

#### ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟ ΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

#### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Διερεύνηση των Υπαρχόντων Μεθόδων Ανάλυσης της Αλληλεπίδρασης Λεπτόγραμμων Σωληνοειδών Κατασκευών με τον Θαλάσσιο Πυθμένα»



Depth, z

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΣ ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ Θ. ΚΑΡΑΤΑΠΑΝΗΣ

## Δρ. Μηχ. ΙΩΑΝΝΗΣ ΧΑΤΖΗΓΕΩΡΓΙΟΥ

ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Ιωάννη Χατζηγεωργίου για την βοήθεια και την καθοδήγηση που μου προσέφερε στην εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Επίσης, ομοίως ευχαριστώ και τον Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π Στέφανο Κατηφέογλου για την υποστήριξή του.

#### Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	1
Περιεχόμενα Σχημάτων	3
Περιεχόμενα Πινάκων	8
Περίληψη	9
Περίληψη στα Αγγλικά-Abstract	10
Εισαγωγή- Σκοπός	11

#### Κεφάλαιο 1. Αρχές Σχεδιασμού-Λειτουργίας Υποθαλάσσιων Αγωγών-Risers 13

1.1	Εισαγωγή	13
1.2	Υποθαλάσσιοι Αγωγοί-Risers	13
1.2.1	Σχεδιασμός-Λειτουργίας	13
1.2.2	Επιβαλλόμενα Φορτία	16
1.2.3	Οριακές Καταστάσεις Σχεδιασμού	17
1.3	Φαινόμενο Δημιουργίας Τάφρου-Περιγραφή Προβλήματος	18

#### Κεφάλαιο 2.

# Παρουσίαση Μεθόδων Ανάλυσης Αλληλεπίδρασης Υποθαλάσσιων Αγωγών-Risers με τον Θαλάσσιο Πυθμένα

2.1	Εισαγωγή	26
<b>っ</b> っ	Γεωτονιμκές Μέθοδοι	26
2.2.1	Γεωτεχνικές ινεσοσοί Πειραματική μελέτη μεγάλης κλίμακας για εκτίμηση συμπεριφοράς μεταλλικού υποθαλάσσιου αγωγού	20
2.2.2	Δοκιμή διείσδυσης Τ- Bar σε μαλακές αργίλους	32
2.2.3	Εφαρμογή συστήματος φυγοκέντρησης για την παρακολούθηση της κατακόρυφης κίνησης μεταλλικού αλυσοειδούς αγωγού στο σημείο επαφής του με τον θαλάσσιο πυθμένα	36
2.2.4	Ερμηνεία των μετρήσεων διείσδυσης από πρόσκρουση σε μαλακές αργίλους	49
2.2.5	Επιρροή εδαφικής ακαμψίας στην περιοχή επαφής ενός αλυσοειδούς ανωνού	56
2.2.6	Επιρροή αλληλεπίδρασης εδάφους-αγωγού στην απόκριση απλού αλυσοειδούς αγωγού	57
2.3	Αριθμητικές Μέθοδοι	65

#### 1

26

2.3.1	Εκτίμηση φορτίου κατάρρευσης για κύλινδρο εμπηγμένο σε τάφρο από συνεκτικό έδαφος	66
2.3.2	Εκτίμηση αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε υποθαλάσσιο αγωγό και θαλάσσιο πυθμένα με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων	70
2.3.3	Μοντέλο αλληλεπίδρασης αγωγού – θαλάσσιου πυθμένα	77
2.3.4	Επιρροή του φαινομένου δημιουργίας τάφρου στη δυναμική συμπεριφορά ενός μεταλλικού αλυσοειδούς αγωγού	79
2.3.5	Δημιουργία εσοχής (τάφρου) στο σημείο επαφής αγωγού και θαλάσσιου πυθμένα	90
2.3.6	Επιρροή εδαφικής αντοχής εξαρτώμενης από ρυθμό παραμόρφωσης στη διείσδυση κυλίνδρων σε μαλακές αργίλους	93
2.4	Εμπειρικές Μέθοδοι (Πειραματικές Μέθοδοι με παράλληλη χρήση εμπειρικών σχέσεων)	104
2.4.1	Εκτίμηση διείσδυσης αγωγού σε θαλάσσιο πυθμένα με τη μέθοδο Verley και Lund	105
212	Εκτίμηση διείσδυσης αγωγού σε θαλάσσιο πυθμένα με την κλασσική	106
2.4.2	Εκτίμηση διείσδυσης αγωγού σε θαλάσσιο πυθμένα με την μέθοδο της άνωσης	107

#### Κεφάλαιο 3. Συμπεράσματα Μεθόδων Ανάλυσης Αλληλεπίδρασης Υποθαλάσσιων Αγωγών-Risers με τον Θαλάσσιο Πυθμένα

3.1	Εισαγωγή	108
3.2	Γεωτεχνικές Μέθοδοι	108
3.3	Αριθμητικές Μέθοδοι	111
3.4	Εμπειρικές Μέθοδοι (Πειραματικές Μέθοδοι με παράλληλη χρήση εμπειρικών σχέσεων)	114

Κεφάλαιο 4.	115
Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	

4.1	Εισαγωγή	115
4.2	Γεωτεχνικές Μέθοδοι	115
4.3	Αριθμητικές Μέθοδοι	116
	Βιβλιογραφία	118

108

#### Περιεχόμενα Σχημάτων

Σελίδα

#### Κεφάλαιο 1

Σχήμα 1.1	Διατάξεις Εύκαμπτων Υποθαλάσσιων Αγωγών, (Bai et al, 2005)	14
Σχήμα 1.2	Γενική Διάταξη Μεταλλικού Αλυσοειδούς Αγωγού, (Bridge et al, 2003)	15
Σχήμα 1.3	Ποσοστό % εκτιμώμενης καταπόνησης λόγω κόπωσης για θαλάσσιο πυθμένα με γραμμικώς μεταβαλλόμενη ακαμψία, (Bridge et al, 2004)	19
Σχήμα 1.4	Διαδικασία φόρτισης-δημιουργίας τάφρου κατά την αλληλεπίδραση υποθαλάσσιου αγωγού-πυθμένα, (Bridge et al, 2004)	21
Σχήμα 1.5	Παρουσίαση αλληλεπίδρασης αγωγού-πυθμένα κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης- επαναφόρτισης κατά τον οποίο χάνεται η επαφή αγωγού- εδάφους, (Bridge et al, 2004)	22
Σχήμα 1.6	Παρουσίαση αλλήλεπίδρασης αγωγού-πυθμένα κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης- επαναφόρτισης κατά τον οποίο δεν χάνεται η επαφή αγωγού-εδάφους, (Bridge et al, 2004)	23

#### Κεφάλαιο 2

Σχήμα 2.1	Διάταξη αγωγού για εκτέλεση πειραμάτων μεγάλης κλίμακας, (Bridge et al. 2003)	27
Σχήμα 2.2	Σχηματική διάταξη αγωγού – Θέσεις μετρητών παραμόρφωσης, (Bridge et al. 2003)	28
Σχήμα 2.3	Διάγραμμα καμπτικής ροπής σε συνάρτηση με τη θέση ανάρτησης για μετρητή D, (Bridge et al. 2003)	29
Σχήμα 2.4	Θέση αγωγού κατά μήκος δημιουργηθείσας τάφρου υπό χαμηλή παλίρροια, (Bridge et al, 2003)	30
Σχήμα 2.5	Βάθος δημιουργηθείσας τάφρου κατά μήκος αγωγού, (Bridge et al, 2003)	30
Σχήμα 2.6	Πλάτος δημιουργηθείσας τάφρου κατά μήκος αγωγού, (Bridge et al, 2003)	31
Σχήμα 2.7	Διεισδυσιόμετρο t-bar για εφαρμογές υπαίθρου, (Stewart et al, 1994)	33
Σχήμα 2.8	Αποτελέσματα δύο επί τόπου δοκιμών διεισδυσιομέτρου t- bar, (Stewart et al, 1994)	34
Σχήμα 2.9	Κατανομή αστράγγιστης διατμητικής αντοχής σε συνάρτηση με το βάθος από δοκιμές υπαίθρου και εργαστηρίου, (Stewart et al, 1994)	35

Σχήμα 2.10	Σχηματική απεικόνιση μπροστινής και πλάγιας όψης του συστήματος φυγοκέντρησης (διαστάσεις σε mm), (Ηu at al. 2010)	36
Σχήμα 2.11	(πα et al, 2010) Όργανα μέτρησης πίεσης πόρων επί του αγωγού του συστήματος φυγοκέντρησης, (Hu et al. 2010)	37
Σχήμα 2.12	(πα στ αι, 2010) Κατανομές αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος για τα δείγματα με το διαφορετικό βαθμός προστερεοποίησης, (Hu et al. 2010)	38
Σχήμα 2.13	(Πα εί αι, 2010) Διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης για το πείραμα 1, (Hu et al. 2010)	40
Σχήμα 2.14	Μοντέλο απόκρισης μεταλλικού αλυσοειδούς αγωγού στην περιοχή του σημείου επαφής του με το θαλάσσιο πυθμένα, (Clukey et al. 2007)	41
Σχήμα 2.15	Κατανομή κανονικοποιημένης αντίστασης διείσδυσης και αντίστασης εξαγωγής ως προς το πλήθος των κύκλων φόρτισης - αποφόρτισης, (Hu et al. 2010)	42
Σχήμα 2.16	Διακύμανση πίεσης πόρων σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης από τις καταγραφές τριών μετρητών πίεσης πόρων,	42
Σχήμα 2.17	(πα ετ al, 2010) Κατανομή καθαρής δύναμης που ασκείται από το νερό στον αγωγό σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης, (Hu et al. 2010)	43
Σχήμα 2.18	Διαγράμματα δύναμης - μετατόπισης για τα πειράματα 3 και 4, (Hu et al. 2010)	44
Σχήμα 2.19	Σύγκριση μείωσης μέγιστης αντίστασης διείσδυσης σε συνάρτηση με το πλήθος των κύκλων φόρτισης, (Hu et al. 2010)	45
Σχήμα 2.20	Διαγράμματα δύναμης - μετατόπισης για τα πειράματα 5 και 6, (Hu et al. 2010)	46
Σχήμα 2.21	Σύγκριση μείωσης μέγιστης αντίστασης διείσδυσης σε συνάρτηση με το πλήθος των κύκλων φόρτισης, (Hu et al. 2010)	47
Σχήμα 2.22	Διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης για το πείραμα 2, (Hu et al. 2010)	48
Σχήμα 2.23	(Για είται, 2010) Μέγιστο βάθος διείσδυσης αγωγού και αυξητική μέγιστη διείσδυση αγωγού σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης, (Hu et al. 2010)	49
Σχήμα 2.24	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διεισδυσιομέτρου XBP,	50
Σχήμα 2.25	Ορισμός μέγιστου εμβαδού διατομής και μέγιστης διαμέτρου διεισδυσιομέτρου XBP, (Aubeny et al. 2006)	51
Σχήμα 2.26	Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για διείσδυση διεισδυσιομέτρου h/d = 1,2, (Aubeny et al, 2006)	52

Σχήμα 2.27	Εκτιμήσεις της παραμέτρου $N_{c0}$ από τις αναλύσεις	52
	πεπερασμένων στοιχείων,	
<b>E</b> wéwa 0.00	(Aubeny et al, 2006)	<b>F</b> 4
Σχημα 2.28	ι υπικά προφιλ ταχυτητάς και επιβράουνσης κάτα τη διάρκεια μιας δοκιμής διεισδυσιομέτρου XBP, (Aubeny et al. 2006)	54
Σχήμα 2.29	Εκτιμώμενο προφίλ διατμητικής αντοχής σε συνάρτηση με	54
	το βάθος από δοκιμή διεισδυσιομέτρου XBP (τοποθεσία 12), (Aubeny et al, 2006)	-
Σχήμα 2.30	Εκτιμώμενο προφίλ διατμητικής αντοχής σε συνάρτηση με	55
	το βάθος από δοκιμή διεισδυσιομέτρου XBP (τοποθεσία	
	19), (Aubeny et al, 2006)	
Σχήμα 2.31	Ευαισθησία αποτελεσμάτων δοκιμής διεισδυσιομέτρου	56
	XBP στον επιβαλλόμενο ρυθμό παραμόρφωσης,	
= / 0.00	(Aubeny et al, 2006)	
Σχημα 2.32	Γιεριβάλλουσα καμπυλη αποκρισης παρθένου εοαφους και απόκριση εδάφους σε μεταγενέστερους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης,	60
	(Thethi et al, 2001)	
Σχήμα 2.33	Μοντέλο διείσδυσης αγωγού με βάθος διείσδυσης μισή	61
	$O(\alpha\mu\epsilon\tau\rho o),$	
Σνήμα 2.24	(Thethi et al, 2001) Διακύμανση «Ροράς λόγκη κόπωσης για δύο αγκηγιούς σε	61
Ζχημα 2.34	Διακύμανοι μφορας λογώ κοι ωσης για συσ αγωγούς σε	01
	(Thethi et al. $2001$ )	
Σνήμα 2 35	Μοντέλο ελατηρίων για προσομοίωση επιορρής δύναμης	62
	«εισρόφησης».	02
	(Thethi et al. 2001)	
Σχήμα 2.36	Καμπύλες δύναμης «εισρόφησης»,	63
	(Thethi et al, 2001)	
Σχήμα 2.37	Επιρροή πλευρικής αντίστασης στην προκύπτουσα	64
	καμπτική ροπή,	
- /	(Thethi et al, 2001)	
Σχήμα 2.38	Σχηματικό μοντέλο – Ορισμοί χρησιμοποιούμενων μεγεθών,	66
<b>E</b> wéwa 0.20	(Aubeny et al, 2005) $\Sigma$ émeren Mérer Mérer Stérez Sugra sums éress é éres	07
Σχημα 2.39	Συγκρισή λυσεων για βαθος οιεισουσής μικροτερο ή ισο	67
	(Aubeny et al. 2005)	
Σνήμα 2 40	Σύνκοιση λύσεων για βάθος διείσδυσης μεναλύτερο της	69
	μισής διαμέτρου αγωνού	00
	(Aubenv et al. 2005)	
Σχήμα 2.41	Περιπτώσεις παραμόρφωση καννάβου για α) Μέθοδο	71
X II	Lagrangian και β) Μέθοδο Lagrangian/ Éulerían,	
<b>E</b> wéwa 0.40	(Clukey et al, 2008)	70
Σχημα 2.42	ινιειωση ουναμης αντιορασης στον αγωγο,	12
Σνήμα 2.43	(Οιμκεγ εί αι, 2000) Καμπύλες τάσεων – παραμοριούσεων για το εδαιαικό	7/
-Ailha 2.49	παμπολές παθέων - παραμορφωσέων για το εσαφικό	/ 4
	(Clukev et al. 2008)	
Σχήμα 2.44	Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες νια το μοντέλο των	75
<u>V.II. 2</u>	πεπερασμένων στοιχείων, (Clukey et al, 2008)	

Σχήμα 2.45	Καμπύλη φορτίου – μετατόπισης από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και σύγκριση με πειραματικά δεδομένα,	76
Σχήμα 2.46	(Clukey et al, 2008) Παράδειγμα κινηματικής συμπεριφοράς σωματιδίων νερού κατά τη διάρκεια κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης- επαναφόρτισης, (Clukey et al. 2008)	77
Σχήμα 2.47	(Clukey et al, 2008) Καμπύλη Ρ-y για έδαφος χωρίς μείωση των μηχανικών του χαρακτηριστικών, (Aubapy et al. 2006)	78
Σχήμα 2.48	(Auberry et al, 2000) Καμπύλη Ρ-y για επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης για έδαφος χωρίς μείωση των μηχανικών του χαρακτηριστικών, (Aubery et al. 2009)	79
Σχήμα 2.49	Καμπύλη Ρ-y για επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης για έδαφος με μείωση των μηχανικών του χαρακτηριστικών, (Aubeny et al. 2008)	84
Σχήμα 2.50	Δημιουργία τάφρου υπό τον αγωγό 1,	85
Svána 2 54	(Nakhee et al, 2009)	96
Ζχημα 2.51	(Nakhee et al. 2009)	00
Σχήμα 2.52	Μέγιστη διακύμανση καμπτικής ροπής στο σημείο επαφής αγωγού-εδάφους, υπό τον αγωγό 1, (Νακόρο οt al. 2000)	87
Σχήμα 2.53	(Νακήθε ετ αι, 2009) Μέγιστη διακύμανση καμπτικής ροπής στο σημείο επαφής αγωγού-εδάφους, υπό τον αγωγό 2, (Nakhee et al. 2009)	87
Σχήμα 2.54	Διακύμανση καμπτικής ροπής σε διάφορους κόμβους, υπό τον αγωγό 1, (Nakhee et al. 2009)	88
Σχήμα 2.55	(Νακήσε ετ αι, 2000) Μέγιστη διακύμανση καμπτικής ροπής για διαφορετικά προφίλ εδαφικής αντοχής για τον αγωγό 2, (Nakhee et al. 2009)	89
Σχήμα 2.56	(Νακήσε στ αι, 2000) Μείωση στη μέγιστη διακύμανση καμπτικής ροπής για διαφορετικό εύρος επιβαλλόμενης ανύψωσης του σημείου ανάρτησης του αγωγού 2, (Nakhee et al. 2009)	89
Σχήμα 2.57	Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης αγωγού-πυθμένα στο σημείο επαφής, (Palmor, 2008)	90
Σχήμα 2.58	(Famer, 2008) Περιοχή σημείου επαφής αγωγού-πυθμένα για την περίπτωση άκαμπτου πυθμένα, (Palmer 2008)	91
Σχήμα 2.59	(Γαπισι, 2000) Περιοχή σημείου επαφής αγωγού-πυθμένα για την περίπτωση άκαμπτου-πλαστικού πυθμένα, (Palmer 2008)	92
Σχήμα 2.60	Αντίσταση διείσδυσης σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης και την κατά μήκος του αγωγού απόσταση, (Palmer 2008)	93
Σχήμα 2.61	τασικό προφίλ έμπροσθεν του κυλίνδρου για διάφορες ταχύτητες διείσδυσης, (Aubeny et al, 2007)	97

Σχήμα 2.62	Προβλέψεις πεπερασμένων στοιχείων για φορτία κατάρρευσης σε συνάρτηση με την ταχύτητα διείσδυσης, (Aubeny et al. 2007)	98
Σχήμα 2.63	Συσχέτιση των συντελεστών $\lambda_{c0}$ και $ ho_{0}$ ,	98
	(Aubeny et al, 2007)	
Σχήμα 2.64	Απλοποιημένη πρόβλεψη επιρροής ρυθμού παραμόρφωσης, (Aubeny et al. 2007)	99
Σχήμα 2.65	Παραμετρική μελέτη εκτίμησης διείσδυσης κυλίνδρου, (Aubeny et al, 2007)	100
Σχήμα 2.66	Εξάρτηση διατμητικής αντοχής από το ρυθμό παραμόρφωσης σε δοκιμές συσκευής μικροσκοπικού πτερυγίου, (Aubeny et al. 2007)	101
Σχήμα 2.67	Σχέση βάθους διείσδυσης σε συνάρτηση με ταχύτητας πρόσκρουσης κυλίνδρου-Σύγκριση πειραματικών δεδομένων με προβλέψεις μοντέλου, (Aubeny et al. 2007)	102
Σχήμα 2.68	Εκτιμώμενη ευαισθησία αργίλων που χρησιμοποιήθηκαν στην επιστημονική μελέτη, (Aubeny et al. 2007)	103
Σχήμα 2.69	Προβλεπόμενη διείσδυση σε σχέση με την μετρούμενη διείσδυση για τα πειράματα διείσδυσης κυλίνδρου, (Aubeny et al. 2007)	104
Σχήμα 2.70	Σχέση εδαφικής πίεσης – διείσδυσης αγωγού, (Verley and Lund, 1995)	105
Σχήμα 2.71	Σχέση εδαφικής πίεσης – διείσδυσης αγωγού, (Bai, 2001)	106
Σχήμα 2.72	Σχέση εδαφικής πίεσης – διείσδυσης αγωγού, (Haland, 1997)	107

#### Περιεχόμενα Πινάκων

Σελίδα

#### Κεφάλαιο 2

Πίνακας 2.1	Πειράματα ερευνητικού προγράμματος, (Hu et al. 2010)	39
Πίνακας 2.2	Διαδικασία φόρτισης για πείραμα αλληλεπίδρασης μεταξύ αγωγού - εδάφους, (Clukev et al. 2008)	72
Πίνακας 2.3	Στοιχεία μέτρου ελαστικότητας και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής επιφανειών διαρροής, (Clukey et al. 2008)	73
Πίνακας 2.4	Βασικά χαρακτηριστικά μεταλλικών αλυσοειδών αγωγών, (Nakhae et al, 2009)	81
Πίνακας 2.5	Τυπικά εύρη τιμών διατμητικής αντοχής εδαφικού πυθμένα, (Nakhae et al, 2009)	82
Πίνακας 2.6	Οριακοί ρυθμοί περιστροφής, οριακές διατμητικές δυνάμεις για διάφορες τιμές της παραμέτρου ρυθμού παραμόρφωσης, (Aubeny et al, 2007)	102

#### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο εκπόνησης διπλωματικής εργασίας του διατμηματικού μεταπτυχιακού προγράμματος σε «Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική διερεύνηση των σημαντικότερων πρόσφατων υψηλού επιπέδου ερευνητικών εφαρμογών ανάλυσης της αλληλεπίδρασης λεπτόγραμμων σωληνοειδών κατασκευών με το θαλάσσιο πυθμένα. Κατόπιν ακολούθησε καταγραφή και ανάλυση των διαφόρων πειραματικών, εμπειρικών και αριθμητικών προσεγγίσεων και αξιολόγηση των προοπτικών των διαφόρων εφαρμογών».

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας, και προκειμένου να εξοικειωθεί ο λειτουργία υποθαλάσσιων αναγνώστης με την των ανωνών-risers (λεπτόγραμμοι σωληνοειδείς αγωγοί) εξόρυξης υδρογονανθράκων, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές σχεδιασμού και λειτουργίας των κατασκευών αυτών. Επιπρόσθετα γίνεται αναφορά στο φαινόμενο της δημιουργίας τάφρου στον θαλάσσιο πυθμένα από τον υποθαλάσσιο αγωγό, στο σημείο επαφής τους (touchdown point). Το φαινόμενο αυτό ελέγχει ουσιαστικά την αντοχή του αγωγού σε φαινόμενα κόπωσης και είναι η πηγή προβληματισμού και έρευνας στην επιστημονική κοινότητα, ως προς το ποια μέθοδος θα μπορέσει να προσομοιώσει όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα, την αλληλεπίδραση ανάμεσα στους αγωγούς και τον θαλάσσιο πυθμένα.

Το δεύτερο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην παρουσίαση της βιβλιογραφικής έρευνας που έλαβε χώρα σχετικά με τις υπάρχουσες (μέχρι τώρα εφαρμοσμένες-υιοθετημένες) μεθόδους ανάλυσης της αλληλεπίδρασης των υποθαλάσσιων αγωγών-risers με τον θαλάσσιο πυθμένα.

Στο επόμενο κεφάλαιο (τρίτο) της μεταπτυχιακής εργασίας αναφέρονται τα βασικά συμπεράσματα των μεθόδων ανάλυσης της αλληλεπίδρασης των υποθαλάσσιων αγωγών-risers με τον θαλάσσιο πυθμένα.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας καταγράφονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

In terms of the fulfilment of the Postgraduate Thesis for the postgraduate program «Marine Technology and Science» of the National Technical University of Athens, a bibliographic investigation of the most important, recent and sophisticated research applications of the analysis of the interaction between the tube shaped risers with the seabed was conducted. Subsequently, the recording and analysis of various experimental, empirical and numerical approaches and assessment of the perspectives of the various applications followed.

In the first chapter of the diploma thesis, and in order to familiarize the reader with the operation of the tube shaped risers system that enables hydrocarbon extraction, the basic concepts for the design and function of these structures are being presented. Furthermore the phenomenon of seabed trench formation at the touchdown point with of the riser is being presented. This phenomenon actually governs the fatigue life of the riser and is currently the source of questioning and research among the scientific community, as for which method can simulate with the most accurate way the interaction between the risers and the seabed.

The second chapter focuses on the presentation of the literature review that took place concerning the existing (currently applied) methods of analysis of the interaction between tube shaped risers and the seabed.

In the following chapter (third) of the postgraduate thesis, the basic conclusions of the methods of analysis of the interaction between tube shaped risers and the seabed are being presented.

The fourth and final chapter of this work, contains suggestions for further experimental research.

Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί-risers, αποτελούν ουσιώδες μηχανισμό για κάθε πλατφόρμα εξόρυξης υδρογονανθράκων και πετρελαίου, από υποθαλάσσια πεδία που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη. Οι λεπτόγραμμες αυτές σωληνοειδείς κατασκευές, εξυπηρετούν πληθώρα σκοπών καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας εξόρυξης. Η σχεδίαση και κατασκευή των υποθαλάσσιων αγωγών μεταφοράς υδρογονανθράκων και πετρελαίου θα πρέπει να πληρεί συγκεκριμένες αυστηρές τεχνικές προδιαγραφές έτσι ώστε το όλο σύστημα να λειτουργεί με ασφάλεια, οικονομία και αποτελεσματικότητα και για μεγάλη χρονική διάρκεια.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αλληλεπίδρασή των αγωγών με το θαλάσσιο πυθμένα, ειδικά στο σημείο επαφής τους με αυτόν (touch down point). Στο σημείο αυτό, μέσω ενός πολύπλοκου μηχανισμού, δημιουργείται μια τάφρος (trench formation) κατά την επαφή αγωγού με θαλάσσιο πυθμένα, κατά τις επαναλαμβανόμενες φάσεις φόρτισης-αποφόρτισης που υφίσταται ο αγωγός . Η αλληλεπίδραση αγωγού-πυθμένα στην περιοχή της τάφρου διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο κατά τη φάση σχεδίασης, κατασκευής αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας των αγωγών. Μέχρι τα τέλη του προηγούμενου αιώνα η επιστημονική έρευνα σχετικά με την αλληλεπίδραση αγωγών-θαλάσσιου πυθμένα ήταν αρκετά περιορισμένη με αποτέλεσμα οι μελετητές να προβαίνουν σε αρκετά συντηρητικούς σχεδιασμούς, λαμβάνοντας πολύ υψηλούς συντελεστές ασφαλείας, και, σε μερικές περιπτώσεις, αυξάνοντας κατά πολύ το κόστος κατασκευής των συστημάτων αυτών. Για την καλύτερη κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των υποθαλάσσιων αγωγών και του θαλάσσιου πυθμένα και αποσκοπώντας στην ουσία, στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους και την παράλληλη μείωση του κόστους κατασκευής τους, τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια έχει διεξαχθεί μεγάλο πλήθος ερευνητικής δραστηριότητας που περιλαμβάνει πεδιακές και εργαστηριακές έρευνες καθώς επίσης και ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων προσομοίωσης της παραπάνω συμπεριφοράς. Για την εκτέλεση όλων των παραπάνω ερευνών έχει απαιτηθεί η συνδρομή πολλών διαφορετικών επιστημονικών κλάδων, γεγονός που καταδεικνύει τόσο τη συνθετότητα του προβλήματος όσο βέβαια και το μεγάλο ενδιαφέρον σχετικά με αυτό.

Η σύγχρονη προσέγγιση του προβλήματος περιλαμβάνει τη χρήση είτε μοντέλων γραμμικών-μη γραμμικών ελατηρίων είτε άκαμπτης έδρασης για την προσομοίωση της έδρασης των αγωγών στο θαλάσσιο πυθμένα. Βέβαια η προσέγγιση αυτή αγνοεί τους περίπλοκους και ανεξάρτητους, μεταξύ τους, μηχανισμούς που διέπουν την αλληλεπίδραση αγωγού-πυθμένα. Είναι κοινός τόπος κατά συνέπεια, ότι θα χρειαστεί να συνεχιστούν οι έρευνες πάνω στο συγκεκριμένο θέμα προκειμένου να καταλήξουν οι ερευνητικές προσπάθειες στην, όσο το δυνατόν, πιο αξιόπιστη μέθοδο προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης αγωγού-πυθμένα.

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι μετά από εκτενή βιβλιογραφική έρευνα, η, κατά το δυνατό, σφαιρικότερη παρουσίαση των υφιστάμενων μεθόδων ανάλυσης της αλληλεπίδρασης μεταξύ των υποθαλάσσιων σωληνοειδών κατασκευών-risers και του θαλάσσιου πυθμένα. Για κάθε μέθοδο ανάλυσης, θα παρουσιαστούν η μεθοδολογία και οι βασικές παραδοχές της, τα πειραματικά αποτελέσματα από τις πειραματικές πεδιακές και εργαστηριακές δοκιμές καθώς επίσης και τα αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων θεωρητικών προτύπων. Στο τέλος της παρουσίασης για κάθε μέθοδο, θα γίνει αναφορά στα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν μετά την ολοκλήρωση της έρευνας. Επιπρόσθετα θα γίνουν προτάσεις για μελλοντικές έρευνες.

# 1

## Αρχές Σχεδιασμού-Λειτουργίας Υποθαλάσσιων Αγωγών-Risers

### 1.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με την συνοπτική περιγραφή των υποθαλάσσιων αγωγών-risers. Γίνεται αναφορά στις αρχές σχεδιασμού-λειτουργίας των σωληνοειδών αγωγών risers, στο σκοπό που εξυπηρετούν, στις διατάξεις τους, στις κατηγορίες των επιβαλλόμενων σε αυτούς φορτίων και στις οριακές καταστάσεις σχεδιασμού. Στο τέλος του κεφαλαίου αναπτύσσεται το φαινόμενο δημιουργίας τάφρου στο θαλάσσιο πυθμένα στο σημείο επαφής του αγωγού με αυτόν.

#### 1.2 Υποθαλάσσιοι Αγωγοί-Risers

#### 1.2.1 Σχεδιασμός-Λειτουργία

Με την αυξανόμενη ανάγκη για παραγωγή ενέργειας παγκοσμίως, τα μεγαλύτερα αποθέματα πετρελαίου και υδρογονανθράκων σε μικρά βάθη έχουν εξαντληθεί. Κατά συνέπεια οι δραστηριότητες εξόρυξης πετρελαίου και υδρογονανθράκων έχουν μεταφερθεί σε αρκετά μεγαλύτερα βάθη, καθιστώντας αναγκαία τη χρήση συστημάτων υποθαλάσσιων αγωγών-riser. Ένα σύστημα υποθαλάσσιου αγωγού-riser, πρόκειται για σύστημα σωληνωτών αγωγών που συνδέουν την πλωτή πλατφόρμα εξόρυξης που βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας με τις κεφαλές των πηγαδιών εξόρυξης που βρίσκονται στον πυθμένα της θάλασσας. Υπάρχουν δύο κύρια είδη υποθαλάσσιων αγωγών, οι άκαμπτοι και οι εύκαμπτοι, ενώ ο συνδυασμός των δύο παραπάνω ειδών μας δίνει τον υβριδικό αγωγό (hybrid riser). Οι λεπτόγραμμοι σωληνοειδείς υποθαλάσσιοι αγωγοί-risers, χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά υγρών μεταξύ του πυθμένα της θάλασσας και της πλατφόρμας εξόρυξης, κατά τη διάρκεια των εργασιών διάτρησης, εισπίεσης, παραγωγής και εξαγωγής υδρογονανθράκων. Κατά τη διάρκεια της διάτρησης, οι υποθαλάσσιοι αγωγοί χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των απαραίτητων υγρών διάτρησης από και προς το πηγάδι εξόρυξης. Επιπρόσθετα συμμετέχουν στη στήριξη βοηθητικών γραμμών (auxiliary lines) και εργαλείων οδηγών (guide tools) του συστήματος. Οι αγωγοί παραγωγής και εξαγωγής, χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των οδηγών (Buide tools) του συστήματος. Οι αγωγοί παραγωγής και εξαγωγής, χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των υδρογονανθράκων προς την πλατφόρμα εξόρυξης (Nakhaee, 2010).

Με την πάροδο των ετών έχουν αναπτυχθεί διάφορες διατάξεις υποθαλάσσιων αγωγών, ειδικότερα για την υποκατηγορία των εύκαμπτων αγωγών. Οι βασικότερες διατάξεις εύκαμπτων υποθαλάσσιων αγωγών παρουσιάζονται από τους Bai et al (2005) στο επόμενο σχήμα (1.1).



**Σχήμα 1.1**: Διατάξεις Εύκαμπτων Υποθαλάσσιων Αγωγών, (Bai et al, 2005)

Καθεμία από τις παραπάνω διατάξεις εμφανίζει μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα. Η τελική επιλογή διάταξης θα πρέπει να γίνει λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις παραγωγής του συστήματός, τις ιδιαιτερότητες της τοποθεσίας και τα αποτελέσματα στατικής μελέτης. Επιπρόσθετα, παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή της διάταξης περιλαμβάνουν τη γενική γεωμετρία και τοπογραφία της περιοχής, τα χρησιμοποιούμενα υλικά, τις ιδιότητες της διατομής του υλικού, τα μέσα υποστήριξης του συστήματος και το κόστος (Bai et al, 2005).

Ο υποθαλάσσιος αγωγός πρέπει να έχει το μικρότερο δυνατό μήκος προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος εγκατάστασης και το κόστος του υλικού. Από την

άλλη επιβάλλεται να χαρακτηρίζεται από επαρκή ευκαμψία έτσι ώστε να επιτρέπει μεγάλες μετακινήσεις της πλωτής πλατφόρμας.

Ο βασικότερος και ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος εύκαμπτου υποθαλάσσιου αγωγού στη βιομηχανία είναι η «ελεύθερα ανηρτημένη αλυσοειδής κατασκευή» (free hanging catenary). Πρόκειται για τον τύπο με την απλούστερη διάταξη αλλά και το χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης, γεγονός που οφείλεται στην απαίτηση περιορισμένης υποθαλάσσιας τεχνολογικής υποδομής αλλά και στην εύκολη διαδικασία εγκατάστασης, όταν δεν συναντώνται ιδιαίτερες δυσκολίες κατά την εφαρμογή υποθαλάσσιων τεχνικών μέσων πλοήγησης-συγκράτησης του αγωγού. Βασικό μειονέκτημα της παραπάνω διάταξης αποτελεί το γεγονός ότι ο αγωγός είναι εκτεθειμένος σε σοβαρά φορτία οφειλόμενα στις κινήσεις του πλωτού μέσου. Ο αγωγός υπόκειται, χωρίς να υπάρχει σύστημα προστασίας, σε κινήσεις από και προς τον θαλάσσιο πυθμένα και είναι συνηθισμένο να υφίσταται έντονες συμπιεστικές φορτίσεις στο σημείο επαφής του με αυτόν (Bai et al, 2005).

Στο σχήμα 1.2 απεικονίζεται η γενική διάταξη ενός μεταλλικού αλυσοειδούς υποθαλάσσιου αγωγού, ελεύθερα ανηρτημένου.



Σχήμα 1.2: Γενική Διάταξη Μεταλλικού Αλυσοειδούς Αγωγού, (Bridge et al, 2003)

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα το πάνω μέρος του αγωγού συνδέεται με την πλωτή πλατφόρμα εξόρυξης υδρογονανθράκων, από την οποία αναρτάται υπό μια συγκεκριμένη γωνία. Ο χαλύβδινος αγωγός (steel catenary riser) καμπυλώνει ομαλά προς το σημείο επαφής (touchdown point) με τον πυθμένα. Στο σημείο αυτό, και υπό την επιρροή σύνθετων ανεξάρτητων μηχανισμών, δημιουργείται μια τάφρος (trench formation) και ένα τμήμα του αγωγού στην ουσία κείτεται θαμμένο (buried zone) κάτω από το θαλάσσιο πυθμένα. Ο αγωγός ανυψώνεται από τη ζώνη ταφής, φθάνει στην επιφάνεια του πυθμένα της θάλασσας και εδράζεται πάνω σε αυτόν, έως το άκρο του αγωγού στη θέση εξόρυξης.

Σε γενικές γραμμές μπορεί να γίνει ο ακόλουθος διαχωρισμός του υποθαλάσσιου αγωγού κατά μήκος αρχίζοντας από το σημείο σύνδεσης με την πλωτή πλατφόρμα εξόρυξης και καταλήγοντας στο σημείο εναπόθεσης επί του θαλάσσιου πυθμένα :

α) Ζώνη αλυσοειδούς (catenary zone), στην οποία ο αγωγός έχει σχήμα αλυσοειδούς και περιλαμβάνει το τμήμα του αγωγού ανάμεσα στο σημείο ανάρτησης από την πλατφόρμα έως το σημείο επαφής με τον πυθμένα.

