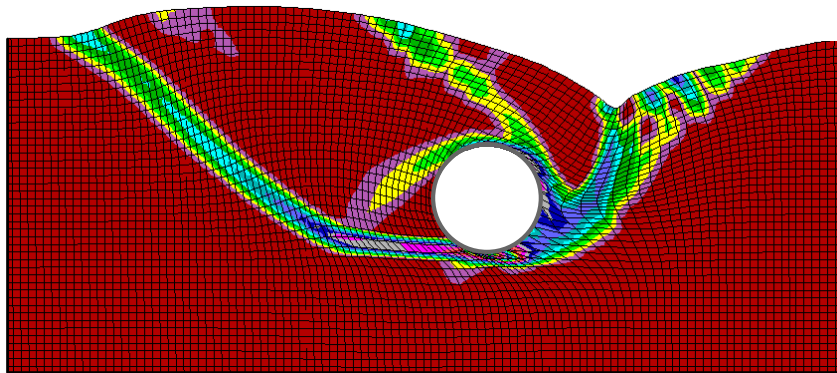




ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
**ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΓΩΓΟΥ ΣΕ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗ ΜΕ ΡΗΓΜΑ
ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ:
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΑΦΡΟΥ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ**

**Αλέξανδρος Ζάμπας
Σπυρίδων Ζερβός**

Επιβλέπων: Γεώργιος Δ. Μπουκοβάλας, Καθηγητής Ε.Μ.Π.



DIPLOMA THESIS
**PIPELINE ANALYSIS AT STRIKE-SLIP
FAULT CROSSING:
EFFECT OF EMBEDMENT TRENCH DIMENSIONS**

**Alexandros Zampas
Spyridon Zervos**

Supervisor: George D. Bouckovalas, Prof. N.T.U.A.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μας εργασίας, νιώθουμε την ανάγκη να εκφράσουμε γραπτώς τις ευχαριστίες μας στα άτομα η συμβολή των οποίων υπήρξε καθοριστική για την εκπόνησή της.

Πρωτίστως, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή κύριο Γιώργο Μπουκοβάλα για την πολύτιμη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μας εργασίας. Οι γνώσεις του, το οργανωτικό του πνεύμα και η συνεχής ενθάρρυνσή του αποτέλεσαν σημαντικούς παράγοντες για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Μας έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθούμε με ένα θέμα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος το οποίο μας ενθουσίασε από την αρχή μέχρι το τέλος, αλλά κυριότερα, μας έδωσε την ευκαιρία να αναβαθμίσουμε τις ικανότητές μας μέσω της τριβής μας με την παρούσα εργασία. Επιπρόσθετα, θα θέλαμε να τον ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα για τις πολύτιμες συμβουλές του, τόσο για θέματα σχετικά με τη διπλωματική εργασία, όσο και για θέματα ευρύτερου ενδιαφέροντος που κατά καιρούς μας απασχολούσαν.

Για τον μεταδιδακτορικό ερευνητή Γιάννη Χαλούλο τι να πρωτοπούμε. Ξέρουμε πως οποιαδήποτε προσπάθεια ποσοτικοποίησης της ευγνωμοσύνης μας προς το πρόσωπο του είναι εκ των προτέρων καταδικασμένη να αποτύχει. Το υπέρμετρο ενδιαφέρον που έδειξε προς εμάς και η βοήθεια του σε οτιδήποτε και αν χρειαζόμασταν, από το πιο απλό όπως ότι δύο μηδενικά είναι ίσα με ένα μηδενικό, έως τα πλέον εξεζητημένα επιστημονικά θέματα που αντιμετωπίσαμε, κέρδισαν στο Γιάννη μια ξεχωριστή θέση στην καρδιά μας. Ο Γιάννης, με το αστείρευτο χιούμορ του και την καλή του διάθεση, φρόντισε να καταστούν ευχάριστες ακόμη και οι πλέον απαιτητικές ημέρες εργασίας. Πάνω απ' όλα όμως, θέλουμε να τον ευχαριστήσουμε για την άριστη συνεργασία που είχαμε μαζί του, μέσω της οποίας γίναμε σοφότεροι ως μηχανικοί, κυρίως όμως, γίναμε καλύτεροι ως άνθρωποι.

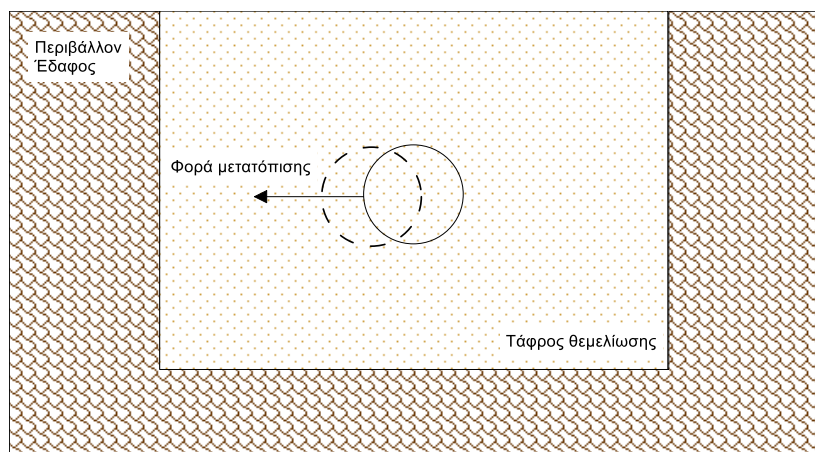
Ακόμη, δεν πρέπει να παραλείψουμε να πούμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στους Γιάννη Τσιάπα και Αλέξανδρο Βαλσαμή, για την ανιδιοτελή βοήθειά τους όσον αφορά την εκμάθηση του προγράμματος FLAC και την χρήση αναλυτικών μεθόδων προσομοίωσης αγωγών.

Τέλος, θέλουμε να εκφράσουμε την απέραντη ευγνωμοσύνη μας στις οικογένειές μας για την συμπαράστασή τους και τη συνεχή τους ενθάρρυνση κατά τη διάρκεια ενασχόλησής μας με τη διπλωματική εργασία, καθώς και στις Νατάσσα και Σοφία για την υπομονή και την υποστήριξή τους.

Εκτενής Περίληψη και Συμπεράσματα

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία εξετάζεται το πρόβλημα της οριζόντιας πλευρικής μετατόπισης χαλύβδινου αγωγού εγκιβωτισμένου εντός ορθογωνικού σκάμματος, με περιορισμένες διαστάσεις και επίχωση ξηρής άμμου, κατά τη διασταύρωσή του με ενεργό ρήγμα. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης των διαστάσεων της τάφρου θεμελίωσης του αγωγού, στις αναπτυσσόμενες εδαφικές αντιδράσεις, κατά την πλευρική μετατόπισή του.

Οι έως τώρα οδηγίες σχεδιασμού υπόγειων αγωγών βασίζονται σε πειράματα και αριθμητικές αναλύσεις, τα οποία θεωρούν θεμελίωση του αγωγού εντός άμμου επίχωσης μεγάλης έκτασης στο εγκάρσιο ως προς τον άξονα του αγωγού επίπεδο, χωρίς δηλαδή να συνυπολογίζεται το γεγονός ότι ο αγωγός κατά τη συνήθη πρακτική εγκιβωτίζεται εντός τάφρου θεμελίωσης αρκετά περιορισμένων διαστάσεων. Η ανάπτυξη επιπρόσθετων εδαφικών αντιδράσεων, λόγω της παρεμπόδισης της ελεύθερης εκδήλωσης της επιφάνειας αστοχίας εντός της τάφρου θεμελίωσης είναι ο κύριος προς διερεύνηση στόχος. Σχηματική απεικόνιση του προβλήματος που εξετάζεται παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1**.



Σχήμα 1: Αγωγός εντός τάφρου θεμελίωσης, υποβαλλόμενος σε πλευρική μετατόπιση
Σε πρώτο στάδιο αναπτύχθηκε αριθμητική μεθοδολογία για την προσομοίωση του προβλήματος που εξετάζεται, με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων διαφορών FLAC v7.0 (Itasca 2007). Για την περιγραφή της συμπεριφοράς του εδαφικού υλικού

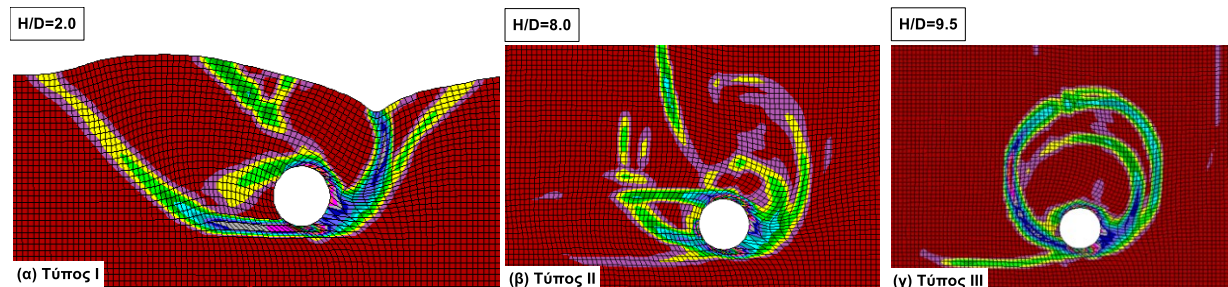
χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb. Επιπρόσθετα, για την ακριβέστερη προσομοίωση της σχετικής ολίσθησης μεταξύ του αγωγού και του περιβάλλοντος εδάφους κατά την μετακίνησή του, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία διεπιφάνειας (Interface elements) με μειωμένη γωνία τριβής. Τέλος, λόγω της έντονης μη γραμμικότητας του προβλήματος που εξετάζεται και της επιβολής μεγάλων μετακινήσεων, χρησιμοποιήθηκε η δυνατότητα που δίνει ο κώδικας για συνεχή ανανέωση των συντεταγμένων των κόμβων (Large strain mode), καθώς και η δυνατότητα αναδιάταξης του κανάβου με βάση την τρέχουσα παραμορφωσιακή κατάσταση (automatic rezoning). Κατόπιν της κατάστρωσης της αριθμητικής προσομοίωσης του προβλήματος, πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση-αξιολόγησή της με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα των Trautmann και O'Rourke (1983) καθώς και τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων των Kouretzis et al. (2013), για να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία των παραγόμενων αποτελεσμάτων πριν την έναρξη των παραμετρικών αναλύσεων.

Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Kouretzis et al. (2013), δίνει μία ξεκάθαρη εικόνα όσον αφορά τη μορφή και την έκταση της επιφάνειας αστοχίας που προκύπτει για βάθη εγκιβωτισμού που δεν ξεπερνάνε την τιμή $H/D=5.5$ (όπου H η απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους ως το κέντρο του αγωγού και D η διάμετρος του αγωγού). Στην παρούσα εργασία επιδιώχθηκε να διευρυνθεί το φάσμα αυτό και σε αρκετά μεγαλύτερα βάθη θεμελίωσης, καθώς η μορφή και η έκταση της σχηματιζόμενης επιφάνειας αστοχίας αποτελούν καθοριστικό παράγοντα στην κατανόηση των αναπτυσσόμενων εδαφικών αντιδράσεων. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε σειρά αναλύσεων πλευρικής μετακίνησης αγωγού στο ελεύθερο πεδίο για λόγους εγκιβωτισμού με τιμές από $H/D=1.5$ έως $H/D=16$. Τα ευρήματα των αναλύσεων αυτών καταδεικνύουν την ύπαρξη τριών χαρακτηριστικών τύπων αστοχίας:

- Ο **τύπος αστοχίας I** αναπτύσσεται για λόγους εγκιβωτισμού μικρότερους ή ίσους με την τιμή $H/D=4.5$ για άμμο μέσης πυκνότητας, και με την τιμή $H/D=6.0$ για χαλαρή άμμο. Στον τύπο αυτό, η επιφάνεια αστοχίας που δημιουργείται εκτείνεται έως την επιφάνεια και συνοδεύεται από τη ανάπτυξη δύο εδαφικών πρισμάτων (ενεργητικού και παθητικού).
- Ο **τύπος αστοχίας III** αναπτύσσεται για λόγους εγκιβωτισμού με τιμές μεγαλύτερες του $H/D=9.5$ για άμμο μέσης πυκνότητας και του $H/D=10$ για χαλαρή άμμο. Στην περίπτωση αυτή έχουμε ανάπτυξη μίας τοπικής επιφάνειας αστοχίας η οποία περιβάλλει τον αγωγό.
- Ο **τύπος αστοχίας II** αφορά τις ενδιάμεσες τιμές λόγων εγκιβωτισμού, δηλαδή για $4.5 < H/D < 9.5$ για άμμο μέσης πυκνότητας και $6.0 < H/D < 10$ για χαλαρή άμμο. Η

επιφάνεια αστοχίας που αναπτύσσεται παύει να εκτείνεται έως την επιφάνεια του εδάφους και αρχίζει να προσεγγίζει τον αγωγό.

Οι χαρακτηριστικές επιφάνειες αστοχίας που αναπτύσσονται για κάθε έναν από τους τρεις τύπους που περιγράφηκαν, παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2**:



Σχήμα 2: Οι τρεις διαφορετικές μορφές αστοχίας, για (α) μικρά, (β) μεσαία και (γ) μεγάλα βάρη εγκιβωτισμού του αγωγού

Η έκταση “x” της επιφάνειας αστοχίας υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$x/D = \left\{ \begin{array}{ll} 3 + 0.1 \cdot (H/D)^a, & H/D \leq (H/D)_{I-II} \\ -1.2 \cdot (H/D) + 13.1, & (H/D)_{I-II} < H/D < (H/D)_{II-III} \\ \beta, & H/D \geq (H/D)_{II-III} \end{array} \right\}, \quad (1)$$

Πίνακας 1: Βασικές παράμετροι αναλυτικής σχέσης υπολογισμού του λόγου x/D

Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Παράμετρος α	Παράμετρος β	(H/D) _{I-II}	(H/D) _{II-III}
Χαλαρή	1.88	1.10	6.0	10.0
Μέσης πυκνότητας	2.41	1.70	4.8	9.50

Οι παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της επίδρασης των διαστάσεων της τάφρου θεμελίωσης χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Επίδραση της μείωσης της οριζόντιας απόστασης “x” από το κέντρο του αγωγού, μετά την μετατόπισή του, έως την κατακόρυφη παρειά της τάφρου
- Επίδραση της μείωσης της κατακόρυφης απόστασης “d” από το κατώτατο σύνορο του αγωγού έως την οριζόντια παρειά της τάφρου

Για κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες εξετάστηκε ξεχωριστά η επίδραση στο οριακό φορτίο p_{ult} που αναπτύσσεται επί του αγωγού, και στην οριακή μετατόπιση y_{ult} στην οποία αυτό παρουσιάζεται. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων έγινε φανερή η έντονη επίδραση της μείωσης της οριζόντιας απόστασης x στην αναπτυσσόμενη επί του αγωγού καταπόνηση. Η επίδραση αυτή φάνηκε να φθίνει με την αύξηση του λόγου εγκιβωτισμού. Αντιθέτως, η μείωση της κατακόρυφης απόστασης d δεν φάνηκε να επηρεάζει αισθητά τις εδαφικές αντιδράσεις για βάθη εγκιβωτισμού που υπεισέρχονται στις μορφές αστοχίας τύπου I και II, ενώ παρουσίασε μόνο ελαφρά αυξητική επίδραση στα μέγιστα φορτία κατόπιν της μετάβασης στην αστοχία τύπου III.

Οι προτεινόμενες αναλυτικές σχέσεις για τους διορθωτικούς συντελεστές ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) και ($y_{ult}/y_{ult,inf}$), όπου $p_{ult,inf}$ και $y_{ult,inf}$ τα αντίστοιχα μεγέθη, για περιπτώσεις πλευρικής μετατόπισης αγωγών στο ελεύθερο πεδίο, είναι:

• **Επίδραση πλάτους της τάφρου (απόσταση “x”)**

$$\frac{p_{ult}}{p_{ult,inf}} = \begin{cases} \left[\frac{(x/D)_{crit}}{(x/D)} \right]^a, & x/D < (x/D)_{crit} \\ 1.0, & x/D \geq (x/D)_{crit} \end{cases}, \quad (2)$$

όπου ο συντελεστής a προσδιορίζεται από την σχέση:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{res} + [(H/D)_{crit} - (H/D)] \cdot \beta, & H/D < (H/D)_{crit} \\ \alpha_{res}, & H/D \geq (H/D)_{crit} \end{cases}, \quad (3)$$

Πίνακας 2: Βασικές παράμετροι αναλυτικής σχέσης για τον διορθωτικό συντελεστή ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) του οριακού φορτίου

Παράμετρος	$(x/D)_{crit}$	$(H/D)_{crit}$	α_{res}	β
Χαλαρή άμμος	5.0	6.5	0.48	0.12
Μέσης πυκνότητας άμμος	4.0	9.5	0.48	0.12

$$\frac{y_{ult}}{y_{ult,inf}} = \begin{cases} c, & x/D < (x/D)_{crit} \\ 1.0, & x/D \geq (x/D)_{crit} \end{cases}, \quad (4)$$

όπου η σταθερά c προσδιορίζεται ως εξής:

$$c = \begin{cases} c_{res} + [(H/D)_{crit} - (H/D)] \cdot \delta, & H/D < (H/D)_{crit} \\ c_{res} & H/D \geq (H/D)_{crit} \end{cases}, \quad (5)$$

Πίνακας 3: Βασικές παράμετροι αναλυτικής σχέσης για τον διορθωτικό συντελεστή ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) της οριακής μετατόπισης

Παράμετρος	$(x/D)_{crit}$	$(H/D)_{crit}$	c_{res}	δ
Χαλαρή άμμος	5.0	6.5	0.9	0.24
Μέσης πυκνότητας άμμος	4.0	9.5	0.9	0.24

- **Επίδραση απόστασης “d” από το οριζόντιο σύνορο της τάφρου**

Πίνακας 4: Τιμές διορθωτικού συντελεστή ($\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$) για $(d/D) < 1$

α/α	Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Λόγος H/D	$\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$
1	χαλαρή	$H/D < 9.5$	1.1 ± 0.10
2	χαλαρή	$H/D \geq 9.5$	1.2 ± 0.20
3	μέση	$H/D < 9.5$	1.0 ± 0.10
4	μέση	$H/D \geq 9.5$	1.2 ± 0.20

*Για τιμές του λόγου (d/D) μεγαλύτερες της μονάδας ο διορθωτικός συντελεστής ($\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$) θα λαμβάνεται ίσος με 1.0.

Πίνακας 5: Τιμές διορθωτικού συντελεστή ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) για $(d/D) < 1$

α/α	Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Λόγος H/D	$\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$
1	χαλαρή	$H/D < 9.5$	1.0
2	χαλαρή	$H/D \geq 9.5$	1.2
3	μέση	$H/D \leq 9.5$	0.8
4	μέση	$H/D > 9.5$	1.2

*Για τιμές του λόγου (d/D) μεγαλύτερες της μονάδας ο διορθωτικός συντελεστής ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) θα λαμβάνεται ίσος με 1.0.

Τέλος, εξετάστηκε η επίδραση της μείωσης του πλάτους της τάφρου θεμελίωσης σε όρους παραμόρφωσης στον αγωγό, με χρήση των διορθωτικών συντελεστών για τα οριζόντια εδαφικά ελατήρια, που προέκυψαν με βάση τις προτεινόμενες αναλυτικές σχέσεις. Για το σκοπό αυτό έγινε χρήση της μεθοδολογίας των Karamitros et al. (2007). Η παραπάνω

διαδικασία υπέδειξε πως η μείωση του πλάτους της τάφρου θεμελίωσης μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των παραμορφώσεων του αγωγού έως και 300%.

Extended Summary

The present Thesis deals with the problem of the lateral displacement of a steel pipe at an intersection with an active fault. The pipe is embedded in a rectangular trench of finite dimensions filled with dry sand. The purpose of the Thesis is to evaluate the effects of trench dimensions on the resulting soil reaction forces due to the displacement of the pipe.

Current practice with regard to the design of underground steel pipes is based on experimental and numerical data, which assume that the trench extends infinitely both in the horizontal and the vertical direction. In view of the above, the scope of the present study is the estimation of the modified soil pressures, resulting from the fact that the development of the failure mechanism corresponding to the case of infinite trench dimensions is impeded. The problem at hand is schematically illustrated in **Figure 1**.

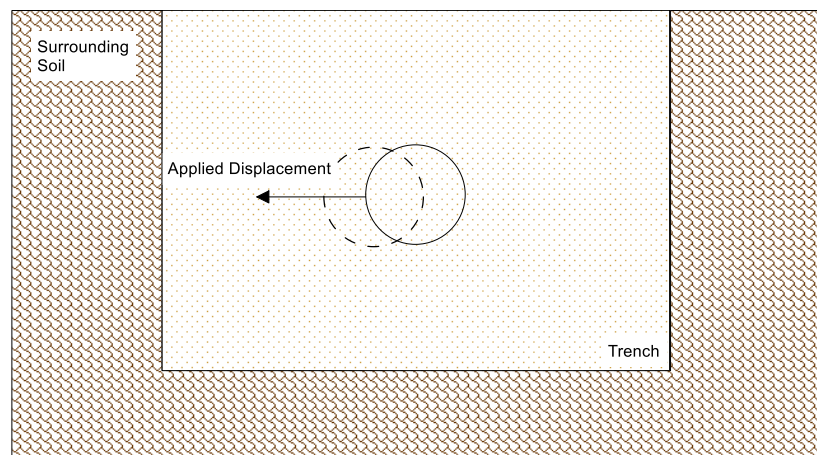


Figure 1: Problem layout: Pipe moving laterally inside a sand trench of finite dimensions

As a first step the study focuses on the development of a numerical methodology to analyze the problem in question. For this purpose, the finite differences code FLAC v7.0 (Itasca 2007) was incorporated, along with the elastoplastic Mohr-Coulomb constitutive model to describe the response of the backfill material. Furthermore, in order to capture the critical response pattern of the relative pipe –soil displacement, interface elements were placed

between the pipe and the soil. Finally, given the large magnitude of applied displacements, analyses were performed by activating FLAC's large strain mode in conjunction with an advanced user-defined rezoning technique. The methodology was calibrated and verified against the experimental data by Trautmann and O'Rourke (1983) and the numerical data by Kouretzis et al. (2013), ensuring its accuracy prior to the execution of the parametric analyses.

Kouretzis et al. (2013) provides a rather clear image with regard to the form and extent of the failure surface due to lateral pipe movement. However, his investigation is limited to cases where the embedment ratio, i.e. the normalized depth from the ground surface to the center of the pipe, H , over the diameter of the pipe, D , does not exceed the value $H/D=5.5$. In the present study, the range of examined embedment ratios is extended to a much greater range, while it is revealed the shape and the size of the failure surface is the determinant factor for the resulting soil reactions. For this purpose, a large set of analyses assuming free field were conducted, for embedment ratios between $H/D=1.5$ and $H/D=16$. The following three response patterns were identified:

- The **first type** is developed for embedment ratios that don't exceed $H/D=4.5$ and $H/D=6.0$ for sands of medium density as well as loose respectively. The failure surface in this case extends to the ground surface and is accompanied by the development of a passive and an active soil wedge (**Figure 2a**).
- The **third type** is developed for embedment ratios larger than $H/D=9.5$ for medium density backfill sand and $H/D=10$ for loose backfill sand. In this case, the failure surface is circular and is developed locally around the pipe (**Figure 2c**).
- Finally, the **second type** applies to the remaining, intermediate embedment ratios, i.e. for $H/D=4.5$ to $H/D=9.5$ for medium density backfill sand, and $H/D=6.0$ to $H/D=10$ for loose backfill sand. In this case, the surface does not extend to the ground surface and gradually obtains the local mode described above (**Figure 2b**).

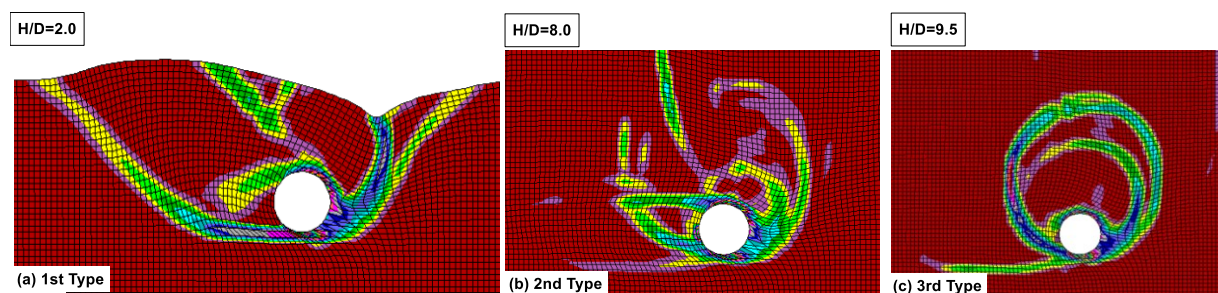


Figure 2: Three types of failure for (a) small (b) intermediate and (c) large depths

The extent of the failure surface, i.e. the length between the pipe center (after subtracting the applied displacement) and the boundary of the surface, can be estimated as follows:

$$x/D = \begin{cases} 3 + 0.1 \cdot (H/D)^a, & H/D \leq (H/D)_{I-II} \\ -1.2 \cdot (H/D) + 13.1, & (H/D)_{I-II} < H/D < (H/D)_{II-III} \\ \beta, & H/D \geq (H/D)_{II-III} \end{cases}, \quad (1)$$

Table 1: Basic parameters of the analytical relation for the calculation of the x/D ratio

Backfill Sand Density	Parameter α	Parameter β	$(H/D)_{I-II}$	$(H/D)_{II-III}$
Loose	1.88	1.10	6.0	10.0
Medium	2.41	1.70	4.8	9.50

The parametric investigation with regard to the effects of trench dimensions involved two sets of analyses:

- The effect of the horizontal distance “x”, from the center of the pipe to the vertical border of the trench, after the pipe displacement has been removed
- The effect of the vertical distance “d”, from the lower bound of the pipe to the horizontal border of the trench

For each one of the aforementioned categories, the effect on the ultimate soil reaction, p_{ult} and on the ultimate displacement at which the former is developed, y_{ult} , were examined separately. Interpretation of the results revealed that the lateral distance can drastically affect the response of the pile as it significantly increases the resulting axial strains with these effects being more pronounced for small depths. On the contrary, gradual decrease of the vertical boundary of the trench appeared to have a negligible effect on the response of the pipe for embedment ratios in the two first failure modes, whereas a slight increase of the pipe’s strains was observed for depths corresponding to the third failure mode.

The proposed analytical relations for the calculation of correction factors ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) and ($y_{ult}/y_{ult,inf}$), where $p_{ult,inf}$ and $y_{ult,inf}$ refer to the corresponding parameters for the case of pipe lateral displacement in the free field, are the following:

• **Effect of trench width (parameter “x”)**

$$\frac{p_{ult}}{p_{ult,inf}} = \begin{cases} \left[\frac{(x/D)_{crit}}{(x/D)} \right]^{\alpha}, & x/D < (x/D)_{crit} \\ 1.0, & x/D \geq (x/D)_{crit} \end{cases}, \quad (2)$$

where the coefficient α is estimated as follows:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{res} + [(H/D)_{crit} - (H/D)] \cdot \beta, & H/D < (H/D)_{crit} \\ \alpha_{res}, & H/D \geq (H/D)_{crit} \end{cases}, \quad (3)$$

In the above expressions the values for parameters $(x/D)_{crit}$, $(H/D)_{crit}$, α_{res} and β are obtained from Table 2:

Table 2: Basic parameters used for the calculation of the $(p_{ult}/p_{ult,inf})$ correction factor

Parameter	$(x/D)_{crit}$	$(H/D)_{crit}$	α_{res}	β
Loose Sand	5.0	6.5	0.48	0.12
Medium Sand	4.0	9.5	0.48	0.12

$$\frac{y_{ult}}{y_{ult,inf}} = \begin{cases} c, & x/D < (x/D)_{crit} \\ 1.0, & x/D \geq (x/D)_{crit} \end{cases}, \quad (4)$$

Coefficient c is calculated by the following equation:

$$c = \begin{cases} c_{res} + [(H/D)_{crit} - (H/D)] \cdot \delta, & H/D < (H/D)_{crit} \\ c_{res}, & H/D \geq (H/D)_{crit} \end{cases}, \quad (5)$$

Table 3: Basic parameters used for the calculation of the $(y_{ult}/y_{ult,inf})$ correction factor

Parameter	$(x/D)_{crit}$	$(H/D)_{crit}$	c_{res}	δ
Loose Sand	5.0	6.5	0.9	0.24
Medium Sand	4.0	9.5	0.9	0.24

- **Effect of distance “d” from the horizontal border of the trench**

Table 4: Correction factor ($\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$) values for $(d/D) < 1$

α/α	Backfill Sand Density	H/D Ratio	$\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}^*$
1	loose	$H/D < 9.5$	1.1 ± 0.10
2	loose	$H/D \geq 9.5$	1.2 ± 0.20
3	medium	$H/D < 9.5$	1.0 ± 0.10
4	medium	$H/D \geq 9.5$	1.2 ± 0.20

*For values of $(d/D) > 1$, the correction factor ($\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$)=1.0

Table 5: Values of the correction factor $\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$

α/α	Backfill Sand Density	Λόγος H/D	$\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$
1	loose	$H/D < 9.5$	1.0
2	loose	$H/D \geq 9.5$	1.2
3	medium	$H/D \leq 9.5$	0.8
4	medium	$H/D > 9.5$	1.2

* For values of $(d/D) > 1$, the correction factor ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$)=1.0

Finally, the proposed relationships were applied for the case of a laterally displaced pipe at an intersection with a strike-slip fault. The resulting pipe strains were evaluated by incorporating the analytical methodology proposed by Karamitros (2007), revealing an increase of up to 300% on the resulting maximum strains.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	3
1.1 Περιγραφή του Προβλήματος	3
1.2 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας	5
1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας	5
2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση	7
2.1 Γενικά	7
2.2 Σχεδιασμός αγωγών έναντι μόνιμων μετακινήσεων.....	7
2.2.1 Αξονικά ελατήρια	8
2.2.2 Εγκάρσια κατακόρυφα ελατήρια.....	9
2.2.3 Εγκάρσια οριζόντια ελατήρια	11
2.3 Πρόσφατες έρευνες απόκρισης αγωγού σε οριζόντια μετακίνηση	13
2.4 Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού Φέρουσας Ικανότητας	25
2.5 Συμπεράσματα.....	28
3. Αριθμητικές Αναλύσεις	31
3.1 Γενικά	31
3.2 Πειραματικές Μετρήσεις Trautmann Ο'Rourke (1983).....	32
3.3 Αριθμητική Προσομοίωση Οριζόντιας Μετατόπισης Αγωγού	33
3.4 Βαθμονόμηση αριθμητικής μεθοδολογίας	42
3.5 Παραμετρικές Αναλύσεις.....	46
3.6 Συμπεράσματα.....	50
4. Έκταση Επιφάνειας Αστοχίας	53
4.1 Γενικά	53
4.2 Μορφή επιφάνειας αστοχίας	54
4.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων	59
4.4 Συμπεράσματα.....	67
5. Επίδραση Διαστάσεων Τάφρου	69
5.1 Γενικά	69

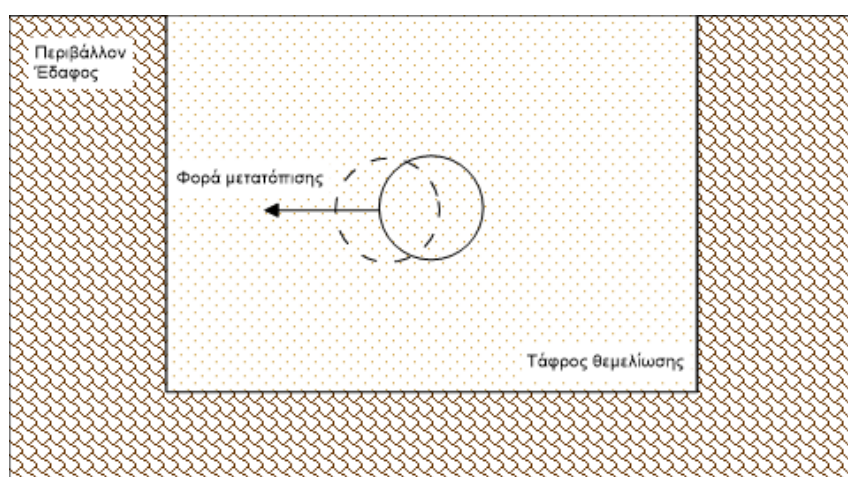
5.2	Υπολογισμός οριακού φορτίου (p_{ult}), οριακής μετατόπισης (y_{ult}).....	69
5.3	Επίδραση του πλάτους της τάφρου.....	72
5.3.1	Επίδραση στην οριακή εδαφική αντίδραση (p_{ult})	73
5.3.2	Επίδραση στην οριακή μετατόπιση (y_{ult}).....	87
5.4	Επίδραση απόστασης αγωγού από το οριζόντιο κάτω όριο της τάφρου	96
5.4.1	Επίδραση στην οριακή εδαφική αντίδραση (p_{ult})	96
5.4.2	Επίδραση στην οριακή μετατόπιση (y_{ult}).....	103
5.5	Συμπεράσματα.....	107
5.5.1	Επίδραση του πλάτους της τάφρου (x) στο οριακό φορτίο (p_{ult}).....	107
5.5.2	Επίδραση του πλάτους της τάφρου (x) στην οριακή μετατόπιση (y_{ult}).....	108
5.5.3	Επίδραση της απόστασης του αγωγού από το κάτω όριο της τάφρου (d) στο οριακό φορτίο (p_{ult})	109
5.5.4	Επίδραση της απόστασης του αγωγού από το κάτω όριο της τάφρου (d) στην οριακή μετατόπιση (y_{ult}).....	110
6.	Επίδραση στις Παραμορφώσεις Αγωγού.....	111
6.1	Γενικά	111
6.2	Αναλυτική μεθοδολογία Karamitros et al (2007)	111
6.3	Παραμετρικές Αναλύσεις και Αποτελέσματα.....	115
6.4	Συμπεράσματα.....	123
7.	Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	125
7.1	Συμπεράσματα.....	125
7.1.1	Μορφή και έκταση μηχανισμού αστοχίας.....	125
7.1.2	Επίδραση απόστασης “ x ” του κέντρο του αγωγού, μετά την επιβολή της μετατόπισης, από το κατακόρυφο σύνορο της τάφρου	127
7.1.3	Επίδραση απόστασης “ d ” του κατώτατου σημείου του αγωγού από το οριζόντιο σύνορο της τάφρου.....	129
7.1.4	Επίδραση του πλάτους της τάφρου στις παραμορφώσεις του αγωγού	130
7.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	130
14.	Βιβλιογραφία	131

1

Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του Προβλήματος

Στις διασταυρώσεις υπογείων αγωγών με ενεργά ρήγματα, η καταπόνηση που μπορεί να προκύψει κατά τη διάρρηξη του ρήγματος, αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους κινδύνους για την ασφάλεια του αγωγού. Και αυτό γιατί, στην προσπάθεια του (ο αγωγός) να ακολουθήσει τις μετατοπίσεις του εδάφους, κάμπτεται με αποτέλεσμα την ανάπτυξη εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων και παραμορφώσεων. Στην περίπτωση ορθών ρηγμάτων, καθώς και ρηγμάτων οριζόντιας διάρρηξης όπου η γωνία μεταξύ του άξονα του αγωγού και του διανύσματος της μετακίνησης στο κινούμενο τέμαχος είναι οξεία, οι ανωτέρω καμπτικές τάσεις και παραμορφώσεις επαλληλίζονται με αντίστοιχες εφελκυστικές. Αντίθετα, στην περίπτωση ανάστροφων ρηγμάτων, ή και ρηγμάτων οριζόντιας διάρρηξης όπου η γωνία μεταξύ του αγωγού και του διανύσματος της κίνησης είναι αμβλεία, η κάμψη του αγωγού συνοδεύεται και από θλίψη με σημαντικό κίνδυνο εμφάνισης φαινομένου τοπικού ή ολικού λυγισμού. Το πρόβλημα της οριζόντιας μετατόπισης αγωγού, εντός της τάφρου τοποθέτησης του παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1.1**.



Σχήμα 1.1: Αγωγός εντός τάφρου θεμελίωσης, υποβαλλόμενος σε πλευρική μετατόπιση

Ο συνηθέστερος τρόπος ανάλυσης της εντατικής κατάστασης του αγωγού στις παραπάνω περιπτώσεις είναι η μέθοδος της «δοκού επί εδαφικών ελατηρίων Winkler». Συγκεκριμένα, το έδαφος που περιβάλλει τον αγωγό αντικαθίσταται από κατανεμημένα ελατήρια Winkler σε τρισσορθογώνιο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, προσαρμοσμένο στον άξονα του αγωγού και η μετακίνηση του ρήγματος επιβάλλεται στο ελεύθερο άκρο των ελατηρίων που αντιστοιχούν στο ολισθαίνων τμήμα. Γίνεται επομένως κατανοητό, ότι η καταπόνηση του αγωγού για δεδομένη μετατόπιση ρήγματος, εξαρτάται από τη δυσκαμψία και το όριο διαρροής των εδαφικών ελατηρίων. Εάν το υλικό επίχωσης του αγωγού είναι χαλαρό, τα αντίστοιχα ελατήρια είναι εύκαμπτα και έχουν μικρό φορτίο διαρροής, με αποτέλεσμα ο αγωγός να δέχεται μικρές δράσεις από την επίχωση και να αναπτύσσει μικρή σχετικά καμπυλότητα. Αντίθετα, όταν το υλικό επίχωσης είναι πυκνό, οι εδαφικές αντιδράσεις επάνω στον αγωγό είναι μεγάλες, με αποτέλεσμα να τον εξαναγκάζουν να ακολουθεί πιστά τη sterlike μετατόπιση του ρήγματος και να εμφανίζει έντονη καμπυλότητα.

Οι αναλυτικές και εμπειρικές σχέσεις που προτείνονται από τις διεθνείς οδηγίες σχεδιασμού υπόγειων αγωγών (ASCE-ALA), έχουν προκύψει από πειράματα και αριθμητικές αναλύσεις, στις οποίες το υλικό επίχωσης (συνήθως χαλαζιακή άμμος) εκτείνεται σε μεγάλη οριζόντια και κατακόρυφη απόσταση, εγκάρσια από τη διατομή του αγωγού (Trautmann and O'Rourke 1983, Meyerhoff 1955). Πρόσφατα όμως οι Kouretzis et al. (2013), δημοσίευσαν μία επιμελώς στοιχειοθετημένη διερεύνηση σχετικά με το μέγεθος της επιφάνειας αστοχίας η οποία αναπτύσσεται κατά την οριζόντια μετακίνηση της διατομής του αγωγού, στην περίπτωση δηλαδή διασταύρωσής του με ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης καταδεικνύουν ότι η εν λόγω επιφάνεια αστοχίας αναδύεται στην επιφάνεια του εδάφους σε απόσταση από τον άξονα του αγωγού έως και $6D$, όπου D η διάμετρος του αγωγού. Σε σύγκριση με τις διαστάσεις της τάφρου εκσκαφής για την τοποθέτηση αγωγών, της οποίας η παρειά δεν απέχει πάνω από 1.5 έως $2D$ από τον άξονα του αγωγού, η μέγιστη απόσταση των Kouretzis et al. είναι σημαντικά μεγαλύτερη και δημιουργεί το εύλογο ερώτημα κατά πόσο τα μηχανικά χαρακτηριστικά των εδαφικών ελατηρίων που έχουν προκύψει για απείρως εκτεινόμενη άμμο επίχωσης θα πρέπει να αναθεωρηθούν. Ο λόγος είναι ότι η ύπαρξη εκσκαφής εντός σκληρού εδάφους με περιορισμένες σχετικά διαστάσεις εμποδίζει την ελεύθερη ανάπτυξη της επιφάνειας αστοχίας εντός της επίχωσης, αυξάνοντας έτσι την εδαφική αντίσταση που ασκείται στον αγωγό. Σε περίπτωση που αυτή η υπόθεση αποδειχθεί ότι ευσταθεί, θα σημαίνει ότι ο σχεδιασμός των αγωγών με τις σταθερές των ελατηρίων που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι μη συντηρητικός, γιατί υποεκτιμά τις δράσεις του εδάφους επί του αγωγού και κατ' επέκταση την καμπύλωση και τις αντίστοιχες παραμορφώσεις του.

1.2 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Κατ' επέκταση των ανωτέρω, η παρούσα Διπλωματική Εργασία εξετάζει το πρόβλημα της οριζόντιας μετατόπισης κυκλικής διατομής χαλύβδινου αγωγού εντός ξηρής άμμου. Σε γενικές γραμμές οι αριθμητικές αναλύσεις που έγιναν για το σκοπό αυτό ακολουθούν την καλά τεκμηριωμένη μεθοδολογία των Kouretzis et al., προκειμένου να εξασφαλισθεί η συμβατότητα με τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν. Η συστηματική διαφοροποίηση από την εν λόγω ανάλυση αφορά στη θεώρηση της τάφρου, η οποία είναι ορθογωνική και ανένδοτη όσον αφορά τις κινήσεις εντός επιπέδου εγκάρσια προς τον άξονα του αγωγού.

1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Εν περιλήψει, οι επιμέρους εργασίες που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας είναι οι ακόλουθες:

Στο **Κεφάλαιο 2** πραγματοποιείται βιβλιογραφική αναδρομή στους υπάρχοντες κανονισμούς σχετικά με τη διαστασιολόγηση αγωγών, υποβαλλόμενων σε μετατόπιση στον τρισδιάστατο χώρο. Επιπλέον παρουσιάζονται συνοπτικά πρόσφατες έρευνες σχετικά με την απόκριση αγωγών υποβαλλόμενων σε πλευρική μετατόπιση.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η αριθμητική μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του προβλήματος που αντιμετωπίζεται καθώς και η βαθμονόμηση της με βάση υπάρχοντα πειραματικά και αναλυτικά δεδομένα. Επιπρόσθετα, παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας με το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Στο **Κεφάλαιο 4** εξετάζεται η διαφοροποίηση στη μορφή των σχηματιζόμενων επιφανειών αστοχίας για πλευρική μετατόπιση του αγωγού, σε σχέση με το βάθος εγκιβωτισμού του. Η σημασία των ευρημάτων του παρόντος κεφαλαίου είναι καθοριστική για την κατανόηση της συμπεριφοράς του αγωγού στις παραμετρικές αναλύσεις του Κεφαλαίου 5.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων σταδιακής μείωσης των διαστάσεων της τάφρου θεμελίωσης. Η επίδραση του πλάτους της τάφρου και της απόστασης του αγωγού από το οριζόντιο σύνορό της εξετάζονται ξεχωριστά. Έπειτα προτείνονται αναλυτικές σχέσεις για τον υπολογισμό των διορθωτικών συντελεστών του μέγιστου φορτίου επί του αγωγού και της οριακής εδαφικής μετατόπισης στην οποία αυτό παρουσιάζεται.

Στο **Κεφάλαιο 6** εξετάζεται η απόκριση του αγωγού στη διορθωμένη καταπόνηση που υπολογίστηκε μέσω των προτεινόμενων αναλυτικών σχέσεων, με χρήση της μεθοδολογίας των Karamitros et al. (2007).

Στο **Κεφάλαιο 7** συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα Εργασία και προτείνονται πεδία για μελλοντική έρευνα σχετικά με το εξεταζόμενο αντικείμενο.

Βιβλιογραφική Επισκόπηση

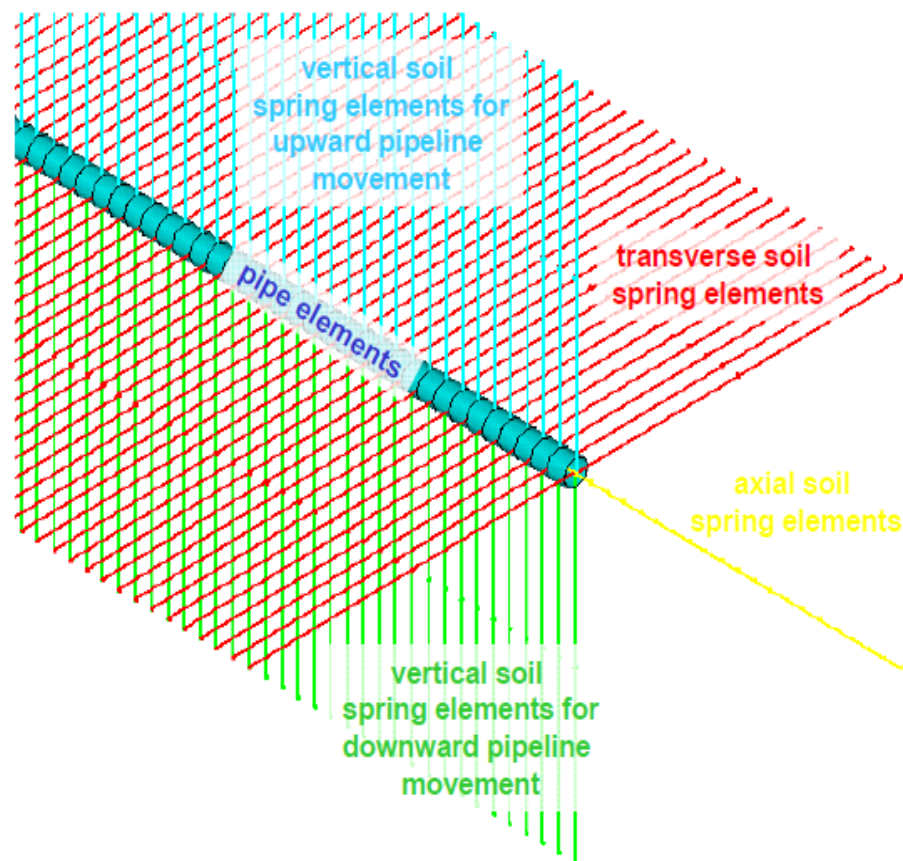
2.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η βασική βιβλιογραφία αναφορικά με την συμπεριφορά και ανάλυση μεταλλικών αγωγών υποβαλλόμενων σε οριζόντια κινηματικά φορτία (π.χ. λόγω εδαφικής ρευστοποίησης, μετακίνησης ενεργού ρήγματος πλησίον του αγωγού, κατολισθητικών φαινομένων, εκσκαφών κ.λ.π.). Πληθώρα πειραματικών (π.χ. Audibert and Nyman 1977, Trautmann and O' Rourke 1983) και αναλυτικών (π.χ. Rowe and Davis 1982, Yimsiri et al. 2004, Kouretzis et al. 2013) μελετών έχουν πραγματοποιηθεί ως τώρα προκειμένου να μελετηθεί η αλληλεπίδραση εδάφους-αγωγού με έμφαση στους μηχανισμούς που επιδρούν στην ανάπτυξη των εδαφικών αντιδράσεων. Στα επόμενα κεφάλαια περιγράφεται αναλυτικά η τρέχουσα μεθοδολογία σχεδιασμού, και συνοψίζονται τα κυριότερα ευρήματα πρόσφατων ερευνών σχετικά με την μελέτη της συμπεριφοράς αγωγών υπό κινηματική φόρτιση.

2.2 Σχεδιασμός αγωγών έναντι μόνιμων μετακινήσεων

Ο συνηθέστερος τρόπος σχεδιασμού και μελέτης στην πράξη της συμπεριφοράς εγκιβωτισμένων στο έδαφος αγωγών βασίζεται στην μέθοδο της δοκού επί ελατηριωτού εδάφους. Ο αγωγός προσομοιώνεται είτε με στοιχεία δοκού (συνηθέστερα) είτε με σε στοιχεία σωλήνα, τα οποία επιτρέπουν την απ' ευθείας εφαρμογή της εσωτερικής πίεσης, παράλληλα προς την εξωτερικά επιβαλλόμενη φόρτιση. Η αλληλεπίδραση εδάφους-αγωγού προσομοιώνεται μέσω πέντε (5) μη-γραμμικών ελατηρίων ανά διατομή (**Σχήμα 2.1**): ένα στην αξονική, δύο στην εγκάρσια οριζόντια και δύο στην εγκάρσια κατακόρυφη διεύθυνση. Το ένα άκρο καθενός εκ των παραπάνω ελατηρίων είναι συνδεδεμένο με τον αγωγό και το άλλο παραμένει ακλόνητο, ενώ η μετακίνηση του εδάφους αντιστοιχεί σε επιβαλλόμενη μετατόπιση στο ακλόνητο άκρο των εν λόγω ελατηρίων.

Η θεωρία για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών των ελατηρίων του εδάφους περιγράφεται εν συντομία στις ακόλουθες παραγράφους. Έμφαση θα δοθεί στις περιπτώσεις μη συνεκτικών εδαφών που αποτελούν και το συνηθέστερο εδαφικό υλικό πλήρωσης της τεχνητής τάφρου που κατασκευάζεται για την εγκατάσταση του αγωγού.



Σχήμα 2.1: Χρήση ελαστοπλαστικών ελατηρίων για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους-αγωγού

2.2.1 Αξονικά ελατήρια

Οι οριακές αξονικές δυνάμεις των ελατηρίων αντιστοιχούν στην τριβή που ασκείται στην εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια κατά μήκος του αγωγού, και υπολογίζονται με βάση θεωρίες ανάλογες προς αυτές που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της μεταφοράς φορτίων στις αξονικώς φορτιζόμενες διεπιφάνειες πασσάλου-εδάφους. Για τις άμμους και άλλα μη συνεκτικά εδάφη, οι εν λόγω δυνάμεις λαμβάνονται με την ολοκλήρωση των διατμητικών τάσεων κατά μήκος της επιφάνειας επαφής αγωγού-εδάφους.

Για έναν πλήρως εγκιβωτισμένο σε μη συνεκτικό υλικό αγωγό η μέγιστη αξονική αντίσταση ανά μονάδα μήκους μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$t_u = \frac{\pi \cdot d}{2} \gamma \cdot H \cdot (1 + K_0) \tan \delta \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (2.1)$$

όπου:

K_0 :συντελεστής ουδέτερης ώθησης γαιών

H : απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους ως το κέντρο του αγωγού

d : εξωτερική διάμετρος αγωγού

γ : ξηρό ειδικό βάρος επίχωσης

δ : γωνία τριβής μεταξύ αγωγού και επίχωσης

Ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας του αγωγού, η γωνία τριβής δ είναι ίση με το $50 \div 100\%$ της γωνίας τριβής ϕ της επίχωσης.

2.2.2 Εγκάρσια κατακόρυφα ελατήρια

Οι δυνάμεις αντίστασης για τα κατακόρυφα ελατήρια είναι μη συμμετρικές, δηλαδή η απόκριση είναι διαφορετική για τις «προς τα κάτω» και τις «προς τα πάνω» μετακινήσεις, δεδομένου ότι η αντίσταση που αναπτύσσεται από το σχετικά λεπτό στρώμα της επίχωσης πάνω από τον αγωγό είναι σημαντικά μικρότερη.

Για «προς-τα-κάτω» μετακίνηση θεωρείται ότι ο αγωγός ενεργεί ως κυλινδρικό θεμέλιο-λωρίδα και η μέγιστη εδαφική αντίσταση q_u δίνεται από την συμβατική θεωρία φέρουσας ικανότητας για μη συνεκτικά εδάφη:

$$q_u = \gamma \cdot H \cdot N_q \cdot d + 0.5 \cdot \gamma \cdot d^2 \cdot N_\gamma \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (2.2)$$

όπου:

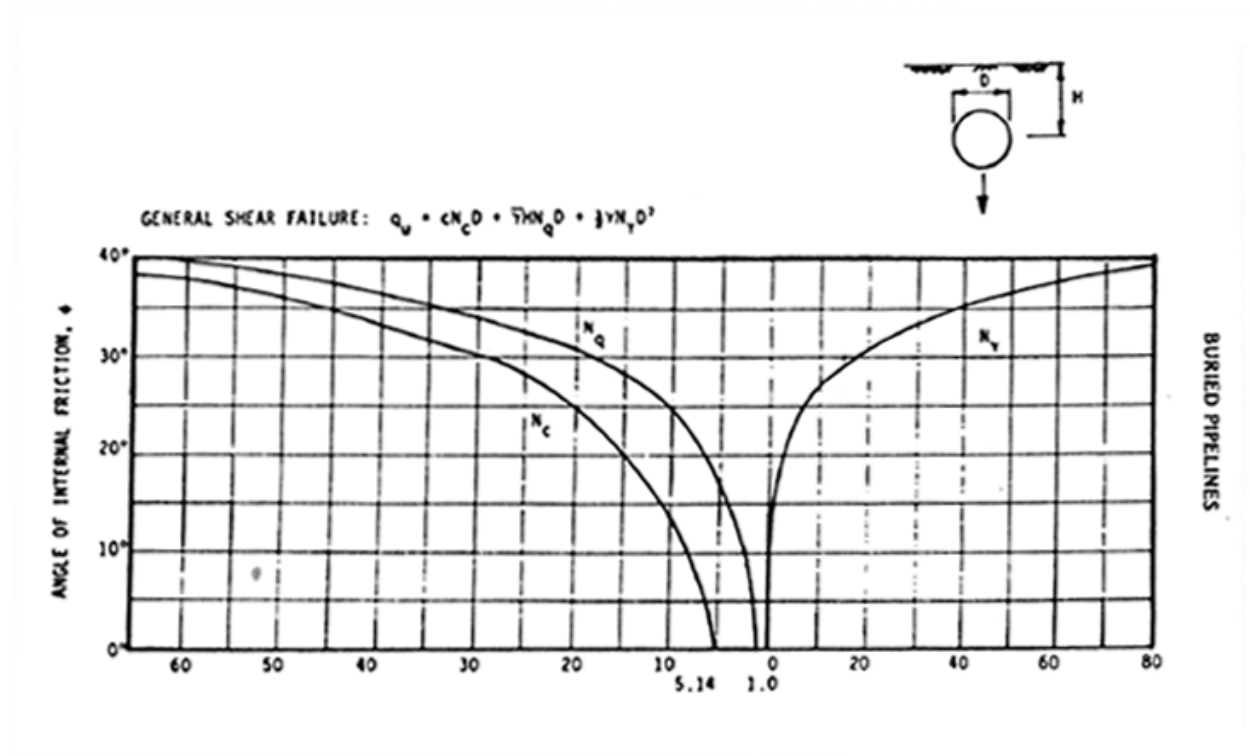
N_q, N_γ : συντελεστές φέρουσας ικανότητας για λωριδωτά θεμέλια που φορτίζονται κατακόρυφα προς τα κάτω, οι οποίοι υπολογίζονται από το **Σχήμα 2.2** συναρτήσει της γωνίας τριβής ϕ (Meyerhof, 1955)

γ : ξηρό ειδικό βάρος επίχωσης

H : βάθος επίχωσης του άξονα του αγωγού

d : διάμετρος αγωγού

Για την περίπτωση ενός διγραμμικού νόμου δύναμης-μετατόπισης, η μετακίνηση κατά την αστοχία μπορεί να ληφθεί ως το 10-15% της διαμέτρου του αγωγού ($z_{u,dn} = 0.10d \div 0.15d$) για πυκνές και χαλαρές άμμους αντίστοιχα.



Σχήμα 2.2: Συντελεστές κατακόρυφης προς τα κάτω φέρουσας ικανότητας (από Meyerhof, 1955)

Για «προς-τα-άνω» μετακίνηση του αγωγού η σχέση μεταξύ της δύναμης q και της κατακόρυφης προς τα άνω μετατόπισης z μπορεί να εκφραστεί από την ακόλουθη υπερβολική σχέση (Trautmann and O' Rourke, 1983b):

$$q = \frac{z}{A + B \cdot z} \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (2.3)$$

όπου:

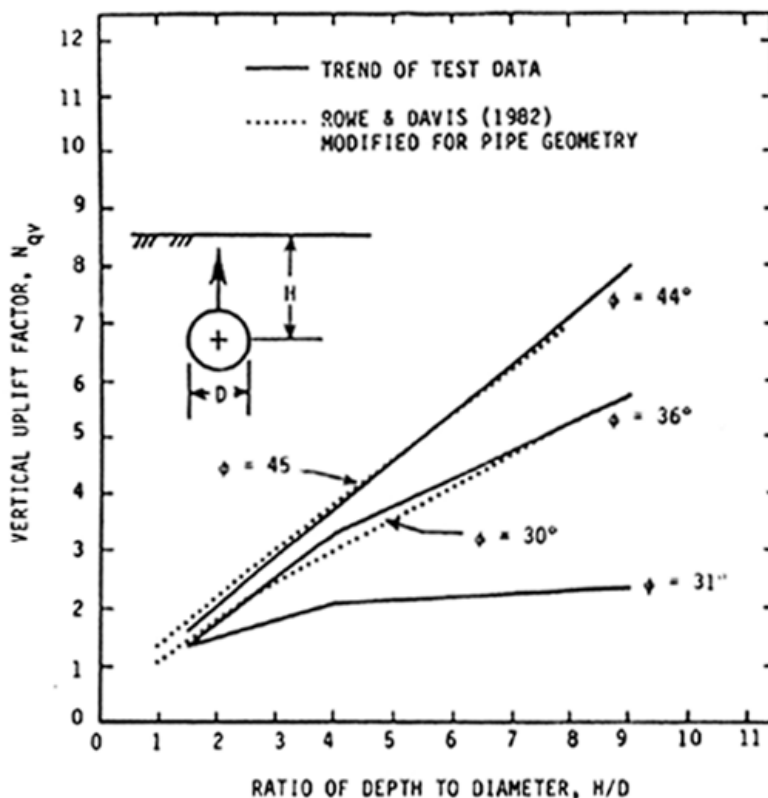
$$A = 0.07z_u / q_u \quad (2.4)$$

$$B = 0.93 / q_u \quad (2.5)$$

Για μη συνεκτικά εδάφη, η μέγιστη αντίσταση υπολογίζεται ως εξής (Trautmann and O' Rourke, 1983b):

$$q_u = \gamma \cdot H \cdot N_{qv} \cdot d \quad (2.6)$$

όπου ο συντελεστής κατακόρυφης ανύψωσης N_{qv} δίνεται στο **Σχήμα 2.3** ως συνάρτηση του λόγου του βάθους του άξονα του αγωγού προς την διάμετρο H/d και της γωνίας τριβής της επίχωσης ϕ .



