αγωγού μεταφέρονται τα τμήματα αυτά με γερανούς χειροκίνητους ή αυτοματοποιημένους. Τα



τμήματα τοποθετούνται με τη σειρά σε οριζόντια γραμμή παραγωγής είτε εκτεθειμένη στις περιβαλλοντικές συνθήκες είτε προστατευμένη σε κάποιο κλειστό ειδικά διαμορφωμένο χώρο του πλοίου. Αφού γίνει σωστή προετοιμασία των άκρων των προς συγκόλληση τμημάτων, τα τμήματα συγκολλούνται είτε μηχανικά είτε χειροκίνητα από πιστοποιημένους συγκολλητές. Έπειτα το συγκολλημένο τμήμα μεταφέρεται κατά μήκος της γραμμής παραγωγής ώστε να ελεγχθεί η επιτυχία της συγκολλήσεως με εφαρμογή σκαναρίσματος και εφόσον ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις αυτής, εκτελείται καθαρισμός της περιοχής, πλύσιμο και τριβή και κάλυψη του συγκολλημένου τμήματος με υλικά για την αποκατάσταση της εξωτερικής ασυνέχειας στη γεωμετρία του αγωγού. Τα συγκολλημένα πλέον τμήματα ωθούνται, με τη βοήθεια των εντατήρων, προς το ρύγχος και εισέρχονται σταδιακά στη θάλασσα καθώς η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται με τα υπολειπόμενα τμήματα του αγωγού. Για τη σταθεροποίηση του αγωγού στον πυθμένα ανάλογα με τις συνθήκες της εκάστοτε περιοχής, ροές ρευμάτων, βάθος, πυθμένας, επιλέγεται και διαφορετική μέθοδος σταθεροποίησης του αγωγού, είτε με εναπόθεση ειδικά διαμορφωμένων βαριδιών είτε με προκατασκευασμένα στοιχεία από ωπλισμένο σκυρόδεμα είτε ακόμα και με εισχώρηση στο υπέδαφος. Η διαδικασία αυτή, των διαφορετικών σταδίων που εκτελούνται παράλληλα, ακολουθείται για τη μείωση του απαιτούμενου χρόνου της παραγωγικής διαδικασίας. Η συνήθης πρόοδος υπολογίζεται σε προώθηση 4-5 [km] ανά 24 ώρες εργασίας. Εκτιμάται λοιπόν ότι είναι μία αρκετά γρήγορη διαδικασία βύθισης του αγωγού.



Σχήμα 3.5: Σύνδεση πλοίου μεταφορέα με πλοίο προώθησης.

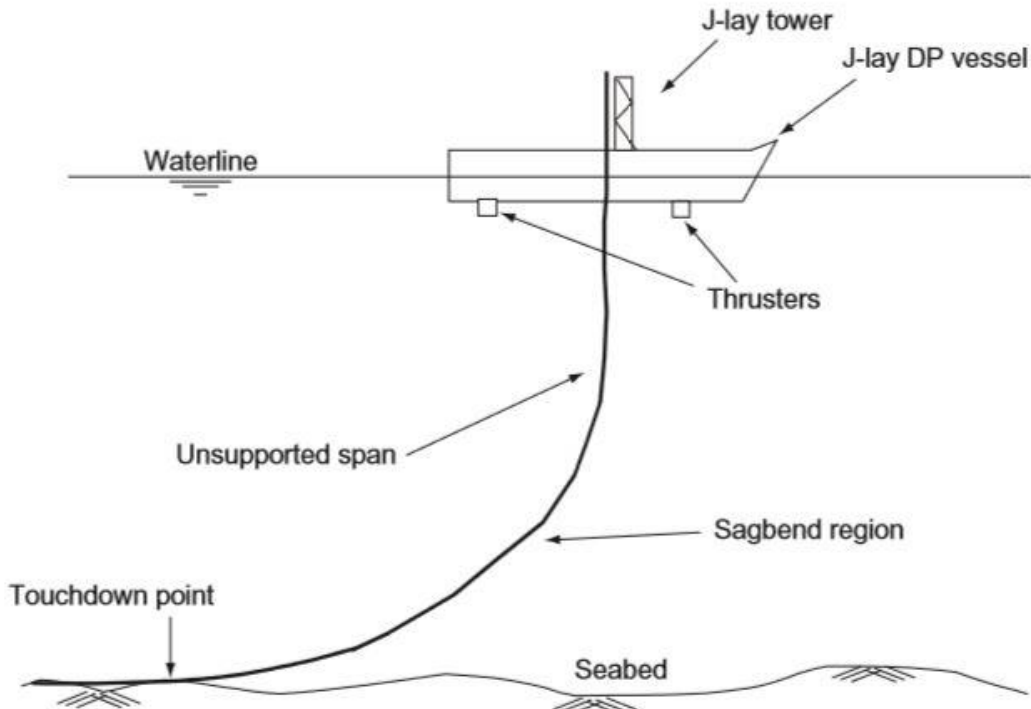
### 3.3.2 J-lay

#### 3.3.2.1 Γενικά

Η προαναφερθείσα μέθοδος S-lay είναι αρκετά αποτελεσματική για βάθη έως 700[m]. Σε μεγαλύτερα βάθη το ίδιο βάρος του αγωγού είναι τέτοιο ώστε η χρήση ρύγχους για τη διαμόρφωση της άνω καμπύλης είναι πρακτικά αδύνατη, επομένως η λύση είναι η εφαρμογή της μεθόδου J-lay. Όπως φαίνεται και από το όνομα της μεθόδου σε αυτή την περίπτωση ο αγωγός εισέρχεται στο νερό από κατακόρυφη, ή σχεδόν κατακόρυφη, θέση. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 3.6, ο αγωγός κατά τη βύθισή του σχηματίζει μία μόνο μεγάλης ακτίνας καμπύλη η οποία έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μικρότερων τάσεων κατά μήκος του αγωγού σε σχέση με τη μέθοδο S-lay για το ίδιο βάθος νερού. Αντίστοιχα οι απαιτούμενες οριζόντιες τάσεις για τη σταθεροποίηση αυτού του σχηματισμού, είναι και αυτές πολύ μικρότερες σε σχέση με την προαναφερθείσα μέθοδο.

Η ύπαρξη μικρών οριζόντιων εντάσεων οδηγεί στην επάρκεια ενός απλού κατακόρυφου προωθητήρα του λεγόμενου J-lay tower, ο οποίος τοποθετείται πάνω στο πλοίο από το οποίο γίνεται η βύθιση του αγωγού. Συνήθης είναι η χρήση σκαφών τέταρτης

γενιάς σε αυτή τη μέθοδο, ενώ μερικές φορές μπορεί να γίνει και χρήση σκαφών τρίτης γενιάς.

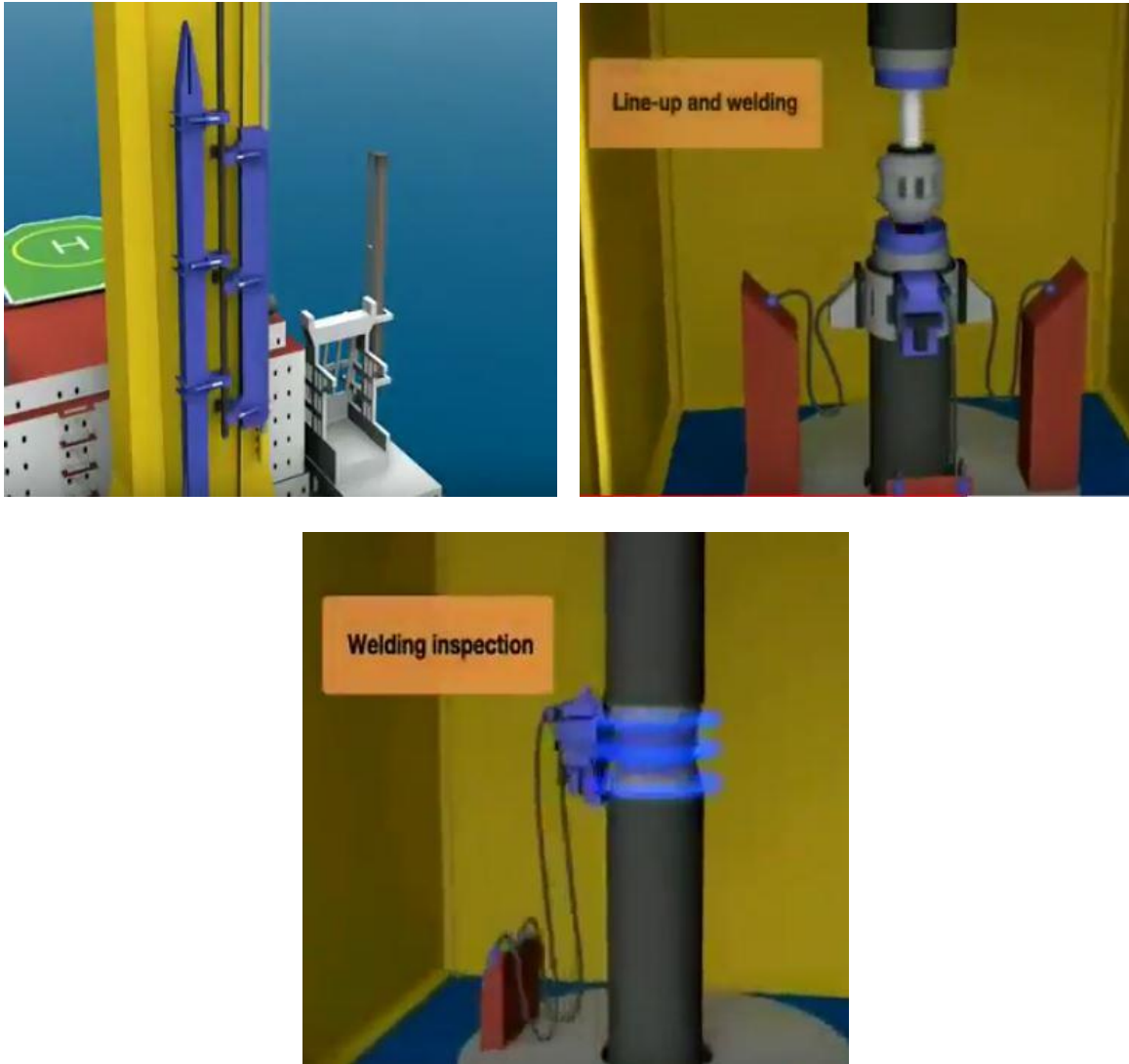


Σχήμα 3.6: Σχεδιάγραμμα επιμέρους τμημάτων φορέα για τοποθέτηση κατά την μέθοδο J-lay.

### 3.3.2.2 Διαδικασία προώθησης

Όπως και στην προηγούμενη μέθοδο έτσι και εδώ, οι πρώτες ύλες και τα επιμέρους τμήματα του αγωγού φτάνουν στο σημείο βύθισης με άλλα μικρότερα σκάφη και μεταφέρονται στο σκάφος βύθισης με ηλεκτρικό σύστημα τροχαλιών όπου και τοποθετούνται παράλληλα δίπλα σε έναν κυλιόμενο διάδρομο. Κάθε τμήμα του αγωγού οδηγείται μέσω του κυλιόμενου διαδρόμου σε ένα ειδικό σύστημα ανύψωσης το οποίο φέρει το κάθε τμήμα από οριζόντια σε κατακόρυφη θέση, εύκολα προσβάσιμη από το μηχανικό σύστημα του πύργου προώθησης. Ειδικές δαγκάνες ασφαλίζουν το κατακόρυφο πλέον τμήμα αγωγού και το τοποθετούν στο εσωτερικό του πύργου. Εκεί με τη χρήση ειδικού συστήματος ισοστάθμισης (Σχήμα 3.7) ευθυγραμμίζονται τα προς συγκόλληση τμήματα και προωθούνται στο σημείο εφαρμογής της συγκόλλησης η οποία μπορεί να είναι είτε απλού είδους συγκόλληση ή ακόμη και συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων. Μετά την ολοκλήρωση αυτών των σταδίων ακολουθούν δύο ακόμα βασικά στάδια, ο έλεγχος της επάρκειας συγκολλησεως αλλά και η πλήρωση της εξωτερικής ασυνέχειας του αγωγού. Όλη αυτή η διαδικασία γίνεται σε μη εκτεθειμένες στο περιβάλλον συνθήκες και τις περισσότερες φορές γίνεται με τη βοήθεια ηλεκτρονικών μέσων χωρίς να είναι απαραίτητη η ύπαρξη αρκετού ανθρώπινου δυναμικού. Αυτό την κάνει να είναι ακριβέστερη σαν μέθοδος αλλά αρκετά πιο αργή. Στην συνέχεια ο αγωγός εισέρχεται στο νερό διαμορφώνοντας μία μόνο καμπύλη στο κάτω τμήμα του, στη θέση δηλαδή που έρχεται σε επαφή με το έδαφος.





Σχήμα 3.7: Επιμέρους διαδικασίες πύργου προώθησης.

Για τη σταθεροποίηση του αγωγού στον πυθμένα και σε αυτή τη μέθοδο, ανάλογα με τις συνθήκες της εκάστοτε περιοχής, τις ροές ρευμάτων, το βάθος, το υλικό του πυθμένα, επιλέγεται διαφορετική μέθοδος σταθεροποίησης του αγωγού, είτε με εναπόθεση ειδικά διαμορφωμένων βαριδιών είτε με προκατασκευασμένα στοιχεία από ωπλισμένο σκυρόδεμα είτε ακόμα και με εισχώρηση στο υπέδαφος.

Συνήθως η μέθοδος J-lay είναι πιο χρονοβόρα από την S-lay αλλά αυτό είναι άμεσα συνδεδεμένο και με το μέγεθος του πύργου προώθησης. Όσο πιο μεγάλος είναι ο πύργος τόσο περισσότερους κόμβους μπορεί να συγκολλάει ταυτόχρονα και συνεπώς η προώθηση να γίνεται γρηγορότερα. Η τοποθέτηση μεγαλύτερων πύργων προώθησης προϋποθέτει σαφώς και μεγαλύτερα σκάφη βύθισης. (Σχήμα 3.8)



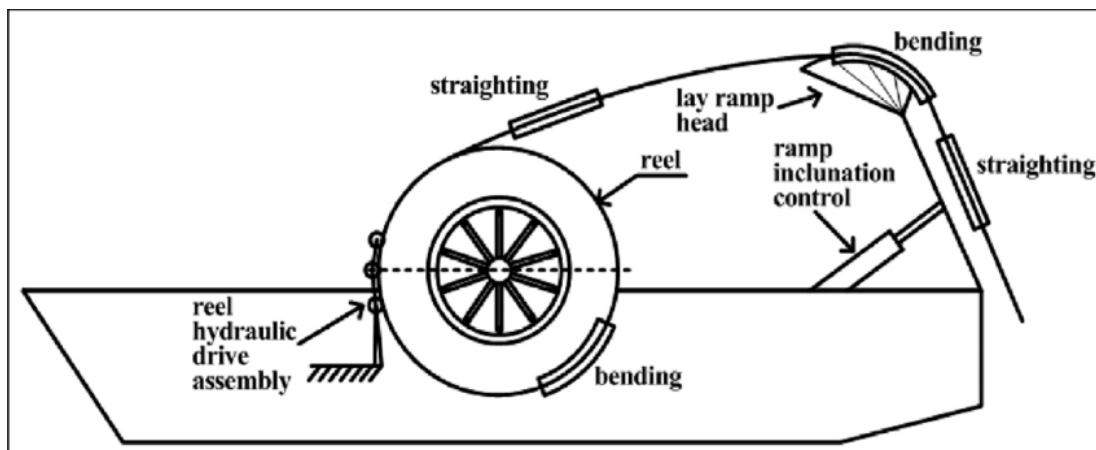
Σχήμα 3.8: Φορτηγό πλοίο με προσαρτημένο πύργο προώθησης.

### 3.3.3 Reel Lay

#### 3.3.3.1 Γενικά

Πέρα από τις δύο παραπάνω μεθόδους ιδιαίτερης σημασίας είναι και η Reel lay μέθοδος καθώς ανάλογα με τις συνθήκες μπορεί να λειτουργήσει είτε σύμφωνα με την S-lay είτε σύμφωνα με την J-lay μέθοδο προσδίδοντας όμως κάποια περεταίρω χαρακτηριστικά που μπορούν να συμβάλλουν σε διάφορους τομείς της διεκπεραίωσης του έργου. Η Reel lay μέθοδος βασίζεται στη λογική του ξετυλίγματος ενός 'κουβαριού', τμήματος του αγωγού μεγαλύτερου μήκους από αυτά που χρησιμοποιούνται για την σύνθεση του τελικού αγωγού κατά τις άλλες δύο μεθόδους. Τα καρούλια που χρησιμοποιούνται μπορούν να έχουν διάμετρο έως και 30[m]. Αυτό καθορίζει και τα όρια στη διάμετρο και το μήκος του αγωγού που πρόκειται να τοποθετηθεί. Τα καρούλια κατασκευάζονται στην ακτή και μεταφέρονται στο εκάστοτε σημείο βύθισης, η συγκεκριμένη διαδικασία τοποθέτησης έχει ως αποτέλεσμα ένα ασφαλέστερο και πιο σταθερό εργασιακό περιβάλλον και ταυτόχρονα αύξηση της ταχύτητας βύθισης του αγωγού καθιστώντας την έως και δέκα φορές ταχύτερη σε σχέση με τις προαναφερθείσες μεθόδους. Επιπρόσθετα είναι αρκετά φθηνότερη σε ό,τι αφορά το κομμάτι των συγκολλήσεων, του σκαναρίσματος αυτών, της προετοιμασίας του αγωγού για αντοχή σε διάβρωση και την εφαρμογή των απαιτούμενων ελέγχων καθώς το μεγαλύτερο μέρος αυτών των διαδικασιών ολοκληρώνεται στη στεριά όπου και τα αντίστοιχα κόστη είναι σημαντικά μικρότερα. (Σχήμα 3.9)

Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται κυρίως σε βαθιά νερά λόγω του ότι σε αυτά οι αυξημένες πιέσεις απαιτούν μεγαλύτερο πάχος τοιχωμάτων του αγωγού κάτι το οποίο λειτουργεί ευνοϊκά και για την ευστάθεια του ίδιου του αγωγού καθώς λόγω της ιδιαιτερότητας της μεθόδου, να χρησιμοποιούνται τυλιγμένα τμήματα αγωγού, η χρήση επικάλυψης σκυροδέματος για την αύξηση του βάρους και συνεπώς της ευστάθειας είναι αδύνατη.



Σχήμα 3.9: Σχεδιάγραμμα επιμέρους τμημάτων φορέα για τοποθέτηση κατά την μέθοδο Reel-lay

### 3.3.3.2 Σκάφη

Τα σκάφη που χρησιμοποιούνται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας με αυτή τη μέθοδο είναι δύο ειδών ανάλογα με το πώς είναι διαμορφωμένη η υποδοχή του καρουλιού πάνω σε αυτά αλλά και ανάλογα με τα νερά στα οποία καλούνται να εκτελέσουν τη διαδικασία.

Τα σκάφη Οριζόντιου καρουλιού έχουν υποδοχές για την οριζόντια εναπόθεση του καρουλιού και χρησιμοποιούνται συνήθως σε μικρού έως μεσαίου βάθους νερά. Κατά συνέπεια, η μέθοδος που συγχρησιμοποιείται για τη βύθιση είναι η S-lay με προσαρτημένο στο σκάφος το απαιτούμενο ρύγχος. Η σταθεροποίηση του σκάφους αυτού γίνεται είτε με άγκυρες είτε με τη χρήση κάποιου DP συστήματος. Σχήμα 3.10



Σχήμα 3.10: Διαμόρφωση σκάφους που ακολουθεί την ρίψη με την οριζόντια μέθοδο Reel-lay.

Τα σκάφη Κατακόρυφου καρουλιού όπως φαίνεται και από την ονομασία τους έχουν υποδοχείς για κατακόρυφη τοποθέτηση του καρουλιού και χρησιμοποιούνται συνήθως σε μεσαίου βάθους έως και βαθιά νερά. Γι' αυτό τον λόγο γίνεται ταυτόχρονη χρήση της J-lay μεθόδου με την προσθήκη ενός κατακόρυφου πύργου προώθησης στο σκάφος. Η διαφορά εδώ έγκειται στο ότι ο πύργος δεν είναι απαραίτητο να είναι μεγάλος καθώς καλείται να υποστηρίξει τις ανάγκες μίας μόνο συγκόλλησης, αυτής στα άκρα των προς σύνδεση καρουλιών. Σε αυτά τα σκάφη λόγω του μεγάλου βάθους η σταθεροποίησή τους γίνεται πάντα με τη χρήση DP συστήματος. Σχήμα 3.11



Σχήμα 3.11: Διαμόρφωση σκάφους που ακολουθεί την ρίψη με την κατακόρυφη μέθοδο Reel-lay.

### 3.3.3.3 Διαδικασία προώθησης

Βοηθητικά σκάφη μεταφέρουν το κάθε καρούλι στη θέση βύθισης και με τη χρήση γερανών αυτό τοποθετείται στους ειδικούς υποδοχείς. Ο αγωγός αρχίζει να ξετυλίγεται και υπόκειται σε ειδική διαδικασία ευθυγράμμισης. (Σχήμα 3.12) Τοποθετείται στη θέση εισόδου στο νερό, ρύγχος ή πύργος προώθησης, ανάλογα με τη μέθοδο που έχει επιλεγεί να χρησιμοποιηθεί. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις στην περιοχή της επαφής του αγωγού με τον πυθμένα ελέγχονται από το ίδιο εντατικό σύστημα που ελέγχει και το καρούλι. Το σκάφος μετακινείται καθώς το καρούλι ξετυλίγεται και ο αγωγός βυθίζεται. Λόγω του μεγάλου βάρους του υλικού του αγωγού τα καρούλια είναι περιορισμένου μήκους σαφώς μεγαλύτερου όμως από αυτό των επιμέρους τμημάτων που χρησιμοποιούνται στις προαναφερθείσες μεθόδους. Όταν έχει ξετυλιχθεί όλο το καρούλι, ειδική απόληξη συνδεδεμένη με σημαδούρα προσαρτάται στην άκρη του αγωγού και ο αγωγός αφήνεται να βυθιστεί. Στο πλοίο προσαρτάται το επόμενο καρούλι το οποίο με τη σειρά του αρχίζει να ξετυλίγεται. Το αγκυροβολημένο άκρο του προηγούμενου τμήματος ανελκύεται, αφαιρείται η προσωρινά τοποθετημένη απόληξη και ακολουθεί συγκόλληση των δύο άκρων.

Όπως είναι αναμενόμενο η παραπάνω διαδικασία είναι αρκετά γρήγορη παρόλα αυτά δεν χρησιμοποιείται ευρέως καθώς έχει κάποια αρνητικά τα οποία της προσδίδουν δυσκολία στην εκτέλεση αλλά και αύξηση κόστους. Η δημιουργία εγκατάστασης κατασκευής καρουλιών κοντά στο σημείο βύθισης είναι εάν όχι αδύνατη, εξαιρετικά δύσκολη. Επιπλέον όπως ήδη έχει αναφερθεί η χρήση της μεθόδου είναι αδύνατη για



αγωγούς που απαιτούν κάλυμμα σκυροδέματος για τη σταθεροποίησή τους στον πυθμένα. Τέλος αρκετά σοβαρό είναι το πρόβλημα της πλαστικής παραμόρφωσης του αγωγού κατά το τύλιγμα και η επαναφορά αυτού σε ευθύγραμμη μορφή. Αυτή η διαδικασία έχει ως συνέπεια την εμφάνιση τοπικών ατελειών όπως τη δημιουργία ανωμαλιών στο πάχος των τοιχωμάτων του αγωγού αλλά και τη μείωση της αντοχής διαρροής του υλικού στα σημεία αυτά.



Σχήμα 3.12: Διαδικασία επαναφοράς αγωγού στην ευθύγραμμη μορφή του.

### 3.4 Έλεγχος τάσεων καμπύλων τμημάτων – Φάση τοποθέτησης

#### 3.4.1 Γενικά

Έχει αποδειχθεί ότι οι τάσεις που αναπτύσσονται στα καμπύλα τμήματα του αγωγού πρέπει να λαμβάνονται με διαφορετικό τρόπο ανάλυσης ανάλογα με το υφιστάμενο βάθος πυθμένα. Πιο συγκεκριμένα σε ρηγά νερά οι τάσεις που προκύπτουν από δυναμική ανάλυση είναι συνήθως μικρότερες από το 30% των στατικών τάσεων. Σε βαθιά νερά όμως οι προκύπτουσες από την δυναμική ανάλυση τάσεις είναι εκείνες που υποδεικνύουν τις οριακές καιρικές συνθήκες, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν υπέρβαση φέρουσας ικανότητας ή αστοχία από κόπωση, και συνεπώς η μελέτη τους είναι υποχρεωτική. Στην παρούσα παράγραφο παρατίθενται τρόποι ελέγχου των αναπτυσσόμενων τάσεων κατά την φάση της τοποθέτησης του αγωγού με τις προαναφερθείσες Lay μεθόδους. Οι τάσεις αυτές περιλαμβάνουν τις εξής υποκατηγορίες:

- Τάσεις αρνητικής καμπύλωσης
- Τάσεις θετικής καμπύλωσης
- Τάσεις λόγω οριζόντιας κάμψης

Ανάλογα με τη μέθοδο τοποθέτησης που έχει ακολουθηθεί υπάρχουν και οι αντίστοιχες περιοχές καμπύλωσης στις οποίες ο μελετητής καλείται να εστιάσει. Ακριβέστερα, στη S-lay μέθοδο υπάρχουν δύο περιοχές καμπύλωσης, η overbend και η sagbend επομένως μελετώνται και οι αντίστοιχες τάσεις. Στη J-lay μέθοδο υπάρχει μία μόνο περιοχή καμπύλωσης, αυτή στη θέση επαφής του αγωγού με τον πυθμένα, επομένως μελετώνται μόνο οι sagbend stresses. Αντίστοιχα στη Reel lay μέθοδο μελετώνται οι αντίστοιχες τάσεις ανάλογα με το σχηματισμό που έχει επιλεγεί να ακολουθηθεί για την τοποθέτηση σύμφωνα και με το βάθος του πυθμένα.

Παρακάτω δίδεται η βασική διαφορική εξίσωση 3.1 η οποία χρησιμοποιείται για την ανάλυση των τάσεων που αναπτύσσονται στις καμπυλώσεις του αγωγού κατά την τοποθέτηση και η οποία είναι δυνατό να εφαρμοστεί σε ρηχά αλλά και βαθιά νερά.

$$-q = EI \frac{d}{ds} \left( \sec \theta \frac{d^2 \theta}{ds^2} \right) - T_0 \left( \sec 2\theta \frac{d\theta}{ds} \right) \quad \text{Εξίσωση 3.1}$$

Όπου:

q: το βάρος του βυθισμένου αγωγού

EI: η δυσκαμψία του αγωγού

T<sub>0</sub>: η ελάχιστη τάση του αγωγού

s: η κατά μήκος απόσταση του αγωγού

θ: η γωνία για την αντίστοιχη απόσταση s, sinθ=dy/ds

### 3.4.2 Τάσεις θετικής καμπύλωσης

Η περίπτωση αυτή προϋποθέτει την ύπαρξη ρύγχους το οποίο διαμορφώνει την καμπύλη του αγωγού στο σημείο εισόδου του στο νερό καθώς επίσης και την εφαρμογή έντασης για τη διατήρηση της επιθυμητής αυτής καμπύλης μέσω των εντατήρων οι οποίοι είναι προσαρτημένοι στο πλοίο τοποθέτησης. Η καμπύλωση αυτή λόγω της ύπαρξης του ρύγχους και η ύπαρξη αξονικής δύναμης έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη τάσεων στο τμήμα αυτό του αγωγού. Επιπροσθέτως, τοπικές τάσεις αναπτύσσονται και στα σημεία όπου ο αγωγός στηρίζεται σε τροχούς ώστε να μπορέσει να προωθηθεί. Και σε αυτή την περίπτωση, οι αντιδράσεις αυτές είναι άξιες υπολογισμού στην περίπτωση των βαθιών νερών. Αυτό συμβαίνει γιατί η δυναμική μελέτη έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση αυξημένων αντιδράσεων στους τελευταίους τροχούς στήριξης. Με εφαρμογή ανακατανομής όμως των φορτίων σε όλους τους τροχούς οι τάσεις μειώνονται.

Επιπροσθέτως αξίζει να σημειωθεί ότι το ύψος των τροχών επηρεάζει αρκετά τις αναπτυσσόμενες στον αγωγό τάσεις, γι' αυτό και για τη διαδικασία της τοποθέτησης πλέον, προτιμώνται πλοία που έχουν τη δυνατότητα μέσω του συστήματός τους να ελέγχουν και να μεταβάλουν αναλόγως το ύψος των τροχών για τη μείωση των αναπτυσσόμενων αυτών τάσεων.

Η αναπτυσσόμενη στον αγωγό τάση στην εν λόγω περιοχή υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\sigma_a = \frac{ED}{2R_{cv}} \quad \text{Εξίσωση 3.2}$$

Όπου:

σ<sub>a</sub>: τάση από αξονική δύναμη

E: μέτρο ελαστικότητας χάλυβα

D: εξωτερική διάμετρος αγωγού

R<sub>cv</sub>: ακτίνα καμπυλότητας αγωγού

Η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας που μπορεί να ληφθεί ώστε οι αναπτυσσόμενες τάσεις στην overbend περιοχή να προκύπτουν μικρότερες από την τάση διαρροής του χάλυβα, μειωμένη και σύμφωνα με έναν συντελεστή f<sub>D</sub>, προκύπτει από την εξίσωση:

$$R_{cv} = \frac{ED}{2\sigma_y f_D} \quad \text{Εξίσωση 3.3}$$

Όπου:

σ<sub>y</sub>: τάση διαρροής χάλυβα

f<sub>D</sub>: συντελεστής σχεδιασμού, συνήθως λαμβάνεται ίσος με 0.85

### 3.4.3 Τάσεις αρνητικής καμπύλωσης

#### 3.4.3.1 Μέθοδοι ανάλυσης

Η περιοχή που ορίζεται από τη βιβλιογραφία ως sagbend region είναι εκείνη στην οποία ο αγωγός έρχεται σε επαφή με το έδαφος και αρχίζει να διαμορφώνει καμπύλη κατά το στρώσιμό του. Αυτή η καμπύλη υφίσταται και στις δύο περιπτώσεις τοποθέτησης του αγωγού γι' αυτό τον λόγο έχει απασχολήσει και την επιστημονική κοινότητα ιδιαίτερος. Η καμπύλη συνήθως υπολογίζεται με τη θεωρία των ελαστικών ράβδων λαμβάνοντας τη θεώρηση μικρής έντασης και μεγάλων μετατοπίσεων και ταυτόχρονα αγνοώντας τις αξονικές παραμορφώσεις και τις παραμορφώσεις ροπή.

Οι μέθοδοι ανάλυσης των τάσεων της προαναφερθείσας περιοχής είναι διάφορες ανάλογα με το βάθος του πυθμένα αλλά και τις θεωρήσεις που μπορούν να γίνουν κατά τη μελέτη. Κάποιες από αυτές είναι η μέθοδος της δοκού, η μη γραμμική μέθοδος δοκού, η μέθοδος του φυσικού αλυσοειδούς, η μέθοδος του ενισχυμένου αλυσοειδούς, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων καθώς και η μέθοδος επικάλυψης με σκυρόδεμα. Τα χαρακτηριστικά των μεθόδων θα αναλυθούν παρακάτω.

Η **μέθοδος της δοκού**, στην βιβλιογραφία αναφέρεται και ως μέθοδος μικρών μετακινήσεων, και όπως είναι αναμενόμενο εφαρμόζεται μόνο σε αγωγούς με μικρές μετακινήσεις κάτι που σημαίνει είτε αρκετά δύσκαμπτους είτε σε αγωγούς που τοποθετούνται σε ρηχά νερά.

Η **μη γραμμική μέθοδος δοκού** βασίζεται στη μη γραμμική εξίσωση κάμψης δοκού για να περιγράψει την καμπύλωση του αγωγού (Bryndum et al., 1982). Είναι δυνατό να εφαρμοσθεί σε ρηχά αλλά και βαθιά νερά αλλά και σε περιπτώσεις μικρών και μεγάλων μετατοπίσεων και επομένως αυτό την καθιστά παρόλη τη δυσκολία της, λόγω της μη γραμμικότητας, μία μέθοδο γενικής εφαρμογής.

Η **μέθοδος του φυσικού αλυσοειδούς**, εφαρμόζεται για την περιγραφή ενός τμήματος του αγωγού απομακρυσμένο από τα πέρατα αυτού. Η εφαρμογή της μεθόδου σε αγωγούς μικρής δυσκαμψίας είναι σπάνια καθώς δεν ικανοποιούνται, σε αυτές τις περιπτώσεις, συχνά οι οριακές συνθήκες που είναι απαιτητό για την ορθή τοποθέτηση του αγωγού. Γι' αυτό το λόγο η μέθοδος εφαρμόζεται σε βαθιά νερά ή σε νερά όπου οι εντάσεις είναι πολύ μεγάλες και υπερνικούν τον παράγοντα της δυσκαμψίας.

Η **μέθοδος του ενισχυμένου αλυσοειδούς** διαφέρει από αυτή του φυσικού στο ότι τα οριακά κριτήρια ικανοποιούνται και επομένως μπορεί να εφαρμοσθεί και σε περιοχές του αγωγού κοντά στις απολήξεις. Παρόλα αυτά δεν ενδείκνυται η χρήση της σε βαθιά νερά ή σε περιοχές όπου ο αγωγός χαρακτηρίζεται από μικρή δυσκαμψία.

Η **μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων** εφαρμόζεται σε όλα τα βάθη πυθμένα. Ο αγωγός προσομοιώνεται ως σύστημα συνδεδεμένων πεπερασμένων στοιχείων δοκών και το σύστημα επιλύεται με τη χρήση πινάκων. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων.

Τέλος, η **μέθοδος της παχιάς επικάλυψης με σκυρόδεμα**, εφαρμόζεται σε πολύ συγκεκριμένες περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητο να αυξηθεί το βάρος της κατασκευής ώστε να μπορέσουν να εξισορροπηθούν οι υδροστατικές δυνάμεις στην επιφάνεια του πυθμένα. Σε αυτή τη μέθοδο, όταν ο αγωγός κάμπτεται, οι τάσεις εντείνονται σε σημεία μικρής δυσκαμψίας του αγωγού.

### 3.4.3.2 Κανονιστικά πλαίσια

Στην περίπτωση της τοποθέτησης του αγωγού χωρίς αυτός να είναι γεμάτος με νερό, η ύπαρξη των εξωτερικών δυνάμεων και πιο συγκεκριμένα της υδροστατικής πίεσης, αυξάνει τις πιθανότητες αστοχίας, γι' αυτό τον λόγο πολλοί κανονισμοί εστιάζουν στη μελέτη των δυνάμεων που αναπτύσσονται στις περιοχές αυτές και από την πλευρά της μηχανικής των στερεών.

Στην παρούσα παράγραφο θα αναλυθεί η αντιμετώπιση του φαινομένου από τους δύο βασικότερους παγκοσμίως κανονισμούς οι οποίοι αγγίζουν τον τομέα των υποθαλάσσιων μεταλλικών αγωγών, τον API RP 1111 (Αμερικάνικος Κανονισμός) και τον DnV OS F101(2007) (Γερμανικός Κανονισμός).