β) Ζώνη ταφής (buried zone), στην οποία ο αγωγός βρίσκεται θαμμένος υπό τον θαλάσσιο πυθμένα και περιλαμβάνει το τμήμα του αγωγού ανάμεσα στο σημείο επαφής με τον πυθμένα έως το σημείο που ο αγωγός ανυψώνεται στην επιφάνεια του πυθμένα.

γ) Επιφανειακή ζώνη (surface zone), στην οποία ο αγωγός κείτεται επί του πυθμένα της θάλασσας. Οι κινήσεις του αγωγού στο τμήμα αυτό, τείνουν να αποσβένονται σε κάποιο μήκος μακριά από τη ζώνη ταφής, όμως δεν εξαλείφονται εξ ολοκλήρου.

#### 1.2.2 Επιβαλλόμενα Φορτία

Ένα από τα πλέον ουσιαστικά βήματα στη σχεδίαση ενός συστήματος υποθαλάσσιου αγωγού-riser, είναι η εκτίμηση και ο υπολογισμός των επιβαλλόμενων σε αυτό φορτίων. Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί υποβάλλονται σε μια πληθώρα περιβαλλοντικών φορτίων αλλά και φορτίων λειτουργίας όπως κατασκευαστικά φορτία και φορτία λόγω εσωτερικής ροής ρευστού. Σύμφωνα με τον Nakhaee (2010), τα κυριότερα φορτία είναι τα ακόλουθα :

- Φορτία περιβάλλοντος, όπως κυματισμοί, πάγος
- Κινήσεις πλωτής πλατφόρμας (χαμηλής συχνότητας κινήσεις, κινήσεις σύμφωνα με τη συχνότητα των κυματισμών)
- Βάρος και ανωστικές δυνάμεις στον αγωγό και στις σωληνώσεις του
- Βάρος και πίεση εσωτερικά μεταφερόμενων υγρών-αερίων
- Παραμένοντα φορτία που προκλήθηκαν από τις διαδικασίες εγκατάστασης
- Θερμικά φορτία
- Φορτία που προκλήθηκαν από τις διαδικασίες διάτρησης
- Φορτία προφόρτισης των συνδέσεων
- Εδαφικές πιέσεις στα θαμμένα τμήματα του αγωγού
- Εξωτερική υδροστατική πίεση
- Τυχαία φορτία

Ο Bridge et al (2003), αναφέρουν ότι η κατακόρυφη κίνηση της πλωτής πλατφόρμας (heaving) προκαλεί τη μεγαλύτερη διακύμανση επιβαλλόμενων τάσεων στο σημείο επαφής του αγωγού με το θαλάσσιο πυθμένα. Σύμφωνα με τις αναλύσεις τους, μια δυναμική κατακόρυφη κίνηση εύρους ±1.0m ενδέχεται να μετακινήσει οριζοντίως το σημείο επαφής αγωγού-πυθμένα (για αγωγό ευρισκόμενο σε βάθος 1000m) σε απόσταση της τάξης των 10m.

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά την φάση σχεδίασης του αγωγού να γίνει πρόβλεψη έτσι ώστε οι παραπάνω επιβαλλόμενες φορτίσεις στον υποθαλάσσιο αγωγό να είναι εντός απαιτούμενων ορίων για την αποφυγή αστοχιών σε εφελκυσμό, κάμψη, στρέψη, θλίψη ή κόπωση (Bai, 2001).

Σύμφωνα με τους Thethi et al (2001), η σχεδίαση ενός συστήματος υποθαλάσσιου αγωγού αποτελεί μια επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία ελέγχονται τα ακόλουθα :

- Πάχος τοιχώματος αγωγού
- Στατική και δυναμική ανάλυση σε καταστάσεις ακραίων φορτίσεων
- Ανάλυση κόπωσης

Καταρχήν συνιστάται η εκτίμηση πάχους τοιχώματος για τον αγωγό. Η επιλογή θα πρέπει να γίνει έτσι ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις του κανονισμού έναντι κατάρρευσης και κάμψης υπό στατική φόρτιση. Εν συνεχεία εκτελείται καθολική ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς συνηθέστερα με αριθμητικές μεθόδους προκειμένου να ληφθεί υπόψη η σύνθετη και μη γραμμική συμπεριφορά του αγωγού. Η ανάλυση θα πρέπει να περιλαμβάνει διάφορους συνδυασμούς φορτίσεων και ειδικότερα φορτίσεις οφειλόμενες σε περιβαλλοντικά φαινόμενα όπως κύματα και σε μετακινήσεις της πλωτής πλατφόρμας εξόρυξης. Είναι προφανές πως για όλες αυτές τις περιπτώσεις θα πρέπει η απόκριση του συστήματος και τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη να βρίσκονται εντός των απαιτούμενων ορίων.

Μετά την προκαταρκτική ανάλυση, λαμβάνει χώρα η βελτιστοποίηση της διάταξης προκειμένου να προκύψει η τελική της μορφή. Ο Thethi et al (2001), αναφέρουν πως συνήθως εξετάζεται η αλλαγή του πάχους του τοιχώματος του αγωγού και η γωνία βύθισης, σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο, από την πλωτή πλατφόρμα.

#### 1.2.3 Οριακές Καταστάσεις Σχεδιασμού

Σύμφωνα με τον Nakhaee (2010), η σχεδίαση ενός συστήματος υποθαλάσσιου αγωγού βασίζεται στη θεώρηση διαφορετικών συνδυασμών φόρτισης. Η επιλογή του τελικού συστήματος θα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις σχεδιασμού των ακόλουθων οριακών καταστάσεων :

- Οριακή κατάσταση λειτουργίας : Απαιτείται να συνεχίζεται η κανονική λειτουργία του αγωγού υπό συνηθισμένες συνθήκες.
- Τελική οριακή κατάσταση : Απαιτείται να παραμένει ο αγωγός ακέραιος και να αποφευχθεί η θραύση του, χωρίς να είναι απαραίτητη η συνέχιση της λειτουργίας του. Η οριακή κατάσταση αυτή αφορά τη μέγιστη αντίσταση του αγωγού στα επιβαλλόμενα φορτία με ετήσια πιθανότητα υπέρβασης 1%.
- Οριακή κατάσταση οφειλόμενη σε μη συνηθισμένα φορτία: Πρόκειται για τελική οριακή κατάσταση οφειλόμενη σε μη συνηθισμένα (τυχαία) φορτία.
- Οριακή κατάσταση αστοχίας υπό φαινόμενα κόπωσης : Πρόκειται για τελική οριακή κατάσταση υπό την οποία ο αγωγός αστοχεί εξαιτίας του φαινομένου της κόπωσης (προοδευτική-τοπική αστοχία αγωγού), οφειλόμενης σε κυκλική επαναλαμβανόμενη φόρτιση.

Σύμφωνα με τους παραπάνω ερευνητές η τελευταία οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω φαινομένων κόπωσης, αποτελεί ίσως τον πιο κρίσιμο παράγοντα που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την ανάλυση και σχεδίαση ενός συστήματος υποθαλάσσιου αγωγού.

Ο Eddie (2010), αναφέρει πως μια πλήρης εκτίμηση της επιρροής φαινομένων κόπωσης θα πρέπει να εκτελείται κατά το σχεδιασμό. Επιβάλλεται να λαμβάνονται υπόψη μη γραμμικά φαινόμενα αλλά και η αλληλεπίδραση θαλάσσιου πυθμένα-αγωγού καθώς και η αμεσότητα των περιβαλλοντικών φορτίσεων. Τέλος εκτός από την εκτίμηση φθοράς λόγω κόπωσης από πρωτογενή αίτια, θα πρέπει να αξιολογείται και η φθορά λόγω κόπωσης που οφείλεται σε δευτερογενείς κινήσεις της πλωτής πλατφόρμας αλλά και σε δονήσεις που προκαλούνται από την κίνηση θαλασσίου ρεύματος.

### 1.3 Φαινόμενο Δημιουργίας Τάφρου – Περιγραφή

## Προβλήματος

Όπως προαναφέρθηκε, η απόκριση του πυθμένα στη φόρτιση που προκαλεί ο αγωγός αλλά και το φαινόμενο δημιουργίας τάφρου στο σημείο επαφής αγωγούπυθμένα έχουν ιδιαίτερα μεγάλη σημασία για τον ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό ενός υποθαλάσσιου αγωγού. Είναι αποδεκτό, πως υπό τις κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες και εξαιτίας των επιβαλλόμενων φορτίων σε αυτόν, ένας αγωγός που κείτεται σε ένα χαλαρό εδαφικό υλικό πυθμένα με περίπου ελαστικές-πλαστικές μηχανικές ιδιότητες και με σχετικά μικρές παραμέτρους αντοχής, θα δημιουργήσει προοδευτικά μια τάφρο. Οι αρχικές εκτιμήσεις για το μηχανισμό δημιουργίας τάφρου ήταν ότι προκαλείται από το συνδυασμό της δυναμικής κίνησης του αγωγού και της διαδικασίας μεταφοράς ιζημάτων από τα θαλάσσια ρεύματα που δρουν στον πυθμένα (Bridge et al, 2003). Βέβαια ο ακριβής μηχανισμός δεν έχει γίνει ακόμα γνωστός και αποτελεί αντικείμενο έρευνας από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα. Κατά συνέπεια ο σχεδιασμός των συστημάτων risers βασιζόταν σε ιδιαίτερα συντηρητικές προσεγγίσεις καθώς δεν γινόταν ανάλυση της κατάστασης στον πυθμένα και υιοθετούνταν ακραίες καταστάσεις μόνο, με αποτέλεσμα σε αρκετές περιπτώσεις η σχεδίαση να κρίνεται αντιοικονομική.

Τα παραπάνω αποτελούν αντικείμενο έντονου προβληματισμού για τη διεθνή επιστημονική κοινότητα. Η μέχρι τώρα προσέγγιση για την προσομοίωση της απόκρισης του θαλάσσιου πυθμένα ήταν η χρήση γραμμικών ή μη γραμμικών ελατηρίων ή η θεώρηση άκαμπτης συμπεριφοράς. Επιπρόσθετα βασική εκτίμηση για τον πυθμένα ήταν ότι πρόκειται για επίπεδη επιφάνεια.

Είναι γεγονός πως οι παραπάνω προσεγγίσεις δεν είναι ακριβείς διότι αγνοούν τόσο το μηχανισμό δημιουργίας τάφρου όσο και τη σύνθετη συμπεριφορά του συστήματος αγωγού-πυθμένα στο σημείο επαφής τους. Σύμφωνα με τους Bridge et al (2004), το μοντέλο συμπεριφοράς του θαλάσσιου πυθμένα που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση του υποθαλάσσιου αγωγού έχει σημαντική επιρροή στον εκτιμώμενο χρόνο ζωής του αγωγού προτού αστοχήσει σε φαινόμενα κόπωσης και μάλιστα αναφέρουν ότι η εκτιμώμενη καταπόνηση λόγω κόπωσης (fatigue damage) είναι εξαρτώμενη από την εδαφική ακαμψία (soil stiffness). Στο επόμενο σχήμα (1.3) παρατίθεται η παραπάνω θεώρηση, για την περίπτωση θαλάσσιου πυθμένα με γραμμικώς μεταβαλλόμενη ακαμψία, βασιζόμενη σε δεδομένα υποθαλάσσιων αγωγών που είχαν τοποθετηθεί στη δυτική Αφρική και στον κόλπο του Μεξικό.



**Σχήμα 1.3**: Ποσοστό % εκτιμώμενης καταπόνησης λόγω κόπωσης για θαλάσσιο πυθμένα με γραμμικώς μεταβαλλόμενη ακαμψία, (Bridge et al, 2004)

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, για την περίπτωση υψηλής ακαμψίας της τάξης των 10.000 kN/m/m, η προκύπτουσα καταπόνηση λόγω κόπωσης είναι εφάμιλλη με την καταπόνηση που θα προέκυπτε αν ο πυθμένας προσομοιαζόταν ως άκαμπτη έδραση. Θεωρώντας μια μείωση μιας τάξης μεγέθους για την ακαμψία (1.000 kN/m/m) παρατηρείται μείωση της καταπόνησης περί το 30% (65-80% της καταπόνησης που αντιστοιχεί για άκαμπτη έδραση), ενώ με μείωση της καταπόνησης περί το 30% ότο τάξεων μεγέθους της ακαμψίας (100 kN/m/m) η αντίστοιχη μείωση της καταπόνησης είναι 40-60% (30-60% της καταπόνησης που αντιστοιχεί για άκαμπτη έδραση).

Είναι προφανές πως στην περίπτωση που το εύρος τιμών για την εδαφική ακαμψία, που θα χρησιμοποιηθεί στις αναλύσεις των υποθαλάσσιων αγωγών, είναι αρκετά υψηλό θα προκύψει εκτίμηση μικρού διαστήματος ωφέλιμης ζωής για τον αγωγό προτού αστοχήσει σε κόπωση, ενώ αντιθέτως αν το εύρος τιμών είναι αρκετά χαμηλό τότε η αντίστοιχη πρόβλεψη θα αφορά μεγάλο χρονικό διάστημα και ίσως αποδειχθεί συντηρητική ή μη αντιπροσωπευτική. Όπως γίνεται αντιληπτό, η τελική επιλογή του εύρους της ακαμψίας του θαλάσσιου πυθμένα διαδραματίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο για το σχεδιασμό του αγωγού.

Οι ίδιοι ερευνητές παρουσίασαν την εκτίμησή τους για τους βασικούς μηχανισμούς που συνεισφέρουν στο φαινόμενο δημιουργίας τάφρου.

A) Επαναλαμβανόμενη κυκλική φόρτιση οφειλόμενη σε μικρού εύρους κίνηση του αγωγού. Η επαναλαμβανόμενη αυτή κίνηση έχει ως αποτέλεσμα την ανάμειξη εδάφους-νερού και την αναμόχλευση και υποβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους που οδηγούν στη διείσδυση της διατομής του αγωγού στο υπέδαφος. Το βάθος διείσδυσης της διατομής είναι εκείνο στο οποίο η εδαφική αντίσταση είναι ίση με τη δύναμη διείσδυσης. Η παραμόρφωση του εδάφους είναι πλαστική.

B) Η δύναμη διείσδυσης μηδενίζεται γεγονός που επιτρέπει στο έδαφος να διογκωθεί και οδηγεί στην ανύψωση του αγωγού οφειλόμενη σε μεγάλου εύρους ανοδική κίνηση. Στην περίπτωση αυτή ο αγωγός αποκολλάται από την επιφάνεια του πυθμένα, γεγονός που οδηγεί στην ανάπτυξη εφελκυστικής δύναμης «εισρόφησης» (suction) που ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες μπορεί να συμβάλλει στην κατάρρευση κάποιου όγκου εδάφους, ο οποίος τείνει να προσκολληθεί πάνω στον αγωγό. Το προσκολληθεί, είτε θα παραμείνει πάνω στον αγωγό μέχρι την καθοδική κίνηση του αγωγού, όπου αγωγός και πυθμένας θα έρθουν και πάλι σε επαφή.

Γ) Αλληλεπίδραση νερού-κατασκευής όπου η εκτοπιζόμενη μάζα του νερού κατά τη διάρκεια της κίνησης του αγωγού οδηγεί σε τοπική ανάμειξη εδάφους και νερού. Δ) Μεταφορά των εδαφικών σωματιδίων της τάφρου από υπόγεια ρεύματα με διεύθυνση κίνησης κοντά στο θαλάσσιο πυθμένα. Η παραπάνω διαδικασία συμβάλλει στην επιτάχυνση του μηχανισμού δημιουργίας τάφρου.

E) Εκ νέου διείσδυση του αγωγού στην υφιστάμενη τάφρο που δημιουργήθηκε κατά το βήμα Α. Η δύναμη διείσδυσης είναι μηδενική και αρχίζει να αυξάνεται μόνο κατά τη στιγμή που ο αγωγός έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα. Στη συνέχεια η δύναμη διείσδυσης αυξάνεται σταδιακά ακολουθώντας διαφορετική διαδρομή φόρτισης από αυτή του βήματος Α, καταλήγοντας πάντως τελικά σε αυτή.

Οι παραπάνω μηχανισμοί και η εκτιμώμενη διαδικασία φόρτισης-δημιουργία τάφρου παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα (1.4).



**Σχήμα 1.4**: Διαδικασία φόρτισης-δημιουργίας τάφρου κατά την αλληλεπίδραση υποθαλάσσιου αγωγού-πυθμένα, (Bridge et al, 2004)

Το τελικό μοντέλο απόκρισης του θαλάσσιου πυθμένα κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης κατά τον οποίο χάνεται η επαφή μεταξύ αγωγού-εδάφους παρατίθεται στο σχήμα 1.5.



**Σχήμα 1.5**: Παρουσίαση αλληλεπίδρασης αγωγού-πυθμένα κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης κατά τον οποίο χάνεται η επαφή αγωγού-εδάφους, (Bridge et al, 2004)

Συνεχίζοντας την έρευνά τους ο Bridge et al (2004) παρουσίασαν και μια καμπύλη αλληλεπίδρασης αγωγού-εδάφους κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης, που παρατίθεται στο σχήμα 1.6, κατά τον οποίο δεν χάνεται η επαφή ανάμεσα στον αγωγό και το έδαφος.

Στη δεξιά στήλη του επόμενου σχήματος δίνεται η σχέση ανάμεσα στην καμπύλη μέγιστης δύναμης που ασκεί το έδαφος για την αποτροπή τη διείσδυσης του αγωγού σε συγκεκριμένο βάθος (backbone curve) και την καμπύλη αλληλεπίδρασης αγωγού-εδάφους (σχέση δύναμης-μετατόπισης) για ένα αγωγό ο οποίος διεισδύει εντός του θαλάσσιου πυθμένα.

Στην αριστερή στήλη του επόμενου σχήματος (1.6) σημειώνεται η κατακόρυφη κίνηση του αγωγού συσχετιζόμενη με το αντίστοιχο τμήμα της καμπύλης αλληλεπίδρασης αγωγού-εδάφους της δεξιάς στήλης. Αρχές Σχεδιασμού-Λειτουργίας Υποθαλάσσιων Αγωγών-Risers



Σχήμα 1.6: Παρουσίαση αλληλεπίδρασης αγωγού-πυθμένα κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης κατά τον οποίο δεν χάνεται η επαφή αγωγού-εδάφους, (Bridge et al, 2004)

Οι διάφορες φάσεις που παρουσιάζονται αναφέρονται στις ακόλουθες συγκεκριμένες χρονικές φάσεις του κύκλου φόρτισης-αποφόρτισηςεπαναφόρτισης κατά τον οποίο δεν χάνεται η επαφή αγωγού-εδάφους είναι οι ακόλουθες :

1) Ο αγωγός αιωρείται πάνω από τον θαλάσσιο πυθμένα, ο οποίος δεν έχει υποστεί στο παρελθόν φόρτιση από υποθαλάσσιο αγωγό (αρχική κατάσταση).

2) Ο αγωγός διεισδύει εντός του εδάφους υπό το ίδιο βάρος του, προκαλώντας πλαστική παραμόρφωση σε αυτό. Η καμπύλη αλληλεπίδρασης αγωγού-εδάφους ακολουθεί την καμπύλη μέγιστης δύναμης που ασκεί το έδαφος για την αποτροπή τη διείσδυσης του αγωγού σε συγκεκριμένο βάθος.

3) Ο αγωγός κινείται προς τα πάνω με αντίστοιχη ελαστική απόκριση του εδάφους και την καμπύλη αλληλεπίδρασης αγωγού-εδάφους να ακολουθεί διαρκώς μειούμενη διαφορετική διαδρομή, σε σχέση με τη φάση φόρτισης.

4) Καθώς ο αγωγός έρχεται ξανά σε επαφή με το έδαφος ακολουθεί και πάλι διείσδυσή του σε αυτό, με ελαστική παραμόρφωση αυτή τη φορά. Αξίζει να σημειωθεί πως η καμπύλη αλληλεπίδρασης αγωγού-εδάφους σε αυτή τη φάση φόρτισης, ακολουθεί διαδρομή ελαστικής φόρτισης παρόμοια με τη διαδρομή αποφόρτισης του προηγούμενου βήματος.

5) Ο αγωγός διεισδύει βαθύτερα στον θαλάσσιο πυθμένα, προκαλώντας πλέον πλαστική παραμόρφωση. Η καμπύλη αλληλεπίδρασης αγωγού-εδάφους αρχίζει να ακολουθεί και πάλι την καμπύλη μέγιστης δύναμης που ασκεί το έδαφος για την αποτροπή τη διείσδυσης του αγωγού σε συγκεκριμένο βάθος, όπως και στο βήμα 1.

Ο Bai et al (2005), δίνουν τη δική τους ερμηνεία για το μηχανισμό δημιουργίας τάφρου, για την περίπτωση που ένας υποθαλάσσιος αγωγός τοποθετείται επί του θαλάσσιου πυθμένα, θεωρώντας πως το εδαφικό προφίλ αποτελείται επιφανειακά από χαλαρή άμμο και στη συνέχεια από στιφρή άργιλο.

Η εκτίμηση των παραπάνω ερευνητών είναι πως στην περίπτωση που ένας αγωγός τοποθετείται στον θαλάσσιο πυθμένα και υπόκειται σε κυκλική φόρτιση ταλάντωσης, δημιουργείται μια σύνθετη αλληλεπίδραση που περιλαμβάνει κίνηση του αγωγού, διείσδυση εντός του πυθμένα και ανάπτυξη εδαφικής αντίστασης. Στο σημείο επαφής του αγωγού με τον πυθμένα, θα λάβουν χώρα εγκάρσιες μετατοπίσεις του αγωγού, οφειλόμενες σε δυνάμεις ταλάντωσης που δημιουργούνται από την εγκάρσια δράση κυμάτων που ασκείται στο ελεύθερα κρεμάμενο τμήμα του αγωγού.

Κατά τη διάρκεια μικρής και μεσαίας τάξης μεγέθους φόρτισης από δράση κυμάτων, η απόκριση κατά την οριζόντια διεύθυνση του αγωγού στο σημείο επαφής με τον πυθμένα είναι σχεδόν αμελητέα (τάξη μεγέθους 0.2 Χ διάμετρος αγωγού). Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα την βύθιση του αγωγού στο ανώτερο χαλαρό αμμώδες εδαφικό τμήμα και την εκσκαφή τάφρου. Το φαινόμενο της διείσδυσης του αγωγού θα περιοριστεί καθώς ο αγωγός πλησιάζει στο υποκείμενο εδαφικό στρώμα στιφρής αργίλου. Το πλάτος της τάφρου

εκτιμάται περίπου ίσο με 2 έως 3 διαμέτρους του αγωγού. Σε αυτό το εύρος, ο αγωγός μπορεί να κινείται ελεύθερα χωρίς να προσκρούει στις άκρες της τάφρου.

Αντιθέτως η εκτίμηση των ερευνητών (Bai et al, 2005) για την περίπτωση μεγάλης τάξης μεγέθους φόρτιση από δράση κυμάτων (περίπτωση καταιγίδας), είναι ότι σταδιακά η τάφρος θα εξαφανιστεί εξαιτίας των, μεγαλύτερου εύρους, κινήσεων του αγωγού αλλά και της πλήρωσής της από υλικό του πυθμένα.

# 2

# Παρουσίαση Μεθόδων Ανάλυσης Αλληλεπίδρασης Υποθαλάσσιων Αγωγών-Risers με τον Θαλάσσιο Πυθμένα

#### 2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι υπάρχουσες (μέχρι τώρα υιοθετημένες/ εφαρμοσμένες) ιοδοθჰμ ανάλυσης της αλληλεπίδρασης υποθαλάσσιων αγωγών-risers με τον θαλάσσιο πυθμένα. Οι επιμέρους κατηγορίες στις οποίες έχουν χωριστεί οι μέθοδοι όσον αφορά στην προσέγγιση του προβλήματος είναι : α) γεωτεχνικές μέθοδοι, β) μέθοδοι δυναμικής ανάλυσης με χρήση αριθμητικής προσέγγισης, γ) εμπειρικές μέθοδοι (με χρήση εμπειρικών σχέσεων που προέκυψαν από πειραματικές παρατηρήσεις). Για κάθε μέθοδο που εξετάζεται αναφέρονται οι βασικές της παραδοχές, οι εξεταζόμενες παράμετροι, την επιρροή των οποίων μελετάει η εκάστοτε εφαρμοζόμενη μέθοδος με βάση τα αποτελέσματα δοκιμών πεδίου ή εργαστηρίου και τα αποτελέσματα αναλύσεων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

#### 2.2 Γεωτεχνικές Μέθοδοι

Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται κυρίως μέθοδοι που μελετούν την αλληλεπίδραση πυθμένα-αγωγού με την εκτέλεση γεωτεχνικών πειραμάτων μεγάλης κλίμακας στην ύπαιθρο ή εργαστηριακών δοκιμών. Τα αποτελέσματα και οι εκτιμήσεις επαληθεύονται συχνά από τους ερευνητές μέσω αναλύσεων με λογισμικό Η/Υ.

#### 2.2.1 Πειραματική μελέτη μεγάλης κλίμακας για εκτίμηση

#### συμπεριφοράς μεταλλικού υποθαλάσσιου αγωγού

Η εξεταζόμενη στην παρούσα ενότητα εργασία των Bridge et al (2003), παρουσιάζει αποτελέσματα και παρατηρήσεις που αφορούν στην εκτέλεση πειραματικής μελέτης μεγάλης κλίμακας για την εκτίμηση της συμπεριφοράς μεταλλικού υποθαλάσσιου αγωγού. Μελετήθηκε η τρισδιάστατη αλληλεπίδραση ανάμεσα σε τρία υλικά : το νερό, τον αγωγό και το έδαφος πυθμένα στην περιοχή του σημείου επαφής με τον πυθμένα. Ο κύριος σκοπός των πειραμάτων ήταν η αξιολόγηση της σημασίας της αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε νερό, αγωγό και έδαφος πυθμένα και η παραγωγή κατάλληλων μεγεθών για εισαγωγή τους σε ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία με την οποία δίδεται η δυνατότητα πρόβλεψης της απόκρισης του παραπάνω συστήματος υπό συγκεκριμένες δυναμικές φορτίσεις.

Οι εργασίες υπαίθρου για τα παραπάνω πειράματα εκτελέστηκαν σε μια χρονική περίοδο τριών μηνών, σε μια τοποθεσία λιμένος. Χρησιμοποιήθηκε ένας μεταλλικός αγωγός, μήκους 110m, διαμέτρου 0.1683m και πάχους τοιχωμάτων 6.9mm, ο οποίος αναρτήθηκε από τον τοίχο του λιμανιού. Ο εδαφικός πυθμένας, στη θέση εκτέλεσης των πειραμάτων, ήταν επίπεδος και αδιατάρακτος (σχήμα 2.1).



**Σχήμα 2.1**: Διάταξη αγωγού για εκτέλεση πειραμάτων μεγάλης κλίμακας, (Bridge et al, 2003)

Ο αγωγός που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα έφερε, σε διάφορα σημεία της περιοχής του σημείου επαφής (θέσεις Α-Μ), δεκατρείς μετρητές κατακόρυφης και οριζόντιας παραμόρφωσης, λόγω κάμψης. Επιπρόσθετα τοποθετήθηκαν σε αυτόν, μετρητές φορτίων (δύναμης), για την εκτίμηση εφελκυστικών και διατμητικών δυνάμεων στο σημείο πρόσδεσης και για την εκτίμηση εφελκυστικών δυνάμεων στο σημείο αγκύρωσης (σχήμα 2.2).



**Σχήμα 2.2**: Σχηματική διάταξη αγωγού – Θέσεις μετρητών παραμόρφωσης, (Bridge et al, 2003)

Η μέση στάθμη της θάλασσας ήταν 3.5m πάνω από το επίπεδο αγκύρωσης. Η ταχύτητα των κυμάτων που οφείλονται σε φαινόμενα παλίρροιας, στην υπό εξέταση περιοχή καθώς ο λιμένας πληρωνόταν ή άδειαζε με νερό, ήταν χαμηλή. Εκτελέστηκαν δοκιμές με χαμηλή και υψηλή παλίρροια.

Από γεωτεχνικής άποψης, ο πυθμένας χαρακτηρίστηκε ως μαλακή άργιλος, με αστράγγιστη διατμητική αντοχή της τάξης των 3 έως 5 kPa, δείκτη πλαστικότητας PI 39%, δείκτη ευαισθησίας 3 και με συμπεριφορά κανονικώς στερεοποιημένου σχηματισμού.

Διάφορες παραδοχές λήφθηκαν ως προς τη γεωμετρία και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους όπου εφάπτεται ο αγωγός, με στόχο την εκτέλεση ξεχωριστών πειραμάτων για εξέταση κατά το δυνατόν περισσότερων περιπτώσεων. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε πως ο αγωγός είχε επαφή με ανοικτή τάφρο, με τάφρο μεγαλύτερου βάθους το οποίο οφείλεται σε τεχνητά αίτια, με επανεπιχωμένη τάφρο από εδαφικό υλικό και με άκαμπτο πυθμένα. Για κάθε ένα από τους παραπάνω διαδρόμους, εκτελέστηκαν πειράματα για να εξεταστεί τόσο η επιρροή μικρής τάξης μεγέθους μετατόπισης όσο και η επιρροή έντονων δυναμικών κινήσεων.

Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές πεδίου δόθηκαν σαν τιμές καμπτικής ροπής σε συνάρτηση με τη θέση ανάρτησης από τον κατακόρυφο τοίχο του λιμένα, για συγκεκριμένο μετρητή παραμόρφωσης. Ένα τυπικό τέτοιο διάγραμμα για το μετρητή παραμόρφωσης D, δίνεται στο επόμενο σχήμα (2.3).

Κεφάλαιο 2°



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα καμπτικής ροπής σε συνάρτηση με τη θέση ανάρτησης για μετρητή D, (Bridge et al, 2003)

Σχολιάζοντας το παραπάνω διάγραμμα, θα πρέπει να αναφερθεί πως για θέση ανάρτησης στα -0.8m, η καμπτική ροπή υπολογίστηκε 0.5kNm. Καθώς η θέση ανάρτησης ανέρχεται ψηλότερα η καμπτική ροπή παραμένει σταθερή μέχρι τη θέση ανάρτησης στα -0.6m. Από εκείνη τη θέση και στη συνέχεια η καμπτική ροπή μειώνεται μέχρι την τιμή -6kNm, για θέση ανάρτησης στα 0.8m. Τελικώς η καμπτική ροπή καταλήγει με τιμή -5.5kNm, για θέση ανάρτησης στο 1.4m.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η διατομή D του αγωγού ήταν στην επιφάνεια του πυθμένα. Όσο η θέση ανάρτησης ανυψωνόταν, η θέση της διατομής διήλθε μέσα από τη ζώνη ταφής, ενώ τελικά κατέληξε στην αλυσοειδή ζώνη. Παρατηρήθηκε πως κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας το σημείο επαφής αγωγού-πυθμένα μετακινήθηκε κατά 25m προς τη θέση αγκύρωσης.

Σε γενικές γραμμές οι συγγραφείς θεωρούν πως τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα από όλα τα πειράματα, παρουσιάζουν ικανοποιητική συνέπεια μεταξύ τους.

Κατά την αρχική τοποθέτηση του αγωγού στον θαλάσσιο πυθμένα, έλαβε χώρα παραμόρφωση του εδάφους και δημιουργία μιας τάφρου περιμετρικά του αγωγού. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, παρατηρήθηκε αύξηση του βάθους και του πλάτους της τάφρου. Στο σχήμα 2.4 δίνεται φωτογραφία της τάφρου που δημιουργήθηκε. Σημειώνεται η θέση του αγωγού, καθώς καταδύεται από την αλυσοειδή ζώνη προς το σημείο επαφής. Εν συνεχεία τμήμα του αγωγού βυθίζεται εντός του εδάφους στη ζώνη ταφής, ενώ από ένα σημείο και μετά ανέρχεται και πάλι στην επιφάνεια του πυθμένα όπου και συνδέεται με μια άγκυρα (θέση αγκύρωσης). Παρατηρήθηκε ότι η αρχή της τάφρου είναι στο σημείο επαφής του αγωγού με τον πυθμένα. Η τάφρος εκτείνεται προς τη θέση αγκύρωσης και το πλάτους της αυξάνεται από 1 X D σε μέγιστη τιμή 2.5 X D για μια απόσταση 20m. Στη συνέχεια το πλάτος της τάφρου μειώνεται και είναι ίσο με 1 X D αγωγού για τα επόμενα 40m. Από εκείνη τη θέση και στη συνέχεια ο αγωγός θεωρείται ως στατικός σωληνωτός αγωγός στην επιφάνεια του πυθμένα.



**Σχήμα 2.4**: Θέση αγωγού κατά μήκος δημιουργηθείσας τάφρου υπό χαμηλή παλίρροια, (Bridge et al, 2003)

Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων πεδίου, ελήφθησαν συνεχείς μετρήσεις του πλάτους και του βάθους της δημιουργηθείσας τάφρου. Τα αποτελέσματα δίνονται στα σχήματα 2.5 και 2.6.



#### Depth of Trench Along Riser Length

**Σχήμα 2.5**: Βάθος δημιουργηθείσας τάφρου κατά μήκος αγωγού, (Bridge et al, 2003)



#### Width of Trench Along Riser Length

**Σχήμα 2.6**: Πλάτος δημιουργηθείσας τάφρου κατά μήκος αγωγού, (Bridge et al, 2003)

Από την επισκόπηση των παραπάνω σχημάτων προκύπτει πως η τάφρος είχε σχήμα «δακρύου» (tear-drop shape). Το μέγιστο βάθος και πλάτος της τάφρου, αυξήθηκαν μέσα στην περίοδο εκτέλεσης των πειραμάτων (έξι εβδομάδες) από 0.5 X D σε 1.2 X D και από 1 X D σε 2.5 X D αντίστοιχα.

Οι Bridge et al αναφέρουν τους ακόλουθους πιθανούς μηχανισμούς δημιουργίας της τάφρου :

- Οι ταλαντωτικές κινήσεις που επιβλήθηκαν στο σύστημα από το μηχανισμό στη θέση πρόσδεσης. Επιπρόσθετα οποιαδήποτε κίνηση στο σημείο επαφής αγωγού-πυθμένα προκαλεί εκτοπισμό του νερού της τάφρου προς τα έξω, κατά την οποία μεταφέρεται ίζημα έξω από την τάφρο, διευρύνοντάς την.
- Η ροή υδάτων λόγω του φαινομένου της παλίρροιας ενδέχεται να μετακινεί ίζημα που βρίσκεται περιμετρικά του αγωγού.
- Η ροή υδάτων κατά πλάτος του αγωγού μπορεί να προκαλέσει δονήσεις λόγω δινών/ φύλλων στροβιλότητας (vortex induced vibrations). Αυτή η κίνηση υψηλής συχνότητας μπορεί να συμβάλλει στην διεύρυνση της τάφρου.
- Οι ανωστικές δυνάμεις που ασκούνται στον αγωγό συμβάλλουν σε μια μικρή ανύψωσή του από τον πυθμένα. Με αυτό τον τρόπο είναι σύνηθες να απομακρύνονται χαλαρά ιζήματα που βρίσκονται εντός της τάφρου ή προσκολλημένα στον αγωγό.

#### 2.2.2 Δοκιμή διείσδυσης Τ- Bar σε μαλακές αργίλους

Οι Stewart et al (1994) αναφέρουν πως για τη διερεύνηση της στρωματογραφίας σε τοποθεσίες που το έδαφος αποτελείται από μαλακές αργίλους, ενδείκνυται η χρήση της δοκιμής διείσδυσης κώνου (Cone Penetration Test), ενώ για την εκτίμηση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής προτείνεται η χρήση της επί τόπου δοκιμής διάτμησης πτερυγίου (in situ vane shear testing). Η δοκιμή διείσδυσης κώνου έχει περιορισμένο ρόλο καθώς η μετρούμενη αντίσταση στον κώνο είναι πάρα πολύ μικρή σε μαλακές αργιλικές αποθέσεις γεγονός που έχει ως συνέπεια, η ακρίβεια της μέτρησης να είναι περιορισμένη.

Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή μπορεί να υπολογιστεί από εμπειρικές σχέσεις, αλλά υπάρχει έντονη αβεβαιότητα σχετικά με τις κατάλληλες τιμές για ορισμένους εκ των εμπειρικών παραγόντων που υπεισέρχονται στις παραπάνω εξισώσεις. Είναι γενικά αποδεκτό πως οι εμπειρικές παράμετροι εξαρτώνται από την ακαμψία του εδάφους, το επίπεδο τάσεων αλλά και των προϊστορία της φόρτισης, γεγονός που κάνει την επιλογή των εμπειρικών παραμέτρων αρκετά δυσχερή.

Σημαντική εξέλιξη για τη δοκιμή διείσδυσης κώνου αποτελεί η ενσωμάτωση μετρητή για την πίεση πόρων. Αυτή η επί τόπου δοκιμή έχει πιο ευρεία εφαρμογή καθώς υπάρχει πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια στη μέτρηση της πίεσης πόρων, σε σύγκριση με την αντίσταση στον κώνο, και κατά συνέπεια είναι δυνατή η ακριβέστερη συσχέτισή της με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή των μαλακών αργίλων. Παρολ' αυτά υπάρχει και πάλι εξάρτηση των αποτελεσμάτων από τις εδαφικές παραμέτρους και τη θέση του μετρητή πίεσης πόρων.

Οι Stewart et al, (1994) ανέπτυξαν ένα διεισδυσιόμετρο t-bar μικρής κλίμακας που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της δοκιμής διείσδυσης κώνου και της επί τόπου δοκιμής διάτμησης πτερυγίου. Πιο συγκεκριμένα η νέα συσκευή δίνει τη δυνατότητα για : α) συνεχή καταγραφή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής σε συνάρτηση με το βάθος και β) απευθείας συσχέτιση της δύναμης διείσδυσης με τη διατμητική αντοχή χωρίς τη χρήση άλλης εμπειρικής συσχέτισης. Το διεισδυσιόμετρο t-bar μικρής κλίμακας έχει δώσει πολύ καλά αποτελέσματα για μεγάλο πλήθος εργαστηριακών δοκιμών.

Οι μελετητές ανέπτυξαν σε μεγαλύτερη κλίμακα το παραπάνω διεισδυσιόμετρο με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε δοκιμές υπαίθρου σε συνεργασία με τον εξοπλισμό του κώνου διείσδυσης, πολύ απλά και με μειωμένο κόστος. Το διεισδυσιόμετρο t-bar για δοκιμές υπαίθρου παρουσιάζεται στο σχήμα 2.7. Κεφάλαιο 2°

Παρουσίαση Μεθόδων Ανάλυσης Αλληλεπίδρασης Υποθαλάσσιων Αγωγών-Risers με τον Θαλάσσιο Πυθμένα



Σχήμα 2.7: Διεισδυσιόμετρο t-bar για εφαρμογές υπαίθρου, (Stewart et al, 1994)

Η συσκευή αποτελείται από μια μπάρα αλουμινίου με μήκος 200mm και διάμετρο 50mm που τοποθετείται υπό ορθή γωνία στο άκρο του συμβατικού εξοπλισμού δοκιμής διείσδυσης κώνου. Η αιχμή του κώνου (με γωνία 60°), αντικαταστάθηκε από μια νέα αιχμή σχήματος «φτυαριού» (spade-shaped tip), προκειμένου να προσφέρεται αντίσταση στη μπάρα καθώς λαμβάνει χώρα η διείσδυση εντός του εδάφους. Επιπρόσθετα προστέθηκε και μηχανισμός άρθρωσης για την αποφυγή κάμψης στην περίπτωση που ένα σκληρό αντικείμενο χτυπήσει στο ένα άκρο της μπάρας.

Η συσκευή διεισδύει στο έδαφος με τον ίδιο ρυθμό με τη συμβατική δοκιμή διείσδυσης κώνου και η αντίσταση στη διείσδυση μετράται στο μετρητή φορτίου που είναι εγκαταστημένος στην κωνική αιχμή. Η διατομή του διεισδυσιομέτρου t-bar,είναι 10,000 mm<sup>2</sup>, περί τις 10 φορές μεγαλύτερη από τη διατομή ενός συμβατικού κώνου, γεγονός που βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια στη μέτρηση δύναμης.

Τα αποτελέσματα της επί τόπου δοκιμής ερμηνεύονται με τη χρήση της λύσης της θεωρίας της πλαστικότητας για την μέγιστη πίεση που ασκείται σε κύλινδρο ή πάσσαλο, ο οποίος κινείται πλευρικά δια μέσου ενός συνεκτικού εδάφους. Η ανάλυση θεωρεί πλήρη πλήρωση από έδαφος του κενού όπισθεν του αγωγού. Τελικά η επίλυση της θεωρίας της πλαστικότητας καταλήγει σε μια απλή έκφραση για τη μέγιστη δύναμη που ασκείται πάνω σε έναν κύλινδρο απείρου μήκους :

$$\frac{P}{s_u d} = N_b$$

όπου P : την ασκούμενη δύναμη ανά μέτρο μήκους, d : τη διάμετρο του αγωγού,  $s_u$  : την αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους και  $N_b$  : παράμετρο μπάρας.

Η αναλυτική τιμή για την παράμετρο της μπάρας Ν<sub>b</sub>, εξαρτάται από την επιφανειακή τραχύτητα του αγωγού. Το πάνω και κάτω όριο για τη λύση της θεωρίας της πλαστικότητας συγκλίνουν στην τιμή 12 για την παράμετρο, για ένα

εντελώς τραχύ αγωγό, ενώ εμφανίζεται μια ελαφρά απόκλιση για μικρότερη τραχύτητα του αγωγού, με μια ελάχιστη τιμή για την παράμετρο ίση με 9. Οι ερευνητές προτείνουν την τιμή 10.5 για γενική χρήση, και τα αποτελέσματα των μετρήσεων των Stewart et al (1994) και άλλων έχουν γίνει με αυτή την τιμή. Το πιθανό εύρος τιμών για την παράμετρο μπάρας είναι σχετικά μικρό, με τις ακραίες τιμές 9 και 12 να αντιστοιχούν σε σφάλμα της τάξης του ± 13%. Εργαστηριακά αποτελέσματα στο διεισδυσιόμετρο t-bar, μικρής κλίμακας έδειξαν πως η παράμετρος μπάρας είναι ανεπηρέαστη από το επίπεδο τάσεων και την προϊστορία της φόρτισης.

Οι μελετητές εκτέλεσαν ένα πλήθος επί τόπου δοκιμών σε μια τοποθεσία στη δυτική Αυστραλία. Η στρωματογραφία στην περιοχή αποτελείτο από μερικώς σιμεντωμένες αποθέσεις τέφρας πάχους μερικών μέτρων που υπέρκεινται μιας ομογενούς, μαλακής αργιλικής απόθεσης πάχους περί των 18m. Εκτελέστηκαν δύο δοκιμές με διεισδυσιόμετρο t-bar, με απόσταση μεταξύ τους περί το 1.5m, αφού πρώτα εκσκάφθηκε μια ρηχή τάφρος δια μέσου της επιφανειακής κρούστας της τέφρας.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στο σχήμα 2.8, σαν κατανομή της φέρουσας αντίστασης (δύναμη διείσδυσης ανηγμένη προς επιφάνεια της μπάρας) σε συνάρτηση με το βάθος.



## **Σχήμα 2.8**: Αποτελέσματα δύο επί τόπου δοκιμών διεισδυσιομέτρου t-bar, (Stewart et al, 1994)
Από την επισκόπηση των δύο κατανομών, είναι προφανής η ύπαρξη της σκληρής επιφανειακής κρούστας τέφρας με πάχος περί τα 3-4m. Στη συνέχεια συναντάται η υποκείμενη στρώση μαλακής αργίλου, η οποία εμφανίζει μια πολύ απαλή αύξηση της φέρουσας αντίστασης σε συνάρτηση με το βάθος. Τα αποτελέσματα των δύο δοκιμών είναι σχεδόν ταυτόσημα, γεγονός που οφείλεται στην γειτνίαση των σημείων ελέγχου.

Από τα δεδομένα επί τόπου δοκιμών διεισδυσιομέτρου t-bar, υπολογίστηκε η αστράγγιστη διατμητική αντοχή των σχηματισμών. Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζεται η κατανομή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής σε συνάρτηση με το βάθος τόσο ως προς τη συνεχή καταγραφή του διεισδυσιομέτρου t-bar όσο και ως προς σημειακές τιμές της που προέκυψαν από επί τόπου δοκιμές διάτμησης πτερυγίου, από επί τόπου δοκιμές πιεσομέτρου αυτόνομης διείσδυσης (self-boring pressuremeter tests) και από αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές ισότροπα στερεοποιημένων δειγμάτων (isotropically consolidated undrained triaxial tests). Τα αποτελέσματα των δοκιμών του πρεσσιομέτρου παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές περί τον πυθμένα της αργιλικής στρώσεων στην περιοχή. Σε γενικές γραμμές παρατηρείται πολύ καλή συμφωνία ανάμεσα στα αποτελέσματα όλων των μεθόδων.



**Σχήμα 2.9**: Κατανομή αστράγγιστης διατμητικής αντοχής σε συνάρτηση με το βάθος από δοκιμές υπαίθρου και εργαστηρίου, (Stewart et al, 1994)

Αποτελέσματα δοκιμών συμβατικού κώνου διείσδυσης στην ίδια περιοχή έδωσαν εύρος τιμών 0.2MPa – 0.6MPa για την αντίσταση αιχμής κώνου. Με τη θεώρηση εμπειρικής σχέσης προκύπτει ένα εύρος αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της τάξης του 12kPa - 25kPa.

# 2.2.3 Εφαρμογή συστήματος φυγοκέντρησης για την παρακολούθηση της κατακόρυφης κίνησης μεταλλικού αλυσοειδούς αγωγού στο σημείο επαφής του με τον θαλάσσιο πυθμένα

Η μελέτη των Hu et al (2010) παρουσιάζει πειραματικά δεδομένα για τα οποία χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα φυγοκέντρησης για την προσομοίωση της επαναλαμβανόμενης κατακόρυφης κίνησης ενός τμήματος αγωγού, τοποθετημένου επί ενός αργιλικού πυθμένα με, αυξανόμενη με το βάθος, αστράγγιστη διατμητική αντοχή. Λαμβάνοντας υπόψη την πληθώρα των φορτίων που δέχεται μια πλωτή πλατφόρμα που φέρει ένα τέτοιο υποθαλάσσιο αγωγό, από περιβαλλοντικά αίτια, οι συγγραφείς εκτέλεσαν δοκιμές προκειμένου να ερευνήσουν την επιρροή, της εδαφικής αντοχής, του ρυθμού μετακίνησης του αγωγού και του τρόπου φόρτισης του αγωγού, στην αλληλεπίδραση αγωγού.

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε σύστημα φυγοκέντρησης από το πανεπιστήμιο της Σιγκαπούρης, το οποίο μπορεί να επιβάλλει συγκεκριμένο βαρυτικό πεδίο. Συνοπτική σχηματική περιγραφή (μπροστινή και πλάγια όψη) του συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 2.10.



**Σχήμα 2.10**: Σχηματική απεικόνιση μπροστινής και πλάγιας όψης του συστήματος φυγοκέντρησης (διαστάσεις σε mm), (Hu et al, 2010)

Το σύστημα τοποθετείται εντός ορθογωνίου μεταλλικού κουτιού από ανοξείδωτο χάλυβα, διαστάσεων 520 X 300 X 450 (ύψος) mm<sup>3</sup>. Το πλαίσιο επιβολής φορτίων εφαρμόζεται στο πάνω μέρος του συστήματος και φέρει δύο υδραυλικούς κυλίνδρους. Ο πρώτος λειτουργεί ως ο κύριος μηχανισμός φόρτισης και στη μέγιστη πίεση λειτουργίας για τη φυγοκέντρηση (70 atm), μπορεί να παράσχει θλιπτική και εφελκυστική δύναμη 4 και 2,3 tn αντίστοιχα. Ο δεύτερος κύλινδρος χρησιμοποιείται για την καταγραφή της διατμητικής αντοχής. Και οι δύο κύλινδροι μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα, ελεγχόμενοι από σύστημα βαλβίδων που βρίσκεται στο βραχίονα φυγοκέντρησης.

Το μοντέλο του σωληνωτού αγωγού στην παρούσα μελέτη κατασκευάστηκε από ένα κούφιο μεταλλικό αγωγό από ανοξείδωτο χάλυβα, με πάχος τοιχώματος 3mm. Οι επιφάνειες του αγωγού λειάνθηκαν αρκετά καλά για την ελάττωση του συντελεστή τριβής. Επιλέχθηκαν δύο εξωτερικές διάμετροι, 30mm και 50mm για τα μοντέλα αγωγού, και με τη χρήση συντελεστών μεγέθυνσης 33 και 20 αντίστοιχα μπορούν να προκύψει διάμετρος αγωγού 1000mm, για την κλίμακα του πρωτοτύπου. Παρόλο που στην πράξη το εύρος διαμέτρου των αγωγών περιορίζεται μεταξύ 150 και 600mm, επιλέχθηκε τέτοια μεγάλη διάμετρος για να διευκολυνθεί η τοποθέτηση οργάνων μέτρησης πίεσης πόρων. Το εσωτερικό του αγωγού διαμορφώθηκε με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση των οργάνων μέτρησης πόρανα τοποθετήθηκαν τελικά (σχήμα 2.11), επί της κατακορύφου και σχηματίζοντας γωνίες 30° και 60° αντίστοιχα ως προς την κατακόρυφο.



**Σχήμα 2.11**: Όργανα μέτρησης πίεσης πόρων επί του αγωγού του συστήματος φυγοκέντρησης, (Hu et al, 2010)

Μια στρώση κορεσμένης άμμου πάχους 25mm τοποθετήθηκε στη βάση του μηχανισμού, προκειμένου να εξυπηρετήσει σαν στρώση στράγγισης κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας του δείγματος. Η άργιλος που χρησιμοποιήθηκε κατά την παρούσα μελέτη προέρχεται από καολίνη Μαλαισίας.

Η διαδικασία προετοιμασίας των δειγμάτων περιελάμβανε τοποθέτησή τους εντός του συστήματος φυγοκέντρησης και στερεοποίηση στις επιδιωκόμενες τασικές συνθήκες. Με διακύμανση του βαθμού προστερεοποίησης (Over Consolidation Ratio) του εδάφους, προετοιμάστηκαν εδαφικά δείγματα με αυξανόμενη, με το βάθος, διατμητική αντοχή τα οποία εμφάνιζαν και διαφορετικό ρυθμό αύξησης αντοχής συναρτήσει του βάθους. Τελικώς προετοιμάστηκαν ένα κανονικώς στερεοποιημένο δείγμα (O.C.R. = 1) και δύο υπερστερεοποιημένα δείγματα (O.C.R. = 3 και 5 αντίστοιχα). Τα τρία δείγματα μετά τη διαδικασία καθορισμού του βαθμού προστερεοποίησης, αφέθηκαν να διογκωθούν για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα προκειμένου να προκύψει για όλα αστράγγιστη διατμητική αντοχή γραμμικώς μεταβαλλόμενη με το βάθος.

Με τη χρήση ενός πενετρομέτρου t-bar μικρής κλίμακας, μετρήθηκε η κατανομή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος και για τα τρία δείγματα με το διαφορετικό βαθμό προστερεοποίησης. Τα αποτελέσματα δίνονται για κάθε εδαφικό σχηματισμό στο σχήμα 2.12.



**Σχήμα 2.12**: Κατανομές αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με το βάθος για τα δείγματα με το διαφορετικό βαθμό προστερεοποίησης, (Hu et al, 2010)

Ο υδροφόρος ορίζοντας (θάλασσα) θεωρήθηκε 60mm υψηλότερα από τη στάθμη του εδάφους κατά την εκκίνηση των δοκιμών. Εξαιτίας της εξάτμισης του νερού παρατηρήθηκε από τις μετρήσεις πίεσης πόρων μια ελαφρά υποβίβαση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα έως 5mm, με την τελική του στάθμη να είναι σε όλες τις περιπτώσεις πάντα υψηλότερα από τη στάθμη του εδάφους.

Στον πίνακα 2.1 παρατίθενται συνοπτικά όλα τα πειράματα που έλαβαν χώρα στο ερευνητικό πρόγραμμα. Το πείραμα 1 θεωρήθηκε ως πείραμα βάσης και λαμβάνεται ως μέτρο σύγκρισης με όλα τα μεταγενέστερα πειράματα. Εδαφικά δείγματα με διαφορετικό λόγο προστερεοποίησης χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της επιρροής της εδαφικής αντοχής (πειράματα 1, 3 και 4). Τα πειράματα 1, 5 και 6 εκτελέστηκαν για τη διερεύνηση του της επίδρασης του ρυθμού μετατόπισης του αγωγού. Όλα τα πειράματα έλαβαν χώρα με επαναλαμβανόμενη διείσδυση του αγωγού σε βάθος τριών διαμέτρων υπό την επιφάνεια του εδάφους, εκτός από το πείραμα 2 όπου το εύρος της επαναλαμβανόμενης κίνησης διείσδυσης-ανύψωσης επιλέχθηκε ώστε σε κάθε κύκλο κίνησης να αναπτύσσεται τέτοιο φορτίο στον αγωγό όσο κατά τη διάρκεια της πρώτης διείσδυσης βάθους τριών διαμέτρων από τον αγωγό.

Πείραμα	Μεταβολή διατμητικής αντοχής / μ	Διάμετρος αγωγού	Ρυθμός μετατόπισης	Μέγιστη διείσδυση	Εύρος κίνησης
	kPa / m	mm	mm / sec		
1	5.19	1000	1	3 D	3 D
2	1.39	600	1.67	Τερματίστηκε στη μέγιστη αντίσταση διείσδυσης στον πρώτο κύκλο	_
3	1.39	1000	1.67	3 D	3 D
4	3.72	1000	1	3 D	3 D
5	5.19	1000	3	3 D	3 D
6	5.19	1000	6	3 D	3 D

Πίνακας 2.1: Πειράματα ερευνητικού προγράμματος, (Hu et al, 2010)

Το πείραμα 1 του παραπάνω πίνακα, όπου ο βαθμός προστερεοποίησης ήταν 5, εκτιμήθηκε από τους συγγραφείς πως θα έδινε τα πιο συνεπή αποτελέσματα, γι' αυτό και ελήφθη ως βασικό πείραμα επί του οποίου θα γίνονταν οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων όλων των υπολοίπων πειραμάτων.

Στο επόμενο σχήμα (2.13) παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης για το πείραμα 1. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ως δύναμη στο διάγραμμα αυτό αλλά και σε όλα τα υπόλοιπα, ορίζεται το καθαρό κατακόρυφο φορτίο στον αγωγό ανά μέτρο μήκους αγωγού, αμελώντας το υπό άνωση βάρος του αγωγού. Επιπρόσθετα αρνητικές τιμές για τη δύναμη υποδηλώνουν αντίσταση στη διείσδυση, ενώ ως βάθος διείσδυσης του αγωγού ορίζεται η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο κέντρο της διατομής του αγωγού και την αρχική επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 2.13: Διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης για το πείραμα 1, (Hu et al, 2010)

Από την επισκόπηση του παραπάνω σχήματος, παρατηρείται πως το τμήμα Α-Β αφορά την αρχική διείσδυση του αγωγού και το τμήμα Β–D αφορά την εξαγωγή του αγωγού κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου φόρτισης – αποφόρτισης. Οι μεταγενέστεροι κύκλοι φόρτισης – αποφόρτισης κινούνται στο εσωτερικό της καμπύλης του πρώτου κύκλου. Η μέγιστη αντίσταση διείσδυσης υπολογίστηκε 113kN/m και καταγράφηκε στο μέγιστο βάθος διείσδυσηςς των 3m. Αμέσως μετά έλαβε χώρα η εξαγωγή του αγωγού και καταγράφηκε η μέγιστη δύναμη αντίστασης στην εξαγωγή ίση με 113kN/m για ανύψωση ίση με 0.35m. Η δύναμη αντίστασης στην εξαγωγή σταδιακά ελαττώνεται. Το αποτέλεσμα του πειράματος ως προς την ποιοτική φύση της καμπύλης συμφωνεί με το μη γραμμικό μοντέλο φορτίου – μετακίνησης που πρότειναν οι Clukey et al (2007), το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 2.14.

Παρουσίαση Μεθόδων Ανάλυσης Αλληλεπίδρασης Υποθαλάσσιων Αγωγών-Risers με τον Θαλάσσιο Πυθμένα



**Σχήμα 2.14**: Μοντέλο απόκρισης μεταλλικού αλυσοειδούς αγωγού στην περιοχή του σημείου επαφής του με το θαλάσσιο πυθμένα, (Clukey et al, 2007)

Η διαδικασία διείσδυσης – εξαγωγής – επαναδιείσδυσης επαναλήφθηκε για 11 κύκλους επιπλέον. Από το δεύτερο κύκλο και στη συνέχεια, παρατηρείται αύξηση της αντίστασης στη διείσδυση μόνο αφού το βάθος διείσδυσης είχε φθάσει στο 0.5m, γεγονός που υποδηλώνει πως μια τάφρος αντίστοιχου βάθους είχε διαμορφωθεί κατά τον πρώτο κύκλο φόρτισης – αποφόρτισης. Επιπρόσθετα παρατηρείται σταδιακά, μείωση στη μέγιστη αντίσταση στη διείσδυση, που οφείλεται στην έντονη αναμόχλευση του εδάφους. Για τη διευκόλυνση της σύγκρισης ανάμεσα στα αποτελέσματα των διάφορων κύκλων, παρουσιάζεται το σχήμα (2.15), όπου παρατίθενται η κατανομή της μέγιστης αντίστασης στη διείσδυση του αγωγού σε συνάρτηση με το πλήθος των κύκλων. Οι μέγιστες αντιστάσεις παρουσιάζονται κανονικοποιημένες ως προς τη μέγιστη αντίσταση στη διείσδυση που προέκυψε κατά τον πρώτο κύκλο φόρτισης.

Κεφάλαιο 2°

Παρουσίαση Μεθόδων Ανάλυσης Αλληλεπίδρασης Υποθαλάσσιων Αγωγών-Risers με τον Θαλάσσιο Πυθμένα



**Σχήμα 2.15**: Κατανομή κανονικοποιημένης αντίστασης διείσδυσης και αντίστασης εξαγωγής ως προς το πλήθος των κύκλων φόρτισης - αποφόρτισης, (Hu et al, 2010)

Παρατηρείται έντονη μείωση τόσο της αντίστασης στη διείσδυση όσο και της αντίστασης στην εξαγωγή του αγωγού κατά τη διάρκεια των πρώτων κύκλων φόρτισης – αποφόρτισης, ενώ λαμβάνει χώρα σταθεροποίηση του φαινομένου μετά το πέρας των 8 πρώτων κύκλων.

Ο Hu και άλλοι μελέτησαν τη διακύμανση της πίεσης πόρων σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης του αγωγού. Τα αποτελέσματα των καταγραφών των τριών μετρητών πίεσης πόρων για διάφορα βάθη διείσδυσης δίνονται στο σχήμα 2.16. Και στα τρία επιμέρους διαγράμματα δίνεται και η υδροστατική κατανομή της πίεσης πόρων.



**Σχήμα 2.16**: Διακύμανση πίεσης πόρων σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης από τις καταγραφές τριών μετρητών πίεσης πόρων, (Hu et al, 2010)

Κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου διείσδυσης του αγωγού αναπτύχθηκε θετική υπερπίεση πόρων καθώς ο αντίστοιχος μετρητής της πίεσης πόρων ήρθε σε επαφή με το έδαφος. Κατά την εξαγωγή του αγωγού από το έδαφος, οι πιέσεις πόρων κάτω από τον αγωγό μειώθηκαν ραγδαία και μάλιστα μετρήθηκαν χαμηλότερες από την αντίστοιχη υδροστατική πίεση. Η μέγιστη τιμή της αρνητικής πίεσης πόρων σημειώθηκε στο κέντρο του αγωγού και μειωνόταν προς την περιφέρεια του αγωγού. Η μέγιστη αρνητική υπερπίεση πόρων μετρήθηκε από τους μετρητές σε διαφορετικές στιγμές. Στη βάση του αγωγού μετρήθηκε μετά από 0.25m ανύψωσης ενώ στους άλλους δύο μετρητές που βρίσκονται υπό γωνίες 30° και 60° αντίστοιχα ως προς την κατακόρυφο, μετρήθηκε μετά από 0.33m και 1.1m ανύψωσης αντίστοιχα. Σε μεταγενέστερους κύκλους διείσδυσης – εξαγωγής του αγωγού, το μέτρο της πίεσης πόρων σταδιακά μειώνεται προς την αντίστοιχη τιμή της υδροστατικής κατανομής, γεγονός που αποδίδεται στην αναμόχλευση του εδάφους και στη μερική στράγγιση που έλαβαν χώρα, που με τη σειρά τους οδήγησαν στην ταχύτερη αποτόνωση της υπερπίεσης πόρων.

Στο σχήμα 2.17 παρουσιάζεται η καθαρή δύναμη, ανά μέτρο μήκους αγωγού, που ασκείται από το νερό στον αγωγό σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης, για διάφορους κύκλους φόρτισης – αποφόρτισης.



**Σχήμα 2.17**: Κατανομή καθαρής δύναμης που ασκείται από το νερό στον αγωγό σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης, (Hu et al, 2010)

Αρνητικές τιμές της δύναμης του νερού αντιστοιχούν σε δυνάμεις αναρρόφησης. Παρατηρείται πως κατά την πρώτη διείσδυση του αγωγού, η θετική καθαρή δύναμη του νερού αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με το βάθος μέχρι διείσδυσης του αγωγού στο απαιτούμενο βάθος. Με την εξαγωγή του αγωγού, η υπερπίεση πόρων μειώθηκε ταχύτατα σε αρνητικές τιμές, καταδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο την ανάπτυξη δύναμης αναρρόφησης υπό τον αγωγό. Η μέγιστη δύναμη αναρρόφησης ήταν της τάξης των 28kN/m και μετρήθηκε μετά από ανοδική μετατόπιση της τάξης του 0.5m. Από το δεύτερο κύκλο φόρτισης και στη συνέχεια, η θετική δύναμη κατά τη φάση διείσδυσης άρχισε να αναπτύσσεται μόνο αφού ο αγωγός είχε διεισδύσει βάθος 0.5m, που κατά πάσα πιθανότητα είναι το βάθος της τάφρου που δημιουργήθηκε κατά τον πρώτο κύκλο φόρτισης. Κατά συνέπεια οι μετρήσεις της πίεσης πόρων καταλήγουν στο ίδιο συμπέρασμα, ως προς τη δημιουργία τάφρου, με τις μετρήσεις της δύναμης αντίστασης στον αγωγό (σχήμα 2.13).

Οι μελετητές εκτέλεσαν διάφορα πειράματα για την εκτίμηση της επιρροής της εδαφικής αντοχής – βαθμού προστερεοποίησης, του ρυθμού μετακίνησης του αγωγού και του τρόπου φόρτισης του αγωγού, στην αλληλεπίδραση αγωγούπυθμένα.

### Επιρροή εδαφικής αντοχής – βαθμού προστερεοποίησης

Εκτελέστηκαν τρία πειράματα με εδάφη διαφορετικής αντοχής, που προέκυψε από μεταβολή του βαθμού προστερεοποίησης (O.C.R.) του εδάφους. Οι ρυθμοί επιβολής των μετακινήσεων του αγωγού σε κάθε πείραμα ήταν διαφορετικοί για την επίτευξη φόρτισης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε κάθε περίπτωση. Στο σχήμα 2.18, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων 3 (O.C.R. = 1) και 4 (O.C.R. = 3), ενώ το πείραμα 1 (O.C.R. = 5) έχει παρουσιαστεί στο σχήμα 2.13.



**Σχήμα 2.18**: Διαγράμματα δύναμης - μετατόπισης για τα πειράματα 3 και 4, (Hu et al,2010)

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων 3 και 4 είναι παρόμοια με το πείραμα σύγκρισης (πείραμα 1). Η αντίσταση διείσδυσης αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με το βάθος διείσδυσης και για τα δύο πειράματα. Στο πείραμα 1, με έδαφος με το μεγαλύτερο βαθμό προστερεοποίησης (O.C.R. = 5), η μέγιστη αντίσταση στη διείσδυση ήταν της τάξης των 113kN/m, ενώ στα πειράματα 4 (O.C.R. = 3) και 3 (O.C.R. = 1), η μέγιστη αντίσταση στη διείσδυση ήταν 89kN/m και 46kN/m αντίστοιχα. Όλες οι μέγιστες αντιστάσεις καταγράφηκαν όταν ο αγωγός είχε διεισδύσει στο μέγιστο βάθος. Όσον αφορά στην αντίσταση στην ανύψωση του αγωγού, στο πείραμα 1 καταγράφηκε στα 43kN/m για ανύψωση 0.2m. Στο πείραμα 4, καταγράφηκε η ίδια μέγιστη αντίσταση στην ανύψωση στην ανύψωση ήταν 14.3kN/m για ύψος ανύψωσης 0.5m.

Το σχήμα 2.19 αποτυπώνει την μείωση της μέγιστης αντίστασης στη διείσδυση, κανονικοποιημένη με τη μέγιστη αντίσταση στη διείσδυση κατά τον πρώτο κύκλο φόρτισης, σε συνάρτηση με το πλήθος των κύκλων φόρτισης – αποφόρτισης για τα πειράματα 1, 3 και 4. Παρατηρείται ότι ο βαθμός προστερεοποίησης επηρεάζει την μείωση της μέγιστης αντίστασης στη διείσδυση, καθώς εντονότερη μείωση παρατηρείται στο πείραμα 1. Το πείραμα 4 με την ενδιάμεση τιμή λόγου προστερεοποίησης διαφοροποιείται μετά τον 3° κύκλο φόρτισης και πάντως εμφανίζει μικρότερη μείωση. Τέλος το κανονικώς στερεοποιημένο δείγμα του πειράματος 3, εμφανίζει τη μικρότερη μείωση. Τα υπερστερεοποιημένα δείγματα διογκώνονται κατά τη διάρκεια της διάτμησης και της αναμόχλευσης γεγονός που οδηγεί σε εντονότερη μείωση της αντοχής τους. Αντιθέτως το κανονικώς στερεοποιημένο δείγμα δεν διογκώνεται κατά τη διάρκεια της διάτμησης και κατά συνέπεια η μείωση της αντοχής είναι λιγότερο έντονη. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να σημειωθεί πως κατά τη διάρκεια κάθε φάσης εξαγωγής, ο αγωγός αποσυρόταν εντελώς από το έδαφος, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την εισροή νερού εντός της τάφρου. Η εισροή αυτή επιτάχυνε το βαθμό χαλάρωσης του εδάφους για την περίπτωση των υπερστερεοποιημένων δειγμάτων τα οποία λόγω της διόγκωσής τους έχουν εντονότερη τάση για εισρόφηση νερού. Οι μειώσεις στην αντίσταση διείσδυσης, και για τρία εδαφικά δείγματα, φαίνεται ότι σταματούν μετά το πέρας του 9<sup>ου</sup> κύκλου φόρτισης.



**Σχήμα 2.19**: Σύγκριση μείωσης μέγιστης αντίστασης διείσδυσης σε συνάρτηση με το πλήθος των κύκλων φόρτισης, (Hu et al, 2010)

Σε γενικές γραμμές τα πειραματικά αποτελέσματα συγκλίνουν στην άποψη προς αντίστασης αυξάνεται με την αύξηση βαθμού μείωση της TOU η προστερεοποίησης του εδάφους. Το συμπέρασμα αυτό κρίνεται ιδιαίτερα καθώς κανονικώς στερεοποιημένες σημαντικό τόσο όσο και υτερστερεοποιημένες άργιλοι συναντώνται συχνότατα ως θαλάσσιος πυθμένας σε θέσεις κατασκευής υποθαλάσσιων αγωγών. Ως εκ τούτου, η επιρροή του βαθμού προστερεοποίησης στη μείωση της αντίστασης διείσδυσης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση κόπωσης του αγωγού.

#### Επιρροή ρυθμού μετακίνησης αγωγού

Για τη διερεύνηση της επιρροής του ρυθμού μετακίνησης του αγωγού στην αλληλεπίδραση αγωγού – πυθμένα, εκτελέστηκαν τα πειράματα 1, 5 και 6 με αντίστοιχους ρυθμούς μετακίνησης αγωγού 1mm / sec, 3mm / sec και 6mm / sec. Με αυτούς τους ρυθμούς διείσδυσης επιτεύχθηκε φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες και για τα τρία πειράματα. Στο σχήμα 2.20, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων 5 και 6, ενώ το πείραμα 1 έχει παρουσιαστεί στο σχήμα 2.13.



**Σχήμα 2.20**: Διαγράμματα δύναμης - μετατόπισης για τα πειράματα 5 και 6, (Hu et al, 2010)

Από την επισκόπηση των διαγραμμάτων και των τριών πειραμάτων, γίνεται κατανοητή η έντονη ομοιότητά τους, κυρίως όσον αφορά το σχήμα και το εύρος τιμών και για τις τρεις περιπτώσεις ρυθμού μετακίνησης του αγωγού.

Στο σχήμα 2.21, παρατίθεται η μείωση της μέγιστης αντίστασης διείσδυσης κανονικοποιημένη με τη μέγιστη αντίσταση στη διείσδυση κατά τον πρώτο κύκλο φόρτισης, σε συνάρτηση με το πλήθος των κύκλων φόρτισης – αποφόρτισης για τα πειράματα 1, 5 και 6.



**Σχήμα 2.21**: Σύγκριση μείωσης μέγιστης αντίστασης διείσδυσης σε συνάρτηση με το πλήθος των κύκλων φόρτισης, (Hu et al, 2010)

Και τα τρία πειράματα εμφανίζουν την ίδια συμπεριφορά καθώς οι προκύπτουσες καμπύλες είναι ταυτόσημες. Οι μειώσεις στην αντίσταση διείσδυσης, και για τρία εδαφικά δείγματα, φαίνεται ότι σταματούν μετά το πέρας του 8<sup>ου</sup> κύκλου φόρτισης. Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδηλώνουν πως η επίδραση του ρυθμού μετακίνησης του αγωγού στην αλληλεπίδραση αγωγού – πυθμένα δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική.

#### Επιρροή τρόπου φόρτισης αγωγού

Για το πείραμα 1, το εύρος της κυκλικής κίνησης του αγωγού ήταν σταθερό και ίσο με 3 διαμέτρους του αγωγού (3m). Για τη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης αγωγού – πυθμένα υπό κυκλική κίνηση με έλεγχο της επιβαλλόμενης αντίστασης στη διείσδυση του αγωγού, το πείραμα 2 εκτελέστηκε με τερματισμό της διείσδυσης του αγωγού σε κάθε κύκλο φόρτισης εφόσον αναπτυσσόταν στον αγωγό η αντίσταση διείσδυσης του πρώτου κύκλου φόρτισης. Σαν αποτέλεσμα του παραπάνω, το βάθος διείσδυσης του αγωγού σε κάθε κύκλο φόρτισης δεν είναι το ίδιο. Παρόλο που η διάμετρος του αγωγού δεν είναι η ίδια στα πειράματα 1 και 2, οι προκύπτουσες καμπύλες από τα πειράματα αυτά παρέχουν μια ποιοτική διαφοροποίηση στον τρόπο απόκρισης του συστήματος αγωγού – πυθμένα για την περίπτωση ελέγχου της μετατόπισης (πείραμα 1) και ελέγχου του φορτίου (πείραμα 2). Το αποτέλεσμα του πειράματος 2 παρατίθεται στο σχήμα 2.22. Παρουσίαση Μεθόδων Ανάλυσης Αλληλεπίδρασης Υποθαλάσσιων Αγωγών-Risers με τον Θαλάσσιο Πυθμένα



Σχήμα 2.22: Διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης για το πείραμα 2, (Hu et al, 2010)

Για τον πρώτο κύκλο φόρτισης στο πείραμα 2, παρατηρείται αντίστοιχη απόκριση με το πείραμα 1, δηλαδή σχεδόν γραμμική αύξηση της αντίστασης διείσδυσης με το βάθος διείσδυσης και άμεση ενεργοποίηση της αντίστασης εξαγωγής του αγωγού κατά την ανύψωση του αγωγού. Εν συνεχεία και με δεδομένο ότι η αντίσταση διείσδυσης παραμένει σταθερή, παρατηρείται αύξηση του βάθους διείσδυσης του αγωγού με την αύξηση του πλήθους κύκλων φόρτισης – αποφόρτισης. Μετά από 5 κύκλους φόρτισης, παρατηρήθηκε μια σταθεροποίηση του βάθους διείσδυσης στα 2.1m. Κατά τη διάρκεια του 10<sup>ου</sup> κύκλου φόρτισης παρατηρήθηκε έντονη αύξηση του βάθους διείσδυσης που ξεπέρασε το αντίστοιχο βάθος του 9<sup>ου</sup> κύκλου φόρτισης (2.3m) και κατέληξε στο τελικό βάθος διείσδυσης, στα 2.7m.

