



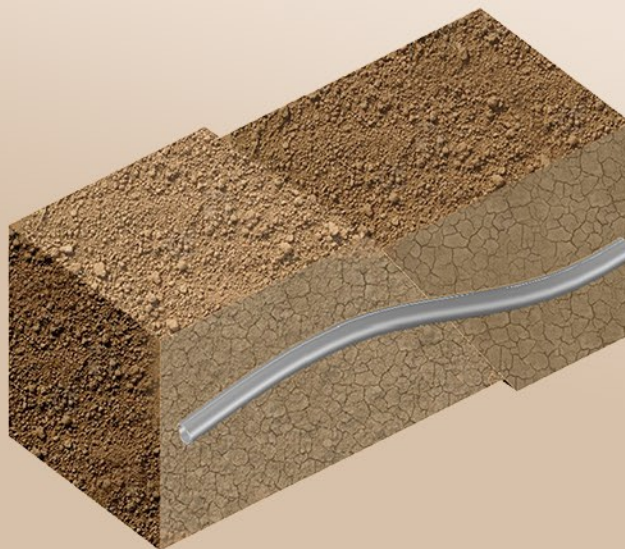
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ**

**Ανάλυση αγωγού σε διασταύρωση  
με «κανονικό» ρήγμα:  
Επίδραση διαστάσεων τάφρου θεμελίωσης**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Ταξιαρχούλα Λημναίου - Αργυρούλα Χούσου**

**Επιβλέποντες: Γεώργιος Δ. Μπουκοβάλας, Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Δρ. Γιάννης Χαλούλος**



**Pipeline analysis at “normal” fault crossing:  
Effect of embedment trench dimensions**

**DIPLOMA THESIS**

**Argiroula Housos - Taxiarchoula Limnaiou**

**Supervisors: George D. Bouckovalas, Professor NTUA  
Dr. Yannis Chaloulos**

**ΑΘΗΝΑ – ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2015/ATHENS – OCTOBER 2015**

## Ευχαριστίες

---

Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο της ζωής μας θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε όλους εκείνους που συνέβαλαν στην ολοκλήρωσή του.

Πρώτα απ' όλους, οφείλουμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Καθηγητή μας κ. Γιώργο Μπουκοβάλα, επιβλέποντα της Διπλωματικής μας Εργασίας. Τον ευχαριστούμε για τη συνεχή του καθοδήγηση, για το ότι ήταν «εκεί» σε όλα τα σημεία της διαδρομής για να μας βοηθάει να ξεπερνάμε τα εμπόδια, να ανεβάζει τον πήχη όλο και πιο ψηλά και να δίνει το έναυσμα να ξεδιπλώσουμε τον καλύτερό μας εαυτό. Η επαφή μαζί του και ο τρόπος που προσεγγίζει κάθε πρόβλημα, κάνοντας και το πιο σύνθετο να φαίνεται απλό, διεύρυνε το νου μας και άλλαξε τον τρόπο σκέψης μας. Τον ευχαριστούμε ακόμη για την υπομονή του όταν απογοητευόμασταν και για το πατρικό ενδιαφέρον και τις συμβουλές του όταν τις είχαμε ανάγκη. Σπάνιο να βρεις καθηγητή να διαβάξει τα μάτια σου...

Τίποτα όμως δεν θα ήταν ίδιο αν στο πλευρό μας δεν ήταν ο Γιάννης Χαλούλος, μεταδιδακτορικός ερευνητής. Είναι εκείνος που βοήθησε να γίνει πράξη όλη μας η προσπάθεια. Η οξύνοια, η μεθοδικότητα και η οργανωτικότητά του είναι για μας παράδειγμα και φάρος για τη σταδιοδρομία μας από εδώ και πέρα. Κάθε μας πρόβλημα γινόταν και δικό του και ήταν πάντα διαθέσιμος να το συζητήσουμε μαζί του. Ακόμη και εκείνες τις μέρες που όλα φαίνονταν δύσκολα και σκοτεινά, με το χιούμορ του και τη ζωντάνια του έκανε τα πάντα να είναι φωτεινά. Τον ευχαριστούμε πολύ για όλα.

Ευχαριστούμε πολύ τον πάντα πρόθυμο Γιάννη Τσιάπα, διδακτορικό ερευνητή. Οι υποδείξεις του σχετικά με την αισθητική της Εργασίας μας αναβάθμισαν το έργο μας και αποτελούν εφόδιο για τη μετέπειτα πορεία μας. Φιλικός και εγκάρδιος, πάντα διαθέσιμος να συζητήσουμε θέματα σχετικά και μη με τη Διπλωματική και να συμβάλλει σε όλες αυτές τις λεπτομέρειες που κάνουν τη διαφορά.

Ακόμη, ευχαριστούμε όλα τα μέλη της ερευνητικής ομάδας για τη φιλοξενία τους και την παρέα τους.

Ευγνωμονούμε τους Αλέξανδρο Ζάμπα και Σπύρο Ζερβό, των οποίων η Εργασία αποτέλεσε πρότυπο, καθώς η έρευνά μας αποτελεί συνέχεια της δικής τους.

Ένα ευχαριστώ στην Ξανθίπη Τσέλιου για την καλλιτεχνική επιμέλεια του εξωφύλλου της Εργασίας μας.

Στο τέλος των προπτυχιακών μας σπουδών οφείλουμε να αναγνωρίσουμε τη συμβολή όλων των καθηγητών μας στη διαμόρφωση γερών βάσεων στο αντικείμενο του Πολιτικού Μηχανικού και στην καλλιέργεια δομημένης σκέψης.

Αυτός ο κύκλος της ζωής μας έγινε πιο όμορφος χάρη στους φίλους μας: συνεργάτες στα μαθήματα, πρωταγωνιστές σε όλες τις φοιτητικές μας αναμνήσεις, στήριγμα στις δύσκολες στιγμές και παρόντες σε όλες τις χαρές.

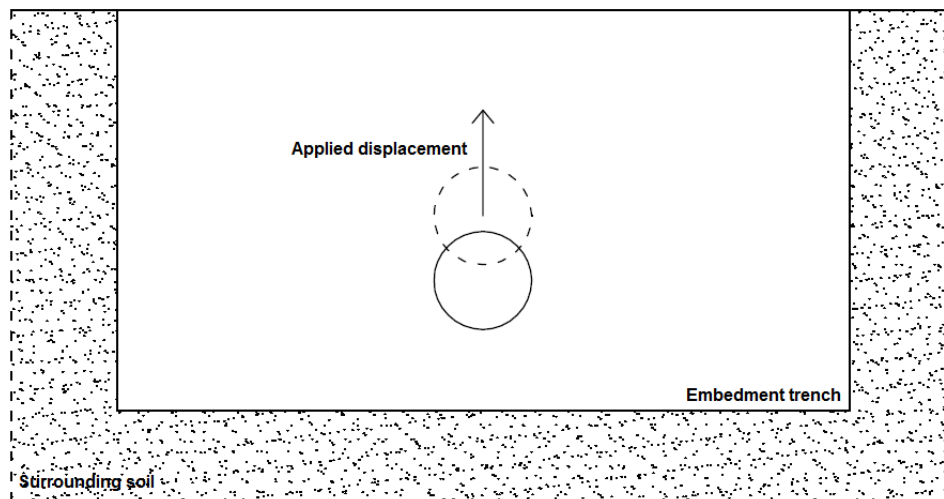
Τέλος, το πιο μεγάλο ευχαριστώ θέλουμε να πούμε στους γονείς μας και τα αδέρφια μας, Χάρη και Γιάννη, που μας αγαπούν, μας υπερασπίζονται και μας στηρίζουν από το πρώτο μας βήμα. Πιστεύουν σε μας, μας δίνουν θάρρος και εξασφαλίζουν τις συνθήκες για να μπορούμε να κάνουμε τους στόχους μας πραγματικότητα.

Σας ευχαριστούμε όλους,

Αργυρούλα και Ταξιαρχούλα

## Extended Summary

The analytical relations for the p-y curves of buried steel pipelines at an intersection with an active fault, proposed by international guidelines, are based on experimental and numerical data, which assume that the trench is “infinitely” large both in the horizontal and vertical direction. In this way, the effect of the stiffer soil, which surrounds the trench, is not taken into account in the calculation of the loads that act on the pipeline.



**Figure 1:** Problem layout: Pipe moving vertically upwards inside a trench of finite dimensions.

The scope of the present Thesis is to evaluate in qualitative and quantitative terms the effect of embedment trench dimensions on the vertical uplift displacement of a buried pipeline, when it crosses an active normal fault.

The problem at hand is schematically illustrated in **Figure 1**.

As a first step, this 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 used. The response of the backfill material was described by the elasto-plastic Mohr-Coulomb constitutive model, as it represents in an appropriate way the material behavior after yielding, and thus the peak reaction

forces on the pipeline. 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 automatic rezoning.

The methodology was calibrated and verified against the experimental data of *Trautmann et al. (1985)* and the numerical data of *Yimsiri et al. (2004)*, *Jung et al. (2013)* and *Kouretzis et al. (2014)*, ensuring its accuracy prior to the execution of the parametric analyses.

Moreover, measurements were made in order to define the failure mechanism of the backfill material because of the pipeline's upward movement.

Additionally, successive analyses were conducted in order to evaluate the effect of the trench width not only on the ultimate load on the pipeline, but also on the ultimate displacement.

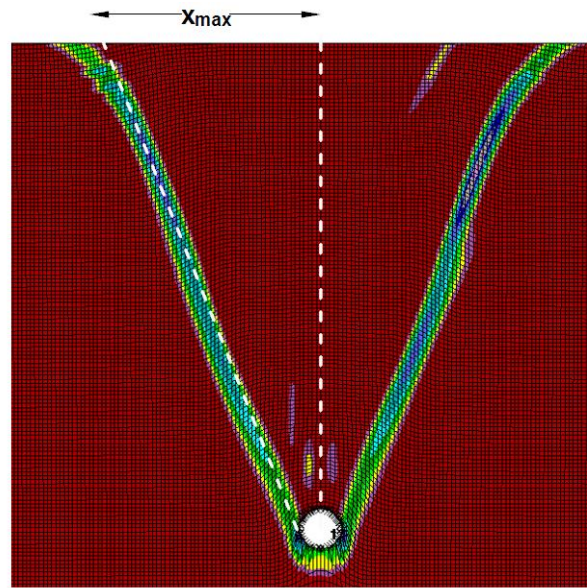
Last but not least, in the interest of suggesting an alternative trench shape, which would ensure free-field conditions, further analyses were made adopting an embedment trench with inclined borders.

The major conclusions of this Thesis concern:

- the shape and the size of the failure surface in the backfill material,
- the effect of the trench width on the ultimate force that acts on the pipeline and the displacement where the former is developed,
- the appropriate shape of the trench, so that the effect of the stiffer surrounding soil will be negligible.

### **Shape and size of failure mechanism**

Interpretation of the data collected from the parametric analyses, conducted for a range of embedment ratios between  $H/D=4$  and  $H/D=13$ , revealed that the response pattern is unique for all the examined densities (loose, medium and dense sand) and for all embedment ratios. The failure mechanism has the shape of an inverted cone and its extent to the soil surface ( $x_{max}$ ) (**Figure 2**), measured from the center of the pipe, is an increasing function of the friction angle  $\phi$  of the backfill material (in direct shear conditions) and the embedment ratio  $H/D$ .



**Figure 2:** Unique response pattern and  $x_{\max}$  distance (Dense sand- $H/D=13$ ).

The proposed analytical relation for the calculation of  $x_{\max}$  is:

$$x_{\max} = 0.45 \cdot H \cdot \tan \varphi, \text{ for } 4 \leq H / D \leq 13 \quad (1)$$

where:

H: depth of the center of the pipe

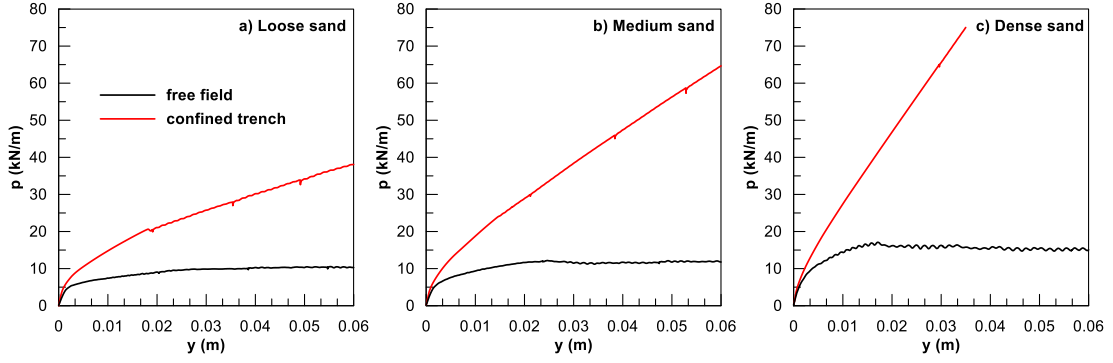
D: diameter of the pipe

$\varphi$ : friction angle of backfill sand, measured with direct shear test

For all the examined values of relative density, the analytical **Relation (1)** predicts the distance  $x_{\max}$  with an error less than 20%. The only exception is the case of embedment ratio  $H/D=13$  for loose sand, where the failure surface cannot be defined clearly and compared with the analytical value.

### Effect of trench semi-width on the ultimate load

- There is a critical value for the ratio  $x/x_{\max} - (x/x_{\max})_{cr}$ , symbolized as  $a_p$ , beyond which the effect of the vertical border of the trench is negligible. For  $x/x_{\max}$  less than this critical value, the vertical border impedes the free formation of the failure surface of the backfill sand and leads to  $p_{ult}/p_{ult,inf}$  increase (**Figure 3**), where  $p_{ult}$  and  $p_{ult,inf}$  refer to the ultimate load in case of a limited trench embedment and free field conditions correspondingly.



**Figure 3:** Trench effect on ultimate load  $p_{ult}$ .

- The ratio  $(p_{ult}/p_{ult,inf})$ , which reflects the effect of the trench width on the peak force that acts on the pipeline during its vertical uplift displacement, is a decreasing function of the embedment depth, for a standard value of  $x/x_{max}$ , and has the same behavior for loose, medium and dense sand as well. The analytical relation for the calculation of the proposed correction factor  $(p_{ult}/p_{ult,inf})$ , for all three examined sand relative densities (loose, medium, dense) is:

$$\frac{p_{ult}}{p_{ult,inf}} = \left\{ \begin{array}{ll} \left( \frac{x}{x_{max} \cdot a_p} \right)^{-B_p} & , x/x_{max} < a_p \\ 1.0, & x/x_{max} \geq a_p \end{array} \right\} \quad (2)$$

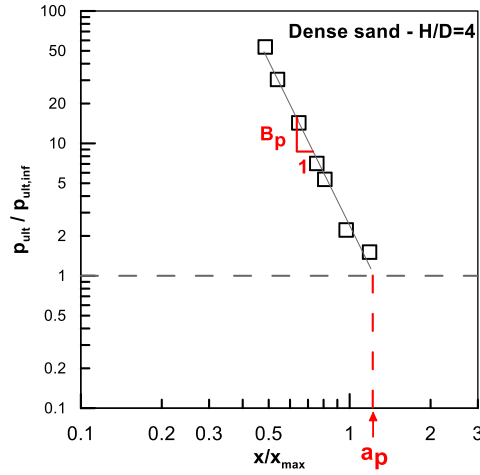
where:

The ratio  $a_p$  is an increasing function of the friction angle  $\phi$  of the backfill material, but is practically stable while the embedment ratio increases. It is given as:

$$a_p = 1.087 \cdot \tan \phi \quad (3)$$

$$B_p = \left\{ \begin{array}{l} 27 \cdot [H/D]^{-0.93}, \text{ loose} \\ 19 \cdot [H/D]^{-0.78}, \text{ medium} \\ 17 \cdot [H/D]^{-0.79}, \text{ dense} \end{array} \right\}, \text{ for } 4 \leq H/D \leq 10 \quad (4)$$

The significant increase of the correction factor  $p_{ult}/p_{ult,inf}$ , as a result of the confinement of the embedment trench and the parameters  $a_p$  and  $B_p$ , for the characteristic case of dense sand and  $H/D=4$ , are illustrated in **Figure 4**:



**Figure 4:** Correlation of  $p_{ult}/p_{ult,inf}$  to  $x/x_{max}$  – Definition of  $a_p$  and  $B_p$  parameters.

- The error of the **Relation (2)** is less than 50% for the 94% of data.

#### Effect of trench semi-width on the ultimate displacement

- As in the case of ultimate load, there is also a critical value of  $x/x_{max}$ , symbolized as  $a_y$ , beyond which the effect of the vertical border of the trench on the ultimate displacement is eliminated. It is proved that  $a_y$  is equal to  $a_p$  i.e.,

$$a_y = a_p \quad (5)$$

- Calculation of the correction factor ( $y_{ult}/y_{ult,inf}$ ), where  $y_{ult}$  and  $y_{ult,inf}$  refer to the ultimate displacement in case of trench embedment and free field correspondingly, may be based on the **Relation (6)**:

$$\frac{y_{ult}}{y_{ult,inf}} = \left\{ \begin{array}{ll} \left( \frac{x}{x_{max} \cdot a_y} \right)^{-B_y} & , x/x_{max} < a_y \\ 1.0, & x/x_{max} \geq a_y \end{array} \right\} \quad (6)$$

where:

$$B_y = \left\{ \begin{array}{l} 22 \cdot [H/D]^{-0.65}, \text{ loose} \\ 22 \cdot [H/D]^{-0.70}, \text{ medium} \\ 22 \cdot [H/D]^{-0.75}, \text{ dense} \end{array} \right\}, \text{ for } 4 \leq H/D \leq 10 \quad (7)$$



The error of the correction factor  $y_{ult}/y_{ult,inf}$  is larger than this of  $p_{ult}/p_{ult,inf}$  and it has a significant bias. This can be justified considering the use of hyperbolic relations for the analytical description of numerical data. However, the correction factor that refers to displacement is of less practical interest compared to that referring to  $p_{ult}$  and the observed error can be tolerated.

### Alternative embedment trench design

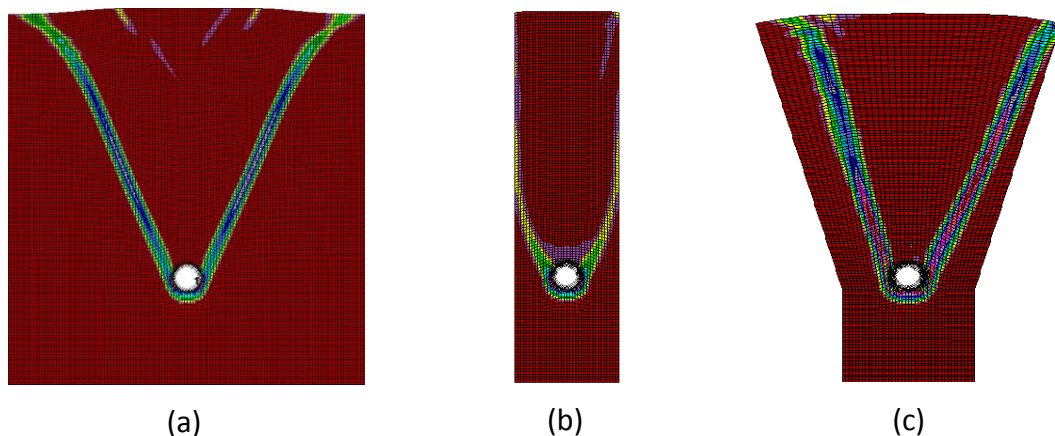
In order to ensure the necessary trench dimensions, in existing as well as in new constructions at the lowest cost, the solution of a trench with inclined borders was examined.

The aim of this alternative design is to allow the failure surface to form freely, so as the border effect on  $p_{ult}$  and  $y_{ult}$  will be eliminated. In order to conclude to a specific design, further analyses were conducted. It was proved that the trench width at the soil surface must be greater than  $x_{cr,n}$ , where  $x_{cr,n}$  is the minimum distance between the trench border and the pipeline's side, so as not to affect the failure mechanism and is set as:

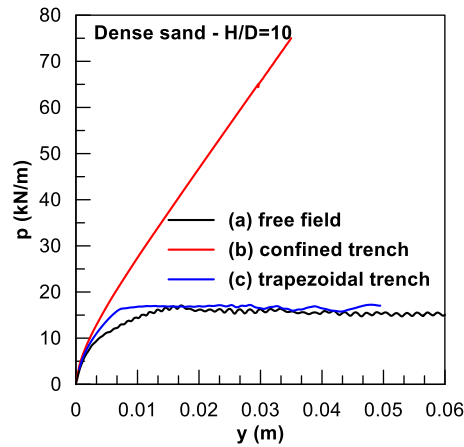
$$x_{cr,n} = 0.49 \cdot H \cdot \tan^2 \varphi - 0.051 \quad (8)$$

where 0.051 is the radius of the pipeline used in the analyses, while  $x_{cr}$  and it are expressed in m.

As shown in **Figure 5** and **Figure 6** an embedment trench whose width at the soil surface is equal to  $x_{cr,n}$ , while its width at the level of the pipeline center can be of any value, is capable to ensure free-field conditions.



**Figure 5:** Failure surface for (a) free field, (b) confined trench, (c) trapezoidal trench embedment conditions (Dense sand –  $H/D=10$ ).



**Figure 6:** P-y curves for (a) free field, (b) confined trench, (c) trapezoidal trench embedment conditions (Dense sand – H/D=10).

Thus, the proposed geometry for embedment trench with inclined borders, shown in **Figure 7** , has the following dimensions:

- The trench width  $B$  at the soil surface should be greater than:

$$B \geq 2 \cdot x_{cr,n} + D \quad (9)$$

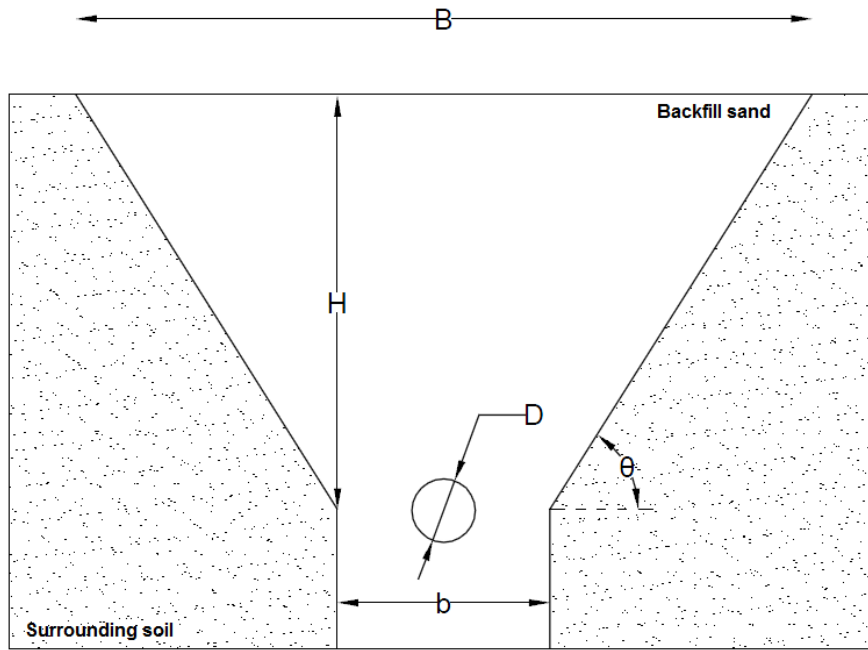
- The trench width  $b$  at the level of pipeline’s center should be greater than:

$$b \geq 1.40 \cdot D \quad (10)$$

- Alternatively, the borders’ inclination from the pipeline’s center and up should be:

$$\tan \theta \leq \frac{1}{0.489 \cdot \tan^2 \varphi - \frac{1.20}{H / D}} \quad (11)$$

where  $\theta$  is the angle between the inclined trench border and the horizontal axis



**Figure 7:** Proposed embedment trench geometry.

## Περιεχόμενα

---

<b>1. Εισαγωγή .....</b>	<b>5</b>
1.1 Περιγραφή του Προβλήματος .....	5
1.2 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας .....	7
1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας .....	7
<b>2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση .....</b>	<b>9</b>
2.1 Γενικά .....	9
2.2 Σχεδιασμός αγωγών έναντι μόνιμων μετακινήσεων .....	9
2.2.1 Αξονικά ελατήρια .....	10
2.2.2 Εγκάρσια οριζόντια ελατήρια .....	11
2.2.3 Εγκάρσια κατακόρυφα ελατήρια .....	12
2.3 Μέθοδοι υπολογισμού της μέγιστης δύναμης επί του κατακορύφως μετατοπιζόμενου αγωγού .....	14
2.3.1 Αριθμητική εφαρμογή .....	16
2.4 Συμπεράσματα .....	18
<b>3. Αριθμητικές Αναλύσεις .....</b>	<b>21</b>
3.1 Γενικά .....	21
3.2 Πειραματικές Μετρήσεις Trautmann et al. (1985) .....	22
3.3 Αριθμητικές Αναλύσεις .....	24
3.3.1 <i>Yimsiri et al. (2004)</i> .....	24
3.3.2 <i>Kouretzis et al. (2014)</i> .....	26
3.3.3 <i>Jung et al. (2013)</i> .....	27
3.4 Αριθμητική Προσομοίωση Κατακόρυφης Μετατόπισης Αγωγού .....	28
3.4.1 Επίδραση μεγέθους ζωνών διακριτοποίησης .....	29
3.4.2 Εισαγωγή στοιχείων διεπιφάνειας .....	30
3.4.3 Επίδραση συνοριακών συνθηκών .....	33
3.4.4 Καταστατικό προσομοίωμα άμμου .....	34
3.4.5 Επίδραση ταχύτητας επιβολής μετατόπισης αγωγού .....	40
3.4.6 Θεώρηση ανάλυσης μεγάλων μετατοπίσεων και αναμόρφωσης του καννάβου .....	42

3.5	Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα .....	44
3.5.1	Παραμετρικές Αναλύσεις .....	44
3.5.2	Σύγκριση για μικρές και μεσαίες μετατοπίσεις .....	45
3.5.3	Σύγκριση για μεγάλες μετατοπίσεις.....	49
3.5.4	Σύγκριση με οδηγίες σχεδιασμού <i>ASCE-ALA (2005)</i> .....	51
3.6	Συμπεράσματα .....	52
<b>4.</b>	<b>Έκταση Επιφάνειας Αστοχίας .....</b>	<b>55</b>
4.1	Γενικά.....	55
4.2	Μορφή επιφάνειας αστοχίας.....	56
4.3	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων .....	64
4.4	Συμπεράσματα .....	70
<b>5.</b>	<b>Επίδραση Διαστάσεων Τάφρου .....</b>	<b>73</b>
5.1	Γενικά.....	73
5.2	Υπολογισμός οριακού φορτίου ( $p_{ult}$ ) και οριακής μετατόπισης ( $y_{ult}$ ).....	73
5.3	Επίδραση του πλάτους της τάφρου στην οριακή εδαφική αντίδραση ( $p_{ult}$ )	76
5.3.1	Γενική μορφή του διορθωτικού συντελεστή.....	76
5.3.2	Αναλυτικός υπολογισμός της κρίσιμης διάστασης τάφρου $a_p$ .....	79
5.3.3	Αναλυτικός υπολογισμός της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ ).....	81
5.4	Επίδραση του πλάτους της τάφρου στην οριακή μετατόπιση ( $y_{ult}$ ) .....	87
5.4.1	Γενική μορφή του διορθωτικού συντελεστή.....	87
5.4.2	Αναλυτικός υπολογισμός της κρίσιμης διάστασης τάφρου $a_y$ .....	90
5.4.3	Αναλυτικός υπολογισμός της οριακής μετατόπισης ( $y_{ult}$ ).....	91
5.5	Συμπεράσματα .....	97
<b>6.</b>	<b>Εναλλακτικός Σχεδιασμός Τάφρου Θεμελίωσης .....</b>	<b>101</b>
6.1	Γενικά.....	101
6.2	Παραμετρικές Αναλύσεις .....	103
6.3	Επίδραση της εναλλακτικής γεωμετρίας τάφρου στην επιφάνεια αστοχίας	104
6.4	Επίδραση της εναλλακτικής γεωμετρίας τάφρου στο οριακό φορτίο ( $p_{ult}$ )	107
6.5	Επίδραση της εναλλακτικής γεωμετρίας τάφρου στην οριακή μετατόπιση ( $y_{ult}$ ) .....	111
6.6	Συμπεράσματα .....	112
<b>7.</b>	<b>Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα .....</b>	<b>115</b>
7.1	Συμπεράσματα .....	115
7.1.1	Μορφή και έκταση μηχανισμού αστοχίας.....	116
7.1.1	Επίδραση του ημιπλάτους $x$ της τάφρου θεμελίωσης στο οριακό φορτίο επί του αγωγού.....	117

7.1.2	Επίδραση του ημιπλάτους $\chi$ της τάφρου θεμελίωσης στην οριακή μετατόπιση του αγωγού.....	118
7.1.3	Εναλλακτικός σχεδιασμός τάφρου θεμελίωσης.....	119
7.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	121
<b>8.</b>	<b>Βιβλιογραφικές Αναφορές .....</b>	<b>123</b>

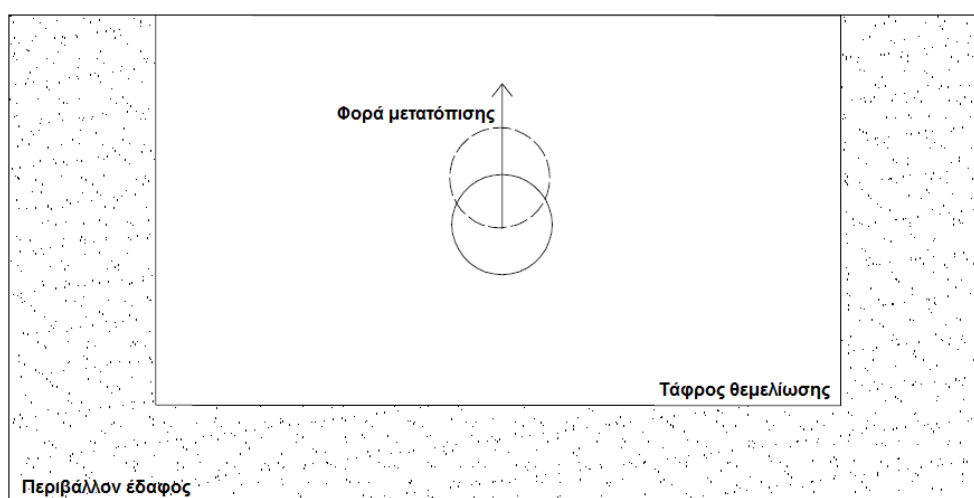


# 1

## 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 κατακόρυφης μετατόπισης αγωγού, εντός της τάφρου τοποθέτησης του παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1.1**.



**Σχήμα 1.1:** Αγωγός εντός τάφρου θεμελίωσης, υποβαλλόμενος σε κατακόρυφη προς τα πάνω 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 ολισθαίνον 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 διεθνείς οδηγίες σχεδιασμού υπόγειων αγωγών (*ASCE-ALA,2005, PRCI,2009* και *O'Rourke and Liu,2012*) προτείνουν την αντιμετώπιση της κατακόρυφης προς τα πάνω κίνησης αγωγού ως περίπτωση κίνησης ενός πρίσματος εδαφικού υλικού μορφής ανεστραμμένου κώνου πάνω από τον αγωγό. Συνήθης πρακτική κατά την κατασκευή υπόγειου αγωγού είναι η δημιουργία τάφρου με αμμώδες υλικό επίχωσης. Στην περίπτωση αυτή τα μηχανικά χαρακτηριστικά των εδαφικών ελατηρίων προσδιορίζονται από τις ιδιότητες του υλικού επίχωσης. Σύμφωνα με τις υπάρχουσες διεθνείς οδηγίες, προκειμένου να μην υπάρξει αλληλεπίδραση του αγωγού με το περιβάλλον την τάφρο έδαφος, πρέπει αυτή να διαμορφώνεται με επαρκείς διαστάσεις χωρίς όμως να αποσαφηνίζεται ο όρος «επαρκείς». Στην περίπτωση που οι διαστάσεις της τάφρου δεν είναι επαρκείς δημιουργείται 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 επίδρασης των διαστάσεων της τάφρου θεμελίωσης στην κατακόρυφη προς τα πάνω κίνηση κυκλικής διατομής χαλύβδινου αγωγού εντός ξηρής άμμου, όταν αυτός διασταυρώνεται με κανονικό ρήγμα. Σε γενικές γραμμές οι αριθμητικές αναλύσεις που έγιναν για το σκοπό αυτό ακολουθούν τις καλά τεκμηριωμένες μεθοδολογίες των *Trautmann et al. (1985)*, *Yimsiri et al. (2004)*, *Jung et al. (2013)* και *Kouretzis et al. (2014)*, προκειμένου να εξασφαλισθεί η συμβατότητα με τα αποτελέσματα των μελετών αυτών και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν.

## 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.

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.

Στο **Κεφάλαιο 4** εξετάζεται η μορφή των σχηματιζόμενων επιφανειών αστοχίας για κατακόρυφη προς τα πάνω μετατόπιση του αγωγού, σε σχέση τόσο με τη πυκνότητα της άμμου επίχωσης, όσο και με το βάθος εγκιβωτισμού. 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. 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 ο εναλλακτικός σχεδιασμός τάφρου θεμελίωσης με κεκλιμένα πλευρικά όρια και η συμβολή της διαμόρφωσης αυτής στην απομείωση των πρόσθετων δυνάμεων επί του αγωγού, λόγω περιορισμένης γεωμετρίας θεμελίωσης.

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

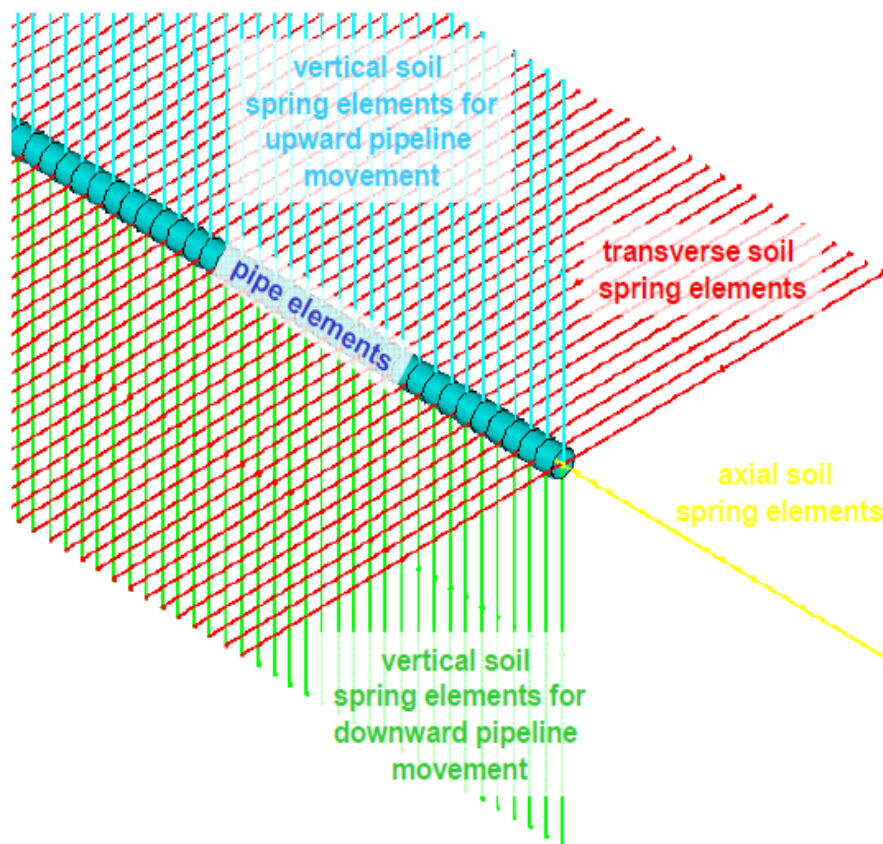
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η βασική βιβλιογραφία αναφορικά με τη συμπεριφορά και ανάλυση μεταλλικών αγωγών υποβαλλόμενων σε κατακόρυφα κινηματικά φορτία (π.χ. λόγω εδαφικής ρευστοποίησης, μετακίνησης ενεργού ρήγματος πλησίον του αγωγού, κατολισθητικών φαινομένων, εκσκαφών κ.λ.π.). Πληθώρα πειραματικών (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 τη 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 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 ελαστο-πλαστικών 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

$\gamma$  : ξηρό ειδικό βάρος επίχωσης

$\delta$  : γωνία τριβής μεταξύ αγωγού και επίχωσης

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

### 2.2.2 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*):

$$p = \frac{y}{A + B \cdot y} \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (2.2)$$

όπου:

$$A = 0.15 \cdot y_u / p_u \quad (2.3)$$

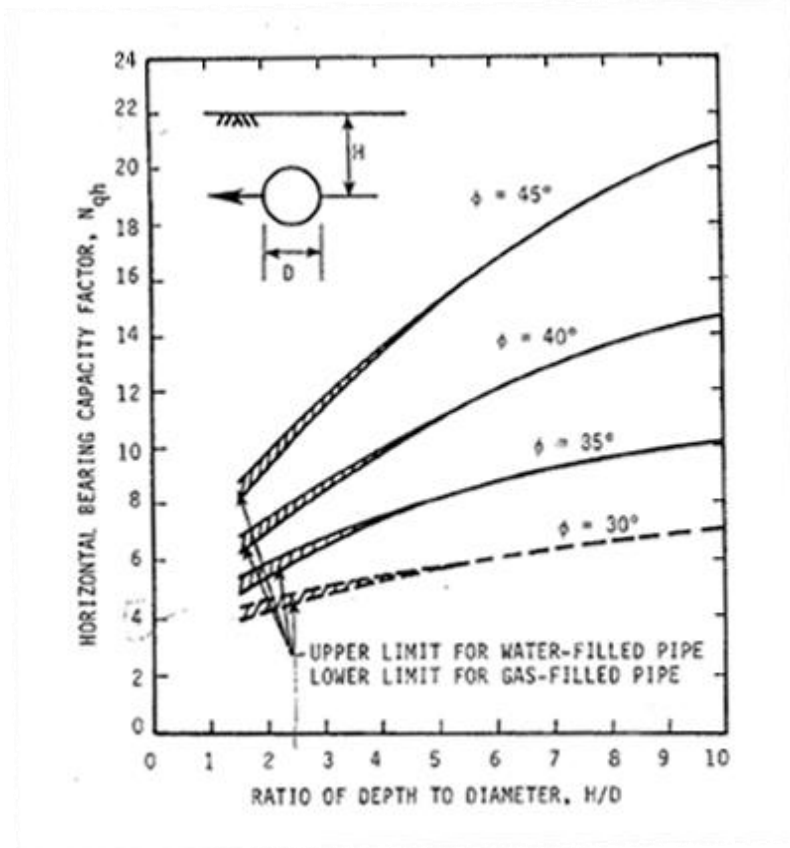
$$B = 0.85 / p_u \quad (2.4)$$

$$p_u = \gamma \cdot H \cdot N_{qh} \cdot D \quad (2.5)$$

$N_{qh}$  : συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας που υπολογίζεται από το **Σχήμα 2.2** (*Trautmann and O'Rourke, 1983a*)

$$y_u = 0.07 \text{ έως } 0.10 (H+D/2) \text{ για χαλαρή άμμο} \quad (2.6)$$

$$0.02 \text{ έως } 0.03 (H+D/2) \text{ για πυκνή άμμο} \quad (2.7)$$



**Σχήμα 2.2:** Συντελεστής οριζόντιας φέρουσας ικανότητας (από *Trautmann and O'Rourke, 1983a*)

### 2.2.3 Εγκάρσια κατακόρυφα ελατήρια

Οι δυνάμεις αντίστασης για τα κατακόρυφα ελατήρια είναι μη συμμετρικές, δηλαδή η απόκριση είναι διαφορετική για τις «προς τα πάνω» και τις «προς τα κάτω» 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  $p_u$  δίνεται από την συμβατική θεωρία φέρουσας ικανότητας για μη συνεκτικά εδάφη:

$$p_u = \bar{\gamma} \cdot H \cdot N_q \cdot D + 0.5 \cdot \bar{\gamma} \cdot D^2 \cdot N_\gamma \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (2.8)$$

όπου:

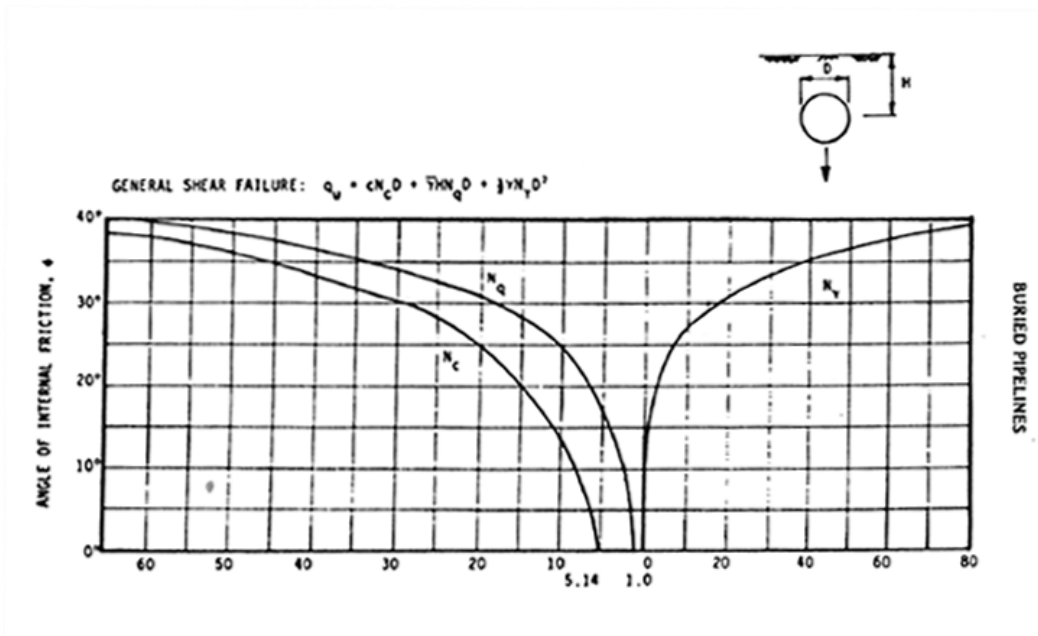
$N_q, N_\gamma$ : συντελεστές φέρουσας ικανότητας για λωριδωτά θεμέλια που φορτίζονται κατακόρυφα προς τα κάτω, οι οποίοι υπολογίζονται από το **Σχήμα 2.3** συναρτήσει της γωνίας τριβής  $\phi$  (*Meyerhoff, 1955*)

$\bar{\gamma}$ : ενεργό 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 2.3:** Συντελεστές κατακόρυφης προς τα κάτω φέρουσας ικανότητας (από Meyerhof, 1955)

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

$$p = \frac{z}{A + B \cdot z} \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (2.9)$$

όπου:

$$A = 0.07 \cdot z_u / p_u \quad (2.10)$$

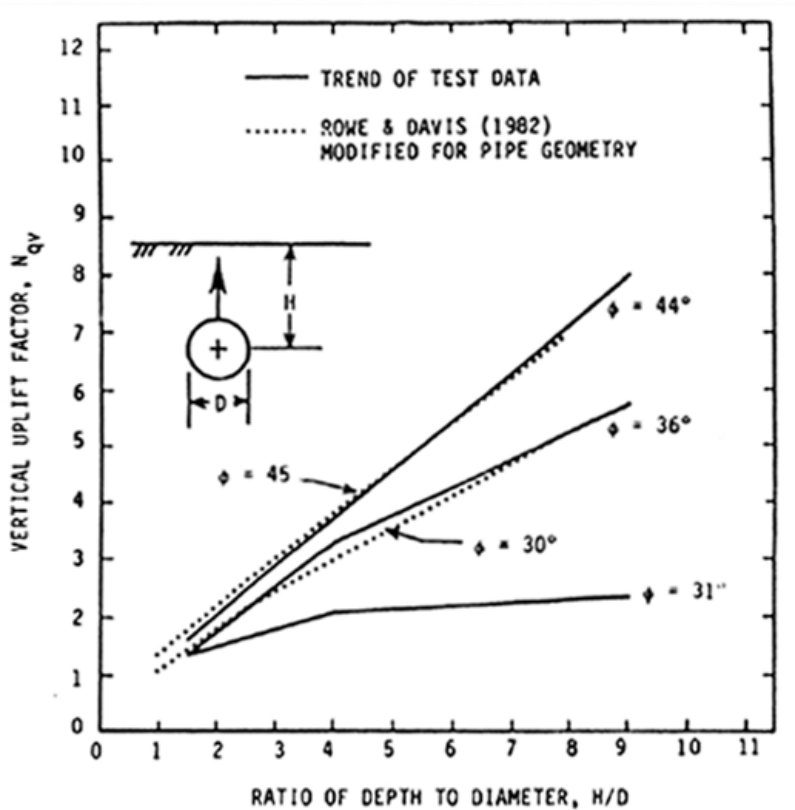
$$B = 0.93 / p_u \quad (2.11)$$

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

$$p_u = \gamma \cdot H \cdot N_{qv} \cdot D \quad (2.12)$$



όπου ο συντελεστής κατακόρυφης ανύψωσης  $N_{qv}$  δίνεται στο **Σχήμα 2.4** ως συνάρτηση του λόγου του βάθους του άξονα του αγωγού προς την διάμετρο  $H/D$  και της γωνίας τριβής της επίχωσης  $\phi$ .



**Σχήμα 2.4:** Συντελεστής κατακόρυφης προς τα άνω φέρουσας ικανότητας (από *Trautmann and O' Rourke, 1983a*)

### 2.3 Μέθοδοι υπολογισμού της μέγιστης δύναμης επί του κατακορύφως μετατοπιζόμενου αγωγού

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, ο υπολογισμός των οριακών δυνάμεων των ελατηρίων πραγματοποιείται μέσω των σχέσεων που έχουν αναπτυχθεί. Στην περίπτωση των εγκαρσίων κατακόρυφων ελατηρίων για κίνηση «προς τα πάνω» έχει αναπτυχθεί μια σειρά από σχέσεις για τη διαστασιολόγηση του αγωγού, οι οποίες για τον υπολογισμό της μέγιστης αντίστασης που αναπτύσσεται επί αυτού θεωρούν στην ουσία την κίνηση ενός πρίσματος εδαφικού υλικού μορφής ανεστραμμένου κώνου πάνω από τον αγωγό. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποιες από αυτές:

- Η προαναφερθείσα σχέση των *Trautmann and O' Rourke (1983b)* και *O'Rourke and Liu (2012)*, για μη συνεκτικά εδάφη :

$$q_u = \bar{\gamma} \cdot H \cdot N_{qv} \cdot D \quad (\text{δύναμη ανά μονάδα μήκους}) \quad (2.13)$$

όπου:

ο συντελεστής κατακόρυφης ανύψωσης  $N_{qv}$  δίνεται στο **Σχήμα 2.4** ως συνάρτηση του λόγου του βάθους του άξονα του αγωγού προς την διάμετρο  $H/D$  και της γωνίας τριβής της επίχωσης  $\phi$ .

$\bar{\gamma}$  : ενεργό 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 1-1.5% του βάθους εγκιβωτισμού του αγωγού ( $z_{u,dn} = 0.01 \div 0.015$ )H για πυκνές και χαλαρές άμμους αντίστοιχα.

- Η σχέση που υιοθετεί η *American Society of Civil Engineers (ASCE- ALA, 2005)* και το *Pipeline Research Council International (PRCI, 2009)* είναι όμοια με τη **Σχέση (2.13)**, όμως διαφοροποιείται η σχέση υπολογισμού του συντελεστή  $N_{qv}$  ανάλογα με κάθε μεθοδολογία, ως εξής:

- *American Society of Civil Engineers (ASCE- ALA, 2005)*:

$$N_{qv} = \left( \frac{\phi \cdot H}{44 \cdot D} \right) \leq N_q \quad (2.14)$$

όπου:

$$N_q = \exp(\pi \cdot \tan \phi) \cdot \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.15)$$

-*Pipeline Research Council International (PRCI, 2009)*:

$$N_{qv} = \tan(0.9\phi) \cdot \left( \frac{H}{D} \right) \leq N_{qh} \quad (2.16)$$

όπου:

$N_{qh}$ : συντελεστής υπολογισμού της αντίστασης σε πλευρική κίνηση αγωγού,

$N_{qh} = a + b \cdot \left( \frac{H}{D} \right)$  και οι συντελεστές  $a, b$  δίνονται ως ακολούθως:

**Πίνακας 2.1:** Συντελεστές a,b για τον υπολογισμό του  $N_{qh}$ .

$\phi$ (°)	Εύρος H/D	a	b	Μέγιστο $N_{qh}$
35	0.5 ÷ 12	4	0.92	15
40	0.5 ÷ 6	5	1.43	23
	6 ÷ 15	8	1.00	
45	0.5 ÷ 7	5	2.17	30
	7 ÷ 15	10	1.33	

Σημειώνεται πως για ενδιάμεσες τιμές της γωνίας  $\phi$  μεταξύ των τιμών  $35^\circ \div 45^\circ$  πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή, ενώ η ελάχιστη τιμή που πρέπει να ληφθεί είναι οι  $35^\circ$  ακόμη και αν οι σχετικές δοκιμές δίνουν μικρότερη γωνία τριβής.

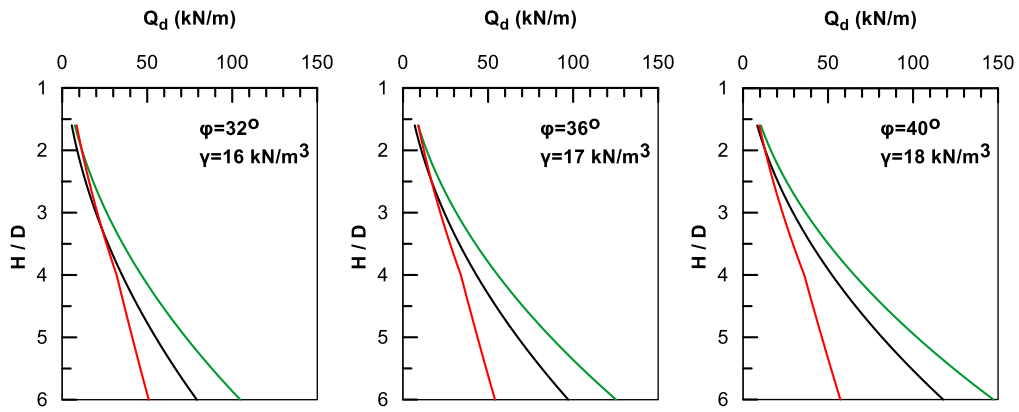
Για την περίπτωση ενός διγραμμικού νόμου δύναμης-μετατόπισης, η μετακίνηση κατά την αστοχία μπορεί να ληφθεί ως το 1-2% του βάθους εγκιβωτισμού του αγωγού ( $z_{u,dn} = 0.01 \div 0.02$ )H για πυκνές και χαλαρές άμμους αντίστοιχα, με την προϋπόθεση πως αυτή είναι μικρότερη του 10% της διαμέτρου του αγωγού.

### 2.3.1 Αριθμητική εφαρμογή

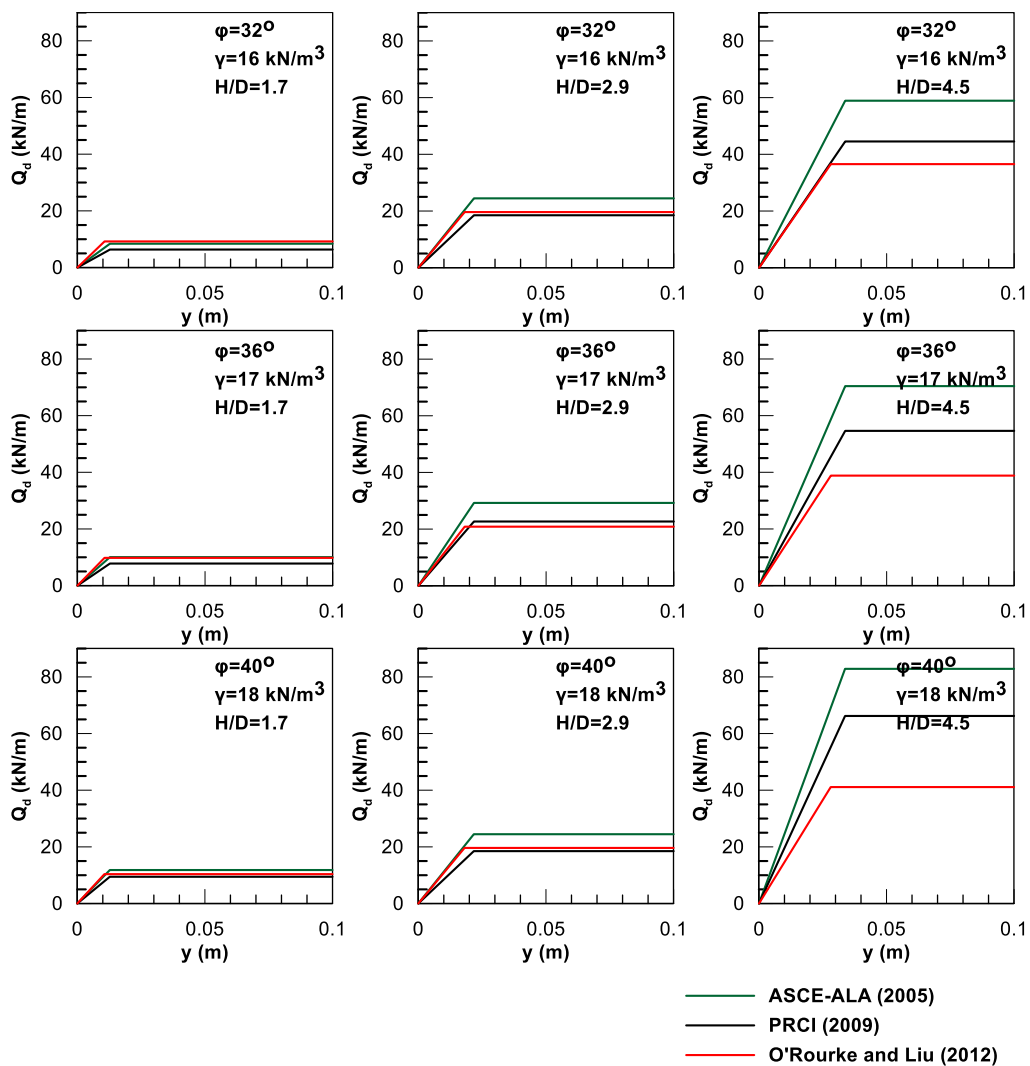
Προκειμένου να γίνει σύγκριση των παραπάνω μεθοδολογιών, έγινε η ακόλουθη εφαρμογή:

Θεωρήθηκε αγωγός διαμέτρου  $D= 0.5m$ , ο οποίος είναι εγκιβωτισμένος σε βάθη  $H/D= 1.7, 2.9$  και  $4.5$  εντός τάφρου επαρκών διαστάσεων (ώστε η τάφρος να μην επηρεάζει το μέγεθος της δύναμης επί του αγωγού), η οποία πληρούται με μη συνεκτικό εδαφικό υλικό ειδικού βάρους  $16, 17, 18 \text{ kN/m}^3$  και μέγιστης γωνίας τριβής  $\phi_{peak}= 32^\circ, 36^\circ$  και  $40^\circ$  αντίστοιχα.

Στο **Σχήμα 2.5** και **Σχήμα 2.6** φαίνονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής:



Σχήμα 2.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων των διαφόρων μεθόδων, μεταβαλλομένου του βάθους εγκιβωτισμού ( $H/D$ ) για σταθερή γωνία τριβής  $\phi$ .



Σχήμα 2.6: Σύγκριση καμπυλών  $p$ - $y$  που προκύπτουν από την εφαρμογή κάθε μεθόδου.

Παρατηρείται ότι όντως για μικρό βάθος εγκιβωτισμού ( $H/D=1.7$ ) για όλες τις εξεταζόμενες γωνίες τριβής οι λύσεις των τριών μεθόδων συμπίπτουν, όμως για μεγαλύτερα βάθη εγκιβωτισμού, η μέθοδος των *ASCE-ALA* υπερεκτιμά το μέγιστο φορτίο επί του αγωγού σε σχέση με τη μέθοδο των *O'Rourke and Liu*. Εν γένει, είναι εμφανές ότι η μέθοδος των *O'Rourke and Liu* υποεκτιμά συστηματικά το αποτέλεσμα, η μέθοδος των *PRCI* δίνει σχεδόν σε όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις ένα μέσο αποτέλεσμα, ενώ η μέθοδος των *ASCE-ALA* δίνει σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις το δυσμενέστερο αποτέλεσμα. Συμπερασματικά, η χρήση του υπάρχοντος *Αμερικανικού κανονισμού* για τη διαστασιολόγηση υπογείων αγωγών είναι ασφαλής σε κάθε περίπτωση άμμου επίχωσης και βάθους εγκιβωτισμού. Μάλιστα, πρέπει να τονισθεί ότι στο πρόβλημα του κατακορύφως μετατοπιζόμενου προς τα πάνω υπόγειου αγωγού, το οποίο «ελέγχεται» από την παραμόρφωση, υποεκτίμηση της οριακής δύναμης θα οδηγήσει σε υποεκτίμηση των παραμορφώσεων του αγωγού (*Kouretzis, Krabbenhoft, Sheng and Sloan, 2014*).

## 2.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η τρέχουσα μεθοδολογία σχεδιασμού και μελέτης εγκιβωτισμένων αγωγών φυσικού αερίου και πετρελαίου σύμφωνα με τους υπάρχοντες κανονισμούς.

Η συμπεριφορά εγκιβωτισμένων αγωγών που υποβάλλονται σε φορτίσεις λόγω εδαφικών κινήσεων μελετάται σύμφωνα με τα πρότυπα των οδηγιών της *ASCE «Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe (2001)»*, του *PRCI «Guidelines for constructing natural gas and liquid hydrocarbon pipelines through areas prone to landslide and subsidence hazards (2009)»* και των *O'Rourke and Liu (2012)*. 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  $H/D \geq 6$  (μεγάλα βάθη εγκιβωτισμού);
- Απάντηση στο συγκεκριμένο πρόβλημα προσπάθησε να δώσουν ο *Trautmann et al. (1985)*, αλλά και 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. Πώς 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 τη φέρουσα ικανότητα του αγωγού σε φορτίσεις κατά τις κύριες διευθύνσεις. Μάλιστα τα προτεινόμενα από τον κανονισμό διαγράμματα σχεδιασμού αφορούν τη 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 και συνεπώς η παραπάνω θεώρηση αποτελεί μια απλοποιητική παραδοχή.
  - 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 το σχεδιασμό.
3. Ποιός είναι ο τρόπος διαστασιολόγησης της τάφρου εγκιβωτισμού;
- Για τις διαστάσεις της τάφρου εγκιβωτισμού, ο κανονισμός ορίζει πως πρέπει να είναι «επαρκείς» ώστε η συμπεριφορά του αγωγού να εξαρτάται αποκλειστικά από τις ιδιότητες του υλικού πλήρωσης της τάφρου και να μην αλληλεπιδρά με το φυσικό έδαφος εκτός της τάφρου. Παρόλα αυτά, δεν προτείνεται καμία μέθοδος διαστασιολόγησης της τάφρου ώστε να ικανοποιείται η παραπάνω απαίτηση και ο όρος «επαρκείς» δε διευκρινίζεται με σαφήνεια.
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, ωστόσο στη βιβλιογραφία αυτή η αύξηση δεν ποσοτικοποιείται σαφώς. Ωστόσο, υπάρχει μια μικρή αναφορά – παράδειγμα στο άρθρο των *Kouretzis, Krabbenhøft, Sheng and Sloan (2014)*, όπου καταδεικνύουν την αύξηση της δύναμης επί του αγωγού, λόγω μειωμένων διαστάσεων της τάφρου.



# 3

## Αριθμητικές Αναλύσεις

---

### 3.1 Γενικά

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

- 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.
- Για την περιγραφή της συμπεριφοράς του εδαφικού υλικού υιοθετήθηκε το καταστατικό ελαστο-πλαστικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb, λαμβάνοντας υπόψη τη γωνία διαστολικότητας. Το πλεονέκτημα του εν λόγω προσομοιώματος είναι η ευκολία στη βαθμονόμηση, ενώ αξιολόγηση σε σχέση με πειραματικά δεδομένα δείχνει ότι μπορεί να προβλέψει με ικανοποιητική ακρίβεια τη μέγιστη απόκριση του εδάφους, κάτι που αποτελεί αντικείμενο της παρούσας Εργασίας.
- Επιπλέον, για την προσομοίωση της σχετικής ολίσθησης μεταξύ του αγωγού και του περιβάλλοντος εδάφους κατά την κατακόρυφη μετακίνηση του αγωγού, έγινε χρήση στοιχείων διεπιφάνειας (Interface elements) με μειωμένη γωνία τριβής σε σχέση με αυτή του περιβάλλοντος εδάφους.
- Τέλος, λόγω της επιβολής μεγάλων κατακόρυφων 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 καννάβου 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, τύπος απόσβεσης, μέγεθος στοιχείων καννάβου κ.λ.π.) πραγματοποιήθηκε σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των πειραμάτων των *Trautmann et al. (1985)*, καθώς και των αριθμητικών αναλύσεων των *Kouretzis et al. (2014)*, *Jung et al. (2013)* και *Yimsiri et al. (2004)*, που αφορούν τη συμπεριφορά αγωγού υποβαλλόμενου σε κατακόρυφη προς τα πάνω μετατόπιση

### 3.2 Πειραματικές Μετρήσεις Trautmann et al. (1985)

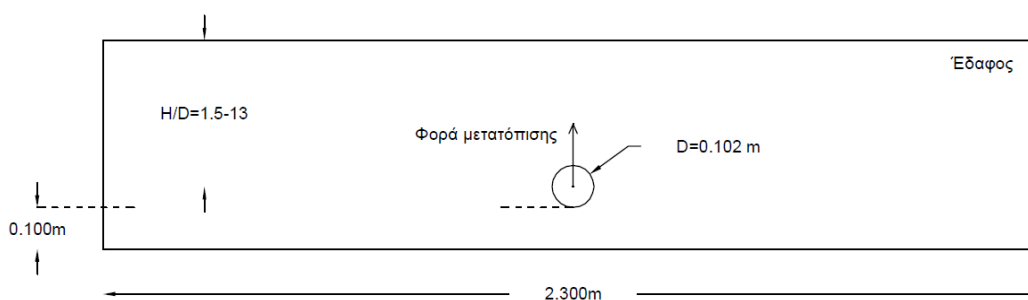
Όπως προαναφέρθηκε στο **Κεφάλαιο 2.3** οι *Trautmann et al. (1985)* πραγματοποίησαν μία σειρά πειραμάτων για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς αγωγών σε κατακόρυφη προς τα πάνω μετατόπιση. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από πέντε (5) βασικά μέρη: (α) το κιβώτιο μέσα στο οποίο τοποθετήθηκε 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 1.52 m, ενώ το μήκος του ήταν ίσο με 1.22 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/m<sup>3</sup> (χαλαρή, μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμος) που αντιστοιχούν σε γωνίες εσωτερικής τριβής 31°, 36° και 44° αντίστοιχα, όπως προέκυψαν από δοκιμές απευθείας διάτμησης σε κατακόρυφη τάση 5kN/m<sup>2</sup>. Για τις δοκιμές κατακόρυφης μετατόπισης χρησιμοποιήθηκε ένα τμήμα μεταλλικού αγωγού εξωτερικής διαμέτρου 102mm, με πάχος τοιχώματος 6.4mm και μήκος 1.2 m. Τα φορτία μεταφέρονταν στον αγωγό μέσω ατσάλινων ράβδων διαμέτρου 16mm, οι οποίες ήταν εξοπλισμένες με μετρητές παραμορφώσεων για τον υπολογισμό των φορτίων, αλλά και με κάλυμμα από PVC ώστε να μειώνεται η τριβή με το έδαφος.

Σε κάθε δοκιμή που πραγματοποιήθηκε, υπήρχε άμμος πάχους τουλάχιστον 100 mm κάτω από τον αγωγό. Πραγματοποιήθηκαν 13 συνολικά δοκιμές φόρτισης. Οι δοκιμές αυτές έγιναν για τις τρεις προαναφερθείσες πυκνότητες και για τέσσερα (4) διαφορετικά βάρη ανά πυκνότητα, με λόγο  $H/D=1.5, 4, 8$  και 13 (όπου  $H$  η απόσταση από το κέντρο του αγωγού ως την επιφάνεια του εδάφους και  $D$  η εξωτερική διάμετρος του αγωγού). Πραγματοποιήθηκε μια επιπλέον δοκιμή για την

πυκνότητα  $17.7 \text{ kN/m}^3$ , για  $H/D=4$  (Test 50). Το ποσοστό πλήρωσης του κιβωτίου με άμμο επίχωσης αποτελούσε συνάρτηση του εκάστοτε λόγου εγκιβωτισμού. Η προσομοίωση της επιρροής της τραχύτητας της εξωτερικής επιφάνειας του αγωγού έγινε μέσω της κάλυψης της με γυαλόχαρτο και με λεπτό στρώμα πλαστικού επιχρισμένου με λάδι μηχανής, για την προσομοίωση τραχειάς και λείας διεπιφάνειας αγωγού-εδάφους αντίστοιχα.

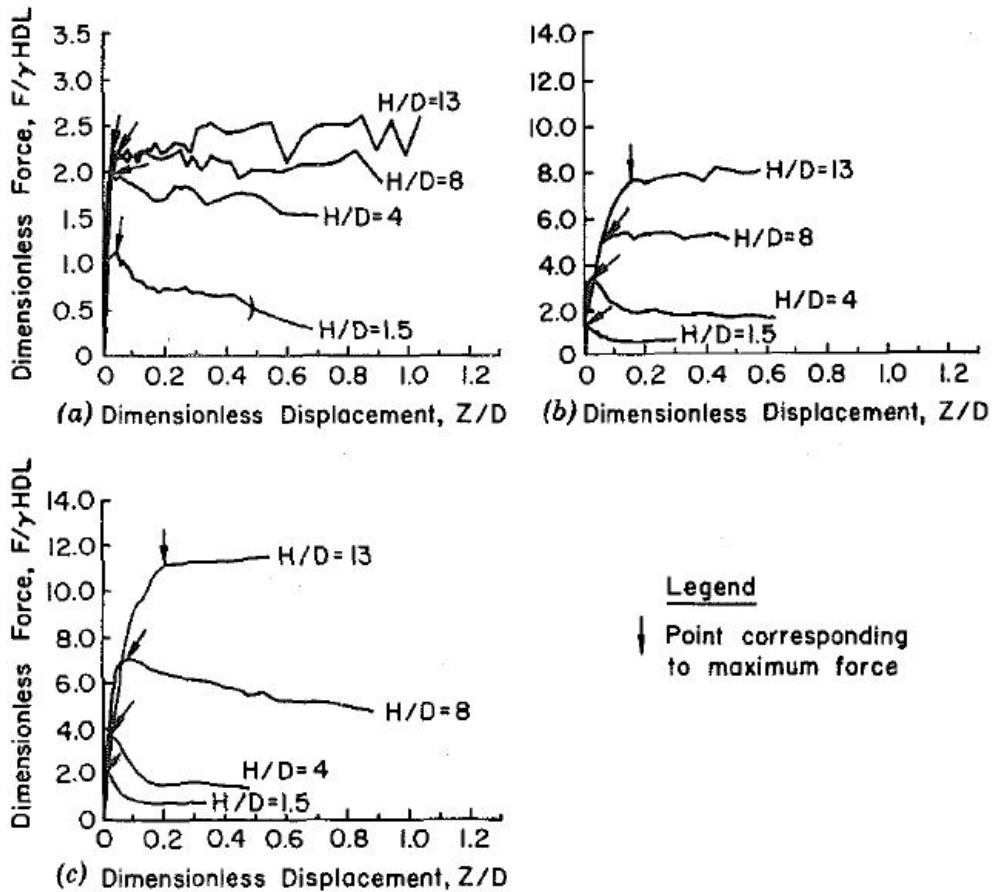
Μία τυπική διατομή της πειραματικής διάταξης για βάθη εγκιβωτισμού  $H/D$  που κυμαίνονται από 1.5 έως 13 και χρήση αγωγού διατομής  $D=102 \text{ mm}$  παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.1**. Στο σχήμα αυτό είναι επίσης εμφανής η φορά μετακίνησης του αγωγού εντός του εδάφους.



