



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

***Ανάλυση Σεισμικών Μετατοπίσεων λόγω
Ρευστοποίησης σε Τάφρους Περιορισμένου Πλάτους***

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αικατερίνη Σ. Σκοβολά

Επιβλέποντες: **Αχιλλέας Γ. Παπαδημητρίου**, Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ,
Γεώργιος Δ. Μπουκοβάλας, Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων: **Ιωάννης Ζ. Τσιάπας**, Μεταδιδακτορικός Ερευνητής ΕΜΠ

***Numerical Analysis of Lateral Spreading
Displacements in Channels of Limited Width***

DIPLOMA THESIS

Aikaterini S. Skovola

Supervisors: **Achilleas G. Papadimitriou**, Associate Professor NTUA,
George D. Bouckovalas, Professor NTUA

Co-supervisor: **Ioannis Z. Tsiapas**, Post-doctoral Researcher NTUA

Αθήνα, Οκτώβριος 2023 / Athens, October 2023

Ευχαριστίες

Οι ευχαριστίες είθισται να γράφονται τελευταίες. Στην περίπτωσή μου όμως θα μπορούσα να τις έχω γράψει πολύ νωρίτερα, καθώς από την πρώτη στιγμή και καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας εισέπραττα την σταθερή και αμέριστη υποστήριξη και καθοδήγηση του καθηγητή μου κ. Γιώργου Δ. Μπουκοβάλα και του μεταδιδάκτορα κ. Γιάννη Τσιάπα. Σας ευχαριστώ πολύ για την ευκαιρία που μου δώσατε καθώς και για το χρόνο, τον κόπο και την ενέργεια που δαπανήσατε για μένα, μαζί με μένα, ώστε να μάθω και να εκπαιδευτώ.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και όλους τους φίλους και συναδέλφους μου που ομόρφυναν τα φοιτητικά μου χρόνια.

Σκοβολά Κατερίνα

Summary

The scope of this Diploma Thesis is to investigate the effect of the channel width on the lateral spreading displacements D_h due to free face proximity.

Initially, an extensive literature survey was conducted for the identification of pertinent references and case studies related to the effect of the width of a channel on the development of the lateral spreading. It was found that there are not any related and comprehensive studies on this topic. Thus, an extensive parametric numerical investigation was conducted in the sequel on this subject, with the aid of the Finite Difference Code FLAC2D.

As a first step, the baseline analysis set was conducted, which confirmed that the width B of the channel actually affects the horizontal displacements D_h . Based on this effect, the general form of the analytical expression which correlates the displacements for an infinite width channel (free-face conditions) to those developed in cases of finite ratio between the width and the depth of the channel (B/H), was formulated.

In the sequel, approximately 200 parametric analyses were conducted in order to examine the effect of the following basic design parameters on the horizontal displacements D_h . In particular, the examined design parameters are: (a) the slope i of the watercourse, (b) the undrained shear strength C_u of the clay cap, (c) the relative density D_r of the liquefiable sand layer, (d) the coefficient of permeability k , (e) the number of main cycles N_{cyc} of the seismic excitation, (f) the thickness H_{crust} of the clay cap, (g) the input peak ground acceleration PGA, (h) the period of the seismic excitation T_{exc} , (i) the thickness of the liquefiable sand layer H_{liq} , and (j) the depth H of the watercourse.

It was found from the parametric study that only three of the above parameters have a systematic and significant effect on the reduction of ground displacements when reducing the width of the channel. In particular, these parameters are: the period of the seismic excitation T_{exc} , the thickness of the liquefiable sand layer H_{liq} , and the depth of the channel H . As a result, based on the results of the

conducted statistical processing, the general form of the analytical equation for the reduction of lateral spreading displacements with the reduction of the B/H ratio, was properly extended to include the effect of these parameters (i.e. T_{exc} , H_{liq} and H).

