



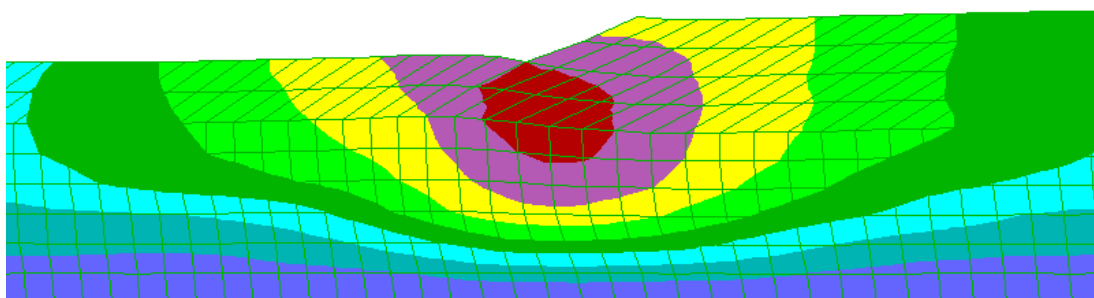
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΕΞΑΠΛΩΣΗΣ  
ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΠΡΟΣ ΑΝΑΒΑΘΜΟ

**Πολύδωρος Νικολάου**

**Επιβλέπων: Αχιλλέας Γ. Παπαδημητρίου**  
**Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π**



**DIPLOMA THESIS**

NUMERICAL INVESTIGATION OF LATERAL SPREADING OF A  
HORIZONTAL SOIL LAYER TOWARDS A FREE-FACE

**Polydoros Nikolaou**

**Supervisor: Achilleas G. Papadimitriou**  
**Associate Professor NTUA**

Οκτώβριος 2023 / October 2023

## Ευχαριστίες

---

Επ' ευκαιρίας της παράδοσης της παρούσας εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου και με βοήθησαν στην ολοκλήρωση του πρώτου κύκλου σπουδών μου στην Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ κ. Αχιλλέα Παπαδημητρίου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την εκπόνηση της εργασίας και φυσικά για όλη την καθοδήγηση και στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης. Επίσης θα ήταν παράλειψη μου να μην ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ και ιδιαίτερα τους καθηγητές του Τομέα Γεωτεχνικής, όπου με τις γνώσεις τους και την μεθοδικότητα τους με προετοίμασαν δεόντως για την κάθε πρόκληση που μπορεί να αντιμετωπίσω ως Πολιτικός Μηχανικός.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και τα αδέρφια μου που ήταν δίπλα μου και με στήριζαν όλα αυτά τα χρόνια, και φυσικά θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου που μέσα από τις δυσκολίες που αντιμετωπίζουν κατάφεραν να σπουδάσουν εμένα και τα τρία μου αδέρφια.

## Περίληψη

Ένα από τα φαινόμενα που καλείται να αντιμετωπίσει ο Πολιτικός Μηχανικός κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή έργων σε χαλαρά κορεσμένα χονδρόκοκκα εδάφη, είναι η πλευρική εξάπλωση του εδάφους λόγω σεισμικής ρευστοποίησης, όταν αυτό έχει ήπια κλίση ή όταν βρίσκεται πλησίον αναβαθμού. Η μελέτη της πλευρικής εξάπλωσης στη διεθνή βιβλιογραφία βασίζεται κυρίως σε ιστορικά περιστατικά, και δευτερευόντως σε αριθμητικές προσεγγίσεις. Έχουν προταθεί εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης της οριζόντιας μετακίνησης της επιφάνειας του εδάφους (π.χ., Youd et al. 2002), αλλά ως σύνολο η σχετική μελέτη είναι μάλλον ελλιπής, καθώς κρίσιμες εκφάνσεις της εδαφικής απόκρισης δεν έχουν ποσοτικοποιηθεί (π.χ., η εμφάνιση καθιζήσεων/ανυψώσεων, πέραν της οριζόντιας μετατόπισης του εδάφους).

Η εργασία αυτή στοχεύει στη συμπλήρωση της σχετικής βιβλιογραφίας, για την περίπτωση της πλευρικής εξάπλωσης οριζόντιας στρώσης πλησίον αναβαθμού. Η διερεύνηση του φαινομένου γίνεται με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών (FLAC 2D, Itasca Inc. 2011), και εξετάζεται παραμετρικά η επίδραση του ύψους  $H$  του αναβαθμού και των λεπτομερειών του γεωτεχνικού προφίλ (π.χ., η ύπαρξη μη-ρευστοποιήσιμης αργιλικής στρώσης) στην απόκριση του πλευρικός εξαπλούμενου εδάφους. Για την προσομοίωση της άμμου χρησιμοποιείται το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010), ενώ για την προσομοίωση της αργιλικής στρώσης γίνεται χρήση του καταστατικού προσομοιώματος Mohr-Coulomb. Χάριν απλότητας, ως διέγερση θεωρείται μια ισχυρή αρμονική κίνηση.

Ως γνωστόν, η σχέση εκτίμησης των οριζοντίων μετατοπίσεων  $D_h$  στην επιφάνεια του εδάφους των Youd et al. (2002) προτείνεται προς χρήση για την περιοχή πίσω από τη στέψη του αναβαθμού και για αποστάσεις  $L \geq 5H$  από τον πόδα. Προκύπτει ότι για αποστάσεις  $0 < L < 5H$  οι οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  στην επιφάνεια του εδάφους αυξάνουν ραγδαία (π.χ. έως και κατά 100%) σε σχέση με την τιμή που προβλέπεται σε απόσταση  $L = 5H$ . Με το βάθος από την επιφάνεια, οι τιμές των οριζοντίων μετατοπίσεων είναι μικρότερες ή ίσες με αυτές στην επιφάνεια, αλλά σε βάθος  $2H$  παραμένουν σαφώς μη-μηδενικές. Προκύπτει επίσης ότι η πλευρική εξάπλωση οριζόντιου εδάφους δεν δημιουργεί μόνο οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  προς τον αναβαθμό στην περιοχή πίσω από τη στέψη που φθίνουν με την απόσταση  $L$ , αλλά και αντιστοίχου μεγέθους οριζόντιες μετατοπίσεις στην ίδια διεύθυνση και στην περιοχή μπροστά από τον πόδα, οι οποίες επίσης φθίνουν με την απόσταση από τον πόδα. Υπογραμμίζεται ότι στη βιβλιογραφία δεν γίνεται αναφορά σε οριζόντιες εδαφικές μετατοπίσεις  $D_h$  μπροστά από τον πόδα.

Επιπλέον, η πλευρική εξάπλωση οριζόντιου εδάφους δημιουργεί και σημαντικές κατακόρυφες εδαφικές μετατοπίσεις  $D_v$ , ήτοι καθιζήσεις πίσω από τη στέψη και ανυψώσεις μπροστά από τον πόδα του αναβαθμού. Αυτές οφείλονται στη μορφή της εδαφικής παραμόρφωσης πλησίον του αναβαθμού που ομοιάζει ευρείας περιστροφικής αστοχίας που

φθάνει σε βάθος λίγο πάνω από τον πυθμένα της ρευστοποιήσιμης στρώσης με κέντρο περιστροφής περίπου πάνω από τον πόδα. Υπογραμμίζεται ότι στη βιβλιογραφία δεν γίνεται καμία αναφορά σε κατακόρυφες εδαφικές μετατοπίσεις  $D_v$ .

Οι παραμετρικές αναλύσεις υποδεικνύουν επίσης ότι όσο αυξάνει το ύψος του αναβαθμού  $H$ , τόσο αυξάνουν οι οριζόντιες  $D_h$  και κατακόρυφες  $D_v$  μετατοπίσεις. Το ύψος  $H$  δεν υπεισέρχεται άμεσα στις εμπειρικές σχέσεις της βιβλιογραφίας (π.χ., στη σχέση των Youd et al. 2002), αλλά αποδεικνύεται σημαντική παράμετρος. Αυτό επειδή μεγαλύτερου ύψους αναβαθμοί με το ίδιο, κατά τα άλλα, κοκκώδες έδαφος έχουν και στατικά μικρότερη ευστάθεια (λόγω της προαναφερθείσας ευρείας περιστροφικής αστοχίας), οπότε οδηγούνται σε εντονότερη συσσώρευση μετατοπίσεων υπό την ίδια διέγερση.

Σε ποιοτική συμφωνία με τη βιβλιογραφία, προκύπτει ότι η ύπαρξη αργιλικής στρώσης πάχους  $h_c$  μειώνει τις μετατοπίσεις του εδάφους λόγω πλευρικής εξάπλωσης. Επιπλέον, όμως, προκύπτει ότι και το βάθος  $z_c$  της αργιλικής στρώσης παίζει ρόλο στον καθορισμό των μετατοπίσεων, και αυτή είναι μια παράμετρος που δεν υπεισέρχεται στις εμπειρικές σχέσεις της βιβλιογραφίας (π.χ. στη σχέση των Youd et al. 2002). Πιο σημαντικά, αποδεικνύεται ότι οι μετατοπίσεις του εδάφους είναι σαφώς μικρότερες στην περιοχή του αναβαθμού όταν υπάρχει αργιλική στρώση που είτε φθάνει ή βρίσκεται κάτω από τον πόδα, δηλαδή όταν  $(h_c + z_c)/H \geq 1$ . Ταυτόχρονα όμως, οι μετατοπίσεις του εδάφους δεν απομειώνονται σημαντικά με την απόσταση  $L/H$  στην περίπτωση αυτή. Δηλαδή το (μη-ρευστοποιήσιμο) αργιλικό έδαφος σε μεγάλο βάθος λειτουργεί ως «φρένο» της πλευρικής εξάπλωσης προς τον αναβαθμό.

Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων, προτείνονται εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης των κανονικοποιημένων μετατοπίσεων  $D_h/D_h(5H)$ ,  $D_v/D_h$ ,  $D_v/D_h(5H)$  και  $D_{h,2H}/D_h$  προς την αδιάστατη απόσταση  $L/H$ , όπου  $D_h(5H)$  είναι η εκτίμηση της μετατόπισης σε απόσταση  $L = 5H$  με βάση σεισμολογικά, γεωτεχνικά και τοπογραφικά δεδομένα (Youd et al. 2002) και  $D_{h,2H}$  είναι η οριζόντια εδαφική μετακίνηση σε βάθος  $2H$  (από την επιφάνεια του εδάφους πίσω από τη στέψη). Οι σχέσεις αυτές αφορούν τόσο για την περιοχή πίσω από τη στέψη, όσο και εκείνη μπροστά από τον πόδα (όπου  $L/H < 0$ ). Επισημαίνεται ότι η πλήρης ποσοτικοποίηση των μετατοπίσεων  $D_h$ ,  $D_v$  και  $D_{h,2H}$  με βάση τις προτεινόμενες σχέσεις προϋποθέτει εκτίμηση της μετατόπισης  $D_h(5H)$ . Συνεπώς, οι προτεινόμενες σχέσεις λειτουργούν συνεργατικά με τη σχέση των Youd et al. (2002).

## Abstract

One of the challenges a civil engineer deals during the design and construction on loose saturated coarse-grained soils is the lateral spreading of the soil due to seismic liquefaction, due to either gentle sloping or proximity to a free-face. The study of lateral spreading in international literature is primarily based on case histories, rather than computational work. Such efforts have led to empirical relations for estimating the horizontal displacement of the ground surface (e.g., Youd et al. 2002), which however do not give the full picture of the soil response (e.g., there is no quantification for the settlement/uplift of the ground surface).

This Diploma thesis aims to supplement the aforementioned literature in regard to the lateral spreading of horizontal layers in the proximity of a free-face. The investigation is carried out using the finite difference method (FLAC 2D, Itasca Inc. 2011), and studies the effects of the height  $H$  of a free-face and of the geotechnical profile of the soil (e.g., the presence of a non-liquefiable clay layer) on the response of the laterally spreading soil. The NTUA-SAND constitutive model (Andrianopoulos et al. 2010) is used to simulate the sand layer, while the Mohr-Coulomb constitutive model is used to simulate the clay layer. A sinusoidal acceleration time history has been used to simulate the seismic excitation.

The empirical relation of Youd et al. (2002) for estimating the horizontal displacements  $D_h$  at the ground surface is proposed for use for the region behind the free-face and for distances  $L \geq 5H$  from the toe of the free-face. This work shows that for distances  $0 < L < 5H$ , the horizontal displacements  $D_h$  at the ground surface increase rapidly (e.g., up to 100%) relative to the value predicted at a distance of  $L = 5H$ . The value of horizontal displacement at greater depths is less or equal to that at the ground surface, but even at a depth of  $2H$  it remains clearly non-zero. It is also shown that lateral spreading is associated not only with horizontal displacements  $D_h$  towards the free-face in the region behind it (that decrease with distance  $L$ ), but also with horizontal displacements of similar magnitude in the same direction and in the region in front of the toe (which also decrease with distance from it). It is emphasized here that in the studied literature there is no reference to horizontal ground displacements  $D_h$  in front of the free face.

In addition, this study shows that the lateral spreading of a horizontal layer also generates significant vertical soil displacements  $D_v$ , i.e., settlement behind the crest and uplift in front of the toe of the free-face. These are due to the manner by which the geostructure deforms, via a wide rotational failure reaching a depth just above the bottom of the liquefiable layer with the center of rotation approximately above the toe of the free-face. As above, there is no reference to vertical ground displacements  $D_v$  in the studied literature.

The parametric analyses also indicate that as the height  $H$  of the free-face increases, so do the horizontal  $D_h$  and vertical  $D_v$  displacements. Hence, despite that the height  $H$  turns out to be an important problem parameter, it is not included directly in the studied empirical relations from the literature (e.g., in that of Youd et al. 2002). The depicted effect of  $H$  is

attributed to the fact that a taller free-face for the same granular soil has a lower static factor of safety (against the aforementioned rotational failure), so larger displacements are induced under the same excitation.

Furthermore, in agreement with the literature, the existence of a clay layer of thickness  $h_c$  reduces soil displacements due to lateral spreading. More importantly, it is found that the depth  $z_c$  of the clay layer also plays a role in determining displacements, but this parameter is not considered in the pertinent empirical relations from the literature (e.g., in that of Youd et al. 2002). Moreover, it appears that soil displacement is evidently smaller in the region of the free-face when there is a clay layer that either reaches or lies below the tow elevation, i.e., when  $(h_c + z_c)/H \geq 1$ . Concurrently, soil displacement does not decrease with an increase of the  $L/H$  distance, suggesting that the (non-liquefiable) clayey soil at great depth acts as a "brake" on the lateral spreading towards the free-face.

In conclusion, empirical relations are proposed based on the results of the numerical analyses, estimating the normalized displacements  $D_h/D_h(5H)$ ,  $D_v/D_h$ ,  $D_v/D_h(5H)$  and  $D_{h,2H}/D_h$  as functions of the dimensionless distance  $L/H$ . In these ratios, the  $D_h(5H)$  is the estimate of the ground surface displacement at distance  $L = 5H$ , based on seismological, geotechnical and topographic data according to Youd et al. (2002). Similarly, the  $D_{h,2H}$  is the horizontal ground displacement at a depth of  $2H$  (from the ground surface behind the crest). These relations provide estimates for both the area behind the crest and that in front of the toe of the free-face (where  $L/H < 0$ ). Note that also that the complete quantification of the  $D_h$ ,  $D_v$  and  $D_{h,2H}$  displacements based on the proposed relations presupposes an estimate of the  $D_h(5H)$  displacement. Therefore, the proposed relations work synergistically with the empirical relation of Youd et al. (2002) for horizontal ground displacement due to lateral spreading in the proximity of a free-face.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

Περίληψη.....	ii
Abstract .....	iv
Λίστα Σχημάτων .....	viii
Λίστα Πινάκων .....	xii
<b>Κεφάλαιο 1   Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
1.1 Αντικείμενο .....	1
1.2 Διάρθρωση εργασίας.....	1
<b>Κεφάλαιο 2   Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....</b>	<b>3</b>
2.1 Μηχανισμός ρευστοποίησης και πλευρική εξάπλωση.....	3
2.2 Σχέσεις υπολογισμού οριζόντιας μετατόπισης λόγω πλευρικής εξάπλωσης .....	4
2.2.1 Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού οριζόντιας μετατόπισης Youd et al. (2002).....	4
2.2.2 Σχέσεις υπολογισμού οριζόντιας μετατόπισης Zhang et al. (2004) .....	7
2.2.3 Εμπειρική σχέση υπολογισμού οριζόντιας μετατόπισης Hamada (1999).....	10
2.2.4 Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού οριζόντιας μετατόπισης Valsamis et al. (2010)	12
2.3 Σύνοψη.....	13
<b>Κεφάλαιο 3   Αριθμητική Μεθοδολογία .....</b>	<b>15</b>
3.1 Εισαγωγή.....	15
3.2 Μεθοδολογία Αριθμητικής Προσομοίωσης .....	15
3.2.1 Κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών FLAC 2D .....	15
3.2.2 Καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND.....	16
3.3 Περιγραφή Αριθμητικής Προσομοίωσης.....	19
3.3.1 Προσομοίωση εδάφους.....	20
3.3.2 Προσομοίωση Απόσβεσης και Σεισμικής Διέγερσης.....	21
<b>Κεφάλαιο 4   Πλευρική εξάπλωση οριζόντιας στρώσης προς αναβαθμό .....</b>	<b>22</b>
4.1 Γενικά .....	22
4.2: Τυπική απόκριση ομοιόμορφης στρώσης προς αναβαθμό .....	23
4.3 Επίδραση ύψους αναβαθμού στην πλευρική εξάπλωση ομοιόμορφης στρώσης.....	27
4.4 Πλευρική εξάπλωση εδάφους με επιφανειακή αργιλική στρώση προς αναβαθμό .....	31

4.5 Πλευρική εξάπλωση εδάφους με μη-επιφανειακή αργιλική στρώση προς αναβαθμό	40
4.6 Σύνοψη Αποτελεσμάτων.....	47
<b>Κεφάλαιο 5   Ποσοτικοποίηση μετατοπίσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης προς αναβαθμό .....</b>	<b>49</b>
5.1 Γενικά .....	49
5.2 Εκτίμηση μέσης απόκρισης με την απόσταση L/H .....	51
5.3 Επίδραση ύψους αναβαθμού και γεωτεχνικού προφίλ .....	60
5.4 Σχέσεις εκτίμησης μέσης απόκρισης με την απόσταση .....	63
<b>Κεφάλαιο 6   Συμπεράσματα – Προτάσεις .....</b>	<b>68</b>
6.1 Γενικά .....	68
6.2 Βασικά συμπεράσματα .....	68
6.3 Προτάσεις.....	69
<b>Κεφάλαιο 7   Βιβλιογραφία .....</b>	<b>71</b>



# Λίστα Σχημάτων

---

Σχήμα 2.1: Αστοχία πλευρικής εξάπλωσης λόγω ρευστοποίησης. (Youd 2018).....	3
Σχήμα 2.2: Διάγραμμα συσχέτισης υπολογισμένων και μετρημένων μετατοπίσεων των σχέσεων (2.1a) και (2.1b). (Youd et al. 2002).....	5
Σχήμα 2.3: Όρια συνδυασμού ποσοστού λεπτόκοκκων $F_{15}$ και μέσης τιμής κοκκομετρικής διαμέτρου $D_{50_{15}}$ στη βάση δεδομένων (Youd et al. 2002).....	6
Σχήμα 2.4: Παράδειγμα υπολογισμού του δείκτη πλευρικής εξάπλωσης LDI με δοκιμή CPT. (Zhang et al. 2004) .....	8
Σχήμα 2.5: Ο λόγος των μετρημένων οριζόντιων μετατοπίσεων $D_h$ ως προς τον δείκτη πλευρικής εξάπλωσης LDI, ως προς την κλίση του εδάφους $S$ στο (a) και ως προς την απόσταση από τον αναβαθμό $L$ διά το ύψος του αναβαθμού $H$ στα (b) και (c). (Zhang et al. 2004) .....	9
Σχήμα 2.6: Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων μετατοπίσεων για περιστατικά με: (a) κλίση χωρίς αναβαθμό, (b) οριζόντια στρώση εδάφους και αναβαθμό και (c) κλίση και αναβαθμό. (Zhang et al. 2004) .....	10
Σχήμα 2.7: Χρονοϊστορία εδαφικής επιτάχυνσης του σεισμού Nihonkai-Chunu 1983. (Hamada 1999).....	11
Σχήμα 2.8: Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων μετατοπίσεων. (Hamada 1999) .....	11
Σχήμα 2.9: Σύγκριση αποτελεσμάτων της σχέσης (2.11) για οριζόντιο έδαφος με αναβαθμό με τα αριθμητικά αποτελέσματα. (Valsamis, Bouckovalas, Dimitriadi 2010).....	13
Σχήμα 2.10: Σύγκριση αποτελεσμάτων της σχέσης (2.12) για επικλινές έδαφος με τα αριθμητικά αποτελέσματα (Valsamis, Bouckovalas, Papadimitriou 2010).....	13
Σχήμα 3.1: Η διαδικασία που ακολουθείται σε κάθε χρονικό βήμα. ....	16
Σχήμα 3.2: Επιφάνειες του προσομοιώματος στο χώρο $p - q$ και η προβολή τους στο επίπεδο αποκλινοσών τάσεων. ....	17
Σχήμα 3.3: Κάνναβος οριζόντιας ρευστοποιήσιμης στρώσης πάχους 10 m, πλησίον αναβαθμού ύψους 2m. ....	20
Σχήμα 3.4: Χρονοϊστορία επιτάχυνσης της αρμονικής διέγερσης βάσης. ....	21
Σχήμα 4.1: Εδαφικό προφίλ παραμετρικών αναλύσεων.....	22
Σχήμα 4.2: Μεταβολή οριζόντιων μετατοπίσεων $D_h$ , λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $T_{15} = 10m$ πλησίον αναβαθμού με ύψος $H = 2m$ . ....	24
Σχήμα 4.3: Μεταβολή κατακόρυφων μετατοπίσεων $D_v$ , λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $T_{15} = 10m$ πλησίον αναβαθμού με ύψος $H = 2m$ . ....	24

Σχήμα 4.4: Οι οριζόντιες μετατοπίσεις $D_h$ στην επιφάνεια του εδάφους ως συνάρτηση της απόστασης $L/H$ σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $T_{15} = 10m$ με ύψος αναβαθμού $H = 2m$ , και σύγκριση με τη σχέση των Youd et al. (2002). .....	25
Σχήμα 4.5: Οι κανονικοποιημένες οριζόντιες μετατοπίσεις $D_h/D_h(5H)$ ως συνάρτηση της απόστασης $L/H$ σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $T_{15} = 10m$ με ύψος αναβαθμού $H = 2m$ , και σύγκριση με τη σχέση των Youd et al. (2002). .....	25
Σχήμα 4.6: Οι οριζόντιες μετατοπίσεις $D_h$ ως συνάρτηση της απόστασης $L/H$ στην επιφάνεια και σε βάθη $z = 2H$ , $z = 3H$ και $z = 4H$ , σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $T_{15} = 10m$ με ύψος αναβαθμού $H = 2m$ . .....	26
Σχήμα 4.7: Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις $D_v$ στην επιφάνεια του εδάφους, ως συνάρτηση της απόστασης $L/H$ , σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $T_{15} = 10m$ με ύψος αναβαθμού $H = 2m$ . .....	27
Σχήμα 4.8: Ο λόγος των κατακόρυφων μετατοπίσεων $D_v$ προς την οριζόντια μετατόπιση $D_h(5H)$ σε απόσταση $L = 5H$ από τη βάση του αναβαθμού, ως συνάρτηση της απόστασης $L/H$ , σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $T_{15} = 10m$ με ύψος αναβαθμού $H = 2m$ . ....	27
Σχήμα 4.9: Μεταβολή οριζόντιων μετατοπίσεων $D_h$ , λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $T_{15} = 10m$ με αναβαθμό ύψους $H = 4m$ . .....	28
Σχήμα 4.10: Μεταβολή κατακόρυφων μετατοπίσεων $D_v$ , λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $T_{15} = 10m$ με αναβαθμό ύψους $H = 4m$ . .....	28
Σχήμα 4.11: Επίδραση ύψους αναβαθμού $H$ στη σχέση απόστασης $L/H$ και οριζόντιων μετατοπίσεων $D_h$ στην επιφάνεια του εδάφους, και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς $D_h(5H)$ σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $T_{15} = 10m$ . .....	29
Σχήμα 4.12: Επίδραση απόστασης $L/H$ στις οριζόντιες μετατοπίσεις $D_h$ στην επιφάνεια ( $z = 0$ ) και σε βάθος $z = 2H$ , σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $T_{15} = 10m$ με αναβαθμό ύψους $H = 4m$ . .....	30
Σχήμα 4.13: Επίδραση ύψους αναβαθμού $H$ στη σχέση απόστασης $L/H$ στον λόγο της οριζόντιας μετατόπισης $D_{h,2H}$ σε βάθος $z = 2H$ ως προς την αντίστοιχη της στην επιφάνεια του εδάφους $D_h$ σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $T_{15} = 10m$ .....	30
Σχήμα 4.14: Επίδραση ύψους αναβαθμού $H$ στη σχέση απόστασης $L/H$ και κατακόρυφων μετατοπίσεων $D_v$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς $D_h(5H)$ , σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους $T_{15} = 10m$ . .....	31
Σχήμα 4.15: Μεταβολή οριζόντιων μετατοπίσεων $D_h$ λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε στρώση με ύψος αναβαθμού $H = 2m$ , που εμπεριέχει αργλική στρώση πάχους ( $\alpha$ ) $h_c = 1m$ , ( $\beta$ ) $h_c = 2m$ ( $\gamma$ ) $h_c = 3m$ και ( $\delta$ ) $h_c = 4m$ στην επιφάνεια ( $z_c = 0$ ). .....	32
Σχήμα 4.16: Μεταβολή κατακόρυφων μετατοπίσεων $D_v$ λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε στρώση με ύψος αναβαθμού $H = 2m$ , που εμπεριέχει αργλική στρώση πάχους ( $\alpha$ ) $h_c = 1m$ , ( $\beta$ ) $h_c = 2m$ ( $\gamma$ ) $h_c = 3m$ και ( $\delta$ ) $h_c = 4m$ στην επιφάνεια ( $z_c = 0$ ). .....	33
Σχήμα 4.17: Μεταβολή οριζόντιων μετατοπίσεων $D_h$ λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε στρώση με ύψος αναβαθμού $H = 4m$ , που εμπεριέχει αργλική στρώση πάχους ( $\alpha$ ) $h_c = 1m$ , ( $\beta$ ) $h_c = 2m$ , ( $\gamma$ ) $h_c = 4m$ , ( $\delta$ ) $h_c = 5m$ και ( $\epsilon$ ) $h_c = 6m$ στην επιφάνεια ( $z_c = 0$ ). .....	34

Σχήμα 4.18: Μεταβολή κατακόρυφων μετατοπίσεων $D_v$ λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε στρώση με ύψος αναβαθμού $H = 4\text{m}$ , που εμπεριέχει αργλική στρώση πάχους ( $\alpha$ ) $h_c = 1\text{m}$ , ( $\beta$ ) $h_c = 2\text{m}$ , ( $\gamma$ ) $h_c = 4\text{m}$ , ( $\delta$ ) $h_c = 5\text{m}$ και ( $\epsilon$ ) $h_c = 6\text{m}$ στην επιφάνεια ( $z_c = 0$ ). .....	35
Σχήμα 4.19: Επίδραση πάχους $h_c$ της επιφανειακής ( $z_c = 0$ ) αργλικής στρώσης στη σχέση απόστασης $L/H$ και οριζοντίων μετατοπίσεων $D_h$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς $D_h(5H)$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους $H = 2\text{m}$ . .....	36
Σχήμα 4.20: Επίδραση πάχους $h_c$ της επιφανειακής ( $z_c = 0$ ) αργλικής στρώσης στη σχέση απόστασης $L/H$ και οριζοντίων μετατοπίσεων $D_h$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς $D_h(5H)$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους $H = 4\text{m}$ . .....	36
Σχήμα 4.21: Επίδραση πάχους $h_c$ της επιφανειακής ( $z_c = 0$ ) αργλικής στρώσης στη σχέση απόστασης $L/H$ και λόγου της οριζόντιας μετατόπισης σε βάθος $z = 2H$ ( $D_{h,2H}$ ) ως προς την αντίστοιχη της στην επιφάνεια $D_h$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους (i) $H = 2\text{m}$ και (ii) $H = 4\text{m}$ . .....	38
Σχήμα 4.22: Επίδραση πάχους $h_c$ της επιφανειακής ( $z_c = 0$ ) αργλικής στρώσης στη σχέση απόστασης $L/H$ και κατακόρυφων μετατοπίσεων $D_v$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς $D_h(5H)$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους $H = 2\text{m}$ . .....	38
Σχήμα 4.23: Επίδραση πάχους $h_c$ της επιφανειακής ( $z_c = 0$ ) αργλικής στρώσης στη σχέση απόστασης $L/H$ και κατακόρυφων μετατοπίσεων $D_v$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς $D_h(5H)$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους $H = 4\text{m}$ . .....	39
Σχήμα 4.24: Μεταβολή οριζοντίων μετατοπίσεων $D_h$ λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε στρώση με ύψος αναβαθμού $H = 2\text{m}$ , που εμπεριέχει αργλική στρώση πάχους $h_c = 1\text{m}$ στην επιφάνεια ( $\alpha$ ) $z_c = 0$ και σε βάθη ( $\beta$ ) $z_c = 1\text{m}$ ( $\gamma$ ) $z_c = 2\text{m}$ και ( $\delta$ ) $z_c = 4\text{m}$ . .....	40
Σχήμα 4. 25: Μεταβολή κατακόρυφων μετατοπίσεων $D_v$ λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε στρώση με ύψος αναβαθμού $H = 2\text{m}$ , που εμπεριέχει αργλική στρώση πάχους $h_c = 1\text{m}$ στην επιφάνεια ( $\alpha$ ) $z_c = 0$ και σε βάθη ( $\beta$ ) $z_c = 1\text{m}$ , ( $\gamma$ ) $z_c = 2\text{m}$ και ( $\delta$ ) $z_c = 4\text{m}$ . .....	41
Σχήμα 4.26: Μεταβολή οριζοντίων μετατοπίσεων $D_h$ λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε στρώση με ύψος αναβαθμού $H = 4\text{m}$ , που εμπεριέχει αργλική στρώση πάχους $h_c = 2\text{m}$ στην επιφάνεια ( $\alpha$ ) $z_c = 0$ και σε βάθη ( $\beta$ ) $z_c = 1\text{m}$ ( $\gamma$ ) $z_c = 2\text{m}$ και ( $\delta$ ) $z_c = 4\text{m}$ . .....	42
Σχήμα 4.27: Μεταβολή κατακόρυφων μετατοπίσεων $D_v$ λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε στρώση με ύψος αναβαθμού $H = 4\text{m}$ , που εμπεριέχει αργλική στρώση πάχους $h_c = 2\text{m}$ ( $\alpha$ ) στην επιφάνεια ( $z_c = 0$ ) και σε βάθη ( $\beta$ ) $z_c = 1\text{m}$ , ( $\gamma$ ) $z_c = 2\text{m}$ και ( $\delta$ ) $z_c = 4\text{m}$ . .....	42
Σχήμα 4.28: Επίδραση βάθους εμφάνισης $z_c$ της αργλικής στρώσης πάχους $h_c = 1\text{m}$ στη σχέση απόστασης $L/H$ και οριζοντίων μετατοπίσεων $D_h$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς $D_h(5H)$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους $H = 2\text{m}$ . .....	43
Σχήμα 4.29: Επίδραση βάθους εμφάνισης $z_c$ της αργλικής στρώσης πάχους $h_c = 2\text{m}$ στη σχέση απόστασης $L/H$ και οριζοντίων μετατοπίσεων $D_h$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς $D_h(5H)$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους $H = 4\text{m}$ . .....	44
Σχήμα 4.30: Επίδραση βάθους εμφάνισης $z_c$ της αργλικής στρώσης στη σχέση απόστασης $L/H$ και του λόγου της οριζόντιας μετατόπισης σε βάθος $z = 2H$ ( $D_{h,2H}$ ) ως προς την αντίστοιχη	

της στην επιφάνεια $D_h$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους (i) $H = 2m$ και (ii) $H = 4m$ .....	45
Σχήμα 4.31: Επίδραση βάθους εμφάνισης $z_c$ της αργιλικής στρώσης πάχους $h_c = 1m$ στη σχέση απόστασης $L/H$ και κατακόρυφων μετατοπίσεων $D_v$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς $D_h(5H)$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους $H = 2m$ .....	46
Σχήμα 4.32: Επίδραση βάθους εμφάνισης $z_c$ της αργιλικής στρώσης πάχους $h_c = 1m$ στη σχέση απόστασης $L/H$ και κατακόρυφων μετατοπίσεων $D_v$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς $D_h(5H)$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους $H = 4m$ .....	46
Σχήμα 5.1: Κανονικοποιημένες μετατοπίσεις $D_h/D_h(5H)$ , $D_v/D_h$ , $D_v/D_h(5H)$ και $D_{h,2H}/D_h$ προς την αδιάστατη απόσταση $L/H$ , για τις περιπτώσεις με ύψος αναβαθμού $H = 2m$ ανεξαρτήτως γεωτεχνικού προφίλ, και εκτίμηση μέσω τιμών.....	52
Σχήμα 5.2: Κανονικοποιημένες μετατοπίσεις $D_h/D_h(5H)$ , $D_v/D_h$ , $D_v/D_h(5H)$ και $D_{h,2H}/D_h$ προς την αδιάστατη απόσταση $L/H$ , για τις περιπτώσεις με ύψος αναβαθμού $H = 4m$ ανεξαρτήτως γεωτεχνικού προφίλ, και εκτίμηση μέσω τιμών.....	53
Σχήμα 5.3: Κανονικοποιημένες μετατοπίσεις $D_h/D_h(5H)$ , $D_v/D_h$ , $D_v/D_h(5H)$ και $D_{h,2H}/D_h$ προς την αδιάστατη απόσταση $L/H$ , για τις περιπτώσεις χωρίς αργιλική στρώση ή με αργιλική στρώση που δεν φτάνει κάτω από τον πόδα του αναβαθμού (όταν $(h_c+z_c)/H \leq 1$ ), ανεξαρτήτως ύψους αναβαθμού $H$ , και εκτίμηση μέσω τιμών.....	55
Σχήμα 5.4: Κανονικοποιημένες μετατοπίσεις $D_h/D_h(5H)$ , $D_v/D_h$ , $D_v/D_h(5H)$ και $D_{h,2H}/D_h$ προς την αδιάστατη απόσταση $L/H$ , για τις περιπτώσεις με αργιλική στρώση που φτάνει ή βρίσκεται κάτω από τον πόδα του αναβαθμού (όταν $(h_c+z_c)/H > 1$ ), ανεξαρτήτως ύψους αναβαθμού $H$ , και εκτίμηση μέσω τιμών.....	56
Σχήμα 5.5: Κανονικοποιημένες μετατοπίσεις $D_h/D_h(5H)$ , $D_v/D_h$ , $D_v/D_h(5H)$ και $D_{h,2H}/D_h$ προς την αδιάστατη απόσταση $L/H$ , για τις όλες τις περιπτώσεις της παρούσας εργασίας ( $H = 2-4m$ , $0 \leq (h_c+z_c)/H \leq 2.5$ ), και εκτίμηση μέσω τιμών.....	58
Σχήμα 5.6: Επίδραση ύψους αναβαθμού $H$ στις μέσες καμπύλες των κανονικοποιημένων μετατοπίσεων $D_h/D_h(5H)$ , $D_v/D_h$ , $D_v/D_h(5H)$ και $D_{h,2H}/D_h$ προς την αδιάστατη απόσταση $L/H$ ...	60
Σχήμα 5.7: Επίδραση γεωτεχνικού προφίλ στις μέσες καμπύλες των κανονικοποιημένων μετατοπίσεων $D_h/D_h(5H)$ , $D_v/D_h$ , $D_v/D_h(5H)$ και $D_{h,2H}/D_h$ προς την αδιάστατη απόσταση $L/H$ ...	62
Σχήμα 5.8: Σύγκριση εύρους, μέσω καμπυλών και καμπυλών σχεδιασμού των κανονικοποιημένων μετατοπίσεων $D_h/D_h(5H)$ , $D_v/D_h$ , $D_v/D_h(5H)$ και $D_{h,2H}/D_h$ προς την αδιάστατη απόσταση $L/H$ .....	65
Σχήμα 5.9: Καμπύλες μέσης τιμής του λάθους εκτίμησης των κανονικοποιημένων μετατοπίσεων $D_h/D_h(5H)$ , $D_v/D_h$ , $D_v/D_h(5H)$ και $D_{h,2H}/D_h$ προς την αδιάστατη απόσταση $L/H$ ...	67

## Λίστα Πινάκων

---

Πίνακας 3.1: Εξισώσεις προσομοιώματος NTUA-SAND (Andriopoulos et al. 2010).....	17
Πίνακας 3.2: Βαθμονομημένες παράμετροι προσομοιώματος NTUA-SAND για άμμο Nevada (Andriopoulos et al.2010). .....	19
Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά εδάφους.....	21
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά παραμετρικών αναλύσεων πλευρικής εξάπλωσης στρώσης προς αναβαθμό του παρόντος κεφαλαίου.....	23
Πίνακας 5.1: Περιπτώσεις με ύψος αναβαθμού H, ανεξαρτήτως ύπαρξης αργλικής στρώσης ή όχι. ....	49
Πίνακας 5.2: Περιπτώσεις με ύψος αναβαθμού H = 4m, ανεξαρτήτως ύπαρξης αργλικής στρώσης ή όχι. ....	50
Πίνακας 5.3: Περιπτώσεις χωρίς αργλική στρώση ή με αργλική στρώση που δεν φτάνει ή βρίσκεται κάτω από τον πόδα του αναβαθμού, ήτοι όταν $(h_c+z_c)/H \leq 1$ , ανεξαρτήτως ύψους H αναβαθμού.....	50
Πίνακας 5.4: Περιπτώσεις με αργλική στρώση που φτάνει ή βρίσκεται κάτω από τον πόδα του αναβαθμού, ήτοι όταν $(h_c+z_c)/H > 1$ , ανεξαρτήτως ύψους H αναβαθμού.....	51

# Κεφάλαιο 1 | Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο

Το φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης λόγω ρευστοποίησης του εδάφους προκύπτει όταν έχει προηγηθεί μια έντονη σεισμική διέγερση σε κορεσμένα χονδρόκοκκα εδάφη όπως αμμοιούλες, άμμοι και αμμοχάλικα. Το φαινόμενο παρατηρείται όταν το έδαφος είναι υπό ήπια κλίση ή όταν υπάρχει αναβαθμός στη γειτονία του εδάφους. Το φαινόμενο αυτό επιφέρει καταστροφικές συνέπειες σε έργα Πολιτικού Μηχανικού που βρίσκονται σε παράκτιες περιοχές, χωρίς βέβαια να αποκλείονται άλλες περιοχές για τις οποίες ισχύουν οι πιο πάνω προϋποθέσεις. Τα πιο ευάλωτα σχετικά έργα είναι υπόγειοι αγωγοί (ύδρευσης ή μεταφοράς ενεργειακών πόρων), βάθρα γεφυρών, έργα οδοποιίας ή και απλά κτίρια.

Λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου της πλευρικής εξάπλωσης, έχουν αναπτυχθεί μόνο εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης των οριζοντίων μετατοπίσεων, με βάση καταγραφές ιστορικών περιστατικών. Οι σχέσεις αυτές είναι βέβαια εύκολες στην χρήση, ωστόσο στις περισσότερες περιπτώσεις αδυνατούν να περιγράψουν με ακρίβεια και πληρότητα το φαινόμενο. Επομένως, η παρούσα εργασία στοχεύει στην περαιτέρω διερεύνηση των παραμέτρων του φαινομένου, όπου οι υπάρχουσες εμπειρικές σχέσεις δεν περιγράφουν επαρκώς. Η διερεύνηση θα γίνει με αριθμητικές αναλύσεις, με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών FLAC 2D v.7.0 (Itasca Inc. 2011). Απώτερος στόχος είναι η συμπλήρωση των υπάρχουσων εμπειρικών σχέσεων για την πλευρική εξάπλωση.

## 1.2 Διάρθρωση εργασίας

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται βιβλιογραφική αναφορά στις πιο διαδεδομένες εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού της οριζόντιας μετατόπισης της επιφάνειας του εδάφους, που προκύπτει από πλευρική εξάπλωση μετά από σεισμική ρευστοποίηση. Στόχος της αναφοράς είναι ο εντοπισμός των περιορισμών αυτών.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται το λογισμικό πεπερασμένων διαφορών FLAC 2D v.7.0 (Itasca Inc. 2011) και το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010) που χρησιμοποιήθηκαν για την αριθμητική προσομοίωση της σεισμικής ρευστοποίησης χονδρόκοκκων εδαφών. Επίσης, παρουσιάζονται οι παραδοχές των αριθμητικών αναλύσεων (π.χ., κάρναβος, συνοριακές συνθήκες, διέγερση).

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται η απόκριση του πλευρικός εξαπλούμενου εδάφους όπως προκύπτει από τις αριθμητικές αναλύσεις. Έμφαση δίνεται τόσο στις οριζόντιες όσο και στις κατακόρυφες εδαφικές μετατοπίσεις, ενώ διερευνώνται παραμετρικά η σημαντικότητα του ύψους  $H$  του αναβαθμού, όσο των λεπτομερειών του γεωτεχνικού προφίλ (π.χ., ύπαρξη, πάχος και βάθος αργιλικής στρώσης).

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται κατηγοριοποίηση και ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων σε όρους εδαφικών μετατοπίσεων με την απόσταση από τον πόδα του αναβαθμού, με βάση το ύψος του αναβαθμού και το πάχος/βάθος της αργλικής στρώσης (αν υπάρχει). Προτείνονται σχέσεις εκτίμησης των μετατοπίσεων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί με υπάρχουσες εμπειρικές σχέσεις από τη βιβλιογραφία.