**Σχήμα 3.1:** Τυπική διατομή πειραματικής διάταξης *Trautmann et al. (1985)*.

Οι σχέσεις φορτίου-μετατόπισης που προέκυψαν από τα πειράματα αυτά παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο **Σχήμα 3.2**.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία δόθηκε έμφαση στα αποτελέσματα των δοκιμών των *Trautmann et al.* που πραγματοποιήθηκαν για ειδικά βάρη της άμμου επίχωσης  $\gamma=16.4 \text{ kN/m}^3$  (medium sand) και  $\gamma=17.7 \text{ kN/m}^3$  (dense sand) και βάρη επίχωσης  $H/D=1.5, 4, 8,$  και  $13$ . Η επιλογή των μεγαλύτερων πυκνοτήτων προτείνεται και από τους *Yimsiri et al. (2004)*, οι οποίοι αναφέρουν ότι αυτές οι πυκνότητες άμμου επίχωσης χρησιμοποιούνται στη συνήθη πρακτική. Σημειώνεται ότι τα εν λόγω πειράματα προσομοιώθηκαν αριθμητικά και από τους *Kouretzis et al. (2014)*, *Jung et al. (2013)* και *Yimsiri et al. (2004)*, οι παραδοχές και τα αποτελέσματα των οποίων συνεκτιμήθηκαν κατά την αξιολόγηση και βαθμονόμηση της αριθμητικής μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.



**Σχήμα 3.2:** Αποτελέσματα πειραμάτων *Trautmann et al. (1985)* για αγωγό διαμέτρου  $D=102\text{mm}$  σε υλικό πυκνότητας α)  $14.8\text{ kN/m}^3$  b)  $16.4\text{ kN/m}^3$ , c)  $17.7\text{ kN/m}^3$

### 3.3 Αριθμητικές Αναλύσεις

#### 3.3.1 *Yimsiri et al. (2004)*

Οι *Yimsiri et al. (2004)* πραγματοποίησαν σειρά αριθμητικών αναλύσεων για πλήθος βαθών εγκιβωτισμού (έως  $H/D=100$ ) και για προς τα πάνω κατακόρυφη μετατόπιση του αγωγού χρησιμοποιώντας τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (HKS 1998). Ακολούθησαν ως πρότυπο τα πειράματα των *Trautmann et al. (1985)* τόσο ως προς τη διάταξη, όσο και ως προς τα μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών (Cornell Filter Sand, με μέση και μεγάλη πυκνότητα). Για την αριθμητική προσομοίωση δοκιμάστηκαν τα καταστατικά προσομοιώματα Mohr-Coulomb και Nor-Sand (*Jefferies 1993*), όμως τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση του προσομοιώματος Mohr-Coulomb είναι περισσότερο συμβατή με το πρόβλημα της κατακόρυφης προς τα πάνω κίνησης του αγωγού και αυτό χρησιμοποιήθηκε εν τέλει.

Όσον αφορά τις παραμέτρους που εισήχθησαν, η μέγιστη γωνία τριβής  $\phi_{peak}$  και η γωνία διαστολικότητας  $\psi$  προέκυψαν από πειράματα απευθείας διάτμησης που παρουσιάστηκαν από τους *Trautmann et al. (1983)*, ενώ για τον προσδιορισμό της παραμένουσας γωνίας τριβής  $\phi_{crit}$  έγινε χρήση της σχέσης του *Bolton (1986)*:

$$\phi_{peak} = \phi_{crit} + 0.8 \cdot \psi \quad (3.1)$$

Όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας του Young της άμμου επίχωσης χρησιμοποιήθηκε η σχέση των *Hardin and Black (1986)* προσαρμοσμένη στην κατακόρυφη ενεργό τάση στο κέντρο του αγωγού και με τάση αναφοράς την ενεργό τάση εγκιβωτισμού  $p'_A=20$  kPa.

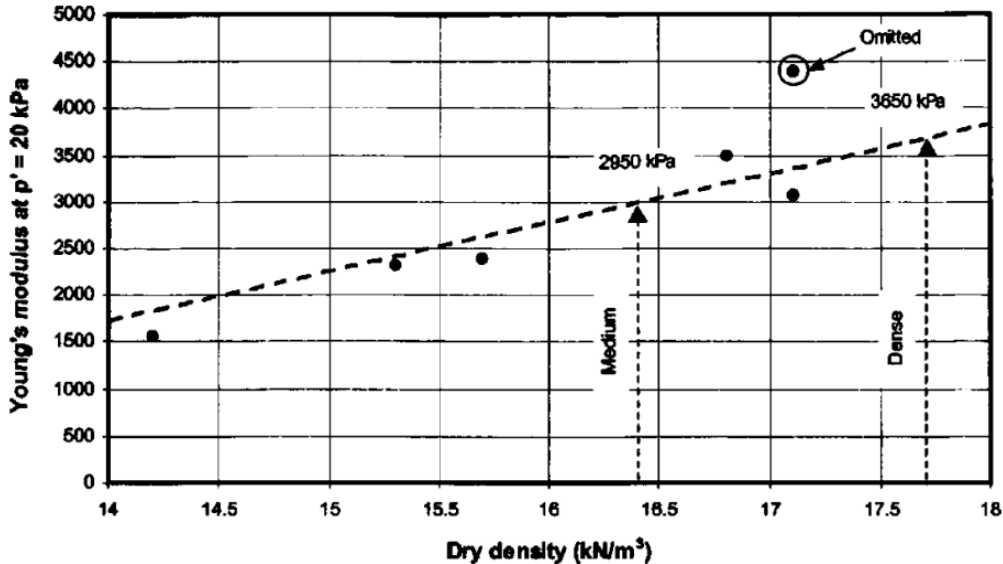
$$E = E_{p'_A} \cdot \sqrt{\frac{\sigma'_v}{p'_A}} \quad (3.2)$$

όπου:

$E_{p'_A}$ : το μέτρο ελαστικότητας για την τάση αναφοράς  $p'_A$  (kPa) (**Σχήμα 3.3**)

$p'_A$ : τάση αναφοράς = 20 kPa

$\sigma'_v$ : κατακόρυφη ενεργός τάση στο κέντρο του αγωγού



**Σχήμα 3.3:** Σχέση μέτρου ελαστικότητας και ξηρής πυκνότητας για τάση αναφοράς  $p'_A=20$  kPa (*Turner and Kulhawy, 1987*).

Ο αγωγός θεωρήθηκε άκαμπτος και η αλληλεπίδραση αυτού με το περιβάλλον έδαφος προσομοιώθηκε με στοιχεία διεπιφάνειας που επιτρέπουν τόσο την ολίσθηση, όσο και την αποκόλληση των δύο επιφανειών. Ακόμη, η γωνία τριβής

μεταξύ αγωγού και εδάφους θεωρήθηκε ίση με  $0.5\phi_{\text{peak}}$ , αφού αποδείχθηκε ότι η τιμή της δεν επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα.

### 3.3.2 Kouretzis et al. (2014)

Οι *Kouretzis et al.* χρησιμοποίησαν τη μέθοδο οριακής ισορροπίας σε κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, ώστε να προσομοιώσουν την κατακόρυφη προς τα κάτω κίνηση του αγωγού. Για τη βαθμονόμηση της μεθόδου τους αναπαρήγαγαν τα πειράματα των *Trautmann et al. (1985)* για κατακόρυφη κίνηση προς τα πάνω χρησιμοποιώντας το καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb. Ακολούθησαν την ίδια διάταξη και τα ίδια μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά άμμου επίχωσης όπως οι *Yimsiri et al. (2014)*, μετατρέποντας όμως τη μέγιστη γωνία τριβής στην αντίστοιχη τιμή για υλικό με συσχετισμένο νόμο ροής (δηλαδή με  $\psi=0$ ), προκειμένου αυτή να είναι συμβατή με τη μέθοδο ανάλυσής τους. Η μετατροπή αυτή δίνεται από τη σχέση του *Davis (1968)* :

$$\tan \varphi^* = n \cdot \tan \varphi_{\text{peak,DS}} \quad (3.3)$$

όπου:

$$n = \frac{\cos \psi \cdot \sin \varphi_{\text{peak,DS}}}{1 - \sin \psi \cdot \sin \varphi_{\text{peak,DS}}} \quad (3.4)$$

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

$\psi$  : η γωνία διαστολικότητας του εδάφους

$\varphi^*$  : η ισοδύναμη μέγιστη γωνία τριβής για υλικό με συσχετισμένο νόμο ροής

Όσον αφορά τη δυσκαμψία της άμμου επίχωσης χρησιμοποιήθηκε η σχέση (*O'Rourke, 2010*) :

$$E = 2 \cdot 10^{-13.97} \cdot (\gamma \cdot \sigma'_v)^{0.0378} \quad (3.5)$$

όπου :

$\gamma$  : το ειδικό βάρος του εδάφους

$\sigma'_v$  : η κατακόρυφη ενεργός γεωστατική τάση

Τέλος, η γωνία τριβής στη διεπιφάνεια αγωγού και περιβάλλοντος εδάφους θεωρήθηκε ίση με  $\delta=0.5\phi_{\text{peak,PS}}$ , όπου  $\phi_{\text{peak,PS}}$  η μέγιστη γωνία τριβής σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, προκειμένου να είναι συμβατή με τις τιμές που υιοθετήθηκαν από τους *Yimsiri et al. (2004)*.

### 3.3.3 Jung et al. (2013)

Οι Jung et al. (2013) προσομοίωσαν την κατακόρυφη προς τα πάνω κίνηση του αγωγού χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και το λογισμικό ABAQUS. Το καταστατικό προσομοίωμα που υιοθετήθηκε ήταν το Mohr-Coulomb και η συμπεριφορά του υλικού επίχωσης μελετήθηκε ως ελαστοπλαστική. Όπως αναφέρεται, προκειμένου τα αριθμητικά αποτελέσματα να μπορούν να συγκριθούν απευθείας με τα πειραματικά αποτελέσματα των Trautmann et al. (1985), χρησιμοποιήθηκαν παράμετροι αντοχής για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης. Για τον προσδιορισμό της μέγιστης γωνίας τριβής έγινε χρήση των πειραματικών αποτελεσμάτων απευθείας διάτμησης σε άμμο Cornell που διεξήχθησαν από τον Olson (2009) και η μετατροπή αυτής έγινε μέσω της σχέσης του Davis (1968) ως ακολούθως:

$$\sin \varphi_{peak,PS} = \frac{\tan \varphi_{peak,DS}}{\cos \psi + \sin \psi \cdot \tan \varphi_{peak,DS}} \quad (3.6)$$

όπου:

$\varphi_{peak,DS}$ : η μέγιστη γωνία τριβής που προκύπτει από τη δοκιμή απευθείας διάτμησης

$\psi$ : η γωνία διαστολικότητας του εδάφους

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

Σχετικά με τη γωνία διαστολικότητας  $\psi$  αναφέρεται πως ο προσδιορισμός αυτής ανάλογα με την κατακόρυφη ενεργό τάση  $\sigma'_v$  στο μέσον του αγωγού δεν είναι ρεαλιστικός, καθώς δε λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή των  $\psi$  και  $\varphi_{peak}$  σε κάθε βάθος λόγω της μεταβολής της  $\sigma'_v$ . Παρά ταύτα παραμετρικές αναλύσεις των Jung et al. (2012) απέδειξαν ότι η θεώρηση μεταβολής της γωνίας  $\psi$  με την τάση εγκιβωτισμού παρουσιάζει διαφορά στις τιμές των μέγιστων πλευρικών δυνάμεων επί του αγωγού της τάξης του 0.2% έως 3.3%, οι οποίες είναι σχετικά μικρές και συνεπώς μπορούν να αγνοηθούν.

Το υλικό μελέτης ήταν άμμος Cornell σε πυκνότητες 16.4 kN/m<sup>3</sup> και 17.7 kN/m<sup>3</sup>.

Ως προς το μέτρο ελαστικότητας του υλικού χρησιμοποιήθηκε η σχέση του Jung (2010):

$$E_a = (1 - a \cdot R_f) \cdot E_i \quad (3.7)$$

όπου:

$a = 0.94$  (Jung, 2010)

$R_f = 0.90$  (Trautmann and O'Rourke, 1983)

$$E_i = K \cdot p_a \cdot \left( \frac{\sigma'_3}{p_a} \right)^n \quad (\text{Janbu, 1963}) \quad (3.8)$$

όπου:

$\sigma'_3$  : πλευρική πίεση

$K = 800$  (Duncan and Chang (1970) και Wong and Duncan (1974))

$n = 0.55$  (Duncan and Chang (1970) και Wong and Duncan (1974))

$p_a$  : ατμοσφαιρική πίεση = 98.1 kPa

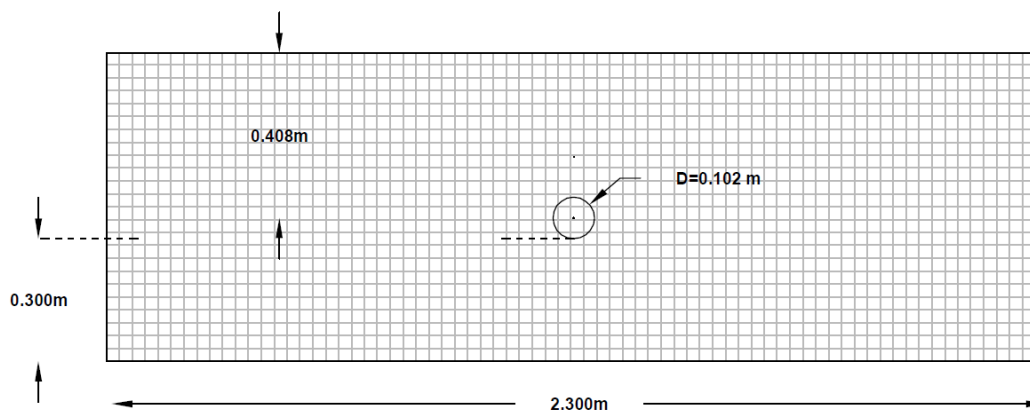
Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στη μείωση της κατακόρυφης δύναμης επί του αγωγού με την αύξηση της μετατόπισης πέραν αυτής στην οποία η κατακόρυφη δύναμη φθάνει τη μέγιστη τιμή της, κάτι που παρατηρήθηκε στα πειραματικά αποτελέσματα για μικρά κυρίως βάθη εγκιβωτισμού. Οι Cheuk et al. (2008) αναφέρουν πως αυτή η μείωση οφείλεται τόσο στη μείωση του βάρους του εδαφικού πρίσματος πάνω από τον αγωγό, καθώς υλικό ολισθαίνει πλευρικά γεμίζοντας το κενό που δημιουργείται κάτω από τον αγωγό, όσο και στη μείωση της δύναμης τριβής στις διατμητικές επιφάνειες αστοχίας, οι οποίες εκτείνονται από τον αγωγό έως την επιφάνεια του εδάφους. Η μείωση της δύναμης τριβής είναι συνέπεια της μείωσης της γωνίας τριβής από την τιμή  $\phi_{peak}$  στην τιμή  $\phi_{crit}$  και της μείωσης του μήκους των επιφανειών αστοχίας καθώς ο αγωγός κινείται προς τα πάνω.

Οι Jung et al. προσομοιώνουν αυτή τη συμπεριφορά με το μοντέλο που πρότειναν οι Anastasopoulos et al. (2007), το οποίο μειώνει τη  $\phi_{peak}$  και την  $\psi$  στις τιμές  $\phi_{crit}$  και 0 αντίστοιχα ανάλογα με τη διατμητική παραμόρφωση  $\gamma$ . Τέλος, προκειμένου τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης να συμφωνούν ακόμη περισσότερο με τα πειραματικά, προχώρησαν στην αφαίρεση στοιχείων από την επιφάνεια του εδάφους, ώστε να μειώνεται σταδιακά το βάρος του εδαφικού πρίσματος.

### 3.4 Αριθμητική Προσομοίωση Κατακόρυφης Μετατόπισης Αγωγού

Ο κάρναβος πεπερασμένων διαφορών που κατασκευάστηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία για τη μελέτη του προβλήματος φαίνεται στο **Σχήμα 3.4**. Οι διαστάσεις του ορίστηκαν με βάση την πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα των Trautmann et al (1985). Συγκεκριμένα το μήκος του σε όλες τις αναλύσεις διατηρήθηκε σταθερό και ίσο με 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 καννάβου διατηρήθηκε σταθερή, ανεξαρτήτως βάθους εγκιβωτισμού, και ίση με 300 mm (*Yimsiri et al. (2004)* και *Kouretzis et al. (2014)*), ούτως ώστε να διασφαλισθεί ότι το κάτω όριο του καννάβου δεν θα ασκεί καμία επιρροή στα αριθμητικά αποτελέσματα. Στα πειράματα των *Trautmann et al. (1985)* και κατά συνέπεια και στις αναλύσεις αξιολόγησης της παρούσας μεθοδολογίας εξετάστηκαν 4 διαφορετικά βάθη εγκιβωτισμού του αγωγού,  $H/D=1.5, 4, 8$  και  $13$ , όπου  $D$  η εξωτερική διάμετρος του αγωγού με σταθερή τιμή  $D=102$  mm.



**Σχήμα 3.4:** Τυπική απεικόνιση καννάβου για βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=4$ .

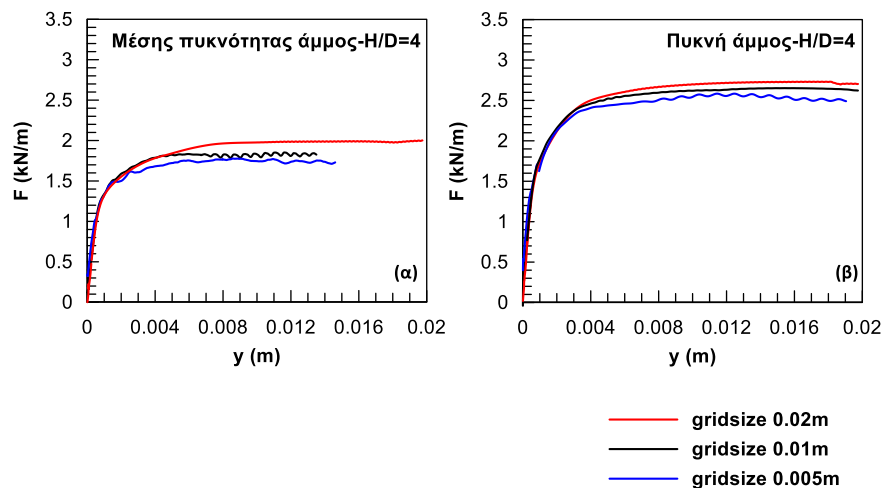
### 3.4.1 Επίδραση μεγέθους ζωνών διακριτοποίησης

Τα στοιχεία του καννάβου που επιλέχθηκαν είχαν τετραγωνικό σχήμα. Οι διαστάσεις των στοιχείων προέκυψαν έπειτα από αναλύσεις ευαισθησίας στις οποίες εξετάστηκαν οι τιμές 0.005, 0.01 και 0.02 m. Οι αναλύσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν για βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=4$  εξετάζοντας τόσο την περίπτωση της μέσης πυκνότητας άμμου (medium sand), όσο και την περίπτωση της πυκνής άμμου (dense sand). Τα αποτελέσματα σε όρους φορτίου-μετατόπισης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.5**.

Από τις αναλύσεις ευαισθησίας προκύπτει ότι με τη μείωση του μεγέθους των στοιχείων του καννάβου, η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης προσεγγίζει ακριβέστερα την πραγματική της μορφή. Η σύγκριση αυτή γίνεται πιο αισθητή στη σύγκριση μεταξύ του αδρού καννάβου με στοιχεία 0.02 και του πιο λεπτομερούς με στοιχεία 0.005 m. Παρατηρείται επίσης, ότι ο καννάβος με μέγεθος στοιχείων 0.02 m, οδηγεί σε σημαντική υπερεκτίμηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους, ενώ ο καννάβος με στοιχεία 0.01 m δίνει πάντα μία μέση τιμή. Τέλος, η πιθανή χρήση του καννάβου με στοιχεία 0.005 m θα επιβάρυνε σε μεγάλο βαθμό την ταχύτητα ολοκλήρωσης των αναλύσεων, χωρίς παράλληλα να δίνει εύλογες αποκλίσεις στα



αποτελέσματα συγκριτικά με τον κάρναβο στοιχείων μεγέθους 0.01 m. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα ανωτέρω, καθώς και το γεγονός ότι στην παρούσα Εργασία μελετάται η σχετική επίδραση της γεωμετρίας της τάφρου στην τιμή του οριακού φορτίου και όχι η ίδια η τιμή του οριακού φορτίου, στην παρούσα αριθμητική μεθοδολογία επιλέχθηκε τελικά κάρναβος με τετραγωνικά στοιχεία μεγέθους 0.01 m.



**Σχήμα 3.5:** Αποτελέσματα αναλύσεων ευαισθησίας για την επιλογή του μεγέθους των στοιχείων του κάρναβου α) για μέσης πυκνότητας και β) για πυκνή άμμο επίχωσης.

### 3.4.2 Εισαγωγή στοιχείων διεπιφάνειας

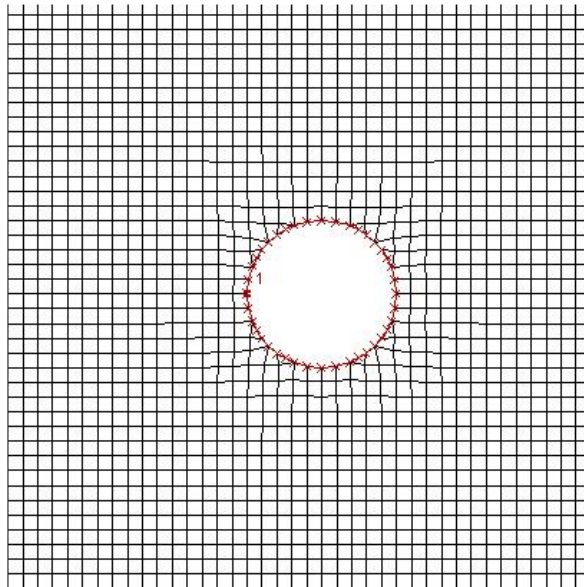
Για την προσομοίωση της σχετικής ολίσθησης αγωγού-περιβάλλοντος εδάφους, μηχανισμού ιδιαίτερα κρίσιμου για την ορθή εκτίμηση της όλης απόκρισης, έγινε χρήση στοιχείων διεπιφάνειας (interface). Η λογική με την οποία λειτουργεί το FLAC όσον αφορά τα στοιχεία διεπιφάνειας είναι η ακόλουθη: Πραγματοποιείται η τοποθέτηση των εν λόγω στοιχείων και στις δύο πλευρές της εκάστοτε επιφάνειας, στην περίπτωση μας 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 (από το χρήστη) δυσκαμψίας και παραμέτρων αστοχίας (εφελκυστική και διατμητική).

Αν η εφελκυστική αντοχή των ελατηρίων ορισθεί ίση με μηδέν (0 kPa), τότε για τη διατμητική αστοχία χρησιμοποιείται από το FLAC το κριτήριο Mohr-Coulomb. Σε περίπτωση όμως που ορισθεί κάποια τιμή διάφορη του μηδενός για την εφελκυστική αντοχή, τότε η διατμητική αντοχή λαμβάνεται αυτόματα εκατονταπλάσια αυτής. Κατά τη 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 αναπτυσσομένη δύναμη ξεπεράσει την παραπάνω οριακή τιμή, τότε πραγματοποιείται ολίσθηση ή και αποκόλληση των στοιχείων του εδάφους από τα στοιχεία του αγωγού.

Ο αλγόριθμος πεπερασμένων διαφορών FLAC παρέχει στο χρήστη αρκετές επιλογές σχετικά με τη 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 στη 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 κατακόρυφη μετατόπιση, επιτράπηκε η ολίσθηση των στοιχείων του εδάφους επί των στοιχείων του αγωγού, καθώς επίσης και η αποκόλλησή τους, δεδομένης της φυσικής του προβλήματος, αλλά και του γεγονότος ότι η δέσμευση της αποκόλλησης και της ολίσθησης θα αύξανε πλασματικά την τιμή της κατακόρυφης δύναμης επί του αγωγού.

Στο **Σχήμα 3.6** δίνεται λεπτομέρεια του καννάβου στην οποία παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα η διεπιφάνεια αγωγού-περιβάλλοντος εδάφους.



**Σχήμα 3.6:** Διεπιφάνεια εδάφους αγωγού

Αναφορικά με τη 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, όπως προτείνεται από το εγχειρίδιο του FLAC :

$$k_n = k_s = \frac{K + \frac{4}{3} \cdot G}{\Delta z_{\min}} \quad (3.9)$$

όπου:

$k_n$  : η τιμή της αξονικής δυσκαμψίας

$k_s$  : η τιμή της διατμητικής δυσκαμψίας

$K$  : το μέτρο ογκομετρικής παραμόρφωσης του εδάφους

$G$  : το μέτρο διάτμησης του εδάφους

$\Delta z_{\min}$  : το μήκος των στοιχείων του καννάβου

Οι τιμές των  $K$  και  $G$  αυξάνονται με το βάθος σύμφωνα με μια συνάρτηση που θα παρουσιαστεί παρακάτω. Αν και στο εγχειρίδιο του FLAC αναφέρεται ότι οι τιμές των  $K$  και  $G$  που επιλέγονται στη **Σχέση (3.9)** πρέπει να είναι οι μεγαλύτερες τιμές μεταξύ όλων των εδαφικών στοιχείων της διεπιφάνειας (άρα αντιστοιχούν στη βάση του αγωγού), από αναλύσεις ευαισθησίας προέκυψε ότι η χρήση των τιμών  $K$  και  $G$  που αντιστοιχούν στο κέντρο του αγωγού είναι επίσης κατάλληλη. Ακόμη, οι τιμές των  $K$  και  $G$  αναφέρονται μόνο στο έδαφος, καθώς ο αγωγός θεωρήθηκε πως μεταφέρεται ως άκαμπτο στερεό και συνεπώς επιλέχθηκε γι' αυτόν πολύ μεγάλη δυσκαμψία. Η τιμή του  $\Delta z_{\min}$  επιλέχθηκε ίση με το μέγεθος των στοιχείων του καννάβου ( $\Delta z_{\min}=0.01$  m), αφού ο κάρναβος αποτελείται από ομοιόμορφα τετραγωνικά στοιχεία. Οι τιμές της δυσκαμψίας της διεπιφάνειας που υπολογίστηκαν με βάση τη **Σχέση (3.9)** είναι ίσες με :

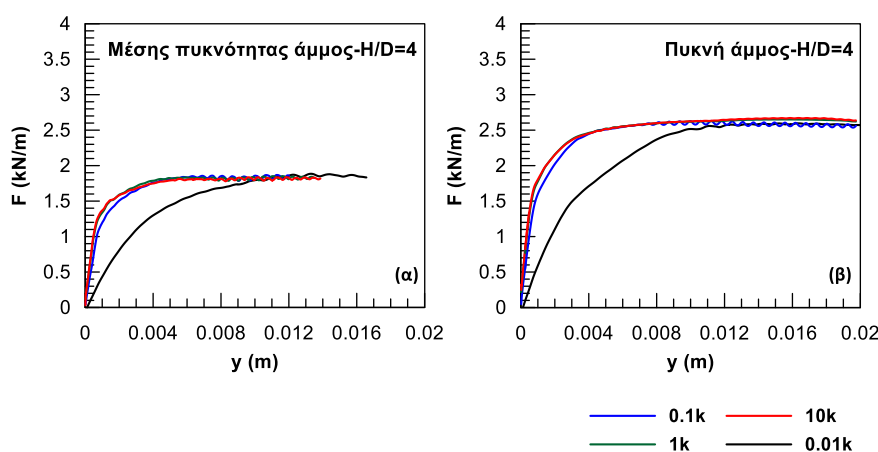
- $k_n = k_s = 250928.57$  kN/m<sup>3</sup>, για άμμο ειδικού βάρους 16.4kN/m<sup>3</sup> και λόγο H/D=4.
- $k_n = k_s = 340215.06$  kN/m<sup>3</sup>, για άμμο ειδικού βάρους 17.7 kN/m<sup>3</sup> και λόγο H/D=4.

Κατόπιν υπολογισμού των βασικών τιμών για τη δυσκαμψία της διεπιφάνειας από την εξίσωση **(3.9)**, 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 :

- $k_{n1}=k_{s1}=k_n, k_s \times 0.01$
- $k_{n2}=k_{s2}=k_n, k_s \times 0.1$

- $k_{n3}=k_{s3}=k_n, k_s \times 1$
- $k_{n4}=k_{s4}=k_n, k_s \times 10$

Οι σχέσεις φορτίου-μετατόπισης που προκύπτουν από τις παραπάνω αναλύσεις παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.7**. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν τόσο για άμμο με ειδικό βάρος  $\gamma=16.4 \text{ kN/m}^3$  (medium sand), όσο και για άμμο με ειδικό βάρος  $\gamma=17.7 \text{ kN/m}^3$  (dense sand) και ενδεικτικά για βάθος εγκιβωτισμού του αγωγού  $H/D=4$ . Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών φαίνεται πως έντονη επιρροή στην καμπύλη φορτίου μετατόπισης παρουσιάζεται κυρίως στην περίπτωση των τιμών  $k_{n1} - k_{s1}$  και  $k_{n2} - k_{s2}$ . Οι υπόλοιπες τιμές δεν φαίνονται να επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα της ανάλυσης, συνεπώς για την αριθμητική μεθοδολογία επιλέχθηκαν οι αρχικές τιμές δυσκαμψίας  $k_{n3} - k_{s3}$ .



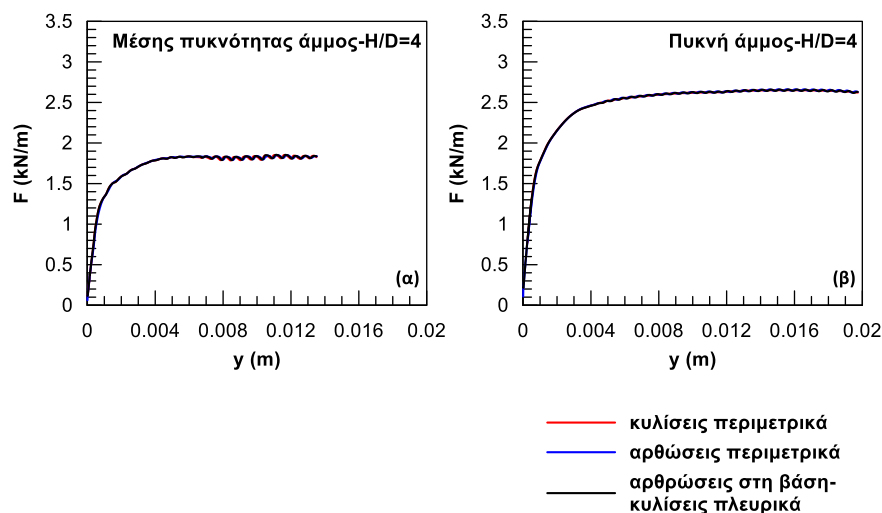
**Σχήμα 3.7:** Αναλύσεις ευαισθησίας για την εκτίμηση της επιρροής της δυσκαμψίας των στοιχείων διεπιφάνειας στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης α) για μέσης πυκνότητας και β) για πυκνή άμμο επίχωσης.

Η συνοχή (cohesion) των στοιχείων της διεπιφάνειας του αγωγού λήφθηκε ίση με 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.

### 3.4.3 Επίδραση συνοριακών συνθηκών

Όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες, πραγματοποιήθηκε σειρά αναλύσεων ευαισθησίας λόγω αβεβαιοτήτων σχετικά με τις συνοριακές συνθήκες της πειραματικής διάταξης των *Trautmann et al. (1985)*. Εξετάστηκαν οι περιπτώσεις χρήσης μόνο κυλίσεων περιμετρικά της τάφρου, μόνο αρθρώσεων περιμετρικά της τάφρου, αλλά και συνδυασμού κυλίσεων στα κατακόρυφα όρια και αρθρώσεων στη

βάση. Οι σχέσεις φορτίου-μετατόπισης που προκύπτουν από τις παραπάνω αναλύσεις παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.8**. Όπως φαίνεται οι συνοριακές συνθήκες πρακτικά δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Προκειμένου όμως να προσομοιωθεί ρεαλιστικότερα η φυσική του προβλήματος, επιλέγονται αρθρώσεις περιμετρικά, δεδομένου ότι σε πρακτικές εφαρμογές αναπτύσσεται μεγάλη δύναμη τριβής μεταξύ του υλικού επίχωσης και του φυσικού εδάφους.



**Σχήμα 3.8:** Αναλύσεις ευαισθησίας για την εκτίμηση της επιρροής των συνοριακών συνθηκών στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης α) για μέσης πυκνότητας και β) για πυκνή άμμο επίχωσης.

#### 3.4.4 Καταστατικό προσομοίωμα άμμου

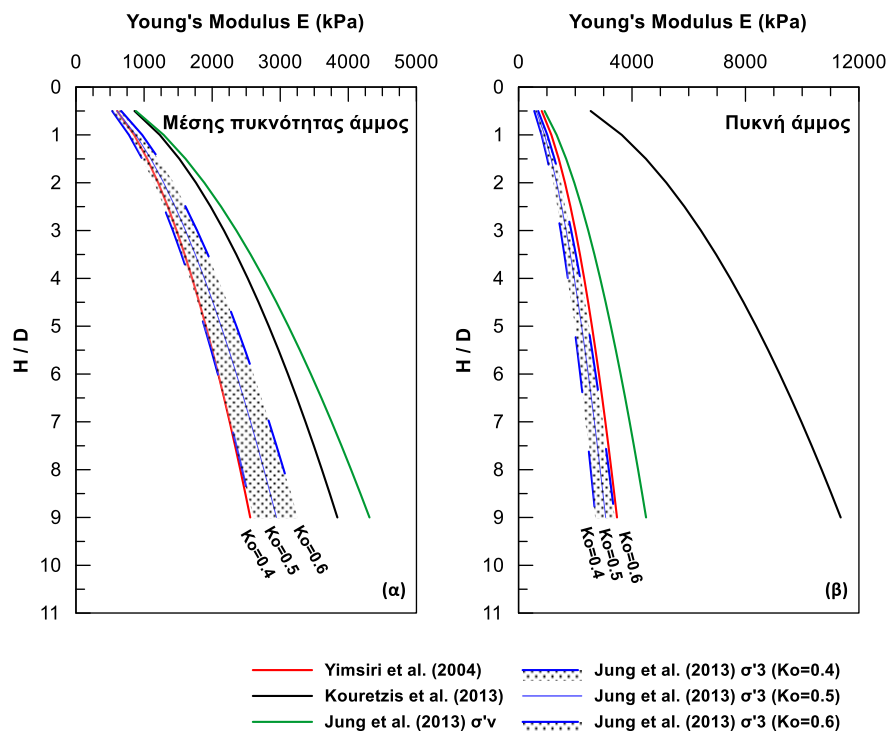
Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους χρησιμοποιήθηκε το ελαστοπλαστικό καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb. Εκτενής δικαιολόγηση της επιλογής αυτής θα γίνει στην **Ενότητα 3.5.2**. Εκ προοιμίου αναφέρεται ότι η τιμή του μέτρου ελαστικότητας  $E$  αποτέλεσε αντικείμενο αναλύσεων ευαισθησίας. Εξετάστηκαν οι εξής περιπτώσεις:

- Μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με τους *Yimsiri et al. (2004)*, **Σχέση (3.2)**
- Μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με τους *Jung et al. (2013)*, **Σχέση (3.7)**
- Μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με τους *Kouretzis et al. (2013)*, **Σχέση (3.5)**

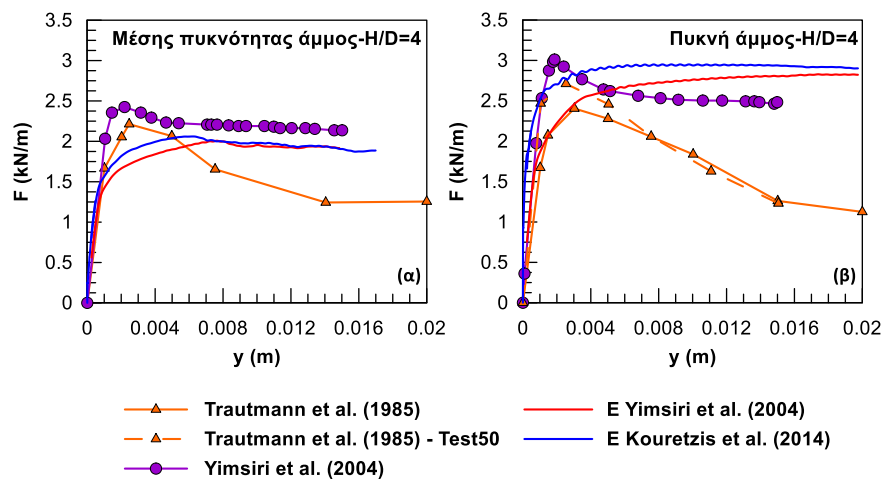
Στο **Σχήμα 3.9** παρουσιάζεται η μεταβολή του προτεινόμενου σε κάθε περίπτωση μέτρου ελαστικότητας με το βάθος.

Όπως φαίνεται και στις δύο περιπτώσεις πυκνότητας τα αποτελέσματα των *Yimsiri et al. (2004)* και των *Jung et al. (2013)* για χρήση της πλευρικής ενεργού τάσης στη **Σχέση (3.8)** είναι πολύ κοντά, γι' αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις

ευαισθησίας όπου εξετάστηκαν μόνο οι σχέσεις των *Yimsiri et al. (2004)* και *Kouretzis et al. (2013)*, οι οποίες διαφέρουν σημαντικά.



**Σχήμα 3.9:** Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας με το βάθος σύμφωνα με τους *Yimsiri et al. (2004)*, *Jung et al. (2013)* και *Kouretzis et al. (2013)* α) για μέσης πυκνότητας και β) για πυκνή άμμο επίχωσης.



**Σχήμα 3.10:** Αναλύσεις ευαισθησίας για την εκτίμηση της επιρροής της σχέσης υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης α) για μέσης πυκνότητας και β) για πυκνή άμμο επίχωσης.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για  $H/D=4$  παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.10** μαζί με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα. Είναι εμφανές ότι η καμπύλη φορτίου μετατόπισης η οποία προκύπτει χρησιμοποιώντας το μέτρο ελαστικότητας που προτείνεται από τους *Yimsiri et al. (2004)* προσεγγίζει καλύτερα την πειραματική καμπύλη των *Trautmann et al. (1985)*, ενώ η αντίστοιχη καμπύλη που προκύπτει για μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με τους *Kouretzis et al. (2013)* υπερεκτιμά συστηματικά την ακαμψία του υλικού επίχωσης της τάφρου και κατ' επέκταση την κατακόρυφη δύναμη επί του αγωγού. Συνεπώς επιλέγεται το μέτρο ελαστικότητας των *Yimsiri et al.* στις αναλύσεις της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

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

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (3.10)$$

και

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \quad (3.11)$$

όπου:

$E$  : το μέτρο ελαστικότητας

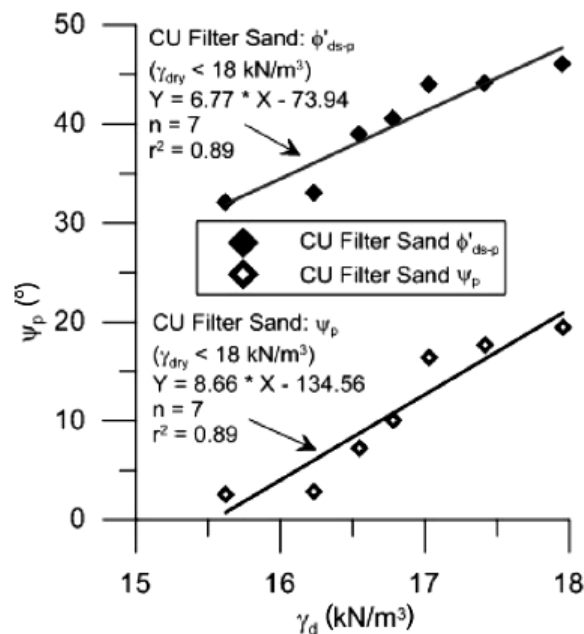
$\nu$  : ο λόγος του Poisson ο οποίος για όλες τις αναλύσεις θεωρήθηκε ίσος με  $\nu=1/3$

Η μέγιστη γωνία τριβής για την άμμο Cornell, που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα των *Trautmann et al. (1985)*, για την περίπτωση μέσης πυκνότητας και πυκνής άμμου αναφέρεται ίση με  $\phi_{\text{peak}}=36^\circ$  και  $44^\circ$  αντίστοιχα, ενώ η αντίστοιχη τιμή κατά την κρίσιμη κατάσταση είναι ίση με  $\phi_{\text{crit}}=31^\circ$ . Σημειώνεται ότι οι εν λόγω τιμές αφορούν δοκιμές απευθείας διάτμησης των ιδίων.

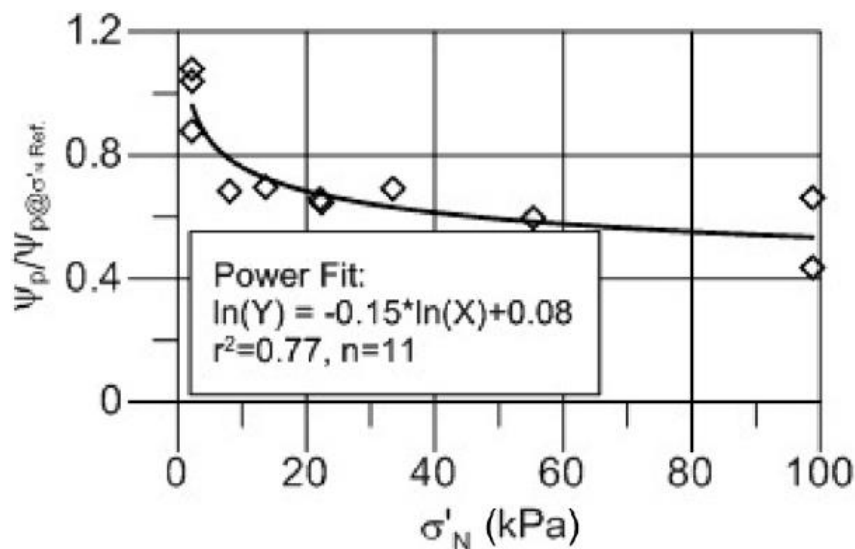
Οι *Yimsiri et al. (2004)* πραγματοποίησαν αριθμητικές αναλύσεις χρησιμοποιώντας τις γωνίες τριβής όπως αυτές προέκυψαν από τις δοκιμές απευθείας διάτμησης των *Trautmann et al. (1985)* και τη γωνία διαστολικότητας  $\psi$  όπως αυτή προκύπτει από τη **Σχέση (3.1)** του *Bolton (1986)*.

Οι *Jung et al. (2013)* χρησιμοποίησαν τα αποτελέσματα των δοκιμών απευθείας διάτμησης που παρουσίασε ο *Olson (2009)*, σύμφωνα με τα οποία προσεγγίζεται η

μεταβολή της γωνίας τριβής  $\phi_{peak,DS}$  και της γωνίας διαστολικότητας  $\psi$  με το βάθος (Σχήμα 3.11 και Σχήμα 3.12).



**Σχήμα 3.11:** Σχέση γωνιών  $\psi_p$  και  $\phi_{peak,DS}$  – ξηρού ειδικού βάρους για ξηρή άμμο Cornell σε ενεργό κατακόρυφη τάση  $\sigma'_N = 2.1$  kPa (Olson, 2009).



**Σχήμα 3.12:** Επίδραση κατακόρυφης ενεργού τάσης στην τιμή της γωνίας διαστολικότητας  $\psi_p$  (για  $\gamma_d = 16.5$  kN/m<sup>3</sup>).

Για τον υπολογισμό της μέγιστης γωνίας τριβής  $\phi_{peak,DS}$  χρησιμοποίησαν τη σχέση των Lings and Dietz (2004) :

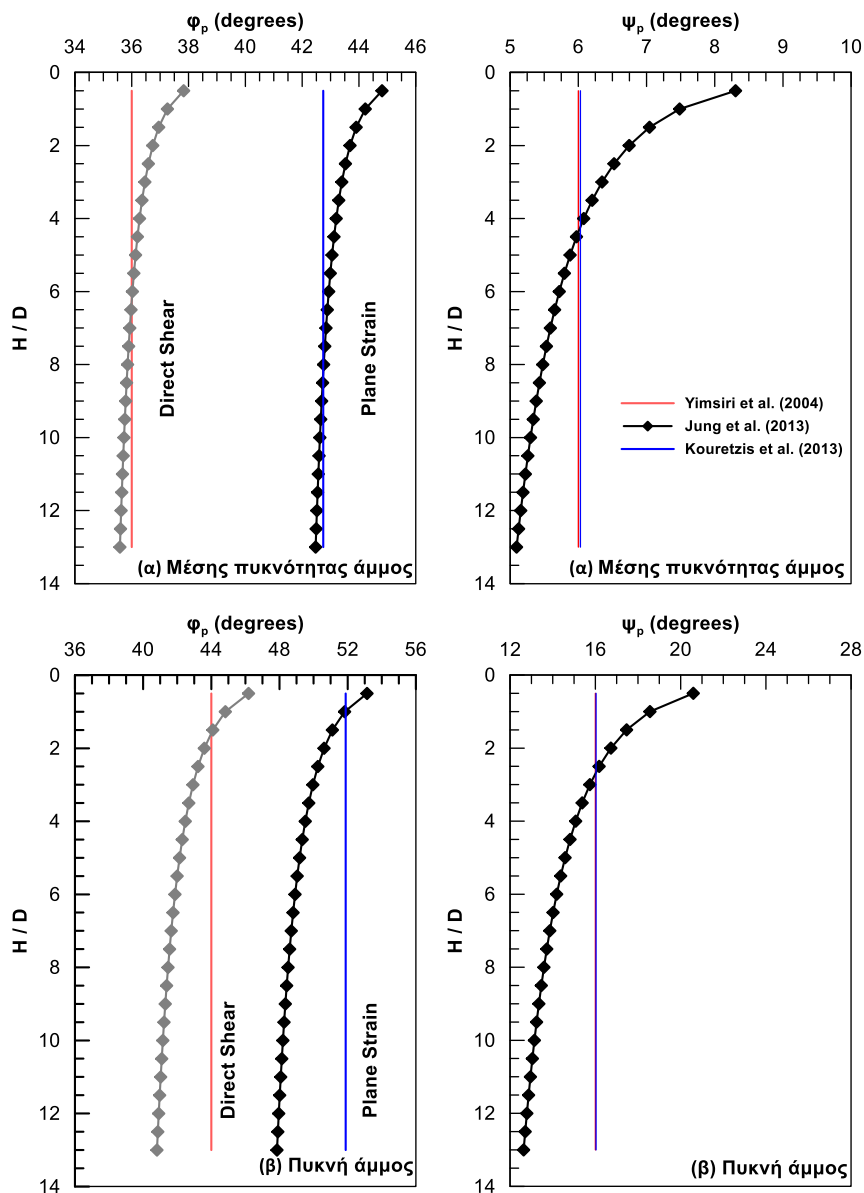


$$\tan \varphi'_{peak,DS} = \frac{\sin \varphi'_{crit} + \sin \psi_p}{\cos \psi_p} \quad (3.12)$$

όπου  $\varphi'_{crit} = 38.6^\circ$  και η  $\psi_p$  υπολογίζεται ως ανωτέρω.

Για τη μετατροπή των δεδομένων γωνιών από πειράματα απευθείας διάτμησης σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκε η **Σχέση (3.6)** του *Davis (1968)*.

Στο **Σχήμα 3.13** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές των γωνιών που προτείνονται παραπάνω καθώς και η μεταβολή τους με το βάθος.



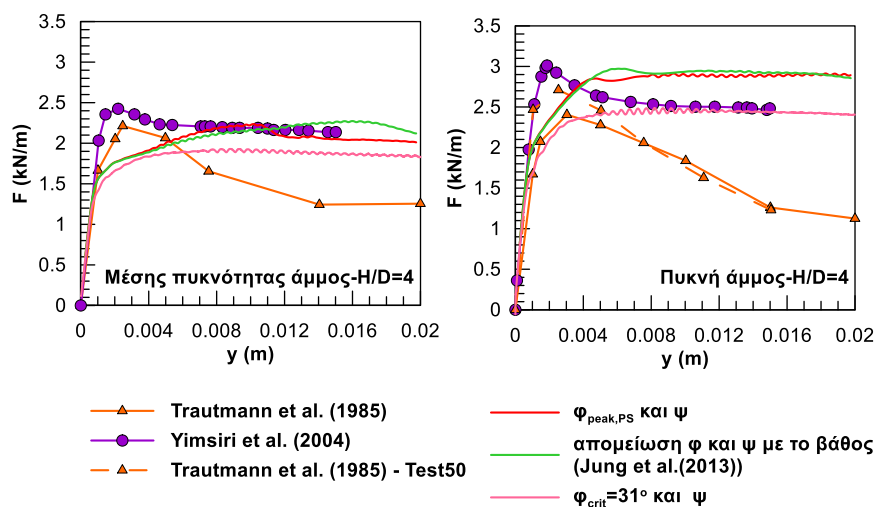
**Σχήμα 3.13:** Γωνίες τριβής και **Σχήμα 3.13** διαστολικότητας όπως προτείνονται από τους *Yimsiri et al.* και *Jung et al.* για διάφορα βάθη εγκιβωτισμού α) για μέσης πυκνότητας και β) για πυκνή άμμο επίχωσης.

Στην παρούσα Εργασία, προκειμένου να γίνει αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που δίνει κάθε προτεινόμενη μεθοδολογία και επιλογή των καταλλήλων τιμών για τις γωνίες τριβής και διαστολικότητας, εξετάσθηκε πληθώρα πιθανών τιμών, από τις οποίες παρουσιάζονται τα άνω και κάτω όρια:

- Άνω όριο:  $\phi_{\text{peak,PS}} = 43^\circ$  και  $52^\circ$  και  $\psi = 6^\circ$  και  $16^\circ$ , για μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο αντίστοιχα.
- Κάτω όριο:  $\phi_{\text{crit}} = 31^\circ$  και  $\psi = 6^\circ$  και  $16^\circ$ , για μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο αντίστοιχα.
- Μεταβολή της  $\phi_{\text{peak,PS}}$  και της  $\psi$  με το βάθος (Jung et al. (2013))

Η χρήση  $\phi_{\text{crit}}$  σε συνδυασμό με γωνία διαστολικότητας διάφορης του μηδενός αιτιολογείται από το γεγονός ότι, σύμφωνα με το καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb, μόνο η γωνία τριβής  $\phi_{\text{crit}}$  χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής, ενώ η γωνία διαστολικότητας είναι απαραίτητη για τη σωστή προσομοίωση των επιφανειών αστοχίας και κατ' επέκταση το σωστό υπολογισμό του βάρους του υπερκείμενου πρίσματος.

Στο **Σχήμα 3.14** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αυτών αναλύσεων.



**Σχήμα 3.14:** Παραμετρικές αναλύσεις για την εκτίμηση της επιρροής των γωνιών τριβής και διαστολικότητας στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης· άνω όριο και κάτω όριο.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν δύο βασικά συμπεράσματα: α) τόσο η εφαρμογή της μέγιστης γωνίας τριβής σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης  $\phi_{\text{peak,PS}}$ , όσο και η εφαρμογή σταδιακής απομείωσης με το βάθος της  $\phi_{\text{peak,PS}}$  και της γωνίας διαστολικότητας  $\psi$  δίνουν καμπύλες φορτίου-μετατόπισης των οποίων η μέγιστη τιμή προσεγγίζει ικανοποιητικά τη μέγιστη τιμή των πειραματικών

αποτελεσμάτων. Συνεπώς, επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί σταθερή γωνία τριβής ίση με τη μέγιστη γωνία τριβής σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης  $\phi_{\text{peak,PS}}$ , καθώς τα αποτελέσματα διαφέρουν μόνο κατά 5% σε σχέση με αυτά που δίνονται για μεταβαλλόμενη με το βάθος  $\phi_{\text{peak,PS}}$  και  $\psi$ , ενώ ο υπολογιστικός χρόνος στη δεύτερη περίπτωση αυξάνεται αισθητά. β) Όπως ήταν αναμενόμενο, η χρήση της κρίσιμης γωνίας τριβής  $\phi_{\text{crit}}$  έδωσε σημαντικά μικρότερο οριακό φορτίο επί του αγωγού. Όμως, παρουσιάζει ενδιαφέρον ότι η εν λόγω μείωση του οριακού φορτίου υστερεί αυτής που επιδεικνύουν τα πειραματικά αποτελέσματα. Αυτό σημαίνει ότι η μείωση της γωνίας τριβής από  $\phi_{\text{peak,PS}}$  σε  $\phi_{\text{crit}}$  δεν είναι ο μόνος μηχανισμός που διαμορφώνει την παρατηρούμενη μείωση των πειραματικών μετρήσεων για αυξανόμενη μετατόπιση του αγωγού. Πρόσθετη επίδραση θα πρέπει να προέρχεται από την εισροή άμμου στο κενό που δημιουργείται κάτω από τον αγωγό, όπως υποδεικνύουν οι *Cheuk et al. (2008)* και *Jung et al. (2013)*. Περαιτέρω διερεύνηση του θέματος γίνεται στην ενότητα **3.5.3**.

#### 3.4.5 Επίδραση ταχύτητας επιβολής μετατόπισης αγωγού

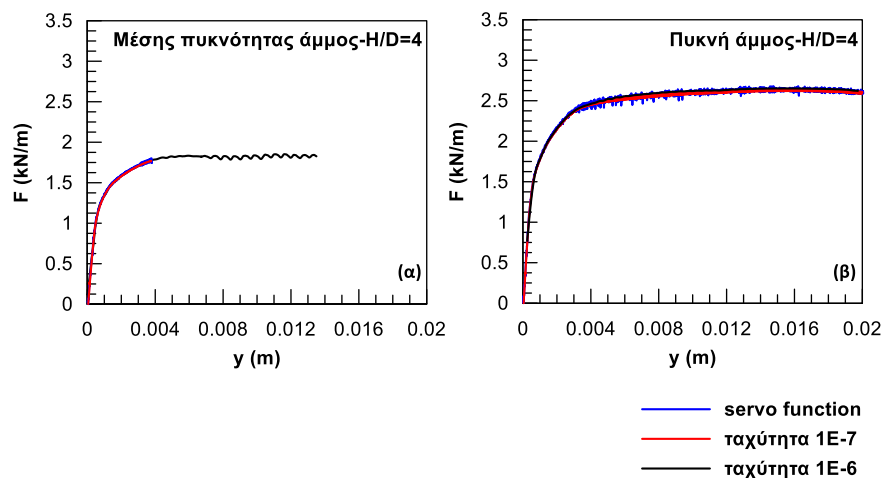
Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε δύο (2) στάδια. Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται η επίλυση του μοντέλου υπό καθεστώς γεωστατικών τάσεων. Για την επίλυση ορίστηκε συντελεστής ουδέτερης ώθησης γαιών  $K_0=0.5$  και τιμή επιτάχυνσης βαρύτητας ίση με  $g=9.81 \text{ m/s}^2$ . Στη φάση αυτή της ανάλυσης, το 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. Μετά την επίλυση του πρώτου σταδίου προσδόθηκαν στο έδαφος οι πραγματικές του ιδιότητες.

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

- $v_{\text{vel}}=10^{-6} \text{ m/step}$
- $v_{\text{vel}}=10^{-7} \text{ m/step}$
- Συνεχής αυξομείωση της ταχύτητας ώστε να περιορίζονται τα αδρανειακά φαινόμενα σε κάθε βήμα (servo function).

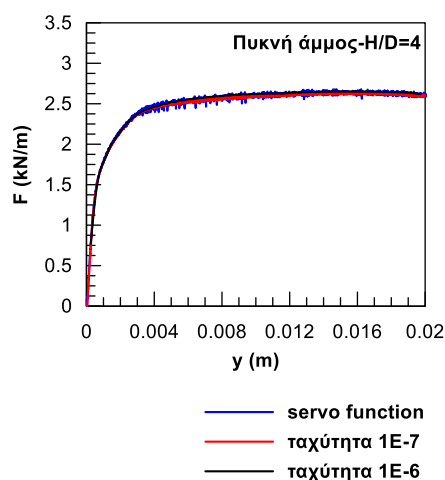
Όπως και στις προηγούμενες αναλύσεις ευαισθησίας, ο κάνναβος που επιλέχθηκε αντιστοιχεί σε λόγο  $H/D=4$ , ενώ εξετάστηκε η περίπτωση τόσο της άμμου μέσης

πυκνότητας (medium sand), όσο και της πυκνής άμμου επίχωσης (dense sand). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων ευαισθησίας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.15**.



**Σχήμα 3.15:** Αναλύσεις ευαισθησίας για την εκτίμηση της επιρροής του μεγέθους της επιβαλλόμενης στον αγωγό ταχύτητας α) για μέσης πυκνότητας και β) για πυκνή άμμο επίχωσης.

Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η μετατόπιση, η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης παρουσιάζει διακυμάνσεις, οι οποίες σύμφωνα με τους *Trautmann et al. (1985)* οφείλονται στην εναλλασσόμενη συσσώρευση και εκτόνωση τάσεων, καθώς υλικό επίχωσης ρέει περιοδικά προς το σχηματιζόμενο κάτω από τον αγωγό κενό. Είναι εμφανές πως με την αύξηση της ταχύτητας το αδρανειακό φαινόμενο γίνεται πιο έντονο, ιδιαιτέρως στην περίπτωση της πυκνής άμμου. Συνεπώς, η ταχύτητα  $10^{-7}$  m/step και η μέθοδος της συνεχούς αυξομείωσης της ταχύτητας (servo function) υπερέχουν ως προς τη σταθερότητα της λύσης. Ωστόσο, με την εφαρμογή της μέσης καμπύλης για την περίπτωση της ταχύτητας  $10^{-6}$  m/step (**Σχήμα 3.16**) προκύπτει ουσιαστική ταύτιση των καμπυλών φορτίου-μετατόπισης.



**Σχήμα 3.16:** Εφαρμογή μέσης καμπύλης για την ταχύτητα  $10^{-6}$  m/step.

Συμπερασματικά και για λόγους εξοικονόμησης χρόνου, δεδομένης της μεγάλης χρονικής απαίτησης για την ολοκλήρωση αναλύσεων με χρήση ταχύτητας  $10^{-7}$  m/step ή με servo function, επιλέγεται ως επιβαλλόμενη στον αγωγό ταχύτητα η  $v_{vel}=10^{-6}$  m/step με την εφαρμογή όμως της μέσης καμπύλης σε κάθε ανάλυση.

#### **3.4.6 Θεώρηση ανάλυσης μεγάλων μετατοπίσεων και αναμόρφωσης του καννάβου**

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 καννάβου (automatic rezoning). Η διαδικασία αυτή είναι επιβεβλημένη λόγω των υψηλών επιβαλλόμενων μετακινήσεων του αγωγού, που έχουν ως αποτέλεσμα πολλά στοιχεία (στην περιοχή γύρω 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 καννάβου 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 καννάβου πριν την εμφάνιση του μηνύματος εσφαλμένης γεωμετρίας, (β) έπειτα να κατασκευασθεί ένας νέος καννάβος που θα λαμβάνει υπόψη την παραμορφωσιακή κατάσταση του προηγούμενου καννάβου 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 καννάβου στα αντίστοιχα στοιχεία του νέου.

Ο αλγόριθμος που κατασκευάστηκε στο πλαίσιο της Διπλωματικής Εργασίας των *Ζάμπα Αλέξανδρου και Ζερβού Σπυρίδωνα, 2014* και υιοθετήθηκε στην παρούσα Εργασία για την αναμόρφωση του καννάβου 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 καννάβο, λαμβάνοντας υπόψη την τελευταία θέση του αγωγού και τη μορφή της επιφάνειας του εδάφους. (γ) Στη συνέχεια, στα στοιχεία του νέου καννάβου 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 κατακόρυφης δύναμης χρησιμοποιήθηκαν δύο εναλλακτικοί τρόποι:

- Υπολογισμός μέσω των κατακόρυφων αντιδράσεων που αναπτύσσονται στους περιφερειακούς κόμβους του αγωγού, με αφαίρεση του ίδιου βάρους του αγωγού, προκειμένου να προκύψει η «καθαρή» αντίσταση στην κατακόρυφη κίνηση προς τα πάνω.
- Υπολογισμός μέσω των κατακόρυφων δυνάμεων που αναπτύσσονται στους κόμβους των στοιχείων διεπιφάνειας.

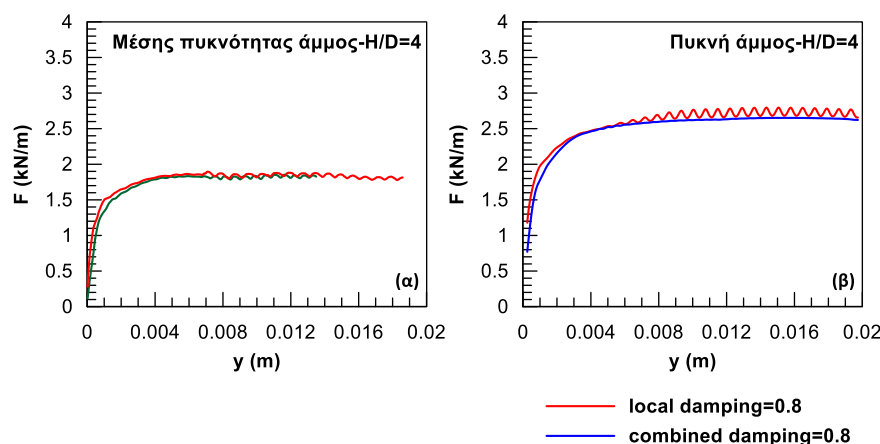
Όσον αφορά την απόσβεση, το λογισμικό FLAC παρέχει δύο τύπους: *local* και *combined*.

***Local Damping***: Πρόκειται για ένα τύπο απόσβεσης στον οποίο η δύναμη απόσβεσης πάνω σε κάθε κόμβο είναι ανάλογη του μεγέθους της δύναμης ανισοροπίας, από την οποία καθορίζεται και το πρόσημό της, έτσι ώστε να αποσβέννεται η κινητική ενέργεια.

***Combined Damping***: Αποτελεί μια πιο αποτελεσματική εκδοχή του *local damping* για προβλήματα μεγάλων, ομοιόμορφων και μονίμων μετατοπίσεων. Στην περίπτωση αυτή η απόσβεση ενεργοποιείται με την αλλαγή του προσήμου της ταχύτητας.

Από το εγχειρίδιο του FLAC προτείνεται και για τους δύο τύπους η τιμή 0.8 ως καταλληλότερη.

Για την επιλογή του τύπου απόσβεσης που δόθηκε στο προσομοίωμα προκειμένου να διασφαλισθεί η απουσία δυναμικών φαινομένων, πραγματοποιήθηκε σειρά αναλύσεων ευαισθησίας.



**Σχήμα 3.17:** Αναλύσεις ευαισθησίας για την εκτίμηση της επιρροής του τύπου απόσβεσης α) για μέσης πυκνότητας και β) για πυκνή άμμο επίχωσης.

Στο **Σχήμα 3.17** φαίνεται πως ο τύπος combined damping υπερέχει έναντι του τύπου local ως προς τη σταθερότητα της λύσης και γι' αυτό επιλέγεται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.

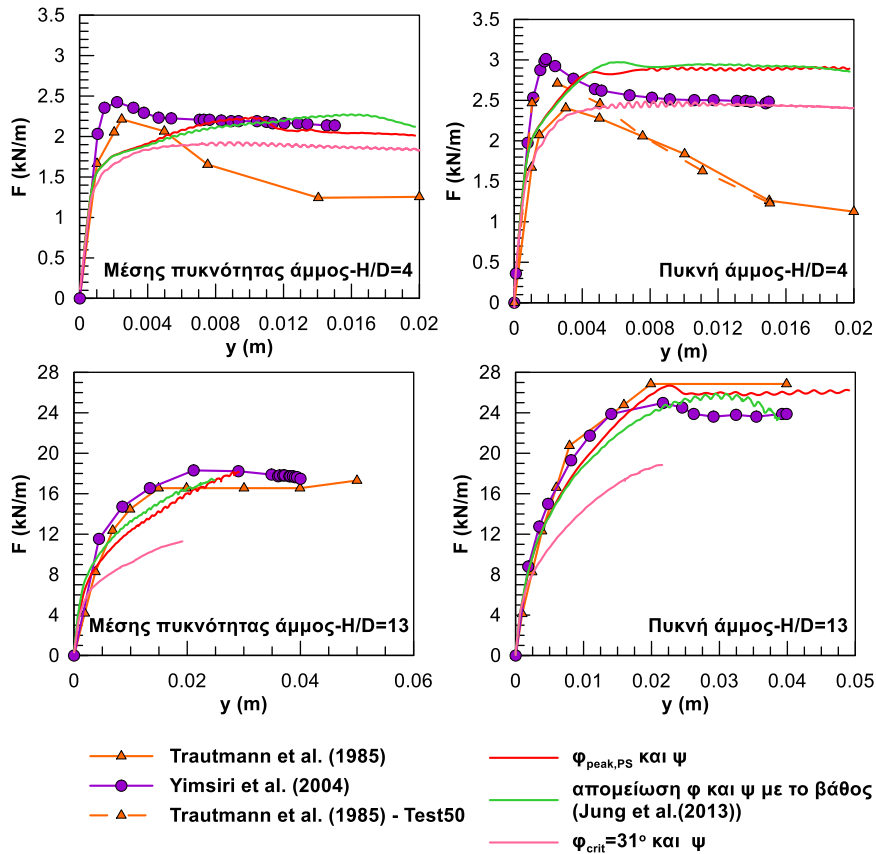
### 3.5 Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα

#### 3.5.1 Παραμετρικές Αναλύσεις

Όπως προαναφέρθηκε, όλες οι προηγούμενες αναλύσεις ευαισθησίας για τον προσδιορισμό των επιμέρους παραμέτρων πραγματοποιήθηκαν με το καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb. Όμως, όπως δείχνουν οι συγκρίσεις στο **Σχήμα 3.18**, το εν λόγω προσομοίωμα προσεγγίζει ικανοποιητικά τη μέγιστη αντίσταση του εδάφους στην κίνηση του αγωγού, όπως αυτή προέκυψε από τα πειράματα των *Trautmann et al. (1985)*, αλλά υστερεί στην ακριβή πρόβλεψη της μορφής της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης, πριν και μετά την αστοχία, όπως φαίνεται παρακάτω. Έτσι, μελετήθηκαν όλες οι δυνατές περιπτώσεις γωνίας τριβής και διαστολικότητας σε δύο χαρακτηριστικά βάθη εγκιβωτισμού και για τις δύο υπό εξέταση πυκνότητες, προκειμένου να προσδιορισθεί η αιτία της παραπάνω απόκλισης πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων. Παρακάτω συνοψίζονται οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν (**Πίνακας 3.1**) για τον σκοπό αυτό.