Σχήμα 2.3: Συντελεστής κατακόρυφης προς τα άνω φέρουσας ικανότητας (από Trautmann and O' Rourke, 1983a)

2.2.3 Εγκάρσια οριζόντια ελατήρια

Τα ελατήρια αυτά προσομοιώνουν την αντίσταση που ασκείται από το περιβάλλον έδαφος λόγω οριζόντιας μετατόπισης του αγωγού. Κατά συνέπεια, οι μηχανισμοί της αλληλεπίδρασης εδάφους-αγωγού είναι παρόμοιοι με εκείνους των κατακόρυφων πλακών αγκύρωσης ή των θεμελίων που κινούνται οριζόντια σχετικά με το περιβάλλον έδαφος, ενεργοποιώντας έτσι έναν μηχανισμό παθητικής ώθησης γαιών.

Για μη συνεκτικά εδάφη, η σχέση μεταξύ της δύναμης p ανά μονάδα μήκους του αγωγού και της οριζόντιας μετατόπισης y , εκφράζεται από την ακόλουθη υπερβολική σχέση (Trautmann and O' Rourke, 1983a):

$$p = \frac{y}{A + B \cdot y} \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (2.7)$$

όπου:

$$A=0.15\gamma_u/\rho_u \quad (2.8)$$

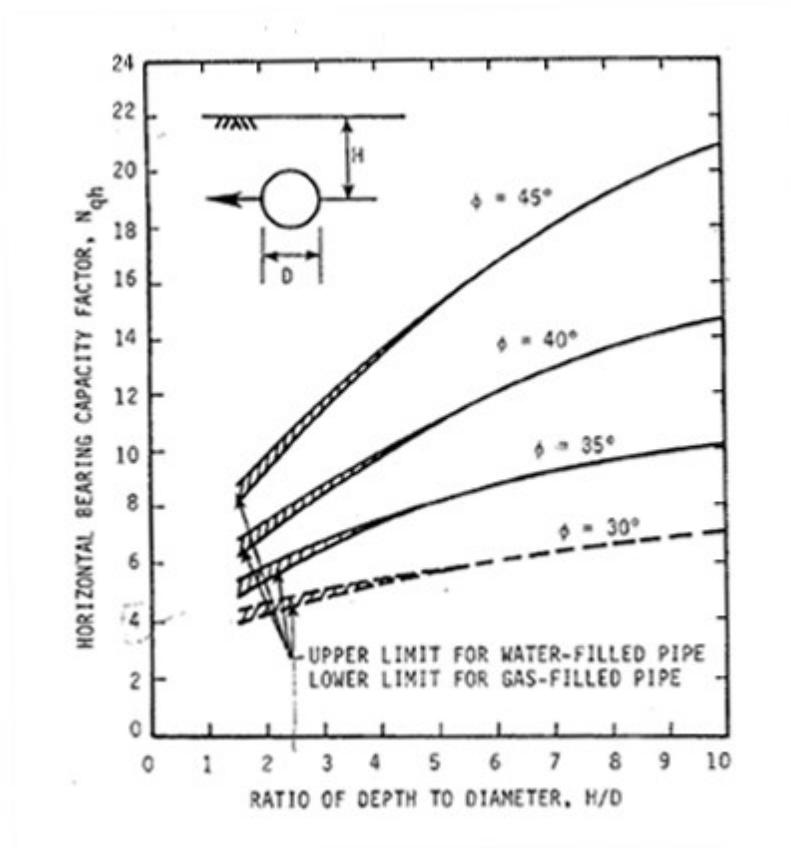
$$B=0.85/\rho_u \quad (2.9)$$

$$\rho_u=\gamma H N_{qh} d \quad (2.10)$$

N_{qh} : συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας που υπολογίζεται από το **Σχήμα 2.4** (Trautmann and O' Rourke, 1983a)

$$\gamma_u = 0.07 \text{ έως } 0.10 (H+d/2) \text{ για χαλαρή άμμο} \quad (2.11)$$

$$0.02 \text{ έως } 0.03 (H+d/2) \text{ για πυκνή άμμο} \quad (2.12)$$



Σχήμα 2.4: Συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας (από Trautmann and O' Rourke, 1983a)

2.3 Πρόσφατες έρευνες απόκρισης αγωγού σε οριζόντια μετακίνηση

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, ο υπολογισμός των οριζόντιων ελατηρίων πραγματοποιείται με βάση τις προτάσεις των **Trautmann and O' Rourke (1983)**, οι οποίοι με δεδομένες τις μεγάλες αποκλίσεις των προγενέστερων ερευνών σχετικά με την συμπεριφορά των αγωγών σε πλευρική εδαφική μετακίνηση, πραγματοποίησαν μια σειρά πειραμάτων με σκοπό:

- Την εύρεση της μέγιστης οριζόντιας εδαφικής αντίδρασης που αναπτύσσεται επί του αγωγού.
- Τον προσδιορισμό της μη-γραμμικής σχέσης δύναμης-μετατόπισης του αγωγού.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από ένα κιβώτιο διαστάσεων 1.2 m x 2.3 m x 1.2 m. Χρησιμοποιήθηκε άμμος τύπου Cornell (Cornell filter sand) σε πυκνότητες που αντιστοιχούν σε ξηρό ειδικό βάρος $\gamma=14.8, 16.4$ και 17.7 kN/m^3 και σε γωνίες εσωτερικής τριβής $31^\circ, 36^\circ$ και 44° αντίστοιχα. Πραγματοποιήθηκαν τριάντα (30) δοκιμές πλευρικής φόρτισης σε αγωγούς διαμέτρου $D=102 \text{ mm}$ και $D=324 \text{ mm}$ και μήκους $L=1.20 \text{ m}$ για διάφορους λόγους εγκιβωτισμού $H/D=1.5-11$ (μικρά έως μέσα βάθη εγκιβωτισμού).

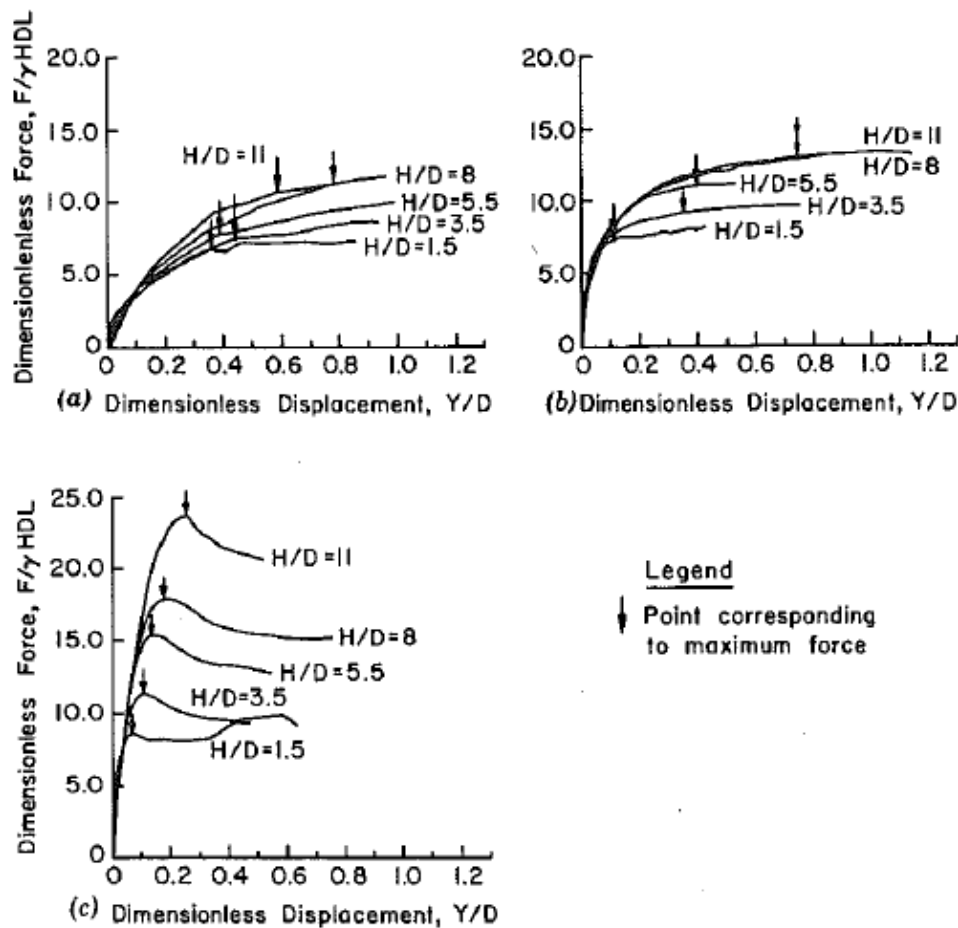
Οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης που προέκυψαν από τα παραπάνω πειράματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.5a, b** και **c** για γωνίες τριβής $\phi=31^\circ, 36^\circ$ και 44° αντίστοιχα, σε όρους αδιαστατοποιημένης εδαφικής αντίδρασης ($F/\gamma HDL$) – αδιαστατοποιημένης πλευρικής μετατόπισης (Y/D). Τα βέλη στις καμπύλες αντιπροσωπεύουν τα σημεία της μέγιστης αδιαστατοποιημένης δύναμης N_h , η οποία εμφανίζεται για μετατόπιση Y_f και υπολογίζεται ως εξής:

$$N_h = \frac{F_m}{\gamma \cdot H \cdot D \cdot L} \quad (2.13)$$

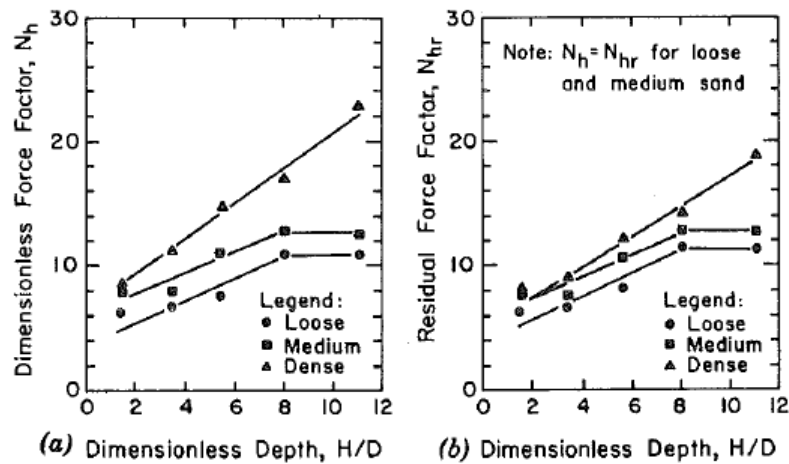
όπου F_m η μέγιστη μετρηθείσα τιμή της οριζόντιας δύναμης.

Στην περίπτωση πυκνής άμμου, η μέγιστη δύναμη που δρα επί του αγωγού φαίνεται ξεκάθαρα από τις σχηματιζόμενες καμπύλες φορτίου-μετατόπισης που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.5c. Στην περίπτωση άμμου μέσης πυκνότητας, για τον προσδιορισμό της μέγιστης δύναμης που δρα επί του αγωγού εφαρμόστηκε το κριτήριο Hansen 90%. Το κριτήριο Hansen 90% είναι ένα εμπειρικό κριτήριο προσδιορισμού του σημείου αστοχίας ενός εδαφικού στοιχείου στην καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων που προτάθηκε από τον J. Brinch Hansen. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, το σημείο αστοχίας ενός εδαφικού στοιχείου ορίζεται ως το σημείο με τάση που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση ίση με την διπλάσια παραμόρφωση που αναπτύσσεται σε τάση μικρότερη κατά 10% από την τάση του σημείου αστοχίας. Όταν η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης έχει τέτοια μορφή που το σημείο αστοχίας

δεν μπορεί να προσδιοριστεί, ο παραπάνω ορισμός δίνει μοναδικό σημείο αστοχίας. Τέλος, για τη χαλαρή άμμο, η θέση της μέγιστης δύναμης προσδιορίσθηκε στο σημείο αλλαγής κλίσης των καμπυλών φορτίου-μετατόπισης. Μάλιστα, στις περιπτώσεις λόγω εγκιβωτισμού $H/D=8.0$ και 11 , ο προσδιορισμός του σημείου αυτού ήταν τόσο αβέβαιος, που το αποτέλεσμα σε όρους μετατόπισης, δεν χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις.



Σχήμα 2.5: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για γωνίες τριβής (a) $\phi=31^\circ$, (b) $\phi=36^\circ$ και (c) $\phi=44^\circ$ (από Trautmann and O' Rourke, 1983)



Σχήμα 2.6: Σχέση (a) N_h και (b) N_{hr} με τον λόγο H/D για γωνίες τριβής $\phi=31^\circ$, $\phi=36^\circ$ και $\phi=44^\circ$ (από Trautmann and O' Rourke, 1983)

Στο **Σχήμα 2.6α** και **2.6β** φαίνεται η σχέση μεταξύ της μέγιστης αδιαστατοποιημένης οριζόντιας δύναμης (N_h) και της παραμένουσας αδιαστατοποιημένης οριζόντιας δύναμης (N_{hr}) με το λόγο εγκιβωτισμού H/D για χαλαρή, πυκνή και μέσης πυκνότητας άμμο. Εξετάστηκαν βάθη εγκιβωτισμού H/D με εύρος τιμών από 0 έως 11. Με βάση τα ανωτέρω, οι ερευνητές κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα αναφορικά με την συμπεριφορά του εγκιβωτισμένου αγωγού και την αλληλεπίδραση του αγωγού με το έδαφος:

- Μόνο στην περίπτωση της πυκνής άμμου (Σχήμα 2.5) η δύναμη λαμβάνει μια παραμένουσα τιμή (N_{hr}) όταν η μετατόπιση αυξηθεί περαιτέρω από αυτή που αντιστοιχεί στην εμφάνιση της μέγιστης οριζόντιας δύναμης (N_h). Αντίθετα, στις άλλες δύο περιπτώσεις, τίθεται $N_h=N_{hr}$.
- Για χαλαρές άμμους και άμμους μέσης πυκνότητας υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του λόγου H/D πέρα από την οποία η τιμή του N_h παραμένει σταθερή. Το φαινόμενο αυτό σηματοδοτεί αλλαγή του μηχανισμού αστοχίας, από έναν μηχανισμό παθητικής σφήνας που εκδηλώνεται επιφανειακά σε ένα βαθύ μηχανισμό επίπεδης αστοχίας σε μεσαία και μεγάλα βάθη. Σημειώνεται ότι για την περίπτωση της πυκνής άμμου, δεν κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός της κρίσιμης τιμής του λόγου H/D , πιθανώς λόγω του περιορισμένου εύρους τιμών του που εξετάστηκαν.
- Τέλος, παρατηρείται ότι η διαφορά στις τιμές του N_h και N_{hr} για χαλαρές άμμους και άμμους μέσης πυκνότητας είναι σχετικά μικρή. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην συμπίεση της χαλαρής άμμου κατά την κίνηση του αγωγού με αποτέλεσμα τιμές της οριζόντιας δύναμης παραπλήσιες με αυτές που προκύπτουν για άμμους μέσης πυκνότητας.

Με βάση τα παραπάνω προτάθηκε η ακόλουθη μεθοδολογία υπολογισμού της καμπύλης δύναμης μετατόπισης:

- Διαπιστώθηκε πως η μη γραμμική σχέση δύναμης-μετατόπισης μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη υπερβολική σχέση (**Σχήμα 2.7**):

$$F'' = \frac{Y''}{(0.17 + 0.83Y'')} \quad (2.14)$$

όπου :

$$F'' = (F/\gamma_{HDL})/N_h \quad (2.15)$$

$$Y'' = (Y/D)/(Y_f/D) \quad (2.16)$$

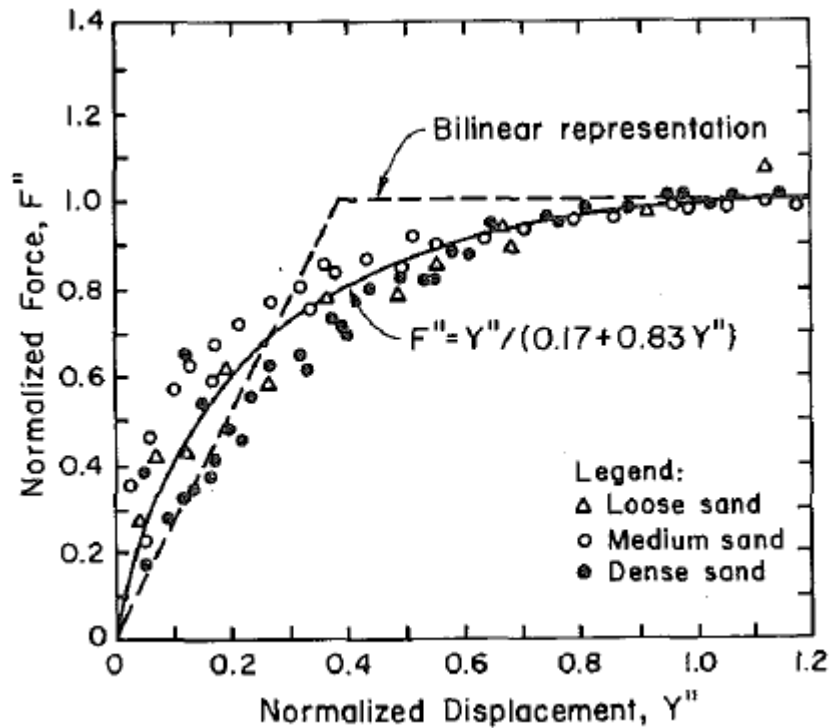
- Η παραπάνω καμπύλη προσεγγίστηκε και με μια σχέση διγραμμικής μορφής (Σχήμα 2.7) για την περιγραφή της οποίας απαιτείται ο υπολογισμός της αρχικής δυσκαμψίας (K_{h70}), καθώς και της οριακής εδαφικής αντίδρασης (F''). Η αρχική δυσκαμψία υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$K_{h70} = C_k \cdot N_h \cdot \gamma \cdot D \cdot L \quad (2.17)$$

- όπου C_k συντελεστής που εξαρτάται από την σχετική πυκνότητα του εδάφους (**Πίνακας 2.1**)
- Τέλος, για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας προτείνεται το διάγραμμα του σχήματος Σχήμα 2.4 για την διαστασιολόγηση και μελέτη των εγκιβωτισμένων αγωγών που αποτελεί τμήμα των σύγχρονων κανονισμών διαστασιολόγησης όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.2.3.

Πίνακας 2.1: Τιμές του συντελεστή C_k (από Trautmann and O' Rourke, 1983)

Soil density (1)	Displacement at maximum horizontal force (2)	Factor for estimating horizontal soil stiffness, C_k (3)
Loose	0.13H	20
Medium	0.08H	30
Dense	0.03H	80

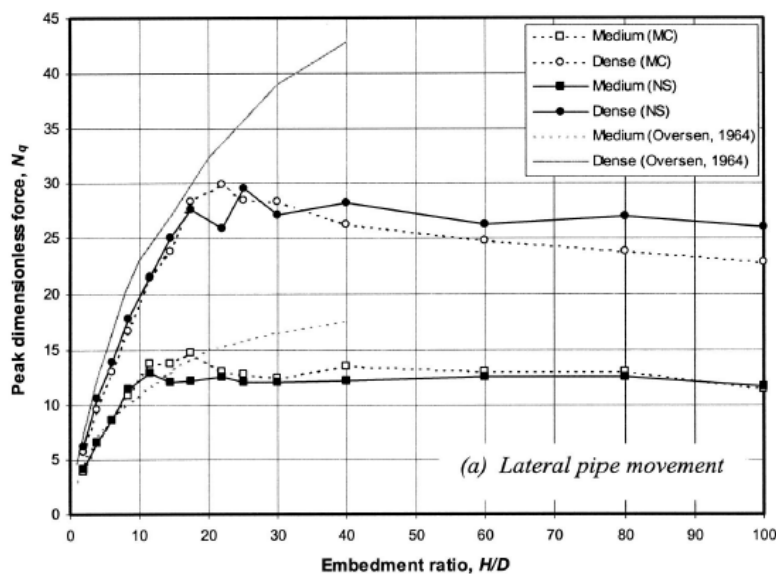


Σχήμα 2.7: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με την υπερβολική και διγραμμική προσέγγιση (από Trautmann and O' Rourke, 1983)

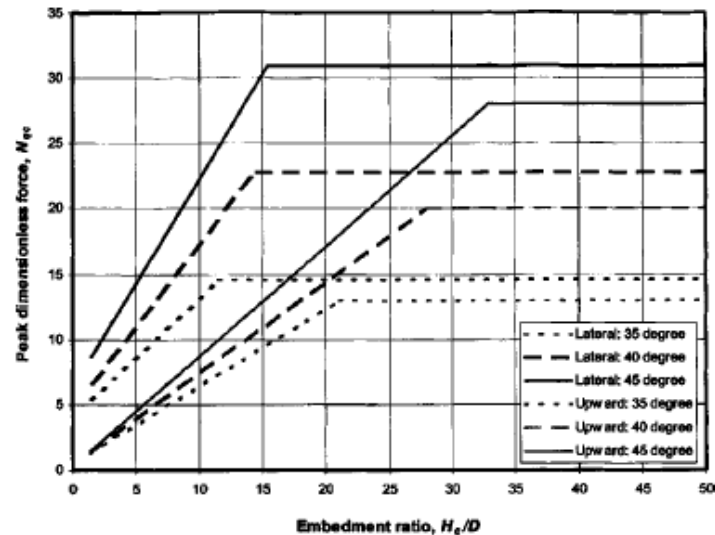
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα πειράματα των Trautmann and O' Rourke αφορούσαν σχετικά μικρά βάθη εγκιβωτισμού με τιμές ($H/D=1.5-11$). Οι **Yimsiri et al. (2004)** εξέτασαν την περίπτωση μεγάλων βαθών εγκιβωτισμού ($H/D=11-100$) τα οποία δεν προβλεπόντουσαν από τον ως τότε υπάρχοντα κανονισμό. Συγκεκριμένα πραγματοποίησαν αριθμητικές αναλύσεις με χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (HKS 1998), στις οποίες η απόκριση της άμμου προσομοιώθηκε με το προσομοίωμα Mohr-Coulomb καθώς και το Nor-Sand Model.

Αρχικά, οι αναλύσεις επικεντρώθηκαν στην προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων των Trautmann και O' Rourke (1983) και στην συνέχεια επεκτάθηκαν για μεγάλα βάθη εγκιβωτισμού. Η γεωμετρία του κανάβου πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση πλευρικής μετακίνησης ακολουθούσε την αντίστοιχη γεωμετρία της πειραματικής διάταξης των Trautmann and O'Rourke. Ο κανάβος είχε πλάτος 2.3 m, ενώ το ύψος του αποτελούσε συνάρτηση του εκάστοτε λόγου εγκιβωτισμού H/D . Βασική διαφορά με την πειραματική διάταξη των Trautmann and O'Rourke, εντοπιζόταν στο γεγονός ότι το περιθώριο κάτω από τον αγωγό παρέμενε σταθερό και ίσο με 300 mm για τις διάφορες περιπτώσεις βαθών εγκιβωτισμού, έναντι των 200 mm που χρησιμοποιήθηκαν από τους Trautmann and O'Rourke.

Στο **Σχήμα 2.8** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για πυκνή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας σε όρους μέγιστης αδιαστατοποιημένης δύναμης (N_q) και λόγου εγκιβωτισμού (H/D), για τα δύο καταστατικά προσομοιώματα (Mohr-Coulomb και Nor-Sand) καθώς και η σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του **Ovesen (1964)**. Από το ίδιο σχήμα (Σχήμα 2.8) προσδιορίστηκε ο κρίσιμος λόγος H/D έπειτα από τον οποίο η τιμή της N_q παραμένει σταθερή. Για πλευρική μετατόπιση του αγωγού και άμμο μέσης πυκνότητας η τιμή αυτή προσδιορίστηκε ίση με $H/D=12$ ενώ η αντίστοιχη τιμή για πυκνή άμμο προέκυψε ίση με $H/D=16$. Τέλος, προτάθηκε το διάγραμμα σχεδιασμού (**Σχήμα 2.9**) εγκιβωτισμένων αγωγών που επεκτείνεται και σε μεγάλες τιμές του λόγου H/D . Στο σχήμα αυτό παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις των Yimsiri et al. για τις περιπτώσεις πλευρικής αλλά και κατακόρυφης προς τα πάνω μετατόπισης. Τα βάθη εγκιβωτισμού (H/D) που παρουσιάζονται έχουν τιμές από 1.5 έως 50. Παρατίθενται τα αποτελέσματα για τρεις περιπτώσεις άμμου με χαλαρή, μέση και πυκνή δομή και με γωνίες τριβής 35° , 40° και 45° , αντίστοιχα.



Σχήμα 2.8: Σχέση N_q με το λόγο H/D για μεγάλα βάθη εγκιβωτισμού (από Yimsiri et al., 2004)



Σχήμα 2.9: Προτεινόμενο διάγραμμα σχεδιασμού (από Yimsiri et al., 2004)

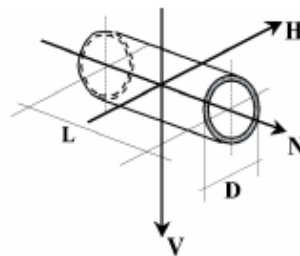
Η πλειονότητα των πειραματικών (π.χ. Audibert and Nyman 1977, Trautmann and O' Rourke 1983) και αναλυτικών (π.χ. Rowe and Davis 1982, Yimsiri et al. 2004, Kouretzis et al. 2013) μελετών έχει εξετάσει τις περιπτώσεις εγκιβωτισμένων αγωγών υποβαλλόμενων σε φορτίσεις σε κάποια από τις κύριες διευθύνσεις του αγωγού (**Σχήμα 2.10**). Μάλιστα, σε κάθε περίπτωση εξετάζεται μονοτονική φόρτιση με μοναδική διεύθυνση και όχι συνδυασμός φορτίσεων σε διαφορετικές διευθύνσεις. Οι **Claudio di Prisco και Adrea Galli (2006)** επεκτάθηκαν στην μελέτη αγωγών υποκείμενων σε στατικές φορτίσεις εκτός οριζόντιας και κατακόρυφης διεύθυνσης, καθώς και σε ανακυκλικές φορτίσεις.

Για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας του αγωγού υπό συνδυασμό φορτίσεων στην πλευρική οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων υπό κλίμακα. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε περιλάμβανε ένα κιβώτιο διαστάσεων 0.890 m x 0.400 m x 0.200 m και αγωγό διαμέτρου 5 cm και μήκους 16 cm. Για την πλήρωση του κιβωτίου χρησιμοποιήθηκε άμμος (Ticino sand) σε πυκνότητες 16.48 kN/m³ (dense sand) και 14.58 kN/m³ (loose sand). Οι λοιπές ιδιότητες της άμμου ήταν $D_R=100\%$, $\phi=42.12^\circ$ και $D_R=37.2\%$, $\phi=32.35^\circ$ για την περίπτωση πυκνής και χαλαρής άμμου, αντίστοιχα. Τα πειράματα εκτελέστηκαν για τρεις τιμές του λόγου εγκιβωτισμού z/D ίσες με 1.5, 2.5 και 3.5.

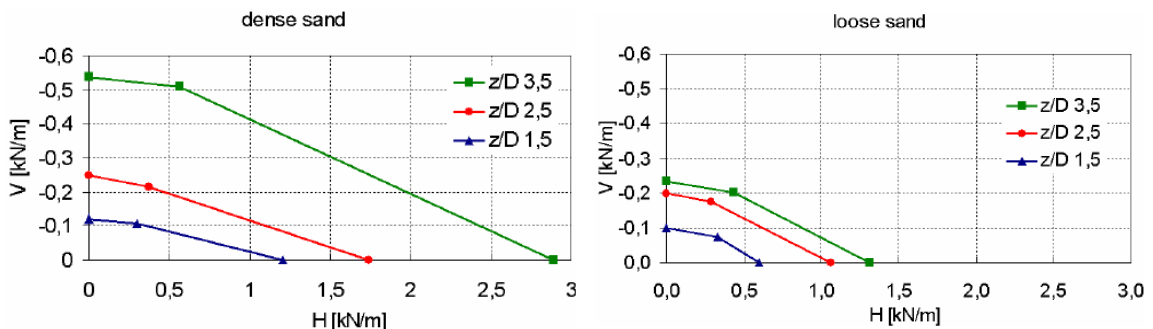
Στο **Σχήμα 2.11** φαίνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων σε όρους μέγιστης κατακόρυφης εδαφικής αντίδρασης (κατακόρυφος άξονας) και μέγιστης οριζόντιας εδαφικής αντίδρασης (οριζόντιος άξονας) για πυκνή και χαλαρή άμμο. Παρατηρείται έντονη αλληλεπίδραση κατακόρυφης και οριζόντιας φόρτισης (η ύπαρξη κατακόρυφης φόρτισης επηρεάζει την φέρουσα ικανότητα του αγωγού σε οριζόντια φόρτιση και αντίστροφα).

Για την επαλήθευση των πειραματικών αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Tochnog (FEAT, 2004). Ο αγωγός προσομοιώθηκε ως ένα άκαμπτο κυκλικό σώμα, διαμέτρου 0.75m, εγκιβωτισμένο στο έδαφος σε βάθος 1.125 m. Για την περιγραφή της συμπεριφοράς του εδάφους χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb με τις εξής παραμέτρους: η συνοχή του εδάφους θεωρήθηκε μηδενική ($c=0$ kPa), η γωνία εσωτερικής τριβής ίση με 30° ($\phi=30^\circ$) και η γωνία διαστολικότητας, ψ , ίση με 20° . Για την προσομοίωση της διεπιφάνειας μεταξύ του αγωγού και του περιβάλλοντος εδάφους χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία διεπιφάνειας με γωνία τριβής ίση με τα $2/3$ της γωνίας του εδάφους.

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων αναδεικνύουν την ύπαρξη αλληλεπίδρασης μεταξύ της κατακόρυφης και οριζόντιας φόρτισης, όπως είχε παρατηρηθεί και από τα πειράματα. Ωστόσο τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης (coupling effects) εμφανίζονται μόνο μεταξύ των εγκάρσιων στον αγωγό δυνάμεων, δηλαδή της εγκάρσιας οριζόντιας και εγκάρσιας κατακόρυφης δύναμης. Αντίθετα, δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των εγκάρσιων φορτίσεων και της αξονικής δύναμης. Οι ερευνητές αποδίδουν την συμπεριφορά αυτή στο γεγονός ότι κατά την διαμήκη διεύθυνση η αστοχία εξαρτάται από τις ιδιότητες της διεπιφάνειας αγωγού-εδάφους και αφορά την ανάπτυξη τριβής στην επιφάνεια του αγωγού, ενώ κατά τις εγκάρσιες διευθύνσεις ο μηχανισμός αστοχίας περιλαμβάνει την κινητοποίηση του περιβάλλοντος εδάφους και εξαρτάται από τις εδαφικές παραμέτρους.



Σχήμα 2.10: Κύριες διευθύνσεις φόρτισης αγωγού (από di Prisco & Adrea Galli, 2006)



Σχήμα 2.11: Περιβάλλουσα αστοχίας στο επίπεδο V-H για πυκνή και χαλαρή άμμο (από di Prisco & Adrea Galli, 2006)

Τέλος, αναφορικά με την επιβολή ανακυκλικών φορτίσεων στον αγωγό, διαπιστώθηκε η αδυναμία ενός ελαστικού-πλήρους πλαστικού μοντέλου αστοχίας του εδάφους να περιγράψει την πραγματική εδαφική συμπεριφορά.

Οι **Kouretzis et al. (2013)** επικεντρώθηκαν σε μικρές τιμές του λόγου εγκιβωτισμού $H/D \leq 5.5$, που αντικατοπτρίζουν τις συνήθεις κατασκευαστικές πρακτικές αγωγών τοποθετημένων σε ρηχή τάφρο η οποία πληρώνεται με άμμο.

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS/Explicit. Οι προαναφερθείσες περιπτώσεις βαθών εγκιβωτισμού εξετάστηκαν για άμμους με πυκνότητες 14.8 kN/m^3 (loose sand) και 16.4 kN/m^3 (medium sand). Η γεωμετρία του κανάβου που χρησιμοποιήθηκε ήταν ίδια με την αντίστοιχη κατά Yimsiri et al. που παρουσιάζεται στο παρών κεφάλαιο. Οι αναλύσεις, κατόπιν της βαθμονόμησής τους με βάση τα δεδομένα των Trautmann and O'Rourke και Yimsiri et al., είχαν ως στόχο αρχικά την κατάστρωση απλής μαθηματικής σχέσης για τον υπολογισμό της μέγιστης δύναμης που αναπτύσσεται επί του αγωγού, και έπειτα τον καθορισμό των βέλτιστων διαστάσεων για την τάφρο θεμελίωσής του.

Αρχικά, αποδεικνύεται ότι για μικρές τιμές του λόγου εγκιβωτισμού H/D ($H/D \leq 5.5$) και άμμους χαλαρής και μέσης πυκνότητας, οι δυνάμεις που δρουν επί του αγωγού εξαρτώνται κυρίως από την παραμένουσα γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ_{crit}) του εδάφους. Αυτό συμβαίνει διότι στις περιπτώσεις αυτές, ο μηχανισμός αστοχίας που αναμένεται να αναπτυχθεί συνοδεύεται από πολύ μεγάλες παραμορφώσεις. Συνεπώς, στην κατάσταση αυτή, η συμπεριφορά της άμμου είναι λογικό να εξαρτάται από την παραμένουσα γωνία τριβής (ϕ_{crit}).

Η χρήση της μέγιστης γωνίας τριβής (ϕ_{peak}) δίνει ένα άνω όριο για τον υπολογισμό των δυνάμεων επί του αγωγού ενώ η χρήση της παραμένουσας (ϕ_{crit} , $\psi=0$) δίνει το αντίστοιχο κάτω όριο. Με βάση τα παραπάνω, προτείνεται για μικρές τιμές του λόγου H/D η εξίσωση (2.18) για τον υπολογισμό της μέγιστης αδιαστατοποιημένης δύναμης N_h επί του αγωγού, που είναι ανεξάρτητη της μέγιστης εσωτερικής γωνίας τριβής (ϕ_{peak}) του εδάφους:

$$N_h = 0.42\left(\frac{H}{D}\right) + 13.8\left(\frac{\gamma}{\gamma_{\text{ref}}}\right) - 8.1 \quad (2.18)$$

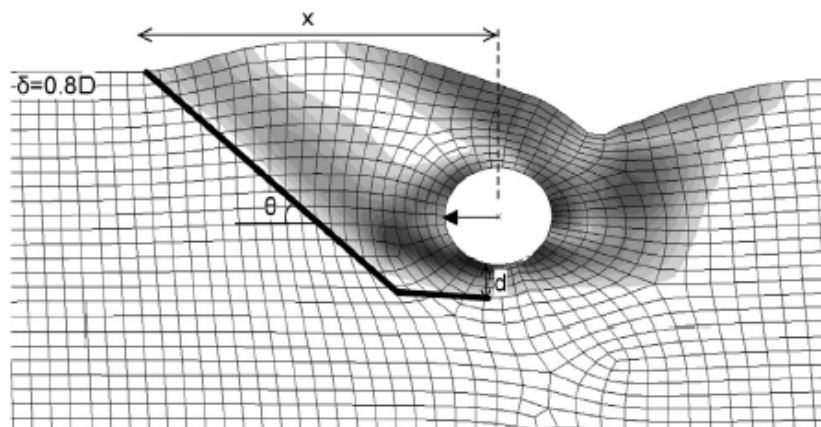
όπου γ_{ref} το ειδικό βάρος του υλικού πλήρωσης για σχετική πυκνότητα $D_r=0\%$.

Στη συνέχεια η έρευνα επικεντρώθηκε στην έκταση και την γεωμετρία της επιφάνειας αστοχίας που αντιστοιχεί στην οριακή φέρουσα ικανότητα. Ενδεικτικά στο **Σχήμα 2.12** φαίνεται μια τυπική επιφάνεια αστοχίας μετά από οριζόντια μετακίνηση του αγωγού. Ιδανικά, οι διαστάσεις της τάφρου θα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε η επιφάνεια αστοχίας να

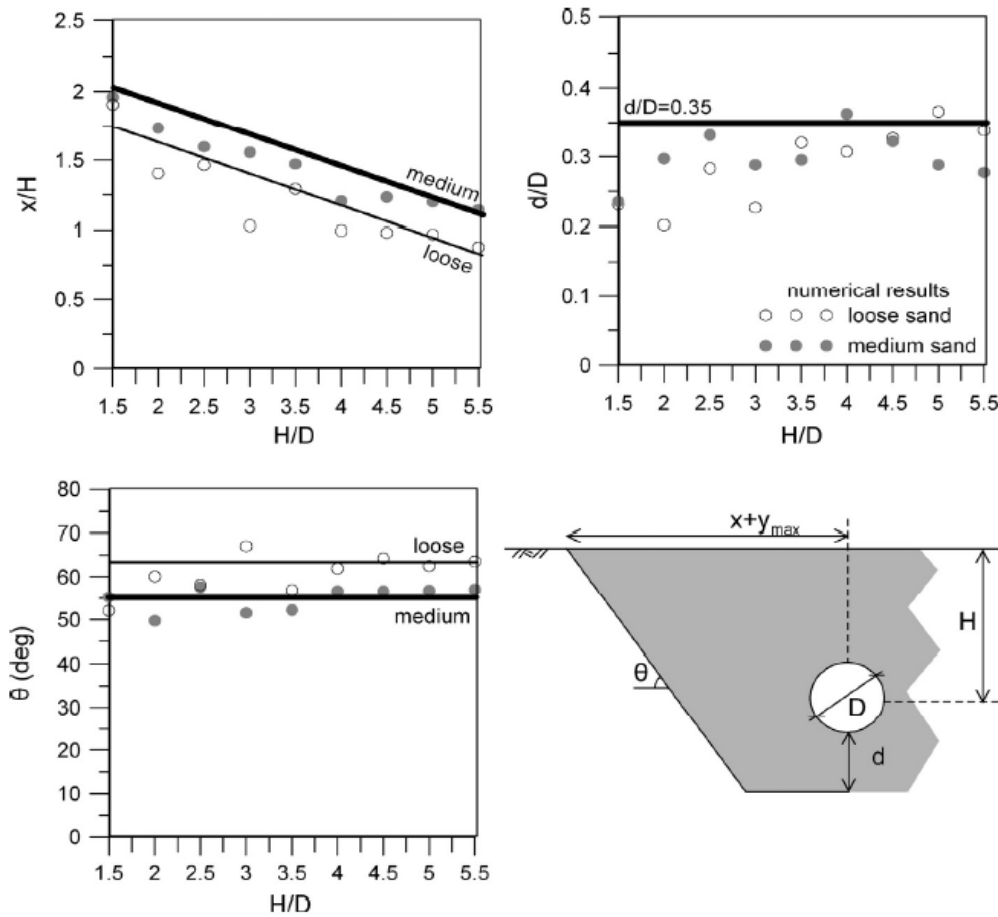
εφάπτεται σε αυτή ή να την περιλαμβάνει. Ως εκ τούτου, και μετά από εξέταση των παραμορφωμένων κανάβων των αναλύσεων, προτάθηκαν διαγράμματα για τη διαστασιολόγηση της τάφρου εγκιβωτισμού, έτσι ώστε η συμπεριφορά του αγωγού να εξαρτάται αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά του υλικού πλήρωσης και όχι από το συνήθως πολύ πιο δύσκαμπτο περιβάλλον έδαφος. Τα διαγράμματα αυτά απεικονίζονται στο **Σχήμα 2.13**. Το σχήμα αυτό συνοψίζει τις διαστάσεις των σχηματιζόμενων επιφανειών αστοχίας για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, για τα διάφορα βάθη εγκιβωτισμού και τις δύο περιπτώσεις πυκνότητας της άμμου επίχωσης. Οι διαστάσεις, που παρουσιάζονται σε αδιαστατοποιημένη μορφή είναι οι εξής:

- Η απόσταση x από το κέντρο του αγωγού κατά τον οριζόντιο άξονα στην οποία εκτείνεται η επιφάνεια αστοχίας. Η απόσταση x περιλαμβάνει και την μέγιστη οριζόντια μετακίνηση του αγωγού που αναμένεται να πραγματοποιηθεί.
- Η γωνία θ που σχηματίζει προσεγγιστικά η σχηματιζόμενη επιφάνεια αστοχίας με το οριζόντιο επίπεδο.
- Και τέλος η κατακόρυφη απόσταση d από το κατώτατο άκρο του αγωγού μέχρι κατώτατο σημείο της επιφάνειας αστοχίας.

Έτσι με βάση τις σχηματιζόμενες επιφάνειες αστοχίας για την κάθε περίπτωση, μπορεί να γίνει η διαστασιολόγηση της τάφρου εγκιβωτισμού.



Σχήμα 2.12: Παραμορφωμένος κανάβος μετά την επιβολή οριζόντιας μετατόπισης δ στον αγωγό (από Kouretzis et al., 2013)



Σχήμα 2.13: Προτεινόμενα διαγράμματα για την διαστασιολόγηση της τάφρου (από Kouretzis et al., 2013)

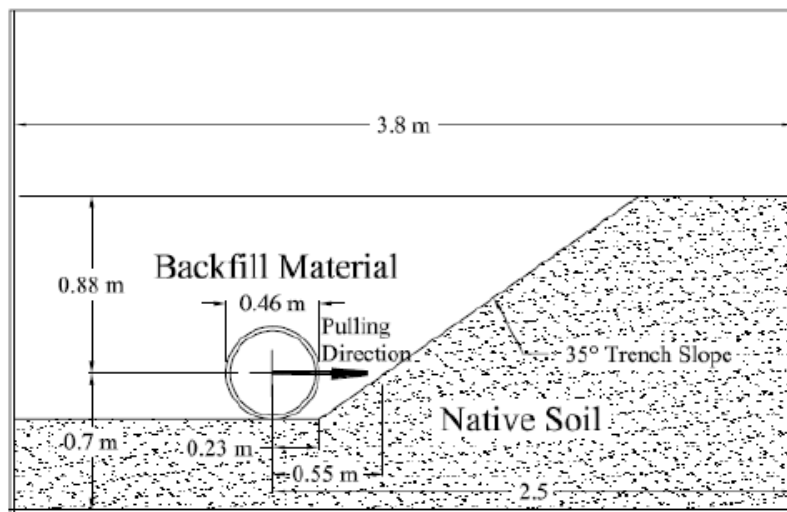
Οι **Karimian et al. (2006)** παρουσίασαν τα αποτελέσματα πειραμάτων πλευρικής οριζόντιας μετακίνησης αγωγών τοποθετημένων σε τραπεζοειδή τάφρο εγκιβωτισμού. Στην σειρά πειραμάτων τους, εξέτασαν την επιρροή της χρήσης γεωυφάσματος στις οριζόντιες δυνάμεις που αναπτύσσονται στον αγωγό.

Σε πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε ομοιόμορφο έδαφος, καθώς και σε ομοιόμορφο έδαφος με δύο στρώσεις γεωυφάσματος τοποθετημένες με κλίση 35° σε απόσταση 0.23 m από το κέντρο του αγωγού κατά την κατεύθυνση της φόρτισης. Η διάμετρος του υπό εξέταση αγωγού ήταν $D=0.457$ m. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ύπαρξη των στρώσεων γεωυφάσματος δεν επιφέρουν καμία μείωση στην δύναμη που αναπτύσσεται επί του αγωγού.

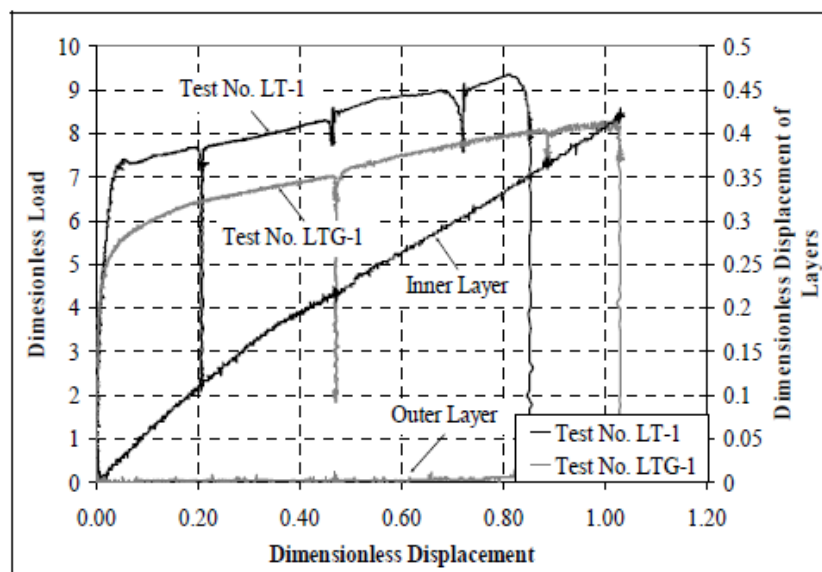
Στην συνέχεια, για την προσομοίωση ενός πιο δύσκαμπτου περιβάλλοντος υλικού εκτός των ορίων της τάφρου, χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διάταξη μια σανίδα ξύλου υπό γωνία 35°. Ακολούθησε μια νέα σειρά πειραμάτων χωρίς και με τη χρήση γεωυφάσματος επί της ξύλινης επιφάνειας. Διαπιστώθηκε ότι η ύπαρξη γεωυφάσματος επιφέρει μείωση των

οριζοντίων δυνάμεων επί του αγωγού της τάξης του 20%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την οριζόντια φόρτιση πραγματοποιείται σχετική ολίσθηση μεταξύ των δύο στρώσεων γεωφάσματος μειωμένου συντελεστή τριβής. Η μείωση αυτή φαίνεται στο **Σχήμα 2.15**, όπου οι καμπύλες LT-1 και LTG-1 αναφέρονται στις δοκιμές χωρίς και με γεωφάσμα, αντίστοιχα. Οι καμπύλες Inner Layer και Outer Layer εκφράζουν την σχετική ολίσθηση των δύο (2) στρώσεων γεωφάσματος. Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης φαίνεται στο **Σχήμα 2.14** με εμφανείς παραμέτρους τη διάμετρο του αγωγού, το ύψος της τάφρου επίχωσης και τη γωνία που σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο, και τέλος την κατεύθυνση της φόρτισης.

Αξίζει να αναφερθεί πως η εν λόγω μελέτη είναι η μοναδική στην οποία πραγματοποιείται κίνηση του αγωγού επί του κεκλιμένου ορίου της τάφρου επίχωσης. Η αλληλεπίδραση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την αναμενόμενη αύξηση του μέγιστου φορτίου επί του αγωγού για την επιβολή ίσης μετατόπισης με άλλες αντίστοιχες μελέτες πλευρικής μετατόπισης αγωγών. Οι υψηλές τιμές του αδιαστατοποιημένου φορτίου είναι εμφανείς και στο **Σχήμα 2.15** για την περίπτωση απουσίας γεωφάσματος (Test No. LT-1).



Σχήμα 2.14: Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης (από Karimian et al., 2006)



Σχήμα 2.15: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για τον αγωγό (LT-1, LTG-1) και τις στρώσεις γεωφάσματος (από Karimian et al., 2006)

2.4 Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού Φέρουσας Ικανότητας

Όπως προαναφέρθηκε η εκτίμηση της οριακής φέρουσας ικανότητας εγκιβωτισμένου στο έδαφος αγωγού για οριζόντια μετακίνηση, προσεγγίζεται από λύσεις που έχουν προταθεί για ανάλογα προβλήματα γεωτεχνικής που πλησιάζουν το υπάρχον πρόβλημα. Τέτοια προβλήματα είναι αυτά του άκαμπτου κατακόρυφου πάσσαλου που υποβάλλεται σε οριζόντια φορτία στην κεφαλή του και της κατακόρυφης πλάκας αγκυρώσεως. Οι σχέσεις που προέκυψαν για τα προβλήματα αυτά διαμορφώθηκαν στην συνέχεια για να προσεγγίζουν το πρόβλημα των αγωγών. Ως εκ τούτου, η παρούσα παράγραφος περιγράφει κάποιες από τις σημαντικότερες τέτοιες μεθοδολογίες.

Η μεθοδολογία **Brinch Hansen (1961)** για τον υπολογισμό της μέγιστης οριζόντιας δύναμης που μπορεί να φέρει άκαμπτos κατακόρυφος πάσσαλος ήταν αυτή που προτάθηκε αρχικά για εφαρμογή σε εγκιβωτισμένους αγωγούς. Κατά την θεώρηση αυτή, ο άκαμπτos πάσσαλος δεν αναπτύσσει πλαστική άρθρωση ενώ αν αγνοήσουμε τις ελαστικές παραμορφώσεις που λαμβάνουν χώρα λόγω των εδαφικών ωθήσεων, τότε μπορούμε να υποθέσουμε πως ο πάσσαλος απλά περιστρέφεται σαν ένα στερεό σώμα περί ένα σημείο κοντά στην βάση του. Δηλαδή, ο πάσσαλος συμπεριφέρεται σαν ένας άκαμπτos τοίχος αντιστήριξης και το πρόβλημα έγκειται στον προσδιορισμό των ενεργητικών και των παθητικών ωθήσεων που αναπτύσσονται επ' αυτού.

Η συνολική πίεση (παθητική ώθηση μείον ενεργητική ώθηση) που αναπτύσσεται σε βάθος D από την επιφάνεια του εδάφους ανά μονάδα μήκους και επιφάνειας ορθογωνικού πάσσαλου διαστάσεων $B \times L$ και δρα κάθετα στην πλευρά B δίνεται από την σχέση:

$$e^D = \bar{q} \cdot K_q^D + c \cdot K_c^D \quad (2.19)$$

όπου:

$$\bar{q} = \rho + \gamma D_d + \gamma' D_s \quad (2.20)$$

ρ : επιφόρτιση στην επιφάνεια του εδάφους

γ : ξηρό ειδικό βάρος εδάφους

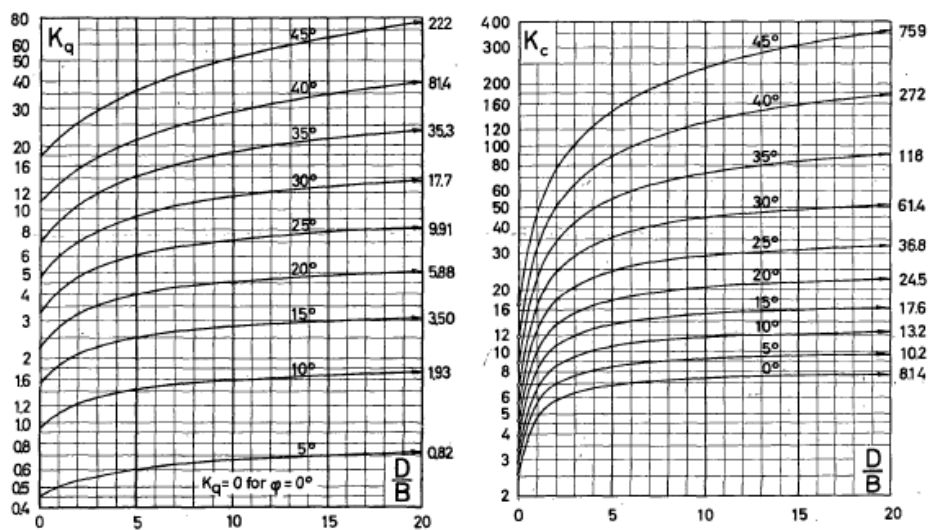
γ' : κορεσμένο ειδικό βάρος εδάφους

D_d : απόσταση μέχρι τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα

D_s : απόσταση από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα μέχρι το βάθος D

c : ο όρος της συνοχής του εδάφους

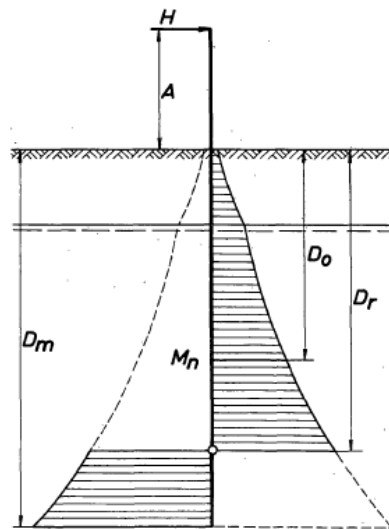
K_q^D, K_c^D : οι συντελεστές ώθησης γαιών για την πίεση των υπερκειμένων και τη συνοχή, δίνονται **Σχήμα 2.16**.



Σχήμα 2.16: Συντελεστές ώθησης γαιών για την πίεση των υπερκειμένων και την συνοχή (από Brinch Hansen, 1961)

Το **Σχήμα 2.17** δείχνει την κατανομή των εδαφικών ωθήσεων επί του πασσάλου και την υπάρχουσα γεωμετρία του προβλήματος. Για δεδομένο βάθος έμπηξης του πασσάλου D_m , ο προσδιορισμός της μέγιστης οριζόντιας δύναμης H που δρα σε γνωστό ύψος A από την επιφάνεια του εδάφους γίνεται ως εξής: αρχικά προσδιορίζεται το σημείο περιστροφής του πασσάλου D_r με δοκιμές έτσι ώστε η ροπή περί το σημείο που δρα η δύναμη H να είναι

μηδενική. Στην συνέχεια προσδιορίζεται η δύναμη H από την ισορροπία των οριζόντιων δυνάμεων.



Σχήμα 2.17: Κατανομή εδαφικών πιέσεων επί του πασσάλου (από Brinch Hansen, 1961)

Οι **Audibert and Nyman (1977)** διαπίστωσαν ότι ο μηχανισμός αστοχίας του συστήματος αγωγού-εδάφους λόγω επιβολής οριζόντιας μετακίνησης είναι μια συνάρτηση του λόγου H/D . Για τιμές του λόγου $H/D < 3$ (μικρά βάθη εγκιβωτισμού του αγωγού) ο μηχανισμός αστοχίας περιλαμβάνει την δημιουργία μιας «παθητικής» σφήνας εδάφους (δηλαδή το έδαφος αναπτύσσει παθητικές ωθήσεις) μπροστά και πάνω από τον αγωγό και μιας στενής ζώνης εδάφους σε ενεργητική κατάσταση ακριβώς πάνω από τον αγωγό. Τόσο η «παθητική» σφήνα όσο και η «ενεργητική» ζώνη εδάφους φτάνουν μέχρι την επιφάνεια του εδάφους. Στην περίπτωση αυτή, για μη συνεκτικό έδαφος, η μέγιστη τιμή της οριζόντιας δύναμης που αναπτύσσεται επί του αγωγού δίνεται από την εξίσωση:

$$F_{\max} = p_u = \frac{\gamma \cdot \left(H + \frac{D}{2}\right)^2 \cdot \tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)}{\cos \beta \cdot \mu \cdot \sin \beta} [\sin \beta + \mu \cos \beta] \quad (2.21)$$

όπου:

$$\beta = 45 - \varphi/2 \quad (2.22)$$

H : απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους ως το κέντρο του αγωγού

D : εξωτερική διάμετρος αγωγού

φ : η γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους

γ : ξηρό ειδικό βάρος εδάφους

Στην περίπτωση όπου $3 \leq H/D \leq 12$ (μέσα βάθη εγκιβωτισμού του αγωγού) ο μηχανισμός αστοχίας που αναπτύσσεται είναι παρόμοιος με αυτόν που αναφέρθηκε παραπάνω και η σχέση υπολογισμού της μέγιστης οριζόντιας δύναμης επί του αγωγού δίνεται από την παραπάνω **εξίσωση (2.21)**.

Τέλος, στην περίπτωση όπου $H/D > 12$ (μεγάλα βάθη εγκιβωτισμού) ο μηχανισμός αστοχίας περιορίζεται εντελώς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους με την δημιουργία ενός τετράπλευρου άκαμπτου εδαφικού τεμάχους. Στην περίπτωση αυτή, η μέγιστη οριζόντια δύναμη που δρα επί του αγωγού δίνεται από την εξίσωση :

$$F_{\max} = 4 \cdot \mu \cdot \gamma \cdot H \cdot D + \gamma \cdot H \cdot D \cdot (1 + k_p)(1 + \mu) - 1.12 \cdot \gamma \cdot H \cdot D \cdot (1 + k_a)(0.44 - 0.89\mu) \quad (2.23)$$

όπου:

k_p, k_a : οι συντελεστές ώθησης γαιών για παθητική και ενεργητική κατάσταση αντίστοιχα

2.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η τρέχουσα μεθοδολογία σχεδιασμού και μελέτης εγκιβωτισμένων αγωγών φυσικού αερίου και πετρελαίου καθώς και οι μελέτες που συνέβαλαν είτε στον καθορισμό της μεθοδολογίας αυτής είτε στην επέκταση της γνώσης σε θέματα που δεν καλύπτονται από τους κανονισμούς.

Η συμπεριφορά εγκιβωτισμένων αγωγών που υποβάλλονται σε φορτίσεις λόγω εδαφικών κινήσεων μελετάται σύμφωνα με τα πρότυπα των οδηγιών της ASCE «Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems (1984)». Οι οδηγίες αυτές βασίστηκαν στα εκτεταμένα πειράματα των Trautmann και O'Rourke (1983), οι οποίοι εξέτασαν περιπτώσεις αγωγών με σχετικά μικρούς λόγους εγκιβωτισμού $H/D \leq 11$.

Σύμφωνα με την προαναφερθείσα βιβλιογραφία και τους υπάρχοντες κανονισμούς δημιουργούνται τα παρακάτω καίρια ερωτήματα.

1. Τι συμβαίνει στις περιπτώσεις που ο λόγος εγκιβωτισμού H/D παίρνει μεγάλες τιμές, δηλαδή $H/D \geq 12$ (μεγάλα βάθη εγκιβωτισμού);
- Απάντηση στο συγκεκριμένο πρόβλημα προσπάθησε να δώσει ο Yimsiri et al.(2004), ο οποίος στην έρευνα που πραγματοποίησε εξέτασε λόγους εγκιβωτισμού έως $H/D=100$ και πρότεινε συμπληρωματικά προς τον κανονισμό διαγράμματα σχεδιασμού. Να τονιστεί όμως πως τα διαγράμματα αυτά ισχύουν για αγωγούς με μικρές διαμέτρους εγκιβωτισμένους σε ομοιόμορφο έδαφος.