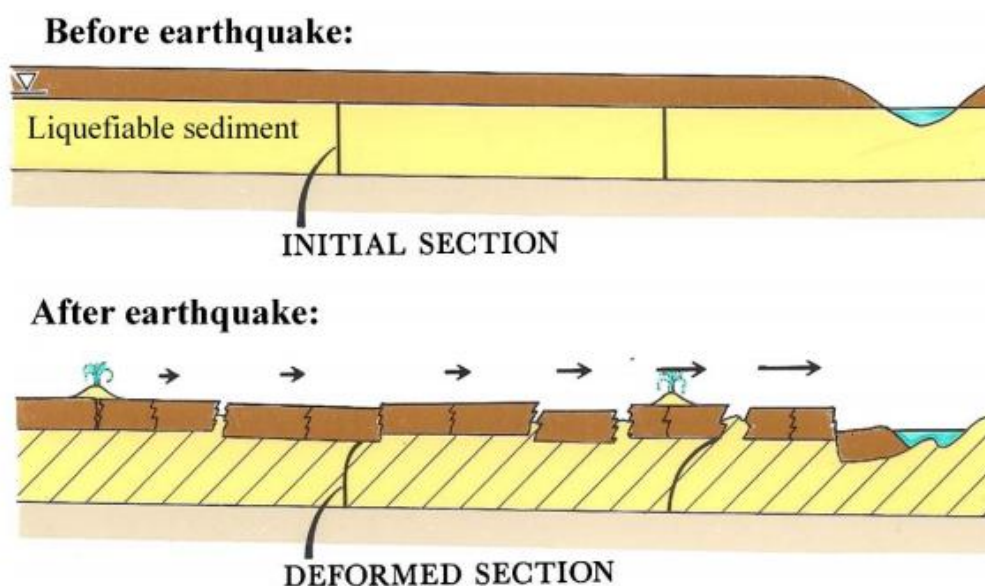
Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία και προτείνονται θέματα για μελλοντική έρευνα με στόχο την περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου της πλευρικής εξάπλωσης προς αναβαθμό.

## Κεφάλαιο 2 | Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 2.1 Μηχανισμός ρευστοποίησης και πλευρική εξάπλωση

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που προκύπτουν στα έργα Πολιτικού Μηχανικού από έναν ισχυρό σεισμό είναι η ρευστοποίηση του εδάφους. Ρευστοποίηση συμβαίνει σε κορεσμένα μη-συνεκτικά εδάφη (όπως άμμοι, αμμοχάλικα, αμμοιλύες), όταν δεν προλαβαίνουν να στραγγίσουν επαρκώς στη διάρκεια μιας σεισμικής διέγερσης. Συγκεκριμένα η δυναμική φόρτιση προκαλεί αύξηση των πιέσεων του νερού των πόρων που δεν προλαβαίνει να στραγγίσει, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση παραμορφώσεων και τη (σχεδόν ολοκληρωτική) απομείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Πρακτικά οδηγεί σε μεγάλες μετακινήσεις, είτε κατακόρυφες όπως καθιζήσεις, είτε οριζόντιες λόγω πλευρικής εξάπλωσης του εδάφους.

Η πλευρική εξάπλωση συμβαίνει σε εδάφη με ήπια κλίση, ή και σε οριζόντια εδάφη πλησίον αναβαθμού. Αν υπάρχει επιφανειακή μη-ρευστοποιήσιμη εδαφική «κρούστα», αυτή παρασύρεται και πιθανώς ρηγματώνεται (βλ. ενδεικτικά στο **Σχήμα 2.1**).



**Σχήμα 2.1:** Αστοχία πλευρικής εξάπλωσης λόγω ρευστοποίησης. (Youd 2018)



## 2.2 Σχέσεις υπολογισμού οριζόντιας μετατόπισης λόγω πλευρικής εξάπλωσης

Το μέγεθος της οριζόντιας μετατόπισης του εδάφους λόγω πλευρικής εξάπλωσης είναι αρκετά δύσκολο να υπολογισθεί με αναλυτικές σχέσεις και για αυτό η οποιαδήποτε προσπάθεια να προβλεφθεί γίνεται με εμπειρικές σχέσεις που αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια από ιστορικά περιστατικά. Το πόσο μεγάλη θα είναι η μετατόπιση του εδάφους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης (π.χ., μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, διάρκεια), της ρευστοποιήσιμης στρώσης (π.χ., σχετική πυκνότητα, ποσοστό λεπτόκοκκων κατά βάρος, πάχος), καθώς και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (π.χ., κλίση του εδάφους, το ύψος του αναβαθμού και εγγύτητα σε αυτόν, αν υπάρχει. Οι περισσότερες από αυτές τις παραμέτρους συμπεριλαμβάνονται έμμεσα ή άμεσα στις διάφορες εμπειρικές σχέσεις, όμως με διαφορετική σημαντικότητα στην κάθε σχέση, ανάλογα με τη βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε έρευνα.

### 2.2.1 Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού οριζόντιας μετατόπισης Youd et al. (2002)

Οι Bartlett και Youd (1992, 1995) ανέπτυξαν εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού της οριζόντιας μετακίνησης λόγω πλευρικής εξάπλωσης χρησιμοποιώντας τη στατιστική μέθοδο Πολλαπλής Γραμμικής Παλινδρόμησης (Multilinear Regression MLR) σε μια βάση δεδομένων από ιστορικά περιστατικά, με 448 μετρήσεις μετατόπισης λόγω πλευρικής εξάπλωσης. Μετά από ευρεία χρήση των σχέσεων αυτών παρατηρήθηκε η ανάγκη για κάποιες διορθώσεις και τροποποιήσεις, με βάση τις οποίες τελικά προέκυψαν οι σχέσεις (2.1) και (2.2) (Youd et al. 2002):

Η σχέση (2.1) αφορά περιπτώσεις με αναβαθμό:

$$\log D_H = -16.713 + 1.532M_w - 1.406R^* - 0.012R + 0.592 \log W + 0.540 \log T_{15} + 3.413 \log(100 - F_{15}) - 0.795 \log(D50_{15} + 0.1mm) \quad (2.1)$$

και η σχέση (2.2) περιπτώσεις με ήπια κλίση:

$$\log D_H = -16.213 + 1.532M_w - 1.406R^* - 0.012R + 0.338 \log S + 0.540 \log T_{15} + 3.413 \log(100 - F_{15}) - 0.795 \log(D50_{15} + 0.1mm) \quad (2.2)$$

όπου:  $R^* = R + 10^{(0.89M - 5.64)}$

$D_H$  = Πλευρική μετατόπιση εδάφους (m)

$M_w$  = Μέγεθος σεισμού (στην κλίμακα Richter)

$R$  = Επικεντρική απόσταση (km)

$T_{15}$  = Συνολικό πάχος μη-συνεκτικών εδαφικών στρώσεων με  $(N_1)_{60} < 15$  (m)

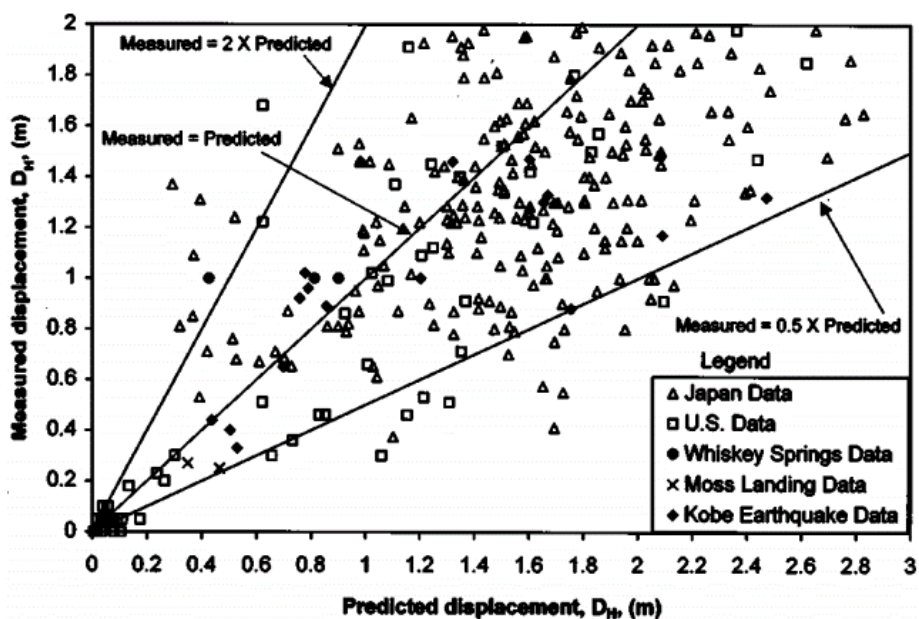
$F_{15}$  = Μέση τιμή του ποσοστού λεπτόκοκκων (%) στις ανωτέρω εδαφικές στρώσεις

$D50_{15}$  = Μέση κοκκομετρική διάμετρος  $D50$  (mm) στις ανωτέρω εδαφικές στρώσεις

$W$  = Ο λόγος του ύψους του αναβαθμού ( $H$ ) προς την απόσταση ( $L$ ) από την βάση του αναβαθμού έως το σημείο ελέγχου (σημείο αστοχίας), (%), αν υπάρχει αναβαθμός

$S$  = Κλίση εδάφους (%)

Σε αντίθεση με παρόμοιες σχέσεις υπολογισμού της οριζόντιας μετατόπισης του εδάφους οι παράμετροι που εκφράζουν τον σεισμό είναι το μέγεθος σεισμού  $M_w$  και η επικεντρική απόσταση  $R$  και όχι η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση και η διάρκεια του σεισμού. Ο λόγος είναι ότι δεν υπάρχουν αυτά τα δεδομένα για τους περισσότερους σεισμούς στην βάση δεδομένων, ενώ ο έμμεσος υπολογισμός τους μέσω του μεγέθους  $M_w$  και της απόστασης  $R$  δεν ήταν απόλυτα ακριβής. Η παράμετρος  $T_{15}$  εκφράζει το συνολικό πάχος των στρώσεων που βάση την πυκνότητά τους ( $(N_1)_{60} < 15$ ) πιθανόν να ρευστοποιηθούν, ενώ ο συνδυασμός των παραμέτρων  $F_{15}$  και  $D50_{15}$  εκφράζουν έμμεσα την διαπερατότητα των στρώσεων αυτών και συνεπώς αν θα φτάσουν και πότε σε ρευστοποίηση. Οι παράμετροι  $W$  και  $S$  εκφράζουν έμμεσα τις κινητικές δυνάμεις (βαρυτικές) που ασκούνται στο έδαφος οι οποίες συνεισφέρουν στην πλευρική μετατόπιση του εδάφους.

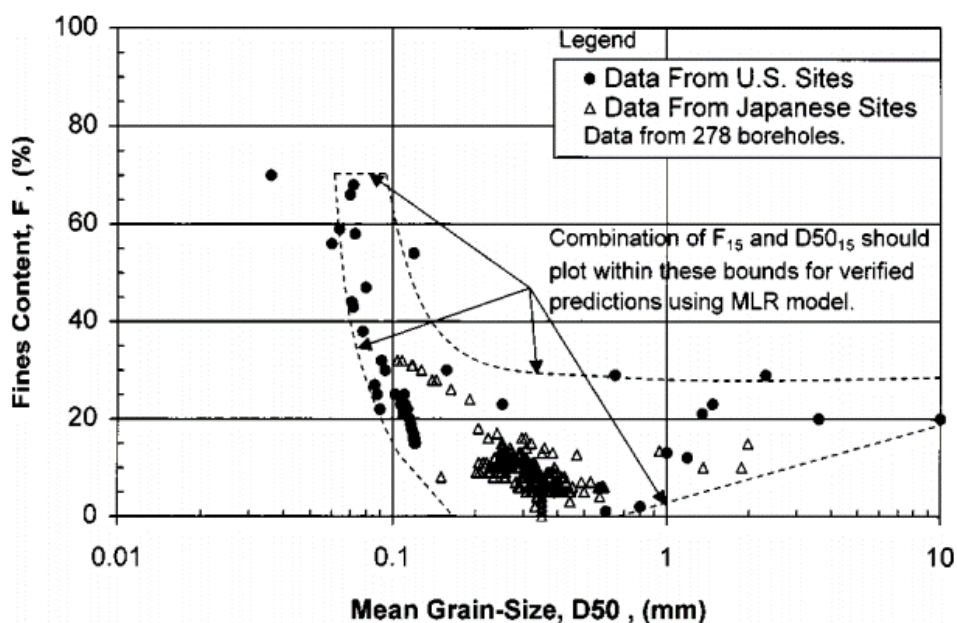


**Σχήμα 2.2:** Διάγραμμα συσχέτισης υπολογισμένων και μετρημένων μετατοπίσεων των σχέσεων (2.1) και (2.2). (Youd et al. 2002)

Στο **Σχήμα 2.2** παρουσιάζεται η ικανότητα των σχέσεων (2.1) και (2.2) να προβλέψουν τις μετατοπίσεις των γεγονότων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη αυτών. Η πλειονότητα των προβλεπόμενων μετατοπίσεων λαμβάνοντας ένα συντελεστή ασφαλείας ίσο με 2.0 είναι αρκετά κοντά στις μετρημένες.

Οι σχέσεις (2.1) και (2.2) βασίστηκαν σε συγκεκριμένα ιστορικά περιστατικά και διαπιστώθηκε πως η χρήση τους σε περιπτώσεις που έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά έχει ως αποτέλεσμα η συνολική μετατόπιση του εδάφους να υπερεκτιμηθεί ή να υποεκτιμηθεί. Ως εκ τούτου χρειάστηκε να τεθούν κάποια όρια όπου για τιμές πέραν αυτών των ορίων η αξιοπιστία των σχέσεων (2.1) και (2.2) μειώνεται.

Το μέγεθος του σεισμού  $M_w$  πρέπει να είναι μεταξύ  $6 \leq M_w \leq 8$  διότι τιμές πέρα από αυτά τα όρια οι σχέσεις δίνουν αβέβαια αποτελέσματα, ειδικά για σεισμούς με μέγεθος  $M_w > 8$ . Για σεισμούς με μέγεθος  $M_w < 6$  η μετατόπιση λόγω πλευρικής εξάπλωσης είναι σχετικά μικρή, και ως εκ τούτου τα αποτελέσματα των σχέσεων δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα. Σε περιπτώσεις όπου εξετάζεται η πλευρική εξάπλωση και το ρήγμα βρίσκεται αρκετά κοντά ( $R < 0.5\text{km}$ ) οι σχέσεις υπερεκτιμούν την οριζόντια μετατόπιση. Ως εκ τούτου συνίσταται για  $R < 0.5\text{km}$  η απόσταση  $R$  να λαμβάνεται ίση με  $0.5\text{km}$ . Ακόμη ο συνδυασμός του ποσοστού λεπτόκοκκων  $F_{15}$  και της μέσης κοκκομετρικής διαμέτρου  $D_{50_{15}}$  θα πρέπει να βρίσκονται μεταξύ των ορίων του **Σχήματος 2.3**.



**Σχήμα 2.3:** Όρια συνδυασμού ποσοστού λεπτόκοκκων  $F_{15}$  και μέσης τιμής κοκκομετρικής διαμέτρου  $D_{50_{15}}$  στη βάση δεδομένων (Youd et al. 2002).

Περιορισμός τίθεται επίσης και στο συντελεστή αναβαθμού  $W$  όπου  $1 \leq W(\%) \leq 20$ . Για  $W < 1\%$  συνίσταται η χρήση της σχέσης για ήπια κλίση (2.2) ενώ για  $W > 20\%$  η αβεβαιότητα της σχέσης (2.1) αυξάνεται. Επιπλέον, ως προς την κλίση του εδάφους, η σχέση (2.2) αποδίδει αρκετά καλά για τιμές  $0.1 < S(\%) < 6.0$  και η χρήση της για τιμές  $S$  πέραν αυτής καλό είναι να αποφεύγεται. Όσο για την γεωμετρία των στρώσεων, το συνολικό πάχος των στρώσεων με  $(N_1)_{60} < 15$  πρέπει να είναι  $1 < T_{15}(\text{m}) < 15$  και το βάθος  $Z_T$  όπου βρίσκεται η ρευστοποιήσιμη στρώση πρέπει να είναι έως  $10\text{m}$  από το πάνω όριο της στρώσης και το βάθος  $Z_B$  έως  $20\text{m}$  από το κάτω όριο της στρώσης. Επισημαίνεται ότι οι παράμετροι  $Z_T$  και  $Z_B$  δεν υπεισέρχονται

στις σχέσεις (2.1) και (2.2), όπως επίσης δεν υπεισέρχεται το ύψος  $H$  του αναβαθμού στη σχέση (2.1).

Οι σχέσεις (2.1) και (2.2) είναι εύχρηστες σε περιπτώσεις όπου τα χαρακτηριστικά του εδάφους είναι εντός των πιο πάνω ορίων. Όμως ο μηχανικός έρχεται πολλές φορές αντιμέτωπος με πιο περιπλοκές καταστάσεις επιτόπου, και οι σχέσεις (2.1) και (2.2) δεν μπορούν να προσαρμοστούν στο πρόβλημα. Συγκεκριμένα όταν υπάρχει αναβαθμός αλλά και το έδαφος είναι υπό κλίση δεν είναι γνωστό ποια από τις δύο σχέσεις (2.1) και (2.2) δίνει πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα. Οι Youd et al. (2002) προτείνουν συντηρητικά να λαμβάνεται υπόψη η μεγαλύτερη τιμή από τις μετατοπίσεις που δίνουν οι δύο σχέσεις. Επίσης υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο συντελεστής αναβαθμού  $W > 20\%$  και η σχέση (2.1) δεν μπορεί να εφαρμοστεί με βεβαιότητα. Αυτό συμβαίνει διότι η σχέση (2.1) βασίστηκε σε μετρήσεις με  $W < 20\%$  και όσο μεγαλώνει το  $W$  οι βαρυτικές δυνάμεις αλλάζουν με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται μεγαλύτερες, αλλά άγνωστες, μετατοπίσεις. Ακόμη σε περιπτώσεις με αναβαθμό δεν είναι ξεκάθαρο μέχρι ποιο βάθος  $Z_T$  οι ρευστοποιήσιμες στρώσεις συνεισφέρουν στην μετατόπιση και ως εκ τούτου αν πρέπει να ληφθούν υπόψη στην εκτίμηση μέσω της σχέσης (2.1).

### 2.2.2 Σχέσεις υπολογισμού οριζόντιας μετατόπισης Zhang et al. (2004)

Η ιδιαιτερότητα των σχέσεων Zhang et al. (2004) είναι πως μπορούν να χρησιμοποιήσουν δεδομένα όσο από την μέθοδο SPT αλλά και από την μέθοδο CPT. Οι σχέσεις βασίζονται στην μέγιστη ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση  $\gamma_{\max}$ , όπου για τον υπολογισμό της χρειάζεται η σχετική πυκνότητα  $D_r$  και ο συντελεστής ασφαλείας  $FS$  έναντι ρευστοποίησης. Ο συντελεστής ασφαλείας  $FS$  μπορεί να υπολογιστεί από μετρήσεις SPT αλλά και από CPT χρησιμοποιώντας τις μεθόδους που παρουσιάζονται από τους Youd et al. (2001). Αντίστοιχα, και η σχετική πυκνότητα μπορεί να υπολογιστεί και από μετρήσεις SPT αλλά και από CPT. Για παράδειγμα, η σχέση (2.3) του Meyerhof (1957) υπολογίζει την σχετική πυκνότητα χρησιμοποιώντας τους διορθωμένους κτύπους  $(N_1)_{60}$  ενώ η σχέση (2.4) των Tatsuoka et al. (1990) χρησιμοποιώντας την διορθωμένη αντίσταση αιχμής  $q_{c1N}$ .

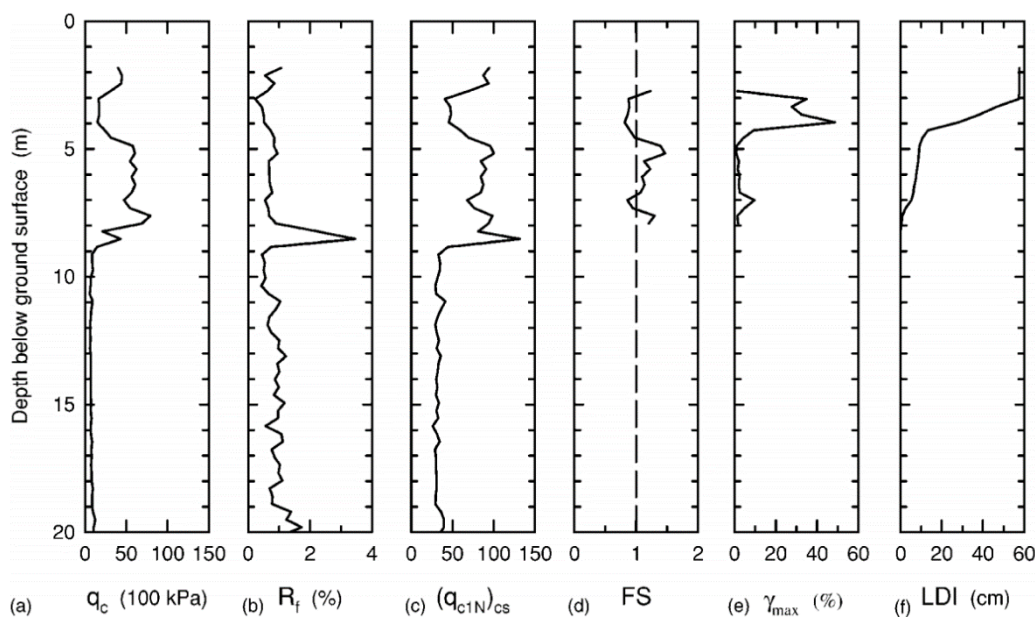
$$D_r = 14 \cdot \sqrt{(N_1)_{60}} \quad [(N_1)_{60} \leq 42] \quad (2.3)$$

$$D_r = -85 + \log(q_{c1N}) \quad (q_{c1N} \leq 200) \quad (2.4)$$

Με την μέθοδο Ishihara and Yoshimine (1992) υπολογίζεται η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση  $\gamma_{\max}$  και με ολοκλήρωση προκύπτει ο δείκτης πλευρικής εξάπλωσης LDI (Lateral Displacement Index) σύμφωνα με τη σχέση:

$$LDI = \int_0^{Z_{\max}} \gamma_{\max} dz \quad (2.5)$$

Όπου  $Z_{max}$  το μέγιστο βάθος των ρευστοποιήσιμων στρώσεων το οποίο πρέπει να είναι μικρότερο από 23 m. Στο **Σχήμα 2.4** παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού του LDI χρησιμοποιώντας δεδομένα από δοκιμή CPT σε συνάρτηση με το βάθος. Στο (a) παριστάνεται η αντίσταση αιχμής  $q_c$  και στο (b) ο συντελεστής τριβής  $R_f$ , όπου και οι δύο παράμετροι προκύπτουν άμεσα από τη δοκιμή CPT. Στο (c) παρουσιάζεται η διορθωμένη τιμή αντίστασης αιχμής για καθαρή άμμο  $q_{c1N}$  και στο (d) ο συντελεστής ασφαλείας FS όπως υπολογίστηκε από την μέθοδο των Youd et al. (2001). Ακολουθεί η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση  $\gamma_{max}$  στο (e) και στο (f) ο δείκτης πλευρικής εξάπλωσης LDI.



**Σχήμα 2.4:** Παράδειγμα υπολογισμού του δείκτη πλευρικής εξάπλωσης LDI με δοκιμή CPT. (Zhang et al. 2004)

Από τον συσχετισμό πραγματικών μετρήσεων πλευρικής εξάπλωσης από 13 ιστορικά περιστατικά με τον δείκτη πλευρικής εξάπλωσης LDI προέκυψαν οι σχέσεις υπολογισμού οριζόντιας μετατόπισης λόγω πλευρικής εξάπλωσης (2.6) και (2.7) με τη σχέση (2.6) να αφορά συνθήκες εδάφους με ήπια κλίση  $S$  και η σχέση (2.7) για οριζόντιο έδαφος με αναβαθμό:

Επικλινές έδαφος:

$$D_h = (S + 0.2) \cdot LDI \quad (0.2\% < S < 3.5\%) \quad (2.6)$$

Οριζόντιο έδαφος με αναβαθμό:

$$D_h = 6 \cdot \left(\frac{L}{H}\right)^{-0.8} \cdot LDI \quad (4 < \frac{L}{H} < 10) \quad (2.7)$$

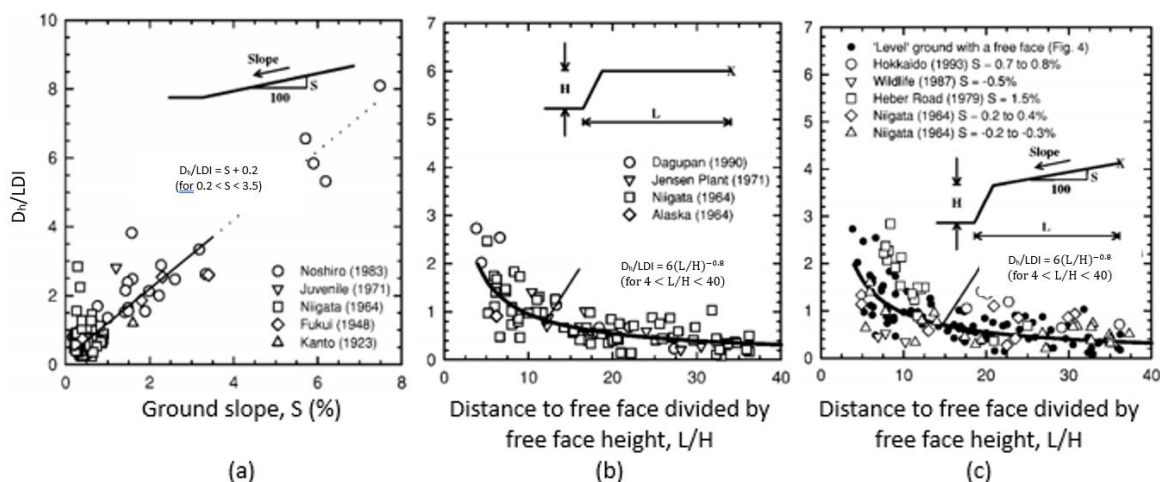
$D_h$  = Οριζόντια μετατόπιση (m)

$S$  = Κλίση εδάφους (%)

$H$  = Ύψος πρανούς (m)

$L$  = Απόσταση του σημείου ενδιαφέροντος από την βάση του αναβαθμού (m)

Στα διαγράμματα του **Σχήματος 2.5** παρουσιάζεται ο λόγος των μετρημένων οριζόντιων μετατοπίσεων  $D_h$  ως προς τον δείκτη πλευρικής εξάπλωσης LDI. Στο διάγραμμα (a) όπου παρουσιάζονται τα περιστατικά μόνο με κλίση  $S$  (%) χωρίς αναβαθμό, παρατηρείται πως ο λόγος  $D_h/LDI$  αυξάνεται όσο αυξάνεται η κλίση του εδάφους  $S$ , και η αύξηση αυτή περιγράφεται από την σχέση (2.6). Στο διάγραμμα (b) παρουσιάζονται τα περιστατικά με οριζόντια στρώση εδάφους και αναβαθμό. Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται ο λόγος  $L/H$ , ο λόγος  $D_h/LDI$  μειώνεται και αυτό περιγράφεται από την σχέση (2.7). Στο διάγραμμα (c) παρουσιάζονται τα περιστατικά με κλίση και αναβαθμό και προστίθενται τα περιστατικά με οριζόντια στρώση εδάφους και αναβαθμό για σκοπούς σύγκρισης. Παρατηρείται πως τα περιστατικά με κλίση είναι αρκετά κοντά σε αυτά όπου η στρώση του εδάφους είναι οριζόντια, με μια τάση αύξησης του λόγου  $D_h/LDI$  όσο αυξάνεται η κλίση  $S$  (%) του εδάφους. Από το διάγραμμα (c) συμπεραίνεται πως η σχέση (2.7) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιστατικά με κλίση  $S < 0.5\%$ , όμως συστήνεται η χρήση της να γίνεται με προσοχή για περιπτώσεις με κλίση  $S > 0.5\%$ .

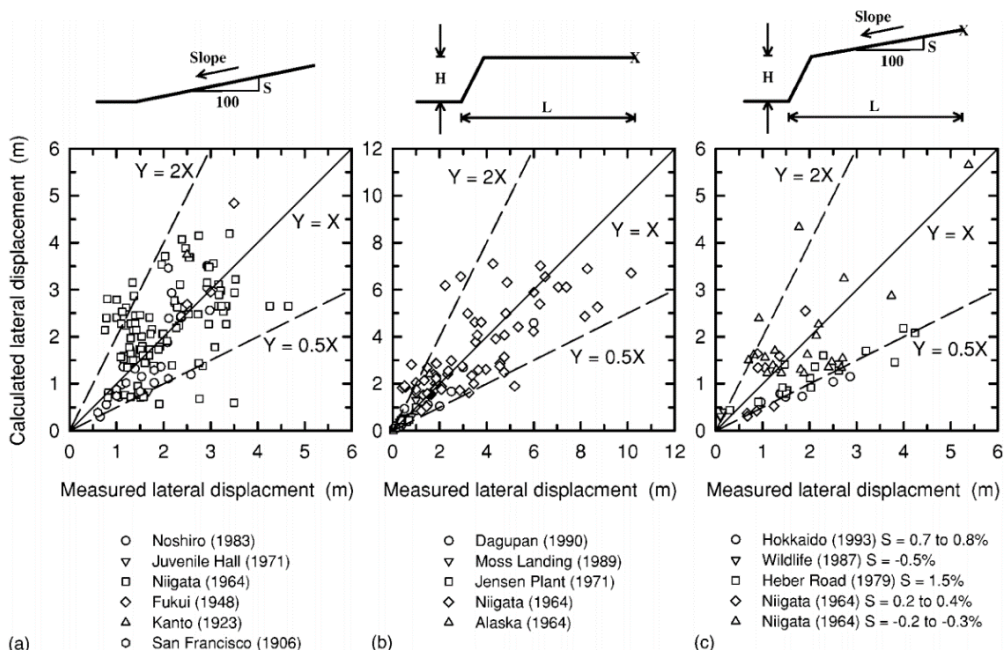


**Σχήμα 2.5:** Ο λόγος των μετρημένων οριζόντιων μετατοπίσεων  $D_h$  ως προς τον δείκτη πλευρικής εξάπλωσης LDI, ως προς την κλίση του εδάφους  $S$  στο (a) και ως προς την απόσταση από τον αναβαθμό  $L$  διά το ύψος του αναβαθμού  $H$  στα (b) και (c). (Zhang et al. 2004)

Στο **Σχήμα 2.6** συγκρίνονται τα αποτελέσματα των σχέσεων (2.6) και (2.7) με τις μετρημένες μετατοπίσεις. Στο (a) παρουσιάζεται η σύγκριση σε περιστατικά με ήπια κλίση, στο (b) παρουσιάζεται η σύγκριση σε περιστατικά οριζόντιας στρώσης με αναβαθμό και στο (c) παρουσιάζεται η σύγκριση σε περιστατικά με ήπια κλίση και αναβαθμό. Το 90% των υπολογιζόμενων μετατοπίσεων βρίσκονται μεταξύ του 50% και 200% των μετρημένων



μετατοπίσεων, κι έτσι οι σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ένα συντελεστή ασφαλείας ίσο με 2.0.



**Σχήμα 2.6:** Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων μετατοπίσεων για περιστατικά με: (a) κλίση χωρίς αναβαθμό, (b) οριζόντια στρώση εδάφους και αναβαθμό και (c) κλίση και αναβαθμό. (Zhang et al. 2004)

### 2.2.3 Εμπειρική σχέση υπολογισμού οριζόντιας μετατόπισης Hamada (1999)

Το 1999 ο Hamada μέσα από πειράματα σεισμικής τράπεζας απέδειξε πως το ρευστοποιήσιμο έδαφος συμπεριφέρεται ως σχεδόν πλαστικό υγρό και πως σε συνθήκες ροής ισχύει ο νόμος του Reynolds. Εφαρμόζοντας τον νόμο αυτό και μέσα από τα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψε η σχέση (2.8):

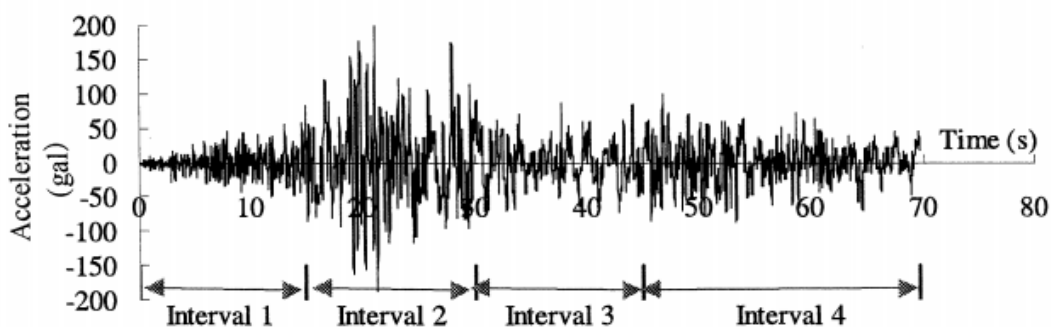
$$D_h = 1.6\sqrt{T_{15}} \cdot S \cdot D_r^{-1.75} \cdot a^{0.48} \cdot T_f \quad (2.8)$$

Όπου  $D_h$  (m) η οριζόντια μετατόπιση,  $T_{15}$  (m) το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης,  $S$  (%) η κλίση της επιφάνειας του εδάφους,  $D_r$  (%) η σχετική πυκνότητα,  $a$  ( $\text{cm/s}^2$ ) η σεισμική επιτάχυνση και  $T_f$  (sec) η διάρκεια ροής στο έδαφος.

Αντικαθιστώντας την σχετική πυκνότητα με τους διορθωμένους κτύπους  $(N_1)_{60}$  από δοκιμές SPT προκύπτει η σχέση (2.9).

$$D_h = 0.0125\sqrt{T_{15}} \cdot S \cdot a^{0.48} \cdot \frac{T_f}{(N_1)_{60}^{0.88}} \quad (2.9)$$

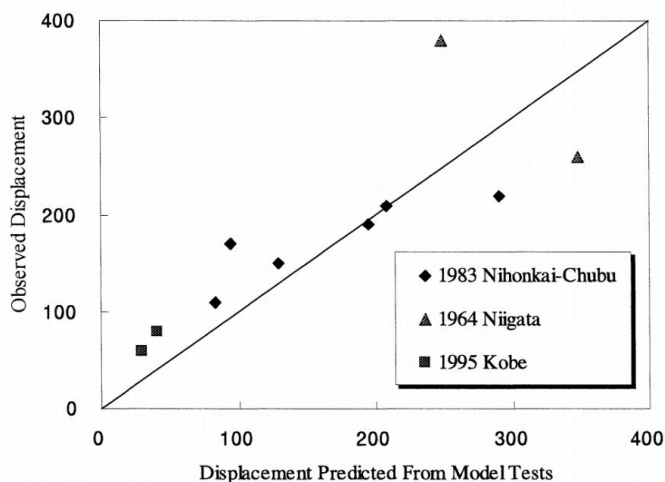
Για σκοπούς επαλήθευσης της σχέσης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τρεις σεισμούς που προκάλεσαν πλευρική εξάπλωση (Niigata 1964, Kobe 1995, Nihonkai-Chubu 1983). Η μετατόπιση μετρήθηκε από εναέριες φωτογραφίες ενώ το πάχος  $T_{15}$ , η κλίση  $S$  και οι κτύποι SPT-N από γεωλογικές και τοπογραφικές έρευνες. Ο χρόνος  $T_f$  προκύπτει χωρίζοντας τις χρονοϊστορίες σε κομμάτια ανάλογα με το μέγεθος της επιτάχυνσης και την συχνότητα. Έτσι οι παράμετροι  $T_f$  και  $a$  αντικαθίστανται από τις  $T_i$  τη διάρκεια και  $a_i$  τη μέση επιτάχυνση του κάθε κομματιού. Στο **Σχήμα 2.7** παρουσιάζεται η χρονοϊστορία της εδαφικής επιτάχυνσης του σεισμού Nihonkai-Chubu 1983 η οποία χωρίζεται σε 4 κομμάτια. Το δεύτερο κομμάτι διαχωρίζεται από το πρώτο όταν αυξάνεται το μέγεθος της επιτάχυνσης και σταματάει εκεί που αρχίζει και μειώνεται. Το τέταρτο κομμάτι διαχωρίζεται από το τρίτο λόγω του ότι παρατηρείται μια μικρή αύξηση της συχνότητας.



**Σχήμα 2.7:** Χρονοϊστορία εδαφικής επιτάχυνσης του σεισμού Nihonkai-Chubu 1983. (Hamada 1999)

Εν τέλει προκύπτει η μορφή της σχέσης (2.10) όπου η συνολική μετατόπιση μπορεί να υπολογιστεί από το άθροισμα  $A_i$  και  $T_i$ . Στο **Σχήμα 2.8** παρουσιάζεται μια καλή συσχέτιση των μετρημένων και των υπολογισμένων μετατοπίσεων της σχέσης (2.10).

$$D_h = \frac{0.0125 \cdot \sqrt{T_{15}} \cdot S}{(N_1)_{60}^{0.88}} \sum_i^n A_i^{0.48} \cdot T_i \quad (2.10)$$



**Σχήμα 2.8:** Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων μετατοπίσεων. (Hamada 1999)



## 2.2.4 Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού οριζόντιας μετατόπισης Valsamis et al. (2010)

Σε αντίθεση με τις πιο πάνω σχέσεις, οι σχέσεις των Valsamis et al. 2010 αναπτύχθηκαν μέσω μιας αριθμητικής μεθόδου η οποία αναπτύχθηκε μέσα από τα χρόνια στο ΕΜΠ, με σκοπό να αναπαριστά με μεγαλύτερη ακρίβεια όσα προβλήματα παρουσιάζονται κατά τη ρευστοποίηση (Paradimitriou et al. 2001, Andrianopoulos et al. 2009, Karamitros 2009). Συγκεκριμένα, η πιο πάνω αριθμητική μέθοδος προσομοιάζει την ανακυκλική συμπεριφορά μη συνεκτικών εδαφών για μικρές-μεσαίες-μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις. Η διαδικασία αυτή γίνεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC χρησιμοποιώντας δεδομένα από δοκιμές φυγοκέντρισης, έτσι ώστε να επαληθευθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μεθόδου. Η δυναμική ανάλυση έγινε με ημιτονοειδής χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, αλλά και με χρονοϊστορίες επιτάχυνσης από πραγματικούς σεισμούς που έγιναν στο Αίγιο το 1995, στο Κόμπε το 1995 και στην Λευκάδα το 2003.

Από την στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων της παραμετρικής ανάλυσης προέκυψαν δύο σχέσεις υπολογισμού οριζόντιας μετατόπισης όπου η πρώτη σχέση (2.11) αφορά οριζόντιο έδαφος με αναβαθμό ενώ η δεύτερη σχέση (2.12) αφορά έδαφος με ήπια κλίση.

Οριζόντιο έδαφος με αναβαθμό:

$$D_h = 0.035 \left(\frac{a}{g}\right)^{0.44} [T(N_{CYC} - N_L)]^{1.15} [(N_{1,60})_{cs}]^{-0.54} [H_{tot}]^{0.64} W^{0.33} H^{0.60} (1 - F_{15})^{3.0} \quad (2.11)$$

Επικλινές έδαφος:

$$D_h = 2.1 \left(\frac{a}{g}\right)^{0.5} [T(N_{CYC} - N_L)]^{0.8} [(N_{1,60})_{cs}]^{-1.0} [H_{tot}(m)] [\tan S]^{0.5} (1 - F_{15})^{3.0} \quad (2.12)$$

$D_h$  = Οριζόντια μετατόπιση (m)

$a$  = Μέση επιτάχυνση σεισμού (m/sec<sup>2</sup>)

$T$  = Δεσπόζουσα περίοδος της σεισμικής δόνησης (sec)

$N_{CYC}$  = Αριθμός σημαντικών κύκλων δόνησης

$N_L$  = Αριθμός κύκλων δόνησης μετά την ρευστοποίηση

$(N_{1,60})_{cs}$  = Διορθωμένος αριθμός κτύπων SPT

$H_{tot}$  = Το συνολικό πάχος των στρώσεων που ολισθαίνουν (m)

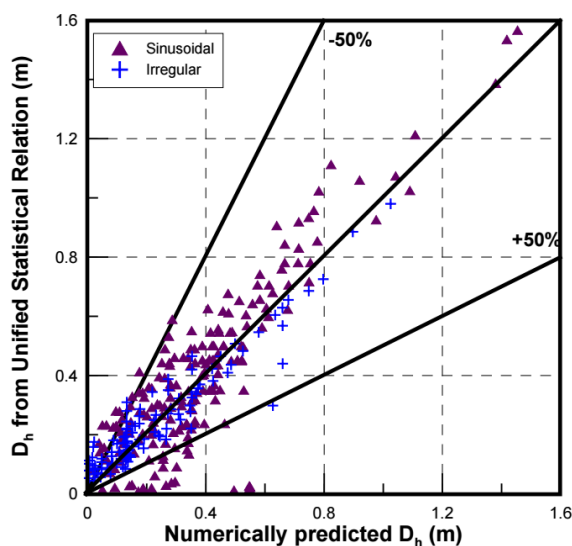
$S$  = Η κλίση της επιφάνειας του εδάφους (°)

$F_{15}$  = Ποσοστό λεπτόκοκκων (%)

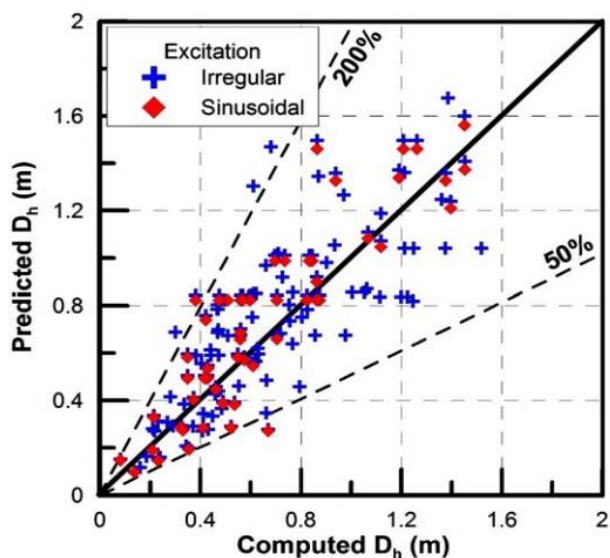
$H$  = Ύψος αναβαθμού (m)

$W$  = Ο λόγος του ύψους αναβαθμού  $H$  προς την απόσταση  $L$  του σημείου ελέγχου από την βάση του αναβαθμού

Στο **Σχήμα 2.9** γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων της σχέσης (2.11) με τα αριθμητικά αποτελέσματα επί των οποίων βασίστηκε. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της σχέσης (2.11) είναι αρκετά ικανοποιητική όπου το 95% των περιπτώσεων βρίσκονται μεταξύ των ορίων 50% και 200% των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Στο **Σχήμα 2.10** γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της σχέσης (2.12) με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα. Και σε αυτή την περίπτωση η ακρίβεια είναι ικανοποιητική μιας και το 95% των αποτελεσμάτων της σχέσης (2.12) βρίσκονται μεταξύ των ορίων 50% και 200% των αριθμητικών αποτελεσμάτων.