**Πίνακας 3.1:** Σύνοψη αναλύσεων για αξιολόγηση καταστατικού προσομοιώματος Mohr-Coulomb.

Γωνία τριβής $\phi$ (°)	Γωνία διαστολικότητας $\psi$ (°)	Ειδικό βάρος $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Βάθος εγκιβωτισμού H/D
$\phi_{peak,PS}$	$\psi_p$	16.4 , 17.7	4 , 13
$\phi_{crit}$	$\psi_p$	16.4 , 17.7	4 , 13
Μεταβαλλόμενη με το βάθος, σύμφωνα με Jung et al. (2013)	Μεταβαλλόμενη με το βάθος, σύμφωνα με Jung et al. (2013)	16.4 , 17.7	4 , 13



**Σχήμα 3.18:** Αναλύσεις για αξιολόγηση καταστατικού προσομοιώματος Mohr-Coulomb.

### 3.5.2 Σύγκριση για μικρές και μεσαίες μετατοπίσεις

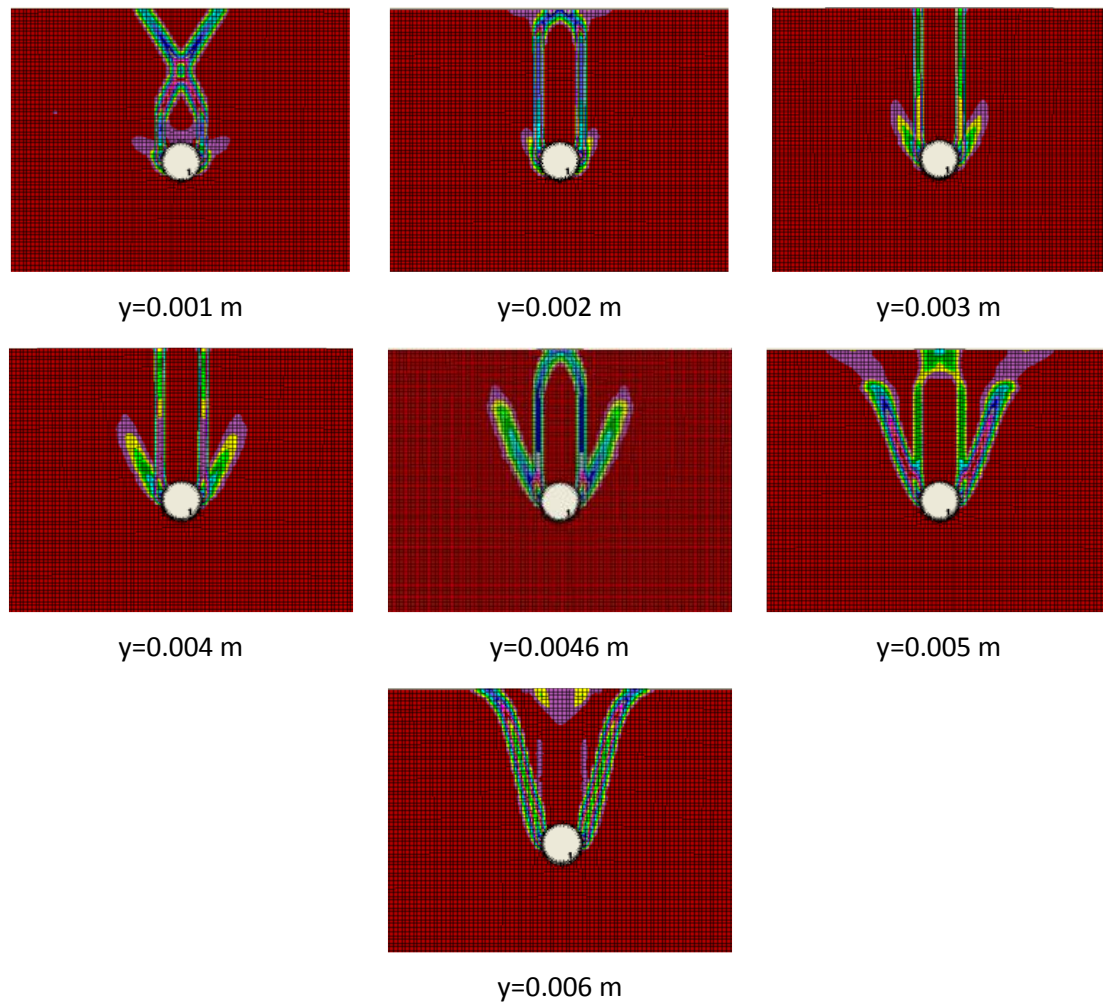
Όπως φαίνεται παραπάνω, με εξαίρεση την περίπτωση της  $\phi_{crit}$  που υποεκτιμά συστηματικά τα πειραματικά αποτελέσματα, σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις η μέγιστη τιμή της απόκρισης προσεγγίζεται σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Όμως, προβληματισμός προκύπτει για το τμήμα των καμπυλών φορτίου-μετατόπισης πριν τη σταθεροποίηση της εδαφικής απόκρισης. Ενώ αρχικά υπάρχει πλήρης ταύτιση με τις πειραματικές καμπύλες, στη συνέχεια και ιδιαίτερα στην περίπτωση του μικρού βάθους εγκιβωτισμού  $H/D=4$  παρατηρείται απότομη «χαλάρωση» της καμπύλης, με ταυτόχρονη έντονη μείωση του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας για όλες τις περιπτώσεις γωνιών τριβής και διαστολικότητας. Έτσι, εξετάστηκαν οι δημιουργούμενες επιφάνειες αστοχίας, με σκοπό να διερευνηθεί το βαθύτερο αίτιο της συμπεριφοράς αυτής.

Ενδεικτικά, παρουσιάζονται χαρακτηριστικά στιγμιότυπα του μηχανισμού αστοχίας σε βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=4$  και για πυκνή άμμο ( $\gamma=17.7 \text{ kN/m}^3$ ) για σταδιακή κατακόρυφη προς τα πάνω μετατόπιση του αγωγού  $\gamma$  μέχρι να σταθεροποιηθεί η μέγιστη κατακόρυφη δύναμη επί αυτού, με χρήση του προσομοιώματος Mohr-

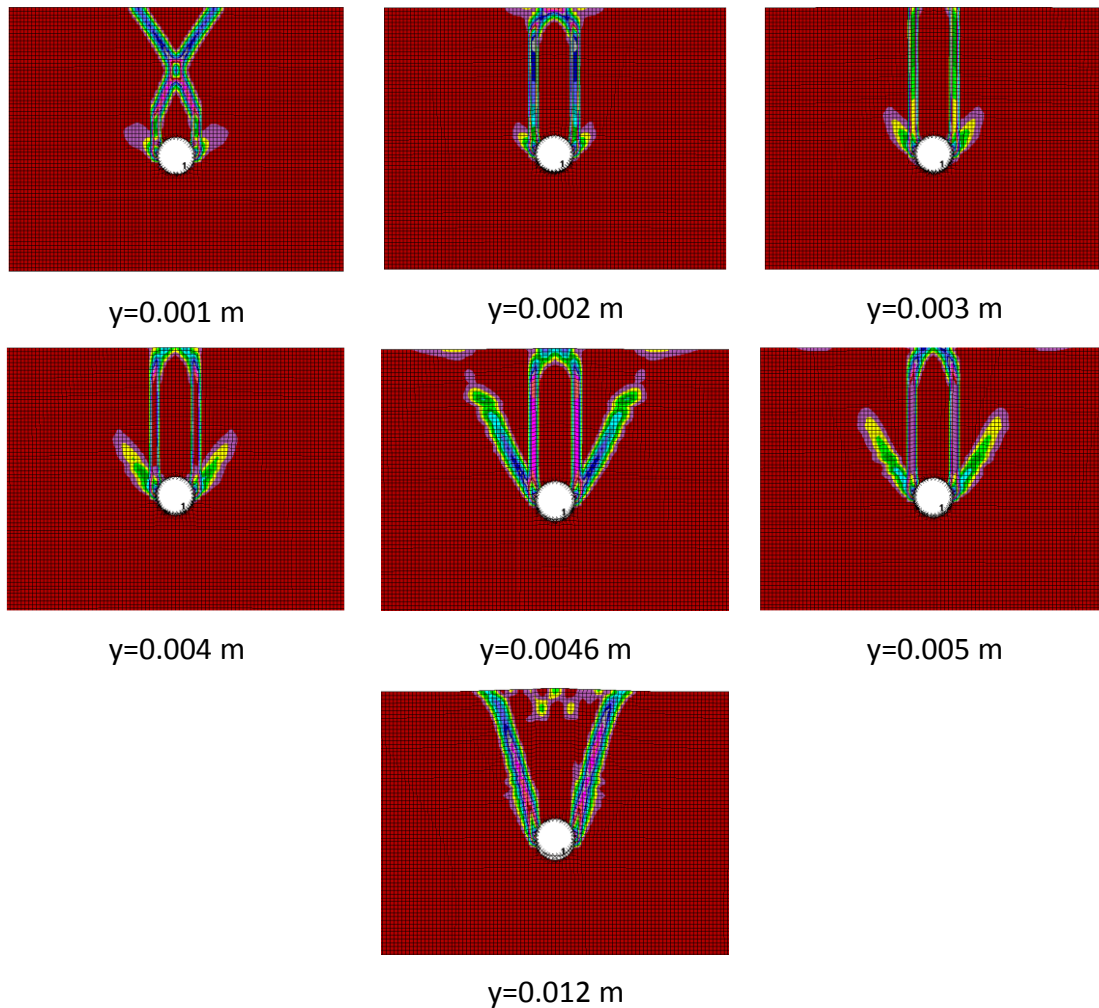


Coulomb. Οι επιφάνειες αστοχίας αφορούν τόσο σταθερές, όσο και μεταβαλλόμενες γωνίες τριβής και διαστολικότητας (Σχήμα 3.19 και Σχήμα 3.20 αντίστοιχα).

Ενώ αναμένεται οι διατμητικές επιφάνειες αστοχίας που θα σχηματιστούν να είναι κεκλιμένες και μάλιστα, σύμφωνα με τους *Cheuk et al. (2008)*, να σχηματίζουν γωνία ως προς την κατακόρυφο ίση με τη γωνία διαστολικότητας  $\psi_p$ , εν προκειμένω παρατηρείται και στις δύο περιπτώσεις ότι ο μηχανισμός αστοχίας αρχικά αποτελείται από κατακόρυφες διατμητικές επιφάνειες. Αυτό ισχύει μέχρι τη μετατόπιση  $\gamma=0.0046\text{m}$  (μετατόπιση μεγιστοποίησης της δύναμης επί του αγωγού), όπου οι διατμητικές αυτές επιφάνειες αρχίζουν να παίρνουν κλίση προς τα έξω.

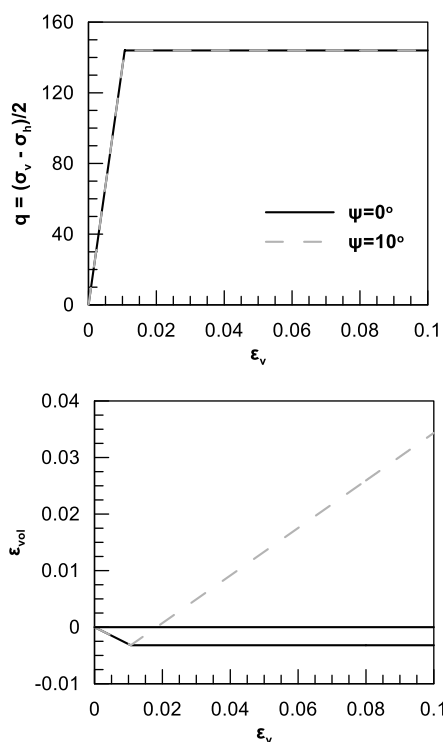


**Σχήμα 3.19:** Εξέλιξη επιφάνειας αστοχίας για σταθερή γωνία τριβής και διαστολικότητας ( $\phi_{peak,PS}=52^\circ$  και  $\psi_p=16^\circ$ ).



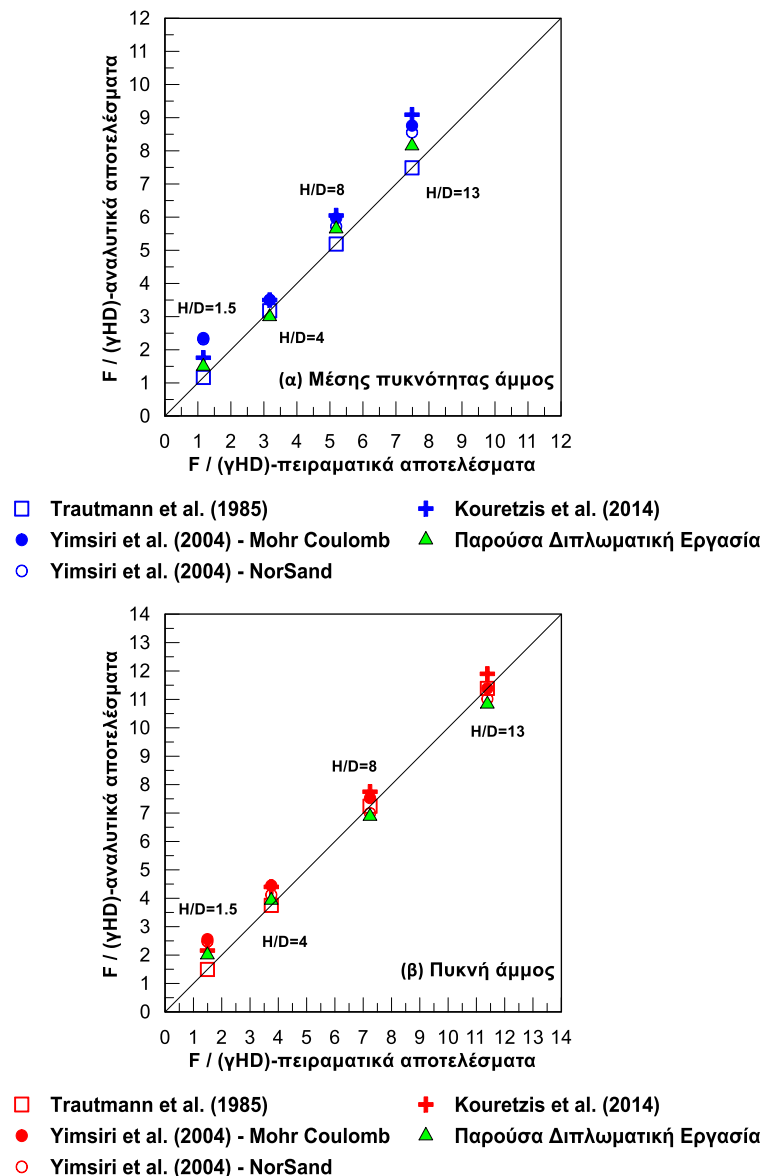
**Σχήμα 3.20:** Εξέλιξη επιφάνειας αστοχίας για μεταβαλλόμενη με το βάθος γωνία τριβής και διαστολικότητας.

Δεδομένου ότι το καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb ξεκινά να λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο της διαστολικότητας μετά την αστοχία (**Σχήμα 3.21**), γίνεται πλήρως κατανοητή η παραπάνω συμπεριφορά και η απόκλισή της από την πραγματικότητα. Έτσι, εξάγεται το συμπέρασμα πως, παρόλο που γίνεται σωστή πρόβλεψη της εδαφικής συμπεριφοράς μετά την αστοχία, δεν καλύπτεται πλήρως η πορεία προς αυτή· κάτι το οποίο αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα του προσομοιώματος Mohr-Coulomb.



**Σχήμα 3.21:** Δοκιμή τριαξονικής φόρτισης σε υλικό με και χωρίς διαστολικότητα, σύμφωνα με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

Στο **Σχήμα 3.22** γίνεται σύγκριση της μέγιστης (κανονικοποιημένης) κατακόρυφης δύναμης επί του αγωγού, όπως αυτή προβλέπεται από τους *Trautmann et al. (1985)*, *Yimsiri et al. (2004)*, *Kouretzis et al. (2014)* και από την παρούσα Διπλωματική Εργασία, με χρήση προσομοιώματος Mohr-Coulomb, για τα υπό εξέταση βάθη εγκιβωτισμού ( $H/D=1.5, 4, 8, 13$ ) και τις υπό εξέταση πυκνότητες άμμου (μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμος). Είναι εμφανής η προαναφερθείσα επιτυχία του προσομοιώματος που αναπτύχθηκε σε αυτή τη Διπλωματική Εργασία στην πρόβλεψη της μέγιστης εδαφικής απόκρισης, με εξαίρεση το «ρηχότερο» βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=1.5$ , όπου αυτή υπερεκτιμάται ελαφρά. Το ίδιο φαινόμενο απαντά και στα αποτελέσματα των υπολοίπων αριθμητικών μεθοδολογιών (*Yimsiri et al. (2004)*, *Kouretzis et al. (2014)*) και χαρακτηρίζεται από τους *Yimsiri et al.* ως συνέπεια του γεγονότος ότι η αριθμητική προσομοίωση δεν επιτρέπει να αποκολληθούν εδαφικά στοιχεία και να πέσουν στο κενό που σχηματίζεται κάτω από τον αγωγό, συνεπώς αυτά συνεχίζουν να συνεισφέρουν στην αντίσταση που δέχεται ο αγωγός κατά την κίνησή του προς τα πάνω και κατ' επέκταση αυξάνουν τη μέγιστη εδαφική απόκριση.



**Σχήμα 3.22:** Σύγκριση μεγίστων κατακόρυφων δυνάμεων επί του αγωγού μεταβαλλομένου του βάθους εγκιβωτισμού α) για μέσης πυκνότητας και β) για πυκνή άμμο επίχωσης.

### 3.5.3 Σύγκριση για μεγάλες μετατοπίσεις

Στο **Σχήμα 3.18** παρατηρείται πως για βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=4$  υπάρχει μείωση της κατακόρυφης δύναμης επί του αγωγού με την αύξηση της μετατόπισης πέραν αυτής στην οποία η δύναμη μεγιστοποιείται (softening).

Σύμφωνα με τους *Trautmann et al. (1985)* και *Jung et al. (2013)* το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο στα μικρά βάθη εγκιβωτισμού (έως  $H/D=5.5$ ), ενώ για μεγαλύτερα βάθη η απομείωση της δύναμης δεν είναι αισθητή.

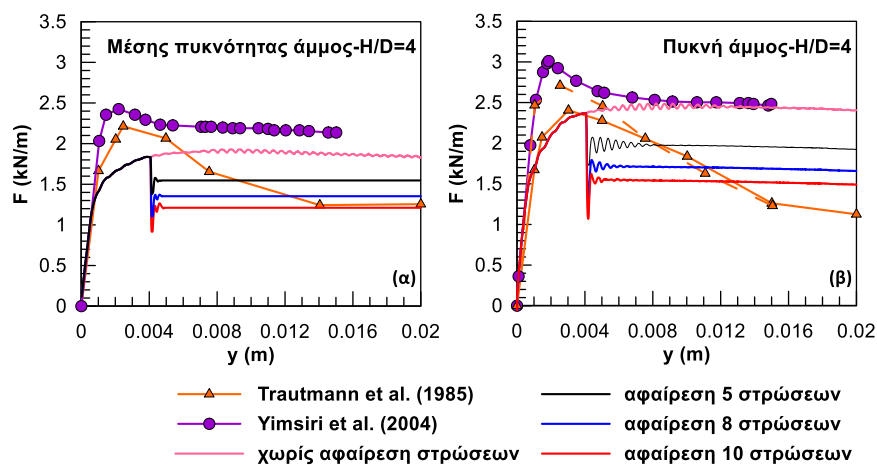
Όπως προαναφέρθηκε, η μείωση αυτή οφείλεται κατά ένα ποσοστό στη μείωση του βάρους του εδαφικού πρίσματος πάνω από τον αγωγό, καθώς υλικό ολισθαίνει

πλευρικά γεμίζοντας το κενό που δημιουργείται κάτω από τον αγωγό και κατά ένα άλλο ποσοστό στη μείωση της δύναμης τριβής στις διατμητικές επιφάνειες αστοχίας, οι οποίες εκτείνονται από τον αγωγό έως την επιφάνεια του εδάφους. Επίσης, η μείωση της δύναμης τριβής είναι συνέπεια της μείωσης της γωνίας τριβής από την τιμή  $\phi_{peak,PS}$  στην τιμή  $\phi_{crit}$ .

Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με χρήση της  $\phi_{crit}$  προκειμένου να προσδιορισθεί το ποσοστό της μείωσης της δύναμης επί του αγωγού λόγω της μείωσης της γωνίας τριβής. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως στην περίπτωση της άμμου μέσης πυκνότητας προέκυψε μείωση 18.75% επί της συνολικής μείωσης, ενώ στην περίπτωση της πυκνής άμμου προέκυψε μείωση 27.68% επί της συνολικής μείωσης. Η αντίστοιχη μείωση των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι περίπου 60% (Σχήμα 3.18).

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις στις οποίες αφαιρούταν υλικό άνωθεν του αγωγού, ώστε να προσεγγισθεί η περαιτέρω απομείωση δύναμης που φαίνεται στα πειραματικά αποτελέσματα. Στο Σχήμα 3.23 φαίνονται ενδεικτικά αποτελέσματα, όπου αποδεικνύεται πως η σταδιακή αφαίρεση υλικού (αφαίρεση επιφανειακών ζωνών του καννάβου) οδηγεί σε μείωση του φορτίου επί του αγωγού, συγκρίσιμη με αυτή που επιδεικνύουν τα πειραματικά αποτελέσματα.

Συμπερασματικά, η παρατηρούμενη «χαλάρωση» της σχέσης φορτίου-μετατόπισης για μικρά βάθη του αγωγού ( $H/D=4$ ) μπορεί να αποδοθεί στους δύο μηχανισμούς που εξετάστηκαν, ανεξάρτητα ή συνδυασμένα. Παραμένει όμως το ερώτημα γιατί αυτοί οι δύο μηχανισμοί δεν ενεργοποιούνται στην περίπτωση μεγάλου βάθους εγκιβωτισμού του αγωγού (π.χ. για  $H/D=13$ ), όπου δεν παρατηρείται «χαλάρωση» της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης.



Σχήμα 3.23: Σταδιακή αφαίρεση επιφανειακών στρώσεων άμμου επίχωσης.

### 3.5.4 Σύγκριση με οδηγίες σχεδιασμού ASCE-ALA (2005)

Σύμφωνα με τις οδηγίες σχεδιασμού της ASCE-ALA (2005), η μέγιστη δύναμη που αναπτύσσεται επί του αγωγού για κατακόρυφη κίνηση προς τα πάνω υπολογίζεται για άμμο από τη **Σχέση (3.13)** :

$$Q_u = N_{qv} \cdot \bar{\gamma} \cdot H \cdot D \quad (3.13)$$

όπου:

$$N_{qv} = \frac{\varphi \cdot H}{44 \cdot D}$$

$\bar{\gamma}$ : ενεργό ειδικό βάρος άμμου επίχωσης

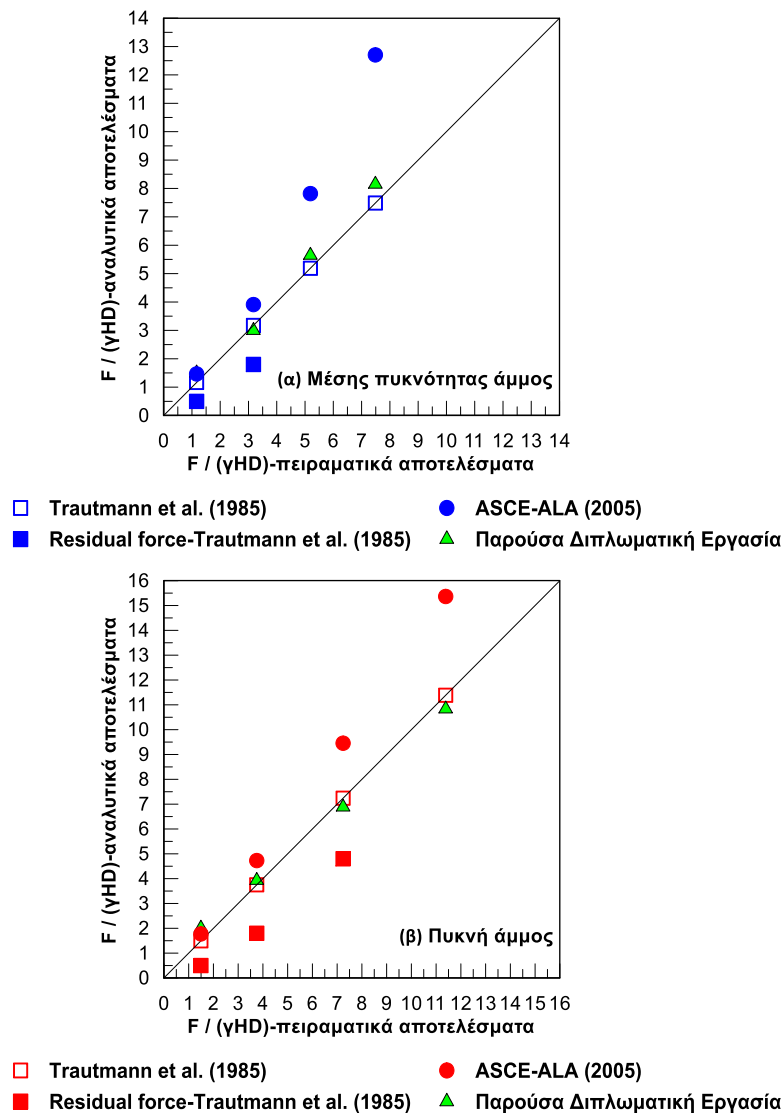
H: το βάθος στο οποίο βρίσκεται το κέντρο του αγωγού

D: η διάμετρος του αγωγού

Σημειώνεται ότι η σχέση εφαρμόζεται για μικρά βάθη εγκιβωτισμού, δεδομένου ότι έχει προκύψει από αποτελέσματα πειραμάτων μικρής κλίμακας.

Προκειμένου να εξακριβωθεί η συμβατότητα μεταξύ των αποτελεσμάτων της Παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων της **Σχέσης (3.13)**, παρατίθεται το **Σχήμα 3.24**.

Παρατηρείται ότι για μικρά βάθη εγκιβωτισμού τα αποτελέσματα συμπίπτουν πολύ ικανοποιητικά, ενώ για μεγαλύτερα βάθη ( $H/D > 8$ ) υπάρχει η αναμενόμενη απόκλιση, με τα αποτελέσματα της ASCE-ALA (2005) να είναι κατά τι μεγαλύτερα των πειραματικών, καθώς και των αριθμητικών προβλέψεων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Ένα επίσης ενδιαφέρον συμπέρασμα είναι ότι τα αποτελέσματα κατά ASCE-ALA (2005) παραπέμπουν σε χρήση της μέγιστης και όχι της παραμένουσας αντίστασης του αγωγού για θέματα σχεδιασμού.



**Σχήμα 3.24:** Σύγκριση αποτελεσμάτων παρούσας μεθοδολογίας, πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων ASCE-ALA (2005) α) για μέσης πυκνότητας και β) για πυκνή άμμο επίχωσης .

### 3.6 Συμπεράσματα

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

- Το προσομοίωμα Mohr-Coulomb αποτυγχάνει στην πρόβλεψη της σωστής επιφάνειας αστοχίας και συνολικά της απόκρισης του εδάφους σε προβλήματα όπως το συγκεκριμένο, όπου ο ρόλος της διαστολικότητας είναι καθοριστικός· ωστόσο προσεγγίζει ικανοποιητικά τη μέγιστη τιμή της απόκρισης, ο υπολογισμός της οποίας αποτελεί αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, καθώς και την αντίστοιχη επιφάνεια αστοχίας.

- Η μετατροπή της γωνίας τριβής που έχει προκύψει από δοκιμές απευθείας διάτμησης ( $\phi_{peak,DS}$ ), σε αντίστοιχη για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης ( $\phi_{peak,PS}$ ) αντιπροσωπεύει καταλληλότερα τη φυσική του προβλήματος.
- Η μείωση της γωνίας τριβής και διαστολικότητας με το βάθος μέσω ενός μοντέλου Strain-Softening δεν παρέχει ουσιαστική διαφοροποίηση στην παραγόμενη επιφάνεια αστοχίας λόγω κατακόρυφης προς τα πάνω μετακίνησης.
- Αποδεικνύεται πως η υιοθέτηση του μέτρου ελαστικότητας όπως αυτό προτείνεται από τους Yimsiri *et al.* (2004) προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα.
- Η ύπαρξη προβλήματος μεγάλων μετατοπίσεων καθιστά απαραίτητη τη χρήση της δυνατότητας του κώδικα για συνεχή ανανέωση των συντεταγμένων των κόμβων του καννάβου (large strain). Η δυνατότητα αυτή συμβάλλει αισθητά στην προσέγγιση ρεαλιστικής εικόνας παραμορφωμένου καννάβου.
- Η χρήση αρθρώσεων για την προσομοίωση των συνοριακών συνθηκών στη βάση του καννάβου, καθώς και πλευρικά αποτυπώνει καλύτερα τις πραγματικές συνοριακές συνθήκες του προβλήματος.
- Η χρήση στοιχείων διεπιφάνειας (interface) με μειωμένη γωνία τριβής, για την προσομοίωση της σχετικής ολίσθησης εδάφους-αγωγού, κρίνεται απαραίτητη.
- Η μείωση της κατακόρυφης δύναμης επί του αγωγού με την αύξηση της μετατόπισης πέραν αυτής στην οποία η δύναμη μεγιστοποιείται (softening), που συμβαίνει για μικρά βάθη εγκιβωτισμού, οφείλεται στη μείωση της γωνίας τριβής στις διατμητικές επιφάνειες αστοχίας και στη μείωση του βάρους του υπερκείμενου εδαφικού πρίσματος λόγω ροής προς το κενό κάτω από τον αγωγό.
- Οι τιμές της οριακής εδαφικής αντίστασης επί του αγωγού που υπολογίζονται κατά ASCE-ALA (2005) βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τις μέγιστες και όχι τις παραμένουσες τιμές που προκύπτουν από τα πειράματα των Trautmann *et al.* (1985).

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 κατακόρυφη προς τα πάνω μετατόπιση· κάτι που αποτελεί αντικείμενο των επόμενων κεφαλαίων της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.





# 4

## Έκταση Επιφάνειας Αστοχίας

### 4.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων σχετικά με την έκταση και τη μορφή της επιφάνειας αστοχίας γύρω από τον αγωγό. Οι βασικές αριθμητικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για μέσης πυκνότητας και για πυκνή άμμο, με μηχανικά χαρακτηριστικά συμβατά με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές μετρήσεις των Trautmann et al. (1985) και στις αριθμητικές αναλύσεις των Yimsiri et al. (2004), όπως έχει παρουσιαστεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επιπλέον, έγιναν αναλύσεις και για την περίπτωση χαλαρής άμμου επίχωσης, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται ευρέως στη συνήθη πρακτική.

Τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά για τις άμμους που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές αναλύσεις συγκεντρώνονται στον **Πίνακα 4.1**. Οι αναλύσεις έγιναν για αγωγό διαμέτρου 0.102m και για βάθη εγκιβωτισμού H/D από 1.5 έως 13 και δύο επιπλέον για H/D=20 και 25. Τα βασικά δεδομένα των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν συνοψίζονται στον **Πίνακα 4.2**.

**Πίνακας 4.1:** Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά άμμων.

Άμμος	Σχετική πυκνότητα $D_r$ (%)	Ειδικό βάρος $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Δείκτης πόρων $e$	Γωνία τριβής $\phi$ (°)	Γωνία διαστολικότητας $\psi$ (°)
Χαλαρή	20	16.0	0.7138	32.5	2
Μέση	45	16.7	0.6461	36	6
Πυκνή	80	17.7	0.5512	44	16

**Πίνακας 4.2:** Δεδομένα αριθμητικών αναλύσεων.

$\alpha/\alpha$	Διάμετρος D (m)	Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Λόγος H/D
1	0.102	χαλαρή, μέση, πυκνή	1.5
2	0.102	χαλαρή, μέση, πυκνή	4
3	0.102	χαλαρή, μέση, πυκνή	6
4	0.102	χαλαρή, μέση, πυκνή	8
5	0.102	χαλαρή, μέση, πυκνή	10
6	0.102	χαλαρή, μέση, πυκνή	13
7	0.102	πυκνή	20
8	0.102	πυκνή	25

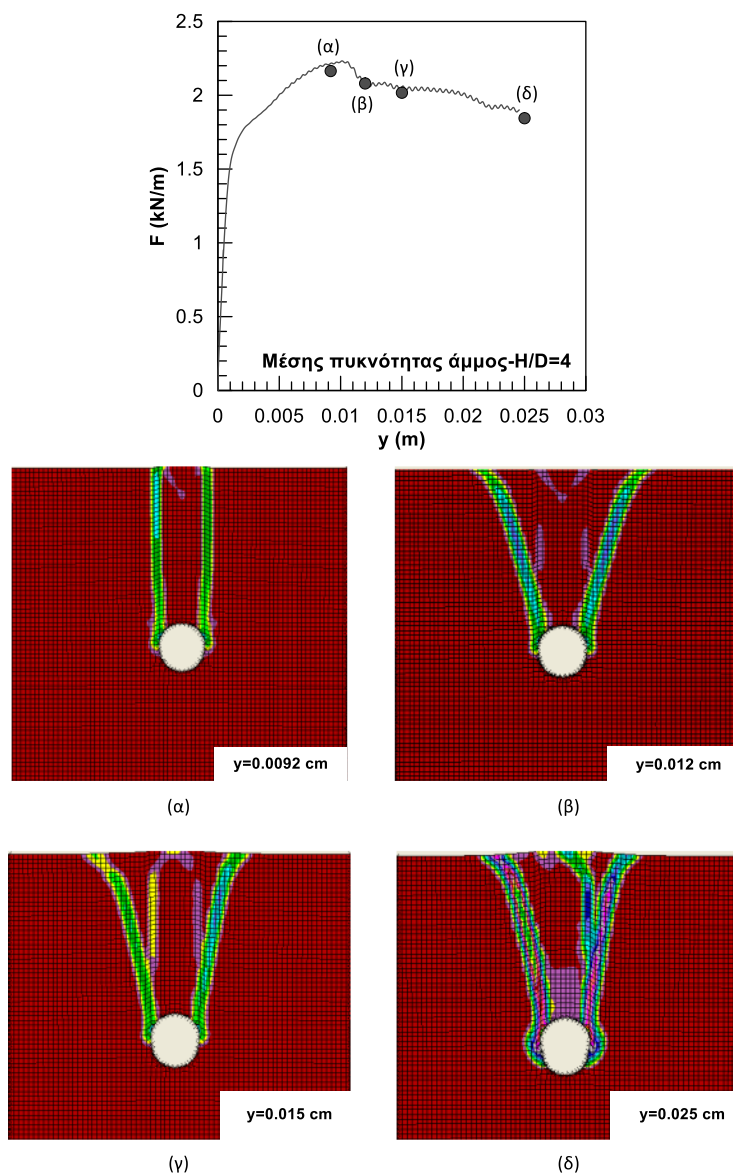
Απώτερος σκοπός των αναλύσεων αυτών ήταν ο προσδιορισμός της μέγιστης οριζόντιας απόστασης της επιφάνειας αστοχίας από το κέντρο του αγωγού και της εξέλιξης του μηχανισμού αστοχίας που αναπτύσσεται, καθώς αυξάνεται η μετατόπιση του αγωγού για κάθε τιμή του λόγου εγκιβωτισμού H/D που εξετάζεται. Βάσει των ανωτέρω, πραγματοποιήθηκε συσχέτιση της έκτασης της επιφάνειας αστοχίας με το βάθος εγκιβωτισμού του αγωγού και τη γωνία τριβής της άμμου επίχωσης.

## 4.2 Μορφή επιφάνειας αστοχίας

Με βάση τα αποτελέσματα των παραπάνω αριθμητικών αναλύσεων σχετικά με τη διαρροή των εδαφικών στοιχείων γύρω και στην ευρύτερη περιοχή πάνω από τον αγωγό κατά τη μετατόπισή του, προσδιορίζεται η μορφή της επιφάνειας αστοχίας όπως περιγράφεται ακολούθως.

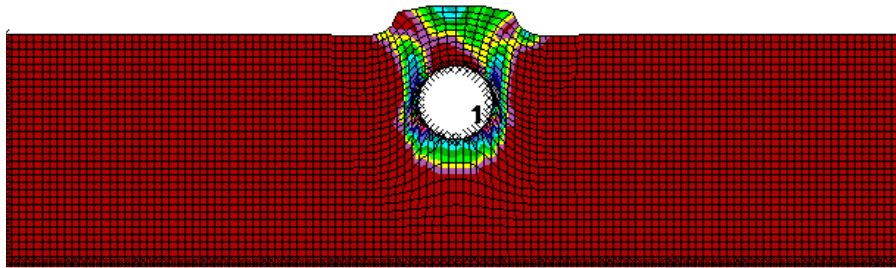
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, καθοριστική για τη μορφή της επιφάνειας αστοχίας είναι η χρήση του καταστατικού προσομοιώματος Mohr-Coulomb. Καθώς το συγκεκριμένο προσομοίωμα λαμβάνει υπόψη του τη διαστολικότητα για μετατοπίσεις από τη διαρροή και μετά, όπως έχει αναφερθεί λεπτομερώς στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι επιφάνειες αστοχίας στις μικρότερες μετατοπίσεις προκύπτουν κατακόρυφες· κάτι που δικαιολογείται από την εξάρτηση της κλίσης των διατμητικών επιφανειών από την τιμή της γωνίας διαστολικότητας. Από το

σημείο διαρροής και έπειτα η επιφάνεια αστοχίας αποκτά μορφή ανεστραμμένου κώνου σε όλα τα βάθη εγκιβωτισμού και σταθεροποιείται σ' αυτή τη μορφή παρ' όλη την μετέπειτα αύξηση της μετατόπισης. Στο **Σχήμα 4.1** απεικονίζεται η επίδραση της μετατόπισης του αγωγού στην εξέλιξη της επιφάνειας αστοχίας, χαρακτηριστικά για άμμο μέσης πυκνότητας και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=4$ .

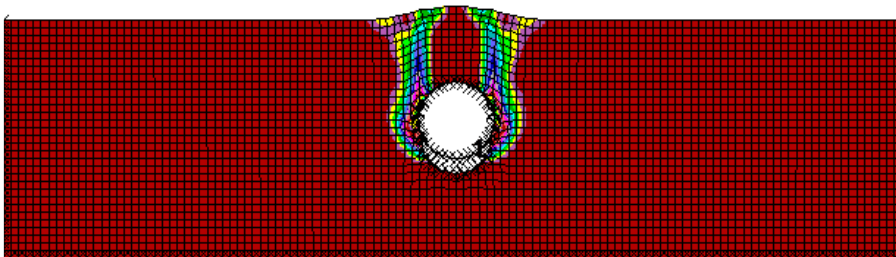


**Σχήμα 4.1:** Εξέλιξη επιφάνειας αστοχίας σε χαρακτηριστικές μετατοπίσεις – Επίδραση μετατόπισης του αγωγού.

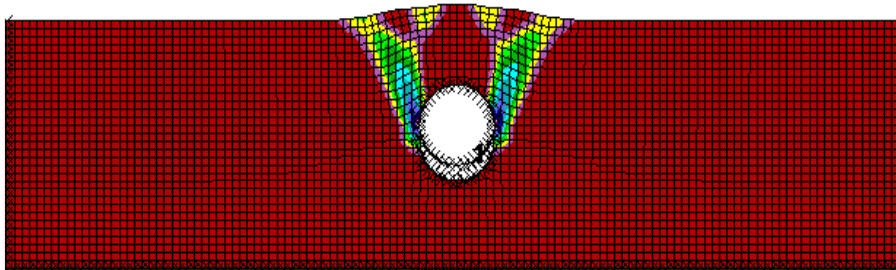
Στο **Σχήμα 4.2** έως και το **Σχήμα 4.7** παρουσιάζεται η τελική μορφή των επιφανειών αστοχίας για χαλαρή, μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο και για όλα τα υπό εξέταση βάθη εγκιβωτισμού.



(α)

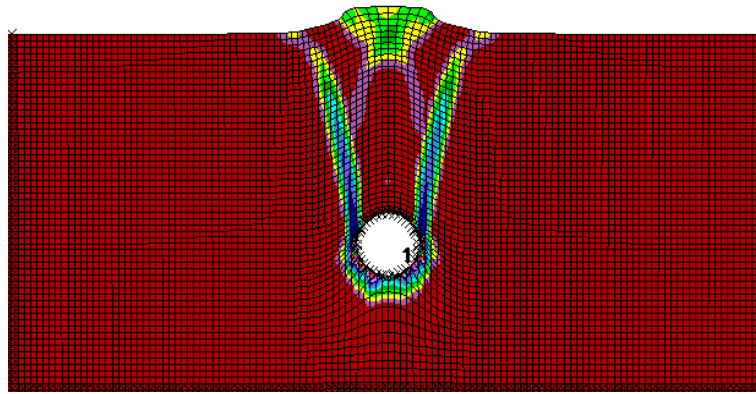


(β)

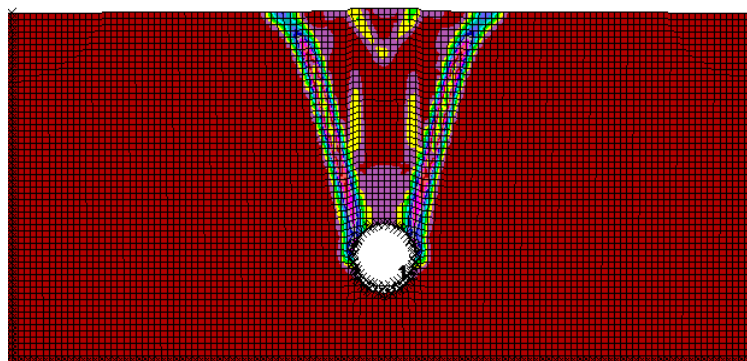


(γ)

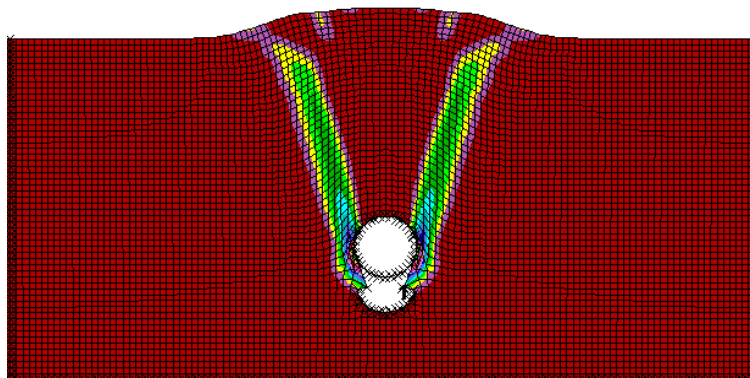
**Σχήμα 4.2:** Μηχανισμός αστοχίας αγωγού διαμέτρου 0.102m, εγκιβωτισμένου σε (α) χαλαρή, (β) μέσης πυκνότητας και (γ) πυκνή άμμο επίχωσης για λόγο εγκιβωτισμού  $H/D=1.5$ .



(α)

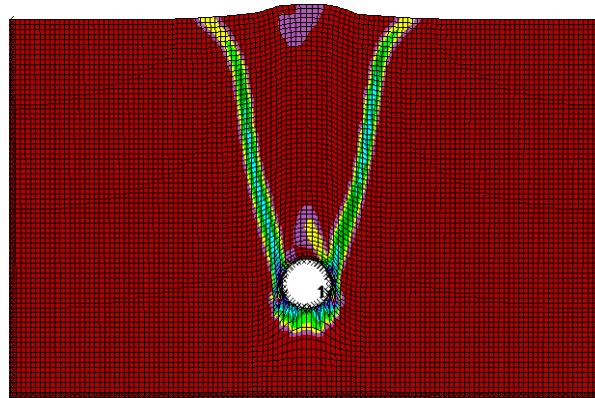


(β)

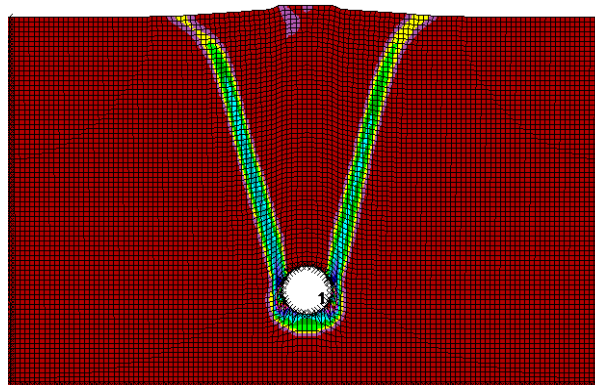


(γ)

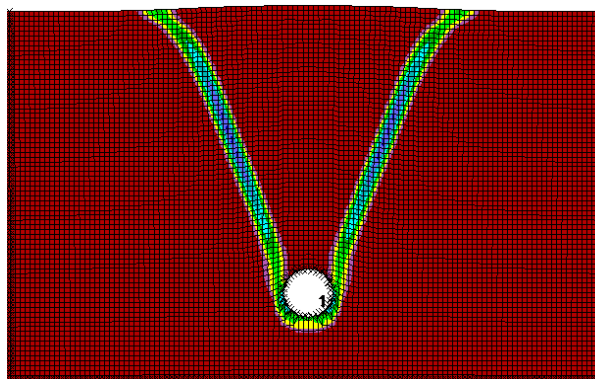
**Σχήμα 4.3:** Μηχανισμός αστοχίας αγωγού διαμέτρου 0.102m, εγκιβωτισμένου σε (α) χαλαρή, (β) μέσης πυκνότητας και (γ) πυκνή άμμο επίχωσης για λόγο εγκιβωτισμού  $H/D=4$ .



(α)

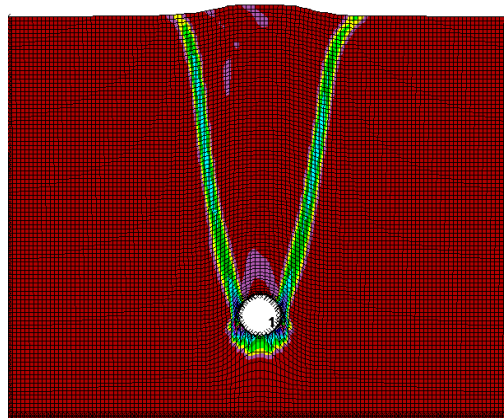


(β)

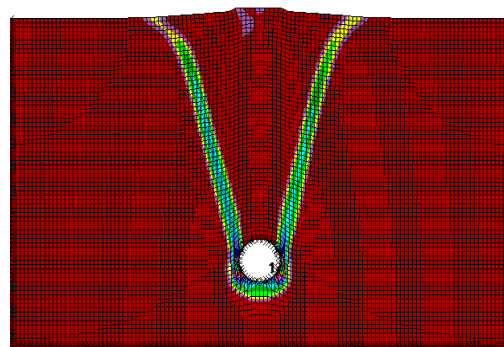


(γ)

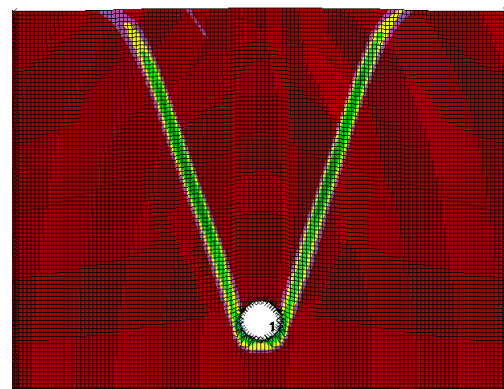
**Σχήμα 4.4:** Μηχανισμός αστοχίας αγωγού διαμέτρου 0.102m, εγκιβωτισμένου σε (α) χαλαρή, (β) μέσης πυκνότητας και (γ) πυκνή άμμο επίχωσης για λόγο εγκιβωτισμού  $H/D=6$ .



(α)



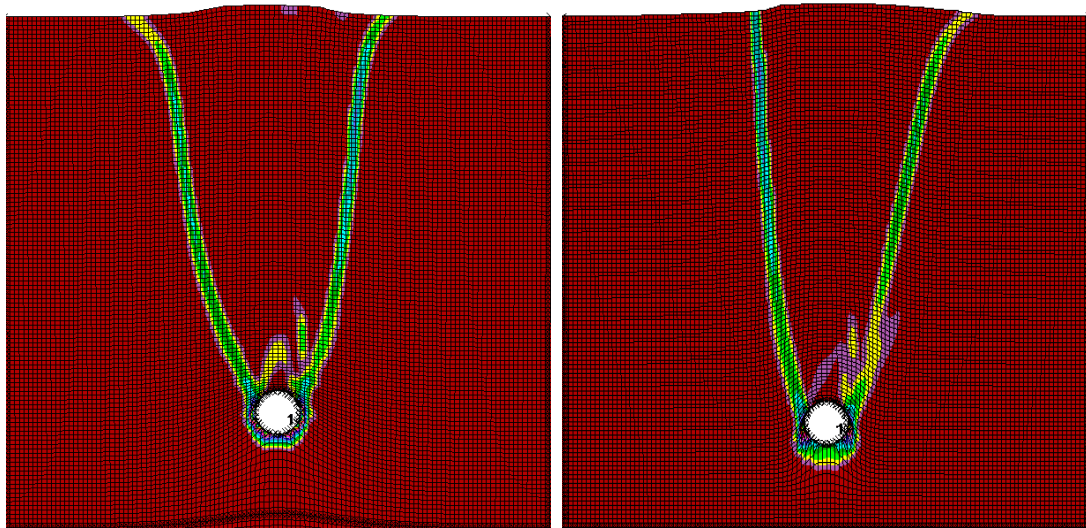
(β)



(γ)

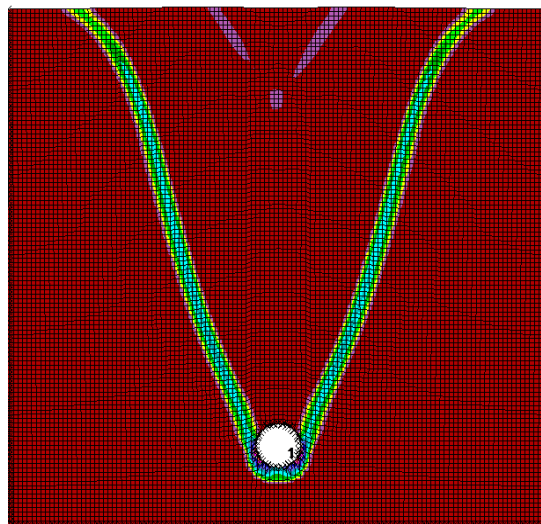
**Σχήμα 4.5:** Μηχανισμός αστοχίας αγωγού διαμέτρου 0.102m, εγκιβωτισμένου σε (α) χαλαρή, (β) μέσης πυκνότητας και (γ) πυκνή άμμο επίχωσης για λόγο εγκιβωτισμού  $H/D=8$ .





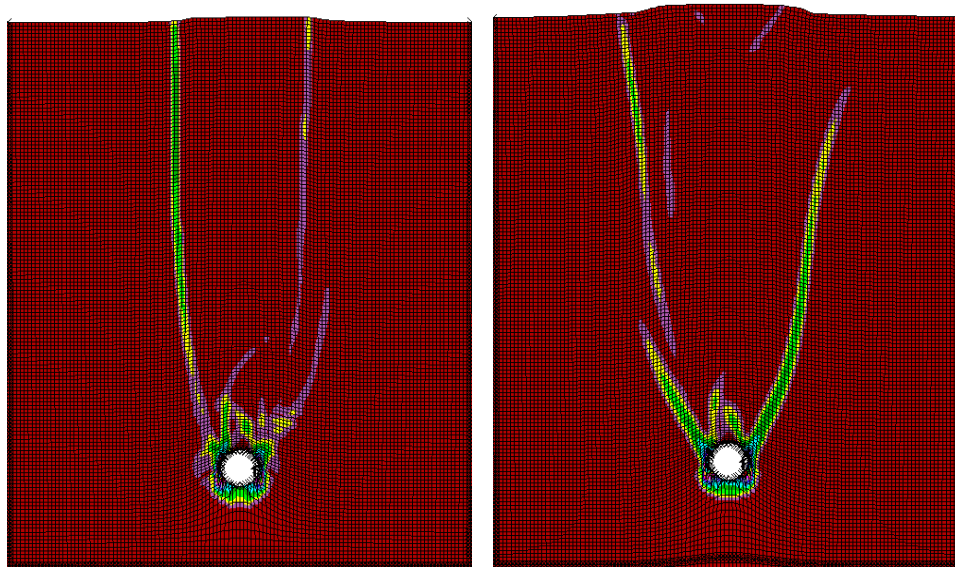
(α)

(β)



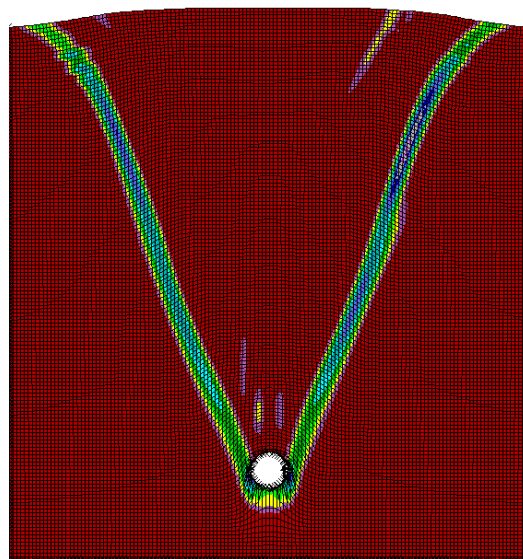
(γ)

**Σχήμα 4.6:** Μηχανισμός αστοχίας αγωγού διαμέτρου 0.102m, εγκιβωτισμένου σε (α) χαλαρή, (β) μέσης πυκνότητας και (γ) πυκνή άμμο επίχωσης για λόγο εγκιβωτισμού  $H/D=10$ .



(α)

(β)

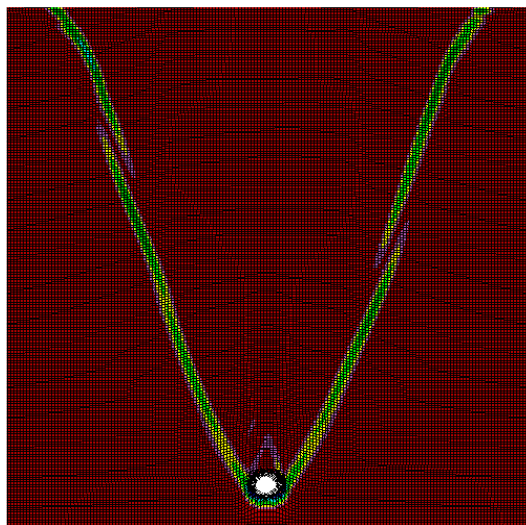


(γ)

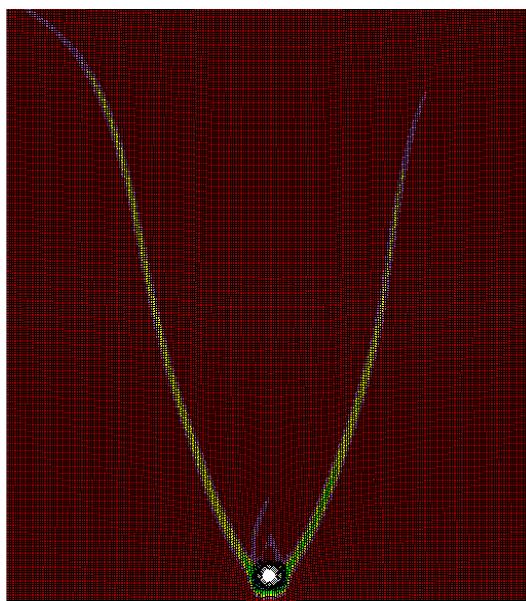
**Σχήμα 4.7:** Μηχανισμός αστοχίας αγωγού διαμέτρου 0.102m, εγκιβωτισμένου σε (α) χαλαρή, (β) μέσης πυκνότητας και (γ) πυκνή άμμο επίχωσης για λόγο εγκιβωτισμού  $H/D=13$ .

Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν ο μηχανισμός αστοχίας δε μεταβάλλεται ακόμη και σε πολύ μεγάλα βάθη, σε σχέση με αυτά που χρησιμοποιούνται στη συνήθη πρακτική, και διατηρεί τη μορφή ανεστραμμένου κώνου, έγιναν ενδεικτικά δύο επιπλέον αναλύσεις για πυκνή άμμο στις οποίες ο αγωγός ήταν εγκιβωτισμένος σε

βάθος  $H/D = 20$  και  $25$ . Στο **Σχήμα 4.8** παρουσιάζονται οι εν λόγω επιφάνειες αστοχίας.



(α)



(β)

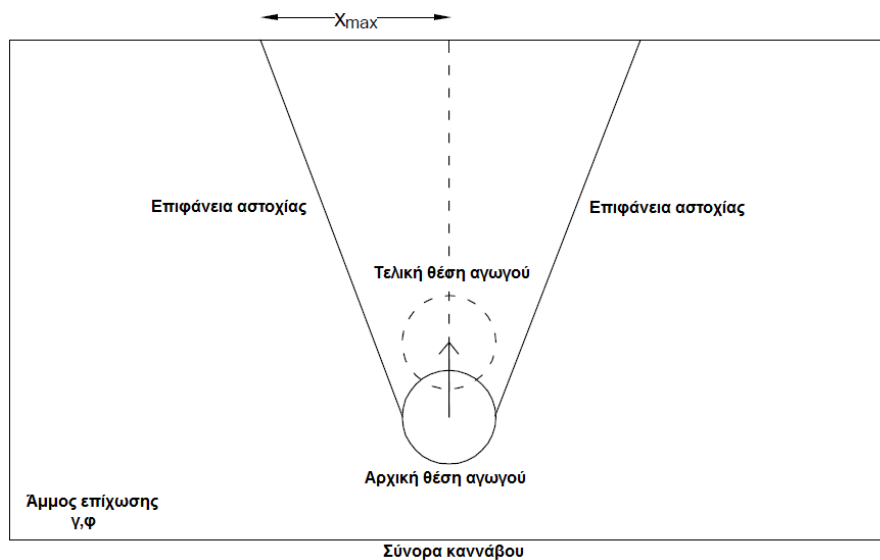
**Σχήμα 4.8:** Μηχανισμός αστοχίας για αγωγό εγκιβωτισμένο σε πυκνή άμμο επίχωσης για (α) λόγο  $H/D=20$  και (β) λόγο  $H/D=25$ .

### 4.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων

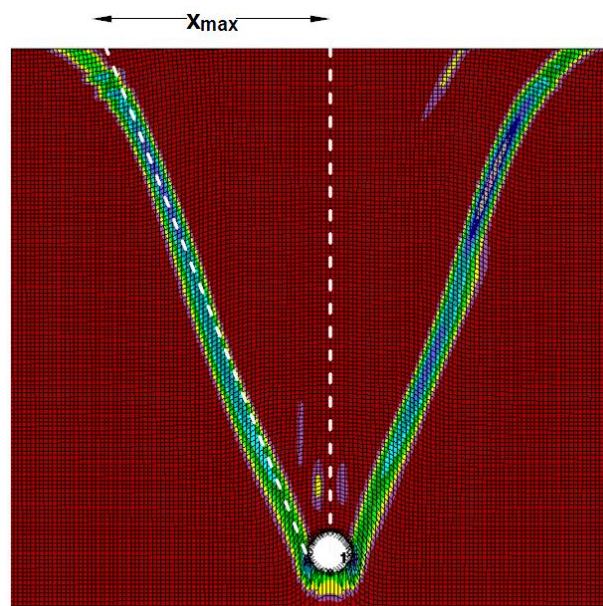
Για τις ανάγκες της παρούσας αξιολόγησης, ορίζεται ως “ $x_{max}$ ” η μέγιστη οριζόντια απόσταση της επιφάνειας αστοχίας από το κέντρο του αγωγού (**Σχήμα 4.9**). Σε προηγούμενα κεφάλαια, διαπιστώθηκε πως η επιφάνεια αστοχίας του εδάφους

απεικονίζεται κατά το βέλτιστο τρόπο, δηλαδή με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια και ευκρίνεια, εμφανίζοντας τη μεταβολή της διατμητικής παραμόρφωσης λόγω της επιβολής της κατακόρυφης μετατόπισης στο τελευταίο βήμα της αριθμητικής ανάλυσης (shear strain rate plot).

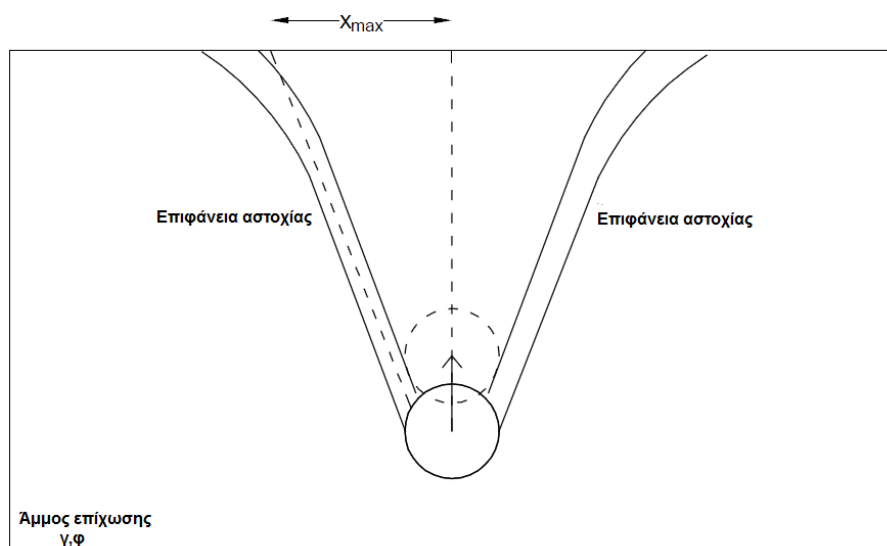
Για τον υπολογισμό της απόστασης  $x_{max}$  λήφθηκε υπόψη μία μέση ευθεία γραμμή κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας και αγνοήθηκε η καμπύλωση αυτής στο σημείο που συναντά την επιφάνεια του εδάφους, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.10** και στο **Σχήμα 4.11**. Η μέθοδος αυτή ακολουθήθηκε διότι η συγκεκριμένη καμπύλωση είναι τοπική και οδηγεί σε εσφαλμένη υπερεκτίμηση του  $x_{max}$ .



**Σχήμα 4.9:** Ορισμός απόστασης  $x_{max}$ .



**Σχήμα 4.10:** Προσδιορισμός απόστασης  $x_{max}$  από τις διατμητικές παραμορφώσεις (πυκνή άμμος,  $H/D=13$ ).

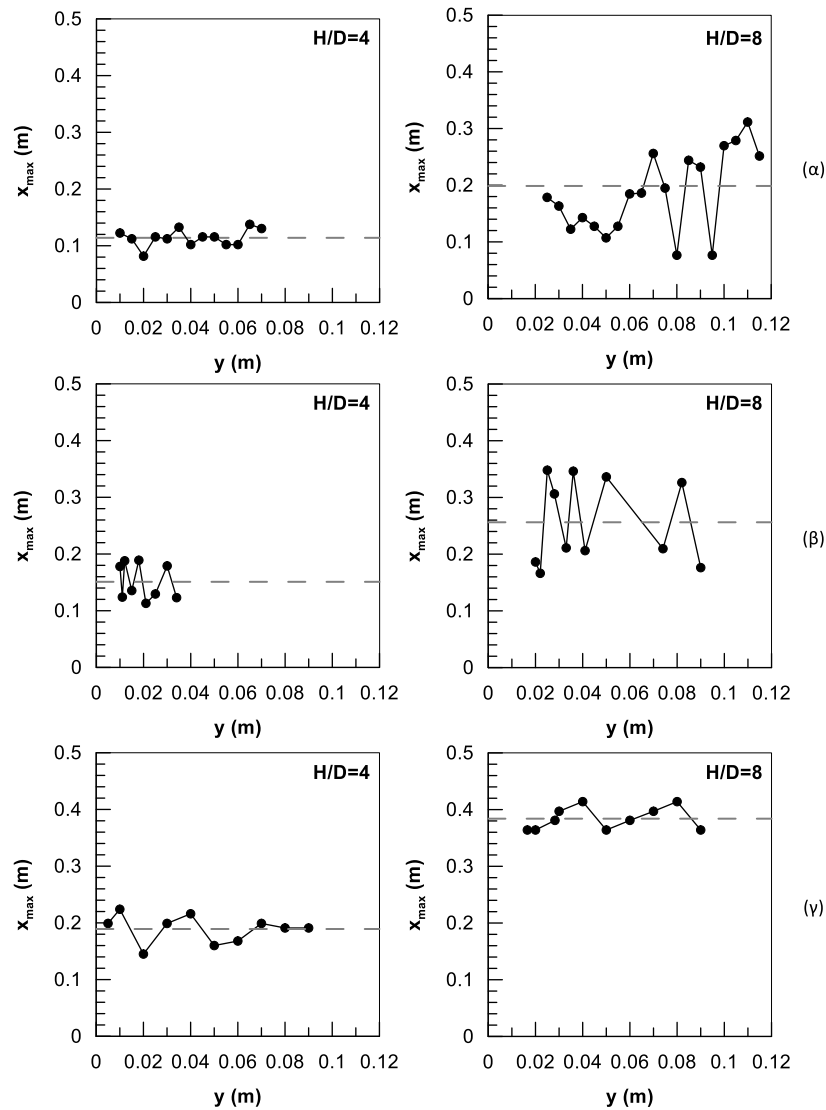


**Σχήμα 4.11:** Προσδιορισμός απόστασης  $x_{\max}$  με χρήση μέσης γραμμής επί των διατμητικών επιφανειών (πυκνή άμμος,  $H/D=4$ ).

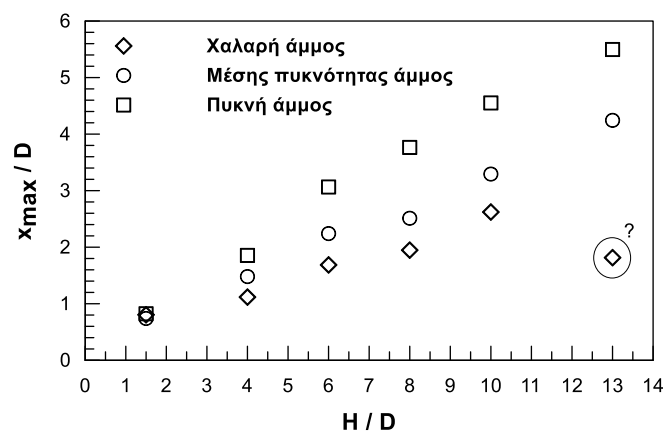
Κατά τη διάρκεια των αναλύσεων παρατηρήθηκε αυξομείωση της απόστασης  $x_{\max}$  αυξανόμενης της κατακόρυφης μετατόπισης του αγωγού  $\gamma$ . Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι το χρησιμοποιούμενο λογισμικό επιλύει το πρόβλημα δυναμικά και παρουσιάζει αναπόφευκτη αστάθεια σε κάθε βήμα επιβολής μετακίνησης. Στο **Σχήμα 4.12** παρουσιάζονται οι μετρήσεις της απόστασης  $x_{\max}$  για σταδιακή αύξηση της μετατόπισης  $\gamma$  για δύο ενδεικτικά βάθη εγκιβωτισμού  $H/D=4$  και  $H/D=8$  και για χαλαρή, μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο.

Η αυξομείωση της απόστασης  $x_{\max}$  γίνεται γύρω από μία μέση τιμή, η οποία και επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί ως αντιπροσωπευτική της έκτασης της επιφάνειας αστοχίας για κάθε βάθος εγκιβωτισμού του αγωγού και κάθε πυκνότητα άμμου επίχωσης. Επιπλέον, σημειώνεται ότι όλες οι παραπάνω μετρήσεις αντιστοιχούν σε μετατοπίσεις του αγωγού από την αστοχία και έπειτα, καθώς όπως έχει προαναφερθεί σε μικρότερες μετατοπίσεις οι επιφάνειες αστοχίας παραμένουν κατακόρυφες και συνεπώς η έκτασή τους πέραν της ακτίνας του αγωγού είναι μηδενική.

Στο **Σχήμα 4.13** εκφράζεται ο αδιαστατοποιήμενος λόγος  $x_{\max}/D$  συναρτήσει του λόγου εγκιβωτισμού  $H/D$  για χαλαρή, μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο. Διαπιστώνεται αύξηση της απόστασης  $x_{\max}$  τόσο με την αύξηση του βάθους εγκιβωτισμού, όσο και με την αύξηση της πυκνότητας του εδαφικού υλικού.



**Σχήμα 4.12:** Μετρήσεις της απόστασης  $x_{max}$  για σταδιακή αύξηση της μετατόπισης  $y$  για δύο ενδεικτικά βάθη εγκιβωτισμού  $H/D=4$  και  $H/D=8$  για (α) χαλαρή, (β) μέσης πυκνότητας και (γ) πυκνή άμμο.

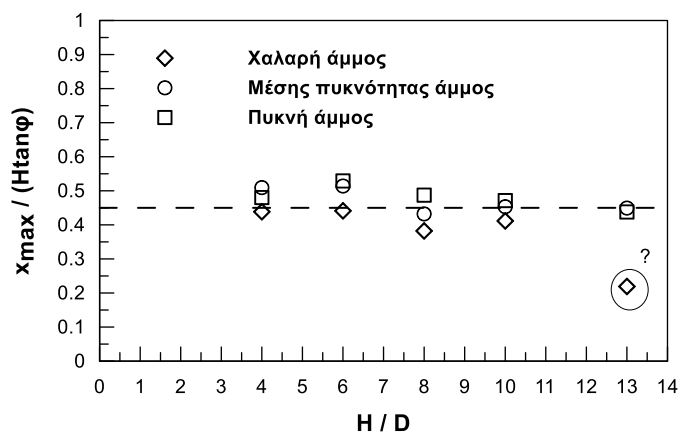


**Σχήμα 4.13:** Διάγραμμα  $x_{max}/D-H/D$  για χαλαρή, μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο επίχωσης.

Σ' αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι για βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=1.5$  ο αδιαστατοποιημένος λόγος  $x_{max}/D$  έχει και για τις τρεις πυκνότητες την τιμή 0.9, κάτι που σημαίνει πως η σχηματιζόμενη επιφάνεια αστοχίας εκτείνεται σε πλάτος λιγότερο από αυτό της μίας διαμέτρου από το κέντρο του αγωγού. Στη συνήθη πρακτική οι τάφροι θεμελίωσης σχεδιάζονται με περιθώριο 0.20 m περιμετρικά του αγωγού. Έτσι, ακόμη και στην περίπτωση ενός αγωγού μεγάλης διαμέτρου, της τάξης των 0.70 m, η επιφάνεια αστοχίας δεν ξεπερνά κατά πολύ το πλάτος της τάφρου που ήδη προβλέπεται και εφαρμόζεται. Συνεπώς, ο αγωγός θεωρείται εγκιβωτισμένος σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου, η επίδραση στη δύναμη που θα αναπτυχθεί επί του αγωγού (εξαιτίας των συνόρων της τάφρου) κατά την κατακόρυφη προς τα πάνω μετακίνησή του είναι αμελητέα και γι' αυτό δε θα γίνει περαιτέρω μελέτη του συγκεκριμένου βάθους εγκιβωτισμού.

Επιπροσθέτως, σε όλα τα σχήματα παρατηρείται απόκλιση της περίπτωσης αγωγού εγκιβωτισμένου σε χαλαρή άμμο και σε βάθος  $H/D=13$  από την «τάση» των υπόλοιπων δεδομένων, κάτι που ίσως αποδίδεται στο γεγονός ότι η επιφάνεια αστοχίας στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να ορισθεί με σαφήνεια (**Σχήμα 4.7 (α)**).