2. *Πως επηρεάζεται η φέρουσα ικανότητα του αγωγού σε φορτίσεις που έχουν διευθύνσεις διαφορετικές από τις κύριες (εγκάρσια οριζόντια, εγκάρσια κατακόρυφη και διαμήκης διεύθυνση);*
 - Η πλειονότητα των μελετών, τόσο αναλυτικές όσο και πειραματικές, ασχολήθηκε κυρίως με την φέρουσα ικανότητα του αγωγού σε φορτίσεις κατά τις κύριες διευθύνσεις. Μάλιστα τα προτεινόμενα από τον κανονισμό διαγράμματα σχεδιασμού αφορούν την φέρουσα ικανότητα του αγωγού σε τέτοιου είδους φορτίσεις. Όμως, οι δυνάμεις που επιβάλλονται στον αγωγό λόγω των εδαφικών κινήσεων είναι σίγουρο πως ασκούνται υπό κάποια γωνία με τους κύριους άξονες του αγωγού.
 - Οι Claudio di Prisco και Adrea Galli (2006) ασχολήθηκαν με το συγκεκριμένο πρόβλημα και διαπίστωσαν την ύπαρξη αλληλεπίδρασης μεταξύ των δυνάμεων στην εγκάρσια οριζόντια και εγκάρσια κατακόρυφη διεύθυνση. Λόγω αυτής της αλληλεπίδρασης μειώνεται η φέρουσα ικανότητα του αγωγού, μείωση η οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό.
3. *Ποιος είναι ο τρόπος διαστασιολόγησης της τάφρου εγκιβωτισμού;*
 - Για τις διαστάσεις της τάφρου εγκιβωτισμού, ο κανονισμός ορίζει πως πρέπει να είναι επαρκής ώστε η συμπεριφορά του αγωγού να εξαρτάται αποκλειστικά από τις ιδιότητες του υλικού πλήρωσης της τάφρου. Παρόλα αυτά, δεν προτείνεται καμία μέθοδος διαστασιολόγησης της τάφρου ώστε να ικανοποιείται η παραπάνω απαίτηση.
 - Οι Kouretzis et al. (2013) πρότειναν διαγράμματα διαστασιολόγησης της τάφρου εγκιβωτισμού, ώστε ο μηχανισμός αστοχίας του συστήματος εδάφους-αγωγού να εκδηλώνεται εντός της τάφρου. Όμως, τα διαγράμματα αυτά ισχύουν για συγκεκριμένες τιμές του λόγου $H/D \leq 5.5$ (μικρά βάθη εγκιβωτισμού).
4. *Τι συμβαίνει όταν οι διαστάσεις της τάφρου είναι περιορισμένες και γνωρίζουμε εκ των προτέρων ότι θα υπάρξει αλληλεπίδραση του αγωγού με το πιο δύσκαμπτο περιβάλλον έδαφος;*
 - Λόγω της αλληλεπίδρασης του αγωγού με το περιβάλλον έδαφος, οι δυνάμεις που θα αναπτυχθούν επί του αγωγού αυξάνονται. Οι Karimian et al. (2006) κατέδειξαν πως στην περίπτωση αυτή η χρήση γεωφάσματος μπορεί να μειώσει την αναπτυσσόμενη στον αγωγό δύναμη έως και 20%.

3.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ενδελεχώς η αριθμητική μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους- αγωγού υποβαλλόμενου σε οριζόντια πλευρική μετατόπιση. Συνοπτικά, τα βασικά σημεία της αριθμητικής μεθοδολογίας περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- i. Χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων διαφορών FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) v7.0. Το κύριο σημείο διαφοροποίησης του λογισμικού FLAC (Itasca, 2011) από τη συντριπτική πλειοψηφία των σημερινών προγραμμάτων είναι η διατύπωση των εξισώσεων σε μη πεπλεγμένη μορφή (explicit form). Κύριο χαρακτηριστικό του εν λόγω αλγόριθμου επίλυσης είναι η μη απαίτηση ισορροπίας σε κάθε υπολογιστικό βήμα που προϋποθέτει αντιστροφή μητρώων, με αποτέλεσμα ο κώδικας να καθίσταται ιδανικός για την προσομοίωση έντονα μη γραμμικών προβλημάτων μεγάλων μετακινήσεων, όπως το εξεταζόμενο.
- ii. Για την περιγραφή της συμπεριφοράς του εδαφικού υλικού υιοθετήθηκε το ευρύτατα χρησιμοποιούμενο καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb. Το συγκριτικό πλεονέκτημα του εν λόγω προσομοιώματος είναι η ευκολία στην βαθμονόμηση ενώ αξιολόγηση σε σχέση με πειραματικά δεδομένα δείχνει ότι μπορεί να προβλέψει με ικανοποιητική ακρίβεια την απόκριση του εδάφους.
- iii. Επιπλέον, για την προσομοίωση της σχετικής ολίσθησης μεταξύ του αγωγού και του περιβάλλοντος εδάφους κατά την οριζόντια μετακίνηση του αγωγού, έγινε χρήση στοιχείων διεπιφάνειας (Interface elements) με μειωμένη γωνία τριβής.
- iv. Τέλος, λόγω της επιβολής μεγάλων οριζοντίων μετακινήσεων επί του αγωγού και της έντονα μη γραμμικής φύσης του προβλήματος ενεργοποιήθηκε η δυνατότητα που δίνει ο κώδικας για συνεχή ανανέωση των συντεταγμένων των κόμβων (large strain mode) καθώς και αναδιάταξη του κανάβου με βάση την τρέχουσα παραμορφωσιακή κατάσταση (automatic rezoning).

Η βαθμονόμηση των διαφόρων παραμέτρων που υπεισέρχονται στην ανάλυση (διατμητική αντοχή και ακαμψία εδάφους, διατμητική αντοχή και ακαμψία στοιχείων διεπιφάνειας,

ταχύτητα επιβαλλόμενης μετατόπισης, συνοριακές συνθήκες κ.λ.π.) πραγματοποιήθηκε με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων των **Trautmann και O'Rourke (1983)** καθώς και των αριθμητικών αναλύσεων των **Kouretzis et al. (2013)**, που αφορούν τη συμπεριφορά αγωγού υποβαλλόμενου σε οριζόντια πλευρική μετατόπιση.

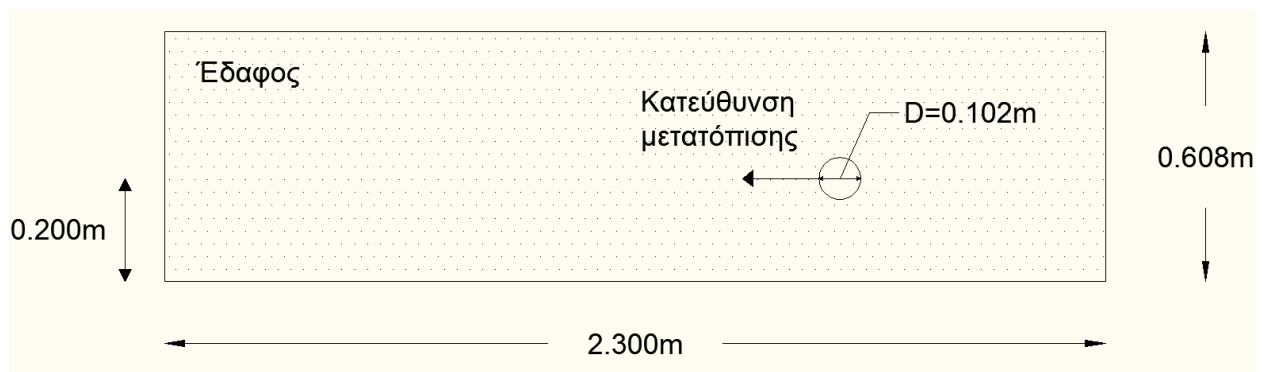
3.2 Πειραματικές Μετρήσεις Trautmann O'Rourke (1983)

Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.3 οι Trautmann και O'Rourke (1983) πραγματοποίησαν μία σειρά πειραμάτων για την διερεύνηση της συμπεριφοράς αγωγών σε οριζόντια πλευρική μετακίνηση. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από πέντε (5) βασικά μέρη: (α) το κιβώτιο μέσα στο οποίο τοποθετήθηκε ο αγωγός, (β) συσκευή εναπόθεσης της άμμου εντός του κιβωτίου, (γ) ένας αποθηκευτικός κάδος και ένα σύστημα μεταφοράς, (δ) τα απαραίτητα όργανα μέτρησης και (ε) το σύστημα απόκτησης δεδομένων.

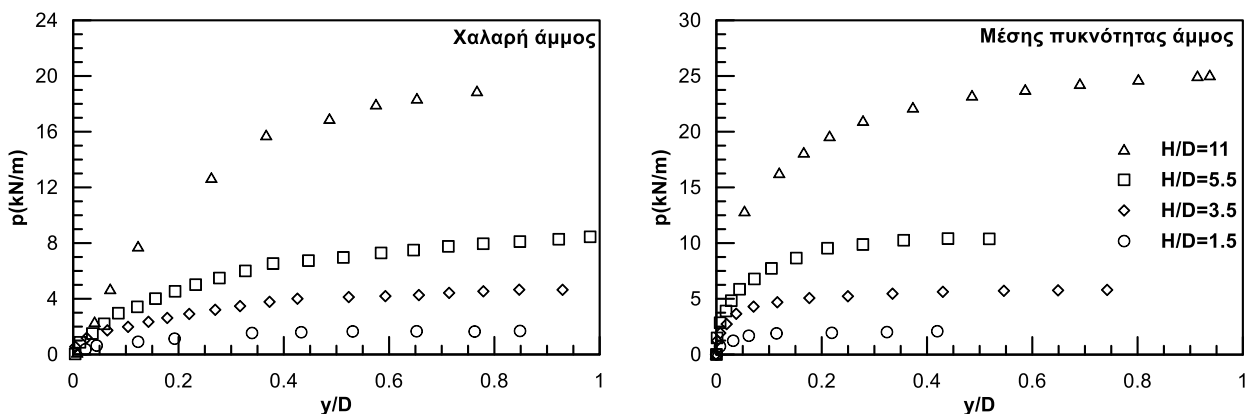
Το πειραματικό κιβώτιο είχε ορθογωνική διατομή πλάτους 2.3 m και ύψους 1.2 m ενώ το μήκος του ήταν ίσο με 1.2 m. Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε για την πλήρωση του κιβωτίου ήταν τύπου Cornell (Cornell filter sand). Η εναπόθεση της άμμου έγινε σε πυκνότητες 14.8, 16.4 και 17.7 kN/m³ που αντιστοιχούν σε γωνίες εσωτερικής τριβής 31°, 36° και 44° αντίστοιχα. Για τις δοκιμές πλευρικής μετακίνησης χρησιμοποιήθηκαν δύο δοκίμια εξωτερικής διαμέτρου 102 και 324 mm, με πάχος τοιχώματος 6.4 και 9.5mm αντίστοιχα και μήκος 1.2 m. Τα φορτία μεταφέρονταν στον αγωγό μέσω ατσάλινων ράβδων διαμέτρου 25 mm, οι οποίες ήταν εξοπλισμένες με μετρητές παραμορφώσεων για τον υπολογισμό των φορτίων.

Σε κάθε δοκιμή που πραγματοποιήθηκε, υπήρχε άμμος πάχους τουλάχιστον 200 mm κάτω από τον αγωγό. Η τοποθέτηση αυτών των 200 mm άμμου πραγματοποιήθηκε ώστε ο αγωγός να μπορεί να παραμορφωθεί ελεύθερα και ο εκάστοτε μηχανισμός αστοχίας του εδάφους να εκδηλώνεται χωρίς να επηρεάζεται από τα κάτω όρια του κιβωτίου. Πραγματοποιήθηκαν 30 συνολικά δοκιμές φόρτισης. Οι δοκιμές αυτές έγιναν για τις τρεις προαναφερθείσες πυκνότητες και για πέντε (5) διαφορετικά βάρη ανά πυκνότητα, με λόγο $H/D=1.5, 3.5, 5.5, 8$ και 11 (όπου H η απόσταση από το κέντρο του αγωγού ως την επιφάνεια του εδάφους και D η εξωτερική διάμετρος του αγωγού). Το ποσοστό πλήρωσης του κιβωτίου από την άμμο επίχωσης αποτελούσε συνάρτηση του εκάστοτε λόγου εγκιβωτισμού. Η προσομοίωση της επιρροής της τραχύτητας της εξωτερικής επιφάνειας του αγωγού έγινε μέσω της κάλυψης της, στην περίπτωση του αγωγού διαμέτρου 102 mm, με γυαλόχαρτο, και λεπτό στρώμα πλαστικού επιχρισμένου με λάδι μηχανής, για την προσομοίωση τραχειάς και λείας διεπιφάνειας αγωγού-εδάφους αντίστοιχα. Μία τυπική διατομή της πειραματικής διάταξης για την περίπτωση λόγου εγκιβωτισμού $H/D=3.5$ και χρήση αγωγού διατομής $D=102$ mm παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.1**. Στο σχήμα αυτό είναι επίσης εμφανής η φορά μετακίνηση του

αγωγού εντός του εδάφους. Για το λόγο εγκιβωτισμού που παρουσιάζεται, η άμμος επίχωσης έχει ύψος 608 mm.



Σχήμα 3.1: Τυπική διατομή πειραματικής διάταξης Trautmann και Ο'Rourke



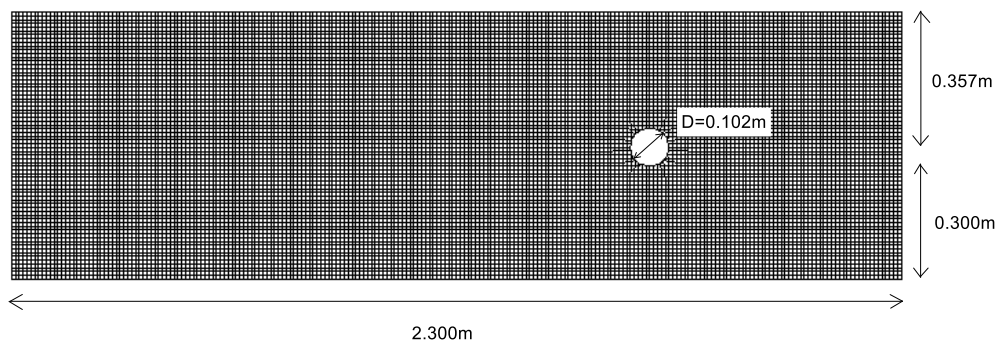
Σχήμα 3.2: Αποτελέσματα πειραμάτων Trautmann και Ο'Rourke για αγωγό διαμέτρου $D=102\text{mm}$

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία έμφαση δόθηκε στα αποτελέσματα των δοκιμών των Trautmann και Ο'Rourke που πραγματοποιήθηκαν στο δοκίμιο διαμέτρου $D=102\text{ mm}$, για ειδικά βάρη της άμμου επίχωσης $\gamma=14.8\text{ kN/m}^3$ (loose sand) και $\gamma=16.4\text{ kN/m}^3$ (medium sand) και βάθη επίχωσης $H/D=1.5, 3.5, 5.5,$ και 11 . Οι σχέσεις φορτίου-μετατόπισης που προέκυψαν από τα πειράματα αυτά παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο **Σχήμα 3.2**. Σημειώνεται ότι τα εν λόγω πειράματα προσομοιώθηκαν αριθμητικά και από τους Kouretzis et al. (2013), οι παραδοχές και τα αποτελέσματα των οποίων συνεκτιμήθηκαν για την αξιολόγηση και βαθμονόμηση της αριθμητικής μεθοδολογίας.

3.3 Αριθμητική Προσομοίωση Οριζόντιας Μετατόπισης Αγωγού

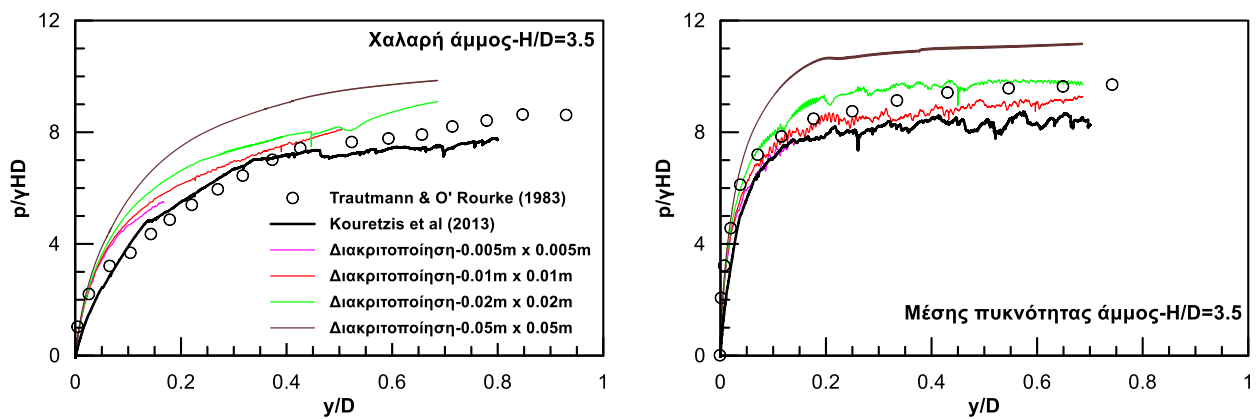
Ο κানাβος πεπερασμένων διαφορών που κατασκευάστηκε για την μελέτη του προβλήματος φαίνεται στο **Σχήμα 3.3**. Οι διαστάσεις του ορίστηκαν με βάση την πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα των Trautmann & Ο'Rourke. Συγκεκριμένα το μήκος του σε

όλες τις αναλύσεις διατηρήθηκε σταθερό και ίσο με $L=2.3$ m, ενώ το ύψος του μεταβαλλόταν ανάλογα με το βάθος εγκιβωτισμού H (όπου H το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το κέντρο του αγωγού). Τέλος, η απόσταση της βάσης του αγωγού από το κάτω όριο του κανάβου διατηρείται σταθερή, ανεξαρτήτως βάθους εγκιβωτισμού, και ίση με 300 mm. Στα πειράματα των Trautmann & O'Rourke και κατά συνέπεια και στις αναλύσεις αξιολόγησης της παρούσας μεθοδολογίας εξετάστηκαν 4 διαφορετικά βάθη εγκιβωτισμού του αγωγού, $H/D=1.5, 3.5, 5.5$ και 11, όπου D η εξωτερική διάμετρος του αγωγού με σταθερή τιμή $D=102$ mm.



Σχήμα 3.3: Τυπική απεικόνιση κανάβου για βάθος εγκιβωτισμού $H/D=3.5$

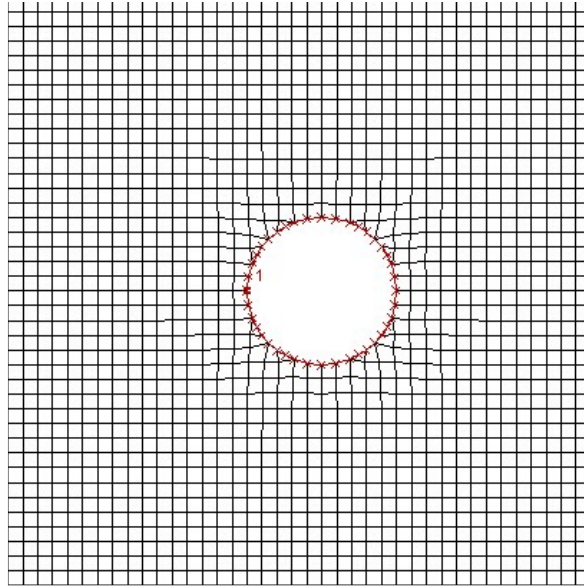
Τα στοιχεία του κανάβου που επιλέχθηκαν είχαν τετραγωνικό σχήμα. Οι διαστάσεις των στοιχείων προέκυψαν έπειτα από αναλύσεις ευαισθησίας στις οποίες εξετάστηκαν οι τιμές 0.005, 0.01, 0.02 και 0.05 m. Οι αναλύσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν για βάθη εγκιβωτισμού $H/D=3.5$ εξετάζοντας και τις δύο περιπτώσεις πυκνότητας της άμμου (loose και medium sand). Τα αποτελέσματα σε όρους φορτίου-μετατόπισης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.4**. Από τις αναλύσεις ευαισθησίας προκύπτει ότι με τη μείωση του μεγέθους των στοιχείων του κανάβου, η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης προσεγγίζει ακριβέστερα την πραγματική της μορφή. Η σύγκλιση αυτή είναι έντονα αισθητή στη σύγκριση μεταξύ των αρχικών, αρκετά αδρών κανάβων με στοιχεία 0.05 και 0.02 m. Η καμπύλη δείχνει να σταθεροποιείται με τη χρήση στοιχείων μεγέθους 0.01 και 0.005 m. Παρατηρείται επίσης, ότι οι κανάβοι με μέγεθος στοιχείων 0.05 και 0.02 m, οδηγούν σε σημαντική υπερεκτίμηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους. Τέλος, η πιθανή χρήση του κανάβου με στοιχεία 0.005 m θα επιβάρυνε σε μεγάλο βαθμό τη ταχύτητα ολοκλήρωσης των αναλύσεων, χωρίς παράλληλα να δίνει εύλογες αποκλίσεις στα αποτελέσματα συγκριτικά με τον κανάβο στοιχείων μεγέθους 0.01 m. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα ανωτέρω, στην παρούσα αριθμητική μεθοδολογία επιλέχθηκε τελικά κανάβος με τετραγωνικά στοιχεία μεγέθους 0.01 m.



Σχήμα 3.4: Αποτελέσματα αναλύσεων ευαισθησίας για την επιλογή του μεγέθους των στοιχείων του κανάβου

Για την προσομοίωση της σχετικής ολίσθησης αγωγού-περιβάλλοντος εδάφους, μηχανισμού ιδιαίτερα κρίσιμου για την ορθή εκτίμηση της όλης απόκρισης, έγινε χρήση στοιχείων διεπιφάνειας (interface). Το FLAC λειτουργεί με την παρακάτω λογική όσον αφορά τα στοιχεία διεπιφάνειας: Πραγματοποιείται η τοποθέτηση των εν λόγω στοιχείων και στις δύο πλευρές της εκάστοτε επιφάνειας, π.χ. τόσο στα στοιχεία που ανήκουν στην εξωτερική περιφέρεια του αγωγού όσο και στα στοιχεία εδάφους που έρχονται σε επαφή με αυτή. Έπειτα, τα στοιχεία αυτά ενώνονται μεταξύ τους με χρήση διατμητικών και αξονικών ελαστοπλαστικών ελατηρίων δεδομένης δυσκαμψίας και παραμέτρων αστοχίας (εφελκυστική και διατμητική). Κατά την διάρκεια της μετακίνησης του αγωγού, όσο η δύναμη που αναπτύσσεται στα ελατήρια αυτά παραμένει μικρότερη της αντοχής, τα συζευγμένα στοιχεία εδάφους-αγωγού κινούνται μαζί. Όταν η αναπτυσσόμενη δύναμη ξεπεράσει την παραπάνω οριακή τιμή, τότε πραγματοποιείται ολίσθηση ή και αποκόλληση των στοιχείων του εδάφους επί των στοιχείων του αγωγού.

Ο αλγόριθμος πεπερασμένων διαφορών FLAC παρέχει στο χρήστη αρκετές επιλογές σχετικά με την συμπεριφορά των στοιχείων μετά την υπέρβαση της οριακής τιμής των ελαστοπλαστικών ελατηρίων. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα να υπάρξει μόνο ολίσθηση των εδαφικών στοιχείων επί κάποιας επιφάνειας ή μόνο αποκόλληση ή ούτε ολίσθηση ούτε αποκόλληση. Είναι στην διακριτική ευχέρεια του χρήστη να ενεργοποιήσει εκείνες τις επιλογές που περιγράφουν καλύτερα την εδαφική συμπεριφορά σύμφωνα με το εκάστοτε πρόβλημα. Στην περίπτωση ενός αγωγού εγκιβωτισμένου σε αμμώδες έδαφος και υποβαλλόμενου σε οριζόντια μετακίνηση, επιτράπηκε η ολίσθηση των στοιχείων του εδάφους επί των στοιχείων του αγωγού, όχι όμως η αποκόλλησή τους. Στο **Σχήμα 3.5** δίνεται λεπτομέρεια του κανάβου στην οποία παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα η διεπιφάνεια αγωγού-περιβάλλοντος εδάφους.



Σχήμα 3.5: Διεπιφάνεια εδάφους αγωγού

Αναφορικά με την βαθμονόμηση των στοιχείων διεπιφάνειας αναφέρεται ότι δόθηκαν μεγάλες τιμές δυσκαμψίας, με σκοπό αυτά να μην επηρεάζουν μέσω της παραμόρφωσής τους την ανάπτυξη των τάσεων. Στόχος ήταν οι τάσεις να αναπτύσσονται εξολοκλήρου λόγω της παραμόρφωσης του εδάφους. Για τον υπολογισμό της δυσκαμψίας των στοιχείων της διεπιφάνειας σε πρώτο στάδιο χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση :

$$K_n = K_s = \frac{K + \frac{4}{3} \cdot G}{\Delta z_{\min}} \quad (3.1)$$

όπου:

- K_n : η τιμή της εφελκυστικής δυσκαμψίας
- K_s : η τιμή της διατμητικής δυσκαμψίας
- K : το μέτρο ογκομετρικής παραμόρφωσης του εδάφους
- G : το μέτρο διάτμησης του εδάφους
- Δz_{\min} : το μήκος των στοιχείων του καννάβου

Οι τιμές των K και G αυξάνονται με το βάθος σύμφωνα με μια συνάρτηση που θα παρουσιαστεί παρακάτω. Οι τιμές των K και G που επιλέχθηκαν για χρήση στην εξίσωση **(3.1)** είναι οι μεγαλύτερες τιμές μεταξύ όλων των εδαφικών στοιχείων της διεπιφάνειας, οι οποίες αντιστοιχούν στη βάση του αγωγού. Η τιμή του Δz_{\min} επιλέχθηκε ίση με το μέγεθος των στοιχείων του κανάβου ($\Delta z_{\min}=0.01$ m), αφού ο κανάβος αποτελείται από ομοιόμορφα

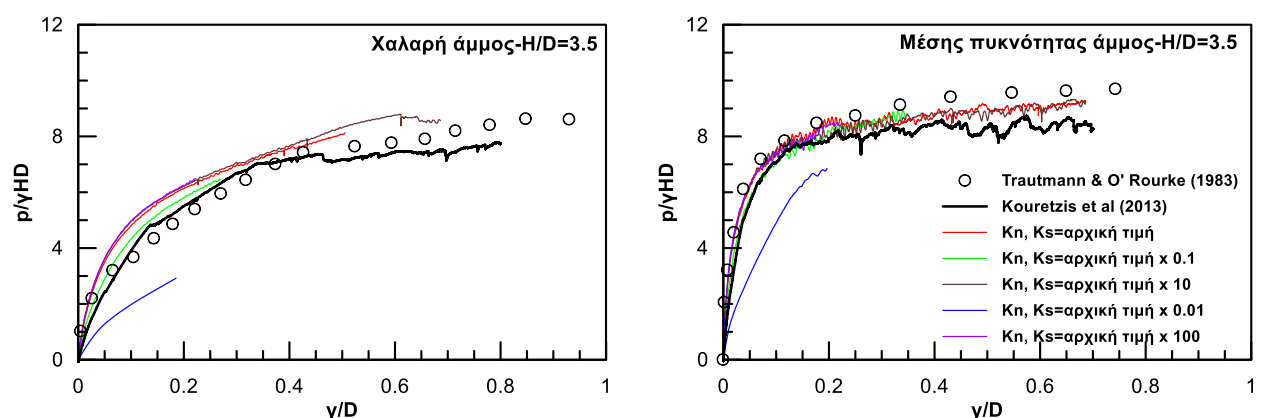
τετραγωνικά στοιχεία. Οι βασικές τιμές της δυσκαμψίας της διεπιφάνειας που υπολογίστηκαν με βάση την εξίσωση (3.1) είναι ίσες με :

- $K_n=K_s=79556.67$ για άμμο ειδικού βάρους 14.8 kN/m^3 και λόγο $H/D=3.5$
- $K_n=K_s=342400$ για άμμο ειδικού βάρους 16.4 kN/m^3 και λόγο $H/D=3.5$

Κατόπιν υπολογισμού των βασικών τιμών για τη δυσκαμψία της διεπιφάνειας από την εξίσωση (3.1), πραγματοποιήθηκε σειρά αναλύσεων ευαισθησίας με σκοπό τον προσδιορισμό της επιρροής των τιμών αυτών στην ανάπτυξη δυνάμεων επί του αγωγού. Στις αναλύσεις αυτές χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τιμές για τη δυσκαμψία της διεπιφάνειας :

- $K_{n1}=K_{s1}=K_n, K_s \times 0.1$
- $K_{n2}=K_{s2}=K_n, K_s \times 10$
- $K_{n3}=K_{s3}=K_n, K_s \times 0.01$
- $K_{n4}=K_{s4}=K_n, K_s \times 100$

Οι αδιαστατοποιημένες σχέσεις φορτίου-μετατόπισης που προκύπτουν από τις παραπάνω αναλύσεις παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.6**. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν ενδεικτικά για άμμους με ειδικά βάρη $\gamma=14.8 \text{ kN/m}^3$ (loose sand) και $\gamma=16.4 \text{ kN/m}^3$ (medium sand) και βάθος εγκιβωτισμού του αγωγού $H/D=3.5$. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών φαίνεται πως έντονη επιρροή στην καμπύλη φορτίου μετατόπισης παρουσιάζεται κυρίως στην περίπτωση των τιμών K_{n3} και K_{s3} . Οι υπόλοιπες τιμές δεν φαίνονται να επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα της ανάλυσης, συνεπώς για την αριθμητική μεθοδολογία επιλέχθηκαν οι αρχικές τιμές δυσκαμψίας K_n, K_s .



Σχήμα 3.6: Αναλύσεις ευαισθησίας για την εκτίμηση της επιρροής της δυσκαμψίας των στοιχείων διεπιφάνειας στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης

Η συνοχή (cohesion) των στοιχείων της διεπιφάνειας του αγωγού λήφθηκε ίση με το μηδέν (0), ενώ η γωνία τριβής (friction angle) τους υπολογίστηκε ως το μισό της γωνίας τριβής του

εδάφους. Η επιλογή της γωνίας τριβής για την εισαγωγή στο καταστατικό προσομοίωμα περιγραφής της εδαφικής απόκρισης παρουσιάζεται εκτενώς παρακάτω.

Όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες, στα κατακόρυφα όρια του κανάβου έγινε χρήση κυλίσεων. Για τη βάση του κανάβου πραγματοποιήθηκε σειρά αναλύσεων ευαισθησίας λόγω αβεβαιοτήτων σχετικά με τις συνοριακές συνθήκες της πειραματικής διάταξης των Trautmann και O'Rourke. Εξετάστηκαν οι περιπτώσεις χρήσης κυλίσεων και αρθρώσεων αντίστοιχα και τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στην ενότητα **3.4**.

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας E υπολογίστηκε σε συνάρτηση με το βάθος από την παρακάτω σχέση :

$$E = 2 \cdot 10^{-13.97} \cdot (\gamma \cdot \sigma_v^{0.0378})^{13.7} \quad (3.2)$$

όπου :

γ : το ειδικό βάρος του εδάφους

σ_v : κατακόρυφη γεωστατική τάση

Ο προσδιορισμός του μέτρου διάτμησης G (shear modulus) και του μέτρου ογκομετρικής παραμόρφωσης (bulk modulus) έγινε με βάση το μέτρο του Young από τις παρακάτω σχέσεις:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (3.3)$$

και

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \quad (3.4)$$

όπου

E : το μέτρο ελαστικότητας

ν : ο λόγος του Poisson ο οποίος για όλες τις αναλύσεις θεωρήθηκε ίσος με $\nu=1/3$

Για την άμμο Cornell, που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα των Trautmann και O'Rourke, η μέγιστη γωνία τριβής για την περίπτωση χαλαρής και πυκνής άμμου αναφέρεται ίση με $\phi_{peak}=31^\circ$ και 36° αντίστοιχα, ενώ η αντίστοιχη τιμή για κατά την κρίσιμη κατάσταση είναι ίση με $\phi_{crit}=31^\circ$. Σημειώνεται ότι οι εν λόγω τιμές αφορούν δοκιμές απευθείας διάτμησης.

Σύμφωνα με την μελέτη των Kouretzis et al. οι αντίστοιχες τιμές για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης μπορούν να υπολογιστούν από την ακόλουθη σχέση:

$$\tan \varphi_{DS} = \frac{\cos \psi \cdot \sin \varphi_{\text{peak,PS}}}{1 - \sin \psi \cdot \sin \varphi_{\text{peak,PS}}} \quad (3.5)$$

όπου:

φ_{DS} : η εσωτερική γωνία τριβής που προκύπτει από τη δοκιμή απευθείας διάτμησης

ψ : η γωνία διαστολικότητας του εδάφους

$\varphi_{\text{peak,PS}}$: η μέγιστη γωνία τριβής για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης

Επιπλέον, οι αναλύσεις των Kouretzis et al. δείχνουν πως τα πειραματικά αποτελέσματα μπορούν να προσεγγιστούν επαρκώς με χρήση της παραμένουσας γωνίας τριβής (φ_{crit}), οπότε η σχέση **(3.5)** μετασχηματίζεται ως εξής (για $\psi=0$): :

$$\tan \varphi_{\text{crit,DS}} = \sin \varphi_{\text{crit,PS}} \quad (3.6)$$

όπου:

$\varphi_{\text{crit,DS}}$: η παραμένουσα γωνία τριβής που προκύπτει από τη δοκιμή απευθείας διάτμησης

$\varphi_{\text{crit,PS}}$: η παραμένουσα γωνία τριβής υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης

Για την αριθμητική προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους αγωγού, οι Trautmann και O'Rourke υποδεικνύουν πως η χρήση της εξίσωσης (3.5) παρέχει ένα άνω όριο όσον αφορά τις δυνάμεις που ασκούνται στον αγωγό, ενώ αντιθέτως η χρήση της παραμένουσας γωνίας εσωτερικής τριβής $\varphi_{\text{crit,PS}}$ ($=\varphi_{\text{residual}}$) που προκύπτει από την εξίσωση **(3.6)** παρέχει το αντίστοιχο κάτω όριο. Ως εκ τούτου, για την παρούσα αριθμητική μεθοδολογία επιλέχθηκε η παραμένουσα τιμή της γωνίας τριβής η οποία για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης προκύπτει ίση με $\varphi_{\text{crit,PS}}=37^\circ$. Τέλος, λόγω της μη-συνεκτικής φύσης του εδάφους, η συνοχή λήφθηκε ίση με το μηδέν (0).

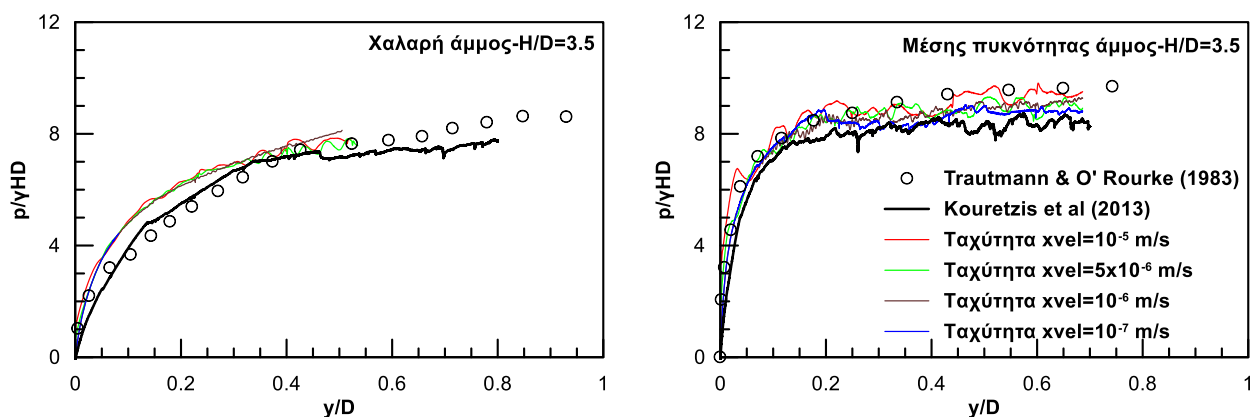
Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε δύο (2) στάδια. Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται η επίλυση του μοντέλου υπό καθεστώς γεωστατικών τάσεων. Για την επίλυση ορίστηκε συντελεστής ουδέτερης ώθησης γαιών $K_0=0.5$, και τιμή επιτάχυνσης βαρύτητας ίση με $g=9.81 \text{ m/s}^2$. Στη φάση αυτή της ανάλυσης, το έδαφος θεωρήθηκε πως έχει ελαστική συμπεριφορά και η δυσκαμψία του αγωγού έλαβε ιδιαίτερα μεγάλες τιμές ώστε να προσεγγιστούν όσο το δυνατόν καλύτερα οι γεωστατικές συνθήκες. Κατόπιν ισορροπίας του μοντέλου προσδόθηκαν στο έδαφος οι πραγματικές του ιδιότητες.

Σε δεύτερο στάδιο της ανάλυσης επιβάλλεται οριζόντια μετατόπιση στον αγωγό, μέσω εφαρμογής στους αντίστοιχους κόμβους, πλευρικής οριζόντιας ταχύτητας. Η ταχύτητα αυτή επιδιώχθηκε να έχει όσο το δυνατόν μικρότερη τιμή, για τον περιορισμό δυναμικών φαινομένων. Εξετάστηκαν τέσσερις διαφορετικές τιμές και αξιολογήθηκε η επίδραση τους στις καμπύλες φορτίου μετατόπισης. Οι τιμές οριζόντιας ταχύτητας που εξετάστηκαν ήταν οι εξής:

- $xvel=10^{-5}$ m/s
- $xvel=5 \cdot 10^{-6}$ m/s
- $xvel=10^{-6}$ m/s
- $xvel=10^{-7}$ m/s

Όπως και στις προηγούμενες αναλύσεις ευαισθησίας, ο κánaβος που επιλέχθηκε αντιστοιχεί σε λόγο $H/D=3.5$, ενώ εξετάστηκαν και οι δύο περιπτώσεις ειδικού βάρους όσον αφορά την άμμο επίχωσης (loose και medium sand).

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων ευαισθησίας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.7**. Είναι εμφανές πως με τη μείωση της ταχύτητας η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης προσεγγίζει την πραγματική της μορφή. Για τιμές ταχύτητας ίσες με 10^{-5} και 10^{-6} m/s παρατηρείται υπερεκτίμηση της μέγιστης τιμής της οριζόντιας δύναμης επί του αγωγού, ενώ η απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των αναλύσεων για ταχύτητες 10^{-6} και 10^{-7} m/s είναι αμελητέα. Συμπερασματικά και για λόγους εξοικονόμησης χρόνου, δεδομένης της μεγάλης χρονικής απαίτησης για την ολοκλήρωση αναλύσεων με χρήση ταχύτητας 10^{-7} m/s, επιλέγεται ως επιβαλλόμενη στον αγωγό ταχύτητα η $xvel=10^{-6}$ m/s. .



Σχήμα 3.7: Αναλύσεις ευαισθησίας για την εκτίμηση της επιρροής του μεγέθους της επιβαλλόμενης στον αγωγό ταχύτητας.

Δεδομένων των μεγάλων μετατοπίσεων που αναπτύσσονται, όλες οι αναλύσεις εκτελούνται με ενεργοποιημένη τη δυνατότητα που παρέχει ο κώδικας συνεχούς επανακαθορισμού των συντεταγμένων των κόμβων (large strain mode) με ταυτόχρονη αναμόρφωση της

γεωμετρίας των στοιχείων του κανάβου (automatic rezoning). Η διαδικασία αυτή είναι επιβεβλημένη λόγω των υψηλών επιβαλλόμενων μετακινήσεων του αγωγού, που έχουν ως αποτέλεσμα πολλά στοιχεία (στην περιοχή πίσω και μπροστά από τον αγωγό) να παραμορφώνονται έντονα με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας και ο κώδικας να εμφανίζει μήνυμα εσφαλμένης γεωμετρίας (bad geometry error).

Η λογική της αναμόρφωσης του κανάβου έγκειται στα ακόλουθα: (α) να αποθηκευτούν οι τιμές των μετακινήσεων, των ταχυτήτων και των τάσεων που έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής σε κάθε στοιχείο του παραμορφωμένου κανάβου πριν την εμφάνιση του μηνύματος εσφαλμένης γεωμετρίας, (β) έπειτα να κατασκευασθεί ένας νέος κανάβος που θα λαμβάνει υπόψη την παραμορφωσιακή κατάσταση του προηγούμενου κανάβου και θα έχει μια πιο «κανονική» γεωμετρία που θα επιτρέψει στην αριθμητική επίλυση να συνεχίσει και (γ) τέλος να επιβληθούν οι αποθηκευμένες τιμές των ταχυτήτων, των παραμορφώσεων και των τάσεων του προηγούμενου κανάβου στα αντίστοιχα στοιχεία του νέου.

Ο αλγόριθμος που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας για την αναμόρφωση του κανάβου περιλαμβάνει τα εξής βήματα: (α) Αρχικά, αποθηκεύεται σε πίνακα η θέση του αγωγού πριν την εμφάνιση του μηνύματος εσφαλμένης γεωμετρίας. Σε διαφορετικό πίνακα αποθηκεύονται οι συντεταγμένες που κατέχουν τα στοιχεία της επιφάνειας του εδάφους την ίδια χρονική στιγμή. (β) Όταν η αριθμητική επίλυση σταματήσει, αυτόματα καλείται ένας αλγόριθμος που κατασκευάζει το νέο κανάβο, λαμβάνοντας υπόψη την τελευταία θέση του αγωγού και την μορφή της επιφάνειας του εδάφους. Τόσο η επιφάνεια του εδάφους όσο και η περιφέρεια του αγωγού υποβάλλονται σε μια διαδικασία εξομάλυνσης των γεωμετρικών ανωμαλιών (smooth surfaces). (γ) Στην συνέχεια, στα στοιχεία του νέου κανάβου επιβάλλονται οι ταχύτητες, οι μετατοπίσεις και οι τάσεις που είχαν αναπτυχθεί στο τελευταίο βήμα της αριθμητικής επίλυσης πριν αυτή διακοπεί, και τέλος συνεχίζεται η αριθμητική επίλυση από το βήμα στο οποίο είχε σταματήσει.

Τέλος, για τον υπολογισμό της επιβαλλόμενης στον αγωγό οριζόντιας δύναμης χρησιμοποιήθηκαν δύο εναλλακτικοί τρόποι:

- Υπολογισμός μέσω των οριζοντίων αντιδράσεων που αναπτύσσονται στους περιφερειακούς κόμβους του αγωγού.
- Υπολογισμός μέσω των οριζοντίων δυνάμεων που αναπτύσσονται στους κόμβους των στοιχείων διεπιφάνειας.

3.4 Βαθμονόμηση αριθμητικής μεθοδολογίας

Έπειτα από την παρουσίαση των βασικών βημάτων και παραδοχών της αριθμητικής μεθοδολογίας, πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση της, η οποία βασίστηκε στα αποτελέσματα των πειραμάτων των Trautmann και O'Rourke (1983) και των αριθμητικών αναλύσεων των Kouretzis et al. (2013). Συνολικά εκτελέστηκαν 4 ομάδες αναλύσεων, στις οποίες διερευνήθηκε η επίδραση των εξής παραμέτρων:

Συνοριακές συνθήκες στην βάση του προσομοιώματος.- Όπως τονίστηκε και στο Κεφάλαιο 3.3, στη βάση της πειραματικής διάταξης υπάρχουν σημαντικές αβεβαιότητες όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες. Για το λόγο αυτό εκτελέστηκαν αναλύσεις θεωρώντας τόσο αρθρώσεις όσο και κυλίσεις στην βάση του προσομοιώματος.

Λειτουργία μικρών και μεγάλων μετατοπίσεων.- Αναμφίβολα, το υπό εξέταση πρόβλημα αποτελεί πρόβλημα μεγάλων μετακινήσεων. Ωστόσο η ενεργοποίηση της εν λόγω δυνατότητας που παρέχει ο αριθμητικός κώδικας έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση του χρόνου ολοκλήρωσης της ανάλυσης. Ως εκ τούτου, για να αξιολογηθεί η αναγκαιότητα ενεργοποίησης της συγκεκριμένης λειτουργίας εκτελέστηκε μία ομάδα αναλύσεων θεωρώντας λογική μικρών μετατοπίσεων.

Για κάθε ομάδα αναλύσεων εκτελέστηκαν 8 αναλύσεις για βάθη εγκιβωτισμού $H/D=1.5, 3.5, 5.5$ και 11 καθώς και για άμμο χαλαρής και μέσης πυκνότητας. Συνολικά οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Σύνολο αναλύσεων βαθμονόμησης

α/α	Συνοριακές συνθήκες στην βάση	Λειτουργία Μικρών/Μεγάλων Μετατοπίσεων	Πυκνότητα Άμμου (kN/m^3)	Βάθος εγκιβωτισμού (H/D)
1	Αρθρώσεις	Μικρές	14.8,16.4	1.5,3.5,5.5,11
2	Αρθρώσεις	Μεγάλες	14.8,16.4	1.5,3.5,5.5,11
3	Κυλίσεις	Μικρές	14.8,16.4	1.5,3.5,5.5,11
4	Κυλίσεις	Μεγάλες	14.8,16.4	1.5,3.5,5.5,11

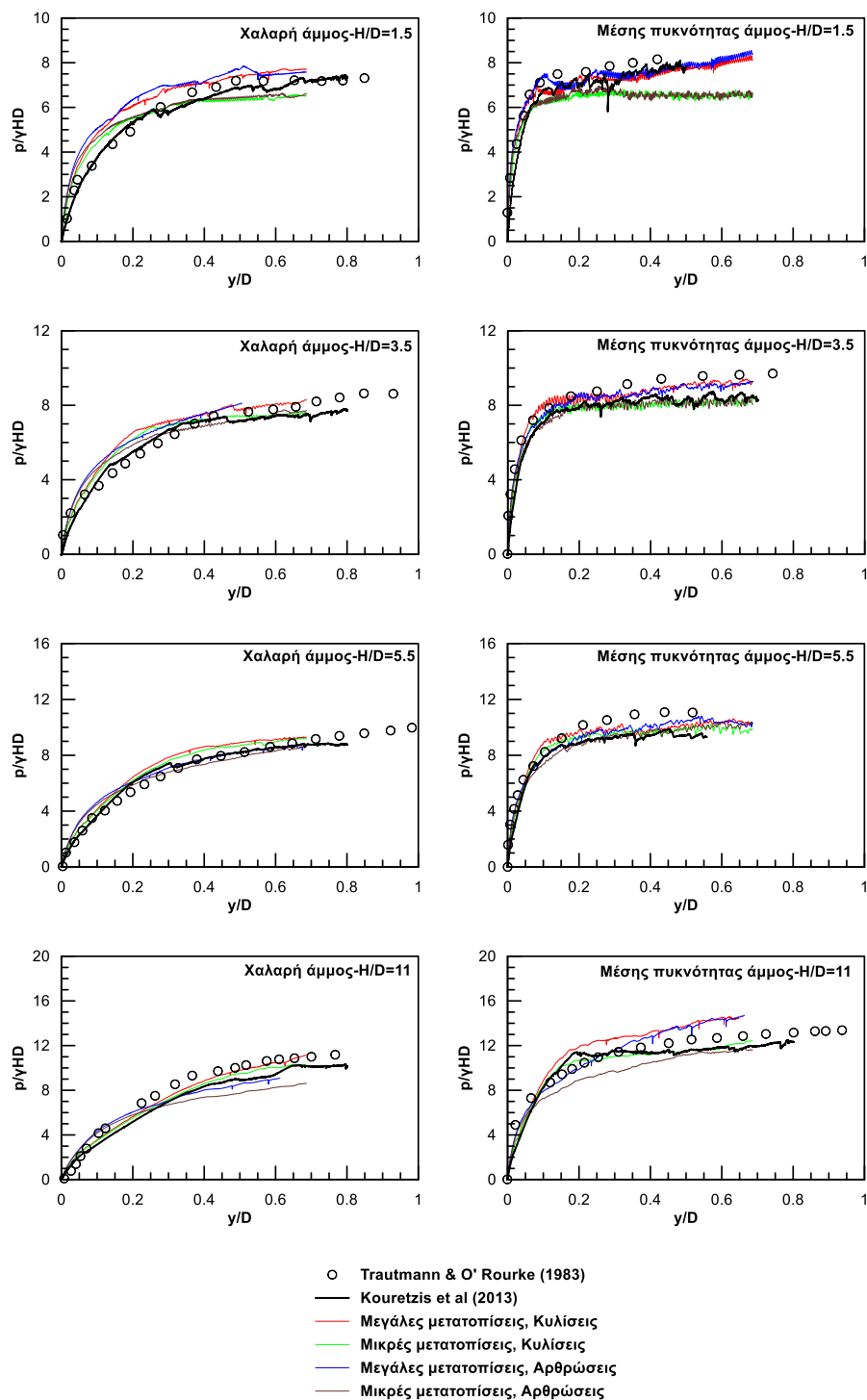
Στο **Σχήμα 3.8** παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου μετατόπισης που προκύπτουν από τις αναλύσεις της παρούσας μελέτης, καθώς και τα αντίστοιχα διαγράμματα από τις μελέτες των Trautmann and O'Rourke και Kouretzis et al. Επίσης στο **Σχήμα 3.9** φαίνεται η μορφή του παραμορφωμένου κανάβου για την περίπτωση μεγάλων και μικρών μετακινήσεων αντίστοιχα, ενώ στο **Σχήμα 3.10** φαίνονται οι ισοκαμπύλες του ρυθμού ανάπτυξης διατμητικών παραμορφώσεων (shear strain rate). Συνολικά παρατηρούνται τα εξής:

- Η επιρροή των συνθηκών στήριξης στη βάση του κανάβου είναι πιο εμφανής στα μεγάλα βάθη εγκιβωτισμού ($H/D=11$). Στις αναλύσεις αυτές παρατηρείται πως η χρήση αρθρώσεων προσεγγίζει ακριβέστερα τα αποτελέσματα των αναλύσεων των Kouretzis et al., ιδιαίτερα στην περίπτωση της χαλαρής άμμου. Η χρήση κυλίσεων αντιθέτως προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα των Trautmann και O'Rourke. Συνολικά, δεν παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση αναφορικά με το μέγιστο φορτίο που αναπτύσσεται επί του αγωγού. Επιπρόσθετα, η επιλογή αρθρώσεων ή κυλίσεων δεν έδειξε να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την σχηματιζόμενη επιφάνεια αστοχίας, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.10**. Αξίζει όμως να τονιστεί, πως η χρήση αρθρώσεων προσεγγίζει πολύ καλύτερα τις πραγματικές συννοριακές συνθήκες του προβλήματος.

Η επιλογή της λειτουργίας μεγάλων μετατοπίσεων δείχνει να υπερτερεί στην πλειοψηφία των αναλύσεων καθώς δίνει αισθητά καλύτερες συγκρίσεις τόσο με τις πειραματικές όσο και με τις αναλυτικές καμπύλες βαθμονόμησης. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση άμμου ειδικού βάρους 16.4 kN/m^3 για βάθος εγκιβωτισμού $H/D=11$, όπου με τη χρήση μεγάλων μετατοπίσεων προκύπτει υπερεκτίμηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους. Η χρήση όμως της λειτουργίας αυτής κρίνεται προτιμότερη, καθώς δίνει πολύ πιο ρεαλιστική εικόνα του παραμορφωμένου κανάβου, έπειτα από την επιβολή της μετατόπισης στον αγωγό. Η σύγκριση αυτή παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.9**. Στο σχήμα αυτό, στα αριστερά φαίνεται ο παραμορφωμένος κάναβος μετά την επιβολή της συνολικής μετατόπισης με τη χρήση της δυνατότητας μεγάλων μετατοπίσεων, ενώ στα δεξιά ο αντίστοιχος παραμορφωμένος κάναβος χωρίς την ενεργοποίησή της.

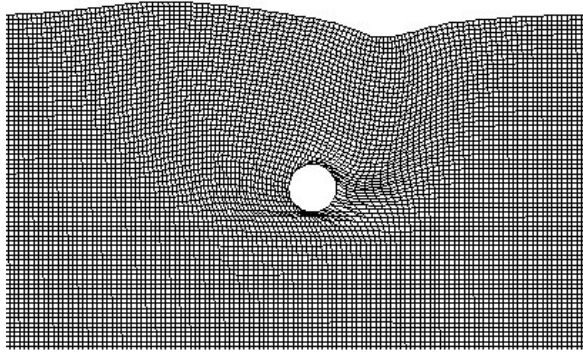
Πέραν των ανωτέρω, στο τελικό στάδιο της βαθμονόμησης, εξετάστηκε η χρήση μοντέλου Strain-Softening έναντι του αρχικά επιλεγμένου καταστατικού προσομοιώματος Mohr-Coulomb. Εξετάστηκε κυρίως η πιθανή ευνοϊκή επιρροή του μοντέλου Strain-Softening στην σχηματιζόμενη επιφάνεια αστοχίας. Η βασική διαφορά των δύο καταστατικών προσομοιωμάτων έγκειται στο ότι το καταστατικό προσομοίωμα Strain-Softening θεωρεί γραμμική μείωση στην γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους όταν η παραμόρφωση του εδαφικού στοιχείου ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή. Στην περίπτωση μας, η αρχική τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής θεωρήθηκε ίση με 39° , η τελική τιμή της ίση με 37° (που είναι η παραμένουσα γωνία τριβής που χρησιμοποιήθηκε στο καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb) ενώ η παραμόρφωση αστοχίας ίση με 5%. Στο **Σχήμα 3.11** και **Σχήμα 3.12** παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των σχηματιζόμενων επιφανειών αστοχίας και των καμπυλών φορτίου μετατόπισης για τα δύο μοντέλα στην περίπτωση του κανάβου με βάθος επίχωσης $H/D=3.5$ και μέσης πυκνότητας άμμο επίχωσης. Οι καμπύλες φορτίου μετατόπισης για τα δύο καταστατικά προσομοιώματα είναι πρακτικά οι ίδιες, συνεπώς δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στην τιμή του φορτίου αστοχίας που υπολογίζεται σε κάθε περίπτωση.

Τέλος, σχετικά με την επιφάνεια αστοχίας, η εικόνα που προκύπτει είναι παρόμοια και στις δυο περιπτώσεις με διαφορές στην λεπτομέρεια.