Στο σχήμα 2.23, σημειώνονται το μέγιστο βάθος διείσδυσης του αγωγού και η αυξητική μέγιστη διείσδυση ανά κύκλο φόρτισης σε συνάρτηση με το πλήθος των κύκλων φόρτισης. Η αυξητική μέγιστη διείσδυση αναφέρεται στη διαφορά στο βάθος διείσδυσης ανάμεσα σε δυο διαδοχικούς κύκλους φόρτισης. Κεφάλαιο 2°

Παρουσίαση Μεθόδων Ανάλυσης Αλληλεπίδρασης Υποθαλάσσιων Αγωγών-Risers με τον Θαλάσσιο Πυθμένα



**Σχήμα 2.23**: Μέγιστο βάθος διείσδυσης αγωγού και αυξητική μέγιστη διείσδυση αγωγού σε συνάρτηση με το πλήθος κύκλων φόρτισης, (Hu et al, 2010)

Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν αφενός μια ελαφρά αύξηση του βάθους διείσδυσης σε συνάρτηση με το πλήθος των κύκλων φόρτισης και αφετέρου μια έντονη και στη συνέχεια ομαλότερη μείωση της αυξητικής μέγιστης διείσδυσης του αγωγού σε συνάρτηση με το πλήθος των κύκλων φόρτισης. Το δεύτερο μπορεί να ερμηνευτεί από το γεγονός πως το πείραμα εκτελέστηκε σε εδαφικό σχηματισμό με αυξανόμενη διατμητική αντοχή με το βάθος. Παρ' όλ' αυτά, η αντοχή του εδαφικού σχηματισμού σε βάθος μικρότερο του μέγιστου βάθους διείσδυσης του αγωγού, φαίνεται πως αυξάνεται με την αύξηση του πλήθους των κύκλων φόρτισης. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο ότι η εδαφική ζώνη που βρίσκεται κάτω από το μέγιστο βάθος διείσδυσης του αγωγού, φορτίζεται διαρκώς με ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων. Ενδέχεται λοιπόν η υπερπίεση πόρων να έχει επεκταθεί και στην ανώτερη έντονα αναμοχλευμένη εδαφική ζώνη, συντελώντας κατ΄ αυτό τον τρόπο στην αύξηση της αντοχής της.

## 2.2.4 Ερμηνεία των μετρήσεων διείσδυσης από πρόσκρουση σε

## μαλακές αργίλους

Οι Aubeny et al (2006) μελέτησαν και προσπάθησαν να καταλήξουν σε μια διαδικασία εκτίμησης της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους με τη χρήση των αποτελεσμάτων δοκιμών διείσδυσης από πρόσκρουση (impact penetrometer measurements). Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκε το διεισδυσιόμετρο XBP, μια συσκευή που καταγράφει την επιτάχυνση κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης με το έδαφος. Η εκτίμηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής μαλακών αργίλων σε πολύ μικρά βάθη από την επιφάνεια του εδάφους είναι απαραίτητη για πολλές εφαρμογές Γεωτεχνικών Έργων. Ειδικότερα για το αντικείμενο της μελέτης της αλληλεπίδρασης υποθαλάσσιων αγωγών με τον εδαφικό πυθμένα κρίνεται αναγκαία για το χαρακτηρισμό της εδαφικής ακαμψίας στο σημείο επαφής του αλυσοειδούς αγωγού με το θαλάσσιο πυθμένα. Επειδή οι ανάγκες για το σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων απαιτούν τόσο τη δειγματοληψία και την εργαστηριακή εκτίμηση της αντοχής πολύ μαλακών σχηματισμών όσο και

τη γνώση της παραπάνω πληροφορίας για μια αρκετά μεγάλη περιοχή, η ύπαρξη μιας επί τόπου δοκιμής με μειωμένο κόστος και συγκριτικά μεγαλύτερη ταχύτητα εκτέλεσης αποδεικνύεται αρκετά ελκυστική για τους μελετητές.

Το διεισδυσιόμετρο XBP, πέφτει υπό το ίδιο βάρος του μέσα από μια στήλη νερού και διεισδύει σε μικρά βάθη, στον θαλάσσιο πυθμένα. Οι δοκιμές εκτελούνται από ένα κινούμενο σκάφος. Στο σχήμα 2.24 παρουσιάζονται τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του διεισδυσιομέτρου XBP. Το σύστημα είναι εξοπλισμένο με επιταχυνσιόμετρο το οποίο μετράει την επιβράδυνση από τη στιγμή της πρόσκρουσης και καθ' όλη τη διάρκεια της διείσδυσης του διεισδυσιομέτρου στον πυθμένα.





Βασική μαθηματική εξίσωση που χρησιμοποιούν οι συγγραφείς για τη συσχέτιση της δύναμης διατμητικής αντίστασης του εδάφους με τη μετρούμενη επιβράδυνση αποτελεί η :  $a(\frac{W}{g}) = W_b - F_s - F_b$ ,

με *a* = επιβράδυνση του διεισδυσιομέτρου, *W* = ολικό βάρος διεισδυσιομέτρου, *W<sub>b</sub>* = υπό άνωση βάρος διεισδυσιομέτρου, *g* = επιτάχυνση της βαρύτητας, *F<sub>b</sub>* = δύναμη άνωσης-υπό άνωση βάρος του εδάφους που εκτοπίζεται από το διεισδυσιόμετρο και *F<sub>s</sub>* = δύναμη διατμητικής αντίστασης εδάφους.

Οι συγγραφείς αναφέρουν πως δύο παράμετροι που θα πρέπει να λαμβάνονται ιδιαίτερα υπόψη για την ερμηνεία των μετρήσεων διείσδυσης, είναι οι συνθήκες διείσδυσης και η ταχύτητα διείσδυσης. Κατά συνέπεια το πλαίσιο υπό το οποίο θα γίνεται η ερμηνεία και η συσχέτιση μετρούμενης επιβράδυνσης – δύναμης διατμητικής αντίστασης εδάφους – αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, θα πρέπει να έχει δημιουργηθεί λαμβάνοντας υπόψη το εύρος μεταβολής των παραπάνω παραμέτρων.

Η δύναμη διατμητικής αντίστασης του εδάφους συσχετίζεται με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους με τη χρήση μια αδιάστατης παραμέτρου, σύμφωνα με τη σχέση :  $N_{c0} = \frac{F_{s0}}{c_0 A}$ ,

με *A* = μέγιστο εμβαδό διατομής διεισδυσιομέτρου, *N*<sub>c0</sub> = αδιάστατος συντελεστής, *c*<sub>0</sub> = αστράγγιστη διατμητική αντοχή, *F*<sub>s0</sub> = δύναμη διατμητικής αντίστασης εδάφους.

Σύμφωνα με τους ερευνητές, η παράμετρος  $N_{c0}$  είναι συνάρτηση του βάθους διείσδυσης και συσχετίζεται με αυτό με την αδιάστατη παράμετρο  $\frac{h}{d}$ , με h=διείσδυση διεισδυσιομέτρου και d = μέγιστη διάμετρος διεισδυσιομέτρου. Το μέγιστο εμβαδό διατομής και η μέγιστη διάμετρος διεισδυσιομέτρου σημειώνονται στο σχήμα 2.25.



**Σχήμα 2.25**: Ορισμός μέγιστου εμβαδού διατομής και μέγιστης διαμέτρου πενετρομέτρου XBP, (Aubeny et al, 2006)

Για την εκτίμηση της παραμέτρου N<sub>c0</sub> εκτελέστηκε μια σειρά από αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία με τη χρήση του λογισμικού ABAQUS. Το μοντέλο θεωρούσε πως στη διαρροή το έδαφος έχει τελείως πλαστική συμπεριφορά και γενικά ακολουθεί κριτήριο αστοχίας Von Mises. Τα πεπερασμένα στοιχεία που εφαρμόστηκαν στις αναλύσεις ήταν αξονοσυμμετρικά τετράπλευρα στοιχεία. Θεωρήθηκε από την ανάλυση πως ένα κυλινδρικό κενό κατά την κίνηση διείσδυσης του πενετρομέτρου. Στην περιοχή της διεπιφάνειας πενετρομέτρουεδαφικού πυθμένα, χρησιμοποιήθηκε πεπερασμένα στοιχεία με πολύ μικρές διαστάσεις της τάξης του 0.005 X d, με d τη διάμετρο του αγωγού, ενώ η παραπάνω διεπιφάνεια χαρακτηρίστηκε ως τραχεία και απαιτήθηκε συνθήκη μη σχετικής μετακίνησης μεταξύ τους. Το μοντέλο μαζί και με τις απαιτήσεις συνοριακών συνθηκών παρουσιάζεται στο σχήμα 2.26. Κεφάλαιο 2°

Παρουσίαση Μεθόδων Ανάλυσης Αλληλεπίδρασης Υποθαλάσσιων Αγωγών-Risers με τον Θαλάσσιο Πυθμένα



**Σχήμα 2.26**: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για διείσδυση πενετρομέτρου h/d = 1,2, (Aubeny et al, 2006)

Τα αποτελέσματα των προβλέψεων για την αδιάστατη παράμετρο N<sub>c0</sub>, δίνονται στο σχήμα 2.27 για διάφορες τιμές του βάθους διείσδυσης και για μηδενική ταχύτητα διείσδυσης ν.



**Σχήμα 2.27**: Εκτιμήσεις της παραμέτρου N<sub>c0</sub> από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, (Aubeny et al, 2006)

Οι συγγραφείς κατέληξαν και σε δύο εξισώσεις πρόβλεψης της τιμής του  $N_{c0}$  ανάλογα με την τιμή του λόγου h/d. Πιο συγκεκριμένα :

- $N_{c0} = 8.55(h/d)^{0.756}, h/d \le 1.2$
- $N_{c0} = 9.60(h/d)^{0.21}, h/d > 1.2$

Οι προβλέψεις των παραπάνω σχέσεων παρουσιάζουν ικανοποιητική συσχέτιση με τις προβλέψεις των αναλύσεων των πεπερασμένων στοιχείων.

Οι παραπάνω προβλέψεις των συγγραφέων βασίζονται σε εδαφικές παραμέτρους που είναι ανεξάρτητες του επιβαλλόμενου ρυθμού παραμόρφωσης. Παρολ' αυτά πολλοί ερευνητές (Casagrande et al, 1951) έχουν αναγνωρίσει την παραπάνω συσχέτιση καθώς τη θεωρούν σημαντική και μάλιστα έχουν καταλήξει στη σχέση  $c = c_0[1 + \rho_0 \log(\varepsilon / \varepsilon_0]$ , όπου c η αστράγγιστη διατμητική αντοχή για ρυθμό παραμόρφωσης  $\varepsilon$ ,  $c_0$  η αστράγγιστη διατμητική αντοχή για ρυθμό παραμόρφωσης  $\varepsilon_0$  (οριακή τιμή του ρυθμού παραμόρφωσης πέραν της οποίας η εδαφική συμπεριφορά είναι ανεξάρτητη του ρυθμού παραμόρφωσης) και  $\rho_0$  η παράμετρος ρυθμού παραμόρφωσης που συσχετίζεται με την οριακή τιμή  $\varepsilon_0$ .

Εκτελέστηκαν επιπλέον αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία, για την αξιολόγηση της επίδρασης του ρυθμού παραμόρφωσης στη δύναμη διατμητικής αντίστασης του εδάφους. Χρησιμοποιήθηκε μοντέλο εδάφους με αντοχή που να υπακούει στη σχέση  $c = c_0[1 + \rho_0 \log(\varepsilon / \varepsilon_0]$ , ενώ όλες οι υπόλοιπες παράμετροι ήταν αντίστοιχες με εκείνες που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για μηδενικό ρυθμό παραμόρφωσης. Ως παράμετρος  $\rho_0$  χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0.15, με μια αντίστοιχη οριακή τιμή του ρυθμού παραμόρφωσης  $\varepsilon_0 = 0.05\% / h$ . Στο σχήμα 2.27 παρουσιάζονται και οι εκτιμήσεις της παραμέτρου  $N_{c0}$  για ένα εύρος ταχυτήτων διείσδυσης (επιρροή ρυθμού παραμόρφωσης) που αντιστοιχεί στο εύρος ταχυτήτων διείσδυσης του διεισδυσιομέτρου XBP.

Οι μελετητές καταλήγουν σε μια σχέση που αποτυπώνει την επιρροή του ρυθμού παραμόρφωσης στο συντελεστή N<sub>c</sub>. Πιο συγκεκριμένα προτείνουν τη σχέση :

 $N_c = N_{c0}[1 + \lambda_0 \log(v \varepsilon_0 / d)]$ , όπου  $N_{c0}$  η παράμετρος για μηδενική ταχύτητα διείσδυσης, ν η ταχύτητα διείσδυσης του διεισδυσιομέτρου και  $\lambda_0 = \rho_0$ .

Με τη χρήση όλων των παραπάνω διαγραμμάτων και σχέσεων προκύπτει η διαδικασία εκτίμησης της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής από τα αποτελέσματα των μετρήσεων του διεισδυσιομέτρου πρόσκρουσης XBP.

Η παραπάνω διαδικασία αξιολογήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα επί τόπου δοκιμών διεισδυσιομέτρου ΧΒΡ στον κόλπο του Μεξικό. Σε κάθε τοποθεσία ελέγχου εκτελέστηκαν επίσης σε εδαφικά δείγματα, εργαστηριακές

δοκιμές μικροσκοπικού πτερυγίου (Miniature Vane Tests) για την εκτίμηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής.

Στο σχήμα 2.28, απεικονίζονται τυπικά προφίλ ταχύτητας και επιβράδυνσης από μια δοκιμή διεισδυσιομέτρου XBP. Η πρόσκρουση του διεισδυσιομέτρου με το θαλάσσιο πυθμένα έγινε με ταχύτητα περίπου 720cm/sec. Η επιβράδυνση αυξάνεται σχεδόν ευθύγραμμα μέχρι βάθους διείσδυσης 15cm, και παραμένει περίπου σταθερή στα 15g, για βάθος 20cm. Παρατηρείται μια έντονη, κατακόρυφη ανύψωση στην επιβράδυνση ανάμεσα στο βάθος των 23cm-24cm.



**Σχήμα 2.28**: Τυπικά προφίλ ταχύτητας και επιβράδυνσης κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής διεισδυσιομέτρου XBP, (Aubeny et al, 2006)

Στα σχήματα 2.29 και 2.30 παρουσιάζονται τα εκτιμώμενα προφίλ αστράγγιστης διατμητικής αντοχής σε συνάρτηση με το βάθος που προέκυψαν από τις δοκιμές διεισδυσιομέτρου XBP σε δύο διαφορετικές τοποθεσίες ελέγχου. Στα ίδια διαγράμματα παρατίθενται και τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών μικροσκοπικού πτερυγίου σε αντίστοιχα βάθη.



**Σχήμα 2.29**: Εκτιμώμενο προφίλ διατμητικής αντοχής σε συνάρτηση με το βάθος από δοκιμή διεισδυσιομέτρου XBP (πείραμα 12), (Aubeny et al, 2006)

Κεφάλαιο 2°



**Σχήμα 2.30**: Εκτιμώμενο προφίλ διατμητικής αντοχής σε συνάρτηση με το βάθος από δοκιμή διεισδυσιομέτρου XBP (πείραμα 19), (Aubeny et al, 2006)

Από την επισκόπηση των διαγραμμάτων παρατηρείται ότι κατά τα αρχικά στάδια της διείσδυσης, σημειώνεται μια σοβαρή υπερεκτίμηση της διατμητικής αντοχής από το διεισδυσιόμετρο XBP, σε σύγκριση με τη δοκιμή πτερυγίου. Μια πιθανή εξήγηση αποτελεί η αγνόηση των αδρανειακών δυνάμεων κατά τη διαδικασία εκτίμησης της αντοχής από τη δοκιμή διεισδυσιομέτρου. Ειδικά σε τόσο μικρά βάθη, οι αδρανειακές δυνάμεις ενδέχεται να είναι αρκετά μεγάλες σε σχέση τη δύναμη διατμητικής αντίστασης του εδάφους. Το βάθος μέχρι το οποίο οι εκτιμήσεις αντοχής από το διεισδυσιόμετρο XBP, θεωρούνται αναξιόπιστες, είναι εκείνο το βάθος στο οποίο σημειώνεται τοπικό ελάχιστο για την εκτιμώμενη αντοχή (4-5cm για την κατανομή του σχήματος 2.29 και 3-5cm για την κατανομή του σχήματος 2.30).

Παρατηρείται μείωση της αντοχής του διεισδυσιομέτρου στα τελευταία στάδια της διείσδυσης. Πιθανότατη εξήγηση για το γεγονός αυτό αποτελεί η ελαστική ανύψωση του εδάφους καθώς η ταχύτητα διείσδυσης προσεγγίζει το μηδέν. Το παραπάνω φαινόμενο αγνοήθηκε κατά τη διαδικασία εκτίμησης της αντοχής από τα αποτελέσματα των δοκιμών διεισδυσιομέτρου.

Ανάμεσα σε αυτά τα δύο στάδια διείσδυσης (αρχικό και τελικό) παρατηρείται αρκετά ικανοποιητική συμφωνία ανάμεσα στα αποτελέσματα των δύο δοκιμών. Κατά περιπτώσεις παρατηρήθηκαν έντονες και ξαφνικές ανυψώσεις των καταγραφών του διεισδυσιομέτρου. Η πιθανότερη εξήγηση για το παραπάνω γεγονός είναι η ύπαρξη λεπτών αμμωδών ενστρώσεων.

Η τελευταία παράμετρος ελέγχου των ερευνητών ήταν η ευαισθησία των αποτελεσμάτων των δοκιμών πενετρομέτρου XBP, στο ρυθμό της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης. Στο σχήμα 2.31, δίνονται προφίλ εκτιμώμενης

διατμητικής αντοχής από διεισδυσιόμετρο XBP, για διάφορες τιμές του συντελεστή λ του επιβαλλόμενου ρυθμού παραμόρφωσης. Επιπρόσθετα, οι προκύπτουσες κατανομές περικλείονται από τα αποτελέσματα δοκιμών αντοχής μικροσκοπικού πτερυγίου.



**Σχήμα 2.31**: Ευαισθησία αποτελεσμάτων δοκιμής διεισδυσιομέτρου XBP στον επιβαλλόμενο ρυθμό παραμόρφωσης, (Aubeny et al, 2006)

Παρατηρώντας το σχήμα, εξάγεται το συμπέρασμα πως η θεώρηση μη εξάρτησης από το ρυθμό παραμόρφωσης (λ=0), δίνει εκτιμήσεις που κρίνονται πολύ υψηλές. Η πιο αντιπροσωπευτική τιμή για το συντελεστή λ είναι το 0.15, για εδαφικούς σχηματισμούς αντίστοιχους με αυτούς που συναντήθηκαν στην περιοχή, καθώς οι προκύπτουσες εκτιμήσεις τείνουν να έχουν τη μικρότερη απόκλιση σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το ότι όλες οι κατανομές για οποιοδήποτε ρυθμό επιβολής παραμόρφωσης εμφανίζουν την ίδια μορφή και ποσοτικά περικλείονται μετά το βάθος των 5cm, από το προκύπτων εύρος τιμών από τις εργαστηριακές δοκιμές αντοχής μικροσκοπικού πτερυγίου.

# 2.2.5 Επιρροή εδαφικής ακαμψίας στην περιοχή επαφής ενός αλυσοειδούς αγωγού

Ο Pesce et al (1998) σε συνδυασμό με τις αναλύσεις άλλων ερευνητών, επικεντρώθηκαν στη διερεύνηση της επιρροής της εδαφικής ακαμψίας για το συνοριακό πρόβλημα του σημείου επαφής του αγωγού με τον πυθμένα. Η προηγούμενη επιστημονική έρευνα είχε περιοριστεί στη θεώρηση άπειρης εδαφικής ακαμψίας. Οι συγγραφείς θεώρησαν έδαφος με γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά και έδωσαν αναλυτική λύση για το στατικό πρόβλημα. Ορίστηκε από τους μελετητές μια αδιάστατη παράμετρος εδαφικής ακαμψίας, σύμφωνα με τη σχέση :  $K = \frac{k\lambda^4}{EI} = \frac{k\lambda^2}{T_0} = \frac{kEI}{T_0^2}$ , όπου k = ακαμψία ανά μονάδα επιφανείας, EI = καμπτική ακαμψία,  $T_o =$  στατική εφελκυστική δύναμη στο σημείο επαφής αγωγού-πυθμένα και  $\lambda =$  παράμετρος μήκους κάμψης.

Από το αποτέλεσμα της επίλυσης των ερευνητών προέκυψε τυπική συμπεριφορά ταλαντωτή όσον αφορά στην ελαστικότητα του υποστηριζόμενου τμήματος του αγωγού. Επιπρόσθετα επισημάνθηκε πως η παραπάνω συμπεριφορά προσεγγίζει την επίλυση του αλυσοειδούς κατά μήκος του τμήματος που βρίσκεται σε αιώρηση, μεταξύ του σημείου επαφής στον πυθμένα και του σημείου ανάρτησης από την πλωτή πλατφόρμα. Με αυτό τον τρόπο, αμελήθηκε η επιρροή της διάτμησης που ήταν δεδομένη για την περίπτωση εδάφους με άπειρη ακαμψία.

Στην τελευταία περίπτωση (έδαφος με άπειρη ακαμψία), η παράμετρος μήκους  $\lambda = \sqrt{\frac{EI}{T_0}}$ , αποδεικνύεται πως αποτελεί μέτρο για την πραγματική θέση του

σημείου επαφής αγωγού-πυθμένα, πάντα σε σχέση με την ιδεατή διάταξη του αγωγού.

Αντιθέτως, για την περίπτωση εδάφους με γραμμικώς ελαστική ακαμψία, η παράμετρος μήκους *λ*, αποδεικνύεται πως αποτελεί μέτρο της μετακίνησης από το σημείο οριζόντιας εφαπτομένης.

Οι συγγραφείς, παρουσίασαν ορισμένα αδιάστατα διαγράμματα, δείχνοντας για τιμές του  $K \ge 10$ , την ελαστική γραμμή, τη γωνία ως προς το οριζόντιο επίπεδο και την καμπυλότητα σε συνάρτηση με την αδιάστατη παράμετρο μήκους τόξου

 $\varepsilon = \frac{s}{\lambda}$ . Οι συγγραφείς προτείνουν επιπρόσθετες καμπύλες, με τη χρήση των

οποίων είναι δυνατός ο προσδιορισμός της πραγματικής θέσης του σημείου επαφής αγωγού-πυθμένα, σαν συνάρτηση της εδαφικής ακαμψίας.

# 2.2.6 Επιρροή αλληλεπίδρασης εδάφους-αγωγού στην απόκριση απλού αλυσοειδούς αγωγού

Οι Thethi et al (2001) επικεντρώθηκαν στη μελέτη της επιρροής της αλληλεπίδρασης εδαφικού πυθμένα-αγωγού, στο σχεδιασμό απλών μεταλλικών αλυσοειδών αγωγών. Σημαντικά φαινόμενα, κατά τους συγγραφείς, που αποκαλύπτεται πως δυνητικά μπορούν να συμβάλλουν σε αύξηση των τάσεων στον υποθαλάσσιο αγωγό, αποτελούν η δύναμη «εισρόφησης» του εδάφους καθώς και η αντίσταση των τοιχωμάτων της τάφρου που δημιουργείται από τον αγωγό.

Οι συγγραφείς τονίζουν πως μπορεί μεν η έννοια του μεταλλικού αλυσοειδούς αγωγού να είναι αρκετά απλή, αλλά οι δυναμικές κινήσεις που υφίσταται ο αγωγός λόγω της κίνησης της πλατφόρμας εξόρυξης, σε συνδυασμό με την υδροδυναμική φόρτισή του, έχουν ως αποτέλεσμα μια αρκετά περίπλοκη συμπεριφορά από το όλο σύστημα.

Οι κυριότεροι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης αγωγού-πυθμένα χωρίζονται από τους συγγραφείς στις εξής κατηγορίες :

Επιρροή κινήσεων αγωγού στον πυθμένα. Το αποτέλεσμα αυτού του μηχανισμού είναι η μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους εξαιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης που αυτό υφίσταται αλλά και την εκσκαφή τάφρου από τον αγωγό. Τα παραπάνω οφείλονται κυρίως από τις κατακόρυφες κινήσεις του αγωγού σε συνδυασμό με πλευρικές του κινήσεις.

Επιρροή νερού στον θαλάσσιο πυθμένα. Οι κινήσεις του αγωγού, στον πυθμένα, δημιουργούν ένα μηχανισμό υπό τον οποίο το νερό επιταχύνεται και διαφεύγει κάτω από τον αγωγό καθώς αυτός πλησιάζει τον πυθμένα, ενώ αντιθέτως καθώς ο αγωγός απομακρύνεται από τον πυθμένα με μια ανοδική κίνηση το νερό κινείται προς τα κάτω από τον αγωγό. Το όλο φαινόμενο αντιστοιχεί σε μια λειτουργία «άντλησης», συμβάλλει στην απομάκρυνση εδάφους κάτω από τη θέση του αγωγού και με αυτό τον προοδευτικό τρόπο η αρχική εκβάθυνση εξελίσσεται σε μια τάφρο,

Επιρροή πυθμένα στον αγωγό. Ο πυθμένας, ασκεί μια σύνθετη αντίσταση κατά την κίνηση του αγωγού, τόσο κατά την κατακόρυφη όσο και κατά την οριζόντια και αξονική διάσταση του αγωγού. Η κατακόρυφη εδαφική αντίσταση μπορεί να χωριστεί στην αντίσταση στην κατακόρυφη διείσδυση του αγωγού και στην αντίσταση στην ανοδική κίνηση του αγωγού. Κατά την καθοδική κίνηση του αγωγού, το έδαφος εμφανίζει ελαστική συμπεριφορά για μικρές παραμορφώσεις διείσδυσης. Αυτή η ελαστική συμπεριφορά είναι ωφέλιμη για την αντοχή του αγωγού σε φαινόμενα κόπωσης στο σημείο επαφής του με τον θαλάσσιο πυθμένα. Κατά την ανοδική κίνηση του αγωγού, ενδέχεται να ασκηθεί δύναμη «εισρόφησης» από το έδαφος που είναι σε επαφή με αυτόν. Η πλευρική αντίσταση από την άλλη, αποτελείται από την τριβή μεταξύ του αγωγού και του πυθμένα και την παθητική αντίσταση του εδάφους καθώς ο αγωγός κινείται πλευρικά προς τα τοιχώματα της δημιουργηθείσας τάφρου. Η αντίσταση κατά την αξονική έννοια οφείλεται μόνο σε φαινόμενα τριβής και μπορεί προφανώς να ληφθεί υπόψη κατά τις αναλύσεις.

Είναι προφανές πως οι παραπάνω μηχανισμοί αλληλεπίδρασης αλληλοεπηρεάζονται και συλλειτουργούν τις περισσότερες φορές. Οι συγγραφείς

συστήνουν κατά συνέπεια, να επιλέγονται για τις αναλύσεις υποθαλάσσιων αγωγών συντηρητικές εδαφικές παράμετροι μηχανικών χαρακτηριστικών αλλά και τέτοιο βάθος και πλάτος τάφρου, κατά μήκος του αγωγού, βασιζόμενα στις βαθύτερες τάφρους που έχουν προκύψει είτε σε πειραματικές διατάξεις είτε σε πραγματικές παρατηρήσεις πεδίου.

Οι συγγραφείς τονίζουν πως είναι δυνατόν να προκύψουν βελτιώσεις στον τρόπο μοντελοποίησης της εδαφικής αντίστασης τόσο κατά την κατακόρυφη όσο και κατά την οριζόντια διεύθυνση με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων ελατηρίων, που υπακούουν σε συγκεκριμένο νόμο δύναμης-μετακίνησης. Με τη χρήση δεδομένων για τη διείσδυση σωλήνων εντός του εδάφους, βασιζόμενα στη θεωρία φέρουσας ικανότητας αλλά και σε μελέτες αλληλεπίδρασης σωληνωτών αγωγών-εδάφους, είναι δυνατόν να βελτιστοποιηθεί η μοντελοποίηση της ακαμψίας του πυθμένα και της πλευρικής εδαφικής αντίστασης ενός αγωγού εμπηγμένου εντός του πυθμένα. Η μεγαλύτερη αβεβαιότητα, σύμφωνα με τους συγγραφείς, είναι η εδαφική απόκριση όσον αφορά στην ανάπτυξη δύναμης «εισρόφησης».

Η καμπύλη απόκρισης από την αλληλεπίδραση αγωγού-εδάφους μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη θεώρηση της προσφερόμενης στήριξης του εδάφους υπό παρατηρηθεί μορφή ελατηρίου. Έχει όμως. εξαιτίας тп ÓTI тпс επαναλαμβανόμενης χρονικά φόρτισης και της πλαστικής παραμόρφωσης του εδάφους, δεν είναι πρόσφορο να αντιπροσωπευτεί η στήριξη του εδάφους από ένα ελατήριο με σταθερές ιδιότητες σε συνάρτηση με το χρόνο. Προτείνεται κατά συνέπεια, η μορφή του ελατηρίου να μπορεί δυνητικά να μεταβληθεί με το χρόνο και να εξελιχθεί από απόκριση εδάφους που φορτίζεται για πρώτη φορά σε απόκριση εδάφους με απομειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά. Η καμπύλη απόκρισης ενός παρθένου εδάφους χρησιμοποιείται σαν περιβάλλουσα καμπύλη για μεταγενέστερους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης του εδάφους. Κατ' επέκταση, κάθε καμπύλη απόκρισης αγωγού-εδάφους μπορεί να θεωρηθεί σαν διαδρομή φόρτισης που περιβάλλεται από την καμπύλη απόκρισης του παρθένου εδάφους. Στο σχήμα 2.32, παρουσιάζεται η καμπύλη φόρτισηςαναφορικά σε απόκριση παρθένου εδάφους αλλά αποφόρτισης και μεταγενέστερες καμπύλες αντίστασης-μετακίνησης για επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης.

Κεφάλαιο 2°



**Σχήμα 2.32**: Περιβάλλουσα καμπύλη απόκρισης παρθένου εδάφους και απόκριση εδάφους σε μεταγενέστερους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης, (Thethi et al, 2001)

Είναι προφανής η εξάρτηση της απόκρισης του συστήματος αγωγού-πυθμένα από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους και τη διάμετρο του αγωγού. Επιπρόσθετα θα πρέπει να τονιστεί ότι υφίσταται εξάρτηση και από το βάθος διείσδυσης του αγωγού, το οποίο μπορεί να μεταβάλλεται ανά διατομή, κατά μήκος του αγωγού ή και στην ίδια διατομή (με την διεύρυνση της σχηματιζόμενης τάφρου). Κατά συνέπεια το μοντέλο πρόβλεψης της απόκρισης του συστήματος αγωγού-πυθμένα, θα πρέπει να έχει ενσωματωμένα χαρακτηριστικά απόκρισης που να συνδέονται με τα διάφορα βάθη διείσδυσης του αγωγού. Η ενσωμάτωση της εξάρτησης από το βάθος διείσδυσης μπορεί να γίνει με τους ακόλουθους τρόπους : α) Οι συνιστώσες της φόρτισης μπορούν να εκφραστούν σαν συνάρτηση του βάθους διείσδυσης και β) Διαφορετικές σχέσεις απόκρισης μπορούν να επιλεγούν, με την κάθε μια να σχετίζεται με το αντίστοιχο εύρος βάθους.

Η επιλογή γραμμικώς ελαστικής ακαμψίας για το έδαφος στο οποίο τοποθετείται ο αγωγός, αναφορικά με την ανάλυση κατά φαινομένων κόπωσης, είναι εξαρτώμενη από τα χαρακτηριστικά του υλικού του πυθμένα και τις μέσες εκτιμώμενες κατακόρυφες μετακινήσεις του αγωγού στο σημείο επαφής του με τον πυθμένα, για συγκεκριμένη κατάσταση θάλασσας και φορά φόρτισης. Η επιλογή ελαστικής εδαφικής ακαμψίας με τη χρήση ενός μη γραμμικού μοντέλου απόκρισης αγωγού-εδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να ακολουθήσει σαν ανάλυση τις περιπτώσεις όπου η θεώρηση πυθμένα δεν θα έχει δώσει ικανοποιητικό συντελεστή ασφαλείας για αστοχία έναντι σε κόπωση. Στο σχήμα 2.33, παρατίθεται ένα μοντέλο διείσδυσης αγωγού, με τη σχέση φορτίουμετατόπισης, για ένα αγωγό με βάθος διείσδυσης ίσο με μισή διάμετρο.



**Σχήμα 2.33**: Μοντέλο διείσδυσης αγωγού με βάθος διείσδυσης μισή διάμετρο, (Thethi et al, 2001)

Η διακύμανση της φθοράς λόγω φαινομένων κόπωσης σε συνάρτηση με την ακαμψία του πυθμένα, για δύο αγωγούς διαμέτρου 12 και 28 ιντσών αντίστοιχα, παρουσιάζεται στο σχήμα 2.34. Η διακύμανση δίνεται σαν ποσοστό επί της φθοράς λόγω κόπωσης με τη θεώρηση άκαμπτου πυθμένα, για αυξανόμενη ακαμψία του πυθμένα.





Η σχέση ανάμεσα στην εδαφική ακαμψία και την φθορά λόγω κόπωσης είναι λογαριθμική, με τη φθορά να αυξάνεται αρχικώς πολύ απότομα, ενώ στη συνέχεια να αυξάνεται σταδιακά καθώς το έδαφος γίνεται πιο άκαμπτο. Επιπρόσθετα παρατηρείται μεγαλύτερο ποσοστό φθοράς λόγω κόπωσης για την περίπτωση του αγωγού με τη μικρότερη διάμετρο. Από την επισκόπηση του διαγράμματος γίνεται αντιληπτό πως και για τις δύο περιπτώσεις διαμέτρου αγωγού, η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής του αγωγού προτού αυτός αστοχήσει από φαινόμενα κόπωσης αυξάνεται με τη θεώρηση μαλακότερου (μικρότερη ακαμψία) θαλάσσιου πυθμένα.

Η επιρροή της εδαφικής δύναμης «εισρόφησης» στη συμπεριφορά του αγωγού μπορεί να προσομοιωθεί με τη χρήση μη γραμμικών στοιχείων ελατηρίων με πλαστική συμπεριφορά σε ένα πρόγραμμα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Είναι προφανές ότι το σενάριο άσκησης δύναμης «εισρόφησης» είναι εφαρμόσιμο μόνο στην περίπτωση που θα λάβουν χώρα ανωστικές, εντός του επιπέδου, μετακινήσεις του αγωγού στις οποίες θα αντιστέκεται η δύναμη αναρρόφησης. Στο σχήμα 2.35 παρουσιάζεται μια διάταξη υποθαλάσσιου αγωγού, στην οποία έχουν ενσωματωθεί στοιχεία ελατηρίου (spring elements for suction resistance) για την αξιολόγηση της επιρροής της δύναμης «εισρόφησης» στις αναπτυσσόμενες καμπτικές ροπές στο σημείο επαφής αγωγού με θαλάσσιο πυθμένα. Υπάρχει η δυνατότητα μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων να γίνεται συνεχής καταγραφή των αναπτυσσόμενων καμπτικών ροπών στα σημεία που έχουν επιλεγεί, καθώς η πλωτή πλατφόρμα μετακινείται.



**Σχήμα 2.35**: Μοντέλο ελατηρίων για προσομοίωση επιρροής δύναμης «εισρόφησης», (Thethi et al, 2001)

Η σχέση δύναμης-μετατόπισης που αντιπροσωπεύει την απόκριση στη δύναμη «εισρόφησης» απεικονίζεται στο σχήμα 2.36.