Στο **Σχήμα 4.13** είναι εμφανής η συσχέτιση αναλογίας που υπάρχει μεταξύ της έκτασης της επιφάνειας αστοχίας και του βάθους εγκιβωτισμού του αγωγού. Επιπλέον, επίδραση έχει και η σχετική πυκνότητα της άμμου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι εκ των μηχανικών παραμέτρων της άμμου, η σχετική πυκνότητα επιδρά κυρίως στη γωνία τριβής, επιχειρήθηκε ακολούθως η αδιαστατοποίηση της απόστασης  $x_{max}$  ως προς το βάθος εγκιβωτισμού  $H$  και την εφαπτομένη της γωνίας τριβής. Στο **Σχήμα 4.14** παρουσιάζεται η εν λόγω αδιαστατοποίηση και η συσχέτιση με το λόγο εγκιβωτισμού  $H/D$ .



**Σχήμα 4.14:** Διάγραμμα  $x_{max}/(H \tan \phi)$ - $H/D$  για χαλαρή, μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο επίχωσης.

Είναι εμφανές ότι τώρα οι τιμές συγκλίνουν γύρω από μία σταθερή τιμή, η οποία μπορεί να ληφθεί ίση με 0.45 για όλες τις πυκνότητες. Η απεικόνιση λοιπόν των αποτελεσμάτων στην παραπάνω μορφή (**Σχήμα 4.14**) προσφέρεται για εξαγωγή μιας ενιαίας σχέσης (**4.1**) που θα υπολογίζει την τιμή της απόστασης  $x_{\max}$ , η χρήση της οποίας περιορίζεται σε βάθη εγκιβωτισμού  $H/D$  από 4 έως 13 :

$$x_{\max} = 0.45 \cdot H \cdot \tan \varphi , \text{ για } 4 \leq H / D \leq 13 \quad (4.1)$$

όπου:

$H$ : βάθος εγκιβωτισμού του αγωγού

$\varphi$ : γωνία τριβής άμμου επίχωσης για συνθήκες απευθείας διάτμησης

Η εκτίμηση του σφάλματος της προτεινόμενης αναλυτικής σχέσης για τον υπολογισμό της απόστασης  $x_{\max}$  φαίνεται στο **Σχήμα 4.15** για χαλαρή, μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο επίχωσης.

Σημειώνεται ότι το σφάλμα στο παρακάτω διάγραμμα υπολογίστηκε ως εξής:

$$\text{Σφάλμα} = \frac{x_{\max, \text{αριθμητικό}} - x_{\max, \text{αναλυτικό}}}{x_{\max, \text{αριθμητικό}}} \quad (4.2)$$

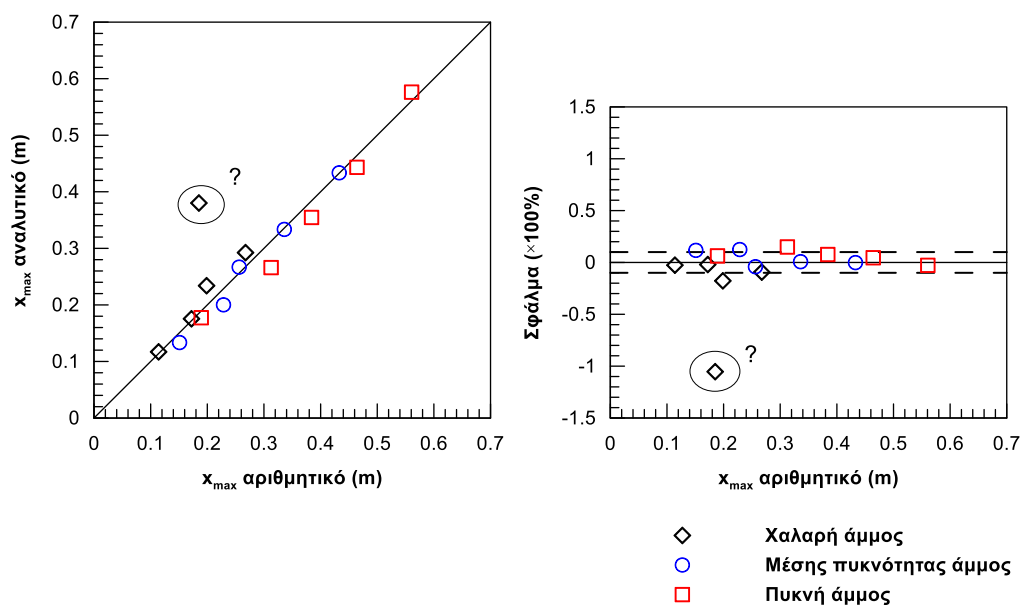
όπου:

$x_{\max, \text{αριθμητικό}}$  : η απόσταση  $x_{\max}$  που έχει προκύψει από τις αριθμητικές αναλύσεις

$x_{\max, \text{αναλυτικό}}$  : η απόσταση  $x_{\max}$  που έχει προκύψει με χρήση της σχέσης (**4.1**).

Σε όλες τις περιπτώσεις πυκνότητας άμμου επίχωσης η αναλυτική σχέση προβλέπει την τιμή της απόστασης  $x_{\max}$  με σφάλμα μικρότερο ή ίσο του 20%. Εξάιρεση αποτελεί και πάλι η περίπτωση της χαλαρής άμμου για βάθος εγκιβωτισμού του αγωγού  $H/D=13$ .





**Σχήμα 4.15:** Σύγκριση τιμών της απόστασης  $x_{\max}$  όπως προκύπτει από τις αριθμητικές αναλύσεις και τη **Σχέση (4.1)**.

#### 4.4 Συμπεράσματα

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

- Στην περίπτωση κατακόρυφης προς τα πάνω μετατόπισης εγκιβωτισμένου στο έδαφος αγωγού, η άμμος επίκωσης αστοχεί με έναν και μόνο μηχανισμό αστοχίας, ο οποίος έχει τη μορφή ανεστραμμένου κώνου, ανεξαρτήτως βάθους εγκιβωτισμού και πυκνότητας.
- Σε πολύ μικρά βάθη  $H/D$ , της τάξης του 1.5, οι διαστάσεις της τάφρου θεμελίωσης που εφαρμόζονται στη συνήθη πρακτική δεν αποκλίνουν πολύ από τις πραγματικά απαιτούμενες ώστε να εξασφαλίζονται συνθήκες ελεύθερου πεδίου και κατ' επέκταση οι αναμενόμενες δυνάμεις επί του αγωγού δεν παρουσιάζουν σημαντική αύξηση σε σχέση με τις αναπτυσσόμενες σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου.
- Η έκταση της επιφάνειας αστοχίας κατά την οριζόντια διεύθυνση (απόσταση « $x_{\max}$ »), που προσδιορίστηκε με παρατήρηση του μηχανισμού αστοχίας που αναπτύσσεται σε κάθε περίπτωση λόγου εγκιβωτισμού  $H/D$ , εξαρτάται τόσο από το βάθος στο οποίο βρίσκεται το κέντρο του αγωγού, όσο και από τη γωνία τριβής της άμμου επίκωσης,  $x_{\max} = f(H, \varphi)$ .
- Η προτεινόμενη αναλυτική σχέση υπολογισμού της απόστασης  $x_{\max}$  είναι:

$$x_{\max} = 0.45 \cdot H \cdot \tan \varphi, \text{ για } 4 \leq H / D \leq 13$$

όπου:

Η: βάθος εγκιβωτισμού του αγωγού

φ: γωνία τριβής άμμου επίχωσης για συνθήκες απευθείας διάτμησης

Η γνώση της μορφής και της έκτασης της επιφάνειας αστοχίας που αναμένεται να εμφανισθεί σε ένα πρόβλημα κατακόρυφης προς τα πάνω φόρτισης αγωγού είναι καθοριστικής σημασίας για το μελετητή και για τις διαστάσεις της τάφρου που ο τελευταίος θα πρέπει να προτείνει. Η επιρροή των συνόρων της τάφρου θεμελίωσης στις δυνάμεις που αναπτύσσονται επί του αγωγού κυμαίνεται σημαντικά, όντας μεγάλη όταν τα σύνορα της τάφρου είναι κοντά στον αγωγό και πολύ στενά σε σχέση με τα απαιτούμενα, ώστε η επιφάνεια αστοχίας να εκδηλωθεί πλήρως και ανεμπόδιστα. Η επίδραση αυτή των διαστάσεων της τάφρου θεμελίωσης διερευνάται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο.



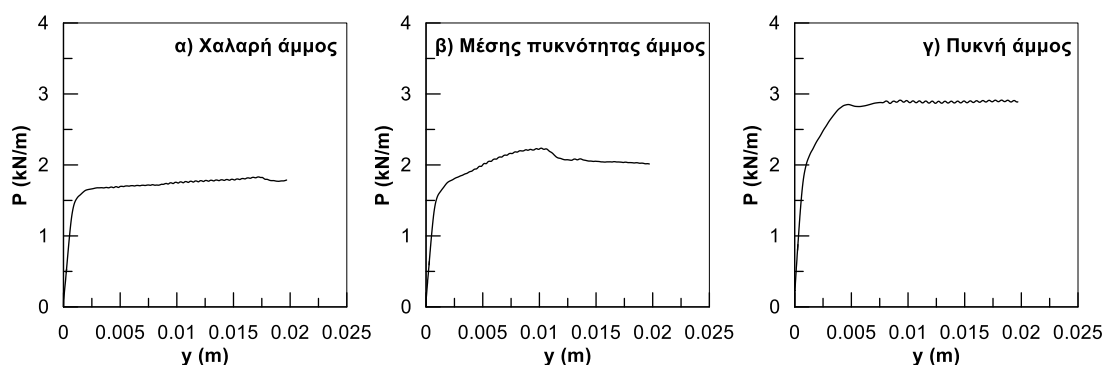
## Επίδραση Διαστάσεων Τάφρου

### 5.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η επίδραση των διαστάσεων της τάφρου θεμελίωσης στην καμπύλη δύναμης-μετατόπισης του εδάφους κατά την κατακόρυφη προς τα πάνω μετατόπιση του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα, 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 τις αντίστοιχες τιμές όταν ο αγωγός βρίσκεται εγκιβωτισμένος στο ελεύθερο πεδίο.

### 5.2 Υπολογισμός οριακού φορτίου ( $p_{ult}$ ) και οριακής μετατόπισης ( $y_{ult}$ )

Η αριθμητική καμπύλη φορτίου-μετατόπισης, όπως προκύπτει από τον αλγόριθμο πεπερασμένων διαφορών FLAC v7.0 (Itasca), για αγωγό εγκιβωτισμένο σε άμμο στο ελεύθερο πεδίο φαίνεται στο **Σχήμα 5.1** για χαλαρή, μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=4$ .



**Σχήμα 5.1:** Καμπύλη φορτίου - μετατόπισης για κατακόρυφη προς τα πάνω μετατόπιση αγωγού εγκιβωτισμένου σε (α) χαλαρή, (β) μέσης πυκνότητας και (γ) πυκνή άμμο για βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=4$ .

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.

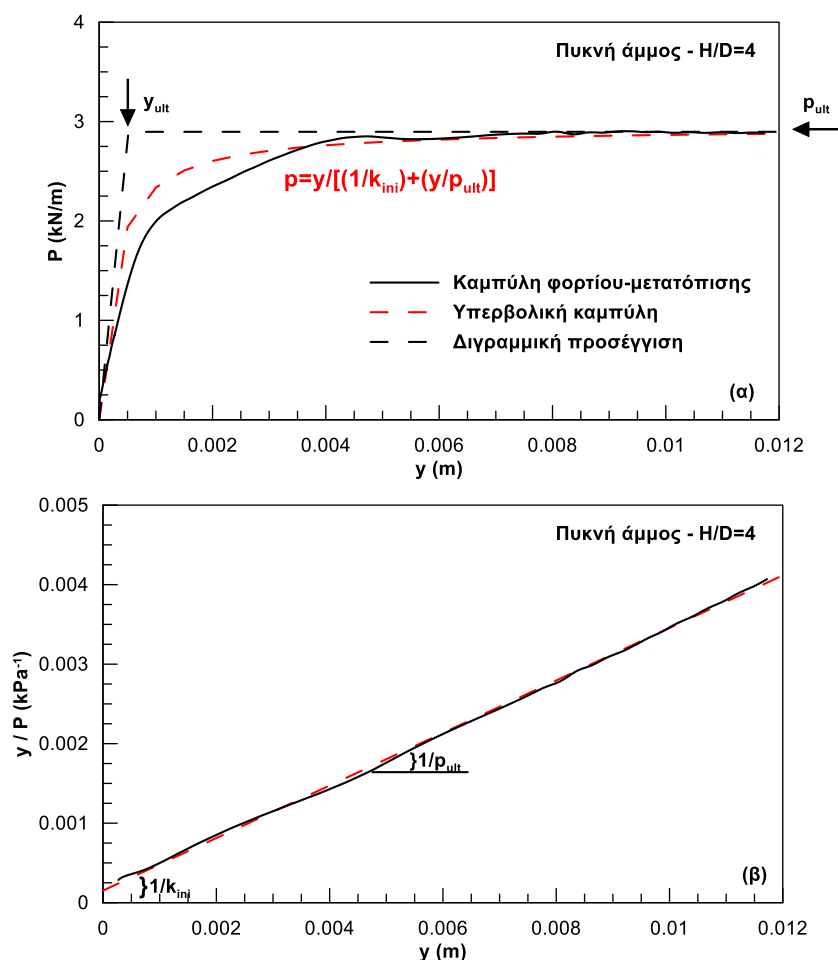
- Η **Σχέση (5.1)** μπορεί να πάρει την παρακάτω μορφή:

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

Στο συντεταγμένο επίπεδο με οριζόντιο άξονα  $y$  (m) και κατακόρυφο  $y/p$  ( $\text{KPa}^{-1}$ ), 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 γραμμή που προσεγγίζει τα αριθμητικά αποτελέσματα.
- 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 πυκνή άμμο με λόγο εγκιβωτισμού  $H/D=4$ .



**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 ( $y_{50}$ ) από την υπερβολική καμπύλη. Διαπιστώθηκε πως η αντίστοιχη μετατόπιση ( $y_{50}$ ) η οποία υπολογίζεται από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης, όπως προκύπτει από τα αριθμητικά αποτελέσματα, έχει πολύ μικρή διαφορά από την προηγούμενη, της τάξης του  $10^{-4}$ . Έτσι, για λόγους μεγαλύτερης υπολογιστικής ευχέρειας χρησιμοποιήθηκε η υπερβολική καμπύλη.
- Τέλος, υπολογίζεται η οριακή τιμή της μετατόπισης ( $y_{ult}$ ) από τη σχέση:

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

Στο **Σχήμα 5.2**, για την περίπτωση αγωγού σε πυκνή άμμο με λόγο εγκιβωτισμού  $H/D=4$ , φαίνεται με διακεκομμένη γκρι γραμμή η δι-γραμμική προσέγγιση της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης του εδάφους, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω.

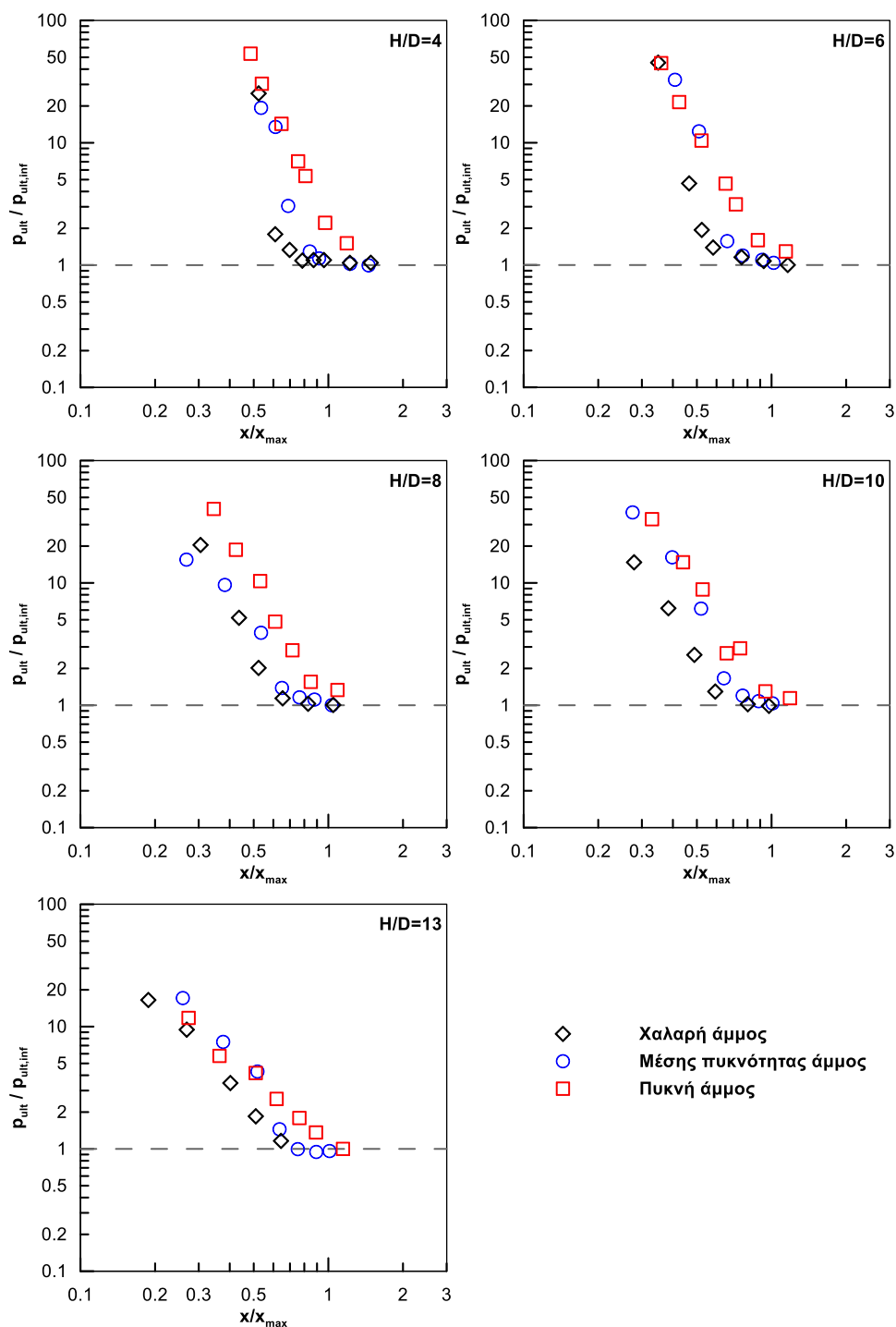
Όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3, για τη μελέτη της επίδρασης του πλάτους της τάφρου στην οριακή τιμή του φορτίου που δρα επί του αγωγού ( $p_{ult}$ ) και στη μετατόπιση που η παραπάνω τιμή εμφανίζεται ( $y_{ult}$ ), εκτελέστηκαν συνολικά 24 αριθμητικές αναλύσεις για χαλαρή, μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο επίχωσης, καθώς και για διάφορες τιμές του αδιαστατοποιημένου βάθους  $H/D$ , και συγκεκριμένα  $H/D=1.5, 4, 6, 8, 10, 13$  και  $20, 25$  μόνο για πυκνή άμμο.

Για κάθε περίπτωση πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις για διάφορες τιμές της απόστασης  $x$  του κέντρου του αγωγού από το κατακόρυφο σύνορο της τάφρου. Η μέγιστη τιμή της απόστασης  $x$  που εξετάστηκε είναι  $x=116$  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 ελήφθη ίση με  $x=6$  cm. Όλες οι παραπάνω αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για αγωγό διαμέτρου  $D=0.102$ m.

### 5.3 Επίδραση του πλάτους της τάφρου στην οριακή εδαφική αντίδραση ( $p_{ult}$ )

#### 5.3.1 Γενική μορφή του διορθωτικού συντελεστή

Στο **Σχήμα 5.3** παρουσιάζονται σε διπλή λογαριθμική κλίμακα 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 χρησιμοποιείται διαφορετικό σύμβολο για κάθε εξεταζόμενη πυκνότητα άμμου.



**Σχήμα 5.3:** Διαγράμματα  $(p_{ult}/p_{ult,inf})-(x/x_{max})$  για τιμές του λόγου εγκιβωτισμού  $H/D=4, 6, 8, 10, 13$ .

Η τιμή της απόστασης  $x$  έχει αδιαστατοποιηθεί ως προς την τιμή της έκτασης της επιφάνειας αστοχίας σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου  $x_{max}$  ( $x/x_{max}$ ), ενώ η τιμή της μέγιστης εδαφικής αντίδρασης που προκύπτει σε κάθε ανάλυση έχει αδιαστατοποιηθεί ως προς την αντίστοιχη τιμή όταν ο αγωγός βρίσκεται



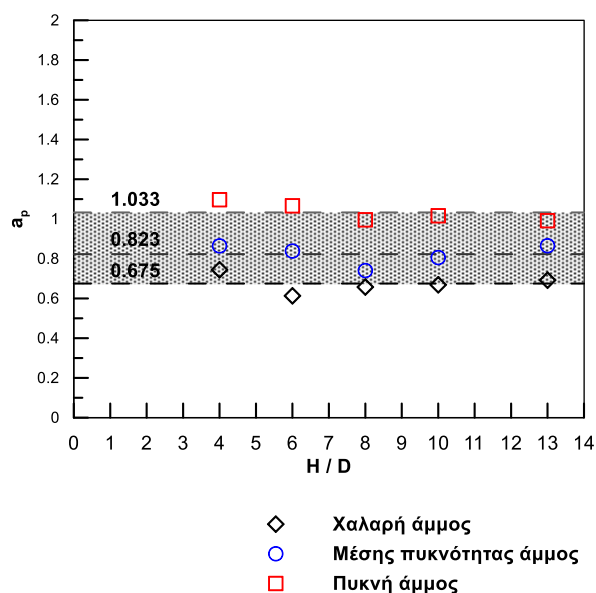
εγκιβωτισμένος στο ελεύθερο πεδίο ( $\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$ ). Από τη σύγκριση προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Επίδραση οριζόντιας απόστασης  $x/x_{max}$ : Ο λόγος ( $\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$ ) μειώνεται μέχρι μια κρίσιμη τιμή του λόγου  $(x/x_{max})_{cr}$ , η οποία από εδώ και στο εξής θα συμβολίζεται ως  $a_p$ , ενώ για  $x/x_{max} > a_p$  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 αναπτυσσομένη στον αγωγό δύναμη είναι αμελητέα. Για μικρότερες τιμές, το σύνορο της τάφρου θεμελίωσης 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 ( $\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$ ) για δεδομένη τιμή του λόγου  $x/x_{max}$ . Η επίδραση αυτή μπορεί να εξηγηθεί λαμβάνοντας υπόψη την αύξηση της έκτασης της επιφάνειας αστοχίας με το βάθος, όπως αυτή αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα, καθώς η επιφάνεια αστοχίας διευρύνεται με την αύξηση του βάθους εγκιβωτισμού, ακόμη και μία μείωση σε αυτήν της τάξης του 50% έχει μικρότερη βαρύτητα απ' ότι έχει στις ήδη στενές επιφάνειες αστοχίας που αντιστοιχούν στα μικρά βάθη. Επομένως, είναι αναμενόμενο η επίδραση του κατακόρυφου συνόρου της τάφρου να είναι εντονότερη σε μικρές τιμές του λόγου εγκιβωτισμού. Εξάιρεση αποτελεί το βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=1.5$  στο οποίο η έκταση της επιφάνειας αστοχίας ακόμη και σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου είναι τόσο μικρή που δεν ξεπερνά τα όρια της τάφρου θεμελίωσης που εφαρμόζεται στη συνήθη πρακτική, όπως έχει αναφερθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οποιαδήποτε μείωση των διαστάσεων της τάφρου δεν επηρεάζει την οριακή δύναμη επί του αγωγού, συνεπώς δεν μελετάται περαιτέρω. Όσον αφορά την τιμή της παραμέτρου  $a_p=(x/x_{max})_{cr}$  πρακτικά δεν επηρεάζεται από την αύξηση του βάθους.
- Επίδραση πυκνότητας άμμου: Από το **Σχήμα 5.3** παρατηρείται πως η κρίσιμη τιμή  $a_p$ , 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 κατακόρυφη μετατόπισή του, είναι διαφορετική ανάλογα με την πυκνότητα της άμμου επίχωσης. Συγκεκριμένα, παρουσιάζει αύξηση με την αύξηση της πυκνότητας. Η επίδραση αυτή μπορεί να εξηγηθεί λαμβάνοντας υπόψη τον κυρίαρχο ρόλο της πυκνότητας στον υπολογισμό του φορτίου επί του αγωγού (σχέση αναλογίας). Για παράδειγμα, για μείωση της έκτασης της

τάφρου κατά 70% σε σχέση με την τιμή  $x_{max}$  ( $a_p=0.7$ ) η δύναμη που αναπτύσσεται επί του αγωγού κατά την κατακόρυφη προς τα πάνω μετατόπισή του είναι πολύ μεγαλύτερη για πυκνή απ' ότι για χαλαρή άμμο επίχωσης. Συνεπάγεται ότι απαιτείται μεγαλύτερη μείωση της έκτασης της τάφρου (μικρότερη τιμή του λόγου  $a_p$ ), ώστε να γίνει αντιληπτή η επίδραση του ορίου στην περίπτωση της μέσης πυκνότητας και χαλαρής άμμου.

### 5.3.2 Αναλυτικός υπολογισμός της κρίσιμης διάστασης τάφρου $a_p$

Ως πρώτο βήμα για την εξαγωγή αναλυτικών σχέσεων υπολογισμού του διορθωτικού συντελεστή ( $\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$ ), εκτιμήθηκε η κρίσιμη τιμή του λόγου  $a_p = (x/x_{max})_{cr}$ , πέρα από την οποία ο διορθωτικός συντελεστής παραμένει σταθερός και ίσος με την μονάδα. Στο **Σχήμα 5.4** παρουσιάζονται οι τιμές του  $a_p$  που υπολογίστηκαν για κάθε λόγο  $H/D$ , για χαλαρή, μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο.



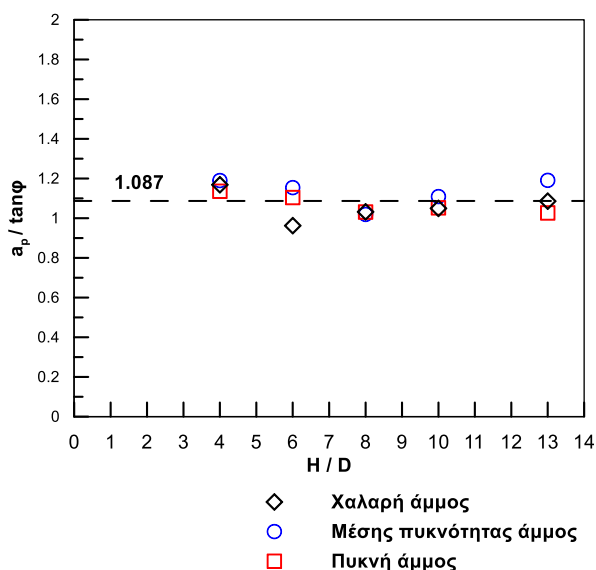
**Σχήμα 5.4:** Τιμές του λόγου  $a_p$  για χαλαρή άμμο, άμμο μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο.

Οι μέσες τιμές των τιμών του  $a_p$  που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.4** μεταβάλλονται ως ακολούθως ανάλογα με τη σχετική πυκνότητα της άμμου:

$$a_p = \begin{cases} 0.675 & , \text{ χαλαρή} \\ 0.823 & , \text{ μέση} \\ 1.033 & , \text{ πυκνή} \end{cases} \quad (5.4)$$

Για να εξαλειφθεί η επίδραση της σχετικής πυκνότητας, στο **Σχήμα 5.5** παρουσιάζεται η κανονικοποίηση του λόγου  $a_p$  ως προς την εφαπτομένη της γωνίας  $\phi$ , προκειμένου να προκύψει μια σχέση που να δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να

υπολογίσει την τιμή του λόγου  $a_p$  κάνοντας χρήση της εκάστοτε γωνίας τριβής της άμμου επίχωσης.



**Σχήμα 5.5:** Τιμές του κανονικοποιημένου λόγου  $a_p/\tan\phi$  για χαλαρή, μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο.

Πράγματι, μετά την κανονικοποίηση, οι τιμές  $a_p/\tan\phi$  συγκλίνουν στην τιμή 1.087 και η σχέση που προτείνεται είναι η εξής:

$$a_p = \left( \frac{x}{x_{\max}_{cr}} \right) = 1.087 \cdot \tan \varphi \quad (5.5)$$

όπου:

$\varphi$  : γωνία τριβής της άμμου επίχωσης για συνθήκες απευθείας διάτμησης

Σ' αυτό το σημείο αξίζει να τονισθεί ότι από την παραπάνω συσχέτιση προκύπτει πως η κρίσιμη απόσταση  $x$ , πέρα από την οποία παύει να υπάρχει επίδραση του συνόρου στο οριακό φορτίο επί του αγωγού, είναι επίσης συνάρτηση της γωνίας τριβής  $\varphi$  (όπως και η απόσταση  $x_{\max}$ ) και μάλιστα επηρεάζεται διπλά από την τιμή αυτής, καθώς η γωνία  $\varphi$  υπεισέρχεται τόσο στον υπολογισμό του  $x_{\max}$ , όσο και του  $a_p$ . Συγκεκριμένα, αν η κρίσιμη αυτή απόσταση συμβολιστεί ως  $x_{cr}$ , τότε ισχύει:

$$x_{cr} (m) = a_p \cdot x_{\max} = 1.087 \cdot \tan \varphi \cdot 0.45 \cdot H \cdot \tan \varphi = 0.489 \cdot H \cdot \tan^2 \varphi \quad (5.6)$$

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι στη **Σχέση (5.6)**, όπως έχει ορισθεί από την αρχή του κεφαλαίου, η κρίσιμη απόσταση  $x_{cr}$  αναφέρεται στην

απόσταση από το κέντρο του αγωγού μέχρι το κατακόρυφο σύνορο της τάφρου. Μία τέτοια σχέση όμως δεν έχει καθολική ισχύ, αφού λαμβάνει υπόψη της τη διάμετρο του αγωγού για τον οποίο πραγματοποιήθηκαν όλες οι παραπάνω αναλύσεις. Επομένως, για να εξαιρεθεί η επίδραση αυτή, ορίζουμε ως  $x_{cr,n}$  την καθαρή απόσταση από την παρειά του αγωγού έως το τοίχωμα της τάφρου ως εξής:

$$x_{cr,n}(m) = 0.489 \cdot H \cdot \tan^2 \varphi - 0.051 \quad (5.7)$$

όπου:

0.051 m : η ακτίνα του αγωγού για τον οποίο έχουν πραγματοποιηθεί οι αναλύσεις.

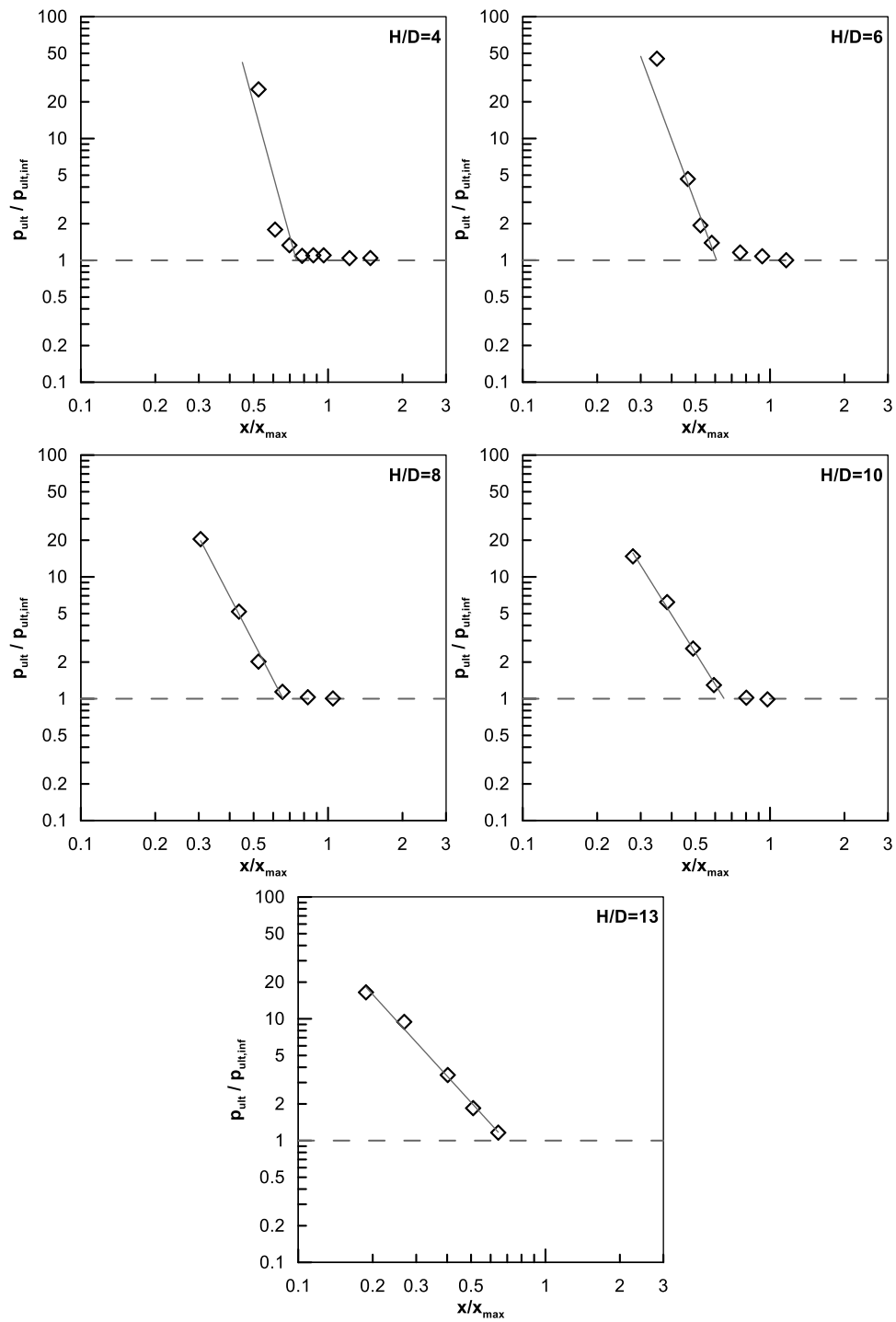
### 5.3.3 Αναλυτικός υπολογισμός της οριακής εδαφικής αντίδρασης ( $p_{ult}$ )

Στη συνέχεια, από το **Σχήμα 5.3** προκύπτει πως για τιμές του  $(x/x_{max}) < a_p$ , ο διορθωτικός συντελεστής ( $p_{ult}/p_{ult,inf}$ ) μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά από μια σχέση της ακόλουθης μορφής:

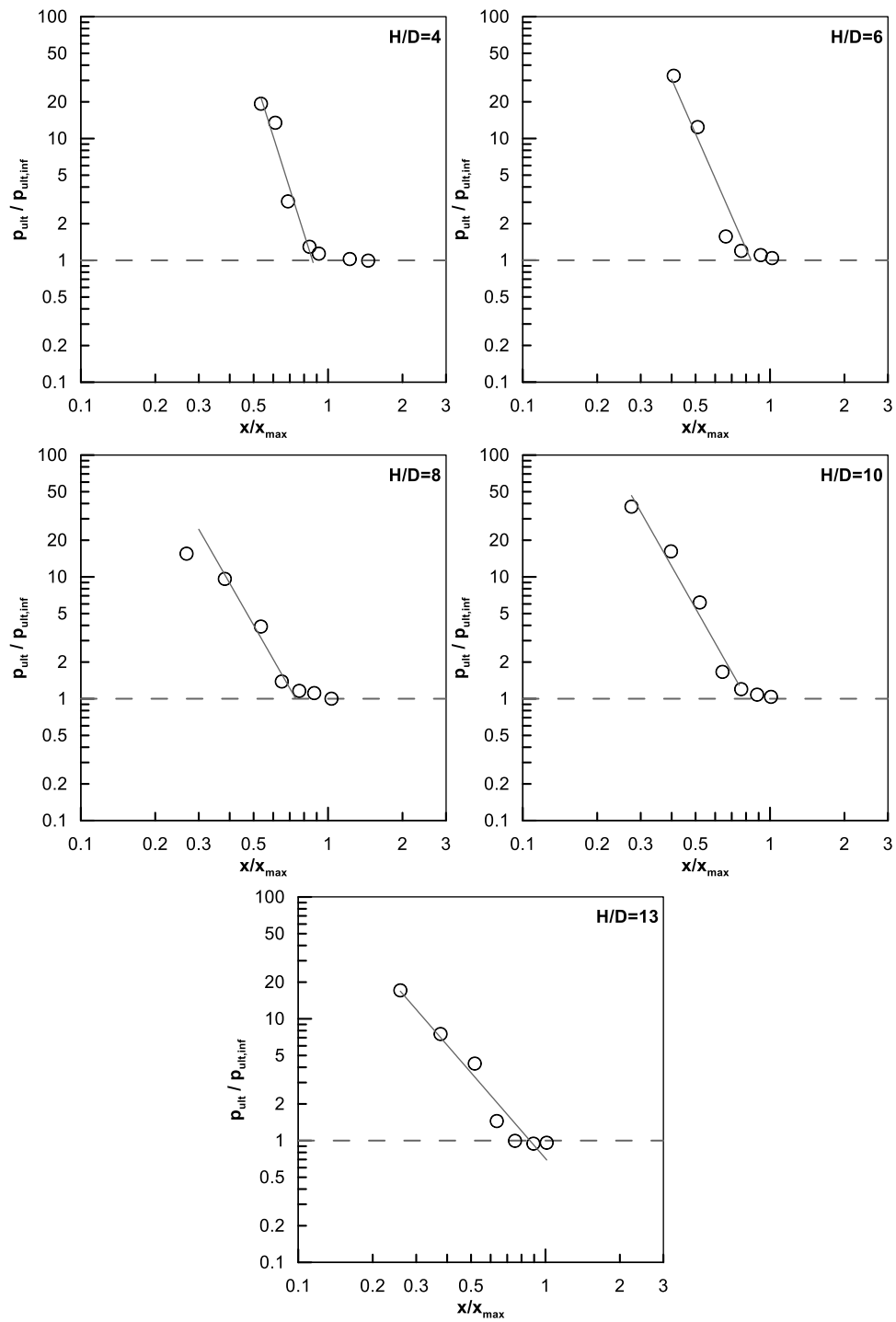
$$\frac{P_{ult}}{P_{ult,inf}} = \left( \frac{x}{x_{max} \cdot a_p} \right)^{-B_p} \geq 1 \quad (5.8)$$

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

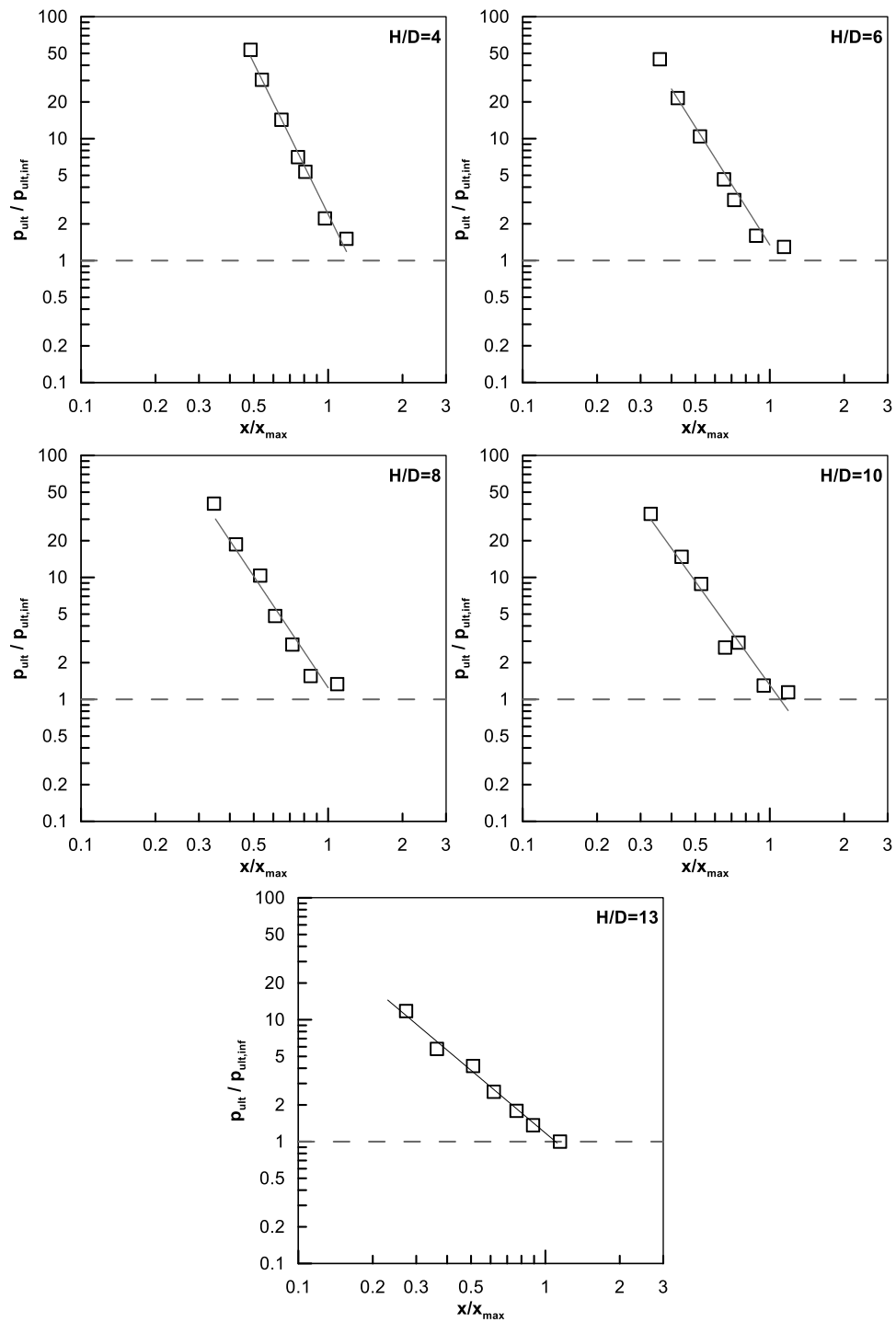
- Σύμφωνα με τη σχέση **(5.8)** τα αριθμητικά δεδομένα που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.3** για  $x/x_{max} < a_p$  και για κάθε τιμή του λόγου  $H/D$  μπορούν να προσεγγισθούν με ευθεία, η οποία τέμνει τον οριζόντιο άξονα της μονάδας στην τιμή  $a_p$  και έχει κλίση ίση με  $B_p$  (**Σχήμα 5.6**, **Σχήμα 5.7** και **Σχήμα 5.8**).
- Από τις ευθείες αυτές προσδιορίζεται η τιμή του συντελεστή  $B_p$  για κάθε λόγο εγκιβωτισμού  $H/D$ .



**Σχήμα 5.6:** Προσέγγιση ευθείας - Διαγράμματα  $(p_{ult}/p_{ult,inf})-(x/x_{max})$  για χαλαρή άμμο επίχωσης.

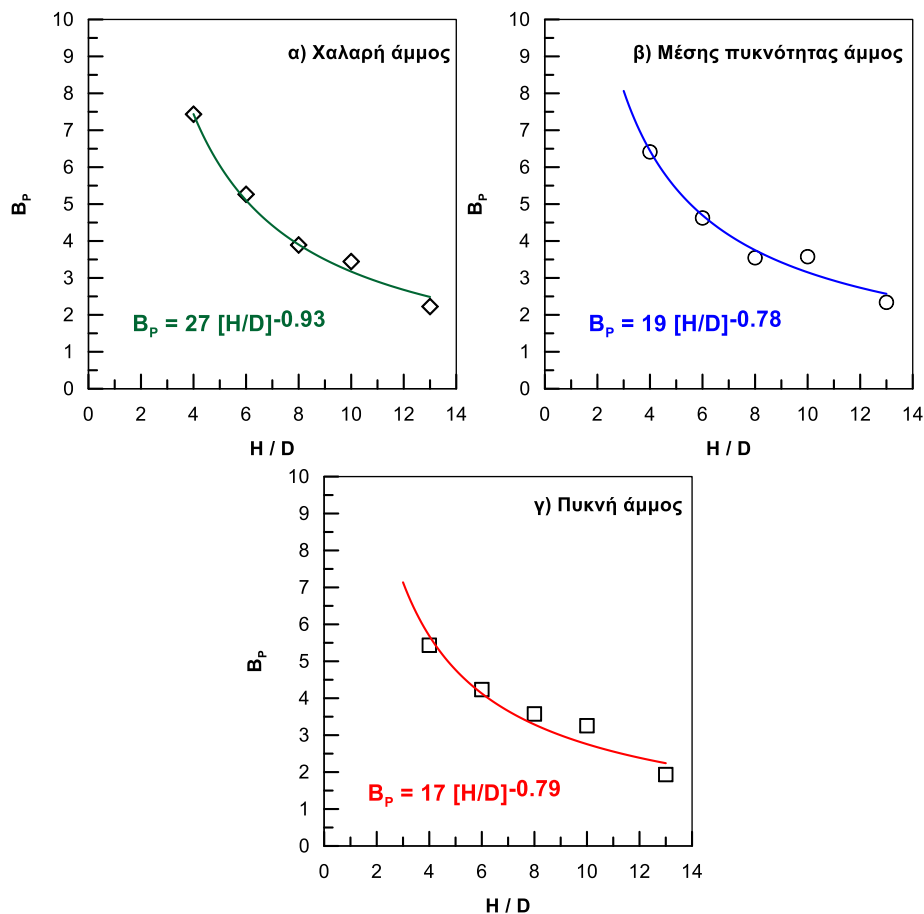


Σχήμα 5.7: Προσέγγιση ευθείας - Διαγράμματα  $(p_{ult}/p_{ult,inf})-(x/x_{max})$  για μέσης πυκνότητας άμμο επίχωσης.



Σχήμα 5.8: Προσέγγιση ευθείας - Διαγράμματα  $(p_{ult}/p_{ult,inf})-(x/x_{max})$  για πυκνή άμμο επίχωσης.

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.9**, ο συντελεστής  $B_p$  έχει διαφορετική τιμή για κάθε πυκνότητα, χωρίς όμως η απόκλιση να είναι σημαντική. Η τιμή του μπορεί να υπολογισθεί μέσω μιας αναλυτικής σχέσης δύναμης για κάθε μία από τις τρεις εξεταζόμενες πυκνότητες.



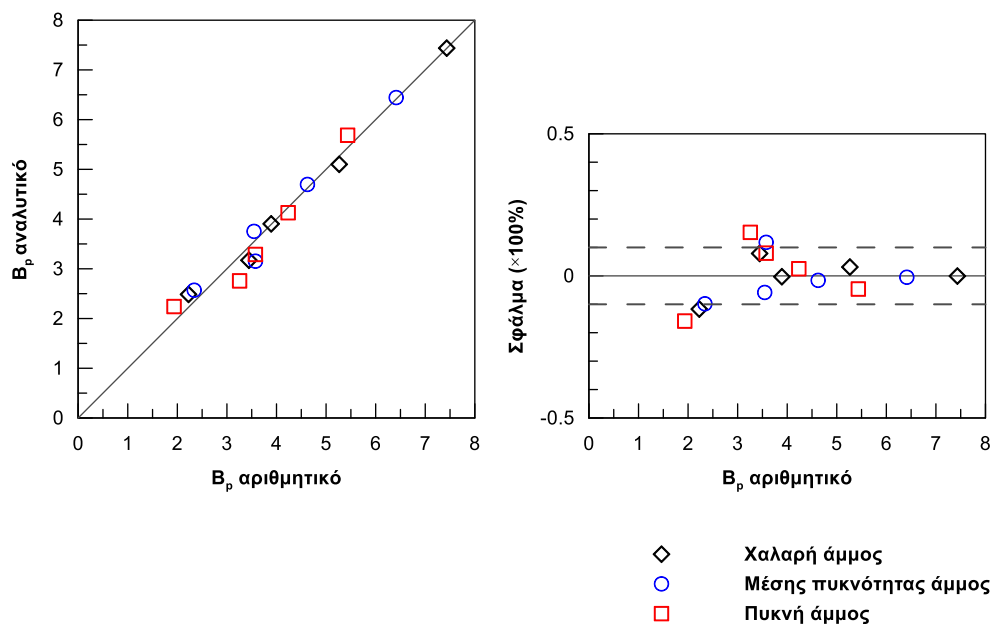
**Σχήμα 5.9:** Τιμές του συντελεστή  $B_p$  για α) χαλαρή, β) μέσης πυκνότητας και γ) πυκνή άμμο.

Συγκεκριμένα, από το **Σχήμα 5.9**, η προσέγγιση των τιμών του συντελεστή  $B_p$  μπορεί να γίνει για χαλαρή, μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο από μία αναλυτική σχέση της μορφής:

$$B_p = \left\{ \begin{array}{l} 27 \cdot [H/D]^{-0.93}, \text{ χαλαρή} \\ 19 \cdot [H/D]^{-0.78}, \text{ μέση} \\ 17 \cdot [H/D]^{-0.79}, \text{ πυκνή} \end{array} \right\}, \text{ για } 4 \leq H/D \leq 13 \quad (5.9)$$

Η εκτίμηση του σφάλματος της προτεινόμενης αναλυτικής σχέσης για τον υπολογισμό του συντελεστή  $B_p$  φαίνεται στο **Σχήμα 5.10** για όλες τις εξεταζόμενες πυκνότητες.





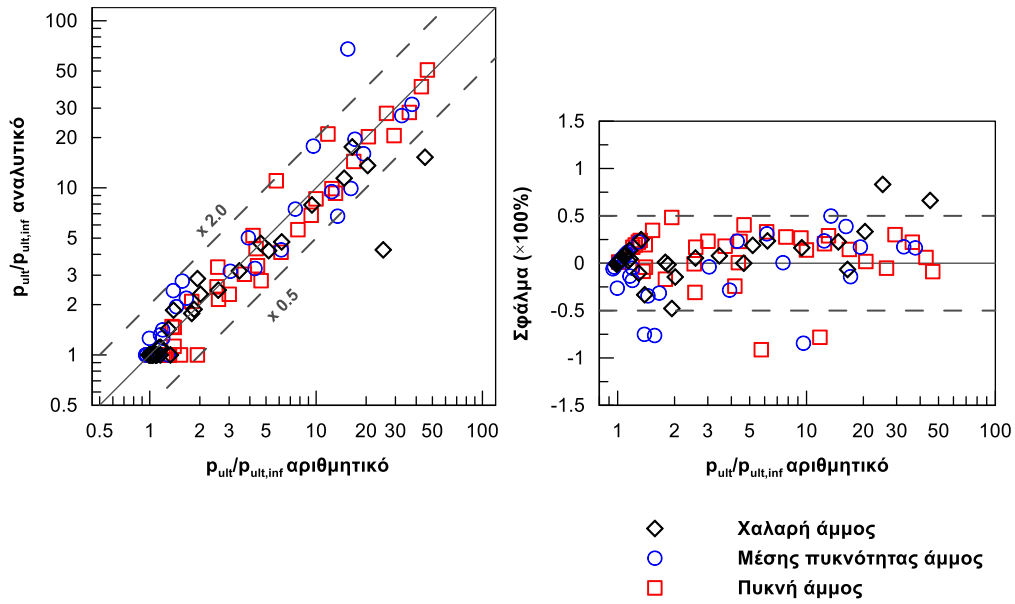
**Σχήμα 5.10:** Σύγκριση τιμών του συντελεστή  $B_p$  όπως προκύπτει από το **Σχήμα 5.6**, **Σχήμα 5.7** και **Σχήμα 5.8** και τη **Σχέση (5.9)**.

Σημειώνεται ότι το σφάλμα στο παραπάνω διάγραμμα υπολογίστηκε ως εξής:

$$\Sigma\phi\acute{\alpha}\lambda\mu\alpha = \frac{B_{p,\text{αριθμητικό}} - B_{p,\text{αναλυτικό}}}{B_{p,\text{αριθμητικό}}} \quad (5.10)$$

Σε όλες τις περιπτώσεις πυκνότητας άμμου επίχωσης η αναλυτική σχέση προβλέπει την τιμή της παραμέτρου  $B_p$  με σφάλμα μικρότερο ή ίσο του 16%. Ειδικότερα, το 87% των δεδομένων παρουσιάζει σφάλμα μικρότερο του 15%, ενώ το 73% των δεδομένων παρουσιάζει σφάλμα μικρότερο του 10%.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η αξιολόγηση της προτεινόμενης αναλυτικής σχέσης **(5.8)** 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 5.11**, όπου εξετάζεται το σφάλμα της σχέσης **(5.8)** για διακριτές τιμές του λόγου  $a_p$  ανάλογα με την πυκνότητα. Παρατηρούμε ικανοποιητική πρόβλεψη των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων από την αναλυτική σχέση με σφάλμα μικρότερο του 50% για το 94% των δεδομένων. Το σφάλμα που προκύπτει από τη χρήση της εξίσωσης **(5.5)** για τον υπολογισμό του λόγου  $a_p$  είναι ακριβώς το ίδιο. Έτσι, παρουσιάζει συγκριτικό πλεονέκτημα, γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλες τις πυκνότητες άμμου επίχωσης.



**Σχήμα 5.11:** Σύγκριση αποτελεσμάτων του διορθωτικού συντελεστή ( $\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$ ) όπως υπολογίζεται από τις αριθμητικές αναλύσεις και την προτεινόμενη αναλυτική σχέση.

Σημειώνεται ότι το σφάλμα στο παραπάνω διάγραμμα υπολογίστηκε ως εξής:

$$\Sigma \text{φά}\lambda\mu\alpha = \frac{\frac{P_{ult}}{P_{ult,inf, \text{αριθμητικό}}} - \frac{P_{ult}}{P_{ult,inf, \text{αναλυτικό}}}}{\frac{P_{ult}}{P_{ult,inf, \text{αριθμητικό}}}} \quad (5.11)$$

Τέλος, θα πρέπει να τονιστεί ότι κατά τον προσδιορισμό των παραμέτρων  $a_p$  και  $B_p$  θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχει επίδραση των διαστάσεων του αγωγού, όπως αποδείχθηκε στο πλαίσιο της Διπλωματικής Εργασίας των Ζάμπα Αλέξανδρου και Ζερβού Σπυρίδωνα, 2014, αλλά η εκτίμηση των παραμέτρων αυτών μπορεί να γίνει από τις προηγούμενες σχέσεις ανεξαρτήτως της διαμέτρου ( $D$ ) του αγωγού.

## 5.4 Επίδραση του πλάτους της τάφρου στην οριακή μετατόπιση ( $\gamma_{ult}$ )

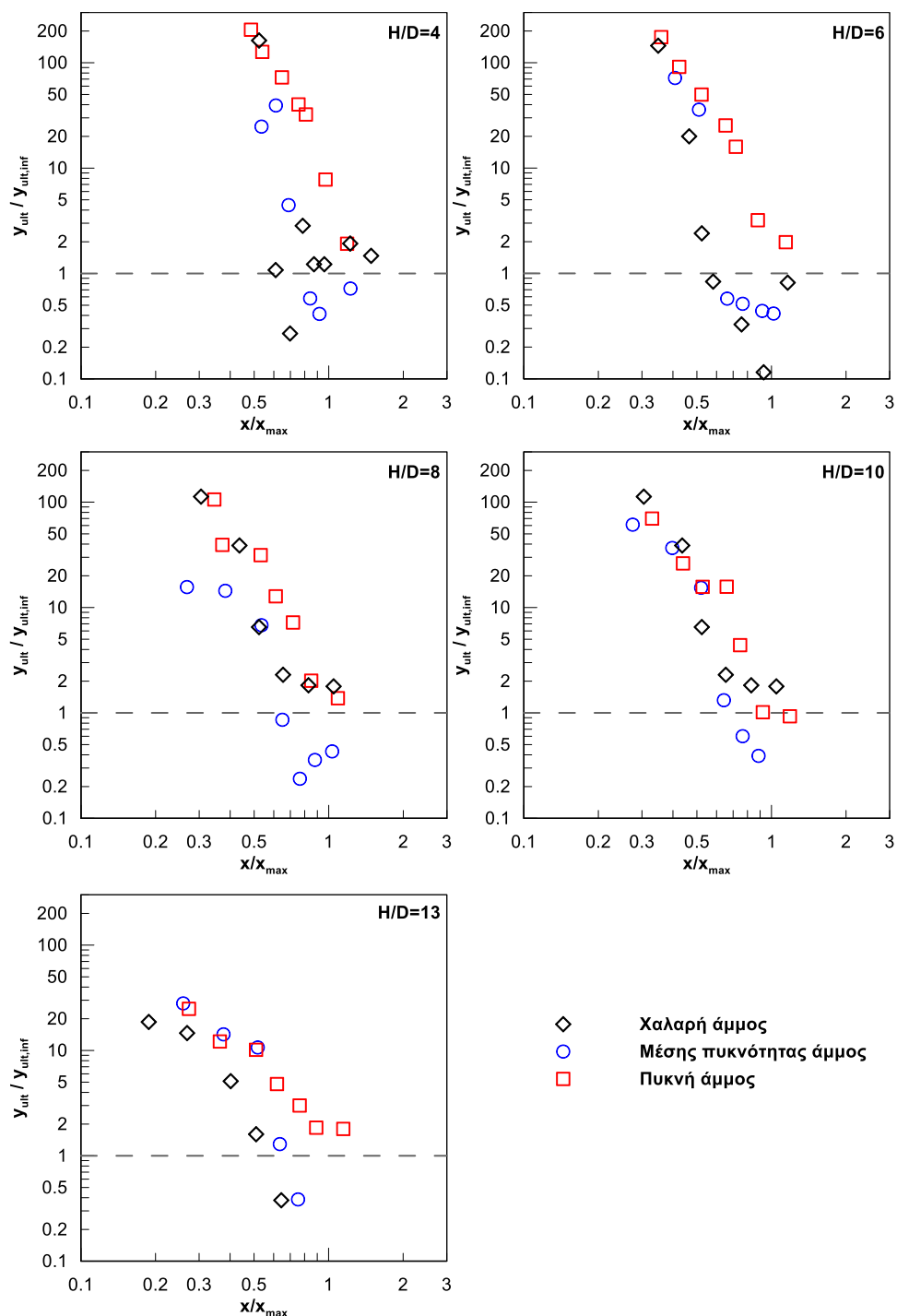
### 5.4.1 Γενική μορφή του διορθωτικού συντελεστή

Στο **Σχήμα 5.12** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα όλων των παραμετρικών αναλύσεων που έγιναν σχετικά με την επίδραση του πλάτους της τάφρου στην οριακή μετατόπιση, δηλαδή στη μετατόπιση στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη τιμή του φορτίου που δρα στον αγωγό όταν θεωρηθεί διγραμμική καμπύλη για τη συμπεριφορά του εδαφικού υλικού επίχωσης.

Κάθε σχήμα αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο λόγο εγκιβωτισμού  $H/D$ , ενώ έχει γίνει διαχωρισμός των αποτελεσμάτων ανάλογα με την πυκνότητα. Η τιμή της απόστασης  $x$  έχει αδιαστατοποιηθεί ως προς την τιμή της έκτασης της επιφάνειας αστοχίας σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου ( $x/x_{max}$ ), ενώ η τιμή της οριακής μετατόπισης που προκύπτει σε κάθε ανάλυση έχει αδιαστατοποιηθεί ως προς την αντίστοιχη τιμή στην περίπτωση που ο αγωγός βρίσκεται εγκιβωτισμένος στο ελεύθερο πεδίο ( $y_{ult}/y_{ult,inf}$ ).

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 διαπιστώνονται τα εξής:

- Επίδραση οριζόντιας απόστασης  $x/x_{max}$ : Υπάρχει μια κρίσιμη τιμή  $(x/x_{max})_{cr}$ , η οποία από εδώ και στο εξής θα συμβολίζεται ως  $a_y$ , πέρα από την οποία ο λόγος ( $y_{ult}/y_{ult,inf}$ ) παραμένει πρακτικά σταθερός και ίσος με τη μονάδα, αντίστοιχα με την περίπτωση του οριακού φορτίου. Για τιμές του  $x/x_{max}$  μικρότερες από την κρίσιμη αυτή τιμή  $a_y$ , το κατακόρυφο σύνορο της τάφρου επηρεάζει την κίνηση του αγωγού, μην επιτρέποντας στο μηχανισμό αστοχίας της άμμου επίχωσης να αναπτυχθεί ανεμπόδιστα, γεγονός που μεταφράζεται σε αύξηση του λόγου ( $y_{ult}/y_{ult,inf}$ ).
- Επίδραση βάθους εγκιβωτισμού  $H/D$ : Στο **Σχήμα 5.12** φαίνεται η σταδιακή μείωση του λόγου ( $y_{ult}/y_{ult,inf}$ ) που αντιστοιχεί σε τιμές του  $x/x_{max}$  μικρότερες του  $a_y$ , με την αύξηση του βάθους για δεδομένη τιμή του λόγου  $x/x_{max}$ . Η επίδραση αυτή μπορεί να εξηγηθεί λαμβάνοντας υπόψη την αύξηση της έκτασης της επιφάνειας αστοχίας με το βάθος και της συνεπαγόμενης μείωσης της επιρροής του περιορισμού της τάφρου, όπως αυτή αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Όσον αφορά την τιμή της παραμέτρου  $a_y$  πρακτικά δεν επηρεάζεται από την αύξηση του βάθους.
- Επίδραση πυκνότητας άμμου: Όπως αναφέρθηκε και στην επίδραση της οριζόντιας απόστασης  $x/x_{max}$ , για κάθε περίπτωση άμμου επίχωσης λαμβάνεται διαφορετική τιμή του κρίσιμου λόγου  $a_y$ . Συγκεκριμένα, παρουσιάζει αύξηση με την αύξηση της πυκνότητας, όπως ακριβώς συμβαίνει και για το λόγο  $a_p$ .



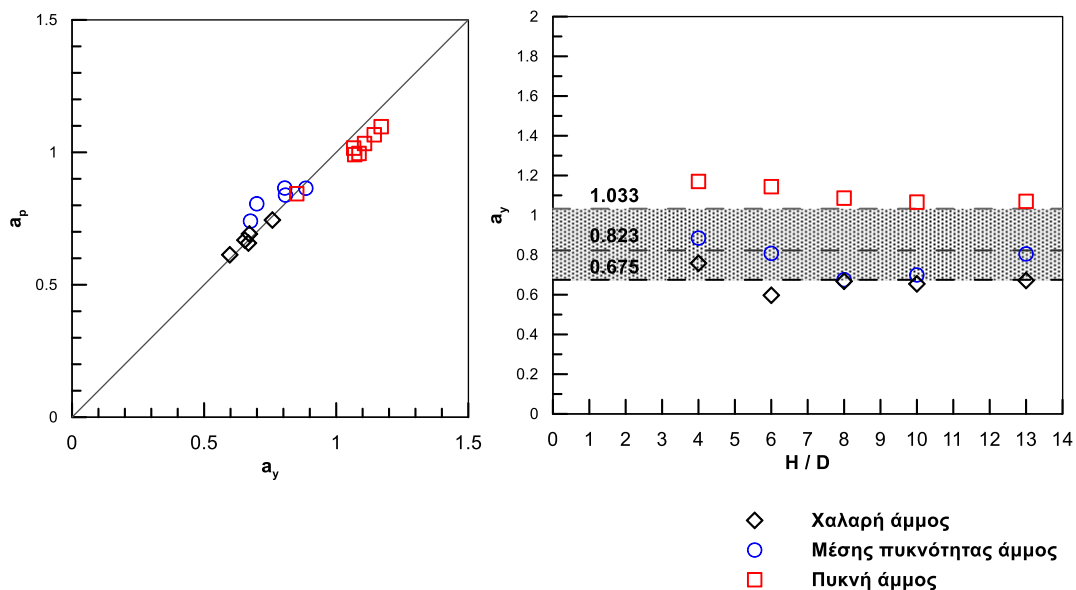
**Σχήμα 5.12:** Διαγράμματα  $(\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf})-(x/x_{max})$  για τιμές του λόγου εγκιβωτισμού  $H/D=4, 6, 8, 10, 13$ .

Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση για τις τιμές του λόγου  $(\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf})$  είναι ότι αυτές σε ορισμένες περιπτώσεις λαμβάνουν τιμές μικρότερες της μονάδας ενώ ο αντίστοιχος λόγος  $(\rho_{ult}/\rho_{ult,inf})$  είναι ίσος με τη μονάδα (**Σχήμα 5.3**). Από τη 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 κατακόρυφης μετατόπισης και οφείλεται σε αλληλεπίδραση των κατακόρυφων συνόρων που τέθηκαν κατά την αριθμητική προσομοίωση με την κατακόρυφη 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, συνεπάγεται και επίδραση του συνόρου στον αγωγό, ανεξάρτητα από την απόσταση στην οποία έχει τοποθετηθεί σε σχέση με τον αγωγό.

#### 5.4.2 Αναλυτικός υπολογισμός της κρίσιμης διάστασης τάφρου $a_y$

Απαραίτητη για την εξαγωγή αναλυτικών σχέσεων υπολογισμού του διορθωτικού συντελεστή ( $\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$ ) είναι η εκτίμηση της κρίσιμης τιμής  $a_y=(x/x_{max})_{cr}$  πέρα από την οποία ο διορθωτικός συντελεστής παραμένει σταθερός και ίσος με τη μονάδα. Η φυσική έννοια των μεγεθών  $a_p$  και  $a_y$  είναι ο προσδιορισμός της μικρότερης διάστασης της τάφρου θεμελίωσης, ώστε να μην επηρεάζεται η κίνηση του αγωγού από τα κατακόρυφα πλευρικά σύνορα. Αναμένεται λοιπόν οι δύο αυτές τιμές να ταυτίζονται, κάτι που επαληθεύτηκε από τις αριθμητικές αναλύσεις.



**Σχήμα 5.13:** Σύγκριση τιμών των λόγων  $a_y$  και  $a_p$  για χαλαρή άμμο, άμμο μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο.

Στο **Σχήμα 5.13** παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών των λόγων  $a_y$  και  $a_p$  για όλα τα εξεταζόμενα βάρη εγκιβωτισμού και για τις τρεις πυκνότητες. Διαπιστώνεται ταύτισή τους και, κατά συνέπεια, για τον υπολογισμό της τιμής  $a_y$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε η **Σχέση (5.4)**, είτε η **Σχέση (5.5)**.

### 5.4.3 Αναλυτικός υπολογισμός της οριακής μετατόπισης ( $\gamma_{ult}$ )

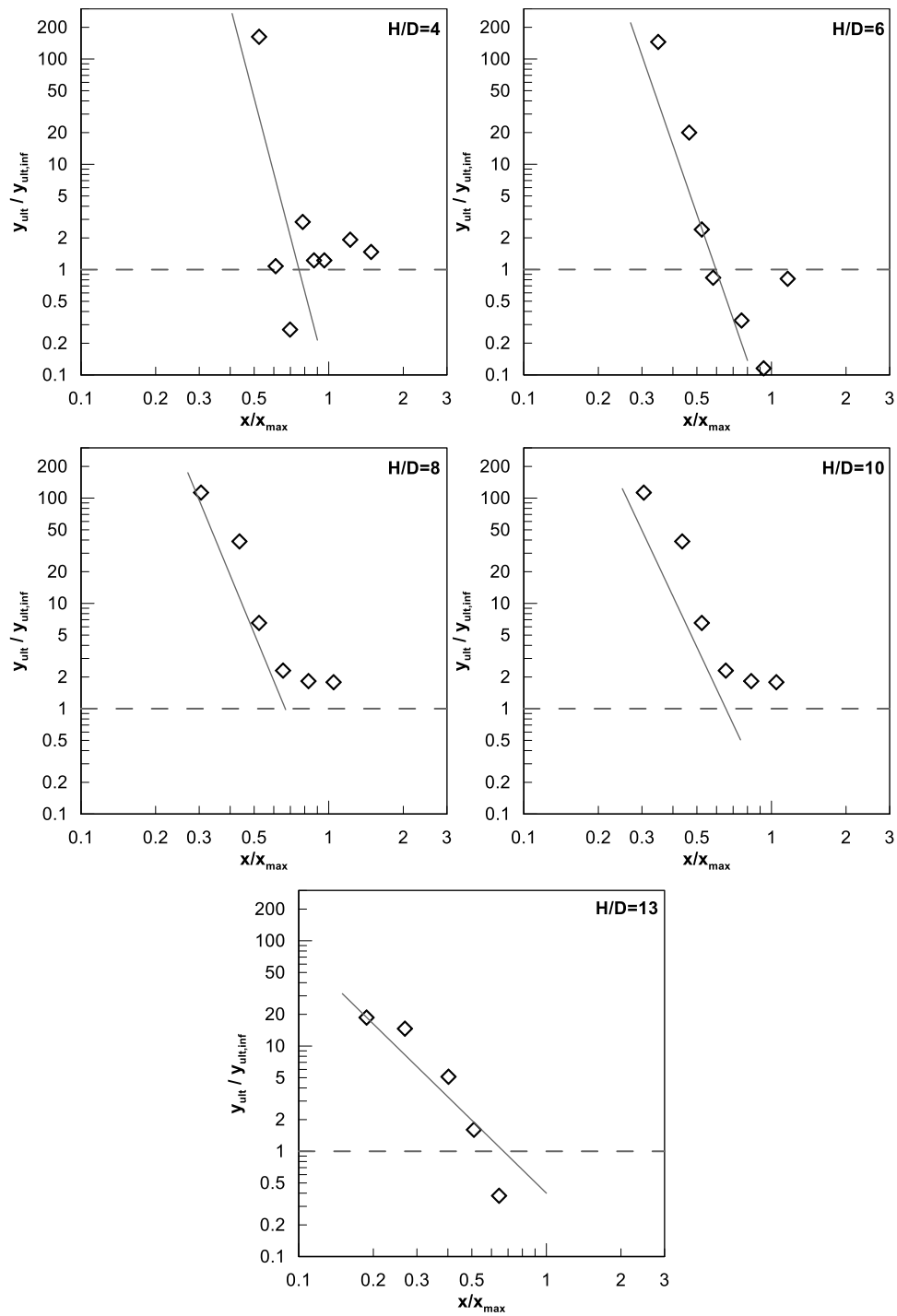
Για την εξαγωγή αναλυτικών σχέσεων υπολογισμού του διορθωτικού συντελεστή ( $\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$ ) πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδικασία όπως αυτή που περιγράφηκε για το διορθωτικό συντελεστή του οριακού φορτίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέγεθος αυτό ( $\gamma_{ult}$ ) είναι μικρότερου πρακτικού ενδιαφέροντος σε σχέση με το οριακό φορτίο.