Main Conclusions

I. Effect of the channel width on the development of lateral spreading displacements D_h

- i. The critical mechanism determining the effect of the channel width is the size of the failure surface on both banks. When the failure surface of each of the two banks is developed within the available half-width of the channel, the channel width was no effect on the horizontal displacements D_h . However, in cases where there is an overlap between the two failure surfaces, the horizontal displacements are affected.
- ii. In these cases, the width of a channel significantly affects the horizontal displacements D_h due to lateral spreading. Its effect on horizontal displacements D_h , relative to the corresponding displacements for single slopes, can be expressed analytically in terms of a reduction factor $I_{D,h}$, which for the baseline analysis is equal to: $I_{D,h} = 1.30 \cdot \left(\frac{B}{H}\right) / \left(17 + \frac{B}{H}\right) \leq 1$ for the displacements at a distance of 5H behind the bank toe and $I_{D,h} = 1.285 \cdot \left(\frac{B}{H}\right) / \left(17 + \frac{B}{H}\right) \leq 1$ for the maximum displacements on the ground surface.
- iii. As for the distance of 5H, where H is the depth of the channel, which was considered critical for the maximum horizontal displacements D_h (Youd et al. 2002, 2009 & Youd 2018), it was found that is not the most reliable way in order to detect the maximum lateral spreading displacements. Based on the numerical analysis results, it was observed that the maximum displacements are indeed located behind the slope, but not necessarily at a distance of 5H from the toe of the bank. These maximum displacements appear to constitute a more stable and consistent indicator, as the corresponding displacement reduction curve derived from the baseline analysis is smoother.

II. Effect of parameters on the reduction of lateral spreading displacements D_h

- i. The excitation period T_{exc} affects significantly the development of the ratio of horizontal displacements, for values greater than $T_{exc} = 0.35$ sec up to $T_{exc} = 0.7$ sec that were examined. The larger the value of the excitation period T_{exc} is, the smaller appears to be the reduction of the horizontal displacements D_h and therefore the larger the value of the corresponding reduction factor $I_{D,h}$. The above effect is more evident for small values of the B/H ratio.

- ii. The thickness H_{liq} of the liquefiable sand layer has a significant effect on the reduction factor $I_{D,h}$. It was observed that for a thickness smaller than that of the baseline case ($H_{liq} = 16$ m), the value of the correction factor $I_{D,h}$ increases, while on the contrary for greater thicknesses, the values of the reduction factor decrease. It is thus concluded that, at least for the whole range of H_{liq} values examined herein ($H_{liq} = 8, 12, 16, 20$ m) this parameter has a significant effect on the lateral spreading displacements D_h .
- iii. The depth H of the channel, in the examined range of values, has also a significant effect the reduction factor $I_{D,h}$. In particular, for a given value of the B/H ratio, the values of the correction factor $I_{D,h}$ increase. as the depth of the channel decreases.
- iv. As mentioned above, the rest of the parameters examined herein, namely:
- the slope i of the channel banks
 - the coefficient of permeability k
 - the number of main cycles of the seismic excitation N_{cyc}
 - the peak ground acceleration PGA
 - the undrained shear strength of the clay crust C_u
 - the relative density of the liquefiable sand layer D_r
 - the thickness of the overlying clay layer H_{cr}
- have no noteworthy effect on the reduction of the horizontal displacements D_h .

III. Analytical prediction of the reduction factor $I_{D,h}$

- i. The values of the reduction factor $I_{D,h}$ can be estimated from the following analytical relations:

$$I_{D,h}^{5H} = 1.25 \cdot f(T_{exc}) \cdot g(H_{liq}^*/H) \cdot h(H) \cdot \frac{B/H}{17 + B/H} \leq 1 \quad (I)$$

$$I_{D,h}^{\max} = 1.26 \cdot f(T_{exc}) \cdot g(H_{liq}^*/H) \cdot h(H) \cdot \frac{B/H}{17 + B/H} \leq 1 \quad (II)$$

$$I_{D,h}^{5H} = 1.25 \cdot f(T_{exc}) \cdot g(H_{liq}/H) \cdot h(H) \cdot \frac{B/H}{17 + B/H} \leq 1 \quad (III)$$

$$I_{D,h}^{\max} = 1.26 \cdot f(T_{exc}) \cdot g(H_{liq}/H) \cdot h(H) \cdot \frac{B/H}{17 + B/H} \leq 1 \quad (IV)$$

where the analytical expression of $f(T_{exc})$, $g(H_{liq}/H)$, $g(H_{liq}^*/H)$ and $h(H)$ are summarized in **Table I**.