#### ➤ API RP 1111

Σύμφωνα με τον αμερικάνικο κανονισμό πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση 3.4, για λυγισμό που προκαλείται λόγω εξωτερικής πίεσης και καμπύλωσης:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_b} + \frac{(P_o - P_i)}{P_c} \leq g(\delta) \quad \text{Εξίσωση 3.4}$$

Όπου:

$\varepsilon$ : παραμόρφωση του αγωγού

$\varepsilon_b$ : κρίσιμη παραμόρφωση του αγωγού που βρίσκεται υπό καθαρή κάμψη =  $t/2D$

$P_o$ : εξωτερική υδροστατική πίεση

$P_i$ : εσωτερική πίεση

$P_c$ : πίεση αστοχίας (βλ. API RP 1111 , sec. 4.3.2.1 )

$g(\delta)$ : μειωτικός συντελεστής αστοχίας =  $(1+20\delta)^{-1}$

$$\delta = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} = \text{ovality} \quad \text{Εξίσωση 3.5}$$

Όπου:

$D_{max}$ : μέγιστη διάμετρος αγωγού

$D_{min}$ : ελάχιστη διάμετρος αγωγού

Για την παραμόρφωση του αγωγού ισχύει επίσης:

$$\varepsilon \leq \left[ g(\delta) - \frac{(P_o - P_i)}{P_c} \right] \frac{t}{2D} \quad \text{Εξίσωση 3.6}$$

Κατά την τοποθέτηση η επιτρεπτή παραμόρφωση του αγωγού λαμβάνει και έναν μειωτικό συντελεστή  $f_1$  (προτείνεται  $f_1=2.0$ ) έτσι ώστε να ισχύει:

$$f_1 \varepsilon_1 \leq \varepsilon \quad \text{Εξίσωση 3.7}$$

όπου,  $\varepsilon_1$  είναι η μέγιστη παραμόρφωση κατά την τοποθέτηση.

Γενικά ο κανονισμός αναφέρεται σε αγωγούς με λόγο  $D/t < 50$ . Συνήθως, κατά τον υπολογισμό του απαιτούμενου πάχους αγωγού κατά τον σχεδιασμό, λαμβάνεται μέγιστη καμπτική παραμόρφωση 0.2%, σε πολλές όμως περιπτώσεις έχει αποδειχθεί ότι η τιμή αυτή μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη.

#### ➤ DnV (2007)

Ο Γερμανικός κανονισμός έχει και αυτός μία παρόμοια εξίσωση υπολογισμού της παραμόρφωσης λόγω της επιβαλλόμενης εξωτερικής υδροστατικής πίεσης και της επιβαλλόμενης καμπύλωσης του αγωγού.

$$\left( \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_c / \gamma_s} \right)^{0.8} + \frac{p_s}{(p_c / \gamma_{sc} \gamma_m)} \leq 1 \quad \text{Εξίσωση 3.8}$$



Όπου:

$e_d$ : θλιπτική παραμόρφωση σχεδιασμού

$e_c$ : κρίσιμη θλιπτική παραμόρφωση

$p_e$ : εξωτερική πίεση

$p_c$ : πίεση αστοχίας

$\gamma_e, \gamma_{sc}, \gamma_m$ : συντελεστές αντίστασης, ασφαλείας και υλικού.

Γενικά ο γερμανικός κανονισμός θεωρείται αρκετά πιο συντηρητικός από τον αμερικανικό. Για παράδειγμα σύμφωνα με τον DnV (2007) η οβαλοποίηση προκύπτει από την εξίσωση:

$$f_o = \frac{D_{max} - D_{min}}{D} \quad \text{Εξίσωση 3.9}$$

Ο οποίος έχει αποτέλεσμα διπλάσιο από αυτό που προκύπτει σύμφωνα με τον API RP 1111.

Αντίθετα όμως, σύμφωνα με τον DnV (2007), η πίεση αστοχίας  $p_c$  προκύπτει με την οβαλοποίηση, κάτι το οποίο όμως ύστερα από αρκετά πειράματα που έγιναν σε αγωγούς με τοιχώματα μεγαλύτερου πάχους δεν επαληθεύεται, κάνοντας έτσι την εξίσωση του API RP 1111 ακριβέστερη.

Η εγκατάσταση των αγωγών, σε βαθιά νερά, ενώ έχουν πληρωθεί με κάποιο υγρό, συνήθως νερό, έχει σαν αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση του κινδύνου αστοχίας λόγω εξωτερικής πίεσης και συνεπώς τη μείωση την απαίτησης μεγάλου πάχους τοιχωμάτων του αγωγού. Επιπροσθέτως, ο αγωγός είναι ιδιαίτερα σταθερός και μετά την πρώτη φάση της τοποθέτησής του και μπορεί άμεσα να τεθεί σε υδροστατικό έλεγχο. Βέβαια λίγοι είναι οι αγωγοί που έχουν τοποθετηθεί με αυτόν τον τρόπο γιατί αυξάνεται η απαίτηση αξονικής έντασης κατά πολύ, κυρίως για νερά βάθους μεγαλύτερου των 2300m.

Γενικά η αύξηση της έντασης προκαλεί μείωση των τάσεων στην περιοχή του sagbend, όμως πρέπει να δοθεί προσοχή στην περίπτωση των ριχών νερών όπου η αύξηση της έντασης πρέπει να υπολογισθεί έτσι ώστε να παραλαμβάνεται με ασφάλεια από τις άγκυρες ώστε να μην υπάρξει ολίσθηση του αγωγού στην επιφάνεια του πυθμένα. Επιπλέον η αυξημένη ένταση στον αγωγό έχει ως αποτέλεσμα και μεγαλύτερες απομένουσες τάσεις στο τμήμα του αγωγού που ακουμπάει τον πυθμένα καθώς επίσης και μεγαλύτερο «άνοιγμα» αγωγού. Γι' αυτούς τους λόγους σκόπιμο είναι να μελετάται αρκετά προσεκτικά η επιβολή επιπρόσθετης έντασης στον αγωγό και να μη λαμβάνεται αυθαίρετα.

Καταληκτικά άξιο αναφοράς είναι και το φαινόμενο του λυγισμού που προκαλείται στην επιφάνεια επαφής του αγωγού με τον πυθμένα και το οποίο μελετάται και αυτό από τους παραπάνω κανονισμούς. Στα βαθιά νερά, η αυξημένη εξωτερική πίεση σε συνδυασμό με την καμύλωση του αγωγού μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία από διάδοση λυγισμού κατά μήκος του αγωγού. Για την αποφυγή της διάδοσης του λυγισμού χρησιμοποιούνται ανά αποστάσεις ειδικές κατασκευές οι οποίες ονομάζονται αναστολείς λυγισμού και ουσιαστικά είναι τμήματα μεταλλικού αγωγού με τοιχώματα μεγαλύτερου πάχους τα οποία συγκολλούνται πάνω στον κυρίως αγωγό. Σύμφωνα με τον αμερικανικό κανονισμό, η πίεση διάδοσης του λυγισμού προκύπτει από την εξίσωση:

$$P_p = 245 \left( \frac{t}{D} \right)^{2.4} \quad \text{Εξίσωση 3.10}$$

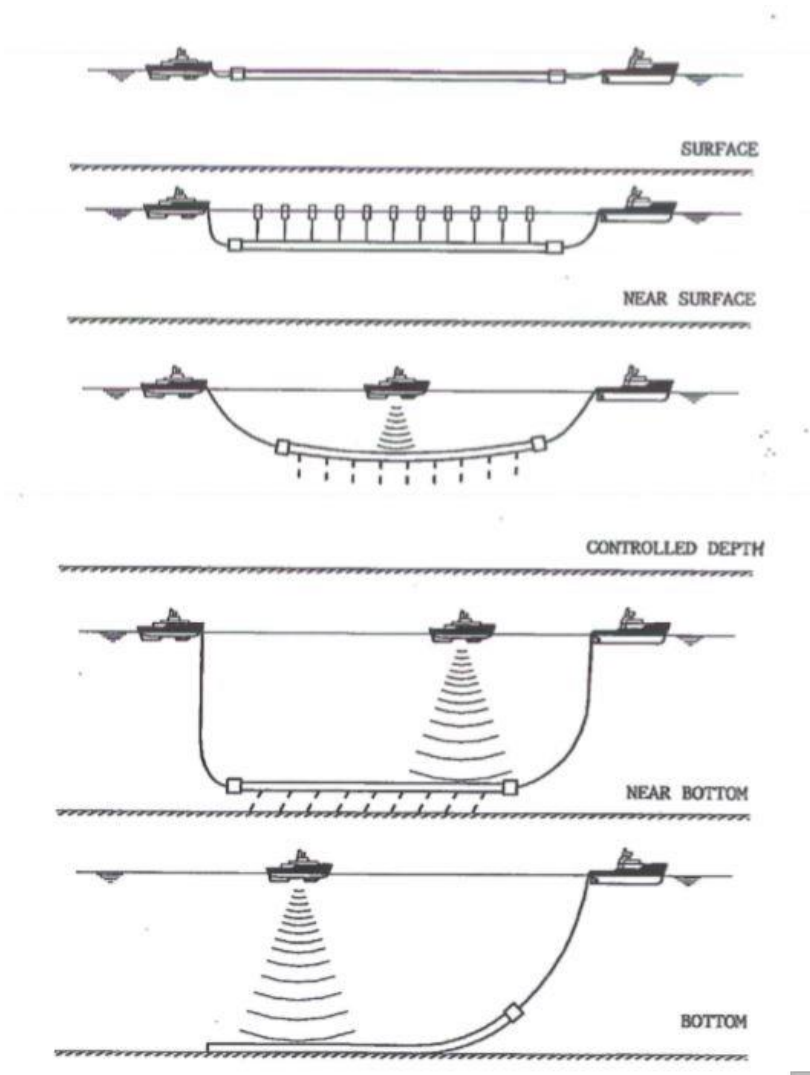
Όπου  $S$  είναι η ελάχιστη τάση διαρροής του χάλυβα.

Στον έλεγχο των τάσεων για την εξασφάλιση της μη διάδοσης του λυγισμού εφαρμόζεται συντελεστής ασφαλείας στην επιβαλλόμενη εξωτερική πίεση 1.25. Αυτή η διαδικασία ελέγχου είναι εμπειρική και βασισμένη σε πειράματα που έχουν εκτελεστεί σε αγωγούς υπό επιβαλλόμενη εξωτερική πίεση.

## 3.5 Μέθοδοι ρυμούλκησης

### 3.5.1 Γενικά

Οι μέθοδοι tow ενδείκνυνται για την τοποθέτηση αγωγών σε λίμνες, ποταμούς αλλά και σε θαλάσσιες περιοχές. Η βασική τους διαφορά με τις lay-methods έγκειται στο ότι ολόκληρος ο αγωγός ή αν αυτό δεν είναι εφικτό μέρος αυτού, κατασκευάζεται σε παράκτια περιοχή και μεταφέρεται στην επιθυμητή τοποθεσία. (Σχήμα 3.13) Το βασικό πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι ότι όλη η διαδικασία συγκόλλησης των επιμέρους τμημάτων και ελέγχου των συγκολλήσεων αυτών εκτελείται στη στεριά όπου οι συνθήκες είναι σαφώς ευνοϊκότερες αλλά και τα κόστη μικρότερα. Μετά την εξασφάλιση του επιθυμητού μήκους του αγωγού και αφού εκτελεστεί έλεγχος ατελειών με χρήση νερού, ο αγωγός στεγανώνεται πλήρως και μεταφέρεται στο νερό.



Σχήμα 3.13: Tow-Methods

Για την ασφαλή μεταφορά του αγωγού και την εξασφάλιση όσο το δυνατόν μεγαλύτερου ελέγχου, γίνεται χρήση δύο τουλάχιστον ρυμουλκών πλοίων, ένα για το αρχικό άκρο, το οποίο είναι υπεύθυνο και για την πορεία όλου του αγωγού, και ένα για τον

έλεγχο του τελικού άκρου. Τα πλοία που χρησιμοποιούνται είναι ειδικά διαμορφωμένα, φέρουν μεγάλες άγκυρες στις οποίες προσαρτάται με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με την επιλεχθείσα τωμ μέθοδο η εκάστοτε άκρη του αγωγού. Αφού ολοκληρωθεί η μεταφορά του αγωγού κάθε άκρο του συνδέεται αντίστοιχα με τις επιθυμητές υφιστάμενες εγκαταστάσεις ή με προϋπάρχον τμήμα αγωγού. Η κατασκευή του αγωγού στην ακτή γίνεται με δύο μεθόδους, είτε παράλληλα με την ακτογραμμή είτε κάθετα σε αυτήν.

Για την παράλληλη κατασκευή πρέπει να εξασφαλισθεί η μίσθωση περιοχής τόσο μεγάλης ώστε να χωράει το επιθυμητό μήκος του αγωγού. Αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει μεγάλο πρόβλημα αλλά και σημαντικό έξοδο. Οι επιμέρους διατομές τοποθετούνται σε σειρά, συγκολλούνται μεταξύ τους και ελέγχονται. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή για το επιθυμητό μήκος, ο ολοκληρωμένος πλέον αγωγός μεταφέρεται στο νερό με τη βοήθεια γερανών και ειδικά διαμορφωμένων φορτηγών. Το μπροστινό μέρος του αγωγού συνδέεται με το ένα σκάφος ενώ το πίσω άκρο του συνδέεται με ειδικά διαμορφωμένο εξοπλισμό ο οποίος είτε λειτουργεί σαν άγκυρα είτε συνδέεται με δεύτερο σκάφος ανάλογα με τη μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά του αγωγού στην επιθυμητή θέση. Το σκάφος οδηγός κινείται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί η σταδιακή είσοδος όλου του αγωγού στο νερό, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα και μία ασφαλή καμπυλότητα για τον αγωγό. Όταν όλος ο αγωγός εισέλθει στο νερό και σχηματίζεται πλέον μόνο μία καμπυλότητα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, ξεκινάει η κίνηση του αγωγού προς τη θέση εναπόθεσης. (Σχήμα 3.14)



**Σχήμα 3.14: Προώθηση του αγωγού στην ξηρά.**

Η κάθετη στην ακτογραμμή κατασκευή του αγωγού είναι ίσως οικονομικότερη από την παράλληλη καθώς απαιτεί μίσθωση μικρότερης χερσαίας έκτασης. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στην ύπαρξη του διαδρόμου εκκίνησης που αποτελείται από αριθμό τροχίσκων οι οποίοι βοηθούν στην ευκολότερη μετακίνηση των τμημάτων του αγωγού προς το νερό, και ο οποίος έχει φορά από την ακτή προς το υγρό στοιχείο. Η πρώτη διατομή του αγωγού τοποθετείται πάνω στον ειδικά διαμορφωμένο αυτό διάδρομο και συνδέεται με τροχαλία στο σκάφος οδηγό. Το σκάφος κινείται και το συνδεδεμένο πλέον σε αυτό τμήμα του αγωγού κινείται εισερχόμενο προς το νερό αφήνοντας στην εξωτερική επιφάνεια τμήμα ικανό για τη σύνδεση με το επόμενο τμήμα του αγωγού. Έτσι η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την εξασφάλιση του επιθυμητού μήκους. Όλες οι διατομές που χρησιμοποιούνται έχουν κατασκευαστεί και ελεγχθεί σε πιστοποιημένα κέντρα κατασκευής. Καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας ειδικά βαρούλκα είναι προσαρτημένα στον υπό κατασκευή αγωγό για τον έλεγχο πιθανών επικίνδυνων μετακινήσεων. (Σχήμα 3.15)



**Σχήμα 3.15: Είσοδος του αγωγού στην θάλασσα.**

Για αγωγούς που τοποθετούνται σε βαθιά νερά, πιο συγκεκριμένα για βάθη έως 900-1000 [m], προτείνεται η χρήση πεπιεσμένου αζώτου ώστε να αποτραπούν τυχόν αστοχίες ή λυγισμοί λόγω μεγάλης υδροστατικής πίεσης. Για μεγαλύτερα βάθη πιθανόν να χρειάζεται κάποια ενδιάμεση στάση για ανεφοδιασμό αζώτου αν και κάτι τέτοιο δεν έχει εφαρμοσθεί μέχρι τώρα.

Όπως είναι λογικό λόγω της χερσαίας κατασκευής του αγωγού οι μέθοδοι των είναι οικονομικότερες ακόμα και για την τοποθέτηση αγωγού σε θάλασσα, παρόλα αυτά τα πλεονεκτήματα είναι ακόμη μεγαλύτερα στις περιπτώσεις των πολλών μεμονωμένων και μικρών σε μήκος αγωγών. Βέβαια προτείνεται να γίνεται πάντα ανάλυση των δεδομένων της κάθε μεθόδου για να αποφευχθούν αστοχίες καθώς ειδικά για την τοποθέτηση σε βαθιά νερά το ρίσκο είναι μεγάλο.

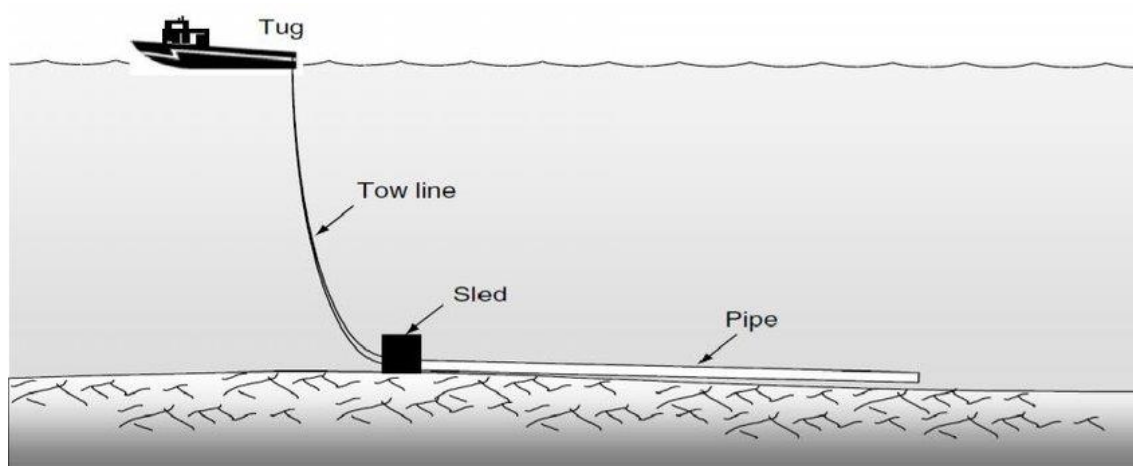
Ανάλογα με το βάθος του νερού και συνεπώς την καθ' ύψος θέση του αγωγού μέσα στο υγρό στοιχείο κατά τη διάρκεια της μεταφοράς του από την ακτή στη θέση εναπόθεσης υπάρχουν τέσσερις βασικές κατηγορίες των μεθόδων.

- Ρυμούλκηση στον πυθμένα
- Ρυμούλκηση άνω του πυθμένα
- Επιφανειακή ρυμούλκηση
- Ρυμούλκηση ελεγχόμενου βάθους

### 3.5.2 Ρυμούλκηση στον πυθμένα

#### 3.5.2.1 Γενικά

Είναι η μέθοδος κατά την οποία ο αγωγός μεταφέρεται από την ακτή στην τελική του θέση εναπόθεσης με τη βοήθεια βαρούλκων "συρτός" στην επιφάνεια του βυθού. (Σχήμα 3.16) Είναι συνήθης η εφαρμογή αυτής της μεθόδου για μικρές μετακινήσεις σε περιπτώσεις που οι θέσεις εναπόθεσης είναι κοντά στην ακτή. Ολόκληρη η διαδικασία απαιτεί πολύ καλό σχεδιασμό, ακριβή προγραμματισμό και μελέτες όχι μόνο στην περιοχή εναπόθεσης του αγωγού αλλά και στην ευρύτερη περιοχή που ο αγωγός θα διασχίσει κατά τη μετακίνησή του, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες αστοχιών. Ιδιαίτερα στην περίπτωση κατά την οποία ο αγωγός προετοιμάζεται παράλληλα με την ακτογραμμή τότε πρέπει να γίνει έλεγχος όλης της περιοχής των ρηχών νερών κατά μήκος του αγωγού.



Σχήμα 3.16: Σχεδιάγραμμα επιμέρους τμημάτων φορέα για τοποθέτηση κατά την μέθοδο Bottom-tow

#### 3.5.2.2 Ιδιαίτερες απαιτήσεις

Όπως είναι λογικό η τριβή του αγωγού με τον θαλάσσιο πυθμένα προκαλεί αντικείμενο μελέτης για την αντιμετώπιση πιθανών προβλημάτων που μπορούν να επέλθουν όπως η φθορά της εποξειδικής ρητίνης που χρησιμοποιείται για την εξασφάλιση του αγωγού από διάβρωση. Για τον λόγο αυτό τοποθετείται στο κάτω μισό τμήμα του αγωγού προστατευτικό κάλυμμα συνήθως κατασκευασμένο από ωπλισμένο σκυρόδεμα το οποίο συμβάλει και στην αύξηση της ευστάθειας του αγωγού. Υπάρχουν διάφορων ειδών επικαλύψεις ιδανικές για την κάλυψη των αναγκών γι' αυτό τον λόγο καλό είναι να γίνεται έλεγχος για την εύρεση του ιδανικότερου για την κάθε περίπτωση υλικού. Ένα λείο για παράδειγμα υλικό εκτός του ότι μειώνει τη δράση της τριβής μειώνει και τις απαιτήσεις σε αντοχή των ιμάντων και των μηχανισμών σύνδεσης του αγωγού με τα σκάφη.

Η αντοχή και συνεπώς οι απαιτήσεις του εκάστοτε μηχανισμού σύνδεσης του αγωγού με το ρυμουλκό σκάφος είναι στοιχεία άμεσα συνδεδεμένα με το μήκος των επιμέρους τμημάτων του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα η έλξη του δέστρου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το συνολικό βάρος του αγωγού συν το μερικό βάρος των βαρούλκων που είναι τοποθετημένα στις απολήξεις του αγωγού επί τον συντελεστή τριβής του εδάφους ο οποίος συντηρητικά μπορεί να ληφθεί ως μονάδα. Σε περίπτωση μη επάρκειας είναι δυνατή η σε



σειρά τοποθέτηση περισσότερων από ένα σκαφών με στόχο την αύξηση της δύναμης έλξης του δέστρου.

Στην περίπτωση των ρηχών νερών, είναι πιθανή η απαίτηση δημιουργίας τάφρου για την εξασφάλιση της ευστάθειας του αγωγού αλλά και την ικανοποίηση κανονιστικών διατάξεων. Σε τέτοιες περιπτώσεις πιθανή είναι η απαίτηση προσθήκης στο μπροστινό μέρος του αγωγού ειδικά διαμορφωμένο άροτρο το οποίο βέβαια αυξάνει και τις απαιτήσεις σε δύναμη έλξης του δέστρου.

### **3.5.2.3 Επί τόπου συνδέσεις**

Η σύνδεση των άκρων του αγωγού που μεταφέρεται με την Bottom-tow μέθοδο στην τοποθεσία εναπόθεσης με τις προϋπάρχουσες εγκαταστάσεις γίνεται με τη χρήση της μεθόδου Deflect-to-Connect. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο τα άκρα του αγωγού με τη βοήθεια ειδικών σωσιβίων επιπλέουν μερικά μέτρα πάνω από τον πυθμένα και φέρουν αλυσίδες με προσαρτημένες ειδικές άγκυρες οι οποίες τοποθετούνται κατά τη διαδικασία που έχει προηγηθεί στην στεριά. Όταν ο αγωγός έρθει στη σωστή θέση και με τη βοήθεια πλευρικών καλωδίων σταθεροποιηθεί, η σύνδεσή του με τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις γίνεται είτε χειροκίνητα, από ειδικά εκπαιδευμένους δύτες εάν βρίσκεται σε βάθη όπου είναι δυνατή η κατάδυση, είτε από υδραυλικά συστήματα σύνδεσης, σε βαθιά νερά.

### **3.5.2.4 Δυσκολίες**

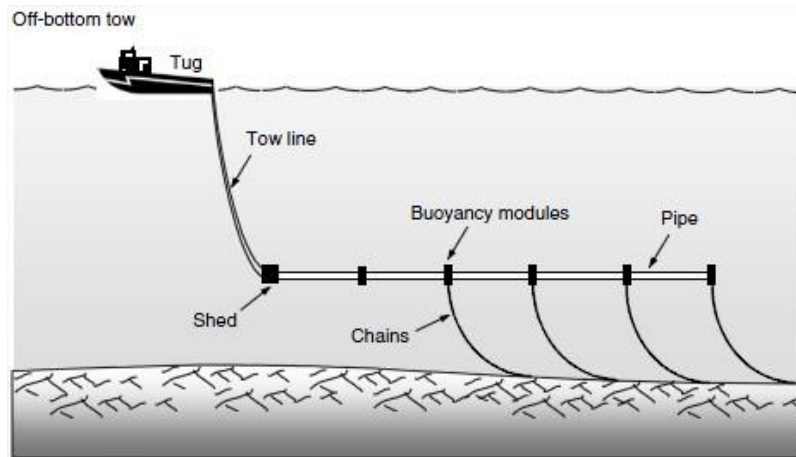
Όπως έχει είδη αναφερθεί η μέθοδο αυτή αποτελεί ιδανική λύση για μικρού μήκους αγωγούς των οποίων η θέση εναπόθεσης δεν απέχει πολύ από τη στεριά καθώς τα κόστη κατασκευής τους είναι πολύ μικρά. Παρόλα αυτά, είναι εμφανές ότι υπάρχουν αρκετές δυσκολίες κατά την εφαρμογή του οι οποίες έγκειται κυρίως στις πρακτικές διαδικασίες που ακολουθούνται. Αρχικά πέρα από τον εκτενή έλεγχο της περιοχής από την οποία πρόκειται να διέλθει ο αγωγός πρέπει να εξασφαλισθεί ότι στη διαδρομή η οποία θα ακολουθηθεί δεν υπάρχουν όχι μόνο φυσικά εμπόδια αλλά και υφιστάμενοι αγωγοί. Επιπλέον απαραίτητη είναι η χρήση ειδικού μηχανοποιημένου συστήματος ανίχνευσης βυθού καθ' όλη την διάρκεια μετακίνησης και σύνδεσης του αγωγού. Τέλος δεν πρέπει να αμελείται η προφύλαξη και συντήρηση του αγωγού από φυσικές συνθήκες κατά τη διάρκεια κατασκευής του στην χερσαία παράκτια περιοχή.

## **3.5.3 Ρυμούλκηση άνω του πυθμένα**

### **3.5.3.1 Γενικά**

Σε αυτή τη μέθοδο ο αγωγός επιπλέει σε προκαθορισμένο ύψος πάνω από τον πυθμένα. (Σχήμα 3.17) Αυτό βασίζεται στο ότι ο αγωγός πρέπει να είναι ελάχιστα ελαφρύτερος από το νερό και στη τοποθέτηση σε αυτόν αλυσίδων και σωσιβίων, καθ' όλο το μήκος του, υπολογισμένων με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ανύψωσή του από τον πυθμένα.

Η διαδικασία που ακολουθείται για την προσάρτηση των αλυσίδων και των σωσιβίων στον αγωγό είναι όμοια με αυτή που ακολουθείται κατά την προαναφερθείσα Bottom-tow μέθοδο. Προσαρτώνται κατά την κατασκευή του αγωγού στην στεριά και αφαιρούνται όταν αυτός έχει σταθεροποιηθεί με τη βοήθεια καλωδίων στη θέση τοποθέτησής του.



Σχήμα 3.17: Σχεδιάγραμμα επιμέρους τμημάτων φορέα για τοποθέτηση κατά την μέθοδο Off-bottom-tow

### 3.5.3.2 Πλεονεκτήματα μεθόδου

Σε σχέση με την προαναφερθείσα μέθοδο υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα που καθιστούν στην Off-bottom tow μέθοδο προσφιλέστερη. Αρχικά σημαντικό είναι το γεγονός ότι προϋπάρχοντες αγωγοί δεν αποτελούν πλέον πρόβλημα καθώς δύναται η κάλυψή τους με προκατασκευασμένα τμήματα ωπλισμένου σκυροδέματος τα οποία θα τους προφυλάσσουν από την επαφή τους με τις αλυσίδες του μετακινούμενου αγωγού. Επιπλέον δεν απαιτείται αύξηση της επικάλυψης του υπό μελέτη αγωγού λόγω τριβής σε σημείο που πιθανόν να μην είναι απαραίτητη η χρήση επικάλυψης από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Τέλος κατά τη μελέτη και χαρτογράφηση του πυθμένα δεν απαιτούνται ιδιαίτερες λεπτομέρειες παρά μόνο η αποτύπωση εμποδίων ψηλότερων από το ελεύθερο ύψος μεταξύ αγωγού και πυθμένα.

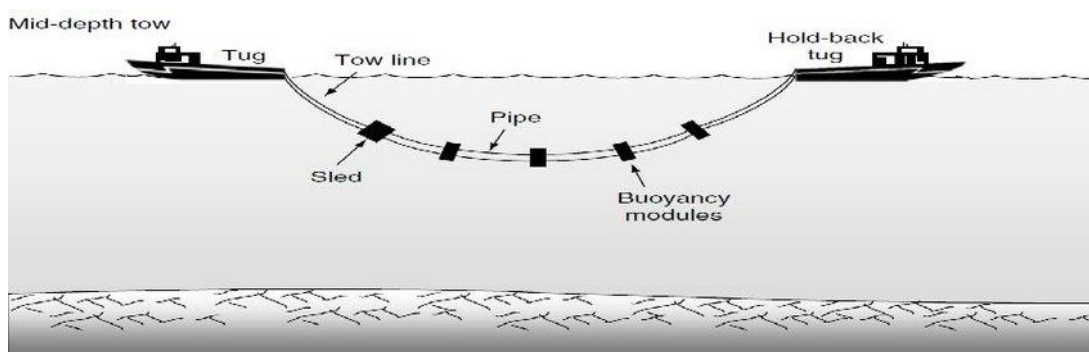
### 3.5.4 Ρυμούλκηση ελεγχόμενου βάθους

#### 3.5.4.1 Γενικά

Αρκετά ιδιόμορφη στην εφαρμογή της είναι μέθοδος μεσαίου βάθους, ή αλλιώς ελεγχόμενου βάθους. Σύμφωνα με αυτήν, ο αγωγός είναι ελαφρά βυθισμένος μέσα στο νερό και η στάθμη της βύθισης αυτής ελέγχεται από την κίνηση και την ταχύτητα των δύο ρυμουλκικών πλοίων που μεταφέρουν τον αγωγό. (Σχήμα 3.18) Η διαδικασία δημιουργίας του αγωγού εκτελείται με τις μεθόδους που αναφέρθηκαν εισαγωγικά στην ακτή ενώ τα αρχικά τοποθετημένα αντίβαρα αφαιρούνται μόλις ο αγωγός εισέλθει ολόκληρος στο νερό ώστε να μπορέσει να εφαρμοστεί η μέθοδος.

Πέρα από τις αλυσίδες και τα αντίβαρα που τοποθετούνται καθ' όλο το μήκος του αγωγού, η διαδικασία βασίζεται στην εφαρμογή τάσης, αντίθετης, από τα δύο ρυμουλκικά πλοία στον αγωγό, τέτοιας ώστε να εξασφαλίζεται το επιθυμητό «τέντωμα» του αγωγού και συνεπώς το επιθυμητό βύθισμά του. Όταν ο αγωγός φτάσει στο επιθυμητό ύψος το πλοίο οδηγός ασκεί μεγαλύτερη ώθηση ώστε να κινηθεί το σύστημα πλοίων-αγωγού, ενώ ταυτόχρονα το πίσω σκάφος ασκεί μικρότερη αντίθετη ώθηση. Από τρίτο σκάφος ελέγχεται συνεχώς το ύψος του αγωγού στη μεσαία κατά μήκος θέση του και τα αποτελέσματα του ελέγχου στέλνονται ταυτόχρονα και στα δύο συνδεδεμένα με τον αγωγό πλοία ώστε να μεταβάλουν την κίνησή τους σε περίπτωση που κάτι τέτοιο χρειάζεται.

Η παραπάνω διαδικασία είναι σίγουρα πολύπλοκη και η εφαρμογή της προτείνεται για αγωγούς μικρότερους των 3[km] καθώς επίσης είναι αρνητικό το γεγονός ότι κατά την εφαρμογή της πρέπει να έχει γίνει μελέτη για την εύρεση περιοχής στην οποία ο αγωγός θα μπορέσει να προστατευτεί σε περίπτωση ανάγκης. Παρ' όλ' αυτά, η εφαρμογή της είναι αρκετά συχνή κυρίως επειδή δεν απαιτεί την ύπαρξη λεπτομερών μελετών του πυθμένα που θα διασχίσει ο αγωγός, καθώς η στάθμη στην οποία βρίσκεται κατά την μεταφορά του, παρέχει ασφάλεια όχι μόνο από τις απρόσμενες κυματικές συνθήκες αλλά και από τις ανομοιογένειες και τα εμπόδια, φυσικά και τεχνητά, που βρίσκονται στον πυθμένα. Γι' αυτό τον λόγο η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιοχές με πετρώδες ανάγλυφο ή σε περιοχές με υφιστάμενο δίκτυο αγωγών.

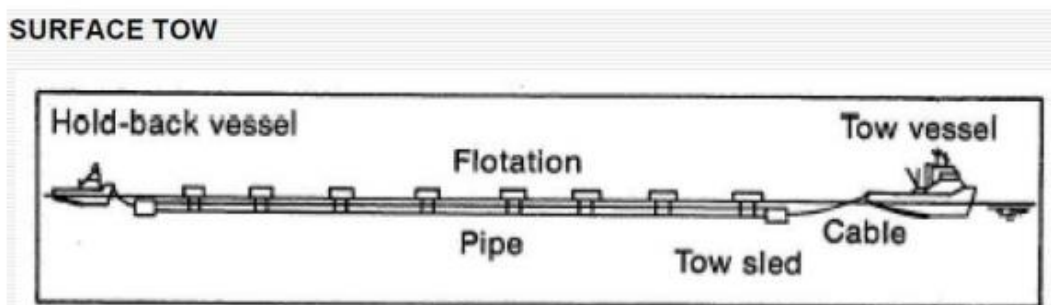


Σχήμα 3.18: Σχεδιάγραμμα επιμέρους τμημάτων φορέα για τοποθέτηση κατά την μέθοδο Mid-depth-tow

### 3.5.5 Επιφανειακή ρυμούλκηση

#### 3.5.5.1 Γενικά

Παρόμοια με τη mid-depth tow μέθοδο, η μέθοδος surface tow δεν απαιτεί την ύπαρξη αλυσίδων κατά μήκος του αγωγού αλλά τη στήριξη αυτού σε πλωτά στοιχεία, σχεδίες. Ο αγωγός επιπλέει και κινείται με τη βοήθεια δύο ρυμουλκών πλοίων στα οποία είναι συνδεδεμένος και τα οποία του προσδίδουν ώθηση με τρόπο όμοιο με αυτόν που περιγράφεται στη διαδικασία mid-depth tow. Σχήμα 3.19



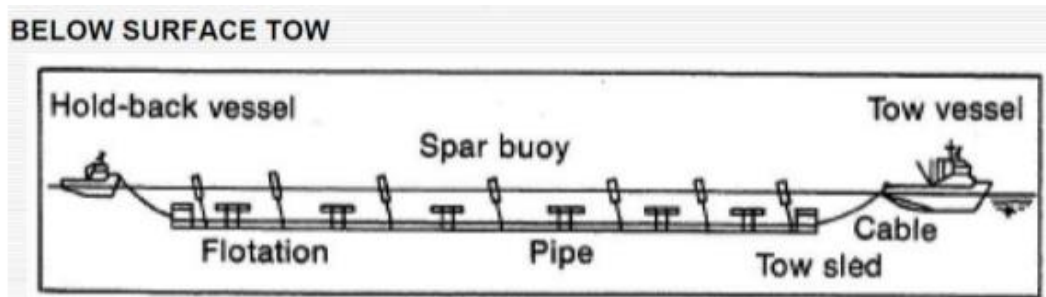
Σχήμα 3.19: Σχεδιάγραμμα επιμέρους τμημάτων φορέα για τοποθέτηση κατά την μέθοδο Surface-tow

Η μέθοδος αυτή απαιτεί τη μελέτη του πυθμένα παρά μόνο στην περιοχή που θα εγκατασταθεί τελικώς ο αγωγός. Η εφαρμογή της προτείνεται σε ρηγά κυρίως νερά καθώς σε βαθιά νερά απαιτείται η χρήση ειδικού συστήματος βύθισης του αγωγού για την τοποθέτησή του στην τελική του θέση κάτι ιδιαίτερα εξειδικευμένο και κοστοβόρο.



Επιπλέον η μέθοδος αυτή καθιστά τον αγωγό ευάλωτο στις καιρικές συνθήκες αλλά κυρίως στην ανεπιθύμητη κυματική δραστηριότητα η οποία μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες στον αγωγό. αυτός είναι και ο κύριος λόγος που αυτή η μέθοδος σπάνια χρησιμοποιείται.