Η προτεινόμενη αναλυτική σχέση έχει τη γενική μορφή:

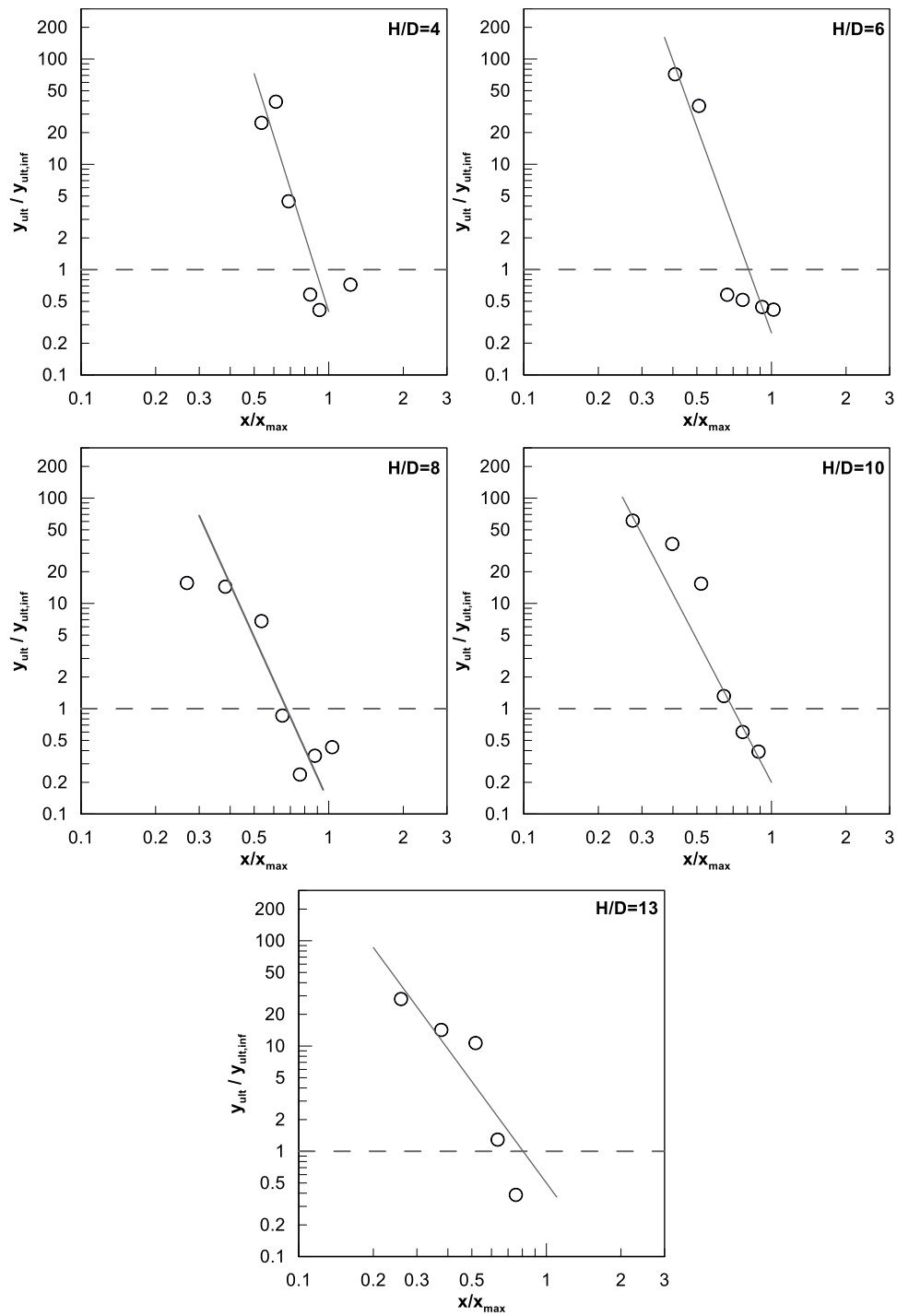
$$\frac{\gamma_{ult}}{\gamma_{ult,inf}} = \left( \frac{x}{x_{max} \cdot a_y} \right)^{-B_y} \geq 1, \text{ για } x/x_{max} < a_y \quad (5.12)$$

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

- Σύμφωνα με τη **Σχέση (5.12)**, τα αριθμητικά δεδομένα που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.12** για  $x/x_{max} < a_y$  και για κάθε τιμή του λόγου  $H/D$  μπορούν να προσεγγισθούν με ευθεία, η οποία τέμνει τον οριζόντιο άξονα της μονάδας στην τιμή  $a_y$  και έχει κλίση ίση με  $B_y$  (**Σχήμα 5.14**, **Σχήμα 5.15**, και **Σχήμα 5.16**).
- Από τις ευθείες αυτές προσδιορίζεται η τιμή του συντελεστή  $B_y$  για κάθε λόγο εγκιβωτισμού  $H/D$ .

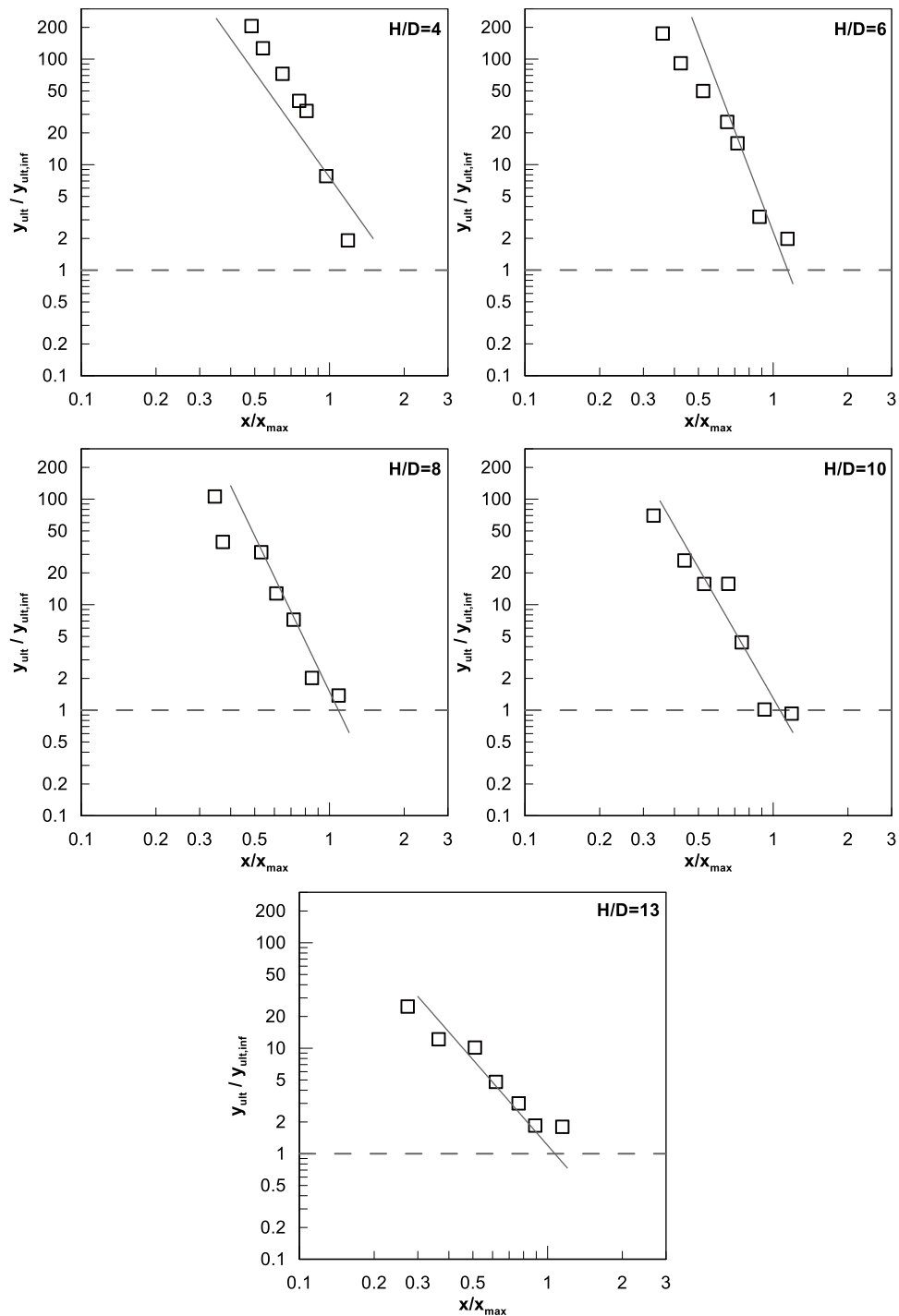


**Σχήμα 5.14:** Προσέγγιση ευθείας - Διαγράμματα  $(y_{ult}/y_{ult,inf})-(x/x_{max})$  για χαλαρή άμμο επίχωσης.



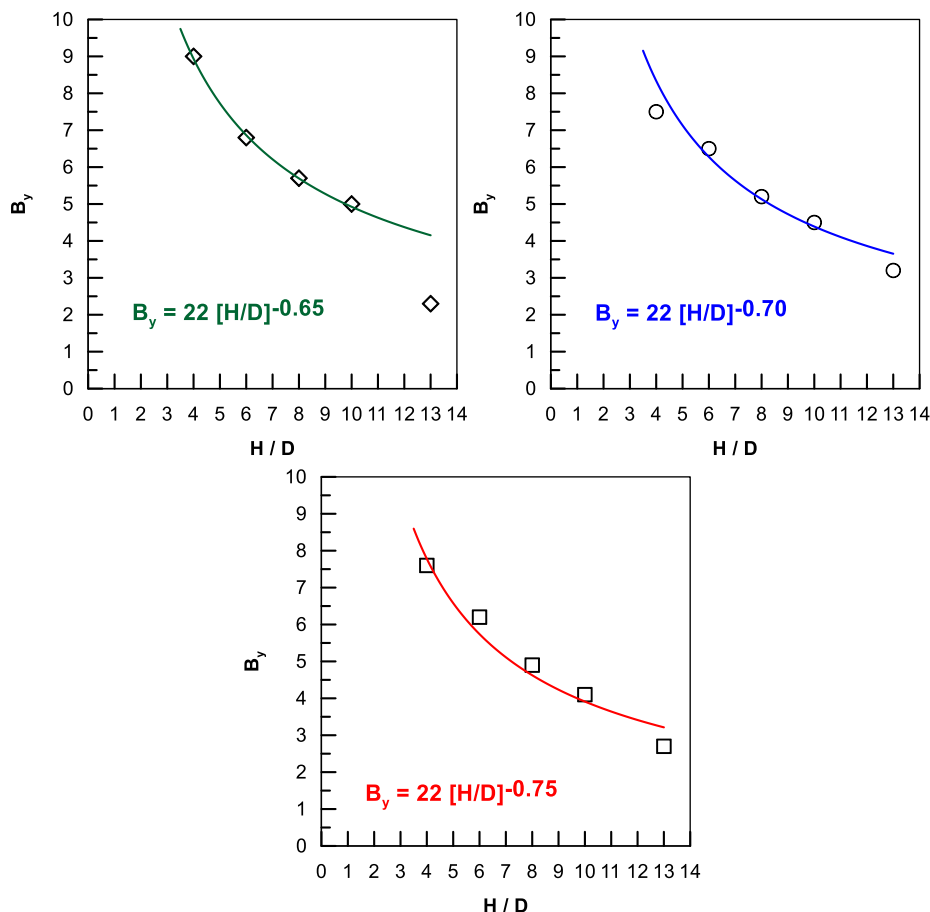
**Σχήμα 5.15:** Προσέγγιση ευθείας - Διαγράμματα  $(\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf})-(x/x_{max})$  για μέσης πυκνότητας άμμο επίχωσης.





**Σχήμα 5.16:** Προσέγγιση ευθείας - Διαγράμματα  $(\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf})-(x/x_{max})$  για πυκνή άμμο επίχωσης.

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.17**, ο συντελεστής  $B_y$  έχει διαφορετική τιμή για κάθε πυκνότητα, χωρίς όμως η απόκλιση να είναι σημαντική. Η τιμή του μπορεί να υπολογισθεί μέσω μιας αναλυτικής σχέσης δύναμης για κάθε μια από τις τρεις εξεταζόμενες πυκνότητες.



**Σχήμα 5.17:** Τιμές του συντελεστή  $B_y$  για χαλαρή άμμο, άμμο μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο.

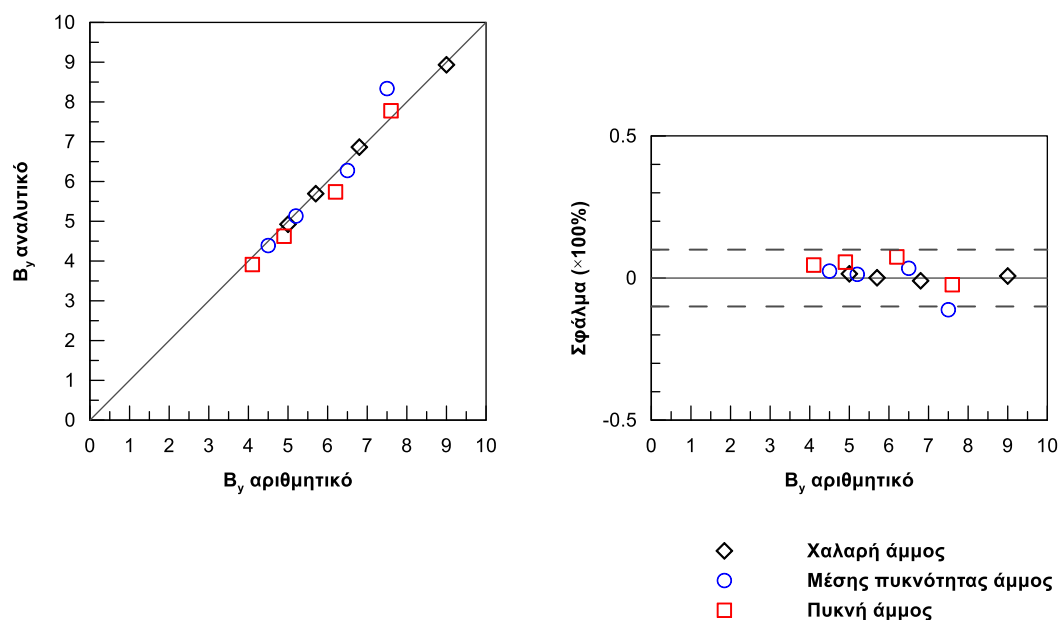
Από το **Σχήμα 5.17**, η προσέγγιση των τιμών του συντελεστή  $B_y$  μπορεί να γίνει για χαλαρή, μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο από μία αναλυτική σχέση της μορφής:

$$B_y = \left\{ \begin{array}{l} 22 \cdot [H/D]^{-0.65}, \text{ χαλαρή} \\ 22 \cdot [H/D]^{-0.70}, \text{ μέση} \\ 22 \cdot [H/D]^{-0.75}, \text{ πυκνή} \end{array} \right\}, \text{ για } 4 \leq H/D \leq 10 \quad (5.13)$$

Η εκτίμηση του σφάλματος της προτεινόμενης αναλυτικής **Σχέσης (5.13)** για τον υπολογισμό του συντελεστή  $B_y$  φαίνεται στο **Σχήμα 5.18** για όλες τις εξεταζόμενες πυκνότητες.

Σημειώνεται ότι το σφάλμα στο παρακάτω διάγραμμα υπολογίστηκε με τον ίδιο τρόπο όπως και στο  $B_p$  ως εξής:

$$\text{Σφάλμα} = \frac{B_{y,\text{αριθμητικό}} - B_{y,\text{αναλυτικό}}}{B_{y,\text{αριθμητικό}}} \quad (5.14)$$

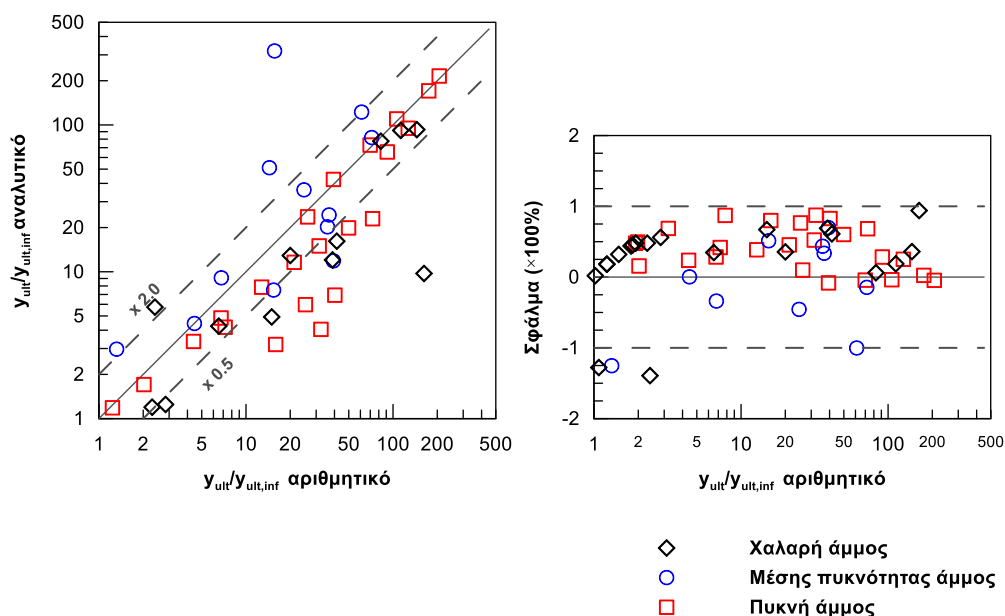


**Σχήμα 5.18:** Σύγκριση τιμών του συντελεστή  $B_y$  όπως προκύπτει από την εξίσωση (5.13) και τα Σχήμα 5.14, Σχήμα 5.15 και Σχήμα 5.16.

Στις περισσότερες περιπτώσεις πυκνότητας άμμου επίχωσης η αναλυτική σχέση προβλέπει την τιμή της παραμέτρου  $B_y$  με σφάλμα μικρότερο ή ίσο του 10%. Εξαιρείται η περίπτωση στην οποία ο αγωγός είναι εγκιβωτισμένος σε βάθος  $H/D=13$ . Όμως, η χρήση της Σχέσης (5.13) γι' αυτό το βάθος εγκιβωτισμού ( $H/D=13$ ) θα αποτελούσε συντηρητική προσέγγιση μιας και η προτεινόμενη αναλυτική σχέση δίνει μεγαλύτερο συντελεστή  $B_y$ , επομένως οδηγεί σε υπέρ της ασφαλείας αποτελέσματα κατά τον υπολογισμό του διορθωτικού συντελεστή ( $\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$ ).

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η αξιολόγηση της προτεινόμενης αναλυτικής Σχέσης (5.12) 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 5.19, όπου παρουσιάζεται το σφάλμα της Σχέσης (5.12) για τις διακριτές τιμές του λόγου  $a_y$  ανάλογα με την πυκνότητα. Το σφάλμα που προκύπτει από τη χρήση της Σχέσης (5.5) για τον υπολογισμό του λόγου  $a_y$  είναι ακριβώς το ίδιο, αφού οι τιμές παραμένουν ίδιες, απλά εκφράζονται συναρτήσει της γωνίας τριβής  $\phi$ . Παρατηρείται πως το σφάλμα κατά τον υπολογισμό του διορθωτικού συντελεστή

$\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$  είναι σαφέστατα μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό που προέκυψε κατά τον υπολογισμό του οριακού φορτίου και έχει μεγαλύτερη διασπορά. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στη χρήση υπερβολικών σχέσεων για την αναλυτική προσέγγιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Παρόλη όμως την αυξημένη τιμή του σφάλματος της, η **Σχέση (5.12)** εκφράζει με ικανοποιητική ακρίβεια την επίδραση της απόστασης του κατακόρυφου συνόρου στη μετατόπιση όπου εμφανίζεται το οριακό φορτίο επί του αγωγού. Εξάλλου, ο διορθωτικός συντελεστής επί της οριακής μετατόπισης αποτελεί μέγεθος μικρότερου πρακτικού ενδιαφέροντος και μπορεί να επιδεχθεί μεγαλύτερο σφάλμα κατά τον υπολογισμό του. Επιπλέον, για τον υπολογισμό του σφάλματος επιλέχθηκε να αγνοηθούν τιμές του διορθωτικού συντελεστή  $\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$  μικρότερες της μονάδας καθώς αυξάνουν το σφάλμα χωρίς να έχουν πρακτική σημασία.



**Σχήμα 5.19:** Σύγκριση αποτελεσμάτων του διορθωτικού συντελεστή ( $\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$ ) όπως υπολογίζεται από τις αριθμητικές αναλύσεις και την προτεινόμενη αναλυτική σχέση.

## 5.5 Συμπεράσματα

- Υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του λόγου ( $x/x_{max}$ ) ( $(x/x_{max})_{cr}$ ), η οποία συμβολίζεται ως  $a_p$ , πέρα από την οποία η επίδραση του κατακόρυφου συνόρου της τάφρου εγκιβωτισμού είναι αμελητέα. Για τιμές του  $x/x_{max}$  μικρότερες από την κρίσιμη αυτή τιμή, το κατακόρυφο σύνορο της τάφρου εμποδίζει την ελεύθερη εκδήλωση του μηχανισμού αστοχίας της άμμου επίχωσης, οδηγώντας σε αύξηση του λόγου ( $\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$ ) και του λόγου ( $\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$ ).

- Οι τιμές του λόγου  $a_p$  είναι αύξουσα συνάρτηση της γωνίας τριβής του υλικού επίχωσης, αλλά παραμένουν σχεδόν σταθερές με το βάθος εγκιβωτισμού του αγωγού  $H/D$  και δίνονται από τη σχέση:

$$a_p = 1.087 \cdot \tan \varphi$$

όπου:

$\varphi$  : γωνία τριβής της άμμου επίχωσης για συνθήκες απευθείας διάτμησης

- Η τιμή του λόγου  $(\rho_{ult}/\rho_{ult,inf})$  είναι φθίνουσα συνάρτηση του βάθους εγκιβωτισμού για δεδομένη τιμή του λόγου  $x/x_{max}$  και ακολουθεί πανομοιότυπη συμπεριφορά και για τις τρεις μελετώμενες πυκνότητες.
- Η αναλυτική σχέση που προτείνεται για τον υπολογισμό του διορθωτικού συντελεστή  $(\rho_{ult}/\rho_{ult,inf})$  σχετικά με την επίδραση του πλάτους της τάφρου θεμελίωσης στη μέγιστη τιμή του φορτίου που αναπτύσσεται στον αγωγό κατά την κατακόρυφη προς τα πάνω μετατόπισή του και για τα τρία είδη άμμου επίχωσης (χαλαρή, μέσης πυκνότητας, πυκνή) είναι:

$$\frac{\rho_{ult}}{\rho_{ult,inf}} = \begin{cases} \left( \frac{x}{x_{max} \cdot a_p} \right)^{-B_p}, & x/x_{max} < a_p \\ 1.0, & x/x_{max} \geq a_p \end{cases}$$

όπου:

$$B_p = \begin{cases} 27 \cdot [H/D]^{-0.93}, & \text{χαλαρή} \\ 19 \cdot [H/D]^{-0.78}, & \text{μέση} \\ 17 \cdot [H/D]^{-0.79}, & \text{πυκνή} \end{cases}, \text{ για } 4 \leq H/D \leq 13$$

- Όπως είναι λογικό, η κρίσιμη τιμή του λόγου  $(x/x_{max})$   $((x/x_{max})_{cr})$ , πέρα από την οποία εξασφαλίζονται συνθήκες ελεύθερου πεδίου είναι κοινή για τον υπολογισμό των διορθωτικών συντελεστών  $\rho_{ult}/\rho_{ult,inf}$  και  $\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$ . Δηλαδή,

$$a_y = a_p$$

- Η τιμή του λόγου  $(\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf})$  φθίνει καθώς αυξάνεται το βάθος εγκιβωτισμού του αγωγού για δεδομένη τιμή του λόγου  $x/x_{max}$  και ακολουθεί πανομοιότυπη συμπεριφορά και για τις τρεις μελετώμενες πυκνότητες.
- Η εκτίμηση των τιμών του διορθωτικού συντελεστή  $(\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf})$  για χαλαρή, μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο επίχωσης μπορεί να γίνει αναλυτικά με μια σχέση της μορφής:

$$\frac{\gamma_{ult}}{\gamma_{ult,inf}} = \begin{cases} \left( \frac{x}{x_{max} \cdot a_y} \right)^{-B_y}, & x/x_{max} < a_y \\ 1.0, & x/x_{max} \geq a_y \end{cases}$$

όπου:

$$B_y = \left\{ \begin{array}{l} 22 \cdot [H / D]^{-0.65}, \text{ χαλαρή} \\ 22 \cdot [H / D]^{-0.70}, \text{ μέση} \\ 22 \cdot [H / D]^{-0.75}, \text{ πυκνή} \end{array} \right\}, \text{ για } 4 \leq H/D \leq 10$$



# 6

## Εναλλακτικός Σχεδιασμός Τάφρου Θεμελίωσης

### 6.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων σχετικά με την εναλλακτική διαμόρφωση της τάφρου θεμελίωσης σε τραπεζοειδές σχήμα, ώστε να απομειωθεί και ίσως να αποφευχθεί η δυσμενής επίδραση των κατακόρυφων συνόρων της. Οι βασικές αριθμητικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για χαλαρή, μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο, όπως έχει παρουσιαστεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Έμφαση δίνεται τόσο στη διασφάλιση επαρκούς χώρου για την απρόσκοπτη διαμόρφωση της επιφάνειας αστοχίας, όσο και στην αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης γεωμετρίας τάφρου όσον αφορά τη μείωση του οριακού φορτίου επί του αγωγού.

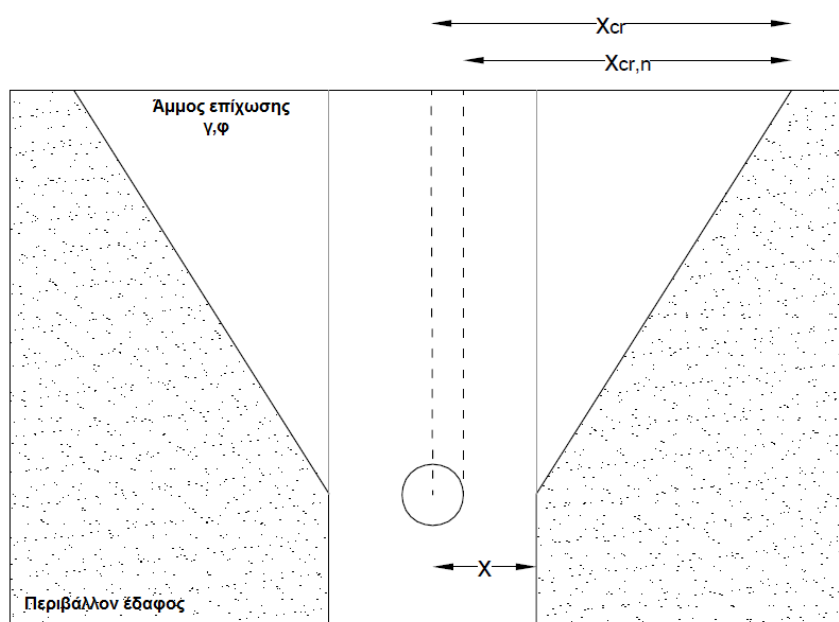
Εφαρμόζοντας τη **Σχέση 5.7** για όλες τις υπό εξέταση άμμους επίχωσης και για όλα τα βάθη εγκιβωτισμού (**Πίνακας 6.1**) προκύπτει ότι, ιδιαίτερα στις πυκνότερες άμμους και για μεγάλα βάθη, η απαιτούμενη έκταση  $x_{cr,n}$  της τάφρου θεμελίωσης από την παρειά του αγωγού και πέρα πρέπει να είναι έως και τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτή που κατασκευάζεται στη συνήθη πρακτική (20 cm), ώστε να μην υπάρχει επίδραση των συνόρων στην κίνηση του αγωγού και στο φορτίο επί αυτού.

Προκειμένου να εξασφαλισθεί η απαιτούμενη έκταση τάφρου τόσο σε υφιστάμενες κατασκευές, όσο και σε νέες με το χαμηλότερο δυνατό κόστος, διερευνήθηκε η λύση της κατασκευής τάφρου με κεκλιμένα πλευρικά όρια από το κέντρο του αγωγού και άνω, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.1**. Σκοπός της εν λόγω διαμόρφωσης είναι η εξασφάλιση της απαιτούμενης έκτασης  $x_{cr}$ , όπως αυτή προσδιορίστηκε στο Κεφάλαιο 5, στο σημείο που το πλευρικό όριο της τάφρου θεμελίωσης συναντά την επιφάνεια του εδάφους. Υπενθυμίζεται ότι η απόσταση  $x_{cr}$  μετράται από το κέντρο του αγωγού.



**Πίνακας 6.1:** Αποτελέσματα εφαρμογής της Σχέσης 5.7 για χαλαρή, μέση και πυκνή άμμο.

Λόγος H/D	Χαλαρή άμμος	Μέσης πυκνότητας άμμος	Πυκνή άμμος
<b>Απαιτούμενη απόσταση <math>x_{cr,n}</math> (cm)</b>			
1.5	2.0	2.0	2.0
4	3.0	5.4	13.5
6	7.1	10.7	22.8
8	11.1	16.0	32.1
10	15.1	21.2	41.4
13	21.2	29.1	55.4



**Σχήμα 6.1:** Γεωμετρία τραπεζοειδούς τάφρου θεμελίωσης

## 6.2 Παραμετρικές Αναλύσεις

Για την αξιολόγηση της προτεινόμενης λύσης, πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις, αντίστοιχες αυτών που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5, για χαλαρή, μέση πυκνότητας και πυκνή άμμο επίχωσης, καθώς και για διάφορες τιμές του αδιαστατοποιημένου βάθους εγκιβωτισμού  $H/D$ , και συγκεκριμένα για  $H/D=4, 6, 8, 10, 13$ .

Τα βασικά δεδομένα των αριθμητικών αναλύσεων συνοψίζονται στον **Πίνακας 6.2**.

**Πίνακας 6.2:** Δεδομένα αριθμητικών αναλύσεων

α/α	Διάμετρος D (m)	Πυκνότητα άμμου επίχωσης	Λόγος H/D	$x_{cr}$ (cm)	x (cm)
1	0.102	χαλαρή	4	8.49	7.14÷8.16
		μέση		13.05	7.14÷12.24
		πυκνή		20.75	9.18÷18.36
2	0.102	χαλαρή	6	10.55	8.16÷10.20
		μέση		19.17	8.16÷18.36
		πυκνή		33.33	11.22÷27.54
3	0.102	χαλαρή	8	13.06	7.14÷12.24
		μέση		18.97	7.14÷17.34
		πυκνή		38.24	13.26÷32.64
4	0.102	χαλαρή	10	17.88	8.16÷17.34
		μέση		27.07	9.18÷25.50
		πυκνή		47.17	15.30÷43.86
5	0.102	χαλαρή	13	12.81	7.14÷10.20
		μέση		37.45	11.22÷32.64
		πυκνή		55.58	15.30÷49.98

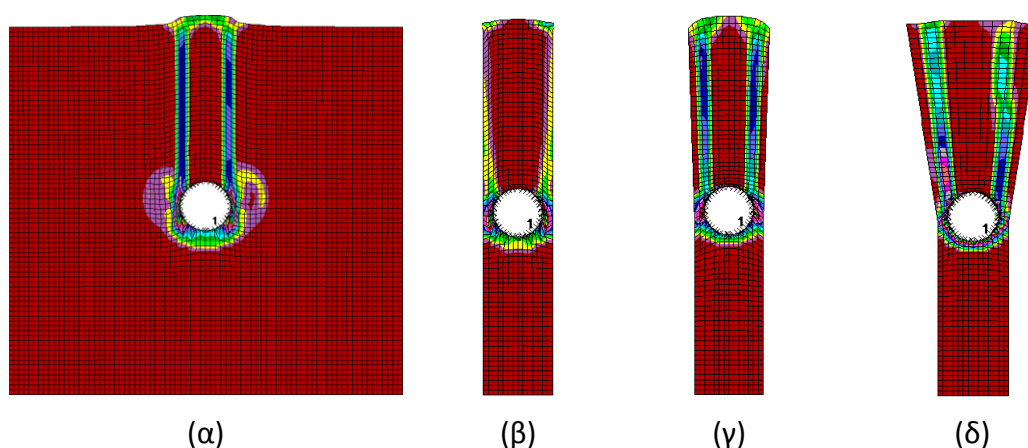
Για κάθε περίπτωση άμμου εξετάστηκαν διαμορφώσεις τάφρου με διάφορες τιμές της απόστασης  $x$  του κέντρου του αγωγού από το κατακόρυφο σύνορο της τάφρου, υπό την προϋπόθεση ότι η απόσταση  $x$  ήταν μικρότερη από την απόσταση  $x_{cr}$  που απαιτείται για την εξάλειψη της επίδρασης του πλάτους της τάφρου στην οριακή τιμή του φορτίου που δρα επί του αγωγού ( $p_{ult}$ ). Η ελάχιστη τιμή της απόστασης

στις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι ίση με  $x=7$  cm, δηλαδή αφέθηκε περιθώριο 2cm από την παρειά του αγωγού μέχρι το σύνορο της τάφρου, περιθώριο που αντιστοιχεί στο 20% της διαμέτρου του αγωγού.

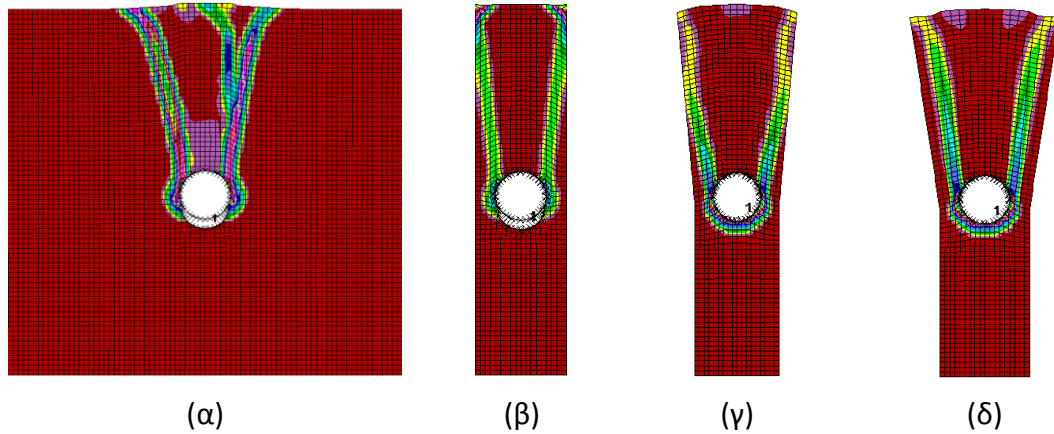
Σημειώνεται ότι η απόσταση  $x_{cr}$  ελήφθη από τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα **Σχήματα 5.6** έως **5.8** και όχι από τη **Σχέση 5.6** για πιο ορθή προσέγγιση του φαινομένου και παράκαμψη πιθανού σφάλματος που ενέχει η συγκεκριμένη σχέση. Επιπροσθέτως, οι ίδιες αριθμητικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν και για ημιπλάτος τάφρου  $x_{des}$  ίσο με  $x_{cr,analytical}$  όπως αυτό προκύπτει από τη **Σχέση 5.6** προσαυξημένο κατά 5 cm ( $x_{des}=x_{cr,analytical}+5$ cm), προκειμένου να διερευνηθεί η ευαισθησία των αποτελεσμάτων και να αναδειχθεί η επίδραση που θα είχε ένας συντηρητικός σχεδιασμός, όπως συχνά γίνεται στην πράξη. Όλες οι παραπάνω αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για αγωγό διαμέτρου  $D=0.102$ m.

### 6.3 Επίδραση της εναλλακτικής γεωμετρίας τάφρου στην επιφάνεια αστοχίας

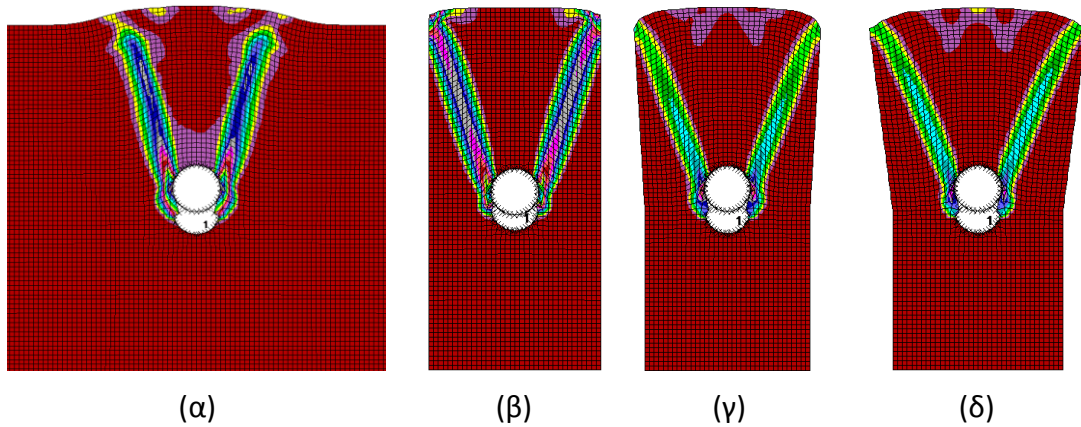
Από το **Σχήμα 6.2** έως το **Σχήμα 6.7** παρουσιάζονται οι επιφάνειες αστοχίας όπως προέκυψαν α) από την ανάλυση για συνθήκες ελεύθερου πεδίου, β) από την ανάλυση με περιορισμένη τάφρο εγκιβωτισμού και κατακόρυφα τοιχώματα, γ) από την ανάλυση με τραπεζοειδή τάφρο ημιπλάτους  $x_{cr}$  και δ) από την ανάλυση με τραπεζοειδή τάφρο ημιπλάτους  $x_{des}$ , για χαλαρή, μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο, ενδεικτικά για βάθη εγκιβωτισμού  $H/D=4$  και 10. Οι επιφάνειες αυτές αντιστοιχούν στην ίδια μετατόπιση του αγωγού  $y$  και στο ίδιο πλάτος  $x$  στο επίπεδο του κέντρου του αγωγού ανά σχήμα.



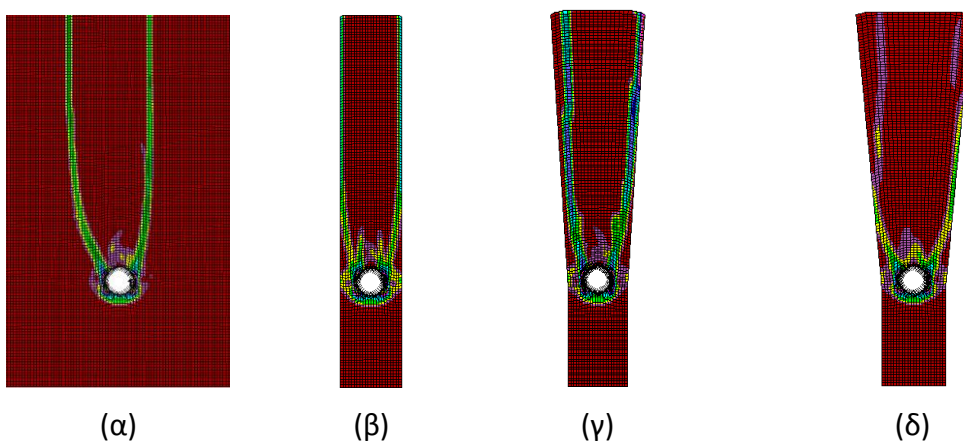
**Σχήμα 6.2:** Επιφάνειες αστοχίας για αγωγό διαμέτρου 0.102m, εγκιβωτισμένου σε χαλαρή άμμο για λόγο εγκιβωτισμού  $H/D=4$ .



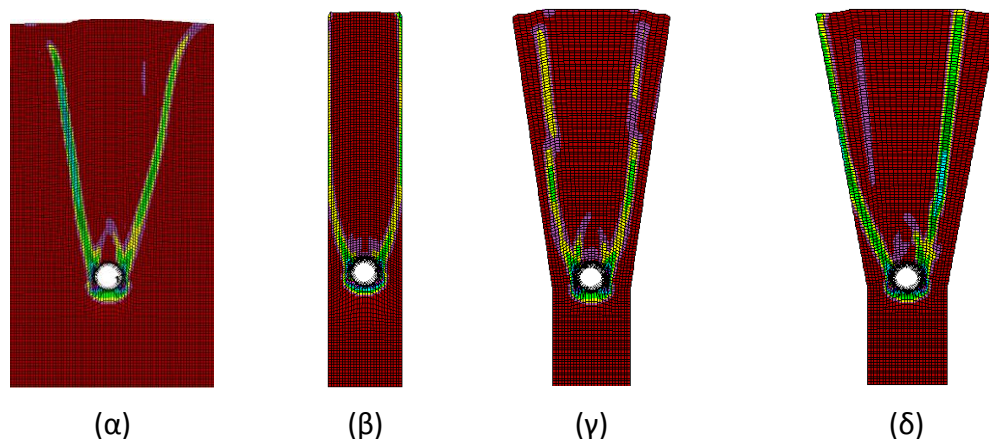
**Σχήμα 6.3:** Επιφάνειες αστοχίας για αγωγό διαμέτρου 0.102m, εγκιβωτισμένου σε μέσης πυκνότητας άμμο για λόγο εγκιβωτισμού  $H/D=4$ .



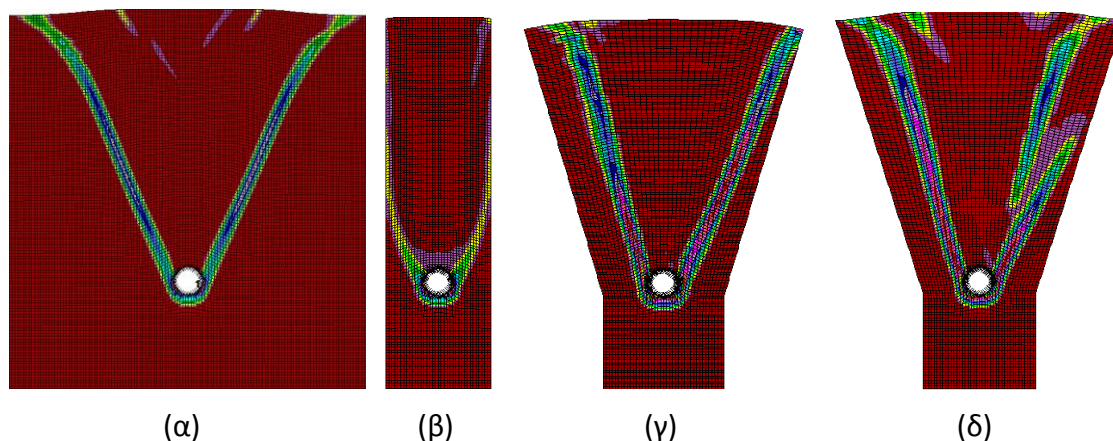
**Σχήμα 6.4:** Επιφάνειες αστοχίας για αγωγό διαμέτρου 0.102m, εγκιβωτισμένου σε πυκνή άμμο για λόγο εγκιβωτισμού  $H/D=4$ .



**Σχήμα 6.5:** Επιφάνειες αστοχίας για αγωγό διαμέτρου 0.102m, εγκιβωτισμένου σε χαλαρή άμμο για λόγο εγκιβωτισμού  $H/D=10$ .



**Σχήμα 6.6:** Επιφάνειες αστοχίας για αγωγό διαμέτρου 0.102m, εγκιβωτισμένου σε μέσης πυκνότητας άμμο για λόγο εγκιβωτισμού  $H/D=10$ .

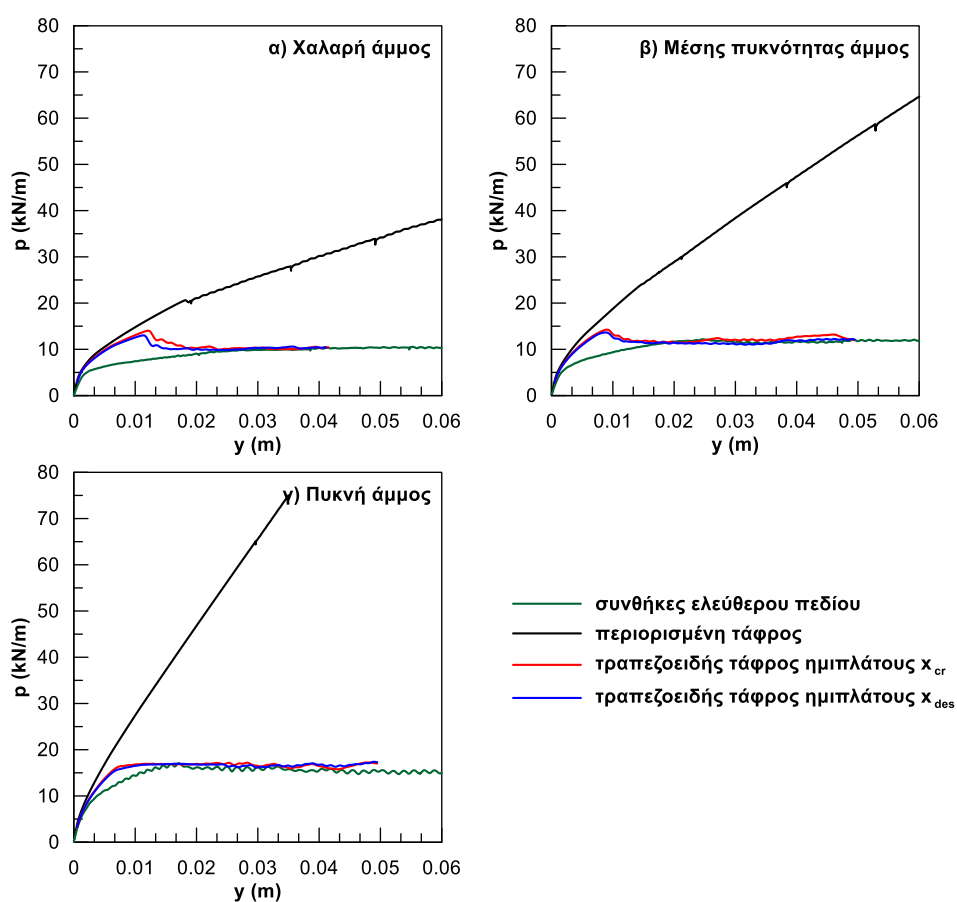


**Σχήμα 6.7:** Επιφάνειες αστοχίας για αγωγό διαμέτρου 0.102m, εγκιβωτισμένου σε πυκνή άμμο για λόγο εγκιβωτισμού  $H/D=10$ .

Είναι εμφανές ότι η προτεινόμενη εναλλακτική διαμόρφωση εξασφαλίζει τον απαιτούμενο χώρο, ώστε να αναπτυχθούν οι επιφάνειες αστοχίας όπως ακριβώς αναπτύσσονται στην περίπτωση του ελεύθερου πεδίου και άρει ουσιαστικά τη δυσμενή κατάσταση και τον έντονο περιορισμό που παρατηρείται στις εικόνες που αντιστοιχούν στην περιορισμένη τάφρο με κατακόρυφα τοιχώματα (β). Αξίζει να σημειωθεί πως ακόμη και ο οριακός σχεδιασμός με ημιπλάτος  $x_{cr}$  (γ), πετυχαίνει το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα, πόσο μάλλον ο συντηρητικότερος που αντιστοιχεί στην εικόνα (δ).

## 6.4 Επίδραση της εναλλακτικής γεωμετρίας τάφρου στο οριακό φορτίο ( $p_{ult}$ )

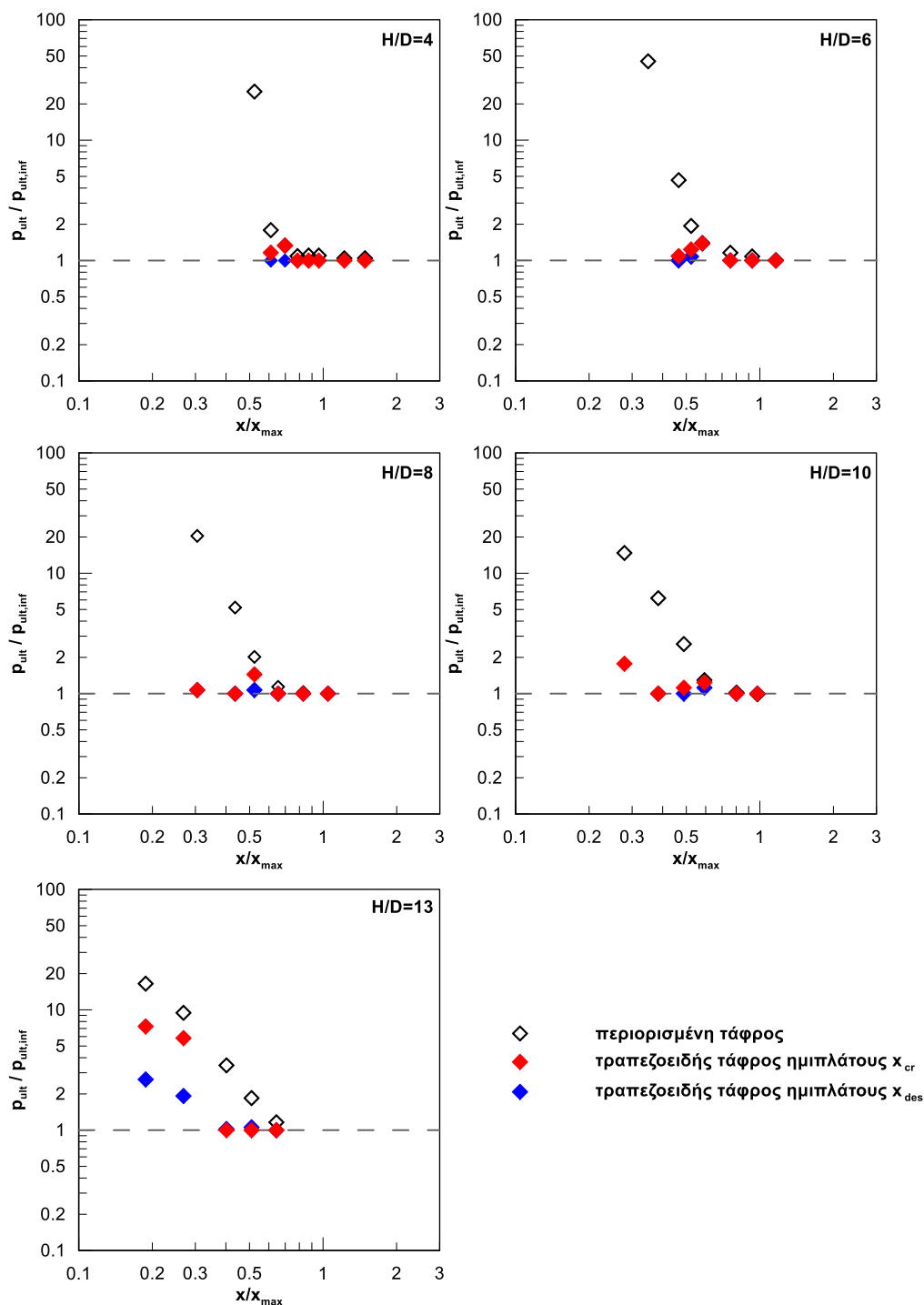
Αναφορικά με την επίδραση της εναλλακτικής αυτής γεωμετρίας της τάφρου θεμελίωσης στην τιμή του οριακού φορτίου ( $p_{ult}$ ) ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία διερεύνησης, όπως αυτή που περιγράφεται στην **Ενότητα 5.2**. Στο **Σχήμα 6.8** παρουσιάζονται οι αριθμητικές καμπύλες φορτίου-μετατόπισης που προκύπτουν από τον αλγόριθμο πεπερασμένων διαφορών FLAC v7.0 (Itasca) για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις τάφρου (συνθήκες ελεύθερου πεδίου, περιορισμένη τάφρος με κατακόρυφα τοιχώματα, τραπεζοειδής τάφρος ημιπλάτους  $x_{cr}$ , τραπεζοειδής τάφρος ημιπλάτους  $x_{des}$ ) και όλες τις πυκνότητες άμμου, ενδεικτικά για βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=10$ . Σημειώνεται ότι οι καμπύλες αυτές αντιστοιχούν στις επιφάνειες αστοχίας που απεικονίζονται στο **Σχήμα 6.5** έως το **Σχήμα 6.7**.



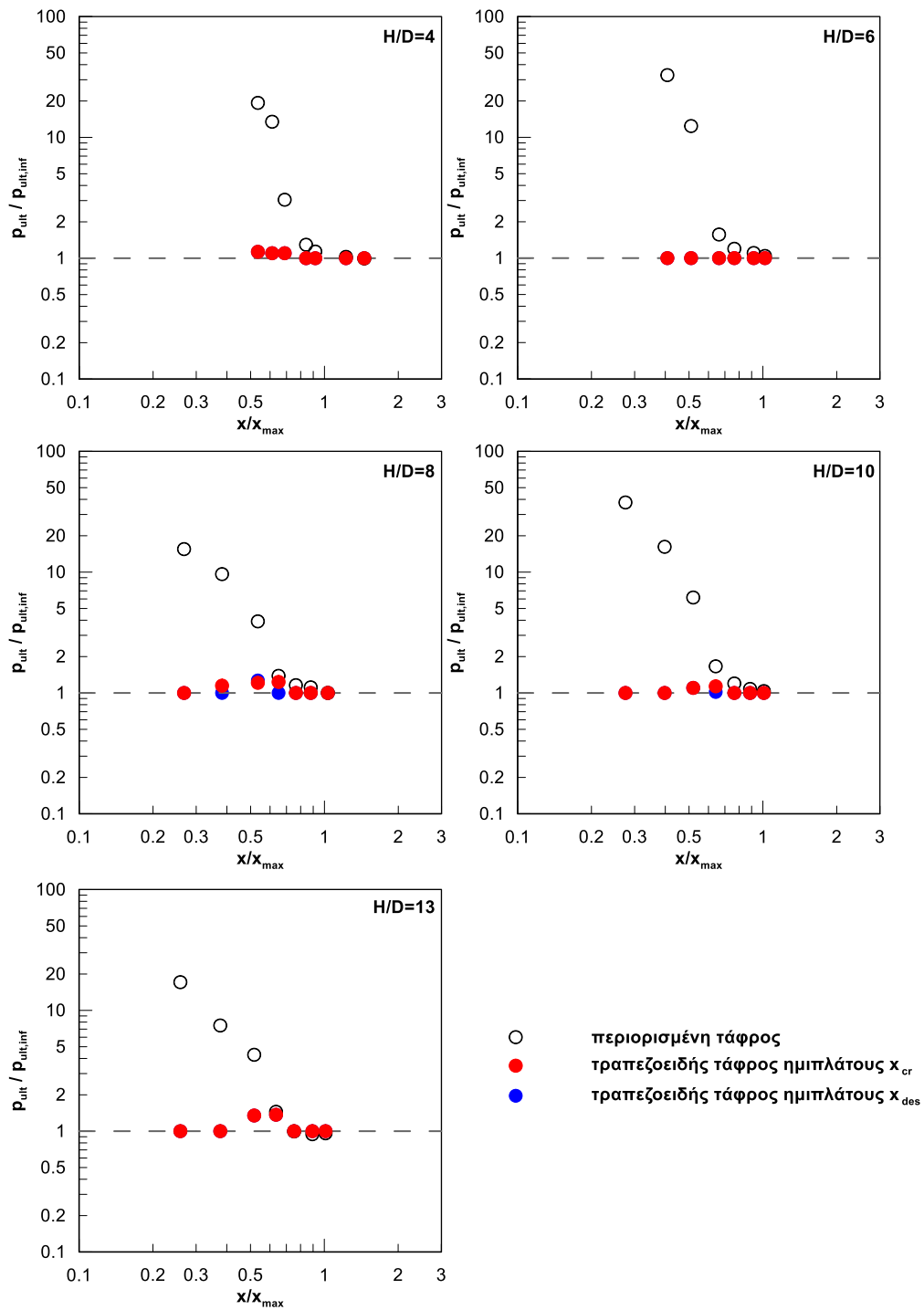
**Σχήμα 6.8:** Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης για κατακόρυφη προς τα πάνω μετατόπιση αγωγού εγκιβωτισμένου σε α) χαλαρή, β) μέσης πυκνότητας και γ) πυκνή άμμο για βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=10$  και όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου.

Παρατηρείται η έντονη μείωση του οριακού φορτίου που δρα επί του αγωγού στην περίπτωση της τραπεζοειδούς τάφρου σε σχέση με την περιορισμένη τάφρο με

κατακόρυφα τοιχώματα και η πρακτική σύμπτωσή του με το αντίστοιχο για συνθήκες θεμελίωσης σε ελεύθερο πεδίο. Μάλιστα, τα αποτελέσματα για ημιπλάτος  $x_{des}$  και  $x_{cr}$  δεν παρουσιάζουν ουσιαστική διαφορά.

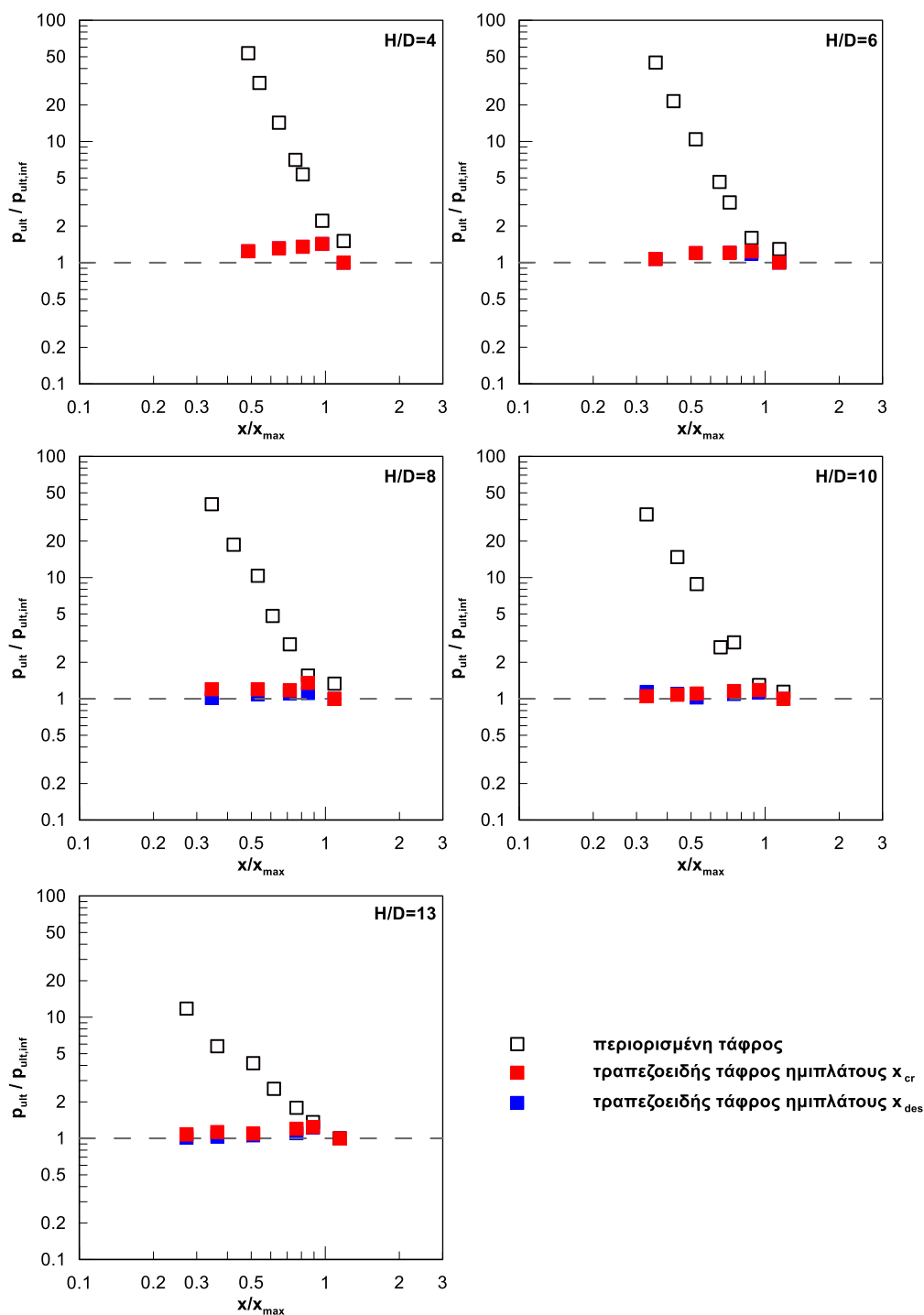


Σχήμα 6.9: Διαγράμματα  $(p_{ult}/p_{ult,inf})-(x/x_{max})$  για χαλαρή άμμο.



Σχήμα 6.10: Διαγράμματα  $(p_{ult}/p_{ult,inf})-(x/x_{max})$  για μέσης πυκνότητας άμμο.





**Σχήμα 6.11:** Διαγράμματα  $(p_{ult}/p_{ult,inf})-(x/x_{max})$  για πυκνή άμμο.

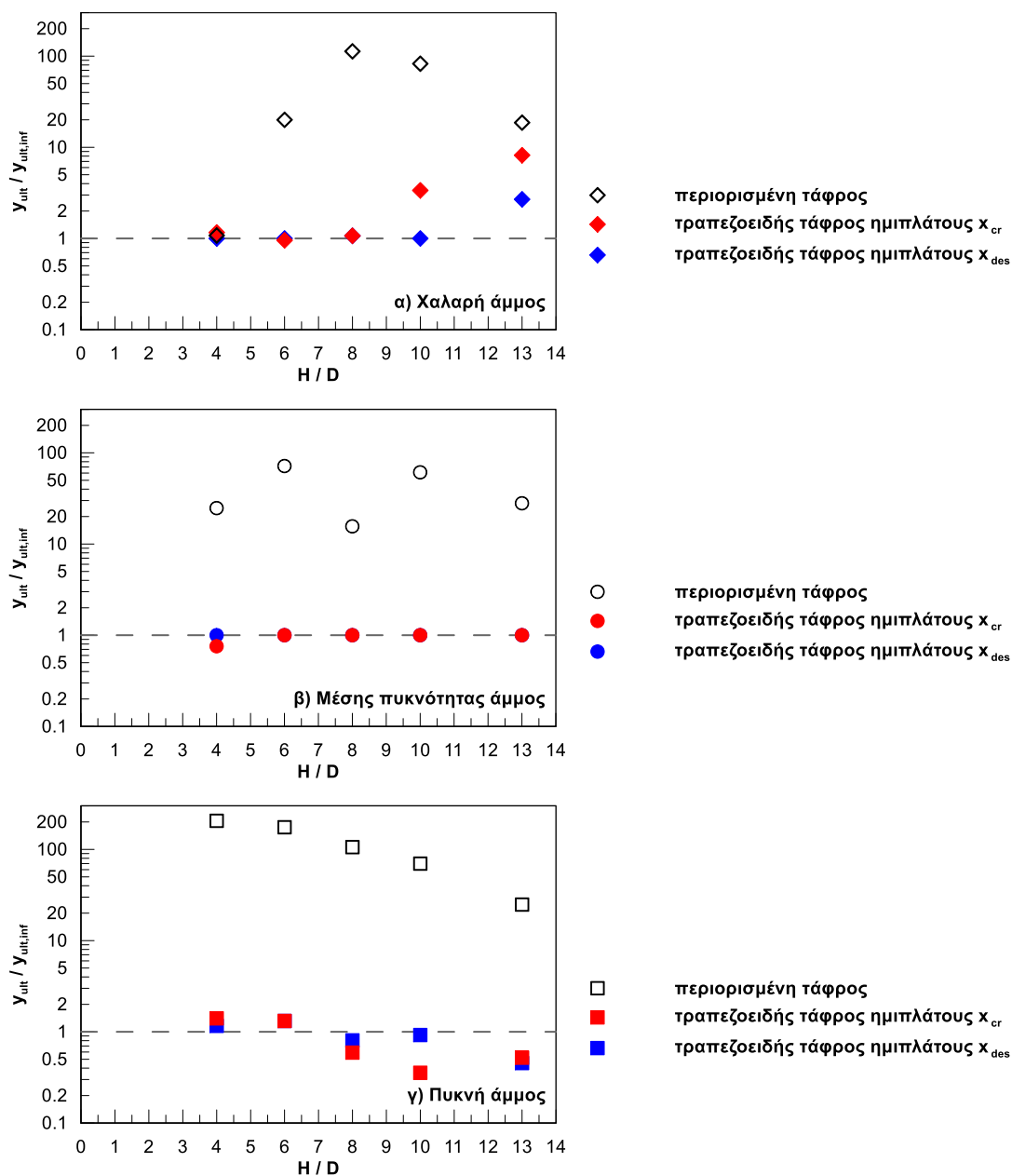
Στο **Σχήμα 6.9** έως και το **Σχήμα 6.11** παρουσιάζονται σε διπλή λογαριθμική κλίμακα συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα όλων των παραμετρικών αναλύσεων που έγιναν προκειμένου να προσδιορισθεί η ποσοτική επίδραση της προτεινόμενης εναλλακτικής γεωμετρίας τάφρου στο οριακό φορτίο. Πιο συγκεκριμένα, κάθε σχήμα αντιστοιχεί σε διαφορετική πυκνότητα άμμου επίχωσης, ενώ χρησιμοποιείται διαφορετικό χρώμα για κάθε εξεταζόμενη διαμόρφωση τάφρου.

Με βάση τις παραπάνω καμπύλες και διαγράμματα εξάγεται το συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη εναλλακτική διαμόρφωση τάφρου δίνει σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με την περίπτωση εγκιβωτισμού του αγωγού σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου και συμβάλλει ουσιαστικά στην απομείωση του οριακού φορτίου ( $p_{ult}$ ) που δρα επί του αγωγού στην περίπτωση τάφρου θεμελίωσης περιορισμένων διαστάσεων με κατακόρυφα τοιχώματα. Αν και σε κάποιες περιπτώσεις η τραπεζοειδής τάφρος θεμελίωσης δεν εξασφαλίζει στον αγωγό συνθήκες ελεύθερου πεδίου (**Σχήματα 6.9 έως 6.11** στα σημεία που ο λόγος  $p_{ult}/p_{ult,inf}$  δεν ισούται με τη μονάδα), εντούτοις το αποτέλεσμα της σε όρους οριακού φορτίου ( $p_{ult}$ ) πλεονεκτεί σε σχέση με το αποτέλεσμα της περιορισμένης τάφρου. Είναι εμφανές ότι σε κάποιες περιπτώσεις η εφαρμογή της εναλλακτικής τάφρου μειώνει το οριακό φορτίο έως και 50 φορές σε σχέση με το οριακό φορτίο που αντιστοιχεί στην περιορισμένη τάφρο με κατακόρυφα τοιχώματα. Αξίζει να αναφερθεί πως τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε ημιπλάτος  $x_{cr}$  και ημιπλάτος  $x_{des}$  βρίσκονται αρκετά κοντά μεταξύ τους, αν και διακρίνεται η υπεροχή του συντηρητικότερου σχεδιασμού.