SOIL SUCTION LOADING RESPONSE FOR 14" SCR



**Σχήμα 2.36**: Καμπύλες δύναμης «εισρόφησης», (Thethi et al, 2001)

Στην ουσία αφορά την απόκριση ενός αγωγού που βρίσκεται εντός μιας στενούς, βαθιάς και επανεπιχωμένης τάφρου. Η σχέση είναι έντονα μη γραμμική, παρουσιάζοντας μια απαίτηση για ανοδική μετατόπιση αρχικά μέχρι να κινητοποιηθεί η πλήρης δύναμη «εισρόφησης». Εν συνεχεία παρατηρείται μια ανεπαίσθητη μείωση της δύναμης «εισρόφησης», η οποία τερματίζεται με μια έντονη πτώση προς μηδενική τιμή για μετατόπιση λίγο μεγαλύτερη από 5 ίντσες Η τιμή σταθεροποίησης (plateau region), αντιπροσωπεύει την πλαστική παραμόρφωση το εδάφους, καθώς ο αγωγός κινείται ανοδικά και έξω από την τάφρο, ενώ η απότομη πτώση στη δύναμη «εισρόφησης» αντιπροσωπεύει τον αποχωρισμό του αγωγού από το θαλάσσιο πυθμένα. Οι συγγραφείς τονίζουν ότι η μορφή της καμπύλης δύναμης «εισρόφησης» εξαρτάται από την εδαφική αντοχή και τη διάμετρο του αγωγού ενώ μπορεί να εφαρμοστεί για κινήσεις του αγωγού μόνο όταν ο αγωγός έχει έρθει σε επαφή με το θαλάσσιο πυθμένα για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Επιπρόσθετη έρευνα έδωσε επιπλέον παραμέτρους από τους οποίους εξαρτάται η απόκριση λόγω δύναμης «εισρόφησης». Πιο συγκεκριμένα οι συγγραφείς παρατήρησαν ότι : α) Η αυξανόμενη ταχύτητα αποχωρισμού συμβάλλει στην μείωση της μέγιστης δύναμης «εισρόφησης» αλλά και στο μήκος της απόστασης σταθεροποίησης (plateau distance), β) Η αύξηση του πλήθους των κύκλων ανοδικής κίνησης του αγωγού συμβάλλει στην μείωση της δύναμης

63

«εισρόφησης» και γ) Η ύπαρξης περιόδου παύσης ανάμεσα στους κύκλους ανοδικής κίνησης του αγωγού συμβάλλει στην επαναστερεοποίηση του εδάφους κάτω από τον αγωγό και στην αύξηση της δύναμης «εισρόφησης».

Πολύ σημαντική παρατήρηση από τους συγγραφείς αποτελεί η δυνατότητα εφαρμογής στοιχείων ελατηρίου για την προσομοίωση της αντίστασης των τοιχωμάτων της τάφρου σε μεγάλου εύρους εγκάρσιες κινήσεις της πλωτής πλατφόρμας. Οι πλευρικές καμπύλες φόρτισης του εδάφους προκύπτουν ανάλογες με τις πλευρικές κινήσεις του αγωγού. Οι εγκάρσιες κινήσεις της πλατφόρμας μεταφράζονται σε κατακόρυφη ανύψωση και σε πλευρικές κινήσεις του αγωγού. Το τμήμα του αγωγού στο οποίο υποβάλλεται πλευρική αντίσταση τοιχώματος αλλάζει καθώς λαμβάνουν χώρα κινήσεις της πλωτής πλατφόρμας. Είναι προφανές πως μπορούν να εφαρμοστούν διαφορετικές καμπύλες δύναμηςμετατόπισης στο σημείο επαφής αγωγού-πυθμένα, έτσι ώστε να αντιπροσωπεύονται τα διάφορα βάθη και πλάτη της τάφρου.

Στο σχήμα 2.37 παρουσιάζεται η αύξηση της προκύπτουσας καμπτικής ροπής σε έναν αγωγό, ευρισκόμενο σε βάθος 1200m και με 5% εγκάρσια μετακίνηση, σε συνάρτηση με το πλάτος και το βάθος της τάφρου. Θα πρέπει να σημειωθεί πως το προφίλ του επόμενου σχήματος δίνεται κατά μήκος του αλυσοειδούς αγωγού.





**Σχήμα 2.37**: Επιρροή πλευρικής αντίστασης στην προκύπτουσα καμπτική ροπή, (Thethi et al, 2001)

Από την επισκόπηση του σχήματος προκύπτει σημαντική αύξηση της καμπτικής ροπής στο σημείο επαφής του αγωγού με τον πυθμένα. Παρατηρείται αύξηση περί το 15% της μέγιστης καμπτικής ροπής για την περίπτωση του αγωγού με τη μικρότερη εξεταζόμενη διάμετρο. Αυτό συμβαίνει πολύ τοπικά, στη θέση του σημείου επαφής αγωγού-πυθμένα. Για όλο το υπόλοιπο μήκος των αγωγών παρατηρείται σχεδόν πλήρης ταύτιση ανάμεσα στις καμπύλες για διαφορετικές διαμέτρους.

Αποτελεί κοινό τόπο πως υπάρχουν αρκετές αβεβαιότητες αναφορικά με τον τρόπο μετακίνησης του αγωγού εντός της τάφρου, καθώς λαμβάνει χώρα μια εγκάρσια κίνηση της πλωτής πλατφόρμας. Είναι πιθανό παράλληλα με την κίνηση της πλατφόρμας να λάβει χώρα έξοδος του αγωγού από την τάφρο εξαιτίας της τρισδιάστατης γεωμετρίας του, εκτονώνοντας με αυτό τον τρόπο την υψηλή συγκέντρωση τάσεων σε αυτό το σημείο του αγωγού. Επιπρόσθετα κατά την αργή μετακίνηση της πλωτής πλατφόρμας, η πλευρική φόρτιση χαμηλής συχνότητας στο τοιχίο της τάφρου θα έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους που βρίσκεται στην περιοχή του τοιχώματος. Προοδευτικά αυτό θα συμβάλλει στην αύξηση του πλάτους της τάφρου.

Οι συγγραφείς αναφέρονται σε διενέργεια πειραματικού προγράμματος μεγάλης κλίμακας για τη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης θαλάσσιου πυθμένα και αγωγού στο σημείο επαφής τους. Τα δύο βασικότερα πορίσματα του ερευνητικού προγράμματος ήταν : α) Υπάρχει δυνατότητα προσομοίωσης και εκτίμησης του φαινομένου αύξησης της τάσης, σε τρισδιάστατη κλίμακα, εξαιτίας της εδαφικής δύναμης «εισρόφησης» και αντίστασης τοιχώματος με τη χρήση των αντίστοιχων μοντέλων που αναπτύχθηκαν σε πειράματα δύο διαστάσεων, και β) Παρατηρούνται υψηλότερα επίπεδα απόσβεσης των δονήσεων του αγωγού για την περίπτωση αγωγού ευρισκόμενου εντός της τάφρου σε σχέση με ένα αγωγό που βρίσκεται επί ενός άκαμπτου πυθμένα.

# 2.3 Αριθμητικές Μέθοδοι

Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται κυρίως μέθοδοι που μελετούν την αλληλεπίδραση πυθμένα-αγωγού με την εκτέλεση αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων σε Η/Υ. Τις περισσότερες φορές οι ερευνητές καταλήγουν σε υπολογιστικά προσομοιώματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της αλληλεπίδρασης. Συνηθίζεται τα παραπάνω μοντέλα πρόβλεψης να επικαιροποιούνται και να διορθώνονται με τη χρήση πεδιακών μετρήσεων. Οι ερευνητές εκτελούν στην πλειοψηφία των περιπτώσεων παραμετρικές αναλύσεις για την αξιολόγηση της επίδρασης μεμονωμένων παραμέτρων.

# 2.3.1 Εκτίμηση φορτίου ολίσθησης-υποχώρησης για κύλινδρο

## εμπηγμένο σε τάφρο από συνεκτικό έδαφος

Η μελέτη των Aubeny et al (2005), ερευνά τη σχέση ανάμεσα στην εδαφική δύναμη αντίστασης και στο βάθος εισχώρησης για οριζόντιο κύλινδρο, ευρισκόμενο σε κατακόρυφη τάφρο. Εκτελέστηκαν αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης για την εκτίμηση φορτίων ολίσθησης-υποχώρησης για διάφορα βάθη εισχώρησης του κυλίνδρου. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων επαληθεύονται από τις λύσεις άνω και κάτω ορίου της κλασσικής θεωρίας πλαστικότητας. Τα αποτελέσματα της έρευνας έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς η αντίσταση του θαλάσσιου πυθμένα στη διείσδυση κυλινδρικής διατομής αγωγών προσομοιάζει επακριβώς το φαινόμενο της διείσδυσης ενός αλυσοειδούς υποθαλάσσιου αγωγού στο σημείο επαφής του με τον θαλάσσιο πυθμένα.

Η προσομοίωση του υλικού ως προς τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων έγινε με τη χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων, σχήματος τετραπλεύρου για υλικό με γραμμική ελαστική-τελείως πλαστική συμπεριφορά το οποίο υπακούει στο κριτήριο Von Mises.

Το σχηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε και στο οποίο φαίνεται ο κυλινδρικός αγωγός διαμέτρου D, το βάθος εισχώρησης h και η εδαφική δύναμη αντίστασης F, παρατίθεται στο σχήμα 2.38



**Σχήμα 2.38**: Σχηματικό μοντέλο – Ορισμοί χρησιμοποιούμενων μεγεθών, (Aubeny et al, 2005)

Η μελέτη θεώρησε γραμμικώς μεταβαλλόμενη αντοχή για το έδαφος και βάθη διείσδυσης μεγαλύτερα από μια διάμετρο. Οι προκύπτουσες προβλέψεις αφορούν φόρτιση του πυθμένα υπό αστράγγιστες συνθήκες και ο εδαφικός σχηματισμός θεωρείται ότι εμφανίζει συμπεριφορά συνεκτικού εδάφους. Οι επιλύσεις που προέκυψαν από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων συγκρίνονται με τις ακριβείς λύσεις πάνω και κάτω opίou (upper bound-lower bound), της κλασσικής θεωρίας πλαστικότητας.

Ειδικά όσον αφορά στο προφίλ αντοχής ελήφθη πως η αστράγγιστη διατμητική αντοχή c, σε βάθος z, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση c=c<sub>o</sub> + kz, με c<sub>o</sub> την αστράγγιστη διατμητική αντοχή στην επιφάνεια του εδάφους και k το ρυθμό αύξησης της διατμητικής αντοχής συναρτήσει του βάθους. Η εκτίμηση προφίλ εδάφους με μεταβλητή αντοχή έγινε τελικά με τη χρήση της αδιάστατης παραμέτρου n, με n = Kd / c<sub>o</sub>. Η παράμετρος n μπορεί να λάβει τιμές από n = 0 (ομοιόμορφη αντοχή) έως n =  $\infty$  (γραμμικώς μεταβαλλόμενη αντοχή).

Τέλος όσον αφορά στην τραχύτητα του ορίου αγωγού-εδάφους ελήφθησαν δύο περιπτώσεις : 1. λείο (smooth) και 2. τραχύ (rough).

#### Βάθος διείσδυσης μικρότερο ή ίσο της μισής διαμέτρου του αγωγού

Καταρχήν θεωρήθηκαν συνθήκες μικρής διείσδυσης αγωγού (h/D≤0.5), τόσο για συνθήκες ομοιόμορφης εδαφικής αντοχής όσο και για συνθήκες γραμμικώς μεταβαλλόμενης εδαφικής αντοχής.

Στο επόμενο σχήμα (2.39) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία για την εκτίμηση του φορτίου κατάρρευσης για διάφορες περιπτώσεις τραχύτητας αγωγού και εδαφικής αντοχής και συγκρίνονται με τις ακριβείς επιλύσεις των θεωριών της πλαστικότητας. Τόσο το φορτίο κατάρρευσης F όσο και το βάθος διείσδυσης h δίνονται σαν ανηγμένα μεγέθη προς τη διάμετρο D του αγωγού. Στον κατακόρυφο άξονα δίνεται το πηλίκο του φορτίου κατάρρευσης προς το γινόμενο c<sub>h</sub> (διατμητική αντοχή στο βάθος h) επί D, ενώ στον οριζόντιο άξονα δίνεται το πηλίκο h προς D.



**Σχήμα 2.39**: Σύγκριση λύσεων για βάθος διείσδυσης μικρότερο ή ίσο της μισής διαμέτρου αγωγού, (Aubeny et al, 2005)

Από την επισκόπηση και σύγκριση των λύσεων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- Για λείο όριο, με εδαφικό προφίλ ομοιόμορφης αντοχής, η λύση του κάτω ορίου (lower bound-method of characteristics), βρίσκεται σε συμφωνία με τη λύση των πεπερασμένων στοιχείων για βάθη εισχώρησης h / D έως 0.3. Για μεγαλύτερα βάθη παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των δύο λύσεων, με μέγιστη απόκλιση της τάξης του 10% για βάθος εισχώρησης h / D ίσο με 0.5. Η λύση του άνω ορίου (upper bound-consistent) συμφωνεί με την λύση των πεπερασμένων στοιχείων μόνο για πολύ ρηχά βάθη εισχώρησης της τάξης του h / D έως 0.1. Για μεγαλύτερα βάθη εισχώρησης, διευρύνεται συνεχώς η απόκλιση της λύσης του άνω ορίου, μέχρι βάθους εισχώρησης h / D ίσο με 0.5, όπου η λύση των πεπερασμένων στοιχείων υπολείπεται στην εκτίμηση του φορτίου κατάρρευσης για 25% περίπου.
- Για τραχύ όριο, με εδαφικό προφίλ ομοιόμορφης αντοχής, η λύση του άνω ορίου (upper bound-consistent), συμφωνεί εντελώς με την λύση πεπερασμένων στοιχείων για βάθη εισχώρησης h / D έως 0.3, με μέγιστη απόκλιση για μεγαλύτερα βάθη εισχώρησης έως 5%. Η λύση άνω ορίου Randolph-Houlsby (upper bound-Randolph Houlsby), υπέρκειται της λύσης των πεπερασμένων στοιχείων στοιχείων περί το 10%, για μικρά βάθη εισχώρησης h / D έως 0.3. Για μεγαλύτερα βάθη, η απόκλιση των λύσεων μειώνεται καταλήγοντας σε πλήρη συμφωνία μεταξύ τους για h / D ίσο με 0.5.
- Για λείο όριο και εδαφικό προφίλ γραμμικώς μεταβαλλόμενης αντοχής, η λύση των πεπερασμένων στοιχείων συμφωνεί πολύ καλά με τη λύση του κάτω ορίου για βάθη εισχώρησης h / D έως 0.4. Για μεγαλύτερα βάθη, σημειώνεται μικρή απόκλιση της τάξης του 5% ανάμεσα στις μεθόδους. Τόσο η λύση άνω ορίου Randolph-Houlsby όσο και η δεύτερη λύση άνω ορίου, δίνουν σχεδόν ταυτόσημα αποτελέσματα και εμφανίζουν έντονη απόκλιση συγκριτικά με τη λύση των πεπερασμένων στοιχείων για βάθη εισχώρησης h / D έως 0.3. Για μεγαλύτερες τιμές του βάθους εισχώρησης, οι εκτιμήσεις των λύσεων άνω ορίου έρχονται σε καλύτερη συμφωνία (5% απόκλιση) με τη λύση των πεπερασμένων στοιχείων.

## Βάθος διείσδυσης μεγαλύτερο της μισής διαμέτρου του αγωγού

Θεωρήθηκαν συνθήκες βαθύτερης διείσδυσης αγωγού (h/D>0.5), τόσο για συνθήκες ομοιόμορφης εδαφικής αντοχής όσο και για συνθήκες γραμμικώς μεταβαλλόμενης εδαφικής αντοχής.

Αντίστοιχα με την προηγούμενη περίπτωση, στο σχήμα (2.40) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία για την εκτίμηση του φορτίου κατάρρευσης για διάφορες περιπτώσεις τραχύτητας αγωγού και εδαφικής αντοχής και συγκρίνονται με τις ακριβείς επιλύσεις των θεωριών της πλαστικότητας.



**Σχήμα 2.40**: Σύγκριση λύσεων για βάθος διείσδυσης μεγαλύτερο της μισής διαμέτρου αγωγού, (Aubeny et al, 2005)

Από την επισκόπηση και σύγκριση των λύσεων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- Για λείο αλλά και τραχύ όριο, με εδαφικό προφίλ ομοιόμορφης αντοχής, τα φορτία κατάρρευσης που προβλέπονται από τη λύση του άνω ορίου αυξάνονται απότομα για εύρος βάθους εισχώρησης h / D ανάμεσα σε 0.5 και 1. Για μεγαλύτερο βάθος, η πρόβλεψη δίνει σταθερή τιμή για το φορτίο κατάρρευσης. Η λύση του άνω ορίου υπερεκτιμά τη λύση των πεπερασμένων στοιχείων κατά 50% για εύρος βάθους εισχώρησης h / D από 1 έως 2. Για μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης η λύση του άνω ορίου.
- Για τραχύ όριο και εδαφικό προφίλ γραμμικώς μεταβαλλόμενης αντοχής, και για βάθος εισχώρησης h / D > 1, η λύση του άνω ορίου εμφανίζει σταδιακά σημαντική απόκλιση από τη λύση των πεπερασμένων στοιχείων. Για βάθος εισχώρησης h / D > 1.5, οι δύο λύσεις εμφανίζουν περίπου παράλληλη κατανομή, με τη λύση του άνω ορίου να υπερεκτιμά το φορτίο κατάρρευσης του αγωγού κατά περίπου 20%.

# 2.3.2 Εκτίμηση αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε υποθαλάσσιο

## αγωγό και θαλάσσιο πυθμένα με τη χρήση πεπερασμένων

## στοιχείων

Σύμφωνα με τους Clukey et al (2008), η αλληλεπίδραση ανάμεσα στον υποθαλάσσιο αγωγό, τον θαλάσσιο πυθμένα και το νερό δημιουργεί μια εξαιρετικά σύνθετη κατάσταση. Ένα πρόβλημα σαν και αυτό ανήκει στην κατηγορία προβλημάτων μηχανικής συνεχούς μέσου. Η προσέγγιση των μηχανικών, γεωτεχνικών και υδροδυναμικών παραμέτρων του προβλήματος θα πρέπει να αναπαρασταθεί με απόλυτη σαφήνεια. Με αυτό τον τρόπο, κάθε επιμέρους φαινόμενο μπορεί να απομονωθεί και να εξεταστεί προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδρασή του στην καθολική απόκριση του συστήματος.

Οι επιμέρους μηχανισμοί που πρέπει να εξετάζονται από άποψης μηχανικής συνεχούς μέσου είναι οι ακόλουθοι :

- Αλληλεπίδραση ανάμεσα στην άκαμπτη διατομή του αγωγού (καθώς η ακαμψία του αγωγού είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την ακαμψία του εδάφους), το περιβάλλον υγρό και ένα σχετικά μαλακό, κορεσμένο εδαφικό μέσο.
- Ολική παραμόρφωση, πλαστικοποίηση και κυκλικά εμφανιζόμενη υποβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους.
- Απόσβεση του συστήματος εξαιτίας υδροδυναμικών δράσεων.
- Δυνάμεις «εισρόφησης», επιφανειακού εφελκυσμού και «προσκόλλησης» ανάμεσα στα υλικά.
- Διακοπτόμενη επαφή ανάμεσα στα υλικά.
- Εφελκυστική αστοχία και διαμόρφωση νέων επιφανειών.
- Ανάμειξη υλικών και διάβρωση.

Για την προσομοίωση των παραπάνω μηχανισμών, οι συγγραφείς προτείνουν λογισμικό Η/Υ που θα χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες λειτουργίες :

- Ασυμπίεστη απόκριση νερού λόγω κίνησης ενός άκαμπτου στερεού ορίου μέσα στο υγρό.
- Χαρακτηριστικά κορεσμένου εδαφικού μέσου και άκαμπτου σώματος για τα υλικά, τα οποία θα περιλαμβάνουν και το φαινόμενο της διάβρωσης.
- Μηχανισμό διακοπτόμενης επαφής ανάμεσα στα υλικά, ο οποίος θα έχει ενσωματωμένη τη δυνατότητα προσομοίωσης τριβής και προσκόλλησης ανάμεσα στα υλικά.

Οι Clukey et al, (2008) κατέληξαν σε κώδικες πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούν ρητή χρονική ολοκλήρωση (explicit time integration). Η ρητή χρονική ολοκλήρωση θεωρείται ότι είναι εφαρμόσιμη για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε υποθαλάσσιο αγωγό και τον θαλάσσιο πυθμένα,
καθώς εξαρτάται αποκλειστικά από την αλλαγή στο φορτίο σε κάθε χρονικό βήμα και από τις μηχανικές συνθήκες στην αρχή κάθε χρονικού βήματος.

Οι πιο συνηθισμένοι κώδικες για αντίστοιχες συμπεριφορές χρησιμοποιούν τη Lagrangian μέθοδο του παραμορφώσιμου καννάβου, όπου οι θέσεις των κόμβων προσαρμόζουν συνεχώς τη θέση τους με το χρόνο προκειμένου να δημιουργήσουν ένα παραμορφωμένο κάνναβο. Η διαδικασία αυτή έχει εξαιρετική εφαρμογή για την περίπτωση μικρών παραμορφώσεων όπου η παραμόρφωση του καννάβου είναι συγκριτικά μικρή. Η Lagrangian μέθοδος θεωρείται ακατάλληλη για τις περιπτώσεις όπου μπορούν να λάβουν χώρα σημαντικές παραμορφώσεις του καννάβου, καθώς σε κάποιες περιπτώσεις ενδέχεται να προκληθεί αριθμητική αστάθεια.

Το παραπάνω πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τη χρήση της αυθαίρετης Lagrangian/ Eulerian μεθόδου, η οποία αντιμετωπίζει πολλά προβλήματα σχετικά με την καθολική παραμόρφωση των υλικών αλλά το βασικό της μειονέκτημα είναι ότι δεν μπορεί να θεωρήσει ανάμειξη των υλικών. Εναλλακτικές προσεγγίσεις αποτελούν η επιλεκτική απαλοιφή τμημάτων του καννάβου στα οποία δεν συντελούνται οι απαιτούμενες λειτουργίες ή εφαρμογή διαδικασιών χωρισμού σε νέες ζώνες προκειμένου να μειωθούν οι μεγάλες παραμορφώσεις του καννάβου.

Στο επόμενο σχήμα (σχήμα 2.41), παρουσιάζονται περιπτώσεις παραμόρφωσης του καννάβου για τη Lagrangian μέθοδο και την Lagrangian/ Eulerian μέθοδο. Είναι προφανής η αδυναμία της Lagrangian μεθόδου να προσομοιάσει μεγάλες παραμορφώσεις (δεύτερο σχήμα από τα αριστερά).



**Σχήμα 2.41**: Περιπτώσεις παραμόρφωση καννάβου για α) Μέθοδο Lagrangian και β) Μέθοδο Lagrangian/ Eulerian, (Clukey et al, 2008)

Μια εναλλακτική για τις παραπάνω μεθόδους αποτελεί η πλήρης μέθοδος Eulerian, κατά την οποία μπορεί να υπάρξει ροή μέσα από ένα συγκεκριμένο κάνναβο. Η μέθοδος αυτή επιλύει το πρόβλημα της ανάμειξης υλικού. Η μελέτη των Clukey et al, (2008) περιγράφει τη χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ρητής χρονικής ολοκλήρωσης LS-DYNA, που χρησιμοποιεί τις επιλύσεις των μεθόδων Lagrangian, Lagrangian/ Eulerian και Eulerian για την εξέταση της αλληλεπίδρασης υποθαλάσσιου αγωγού-πυθμένα.

Η σύγκριση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων έγινε σε σχέση με τα αποτελέσματα ενός εκτενούς ερευνητικού εργαστηριακού προγράμματος το οποίο εκτελέστηκε από την BP. Το πρόγραμμα αφορούσε την διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ επίπεδων σωληνωτών αγωγών και καολίνη. Μεγάλη ποικιλία πειραμάτων έλαβε χώρα είτε με έλεγχο των μετατοπίσεων είτε με έλεγχο των φορτίων. Το πείραμα το οποίο συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα των αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία ήταν πείραμα με έλεγχο των μετατοπίσεων και η διαδικασία φόρτισης που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα (2.2).

Μέρα 1 <sup>η</sup>	Μέρα 2 <sup>η</sup>	Μέρα 3 <sup>η</sup>	Μέρα 4 <sup>η</sup>
Διείσδυση σε	Κυκλική φόρτιση	Διείσδυση σε	Αργή επαναφορά
βάθος 0.28 D	στα 0.1 Hz	βάθος 0.50 D	προς τα πάνω
	-1±1χλστ για 1000 κύκλους φόρτισης		
Παραμονή σε	Παραμονή σε	Παραμονή σε	
βάθος 0.28 D	βάθος 0.28 D	βάθος 0.50D	

Πίνακας 2.2: Διαδικασία φόρτισης για πείραμα αλληλεπίδρασης μεταξύ αγωγού - εδάφους, (Clukey et al, 2008)

Όπως σημειώνεται στο σχήμα 2.42, ακόμα και για την περίπτωση ταλάντωσης με συγκριτικά χαμηλό εύρος (1mm), παρατηρείται σημαντική μείωση στην επιβαλλόμενη δύναμη αντίδρασης (ακαμψία) στον αγωγό. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη σύνθετη αλληλεπίδραση ανάμεσα στο έδαφος και στο νερό η οποία οδηγεί στην ανάμειξή τους που με τη σειρά της μειώνει τη διατμητική αντοχή του εδάφους.



Σχήμα 2.42: Μείωση δύναμης αντίδρασης στον αγωγό, (Clukey et al, 2008)

Η μοντελοποίηση του εδάφους, προκειμένου να προσομοιαστεί η συμπεριφορά του υπό συνθήκες φόρτισης, πραγματοποιήθηκε με τη θεώρηση κριτηρίου αστοχίας Mises. Για την εξασφάλιση, πρακτικά, ασυμπίεστης συμπεριφοράς από το νερό θεωρήθηκε δείκτης Poisson 0.499. Το μοντέλο που επιλέχθηκε χαρακτηρίζεται από μια ομάδα τεσσάρων επιφανειών διαρροής (τεσσάρων επιμέρους στρώσεων), με ελαστική-τελείως πλαστική συμπεριφορά, που ταυτόχρονα ανταποκρίνονται στη φόρτιση. Λεπτομέρειες για τις επιμέρους επιφάνειες διαρροής δίνονται στον πίνακα 2.3. Επιπρόσθετα, η τελική καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων για το υλικό (σχήμα 2.43) προκύπτει από την άθροιση των ακαμψιών των επιμέρους στρώσεων. Η χρησιμοποιηθείσα επιφάνεια διαρροής επιτρέπει αλλαγές στην ακαμψία του υλικού κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Είναι γεγονός πως θα μπορούσαν να προστεθούν επιπλέον επιφάνειες διαρροής στο μοντέλο, αλλά η χρήση τους θα επηρέαζε σε μεγάλο βαθμό τον υπολογιστικό φόρτο.

Στρώση	E / Su	Su (N/ m²)
1	100	400
2	150	800
3	250	1200
4	500	1600

Πίνακας 2.3: Στοιχεία μέτρου ελαστικότητας και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής επιφανειών διαρροής, (Clukey et al, 2008)

Παρουσίαση Μεθόδων Ανάλυσης Αλληλεπίδρασης Υποθαλάσσιων Αγωγών-Risers με τον Θαλάσσιο Πυθμένα



**Σχήμα 2.43**: Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων για το εδαφικό μοντέλο, (Clukey et al, 2008)

Οι συγγραφείς επισημαίνουν πως το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε προσομοιάζει την επίδραση της επιβαλλόμενης φόρτισης αλλά δεν έχει δυνατότητα επακριβούς εκτίμησης της επιρροής πολλαπλών κύκλων φόρτισης. Προτείνουν για τη βελτιστοποίησή του, την ενσωμάτωση στο μοντέλο των ακόλουθων παραμέτρων :

- Συνάρτηση μείωσης εδαφικής αντοχής σε σχέση με το πλήθος των κύκλων φόρτισης.
- Επίδραση ρυθμού παραμόρφωσης.
- Επίδραση ερπυστικών παραμορφώσεων.

Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, με τη χρήση του λογισμικού LS-DYNA, που εφάρμοσαν οι συγγραφείς περιελάμβανε πλήθος αναλύσεων μοντέλων υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης που αντιπροσώπευαν το πείραμα με ελεγχόμενη παραμόρφωση που παρουσιάστηκε παραπάνω.

Τα μοντέλα που χρησιμοποίησαν περιελάμβαναν το εδαφικό υλικό, το υπερκείμενο νερό και τη διατομή του αγωγού. Εκμεταλλευόμενοι την συμμετρία περί τον κατακόρυφο άξονα, χρησιμοποίησαν τη γεωμετρία του μισού μοντέλου (σχήμα 2.44). Το έδαφος αντιμετωπίστηκε σαν υλικό που υπακούει στην Eulerian μέθοδο, με ελαστική – τελείως πλαστική συμπεριφορά με κριτήριο διαρροής Mises. Το νερό αντιμετωπίστηκε σαν υλικό που υπακούει στην αυθαίρετη Lagrangian/ Eulerian μέθοδο και θεωρήθηκε πως εμφανίζει μηδενική διατμητική αντοχή, ενώ για την πυκνότητά του ελήφθη 1025 kgr/m<sup>3</sup>. Τέλος ο αγωγός, για όλες τις περιπτώσεις, προσομοιάστηκε ως ένα άκαμπτο σώμα με πυκνότητα 7800 kgr/m<sup>3</sup>.

Το πλάτος του εδαφικού πυθμένα ελήφθη ίσο με 3.5 διαμέτρους, το βάθος του πυθμένα ίσο με 4 διαμέτρους και το βάθος του νερού ίσο με 2.2 διαμέτρους. Η οριζόντια ανώτερη επιφάνεια του νερού θεωρήθηκε σαν όριο στο οποίο επιτρέπεται η ροή ύδατος, σε αντίθεση με το πέρας του εδαφικού πυθμένα αλλά και την κατακόρυφη υδάτινη και εδαφική επιφάνεια για τις οποίες απαγορεύτηκε η υδατική ροή.



Σχήμα 2.44: Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες για το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων, (Clukey et al, 2008)

Σε όλες τις αναλύσεις θεωρήθηκε ότι για την κίνηση της διατομής του αγωγού επιβάλλονται συγκεκριμένες μετακινήσεις σε αυτόν (μέθοδος ελέγχου των μετατοπίσεων). Η βαρυτική έλξη και η άνωση αγνοήθηκαν για όλες τις περιπτώσεις ανάλυσης, για να απομονωθεί και να εξεταστεί αποκλειστικά η απόκριση του εδάφους υπό το επιβαλλόμενο φορτίο του αγωγού. Από κάθε ανάλυση εκτιμήθηκε η δύναμη αντίδρασης από το έδαφος επί του αγωγού και έγινε αναγωγή της σε όλο το μήκος του. Επιπρόσθετα για τις περιπτώσεις που παρατηρήθηκε αποχωρισμός του αγωγού από τον πυθμένα, εξετάστηκε η κινηματική συμπεριφορά των σωματιδίων του νερού.

Στο σχήμα 2.45 παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων και συγκρίνονται με την καμπύλη φόρτισης της πειραματικής μελέτης.



**Σχήμα 2.45**: Καμπύλη φορτίου – μετατόπισης από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και σύγκριση με πειραματικά δεδομένα, (Clukey et al, 2008)

Η αρχική καμπύλη φόρτισης φαίνεται να συμφωνεί σε μεγάλο βαθμό με τα πειραματικά δεδομένα, εκτός από τα αρχικά στάδια φόρτισης όπου εμφανίζεται ελαφρώς πιο στιφρή συμπεριφορά. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην επιλογή των συγκεκριμένων λόγων Ε / Su, για τις επιφάνειες διαρροής. Κατά τη διάρκεια της ανοδικής κίνησης του αγωγού, το έδαφος αποφορτίζεται ελαστικά, γεγονός που αποτυπώνεται με μια απότομη καμπύλη αποφόρτισης. Όταν η δύναμη στον αγωγό μηδενιστεί τότε λαμβάνει χώρα ο αποχωρισμός αγωγού-πυθμένα. Κατά τη φάση της επαναφόρτισης, η καμπύλη είναι αρχικώς επίπεδη και στη συνέχεια ανέρχεται προς την αρχική καμπύλη φόρτισης, Σύμφωνα με τους ερευνητές, η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην πλαστική παραμόρφωση που υφίσταται το έδαφος κατά τον πρώτο κύκλο φόρτισης, γεγονός που επηρεάζει την απόκριση του εδάφους κατά τους μεταγενέστερους κύκλους φόρτισης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το σχήμα 2.46, στο οποίο απεικονίζεται η κινηματική συμπεριφορά σωματιδίων νερού (υπό τη μορφή διανυσμάτων ταχύτητας), κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης.



**Σχήμα 2.46**: Παράδειγμα κινηματικής συμπεριφοράς σωματιδίων νερού κατά τη διάρκεια κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης, (Clukey et al, 2008)

Κατά τη φάση φόρτισης και την καθοδική κίνηση του αγωγού σημειώνεται κινητοποίηση των σωματιδίων του νερού που υπόκεινται του αγωγού. Τα σωματίδια του νερού που βρίσκονται κάτω από τον αγωγό εξωθούνται προς τα πλάγια, προτού ο αγωγός και ο πυθμένας έρθουν σε επαφή. Κατά την ανοδική κίνηση του αγωγού στη φάση αποφόρτισης, το νερό γεμίζει την τάφρο που δημιουργήθηκε όταν αποχωρίστηκε το νερό και ο πυθμένας. Κατά τη διάρκεια της επαναφόρτισης, τα σωματίδια του νερού της τάφρου εξωθούνται και πάλι προς τα πλάγια, γεγονός που συμβάλλει στην άσκηση κατακόρυφης και πλευρικής φόρτισης στο υποκείμενο έδαφος. Αυτός ο κύκλος απόκρισης κατά τη διάρκεια φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης, εκτιμάται πως είναι η αιτία ανάμειξης νερού-εδάφους που δυνητικά μπορεί να δημιουργήσει την τάφρο στο σημείο επαφής αγωγού με τον πυθμένα.

#### 2.3.3 Μοντέλο αλληλεπίδρασης αγωγού – θαλάσσιου πυθμένα

Οι Aubeny et al (2006), βασιζόμενοι σε σχετικά εργαστηριακά αποτελέσματα και μαθηματικά μοντέλα, πρότειναν μια καμπύλη P-y (δύναμης αντίστασης στον αγωγό – κατακόρυφης διείσδυσης του αγωγού στον πυθμένα) για έδαφος το οποίο δεν υφίσταται μείωση των μηχανικών του χαρακτηριστικών. Η καμπύλη αυτή, εκφράζει σημαντικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε αγωγό και πυθμένα, όπως η ελαστική ανύψωση του αγωγού, ο αποχωρισμός αγωγού-εδάφους, η επαφή εκ νέου αγωγού και εδάφους και η πλαστική διείσδυση.

Κεφάλαιο 2°



**Σχήμα 2.47**: Καμπύλη Ρ-y για έδαφος χωρίς μείωση των μηχανικών του χαρακτηριστικών, (Aubeny et al, 2006)

Η καμπύλη των Aubeny et al (2006) (σχήμα 2.47), μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερα διαφορετικά τμήματα. Το πρώτο τμήμα αποδίδει την αρχική φόρτιση (σημείο 0 έως 1) και την διείσδυση του αγωγού σε παρθένο έδαφος (στο οποίο δεν έχει διεισδύσει αγωγός στο παρελθόν). Σημαντική παρατήρηση των συγγραφέων αποτελεί πως η αρχική διείσδυση βάσει πρόβλεψης του μοντέλου είναι συνήθως αρκετά μικρότερη από μετρημένες διεισδύσεις αγωγών σε πραγματικές συνθήκες, όπου η τάξη μεγέθους της διείσδυσης μερικούς μήνες μετά την εγκατάσταση των αγωγών ήταν τέσσερεις – πέντε διάμετροι αγωγού.