Μία εναλλακτική της μεθόδου αυτής θα μπορούσε να θεωρηθεί η near-surface tow ή εναλλακτικά below surface tow μέθοδος, κατά την οποία ο αγωγός δεν υποστηρίζεται από πλωτά στοιχεία αλλά μόνο από την εφαρμοζόμενη σε αυτόν τάση από τα ρυμουλκά πλοία, και επομένως είναι ελάχιστα βυθισμένος και κατά συνέπεια πιο προστατευμένος από τα καιρικά φαινόμενα και τους έντονους κυματισμούς. Σχήμα 3.20



Σχήμα 3.20: Σχεδιάγραμμα επιμέρους τμημάτων φορέα για τοποθέτηση κατά την μέθοδο Below-surface-tow

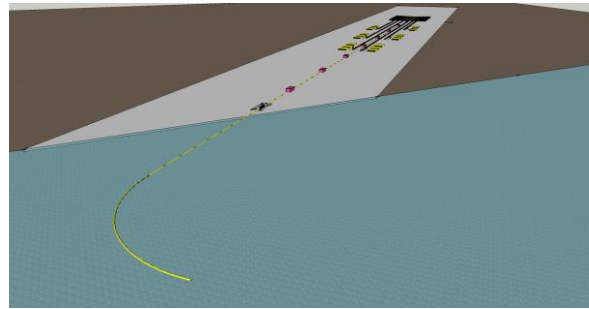
## 3.6 O-lay Methods

### 3.6.1 Γενικά

Ο συνδυασμός της χρήσης μεθόδων tow και lay γεννά την μέθοδο O-lay. Η νεότερη μέθοδος τοποθέτησης υποθαλάσσιων αγωγών, σε ρηχά αλλά και βαθιά νερά, αποτελεί ακόμα θέμα συζήτησης καθώς η αυξημένη ταχύτητα τοποθέτησης που παρέχει, έρχεται να αντιπαρατεθεί, με τις αυξημένες τάσεις που αναπτύσσονται λόγω επιβαλλόμενων παραμορφώσεων στον αγωγό.

Στα θετικά χαρακτηριστικά της συμπεριλαμβάνεται η προετοιμασία μεγάλου, ενιαίου μήκους του αγωγού στην ξηρά. Όλες οι απαραίτητες συγκολλήσεις, οι έλεγχοι και η προετοιμασία του αγωγού γενικότερα γίνονται σε ασφαλέστερο περιβάλλον και με λιγότερο κόστος. Για τη συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιείται η διαδικασία της κάθετης στην ακτογραμμή κατασκευής του αγωγού όπως ακριβώς αυτή αναφέρθηκε στην παράγραφο των tow μεθόδων. (Σχήμα 3.21) Η διαφορά έγκειται στο ότι ο αγωγός καθώς διασχίζει την επιφάνεια του νερού ωθείται να δημιουργήσει μία μονοστρωματική σπείρα προϋπολογισμένων διαστάσεων. Αφού κατασκευαστεί όλος ο αγωγός, συνδέεται με ρυμουλκά πλοία, S-lay barges, χωρίς συγκεκριμένες ιδιαιτερότητες, και ρυμουλκείται έως τη θέση τοποθέτησής του. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και οι περιορισμοί που οφείλουν να τηρηθούν θα αναφερθούν αναλυτικότερα σε επόμενη παράγραφο. Επιπρόσθετα, θετικό της μεθόδου είναι η δυνατότητα εφαρμογής επικάλυψης του αγωγού από ωπλισμένο σκυρόδεμα, κάτι το οποίο πέρα από την προστασία ως προς την οξείδωση του αγωγού προσδίδει και το απαιτούμενο βάρος για τη σταθεροποίησή του στην τελική θέση τοποθέτησης. Τέλος, η O-lay μέθοδος είναι ιδανική για μεγάλου μήκους αγωγούς, καθώς θεωρητικά και πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι είναι δυνατή η δημιουργία σπείρας αγωγών οποιασδήποτε διαμέτρου, παρόλα αυτά για λόγους ασφάλειας έως τώρα έχει χρησιμοποιηθεί για αγωγούς έως 90[cm].

Στα μειονεκτήματα τώρα της μεθόδου είναι το γεγονός ότι για την διαμόρφωση της σπείρας καθώς και για τις διαδικασίες της αποθήκευσης, της μεταφοράς και της εγκατάστασης του αγωγού, απαιτείται η εφαρμογή εναλλασσόμενων μεγάλων δυνάμεων κάτι το οποίο προκαλεί μείωση της αντοχής του υλικού και συνεπώς μείωση και της αναμενόμενης διάρκειας ζωής του. Τέλος σημαντικό στοιχείο προβληματισμού αποτελούν οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες, καθώς λόγω του ότι η σπείρα επιπλέει στην επιφάνεια του νερού, καθίσταται ευάλωτη από τις ανεξέλεγκτες έντονες καιρικές συνθήκες αλλά και από τους αναμενόμενους κατά τόπους έντονους κυματισμούς.



Σχήμα 3.21: Προώθηση αγωγού από την ακτή για την προετοιμασία της μεθόδου O-lay.

### 3.6.1.1 Κάμψη σκυροδέματος

Η χρήση επικάλυψης σκυροδέματος κατά την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου φαίνεται κατά μία πρώτη ματιά παράδοξη, ίσως και αδύνατη. Όπως είναι γνωστό, ο χάλυβας ως υλικό είναι εύκολα παραμορφώσιμο και όλκιμο, έχει δηλαδή τη δυνατότητα οι παραμορφώσεις του στο φάσμα της ελαστικής περιοχής να μην είναι παραμένοντες. Αντίθετα το σκυροδέμα δεν έχει από μόνο του αυτή τη δυνατότητα καθώς σαν υλικό είναι ψαθυρό. Τη λύση σε αυτό τη δίνει η εφαρμογή θλιπτικής δύναμης, η οποία βοηθά κατά πολύ τη βελτίωση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος, καθώς και η προσθήκη ειδικών προσμίκτων, ινωδών υλικών αλλά και μικρής διαμέτρου αδρανών. Τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται δρουν επιβραδύνοντας την ανάπτυξη μικρορωγμών στο σκυροδέμα ενώ τα ανθρακονήματα ενισχύουν την αντοχή του. Αντίστοιχα το μέγεθος των αδρανών όπως είναι γνωστό επηρεάζει στη συνοχή του σκυροδέματος, προσφέροντας έτσι μεγαλύτερη ανθεκτικότητα και αντοχή ύστερα από τη χρήση μικρόκοκκων αδρανών. Πειραματικά από πανεπιστήμιο του Michigan έχει παρατηρηθεί αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος έως και 4%. Σχήμα 3.22

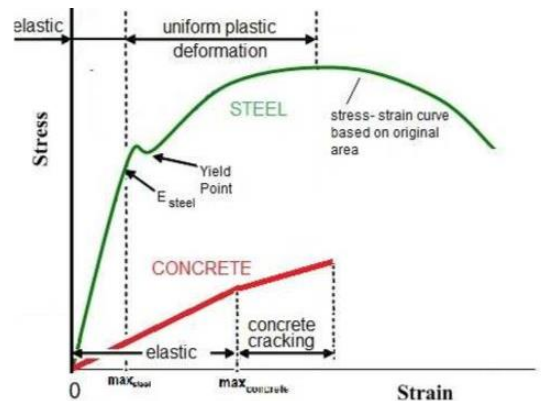


Σχήμα 3.22: Πειραματική διαδικασία κάμψης σκυροδέματος.

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα από την ίδια μελέτη, (University of Michigan, Li, VC (2003)) για την κάμψη του αγωγού που απαιτείται για τη διαμόρφωση της σπείρας κρίσιμο υλικό υποδεικνύεται ο χάλυβας και επομένως μαθηματικά αποδεικνύεται η συσχέτιση της διαμέτρου του αγωγού με τη διάμετρο της διαμορφούμενης σπείρας. Πιο συγκεκριμένα ισχύει:

$$D_{\text{spiral}}/d_{\text{pipe}} > E/f_y$$

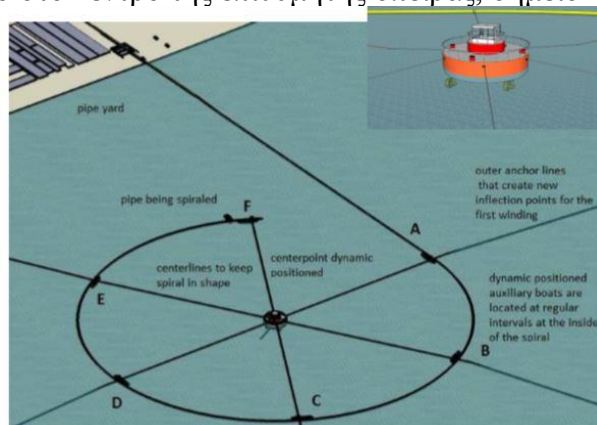
Όπου:  $D_{\text{spiral}}$  → η διάμετρος της εσωτερικής  
 παρειάς της σπείρας  
 $d_{\text{pipe}}$  → η εξωτερική διάμετρος  
 του αγωγού  
 $f_y$  → η τάση διαρροής του  
 χάλυβα  
 $E$  → το μέτρο ελαστικότητας  
 του χάλυβα



Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι με την αύξηση της ποιότητας του χάλυβα αυξάνεται και το όριο διαρροής του χάλυβα ενώ το μέτρο ελαστικότητας παραμένει σταθερό, και κατά συνέπεια η διάμετρος της σπείρας μπορεί να γίνει μικρότερη. Για ασφάλεια παρόλα αυτά δεν επιλέγεται διάμετρος πρώτου στρώματος σπείρας μικρότερη του  $500 \cdot d_{\text{pipe}}$ .

### 3.6.1.2 Διαδικασία

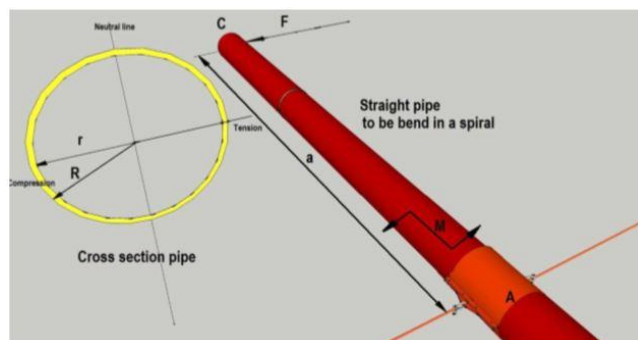
Η διαδικασία που ακολουθείται για την εφαρμογή της μεθόδου είναι αρκετά ιδιαίτερη και απαιτητική παρόλα αυτά δεν είναι απαγορευτική καθώς εν τέλει η τοποθέτηση είναι αρκετά γρηγορότερη από άλλες μεθόδους. Αρχικά ο αγωγός όπως προαναφέρθηκε κατασκευάζεται στη ξηρά και προωθείται προς το υγρό στοιχείο κάθετα στην ακτογραμμή. Όταν επαρκές μήκος του αγωγού, μεγαλύτερο των 2/3 της περιφέρειας της επιθυμητής σπείρας, επιπλέει ευθύγραμμα στην επιφάνεια της θάλασσας, εκτελείται σύνδεση σημείου του αγωγού με αντίβαρο στο κέντρο της επιθυμητής σπείρας, σημείο Α. (Σχήμα 3.23)



Σχήμα 3.23: Διαμόρφωση μεθόδου O-lay.

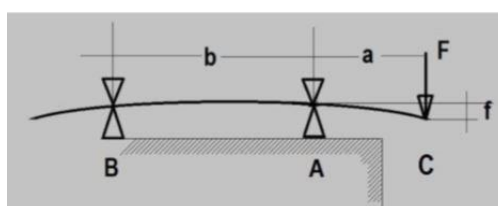
Για να στραφεί ο αγωγός απαιτείται η άσκηση δυνάμεων ιδιαίτερα μεγάλων για τη δημιουργία ροπής στο σημείο M του αγωγού όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.24 όσο

μεγαλύτερος ο μοχλοβραχίονας τόσο μεγαλύτερη η ασκούμενη ροπή και συνεπώς τόσο μεγάλη και η καμπυλότητα που επιτυγχάνεται. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα δύσκολη στα ακραία τμήματα του αγωγού, αρχή και πέρασ, και γι' αυτό τον λόγο σε αυτά τα σημεία αυτά προσαρμόζεται ειδικά κατασκευασμένο πλαστικό στοιχείο το οποίο λειτουργεί υποβοηθητικά για την ολοκλήρωση της καμπύλωσης.



Σχήμα 3.24:Απεικόνιση στατικού μοντέλου μεθόδου O-lay.

Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης δύναμης για την καμπύλωση του αγωγού γίνεται χρήση των εξισώσεων που υπακούν στην αμφιπροέχουσα δοκό υπό σημειακή φόρτιση στο ένα εκ των άκρων της όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.25.

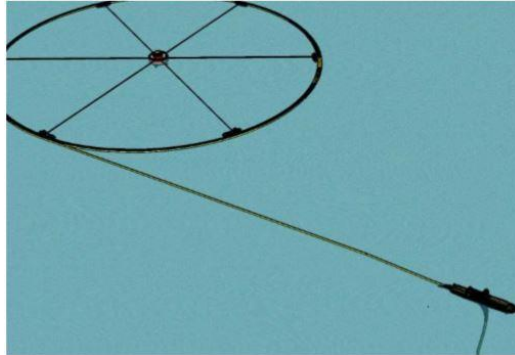


Σχήμα 3.25:Στατικό προσομοίωμα

Η διαδικασία της καμπύλωσης συνεχίζεται για τη δημιουργία της σπείρας με τη βοήθεια ενός σκάφους στο κέντρο της, το οποίο σταθεροποιείται σε συγκεκριμένο σημείο χρησιμοποιώντας σύστημα DP. Υποβοηθητικά λειτουργούν τουλάχιστον δύο ακόμα πλοία τα οποία τοποθετούνται στην περιφέρεια της έλικας και τα οποία αντιστέκονται σε πλευρικές μη επιθυμητές κινήσεις και ταυτόχρονα ελέγχουν και την περιστροφή του αγωγού. Για ακόμη μεγαλύτερη σταθερότητα της έλικας κατά τη μεταφορά το σύστημα κεντρικού πλοίου-περιμετρικών πλοίων-σπείρα συνδέεται και με ειδικά διαμορφωμένα σχοινιά. Με τη χρήση αυτής της μεθόδου είναι δυνατή η μεταφορά αγωγού μεγαλύτερου των 100[km]. Ο μόνος περιορισμός είναι το βάρος του το οποίο όσο αυξάνεται απαιτεί και πιο ισχυρά ρυμουλκά πλοία.

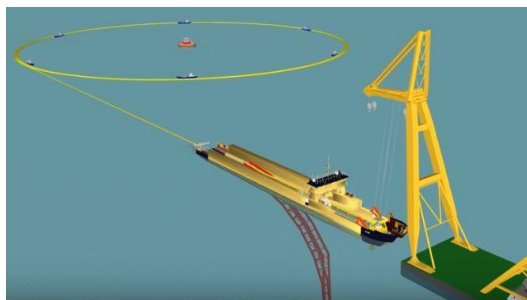
Το ξετύλιγμα και η βύθιση του αγωγού γίνονται όταν αυτός έχει φτάσει στη θέση τοποθέτησής του. Όπως και στην εφαρμογή της αρχικής καμπύλωσης για τη δημιουργία της σπείρας, έτσι και κατά το ξετύλιγμα αυτής απαραίτητη είναι η ύπαρξη ενός ευθύγραμμου τμήματος πριν τη βύθιση του αγωγού. Η βύθιση γίνεται με τον σχηματισμό της S-lay μεθόδου με τη διαφορά ότι το πλοίο που θα φέρει το ρύγχος για τον σχηματισμό της άνω καμπύλωσης που εφαρμόζεται κατά τη μέθοδο αυτή δεν είναι απαραίτητο να φέρει περισσότερα από ένα στάδια επεξεργασίας του αγωγού καθώς ο αγωγός είναι είδη συγκολλημένος και ελεγμένος από την στεριά και οι μόνιμοι έλεγχοι που χρειάζονται αφορούν τον εντοπισμό πιθανών βλαβών που προκλήθηκαν κατά τη μεταφορά του. (Σχήμα 3.26) Κατά την εφαρμογή της μεθόδου σε βαθιά νερά συνηθίζεται η τοποθέτηση

ελκυστήρα στο άκρο του ρύγχους για τον έλεγχο των τάσεων που ασκούνται στον αγωγό. Η ταχύτητα διάστρωσης του αγωγού κυμαίνεται ανάλογα με τη διάμετρό του αλλά είναι αρκετά συχνή η τοποθέτηση αγωγού 20-25 [km] ανά ημέρα.



**Σχήμα 3.26: Ολική απεικόνιση εφαρμογής μεθόδου O-lay.**

Η χρήση της μεθόδου σε πολύ ρηγά νερά ακόμη και με βάθος 1[m] είναι δυνατή. Στην περίπτωση αυτή όμως αντί για τη χρήση των γνωστών ρυμουλκών σκαφών που χρησιμοποιούνται στις λοιπές περιπτώσεις, γίνεται χρήση ειδικά διαμορφωμένων ερπυστριοφόρων οχημάτων. Σχήμα 3.27 Η μέθοδος είναι και εδώ ιδιαίτερα γρήγορη και σαφώς έχει το πλεονέκτημα της μη απαίτησης ειδικά διαμορφωμένων σκαφών για τη μεταφορά του προς τοποθέτηση αγωγού.



**Σχήμα 3.27: Χρήση της μεθόδου O-lay σε ρηγά νερά.**





## 4 Κανονιστικά πλαίσια

### 4.1 Γενικά κανονιστικά πλαίσια σχεδιασμού υποθαλάσσιου αγωγού

Η κατασκευή των αγωγών υδρογονανθράκων έχει απασχολήσει το παγκόσμιο επιστημονικό κοινό ιδιαίτερα για τους λόγους που έχουν αναφερθεί και στο κεφάλαιο 1 της παρούσας εργασίας. Λόγω της αύξησης της κατασκευής τους με την πάροδο των χρόνων, απαραίτητη κρίθηκε η μόρφωση κανονιστικών πλαισίων που θα εξασφάλιζαν την ορθότερη, ασφαλέστερη, ταχύτερη και οικονομικότερη κατασκευή τους. Όπως και με τους όποιους άλλους κανονισμούς που αφορούν τον μηχανικό έτσι και με αυτούς υπήρξε διαφορετική αντιμετώπιση μεταξύ αμερικάνικου και ευρωπαϊκού επιστημονικού κύκλου.

Πιο συγκεκριμένα ο αμερικανικός κανονισμός που εστιάζει σ' ό,τι αφορά την κατασκευή και τοποθέτηση υποθαλάσσιων μεταλλικών αγωγών είναι ο ASME B31.8-1999 Chapter VIII ο οποίος ακολουθεί για τον σχεδιασμό τη μέθοδο της επιτρεπόμενης τάσης (ASD family of codes).

Για αγωγούς που τοποθετούνται κυρίως στη Βόρεια Θάλασσα ακολουθείται ο ευρωπαϊκός κανονισμός, DNV OS-F101 κυρίως. Ταυτόχρονα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και πρόσθετα άρθρα που αναφέρονται στους παρακάτω πίνακες. Ο ευρωπαϊκός κανονισμός χαίρει παγκόσμιας εκτίμησης και βασίζεται στον τρόπο σχεδιασμού LRFD (Load and Resistance Factor Design).

<b>Table 1-2 Normative references</b>		
<i>Reference</i>	<i>Revision</i>	<i>Title</i>
DNV-OS-H101	Oct. 2011	Marine Operations, General
DNV-OS-H102	Jan. 2012	Marine Operations, Design and Fabrication
DNV-OS-H201	Apr. 2012	Load Transfer Operations
DNV-OS-H202	Apr./May 2014	Sea Transport (VMO Standard Part 2-2)
DNV-OS-H203	Feb. 2012	Transit and Positioning of Offshore Units
DNV-OS-H205	Feb. 2014	Lifting Operations (VMO Standard Part 2-5)
DNV-OS-H206	Mar. 2014	Sub Sea Operations (VMO Standard Part 2-6)
VMO-Rules	1996/2000	DNV Rules for Planning and Execution of Marine Operations
<i>Note:</i> The DNV-OS H series is planned to be issued during the period October 2011 through 2014. Each OS will enter into force at the date of publication. Until the OS is published the relevant requirements in "DNV - Rules for Planning and Execution of Marine Operations" shall be considered governing.		

**Πίνακας 4.1: Επικαιροποιημένα άρθρα του κανονισμού που αφορά υποθαλάσσιους αγωγούς στα οποία βασίζεται το κεφάλαιο του κανονισμού DNV-OS-H204.**

<b>Table 1-2 Normative references</b>		
<i>Reference</i>	<i>Revision</i>	<i>Title</i>
DNV-OS-C101	April 2011	Design of Offshore Steel Structures, General (LRFD Method)
DNV-OS-C401	October 2010	Fabrication and Testing of Offshore Structures
DNV-OS-H102	See note below	Marine Operations, Design & Fabrication
DNV-OS-H201	See note below	Load Transfer Operations
DNV-OS-H202	See note below	Sea Transports
DNV-OS-H203	See note below	Transit and Positioning of Mobile Offshore Units
DNV-OS-H204	See note below	Offshore Installation Operations
DNV-OS-H205	See note below	Lifting Operations
DNV-OS-H206	See note below	Sub Sea Operations

<b>Table 1-3 Informative references</b>	
<i>Reference</i>	<i>Title</i>
DNV-RP-H101	Risk Management in Marine- and Subsea Operations
DNV-RP-H102	Marine Operations during Removal of Offshore Installations
DNV-RP-H103	Modelling and Analysis of Marine Operations
DNV-RP-A203	Qualification Procedure for New Technology
DNV-RP-C204	Design Against Accidental Loads
DNV-RP-C205	Environmental Conditions and Environmental Loads
DNV-OS-C301	Stability and Watertight Integrity
DNV-OS-E301	Positioning Mooring
DNV-OS-E302	Offshore Mooring Chain
DNV-OS-E303	Offshore Mooring Fibre Ropes
DNV-OS-E304	Offshore Mooring Steel Wire Ropes
DNV-RP-E301	Design and Installation of Fluke Anchors in Clay
DNV-RP-E302	Design and Installation of Plate Anchors in Clay
DNV Ship Rules	Rules for Classification of Ships
DNV CN 20.1	Classification Note 20.1 - Stability Documentation for Approval
DNV CN 22.2	Lifting Appliances
ISO 19901-6	Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures – Part 6: Marine operations
NORSOK N-003	Action and Action Effects
OCIMF <sup>1)</sup>	Mooring Equipment Guidelines, 3 <sup>rd</sup> Edition
ICLL 1966	International Convention on Load Lines
SOLAS 1974	International Convention for Safety of Life at Sea
IMO - Intact Stability Code	The International Code on Intact Stability, 2008, as adopted with Res. MSC.267(85) on 4 December 2008
1) Oil Companies International Marine Forum	

**Πίνακας 4.2: Επικαιροποιημένα άρθρα του κανονισμού που αφορά υποθαλάσσιους αγωγούς στα οποία βασίζεται το κεφάλαιο του κανονισμού DNV-OS-H101.**

## 4.2 Ορολογία

Πέρα από τις διαδικασίες που έχουν αναφερθεί εκτενώς σε προηγούμενα κεφάλαια, αξίζει να γίνει αναφορά σε ορισμένες που είναι εξίσου σημαντικές και η εκπόνησή τους ορίζεται από τους κανονισμούς.

**Ενίσχυση με τσιμεντένεμα:** όλες οι διαδικασίες οι οποίες αφορούν την πλήρωση κενών μεταξύ γειτονικών αγωγών ή μεταξύ αγωγού και πυθμένα.

**Έναρξη ροής:** Οι διαδικασίες της συναρμολόγησης του αγωγού είτε στη στεριά είτε στη θάλασσα στα ειδικά διαμορφωμένα πλοία, και η μεταφορά του μέχρι το σημείο τοποθέτησης και βύθισής του.

**Ανύψωση:** Με τη χρήση ειδικά διαμορφωμένων γερανών γίνεται ανύψωση τμημάτων του αγωγού όπου αυτό απαιτείται.

**Συσσώρευση:** Η διαδικασία προώθησης και στερέωσης του αγωγού στον πυθμένα.



- Τοποθέτηση:** Η διαδικασία ορισμού της επιθυμητής θέσης του αγωγού με τη χρήση ειδικών συστημάτων για την τελική βύθιση και εγκατάσταση του αγωγού.
- Εγκατάσταση:** Οι απαραίτητες διαδικασίες που εκτελούνται για την ορθή βύθιση του αγωγού αφού έχει ορισθεί το σωστό σημείο τοποθέτησής του.
- Ασφαλείς συνθήκες:** Οι συνθήκες κατά τις οποίες ο αγωγός είναι εκτεθειμένος σε φυσιολογικά επίπεδα ρίσκου σ ό,τι αφορά την αστοχία του.

### 4.3 Φιλοσοφία ασφάλειας

Για την εξασφάλιση της απαιτούμενης ασφάλειας του δικτύου αγωγών οι κανονισμοί προβλέπουν μία μέθοδο κατηγοριοποίησης των σταθμών ασφάλειας. Βασισμένοι στις αποδεκτές αστοχίες γίνεται η κατηγοριοποίηση του υπό μελέτη αγωγού και υποδεικνύονται οι προκαθορισμένοι από τον κανονισμό συντελεστές ασφαλείας που χρησιμοποιούνται σε κάθε μοντέλο μελέτης. Η κατηγοριοποίηση γίνεται για το υγρό που θα φέρει ο αγωγός, για την τοποθεσία εγκατάστασής του αλλά και για τις επιτρεπόμενες βλάβες στον ίδιο τον αγωγό.

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι διάφορες κατηγορίες ασφάλειας ανάλογα με τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω.

<b>Table 2-1 Classification of fluids</b>	
<i>Category</i>	<i>Description</i>
A	Typical non-flammable water-based fluids.
B	Flammable and/or toxic fluids which are liquids at ambient temperature and atmospheric pressure conditions. Typical examples are oil and petroleum products. Methanol is an example of a flammable and toxic fluid.
C	Non-flammable fluids which are non-toxic gases at ambient temperature and atmospheric pressure conditions. Typical examples are nitrogen, carbon dioxide, argon and air.
D	Non-toxic, single-phase natural gas.
E	Flammable and/or toxic fluids which are gases at ambient temperature and atmospheric pressure conditions and which are conveyed as gases and/or liquids. Typical examples would be hydrogen, natural gas (not otherwise covered under category D), ethane, ethylene, liquefied petroleum gas (such as propane and butane), natural gas liquids, ammonia, and chlorine.

**Πίνακας 4.3: Κατηγοριοποίηση του αγωγού σύμφωνα με το υγρό που θα φέρει, με βάση τον κανονισμό DNV-OS-F101.**

<b>Table 2-2 Classification of location</b>	
<i>Location</i>	<i>Definition</i>
1	The area where no frequent human activity is anticipated along the pipeline route.
2	The part of the pipeline/riser in the near platform (manned) area or in areas with frequent human activity. The extent of location class 2 should be based on appropriate risk analyses. If no such analyses are performed a minimum horizontal distance of 500 m shall be adopted.

**Πίνακας 4.4: Κατηγοριοποίηση του αγωγού σύμφωνα με την τοποθεσία του, με βάση τον κανονισμό DNV-OS-F101.**

<i>Safety class</i>	<i>Definition</i>
Low	Where failure implies insignificant risk of human injury and minor environmental and economic consequences
Medium	Where failure implies low risk of human injury, minor environmental pollution or high economic or political consequences.
High	Classification for operating conditions where failure implies risk of human injury, significant environmental pollution or very high economic or political consequences

**Πίνακας 4.5: Κατηγοριοποίηση του αγωγού σύμφωνα με τον επιτρεπόμενο βαθμό βλάβης του, με βάση τον κανονισμό DNV-OS-F101.**

<i>Phase</i>	<i>Fluid Category A, C</i>		<i>Fluid Category B, D and E</i>	
	<i>Location Class</i>		<i>Location Class</i>	
	1	2	1	2
Temporary <sup>2,3</sup>	Low	Low	-	-
Operational	Low	Medium <sup>4</sup>	Medium	High

1) Other classifications may exist depending on the conditions and criticality of failure the pipeline. For pipelines where some consequences are more severe than normal, i.e. when the table above does not apply, the selection of a higher safety class shall also consider the implication, on the total gained safety. If the total safety increase is marginal, the selection of a higher safety class may not be justified.

2) Installation until pre-commissioning (temporary phase) will normally be classified as safety class Low.

3) For safety classification of temporary phases after commissioning, special consideration shall be made to the consequences of failure, i.e. giving a higher safety class than Low.

4) Risers during normal operation will normally be classified as safety class High.

**Πίνακας 4.6: Συνολική συνδυαστική κατάταξη των παραπάνω κατηγοριοποιήσεων.**

<i>Limit State Category</i>	<i>Limit State</i>	<i>Safety Classes</i>			
		<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>Very High<sup>4)</sup></i>
SLS	All	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$
ULS	Pressure Containment <sup>1)</sup>	$10^{-4}$ to $10^{-5}$	$10^{-5}$ to $10^{-6}$	$10^{-6}$ to $10^{-7}$	$10^{-7}$ to $10^{-8}$
ALS					
ULS	All other	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
FLS <sup>2)</sup>					
ALS <sup>3)</sup>					

1) The failure probability for the pressure containment (wall thickness design) is one to two order of magnitudes lower than the general ULS criterion given in the Table, in accordance with industry practice and reflected by the ISO requirements.

2) The failure probability will effectively be governed by the last year in operation or prior to inspection depending on the adopted inspection philosophy.

3) Nominal target failure probabilities can alternatively be one order of magnitude less (e.g.  $10^{-4}$  per pipeline to  $10^{-5}$  per km) for any running km if the consequences are local and caused by local factors.

4) See Appendix F Table F-2.

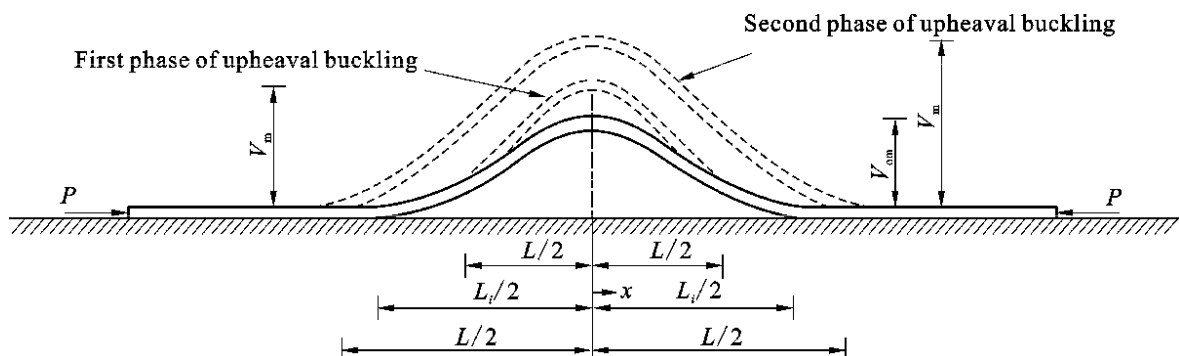
5) The target shall be interpret as “probability that a failure occurs in the period of one year”.

**Πίνακας 4.7: Σχετικές πιθανότητες αστοχίας αγωγού ανάλογα την κατηγορία ασφαλείας του.**

## 5 Προετοιμασία για τοποθέτηση

### 5.1 Γενικά

Η τοποθέτηση ενός αγωγού όπως έχει ήδη αναφερθεί προϋποθέτει τη διεξαγωγή έρευνας του βυθού για τη χάραξη της θέσης του αγωγού. Είναι αντιληπτό το γεγονός ότι ο αγωγός αποτελείται από επιμέρους τμήματα τα οποία κατασκευάζονται με τις μεθόδους που έχουν αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια και συνδέονται μεταξύ τους στην τελική θέση τοποθέτησης. Αυτό το γεγονός σε συνδυασμό με τις διάφορες ιδιαιτερότητες του ανάγλυφου του πυθμένα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία περιοχών στις ενώσεις του αγωγού όπου αναπτύσσονται είτε υψηλές τάσεις είτε μεγάλες μετακινήσεις καθώς το άθροισμα του μήκους των επιμέρους τμημάτων του αγωγού είναι πιθανό να διαφέρει σε κάποιο βαθμό με το πραγματικό μήκος της ροής του αγωγού. Γι' αυτό τον λόγο είναι απαραίτητη ορισμένες φορές η εκπόνηση προκαταρκτικών εργασιών για τη διαμόρφωση του πυθμένα τοποθέτησης. Εκσκαφές ή επιχωματώσεις είναι οι πιο συνήθεις διεργασίες που εκτελούνται για τη διασφάλιση μακροχρόνιας υδροδυναμικής σταθερότητας, την αποφυγή λυγισμών καθ' ύψους Σχήμα 5.1, αλλά και την εξασφάλιση της απαραίτητης μηχανολογικής προστασίας.



Σχήμα 5.1: Τοπικός λυγισμός τοποθετημένου αγωγού.

Διαμορφώσεις του φυσικού υπεδάφους που είναι πιθανό να χρειαστούν για την εξασφάλιση των παραπάνω υπάρχουν πολλές, ορισμένες από αυτές αφορούν την ελαχιστοποίηση των μετακινήσεων μετά την τοποθέτηση ενώ άλλες τη μετρίαση των αναπτυσσόμενων τάσεων στον αγωγό λόγω των διαφόρων ανωμαλιών του εδάφους. Επιγραμματικά θα αναφερθούν ορισμένες:

- Αντικατάσταση του εδαφικού υλικού για τη βελτίωση του εδάφους εναπόθεσης και ελαχιστοποίηση των δυνατών μετατοπίσεων.
- Προστασία υφιστάμενων αγωγών ή διασταυρούμενων καλωδίων με επιχώσεις
- Πρόβλεψη των απαραίτητων στηρίξεων με επιχώματα ή εκσκαφές.
- Εκσκαφές για τη μείωση των φορτίων που δέχεται ο αγωγός από τους κυματισμούς.

- Μείωση του ελεύθερου ύψους στα ανοίγματα του αγωγού για τη μείωση και των τυρβωδών δυνάμεων.
- Εξομάλυνση των πλευρών του αγωγού για τη μείωση των ελεύθερων ανοιγμάτων και την αποφυγή των πιέσεων επαφής που προκαλούν αλλοίωση της επικάλυψης του αγωγού.

## 5.2 Δυσκολίες

Κατά την τοποθέτηση του αγωγού ο μηχανικός καλείται να αντιμετωπίσει προβλήματα που εμφανίζονται ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες. Για παράδειγμα τα ελεύθερα ανοίγματα που μπορεί να έχει ένας αγωγός μεταξύ των στηρίξεων του διαφοροποιούνται ανάλογα και με το υλικό που θα κληθεί να φέρει. Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η πρόβλεψη των πιθανών εκσκαφών ή επιχώσεων του αγωγού που θα χρειαστεί να γίνουν. Εκσκαφές εκτελούνται συνήθως σε αγωγούς που τοποθετούνται με τη μέθοδο «τεντώματος-χαλάρωσης» κυρίως σε ρηχά νερά ή σε λασπώδη εδάφη, όπου και απαιτείται πρόσβαση των σκαφών που θα φέρουν τον αγωγό. Στηρίξεις των αγωγών εκτελούνται για τη διαμόρφωση των επιτρεπτών ανοιγμάτων με διάφορες μεθόδους, που θα αναλυθούν παρακάτω, οι οποίες σχετίζονται άμεσα με τις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες της υπό μελέτη περιοχής.

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το φαινόμενο των αυξημένων τάσεων στον αγωγό, λόγω διαφοράς θεωρητικού και πραγματικού μήκους, το οποίο συνήθως αντιμετωπίζεται με τη δημιουργία επιχώσεων ή εκσκαφών ειδικά υπολογισμένων. Μεγάλης σημασίας είναι και ο απαραίτητος έλεγχος μετά την περαίωση όλων των διαδικασιών εγκατάστασης του αγωγού και πριν τη λειτουργία του, η λεγόμενη μέθοδος test water με την οποία και εντοπίζονται όλες οι πιθανές ανωμαλίες που δημιουργήθηκαν κατά την εγκατάστασή του. Προσοχή απαιτείται και μετά από αυτόν τον έλεγχο όπου πέρα από την πλήρη στεγάνωσή του αγωγού πριν τη χρήση του πρέπει να εξασφαλισθεί και η αντοχή του. Εκτελείται έλεγχος κόπωσης από τον οποίο πρέπει να προκύψει μείωση της αντοχής έως 10% της αντοχής σχεδιασμού του αγωγού.