Table I: Analytical relations of functions f, g and h in Eqs. (I) to (IV)

Parameter	Displacements at distance 5H	Maximum displacements
T_{exc} (sec)	$f(T_{exc}) = 0.552 \cdot \exp(1.696T_{exc}) \geq 1.000$	$f(T_{exc}) = 0.558 \cdot \exp(1.668T_{exc}) \geq 1.011$
H^*_{liq}/H	$g(H^*_{liq}/H) = 18.727 \cdot \exp\left(-0.586 \frac{H^*_{liq}}{H}\right) \geq 0.925$	$g(H^*_{liq}) = 15.029 \cdot \exp\left(-0.542 \frac{H^*_{liq}}{H}\right) \geq 0.918$
H_{liq}/H	$g(H_{liq}/H) = 10.423 \cdot \exp\left(-0.586 \frac{H_{liq}}{H}\right) \geq 0.925$	$g(H_{liq}/H) = 8.741 \cdot \exp\left(-0.542 \frac{H_{liq}}{H}\right) \geq 0.918$
H (m)	$h(H) = 3.127 \cdot \exp(-0.285H) \geq 1.036$	$h(H) = 2.933 \cdot \exp(-0.269H) \geq 1.032$

- ii. The values estimated via the above analytical equations are in good agreement with the corresponding numerical analysis results with a deviation that generally does not exceed $\pm 15\%$. However, the use of Eqs. (II) and (IV) which take into account the maximum displacements give slightly more accurate results, compared to Eqs. (I) and (III) which rely on the displacements at a distance of 5H behind of the toe of the banks and are thus preferred.
- iii. Regarding the use of the Eqs. (I) and (II) in which the term H^*_{liq}/H is utilized instead of Eqs. (III) and (IV) where the term H_{liq}/H is considered, no systematic and clear difference emerges. As a result, further investigation is needed in order to examine the differences in terms of accuracy.
- iv. The use of the analytical expressions for the calculation of the reduction factor $I_{D,h}$ should be within the limits of the design parameters used to derive them. Specifically, for period of excitation $T_{exc} = 0.2 - 0.7$ s, channel depth $H = 1 - 4$ m, $H^*_{liq}/H = 3 - 6$ and $H_{liq}/H = 2 - 5$.
- v. In general, the predicted values of $I_{D,h}$ are on average slightly larger than the numerical ones. However, this choice was purposely made during the formulation of the analytical expressions since larger values of $I_{D,h}$ act in favor of safety, i.e. they lead to a smaller reduction of the horizontal displacements D_h calculated as $D_h = I_{D,h} \cdot D_{h,\infty}$, where $D_{h,\infty}$ stands for the horizontal displacements resulting from the analysis with channels of infinite width corresponding to truly free-face conditions.

Suggestions for future research

- i. The execution of a bigger number of analyses, within and outside the examined range of the analytical relationships formulated, to fully and more accurately compare the reliability and conservatism that they embody.

In particular, a bigger number of analyses is specifically proposed to investigate the difference in reliability between Eqs. (I) & (II) incorporating the H^*_{liq}/H ratio, versus Eqs. (III) & (IV) which

utilize the H_{liq}/H ratio, as after evaluating the data of the analyses carried out in this Diploma Thesis, no systematic difference between the two cases emerges.

- ii. The execution of additional analyses specifically for cases with thin clay crusts and strong seismic excitations, as it was found that in these cases there are not two “competitive” failure surfaces but only one which determines all movements and forces them in a single direction. Further investigation of the mechanisms governing the lateral spreading of soil on channel banks in these cases is therefore suggested.
- iii. To study the effect of the channel width on the vertical displacement on only behind the watercourse but also on the surface of channel.

Ευχαριστίες.....	i
Extended Abstract.....	iii
Περιεχόμενα.....	ix
1. Εισαγωγή	1
1.1 Περιγραφή Τεχνικού Προβλήματος.....	1
1.2 Αντικείμενο – Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας	3
1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας	4
2. Βιβλιογραφική Αναδρομή.....	5
2.1 Γενικά	5
2.2 Μεθοδολογίες εκτίμησης μετακινήσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε συνθήκες οριζόντιου εδάφους με αναβαθμό	5
2.2.1 Youd et al. (2002)	5
2.2.2 Zhang et al. (2004).....	8
2.2.3 Valsamis et al. (2012)	12
2.3 Επίδραση πλάτους καναλιού στις εκτιμώμενες μετατοπίσεις λόγω πλευρικής εξάπλωσης	13
2.3.1 Chu et al. (2006)	13
2.3.2 Youd et al. (2009)	20
2.3.3 Youd (2018)	23
2.4 Σύνοψη.....	26
3. Περιγραφή Αριθμητικής Μεθοδολογίας.....	27
3.1 Γενικά	27