**Σχήμα 2.9:** Σύγκριση αποτελεσμάτων της σχέσης (2.11) για οριζόντιο έδαφος με αναβαθμό με τα αριθμητικά αποτελέσματα. (Valsamis, Bouckovalas, Dimitriadi 2010)



**Σχήμα 2.10:** Σύγκριση αποτελεσμάτων της σχέσης (2.12) για επικλινές έδαφος με τα αριθμητικά αποτελέσματα. (Valsamis, Bouckovalas, Papadimitriou 2010)

## 2.3 Σύνοψη

Με βάση όσα παρουσιάστηκαν στη βιβλιογραφική έρευνα, υπάρχουν αρκετές σχέσεις για την εκτίμηση της οριζόντιας μετατόπισης λόγω πλευρικής εξάπλωσης, οι οποίες όμως δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες. Οι λόγοι που δεν είναι συγκρίσιμες είναι πολλοί: α) διαφορετικές παράμετροι εισόδου (π.χ. σεισμολογικές, ή με βάση την ένταση της διέγερσης), β) διαφορετικού είδους και εύρους βάσεις δεδομένων (π.χ. από ιστορικά περιστατικά ή αριθμητικά αποτελέσματα), γ) διαφορετικής εφαρμοσιμότητας (π.χ. για επικλινή στρώση, ή πλησίον σε αναβαθμό, ή και συνδυασμό των δύο). Παρόλα αυτά, υπάρχουν ανοιχτά ερωτήματα που χρειάζονται απαντήσεις, που δε δίνονται από τις σχέσεις της βιβλιογραφίας, όπως:

- Πόση είναι η οριζόντια μετατόπιση πολύ κοντά στον αναβαθμό (π.χ. για  $W > 20\%$ , κατά Youd et al. 2002);

- Μέχρι τι βάθος συνεισφέρουν οι ρευστοποιήσιμες στρώσεις στην οριζόντια μετατόπιση πλησίον αναβαθμού (π.χ., πρέπει να προσμετρώνται στο  $T_{15}$  κατά Youd et al. 2002);
- Πόση είναι η οριζόντια μετατόπιση στη βάση του αναβαθμού και μπροστά από αυτόν;
- Τι σημασία έχει η διαστρωμάτωση ρευστοποιήσιμων και μη-ρευστοποιήσιμων στρώσεων στην οριζόντια μετατόπιση πλησίον αναβαθμού (π.χ. αν υπάρχει επιφανειακή μη-ρευστοποιήσιμη στρώση, ή αν αυτή βρίσκεται με ίδιο πάχος σε κάποιο βάθος);
- Πόση σημασία έχει το ύψος  $H$  του αναβαθμού στη σχετική οριζόντια μετατόπιση πλησίον αυτού (π.χ., το  $H$  δεν υπεισέρχεται ως παράμετρος στη σχέση των Youd et al. 2002);

Το να δοθούν απαντήσεις σε αυτά τα ερωτήματα είναι ο στόχος της παρούσας εργασίας.

## Κεφάλαιο 3 | Αριθμητική Μεθοδολογία

### 3.1 Εισαγωγή

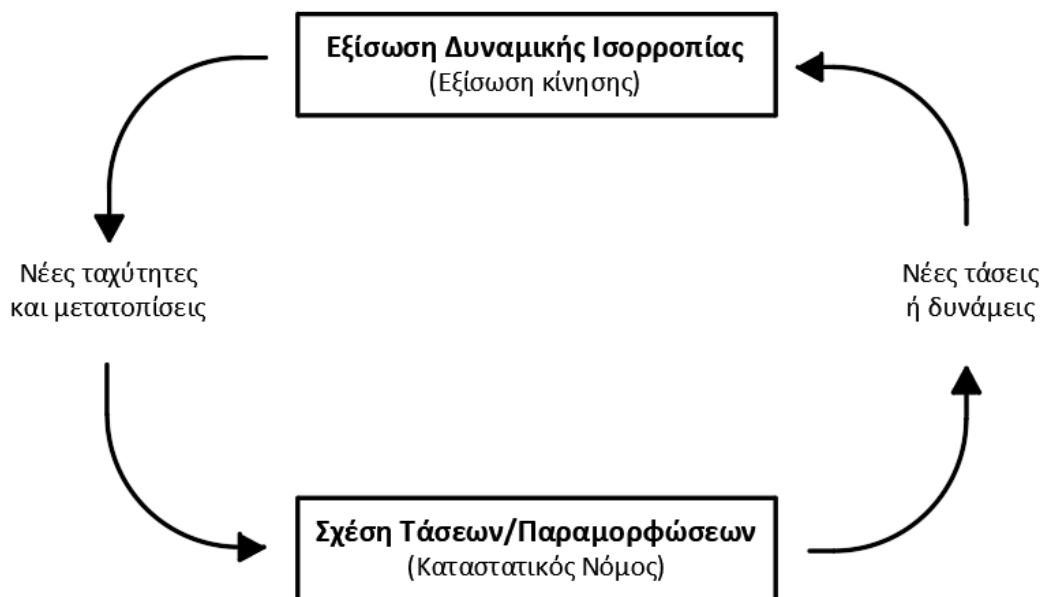
Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η αριθμητική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την καλύτερη προσομοίωση του φαινομένου της πλευρικής εξάπλωσης έπειτα από ρευστοποίηση. Αρχικά γίνεται μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθεί ο κώδικας πεπερασμένων διαφορών FLAC 2D v.7.0 (Itasca Inc. 2011) και στην συνέχεια περιγράφεται το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010) που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της άμμου σε συνθήκες ρευστοποίησης. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η γεωμετρία του προσομοιώματος και τα χαρακτηριστικά της άμμου και της αργίλου που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις και τέλος παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης που εισάχθηκε στο λογισμικό για την επίτευξη ρευστοποίησης.

### 3.2 Μεθοδολογία Αριθμητικής Προσομοίωσης

#### 3.2.1 Κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών FLAC 2D

Για την διερεύνηση του προβλήματος της πλευρικής εξάπλωσης λόγω ρευστοποίησης χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων διαφορών FLAC 2D v.7.0 ο οποίος ειδικεύεται στην διερεύνηση της συμπεριφοράς του εδάφους αλλά και βράχου. Η προσομοίωση γίνεται σε ένα κάρναβο ο οποίος διακριτοποιείται σε τετραπλευρικές ζώνες (zones), αντίστοιχα με τα στοιχεία (στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών), που οριοθετούνται από 4 κόμβους (nodes). Κάθε ζώνη συμπεριφέρεται ανάλογα με το καταστατικό νόμο τάσεων/παραμορφώσεων που την χαρακτηρίζει και τις δυνάμεις ή μετατοπίσεις που εφαρμόζονται στους κόμβους της.

Η διαδικασία που ακολουθεί ο κώδικας σε κάθε χρονικό βήμα  $\Delta t$  παρουσιάζεται συνοπτικά στο **Σχήμα 3.1**. Σε κάθε βήμα ως παράμετρος εισόδου θεωρούνται οι μετατοπίσεις των κόμβων, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των μεταβολών των τάσεων μέσω του καταστατικού νόμου κάθε ζώνης. Οι μεταβολές των τάσεων χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των νέων τάσεων, με βάση τις οποίες ελέγχεται η εξίσωση δυναμικής ισορροπίας, η οποία οδηγεί σε υπολογισμό νέων τιμών για τις μετατοπίσεις των κόμβων κάθε ζώνης, ξεκινώντας ξανά τον υπολογιστικό κύκλο. Στην περίπτωση στατικής φόρτισης εισάγεται αυτόματα μεγάλη τιμή απόσβεσης που αποτρέπει την εμφάνιση αδρανειακών δυνάμεων. Στην περίπτωση δυναμικής φόρτισης, εισάγεται από το χρήστη αριθμητική απόσβεση (είτε τοπική, ή τύπου Rayleigh), πέραν της οποίας απόσβεσης προκύπτει από τον θεωρούμενο καταστατικό νόμο.



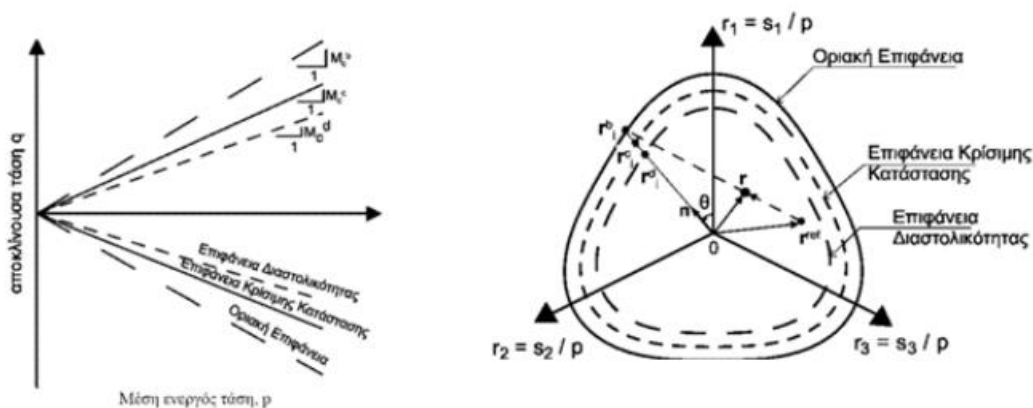
Σχήμα 3.1: Η διαδικασία που ακολουθείται σε κάθε χρονικό βήμα.

### 3.2.2 Καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND

Το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND αναπτύχθηκε το 2002 από τους Papadimitriou and Bouckonas με σκοπό την καλύτερη προσομοίωση της συμπεριφοράς μη-συνεκτικών εδαφών, σε περίπτωση ρευστοποίησης. Βασίζεται στη Θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης και εξετάζει την απόκριση του εδάφους υπό μονοτονική αλλά και υπό ανακυκλική φόρτιση μικρών, μεσαίων και μεγάλων διατμητικών ανακυκλικών παραμορφώσεων, λαμβάνοντας υπόψη και τις συνθήκες στράγγισης. Περιλαμβάνει τρεις κωνικού τύπου επιφάνειες στον χώρο των τάσεων (Σχήμα 3.2), την επιφάνεια Κρίσιμης Κατάστασης όπου οι διατμητικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται υπό σταθερές τάσεις και μηδενική ογκομετρική παραμόρφωση, την Οριακή επιφάνεια όπου εντοπίζει τη μέγιστη τιμή του λόγου των τάσεων και την επιφάνεια Διαστολικότητας η οποία υπαγορεύει το πρόσημο του λόγου της ογκομετρικής παραμόρφωσης κατά την διάρκεια της φόρτισης (σημείο αλλαγής από συστολική σε διαστολική απόκριση). Η κλίση  $M_c^b$  της Οριακής επιφάνειας και η κλίση  $M_c^d$  της επιφάνειας Διαστολικότητας ορίζονται από την παράμετρο κατάστασης  $\psi = e - e_{cs}$  κατά Been & Jefferies (1985), όπου  $e$  ο δείκτης πόρων στην τρέχουσα κατάσταση και  $e_{cs}$  ο δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση για την ίδια τιμή της ενεργού τάσης  $p'$ . Η κλίση  $M_c^c$  της επιφάνειας Κρίσιμης Κατάστασης εισάγεται ως παράμετρος.

Το προσομοίωμα NTUA-SAND χρησιμοποιεί μια σχέση απομείωσης του ελαστικού μέτρου διάτμησης τύπου Ramberg – Osgood, περιγράφοντας έτσι την οιονεί «ελαστική» συμπεριφορά του εδάφους σε μικρές έως μεσαίες ανακυκλικές διατμητικές παραμορφώσεις. Επιπρόσθετα το προσομοίωμα λαμβάνει υπόψη την επίδραση της αλλαγής της δομής του εδάφους στο πλαστικό μέτρο κράτυνσης με την χρήση ενός εμπειρικού δείκτη

που προβλέπει τον ρυθμό συσσώρευσης παραμορφώσεων υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, ή ισοδύναμα τον ρυθμό ανάπτυξης υπερπίεσεων του νερού των πόρων υπό αστραγγιστες συνθήκες. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις του προσομοιώματος NTUA-SAND και οι παράμετροι που χρήζουν βαθμονόμησης.



**Σχήμα 3.2:** Επιφάνειες του προσομοιώματος στο χώρο  $p - q$  και η προβολή τους στο επίπεδο αποκλινοσών τάσεων.

**Πίνακας 3.1:** Εξισώσεις προσομοιώματος NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010).

Περιγραφή	Εξίσωση	Παράμετροι
Κλίση της Οριακής επιφάνειας για τριαξονική θλίψη (TC)	$M_c^b = M_c^c + k_c^b \langle -\psi \rangle$	$M_c^c, k_c^b$
Κλίση της επιφάνειας Διαστολικότητας για (TC)	$M_c^d = M_c^c + k_c^d \psi$	$k_c^d$
Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης στο χώρο $[e, p]$	$\psi = e - e_{cs} = e - \Gamma_{cs} + \lambda \ln(p)$	$\Gamma_{cs}, \lambda$
Γενίκευση των επιφανειών του μοντέλου στο χώρο	$M_\theta^{c,b,d} = g(\theta, c) M_c^{c,b,d}$	$c = \frac{M_e^c}{M_c^c}$
Σχήμα των επιφανειών του προσομοιώματος στο «επίπεδο $\pi$ »	$g(\theta, c) = \frac{4c}{(1+c) - (1-c)\cos(3\theta)} - \left[ \frac{(1+c) + (1-c)\cos(3\theta)}{2} \right]$	
Γωνία Lode, $\theta$	$\cos(3\theta) = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{(r_i^b : r_i^b : r_i^b)}{(0.5(r_i^b : r_i^b))^{2/3}}$	
Επαύξηση ελαστικών παραμορφώσεων	$\dot{\epsilon}^e = \dot{\epsilon}^e + \left(\frac{\dot{\epsilon}_p^e}{3}\right) I = \frac{\dot{s}}{2G_t} + \left(\frac{\dot{p}}{K_t}\right) I$	
Επαύξηση πλαστικών παραμορφώσεων	$\dot{\epsilon}^p = \dot{\epsilon}^e + \left(\frac{\dot{\epsilon}_p^e}{3}\right) I = \langle \Lambda \rangle R$	
Δείκτης φόρτισης σε όρους επαυξητικής ενεργού τάσης	$\Lambda = \frac{L : \sigma}{K_p}$	
Διεύθυνση φόρτισης	$L = n - \frac{n : r}{3} I$	
Διεύθυνση πλαστικής επαυξητικής παραμόρφωσης	$R = n + \frac{D}{3} I$	
Επαύξηση ενεργού τάσης	$\dot{\sigma} = 2G_t \dot{\epsilon} + K_t \dot{\epsilon}_p I - \langle \Lambda \rangle (2G_t n + K_t D I)$	

Δείκτης φόρτισης σε όρους εφαρμοσμένης επαυξητικής παραμόρφωσης	$\Lambda = \frac{2G_t n: \dot{\epsilon} - (n: r) K_t \dot{\epsilon}_p}{K_p + 2G_t - (n: r) K_t D}$	
Μοναδιαίο διάνυσμα στη διεύθυνση φόρτισης	$n = \frac{r_i^b}{\sqrt{r_i^b : r_i^b}}$	
Συζυγές σημείο στις επιφάνειες του προσομοιώματος	$r_i^{c,b,d} = \left( \sqrt{\frac{2}{3}} M_{\theta}^{c,b,d} \right) n$	
Απόσταση συζυγούς σημείου από την τρέχουσα κατάσταση	$d^{b,d} = (r_i^{b,d} - r) : n$	
Μέγιστη απόσταση	$d_{\max}^{b,d} = \sqrt{\frac{2}{3}} (M_{\theta}^{b,d} + M_{\theta+\pi}^{b,d})$	
Εφαπτομενικό μέτρο Διάτμησης	$G_t = \frac{G_{\max}}{T} = \left( \frac{B p_a}{0.3 + 0.7 e^2} \sqrt{\frac{p}{p_a}} \right) \left( \frac{1}{T} \right)$	$B, \alpha_1, \gamma_1$
	$T = 1 + \left( \frac{1}{a_1} - 1 \right) \left( \frac{\sqrt{\frac{1}{2}} (r - r^{\text{ref}}) : (r - r^{\text{ref}})}{a_1 \left( \frac{G_{\max}^{\text{ref}}}{p^{\text{ref}}} \right) \gamma_1} \right)$	
Εφαπτομενικό μέτρο ισότροπης συμπίεσης	$K_t = \frac{2G_t(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)}$	$\nu$
Συνάρτηση διαστολικότητας	$D = A_o d^d \left[ 2 - \sqrt{\frac{\langle d^d \rangle}{d_{\max}^d}} \right]$	$A_o$
Πλαστικό μέτρο κράτυνσης	$K_p = \rho h_d h_f d^b$	
Εξίσωση νόμου παρεμβολής	$h_d = h_o \frac{ d^b ^3}{\langle d_{\max}^b -  d^b  \rangle}$	$h_o$
	$h_f = \frac{1 + \langle F: I \rangle^2}{1 + \langle F: n \rangle} = \frac{1 + \langle f_p \rangle^2}{1 + \langle F: n \rangle}$	
Επίδραση της αλλαγής της δομής	$\dot{f}_p = N \dot{\epsilon}_p^p$ $\dot{f} = -N \langle -\dot{\epsilon}_p^p \rangle [F_m n + f]$ $N = N_o \left( \frac{p_a}{\sigma_{10}} \right) \langle -\psi_o \rangle$	$N_o$

Το καταστατικό προσομοίωμα βαθμονομήθηκε από τους Andrianopoulos et al. (2010) για λεπτή ομοιόμορφη άμμο (Nevada) χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του ερευνητικού προγράμματος VELACS (Arulmoli et al. 1992) και η συμπεριφορά του επαληθεύτηκε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων με αποτελέσματα σε πειράματα φυγοκέντρισης. Στον **Πίνακα 3.2** παρουσιάζονται οι παράμετροι που

βαθμονομήθηκαν και οι τιμές τους μπορούν να εφαρμοστούν σε ανακυκλική φόρτιση, με εξαίρεση των παραμέτρων  $B$  και  $\alpha_1$  οι οποίες αλλάζουν τιμές για μονοτονική φόρτιση.

**Πίνακας 3.2:** Βαθμονομημένες παράμετροι προσομοιώματος NTUA-SAND για άμμο Nevada (Andrianopoulos et al.2010).

Παράμετροι	Φυσική Σημασία	Τιμή
$M_c^c$	Κλίση της επιφάνειας Κρίσιμης Κατάστασης για τριαξονική θλίψη (TC)	1.25
$c$	Λόγος της κλίσης της επιφάνειας Κρίσιμης Κατάστασης για τριαξονικό εφελκυσμό (TE) προς την αντίστοιχη κλίση για τριαξονική θλίψη (TC)	0.72
$\Gamma_{cs}$	Δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση για $p=1\text{kPa}$	0.91
$\lambda$	Κλίση της γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης στο επίπεδο $[e-\ln p]$	0.022
$B$	Παράμετρος του ελαστικού μέτρου διάτμησης	600 (100*)
$\nu$	Λόγος Poisson	0.33
$k_c^b$	Επίδραση της παραμέτρου $\psi$ στην κλίση της Οριακής Επιφάνειας για TC	1.45
$k_c^d$	Επίδραση της παραμέτρου $\psi$ στην κλίση της Επιφάνειας Διαστολικότητας για TC	0.3
$\gamma_1$	Χαρακτηριστική διατμητική παραμόρφωση	0.025%
$\alpha_1$	Ρυθμός απομείωσης του ελαστικού μέτρου διάτμησης	0.6 (1.0*)
$A_0$	Παράμετρος της συνάρτησης διαστολικότητας	0.8
$h_0$	Παράμετρος του πλαστικού μέτρου κράτυνσης	15,000
$N_0$	Παράμετρος της επίδρασης της αλλαγής της δομής	40,000

\*Τιμές για μονοτονική φόρτιση

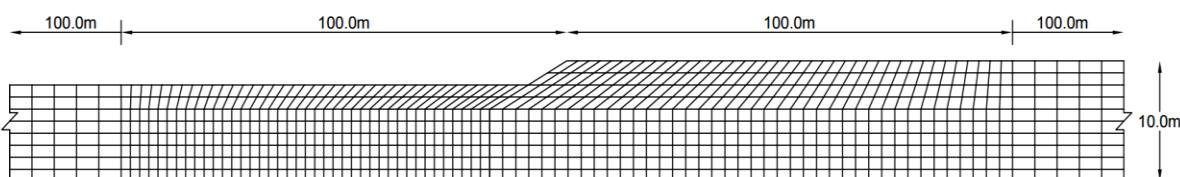
### 3.3 Περιγραφή Αριθμητικής Προσομοίωσης

Για την διερεύνηση του φαινομένου της πλευρικής εξάπλωσης λόγω ρευστοποίησης πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις στο λογισμικό πεπερασμένων διαφορών FLAC 2D. Συγκεκριμένα εξετάζεται η περίπτωση οριζόντιας ρευστοποιήσιμης στρώσης προς αναβαθμό διαφορετικών τιμών ύψους  $H$ , με εισαγωγή μη-ρευστοποιήσιμης στρώσης διαφορετικών τιμών πάχους και διαφορετικών τιμών βάθους εμφάνισης.



### 3.3.1 Προσομοίωση εδάφους

Η προσομοίωση του εδάφους έγινε σε κάναβο 300x10 ζωνών με πύκνωση στην περιοχή του αναβαθμού για μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ στα 100m μπροστά και πίσω από τη στέψη του αναβαθμού ο κάναβος αραιώνει για ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού χρόνου. Συγκεκριμένα, οι ζώνες έχουν διαστάσεις 1.0m x 1.0m στην περιοχή του αναβαθμού και πέρα των 100m και μέχρι τα όρια του καννάβου που βρίσκονται στα 200m από τη στέψη, οι ζώνες έχουν διαστάσεις 2.0m x 1.0m. Όσον αφορά στις συνοριακές συνθήκες, κατά την στατική ανάλυση περιορίστηκε η οριζόντια μετακίνηση στα πλευρικά όρια και στο κάτω όριο περιορίστηκε η κατακόρυφη μετακίνηση. Κατά την δυναμική ανάλυση λόγω διαφορετικού ύψους στα πλευρικά σύνορα δεν κατέστη δυνατή η χρήση «συνδεδεμένων κόμβων» (tied nodes), ενώ η χρήση συνόρων ελεύθερου πεδίου δεν συνιστάται λόγω της χρήσης του NTUA-SAND αλλά και της κινηματικής του προβλήματος. Συνεπώς, περιορίστηκε μόνο η κατακόρυφη μετατόπιση αυτών, αφήνοντας ελεύθερη την οριζόντια μετατόπιση, καθώς στόχος είναι η μελέτη της πλευρικής εξάπλωσης. Σε κάθε περίπτωση, το μεγάλο εύρος του καννάβου θεωρείται επαρκές ώστε να μην επηρεάζεται η απόκριση στην περιοχή του αναβαθμού, που είναι και η περιοχή ενδιαφέροντος. Στο **Σχήμα 3.3** παρουσιάζεται ο κάναβος με διαφορετική κλίμακα για το ύψος και το μήκος και με τομή στην περιοχή που αραιώνει για πιο λεπτομερή παρουσίαση του.



**Σχήμα 3.3:** Κάνναβος οριζόντιας ρευστοποιήσιμης στρώσης πάχους 10 m, πλησίον αναβαθμού ύψους  $H = 2\text{m}$ .

Η εδαφική στρώση έχει πάχος 10m και η κλίση του αναβαθμού είναι ίση με  $30^\circ$  με το ύψος του να αλλάζει από  $H = 2\text{m}$  σε  $H = 4\text{m}$  για κάθε σειρά αναλύσεων. Συνεπώς, μπροστά από τον αναβαθμό το πάχος του εδάφους είναι 8 ή 6m, αντίστοιχα. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ΣΥΟ βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους, και συνεπώς δημιουργείται υπόγεια ροή στον αναβαθμό λόγω κεκλιμένης ΣΥΟ.

Ως ρευστοποιήσιμη στρώση θεωρήθηκε άμμος Nevada σχετικής πυκνότητας  $D_r = 45\%$ , προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND με τις τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν από την βαθμονόμηση των Andrianopoulos et al. (2010). Ως μη-ρευστοποιήσιμη στρώση θεωρήθηκε άργιλος, που προσομοιώθηκε με το καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb. Στον **Πίνακα 3.3** παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των δύο τύπων εδάφους, με την άργιλο να προσομοιώνεται ως υλικό με αστραγγιστή διατμητική αντοχή  $C_u = 30\text{ kPa}$ , τιμές των  $G$  και  $K$  για την άργιλο να αντιστοιχούν

στη δυναμική φόρτιση ( $V_s \approx 300\text{m/s}$ ) και με θεώρηση υστερητικής απόσβεσης όταν βρίσκεται στην ελαστική περιοχή.

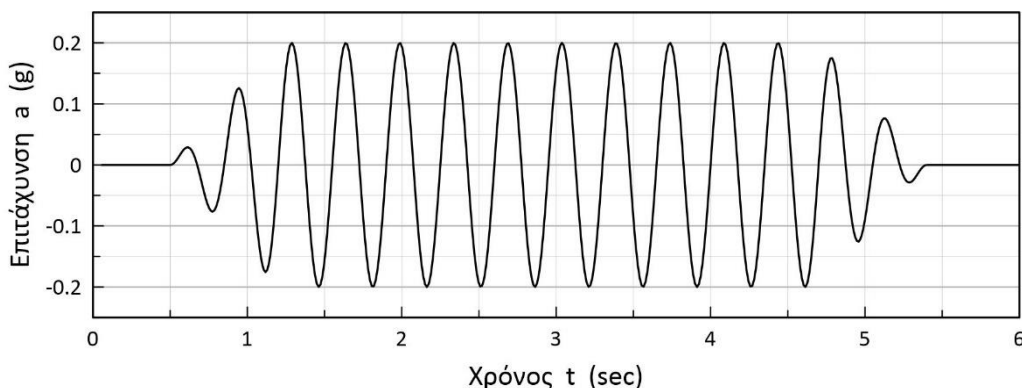
**Πίνακας 3.3:** Χαρακτηριστικά εδάφους

Παράμετροι	Άμμος Nevada	Άργιλος
Σχετική πυκνότητα $D_r$ (%)	45	-
Δείκτης πόρων $e$	0.7178	-
Πορώδες $n$	0.418	-
Πυκνότητα ξηρού εδάφους $\rho_d$ ( $\text{Mg/m}^3$ )	1.554	1.554
Πυκνότητα κορεσμένου εδάφους $\rho_{\text{sat}}$ ( $\text{Mg/m}^3$ )	1.98	1.98
Γωνία τριβής $\phi$ ( $^\circ$ )	NTUA-SAND	0
Γωνία Διαστολικότητας $\psi$ ( $^\circ$ )	NTUA-SAND	0
Συνοχή $c$ (kPa)	NTUA-SAND	30
Διαπερατότητα $k$ (m/s)	$6.6 \cdot 10^{-5}$	$6.6 \cdot 10^{-7}$
Μέτρο Ισότροπης Συμπίεσης $K$ (MPa)	NTUA-SAND	390
Μέτρο Διάτμησης $G$ (MPa)	NTUA-SAND	180

### 3.3.2 Προσομοίωση Απόσβεσης και Σεισμικής Διέγερσης

Στην περίπτωση της άμμου χρησιμοποιήθηκε «τοπική» απόσβεση ίση με 2% (ανεξάρτητη της συχνότητας), η οποία προστίθεται σε όποια υστερητική απόσβεση προβλέπει το προσομοίωμα NTUA-SAND. Στην άργιλο χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Υστερητικής απόσβεσης του κώδικα FLAC με όνομα sig3 (Sigmoidal model 3), όπου για τον υπολογισμό του συντελεστή απόσβεσης χρειάζεται να οριστούν από τον χρήστη οι παράμετροι  $a$ ,  $b$  και  $x_0$  οι οποίες ορίστηκαν ως  $a = 1.00$ ,  $b = -0.50$  και  $x_0 = -1.30$ .

Ως σεισμική διέγερση θεωρήθηκε αρμονική διέγερση βάσης, με εισαγωγή χρονοϊστορίας οριζόντιας επιτάχυνσης στην βάση που αποτελείται από 14 κύκλους με περίοδο  $T = 0.35\text{sec}$  και μέγιστη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση  $a_{\text{max}} = 0.2\text{g}$ . Οι πρώτοι και τελευταίοι δύο κύκλοι έχουν μειωμένη επιτάχυνση έτσι ώστε να μην επιβάλλεται «απότομα» η αρμονική διέγερση σταθερού εύρους διάρκειας 10 κύκλων, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 3.4**.



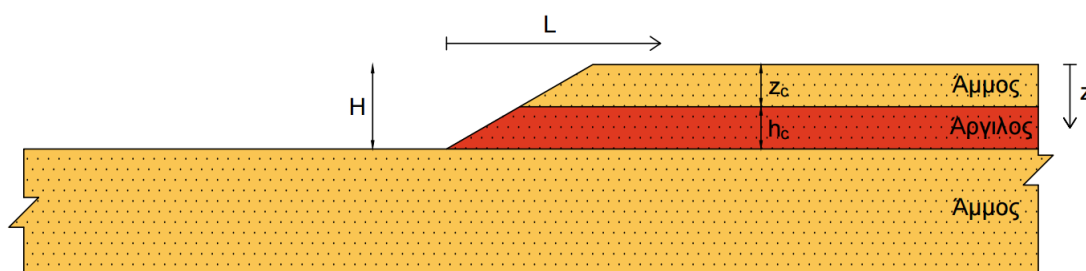
**Σχήμα 3.4:** Χρονοϊστορία επιτάχυνσης της αρμονικής διέγερσης βάσης.

## Κεφάλαιο 4 | Πλευρική εξάπλωση οριζόντιας στρώσης προς αναβαθμό

### 4.1 Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων που εκτελέστηκαν ακολουθώντας την μεθοδολογία που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3. Σκοπός των αναλύσεων είναι να διερευνηθούν το φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης οριζόντιας στρώσης προς αναβαθμό και να δώσουν απαντήσεις στα ερωτήματα που προέκυψαν κατά την βιβλιογραφική έρευνα που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2.

Αρχικά, στην παράγραφο 4.2, παρουσιάζεται η απόκριση ομοιόμορφης ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου πάχους 10m με ρηχό αναβαθμό ύψους  $H = 2\text{m}$ . Στη συνέχεια, στην παράγραφο 4.3, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την ίδια ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση, όταν ο αναβαθμός είναι σχετικά βαθύς ( $H = 4\text{m}$ ), δηλαδή σε σύγκριση με ό,τι παρουσιάζεται στην παράγραφο 4.2 αποτυπώνεται η επίδραση του ύψους του αναβαθμού. Ακολουθώντας, στην παράγραφο 4.4 διερευνάται η πλευρική εξάπλωση εδάφους προς αναβαθμό με επιφανειακή αργιλική στρώση διαφορετικού πάχους  $h_c$ , ενώ στην παράγραφο 4.5 γίνεται το ίδιο για έδαφος με αργιλική στρώση σε διαφορετικά βάθη  $z_c$ . Τα μεγέθη ενδιαφέροντος ορίζονται συνοπτικά, με αργιλική μη-ρευστοποιήσιμη στρώση διαφορετικών τιμών πάχους  $h_c$  και βάθους  $z_c$  που εμφανίζεται, όπως αυτά ορίζονται στο **Σχήμα 4.1**.



**Σχήμα 4.1:** Εδαφικό προφίλ παραμετρικών αναλύσεων.

Πιο συγκεκριμένα στο **Σχήμα 4.1** παρουσιάζεται το εδαφικό προφίλ των παραμετρικών αναλύσεων, όπου  $H$  το ύψος του αναβαθμού,  $L$  η απόσταση από τον πόδα του αναβαθμού,  $z$  το βάθος από την επιφάνεια πίσω από τον αναβαθμό,  $z_c$  το βάθος όπου συναντάται η στρώση της αργίλου και  $h_c$  το πάχος της στρώσης αυτής.

Στον **Πίνακα 4.1** συνοψίζονται οι παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τις ανάγκες του παρόντος κεφαλαίου.

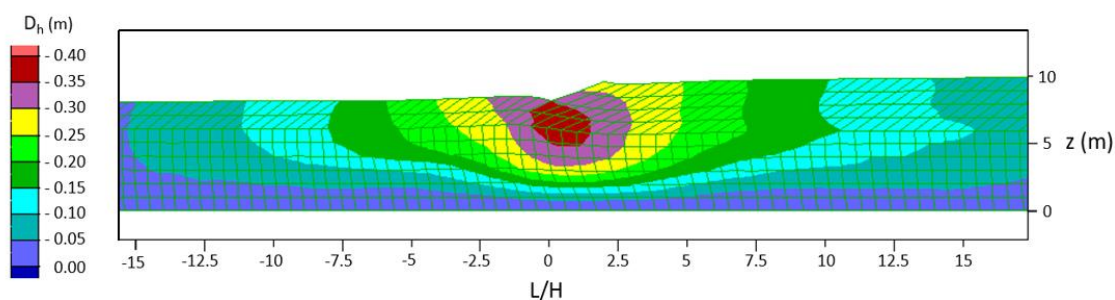
**Πίνακας 4.1:** Χαρακτηριστικά παραμετρικών αναλύσεων πλευρικής εξάπλωσης στρώσης προς αναβαθμό του παρόντος κεφαλαίου.

Ανάλυση	Πάχος στρώσης αργίλου $h_c$ (m)	Βάθος στρώσης αργίλου $z_c$ (m)
<b>H = 2 m</b>		
1-1	0	0
1-2	1	0
1-3	2	0
1-4	3	0
1-5	4	0
1-6	1	1
1-7	1	2
1-8	1	4
<b>H = 4 m</b>		
2-1	0	0
2-2	1	0
2-3	2	0
2-4	4	0
2-5	5	0
2-6	6	0
2-7	2	1
2-8	2	2
2-9	2	4

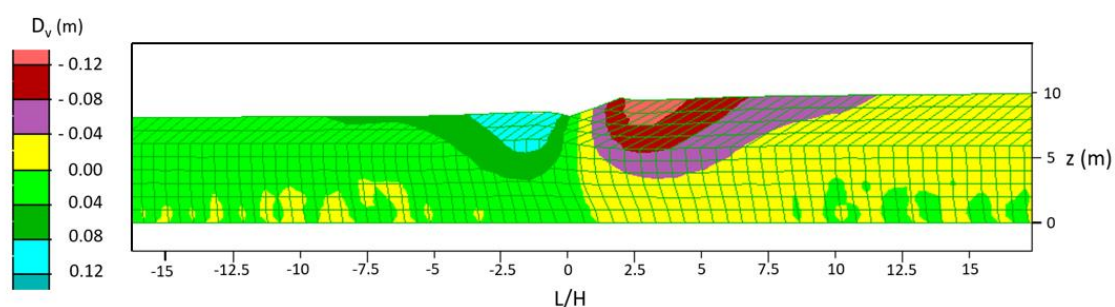
## 4.2: Τυπική απόκριση ομοιόμορφης στρώσης προς αναβαθμό

Εδώ διερευνάται η απόκριση οριζόντιας ομοιόμορφης ρευστοποιήσιμης στρώσης πάχους  $T_{15} = 10\text{m}$  με αναβαθμό ύψους  $H = 2\text{m}$ , υπό την αρμονική σεισμική διέγερση που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 (βλ. υπό-παράγραφος 3.3.2). Με βάση την ορολογία του Youd et al. (2002), το πάχος εδάφους που είναι ρευστοποιήσιμο και προκαλεί την πλευρική εξάπλωση ορίζεται ως  $T_{15}$ , οπότε εδώ  $T_{15} = 10\text{m}$ . Στο **Σχήμα 4.2** παρουσιάζεται η μεταβολή των οριζόντιων μετατοπίσεων  $D_h$  κοντά στην περιοχή του αναβαθμού, με τιμές  $D_h < 0$  να αντιστοιχούν σε μετακινήσεις προς τα αριστερά, δηλαδή μετακινήσεις προς τον αναβαθμό για την περιοχή πίσω από αυτόν και το ανάποδο για την περιοχή μπροστά από αυτόν. Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 4.3** παρουσιάζεται η μεταβολή των κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$ , με τιμές  $D_v < 0$  να αντιστοιχούν σε καθιζήσεις και τιμές  $D_v > 0$  σε ανυψώσεις του εδάφους. Για σκοπούς σύγκρισης η απόσταση από τη βάση του αναβαθμού κανονικοποιείται ως προς το ύψος του ( $L/H$ ), και παίρνει αρνητικές τιμές μπροστά από τον αναβαθμό και θετικές πίσω από αυτόν.

Στο **Σχήμα 4.2** παρατηρείται πως η οριζόντια μετατόπιση  $D_h$  παίρνει τη μέγιστη τιμή της στον πόδα του αναβαθμού και μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση  $L/H$  από αυτόν. Αδρά, η  $D_h$  δείχνει να παίρνει τιμές ίσες με το 33% της μέγιστης σε απόσταση  $L/H = \pm 12.5$  από τον πόδα του αναβαθμού, δηλαδή δείχνει να μειώνεται με παρόμοιο ρυθμό τόσο πίσω όσο και μπροστά από τον αναβαθμό. Επιπλέον, παρατηρούνται σημαντικές οριζόντιες μετατοπίσεις (π.χ. ίσες με το 33% της μέγιστης) και σε βάθη  $z = 8 - 9$  m, δηλαδή σε βάθη μεγαλύτερα από  $3H$  από τον πόδα του αναβαθμού, κάτι που μάλλον δε συμφωνεί με τα ευρήματα της βιβλιογραφίας (βλ. Κεφάλαιο 2). Επιπλέον, στο **Σχήμα 4.3** προκύπτει ότι το έδαφος πίσω από τον αναβαθμό καθιζάνει, ενώ το έδαφος μπροστά από αυτόν ανυψώνεται, με τα φαινόμενα αυτά να μειώνονται με την απόσταση  $L/H$ . Η μέγιστη καθίζηση προκύπτει πίσω από τη στέψη του αναβαθμού (σε απόσταση έως  $L/H = 5$ ), ενώ η μέγιστη ανύψωση σε κοντινή απόσταση μπροστά από τον πόδα (σε απόσταση έως  $L/H = -5$ ). Γενικώς, η περιοχή μεγάλων  $D_v$  (τιμές μεγαλύτερες από 33% της μέγιστης ανύψωσης ή καθίζησης) φθάνει έως αποστάσεις  $L/H = \pm 12.5$  από τον πόδα του αναβαθμού, δηλαδή είναι αντίστοιχη με την περιοχή μεγάλων  $D_h$ .



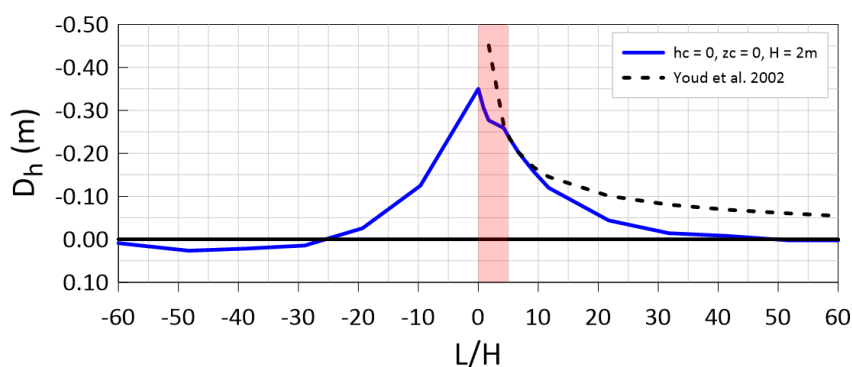
**Σχήμα 4.2:** Μεταβολή οριζόντιων μετατοπίσεων  $D_h$ , λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους  $T_{15} = 10$  m πλησίον αναβαθμού με ύψος  $H = 2$  m.



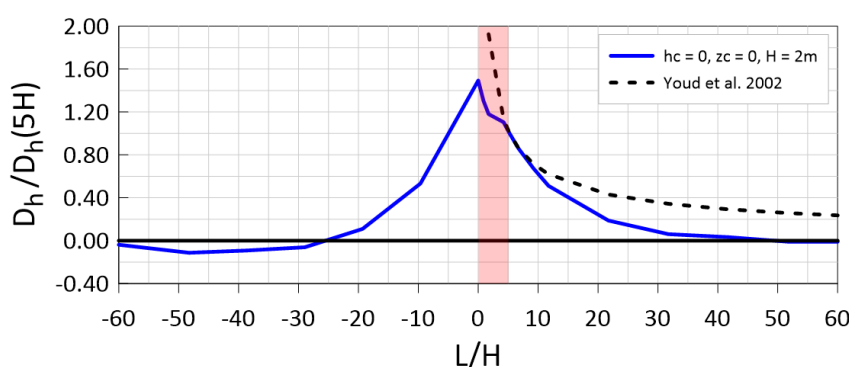
**Σχήμα 4.3:** Μεταβολή κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$ , λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους  $T_{15} = 10$  m πλησίον αναβαθμού με ύψος  $H = 2$  m.