## 5.3 Εκσκαφές

Εκσκαφές εκτελούνται κατά την τοποθέτηση του αγωγού για τη μείωση των ελεύθερων ανοιγμάτων στην έδρασή του, με τη χρήση ειδικών εκσκαφών ανάλογα με τη σκληρότητα του εδάφους και το βάθος του πυθμένα. Σε ρηχά νερά οι εκσκαφές μπορούν να υλοποιηθούν από ειδικά διαμορφωμένες πλατφόρμες που φέρουν όργανα εκσκαφής. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι πιθανή και η χρήση εκρηκτικών υλικών. Η λύση της εκσκαφής προτιμάται κυρίως σε περιπτώσεις όπου η τοποθέτηση του αγωγού γίνεται με κάποια μέθοδο tow λόγω του μεγάλου εύρους εκσκαφής που απαιτείται, καθώς και γενικότερα σε ρηχά νερά και βαλτώδη εδάφη όπου η εκσκαφή πραγματοποιείται υποχρεωτικά και για τη διέλευση των πλοιαρίων που φέρουν τον ίδιο τον αγωγό.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι περιοχές αυτές συνήθως είναι οι πιο ευαίσθητες περιβαλλοντικά και γι' αυτό τον λόγο οι περιορισμοί στο εύρος των εκσκαφών είναι πολλοί, για την προστασία του ίδιου του φυσικού τοπίου. Σχήμα 5.2



**Σχήμα 5.2: Διαδικασία εκσκαφών.**

Σε βαθιά νερά οι εκσκαφές εκτελούνται από ειδικό ερπυστριοφόρο εκσκαφέα ο οποίος μεταφέρεται στην επιθυμητή θέση με την βοήθεια πλοίων και βυθίζεται στον πυθμένα με την χρήση ειδικά διαμορφωμένου γερανού. (Σχήμα 5.3)



**Σχήμα 5.3: Ερπυστριοφόρος εκσκαφέας.**

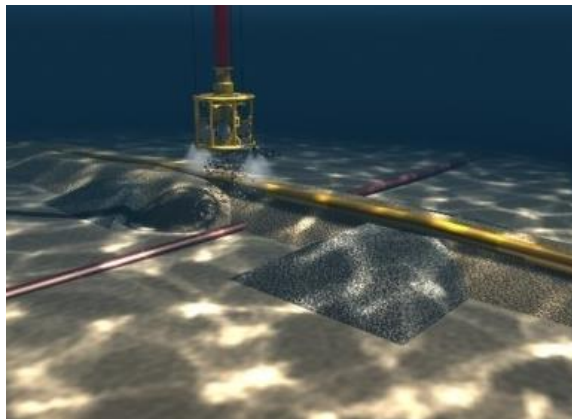
## 5.4 Στηρίξεις

Εναλλακτικά της μεθόδου εκσκαφής, το ίδιο αποτελεσματική μπορεί να είναι και η μέθοδος της διαμόρφωσης τεχνητής υποστήριξης στις παριές της όδευσης που έχει επιλεγεί για τον αγωγό. Επιχώσεις από αδρανή διαφόρων μεγεθών είτε κατά μήκος όλης της επικίνδυνης περιοχής είτε σημειακά, κατασκευάζονται και λειτουργούν προστατεύοντας τον ίδιο τον αγωγό από μεγάλα εξωτερικά φορτία αλλά και από ανεπιθύμητες μετακινήσεις λόγω αργιλώδους εδάφους.

Το μέγεθος των αδρανών που χρησιμοποιούνται ορίζεται από την εκάστοτε περιοχή τοποθέτησης, και τις περιβαλλοντικές δράσεις τις οποίες καλείται να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά.

Η εναπόθεση των αδρανών γίνεται συνήθως από φορτηγίδες τύπου καταμαράν, ή για μεγαλύτερη οικονομία χρησιμοποιούνται πλοίαρια ειδικά διαμορφωμένα, τα οποία φέρουν αγωγό για τη ρίψη των αδρανών στην επιθυμητή θέση, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη ακρίβεια. Η ρίψη με τη χρήση ειδικών αγωγών συνήθως εκτελείται σε βάθη μεγαλύτερα των 300[m] και με οριζόντια απόκλιση 200[mm].

Στις περιπτώσεις όπου η διαμόρφωση των πλευρικών στηρίξεων του αγωγού γίνεται πριν την τοποθέτηση αυτού, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρχει μεγάλη ακρίβεια, καθώς πρέπει να υπολογιστεί και το απαιτούμενο εύρος μεταξύ των πλευρικών στηρίξεων ώστε να χωράει να διέλθει ο αγωγός.



Σχήμα 5.4: Επίχωση με αδρανή.

Η αποφυγή μεγάλων ελεύθερων ανοιγμάτων σε αγωγούς τοποθετημένους σε πολύ βαθιά νερά όπου η χρήση του αγωγού ρίψης είναι αδύνατη, συνηθίζεται η διαμόρφωση ενδιάμεσων σημειακών στηρίξεων με την τοποθέτηση μεμονωμένων σάκων ενέματος, ή κάποιου άλλου υλικού με στόχο να αποτραπεί η βύθιση του αγωγού σε μαλακό αργιλώδες πυθμένα.





**Σχήμα 5.5: Σταθεροποίηση του αγωγού με σάκους ενέματος.**

Ένα άλλο είδος στήριξης είναι και η διαμόρφωση όγκου σκυροδέματος περιμετρικά του αγωγού κάτι το οποίο βοηθάει κυρίως στην καθολική προστασία του αγωγού καθώς εξασφαλίζει καλύτερο έδαφος, μεγαλύτερη πλευρική υποστήριξη αλλά και προστασία της επικάλυψης του αγωγού.



**Σχήμα 5.6: Σταθεροποίηση του αγωγού με ειδικά διαμορφωμένους όγκους σκυροδέματος.**





## 6 Προσομοίωση μεθόδου S-lay και παραμετρική διερεύνηση

### 6.1 Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθεί πιο εκτεταμένα και με τη βοήθεια ενός προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων η μέθοδος τοποθέτησης S-lay. Στόχος είναι στο να εξαχθούν συμπεράσματα για τη συσχέτιση της διαμέτρου του υπό βύθιση αγωγού και της ακτίνας καμπύλωσής του κατά την τοποθέτησή του με τις αναπτυσσόμενες στον αγωγό εντάσεις αλλά και τις προκύπτουσες παραμορφώσεις.

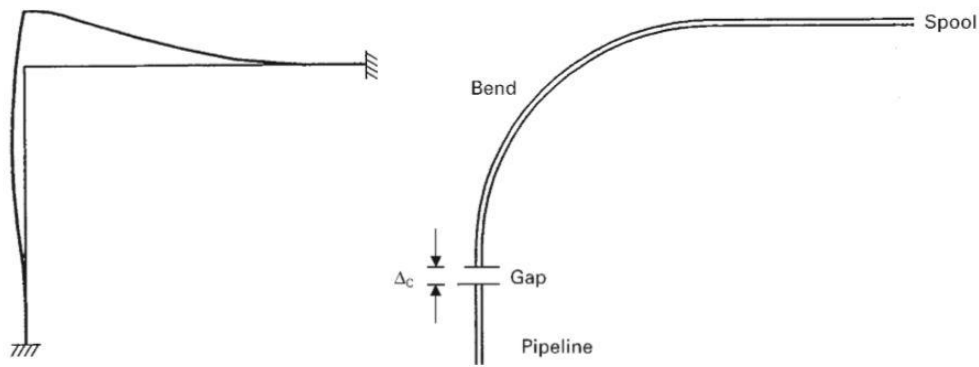
Κατά τη μελέτη ενός τέτοιου έργου για την προσομοίωση του φορέα και τη μελέτη του χρησιμοποιούνται διαφόρων ειδών προγράμματα ανάλογα με το τι επιδιώκεται από την εκάστοτε μελέτη. Όλα τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων έχουν την δυνατότητα προσομοίωσης και επίλυσης του φορέα, παρόλ' αυτά στην αγορά υπάρχουν και αρκετά προγράμματα στοχευμένα στην προσομοίωση της μεθόδου τοποθέτησης του αγωγού ανάλογα με το φορτηγό πλοίο που χρησιμοποιείται. Τα πιο κοινά προγράμματα που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής:

- ANSYS (Πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων γενικής χρήσης)
- OFFPIPE (Εξειδικευμένο πρόγραμμα για την τοποθέτηση αγωγών)
- Flexcom-3D (Εξειδικευμένο πρόγραμμα που εστιάζει σε υποθαλάσσιους αγωγούς, risers, αγκυροβολίσεις κ.α )
- OrcaFlex (Εξειδικευμένο πρόγραμμα που στοχεύει και αυτό σε ίδιο αντικείμενο με το Flexcom-3D )

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το ANSYS λόγω της ελευθερίας που παρέχει στον μελετητή να ορίσει εκείνος τις επιθυμητές συνθήκες επακριβώς. Τα εξειδικευμένα προγράμματα λόγω του ότι έχουν δημιουργηθεί από τις εταιρίες των διαφόρων πλοίων που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή, έχουν αρκετούς περιορισμούς και επομένως για την επιθυμητή διερεύνηση ήταν σαφής η επιλογή του προγράμματος που θα ικανοποιούσε τους στόχους της παρούσας μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το ANSYS\_2019\_R3 και η επίλυση έγινε στο Static Structural.

### 6.2 Μοντελοποίηση

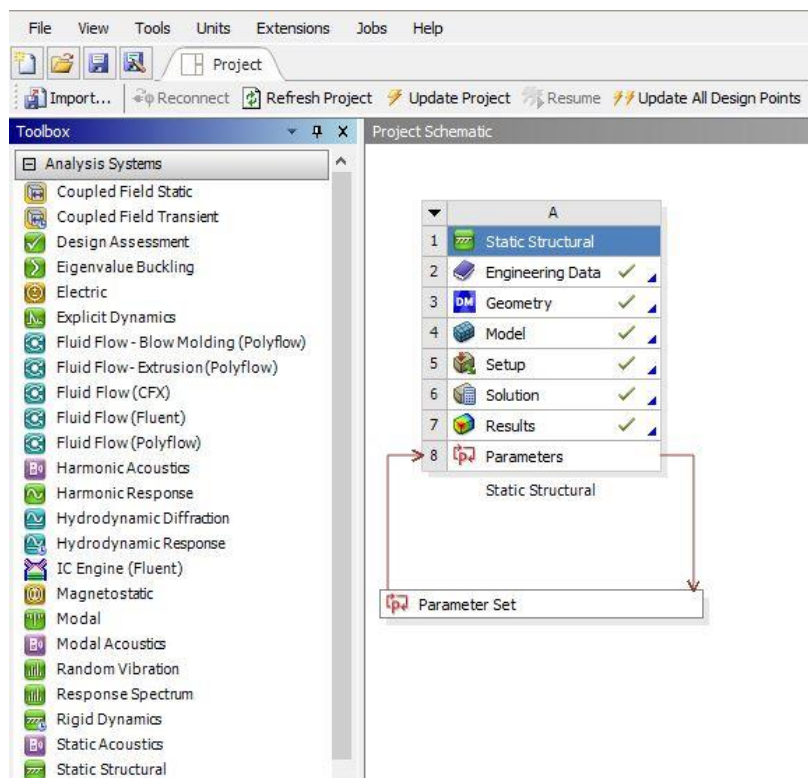
Οποιοδήποτε καμπύλο τμήμα ενός αγωγού μπορεί να θεωρηθεί ως ένας φορέας γωνιακός, τύπου Γ, πακτωμένος και στις δύο άκρες του. Η πάκτωση είναι θεωρητική καθώς στην πραγματικότητα ο αγωγός συνεχίζεται για μεγάλο μήκος κάτι το οποίο τον κάνει να συμπεριφέρεται θεωρητικά ως πακτωμένος.



**Σχήμα 6.1: Προσομοίωση καμπύλωσης αγωγού σύμφωνα με Mikael W. Braestrup (2005), “Design and Installation of Marine Pipelines”, Blackwell Science, USA.**

Λόγω του μεγάλου μήκους του στοιχείου και της μικρής διαμέτρου του αναλογικά με το μήκος του, η προσομοίωση γίνεται με γραμμικά στοιχεία και η διακριτοποίησή του αντιστοίχως. Πιο συγκεκριμένα υπάρχει η δυνατότητα στο πρόγραμμα να οριστεί το στοιχείο, ως στοιχείο *pipe* κάτι το οποίο επιτρέπει την επιλεκτική μεγαλύτερη διακριτοποίησή του στα σημεία καμπύλωσης.

Αρχικά επιλέγοντας στο πρόγραμμα την καρτέλα του Static Structural (Σχήμα 6.2) και μπαίνοντας στην υποκατηγορία *engineering data*, ορίζονται τα χαρακτηριστικά των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο.



**Σχήμα 6.2: Αρχική καρτέλα Project στο Workbench του ANSYS για Static Structural ανάλυση.**

Στην προκειμένη περίπτωση ορίστηκε εδαφικό υλικό με τα χαρακτηριστικά που εμφανίζονται στο Σχήμα 6.3 και κατασκευαστικός χάλυβας με τα κλασικά χαρακτηριστικά όπως αυτά φαίνονται στο Σχήμα 6.4.

Outline of Schematic A2: Engineering Data				
	A	B	C	E
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	Soil		C:\Users\user1\Desktop\DIAMETR	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5 -110.1
4	Structural Steel		C:\Users\user1\Desktop\DIAMETR	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5 -110.1
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 3: Soil				
	A	B	C	E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2000	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisso...		
6	Young's Modulus	2E+11	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,3		
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	

Σχήμα 6.3: Χαρακτηριστικά εδάφους.

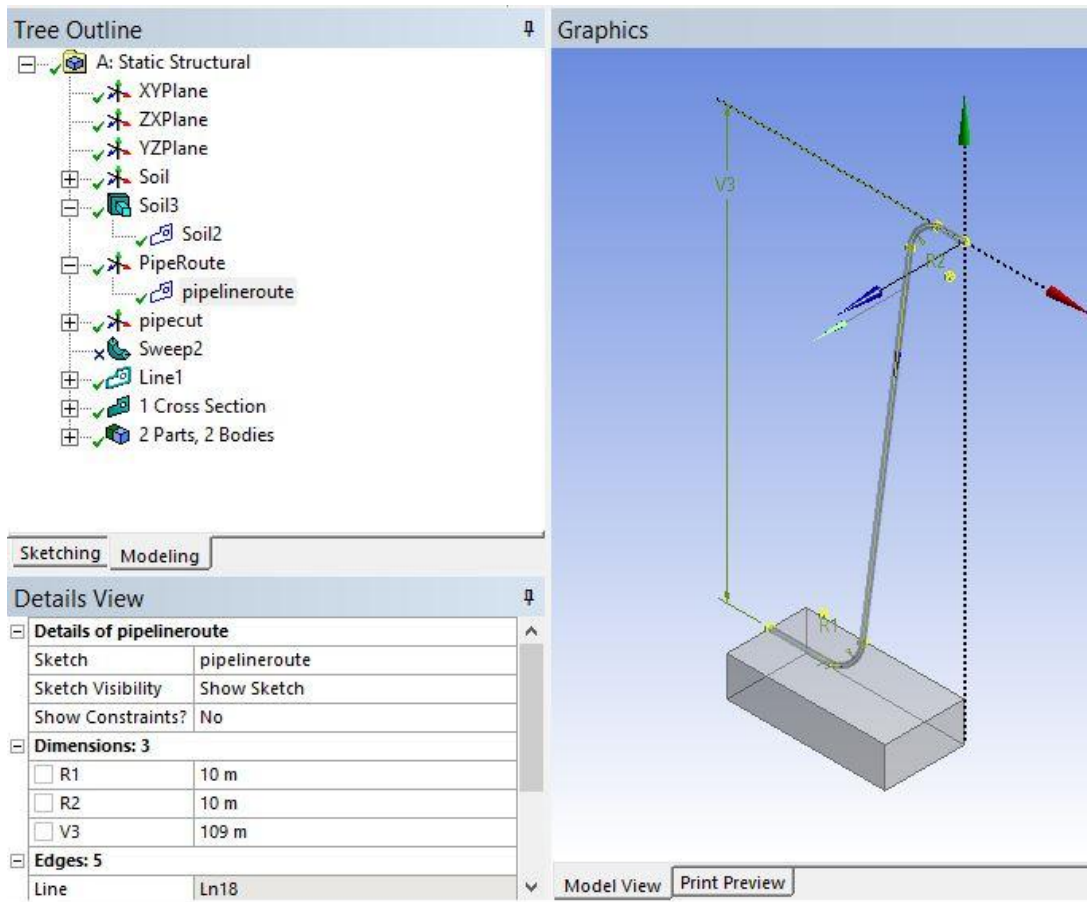
Outline of Schematic A2: Engineering Data				
	A	B	C	E
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	Soil		C:\Users\user1\Desktop\DIAMETR	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5 -110.1
4	Structural Steel		C:\Users\user1\Desktop\DIAMETR	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5 -110.1
*	Click here to add a new material			

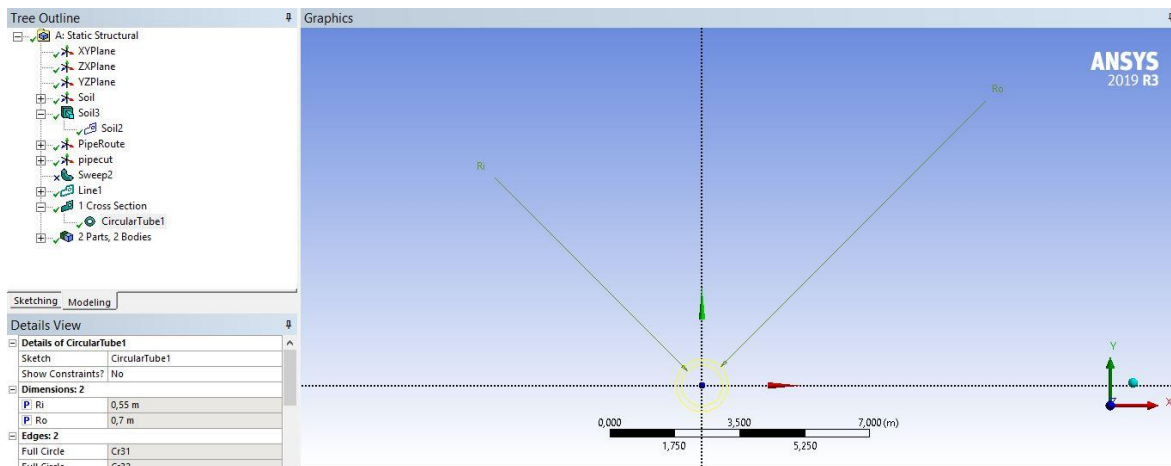
Properties of Outline Row 4: Structural Steel				
	A	B	C	E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion	1E-05	C <sup>-1</sup>	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and Poisso...		
8	Young's Modulus	2E+11	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,3		
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	

Σχήμα 6.4: Χαρακτηριστικά χάλυβα.

Σε επόμενο βήμα ορίζεται η επιθυμητή γεωμετρία του φορέα, μπαίνοντας αντίστοιχα στην υποκατηγορία Geometry. Εκεί αρχικά ορίζονται δύο διαφορετικά συστήματα αξόνων, ένα για τον επιθυμητό κεντροβαρικό άξονα του αγωγού και ένα άλλο για τον ορισμό της διατομής του. Το πρώτο φαίνεται στο Σχήμα 6.5 ενώ το δεύτερο στο Σχήμα 6.6.



Σχήμα 6.5: Σύστημα αξόνων για τον ορισμό της χάραξης του αγωγού.



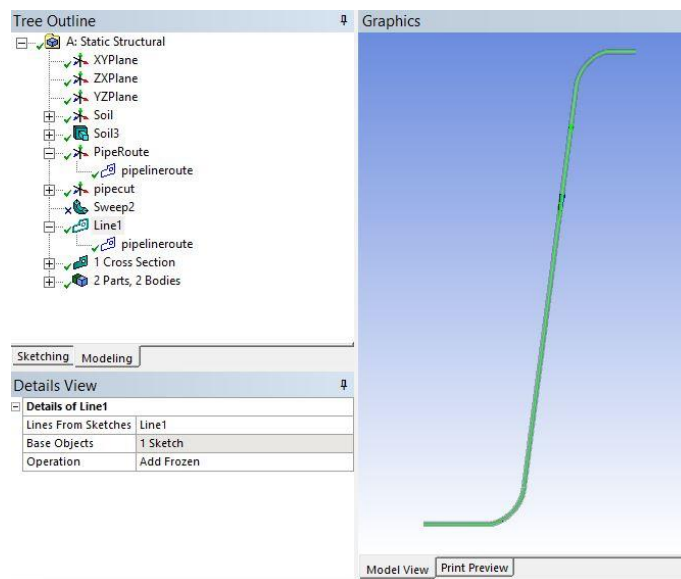
Σχήμα 6.6: Σύστημα αξόνων για τον ορισμό της επιθυμητής διαμέτρου του αγωγού.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.5 η τιμή V3 ορίζει το ύψος του αγωγού και στην συγκεκριμένη μελέτη έχει επιλεγθεί 109m ώστε να αντιστοιχεί σε ένα βάθος πυθμένα περίπου 100m. Οι τιμές R1 και R2 αφορούν την ακτίνα καμπύλωσης του αγωγού κατά την τοποθέτησή του. Αντιστοίχως όπως είναι εμφανές από το Σχήμα 6.5 οι τιμές Ro και Ri

αντικατοπτρίζουν την εξωτερική και εσωτερική αντίστοιχα ακτίνα της διατομής του αγωγού.

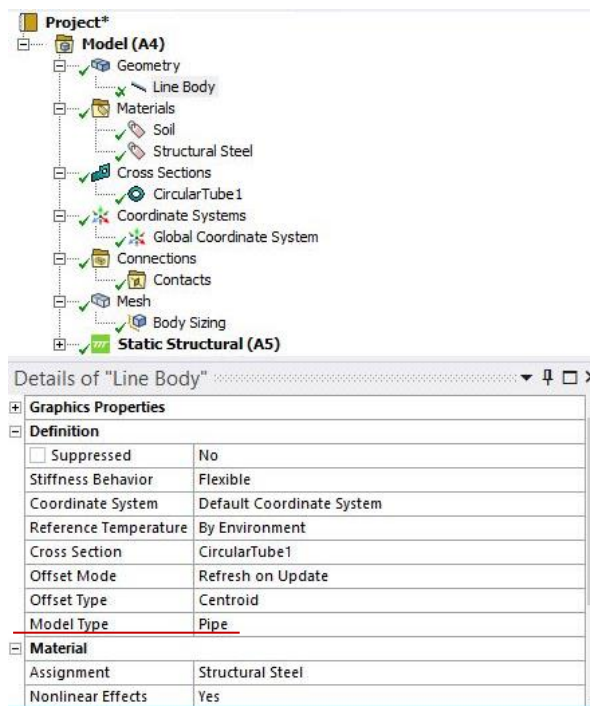
Εκτελέστηκαν δύο ειδών αναλύσεις. Στην πρώτη επιλέχθηκε παραμετροποίηση της διαμέτρου και του πάχους του αγωγού ενώ στη δεύτερη παραμετροποίηση των ακτίνων καμπύλωσής του κατά την βύθισή του. Η επιλογή της παραμετροποιημένης επίλυσης φαίνεται από την ύπαρξη του συμβόλου P που εισάγεται δίπλα από το μέγεθος που θα παραμετροποιηθεί. (Σχήμα 6.5)

Τέλος για τη δημιουργία του φορέα επιλέγεται από την εντολή Concept η σχεδίαση Lines from sketches και εκεί επιλέγεται σαν sketch ο κεντροβαρικός άξονας του αγωγού που είχε σχεδιασθεί σε προηγούμενο βήμα. (Σχήμα 6.7)



Σχήμα 6.7: Διαμορφωμένος φορέας.

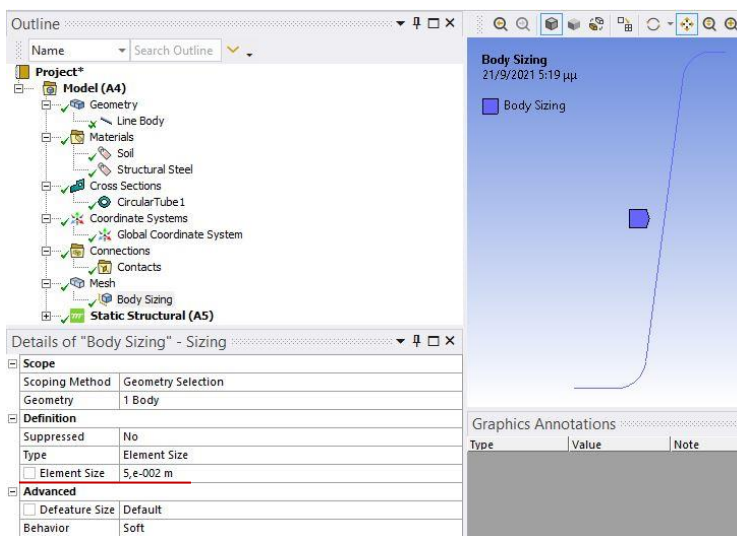
Μετά την ολοκλήρωση της γεωμετρίας του φορέα ο μελετητής εισέρχεται στην κατηγορία Model, όπου ορίζει την επιθυμητή διακριτοποίηση του φορέα, τις συνθήκες στήριξης, τα εντατικά μεγέθη και τα αποτελέσματα.



Σχήμα 6.8: Ορισμός στοιχείου ως αγωγός.

Αρχικά στην κατηγορία Geometry όπου φαίνεται το γραμμικό στοιχείο που έχει οριστεί (Line Body) στη θέση Model Type ορίζεται το επιθυμητό είδος του αγωγού Pipe. Έπειτα ελέγχεται ότι τα υλικά που έχουν οριστεί είναι τα επιθυμητά καθώς και η διατομή του αγωγού και το σύστημα αξόνων.

Στην διακριτοποίηση (mesh) επιλέγεται η μέθοδος τετραεδρικού στοιχείου. Το μέγεθος της διακριτοποίησης για να αποφευχθεί η αυτόματη επιλογή του από το πρόγραμμα, εισάγεται από την καρτέλα Body sizing και στην προκειμένη περίπτωση έχει επιλεγεί 0.05m ώστε να προκύψει μία καλή σχετικά ανάλυση χωρίς μεγάλες υπολογιστικές απαιτήσεις.

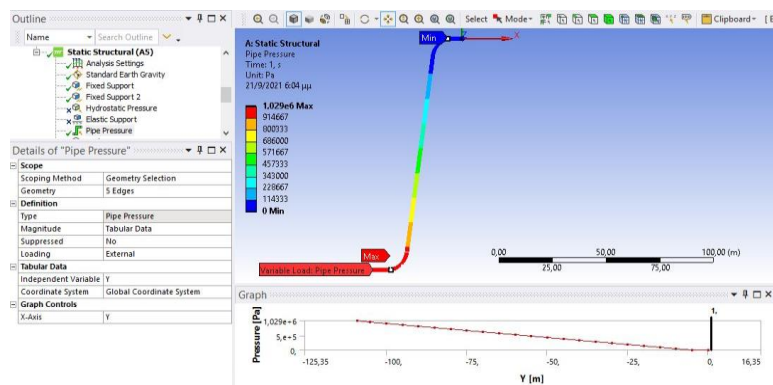


Σχήμα 6.9: Διακριτοποίηση αγωγού.



Με τον ορισμό του στοιχείου ως Pipe ο μελετητής, πρέπει να ορίσει διαφορετική διακριτοποίηση των τμημάτων elbow, δηλαδή των καμπυλών. Αυτό γίνεται σε επόμενο βήμα στην κατηγορία Static Structural. Εκεί ορίζονται οι συνθήκες στήριξης του φορέα που στο συγκεκριμένο μοντέλο όπως προαναφέρθηκε ορίστηκαν πακτώσεις στα άκρα του, καθώς και τα επιβαλλόμενα στον φορέα φορτία. Εδώ, πέρα από το ίδιο βάρος του αγωγού λαμβάνεται και η υδροστατική πίεση υπό μορφή εξωτερικής μεταβαλλόμενης πίεσης.

Προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι η υδροστατική πίεση σε στοιχεία pipe δεν μπορεί να εισαχθεί με τον αυτόματο τρόπο του προγράμματος, αλλά εισάγεται σαν external pipe pressure με τιμές που ορίζονται από πίνακα για να επιτευχθεί η καθ' ύψος μεταβολή του φορτίου. (Σχήμα 6.11). Στην παρούσα μελέτη η επιρροή της υδροστατικής πίεσης ελήφθη από υπολογισμούς σύμφωνα με το Παράρτημα Α, αλλά για λόγους πληρότητας έχει εισαχθεί και στο πρόγραμμα χωρίς να επηρεάζει τα αποτελέσματα.

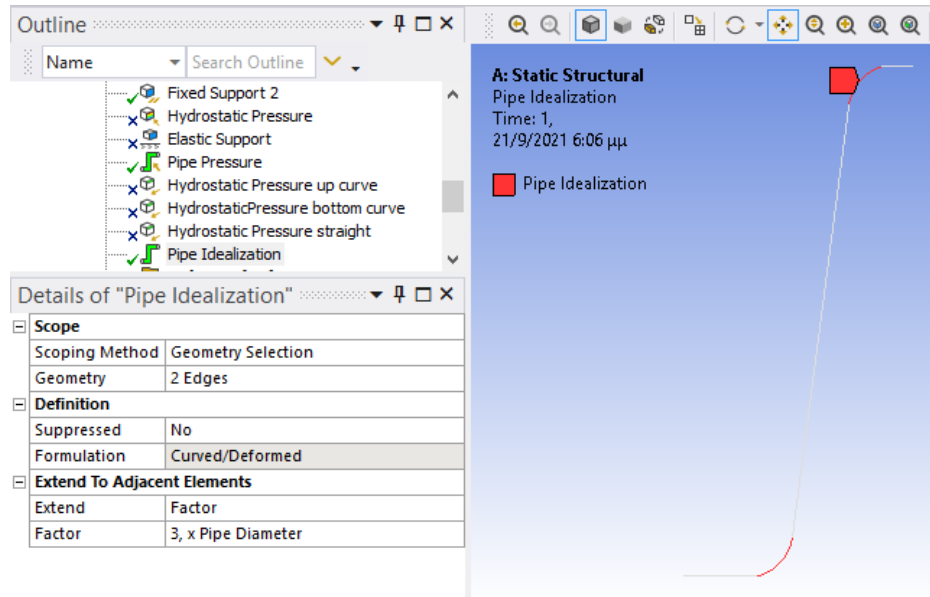


Σχήμα 6.10: Σχηματική απεικόνιση της υδροστατικής πίεσης καθ' ύψος.

Tabular Data		
	Y [m]	Pressure [Pa]
1	-109	1,029e+006
2	-105	9,8e+005
3	-100	9,31e+005
4	-95	8,82e+005
5	-90	8,33e+005
6	-85	7,84e+005
7	-80	7,35e+005
8	-75	6,86e+005
9	-70	6,37e+005
10	-65	5,88e+005
11	-60	5,39e+005
12	-55	4,9e+005
13	-50	4,41e+005
14	-45	3,92e+005
15	-40	3,43e+005
16	-35	2,94e+005
17	-30	2,45e+005
18	-25	1,96e+005
19	-20	1,47e+005
20	-15	98000
21	-10	49000
22	-5	0
23	0	0

Σχήμα 6.11: Πίνακας τιμών υδροστατικής πίεσης καθ' ύψος.

Επόμενο βήμα, μετά την επιβολή των απαιτούμενων φορτίων, αποτελεί η εισαγωγή της εντολής του pipe idealization για την ορθή λειτουργία των elbow στοιχείων, των τμημάτων δηλαδή που βρίσκονται στις περιοχές καμπύλωσης του αγωγού και έχουν οριστεί στο πρόγραμμα ως γραμμικά στοιχεία αγωγού (line pipe curved elements). (Σχήμα 6.12)



**Σχήμα 6.12: Εισαγωγή της διαδικασίας Pipe Idealization.**

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως έγιναν παραμετρικές επιλύσεις. Ο ορισμός των παραμέτρων γίνεται από την καρτέλα Parameters εισάγοντας τις επιθυμητές τιμές στον αντίστοιχο πίνακα. Λόγω της ύπαρξης δύο διαφορετικών παραμετρικών αναλύσεων παρακάτω θα παρατεθούν οι αντίστοιχοι πίνακες για την κάθε ανάλυση.



→ **1<sup>η</sup> επίλυση**

Σε αυτή την επίλυση επιλέχθηκε παραμετρική διάσταση στη διάμετρο του αγωγού D, το οποίο φαίνεται και στο Σχήμα 6.13 στο μέρος των Input Parameters. Στο Output parameters φαίνονται κάποια αποτελέσματα τα οποία ενδιαφέρουν τον μελετητή και από τα οποία θα προκύψουν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα. Στο Σχήμα 6.14 φαίνονται οι τιμές που έχουν ληφθεί για τις επιλύσεις που θα γίνουν.

Outline of Schematic A8: Parameters				
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	[-] Input Parameters			
3	[-] [Static Structural (A1)]			
4	[P] P2	Rinside	220,5	mm
5	[P] P3	Routside	228,5	mm
*	[P] New input parameter	New name	New expression	
7	[-] Output Parameters			
8	[-] [Static Structural (A1)]			
9	[P] P4	Direct Stress Maximum Total	7,4605E+06	Pa
10	[P] P5	Minimum Combined Stress Maximum Total	6,4298E+06	Pa
11	[P] P6	Minimum Combined Stress Minimum Total	-8,8751E+08	Pa
12	[P] P7	Maximum Combined Stress Maximum Total	8,8879E+08	Pa
13	[P] P8	Maximum Combined Stress Minimum Total	8,4552E+05	Pa
14	[P] P9	Direct Stress Minimum Sagbend	2,7154E+05	Pa
15	[P] P10	Total Deformation Maximum Total	3,7511	m

Σχήμα 6.13: Ορισμός παραμετρικών δεδομένων για την πρώτη επίλυση και των επιθυμητών αποτελεσμάτων προς εξαγωγή.

Table of Design Points			
	A	B	C
1	Name	P2 - Rinside	P3 - Routside
2	Units	mm	mm
3	DP 0 (Current)	220,5	228,5
4	DP 1	246	254
5	DP 2	297	305
6	DP 3	345,5	355,5
7	DP 4	373	381
8	DP 5	398,5	406,5
9	DP 6	449	457
*			

Σχήμα 6.14: Τιμές Εσωτερικής και Εξωτερικής διαμέτρου αγωγού για την εφαρμογή της παραμετρικής επίλυσης.

→ **2<sup>η</sup> επίλυση**

Σε αυτή την επίλυση επιλέχθηκε παραμετρική διάσταση για την καμπύλωση του αγωγού κατά τη βύθισή του, αυτό που σε προηγούμενα κεφάλαια έχει αναφερθεί ως overbend και sagbend το οποίο φαίνεται και στο Σχήμα 6.15 στο μέρος των Input Parameters. Αντίστοιχα και εδώ, στο Output parameters φαίνονται κάποια αποτελέσματα τα οποία ενδιαφέρουν τον μελετητή και από τα οποία θα προκύψουν, τα αντίστοιχα με προηγούμενως, συγκεντρωτικά διαγράμματα. Στο Σχήμα 6.16 φαίνονται οι τιμές που έχουν ληφθεί για τις επιλύσεις που θα γίνουν.

