

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Π.Μ.Σ. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ

ΥΠΟΔΟΜΩΝ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ**

**ΑΓΩΓΩΝ ΛΟΓΩ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΝΩΜΑΛΙΩΝ ΤΟΥ ΠΥΘΜΕΝΑ**

**ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ**

υπό

**ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΞΑΝΘΟΥ**



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του Διπλώματος Μεταπτυχιακών Σπουδών

2021

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής: Γεώργιος Εφραιμίδης, Επ. Καθηγητής

Δεύτερος Εξεταστής: Πάνος Ντακούλας, Καθηγητής

Τρίτος Εξεταστής: Πολυξένη Καλλιόγλου, Λέκτορας

## Ευχαριστίες

Στο τέλος της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Γεώργιο Εφραιμίδη για την πολύτιμη βοήθεια, την καθοδήγηση και την υποστήριξη που μου παρείχε κατά τη διερεύνηση του θέματος της εργασίας, καθώς και για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Παναγιώτη Ντακούλα και την λέκτορα κα. Πολυξένη Καλλιόγλου για την ευγενική αποδοχή τους να είναι μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής και για τις πολύ χρήσιμες παρατηρήσεις τους.

Επίσης, οφείλω ευχαριστίες στο διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Τζάρο για την άμεση και διαρκή υποστήριξη σε όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου, καθώς και για τις απαραίτητες συμβουλές του.

# **Ανάλυση μηχανικής συμπεριφοράς υποθαλάσσιων αγωγών λόγω μορφολογικών ανωμαλιών του πυθμένα της θάλασσας**

Γεώργιος Ξάνθος

Επισμηναγός, Μηχανικός Εγκαταστάσεων Πολεμικής Αεροπορίας

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Εφραιμίδης, Επ. Καθηγητής

## **Περίληψη**

Τα συστήματα αγωγών είναι ευρέως διαδεδομένα για την μεταφορά υδρογονανθράκων και άλλων προϊόντων σε μεγάλη απόσταση. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να παρατεθεί ένα ευρύ φάσμα πληροφοριών σχετιζόμενων με τη μελέτη και την κατασκευή συστημάτων αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων, με έμφαση στους υποθαλάσσιους αγωγούς και να μελετηθεί η μηχανική συμπεριφορά τους λόγω μορφολογικών ανωμαλιών του πυθμένα της θάλασσας. Αρχικά, αναφέρονται στοιχεία σχετικά με τα υπάρχοντα συστήματα χερσαίων και υποθαλάσσιων αγωγών, τον τρόπο κατασκευής τους και τις χαρακτηριστικές παραμέτρους που εξετάζονται κατά το σχεδιασμό των υποθαλάσσιων τμημάτων. Κατόπιν αυτών περιγράφονται οι κύριοι γεωκίνδυνοι που παρουσιάζονται σε υποθαλάσσιο περιβάλλον και οι επιπτώσεις τους στα συστήματα υποθαλάσσιων αγωγών. Στην συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση της κατασκευής αριθμητικών προσομοιωμάτων με εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό να εκτιμηθεί η μηχανική συμπεριφορά διαφόρων κατασκευών σε ποικίλες καταστάσεις φόρτισης. Τέλος, με τη βοήθεια της αριθμητικής προσομοίωσης, μέσω του λογισμικού MARC, γίνεται εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς υποθαλάσσιου αγωγού λόγω μορφολογικών ανωμαλιών του θαλάσσιου πυθμένα και ακολουθεί η αναφορά των εξαγόμενων συμπερασμάτων από την προσομοίωση καθώς και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

# **Analysis of the mechanical behavior of submarine pipelines due to morphological anomalies of the seabed**

George Xanthos

Major, Hellenic Air Force Infrastructure Engineer

Department of Civil Engineering

University of Thessaly

Supervisor: George Efremidis, Assistant Professor

## **Abstract**

Pipeline systems are widely used to transport hydrocarbons and other products over long distances. The purpose of the present master thesis is to present a wide range of information related to the design and construction of hydrocarbon transport pipeline systems, with an emphasis on submarine pipelines and to study their mechanical behavior due to morphological anomalies of the seabed. At first, data on existing land and submarine pipeline systems is reported, how they are constructed and some parameters that are considered when designing submarine pipeline systems. Next, the main types of geo-hazards occurring in the underwater environment are mentioned. Furthermore, the application of the finite element method for the construction of simulations is analyzed in order to evaluate the behavior of various types of constructions in various loading conditions. Finally, by applying the numerical simulation, through MARC software, the mechanical behavior of a submarine pipeline due to morphological anomalies of the seabed is assessed, followed by the conclusions as well as the proposals for future research.

## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1.....	10
1.1    Είδη αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων.....	10
1.1.1    Χερσαίοι αγωγοί.....	10
1.1.2    Υποθαλάσσιοι αγωγοί.....	14
1.2    Κατασκευή των τμημάτων αγωγών .....	20
1.3    Ανάλυση σχεδιασμού υπεράκτιων αγωγών.....	25
1.3.1    Ανάλυση τάσεων των αγωγών .....	26
1.3.2    Εφαπτομενικές τάσεις αγωγού- Αντοχή σε διάρρηξη από εσωτερική πίεση (Pressure Containment Design).....	27
1.3.3    Αιώρηση τμημάτων αγωγών .....	29
1.3.4    Καθολικός λυγισμός αγωγού .....	29
1.3.5    Εφαρμογή εξωτερικής πίεσης .....	30
1.3.6    Αξονική φόρτιση αγωγού .....	35
1.3.7    Συνδυασμός φορτίσεων.....	36
1.4    Μέθοδοι εγκατάστασης υπεράκτιων αγωγών .....	36
1.4.1    Μέθοδος S-Lay .....	37
1.4.2    Μέθοδος J-Lay.....	40
1.4.3    Μέθοδος Reeling.....	42
1.4.4    Μέθοδος Ρυμούλκησης (Towing) .....	44
1.5    Αλληλεπίδραση πυθμένα και αγωγού .....	47
1.5.1    Είδη και κατηγοριοποίηση υλικού πυθμένα .....	48
1.5.2    Συντελεστής τριβής .....	49
1.5.3    Αλληλεπίδραση εδάφους - αγωγού σε θερμική καταπόνηση.....	51
1.5.4    Διείσδυση αγωγού .....	52
1.5.5    Αξονική φόρτιση του αγωγού .....	54
1.6    Σταθερότητα αγωγού στον πυθμένα .....	56
1.6.1    Κατακόρυφη σταθερότητα αγωγού στον πυθμένα.....	57
1.7    Τρόποι σταθεροποίησης αγωγού στον πυθμένα.....	58
Κεφάλαιο 2.....	60
2.1    Υποθαλάσσιοι γεωκίνδυνοι.....	60
2.2    Εντοπισμός των γεωκινδύνων.....	63
2.3    Επιπτώσεις των γεωκινδύνων .....	65
2.4    Εκτίμηση επικινδυνότητας .....	66

2.5	Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις .....	67
Κεφάλαιο 3	.....	70
3.1	Γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα .....	70
3.2	Πεπερασμένα στοιχεία.....	71
3.3	Ακρίβεια των αποτελεσμάτων .....	73
3.4	Αλγόριθμοι αριθμητικής επίλυσης προβλημάτων.....	74
3.5	Δημιουργία προσομοιώματος με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων .....	76
Κεφάλαιο 4	.....	78
4.1	Δομική ανάλυση .....	78
4.2	Παρουσίαση του προβλήματος .....	80
α.	Σενάριο προβλήματος 1 .....	83
β.	Σενάριο προβλήματος 2 .....	93
γ.	Σενάριο προβλήματος 3.....	95
δ.	Σενάριο προβλήματος 4 .....	100
ε.	Σενάριο προβλήματος 5 .....	103
στ.	Σενάριο προβλήματος 6 .....	105
ζ.	Σενάριο προβλήματος 7.....	108
η.	Σενάριο προβλήματος 8 .....	111
θ.	Σενάριο προβλήματος 9.....	115
ι.	Σενάριο προβλήματος 10.....	117
ια.	Σενάριο προβλήματος 11.....	119
ιβ.	Σενάριο προβλήματος 12 .....	121
ιγ.	Σενάριο προβλήματος 13.....	124
Κεφάλαιο 5	.....	127
	Συμπεράσματα και προτάσεις.....	127
Παράρτημα	.....	131
	Περιγραφή μοντέλου αριθμητικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα MARC	
Βιβλιογραφία	.....	143
Ιστογραφία	.....	144





# Κεφάλαιο 1

## Γενικά περί αγωγών

### Σύνοψη

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται γενικές πληροφορίες αναφορικά με την κατασκευή και τη χρήση αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων. Γίνεται αναφορά στα τεχνικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών, στους τρόπους κατασκευής συστημάτων αγωγών και ακολουθεί μια ανασκόπηση υπαρχόντων εγκαταστάσεων αγωγών ορυκτών καυσίμων, δηλαδή αργού πετρελαίου και φυσικού αερίου.

#### 1.1 Είδη αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων

Τα συστήματα αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων έχουν στην πλειονότητα των περιπτώσεων πολύ μεγάλο μήκος, το οποίο μπορεί να ανέρχεται σε εκατοντάδες ή και χιλιάδες χιλιόμετρα. Πρόκειται για σωλήνες, κυλινδρικού κελύφους, συνήθως μεγάλου διαμετρήματος, οι οποίοι μεταφέρουν πετρέλαιο ή φυσικό αέριο. Αναλόγως του περιβάλλοντος από το οποίο διέρχονται οι αγωγοί, διακρίνονται σε χερσαίους και σε υποθαλάσσιους.

##### 1.1.1 Χερσαίοι αγωγοί

Οι χερσαίοι αγωγοί διαπερνούν πάσης φύσεως γεωλικά σε μεγάλα μήκη και μπορεί να είναι υπόγειοι ή υπέργειοι. Στη περίπτωση που είναι υπέργειοι τοποθετούνται σε ειδικά στηρίγματα (εικόνα 1.1. και 1.2.) Στην παρούσα εργασία θα γίνει αναφορά επιγραμματικά στους εν λόγω αγωγούς και δε θα αναλυθούν οι παράμετροι σχεδιασμού τους. Αξίζει να αναφερθεί ότι η μηχανική συμπεριφορά υπόγειων αγωγών εντός του εδάφους απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή όταν αυτοί διέρχονται από ενεργά ρήγματα. Οι τάσεις που αναπτύσσονται

κατά τη διάρκεια σεισμών, η ρευστοποίηση του εδάφους και οι κατολισθήσεις αποτελούν κύριες αιτίες για την εμφάνιση βλαβών και αστοχιών στους χερσαίους αγωγούς [18].



Εικόνα 1.1 Υπέργειος αγωγός [22].



Εικόνα 1.2 Υπόγειος αγωγός [23].

Περιπτώσεις από υπάρχοντα και υπό κατασκευή συστήματα χερσαίων αγωγών:

- Ο αγωγός Baku- Tiblisi- Ceyhan (Εικόνα 1.3), [1].

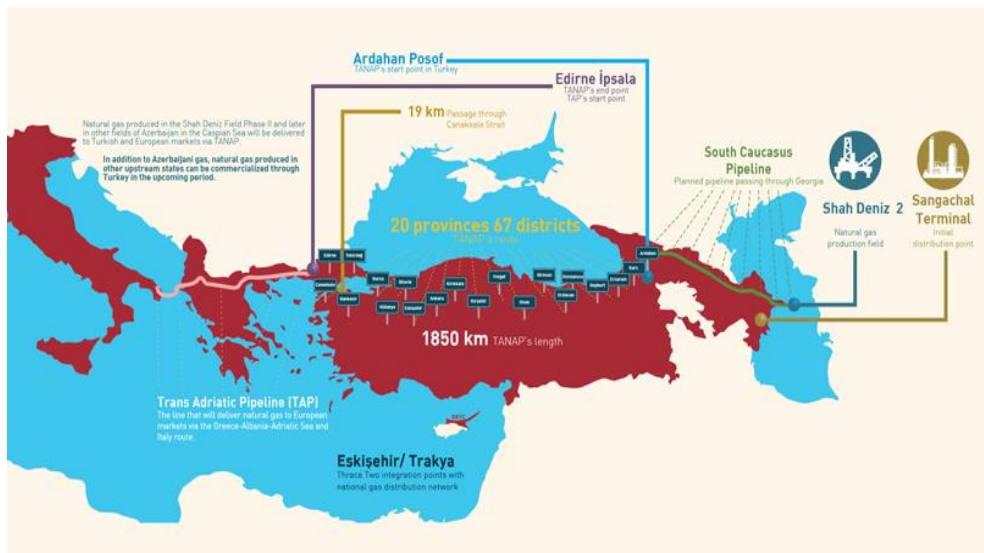
Είδος καυσίμου:	Αργό πετρέλαιο
Μήκος:	1768 km
Δυνατότητα μεταφοράς:	$1 \times 10^6$ βαρέλια/ημερησίως
Εσωτερική πίεση:	86 bar
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά:	42 in (διάμετρος)
Έτος λειτουργίας:	2006



Εικόνα 1.3 Αγωγός BTC [24].

- Ο αγωγός Trans Anatolian Natural Gas Pipeline Project –TANAP (εικόνα 1.4) [1].

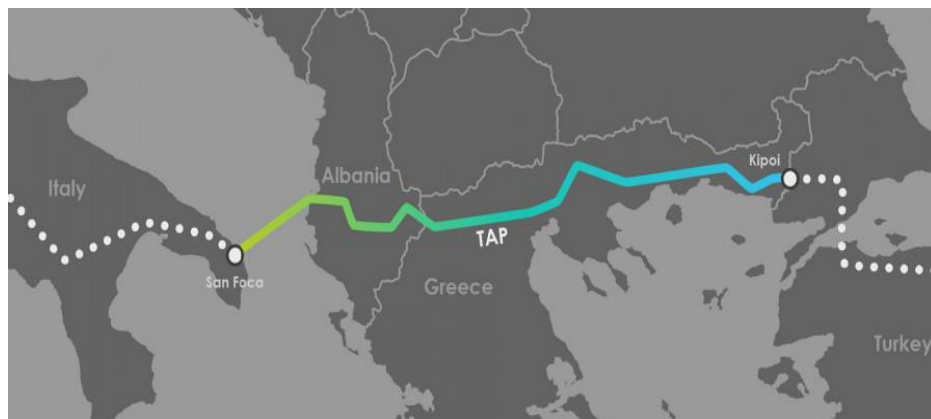
Είδος καυσίμου:	Φυσικό αέριο
Μήκος:	1841 km
Δυνατότητα μεταφοράς:	$16 \times 10^9$ m <sup>3</sup> /το χρόνο
Εσωτερική πίεση:	95.5 bar
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά:	56 in, 48 in (2 τμήματα με διαφορετική διάμετρο)
Έτος λειτουργίας:	Υπό κατασκευή



Εικόνα 1.4 Αγωγός TANAP [25].

- Ο χερσαίος αγωγός Trans Adriatic pipeline (TAP) (Εικόνα 1.5), [1].

Είδος καυσίμου:	Φυσικό αέριο
Μήκος:	750 km
Δυνατότητα μεταφοράς:	$20 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{το χρόνο}$
Εσωτερική πίεση:	95 bar
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά:	48 in
Έτος λειτουργίας:	Υπό κατασκευή



Εικόνα 1.5 Αγωγός Trans Adriatic pipeline (TAP), [26].



## 1.1.2 Υποθαλάσσιοι αγωγοί

Η παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου στη θάλασσα έλαβε χώρα από την αρχή του 20ού αιώνα. Η σημασία όμως και η κινητικότητα της βιομηχανίας υποθαλασσιών αγωγών ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του '70, όταν η Βόρεια Θάλασσα έγινε σημαντικός παραγωγός πετρελαίου. Από τότε, η ανάπτυξη των υπεράκτιων εγκαταστάσεων πετρελαίου ήταν συνεχής και γρήγορη. Αυτή η εξέλιξη έχει συνδυαστεί με μια σταδιακή μετακίνηση των εγκαταστάσεων άντλησης σε βαθύτερα νερά, όπου σήμερα η παραγωγή φτάνει σε βάθος πυθμένα 2.000 m περίπου, ενώ η διερεύνηση συνεχίζεται ακόμη βαθύτερα, έως το βάθος των 3.000 m περίπου [6].

Οι αγωγοί και γενικά οι σωληνοειδείς κατασκευές, είναι σημαντικά βιομηχανικά εργαλεία πετρελαίου και φυσικού αερίου που χρησιμοποιούνται για τις διαδικασίες της εξερεύνησης, της διάτρησης, της παραγωγής και της μεταφοράς. Η εγκατάσταση και ο χειρισμός σωληνοειδών κατασκευών σε βαθιά νερά παρουσιάζουν ιδιαίτερες απαιτήσεις σχεδιασμού. Οι υψηλές πιέσεις και οι αυξημένες θερμοκρασίες των αγωγών, καθώς και οι υψηλές πιέσεις του περιβάλλοντος, όπως επίσης και οι μεγάλες τάσεις που αναπτύσσονται κατά την κατασκευή, μπορεί να οδηγήσουν σε μεγάλο αριθμό οριακών κρίσιμων καταστάσεων και πιθανών αστοχιών οι οποίες πρέπει να αντιμετωπιστούν με επιτυχία [6].

Γενικά, οι αγωγοί αποτελούν σημαντικό μέσο μεταφοράς ρευστών (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, νερό, λύματα κλπ.). Η χρήση τους έχει επεκταθεί με το χρόνο, επειδή είναι τα πιο αποδοτικά, από ενεργειακή άποψη, μέσα μεταφοράς τέτοιων ρευστών. Κύρια γνωρίσματά τους είναι ότι α) απαιτούν μεγάλη αρχική επένδυση, β) έχουν διάρκεια ζωής έως και 40 χρόνια και γ) δεν απαιτούν ιδιαίτερη συντήρηση. Οι αγωγοί πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι συνήθως οι μεγαλύτεροι (σε μήκος) που συναντώνται, συχνά διασχίζουν ολόκληρες χώρες και μερικές φορές είναι διηπειρωτικοί. Πολλές φορές προκύπτουν γεωπολιτικές

επιπλοκές από εντάσεις μεταξύ των χωρών κατά μήκος της όδευσης του αγωγού, ή μεταξύ αυτών και των χωρών της προέλευσης ή και προορισμού του. Κατά συνέπεια, τα έργα αγωγών απαιτούν πολύ προσεκτικό σχεδιασμό [6].

Υπάρχοντα συστήματα υποθαλασσίων αγωγών:

- Ο αγωγός Blue Stream (Εικόνα 1.6), [1].

Είδος καυσίμου:	Φυσικό αέριο
Μήκος:	774 km
Μέγιστο Βάθος:	2150 m
Δυνατότητα μεταφοράς:	$16 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ετησίως}$
Εσωτερική πίεση:	250 bar
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά:	24 in
Έτος λειτουργίας:	2003

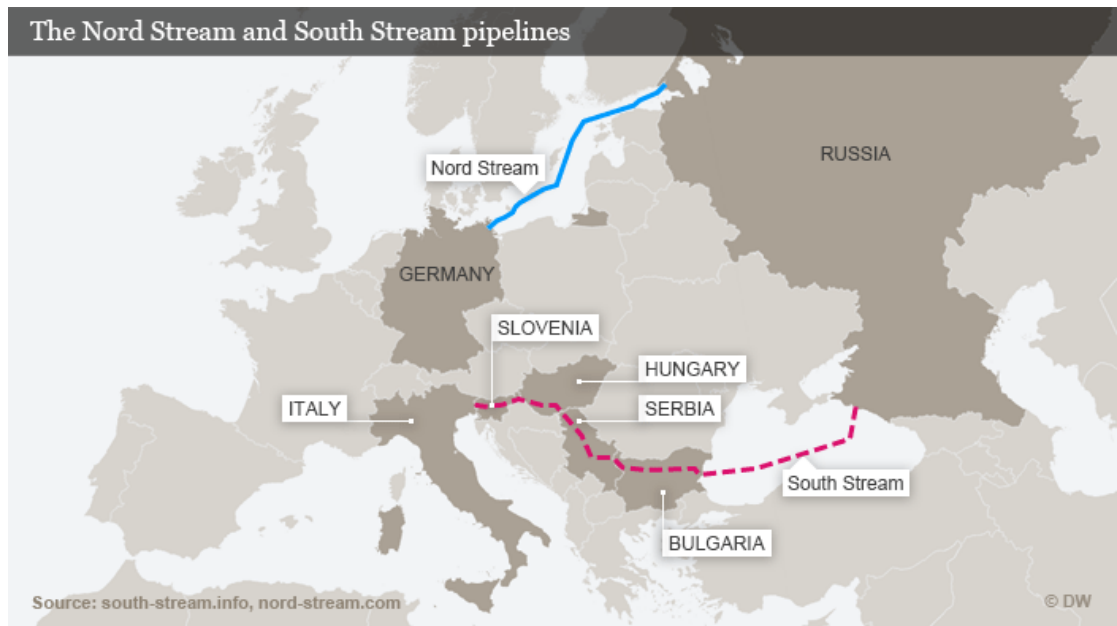


Εικόνα 1.6 Αγωγός blue stream, [27].

- Ο αγωγός South Stream (Εικόνα 1.7), [1].

Είδος καυσίμου:	Φυσικό αέριο
-----------------	--------------

Μήκος:	1480 km (4 lines)
Μέγιστο Βάθος:	2250 m
Δυνατότητα μεταφοράς:	$63 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ετησίως}$
Εσωτερική πίεση:	277 bar
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά:	24 in
Έτος λειτουργίας:	Υπό διαπραγμάτευση



Εικόνα 1.7 Αγωγός South stream, [28].

- Ο αγωγός Medgaz (Εικόνα 1.8), [1].

Είδος καυσίμου:	Φυσικό αέριο
Μήκος:	210 km
Μέγιστο Βάθος:	2155 m
Δυνατότητα μεταφοράς:	$8 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ετησίως}$
Εσωτερική πίεση:	220 bar
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά:	24 in
Έτος λειτουργίας:	2009

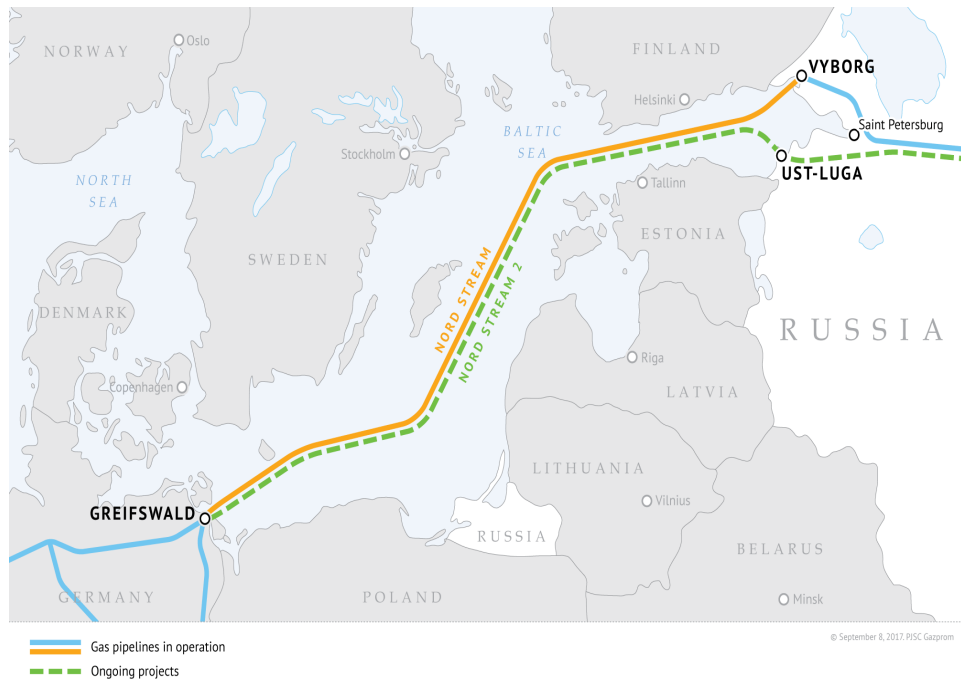




Εικόνα 1.8 Αγωγός Medgaz, [29].

- Ο αγωγός Nord Stream (Εικόνα 1.9), [1].

Είδος καυσίμου:	Φυσικό αέριο
Μήκος:	1224 km (2 lines)
Μέγιστο Βάθος:	210 m
Δυνατότητα μεταφοράς:	$55 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ετησίως}$
Εσωτερική πίεση:	220 bar
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά:	48 in
Έτος λειτουργίας:	2011-2012



Εικόνα 1.9 Αγωγός Nord stream, [30].

Η κατασκευή και λειτουργία αγωγών στο υπεράκτιο περιβάλλον είναι ένα νέο σχετικά πεδίο που δημιούργησε καινούργιες σχεδιαστικές ανάγκες και προκλήσεις με αποτέλεσμα να εξελιχθούν νέες τεχνολογίες, όπως: τεχνολογίες υποβρύχιας έρευνας, διάφορες μεθόδους και σχετικά πλωτά μέσα για την εγκατάσταση αγωγών σε συνεχώς μεγαλύτερο βάθος, νέα αντιδιαβρωτική προστασία και μονωτικά υλικά, νέες υποβρύχιας μεθόδους συγκόλλησης και επιθεώρησης, νέες μεθόδους διαμόρφωσης τάφρων βυθού, νέα οχήματα με τηλεχειρισμό (Remotely Operated Underwater Vehicle - ROV) για εργασίες σε μεγάλα βάθη κλπ. [6].

Οι χερσαίοι αγωγοί πετρελαίου και φυσικού αερίου έχουν στις περισσότερες περιπτώσεις διαμέτρους από 36 in έως 64 in. Το κύριο φορτίο σχεδιασμού τους είναι η εσωτερική πίεση της ροής. Ως αποτέλεσμα, έχουν λόγους διαμέτρου προς πάχος κελύφους ( $D/t$ ) από 40 έως 80. Αντίθετα, οι υποθαλάσσιοι αγωγοί συνήθως έχουν διαμέτρους κάτω των 36 in (διάμετροι μεγαλύτερες από 36 in χρησιμοποιούνται σε ρηγά νερά). Το κύριο φορτίο εδώ είναι η εξωτερική πίεση, κάτι που μπορεί οδηγεί σε αστοχία. Η διαδικασία της εγκατάστασης καθώς και άλλα λειτουργικά φορτία μπορούν επίσης να επηρεάσουν το σχεδιασμό και να δείξουν ότι το υλικό των σωλήνων θα εμφανίζει σημαντική ολκιμότητα.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι οι υπεράκτιοι αγωγοί έχουν μεγαλύτερο πάχος κελυφών, με τιμές  $D/t$  που κυμαίνονται από 50 για ρηχά νερά έως και 15 για τα βαθιά νερά. Ακόμη χαμηλότερη τιμή του λόγου ( $D/t$ ) έχουν οι αγωγοί υψηλής πίεσης. Παρατηρείται δηλαδή μία σταδιακή μετάβαση από λεπτόπαχους σε χονδρόπαχους αγωγούς όσο αυξάνεται το βάθος της θάλασσας και η εσωτερική πίεση του αγωγού. Για να καλυφθούν αυτές οι διαφορές μεταξύ χερσαίων και υπεράκτιων αγωγών, έπρεπε να αναπτυχθούν νέα κράματα χάλυβα καθώς και βελτιωμένες μέθοδοι κατασκευής. Η εξέλιξη περιλαμβάνει τη χρήση χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και θερμομηχανική επεξεργασία ελέγχου (Thermo-Mechanical Control Process-TMCP). Όλα αυτά συντελούν στην αύξηση της σκληρότητας του αγωγού. Καινούργια είναι επίσης η εισαγωγή συνεχούς χύτευσης, η κατασκευή σωλήνων χωρίς συγκόλληση και βελτιώσεις στη διαμόρφωση σωλήνων με ραφή [6].

Οι υπεράκτιοι αγωγοί έχουν σχεδιαστεί για να ανταπεξέρχονται πρωτίστως στα φορτία εγκατάστασης, αναλόγως της χρησιμοποιούμενης μεθόδου κατασκευής. Τα λειτουργικά φορτία είναι η δεύτερη παράμετρος σχεδιασμού, όπως η εσωτερική και εξωτερική πίεση, καθώς και η θερμοκρασία. Σαν τελευταία παράμετρο αναφέρεται ο σχεδιασμός έναντι τυχαίων συνθηκών και καταστάσεων, όπως η πτώση αντικειμένου σε τμήμα του αγωγού, οι σεισμοί, οι κατολισθήσεις κλπ. [6].

Η πλειονότητα αυτών των φορτίων είναι τέτοιας φύσης που η παραδοσιακή σχεδίαση, βασισμένη στις τάσεις, δεν είναι αποτελεσματική. Για το λόγο αυτό, ο σχεδιασμός υπεράκτιων αγωγών βασίζεται σε οριακές καταστάσεις αστοχίας. Με άλλα λόγια, σε πολλά από τα σενάρια σχεδιασμού επιτρέπεται η πλαστική παραμόρφωση, αλλά ο μηχανικός πρέπει να διασφαλίσει ότι η κατασκευή δε θα παραμορφωθεί υπερβολικά ή δε θα εμφανιστεί αστοχία. Πολλά σενάρια σχεδιασμού περιλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό οριακών καταστάσεων αστοχίας, όπως η κατάρρευση υπό την εξωτερική πίεση, η αστοχία υπό

εσωτερική πίεση και πολλά άλλα. Οι οριακές καταστάσεις αστοχίας επηρεάζουν τη μέθοδο κατασκευής του αγωγού, τον τρόπο εγκατάστασής του και τη μακροπρόθεσμη λειτουργία του στο υποθαλάσσιο περιβάλλον.

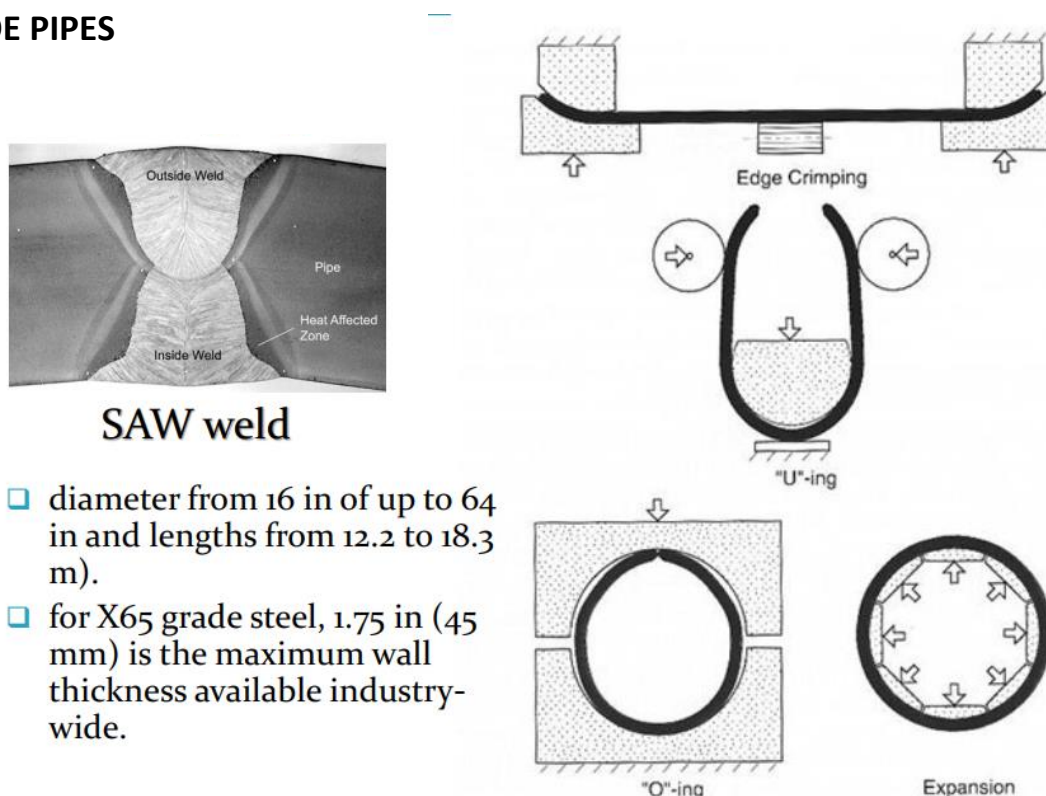
## 1.2 Κατασκευή των τμημάτων αγωγών

Το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται τα τμήματα των σωλήνων των αγωγών είναι ο χάλυβας. Οι μηχανικές ιδιότητες των αγωγών ποικίλλουν ανάλογα με την περίπτωση. Οι απαιτήσεις ιδιοτήτων του χάλυβα είναι συνήθως πολύ αυστηρές, καθώς περιλαμβάνουν υψηλή αντοχή, υψηλή ολκιμότητα, υψηλή αντοχή στη διάβρωση και καλή ικανότητα συγκόλλησης. Για υπεράκτιους αγωγούς, αυτά πρέπει να συνδυαστούν μαζί με το μεγάλο πάχος του κελύφους του τοιχώματος του αγωγού που απαιτείται για να αντέχει η κατασκευή στις μεγάλες εξωτερικές πιέσεις. Για να εκπληρωθούν αυτές οι απαιτήσεις χρησιμοποιείται πολύ καλή ποιότητα χάλυβα (π.χ. X60, X65). Επιπλέον, η κατασκευή των αγωγών παρακολουθείται διεξοδικά σε κάθε βήμα κατασκευής. Το αποτέλεσμα ελέγχεται με δοκιμές, συμπεριλαμβανομένων υπερήχων, μαγνητικών σωματιδίων και ακτινών X ώστε να διαπιστωθούν τυχόν ελαττώματα στο πάχος και στη συγκόλληση των ραφών. Οι δοκιμές ελέγχου αυξάνονται συχνά για να ανταποκριθούν οι αγωγοί στις ανάγκες συγκεκριμένων έργων. Κάθε αγωγός αριθμείται ξεχωριστά και εκδίδεται μοναδικό πιστοποιητικό που περιλαμβάνει το ιστορικό της διαδικασίας κατασκευής. Με εξαίρεση την αεροδιαστημική βιομηχανία, σε πολύ λίγες εφαρμογές τα μεταλλικά μέρη ελέγχονται τόσο λεπτομερώς με καταγραφή ιστορικού, [1], [6].

Οι αγωγοί (pipes) κατασκευάζονται είτε χωρίς συγκόλληση (εικόνα 1.14) είτε με ραφή. Αν και μπορούν να διαμορφωθούν σε μεγαλύτερες διαμέτρους, οι αγωγοί χωρίς ραφή έχουν συνήθως εξωτερικές διαμέτρους έως 16 in. Οι συγκολλημένοι με ραφή αγωγοί, που σχηματίζονται από μεμονωμένες χαλύβδινες πλάκες μέσω της διαδικασίας UOE (U-ing, O-

ing, Expansion) [ή JCO (J-ing, C-ing, O-ing)] (Εικόνες 1.10 και 1.11) διατίθεται από 16 έως 64 in (διάμετρος και πάχος κελύφους ποικίλλουν μεταξύ των κατασκευαστών). Οι αγωγοί που κατασκευάζονται με τη μέθοδο ERW (Electric Resistance Welded- συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση) (εικόνα 1.12), διαμορφώνονται μέσω μιας συνεχούς διαδικασίας από την κυλινδρική διαμόρφωση μιας λωρίδας χαλύβδινης πλάκας και τέλος τη συγκόλληση κατά τη φορά του αγωγού και διατίθενται από περίπου 2.375 in έως 24 in. Αυτές οι τέσσερις μεγάλες διαδικασίες, ήτοι χωρίς ραφή, ή με συγκόλληση (UOE, JCO και ERW) παράγουν τη μεγάλη πλειοψηφία των σωλήνων των αγωγών. Υπάρχει και μία πέμπτη μέθοδος όπου η λωρίδα πλάκας είναι σπειροειδώς συγκολλημένη (εικόνα 1.13). Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται συχνά σε αγωγούς νερού επί του εδάφους και όχι σε υπεράκτιες εφαρμογές, [1], [6].

## UOE PIPES



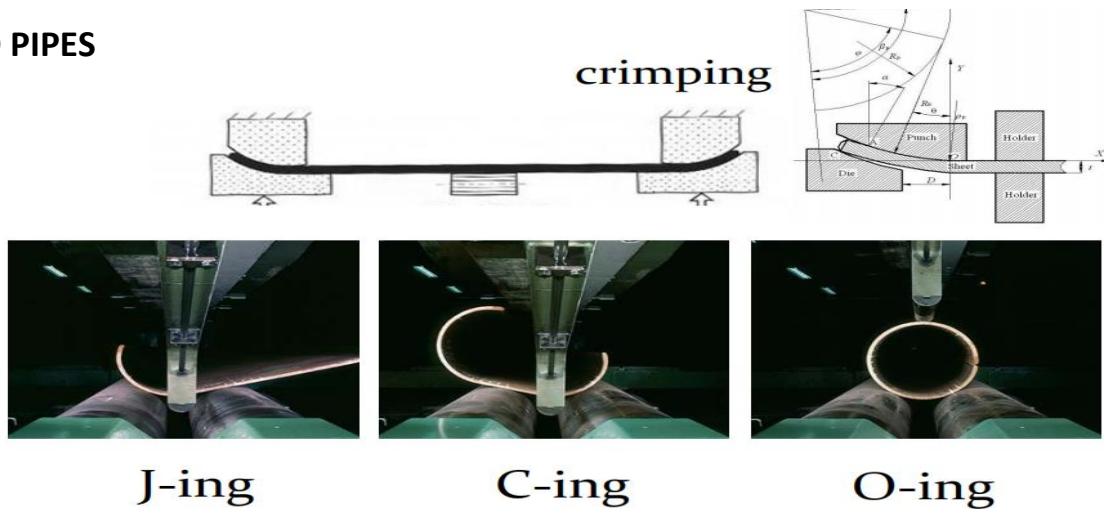
- diameter from 16 in of up to 64 in and lengths from 12.2 to 18.3 m).
- for X65 grade steel, 1.75 in (45 mm) is the maximum wall thickness available industry-wide.

Εικόνα 1.10 Διαδικασία UOE κατασκευής σωλήνα [1].

SAW= Submerged Arc Welding , Συγκόλληση βυθιζόμενου τόξου  
 UOE pipes= U-ing, O-ing, Expansion, Αγωγοί που κατασκευάζονται με τη διαμόρφωση φύλλων χάλυβα σε U, O και τέλος την διάτασή τους, με ραφή  
 Edge crimping= διαμόρφωση άκρων

Diameter from 16 in of up to 64 in and lengths from 12,2 to 18,3 m= Διάμετρος από 16 έως 24 in και μήκος από 12,2 έως 18,3 m  
 For X65 grade steel 1,75 in is the maximum wall thickness available industry-wide= Για χάλυβα X65 1,75 in είναι το μέγιστο πάχος κελύφους

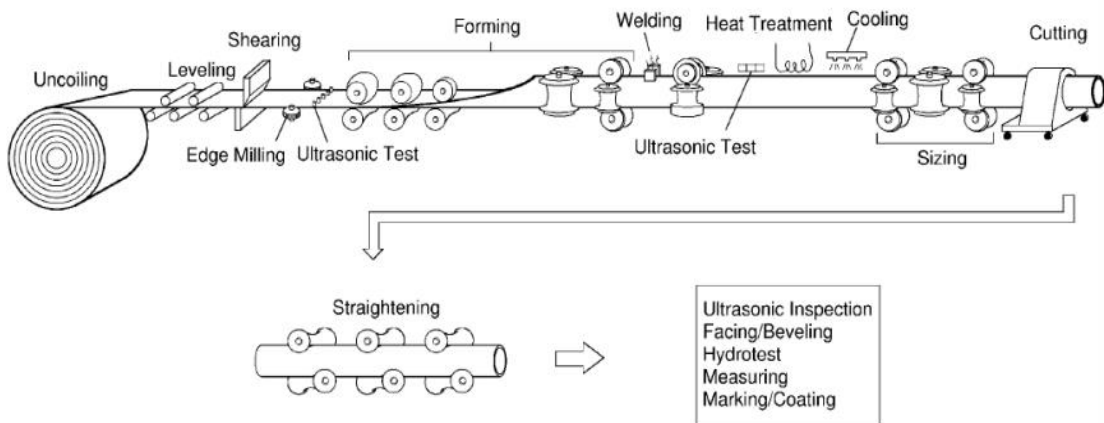
### JCO PIPES



Εικόνα 1.11 Διαδικασία JCO κατασκευής σωλήνα, [1].

JCO pipes= J-ing, C-ing, O-ing (Αγωγοί που κατασκευάζονται με τη διαμόρφωση φύλλων χάλυβα σε J, C και τέλος σε O, με ραφή)  
 Crimping= διαμόρφωση

### ERW PIPES



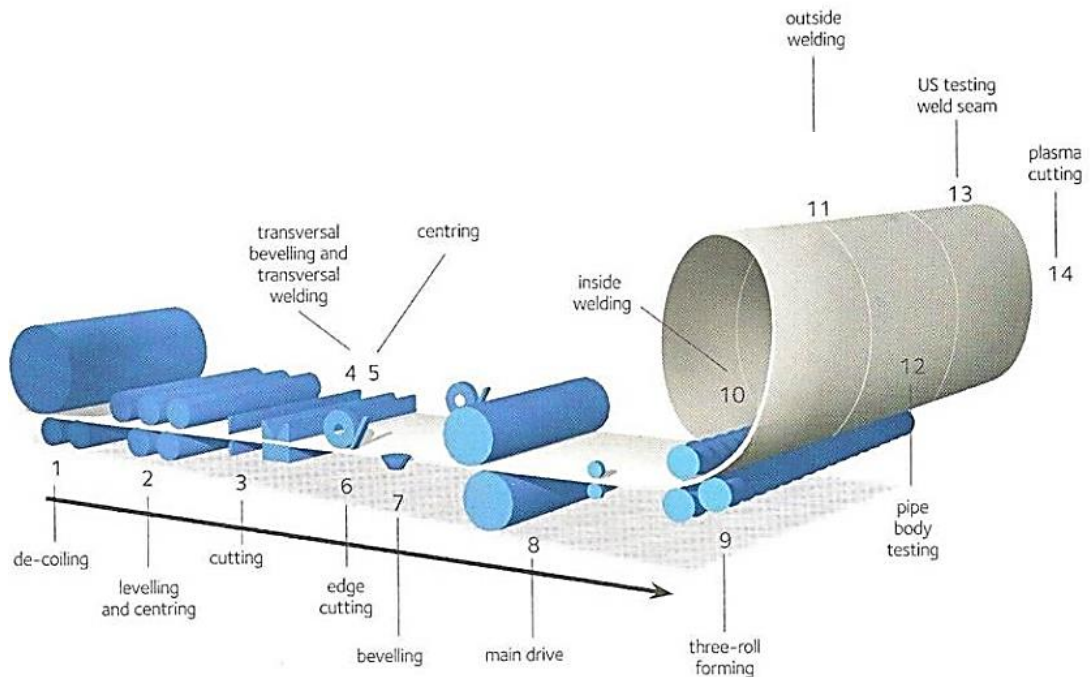
Εικόνα 1.12 Διαδικασία ERW κατασκευής σωλήνα, [6].

ERW pipes= Electric Resistance Welded (Αγωγοί που κατασκευάζονται με συγκόλληση ηλεκτρικής αντίστασης)



uncoling=ξετύλιγμα, leveling=επιπεδοποίηση, shoaring=υποστήριξη, edge milling ultrasonic test= έλεγχος υπερήχων από τα άκρα, forming= διαμόρφωση, welding= συγκόλληση, heat treatment=θερμική επεξεργασία, cooling=ψύξη, sizing=καθορισμός διαστάσεων, cutting=κοπή, straitening=ευθυγράμμιση, ultrasonic inspection= έλεγχος υπερήχων, facing/beveling=διαμόρφωση άκρων, hydrotest=υδραυλική δοκιμή, measuring= μέτρηση, marking/coating=επικάλυψη

## SPIRAL WELDED PIPES

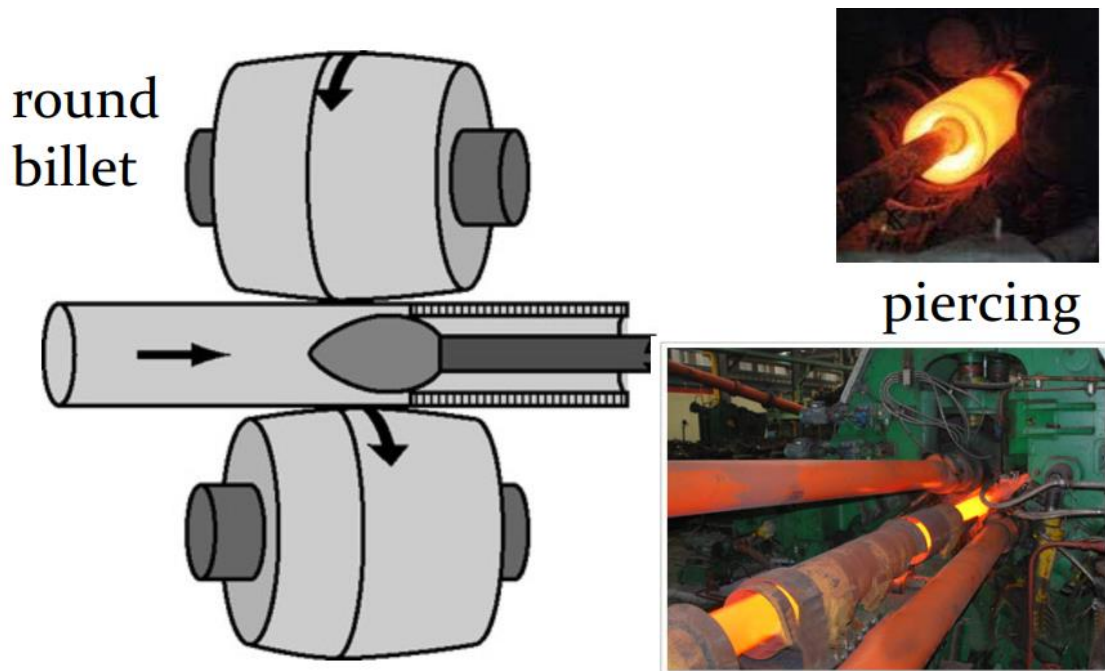


Εικόνα 1.13 Σπειροειδώς συγκολλημένος σωλήνας, [1].

decoling=ξετύλιγμα, leveling and centring= επιπεδοποίηση και κεντράρισμα, cutting=κόψιμο, transversal beveling and welding= διαμόρφωση-κόλληση γωνιών-άκρων, centring=κεντράρισμα, beveling=μπιζουτάρισμα, main drive= κύριος οδηγός, three roll forming= διαμόρφωση με 3 κυλίνδρους, inside- outside welding= εσωτερική- εξωτερική συγκόλληση, testing weld seam= έλεγχος ραφής, pipe body testing= έλεγχος σώματος αγωγού, plasma cutting= κοπή με πλάσμα

Spiral welded pipes= σπειροειδώς συγκολλημένοι αγωγοί

## SEAMLESS PIPES



Εικόνα 1.14 Κατασκευή σωλήνα χωρίς ραφή, [1].

Round billet= κυλινδρική μπιγιέτα, piercing=διείσδυση  
Seamless pipes= αγωγοί χωρίς ραφή

Στις εγκαταστάσεις αγωγών, εφαρμόζεται συνήθως η προδιαγραφή API 5L (ISO 3183 standard). Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται καθορίζεται από την ποιότητά του. Οι συνήθεις ποιότητες χάλυβα για τους υπεράκτιους αγωγούς, σύμφωνα με την API 5L είναι οι εξής:

- X52, χρησιμοποιήθηκε πολύ τις δεκαετίες '80 και '90,
- X60, βρίσκεται σε χρήση,
- X65, το περισσότερο διαδεδομένο υλικό για υπεράκτια χρήση,
- X70, δε διαφέρει πολύ από το X65.

Επίσης, υπάρχουν ακόμα υψηλότερες ποιότητες χάλυβα (π.χ. X80, X100), οι οποίες χρησιμοποιούνται σε χερσαίους αγωγούς. Για αυτά τα είδη ακόμα διεξάγονται έρευνες [1].

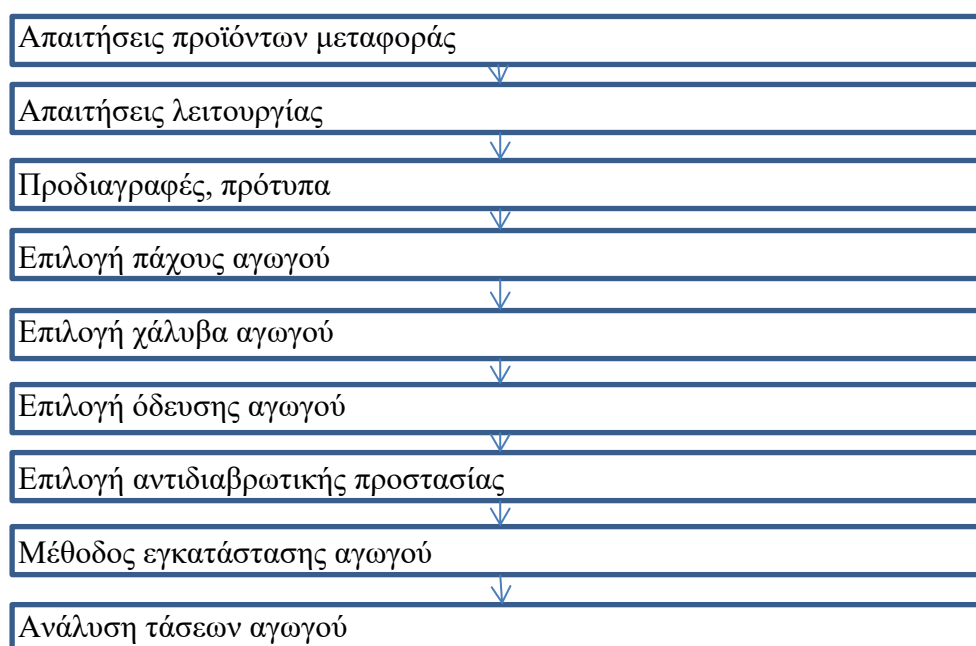


### 1.3 Ανάλυση σχεδιασμού υπεράκτιων αγωγών

Αντικείμενο του σχεδιασμού ενός αγωγού είναι ο προσδιορισμός, σύμφωνα με τις απαιτήσεις λειτουργίας του, των βέλτιστων παραμέτρων του μεγέθους του. Αυτές οι παράμετροι είναι οι εξής:

- Η εσωτερική διάμετρος του αγωγού,
- Το πάχος κελύφους του αγωγού,
- Η ποιότητα του χάλυβα κατασκευής του αγωγού,
- Το είδος της αντιδιαβρωτικής προστασίας.

Για να παραμετροποιηθεί ο αγωγός, η διαδικασία σχεδιασμού του έχει ως παρακάτω (Διάγραμμα 1):



**Διάγραμμα 1.** Διαδικασία σχεδιασμού για την παραμετροποίηση του αγωγού.

Στην περίπτωση της αποτυχίας ενός σταδίου κατόπιν αυτού της επιλογής πάχους του αγωγού, επαναλαμβάνεται ο έλεγχος με νέα χαρακτηριστικά αγωγού.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού προσδιορίζονται έτσι ώστε να διαπιστωθεί η δυνατότητα της κατασκευής του.

Η όδευση επιλέγεται για να καθοριστούν τα ευθύγραμμα τμήματα.

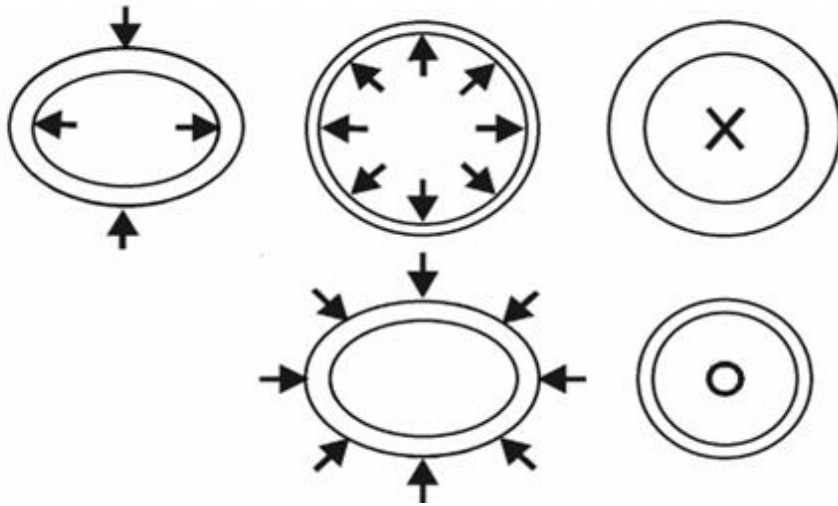
Η ανάλυση των τάσεων πραγματοποιείται για να διαπιστωθεί ότι ο αγωγός είναι δυνατό να ανταπεξέλθει σε όλες τις απαιτήσεις καταπόνησής του, από την εγκατάσταση μέχρι τη λειτουργία. Εδώ επίσης περιλαμβάνεται και η ανάλυση των επιτρεπόμενων τμημάτων του αγωγού που θα βρίσκονται σε αιώρηση, των λεπτομερειών των συνδέσεων και ο έλεγχος των μέγιστων πιέσεων δοκιμών.