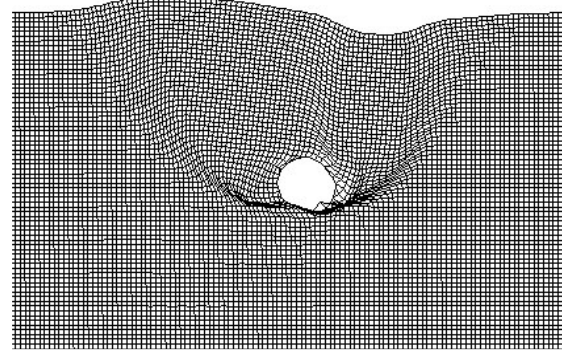


Σχήμα 3.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής μεθοδολογίας με προυπάρχουσες μελέτες από Trautmann & O' Rourke (1983) και Kouretzis et al. (2013)

α) Μεγάλες μετατοπίσεις (set large)

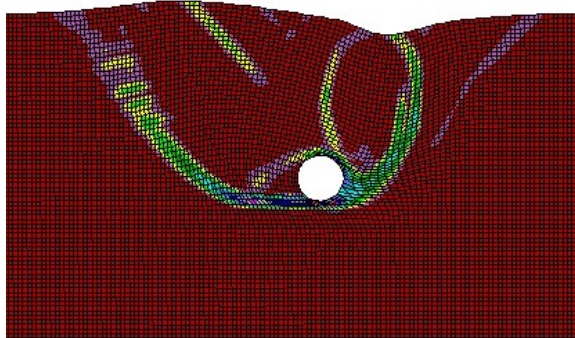


β) Μικρές μετατοπίσεις (set small)

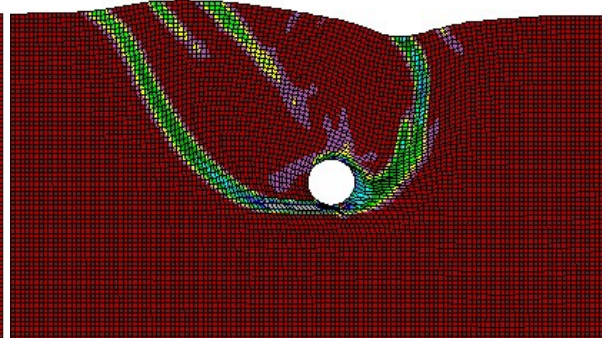


Σχήμα 3.9: Σύγκριση παραμορφωμένων καννάβων: (α) Λειτουργία μεγάλων μετακινήσεων (β) Λειτουργία μικρών μετακινήσεων

Χρήση αρθρώσεων (hinges)

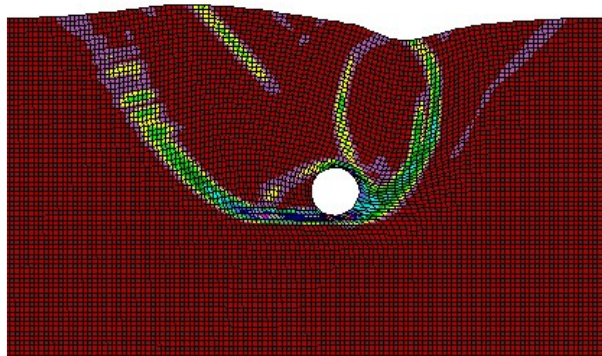


Χρήση κυλίσεων (rollers)

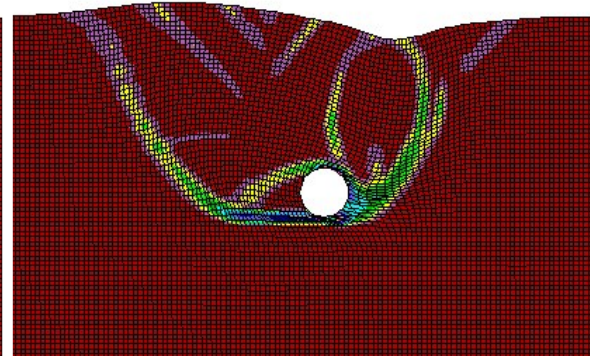


Σχήμα 3.10: Επιρροή συνοριακών συνθηκών στις σχηματιζόμενες επιφάνειες αστοχίας, για αγωγό με λόγο εγκιβωτισμού $H/D=3.5$ και μέσης πυκνότητας άμμο επίχωσης

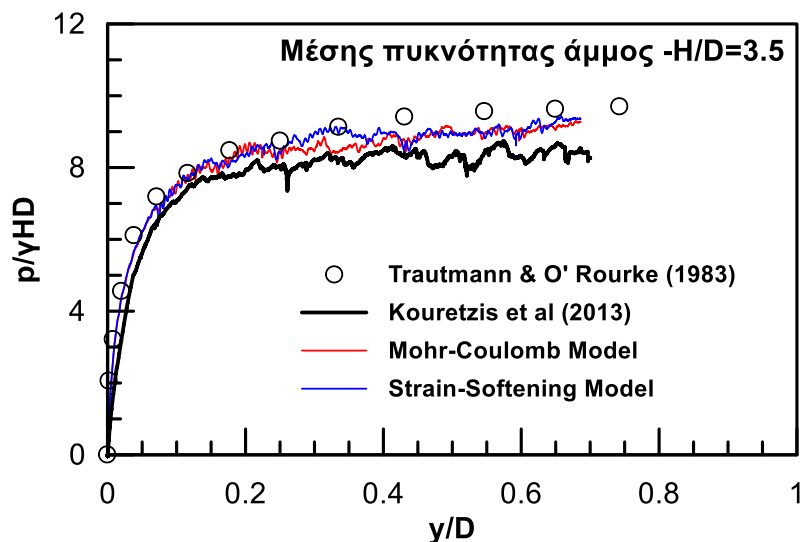
Καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb



Καταστατικό προσομοίωμα Strain-Softening



Σχήμα 3.11: Επιρροή καταστατικού μοντέλου στις σχηματιζόμενες επιφάνειες αστοχίας, για αγωγό με λόγο εγκιβωτισμού $H/D=3.5$ και μέσης πυκνότητας άμμο επίχωσης



Σχήμα 3.12: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για τα καταστατικά προσομοιώματα Mohr-Coulomb και Strain-Softening

Επομένως με την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης της αριθμητικής μεθοδολογίας επιλέχθηκε η χρήση:

- της επιλογής large strain για την καλύτερη προσομοίωση του προβλήματος μεγάλων παραμορφώσεων που εξετάζεται
- της χρήσης αρθρώσεων για την προσομοίωση των συνοριακών συνθηκών στη βάση του αγωγού
- καταστατικού προσομοιώματος Mohr-Coulomb έναντι μοντέλου Strain-Softening

3.5 Παραμετρικές Αναλύσεις

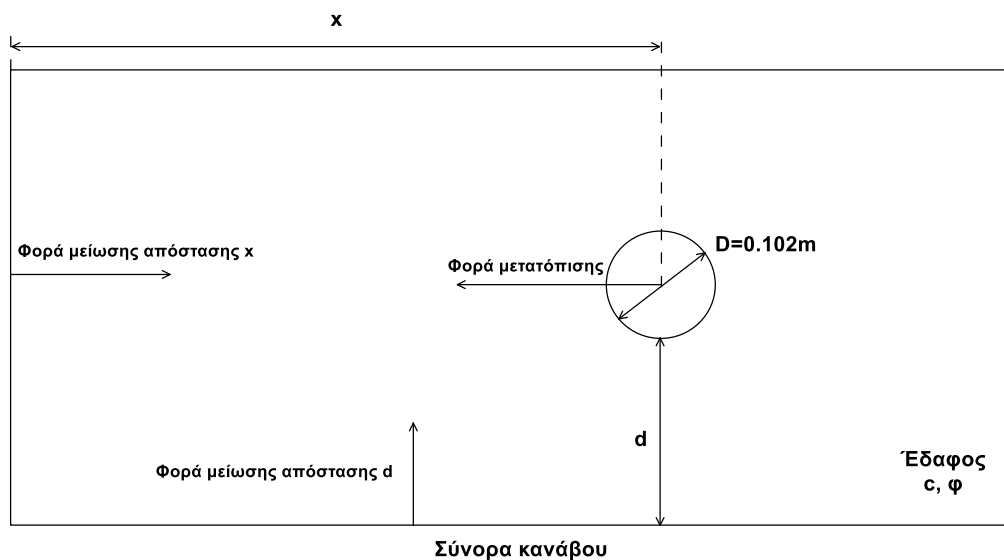
Όπως αναφέρθηκε και στη βιβλιογραφική αναδρομή του Κεφαλαίου 2, οι Kouretzis et al. (2013) πραγματοποίησαν σειρά αναλύσεων για τον προσδιορισμό των διαστάσεων της τάφρου εγκιβωτισμού του αγωγού, έτσι ώστε η επιφάνεια αστοχίας που αναπτύσσεται λόγω πλευρικής μετατόπισης του, να εκδηλώνεται εξ' ολοκλήρου εντός αυτής. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση της επιρροής του περιβάλλοντος την τάφρο φυσικού εδάφους στην καταπόνηση του αγωγού καθώς αυτός μετακινείται πλευρικά και δεν εξετάζεται η πιθανή επιρροή των διαστάσεων και της γεωμετρίας της τάφρου εγκιβωτισμού στις καμπύλες φορτίου-οριζόντιας μετατόπισης του αγωγού.

Έτσι, για τον προσδιορισμό της επίδρασης των διαστάσεων της τάφρου στις αναπτυσσόμενες στον αγωγό δυνάμεις πραγματοποιήθηκε σειρά παραμετρικών αναλύσεων, στις οποίες εξετάστηκε το πρόβλημα της πλευρικής μετατόπισης που παρουσιάστηκε στην αριθμητική μεθοδολογία του προηγούμενου κεφαλαίου, για περιπτώσεις τάφρων με κατακόρυφες

παρειές και συνεχώς μειούμενες διαστάσεις. Οι αναλύσεις αυτές χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- i. Στην πρώτη κατηγορία εξετάστηκε το πρόβλημα για τάφρους στις οποίες περιοριζόταν σταδιακά η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του κατώτατου άκρου του αγωγού και του οριζοντίου συνόρου της τάφρου. Για τον ορισμό της απόστασης αυτής χρησιμοποιήθηκε ο όρος d ο οποίος κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών $0.15D$ και $3.0D$ (D είναι η εξωτερική διάμετρος του αγωγού).
- ii. Στη δεύτερη κατηγορία εξετάστηκε η περίπτωση κατά την οποία έχουμε σταδιακή μείωση της οριζόντιας απόστασης του αγωγού από το κατακόρυφο σύνορο της τάφρου. Για τον ορισμό της απόστασης αυτής χρησιμοποιήθηκε ο όρος x , ο οποίος εκφράζει την οριζόντια απόσταση μεταξύ του κέντρου του αγωγού και του κατακόρυφου συνόρου της τάφρου, μετά την επιβολή της μετακίνησης, και λαμβάνει τιμές μεταξύ των $0.8D$ και $15.8D$.

Στο **Σχήμα 3.13** ορίζονται γραφικά οι όροι x και d , καθώς και η φορά με την οποία αυτοί μειώνονται.



Σχήμα 3.13: Ενδεικτική παρουσίαση όρων x και d

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για διάφορες τιμές του λόγου εγκιβωτισμού H/D , με εύρος τιμών από $1.5 \leq H/D \leq 16$, όπου H το βάθος από την επιφάνεια μέχρι το κέντρο του αγωγού και D η διάμετρος του αγωγού. Στην πλειονότητα των αναλύσεων η τιμή της διαμέτρου επιλέχθηκε ίση με 0.102m .

Από την εκάστοτε ανάλυση συγκεντρώθηκαν οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης του αγωγού, καθώς και οι εικόνες των σχηματιζόμενων επιφανειών αστοχίας. Από τις καμπύλες

φορτίου μετατόπισης προκύπτει κατόπιν επεξεργασίας το μέγιστο φορτίο το οποίο επιβάλλεται στον αγωγό, όπως επίσης και η αντίστοιχη επιβαλλόμενη μετατόπιση στην οποία εμφανίζεται αυτό.

Στις εν λόγω αναλύσεις εκτός από την επιρροή των διαστάσεων της τάφρου θεμελίωσης, εξετάστηκε και:

- Η επίδραση της πυκνότητας της άμμου επίχωσης στα παραγόμενα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα έγινε χρήση δύο πυκνοτήτων με αντίστοιχες τιμές ειδικού βάρους 14.8 kN/m^3 (χαλαρή άμμος) και 16.4 kN/m^3 (άμμος μέσης πυκνότητας).
- Η επίδραση της κλίμακας του προβλήματος στα παραγόμενα αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν επιπρόσθετες αναλύσεις με χρήση αγωγού κανονικών διαστάσεων. Η διάμετρος του εν λόγω αγωγού είχε τιμή $D=0.70\text{m}$ και ήταν εγκιβωτισμένος σε άμμο μέσης πυκνότητας.

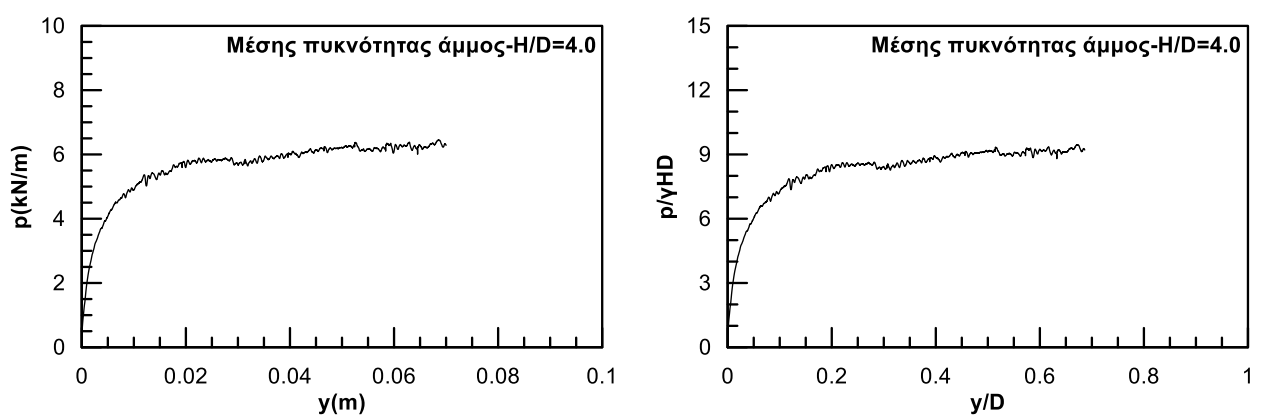
Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 330 παραμετρικές αναλύσεις, οι βασικές παράμετροι των οποίων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.2**.

Πίνακας 3.2: Βασικά χαρακτηριστικά παραμετρικών αναλύσεων

α/α	Διάμετρος (D) (m)	Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Λόγος H/D	x (cm)	d (cm)
1	0.102	χαλαρή, μέση	1.5	158,118,78,48 38,28,18,8	30
2	0.102	χαλαρή, μέση	1.5	158	30,20,15,10,8,5,3.5, 3.0,2.5,2.0,1.5
3	0.102	χαλαρή, μέση	4.0	158,118,78,48 38,28,18,8	30
4	0.102	χαλαρή, μέση	4.0	158	30,20,15,10,8,5,3.5, 3.0,2.5,2.0,1.5
5	0.102	χαλαρή, μέση	5.5	158,118,78,48 38,28,18,8	30
6	0.102	χαλαρή, μέση	6.5	158,118,78,48 38,28,18,8	30
7	0.102	χαλαρή, μέση	6.5	158	30,20,15,10,8,5,3.5, 3.0,2.5,2.0,1.5
8	0.102	χαλαρή, μέση	8.0	158,118,78,48 38,28,18,8	30
9	0.102	χαλαρή, μέση	8.0	158	30,20,15,10,8,5,3.5, 3.0,2.5,2.0,1.5
10	0.102	χαλαρή, μέση	9.5	158,118,78,48 38,28,18,8	30
11	0.102	χαλαρή, μέση	9.5	158	30,20,15,10,8,5,3.5, 3.0,2.5,2.0,1.5

12	0.102	χαλαρή, μέση	11.5	158,118,78,48 38,28,18,8	30
13	0.102	χαλαρή, μέση	11.5	158	30,20,15,10,8,5,3.5, 3.0,2.5,2.0,1.5
14	0.102	χαλαρή, μέση	16.0	158,118,78,48 38,28,18,8	30
15	0.102	χαλαρή, μέση	16.0	158	30,20,15,10,8,5,3.5, 3.0,2.5,2.0,1.5
16	0.70	μέση	1.5	1085,810,535.5,329, 261,192.5,123,54.6	210
17	0.70	μέση	1.5	1085	210,140,105,70,56, 35,21,14
18	0.70	μέση	6.5	1085,810,535.5,329, 261,192.5,123,54.6	210
19	0.70	μέση	6.5	1085	210,140,105,70,56, 35,21,14
20	0.70	μέση	11.5	1085,810,535.5,329, 261,192.5,123,54.6	210
21	0.70	μέση	11.5	1085	210,140,105,70,56, 35,21,14

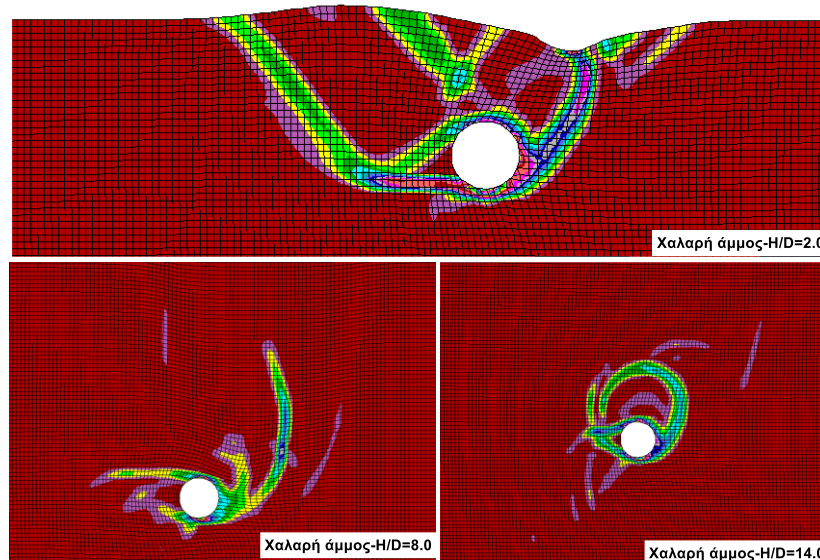
Ακολούθως, παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια χαρακτηριστικά αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 3.14** παρουσιάζεται η τυπική καμπύλη φορτίου μετατόπισης, σε κανονική και σε αδιαστατοποιημένη μορφή, για την περίπτωση λόγου εγκιβωτισμού $H/D=4.0$ και άμμου μέσης πυκνότητας.



Σχήμα 3.14: Τυπική καμπύλη φορτίου-μετατόπισης

Επιπλέον, στο **Σχήμα 3.15** παρουσιάζονται τυπικές επιφάνειες αστοχίας για τρία διαφορετικά βάθη εγκιβωτισμού. Παρατηρείται ότι η μορφή της επιφάνειας αστοχίας εξαρτάται σημαντικά από το λόγο εγκιβωτισμού H/D , και μεταβάλλεται από γενικευμένη αστοχία με

επιφανειακή έκφραση για μικρά βάθη εγκιβωτισμού ($H/D=2.0$), σε τοπική αστοχία κυλινδρικής μορφής σε μεγάλα βάθη ($H/D=14$). Η μορφή του μηχανισμού αστοχίας που αναπτύσσεται κατά την οριζόντια μετατόπιση του αγωγού επηρεάζει σημαντικά τις επιβαλλόμενες στον αγωγό δυνάμεις και για το λόγο αυτό εξετάζεται εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 3.15: Μηχανισμοί αστοχίας για λόγους εγκιβωτισμού $H/D=2.0$, 8.0 και 14.0 , αγωγό διαμέτρου 0.102m και χαλαρή άμμο (εικόνες εκτός κλίμακας)

3.6 Συμπεράσματα

Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την κατάστρωση της αριθμητικής μεθοδολογίας και τη βαθμονόμησή της είναι τα εξής:

- i. Η ύπαρξη προβλήματος μεγάλων μετατοπίσεων καθιστά απαραίτητη τη χρήση της δυνατότητας του κώδικα για συνεχή ανανέωση των συντεταγμένων των κόμβων του κανάβου (*large strain*). Η δυνατότητα αυτή συμβάλλει αισθητά στην προσέγγιση ρεαλιστικής εικόνας παραμορφωμένου κανάβου.
- ii. Η χρήση αρθρώσεων για την προσομοίωση των συνοριακών συνθηκών στη βάση του κανάβου αποτυπώνει καλύτερα τις πραγματικές συνοριακές συνθήκες του προβλήματος.
- iii. Το καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb περιγράφει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του εδάφους. Επιπλέον αποδεικνύεται πως είναι επαρκής η υιοθέτηση της γωνίας τριβής κρίσιμης κατάστασης (ϕ_{crit}), η οποία είναι ανεξάρτητη της σχετικής πυκνότητας της άμμου.

- iv. Η χρήση στοιχείων διεπιφάνειας (interface) με μειωμένη γωνία τριβής, για την προσομοίωση της σχετικής ολίσθησης εδάφους-αγωγού, κρίνεται απαραίτητη.
- v. Η χρήση μοντέλου Strain-Softening δεν παρέχει ουσιαστική διαφοροποίηση στην παραγόμενη επιφάνεια αστοχίας λόγω πλευρικής μετακίνησης.

Καταλήγοντας, η αριθμητική μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο, κρίνεται κατόπιν της αξιολόγησής της πως περιγράφει σε ικανοποιητικό βαθμό, ποσοτικά και ποιοτικά, το πρόβλημα της συμπεριφοράς αγωγού υποβαλλόμενου σε οριζόντια πλευρική μετακίνηση.

4

Έκταση Επιφάνειας Αστοχίας

4.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων σχετικά με την έκταση της επιφάνειας αστοχίας γύρω από τον αγωγό. Οι βασικές αριθμητικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας, και αγωγό διαμέτρου 0.102m. Επιλεκτικά, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για αγωγό διαμέτρου 0.70m σε άμμο μέσης πυκνότητας για την εξέταση της επιρροής της διαμέτρου στα αποτελέσματα που εξήχθησαν. Για λόγους σύγκρισης, στα ανωτέρω προστέθηκαν και αυτά των **Kouretzis et al. (2013)** που, όπως έχει προαναφερθεί, εξέτασε περιπτώσεις λόγων εγκλιβωτισμού $H/D \leq 5.5$. Τα βασικά δεδομένα των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν συνοψίζονται στον **Πίνακα 4.1**.

Πίνακας 4.1: Δεδομένα αριθμητικών αναλύσεων

α/α	Διάμετρος (D) (m)	Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Λόγος H/D
1	0.102	χαλαρή, μέση	1.5
2	0.102	χαλαρή, μέση	2.0
3	0.102	χαλαρή, μέση	2.5
4	0.102	χαλαρή, μέση	3.0
5	0.102	χαλαρή, μέση	3.5
6	0.102	χαλαρή, μέση	4.0
7	0.102	χαλαρή, μέση	4.5
8	0.102	χαλαρή, μέση	5.0
9	0.102	χαλαρή, μέση	5.5
10	0.102	χαλαρή, μέση	6.0
11	0.102	χαλαρή, μέση	6.5
12	0.102	χαλαρή, μέση	8.0
13	0.102	χαλαρή, μέση	9.5
14	0.102	χαλαρή, μέση	10.0
15	0.102	χαλαρή, μέση	11.0
16	0.102	χαλαρή, μέση	11.5
17	0.102	χαλαρή, μέση	12.0
18	0.102	χαλαρή, μέση	14.0
19	0.102	χαλαρή, μέση	16.0

20	0.70	μέση	1.5
21	0.70	μέση	6.5
22	0.70	μέση	11.5

Απώτερος σκοπός των αναλύσεων αυτών είναι ο προσδιορισμός της μέγιστης οριζόντιας απόστασης της επιφάνειας αστοχίας από το κέντρο του αγωγού καθώς και η περιγραφή του μηχανισμού αστοχίας που αναπτύσσεται για κάθε τιμή του λόγου εγκιβωτισμού H/D που εξετάζεται. Τελικά, πραγματοποιείται μια κατηγοριοποίηση των διαφόρων μηχανισμών αστοχίας σε τρεις διαφορετικούς τύπους (modes) ανάλογα με την μορφή τους, όπως περιγράφεται ακολούθως.

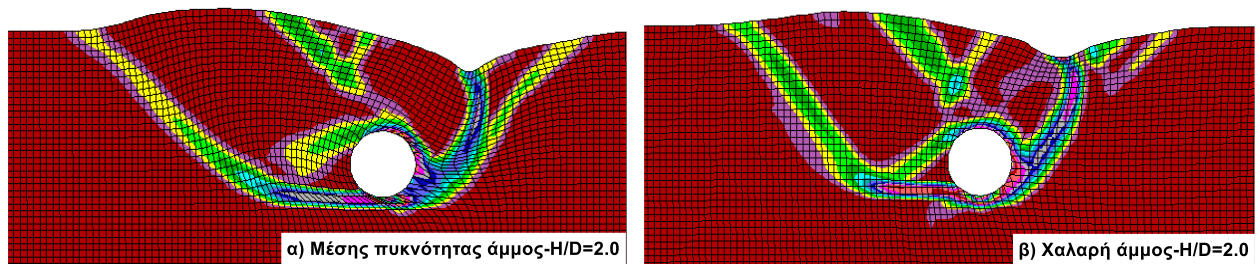
4.2 Μορφή επιφάνειας αστοχίας

Με βάση τα λεπτομερή αποτελέσματα των παραπάνω αριθμητικών αναλύσεων σχετικά με την διαρροή των εδαφικών στοιχείων γύρω από τον αγωγό κατά την μετατόπισή του, προσδιορίζονται οι διακριτές μορφές της επιφάνειας αστοχίας που περιγράφονται ακολούθως.

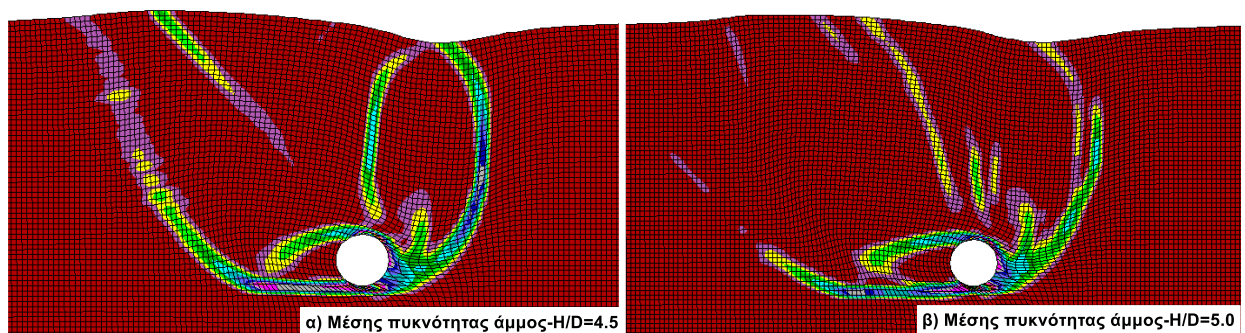
Ο **τύπος αστοχίας I (Σχήμα 4.1)** αναπτύσσεται μέχρι την τιμή λόγου $H/D=4.5$ για άμμο μέσης πυκνότητας και $H/D=6.0$ για χαλαρή άμμο. Τα όρια αυτά του τύπου αστοχίας I για τις δύο πυκνότητες άμμου επίχωσης προσδιορίστηκαν με παρατήρηση της επιφάνειας αστοχίας που αναπτύσσεται για τον εκάστοτε λόγο εγκιβωτισμού H/D . Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι στην άμμο μέσης πυκνότητας, ο μηχανισμός αστοχίας αλλάζει μορφή για τιμή $H/D \geq 5.0$ (**Σχήμα 4.2**) ενώ η αντίστοιχη τιμή για χαλαρή άμμο είναι $H/D \geq 6.5$ (**Σχήμα 4.3**).

Ο μηχανισμός αστοχίας τύπου I αντιστοιχεί σε μια επιφάνεια αστοχίας η οποία εκτείνεται μέχρι και την επιφάνεια του εδάφους. Η μορφή της αστοχίας αυτής αντιστοιχεί σε μια ρηχού τύπου αστοχία, κατά την οποία δημιουργούνται δύο εδαφικά πρίσματα:

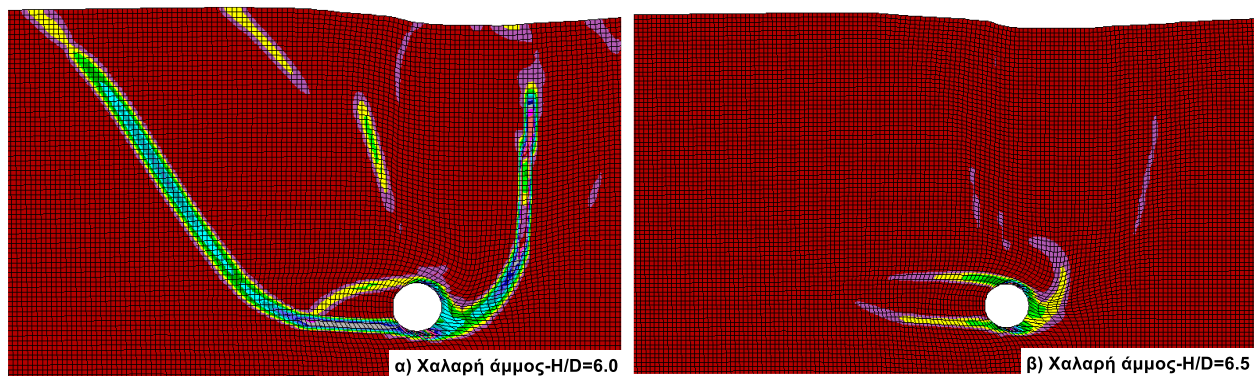
- (α) Το παθητικό πρίσμα εδάφους, το οποίο ωθείται κατά την κίνηση του αγωγού προς τα πάνω και στο οποίο το έδαφος αναπτύσσει παθητικές ωθήσεις και
- (β) το ενεργητικό πρίσμα εδάφους, το οποίο αναπτύσσεται πάνω και πίσω από τον αγωγό και περιλαμβάνει την εδαφική μάζα η οποία ολισθαίνει προς τα κάτω, καλύπτοντας το κενό που δημιουργείται πίσω από τον αγωγό λόγω της κίνησης του.



Σχήμα 4.1: Μορφή αστοχίας τύπου I για λόγο εγκιβωτισμού $H/D=2.0$ και α) άμμο μέσης πυκνότητας, β) χαλαρή άμμο

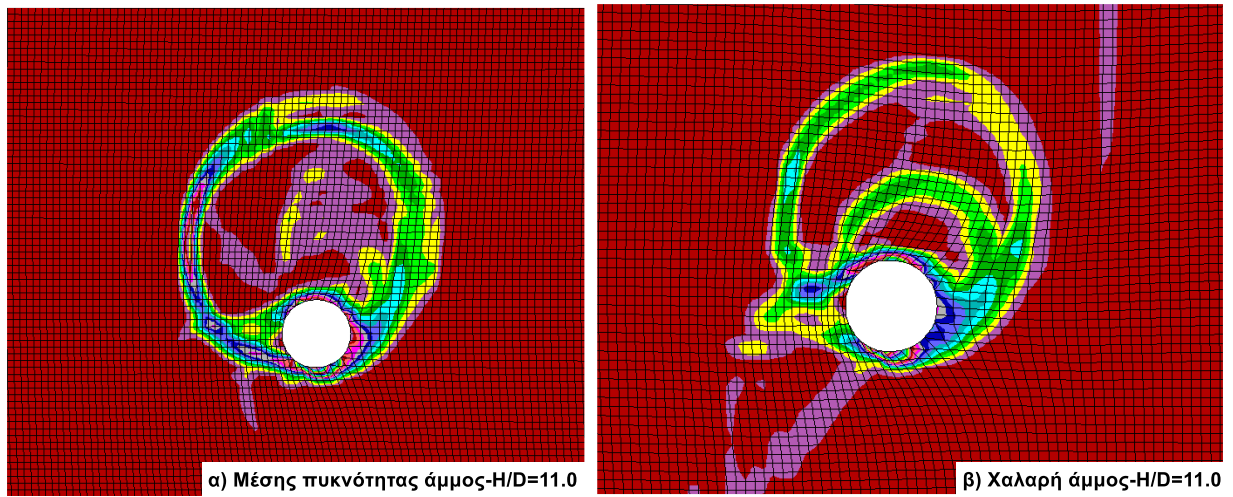


Σχήμα 4.2: Μηχανισμός αστοχίας αγωγού διαμέτρου 0.102m, εγκιβωτισμένου σε μέσης πυκνότητας άμμο επίχωσης για α) λόγο $H/D=4.5$ και β) λόγο $H/D=5.0$

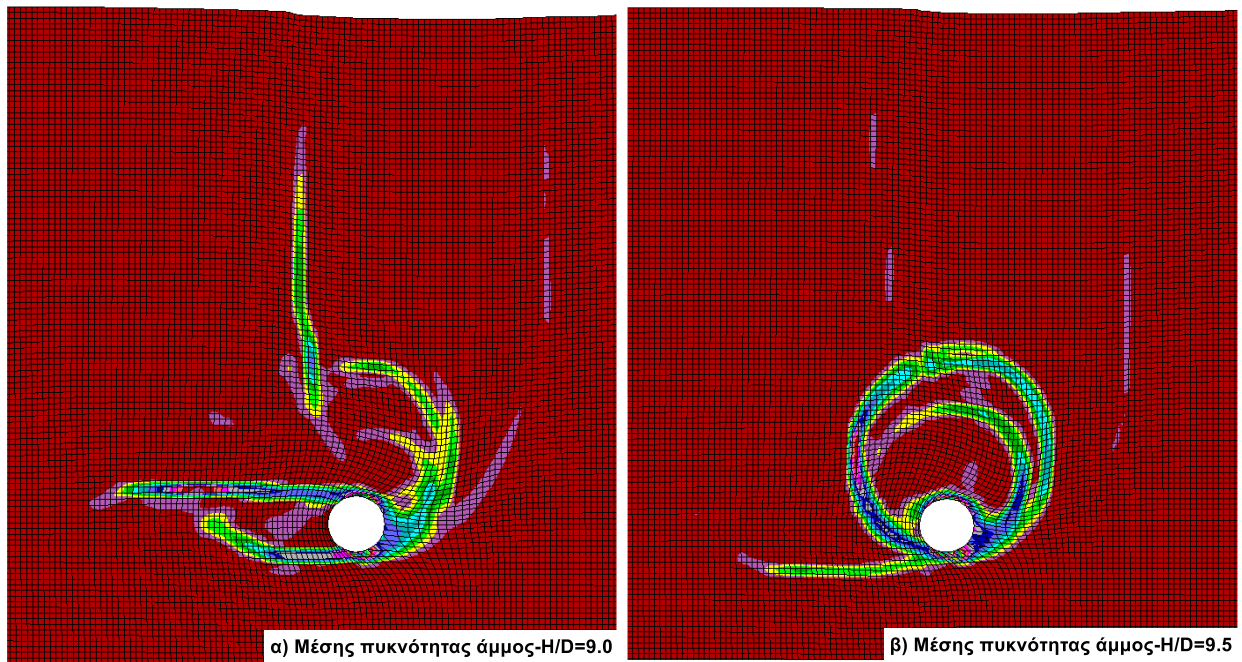


Σχήμα 4.3: Μηχανισμός αστοχίας αγωγού διαμέτρου 0.102m, εγκιβωτισμένου σε χαλαρή άμμο επίχωσης για α) λόγο $H/D=6.0$ και β) λόγο $H/D=6.5$

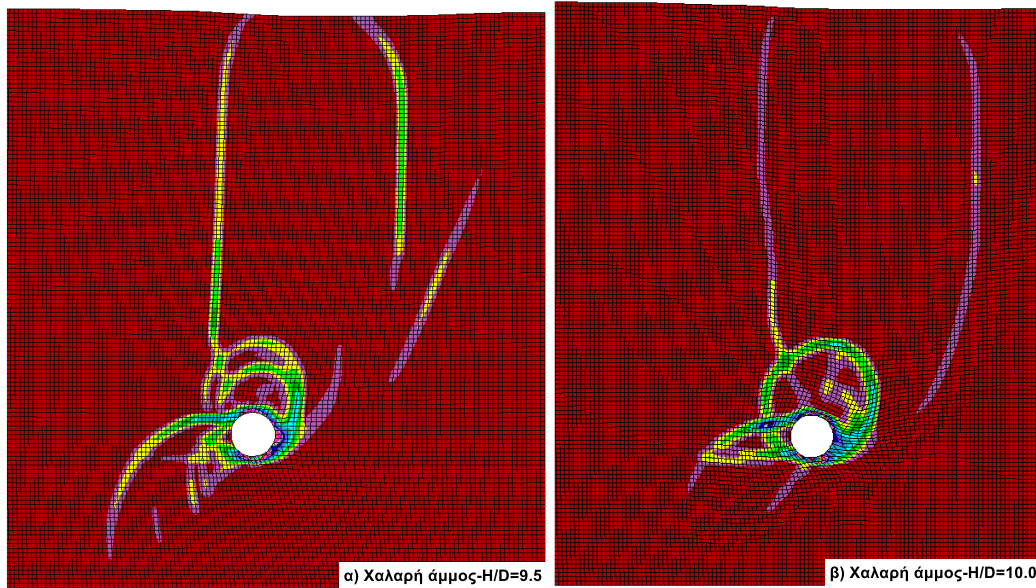
Ο τύπος αστοχίας III (Σχήμα 4.4) ξεκινάει από λόγο $H/D = 9.5$ για άμμο μέσης πυκνότητας (Σχήμα 4.5), από λόγο $H/D=10.0$ για χαλαρή άμμο (Σχήμα 4.6) και συνεχίζει για όλες τις τιμές που είναι μεγαλύτερες. Για τις παραπάνω τιμές λόγου εγκιβωτισμού H/D , αναπτύσσεται ένας βαθύς μηχανισμός αστοχίας που περιλαμβάνει μια επιφάνεια η οποία περικλείει τον αγωγό.



Σχήμα 4.4: Μορφή αστοχίας τύπου III για λόγο εγκιβωτισμού $H/D=11.0$ και α) άμμο μέσης πυκνότητας, β) χαλαρή άμμο

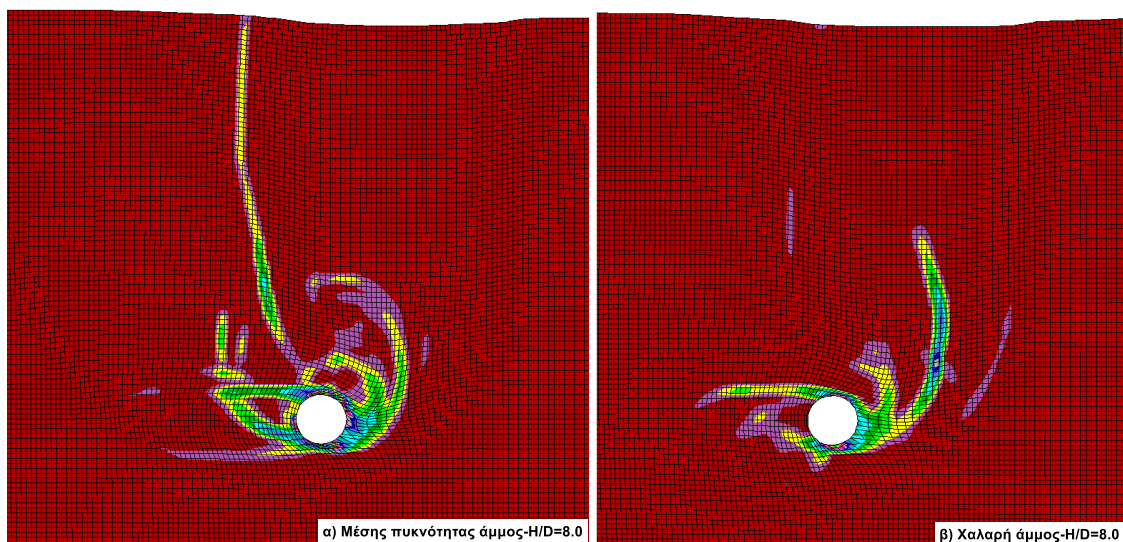


Σχήμα 4.5: Μηχανισμός αστοχίας αγωγού διαμέτρου 0.102m, εγκιβωτισμένου σε μέσης πυκνότητας άμμο επίχωσης για α) λόγο $H/D=9.0$ και β) λόγο $H/D=9.5$



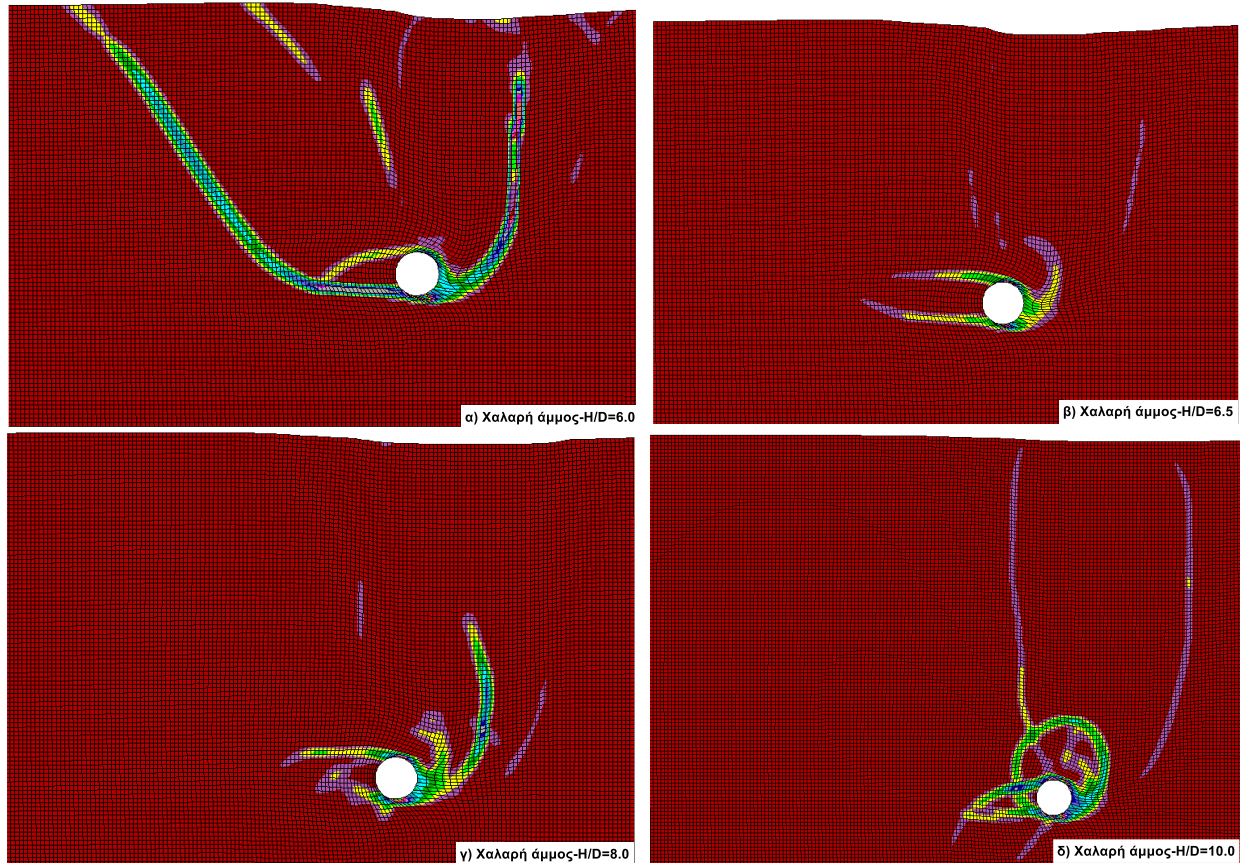
Σχήμα 4.6: Μηχανισμός αστοχίας αγωγού διαμέτρου 0.102m, εγκιβωτισμένου σε χαλαρή άμμο επίχωσης για α) λόγο $H/D=9.5$ και β) λόγο $H/D=10.0$

Τέλος, ο **τύπος αστοχίας II** (Σχήμα 4.7) εμφανίζεται για τις ενδιάμεσες τιμές του λόγου εγκιβωτισμού H/D , δηλαδή για $4.5 < H/D < 9.5$ για άμμο μέσης πυκνότητας και $6.0 < H/D < 10$ για χαλαρή άμμο. Για το παραπάνω εύρος λόγων εγκιβωτισμού H/D , ο μηχανισμός αστοχίας παύει να εκτείνεται ως την επιφάνεια του εδάφους, αρχίζει να προσεγγίζει τον αγωγό και να δημιουργείται σταδιακά η επιφάνεια που τον περικλείει στην αστοχία τύπου III.

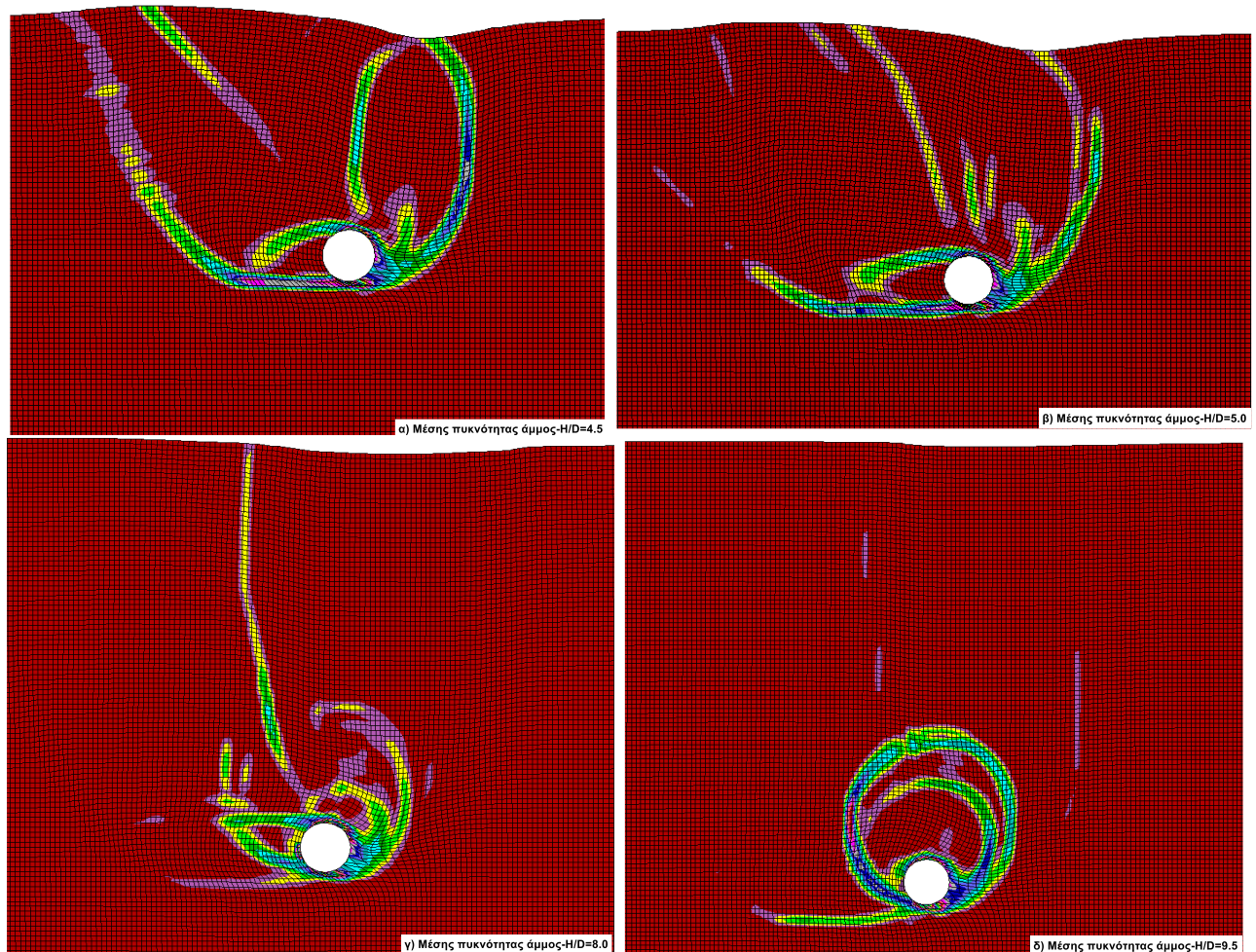


Σχήμα 4.7: Μορφή αστοχίας τύπου II για λόγο εγκιβωτισμού $H/D=8.0$ και α) άμμο μέσης πυκνότητας, β) χαλαρή άμμο

Το εύρος αυτό λόγω H/D θα το καλέσουμε μεταβατική ζώνη (transition zone) καθώς μέσα σε αυτό παρατηρείται η σταδιακή μετάβαση του μηχανισμού αστοχίας από τύπου I, δηλαδή ρηγή αστοχία που εκδηλώνεται μέχρι την εδαφική επιφάνεια, σε τύπου III, δηλαδή μια βαθιά μορφή αστοχίας γύρω από τον αγωγό. Η μετάβαση αυτή παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.8** για χαλαρή άμμο και στο **Σχήμα 4.9** για άμμο μέσης πυκνότητας.



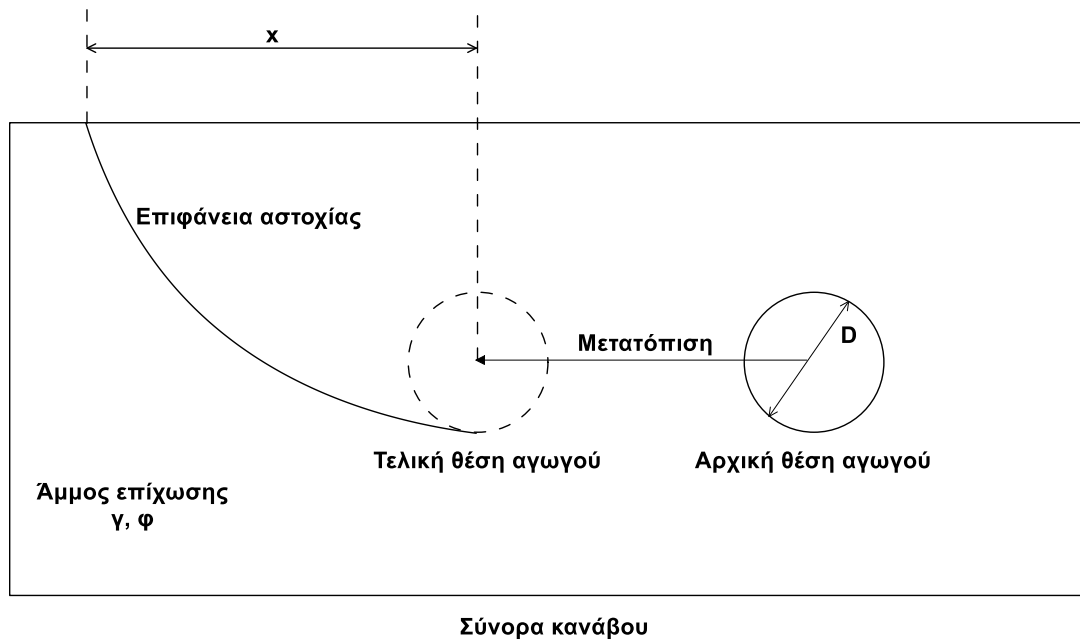
Σχήμα 4.8: Μετάβαση μορφής αστοχίας από τύπου I για λόγο $H/D=6.0$ (α) σε τύπου II για λόγο $H/D=6.5$ (β), $H/D=8.0$ (γ) και σε τύπου III για λόγο $H/D=10.0$ (δ) και χαλαρή άμμο επίχωσης



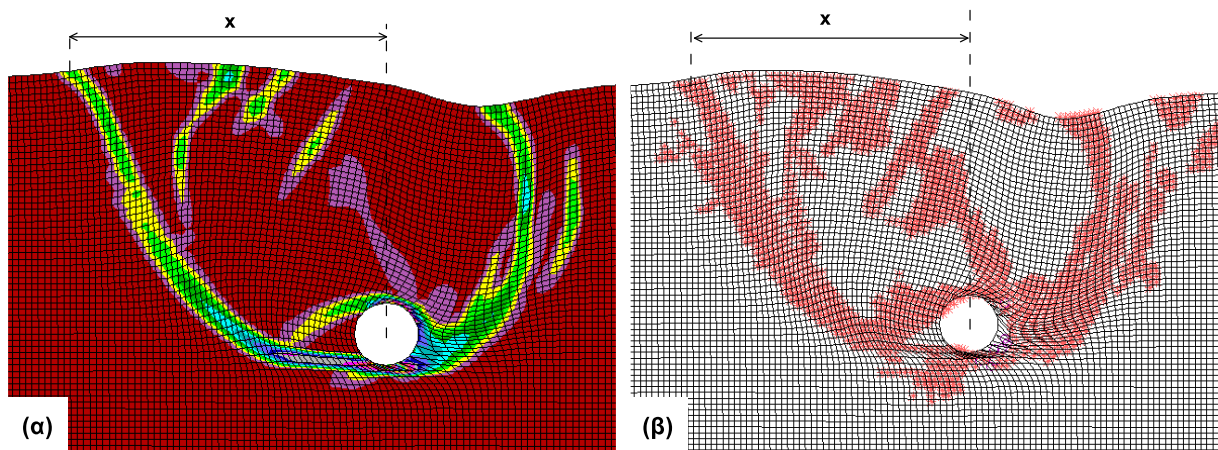
Σχήμα 4.9: Μετάβαση μορφής αστοχίας από τύπου I για λόγο $H/D=4.5$ (α) σε τύπου II για λόγο $H/D=5.0$ (β), $H/D=8.0$ (γ) και σε τύπου III για λόγο $H/D=9.5$ (δ) και μέσης πυκνότητας άμμο επίχωσης

4.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων

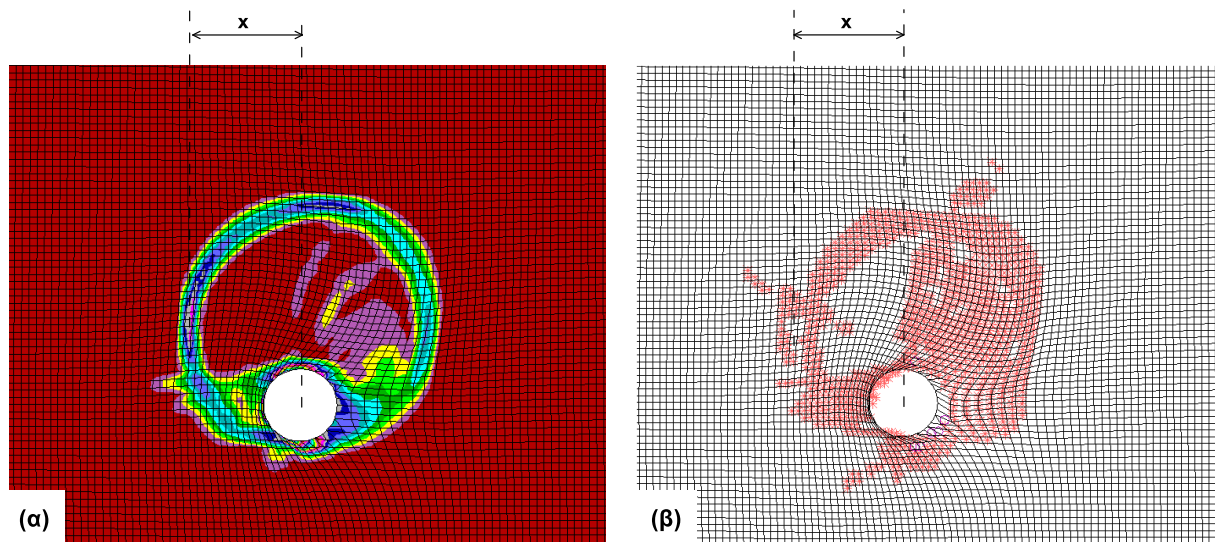
Για τις ανάγκες της παρούσας αξιολόγησης, ορίζουμε ως “ x ” την μέγιστη οριζόντια απόσταση της επιφάνειας αστοχίας από το κέντρο του αγωγού στην τελική του θέση, δηλαδή μετά την οριζόντια μετατόπιση που του επιβάλλουμε (Σχήμα 4.10). Σε προηγούμενα κεφάλαια, διαπιστώθηκε πως η επιφάνεια αστοχίας του εδάφους απεικονίζεται κατά τον βέλτιστο τρόπο, δηλαδή με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια και ευκρίνεια, εμφανίζοντας τα εδαφικά στοιχεία που έχουν αστοχήσει κατά την επιβολή της οριζόντιας μετατόπισης του αγωγού (plasticity plot) και των διατμητικών παραμορφώσεων στο τελευταίο βήμα της αριθμητικής ανάλυσης (shear strain rate plot). Με βάση τις δύο παραπάνω εικόνες προσδιορίζεται η απόσταση x για κάθε εξεταζόμενη τιμή του λόγου H/D . Ενδεικτικά, παρατίθενται δύο περιπτώσεις προσδιορισμού της απόστασης x για άμμο μέσης πυκνότητας και λόγο H/D ίσο με 4.0 (Σχήμα 4.11) και 16.0 (Σχήμα 4.12).



Σχήμα 4.10: Ορισμός απόστασης x



Σχήμα 4.11: Προσδιορισμός απόστασης x από: (α) διάγραμμα διατμητικών παραμορφώσεων (shear strain rate plot) και (β) διάγραμμα πλαστικοποίησης εδαφικών σημείων (plasticity plot) για λόγο $H/D=4.0$ και άμμο μέσης πυκνότητας

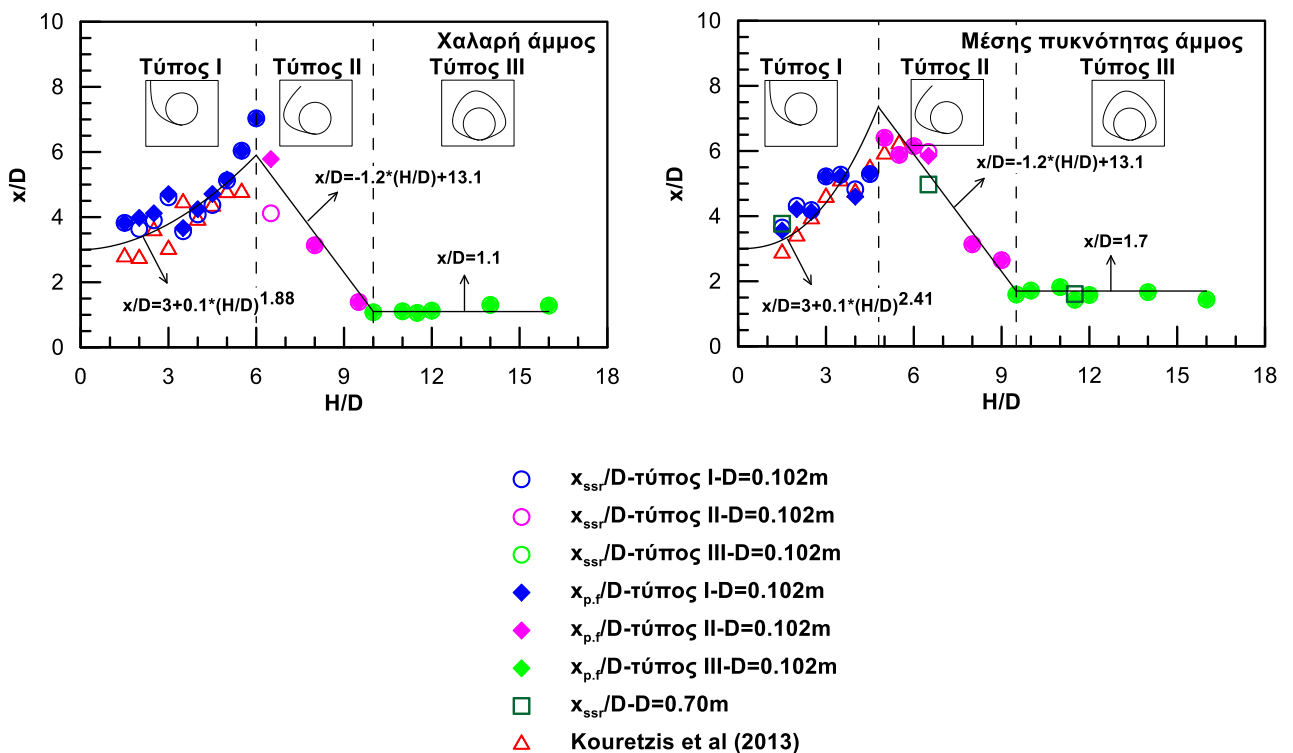


Σχήμα 4.12: Προσδιορισμός απόστασης x από α) διάγραμμα διατμητικών παραμορφώσεων (shear strain rate plot) και β) διάγραμμα πλαστικοποίησης εδαφικών σημείων (plasticity plot) για λόγο $H/D=16.0$ και άμμο μέσης πυκνότητας

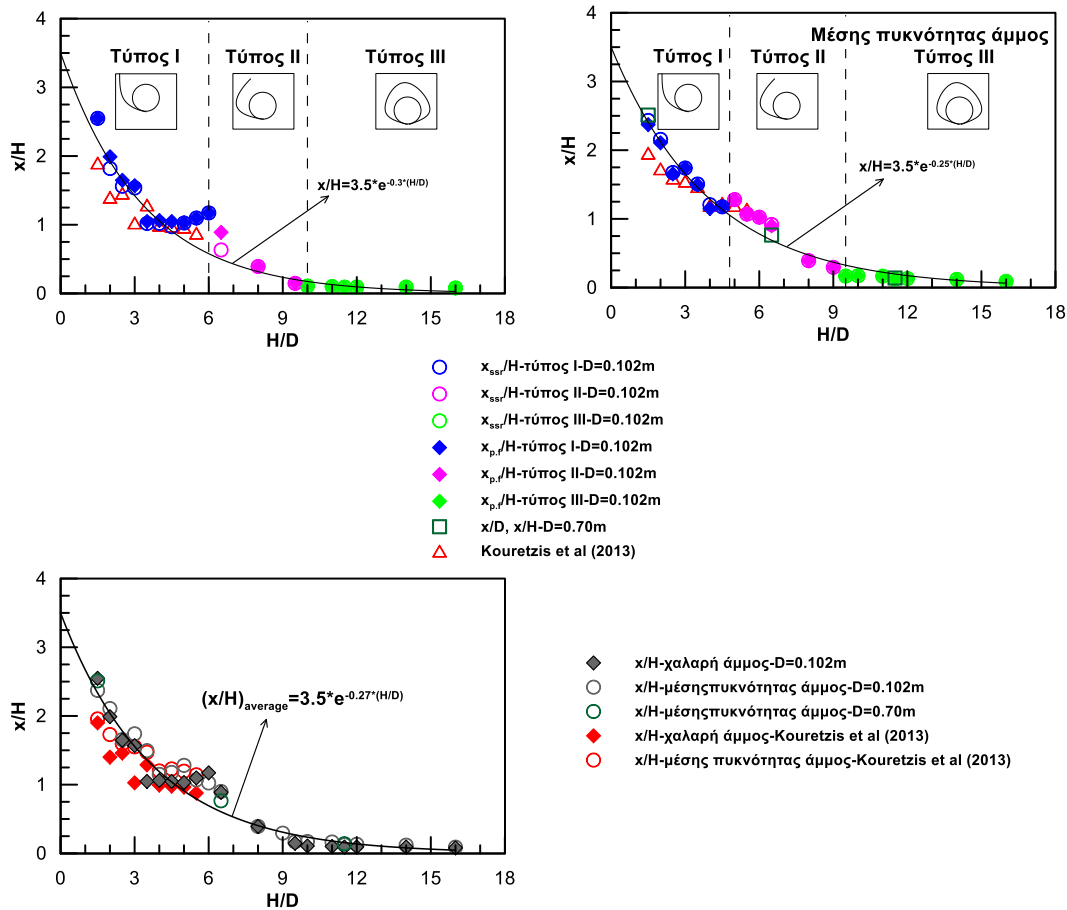
Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της μεταβολής της απόστασης x συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού H/D παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.13** και στο **Σχήμα 4.14**. Στο Σχήμα 4.13 εκφράζεται ο αδιαστατοποιημένος λόγος x/D συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού H/D για χαλαρή και μέσης πυκνότητας άμμο. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 4.14 εκφράζεται ο αδιαστατοποιημένος λόγος x/H συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού H/D για τις δύο διαφορετικές πυκνότητες άμμου επίχωσης.