Outline of Schematic A8: Parameters				
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	[-] Input Parameters			
3	[-] [Static Structural (A1)]			
4	[P] P11	BottomR	8	m [v]
5	[P] P12	TopR	8	m [v]
*	[P] New input parameter	New name	New expression	
7	[-] Output Parameters			
8	[-] [Static Structural (A1)]			
9	[P] P4	Direct Stress Maximum Total	6,6931E+06	Pa
10	[P] P5	Minimum Combined Stress Maximum Total	4,3608E+06	Pa
11	[P] P6	Minimum Combined Stress Minimum Total	-4,321E+08	Pa
12	[P] P7	Maximum Combined Stress Maximum Total	4,3293E+08	Pa
13	[P] P8	Maximum Combined Stress Minimum Total	-2,9067E+07	Pa
14	[P] P9	Direct Stress Minimum Total	-2,9646E+07	Pa
15	[P] P10	Total Deformation Maximum Total	1,3727	m

**Σχήμα 6.15: Ορισμός παραμετρικών δεδομένων για την δεύτερη επίλυση και των επιθυμητών αποτελεσμάτων προς εξαγωγή.**

Table of Design Points			
	A	B	C
1	Name	P11 - BottomR	P12 - TopR
2	Units	m	m
3	DP 0 (Current)	8	8
4	DP 1	9	9
5	DP 2	10	10
6	DP 3	11	11
7	DP 4	12	12
8	DP 5	13	13
9	DP 6	14	14
10	DP 7	15	15
11	DP 8	16	16
12	DP 9	17	17
13	DP 10	18	18
14	DP 11	19	19
15	DP 12	20	20
*			

Σχήμα 6.16: Τιμές καμπύλωσης του αγωγού στις περιοχές Sagbend (Bottom) και Overbend (Top) για την εφαρμογή της παραμετρικής επίλυσης.

### 6.3 Αποτελέσματα

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που έγιναν κατά τις δύο παραπάνω επιλύσεις αφού αυτές αναλυθούν λίγο εκτενέστερα.

Για την καλύτερη ανάγνωση των αποτελεσμάτων πρέπει να αναφερθούν αναλυτικά έννοιες που αφορούν τον τρόπο απεικόνισης των αποτελεσμάτων στο ANSYS.

- **Direct Stress:** είναι η τάση η οποία αναπτύσσεται λόγω της ύπαρξης αξονικής δύναμης σε ένα στοιχείο δοκού.
- **Minimum Bending Stress:** τα καμπτικά φορτία προκαλούν σε ένα στοιχείο δοκού καμπτική ροπή σε δύο διευθύνσεις. Συγκεκριμένα στο μοντέλο της επίλυσης που θα παρουσιαστεί στους άξονες Y και Z. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη τεσσάρων ειδών καμπτικών τάσεων στο στοιχείο, δύο ανά κατεύθυνση, μία για το πάνω μέρος της διατομής και μία για το κάτω. Με τον όρο Minimum Bending Stress το πρόγραμμα αναφέρεται στην ελάχιστη από αυτές τις τέσσερις τιμές.
- **Maximum Bending Stress:** είναι η μέγιστη τιμή από τις τέσσερις προαναφερθείσες τάσεις που αναπτύσσονται σε μία δοκό υπό τη δράση καμπτικού φορτίου.
- **Minimum Combined Stress:** ο γραμμικός συνδυασμός των direct stress και minimum bending stress, είναι δηλαδή η ελάχιστη τάση που προκύπτει σε ένα στοιχείο δοκού για συνδυασμένη κάμψη και αξονική δύναμη.
- **Maximum Combined Stress:** ο γραμμικός συνδυασμός των direct stress και maximum bending stress, είναι δηλαδή η μέγιστη τάση που προκύπτει σε ένα στοιχείο δοκού για συνδυασμένη κάμψη και αξονική δύναμη.

## →1<sup>η</sup> επίλυση

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η πρώτη επίλυση εστιάζει στη διαφοροποίηση της διαμέτρου του αγωγού και στο πώς αυτή επηρεάζει τις μετακινήσεις και τα εντατικά μεγέθη. Η επιλογή των διαμέτρων έγινε σύμφωνα με προτεινόμενες τιμές της βιβλιογραφίας οι οποίες δεικνύονται στο Σχήμα 6.17 και αφορούν συνήθεις τιμές διαμέτρων ανάλογα με το μήκος του αγωγού αλλά και σύμφωνα με τους πίνακες τυπικών μεταλλικών κοίλων διατομών ( Kreisformige Hohlprofile, DIN EN 10210-2/10219-2, Ausgabe, November 1997). Η καμπύλωση του αγωγού έχει διατηρηθεί σταθερή σε όλες τις αναλύσεις, ίση με 10m και έχει οριστεί να είναι κοινή και για τις δύο περιοχές καμπύλωσης.

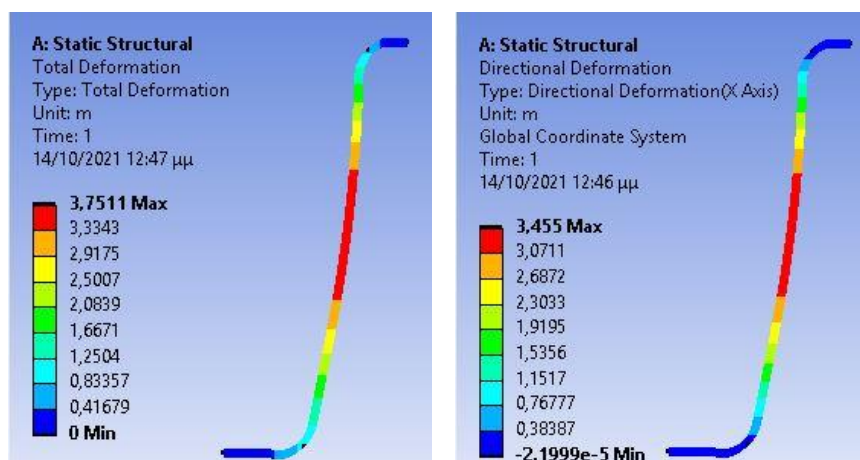
**Table 6.9 Selected pipe dimensions for the offshore pipeline**

Location	Approximate length	D (mm)	t (mm)	D/t ratio
Location Class 1	300 km	711	16.4	43.3
Location Class 2	3 km	719	20.5	35.1
Near shore section	5 km	719	20.5	35.1
Tie-in spools	0.6 km	726	24.1	30.1

**Σχήμα 6.17: Προτεινόμενες τιμές διαμέτρου αγωγού σύμφωνα με Mikael W. Braestrup (2005), “Design and Installation of Marine Pipelines”, Blackwell Science, USA.**

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα από το πρόγραμμα για τις δύο οριακές καταστάσεις των αναλύσεων αναλυτικά αλλά και ένα πακέτο συγκεντρωτικών διαγραμμάτων στα οποία συγκρίνονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές για όλες τις αναλύσεις.

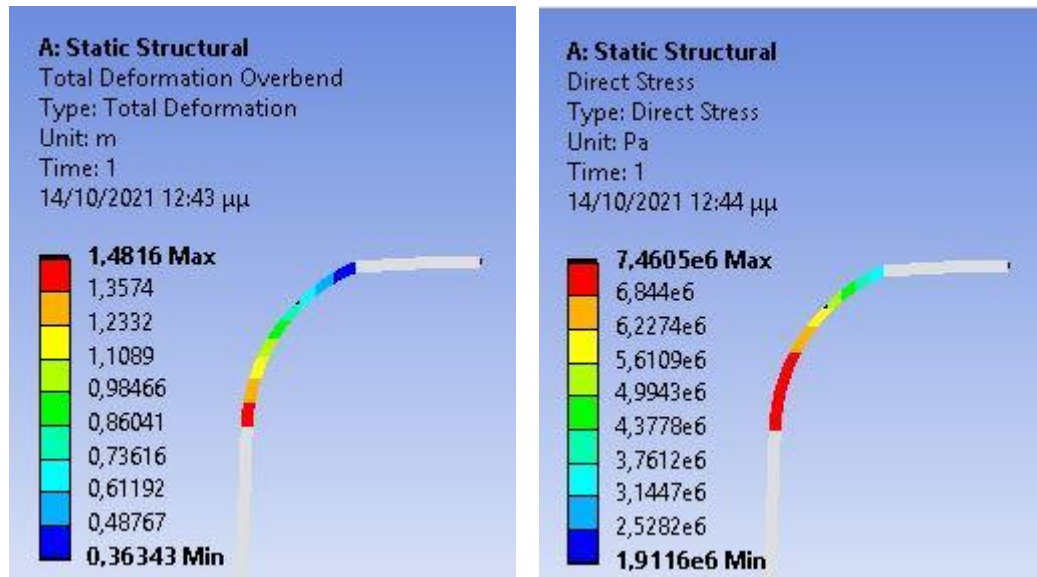
- **D<sub>out</sub>=457mm και t=16mm**



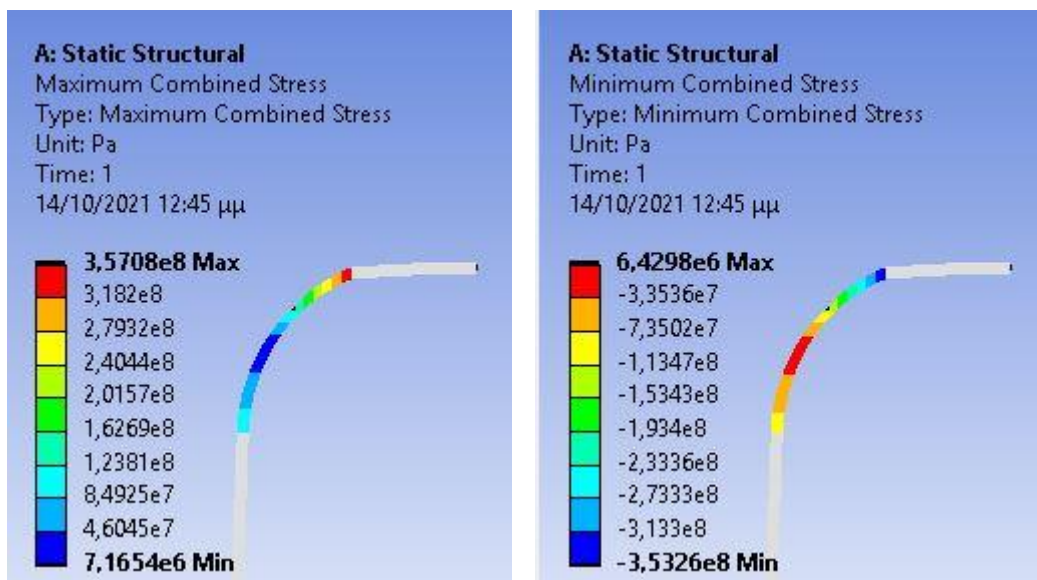
**Σχήμα 6.18: Κατανομή παραμορφώσεων συνολικών και μεμονωμένων κατά τον άξονα X στον αγωγό.**

Όσον αφορά τις παραμορφώσεις του αγωγού, παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, η μέγιστη μετακίνηση να εμφανίζεται στο ευθύγραμμο τμήμα του, μεταξύ των δύο καμπλώσεων. Επίσης παρατηρείται ότι ο κύριος άξονας παραμόρφωσης είναι ο X.

Στην θέση της άνω καμπύλης, overbend region, στα σχήματα 6.19 και 6.20 απεικονίζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων και των τάσεων που αναπτύσσονται.



Σχήμα 6.19: Κατανομή παραμορφώσεων και τάσεων λόγω αξονικής καταπόνησης στην περιοχή overbend.

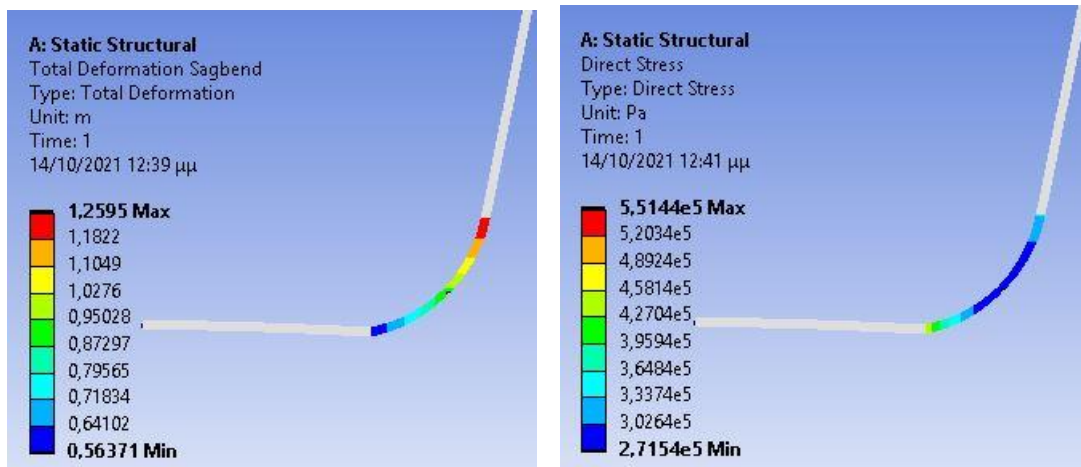


Σχήμα 6.20: Κατανομή μέγιστων και ελάχιστων τάσεων λόγω συνδυασμένης αξονικής και καμπτικής καταπόνησης στην περιοχή overbend.

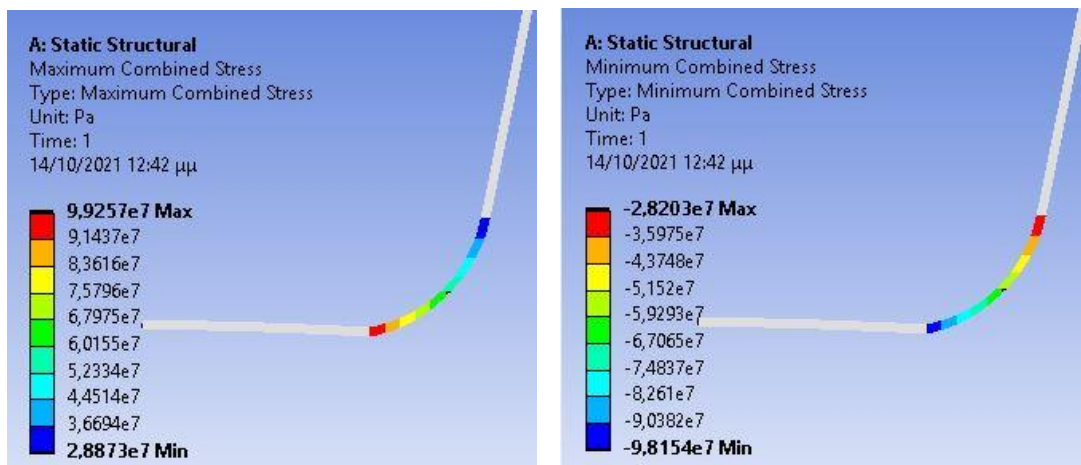
Αντίστοιχα για την κάτω καμπύλη, sagbend region, στα σχήματα 6.21 και 6.22 απεικονίζονται αναλυτικότερα τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων αλλά και των



τάσεων που αναπτύσσονται λόγω αξονικής και λόγω συνδυασμού αξονικής και καμπτικής δύναμης.

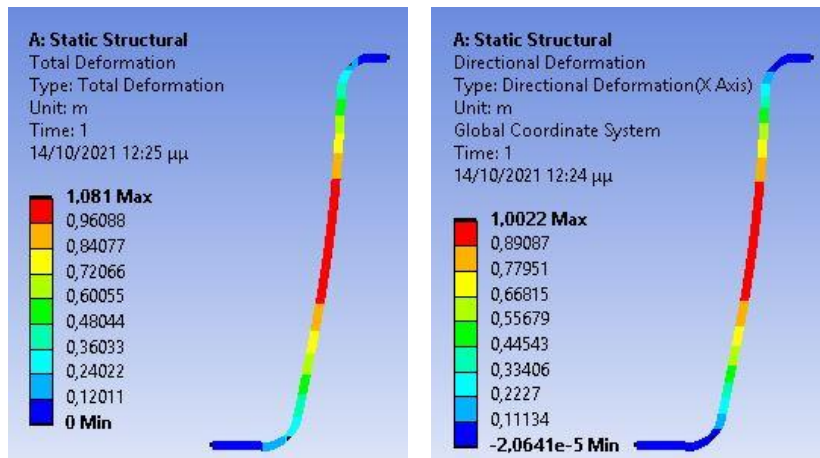


Σχήμα 6.21: Κατανομή παραμορφώσεων και τάσεων λόγω αξονικής καταπόνησης στην περιοχή sagbend.



Σχήμα 6.22: Κατανομή μέγιστων και ελάχιστων τάσεων λόγω συνδυασμένης αξονικής και καμπτικής καταπόνησης στην περιοχή sagbend.

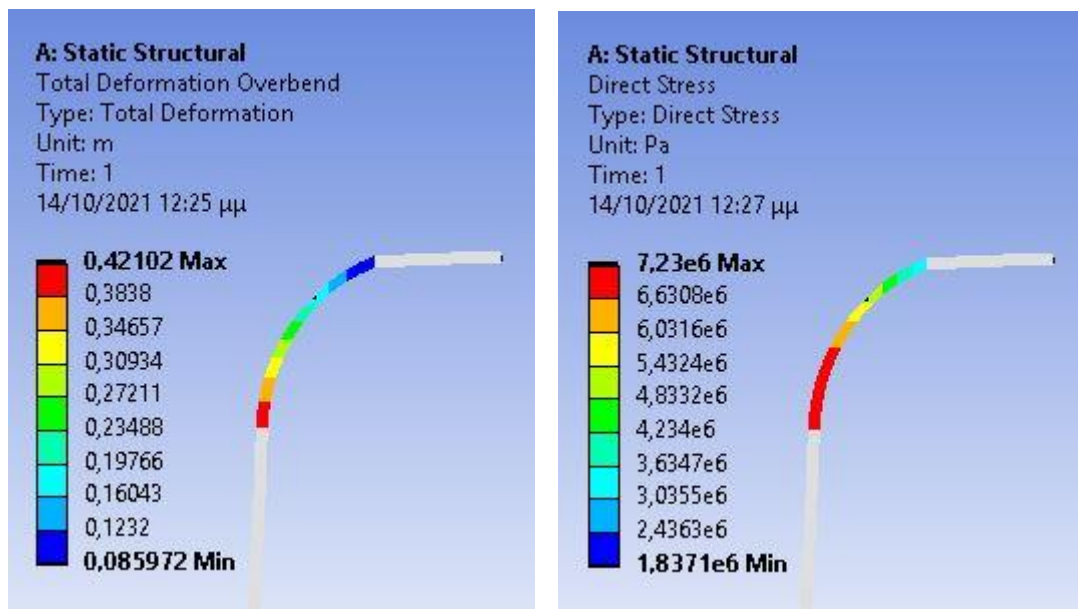
- Dout=914mm και t=16mm



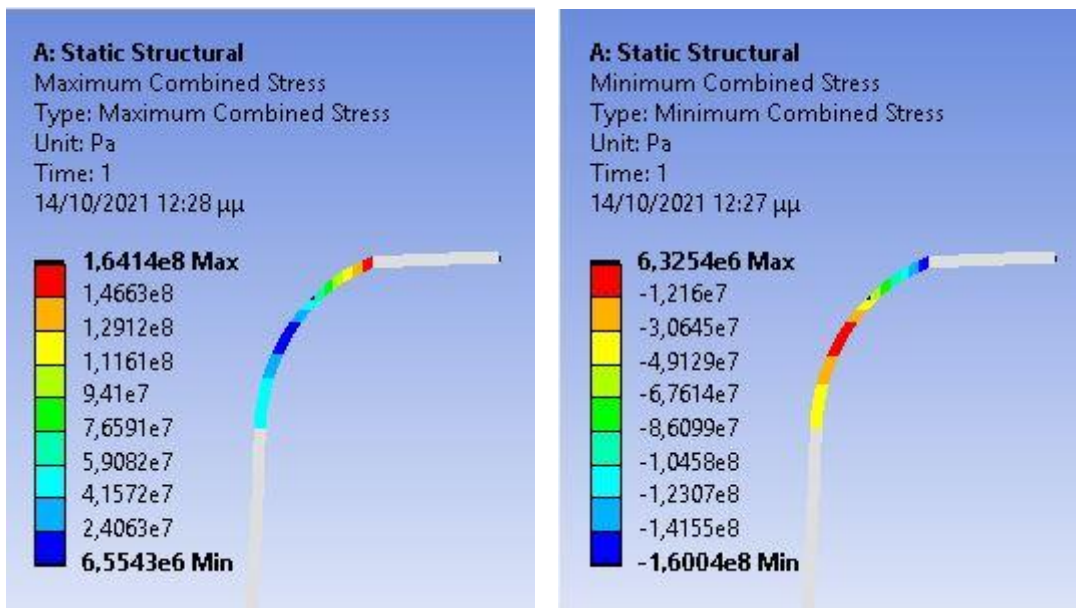
Σχήμα 6.23: Κατανομή παραμορφώσεων συνολικών και μεμονωμένων κατά τον άξονα X στον αγωγό.

Όσον αφορά τις παραμορφώσεις του αγωγού, παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, η μέγιστη μετακίνηση να εμφανίζεται στο ευθύγραμμο τμήμα του, μεταξύ των δύο καμπυλώσεων. Επίσης παρατηρείται ότι ο κύριος άξονας παραμόρφωσης είναι ο X.

Στην θέση της άνω καμπύλης, overbend region, στα σχήματα 6.24 και 6.25 απεικονίζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων και των τάσεων που αναπτύσσονται.

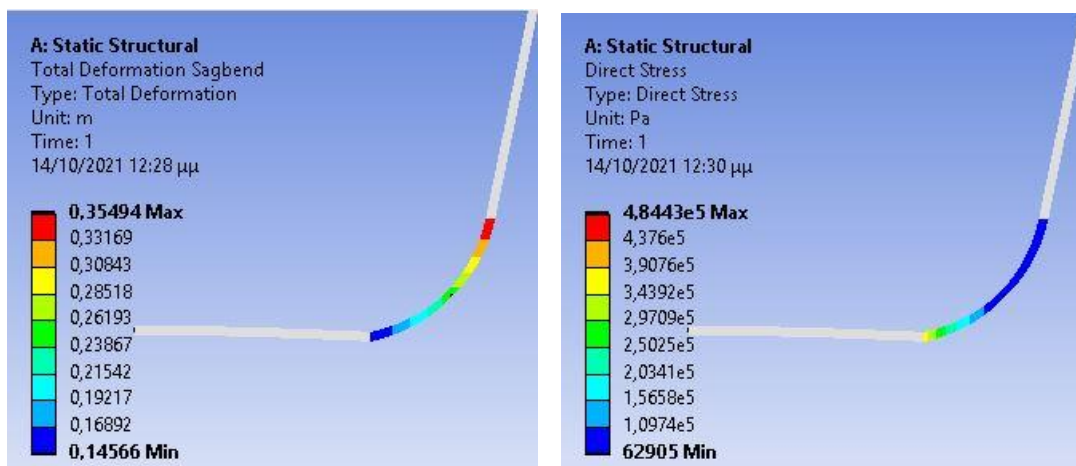


Σχήμα 6.24: Κατανομή παραμορφώσεων και τάσεων λόγω αξονικής καταπόνησης στην περιοχή overbend.



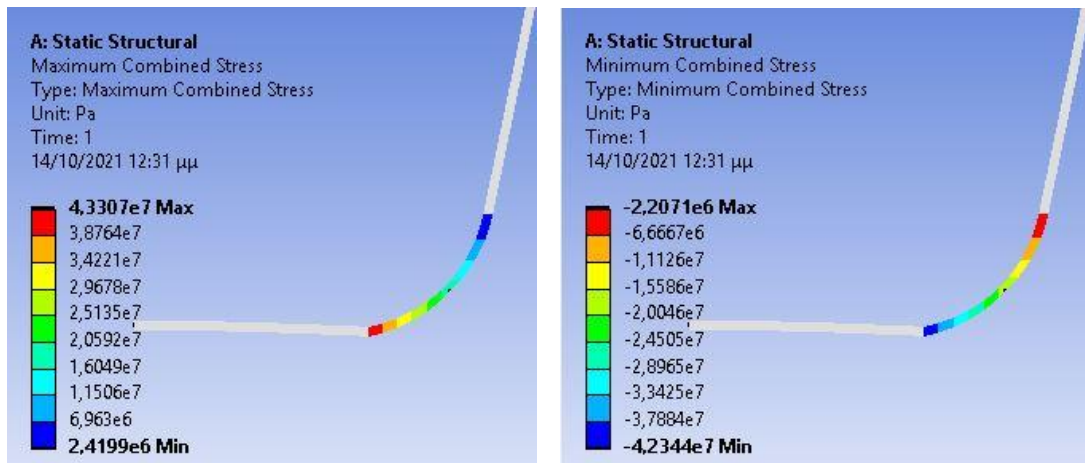
Σχήμα 6.25: Κατανομή μέγιστων και ελάχιστων τάσεων λόγω συνδυασμένης αξονικής και καμπτικής καταπόνησης στην περιοχή overbend.

Αντίστοιχα για την κάτω καμπύλη, sagbend region, στα σχήματα 6.26 και 6.27 απεικονίζονται αναλυτικότερα τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων αλλά και των τάσεων που αναπτύσσονται λόγω αξονικής και λόγω συνδυασμού αξονικής και καμπτικής δύναμης.



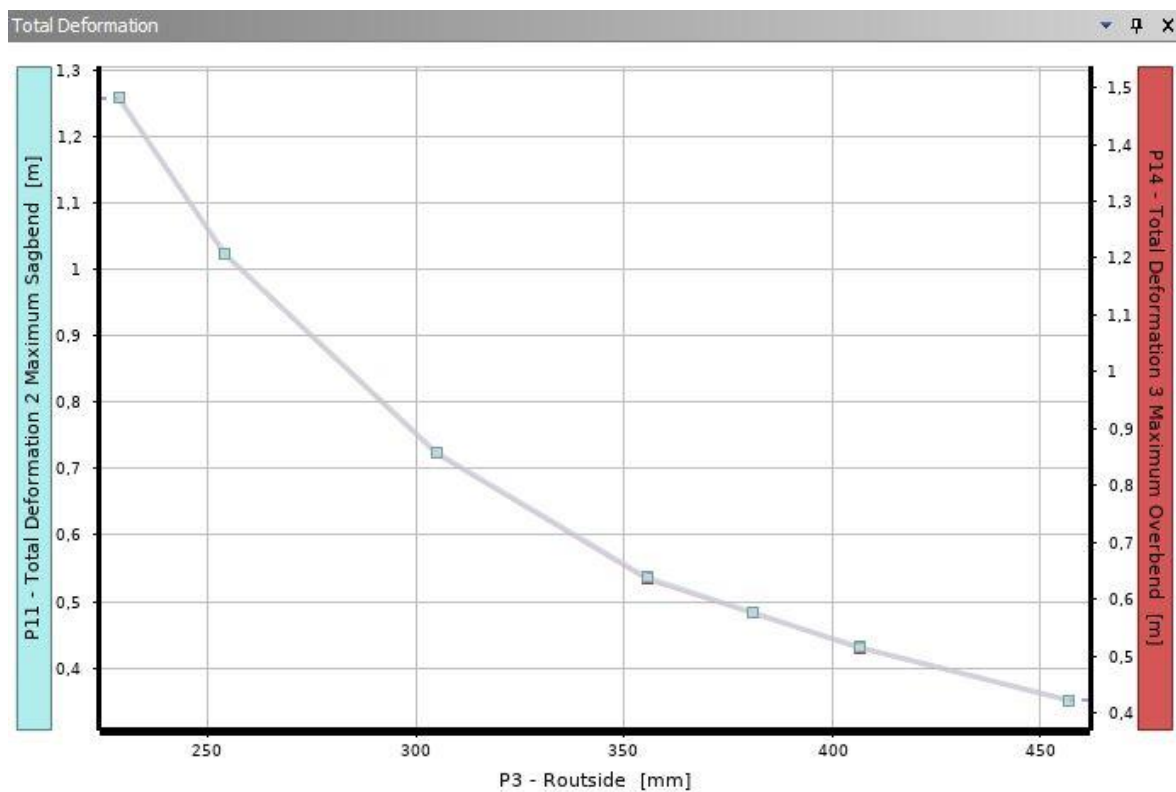
Σχήμα 6.26: Κατανομή παραμορφώσεων και τάσεων λόγω αξονικής καταπόνησης στην περιοχή sagbend.





Σχήμα 6.27: Κατανομή μέγιστων και ελάχιστων τάσεων λόγω συνδυασμένης αξονικής και καμπτικής καταπόνησης στην περιοχή sagbend.

- Συγκριτικά διαγράμματα



Σχήμα 6.28: Συγκριτικό διάγραμμα συνολικών παραμορφώσεων του αγωγού στις περιοχές overbend και sagbend.

Στο Σχήμα 6.28 απεικονίζεται η καμπύλη των μέγιστων παραμορφώσεων του αγωγού στις δύο υπό μελέτη περιοχές. Ο αριστερός άξονας αφορά τις παραμορφώσεις της περιοχής sangbend, ενώ ο δεξιός της περιοχής overbend. Ο άξονας στην βάση του

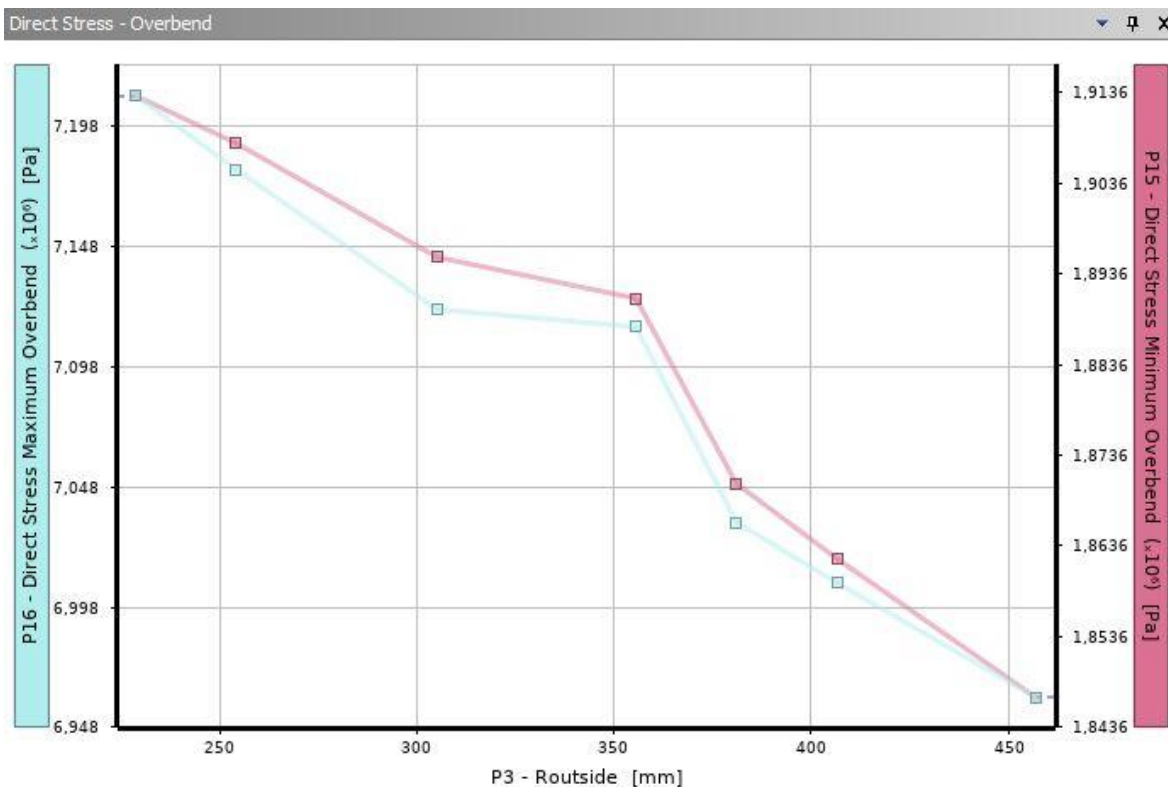
διαγράμματος αφορά την εσωτερική ακτίνα του αγωγού ενώ ο πάνω άξονας την εξωτερική.

Παρατηρείται λοιπόν από το συγκεκριμένο σχήμα πως με την αύξηση της διαμέτρου της διατομής του αγωγού έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των παραμορφώσεων και στις δύο περιοχές καμπύλωσης του αγωγού.

Πιο συγκεκριμένα όπως φαίνεται και υπολογιστικά από τα Σχήματα Σχήμα 6.17 και Σχήμα 6.22, για την περιοχή της **άνω καμπύλης**, οι τιμές των παραμορφώσεων κυμαίνονται από 1.48m-0.36m για την περίπτωση της μικρότερης διαμέτρου ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την περίπτωση της μεγαλύτερης διαμέτρου αγωγού κυμαίνονται από 0.42m-0.09, διαφορά μεγαλύτερη από το 50%.

Αντίστοιχα για την περιοχή της **κάτω καμπύλωσης** του αγωγού όπως προκύπτει και από τα Σχήματα Σχήμα 6.19 και Σχήμα 6.24, οι τιμές των παραμορφώσεων κυμαίνονται από 1.26m-0.56m για την περίπτωση της μικρότερης διαμέτρου ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την περίπτωση της μεγαλύτερης διαμέτρου αγωγού κυμαίνονται από 0.35m-0.15, διαφορά και σε αυτή την περίπτωση μεγαλύτερη από το 50%.

Επίσης θα μπορούσε κανείς να παρατηρήσει ότι το εύρος των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στην άνω καμπύλη είναι ελάχιστο μεγαλύτερο από αυτό της κάτω καμπύλης.



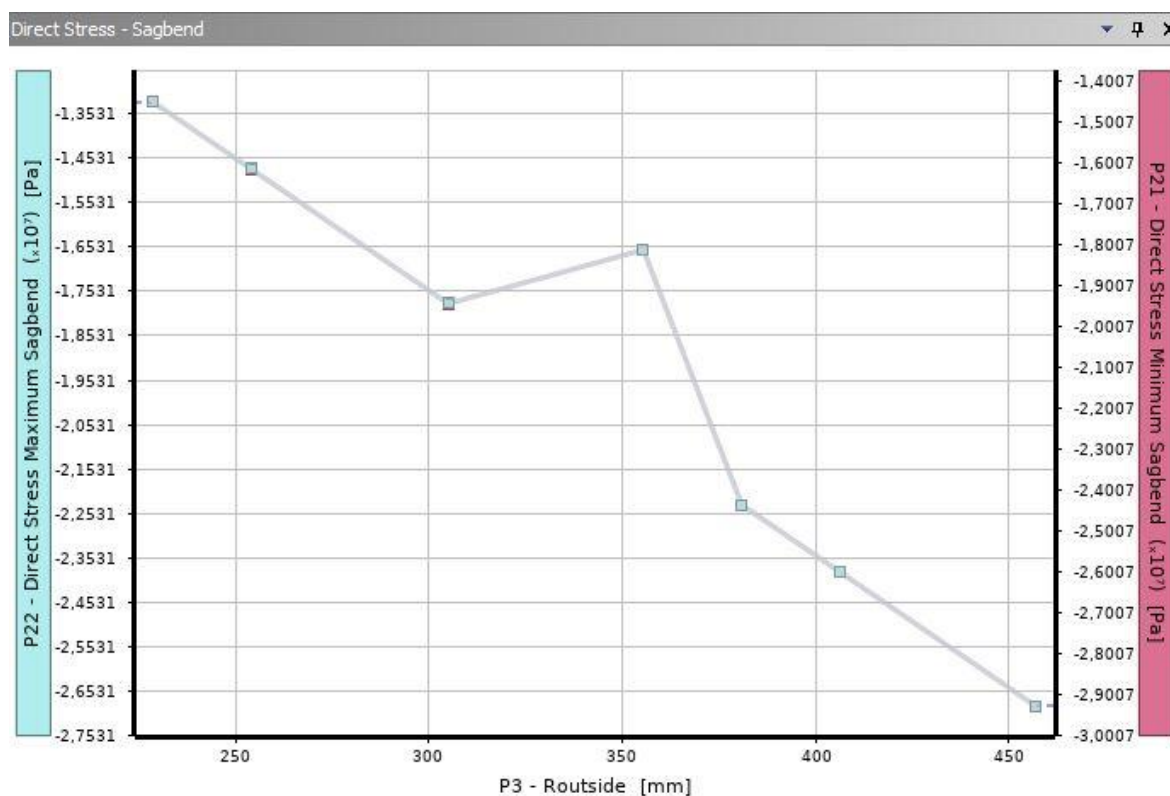
**Σχήμα 6.29: Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστων και ελάχιστων τάσεων από αξονική δύναμη στον αγωγό στην περιοχή overbend.**

Στο Σχήμα 6.29 απεικονίζεται η καμπύλη των μέγιστων τάσεων που αναπτύσσονται στον αγωγό λόγω αξονικής έντασης στην περιοχή overbend. Ο αριστερός άξονας αφορά τις μέγιστες τάσεις ενώ ο δεξιός τις ελάχιστες. Ο πάνω και ο κάτω άξονας και σε αυτό το

διάγραμμα όπως και στα επόμενα, αφορά αντίστοιχα την εξωτερική και εσωτερική διάμετρο του αγωγού.