3.2	Μεθοδολογία Αριθμητικών Αναλύσεων.....	27
3.2.1	Κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών FLAC.....	27
3.2.2	Καταστατικό προσομοίωμα NTUA-Sand.....	29
3.2.3	Αριθμητική προσομοίωση καναλιού	33
3.3	Βασική Σειρά Αναλύσεων.....	35
3.3.1	Επίδραση πλάτους καναλιού στις οριζόντιες μετακινήσεις	35
3.3.2	Ερμηνεία αποτελεσμάτων	40
3.3.3	Ανάπτυξη αναλυτικής συσχέτισης	47
3.4	Συμπεράσματα.....	52
4.	Παραμετρική Διερεύνηση	53
4.1	Γενικά	53
4.2	Επίδραση της Κλίσης των Πρανών.....	55
4.3	Επίδραση της Σεισμικής Διέγερσης.....	56
4.3.1	Επίδραση των κύριων κύκλων φόρτισης	56
4.3.2	Επίδραση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης.....	58
4.3.3	Επίδραση της περιόδου διέγερσης.....	58
4.4	Επίδραση Εδαφικών Χαρακτηριστικών	60
4.4.1	Επίδραση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής.....	60
4.4.2	Επίδραση της σχετικής πυκνότητας.....	61
4.4.3	Επίδραση του συντελεστή υδατοπερατότητας k	62
4.5	Επίδραση του Πάχους της Αργιλικής Κρούστας	64
4.6	Επίδραση του Πάχους της Ρευστοποιήσιμης Στρώσης	65
4.7	Επίδραση του Βάθους του Καναλιού.....	67
4.8	Πρόσθετες Παραμετρικές Αναλύσεις	69
4.8.1	Συνδυαστική επίδραση πάχους ρευστοποιήσιμης στρώσης και βάθους καναλιού	69
4.8.2	Επίδραση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου και της αργιλικής κρούστας.....	72
4.9	Συμπεράσματα.....	74
5.	Αναλυτική Μεθοδολογία Εκτίμησης του Διορθωτικού Συντελεστή $I_{D,h}$.....	77
5.1	Γενικά	77
5.2	Διατύπωση Αναλυτικής Σχέσης.....	77
6.	Αξιολόγηση Αναλυτικών Σχέσεων	91

6.1	Γενικά	91
6.2	Αξιολόγηση Αναλυτικών Σχέσεων.....	92
6.2.1	Συγκριτική αξιολόγηση σχέσεων για τον συντελεστή A.....	92
6.2.2	Συγκριτική αξιολόγηση σχέσεων για το συντελεστή $I_{D,h}$	95
6.3	Εκτίμηση «Σχετικού Σφάλματος» Αναλυτικών Σχέσεων.....	103
7.	Σύνοψη – Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	109
7.1	Σύνοψη.....	109
7.2	Κύρια Συμπεράσματα	110
7.3	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	113
	Βιβλιογραφία	115
	Παράρτημα Α: Αποτελέσματα Παραμετρικών Αναλύσεων.....	117

Κεφάλαιο 1

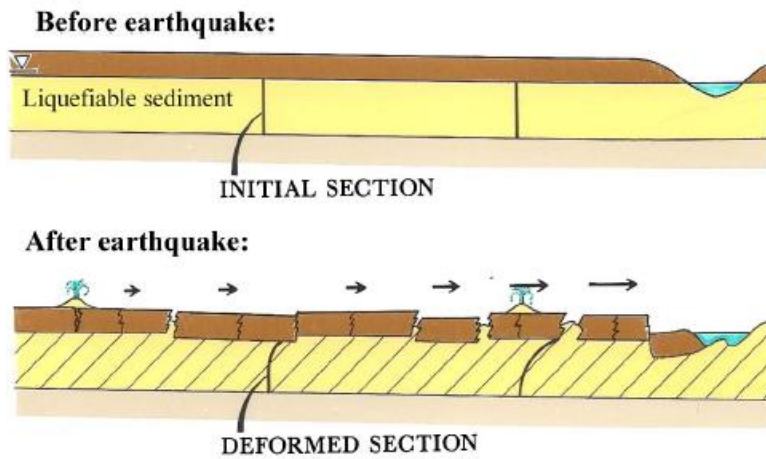
Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή Τεχνικού Προβλήματος