Η ανάλυση της διαδικασίας εγκατάστασης αγωγού γίνεται για να διαπιστωθεί ότι οι τάσεις σε όλα τα στάδια εγκατάστασης είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Κατά την ανάλυση θα πρέπει να επιβεβαιωθεί ότι η προτεινόμενη μέθοδος εγκατάστασης αγωγού δεν θα τον βλάψει.

Επίσης, ελέγχεται η απόκριση του αγωγού σε καταστάσεις διαστολής και συστολής, υδροδυναμικής συμπεριφοράς, λυγισμού, διαρροής (θραύσης), προσκρούσεων αντικειμένων, εμφάνισης βαθουλωμάτων και διάβρωσης, [7].

### **1.3.1 Ανάλυση τάσεων των αγωγών**

Η ανάλυση τάσεων στον αγωγό περιλαμβάνει τον έλεγχο απόκρισης κατά τις εφαπτομενικές τάσεις (hoop stresses) και τις διαμήκεις τάσεις (longitudinal stresses) τάσεις στο κέλυφος του αγωγού (Εικόνα 1.14), καθώς και τον έλεγχο έναντι λυγισμού.



Εικόνα 1.14: Τομές κελυφών αγωγών που υπόκεινται σε διάφορες τάσεις, [7].

### 1.3.2 Εφαπτομενικές τάσεις αγωγού- Αντοχή σε διάρρηξη από εσωτερική πίεση (Pressure Containment Design)

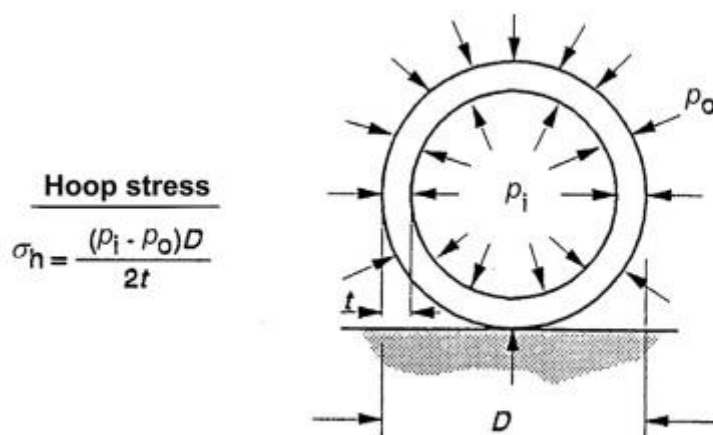
$$\sigma_h = (p_i - p_o) \frac{D}{2t}, \quad [1.1]$$

όπου:  $p_i$ = εσωτερική πίεση,

$p_o$ = εξωτερική πίεση,

$D$ = εξωτερική διάμετρος αγωγού,

$t$ = πάχος κελύφους του αγωγού.



Εικόνα 1.15 Εφαπτομενικές τάσεις, [7].

Hoop stress = Εφαπτομενική τάση

Αναλόγως των προτύπων και βάσει των προδιαγραφών του αγωγού, η εφαπτομενική τάση δεν πρέπει να ξεπερνάει την τάση διαρροής του υλικού [7].

Για την επιλογή του πάχους του κελύφους του αγωγού χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος [2]:

$$t = \frac{1}{f_1 f_2} \frac{p D}{2 \sigma_y}, \quad [1.2]$$

όπου:  $\sigma_y$  = τάση διαρροής υλικού

$f_1$  = συντελεστής ασφαλείας για τάση διαρροής υλικού, (συνήθως  $f_1=0.72$ ),

$f_2$  = συντελεστής ατελειών κατασκευής αγωγού,

$p$  = η συνολική πίεση περιβάλλοντος,

$D$  = η εξωτερική διάμετρος αγωγού.

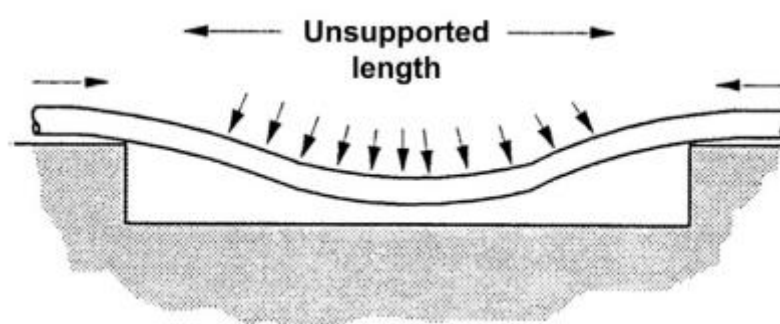
Η αστοχία τύπου διάρρηξης (burst) του αγωγού σχετίζεται με την αδυναμία να ανταπεξέλθει στα αυξημένα φορτία λόγω εσωτερικής πίεσης.



Εικόνα 1.16 Διάρρηξη αγωγού λόγω εσωτερικής πίεσης, [2].

### 1.3.3 Αιώρηση τμημάτων αγωγών

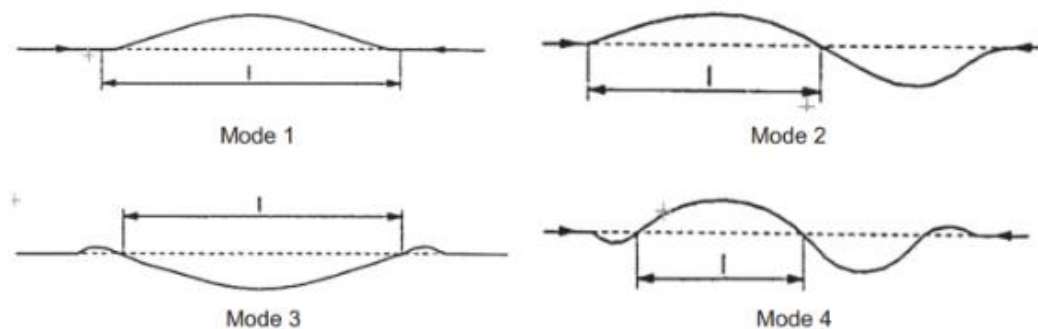
Όταν το ανάγλυφο του θαλάσσιου βυθού είναι έντονο, υπάρχει περίπτωση να χαθεί η επαφή του αγωγού με αυτόν ακόμα και σε ένα σημαντικό μήκος. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι πολύ σημαντική η έρευνα για τη διαπίστωση της επάρκειας της αντοχής του αγωγού σε αυτές τις καταστάσεις. Σε περίπτωση που το πραγματικό μήκος αιώρησης υπερβαίνει το επιτρεπόμενο, απαιτούνται διορθώσεις για τη μείωση του μήκους των ανοιγμάτων, [7].



Εικόνα 1.17 Αιώρηση αγωγού, [7]. (Unsupported length= Μη υποστηριζόμενο μήκος)

### 1.3.4 Καθολικός λυγισμός αγωγού

Καθολικός λυγισμός ενός αγωγού παρατηρείται όταν η αξονική δύναμη συμπίεσης αυτού γίνεται τόσο μεγάλη που το τμήμα του αγωγού αναγκαστικά εκτρέπεται πλευρικά ή κάθετα, έτσι ώστε να μειωθούν αυτά τα αξονικά φορτία. Επειδή ολοένα και περισσότεροι αγωγοί λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, η πιθανότητα εμφάνισης λυγισμού γίνεται πιο μεγάλη, λόγω του φαινομένου της διαστολής [7].



Εικόνα 1.18 Είδη εμφάνισης καθολικού λυγισμού, [7]. (Mode= Είδος/τρόπος)

Όταν σε ένα σωλήνα εφαρμόζεται καμπτική ροπή αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αυξημένη παραμόρφωση σε σχήμα οβάλ της διατομής του. Μέχρι ένα σημείο παραμόρφωσης η μείωση της ροπής αντίστασης του αγωγού αντισταθμίζεται από την αυξημένη τάση αντίστασης του κελύφους του αγωγού λόγω σκλήρυνσής του. Όταν η μείωση της ροπής αντίστασης δεν μπορεί πλέον να αντισταθμιστεί από το προαναφερθέν φαινόμενο, συμβαίνει αστοχία του κελύφους και διαρροή της διατομής εάν εφαρμοστεί επιπλέον ροπή. Ο τρόπος απόκρισης της διατομής στη ροπή εξαρτάται από το λόγο  $D/t$ . Όταν αυτός είναι χαμηλός, η αστοχία ξεκινά στην πλευρά του αγωγού που εφελκύεται. Για υψηλό  $D/t$  (30–35 και άνω), η αστοχία συμβαίνει στην περιοχή θλίψης του σωλήνα. Οι γεωμετρικές ατέλειες (εκτός διάβρωσης) δε θεωρείται ότι επηρεάζουν σημαντικά την ικανότητα αντίστασης σε εφαρμογή ροπής κάμψης του αγωγού, η οποία υπολογίζεται ως εξής [7]:

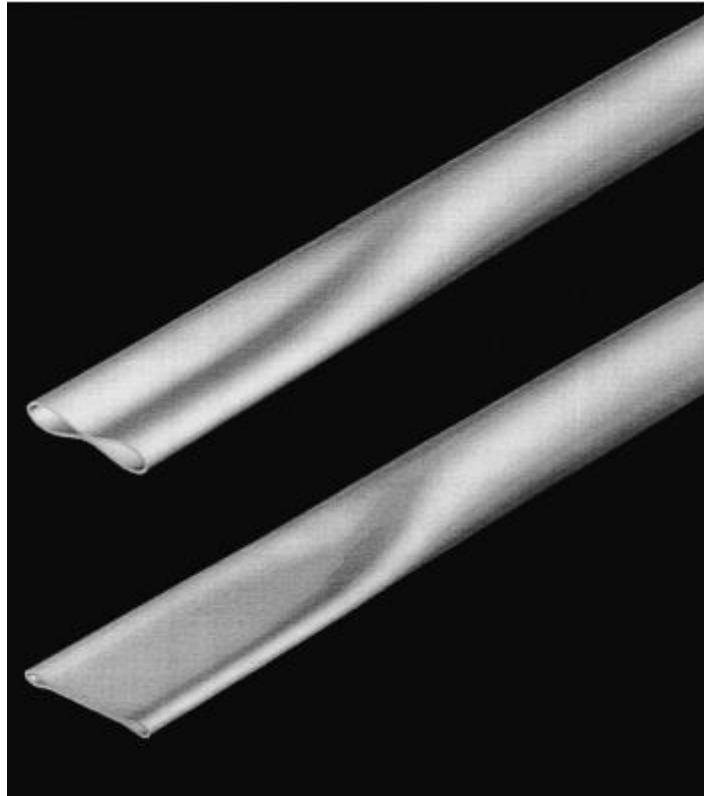
$$M_{C(F=0,P=0)} = (1.05 - 0.0015 \frac{D}{t}) SMYS D^2 t, \quad [1.3]$$

όπου:  $D$ = μέση διάμετρος,  $t$ = πάχος κελύφους,  $SMYS$ = τάση διαρροής.

### 1.3.5 Εφαρμογή εξωτερικής πίεσης

Θεωρητικά σε ένα κέλυφος με τέλειο κυλινδρικό σχήμα θα διατηρούταν το σχήμα του με την αύξηση της εσωτερικής πίεσης. Λόγω των κατασκευαστικών ατελειών όμως, που

έχουν οι αγωγοί κατά την παραγωγή τους, συμβαίνει πάντα μια παραμόρφωση της διατομής κατά την εφαρμογή της εξωτερικής πίεσης και τελικώς οδηγούνται στην πλήρη αστοχία τους (Εικόνα 1.19), [6].



Εικόνα:1.19 Αστοχία αγωγού λόγω εξωτερικής πίεσης, [3].

Για την περιγραφή του φαινομένου υπάρχουν αρκετές θεωρίες στη βιβλιογραφία. Μία από τις πιο κλασικές είναι η θεωρία των Timoshenko and Gere [7] που παρουσιάζει την ακόλουθη εξίσωση για την εξωτερική πίεση διαρροής του αγωγού:

$$p_c^2 - \left[ p_p + \left( 1 + 1,5 \frac{f_0 D}{t} \right) p_{el} \right] p_c + p_p p_{el} = 0, \quad [1.4]$$

όπου:  $p_c$ = εξωτερική πίεση διαρροής,

$$p_{el} = \frac{2E}{(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{D} \right)^3 \quad [1.5]$$

$$p_c = 2SMYS \frac{t}{D} \quad [1.6]$$

$f_0$ = δείκτης ατελειών κυκλικής διατομής

$$f_0 = (D_{max} - D_{min}) / D$$

[1.7]

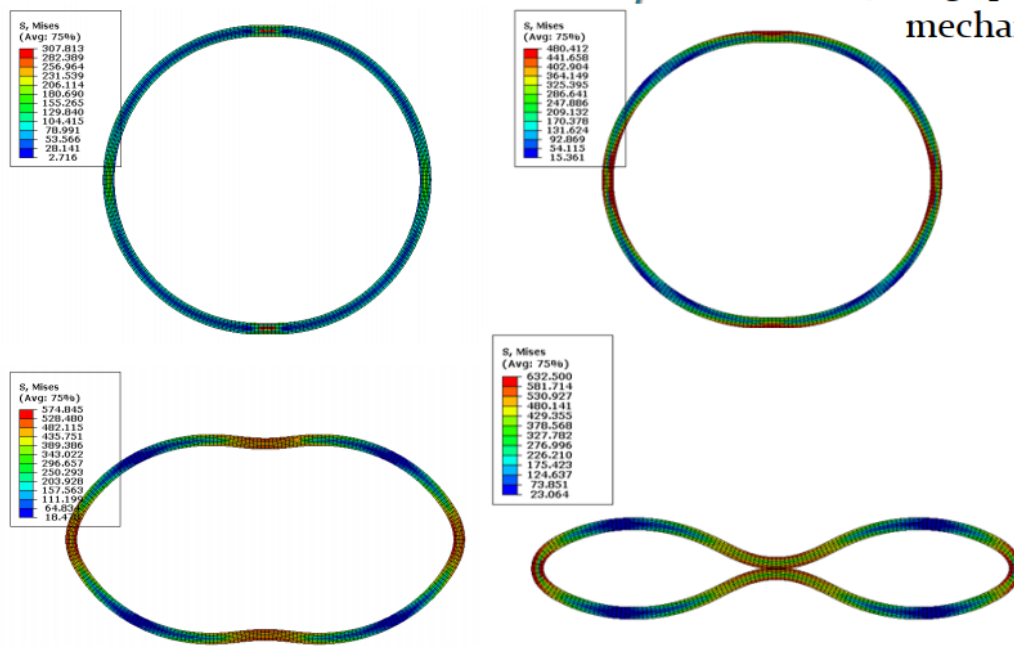
$D$ = μέση διάμετρος,  $t$ = πάχος κελύφους,  $E$ = μέτρο ελαστικότητας,  $\nu$ = λόγος Poisson.

Από την εξίσωση [1.4] προκύπτει η τιμή της μέγιστης επιτρεπόμενης εξωτερικής πίεσης πριν την αστοχία (πίεση κατάρρευσης / collapse pressure) της διατομής, στην οποία συνυπολογίζονται και οι κατασκευαστικές ατέλειες του αγωγού.

Οι αγωγοί που κατασκευάζονται με τις μεθόδους UO και UOE, εξαιτίας των μεγάλων παραμενουσών τάσεων κατά τη διαδικασία κατασκευής τους, πρέπει να υφίστανται μείωση των τιμών διαρροής που προκύπτουν από την εξίσωση 1.4 κατά 7% και 15% αντίστοιχα, [6], [13].

## Propagation pressure $p_p$

## Development of 4-hinge plastic mechanism



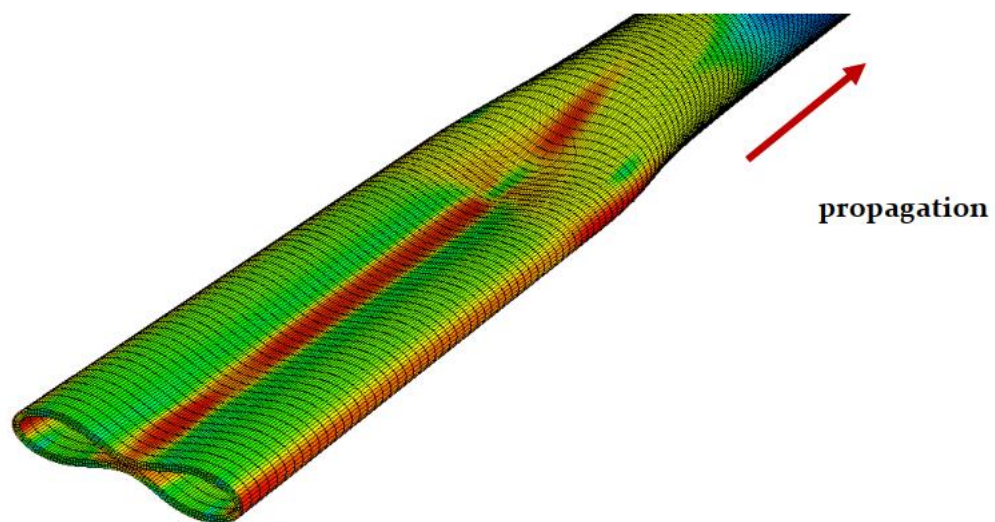
Εικόνα 1.20 Στάδια αστοχίας διατομής από εξωτερική πίεση, [3].

Propagation pressure= πίεση διάδοσης (λυγισμού), development of 4 hinge plastic mechanism= ανάπτυξη πλαστικοποίησης σε 4 σημεία

Συνεχίζοντας την περιγραφή του φαινομένου, πρέπει να αναφερθεί ότι η αποτροπή του αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα σχεδιασμού των αγωγών, δεδομένου ότι το



φαινόμενο διαδίδεται σε μεγάλο μήκος του αγωγού ως εξής: Αν εφαρμοστεί τοπικά τάση σε ένα σημείο του κελύφους τότε υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης, από την αρχή του φαινομένου λυγισμού τοπικά, με την εφαρμογή εξωτερικής πίεσης. Με τη διάδοση του λυγισμού (buckle propagation) παρατηρείται παραμόρφωση της διατομής του αγωγού, ή οποία γίνεται επίπεδη (flat) σε ένα πολύ μεγάλο τμήμα (Εικόνες 1.20, 1.21). Πρόκειται για ένα φαινόμενο αστοχίας που συμβαίνει στους αγωγούς που εγκαθίστανται σε βαθιά νερά, [3].



Εικόνα 1.21 Διάδοση λυγισμού Buckle propagation, [3]. (Propagation= διάδοση)

Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε κατασκευαστικές ατέλειες όπως, το τυχαίο χτύπημα του αγωγού από κάποιο αντικείμενο και η εμφάνιση τοπικού λυγισμού του κελύφους από συνδυασμό φορτίσεων. Γενικότερα ισχύει:

$$p_p = 35\sigma_y a_{fab} \left(\frac{t}{D}\right)^{2.5}, \quad [1.8]$$

όπου:  $p_p$ = η πίεση διαδιδόμενου λυγισμού,  
 $\sigma_y$ = η τάση διαρροής του χάλυβα,  
 $a_{fab}$ = ο συντελεστής ατελειών αγωγού,  
 $t$ = πάχος κελύφους (Εικόνα 1.22),  
 $D$ = διάμετρος αγωγού.

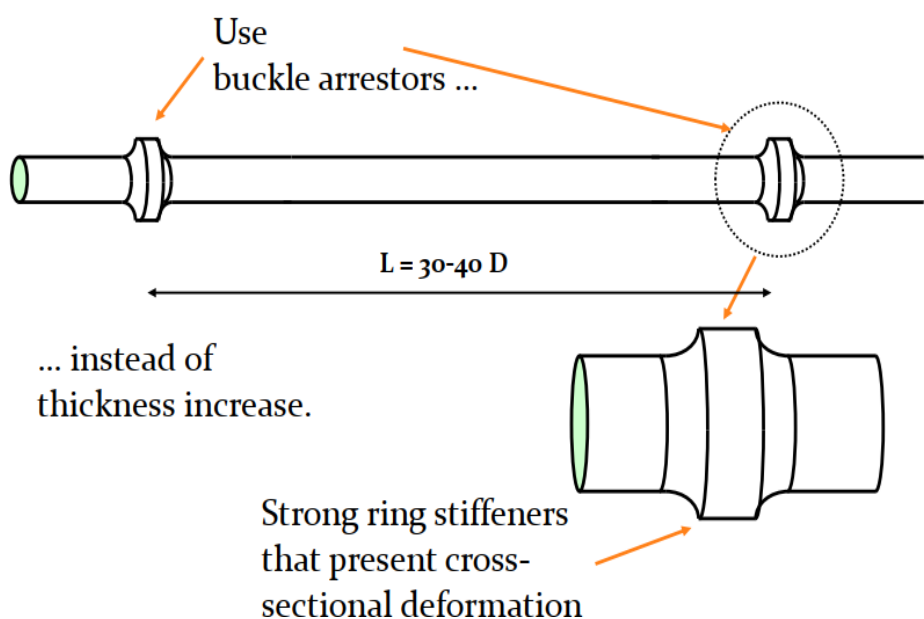
Pipe	Seamless	UO & TRB & ERW	UOE
$\alpha_{fab}$	1.00	0.93	0.85

Εικόνα 1.22 Τιμές συντελεστών ατελειών αγωγού, [4].

Pipe= αγωγός, seamless= χωρίς ραφή, UO, TRB, ERW, UOE= κατασκευαστικές μέθοδοι αγωγών

Για το σχεδιασμό έναντι της διάδοσης λυγισμού χρησιμοποιούνται οι λεγόμενοι buckle arrestors (Εικόνα 1.23), που είναι δακτυλίδια ενίσχυσης της διατομής του αγωγού. Τα δακτυλίδια αυτά τοποθετούνται σε αποστάσεις 30-40 διαμέτρων μεταξύ τους [3].

## Design against buckle propagation



Εικόνα 1.23: Δακτυλίδια ενίσχυσης, [3].

Design against buckle propagation=Σχεδιασμός έναντι διάδοσης λυγισμού, use buckle arrestors= χρήση των δακτυλιδιών ενίσχυσης, instead of thickness increase= αντί για αύξηση του πάχους (διατομής), strong ring stiffeners that present cross-sectional deformation= δυνατά δακτυλίδια σκλήρυνσης που προστατεύουν από παραμόρφωση διατομής

Για να χρησιμοποιηθούν δακτυλίδια ενίσχυσης, σύμφωνα με την [8] πρέπει να ισχύει [4]:

$$p \geq f_p P_p, \quad [1.9]$$

$$\text{όπου: } P_p = 24\sigma_y \left(\frac{t}{D}\right)^{2.4} \quad [1.10]$$

$f_p$ = συντελεστής σχεδιασμού έναντι διάδοσης λυγισμού = 0,80 [8]

$\sigma_y$ = τάση διαρροής υλικού

$t$ =πάχος κελύφους αγωγού

$D$ = διάμετρος αγωγού

### 1.3.6 Αξονική φόρτιση αγωγού

Στην εφαρμογή αξονικών φορτίσεων του αγωγού συναντώνται οι περιπτώσεις των εφελκυστικών και των θλιπτικών τάσεων.

Όταν ασκείται εφελκυσμός το κέλυφος αστοχεί γιατί λεπταίνει (το πάχος του). Από μία οριακή τιμή της τάσης και πάνω, το πάχος του κελύφους μειώνεται πολύ και επέρχεται η αστοχία [7]:

$$F_1 = (SMTS)A \quad [1.11]$$

όπου  $A$  είναι η επιφάνεια του μετάλλου της διατομής και  $SMTS$  η αντοχή σε θραύση του χάλυβα και  $F_1$  η εφελκυστική δύναμη.

Όταν στον αγωγό εφαρμόζονται αξονικές θλιπτικές τάσεις, για την εμφάνιση τοπικού λυγισμού υπολογίζεται η κρίσιμη τάση ως εξής [3]:

$$\sigma_{cr} = \frac{2E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{t}{D}, \quad [1.12]$$

όπου:  $E$ = μέτρο ελαστικότητας,

$t$ = πάχος κελύφους,

$D$ = διάμετρος,

$\nu$ = λόγος Poisson.

### 1.3.7 Συνδυασμός φορτίσεων

Σύμφωνα με την [8] ο συνδυασμός των αξονικών φορτίσεων και των θλιπτικών φορτίσεων (longitudinal load, pressure load) για τις περιπτώσεις που η εσωτερική πίεση είναι μεγαλύτερη από την εξωτερική, δεν πρέπει να γίνεται υπέρβαση του παρακάτω ορίου:

$$\sqrt{\left(\frac{P_i - P_o}{P_b}\right)^2 + \left(\frac{T_{eff}}{T_y}\right)^2} \leq \begin{cases} 0.90 & \text{Για φορτία λειτουργίας} \\ 0.96 & \text{Για φορτία υδραυλικής δοκιμής} \end{cases} \quad [1.13]$$

όπου:  $p_i$ = η εσωτερική πίεση του αγωγού,  
 $p_o$ = η εξωτερική υδροστατική πίεση του αγωγού,  
 $p_b$ = η πίεση διαρροής του αγωγού,  
 $T_{eff}$ = η τάση εφελκυσμού,  
 $T_y$ = η τάση διαρροής της διατομής αγωγού.

Στην περίπτωση εφαρμογής μεγαλύτερης εξωτερικής πίεσης πρέπει να ικανοποιείται η εξής σχέση:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_b} + \frac{(P_o - P_i)}{P_c} \leq g(\delta), \quad [1.14]$$

όπου:  $g(\delta) = (1 + 20\delta) - 1 =$  συντελεστής κατάρρευσης της διατομής,

$$\delta = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}}, \quad [1.15]$$

$\varepsilon$ = επιφανειακή τάση λόγω κάμψης,  
 $\varepsilon_b = t/2D$ ,  
 $p_i$ = η εσωτερική πίεση του αγωγού,  
 $p_o$ = η εξωτερική υδροστατική πίεση του αγωγού,  
 $p_c$ = η πίεση διαρροής του αγωγού.

### 1.4 Μέθοδοι εγκατάστασης υπεράκτιων αγωγών

Η εγκατάσταση υπεράκτιων αγωγών αποτελεί μία δύσκολη εργασία και χρειάζεται να καταβληθεί μεγάλη προσπάθεια για το σωστό σχεδιασμό προς αποφυγή δυσμενών καταστάσεων καθώς και για να διατηρηθεί το κόστος κατασκευής σε βιώσιμα επίπεδα για το

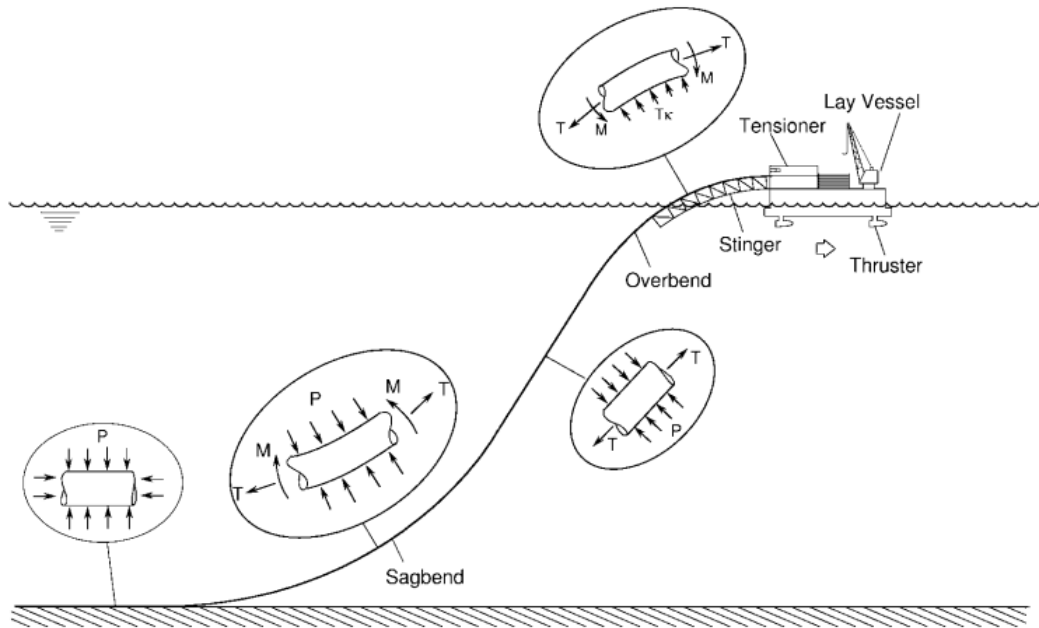
έργο.

### 1.4.1 Μέθοδος S-Lay

Κατά τη μέθοδο S-Lay ο αγωγός τοποθετείται στο βυθό ξεκινώντας από το ειδικό σκάφος σε οριζόντια θέση. Το σχήμα του, καθώς αυτός βυθίζεται στον πυθμένα και καταλήγει οριζόντιος, θυμίζει S. Τα τμήματα του αγωγού βρίσκονται στο πλωτό μέσο, συγκολλούνται μεταξύ τους και ελέγχονται ποιοτικά καθώς το σκάφος κινείται, εναποθέτοντας τα ενωμένα τμήματα στον πυθμένα. Για να αρχίζει η πόντιση του αγωγού σε οριζόντια θέση, το σκάφος έχει μια ειδική κατασκευή για να τον υποστηρίξει που μοιάζει με κεντρί (sting) (Εικόνες 1.24, 1.25). Το μέγεθος της ειδικής αυτής κατασκευής (κεντρί) διαφέρει, αναλόγως του βάθους της εργασίας. Σε συμβατικές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει και τα 100 m και έχει ειδικά ράουλα (rollers) για να επιτρέπεται η ανεμπόδιστη κίνηση του αγωγού χωρίς να φθείρεται, [3], [6].



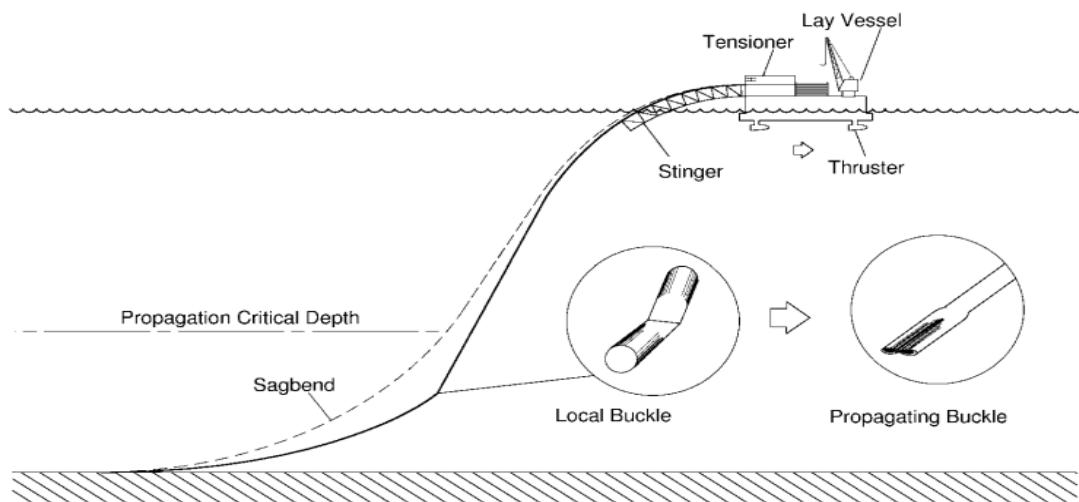
Εικόνα 1.24 Σκάφος κατασκευής υπεράκτιου αγωγού με μέθοδο S-Lay, [3].



Εικόνα 1.25 Τυπική διάταξη S-Lay εναπόθεσης αγωγού στον πυθμένα, [6].

Sagbend= κρεμάμενη καμπύλη, overbend= υπερβολική καμπύλη, stinger= κεντρί, tensioner= εντατήρας, lay vessel= σκάφος απόθεσης, thruster= προωθητής

Κατά την εναπόθεση του αγωγού στον πυθμένα, με αυτόν τον τρόπο, παρουσιάζονται δύο σημεία καμπυλότητάς του, το ένα κοντά στην επιφάνεια και το άλλο στον πυθμένα. Συχνά η καμπυλότητα στον πυθμένα είναι μεγαλύτερη και χρειάζεται προσοχή στο σχεδιασμό για να μπορεί το κέλυφος να αντεπεξέλθει σε συνδυασμό φόρτισης από εξωτερική υδροστατική πίεση και κάμψη, χωρίς να αστοχήσει. Γενικά η καμπυλότητα στον πυθμένα ελέγχεται από την τάση που εφαρμόζεται από την επιφάνεια. Λάθος χειρισμός ή εσφαλμένη κίνηση του πλοίου μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες παραμορφώσεις ή ακόμα και αστοχία στο τμήμα που ακουμπάει το βυθό (Εικόνα 1.26), [6].



Εικόνα 1.26: Αστοχία διατομής του αγωγού, [6].

Sagbend= κρεμάμενη καμπύλη, propagation critical depth=βάθος κρίσιμο για εμφάνιση διαδιδόμενου λυγισμού, local buckle= τοπικός λυγισμός, stinger= κεντρί, tensioner= εντατήρας, lay vessel= σκάφος απόθεσης, propagating buckle= διαδιδόμενος λυγισμός, thruster= προωθητής

Εξαιτίας της σημασίας του ρόλου του πλωτού μέσου στη διατήρηση της τάσης στο αναρτώμενο τμήμα του αγωγού, ώστε να διατηρείται το σχήμα του, έχουν αναπτυχθεί νέες τεχνολογίες στα σκάφη, ώστε να μπορούν να προσδιορίζουν τη θέση τους και να κινούνται με ακρίβεια. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση προωθητών (προπελών) που μπορούν να κατευθύνονται ελεύθερα και να ελέγχονται μέσω υπολογιστών και GPS. Αυτά τα σκάφη χρειάζονται μεγαλύτερη ισχύ, είναι όμως πιο αποδοτικά αναφορικά με την ταχύτητα εναπόθεσης του αγωγού στον πυθμένα, [6].

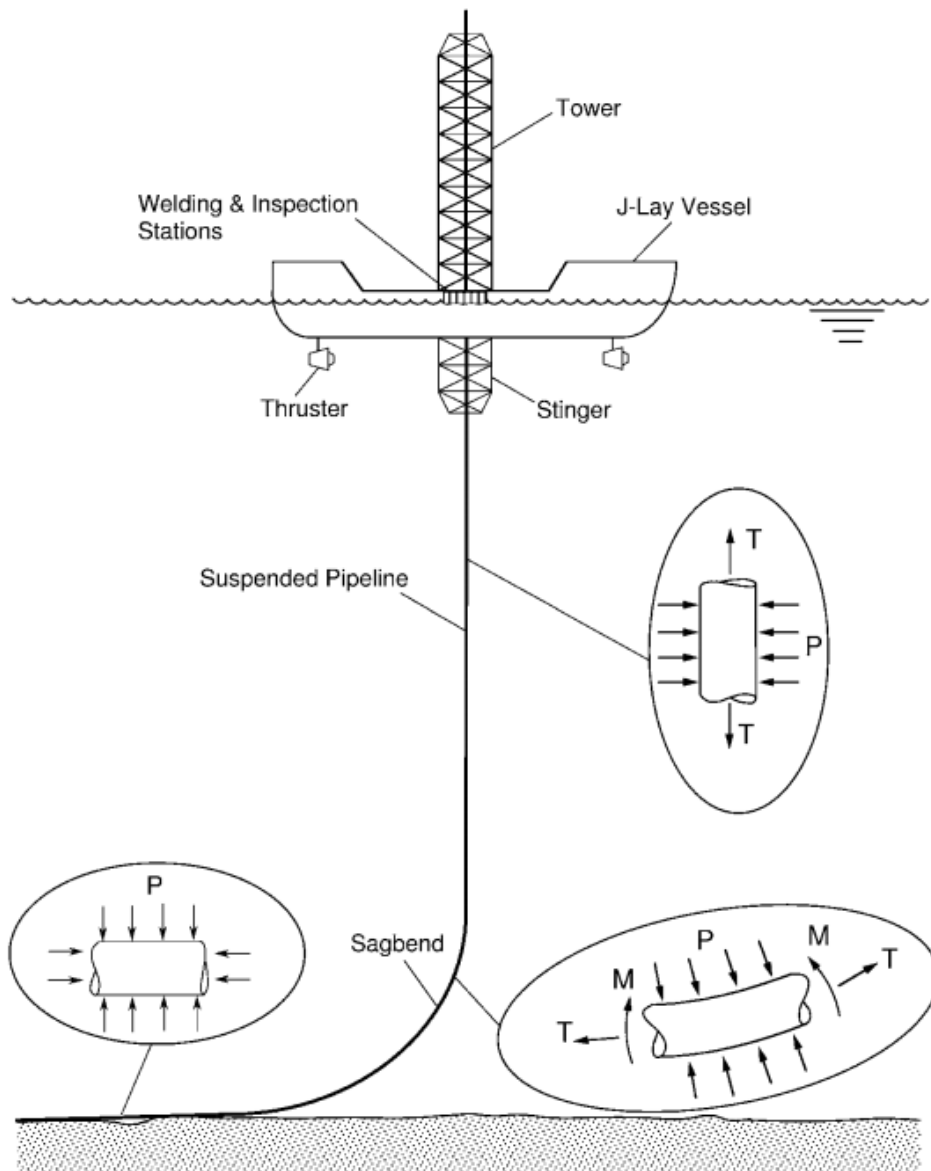
Οι αγωγοί ποντίζονται συνήθως κενοί, για να είναι μικρότερες οι τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτούς κατά την εγκατάσταση. Αυτός ο τρόπος κατασκευής βρίσκεται εφαρμογή πλέον σε βάθη έως 1000 m περίπου. Το βάθος αυτό είναι σχεδόν το διπλάσιο συγκριτικά με αυτό που ίσχυε στο παρελθόν, λόγω των νέων μεγαλύτερων κεντριών που έχουν τα σκάφη αυτού του είδους [6].

## 1.4.2 Μέθοδος J-Lay

Για μεγαλύτερα βάθη, η προηγούμενη μέθοδος εγκατάστασης καθίσταται πολύ περίπλοκη γιατί θα πρέπει να αυξηθεί πολύ το μήκος από το κεντρί (sting). Για το λόγο αυτό αποφεύγεται η πόντιση του αγωγού σε οριζόντια θέση και εναλλακτικά χρησιμοποιείται η μέθοδος J-Lay, κατά την οποία ο αγωγός ποντίζεται σχεδόν σε κατακόρυφη θέση (Εικόνα 1.27). Το σχήμα του αγωγού, εφόσον αυτό αρχικώς βρίσκεται σε κατακόρυφη σχεδόν θέση και καταλήγει οριζόντιος, στον πυθμένα θυμίζει J. Το αναρτώμενο μήκος του αγωγού με τον τρόπο αυτό είναι μειωμένο σε σχέση με την μέθοδο S-Lay. Επίσης ο ρόλος της επιβαλλόμενης τάσης στην επιφάνεια, από το σκάφος, είναι να υποστηρίζει αγωγό μικρότερου μήκους και να ελέγχει επίσης την καμπυλότητά του στο σημείο κοντά στον πυθμένα.

Στην εν λόγω μέθοδο συνήθως υπάρχει ένας μόνο σταθμός συγκολλήσεων και ελέγχου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μεγαλύτερα μήκη τμημάτων σωλήνων ώστε να είναι πιο αποδοτική (ταχύτερη) η εξέλιξη των εργασιών. Συνήθως 4 έως 6 τμήματα των 12 m το καθένα, συγκολλούνται στην ακτή και μεταφέρονται για τη χρήση και συγκόλληση στο υποθαλάσσιο τμήμα του αγωγού. Για το σκοπό αυτό το σκάφος διαθέτει ένα πύργο που υποστηρίζει τα εκ των προτέρων συγκολλημένα τμήματα σε κατακόρυφη θέση [6].





Εικόνα 1.27: Μέθοδος J-Lay εγκατάστασης αγωγού, [6].

Welding&inspection station= σταθμός συγκολλήσεων και επιθεωρήσεων, tower= πύργος, J-lay vessel= σκάφος εναπόθεσης (σχήματος J), thruster= προωθητήρας, stinger= κεντρί, suspended pipe= αναρτώμενος αγωγός, sagbend= κρεμάμενη καμπύλη

Με τη χρήση της μεθόδου αυτής είναι εφικτή η εγκατάσταση αγωγών σε βάθος έως 3350 m. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.27, κάθε τμήμα κατά την εγκατάσταση έχει διαφορετική κατάσταση φόρτισης. Στο κατακόρυφο τμήμα του αγωγού ασκούνται αξονικός εφελκυσμός και περιμετρικά υδροστατική πίεση. Στο καμπυλωμένο τμήμα του αγωγού

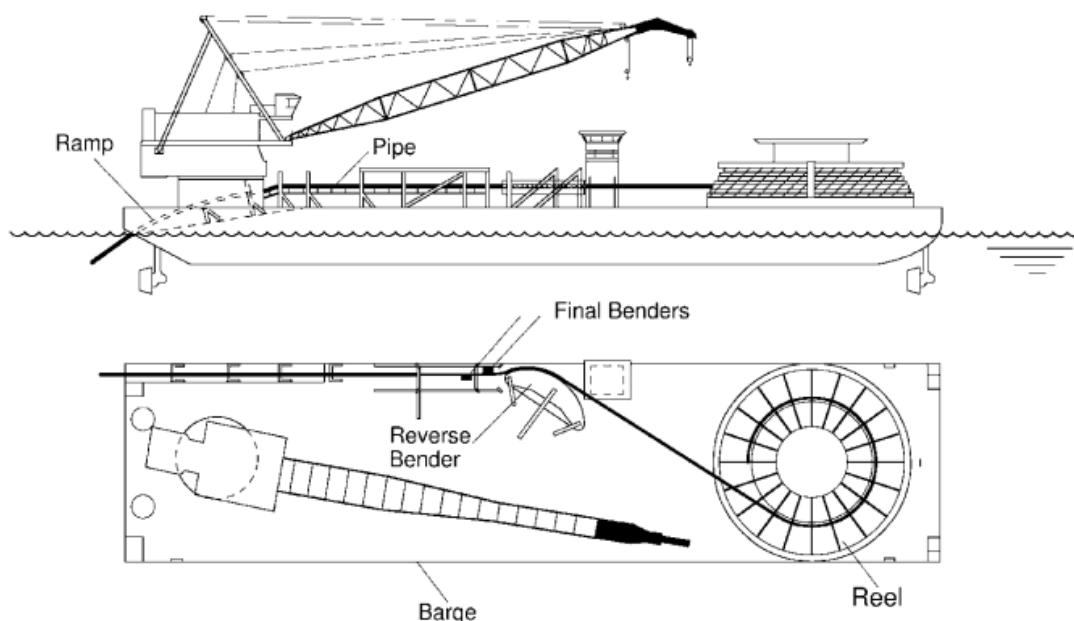
ασκούνται καμπτικές ροπές, αξονικός εφελκυσμός και υδροστατική πίεση. Στο οριζόντιο τμήμα του αγωγού ασκούνται αξονικά και περιμετρικά θλιπτικές τάσεις. Όσο αυξάνεται το βάθος τόσο αυξάνεται η υδροστατική πίεση περιβάλλοντος και η τάση κατά τη δημιουργία της καμπυλότητας. Αυτές οι καταστάσεις απαιτούν πολύ προσεκτικό σχεδιασμό και επειδή σε αυτά τα βάθη υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης διαδιδόμενου λυγισμού, καθίσταται υποχρεωτική η χρήση των ειδικών τεμαχίων ενίσχυσης του κελύφους του αγωγού (buckle arrestors), όπως φαίνονται στην εικόνα 1.23 [6].

### 1.4.3 Μέθοδος Reeling

Μια από τις πιο αποδοτικές μεθόδους για την πόντιση υπεράκτιων αγωγών είναι η χρήση σκάφους που διαθέτει τροχό-καρούλι (reel). Αρκετά χιλιόμετρα αγωγού, τυλίγονται σε ένα μεγάλο τροχό επί του πλωτού μέσου (Εικόνες 1.28, 1.29), το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται στο σημείο του έργου και ξετυλίγει τον αγωγό. Πρόκειται για την πιο οικονομική και την πιο γρήγορη μέθοδο κατασκευής αγωγών, εξαιτίας του γεγονότος ότι οι διαδικασίες συγκόλλησης και ελέγχου των εργασιών πραγματοποιούνται στην στεριά [6].

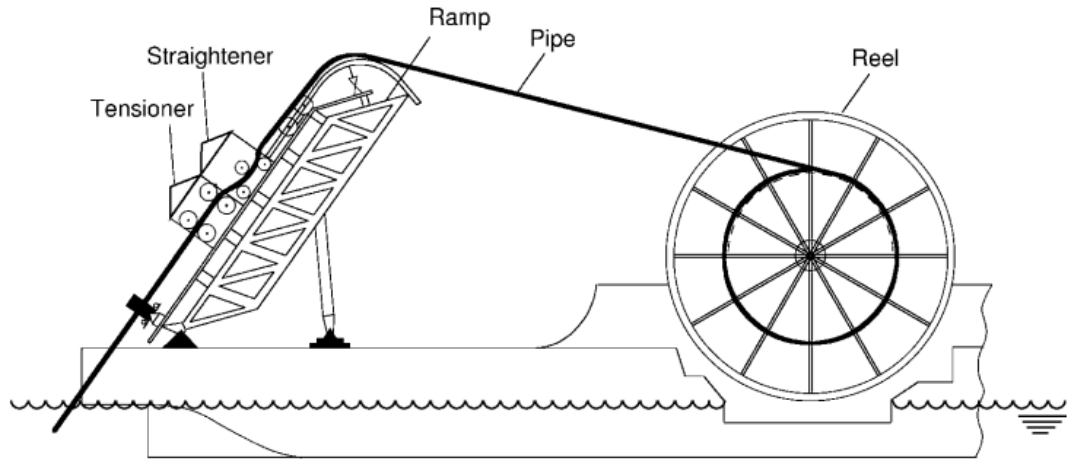
Λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις του τροχού, οι διαδικασία τυλίγματος και ξετυλίγματος προκαλεί καμπυλότητες στον αγωγό, εντός του εύρους της πλαστικής παραμόρφωσης του χάλυβα. Πρέπει επομένως να μελετάται το πάχος του κελύφους του αγωγού, καθώς και οι μηχανικές ιδιότητές του, ώστε να αποφευχθεί η εμφάνιση τοπικού λυγισμού. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του σκάφους προσθέτουν επιπλέον κύκλους πλαστικής φόρτισης στον αγωγό: ο αγωγός κάμπτεται όταν τυλίγεται στο καρούλι, όταν ξετυλίγεται ευθυγραμμίζεται, κάμπτεται πάλι, ευθυγραμμίζεται εκ νέου με τη χρήση ειδικών οδηγών- ράουλων, όταν εγκαταλείπει το σκάφος και αιωρείται κάμπτεται ανάποδα και τέλος κατά την απόθεσή του αποφορτίζεται. Τα παραπάνω στάδια φαίνονται στις εικόνες 1.29 και 1.30, [3],[6].

Η ιστορία της φόρτισης στον αγωγό κατά την εγκατάστασή του, με τη συγκεκριμένη μέθοδο, επηρεάζει τη γεωμετρία του και πιθανόν να επιταχύνει την κόπωση του υλικού και κατά συνέπεια να μειώνει το προσδοκώμενο όριο ζωής του έργου. Παρά της προσπάθειας να αποφεύγεται ο λυγισμός, οι επαναλαμβανόμενες εντατικές καταστάσεις εντός της πλαστικής περιοχής του χάλυβα, προκαλούν μόνιμη επιμήκυνση και μεταβολή στις μηχανικές ιδιότητές του. Επιπλέον η διατομή του αγωγού αποκτά περισσότερο οβάλ σχήμα, γεγονός που επηρεάζει την ικανότητα του κελύφους να ανταπεξέρχεται με επιτυχία σε αυξημένες εξωτερικές πιέσεις, κάτι το οποίο έχει ιδιαίτερη σημασία για τους αγωγούς σε μεγάλα βάθη. Εκτός αυτών, η επιμήκυνση δύναται να επηρεάσει δυσμενώς και τις κολλήσεις, βοηθώντας να αστοχήσουν τυχόν ατέλειες δομής που υφίστανται στον αγωγό.



Εικόνα 1.28: Reel (περιτύλιξη) [3].

Ramp= κεκλιμένη επιφάνεια (ράμπα), pipe=αγωγός, reel= καρούλι, reverse bender= διάταξη που προκαλεί ανάποδη κάμψη στον αγωγό, final bender= διάταξη που ευθυγραμμίζει τον αγωγό, barge= φορτηγίδα

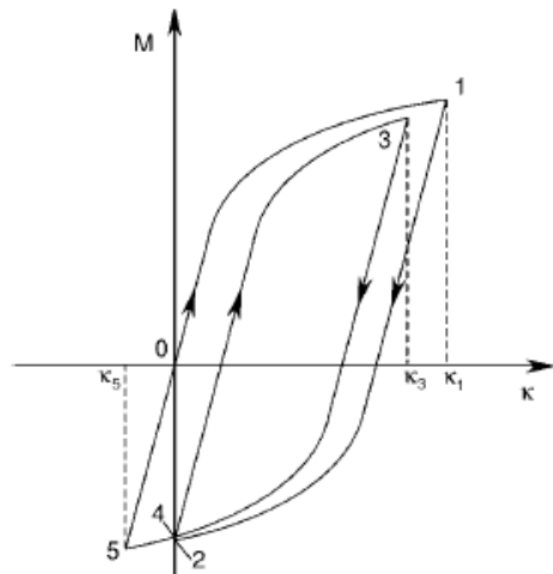


Εικόνα 1.29: Reel (περιτύλιξη) [3].

Tensioner= εντατήρας, straightener= διάταξη ευθυγράμμισης, ramp= κεκλιμένη επιφάνεια, pipe= αγωγός, reel= καρούλι

## Cyclic deformation of reeled pipe

- 0-1: reeled
- 1-2: straightened
- 2-3: bent again
- 3-4: straightened
- 4-5: reverse bending
- 5-0: final unloading and return to zero moment and curvature condition.



Εικόνα 1.30: Κυκλική παραμόρφωση περιτυλιγμένου αγωγού [3].

Reeled= περιτύλιξη, straightened= ευθυγράμμιση, bent again= κάμψη ξανά, reverse bending= ανάποδη κάμψη, final unloading return to zero moment= τελική αποφόρτιση και επιστροφή σε μηδενική ροπή κάμψης

### 1.4.4 Μέθοδος Ρυμούλκησης (Towing)

Ένας ακόμα τρόπος εγκατάστασης υπεράκτιων αγωγών είναι η ρυμούλκησή τους στο

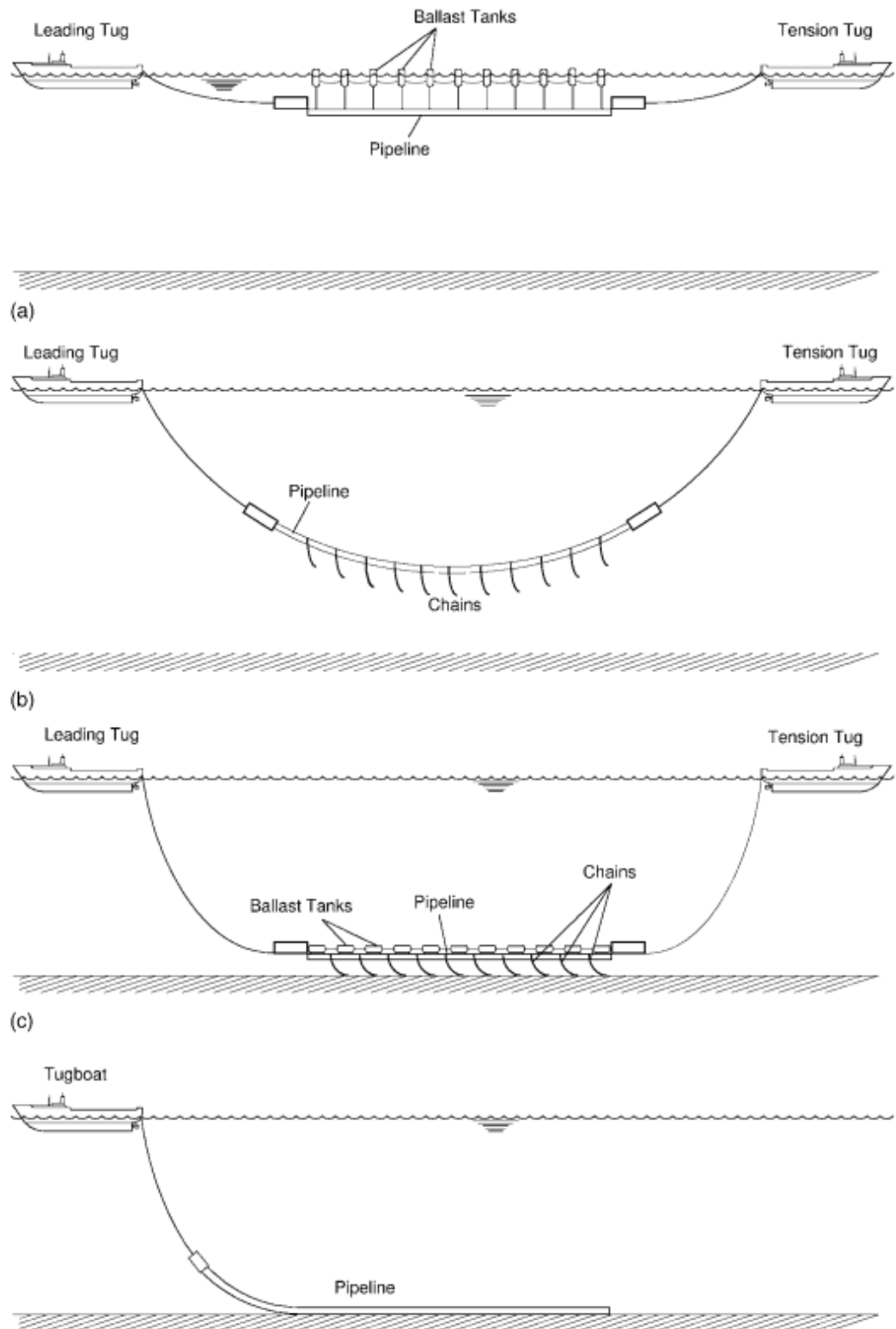
σημείο κατασκευής του έργου. Ένα τμήμα του αγωγού κατασκευάζεται στην ακτή και ρυμουλκείται για την εγκατάστασή του σύμφωνα με τις μεθόδους που φαίνονται στην εικόνα 1.30. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι η όλη κατασκευή και ο έλεγχος γίνονται στην ακτή, πριν την εγκατάσταση. Η μέθοδος αυτή είναι ιδανική για την κατασκευή αγωγών μικρού μήκους που βρίσκονται σχετικά κοντά στην ακτή [6].

Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.31, ο αγωγός ρυμουλκείται στην (a) περίπτωση με δύο ρυμουλκά σκάφη και τη βοήθεια ρυθμιστών πλευστότητας (ballast tanks), ώστε αυτός να παραμένει κοντά στην επιφάνεια. Όταν προσεγγίσει το σημείο πόντισης τότε βυθίζεται με ελεγχόμενο τρόπο με τη βοήθεια των δύο σκαφών εκατέρωθεν των άκρων του τμήματος, τα οποία διατηρούν τάση μεταξύ τους. Τα θαλάσσια ρεύματα και τα κύματα μπορεί να προκαλέσουν ασταθείς καταστάσεις.

Στη (b) περίπτωση της εικόνας 1.31 ο αγωγός αναρτάται μεταξύ δύο ρυμουλκών σκαφών αρκετά κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, οπότε και ο κυματισμός είναι μειωμένος, παρόλο που μπορεί να επηρεάσει τα ρυμουλκά σκάφη. Επειδή ο αγωγός συνήθως επιπλέει όταν περιέχει αέρα, χρησιμοποιούνται αλυσίδες για να βυθίζεται. Η τάση μεταξύ των ρυμουλκών σκαφών διατηρεί την καμπυλότητα του αναρτώμενου τμήματος του αγωγού σε αποδεκτά επίπεδα.

Ακολουθώντας στη (c) περίπτωση ο αγωγός με τη βοήθεια αλυσίδων και ρυθμιστών πλευστότητας έχει φτάσει σχεδόν μέχρι τον πυθμένα της θάλασσας. Οι αλυσίδες έρπουν ελαφρώς στο βυθό, καθώς τα ρυμουλκά έλκουν τον αγωγό.

Τέλος στην περίπτωση (d) ο αγωγός μεταφέρεται ενώ βρίσκεται σε επαφή με τον πυθμένα. Η επιρροή που δέχεται από κυματισμούς, ρεύματα και φορτία είναι ελάχιστη. Πρέπει βέβαια να διασφαλιστεί ότι δεν υπάρχουν εμπόδια στην ακολουθούμενη όδευση και ότι η μόνωση δε θα υποστεί φθορά [3], [6].



Εικόνα 1.31: Ρυμούλκηση αγωγού (Towing) [6].

Loading tug= ρυμουλκό φόρτωσης, tension tug= ρυμουλκό δημιουργίας τάσης, pipeline= αγωγός, tugboat= ρυμουλκό, chains= αλυσίδες, ballast tanks= ρυθμιστές πλευστότητας

## 1.5 Αλληλεπίδραση πυθμένα και αγωγού

Ο πυθμένας επηρεάζει τις ακόλουθες παραμέτρους του αγωγού που τοποθετείται πάνω σε αυτόν [7]:

α) Την εγκάρσια σταθερότητα του αγωγού λόγω της επίδρασης των δυνάμεων κυματισμού, τόσο κατά τη φάση της εγκατάστασης όσο και κατά τη φάση της λειτουργίας αυτού. Αναλόγως των δυνάμεων κυματισμού που ασκούνται στον αγωγό, είναι δυνατό να καταπονηθεί όσο βρίσκεται σε στάδιο εγκατάστασης ακόμα και αν δεν έχει ολοκληρωθεί η απόθεσή του στον πυθμένα, καθώς και να επηρεαστεί η θέση του τελικώς αφού η κατασκευή του αγωγού έχει ολοκληρωθεί

β) Την διαστολή του αγωγού, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας κατά τη λειτουργία του, με συνέπεια την εμφάνιση καθολικού λυγισμού, καθώς εξαιτίας των μεταβολών του μήκους, αυτός μετακινείται εγκάρσια.

γ) Την τοποθέτηση του αγωγού στον πυθμένα και τη ρυμούλκησή του επί του πυθμένα.

δ) Την εμφάνιση αιωρούμενων τμημάτων του αγωγού όταν υφίσταται έντονο ανάγλυφο πυθμένα.

Στους υπολογισμούς κατά τη μελέτη αυτών των παραμέτρων κατασκευάζεται ένα μοντέλο αλληλεπίδρασης αγωγού - πυθμένα. Στο μοντέλο αυτό λαμβάνονται υπόψη παράμετροι όπως το μέτρο δυσκαμψίας του πυθμένα, οι δυνάμεις τριβής από τις διαμήκεις και τις εγκάρσιες μετακινήσεις του αγωγού. Η ισοδύναμη αντίσταση της τριβής βασίζεται κυρίως στο νόμο του Coulomb για συνεκτικά (αργιλικά) και μη συνεκτικά (αμμώδη) εδάφη και εξαρτάται από την πυκνότητα του πυθμένα και το βάρος του αγωγού.

Έτσι μελετώνται οι επιπτώσεις της επίδρασης του βυθού στη δομική ακεραιότητα του αγωγού, οι οποίες είναι [7]:

α) Η πρόβλεψη της διείδυσης του αγωγού στον πυθμένα κατά την εγκατάσταση και

κατά τη λειτουργία του.

β) Ο προσδιορισμός της διαμήκους και της εγκάρσιας δύναμης αντίστασης κατά τη μετακίνηση του αγωγού, όταν σε αυτόν ασκούνται τα φορτία λειτουργίας, που προκαλούν μεταβολές στη θερμοκρασία και κατά συνέπεια φαινόμενα διαστολής και συστολής αυτού, ή φορτία κυματισμού. Οι δυνάμεις αυτές που θα εφαρμοστούν στους υπολογισμούς για την εξέταση της σταθερότητας του αγωγού υπό τα προαναφερθέντα φορτία.

γ) Ο προσδιορισμός των παραμέτρων που απαιτούνται για την ανάλυση του φαινομένου του εγκάρσιου λυγισμού και της αξονικής μετακίνησης του αγωγού.

### **1.5.1 Είδη και κατηγοριοποίηση υλικού πυθμένα**

Για την κατασκευή του μοντέλου αλληλεπίδρασης αγωγού-πυθμένα απαιτείται η συλλογή δεδομένων του πυθμένα κατά μήκος της όδευσης του αγωγού. Τα δεδομένα αυτά λαμβάνονται έπειτα από γεωφυσικές και γεωτεχνικές έρευνες, οι οποίες δίνουν τις κατάλληλες πληροφορίες για το χαρακτηρισμό του υλικού του πυθμένα.

Τα εδάφη χαρακτηρίζονται ως χονδρόκοκκα (άμμοι, χαλίκια) ή λεπτόκοκκα (ιλύες, άργιλοι), όταν οι εδαφικοί κόκκοι που τα συνθέτουν έχουν μέγεθος μεγαλύτερο ή μικρότερο από 0,072 mm, αντίστοιχα. Τα εδάφη ακόμα ταξινομούνται και ως συνεκτικά ή μη συνεκτικά ανάλογα με την πλαστικότητα τους. Η καθαρή άμμος για παράδειγμα είναι μη πλαστική και άρα μη συνεκτική, ενώ οι άργιλοι είναι πλαστικά και συνεκτικά εδάφη. Η ιλύς βρίσκεται μεταξύ της αργίλου και της άμμου και είναι ταυτόχρονα λεπτόκοκκη και συνήθως χωρίς πλαστικότητα [7].

Επίσης η συμπεριφορά του εδάφους μελετάται υπό στραγγιζόμενες και αστράγγιστες συνθήκες και εξαρτάται από το ρυθμό επιβολής του φορτίου και τη διαπερατότητά του. Εάν ο ρυθμός είναι γρήγορος, δεν προλαβαίνει να απομακρυνθεί το νερό των πόρων και οι συνθήκες φόρτισης είναι αστράγγιστες. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν ο ρυθμός επιβολής του φορτίου



είναι μικρότερος, οι συνθήκες φόρτισης είναι στραγγισμένες [7].

Γενικά η άργιλος θεωρείται ότι εμφανίζει συμπεριφορά αστράγγιστων συνθηκών, γιατί παρουσιάζει πολύ χαμηλή υδατοπερατότητα. Η συμπεριφορά των αμμωδών εδαφών θεωρείται γενικά στραγγισμένη, γιατί εμφανίζουν μεγάλη υδατοπερατότητα και ο ρυθμός επιβολής φορτίου είναι συνήθως μικρότερος από το ρυθμό με τον οποίο το νερό πόρων μπορεί να μετακινηθεί μέσα ή έξω από κενά μεταξύ των σωματιδίων. Ωστόσο, η συμπεριφορά αμμωδών εδαφών υπό δυναμικές συνθήκες φόρτισης μελετάται υπό αστράγγιστες συνθήκες.

Το Unified Soil Classification System (USCS) είναι ένα αξιόπιστο σύστημα για την περιγραφή των εδαφικών υλικών σε σχέση με έργα αγωγών.

### 1.5.2 Συντελεστής τριβής

Ο νόμος του Coulomb είναι ένας απλός τρόπος για να περιγραφεί η επίδραση της τριβής στις επιφάνειες (π.χ. μεταξύ αγωγού και πυθμένα). Σύμφωνα με αυτόν, η τριβή εξαρτάται από τη δύναμη που ασκεί ο αγωγός στον πυθμένα. Η σχέση της δύναμης τριβής και της δύναμης μεταξύ των σωμάτων είναι μία σταθερά που ονομάζεται συντελεστής τριβής. Η διαμήκης δύναμη τριβής εμφανίζεται όταν ασκούνται αξονικές δυνάμεις στον αγωγό που βρίσκεται πάνω στον πυθμένα [7].

Ο υπολογισμός των συντελεστών τριβής δεν είναι εύκολος. Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές των εκτιμώμενων συντελεστών βρίσκονται στην εικόνα 1.32 [7].

Soil Type	Lateral Coefficient of Friction		Axial Coefficient of Friction	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Noncohesive soils (sand)	0.5	0.9	0.55	1.2
Cohesive soils (clay)	0.3	0.75	0.3	1.0

Εικόνα 1.32: Συντελεστές τριβής συνεκτικών και μη-συνεκτικών εδαφών, [7].

Soil type= είδος εδάφους, noncohesive soils (sand)= μη συνεκτικά εδάφη (άμμος), cohesive

soils (clay)= συνεκτικά εδάφη (άργιλος), lateral coefficient of friction= Πλευρικός συντελεστής τριβής, axial coefficient of friction= Αξονικός συντελεστής τριβής, minimum= ελάχιστο, maximum= μέγιστο

Ο συντελεστής της τριβής και στις δύο διευθύνσεις του αγωγού εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού του πυθμένα και το είδος του φαινομένου που αναλύεται. Είναι σημαντικό να επιλεγεί μια αντιπροσωπευτική τιμή στον συντελεστή, γιατί μερικά φαινόμενα έχουν άμεση σχέση με αυτόν και επηρεάζεται κατά πολύ το αποτέλεσμα του σχεδιασμού.

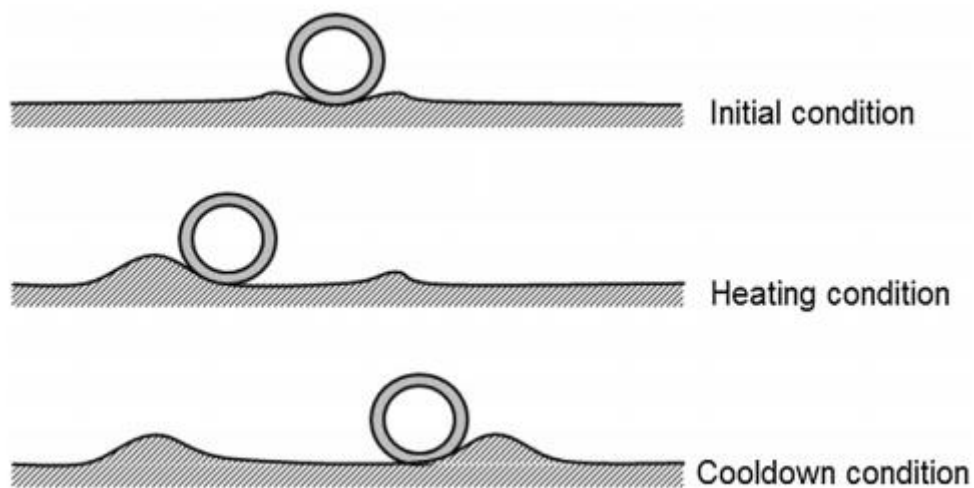
Για παράδειγμα, κατά τον υπολογισμό της διαστολής σε ένα καμπύλο τμήμα αγωγού, μία υψηλή τιμή πλευρικού συντελεστή τριβής έχει σαν αποτέλεσμα να προκύψουν μεγάλες τιμές στη ροπή κάμψης κατά τους υπολογισμούς στα σημεία που το καμπύλο τμήμα συνδέεται με το ευθύγραμμο, ώστε κατ' επέκταση εκεί να υπάρχουν ενδείξεις εμφάνισης λυγισμού. Αν ο πλευρικός συντελεστής τριβής έχει μικρότερη τιμή, διευκολύνεται η μετακίνηση του καμπύλου τμήματος και είναι πιο εύκολο να εμφανιστεί λυγισμός σε τμήμα της καμπύλης και όχι στα σημεία που αυτή συνδέεται με το ευθύγραμμο μέρος του αγωγού.

Ο αξονικός συντελεστής τριβής είναι επίσης πολύ σημαντικός. Για παράδειγμα στην περίπτωση της διαστολής και συστολής του αγωγού, ένας χαμηλός συντελεστής επηρεάζει την μεταβολή του μήκους του αγωγού, η οποία και είναι μεγαλύτερη επομένως οδηγούμαστε σε εντονότερα φαινόμενα εμφάνισης λυγισμού του αγωγού, συγκριτικά με την περίπτωση που θα χρησιμοποιηθεί υψηλότερος πλευρικός συντελεστής τριβής για το ίδιο τμήμα του αγωγού.

Το φαινόμενο βύθισης του αγωγού στον πυθμένα επηρεάζει ελάχιστα τον αξονικό συντελεστή τριβής. Επηρεάζει όμως κατά πολύ το πλευρικό συντελεστή τριβής. Στους πυθμένες με αργιλικά εδαφικά υλικά στα βαθιά νερά, το φαινόμενο μελετάται διεξοδικά διότι έχει άμεση σχέση με την εμφάνιση καθολικού λυγισμού στους αγωγούς [7].

### 1.5.3 Αλληλεπίδραση εδάφους - αγωγού σε θερμική καταπόνηση

Πρόκειται για μία πολύ σημαντική παράμετρο που εξετάζεται κατά το σχεδιασμό των έργων των αγωγών. Δημιουργούνται μοντέλα που περιγράφουν το φαινόμενο λαμβάνοντας υπόψη τη δύναμη της τριβής στην εγκάρσια και αξονική διεύθυνση. Αυτό γίνεται για την εκτίμηση του καθολικού λυγισμού κατά τη φάση λειτουργίας του έργου. Σε αυτή την περίπτωση η χρήση του νόμου του Coulomb για τον υπολογισμό της δύναμης της τριβής κατά την εγκάρσια διεύθυνση δεν κρίνεται επαρκής γιατί είναι υπερβολικά απλός. Όταν υπάρχουν επαναλαμβανόμενες φορτίσεις θερμότητας στον αγωγό από κύκλους λειτουργίας του και πάσης αυτής, συμβαίνει μετακίνηση του αγωγού σύμφωνα με την εικόνα 1.33. Η αξονική δύναμη τριβής μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη το νόμο του Coulomb, αλλά η εγκάρσια δύναμη τριβής είναι μη γραμμική και πρέπει να εξομοιωθεί με τη βοήθεια ενός μοντέλου μη γραμμικής εγκάρσιας αλληλεπίδρασης πυθμένα- αγωγού [7].



Εικόνα 1.33: Μετακίνηση αγωγού υπό κυκλική θερμική φόρτιση [7].

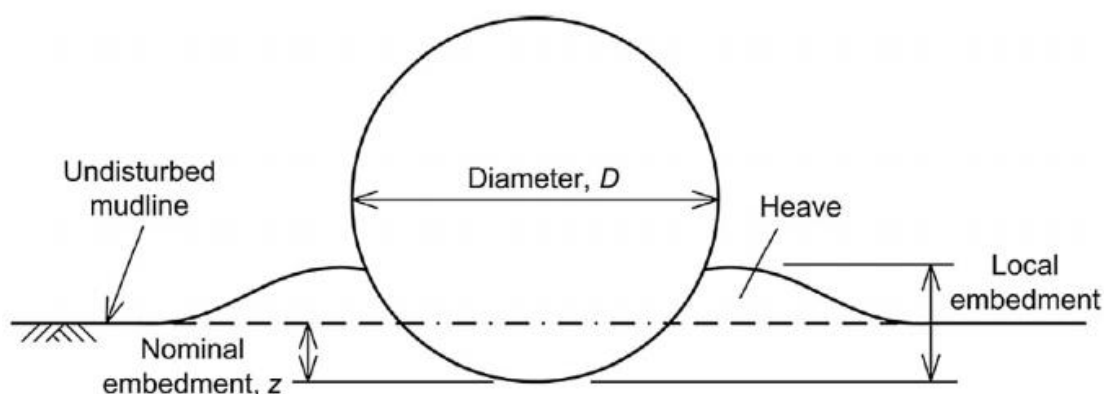
Initial condition= αρχική κατάσταση, heating condition= κατάσταση θέρμανσης (αγωγού), cooldown condition= συνθήκη πτώσης θερμοκρασίας (αγωγού)

### 1.5.4 Διείσδυση αγωγού

Κατά την εναπόθεση του αγωγού στον πυθμένα της θάλασσας, ανάλογα της φέρουσας ικανότητας αυτού, γίνεται διείσδυση του αγωγού στον πυθμένα. Ο υπολογισμός της διείσδυσης είναι πολύ σημαντικός για τη μελέτη διαφόρων φαινομένων αλληλεπίδρασης αγωγού- πυθμένα, γιατί με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται η επιφάνεια επαφής του αγωγού με τον πυθμένα και η αντοχή του εδάφους [7].

Ο πυθμένας στις παρυφές του αγωγού, όταν αυτός βυθίζεται, ανασηκώνεται και αυξάνεται η τοπική διείσδυση του αγωγού και η επιφάνεια επαφής του. Είναι σύνηθες να ανασηκώνεται ο πυθμένας με τον τρόπο που προαναφέρθηκε κατά 50% της πραγματικής κάθετης διείσδυσης του αγωγού [7].

Ο αγωγός εισχωρεί κατακόρυφα στο βυθό μέχρι το σημείο που αυξάνεται η φέρουσα ικανότητα του πυθμένα ώστε να υποστηρίξει το φορτίο του. Η επιφάνεια επαφής είναι κυκλικής διατομής και βαθμιαία αυξάνεται μέχρι το σημείο που σταματάει η εισχώρηση (εικόνα 1.34).



Εικόνα 1.34: Διείσδυση αγωγού στον πυθμένα. [7]

Undisturbed mudline= αδιατάραχτος πυθμένας, heave= σήκωμα, local embedment= τοπική διείσδυση, nominal embedment= πραγματική διείσδυση, diameter= διάμετρος

Η εισχώρηση του αγωγού μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο της φέρουσας ικανότητας του εδάφους του Brinch Hansen, [7] ως εξής:

$$F_u = \alpha N_c + \gamma z N_q + 0.5 \gamma B N_\gamma \quad [1.16]$$

όπου:  $F_u$  = η φέρουσα ικανότητα του εδάφους (τάση),

$\gamma$  = βυθιζόμενη μάζα εδάφους,

$\alpha$  = συνοχή εδάφους,  $S_u$  για άργιλο,

$z$  = εισχώρηση αγωγού,

$D$  = εξωτερική διάμετρος αγωγού,

$B = 2 \times \sqrt{z \times (D - z)}$  για  $z < D/2$ ,

$B = D$  για  $z > D/2$ ,

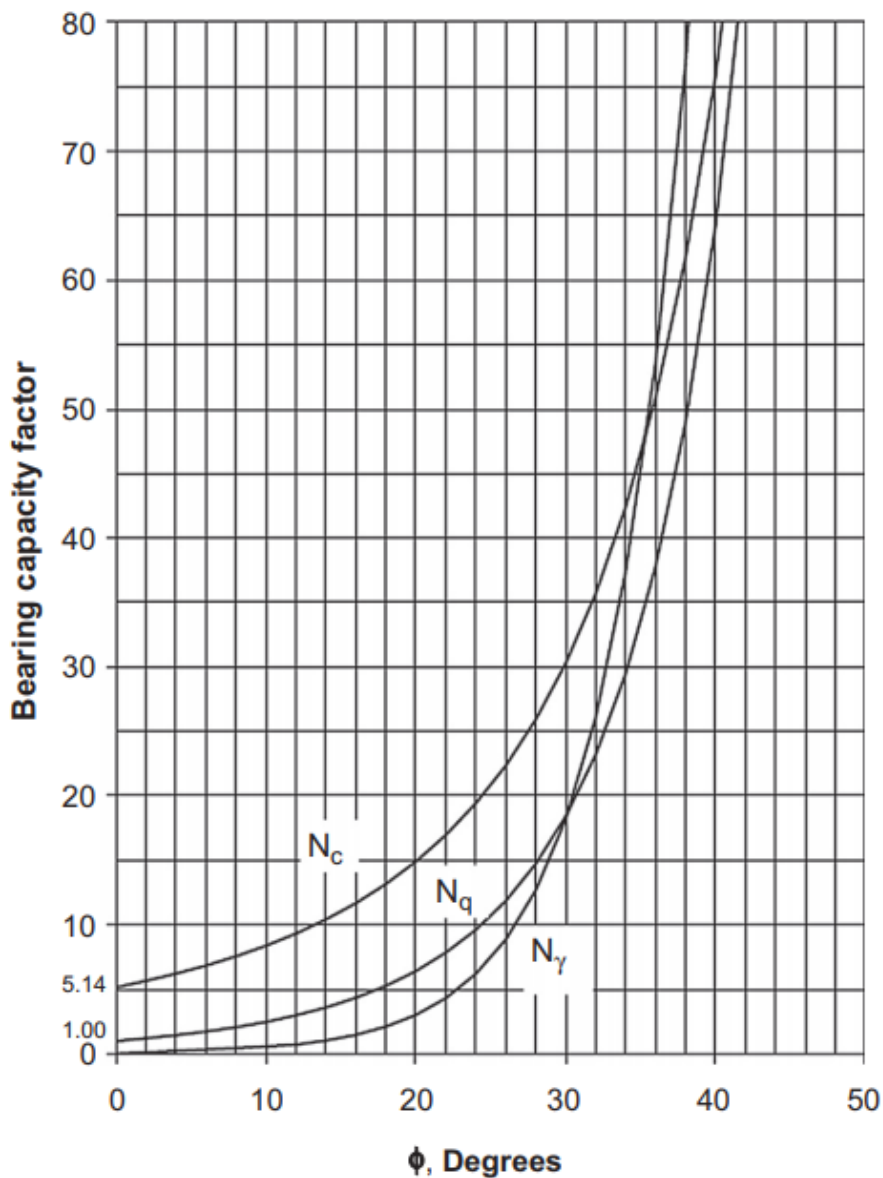
$N_c, N_q, N_\gamma$  = αδιάστατοι συντελεστές φέρουσας ικανότητας που προκύπτουν σε συνάρτηση της γωνίας τριβής  $\phi$  του πυθμένα (εικόνα 1.34).

Για τις αργίλους (συνεκτικά εδάφη) όπου  $\phi=0$ , η συνοχή μπορεί να θεωρηθεί περίπου ίση με τη διατμητική αντοχή  $S_u$  και ο τύπος [1.9] μετασχηματίζεται ως εξής:

$$F_u = S_u N_c + \gamma z \quad [1.17]$$

Για τα μη συνεκτικά εδάφη (αμμώδη) η συνοχή ( $\alpha$ ) είναι μηδενική ο τύπος [1.16] μετασχηματίζεται ως εξής:

$$F_u = \gamma z N_q + 0.5 \gamma B N_\gamma \quad [1.18]$$



Εικόνα 1.35: Συντελεστές φέρουσας ικανότητας εδάφους  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$ . [7].

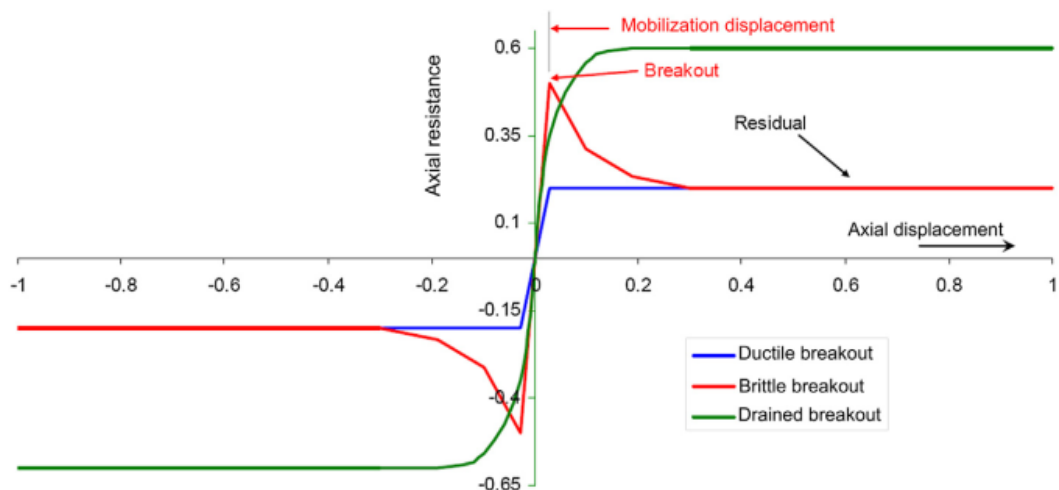
Bearing capacity factor= συντελεστής φέρουσας ικανότητας, degrees= μοίρες

### 1.5.5 Αξονική φόρτιση του αγωγού

Κατά την αξονική διεύθυνση του αγωγού ο κυκλική θερμική καταπόνηση προκαλεί εναλλασσόμενες φάσεις διαστολής και συστολής και αναλόγως της δύναμης τριβής, που αναπτύσσεται μεταξύ του αγωγού και του πυθμένα, είναι πιθανό να συμβεί αξονική μετακίνηση (pipeline walking). Η μετακίνηση αυτή είναι που επιφέρει το φαινόμενο του

καθολικού λυγισμού του αγωγού. Μετά την τοποθέτησή του μέχρι να σταθεροποιηθεί ο αγωγός μπορεί να μετακινηθεί κατά την εγκάρσια διεύθυνση αρκετά. Οι δυνάμεις τις μέγιστης αντίστασης που εμφανίζονται κατά τη μετακίνηση του αγωγού είναι πολύ σημαντικές για το σωστό σχεδιασμό της κατασκευής. Είναι απαραίτητη η εκτίμηση του εύρους των κατώτερων και των ανώτερων τιμών της αντίστασης αυτής εξαιτίας της αβεβαιότητας των ιδιοτήτων του υλικού του πυθμένα σε πολλές περιπτώσεις. Αναλόγως του τρόπου εφαρμογής των καταπονήσεων, για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του αγωγού χρησιμοποιούνται μοντέλα στραγγιζόμενων και αστράγγιστων συνθηκών φόρτισης. Και στις δύο περιπτώσεις έχουμε την εμφάνιση των μέγιστων και των παραμενουσών δυνάμεων αντίστασης [7].

Η δύναμη της διαμήκουσ τριβής εμφανίζει αρκετές εναλλαγές μεγέθους αναλόγως των συνθηκών μετακίνησης του αγωγού (εικόνα 1.36). Αρχικώς, έχουμε τη μεγαλύτερη δύναμη τριβής (οριακή τριβή) κατά την έναρξη της μετακίνησης, η οποία στη συνέχεια μειώνεται (τριβή μετακίνησης) και παραμένει σταθερή. Αν ο αγωγός δεν έχει μετακινηθεί για αρκετό καιρό και η μεταβολή φόρτισης – μετακίνησης (μετατόπισης/displacement) γίνεται αρκετά γρήγορα ώστε να μην συμβαίνει διαφυγή του νερού των πόρων (αστράγγιστες συνθήκες), παρατηρείται ψαθυρή (brittle) συμπεριφορά και η οριακή τριβή (breakout / αστοχία) είναι μεγαλύτερη στην αρχική μετακίνηση, ενώ στα μεταγενέστερα στάδια φορτίσεων-μετακινήσεων του αγωγού η τριβή μειώνεται και παραμένει σταθερή (residual / παραμένουσα). Η απόκριση της αντίστασης σε επόμενες μετακινήσεις έχει εξαρχής πιο ήπια κλίση γεγονός που υποδηλώνει μία όλκιμη (ductile) συμπεριφορά. Αν η μετακίνηση του αγωγού συμβαίνει με ένα πολύ αργό ρυθμό, ώστε να είναι δυνατή η διαφυγή του νερού των πόρων του πυθμένα, τότε υφίσταται κατάσταση στραγγισμένων συνθηκών (drained), με μία αύξηση της τριβής στην περίπτωση αυτή, συγκριτικά με τις αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης. Γενικά σύμφωνα με την [9] ο αξονικός συντελεστής τριβής στις στραγγισμένες συνθήκες είναι 0.6 [7].



Εικόνα 1.36: Αξονικός συντελεστής τριβής [7]

Mobilization displacement= μετατόπιση κινητοποίησης, axial resistance= αξονική αντίσταση, axial displacement= αξονική μετατόπιση, ductile breakout=όλκιμη αστοχία / ήπιο ξεπέρασμα δύναμης τριβής, brittle breakout= ψαθυρή αστοχία / απότομο ξεπέρασμα δύναμης τριβής, drained breakout= αστοχία / ξεπέρασμα δύναμης τριβής στραγγισμένων συνθηκών.

## 1.6 Σταθερότητα αγωγού στον πυθμένα

Οι αγωγοί που βρίσκονται τοποθετημένοι στον πυθμένα της θάλασσας δέχονται αρκετές καταπονήσεις προς όλες τις διευθύνσεις από φορτία κυματισμών και φορτία λειτουργίας. Σε περιπτώσεις μεγάλων φορτίων μπορεί να προκληθεί αποσταθεροποίηση του αγωγού και να προκύψουν καταστάσεις μετακίνησής του ή ακόμα και πλευστότητάς του. Για το λόγο αυτό η σταθερότητα του αγωγού στον πυθμένα είναι κάτι που απασχολεί το σχεδιασμό των έργων, ειδικά όταν οι αγωγοί πρόκειται να τοποθετηθούν σε ρηγά νερά. Στα μεγαλύτερα βάθη, συνήθως εμφανίζουν μεγαλύτερη σταθερότητα στον πυθμένα, λόγω της απουσίας σημαντικών φορτίων κυματισμού. Παρόλα αυτά, οι αγωγοί σε μεγάλα βάθη δέχονται κυκλικές φορτίσεις λειτουργίας και επηρεάζεται η θέση τους. Για το λόγο αυτό απαιτείται επίσης πολύ καλός σχεδιασμός για τη βιωσιμότητα του έργου [7].

Για το μοντέλο αλληλεπίδρασης αγωγού - πυθμένα λαμβάνεται υπόψη το μέτρο δυσκαμψίας του υλικού του πυθμένα και η δύναμη της τριβής που αναπτύσσεται από τη



μετακίνηση του αγωγού. Είναι πολύ σημαντικό να εκτιμηθούν αυτές οι παράμετροι με ακρίβεια. Το φαινόμενο είναι έντονα μη γραμμικό και είναι δύσκολο να περιγραφεί χρησιμοποιώντας ένα απλό μαθηματικό μοντέλο. Για το λόγο αυτό πραγματοποιούνται πολλά πειράματα και εφαρμογές αριθμητικής ανάλυσης.

Ο κύριος στόχος του σχεδιασμού του έργου είναι να επιλεγεί η κατάλληλη όδευση και το είδος του αγωγού για μια αποτελεσματική εγκατάσταση ώστε αυτός να είναι ανθεκτικός στις καταπονήσεις στις οποίες θα υποβληθεί, λαμβάνοντας υπόψη και τον οικονομικό παράγοντα. Σύμφωνα με τα παραπάνω, υπολογίζονται οι ελάχιστες απαιτήσεις της βυθιζόμενης μάζας του αγωγού, η οποία έχει και τεράστια επίδραση στις τάσεις κατά τη διαδικασία της εγκατάστασης καθώς και αυτών που αναπτύσσονται όταν ο αγωγός βρίσκεται τοποθετημένος στον πυθμένα. Από πλευράς εγκατάστασης, ειδικά όταν τα αιωρούμενα τμήματα του αγωγού λόγω έντονου ανάγλυφου του βυθού δεν αποτελούν πρόβλημα, οι μελετητές έχουν γνώμονα την ελαχιστοποίηση της μάζας για την επιλογή των χαρακτηριστικών του αγωγού [7].

### 1.6.1 Κατακόρυφη σταθερότητα αγωγού στον πυθμένα

Σύμφωνα με την [9] για να αποφευχθεί η πλευστότητα του αγωγού πρέπει γενικά να ισχύει:

$$\gamma_w \frac{b}{w_s + b} \leq 1.00 \quad [1.19]$$

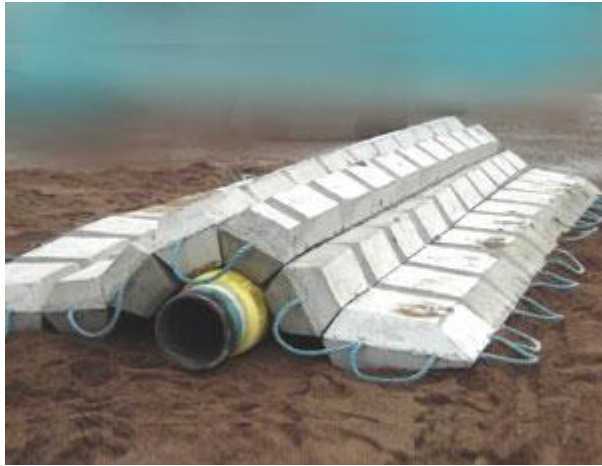
όπου:  $\gamma_w$ = συντελεστής ασφαλείας,  
 $w_s$ = το βυθιζόμενο βάρος του αγωγού ανά μονάδα μήκους,  
 $b$ = η άνωση ανά μονάδα μήκους αγωγού,

Ο συντελεστής ασφαλείας εξαρτάται από τον κυματισμό και τα φορτία στη θέση του αγωγού και συνήθως λαμβάνεται  $\gamma_w=1.1$  όταν ο αγωγός είναι κενός [7].

## 1.7 Τρόποι σταθεροποίησης αγωγού στον πυθμένα

Γενικά η αποσταθεροποίηση ενός υποθαλάσσιου αγωγού προέρχεται από τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτόν, από το νερό και από τις κυκλικά επαναλαμβανόμενες φορτίσεις λειτουργίας του, που προκαλούν διαστολή και συστολή. Για την προστασία του αγωγού από εκτεταμένες μετακινήσεις που επιφέρουν τοπικό λυγισμό λαμβάνονται τα ακόλουθα πρόσθετα μέτρα [7]:

- Η επικάλυψη με σκυρόδεμα. Είναι ένας συνηθισμένος τρόπος για τη βελτίωση της σταθερότητας των αγωγών στον πυθμένα. Το πάχος της στρώσης σκυροδέματος κυμαίνεται από 20 mm έως 120 mm.
- Επειδή με την προηγούμενη μέθοδο αυξάνεται η διάμετρος του αγωγού, γεγονός που με τη σειρά του οδηγεί στην αύξηση των υδροδυναμικών φορτίσεων σε αυτόν, υπάρχει και η επιλογή της χρήσης αγωγού με πιο παχύ κέλυφος για επιπλέον βάρος.
- Σε περίπτωση που το βάθος και το υλικό του πυθμένα το επιτρέπει, μια επιπλέον επιλογή είναι η εναπόθεση του αγωγού σε ένα όρυγμα που έχει δημιουργηθεί για το σκοπό αυτό. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνονται πολύ οι υδροδυναμικές φορτίσεις στον αγωγό.
- Μια ακόμη μέθοδος προστασίας είναι η ρίψη κροκάλας πάνω από τον αγωγό. Η διαδικασία είναι ακριβή, έχει όμως αποτέλεσμα στις περιπτώσεις που επιβάλλεται η προστασία και δεν επιτρέπει το υλικό του πυθμένα την εκσκαφή ορύγματος.
- Επίσης, ειδικά «στρώματα» σκυροδέματος μπορεί να συμβάλλουν στην εξασφάλιση της σταθερότητας του αγωγού, (Εικόνα 1.37).



Εικόνα 1.37 Στρώμα σκυροδέματος [31]

## Κεφάλαιο 2

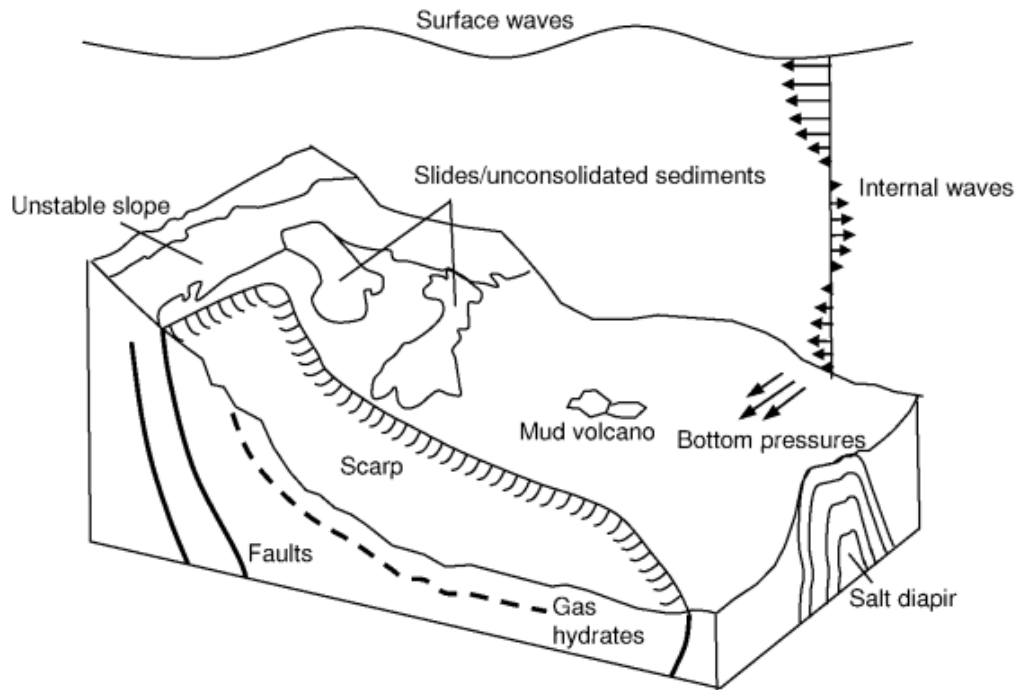
### Γεωκίνδυνος

#### Σύνοψη

Την τελευταία δεκαετία τα υποθαλάσσια τμήματα αγωγών βρίσκονται πλέον σε πολύ μεγάλα βάθη και συχνά διασχίζουν περιοχές στις οποίες λαμβάνουν χώρα επικίνδυνα γεωλογικά φαινόμενα τα οποία πιθανόν να επηρεάσουν τη λειτουργία και την ακεραιότητα των συστημάτων των αγωγών. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους γεωκινδύνους που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό των έργων των αγωγών.

#### 2.1 Υποθαλάσσιοι γεωκίνδυνοι

Οι υποθαλάσσιοι γεωκίνδυνοι είναι δυσμενείς καταστάσεις, που εμφανίζονται στον πυθμένα και συνδέονται με επικίνδυνα γεωλογικά φαινόμενα, οι οποίες με τη σειρά τους μπορεί να δημιουργήσουν πρόβλημα στις κατασκευές (εικόνα 2.1). Παραδείγματα γεωκινδύνων αποτελούν οι κατολισθήσεις, τα ρήγματα, η απότομη αποβολή αερίων του υπεδάφους και η ρευστοποίησή του, καθώς και η μεταβολή του ανάγλυφου του πυθμένα λόγω πολύ μεγάλων φορτίσεων. Αφορμή για την εκδήλωση των φαινομένων αυτών μπορεί να αποτελούν και άλλοι παράγοντες, όπως πχ. οι σεισμοί, οι καταιγίδες επιφανείας, η ανθρώπινη δραστηριότητα κλπ. [14].



Εικόνα 2.1: Απεικόνιση υποθαλάσσιων γεωκινδύνων [14].

Surface waves= επιφανειακά κύματα, unstable slope= ασταθές πρηνές, scarp= γκρεμός, mud volcano= ηφαίστειο λάσπης, bottom pressures= πιέσεις πυθμένα, slides/unconsolidated sediments= κατολισθήσεις/μη στερεοποιημένα ιζήματα, internal waves= κύματα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, salt diapir= διάπυρο άλατος

Οι επιπτώσεις των γεωκινδύνων είναι μεγαλύτερες στα βαθιά νερά και για το λόγο αυτό ο σχεδιασμός των έργων των αγωγών έναντι αυτών μπορεί να αυξήσει κατά πολύ το κόστος τους [14].

Για τα περισσότερα έργα οι γεωκίνδυνοι είναι συνδεδεμένοι με την επικινδυνότητα εμφάνισής τους, για να υπάρχει ένα μέτρο σύγκρισης με άλλης φύσης δυσκολίες του έργου. Η επικινδυνότητα (risk) εξαρτάται από τον κίνδυνο και τη συχνότητα που αυτός εμφανίζεται και εξαρτάται κατά πολύ από την τοποθεσία.[14], [15].

Τα υποθαλάσσια πρηνή αποτελούν ένα φυσικό γεωκίνδυνο επειδή υπάρχει η πιθανότητα να γίνουν ασταθή και να οδηγήσουν σε φαινόμενα κατολισθήσεων, όπου μεγάλες μάζες εδάφους μετακινούνται εξαιτίας της βαρύτητας. Φαινόμενα κατολισθήσεων συμβαίνουν στο υποθαλάσσιο περιβάλλον ακόμα και με πολύ μικρές κλίσεις υποθαλάσσιων πρηνών (ακόμα και  $0.5^{\circ}$ ) [14].

Επίσης τα σειсмоγενή ρήγματα, που είναι αποτέλεσμα της τεκτονικής παραμόρφωσης του φλοιού της γης, μπορεί να οδηγήσουν σε πολύ ισχυρούς σεισμούς, με αποτέλεσμα την εμφάνιση νέων ρηγμάτων του πυθμένα. Οι πολύ μεγάλες τεκτονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια των σεισμών μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε φαινόμενα ρευστοποίησης του εδάφους και στην εμφάνιση μεγάλων διατμητικών τάσεων στον πυθμένα. Τα μη τεκτονικά ρήγματα δεν αποτελούν αιτία εμφάνισης σεισμών, αλλά μπορεί να οδηγήσουν σε παραμόρφωση τους πυθμένα λόγω ελαφριάς ή ξαφνικής μετακίνησης μαζών του εδάφους. Και οι δύο τύποι ρηγμάτων μπορεί να επιβάλλουν μεγάλα φορτία στις κατασκευές [14].

Σε διάφορες περιοχές υπάρχουν μεγάλες ποσότητες αποθέσεων άλατος στον πυθμένα. Αυτές η περιοχές εμφανίζουν μεγάλη κινητικότητα γιατί οι σχηματισμοί άλατος έχουν μικρό ειδικό βάρος με αποτέλεσμα να μην είναι ιδιαίτερα σταθερές. Το αλάτι έχει την τάση να αναδύεται από τα υπερκείμενα ιζήματα και να σχηματίζει θόλους ή στήλες, που σε μέγεθος κυμαίνονται από 1 km έως 10 km κάτω από τον πυθμένα (διάπυρα άλατος ή αλατούχοι δόμοι). Η κίνηση ενός διάπυρου άλατος, προς τα πάνω, οδηγεί σε μεγάλη αύξηση των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια του διαπύρου και των υπερκείμενων στρωμάτων του πυθμένα [14].

Ένας γεωκίνδυνος ο οποίος συναντάται συχνά είναι οι απότομες διαφυγές αερίου (π.χ. μεθάνιο) που βρίσκεται παγιδευμένο σε ρηχούς βυθούς με ιζηματογενείς αποθέσεις του πυθμένα. Το αέριο βρίσκεται με τη μορφή διαλύματος στο νερό των πόρων του βυθού και με την αύξηση της θερμοκρασίας, ή τη μείωση της πίεσης, προκύπτει η διαστολή του και η απότομη αύξηση της πίεσης των πόρων. Στη συνέχεια διαχωρίζεται το αέριο από το νερό και η γρήγορη αύξηση της πίεσης πόρων οδηγεί σε φαινόμενα ρευστοποίησης [14].

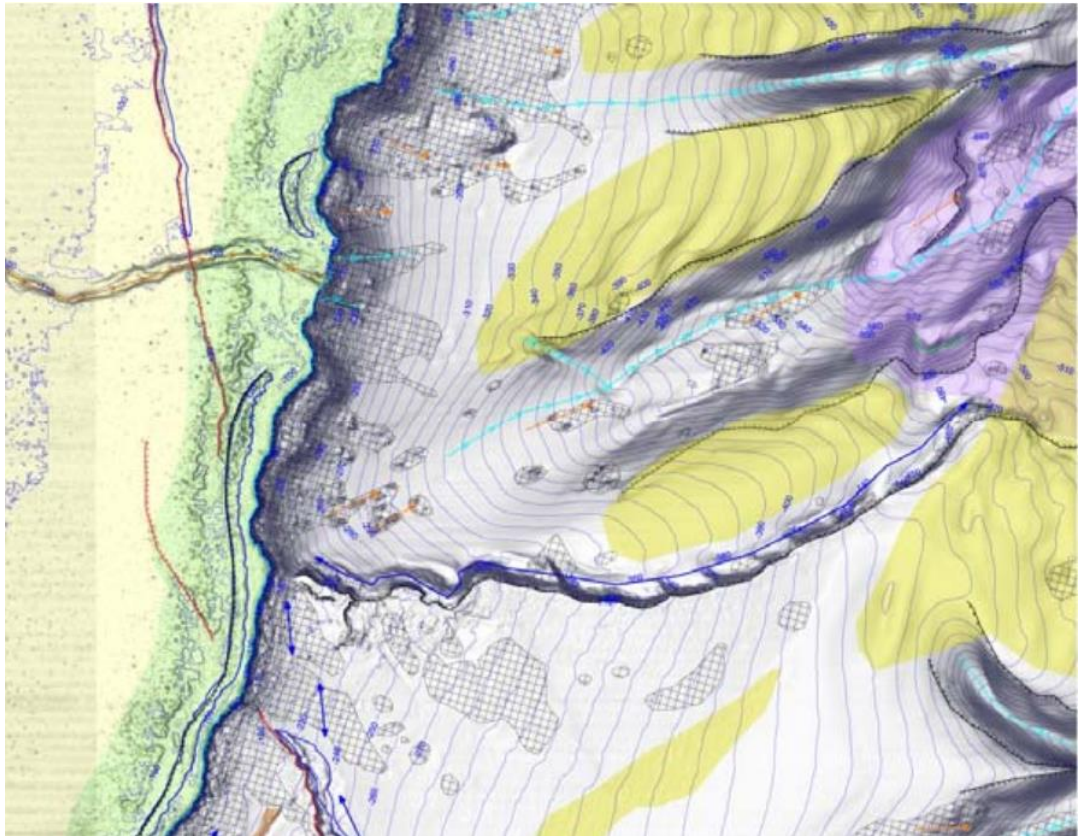
Οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν σε μία περιοχή μπορούν να επηρεάσουν τον πυθμένα των θαλασσών. Τα επιφανειακά κύματα καθώς μετακινούνται ασκούν μία

επαναλαμβανόμενη κυκλική πίεση και διατμητικές τάσεις στο βυθό, οδηγώντας στην αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων των ιζημάτων. Το μέγεθος των πιέσεων αυτών εξαρτάται από το ύψος, το μήκος των κυμάτων, καθώς και από το βάθος της θάλασσας. Όσο αυξάνεται το βάθος τόσο μειώνονται οι επιπτώσεις του κυματισμού και για το λόγο αυτό αυτές είναι εντονότερες σε βάθη μικρότερα των 150 m. Παρόλα αυτά, μεγάλα κύματα από καταιγίδες επιφανείας πιθανόν να επηρεάσουν τις αποθέσεις του πυθμένα σε μεγαλύτερα βάθη [14].

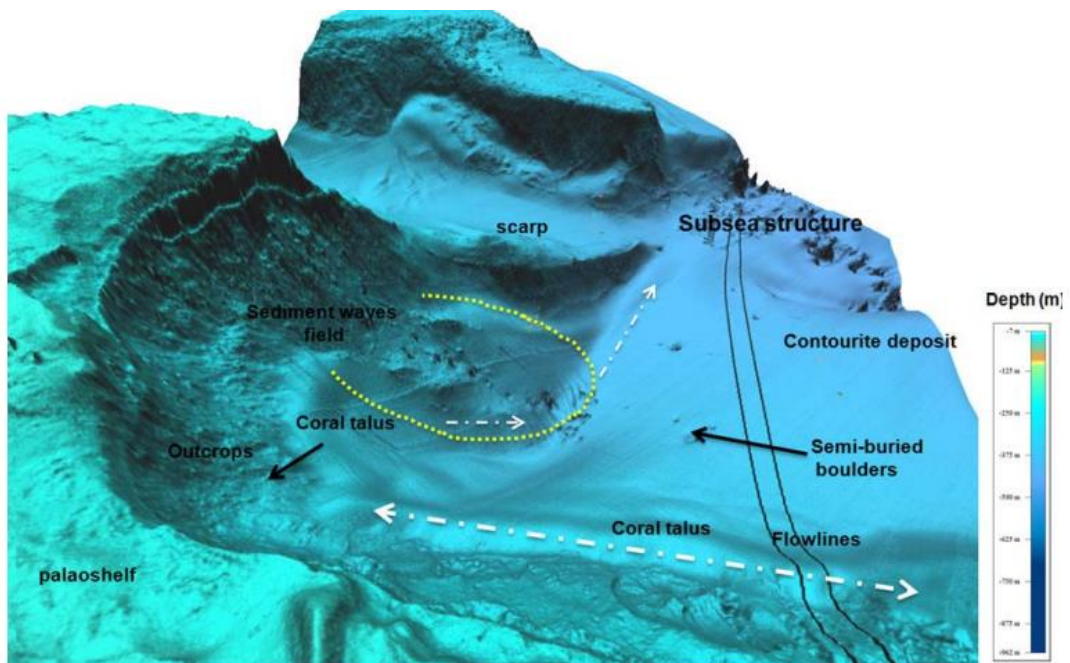
## **2.2 Εντοπισμός των γεωκινδύνων**

Για την έρευνα των γεωλογικών κινδύνων κατά το σχεδιασμό των έργων είναι πολύ σημαντικό να κατανοηθούν οι γεωμορφολογικές συνθήκες που μπορεί να οδηγήσουν σε επικίνδυνες καταστάσεις, καθώς επίσης και να αξιολογηθεί γεωτεχνικά ο ρυθμός εξέλιξής τους και η χρονολογική πιθανότητα εμφάνισής τους. Οι πρωταρχικοί στόχοι λοιπόν των μελετητών είναι οι εξής:

- α) Η χαρτογράφηση και η αξιολόγηση των ιδιοτήτων του πυθμένα μέσα από ένα ευρύ γεωλογικό φάσμα (Εικόνα 2.2).
- β) Ο εντοπισμός πιθανών γεωκινδύνων (Εικόνα 2.3).
- γ) Η εκτίμηση του χρόνου εμφάνισης και της περιοδικότητας των πιθανών δυσμενών καταστάσεων.