Παρατηρείται λοιπόν, και στο κομμάτι των τάσεων, από το συγκεκριμένο σχήμα πως με την αύξηση της διαμέτρου της διατομής του αγωγού οι αναπτυσσόμενες τάσεις και στις δύο περιοχές καμπύλωσης του αγωγού ελαττώνονται.

Πιο συγκεκριμένα όπως φαίνεται και υπολογιστικά από τα Σχήματα Σχήμα 6.17 και Σχήμα 6.22, για την περιοχή της **άνω καμπύλης**, οι τιμές των τάσεων κυμαίνονται από 1.9 MPa – 7.46 MPa για την περίπτωση της μικρότερης διαμέτρου ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την περίπτωση της μεγαλύτερης διαμέτρου αγωγού κυμαίνονται από 1.84 MPa – 7.23 MPa, διαφορά πολύ μικρή.

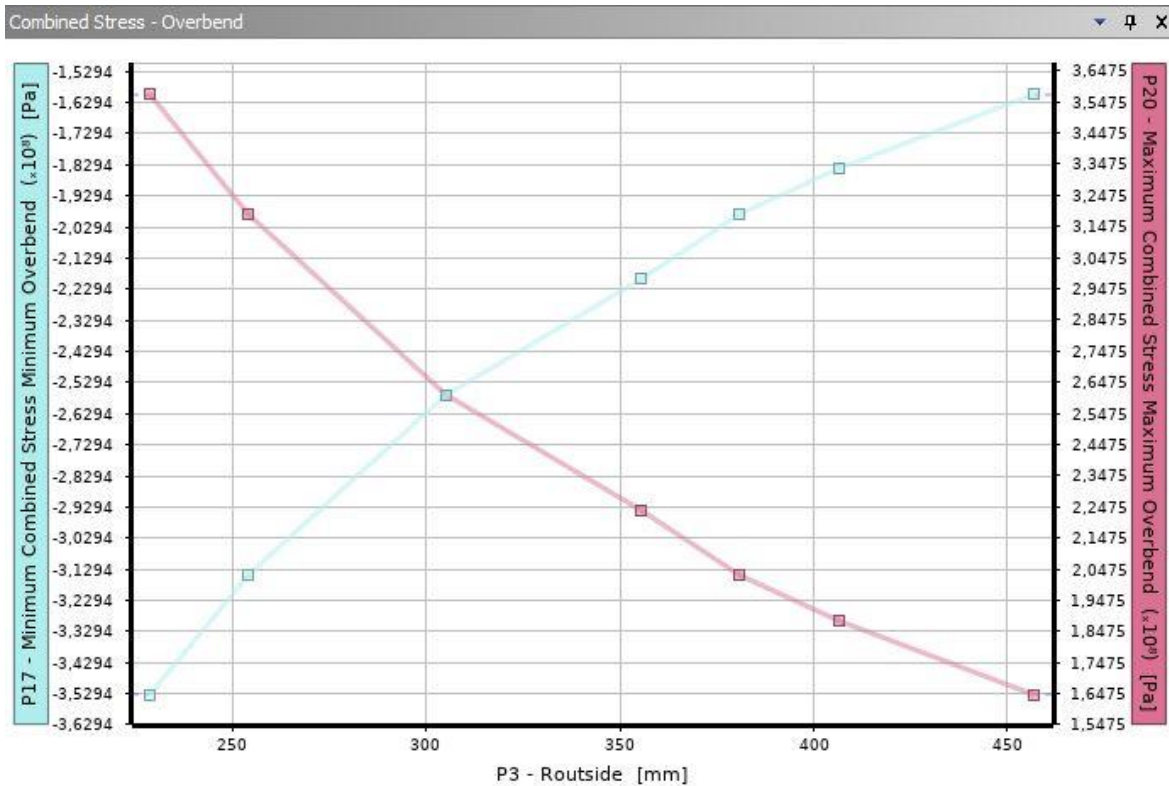


**Σχήμα 6.30: Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστων και ελάχιστων τάσεων από αξονική δύναμη στον αγωγό στην περιοχή sagbend.**

Στο Σχήμα 6.30 απεικονίζεται η καμπύλη των μέγιστων και ελάχιστων τάσεων που αναπτύσσονται στον αγωγό λόγω αξονικής έντασης στην περιοχή sangbend. Ο αριστερός άξονας αφορά τις μέγιστες τάσεις ενώ ο δεξιός τις ελάχιστες. Ο πάνω και ο κάτω άξονας και σε αυτό το διάγραμμα, αφορά αντίστοιχα την εξωτερική και εσωτερική διάμετρο του αγωγού.

Όπως προκύπτει και από τα Σχήματα Σχήμα 6.19 και Σχήμα 6.24, οι τιμές των τάσεων κυμαίνονται από 0.27 MPa έως 0.55 MPa για την περίπτωση της μικρότερης διαμέτρου ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την περίπτωση της μεγαλύτερης διαμέτρου αγωγού κυμαίνονται από 0.06 MPa έως 0.49 MPa, στην προκειμένη περίπτωση παρατηρείται λοιπόν μία μικρή μείωση των τάσεων με την αύξηση της διαμέτρου του αγωγού καθώς επίσης και μία αύξηση του εύρους των τάσεων.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως όπως φαίνεται και στα Σχήματα Σχήμα 6.19 και Σχήμα 6.24, στο μεγαλύτερο τμήμα τις καμπύλης, οι τάσεις είναι πολύ μικρές ενώ παρατηρείται αύξησή τους στο άκρο το οποίο βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο στήριξης και το έδαφος.



**Σχήμα 6.31:** Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστων και ελάχιστων τάσεων από συνδυασμένη κάμψη και αξονική δύναμη στον αγωγό στην περιοχή overbend.

Στο Σχήμα 6.31 απεικονίζεται η καμπύλη των μέγιστων εφελκυστικών και ελάχιστων θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται στον αγωγό, λόγω συνδυασμού αξονικής και καμπτικής έντασης στην περιοχή overbend, σύμφωνα με το πρόγραμμα. Ο αριστερός άξονας και η γαλάζια καμπύλη αφορούν τις ελάχιστες θλιπτικές τάσεις ενώ ο δεξιός με την κόκκινη καμπύλη τις μέγιστες εφελκυστικές. Ο πάνω και ο κάτω άξονας και σε αυτό το διάγραμμα, αφορούν αντίστοιχα την εξωτερική και εσωτερική διάμετρο του αγωγού.

Παρατηρείται λοιπόν, και στο κομμάτι των τάσεων, από το συγκεκριμένο σχήμα πως η αύξηση της διαμέτρου της διατομής του αγωγού οι ελάχιστες θλιπτικές τάσεις καθώς και οι μέγιστες εφελκυστικές τείνουν να μειωθούν κατ' απόλυτη τιμή.

Πιο συγκεκριμένα όπως φαίνεται και υπολογιστικά από τα Σχήματα Σχήμα 6.18 και Σχήμα 6.23, για την περιοχή της **άνω καμπύλης**, οι τιμές των **μέγιστων εφελκυστικών** τάσεων κυμαίνονται από 7.17 MPa – 357.08 MPa για την περίπτωση της μικρότερης διαμέτρου ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την περίπτωση της μεγαλύτερης διαμέτρου αγωγού κυμαίνονται από 6.55 MPa – 164.14 MPa. Είναι εμφανές πως με την αύξηση της διαμέτρου του αγωγού επιτυγχάνεται μεγάλη μείωση της μέγιστης τιμής της μέγιστης αναπτυσσόμενης εφελκυστικής τάσης σε αυτή την περιοχή του αγωγού της τάξης του 50%, καθώς επίσης μειώνεται και το εύρος των τιμών των τάσεων.

Αντίστοιχα, όπως φαίνεται και υπολογιστικά από τα Σχήματα Σχήμα 6.18 και Σχήμα 6.23, για την περιοχή της **άνω καμπύλης**, οι τιμές των **ελάχιστων θλιπτικών** τάσεων

κυμαίνονται από -33.54 MPa έως -353.26 MPa για την περίπτωση της μικρότερης διαμέτρου ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την περίπτωση της μεγαλύτερης διαμέτρου αγωγού κυμαίνονται από -12.16 MPa έως -160.04 MPa. Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται, πως με την αύξηση της διαμέτρου του αγωγού επιτυγχάνεται αρκετά ικανοποιητική μείωση κατ' απόλυτη τιμή, της μέγιστης τιμής της ελάχιστης αναπτυσσόμενης θλιπτικής τάσης σε αυτή την περιοχή του αγωγού.

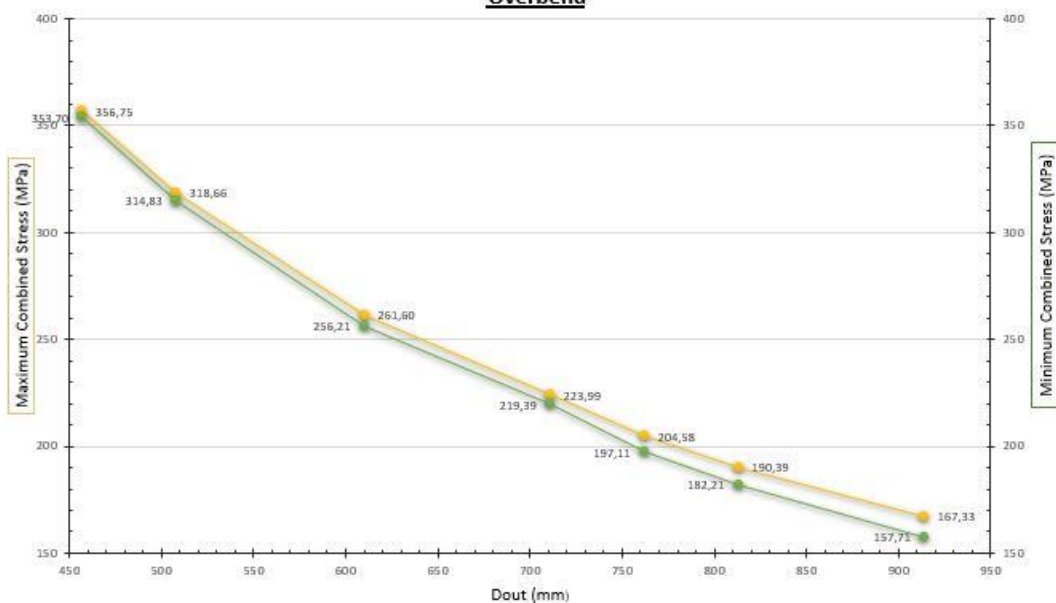
Τα ανωτέρω αποτελέσματα είναι εκείνα που προκύπτουν από το πρόγραμμα και στα οποία δεν λαμβάνεται η επίδραση της υδροστατικής πίεσης καθώς αυτοαναιρείται λόγω του ότι ασκείται περιμετρικά στον αγωγό. Ο υπολογισμός λοιπόν της συνολικής τάσης προκύπτει σύμφωνα με το κριτήριο Von-Mises με συνδυασμό της προκύπτουσας από το πρόγραμμα συνδυασμένης ορθής τάσης και της ορθής τάσης λόγω τη υδροστατικής πίεσης, ο υπολογισμός της οποίας γίνεται σύμφωνα με το Παράρτημα Α.

Overbend		Combined Stress ANSYS (Mpa)		Combined Stress Von Mises (Mpa)	
Dout(mm)	σθ(Mpa)	max (P20)	min (P17)	min	max
457	6,87	357,08	-353,26	353,70	356,75
508	7,64	318,58	-314,77	314,83	318,66
610	9,17	260,68	-256,89	256,21	261,60
711	8,55	223,54	-219,59	219,39	223,99
762	11,46	202,59	-198,61	197,11	204,58
813	12,22	188,01	-183,98	182,21	190,39
914	13,74	164,14	-160,04	157,71	167,33

**Πίνακας 6.1:** Συνολικές τάσεις που αναπτύσσονται στην overbend περιοχή του αγωγού σύμφωνα με το κριτήριο Von-Mises.

Τα αποτελέσματα που αφορούν τις μέγιστες εφελκυστικές και ελάχιστες θλιπτικές τάσεις σύμφωνα με το πρόγραμμα και συνδυασμένες με την τάση λόγω υδροστατικής πίεσης  $\sigma_\theta$ , σύμφωνα με το κριτήριο Von Mises παρατίθενται στον Πίνακας 6.1. Επομένως το αντίστοιχο με το Σχήμα 6.32 , διάγραμμα που προκύπτει για τις απόλυτες τιμές των αναπτυσσόμενων τάσεων, φαίνεται στο Σχήμα 6.32.

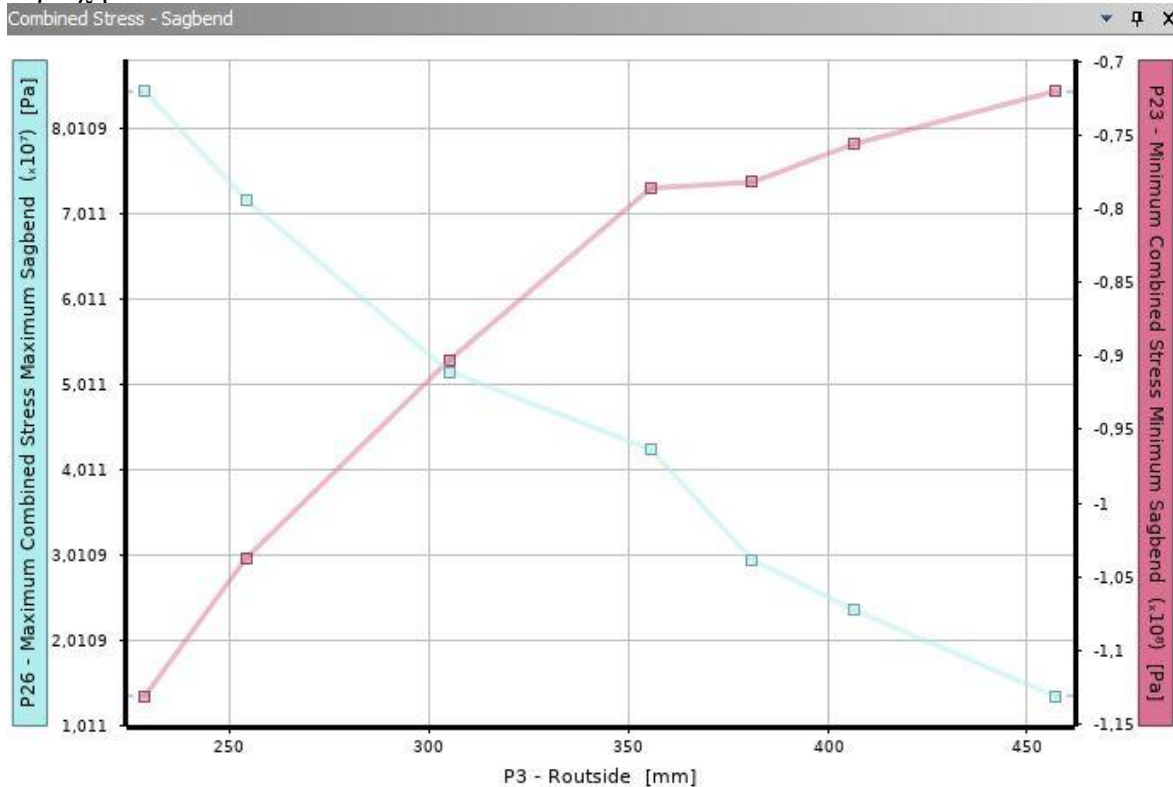
**Combined Stress - Von Mises  
Overbend**



**Σχήμα 6.32:** Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστων και ελάχιστων τάσεων από συνδυασμένη κάμψη και αξονική δύναμη στον αγωγό στην περιοχή overbend σύμφωνα με το κριτήριο Von-Mises.



Όπως είναι αναμενόμενο, στην overbend περιοχή, η διαφοροποίηση των τάσεων ύστερα από την λήψη και της τάσης λόγω υδροστατικής πίεσης δεν είναι μεγάλη. Αυτό συμβαίνει λόγω της φύσης του φαινομένου, σύμφωνα με την οποία η υδροστατική πίεση είναι μεγαλύτερη όσο πιο κοντά στον πυθμένα βρίσκεται ο αγωγός. Αναμένει λοιπόν κανείς ότι η επίδραση της υδροστατικής πίεσης θα είναι αρκετά μεγαλύτερη στη sagbend περιοχή.



Σχήμα 6.33: Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστων και ελάχιστων τάσεων από συνδυασμένη κάμψη και αξονική δύναμη στον αγωγό στην περιοχή sagbend.

Στο Σχήμα 6.33 απεικονίζεται η καμπύλη των μέγιστων εφελκυστικών και ελάχιστων θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται στον αγωγό, λόγω συνδυασμού αξονικής και καμπτικής έντασης στην περιοχή sagbend. Ο δεξιός άξονας και η κόκκινη καμπύλη αφορούν τις ελάχιστες θλιπτικές τάσεις ενώ ο αριστερός με τη γαλάζια καμπύλη τις μέγιστες εφελκυστικές. Ο πάνω και ο κάτω άξονας και σε αυτό το διάγραμμα, αφορούν αντίστοιχα την εξωτερική και εσωτερική διάμετρο του αγωγού.

Παρατηρείται λοιπόν, και στο κομμάτι των τάσεων, όπως και στην overbend περιοχή, έτσι και στην sagbend, από το συγκεκριμένο σχήμα πως η αύξηση της διαμέτρου της διατομής του αγωγού οι ελάχιστες θλιπτικές τάσεις καθώς και οι μέγιστες εφελκυστικές τείνουν να μειωθούν κατ' απόλυτη τιμή.

Πιο συγκεκριμένα όπως φαίνεται και υπολογιστικά από τα Σχήματα Σχήμα 6.20 και Σχήμα 6.25, για την περιοχή της **κάτω καμπύλης**, οι τιμές των **μέγιστων εφελκυστικών** τάσεων κυμαίνονται από 28.87 MPa – 99.26 MPa για την περίπτωση της μικρότερης διαμέτρου ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την περίπτωση της μεγαλύτερης διαμέτρου αγωγού κυμαίνονται από 2.42 MPa – 43.31 MPa. Φαίνεται επομένως πως η επίδραση της αύξησης της διαμέτρου του αγωγού στην κάτω καμπύλωσή του, κατά τη διαδικασία της

τοποθέτησής του, είναι αρκετά μεγάλη και εδώ, καθώς παρατηρείται μείωση των μέγιστων εφελκυστικών τάσεων κατά ποσοστό περίπου 50%.

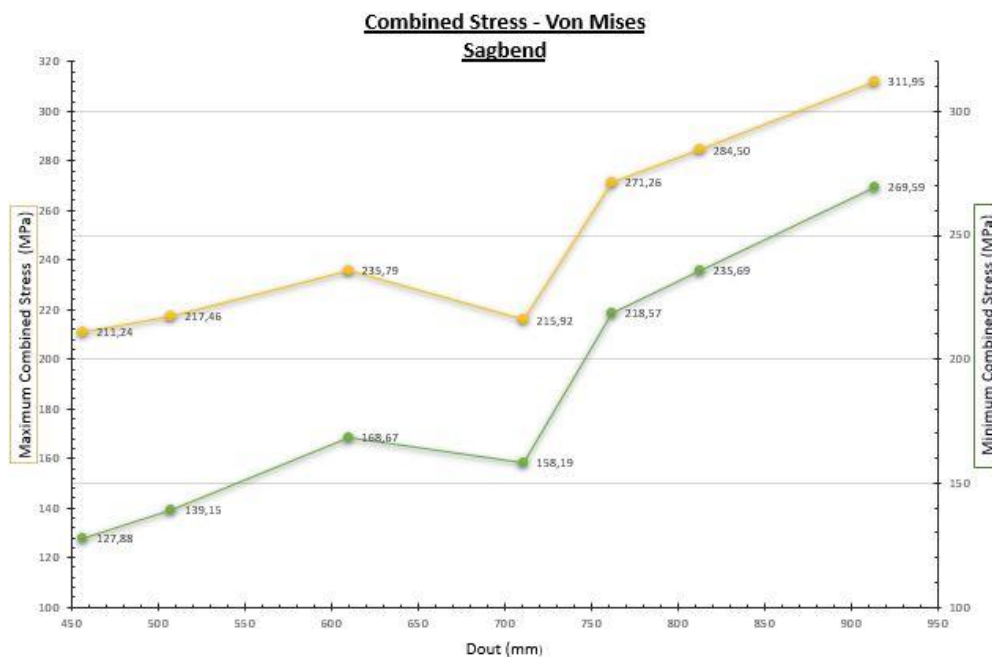
Αντίστοιχα, όπως φαίνεται και υπολογιστικά από τα Σχήματα Σχήμα 6.20 και Σχήμα 6.25, για την περιοχή της **κάτω καμπύλης**, οι τιμές των **ελάχιστων θλιπτικών τάσεων** κυμαίνονται από -28.2 MPa έως -98.15 MPa για την περίπτωση της μικρότερης διαμέτρου ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την περίπτωση της μεγαλύτερης διαμέτρου αγωγού κυμαίνονται από -2.21 MPa έως -42.34 MPa. Όμοια με τα όσα έχουν υπολογισθεί έως τώρα και στην προκειμένη περίπτωση, παρατηρείται, πως με την αύξηση της διαμέτρου του αγωγού επιτυγχάνεται μείωση της μέγιστης, κατ' απόλυτο, τιμής της ελάχιστης αναπτυσσόμενης θλιπτικής τάσης σε αυτή την περιοχή του αγωγού της τάξης του 50%.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στα αποτελέσματα για την overbend περιοχή, έτσι και εδώ, τα ανωτέρω αποτελέσματα είναι εκείνα που προκύπτουν από το πρόγραμμα, και στα οποία δεν λαμβάνεται η επίδραση της υδροστατικής πίεσης.

Sagbend		Combined Stress ANSYS (Mpa)		Combined Stress Von Mises (Mpa)	
Dout(mm)	σθ(Mpa)	max (P26)	min (P23)	min	max
457	144,31	99,26	-98,15	127,88	211,24
508	160,41	88,19	-87,10	139,15	217,46
610	192,62	71,40	-70,33	168,67	235,79
711	179,61	61,01	-59,95	158,19	215,92
762	240,62	54,37	-53,35	218,57	271,26
813	256,72	50,14	-49,14	235,69	284,50
914	288,62	43,31	-42,34	269,59	311,95

**Πίνακας 6.2:** Συνολικές τάσεις που αναπτύσσονται στη sagbend περιοχή του αγωγού σύμφωνα με το κριτήριο Von-Mises.

Τα αποτελέσματα που αφορούν τις μέγιστες εφελκυστικές και ελάχιστες θλιπτικές τάσεις σύμφωνα με το πρόγραμμα και συνδυασμένες με την τάση λόγω υδροστατικής πίεσης  $\sigma_{\theta}$ , σύμφωνα με το κριτήριο Von Mises παρατίθενται στον Πίνακα 6.2, από τα οποία και τον Σχήμα 6.34.



**Σχήμα 6.34:** Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστων και ελάχιστων τάσεων από συνδυασμένη κάμψη και αξονική δύναμη στον αγωγό στην περιοχή sagbend σύμφωνα με το κριτήριο Von-Mises.



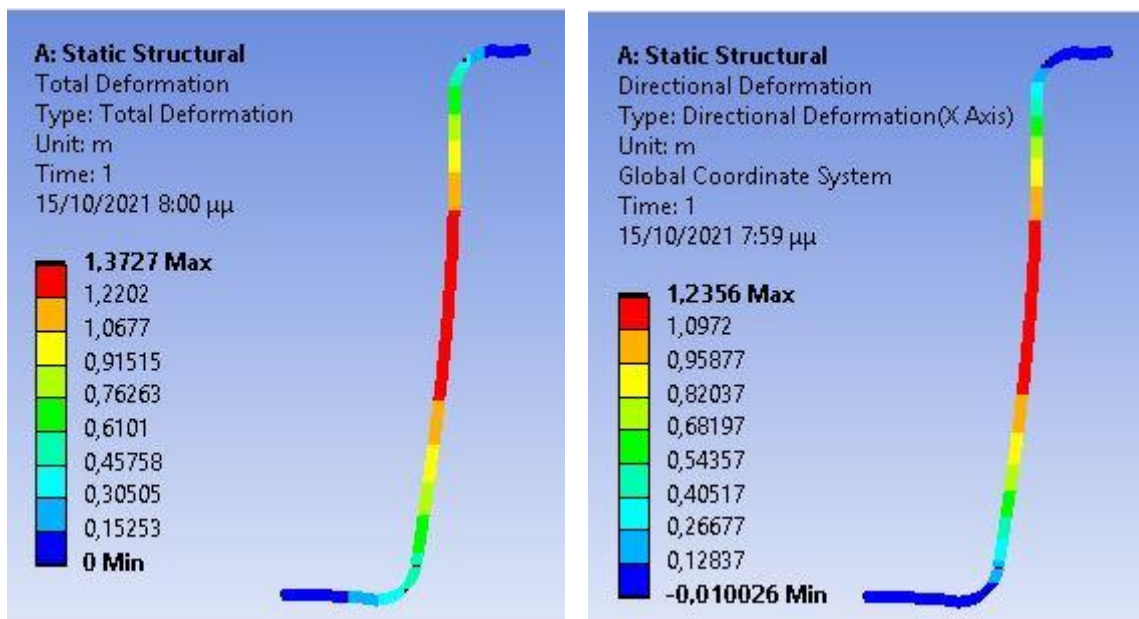
Καθώς ήταν αναμενόμενο, έπειτα από την εξαγωγή των τελικών συνδυασμένων αποτελεσμάτων, παρατηρείται αρκετά μεγαλύτερη διαφορά των τάσεων του προγράμματος με τις τελικές, στην περιοχή sagbend, σε σχέση με τη διαφορά στην περιοχή overbend. Αξίζει ακόμα να σημειωθεί πως όπως ήταν και αυτό αναμενόμενο οι τελικές μέγιστες τιμές τάσεων προέκυψαν από τις ελάχιστες θλιπτικές του προγράμματος.

## → 2<sup>η</sup> επίλυση

Η δεύτερη επίλυση εστιάζει στη διαφοροποίηση της καμπύλωσης του αγωγού στο τμήμα επαφής με το έδαφος και στο τμήμα βύθισής του. Η επιλογή των ακτινών καμπυλότητας έγινε σύμφωνα με τις προτεινόμενες από τη βιβλιογραφία τιμές και εξασφαλίζοντας ότι ο αγωγός δεν χάνει την ευστάθειά του αλλά και γενικότερα την ορθή λειτουργία του. Η διάμετρος του αγωγού έχει διατηρηθεί σταθερή σε όλες τις αναλύσεις, ίση με  $D_{out}=914\text{mm}$  και πάχος τοιχώματος  $16\text{ mm}$ .

Παρακάτω θα παρατεθούν ομοίως, τα αποτελέσματα από το πρόγραμμα για τις δύο οριακές καταστάσεις των αναλύσεων αναλυτικά αλλά και ένα πακέτο συγκεντρωτικών διαγραμμάτων στα οποία συγκρίνονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές για όλες τις αναλύσεις.

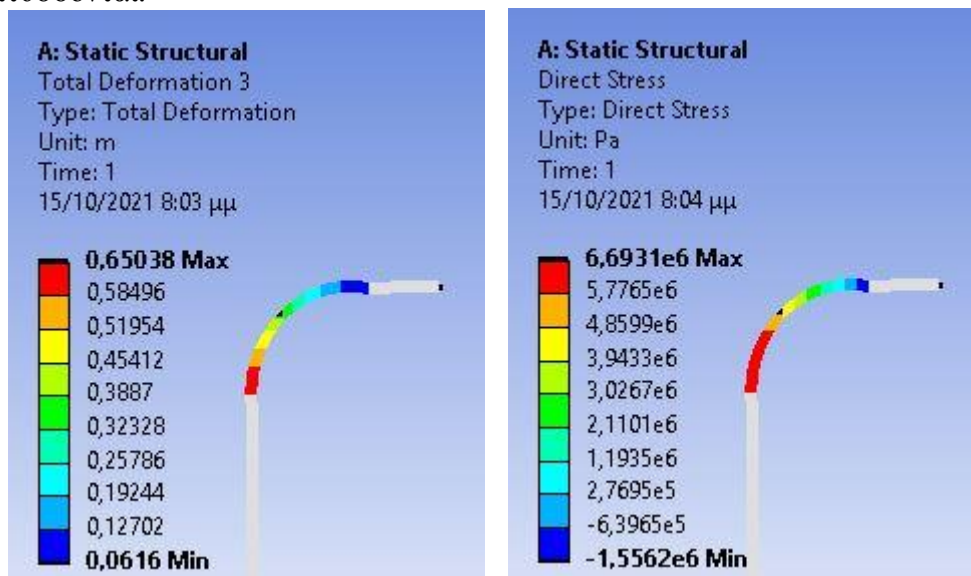
### • R=8m



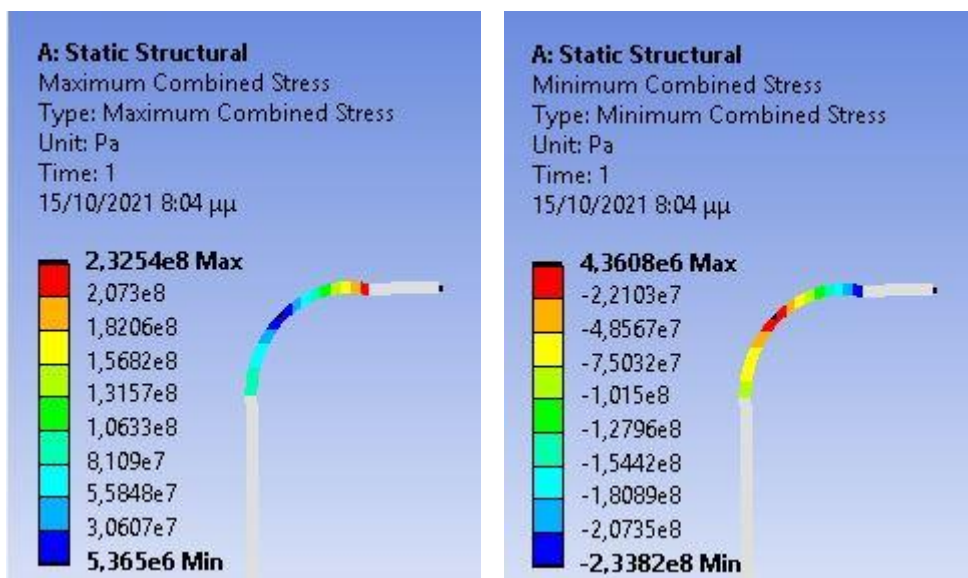
Σχήμα 6.35: Κατανομή παραμορφώσεων συνολικών και μεμονωμένων κατά τον άξονα X στον αγωγό.

Όσον αφορά τις παραμορφώσεις του αγωγού, παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, η μέγιστη μετακίνηση να εμφανίζεται και σε αυτή την επίλυση, στο ευθύγραμμο τμήμα του, μεταξύ των δύο καμπυλώσεων. Επίσης παρατηρείται ότι ο κύριος άξονας παραμόρφωσης είναι ο X.

Στην θέση της άνω καμπύλης, overbend region, στα σχήματα Σχήμα 6.36 και Σχήμα 6.37 απεικονίζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων και των τάσεων που αναπτύσσονται.

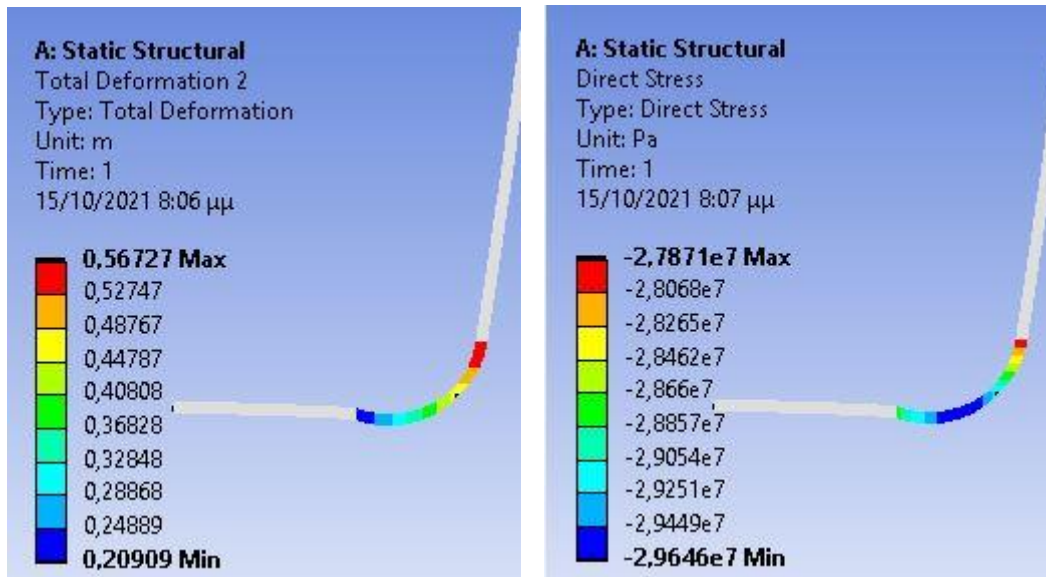


**Σχήμα 6.36: Κατανομή παραμορφώσεων και τάσεων λόγω αξονικής καταπόνησης στην περιοχή overbend.**

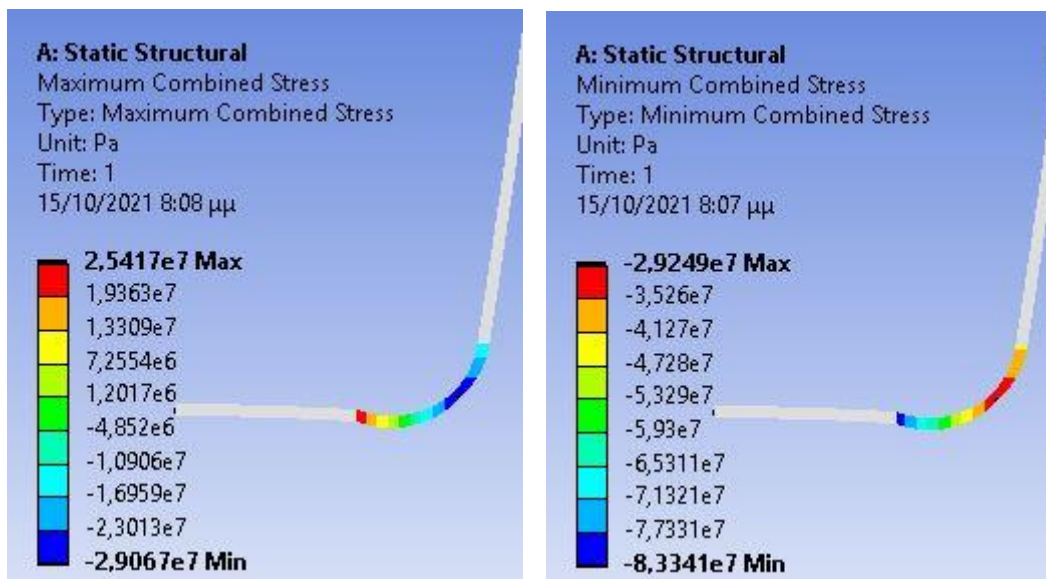


**Σχήμα 6.37: Κατανομή μέγιστων και ελάχιστων τάσεων λόγω συνδυασμένης αξονικής και καμπτικής καταπόνησης στην περιοχή overbend.**

Αντίστοιχα για την κάτω καμπύλη, sagbend region, στα σχήματα Σχήμα 6.38 και Σχήμα 6.39 απεικονίζονται αναλυτικότερα τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων αλλά και των τάσεων που αναπτύσσονται λόγω αξονικής και λόγω συνδυασμού αξονικής και καμπτικής δύναμης.