Τέλος, σημειώνεται ότι για την περίπτωση αγωγού εγκιβωτισμένου σε χαλαρή άμμο επίχωσης και σε βάθος  $H/D=13$ , εμφανίζεται ασυμφωνία αποτελεσμάτων σε σχέση με όλους τους υπόλοιπους συνδυασμούς άμμου επίχωσης-βάθους εγκιβωτισμού, επειδή η τιμή της απόστασης  $x_{cr}$ , όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 5, δεν ήταν δυνατόν να προσδιορισθεί με ακρίβεια και υποεκτιμήθηκε.

### 6.5 Επίδραση της εναλλακτικής γεωμετρίας τάφρου στην οριακή μετατόπιση ( $\gamma_{ult}$ )

Όσον αφορά την επίδραση της προτεινόμενης γεωμετρίας τάφρου θεμελίωσης στην οριακή μετατόπιση ( $\gamma_{ult}$ ), στο **Σχήμα 6.12** παρουσιάζεται ενδεικτικά η τιμή του λόγου  $\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$  για χαλαρή, μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο, για όλα τα βάθη εγκιβωτισμού και για το μικρότερο κατά περίπτωση λόγο  $x/x_{max}$  που εξετάσθηκε, δεδομένου ότι αποτελεί τον δυσμενέστερο σχεδιασμό. Είναι εμφανές ότι στην πλειονότητα των περιπτώσεων η τραπεζοειδής τάφρος με ημιπλάτος είτε  $x_{cr}$ , είτε  $x_{des}$  δίνει αποτελέσματα σε όρους οριακής μετατόπισης όμοια με τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν στο ελεύθερο πεδίο, δηλαδή λόγο  $\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$  περίπου ίσο με τη μονάδα. Εξαιρέση αποτελούν ορισμένες περιπτώσεις, στις οποίες όμως η εναλλακτική τάφρος βρίσκεται εγγύτερα στη θεώρηση ελεύθερου πεδίου από ότι στην περιορισμένη τάφρο. Τέλος, η περίπτωση αγωγού εγκιβωτισμένου σε χαλαρή άμμο και σε βάθος  $H/D=13$  αποκλίνει και πάλι από τις υπόλοιπες, για λόγους που αναφέρθηκαν σε προηγούμενες ενότητες.



**Σχήμα 6.12:** Διαγράμματα  $(y_{ult}/y_{ult,inf})-(H/D)$  για α) χαλαρή, β) μέσης πυκνότητας και γ) πυκνή άμμο.

## 6.6 Συμπεράσματα

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

- Η προτεινόμενη εναλλακτική διαμόρφωση τάφρου σε τραπεζοειδές σχήμα επιτρέπει την ανεμπόδιση εκδήλωση της επιφάνειας αστοχίας, όπως αυτή εμφανίζεται σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου.
- Η εφαρμογή της προτεινόμενης γεωμετρίας οδηγεί σε ανάπτυξη οριακής δύναμης επί του αγωγού ( $p_{ult}$ ) περίπου ίσης με αυτή που αναπτύσσεται σε

συνθήκες ελεύθερου πεδίου, κατά την κατακόρυφη προς τα πάνω κίνηση του αγωγού.

- Με την εφαρμογή της τραπεζοειδούς γεωμετρίας, η μετατόπιση στην οποία εμφανίζεται το οριακό φορτίο επί του αγωγού ( $\gamma_{ult}$ ) πρακτικά ταυτίζεται με αυτή που αντιστοιχεί σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου.
- Καθοριστικής σημασίας είναι η διάσταση της τάφρου στο σημείο όπου αυτή τέμνει την επιφάνεια αστοχίας και μάλιστα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση της τιμής  $x_{cr}$ . Δευτερεύουσας σημασίας είναι το πλάτος της τάφρου από το κέντρο του αγωγού και κάτω.
- Ο σχεδιασμός με ημιπλάτος τάφρου  $x_{cr}$  δίνει αποτελέσματα που πρακτικά συμπίπτουν με τα αντίστοιχα για ημιπλάτος  $x_{des}$ , επομένως δεν είναι απαραίτητη η επαύξηση των 5cm.
- Προτείνεται η κατασκευή τάφρων θεμελίωσης με κεκλιμένα τοιχώματα από το κέντρο του αγωγού και άνω, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.13**, έτσι ώστε:  
-Η έκταση της τάφρου  $B$  στην επιφάνεια του εδάφους να είναι τουλάχιστον ίση με:

$$B \geq 2 \cdot x_{cr,n} + D$$

όπου:

$x_{cr,n}$  προσδιορίζεται από τη **Σχέση 5.7**

$D$ : η διάμετρος του αγωγού (m)

-Η έκταση της τάφρου  $b$  στο επίπεδο του κέντρου του αγωγού να είναι μεγαλύτερη ή ίση με:

$b \geq 1.40 \cdot D$ , διάσταση που καλύπτεται κατά κανόνα από τη συνήθη πρακτική.

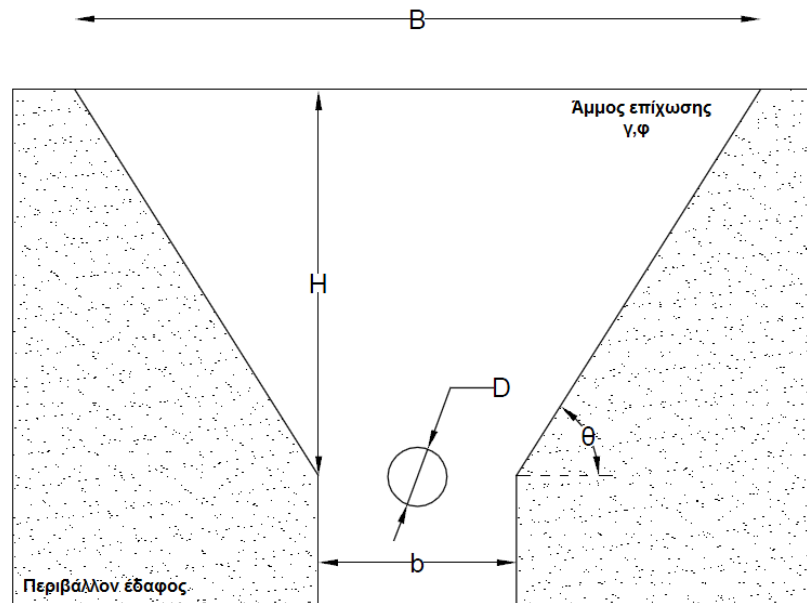
-Εναλλακτικά, η κλίση των τοιχωμάτων της τάφρου από το κέντρο του αγωγού και άνω να είναι μικρότερη ή ίση με:

$$\tan \theta \leq \frac{1}{0.489 \cdot \tan^2 \varphi - \frac{1.20}{H/D}}$$

όπου:

$\theta$ : η γωνία που σχηματίζει το κεκλιμένο σύνορο με τον οριζόντιο άξονα

$\varphi$ : η γωνία τριβής της άμμου επίχωσης για συνθήκες απευθείας διάτμησης



**Σχήμα 6.13:** Προτεινόμενη γεωμετρία τάφρου θεμελίωσης

Λαμβάνοντας υπόψη την ευμενή επίδραση στο οριακό φορτίο και την ευκολία σε συνδυασμό με την οικονομικότητα της κατασκευής της προτεινόμενης γεωμετρίας, συστήνεται η εφαρμογή της τόσο σε νέες όσο και υφιστάμενες τάφρους θεμελίωσης αγωγών.

## Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

---

### 7.1 Συμπεράσματα

Οι σχέσεις για τον προσδιορισμό των καμπυλών φορτίου-μετατόπισης υπόγειων αγωγών σε διασταύρωση με ενεργό ρήγμα, 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 τον άξονα του αγωγού επίπεδο. Με τον τρόπο αυτό δε συνυπολογίζεται η επίδραση του σκληρού-σχετικά ανένδοτου περιβάλλοντος εδάφους, πέραν των συνήθως περιορισμένων συνόρων της τάφρου θεμελίωσης, στην αναπτυσσόμενη επί του αγωγού καταπόνηση κατά την κατακόρυφη προς τα πάνω κίνησή του.

Κύριος προς διερεύνηση στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η ποιοτική και ποσοτική μελέτη της επίδρασης των διαστάσεων της τάφρου θεμελίωσης στην κατακόρυφη προς τα πάνω κίνηση του αγωγού, όταν αυτός διασταυρώνεται με κανονικό ρήγμα.

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 επίχωσης χρησιμοποιήθηκε το ελαστο-πλαστικό καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb, το οποίο παρουσιάζει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του εδαφικού υλικού από την αστοχία και μετά, άρα ενδείκνυται για τον ορθό υπολογισμό του οριακού φορτίου επί του αγωγού. Επιπρόσθετα, για την ακριβέστερη προσομοίωση της σχετικής ολίσθησης μεταξύ του αγωγού και του περιβάλλοντος εδάφους κατά τη μετακίνησή του χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία διεπιφάνειας (Interface elements) με μειωμένη γωνία τριβής. Τέλος, λόγω της έντονης μη γραμμικότητας του προβλήματος που εξετάζεται, καθώς και της επιβολής μεγάλων μετακινήσεων, χρησιμοποιήθηκε η δυνατότητα που παρέχει ο κώδικας για συνεχή ανανέωση των συντεταγμένων των κόμβων (large strain mode), όπως επίσης και η δυνατότητα

αναδιάταξης του καννάβου με βάση την τρέχουσα παραμορφωσιακή κατάσταση (automatic rezoning).

Κατόπιν της κατάστρωσης της αριθμητικής προσομοίωσης του προβλήματος, πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση-αξιολόγησή της με βάση τόσο τα πειραματικά αποτελέσματα των *Trautmann et al. (1985)*, όσο και τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων των *Yimsiri et al. (2004)*, *Jung et al. (2013)* και *Kouretzis et al. (2014)*.

Στη συνέχεια, έγιναν μετρήσεις προκειμένου να προσδιορισθεί με ακρίβεια το σχήμα και το μέγεθος της επιφάνειας αστοχίας της άμμου επίχωσης κατά την κατακόρυφη προς τα πάνω κίνηση του αγωγού.

Επιπλέον, έγιναν διαδοχικές αναλύσεις, προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση της έκτασης της τάφρου εγκιβωτισμού στο οριακό φορτίο επί του αγωγού, αλλά και στην οριακή μετατόπιση.

Τέλος, αποσκοπώντας στον προσδιορισμό μιας διαμόρφωσης τάφρου η οποία θα εξασφαλίζει συνθήκες ελεύθερου πεδίου, διεξήχθησαν περαιτέρω αναλύσεις με εφαρμογή τάφρου με κεκλιμένα πλευρικά όρια.

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

- τη μορφή και την έκταση του μηχανισμού αστοχίας της άμμου επίχωσης,
- την επίδραση του πλάτους της τάφρου στο οριακό φορτίο και τη μετατόπιση στην οποία αυτό εμφανίζεται,
- τη γεωμετρία της τάφρου θεμελίωσης ούτως ώστε η επίδραση του περιβάλλοντος εδάφους στην καταπόνηση του αγωγού να είναι μηδενική.

### 7.1.1 Μορφή και έκταση μηχανισμού αστοχίας

Από τις παραμετρικές αναλύσεις για βάθη εγκιβωτισμού του αγωγού  $H/D=4\div 13$ , διαπιστώθηκε η ύπαρξη μοναδικού τύπου αστοχίας για χαλαρή, μέση και πυκνή άμμο και για όλους τους λόγους εγκιβωτισμού  $H/D$ . Ο μηχανισμός αστοχίας έχει τη μορφή ανεστραμμένου κώνου και η έκτασή του ( $x_{max}$ ), μετρούμενη από το κέντρο του αγωγού, αποτελεί αύξουσα συνάρτηση της γωνίας τριβής  $\phi$  του υλικού επίχωσης και του βάθους εγκιβωτισμού. Η προτεινόμενη αναλυτική σχέση υπολογισμού της απόστασης  $x_{max}$  (m) είναι:

$$x_{max} = 0.45 \cdot H \cdot \tan \phi, \text{ για } 4 \leq H / D \leq 13 \quad (7.1)$$

όπου:

H: βάθος στο οποίο βρίσκεται το κέντρο του αγωγού

D: διάμετρος του αγωγού

φ: γωνία τριβής άμμου επίχωσης για συνθήκες απευθείας διάτμησης

Σε όλες τις περιπτώσεις πυκνότητας άμμου επίχωσης η αναλυτική **Σχέση (7.1)** προβλέπει την τιμή της απόστασης  $x_{max}$  με σφάλμα μικρότερο ή ίσο του 20%. Εξαιρέση αποτελεί η περίπτωση της χαλαρής άμμου για βάθος εγκιβωτισμού του αγωγού  $H/D=13$ , καθώς η επιφάνεια αστοχίας στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να ορισθεί με σαφήνεια και επομένως να συγκριθεί με την αντίστοιχη αναλυτική τιμή.

### 7.1.1 Επίδραση του ημιπλάτους $x$ της τάφρου θεμελίωσης στο οριακό φορτίο επί του αγωγού

- Υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του λόγου  $(x/x_{max}) - ((x/x_{max})_{cr})$ , η οποία συμβολίζεται ως  $a_p$ , πέρα από την οποία η επίδραση του κατακόρυφου συνόρου της τάφρου εγκιβωτισμού είναι αμελητέα. Για τιμές του  $x/x_{max}$  μικρότερες από την κρίσιμη αυτή τιμή, το κατακόρυφο σύνορο της τάφρου εμποδίζει την πλήρη και ελεύθερη εκδήλωση του μηχανισμού αστοχίας της άμμου επίχωσης, οδηγώντας σε αύξηση του λόγου  $(p_{ult}/p_{ult,inf})$ , όπου  $p_{ult}$  και  $p_{ult,inf}$  το οριακό φορτίο για συνθήκες περιορισμένης τάφρου θεμελίωσης και ελεύθερου πεδίου αντίστοιχα.
- Η τιμή του λόγου  $(p_{ult}/p_{ult,inf})$  είναι φθίνουσα συνάρτηση του βάθους εγκιβωτισμού για δεδομένη τιμή του λόγου  $x/x_{max}$  και ακολουθεί πανομοιότυπη συμπεριφορά για τη χαλαρή, μέσης πυκνότητας και πυκνή άμμο. Η αναλυτική σχέση που προτείνεται για τον υπολογισμό του διορθωτικού συντελεστή  $(p_{ult}/p_{ult,inf})$  σχετικά με την επίδραση του πλάτους της τάφρου θεμελίωσης στη μέγιστη τιμή του φορτίου που αναπτύσσεται στον αγωγό κατά την κατακόρυφη προς τα πάνω μετατόπισή του και για τα τρία είδη άμμου επίχωσης (χαλαρή, μέσης πυκνότητας, πυκνή) είναι:

$$\frac{p_{ult}}{p_{ult,inf}} = \left\{ \begin{array}{ll} \left( \frac{x}{x_{max} \cdot a_p} \right)^{-B_p}, & x/x_{max} < a_p \\ 1.0, & x/x_{max} \geq a_p \end{array} \right\} \quad (7.2)$$

όπου:



- Η τιμή του λόγου  $a_p$  είναι αύξουσα συνάρτηση της γωνίας τριβής  $\phi$  του υλικού επίχωσης, αλλά παραμένει σχεδόν σταθερή με το βάθος εγκιβωτισμού του αγωγού  $H/D$  και δίνεται από τη σχέση:

$$a_p = 1.087 \cdot \tan \phi \quad (7.3)$$

$$B_p = \left\{ \begin{array}{l} 27 \cdot [H/D]^{-0.93}, \text{ χαλαρή} \\ 19 \cdot [H/D]^{-0.78}, \text{ μέση} \\ 17 \cdot [H/D]^{-0.79}, \text{ πυκνή} \end{array} \right\} \text{ για } 4 \leq H/D \leq 10 \quad (7.4)$$

- Το σφάλμα της **Σχέσης (7.2)** είναι μικρότερο του 50% για το 94% των δεδομένων.

### 7.1.2 Επίδραση του ημιπλάτους $x$ της τάφρου θεμελίωσης στην οριακή μετατόπιση του αγωγού

- Όπως στην περίπτωση του οριακού φορτίου, υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του  $(x/x_{\max})$ , η οποία συμβολίζεται ως  $a_y$ , πέρα από την οποία απομειώνεται η επίδραση του κατακόρυφου συνόρου της τάφρου εγκιβωτισμού στην οριακή μετατόπιση του αγωγού. Αποδεικνύεται ότι η τιμή  $a_y$  ταυτίζεται με την τιμή  $a_p$ , δηλαδή:

$$a_y = a_p \quad (7.5)$$

- Ο υπολογισμός του διορθωτικού συντελεστή  $(\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf})$ , όπου  $\gamma_{ult}$  και  $\gamma_{ult,inf}$  η μετατόπιση στην οποία εμφανίζεται το οριακό φορτίο για συνθήκες περιορισμένης τάφρου θεμελίωσης και ελεύθερου πεδίου αντίστοιχα, μπορεί να γίνει μέσω της **Σχέσης (7.6)**:

$$\frac{\gamma_{ult}}{\gamma_{ult,inf}} = \left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{x}{x_{\max} \cdot a_y} \right)^{-B_y}, \quad x/x_{\max} < a_y \\ 1.0, \quad x/x_{\max} \geq a_y \end{array} \right\} \quad (7.6)$$

όπου:

$$B_y = \left\{ \begin{array}{l} 22 \cdot [H/D]^{-0.65}, \text{ χαλαρή} \\ 22 \cdot [H/D]^{-0.70}, \text{ μέση} \\ 22 \cdot [H/D]^{-0.75}, \text{ πυκνή} \end{array} \right\} \text{ για } 4 \leq H/D \leq 10 \quad (7.7)$$

Παρατηρείται πως το σφάλμα κατά τον υπολογισμό του διορθωτικού συντελεστή  $\gamma_{ult}/\gamma_{ult,inf}$  είναι σαφέστατα μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό που προέκυψε κατά τον υπολογισμό του οριακού φορτίου και παρουσιάζει μεγαλύτερη διασπορά. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στη χρήση υπερβολικών σχέσεων για την αναλυτική προσέγγιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Παρ' όλα αυτά, ο διορθωτικός συντελεστής επί της οριακής μετατόπισης αποτελεί μέγεθος μικρότερου πρακτικού ενδιαφέροντος, σε σχέση με το διορθωτικό συντελεστή επί του οριακού φορτίου και μπορεί να επιδεχθεί μεγαλύτερο σφάλμα κατά τον υπολογισμό του.

### 7.1.3 Εναλλακτικός σχεδιασμός τάφρου θεμελίωσης

Προκειμένου να εξασφαλισθεί η απαιτούμενη έκταση τάφρου τόσο σε υφιστάμενες κατασκευές, όσο και σε νέες με το χαμηλότερο δυνατό κόστος, διερευνήθηκε η λύση της κατασκευής τάφρου με κεκλιμένα πλευρικά όρια από το κέντρο του αγωγού και άνω.

Η εν λόγω διαμόρφωση έχει σκοπό να εκδηλωθεί πλήρως και ανεμπόδιστα η επιφάνεια αστοχίας και να μειωθεί η επίδραση των συνόρων της τάφρου στο οριακό φορτίο  $p_{ult}$  επί του αγωγού και στη μετατόπιση  $\gamma_{ult}$ , όπου αυτό εμφανίζεται.

Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται το πλάτος της τάφρου εκεί που αυτή συναντά την επιφάνεια του εδάφους να είναι μεγαλύτερο από τη διάσταση  $x_{cr,n}$ , μέγεθος που ορίζεται ως η ελάχιστη απόσταση του συνόρου της τάφρου από την παρειά του αγωγού ώστε να μην επηρεάζεται ο μηχανισμός αστοχίας:

$$x_{cr,n} = 0.49 \cdot H \cdot \tan^2 \varphi - 0.051 \quad (7.8)$$

όπου:

0.051 είναι η ακτίνα του αγωγού για τον οποίο έχουν πραγματοποιηθεί οι αναλύσεις. Τόσο αυτή όσο και το μέγεθος  $x_{cr,n}$  εκφράζονται σε m.

Προτείνεται η κατασκευή τάφρων θεμελίωσης με κεκλιμένα τοιχώματα από το κέντρο του αγωγού και άνω, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.13**, έτσι ώστε:

- Η έκταση της τάφρου B στην επιφάνεια του εδάφους να είναι τουλάχιστον ίση με:

$$B \geq 2 \cdot x_{cr,n} + D \quad (7.9)$$

- Η έκταση της τάφρου b στο επίπεδο του κέντρου του αγωγού να είναι μεγαλύτερη ή ίση με:

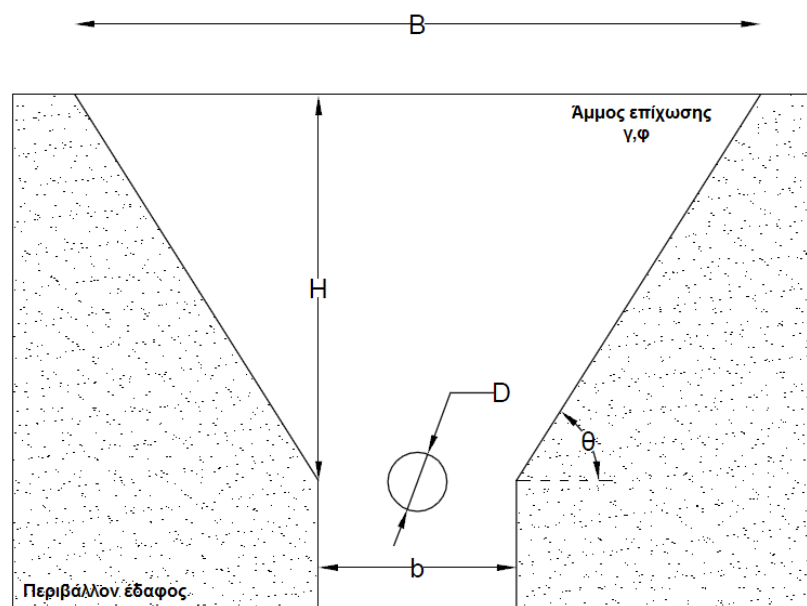
$$b \geq 1.40 \cdot D, \text{ διάσταση που καλύπτεται κατά κανόνα από τη συνήθη πρακτική. } (7.10)$$

- Εναλλακτικά, η κλίση των τοιχωμάτων της τάφρου από το κέντρο του αγωγού και άνω να είναι μικρότερη ή ίση με:

$$\tan \theta \leq \frac{1}{0.489 \cdot \tan^2 \varphi - \frac{1.20}{H/D}}$$

όπου:

$\theta$ : η γωνία που σχηματίζει το κεκλιμένο σύνορο με τον οριζόντιο άξονα



Σχήμα 7.1: Προτεινόμενη γεωμετρία τάφρου θεμελίωσης

## 7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Μέσα από την πορεία διερεύνησης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, προέκυψαν σημεία εύλογου προβληματισμού, τα οποία είναι άξια περαιτέρω διερεύνησης. Τα πιο σημαντικά από αυτά παρατίθενται παρακάτω:

- Εξέταση του προβλήματος με κάποιο καταστατικό προσομοίωμα, πέρα του Mohr-Coulomb, το οποίο θα προσεγγίζει καλύτερα τη συμπεριφορά του εδαφικού υλικού και πριν την αστοχία. Όπως αποδείχθηκε και σε αυτήν την Εργασία, το προσομοίωμα Mohr-Coulomb σε προβλήματα όπου η διαστολικότητα έχει καθοριστική σημασία είναι ακριβές από την αστοχία και μετά.
- Περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης των διαστάσεων της τάφρου σε αγωγό μεγάλης διαμέτρου (π.χ.  $D=0.70\text{m}$ ) για κατακόρυφη προς τα πάνω μετακίνηση, ώστε να εξακριβωθεί πιθανή επιρροή της κλίμακας του προβλήματος στις τιμές των διορθωτικών συντελεστών. Στη βάση του συμπεράσματος των Ζάμπα Αλέξανδρου και Ζερβού Σπυρίδωνα (2014) σχετικά με τη μηδαμινή επίδραση της διαμέτρου του αγωγού στην οριζόντια κίνηση, στην παρούσα Διπλωματική Εργασία έγινε η παραδοχή πως και στο παρόν πρόβλημα η επίδραση είναι αμελητέα.
- Εξέταση της επίδρασης των διαστάσεων της τάφρου για μετατόπιση αγωγού σε κατακόρυφη προς τα κάτω μετατόπιση, μιας και το πρόβλημα στην κατακόρυφη διεύθυνση δεν είναι 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 στη 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.



## Βιβλιογραφικές Αναφορές

---

- 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.
- Bolton, M.D. (1986). "The strength and dilatancy of sands." *Géotechnique*, 36 (1), pp. 65-78.
- Hardin, B.O., and Black, W.L. (1966). "Sand stiffness under various triaxial stresses". *J.Soil Mech. Found. Div.*, (92), pp.27-42.
- Jefferies, M.G. (1993). "Nor-Sand: A simple critical state model for sand". *Géotechnique*, 43(1), pp.91-103.
- Jung, J., O'Rourke, T. and Olson, N. A. (2013b). "Uplift Soil-Pipe Interaction in Granular Soil". *Canadian Geotechnical Journal*. , 50(7), pp.2028-2036.
- 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.
- di Prisco C., Galli A. (2006). "Soil pipe interaction under monotonic loads: experimental and numerical modeling." In: Proc 1<sup>st</sup> Euro-Mediterranean symposium on "Advances in Geomaterials and Structures", Hammamet, Tunisia.
- O'Rourke, M.J. and Liu, X. (2012). "Seismic design of buried and offshore pipelines". MCEER Monograph MCEER-12-MN04.
- O'Rourke TD. (2010). "Geohazards and large, geographically distributed systems" . *Géotechnique*, 60(7), pp. 505-543.
- 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. and Kulhawy, F.H. (1985). "Uplift force-displacement response of pipe" *Journal of geotechnical engineering*, American Society of Civil Engineers ASCE, 111 (9), pp. 1061-76.
- Turner, J.P. and Kulhawy, F.H. (1987). "Experimental analysis of drilled shaft foundations subjected to repeated axial loads under drained conditions". *Rep. to Electric Power Research Institute*, Cornell University, Ithaca, N.Y.

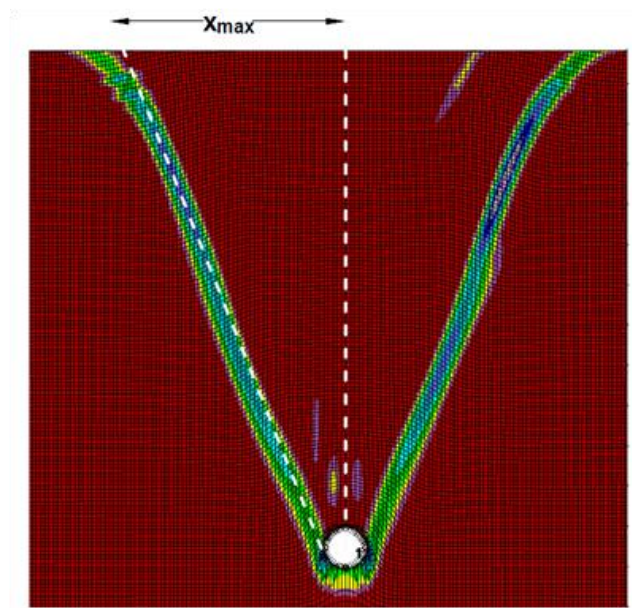
Yimsiri S., Soga K., Yoshizaki K., Dasari G., O'Rourke T.D. (2004). "Lateral and upward soil–pipeline interactions in sand for deep embedment conditions" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130 (8), pp. 830-42.

Ζάμπας, Α., και Ζερβός, Σ. (2014). «Ανάλυση αγωγού σε διασταύρωση με ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης: Επίδραση διαστάσεων τάφρου θεμελίωσης».

# A

## Παράρτημα Α

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται όλα τα αριθμητικά αποτελέσματα αναφορικά με τη μέτρηση της έκτασης και τη μορφή της επιφάνειας αστοχίας.



**Σχήμα Α.1:** Προσδιορισμός απόστασης  $x_{max}$  από τις διατμητικές παραμορφώσεις (πυκνή άμμος,  $H/D=13$ ).

**Πίνακας Α.1:** Εύρος επιφάνειας αστοχίας για συνθήκες ελεύθερου πεδίου για χαλαρή, μέση και πυκνή άμμο και  $H/D=1.5, 4, 6, 8, 10, 13$ .

	$H/D$	$x_{max,numerical}$ (m)	$x_{max,numerical} / D$	$x_{max,numerical} / (H \tan \phi)$
Χαλαρή άμμος	1.5	0.082071	0.804622	0.842002207
	4	0.113985	1.117496	0.438529428
	6	0.172008	1.68635	0.441173192



	8	0.198687	1.947912	0.382201125
	10	0.267429	2.621856	0.411548914
	13	0.18513	1.815	0.219152256
Μέσης πυκνότητας άμμος	1.5	0.075396	0.739176	0.678259316
	4	0.151	1.480392	0.50939625
	6	0.22855	2.240686	0.51400668
	8	0.2562	2.511765	0.432143441
	10	0.335925	3.293382	0.453295193
	13	0.43285	4.243627	0.449296315
Πυκνή άμμος	1.5	0.083875	0.822304	0.567680425
	4	0.1892	1.854902	0.480201802
	6	0.3126	3.064706	0.528932641
	8	0.384	3.764706	0.487308383
	10	0.46421	4.551078	0.471277968
	13	0.560667	5.496732	0.437848665
<b>Μέση τιμή</b>				0.44375415

**Πίνακας Α.2:** Σύγκριση αριθμητικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων σχετικά με το εύρος της επιφάνειας αστοχίας για συνθήκες ελεύθερου πεδίου (εφαρμογή Σχέσης 4.1)

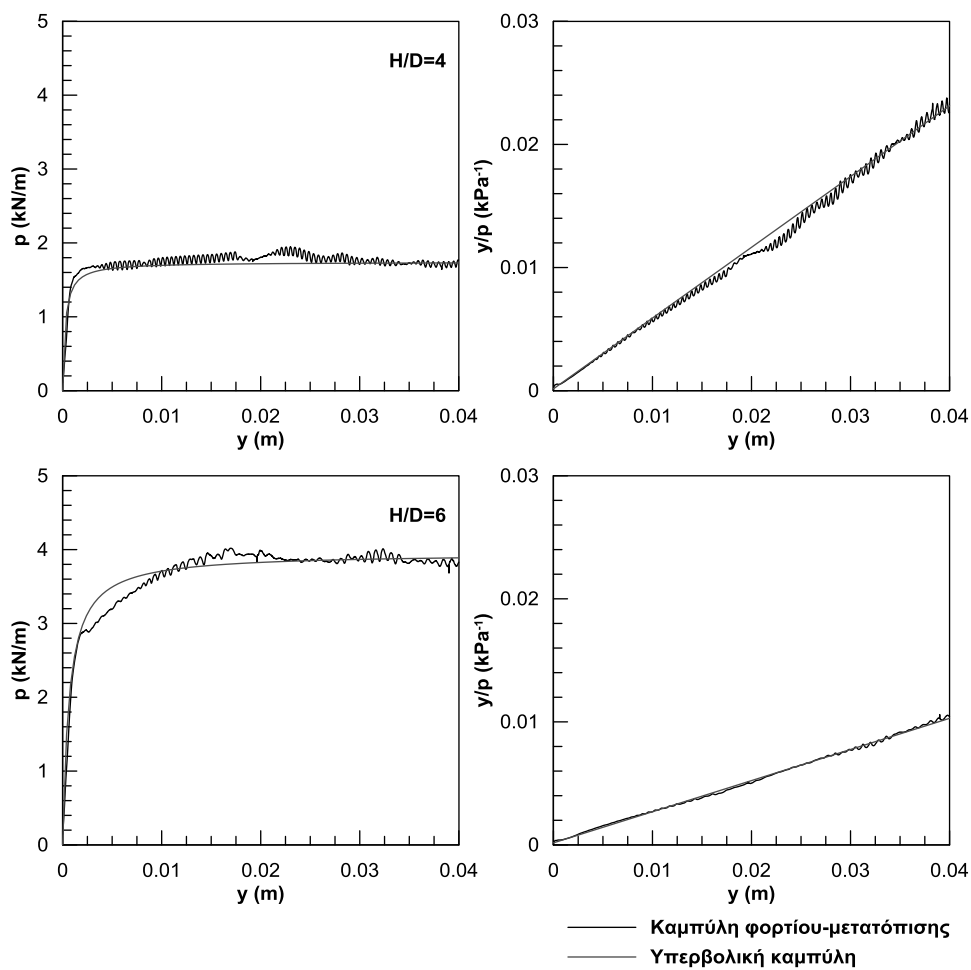
	H/D	$x_{\max, \text{numerical}}$ (m)	$x_{\max, \text{analytical}}$ (m)	Σφάλμα (%)
<b>Χαλαρή άμμος</b>	4	0.113985	0.116966	-2.616
	6	0.172008	0.175449	-2.001
	8	0.198687	0.233932	-17.739
	10	0.267429	0.292415	-9.343
	13	0.18513	0.38014	-105.337
<b>Μέσης πυκνότητας άμμος</b>	4	0.151	0.133393	11.6601
	6	0.22855	0.20009	12.4525
	8	0.2562	-0.266786	4.132
	10	0.335925	0.333483	0.7269
	13	0.43285	-0.433528	0.157
<b>Πυκνή άμμος</b>	4	0.1892	0.1773	6.2894
	6	0.3126	0.265951	14.923
	8	0.384	0.354601	7.656
	10	0.46421	0.443251	4.515
	13	0.560667	0.576226	-2.775



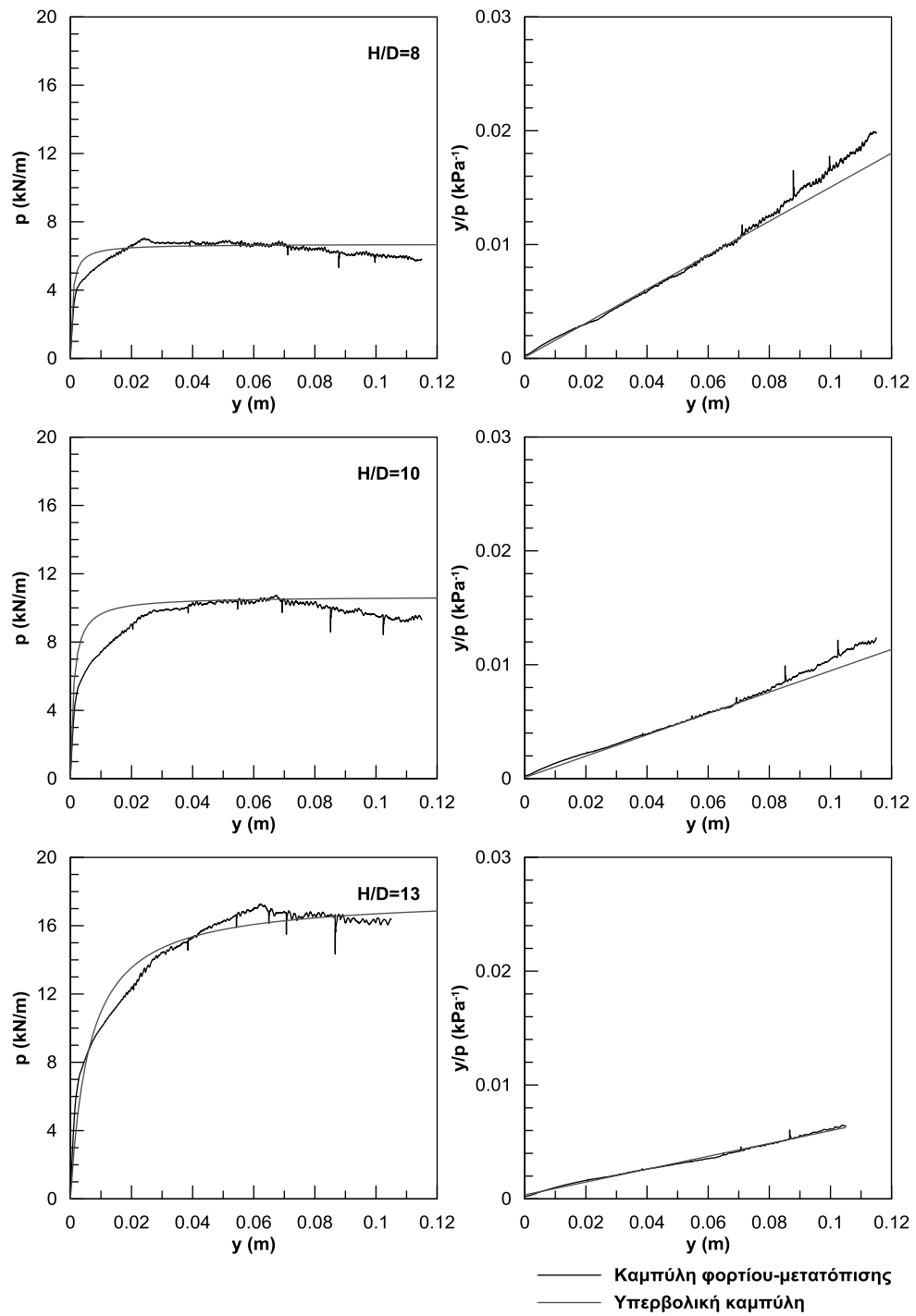
# B

## Παράρτημα Β

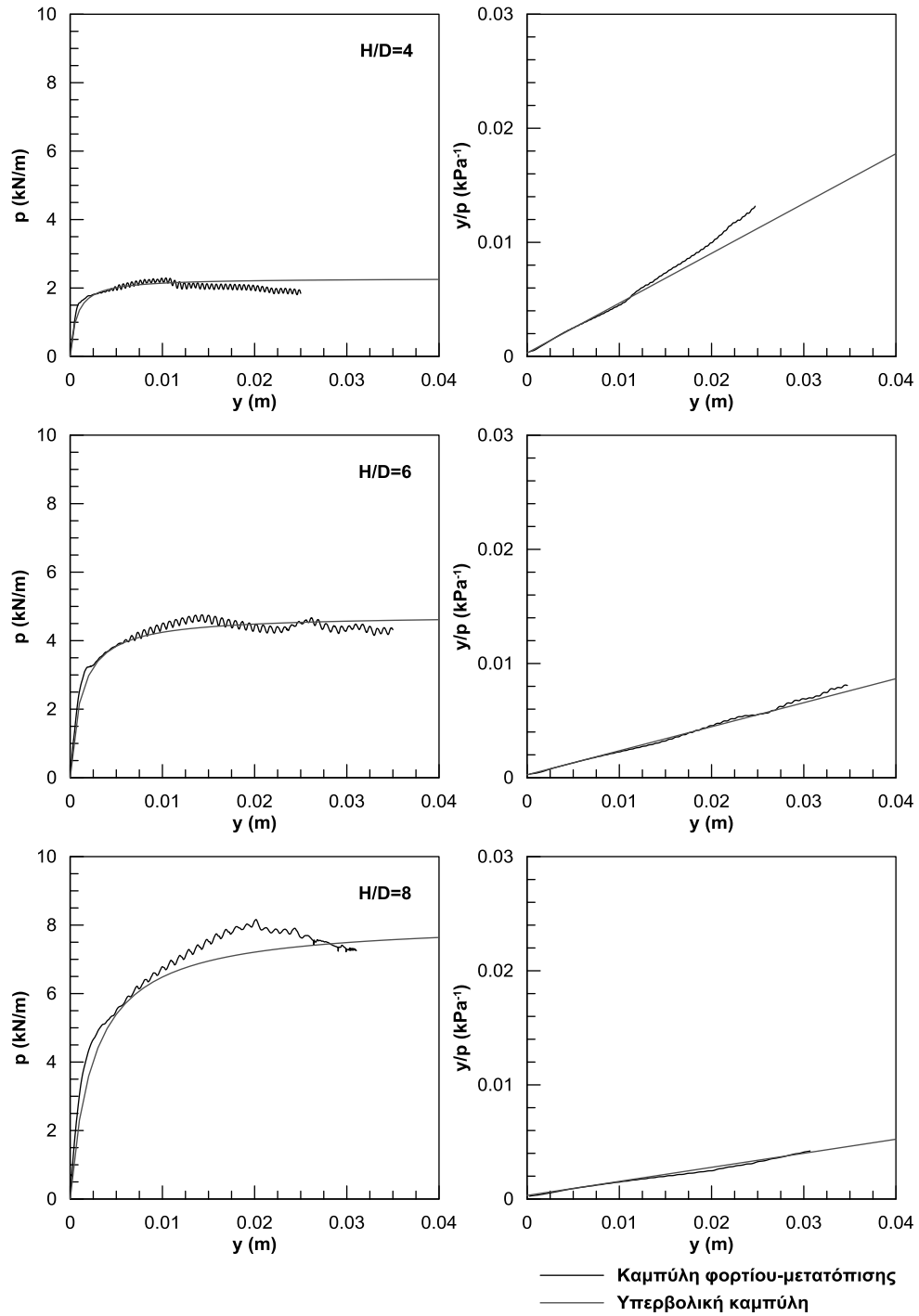
Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και η προσέγγιση αυτών με υπερβολική καμπύλη που αφορούν την κίνηση του αγωγού για συνθήκες ελεύθερου πεδίου.



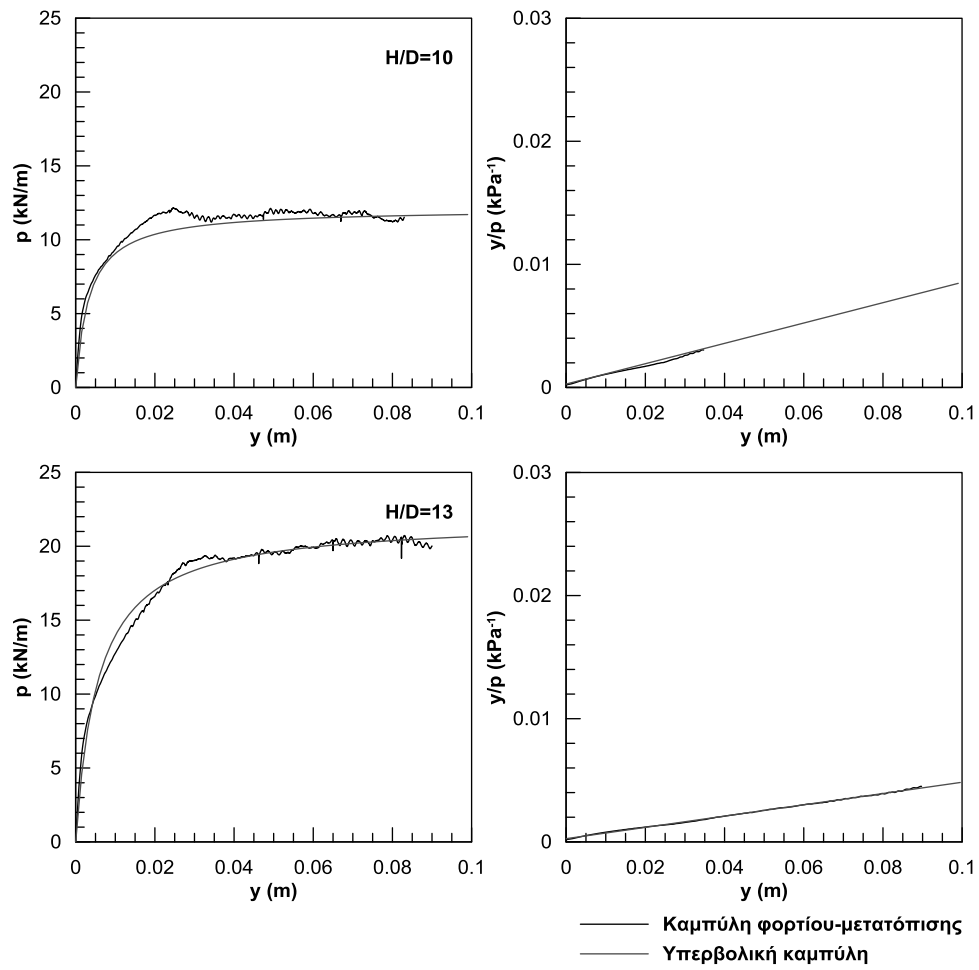
**Σχήμα Β.1:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και υπερβολική καμπύλη για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=4, 6$ .



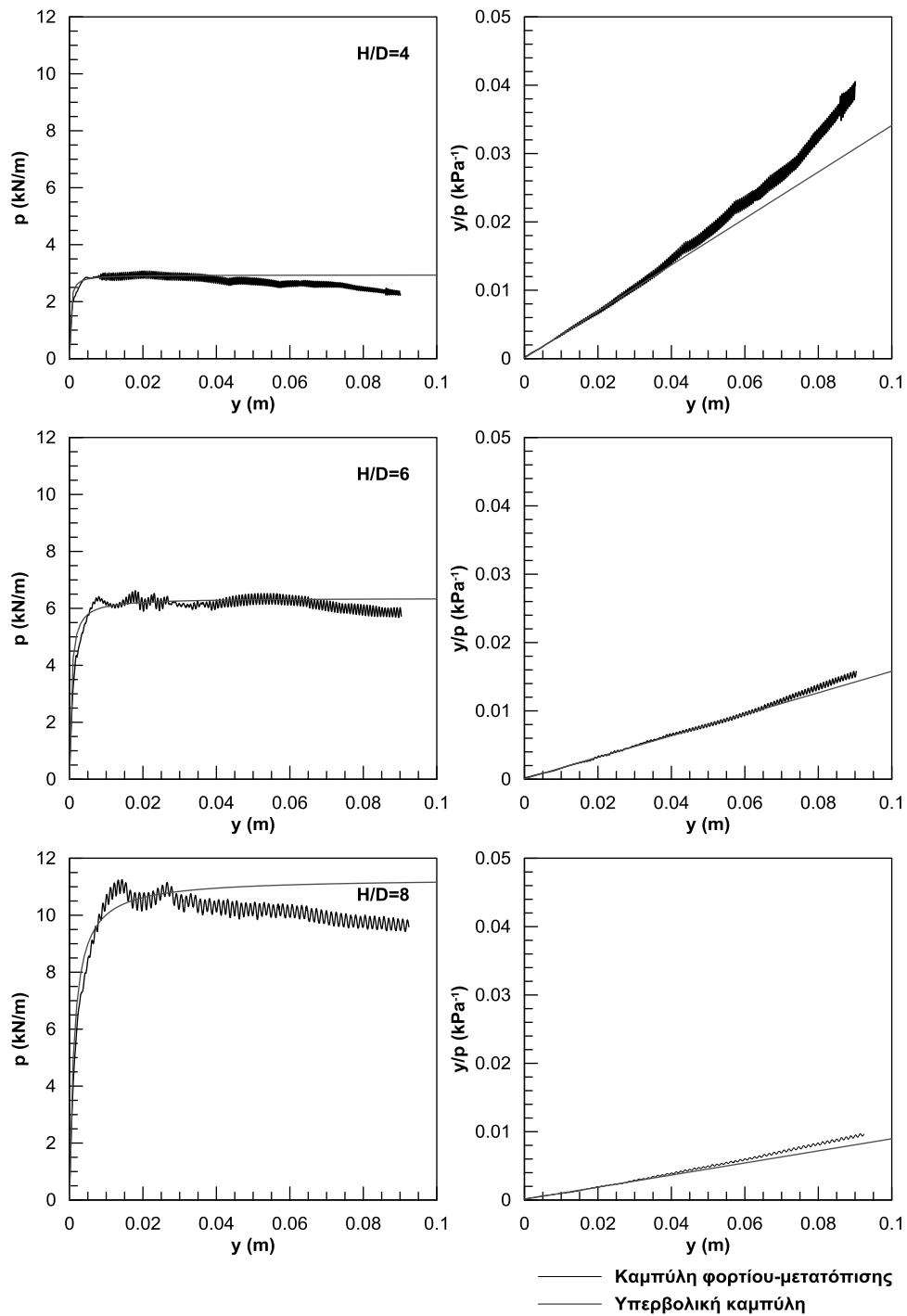
**Σχήμα Β.2:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και υπερβολική καμπύλη για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=8, 10, 13$ .



**Σχήμα Β.3:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και υπερβολική καμπύλη για μέσης πυκνότητας άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=4, 6, 8$ .

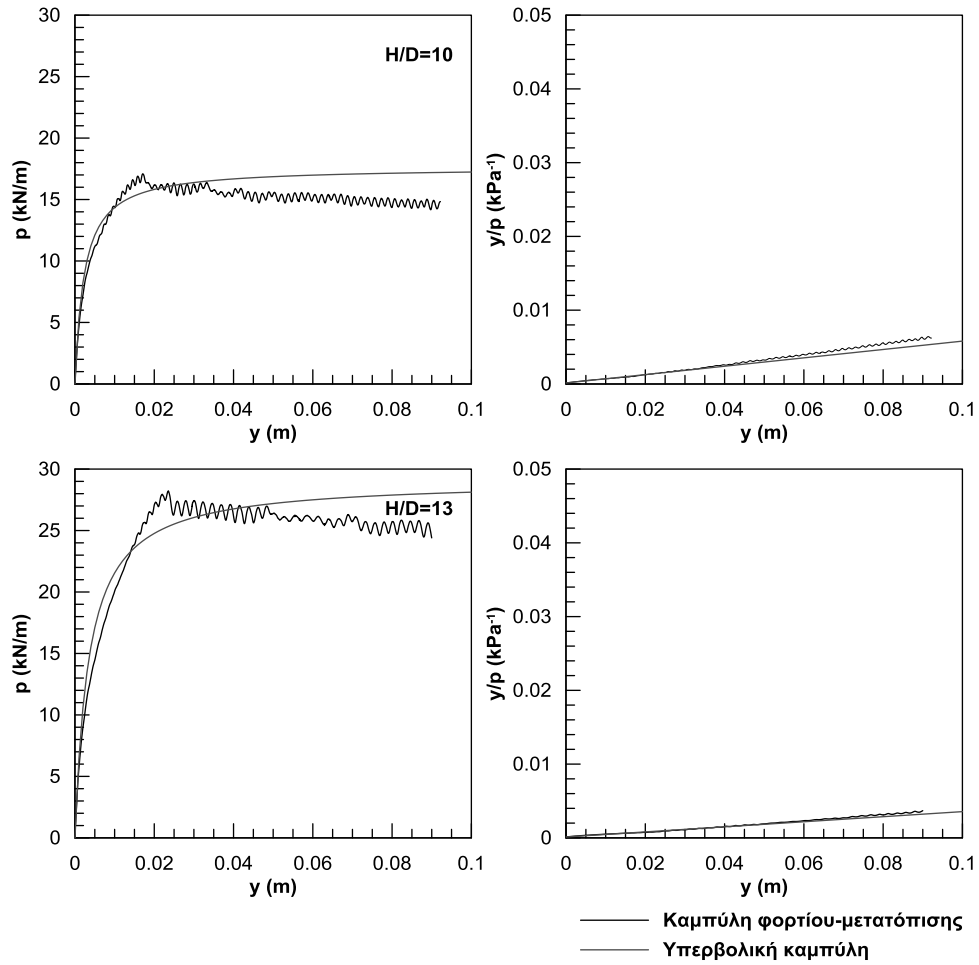


**Σχήμα Β.4:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και υπερβολική καμπύλη για μέσης πυκνότητας άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=10, 13$ .



**Σχήμα Β.5:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και υπερβολική καμπύλη για πυκνή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=4, 6, 8$ .



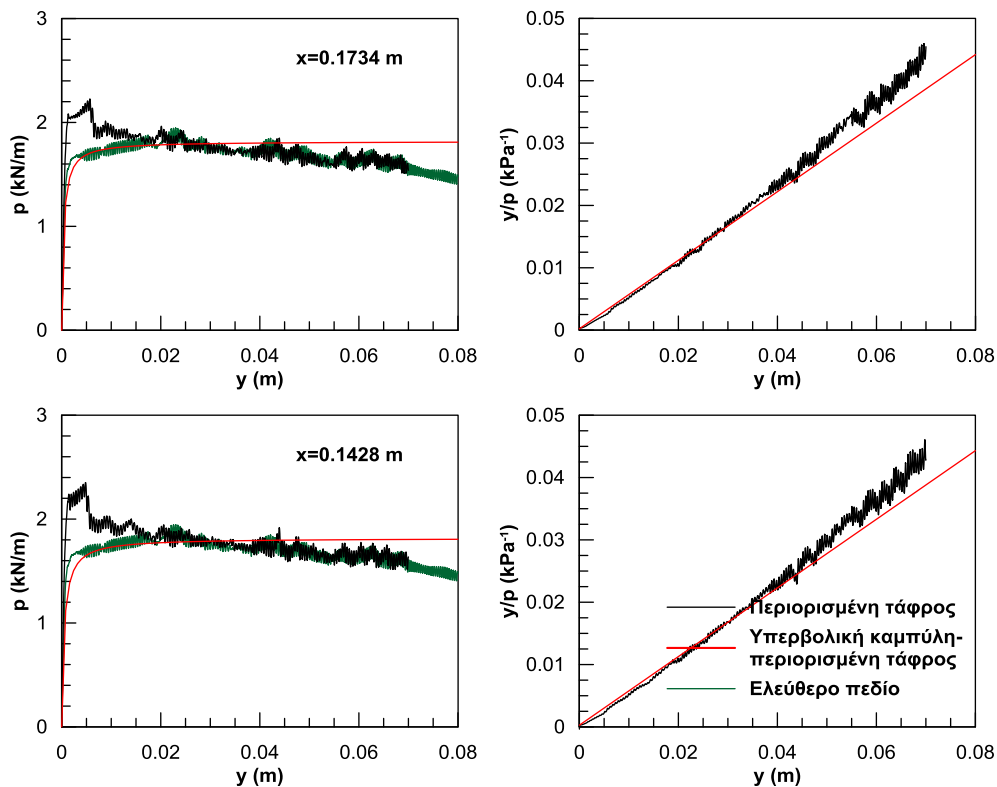


**Σχήμα Β.6:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης και υπερβολική καμπύλη για πυκνή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=10, 13$ .

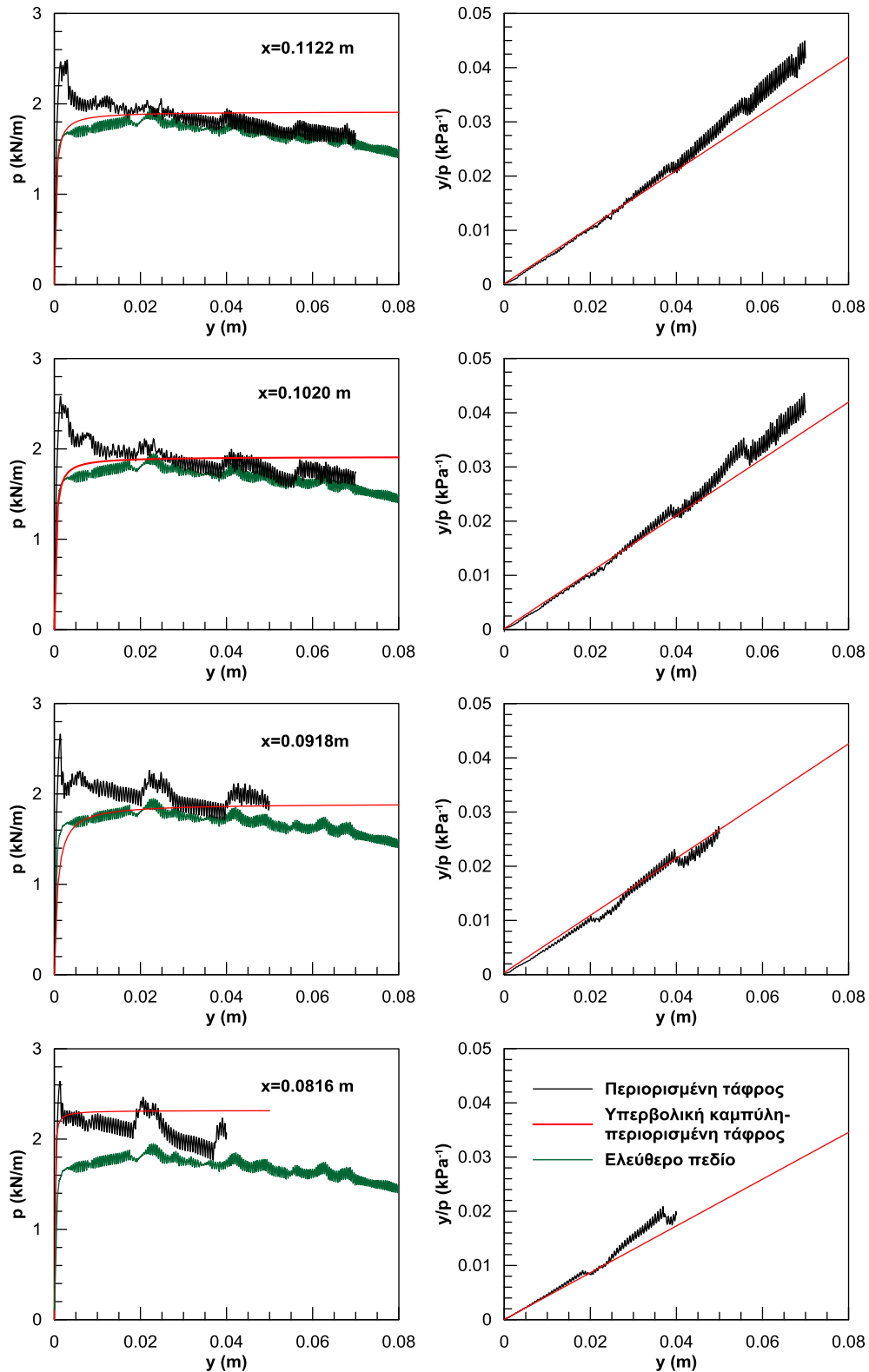


## Παράρτημα Γ

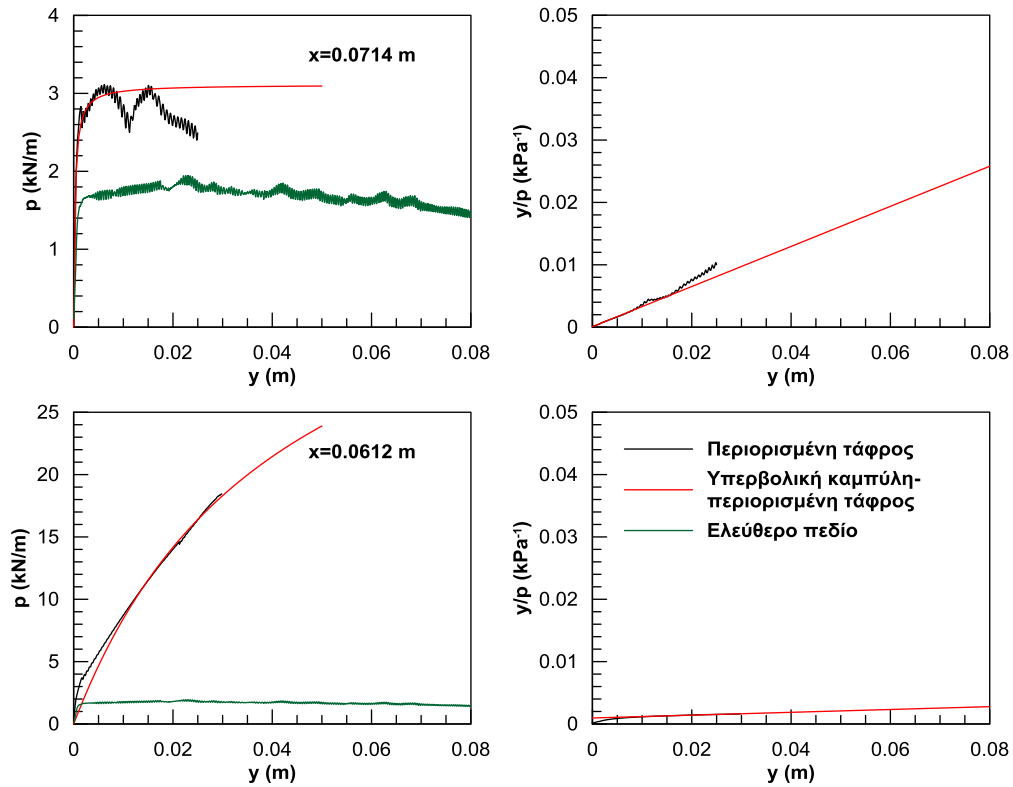
Στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης - και η προσέγγιση αυτών με υπερβολική καμπύλη - που αφορούν την κίνηση του αγωγού σε ορθογωνική τάφρο περιορισμένης έκτασης.



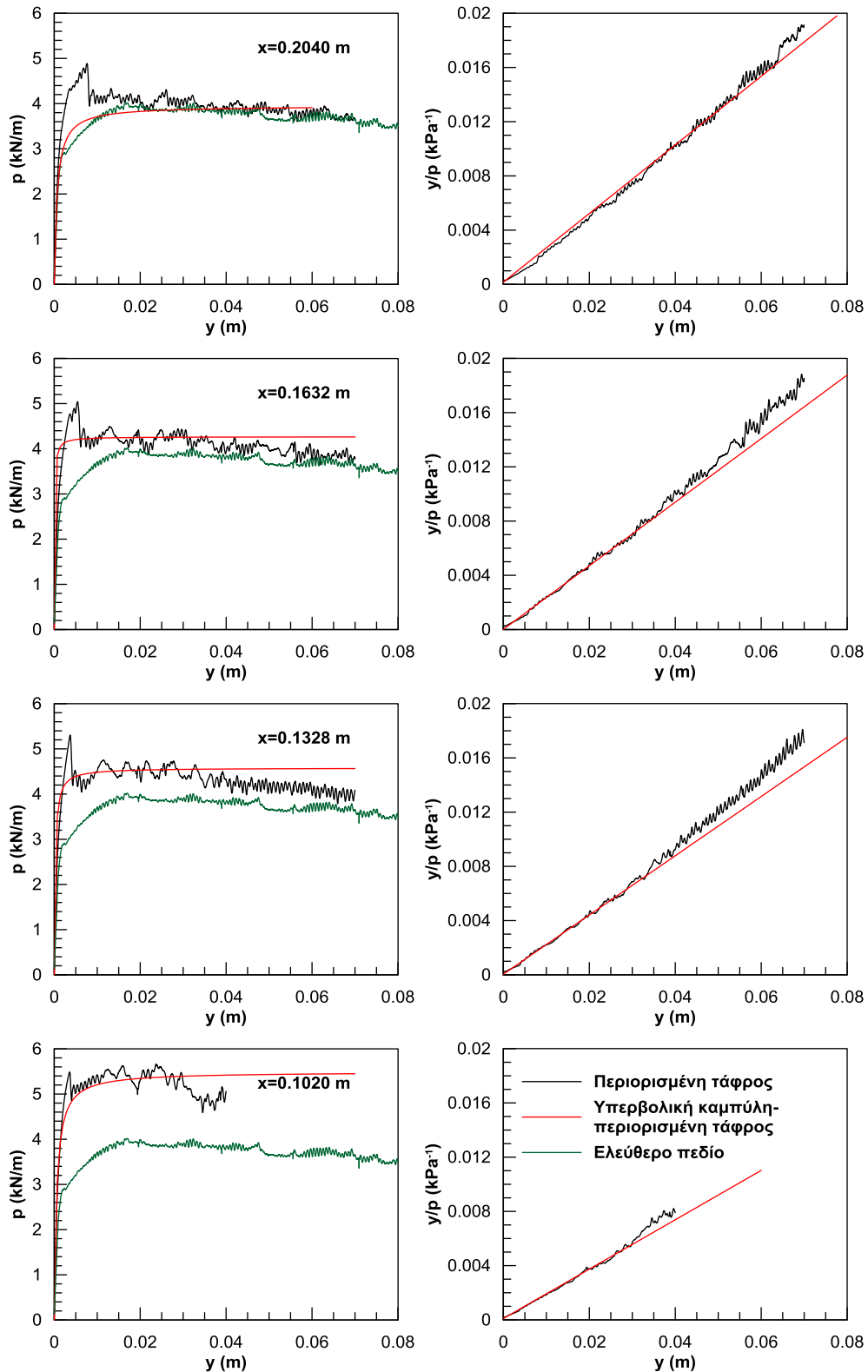
**Σχήμα C.1:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=4$ .



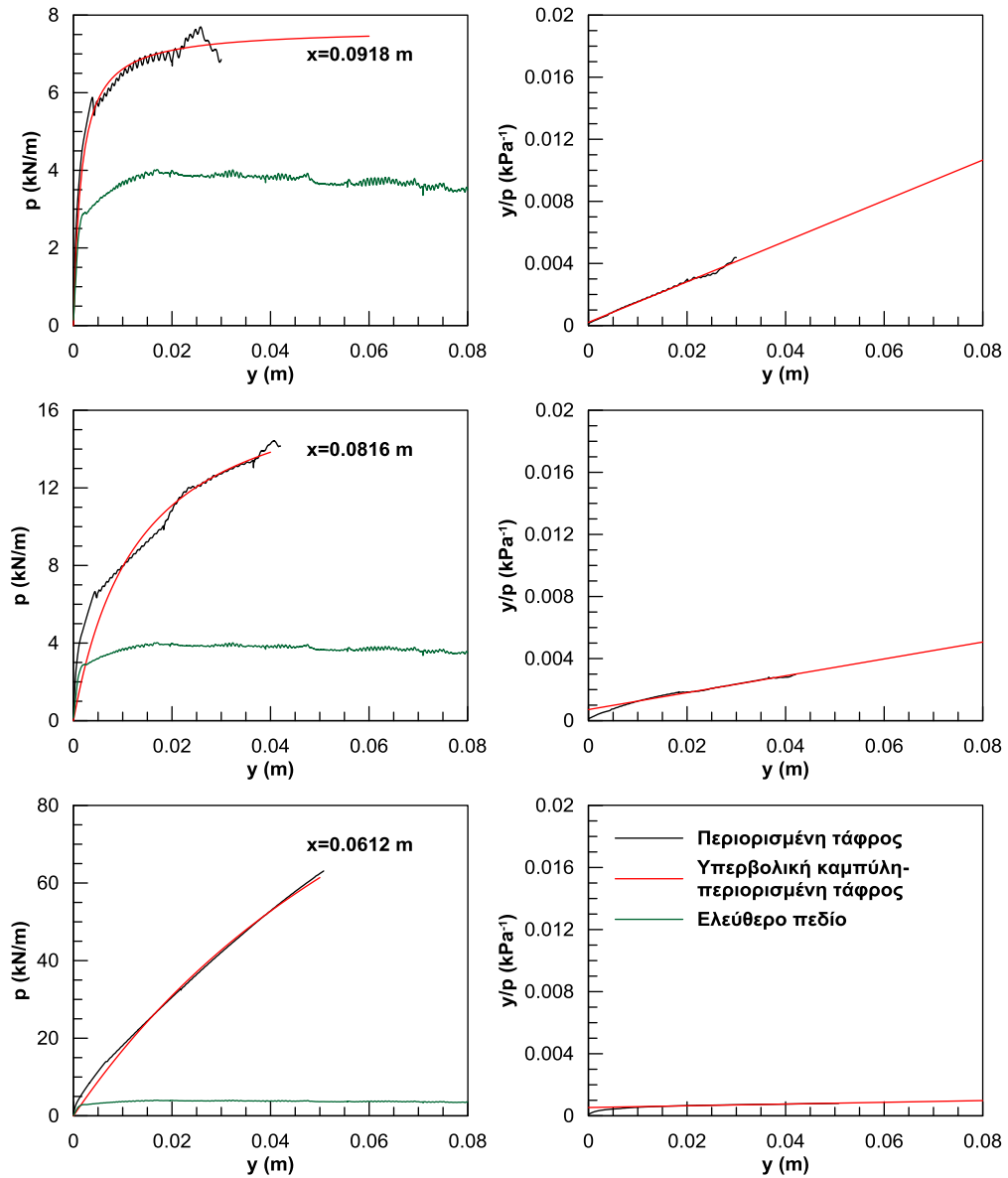
**Σχήμα C.2:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=4$ .