Εικόνα 2.2. Χαρτογράφηση πυθμένα [17].



Εικόνα 2.3: Απεικόνιση 3D πιθανών γεωκινδύνων σε κοραλλιογενή ύφαλο [17].

Scarp= γκρεμός, outcrops=προεξοχές, coral talus= κοραλλιογενής επικαθήσεις, sediment waves field= πεδίο ιζημάτων κυμάτων, contourite deposit= περιφερειακές επικαθήσεις, subsea



structure= υποθαλάσσια κατασκευή, flowlines= γραμμές ροής, semi-buried boulders= σχεδόν θαμμένοι ογκόλιθοι

Η έρευνα επικεντρώνεται σε αυτούς τους τρεις άξονες. Η πρόσφατη πρόοδος στη χαρτογράφηση του πυθμένα σε συνδυασμό με τις σεισμικές έρευνες οδηγούν σε ένα πολύ λεπτομερή προσδιορισμό της μορφολογίας του πυθμένα. Με τη βοήθεια των σύγχρονων σόναρ πολλαπλών ακτινών, τα οποία και έχουν αναπτυχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια και είναι πλέον τα πιο σύγχρονα εργαλεία υπερήχων για απομακρυσμένες παρατηρήσεις, συλλέγονται τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του βυθού, εντάσσονται στο σύστημα GIS και καταγράφονται οι πιθανοί γεωκίνδυνοι στην περιοχή εκτέλεσης των εργασιών. Επίσης καταβάλλεται κάθε δυνατή προσπάθεια για να εφαρμοστούν νέες μεθοδολογίες για την εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης μελλοντικών γεωλογικών κινδύνων [17].

Επειδή ο πυθμένας βρίσκεται σε μια διαδικασία σχεδόν σταθερής ιζηματογένεσης (nearly constant sedimentation), τυχόν γεωκίνδυνοι πιθανόν να είναι καλυμμένοι από ιζήματα. Όταν είναι γνωστός ο ρυθμός των ιζηματογενέσεων μπορεί να προσδιοριστεί η περιοδικότητα των διαφόρων μεταβολών του πυθμένα. Αυτό συμβάλλει στο σωστό σχεδιασμό των έργων αναφορικά με τη θέση και τον τρόπο κατασκευής τους που μπορεί να επηρεάσει το κόστος [16].

### **2.3 Επιπτώσεις των γεωκινδύνων**

Οι υποθαλάσσιοι γεωκίνδυνοι συχνά έχουν σαν αποτέλεσμα τη μετακίνηση του πυθμένα και την ανάπτυξη έντονων καθιζήσεων. Αυτές οι μετακινήσεις έχουν σοβαρές επιπτώσεις στις κατασκευές. Ο όγκος του εδάφους που επηρεάζεται, κυμαίνεται από μερικές δεκάδες m<sup>3</sup> έως χιλιάδες km<sup>3</sup>, με επιπτώσεις που μπορεί να φτάσουν και στην πλήρη αστοχία των έργων. Πολύ μεγάλες μετακινήσεις όγκων του υλικού του πυθμένα πιθανόν να προκαλέσουν τσουνάμι, με καταστροφικά αποτελέσματα [14].

Το είδος των συνεπειών εξαρτάται από τη φύση του γεωκινδύνου. Η αστοχία των

πρανών οδηγεί στην έλλειψη υποστήριξης της κατασκευής με αποτέλεσμα την καταστροφή ή το θάψιμο των υποδομών. Η σεισμική δραστηριότητα μπορεί να οδηγήσει σε μετακινήσεις κατά μήκος των ρηγματών και σε μεγάλες καταπονήσεις στα ιζήματα του πυθμένα. Αυτές οι τάσεις προκαλούν αστάθεια των πρανών ή φαινόμενα ρευστοποίησης. Η παραμόρφωση των ιζηματογενών αποθέσεων κοντά στον πυθμένα από τα διάπυρα άλατος, τα ηφαίστεια λάσπης και τη διάβρωση του βυθού καταπονούν έντονα τις εκάστοτε υποθαλάσσιες κατασκευές [14].

Κατά το σχεδιασμό των έργων των υποθαλάσσιων αγωγών, η εκτίμηση των γεωκινδύνων γίνεται στην όδευση που αυτοί ακολουθούν. Διερευνώνται οι περιοχές πιθανής αστάθειας του πυθμένα καθώς και αυτές που εμφανίζουν δυσκολίες λόγω θαλασσίων ρευμάτων και λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα προφύλαξης.

## **2.4 Εκτίμηση επικινδυνότητας**

Οι γεωλογικοί υποθαλάσσιοι κίνδυνοι είναι ένα πολύ σημαντικό αντικείμενο για την βιομηχανία των αγωγών και αποτελούν ένα συνεχώς αναπτυσσόμενο τομέα έρευνας της υποθαλάσσιας γεωλογίας, με κύριο στόχο την πρόβλεψη και την ελαχιστοποίηση του κινδύνου σε μία νέα κατασκευή. Επειδή η φύση των κινδύνων αυτών είναι περίπλοκη, η προαναφερθείσα πρόβλεψη απαιτεί τη συνεργασία επιστημόνων διαφόρων κλάδων. Για το λόγο αυτό έχει επινοηθεί ένας τρόπος να συγκρίνονται οι υπόψη κίνδυνοι με λοιπές αστοχίες που μπορεί να προκύψουν και είναι διαφορετικής φύσης. Οι αστοχίες αυτές μπορεί να είναι δομικές, λειτουργικές, γεωτεχνικές, γεωλογικές, ή συνδυασμός αυτών. Για τα έργα των αγωγών οι διάφορες μορφές κινδύνων, ώστε να συγκρίνονται απευθείας μεταξύ τους, προκύπτουν από τη σχέση του είδους του κινδύνου με τη συχνότητα που αυτός εκτιμάται ότι μπορεί να εμφανιστεί. Με τον τρόπο αυτό συνεκτιμούνται από τους εμπειρογνώμονες οι διάφορες πιθανότητες αστοχίας [14], [15].

Στην εν λόγω διαδικασία ενίοτε κυριαρχούν οι πολύ καταστροφικοί κίνδυνοι μικρής

πιθανότητας - συχνότητας εμφάνισης. Αρχικώς σε αυτές τις περιπτώσεις καταβάλλεται μία προσπάθεια να αποδειχθεί ότι η πιθανότητα να εκδηλωθεί το συμβάν είναι μικρή. Στη συνέχεια, εκτιμάται η επιρροή του συμβάντος στην κατασκευή και εξετάζεται ότι η βλάβη που θα προκαλέσει θα έχει αποδεκτό οικονομικό κόστος [14].

Κατά την διερεύνηση των πιθανών γεωκινδύνων, μία από τις πιο κοινές αβεβαιότητες στην γεωτεχνική ανάλυση αποτελεί η γνώση της διατμητικής αντοχής των ιζημάτων του πυθμένα στην περιοχή διέλευσης των αγωγών. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά τη διάρκεια κατασκευής και λειτουργίας του έργου μεταβάλλεται η πίεση του νερού των πόρων και κατά συνέπεια η αντοχή του υλικού του πυθμένα. Έτσι μελετάται το έργο λαμβάνοντας υπόψη ένα εύρος ιδιοτήτων πυθμένα και γίνεται η υπόθεση ότι κατά τη διάρκεια ζωής του έργου θα υπάρξει η εκδήλωση γεωκινδύνου [14].

## **2.5 Υποθαλάσσιες κατολισθήσεις**

Η πιθανότητα εμφάνισης υποθαλασσιών κατολισθήσεων αποτελεί ίσως το μεγαλύτερο υποθαλάσσιο γεωλογικό κίνδυνο. Τα χαρακτηριστικά των πρηνών στο περιβάλλον της θάλασσας διαφέρουν κατά πολύ από αυτά της ξηράς. Συχνά παρατηρείται αστοχία σε πρηνή στη θάλασσα που έχουν ελάχιστη κλίση της τάξης των  $2^0$ . Το πιο σημαντικό στοιχείο βέβαια των υποθαλασσιών κατολισθήσεων είναι το μέγεθός τους (το μήκος και το πλάτος ανάπτυξής τους), το οποίο είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με τις χερσαίες κατολισθήσεις. Μερικές χαρτογραφημένες κατολισθήσεις παρουσιάζουν τεράστιες διαστάσεις. Μία πολύ γνωστή και μελετημένη κατολίσθηση είναι αυτή της Storegga (εικόνα 2.4) η οποία εκτείνεται σε μήκος 300 km κατά μήκος της υφαλοκρηπίδας της ακτής της Νορβηγίας. Το πλάτος της ανέρχεται σε 800 km περίπου και περιλαμβάνει  $5.600 \text{ km}^3$  όγκου ιζημάτων που καλύπτουν επιφάνεια  $34.000 \text{ km}^2$ . Παρόλο που η κατολίσθηση της Storegga είναι από τις μεγαλύτερες καταγεγραμμένες, το μέγεθος αυτών που συμβαίνουν σε όλη τη γη είναι συνήθως πολύ

μεγάλο. Το πρόβλημα στην περίπτωση τέτοιων κατολισθήσεων είναι ότι ο μηχανισμός δημιουργίας τους δεν έχει κατανοηθεί πλήρως από τους επιστήμονες. Σε πολλές περιπτώσεις θεωρείται ότι προκλήθηκαν από υψηλή πίεση του νερού των πόρων λόγω ταχείας καθίζησης ιζημάτων [16].

Η εξέλιξη της κατολίσθησης μετά την εκδήλωσή της εξαρτάται από την αρχική πυκνότητα των ιζημάτων και το ποσό της ενέργειας που μεταφέρθηκε σε αυτά κατά την διάρκειά της. Τα πορώδη υλικά συστέλλονται κατά τη διάτμησή τους. Σε αστράγγιστες συνθήκες αυτή η μεταβολή του όγκου προκαλεί αύξηση της πίεσης των πόρων με παράλληλη μείωση της αντοχής του υλικού. Επίσης, ένας παράγοντας που θεωρείται ότι συντείνει στο φαινόμενο των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων είναι η ύπαρξη αερίων με τη μορφή διαλύματος στο νερό, που επηρεάζει κατά πολύ την αντοχή των υλικών του βυθού [16].



Εικόνα 2.4 Υποθαλάσσια κατολίσθηση Storegga [16].



## Κεφάλαιο 3

### Μη Γραμμική Ανάλυση- Πεπερασμένα Στοιχεία

#### Σύνοψη

Η μέθοδος που ασχολείται με την επίλυση προβλημάτων σε διάφορους επιστημονικούς κλάδους είναι η αριθμητική ανάλυση. Τα γραμμικά ή μη γραμμικά συστήματα αποτελούν ένα είδος των προβλημάτων που λύνονται με αριθμητική ανάλυση, η οποία με τη χρήση των κατάλληλων αλγορίθμων παρέχει τον αντίστοιχο αριθμητικό υπολογισμό των άγνωστων ποσοτήτων. Η ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών τις τελευταίες δεκαετίες έχει συμβάλει στη διάδοση της χρήσης των αριθμητικών μεθόδων, οι οποίες με τη σειρά τους βοηθούν στη μελέτη διαφόρων καταστάσεων των κατασκευών. Μία κατασκευή χωρίζεται σε πλήθος επιμέρους γεωμετρικά απλούστερων στοιχείων, που ονομάζονται πεπερασμένα. Με τη βοήθεια των αριθμητικών αναλύσεων της συμπεριφοράς των πεπερασμένων στοιχείων, εκτιμάται η απόκριση του συνολικού φορέα μας όταν υπόκειται σε διάφορες φορτίσεις.

#### 3.1 Γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα

Γραμμικά είναι τα συστήματα εξισώσεων των οποίων η λύση αν αποτυπωθεί σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων παριστάνει μία ευθεία γραμμή. Η γραμμική ανάλυση των προβλημάτων είναι συντομότερη από τη μη γραμμική. Και οι 2 τύποι αναλύσεων στην περίπτωση των κατασκευών μπορούν να παρέχουν μία εκτίμηση της συμπεριφοράς τους υπό διάφορες φορτίσεις.

Στη γραμμική ανάλυση επιβάλλεται απευθείας το σύνολο των φορτίσεων για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του φορέα. Με τη βοήθεια της μη γραμμικής ανάλυσης εκτιμάται η συμπεριφορά των κατασκευών κατά τη σταδιακή επιβολή των εκάστοτε φορτίων και περιγράφεται πιο διεξοδικά ο μηχανισμός της κατάρρευσης. Οι φορτίσεις αυξάνονται και

επιβάλλονται σε μικρά βήματα, μέχρι να πάρουν τη μέγιστη τιμή τους. Κατά τη διάρκεια της σταδιακής αύξησης των φορτίων γίνεται διαρκώς θεωρητική ανακατανομή των τάσεων στα δομικά στοιχεία και με τον τρόπο αυτό καταδεικνύεται η περιοχή της αστοχίας της κατασκευής. Η μη γραμμική ανάλυση, που πραγματοποιείται με τη χρήση υπολογιστών, χρειάζεται μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ και για το λόγο αυτό είναι περισσότερο χρονοβόρα από τη γραμμική ανάλυση [20].

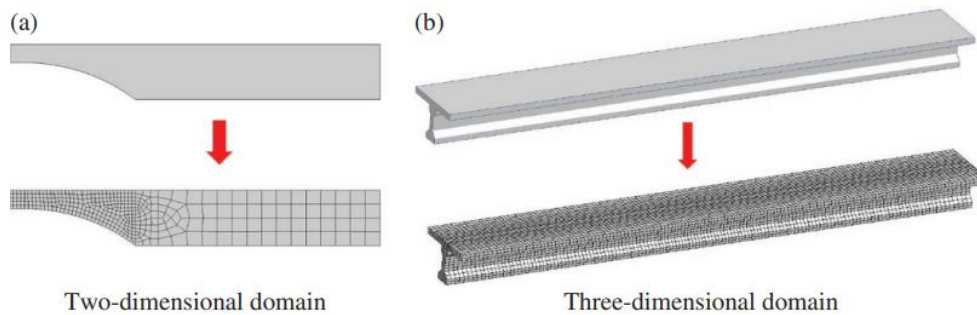
Με τη μη γραμμική ανάλυση είναι εφικτό να υλοποιηθούν πολύ καλές προσομοιώσεις διαφόρων καταστάσεων και προβλημάτων των κατασκευών. Μέσω αυτών μπορεί να προβλεφθεί με αξιοπιστία η συμπεριφορά των κατασκευών σε διάφορες καταπονήσεις. Κατά τη σταδιακή επιβολή μεγαλύτερων τάσεων, όταν ξεπερνιέται το όριο διαρροής του υλικού είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η ανελαστική συμπεριφορά του υλικού, με τη χρήση καταλλήλων ρουτινών λογισμικού [20].

Τόσο στη γραμμική όσο και στη μη γραμμική ανάλυση της συμπεριφοράς των κατασκευών ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Η δημιουργία του φορέα της κατασκευής,
- Ο σχηματισμός καταλλήλου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων του φορέα,
- Η επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας των πεπερασμένων στοιχείων.

### **3.2 Πεπερασμένα στοιχεία**

Όπως προαναφέρθηκε, το βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται εδώ και αρκετά χρόνια για την ανάλυση της συμπεριφοράς των κατασκευών είναι η υποδιαίρεση - διακριτοποίηση του γεωμετρικού σχήματος του φορέα σε επιμέρους στοιχεία (εικόνα 3.1). Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων έχει άμεση σχέση με τον αριθμό και τις διαστάσεις των επιμέρους αυτών στοιχείων και για το λόγο αυτό ο μελετητής πρέπει να έχει την εμπειρία να επιλέξει σε κάθε περίπτωση το σωστό μέγεθος τους [19].



Εικόνα 3.1: Παραδείγματα διακριτοποίησης φορέα [19].

Two-dimensional domain= τομέας 2 διαστάσεων, three-dimensional domain= τομέας 3 διαστάσεων.

Τα στοιχεία υποδιαίρεσης του φορέα συνδέονται μεταξύ του με κόμβους, στους οποίους είναι δυνατό να οριστούν κάποιες συνθήκες, όπως φορτίσεις, βαθμοί ελευθερίας, μετακινήσεις ή στροφή. Όσο πιο λεπτομερής και μεγαλύτερη είναι η διακριτοποίηση του φορέα, δηλαδή όσο περισσότερα πεπερασμένα στοιχεία προκύπτουν, τόσο καλύτερα προσεγγίζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συμβάντος, το πραγματικό γεγονός. Όλες οι μετατοπίσεις που λαμβάνουν χώρα στα στοιχεία του φορέα είναι ίδιες με τις μετατοπίσεις στους αντίστοιχους κόμβους. Έτσι προκύπτει ένα πλήθος μετακινήσεων, που είναι πεπερασμένο.

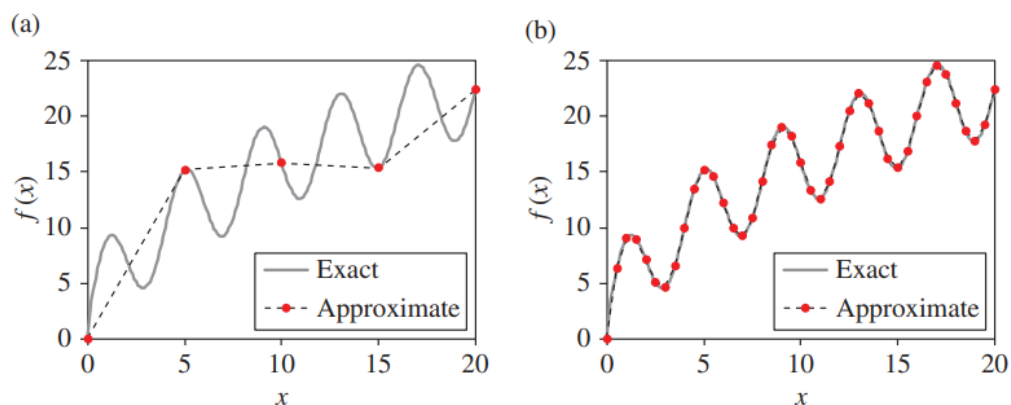
Κατά τη μη γραμμική ανάλυση πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας του φορέα σε όλες τις φάσεις της επιβολής φορτίου. Εδώ υπεισέρχεται ο παράγοντας χρόνος, που στην πραγματικότητα περιγράφει το επίπεδο των επιβαλλόμενων φορτίων. Όλες οι μεταβλητές έχουν υπολογιστεί από τη χρονική στιγμή 0 έως την 1<sup>η</sup> χρονική υποδιαίρεση επιβολής φορτίου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για την επόμενη χρονική υποδιαίρεση της επιβολής του φορτίου [20].



### 3.3 Ακρίβεια των αποτελεσμάτων

Κατά τη διάρκεια της υπολογιστικής προσομοίωσης εκτελούνται επαναλαμβανόμενες ρουτίνες υπολογισμών τα αποτελέσματα των οποίων αποκλίνουν (κάπως) από τα θεωρητικά αποτελέσματα των αρχικών μαθηματικών τύπων. Εδώ εμφανίζεται ο παράγοντας της προσέγγισης, που προκύπτει από τη διαφορά ανάμεσα στις τιμές των αποτελεσμάτων με τη χρήση της προσομοίωσης και στις τιμές σύμφωνα με τη θεωρία και τη χρήση των μαθηματικών τύπων. Όσο μικρότερη είναι η διαφορά αυτών των δύο τιμών, δηλαδή το σφάλμα, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια έχουν τα αποτελέσματα.

Το σφάλμα δείχνει την ποιότητα της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε. Στην εικόνα 3.2 απεικονίζεται η γραφική παράσταση της συνάρτησης  $f(x)$  για τιμές  $x=0$  έως  $x=20$ . Παρατηρείται ότι αν χρησιμοποιηθεί διακριτοποίηση  $\Delta x=5$  (a περίπτωση) η αναπαράσταση της καμπύλης με τη χρήση των τιμών κάθε διακριτού βήματος δεν είναι ικανοποιητική. Εάν αυξηθεί το πλήθος των διακριτών βημάτων ( $\Delta x=0.5$ , b περίπτωση) η αναπαράσταση της καμπύλης με τη χρήση των τιμών κάθε βήματος είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα. Όσο αυξάνεται το πλήθος των βημάτων τόσο περισσότερο προσεγγίζουν τα αποτελέσματα την πραγματική καμπύλη. Έτσι, όταν η τιμές των προσεγγίσεων της προσομοίωσης πλησιάζουν τις πραγματικές έχουμε σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι για να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα από τη χρήση της προσομοίωσης τα αποτελέσματά της πρέπει να συγκλίνουν [19].



Εικόνα 3.2: Γραφική παράσταση συνάρτησης  $f(x)$  [19].

Exact= ακριβής, Approximate= κατά προσέγγιση

### 3.4 Αλγόριθμοι αριθμητικής επίλυσης προβλημάτων

Για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός φορέα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η συνθήκη ισορροπίας πρέπει να ικανοποιεί την ακόλουθη σχέση [20]:

$$R^t - F^t = 0, \quad [3.1]$$

όπου:  $R^t$ = το διάνυσμα των εξωτερικών δράσεων σε κάθε κόμβο

$F^t$ = οι δυνάμεις σε κάθε κόμβο σύμφωνα με τις τάσεις σε κάθε χρονική στιγμή  $t$  παραμόρφωσης

Η φόρτιση επιβάλλεται σταδιακά στη μη γραμμική ανάλυση, σε χρονικές υποδιαίρεσεις (βήματα) το χρόνου επιβολής της συνολικής φόρτισης. Σύμφωνα με αυτόν τον τρόπο επίλυσης, αναζητείται η λύση της χρονικής στιγμής  $t+\Delta t$ , ενώ η λύση σε χρόνο  $t$  είναι ήδη γνωστή. Η σχέση [3.1] για την επόμενη στιγμή της φόρτισης ( $t+\Delta t$ ) λοιπόν γίνεται:

$$R^{t+\Delta t} - F^{t+\Delta t} = 0, \quad [3.2]$$

όπου:  $R^{t+\Delta t}$ = το διάνυσμα των εξωτερικών δράσεων ,

$F^{t+\Delta t}$ = το διάνυσμα των δυνάμεων σε κάθε κόμβο σύμφωνα με τις αναπτυσσόμενες τάσεις στο χρόνο  $t+\Delta t$ , το οποίο εκφράζεται ως αύξηση του διανύσματος των δυνάμεων στο χρόνο  $t$ :

$$F^{t+\Delta t} = F^t + F, \quad [3.3]$$

όπου:  $F$ = η επαύξηση του διανύσματος των δυνάμεων στον κόμβο,

$F^t$ = οι δυνάμεις σε κάθε κόμβο σύμφωνα με τις τάσεις σε κάθε χρονική στιγμή  $t$  παραμόρφωσης.

Με την αύξηση των επικόμβιων δυνάμεων αυξάνονται οι μετατοπίσεις και οι τάσεις. Από το διάνυσμα της επαύξησης των επικόμβιων δράσεων μπορεί να προσεγγιστεί το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας  $K^t$  που αντιστοιχεί στα χαρακτηριστικά του υλικού στο χρόνο  $t$ :

$$F = K^t U, \quad [3.4]$$

όπου:  $U$ = το διάνυσμα επαυξητικών μετατοπίσεων του κόμβου,  
 $K^t$ = εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας.

Το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας βρίσκεται από τη σχέση:

$$K^t = \frac{\partial^t F}{\partial^t U}. \quad [3.5]$$

Από τις σχέσεις [3.2], [3.3] και [3.4] προκύπτει ότι:

$$K^t U = R^{t+\Delta t} - F^t. \quad [3.6]$$

Από την σχέση [3.6], λαμβάνοντας υπόψη τη [3.4] προκύπτει:

$$U^{t+\Delta t} = U^t + U, \quad [3.7]$$

όπου:  $U^t$ = οι μετατοπίσεις σε χρόνο  $t$ ,  
 $U$ = η επαύξηση των μετατοπίσεων.

Με τον τρόπο αυτό, έχοντας προσεγγίσει τις τιμές των μετατοπίσεων στο χρόνο  $t+\Delta t$  μπορούν να υπολογιστούν προσεγγιστικά οι τάσεις και οι δράσεις σε κάθε κόμβο και να συνεχιστεί η επίλυση στο επόμενο βήμα επιβολής της φόρτισης [20].

Όταν οι υποδιαιρέσεις χρονικής επιβολής του φορτίου είναι μεγάλες, ενδεχομένως να μην είναι εφικτή η σύγκλιση των αποτελεσμάτων και η επίλυση να περιέχει σημαντικά σφάλματα. Έτσι η διαδικασία της επίλυσης επαναλαμβάνεται, ώστε να εφαρμόζεται με ικανοποιητική ακρίβεια η σχέση [3.2].

### **3.5 Δημιουργία προσομοιώματος με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων**

Κατά την υποδιαίρεση του φορέα σε επιμέρους στοιχεία είναι πολύ σημαντικό να επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος των στοιχείων που θα βοηθήσει στην επίλυση του προβλήματος.

Μέσω αντίστοιχου λογισμικού ο μελετητής μπορεί να επιλέξει τον τύπο της επίλυσης που επιθυμεί να εκτελεστεί, τόσο με γραμμική όσο και με μη γραμμική συμπεριφορά. Ο τύπος των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατός με τον τύπο της επίλυσης και τα χαρακτηριστικά του φορέα, ώστε να εκτιμηθεί σωστά ο μηχανισμός της αστοχίας. Για παράδειγμα θα χρησιμοποιηθούν διαφορετικού τύπου στοιχεία για την επίλυση μίας δοκού και μίας μεταλλικής δεξαμενής. Στην πρώτη περίπτωση θα χρησιμοποιηθούν στοιχεία δοκού, ενώ στη δεύτερη στοιχεία κελύφους. Επίσης, σημαντικό ρόλο στην επίλυση διαδραματίζει και το γεωμετρικό σχήμα των στοιχείων, καθώς και το μέγεθός τους και η πυκνότητα της διακριτοποίησης. Συνήθως με τη διενέργεια διαδοχικών δοκιμών ο μελετητής καθορίζει το κατάλληλο μέγεθος των στοιχείων αναλόγως του τύπου επίλυσης που θέλει να εκτελέσει [20].



## Κεφάλαιο 4

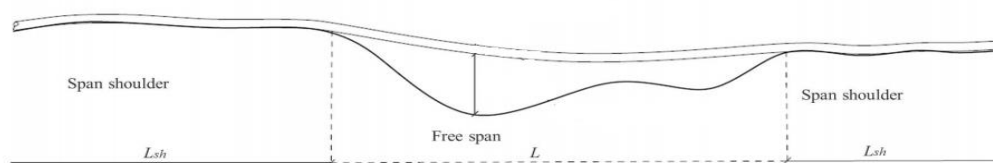
### Αιωρούμενα τμήματα υποθαλασσίου αγωγού

#### Σύνοψη

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1 ο σχεδιασμός της εγκατάστασης αγωγών στο υποθαλάσσιο περιβάλλον θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη διάφορες δυσμενείς καταστάσεις και για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητο να γίνεται η δομική ανάλυση και η εκτίμηση της συμπεριφοράς των αγωγών σε αυτές τις καταστάσεις.

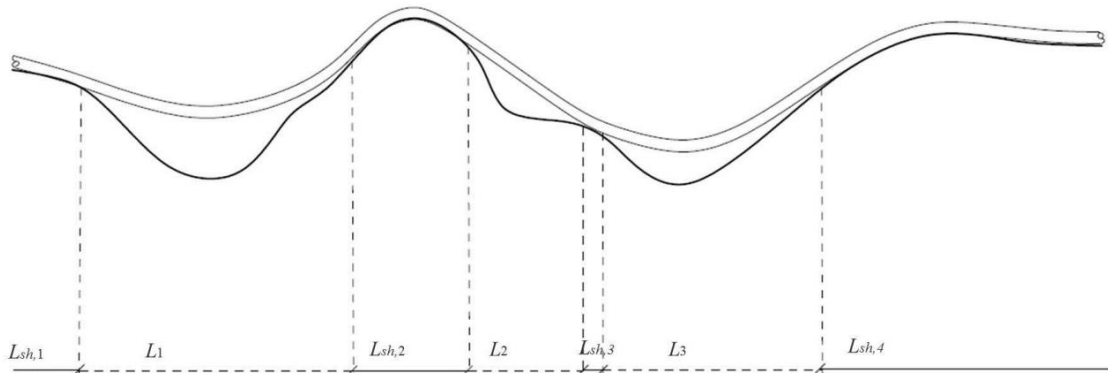
#### 4.1 Δομική ανάλυση

Στο σύνθετο υποθαλάσσιο περιβάλλον οι αγωγοί οι οποίοι τοποθετούνται πάνω στον πυθμένα, είναι πιθανό να αιωρηθούν, είτε εξ αρχής στη φάση κατασκευής του έργου, είτε κατά την περίοδο λειτουργίας αυτού (εικόνες 4.1, 4.2). Σε αυτό το φαινόμενο συντελούν διάφοροι παράγοντες, όπως το έντονο ανάγλυφο του βυθού, η μετακίνηση όγκων υλικού του πυθμένα λόγω εκδήλωσης διαφόρων γεωκινδύνων, η επίδραση των θαλάσσιων ρευμάτων και του κυματισμού στο βυθό, καθώς και τα φορτία λειτουργίας του αγωγού, που λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών προκαλούν σε αυτόν διαστολή και συστολή με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η θέση του. Τα τμήματα που χάνουν την επαφή τους με τον πυθμένα, είναι δυνατό να δημιουργήσουν μεγάλα προβλήματα στο έργο και κατ' επέκταση αστοχία του κελύφους του αγωγού (εικόνες 4.1, 4.2).



Εικόνα 4.1: Αιωρούμενο τμήμα αγωγού [21].

Span shoulder= στήριξη αιωρούμενου τμήματος, free span= αιωρούμενο τμήμα



Εικόνα 4.2: Πολλαπλά αιωρούμενα τμήματα αγωγού [21].

Για το λόγο αυτό είναι πολύ σημαντική η επιλογή της όδευσης. Είναι πρακτικά αδύνατο να μην υπάρχουν ανομοιομορφίες στην επιφάνεια του πυθμένα των θαλασσών σε όλο το μήκος του αγωγού. Αυτό που είναι εφικτό, είναι η επιλογή βέλτιστης όδευσης με το λιγότερο έντονο ανάγλυφο πυθμένα, ώστε να περιοριστούν τα τμήματα του αγωγού που δε θα βρίσκονται σε επαφή με αυτόν. Επίσης, πρέπει να εξετάζεται και η πιθανότητα μετακίνησης μεγάλων όγκων γεωυλικού του πυθμένα, που θα έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια στήριξης σε κάποιο τμήμα του αγωγού.

Γενικά, θα πρέπει να διερευνώνται όλες τα πιθανά σενάρια ελεύθερης αιώρησης του αγωγού, σε όλες τις αναμενόμενες καταστάσεις φόρτισης αυτού [21].

Ο τρόπος που συμπεριφέρεται ένα ελεύθερο τμήμα του αγωγού εξαρτάται από το μήκος της αιώρησης, από την αξονική δύναμη του αγωγού (που προκαλείται εξαιτίας των κύκλων θερμικών φορτίσεων και κατά συνέπεια φαινομένων διαστολής και συστολής του), καθώς και από τη στατική καμπυλότητά του, εξαιτίας της όδευσης που ακολουθεί. Η στατική ανάλυση επηρεάζει άμεσα την απόκριση του αγωγού στην έκθεση σε φυσικές ταλαντώσεις καθώς, αναλόγως των αποτελεσμάτων της, μεταβάλλεται η μάζα ταλάντωσης του αγωγού, η οποία είναι ανάλογη του αιωρούμενου μήκους. Για το λόγο αυτό η στατική ανάλυση θα πρέπει να γίνεται με ακρίβεια σε όλα τα τμήματα που δεν εφάπτονται με τον πυθμένα.

Πρέπει να αναφερθεί επίσης, ότι επειδή τα πολλαπλά αιωρούμενα τμήματα αγωγού (εικόνα 4.2) αλληλεπιδρούν μεταξύ τους δεν είναι σωστό να αντιμετωπίζονται ως άθροισμα μεμονωμένων αιωρούμενων τμημάτων (εικόνα 4.1), γιατί προκύπτουν ανακριβή αποτελέσματα, ιδιαίτερα κατά τις αναλύσεις έκθεσης του αγωγού σε ταλάντωση.

Τόσο η στατική όσο και η δυναμική απόκριση του αγωγού σε κάθε πιθανή επιβολή φορτίσεων θα πρέπει να υλοποιείται με τη μοντελοποίηση του συστήματος αγωγού - πυθμένα. Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στα άκρα του μοντέλου πρέπει να αντιπροσωπεύουν επαρκώς τις καταστάσεις αλληλεπίδρασης αγωγού - πυθμένα, καθώς επίσης και να υφίστανται επαρκή μήκη του αγωγού εκατέρωθεν του εύρους αιώρησης κατά τη μοντελοποίηση, ώστε η ανάλυση να μην επηρεάζεται από την αύξηση του μήκους του μοντέλου. Η κατάλληλη επιλογή των συνοριακών συνθηκών εξαρτάται από την απαιτούμενη ακρίβεια των αποτελεσμάτων, καθώς και από το βαθμό αβεβαιότητας των παραμέτρων της κάθε εξεταζόμενης περίπτωσης [7],[21].

Το ανάγλυφο του πυθμένα επηρεάζει την καμπυλότητα και τις τάσεις που ασκούνται στον αγωγό και πρέπει να ληφθεί υπόψη στην ανάλυση. Για το λόγο αυτό είναι σημαντική η ρεαλιστική προσομοίωση του πυθμένα κατά τη μοντελοποίηση. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η σωστή εκτίμηση του εύρους αιώρησης και των κενών μεταξύ του αγωγού και του πυθμένα [21].

## **4.2 Παρουσίαση του προβλήματος**

Για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των τμημάτων των αγωγών, σύμφωνα με τα παραπάνω, θα πραγματοποιηθεί παραμετρική ανάλυση με τη χρήση του προγράμματος MARC (<https://www.mssoftware.com/product/marc>). Θα κατασκευαστεί ένα αριθμητικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων και με την τροποποίηση των παραμέτρων του προβλήματος θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα: α) τάσης – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης τμήματος του πυθμένα και β) μετατόπισης επιλεγμένων σημείων του αγωγού –



επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης τμήματος του πυθμένα Επίσης σε κάποιες περιπτώσεις θα γίνει γραφική απεικόνιση των τάσεων καθώς και των παραμορφώσεων που υφίσταται ο αγωγός εξαιτίας της μετακίνησης τμήματος του βυθού.

Ο αγωγός, για τις ανάγκες της εργασίας, θεωρείται κενός, σε υποθαλάσσιο περιβάλλον και συγκεκριμένα σε βάθος 800 m (η πίεση περιβάλλοντος θεωρήθηκε 8 MPa), έχει διάμετρο 60,96 cm και αποτελείται από χάλυβα ποιότητας κατά API 5L X70, που συχνά χρησιμοποιείται σε υποθαλάσσιους αγωγούς [1], με πάχος κελύφους 10 mm. Η τάση διαρροής του υλικού του αγωγού κατά API 5L X70 είναι  $\sigma_y=485$  MPa. Για τις ανάγκες της εργασίας το υλικό του αγωγού θεωρήθηκε ότι έχει τάση διαρροής  $\sigma_y=490$  MPa.

Το υλικό του πυθμένα αποτελείται από άμμο μηδενικής συνοχής  $c=0$  και με γωνία εσωτερικής τριβής: α)  $\Phi=40^\circ$  και β)  $\Phi=30^\circ$ . Η συμπεριφορά του υλικού του πυθμένα περιγράφεται από το ελαστικό - απολύτως πλαστικό κριτήριο αστοχίας των Mohr- Coulomb που φαίνεται στην εικόνα 4.3α, όπως είχε χρησιμοποιηθεί και από τον Vazouras [18].

Ο συντελεστής τριβής στις δυσμενέστερες συνθήκες θεωρείται ότι είναι  $\mu=0.6$  [9].

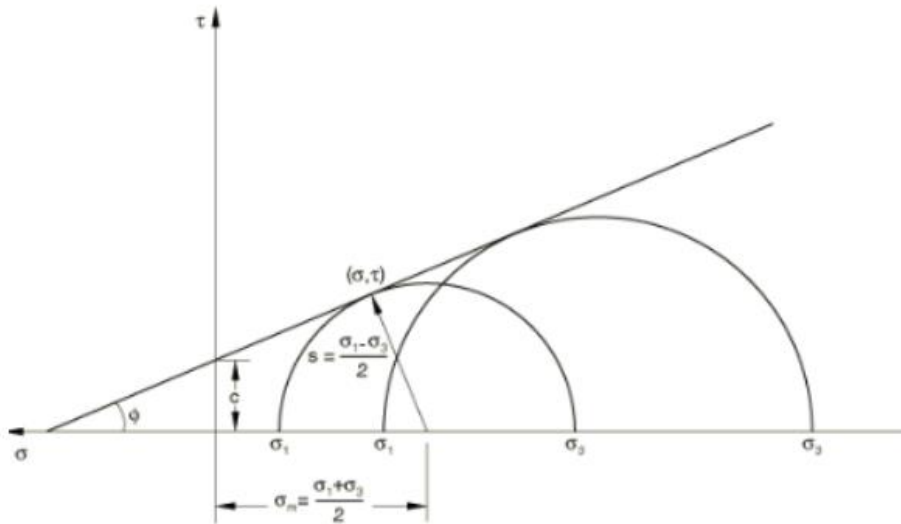
Για την περιγραφή της συμπεριφοράς του υλικού του αγωγού που υφίσταται μεγάλες παραμορφώσεις, χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο διαρροής - ισότροπης κράτυνσης Von Mises, όπως είχε χρησιμοποιηθεί και από τον Vazouras [18] και φαίνεται στην εικόνα 4.3β. Σύμφωνα με το κριτήριο διαρροής Von Mises, η διαρροή του υλικού συμβαίνει όταν η εφαρμοζόμενη ενεργή τάση στο υλικό σε μια σύνθετη εντατική κατάσταση γίνει ίση με την τάση διαρροής σε καθαρό εφελκυσμό [20].

Θα εξεταστούν διάφορα σενάρια, σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί, με μήκος δοκιμίων αγωγού - πυθμένα (μοντέλων): α) 600 m και β) 1000 m, ώστε να μειωθεί η επίδραση του μήκους του αγωγού στη συμπεριφορά του μοντέλου, δεδομένου ότι λαμβάνονται σταθερές συνοριακές συνθήκες στα άκρα του αγωγού [21].

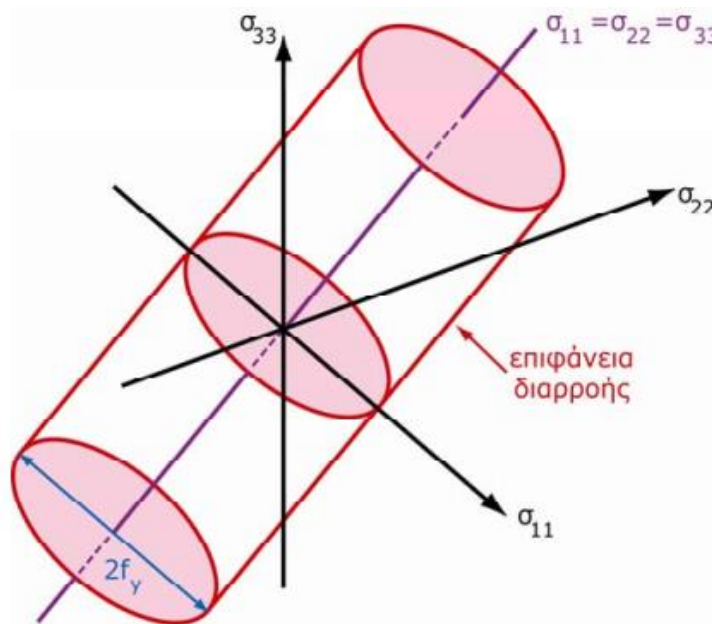
Πίνακας 1: Πίνακας σεναρίων

<u>ΣΕΝΑΡΙΑ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ</u>						
Αριθμός σεναρίου (Μοντέλων- δοκιμίων)	Μήκος δοκιμίου (m)	Γωνία εσωτερικής τριβής άμμου ( <sup>ο</sup> )	Μήκος αγωγού που βυθίζεται (m)			Μέγιστη επιβαλλόμενη μετακίνηση πυθμένα (m)
1.α	600	40	200			12.96
1.β	1000	40	200			13.68
2.α	600	30	200			16.2
2.β	1000	30	200			15.48
3.α	600	40	150			10.08
3.β	1000	40	150			10.80
4.α	600	40	140			10.08
4.β	1000	40	140			12.96
5.α	600	30	140			12.96
5.β	1000	30	140			13.32
6.α	600	40	120			7.2
6.β	1000	40	125			7.56
7.α	600	30	120			7.2
7.β	1000	30	125			7.2
8	1000	40	90	80*	85	2.52
9	1000	30	90	80*	85	2.52
10	1000	30	100	60*	100	5.40
11	1000	30	100	40*	100	5.04
12	1000	40	110	35*	115	5.76
13	1000	30	110	35*	115	5.76

\*απόσταση μεταξύ των βυθισμάτων του πυθμένα



Εικόνα 4.3α: Κριτήριο αστοχίας Mohr- Coulomb [18].

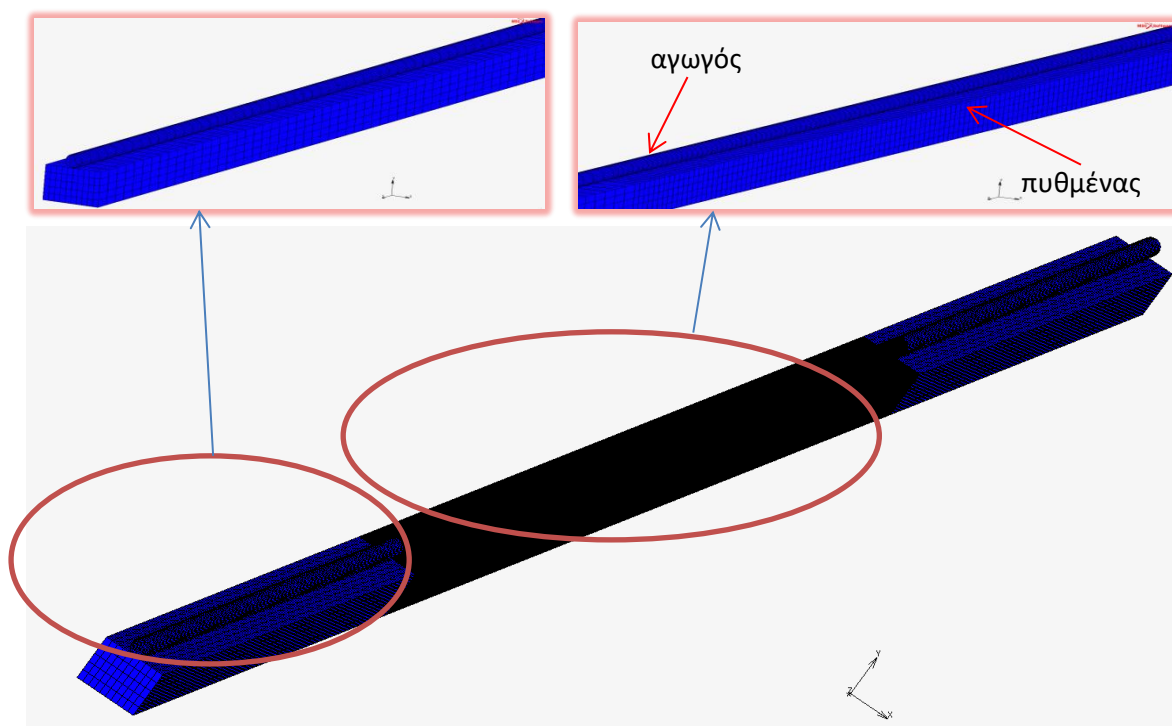


Εικόνα 4.3β: Κριτήριο διαρροής Von Mises για τρισδιάστατη εντατική κατάσταση [20].

### α. Σενάριο προβλήματος 1

Ανάλυση των δοκιμών μήκους 1.α και 1.β με παραμέτρους εδάφους που αντιστοιχούν σε άμμο μηδενικής συνοχής  $c=0$  και γωνίας εσωτερικής τριβής  $\Phi=40^\circ$ . Για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις, μεταβάλλεται το ανάγλυφο του πυθμένα, δημιουργώντας βαθμιαία

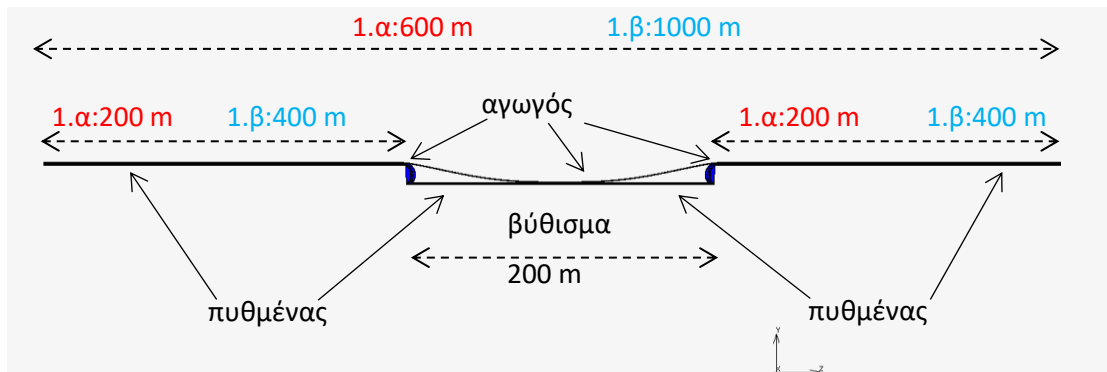
μία βύθιση στο μέσο του κάθε δοκιμίου, μήκους 200 m, μέχρι την πλήρη αστοχία (πλαστικοποίηση) της διατομής του αγωγού. Αυτό συμβαίνει με τη δημιουργία βύθισης περίπου 13 m για το μοντέλο 1.α και περίπου 14 m για το μοντέλο 1.β και θα αναλυθεί στη συνέχεια. Στην εικόνα 4.4 φαίνεται ενδεικτικά ένα αριθμητικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων του προβλήματος. Με σκούρο χρώμα απεικονίζεται η περιοχή που έχουμε πυκνότερη διακριτοποίηση του μοντέλου, για την καλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων, στο κέντρο, όπου και εμφανίζονται τα φαινόμενα μετακίνησης (κατακόρυφη μετατόπιση/βύθιση/δημιουργία μορφολογικής ανωμαλίας) του πυθμένα.



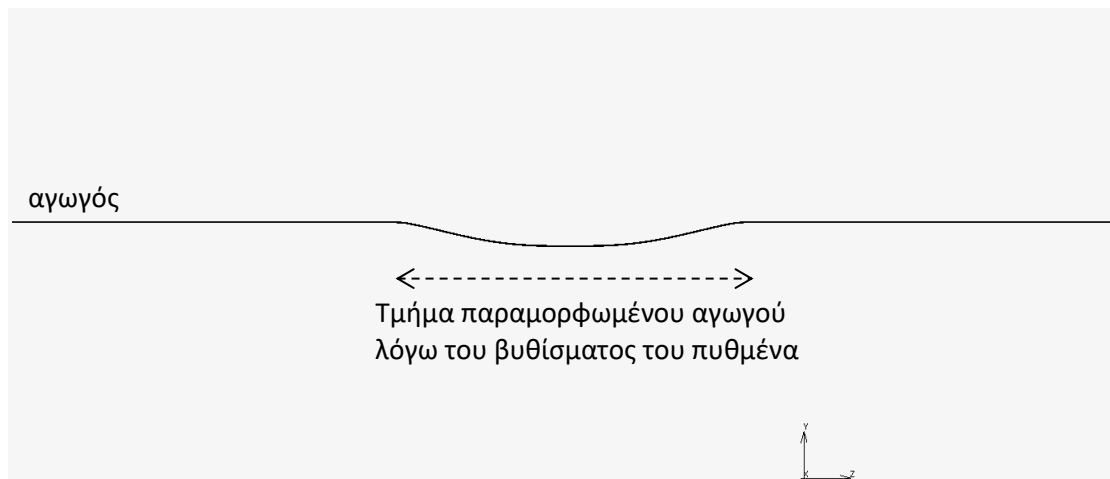
Εικόνα 4.4: Σενάριο προβλήματος 1, αριθμητικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων.

Εφαρμόζοντας κατακόρυφη μετακίνηση κατά  $y$  των κόμβων στο μέσο του προσομοιώματος πυθμένα και σε τμήμα του αγωγού μήκους 200 m, ώστε να δημιουργηθεί ανάγλυφο, ο αγωγός παραμορφώνεται όπως φαίνεται στις εικόνες 4.5 και 4.6. Στην εικόνα 4.5 αποτυπώνονται συγκεντρωτικά οι διαστάσεις των τμημάτων του πυθμένα που βυθίζονται, καθώς και οι διαστάσεις των σταθερών εκατέρωθεν τμημάτων αυτού και για τις 2

εξεταζόμενες περιπτώσεις δοκιμών 1.α και 1.β.



Εικόνα 4.5: Σενάριο προβλήματος 1.α και 1.β, δημιουργία ανάγλυφου (βύθισμα) πυθμένα.

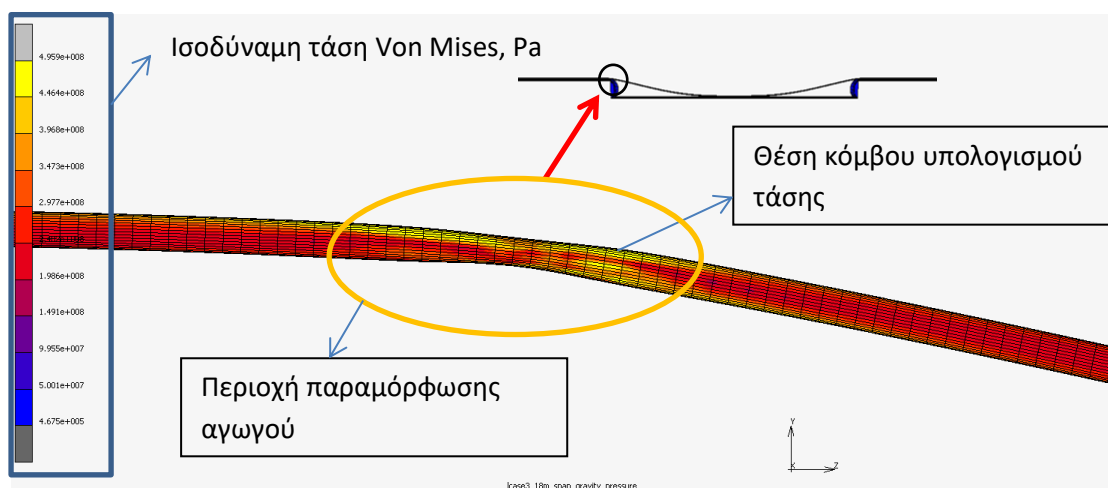


Εικόνα 4.6: Σενάριο προβλήματος 1.α, παραμόρφωση αγωγού.