Η τιμή της απόστασης x μετρήθηκε τόσο από το διάγραμμα των διατμητικών παραμορφώσεων (x_{ssr}/D , x_{ssr}/H) όσο και από το διάγραμμα πλαστικοποίησης των εδαφικών σημείων ($x_{p.f}/D$, $x_{p.f}/H$). Παρατηρούμε ότι οι δύο αυτές τιμές της απόστασης x για τον εκάστοτε λόγο εγκιβωτισμού H/D πρακτικά ταυτίζονται στις περισσότερες περιπτώσεις. Ακόμη, παρατηρείται ικανοποιητική ταύτιση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα των **Kouretzis et al. (2013)**, τα οποία αφορούν αγωγό διαμέτρου $D=0.102\text{m}$, τις ίδιες πυκνότητες της άμμου επίχωσης αλλά εκτείνονται μόνο έως τον λόγο εγκιβωτισμού $H/D=5.5$.

Όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκαν επιλεκτικά αριθμητικές αναλύσεις για αγωγό διαμέτρου $D=0.70\text{m}$ εγκιβωτισμένο σε άμμο μέσης πυκνότητας. Οι αναλύσεις αυτές έγιναν ώστε να διαπιστωθεί πιθανή επιρροή της διαμέτρου του αγωγού στην μορφή του μηχανισμού αστοχίας που αναπτύσσεται και στην απόσταση x που προσδιορίζεται. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13 στο διάγραμμα που αναφέρεται στην άμμο μέσης πυκνότητας, τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών προσεγγίζουν τα αντίστοιχα του αγωγού διαμέτρου $D=0.102\text{m}$ με μεγάλη ακρίβεια, ώστε να μπορούμε να ισχυριστούμε πως δεν υπάρχει επιρροή της διαμέτρου.



Σχήμα 4.13: Διαγράμματα x/D - H/D για χαλαρή και μέσης πυκνότητας άμμο επίχωσης



Σχήμα 4.14: Διαγράμματα $x/H-H/D$ για χαλαρή και μέσης πυκνότητας άμμο επίχωσης

Από το ίδιο σχήμα, γίνεται εύκολα αντιληπτή μια επανάληψη του μηχανισμού αστοχίας που αναπτύσσεται σε κάθε περίπτωση. Η επανάληψη αυτή μας δίνει την δυνατότητα να κάνουμε μια κατηγοριοποίηση των διαφόρων μηχανισμών αστοχίας σε τρεις διαφορετικούς τύπους με βάση την μετρηθείσα τιμή του x και όχι την εικόνα της επιφάνειας αστοχίας, όπως έγινε παραπάνω. Στο Σχήμα 4.13 έχουν επισημανθεί με κατακόρυφες διακεκομμένες γραμμές οι οριακές τιμές του λόγου εγκιβωτισμού H/D , οι οποίες ορίζουν το εύρος των λόγων μέσα στο οποίο αναπτύσσεται κάθε τύπος αστοχίας. Για κάθε τύπο αστοχίας, έχει σχεδιασθεί επίσης ένα υπόμνημα του μηχανισμού αστοχίας παρεμφερές με τον μηχανισμό που αναπτύσσεται στην πραγματικότητα. Παρατηρούμε πως η κατηγοριοποίηση των μηχανισμών αστοχίας με βάση το x οδηγεί στα ίδια ακριβώς όρια λόγων εγκιβωτισμού που εξήχθησαν παραπάνω και για τις δύο άμμους επίχωσης, με παρατήρηση του μηχανισμού αστοχίας που αναπτύσσεται σε κάθε περίπτωση. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η τιμή της απόστασης x εξαρτάται άμεσα από την μορφή της επιφάνειας αστοχίας και πως αυτή μεταβάλλεται με το βάθος.

Από τα ίδια διαγράμματα ($x/D-H/D$, Σχήμα 4.13), μπορούμε να προσδιορίσουμε απλές, αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της απόστασης x για κάθε τύπο αστοχίας. Βασική συνθήκη

που θα πρέπει να ικανοποιούν οι σχέσεις αυτές είναι να λαμβάνουν κοινή τιμή στα όρια της εκάστοτε περιοχής. Και για τις δύο περιπτώσεις άμμου επίχωσης, η περιγραφή των τιμών του x/D στον μηχανισμό αστοχίας τύπου III μπορεί να γίνει με μια οριζόντια ευθεία, για τις τιμές του x/D στον τύπο II μπορούμε να κάνουμε μια γραμμική προσέγγιση ενώ τέλος κρίθηκε ικανοποιητική μια εκθετική σχέση για τις τιμές του x/D που συσχετίζονται με τον μηχανισμό αστοχίας τύπου I. Συνεπώς, η αναλυτική σχέση για τον υπολογισμό της απόστασης x σε κάθε περίπτωση προκύπτει:

$$x/D = \begin{cases} 3 + 0.1 \cdot (H/D)^a, & H/D \leq (H/D)_{I-II} \\ -1.2 \cdot (H/D) + 13.1, & (H/D)_{I-II} < H/D < (H/D)_{II-III} \\ \beta, & H/D \geq (H/D)_{II-III} \end{cases}, \quad (4.1)$$

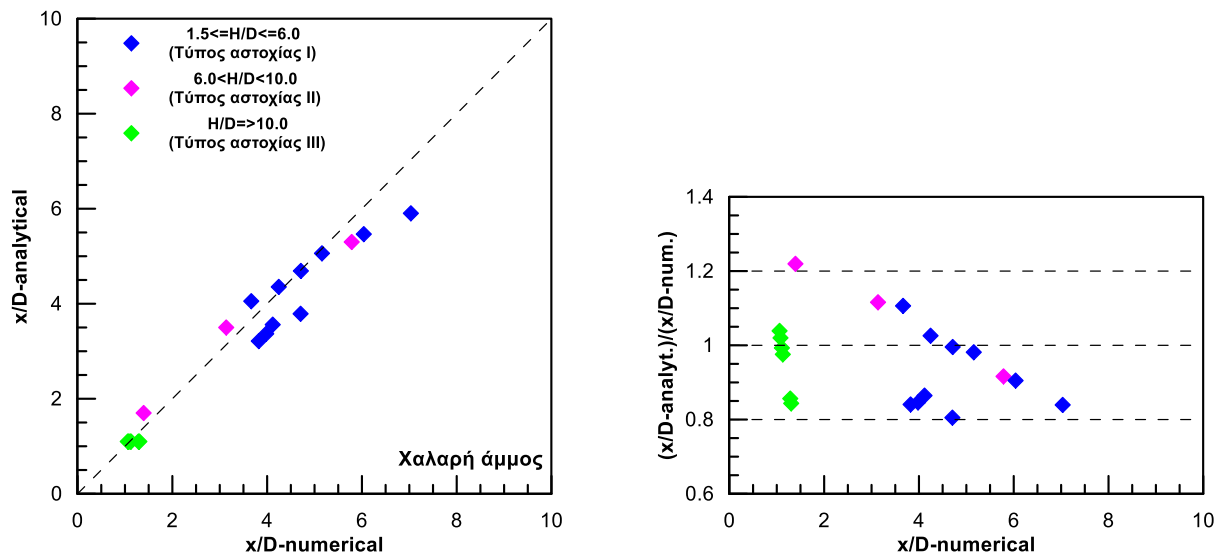
όπου οι βασικές παράμετροι της **εξίσωσης (4.1)** παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.1** για τις δύο περιπτώσεις άμμου επίχωσης:

Πίνακας 4.1: Παράμετροι αναλυτικής σχέσης (εξίσωση 4.1)

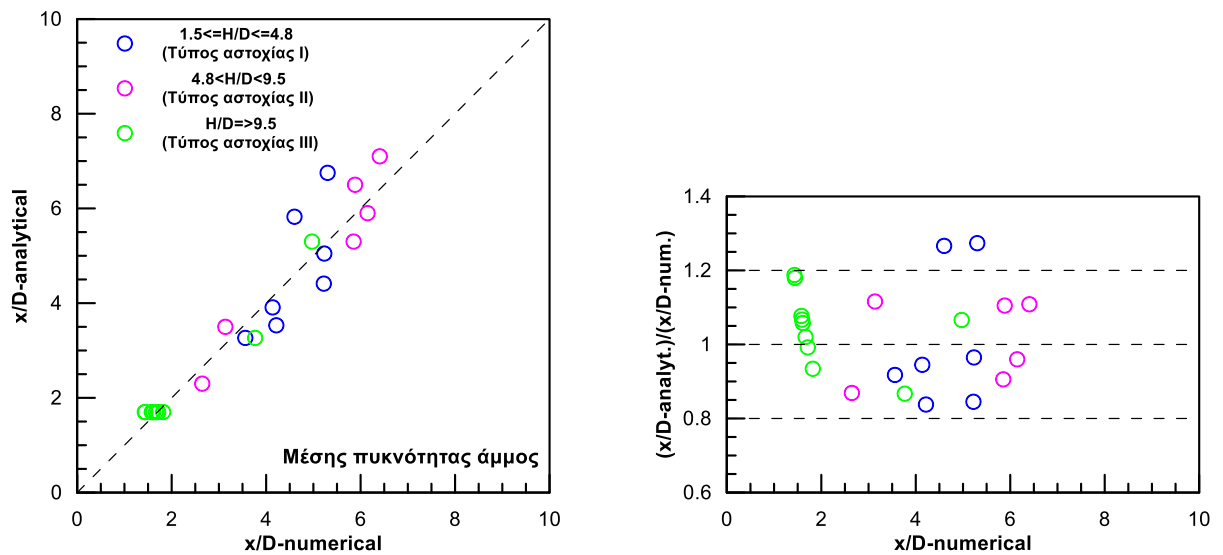
Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Παράμετρος α	Παράμετρος β	$(H/D)_{I-II}$	$(H/D)_{II-III}$
Χαλαρή	1.88	1.10	6.0	10.0
Μέσης πυκνότητας	2.41	1.70	4.8	9.50

Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των παραπάνω σχέσεων για τις δύο άμμους επίχωσης.

Η εκτίμηση του σφάλματος της προτεινόμενης αναλυτικής σχέσης για τον υπολογισμό του λόγου x/D φαίνεται στο **Σχήμα 4.15** για χαλαρή άμμο επίχωσης και στο **Σχήμα 4.16** για άμμο μέσης πυκνότητας. Και στα δύο παραπάνω σχήματα, υπάρχει χρωματικός διαχωρισμός των αποτελεσμάτων ανάλογα με την μορφή του μηχανισμού αστοχίας που αναπτύσσεται.



Σχήμα 4.15: Σύγκριση τιμών του λόγου x/D όπως προκύπτει από τις αριθμητικές αναλύσεις και την εξίσωση (4.1) για χαλαρή άμμο επίχωσης



Σχήμα 4.16: Σύγκριση τιμών του λόγου x/D όπως προκύπτει από τις αριθμητικές αναλύσεις και την εξίσωση (4.1) για μέσης πυκνότητας άμμο

Στην περίπτωση της χαλαρής άμμου, η αναλυτική σχέση προβλέπει την τιμή του λόγου x/D με σφάλμα μικρότερο ή ίσο του 20%. Αντίστοιχα, στην περίπτωση της άμμου μέσης πυκνότητας, η προτεινόμενη σχέση παρουσιάζει σφάλμα μικρότερο ή ίσο του 20% στο 91% των περιπτώσεων ενώ για το υπόλοιπο 9% το σφάλμα είναι μικρότερο από 30%.

Παρατηρήθηκε ακόμη, πως η απεικόνιση των αποτελεσμάτων στην μορφή $x/H-H/D$, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.14, προσφέρεται για εξαγωγή ενιαίας σχέσης που θα υπολογίζει την τιμή του x/H ανεξάρτητα από την μορφή που έχει ο μηχανισμός αστοχίας που αναπτύσσεται σε κάθε περίπτωση. Η μορφή της σχέσης αυτής θεωρήθηκε λογαριθμική. Έτσι,

εξήχθησαν οι εξισώσεις (4.2) και (4.3) για χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας, αντίστοιχα.

$$x / H = 3.5 \cdot e^{-0.30(H/D)} , \text{ για χαλαρή άμμο επίχωσης} \quad (4.2)$$

και

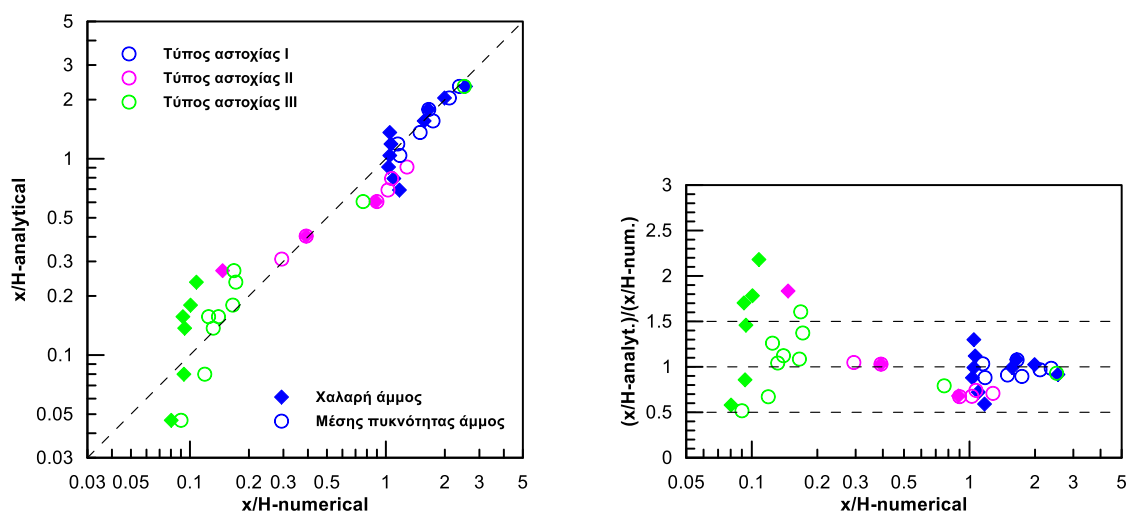
$$x / H = 3.5 \cdot e^{-0.25(H/D)} , \text{ για άμμο επίχωσης μέσης πυκνότητας} \quad (4.3)$$

Η γραφική απεικόνιση των σχέσεων αυτών φαίνεται στο Σχήμα 4.14. Τέλος, επειδή οι δύο παραπάνω εξισώσεις είναι σχεδόν ίδιες, έχοντας μια μικρή διαφορά στον εκθέτη του H/D κρίθηκε σκόπιμο η παρουσίαση όλων των τιμών του λόγου x/H για χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας σε ένα ενιαίο διάγραμμα και η εκτίμηση κοινής σχέσης υπολογισμού του λόγου x/H, ανεξαρτήτως πυκνότητας της άμμου επίχωσης. Τέτοιο διάγραμμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.14.

Η κοινή σχέση υπολογισμού του λόγου x/H που προσδιορίστηκε περιγράφεται από την εξίσωση (4.4):

$$x / H = 3.5 \cdot e^{-0.27(H/D)} \quad (4.4)$$

Στο Σχήμα 4.17 φαίνεται το σφάλμα της παραπάνω αναλυτικής σχέσης στον υπολογισμό του λόγου x/H. Παρουσιάζονται οι τιμές του λόγου x/H και για τις δύο περιπτώσεις άμμου επίχωσης, όπως αυτές προσδιορίστηκαν από τις αριθμητικές αναλύσεις καθώς και από την εξίσωση (4.4). Επιπλέον, έχει τηρηθεί χρωματικός διαχωρισμός ανάλογα με τη μορφή του μηχανισμού αστοχίας που αναπτύσσεται σε κάθε περίπτωση.



Σχήμα 4.17: Σύγκριση τιμών του λόγου x/H όπως προκύπτει από τις αριθμητικές αναλύσεις και την εξίσωση (4.4) για κάθε περίπτωση άμμου επίχωσης

Παρατηρούμε πως το σφάλμα της εξίσωσης (4.4) είναι ίσο με 50% στο 88% των περιπτώσεων ενώ για το υπόλοιπο 12%, το σφάλμα είναι μικρότερο από 120%.

Παρόλα την αυξημένη τιμή του σφάλματος της εξίσωσης (4.4) για τον υπολογισμό του λόγου x/H σε σχέση με το σφάλμα της εξίσωσης (4.1), η οποία προσδιορίζει την τιμή του λόγου x/D ανάλογα με την πυκνότητα της άμμου επίχωσης, δεν θα πρέπει να παραβλέψουμε το συγκριτικό πλεονέκτημα της πρώτης σχέσης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλες τις πυκνότητες άμμου επίχωσης.

4.4 Συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα του κεφαλαίου αυτού μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Στην περίπτωση οριζόντιας μετατόπισης εγκιβωτισμένου στο έδαφος αγωγού, η άμμος επίχωσης μπορεί να αστοχήσει με τρεις διαφορετικούς μηχανισμούς αστοχίας, η εμφάνιση καθενός εκ των οποίων εξαρτάται από την πυκνότητα της άμμου και τον λόγο εγκιβωτισμού H/D του αγωγού.
- Οι κρίσιμες τιμές του λόγου εγκιβωτισμού H/D στις οποίες παρατηρείται μετάβαση του μηχανισμού αστοχίας από τύπου I σε τύπου II είναι 6.0 και 4.8 και από τύπου II σε τύπου III είναι 10.0 και 9.5 για χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας, αντίστοιχα.
- Η έκταση της επιφάνειας αστοχίας κατά την οριζόντια διεύθυνση (απόσταση “ x ”) που προσδιορίσθηκε με παρατήρηση του μηχανισμού αστοχίας που αναπτυσσόταν σε κάθε περίπτωση λόγου εγκιβωτισμού H/D συμφωνεί με τις αντίστοιχες τιμές των Kouretzis et al. (2013).
- Η προτεινόμενη αναλυτική σχέση υπολογισμού του λόγου x/D είναι:

$$x/D = \left\{ \begin{array}{ll} 3 + 0.1 \cdot (H/D)^a, & H/D \leq (H/D)_{I-II} \\ -1.2 \cdot (H/D) + 13.1, & (H/D)_{I-II} < H/D < (H/D)_{II-III} \\ \beta, & H/D \geq (H/D)_{II-III} \end{array} \right\}, \quad (4.5)$$

Η σχέση αυτή είναι άμεσα συνδεδεμένη με την μορφή του μηχανισμού αστοχίας που αναπτύσσεται σε κάθε τιμή του λόγου εγκιβωτισμού H/D , λαμβάνοντας διαφορετική σχέση υπολογισμού του λόγου x/D ανάλογα με το λόγο εγκιβωτισμού H/D .

Οι βασικές παράμετροι της σχέσης αυτής ανάλογα με την πυκνότητα της άμμου επίχωσης φαίνονται στον **Πίνακα 4.2**:

Πίνακας 4.2: Βασικές παράμετροι αναλυτικής σχέσης υπολογισμού του λόγου x/D

Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Παράμετρος α	Παράμετρος β	$(H/D)_{I-II}$	$(H/D)_{III-III}$
Χαλαρή	1.88	1.10	6.0	10.0
Μέσης πυκνότητας	2.41	1.70	4.8	9.50

- Η προτεινόμενη αναλυτική σχέση υπολογισμού του λόγου x/H με το βάθος, ανεξαρτήτως της μορφής που έχει ο μηχανισμός αστοχίας και της πυκνότητας της άμμου επίχωσης είναι:

$$x / H = 3.5 \cdot e^{-0.27(H/D)} \quad (4.6)$$

Η γνώση του τύπου αστοχίας και της έκτασης της επιφάνειας αστοχίας που αναμένεται να εμφανισθεί σε ένα πρόβλημα οριζόντιας φόρτισης αγωγού είναι καθοριστικής σημασίας για τον μελετητή και για τις διαστάσεις της τάφρου που ο τελευταίος θα πρέπει να προτείνει. Η επιρροή των συνόρων της τάφρου εγκιβωτισμού στις δυνάμεις που αναπτύσσονται επί του αγωγού κυμαίνεται σημαντικά, όντας μεγάλη όταν τα σύνορα της τάφρου είναι κοντά στον αγωγό και το έδαφος αστοχεί κατά τον τύπο I και αρκετά μικρότερη στην ίδια περίπτωση που όμως το έδαφος αστοχεί πλέον κατά τον τύπο III. Η επιρροή των διαστάσεων της τάφρου εγκιβωτισμού για κάθε περίπτωση τύπου αστοχίας διερευνάται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο.

5

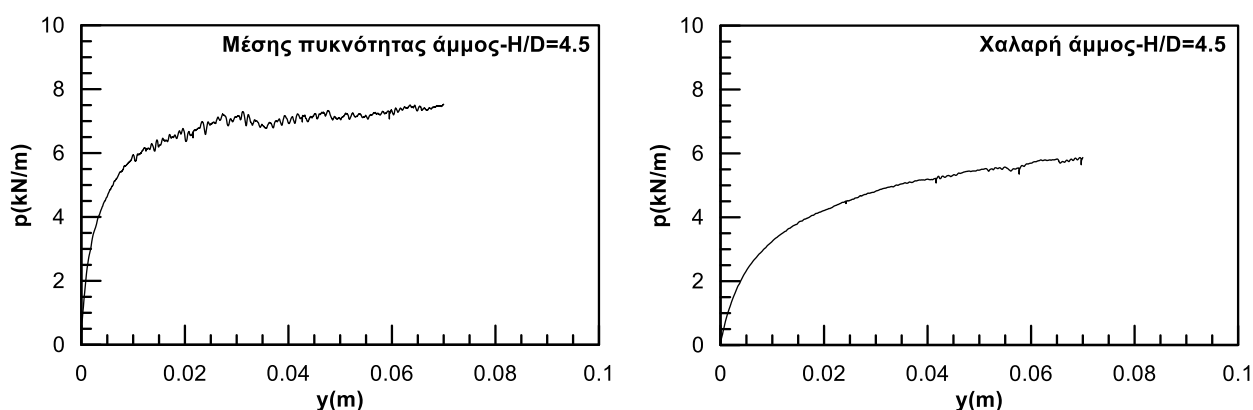
Επίδραση Διαστάσεων Τάφρου

5.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η επίδραση των διαστάσεων της τάφρου εγκιβωτισμού στην καμπύλη δύναμης-μετατόπισης του εδάφους κατά την οριζόντια μετατόπιση του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα, ερευνάται η επίδραση του πλάτους και του βάθους της τάφρου εγκιβωτισμού και προτείνονται διορθωτικοί συντελεστές τόσο για την οριακή τιμή του φορτίου που δρα επί του αγωγού όσο και για την μετατόπιση που η παραπάνω τιμή εμφανίζεται. Τα αποτελέσματα σε όρους δύναμης και μετατόπισης αδιαστατοποιούνται με βάση την αντίστοιχη τιμή όταν ο αγωγός βρίσκεται εγκιβωτισμένος στο ελεύθερο πεδίο.

5.2 Υπολογισμός οριακού φορτίου (p_{ult}), οριακής μετατόπισης (y_{ult})

Η αριθμητική καμπύλη φορτίου-μετατόπισης όπως προκύπτει από το αλγόριθμο πεπερασμένων διαφορών FLAC v7.0 (Itasca) για επιβολή οριζόντιας μετατόπισης σε αγωγό εγκιβωτισμένο σε άμμο φαίνεται στο **Σχήμα 5.1** για άμμο μέσης πυκνότητας και χαλαρή άμμο.



Σχήμα 5.1: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για οριζόντια μετατόπιση αγωγού εγκιβωτισμένου σε (α) άμμο μέσης πυκνότητας και (β) χαλαρή άμμο

Για τον υπολογισμό της οριακής εδαφικής αντίδρασης (p_{ult}) ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

- Έγινε η υπόθεση ότι η μη γραμμική μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης μπορεί να προσεγγιστεί από μία υπερβολική σχέση με εξίσωση:

$$p = \frac{y}{\frac{1}{k_{ini}} + \frac{y}{p_{ult}}} \quad (5.1)$$

όπου p η εδαφική αντίδραση για μετατόπιση y και k_{ini} η αρχική δυσκαμψία.

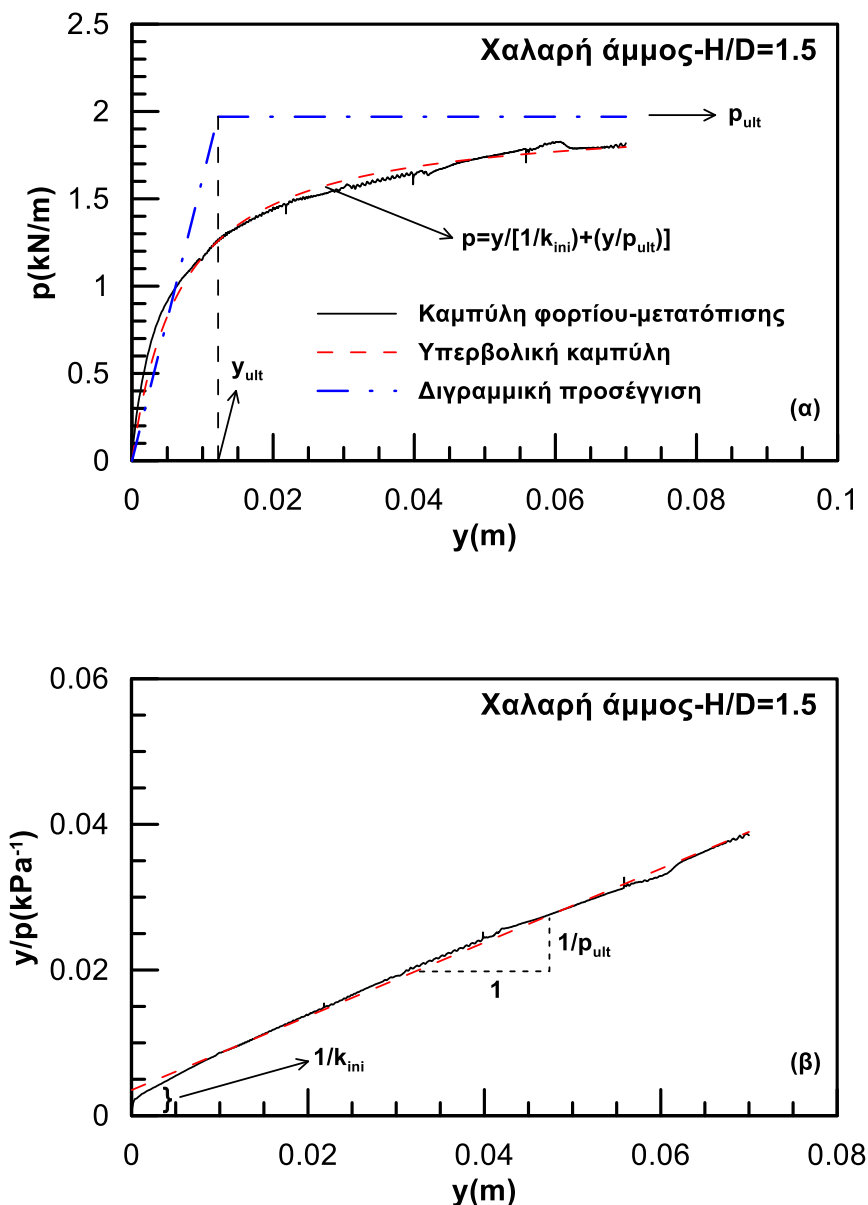
- Η **εξίσωση (5.1)** μπορεί να πάρει την παρακάτω μορφή:

$$\frac{y}{p} = \frac{1}{k_{ini}} + \left(\frac{1}{p_{ult}}\right)y \quad (5.2)$$

Στο συντεταγμένο επίπεδο με οριζόντιο άξονα y (m) και κατακόρυφο y/p (KPa^{-1}), η **εξίσωση (5.2)** παριστάνει ευθεία με κλίση $1/p_{ult}$ και σημείο τομής με τον κατακόρυφο άξονα το $(0, 1/k_{ini})$.

- Συνεπώς, τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο προαναφερθέν σύστημα συντεταγμένων και οι παράμετροι k_{ini} και p_{ult} προσδιορίζονται από την ευθεία.
- Τέλος, για τις τιμές των k_{ini} και p_{ult} που υπολογίζονται, κατασκευάζεται η υπερβολική καμπύλη και παρουσιάζεται με τα αριθμητικά αποτελέσματα, ώστε να επαληθευτεί η αρχική υπόθεση της προσέγγισης των αριθμητικών αποτελεσμάτων με καμπύλη τέτοιας μορφής.

Η παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.2** για την περίπτωση αγωγού εγκιβωτισμένου σε χαλαρή άμμο με λόγο εγκιβωτισμού $H/D=1.5$. Και στα δυο σχήματα, τα αριθμητικά δεδομένα φαίνονται με μια συνεχή μαύρη γραμμή ενώ η αναλυτική πρόβλεψη με διακεκομμένη κόκκινη γραμμή.



Σχήμα 5.2: Προσδιορισμός των παραμέτρων k_{ini} και P_{ult} προσεγγίζοντας την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με μια υπερβολική σχέση (α) στο χώρο P-y και (β) στο χώρο y/P -y

Δεδομένου ότι στην πράξη είναι ευρύτατα διαδεδομένη η χρήση καμπυλών διγραμμικής μορφής, οι παραπάνω υπερβολικές καμπύλες προσεγγίστηκαν μέσω αντίστοιχων διγραμμικών, για τον προσδιορισμό των οποίων απαιτείται η εκτίμηση της οριακής εδαφικής αντίδρασης (p_{ult}) και της αντίστοιχης οριακής μετακίνησης (y_{ult}) στην οποία αναπτύσσεται. Η τελευταία υπολογίστηκε ως εξής:

- Υπολογίζεται η τιμή του φορτίου που αντιστοιχεί στο 50% της οριακής τιμής, $p_{ult}/2$.
- Για την τιμή αυτή του φορτίου, προσδιορίζεται η αντίστοιχη μετατόπιση (y_{50}) είτε από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης όπως προκύπτει από τα αριθμητικά αποτελέσματα

είτε από την υπερβολική καμπύλη. Πρακτικά, οι δύο αυτές τιμές έχουν πολύ μικρή διαφορά μεταξύ τους, της τάξης του 10^{-4} , εφόσον η προσέγγιση είναι ικανοποιητική. Συγκεκριμένα, στο παράδειγμα που εξετάζεται, η τιμή της μετατόπισης y_{50} από την αριθμητική καμπύλη προκύπτει ίση με $y_{50}=0.0061\text{m}$ ενώ η αντίστοιχη τιμή από την υπερβολική καμπύλη είναι ίση με $y_{50}=0.0069\text{m}$. Τελικά, επιλέχθηκε η μετατόπιση y_{50} να υπολογίζεται από την αριθμητική καμπύλη φορτίου-μετατόπισης.

- Τέλος, υπολογίζεται η οριακή τιμή της μετατόπισης (y_{ult}) από την σχέση:

$$y_{ult} = 2 \cdot y_{50} \quad (5.3)$$

Στο Σχήμα 5.2, για την περίπτωση αγωγού σε χαλαρή άμμο με λόγο εγκιβωτισμού $H/D=1.5$, φαίνεται με διακεκομμένη μπλε γραμμή η διγραμμική προσέγγιση της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης του εδάφους σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω.

5.3 Επίδραση του πλάτους της τάφρου

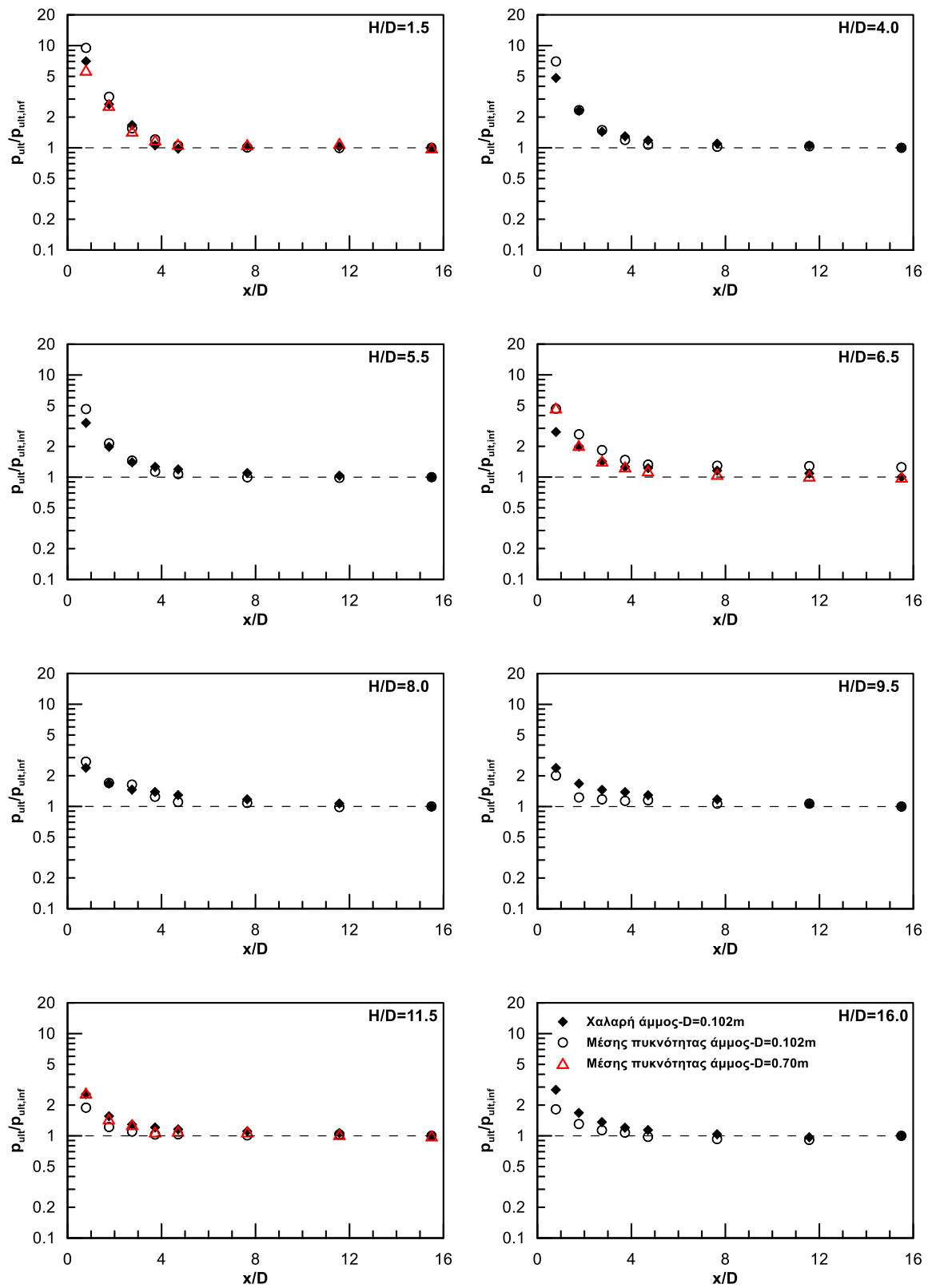
Όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3, για την μελέτη της επίδρασης του πλάτους της τάφρου εκτελέστηκαν συνολικά 64 αριθμητικές αναλύσεις τόσο για χαλαρή όσο και για μέσης πυκνότητας άμμο επίχωσης καθώς και για διάφορες τιμές του αδιαστατοποιημένου βάθους H/D , ήτοι $H/D=1.5, 4.0, 5.5, 6.5, 8.0, 9.5, 11.5$ και 16 , ώστε να εξεταστεί, αφενός το κατά πόσο η επίδραση του πλάτους της τάφρου στην οριακή τιμή του φορτίου μεταβάλλεται με το βάθος, αφετέρου να πραγματοποιηθεί συσχέτιση της επίδρασης αυτής με τον τρόπο που αναπτύσσεται ο μηχανισμός αστοχίας σε κάθε περίπτωση, δηλαδή με ποιον από τους τρεις τύπους αστοχίας (τύπος I, τύπος II ή τύπος III) όπως περιγράφηκαν αναλυτικά στο **Κεφάλαιο 4**, αναμένεται η αστοχία του εδάφους κατά την οριζόντια μετατόπιση του αγωγού.

Για κάθε περίπτωση πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις για διάφορες τιμές της απόστασης x του κέντρου του αγωγού από το κατακόρυφο σύνορο της τάφρου. Τονίζεται ότι η απόσταση x υπολογίζεται από την τελική θέση του αγωγού, δηλαδή μετά την επιβολή της οριζόντιας μετατόπισης. Η μέγιστη τιμή της απόστασης x που εξετάστηκε είναι $x=158\text{cm}$ που θεωρήθηκε ότι αντιστοιχεί σε συνθήκες αγωγού εγκιβωτισμένου στο ελεύθερο πεδίο (χωρίς επίδραση κατακόρυφου συνόρου). Αντίστοιχα, η ελάχιστη τιμή της απόστασης αυτής στις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν ελήφθησε ίση με $x=8\text{cm}$. Όλες οι παραπάνω αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για αγωγό διαμέτρου $D=0.102\text{m}$, ενώ συμπληρωματικά εκτελέστηκαν 24 αναλύσεις για αγωγό διαμέτρου $D=0.70\text{m}$ μέσα σε άμμο μέσης πυκνότητας, για λόγο εγκιβωτισμού $H/D=1.5, 6.5$ και 11.5 για την διερεύνηση πιθανής επιρροής των διαστάσεων του αγωγού στα αποτελέσματα που εξήχθησαν.

5.3.1 Επίδραση στην οριακή εδαφική αντίδραση (p_{ult})

Στο **Σχήμα 5.3** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα όλων των παραμετρικών αναλύσεων που έγιναν σχετικά με την επίδραση του πλάτους της τάφρου στο οριακό φορτίο. Πιο συγκεκριμένα, κάθε σχήμα αντιστοιχεί σε μοναδική τιμή του λόγου εγκιβωτισμού H/D ενώ χρησιμοποιούνται διαφορετικά σύμβολα για την περίπτωση χαλαρής άμμου και άμμου μέσης πυκνότητας, καθώς και για τα αποτελέσματα που σχετίζονται με τον αγωγό διαμέτρου $D=0.70m$. Η τιμή της απόστασης x έχει αδιαστατοποιηθεί ως προς την διάμετρο του αγωγού (x/D) ενώ η τιμή της μέγιστης εδαφικής αντίδρασης που προκύπτει σε κάθε ανάλυση ως προς την αντίστοιχη τιμή όταν ο αγωγός βρίσκεται εγκιβωτισμένος στο ελεύθερο πεδίο ($p_{ult}/p_{ult,inf}$). Από τη σύγκριση προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Επίδραση οριζόντιας απόστασης x/D : Ο λόγος ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) μειώνεται μέχρι μια κρίσιμη τιμή του λόγου $(x/D)_{crit}$, ενώ για $x/D > (x/D)_{crit}$ παραμένει σταθερός και ίσος με τη μονάδα. Δηλαδή, υπάρχει μια οριακή τιμή της οριζόντιας απόστασης του αγωγού από το κατακόρυφο σύνορο της τάφρου μέχρι και την οποία η επίδραση του συνόρου της τάφρου στην αναπτυσσόμενη στον αγωγό δύναμη είναι αμελητέα. Για μικρότερες τιμές, το σύνορο της τάφρου εγκιβωτισμού επηρεάζει την κίνηση του αγωγού, εμποδίζοντας την ελεύθερη εκδήλωση της αστοχίας της άμμου επίχωσης, γεγονός που συντελεί σε αύξηση της δύναμης που δέχεται ο αγωγός κατά την μετατόπιση του.
- Επίδραση βάθους εγκιβωτισμού H/D : Αύξηση του βάθους εγκιβωτισμού οδηγεί σε μείωση του λόγου ($p_{ult}/p_{ult,inf}$), επίδραση η οποία μπορεί να εξηγηθεί λαμβάνοντας υπόψη την μορφή του μηχανισμού αστοχίας όπως αυτή αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση μηχανισμού αστοχίας τύπου I, η επιφάνεια αστοχίας που αναπτύσσεται εκτείνεται μέχρι την επιφάνεια του εδάφους ενώ αντίθετα στην περίπτωση μηχανισμού αστοχίας τύπου III, η επιφάνεια περιβάλλει τον αγωγό. Στην ενδιάμεση περίπτωση, πραγματοποιείται η μετάβαση του μηχανισμού αστοχίας από τύπο I σε τύπο III. Επομένως, είναι αναμενόμενο η επίδραση του κατακόρυφου συνόρου της τάφρου να είναι εντονότερη σε εκείνες τις τιμές του λόγου εγκιβωτισμού H/D που σχετίζονται με μηχανισμό αστοχίας τύπου I, καθώς αυτός εκτείνεται σε μεγαλύτερο πλάτος από ότι οι άλλοι δύο, και να μειώνεται με την αύξηση το λόγου H/D που συνεπάγεται την σταδιακή αλλαγή και μετάβαση του μηχανισμού αστοχίας σε τύπο III. Επιπρόσθετα, διαπιστώνεται πως για αστοχία της άμμου επίχωσης κατά τον μηχανισμό τύπου III, η τιμή του λόγου



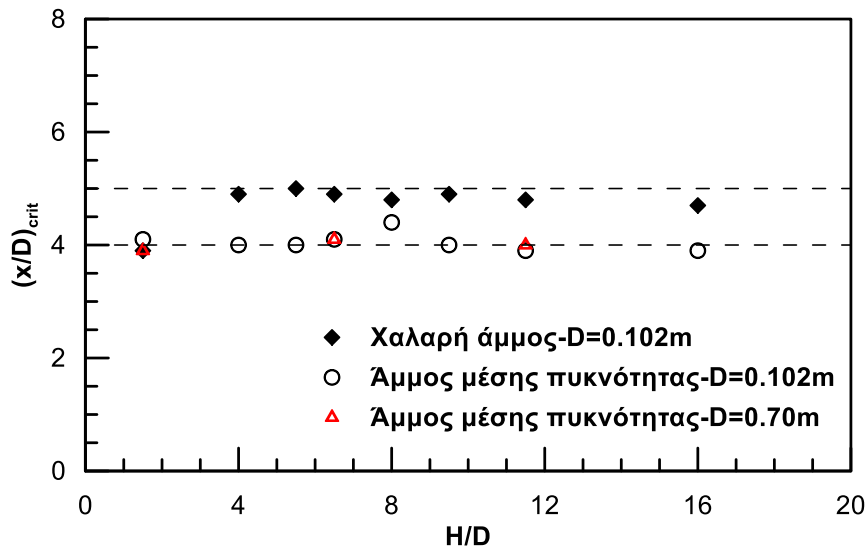
Σχήμα 5.3: Διαγράμματα $(p_{ult}/p_{ult,inf})-(x/D)$ για τιμές του λόγου εγκιβωτισμού $H/D=1.5, 4.0, 5.5, 6.5, 8.0, 9.5, 11.5$ και 16.0

$(\rho_{ult}/\rho_{ult,inf})$ παραμένει πρακτικά σταθερή χωρίς να μειώνεται περαιτέρω με την αύξηση του βάθους (διαγράμματα για λόγους εγκιβωτισμού $H/D=9.5, 11.5$ και 16.0 , Σχήμα 5.3). Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως για τέτοια μορφή αστοχίας, η έκταση του μηχανισμού κατά την οριζόντια διεύθυνση δεν μεταβάλλεται με το βάθος αλλά παραμένει πρακτικά σταθερή (βλ. Κεφάλαιο 4).

- Επίδραση πυκνότητας άμμου: Από το Σχήμα 5.3 παρατηρείται πως η κρίσιμη τιμή $(x/D)_{crit}$, πέρα από την οποία δεν υπάρχει επίδραση του κατακόρυφου συνόρου της τάφρου στην οριακή τιμή της εδαφικής αντίδρασης που αναπτύσσεται επί του αγωγού κατά την οριζόντια μετατόπισή του, είναι διαφορετική ανάλογα με την πυκνότητα της άμμου επίχωσης. Ακόμη, οι τιμές του λόγου $(\rho_{ult}/\rho_{ult,inf})$ που υπολογίζονται για χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας παρουσιάζουν αποκλίσεις μεταξύ τους σε ορισμένες περιπτώσεις λόγου εγκιβωτισμού H/D για τις διάφορες τιμές της απόστασης x/D του αγωγού από το κατακόρυφο σύνορο. Ιδιαίτερα σημαντική διαφορά στις τιμές αυτές φαίνεται να υπάρχει στην περίπτωση που $x/D=0.78$, δηλαδή στην ελάχιστη από τις αποστάσεις που εξετάστηκαν, στις μικρές τιμές του αδιαστατοποιημένου βάθους H/D ($H/D \leq 6.5$).
- Επίδραση διαστάσεων αγωγού: Τέλος, από το ίδιο σχήμα, φαίνεται να υπάρχει συμφωνία των αποτελεσμάτων για τους αγωγούς διαμέτρου $D=0.102m$ και $D=0.70m$ για κάθε τιμή του x/D στις περιπτώσεις λόγων H/D που εξετάστηκαν ($H/D=1.5, 6.5$ και 11.5) πλην της προαναφερθείσας τιμής του x/D ($x/D=0.78$) σε λόγο εγκιβωτισμού $H/D=1.5$ που οδηγεί σε μικρή διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων των δύο αγωγών.

Αναλυτικός υπολογισμός της μέγιστης εδαφικής αντίδρασης (ρ_{ult})

Ως πρώτο βήμα για την εξαγωγή αναλυτικών σχέσεων υπολογισμού του διορθωτικού συντελεστή $(\rho_{ult}/\rho_{ult,inf})$, εκτιμήθηκε η κρίσιμη τιμή $(x/D)_{crit}$, πέρα από την οποία ο διορθωτικός συντελεστής παραμένει σταθερός και ίσος με την μονάδα. Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζονται οι τιμές του $(x/D)_{crit}$ που υπολογίσθηκαν για κάθε λόγο H/D , τόσο για χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας όσο και για τους αγωγούς διαμέτρου $D=0.102m$ και $D=0.70m$. Παρατηρείται ότι μεταξύ των αγωγών διαφορετικής διαμέτρου πρακτικά λαμβάνονται κοινές τιμές του $(x/D)_{crit}$, ενώ, είναι δυνατό να υιοθετηθεί μια σταθερή με τον λόγο H/D τιμή του $(x/D)_{crit}$ για χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας. Οι μέσες τιμές των τιμών του $(x/D)_{crit}$ που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.4 προσδιορίστηκαν σε 4.7 για χαλαρή άμμο και 4.0 για άμμο μέσης πυκνότητας. Για υπολογιστικούς λόγους, οι παραπάνω τιμές ελήφθησαν ίσες με 5.0 και 4.0, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.4: Τιμές του λόγου $(x/D)_{crit}$ για χαλαρή άμμο, άμμο μέσης πυκνότητας και αγωγούς διαμέτρου $D=0.102m$ και $D=0.70m$

Στη συνέχεια, από το **Σχήμα 5.5**, όπου τα αποτελέσματα του Σχήματος 5.3 παρουσιάζονται σε διπλή λογαριθμική κλίμακα, προκύπτει πως για τιμές του $(x/D) < (x/D)_{crit}$, ο διορθωτικός συντελεστής $(\rho_{ult}/\rho_{ult,inf})$ μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά από μια σχέση της ακόλουθης μορφής:

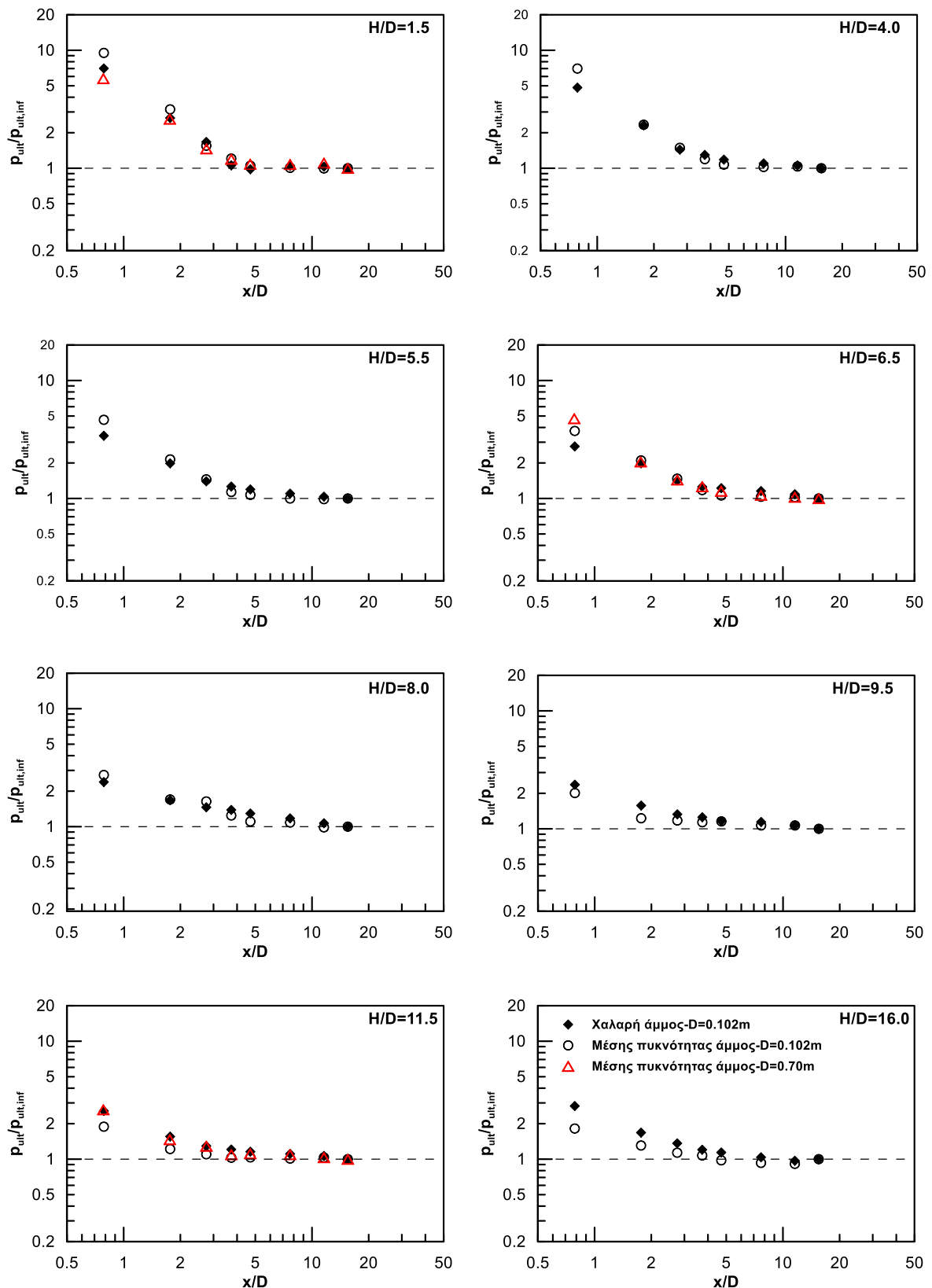
$$\frac{\rho_{ult}}{\rho_{ult,inf}} = \left[\frac{(x/D)_{crit}}{(x/D)} \right]^{\alpha}, \text{ για } x/D < (x/D)_{crit} \quad (5.4)$$

όπου α συντελεστής εξαρτώμενος από το βάθος H/D . Ο προσδιορισμός του συντελεστή α γίνεται ως εξής:

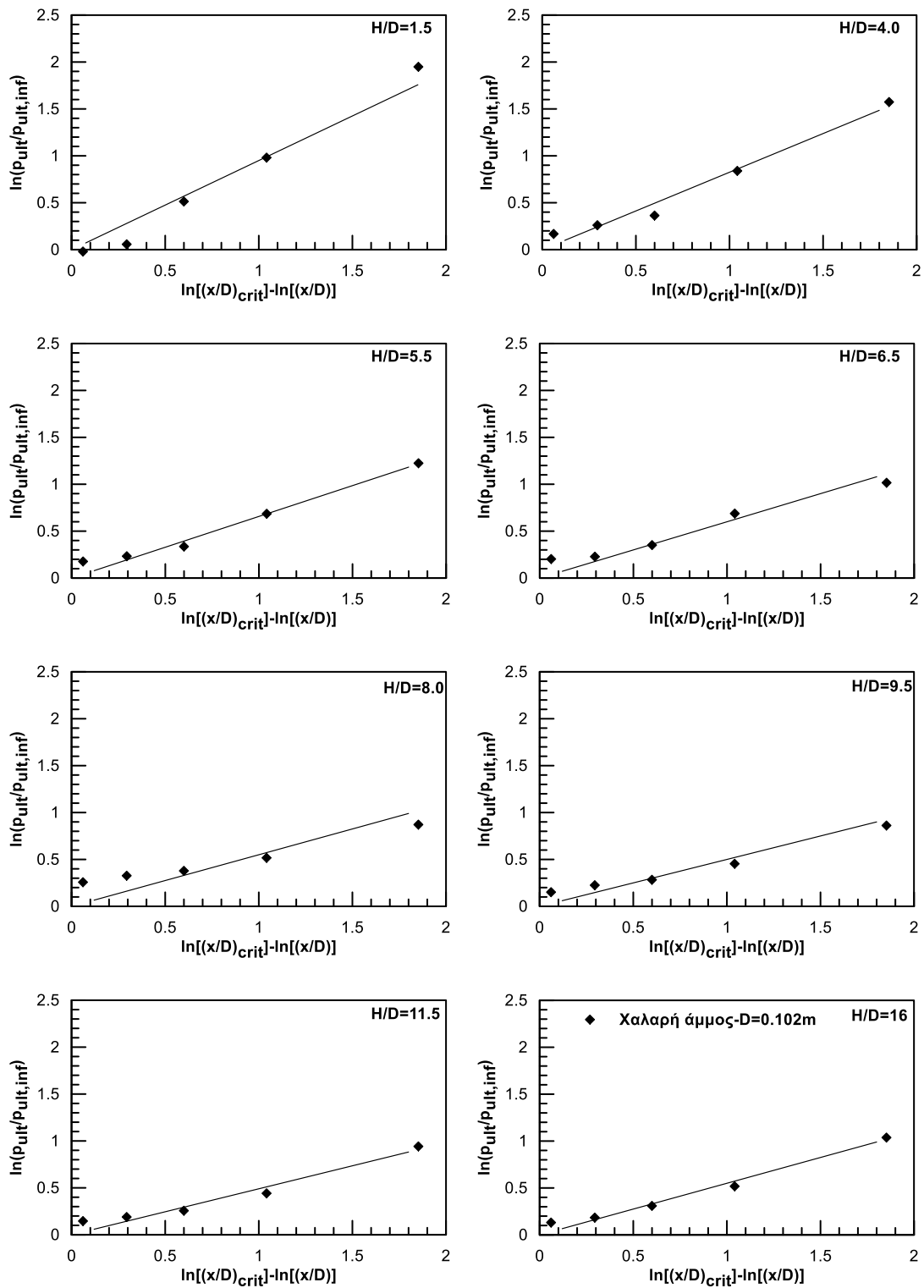
- Σύμφωνα με την **εξίσωση (5.4)**, αν παρουσιάσουμε τα αριθμητικά δεδομένα στο χώρο $\ln(\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}) - \{\ln[(x/D)_{crit}] - \ln(x/D)\}$ για $x/D < (x/D)_{crit}$ και για κάθε τιμή του λόγου H/D , τότε μπορούμε να τα προσεγγίσουμε με ευθεία, η οποία διέρχεται από την αρχή των αξόνων και έχει κλίση ίση με α .
- Από τις ευθείες αυτές προσδιορίζεται η τιμή του συντελεστή α για κάθε λόγο εγκιβωτισμού H/D .
- Ο συντελεστής α προσδιορίζεται ξεχωριστά για τον αγωγό διαμέτρου $D=0.102m$ σε χαλαρή άμμο με $(x/D)_{crit}=5.0$, σε άμμο μέσης πυκνότητας με $(x/D)_{crit}=4.0$ και για τον αγωγό διαμέτρου $D=0.70m$ σε άμμο μέσης πυκνότητας με $(x/D)_{crit}=4.0$.