Είναι γνωστό ότι εδαφικοί σχηματισμοί αποτελούμενοι από κορεσμένες, χαλαρές και μη-συνεκτικές εδαφικές στρώσεις (άμμοι, αμμοχάλικα, ιλυώδεις άμμοι, αμμώδεις ιλύες) είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς στην ανάπτυξη υδατικών υπερπιέσεων υπό σεισμική διέγερση.

Η σταδιακή αύξηση των εν λόγω υπερπιέσεων, έως και την εξίσωσή τους τελικά με τις ενεργές κατακόρυφες τάσεις, οδηγεί βαθμιαία σε απώλεια της διατμητικής αντοχής και της Φέρουσας Ικανότητας του εδάφους και στην επακόλουθη **ρευστοποίηση** του (ήτοι, απλοποιητικά τουλάχιστον, την εξομοίωση της συμπεριφοράς του με αυτή των ρευστών με μηδενική διατμητική αντοχή).

Στην περίπτωση εδαφών με ήπια κλίση (gentle slope conditions) ή εδαφών που καταλήγουν σε ελεύθερο μέτωπο (free-face conditions), η ρευστοποίηση έχει ως συνέπεια το φαινόμενο της **πλευρικής εξάπλωσης (lateral spreading)**, κατά το οποίο το έδαφος μετατοπίζεται οριζόντια και συμπαρασύρει κατασκευές που είναι δομημένες εντός ή επ' αυτού. Σύμφωνα με τον Youd (2018), η μετατόπιση του εδάφους εμφανίζεται ως απόκριση στο συνδυασμό βαρυτικών και σεισμικών αδρανειακών δυνάμεων που δρουν στα εδάφη εντός και πάνω από το ρευστοποιημένο στρώμα. Κατά την πλευρική εξάπλωση, τα επιφανειακά στρώματα συνήθως σπάνε σε μεγάλα τεμάχια, τα οποία παροδικά κινούνται μπρος-πίσω και πάνω-κάτω με τη μορφή κυμάτων εδάφους (ταλάντωση εδάφους) μεταναστεύουν προοδευτικά ως εδαφικά μπλοκ είτε προς ήπιες κλίσεις είτε προς ένα ελεύθερο μέτωπο (**Σχήμα 1.1**). Οι μετατοπίσεις αυτές δεν ξεπερνούν συνήθως το 1.00 m, αλλά μπορεί να λάβουν ακόμη μεγαλύτερες διαστάσεις για μεγάλους σεισμούς και πολύ χαλαρό έδαφος.



Σχήμα 1.1: Σχηματική απεικόνιση της πλευρικής εξάπλωσης (Youd 2018).

Το φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης επομένως μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες σε τεχνικά έργα (βάθρα γεφυρών, υπόγειους αγωγούς, κρηπιδότοιχους) καθώς αναπτύσσονται μεγάλες μετακινήσεις και παραμορφώσεις. Παραδείγματα σχετικών αστοχιών έχουν καταγραφεί σε πρόσφατους αλλά και σε παλαιότερους καταστροφικούς σεισμούς (π.χ. Loma Prieta 1989, Chi-Chi 1999, Kocaeli 1999, Nisqually 2001, Christchurch 2011, Kahramanmaraş 2023) και ορισμένα από αυτά παρουσιάζονται ακολούθως (**Σχήμα 1.2**).



Σχήμα 1.2: Παραδείγματα περιστατικών πλευρικής εξάπλωσης από τους σεισμούς (α) Nisqually (2001), (β) Tohoku (2011), (γ) Nisqually (2001) και (δ) Kahramanmaraş (2023).