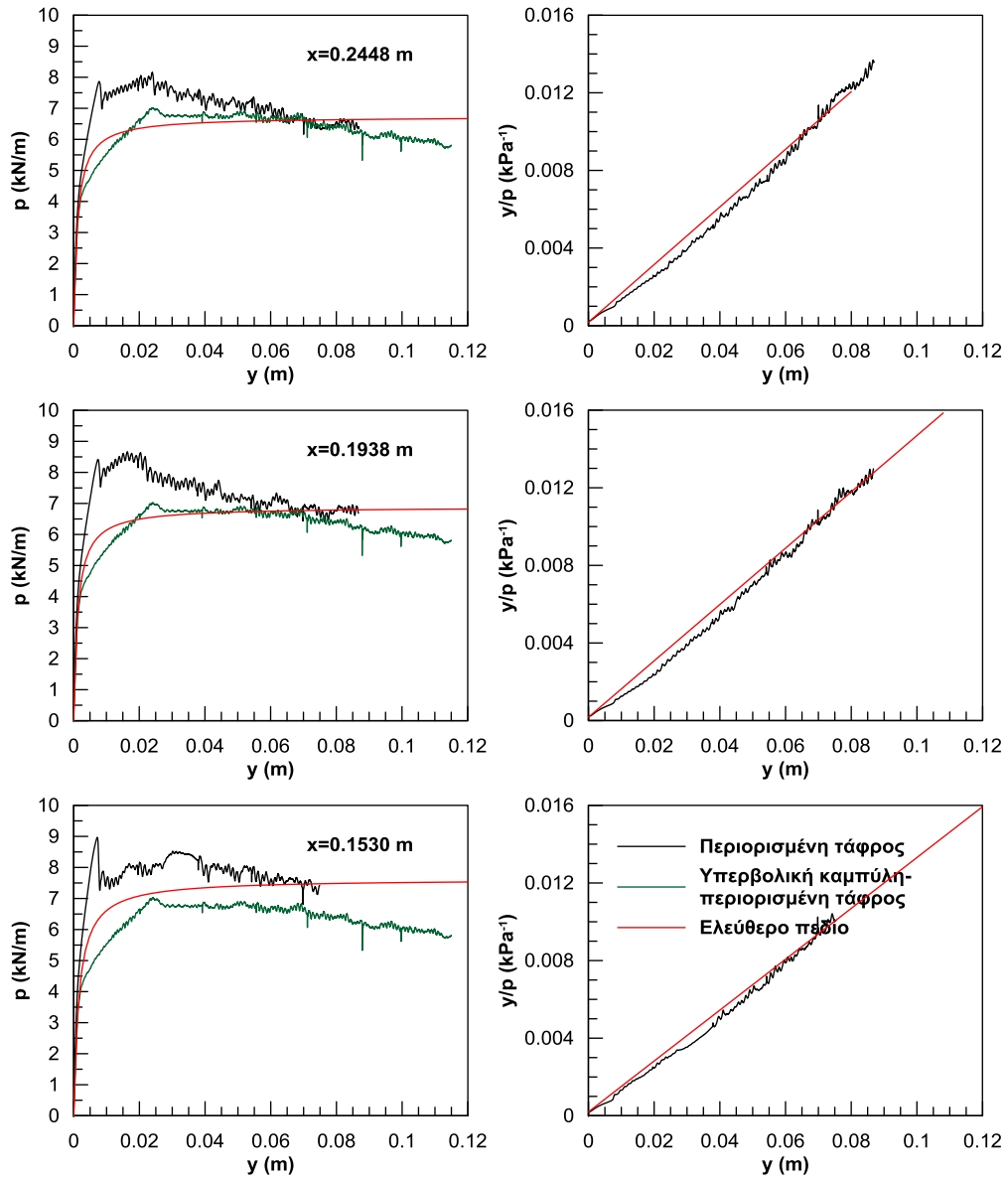
**Σχήμα C.3:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=4$ .



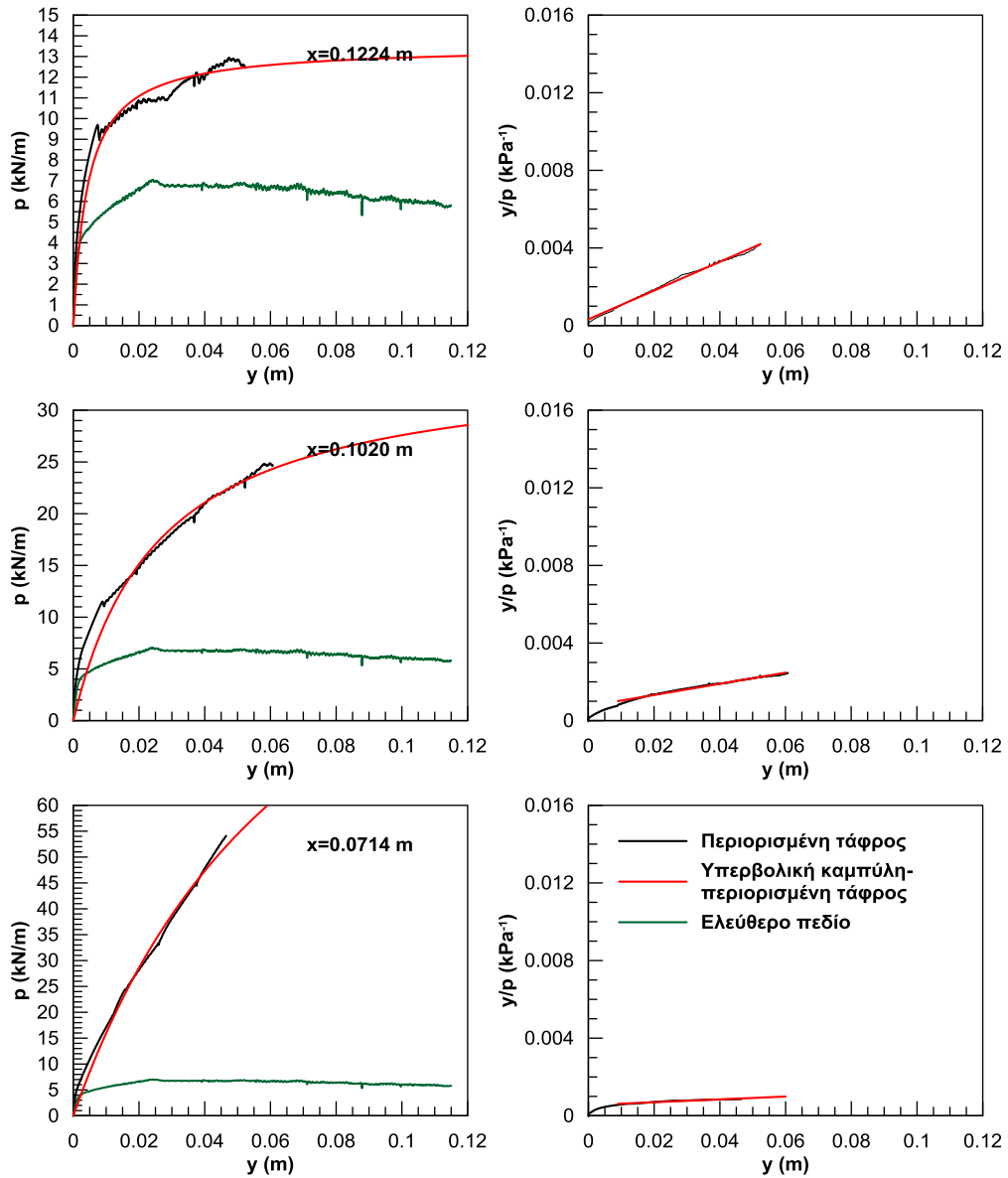
**Σχήμα C.4:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=6$ .



**Σχήμα C.5:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=6$ .

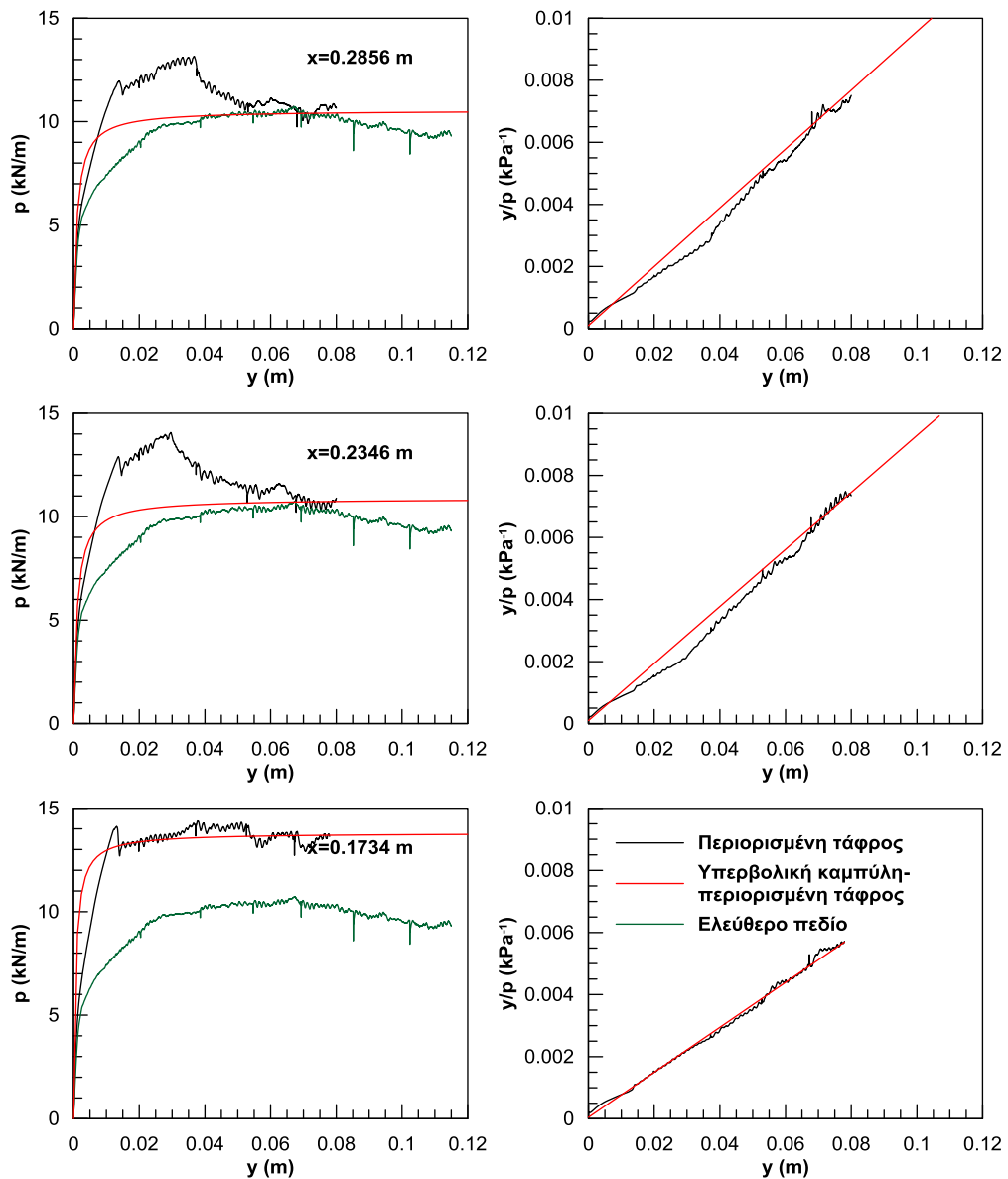


**Σχήμα C.6:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=8$ .

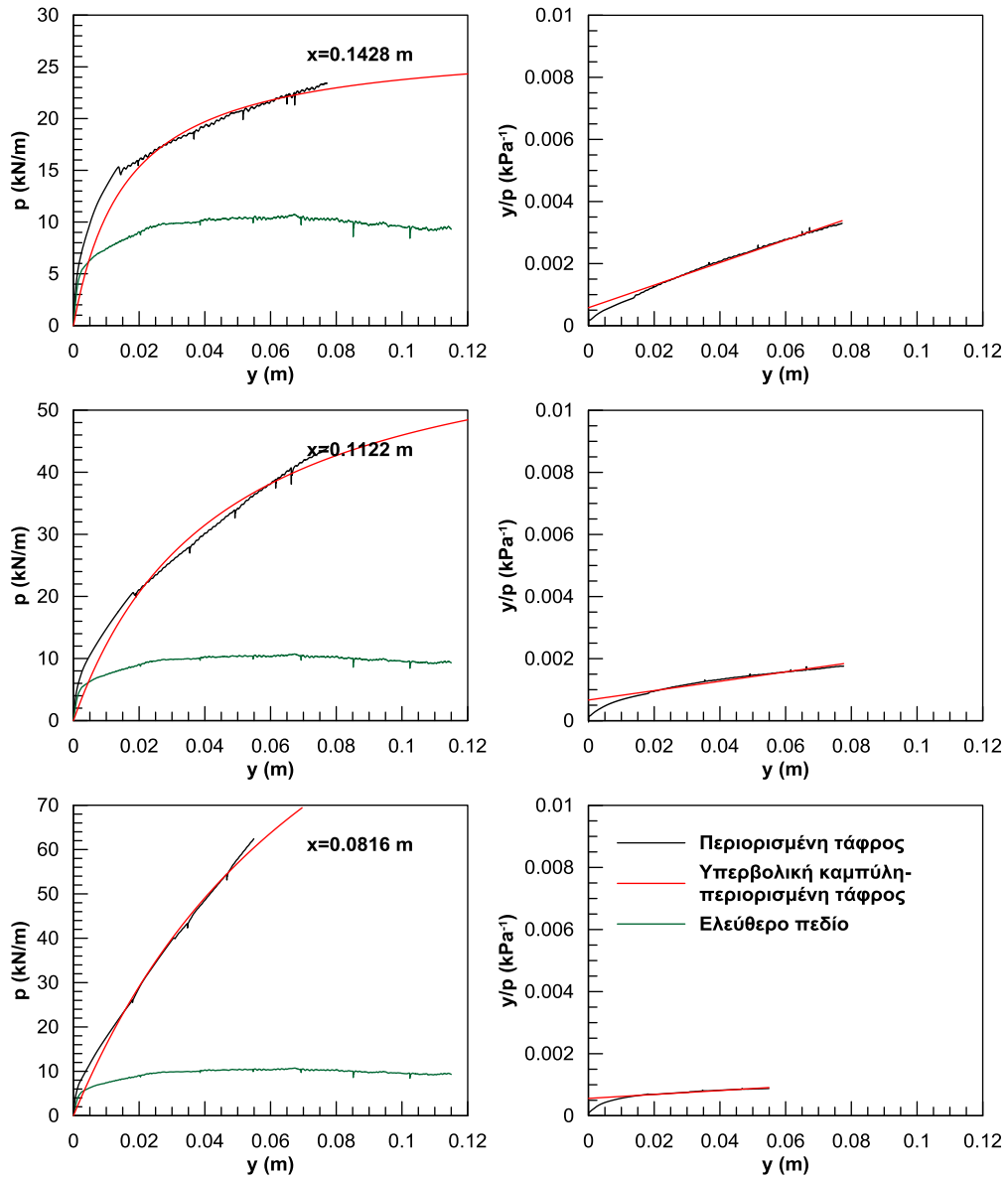


**Σχήμα C.7:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=8$ .

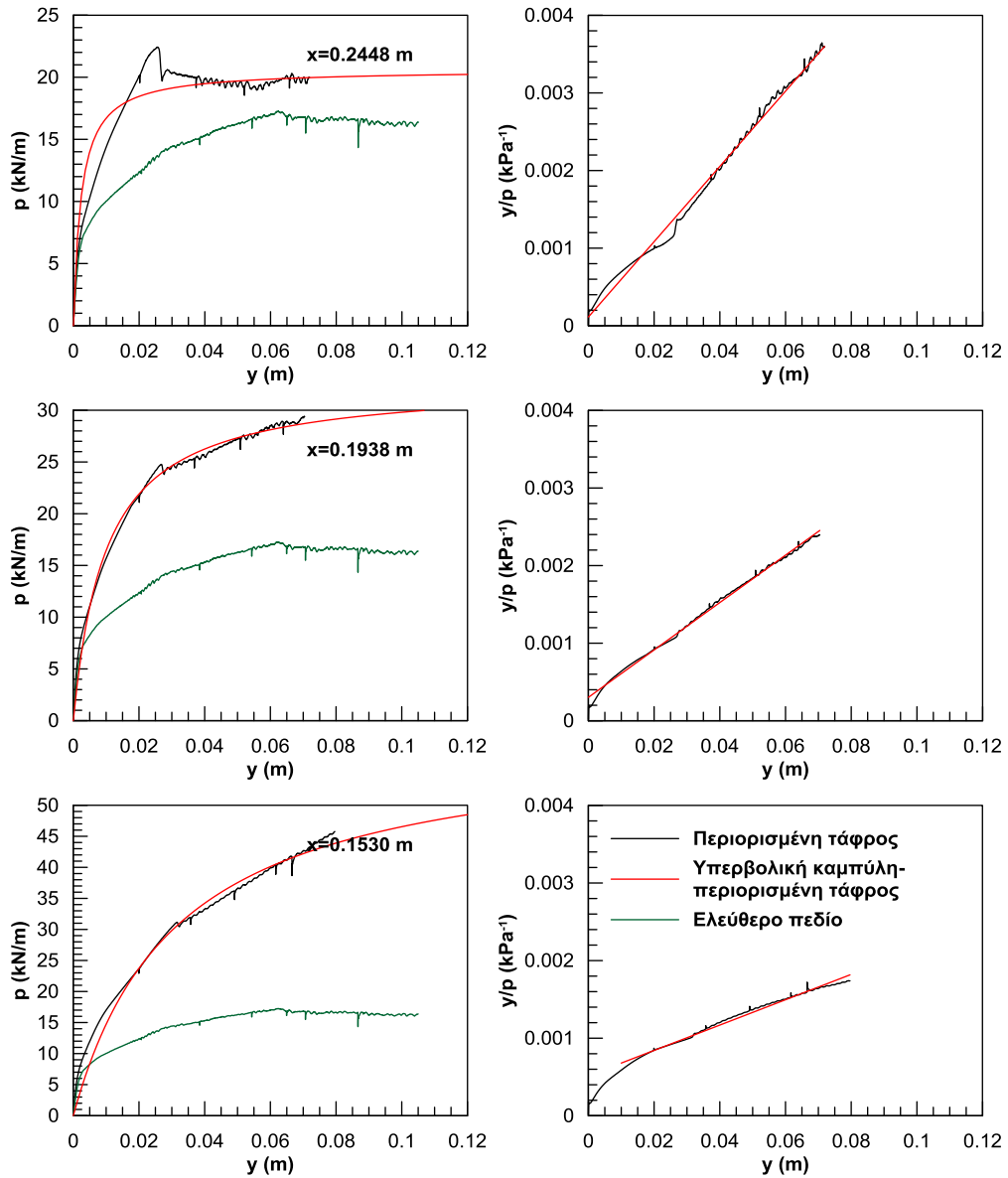




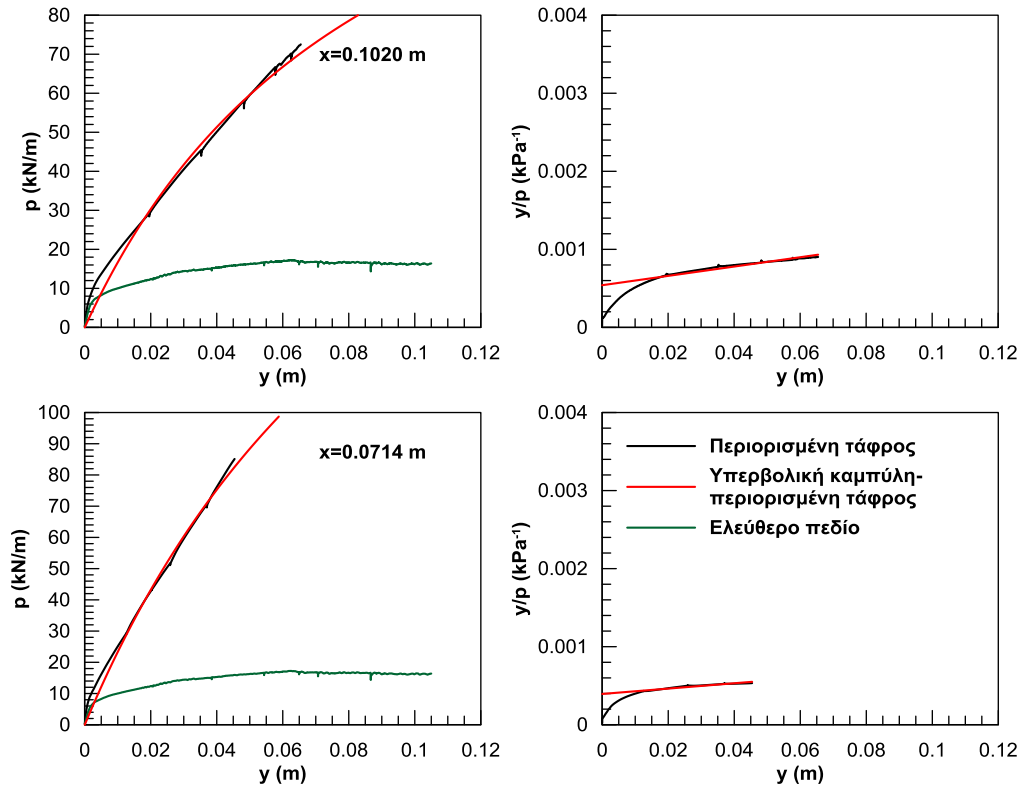
**Σχήμα C.8:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=10$ .



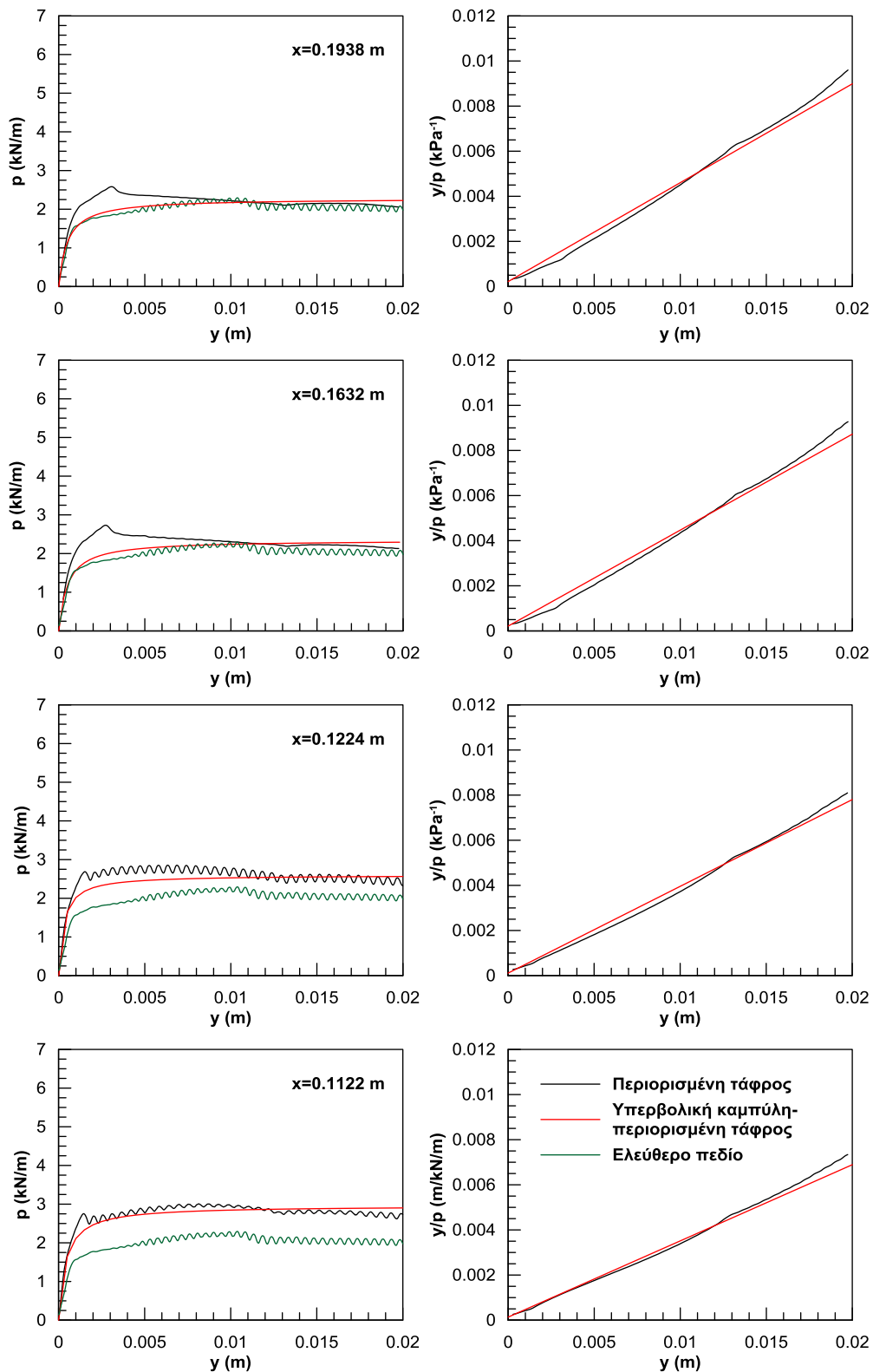
**Σχήμα C.9:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=10$ .



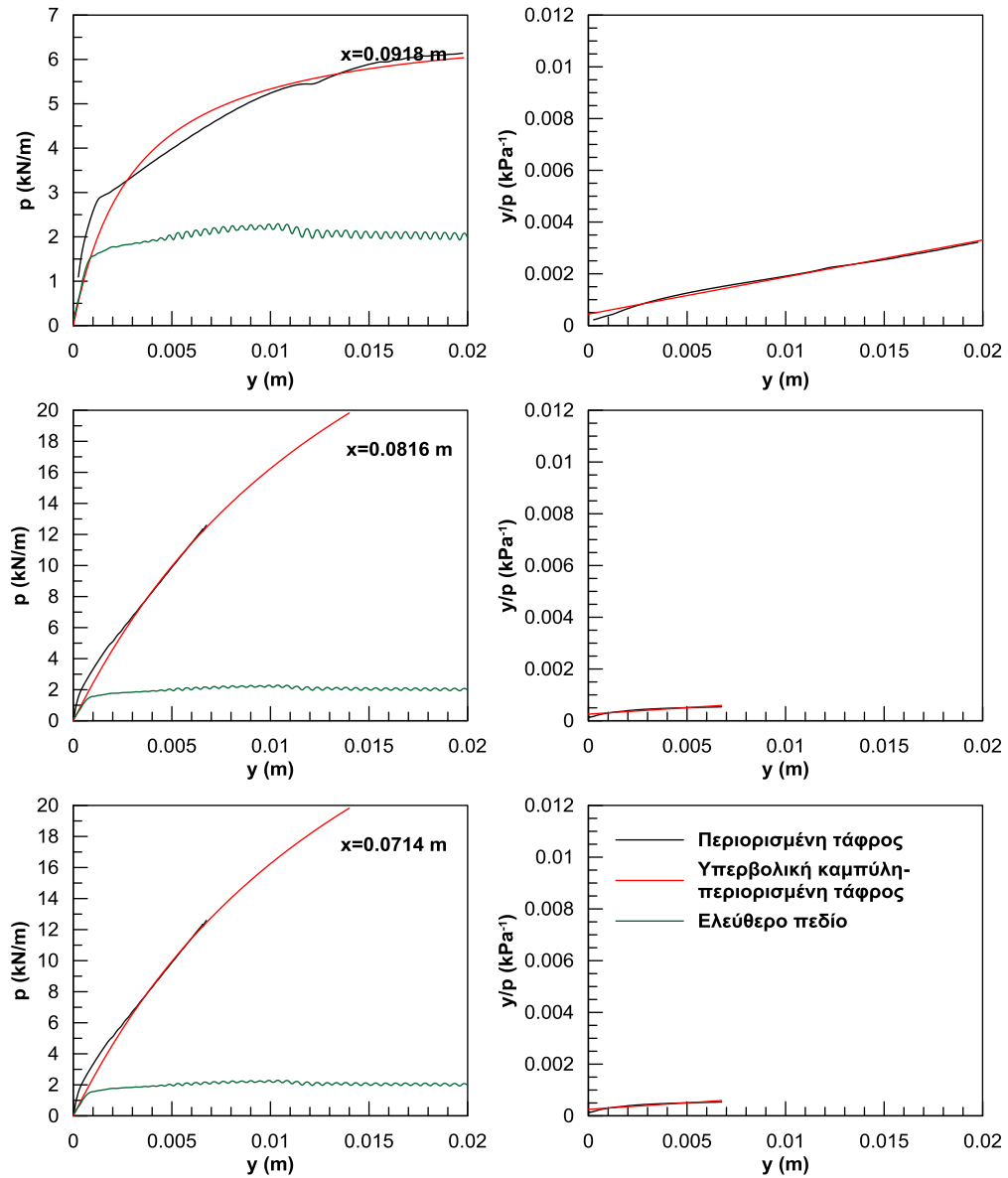
**Σχήμα C.10:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=13$ .



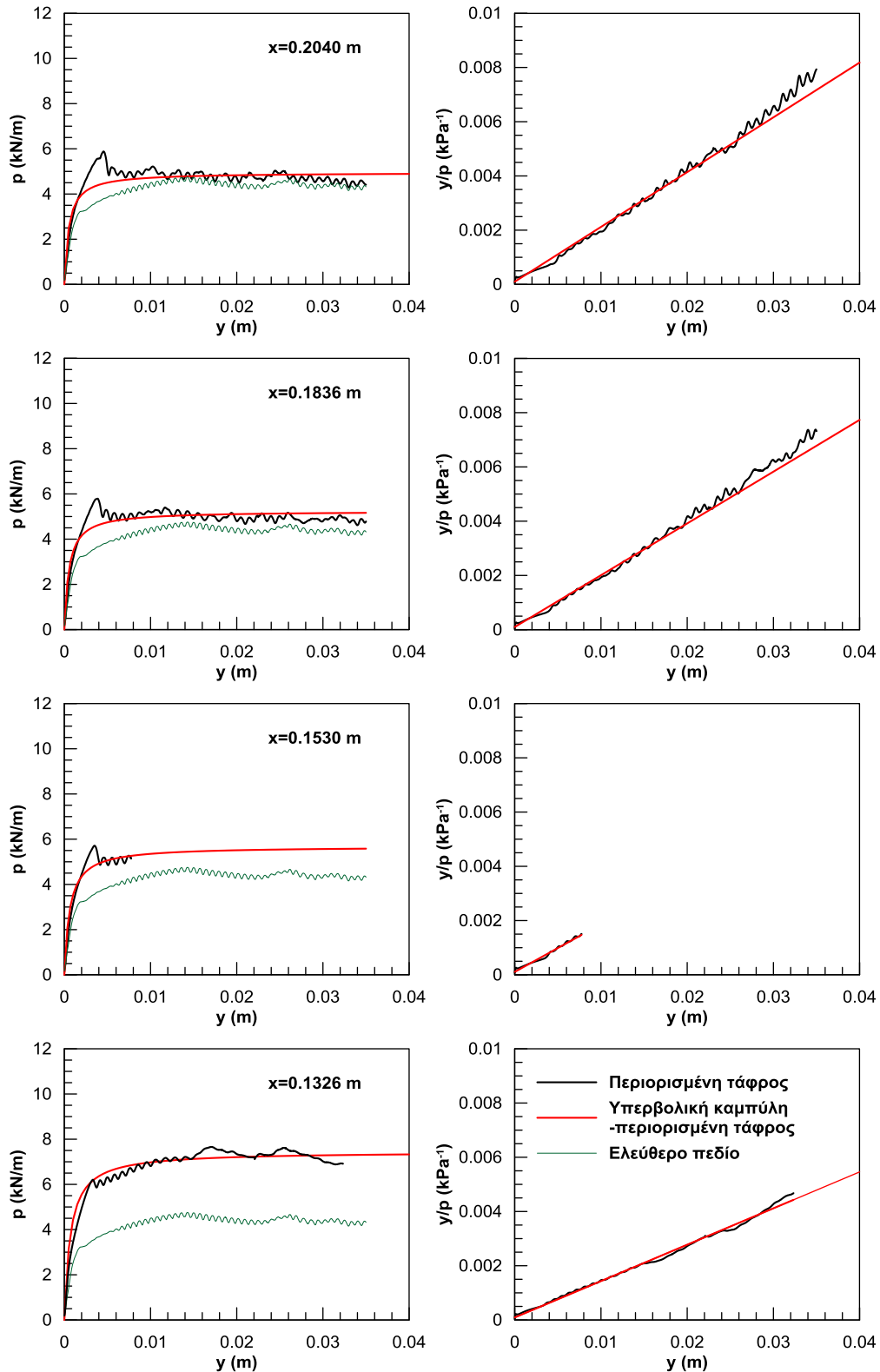
**Σχήμα C.11:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=13$ .



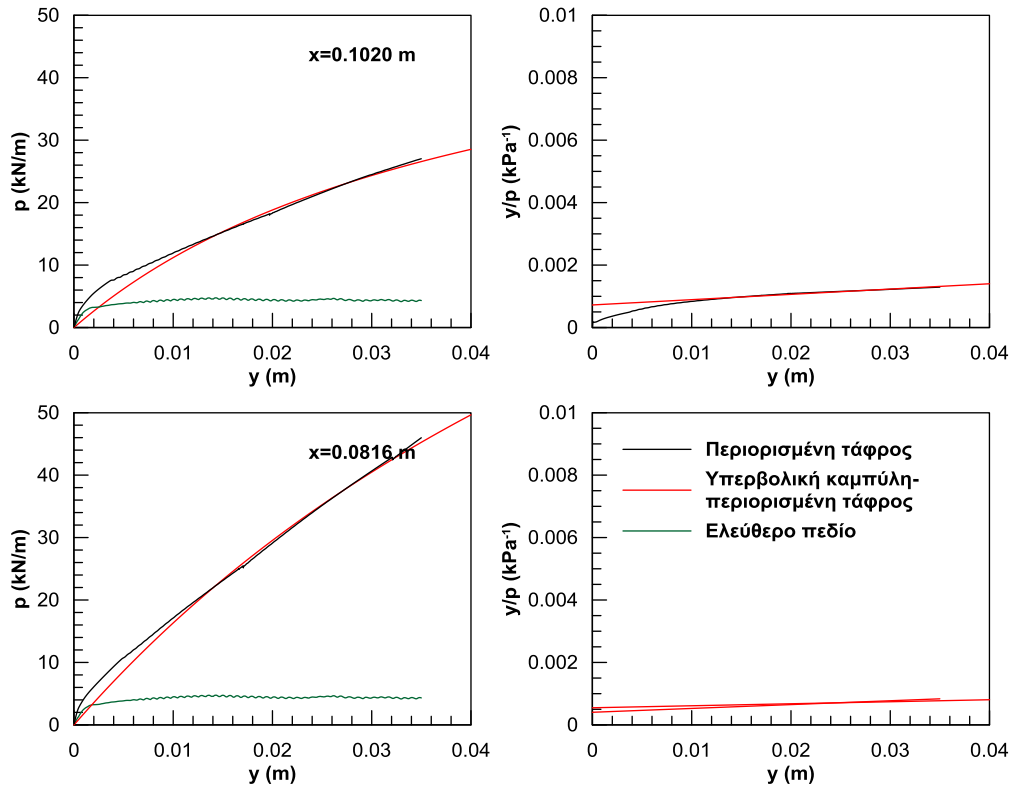
**Σχήμα C.12:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για μέσης πυκνότητας άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=4$ .



**Σχήμα C.13:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για μέσης πυκνότητας άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=4$ .

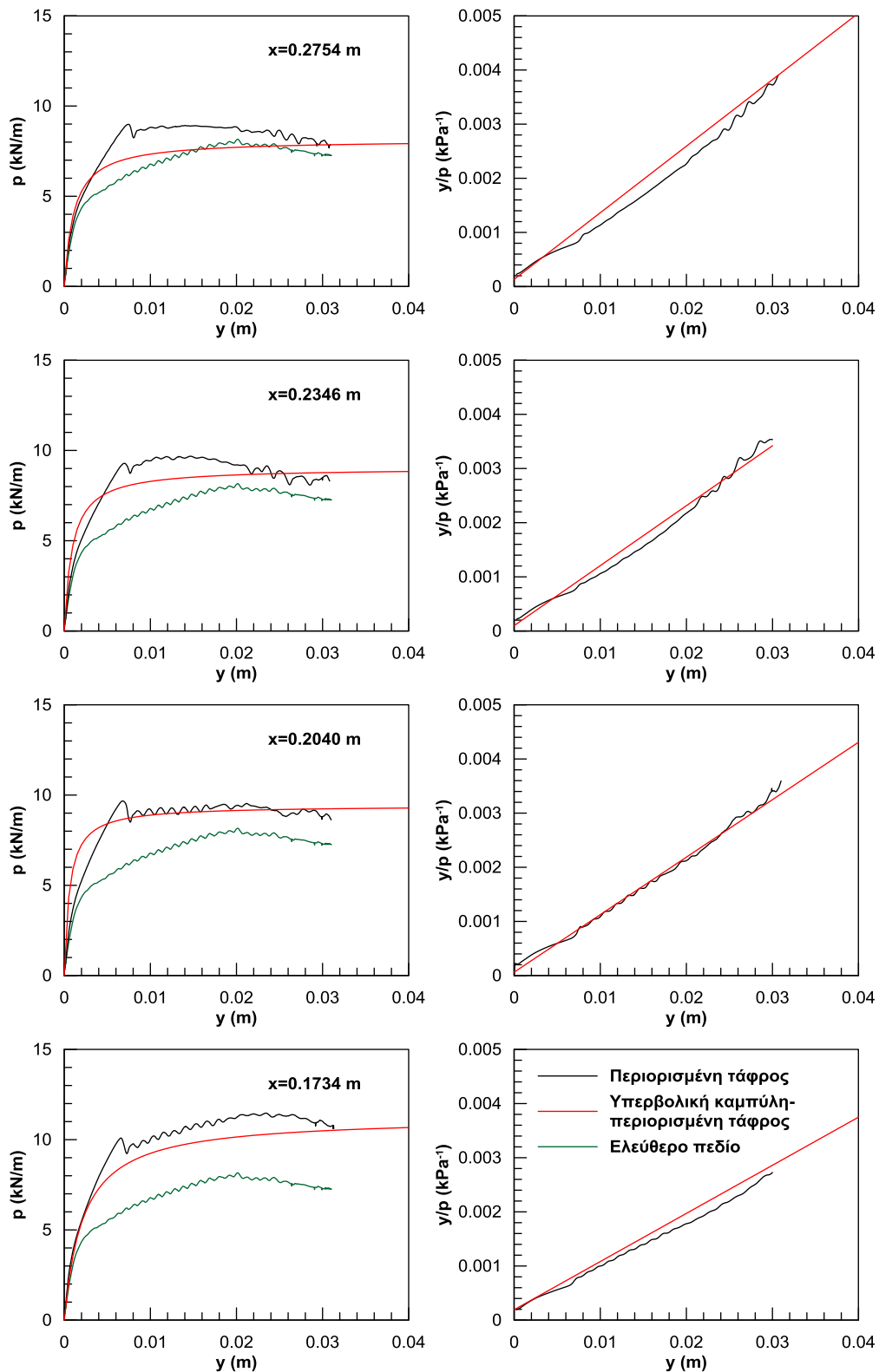


**Σχήμα C.14:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για μέσης πυκνότητας άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=6$ .

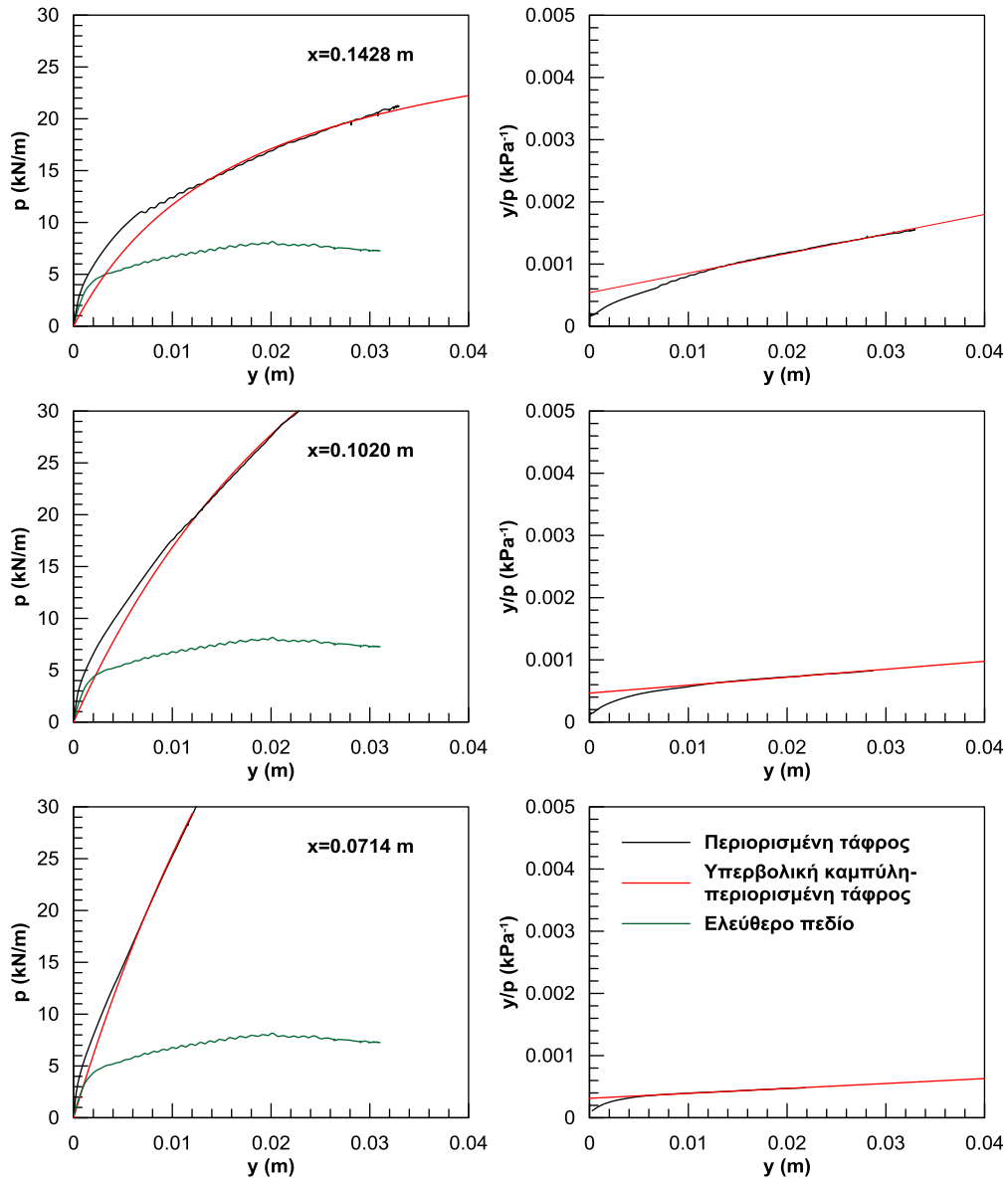


**Σχήμα C.15:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για μέσης πυκνότητας άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=6$ .

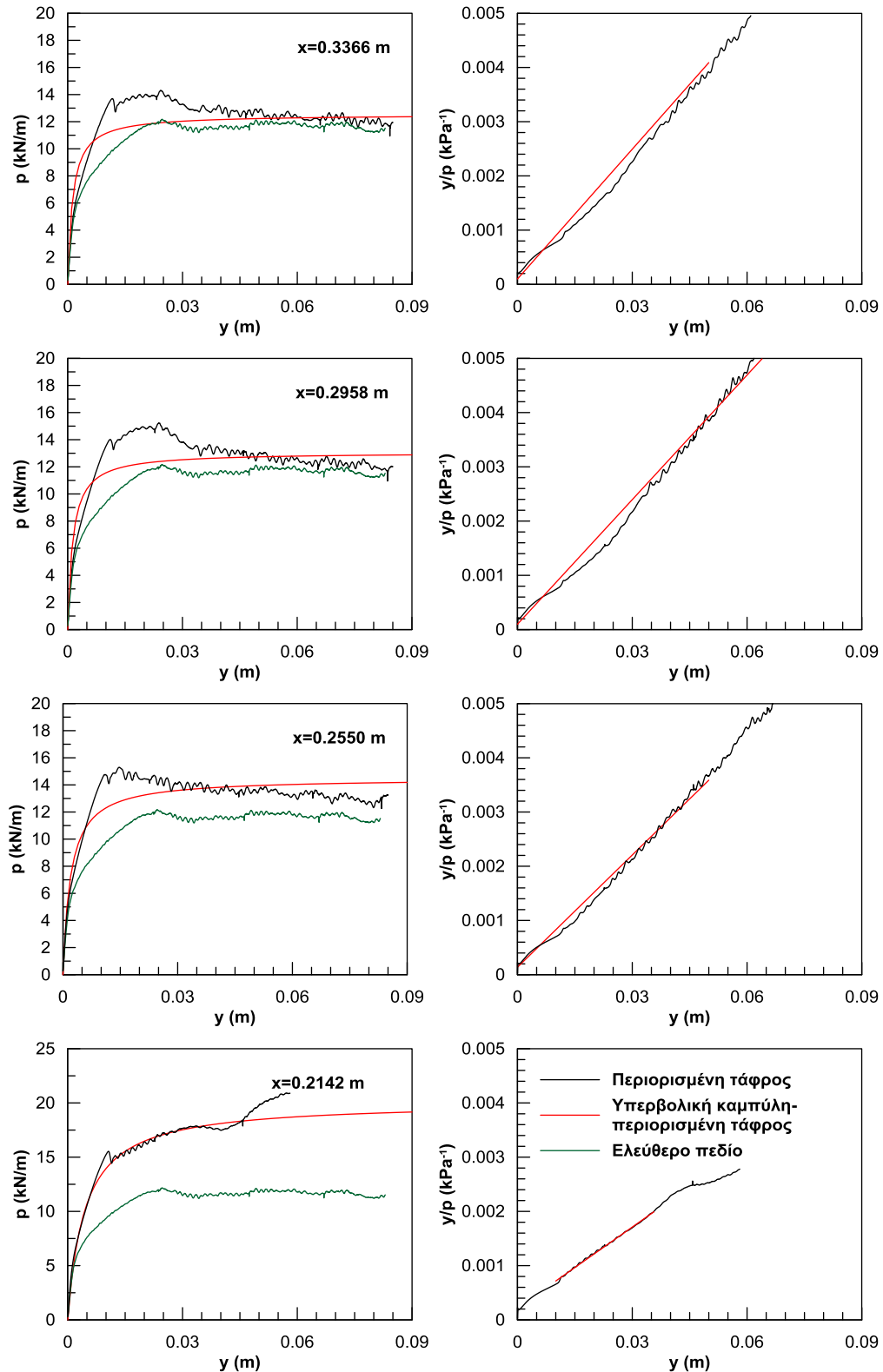




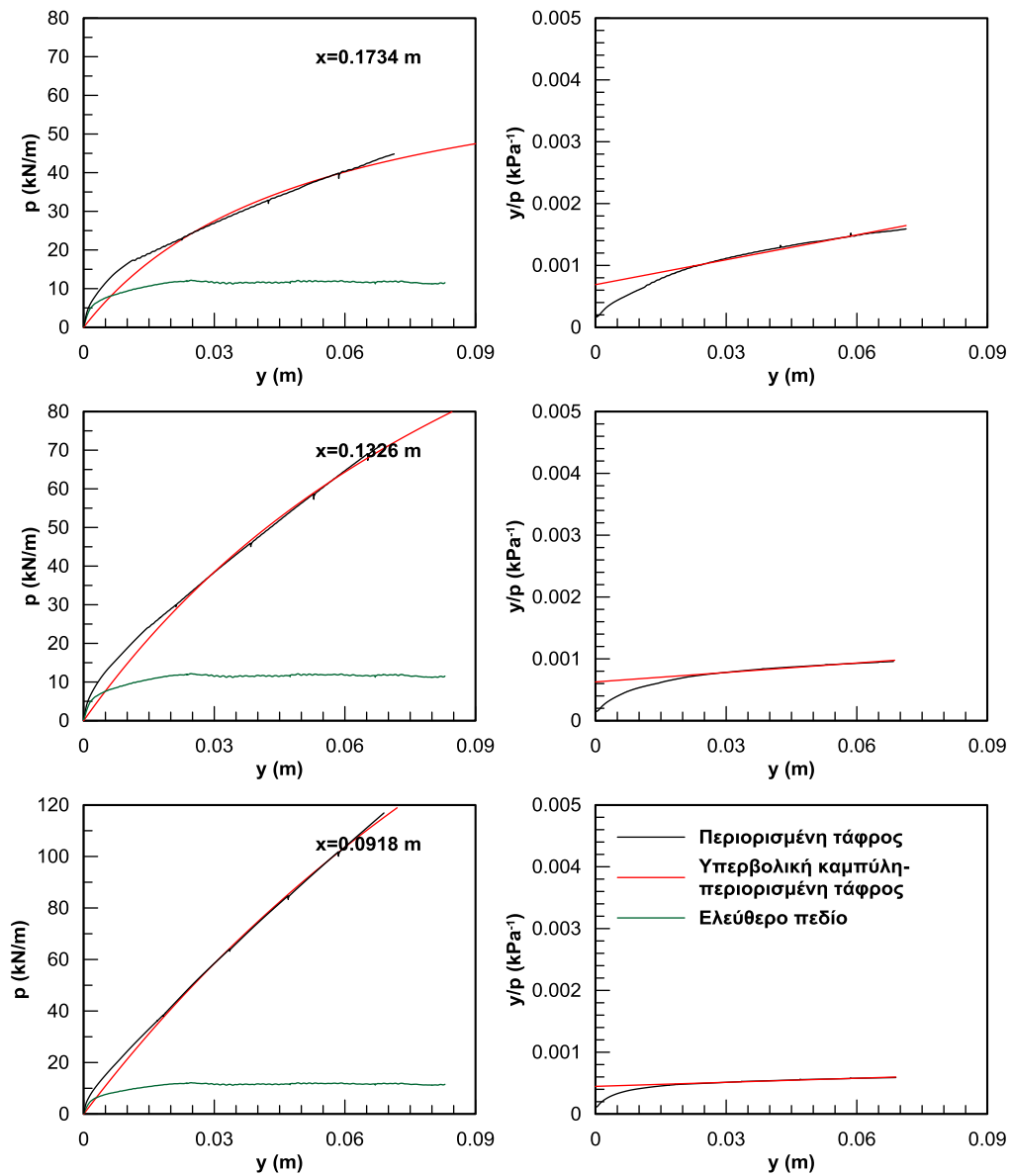
**Σχήμα C.16:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για μέσης πυκνότητας άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=8$ .



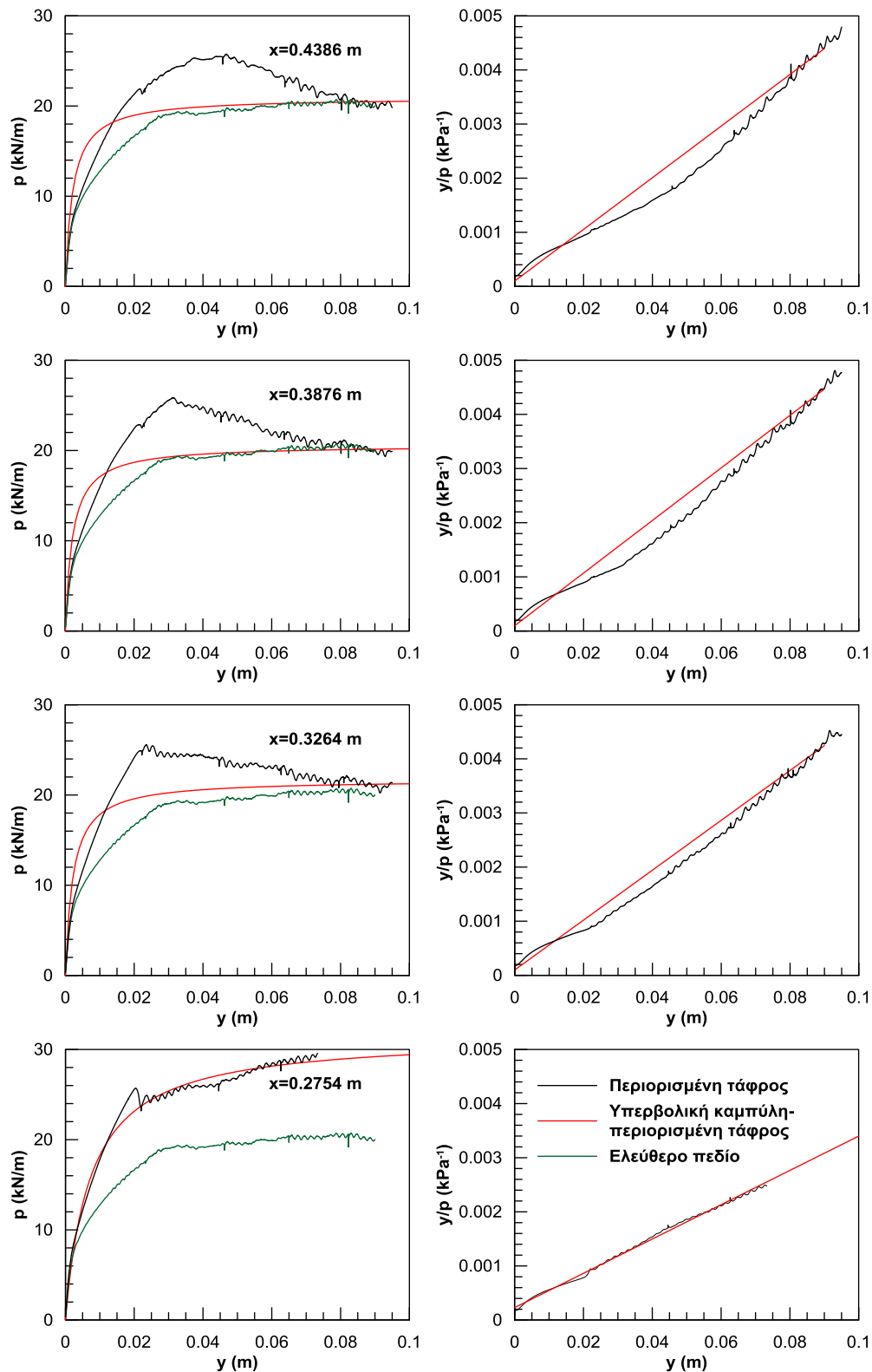
**Σχήμα C.17:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για μέσης πυκνότητας άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=8$ .



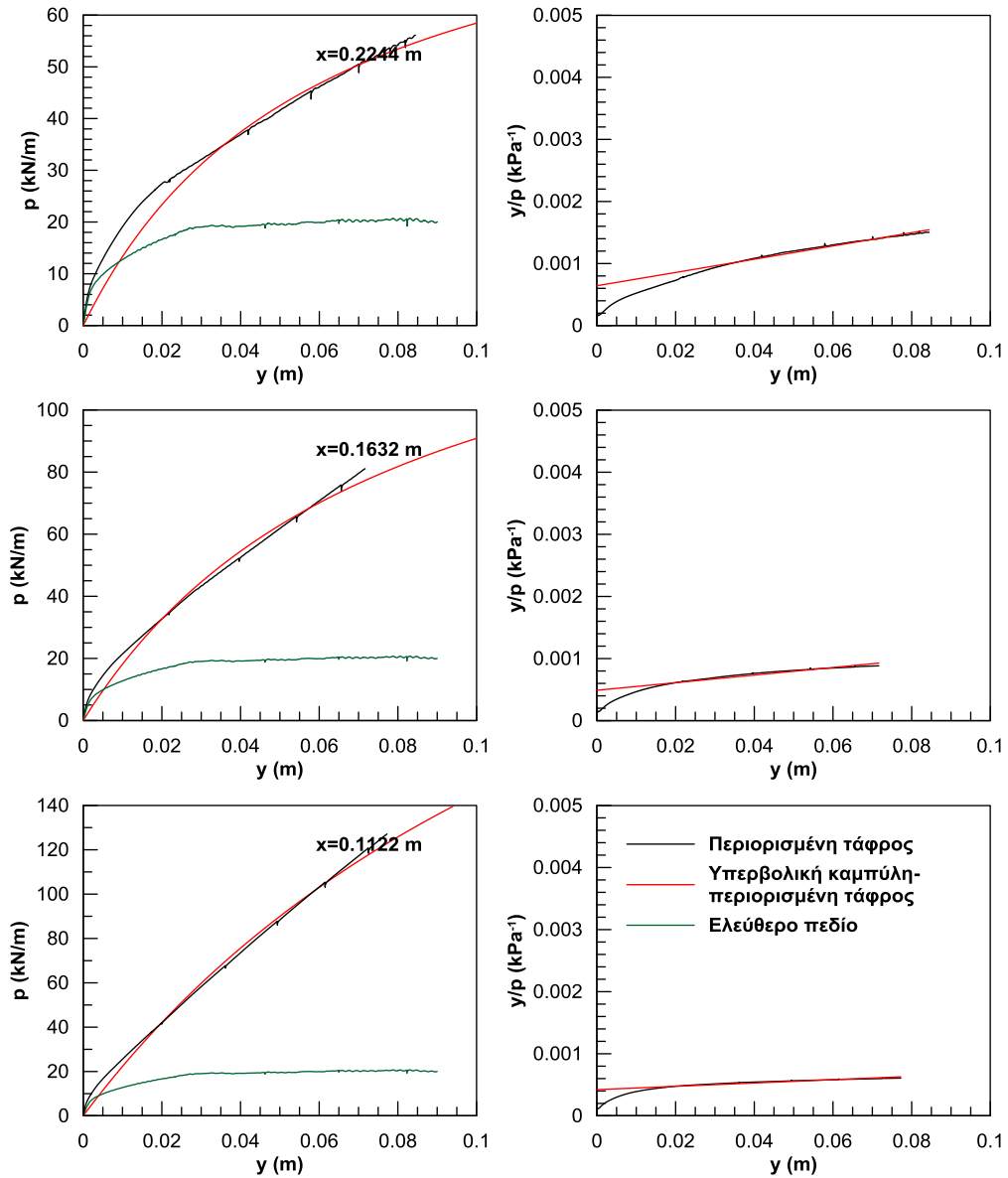
**Σχήμα C.18:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για μέσης πυκνότητας άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=10$ .



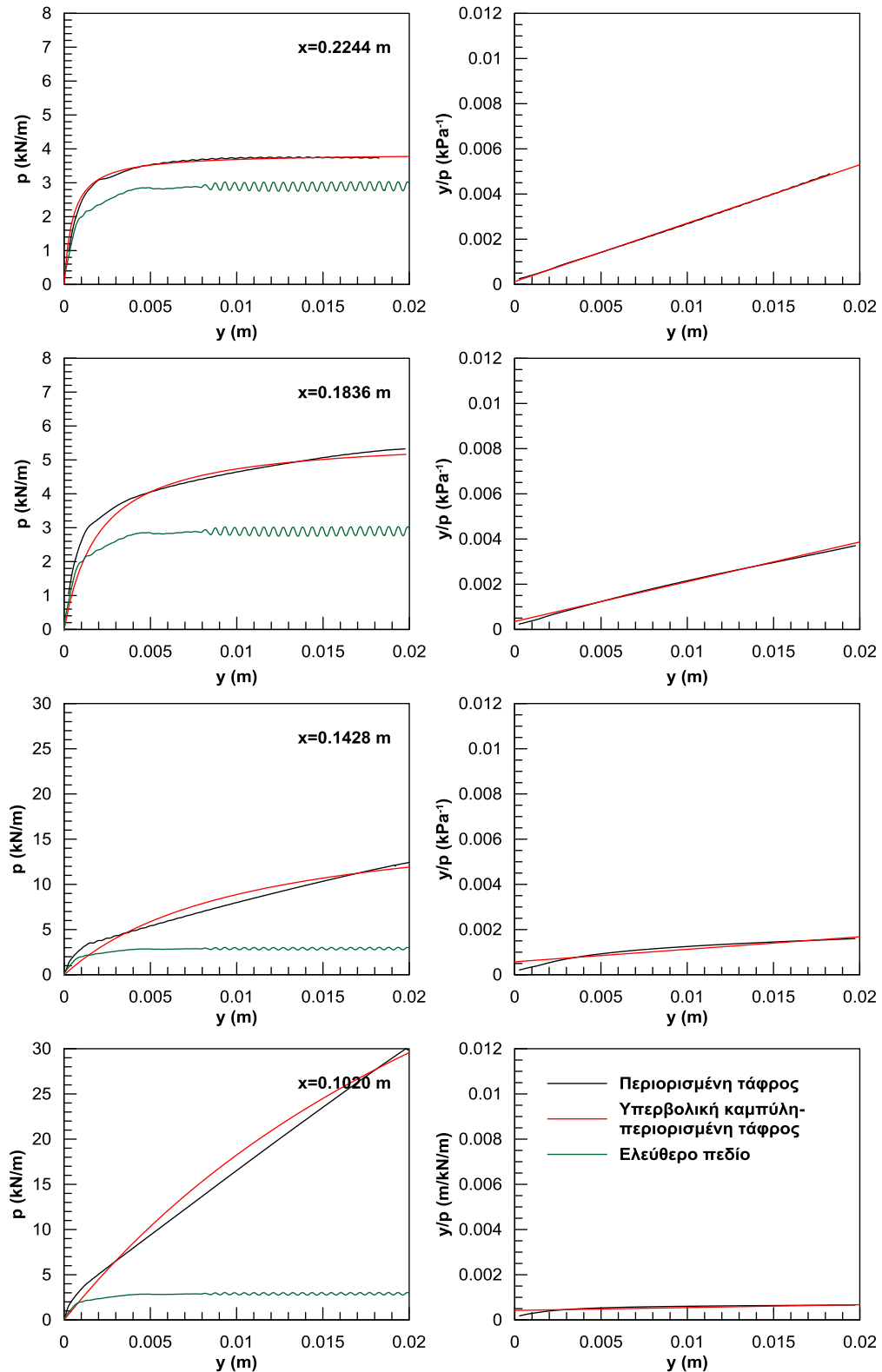
**Σχήμα C.19:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για μέσης πυκνότητας άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=10$ .



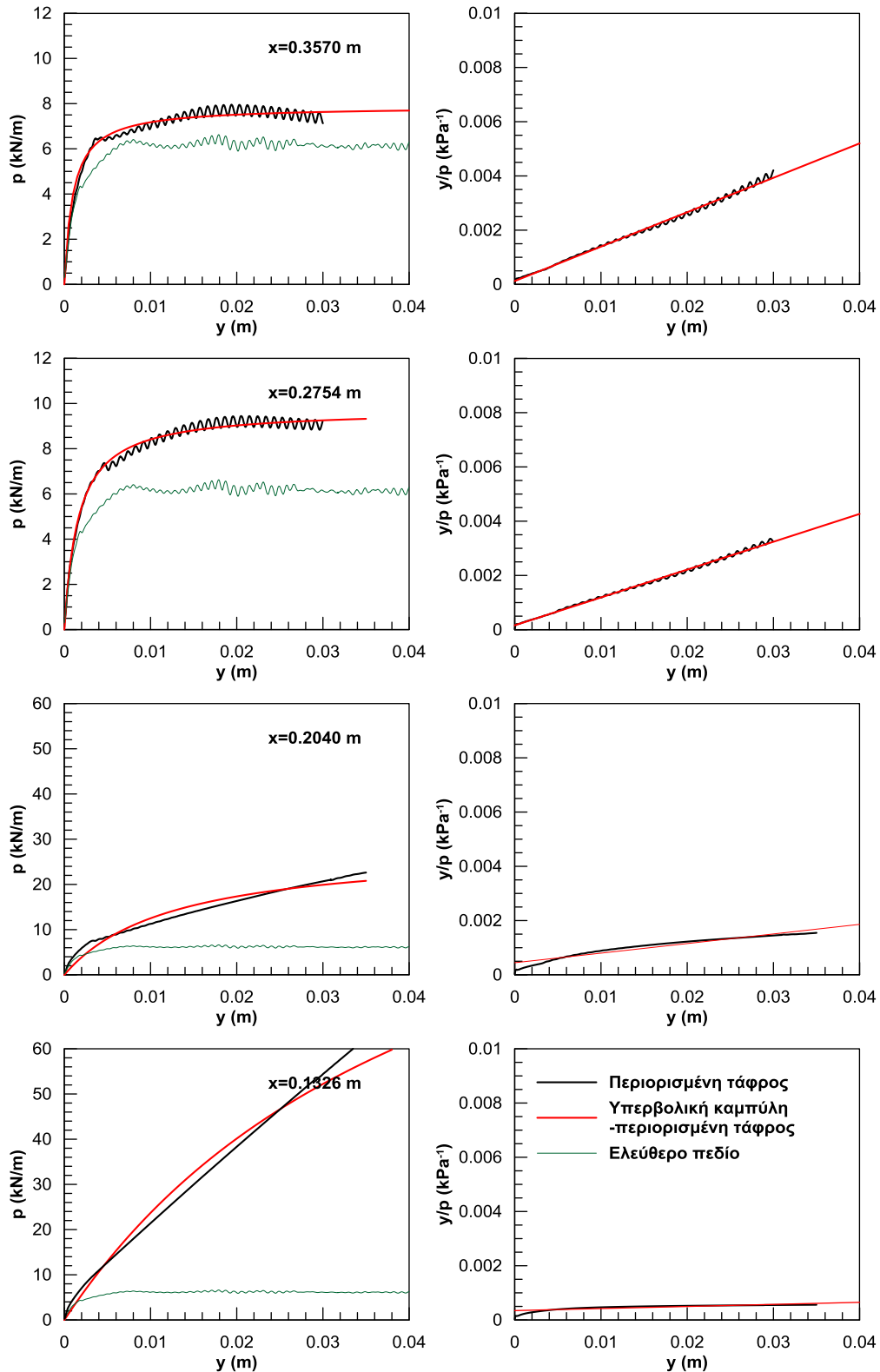
**Σχήμα C.20:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για μέσης πυκνότητας άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=13$ .



**Σχήμα C.21:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για μέσης πυκνότητας άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=13$ .

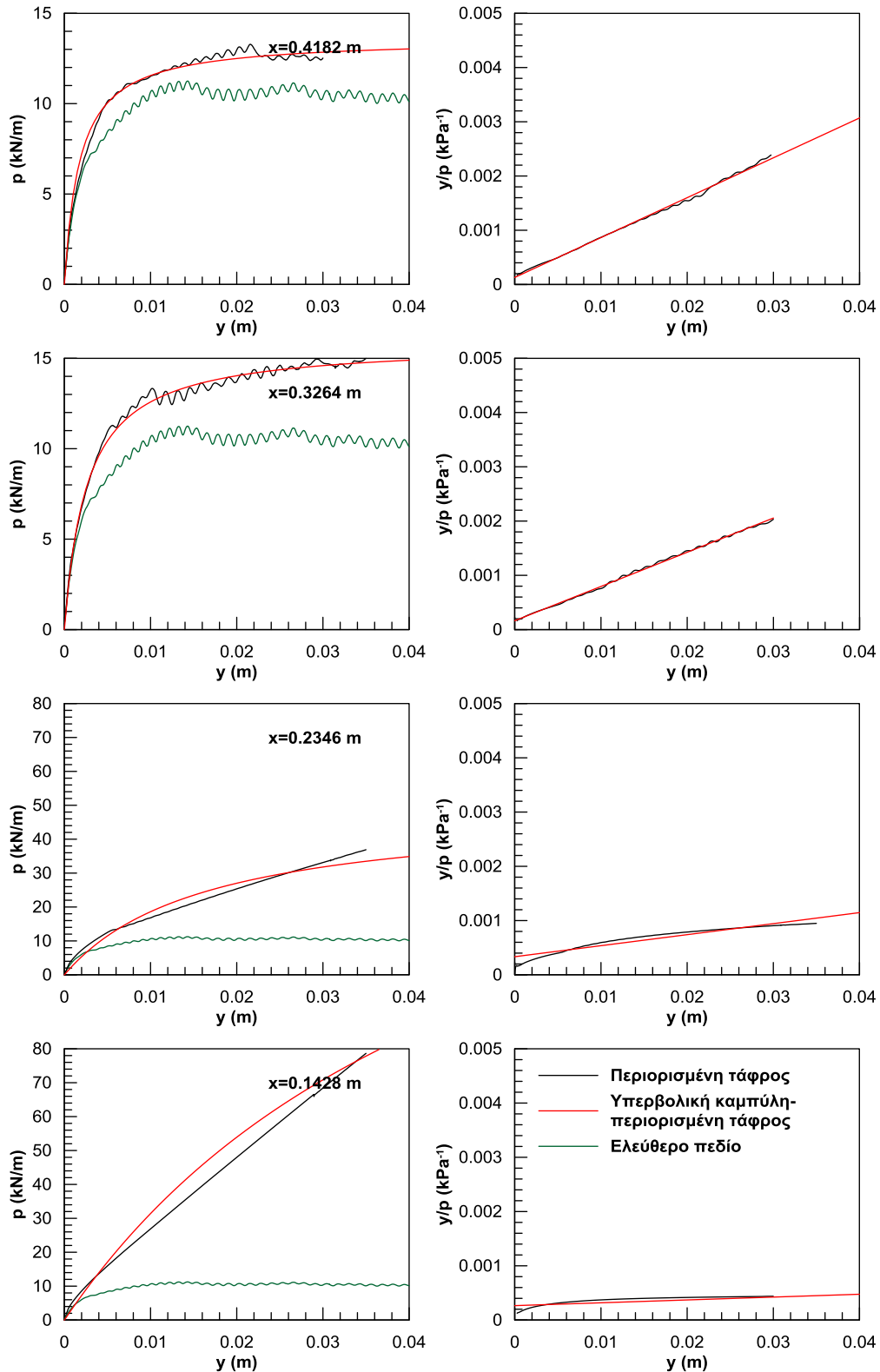


**Σχήμα C.22:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για πυκνή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=4$ .