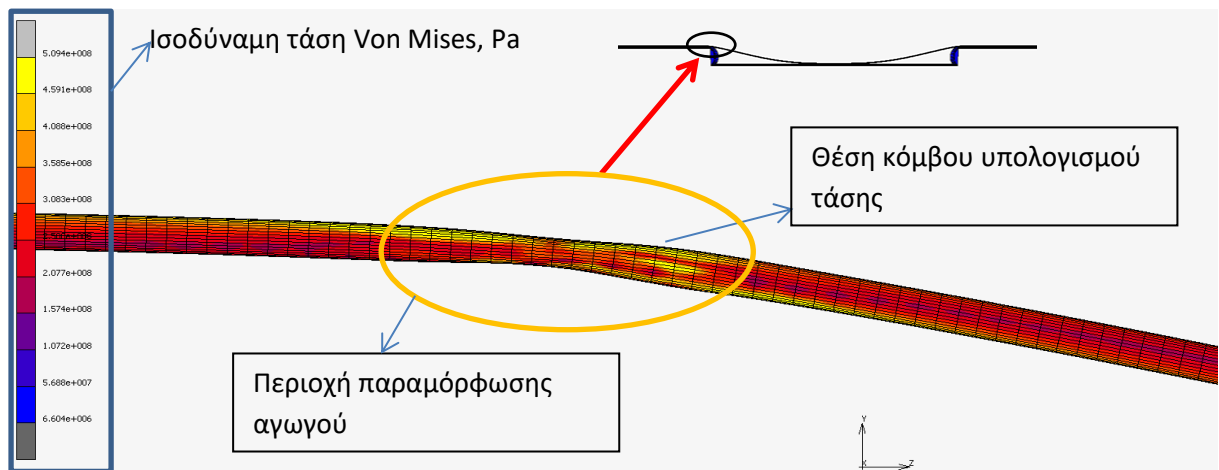
Οι εικόνες 4.7 και 4.8 αναπαριστούν γραφικά την κατανομή των ισοδύναμων τάσεων Von Mises στις περιπτώσεις των δοκιμών 1.α και 1.β αντίστοιχα, στα σημεία που ξεκινάει η κατακόρυφη μετακίνηση του πυθμένα, όπου και παρατηρείται η μεγαλύτερη συγκέντρωσή τους. Οι ισοδύναμες τάσεις Von Mises, όπως φαίνεται, δεν έχουν αρνητικές τιμές. Το γεγονός αυτό δε σημαίνει ότι το υλικό βρίσκεται στην ίδια εντατική κατάσταση (θλίψη ή εφελκυσμό) σε όλες τις περιοχές. Οι τιμές των ισοδύναμων τάσεων Von Mises στην παρούσα εργασία, είναι οι ισοδύναμες ενεργές τάσεις σε καθαρό εφελκυσμό, που δέχεται το κέλυφος του αγωγού, όταν υπόκειται στις σύνθετες εντατικές καταστάσεις. Χρησιμοποιήθηκε αυτός ο

τύπος ανάλυσης ώστε να διερευνηθεί η μηχανική συμπεριφορά του αγωγού και να εξεταστεί συνολικά η αντοχή/αστοχία του κελύφους.

Ο συνδυασμός καταπονήσεων που υφίσταται ο αγωγός είναι εξαιρετικά περίπλοκος. Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, το κέλυφος του αγωγού δέχεται την εξωτερική υδροστατική πίεση περιβάλλοντος και το ίδιο βάρος. Κατά το σχηματισμό του ανάγλυφου του πυθμένα, μέσω της δημιουργίας τεχνητών βυθίσεων με την κατακόρυφη μετακίνηση των κόμβων του προσομοιώματος του πυθμένα, ο αγωγός κάμπτεται, αφού στηρίζεται στα άκρα, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.5. Επομένως στις περιοχές του κελύφους που φαίνονται στις εικόνες 4.7 και 4.8 (περιοχές που αναπτύσσεται το βύθισμα και καταδεικνύονται με το κόκκινο βέλος) παρατηρείται η μεγαλύτερη συγκέντρωση των τάσεων, εξαιτίας έναρξης της καμπυλότητας του αγωγού. Αυτό ισχύει σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις της παρούσης εργασίας. Η απόσταση των περιοχών αυτών από τα όρια των δοκιμίων φαίνονται στην εικόνα 4.5.

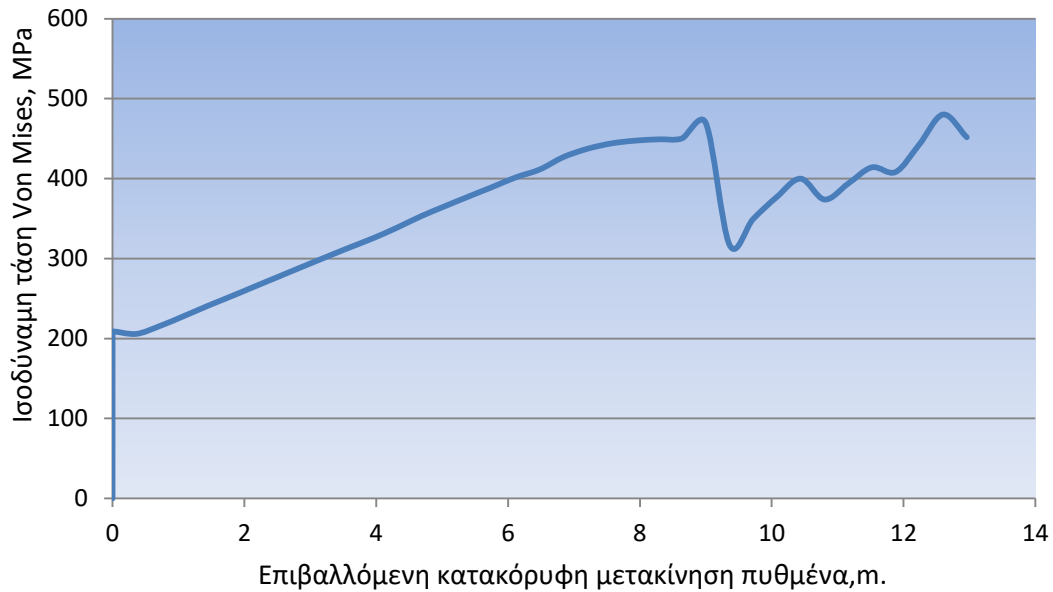


Εικόνα 4.7: Σενάριο προβλήματος 1.α, κατανομή των τάσεων αγωγού (σε μονάδες Pa).



Εικόνα 4.8: Σενάριο προβλήματος 1.β, κατανομή των τάσεων αγωγού (σε μονάδες Pa).

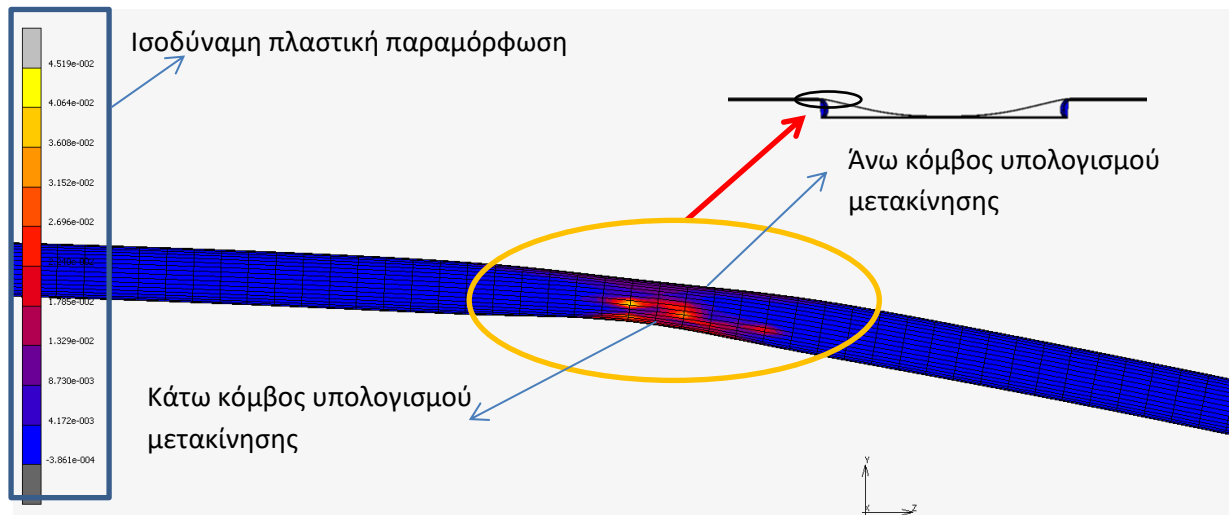
Ακολουθώντας στην εικόνα 4.9, παρατίθεται το διάγραμμα ανάπτυξης ισοδύναμων τάσεων- μετακίνησης (κατακόρυφης μετατόπισης/καθίζησης) πυθμένα για το δοκίμιο 1.α. Η τάση λήφθηκε από ένα κόμβο στο αριθμητικό προσομοίωμα του αγωγού, όπου και εμφανίζονται οι μέγιστες καταπονήσεις σύμφωνα με τη γραφική απεικόνιση των τάσεων της εικόνας 4.7. Σημειώνεται ότι η επιβολή της μετακίνησης των κόμβων του αριθμητικού προσομοιώματος του πυθμένα πραγματοποιήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις της παρούσας εργασίας αφού ολοκληρώθηκε η σταδιακή επιβολή των φορτίσεων του ίδιου βάρους του αγωγού και του υλικού του πυθμένα, καθώς και η επιβολή της εξωτερικής πίεσης στον αγωγό. Η απότομη αύξηση των αρχικών ισοδύναμων τάσεων στο διάγραμμα της εικόνας 4.9 και σε όλα τα αντίστοιχα διαγράμματα που θα ακολουθήσουν στην εργασία, οφείλεται στην επιβολή της εξωτερικής πίεσης στον αγωγό. Η μετέπειτα αύξηση των τάσεων οφείλεται μόνο στην επιβολή της κατακόρυφης μετακίνησης του επιλεγμένου τμήματος του πυθμένα, εφόσον οι λοιπές φορτίσεις (ίδιο βάρος, εξωτερική πίεση) παραμένουν σταθερές.



Εικόνα 4.9: Διάγραμμα τάσης – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 1.α.

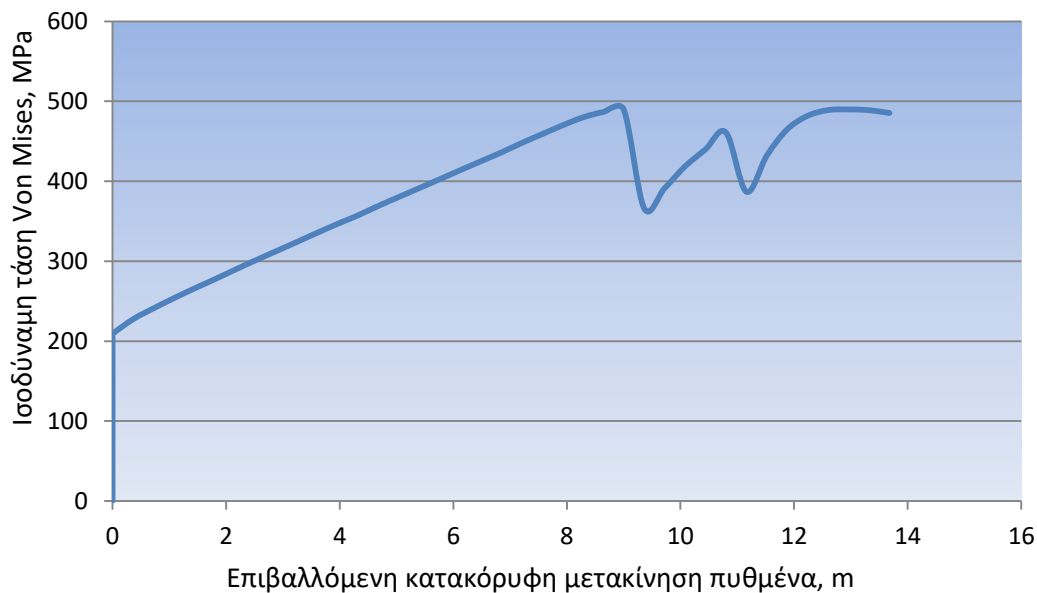
Στην εικόνα 4.10 παρατίθεται η γραφική απεικόνιση των περιοχών πλαστικής παραμόρφωσης του κελύφους του αγωγού στη μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση του πυθμένα. Στην παρούσα εργασία όλες οι τιμές της πλαστικής παραμόρφωσης αφορούν την ισοδύναμη συνολική πλαστική παραμόρφωση που προκύπτει από τη σύνθετη εντατική κατάσταση του υλικού προς όλες τις κατευθύνσεις στις επιλεγμένες περιοχές του μοντέλου. Όταν η ισοδύναμη τάση Von Mises στις εξεταζόμενες περιοχές του κελύφους πάρει τη μέγιστη τιμή  $\sigma_y$ , το κέλυφος εισέρχεται στην περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης και ξεκινάει η διαρροή του υλικού. Στις εικόνες 4.7 και 4.8 παρατηρείται ότι οι μέγιστες ισοδύναμες τάσεις Von Mises του κελύφους ξεπερνούν ελαφρώς τη  $\sigma_y$  σε ορισμένα σημεία, διότι το υλικό του αγωγού βρίσκεται στο στάδιο της κράτυνσης και παρουσιάζει ελαφρά αύξηση της αντοχής έως ότου επέλθει η θραύση.





Εικόνα 4.10: Πλαστική παραμόρφωση δοκιμίου 1.α.

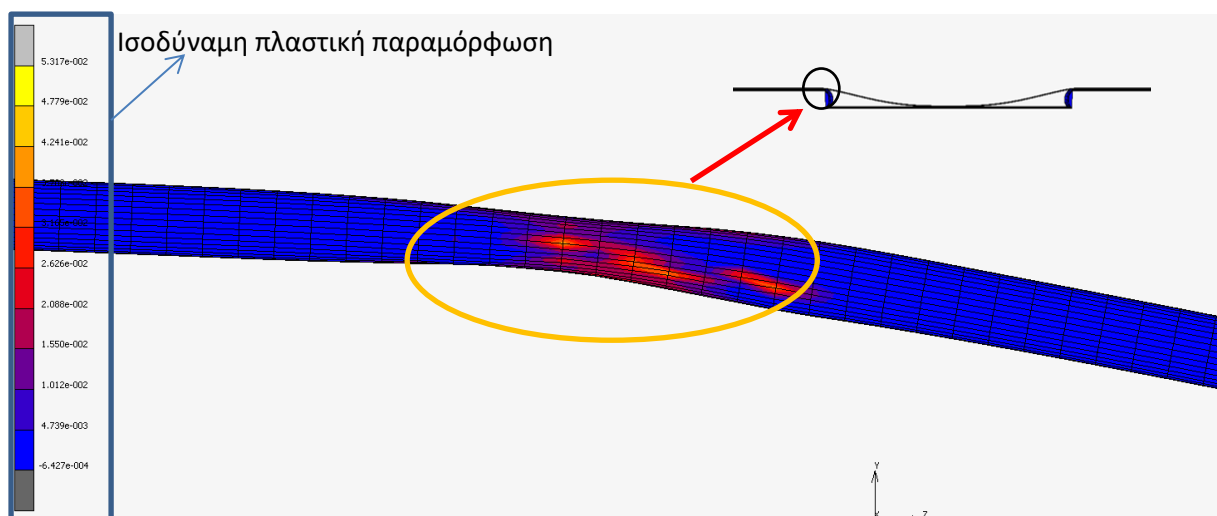
Ακολουθώς, στην εικόνα 4.11 παρατίθεται το διάγραμμα ανάπτυξης ισοδύναμων τάσεων- κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα για το δοκίμιο 1.β. Ομοίως η τάση λήφθηκε από έναν κόμβο σε απόσταση 400 m από το άκρο του αριθμητικού προσομοιώματος του αγωγού, όπου και εμφανίζονται οι μέγιστες καταπονήσεις σύμφωνα με τη γραφική απεικόνιση των τάσεων της εικόνας 4.8.



Εικόνα 4.11: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 1.β.

Στην εικόνα 4.12 παρατίθεται η γραφική απεικόνιση της ισοδύναμης πλαστικής

παραμόρφωσης του κελύφους του αγωγού.



Εικόνα 4.12: Πλαστική παραμόρφωση δοκιμίου 1000 m - Σενάριο 1.β.

Παρατηρείται ότι αρχικά η ισοδύναμη τάση στα διαγράμματα των εικόνων 4.9 και 4.11 εμφανίζει μια διαρκή αύξηση, μέχρι την σταδιακή εφαρμογή της ίδιας περίπου κατακόρυφης μετακίνησης του τμήματος του πυθμένα της τάξης των 9 m. Ακολούθως, κατά την εξέλιξη του φαινομένου μετακίνησης του τμήματος του πυθμένα, η τάση στα διαγράμματα μετά από κάποιο σημείο παρουσιάζει διακυμάνσεις. Αυτό οφείλεται στη σταδιακή μετέπειτα πλαστικοποίηση του υλικού της διατομής του αγωγού και στις αυξημένες παραμορφώσεις- μετατοπίσεις αυτού κατά τη συνέχεια της σταδιακής επιβολής κατακόρυφης μετακίνησης του πυθμένα. Το κέλυφος αρχικώς εισέρχεται στην περιοχή διαρροής και στη συνέχεια μεμονωμένες περιοχές αυτού εισέρχονται στο στάδιο της κράτυνσης, όπου η παραμόρφωση εμφανίζεται ιδιαίτερα αυξημένη (περίπου 5%). Το κέλυφος έχει αστοχήσει. Η σταδιακή πλαστικοποίηση και τελικώς η αστοχία του κελύφους του αγωγού συμβαίνει και στις 2 περιπτώσεις με παρόμοιο τρόπο, όπως φαίνεται στις εικόνες 4.10 και 4.12, με τη δημιουργία της κατακόρυφης τεχνητής βύθισης του πυθμένα περίπου 13 m για το μοντέλο 1.α και περίπου 14 m για το μοντέλο 1.β.

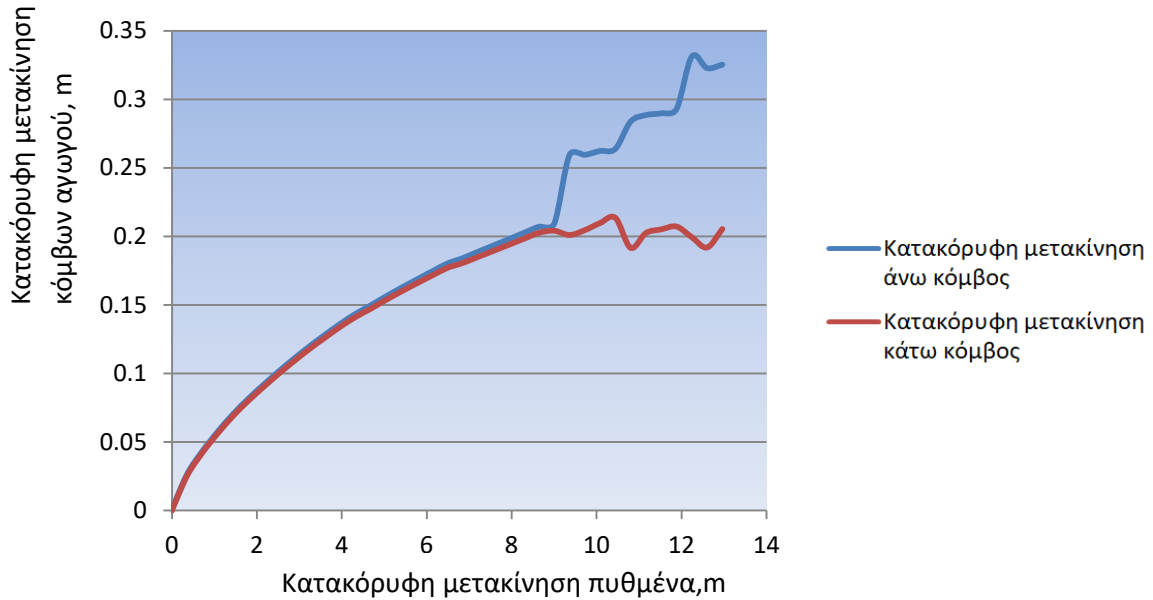
Εφόσον η συμπεριφορά του αγωγού στις εξεταζόμενες περιπτώσεις 1.α και 1.β είναι

παρόμοια και η αστοχία επέρχεται με τον ίδιο περίπου τρόπο κατά την εφαρμογή της ίδιας περίπου κατακόρυφης μετακίνησης του τμήματος του πυθμένα, κρίνονται επαρκείς οι διαστάσεις του μικρότερου μοντέλου (1.α, μήκος 600 m), καθώς βλέπουμε ότι η επίδραση των διαστάσεων αυτού στη μηχανική συμπεριφορά του αγωγού είναι μικρή. Η απόσταση των 200 m του δοκιμίου 1.α (εικόνα 4.5) από το σημείο της εμφάνισης των φαινομένων μετακίνησης (δημιουργίας ανάγλυφου) με τα άκρα του δοκιμίου αγωγού- πυθμένα, στα οποία και έχουν θεωρηθεί σταθερές συνοριακές συνθήκες, κρίνεται, προς το παρόν, ικανοποιητική και θα διερευνηθεί επιπροσθέτως στη συνέχεια.

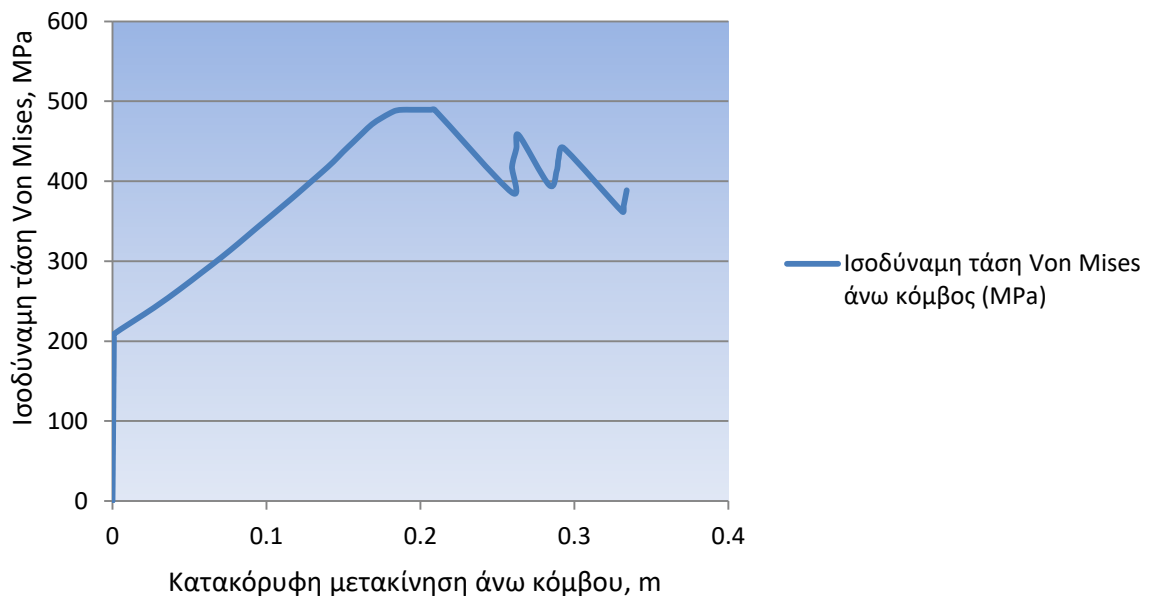
Αξίζει να σημειωθεί ότι στις εικόνες 4.7, 4.8 παρατηρείται μία στένωση στη διατομή του αγωγού, στα άκρα των μοντέλων των δοκιμίων. Στις εικόνες 4.15 και 4.16 φαίνεται από διαφορετικές οπτικές η παραμόρφωση του δοκιμίου 1.α, η οποία εμφανίζεται με παρόμοιο τρόπο και στο δοκίμιο 1.β. Το πάνω και το κάτω μέρος του αγωγού πλησιάζουν και η διατομή του αποκτά ωοειδές σχήμα. Στην εικόνα 4.13 παρατίθεται τα διάγραμμα μετακίνησης στους άνω και κάτω κόμβους του αγωγού - επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα, στην περιοχή του άκρου του τεχνητού βύθισματος, όπου και ξεκινάει η καμπυλότητά του, για το μοντέλο 1.α. Η θέση των κόμβων φαίνεται στην εικόνα 4.10. Παρατηρείται ότι ο κάτω κόμβος υποχωρεί λιγότερο, γιατί ο αγωγός στην κάτω πλευρά βρίσκεται σε επαφή με τον πυθμένα. Όσο εξελίσσεται το τεχνητό βύθισμα, ο αγωγός εισχωρεί στον πυθμένα στην συγκεκριμένη περιοχή και τείνει να σταθεροποιηθεί αφού έχει εισχωρήσει σχεδόν 0,2 m στον πυθμένα. Καθώς αυξάνεται το τεχνητό βύθισμα ο άνω κόμβος συνεχίζει να υποχωρεί κατά τον κατακόρυφο άξονα γιατί ο αγωγός παραμορφώνεται και αποκτά οβάλ σχήμα. Η απόσταση των άνω και κάτω κόμβων του κελύφους του αγωγού στο σημείο έναρξης της καμπυλότητας έχει μειωθεί κατά 15 cm περίπου κατά τον κατακόρυφο άξονα, από 60,96 cm που είναι η αρχική διάμετρος.

Για τη θέση του άνω κόμβου του αγωγού που φαίνεται στην εικόνα 4.10,

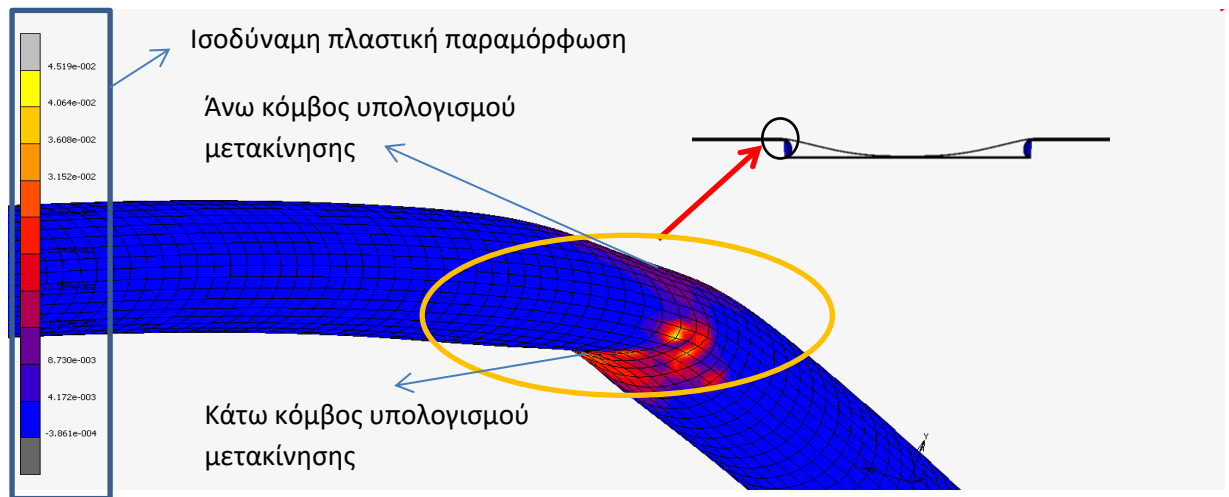
παρουσιάζεται ακολούθως στην εικόνα 4.14 το διάγραμμα ισοδύναμης τάσης Von Mises – κατακόρυφης μετακίνησης.



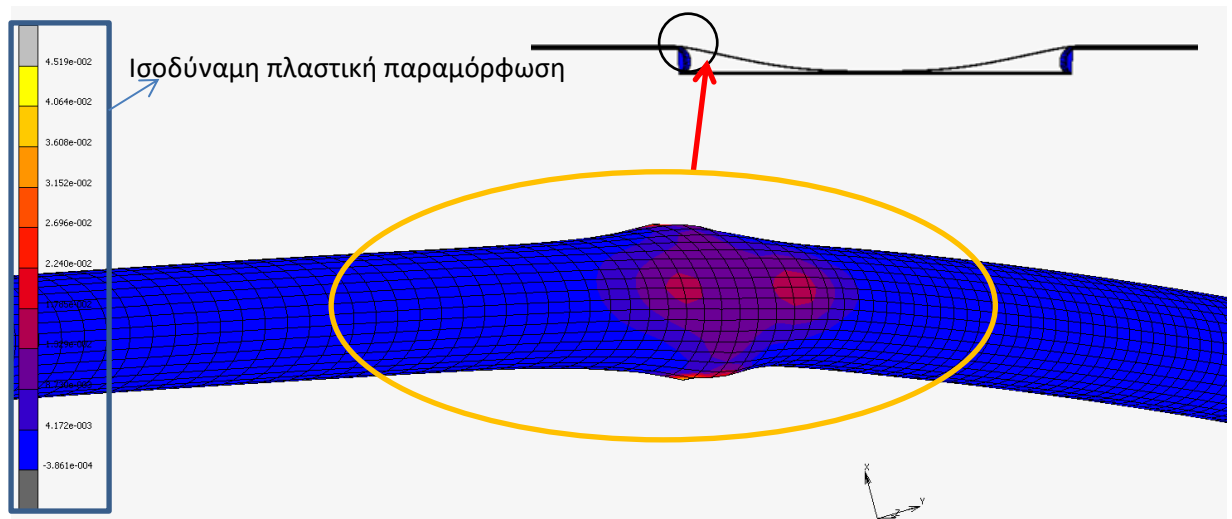
Εικόνα 4.13: Διάγραμμα κατακόρυφης μετακίνησης κόμβων- επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 1.α.



Εικόνα 4.14: Διάγραμμα τάσης Von Mises – Κατακόρυφης μετακίνησης άνω κόμβου αγωγού δοκιμίου 1.α.



Εικόνα 4.15: Πλαστική παραμόρφωση άκρου μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 1.α.

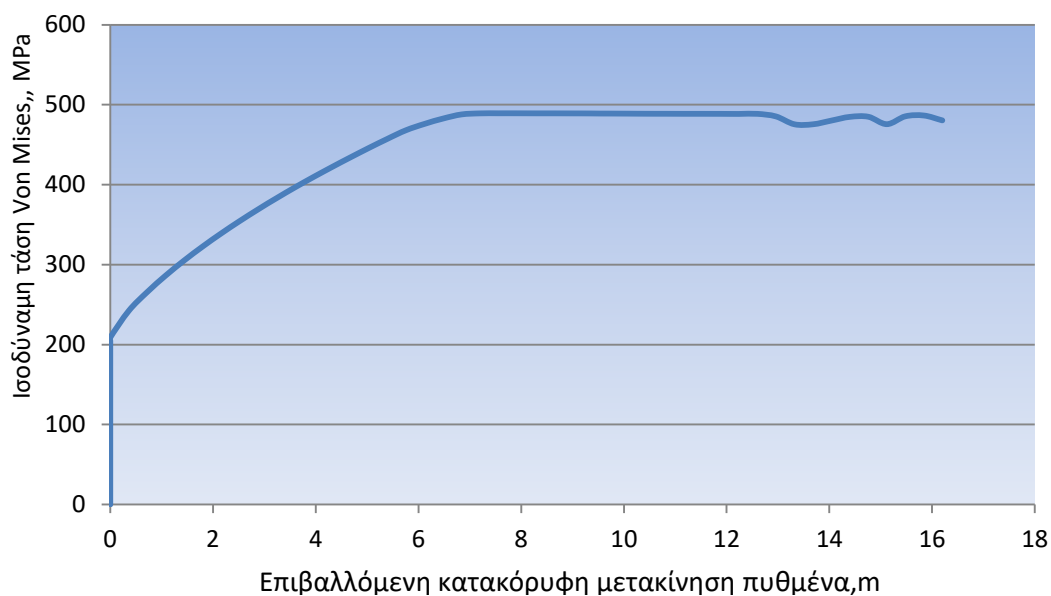


Εικόνα 4.16: Πλαστική παραμόρφωση άκρου μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 1.α. Λήψη στιγμιότυπου κάτοψης, υπό ελαφρά γωνία θέασης.

## β. Σενάριο προβλήματος 2

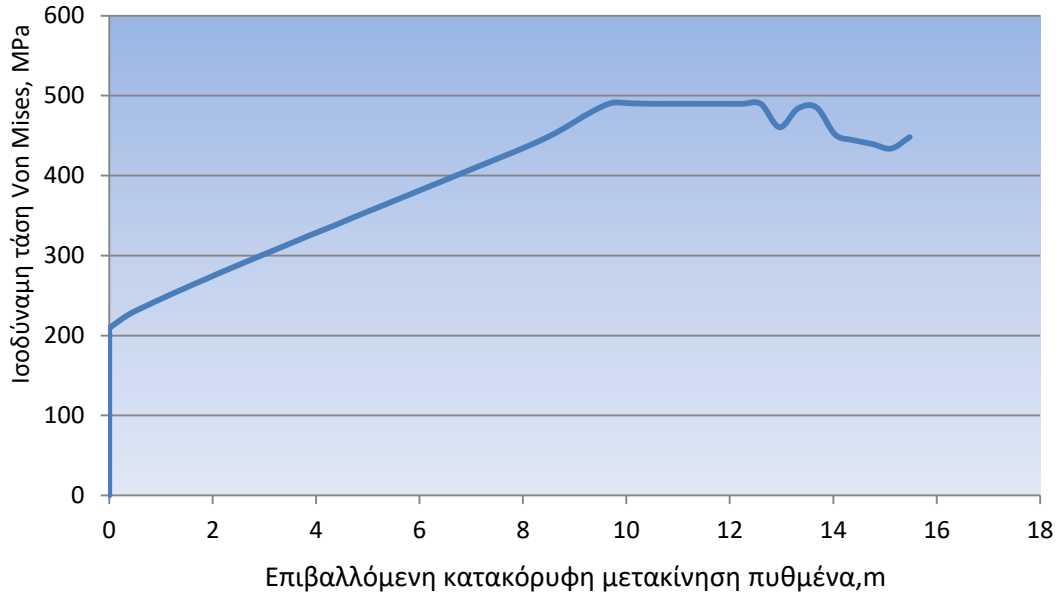
Ανάλυση δοκιμίων μήκους 2.α και 2.β με παραμέτρους εδάφους που αντιστοιχούν σε άμμο με  $c=0$ ,  $\Phi=30^\circ$ , δημιουργώντας βύθιση στο μέσο των δοκιμίων μήκους 200 m, όπως και στο σενάριο προβλήματος 1, ώστε να δημιουργείται ανάγλυφο στον πυθμένα αντίστοιχο με αυτό της εικόνας 4.5, με την ανάλογη βύθιση του σεναρίου 2. Γίνεται η διερεύνηση της συμπεριφοράς των δοκιμίων και η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Στην εικόνα 4.17 παρατίθενται τα αποτελέσματα για το μοντέλο 2.α σε ένα κόμβο του αγωγού σε αντίστοιχη θέση με αυτή που απεικονίζεται στις εικόνες 4.7 και 4.8.



Εικόνα 4.17: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 2.α.

Στην εικόνα 4.18 παρατίθενται τα αποτελέσματα για το μοντέλο 2.β, ομοίως σε ένα κόμβο στην αρχή του φαινομένου της βύθισης, όπου εμφανίζεται η μεγαλύτερη συγκέντρωση των τάσεων, κατά αντιστοιχία με τις εικόνες 4.7 και 4.8.



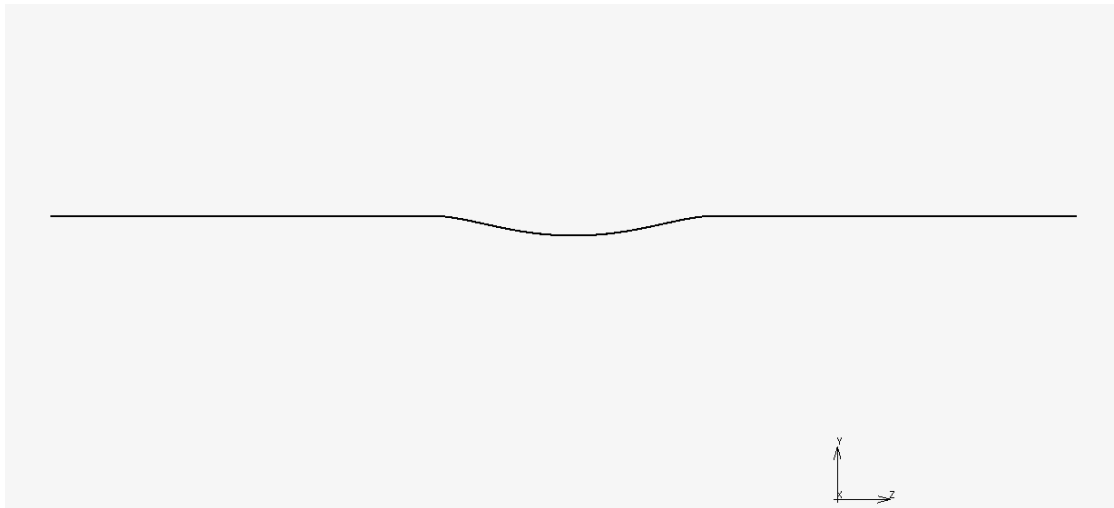
Εικόνα 4.18: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 2.β.

Στο 2ο σενάριο παρατηρείται ότι τα μοντέλα περιγράφουν το φαινόμενο με παρόμοιο τρόπο με την περίπτωση του 1ου σεναρίου, με τη διαφορά ότι το φαινόμενο της πλαστικοποίησης εμφανίζεται κάπως νωρίτερα, κατά την εφαρμογή μετακίνησης του πυθμένα κατά περίπου 7m. Η πλήρη αστοχία της διατομής του αγωγού συμβαίνει, εφόσον δημιουργείται σχεδόν το ίδιο τεχνητό βύθισμα του πυθμένα, κατά 16 m περίπου.

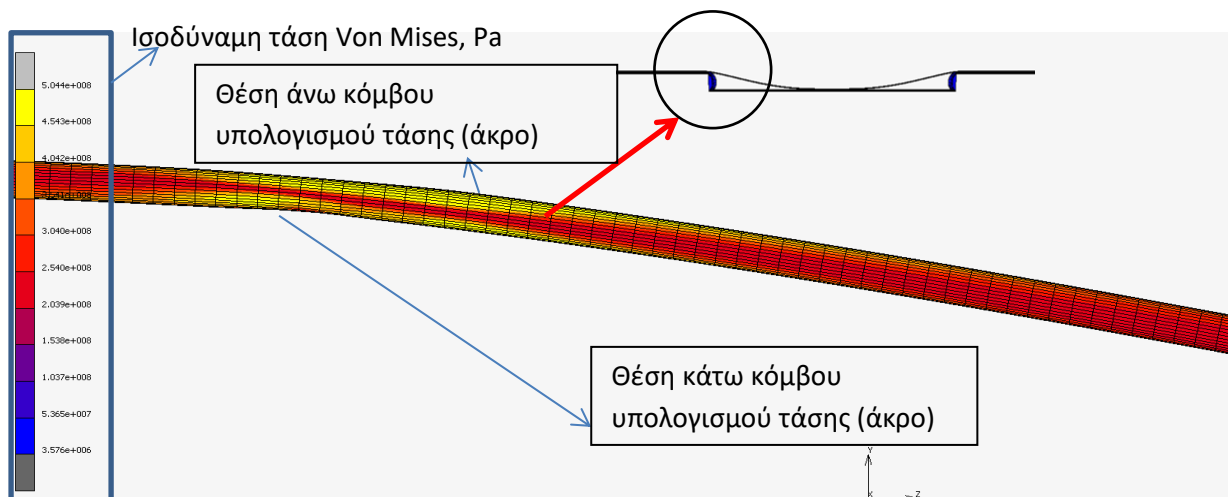
### γ. Σενάριο προβλήματος 3

Ανάλυση των δοκιμών 3.α και 3.β με παραμέτρους εδάφους που αντιστοιχούν σε άμμο με  $c=0$  και  $\Phi=40^\circ$ . Για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις, μεταβάλλεται το ανάγλυφο του πυθμένα δημιουργώντας μία βύθιση στο μέσο του κάθε δοκιμίου μήκους 150 m.

Στις εικόνες 4.19, 4.20 και 4.21 φαίνεται η παραμόρφωση και η γραφική κατανομή των ισοδύναμων τάσεων στον αγωγό κατά την δημιουργία του ανάγλυφου του πυθμένα, για το μοντέλο 3.α. Με ανάλογο τρόπο έχουν δημιουργηθεί οι παραμορφώσεις και στο μοντέλο 3.β.

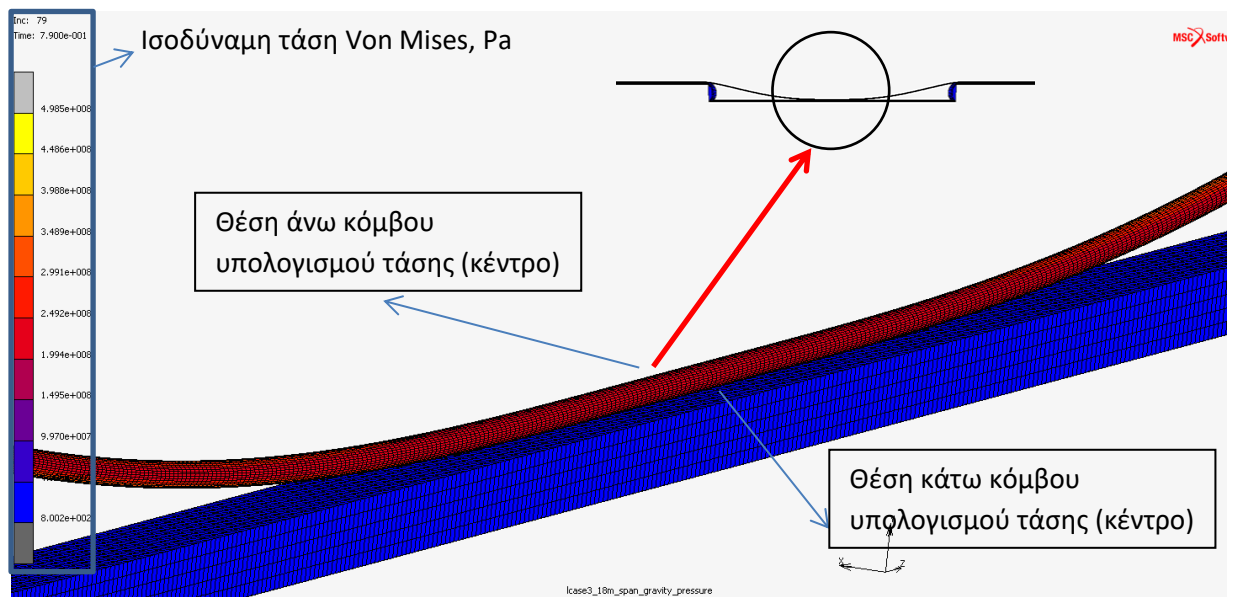


Εικόνα 4.19: Παραμόρφωση αγωγού κατόπιν δημιουργίας ανάγλυφου πυθμένα.



Εικόνα 4.20: Κατανομή των τάσεων (Pa) αγωγού στο αριστερό άκρο της παραμόρφωσης.

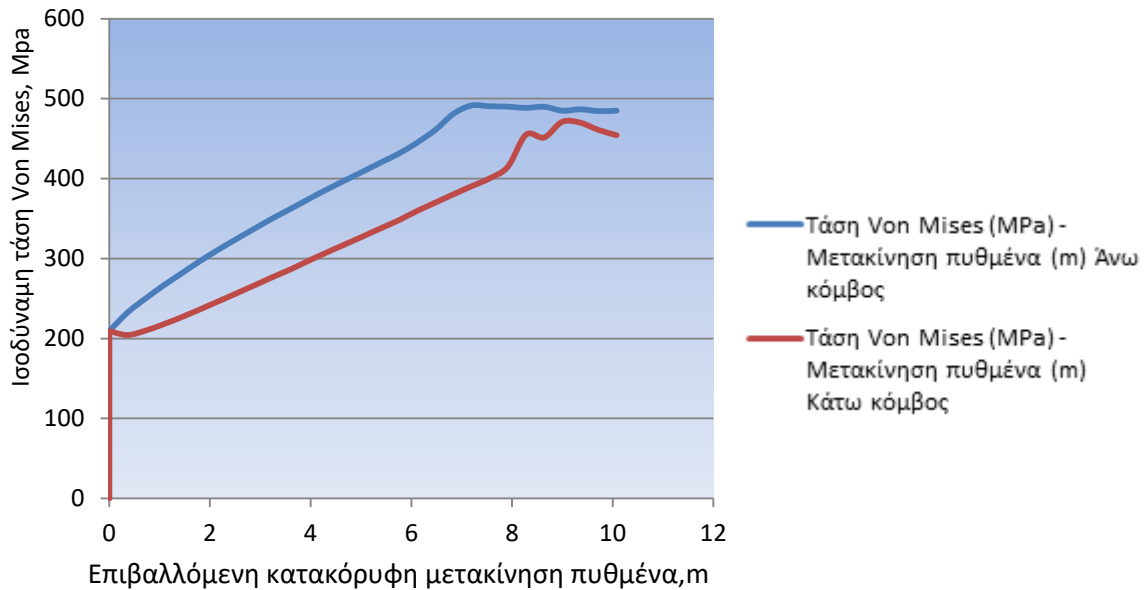




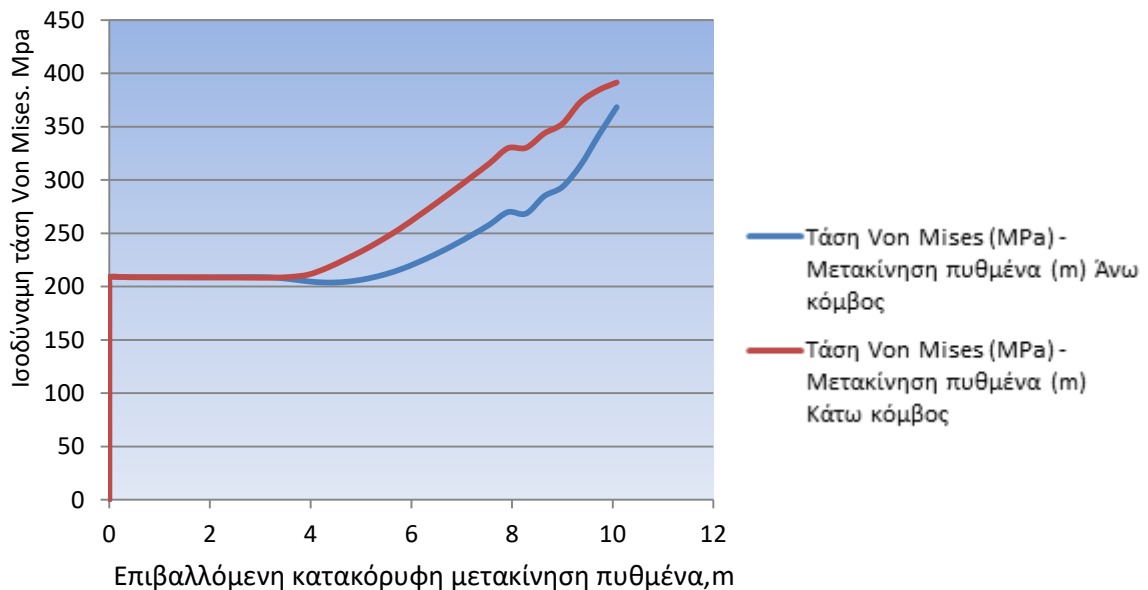
Εικόνα 4.21: Αναπτυσσόμενες τάσεις στον αγωγό με αποχρώσεις πορτοκαλί χρώματος στο κέντρο του μοντέλου 3.α.

Στην προκειμένη περίπτωση θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα τάσεων σε κόμβους σε ένα άκρο της παραμόρφωσης και στο μέσον της. Συγκεκριμένα θα ληφθούν δεδομένα για τους άνω και κάτω κόμβους του αγωγού κατά τον άξονα  $y$ , που έχουμε και τις μεγαλύτερες ισοδύναμες τάσεις, όπως φαίνεται στις εικόνες 4.20 και 4.21 για το άκρο και το κέντρο της παραμόρφωσης.

Για το μοντέλο 3.α:



Εικόνα 4.22: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 3.α - Άκρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).

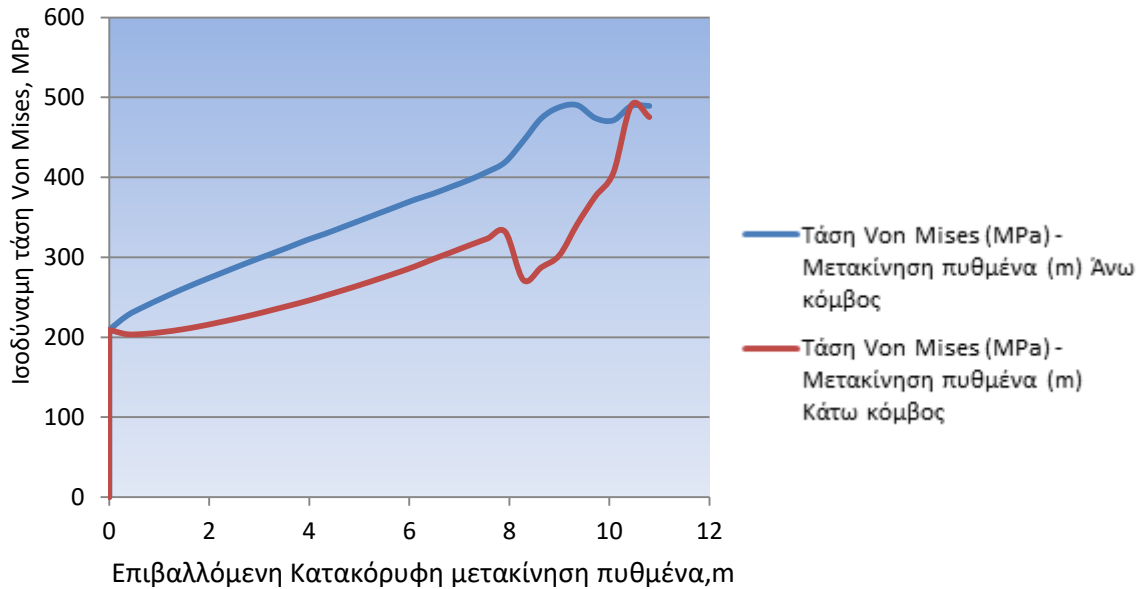


Εικόνα 4.23: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 3.α – Κέντρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).

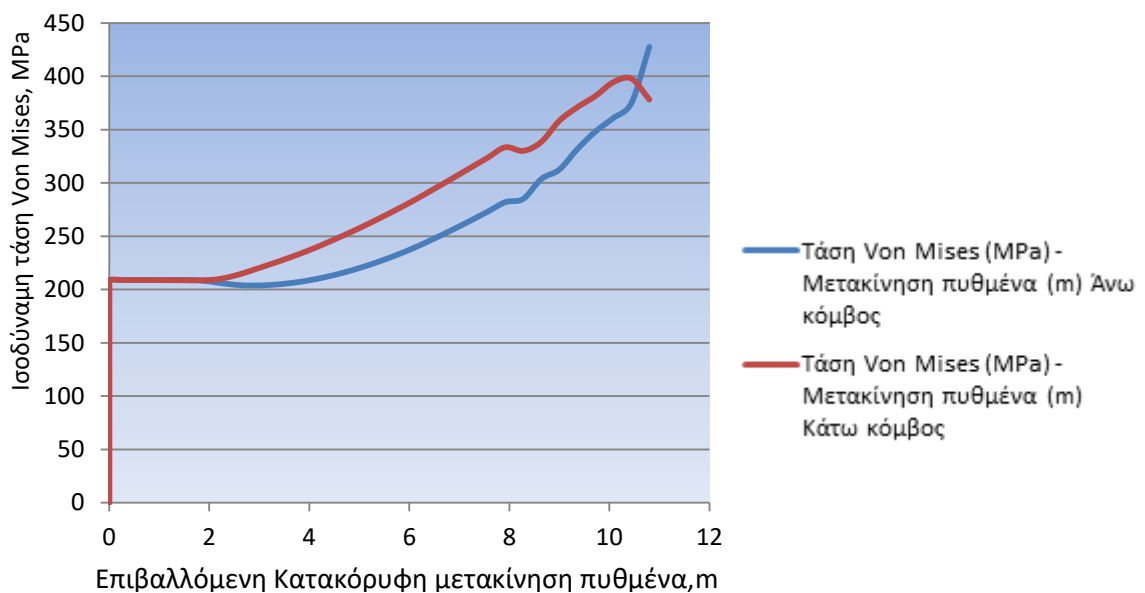
Το πλατό έως την επιβολή κατακόρυφης μετακίνησης περίπου 3,5 m στο διάγραμμα της εικόνας 4.23 είναι λογικό και παρατηρείται γιατί οι κόμβοι λήψης των τάσεων βρίσκονται στο κέντρο του μοντέλου (εικόνα 4.21), σε κάποια απόσταση από τα άκρα δημιουργίας του ανάγλυφου του πυθμένα. Πρέπει λοιπόν να έχει ήδη σχηματιστεί μια καμπυλότητα στον

αγωγό προκειμένου να αναπτυχθούν στην περιοχή πρόσθετες τάσεις εξαιτίας της κάμψης, πέραν αυτών που αναπτύσσονται με την αρχική επιβολή εξωτερικής πίεσης και ιδίου βάρους.

Ομοίως παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το μοντέλο 3.β.



Εικόνα 4.24: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 3.β - Άκρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).



Εικόνα 4.25: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης

πυθμένα δοκιμίου 3.β – Κέντρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).