Στο **Σχήμα 5.6** φαίνεται η παραπάνω διαδικασία για χαλαρή άμμο και αγωγό διαμέτρου $D=0.102m$ και στο **Σχήμα 5.7** η αντίστοιχη διαδικασία για άμμο μέσης πυκνότητας και αγωγό διαμέτρου $D=0.102m$ και $D=0.70m$.

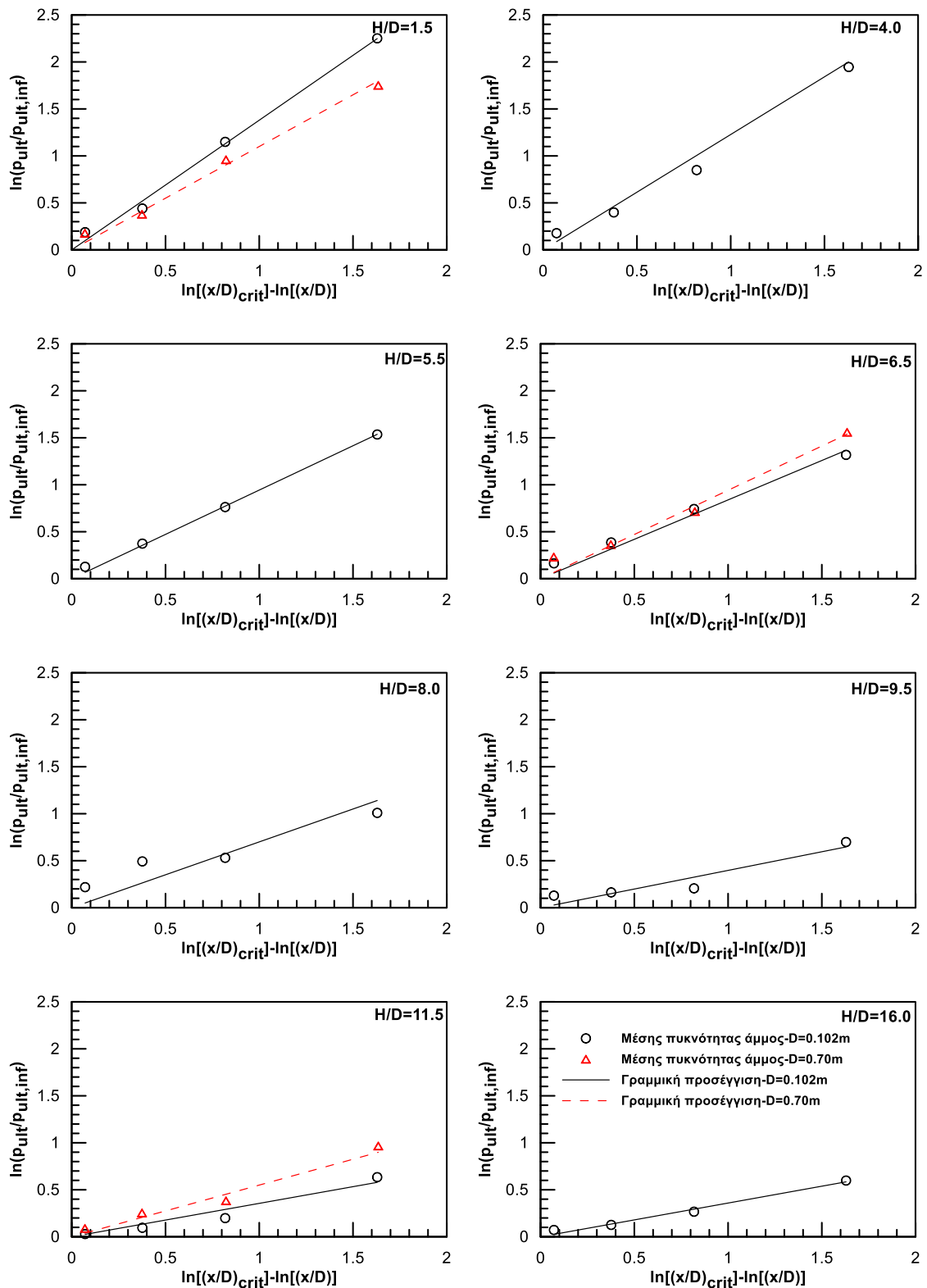
Οι τιμές του συντελεστή α όπως προέκυψαν από τα δύο παραπάνω σχήματα, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο **Σχήμα 5.8**. Από το σχήμα αυτό, παρατηρούμε ότι ο συντελεστής α στην περίπτωση της άμμου μέσης πυκνότητας λαμβάνει πρακτικά σταθερή τιμή για λόγο εγκιβωτισμού $H/D \geq 9.5$. Αντίστοιχα, στην χαλαρή άμμο ο συντελεστής α φαίνεται να σταθεροποιείται για τιμές του λόγου $H/D \geq 6.5$. Οι δύο αυτές οριακές τιμές του λόγου H/D συμπίπτουν μάλιστα με την αλλαγή του μηχανισμού αστοχίας από τύπο II σε τύπο III για την άμμο μέσης πυκνότητας και από τύπο I σε τύπο II για την χαλαρή άμμο. Δηλαδή, η διακύμανση του συντελεστή α φαίνεται να εξαρτάται άμεσα από την μορφή που έχει ο μηχανισμός αστοχίας που εμφανίζεται για τον εκάστοτε λόγο εγκιβωτισμού H/D . Στην άμμο μέσης πυκνότητας, ο συντελεστής α μειώνεται με το βάθος έως ότου αυτό γίνει τέτοιο ώστε να αναπτυχθεί ο μηχανισμός αστοχίας τύπου III. Από το οριακό αυτό βάθος και έπειτα, ο συντελεστής α παραμένει ανεξάρτητος του λόγου H/D . Στην χαλαρή άμμο, ο συντελεστής α μειώνεται όσο ο λόγος H/D συσχετίζεται με τον μηχανισμό αστοχίας τύπου I. Για την οριακή τιμή του λόγου H/D , στην οποία πλέον εμφανίζεται ο μηχανισμός αστοχίας τύπου II, δηλαδή για $H/D=6.5$, ο συντελεστής α παραμένει πρακτικά σταθερός και ανεξάρτητος του βάθους. Η διαπίστωση αυτή συνδέει τις μορφές αστοχίας της άμμου επίχωσης όπως αυτές αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 4 με τον συντελεστή α , καταδεικνύοντας πως πράγματι, η μορφή του μηχανισμού αστοχίας που αναπτύσσεται επηρεάζει διαφορετικά την μέγιστη τιμή της δύναμης που θα ασκηθεί στον αγωγό κατά την οριζόντια μετατόπισή του, όταν η τάφρος εγκιβωτισμού έχει περιορισμένες διαστάσεις.



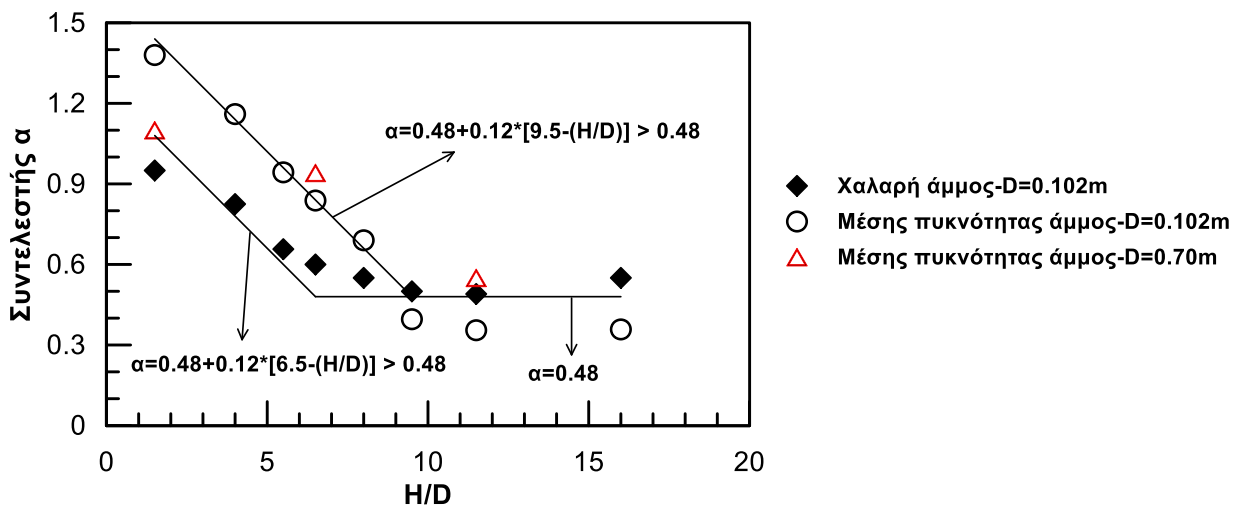
Σχήμα 5.5: Παρουσίαση αριθμητικών αποτελεσμάτων σε διπλή λογαριθμική κλίμακα



Σχήμα 5.6: Παρουσίαση αριθμητικών αποτελεσμάτων στο χώρο $\ln(p_{ult}/p_{ult,inf}) - \{\ln[(x/D)_{crit}] - \ln(x/D)\}$ για $x/D < (x/D)_{crit}$ και για κάθε τιμή του λόγου H/D, για αγωγό διαμέτρου $D=0.102m$ εγκιβωτισμένο σε χαλαρή άμμο



Σχήμα 5.7: Παρουσίαση αριθμητικών αποτελεσμάτων στο χώρο $\ln(\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}) - \{\ln[(x/D)_{crit}] - \ln(x/D)\}$ για $x/D < (x/D)_{crit}$ και για κάθε τιμή του λόγου H/D , για αγωγό διαμέτρου $D=0.102\text{m}$ και $D=0.70\text{m}$ εγκιβωτισμένο σε άμμο μέσης πυκνότητας



Σχήμα 5.8: Συντελεστής α για αγωγό διαμέτρου D=0.102m σε χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας και αγωγό διαμέτρου D=0.70m σε άμμο μέσης πυκνότητας

Από το Σχήμα 5.8, η προσέγγιση των τιμών του συντελεστή α μπορεί να γίνει τόσο για την χαλαρή όσο και για την πυκνή άμμο από μία γραμμική σχέση της μορφής:

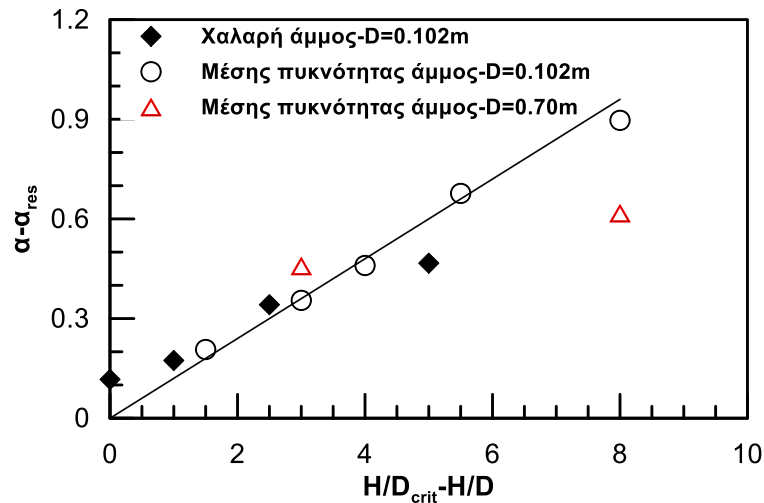
$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{res} + [(H/D)_{crit} - (H/D)] \cdot \beta, & H/D < (H/D)_{crit} \\ \alpha_{res}, & H/D \geq (H/D)_{crit} \end{cases}, \quad (5.5)$$

όπου η τιμή α_{res} μπορεί να θεωρηθεί κοινή τόσο για την χαλαρή άμμο όσο και για την άμμο μέσης πυκνότητας. Η παραμένουσα αυτή τιμή του συντελεστή α προσδιορίζεται ως η μέση τιμή των τιμών του α που αντιστοιχούν σε λόγο $H/D \geq 6.5$ για χαλαρή άμμο και σε λόγο $H/D \geq 9.5$ για άμμο μέσης πυκνότητας. Τελικά, προκύπτει ότι $\alpha_{res}=0.48$.

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή β ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Σύμφωνα με την **εξίσωση (5.5)**, αν παρουσιάσουμε τις τιμές του συντελεστή α στο χώρο $(\alpha - \alpha_{res}) - [(H/D)_{crit} - (H/D)]$, για $H/D < (H/D)_{crit}$ τότε μπορούμε να τις προσεγγίσουμε με ευθεία, η οποία διέρχεται από την αρχή των αξόνων και έχει κλίση ίση με β.
- Η προσέγγιση αυτή θα γίνει ξεχωριστά για άμμο μέσης πυκνότητας και χαλαρή άμμο, δηλαδή θα προσδιοριστούν δύο διαφορετικοί συντελεστές β.

Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται στο **Σχήμα 5.9**. Από το ίδιο σχήμα, παρατηρούμε ότι μπορούμε να φέρουμε μία ευθεία ενιαίας κλίσης από την αρχή των αξόνων που να προσεγγίζει ικανοποιητικά τις τιμές $\alpha - \alpha_{res}$ τόσο για την χαλαρή άμμο όσο και για την άμμο μέσης πυκνότητας.



Σχήμα 5.9: Παρουσίαση τιμών του συντελεστή α στο χώρο $(\alpha - \alpha_{res}) - [(H/D)_{crit} - (H/D)]$, για $H/D < (H/D)_{crit}$, για χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας

Η κλίση της ευθείας αυτής, δηλαδή η τιμή του συντελεστή β προκύπτει ίση με $\beta=0.12$. Στο Σχήμα 5.8 έχει σχεδιαστεί η γραφική παράσταση της **εξίσωσης (5.5)** για τις δύο πυκνότητες άμμου επίχωσης σύμφωνα με τις τιμές των παραμέτρων α_{res} και β που προσδιορίστηκαν.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι κατά τον προσδιορισμό των παραμέτρων α και β θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχει επίδραση των διαστάσεων του αγωγού αλλά η εκτίμηση των παραμέτρων αυτών μπορεί να γίνει από τις προηγούμενες σχέσεις ανεξαρτήτως της διαμέτρου (D) του αγωγού. Παρατηρούμε όμως, ότι η προτεινόμενη σχέση υπολογισμού της παραμέτρου α αποκλίνει σημαντικά για την περίπτωση αγωγού διαμέτρου $D=0.70m$ στα μικρά βάθη, ωστόσο η απόκλιση είναι προς τη συντηρητική κατεύθυνση και υιοθετείται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.

Συγκεντρωτικά λοιπόν, η αναλυτική σχέση που προτείνεται για τον υπολογισμό του διορθωτικού συντελεστή ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) σχετικά με την επίδραση του πλάτους της τάφρου εγκιβωτισμού στην μέγιστη τιμή του φορτίου που αναπτύσσεται στον αγωγό κατά την οριζόντια μετατόπισή του είναι:

$$\frac{p_{ult}}{p_{ult,inf}} = \begin{cases} \left[\frac{(x/D)_{crit}}{(x/D)} \right]^a, & x/D < (x/D)_{crit} \\ 1.0, & x/D \geq (x/D)_{crit} \end{cases}, \quad (5.6)$$

όπου ο συντελεστής α προσδιορίζεται από την σχέση:

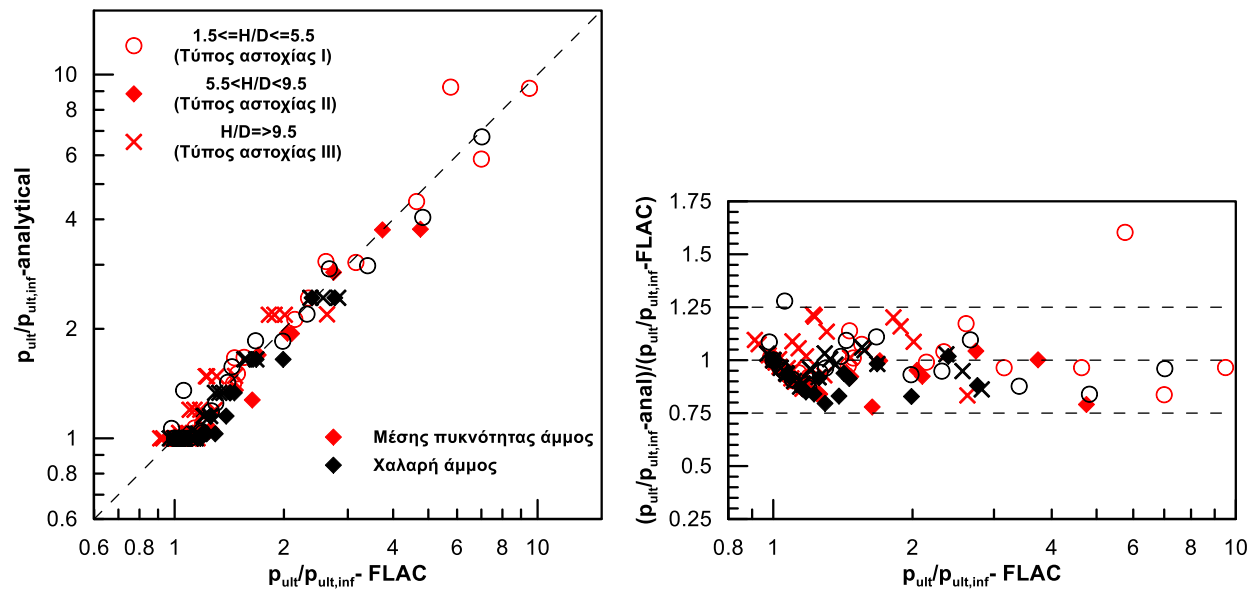
$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{res} + [(H/D)_{crit} - (H/D)] \cdot \beta, & H/D < (H/D)_{crit} \\ \alpha_{res}, & H/D \geq (H/D)_{crit} \end{cases}, \quad (5.7)$$

Οι διάφορες τιμές των παραμέτρων συναρτήσει της άμμου επίχωσης παρουσιάζονται στον **Πίνακας 5.1**.

Πίνακας 5.1: Βασικές παράμετροι αναλυτικής σχέσης για τον διορθωτικό συντελεστή ($\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$) του οριακού φορτίου

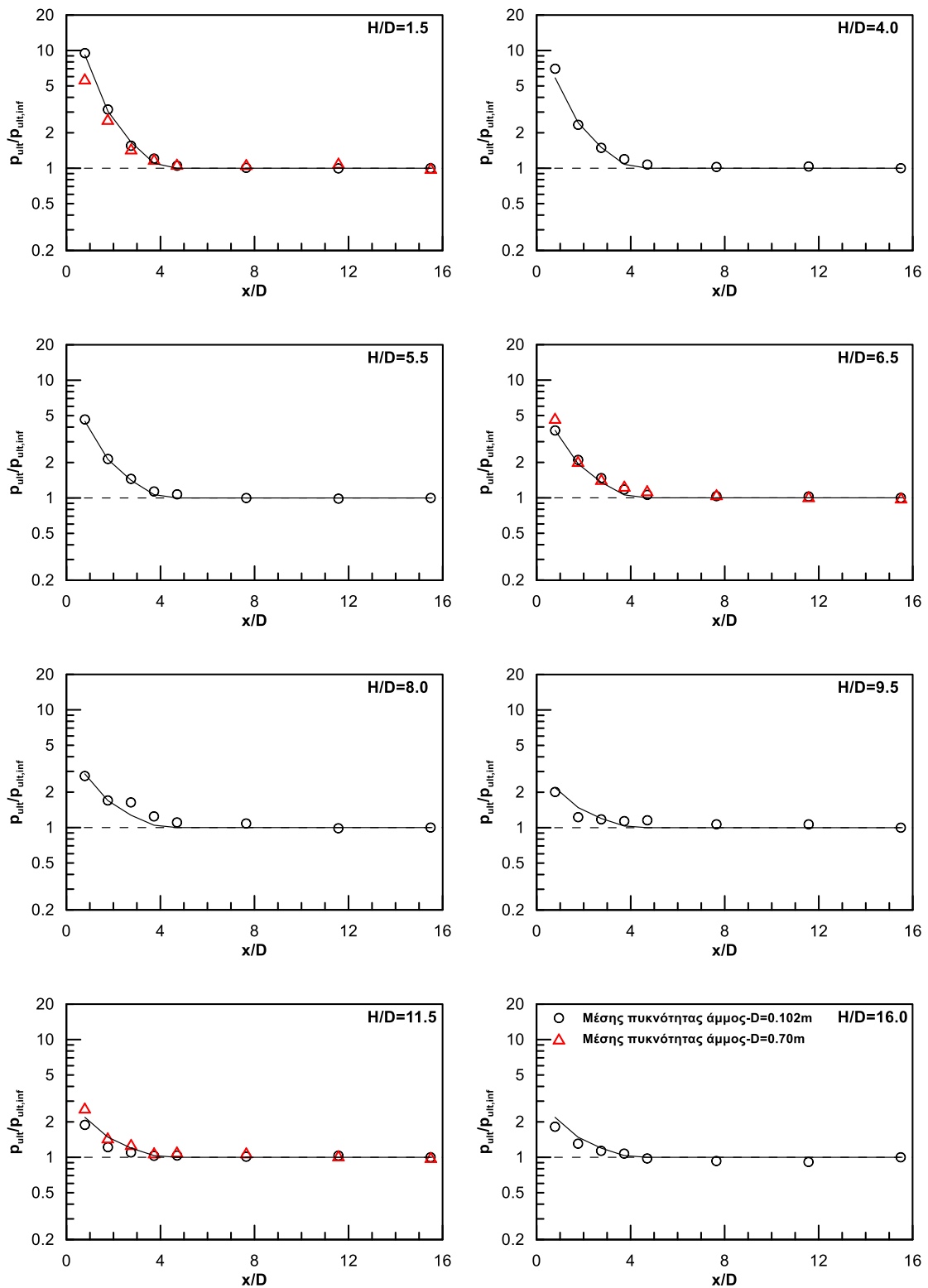
Παράμετρος	$(x/D)_{crit}$	$(H/D)_{crit}$	α_{res}	β
Χαλαρή άμμος	5.0	6.5	0.48	0.12
Μέσης πυκνότητας άμμος	4.0	9.5	0.48	0.12

Στην συνέχεια πραγματοποιείται η αξιολόγηση της προτεινόμενης αναλυτικής σχέσης συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που υπολογίζονται μέσω αυτής για κάθε τιμή του λόγου H/D που εξετάζεται με τα αντίστοιχα που έχουν προκύψει από τις αριθμητικές αναλύσεις. Η σύγκριση αυτή φαίνεται στο **Σχήμα 5.10**. Στο σχήμα αυτό, έχει γίνει διαχωρισμός των τιμών τόσο ως προς την πυκνότητα με την οποία συσχετίζονται (χρωματικός διαχωρισμός) αλλά και ως προς την μορφή του μηχανισμού αστοχίας που αναπτύσσεται (σηματικός διαχωρισμός). Παρατηρούμε ικανοποιητική πρόβλεψη των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων από την αναλυτική σχέση με σφάλμα $\leq 25\%$ σε κάθε περίπτωση πλην εκείνης του αγωγού διαμέτρου $D=070m$ εγκιβωτισμένου σε μέσης πυκνότητας άμμο επίχωσης και τιμή της απόστασης $x/D=0.78$, για τιμή του αδιαστατοποιημένου βάθους $H/D=1.5$. Στην τελευταία περίπτωση, η προτεινόμενη σχέση παρουσιάζει σφάλμα $< 75\%$, η τιμή όμως του διορθωτικού συντελεστή που υπολογίζει είναι υπέρ της ασφαλείας για τον σχεδιασμό.

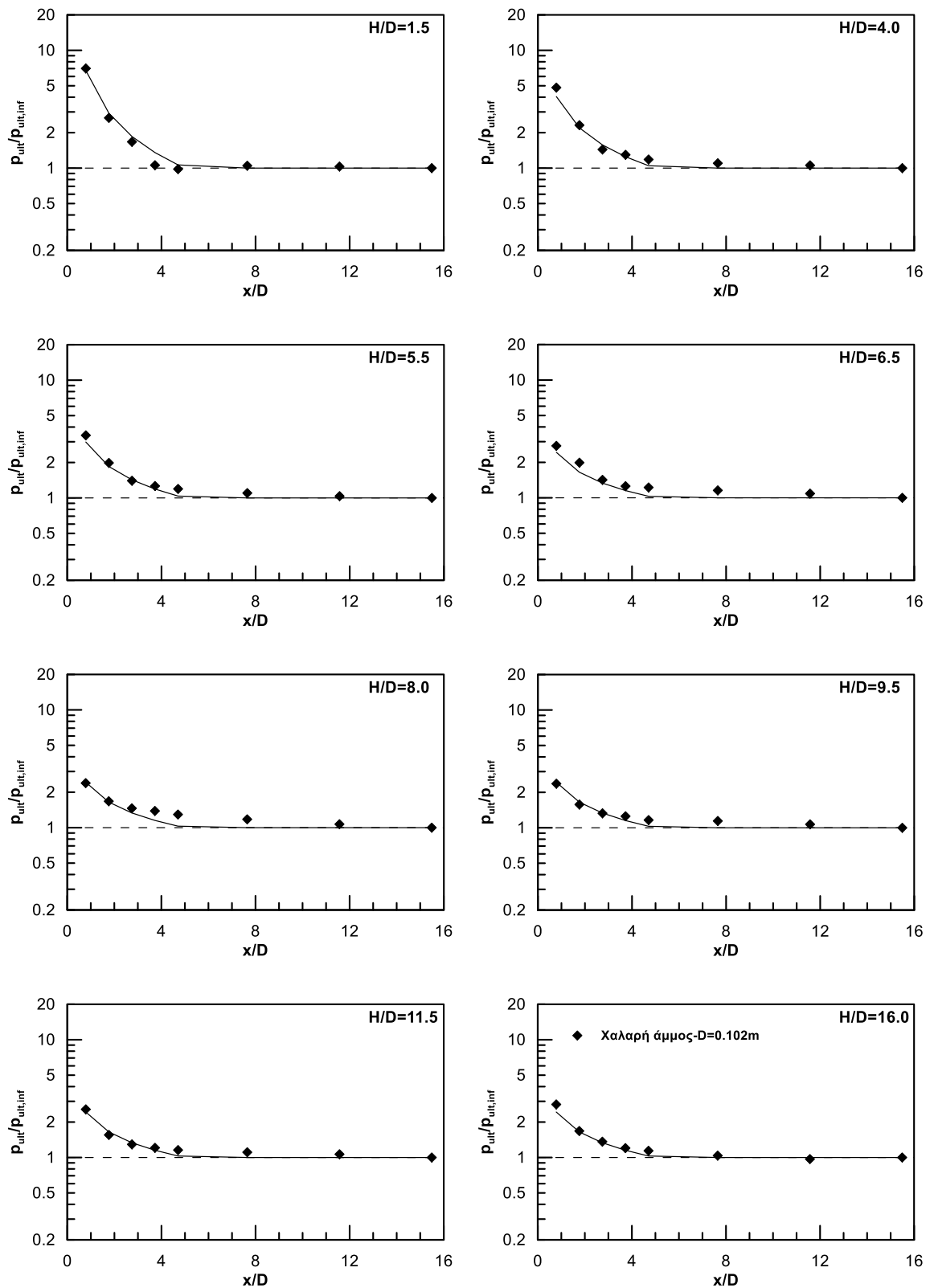


Σχήμα 5.10: Σύγκριση αποτελεσμάτων του διορθωτικού συντελεστή ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) όπως υπολογίζεται από τις αριθμητικές αναλύσεις και την προτεινόμενη αναλυτική σχέση

Τέλος, τα αριθμητικά δεδομένα μαζί με τις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού του διορθωτικού συντελεστή ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) για την μέγιστη τιμή του οριακού φορτίου που αναπτύσσεται επί του αγωγού παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.11** για άμμο μέσης πυκνότητας και αγωγό διαμέτρου $D=0.102m$ και $D=0.70m$ καθώς και στο **Σχήμα 5.12** για χαλαρή άμμο επίχωσης και αγωγό διαμέτρου $D=0.102m$.



Σχήμα 5.11: Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων και η αναλυτική προσέγγισή τους για αγωγό διαμέτρου $D=0.102m$ και $D=0.70m$ εγκιβωτισμένο σε άμμο μέσης πυκνότητας



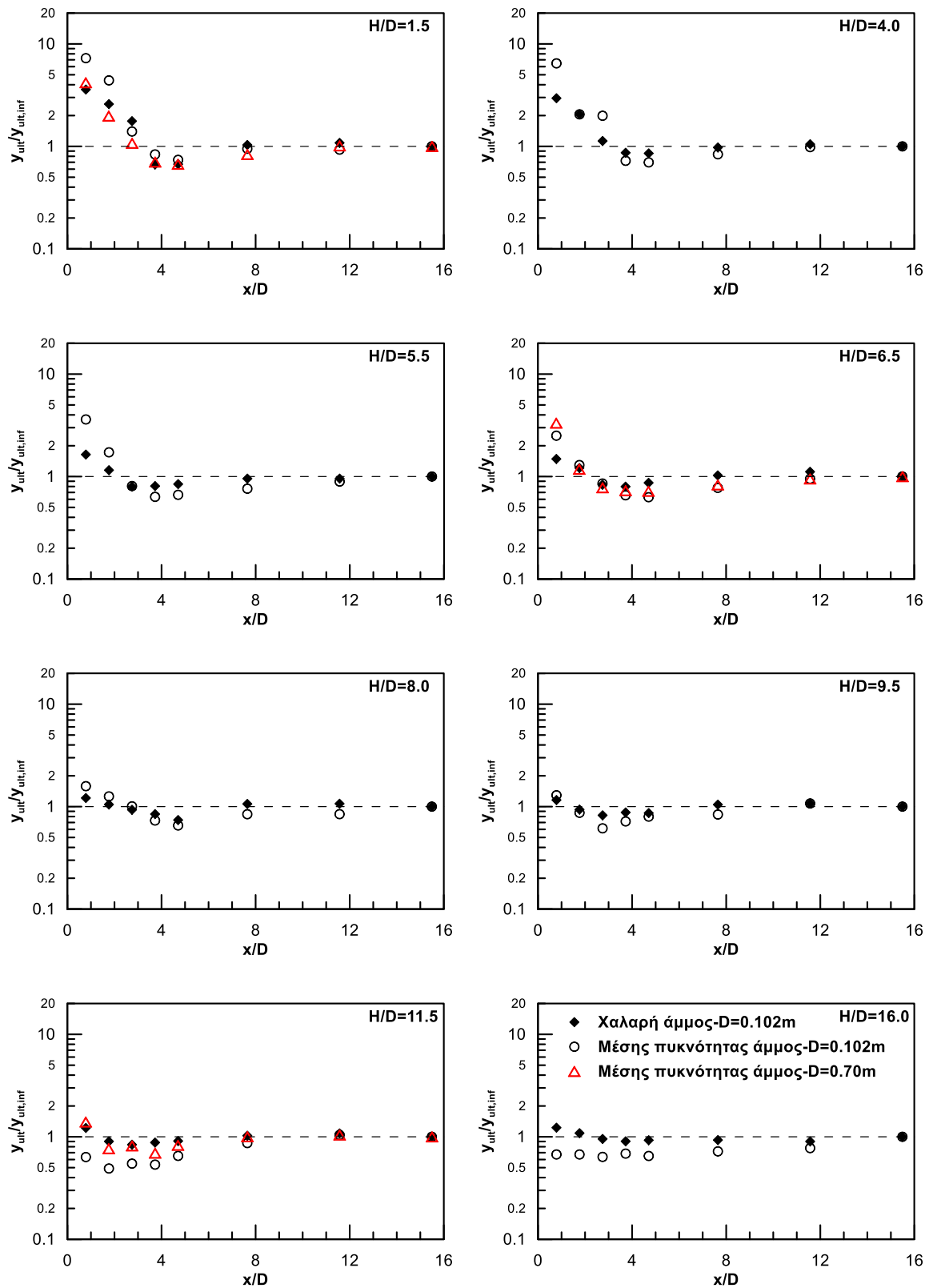
Σχήμα 5.12: Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων και η αναλυτική προσέγγισή τους για αγωγό διαμέτρου $D=0.102\text{m}$ εγκιβωτισμένο χαλαρή άμμο

5.3.2 Επίδραση στην οριακή μετατόπιση (γ_{ult})

Στο **Σχήμα 5.13** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα όλων των παραμετρικών αναλύσεων που έγιναν σχετικά με την επίδραση του πλάτους της τάφρου στην οριακή μετατόπιση, δηλαδή στην μετατόπιση στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη τιμή του φορτίου που δρα στον αγωγό όταν θεωρηθεί διγραμμική καμπύλη για την συμπεριφορά του εδαφικού υλικού επίχωσης. Κάθε σχήμα αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο λόγο εγκιβωτισμού H/D ενώ έχει γίνει διαχωρισμός των αποτελεσμάτων ανάλογα με την πυκνότητα και την διάμετρο του αγωγού που συσχετίζονται. Η τιμή της απόστασης x έχει αδιαστατοποιηθεί ως προς την διάμετρο του αγωγού (x/D) ενώ η τιμή της οριακής μετατόπισης που προκύπτει σε κάθε ανάλυση ως προς την αντίστοιχη τιμή όταν ο αγωγός βρίσκεται εγκιβωτισμένος στο ελεύθερο πεδίο ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$).

Σε αντιστοιχία με όσα αναφέρθηκαν στην επίδραση του πλάτους της τάφρου στην τιμή της μέγιστης δύναμης που αναπτύσσεται στον αγωγό, έτσι και για την οριακή μετατόπιση μπορούμε να διαπιστώσουμε τα εξής:

- Επίδραση οριζόντιας απόστασης x/D : Υπάρχει μια κρίσιμη τιμή $(x/D)_{crit}$, πέρα από την οποία ο λόγος ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) παραμένει πρακτικά σταθερός και ίσος με την μονάδα. Για τιμές του x/D μικρότερες από την κρίσιμη αυτή τιμή, το κατακόρυφο σύνορο της τάφρου επηρεάζει την κίνηση του αγωγού, μη επιτρέποντας στον μηχανισμό αστοχίας της άμμου επίχωσης να αναπτυχθεί ανεμπόδιστα, γεγονός που μεταφράζεται σε αύξηση του λόγου ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$). Παρατηρούμε δηλαδή παρόμοια συμπεριφορά με αυτή που περιγράφηκε για την επίδραση του πλάτους της τάφρου στο οριακό φορτίο. Μάλιστα όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.13, μπορούμε να θεωρήσουμε για τις τιμές του $(x/D)_{crit}$, τις ίδιες ακριβώς τιμές με αυτές που υπολογίσαμε στην **ενότητα 5.3.1**. Συνεπώς, για την άμμο μέσης πυκνότητας και για τους αγωγούς διαμέτρων $D=0.102m$ και $D=0.70m$ λαμβάνεται κοινή τιμή ίση με $(x/D)_{crit}=4.0$ ενώ για τον αγωγό διαμέτρου $D=0.102m$ σε χαλαρή άμμο τιμή ίση με $(x/D)_{crit}=5.0$.
- Επίδραση βάθους εγκιβωτισμού H/D : Στο ίδιο σχήμα φαίνεται η σταδιακή μείωση του λόγου ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) που αντιστοιχεί σε τιμές του x/D μικρότερες του $(x/D)_{crit}$, με την αύξηση του βάθους. Η μείωση αυτή οφείλεται στην μετάβαση του μηχανισμού αστοχίας από έναν ρηχού τύπου μηχανισμό που εκτείνεται ως την επιφάνεια του εδάφους (μηχανισμός αστοχίας τύπου I) σε έναν μηχανισμό που περιβάλλει τον αγωγό (μηχανισμός αστοχίας τύπου III). Η μορφή του μηχανισμού αστοχίας που αναπτύσσεται για τον εκάστοτε λόγο εγκιβωτισμού H/D που εξετάζεται και για τις δύο πυκνότητες άμμου επίχωσης έχει διερευνηθεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε την σταθεροποίηση



Σχήμα 5.13: Διαγράμματα $(\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf})-(x/D)$ για τιμές του λόγου εγκιβωτισμού $H/D=1.5, 4.0, 5.5, 6.5, 8.0, 9.5, 11.5$ και 16.0

των τιμών του λόγου ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) όταν ο μηχανισμός αστοχίας που αναπτύσσεται είναι τύπου III. Συνεπώς, και για τις δύο πυκνότητες άμμου επίχωσης, ο λόγος ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) μειώνεται με την αύξηση του H/D μέχρις ότου να σταθεροποιηθεί σε μία τιμή για κάθε x/D , όταν ο μηχανισμός αστοχίας του εδάφους γίνει τύπου III.

- Επίδραση πυκνότητας άμμου: Όπως αναφέρθηκε και στην επίδραση της οριζόντιας απόστασης x/D , για κάθε περίπτωση άμμου επίχωσης λαμβάνεται διαφορετική τιμή του κρίσιμου λόγου $(x/D)_{crit}$. Επιπρόσθετα, από το Σχήμα 5.13, παρατηρούμε πως οι αντίστοιχες τιμές του λόγου ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) για άμμο μέσης πυκνότητας και χαλαρή άμμο έχουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ τους σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις λόγου εγκιβωτισμού H/D .
- Επίδραση διαστάσεων αγωγού: Τέλος, από το ίδιο σχήμα, φαίνεται να υπάρχει συμφωνία των αποτελεσμάτων για τους αγωγούς διαμέτρου $D=0.102m$ και $D=0.70m$ για κάθε τιμή του x/D μόνο στην περίπτωση λόγου εγκιβωτισμού $H/D=6.5$. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, δηλαδή για $H/D=1.5$ και 11.5 υπάρχει διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων, ειδικά στις μικρές τιμές της απόστασης x/D .
- Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση για τις τιμές του λόγου ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) είναι ότι αυτές σε ορισμένες περιπτώσεις, κυρίως για μέσης πυκνότητας άμμο επίχωσης σε μεγάλα βάθη εγκιβωτισμού ($H/D \geq 9.5$), λαμβάνουν τιμές μικρότερες της μονάδας. Στα βάθη αυτά, η μέγιστη τιμή του φορτίου που αναπτύσσεται στον αγωγό για οποιαδήποτε τιμή του x/D είναι πρακτικά σταθερή και ίση με την μονάδα (Σχήμα 5.3). Από την μηχανική, η δυσκαμψία ορίζεται ως δύναμη προς μετατόπιση. Για σταθερή τιμή της δύναμης, μείωση της μετατόπισης (δηλαδή λόγος ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) < 1.0) συνεπάγεται αύξηση της δυσκαμψίας του εδάφους. Η πλασματική αυτή αύξηση της δυσκαμψίας του εδάφους συμβαίνει γενικά σε προβλήματα οριζόντιας μετατόπισης και οφείλεται σε αλληλεπίδραση των κατακόρυφων συνόρων που τέθηκαν κατά την αριθμητική προσομοίωση με την οριζόντια κίνηση του αγωγού. Μάλιστα, λόγω του προσομοιώματος Mohr-Coulomb που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της αστοχίας του εδάφους, κατά το οποίο μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή της μετατόπισης το έδαφος συμπεριφέρεται ελαστικά, η ελαστική αυτή συμπεριφορά του εδάφους, τουλάχιστον στην αρχή της κίνησης, θα συνεπάγεται και επίδραση του συνόρου στον αγωγό, ανεξάρτητα από την απόσταση στην οποία το έχουμε τοποθετήσει.

Αναλυτικός υπολογισμός της οριακής μετατόπισης (γ_{ult})

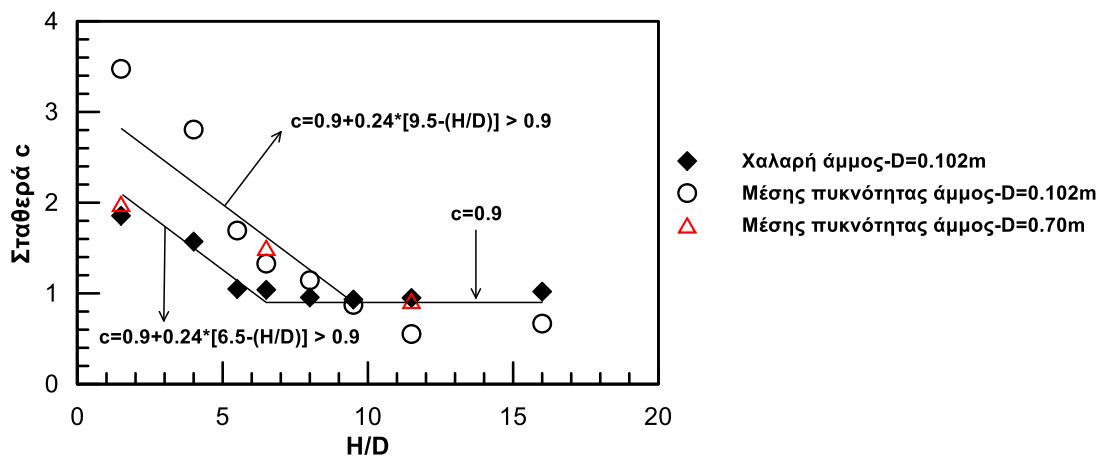
Για την εξαγωγή αναλυτικών σχέσεων υπολογισμού του διορθωτικού συντελεστή ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) θα πραγματοποιηθεί διαφορετική διαδικασία από αυτή που περιγράφηκε για τον διορθωτικό συντελεστή του οριακού φορτίου, στην βάση ότι το μέγεθος αυτό (γ_{ult}) είναι μικρότερου πρακτικού ενδιαφέροντος σε σχέση με το οριακό φορτίο.

Η προτεινόμενη αναλυτική σχέση έχει την γενική μορφή:

$$\frac{\gamma_{ult}}{\gamma_{ult,inf}} = \begin{cases} c, & x/D < (x/D)_{crit} \\ 1.0, & x/D \geq (x/D)_{crit} \end{cases}, \quad (5.8)$$

όπου η σταθερά c ορίζεται ως ο μέσος όρος των τιμών του λόγου ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$), για $x/D < (x/D)_{crit}$ σε κάθε λόγο εγκιβωτισμού H/D που εξετάζεται. Η σταθερά c θα προσδιοριστεί σε κάθε περίπτωση για τον αγωγό διαμέτρου $D=0.102m$ σε άμμο μέσης πυκνότητας και χαλαρή άμμο αλλά και για τον αγωγό διαμέτρου $D=0.70m$ εγκιβωτισμένο σε άμμο μέσης πυκνότητας.

Οι τιμές της σταθεράς c που υπολογίστηκαν φαίνονται συγκεντρωτικά στο **Σχήμα 5.14**. Από το σχήμα αυτό, παρατηρούμε ότι για άμμο μέσης πυκνότητας, οι τιμές της παραμέτρου c λαμβάνουν σταθερή τιμή για λόγο $H/D \geq 9.5$. Αντίστοιχα, στην χαλαρή άμμο, η τιμή της σταθεράς c σταθεροποιείται για λόγο $H/D \geq 6.5$. Μάλιστα οι δύο αυτές οριακές τιμές του λόγου H/D για χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας πέρα από τις οποίες η παράμετρος c γίνεται ανεξάρτητη από το βάθος είναι οι ίδιες με αυτές που έχουν προσδιοριστεί για τον συντελεστή α στην περίπτωση του διορθωτικού συντελεστή του οριακού φορτίου. Ακόμη, όπως είχε αναφερθεί και στην περίπτωση του συντελεστή α , οι δύο αυτές οριακές τιμές σχετίζονται με την αλλαγή της μορφής του μηχανισμού αστοχίας από τύπο I σε τύπο II για την χαλαρή άμμο και από τύπο II σε τύπο III για την άμμο μέσης πυκνότητας. Συνεπώς, η μορφή που έχει ο μηχανισμός αστοχίας επηρεάζει κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο και τους δύο διορθωτικούς συντελεστές (φορτίου, μετατόπισης) μειώνοντάς τους με την αύξηση του λόγου H/D όσο αυτός σχετίζεται με τον μηχανισμό αστοχίας τύπου I και για στις δύο περιπτώσεις άμμου επίχωσης, ενώ στην συνέχεια για την χαλαρή άμμο οι διορθωτικοί συντελεστές παραμένουν σταθεροί καθώς εμφανίζεται ο μηχανισμός αστοχίας τύπου II και III, για την μέσης πυκνότητας άμμο η μείωση αυτή συνεχίζεται και κατά την εμφάνιση του μηχανισμού αστοχίας τύπου II για να σταματήσει όταν αναπτυχθεί η μορφή αστοχίας τύπου III.



Σχήμα 5.14: Σταθερά c για αγωγό διαμέτρου $D=0.102m$ σε χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας και αγωγό διαμέτρου $D=0.70m$ σε άμμο μέσης πυκνότητας

Συνεπώς, από το Σχήμα 5.14, η προσέγγιση της σταθεράς c μπορεί να γίνει τόσο για χαλαρή όσο και για άμμο μέσης πυκνότητας από μία σχέση της μορφής:

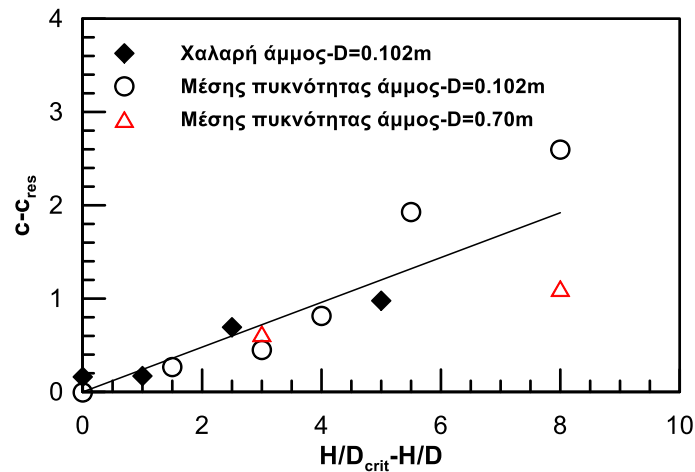
$$c = \begin{cases} c_{res} + [(H/D)_{crit} - (H/D)] \cdot \delta, & H/D < (H/D)_{crit} \\ c_{res}, & H/D \geq (H/D)_{crit} \end{cases}, \quad (5.9)$$

όπου η τιμή c_{res} μπορεί να θεωρηθεί κοινή τόσο για την χαλαρή άμμο όσο και για την άμμο μέσης πυκνότητας. Η παραμένουσα αυτή τιμή της σταθεράς c προσδιορίζεται ως η μέση τιμή των τιμών της c που αντιστοιχούν σε λόγο $H/D \geq 6.5$ για χαλαρή άμμο και σε λόγο $H/D \geq 9.5$ για άμμο μέσης πυκνότητας. Τελικά, προκύπτει ότι $c_{res}=0.878$. Για υπολογιστικούς λόγους, η τιμή που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς ελήφθησε ίση με $c_{res}=0.9$.

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή δ ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Σύμφωνα με την **εξίσωση (5.9)**, αν παρουσιάσουμε τις τιμές της σταθεράς c στο χώρο $(c - c_{res}) - [(H/D)_{crit} - (H/D)]$, για $H/D < (H/D)_{crit}$ τότε μπορούμε να τις προσεγγίσουμε με ευθεία, η οποία διέρχεται από την αρχή των αξόνων και έχει κλίση ίση με δ .
- Η προσέγγιση αυτή θα γίνει ξεχωριστά για άμμο μέσης πυκνότητας και χαλαρή άμμο, δηλαδή θα προσδιοριστούν δύο διαφορετικοί συντελεστές δ .

Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται στο **Σχήμα 5.15**. Από το ίδιο σχήμα, παρατηρούμε ότι μπορούμε να φέρουμε μία ενιαία ευθεία από την αρχή των αξόνων που να προσεγγίζει ικανοποιητικά τις τιμές $c - c_{res}$ τόσο για την χαλαρή άμμο όσο και για την άμμο μέσης πυκνότητας.



Σχήμα 5.15: Παρουσίαση τιμών του συντελεστή δ στο χώρο $(c - c_{res}) - [(H/D)_{crit} - (H/D)]$, για $H/D < (H/D)_{crit}$, για χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας

Η κλίση της ευθείας αυτής, δηλαδή η τιμή του συντελεστή δ προκύπτει ίση με $\delta = 0.24$. Στο Σχήμα 5.14 έχει σχεδιαστεί η γραφική παράσταση της **εξίσωσης (5.9)** και για τις δύο πυκνότητες άμμου επίχωσης σύμφωνα με τις τιμές των παραμέτρων c_{res} και δ που προσδιορίστηκαν. Και πάλι παρατηρείται απόκλιση για την περίπτωση αγωγού με διάμετρο $D = 0.70\text{m}$ σε άμμο μέσης πυκνότητας και λόγο εγκιβωτισμού $H/D = 1.5$, όπως και στην περίπτωση του διορθωτικού συντελεστή για την μέγιστη εδαφική αντίδραση. Στην παρούσα διπλωματική δεν θα εξεταστεί η πιθανή επίδραση της διαμέτρου του αγωγού στις τιμές των παραμέτρων c και δ αλλά θα θεωρηθεί πως οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν ανεξαρτήτως της διαμέτρου του αγωγού.

Συγκεντρωτικά λοιπόν, η αναλυτική σχέση που προτείνεται για τον υπολογισμό του διορθωτικού συντελεστή $(\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf})$ σχετικά με την επίδραση του πλάτους της τάφρου εγκιβωτισμού στην οριακή μετατόπιση είναι:

$$\frac{\gamma_{ult}}{\gamma_{ult,inf}} = \begin{cases} c, & x/D < (x/D)_{crit} \\ 1.0, & x/D \geq (x/D)_{crit} \end{cases}, \quad (5.10)$$

όπου η σταθερά c προσδιορίζεται ως εξής:

$$c = \begin{cases} c_{res} + [(H/D)_{crit} - (H/D)] \cdot \delta, & H/D < (H/D)_{crit} \\ c_{res}, & H/D \geq (H/D)_{crit} \end{cases}, \quad (5.11)$$

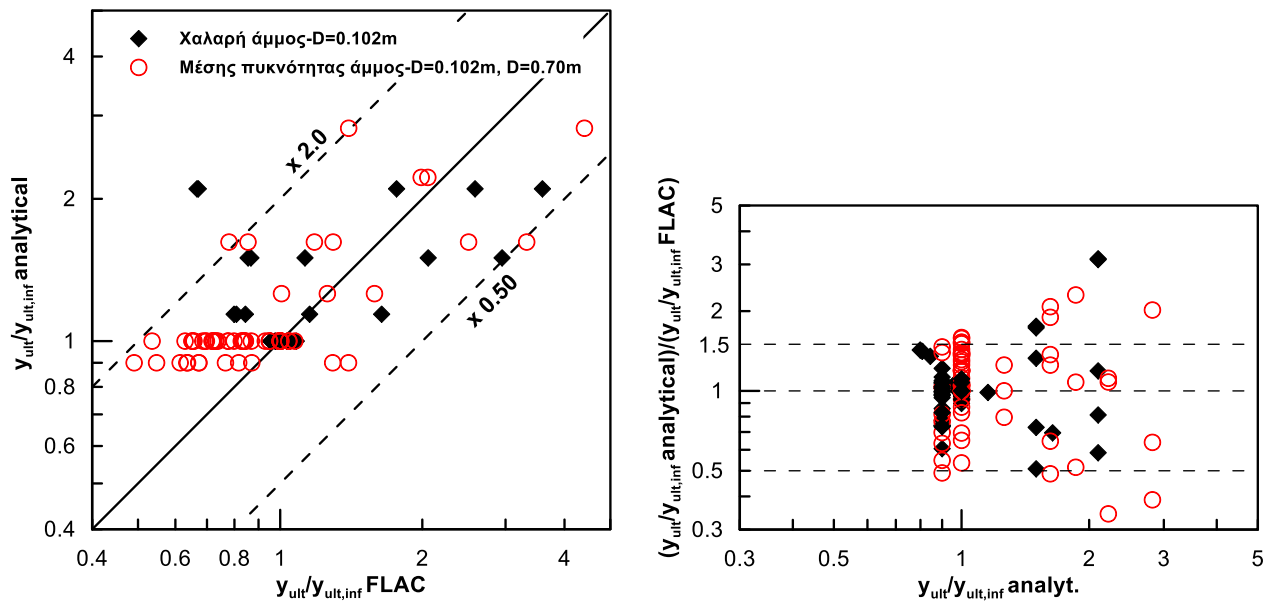
Οι διάφορες τιμές των παραμέτρων για τον υπολογισμό της αναλυτικής σχέσης συναρτήση της άμμου επίχωσης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.2**.

Πίνακας 5.2: Βασικές παράμετροι αναλυτικής σχέσης για τον διορθωτικό συντελεστή ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) της οριακής μετατόπισης

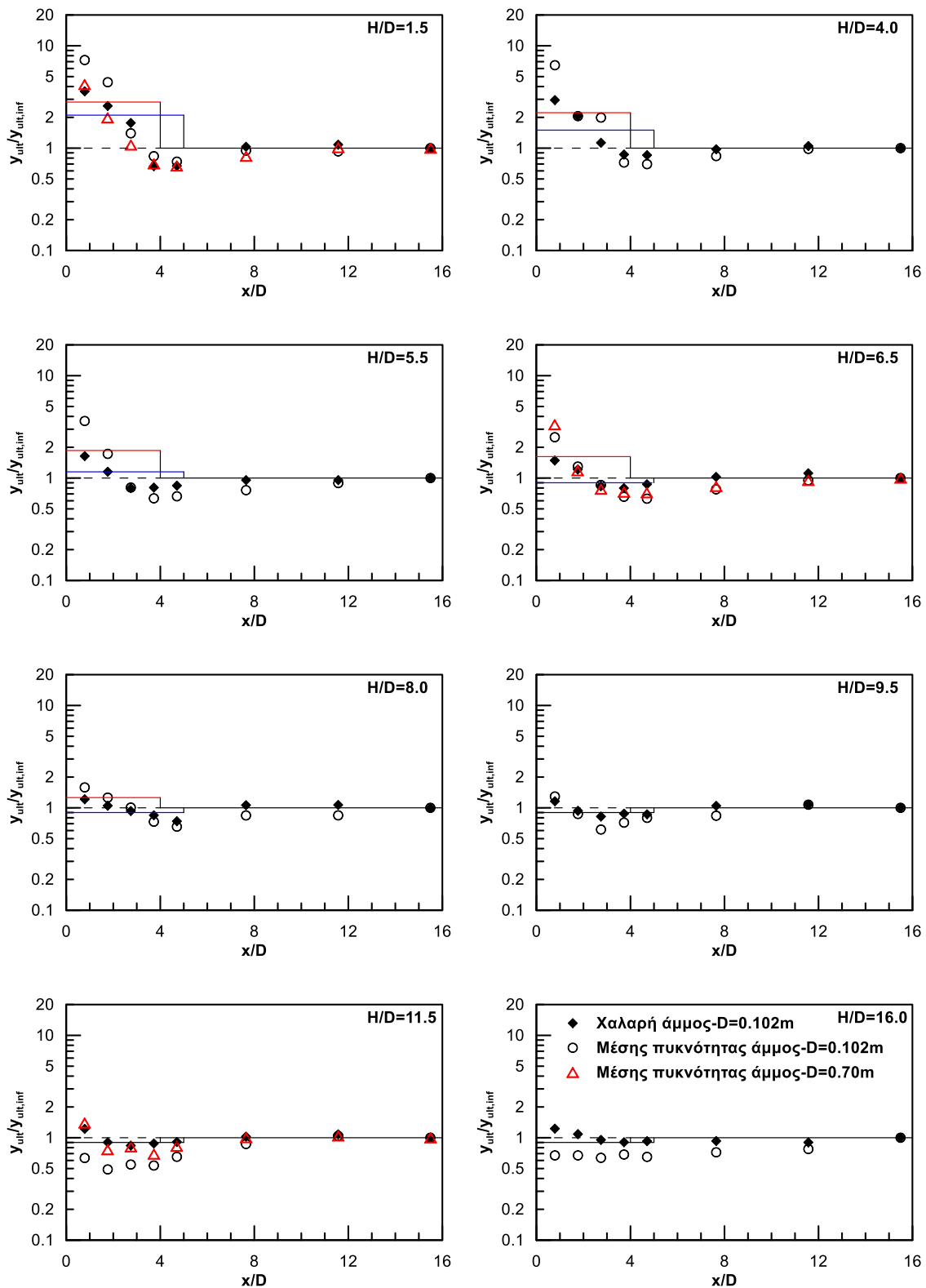
Παράμετρος	$(x/D)_{crit}$	$(H/D)_{crit}$	C_{res}	δ
Χαλαρή άμμος	5.0	6.5	0.9	0.24
Μέσης πυκνότητας άμμος	4.0	9.5	0.9	0.24

Στην συνέχεια πραγματοποιείται η αξιολόγηση της προτεινόμενης αναλυτικής σχέσης συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που υπολογίζονται μέσω αυτής για κάθε τιμή του λόγου H/D που εξετάζεται με τα αντίστοιχα που έχουν προκύψει από τις αριθμητικές αναλύσεις. Η σύγκριση αυτή φαίνεται στο **Σχήμα 5.16**. Στο σχήμα αυτό, έχει γίνει διαχωρισμός των τιμών ως προς την πυκνότητα με την οποία συσχετίζονται (χρωματικός διαχωρισμός). Προκύπτει ότι το σφάλμα της προτεινόμενης αναλυτικής σχέσης είναι μικρότερο ή ίσο με 50% στο 95% των περιπτώσεων ενώ για το υπόλοιπο 5% λαμβάνει τιμές έως και 300%.