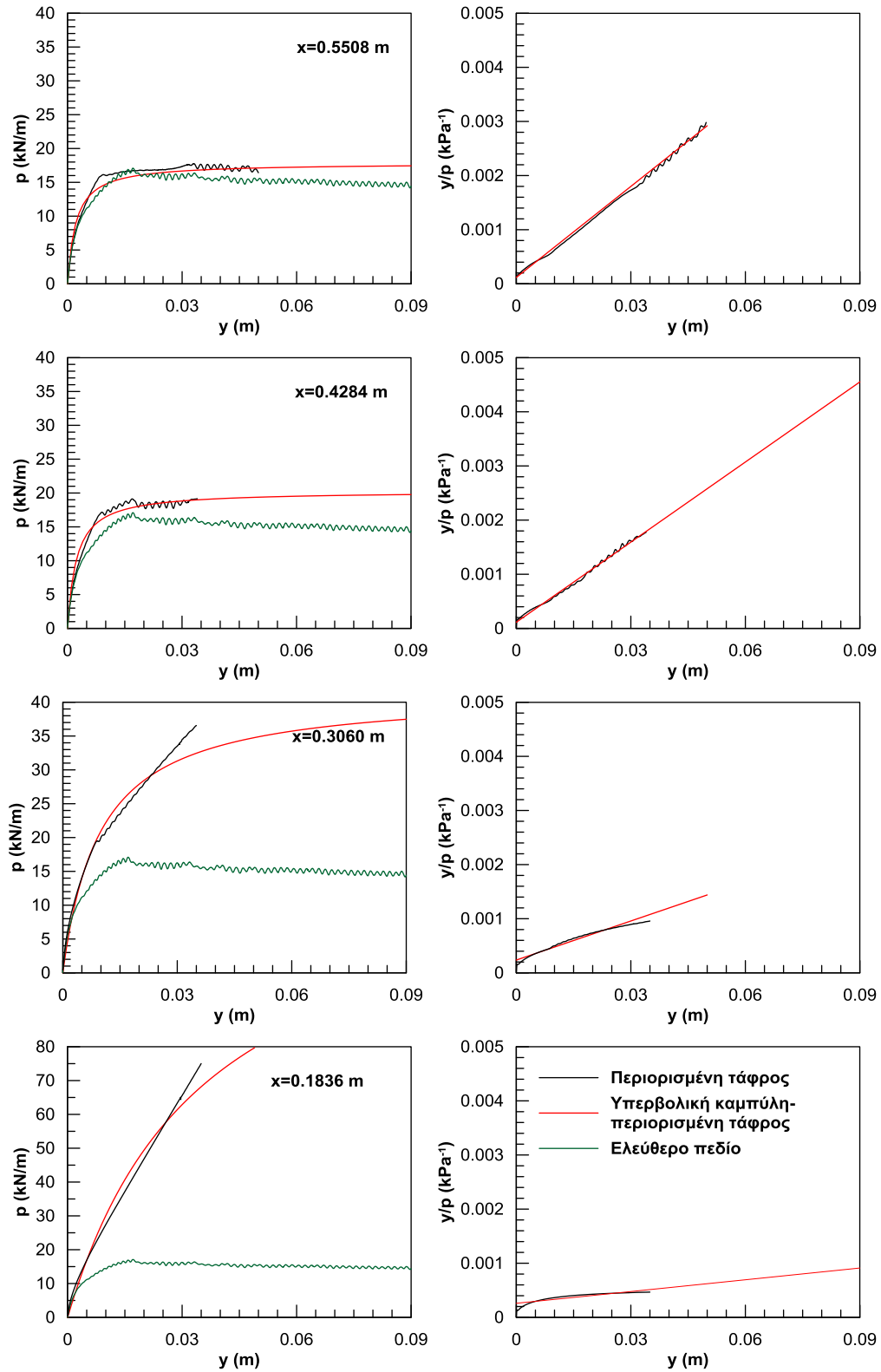


**Σχήμα C.23:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για πυκνή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=6$ .

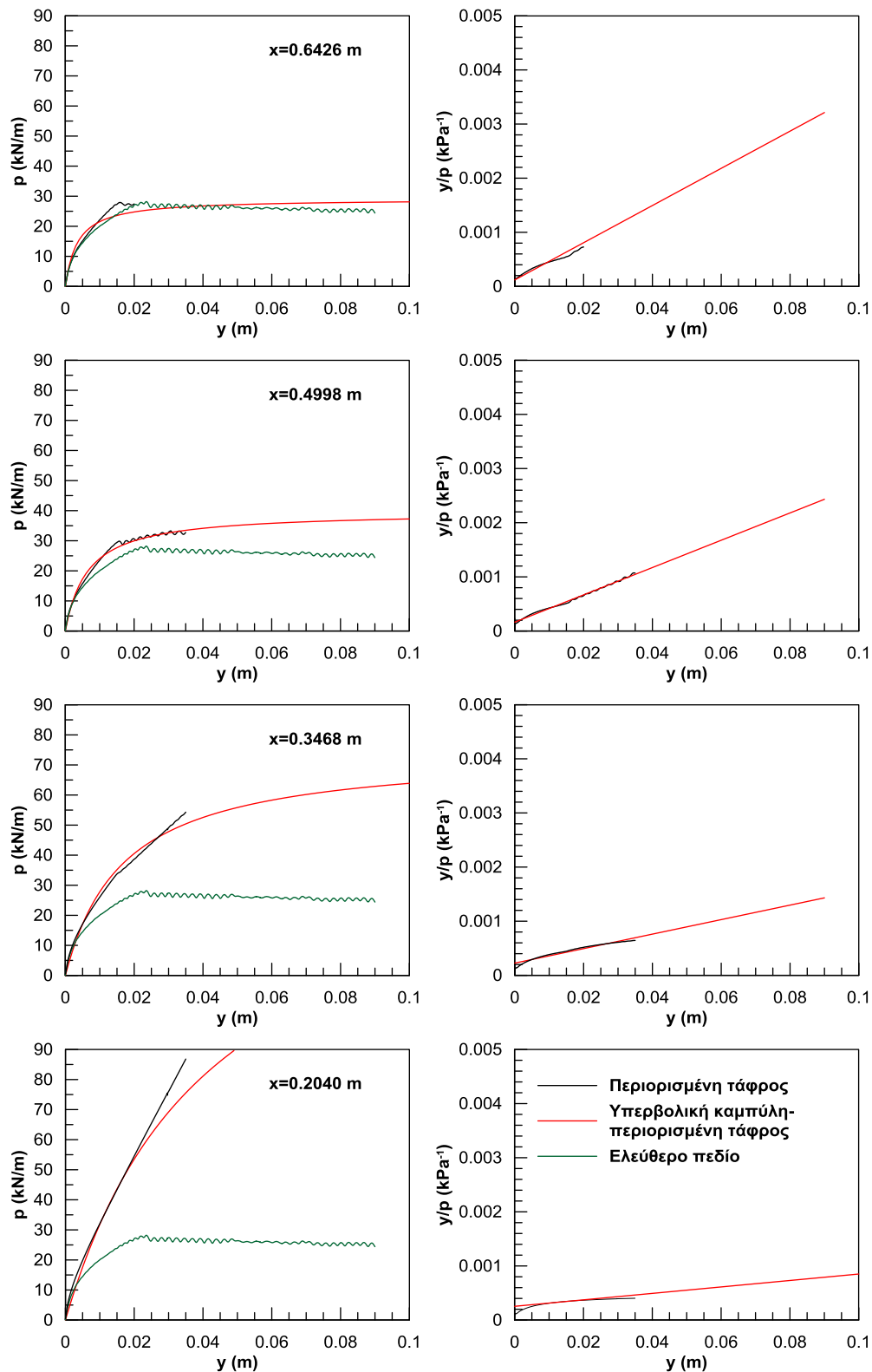




**Σχήμα C.24:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για πυκνή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=8$ .



**Σχήμα C.25:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για πυκνή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=10$ .

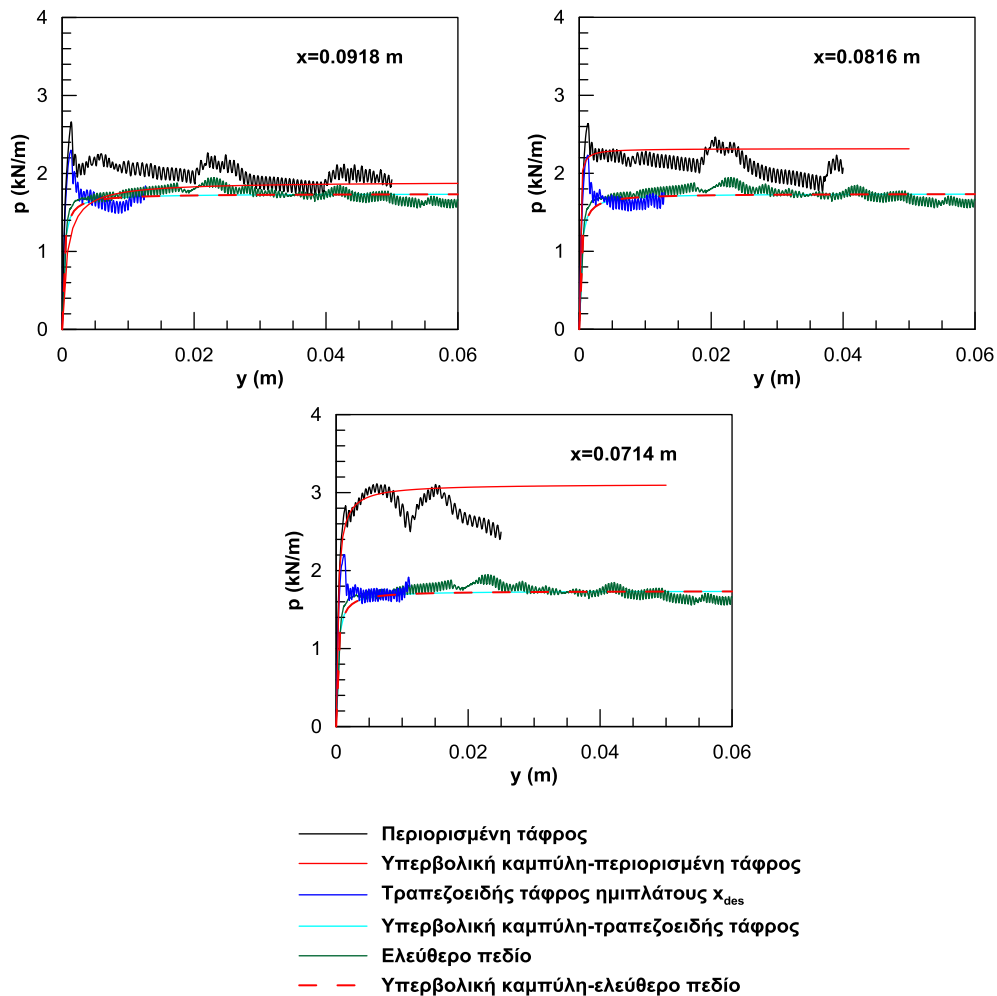


**Σχήμα C.26:** Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για περιορισμένη τάφρο και συνθήκες ελεύθερου πεδίου και υπερβολική καμπύλη για περιορισμένη τάφρο, για πυκνή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=13$ .

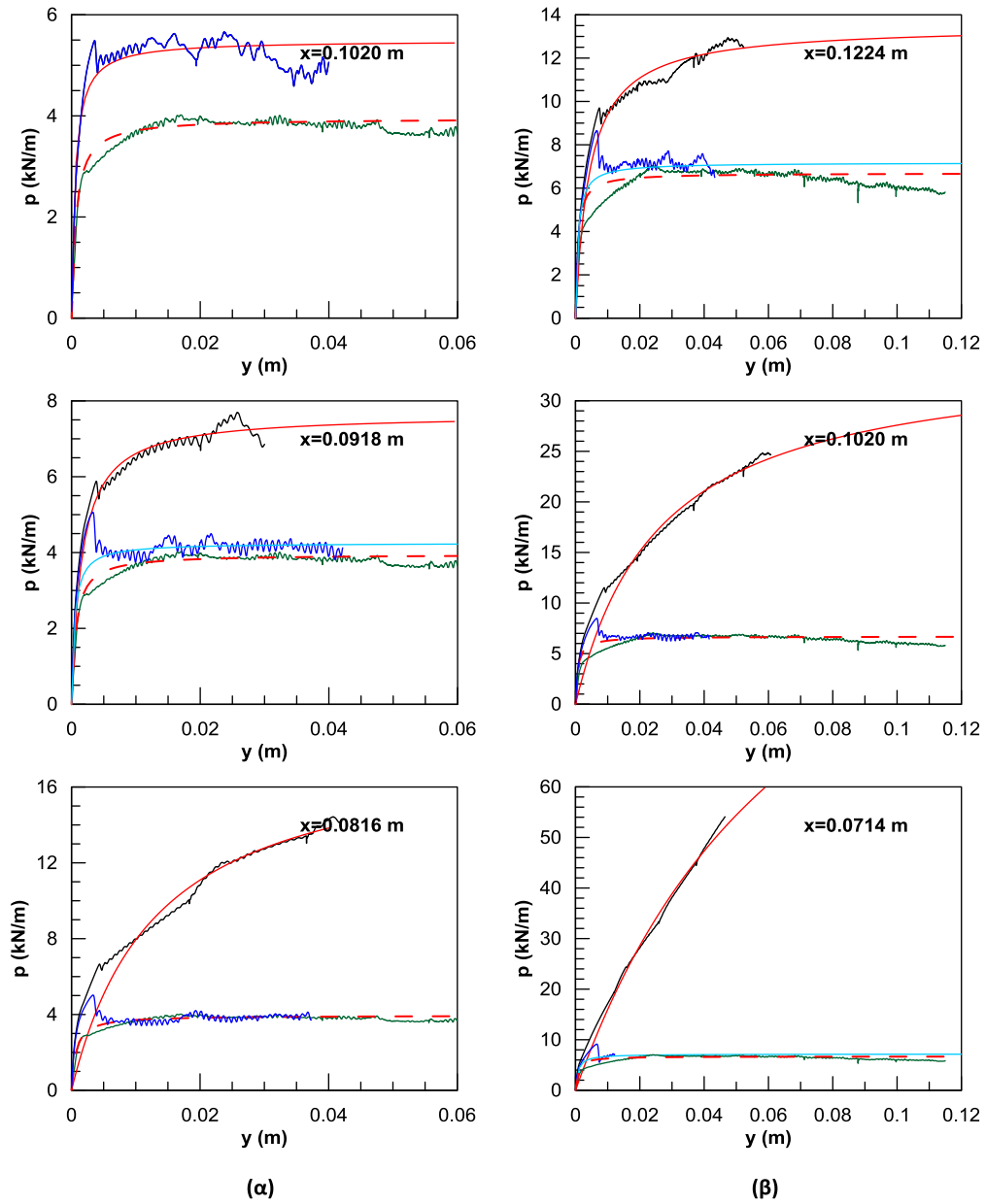


## Παράρτημα Δ

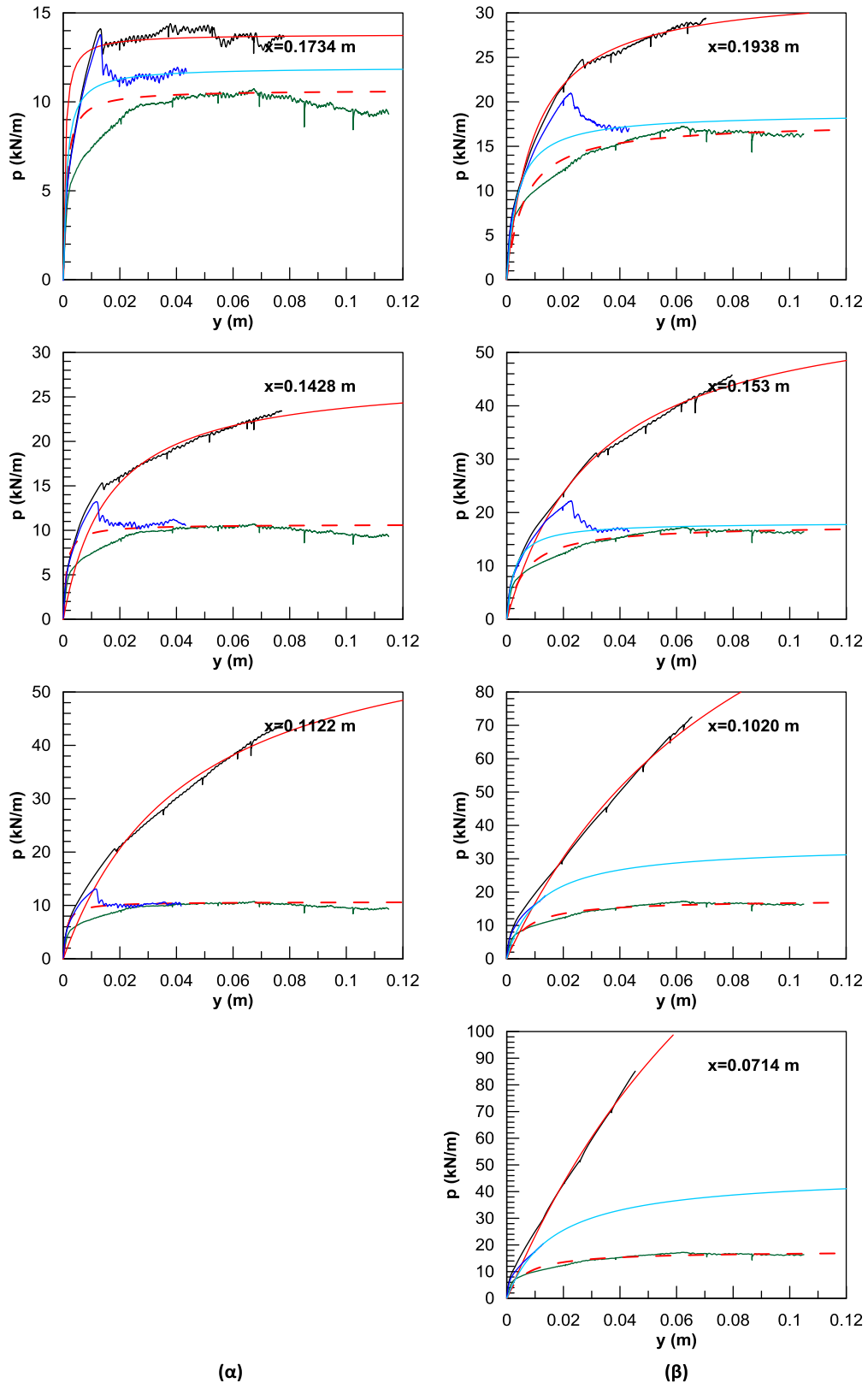
Στο Παράρτημα Δ παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης - και η προσέγγιση αυτών με υπερβολική καμπύλη - που αφορούν την κίνηση του αγωγού σε τραπεζοειδή τάφρο ημιπλάτους  $x_{des}$  και  $x_{cr}$ .



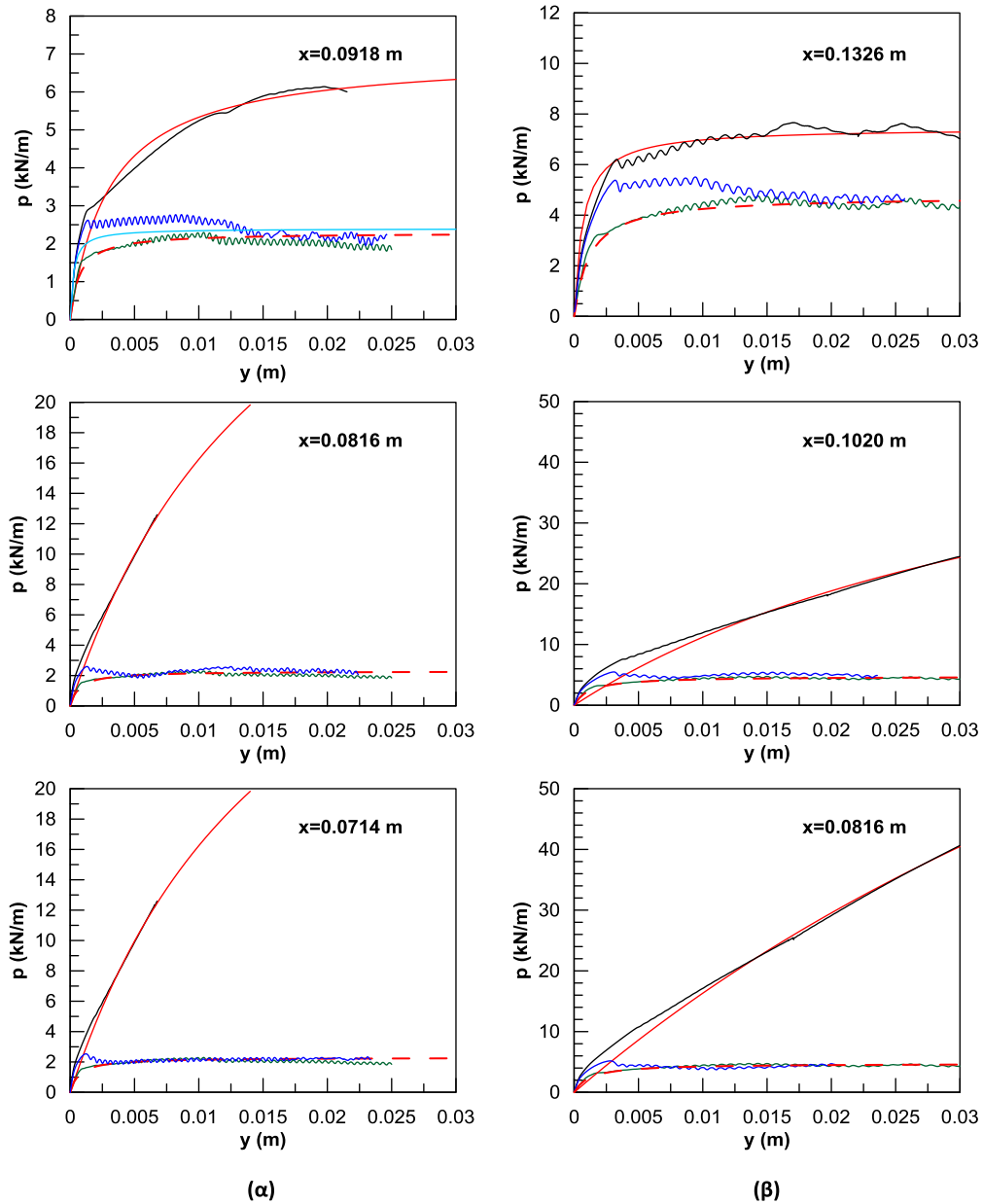
**Σχήμα D.1:** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και υπερβολικές καμπύλες για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου, για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=4$ .



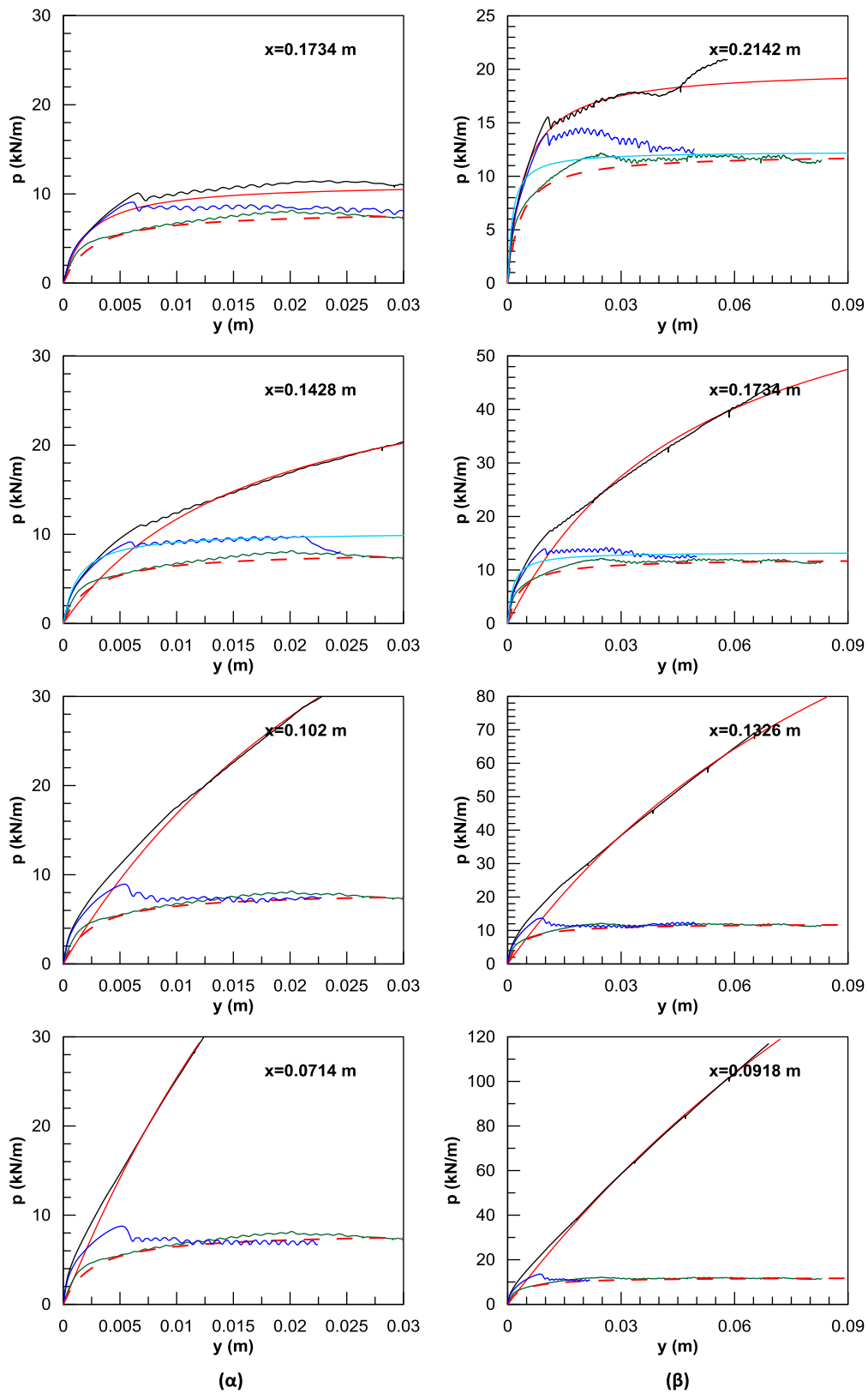
**Σχήμα D.2:** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και υπερβολικές καμπύλες για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου, για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού α)  $H/D=6$  και β)  $H/D=8$ .



**Σχήμα D.3:** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και υπερβολικές καμπύλες για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου, για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού α)  $H/D=10$  και β)  $H/D=13$ .

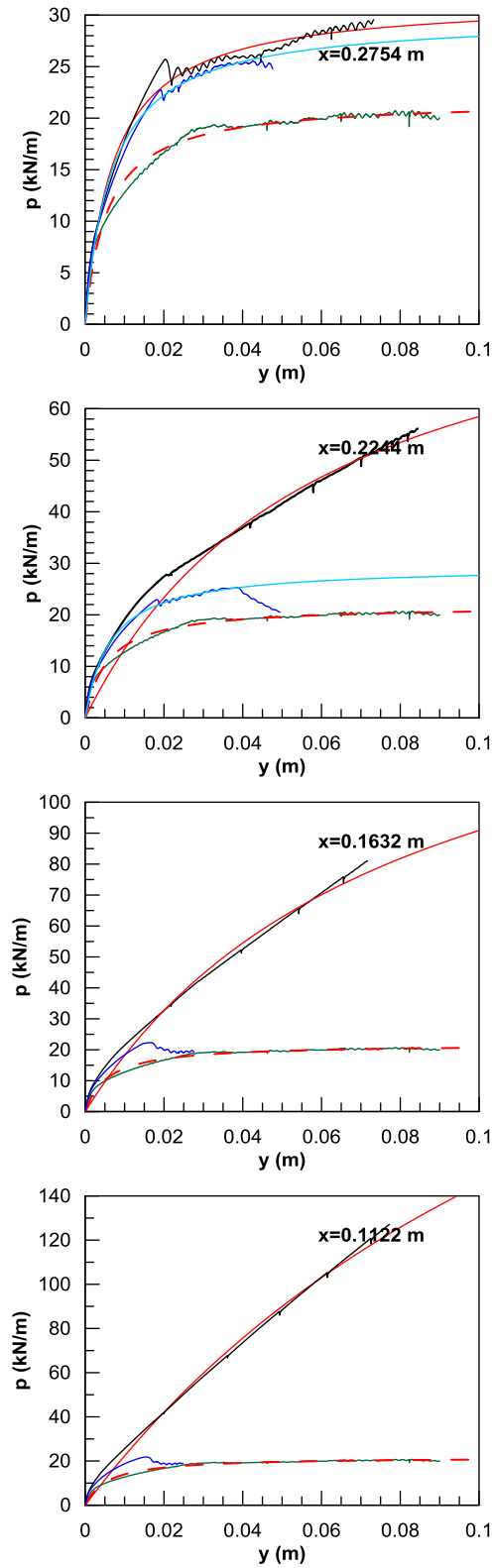


**Σχήμα D.4:** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και υπερβολικές καμπύλες για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου, για μέσης πυκνότητας άμμο και βάθος εγκιβωτισμού α)  $H/D=4$  και β)  $H/D=6$ .

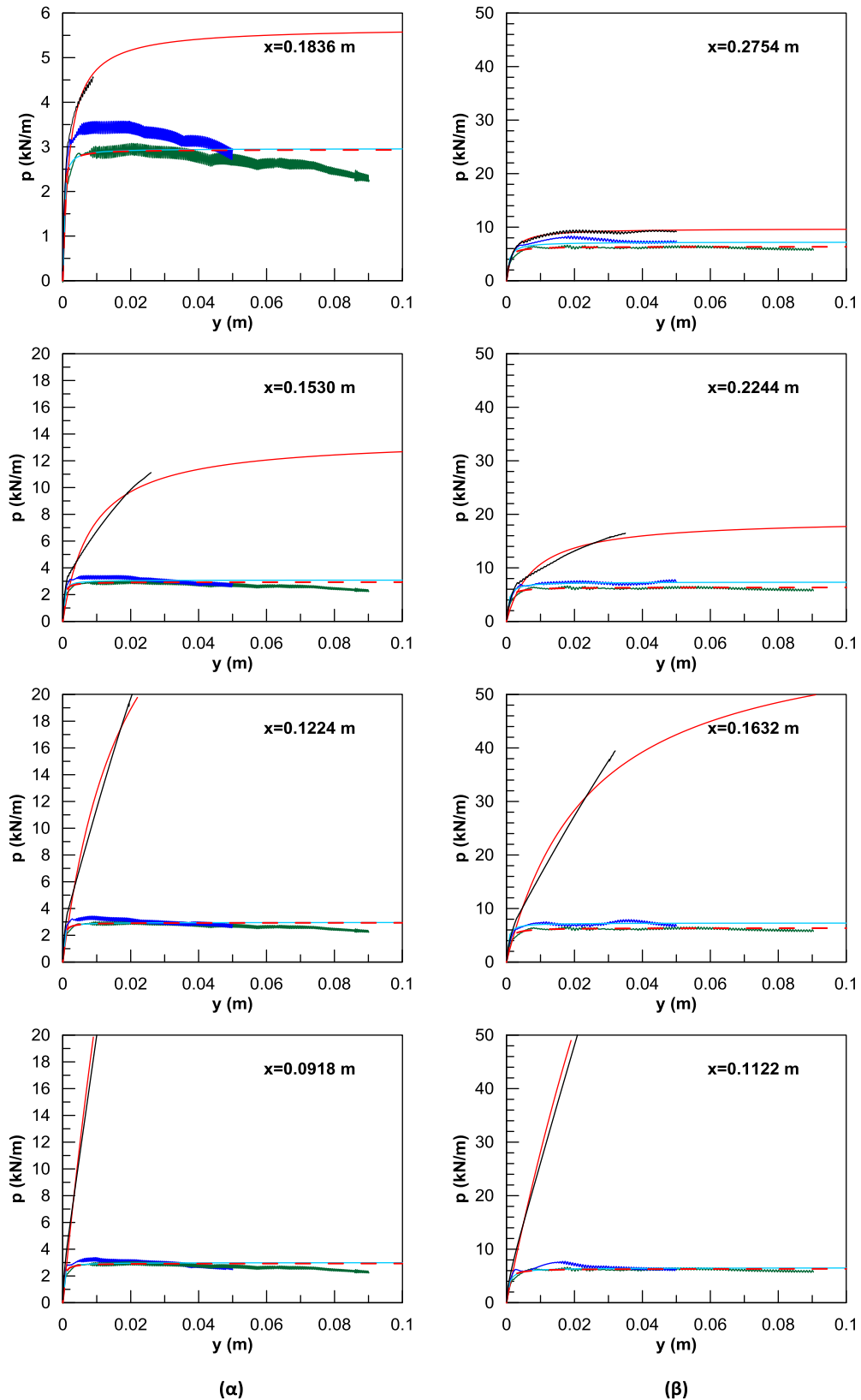


**Σχήμα D.5:** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και υπερβολικές καμπύλες για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου, για μέσης πυκνότητας άμμο και βάθος εγκιβωτισμού α)  $H/D=8$  και β)  $H/D=10$ .

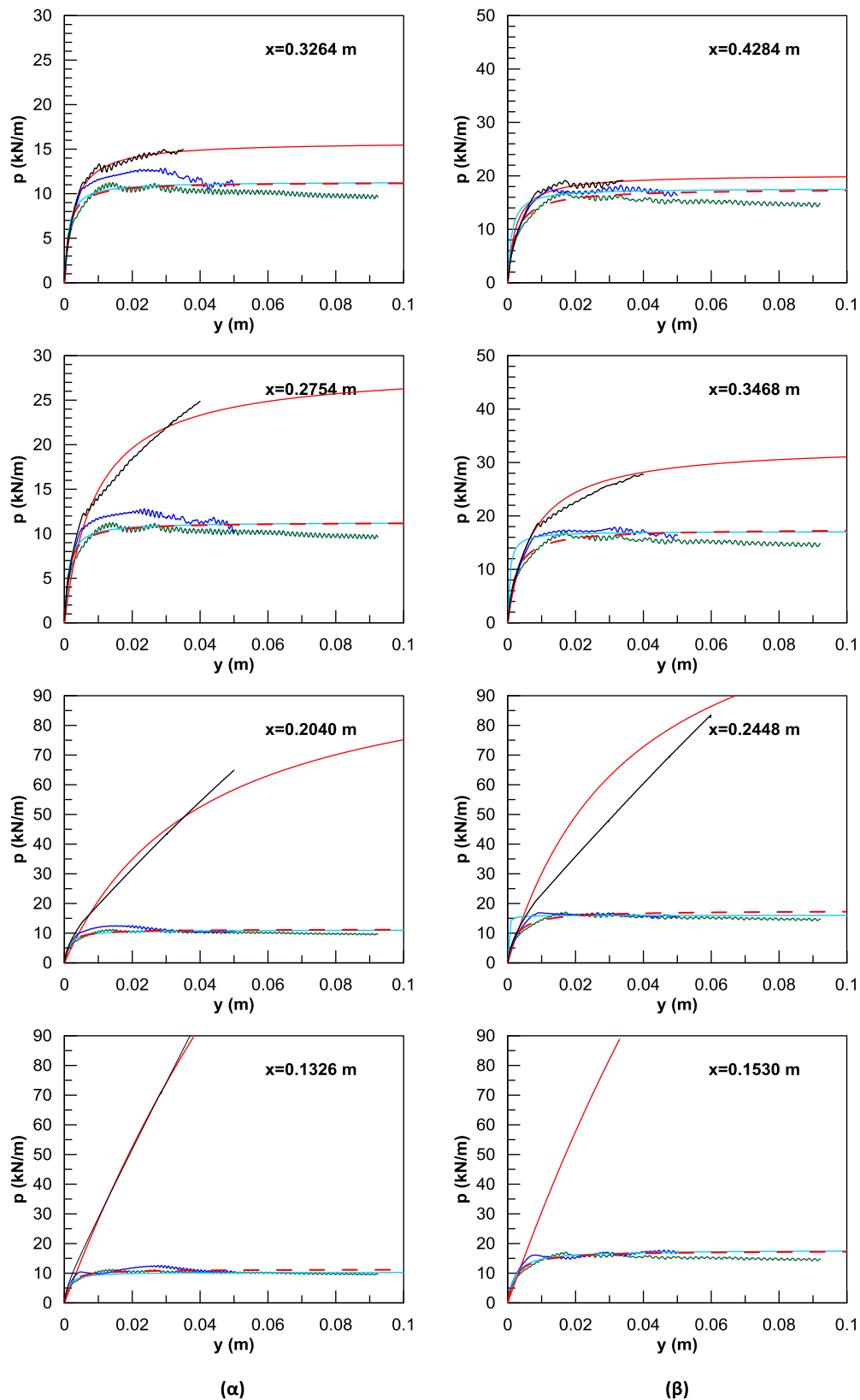




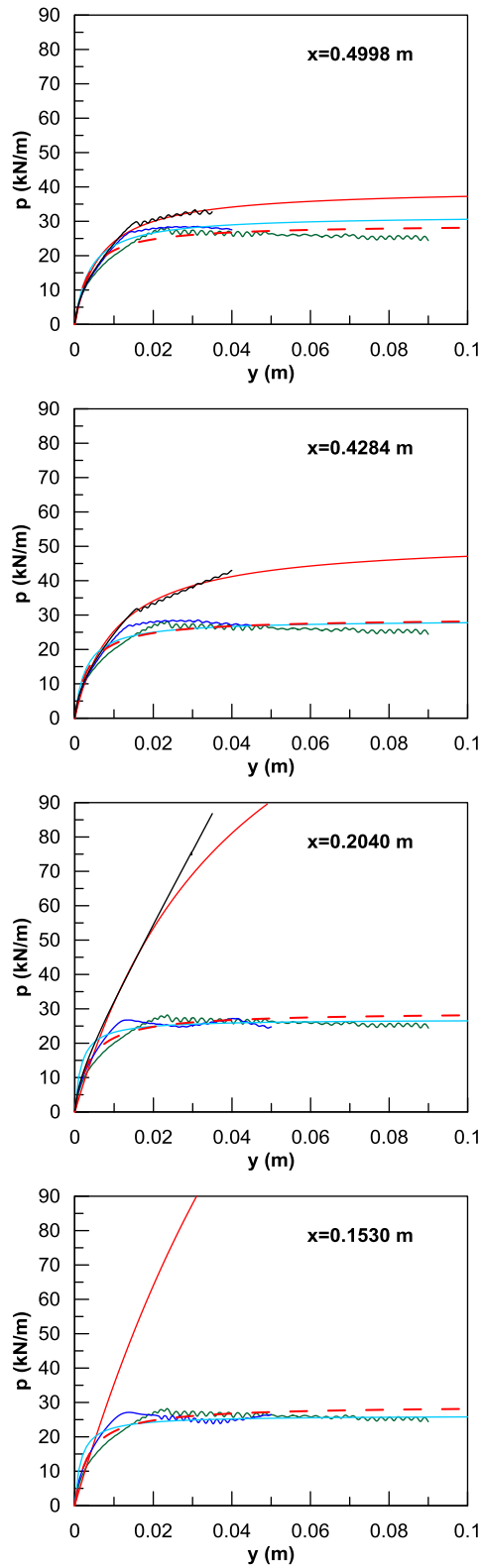
**Σχήμα D.6:** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και υπερβολικές καμπύλες για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου, για μέσης πυκνότητας άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=13$ .



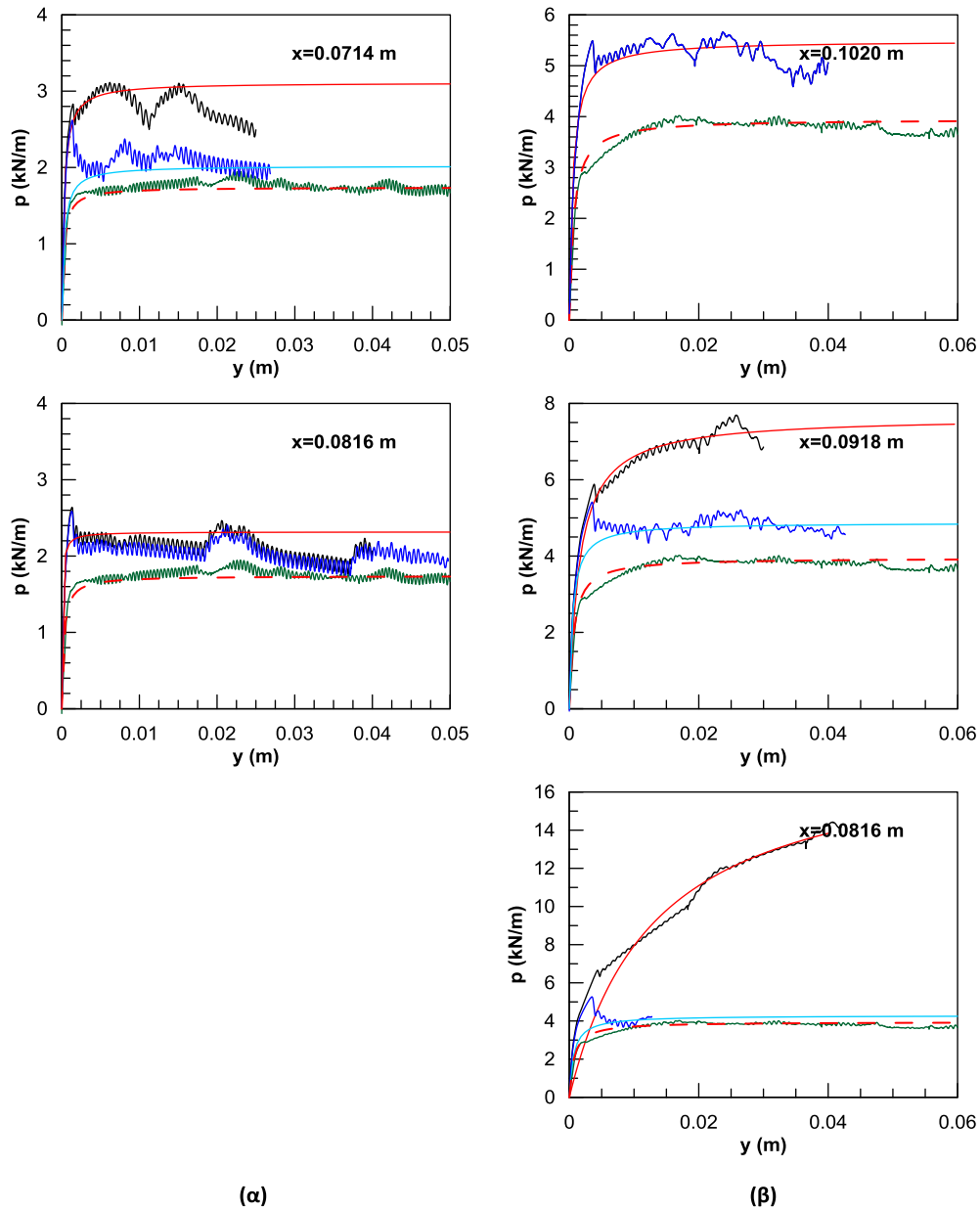
**Σχήμα D.7:** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και υπερβολικές καμπύλες για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου, για πυκνή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού α)  $H/D=4$  και β)  $H/D=6$ .



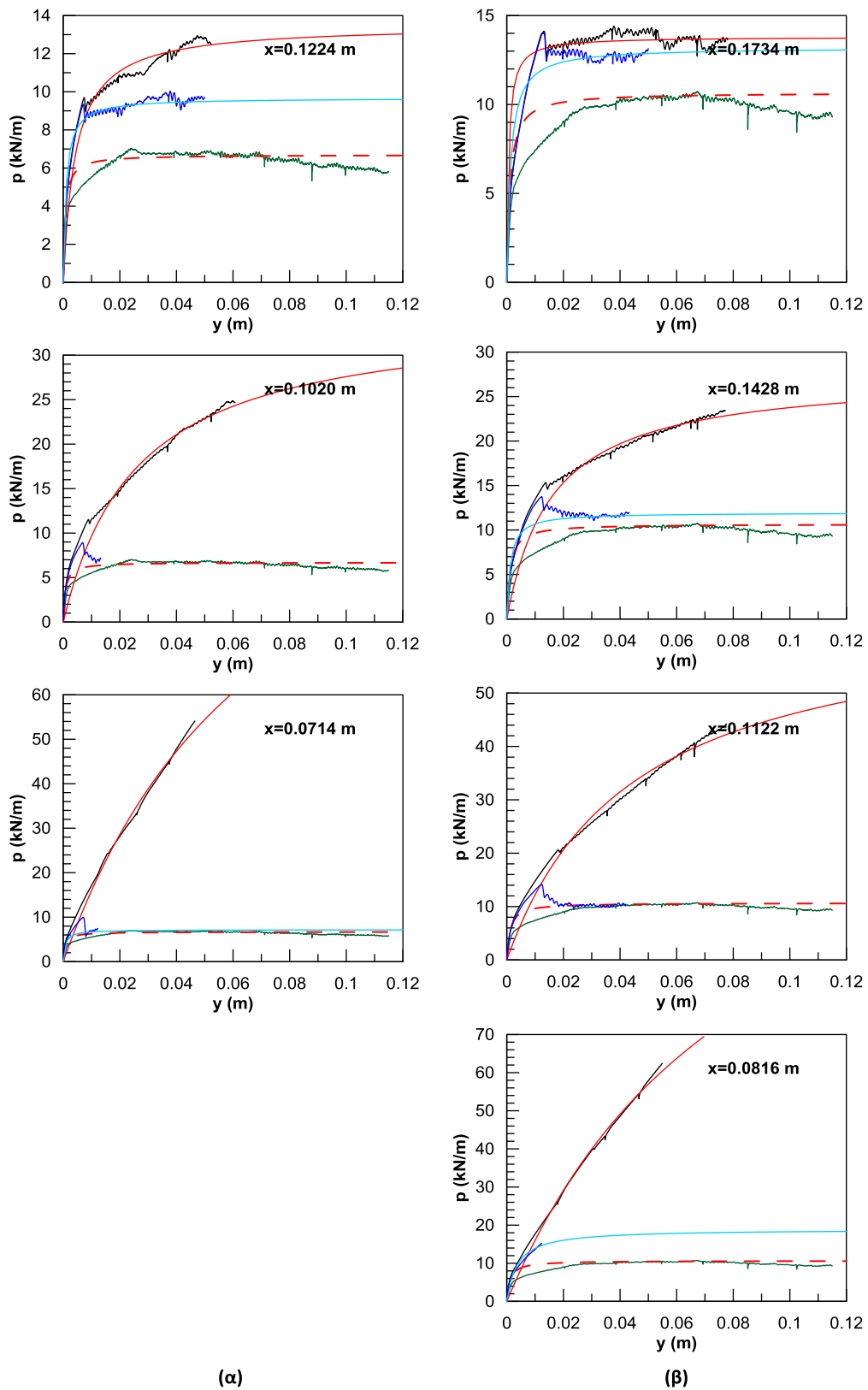
**Σχήμα D.8:** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και υπερβολικές καμπύλες για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου, για πυκνή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού α)  $H/D=8$  και β)  $H/D=10$ .



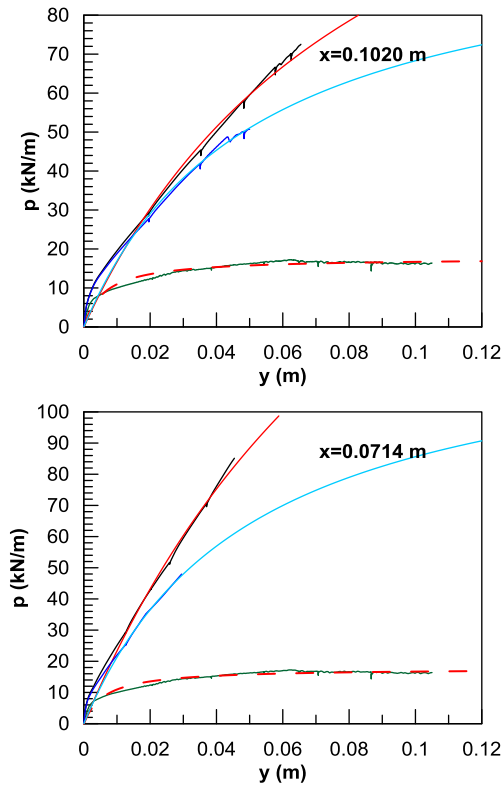
**Σχήμα D.9:** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και υπερβολικές καμπύλες για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου, για πυκνή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=13$ .



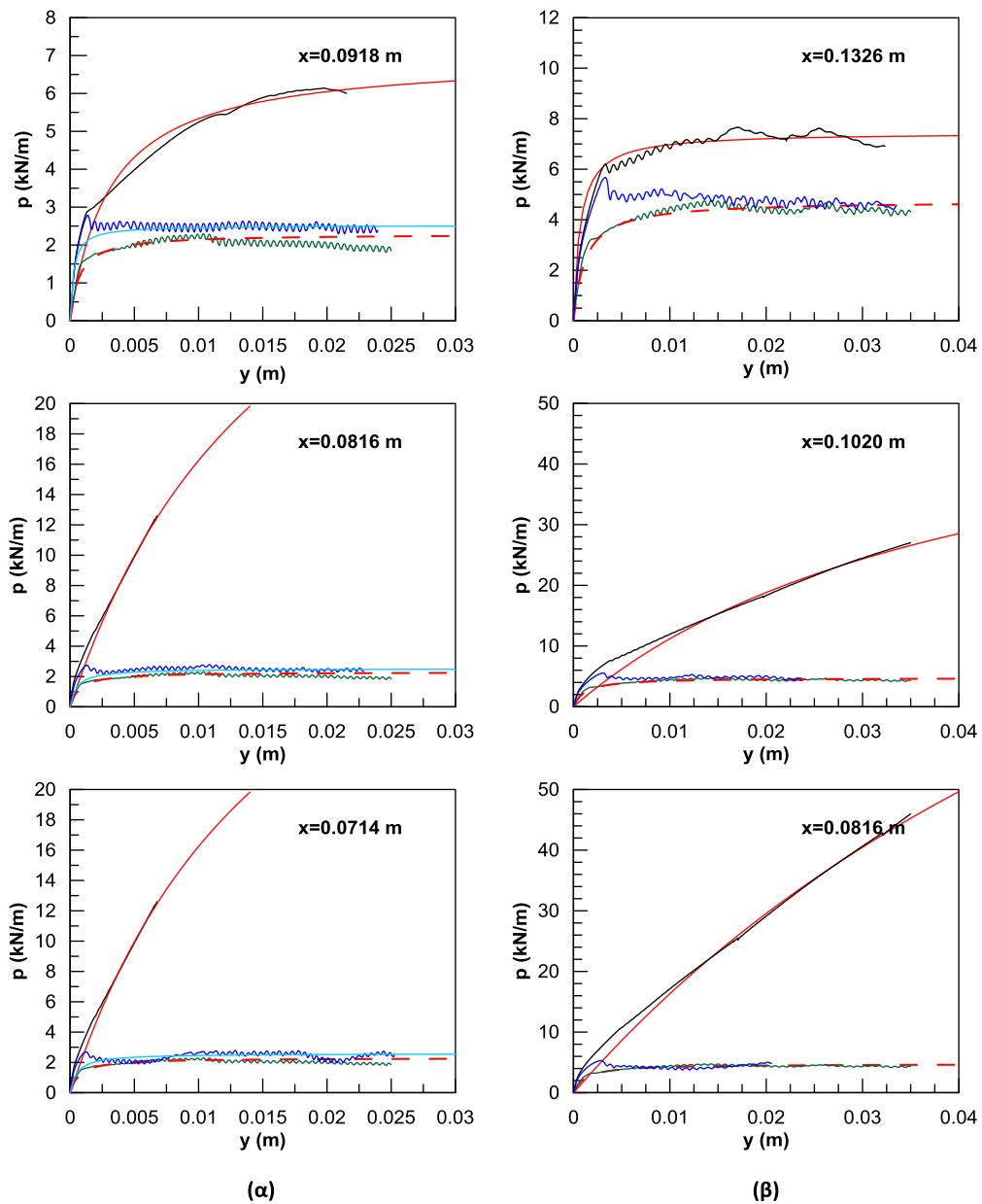
**Σχήμα D.10:** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και υπερβολικές καμπύλες για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου, για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού α)  $H/D=4$  και β)  $H/D=6$ .



**Σχήμα D.11:** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και υπερβολικές καμπύλες για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου, για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού α)  $H/D=8$  και β)  $H/D=10$ .

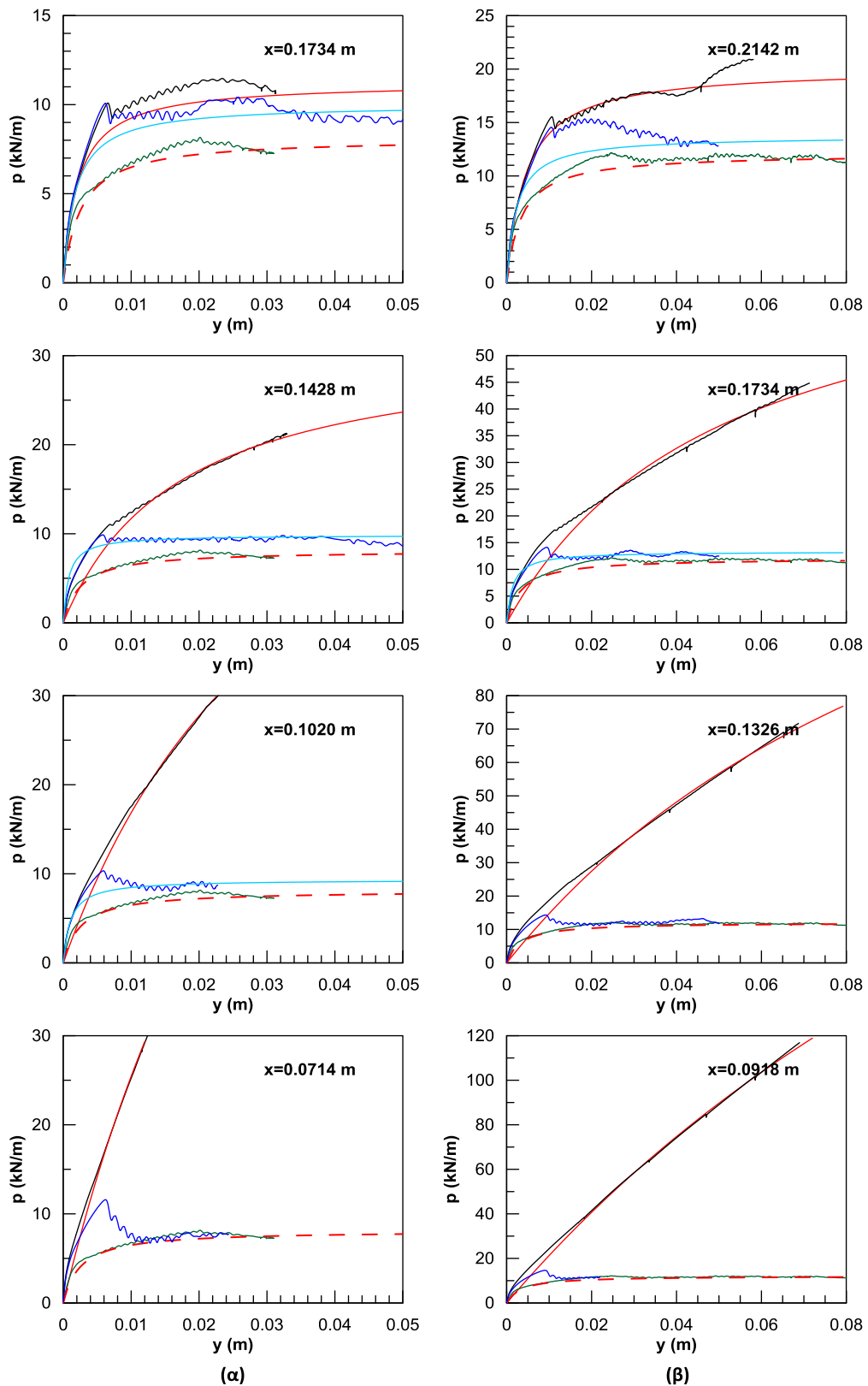


**Σχήμα D.12:** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και υπερβολικές καμπύλες για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου, για χαλαρή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=13$ .

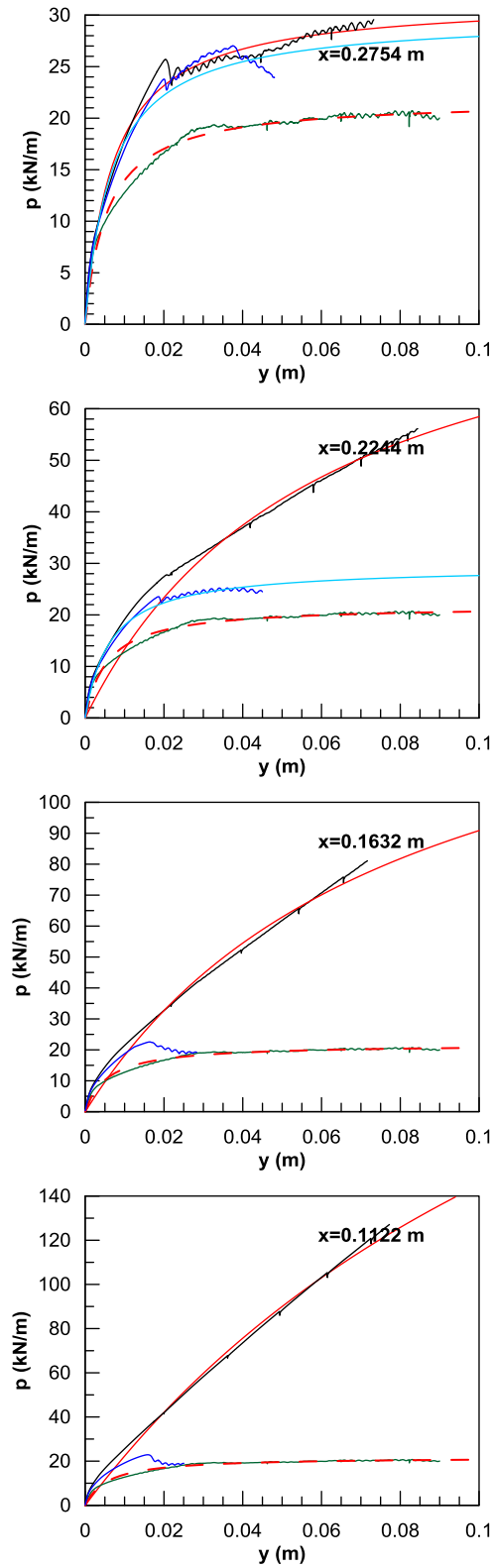


**Σχήμα D.13:** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και υπερβολικές καμπύλες για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου, για μέσης πυκνότητας άμμο και βάθος εγκιβωτισμού α)  $H/D=4$  και β)  $H/D=6$ .

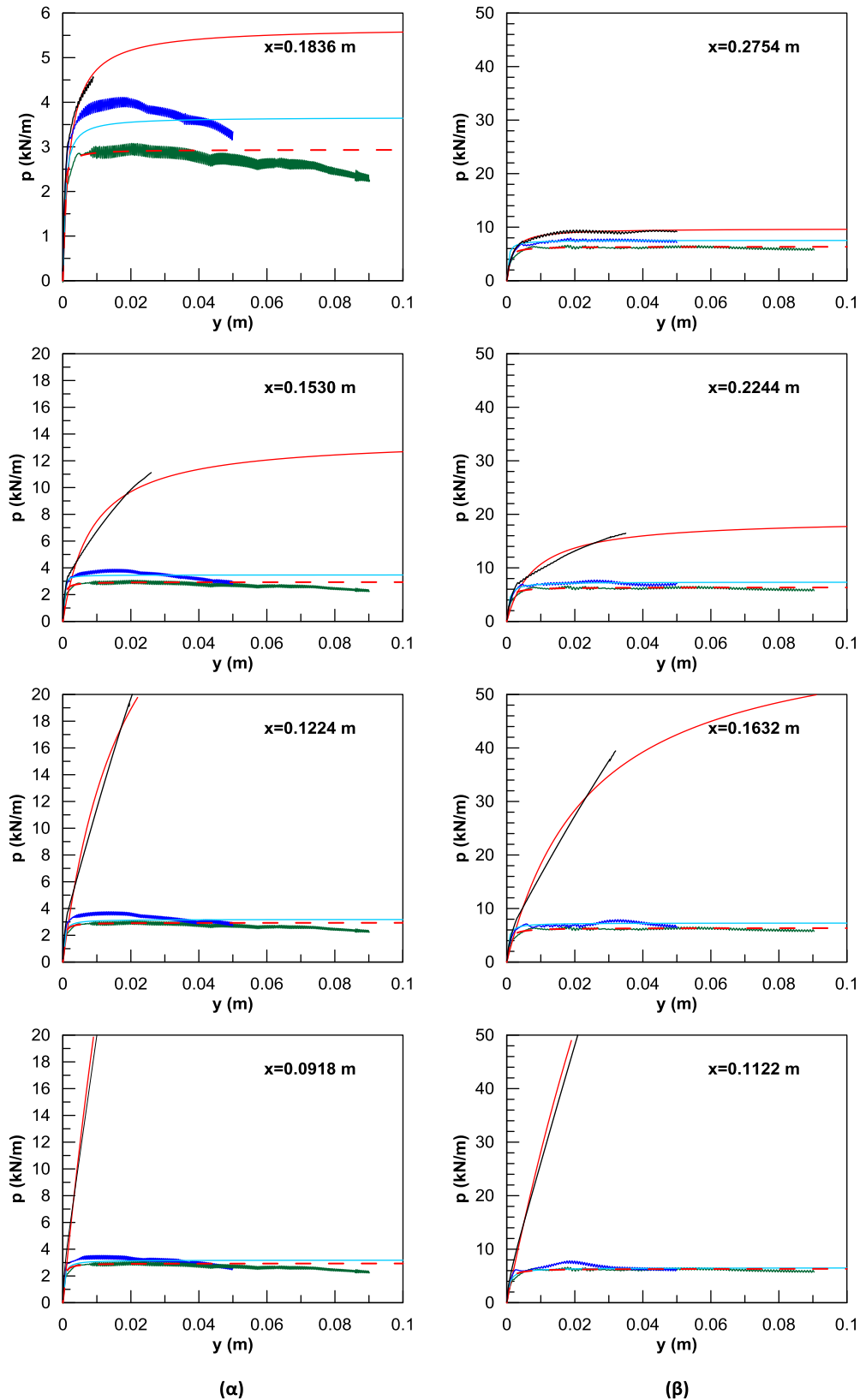




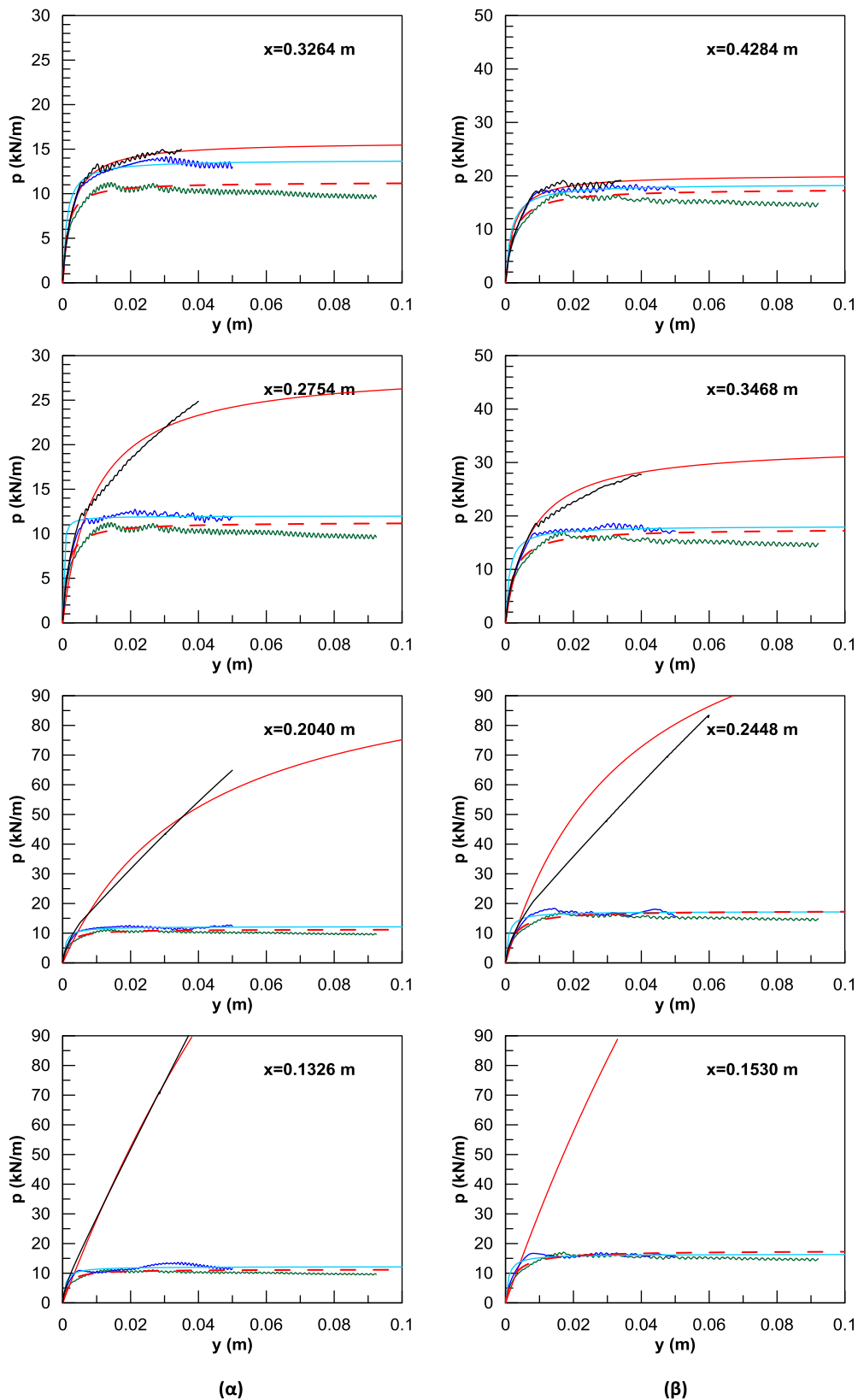
**Σχήμα D.14:** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και υπερβολικές καμπύλες για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου, για μέσης πυκνότητας άμμο και βάθος εγκιβωτισμού α)  $H/D=8$  και β)  $H/D=10$ .



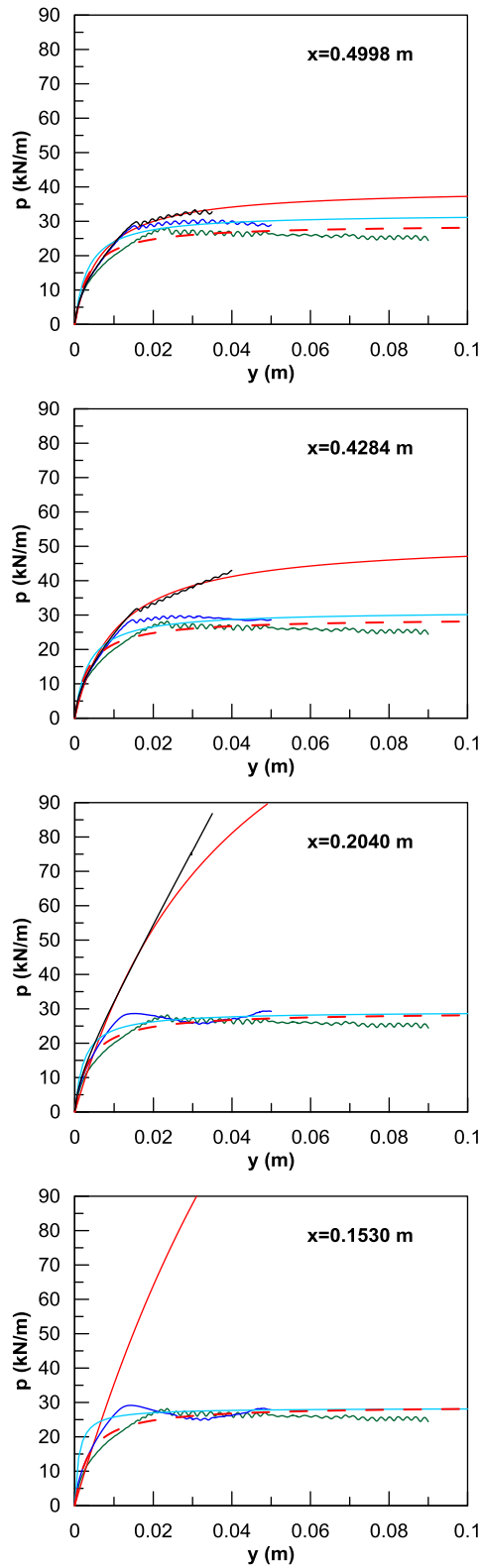
**Σχήμα D.15:** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και υπερβολικές καμπύλες για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου, για μέσης πυκνότητας άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=13$ .



**Σχήμα D.16:** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και υπερβολικές καμπύλες για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου, για πυκνή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού α)  $H/D=4$  και β)  $H/D=6$ .



**Σχήμα D.17:** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και υπερβολικές καμπύλες για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου, για πυκνή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού α)  $H/D=8$  και β)  $H/D=10$ .



**Σχήμα D.18:** Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και υπερβολικές καμπύλες για όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις τάφρου, για πυκνή άμμο και βάθος εγκιβωτισμού  $H/D=13$ .