Πρακτικά, η μορφή παραμόρφωσης του εδάφους πλησίον του αναβαθμού μοιάζει με απώλεια ευστάθειας με κυκλική επιφάνεια ολίσθησης με κέντρο περιστροφής πάνω από τον πόδα, μέγιστο βάθος περί τα 2m πάνω από το τέλος της ρευστοποιήσιμης στρώσης και εύρος έως  $L = \pm 12.5H$ .

Για να γίνουν σαφέστερες οι μετατοπίσεις του πρσανούς, στο διάγραμμα του **Σχήματος 4.4** παρουσιάζεται το μέγεθος της οριζόντιας μετατόπισης  $D_h$  στην επιφάνεια του εδάφους προς την κανονικοποιημένη απόσταση  $L/H$ . Σε συμφωνία με την εμπειρική σχέση Youd et al. (2002), το σημείο  $L = 0$  είναι στον πόδα του αναβαθμού, απ' όπου προκύπτει και η παράμετρος  $W = L/H$  που υφιστάται στην εμπειρική σχέση εκτίμησης της  $D_h$  που προτείνεται. Υπενθυμίζεται, ότι στη εν λόγω σχέση, τίθεται ο περιορισμός στην χρήση της για  $W > 20\%$  (στο διάγραμμα η σκιασμένη περιοχή κόκκινου χρώματος με  $0 < L/H < 5$ ) ενώ δεν υπάρχει καμία αναφορά στο τι συμβαίνει για  $L/H < 0$ . Χάριν σύγκρισης, στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται και η σχέση των Youd et al. (2002), με την παραδοχή ότι προβλέπει τέλεια την τιμή της  $D_h$  σε απόσταση  $L/H = 5$  (ή για  $W = 20\%$ ). Χάριν γενίκευσης, τα ίδια αριθμητικά αποτελέσματα και η σχέση των Youd et al. (2002) παρουσιάζονται κανονικοποιημένα ως προς την τιμή  $D_h(5H)$  στο **Σχήμα 4.5**.



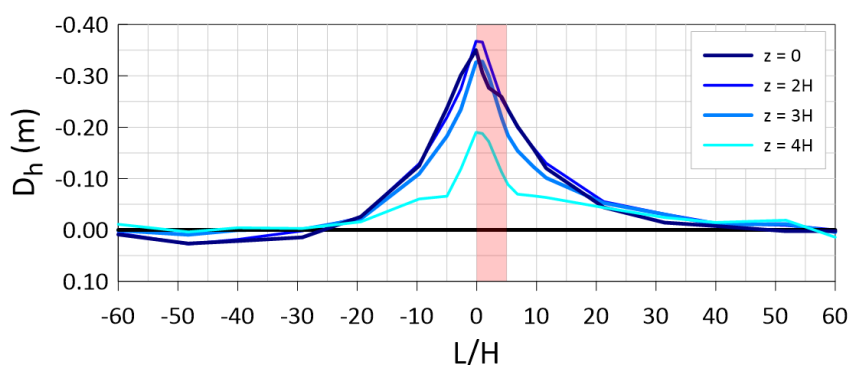
**Σχήμα 4.4:** Οι οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  στην επιφάνεια του εδάφους ως συνάρτηση της απόστασης  $L/H$  σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους  $T_{15} = 10\text{m}$  με ύψος αναβαθμού  $H = 2\text{m}$ , και σύγκριση με τη σχέση των Youd et al. (2002).



**Σχήμα 4.5:** Οι κανονικοποιημένες οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h/D_h(5H)$  ως συνάρτηση της απόστασης  $L/H$  σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους  $T_{15} = 10\text{m}$  με ύψος αναβαθμού  $H = 2\text{m}$ , και σύγκριση με τη σχέση των Youd et al. (2002).

Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι η  $D_h$  είναι έως 50% μεγαλύτερη στον πόδα σε σχέση με την τιμή  $D_h(5H)$ , και ότι πρακτικώς μηδενίζεται σε αποστάσεις  $L = 35H$  και  $-25H$  πίσω και μπροστά από τον πόδα του. Επιπλέον προκύπτει ότι η σχέση των Youd et al. (2002) μάλλον υπερεκτιμά τις τιμές  $D_h$  για  $L/H > 0$ , όταν η τιμή  $D_h(5H)$  προβλέπεται τέλεια.

Από το **Σχήμα 4.2** προέκυψε πως οι οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  παρατηρούνται και σε αρκετά μεγάλο βάθος, ιδιαίτερα στη περιοχή του αναβαθμού. Ως εκ τούτου στο διάγραμμα του **Σχήματος 4.6** παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις στην επιφάνεια και σε βάθη  $z = 2H$ ,  $z = 3H$  και  $z = 4H$ . Παρατηρείται πως το μέγεθος των μετατοπίσεων παραμένει πρακτικώς σταθερό μέχρι και σε βάθος  $z = 3H$  (ή  $2H$  από τον πόδα του αναβαθμού), και φαίνεται να μειώνεται κατά 50% σε βάθος  $z = 4H$  (ή  $3H$  από τον πόδα).

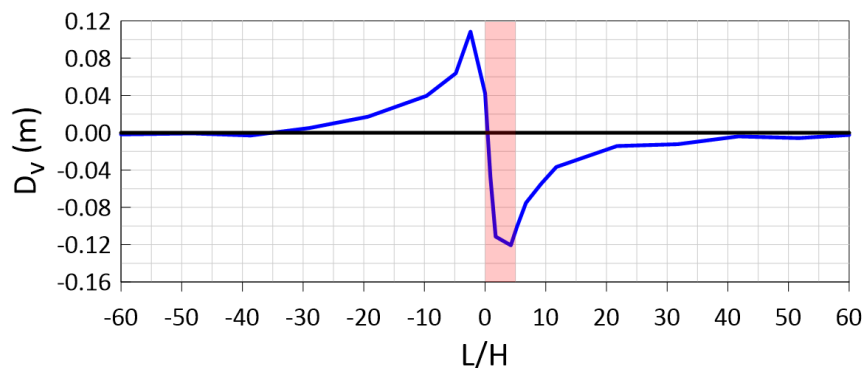


**Σχήμα 4.6:** Οι οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  ως συνάρτηση της απόστασης  $L/H$  στην επιφάνεια και σε βάθη  $z = 2H$ ,  $z = 3H$  και  $z = 4H$ , σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους  $T_{15} = 10m$  με ύψος αναβαθμού  $H = 2m$ .

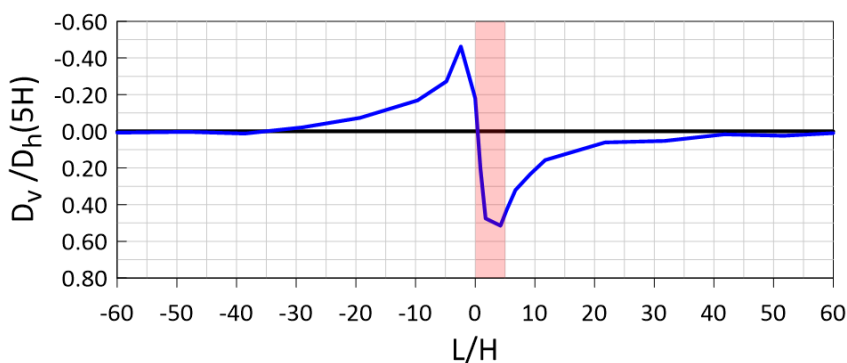
Στο σχεδιασμό έργων Πολιτικού Μηχανικού, εξίσου σημαντικές των οριζόντιων μετατοπίσεων  $D_h$  είναι και οι κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v$ . Στο **Σχήμα 4.7** παρουσιάζονται οι  $D_v$  στην επιφάνεια του εδάφους, ως προς τον λόγο  $L/H$ , και στο **Σχήμα 4.8** ο λόγος των  $D_v$  ως προς την οριζόντια μετατόπιση  $D_h(5H)$  που παρατηρείται σε απόσταση  $L = 5H$  από τη βάση του αναβαθμού, ως προς τον λόγο  $L/H$ . Η συσχέτιση με την τιμή  $D_h(5H)$  γίνεται εδώ μόνο και μόνο γιατί οι Youd et al. (2002), αλλά και όλοι οι υπόλοιποι ερευνητές του φαινομένου της πλευρικής εξάπλωσης, κάνουν αναφορά μόνο σε οριζόντιες μετατοπίσεις.

Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι όλη η περιοχή πίσω από τον πόδα καθιζάνει, ενώ όλη η περιοχή μπροστά από αυτόν ανυψώνεται. Η μέγιστη καθίζηση είναι σε απόσταση έως  $L/H = 5$ , όπως και η μέγιστη ανύψωση (σε απόσταση έως  $L/H = -5$ ), τα μέτρα των οποίων είναι περίπου ίδια και ίσα με το 50% της  $D_h(5H)$ . Επιπλέον, προκύπτει ότι  $D_v = 0$  στον πόδα, ενώ οι κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v$  πρακτικώς μηδενίζονται σε αποστάσεις  $L = +35H$  και  $-30H$  πίσω και μπροστά από τον πόδα, αντίστοιχα. Δηλαδή ο μηδενισμός των κατακόρυφων μετατοπίσεων συμπίπτει χωρικά με τον μηδενισμό και των οριζόντιων μετατοπίσεων τόσο πίσω όσο και μπροστά από τον πόδα του αναβαθμού. Επομένως προκύπτει πως κατά την ρευστοποίηση προκύπτουν σημαντικές κατακόρυφες μετατοπίσεις που φτάνουν μέχρι και το 50% της  $D_h(5H)$ , τουλάχιστον στην περιοχή πλησίον του αναβαθμού.





**Σχήμα 4.7:** Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v$  στην επιφάνεια του εδάφους, ως συνάρτηση της απόστασης  $L/H$ , σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους  $T_{15} = 10\text{m}$  με ύψος αναβαθμού  $H = 2\text{m}$ .



**Σχήμα 4.8:** Ο λόγος των κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$  προς την οριζόντια μετατόπιση  $D_h(5H)$  σε απόσταση  $L = 5H$  από τη βάση του αναβαθμού, ως συνάρτηση της απόστασης  $L/H$ , σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους  $T_{15} = 10\text{m}$  με ύψος αναβαθμού  $H = 2\text{m}$ .

### 4.3 Επίδραση ύψους αναβαθμού στην πλευρική εξάπλωση ομοιόμορφης στρώσης

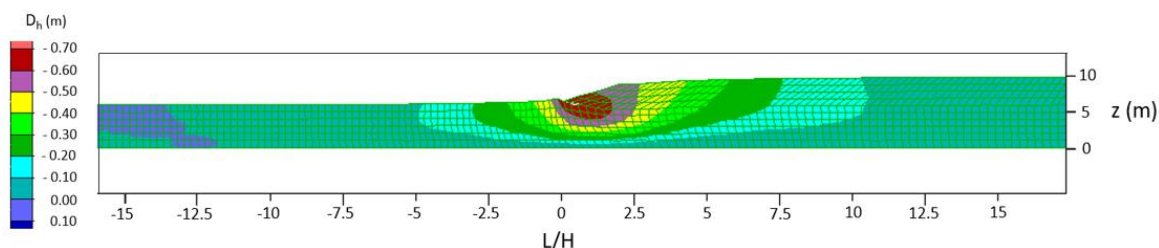
Κατά τη βιβλιογραφική έρευνα που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2 προέκυψε η ανάγκη διερεύνησης της επιρροής του ύψους αναβαθμού  $H$ , στο μέγεθος των οριζόντιων και κατακόρυφων μετατοπίσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης. Ως εκ τούτου, στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται η απόκριση ομοιόμορφης ρευστοποιήσιμης στρώσης πάχους  $T_{15} = 10\text{m}$ , με ύψος αναβαθμού  $H = 4\text{m}$ , η οποία είναι ευθέως συγκρίσιμη με την απόκριση για αναβαθμό με ύψος  $H = 2\text{m}$  στην παράγραφο 4.2.

Στο **Σχήμα 4.9** παρουσιάζεται η μεταβολή των οριζόντιων μετατοπίσεων  $D_h$  κοντά στην περιοχή του αναβαθμού και στο **Σχήμα 4.10** παρουσιάζεται η μεταβολή των κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$  στην αντίστοιχη περιοχή, όταν ο αναβαθμός έχει ύψος  $H = 4\text{m}$ . Παρατηρείται πως η μέγιστη  $D_h$  είναι και πάλι στον πόδα του αναβαθμού, αλλά είναι σημαντικά μεγαλύτερη απ’ ό,τι για  $H = 2\text{m}$ . Από εκεί και πέρα, και πάλι μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση  $L/H$ , με διαφορετικό όμως ρυθμό μπροστά και πίσω από τον αναβαθμό. Συγκεκριμένα, πίσω από τον αναβαθμό, σημαντικές οριζόντιες μετατοπίσεις (π.χ.

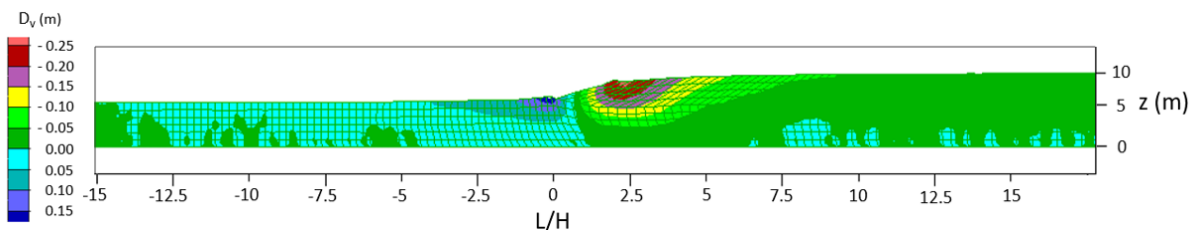


ίσες με το 33% της μέγιστης) παρατηρούνται σε απόσταση μέχρι  $L/H = 7.5$ , ενώ μπροστά από τον αναβαθμό παρατηρούνται σε απόσταση μέχρι  $L/H = -3.0$ . Υπενθυμίζεται πως για ύψος αναβαθμού  $H = 2\text{m}$  (παρ. 4.2), σημαντικές οριζόντιες μετατοπίσεις έφταναν σε απόσταση μέχρι  $L/H = \pm 12.5$  μπροστά και πίσω από τον αναβαθμό δηλαδή οι σαφώς μεγαλύτερες μετατοπίσεις περιορίζονται στη στενή γειτονιά υψηλών αναβαθμών. Επιπλέον, σημαντικές οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  παρατηρούνται και σε βάθος  $z = 8\text{m}$ , ήτοι βάθος  $2H$  αντίστοιχα με ό,τι παρατηρήθηκε και για  $H = 2\text{m}$ .

Επιπρόσθετα, στο **Σχήμα 4.10** παρατηρείται πως η μέγιστη καθίζηση είναι και πάλι μεγαλύτερη απ’ ότι για  $H = 2\text{m}$  και προκύπτει πίσω από τη στέψη του αναβαθμού σε απόσταση έως  $L/H = 2.5$ , ενώ μειώνεται σημαντικά σε απόσταση έως  $L/H = 7.5$ . Αντίστοιχα, η μέγιστη ανύψωση προκύπτει πολύ κοντά στον πόδα του αναβαθμού και μειώνεται σημαντικά σε απόσταση έως  $L/H = -2.5$ , ακολουθώντας έτσι τον ρυθμό μεταβολής των οριζόντιων μετατοπίσεων, όπως συμβαίνει και για  $H = 2\text{m}$ .



**Σχήμα 4.9:** Μεταβολή οριζόντιων μετατοπίσεων  $D_h$ , λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους  $T_{15} = 10\text{m}$  με αναβαθμό ύψους  $H = 4\text{m}$ .



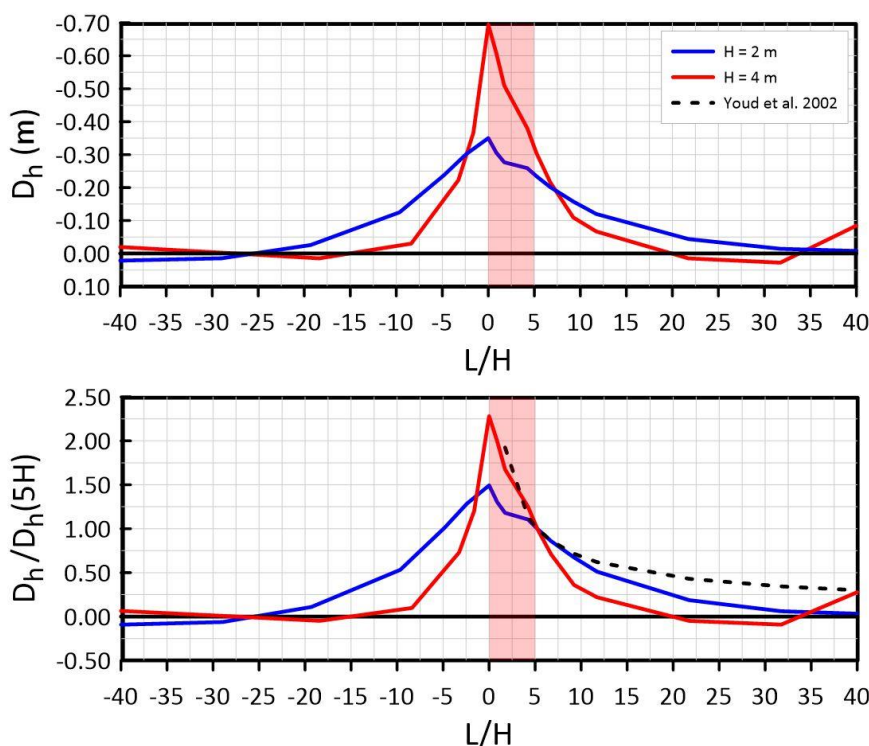
**Σχήμα 4.10:** Μεταβολή κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$ , λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους  $T_{15} = 10\text{m}$  με αναβαθμό ύψους  $H = 4\text{m}$ .

Στα παρακάτω διαγράμματα μελετάται λεπτομερέστερα η απόκριση της ομοιόμορφης στρώσης με ύψος αναβαθμού  $H = 4\text{m}$ , ενώ προστίθεται η απόκριση της ίδιας στρώσης με ύψος αναβαθμού  $H = 2\text{m}$  για σκοπούς σύγκρισης. Στο **Σχήμα 4.11** παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  και οι κανονικοποιημένες οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h/D_h(5H)$  που προκύπτουν στην επιφάνεια του εδάφους ως συνάρτηση της κανονικοποιημένης απόστασης  $L/H$ .

Από τα διαγράμματα του **Σχήματος 4.11** προκύπτει πως η μέγιστη  $D_h$  στην περίπτωση με  $H = 4\text{m}$  είναι διπλάσια της μέγιστης  $D_h$  στην περίπτωση με  $H = 2\text{m}$ . Επιπλέον, στον πόδα του αναβαθμού η  $D_h$  είναι έως 125% μεγαλύτερη από την  $D_h(5H)$  όταν  $H = 4\text{m}$ , ενώ όταν  $H = 2\text{m}$

η αύξηση αυτή έφτανε μέχρι το 50%. Γενικά παρατηρείται μια αύξηση των  $D_h$  στην περιοχή  $-2.5 < L/H < 5$  όταν αυξάνεται το  $H$  και αυτό οφείλεται στο γεγονός πως όσο αυξάνεται το  $H$ , η ευστάθεια του αναβαθμού (ακόμη και στατικά) μειώνεται με αποτέλεσμα να προκύπτουν μεγαλύτερες μετατοπίσεις.

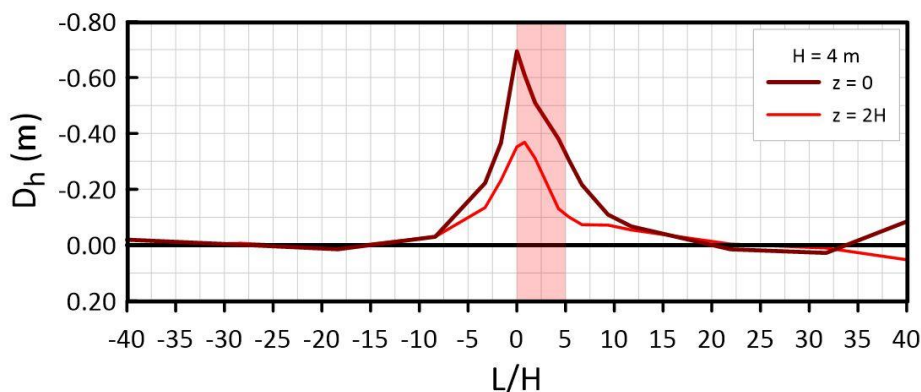
Επιπρόσθετα, παρατηρείται πως οι οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  μηδενίζονται πρακτικώς σε απόσταση  $L = 20H$  και  $-15H$  πίσω και μπροστά από τον αναβαθμό για  $H = 4m$ , ενώ για  $H = 2m$  μηδενίζονται σε απόσταση  $L = +35H$  και  $-25H$ . Δηλαδή προκύπτει πως όσο αυξάνεται το  $H$ , οι οριζόντιες μετατοπίσεις περιορίζονται πιο κοντά στην περιοχή του αναβαθμού. Επιπλέον, παρατηρείται πως η σχέση των Youd et al. (2002) λειτουργεί ως άνω όριο, ακόμη κι αν επεκταθεί καταχρηστικά και για  $0 < L < 5H$ .



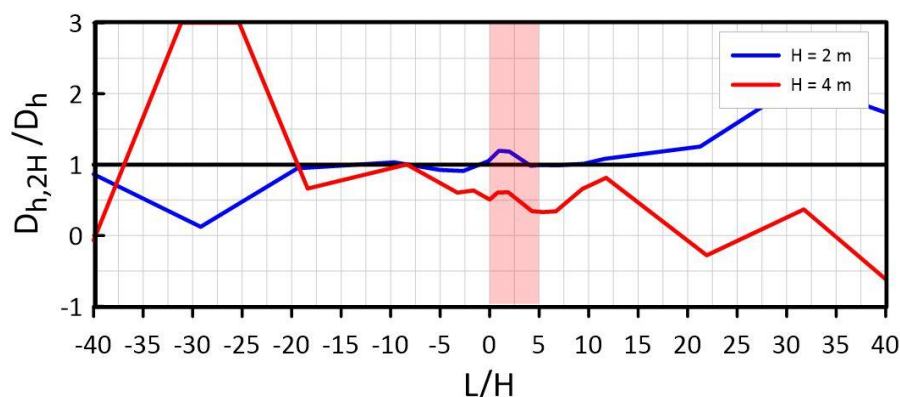
**Σχήμα 4.11:** Επίδραση ύψους αναβαθμού  $H$  στη σχέση απόστασης  $L/H$  και οριζόντιων μετατοπίσεων  $D_h$  στην επιφάνεια του εδάφους, και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς  $D_h(5H)$  σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους  $T_{15} = 10m$ .

Στο **Σχήμα 4.12** παρουσιάζεται το μέγεθος της οριζόντιας μετατόπισης  $D_h$  στην επιφάνεια και σε βάθος  $z = 2H$  (ή  $H$  από τον πόδα του αναβαθμού) και στο **Σχήμα 4.13** ο λόγος της οριζόντιας μετατόπισης σε βάθος  $z = 2H$  ( $D_{h,2H}$ ) ως προς την αντίστοιχη της, στην επιφάνεια  $D_h$ . Παρατηρείται πως για  $H = 4m$  οι οριζόντιες μετατοπίσεις σε βάθος  $z = 2H$  ( $D_{h,2H}$ ) μειώνονται κατά 50% στην περιοχή  $-5 < L/H < 10$ , ενώ για  $H = 2m$  είναι περίπου ίσες, καθώς ο λόγος  $D_{h,2H}/D_h$  είναι κοντά στο 1. Ωστόσο, για  $H = 4m$  το βάθος  $z = 2H$  είναι πολύ πιο κοντά στο κάτω όριο της ρευστοποιήσιμης στρώσης, όπου η σχετική μετακίνηση  $D_h$  μηδενίζεται και αυτό επιδρά στο μέγεθος των οριζοντίων μετατοπίσεων  $D_h$  λίγο πιο πάνω.

Σημειώνεται πως στο **Σχήμα 4.13** προκύπτουν και μεγάλες τιμές του λόγου  $D_{h,2H}/D_h$  όσο αυξάνεται η απόσταση  $L/H$ , όμως αυτό συμβαίνει καθώς το μέγεθος των οριζόντιων μετατοπίσεων  $D_h$  σε τέτοια απόσταση είναι μικρό, κι ως εκ τούτου η διαφορά των οριζόντιων μετατοπίσεων, στην επιφάνεια και σε βάθος  $z = 2H$  είναι πρακτικώς ασήμαντη, αλλά προκαλεί ευαισθησία στην τιμή του λόγου  $D_{h,2H}/D_h$ .



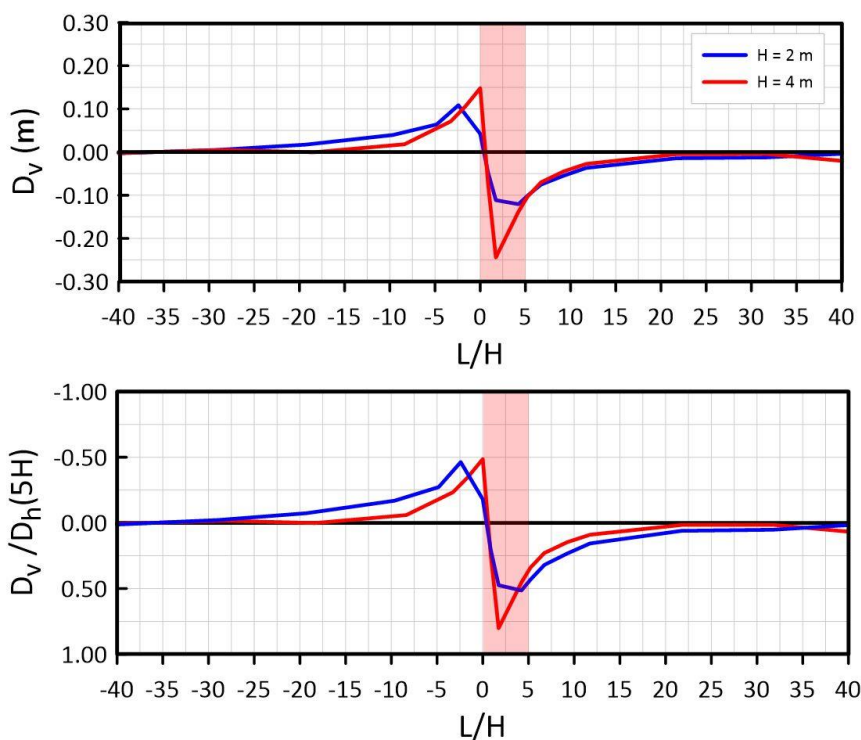
**Σχήμα 4.12:** Επίδραση απόστασης  $L/H$  στις οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  στην επιφάνεια ( $z = 0$ ) και σε βάθος  $z = 2H$ , σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους  $T_{15} = 10m$  με αναβαθμό ύψους  $H = 4m$ .



**Σχήμα 4.13:** Επίδραση ύψους αναβαθμού  $H$  στη σχέση απόστασης  $L/H$  στον λόγο της οριζόντιας μετατόπισης  $D_{h,2H}$  σε βάθος  $z = 2H$  ως προς την αντίστοιχη της στην επιφάνεια του εδάφους  $D_h$  σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους  $T_{15} = 10m$ .

Στα διαγράμματα του **Σχήματος 4.14** παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v$  στην επιφάνεια του εδάφους, ως προς την απόσταση  $L/H$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς την οριζόντια μετατόπιση  $D_h(5H)$ . Παρατηρείται πως για  $H = 4m$  η μέγιστη ανύψωση προκύπτει σε αμελητέα απόσταση  $L/H$  από τον πόδα του αναβαθμού, ενώ για  $H = 2m$  η μέγιστη καθίζηση προκύπτει σε απόσταση  $L/H = 2.5$ . Επιπλέον, παρατηρείται πως για μεγαλύτερο ύψος αναβαθμού  $H = 4m$  η μέγιστη καθίζηση και η μέγιστη ανύψωση είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για  $H = 2m$ , όπως επίσης, η μέγιστη καθίζηση είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη ανύψωση. Επιπρόσθετα διαπιστώνεται πως οι καθιζήσεις αυξάνονται ως προς τις οριζόντιες μετατοπίσεις καθώς ο λόγος  $D_v/D_h(5H)$  είναι μεγαλύτερος για  $H = 4m$ . Επομένως, όσο αυξάνεται το ύψος  $H$ , πέρα από την αύξηση στο μέγεθος των οριζόντιων μετατοπίσεων  $D_h$  παρατηρείται και μια γενική αύξηση στο μέγεθος των

κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$  στην περιοχή του αναβαθμού και ειδικά στις καθιζήσεις. Αυτό αποδίδεται στη μειωμένη (και στατικά) ευστάθεια του αναβαθμού, όσο το  $H$  αυξάνεται.

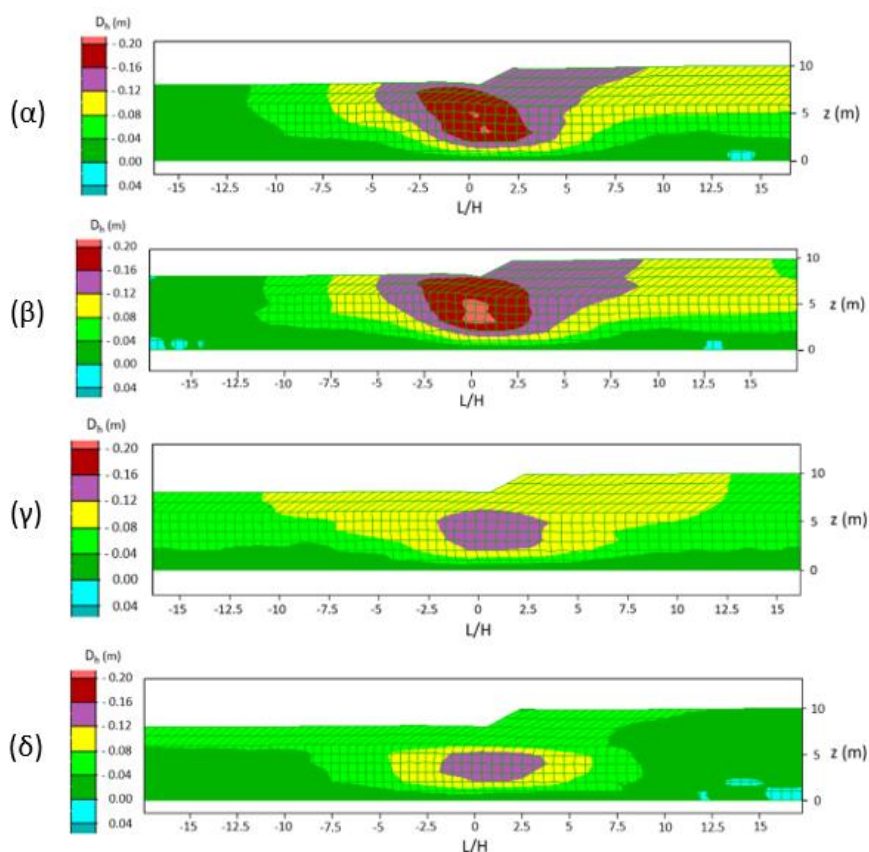


**Σχήμα 4.14:** Επίδραση ύψους αναβαθμού  $H$  στη σχέση απόστασης  $L/H$  και κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς  $D_h(5H)$ , σε ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση πάχους  $T_{15} = 10m$ .

#### 4.4 Πλευρική εξάπλωση εδάφους με επιφανειακή αργιλική στρώση προς αναβαθμό

Μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους, που επηρεάζουν το μέγεθος της οριζόντιας μετατόπισης  $D_h$  λόγω πλευρικής εξάπλωσης και χρησιμοποιείται στις πλείστες εμπειρικές σχέσεις που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 είναι το συνολικό πάχος των ρευστοποιήσιμων στρώσεων  $T_{15}$  (m). Το μειονέκτημα της παραμέτρου αυτής είναι πως δεν περιγράφει πλήρως τη γεωμετρία του εδαφικού προφίλ, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη το βάθος εμφάνισης των μη-ρευστοποιήσιμων στρώσεων. Επομένως, εάν σε ένα εδαφικό προφίλ η μη-ρευστοποιήσιμη αργιλική στρώση πάχους  $h_c$  βρίσκεται είτε στην επιφάνεια ή σε κάποιο βάθος  $z_c > 0$ , το  $T_{15}$  είναι το ίδιο, και συνεπώς προβλέπεται και ίδια τιμή οριζόντιας μετατόπισης  $D_h$ . Για τον λόγο αυτό διερευνήθηκε εδώ η επίδραση ύπαρξης μη-ρευστοποιήσιμης στρώσης στην επιφάνεια του εδάφους πίσω από τον αναβαθμό ( $z_c = 0$ ), η οποία σε κάθε περίπτωση θεωρήθηκε αργιλικής φύσης. Συγκεκριμένα, σε όλες τις αναλύσεις της παρούσας παραγράφου, το ύψος του προσομοιώματος ήταν πάντα 10m. Για αυτό τον σκοπό εξετάστηκαν οι περιπτώσεις με  $h_c = 1, 2, 3$  και 4 m (όπου  $T_{15} = 9, 8, 7$  και 6m,

αντίστοιχα), για ύψος αναβαθμού  $H = 2\text{ m}$ , και αντίστοιχα, οι περιπτώσεις με  $h_c = 1, 2, 4, 5$  και  $6\text{ m}$  (όπου  $T_{15} = 9, 8, 6, 5$  και  $4\text{ m}$ , αντίστοιχα), για ύψος αναβαθμού  $H = 4\text{ m}$ .



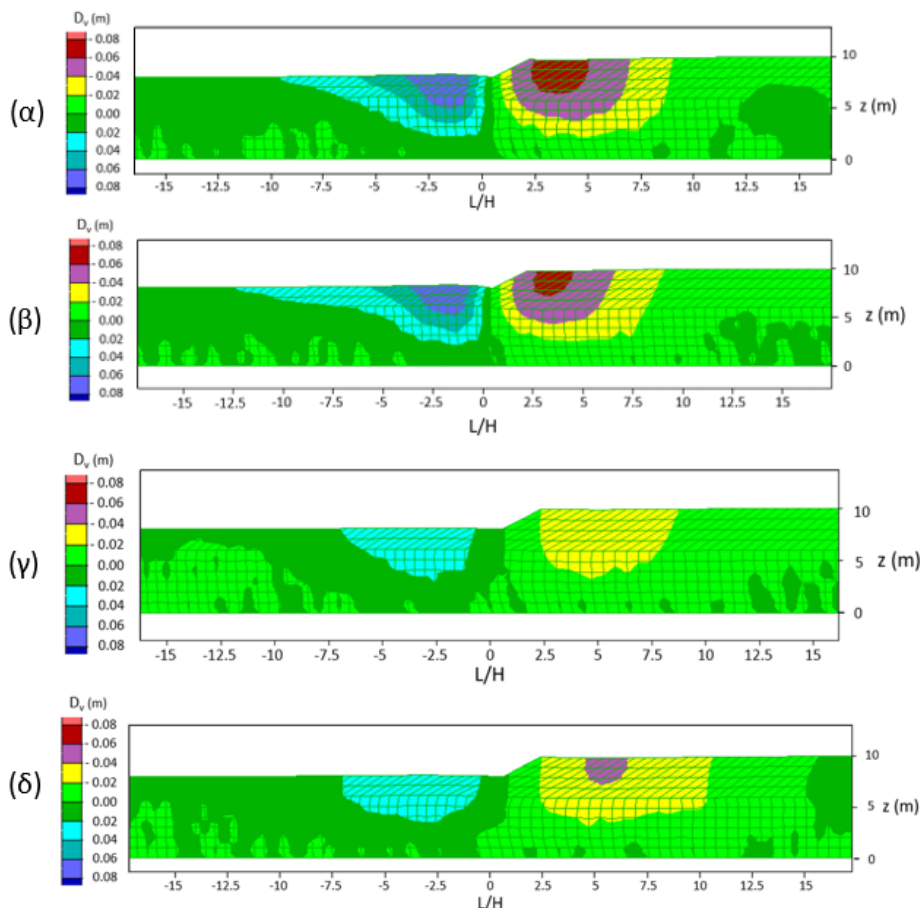
**Σχήμα 4.15:** Μεταβολή οριζόντιων μετατοπίσεων  $D_h$  λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε στρώση με ύψος αναβαθμού  $H = 2\text{ m}$ , που εμπεριέχει αργλική στρώση πάχους (α)  $h_c = 1\text{ m}$ , (β)  $h_c = 2\text{ m}$  (γ)  $h_c = 3\text{ m}$  και (δ)  $h_c = 4\text{ m}$  στην επιφάνεια ( $z_c = 0$ ).

Στο **Σχήμα 4.15** παρουσιάζεται η μεταβολή των οριζόντιων μετατοπίσεων  $D_h$  για τις περιπτώσεις με (α)  $h_c = 1\text{ m}$ , (β)  $h_c = 2\text{ m}$ , (γ)  $h_c = 3\text{ m}$  και (δ)  $h_c = 4\text{ m}$ , για ύψος αναβαθμού  $H = 2\text{ m}$ , ενώ στο **Σχήμα 4.16** παρουσιάζεται η μεταβολή των κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$  για τις ίδιες περιπτώσεις. Σε σύγκριση με την ομοιόμορφη ρευστοποιήσιμη στρώση χωρίς αργλική στρώση ( $T_{15} = 10\text{ m}$ ) που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.2, παρατηρείται εδώ πως το μέγεθος των μετατοπίσεων, οριζόντιων  $D_h$  και κατακόρυφων  $D_v$ , μειώνεται σημαντικά με την παρουσία αργλικής στρώσης στην επιφάνεια.

Ωστόσο διαπιστώνεται πως το μέγεθος των  $D_h$  και  $D_v$  δεν εξαρτάται πάντα από το πάχος  $h_c$ , καθώς παρατηρείται πως στην περίπτωση (β), όπου το  $h_c$  διπλασιάζεται σε σύγκριση με την περίπτωση (α), το μέγεθος των μετατοπίσεων και η απομείωση τους με την απόσταση παραμένουν περίπου σταθερά, ιδιαίτερα σε σχετικώς μεγάλα βάθη ( $z > H$ ). Όμως, στις περιπτώσεις (γ) και (δ) όπου το  $h_c$  αυξάνεται σε 3 και 4 m αντίστοιχα, το μέγεθος των  $D_h$  και  $D_v$  μειώνεται περαιτέρω και η απομείωση τους με την απόσταση διαφέρει. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός πως η αργλική στρώση στις περιπτώσεις (γ) και (δ) φτάνει σε βάθος

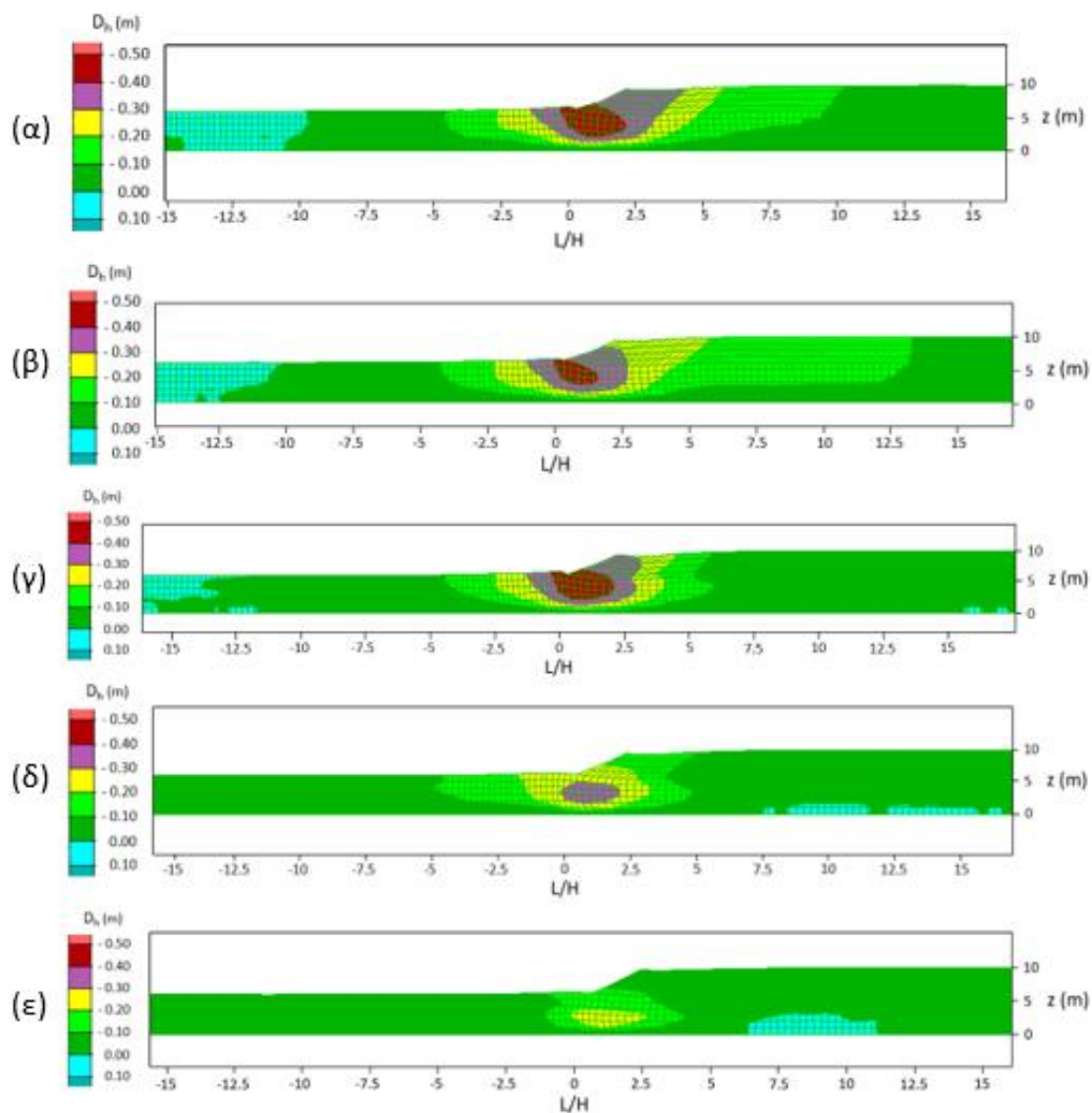


$z > H$  ( $h_c > H$ ), το κάτω όριο της δηλαδή βρίσκεται σαφώς κάτω από τον πόδα του αναβαθμού και επομένως η ρευστοποίηση του εδάφους συμβαίνει σαφώς κάτω από αυτόν. Παρατηρείται λοιπόν αλλαγή της μορφής παραμόρφωσης του εδάφους για  $h_c/H > 1$ , συγκριτικά με ό,τι παρατηρείται για  $h_c/H \leq 1$  που ομοιάζει ποιοτικά με ό,τι παρατηρείται για ομοιόμορφη αμμώδη στρώση (βλ. παρ. 4.2).