Για την ποσοτική καταγραφή του φαινομένου της πλευρικής εξάπλωση, στο πλαίσιο του αντισεισμικού σχεδιασμού των κατασκευών, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες, με στόχο τον υπολογισμό των αναμενόμενων εδαφικών μετακινήσεων: α) εμπειρικές (Youd et al. 2002), β) ημι-εμπειρικές (Zhang et al. 2004) και γ) αναλυτικές (Valsamis et al. 2012). Παρόλα αυτά, μέχρι στιγμής στην περίπτωση του ελεύθερου μετώπου με αναβαθμό (free-face conditions), οι μεθοδολογίες αυτές δεν λαμβάνουν υπόψιν την περίπτωση καναλιών περιορισμένου σχετικά πλάτους όπου τα αντίκρουπρανή του καναλιού μπορεί να αλληλεπιδρούν και να εμποδίζουν έτσι την πλήρη ανάπτυξη του φαινομένου. Ως αποτέλεσμα, είτε ο λόγος του πλάτους προς το βάθος του καναλιού ισούται με τη μονάδα ($B/H = 1$), όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις αρδευτικών καναλιών, είτε ισούται με μία πολύ μεγάλη τιμή (π.χ. $B/H = 100$) όπου η γεωμετρία είναι τελείως διαφορετική, οι υπάρχουσες σχέσεις δίνουν τα ίδια αποτελέσματα.

1.2 Αντικείμενο – Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Παρά λοιπόν την ύπαρξη διαφόρων μεθοδολογιών για την εκτίμηση των μετακινήσεων που αναπτύσσονται σε συνθήκες ελεύθερου μετώπου με αναβαθμό λόγω της πλευρικής εξάπλωσης, η έρευνα σχετικά με την επίδραση που μπορεί να έχει το πλάτος ενός καναλιού σε αυτές τις μετακινήσεις είναι πρακτικά ανύπαρκτη. Το κενό αυτό της υπάρχουσας βιβλιογραφίας αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Πιο συγκεκριμένα, η βιβλιογραφία λαμβάνει υπόψιν και εξετάζει ως πανομοιότυπες όλες τις περιπτώσεις, για οποιαδήποτε γεωμετρία εδάφους, είτε αυτή αντιστοιχεί σε μικρούς λόγους πλάτους προς βάθους καναλιού (B/H) είτε σε μεγάλους. Επομένως, σε περιπτώσεις υδάτινων ρεμάτων αρδευτικών καναλιών, ποταμών, σε κάθε περίπτωση ελεύθερου μετώπου με αναβαθμό εν γένει, εφαρμόζεται η ίδια μεθοδολογία, θεωρώντας ότι η αστοχία που επέρχεται σε καθένα από τα πρανή των όχθων του καναλιού, αναπτύσσεται απρόσκοπτα, ανεξάρτητα από την απόσταση μεταξύ των αντικρινών όχθων.

Ο μηχανισμός αυτός όμως ενδέχεται να αλλάζει δραστικά όταν για μικρά πλάτη καναλιών, οι κύκλοι αστοχίας των πρανών στις όχθες αλληλεπιδρούν, δρώντας ανταγωνιστικά και περιορίζοντας ο ένας τον άλλον και κατ' επέκταση και την απρόσκοπτη, πλήρη ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h .

Συνεπώς τελικός σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας είναι, πλέον της επιβεβαίωσης των ανωτέρω, η διατύπωση αναλυτικών σχέσεων που θα ενσωματώνουν την παραπάνω επίδραση του πλάτους, αλλά και τυχόν άλλων παραμέτρων, και εν είδει διορθωτικού συντελεστή θα προσαρμόζουν τα αποτελέσματα των υπάρχουσών μεθοδολογιών σε πιο ευνοϊκά αποτελέσματα που θα δίνουν μικρότερες μετακινήσεις, λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω.

1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Συνοπτικά, τα περιεχόμενα της Διπλωματικής Εργασίας έχουν ως ακολούθως:

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται η εκτενής βιβλιογραφική έρευνα που έγινε με σκοπό την εύρεση των κυριότερων μεθοδολογιών εκτίμησης μετακινήσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης (lateral spreading) καθώς και βιβλιογραφικών αναφορών και μελετών περιστατικών που σχετίζονται με την επίδραση του πλάτους ενός καναλιού στην εκδήλωση μετακινήσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η αριθμητική μεθοδολογία που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης αρδευτικού καναλιού σε ρευστοποιήσιμο έδαφος. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βασικής σειράς αριθμητικών αναλύσεων μέσω της οποίας εξετάστηκε η επίδραση του πλάτους του καναλιού στις οριζόντιες μετακινήσεις D_h και αναπτύχθηκε η αναλυτική συσχέτιση που την αποτυπώνει.