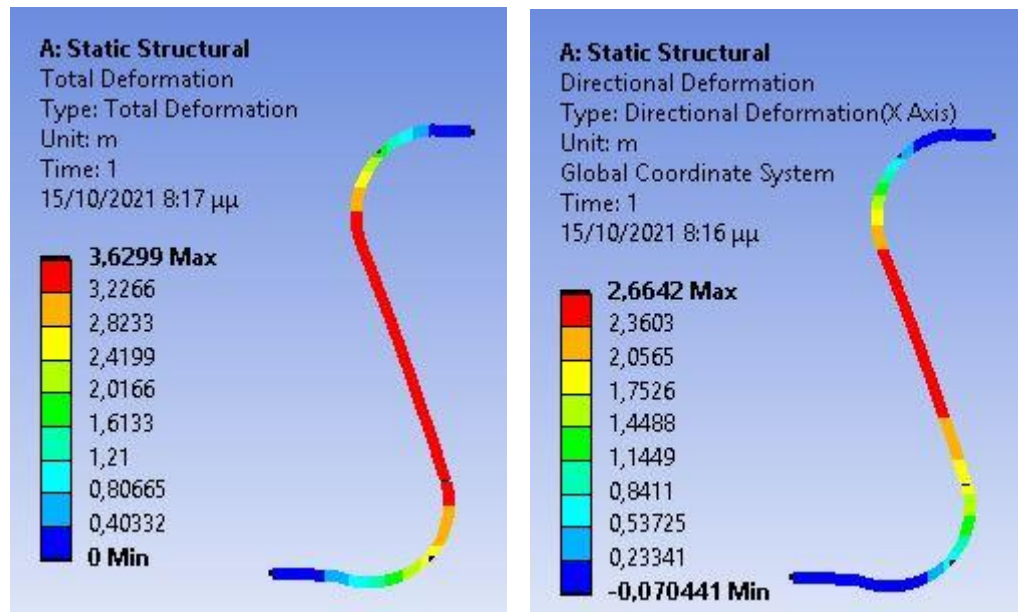


Σχήμα 6.38: Κατανομή παραμορφώσεων και τάσεων λόγω αξονικής καταπόνησης στην περιοχή sagbend.



Σχήμα 6.39: Κατανομή μέγιστων και ελάχιστων τάσεων λόγω συνδυασμένης αξονικής και καμπτικής καταπόνησης στην περιοχή sagbend.

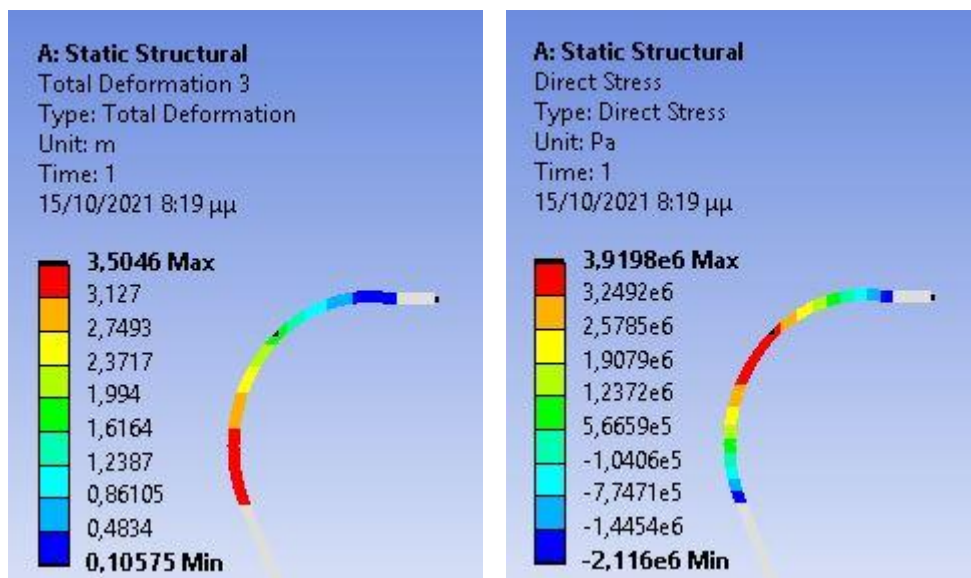
• R=20m



Σχήμα 6.40: Κατανομή παραμορφώσεων συνολικών και μεμονωμένων κατά τον άξονα X στον αγωγό.

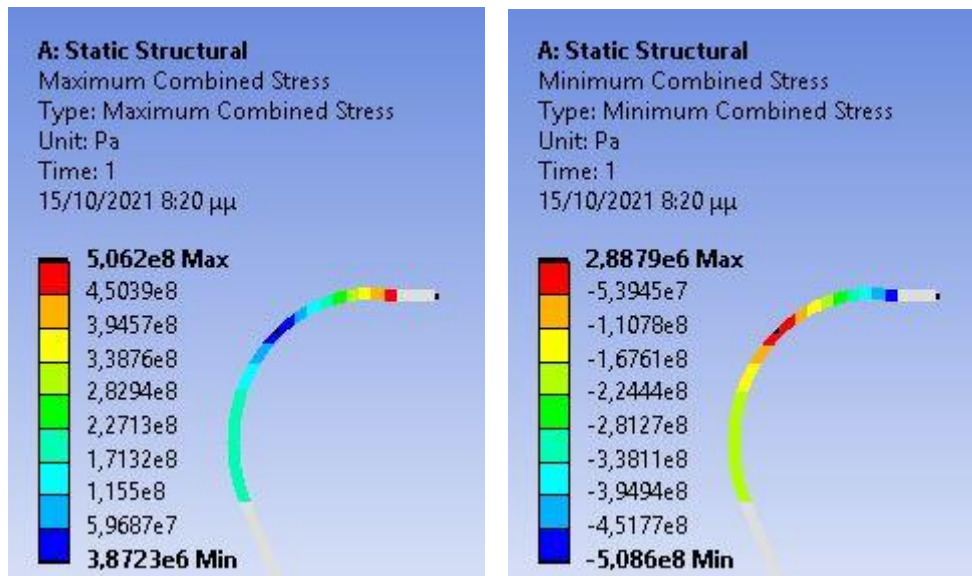
Όσον αφορά τις παραμορφώσεις του αγωγού, παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, η μέγιστη μετακίνηση να εμφανίζεται στο ευθύγραμμο τμήμα του, μεταξύ των δύο καμπυλώσεων. Επίσης παρατηρείται ότι ο κύριος άξονας παραμόρφωσης είναι ο X.

Στην θέση της άνω καμπύλης, overbend region, στα σχήματα Σχήμα 6.41 και Σχήμα 6.42, απεικονίζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων και των τάσεων που αναπτύσσονται.



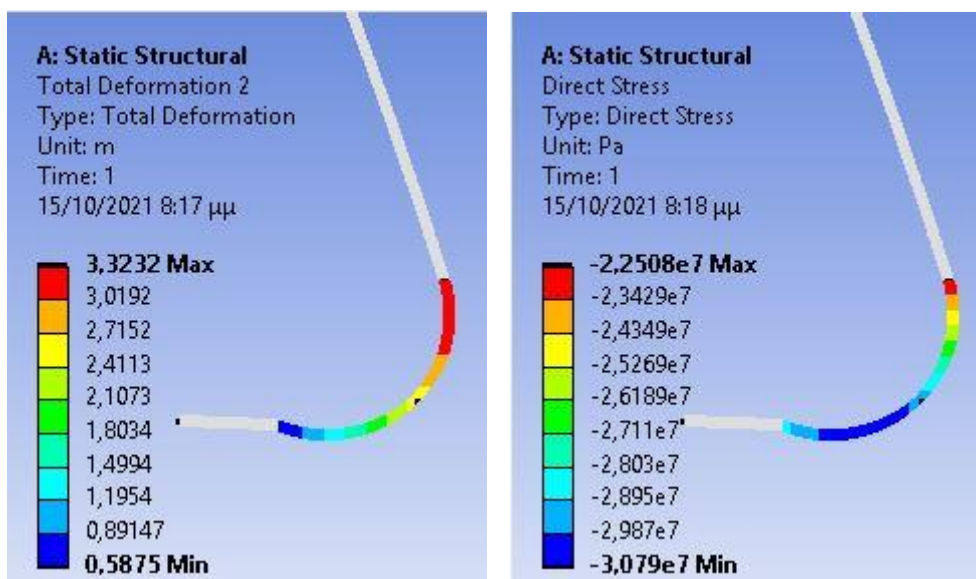
Σχήμα 6.41: Κατανομή παραμορφώσεων και τάσεων λόγω αξονικής καταπόνησης στην περιοχή overbend.





Σχήμα 6.42: Κατανομή μέγιστων και ελάχιστων τάσεων λόγω συνδυασμένης αξονικής και καμπτικής καταπόνησης στην περιοχή overbend.

Αντίστοιχα για την κάτω καμπύλη, sagbend region, στα σχήματα Σχήμα 6.43 και Σχήμα 6.44, απεικονίζονται αναλυτικότερα τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων αλλά και των τάσεων που αναπτύσσονται λόγω αξονικής και λόγω συνδυασμού αξονικής και καμπτικής δύναμης.

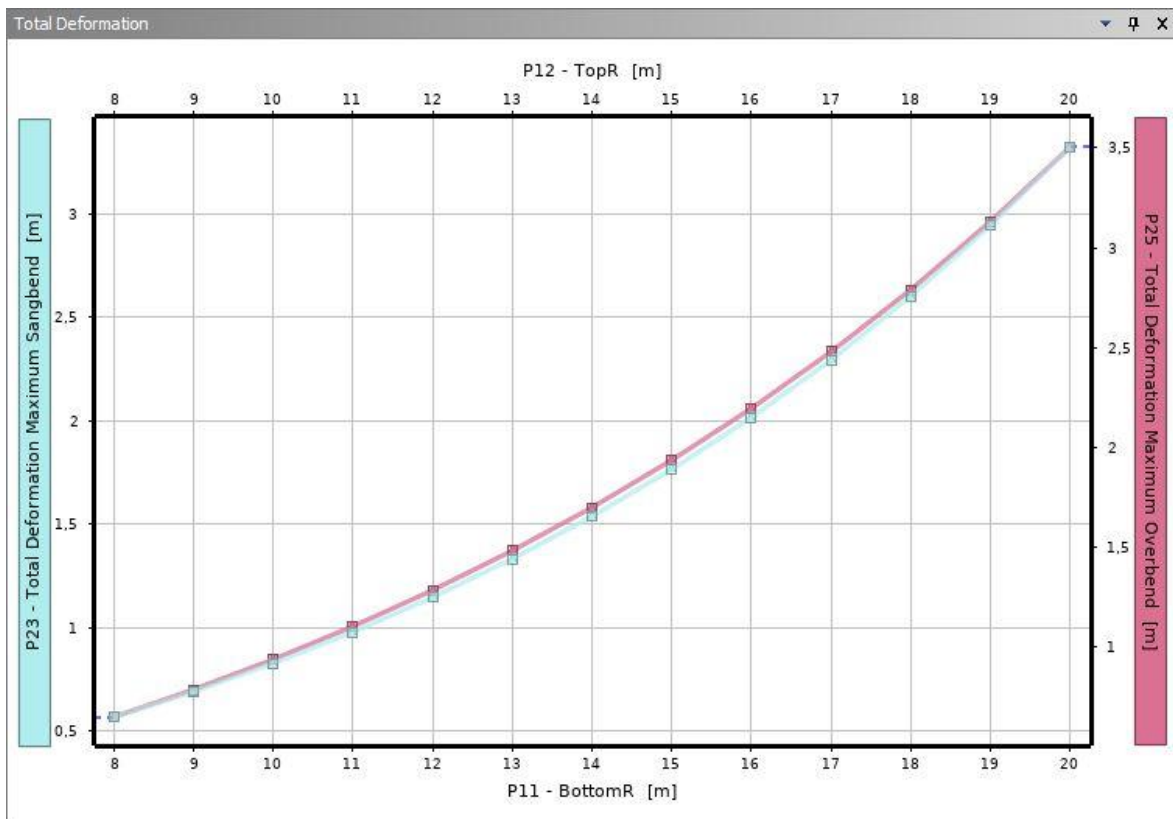


Σχήμα 6.43: Κατανομή παραμορφώσεων και τάσεων λόγω αξονικής καταπόνησης στην περιοχή sagbend.



Σχήμα 6.44: Κατανομή μέγιστων και ελάχιστων τάσεων λόγω συνδυασμένης αξονικής και καμπτικής καταπόνησης στην περιοχή sagbend.

- Συγκριτικά διαγράμματα



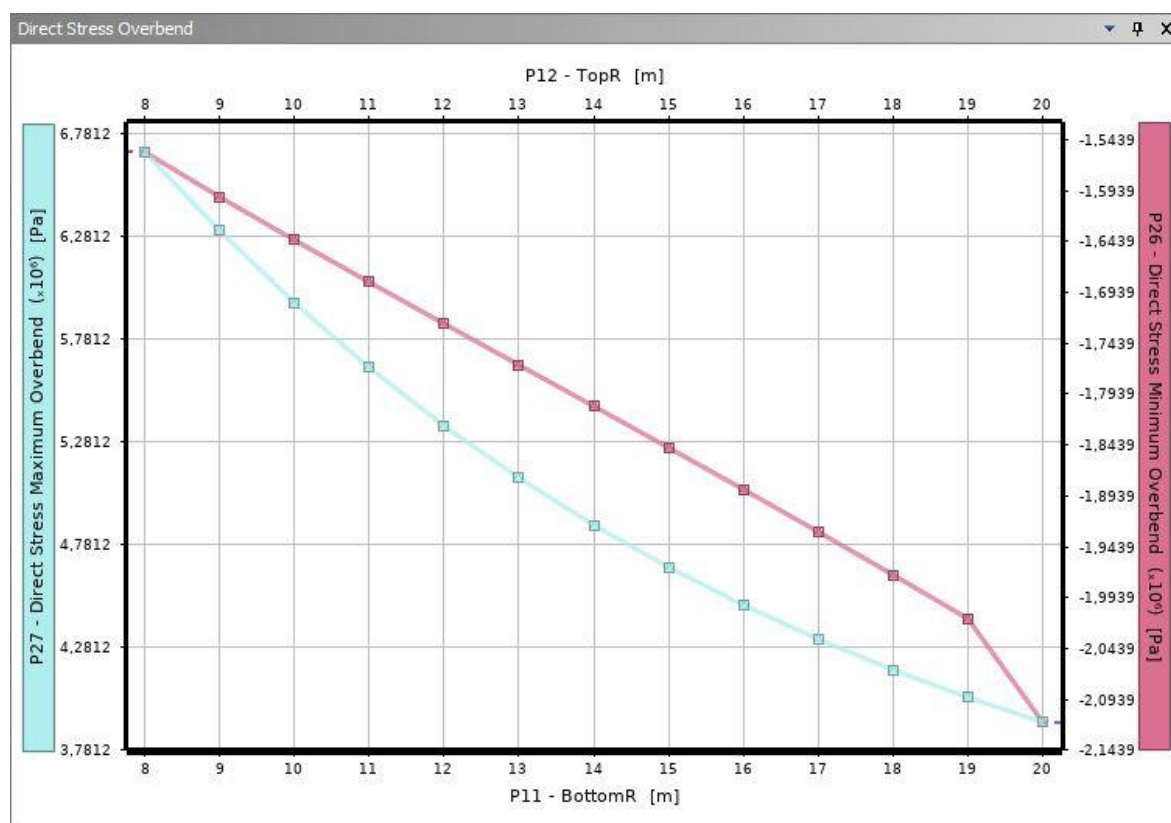
Σχήμα 6.45: Συγκριτικό διάγραμμα συνολικών παραμορφώσεων του αγωγού στις περιοχές overbend και sagbend.

Στο Σχήμα 6.45 απεικονίζεται η καμπύλη των μέγιστων παραμορφώσεων του αγωγού. Ο αριστερός άξονας αφορά τις παραμορφώσεις της περιοχής sangbend ενώ ο δεξιός της περιοχής overbend. Ο άξονας στην βάση του διαγράμματος αφορά την ακτίνα καμπύλωσης στην περιοχή sagbend ενώ ο πάνω άξονας στην περιοχή overbend.

Παρατηρείται λοιπόν από το συγκεκριμένο σχήμα πως με την αύξηση της ακτίνας καμπύλωσης του αγωγού, υφίσταται αύξηση των παραμορφώσεων και στις δύο περιοχές.

Πιο συγκεκριμένα όπως φαίνεται και υπολογιστικά από τα Σχήματα Σχήμα 6.36 και Σχήμα 6.41, για την περιοχή της **άνω καμπύλης**, οι τιμές των παραμορφώσεων κυμαίνονται από 0.06m-0.65m για την περίπτωση της μικρότερης καμπύλωσης ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την περίπτωση της μεγαλύτερης καμπύλωσης αγωγού κυμαίνονται από 0.11m-3.51, διαφορά ιδιαίτερα σημαντική όσον αφορά την μέγιστη παραμόρφωση και πιο συγκεκριμένα μη αποδεκτή στην περίπτωση της μεγαλύτερης ακτίνας καμπύλωσης..

Αντίστοιχα για την περιοχή της **κάτω καμπύλωσης** του αγωγού όπως προκύπτει και από τα Σχήματα Σχήμα 6.38 και Σχήμα 6.42, οι τιμές των παραμορφώσεων κυμαίνονται από 0.21m-0.57m για την περίπτωση της μικρότερης καμπύλωσης ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την περίπτωση της μεγαλύτερης καμπύλωσης αγωγού κυμαίνονται από 0.59m-3.32m, διαφορά μεγαλύτερη του 50%, με την δυσμενέστερη περίπτωση της μεγαλύτερης ακτίνας καμπυλότητας να είναι και σε αυτή την περιοχή μη αποδεκτή.



**Σχήμα 6.46: Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστων και ελάχιστων τάσεων από αξονική δύναμη στον αγωγό στην περιοχή overbend.**

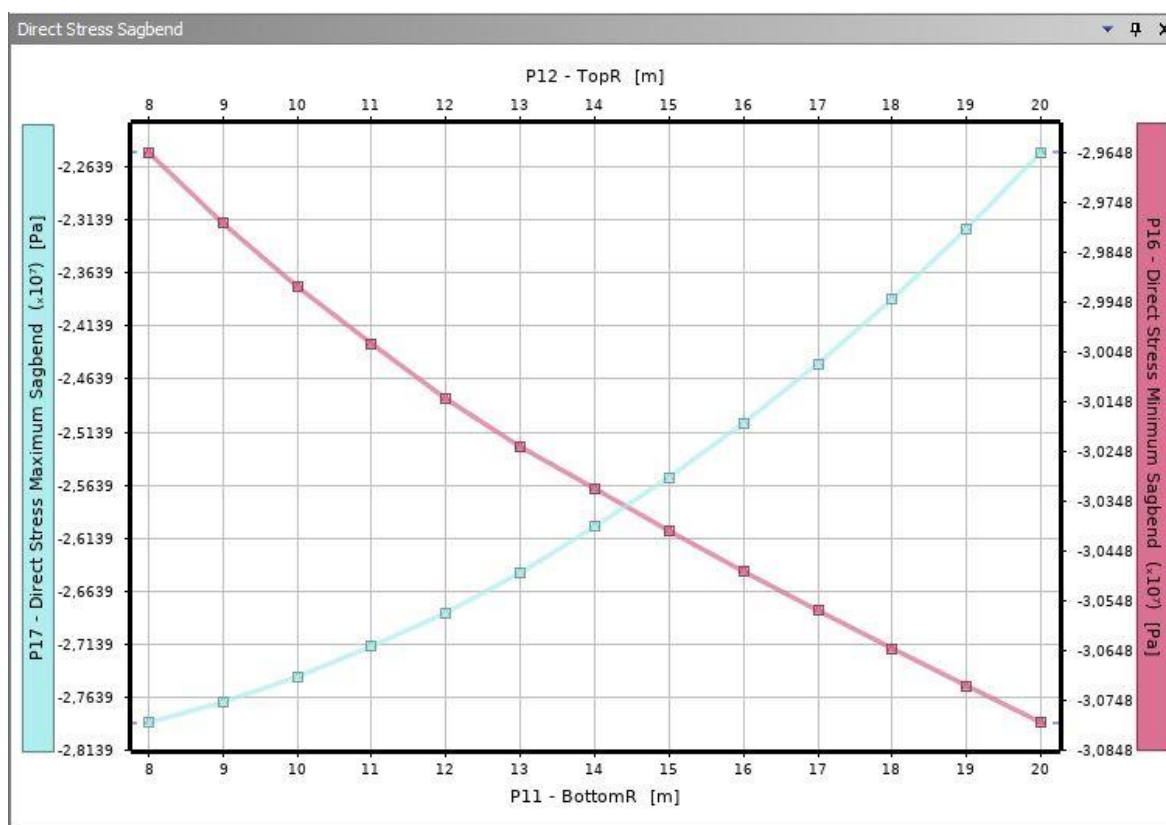
Στο Σχήμα 6.46 απεικονίζεται η καμπύλη των μέγιστων τάσεων που αναπτύσσονται στον αγωγό λόγω αξονικής έντασης στην περιοχή overbend. Ο αριστερός άξονας αφορά τις μέγιστες τάσεις ενώ ο δεξιός τις ελάχιστες. Ο πάνω και ο κάτω άξονας και σε αυτό το



διάγραμμα όπως και στα επόμενα, αφορά αντίστοιχα την άνω και κάτω καμπύλωση του αγωγού.

Παρατηρείται λοιπόν, από το συγκεκριμένο σχήμα πως με την αύξηση της ακτίνας καμπύλωσης του αγωγού οι μέγιστες εφελκυστικές αναπτυσσόμενες τάσεις στην overbend περιοχή μειώνονται. Αντίθετα, οι ελάχιστες θλιπτικές αυξάνονται κατ' απόλυτο τιμή.

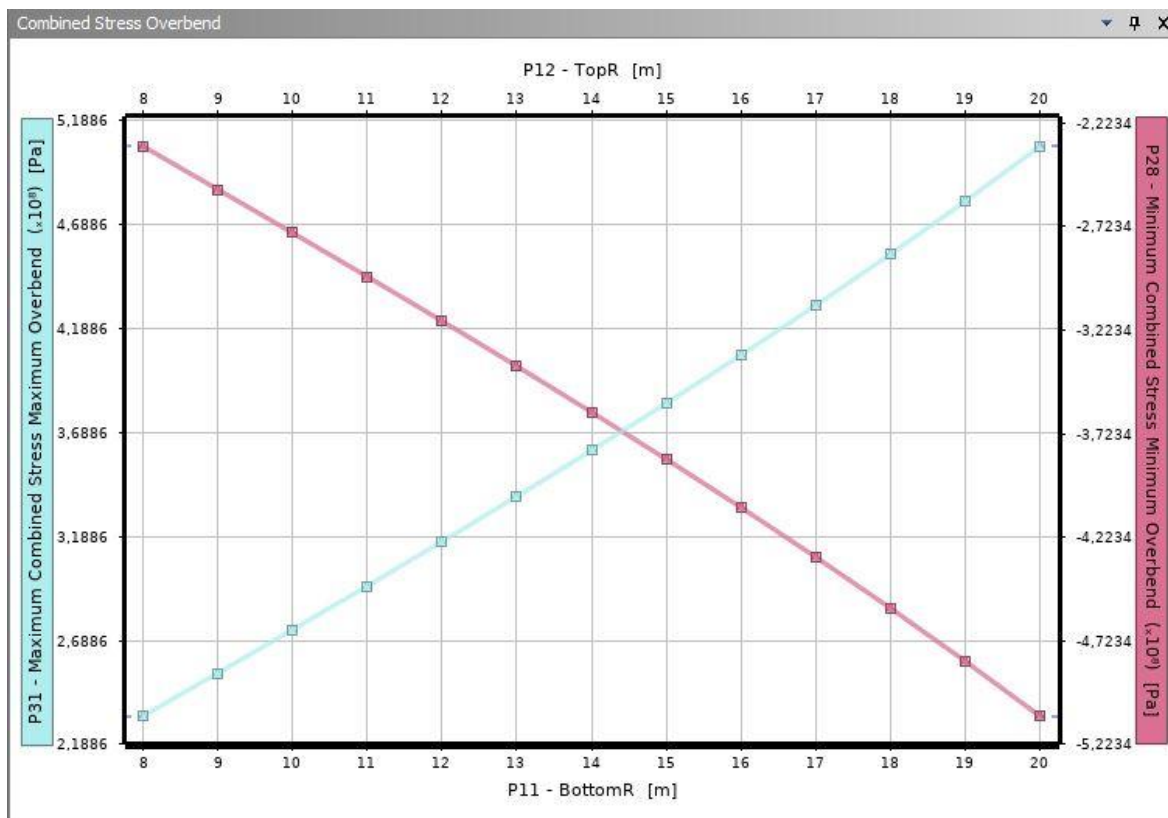
Πιο συγκεκριμένα όπως φαίνεται και υπολογιστικά από τα Σχήματα Σχήμα 6.36 και Σχήμα 6.41, για την περιοχή της άνω καμπύλης, οι μέγιστες εφελκυστικές τιμές των τάσεων κυμαίνονται από 6.69 MPa – 3.92 MPa για τη μικρότερη και μεγαλύτερη ακτίνα καμπύλωσης αντίστοιχα, ενώ οι ελάχιστες θλιπτικές τιμές κυμαίνονται από -1.56 MPa έως -2.11 MPa, για τη μικρότερη και μεγαλύτερη ακτίνα καμπύλωσης αντίστοιχα.



**Σχήμα 6.47: Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστων και ελάχιστων τάσεων από αξονική δύναμη στον αγωγό στην περιοχή sagbend.**

Στο Σχήμα 6.47 απεικονίζεται η καμπύλη των μέγιστων και ελάχιστων τάσεων που αναπτύσσονται στον αγωγό λόγω αξονικής έντασης στην περιοχή sangbend. Ο αριστερός άξονας αφορά τις μέγιστες τάσεις ενώ ο δεξιός τις ελάχιστες. Ο πάνω και ο κάτω άξονας και σε αυτό το διάγραμμα, αφορούν αντίστοιχα τη μεταβολή της άνω και κάτω ακτίνας καμπύλωσης του αγωγού.

Όπως προκύπτει και από τα Σχήματα Σχήμα 6.38 και Σχήμα 6.43, οι τιμές των τάσεων κυμαίνονται από -29.65 MPa έως -27.87 MPa για την περίπτωση της μικρότερης ακτίνας καμπύλωσης ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την περίπτωση της μεγαλύτερης κυμαίνονται από -30.79 MPa έως -22.51 MPa, στην προκειμένη περίπτωση, λοιπόν, παρατηρείται μία μικρή αύξηση κατ' απόλυτη τιμή, των θλιπτικών τάσεων με την αύξηση της ακτίνας καμπύλωσης του αγωγού.



**Σχήμα 6.48:** Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστων και ελάχιστων τάσεων από συνδυασμένη κάμψη και αξονική δύναμη στον αγωγό στην περιοχή overbend.

Στο Σχήμα 6.48 απεικονίζονται οι καμπύλες των μέγιστων εφελκυστικών και ελάχιστων θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται στον αγωγό, λόγω συνδυασμού αξονικής και καμπτικής έντασης στην περιοχή overbend. Ο αριστερός άξονας και η γαλάζια καμπύλη αφορούν τις μέγιστες εφελκυστικές τάσεις ενώ ο δεξιός με την κόκκινη καμπύλη τις ελάχιστες θλιπτικές. Ο πάνω και ο κάτω άξονας και σε αυτό το διάγραμμα, αφορούν αντίστοιχα την άνω και κάτω ακτίνα καμπύλωσης του αγωγού.

Παρατηρείται λοιπόν, από το συγκεκριμένο σχήμα πως με την αύξηση της ακτίνας καμπύλωσης του αγωγού, οι ελάχιστες θλιπτικές τάσεις καθώς και οι μέγιστες εφελκυστικές τείνουν να αυξηθούν κατ' απόλυτο τιμή.

Πιο συγκεκριμένα όπως φαίνεται και υπολογιστικά από τα Σχήματα Σχήμα 6.37 και Σχήμα 6.42, για την περιοχή της **άνω καμπύλης**, οι τιμές των **μέγιστων εφελκυστικών** τάσεων κυμαίνονται από 5.37 MPa – 232.54 MPa για την περίπτωση της μικρότερης ακτίνας καμπύλωσης ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την περίπτωση της μεγαλύτερης κυμαίνονται από 3.87 MPa – 506.2 MPa. Είναι εμφανές πως με την αύξηση της ακτίνας καμπύλωσης του αγωγού αναπτύσσονται πολύ μεγαλύτερες εφελκυστικές τάσεις στην εν λόγω περιοχή και μάλιστα από την ακτίνα καμπύλωσης R=18m και έπειτα αναπτύσσονται μη αποδεκτές εφελκυστικές τάσεις στον αγωγό οι οποίες θα πρέπει να αποφευχθούν, ή εάν κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό θα οδηγήσουν στη χρήση κάποιου χάλυβα υψηλής αντοχής. Κάτι τέτοιο θα επιβεβαιωθεί πλήρως στις επόμενες παραγράφους όπου και υποδεικνύονται τα αποτελέσματα για τις τελικές τάσεις που προκύπτουν στον αγωγό έπειτα από την εφαρμογή του κριτηρίου Von Mises ώστε να ληφθεί υπόψη και η υδροστατική πίεση που ασκείται στον αγωγό.

Αντίστοιχα, όπως φαίνεται και υπολογιστικά από τα Σχήματα Σχήμα 6.37 και Σχήμα 6.42 για την περιοχή της άνω καμπύλης, οι τιμές των ελάχιστων θλιπτικών τάσεων κυμαίνονται από

-22.1 MPa έως -233.82 MPa για την περίπτωση της μικρότερης ακτίνας καμπύλωσης ενώ οι αντίστοιχες τιμές για την περίπτωση της μεγαλύτερης κυμαίνονται από -53.95 MPa έως -508.6 MPa. Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται, πως με την αύξηση της ακτίνας καμπύλωσης του αγωγού υφίσταται σχεδόν διπλασιασμός της μέγιστης τιμής της ελάχιστης αναπτυσσόμενης θλιπτικής τάσης σε αυτή την περιοχή του αγωγού με τις προκύπτουσες τιμές να υπερβαίνουν τα επιθυμητά για το σχεδιασμό όρια.

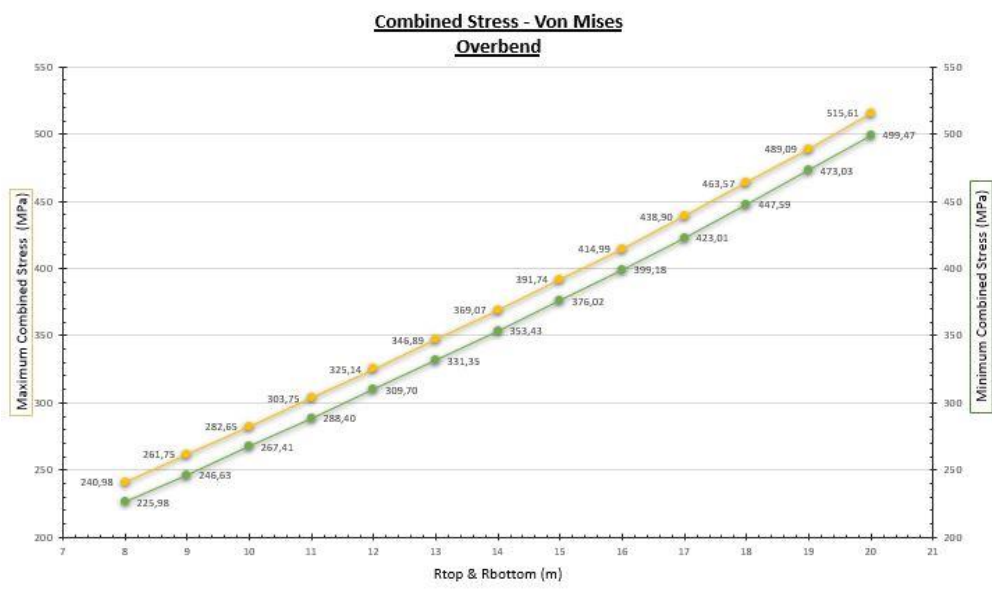
Σύμφωνα με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε και κατά την πρώτη επίλυση για τον υπολογισμό των τελικών τάσεων με τη βοήθεια του κριτηρίου Von Mises, γίνεται συνδυασμός των τάσεων που εξήχθησαν από το πρόγραμμα και αναφέρθηκαν αναλυτικά στις προηγούμενες παραγράφους, με την υδροστατική πίεση που ασκείται εξωτερικά στον αγωγό. Όπως φαίνεται και στο Παράστημα Α ο υπολογισμός της τάσης που αναπτύσσεται στον αγωγό λόγω της επιβολής εξωτερικού φορτίου εξαρτάται από την ακτίνα του αγωγού αλλά και από το πάχος των τοιχωμάτων του. Επειδή στη συγκεκριμένη επίλυση τα δεδομένα αυτά ήταν ίδια για όλες τις επιμέρους αναλύσεις, η τάση λόγω υδροστατικής πίεσης στον αγωγό είναι ίδια σε όλες τις αναλύσεις. Έτσι έπειτα από την εφαρμογή του κριτηρίου Von Mises προκύπτει ο Πίνακας 6.3 στον οποίο φαίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα, από τα οποία διαμορφώνεται και το Σχήμα 6.49.

Overbend		Combined Stress ANSYS (Mpa)		Combined Stress Von Mises (Mpa)	
Rtop & Rbottom (m)	σθ(Mpa)	max (P31)	min (P28)	min	max
8	13,74	232,54	-233,82	225,98	240,98
9	13,74	253,21	-254,61	246,63	261,75
10	13,74	274,02	-275,53	267,41	282,65
11	13,74	295,03	-296,64	288,40	303,75
12	13,74	316,34	-318,05	309,70	325,14
13	13,74	338,01	-339,81	331,35	346,89
14	13,74	360,11	-362,00	353,43	369,07
15	13,74	382,70	-384,69	376,02	391,74
16	13,74	405,88	-407,95	399,18	414,99
17	13,74	429,72	-431,87	423,01	438,90
18	13,74	454,31	-456,55	447,59	463,57
19	13,74	479,76	-482,08	473,03	489,09
20	13,74	506,20	-508,60	499,47	515,61

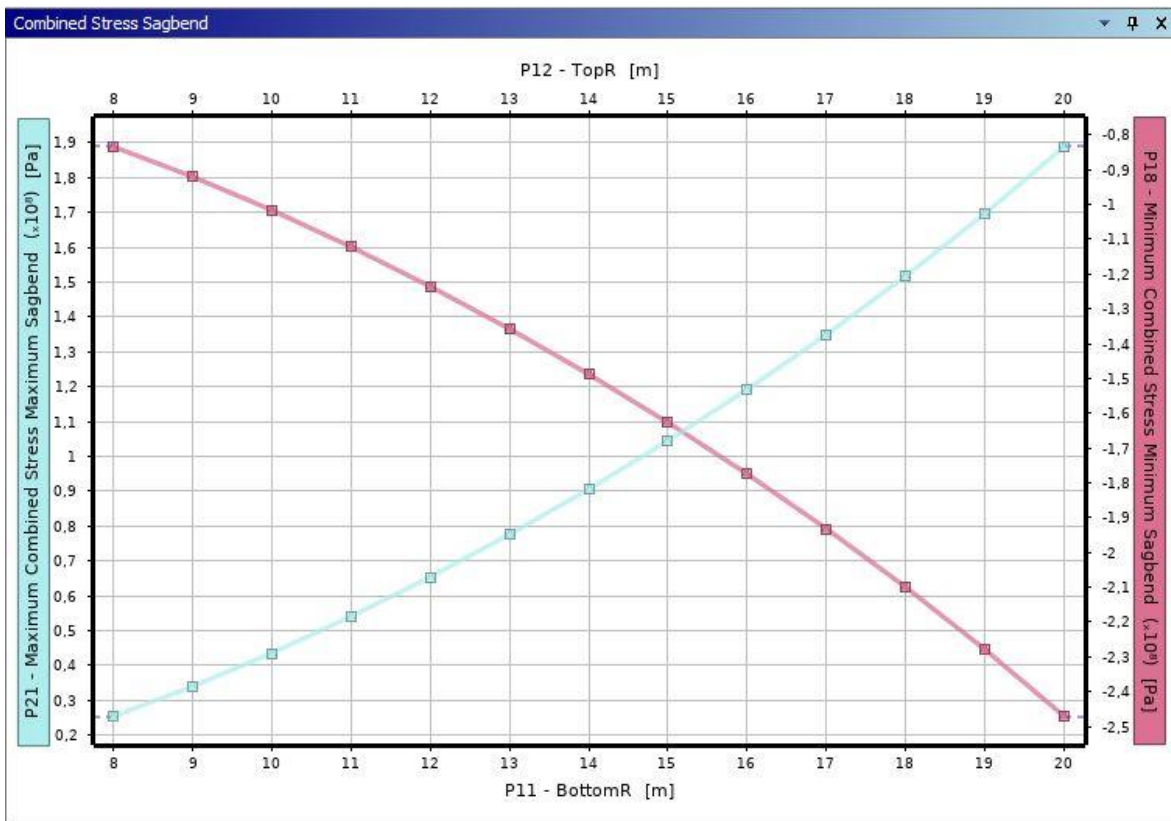
**Πίνακας 6.3:** Συνολικές τάσεις που αναπτύσσονται στην overbend περιοχή του αγωγού σύμφωνα με το κριτήριο Von-Mises.