Στο σενάριο 3 η πλαστικοποίηση εμφανίζεται στα άκρο μετά από την υποχώρηση των κόμβων του πυθμένα κατά 7-8m περίπου και στις 2 περιπτώσεις. Παρατηρείται η πλήρη πλαστικοποίηση της διατομής του αγωγού με την κατακόρυφη μετακίνηση του πυθμένα κατά 11 m περίπου, νωρίτερα από ότι συνέβαινε στα σενάρια 1 και 2, παρόλο που το εύρος της βύθισης μειώθηκε στα 150 m. Αυτό συμβαίνει γιατί μεταφέρονται οι τάσεις από το ένα άκρο στο άλλο, εφόσον αυξάνεται η καμπυλότητα του αγωγού κατά την υποχώρηση του πυθμένα. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρατηρείται και αύξηση των τάσεων στον αγωγό στο κέντρο του μοντέλου, η οποία στις προηγούμενες περιπτώσεις ήταν μικρή.

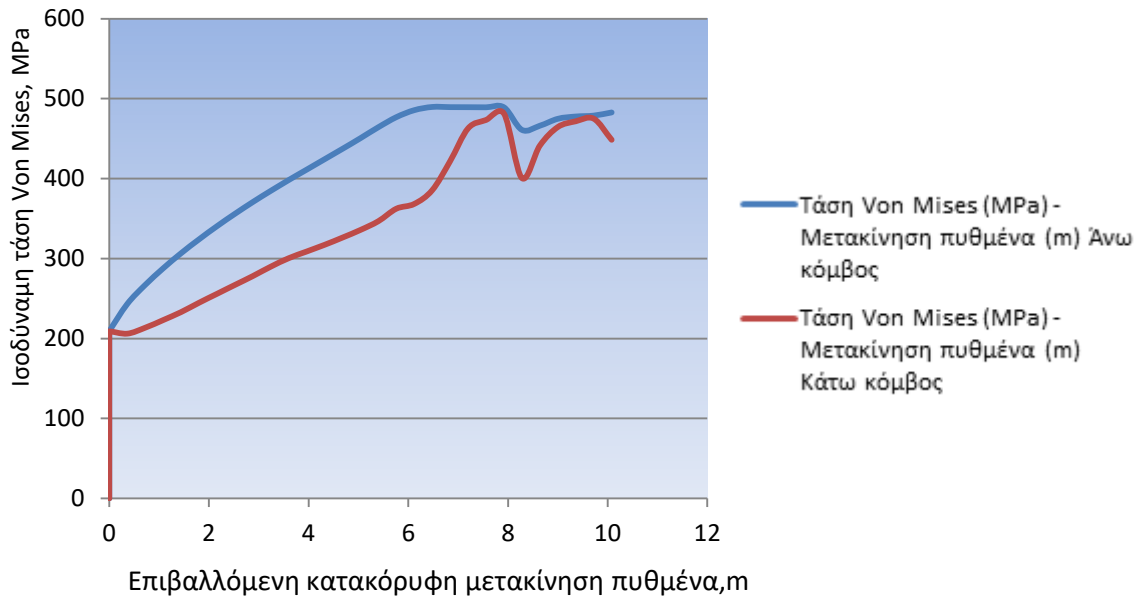
#### **δ. Σενάριο προβλήματος 4**

Συνεχίζονται οι δοκιμές για να εκτιμηθεί η συμπεριφορά των μοντέλων 4.α και 4.β με δημιουργία ανάγλυφου μήκους 140 m, με παραμέτρους εδάφους που αντιστοιχούν σε άμμο  $c=0$ ,  $\Phi=40^\circ$ .

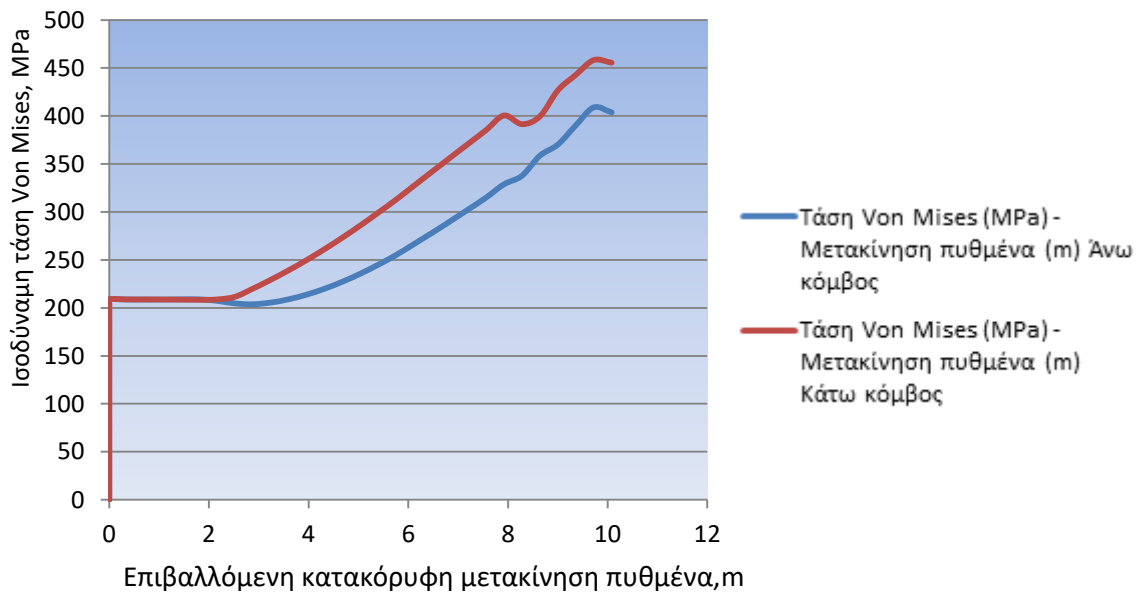
Και σε αυτήν την περίπτωση οι αγωγοί των μοντέλων μας παραμορφώνονται όπως περιγράφεται στην εικόνα 4.6.

Παρατίθενται τα διαγράμματα τάσεων σε κόμβους σε ένα άκρο της παραμόρφωσης και στο μέσον της, τόσο για το μοντέλο 4.α, όσο και για το μοντέλο 4.β. Θα ληφθούν δεδομένα για τους άνω και κάτω κόμβους του αγωγού κατά τον άξονα  $y$ , κατά αντιστοιχία στις θέσεις που φαίνονται στις εικόνες 4.20 και 4.21, που έχουμε και τις μεγαλύτερες τάσεις.

Για το μοντέλο 4.α:

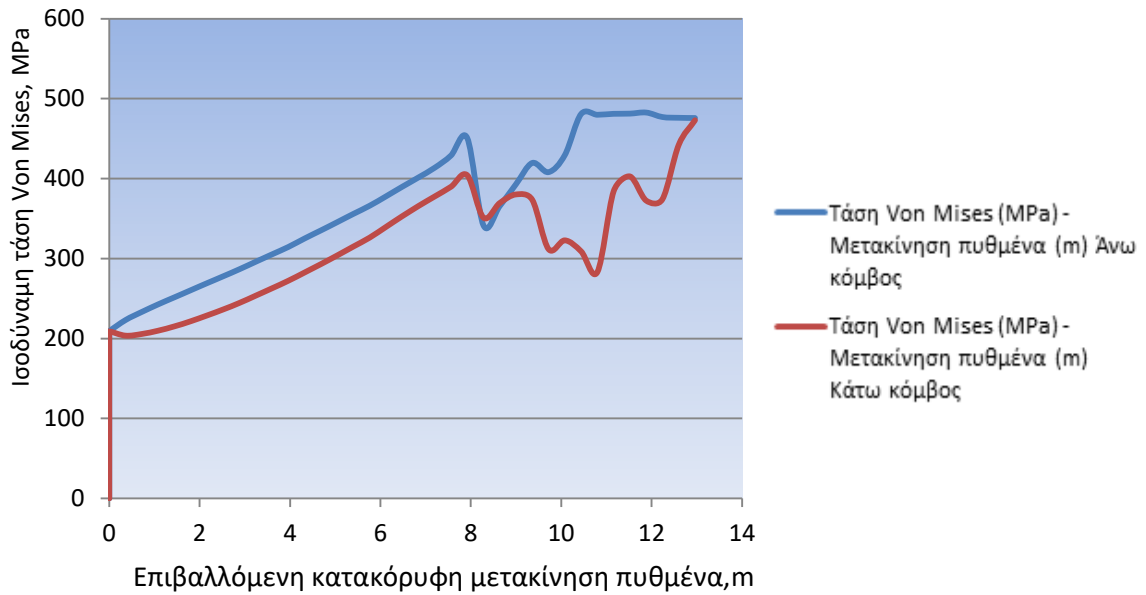


Εικόνα 4.26: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 4.α - Άκρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).

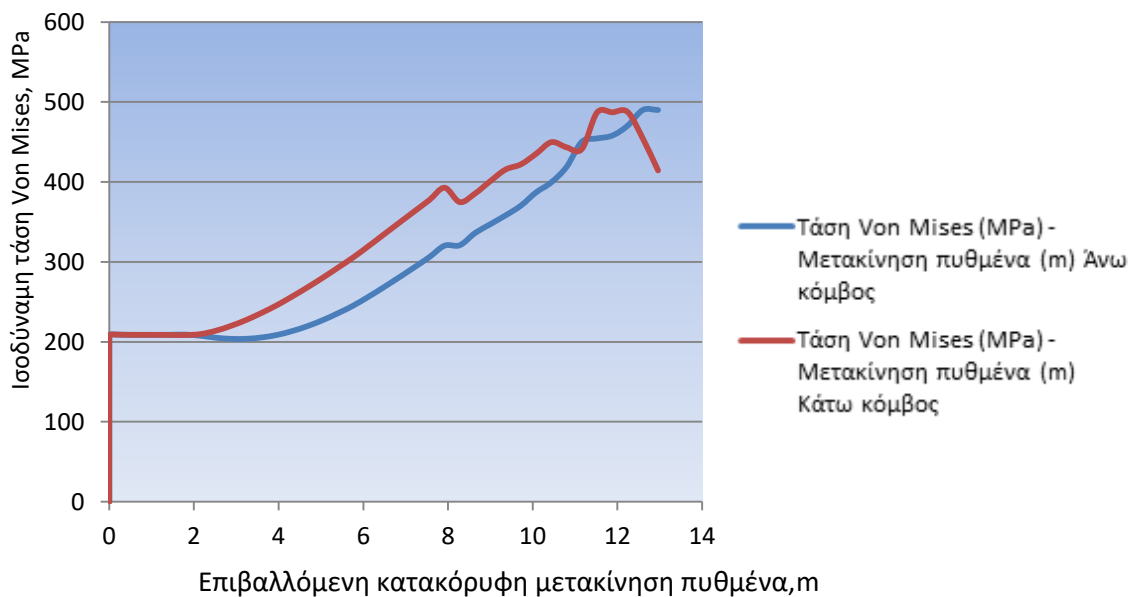


Εικόνα 4.27: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 4.α – Κέντρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).

Για το μοντέλο 4.β:



Εικόνα 4.28: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 4.β - Άκρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).



Εικόνα 4.29: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 4.β – Κέντρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).

Παρατηρείται ότι το κέλυφος του αγωγού ξεκινάει να πλαστικοποιείται κάπως νωρίτερα στο μοντέλο 4.α, με μετακίνηση πυθμένα περίπου 7 m, σε σχέση με το μοντέλο 4.β, που συναντάται το φαινόμενο με μετακίνηση πυθμένα κατά 8 m περίπου. Η διαφοροποίηση κρίνεται ασήμαντη. Και στις 2 περιπτώσεις το κέλυφος πλαστικοποιείται πριν αναρτηθεί σε

όλο το μήκος από τα άκρα.

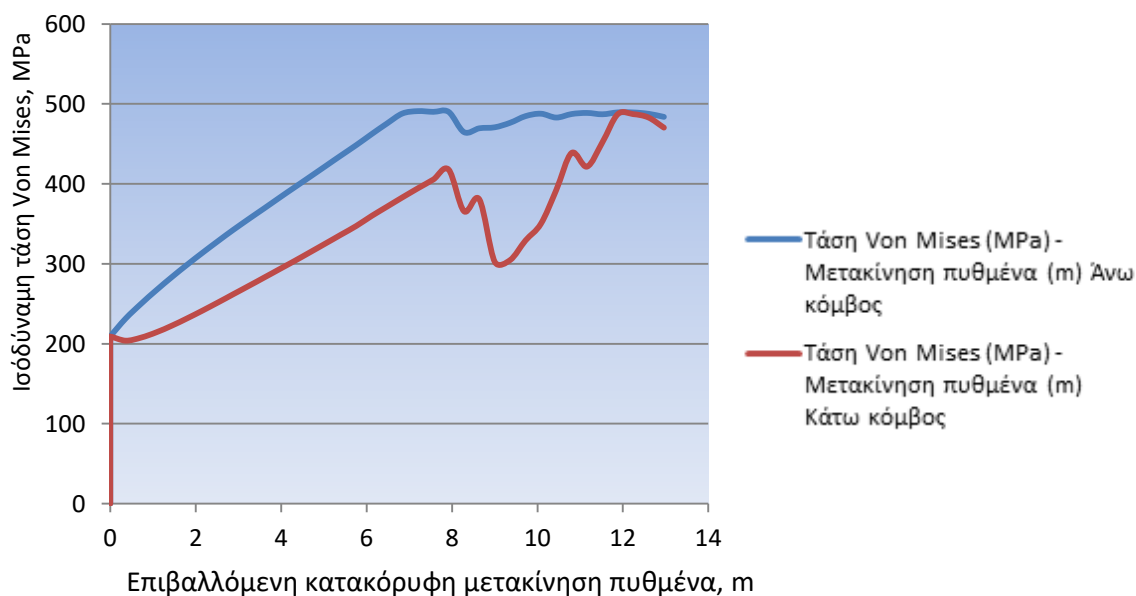
### ε. Σενάριο προβλήματος 5

Συνεχίζονται οι δοκιμές των μοντέλων 5.α και 5.β με δημιουργία ανάγλυφου μήκους 140 m, με παραμέτρους εδάφους που αντιστοιχούν σε άμμο  $c=0$ ,  $\Phi=30^\circ$ .

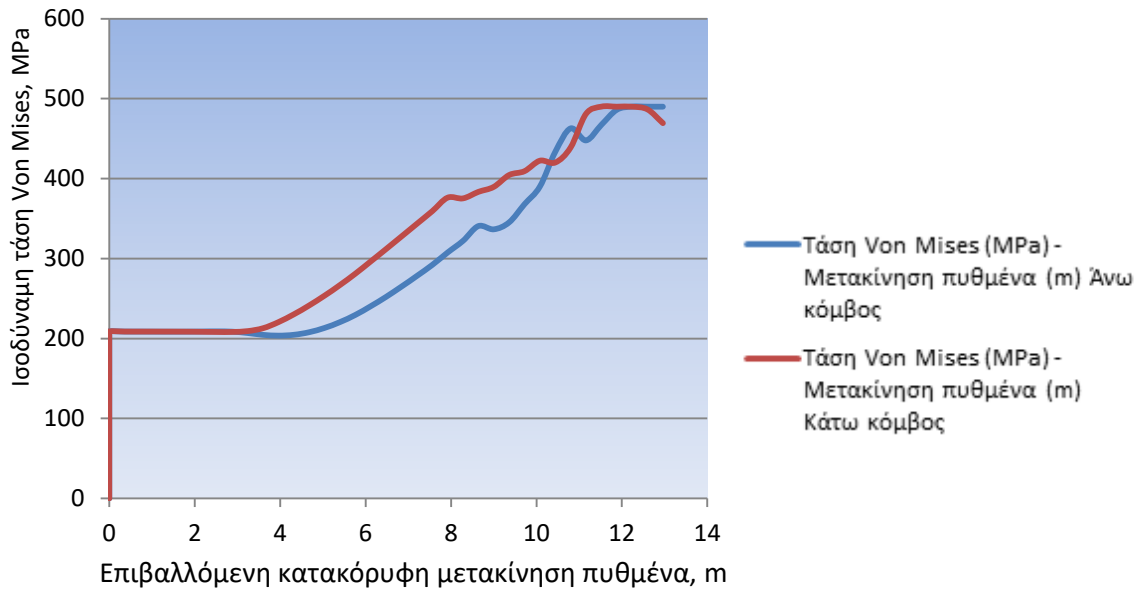
Και σε αυτήν την περίπτωση οι αγωγοί των μοντέλων παραμορφώνονται όπως περιγράφεται στην εικόνα 4.6.

Παρατίθενται τα διαγράμματα τάσεων σε κόμβους σε ένα άκρο της παραμόρφωσης και στο μέσον της, κατά αντιστοιχία στις θέσεις που φαίνονται στις εικόνες 4.16 και 4.17, τόσο για το μοντέλο μήκους 5.α, όσο και για το μοντέλο 5.β.

Μοντέλο 5.α:

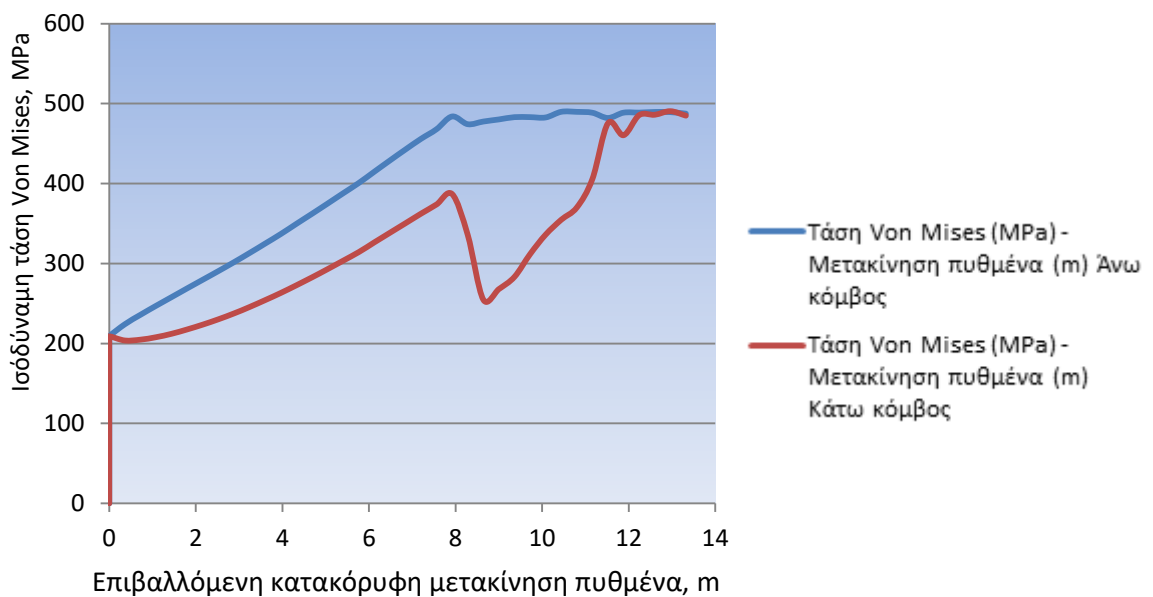


Εικόνα 4.30: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 5.α - Άκρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).



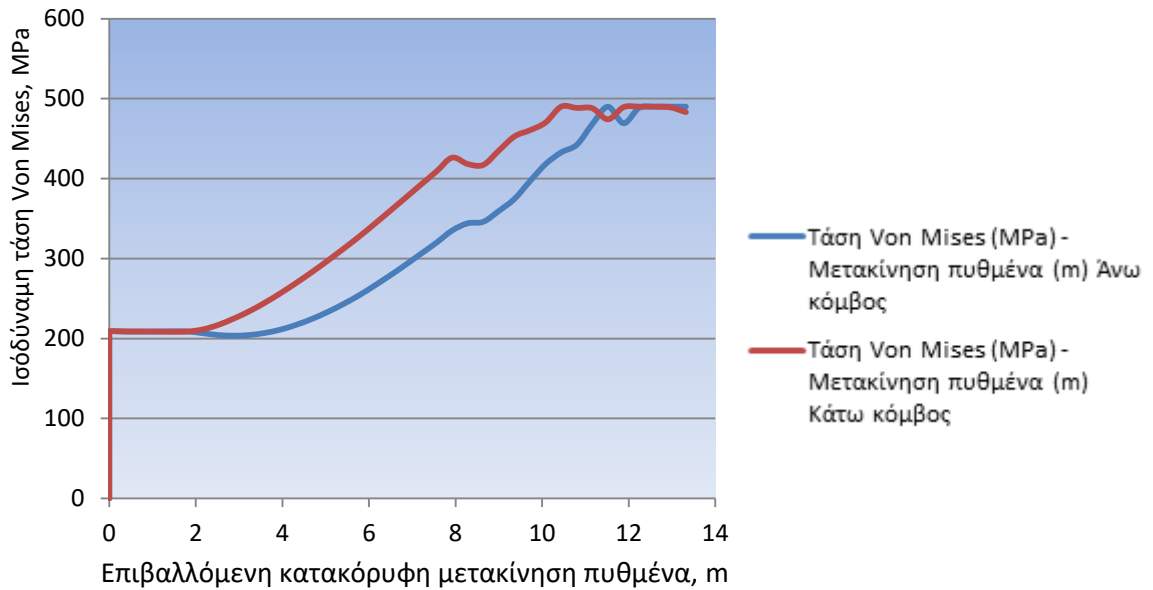
Εικόνα 4.31: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 5.α – Κέντρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).

Μοντέλο 5.β:



Εικόνα 4.32: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 5.β - Άκρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).





Εικόνα 4.33: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 5.β – Κέντρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).

Παρατηρείται περίπου η ίδια συμπεριφορά και στα 2 μοντέλα των δοκιμών μας. Το υλικό του αγωγού φτάνει στο όριο της αντοχής του στο κέντρο του μοντέλου, λόγω αυξημένης καμπυλότητας που δημιουργείται στον αγωγό, εφόσον έχει μειωθεί το εύρος του ανοίγματος- βυθίσματος του πυθμένα. Η μεταβολή των χαρακτηριστικών του υλικού του πυθμένα δεν επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις και η πλήρη πλαστικοποίηση της διατομής του αγωγού συμβαίνει κατόπιν μετακίνησης των κόμβων του πυθμένα κατά 13 m περίπου.

## στ. Σενάριο προβλήματος 6

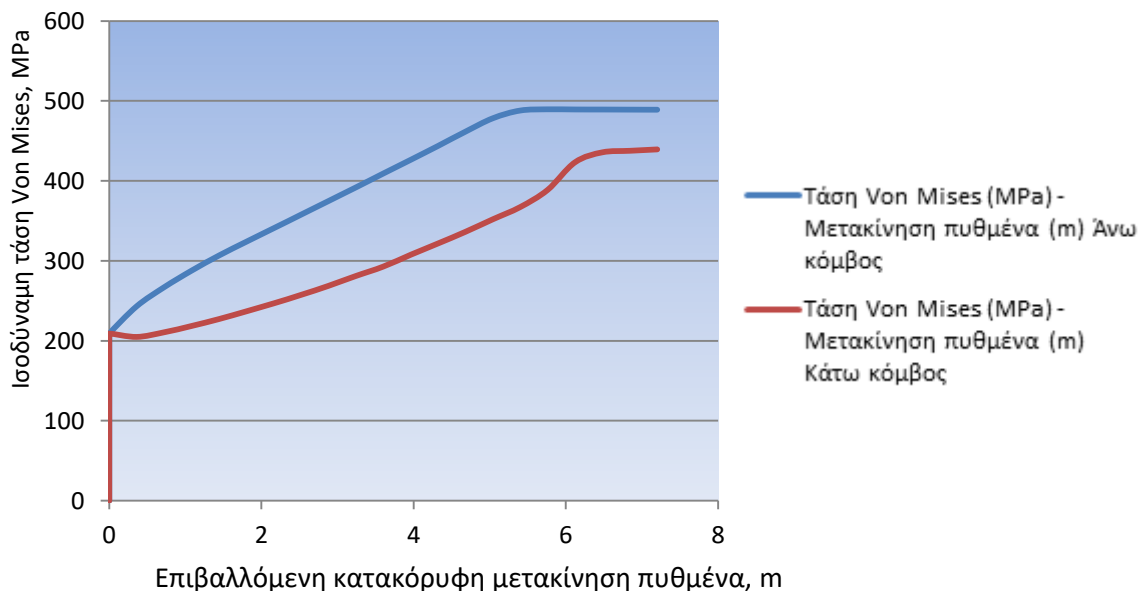
Κατόπιν διαδοχικών δοκιμών διαπιστώθηκε ότι για τα συγκεκριμένα μοντέλα αγωγού-πυθμένα, για να αναρτηθεί το συνολικό μήκος του αγωγού (εικόνα 4.30) το άνοιγμα πρέπει να έχει εύρος : 120 m στο μοντέλο 6.α και 125 m για το μοντέλο 6.β.



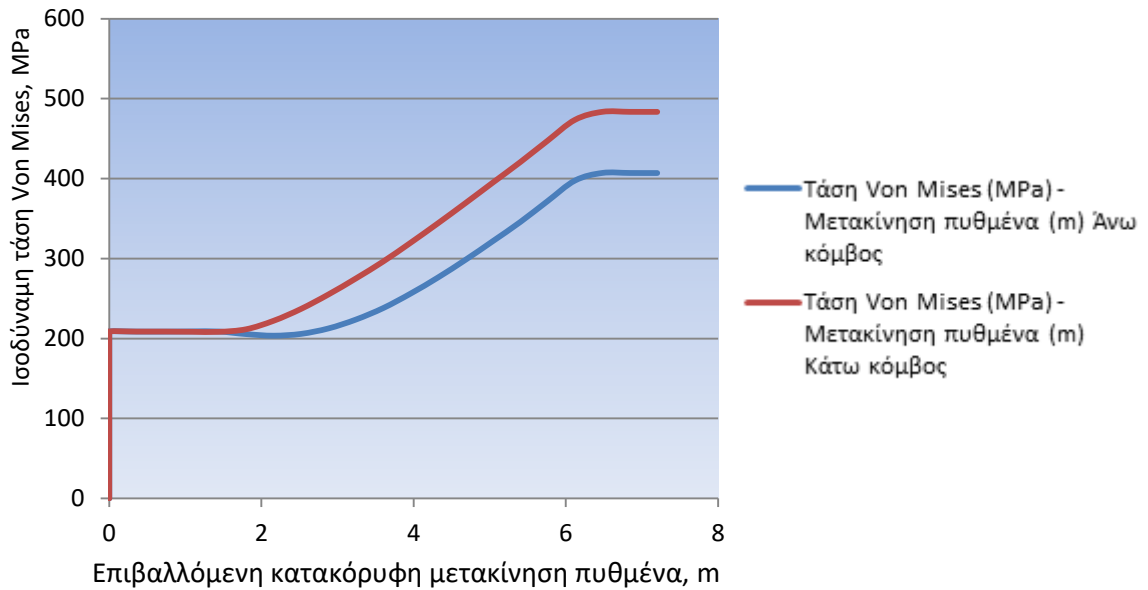
Εικόνα 4.34: Αναπαράσταση ελεύθερου τμήματος αγωγού

Ακολουθώς παρατίθενται τα διαγράμματα τάσεων για τα μοντέλα, σε κόμβους σε ένα άκρο της παραμόρφωσης και στο μέσον της, κατά αντιστοιχία στις θέσεις που φαίνονται στις εικόνες 4.20 και 4.21, έως τη στιγμή που αναρτάται όλο το μήκος του αγωγού εξαιτίας της υποχώρησης του πυθμένα κατά 6 m περίπου, με παραμέτρους πυθμένα που αντιστοιχούν σε άμμο  $c=0$ ,  $\Phi=40^\circ$ .

Για το μοντέλο 6.α:

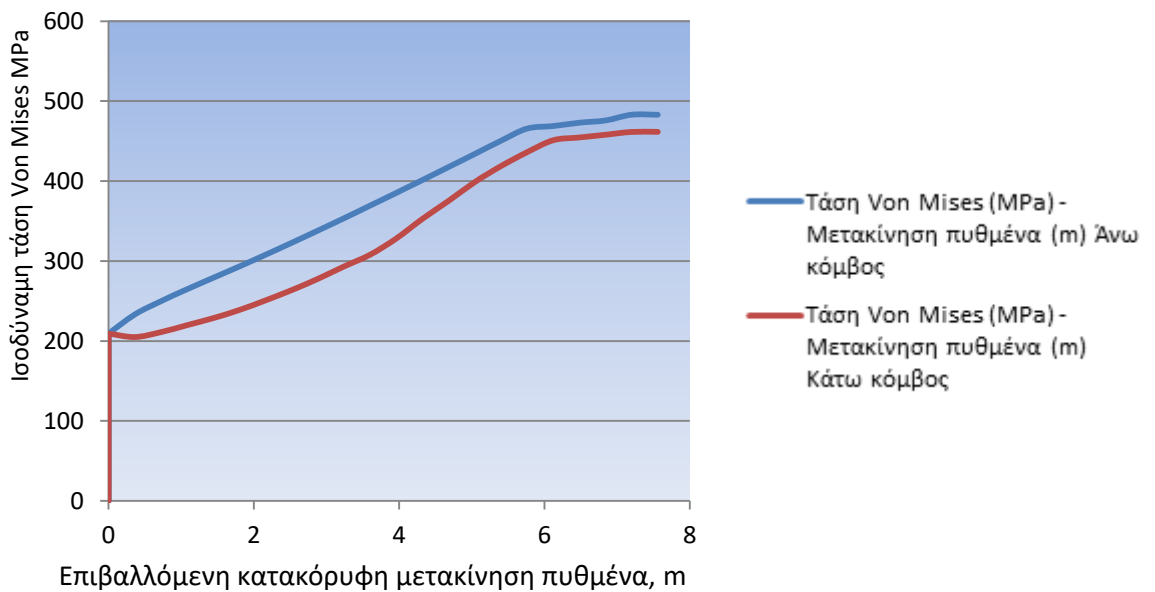


Εικόνα 4.35: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 6.α - Άκρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).

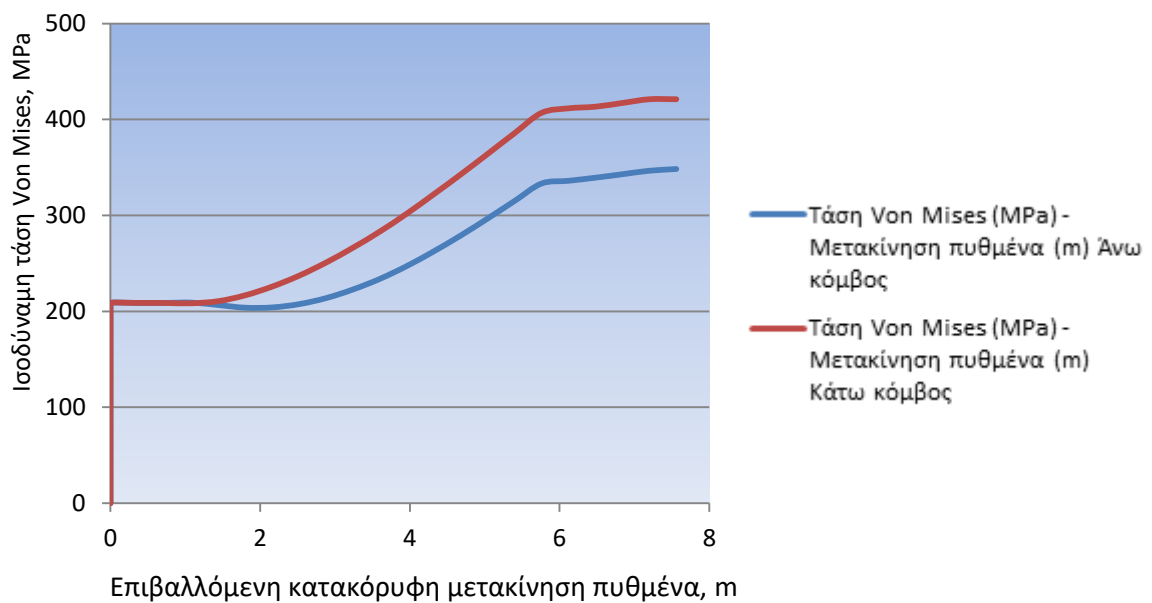


Εικόνα 4.36: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 6.α – Κέντρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).

Για το μοντέλο 6.β:



Εικόνα 4.37: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 6.β - Άκρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).



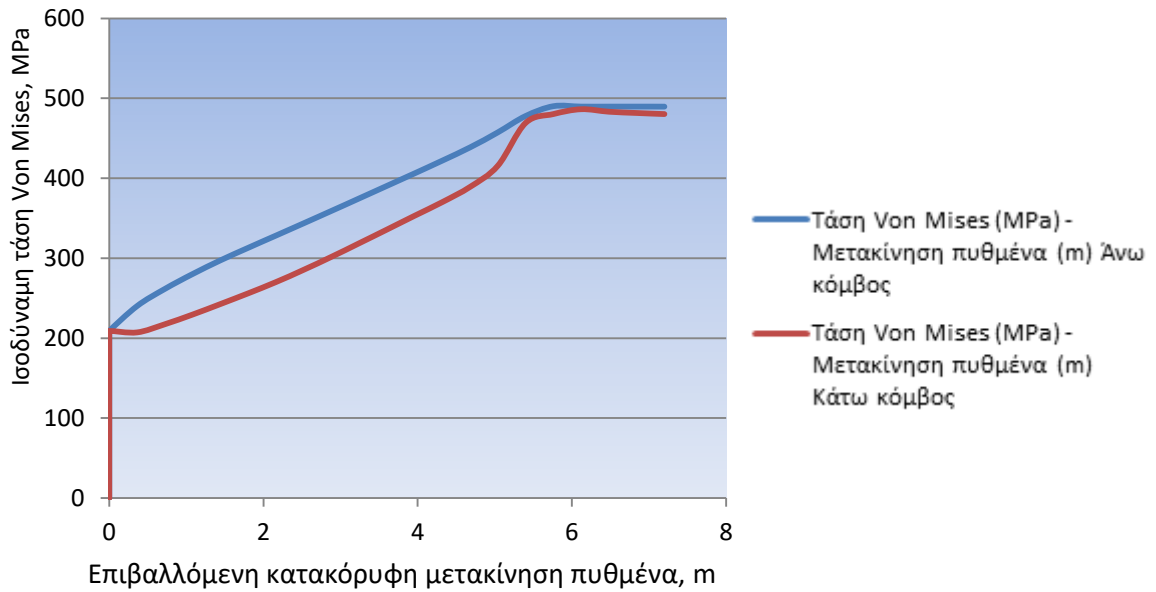
Εικόνα 4.38: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 6.β – Κέντρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).

Γενικά παρατηρείται ότι στα άκρα του ανάγλυφου των μοντέλων οι τάσεις εμφανίζονται αυξημένες στους άνω κόμβους λήψης αποτελεσμάτων (μπλε γραμμές στα αντίστοιχα διαγράμματα). Αντίθετα, στο κέντρο του ανάγλυφου των μοντέλων παρατηρείται ότι γενικώς οι άνω κόμβοι εμφανίζουν μικρότερες τάσεις (μπλε γραμμές στα αντίστοιχα διαγράμματα). Αυτό παρατηρείται εξαιτίας της αντίθετης καμπυλότητας του αγωγού, στα άκρα και στο κέντρο των μοντέλων. Γενικά φαίνεται ότι οι τάσεις είναι μεγαλύτερες στην επιφάνεια του κελύφους του αγωγού της εξωτερικής πλευράς της καμπυλότητάς του.

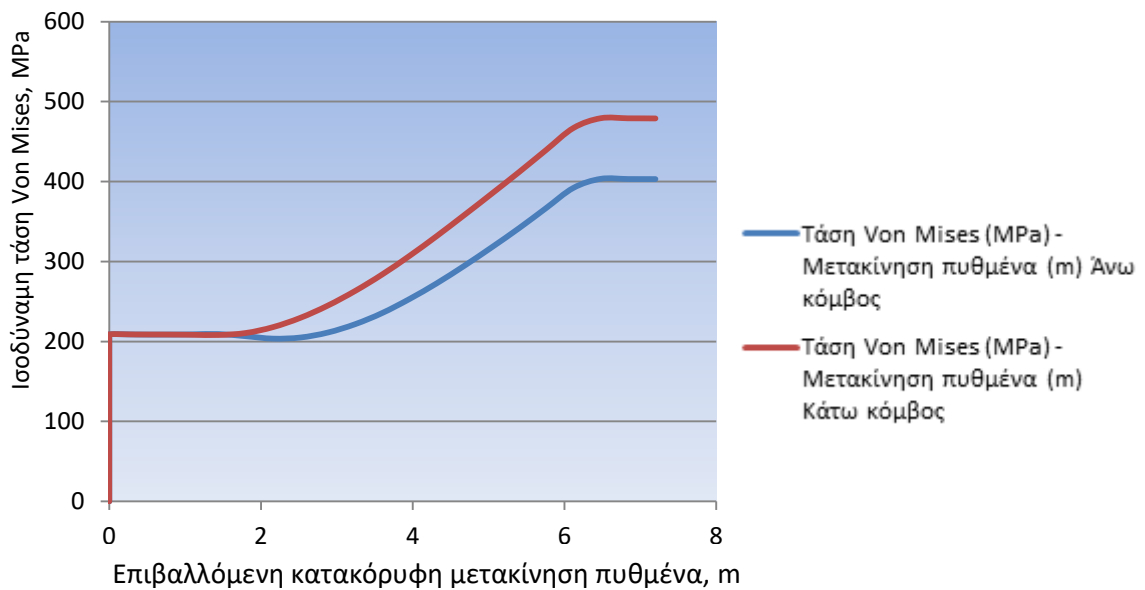
## ζ. Σενάριο προβλήματος 7

Ακολούθως παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα τάσεων για τα μοντέλα 7.α και 7.β, με εύρος ελεύθερου τμήματος 120 m και 125 m αντίστοιχα, όπως και στο σενάριο 6, έως τη στιγμή που αναρτάται όλο το μήκος του αγωγού εξαιτίας της υποχώρησης του πυθμένα κατά 6 m περίπου, με παραμέτρους πυθμένα που αντιστοιχούν σε άμμο  $c=0$ ,  $\Phi=30^\circ$ . Και τα 2 μοντέλα παραμορφώνονται όπως φαίνεται στην εικόνα 4.34.

Για το μοντέλο 7.α:

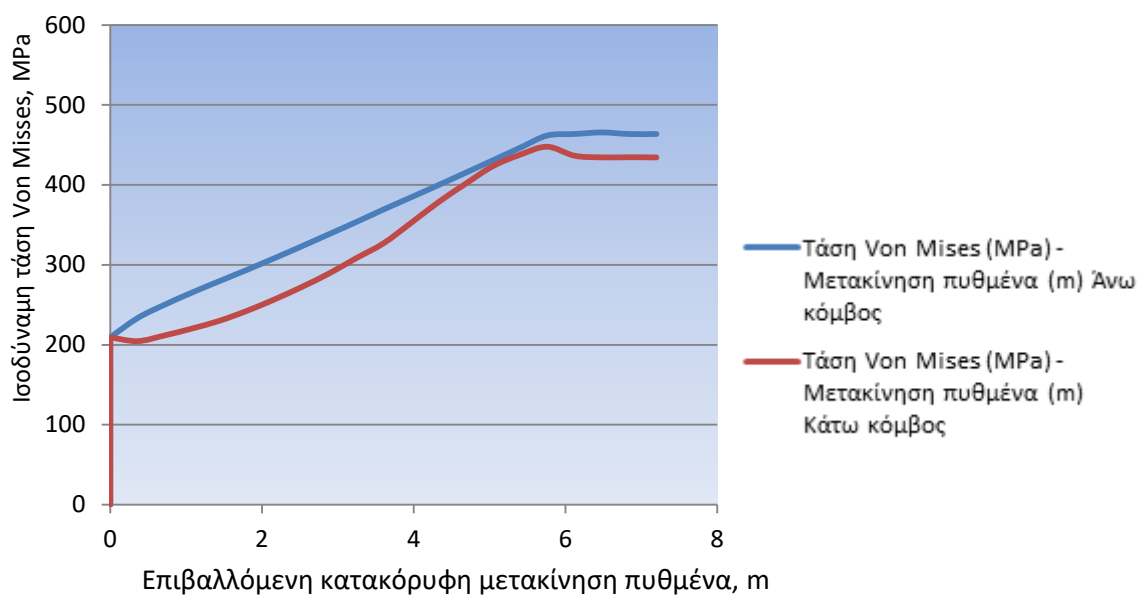


Εικόνα 4.39: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 7.α - Άκρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).

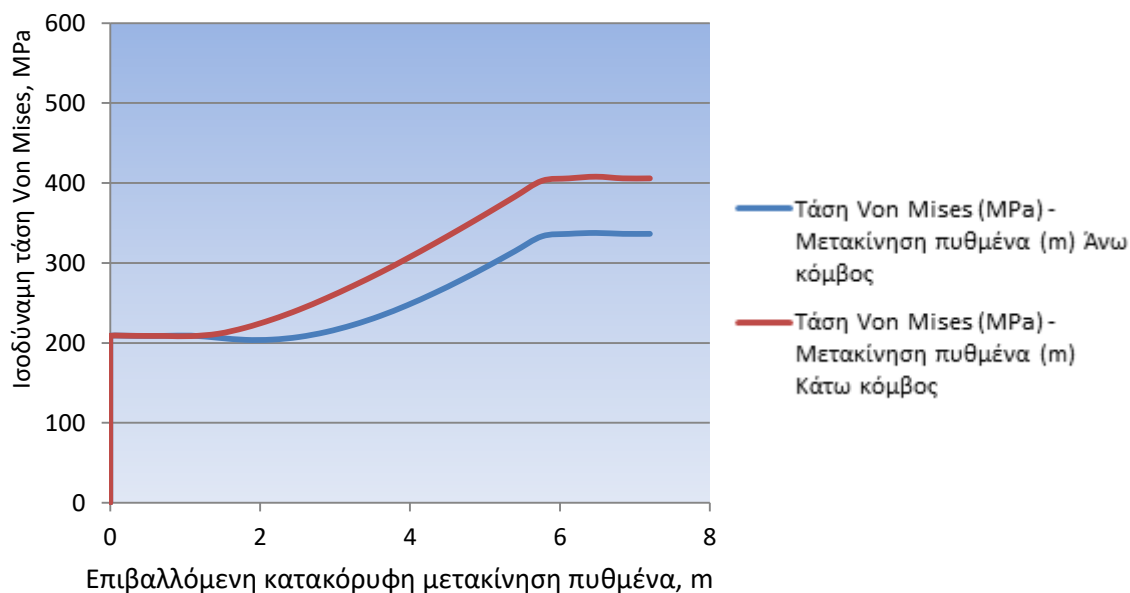


Εικόνα 4.40: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 7.α – Κέντρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).

Για το μοντέλο 7.β:



Εικόνα 4.41: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 7.β - Άκρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).



Εικόνα 4.42: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 7.β – Κέντρο ανάγλυφου (μετακίνησης πυθμένα).

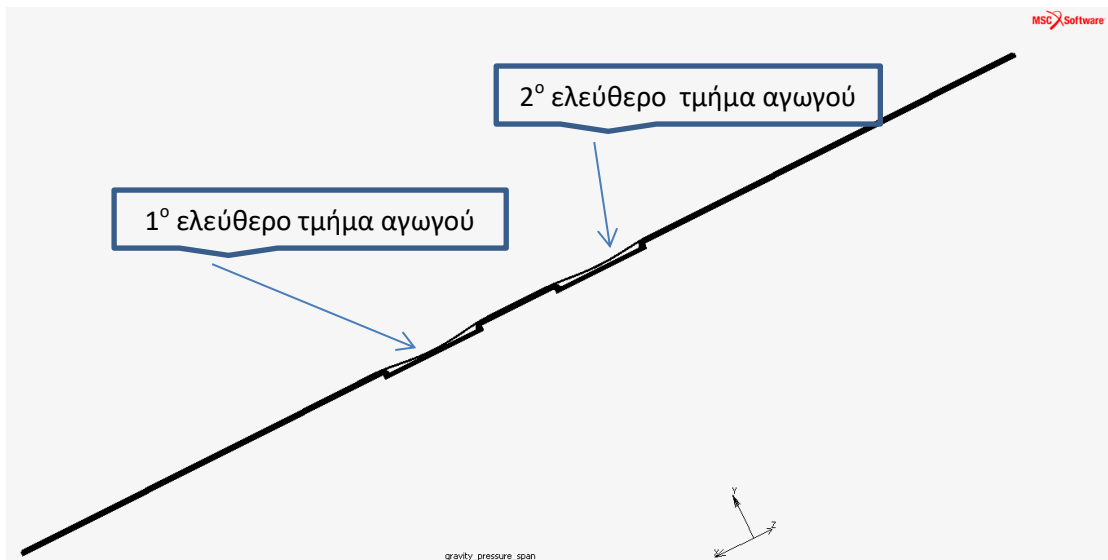
Μετά τα παραπάνω, παρατηρείται ότι τα μοντέλα διαφορετικού μήκους αγωγού, των

περιπτώσεων που εξετάστηκαν, εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά. Η επίδραση των διαστάσεων των μοντέλων στη μηχανική συμπεριφορά του αγωγού είναι μικρή. Η απόσταση των 200 m, του δοκιμίου μήκους 600 m, από το σημείο εμφάνισης των φαινομένων μετακίνησης τμήματος του πυθμένα (δημιουργίας ανάγλυφου) με τα άκρα του δοκιμίου αγωγού - πυθμένα, στα οποία και έχουν θεωρηθεί σταθερές συνοριακές συνθήκες, κρίνεται ικανοποιητική. Τα μοντέλα συμπεριφέρονται κατά τον ίδιο τρόπο και στις 2 κατηγορίες αμμώδους πυθμένα.

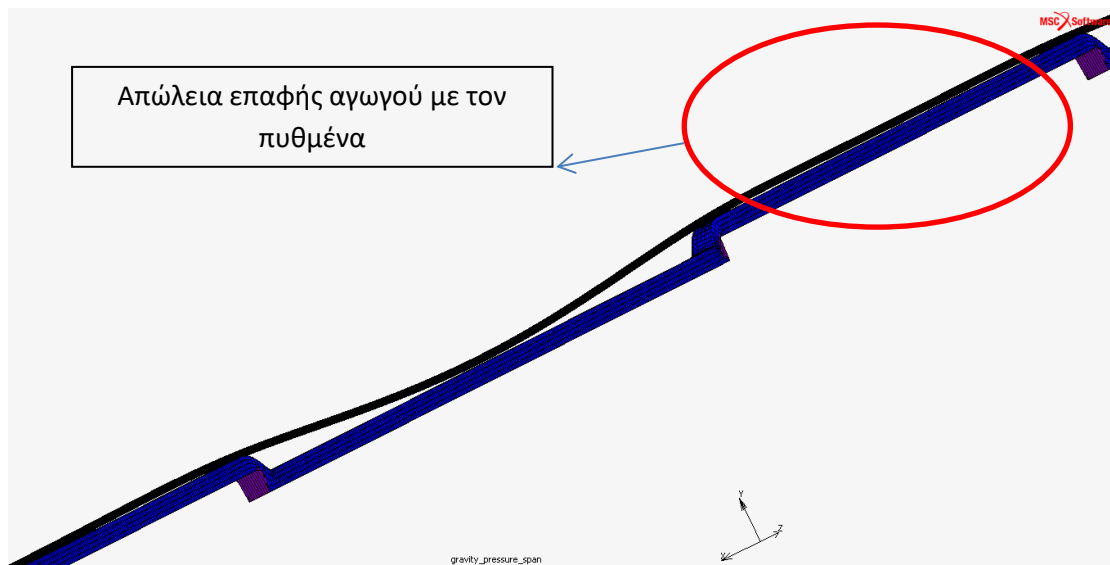
Η ανάλυση θα συνεχίσει με την εκτίμηση συμπεριφοράς του αγωγού σε περιπτώσεις που το ανάγλυφο του πυθμένα σχηματίζει 2 διαδοχικά ελεύθερα αιωρούμενα τμήματα του υποθαλασσίου αγωγού, δημιουργώντας μοντέλα μήκους 1000 m, ώστε να υπάρχει απόσταση τουλάχιστον 200 m της περιοχής εμφάνισης των μετακινήσεων του πυθμένα και των άκρων του μοντέλου.

## **η. Σενάριο προβλήματος 8**

Ανάλυση της συμπεριφοράς του υποθαλασσίου αγωγού δημιουργώντας μοντέλο μήκους 1000 m, με 2 ελεύθερα τμήματα αγωγού, ώστε να διαπιστωθεί αν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των ανοιγμάτων. Στις εικόνες 4.43, 4.44 και 4.45 φαίνονται τα ελεύθερα τμήματα του αγωγού εξαιτίας των μορφολογικών ανωμαλιών του πυθμένα. Στην εικόνα 4.46 φαίνονται οι διαστάσεις των ελεύθερα αιωρούμενων τμημάτων και η μεταξύ τους απόσταση. Από τις εικόνες 4.44 και 4.45 γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει αλληλεπίδραση, εφόσον παρατηρείται ότι το τμήμα του αγωγού που μεσολαβεί μεταξύ των 2 ελεύθερων τμημάτων έχει ανασηκωθεί και δεν εφάπτεται στον πυθμένα, λόγω της καμπτικής ροπής των παρακείμενων ελεύθερων τμημάτων. Ο πυθμένας είναι αμμώδης με  $\Phi=40^\circ$ .

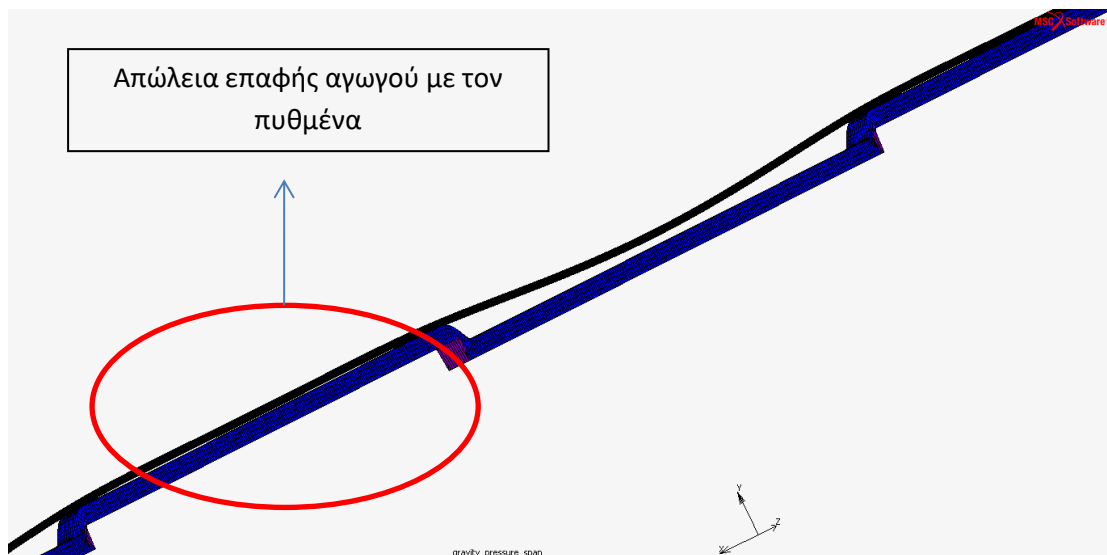


Εικόνα 4.43: Μοντέλο αγωγού – πυθμένα.



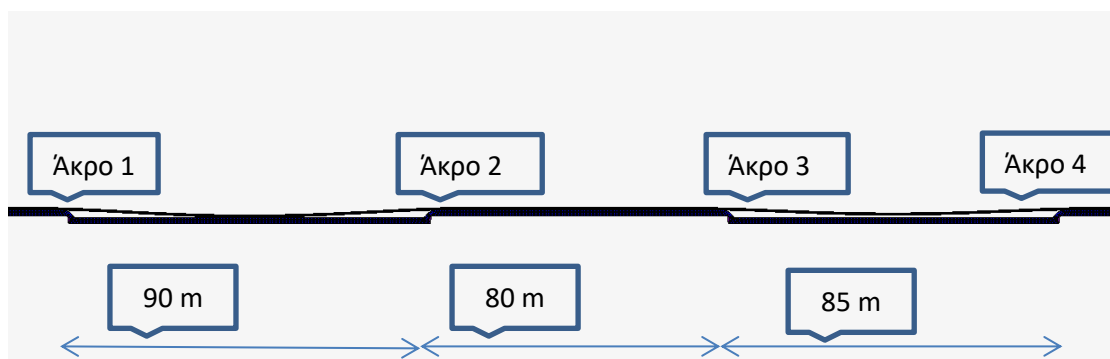
Εικόνα 4.44: 1° ελεύθερο τμήμα αγωγού.