Τέλος, τα αριθμητικά δεδομένα μαζί με τις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού του διορθωτικού συντελεστή ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) για την μέγιστη τιμή της οριακής μετατόπισης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.17**. Στο σχήμα αυτό, με κόκκινη συνεχή γραμμή φαίνεται η γραφική παράσταση του διορθωτικού συντελεστή για την άμμο μέσης πυκνότητας, με μπλε συνεχή γραμμή η αντίστοιχη γραφική παράσταση για την χαλαρή άμμο και με μαύρη συνεχή γραμμή, η γραφική παράσταση του διορθωτικού συντελεστή στις περιοχές εκείνες του x/D που είναι κοινός και για τις δύο άμμους επίχωσης.



Σχήμα 5.16: Σύγκριση αποτελεσμάτων του διορθωτικού συντελεστή ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) όπως υπολογίζεται από τις αριθμητικές αναλύσεις και την προτεινόμενη αναλυτική σχέση



Σχήμα 5.17: Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων και η αναλυτική προσέγγισή τους για αγωγό διαμέτρου $D=0.102m$ εγκιβωτισμένο σε χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας και αγωγό διαμέτρου $D=0.70m$ σε άμμο μέσης πυκνότητας

5.4 Επίδραση απόστασης αγωγού από το οριζόντιο κάτω όριο της τάφρου

Η δεύτερη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων αφορά την επίδραση της κατακόρυφης απόστασης (d) του κατώτατου σημείου του αγωγού από το οριζόντιο σύνορο της τάφρου, στην επιβαλλόμενη στον αγωγό καταπόνηση. Εξετάζεται, όπως και παραπάνω, η επίδραση της σταδιακής μείωσης της απόστασης αυτής (d), στη μέγιστη αναπτυσσόμενη δύναμη (p_{ult}) επί του αγωγού, καθώς και στην αντίστοιχη μετατόπιση (y_{ult}), στην οποία αυτή παρουσιάζεται.

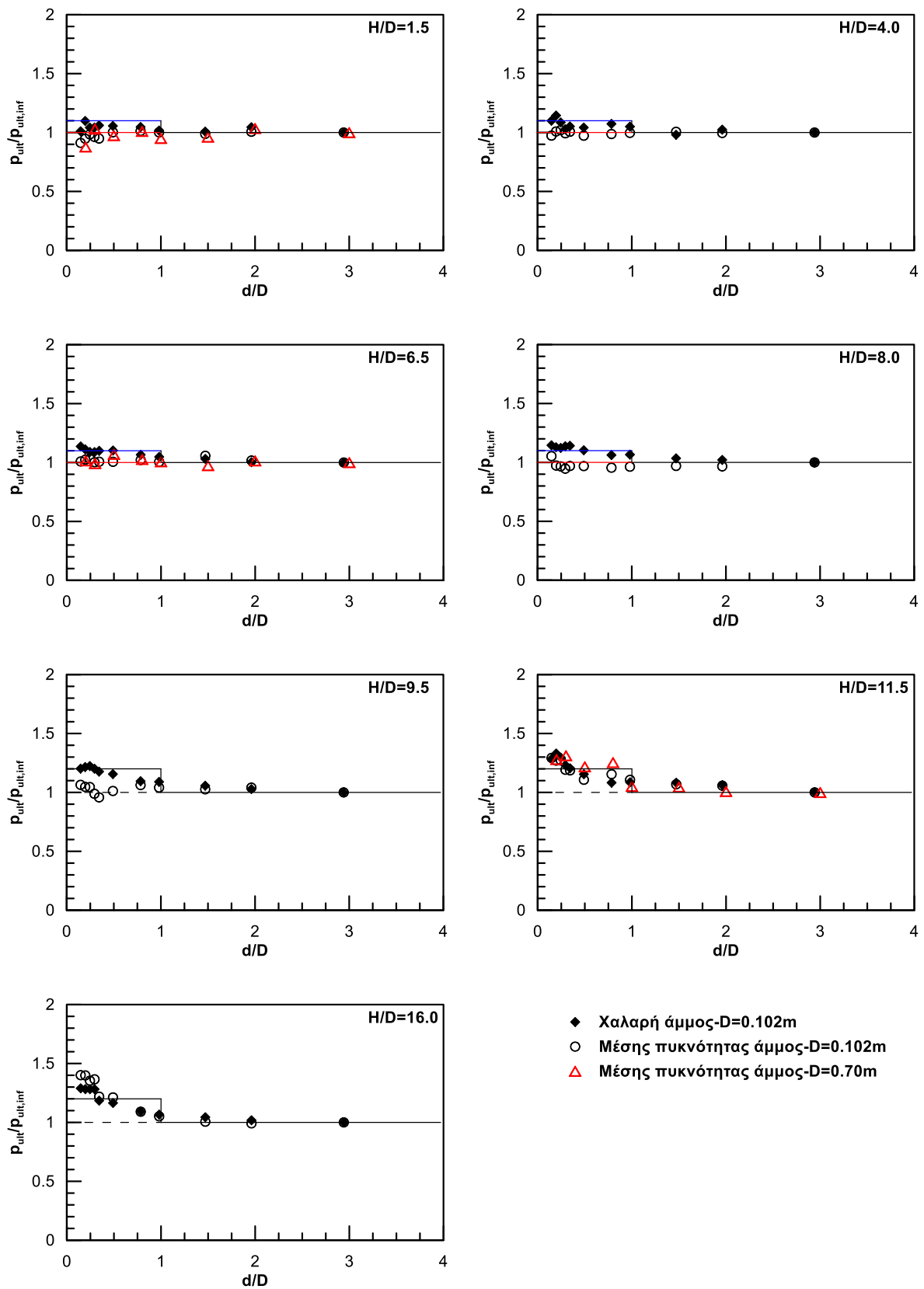
Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3.4, για την εκτίμηση της εν λόγω επίδρασης πραγματοποιήθηκε σειρά παραμετρικών αναλύσεων για αγωγό διαμέτρου $D=0.102\text{m}$ και για βάθη εγκιβωτισμού με τιμές $H/D=1.5, 4.0, 6.5, 8.0, 9.5, 11.5$ και 16.0 . Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας.

Επιπρόσθετα, εξετάστηκε η περίπτωση αγωγού διαμέτρου $D=0.70\text{m}$ εγκιβωτισμένου σε άμμο μέσης πυκνότητας, για τιμές λόγου εγκιβωτισμού $H/D=1.5, 6.5, 11.5$.

5.4.1 Επίδραση στην οριακή εδαφική αντίδραση (p_{ult})

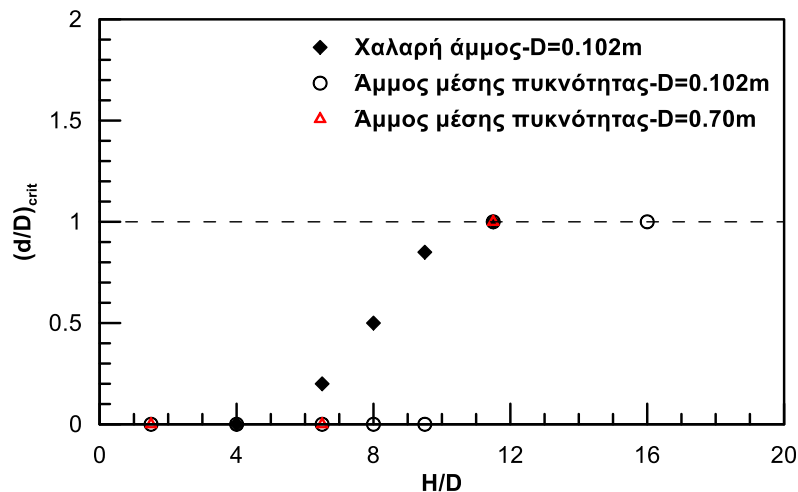
Τα αποτελέσματα του συνόλου των παραμετρικών αναλύσεων αναφορικά με την επίδραση στην μέγιστη αναπτυσσόμενη δύναμη (p_{ult}), παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο **Σχήμα 5.18**. Στο σχήμα αυτό φαίνεται η συσχέτιση του μέγιστου φορτίου με την απόσταση d . Το φορτίο (p_{ult}) δίδεται σε αδιαστατοποιημένη μορφή ως προς το μέγιστο φορτίο ($p_{ult,inf}$) που αναπτύσσεται σε αγωγό εγκιβωτισμένο στο ελεύθερο πεδίο, υφιστάμενο στην ίδια μετατόπιση. Η απόσταση d δίδεται επίσης σε αδιαστατοποιημένη μορφή, ως προς τη διάμετρο του αγωγού D .

Στο σχήμα παρατηρείται πως για βάθη εγκιβωτισμού με τιμές μικρότερες του $H/D=9.5$, η επίδραση της απόστασης d στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις είναι μικρή έως αμελητέα. Αντιθέτως, στα μεγάλα βάθη με τιμές H/D μεγαλύτερες του 9.5 παρατηρείται αύξηση του p_{ult} που αγγίζει και το 40%.



Σχήμα 5.18: Επίδραση της μείωσης του βάθους d στο μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο

Για το εκάστοτε βάθος εγκιβωτισμού, υπολογίστηκε η αδιαστατοποιημένη απόσταση $(d/D)_{crit}$ κατόπιν της οποίας δεν παρατηρείται αισθητή επίδραση στο μέγιστο φορτίο (p_{ult}). Η εν λόγω επίδραση θεωρήθηκε αμελητέα για τιμές του διορθωτικού συντελεστή που ικανοποιούν τη σχέση $0.90 \leq (p_{ult}/p_{ult,inf}) \leq 1.10$. Οι τιμές του οριακού λόγου $(d/D)_{crit}$ υπολογίστηκαν ξεχωριστά για τις διαφορετικές περιπτώσεις άμμων επίχωσης, καθώς και για την περίπτωση του αγωγού μεγάλης διαμέτρου. Συγκεντρωτικά οι τιμές αυτές συναρτήσκει του βάθους επίχωσης H/D συνοψίζονται στο **Σχήμα 5.19**.



Σχήμα 5.19: Τιμές του λόγου $(d/D)_{crit}$ για χαλαρή άμμο, άμμο μέσης πυκνότητας και αγωγούς διαμέτρου $D=0.102m$ και $D=0.70m$

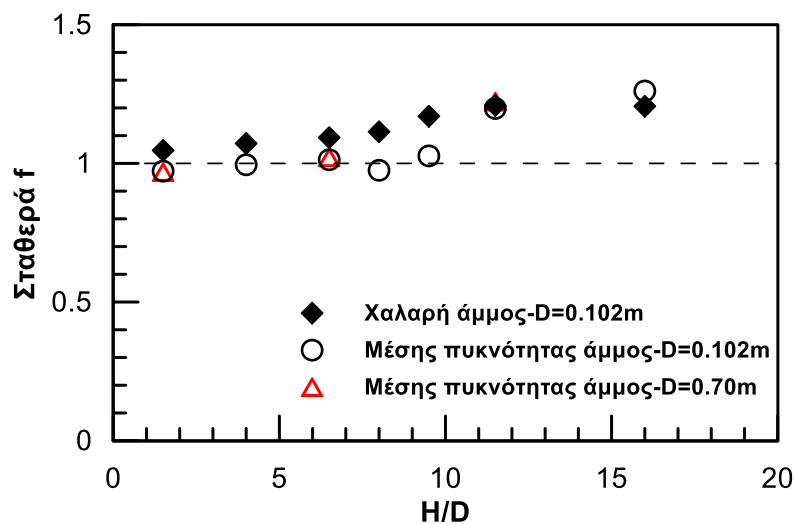
Στο Σχήμα 5.19 παρατηρείται πως στην περίπτωση άμμου μέσης πυκνότητας και για λόγους εγκιβωτισμού $H/D < 9.5$ το $(d/D)_{crit}$ ισούται με 0, γεγονός που υποδεικνύει αμελητέα επίδραση στο οριακό φορτίο p_{ult} . Στην περίπτωση της χαλαρής άμμου ο λόγος $(d/D)_{crit}$ παραμένει σταθερός και ίσος με 0 για $H/D < 6.0$, δηλαδή για περιπτώσεις βαθών εγκιβωτισμού που υπεισέρχονται στην πρώτη μορφή αστοχίας, ενώ για βάθη εγκιβωτισμού που παρουσιάζουν μορφή αστοχίας τύπου II ($6.0 < H/D < 10.0$) το $(d/D)_{crit}$ παρουσιάζει σταδιακή αύξηση μέχρι την τιμή 1.0. Η επίδραση της μετάβασης στην τρίτη μορφή αστοχίας ($H/D > 9.5$) είναι εμφανής. Με τη μετάβαση αυτή, ο οριακός λόγος $(d/D)_{crit}$ σταθεροποιείται πλέον στη μονάδα, ανεξαρτήτως άμμου επίχωσης. Σε όλες τις περιπτώσεις λόγων εγκιβωτισμού και ανεξαρτήτως άμμου επίχωσης και διαμέτρου αγωγού, η επίδραση στο οριακό φορτίο είναι αμελητέα για $(d/D) > 1.0$. Συνεπώς, σχετικά με την τιμή του $(d/D)_{crit}$, αυτή θεωρήθηκε ίση με την μονάδα σε κάθε περίπτωση.

Για την περιγραφή του διορθωτικού συντελεστή ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) μέσω αναλυτικής σχέσης, προτείνεται η χρήση σταθερής τιμής f εξαρτώμενης από το βάθος.

$$\frac{p_{ult}}{p_{ult,inf}} = f, \quad d/D < 1.0 \quad (5.12)$$

Για τον υπολογισμό της σταθεράς f λήφθηκε ο μέσος όρος των τιμών του λόγου ($p_{ult}/p_{ult,inf}$), για $(d/D) < 1.0$ σε κάθε λόγο εγκιβωτισμού H/D , τόσο για χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας, καθώς και για διάμετρο αγωγού $D=0.102\text{m}$ και $D=0.70\text{m}$.

Στο **Σχήμα 5.20** παρουσιάζονται οι τιμές που προκύπτουν από την επεξεργασία αυτή συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού H/D . Όπως και στην περίπτωση της οριζόντιας απόστασης x είναι εμφανής η επίδραση της μορφής του μηχανισμού αστοχίας στην τιμή του διορθωτικού συντελεστή.



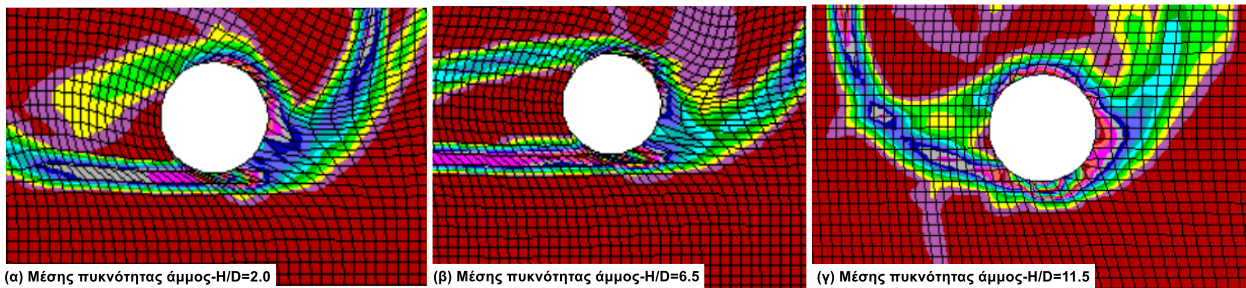
Σχήμα 5.20: Μέσος όρος των τιμών του λόγου ($p_{ult}/p_{ult,inf}$), για $d/D < (d/D)_{crit}$ για τα διάφορα H/D

Συγκεκριμένα, τόσο για την περίπτωση χαλαρής όσο και μέσης πυκνότητας άμμου, παρατηρείται ενιαία επίδραση για αστοχία με το μηχανισμό τύπου I και II και διαφορετική για μηχανισμό τύπου III. Έτσι,

- για άμμο μέσης πυκνότητας μπορεί να υιοθετηθεί ενιαίος συντελεστής 1.0 για $H/D < 9.5$ (τύπος I και II) και 1.2 για $H/D > 9.5$ (τύπος III).
- Αντίστοιχα, για χαλαρή άμμο μπορεί να υιοθετηθεί ενιαίος συντελεστής 1.1 για $H/D < 9.5$ (τύπος I και II) και 1.2 για $H/D > 9.5$ (τύπος III).

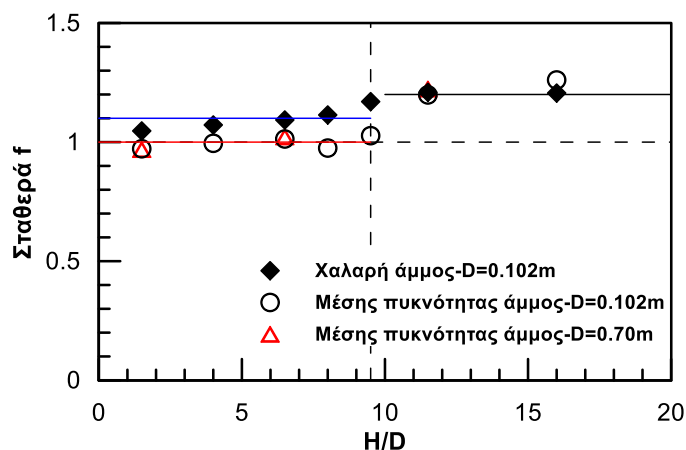
Η αύξηση αυτή που παρατηρείται στο μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο, ανεξαρτήτως άμμου επίχωσης, με τη μετάβαση στην τρίτη μορφή αστοχίας, μπορεί να εξηγηθεί ικανοποιητικά αν παρατηρήσει κανείς τις χαρακτηριστικές επιφάνειες αστοχίας κάθε μορφής.

Στο **Σχήμα 5.21** παρουσιάζονται ενδεικτικά για την άμμο μέσης πυκνότητας, λεπτομέρειες από τρεις επιφάνειες αστοχίας, μία για κάθε διαφορετική μορφή με βάση το Κεφάλαιο 4. Παρατηρείται πως στην περίπτωση της τρίτης μορφής, η επιφάνεια αστοχίας εκτείνεται σε ελαφρώς μεγαλύτερο βάθος συγκριτικά με τις άλλες δύο. Στα σχήματα αυτά, τα στοιχεία του κανάβου σε μη παραμορφωμένη κατάσταση, έχουν διαστάσεις $0.01\text{m} \times 0.01\text{m}$. Συνεπώς παρατηρούμε πως στις περιπτώσεις (α) και (β) η επιφάνεια αστοχίας εκτείνεται σε απόσταση περίπου 0.02m κάτω από τον αγωγό, ενώ στην περίπτωση (γ) σε απόσταση περίπου 0.03m . Συνεπώς με τη μείωση της απόστασης d , η δυνατότητα ελεύθερης εκδήλωσης της επιφάνειας αστοχίας περιορίζεται σε μεγαλύτερο βαθμό στην περίπτωση (γ), με αποτέλεσμα της αύξηση των φορτίων επί του αγωγού.



Σχήμα 5.21: Λεπτομέρειες επιφανειών αστοχίας για αγωγό διαμέτρου $D=0.102\text{m}$ σε άμμο μέσης πυκνότητας και βάθη εγκιβωτισμού (α) $H/D=2.0$, (β) $H/D=6.5$ και (γ) $H/D=11.5$

Με βάση τα παραπάνω προτείνεται η προσέγγιση της παραμέτρου f όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.22**. Στο σχήμα αυτό, με μπλε χρώμα παρουσιάζεται η σχέση περιγραφής της παραμέτρου f στην περίπτωση της χαλαρής άμμου, ενώ με κόκκινο χρώμα η αντίστοιχη σχέση για την άμμο μέσης πυκνότητας. Τέλος, μαύρο χρώμα χρησιμοποιήθηκε για την αποτύπωση της κοινής σχέσης, ανεξαρτήτως άμμου επίχωσης, για την περιγραφή της παραμέτρου f κατόπιν της μετάβασης στην τρίτη μορφή αστοχίας ($H/D > 9.5$).



Σχήμα 5.22: Σχέσεις για την περιγραφή της παραμέτρου f , για χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας

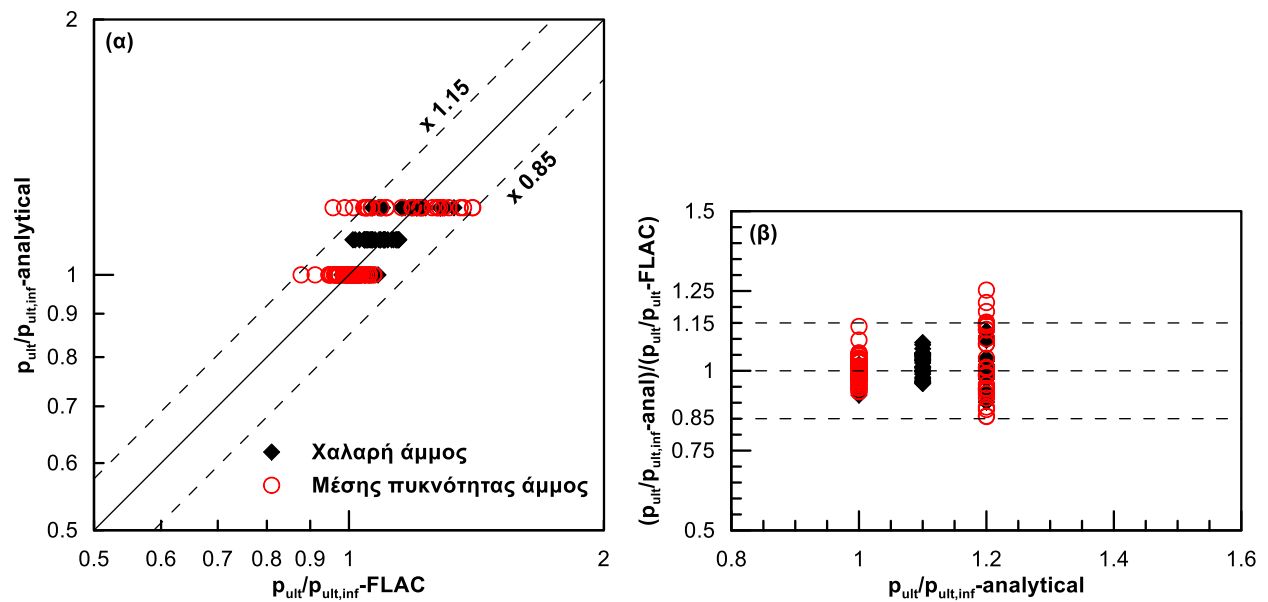
Συγκεντρωτικά, η προτεινόμενη σχέση για τον διορθωτικό συντελεστή ($\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$), για τιμές του λόγου (d/D) μικρότερες της μονάδας, παρουσιάζεται στον **Πίνακα 5.3**.

Πίνακας 5.3: Τιμές διορθωτικού συντελεστή ($\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$) για (d/D) < 1

α/α	Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Λόγος H/D	$\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$
1	χαλαρή	H/D < 9.5	1.1 ± 0.10
2	χαλαρή	H/D ≥ 9.5	1.2 ± 0.20
3	μέση	H/D < 9.5	1.0 ± 0.10
4	μέση	H/D ≥ 9.5	1.2 ± 0.20

*Για (d/D) > 1 ο διορθωτικός συντελεστής ($\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$) θα λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα.

Η σύγκριση της προτεινόμενης σχέσης υπολογισμού με τα αποτελέσματα των αναλύσεων φαίνεται στο **Σχήμα 5.23**. Στο Σχήμα 5.23α ο οριζόντιος άξονας αναφέρεται στους διορθωτικούς συντελεστές που υπολογίστηκαν από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, ενώ ο κατακόρυφος στους αντίστοιχους διορθωτικούς συντελεστές που προκύπτουν με τη χρήση της αναλυτικής σχέσης. Στο Σχήμα 5.23β παρατηρείται πως το σφάλμα της προτεινόμενης σχέσης υπολογισμού του διορθωτικού συντελεστή ($\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$) δεν ξεπερνάει το 15%, για το μεγαλύτερο μέρος των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν.

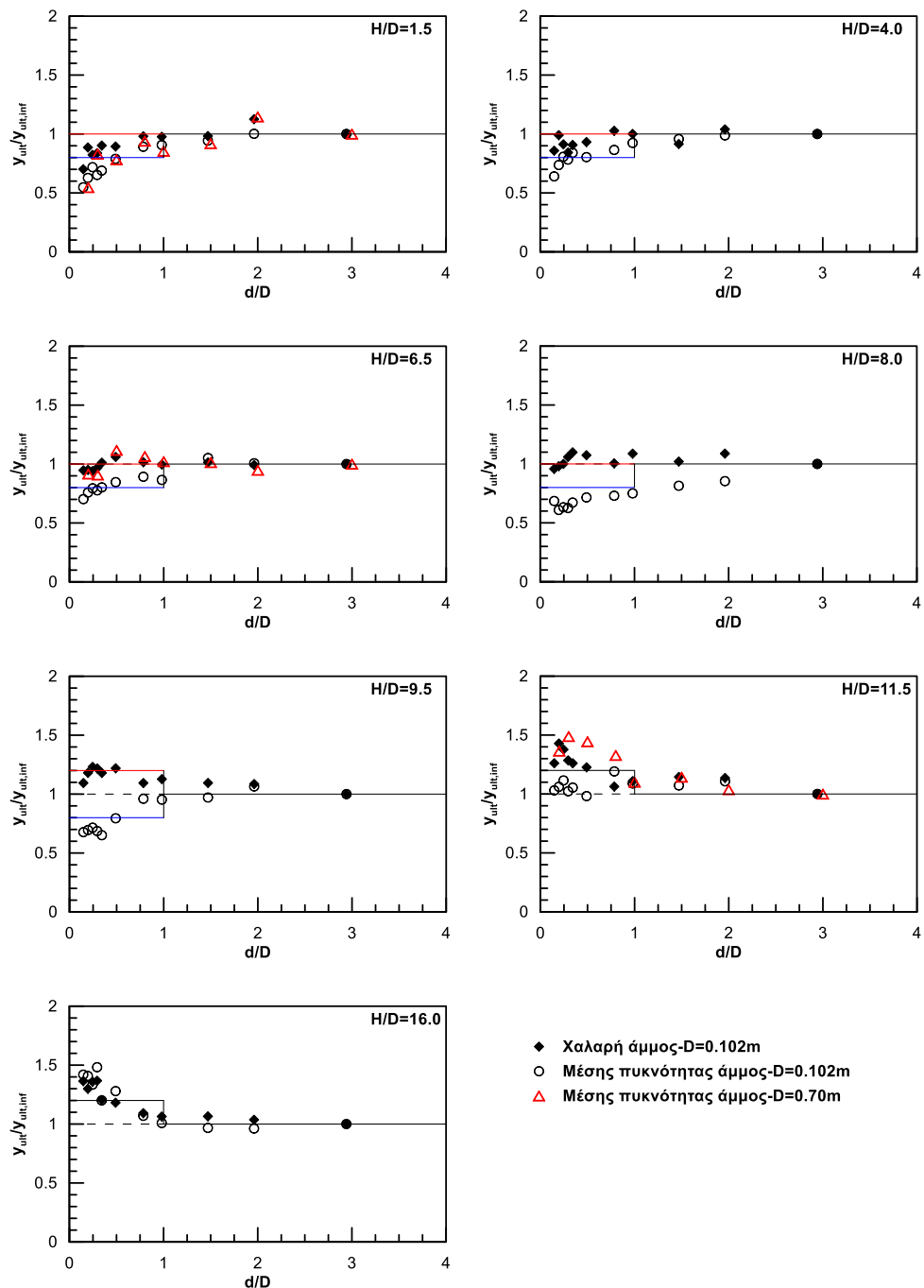


Σχήμα 5.23: Σύγκριση προτεινόμενης σχέσης υπολογισμού διορθωτικού συντελεστή με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων

Τέλος, στο **Σχήμα 5.18** παρουσιάζεται γραφικά η προτεινόμενη λύση για την περιγραφή των διορθωτικών συντελεστών ($p_{ult}/p_{ult,inf}$), σε κοινό διάγραμμα με τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι αναλυτικές σχέσεις για την περιγραφή του διορθωτικού συντελεστή για τη χαλαρή άμμο, με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι αντίστοιχες αναλυτικές σχέσεις για την άμμο μέσης πυκνότητας και τέλος με μαύρο χρώμα οι κοινές-ανεξάρτητες άμμου επίχωσης αναλυτικές σχέσεις.

5.4.2 Επίδραση στην οριακή μετατόπιση (γ_{ult})

Οι διάφορες τιμές του λόγου ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) στο οποίο παρουσιάζεται το εκάστοτε μέγιστο φορτίο επί του αγωγού, για το σύνολο των παραμετρικών αναλύσεων μείωσης της απόστασης d παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.24**.



Σχήμα 5.24: Επίδραση μείωσης της απόστασης d στην οριακή μετατόπιση (γ_{ult})

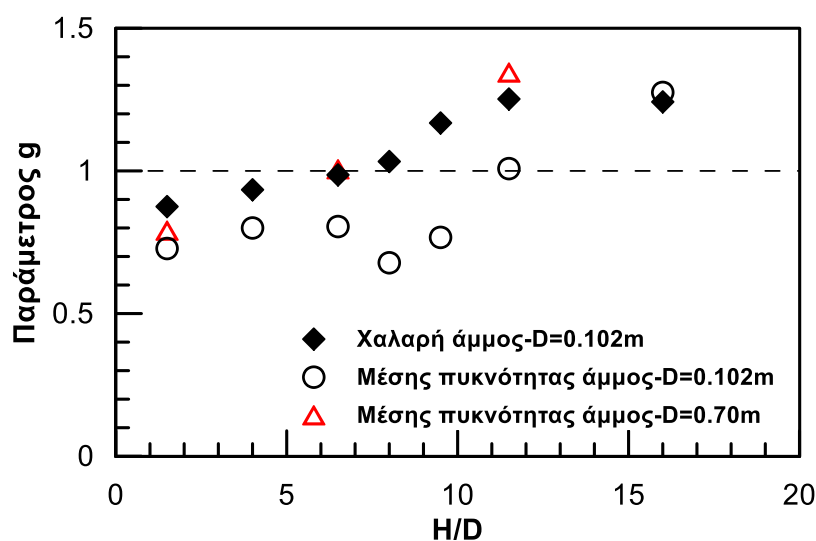
Στο Σχήμα 5.24, η μετατόπιση (γ_{ult}) δίδεται σε αδιαστατοποιημένη μορφή ως προς τον όρο $\gamma_{ult,inf}$, ο οποίος εκφράζει τη μετατόπιση στην οποία εμφανίζεται το μέγιστο φορτίο επί

αγωγού εγκιβωτισμένου στο ελεύθερο πεδίο. Ο όρος ($\gamma_{ult,inf}$) εξαρτάται από την πυκνότητα της άμμου επίχωσης και το εκάστοτε βάθος εγκιβωτισμού που εξετάζεται. Με τον τρόπο αυτό η σύγκριση των αποτελεσμάτων είναι ευχερέστερη. Η απόσταση d μεταξύ του κατώτατου ορίου του αγωγού και του οριζώντιου συνόρου της τάφρου δίνεται επίσης σε αδιαστατοποιημένη μορφή, ως προς τη διάμετρο του αγωγού D , προς διευκόλυνση της σύγκρισης των αποτελεσμάτων μεταξύ των αγωγών διαμέτρων $D=0.102\text{m}$ και $D=0.70\text{m}$.

Βασική παρατήρηση σχετικά με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.24, είναι πως οι διορθωτικοί συντελεστές ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) τείνουν να σταθεροποιηθούν στη μονάδα για τιμές του λόγου d/D μεγαλύτερες του 1.0, αντίστοιχα με την περίπτωση του οριακού φορτίου. Συνεπώς θεωρείται πως για τιμές του όρου d/D μεγαλύτερες της μονάδας, η επίδραση στο γ_{ult} είναι μηδενική, επομένως ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$)=1.0. Κατά αντιστοιχία με την επίδραση στο οριακό φορτίο, η τιμή του όρου $(d/D)_{crit}$ λαμβάνεται ίση με τη μονάδα. Έτσι, η προτεινόμενη σχέση για την περιγραφή του διορθωτικού συντελεστή ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$), όταν $d/D < 1.0$ έχει την παρακάτω μορφή:

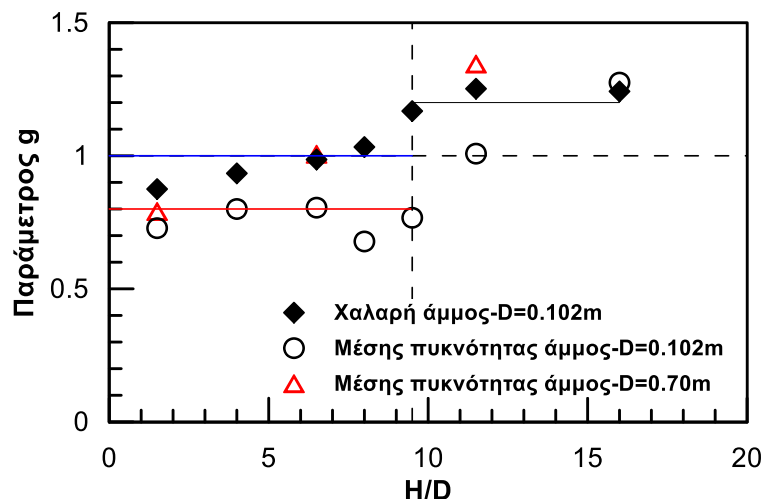
$$\frac{\gamma_{ult}}{\gamma_{ult,inf}} = g, \quad d/D < 1.0, \quad (5.13)$$

Για την περιγραφή του συντελεστή g ακολουθείται αντίστοιχη μεθοδολογία με αυτή του κεφαλαίου 5.4.1. Αρχικά υπολογίζονται οι μέσοι όροι των τιμών των διορθωτικών συντελεστών για το εκάστοτε βάθος εγκιβωτισμού. Οι τιμές που προκύπτουν παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.25**. Ο συντελεστής g θα προκύπτει με βάση την αναλυτική σχέση περιγραφής των αποτελεσμάτων του σχήματος αυτού.



Σχήμα 5.25: Μέσοι όροι διορθωτικών συντελεστών, για τα διάφορα βάθη εγκιβωτισμού και $d/D < 1.0$

Παρόμοια με το οριακό φορτίο, παρατηρούνται δύο ζώνες επιρροής για την χαλαρή και για την άμμο μέσης πυκνότητας. Η πρώτη αφορά βάθη $H/D < 9.5$ (Αστοχία τύπου I και II) και η δεύτερη βάθη $H/D > 9.5$ (Αστοχία τύπου III). Ως εκ τούτου, για άμμο μέσης πυκνότητας και βάθη εγκιβωτισμού μικρότερα του 9.5, μπορεί να υιοθετηθεί σταθερή τιμή του συντελεστή ίση με 0.8. Αντίστοιχα, όσον αφορά τη χαλαρή άμμο, οι τιμές των διορθωτικών συντελεστών παρουσιάζουν μικρή διακύμανση μεταξύ των τιμών 0.9 και 1.1, ωστόσο μπορούν να περιγραφούν ικανοποιητικά από την ευθεία $(\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf})=1.0$. Όπως και στην περίπτωση του οριακού φορτίου, η επίδραση της πυκνότητας της άμμου επίχωσης στους διορθωτικούς συντελεστές δείχνει να εξαφανίζεται με τη μετάβαση στην τρίτη μορφή αστοχίας ($H/D > 9.5$). Για τα μεγάλα αυτά βάθη εγκιβωτισμού ($H/D > 9.5$), οι μέσοι όροι των διορθωτικών συντελεστών $(\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf})$ σταθεροποιούνται κοντά στην τιμή 1.2. Με βάση τα παραπάνω μπορούμε πλέον να αποτυπώσουμε τις σχέσεις υπολογισμού του συντελεστή g , οι οποίες φαίνονται στο **Σχήμα 5.26**.



Σχήμα 5.26: Σχέσεις υπολογισμού του συντελεστή g

Άξια σχολιασμού είναι η συστηματική εμφάνιση διορθωτικών συντελεστών με τιμές μικρότερες της μονάδας, κυρίως για την περίπτωση της άμμου μέσης πυκνότητας. Η πρακτική σημασία του φαινομένου αυτού, είναι πως καθώς η απόσταση d ελαττώνεται, η απαίτηση σε φορτίο για την πραγματοποίηση της ίδιας μετατόπισης αυξάνεται. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει πως η φαινομενική δυσκαμψία του εδάφους αυξάνεται καθώς το d/D μειώνεται. Μια πιθανή εξήγηση για το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποτελέσει το γεγονός πως καθώς η απόσταση d μειώνεται η επίδραση του περιβάλλοντος, εκτός τάφρου επίχωσης, σκληρού εδάφους αυξάνεται και δυσχεραίνει την μετατόπιση του αγωγού.

Ένα ακόμη σημείο άξιο αναφοράς είναι πως στην περίπτωση της άμμου μέσης πυκνότητας για λόγο εγκιβωτισμού $H/D=9.5$, η παράμετρος g παραμένει σχεδόν ίση με την τιμή 0.8 και

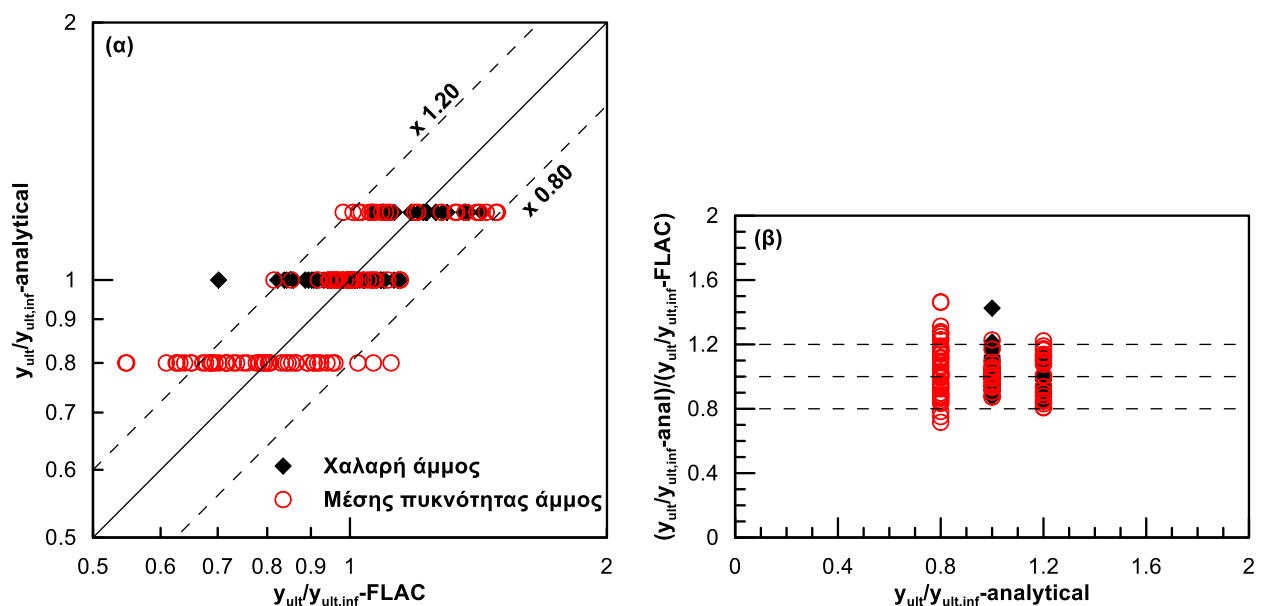
δεν παρουσιάζει την αναμενόμενη αύξηση στο 1.2 που συνεπάγεται της μετάβασης στην αστοχία τρίτου τύπου. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να εξηγηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό εάν αναλογιστεί κανείς πως το εν λόγω βάθος εγκιβωτισμού βρίσκεται ιδιαίτερα κοντά στο σημείο μετάβασης από την αστοχία τύπου II στην αστοχία τύπου III. Με βάση όλα τα παραπάνω παρουσιάζεται ο Πίνακας 5.4 για τον υπολογισμό του διορθωτικού συντελεστή ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) της οριακής μετατόπισης.

Πίνακας 5.4: Τιμές του διορθωτικού συντελεστή ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) για $d/D < 1.0$

α/α	Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Λόγος H/D	Τιμή παραμέτρου g
1	χαλαρή	$H/D < 9.5$	1.0
2	χαλαρή	$H/D \geq 9.5$	1.2
3	μέση	$H/D \leq 9.5$	0.8
4	μέση	$H/D > 9.5$	1.2

*Για $(d/D) \geq 1.0$, ο διορθωτικός συντελεστής ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) θα λαμβάνεται ίσος με την μονάδα.

Στο Σχήμα 5.27 παρουσιάζεται η σύγκριση της προτεινόμενης σχέσης υπολογισμού για τους διορθωτικούς συντελεστές ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$), με τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Στο σχήμα (α) ο οριζόντιος άξονας αναφέρεται στους διορθωτικούς συντελεστές που υπολογίστηκαν από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, ενώ ο κατακόρυφος άξονας στους αντίστοιχους διορθωτικούς συντελεστές που προκύπτουν με τη χρήση της αναλυτικής σχέσης. Στο σχήμα (β) παρουσιάζεται το σφάλμα της προτεινόμενης σχέσης υπολογισμού του διορθωτικού συντελεστή, το οποίο δεν ξεπερνάει το 20% για το μεγαλύτερο μέρος των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν.



Σχήμα 5.27: Σύγκριση προτεινόμενης σχέσης υπολογισμού με αποτελέσματα αναλύσεων

Τέλος, στο **Σχήμα 5.24** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά το σύνολο των αποτελεσμάτων των διορθωτικών συντελεστών για το γ_{ult} καθώς και οι προτεινόμενες σχέσεις υπολογισμού των συντελεστών αυτών. Οι ευθείες με κόκκινο χρώμα περιγράφουν την περίπτωση άμμου μέσης πυκνότητας, οι ευθείες μπλε χρώματος την περίπτωση χαλαρής άμμου και τέλος οι ευθείες μαύρου χρώματος τις περιπτώσεις όπου δεν υφίσταται επιρροή λόγω της άμμου επίχωσης.

5.5 Συμπεράσματα

5.5.1 Επίδραση του πλάτους της τάφρου (x) στο οριακό φορτίο (p_{ult})

- Υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του λόγου (x/D), την οποία καλούμε $(x/D)_{crit}$, πέρα από την οποία η επίδραση του κατακόρυφου συνόρου της τάφρου εγκιβωτισμού στο λόγο ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) είναι αμελητέα. Για τιμές του x/D μεγαλύτερες από την κρίσιμη αυτή τιμή, το κατακόρυφο σύνορο της τάφρου εμποδίζει την ελεύθερη εκδήλωση του μηχανισμού αστοχίας της άμμου επίχωσης, οδηγώντας σε αύξηση του παραπάνω λόγου.
- Οι τιμές της κρίσιμης απόστασης $(x/D)_{crit}$ είναι ίσες με 4.0 για άμμο μέσης πυκνότητας και 5.0 για χαλαρή άμμο, ανεξαρτήτως της διαμέτρου του αγωγού.
- Για χαλαρή άμμο, οι τιμές του λόγου ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) για κάθε x/D αρχικά μειώνονται με το βάθος, όσο ο λόγος H/D σχετίζεται με μορφή αστοχίας τύπου I. Για λόγο εγκιβωτισμού $H/D \geq 6.5$, οι τιμές του λόγου αυτού σταθεροποιούνται. Η οριακή αυτή τιμή του λόγου εγκιβωτισμού H/D αντιστοιχεί στην μετάβαση του μηχανισμού αστοχίας από τύπου I σε τύπου II.
- Για άμμο μέσης πυκνότητας, οι τιμές του λόγου ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) για κάθε x/D αρχικά μειώνονται με το βάθος, όσο ο λόγος H/D σχετίζεται με μορφή αστοχίας τύπου I και τύπου II. Για λόγο εγκιβωτισμού $H/D \geq 9.5$, ο λόγος ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) έχει σταθερή τιμή. Η οριακή αυτή τιμή του λόγου εγκιβωτισμού H/D αντιστοιχεί στην μετάβαση του μηχανισμού αστοχίας από τύπου II σε τύπου III.
- Η εκτίμηση των τιμών του διορθωτικού συντελεστή ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) και για τα δύο είδη άμμου επίχωσης (χαλαρή, μέση) μπορεί να γίνει αναλυτικά με μια σχέση της μορφής:

$$\frac{p_{ult}}{p_{ult,inf}} = \left\{ \begin{array}{ll} \left[\frac{(x/D)_{crit}}{(x/D)} \right]^a, & x/D < (x/D)_{crit} \\ 1.0, & x/D \geq (x/D)_{crit} \end{array} \right\}, \quad (5.14)$$

όπου ο συντελεστής a προσδιορίζεται από την σχέση:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{res} + [(H/D)_{crit} - (H/D)] \cdot \beta, & H/D < (H/D)_{crit} \\ \alpha_{res}, & H/D \geq (H/D)_{crit} \end{cases}, \quad (5.15)$$

Οι διάφορες τιμές των παραμέτρων συναρτήσει της άμμου επίχωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5: Βασικές παράμετροι αναλυτικής σχέσης για τον διορθωτικό συντελεστή ($\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$) του οριακού φορτίου

Παράμετρος	$(x/D)_{crit}$	$(H/D)_{crit}$	α_{res}	β
Χαλαρή άμμος	5.0	6.5	0.48	0.12
Μέσης πυκνότητας άμμος	4.0	9.5	0.48	0.12

- Η σταθεροποίηση των τιμών του λόγου ($\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$) για λόγο $H/D \geq 6.5$ για χαλαρή άμμο και $H/D \geq 9.5$ για άμμο μέσης πυκνότητας αντανάκλαται και στις τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής α , με σταθερή τιμή α_{res} κοινή και για τις δύο πυκνότητας άμμου επίχωσης.

5.5.2 Επίδραση του πλάτους της τάφρου (x) στην οριακή μετατόπιση (y_{ult})

- Η κρίσιμη τιμή $(x/D)_{crit}$ λαμβάνει ακριβώς τις ίδιες τιμές με αυτές που προσδιορίστηκαν για την επίδραση του συνόρου στο οριακό φορτίο για χαλαρή άμμο και για άμμο μέσης πυκνότητας.
- Τόσο για άμμο μέσης πυκνότητας όσο και για χαλαρή άμμο επίχωσης, παρατηρείται επανάληψη του φαινομένου που επισημάνθηκε στο οριακό φορτίο, κατά το οποίο οι τιμές του λόγου ($y_{ult}/y_{ult,inf}$) σταθεροποιούνται για λόγο $H/D \geq 6.5$ και $H/D \geq 9.5$ για χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας, αντίστοιχα.
- Η προσέγγιση των αριθμητικών τιμών του λόγου ($y_{ult}/y_{ult,inf}$) και για τα δύο είδη άμμου επίχωσης γίνεται αναλυτικά μέσω της σχέσης:

$$\frac{y_{ult}}{y_{ult,inf}} = \begin{cases} c, & x/D < (x/D)_{crit} \\ 1.0, & x/D \geq (x/D)_{crit} \end{cases}, \quad (5.16)$$

όπου η σταθερά c προσδιορίζεται ως εξής:

$$c = \begin{cases} c_{res} + [(H/D)_{crit} - (H/D)] \cdot \delta, & H/D < (H/D)_{crit} \\ c_{res}, & H/D \geq (H/D)_{crit} \end{cases}, \quad (5.17)$$

Οι διάφορες τιμές των παραμέτρων για τον υπολογισμό της αναλυτικής σχέσης συναρτήση της άμμου επίχωσης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.6**.

Πίνακας 5.6: Βασικές παράμετροι αναλυτικής σχέσης για τον διορθωτικό συντελεστή ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) της οριακής μετατόπισης

Παράμετρος	$(x/D)_{crit}$	$(H/D)_{crit}$	c_{res}	δ
Χαλαρή άμμος	5.0	6.5	0.9	0.24
Μέσης πυκνότητας άμμος	4.0	9.5	0.9	0.24

- Η σταθεροποίηση των τιμών του λόγου ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) για λόγο $H/D \geq 6.5$ για χαλαρή άμμο και $H/D \geq 9.5$ για άμμο μέσης πυκνότητας αντανακλάται και στις τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής c , με σταθερή τιμή c_{res} κοινή και για τις δύο πυκνότητας άμμους επίχωσης.

5.5.3 Επίδραση της απόστασης του αγωγού από το κάτω όριο της τάφρου (d) στο οριακό φορτίο (p_{ult})

- Παρατηρείται η ύπαρξη μιας κρίσιμης τιμής του λόγου (d/D), την οποία καλούμε $(d/D)_{crit}$, κατόπιν της οποίας η επίδραση της περαιτέρω ελάττωσης του d δεν παρέχει διαφοροποίηση στο οριακό φορτίο επί του αγωγού. Η τιμή αυτή του λόγου (d/D) είναι κοινή για χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας και ίση με τη μονάδα.
- Για χαλαρή άμμο, οι μέσοι όροι των τιμών του διορθωτικού συντελεστή ($p_{ult}/p_{ult,inf}$) για $d/D < 1.0$ δείχνουν να σταθεροποιούνται κοντά στην τιμή 1.1 για λόγους εγκιβωτισμού $H/D < 9.5$. Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι στην περίπτωση της άμμου μέσης πυκνότητας παραμένουν σταθεροί κοντά στην τιμή 1.0. Για βάθη εγκιβωτισμού μεγαλύτερα του $H/D=9.5$ παρατηρείται απότομη αύξηση του μέσου όρου των διορθωτικών συντελεστών και σταθεροποίηση τους κοντά στην τιμή 1.2. Το φαινόμενο αυτό, το οποίο παρουσιάζεται με τη μετάβαση από την αστοχία τύπου II στην αστοχία τύπου III, μπορεί να εξηγηθεί επαρκώς μέσω της διαφοροποίησης των επιφανειών αστοχίας των δύο αυτών τύπων.
- Για τον υπολογισμό του διορθωτικού συντελεστή $p_{ult}/p_{ult,inf}$, προτείνεται η χρήση του παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 5.7**) για τιμές του λόγου (d/D) μικρότερες της μονάδας.

Πίνακας 5.7: Τιμές διορθωτικού συντελεστή ($\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$) για $(d/D) < 1.0$

α/α	Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Λόγος H/D	$\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$
1	χαλαρή	$H/D < 9.5$	1.1 ± 0.10
2	χαλαρή	$H/D \geq 9.5$	1.2 ± 0.20
3	μέση	$H/D < 9.5$	1.0 ± 0.10
4	μέση	$H/D \geq 9.5$	1.2 ± 0.20

*Για τιμές του λόγου (d/D) μεγαλύτερες της μονάδας ο διορθωτικός συντελεστής ($\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$) θα λαμβάνεται ίσος με 1.0.

5.5.4 Επίδραση της απόστασης του αγωγού από το κάτω όριο της τάφρου (d) στην οριακή μετατόπιση (γ_{ult})

- Παρατηρείται και εδώ η ύπαρξη κρίσιμης τιμής για το λόγο (d/D) , η οποία ονομάζεται $(d/D)_{crit}$. Για τιμές του λόγου (d/D) μεγαλύτερες της οριακής αυτής τιμής η επίδραση στην μετατόπιση γ_{ult} είναι αμελητέα.
- Στην περίπτωση της χαλαρής άμμου για τιμές του λόγου (d/D) μικρότερες της μονάδας και βάθη εγκιβωτισμού μικρότερα του $H/D=9.5$, οι μέσοι όροι των διορθωτικών συντελεστών ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) βρίσκονται κοντά στην τιμή 1.1. Οι αντίστοιχοι μέσοι όροι για την περίπτωση της άμμου μέσης πυκνότητας ακολουθούν την τιμή 0.8. Για τιμές του H/D μεγαλύτερες του 9.5 και συνεπώς μετάβαση στην αστοχία τρίτου τύπου, παρατηρείται σταθεροποίηση των μέσων όρων των διορθωτικών συντελεστών ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) κοντά στην τιμή 1.2. Η συμπεριφορά αυτή ακολουθεί τις αντίστοιχες παρατηρήσεις σχετικά με την επίδραση στο μέγιστο φορτίο.
- Για τον υπολογισμό του διορθωτικού συντελεστή $\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$, προτείνεται η χρήση του παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 5.8**) για τιμές του λόγου (d/D) μικρότερες της μονάδας.

Πίνακας 5.8: Τιμές διορθωτικού συντελεστή ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) για $(d/D) < 1.0$

α/α	Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Λόγος H/D	$\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$
1	χαλαρή	$H/D < 9.5$	1.0
2	χαλαρή	$H/D \geq 9.5$	1.2
3	μέση	$H/D \leq 9.5$	0.8
4	μέση	$H/D > 9.5$	1.2

*Για τιμές του λόγου (d/D) μεγαλύτερες της μονάδας ο διορθωτικός συντελεστής ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) θα λαμβάνεται ίσος με 1.0.

6

Επίδραση στις Παραμορφώσεις Αγωγού

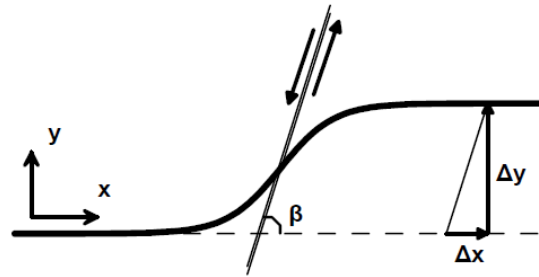
6.1 Γενικά

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, διαπιστώθηκε η σημαντική επίδραση των διαστάσεων της τάφρου και ειδικά του πλάτους, στην μέγιστη δύναμη που αναπτύσσεται επί του αγωγού κατά την οριζόντια μετατόπισή του. Στο παρόν κεφάλαιο, εξετάζεται κατά πόσο το πλάτος της τάφρου έχει το ίδιο αντίκτυπο στις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στον αγωγό, που είναι και το κυρίαρχο μέγεθος κατά τον σχεδιασμό του. Αίτιο της μετατόπιση του αγωγού θα θεωρηθεί ρήγμα οριζόντιας διάρρηξης, το ίχνος του οποίου θα τέμνει τον άξονα του αγωγού κάθετα ή υπό γωνία 45° . Θα εξεταστούν διάφορες περιπτώσεις πλάτους της τάφρου, μετακίνησης του ρήγματος καθώς και λόγου εγκιβωτισμού H/D . Κάθε ανάλυση θα πραγματοποιηθεί για αγωγό διαμέτρου $D=0.102\text{m}$ εγκιβωτισμένο σε άμμο μέσης πυκνότητας και χαλαρή άμμο. Οι αναλύσεις θα εκτελεστούν με την αναλυτική μεθοδολογία των **Karamitros et al. (2007)**, η οποία θα περιγραφεί συνοπτικά παρακάτω.

6.2 Αναλυτική μεθοδολογία Karamitros et al. (2007)

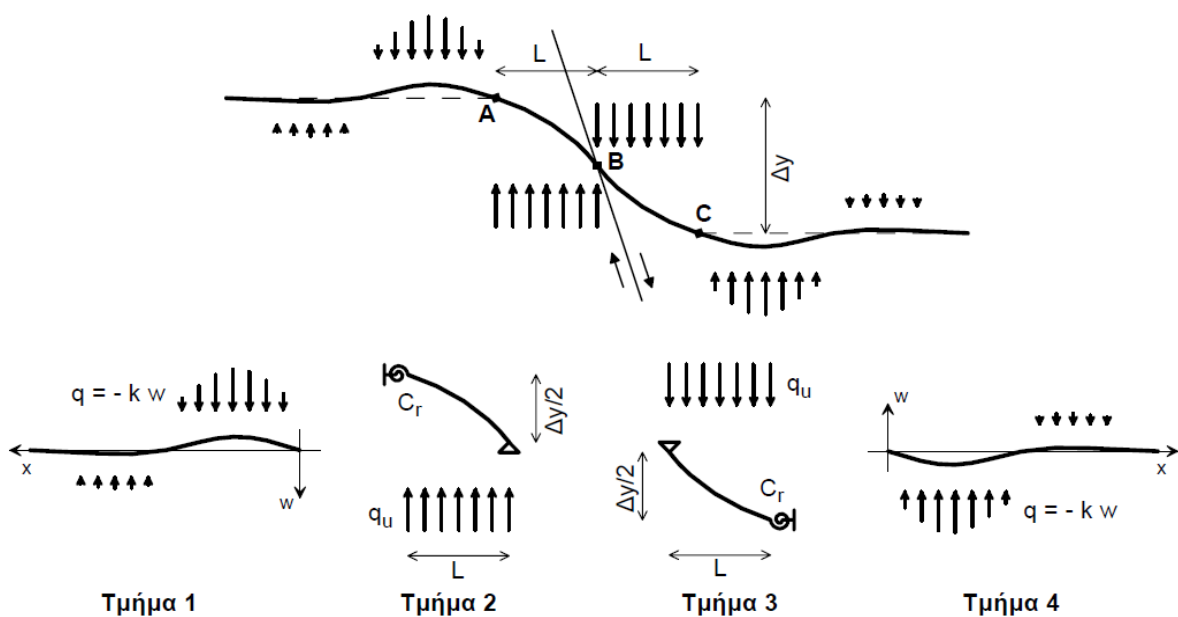
Η μεθοδολογία βασίζεται στον αναλυτικό υπολογισμό της έντασης στον αγωγό σύμφωνα με τη θεωρία ελαστικής δοκού, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την αλληλεπίδραση εδάφους-αγωγού κατά την αξονική και τις εγκάρσιες διευθύνσεις, όσο και την καμπτική δυσκαμψία της διατομής. Η αναλυτική λύση επεκτείνεται για να καλύψει τις περιπτώσεις όπου οι μέγιστες παραμορφώσεις ξεπερνούν το όριο διαρροής του χάλυβα του αγωγού, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας υπολογισμού του τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας.