Το δεύτερο και το τρίτο τμήμα της καμπύλης, αντιστοιχούν στη φάση αποφόρτισης-ανύψωσης του αγωγού (σημείο 1 έως 2) και στη φάση αποχωρισμού αγωγού-πυθμένα (σημείο 2 έως 3). Παρατηρείται πως καθώς ο αγωγός ανυψώνεται, το εύρος της εδαφικής αντίστασης στον αγωγό, μειώνεται ταχύτερα απ' ότι αυξανόταν κατά τη φάση της αρχικής διείσδυσης. Όταν η εδαφική αντίσταση μηδενιστεί, ενδέχεται να εμφανιστεί δύναμη «εισρόφησης» από το έδαφος προς τον αγωγό. Η μέγιστη δύναμη «εισρόφησης» (σημείο 2) είναι σημαντικά μικρότερη από την μέγιστη δύναμη αντίστασης (σημείο 1). Μετά το σημείο 2, η δύναμη «εισρόφησης» μειώνεται και μηδενίζεται εντελώς όταν ο αγωγός αποχωριστεί από το έδαφος.

Το τέταρτο τμήμα της καμπύλης αντιπροσωπεύει τη φάση επαναφόρτισης του αγωγού. Καθώς ο αγωγός διεισδύει και πάλι στο έδαφος, θα ακολουθηθεί η διαδρομή από το σημείο 3 προς το σημείο 1, η οποία είναι σαφώς πιο απότομη από διαδρομή της αρχικής φόρτισης. Οι συγγραφείς αναφέρουν πως εφόσον ο αγωγός συνεχίζει να υφίσταται τον ίδιο περιοδικό κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης και υπό τη θεώρηση ενός εδάφους για το οποίο δεν παρατηρείται μείωση των μηχανικών του χαρακτηριστικών, τότε η συμπεριφορά του θα επαναλαμβάνει τον βρόχο που περικλείεται από το δεύτερο, τρίτο και τέταρτο τμήμα της καμπύλης (σχήμα 2.48).



**Σχήμα 2.48**: Καμπύλη P-y για επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισηςεπαναφόρτισης για έδαφος χωρίς μείωση των μηχανικών του χαρακτηριστικών, (Aubeny et al, 2006)

# 2.3.4 Επιρροή του φαινομένου δημιουργίας τάφρου στη δυναμική συμπεριφορά ενός μεταλλικού αλυσοειδούς αγωγού

Η μελέτη του Nakhaee et al (2009), ασχολείται με την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε ένα μεταλλικό αλυσοειδή αγωγό και το θαλάσσιο πυθμένα. Εξετάζει τη χρήση καμπύλης P-y (σχέση δύναμης αντίστασης στον αγωγό-κατακόρυφης διείσδυσης αγωγού στον πυθμένα) για την προσομοίωση της εδαφικής παραμόρφωσης κατά την αλληλεπίδρασή του με τον αγωγό. Όσον αφορά το μοντέλο του πυθμένα θεωρεί δύο περιπτώσεις: , εδαφικό σχηματισμό για τον οποίο δεν παρατηρείται μείωση των μηχανικών του χαρακτηριστικών (βασιζόμενο στα μοντέλα των Aubeny et al (2006, 2009) και εδαφικό σχηματισμό για τον οποίο λαμβάνεται υπόψη η μείωση των μηχανικών του χαρακτηριστικών λόγω των επαναλαμβανόμενων κύκλων φόρτισης.

Αποτελεί κοινό τόπο στην επιστημονική κοινότητα πως η αστοχία λόγω κόπωσης σε ένα υποθαλάσσιο αγωγό, οφείλεται κατά κύριο λόγο στο υψηλό εύρος των επιβαλλόμενων καμπτικών ροπών κατά μήκος του. Ο βασικός μηχανισμός στον οποίο οφείλονται οι καμπτικές ροπές που καταπονούν τον αγωγό δεν είναι άλλος από την περιοδική κίνηση ταλάντωσης του αγωγού. Η μελέτη των Bhat et al (2004), έχει δείξει πως τα πλέον ευαίσθητα σημεία, για την αστοχία λόγω κόπωσης, σε ένα αγωγό είναι κοντά στο σημείο σύνδεσής του με την πλωτή πλατφόρμα και στο σημείο επαφής του με τον θαλάσσιο πυθμένα.

Βασικό σημείο της μελέτης των Nakhaee et al. (2009) αποτελεί η θεώρηση της δημιουργίας τάφρου στο σημείο επαφής αγωγού με τον πυθμένα και εν συνεχεία η επιρροή πλέον της δημιουργηθείσας τάφρου στη διακύμανση των καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού. Οι συγγραφείς εκτιμούν πως η πιθανή συνεισφορά του μηχανισμού δημιουργίας τάφρου στη μείωση των επιβαλλόμενων καμπτικών ροπών στον αγωγό, αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για τον ασφαλέστερο σχεδιασμό του. Δικαιολογούν τον παραπάνω ισχυρισμό λαμβάνοντας υπόψη την ουσιαστική σχέση που υπάρχει ανάμεσα στο υψηλό εύρος επιβαλλόμενων καμπτικών ροπών σε ένα αγωγό και στην πιθανότητα αστοχίας του λόγω κόπωσης.

Για τη μελέτη των Nakhaee et al. (2009), θεωρήθηκε, για απλούστευση του προβλήματος, πως η ταλάντωση στο σημείο ανάρτησης του αγωγού είναι περιοδική και με δεδομένο το εύρος της, το προκύπτον εύρος επιβαλλόμενων τάσεων στον αγωγό θα παραμένει σταθερό.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε από τους συγγραφείς ήταν το CABLE3D. Με το λογισμικό αυτό, η αντίσταση του θαλάσσιου πυθμένα ως προς τον αγωγό, μοντελοποιείται με σύστημα γραμμικών ελατηρίων με αποσβεστήρα. Η γραμμική ακαμψία των ελατηρίων εκλέχθηκε έτσι ώστε η διείσδυση το αγωγού στον πυθμένα να είναι ίση με την εξωτερική ακτίνα του αγωγού. Ο συντελεστής απόσβεσης ελήφθη ίσος με τον κρίσιμο συντελεστή απόσβεσης  $C_c = 2\sqrt{S_\rho/R}$ , με S το υπό άνωση ειδικό βάρος του αγωγού ανά μέτρο μήκους, ρ την πυκνότητα του αγωγού ανά μέτρο μήκους και R την εξωτερική ακτίνα του αγωγού.

Δύο τυπικοί μεταλλικοί αλυσοειδείς αγωγοί που είχαν χρησιμοποιηθεί και σε προηγούμενες μελέτες (Pesce et al, 2006 και Xu et al, 2006), επιλέχθηκαν για την προσομοίωση. Τα βασικά τους χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον πίνακα 2.4.

Η διατμητική αντοχή του εδάφους, θεωρείται πως αυξάνεται γραμμικά σε συνάρτηση με το βάθος, με βάση τη σχέση  $S = S_0 + S_g y$ , όπου S είναι η διατμητική αντοχή του εδάφους στο βάθος y από την επιφάνεια του εδάφους και όπου  $S_g$  ο ρυθμός αύξησης της διατμητικής αντοχής με το βάθος. Χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά ζεύγη διατμητικής αντοχής – ρυθμού αύξησης διατμητικής αντοχής, τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 2.5. Οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν τυπικά εύρη τιμών διατμητικής αντοχής πυθμένα στον κόλπο του Μεξικό.

Ιδιότητα	Μονάδα	Αγωγός 1	Αγωγός 2
Μήκος	m	5000	8000
Βάθος	m	1800	3000
Πάχος τοιχωμάτων	mm	19.05	25.5
Εσωτερική διάμετρος	m	0.1651	0.355
Εξωτερική διάμετρος	m	0.2032	0.406
Αξονική ακαμψία	kN	2.314 10e6	6.402 10e6
Καμπτική ακαμψία	kN m <sup>2</sup>	9915	116360
Υπό άνωση ειδικό βάρος	kN / m	0.727	1.894
Μάζα	Kg / m	108	238.6
Εφελκυσμός στο σημείο ανάρτησης	kN	1950	4750

Πίνακας 2.4: Βασικά χαρακτηριστικά μεταλλικών αλυσοειδών αγωγών, (Nakhaee et al, 2009)

Κατάταξη Εδάφους	Su (kPa)	Sg (kPa/ m)
Κατώτερο εύρος	1.2	0.8
Μεσαίο εύρος	2.6	1.25
Ανώτερο εύρος	3.8	2.0

Πίνακας 2.5: Τυπικά εύρη τιμών διατμητικής αντοχής πυθμένα, (Nakhaee et al, 2009)

#### <u>Προσέγγιση καμπύλης P-y για έδαφος στο οποίο δεν μειώνονται τα μηχανικά</u> χαρακτηριστικά

Οι συγγραφείς θεώρησαν πως στο ανώτερο σημείο του αγωγού, στο σημείο πρόσδεσης, επιβάλλεται περιοδική ταλάντωση εξαιτίας της πλωτής πλατφόρμας, που με τη σειρά της οδηγεί σε ανύψωση ή υποβιβασμό αντίστοιχα του σημείου πρόσδεσης του αγωγού.

Εξετάστηκε η προσέγγιση της καμπύλης Ρ-ν με το μοντέλο ελατηρίουαποσβεστήρα, με τη χρήση ισοδύναμης γραμμικής ή μη γραμμικής ακαμψίας για το ελατήριο και συντελεστή απόσβεσης. Η ισοδύναμη γραμμική ή μη γραμμική ακαμψία, προσεγγίζεται από την κεντρική γραμμή του βρόχου στην καμπύλη P-y, που συνδέει τα σημεία 1 και 2 του μοντέλου. Κατά συνέπεια η ισοδύναμη ακαμψία επιτρέπει την ανάπτυξη του φαινομένου της «εισρόφησης» κατά τη διάρκεια της ανύψωσης του αγωγού. Από την άλλη, ο συντελεστής απόσβεσης, εκτιμάται με την απαίτηση εξίσωσης την ενέργειας που καταναλώνεται από το μοντέλο ελατηρίου-αποσβεστήρα και της απώλειας ενέργειας που αντιπροσωπεύεται από το εμβαδό του βρόχου στην καμπύλη P-y.

Για την εξέταση του κατά πόσο το απλοποιημένο μοντέλο του ελατηρίουαποσβεστήρα μπορεί να αντιπροσωπεύσει την καμπύλη P-y, έλαβε χώρα προσομοίωση της συμπεριφοράς των δύο αγωγών, με την απαίτηση περιοδικής ανύψωσης των σημείων ανάρτησής τους κάθε 12 δευτερόλεπτα. Θεωρήθηκαν τέσσερεις διαφορετικές τιμές εύρους ανύψωσης που κυμάνθηκαν ανάμεσα σε 0.5m – 5.0m, προκειμένου να εξεταστεί η επιρροή του εύρους ανύψωσης στα αποτελέσματα. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις εκδόσεις του λογισμικού CABLE 3D για τις αναλύσεις. Η πρώτη έκδοση ακολουθεί ακριβώς την καμπύλη P-y, ενώ οι άλλες δύο χρησιμοποιούν την ίδια ισοδύναμη ακαμψία αλλά διαφορετικούς συντελεστές απόσβεσης. Για ένα αγωγό υποκείμενο σε φόρτιση ταλάντωσης, οι σημαντικοί παράμετροι για τον ασφαλή σχεδιασμό του είναι η εφελκυστική δύναμη στο σημείο πρόσδεσης, η αλλαγή στο μήκος ανάρτησης και η διακύμανση της καμπτικής ροπής στην περιοχή του σημείου επαφής με τον πυθμένα. Τα βασικά συμπεράσματα των μελετητών δίνονται στη συνέχεια :

- Η μέγιστη διείσδυση στον θαλάσσιο πυθμένα αυξάνεται ελαφρώς με την αύξηση του εύρους ανύψωσης στο σημείο πρόσδεσης του αγωγού.
- Η αύξηση του συντελεστή απόσβεσης συνεπάγεται αύξηση της μέγιστης διείσδυσης.
- Η διακύμανση των καμπτικών ροπών γίνεται μέγιστη στην περιοχή του σημείου επαφής αγωγού-πυθμένα και μάλιστα όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ανύψωσης τόσο εντονότερη γίνεται η διακύμανση.

## <u>Προσέγγιση καμπύλης Ρ-γ για έδαφος στο οποίο μειώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά</u>

Το μοντέλο που περιγράφηκε στις προηγούμενες σελίδες, αμελεί τα φαινόμενα πλαστικής παραμόρφωσης που οφείλονται στις επαναλαμβανόμενες φορτίσεις στον θαλάσσιο πυθμένα και θεωρεί πως ο αγωγός ακολουθεί συνεχώς τον ίδιο βρόχο στην καμπύλη P-y, με την προϋπόθεση πως η φόρτιση παραμένει σταθερή. Στην πραγματικότητα όμως μια τέτοια μορφή φόρτισης μειώνει τα μηχανικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Μετά από πολλούς κύκλους φόρτισηςαποφόρτισης-επαναφόρτισης, λαμβάνει χώρα πλαστική παραμόρφωση του εδάφους. Το γεγονός αυτό εξηγεί την ασυμφωνία μεταξύ στην εκτιμώμενη τιμή της διείσδυσης ενός αγωγού στο θαλάσσιο πυθμένα από υπολογιστικά μοντέλα και στην πραγματική μετρούμενη τιμή. Επιπρόσθετα, αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής φόρτισης, καταδεικνύουν πως η ακαμψία των συνεκτικών εδαφών μειώνεται με την αύξηση των κύκλων φόρτισης. Ο μηχανισμός μείωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών περιλαμβάνει την αναμόχλευση του εδάφους σε κάθε ανοδική και καθοδική κίνηση του αγωγού που με τη σειρά της οδηγεί σε μείωση της ακαμψίας και της αντοχής του εδάφους. Η βασική εξήγηση για τον παραπάνω μηχανισμό είναι πως τη στιγμή που ο αγωγός κινείται προς το έδαφος μετά τον αποχωρισμό του από αυτό, το υποκείμενο νερό ωθείται προς τα κάτω και αναμιγνύεται με το έδαφος προκαλώντας διάβρωση του υποβάθρου.

Το μοντέλο μείωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους που χρησιμοποιείται στη μελέτη των Nakhaee et al (2009), αμελεί το παραπάνω φαινόμενο, καθώς επίσης και την επαναστερεοποίηση του εδάφους και την εδαφική διάβρωση. Παρολ' αυτά, λαμβάνει υπόψη του την πλαστική παραμόρφωση και κατά συνέπεια το μηχανισμό δημιουργίας τάφρου στο θαλάσσιο πυθμένα.

Οι συγγραφείς αναφέρουν πως η τάφρος που δημιουργείται στο σημείο επαφής αγωγού-πυθμένα συμβάλλει στην απάλυνση της καμπυλότητας του αγωγού και κατά συνέπεια μειώνει το μέγιστο ρυθμό αλλαγής στην επιβαλλόμενη καμπτική ροπή. Για την εκτίμηση του μηχανισμού δημιουργίας τάφρου, στον θαλάσσιο πυθμένα, από αγωγό υποβαλλόμενο σε κυκλική φόρτιση, οι Aubeny et al (2008), εκτέλεσαν εργαστηριακά πειράματα και κατέληξαν σε μια μορφή της καμπύλης Py, για την οποία λαμβάνεται υπόψη ο μηχανισμός δημιουργίας τάφρου. Η καμπύλη αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 2.49.



**Σχήμα 2.49**: Καμπύλη P-y για επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισηςεπαναφόρτισης για έδαφος με μείωση των μηχανικών του χαρακτηριστικών, (Aubeny et al, 2008)

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, κάθε ανεξάρτητος βρόχος της καμπύλης P-y, είναι παρόμοιος με τον αντίστοιχο βρόχο της καμπύλης P-y για έδαφος χωρίς μείωση μηχανικών χαρακτηριστικών (σχήμα 2.48), εκτός από το ότι λαμβάνει χώρα συνεχώς παραμόρφωση του εδάφους. Δηλαδή, η διείσδυση σταδιακά αυξάνεται μετά από κάθε κύκλο φόρτισης και οι βρόχοι μετατίθενται οριζοντίως προς τα δεξιά. Η πλαστική παραμόρφωση στον πυθμένα μετά από ένα κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης είναι πάρα πολύ μικρή για να διακριθεί. Η συσσώρευση όμως πλαστικής παραμόρφωσης μετά από πολλούς κύκλους φόρτισης, είναι σημαντική και δεν μπορεί να αμεληθεί. Οι Aubeny et al (2008), έχουν δώσει εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση της τιμής της διείσδυσης μετά από πολλούς κύκλους φόρτισης.

Οι Nakhaee et al (2009), επέκτειναν τις έρευνες των προηγούμενων ερευνητών ορίζοντας αλλαγές στο υπολογιστικό πρόγραμμα CABLE 3D, προκειμένου αυτό να επιτρέπει τη δημιουργία τάφρου στο θαλάσσιο πυθμένα. Η πρώτη αλλαγή που ενσωμάτωσαν στο λογισμικό ήταν η προσομοίωση κάθε ανεξάρτητου βρόχου στην καμπύλη P-y, με ένα ελατήριο με ισοδύναμη γραμμική ή μη γραμμική ακαμψία και με ένα συντελεστή απόσβεσης, όπως ακριβώς είχε γίνει και στο έδαφος χωρίς μείωση μηχανικών χαρακτηριστικών. Βέβαια απαιτήθηκε οι παραπάνω συντελεστές για όλους του βρόγχους των κύκλων φόρτισης, να είναι ανεξάρτητοι από το χρόνο. Η δεύτερη αλλαγή που επέβαλλαν ήταν η εξάρτηση της πλαστικής παραμόρφωσης του πυθμένα σε ένα μεταγενέστερο χρονικό βήμα από το πλήθος των κύκλων φόρτισης που έχουν εκτελεστεί προγενέστερα. Για

την απλοποίηση των διαδικασιών και επειδή δεν σημειώνονται συνήθως σημαντικές αλλαγές για μικρό πλήθος κύκλων, η μέτρηση του βάθους της τάφρου γινόταν κάθε 100 κύκλους φόρτισης. Εν συνεχεία, η καμπτική ροπή, η εφελκυστική δύναμη στον αγωγό και η διακύμανση των καμπτικών ροπών υπολογίζονται με βάση την επικαιροποιημένη γεωμετρία της τάφρου.

Οι δύο αγωγοί, τα χαρακτηριστικά των οποίων αναφέρονται στον πίνακα 2.4, χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση με την επικαιροποιημένη έκδοση του λογισμικού, που λαμβάνει υπόψη της έδαφος με μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά.

Στα σχήματα 2.50 και 2.51, σημειώνονται αντίστοιχα τη σταδιακή αύξηση του βάθους της τάφρου (με την αύξηση του χρόνου ή κατ' αντιστοιχία των κύκλων φόρτισης) που δημιουργείται κάτω από τον αγωγό 1 και 2 αντίστοιχα. Και για τις δύο περιπτώσεις, η επιβαλλόμενη κυκλική φόρτιση στον πυθμένα οφείλεται σε περιοδική ανύψωση του σημείο ανάρτησης του αγωγού, με πλάτος ανύψωσης 1m και περίοδο 12 δευτερόλεπτα, ενώ ο πυθμένας έχει διατμητική αντοχή που ανήκει στο μεσαίο εύρος του πίνακα 2.5.



Σχήμα 2.50: Δημιουργία τάφρου υπό τον αγωγό 1, (Nakhee et al, 2009)

Κεφάλαιο 2°



Σχήμα 2.51: Δημιουργία τάφρου υπό τον αγωγό 2, (Nakhee et al, 2009)

Οι μελετητές παρατήρησαν, πως αρχικά ο ρυθμός δημιουργίας της τάφρου είναι αρκετά υψηλός αλλά μετά από αρκετούς κύκλους φόρτισης μειώνεται. Ειδικά μετά από 180 ώρες (αντιστοιχία σε 54000 κύκλους φόρτισης) και έως τις 300 ώρες (αντιστοιχία σε 90000 κύκλους), ο ρυθμός μειώνεται αισθητά αλλά η δημιουργία τάφρου συνεχίζει να εξελίσσεται. Επιπρόσθετα παρατηρούν πως κατά το ξεκίνημα της κυκλικής φόρτισης η θέση της τάφρου βρίσκεται περί το κέντρο του σημείου-τμήματος επαφής αγωγού με πυθμένα, ενώ μετά το πέρας 100 ωρών κυκλικής φόρτισης λαμβάνει χώρα μετακίνηση προς το σημείο ανάρτησης του αγωγού. Το βάθος της τάφρου υπό τον αγωγό 2 είναι μεγαλύτερο από την αντίστοιχη τάφρο υπό τον αγωγό 1, γεγονός που αποδίδεται στο μεγαλύτερο υπό άνωση ειδικό βάρος του αγωγού 2. Ο ρυθμός δημιουργίας της τάφρου ανάμεσα σε δύο συνεχόμενους κύκλους φόρτισης, είναι εξαιρετικά μικρός (μικρότερος από 0.002mm ανά κύκλο φόρτισης για τον αγωγό 1 και μικρότερος από 0.005mm ανά κύκλο φόρτισης η δημιουργία της τάφρου είναι εμφανής.

Τα σχήματα 2.52 και 2.53 απεικονίζουν τη μέγιστη διακύμανση της καμπτικής ροπής στην περιοχή του σημείου επαφής αγωγού με πυθμένα (για τους αγωγούς 1 και 2 αντίστοιχα) σαν συνάρτηση του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο έχουν υποστεί περιοδική φόρτιση (ανύψωση του σημείου ανάρτησής τους).

Κεφάλαιο 2°

Παρουσίαση Μεθόδων Ανάλυσης Αλληλεπίδρασης Υποθαλάσσιων Αγωγών-Risers με τον Θαλάσσιο Πυθμένα



**Σχήμα 2.52**: Μέγιστη διακύμανση καμπτικής ροπής στο σημείο επαφής αγωγούεδάφους, υπό τον αγωγό 1, (Nakhee et al, 2009)



**Σχήμα 2.53**: Μέγιστη διακύμανση καμπτικής ροπής στο σημείο επαφής αγωγούεδάφους, υπό τον αγωγό 2, (Nakhee et al, 2009)

Από την επισκόπηση και των δύο σχημάτων γίνεται αντιληπτό πως η μέγιστη διακύμανση καμπτικής ροπής μειώνεται χάρη στο φαινόμενο δημιουργίας της τάφρου. Η μέγιστη διακύμανση δεν λαμβάνει χώρα στο ίδιο σημείο κατά τη διάρκεια δημιουργίας τάφρου. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.54, μπορεί να

παρατηρηθεί σε διαφορετικούς κόμβους μείωση ή αύξηση της διακύμανσης της καμπτικής ροπής κατά τη διάρκεια δημιουργίας τάφρου. Για παράδειγμα στο σχήμα 2.26 όπου υπό τον αγωγό 1 και μετά από κύκλο φόρτισης 140 ωρών, η θέση του σημείου με τη μέγιστη διακύμανση καμπτικής ροπής μετακινήθηκε από τον κόμβο 34 στον κόμβο 33. Οι συγγραφείς πάντως επισημαίνουν πως η μετακίνηση του σημείου στο οποίο υπάρχει η μέγιστη διακύμανση καμπτικής ροπής σχετίζεται με τη μεταβολή των διαστάσεων (αύξηση πλάτους και βάθους) της τάφρου.



**Σχήμα 2.54**: Διακύμανση καμπτικής ροπής σε διάφορους κόμβους, υπό τον αγωγό 1, (Nakhee et al, 2009)

Για την εκτίμηση της επιρροής της εδαφικής αντοχής στη μέγιστη διακύμανση της καμπτικής ροπής, εκτελέστηκαν αναλύσεις για τον αγωγό 2 με τη θεώρηση διαφορετικού προφίλ εδαφικής αντοχής για κάθε περίπτωση. Χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις διαφορετικές περιπτώσεις εδαφικής αντοχής, όπως ακριβώς περιγράφονται στον πίνακα 2.4. Για το ίδιο επιβαλλόμενο εύρος ανύψωσης (0.5m) και για την ίδια περίοδο κυκλικής φόρτισης (12 δευτερόλεπτα) στο σημείο ανάρτησης του αγωγού, βρέθηκε ότι η βαθύτερη τάφρος εκσκάφθηκε στο έδαφος με το χαμηλότερο εύρος ακαμψίας. Όπως αναμενόταν, η βαθύτερη τάφρος έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη μείωση στη διακύμανση της καμπτικής ροπής.

Στο σχήμα 2.55, μπορεί κανείς να παρατηρήσει πως μετά από 480 ώρες κυκλικής φόρτισης, η μείωση στη μέγιστη διακύμανση της καμπτικής ροπής μπορεί να φτάσει στο 35%, 20% και 14% σε σχέση με την αρχική της τιμή, για εδάφη με το κατώτερο, το μεσαίο και το ανώτερο εύρος εδαφικής ακαμψίας αντίστοιχα.



**Σχήμα 2.55**: Μέγιστη διακύμανση καμπτικής ροπής για διαφορετικά προφίλ εδαφικής αντοχής για τον αγωγό 2, (Nakhee et al, 2009)

Επιπρόσθετα οι μελετητές εξέτασαν την επιρροή του εύρους της επιβαλλόμενης ανύψωσης στο ρυθμό μείωσης της μέγιστης διακύμανσης της καμπτικής ροπής στον αγωγό. Θεώρησαν σταθερή την εδαφική αντοχή του πυθμένα αλλά και τη χρονική διάρκεια της περιόδου φόρτισης και παρουσίασαν διάγραμμα μείωσης της μέγιστης διακύμανσης της καμπτικής ροπής κανονικοποιημένη με την αντίστοιχη αρχική τιμή (κατά την έναρξη του φαινομένου εκσκαφής της τάφρου) σε συνάρτηση με το χρόνο. Από την επισκόπηση του σχήματος 2.56, μπορεί κανείς να παρατηρήσει πως η αύξηση του εύρους της επιβαλλόμενης ανύψωσης οδηγεί σε μείωση του ρυθμού μείωσης της μέγιστης διακύμανσης της καμπτικής ροπής στον αγωγό 2.



**Σχήμα 2.56**: Μείωση στη μέγιστη διακύμανση καμπτικής ροπής για διαφορετικό εύρος επιβαλλόμενης ανύψωσης του σημείου ανάρτησης του αγωγού 2, (Nakhee et al, 2009)

#### 2.3.5 Δημιουργία εσοχής (τάφρου) στο σημείο επαφής αγωγού

#### και θαλάσσιου πυθμένα

Η μελέτη του Palmer (2008) διαπραγματεύεται τη δημιουργία εσοχής (τάφρου) στο σημείο επαφής αγωγού και θαλάσσιου πυθμένα. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στην περίπτωση ενός μεταλλικού αλυσοειδούς αγωγού. Για την περίπτωση που ο θαλάσσιος πυθμένας προσομοιάζεται ως άκαμπτο υλικό έχει δοθεί αναλυτική λύση για το πρόβλημα. Ο Palmer επεκτείνεται στην ανάλυση περίπτωσης όπου ο πυθμένας προσομοιάζεται με υλικό με άκαμπτη-πλαστική συμπεριφορά.

Στο σημείο επαφής ενός υποθαλάσσιου αγωγού με τον πυθμένα, η δύναμη ανά μέτρο μήκους ανάμεσα στο σωληνωτό αγωγό και τον πυθμένα είναι σαφώς μεγαλύτερη από το υπό άνωση ειδικό βάρος του αγωγού. Αυτή η πρόσθετη δύναμη προκαλεί διείσδυση του αγωγού εντός του πυθμένα και προκαλεί μια τάφρο η οποία είναι βαθύτερη απ' ότι θα ήταν αν η μοναδική δύναμη που δρούσε στον αγωγό ήταν το υπό άνωση ειδικό του βάρος. Στο σχήμα 2.57, παρουσιάζονται τρεις περιπτώσεις αγωγού που τοποθετείται επί του θαλάσσιου πυθμένα και οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις στον αγωγό.



**Σχήμα 2.57**: Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης αγωγού-πυθμένα στο σημείο επαφής, (Palmer, 2008)

Στην περίπτωση α) όπου ο αγωγός τοποθετείται επί ενός άκαμπτου πυθμένα θεωρείται πως ασκείται στο σημείο επαφής τους μια συγκεντρωμένη δύναμη μεγάλου μέτρου. Πιο συγκεκριμένα, ο Palmer αναφέρει πως για αγωγό διαμέτρου 0.762m, με καμπτική ακαμψία 650 MN m<sup>2</sup>, με υπό άνωση ειδικό βάρος 1.1 kN/m, και οριζόντια συνιστώσα της εφελκυστικής δύναμης στο σημείο ανάρτησης ίση με 350 kN, η προκύπτουσα κατακόρυφη δύναμη στο σημείο επαφής αγωγούπυθμένα είναι της τάξης των 47.4 kN. Στην πραγματικότητα όμως ο πυθμένας θα παραμορφωθεί υπό την επίδραση ενός τόσο μεγάλου φορτίου όπως αυτό που προαναφέρθηκε. Η παραμόρφωση του πυθμένα ουσιαστικά μεταβάλλει τη δύναμη και οδηγεί σε μια κατανομή δύναμης επί του αγωγού (περίπτωση β, άκαμπτη-πλαστική συμπεριφορά πυθμένα). Η προκύπτουσα παραμόρφωση σε αυτή την περίπτωση είναι αρκετά μεγαλύτερη από την παραμόρφωση που λάμβανε χώρα μόνο υπό το ίδιο βάρος του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον Palmer, αν θεωρηθεί πως η αντίδραση του εδάφους ισοκατανέμεται στον αγωγό, υπό τη μορφή μιας ομοιόμορφης κατανομής, το πρόσθετο κατακόρυφο φορτίο του αγωγού θα προέκυπτε περί τα 9.5 kN/m, που είναι πολύ μεγαλύτερο από το υπό άνωση ειδικό του βάρος. Η συμπεριφορά αυτή λαμβάνεται ορισμένες φορές υπόψη κατά το σχεδιασμό υποθαλάσσιων αγωγών, με τη χρήση ενός συντελεστή «σημείου επαφής» (με εύρος 2 έως 3), με τον οποίο πολλαπλασιάζεται το υπό άνωση ειδικό βάρος του αγωγού. Ο συντελεστής αυτός αγνοεί τις παραμέτρους απόθεσης και ειδικότερα τον εφελκυσμό του αγωγού, την καμπτική του ακαμψία και την αντοχή του θαλάσσιου πυθμένα. Οι ερευνητές προσεγγίζουν την αλληλεπίδραση αγωγού-πυθμένα με τη θεώρηση ελαστικής-πλαστικής συμπεριφοράς του πυθμένα (περίπτωση γ).

#### Επαφή αγωγού με άκαμπτο πυθμένα

Το σχήμα 2.58 απεικονίζει την περιοχή κοντά στο σημείο επαφής του αγωγού με τον πυθμένα, για την περίπτωση άκαμπτου και οριζόντιου υποβάθρου. Το ύψος πάνω από τον πυθμένα σημειώνεται ως Υ και μπορεί να δοθεί σε αδιάστατη μορφή με τη σχέση  $y = \frac{Y}{U/w}$ , όπου U, η οριζόντια συνιστώσα της εφελκυστικής δύναμης που ασκείται από την πλωτή πλατφόρμα και w, το υπό άνωση ειδικό βάρος ανά μέτρο μήκους του αγωγού. Εξετάζεται η δισδιάστατη περίπτωση κατά την οποία ο αναρτημένος αγωγός κείτεται σε κατακόρυφο επίπεδο, ο αγωγός τοποθετείται από εγκάρσιους κυματισμούς (κάθετους στο επίπεδο του σχήματος 2.58). Η αρχή των αξόνων θεωρείται στο σημείο στο οποίο έρχεται σε επαφή ο αγωγός με τον πυθμένα.



**Σχήμα 2.58**: Περιοχή σημείου επαφής αγωγού-πυθμένα για την περίπτωση άκαμπτου πυθμένα, (Palmer, 2008)

Οι μαθηματικές επιλύσεις για την εύρεση του βάθους της τάφρου, καταλήγουν στη γενική σχέση  $y = (\frac{1}{2})s^2 + c_1s + c_2 + c_3e^{\left(\frac{s}{\varepsilon}\right)} + c_4e^{\left(-\frac{s}{\varepsilon}\right)}$ , όπου  $s = \frac{S}{U/W}$  (S, η απόσταση μετρούμενη κατά μήκος του αγωγού),  $\varepsilon = \sqrt{\frac{Fw^2}{U^3}}$  (F, η καμπτική

ακαμψία του αγωγού) και c1, c2, c3 και c4 είναι σταθερές ολοκλήρωσης.

Λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες συνοριακές συνθήκες του προβλήματος η παραπάνω σχέση εκφυλίζεται σε μια αρκετά απλούστερη με την ακόλουθη

μορφή 
$$y = (\frac{1}{2})s^2 - \varepsilon s + \varepsilon^2 - \varepsilon^2 e^{\left(-\frac{s}{\varepsilon}\right)}.$$

#### Επαφή αγωγού με άκαμπτο-πλαστικό πυθμένα

Το σχήμα 2.59 απεικονίζει την περιοχή κοντά στο σημείο επαφής του αγωγού με τον πυθμένα, για την περίπτωση προσομοίωσης του πυθμένα με άκαμπτοπλαστικό υλικό. Σε αυτή την περίπτωση η αρχή των αξόνων θεωρείται στο σημείο Ο, από το οποίο και μετά ο αγωγός γίνεται πλέον οριζόντιος και στο οποίο παρατηρείται το μέγιστο βάθος της τάφρου.



**Σχήμα 2.59**: Περιοχή σημείου επαφής αγωγού-πυθμένα για την περίπτωση άκαμπτουπλαστικού πυθμένα, (Palmer, 2008)

Η απόσταση κατά μήκος του αγωγού, από το σημείο Ο προς το σημείο Τ ορίζεται ως Ζ. Η απόσταση κανονικοποιείται ως προς το πηλίκο U/w και προκύπτει η αδιάστατη παράμετρος  $z = \frac{Z}{U/w}$ . Ανάμεσα στα σημεία Ο και Τ, λαμβάνει χώρα προοδευτικά η δημιουργία τάφρου από τον αγωγό και η δύναμη ανά μέτρο μήκους αγωγού ανάμεσα στον αγωγό και τον πυθμένα καλείται δύναμη αντίστασης στη διείσδυση και συμβολίζεται με r. Η δύναμη αυτή είναι σαφώς μεγαλύτερη από το υπό άνωση ειδικό βάρος του αγωγού γιατί σε αντίθετη περίπτωση το έδαφος δεν θα μπορούσε να στηρίξει τον αγωγό. Στο σημείο Ο, η διείσδυση φθάνει τη μέγιστη τιμή της, ενώ στα αριστερά του σημείου Ο, η δύναμη

ανάμεσα στον αγωγό και τον πυθμένα είναι ίδια με το υπό άνωση ειδικό βάρος του αγωγού.

Οι μαθηματικές επιλύσεις για την εύρεση του βάθους της τάφρου, καταλήγουν στη γενική σχέση  $Y(Z) = -(\frac{1}{2})\frac{Fw}{U^2}(-\mu(\ln(1+\frac{1}{\mu}))^2 + \frac{1}{1+\mu})$ όπου  $\mu = \frac{r}{w} - 1$ , ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι έχουν οριστεί για την περίπτωση επαφής αγωγού με άκαμπτο πυθμένα.

Στο επόμενο σχήμα (2.60) παρατίθενται δύο γραφήματα τα οποία παρουσιάζουν τη σχέση ανάμεσα στην αντίσταση διείσδυσης και α) το βάθος διείσδυσης του αγωγού και β) την κατά μήκος του αγωγού απόσταση.



**Σχήμα 2.60**: Αντίσταση διείσδυσης σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης και την κατά μήκος του αγωγού απόσταση, (Palmer, 2008)

Από την επισκόπηση των παραπάνω σχημάτων προκύπτει πως όταν η δύναμη αντίστασης στη διείσδυση είναι μεγάλη τότε το βάθος διείσδυσης περιορίζεται αρκετά, ενώ καθώς το βάθος διείσδυσης αυξάνεται παρατηρείται έντονη μείωση της αντίστασης διείσδυσης. Το βάθος διείσδυσης τείνει σταδιακά προς το άπειρο καθώς η αντίσταση διείσδυσης πλησιάζει στην τιμή του υπό άνωση ειδικού βάρους του αγωγού. Αντίστοιχα, για την περίπτωση όπου εξετάζεται η κατανομή της αντίστασης διείσδυσης σε συνάρτηση με την κατά μήκος του αγωγού απόσταση, παρατηρείται πως σε μεγάλη απόσταση από το σημείο Ο του αγωγού, η αντίσταση διείσδυσης περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό, ενώ καθώς προσεγγίζεται η περιοχή του σημείου Ο η αντίσταση στη διείσδυση γίνεται εντονότερη.