Όπως με την πρώτη επίλυση, έτσι και εδώ, η διαφορά των τάσεων, κατ' απόλυτη τιμή, δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη, λόγω του ότι η τάση λόγω υδροστατικής πίεσης είναι πολύ μικρή στην overbend περιοχή. Επιπρόσθετα, επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα που είχε διεξαχθεί, προηγουμένως, ότι δηλαδή, οι προκύπτουσες τάσεις, για ακτίνα καμπυλότητας μεγαλύτερη των 16m, είναι ιδιαίτερος μεγάλες, κάτι που οδηγεί το μηχανικό είτε σε

επιλογή μικρότερης ακτίνας καμπύλωσης, είτε σε χάλυβες υψηλότερων από των συνήθων αντοχών.



Σχήμα 6.49: Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστων και ελάχιστων τάσεων από συνδυασμένη κάμψη και αξονική δύναμη στον αγωγό στην περιοχή overbend σύμφωνα με το κριτήριο Von-Mises.



Σχήμα 6.50: Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστων και ελάχιστων τάσεων από συνδυασμένη κάμψη και αξονική δύναμη στον αγωγό στην περιοχή sagbend.



Στο Σχήμα 6.50 απεικονίζεται η καμπύλη των μέγιστων εφελκυστικών και ελάχιστων θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται στον αγωγό, λόγω συνδυασμού αξονικής και καμπτικής έντασης στην περιοχή sagbend. Ο δεξιός άξονας και η κόκκινη καμπύλη αφορούν τις ελάχιστες θλιπτικές τάσεις ενώ ο αριστερός με τη γαλάζια καμπύλη τις μέγιστες εφελκυστικές. Ο πάνω και ο κάτω άξονας και σε αυτό το διάγραμμα, αφορούν αντίστοιχα την άνω και κάτω ακτίνα καμπύλωσης του αγωγού.

Πιο συγκεκριμένα και όσον αφορά τις **μέγιστες** αναπτυσσόμενες **εφελκυστικές** τάσεις στην περιοχή της **κάτω καμπύλης** και σύμφωνα με τα Σχήματα Σχήμα 6.39 και Σχήμα 6.44, προκύπτουν τιμές από 1.20 MPa έως 25.42 MPa για τη μικρότερη ακτίνα καμπύλωσης και 18.12 MPa έως 188.87 MPa για τη μέγιστη ακτίνα καμπύλωσης.

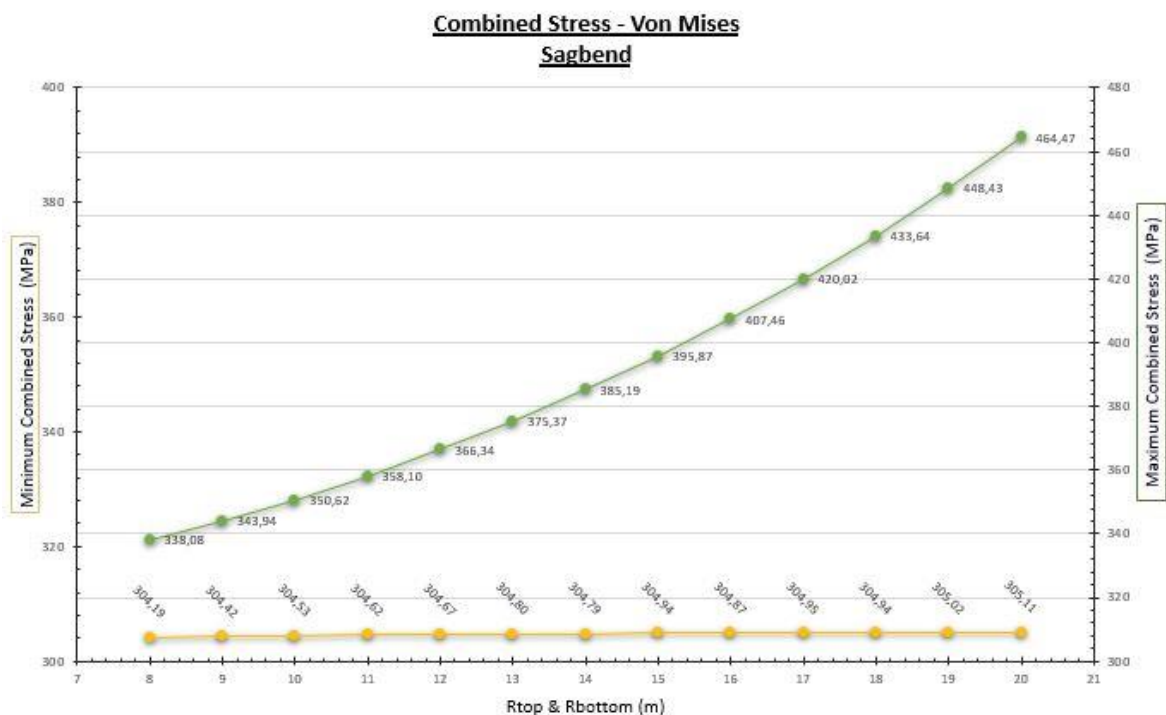
Αντίστοιχα, όσον αφορά τις **ελάχιστες** αναπτυσσόμενες **θλιπτικές** τάσεις στην περιοχή της **κάτω καμπύλης** και σύμφωνα με τα Σχήματα Σχήμα 6.39 και Σχήμα 6.44, προκύπτουν τιμές από

-29.25 MPa έως -83.34 MPa για τη μικρότερη ακτίνα καμπύλωσης και -30.85 MPa έως -247.17 MPa για τη μέγιστη ακτίνα καμπύλωσης. Γενικά παρατηρείται η τάση αύξησης των αναπτυσσόμενων τάσεων με την αύξηση της ακτίνας καμπύλωσης του αγωγού.

Έπειτα από την εφαρμογή του κριτηρίου Von Mises ώστε να συμπεριληφθεί η υδροστατική πίεση που ασκείται στον αγωγό για μία τυπική θέση στην περιοχή Sagbend, προκύπτει ο Πίνακας 6.4 στον οποίο φαίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα, από τα οποία διαμορφώνεται και το Σχήμα 6.51 Σχήμα 6.49.

Sagbend		Combined Stress ANSYS (Mpa)		Combined Stress Von Mises (Mpa)	
Rtop & Rbottom (m)	σθ(Mpa)	min (P20)	min (P18)	min	max
8	288,62	-29,07	-83,34	304,19	338,08
9	288,62	-29,46	-91,95	304,42	343,94
10	288,62	-29,66	-101,58	304,53	350,62
11	288,62	-29,82	-112,13	304,62	358,10
12	288,62	-29,91	-123,52	304,67	366,34
13	288,62	-30,12	-135,74	304,80	375,37
14	288,62	-30,12	-148,78	304,79	385,19
15	288,62	-30,37	-162,68	304,94	395,87
16	288,62	-30,26	-177,48	304,87	407,46
17	288,62	-30,38	-193,24	304,95	420,02
18	288,62	-30,37	-210,04	304,94	433,64
19	288,62	-30,50	-227,99	305,02	448,43
20	288,62	-30,66	-247,17	305,11	464,47

Πίνακας 6.4: Συνολικές τάσεις που αναπτύσσονται στην sagbend περιοχή του αγωγού σύμφωνα με το κριτήριο Von-Mises.



**Σχήμα 6.51:** Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστων και ελάχιστων τάσεων από συνδυασμένη κάμψη και αξονική δύναμη στον αγωγό στην περιοχή sagbend σύμφωνα με το κριτήριο Von-Mises.

Στην προκειμένη περίπτωση, που αφορά τις συνολικές τάσεις που ασκούνται στον αγωγό στη sagbend περιοχή παρατηρούμε ότι η επίδραση της υδροστατικής πίεσης είναι μεγάλη, όπως ήταν αναμενόμενο, λόγω του ότι και το φορτίο ήταν μεγαλύτερο σε αυτό το βάθος. Οι τιμές παραμένουν βέβαια ελάχιστα ευνοϊκότερες από αυτές στην overbend περιοχή, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι δεν ισχύει το συμπέρασμα που είχε εξαχθεί και προηγουμένως. Και εδώ προκύπτει για ακτίνα καμπύλωσης μεγαλύτερη των 16m απαίτηση είτε για λήψη διαφορετικής ακτίνας είτε για χρήση χάλυβα υψηλότερης αντοχής από τη συνήθη.

## **7 Συμπεράσματα**

### **7.1 Γενικά**

Είναι αρκετά εύκολο να συμπεράνει κανείς πως η μελέτη των υποθαλάσσιων μεταλλικών αγωγών είναι ένα θέμα που θα απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα αρκετά τα επόμενα χρόνια. Η αναγκαιότητα ανάπτυξης του δικτύου των υποθαλάσσιων αγωγών λόγω της ευρείας χρήσης τους στην παραγωγή και η ιδιαίτερη κοινωνικοπολιτική σημασία τους είναι ο κύριος λόγος. Καταλήγει λοιπόν κανείς στην ανάγκη βελτιστοποίησης της όλης διαδικασίας κάτι το οποίο γίνεται μελετώντας στοχευμένα τα διάφορα τμήματα που απαρτίζουν όλη τη διαδικασία μελέτης και εγκατάστασης ενός αγωγού.

### **7.2 Επιλογή μεθόδου**

Η συγκεκριμένη εργασία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, εστιάζει στο τμήμα που αφορά την τοποθέτηση του αγωγού, και πιο συγκεκριμένα τις μεθόδους τοποθέτησής του. Ανάλογα με το βάθος του πυθμένα της περιοχής που ενδιαφέρει τον μελετητή, αλλά και ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, το κόστος και τον εξοπλισμό που διατίθεται για το έργο, ο μηχανικός επιλέγει τρόπο τοποθέτησης ανάλογα με τα σημαντικότερα για εκείνον κριτήρια. Για περιοχές με μεγάλο βάθος επιλέγει συνήθως την μέθοδο J-lay και αν είναι δυνατόν με χρήση πλοίου τέταρτης γενιάς, ενώ για τις περιπτώσεις των ρηχών υδάτων επιλέγεται κυρίως η S-lay μέθοδος χωρίς να είναι τόσο απαραίτητη η χρήση πλοιαρίου με σύστημα πλοήγησης όπως αυτό που προαναφέρθηκε. Επίσης, στις περιοχές των ρηχών υδάτων, εφόσον οι καιρικές συνθήκες αλλά και η γεωγραφία του χώρου το επιτρέπουν, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί κάποια μέθοδος Tow με την ιδιαιτερότητα βέβαια ότι λόγω υψηλού κόστους και ρίσκου η διαδικασία της μεταφοράς καλό θα ήταν να μην εκτείνεται σε μεγάλη περιοχή. Καλό θα ήταν επομένως αυτού του είδους οι μέθοδοι τοποθέτησης να χρησιμοποιούνται σε παράκτιες περιοχές κυρίως.

Όσον αφορά τα κανονιστικά πλαίσια που πρέπει να τηρηθούν, έγινε αναφορά στους δύο κύριους κανονισμούς που καλύπτουν το συγκεκριμένο αντικείμενο μελέτης. Υπάρχει γενικότερα η τάση λόγω της πιο συντηρητικής προσέγγισής του αλλά και λόγω της μεγάλης χρήσης του στις θάλασσες κοντά στην Ευρώπη, να γίνεται χρήση του γερμανικού κανονισμού DNV-OS H101.

### **7.3 Προσομοίωση**

Για την μοντελοποίηση του αγωγού και τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων στις περιοχές καμπύλωσής του, διαφορετική προσέγγιση πρέπει να ακολουθείται ανάλογα με το βάθος του πυθμένα στην εκάστοτε θέση μελέτης. Στην προκειμένη περίπτωση που διερεύνηση έγινε για ρηχά νερά με πυθμένα βάθους 109m σύμφωνα με τους κανονισμούς δεν απαιτείται η λήψη δυναμικής φόρτισης αλλά ούτε και η εκπόνηση δυναμικής επίλυσης.

Σ' ότι αφορά την πρώτη επίλυση που εκπονήθηκε, παρατηρούνται μέτριες μεταβολές των χαρακτηριστικών τιμών με την αύξηση της διαμέτρου του αγωγού. Αρχικά, όσον



αφορά τις παραμορφώσεις του αγωγού και στις δύο περιοχές καμπύλωσης, υφίσταται έντονη βελτίωση των αποτελεσμάτων καθώς όσο πιο μεγάλη η διάμετρος του αγωγού τόσο μικρότερη είναι η μέγιστη τιμή της παραμόρφωσής του, μεταβολή αναμενόμενη καθώς αυξάνεται η δυσκαμψία του αγωγού. Στο κομμάτι των ορθών τάσεων μόνο από αξονική δύναμη υπάρχει μία ελάχιστη μείωση των τιμών. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι στις τελικά προκύπτουσες συνδυασμένες τάσεις από αξονική και καμπτική ένταση αλλά και με τον συνυπολογισμό της τάσης λόγω υδροστατικής πίεσης, με την αύξηση της διαμέτρου του αγωγού έχουμε μείωση των τάσεων στην overbend περιοχή αλλά αύξηση στη sagbend. Αυτό είναι κατανοητό εφόσον η τάση λόγω υδροστατικής πίεσης είναι ανάλογη της ακτίνας του αγωγού και επιπρόσθετα είναι σαφώς μεγαλύτερη στην περιοχή sagbend λόγω μεγαλύτερου βάθους.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της δεύτερης επίλυσης, δηλαδή της αύξησης της ακτίνας καμπύλωσης του αγωγού στις περιοχές overbend και sagbend, η προκύπτουσα γενική εικόνα που διαμορφώνεται είναι η χρήση όσο το δυνατόν μικρότερων ακτινών. Αρχικά στο κομμάτι των παραμορφώσεων, η μεταβολή είναι ιδιαίτερα αρνητική καθώς με την αύξηση της ακτίνας καμπύλωσης οι παραμορφώσεις αυξάνονται δραστικά κάτι που πρέπει να αποφεύγεται κατά τον σχεδιασμό για την επίτευξη της ευστάθειας του αγωγού. Οι ορθές τάσεις λόγω αξονικής μόνο δύναμης στον αγωγό έχουν μία πολύ μικρή πτώση αλλά οι τελικά προκύπτουσες συνδυασμένες τάσεις από αξονική και καμπτική ένταση αλλά και με τον συνυπολογισμό της τάσης λόγω υδροστατικής πίεσης αυξάνονται σημαντικά. Χαρακτηριστικό μάλιστα είναι το γεγονός ότι για τις μεγαλύτερες τιμές ακτινών καμπύλωσης προκύπτουν αναπτυσσόμενες τάσεις μεγαλύτερες από την αντοχή των τυπικών χαλύβων.

Συγκεντρωτικά, το συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί έπειτα από τα αποτελέσματα των δύο προαναφερθέντων παραμετρικών επιλύσεων, είναι ότι με την αύξηση της διαμέτρου του αγωγού επιτυγχάνεται αύξηση της δυσκαμψίας του και συνεπώς μείωση των μετακινήσεών του, δηλαδή αύξηση της ευστάθειάς του, καθώς επίσης και μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων στην περιοχή overbend. Αντίθετα προκύπτει αύξηση των αναπτυσσόμενων τάσεων στη sagbend περιοχή. Συνεπώς, ο μελετητής καλείται να επιλέξει την κατάλληλη διάμετρο αγωγού ώστε να ανακουφίσει όσο το δυνατόν καλύτερα την overbend περιοχή, εξασφαλίζοντας και την απαραίτητη για τον αγωγό ευστάθεια, αλλά χωρίς να επιβαρύνει σημαντικά τη sagbend περιοχή. Για την επιλογή καμπύλωσης, η επιλογές είναι αρκετά πιο ξεκάθαρες αφού όσο μικρότερη η καμπύλωση τόσο καλύτερα τα αποτελέσματα των αναπτυσσόμενων τάσεων αλλά και παραμορφώσεων και στις δύο περιοχές.

Με αφορμή όλα όσα αναφέρθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία κατανοεί κανείς την αναγκαιότητα μελέτης του συγκεκριμένου αντικειμένου, αλλά και τη δυσκολία του, την πολυπλοκότητά του και την πληθώρα των παραγόντων που συμβάλουν στην ολιστική προσέγγισή του. Βασικό ρόλο παίζουν οι συνθήκες τις οποίες ο εκάστοτε μελετητής καλείται να αντιμετωπίσει ενώ η επιλογή των χαρακτηριστικών του αγωγού πρέπει να γίνεται προσεκτικά και έπειτα από διερεύνηση. Όπως όλα τα έργα του μηχανικού έτσι και η τοποθέτηση των υποθαλάσσιων μεταλλικών αγωγών πρέπει να μελετάται σφαιρικά και με κύριο γνώμονα την ασφάλεια, τη λειτουργικότητα και την οικονομία. Η συγγραφέας θα ήθελε να προσθέσει και έναν ακόμα τομέα, αυτόν του χαμηλού περιβαλλοντικού αντικτύπου, μιας και είναι εμφανής η αναγκαιότητα συμμετοχής του, ως τομέα σχεδιασμού, όλο και πιο έντονα τα τελευταία χρόνια.

## 8 Βιβλιογραφία

### 8.1 Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

1. Γ.Μιχάλτσος, Τ. Αβραάμ (2019-2020), “ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΕΡΓΩΝ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ, ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΙ ΦΟΡΕΙΣ ”, Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών «ΔΣΑΚ», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
2. Δανιήλ Βασιλικής, (2006), “Υπολογισμός της αντοχής σε εξωτερική πίεση αγωγών διπλού τοιχώματος TFP με προσομοίωση της κατεργασίας .Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. ”, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Πολυτεχνική σχολή Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Εργαστήριο Μηχανικής & Αντοχής των υλικών.
3. A.H. Mousselli, (1981), “Offshore Pipeline Design, Analysis and Methods”, Penn Well Books, Tulsa, Oklahoma.
4. Boyun Guo, Shanhong Song, Ali Chalambor, Tian Rann Lin, (2014), “Offshore Pipelines Design, Installation and Maintenance”, second edition, Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier, Waltham, USA.
5. DNV-OS-F101, (2013), “Submarine Pipeline Systems” Det Norske Veritas AS.
6. DNV-OS-H101, (2011), “Marine Operations, General” Det Norske Veritas AS.
7. DNV-OS-H204, (2013), “Offshore Installation Operations (VMO Standard Part 2-4)” Det Norske Veritas AS.
8. H. Boonstra, (1991), “Towing of long pipeline sections and Buckling of pipelines”, Fourteenth Wegemt school: slender marine structures, Trondheim, Norway.
9. Jan G. Buijvoets (2014), “O-lay; Developments in Offshore Pipeline Installation”, Industrial Innovation BV, Netherlands.
10. Luiz Fellipe F.A. Ribeiro, Murilo Augusto Vaz, (2017), “Analysis of pipeline installation in unplanned flooding condition”, Sociedade Brasileira de Engenharia Naval, Mar Syst Ocean Technol, DOI 10.1007/s40868-017-0034-2.
11. Mark J. Kaiser, (2016), “A review of Deepwater Pipeline Construction in the U.S. Gulf of Mexico-Contracts, Cost, and Installation Methods.”, Center for Energy Studies, Louisiana State University, Baton Rouge, USA.
12. Mikael W. Braestrup (2005), “Design and Installation of Marine Pipelines”, Blackwell Science, USA.
13. Qiang Bai, Yong Bai, (2014), “Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation”, Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier, Waltham, USA.
14. Qiang Bai, Yong Bai, (2014), “Subsea Pipeline integrity and risk management”, Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier, Waltham, USA.
15. Qiang Bai, Yong Bai, (2005), “Subsea Pipeline and risers”, ELSEVIER Ltd The boulevard, Langford Lane Kidlington, Oxford, UK.
16. T.J. Hovland and Mohammad Najafi, (2009), “Inspecting Pipeline Installaton”, American Society of Civil Engineers, Virginia.
17. Y.T Kim, K.S. Park, H.S. Choi, S.Y. Yu & D.K. Kim, (2016), “Method for Installation of marine HDPE pipeline”, edited by Zawawi, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02978-1.

## 8.2 Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

1. National Centers for Environmental Information , “Bathymetric Data Viewer”,  
<https://www.ncei.noaa.gov/maps/bathymetry/>
2. O-lay, “Offshore pipeline and riser installation technology”, <http://www.o-lay.net/>
3. Shallow water pipe lay barge Stingray,  
<https://www.youtube.com/watch?v=7IcQ0KYivtQ>
4. Pipeline installation using S-lay method,  
<https://www.youtube.com/watch?v=IQcVpmmnOMI>
5. Capability-S-lay Method, <https://www.youtube.com/watch?v=2bAottr6AxY>
6. Underwater Pipeline Construction, <https://www.youtube.com/watch?v=-NpoeIAIxivM>
7. Towing of H.D.P.E Pipeline to sea for subsea installation- Qatar,  
[https://www.youtube.com/watch?v=M\\_EjmG7K4aU](https://www.youtube.com/watch?v=M_EjmG7K4aU)
8. CLADEK Towed Pipeline Bundle,  
<https://www.youtube.com/watch?v=zSwckauWZTU>
9. Projects-Montrose area redevelopment (MAR) Pipeline Bundle launch- UK North Sea,  
[https://www.youtube.com/watch?v=7BQpTxw7h\\_I](https://www.youtube.com/watch?v=7BQpTxw7h_I)
10. TC Energy-Gas pipeline construction,  
<https://www.youtube.com/watch?v=Q3fv4UdQxcQ>
11. TransCanada-Northern Courier Pipeline Project – Horizontal Directional Drilling (HDD), <https://www.youtube.com/watch?v=43I9Ov-83O8>
12. O-lay deep water pipeline & PLET installation,  
<https://www.youtube.com/watch?v=g3CtixUcWJo>
13. O-lay pipeline installation in extreme shallow water,  
<https://www.youtube.com/watch?v=CS24lbnWGmo>
14. Lowering Subsea Cables & Pipelines,  
[https://www.youtube.com/watch?v=7Ylt71\\_d\\_78](https://www.youtube.com/watch?v=7Ylt71_d_78)
15. Pipe Stress Analysis Using Ansys, <https://www.youtube.com/watch?v=rqfLBddPaIY>
16. Pipe Stress Analysis Using Ansys, <https://www.youtube.com/watch?v=1V9TTobXdiE>

# Παράρτημα Α

## Α.1 Υπολογισμός υδροστατικής πίεσης

Όπως είναι γνωστό η υδροστατική πίεση είναι φορτίο που μεταβάλλεται με το βάθος, με τη μέγιστή του τιμή να βρίσκεται στο βαθύτερο σημείο και την ελάχιστη και ίση με το μηδέν να βρίσκεται στην επιφάνεια του νερού. Με βάση αυτό υπολογίσθηκαν αρχικά οι τιμές της πίεσης ανά μέτρο βάθους και έπειτα για απλούστευση της διαδικασίας ελήφθησαν αυτές που προέκυψαν ανά πέντε μέτρα (Σχήμα Α.1).

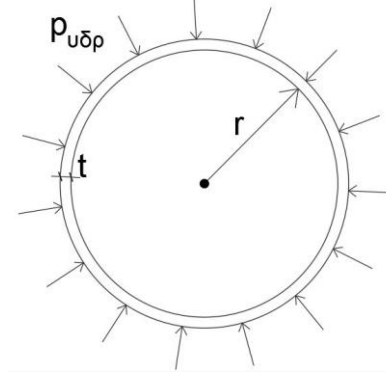
H (m)	Ρυδρ (kPa)	
105	10104,79	sagbend
100	9623,61	
95	9142,43	
90	8661,25	
85	8180,07	
80	7698,89	
75	7217,71	
70	6736,53	
65	6255,35	
60	5774,17	
55	5292,99	
50	4811,81	
45	4330,62	
40	3849,44	
35	3368,26	
30	2887,08	
25	2405,90	
20	1924,72	
15	1443,54	
10	962,36	overbend
5	481,18	
0	0,00	

Σχήμα Α.1: Φορτίο υδροστατικής πίεσης ανά πέντε μέτρα αγωγού.

Οι τιμές που επισημαίνονται με γαλάζιο χρώμα στο Σχήμα Α.1 έχουν επιλεχθεί για την εύρεση των τιμών στη sagbend περιοχή, ενώ εκείνες με πράσινο χρώμα αφορούν την overbend περιοχή.

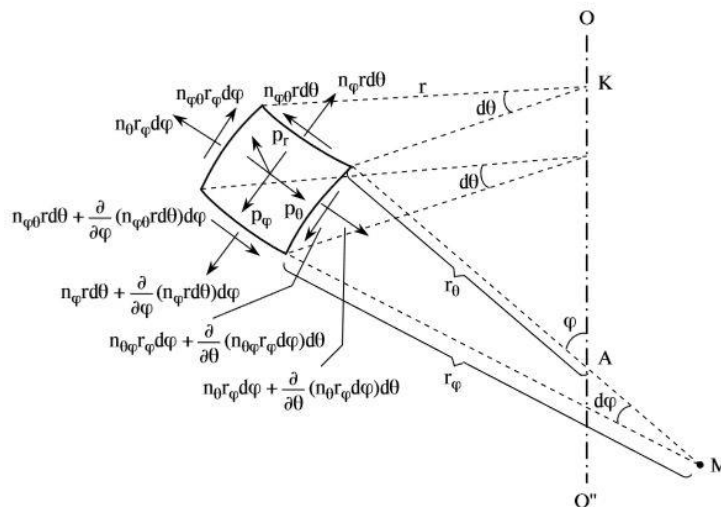
## A.2 Υπολογισμός τάσης στον αγωγό λόγω υδροστατικής πίεσης

Για τον υπολογισμό της αναπτυσσόμενης στον αγωγό τάσης, σε συγκεκριμένες θέσεις, έγινε η θεώρηση ότι τμηματικά ο αγωγός μπορεί να θεωρηθεί ως κυλινδρικό κέλυφος στο οποίο ασκείται εξωτερικό ομοιόμορφο φορτίο μεγέθους ανάλογου με την θέση μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, σε μία οριζόντια τομή στον αγωγό θα ίσχυε η φόρτιση που φαίνεται στο Σχήμα A.2, όπου  $P_{υδρ}$  η αντίστοιχη υδροστατική πίεση στο εκάστοτε σημείο μελέτης υπολογισμένη σύμφωνα με το κεφάλαιο A.1.



Σχήμα A.2: Φόρτιση υδροστατικής πίεσης σε οριζόντια τομή αγωγού.

Σύμφωνα λοιπόν με τη θεωρία κελυφών για τμήμα  $d\varphi$  του κελύφους οι τάσεις αναπτύσσονται σύμφωνα με το Σχήμα A.3.



Σχήμα A.3: Απεικόνιση αναπτυσσόμενων τάσεων σε τμήμα  $d\varphi$  κυλινδρικού κελύφους.

Με βάση την απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης εύρεσης της προκύπτουσας, σε ένα κυλινδρικό κέλυφος, τάσης, η οποία αποτυπώνεται στην εξίσωση A.1, υπολογίζεται η αναπτυσσόμενη τάση σε κάθε επιθυμητό σημείο του αγωγού.

$$\sigma_{\theta} = P_n \frac{r}{t}$$

Εξίσωση A.1

Στα αποτελέσματα της πρώτης επίλυσης μπορεί κανείς να εντοπίσει και τη σημασία της γεωμετρίας του ίδιου του φορέα, καθώς για κάθε θέση διαφοροποιείται η ακτίνα και το πάχος του υπό μελέτη αγωγού. Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά οι πίνακες Πίνακας

Α.1 και Πίνακας Α.2 με τα αποτελέσματα που προέκυψαν και τα οποία ελήφθησαν για τον υπολογισμό των τελικά αναπτυσσόμενων στον αγωγό τάσεων.

<b>Pn(KPa)</b>	<b>Dout(mm)</b>	<b>Din(mm)</b>	<b>Rout(mm)</b>	<b>Rin(mm)</b>	<b>t(mm)</b>	<b>σθ(Mpa)</b>
10104,79	457	441	228,50	220,50	16	144,31
	508	492	254,00	246,00	16	160,41
	610	594	305,00	297,00	16	192,62
	711	691	355,50	345,50	20	179,61
	762	746	381,00	373,00	16	240,62
	813	797	406,50	398,50	16	256,72
	914	898	457,00	449,00	16	288,62
<b>Pn(KPa)</b>	<b>Dout(mm)</b>	<b>Din(mm)</b>	<b>Rout(mm)</b>	<b>Rin(mm)</b>	<b>t(mm)</b>	<b>σθ(Mpa)</b>
9623,61	457	441	228,50	220,50	16	137,44
	508	492	254,00	246,00	16	152,77
	610	594	305,00	297,00	16	183,45
	711	691	355,50	345,50	20	171,06
	762	746	381,00	373,00	16	229,16
	813	797	406,50	398,50	16	244,50
	914	898	457,00	449,00	16	274,87

**Πίνακας Α.1:** Τιμές αναπτυσσόμενων τάσεων στον αγωγό λόγω υδροστατικής πίεσης στην περιοχή sagbend για όλες τις τιμές διαμέτρου και πάχους τοιχώματος αγωγού που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις του κεφαλαίου 6.

<b>Pn(KPa)</b>	<b>Dout(mm)</b>	<b>Din(mm)</b>	<b>Rout(mm)</b>	<b>Rin(mm)</b>	<b>t(mm)</b>	<b>σθ(Mpa)</b>
962,361	457	441	228,50	220,50	16	13,74
	508	492	254,00	246,00	16	15,28
	610	594	305,00	297,00	16	18,35
	711	691	355,50	345,50	20	17,11
	762	746	381,00	373,00	16	22,92
	813	797	406,50	398,50	16	24,45
	914	898	457,00	449,00	16	27,49
<b>Pn(KPa)</b>	<b>Dout(mm)</b>	<b>Din(mm)</b>	<b>Rout(mm)</b>	<b>Rin(mm)</b>	<b>t(mm)</b>	<b>σθ(Mpa)</b>
481,1805	457	441	228,50	220,50	16	6,87
	508	492	254,00	246,00	16	7,64
	610	594	305,00	297,00	16	9,17
	711	691	355,50	345,50	20	8,55
	762	746	381,00	373,00	16	11,46
	813	797	406,50	398,50	16	12,22
	914	898	457,00	449,00	16	13,74

**Πίνακας Α.2:** Τιμές αναπτυσσόμενων τάσεων στον αγωγό λόγω υδροστατικής πίεσης στην περιοχή overbend για όλες τις τιμές διαμέτρου και πάχους τοιχώματος αγωγού που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις του κεφαλαίου 6.



### A.3 Υπολογισμός συνολικής αναπτυσσόμενης τάσης στον αγωγό

Για τον υπολογισμό της συνολικής τάσης που αναπτύσσεται στον αγωγό, γίνεται χρήση του κριτηρίου Von Mises, με την παραδοχή των πολύ μικρών διατμητικών τάσεων. Λαμβάνονται επομένως οι τιμές που προέκυψαν από το πρόγραμμα κατά την επίλυση του μοντέλου για συνδυασμένη κάμψη και αξονική δύναμη, καθώς και αυτές που προέκυψαν σύμφωνα με το κεφάλαιο A.2.

Sagbend						
Dout (mm)	Direct Stress (Mpa)		Max Combined Stress (Mpa)		Min Combined Stress (Mpa)	
	min (P21)	max (P22)	min (P25)	max (P26)	min (P23)	max (P24)
457	0,272	0,551	28,873	99,257	-98,154	-28,203
508	0,257	0,546	24,289	88,189	-87,097	-23,652
610	0,218	0,534	16,637	71,395	-70,328	-16,088
711	0,204	0,529	13,409	61,008	-59,950	-12,889
762	0,142	0,509	8,024	54,370	-53,352	-7,641
813	0,115	0,500	5,832	50,140	-49,139	-5,508
914	0,063	0,484	2,420	43,307	-42,344	-2,207

**Πίνακας A.3:** Τιμές αναπτυσσόμενων τάσεων στην περιοχή sagbend, που προέκυψαν από την επίλυση στο πρόγραμμα για τις αναλύσεις της 1<sup>ης</sup> επίλυσης.

Overbend						
Dout (mm)	Direct Stress (Mpa)		Max Combined Stress (Mpa)		Min Combined Stress (Mpa)	
	min (P15)	max (P16)	min (P19)	max (P20)	min (P17)	max (P18)
457	1,912	7,461	7,165	357,085	-353,262	6,430
508	1,906	7,442	7,512	318,584	-314,773	6,050
610	1,892	7,400	7,058	260,675	-256,891	6,363
711	1,887	7,383	6,973	223,539	-219,588	6,384
762	1,864	7,315	6,895	202,593	-198,608	6,238
813	1,855	7,286	6,641	188,013	-183,984	6,407
914	1,837	7,230	6,554	164,136	-160,039	6,325

**Πίνακας A.4:** Τιμές αναπτυσσόμενων τάσεων στην περιοχή overbend, που προέκυψαν από την επίλυση στο πρόγραμμα για τις αναλύσεις της 1<sup>ης</sup> επίλυσης.

Στους πίνακες Πίνακας A.3 και Πίνακας A.4 παρατίθενται τα αποτελέσματα των τάσεων που προέκυψαν από το πρόγραμμα και αντίστοιχα στους πίνακες Πίνακας A.5 και Πίνακας A.6 εκείνα που προέκυψαν έπειτα από τη χρήση του κριτηρίου Von Mises (Εξίσωση A.2) συνδυάζοντας την αναπτυσσόμενη λόγω υδροστατικής πίεσης τάση με αυτή λόγω κάμψης και αξονικής έντασης.

$$\sigma_{\text{υδρ}}^2 + \sigma_{\text{ansys}}^2 - \sigma_{\text{υδρ}} \times \sigma_{\text{ansys}} = \sigma_{\text{tot}}^2$$

Εξίσωση A.2

<b>Sagbend( Von Mises)</b>					
Dout (mm)	σθ (Mpa)	Max Combined Stress (Mpa)		Min Combined Stress (Mpa)	
		(P25)	(P26)	(P23)	(P24)
457	144,31	132,26	127,88	211,24	160,28
508	160,41	149,75	139,15	217,46	173,45
610	192,62	184,87	168,67	235,79	201,15
711	179,61	173,30	158,19	215,92	186,39
762	240,62	236,71	218,57	271,26	244,53
813	256,72	253,86	235,69	284,50	259,52
914	288,62	287,42	269,59	311,95	289,73

Πίνακας A.5: Τελικές τιμές τάσεων στην περιοχή sagbend έπειτα από την εφαρμογή του κριτηρίου Von Mises, για τις αναλύσεις της 1<sup>ης</sup> επίλυσης.

<b>Overbend( Von Mises)</b>					
Dout (mm)	σθ (Mpa)	Max Combined Stress (Mpa)		Min Combined Stress (Mpa)	
		(P19)	(P20)	(P17)	(P18)
457	13,74	7,02	353,70	356,75	6,66
508	15,28	7,58	314,83	318,66	6,98
610	18,35	8,32	256,21	261,60	8,14
711	17,11	7,88	219,39	223,99	7,70
762	22,92	9,99	197,11	204,58	9,94
813	24,45	10,60	182,21	190,39	10,59
914	27,49	11,91	157,71	167,33	11,91

Πίνακας A.6: Τελικές τιμές τάσεων στην περιοχή overbend έπειτα από την εφαρμογή του κριτηρίου Von Mises, για τις αναλύσεις της 1<sup>ης</sup> επίλυσης.