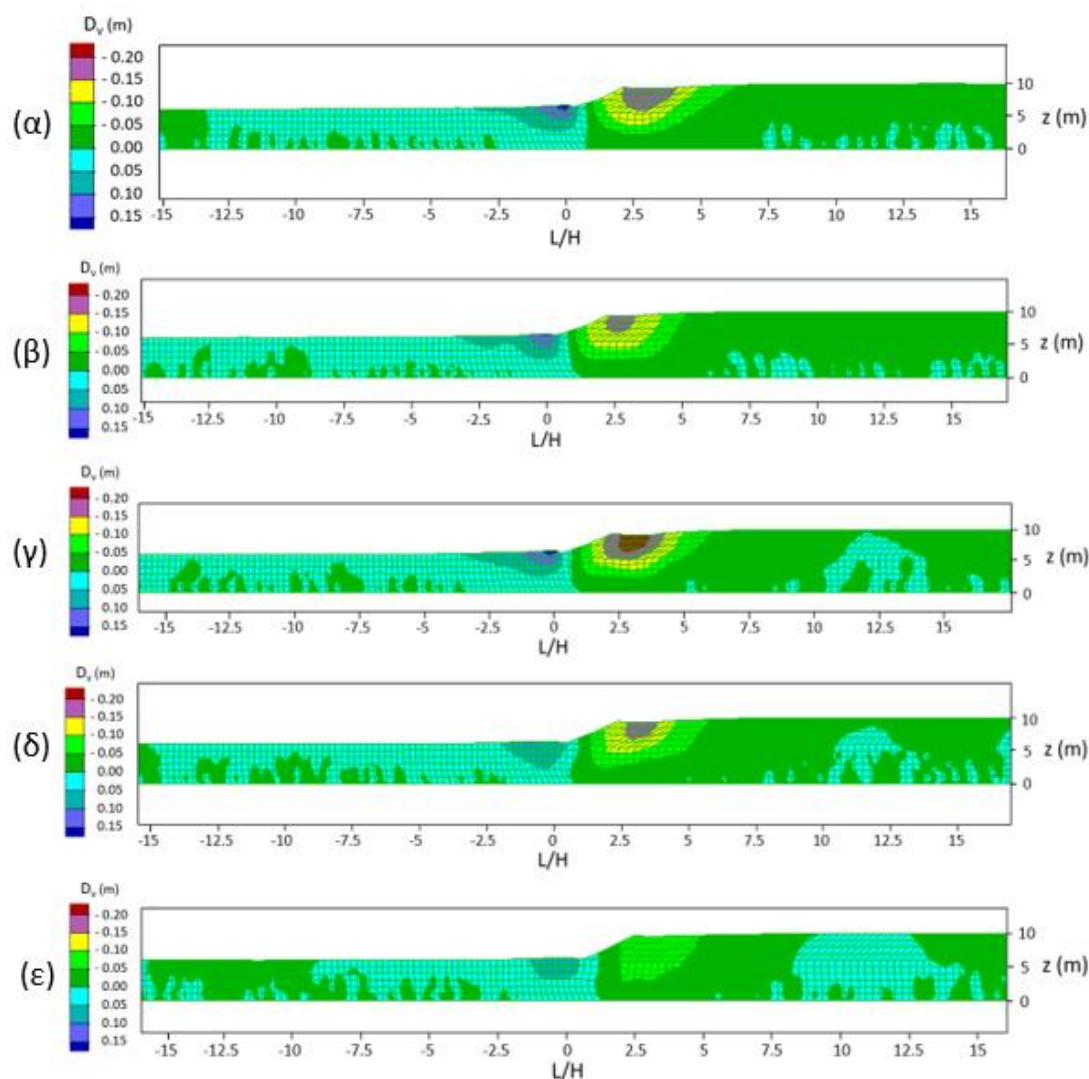


**Σχήμα 4.16:** Μεταβολή κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$  λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε στρώση με ύψος αναβαθμού  $H = 2\text{ m}$ , που εμπεριέχει αργιλική στρώση πάχους (α)  $h_c = 1\text{ m}$ , (β)  $h_c = 2\text{ m}$  (γ)  $h_c = 3\text{ m}$  και (δ)  $h_c = 4\text{ m}$  στην επιφάνεια ( $z_c = 0$ ).

Στα **Σχήματα 4.17 και 4.18** παρουσιάζεται η μεταβολή των οριζόντιων  $D_h$  και κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$ , αντίστοιχα, για τις περιπτώσεις άμμου με αργιλική στρώση πάχους (α)  $h_c = 1\text{ m}$ , (β)  $h_c = 2\text{ m}$ , (γ)  $h_c = 4\text{ m}$ , (δ)  $h_c = 5\text{ m}$  και (ε)  $h_c = 6\text{ m}$  στην επιφάνεια ( $z_c = 0$ ), με ύψος αναβαθμού  $H = 4\text{ m}$ . Όπως και στις περιπτώσεις για  $H = 2\text{ m}$  το μέγεθος των  $D_h$  και  $D_v$  μειώνεται με την παρουσία αργιλικής στρώσης και μένει περίπου στα ίδια επίπεδα όσο αυξάνεται το πάχος  $h_c$  στις περιπτώσεις (α), (β) και (γ), όπου δηλαδή οι αργιλικές στρώσεις βρίσκονται πάνω από τον πόδα του αναβαθμού ( $h_c \leq H$ ). Αντίθετα, στις περιπτώσεις (δ) και (ε) όπου το  $h_c > H$ , το μέγεθος των  $D_h$  και  $D_v$  συνεχίζει να μειώνεται, όσο αυξάνει το πάχος  $h_c$ . Συνεπώς, διαπιστώνεται πως το πάχος  $h_c$  επηρεάζει ελάχιστα το μέγεθος των  $D_h$  και  $D_v$  όσο η αργιλική στρώση βρίσκεται πάνω από τον πόδα του αναβαθμού, ενώ όταν  $h_c > H$  το μέγεθος των  $D_h$  και  $D_v$  μειώνεται όσο αυξάνεται το πάχος  $h_c$  της αργιλικής στρώσης.



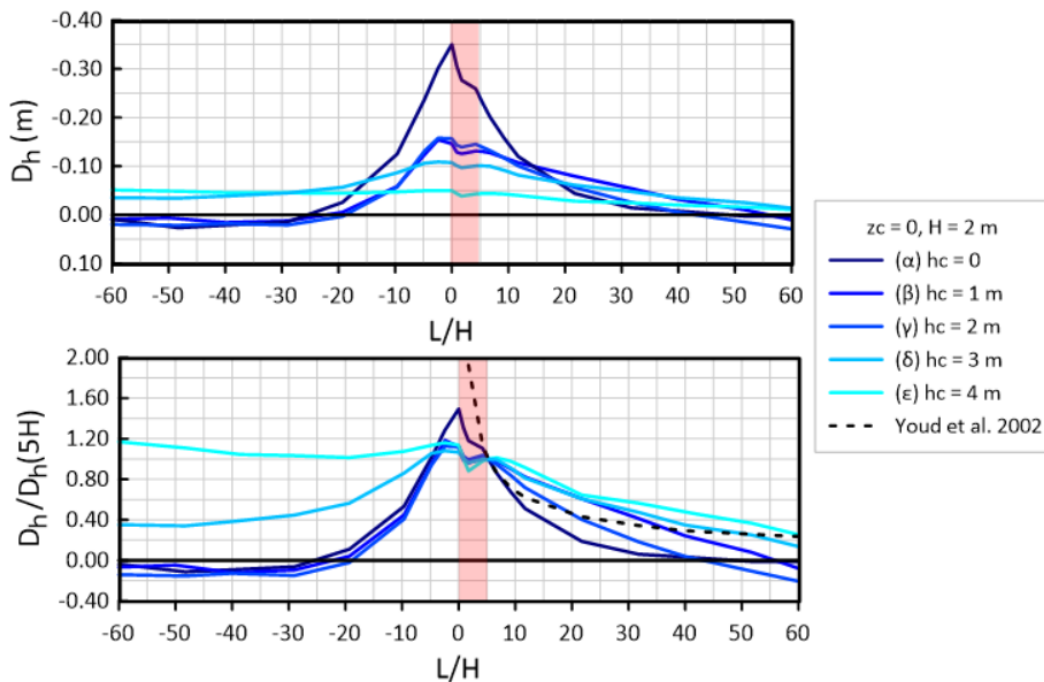
**Σχήμα 4.17:** Μεταβολή οριζόντιων μετατοπίσεων  $D_h$  λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε στρώση με ύψος αναβαθμού  $H = 4\text{m}$ , που εμπεριέχει αργλική στρώση πάχους (α)  $h_c = 1\text{m}$ , (β)  $h_c = 2\text{m}$ , (γ)  $h_c = 4\text{m}$ , (δ)  $h_c = 5\text{m}$  και (ε)  $h_c = 6\text{m}$  στην επιφάνεια ( $z_c = 0$ ).



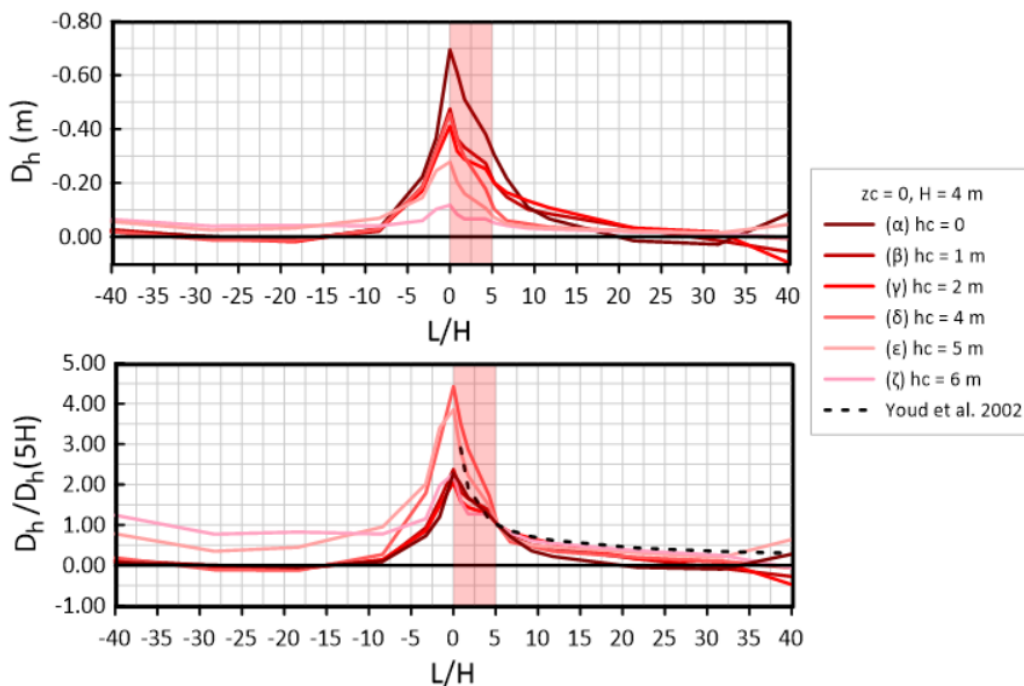
**Σχήμα 4.18:** Μεταβολή κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$  λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε στρώση με ύψος αναβαθμού  $H = 4\text{m}$ , που εμπεριέχει αργιλική στρώση πάχους (α)  $h_c = 1\text{m}$ , (β)  $h_c = 2\text{m}$ , (γ)  $h_c = 4\text{m}$ , (δ)  $h_c = 5\text{m}$  και (ε)  $h_c = 6\text{m}$  στην επιφάνεια ( $z_c = 0$ ).

Για μεγαλύτερη λεπτομέρεια, στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η μεταβολή των μετατοπίσεων στην επιφάνεια του εδάφους, όταν αυτό εμπεριέχει επιφανειακή ( $z_c = 0$ ) αργιλική κρούστα πάχους  $h_c$ . Χάρην σύγκρισης, στα διαγράμματα αυτά συμπεριλαμβάνεται και η περίπτωση ομοιόμορφης ρευστοποιήσιμης στρώσης χωρίς άργιλο (βλ. παρ. 4.2 και 4.3). Πρώτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$ . Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 4.19** παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  και οι κανονικοποιημένες μετατοπίσεις  $D_h/D_h(5H)$  για αναβαθμό ύψους  $H = 2\text{m}$ , και τις περιπτώσεις εδάφους με (α)  $h_c = 0$  (δηλαδή χωρίς αργιλική στρώση), (β)  $h_c = 1\text{m}$ , (γ)  $h_c = 2\text{m}$ , (δ)  $h_c = 3\text{m}$  και (ε)  $h_c = 4\text{m}$ . Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.20** παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για αναβαθμό ύψους  $H = 4\text{m}$ , και τις περιπτώσεις εδάφους με (α)  $h_c = 0$ , (β)  $h_c = 1\text{m}$ , (γ)  $h_c = 2\text{m}$ , (δ)  $h_c = 4\text{m}$ , (ε)  $h_c = 5\text{m}$  και (ζ)  $h_c = 6\text{m}$ .





**Σχήμα 4.19:** Επίδραση πάχους  $h_c$  της επιφανειακής ( $z_c = 0$ ) αργλικής στρώσης στη σχέση απόστασης  $L/H$  και οριζοντίων μετατοπίσεων  $D_h$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς  $D_h(5H)$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους  $H = 2\text{m}$ .



**Σχήμα 4.20:** Επίδραση πάχους  $h_c$  της επιφανειακής ( $z_c = 0$ ) αργλικής στρώσης στη σχέση απόστασης  $L/H$  και οριζοντίων μετατοπίσεων  $D_h$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς  $D_h(5H)$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους  $H = 4\text{m}$ .

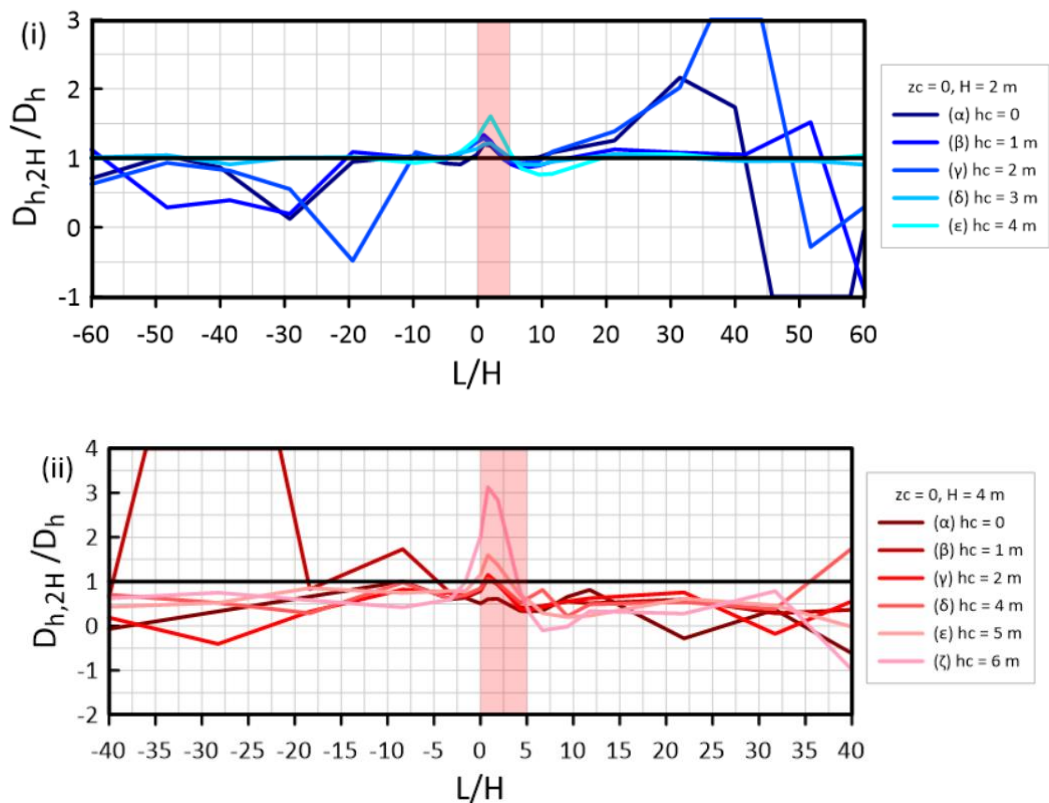
Σε κάθε περίπτωση ύψους αναβαθμού, η απολύτως μέγιστη  $D_h$  προκύπτει για στρώση με ομοιόμορφη άμμο ( $h_c = 0$ ). Παρατηρείται επίσης ότι η ύπαρξη επιφανειακής στρώσης αργίλου πάχους μόνο 1m μειώνει τη μέγιστη  $D_h$  στο 50% (για  $H = 2\text{m}$ ) ή στο 65% (για  $H = 4\text{m}$ )

της εκάστοτε απολύτως μέγιστης. Επιπλέον, όσο αυξάνει το πάχος  $h_c$  της αργλικής στρώσης, η μείωση της μέγιστης  $D_h$  γίνεται πιο έντονη, και φθάνει στο 15% της απολύτως μέγιστης, για  $h_c = 4\text{m}$  και  $6\text{m}$  για αναβαθμούς ύψους  $H = 2\text{m}$  και  $4\text{m}$ , αντίστοιχα. Παρατηρώντας επιπλέον τη μεταβολή των  $D_h$  με την απόσταση  $L/H$  προκύπτει διαφοροποίηση, καθώς για  $h_c/H \leq 1$  υπάρχει σημαντική επίδραση της απόστασης στην απομείωση των μετατοπίσεων, ενώ κάτι τέτοιο δεν προκύπτει όταν  $h_c/H > 1$ , όπου οι μετατοπίσεις δείχνουν απομειωμένες σε μέγεθος στην περιοχή του αναβαθμού, αλλά χωρίς σημαντική περαιτέρω απομείωση με την απόσταση.

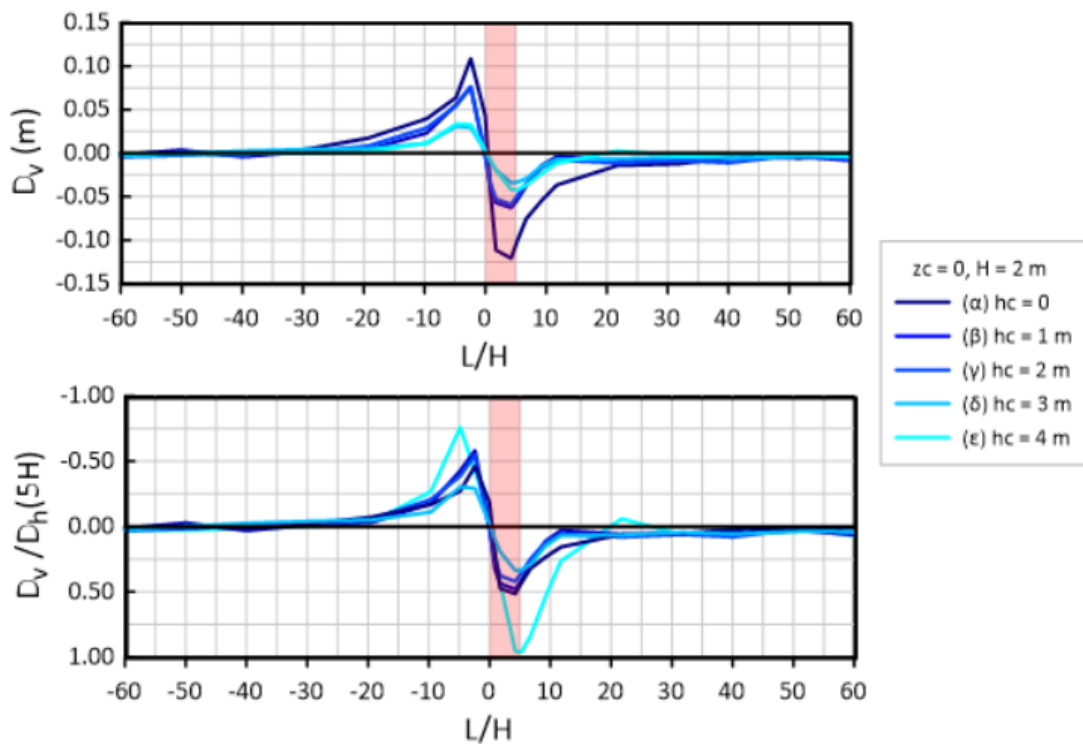
Σημειώνεται εδώ ότι υπολογίζοντας την  $D_h(5H)$  με την σχέση των Youd et al. (2002), η μείωση που προκύπτει στο μέγεθος της λόγω μείωσης του πάχους  $T_{15}$  είναι αρκετά πιο μικρή. Συγκεκριμένα, όταν  $h_c = 1\text{m}$  όπου το  $T_{15}$  μειώνεται από  $10\text{m}$  σε  $9\text{m}$ , η  $D_h$  μειώνεται στο 95% (αντί για 50% ή 65%, όπως στα **Σχήματα 4.19** και **4.20**). Αντίστοιχα, όταν  $h_c = 4\text{m}$  και  $h_c = 6\text{m}$  (όπου παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη μείωση για  $H = 2\text{m}$  και  $H = 4\text{m}$ , αντίστοιχα) η  $D_h$  μειώνεται στο 76% και στο 61% της μέγιστης, αντίστοιχα, αντί για το 15% της μέγιστης που προκύπτει στα **Σχήματα 4.19** και **4.20**.

Παρατηρείται λοιπόν ότι οι αριθμητικές αναλύσεις δίνουν πιο σημαντική επίδραση της ύπαρξης επιφανειακής αργλικής στρώσης στην απόκριση του πρανούς, συγκριτικά με ό,τι προβλέπει η σχέση των Youd et al. (2002). Μάλιστα, οι αριθμητικές αναλύσεις δίνουν ποιοτικά 3 διαφορετικές αποκρίσεις: α) αυτή για  $h_c = 0$  που δίνει τις μέγιστες  $D_h$  και σημαντική μειωτική επίδραση της απόστασης  $L/H$ , β) αυτή για  $0 < h_c \leq H$  που δίνει σαφώς μικρότερες  $D_h$ , αλλά επίδραση της απόστασης  $L/H$  αντίστοιχη με εκείνης για  $h_c = 0$ , και γ) αυτή για  $h_c > H$ , που δίνει πρακτικώς ελάχιστες  $D_h$  με σχετικώς ασήμαντη επίδραση της απόστασης  $L/H$  στη μείωση τους. Αυτή η σημαντική επίδραση της αργλικής στρώσης θα πρέπει να διερευνηθεί μελλοντικά και με καταστατική προσομοίωση πιο σοφιστευμένη από το Mohr-Coulomb που υιοθετείται εδώ (βλ. Κεφάλαιο 3).

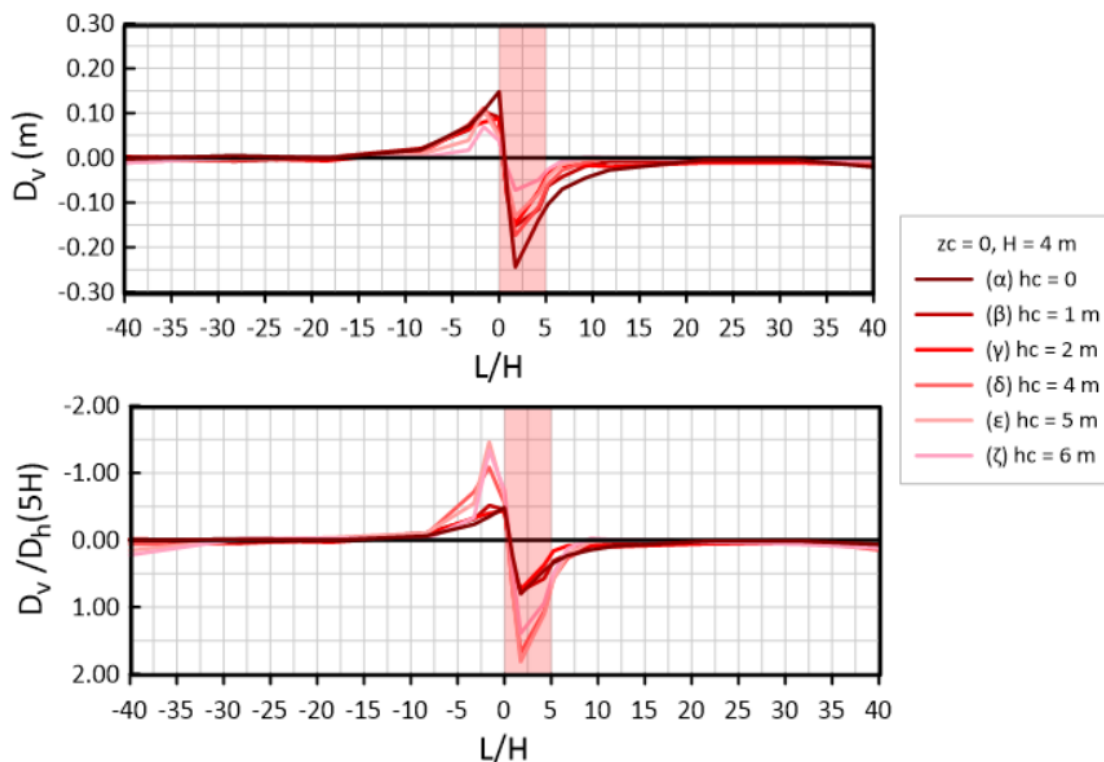
Στα διαγράμματα του **Σχήματος 4.21** παρουσιάζεται η επίδραση ύπαρξης επιφανειακών αργλικών στρώσεων διαφορετικού πάχους  $h_c$  στο μέγεθος των οριζόντιων μετατοπίσεων σε βάθος  $z = 2H$  ( $D_{h,2H}$ ) σε σχέση με το αντίστοιχο μέγεθος  $D_h$  στην επιφάνεια του εδάφους. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ο λόγος  $D_{h,2H}/D_h$  ως συνάρτηση της απόστασης  $L/H$ , για όλες τις προαναφερθείσες αναλύσεις που αφορούν αναβαθμό με ύψος (i)  $H = 2\text{m}$  και (ii)  $H = 4\text{m}$ . Παρατηρείται πως οι τιμές  $D_{h,2H}$  είναι γενικώς μικρότερες από τις τιμές  $D_h$  στην επιφάνεια, αν και υπάρχει γενικώς αρκετά μεγάλη χωρική διαφοροποίηση που δεν επιτρέπει γενίκευση των συμπερασμάτων. Συστηματική εξαίρεση στον ανωτέρω κανόνα αποτελεί η περιοχή  $0 < L/H < 5$ , όπου προκύπτει μάλλον το ανάποδο, και μάλιστα όσο αυξάνεται το πάχος  $h_c$ , να προκύπτει αύξηση του λόγου  $D_{h,2H}/D_h$  και σε τιμές μεγαλύτερες από 1.0. Συνεπώς, όσο αυξάνει το πάχος  $h_c$ , μειώνεται η τιμή της  $D_h$  στην επιφάνεια (βλ. **Σχήματα 4.19** και **4.20**), αλλά δεν μειώνεται αντίστοιχα και η τιμή  $D_{h,2H}$  καθώς σε αυτά τα βάθη εμφανίζεται η ρευστοποίηση.



**Σχήμα 4.21:** Επίδραση πάχους  $h_c$  της επιφανειακής ( $z_c = 0$ ) αργλικής στρώσης στη σχέση απόστασης  $L/H$  και λόγου της οριζόντιας μετατόπισης σε βάθος  $z = 2H$  ( $D_{h,2H}$ ) ως προς την αντίστοιχη της στην επιφάνεια  $D_h$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους (i)  $H = 2\text{ m}$  και (ii)  $H = 4\text{ m}$ .



**Σχήμα 4.22:** Επίδραση πάχους  $h_c$  της επιφανειακής ( $z_c = 0$ ) αργλικής στρώσης στη σχέση απόστασης  $L/H$  και κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς  $D_h(5H)$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους  $H = 2\text{ m}$ .



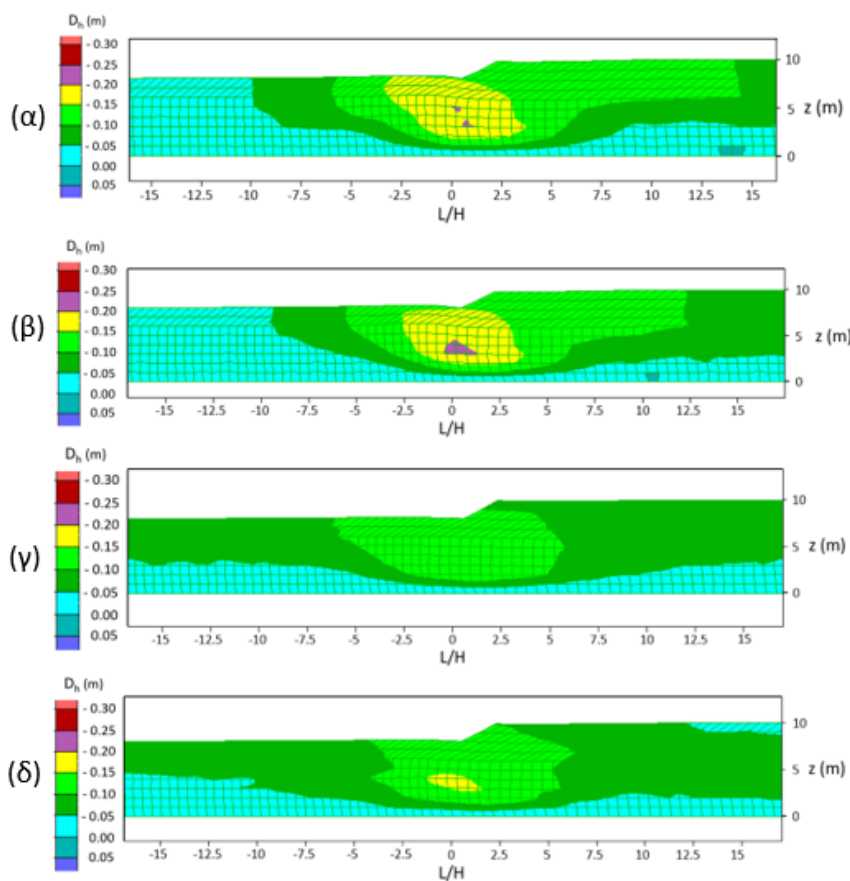
**Σχήμα 4.23:** Επίδραση πάχους  $h_c$  της επιφανειακής ( $z_c = 0$ ) αργλικής στρώσης στη σχέση απόστασης  $L/H$  και κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς  $D_h(5H)$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους  $H = 4\text{m}$ .

Στα **Σχήματα 4.22** και **4.23** παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v$  και οι κανονικοποιημένες κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v/D_h(5H)$  για τις ίδιες περιπτώσεις εδάφους με επιφανειακή αργλική στρώση και ύψη αναβαθμού  $H = 2\text{m}$  και  $H = 4\text{m}$ , αντίστοιχα. Όπως συμβαίνει και στις οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  παρατηρείται πως οι κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v$  μειώνονται με την παρουσία αργλικής στρώσης και μάλιστα όσο αυξάνεται το πάχος  $h_c$ , το μέγεθος των μετατοπίσεων  $D_v$  μειώνεται. Επιπλέον, για στρώσεις με  $h_c/H > 1$  η μείωση είναι εντονότερη. Τέλος, παρατηρείται πως για εδάφη με  $h_c/H > 1$ , ο λόγος  $D_v/D_h(5H)$  αυξάνεται (ειδικά όταν  $H = 4\text{m}$ ), στην περιοχή πλησίον του αναβαθμού.

Συνολικά, αντίστοιχα με ό,τι παρατηρήθηκε και για την οριζόντια μετατόπιση  $D_h$ , οι αριθμητικές αναλύσεις δίνουν ποσοτικά 3 διαφορετικές αποκρίσεις: α) αυτή για  $h_c = 0$  που δίνει τις μέγιστες  $D_v$ , β) αυτή για  $0 < h_c \leq H$  που δίνει σαφώς μικρότερες  $D_v$  και γ) αυτή για  $h_c > H$ , που δίνει πρακτικώς ελάχιστες  $D_v$ . Σε κάθε περίπτωση, οι τιμές των  $D_v$  είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες  $D_v$ , κατ' απόλυτη τιμή, αλλά η επίδραση της απόστασης  $L/H$  δείχνει να είναι αντίστοιχη για όλες τις περιπτώσεις πάχους  $h_c/H$  επιφανειακής αργλικής στρώσης. Σε κάθε περίπτωση, αυτές οι κατακόρυφες μετατοπίσεις του πρσανούς (που δεν ποσοτικοποιούνται από τους Youd et al. 2002) θα πρέπει να διερευνηθούν μελλοντικά περαιτέρω.

## 4.5 Πλευρική εξάπλωση εδάφους με μη-επιφανειακή αργιλική στρώση προς αναβαθμό

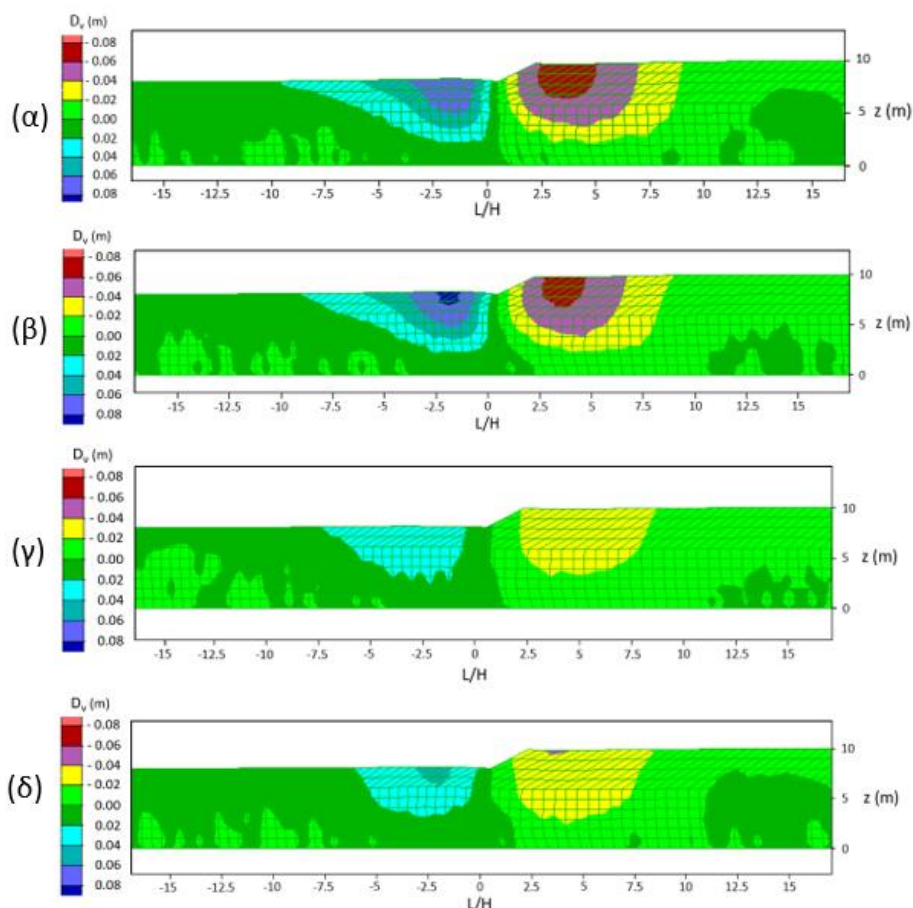
Στη συνέχεια της παραγράφου 4.4, εδώ η αργιλική στρώση θεωρείται ότι δεν βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους, και έτσι διερευνάται η επίδραση του βάθους εμφάνισής της  $z_c$ , μια παράμετρος που δεν υπεισέρχεται καν στις εμπειρικές σχέσεις που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2. Για τον σκοπό αυτό, για αναβαθμό με  $H = 2\text{m}$  διερευνήθηκαν περιπτώσεις με  $z_c = 1\text{m}$ ,  $2\text{m}$  και  $4\text{m}$ , με σταθερό πάχος  $h_c = 1\text{m}$  ( $T_{15} = 9\text{m}$ ). Αντίστοιχα, για αναβαθμό με  $H = 4\text{m}$  διερευνήθηκαν περιπτώσεις με τις ίδιες τιμές  $z_c$  ( $= 1\text{m}$ ,  $2\text{m}$  και  $4\text{m}$ ), αλλά διπλάσιο πάχος  $h_c = 2\text{m}$  ( $T_{15} = 8\text{m}$ ). Στόχος αυτής της επιλογής ήταν να είναι σχετικώς συγκρίσιμες οι αποκρίσεις για τους διαφορετικού ύψους αναβαθμούς, καθώς ο λόγος  $h_c/H = 0.5$  και στις 2 περιπτώσεις.



**Σχήμα 4.24:** Μεταβολή οριζόντιων μετατοπίσεων  $D_h$  λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε στρώση με ύψος αναβαθμού  $H = 2\text{m}$ , που περιέχει αργιλική στρώση πάχους  $h_c = 1\text{m}$  στην επιφάνεια (α)  $z_c = 0$  και σε βάθη (β)  $z_c = 1\text{m}$  (γ)  $z_c = 2\text{m}$  και (δ)  $z_c = 4\text{m}$ .

Στα Σχήματα 4.24 και 4.25 παρουσιάζεται η μεταβολή των οριζόντιων μετατοπίσεων  $D_h$  και κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$ , αντίστοιχα, λόγω πλευρικής εξάπλωσης για τις στρώσεις άμμου με ύψος αναβαθμού  $H = 2\text{m}$  και με αργιλική στρώση πάχους  $h_c = 1\text{m}$  στην επιφάνεια (α)  $z_c = 0$  και σε βάθη (β)  $z_c = 1\text{m}$ , (γ)  $z_c = 2\text{m}$  και (δ)  $z_c = 4\text{m}$ . Από τα δύο σχήματα προκύπτει πως στις περιπτώσεις (α) και (β) το βάθος  $z_c = 0$  ή  $1\text{m}$  δεν επηρεάζει ουσιαστικά το μέγεθος

των  $D_h$  και  $D_v$ . Όμως μειώνεται στην περίπτωση (γ) όταν η αργιλική στρώση βρίσκεται σε βάθος  $z_c = 2\text{m}$  και παραμένει στα ίδια επίπεδα μικρότερων μετατοπίσεων και στην περίπτωση (δ) όπου  $z_c = 4\text{m}$ . Επομένως, προκύπτει πως το μέγεθος των μετατοπίσεων μειώνεται όταν η (λεπτή) αργιλική στρώση βρίσκεται κάτω από τον πόδα του αναβαθμού, δηλαδή όταν  $z_c/H \geq 1$ .

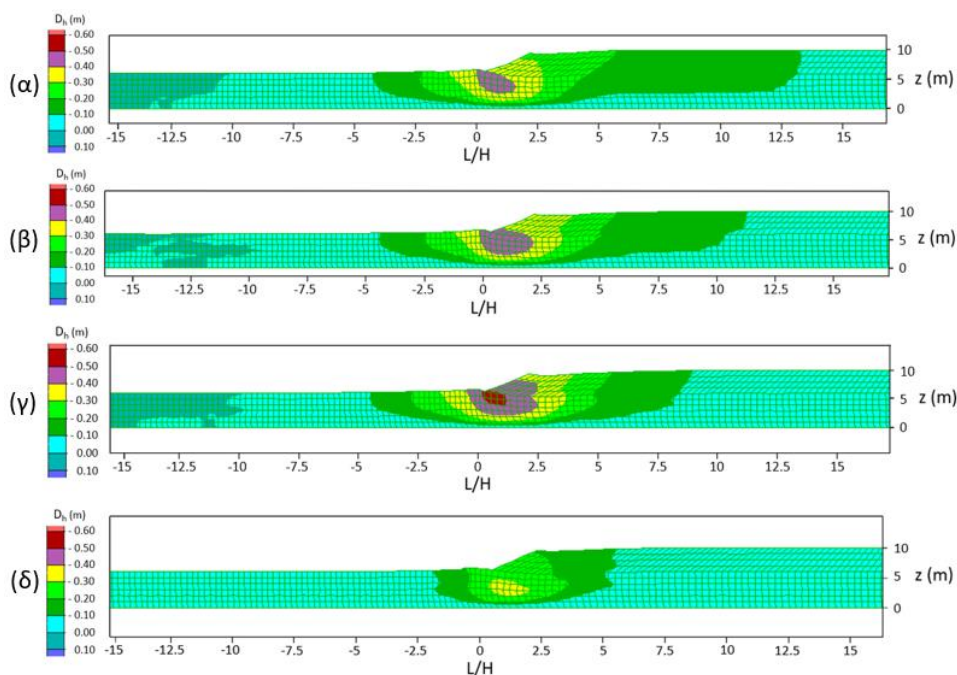


**Σχήμα 4. 25:** Μεταβολή κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$  λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε στρώση με ύψος αναβαθμού  $H = 2\text{m}$ , που εμπεριέχει αργιλική στρώση πάχους  $h_c = 1\text{m}$  στην επιφάνεια (α)  $z_c = 0$  και σε βάθη (β)  $z_c = 1\text{m}$ , (γ)  $z_c = 2\text{m}$  και (δ)  $z_c = 4\text{m}$ .