### 2.3.6 Επιρροή εδαφικής αντοχής εξαρτώμενης από ρυθμό παραμόρφωσης στη διείσδυση κυλίνδρων σε μαλακές αργίλους

Οι Aubeny et al (2007) παρουσίασαν ένα μοντέλο πρόβλεψης για την αστράγγιστη διείσδυση κυλίνδρων σε σχηματισμό μαλακής αργίλου, σε θαλάσσιο πυθμένα. Η παρούσα εργασία συνεισφέρει ουσιαστικά στην εκτίμηση της αλληλεπίδρασης αγωγού-θαλάσσιου πυθμένα κατά τη φάση της διείσδυσης του αγωγού σε αυτόν, στο σημείο επαφής τους.

Κατά την επαφή ενός κυλίνδρου με το θαλάσσιο πυθμένα λαμβάνει χώρα η επιβράδυνση του κυλίνδρου, η οποία εξαρτάται τόσο από το ίδιο βάρος του όσο και από την ανωστική και τη διατμητική αντίσταση του εδάφους. Πολύ σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν το φαινόμενο είναι η ύπαρξη ενός συντελεστή που εκφράζει την εδαφική αντίσταση και ο οποίος αυξάνει με την διείσδυση του αγωγού, την διατάραξη του εδάφους λόγω της μεγάλης παραμόρφωσής του κατά τη διείσδυση του εδάφους που εξαρτάται από το ρυθμό παραμόρφωσης και κατ' επέκταση από την ταχύτητα διείσδυσης.

Σημαντικό σχετικό ερευνητικό έργο είχαν παρουσιάσει στο παρελθόν ο Aubeny et al (2005), αναφερόμενοι στην εκτίμηση του φορτίου κατάρρευσης για εμπηγμένο κύλινδρο σε τάφρο, σε συνεκτικό εδαφικό σχηματισμό. Σε εκείνη τη μελέτη βέβαια, δεν είχε ληφθεί υπόψη εξάρτηση της εδαφικής αντοχής από το ρυθμό παραμόρφωσης, ενώ επιπρόσθετα δεν είχε θεωρηθεί διατάραξη του εδάφους από τη διείσδυση, πέρα από τη χρήση ενός συντελεστή πρόσφυσης που είχε ως σκοπό την αποτύπωση της αναμόχλευσης του εδάφους κατά τη διείσδυση.

Βασικός στόχος των Aubeny et al (2007) για την παρούσα εργασία αποτέλεσε η ενσωμάτωση στο μοντέλο πρόβλεψης των φορτίων κατάρρευσης, διατμητικής αντίστασης που θα εξαρτάται από το ρυθμό παραμόρφωσης του εδάφους, Είναι πολύ σημαντικό να γίνει αντιληπτό πως κατά τη διάρκεια της διείσδυσης του αγωγού στον θαλάσσιο πυθμένα, λαμβάνει χώρα διαρκής μεταβολή της ταχύτητας διείσδυσης, με αρχική ταχύτητα, την ταχύτητα πριν από τη διείσδυση και τελική ταχύτητα ίση με μηδέν. Το παραπάνω έχει ως άμεσο αποτέλεσμα, μεταβαλλόμενη διατμητική αντίσταση από το έδαφος σε κάθε βήμα της ανάλυσης οφειλόμενη βέβαια στις μεταβλητές συνθήκες παραμόρφωσης.

Μετά από την απόρριψη ενός μοντέλου εξάρτησης του ρυθμού παραμόρφωσης από υγρό με μεταβλητό ιξώδες, επιλέχθηκε η προσέγγιση που αφορούσε πλαστικότητα εξαρτώμενη από το ρυθμό παραμόρφωσης. Με τον τρόπο αυτό, η διατμητική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται από το ρυθμό παραμόρφωσης για υψηλούς ρυθμούς παραμόρφωσης και εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά με το μοντέλο υγρού με μεταβλητό ιξώδες, ενώ για τιμές ρυθμού παραμόρφωσης μικρότερες από μια χαρακτηριστική οριακή τιμή παραμένει σταθερή. Παρατηρήθηκε επίσης πως η επιρροή του μεγέθους του ρυθμού παραμόρφωσης ελαχιστοποιείται για πολύ μικρές τιμές του.

Οι βασικές παραδοχές των συγγραφέων σχετίζονταν με τα ακόλουθα : 1) διείσδυση από ένα κύλινδρο απείρου μήκους, 2) δημιουργία κατακόρυφης τάφρου πάνω από τον κύλινδρο και 3) η εδαφική δύναμη αντίστασης είναι συνάρτηση μόνο του βάθους διείσδυσης ενώ είναι ανεξάρτητη από την παραμόρφωση του εδάφους που έχει λάβει χώρα στο παρελθόν.

Ο κύλινδρος που διεισδύει στο έδαφος μοντελοποιήθηκε σαν ένα στοιχειώδες σωματίδιο και με αυτό τον τρόπο οι συγγραφείς μπόρεσαν να εκφράσουν την επιτάχυνση του κυλίνδρου στην ακόλουθη αδιάστατη μορφή :  $\frac{a}{g} = 1 - \frac{F_{sc}}{w} - \frac{F_{bc}}{w}$ , όπου a: επιτάχυνση του κυλίνδρου, g: επιτάχυνση της βαρύτητας,  $F_{sc}$ : δύναμη εδαφικής διατμητικής αντίστασης ανά μέτρο μήκους,  $F_{bc}$ : ανωστική δύναμη ανά μέτρου μήκους και w: βάρος κυλίνδρου ανά μέτρο μήκους.

Οι μελετητές χρησιμοποίησαν τις εξισώσεις πρόβλεψης των φορτίων κατάρρευσης που είχαν προκύψει από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων των Aubeny et al (2005). Οι εξισώσεις αυτές, δίνουν το φορτίο κατάρρευσης σαν συνάρτηση του βάθους διείσδυσης και τη διάμετρο του κυλίνδρου. Πιο συγκεκριμένα ισχύει  $\frac{F_{sc}}{cd} = f(\frac{h}{d})^b$ , με τους συντελεστές f και b να έχουν προκύψει εμπειρικά από αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία, ενώ θα πρέπει να σημειωθεί πως διαφέρουν ανάλογα με τις συνθήκες πρόσφυσης στη διεπιφάνεια κυλίνδρου-εδάφους. Για την περίπτωση τραχείας διεπιφάνειας, ισχύουν f

7,41 кан 
$$b$$
 = 0.37 үна  $\frac{h}{d} \le$  0,5 кан  $f$  = 6,34 кан  $b$  = 0,155 үна  $\frac{h}{d} >$  0.5

Η παραπάνω εξίσωση βασίζεται σε εδαφικές παραμέτρους που δεν παρουσιάζουν εξάρτηση από τον επιβαλλόμενο ρυθμό παραμόρφωσης. Η εξάρτηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής από το ρυθμό παραμόρφωσης έχει δοθεί στο παρελθόν από τους Casagrande et al (1951), και παρουσιάζεται από τη σχέση  $c = c_{ref}[1 + \rho_0 \log(\varepsilon / \varepsilon_{ref}]]$ , με c: τη διατμητική αντοχή για ρυθμό παραμόρφωσης  $\varepsilon_{ref}$  τη διατμητική αντοχή για ρυθμό παραμόρφωσης  $\varepsilon_{ref}$ . Ο μέγιστος ρυθμός παραμόρφωσης που είχε εφαρμοστεί ποτέ σε αντίστοιχη έρευνα ήταν 670%/ ώρα, ενώ αντίστοιχα η τυπική του τιμή κυμαίνεται περί το 50%/ ώρα.

Οι συγγραφείς για την παρούσα μελέτη, θεώρησαν οριακή τιμή του ρυθμού παραμόρφωσης (για χαμηλότερες τιμές ρυθμού παραμόρφωσης τα φαινόμενα επιρροής του ρυθμού παραμόρφωσης είναι αμελητέα) την τιμή 0,05%/ ώρα. Επιπρόσθετα δεν ελήφθη κάποιο άνω όριο για το ρυθμό παραμόρφωσης.

Για το χαρακτηρισμό της εδαφικής διατμητικής αντίστασης *F<sub>sc</sub>*, ενός κυλίνδρου διαμέτρου *d* ο οποίος κινείται με μια στιγμιαία ταχύτητα *v* μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ανάλογη σχέση με την αντίστοιχη σχέση για τη διατμητική

αντοχή. Ισχύει δηλαδή,  $F_{sc} = F_{sc0}[1 + \lambda_{c0} \log(\frac{v}{\varepsilon_0 d})]$ . Αντίστοιχα ισχύει ότι η οριακή διατμητική αντίσταση  $F_{sc0}$  υπολογίζεται θεωρώντας εδαφική διατμητική αντοχή  $c_0$  που αντιστοιχεί στην οριακή τιμή του ρυθμού παραμόρφωσης  $\varepsilon_0$ , ενώ  $\lambda_{c0}$  είναι η παράμετρος του ρυθμού παραμόρφωσης και είναι αντίστοιχη με την ποσότητα  $\rho_0$  της εξίσωσης υπολογισμού της διατμητικής αντοχής.

Ο βασικός στόχος των αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία που εκτελέστηκαν από τους ερευνητές ήταν η εκτίμηση της παραμέτρου  $\lambda_{c0}$  σε συνάρτηση με την παράμετρο  $\rho_0$  και σε σχέση με την αδιάστατη ταχύτητα  $\frac{v}{\varepsilon_0 d}$  και την αδιάστατη διείσδυση  $\frac{h}{d}$ , για εδαφικά προφίλ ομοιόμορφης αντοχής. Το εύρος της αδιάστατης ταχύτητας  $\frac{v}{\varepsilon_0 d}$  κυμάνθηκε από 0 έως 10<sup>9</sup> ενώ το αντίστοιχο εύρος για την αδιάστατη διείσδυση  $\frac{h}{d}$  κυμάνθηκε από 0 έως4.

Επιπρόσθετος στόχος αποτέλεσε η αξιολόγηση της ακρίβειας εφαρμογής των σχέσεων :

• 
$$\frac{F_{sc}}{cd} = f(\frac{h}{d})^b$$

• 
$$c = c_{ref} [1 + \rho_0 \log(\varepsilon / \varepsilon_{ref})]$$

•  $F_{sc} = F_{sc0} [1 + \lambda_{c0} \log(\frac{v}{\varepsilon_0 d})]$ , για την εκτίμηση της διατμητικής δύναμης

αντίστασης του εδάφους  $F_{sc}$  σε αντιστοιχία με την ταχύτητα διείσδυσης v.

Οι αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για την εκτίμηση φορτίων κατάρρευσης για κύλινδρο που διεισδύει εντός του υποβάθρου εκτελέστηκαν με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Η μοντελοποίηση του υλικού έγινε με γραμμικά στοιχεία, μορφής τετραπλεύρου και υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης. Χρησιμοποιήθηκε ισότροπο μοντέλο σκλήρυνσης με εξάρτηση από το ρυθμό επιβολής της παραμόρφωσης, ενώ ως κριτήριο αστοχίας επιλέχθηκε το Von Mises. Η προσομοίωση του κυλίνδρου έλαβε χώρα ως μια κυκλική κοιλότητα που μετακινείται κατακόρυφα με μια σταθερή ταχύτητα ν. Τα φαινόμενα αδρανειακής αντίστασης δεν λήφθηκαν υπόψη κατά την θεώρηση του μοντέλου. Από την άλλη, οι αναλύσεις εκτελέστηκαν με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να προκύπτει εξάρτηση της διατμητικής αντίστασης του εδάφους από τον επιβαλλόμενο ρυθμό παραμόρφωσης.

Κεφάλαιο 2°

#### Εκτίμηση της παραμέτρου λ<sub>c0</sub>

Στο σχήμα 2.61 παρουσιάζεται η επιρροή του ρυθμού παραμόρφωσης στη διατμητική αντοχή. Για ένα κύλινδρο με βάθος διείσδυσης της τάξης του  $\frac{h}{d} = 2,15$ , με παράμετρο ρυθμού παραμόρφωσης  $\rho_0 = 0,15$  και για εύρος αδιάστατης ταχύτητας  $\frac{v}{\varepsilon_0 d}$  από 0 έως 10<sup>9</sup>, δίνεται η σχέση ανάμεσα στη δεύτερη αναλλοίωτη του αποκλίνοντα τανυστή των τάσεων κατά μήκος της κεντρικής γραμμής κάτω από τον κύλινδρο για συνθήκες κατάρρευσης.



**Σχήμα 2.61**: Τασικό προφίλ έμπροσθεν του κυλίνδρου για διάφορες ταχύτητες διείσδυσης, (Aubeny et al, 2007)

Σύμφωνα με τις προβλέψεις, για μηδενική αδιάστατη ταχύτητα η διαρροή προσδιορίζεται για βάθος  $\frac{z}{d}$  3,1, ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες >10<sup>3</sup>, το αντίστοιχο όριο προσδιορίζεται για  $\frac{z}{d}$  3,6-3,8. Η ενεργοποιημένη διατμητική αντίσταση αυξάνεται σημαντικά εντός της ζώνης που έχει διαρρεύσει κοντά στο όριο του κυλίνδρου, εξαιτίας των μεταβλητών ρυθμών παραμόρφωσης που σημειώνονται στην εξεταζόμενη περιοχή. Για όλες τις περιπτώσεις, τα τασικά πεδία μειώνονται προς το μηδέν κοντά στο όριο του κυλίνδρου, γεγονός που αποδίδεται στην συνοριακή συνθήκη τραχύτητας που επιλέχθηκε από τους μελετητές. Το τραχύ όριο του αγωγού έχει ως συνέπεια τη δημιουργία σφήνας από τραχύ υλικό σε βάθος  $\frac{z}{d} < 0,2$  κάτω από τον κύλινδρο. Καθώς οι τάσεις

τείνουν προς το μηδέν στην περιοχή αυτή, είναι προφανές ότι και τα τασικά επίπεδα θα μειώνονται αντίστοιχα. Από την επισκόπηση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι δεν υπάρχει σχέση άμεσης αναλογίας ανάμεσα στα φορτία κατάρρευσης που εξαρτώνται από το ρυθμό παραμόρφωσης και στα στατικά φορτία κατάρρευσης τα οποία δεν παρουσιάζουν αντίστοιχη εξάρτηση.

Στο σχήμα 2.62, δίνονται προβλέψεις πεπερασμένων στοιχείων για το φορτίο κατάρρευσης κανονικοποιημένο με την ποσότητα *c*<sub>0</sub>*d*, σε συνάρτηση με την αδιάστατη διείσδυση.



**Σχήμα 2.62**: Προβλέψεις πεπερασμένων στοιχείων για φορτία κατάρρευσης σε συνάρτηση με την ταχύτητα διείσδυσης, (Aubeny et al, 2007)

Αποτελεί γνώμη των συγγραφέων ότι τέτοιες προβλέψεις σε συνδυασμό με τη σχέση  $F_{sc} = F_{sc0}[1 + \lambda_{c0} \log(\frac{v}{\varepsilon_0 d})]$  μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της σχέση ανάμεσα στα  $\lambda_{c0}$  και  $\rho_0$ , όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.63.



**Σχήμα 2.63**: Συσχέτιση των συντελεστών  $\lambda_{c0}$  και  $\rho_0$ , (Aubeny et al, 2007)

Οι προβλέψεις υποδεικνύουν ότι για υψηλές τιμές της ταχύτητας  $\frac{v}{\varepsilon_0 d}$  στο εύρος από 10<sup>6</sup> έως 10<sup>9</sup> παρατηρείται πολύ μικρή απόκλιση, της τάξης του 6% και μικρότερο, ανάμεσα στο  $\lambda_{c0}$  και το  $\rho_0$ . Για χαμηλότερες τιμές της ταχύτητας παρατηρείται σημαντικότερη απόκλιση ανάμεσα στις εξεταζόμενες παραμέτρους.

Στο σχήμα 2.64, παρατίθεται μια απλοποιημένη πρόβλεψη της επιρροής του ρυθμού παραμόρφωσης, για τις διάφορες τιμές της ταχύτητας  $\frac{v}{\varepsilon_0 d}$  και δίνεται η

σχέση βάθους διείσδυσης σε συνάρτηση με την διατμητική εδαφική αντίσταση, τόσο αναφορικά με τα αποτελέσματα αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία όσο

και με βάση τις προβλέψεις της σχέσης  $F_{sc} = F_{sc0}[1 + \lambda_{c0} \log(\frac{v}{\varepsilon_0 d})].$ 



**Σχήμα 2.64**: Απλοποιημένη πρόβλεψη επιρροής ρυθμού παραμόρφωσης, (Aubeny et al, 2007)

Αναφορικά με τη σύγκριση ανάμεσα στις προβλέψεις, θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα οριακά φορτία κατάρρευσης υπολογίστηκαν από τις αναλύσεις πεπερασμένων

στοιχείων και εφαρμόστηκαν στη σχέση  $F_{sc} = F_{sc0}[1 + \lambda_{c0} \log(\frac{v}{\varepsilon_0 d})]$  με  $\lambda_{c0} = \rho_0$ , για

να εκτιμηθεί η αυξημένη αντίσταση εξαιτίας της επιρροής του ρυθμού παραμόρφωσης. Από την επισκόπηση των αποτελεσμάτων παρατηρείται αρκετά καλή συμφωνία ανάμεσα στις προβλέψεις των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων και στις προβλέψεις της μαθηματικής εξίσωσης, για όλο το εξεταζόμενο εύρος ταχύτητας.

Οι συγγραφείς συνεχίζουν τη μελέτη τους αναφέροντας πως μετά την εκτίμηση της δύναμης εδαφικής διατμητικής αντίστασης  $F_{sc}$  από τα αποτελέσματα αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία, μπορεί να υπολογιστεί η διείσδυση h με απευθείας ολοκλήρωση της σχέσης  $\frac{a}{g} = 1 - \frac{F_{sc}}{w} - \frac{F_{bc}}{w}$ . Οι μεταβλητές που ελέγχουν την πρόβλεψη της διείσδυσης μπορούν να εκφραστούν σε συνάρτηση

της παραμέτρου του ρυθμού παραμόρφωσης  $\lambda_{c0}$ , των συνοριακών συνθηκών στη διεπιφάνεια εδάφους-κυλίνδρου και των τεσσάρων αδιάστατων μεταβλητών που περιγράφουν με τη σειρά : ταχύτητα στην επιφάνεια του πυθμένα, εδαφική διατμητική αντίσταση, επιρροή ειδικού εδαφικού βάρους και οριακού ρυθμού παραμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα οι παράμετροι ορίζονται :  $V_0 = \frac{v_0}{\sqrt{gd}}$ ,  $C_0 = \frac{c_0 d}{w}$ ,

$$\Gamma = \frac{\gamma d^2}{w} \quad \text{Kal} \quad E_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{\frac{g}{d}}}.$$

Στο σχήμα 2.65 απεικονίζεται η παραμετρική μελέτη που εκτελέστηκε με την εκτίμηση τραχείας διεπιφάνειας κυλίνδρου-εδάφους, ταχύτητες στον εδαφικό πυθμένα  $V_0 = 0$  και 2, εύρος εδαφικής διατμητικής αντίστασης  $C_0$  από 0.1 έως 0.5, ειδικό βάρος εδάφους  $\Gamma = 0.5$  και οριακή τιμή ρυθμού παραμόρφωσης  $E_0 = 2X10^{-8}$ . Το εύρος της παραμέτρου ρυθμού παραμόρφωσης  $\lambda_{c0}$  ήταν από 0.05 έως 0.15.



Σχήμα 2.65: Παραμετρική μελέτη εκτίμησης διείσδυσης κυλίνδρου, (Aubeny et al, 2007)

Από την επισκόπηση των αποτελεσμάτων, προκύπτει ότι πολύ μεγάλη επιρροή στο τελικό βάθος διείσδυσης έχει η αρχική ταχύτητα πρόσκρουσης στον εδαφικό πυθμένα, με το προβλεπόμενο βάθος διείσδυσης για ταχύτητες  $V_0 = 0$  και 2, να διαφέρει σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμα και μια τάξη μεγέθους, για την περίπτωση της υψηλότερης ταχύτητας. Επιπρόσθετα, σημαντική είναι και η επιρροή της παραμέτρου του ρυθμού παραμόρφωσης  $\lambda_{c0}$ , καθώς η διείσδυση που προβλέπεται για την μικρότερη τιμή της παραμέτρου  $\lambda_{c0}$ =0.05 είναι ως και  $\lambda_{c0}$ =0.15.

Το υπολογιστικό μοντέλο που περιγράφηκε προηγουμένως χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση και ερμηνεία πειραματικών δεδομένων από τους Aubeny et al (2003). Τα εν λόγω δεδομένα αφορούσαν μετρήσεις διείσδυσης ενός κυλινδρικού μοντέλου για διάφορες συνθήκες βάρους κυλίνδρου και ταχύτητας πρόσκρουσης στον πυθμένα. Τα εδαφικά δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν άργιλοι από την περιοχή του Κόλπου του Μεξικό. Η αντοχή των εδαφικών δειγμάτων προσδιορίστηκε με τη χρήση φορητής συσκευής πτερυγίου που περιστρεφόταν με ρυθμό 0.02 rad/sec, ενώ το προσδιορισθέν εύρος αντοχής ήταν της τάξης του 1-1.5 kPa.

Για την εκτίμηση της εδαφικής αντοχής χρησιμοποιήθηκε η συσκευή διάτμησης με μικροσκοπικό πτερύγιο. Για την εκτίμηση της εξάρτησης της διατμητικής αντοχής από τη μεταβολή του ρυθμού περιστροφής της συσκευής μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα των δοκιμών στα θαλάσσια εδαφικά δείγματα. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο σχήμα 2.66 και είναι προφανές πως προκύπτει μια αρκετά απλή σχέση ανάμεσα στη διατμητική αντοχή και στο ρυθμό περιστροφής.



**Σχήμα 2.66**: Εξάρτηση διατμητικής αντοχής από το ρυθμό παραμόρφωσης σε δοκιμές συσκευής μικροσκοπικού πτερυγίου, (Aubeny et al, 2007)

Παρ' όλη την απλή σχέση συσχέτισης ανάμεσα στην διατμητική αντοχή των δοκιμών διάτμησης με μικροσκοπικό πτερύγιο και ρυθμό περιστροφής που παρατίθεται παραπάνω, αποτελεί γνώμη των συγγραφέων πως χρειάζονται αρκετές παραδοχές για να εφαρμοστούν τα ίδια δεδομένα σε μοντέλο άμεσης πρόσκρουσης αγωγού στον θαλάσσιο πυθμένα. Για την παρούσα εργασία των Aubeny et al, (2007) λήφθηκαν οι ακόλουθες παραδοχές :

• Η διατμητική αντοχή από τις δοκιμές μικροσκοπικού πτερυγίου εκφράζεται συναρτήσει του ρυθμού περιστροφής σύμφωνα με τη σχέση :  $c_{mv} = c_{mv0} [1 + \lambda_{mv0} \log(\frac{\theta}{\theta_0})],$  όπου  $c_{mv}$  η διατμητική αντοχή που σχετίζεται με

τον οριακό ρυθμό περιστροφής *θ* και  $\lambda_{mv0}$  είναι η παράμετρος ρυθμού παραμόρφωσης για τη δοκιμή.

- Η παράμετρος ρυθμού παραμόρφωσης λ<sub>mv0</sub> αντιπροσωπεύει την κατάσταση φορτίου κατάρρευσης ενός οριζόντιου κυλίνδρου και αντιστοιχεί στην τιμή λ<sub>c0</sub>.
- Ο ρυθμός περιστροφής θ μπορεί να ληφθεί κατ΄ αντιστοιχία με το ρυθμό παραμόρφωσης ε<sub>0</sub>.

Οι συγγραφείς λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παραδοχές, θεωρώντας τις παραμέτρους του πίνακα 2.6 και εκτιμώντας ένα εύρος ταχυτήτων, βάρους και διαμέτρου κυλίνδρου αντίστοιχα με όσα χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις με τα πεπερασμένα στοιχεία, παρουσιάζουν την παραμετρική αξιολόγηση του σχήματος 2.67. Όπως φαίνεται, για όλες τις περιπτώσεις η εκτιμώμενη διείσδυση προκύπτει ανεξάρτητη από τον οριακό ρυθμό περιστροφής.

Περίπτωση	Οριακός Ρυθμός Περιστροφής	Οριακή Διατμητική Δύναμη	Παράμετρος Ρυθμού Παραμόρφωσης
-	rad / sec	kPa	
1	1,4 x 10 <sup>-7</sup>	0,928	0,148
2	1,4 x 10⁻ <sup>6</sup>	1,07	0,129
3	1,4 x 10⁻⁵	1,20	0,115





**Σχήμα 2.67**: Σχέση βάθους διείσδυσης σε συνάρτηση με ταχύτητας πρόσκρουσης κυλίνδρου-Σύγκριση πειραματικών δεδομένων με προβλέψεις μοντέλου, (Aubeny et al, 2007)

Είναι προφανές πως οι προβλέψεις διείσδυσης απαιτούν μια εκτίμηση της συνοριακής συνθήκης στην διεπιφάνεια εδάφους-κυλίνδρου. Μια φυσιολογική θεώρηση, εκτιμώντας ότι η διαδικασία διείσδυσης αναμοχλεύει το έδαφος που

γειτνιάζει με τη διεπιφάνεια, αποτελεί η χρήση του αντιστρόφου της εδαφικής ευαισθησίας (soil sensitivity) ως ο συντελεστής προσκόλλησης για τη διεπιφάνεια εδάφους-κυλίνδρου.

Για κάθε πείραμα διείσδυσης κυλίνδρου, ενσωματώθηκε μια διαδικασία κατά την οποία πριν από τη διενέργεια ενός πειράματος, το έδαφος στη λεκάνη πειράματος ανακατευόταν, αναμειγνυόταν και αφηνόταν να καθιζάνει για 24 ώρες πριν από το πείραμα. Η αύξηση αντοχής λόγω θιξοτροπικών φαινομένων για την περίοδο των 24 ωρών παρουσιάζεται στο σχήμα 2.68. Η ευαισθησία του εδάφους κατά την περίοδο αυτή εκτιμήθηκε με δύο μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος συσχέτισε την κορυφαία διατμητική αντοχή από δοκιμή μικροσκοπικού πτερυγίου που μετρήθηκε αμέσως μετά τη διαδικασία ανάμειξης. Η δεύτερη μέθοδος συσχέτισε την κορυφαία αντοχή που μετρήθηκε μετά την εξέλιξη μεγάλων περιστροφικών παραμορφώσεων.



**Σχήμα 2.68**: Εκτιμώμενη ευαισθησία αργίλων που χρησιμοποιήθηκαν στην επιστημονική μελέτη, (Aubeny et al, 2007)

Η προκύπτουσα ευαισθησία της αργίλου ελήφθη τελικώς ως ο μέσος όρος της ευαισθησίας που προέκυψε από τις μετρήσεις των δύο μεθόδων. Για τις ανάγκες της μελέτης ελήφθη ίση με 1.25 και κατ' επέκταση η χρησιμοποιηθείσα τιμή του συντελεστής προσκόλλησης ελήφθη ίση με 0.8.

Τα πειράματα διείσδυσης εκτελέστηκαν με τη χρήση ενός κυλίνδρου από αλουμίνιο, με διάμετρο 0.168m. Και στα δύο άκρα του κυλίνδρου τοποθετήθηκαν ημισφαιρικά καπάκια και το τελικό μήκος του κυλίνδρου ήταν 0.505m. Προβλέφθηκε κατά την κατασκευή του κυλίνδρου και του πλαισίου στερέωσής του, η δυνατότητα διακύμανσης του βάρους τους, με το αντίστοιχο εύρος βάρους να είναι ανάμεσα σε 160N και 750N. Η εδαφική αντοχή μετρήθηκε μετά από κάθε πρόσκρουση του κυλίνδρου, σε έξι διαφορετικές τοποθεσίες. Για τα πειράματα που περιελάμβαναν μη μηδενική ταχύτητα πρόσκρουσης, τοποθετήθηκε ειδικός μετρητής μετατόπισης στον κύλινδρο προκειμένου να είναι δυνατή η συνεχής εκτίμηση της ταχύτητάς του. Οι ερευνητές, σε ορισμένα πειράματα, διαφοροποίησαν τον προσανατολισμό του κυλίνδρου από οριζόντιο έως υπό γωνία  $20^{0}$  ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Χρησιμοποιήθηκαν και πάλι οι αδιάστατες μεταβλητές που αφορούν την ταχύτητα πρόσκρουσης  $V_o$ , τη διατμητική αντοχή  $C_o$  και το εδαφικό ειδικό βάρος Γ. Μετά την εκτέλεση των πειραμάτων προέκυψε ένα ενδιαφέρον διάγραμμα συσχέτισης ανάμεσα στην προβλεπόμενη διείσδυση και στη μετρούμενη διείσδυση, το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 2.69.



**Σχήμα 2.69**: Προβλεπόμενη διείσδυση σε σχέση με την μετρούμενη διείσδυση για τα πειράματα διείσδυσης κυλίνδρου, (Aubeny et al, 2007)

Από την επισκόπηση του παραπάνω διαγράμματος, λαμβάνοντας υπόψη το επίπεδο αβεβαιότητας που αφορά την εκτίμηση της εδαφικής αντοχής, οι προβλεπόμενες διεισδύσεις έχουν αρκετά καλό επίπεδο συμφωνίας με τις πραγματοποιηθείσες διεισδύσεις.

## 2.4 Εμπειρικές Μέθοδοι (Πειραματικές Μέθοδοι με παράλληλη χρήση εμπειρικών σχέσεων)

Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται κυρίως μέθοδοι που μελετούν την αλληλεπίδραση πυθμένα-αγωγού με την χρήση εμπειρικών μεθόδων που έχουν προκύψει από επί τόπου παρατηρήσεις υπαίθρου και συσχετίσεις αποτελεσμάτων ερευνών υπαίθρου.

#### 2.4.1 Εκτίμηση διείσδυσης αγωγού σε θαλάσσιο πυθμένα με τη

#### μέθοδο Verley και Lund

Η μέθοδος των Verley και Lund (1995), βασίζεται σε ανάστροφες αναλύσεις σωληνωτών αγωγών, με εύρος εξωτερικής διαμέτρου από 0.2m έως 1.0m που τοποθετούνται επί αργιλικού σχηματισμού με αστράγγιστη διατμητική αντοχή από 0.8kPa έως 70kPa.

Οι συγγραφείς προτείνουν μια μαθηματική εξίσωση για τον υπολογισμό της διείσδυσης του σωληνωτού αγωγού, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως η κατακόρυφη δύναμη επαφής στον αγωγό και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους, και καταλήγουν σε μια σχέση εδαφικής πίεσης – διείσδυσης αγωγού. Η εξίσωση που προτείνουν είναι η ακόλουθη :

$$\frac{z}{D} = 0,0071(SG^{0,3})^{3,2} + 0,062(SG^{0,3})^{0,7}$$

z = διείσδυση στο θαλάσσιο πυθμένα, S =  $F_c$  / (D  $S_u$ ), G =  $S_u$  / (Dγ'),  $F_c$  = κατακόρυφη δύναμη επαφής στον αγωγό, D = εξωτερική διάμετρος αγωγού,  $S_u$  = αστράγγιστη διατμητική αντοχή εδάφους και γ' = πυκνότητα εδάφους υπό άνωση

Οι ερευνητές συστήνουν η παραπάνω σχέση να χρησιμοποιείται για την περίπτωση όπου S D<sup>0,3</sup> <2,5 καθώς για υψηλότερες τιμές υπερεκτιμάται η διείσδυση. Προτείνεται επίσης η ακόλουθη γραφική σχέση (σχήμα 2.70).



Σχήμα 2.70: Σχέση εδαφικής πίεσης – διείσδυσης αγωγού, (Verley and Lund, 1995)

Για υψηλότερες τιμές του πηλίκου S D<sup>0,3</sup>, οι Verley και Lund συστήνουν την ακόλουθη γραμμική σχέση :

$$\frac{z}{D} = 0,09(SG^{0,3})$$

# 2.4.2 Εκτίμηση διείσδυσης αγωγού σε θαλάσσιο πυθμένα με την κλασσική μέθοδο υπολογισμού φέρουσας ικανότητας

Ο Bai (2001), χρησιμοποίησε την κλασσική εξίσωση της φέρουσας ικανότητας που βασίζεται σε ορθογωνικό θεμέλιο (Hansen, 1961) για να δώσει τη σχέση εδαφικής πίεσης - διείσδυσης αγωγού ανηγμένης προς την αντίστοιχη διάμετρο. Η σχέση που προτείνει είναι η ακόλουθη :

$$\frac{z}{D} = 0.5(1 - (1 - 4(\frac{(\beta + 0.5)\psi}{2(\beta + 0.5\psi^3)^2})^2)^{0.5})$$

 $Ψ = α / (0,5(β+0,5)), α = F_c / (2γ'D^2), β = (N_c S_u) / (γ' D), N_c = συντελεστής φέρουσας ικανότητας (5.14 για επιμήκη πέδιλα)$ 



Ο Bai (2001), προτείνει επίσης την ακόλουθη γραφική σχέση (σχήμα 2.71).

Σχήμα 2.71: Σχέση εδαφικής πίεσης – διείσδυσης αγωγού, (Bai, 2001)
#### 2.4.3 Εκτίμηση διείσδυσης αγωγού σε θαλάσσιο πυθμένα με την

#### μέθοδο της άνωσης

Η μελέτη του Haland (1997), αναφέρεται σε σωληνωτούς αγωγούς που τοποθετούνται μόνο επί πολύ μαλακών αργίλων. Η βασική παραδοχή της μεθόδου της άνωσης είναι ότι το έδαφος δεν εμφανίζει καθόλου αντοχή και πως συμπεριφέρεται σαν ένα βαρύ υγρό. Η διείσδυση υπολογίζεται με την απαίτηση ότι η επαγόμενη (από το έδαφος) άνωση στον αγωγό είναι ίση με την κατακόρυφη δύναμη επαφής.

Ο ερευνητής προτείνει τις ακόλουθες χρήσιμες σχέσεις καθώς και την εκτίμησή του για την καμπύλη εδαφικής πίεσης – διείσδυσης αγωγού (σχήμα 2.72).

$$B = 2\sqrt{Dz - z^2}$$
,  $A_s = (\frac{z}{6B})(3z^2 + 4B^2)$ ,  $O = A_s L\gamma'$ 

B = πλάτος αγωγού σε επαφή με το έδαφος, A<sub>s</sub> = εμβαδό διατομής αγωγού που έχει διεισδύσει στο έδαφος, O = δύναμη άνωσης, z = βάθος διείσδυσης, D = διάμετρος αγωγού, γ' = υπό άνωση ειδικό βάρος εδάφους και L = μήκος αγωγού.



Σχήμα 2.72: Σχέση εδαφικής πίεσης – διείσδυσης αγωγού, (Haland, 1997)

Κεφάλαιο 3°

Συμπεράσματα Μεθόδων Ανάλυσης Αλληλεπίδρασης Υποθαλάσσιων Αγωγών-Risers με τον Θαλάσσιο Πυθμένα

# 3

# Συμπεράσματα Μεθόδων Ανάλυσης Αλληλεπίδρασης Υποθαλάσσιων Αγωγών-Risers με τον Θαλάσσιο Πυθμένα

## 3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα βασικά συμπεράσματα των μεθόδων ανάλυσης της αλληλεπίδρασης υποθαλάσσιων αγωγών-risers με τον θαλάσσιο πυθμένα. Θα ακολουθηθεί ο διαχωρισμός του κεφαλαίου 2 ως προς τις επιμέρους κατηγορίες μεθόδων.

# 3.2 Γεωτεχνικές Μέθοδοι

Τα πειράματα in situ, μεγάλης κλίμακας των Bridge et al (2003), παρέχουν μια πολύτιμη βάση για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε νερό, αγωγό και έδαφος πυθμένα αλλά και την αξιολόγηση αναλυτικών μοντέλων πρόβλεψης. Από τις παρατηρήσεις in situ στη θέση του λιμένα όπου εκτελέστηκαν οι δοκιμές, προέκυψε, μέσα σε χρονικό διάστημα έξι εβδομάδων, τάφρος με σχήμα «δακρύου» (tear-drop shape), στην περιοχή του σημείου επαφής αγωγούπυθμένα, με μέγιστο πλάτος 2.5 X D και μέγιστο βάθος 1.2 X D. Οι συγγραφείς αναφέρουν πως η τάφρος δημιουργείται από ένα συνδυασμό ανάμεσα στις επιβαλλόμενες κινήσεις του αγωγού από τα εξωτερικά φορτία και από τη ροή νερού κατά μήκος και ανάμεσα στον αγωγό και τον πυθμένα.