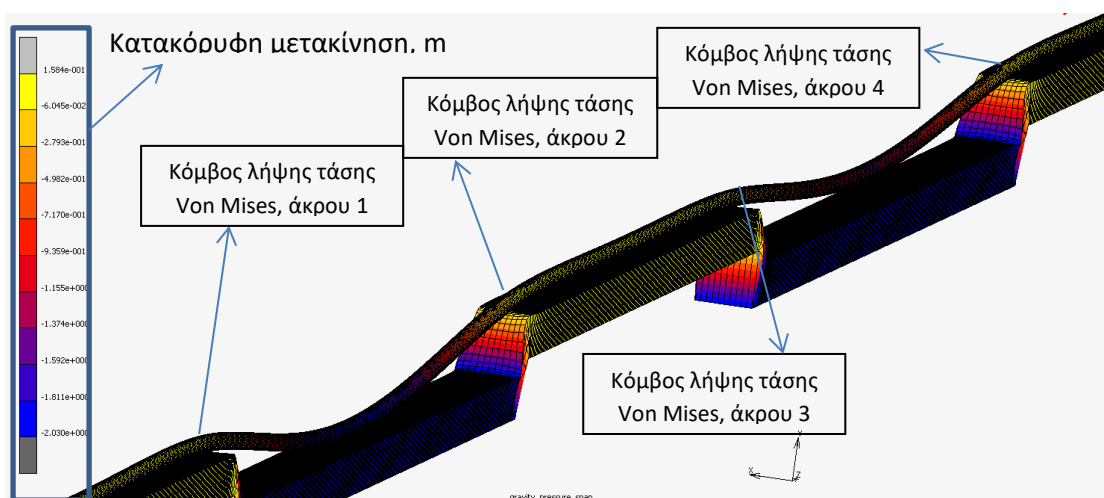


Εικόνα

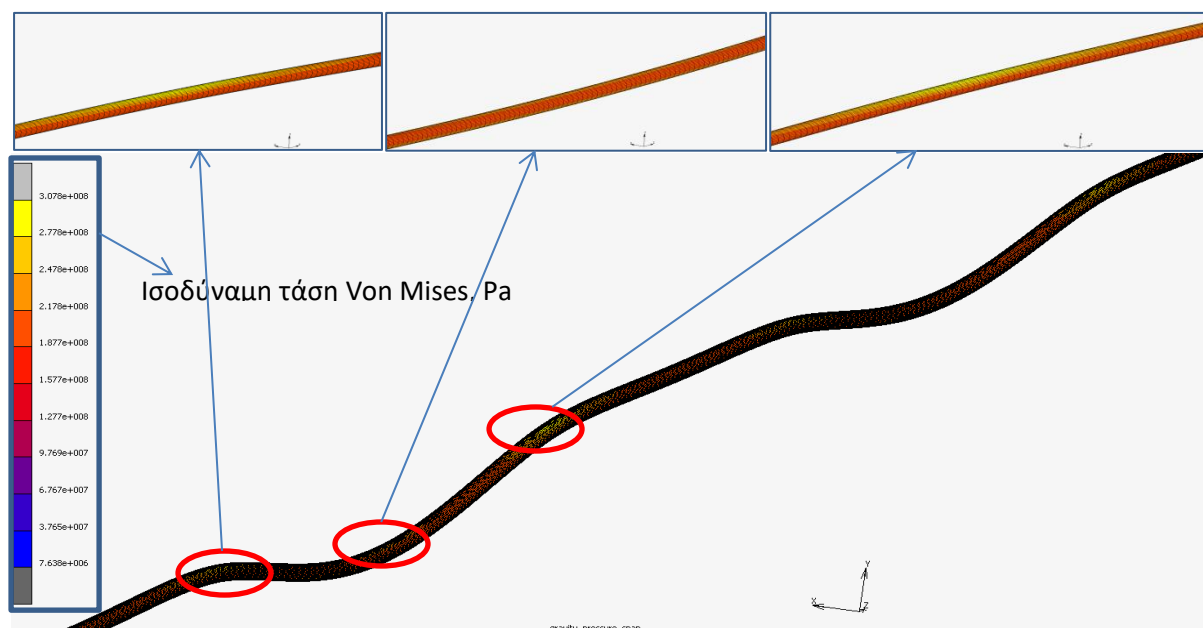
Εικόνα 4.45:2<sup>ο</sup> ελεύθερο τμήμα αγωγού.



Εικόνα 4.46: Διαστάσεις μορφολογικών ανωμαλιών πυθμένα.



Εικόνα 4.47: Χρωματική απεικόνιση των κατακόρυφων μετακινήσεων (m) του μοντέλου.



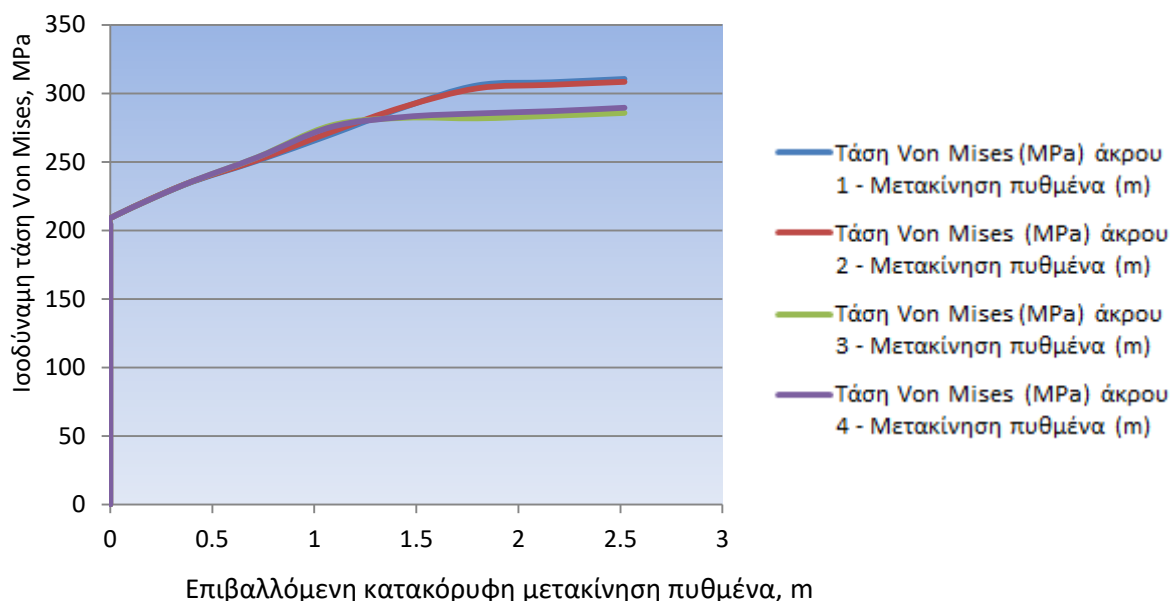
Εικόνα 4.48: Χρωματική απεικόνιση των τάσεων Von Mises (Pa) του αγωγού του μοντέλου.

Στην εικόνα 4.49 φαίνεται το διάγραμμα τάσεων στους κόμβους στις περιοχές που φαίνονται στην εικόνα 4.47, στο πάνω μέρος του κελύφους του αγωγού, στα άκρα των ελεύθερων τμημάτων όπου οι τάσεις είναι και μεγαλύτερες. Παρατηρείται ότι το κέλυφος του αγωγού δεν αστοχεί και επίσης ότι στις περιοχές των τεχνητών βυθισμάτων (κατακόρυφες μετακινήσεις περίπου 2 m) του πυθμένα ο αγωγός χάνει την επαφή του με αυτόν.

Στην εικόνα 4.47 παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση των τιμών των κατακόρυφων μετακινήσεων τόσο του αγωγού, όσο και των τμημάτων του πυθμένα. Το 2<sup>ο</sup> ελεύθερο τμήμα του αγωγού (εικόνα 4.43) που είναι και μικρότερο, χάνει την επαφή με τον πυθμένα μόλις δημιουργηθούν τεχνητά βυθίσματα περίπου 1,2 m. Στη συνέχεια, το 1<sup>ο</sup> ελεύθερο τμήμα του αγωγού χάνει την επαφή του με τον πυθμένα αφού τα τμήματά του υποχωρήσουν κατά 1,8 m περίπου. Αυτό φαίνεται και στο διάγραμμα της εικόνας 4.49, στο οποίο παρατηρείται ότι στα άκρα 1 και 2 οι τάσεις τείνουν να σταθεροποιηθούν έπειτα από κατακόρυφη μετακίνηση του πυθμένα κατά 1,2 m, ενώ στα άκρα 3 και 4 οι τάσεις τείνουν να σταθεροποιηθούν έπειτα από κατακόρυφη μετακίνηση του πυθμένα κατά 1,8 m περίπου.

Παρατηρείται ότι το τμήμα του αγωγού, που μεσολαβεί μεταξύ των δύο ελεύθερων τμημάτων του αγωγού, έχει ανασηκωθεί και δεν εφάπτεται στον πυθμένα. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην καμπτική ροπή των παρακείμενων ελεύθερων τμημάτων.

Ο αγωγός δεν αστοχεί και η αναπτυσσόμενη τάση στο κέλυφος είναι σχετικά μικρές. Μπορεί να υποβληθεί σε μεγαλύτερο εύρος βυθίσματος.



Εικόνα 4.49: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 8.

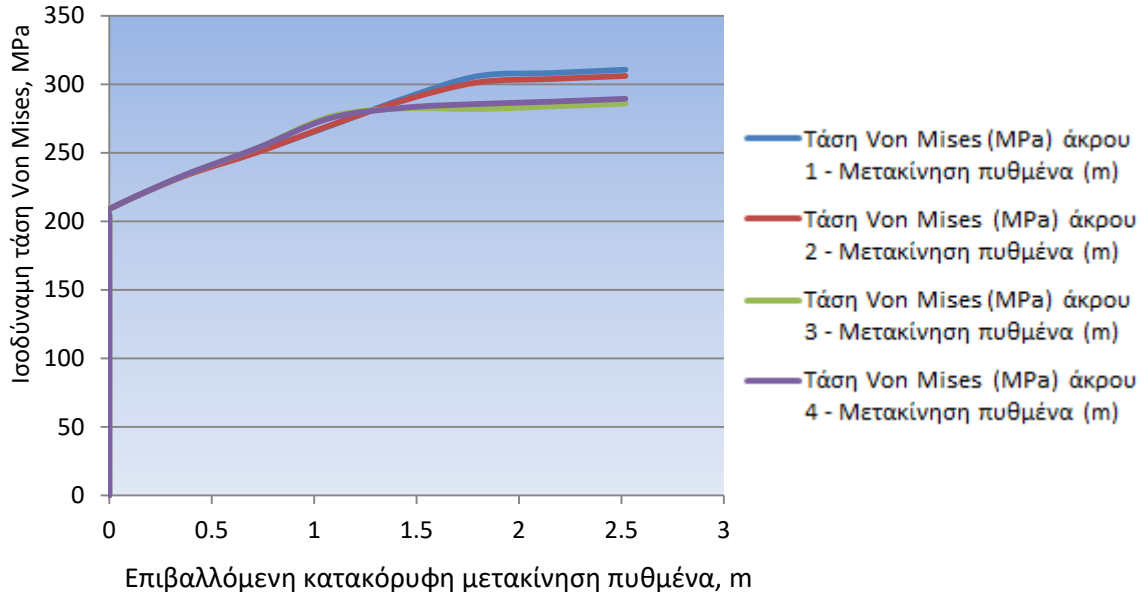
## ζ. Σενάριο προβλήματος 9

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η ανάλυση της συμπεριφοράς του υποθαλασσίου αγωγού με τη δημιουργία μοντέλου μήκους 1000 m, με 2 ελεύθερα τμήματα αγωγού, ομοίων διαστάσεων με το σενάριο 8, θεωρώντας ότι ο πυθμένας είναι αμμώδης με  $c=0$  και  $\Phi=30^\circ$ . Στις εικόνες 4.43, 4.44 και 4.45 φαίνονται τα ελεύθερα τμήματα του αγωγού εξαιτίας των μορφολογικών ανωμαλιών του πυθμένα και σε αυτή την περίπτωση. Στην εικόνα 4.46 φαίνονται οι διαστάσεις των ελεύθερα αιωρούμενων τμημάτων και η μεταξύ τους απόσταση. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, παρατηρούμε ότι το τμήμα του αγωγού που μεσολαβεί μεταξύ των 2 ελεύθερων τμημάτων έχει ανασηκωθεί και δεν εφάπτεται στον

πυθμένα, λόγω της καμπτικής ροπής των παρακείμενων ελεύθερων τμημάτων. Η συμπεριφορά είναι παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση.

Στην εικόνα 4.50 φαίνεται το διάγραμμα τάσεων στο πάνω μέρος του κελύφους του αγωγού, στα άκρα των ελεύθερων τμημάτων, στους αντίστοιχους κόμβους λήψης των τάσεων του κελύφους τους αγωγού του σεναρίου 8, που φαίνονται στην εικόνα 4.47. Ο αγωγός εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά, δεν αστοχεί, και στις περιοχές των τεχνητών βυθισμάτων του πυθμένα, ο αγωγός χάνει την επαφή του με αυτόν, με την επιβολή κατακόρυφης μετακίνησης του πυθμένα κατά περίπου 1,2 m και 1.8 m, για το 2<sup>ο</sup> και το 1<sup>ο</sup> ελεύθερο τμήμα αγωγού αντίστοιχα (εικόνα 4.43). Οι κατακόρυφες μετακινήσεις του πυθμένα που αντιστοιχούν στην απώλεια επαφής του αγωγού με τον πυθμένα, στο διάγραμμα της εικόνας 4.50 είναι αυτές που αντιστοιχούν στα σημεία μεταβολής της κλίσης των τιμών των τάσεων και της σταθεροποίησής τους, όπως και στο σενάριο προβλήματος 8.

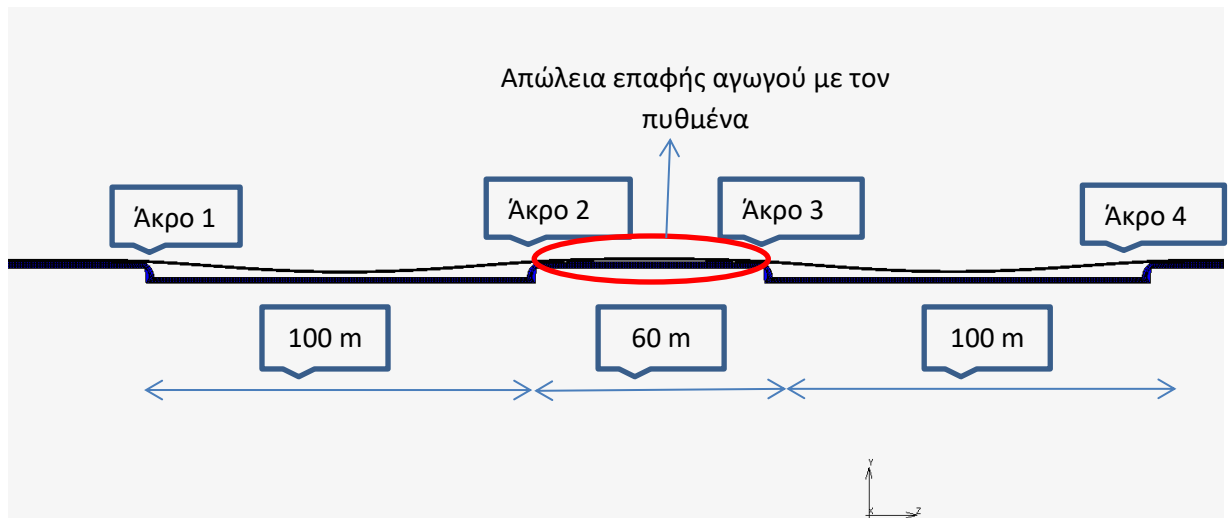
Δε διαπιστώνεται σημαντική διαφοροποίηση από τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του υλικού του πυθμένα, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του σεναρίου προβλήματος 8, το οποίο έχει ίδιες διαστάσεις. Ο αγωγός δεν αστοχεί και η αναπτυσσόμενες τάσεις στο κέλυφος είναι σχετικά μικρές. Μπορεί να υποβληθεί σε μεγαλύτερο εύρος βυθίσματος.



Εικόνα 4.50: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 9.

## ζ. Σενάριο προβλήματος 10

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η ανάλυση της συμπεριφοράς του υποθαλασσίου αγωγού δημιουργώντας μοντέλο μήκους 1000 m, με δύο ελεύθερα τμήματα αγωγού, ομοίων διαστάσεων με που φαίνονται στην εικόνα 4.51, θεωρώντας ότι ο πυθμένας είναι αμμώδης με  $c=0$  και  $\Phi=30^\circ$ .

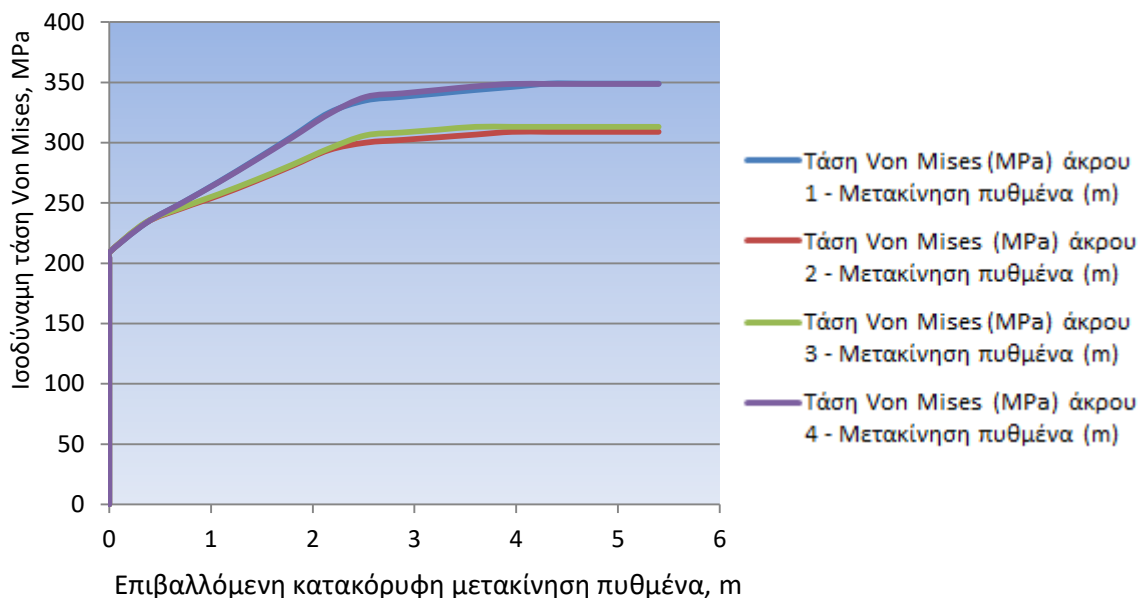


Εικόνα 4.51: Διαστάσεις μορφολογικών ανωμαλιών πυθμένα.

Στις εικόνες 4.43, 4.44 και 4.45 φαίνονται τα ελεύθερα τμήματα του αγωγού εξαιτίας των μορφολογικών ανωμαλιών του πυθμένα και σε αυτή την περίπτωση. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, παρατηρείται ότι το τμήμα του αγωγού που μεσολαβεί μεταξύ των δύο ελεύθερων τμημάτων έχει ανασηκωθεί και δεν εφάπτεται στον πυθμένα, λόγω της καμπτικής ροπής των παρακείμενων ελεύθερων τμημάτων (εικόνα 4.51).

Στην εικόνα 4.52 φαίνεται το διάγραμμα τάσεων στο πάνω μέρος του κελύφους του αγωγού, στα άκρα των ελεύθερων τμημάτων, στους αντίστοιχους κόμβους λήψης των τάσεων του κελύφους τους αγωγού του σεναρίου 8, που φαίνονται στην εικόνα 4.47. Ο αγωγός δεν αστοχεί και στις περιοχές των τεχνητών βυθισμάτων του πυθμένα, χάνει την επαφή του με αυτόν. Παρατηρείται ότι οι τάσεις στους άνω κόμβους των άκρων 2 και 3 είναι μικρότερες, γιατί ο αγωγός στην περιοχή αυτή εμφανίζει αντίθετη καμπυλότητα, αφού ανασηκώνεται στο τμήμα μεταξύ των τεχνητών βυθισμάτων.

Στο διάγραμμα της εικόνας 4.52 παρατηρείται ότι οι τάσεις τείνουν να σταθεροποιηθούν έπειτα από εφαρμογή κατακόρυφης μετακίνησης του πυθμένα κατά περίπου 3,6 m. Σε αυτό το σημείο ο αγωγός χάνει την επαφή του με τον πυθμένα, στα τμήματα αυτού που μετακινούνται κατακόρυφα.



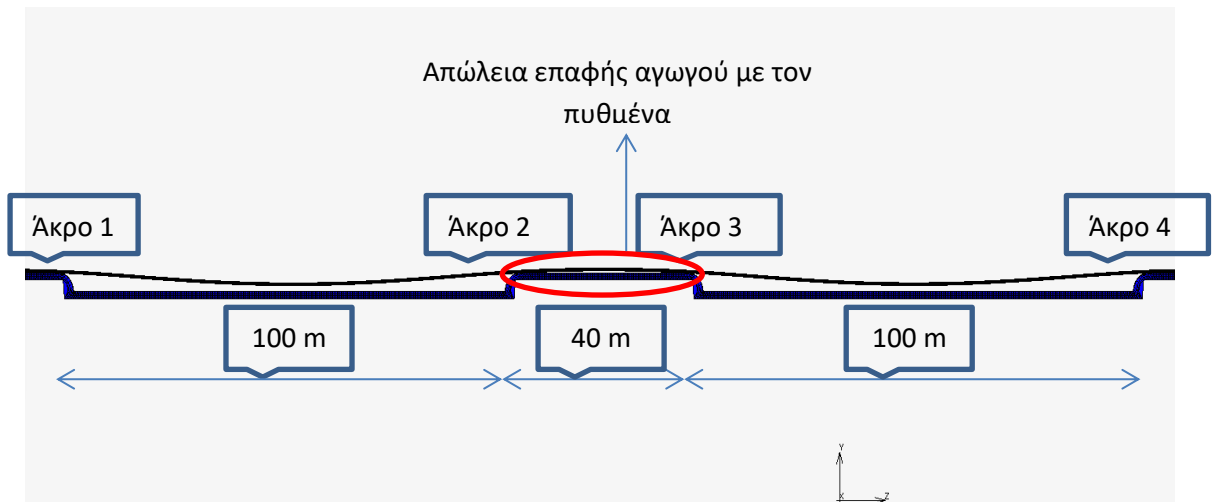
Εικόνα 4.52: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 10.

Ο αγωγός δεν αστοχεί και η αναπτυσσόμενη τάση στο κέλυφος είναι σχετικά μικρές. Μπορεί να υποβληθεί σε μεγαλύτερο εύρος βυθίσματος.

Οι μέγιστες τιμές των τάσεων στο κέλυφος του αγωγού είναι δυσανάλογες με αυτές των προηγούμενων περιπτώσεων των σεναρίων προβλημάτων 8 και 9, δεν έχουν γραμμική μεταβολή σε συνάρτηση με το εύρος των μετακινούμενων τμημάτων του πυθμένα.

## ζ. Σενάριο προβλήματος 11

Συνέχεια της ανάλυσης της συμπεριφοράς του υποθαλασσίου αγωγού δημιουργώντας μοντέλο μήκους 1000 m, με 2 ελεύθερα τμήματα αγωγού, ομοίων διαστάσεων με που φαίνονται στην εικόνα 4.53, θεωρώντας ότι ο πυθμένας είναι αμμώδης με  $\Phi=30^\circ$ .



Εικόνα 4.53: Διαστάσεις μορφολογικών ανωμαλιών πυθμένα.

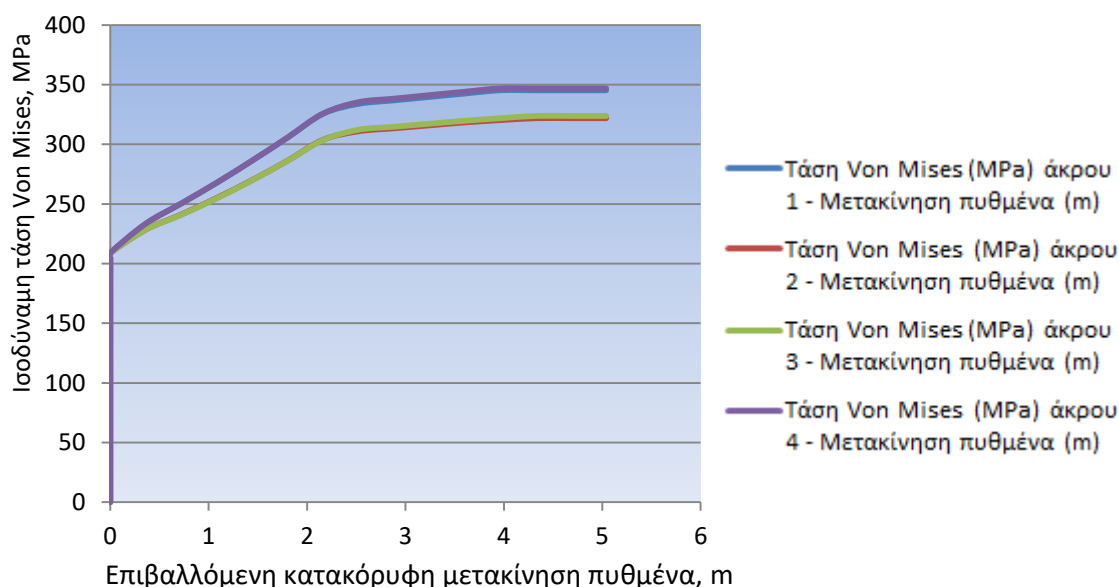
Στις εικόνες 4.43, 4.44 και 4.45 φαίνονται τα ελεύθερα τμήματα του αγωγού εξαιτίας των μορφολογικών ανωμαλιών του πυθμένα και σε αυτή την περίπτωση. Όπως και στο προηγούμενο σενάριο, παρατηρείται ότι το τμήμα του αγωγού που μεσολαβεί μεταξύ των 2 ελεύθερων τμημάτων έχει ανασηκωθεί και δεν εφάπτεται στον πυθμένα, λόγω της καμπτικής ροπής των παρακείμενων ελεύθερων τμημάτων.

Στην εικόνα 4.54 παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσεων στο πάνω μέρος του κελύφους του αγωγού, στα άκρα των ελεύθερων τμημάτων, στους αντίστοιχους κόμβους λήψης των τάσεων του κελύφους τους αγωγού του σεναρίου 8, που φαίνονται στην εικόνα 4.47. Ο αγωγός δεν αστοχεί και στις περιοχές των τεχνητών βυθισμάτων του πυθμένα, χάνει την επαφή του με αυτόν, όπως δείχνει η εικόνα 4.53.

Στο διάγραμμα της εικόνας 4.54 παρατηρείται ότι οι τάσεις στους άνω κόμβους των άκρων 2 και 3 είναι μικρότερες, γιατί ο αγωγός στην περιοχή αυτή εμφανίζει αντίθετη καμπυλότητα, αφού ανασηκώνεται στο τμήμα μεταξύ των τεχνητών βυθισμάτων, κατά αντιστοιχία με την περίπτωση του σεναρίου προβλήματος 10, με τη διαφορά ότι οι τιμές των τάσεων στους ενδιάμεσους κόμβους των άκρων 2 και 3 βρίσκονται πιο κοντά στις τιμές των τάσεων των κόμβων στα άκρα 1 και 4. Οι τάσεις στο διάγραμμα τείνουν να σταθεροποιηθούν



έπειτα από εφαρμογή κατακόρυφης μετακίνησης του πυθμένα κατά περίπου 4 m. Σε αυτό το σημείο ο αγωγός χάνει πλήρως την επαφή του με τον πυθμένα, στα τμήματα αυτού που μετακινούνται κατακόρυφα.



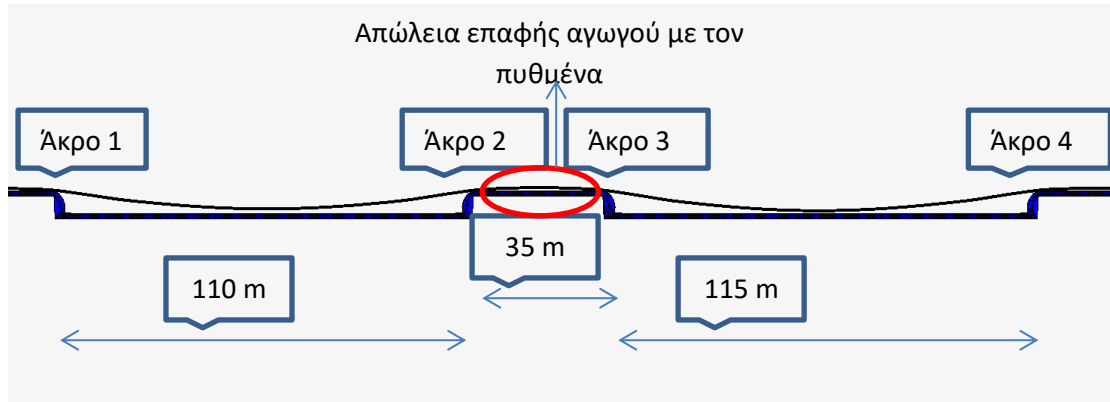
Εικόνα 4.54: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 11.

Ο αγωγός δεν αστοχεί και η αναπτυσσόμενη τάση στο κέλυφος είναι σχετικά μικρές.

Μπορεί να υποβληθεί σε μεγαλύτερο εύρος βυθίσματος.

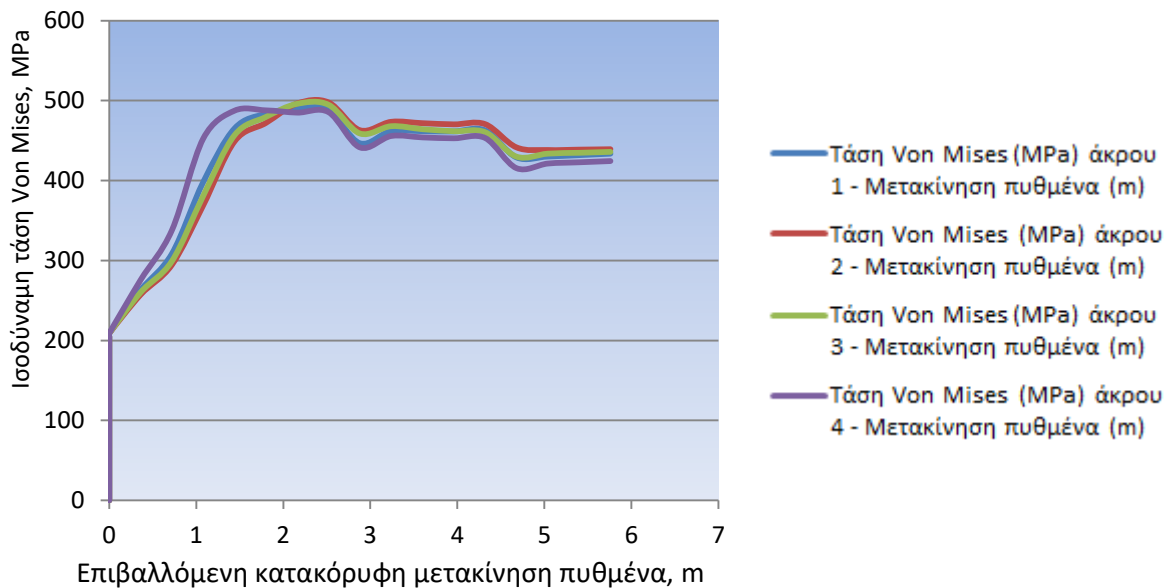
## ι. Σενάριο προβλήματος 12

Ακολούθως συνεχίζεται η ανάλυση δημιουργώντας μοντέλο μήκους 1000 m, με 2 ελεύθερα τμήματα αγωγού. Στην εικόνα 4.43 φαίνεται η μορφή του μοντέλου και στην εικόνα 4.55 φαίνονται οι διαστάσεις των ελεύθερα αιωρούμενων τμημάτων και η μεταξύ τους απόσταση. Επίσης παρατηρείται ότι υπάρχει αλληλεπίδραση, εφόσον το τμήμα του αγωγού που μεσολαβεί μεταξύ των 2 ελεύθερων τμημάτων έχει ανασηκωθεί και δεν εφάπτεται στον πυθμένα, λόγω της καμπτικής ροπής των παρακείμενων ελεύθερων τμημάτων. Ο πυθμένας είναι αμμώδης με  $\Phi=40^\circ$ .



Εικόνα 4.55: Διαστάσεις μορφολογικών ανωμαλιών πυθμένα.

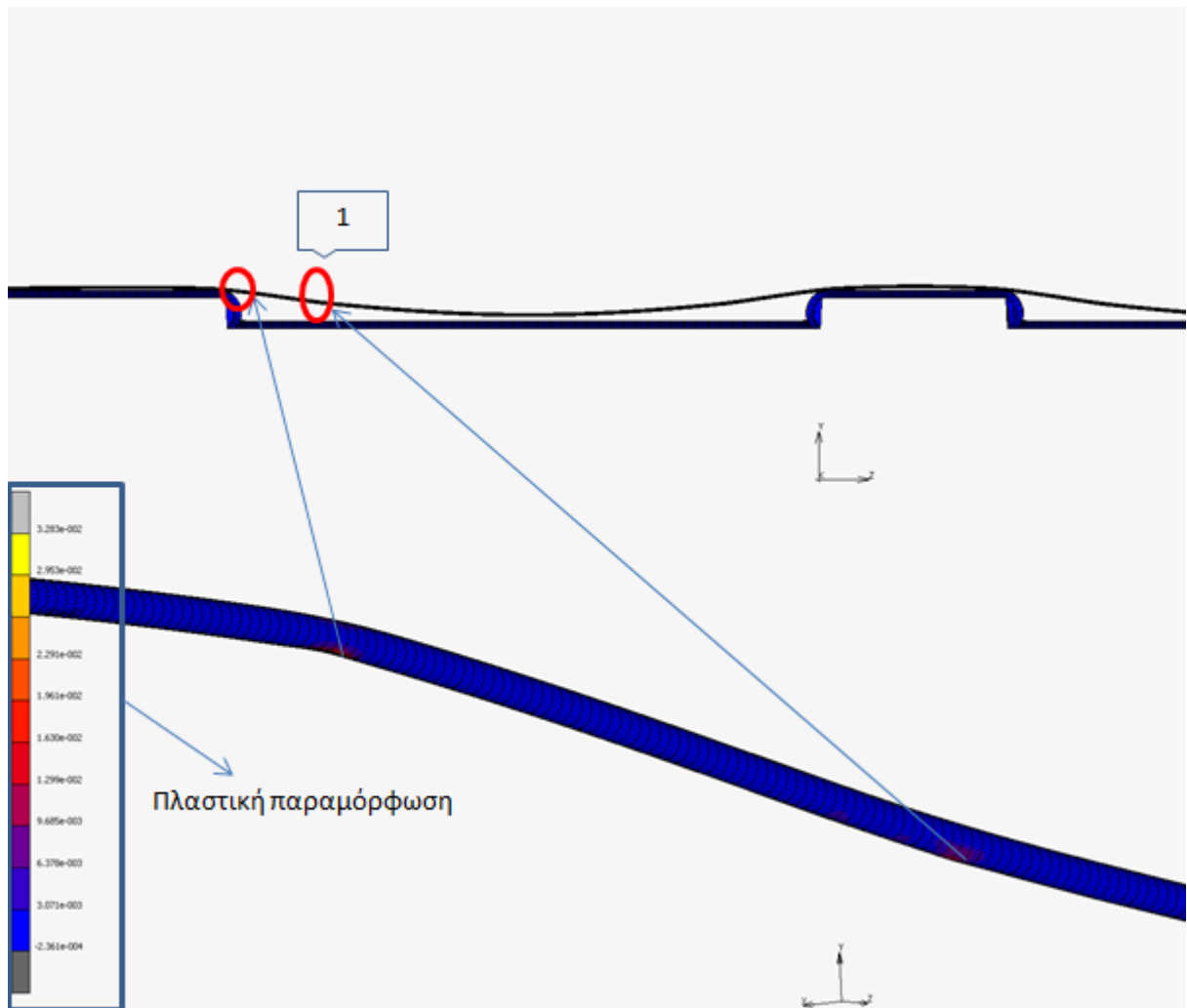
Στην εικόνα 4.56 παρατίθεται το διάγραμμα τάσεων στο πάνω μέρος του κελύφους του αγωγού, στα άκρα των ελεύθερων τμημάτων όπου οι τάσεις είναι και μεγαλύτερες, στους αντίστοιχους κόμβους που φαίνονται στην εικόνα 4.47.



Εικόνα 4.56: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 12.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 4.56, η συμπεριφορά του κελύφους του αγωγού είναι περίπλοκη. Το εύρος των ανοιγμάτων έχει μεγαλώσει αρκετά και παρατηρείται ότι οι τάσεις αυξάνονται μέχρι τα όρια αντοχής του υλικού αρχικώς, ενώ καθώς αυξάνονται οι τεχνητές βυθίσεις του πυθμένα και ο αγωγός χάνει την επαφή του με αυτόν, αυτές μειώνονται.

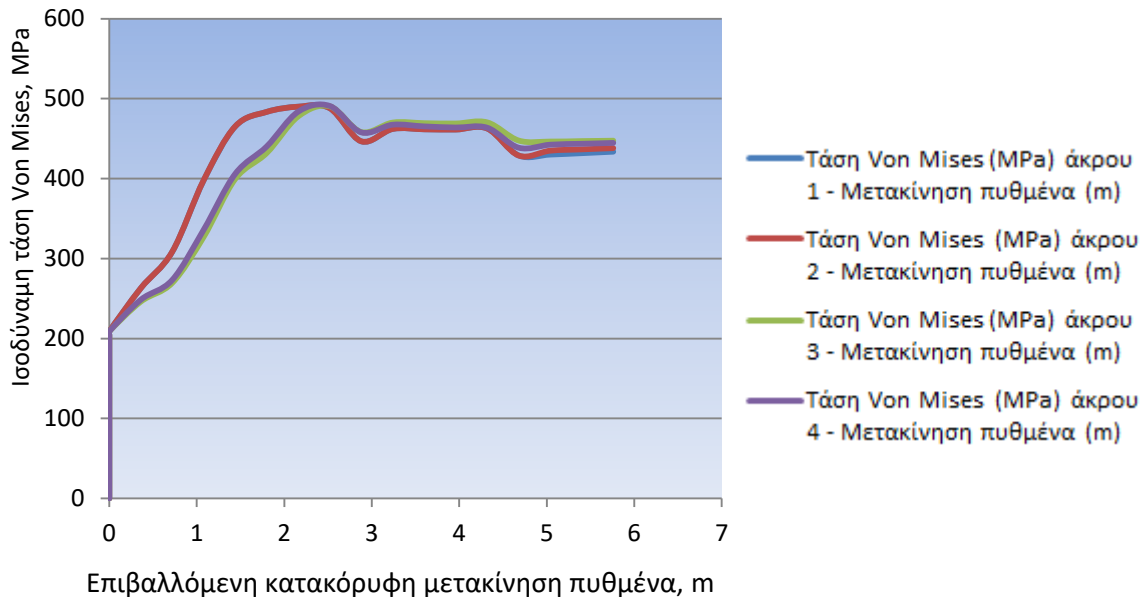
Αυτό συμβαίνει γιατί μειώνεται η καμπυλότητα των τμημάτων του αγωγού καθώς αυτά χάνουν την επαφή τους με τον πυθμένα στα μήκη των τεχνητών βυθισμάτων, γιατί στο κέντρο του μοντέλου όπως φαίνεται στην εικόνα 4.55, ο αγωγός καμπυλώνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αρχικώς χάνει την επαφή με τον πυθμένα το τμήμα του αγωγού που βρίσκεται στο τεχνητό βύθισμα του πυθμένα εύρους 110 m και έχουμε την 1<sup>η</sup> μείωση των τάσεων, έπειτα από κατακόρυφη μετακίνηση του πυθμένα κατά 3.2 m περίπου. Στη συνέχεια, με κατακόρυφη μετακίνηση του πυθμένα κατά 5 m περίπου, όταν και το άλλο τμήμα του αγωγού χάνει την επαφή του με αυτόν, έχουμε τη 2<sup>η</sup> μείωση των τάσεων, οι οποίες και τείνουν να σταθεροποιηθούν. Βέβαια το φαινόμενο της πλαστικοποίησης του κελύφους του αγωγού έχει ξεκινήσει, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.57. Στο σημείο 1 της εικόνας 4.57 το κέλυφος πλαστικοποιείται πριν ο αγωγός χάσει πλήρως την επαφή του με τον πυθμένα στο τεχνητό βύθισμα. Επισημαίνεται ότι η αστοχία στο σημείο 1 της εικόνας 4.57 είναι παρόμοια με αυτήν που εμφανίζεται στην εικόνα 1.26 της παρούσης εργασίας.



Εικόνα 4.57: Χρωματική απεικόνιση περιοχών πλαστικοποίησης του αγωγού.

### ια. Σενάριο προβλήματος 13

Στην περίπτωση δημιουργίας μοντέλου παρόμοιων χαρακτηριστικών με το σενάριο 12, με αμμόδη πυθμένα έχοντας  $c=0$  και  $\Phi=30^\circ$ , οι τιμές των τάσεων στους αντίστοιχους κόμβους στα άκρα των ελεύθερων τμημάτων φαίνονται στην εικόνα 4.58.



Εικόνα 4.58: Διάγραμμα τάσης Von Mises – επιβαλλόμενης κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα δοκιμίου 13.

Το μοντέλο εμφανίζει αντίστοιχη συμπεριφορά με αυτό του σεναρίου προβλήματος 12 και το κέλυφος του αγωγού πλαστικοποιείται μερικώς, χωρίς να παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφορές από τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του υλικού του πυθμένα συγκριτικά με την περίπτωση του σεναρίου προβλήματος 12.



## Κεφάλαιο 5

### Συμπεράσματα και προτάσεις

Στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν καθώς και οι προτάσεις για έρευνα στο μέλλον. Συγκεκριμένα:

➤ Η μεταφορά υδρογονανθράκων μέσω δικτύων αγωγών κρίνεται ολοένα και πιο επιτακτική, με δεδομένη την αυξανόμενη τάση κατανάλωσης ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο.

➤ Τα συστήματα αγωγών καυσίμου τόσο στην ξηρά όσο και στο υποθαλάσσιο περιβάλλον χρειάζονται πολύ προσεκτικό σχεδιασμό, γιατί οποιεσδήποτε αστοχίες συνήθως συνοδεύονται από μεγάλες διαρροές καυσίμων, με δυσμενείς οικονομικές και περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις.

➤ Οι γεωκίνδυνοι μπορεί να δημιουργήσουν μεγάλα προβλήματα στις κατασκευές και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητος ο εντοπισμός τους και ο σωστός σχεδιασμός των έργων έναντι αυτών.

➤ Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της μηχανικής συμπεριφοράς του αγωγού, λόγω μορφολογικών ανωμαλιών του πυθμένα, με τη δημιουργία κατάλληλων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων, έδειξαν ότι οι εμφανιζόμενες τάσεις στο κέλυφος του αγωγού διαφοροποιούνται κατά πολύ από τη μεταβολή των διαστάσεων των ελεύθερων (αιωρούμενων) τμημάτων.

➤ Σε ορισμένες περιπτώσεις μείωση του εύρους του ελεύθερου τμήματος του αγωγού μπορεί να οδηγήσει στην αστοχία του κελύφους του αγωγού με λιγότερο έντονο ανάγλυφο (μεταβολή ύψους) πυθμένα.

➤ Στην περίπτωση που ο πυθμένας αποτελείται από άμμο (με  $c=0$  και  $\Phi=30^\circ$ ,  $40^\circ$ ), η διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών της δεν επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά

του αγωγού, στις περιπτώσεις μορφολογικών ανωμαλιών του πυθμένα πάνω από των οποίου διέρχεται ο αγωγός.

➤ Για τα χαρακτηριστικά του αγωγού που επιλέχθηκαν κρίθηκε ικανοποιητική η δημιουργία μοντέλου με απόσταση 200 m μεταξύ των ορίων του και των σημείων έναρξης δημιουργίας του ανάγλυφου του πυθμένα, εφόσον περαιτέρω αύξηση της απόστασης δεν επηρεάζει σημαντικά τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Πρέπει να αναφερθεί ότι η διαπίστωση αυτή αφορά το συγκεκριμένο είδος περιπτώσεων και όχι αυτές για παράδειγμα που προκύπτουν όταν το ανάγλυφο δημιουργείται σε ένα μεγάλο πρανές (υποθαλάσσια κατωφέρεια) του πυθμένα.

➤ Στην περίπτωση των διαδοχικά ελεύθερων τμημάτων, υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ τους, όπως αναφέρεται και στην [21].

➤ Παρατηρήθηκε ότι το είδος του αγωγού που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία, μπορεί να ανταπεξέλθει στα φορτία εφαρμογής εξωτερικής υδροστατικής πίεσης που αντιστοιχούν σε βάθος 800 m, όντας κενός περιεχομένου.

➤ Επίσης, η αντοχή του κελύφους επαρκεί και για την απώλεια επαφής με αμμώδη πυθμένα μεμονωμένων τμημάτων μήκους 120 m περίπου. Στην περίπτωση των διαδοχικών τμημάτων που δεν έχουν επαφή με τον πυθμένα, το μέγιστο μήκος αιώρησης του αγωγού χωρίς να προκληθεί βλάβη στο κέλυφος είναι μικρότερο από 120 m και εξαρτάται και από την απόσταση που μεσολαβεί μεταξύ των ανοιγμάτων.

➤ Γενικά οι αγωγοί με υψηλό  $D/t$  (λόγος διαμέτρου / πάχος κελύφους αγωγού), όπως στην περίπτωση του αγωγού που εξετάστηκε για τις ανάγκες της εργασίας, όταν υπόκεινται σε μεγάλη εξωτερική πίεση εξαιτίας μεγάλου βάθους, δεν εμφανίζουν μεγάλη αντοχή στα ελεύθερα τμήματα που δημιουργούνται από το ανάγλυφο του πυθμένα και για το λόγο αυτό ενδείκνυται η χρήση αγωγών με σχετικά χαμηλό  $D/t$  στα βαθιά νερά. Ένας ακόμα παράγοντας που συντελεί σε αυτό, είναι και τα φορτία εγκατάστασης, στα οποία πρέπει να



ανταπεξέρχεται το κέλυφος του αγωγού, που σε μεγάλα βάθη είναι ιδιαίτερα αυξημένα εξαιτίας των μεθόδων κατασκευής.

Κατόπιν αυτών, οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα είναι οι ακόλουθες:

➤ Η συσχέτιση διαστάσεων μοντέλου αγωγού - πυθμένα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αγωγών ώστε να είναι εφικτή η εύρεση των ελάχιστων διαστάσεων των μοντέλων που παράγουν αποτελέσματα με επιθυμητή ακρίβεια. Αυτό θα χρησιμεύσει στο σχεδιασμό των έργων αφού θα διεξάγονται οι απαιτούμενες αναλύσεις μόνο και όχι αυτές από τις οποίες καθορίζονται οι ικανοποιητικές διαστάσεις των μοντέλων για κάθε περίπτωση.

➤ Η προσομοίωση των περιπτώσεων ύπαρξης μορφολογικών ανωμαλιών σε μεγάλα πρηνή του πυθμένα. Στις περιπτώσεις αυτές αλλάζει η κατανομή των φορτίσεων, οι οποίες δεν είναι συμμετρικές στις περιοχές του αγωγού, που διέρχονται από τα εκατέρωθεν άκρα των μορφολογικών ανωμαλιών.

➤ Σύμφωνα με τους Qiang Bai and Yong Bai, (2014) [7], ο έλεγχος των αποτελεσμάτων των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων γίνεται με την αντιπαραβολή αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την επεξεργασία μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων σε διαφορετικά προγράμματα λογισμικού. Προτείνεται για τη διαπίστωση της ορθότητας των αποτελεσμάτων, η έρευνα και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προκύπτουν από τη θεωρία και το τυπολόγιο με τη χρήση ισοδύναμων ελατηρίων στα μοντέλα.

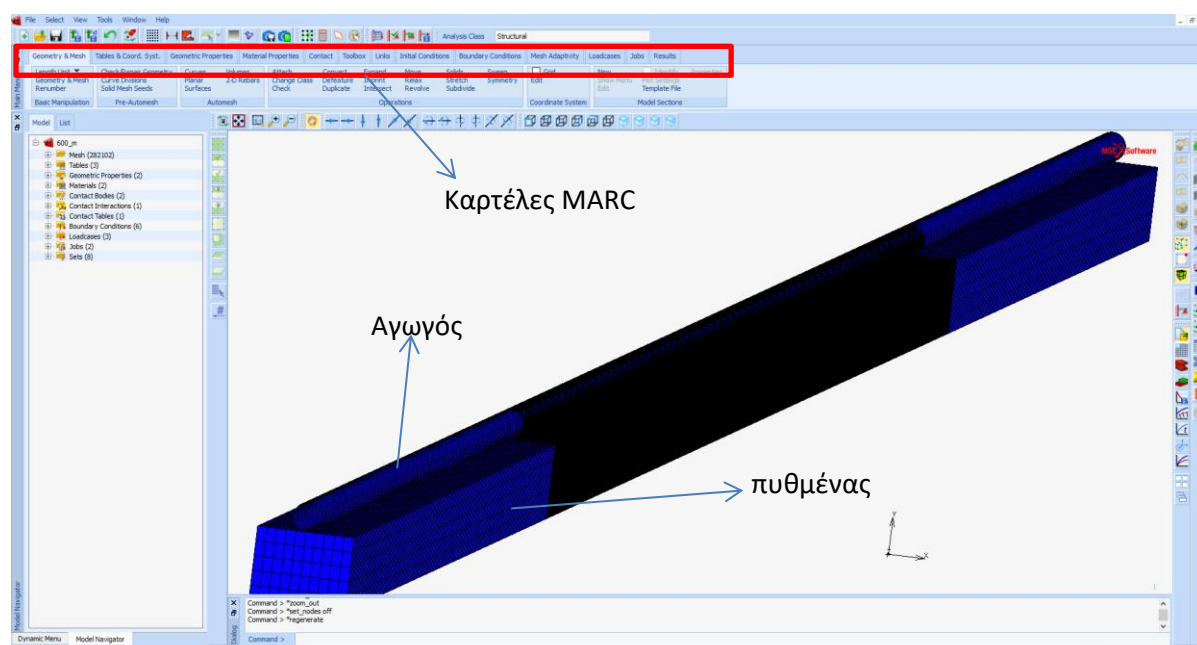


## Παράρτημα

### Περιγραφή μοντέλου αριθμητικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα MARC

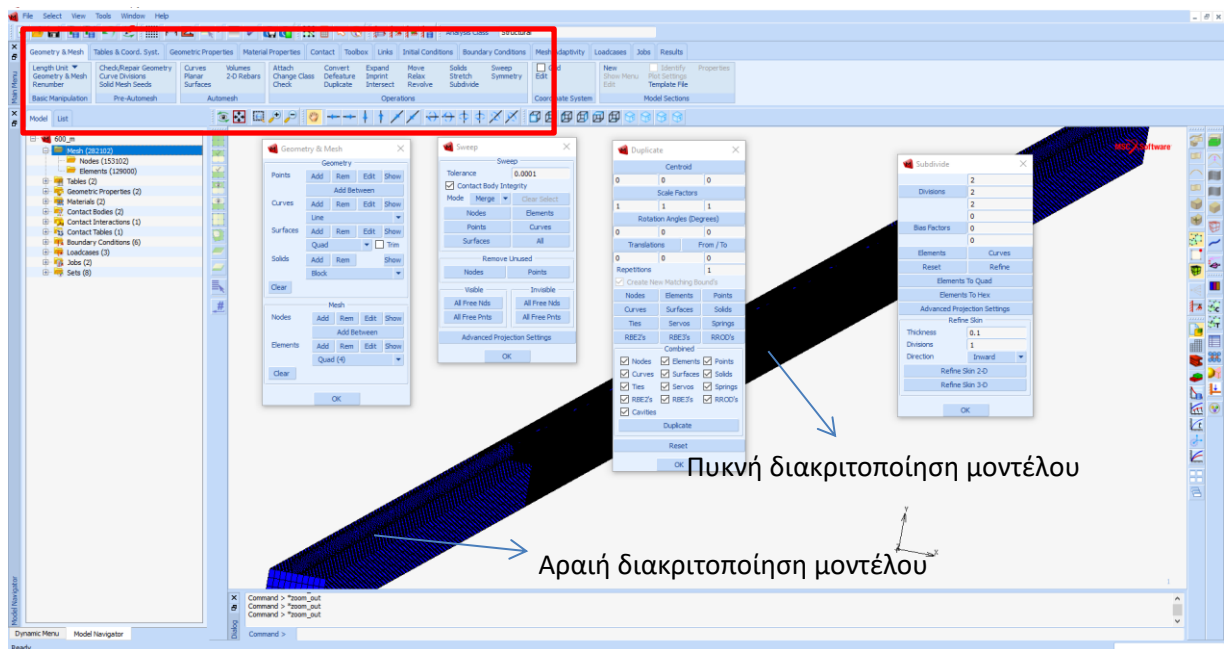
Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται οι κύριες ενέργειες για τη δημιουργία του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα MARC.

Στην εικόνα Π1 φαίνεται η γενική άποψη του περιβάλλοντος εργασίας στο MARC, μαζί με την απεικόνιση του μοντέλου πυθμένα- αγωγού που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων στην παρούσα εργασία.