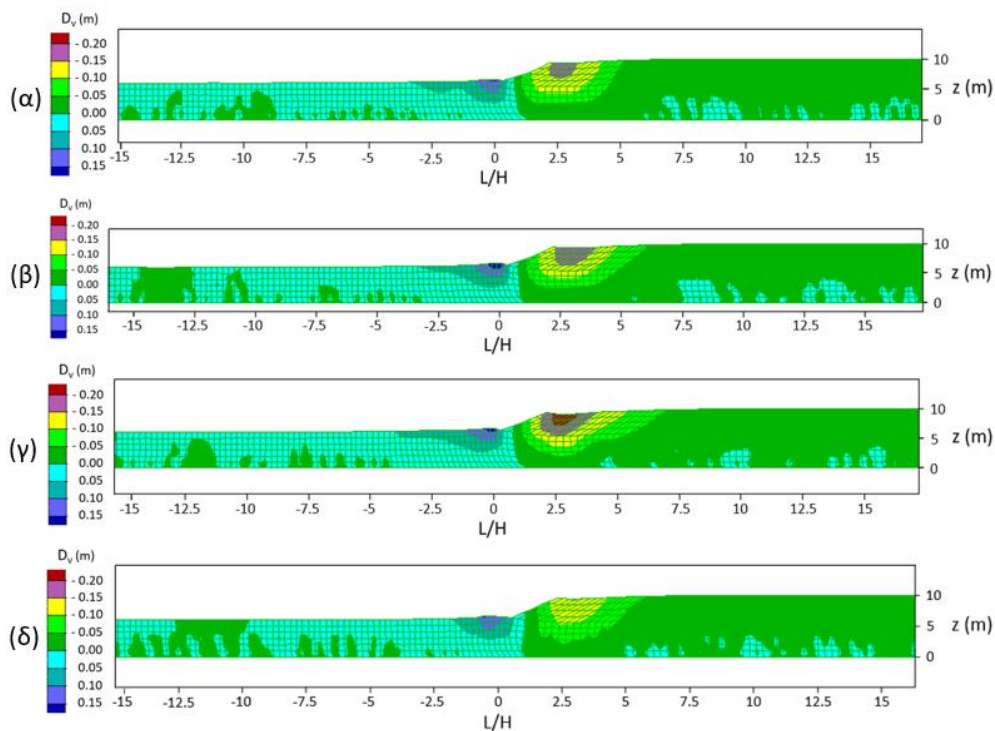
Στο **Σχήμα 4.26** παρουσιάζεται η μεταβολή των οριζοντίων μετατοπίσεων  $D_h$  λόγω πλευρικής εξάπλωσης για τις στρώσεις άμμου με αργιλική στρώση πάχους  $h_c = 2\text{m}$  στην επιφάνεια (α)  $z_c = 0$  και σε βάθη (β)  $z_c = 1\text{m}$ , (γ)  $z_c = 2\text{m}$  και (δ)  $z_c = 4\text{m}$ , με ύψος αναβαθμού  $H = 4\text{m}$ , ενώ στο **Σχήμα 4.27** παρουσιάζεται η αντίστοιχη μεταβολή των κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$ . Αυτό που παρατηρείται είναι μια μικρή αύξηση στο μέγεθος των  $D_h$  και  $D_v$  όταν η αργιλική στρώση βρίσκεται σε βάθη (β)  $z_c = 1\text{m}$  και (γ)  $z_c = 2\text{m}$ , ενώ όταν βρίσκεται σε βάθος (δ)  $z_c = 4\text{m}$  το μέγεθος τους μειώνεται σε μεγάλο βαθμό, ειδικά στο μέγεθος των  $D_h$ . Επομένως, προκύπτει και πάλι ουσιώδης μείωση των μετατοπίσεων, μόνο αν  $z_c/H \geq 1$ , όπως ακριβώς προέκυψε και για τον αναβαθμό με ύψος  $H = 2\text{m}$ . Η διαφοροποίηση που υπάρχει για  $H = 4\text{m}$



είναι ότι προκύπτει και μικρή αύξηση των μετατοπίσεων για την ενδιάμεση περίπτωση όπου  $z_c/H = 0.5$ , κάτι που δεν προέκυψε για τον αναβαθμό ύψους  $H = 2\text{m}$ .

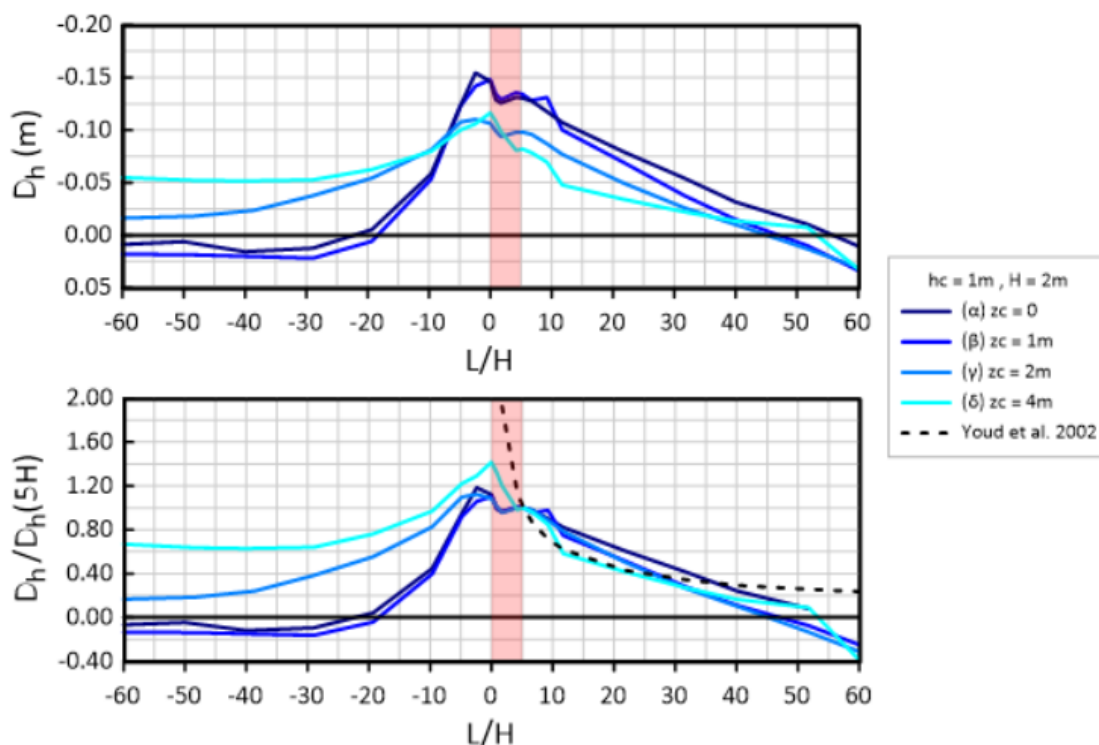


**Σχήμα 4.26:** Μεταβολή οριζόντιων μετατοπίσεων  $D_h$  λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε στρώση με ύψος αναβαθμού  $H = 4\text{m}$ , που εμπεριέχει αργλική στρώση πάχους  $h_c = 2\text{m}$  στην επιφάνεια (α)  $z_c = 0$  και σε βάθη (β)  $z_c = 1\text{m}$  (γ)  $z_c = 2\text{m}$  και (δ)  $z_c = 4\text{m}$ .



**Σχήμα 4.27:** Μεταβολή κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$  λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε στρώση με ύψος αναβαθμού  $H = 4\text{m}$ , που εμπεριέχει αργλική στρώση πάχους  $h_c = 2\text{m}$  (α) στην επιφάνεια ( $z_c = 0$ ) και σε βάθη (β)  $z_c = 1\text{m}$ , (γ)  $z_c = 2\text{m}$  και (δ)  $z_c = 4\text{m}$ .

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται με περισσότερη λεπτομέρεια η απόκριση στην επιφάνεια του εδάφους, για τις περιπτώσεις εδάφους με μη-επιφανειακή αργιλική στρώση. Στα **Σχήματα 4.28 και 4.29** παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  και οι κανονικοποιημένες οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h/D_h(5H)$  στην επιφάνεια του εδάφους για τις προαναφερθείσες περιπτώσεις εδάφους με ύψος αναβαθμού  $H = 2\text{m}$  και  $H = 4\text{m}$ , αντίστοιχα.

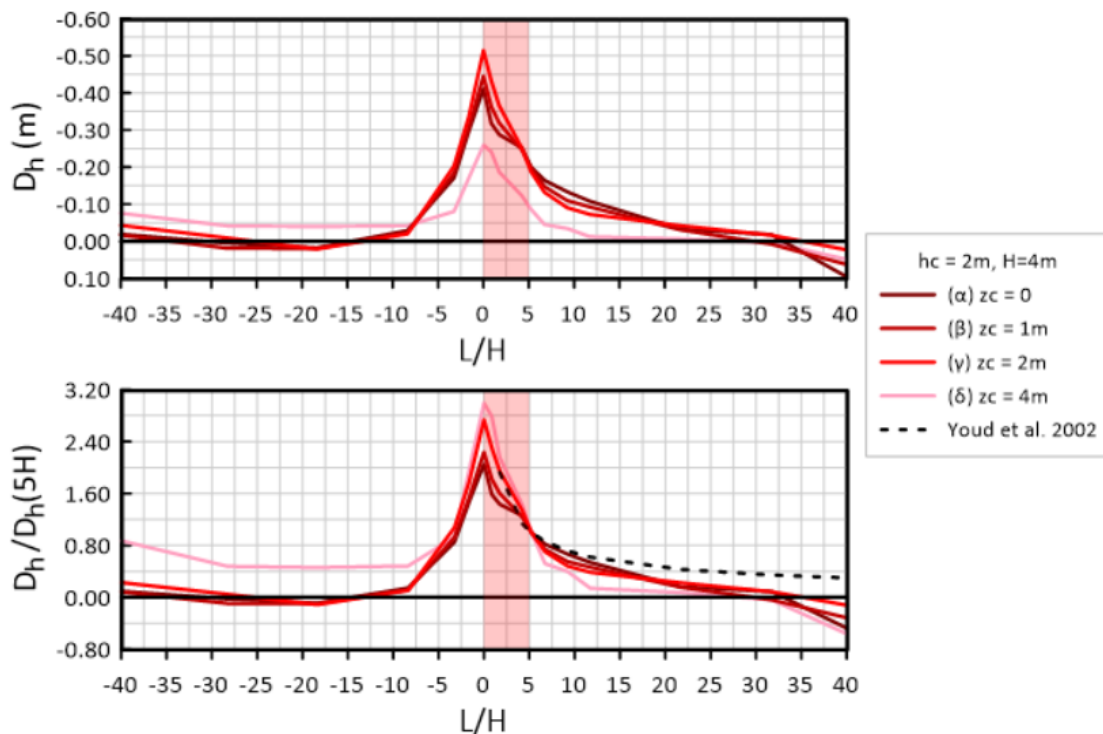


**Σχήμα 4.28:** Επίδραση βάθους εμφάνισης  $z_c$  της αργιλικής στρώσης πάχους  $h_c = 1\text{m}$  στη σχέση απόστασης  $L/H$  και οριζοντίων μετατοπίσεων  $D_h$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς  $D_h(5H)$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους  $H = 2\text{m}$ .

Από το **Σχήμα 4.28** προκύπτει πως οι οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  στην επιφάνεια του εδάφους είναι σχεδόν ταυτόσημες όταν  $z_c = 0$  ή  $1\text{m}$ , δηλαδή όταν  $z_c/H < 1$ . Από την άλλη, όταν  $z_c = 2$  ή  $4\text{m}$  (όταν  $z_c/H \geq 1$ ), τότε οι μετατοπίσεις  $D_h$  μειώνονται συγκριτικά στην περιοχή του αναβαθμού και με την απόσταση πίσω από αυτόν (για  $L/H \geq 0$ ), αλλά δεν μειώνονται σημαντικά με την απόσταση μπροστά από αυτόν (για  $L/H < 0$ ). Από την άλλη, για αναβαθμό με  $H = 4\text{m}$ , με βάση το **Σχήμα 4.29**, όταν το  $z_c$  αυξάνεται από  $z_c = 0$  σε  $1\text{m}$  και  $2\text{m}$  παρατηρείται μια μικρή αύξηση στο μέγεθος των  $D_h$  στην περιοχή του αναβαθμού, χωρίς αυτή να είναι σημαντική πάντως. Λογικά, το αν υπάρχει ή όχι αυτή η αύξηση εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά της διέγερσης, οπότε δεν θα πρέπει να γενικευτεί ως συμπέρασμα. Αυτό που σίγουρα μπορεί να γενικευτεί είναι ότι για  $z_c = 4\text{m}$  (δηλαδή για  $z_c/H = 1$ ) προκύπτει σαφής μείωση των μετατοπίσεων στην περιοχή του αναβαθμού, και λιγότερο έντονη απομείωση αυτών όσο μεγαλώνει η απόσταση  $L/H$  (ειδικά στην περιοχή μπροστά από αυτόν). Αυτό το συμπέρασμα είναι κοινό και για τον αναβαθμό ύψους  $H = 2\text{m}$ . Υπενθυμίζεται επίσης ότι αυτή η μη-απομείωση με την απόσταση είχε παρατηρηθεί και στις περιπτώσεις με  $h_c/H \geq 1$  στην

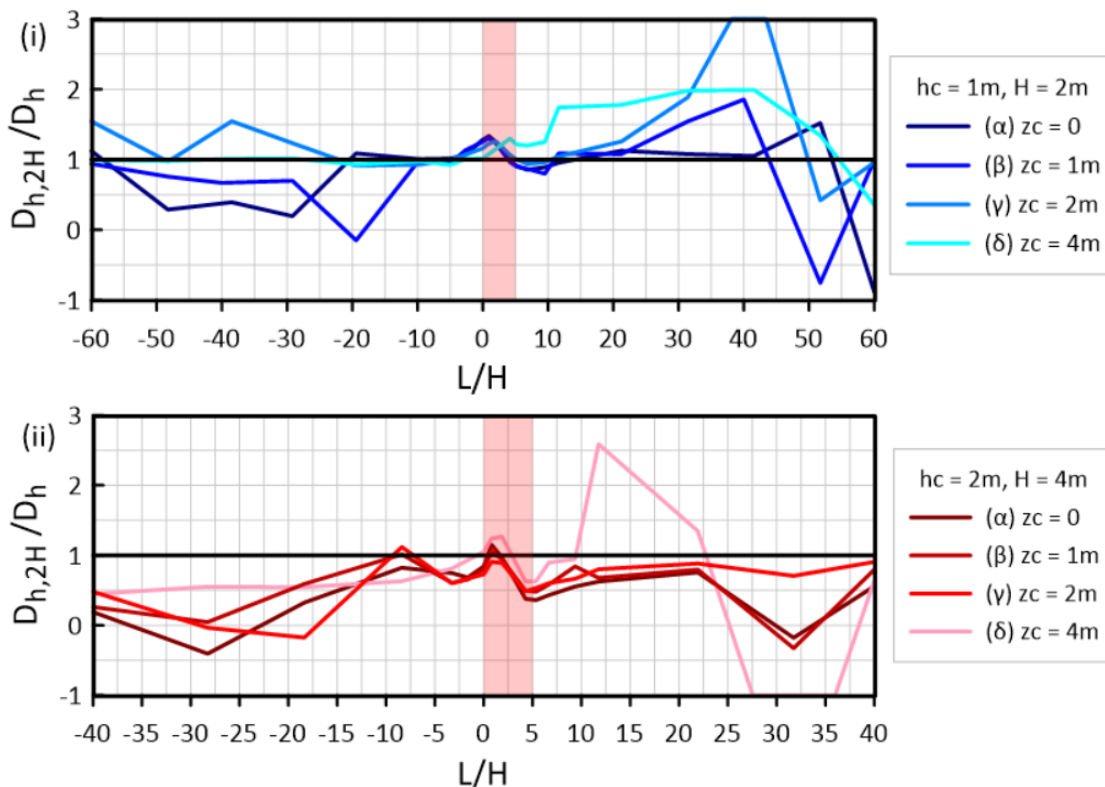


παράγραφο 4.4, δηλαδή και πάλι προκύπτει ότι όταν υπάρχει αργλική στρώση κάτω από τον πόδα του αναβαθμού, η απομείωση των μετατοπίσεων με την απόσταση  $L/H$  είναι λιγότερο έντονη.



**Σχήμα 4.29:** Επίδραση βάθους εμφάνισης  $z_c$  της αργλικής στρώσης πάχους  $h_c = 2$  m στη σχέση απόστασης  $L/H$  και οριζοντίων μετατοπίσεων  $D_h$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς  $D_h(5H)$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους  $H = 4$  m.

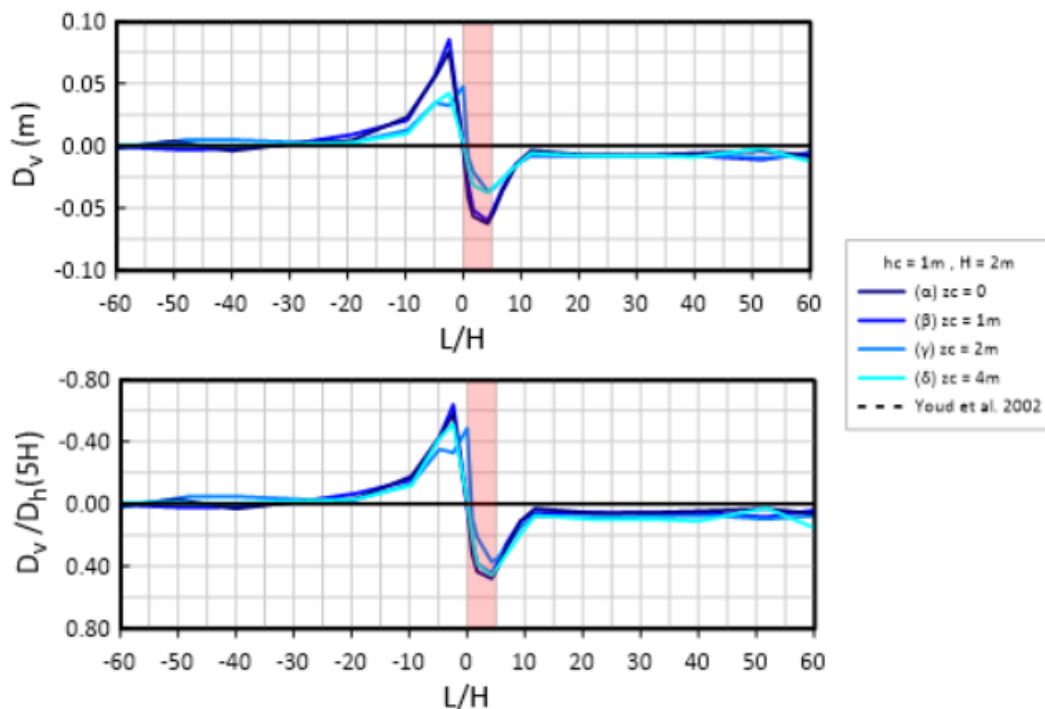
Στο **Σχήμα 4.30** διερευνάται η επίδραση του βάθους εμφάνισης  $z_c$  της αργλικής στρώσης στο μέγεθος των οριζόντιων μετατοπίσεων σε βάθος  $z = 2H$  ( $D_{h,2H}$ ) σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις  $D_h$  στην επιφάνεια. Στα διαγράμματα (i) και (ii) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για αναβαθμό με ύψος  $H = 2$  m και 4 m, αντίστοιχα. Δεν προκύπτει κάποια συστηματική επίδραση του βάθους  $z_c$  στην τιμή του λόγου  $D_{h,2H}/D_h$ , καθώς οι καμπύλες αυτές ως προς  $L/H$  έχουν σημαντικές αυξομειώσεις λόγω της ευαισθησίας της τιμής του λόγου στις μικρές τιμές μετατοπίσεων που εμφανίζονται όταν υπάρχει αργλική στρώση. Το μόνο συμπέρασμα που μπορεί να προκύψει είναι ότι για αναβαθμό με  $H = 4$  m, η τιμή του λόγου  $D_{h,2H}/D_h$  δείχνει συστηματικά μικρότερη από 1.0, αντίθετα με ό,τι προκύπτει για  $H = 2$  m όπου προκύπτουν συχνά και τιμές πάνω από 1.0..



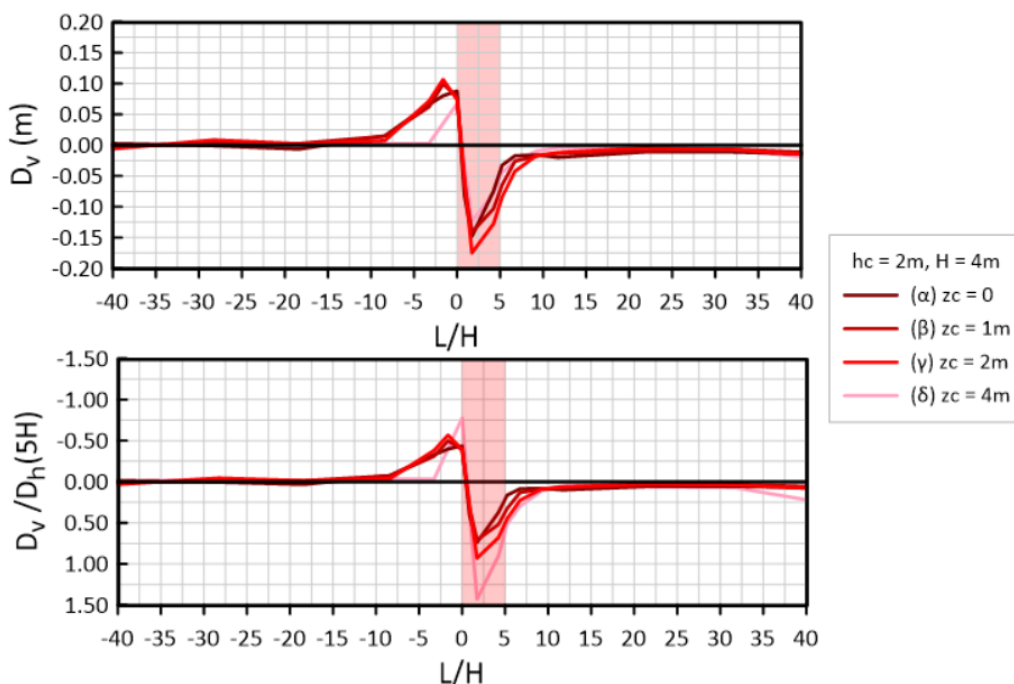
**Σχήμα 4.30:** Επίδραση βάθους εμφάνισης  $z_c$  της αργιλικής στρώσης στη σχέση απόστασης  $L/H$  και του λόγου της οριζόντιας μετατόπισης σε βάθος  $z = 2H$  ( $D_{h,2H}$ ) ως προς την αντίστοιχη της στην επιφάνεια  $D_h$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους (i)  $H = 2m$  και (ii)  $H = 4m$ .

Στα **Σχήματα 4.31 και 4.32** παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v$  και οι κανονικοποιημένες μετατοπίσεις  $D_v/D_h(5H)$  για τις πιο πάνω περιπτώσεις εδάφους με μη-επιφανειακή αργιλική στρώση πλησίον αναβαθμού με ύψος  $H = 2m$  και  $H = 4m$ , αντίστοιχα. Από τα σχήματα αυτά προκύπτει πως το μέγεθος των μετατοπίσεων  $D_v$  μεταβάλλεται με το βάθος  $z_c$ , όπως και το μέγεθος των  $D_h$ . Συγκεκριμένα, για αναβαθμό με  $H = 2m$ , όταν το βάθος  $z_c = 0$  και  $1m$  δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη μεταβολή στο μέγεθος των  $D_v$ , ενώ όταν το βάθος  $z_c = 2m$  και  $4m$  το μέγεθος των  $D_v$  μειώνεται στην περιοχή του αναβαθμού. Σε τιμές λόγου  $D_v/D_h(5H)$ , η κανονικοποίηση δείχνει να οδηγεί, λίγο έως πολύ, σε ενιαία μεταβολή ως συνάρτηση της απόστασης  $L/H$ , ανεξαρτήτως τιμής βάθους  $z_c$ .

Από την άλλη, σε αναβαθμό με  $H = 4m$  παρατηρείται μια μικρή αύξηση στο μέγεθος των  $D_v$  στην περιοχή του αναβαθμού όταν το  $z_c$  αυξάνεται σε  $1m$  και  $2m$ , αλλά και πάλι μειώνεται όταν  $z_c = 4m$ . Επομένως, παρατηρείται πως ανεξαρτήτως ύψους  $H$ , το μέγεθος των κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$  μειώνεται όταν ο λόγος  $z_c/H \geq 1$ . Όμως, αντίθετα με ό,τι προκύπτει για  $H = 2m$ , σε τιμές λόγου  $D_v/D_h(5H)$ , η κανονικοποίηση δεν δείχνει να οδηγεί σε ενιαία μεταβολή ως συνάρτηση της απόστασης  $L/H$ , ανεξαρτήτως τιμής βάθους  $z_c$ . Μάλιστα προκύπτει αύξηση, κατ' απόλυτη τιμή, του λόγου  $D_v/D_h(5H)$  στην περιοχή του αναβαθμού, όσο αυξάνει το βάθος  $z_c$ , κυρίως λόγω της ραγδαίας μείωσης του παρονομαστή, ειδικά όταν  $z_c/H \geq 1$ .



**Σχήμα 4.31:** Επίδραση βάθους εμφάνισης  $z_c$  της αργιλικής στρώσης πάχους  $h_c = 1\text{m}$  στη σχέση απόστασης  $L/H$  και κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς  $D_h(5H)$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους  $H = 2\text{m}$ .



**Σχήμα 4.32:** Επίδραση βάθους εμφάνισης  $z_c$  της αργιλικής στρώσης πάχους  $h_c = 2\text{m}$  στη σχέση απόστασης  $L/H$  και κατακόρυφων μετατοπίσεων  $D_v$ , και μετά από κανονικοποίηση τους ως προς  $D_h(5H)$ , για ρευστοποιήσιμη στρώση με αναβαθμό ύψους  $H = 4\text{m}$ .

## 4.6 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Στις παραμετρικές αναλύσεις που παρουσιάστηκαν στο παρόν Κεφάλαιο διερευνήθηκε η πλευρική εξάπλωση οριζόντιου εδάφους προς αναβαθμό ύψους  $H$ . Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα κάτωθι:

- [1] Η σχέση εκτίμησης των οριζοντίων μετατοπίσεων  $D_h$  στην επιφάνεια του εδάφους των Youd et al. (2002) προτείνεται προς χρήση για την περιοχή πίσω από τη στέψη του αναβαθμού και για αποστάσεις  $L \geq 5H$ . Οι αριθμητικές αναλύσεις δίνουν ότι για αποστάσεις  $0 < L < 5H$  οι οριζόντιες μετατοπίσεις στην επιφάνεια του εδάφους αυξάνουν ραγδαία (π.χ. έως και κατά 100%) σε σχέση με την τιμή που προβλέπεται σε απόσταση  $L=5H$ .
- [2] Οι υπάρχουσες σχέσεις εκτίμησης των οριζοντίων μετατοπίσεων  $D_h$  αφορούν στην επιφάνεια του εδάφους και μόνο, αλλά σημαντικές οριζόντιες μετατοπίσεις υπάρχουν και σε βάθος. Δίνοντας έμφαση στο βάθος  $2H$ , από τις αριθμητικές αναλύσεις προκύπτουν τιμές  $D_h$  μικρότερες ή ίσες από ό,τι στην επιφάνεια του εδάφους, δηλαδή τιμές  $D_h$  σαφώς μη-μηδενικές. Η συσχέτιση των τιμών  $D_h$  σε βάθος με τις τιμές στην επιφάνεια του εδάφους δεν είναι ευχερής, καθώς εξαρτώνται έντονα από το γεωτεχνικό προφίλ (π.χ., από το πάχος και το βάθος αργλικής στρώσης, αν υπάρχει).
- [3] Η πλευρική εξάπλωση οριζόντιου εδάφους δεν δημιουργεί μόνο οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  προς τον αναβαθμό στην περιοχή πίσω από τη στέψη, αλλά και αντιστοίχου μεγέθους οριζόντιες μετατοπίσεις από τον αναβαθμό στην περιοχή μπροστά από τον πόδα. Οι εν λόγω οριζόντιες μετατοπίσεις φθίνουν αργά με την απόσταση από τον πόδα, αλλά παραμένουν υπαρκτές ακόμη και σε μεγάλες αποστάσεις (μέχρι και  $L = 20H$ ). Υπογραμμίζεται ότι στη βιβλιογραφία δεν γίνεται αναφορά σε οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  μπροστά από τον πόδα.
- [4] Η πλευρική εξάπλωση οριζόντιου εδάφους δημιουργεί και σημαντικές κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v$ , ήτοι καθιζήσεις πίσω από τη στέψη και ανυψώσεις μπροστά από τον πόδα του αναβαθμού. Αυτές οφείλονται στη μορφή της εδαφικής παραμόρφωσης πλησίον του αναβαθμού που ομοιάζει ευρείας περιστροφικής αστοχίας που φθάνει σε βάθος λίγο πάνω από τον πυθμένα της ρευστοποιήσιμης στρώσης με κέντρο περιστροφής περίπου πάνω από τον πόδα. Συνεπώς, από μια απόσταση  $L$  πίσω και μπροστά από τον πόδα (για  $L \geq 20H$ ) οι κατακόρυφες μετατοπίσεις είναι πρακτικώς αμελητέες. Υπογραμμίζεται ότι στη βιβλιογραφία δεν γίνεται καμία αναφορά σε κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v$ .
- [5] Όσο αυξάνει το ύψος του αναβαθμού  $H$ , τόσο αυξάνουν οι οριζόντιες  $D_h$  και κατακόρυφες  $D_v$  μετατοπίσεις. Το ύψος  $H$  δεν υπεισέρχεται άμεσα στις εμπειρικές σχέσεις της βιβλιογραφίας (π.χ., στη σχέση των Youd et al. 2002), αλλά αποδεικνύεται σημαντική με βάση τις αριθμητικές αναλύσεις. Ο λόγος που διαφαίνεται σημαντική παράμετρος είναι ότι μεγαλύτερου ύψους αναβαθμοί με το ίδιο, κατά τα άλλα,

κοκκώδες έδαφος έχουν και στατικά μικρότερη ευστάθεια, οπότε οδηγούνται σε εντονότερη συσσώρευση μετατοπίσεων λόγω ρευστοποίησης.

- [6] Η ύπαρξη αργιλικής στρώσης πάχους  $h_c$  μειώνει τις μετατοπίσεις του εδάφους λόγω πλευρικής εξάπλωσης, και μάλλον περισσότερο απ' ό τι προβλέπεται από την αντιστοιχούσα μείωση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης σε εμπειρικές σχέσεις (π.χ., του πάχους  $T_{15}$  στη σχέση των Youd et al. 2002). Επιπλέον, το βάθος  $z_c$  της αργιλικής στρώσης παίζει ρόλο στον καθορισμό των μετατοπίσεων, και αυτή είναι μια παράμετρος που δεν υπεισέρχεται στις εμπειρικές σχέσεις της βιβλιογραφίας (π.χ. στη σχέση των Youd et al. 2002). Αποδεικνύεται ότι οι μετατοπίσεις του εδάφους είναι σαφώς μικρότερες στην περιοχή του αναβαθμού όταν υπάρχει αργιλικό έδαφος κάτω από τον πόδα, δηλαδή όταν μια μη-επιφανειακή αργιλική στρώση έχει βάθος εμφάνισης  $z_c/H \geq 1$  (για  $h_c/H = 0.5$ ) ή όταν μια επιφανειακή αργιλική στρώση έχει πάχος  $h_c/H > 1$ . Ταυτόχρονα όμως, οι μετατοπίσεις του εδάφους δεν απομειώνονται σημαντικά με την απόσταση  $L/H$ , όταν υπάρχει αργιλικό έδαφος κάτω από τον πόδα. Δηλαδή το (μη-ρευστοποιήσιμο) αργιλικό έδαφος σε μεγάλο βάθος λειτουργεί απομειωτικά στο φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης, πολύ περισσότερο απ' ό τι προβλέπουν οι υπάρχουσες εμπειρικές σχέσεις της βιβλιογραφίας.
- [7] Λεπτομερέστερα, για επιφανειακή αργιλική στρώση, το πάχος της  $h_c$  επιδρά διαφορετικά στο μέγεθος των μετατοπίσεων  $D_h$  και  $D_v$  όταν ο λόγος  $h_c/H \leq 1$  και όταν  $h_c/H > 1$ . Συγκεκριμένα, η επίδραση του  $h_c$  είναι αμελητέα όσο ο λόγος  $h_c/H \leq 1$ , ενώ όταν  $h_c/H > 1$  το μέγεθος των  $D_h$  και  $D_v$  μειώνεται και μάλιστα εντονότερα όσο το πάχος  $h_c$  αυξάνεται. Αντίστοιχα, το βάθος εμφάνισης μιας μη-επιφανειακής αργιλικής στρώσης  $z_c$  δεν επηρεάζει ουσιαδώς το μέγεθος των  $D_h$  και  $D_v$  παρά μόνο όταν η αργιλική στρώση βρίσκεται κάτω από τον πόδα του αναβαθμού, όταν δηλαδή  $z_c/H \geq 1$ .

## Κεφάλαιο 5 | Ποσοτικοποίηση μετατοπίσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης προς αναβαθμό

### 5.1 Γενικά

Σε αυτό το Κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια κατηγοριοποίησης και ποσοτικοποίησης των αποτελεσμάτων των αναλύσεων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Η κατηγοριοποίηση γίνεται ξεχωρίζοντας τις περιπτώσεις για ρηχό ( $H = 2\text{ m}$ ) και βαθύ ( $H = 4\text{ m}$ ) αναβαθμό, ενώ υπάρχει και μια επιπλέον κατηγοριοποίηση με βάση την ύπαρξη και τη θέση μιας αργλικής στρώσης πάχους  $h_c$  και βάθους οροφής της  $z_c$ . Συγκεκριμένα, διαχωρίζεται η περίπτωση όπου η αργλική στρώση “περνάει” ( $h_c/H > 1$ , για  $z_c = 0$ ) ή βρίσκεται ( $z_c/H \geq 1$ ) κάτω από τον πόδα του αναβαθμού, από τις περιπτώσεις όπου η αργλική στρώση είτε δεν υπάρχει ή είναι μικρού πάχους και δεν εμφανίζεται σε βάθη μεγαλύτερα του πόδα του αναβαθμού. Συνεπώς, η πρώτη κατηγορία είναι όταν  $(h_c + z_c)/H > 1$ , ενώ η δεύτερη όταν  $(h_c + z_c)/H \leq 1$  συμπεριλαμβάνοντας τις περιπτώσεις καθαρής άμμου. Οι κατηγοριοποιήσεις αυτές προέκυψαν με βάση τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 4, όπου υποδεικνύεται διαφοροποίηση της απόκρισης ανάλογα με το ύψος  $H$  του αναβαθμού, και ανάλογα με την ύπαρξη αργλικής στρώσης κάτω από τον πόδα του αναβαθμού ή όχι. Τα χαρακτηριστικά των περιπτώσεων που εμπεριέχονται σε κάθε κατηγορία συνοψίζονται στους **Πίνακες 5.1 έως 5.4**.

**Πίνακας 5.1:** Περιπτώσεις με ύψος αναβαθμού  $H = 2\text{ m}$ , ανεξαρτήτως ύπαρξης αργλικής στρώσης ή όχι.

Μέση τιμή	Πάχος αργλικής στρώσης $h_c$	Βάθος εμφάνισης αργλικής στρώσης $z_c$
H = 2 m	$h_c = 0\text{ m}$	$z_c = 0\text{ m}$
	$h_c = 1\text{ m}$	$z_c = 0\text{ m}$
	$h_c = 2\text{ m}$	$z_c = 0\text{ m}$
	$h_c = 3\text{ m}$	$z_c = 0\text{ m}$
	$h_c = 4\text{ m}$	$z_c = 0\text{ m}$
	$h_c = 1\text{ m}$	$z_c = 1\text{ m}$
	$h_c = 1\text{ m}$	$z_c = 2\text{ m}$
	$h_c = 1\text{ m}$	$z_c = 4\text{ m}$

**Πίνακας 5.2:** Περιπτώσεις με ύψος αναβαθμού  $H = 4\text{ m}$ , ανεξαρτήτως ύπαρξης αργιλικής στρώσης ή όχι.

Μέση τιμή	Πάχος αργιλικής στρώσης $h_c$	Βάθος εμφάνισης αργιλικής στρώσης $z_c$
H = 4 m	$h_c = 0\text{ m}$	$z_c = 0\text{ m}$
	$h_c = 1\text{ m}$	$z_c = 0\text{ m}$
	$h_c = 2\text{ m}$	$z_c = 0\text{ m}$
	$h_c = 4\text{ m}$	$z_c = 0\text{ m}$
	$h_c = 5\text{ m}$	$z_c = 0\text{ m}$
	$h_c = 6\text{ m}$	$z_c = 0\text{ m}$
	$h_c = 2\text{ m}$	$z_c = 1\text{ m}$
	$h_c = 2\text{ m}$	$z_c = 2\text{ m}$
	$h_c = 2\text{ m}$	$z_c = 4\text{ m}$

**Πίνακας 5.3:** Περιπτώσεις χωρίς αργιλική στρώση ή με αργιλική στρώση που δεν φτάνει ή βρίσκεται κάτω από τον πόδα του αναβαθμού, ήτοι όταν  $(h_c + z_c)/H \leq 1$ , ανεξαρτήτως ύψους H αναβαθμού.

Μέση τιμή	Ύψος αναβαθμού H	Πάχος αργιλικής στρώσης $h_c$	Βάθος εμφάνισης αργιλικής στρώσης $z_c$
$(h_c + z_c)/H \leq 1$	H = 2 m	$h_c = 0\text{ m}$	$z_c = 0\text{ m}$
		$h_c = 1\text{ m}$	$z_c = 0\text{ m}$
		$h_c = 2\text{ m}$	$z_c = 0\text{ m}$
		$h_c = 1\text{ m}$	$z_c = 1\text{ m}$
	H = 4 m	$h_c = 0\text{ m}$	$z_c = 0\text{ m}$
		$h_c = 1\text{ m}$	$z_c = 0\text{ m}$
		$h_c = 2\text{ m}$	$z_c = 0\text{ m}$
		$h_c = 4\text{ m}$	$z_c = 0\text{ m}$
		$h_c = 2\text{ m}$	$z_c = 1\text{ m}$
		$h_c = 2\text{ m}$	$z_c = 2\text{ m}$

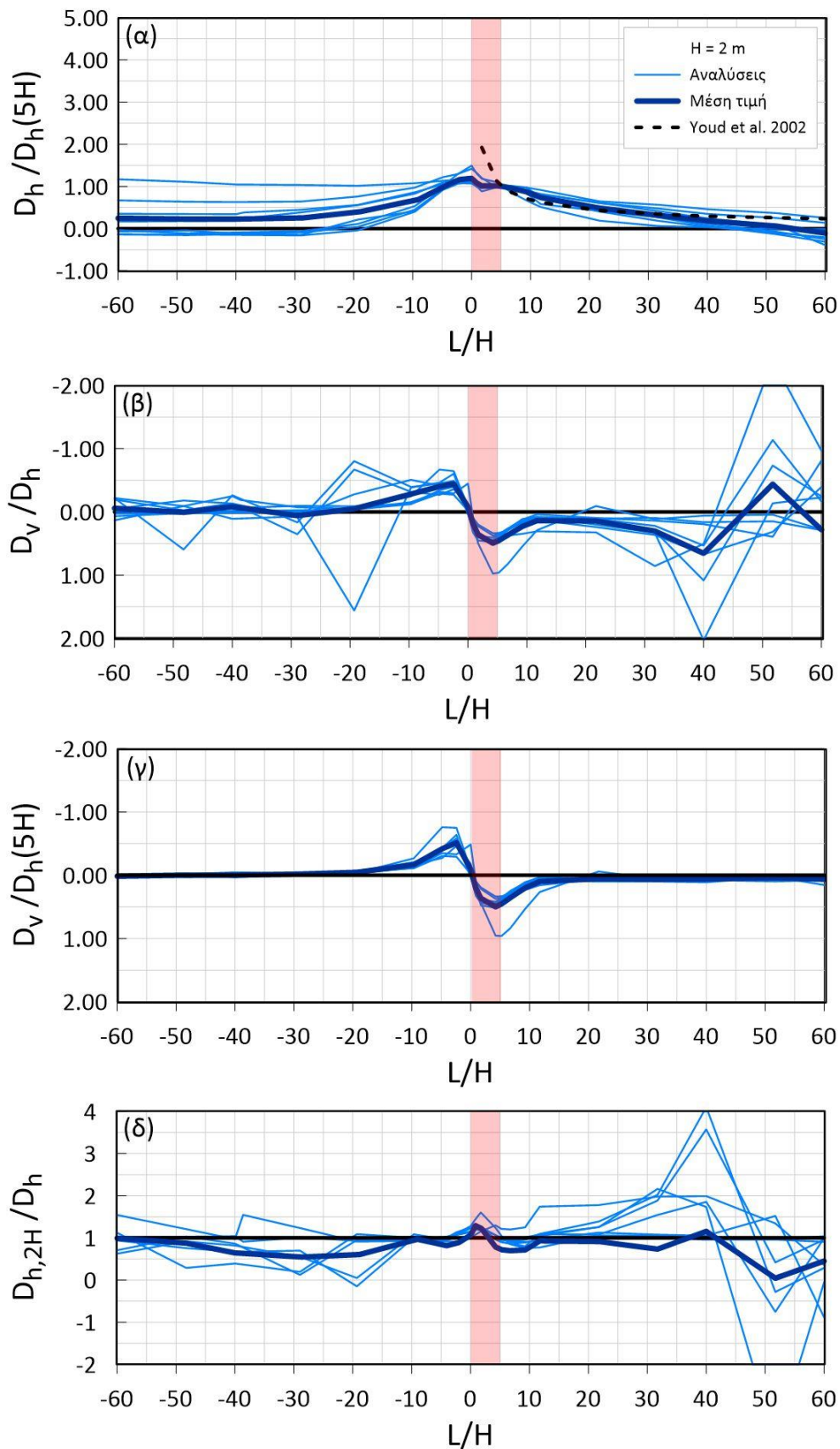
**Πίνακας 5.4:** Περιπτώσεις με αργλική στρώση που φτάνει ή βρίσκεται κάτω από τον πόδα του αναβαθμού, ήτοι όταν  $(h_c+z_c)/H > 1$ , ανεξαρτήτως ύψους  $H$  αναβαθμού.