Το ρήγμα θεωρείται επίπεδο, με μηδενικό πάχος ζώνης διάρρηξης, έτσι ώστε η τομή του ίχνους του με τον αγωγό να μπορεί να θεωρηθεί σημειακή. Οι μετατοπίσεις του ρήγματος ορίζονται στο ορθογώνιο σύστημα αξόνων x και y , όπου ο άξονας x είναι παράλληλος προς τον οριζόντιο άξονα του αγωγού και ο άξονας y είναι οριζόντιος και κάθετος προς τον x (**Σχήμα 6.1**). Με βάση τη γωνία β που σχηματίζει το ίχνος του εξεταζόμενου ρήγματος με τον άξονα x , μπορούμε να αναλύσουμε γεωμετρικά τη μετατόπιση σε Δx και Δy , όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Ορισμός των αξόνων x και y και των μετατοπίσεων Δx και Δy

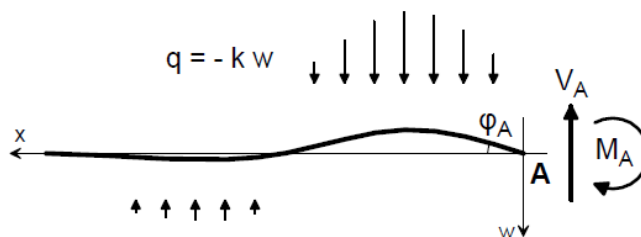
Η μεθοδολογία βασίζεται στη διακριτοποίηση του αγωγού σε 4 τμήματα, με βάση τα σημεία A, B και C, τα οποία ορίζονται ως εξής (**Σχήμα 6.2**): Το σημείο B είναι το σημείο τομής του αγωγού με το επίπεδο του ρήγματος, ενώ τα σημεία A και C είναι τα πρώτα σημεία που συναντώνται εκατέρωθεν του ρήγματος και καθώς απομακρυνόμαστε από αυτό, τα οποία δε μετατοπίζονται κατά τον άξονα y .



Σχήμα 6.2: Διακριτοποίηση του αγωγού σε 4 βασικά τμήματα

Ανάλυση των τμημάτων 1 και 4

Τα τμήματα 1 (από το $-\infty$ έως το A) και 4 (από το C έως το $+\infty$) αναλύονται σύμφωνα με τη θεωρία ελαστικής δοκού επί συνεχών γραμμικών ελατηριωτών στηρίξεων (**Σχήμα 6.3**).

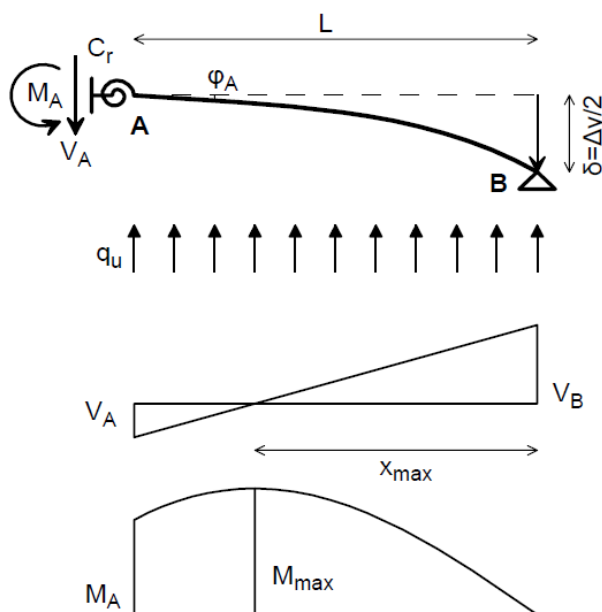


Σχήμα 6.3: Ανάλυση του τμήματος 1, με τη θεωρία ελαστικής δοκού επί ελατηριωτών στηρίξεων

Η επίλυση του παραπάνω τμήματος (λύνοντας την δ.ε που διέπει το πρόβλημα) προσδιορίζει τις αντιδράσεις στήριξης στο σημείο A. Λόγω συμμετρίας, οι αντιδράσεις αυτές αντιστοιχούν σε εκείνες που αναπτύσσονται και στο σημείο C.

Ανάλυση των τμημάτων 2 και 3

Τα τμήματα 2 και 3 αναλύονται σύμφωνα με τη θεωρία ελαστικής δοκού. Λόγω συμμετρίας, η ανάλυση μπορεί να περιοριστεί στο τμήμα 2, δηλαδή στη δοκό AB. Η δοκός στηρίζεται στη θέση A με ένα στροφικό ελατήριο και στη θέση B με μία άρθρωση που υποχωρεί κατά τη μισή, εγκάρσια συνιστώσα της μετατόπισης του ρήγματος. Στη δοκό επιβάλλεται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο, ίσο με την οριακή τιμή της εδαφικής αντίστασης για εγκάρσια οριζόντια σχετική μετατόπιση του αγωγού, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.4**.



Σχήμα 6.4: Ανάλυση του τμήματος 2 με τη θεωρία της ελαστικής δοκού

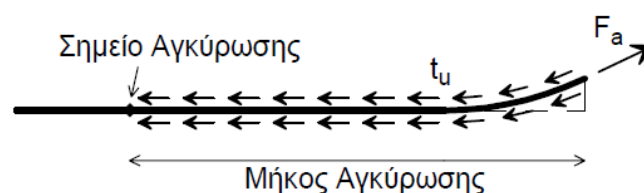
Από τη στατική επίλυση της δοκού, προσδιορίζονται το μήκος L της δοκού AB που ήταν άγνωστο και η κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών επί αυτής. Ακόμη, υπολογίζονται οι καμπτικές παραμορφώσεις στην διατομή μέγιστης καταπόνησης του αγωγού σύμφωνα με την θεωρία ελαστικότητας.

Στην παραπάνω θεώρηση, δε λαμβάνεται υπόψη η γεωμετρική μη γραμμικότητα που προκύπτει λόγω της εφελκυστικής παραμόρφωσης του αγωγού. Αυτό περιορίζει το εύρος εφαρμογής της μεθοδολογίας στις περιπτώσεις όπου η αξονική εφελκυστική παραμόρφωση δεν ξεπερνά το όριο διαρροής, έτσι ώστε κύρια μορφή παραμόρφωσης να είναι η καμπτική. Η προϋπόθεση αυτή πάντως πληρείται για συνήθη ρήγματα, των οποίων οι μετακινήσεις είναι αρκετά μικρές ώστε οι παραμορφώσεις στον αγωγό να είναι της τάξης μεγέθους της επιτρεπόμενης εφελκυστικής παραμόρφωσης στις περιμετρικές συγκολλήσεις (0.5%, σύμφωνα με ASCE, 1984).

Υπολογισμός Αξονικών Παραμορφώσεων

Οι αξονικές παραμορφώσεις υπολογίζονται από την απαίτηση συμβιβαστού απαιτούμενης και διαθέσιμης επιμήκυνσης. Ως γεωμετρικά απαιτούμενη επιμήκυνση ΔL_{req} ορίζεται η επιμήκυνση που προκαλείται στον αγωγό λόγω της μετατόπισης του ρήγματος.

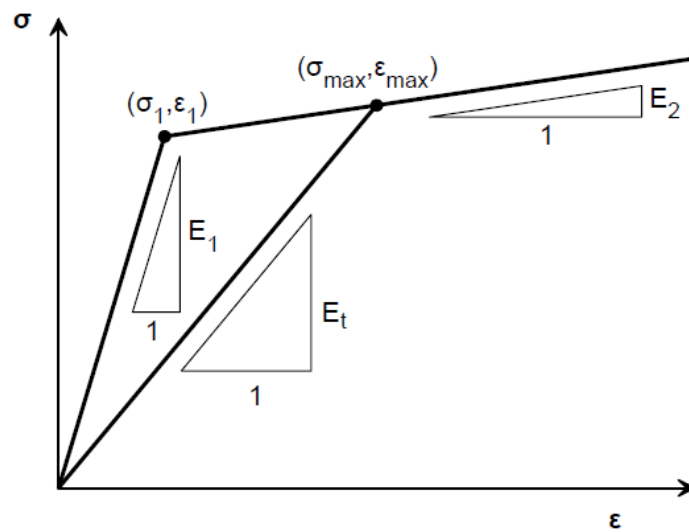
Ως διαθέσιμη επιμήκυνση ΔL_{av} ορίζεται η επιμήκυνση που προκύπτει με ολοκλήρωση των αξονικών ανηγμένων παραμορφώσεων σε όλο το μήκος αγκύρωσης, εκατέρωθεν του ρήγματος (**Σχήμα 6.5**). Το μήκος αγκύρωσης προκύπτει συναρτήσει της αξονικής δύναμης που αναπτύσσεται στο σημείο τομής του αγωγού με το επίπεδο του ρήγματος και της οριακής τριβής λόγω σχετικής ολίσθησης του αγωγού ως προς το έδαφος.



Σχήμα 6.5: Ορισμός του μήκους αγκύρωσης

Στη διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω, δεν έχει ληφθεί υπόψη η μη-γραμμική συμπεριφορά του χάλυβα του αγωγού.

Η μη-γραμμικότητα του υλικού εισάγεται στη λύση μέσω μιας διαδικασίας αναπροσαρμογής του τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας και επανάληψης των υπολογισμών ψευδοελαστικά, με το νέο μειωμένο μέτρο (μέχρι αυτό να συγκλίνει σε μία τελική τιμή) (**Σχήμα 6.6**).



Σχήμα 6.6: Διαδικασία υπολογισμού του αναπροσαρμοσμένου τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας

6.3 Παραμετρικές Αναλύσεις και Αποτελέσματα

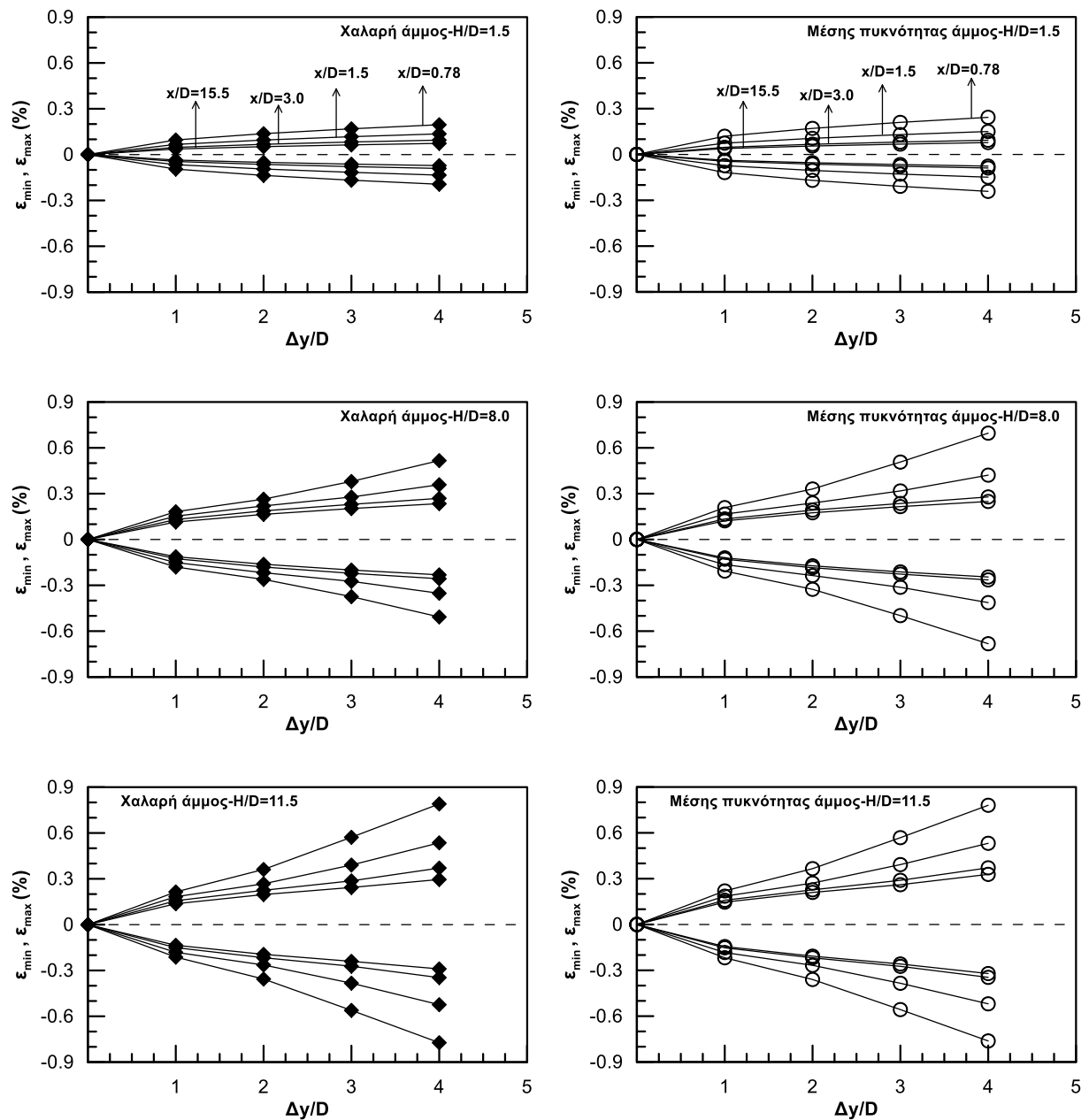
Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για αγωγό διαμέτρου $D=0.102\text{m}$ εγκιβωτισμένο σε χαλαρή άμμο καθώς και σε άμμο μέσης πυκνότητας. Οι παράμετροι των ελατηρίων (ρ_{ult} , γ_{ult}) που προσομοιώνουν τις εδαφικές αντιδράσεις επί του αγωγού υπολογίσθηκαν με βάση τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν στο **Κεφάλαιο 2**, για σχεδιασμό αγωγού επί ελατηριωτού εδάφους. Όσον αφορά τα οριζόντια ελατήρια, χρησιμοποιήθηκαν διορθωτικοί συντελεστές τόσο για το οριακό φορτίο (ρ_{ult}) όσο και για την οριακή μετατόπιση (γ_{ult}), σύμφωνα με τις σχέσεις που εξήχθησαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι λοιπές παράμετροι των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6.1**.

Για κάθε ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, προσδιορίστηκε η μέγιστη (ϵ_{max}) και η ελάχιστη (ϵ_{min}) τιμή της συνολικής παραμόρφωσης του αγωγού, η οποία προκύπτει ως το αλγεβρικό άθροισμα των αξονικών και των καμπτικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται επί αυτού. Στο **Σχήμα 6.7** και στο **Σχήμα 6.8** παρουσιάζονται οι παραπάνω παραμορφώσεις για γωνία του ίχνους του ρήγματος με τον αγωγό (γωνία β) ίση με 0° (κάθετο ρήγμα προς τον αγωγό) και 45° , αντίστοιχα.

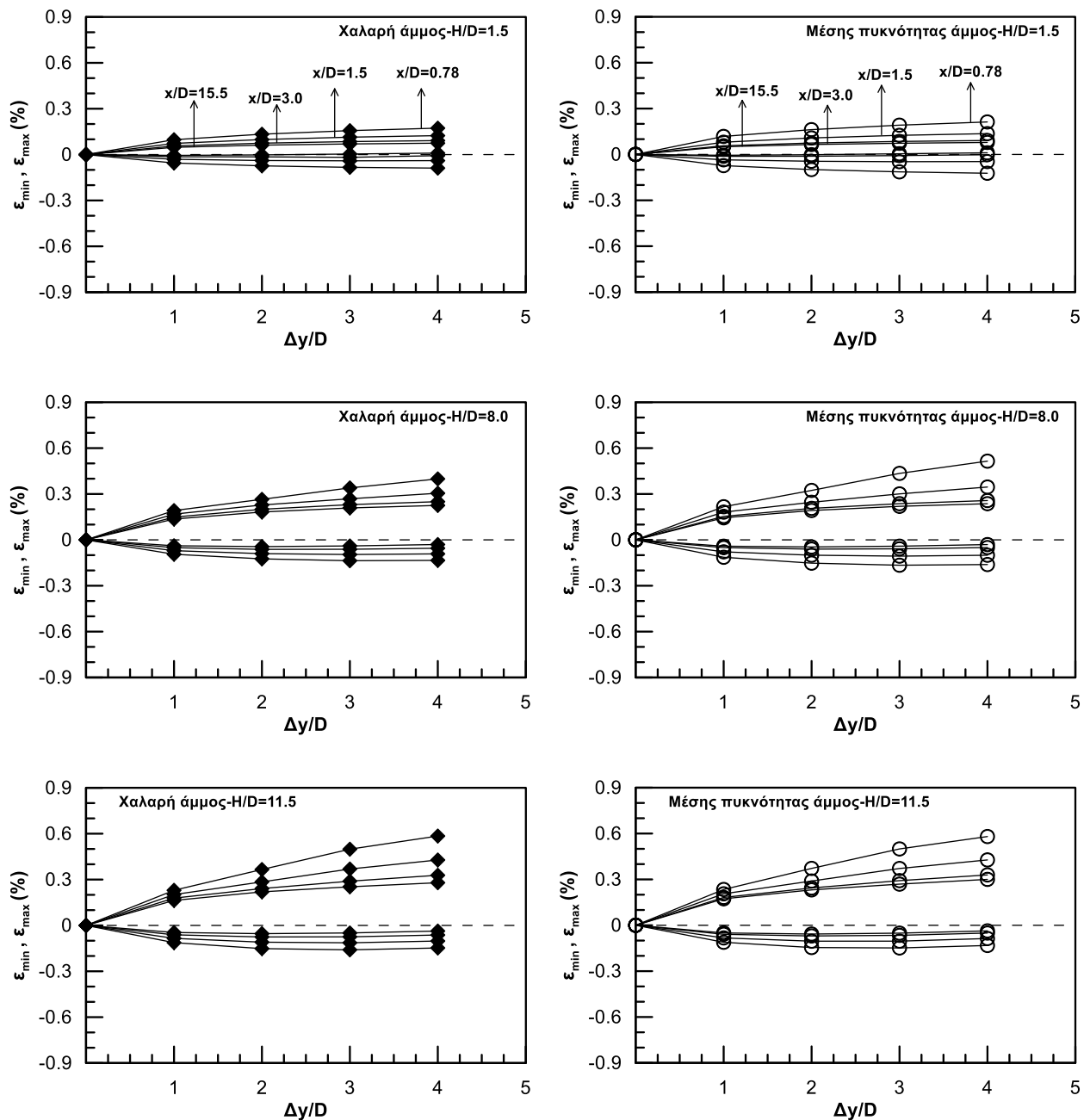
Πίνακας 6.1: Σύνοψη Παραμετρικών Αναλύσεων

α/α	Διάμετρος αγωγού (D) (m)	Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Γωνία β* (μοίρες)	Λόγος H/D	Απόσταση x/D	Μετακίνηση Δy/D
1	0.102	χαλαρή, μέση	0, 45	1.5	15.5	0÷4
2	0.102	χαλαρή, μέση	0, 45	1.5	3.0	0÷4
3	0.102	χαλαρή, μέση	0, 45	1.5	1.5	0÷4
4	0.102	χαλαρή, μέση	0, 45	1.5	0.78	0÷4
5	0.102	χαλαρή, μέση	0, 45	8.0	15.5	0÷4
6	0.102	χαλαρή, μέση	0, 45	8.0	3.0	0÷4
7	0.102	χαλαρή, μέση	0, 45	8.0	1.5	0÷4
8	0.102	χαλαρή, μέση	0, 45	8.0	0.78	0÷4
9	0.102	χαλαρή, μέση	0, 45	11.5	15.5	0÷4
10	0.102	χαλαρή, μέση	0, 45	11.5	3.0	0÷4
11	0.102	χαλαρή, μέση	0, 45	11.5	1.5	0÷4
12	0.102	χαλαρή, μέση	0, 45	11.5	0.78	0÷4

*Γωνία β: Η γωνία που σχηματίζει το ίχνος του ρήγματος με τον άξονα του αγωγού



Σχήμα 6.7: Παραμορφώσεις ϵ_{\min} και ϵ_{\max} για αγωγό διαμέτρου $D=0.102\text{m}$ και γωνία $\beta=0^\circ$ (κάθετο ίχνος ρήγματος στον άξονα του αγωγού)



Σχήμα 6.8: Παραμορφώσεις ϵ_{\min} και ϵ_{\max} για αγωγό διαμέτρου $D=0.102\text{m}$ και γωνία $\beta=45^\circ$

Από τα δύο παραπάνω σχήματα, παρατηρούμε πως οι τιμές της παραμόρφωσης ϵ_{\max} ($\epsilon_{\max} = \epsilon_a + \epsilon_b$) στις δύο περιπτώσεις της γωνίας β που εξετάστηκαν διαφέρουν σημαντικά μόνο στα μεγάλα βάθη και για μεγάλες τιμές της μετατόπισης ($\Delta y \geq 4D$). Για γωνία $\beta=0^\circ$, η συνολική παραμόρφωση αποτελείται μόνο από την καμπτική συνιστώσα (ϵ_b) ενώ για $\beta=45^\circ$, η καμπτική συνιστώσα μειώνεται και αυξάνεται σημαντικά η αξονική. Σχετικά με την τιμή της παραμόρφωσης ϵ_{\min} ($\epsilon_{\min} = \epsilon_a - \epsilon_b$) στην πρώτη περίπτωση ($\beta=0^\circ$) είναι λίγο μικρότερη (κατά απόλυτη τιμή) από αυτή της ϵ_{\max} και με αντίθετο πρόσημο καθώς, όπως προαναφέρθηκε, από το πρόβλημα απουσιάζει η αξονική παραμόρφωση. Για γωνία $\beta=45^\circ$, η μεγάλη τιμή της

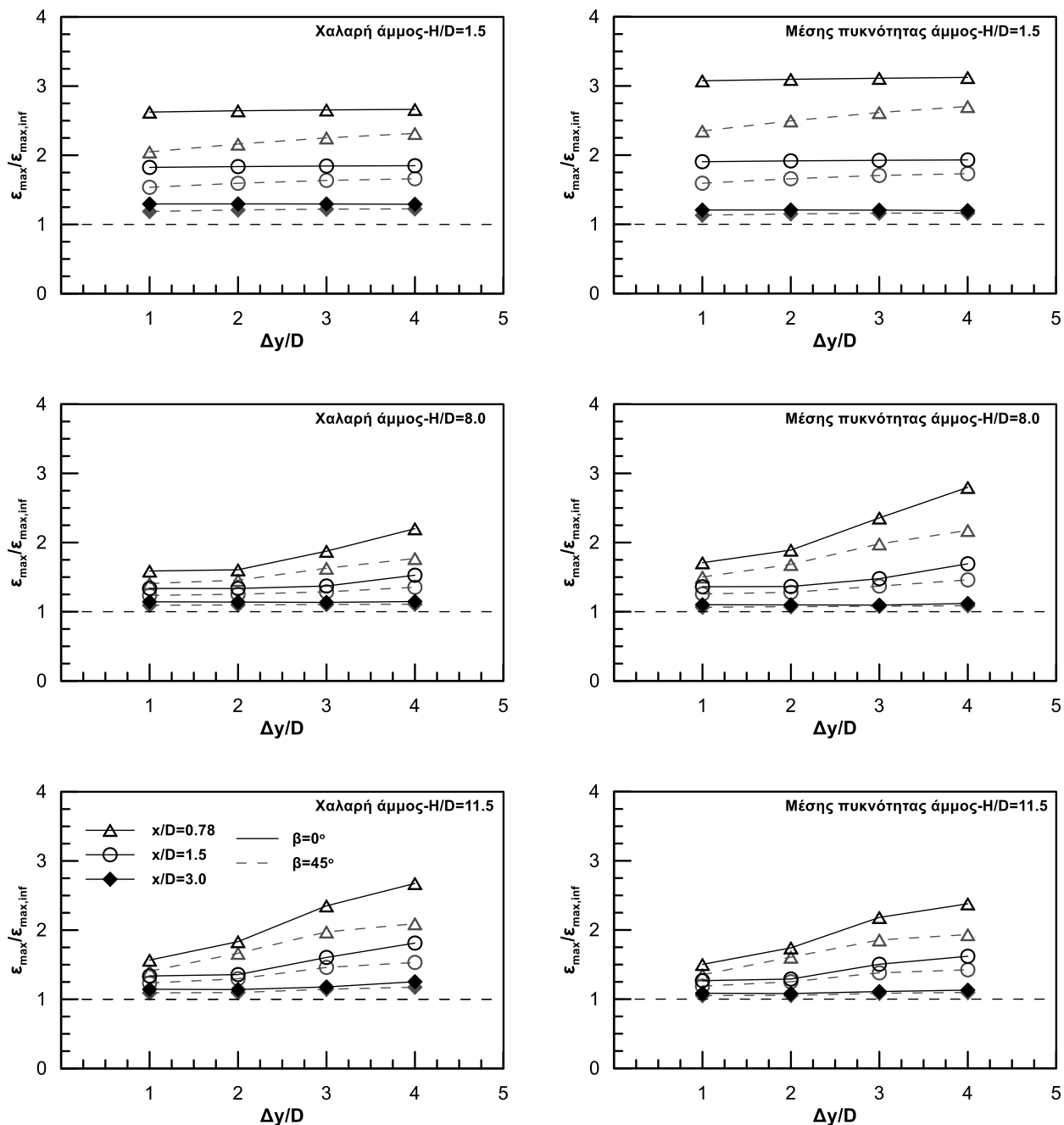
αξονικής παραμόρφωσης σε συνδυασμό με τις μικρότερες τιμές της καμπτικής, συντελούν σε τιμές της ε_{\min} σχεδόν μηδενικές σε κάθε περίπτωση λόγου εγκιβωτισμού H/D .

Η αύξηση της μετατόπισης Δy φαίνεται να αυξάνει σημαντικά την τιμή της μέγιστης παραμόρφωσης κυρίως για μεγάλες τιμές του λόγου εγκιβωτισμού H/D ($H/D \geq 8.0$). Ακόμη, παρατηρείται αύξηση των παραμορφώσεων με το βάθος, λόγω της αύξησης των υπερκειμένων εδαφών από τον αγωγό, γεγονός που συντελεί σε αρκετά μεγαλύτερη τιμή του ρ_{ult} για τα ελατήρια του εδάφους. Τέλος, πρέπει να τονιστεί η επίδραση της απόστασης x/D στις τιμές των παραμορφώσεων και κυρίως στην παραμόρφωση ε_{\max} που ενδιαφέρει άμεσα. Παρατηρούμε πως η μείωση του λόγου x/D οδηγεί σε αύξηση των παραμορφώσεων επί του αγωγού ειδικά στα μεγαλύτερα βάθη εγκιβωτισμού. Η επίδραση της μετατόπισης $\Delta y/D$, της απόστασης x/D και της τιμής της γωνίας διάρρηξης (β) φαίνεται καλύτερα στο **Σχήμα 6.9**. Στο σχήμα αυτό, παρουσιάζονται οι τιμές της ε_{\max} για κάθε επιβαλλόμενη μετακίνηση Δy , αδιαστατοποιημένες ως προς την αντίστοιχη τιμή για απόσταση $x/D=15.5$, η οποία αντιστοιχεί σε αγωγό εγκιβωτισμένο στο ελεύθερο πεδίο, δηλαδή χωρίς να υπάρχει επίδραση του κατακόρυφου συνόρου στην μετατόπισή του. Παρατηρούμε ότι:

- Σχετικά με την επιρροή της γωνίας β , οι τιμές της μέγιστης παραμόρφωσης για γωνία $\beta=45^\circ$ είναι συστηματικά μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές για γωνία $\beta=0^\circ$ για κάθε λόγο εγκιβωτισμού H/D και στις δύο περιπτώσεις άμμου επίχωσης.
- Η επίδραση της μετατόπισης Δy είναι σταθερή για μικρά βάθη εγκιβωτισμού, γεγονός που σχετίζεται με την άμεση διαρροή των ελατηρίων του εδάφους, ακόμη και για πολύ μικρές τιμές της μετακίνησης. Στα μεγαλύτερα βάθη εγκιβωτισμού, η επίδραση αυτή αρχίζει να φαίνεται για μετατόπιση $\Delta y \geq 2D$.
- Η απόσταση x/D επιδρά καθοριστικά στην τιμή της μέγιστης παραμόρφωσης αυξάνοντάς την έως και 3 φορές από την αντίστοιχη τιμή για αγωγό εγκιβωτισμένο στο ελεύθερο πεδίο, στις δύο περιπτώσεις άμμου επίχωσης. Συγκεκριμένα, για λόγο εγκιβωτισμού $H/D=1.5$, η επίδραση του πλάτους της τάφρου στην μέγιστη παραμόρφωση που αναπτύσσεται επί του αγωγού είναι έως και 3 φορές μεγαλύτερη για γωνία $\beta=0^\circ$ και 2.5 φορές για γωνία $\beta=45^\circ$, στην περίπτωση του $x/D=0.78$ ενώ για τα μεγαλύτερη βάθη οι αντίστοιχες τιμές είναι 2.5 και 2 φορές σε σχέση με την αντίστοιχη παραμόρφωση του αγωγού στο ελεύθερο πεδίο, για τις δύο πυκνότητες άμμου επίχωσης. Η επιρροή του πλάτους της τάφρου στην τιμή της μέγιστης παραμόρφωσης και το εύρος μέσα στο οποίο η τελευταία κυμαίνεται, για μετατόπιση Δy από 1D μέχρι και 4D, φαίνεται στο **Σχήμα 6.10**.
- Τέλος, σχετικά με την επιρροή του λόγου εγκιβωτισμού H/D δεν παρουσιάζεται σαφής εικόνα από το σχήμα αυτό. Για τον λόγο αυτό, η επίδραση του βάθους στην μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης εξετάζεται στο **Σχήμα 6.11**.

Στο **Σχήμα 6.10** απεικονίζεται η μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης αδιαστατοποιημένη ως προς την αντίστοιχη τιμή που προκύπτει για τον αγωγό στο ελεύθερο πεδίο συναρτήσει της απόστασης x/D , η οποία έχει διαιρεθεί με την κρίσιμη τιμή $(x/D)_{crit}$ ανάλογα με την πυκνότητα της άμμου επίχωσης, πέρα από την οποία δεν υπάρχει επίδραση του κατακόρυφου ορίου στην κίνηση του αγωγού (βλ. Κεφάλαιο 4). Οι τιμές της παραμόρφωσης που προέκυψαν για τις δύο εξεταζόμενες γωνίες β (0° και 45°) ξεχωρίζουν μεταξύ τους με κατάλληλο σχηματικό και χρωματικό διαχωρισμό ενώ έχει ποσοτικοποιηθεί και το εύρος των τιμών αυτών (με κόκκινη γραμμή φαίνεται το εύρος τιμών για γωνία $\beta=0^\circ$ και με μπλε γραμμή το εύρος τιμών για γωνία $\beta=45^\circ$). Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 6.11** φαίνεται η μεταβολή της ίδιας αδιαστατοποιημένης τιμής της παραμόρφωσης που προαναφέρθηκε, με την αύξηση του βάθους και το αντίστοιχο εύρος της.

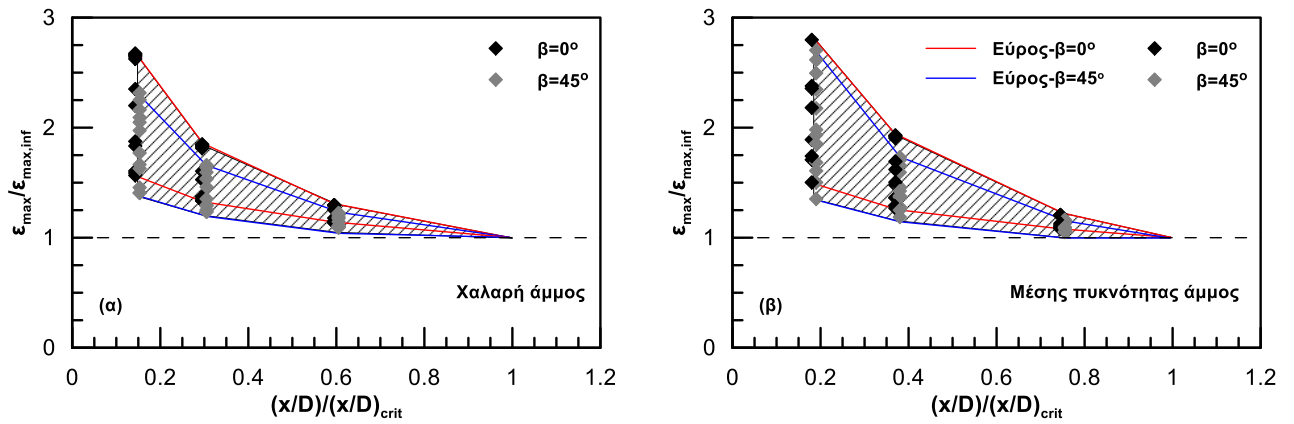
Από το Σχήμα 6.10, παρατηρούμε ότι η μείωση του πλάτους της τάφρου, αυξάνει σημαντικά την μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης στον αγωγό σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή για αγωγό στο ελεύθερο πεδίο και στις δύο περιπτώσεις γωνίας β που εξετάστηκαν. Μάλιστα, η αύξηση αυτή της παραμόρφωσης δεν είναι γραμμική συνάρτηση της μείωσης της απόστασης x/D . Ακόμη, οι αποκλίσεις των τιμών της παραμόρφωσης για τις δύο τιμές της γωνίας φαίνεται να είναι μικρές μεταξύ τους. Στην δυσμενέστερη περίπτωση που εξετάστηκε, δηλαδή για $x/D=0.78$, η μέγιστη παραμόρφωση που αναπτύσσεται στον αγωγό αυξήθηκε έως και 3 φορές σε σχέση με την αντίστοιχη παραμόρφωση για αγωγό στο ελεύθερο πεδίο και στις δύο περιπτώσεις άμμου επίχωσης που εξετάστηκαν.



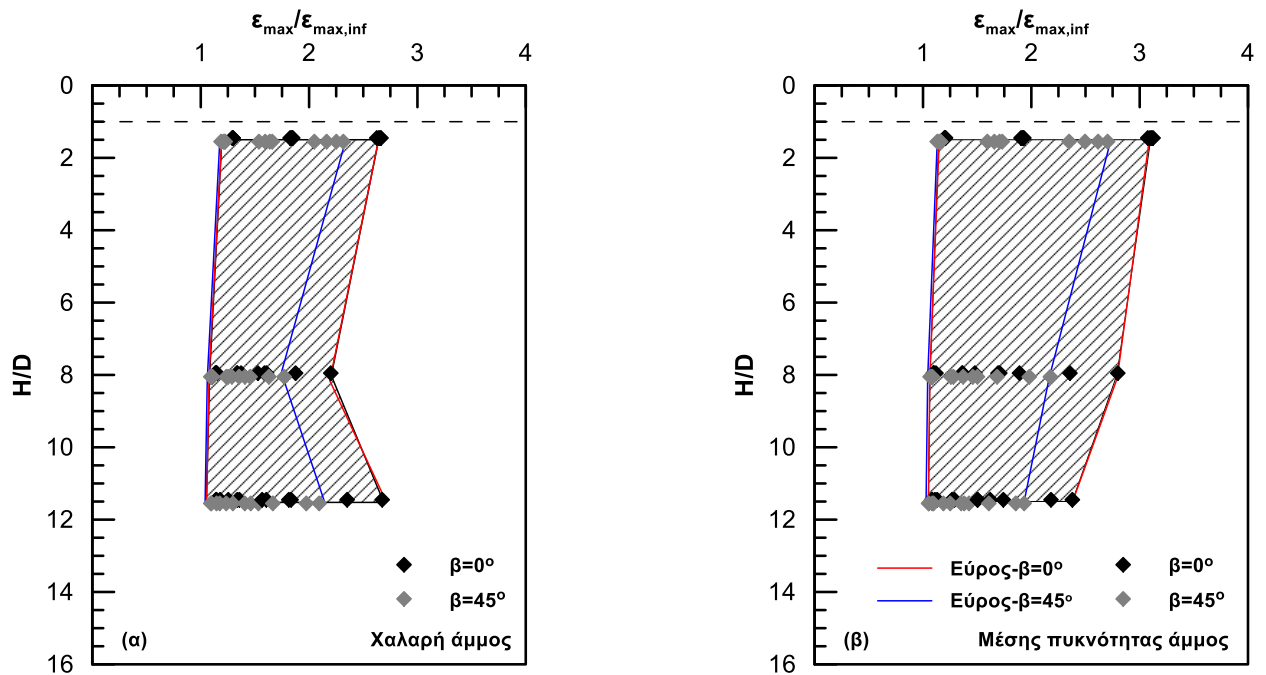
Σχήμα 6.9: Αδιαστατοποιημένη παραμόρφωση ($\epsilon_{\max}/\epsilon_{\max,inf}$) για αγωγό διαμέτρου $D=0.102\text{m}$ και γωνία $\beta=0^\circ$ (κάθετο ίχνος ρήγματος στον άξονα του αγωγού)

Από το Σχήμα 6.11, φαίνεται πως η αύξηση του βάθους επηρεάζει κατά διαφορετικό τρόπο της μέγιστη παραμόρφωση ανάλογα με την πυκνότητα της άμμου επίχωσης. Ακόμη, μικρή επίδραση φαίνεται να έχει στα αποτελέσματα της παραμόρφωσης η τιμή της γωνίας β , με αυτή των 45° να δίνει μικρότερες τιμές από τις αντίστοιχες για τιμή ίση με 0° . Έτσι, για χαλαρή άμμο, η μέγιστη παραμόρφωση είναι έως και 2.5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη παραμόρφωση στον αγωγό χωρίς επίδραση του κατακόρυφου συνόρου και έως 3 φορές

μεγαλύτερη στην περίπτωση της άμμου μέσης πυκνότητας, ανεξάρτητα από την τιμή του λόγου εγκιβωτισμού H/D .



Σχήμα 6.10: Εύρος λόγου ($\epsilon_{\max}/\epsilon_{\max,\text{inf}}$) με την αδιαστατοποιημένη απόσταση από το κατακόρυφο όριο της τάφρου για (α) χαλαρή άμμο (β) άμμο μέσης πυκνότητας



Σχήμα 6.11: Εύρος λόγου ($\epsilon_{\max}/\epsilon_{\max,\text{inf}}$) με τον λόγο εγκιβωτισμού H/D για (α) χαλαρή άμμο (β) άμμο μέσης πυκνότητας

6.4 Συμπεράσματα

Τα βασικά συμπεράσματα του κεφαλαίου είναι:

- Επίδραση της γωνίας διάρρηξης β : Η επίδραση της γωνίας β στην μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης, είναι μικρή αλλά όχι αμελητέα. Σε κάθε περίπτωση μετακίνησης Δy , ο λόγος ($\epsilon_{\max}/\epsilon_{\max,\text{inf}}$) είναι μικρότερος στην περίπτωση γωνίας $\beta=45^\circ$ από ότι για $\beta=0^\circ$.
- Επίδραση της μετακίνησης $\Delta y/D$: Σε μικρά βάθη εγκιβωτισμού, η παραμόρφωση ϵ_{\max} αναπτύσσεται άμεσα για $\Delta y \geq 1D$, έχοντας σταθερή τιμή για μεγαλύτερες τιμές της μετακίνησης. Σε μεγαλύτερα βάθη ($H/D \geq 8.0$), για μετακινήσεις $\Delta y \geq 2D$ παρατηρούμε σημαντική αύξηση της μέγιστης παραμόρφωσή.
- Επίδραση της απόστασης x/D : Η μείωση του λόγου x/D αυξάνει σημαντικά την μέγιστη παραμόρφωση σε σχέση με την περίπτωση του αγωγού στο ελεύθερο πεδίο με αύξηση έως και 3 φορές μεγαλύτερη για γωνία $\beta=0^\circ$ και 2.5 φορές για γωνία 45° , στην περίπτωση του $x/D=0.78$ και λόγου $H/D=1.5$ σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή της παραμόρφωσης για αγωγό χωρίς επίδραση από το κατακόρυφο σύνορο και για τις δύο περιπτώσεις άμμου επίχωσης.
- Επίδραση του βάθους H/D : Η τιμή της μέγιστης παραμόρφωσης φαίνεται να είναι ανεξάρτητη του βάθους, με εύρος από 1 έως και 2.5 για χαλαρή άμμο και 1 ως 3 για άμμο μέσης πυκνότητας, ανάλογα με την επιβαλλόμενη μετακίνηση Δy , για κάθε τιμή του λόγου εγκιβωτισμού H/D .

Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

7.1 Συμπεράσματα

Οι αναλυτικές και εμπειρικές σχέσεις που προτείνονται από τις διεθνείς οδηγίες σχεδιασμού υπόγειων αγωγών, έχουν προκύψει από πειράματα και αριθμητικές αναλύσεις στις οποίες το υλικό επίχωσης εκτείνεται σε μεγάλη οριζόντια και κατακόρυφη απόσταση στο εγκάρσιο ως προς τη διατομή του αγωγού επίπεδο. Με τον τρόπο αυτό δεν συνυπολογίζεται η επίδραση του σκληρού-ανένδοτου περιβάλλοντος εδάφους, πέραν των συνήθως περιορισμένων συνόρων της τάφρου θεμελίωσης, στην αναπτυσσόμενη επί του αγωγού καταπόνηση.

Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική σχετίζονται με:

- την μορφή και την έκταση του μηχανισμού αστοχίας της άμμου επίχωσης
- την επίδραση του πλάτους της τάφρου στο οριακό φορτίο και μετατόπιση (απόσταση “x”)
- την επίδραση της απόστασης του αγωγού από το οριζόντιο σύνορο της τάφρου στο οριακό φορτίο και μετατόπιση (απόσταση “d”)
- την επίδραση του πλάτους της τάφρου στις παραμορφώσεις του αγωγού

7.1.1 Μορφή και έκταση μηχανισμού αστοχίας

a. Από τις παραμετρικές αναλύσεις για το βάθος του αγωγού ($H/D=1.5-16$), διαπιστώθηκε η ύπαρξη τριών χαρακτηριστικών τύπων αστοχίας ανάλογα με τον εκάστοτε λόγο εγκιβωτισμού H/D . Ο τύπος αστοχίας I αναπτύσσεται μέχρι την τιμή λόγου $H/D=4.5$ για άμμο μέσης πυκνότητας και $H/D=6.0$ για χαλαρή άμμο. Ο τύπος αυτός αντιστοιχεί σε μία επιφάνεια αστοχίας, η οποία εκτείνεται μέχρι την επιφάνεια του εδάφους και συνοδεύεται από τη δημιουργία δύο εδαφικών πρισμάτων (παθητικού και ενεργητικού τύπου). Ο τύπος αστοχίας III ξεκινάει από λόγο $H/D=9.5$ για άμμο μέσης πυκνότητας, από λόγο $H/D=10.0$ για χαλαρή άμμο και συνεχίζει για όλες τις μεγαλύτερες τιμές του λόγου εγκιβωτισμού. Στην αστοχία τύπου III αναπτύσσεται ένας βαθύς μηχανισμός αστοχίας που περιβάλλει τον αγωγό. Τέλος, ο τύπος αστοχίας II εμφανίζεται για τις ενδιάμεσες τιμές του λόγου εγκιβωτισμού H/D , δηλαδή για $4.5 < H/D < 9.5$ για άμμο μέσης πυκνότητας και

6.0 < H/D < 10 για χαλαρή άμμο. Ο μηχανισμός αστοχίας αυτής της μορφής αποτελεί το μεταβατικό στάδιο από τον μηχανισμό τύπου I σε τύπου III.

- b. Η έκταση “x” κατά την οριζόντια διεύθυνση της εκάστοτε σχηματιζόμενης επιφάνειας αστοχίας από τον άξονα του αγωγού, για τα διάφορα βάθη εγκιβωτισμού, υπολογίζεται από την αναλυτική σχέση **(7.1)**:

$$x / D = \begin{cases} 3 + 0.1 \cdot (H / D)^a, & H/D \leq (H/D)_{I-II} \\ -1.2 \cdot (H / D) + 13.1, & (H/D)_{I-II} < H/D < (H/D)_{II-III} \\ \beta, & H/D \geq (H/D)_{II-III} \end{cases} \quad (7.1)$$

όπου D η διάμετρος του αγωγού.

Οι παράμετροι της εξίσωσης **(7.1)** για χαλαρή άμμο και άμμο μέσης πυκνότητας λαμβάνονται από τον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 7.1**):

Πίνακας 7.1: Παράμετροι προσδιορισμού της έκτασης “x”

Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Παράμετρος α	Παράμετρος β	(H/D) _{I-II}	(H/D) _{II-III}
Χαλαρή	1.88	1.10	6.0	10.0
Μέσης πυκνότητας	2.41	1.70	4.8	9.50

- c. Το σφάλμα της εξίσωσης (7.1) είναι ≤ 20% για χαλαρή άμμο ενώ για άμμο μέσης πυκνότητας είναι ≤ 20% στο 91% των περιπτώσεων και μικρότερο από 30% για το υπόλοιπο 9%.
- d. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί η **εξίσωση (7.2)**, η οποία υπολογίζει την απόσταση x, ανεξαρτήτως πυκνότητας της άμμου επίχωσης.

$$x / H = 3.5 \cdot e^{-0.27(H/D)} \quad (7.2)$$

όπου H η απόσταση της επιφάνειας του εδάφους από το κέντρο του αγωγού.

- e. Το σφάλμα της παραπάνω σχέσης είναι ≤ 50% στο 88% των περιπτώσεων ενώ για το υπόλοιπο 12% είναι μικρότερο από 120%.

7.1.2 Επίδραση απόστασης “x” του κέντρο του αγωγού, μετά την επιβολή της μετατόπισης, από το κατακόρυφο σύνορο της τάφρου

Στη μέγιστη εδαφική αντίδραση:

- a. Παρατηρήθηκε ότι πέρα από μια κρίσιμη τιμή $(x/D)_{crit}$ το σύνορο της τάφρου δεν επιδρά στην μέγιστη δύναμη που αναπτύσσεται επί του αγωγού. Ακόμη, η επίδραση αυτή μειώνεται με την αύξηση του βάθους, καθώς είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την μορφή και την έκταση του μηχανισμού αστοχίας που αναπτύσσεται σε κάθε περίπτωση. Ο υπολογισμός του διορθωτικού συντελεστή $(p_{ult}/p_{ult,inf})$ (όπου $p_{ult,inf}$ η μέγιστη εδαφική αντίδραση για αγωγό στο ελεύθερο πεδίο) γίνεται μέσω της **εξίσωσης (7.3)** και **(7.4)**:

$$\frac{p_{ult}}{p_{ult,inf}} = \begin{cases} \left[\frac{(x/D)_{crit}}{(x/D)} \right]^a, & x/D < (x/D)_{crit} \\ 1.0, & x/D \geq (x/D)_{crit} \end{cases} \quad (7.3)$$

όπου ο συντελεστής α προσδιορίζεται από την σχέση:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{res} + [(H/D)_{crit} - (H/D)] \cdot \beta, & H/D < (H/D)_{crit} \\ \alpha_{res}, & H/D \geq (H/D)_{crit} \end{cases} \quad (7.4)$$

Οι διάφορες τιμές των παραμέτρων για τον υπολογισμό του διορθωτικού συντελεστή $(p_{ult}/p_{ult,inf})$ συναρτήσει της άμμου επίχωσης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 7.2**:

Πίνακας 7.2: Βασικές παράμετροι αναλυτικής σχέσης για τον διορθωτικό συντελεστή $(p_{ult}/p_{ult,inf})$ του οριακού φορτίου

Παράμετρος	$(x/D)_{crit}$	$(H/D)_{crit}$	α_{res}	β
Χαλαρή άμμος	5.0	6.5	0.48	0.12
Μέσης πυκνότητας άμμος	4.0	9.5	0.48	0.12

- b. Το σφάλμα της εξίσωσης (7.3) είναι μικρότερο από 25% σε κάθε περίπτωση εκτός από αυτή του αγωγού διαμέτρου $D=0.70m$, σε λόγο $H/D=1.5$ και $x/D=0.78$ που λαμβάνει τιμή μικρότερη από 75%.

Στην οριακή μετατόπιση:

- c. Ισχύει ότι αναφέρθηκε για την μέγιστη εδαφική αντίδραση. Η κρίσιμη τιμή του $(x/D)_{crit}$ παραμένει ίδια και στις δύο περιπτώσεις άμμου επίχωσης, όπως προσδιορίστηκε για την μέγιστη εδαφική αντίδραση. Ο υπολογισμός του διορθωτικού συντελεστή $(\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf})$ (όπου $\gamma_{ult,inf}$ η οριακή μετατόπιση για αγωγό στο ελεύθερο πεδίο) γίνεται μέσω των **εξισώσεων (7.5) και (7.6):**

$$\frac{\gamma_{ult}}{\gamma_{ult,inf}} = \begin{cases} c, & x/D < (x/D)_{crit} \\ 1.0, & x/D \geq (x/D)_{crit} \end{cases}, \quad (7.5)$$

όπου η σταθερά c προσδιορίζεται ως εξής:

$$c = \begin{cases} c_{res} + [(H/D)_{crit} - (H/D)] \cdot \delta, & H/D < (H/D)_{crit} \\ c_{res}, & H/D \geq (H/D)_{crit} \end{cases}, \quad (7.6)$$

Οι διάφορες τιμές των παραμέτρων για τον υπολογισμό της αναλυτικής σχέσης συναρτήση της άμμου επίχωσης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 7.3:**

Πίνακας 7.3: Βασικές παράμετροι αναλυτικής σχέσης για τον διορθωτικό συντελεστή $(\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf})$ της οριακής μετατόπισης

Παράμετρος	$(x/D)_{crit}$	$(H/D)_{crit}$	c_{res}	δ
Χαλαρή άμμος	5.0	6.5	0.9	0.24
Μέσης πυκνότητας άμμος	4.0	9.5	0.9	0.24

- d. Το σφάλμα της παραπάνω σχέσης είναι $\leq 50\%$ στο 95% των περιπτώσεων ενώ για το υπόλοιπο 5% λαμβάνει τιμές έως και 300%.

7.1.3 Επίδραση απόστασης “d” του κατώτατου σημείου του αγωγού από το οριζόντιο σύνορο της τάφρου

Στην μέγιστη εδαφική αντίδραση:

- a. Παρατηρήθηκε ότι η μείωση της απόστασης (d) έχει πολύ μικρή επιρροή στην μέγιστη τιμή της εδαφικής αντίδρασης ενώ σε κάθε περίπτωση για λόγο (d/D) > 1 δεν υπάρχει επίδραση στο οριακό φορτίο. Ο διορθωτικός συντελεστής ($\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$) υπολογίζεται από τον **Πίνακα 7.4:**

Πίνακας 7.4: Τιμές διορθωτικού συντελεστή ($\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$) για (d/D) < 1.0

α/α	Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Λόγος H/D	$\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$
1	χαλαρή	H/D < 9.5	1.1 ± 0.10
2	χαλαρή	H/D ≥ 9.5	1.2 ± 0.20
3	μέση	H/D < 9.5	1.0 ± 0.10
4	μέση	H/D ≥ 9.5	1.2 ± 0.20

*Για τιμές του λόγου (d/D) μεγαλύτερες της μονάδας ο διορθωτικός συντελεστής ($\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$) θα λαμβάνεται ίσος με 1.0.

- b. Το σφάλμα της προτεινόμενης αναλυτικής σχέσης είναι ≤ 15% στο 98% των περιπτώσεων και για το υπόλοιπο 2% λαμβάνει τιμές ≤ 25%.

Στην οριακή μετατόπιση:

- c. Αντίστοιχα με όσα αναφέρονται για την επίδραση στο οριακό φορτίο. Ο διορθωτικός συντελεστής ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) υπολογίζεται από τον **Πίνακα 7.5:**

Πίνακας 7.5: Τιμές διορθωτικού συντελεστή ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) για (d/D) < 1.0

α/α	Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Λόγος H/D	$\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$
1	χαλαρή	H/D < 9.5	1.0
2	χαλαρή	H/D ≥ 9.5	1.2
3	μέση	H/D ≤ 9.5	0.8
4	μέση	H/D > 9.5	1.2

*Για τιμές του λόγου (d/D) μεγαλύτερες της μονάδας ο διορθωτικός συντελεστής ($\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$) θα λαμβάνεται ίσος με 1.0.

- d. Το σφάλμα της προτεινόμενης αναλυτικής σχέσης είναι ≤ 20% για το 91% των περιπτώσεων και μικρότερο από 40% για το υπόλοιπο 9%.

7.1.4 Επίδραση του πλάτους της τάφρου στις παραμορφώσεις του αγωγού

- a. Η επίδραση του πλάτους της τάφρου εγκιβωτισμού σε όρους παραμόρφωσης του αγωγού είναι καθοριστική, αυξάνοντας έως και 3 φορές την μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης που θα αναπτυχθεί σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή για αγωγό στο ελεύθερο πεδίο.
- b. Η επίδραση του βάθους εγκιβωτισμού του αγωγού H/D , δεν επηρεάζει σημαντικά την μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης, η οποία έχει εύρος από 1 έως και 2.5 για χαλαρή άμμο και 1 ως 3 για άμμο μέσης πυκνότητας, ανάλογα με την επιβαλλόμενη μετακίνηση Δy , για κάθε τιμή του λόγου εγκιβωτισμού H/D .

7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Μέσα από την πορεία διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προέκυψαν σημεία εύλογου προβληματισμού, τα οποία κατά την προσωπική μας θεώρηση, είναι άξια περαιτέρω διερεύνησης. Τα πιο σημαντικά από αυτά παρατίθενται παρακάτω:

- Περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης των διαστάσεων της τάφρου σε αγωγό μεγάλης διαμέτρου (π.χ. $D=0.70m$) ώστε να εξακριβωθεί πιθανή επιρροή της κλίμακας του προβλήματος στις τιμές των διορθωτικών συντελεστών. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, εξετάστηκαν επιλεκτικά περιπτώσεις για αγωγό διαμέτρου $D=0.70m$ σε λόγους εγκιβωτισμού $H/D=1.5, 6.5, 11.5$ και παρατηρήθηκαν αποκλίσεις από τα αντίστοιχα αποτελέσματα για αγωγό διαμέτρου $D=0.102m$ σχετικά με τους διορθωτικούς συντελεστές του οριακού φορτίου και της οριακής μετατόπισης.
- Η επανεξέταση του παρόντος προβλήματος για τάφρο θεμελίωσης τραπεζοειδούς διατομής. Εφόσον διαπιστώθηκε πως οι διαστάσεις της τάφρου παίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην αναπτυσσόμενη καταπόνηση, πρέπει διερευνηθεί και η επίδραση της γεωμετρίας αυτής.
- Εξέταση της επίδρασης των διαστάσεων της τάφρου για μετατόπιση αγωγού σε διεύθυνση εκτός της οριζόντιας (κατακόρυφη προς τα άνω, κατακόρυφη προς τα κάτω). Μάλιστα, για μετατόπιση στην κατακόρυφη διεύθυνση το πρόβλημα γίνεται μη-συμμετρικό και απαιτείται ξεχωριστή διερεύνηση της εκάστοτε περίπτωσης. Ακόμη, πρέπει να εξεταστεί η περίπτωση μετατόπισης του αγωγού εκτός των κυριών αξόνων του, η οποία συντελεί στην δημιουργία φαινομένων αλληλεπίδρασης μεταξύ των δυνάμεων που αναπτύσσονται επί αυτού και μείωση της φέρουσας ικανότητας της άμμου επίχωσης.
- Επιβολή δυναμικών φορτίσεων στον αγωγό, διερεύνηση των φαινομένων που συμβαίνουν στην άμμο επίχωσης (π.χ. ρευστοποίηση) και πώς τα φαινόμενα αυτά επιδρούν στις μετακινήσεις και στις δυνάμεις που θα αναπτυχθούν στον αγωγό.

Βιβλιογραφία

- American Lifelines Alliance ALA (2005). "Guidelines for the design of buried steel pipes". New York, ASCE.
- American Society of Civil Engineers (1984). "Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Steel Pipeline Systems". Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines, ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering.
- Audibert J.M.E, Nyman K.J. (1977). "Soil restraint against horizontal motion of pipes." *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, v. 103, no. GT-10, Proceedings Paper 13303, pp. 119-1142.
- Hansen J.B., (1961). "The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces." Copenhagen, Denmark: Danish Geotechnical Institute; 1961. Bulletin 12.
- Karamitros D.K., Bouckovalas G.D., Kouretzis G.P. (2007). "Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27 (3), pp . 200-211
- Karamitros D.K, Bouckovalas G.D., Kouretzis G.P., Gkesouli V. (2011). "An analytical method for strength verification of buried steel pipelines at normal fault crossings." *Soil dynamics and Earthquake Engineering*, 31 (11), pp. 1452-1464.
- Karimian H., Wijewickreme D., Honegger D., (2006). "Full-scale laboratory testing to assess methods for reduction of soil loads on buried pipes subject to transverse ground movement." In: Proc 6th International pipeline conference, Calgary, Canada
- Kouretzis G.P., Sheng D., Sloan S.W. (2013). "Sand-pipeline-trench lateral interaction effect for shallow buried pipelines." *Computers and Geotechnics*, 54 (2013), pp. 53-59.
- O'Rourke T.D. (2010). "Geohazards and large geographically distributed systems." *Géotechnique*, 60 (7), pp. 505-43
- di Prisco C., Galli A. (2006). "Soil pipe interaction under monotonic loads: experimental and numerical modeling." In: Proc 1st Euro-Mediterranean symposium on "Advances in Geomaterials and Structures", Hammamet, Tunisia.
- Rowe R.K., Davis E.H., (1982). "The behavior of anchor plates in sand." *Géotechnique*, 32, no 1, pp. 25-41
- Trautmann C.H., O'Rourke T.D. (1985). "Lateral force displacement response of pipe." *Journal of geotechnical engineering*, American Society of Civil Engineers ASCE, 111 (9), pp. 1068-84.

Yimsiri S., Soga K., Yoshizaki K., Dasari G., O'Rourke T.D. (2004). "Lateral and upward soil–pipeline interactions in sand for deep embedment conditions," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130 (8), pp. 830-42.