Εικόνα Π1: Περιβάλλον εργασίας MARC.

Στην αριστερή πλευρά της εικόνας Π1 παρουσιάζεται το μενού των ομάδων των εντολών που χρησιμοποιήθηκαν και περιλαμβάνονται στις καρτέλες του MARC. Κάθε εντολή περιλαμβάνει τις αντίστοιχες δευτερεύουσες ρουτίνες προκειμένου να εισαχθούν τα δεδομένα.

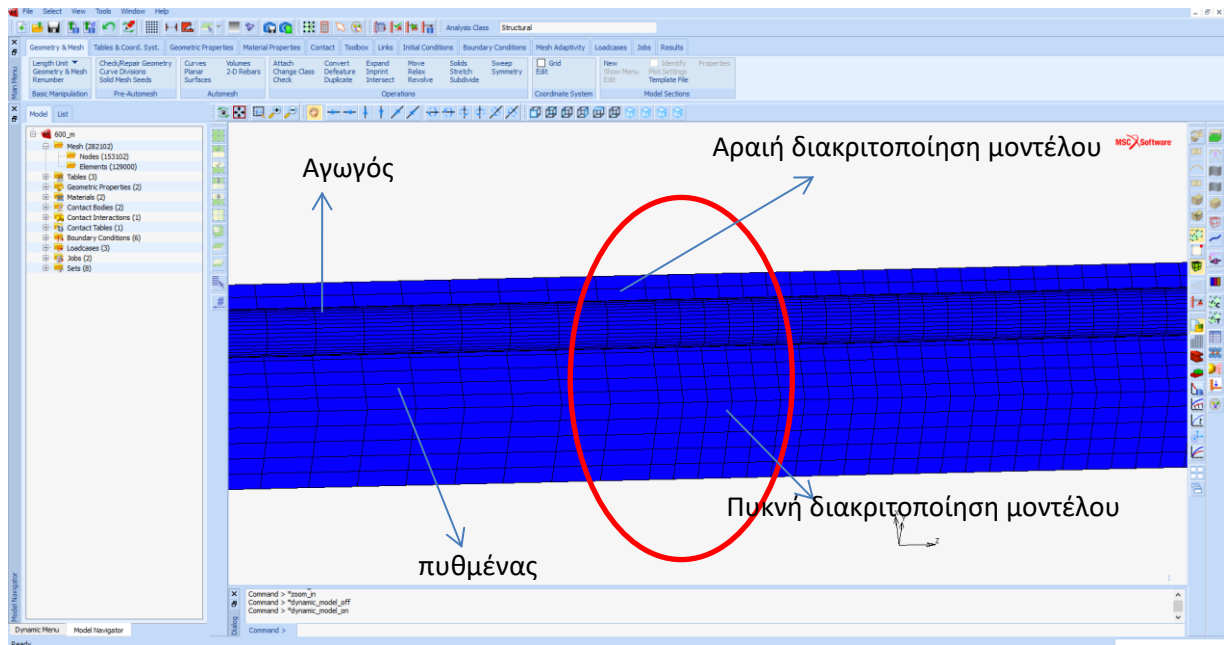


Εικόνα Π2: Εντολές δημιουργίας γεωμετρίας μοντέλου.

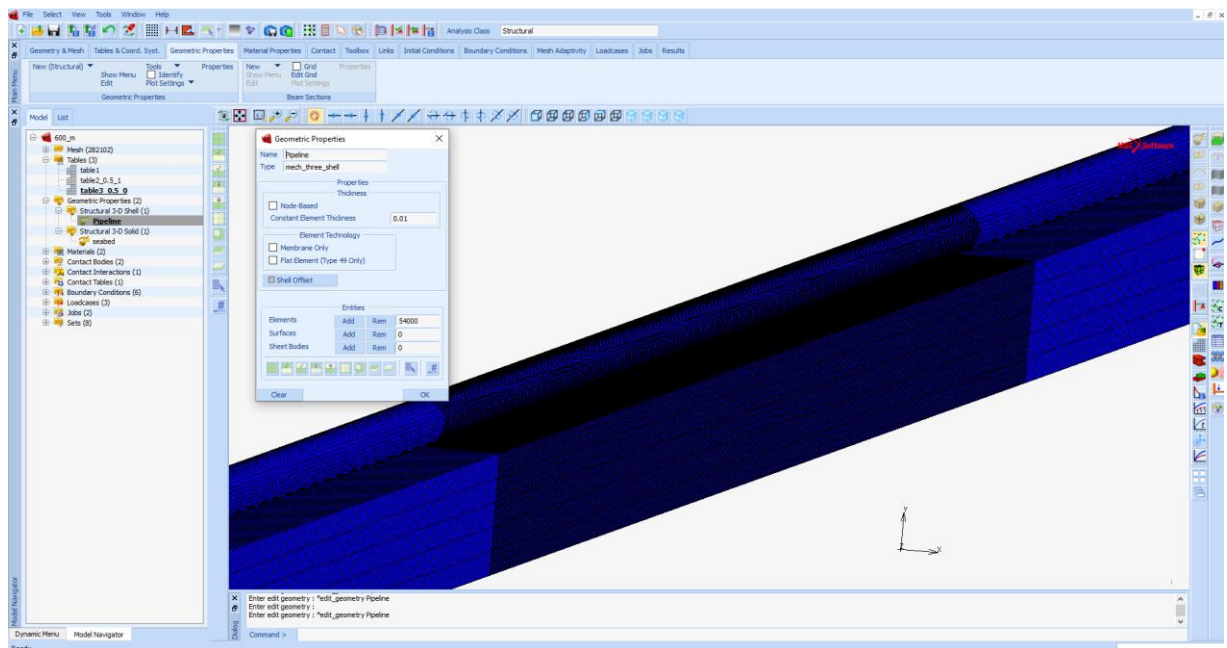
Αρχικώς δημιουργήθηκε η γεωμετρία του μοντέλου μας, χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από εντολές στο περιβάλλον του MARC που φαίνεται στην εικόνα Π2, στην καρτέλα Geometry & Mesh. Επειδή το μήκος των μοντέλων που δημιουργήθηκαν στο MARC για τις ανάγκες της εργασίας είναι μεγάλου μεγέθους, προκειμένου να μειωθούν οι χρόνοι επίλυσης έχει χρησιμοποιηθεί διαφορετική διακριτοποίηση στο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων, ώστε να μειωθεί το σύνολό τους. Στο κέντρο του μοντέλου δημιουργήθηκε πυκνή διακριτοποίηση, ενώ στις περιοχές των άκρων το πλέγμα γίνεται αραιότερο, με τη λογική ότι στο κέντρο συμβαίνει η μετακίνηση του πυθμένα και απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Το μαύρο χρώμα στις εικόνες προέρχεται από τη διαφοροποίηση στη διακριτοποίηση του πλέγματος. Στην εικόνα Π3 φαίνεται η λεπτομέρεια της διαφοράς του μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων. Το μοντέλο δημιουργείται τμηματικά, αρχικώς με την τοποθέτηση κόμβων στα κατάλληλα σημεία ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Ακολουθεί η διακριτοποίηση του πλέγματος, με την χρήση της εντολής υποδιαίρεσης (subdivide).

Στη συνέχεια αναλόγως του τύπου των πεπερασμένων στοιχείων που έχουν επιλεγεί

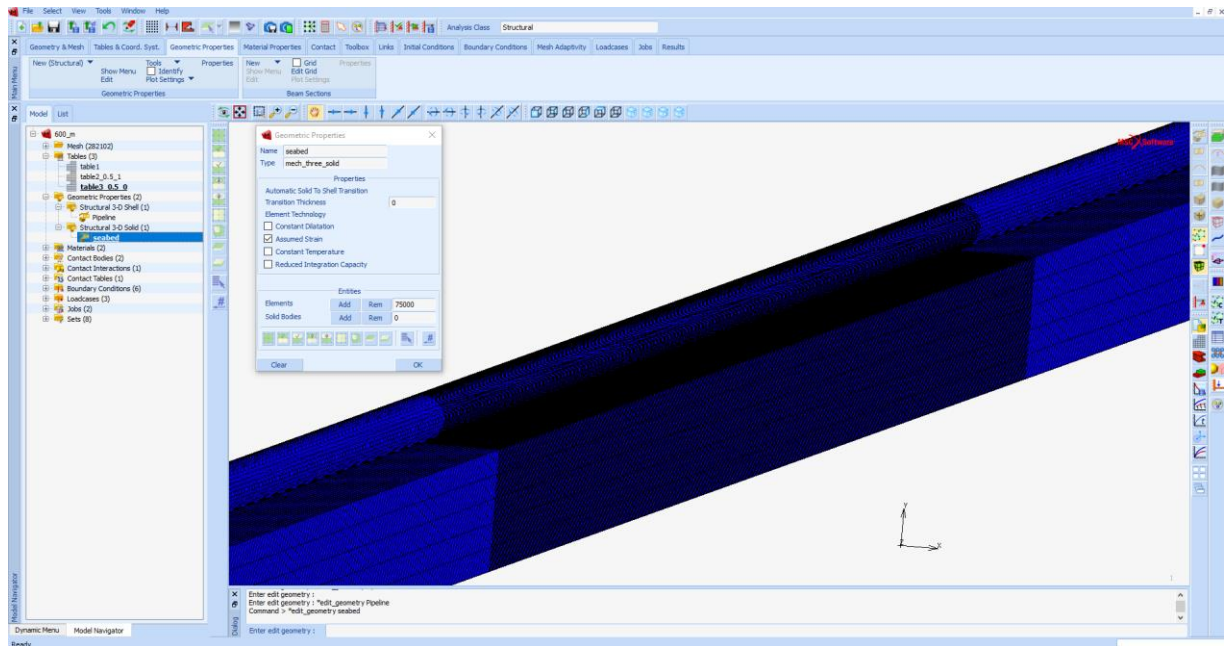
(στοιχεία κελύφους για τον αγωγό και στερεού σώματος για τον πυθμένα) προσδίδονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες που απαιτούνται, όπως φαίνεται στις εικόνες Π4.α και Π4.β, από την καρτέλα Geometric properties.



Εικόνα Π3: Διαφορά μεγέθους πεπερασμένων στοιχείων.

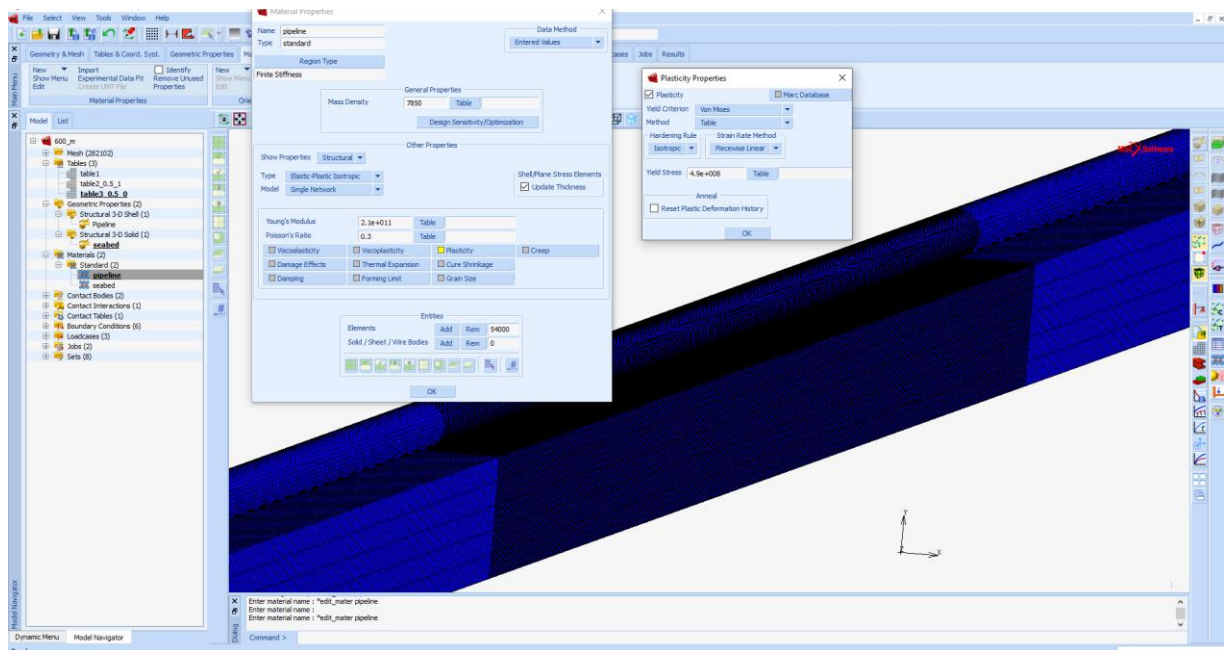


Εικόνα Π4.α: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά- ιδιότητες αγωγού.



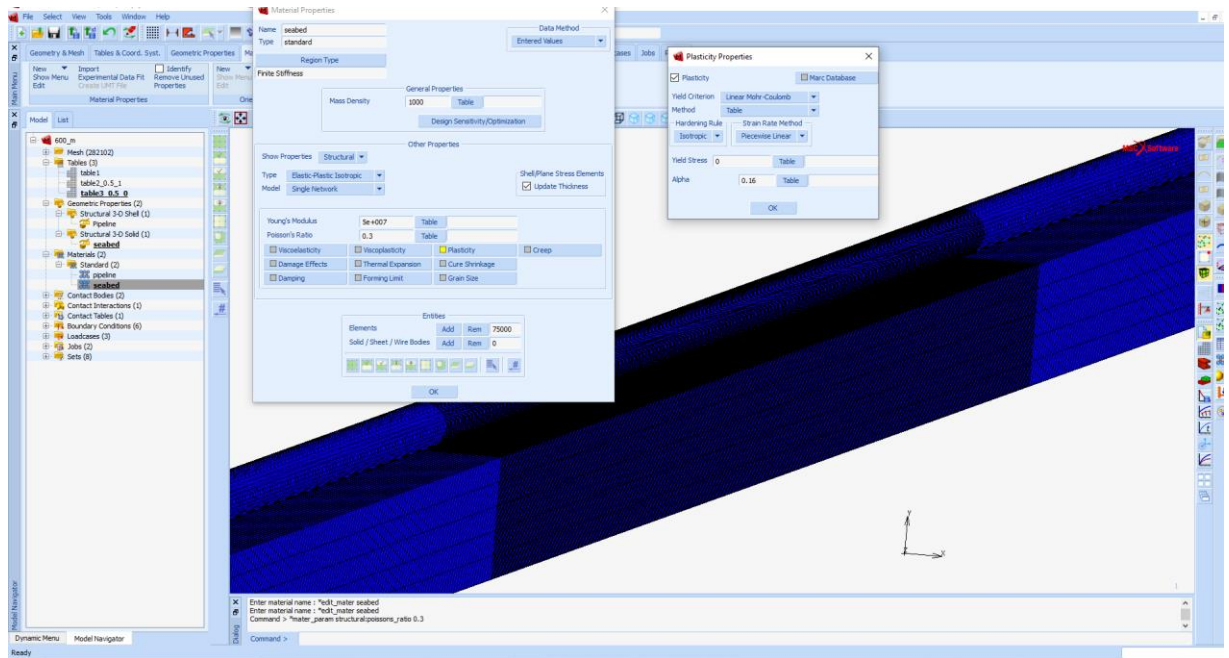
Εικόνα Π4.β: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά- ιδιότητες πυθμένα.

Έπειτα από αυτό, δίνονται οι ιδιότητες του υλικού του αγωγού και του πυθμένα, μέσω των επιλογών των εικόνων Π5.α και Π5.β. Όλες οι μονάδες είναι στο S.I. Εδώ επιλέγονται και τα κριτήρια αστοχίας των υλικών, όπως αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4 της παρούσης εργασίας.

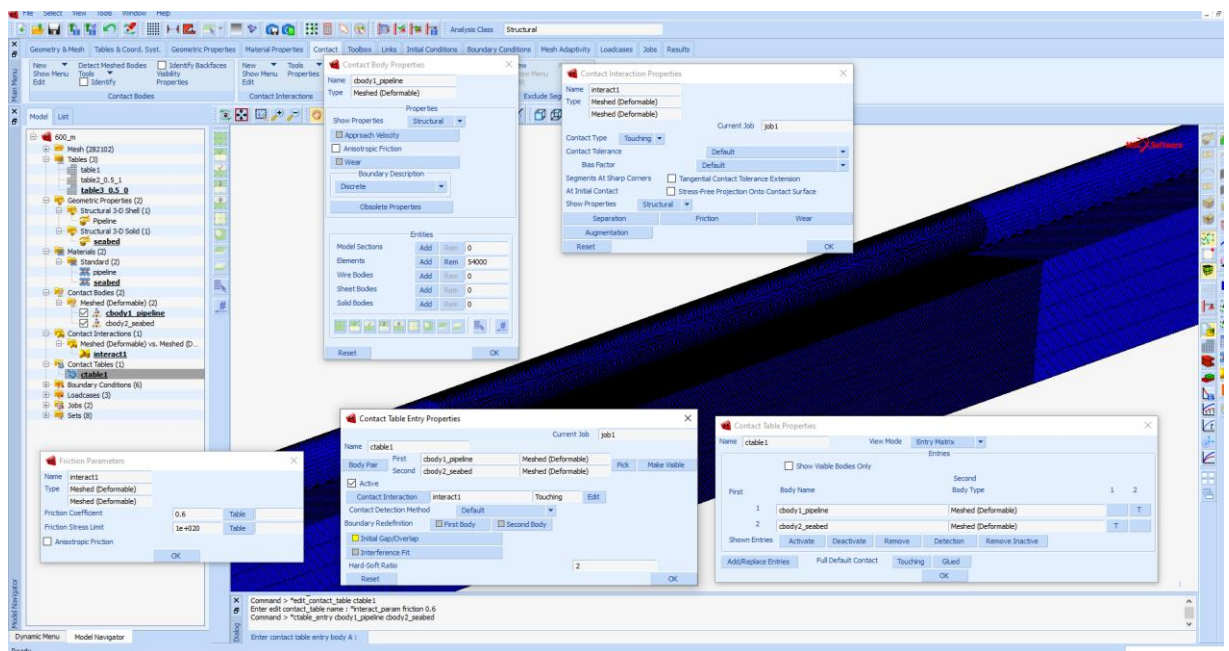


Εικόνα Π5.α: Ιδιότητες υλικού αγωγού.





Εικόνα Π5.β: Ιδιότητες πυθμένα.

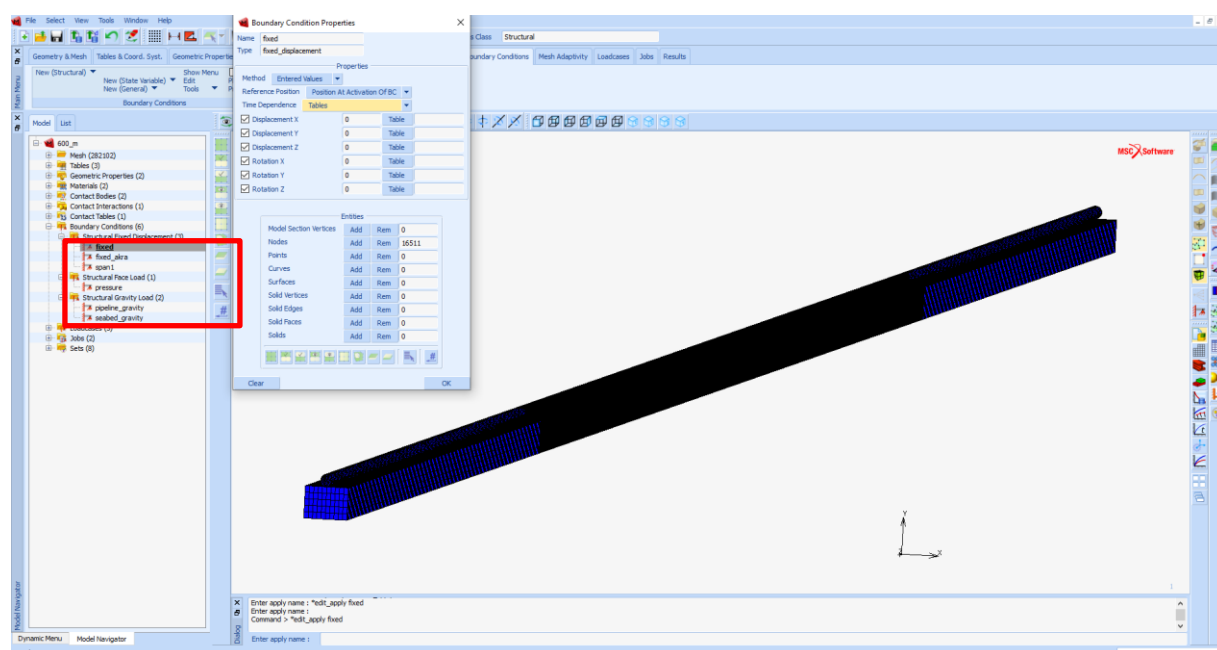


Εικόνα Π6: Καθορισμός ιδιοτήτων επαφής των σωμάτων

Συνεχίζεται η δημιουργία του μοντέλου μας με τη χρήση πλήθους εντολών από την καρτέλα Contact, ώστε να καθοριστεί το είδος της επαφής των σωμάτων και οι λοιπές ιδιότητες της επαφής (εικόνα Π6). Δηλώνεται ότι τα 2 σώματα δεν είναι κολλημένα μεταξύ

τους, παρά μόνο εφάπτονται (touching). Δίδεται επίσης ο συντελεστής τριβής ( $\mu=0,6$ ) και δημιουργείται ο πίνακας επαφής (contact table), στον οποίο φαίνεται ποια σώματα εφάπτονται.

Αφού ολοκληρωθούν οι παραπάνω ενέργειες, μέσω των εντολών της καρτέλας Boundary conditions, εισάγονται οι συνοριακές συνθήκες και οι φορτίσεις στο μοντέλο, όπως φαίνεται στις εικόνες Π7.α και Π7.β. Οι συνοριακές συνθήκες (εικόνα Π7.α) που θεωρήθηκε ότι ισχύουν στην προκειμένη περίπτωση είναι η ακινητοποίηση των κόμβων του αγωγού στα άκρα του μοντέλου και η ακινητοποίηση των κόμβων του πυθμένα στην κάτω πλευρά κατά τον κατακόρυφο άξονα y. Επίσης, εισήχθησαν οι φορτίσεις του ίδιου βάρους του αγωγού και του πυθμένα, της εξωτερικής πίεσης και επιβλήθηκε η κατακόρυφη μετακίνησης του πυθμένα.

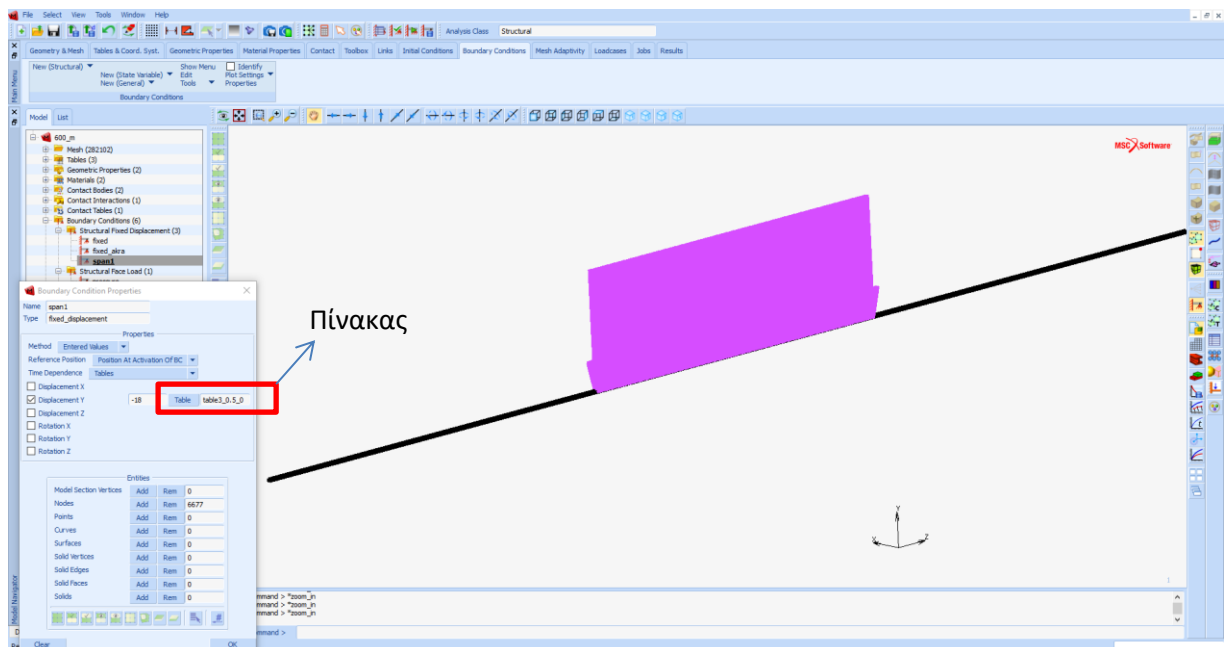


Εικόνα Π7.α: Συνοριακές συνθήκες- φορτίσεις.

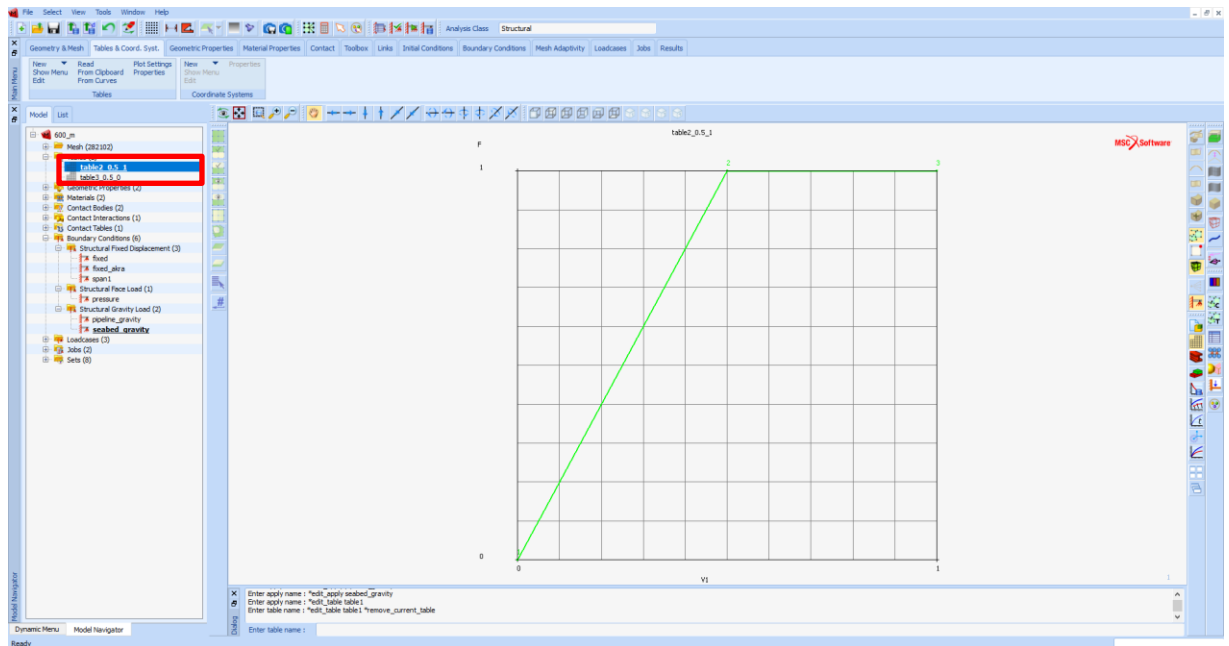
Για τις ανάγκες του μοντέλου δημιουργήθηκαν 2 πίνακες (εικόνα Π7.γ) μέσω της καρτέλας Tables & coord. syst., ώστε να υλοποιείται η σταδιακή επιβολή των φορτίσεων του ίδιου βάρους των σωμάτων και της εξωτερικής πίεσης, καθώς και η σταδιακή επιβολή της κατακόρυφης μετακίνησης του πυθμένα (εικόνα Π7.β). Οι πίνακες αυτοί εισήχθησαν στις



αντίστοιχες φορτίσεις. Ένας πίνακας χρησιμοποιήθηκε για την επιβολή των φορτίσεων ιδίου βάρους των σωμάτων και της εξωτερικής πίεσης στον αγωγό και ένας για την επιβολή της κατακόρυφης μετακίνησης του πυθμένα. Αυτό επιλέχθηκε για να έχει ολοκληρωθεί η επιβολή των φορτίσεων ιδίου βάρους των σωμάτων και της εξωτερικής πίεσης του αγωγού, πριν ξεκινήσει η επιβολή της κατακόρυφης μετακίνησης του πυθμένα, που θεωρήθηκε ότι προσομοιάζει καλύτερα το πραγματικό γεγονός, εφόσον ο αγωγός ήδη θα βρίσκεται σε μεγάλο βάθος, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4.

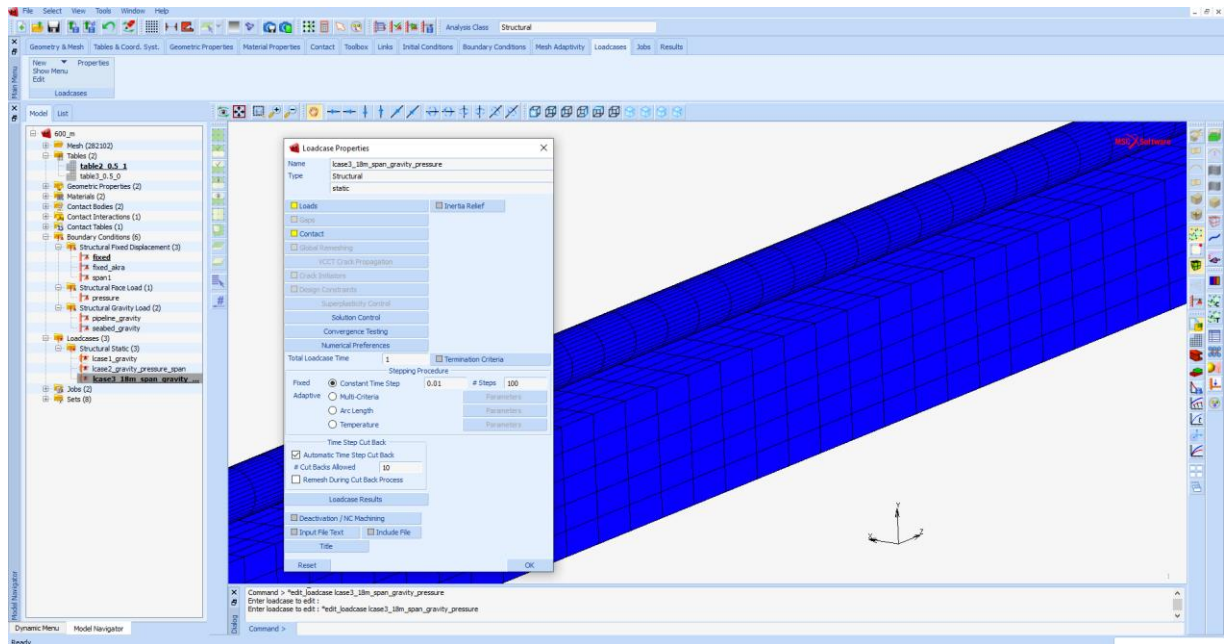


Εικόνα Π7.β: Επιβολή κατακόρυφης μετακίνησης πυθμένα.



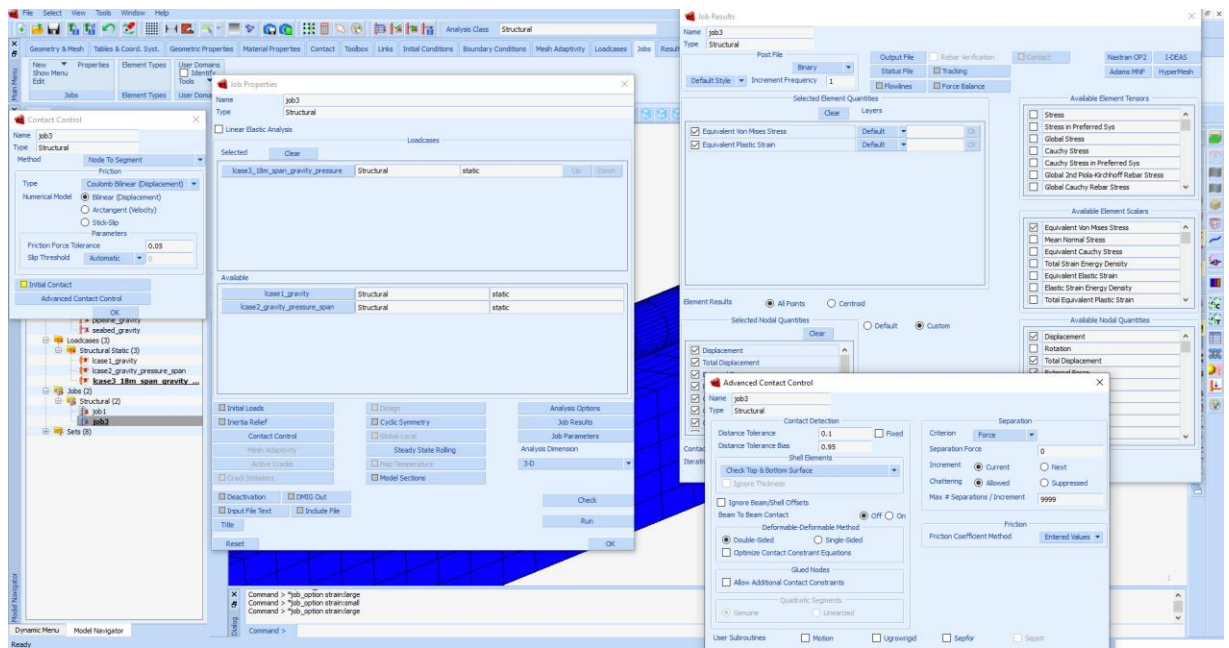
Εικόνα Π7.γ: Πίνακες σταδιακής επιβολής φορτίων- μετακίνησης.

Σε αυτό το στάδιο έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή του μοντέλου και είναι έτοιμο για ανάλυση στο MARC. Πριν πραγματοποιηθεί η ανάλυση, από την καρτέλα Loadcases εισάγονται για κάθε είδος ανάλυσης ορισμένα δεδομένα, προκειμένου αυτά να ληφθούν υπόψη από το MARC, όπως οι φορτίσεις, οι συνοριακές συνθήκες, οι επαφές σωμάτων (εικόνα Π8). Επίσης καθορίζεται το σύνολο των βημάτων για την ολοκλήρωση της επιβολής των φορτίσεων- μετακινήσεων του μοντέλου.

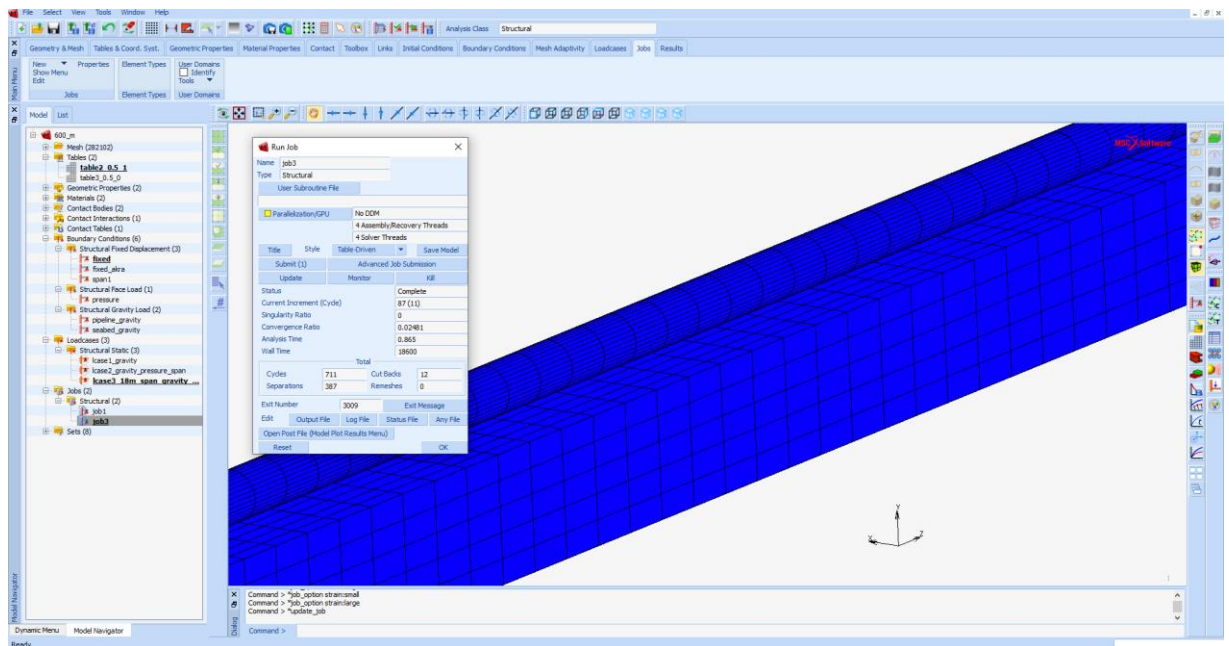


Εικόνα Π8: Περιπτώσεις σεναρίων φορτίσεων

Στη συνέχεια (εικόνα Π9.α) από την καρτέλα Jobs επιλέγεται το είδος της ανάλυσης (structural) και οι λοιπές παράμετροι που καθορίζουν το σενάριο φόρτισης (loadcase) και το είδος των αποτελεσμάτων, που επιθυμούνται κατά την ανάλυση. Κατόπιν αυτού, κατά τη διάρκεια της ανάλυσης του μοντέλου από το MARC γίνεται διαρκής ανακατανομή των τάσεων και των μετατοπίσεων σε όλα τα επιμέρους στοιχεία αυτού, έως ότου το εμφανιστούν μη επιτρεπτές τιμές στα αποτελέσματα και η επίλυση διακόπτεται. Πρακτικά έχουν αυξηθεί πολύ οι μετατοπίσεις λόγω της πλαστικοποίησης του κελύφους του αγωγού. Στην περίπτωση της εικόνας Π9.β η ανάλυση έχει διακοπεί στο βήμα 87 της σταδιακής επιβολής των φορτίσεων, εκ του συνόλου των 100 βημάτων που περιλαμβάνει το σενάριο φόρτισης (loadcase).



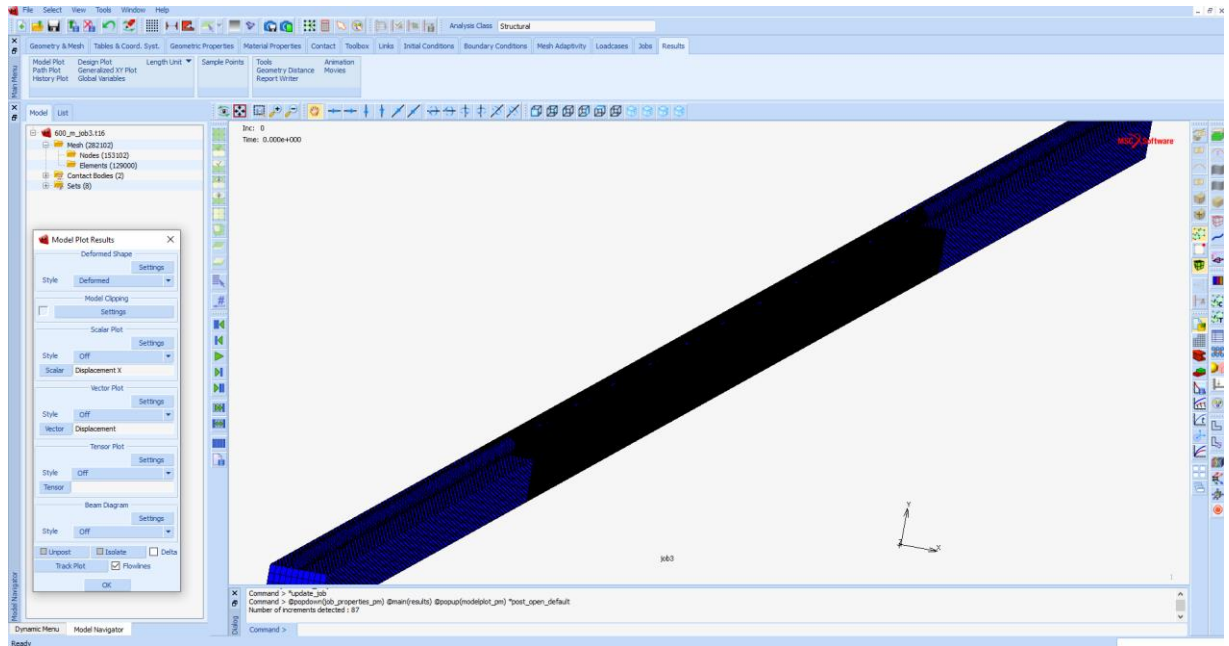
Εικόνα Π9.α: Χαρακτηριστικά - δεδομένα ανάλυσης μοντέλου.



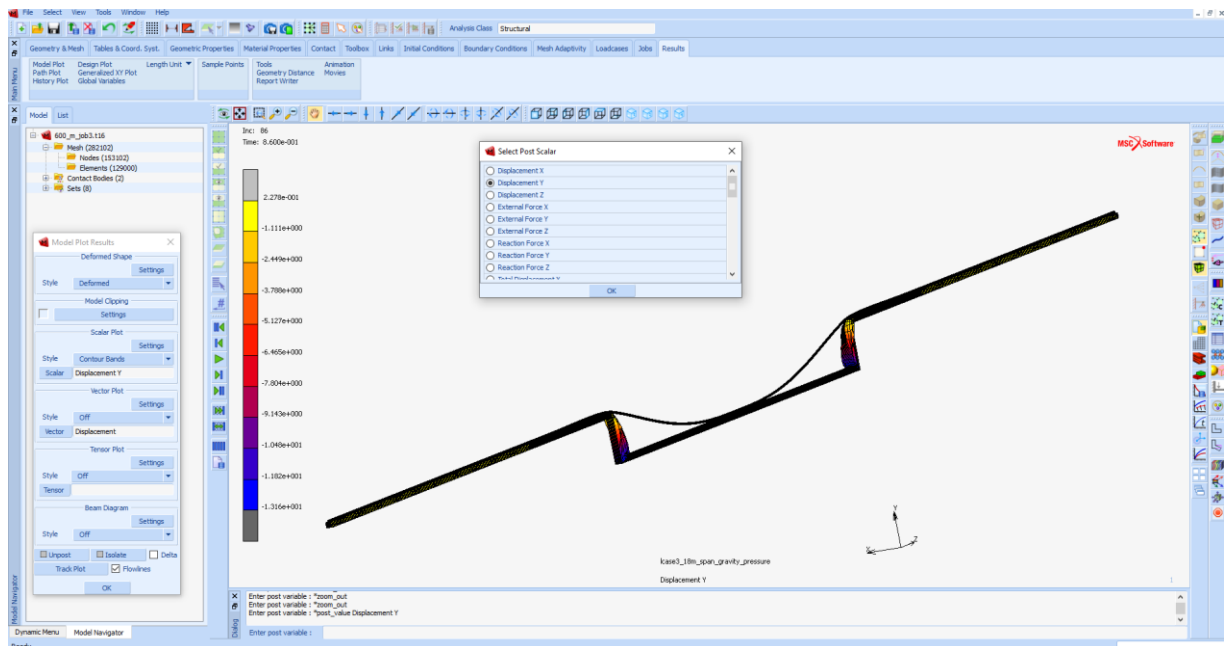
Εικόνα Π9.β: Ανάλυση μοντέλου.

Με την επιλογή “open post file” της εικόνας Π9.β γίνεται μεταφορά στο αρχείο των αποτελεσμάτων του μοντέλου του MARC (εικόνα Π10). Το γραφικό περιβάλλον είναι ίδιο και δίνεται η δυνατότητα περιήγησης ξεχωριστά σε κάθε βήμα επιβολής φόρτισης ώστε να

παρατηρηθεί η εξέλιξη του φαινομένου στην προσομοίωση. Φαίνονται δηλαδή μετακινήσεις, παραμορφώσεις και αναλόγως των επιλογών μας γίνεται γραφική απεικόνιση των τάσεων, μετακινήσεων και γενικά όλων των δεδομένων των οποίων η εξαγωγή είχε επιλεγεί πριν εκτελεστεί η ανάλυση (εικόνα Π9.α).



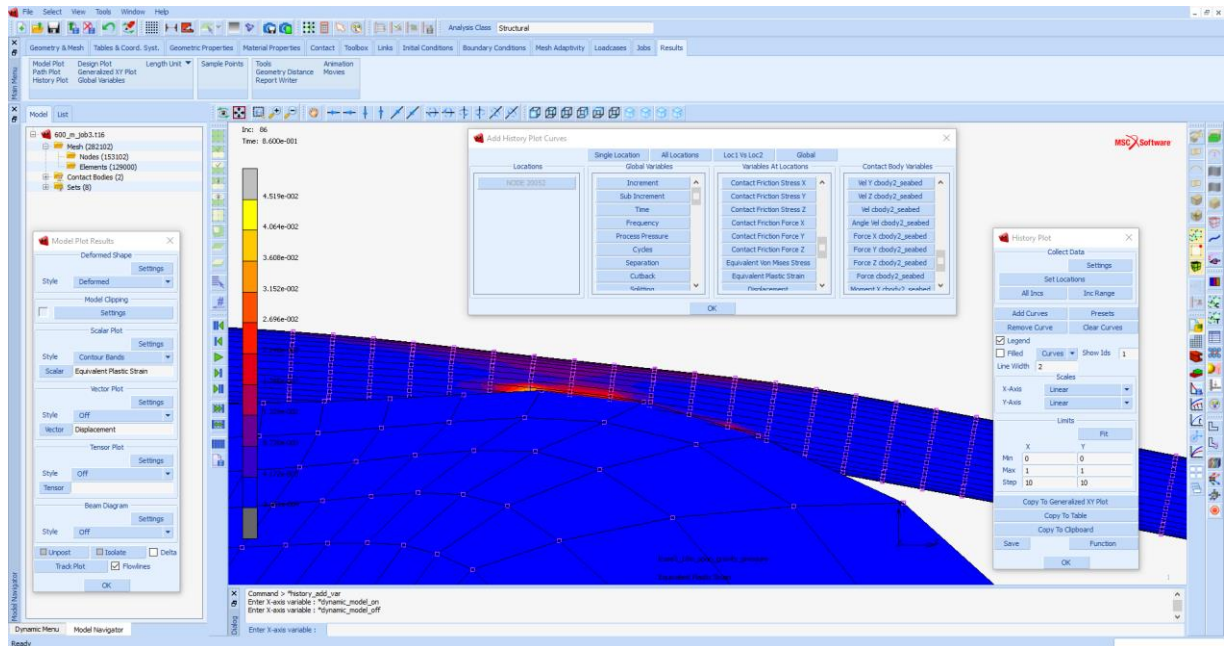
Εικόνα Π10: Αρχείο αποτελεσμάτων.



Εικόνα Π11: Περιήγηση στα βήματα της ανάλυσης.



Η εικόνα Π11 ενδεικτικά περιλαμβάνει τη γραφική απεικόνιση των κατακόρυφων μετακινήσεων του σεναρίου εξεταζόμενου προβλήματος 1.α του κεφαλαίου 4 της παρούσης εργασίας. Μέσω των επιλογών από το μενού “Select plot scalar” μπορεί να επιλεγθεί η απεικόνιση διαφόρων ζητούμενων ποσοτήτων.



Εικόνα Π12: Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων πλαστικής παραμόρφωσης.

Αναλόγως των ζητούμενων αποτελεσμάτων, με τη βοήθεια της γραφικής απεικόνισής τους όπως στην εικόνα Π12, επιλέγονται οι κόμβοι στις επιθυμητές θέσεις των αποτελεσμάτων και με τη βοήθεια της εντολής “Add curves” το είδος των μεταβλητών στους άξονες x και y της γραφικής παράστασης. Με την εντολή “copy to clipboard” μεταφέρονται τα δεδομένα που εξήχθησαν σε υπολογιστικό φύλλο για περαιτέρω επεξεργασία και δημιουργία γραφικής παράστασης.

## Βιβλιογραφία

- [1] Σπύρος Καραμάνος, σημειώσεις «Μηχανική Συμπεριφορά και Δομικός Σχεδιασμός Αγωγών Υδρογονανθράκων», Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2020.
- [2] Σπύρος Καραμάνος, σημειώσεις «Βασικά Στοιχεία Μηχανικής των Υλικών», Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2020.
- [3] Σπύρος Καραμάνος, σημειώσεις “Buckling of Metal Components II” , Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2020.
- [4] Σπύρος Καραμάνος, σημειώσεις “Offshore Pipeline Analysis and Strength”, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2020.
- [5] Σπύρος Καραμάνος, σημειώσεις “Offshore Pipeline Design”, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2020.
- [6] Stelios Kyriakides and Edmundo Corona, 2007, “Mechanics of Offshore Pipelines”, Elsevier.
- [7] Qiang Bai and Yong Bai, 2014, “Subsea Pipeline Design, Analysis and Installation”, Elsevier.
- [8] API RP 1111, 2009, “Design, Construction, Operation, and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines (Limit State Design)”, American Petroleum Institute.
- [9] DNV-RP-F109, 2010, “On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines”, DET NORSKE VERITAS AS.
- [10] DNV-OS-f101, 2013, “Submarine Pipeline Systems”, DET NORSKE VERITAS AS.
- [11] DNVGL-RPF114, 2017, “Pipe-soil interaction for submarine pipelines”, DET NORSKE VERITAS AS.
- [12] DNVGL-RP-C212, 2017, “Offshore Soil Mechanics and Geotechnical Engineering”, DET NORSKE VERITAS A.
- [13] DNV-OS-F101, 2013, “Submarine Pipeline Systems”, DET NORSKE VERITAS AS.
- [14] Mark Randolph and Susan Gourvenc, 2011, “Offshore Geotechnical Engineering”, Spon Press.
- [15] Researchgate Publication/279280711 F. Zolezzi and Eric Parker, 2009, “Offshore Geohazards and their Implication to Industry”.
- [16] Researchgate Publication/230675042 William James Johnson and Eric Parker, 2007, “Evaluation of Offshore Geohazards”.
- [17] Researchgate Publication/279177545 William James Johnson, F. Zolezzi and Marilena

Calarco, 2014, “Offshore Geohazards Industry Implications and Geoscientist Role”, Conference: Near Surface Geoscience 2014, Applied Shallow Marine Geophysics, Athens, Greece.

- [18] Polynikis Vazouras, 2013, “Mechanical behavior of buried steel pipelines crossing active strike slip faults”, PhD Thesis, University of Thessaly, Volos.
- [19] Ioannis Koutroumanos, 2018, “Fundamentals of Finite Element Analysis”, John Wiley & Sons Limited.
- [20] Χαράλαμπος Γάντζος, 2015, “Μη γραμμική συμπεριφορά κατασκευών”, Κάλλιππος.
- [21] DNV-RP-F105, 2017, “Free spanning pipelines”, DET NORSKE VERITAS AS.

### **Ιστογραφία**

- [22] <https://www.eng-tips.com/viewthread.cfm?qid=425659>, (Ημερομηνία προσπέλασης 25/6/2021)
- [23] <https://theconstructor.org/structural-engg/structural-design/types-pipeline-construction-method/1854/> (Ημερομηνία προσπέλασης 25/6/2021)
- [24] [https://www.researchgate.net/figure/Map-of-Baku-Tbilisi-Ceyhan-Oil-and-South-Caucasus-Gas-pipelines\\_fig1\\_279219624](https://www.researchgate.net/figure/Map-of-Baku-Tbilisi-Ceyhan-Oil-and-South-Caucasus-Gas-pipelines_fig1_279219624) (Ημερομηνία προσπέλασης 25/6/2021)
- [25] <http://engelement.com/tanap-project/> (Ημερομηνία προσπέλασης 25/6/2021)
- [26] <https://www.tap-ag.gr/> (Ημερομηνία προσπέλασης 25/6/2021)
- [27] <https://www.pipeline-journal.net/news/fugro-wins-blue-stream-pipeline-inspection-contract> (Ημερομηνία προσπέλασης 25/6/2021)
- [28] <https://www.dw.com/en/south-stream-pipeline-construction-begins/a-16435203> (Ημερομηνία προσπέλασης 25/6/2021)
- [29] [https://en.econostrum.info/Medgaz-completes-its-first-year-of-operation\\_a143.html](https://en.econostrum.info/Medgaz-completes-its-first-year-of-operation_a143.html) (Ημερομηνία προσπέλασης 25/6/2021)
- [30] <https://www.gazprom.com/projects/nord-stream/> (Ημερομηνία προσπέλασης 25/6/2021)
- [31] <https://www.subseaprotectionsystems.co.uk/15-products?start=8> (Ημερομηνία προσπέλασης 25/6/2021)