Μέση τιμή	Ύψος αναβαθμού $H$	Πάχος αργλικής στρώσης $h_c$	Βάθος εμφάνισης αργλικής στρώσης $z_c$
$(h_c + z_c)/H > 1$	$H = 2 \text{ m}$	$h_c = 3 \text{ m}$	$z_c = 0 \text{ m}$
		$h_c = 4 \text{ m}$	$z_c = 0 \text{ m}$
		$h_c = 1 \text{ m}$	$z_c = 2 \text{ m}$
		$h_c = 1 \text{ m}$	$z_c = 4 \text{ m}$
	$H = 4 \text{ m}$	$h_c = 5 \text{ m}$	$z_c = 0 \text{ m}$
		$h_c = 6 \text{ m}$	$z_c = 0 \text{ m}$
$h_c = 2 \text{ m}$		$z_c = 4 \text{ m}$	

## 5.2 Εκτίμηση μέσης απόκρισης με την απόσταση $L/H$

Στην παρούσα παράγραφο εκτιμώνται οι καμπύλες μέσης τιμής των κανονικοποιημένων μετατοπίσεων  $D_h/D_h(5H)$ ,  $D_v/D_h$ ,  $D_v/D_h(5H)$  και  $D_{h,2H}/D_h$  προς την αδιάστατη απόσταση  $L/H$  για όλες τις προαναφερθείσες κατηγορίες. Στα δύο πρώτα **Σχήματα 5.1** και **5.2** παρουσιάζονται οι καμπύλες των αναλύσεων (με τις μέσες τιμές τους) για περιπτώσεις με ύψος αναβαθμού  $H = 2\text{m}$  και  $H = 4\text{m}$ , αντίστοιχα, ανεξαρτήτως γεωτεχνικού προφίλ, δηλαδή για τις περιπτώσεις των **Πινάκων 5.1** και **5.2**. Στην συνέχεια στο **Σχήμα 5.3** παρουσιάζονται οι καμπύλες των αναλύσεων (με τις μέσες τιμές τους) για περιπτώσεις χωρίς αργλική στρώση ή με αργλική στρώση που δεν φτάνει ή βρίσκεται κάτω από τον πόδα του αναβαθμού, ήτοι όταν  $(h_c+z_c)/H \leq 1$ , ανεξαρτήτως ύψους  $H$  αναβαθμού, δηλαδή για τις περιπτώσεις του **Πίνακα 5.3**. Ακολούθως στο **Σχήμα 5.4** παρουσιάζονται οι καμπύλες των αναλύσεων (με τις μέσες τιμές τους) για τις περιπτώσεις όπου η αργλική στρώση βρίσκεται κάτω από τον πόδα του αναβαθμού, ήτοι όταν  $(h_c+z_c)/H > 1$ , ανεξαρτήτως ύψους  $H$  αναβαθμού, δηλαδή για τις περιπτώσεις του **Πίνακα 5.4**. Τέλος στο **Σχήμα 5.5** παρουσιάζονται οι καμπύλες των αναλύσεων (με τις μέσες τιμές τους) για όλες τις περιπτώσεις που διερευνήθηκαν στην παρούσα εργασία. Κάθε ένα από τα σχήματα αυτά έχει τέσσερα υπό-σχήματα ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$ ), ένα για κάθε μία από τις κανονικοποιημένες μετατοπίσεις που διερευνώνται εδώ. Στο υπό-σχήμα ( $\alpha$ ) εμπεριέχεται επίσης (με διακεκομμένη μαύρη καμπύλη) και η καμπύλη των Youd et al. (2002) όπως προεκτείνεται και σε περιοχές με  $0 < L/H < 5$ .

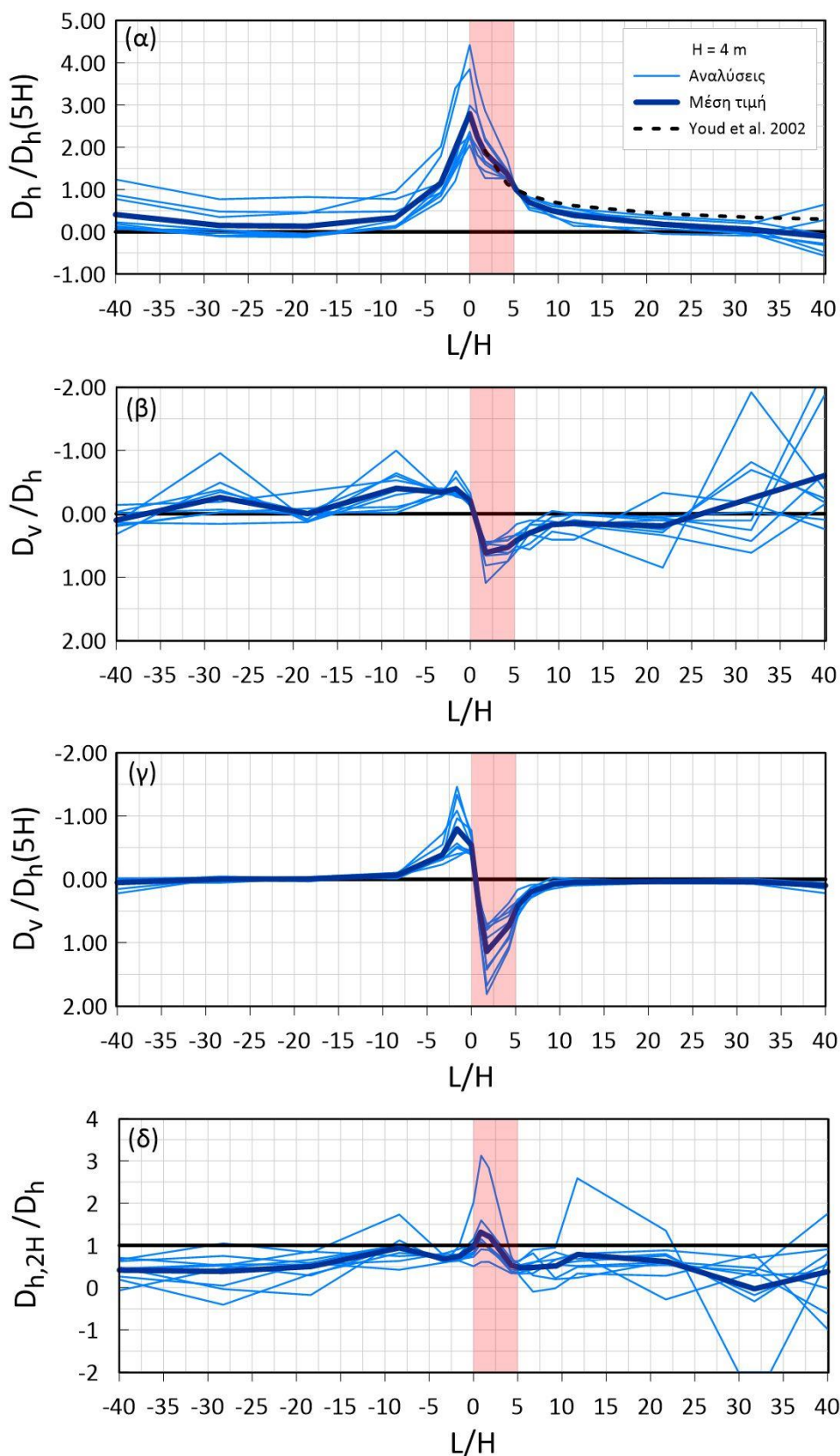




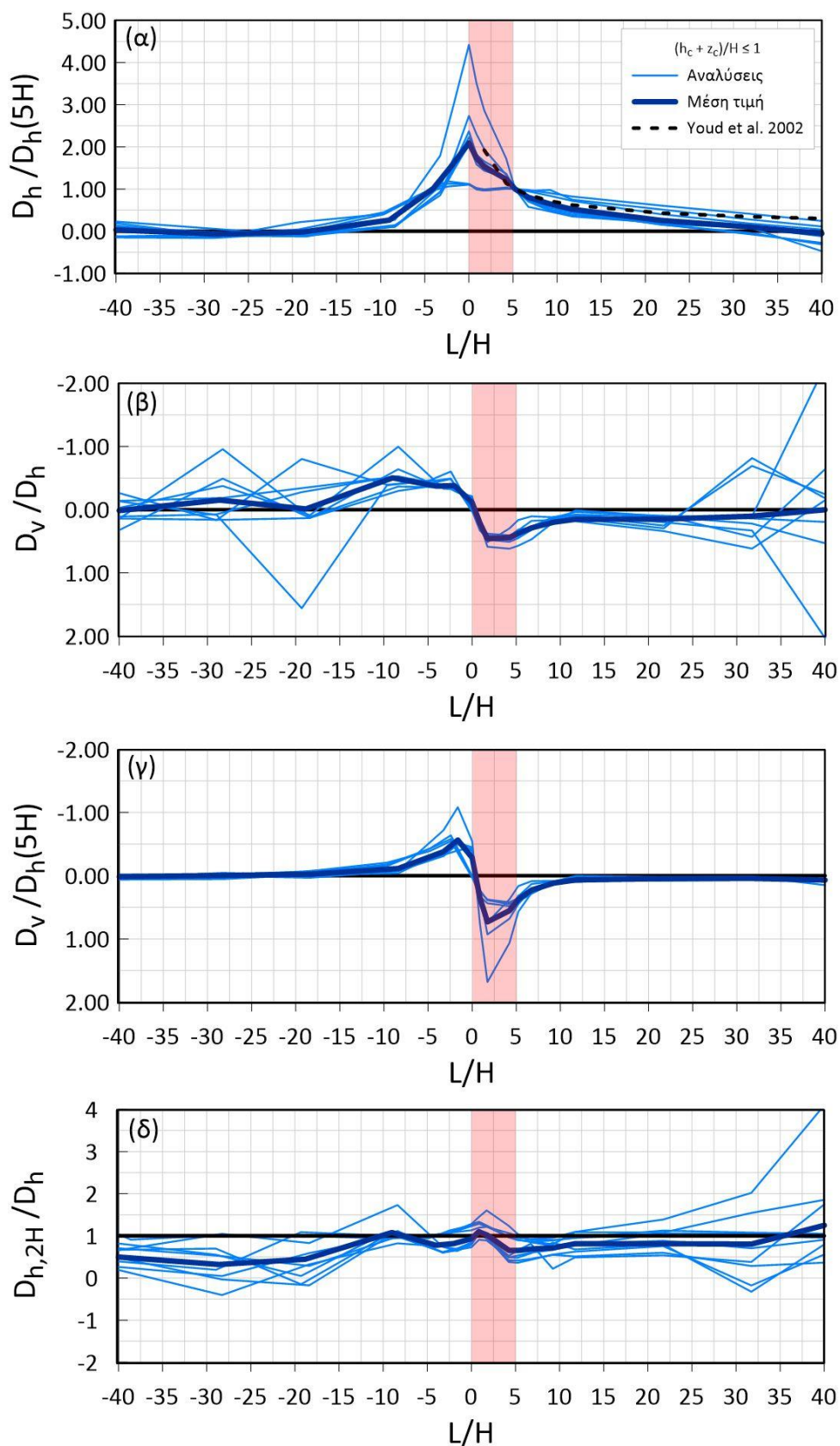
**Σχήμα 5.1:** Κανονικοποιημένες μετατοπίσεις  $D_h/D_h(5H)$ ,  $D_v/D_h$ ,  $D_v/D_h(5H)$  και  $D_{h,2H}/D_h$  προς την αδιάστατη απόσταση  $L/H$ , για τις περιπτώσεις με ύψος αναβαθμού  $H = 2\text{ m}$  ανεξαρτήτως γεωτεχνικού προφίλ, και εκτίμηση μέσωσν τιμών.

Στο υπο-σχήμα (α) του **Σχήματος 5.1** όπου παρουσιάζεται η καμπύλη μέσης τιμής του λόγου  $D_h/D_h(5H)$ , παρατηρείται πως η μέση τιμή μεγιστοποιείται στην περιοχή του αναβαθμού και μειώνεται όσο αυξάνεται η αδιάστατη απόσταση  $L/H$  μπροστά και πίσω από τον αναβαθμό. Όμως μειώνεται με διαφορετικό ρυθμό μπροστά από τον αναβαθμό, όπου μειώνεται στην τιμή  $D_h/D_h(5H) = 0.5$  μέχρι  $L/H = -30$  και μένει σταθερή για  $L/H < -30$ , ενώ πίσω από τον αναβαθμό μειώνεται σταθερά μέχρι να μηδενιστεί. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο μεγαλύτερο εύρος των αναλύσεων με  $H = 2m$ , μπροστά από τον αναβαθμό. Στο υπο-σχήμα (β) όπου παρουσιάζεται η μέση τιμή του λόγου  $D_v/D_h$  παρατηρείται πως η μέση τιμή μπροστά από τον αναβαθμό είναι κοντά στο 0 για αποστάσεις  $L/H < -20$  και αυξάνεται όσο πλησιάζει τον αναβαθμό, όπου το έδαφος ανυψώνεται, φτάνοντας τη μέγιστη τιμή  $D_v/D_h = 0.5$ . Στην συνέχεια, πίσω από τον αναβαθμό το έδαφος καθιζάνει και η μέγιστη μέση τιμή είναι ίση με  $D_v/D_h = 0.5$  και μειώνεται μέχρι το 0 όσο αυξάνεται η απόσταση για  $L/H < 10$ , ενώ σε πιο μεγάλες αποστάσεις αυξομειώνεται λόγω του μεγάλου εύρους που έχουν οι αναλύσεις με  $H = 2m$ . Στο υπο-σχήμα (γ) η καμπύλη μέσης τιμής του λόγου  $D_v/D_h(5H)$  έχει την μορφή των αναλύσεων με  $H = 2m$  (λόγω του μικρού εύρους που παρατηρείται), όπου μπροστά και πίσω από τον αναβαθμό η μέγιστη μέση τιμή είναι ίση με  $D_v/D_h(5H) = 0.5$ . Στο υπο-σχήμα (δ) παρατηρείται πως το εύρος των καμπυλών είναι αρκετά μεγάλο εκτός της περιοχής του αναβαθμού και ιδιαίτερα σε μεγάλες αποστάσεις πίσω από τον αναβαθμό. Ωστόσο η τιμή της μέσης τιμής του λόγου  $D_{h,2H}/D_h$  είναι κοντά στο 1 παρά το μεγάλο εύρος με κάποιες αυξομειώσεις για μεγάλες αποστάσεις πίσω από τον αναβαθμό και με μικρή μείωση στο  $D_{h,2H}/D_h = 0.5$  μπροστά από αυτόν.

Στο **Σχήμα 5.2** όπου παρουσιάζονται οι αναλύσεις με βαθύ αναβαθμό ( $H = 4m$ ) παρατηρείται σχετικά μεγάλο εύρος των καμπυλών σε όλα τα κανονικοποιημένα μεγέθη. Αρχικά στο υπο-σχήμα (α) παρατηρείται μεγάλο εύρος στην περιοχή του αναβαθμού όπου και αυξάνει τη μέση τιμή του λόγου  $D_h/D_h(5H)$  φτάνοντας την τιμή  $D_h/D_h(5H) = 2.8$ , ενώ επίσης μεγάλο εύρος παρατηρείται και μπροστά από τον αναβαθμό με την μέση τιμή να είναι κοντά στο 0. Ενώ πίσω από τον αναβαθμό το εύρος μειώνεται και η καμπύλη μέσης τιμής ακολουθεί την καμπύλη των Youd et al. (2002). Στο υπο-σχήμα (β) παρατηρείται μεγάλο εύρος καθώς αυξάνεται η απόσταση  $L/H$  από τον αναβαθμό με αποτέλεσμα η καμπύλη της μέσης τιμής του λόγου  $D_v/D_h$  να αυξομειώνεται. Στην περιοχή όμως του αναβαθμού το εύρος μειώνεται και η καμπύλη μέσης τιμής έχει την μορφή των καμπυλών απ' όπου προέκυψε φτάνοντας σε τιμές  $D_v/D_h = 0.4$  και  $0.6$  μπροστά και πίσω από τον αναβαθμό, αντίστοιχα. Στο υπο-σχήμα (γ) όλες οι καμπύλες είναι κοντά στο 0 για αποστάσεις  $|L/H| > 10$ , επομένως και η μέση τιμή είναι ίση με 0. Ενώ στην περιοχή του αναβαθμού όπου το εύρος μεγαλώνει, η μέση τιμή βρίσκεται κάπου στη μέση τους εύρους και φτάνει στην μέγιστη τιμή ίση με  $D_v/D_h(5H) = 0.75$  και 1 μπροστά και πίσω από τον αναβαθμό, αντίστοιχα. Στο υπο-σχήμα (δ) η μέση τιμή του λόγου  $D_{h,2H}/D_h$  φτάνει στην μέγιστη τιμή ίση με  $D_{h,2H}/D_h = 1.25$  στην περιοχή του αναβαθμού και μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση  $L/H$  από τον αναβαθμό.



**Σχήμα 5.2:** Κανονικοποιημένες μετατοπίσεις  $D_h/D_h(5H)$ ,  $D_v/D_h$ ,  $D_v/D_h(5H)$  και  $D_{h,2H}/D_h$  προς την αδιάστατη απόσταση  $L/H$ , για τις περιπτώσεις με ύψος αναβαθμού  $H = 4\text{ m}$  ανεξαρτήτως γεωτεχνικού προφίλ, και εκτίμηση μέσω των τιμών.

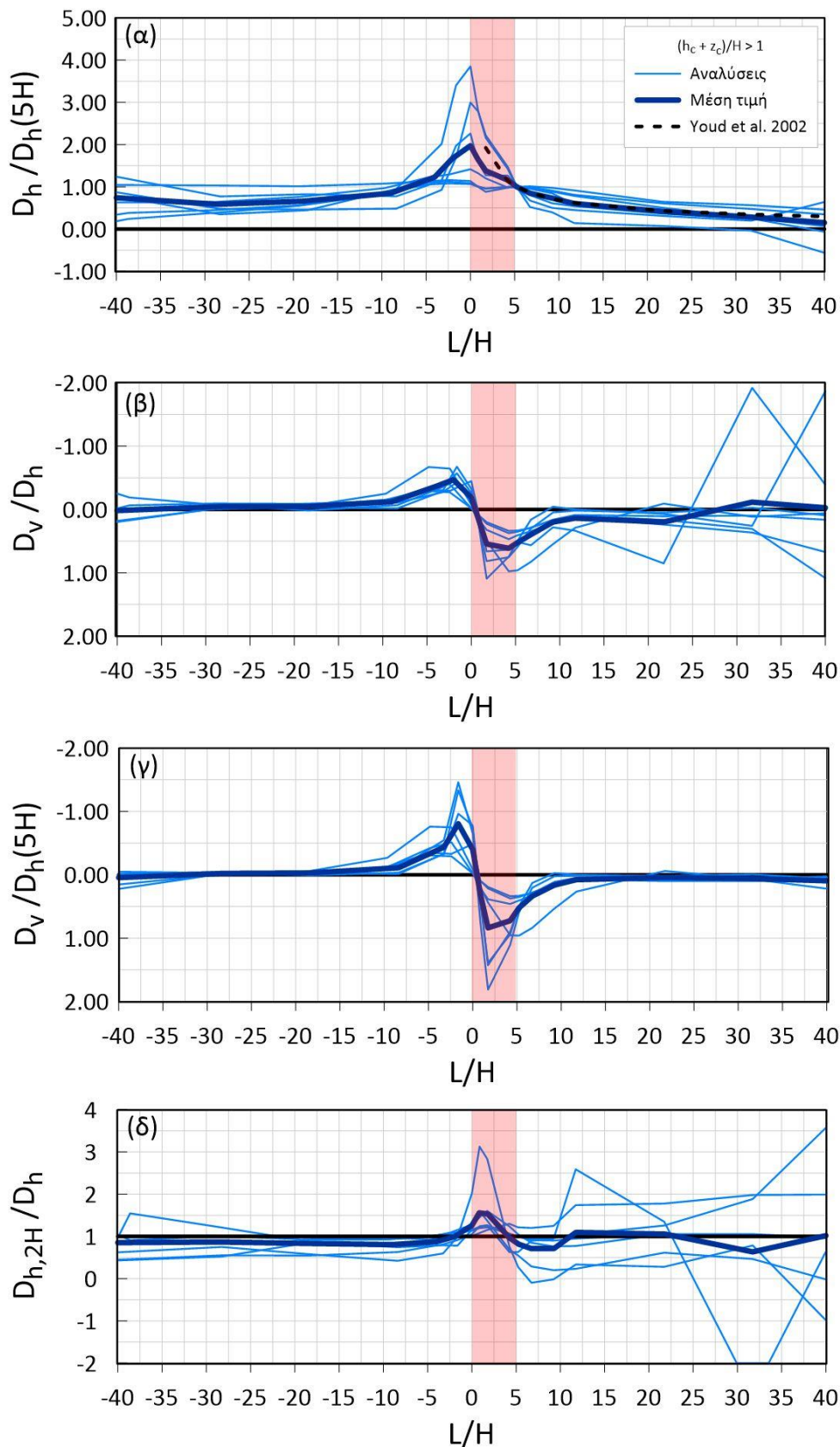


**Σχήμα 5.3:** Κανονικοποιημένες μετατοπίσεις  $D_h/D_h(5H)$ ,  $D_v/D_h$ ,  $D_v/D_h(5H)$  και  $D_{h,2H}/D_h$  προς την αδιάστατη απόσταση  $L/H$ , για τις περιπτώσεις χωρίς αργιλική στρώση ή με αργιλική στρώση που δεν φτάνει κάτω από τον πόδα του αναβαθμού (όταν  $(h_c+z_c)/H \leq 1$ ), ανεξαρτήτως ύψους αναβαθμού  $H$ , και εκτίμηση μέσω των τιμών.

Στο **Σχήμα 5.3** παρουσιάζονται οι καμπύλες μέσης τιμής των αποτελεσμάτων, όταν ισχύει  $(h_c+z_c)/H \leq 1$ , δηλαδή όταν δεν υπάρχει αργιλική στρώση ή αν υπάρχει βρίσκεται πάνω από τον πόδα του αναβαθμού. Στο υπο-σχήμα (α) η μέγιστη μέση τιμή του λόγου  $D_h/D_h(5H)$  βρίσκεται στον πόδα του αναβαθμού και είναι ίση με  $D_h/D_h(5H) = 2$ , και μειώνεται φτάνοντας σε μηδενικές τιμές όσο αυξάνεται η απόσταση  $L/H$  μπροστά και πίσω από τον αναβαθμό. Επιπλέον παρατηρείται πως το εύρος των αναλύσεων μεγαλώνει στην περιοχή του αναβαθμού και μικραίνει όσο αυξάνεται η απόσταση  $L/H$ . Στο υπο-σχήμα (β) η μέση τιμή του λόγου  $D_v/D_h$  φτάνει στην μέγιστη τιμή ίση με  $D_v/D_h = 0.5$  μπροστά και πίσω από τον αναβαθμό, ωστόσο φτάνει κοντά στο μηδέν σε πιο κοντινή απόσταση μπροστά από τον αναβαθμό. Συγκεκριμένα μηδενίζεται σε απόσταση περίπου ίση με  $L/H = 12.5$  μπροστά από τον αναβαθμό και  $L/H = -20$  πίσω από αυτόν. Επιπρόσθετα παρατηρείται πως η καμπύλη μέσης τιμής μένει κοντά στο μηδέν παρά το μεγάλο εύρος των καμπυλών των αναλύσεων σε μεγάλες αποστάσεις  $L/H$  από τον αναβαθμό. Στο υπο-σχήμα (γ) το εύρος είναι μεγαλύτερο στην περιοχή του αναβαθμού, ωστόσο η καμπύλη μέσης τιμής του λόγου  $D_v/D_h(5H)$  είναι κοντά στις μικρότερες τιμές του εύρους με την μέγιστη μέση τιμή να παρατηρείται στο  $D_v/D_h(5H) = 0.75$  και  $0.5$  πίσω και μπροστά από τον αναβαθμό, αντίστοιχα. Στο υπο-σχήμα (δ) η μέση τιμή του λόγου  $D_{h,2H}/D_h$  γίνεται μέγιστη και ίση με  $D_{h,2H}/D_h = 1$  κοντά στον πόδα του αναβαθμού και μειώνεται ελάχιστα πίσω από τον αναβαθμό, ενώ μπροστά από τον αναβαθμό μειώνεται περισσότερο φτάνοντας σε τιμή ίση με  $D_{h,2H}/D_h = 0.5$ .

Στο **Σχήμα 5.4** παρουσιάζονται οι καμπύλες μέσης τιμής των αποτελεσμάτων, όταν η αργιλική στρώση «φτάνει» ή βρίσκεται κάτω από τον πόδα του αναβαθμού, δηλαδή όταν  $(h_c+z_c)/H > 1$ . Στο υπο-σχήμα (α) η μέση τιμή του λόγου  $D_h/D_h(5H)$  μεγιστοποιείται στον πόδα του αναβαθμού στην τιμή  $D_h/D_h(5H) = 2$  και μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση  $L/H$  πίσω από τον αναβαθμό. Ενώ, μπροστά από τον αναβαθμό μειώνεται μέχρι την απόσταση  $L/H = -15$  και μένει σχεδόν σταθερή κοντά στο 1 όσο η απόσταση αυξάνεται. Επιπρόσθετα, το εύρος μεγαλώνει στην περιοχή του αναβαθμού με την καμπύλη της μέσης τιμής να βρίσκεται στην μέση του. Στο υπο-σχήμα (β) η μέγιστη τιμή του λόγου  $D_v/D_h$  παρατηρείται στο  $0.5$  μπροστά και πίσω από τον αναβαθμό και μειώνεται όσο αυξάνεται απόσταση  $L/H$ . Το εύρος των αναλύσεων είναι σχετικά μικρό στην περιοχή του αναβαθμού και μπροστά από αυτόν, ωστόσο μεγαλώνει πίσω από τον αναβαθμό με την μέση τιμή όμως να μένει κοντά στο 0. Στο υπο-σχήμα (γ) η μέγιστη τιμή του λόγου  $D_v/D_h(5H)$  είναι ίδια μπροστά και πίσω από τον αναβαθμό και ίση με  $D_v/D_h(5H) = 0.8$ , και μειώνεται φτάνοντας κοντά στο 0 όσο αυξάνεται η απόσταση  $L/H$ . Επιπλέον παρατηρείται πως το εύρος των αναλύσεων μεγαλώνει στην περιοχή του αναβαθμού με την τιμή της μέσης τιμής να βρίσκεται στην μέση του εύρους. Στο υπο-σχήμα (δ) το εύρος των αναλύσεων μεγαλώνει στην περιοχή του αναβαθμού και μπροστά από αυτόν. Ως αποτέλεσμα αυτού η μέγιστη τιμή του λόγου  $D_{h,2H}/D_h$  παρατηρείται στον πόδα του αναβαθμού και είναι ίση με  $D_{h,2H}/D_h = 1.5$  και μειώνεται κοντά στο 1 όσο αυξάνεται η απόσταση  $L/H$  μπροστά και πίσω από αυτόν.

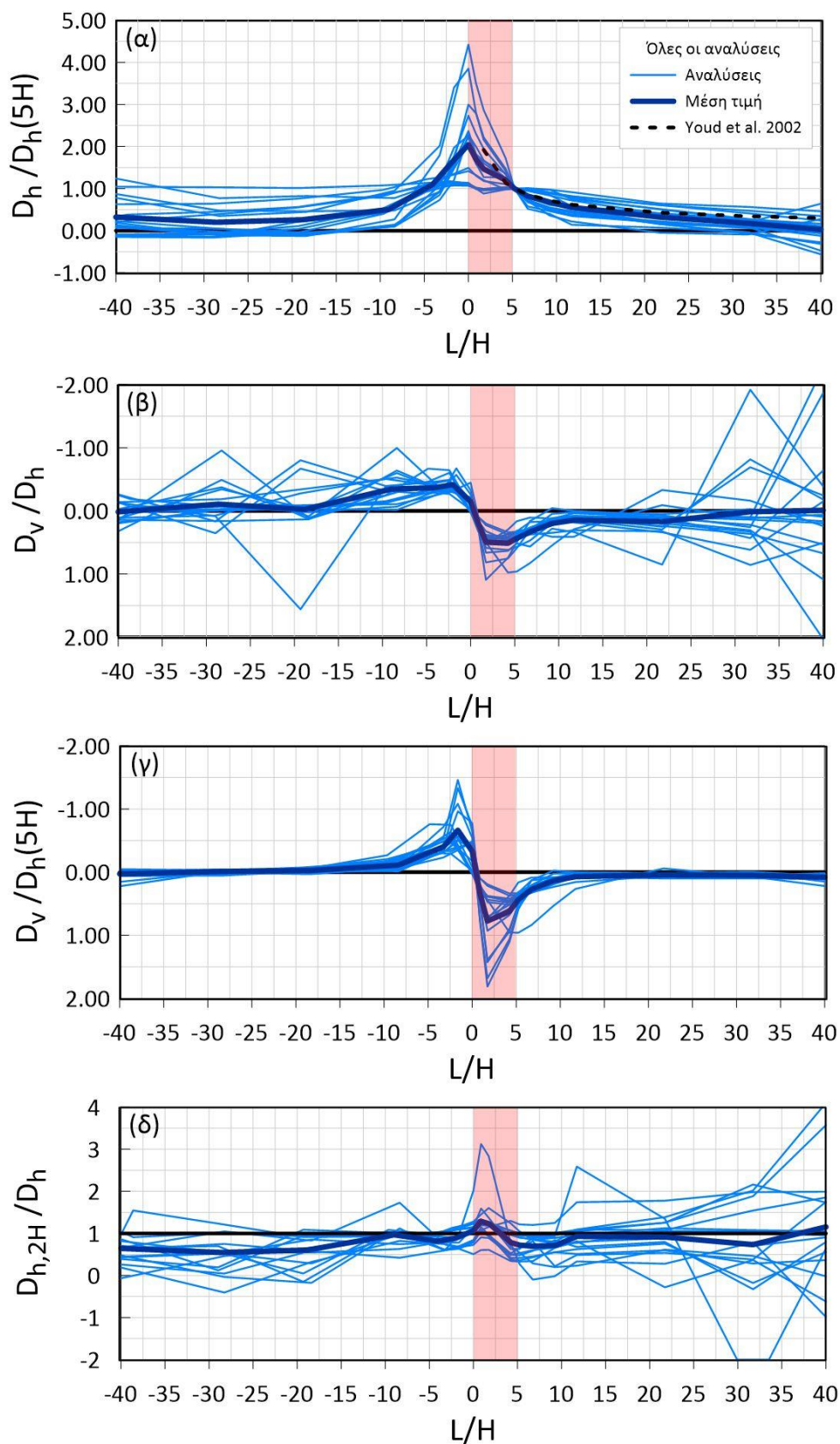




**Σχήμα 5.4:** Κανονικοποιημένες μετατοπίσεις  $D_h/D_h(5H)$ ,  $D_v/D_h$ ,  $D_v/D_h(5H)$  και  $D_{h,2H}/D_h$  προς την αδιάστατη απόσταση  $L/H$ , για τις περιπτώσεις με αργλική στρώση που φτάνει ή βρίσκεται κάτω από τον πόδα του αναβαθμού (όταν  $(h_c + z_c)/H > 1$ ), ανεξαρτήτως ύψους αναβαθμού  $H$ , και εκτίμηση μέσω τιμών.

Στα υπο-σχήματα του **Σχήματος 5.5** παρουσιάζονται συγκεντρωμένες οι καμπύλες των αποτελεσμάτων για όλες τις περιπτώσεις που διερευνήθηκαν στην παρούσα εργασία, όπως επίσης και οι καμπύλες μέσης τιμής που προκύπτουν από αυτές. Στο υπο-σχήμα (α) η μέγιστη μέση τιμή του λόγου  $D_h/D_h(5H)$  παρατηρείται στον πόδα του αναβαθμού και είναι ίση με  $D_h/D_h(5H) = 2$  με το εύρος των αναλύσεων να εκτείνεται από το 1 μέχρι το 5, δηλαδή η μέση τιμή βρίσκεται πιο κοντά στις ελάχιστες τιμές των αναλύσεων. Το ίδιο παρατηρείται και μπροστά από τον αναβαθμό όπου το εύρος μικραίνει και η μέση τιμή καθώς μειώνεται βρίσκεται πιο κοντά στις ελάχιστες τιμές του εύρους. Ενώ πίσω από τον αναβαθμό το εύρος είναι ακόμα πιο μικρό και η καμπύλη μέσης τιμής βρίσκεται στην μέση του εύρους ακολουθώντας με ικανοποιητική ακρίβεια την καμπύλη των Youd et al. (2002). Στο υπο-σχήμα (β) όπου παρουσιάζεται η κανονικοποιημένη μετατόπιση  $D_v/D_h$  παρατηρείται πως η καμπύλη μέσης τιμής ομαλοποιείται ικανοποιητικά παρά τις μεγάλες αυξομειώσεις των αναλύσεων που παρατηρούνται όσο αυξάνεται η απόσταση  $L/H$ . Συγκεκριμένα η μέση τιμή είναι κοντά στο 0 για αποστάσεις  $|L/H| > 20$  μπροστά και πίσω από τον αναβαθμό και αυξάνεται όσο πλησιάζει σε αυτόν, φτάνοντας την μέγιστη τιμή ίση με  $D_v/D_h = 0.5$  για την ανύψωση αλλά και για την καθίζηση του εδάφους. Στο υπο-σχήμα (γ) όπου παρουσιάζεται η κανονικοποιημένη μετατόπιση  $D_v/D_h(5H)$  παρατηρείται πως η μέση τιμή όπως και οι τιμές όλων των αναλύσεων είναι πολύ κοντά στο 0 για αποστάσεις  $|L/H| > 10$  και αυξάνεται όσο πλησιάζει στον αναβαθμό. Συγκεκριμένα φτάνει στη μέγιστη ανύψωση ίση με  $D_v/D_h(5H) = 0.6$  μπροστά από τον αναβαθμό και στη μέγιστη καθίζηση ίση με  $D_v/D_h(5H) = 0.75$  πίσω από τον αναβαθμό. Στο υπο-σχήμα (δ) παρατηρείται παντού σχετικά μεγάλο εύρος ιδιαίτερα στην περιοχή του αναβαθμού και πίσω από αυτόν. Ωστόσο η καμπύλη μέσης τιμής είναι σχετικά ομαλή παρά τις αυξομειώσεις που παρατηρούνται, όπου παίρνει την μέγιστη τιμή ίση με  $D_{h,2H}/D_h = 1.25$  στον πόδα του αναβαθμού και μειώνεται κοντά στο 1 όσο αυξάνεται η απόσταση  $L/H$ , ενώ για μεγάλα  $L/H$  μπροστά από τον αναβαθμό μειώνεται στην τιμή  $D_{h,2H}/D_h = 0.5$ .

Γενικά παρατηρείται πως η μορφή των καμπυλών από τις διαφορετικές περιπτώσεις ακολουθεί την ίδια γενική μορφή ανά κανονικοποιημένη μετατόπιση. Το εύρος δεν είναι μεγάλο, παρά μόνο σε μεγάλες αποστάσεις  $L/H$ , όπου τα μεγέθη των μετατοπίσεων είναι γενικώς μικρά, με αποτέλεσμα η κανονικοποίηση να έχει ευαισθησία. Συνεπώς, έχει νόημα η περαιτέρω προσπάθεια ποσοτικοποίησης των ως άνω κανονικοποιημένων μετατοπίσεων ως προς την αδιάστατη απόσταση  $L/H$ , με στόχο την πρακτική εφαρμογή τους.



**Σχήμα 5.5:** Κανονικοποιημένες μετατοπίσεις  $D_h/D_h(5H)$ ,  $D_v/D_h$ ,  $D_v/D_h(5H)$  και  $D_{h,2H}/D_h$  προς την αδιάστατη απόσταση  $L/H$ , για τις όλες τις περιπτώσεις της παρούσας εργασίας ( $H = 2-4\text{m}$ ,  $0 \leq (h_c+z_c)/H \leq 2.5$ ), και εκτίμηση μέσων τιμών

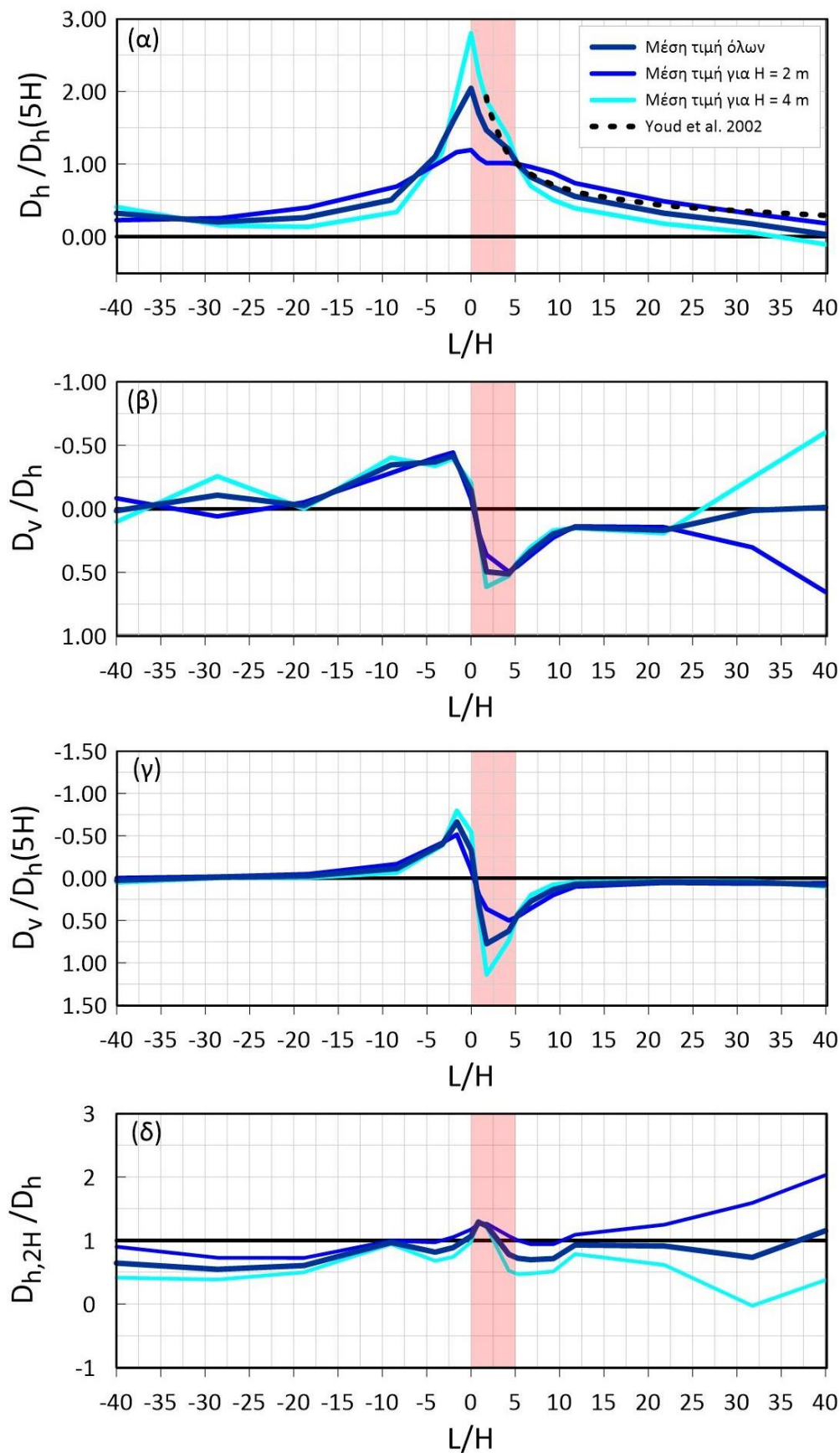


### 5.3 Επίδραση ύψους αναβαθμού και γεωτεχνικού προφίλ

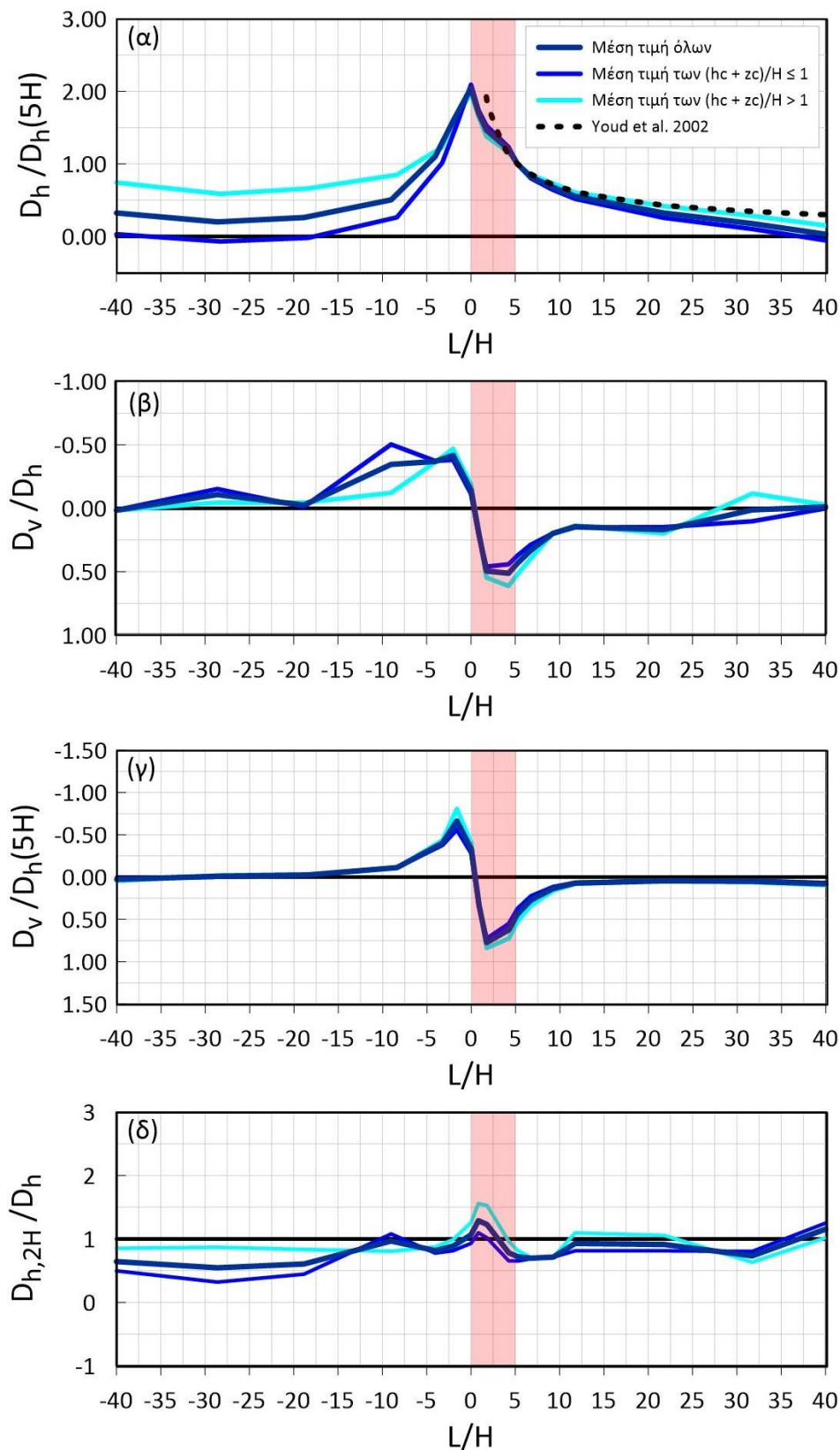
Στην παρούσα παράγραφο διερευνάται η επίδραση του ύψους αναβαθμού  $H$  και του γεωτεχνικού προφίλ στις καμπύλες κανονικοποιημένων μετατοπίσεων  $D_h/D_h(5H)$ ,  $D_v/D_h$ ,  $D_v/D_h(5H)$  και  $D_{h,2H}/D_h$  προς την αδιάστατη απόσταση  $L/H$ , συγκρίνοντας τις καμπύλες μέσης τιμής που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5.2.

Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 5.6** συγκρίνονται οι καμπύλες μέσης τιμής των κανονικοποιημένων μετατοπίσεων  $D_h/D_h(5H)$ ,  $D_v/D_h$ ,  $D_v/D_h(5H)$  και  $D_{h,2H}/D_h$  προς την αδιάστατη απόσταση  $L/H$  όλων των αναλύσεων, των αναλύσεων με  $H = 2\text{m}$  και των αναλύσεων με  $H = 4\text{m}$ , ανεξαρτήτως γεωτεχνικού προφίλ. Προκύπτει η ίδια εικόνα που παρατηρήθηκε και στην παράγραφο 4.3, όπου κατά την αύξηση του ύψους αναβαθμού  $H$ , οι μετατοπίσεις στην περιοχή του αναβαθμού αυξάνονται. Συγκεκριμένα η μέση τιμή του λόγου  $D_h/D_h(5H)$  αυξάνεται για  $H = 4\text{m}$  στην περιοχή του αναβαθμού, όπως και η μέση τιμή του λόγου  $D_v/D_h(5H)$ , ιδιαίτερα στις καθιζήσεις πίσω από τον αναβαθμό. Στην μέση τιμή του λόγου  $D_{h,2H}/D_h$  δεν παρατηρείται κάποια αξιόλογη μεταβολή στην περιοχή του αναβαθμού λόγω μεταβολής του  $H$ , παρά μόνο μια μικρή μείωση με την αύξηση του  $H$ , όσο αυξάνεται η απόσταση  $L/H$ . Όμως, καθώς οι τιμές  $D_h$  και  $D_v$  γίνονται αρκετά μικρές όσο αυξάνεται η απόσταση  $L/H$ , δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα. Από τις καμπύλες μέσης τιμής του λόγου  $D_v/D_h$  προκύπτει πως οι κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v$  ακολουθούν την μεταβολή των οριζόντιων μετατοπίσεων  $D_h$  όσο μεταβάλλεται το  $H$ , καθώς δεν παρατηρείται κάποια αξιόλογη μεταβολή όσο το  $H$  μεταβάλλεται.

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 5.7** συγκρίνονται οι καμπύλες μέσης τιμής των κανονικοποιημένων μετατοπίσεων  $D_h/D_h(5H)$ ,  $D_v/D_h$ ,  $D_v/D_h(5H)$  και  $D_{h,2H}/D_h$  προς την αδιάστατη απόσταση  $L/H$  όλων των αναλύσεων, καθώς και εκείνες για γεωτεχνικό προφίλ χωρίς ή με ρηχή αργιλική στρώση με  $(h_c+z_c)/H \leq 1$ , καθώς και για γεωτεχνικό προφίλ με αργιλική στρώση που φτάνει ή βρίσκεται κάτω από τον πόδα του αναβαθμού, ήτοι με  $(h_c+z_c)/H > 1$ . Από το υπο-σχήμα (α) προκύπτει πως η μέση τιμή του λόγου  $D_h/D_h(5H)$  δεν μεταβάλλεται καθώς αλλάζει το γεωτεχνικό προφίλ στην περιοχή του αναβαθμού, όμως μπροστά από τον αναβαθμό παρατηρείται μια σταθερή αύξηση της μέσης τιμής του λόγου  $D_h/D_h(5H)$  για τις αναλύσεις όπου η αργιλική στρώση βρίσκεται ή φτάνει κάτω από τον πόδα του αναβαθμού, ήτοι με  $(h_c+z_c)/H > 1$ . Επιπλέον, για τις ίδιες περιπτώσεις παρατηρείται μικρή αύξηση και στις κανονικοποιημένες μετατοπίσεις  $D_v/D_h$  και  $D_v/D_h(5H)$  στην περιοχή του αναβαθμού, ωστόσο δεν είναι τόσο σημαντική. Επιπρόσθετα η μέση τιμή του λόγου  $D_{h,2H}/D_h$  αυξάνεται για τις περιπτώσεις με  $(h_c+z_c)/H > 1$  στην περιοχή του αναβαθμού, αλλά και για μεγάλες αποστάσεις  $L/H$  μπροστά από τον αναβαθμό.



**Σχήμα 5.6:** Επίδραση ύψους αναβαθμού  $H$  στις μέσες καμπύλες των κανονικοποιημένων μετατοπίσεων  $D_h/D_h(5H)$ ,  $D_v/D_h$ ,  $D_v/D_h(5H)$  και  $D_{h,2H}/D_h$  προς την αδιάστατη απόσταση  $L/H$ .



**Σχήμα 5.7:** Επίδραση γεωτεχνικού προφίλ στις μέσες καμπύλες των κανονικοποιημένων μετατοπίσεων  $D_h/D_h(5H)$ ,  $D_v/D_h$ ,  $D_v/D_h(5H)$  και  $D_{h,2H}/D_h$  προς την αδιάστατη απόσταση  $L/H$ .

## 5.4 Σχέσεις εκτίμησης μέσης απόκρισης με την απόσταση

Με βάση τις σχετικά μικρές επιδράσεις του ύψους αναβαθμού  $H$  και του γεωτεχνικού προφίλ στις μέσες καμπύλες μεταβολής των κανονικοποιημένων μετατοπίσεων  $D_h/D_h(5H)$ ,  $D_v/D_h$ ,  $D_v/D_h(5H)$  και  $D_{h,2H}/D_h$  συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης  $L/H$  από την παράγραφο 5.3, θεωρείται αποδεκτή η πρόταση εμπειρικών σχέσεων ως βέλτιστες προσεγγίσεις των μέσων αυτών καμπυλών, οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν ως καμπύλες σχεδιασμού. Η μόνη πιθανή εξαίρεση είναι η σχέση  $D_h/D_h(5H) - L/H$  η οποία δείχνει να επηρεάζεται αρκετά από το ύψος του αναβαθμού  $H$ , αλλά στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας αυτή η εξαίρεση αγνοείται.

Για κάθε κανονικοποιημένη μετατόπιση ως απόκριση-στόχος θεωρείται η μέση καμπύλη από όλες τις περιπτώσεις που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία, με ύψη αναβαθμού  $H = 2-4\text{m}$  και  $0 \leq (h_c+z_c)/H \leq 2.5$  (συνολικά 17 περιπτώσεις). Έτσι, στα 4 υπό-σχήματα του **Σχήματος 5.8** παρουσιάζονται οι εκάστοτε καμπύλες σχεδιασμού (με κόκκινη καμπύλη) σε σύγκριση με τις μέσες καμπύλες (με μπλε συνεχή γραμμή) και τις καμπύλες που αντιστοιχούν στη μέση τιμή  $\pm$  την τυπική απόκλιση (με μπλε διακεκομμένη γραμμή) με βάση όλες τις αναλύσεις. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή μπλε χρώματος αντιπροσωπεύει το εύρος των τιμών των μεγεθών που προέκυψαν από όλες τις αναλύσεις, ως μια επιπλέον ένδειξη του πόσο μπορεί να διαφοροποιείται η απόκριση σε σχέση με τη μέση καμπύλη ή την καμπύλη σχεδιασμού.

Συγκεκριμένα, στο υπό-σχήμα  $\alpha$  του **Σχήματος 5.8** παρουσιάζεται η εικόνα για την κανονικοποιημένη μετατόπιση  $D_h/D_h(5H)$  έναντι της αδιάστατης απόστασης  $L/H$ . Ως καμπύλη σχεδιασμού προτείνεται η σχέση 5.1, η οποία θεωρεί συμμετρική μεταβολή της  $D_h/D_h(5H)$  ως προς την τιμή για  $L/H = 0$ . Μάλιστα, προτείνει ως μέγιστη τιμή της  $D_h/D_h(5H)$  την τιμή 2.0, που προκύπτει στη στενή γειτονιά του πόδα (για  $|L/H| \leq 1.55$ ). Υπογραμμίζεται εδώ ότι η σχέση 5.1 χρησιμοποιεί για την απομείωση της τιμής του  $D_h/D_h(5H)$  τη σχέση των Youd et al. (2002), αλλά την επεκτείνει και εκτός του εύρους εφαρμογής της με θεώρηση άνω τιμής το 2.0. Άρα για κάθε περίπτωση στην πράξη, η σχέση 5.1 χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ό,τι προτείνουν οι Youd et al. (2002).

$$D_h/D_h(5H) = \left( \frac{5}{|L/H|} \right)^{0.592} \leq 2 \quad (5.1)$$

Αντίστοιχα, στο υπό-σχήμα  $\beta$  του **Σχήματος 5.8** παρουσιάζεται η εικόνα για την κανονικοποιημένη μετατόπιση  $D_v/D_h$  έναντι της αδιάστατης απόστασης  $L/H$ . Ως καμπύλη σχεδιασμού προτείνεται η σχέση 5.2, η οποία θεωρεί  $D_v = 0$  για  $L/H = 0$ , ανυψώσεις ( $D_v > 0$ ) για  $L/H < 0$  και καθιζήσεις ( $D_v < 0$ ) για  $L/H > 0$ . Μάλιστα, για ίδια τιμή αδιάστατης απόστασης  $|L/H|$ , η απόλυτη τιμή του λόγου  $|D_v/D_h|$  είναι ίδια, και καθώς η τιμή του  $D_h$  είναι ίδια (βλ. σχέση 5.1), το ίδιο ισχύει και για την απόλυτη τιμή της  $|D_v|$ . Προκύπτει μέγιστη τιμή  $|D_v/D_h| = 0.5$  σε απόσταση  $|L/H| = 2.5$ , ενώ οι κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v$  θεωρούνται να

μηδενίζονται σε αποστάσεις  $|L/H| \geq 20$ . Υπογραμμίζεται εδώ ότι η σχέση 5.2 θεωρεί ως δεδομένη τη μετατόπιση  $D_h$  σε κάθε θέση, άρα για κάθε περίπτωση στην πράξη, η σχέση 5.2 χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη σχέση 5.1 (η οποία με τη σειρά της υιοθετεί τη σχέση των Youd et al. 2002).

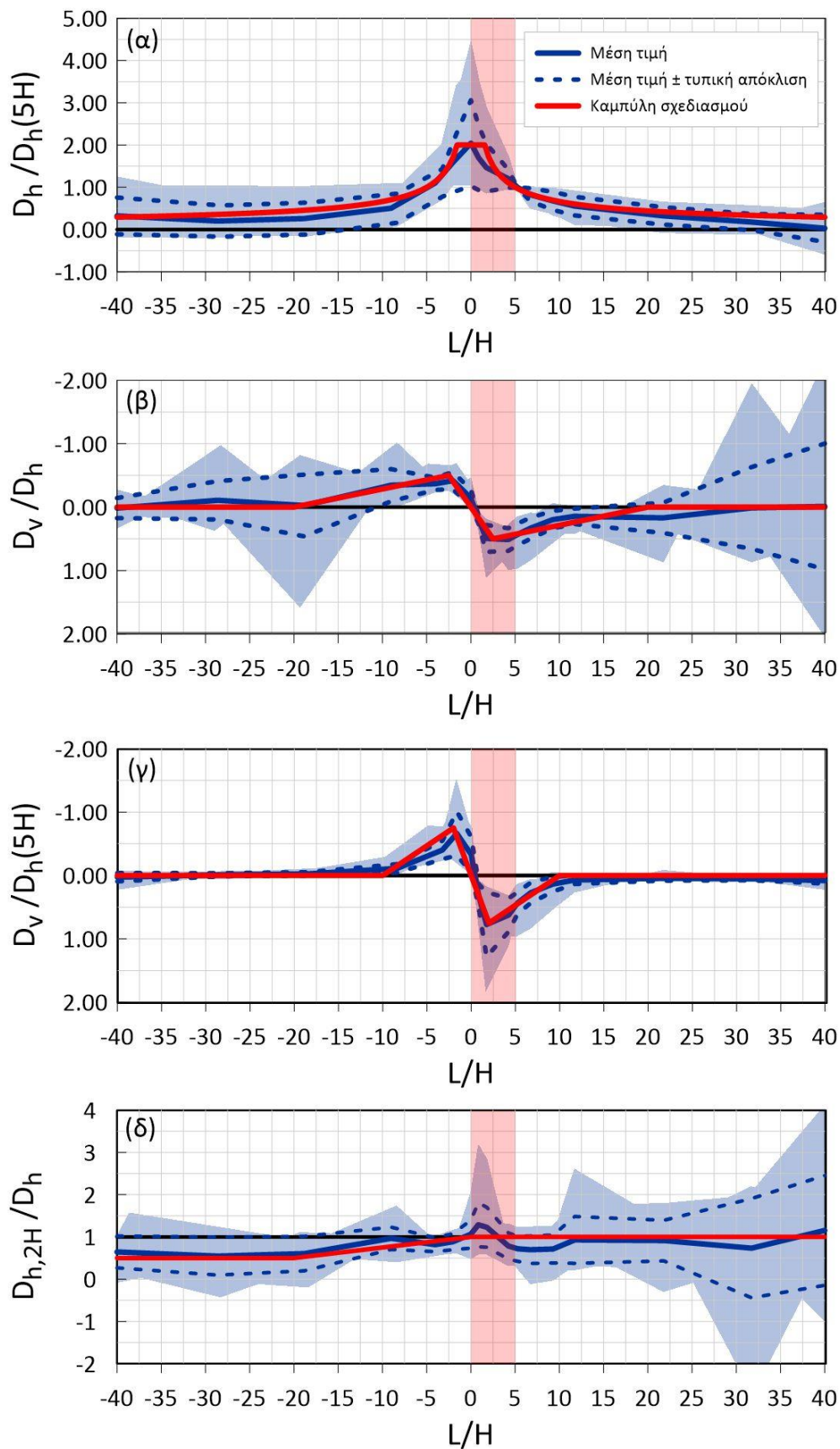
$$D_v/D_h = \begin{cases} 0 & , & |L/H| \geq 20 \\ 0.2 (L/H) & , & |L/H| \leq 2.5 \\ \frac{\text{sign}(L/H)}{35} (20 - |L/H|), & 2.5 \leq |L/H| \leq 20 \end{cases} \quad (5.2)$$

Στο υπο-σχήμα γ του **Σχήματος 5.8** παρουσιάζεται η εικόνα για την κανονικοποιημένη μετατόπιση  $D_v/D_h(5H)$  έναντι της αδιάστατης απόστασης  $L/H$ . Ως καμπύλη σχεδιασμού προτείνεται η σχέση 5.3, η οποία ομοιάζει με την 5.2, και θεωρεί  $D_v = 0$  για  $L/H = 0$ , ανυψώσεις ( $D_v > 0$ ) για  $L/H < 0$  και καθιζήσεις ( $D_v < 0$ ) για  $L/H > 0$ . Όμως καθώς οι κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v$  προκύπτουν από την μετατόπιση  $D_h(5H)$  που υπολογίζεται σε απόσταση  $L = 5H$ , η μέγιστη τιμή του λόγου  $D_v/D_h$  προκύπτει  $|D_v/D_h| = 0.75$  σε απόσταση  $|L/H| = 2.5$ , ενώ οι κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v$  θεωρούνται να μηδενίζονται σε αποστάσεις  $|L/H| \geq 10$ . Σημειώνεται πως η σχέση 5.3 θεωρεί ως δεδομένη τη μετατόπιση  $D_h(5H)$  που υπολογίζεται σε απόσταση  $L = 5H$ , άρα για κάθε περίπτωση στην πράξη, η σχέση 5.3 χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη σχέση 5.1 (η οποία με τη σειρά της υιοθετεί τη σχέση των Youd et al. 2002).

$$D_v/D_h(5H) = \begin{cases} 0 & , & |L/H| \geq 10 \\ 0.3 (L/H) & , & |L/H| \leq 2.5 \\ \frac{\text{sign}(L/H)}{35} (10 - |L/H|), & 2.5 \leq |L/H| \leq 10 \end{cases} \quad (5.3)$$

Αντίστοιχα, στο υπό-σχήμα δ του **Σχήματος 5.8** παρουσιάζεται η εικόνα για την κανονικοποιημένη μετατόπιση  $D_{h,2H}/D_h$  έναντι της αδιάστατης απόστασης  $L/H$ . Ως καμπύλη σχεδιασμού προτείνεται η σχέση 5.4, η οποία θεωρεί  $D_{h,2H}/D_h = 0.5$  για  $L/H \leq -20$ , ενώ για  $L/H > -20$  αυξάνεται μέχρι  $D_{h,2H}/D_h = 1$  στο σημείο  $L/H = 0$  και μένει σταθερά  $D_{h,2H}/D_h = 1$  για  $L/H > 0$ . Υπογραμμίζεται εδώ ότι η σχέση 5.4 θεωρεί ως δεδομένη τη μετατόπιση  $D_h$  σε κάθε θέση, άρα για κάθε περίπτωση στην πράξη, η σχέση 5.4 χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη σχέση 5.1 (η οποία με τη σειρά της υιοθετεί τη σχέση των Youd et al. 2002).

$$D_{h,2H}/D_h = \begin{cases} 0.5 & , & L/H \leq -20 \\ 0.5 + 0.025(20 - (L/H)), & -20 \leq L/H \leq 0 \\ 1 & , & L/H \geq 0 \end{cases} \quad (5.4)$$



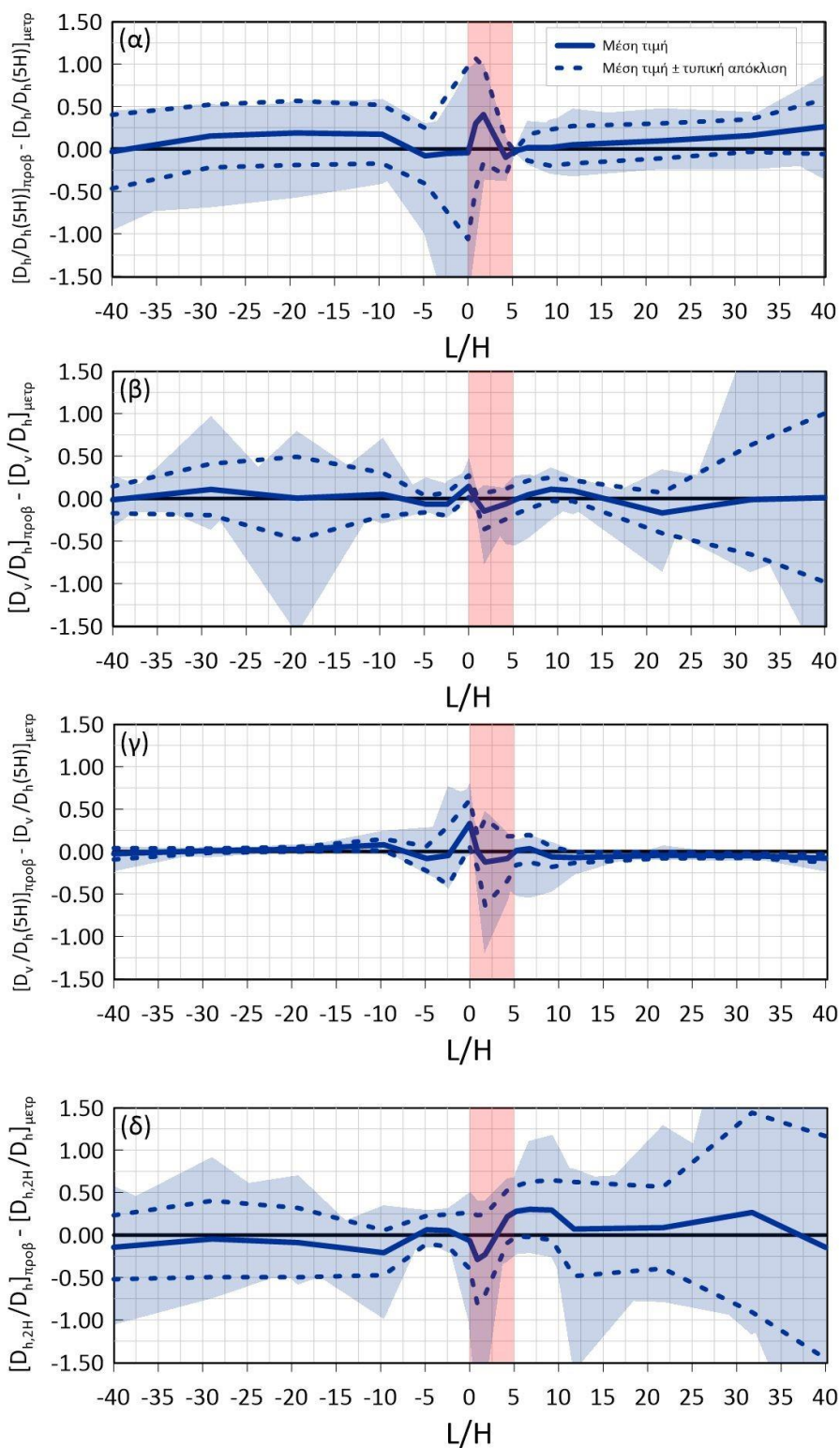
**Σχήμα 5.8:** Σύγκριση εύρους, μέσων καμπυλών και καμπυλών σχεδιασμού των κανονικοποιημένων μετατοπίσεων  $D_h/D_h(5H)$ ,  $D_v/D_h$ ,  $D_v/D_h(5H)$  και  $D_{h,2H}/D_h$  προς την αδιάστατη απόσταση  $L/H$ .

Με σκοπό την διερεύνηση της ακρίβειας των σχέσεων 5.1, 5.2, 5.3 και 5.4, υπολογίστηκε για την κάθε μία το **λάθος εκτίμησης** το οποίο ισούται με την διαφορά της τιμής που προβλέπει η κάθε σχέση μείον την τιμή που προέκυψε από την ανάλυση. Επιλέχθηκε αυτή η διαφορά ως ποσοτικοποίηση του λάθους, γιατί από πρακτικής σκοπιάς αυτό ενδιαφέρει, παρά η ποσοστιαία διαφορά του λάθους (η οποία μάλιστα μπορεί να είναι τεράστια σε μεγάλες τιμές  $L/H$  χωρίς αυτό να έχει πρακτική σημασία για τον μηχανικό). Έτσι, στο **Σχήμα 5.9** παρουσιάζονται οι καμπύλες **της μέσης τιμής του λάθους εκτίμησης** των κανονικοποιημένων μετατοπίσεων προς την αδιάστατη απόσταση  $L/H$ . Η μέση τιμή παρουσιάζεται με μπλε συνεχή γραμμή και με διακεκομμένη μπλε γραμμή παρουσιάζεται η μέση τιμή  $\pm$  την τυπική απόκλιση. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή μπλε χρώματος αναπαριστά το εύρος του λάθους εκτίμησης που υπολογίστηκε για κάθε κανονικοποιημένη μετατόπιση ξεχωριστά.

Στο υπο-σχήμα (α) όπου παρουσιάζεται το λάθος εκτίμησης της κανονικοποιημένης μετατόπισης  $D_h/D_h(5H)$ , παρατηρείται πως η μέγιστη μέση τιμή του λάθους εκτίμησης βρίσκεται στην περιοχή του αναβαθμού και ισούται με  $+0.4$ . Γενικώς το λάθος εκτίμησης είναι μικρό, και μάλλον συντηρητικό, καθώς υπάρχει μια σχετική υπερ-εκτίμηση για το εύρος των αναλύσεων της παρούσας εργασίας. Στο υπο-σχήμα (β) παρουσιάζεται το λάθος εκτίμησης της κανονικοποιημένης μετατόπισης  $D_v/D_h$ . Παρατηρείται πως η μέση τιμή του λάθους εκτίμησης είναι κοντά στο μηδέν, με μικρή διαφοροποίηση έως  $\pm 0.2$ . Στο υπο-σχήμα (γ) όπου παρουσιάζεται το λάθος εκτίμησης της κανονικοποιημένης μετατόπισης  $D_v/D_h(5H)$ , παρατηρείται πως η μέση τιμή του λάθους εκτίμησης παραμένει ίση με 0 μπροστά και πίσω από τον αναβαθμό, ενώ στην περιοχή του αναβαθμού αυξάνεται μόνο τοπικά και έως την τιμή  $+0.3$ . Τέλος, στο υπο-σχήμα (δ) όπου παρουσιάζεται το λάθος εκτίμησης της κανονικοποιημένης μετατόπισης  $D_{h,2H}/D_h$ , παρατηρείται μια μικρή υπερεκτίμηση (έως  $+0.2$ ) για  $L/H \geq 5$ , και μια μικρή υπο-εκτίμηση (έως  $-0.2$ ) για  $L/H < 5$ , πάντα με αυξομειώσεις.

Με βάση τα ανωτέρω, οι σχέσεις 5.1 και 5.4 μπορούν να υπολογίσουν με ικανοποιητική ακρίβεια τις οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  στην επιφάνεια του εδάφους ( $z = 0$ ) και σε βάθος  $z = 2H$  ( $D_{h,2H}$ ). Προφανώς, η σχέση 5.4 προϋποθέτει τη χρήση της σχέσης 5.1 πρώτα, η οποία με τη σειρά της προϋποθέτει την εκτίμηση της τιμής της  $D_h$  σε απόσταση  $L=5H$  (π.χ., από τη σχέση των Youd et al. 2002). Επιπλέον, οι σχέσεις 5.2 και 5.3 μπορούν να υπολογίσουν τις κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v$  στην επιφάνεια του εδάφους. Ωστόσο δεδομένου πως οι σχέσεις 5.2 και 5.3 προκύπτουν από την οριζόντια μετατόπιση  $D_h$  σε κάθε αντίστοιχη θέση και από την οριζόντια μετατόπιση  $D_h(5H)$  σε απόσταση  $L = 5H$ , αντίστοιχα, τα αποτελέσματα τους δεν είναι ταυτόσημα. Σε πρώτη προσέγγιση, συστήνεται για χρήση η σχέση 5.2 η οποία παρουσιάζει μικρότερο λάθος εκτίμησης στην περιοχή του αναβαθμού, ενώ επίσης η σχέση 5.2 μπορεί να υπολογίσει τις κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v$  σε απόσταση μέχρι  $|L| = 20H$ , σε αντίθεση με την 5.3 όπου μηδενίζει τις κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v$  σε αποστάσεις  $|L| > 10H$ .





**Σχήμα 5.9:** Καμπύλες μέσης τιμής του λάθους εκτίμησης των κανονικοποιημένων μετατοπίσεων  $D_h/D_h(5H)$ ,  $D_v/D_h$ ,  $D_v/D_h(5H)$  και  $D_{h,2H}/D_h$  προς την αδιάστατη απόσταση  $L/H$ .



## Κεφάλαιο 6 | Συμπεράσματα – Προτάσεις

### 6.1 Γενικά

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση του φαινομένου της οριζόντιας πλευρικής εξάπλωσης λόγω σεισμικής ρευστοποίησης του εδάφους, στην περίπτωση που υπάρχει αναβαθμός. Η ανάγκη προέκυψε λόγω της ελλιπούς μελέτης του φαινομένου στη διεθνή βιβλιογραφία (π.χ., δεν έχει ποσοτικοποιηθεί η εμφάνιση καθιζήσεων/ανυψώσεων, πέραν της οριζόντιας μετατόπισης). Η διερεύνηση του φαινομένου έγινε με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών (FLAC 2D), και εξετάστηκε παραμετρικά η επίδραση στην απόκριση του πλευρικός εξαπλούμενου εδάφους του ύψους  $H$  του αναβαθμού και των λεπτομερειών του γεωτεχνικού προφίλ (π.χ., η ύπαρξη μη-ρευστοποιήσιμης αργιλικής στρώσης). Για την προσομοίωση της άμμου χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-SAND (Andrianopoulos et al. 2010), ενώ για την προσομοίωση της αργιλικής στρώσης έγινε χρήση του καταστατικού προσομοιώματος Mohr-Coulomb μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης. Από τις αναλύσεις που εκτελέστηκαν προέκυψαν τα βασικά συμπεράσματα της παραγράφου 6.2, αλλά και η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα στο αντικείμενο που αποτυπώνεται στην παράγραφο 6.3.

### 6.2 Βασικά συμπεράσματα

- [1] Η σχέση εκτίμησης των οριζοντίων μετατοπίσεων  $D_h$  στην επιφάνεια του εδάφους των Youd et al. (2002) προτείνεται προς χρήση για την περιοχή πίσω από τη στέψη του αναβαθμού και για αποστάσεις  $L \geq 5H$  από τον πόδα. Προκύπτει ότι για αποστάσεις  $0 < L < 5H$  οι οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  στην επιφάνεια του εδάφους αυξάνουν ραγδαία (π.χ. έως και κατά 100%) σε σχέση με την τιμή που προβλέπεται σε απόσταση  $L = 5H$ . Με το βάθος από την επιφάνεια, οι τιμές των οριζοντίων μετατοπίσεων είναι μικρότερες ή ίσες με αυτές στην επιφάνεια, αλλά σε βάθος  $2H$  παραμένουν σαφώς μη-μηδενικές.
- [2] Η πλευρική εξάπλωση οριζόντιου εδάφους δεν δημιουργεί μόνο οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  προς τον αναβαθμό στην περιοχή πίσω από τη στέψη, αλλά και αντιστοίχου μεγέθους οριζόντιες μετατοπίσεις από τον αναβαθμό στην περιοχή μπροστά από τον πόδα, οι οποίες φθίνουν με την απόσταση από τον πόδα, ακριβώς όπως και εκείνες πίσω από τη στέψη. Υπογραμμίζεται ότι στη βιβλιογραφία δεν γίνεται αναφορά σε οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  μπροστά από τον πόδα.
- [3] Η πλευρική εξάπλωση οριζόντιου εδάφους δημιουργεί και σημαντικές κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v$ , ήτοι καθιζήσεις πίσω από τη στέψη και ανυψώσεις μπροστά από τον πόδα του αναβαθμού. Αυτές οφείλονται στη μορφή της εδαφικής παραμόρφωσης πλησίον του αναβαθμού που ομοιάζει ευρείας περιστροφικής αστοχίας που φθάνει σε

βάθος λίγο πάνω από τον πυθμένα της ρευστοποιήσιμης στρώσης με κέντρο περιστροφής περίπου πάνω από τον πόδα. Υπογραμμίζεται ότι στη βιβλιογραφία δεν γίνεται καμία αναφορά σε κατακόρυφες μετατοπίσεις  $D_v$ .

- [4] Όσο αυξάνει το ύψος του αναβαθμού  $H$ , τόσο αυξάνουν οι οριζόντιες  $D_h$  και κατακόρυφες  $D_v$  μετατοπίσεις. Το ύψος  $H$  δεν υπεισέρχεται άμεσα στις εμπειρικές σχέσεις της βιβλιογραφίας (π.χ., στη σχέση των Youd et al. 2002), αλλά αποδεικνύεται σημαντική παράμετρος. Αυτό επειδή μεγαλύτερου ύψους αναβαθμοί με το ίδιο, κατά τα άλλα, κοκκώδες έδαφος έχουν και στατικά μικρότερη ευστάθεια (λόγω της προαναφερθείσας ευρείας περιστροφικής αστοχίας), οπότε οδηγούνται σε εντονότερη συσσώρευση μετατοπίσεων.
- [5] Η ύπαρξη αργιλικής στρώσης πάχους  $h_c$  μειώνει τις μετατοπίσεις του εδάφους λόγω πλευρικής εξάπλωσης. Επιπλέον, και το βάθος  $z_c$  της αργιλικής στρώσης παίζει ρόλο στον καθορισμό των μετατοπίσεων, και αυτή είναι μια παράμετρος που δεν υπεισέρχεται στις εμπειρικές σχέσεις της βιβλιογραφίας (π.χ. στη σχέση των Youd et al. 2002). Αποδεικνύεται ότι οι μετατοπίσεις του εδάφους είναι σαφώς μικρότερες στην περιοχή του αναβαθμού όταν υπάρχει αργιλική στρώση που είτε φθάνει ή βρίσκεται κάτω από τον πόδα, δηλαδή όταν  $(h_c+z_c)/H \geq 1$ . Ταυτόχρονα όμως, οι μετατοπίσεις του εδάφους δεν απομειώνονται σημαντικά με την απόσταση  $L/H$  στην περίπτωση αυτή. Δηλαδή το (μη-ρευστοποιήσιμο) αργιλικό έδαφος σε μεγάλο βάθος λειτουργεί ως «φρένο» της πλευρικής εξάπλωσης προς τον αναβαθμό.
- [6] Με βάση τις αναλύσεις που εκτελέστηκαν προτείνονται εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης των κανονικοποιημένων μετατοπίσεων  $D_h/D_h(5H)$ ,  $D_v/D_h$ ,  $D_v/D_h(5H)$  και  $D_{h,2H}/D_h$  προς την αδιάστατη απόσταση  $L/H$ , τόσο για την περιοχή πίσω από τη στέψη, όσο και για μπροστά από τον πόδα (όπου  $L/H < 0$ ). Οι σχέσεις αυτές λειτουργούν συνεργατικά με τη σχέση των Youd et al. (2002), με βάση την οποία ποσοτικοποιείται η οριζόντια μετατόπιση  $D_h(5H)$  με βάση σεισμολογικά, γεωτεχνικά και τοπογραφικά δεδομένα. Συνεπώς οι προτεινόμενες σχέσεις είναι πρακτικής επέκταση της σχέσης των Youd et al. (2002).

### 6.3 Προτάσεις

Το φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης και γενικότερα της ρευστοποίησης του εδάφους σε στρώση όπου υπάρχει αναβαθμός είναι αρκετά ιδιαίτερο με πάρα πολλές παραμέτρους που καθορίζουν το μέγεθος των εδαφικών μετατοπίσεων. Επομένως, για περαιτέρω εξακρίβωση της επιρροής των παραμέτρων αυτών, προτείνονται για μελλοντική έρευνα τα παρακάτω:

- [1] Στην εργασία αυτή το πρανές υποβλήθηκε σε μία αρμονική (σεισμική) διέγερση με περίοδο  $T = 0.35$  sec και 10 σημαντικούς κύκλους. Συνεπώς, θα μπορούσε να χαρακτηριστεί μια σχετικώς ισχυρή δόνηση για τον Ελλαδικό χώρο, αλλά σαφώς δεν μπορεί να θεωρηθεί χαρακτηριστική συνήθων σεισμικών διεγέρσεων. Συνεπώς, πρέπει να γίνει πληρέστερη διερεύνηση για διεγέρσεις από πραγματικές

καταγραφές, με διαφορετικό συχνοτικό περιεχόμενο και ένταση, ώστε να αποσαφηνιστεί η επίδραση της διέγερσης στην πλευρική εξάπλωση προς αναβαθμό και να ποσοτικοποιηθεί περαιτέρω η ακρίβεια των προτεινόμενων σχέσεων.

- [2] Στην εργασία αυτή το πρανές αποτελούνταν από ομοιόμορφη αμμώδη στρώση πάχους με σχετική πυκνότητα  $D_r = 45\%$ , η οποία πιθανώς διακόπτεται ή επικαλύπτεται από αργιλική στρώση. Θα ήταν χρήσιμη η διερεύνηση της πλευρικής εξάπλωσης για διαφορετικά χαρακτηριστικά των δύο στρώσεων (π.χ., της σχετικής πυκνότητας και της διαπερατότητας του αμμώδους εδάφους, ή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργιλικής στρώσης).
- [3] Στην εργασία αυτή το ρευστοποιήσιμο έδαφος ήταν οριζόντιο και πλησίον του αναβαθμού. Θα ήταν ενδιαφέρουσα η διερεύνηση της πλευρικής εξάπλωσης αν το ρευστοποιήσιμο έδαφος ήταν ήπια επικλινές και ταυτόχρονα πλησίον του αναβαθμού. Οι πλείστες εμπειρικές σχέσεις υπολογίζουν τις οριζόντιες μετατοπίσεις  $D_h$  αποκλειστικά είτε σε οριζόντια στρώση με αναβαθμό είτε σε επικλινή στρώση χωρίς αναβαθμό. Ωστόσο στην πράξη συναντάται σε αρκετές περιπτώσεις ο συνδυασμός επικλινούς στρώσης πλησίον αναβαθμού και ο βαθμός αξιοπιστίας των εμπειρικών σχέσεων είναι τότε ασαφής.

## Κεφάλαιο 7 | Βιβλιογραφία

---

Youd T. L., Hansen C. M., and Bartlett S. F. (1999). “Revised MLR equations for predicting lateral spread displacement.” Proc. 7th U.S.– Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Liquefaction, Seattle, Tech. Rep. No. MCEER-99-0019, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, N.Y., 99–114.

Youd T. L., Hansen C. M., and Bartlett S. F. (2002). “Revised multilinear regression equations for prediction of lateral spread displacement.” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.

Youd T. L. (2002). Youd, Hansen, and Bartlett database for induced lateral spreads, <<http://www.et.byu.edu/cc/ccweb/faculty/youd/data.html>>.

Youd T. L., Dist. M. ASCE (2018). “Application of MLR Procedure for Prediction of Liquefaction-Induced Lateral Spread Displacement.” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.

Zhang G., Robertson P. K., M. ASCE, and Brachman R. W. I. (2004) “Estimating Liquefaction-Induced Lateral Displacements Using the Standard Penetration Test or Cone Penetration Test.” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.

Youd T. L., Idriss I. M. and Andrus R. D. (2001) “Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils.” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.

Meyerhof G. G. (1957). “Discussion on research on determining the density of sands.” Proc., 4th Int. Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, Vol. 3, 110.

Ishihara K. and Yoshimine M. (1992). “Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes.” Soils Found., 32(1), 173–188.

Tatsuoka F., Zhou S., Sato T. and Shibuya S. (1990). “Method of evaluating liquefaction potential and its application.” Rep. on Seismic hazards in the soil deposits in urban areas, Ministry of Education of Japan, 75–109 (in Japanese).

Valsamis A. I., Bouckovalas G. D. and Dimitriadi V. (2010). “Parametric Investigation of Lateral Spreading in Free-Face Ground Formations.” 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics.

Valsamis A. I., Bouckovalas G. D. and Papadimitriou A. G. (2010). “Parametric Investigation of Lateral Spreading of Gently Sloping Liquefied Ground.” Soil Dynamics and Earthquake Engineering 30 (2010) 490-508.

Papadimitriou A. G., Bouckovalas G. D. and Dafalias Y. F. (2001). “Plasticity model for sand under small and large cyclic strains.” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127, no. 11, 973-983

Andrianopoulos K. I., Papadimitriou A. G. and Bouckovalas G. D. (2009). “Explicit integration of bounding surface model for the analysis of earthquake soil liquefaction”. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*.

Karamitros D. K. (2009). “Development of a numerical algorithm for the dynamic elastoplastic analysis of geotechnical structures in two [2] and three [3] dimensions”, PHD thesis, N.T.U.A.

Andrianopoulos K. I., Papadimitriou A. G. & Bouckovalas G. D. (2010). “Bounding surface plasticity model for the seismic liquefaction analysis of geostructures”. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, Vol. 30, pp. 895–911.