Αποτελεί γνώμη των συγγραφέων ότι απαιτείται επιπλέον έρευνα σχετικά με τους μηχανισμούς δημιουργίας τάφρου έτσι ώστε ο σχεδιασμός των συστημάτων υποθαλάσσιων αγωγών να γίνεται με λιγότερο συντηρητική προσέγγιση.

Σύμφωνα με τον Stewart et al (1994), το διεισδυσιόμετρο t-bar, παρέχει μια αρκετά καλή εκτίμηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους και εμφανίζεται αρκετά συνεπές σε σύγκριση με πλήθος επί τόπου και εργαστηριακών ερευνών. Πρόκειται για αρκετά ταχύτερη μέθοδο σε σύγκριση με τη δοκιμή διείσδυσης κώνου. Δεν έχει βέβαια τη δυνατότητα μέτρησης της παραμένουσας αντοχής αργιλικών σχηματισμών αλλά αποτελεί γνώμη των συγγραφέων πως μπορεί να παρέχει μια αίσθηση για την ευαισθησία του σχηματισμού. Το διεισδυσιόμετρο t-bar, σίγουρα δεν πρόκειται να αντικαταστήσει τη δοκιμή διείσδυσης κώνου ή τη δοκιμή διάτμησης πτερυγίου αλλά αποτελεί μια εναλλακτική, φθηνή και ταχύτατη λύση που θα διευκολύνει την έρευνα πεδίων αποτελούμενων από μαλακές αργιλικές αποθέσεις.

Η πλέον σημαντική εφαρμογή του διεισδυσιομέτρου t-bar, αποτελεί η δυνατότητα εκτίμησης της μέγιστης εδαφικής πίεσης που ασκείται σε ένα αγωγό. Η πίεση αυτή μπορεί να δώσει αίσθηση για την οριακή εδαφική αντίσταση στην κίνηση υποθαλάσσιου αγωγού και κατά συνέπεια αποτελεί μια γεωτεχνική μέθοδο in situ που μπορεί να συμβάλλει στην ακριβέστερη διαστασιολόγηση υποθαλάσσιων μεταλλικών αγωγών.

Το βασικό συμπέρασμα της έρευνας των Hu et al (2010) είναι ότι κατά τη διάρκεια της πρώτης διείσδυσης ενός αγωγού στον θαλάσσιο πυθμένα, δημιουργείται μια τάφρος. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της αντίστασης στην διείσδυση του αγωγού σε μεταγενέστερους κύκλους διείσδυσης.

Κατά τη διάρκεια της ανύψωσης του αγωγού, η ανάπτυξη αρνητικής πίεσης πόρων στην βάση του αγωγού υποδηλώνει την ανάπτυξη δύναμης «εισρόφησης» από το έδαφος, κάτω από τον αγωγό.

Τα αποτελέσματα των παραμετρικών μελετών που εκτελέστηκαν για την αξιολόγηση της επιρροής της εδαφικής αντοχής, του ρυθμού μετατόπισης και του τρόπου φόρτισης του αγωγού, στην αλληλεπίδραση αγωγού-πυθμένα συνοψίζονται στα ακόλουθα :

- Η εδαφική αντοχή, υπό το μέγιστο βάθος διείσδυσης του αγωγού αυξάνει με το πλήθος των κύκλων διείσδυσης, γεγονός που οφείλεται στο ότι η ζώνη αυτή φορτίζεται επαναλαμβανόμενα με ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων και με δεδομένη τη μείωση της υπερπίεσης πόρων προς την έντονα αναμοχλευμένη ανώτερη εδαφική ζώνη, είναι πιθανή η αύξηση της ενεργού τάσης και κατά συνέπεια της εδαφικής αντοχής.
- Τα πειραματικά δεδομένα έδειξαν αύξηση του ρυθμού μείωσης της αντοχής, σε συνάρτηση με την αύξηση εδαφικής του λόγου προστερεοποίησης εδαφικού TOU σχηματισμού. Oı συγγραφείς επισημαίνουν ότι η αιτία για την παραπάνω παρατήρηση είναι η διαφορετική διαδικασία αναμόχλευσης του εδάφους υπό τους επαναλαμβανόμενους κύκλους διείσδυσης-ανύψωσης του αγωγού,

γεγονός που έχει άμεση εξάρτηση με το λόγο προστερεοποίησης του σχηματισμού.

 Η σχέση αντίστασης διείσδυσης-μετατόπισης δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου διείσδυσης για μεταβολή του ρυθμού μετατόπισης του αγωγού στο εύρος 1mm/sec έως 6mm/sec. Επιπρόσθετα τονίζεται πως ο ρυθμός μετατόπισης του αγωγού δεν είναι συνάρτηση της μείωσης της εδαφικής αντοχής καθώς η μεταβολή του δεν θα την επηρεάσει.

Η εργασία των Aubeny et al (2006) παρουσιάζει ένα πλαίσιο υπό το οποίο είναι δυνατή η ερμηνεία δεδομένων in situ από τη δοκιμή διείσδυσης διεισδυσιομέτρου XBP με πρόσκρουση σε μαλακές αργίλους. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων του διεισδυσιομέτρου XBP, βασίζεται στο συντελεστή αντίστασης στην αιχμή του κώνου του διεισδυσιομέτρου, ο οποίος είναι συνάρτηση του βάθους διείσδυσης και του συντελεστή διόρθωσης λόγω εξάρτησης του ρυθμού παραμόρφωσης από την ταχύτητα διείσδυσης.

Οι συγγραφείς τονίζουν πως η χρήση μετρήσεων της επιβράδυνσης έχει πλεονέκτημα για την εκτίμηση της εδαφικής αντοχής καθώς επιτρέπει τη συνεχή επικαιροποίηση του συντελεστή αντίστασης στην αιχμή του κώνου.

Συγκρίσεις των ερμηνευμένων προφίλ εδαφικής αντοχής από το διεισδυσιόμετρο XBP με τα αντίστοιχα αποτελέσματα δοκιμών αντοχής μικροσκοπικού πτερυγίου δείχνουν πως το διεισδυσιόμετρο XBP, υπό το προτεινόμενο πλαίσιο, είναι ικανό να προσφέρει ικανοποιητική πρώτης τάξης εκτίμηση της εδαφικής αντοχής. Παρολ' αυτά η διασπορά ως προς τα εδαφικά προφίλ αναφοράς ήταν μεγάλη έτσι ώστε να επιτραπούν οριστικά συμπεράσματα.

Ο Thethi et al (2001) καταλήγουν πως για την περίπτωση της διαστασιολόγησης ενός μεταλλικού υποθαλάσσιου αγωγού, η προσομοίωση του θαλάσσιου πυθμένα με τη θεώρηση αυτού ως επίπεδου άκαμπτου ή ελαστικού ορίου είναι αρκετά απλοποιητική και μάλιστα απέχει κατά πολύ από την παρατηρηθείσα πραγματική κατάσταση (βαθιές τάφροι) στο σημείο επαφής υφιστάμενων αγωγών με τον πυθμένα. Οι συγγραφείς αναφέρουν πως τόσο η δυνητική επιρροή της δύναμης «εισρόφησης» όσο και η προσφερόμενη παθητική αντίσταση στα τοιχώματα της τάφρου θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την προσομοίωση της συμπεριφοράς.

Προτείνεται η χρήση τεχνικών προσομοίωσης που θα λαμβάνουν υπόψη τις παραπάνω παραμέτρους (ακαμψία εδάφους πυθμένα, εδαφική δύναμη «εισρόφησης», αντίσταση τοιχώματος τάφρου) έτσι ώστε να βελτιωθεί η πρόβλεψη της συμπεριφοράς αλλά και η ωφέλιμη διάρκεια λειτουργίας του αγωγού υπό φαινόμενα κόπωσης. Από την επισκόπηση αποτελεσμάτων παραμετρικών αναλύσεων προκύπτει η σημαντική επιρροή της ακαμψίας του εδάφους πυθμένα και της εδαφικής δύναμης «εισρόφησης» στη φθορά που προκαλείται στον αγωγό από φαινόμενα κόπωσης. Από την άλλη παρατηρείται πως η δύναμη «εισρόφησης» και η αντίσταση των τοιχωμάτων της τάφρου,

ενδέχεται να προκαλέσουν τοπική αύξηση στην επιβαλλόμενη τάση σε κάποιο σημείο του αγωγού κατά τη διάρκεια μια έντονης κίνησης της πλωτής πλατφόρμας.

Σύμφωνα με τους συγγραφείς, το ερευνητικό πρόγραμμα ευρείας κλίμακας STRIDE JIP (φάση 3) απαντά σε αρκετές από τις αβεβαιότητες αναφορικά με τους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης αγωγού-πυθμένα. Επιπρόσθετα τα αποτελέσματα του ερευνητικού προγράμματος συμβάλλουν στην επικαιροποίηση των προς χρήση μοντέλων μελέτης της παραπάνω αλληλεπίδρασης.

#### 3.3 Αριθμητικές Μέθοδοι

Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται κυρίως μέθοδοι που μελετούν την αλληλεπίδραση πυθμένα-αγωγού με την εκτέλεση αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων σε Η/Υ. Τις περισσότερες φορές οι ερευνητές καταλήγουν σε αναλύσεις για την αξιολόγηση της επίδρασης μεμονωμένων παραμέτρων.

Η έρευνα των Clukey et al (2008), περιελάμβανε την εκτέλεση αριθμητικής ανάλυσης με το λογισμικό LS-DYNA προκειμένου να γίνει προσομοίωση της αλληλεπίδρασης αγωγού-πυθμένα, με τη χρήση Eulerian μεθόδου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα εργαστηριακών πειραμάτων.

Από την επισκόπηση των αποτελεσμάτων προκύπτει πως το υστερητικό μοντέλο για το εδαφικό υλικό, που εφαρμόσθηκε, μπορεί να προσομοιάσει με επάρκεια τόσο την επιρροή της μονοτονικής φόρτισης όσο και την εδαφική απόκριση κατά τη διάρκεια κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης, που ενδέχεται να οφείλεται σε μεγάλου εύρους κίνηση του αγωγού. Η χρήση της Eulerian μεθόδου έδωσε τη δυνατότητα στο μοντέλο να μπορέσει να προσομοιάσει την κινηματική κατάσταση των σωματιδίων του νερού κατά την αλληλεπίδραση αγωγού-εδάφους-νερού, με το νερό πρώτα να «αποβάλλεται» ανάμεσα στον αγωγό και το έδαφος. Στη συνέχει παρατηρείται η «ροή» του πίσω προς την τάφρο όταν λαμβάνει χώρα ο αποχωρισμός αγωγού και εδάφους, ενώ «αποβάλλεται» τελικά κατά την τελική καθοδική κίνηση του αγωγού.

Το μοντέλο εδαφικής δύναμης αντίστασης – μετακίνησης, που προέκυψε από τις διαφορετικές αναλύσεις υποδηλώνει πως η απόκριση του εδάφους στο οποίο εδράζεται ο αγωγός, εμφανίζει ισχυρή εξάρτηση τόσο ως προς το μέγεθος όσο και ως προς τη διάρκεια της φόρτισης που προκαλείται από τον αγωγό. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε απεικονίζει την επιρροή του μεγέθους της φόρτισης αλλά δεν έχει δυνατότητα αναπαράστασης της επιρροής πολλαπλών κύκλων φόρτισης. Οι συγγραφείς προτείνουν κατά συνέπεια, να ενσωματωθεί στο παρόν μοντέλο χρονική εξάρτηση των υπό εξέταση παραμέτρων ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι διάφοροι κύκλοι φόρτισης. Το παραπάνω μπορεί να γίνει με την ενσωμάτωση στο μοντέλο :

- Μείωσης εδαφικής αντοχής σε σχέση με το πλήθος των κύκλων φόρτισης.
- Επίδραση ρυθμού παραμόρφωσης.
- Επίδραση ερπυστικών παραμορφώσεων

Όλες οι παραπάνω ενσωματώσεις είναι δυνατές καθώς έχουν εφαρμοστεί και σε άλλα λογισμικά Η/Υ είτε για την περίπτωση ρευστοποιήσιμου υλικού είτε για υλικά στατικών μοντέλων.

Οι συγγραφείς καταλήγουν πως το σύνθετο φαινόμενο της ανάμιξης εδάφουςνερού μπορεί να ενσωματωθεί στο παρόν μοντέλο με τη χρήση μιας εμπειρικής συνάρτησης εκφυλιστικής μορφής, που θα μειώνει την εδαφική αντοχή. Οι παράμετροι της συνάρτησης μείωσης της αντοχής θα μπορούν να υπολογιστούν με ανάστροφες αναλύσεις από την υφιστάμενη βάση δεδομένων με αντίστοιχα πειράματα. Επιπρόσθετα, η επιρροή της διάβρωσης μπορεί να ενσωματωθεί στο μοντέλο λαμβάνοντας υπόψη την κινηματική κατάσταση των σωματιδίων του νερού.

Οι Aubeny et al (2006), παρουσίασαν ένα μοντέλο πρόβλεψης της αλληλεπίδρασης αγωγού-πυθμένα με θεώρηση ελαστικού αγωγού ο οποίος στηρίζεται από ελατήρια με μη γραμμική απόκριση. Η ακαμψία των ελατηρίων περιγράφεται με ένα μοντέλο της μορφής P-y (δύναμης αντίστασης στον αγωγό – κατακόρυφης διείσδυσης του αγωγού στον πυθμένα). Το μοντέλο αυτό κατασκευάζεται θεωρώντας μια αρχική καμπύλη που περιγράφει την αρχική διείσδυση (πλαστική διείσδυση) στον πυθμένα, ένα βρόγχο περιορισμού που περιγράφει την απόκριση υπό συνθήκες μεγάλης μετατόπισης και μια σειρά από κανόνες που περιγράφουν την απόκριση εντός του βρόγχου περιορισμού. Το μοντέλο αυτό έχει την ικανότητα να προσομοιάσει την ανοδική κίνηση του αγωγού καθώς και κύκλους φόρτισης-επαναφόρτισης καθώς οι περιπτώσεις αυτές είναι συνθήκες μερικού ή πλήρους αποχωρισμού του αγωγού από τον πυθμένα.

Η μελέτη του Nakhaee et al (2009), αφορά την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε ένα μεταλλικό αλυσοειδή αγωγό και το θαλάσσιο πυθμένα. Εξετάζει τη χρήση δύο διαφορετικών εδαφικών μοντέλων : α) Έδαφος του οποίου δεν μειώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά και β) Έδαφος του οποίου μειώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά. Το πρώτο μοντέλο αγνοεί την πλαστική παραμόρφωση του πυθμένα στην περιοχή του σημείου επαφής αγωγού-πυθμένα. Παρ' όλα αυτά παρέχει ακριβέστερους συντελεστές ακαμψίας και απόσβεσης για το έδαφος του πυθμένα, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της προσομοίωσης του πυθμένα με ελαστικά ελατήρια.

Οι συντελεστές ακαμψίας και απόσβεσης χρησιμοποιούνται εν συνεχεία στο μοντέλο που λαμβάνει υπόψη του τη μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών και το οποίο θεωρεί επίσης τη δημιουργία τάφρου στον πυθμένα.

Εκτελέστηκαν παραμετρικές αναλύσεις με δύο διαφορετικούς αγωγούς που εδράζονταν σε πυθμένα για τον οποίο εκτιμήθηκαν τρία διαφορετικά προφίλ διατμητικής αντοχής. Στους αγωγούς επιβλήθηκε περιοδική ανύψωση στο σημείο πρόσδεσής τους. Εκτιμήθηκε η διαμόρφωση της τάφρου αλλά και η μέγιστη διακύμανση της καμπτικής ροπής κοντά στο σημείο επαφής αγωγού-πυθμένα με τη θεώρηση κυκλικής φόρτισης του αγωγού.

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η μέγιστη διακύμανση καμπτικής ροπής στην περιοχή του σημείου επαφής αγωγού-πυθμένα εξαρτάται κυρίως από τη μέγιστη (χωρική) αλλαγή του ρυθμού μεταβολής της καμπτικής ροπής και από τη μετακίνηση του σημείου επαφής εξαιτίας της ανύψωσης του σημείου πρόσδεσης.

Η μείωση της μέγιστης διακύμανσης της καμπτικής ροπής έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των επιβαλλόμενων τάσεων του αγωγού στην περιοχή του σημείου επαφής του με τον πυθμένα, γεγονός που με τη σειρά του αυξάνει το πλήθος των κύκλων φόρτισης που ο αγωγός μπορεί να δεχθεί μέχρι να αστοχήσει από φαινόμενα κόπωσης. Η προσομοίωση των συγγραφέων καταδεικνύει πως η σχετική μείωση στη μέγιστη διακύμανση της καμπτικής ροπής είναι μεγαλύτερη όταν το εύρος της ανύψωσης είναι μικρότερο ή/ και όταν το έδαφος πυθμένα έχει μικρότερη διατμητική αντοχή. Η παρατήρηση αυτή έχει ιδιαίτερα σημαντικό ενδιαφέρον για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής ενός αγωγού πριν αυτός αστοχήσει σε φαινόμενα κόπωσης, καθώς ένας αγωγός που βρίσκεται σε πυθμένα μεγάλου βάθους υφίσταται μικρού εύρους ταλαντώσεις για όλη σχεδόν τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής του.

Τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης του Palmer (2008) είναι τα ακόλουθα :

- Αναμένεται μεγάλο βάθος για την εκσκαφθείσα τάφρο για τις περιπτώσεις που η αντίσταση στη διείσδυση και η δύναμη εφελκυσμού στο σημείο πρόσδεσης του αγωγού είναι χαμηλή και για τις περιπτώσεις που η καμπτική ακαμψία και το βάρος του αγωγού έχουν υψηλή τιμή. Τα παραπάνω ισχύουν σε αρκετές περιπτώσεις μεταλλικών υποθαλάσσιων αγωγών και οι παραπάνω θεωρήσεις επιβεβαιώνονται από τις μετρήσεις πεδίου.
- Παρ' όλο που το υπολογισθέν βάθος της τάφρου είναι μόνο ένα μικρό κλάσμα της διαμέτρου του αγωγού, συμβάλλει στην αύξηση της αντίστασης του αγωγού σε πλευρικές κινήσεις, που αποτελεί σημαντική παράμετρο στην ανάλυση του αγωγού για φαινόμενα δυναμικού λυγισμού (lateral buckle).
- Επιπρόσθετα, η δημιουργία της τάφρου περιορίζει την ελευθερία πλευρικής κίνησης του αγωγού στον πυθμένα. Το παραπάνω είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την περίπτωση που η πλωτή πλατφόρμα κινείται πλευρικά καθώς αν ο αγωγός δεν μπορεί να κινηθεί τότε θα αναπτυχθούν σε αυτόν μεγάλες καμπτικές ροπές, ειδικά στο σημείο επαφής με τον πυθμένα, με πιθανή συνέπεια την αστοχία του αγωγού.

Οι Aubeny et al (2007) παρουσίασαν ένα μοντέλο πρόβλεψης για την αστράγγιστη διείσδυση κυλίνδρων σε σχηματισμό μαλακής αργίλου, σε θαλάσσιο πυθμένα. Τα κυριότερα ευρήματα των ερευνητών είναι τα ακόλουθα :

- Για την περίπτωση που η εδαφική αντοχή αυξάνεται ημι-λογαριθμικά με το ρυθμό παραμόρφωσης, η ολική εδαφική αντίσταση διάτμησης θα αυξηθεί με ένα ανάλογο τρόπο.
- Υπάρχει η δυνατότητα ρεαλιστικής εκτίμησης της εδαφικής αντίστασης διάτμησης για την περίπτωση διείσδυσης ενός οριζοντίου κυλίνδρου για διάφορες τιμές της ταχύτητας διείσδυσης αλλά και του βάθους διείσδυσης, με τη χρήση των εξισώσεων (παρ. 2.3.6) που προτείνουν οι συγγραφείς.
- Η κατανόηση και η ακριβής εκτίμηση της επιρροής του ρυθμού επιβολής της παραμόρφωσης είναι απαραίτητη για την εκτίμηση με ακρίβεια του βάθους διείσδυσης του αγωγού.
- Για την εφαρμογή του πλαισίου (πλαστικότητα εξαρτώμενη από το ρυθμό επιβολής της παραμόρφωσης) του μοντέλου πρόβλεψης των συγγραφέων, απαιτείται η εκτίμηση της οριακής τιμής του ρυθμού παραμόρφωσης.
  Υπενθυμίζεται ότι για χαμηλότερες τιμές ρυθμού παραμόρφωσης από την οριακή, η διατμητική εδαφική αντίσταση παραμένει σταθερή.

# 3.4 Εμπειρικές Μέθοδοι (Πειραματικές Μέθοδοι με

#### παράλληλη χρήση εμπειρικών σχέσεων)

Στην κατηγορία αυτή παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των μελετών των Verley και Lund (1995), Bai (2001) με βάση την κλασσική εξίσωση της φέρουσας ικανότητας που βασίζεται σε ορθογωνικό θεμέλιο (Hansen, 1961) και του Haland (1997) και δόθηκαν εμπειρικές σχέσεις συσχέτισης, ανά περίπτωση και λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές θεωρήσεις των ερευνητών, ανάμεσα στην εδαφική πίεση και το βάθος διείσδυσης του αγωγού.

Οι σχέσεις αυτές μπορούν να επιβεβαιωθούν από πειραματικά δεδομένα πεδίου ή εργαστηρίου και εφόσον κρίνεται ικανοποιητική και ακριβής η συσχέτιση που δίνουν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων ως μη-γραμμικές σχέσεις εδαφικής πίεσης-διείσδυσης.

# 4

# Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

# 4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο δίνονται προτάσεις και κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα αναφορικά με το θέμα της αλληλεπίδρασης υποθαλάσσιων αγωγών-riser με το θαλάσσιο πυθμένα.

## 4.2 Γεωτεχνικές Μέθοδοι

- Οι Bridge et al (2003), προτείνουν επέκταση της έρευνας πεδίου προκειμένου να συγκεκριμενοποιηθούν οι κύριοι μηχανισμοί δημιουργίας τάφρου. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να γίνουν ακριβείς προβλέψεις αναφορικά με την τάφρο που δημιουργείται στο σημείο επαφής αγωγούθαλάσσιου πυθμένα και να εκτιμηθούν τα χαρακτηριστικά της (βάθος, πλάτος) αλλά και η απόκριση του πυθμένα. Κατά συνέπεια θα μπορεί να αποφευχθεί ο σχεδιασμός των συστημάτων αγωγών-riser με τον τόσο συντηρητικό τρόπο με τον οποίο γινόταν μέχρι τώρα.
- Οι Hu et al (2010) προτείνουν την εκτέλεση επιπλέον πειραμάτων με τη συσκευή φυγοκέντρησης, με την προϋπόθεση ότι θα τοποθετηθούν στο σύστημα (στο πάνω σημείο της διατομής του αγωγού) επιπλέον μετρητές της πίεσης πόρων. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει μια καλύτερη αξιολόγηση αλλά και πρόβλεψη της διακύμανσης της πίεσης πόρων στην ευρύτερη εδαφική περιοχή. Επιπρόσθετα, κρίνεται αναγκαίο να εκτελεστούν πειράματα για την περίπτωση που δεν θα ισχύουν αστράγγιστες συνθήκες κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης. Σε αυτή την περίπτωση ενδέχεται να λάβει χώρα στράγγιση του νερού των εδαφικών πόρων γεγονός που θα επηρεάσει άμεσα τις αναπτυσσόμενες πιέσεις πόρων αλλά και την απόκριση του συστήματος.
- Οι Aubeny et al (2006), προσδιορίζουν πως θα πρέπει να εξεταστούν εναλλακτικές επιλογές για την ερμηνεία των μετρήσεων διείσδυσης λόγω πρόσκρουσης και ειδικότερα ως προς το εφαρμοζόμενο μοντέλο πλαστικότητας που εξαρτάται από το ρυθμό επιβολής της

παραμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα προτείνουν την εκτέλεση έρευνας αναφορικά με τη δυνατότητα χρήσης μοντέλου ιξώδους (viscous), εδάφους για την παραπάνω διαδικασία. Μοντέλα όπως αυτό που προτείνεται παραπάνω έχουν εφαρμοστεί με μεγάλη επιτυχία για την πρόβλεψη του βάθους έμπηξης αγωγού σε θαλάσσιους πυθμένες αποτελούμενους από μαλακές εδαφικές αποθέσεις. Συστήνουν επίσης την εκτέλεση δοκιμών με το διεισδυσιόμετρο T-bar για τη μέτρηση της «δύναμης αναφοράς» (reference strength measurements) πολύ μαλακών αργίλων, σε σχεδόν υδαρή μορφή (liquid state). Με τον τρόπο αυτό, η παράμετρος του ρυθμού παραμόρφωσης θα μπορεί να εκτιμηθεί επί τόπου και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Το παραπάνω προτείνεται, αφού τα αποτελέσματα των μετρήσεων από δοκιμές μικροσκοπικού πτερυγίου σε τέτοια εδάφη αποτέλεσαν πηγή αβεβαιότητας για τη μελέτη τους. Η έντονη απόκλιση στα αποτελέσματα ενδέχεται να οφείλεται στη διατάραξη κατά τη δειγματοληψία. Επίσης προτείνουν νέες έρευνες για δοκιμές πρόσκρουσης σε σχηματισμούς με λεπτές ενστρώσεις άμμου. Η πρότερη έρευνα (Stroll et al, 2004) καταδεικνύει πως η αντίσταση διείσδυσης σε αμμώδεις σχηματισμούς επηρεάζεται από μια σύνθετη διαδικασία που περιλαμβάνει τη μερική στράγγιση και τη διασταλτικότητα του αμμώδους εδάφους.

 Οι Thethi et al (2001), προτείνουν περαιτέρω έρευνα αναφορικά με την απόκριση ως προς το μέγεθος της απόσβεσης του αγωγού που οφείλεται σε δονήσεις που προκαλούνται από την εμφάνιση λόγω αποκόλλησης της ροής στροβίλων και δινών (vortex- induced vibrations).

## 4.3 Αριθμητικές Μέθοδοι

- Οι Aubeny et al (2005), εκτιμούν πως δεν έχει δοθεί ακόμα ικανοποιητική απάντηση στο κατά πόσο είναι αποδεκτό να θεωρηθεί στις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, κατά τη διάρκεια της πρώτης προσέγγισης (πρώτος κύκλος φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης) μια ανοικτή τάφρος με κατακόρυφες πλευρές ή αν αυτή η τάφρος θα πρέπει να (όπως εμφανίζεται στις σχετικές αναλύσεις) δημιουργείται σταδιακά με την πάροδο των κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης-επαναφόρτισης. Επίσης, για την περίπτωση που αυτή η τάφρος μπορεί να θεωρηθεί εξαρχής(ως προϋπάρχουσα της διείσδυσης του riser), θα πρέπει να εξεταστεί το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος που αυτή μπορεί να έχει κατά την πρώτη προσέγγιση.
- Οι Clukey et al (2008), προτείνουν την ενσωμάτωση στο μοντέλου τους μιας εμπειρικής συνάρτησης «εκφυλισμού» (empirical degeneration function), που μπορεί να προσομοιώσει το σύνθετο φαινόμενο της ανάμειξης εδάφους-νερού. Συνιστούν τον υπολογισμό των παραμέτρων της παραπάνω συνάρτησης από ανάστροφες αναλύσεις από τις

υφιστάμενες βάσεις δεδομένων αντίστοιχων δοκιμών. Τέλος θεωρούν πως σε μελλοντικές έρευνες, είναι δυνατή η εκτίμηση αλλά και ενσωμάτωση της επιρροής της διάβρωσης του εδάφους στην περιοχή της τάφρου, με τη μελέτη και αξιολόγηση της κινηματικής των μορίων του νερού.

- Οι Bridge et al (2004), εκτιμούν πως στα μοντέλα της εδαφικής ακαμψίας που χρησιμοποιούνται για τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων θα πρέπει να ενσωματωθεί ένα «μοντέλο εδαφικής χαλάρωσης» (soil softening model) εξαιτίας της επαναλαμβανόμενης κυκλικής φόρτισης.
- Οι Aubeny et al (2007), συνιστούν την εκτέλεση περισσότερων εργαστηριακών πειραμάτων και αναλύσεων Η/Υ για μεγαλύτερο εύρος τιμών του ρυθμού παραμόρφωσης, προκειμένου να διασαφηνιστεί αν μπορεί να εφαρμοστεί η ημι-λογαριθμική εξίσωση συσχέτισης διατμητικής αντοχής με ρυθμό παραμόρφωσης, που προτείνουν, για όλες τις πιθανές τιμές του ρυθμού παραμόρφωσης. Συνεχίζουν τονίζοντας ότι στην περίπτωση που αυτό δεν επιβεβαιωθεί από τις νέες έρευνες, θα πρέπει να λάβει χώρα επικαιροποίηση του μοντέλου. Επίσης τοποθετούνται αναφορικά με την έλλειψη πειραματικών δεδομένων για τον οριακό ρυθμό παραμόρφωσης για πολύ μαλακές, κανονικώς στερεοποιημένες αργίλους, υποστηρίζοντας πως το παραπάνω αποτελεί εμπόδιο για τη χρήση του προτεινόμενου μοντέλου με αξιοπιστία. Για την περίπτωση που η οριακή τιμή του ρυθμού παραμόρφωσης είναι πολύ χαμηλή, τότε συνιστούν μοντέλο ιξώδους ρευστού για την προσομοίωση της συμπεριφοράς ως προς τη διατμητική αντίσταση του εδάφους του πυθμένα. Τέλος, προτείνουν την εκτέλεση επιπλέον έρευνας για τη βελτίωση της δυνατότητας ερμηνείας των αποτελεσμάτων επεμβατικών μεθόδων έρευνας (συσκευή διείσδυσης κώνου, διεισδυσιόμετρο T-Bar) σε υλικά με εξαρτώνται από επιβαλλόμενο παραμέτρους που TOV ουθυό παραμόρφωσης. Το παραπάνω απορρέει από την αδυναμία άμεσης μέτρησης της αντοχής πολύ μαλακών εδαφών, θεωρώντας πως ισχύουν συνθήκες ομοιόμορφης παραμόρφωσης και σταθερού ρυθμού παραμόρφωσης.
- Ο Nakhaee et al (2010), εκτιμούν πως θα πρέπει να συνεχιστεί η ερευνητική δραστηριότητα σχετικά με την αλληλεπίδραση αγωγούπυθμένα που να περιλαμβάνει την επιρροή στον αγωγό υψίσυχνων ταλαντώσεων που προκαλούνται από φαινόμενα vortex-induced vibrations (κατάντι περιοδική διάχυση στροβίλων και δινών που διεγείρουν υψίσυχνα το riser) αλλά και την πλευρική αντίσταση που αναπτύσσεται στον αγωγό εξαιτίας της αλληλεπίδρασής του με τα τοιχώματα της τάφρου. Επιπρόσθετα θα πρέπει να εξεταστεί η επιρροή μη περιοδικών επιβαλλόμενων ανοδικών κινήσεων του σημείου πρόσδεσης του αγωγού, καθώς τέτοια φαινόμενα θα μπορούσαν να λάβουν χώρα στην πραγματική κατάσταση χωρίς επαναληψιμότητα ή περιοδικότητα.

Η σειρά των αναφορών είναι αλφαβητική κατά το επώνυμο του κύριου συγγραφέα και εν συνεχεία, όπου απαιτείται, χρονολογική.

- 1. Aubeny C, Dunlap W (2003), **Penetration of Cylindrical Objects in Soft Mud**<sup>(7)</sup>, Proceedings IEEE Oceans 2003
- Aubeny C, Shi H, Murff M (2005), 'Collapse Loads for a Cylinder Embedded in Trench in Cohesive Soil', International Journal of Geomechanics ASCE Vol. 5, No. 4
- Aubeny C, Biscontin G, Zhang J (2006), 'Seafloor Interaction with Steel Catenary Risers'', Offshore Technology Research Center (Library Number 9/06A173)
- 4. Aubeny C, Shi H (2006), **'Interpretation of Impact Penetration Measurements in Soft Clays'**, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE Vol. 132
- 5. Aubeny C, Shi H (2007), *Effect of Rate-Dependent Soil Strength on* Cylinders Penetrating into Soft Clay<sup>(')</sup>, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 32, No. 1
- Aubeny C, Biscontin G (2008), *'Interaction Model for Steel* Compliant Riser on Soft Seabed', Offshore Technology Conference 194193
- 7. Aubeny C, Biscontin G (2009), **'Seafloor-Riser Interaction Model'**, Journal of Geomechanics 9(3)
- 8. Bai Y (2001), **''Pipelines and Risers'**, Handbook Ocean Engineering Book Series Vol. 3, Elsevier Publications
- 9. Bai Y, Bai Q (2005), **'Subsea Pipelines and Risers''**, Handbook, Elsevier Publications
- 10. Bhat J, Dutta A, Wu J, Sarkar I (2004), **''Pragmatic Solution to Touch-Down Zone Fatigue Challenges in Steel Catenary Risers**'', Offshore Technology Conference 16627
- 11. Bridge C, Howells H, Toy N et al (2003), **'Full scale model tests of a** steel catenary riser', Proceedings of International Conference on Fluid Structure Interaction

12. Bridge C, Laver K, Clukey E et al (2004), **'Steel Catenary Riser Touchdown Point Vertical Interaction Models'**, Offshore Technology Conference 16628

- 13. Casagrande A, Wilson S (1951), *'Effect of Rate of Loading on the* Strength of Clays and Shales at Constant Water Depth*'*, Geotechnique 2(3)
- 14. Clukey E, Ghosh R, Mokarata P, Dixon M (2007), **Steel Catenary Riser** (SCR) Design Issues at Touch Down Area<sup>\*\*</sup>, Proceedings of the Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference

15. Clukey E, Jacob P, Sharma P (2008), *'Investigation of Riser Seafloor* Interaction Using Explicit Finite Element', Offshore Technology Conference

- 16. Eddie H (2010), **''Pipeline/Riser Soil Interaction Analysis**'', PhD Thesis National University of Singapore
- 17. Haland G (1997), '**Penetration of large diameter pipelines**', Statoil report : 97S97-8268
- 18. Hansen J (1961), **A General Formula for Bearing Capacity**, Bulletin No 11, Danish Technical Institute pp.38-46
- Hu H, Leung C, Chow Y, Palmer A (2010), 'Centrifuge Modelling of SCR Vertical Motion at Touchdown Zone', Ocean Engineering 10.1016, Elsevier Publications
- 20. Nakhaee A, Zhang J (2009), *Trenching Effects on Dynamic Behavior of a Steel Catenary Riser*, Ocean Engineering 37
- 21. Nakhaee A (2010), ' Study of the Fatigue Life of Steel Catenary Risers in Interaction with the Seabed'', PhD Thesis Texas A&M University
- 22. Palmer A (2008), **Touchdown Indentation of the Seabed**, Applied Ocean Research 30
- 23. Pesce C, Aranha J, Martins C (1998), "The Soil Rigidity Effect in the Touchdown Boundary-Layer of a Catenary Riser: Static Problem", Proceedings of 8<sup>th</sup> International Conference on Offshore and Polar Engineering
- 24. Pesce C, Martins C, Silveira L (2006), *''* **Riser-Soil Interaction: Local Dynamics at TDP and a Discussion on the Eigenvalue and the VIV Problems***''* Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering 128

25. Stewart D, Randolph M (1994), **'T-Bar Penetration Testing in Soft Clay'**, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120

26. Stroll R, Sun Y, Bitte I (2004), *'' Measuring Sea Bed Properties Using Static and Dynamic Penetrometers''*, Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University

27. Thethi R, Moros T (2001), "**Soil Interaction Effects on Simple Catenary Riser Response**", Proceedings of Conference on Deepwater Pipeline and Riser Technology

- 28. Verley R, Lund K (1995), *A Soil Resistance Model for Pipelines Placed on Clayey Soils*, Proceedings of OMAE
- 29. Xu J, Jesudasen A, Fang J, Else M (2006), **' Wave Loading Fatigue Performance of SCR's in Underwater Applications**'', Offshore Technology Conference 18180