Στο **Κεφάλαιο 4**, με την βοήθεια παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων, έγινε επαλήθευση του μηχανισμού που περιορίζει την ανάπτυξη των μετακινήσεων σε γεωμετρίες ελεύθερου μετώπου με αναβαθμό και η ποιοτική αποτίμηση της επίδρασης των διαφορετικών παραμέτρων σχεδιασμού στην εκδήλωσή του.

Στο **Κεφάλαιο 5** έγινε στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων και διατυπώθηκαν αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$.

Στο **Κεφάλαιο 6** αξιολογήθηκε η αξιοπιστία των αναλυτικών σχέσεων που διατυπώθηκαν για τον υπολογισμό του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα τελικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη παρούσα Διπλωματική Εργασία και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική Αναδρομή

2.1 Γενικά

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα, με σκοπό την εύρεση των κυριότερων μεθοδολογιών εκτίμησης μετακινήσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης (lateral spreading) σε συνθήκες οριζόντιου εδάφους με αναβαθμό (ελεύθερου μετώπου, free-face conditions). Όπως ήταν φυσικό, έμφαση δόθηκε αρχικά στον εντοπισμό βιβλιογραφικών αναφορών και μελετών περιστατικών που σχετίζονται με την επίδραση του πλάτους καναλιού στην εξέλιξη του φαινομένου της πλευρικής εξάπλωσης. Μετά από βιβλιογραφική ανασκόπηση όμως, διαπιστώθηκε ότι δεν έχει γίνει ολοκληρωμένη και στοχευμένη έρευνα προς αυτήν την κατεύθυνση. Παρόλα αυτά, εντοπίστηκαν και παρουσιάζονται ακολούθως οι βασικότερες μεθοδολογίες που αναφέρονται στην εκτίμηση μετατοπίσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης και που έχουν προκύψει τόσο από στατιστική επεξεργασία βάσης δεδομένων πραγματικών περιστατικών όπου παρατηρήθηκε πλευρική εξάπλωση (Youd et al. 2002, Zhang et al. 2004) όσο και από αριθμητικές αναλύσεις (Valsamis et al. 2012).

2.2 Μεθοδολογίες εκτίμησης μετακινήσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης σε συνθήκες οριζόντιου εδάφους με αναβαθμό

2.2.1 Youd et al. (2002)

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, οι Bartlett & Youd (1992, 1995) εισήγαγαν την εμπειρική τους σχέση-εξίσωση για την πρόβλεψη της πλευρικής μετατόπισης του εδάφους σε ρευστοποιήσιμες θέσεις. Η εξίσωση διατυπώθηκε μέσω πολυ-παραμετρικής γραμμικής παλινδρόμησης (Multi-variable Linear Regression) μιας μεγάλης βάσης δεδομένων ιστορικών περιστατικών που συντάχθηκε από τους ίδιους (Youd et al. 2002).

Κατόπιν σειράς διορθώσεων οι Youd et al. (2002) κατέληξαν στις νέες διορθωμένες σχέσεις για έδαφος με αναβαθμό, που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα και παρουσιάζονται ακολούθως.

Συγκεκριμένα, προτείνεται η ακόλουθη σχέση για οριζόντιο έδαφος με αναβαθμό (συνθήκες ελεύθερου μετώπου, free-face conditions):

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

όπου: M_w το μέγεθος του σεισμού, R η οριζόντια απόσταση του υπό εξέταση σημείου από την πηγή της σεισμικής ενέργειας, σε χιλιόμετρα (km), $R^* = R + R_0$, με $R_0 = 10^{(0.89M_w - 5.64)}$, W ο λόγος του ύψους αναβαθμού (free face) H , προς την απόσταση L μεταξύ του εξεταζόμενου σημείου από τη βάση-πόδα του αναβαθμού, σε ποσοστό ($W = H/L \times 100$), T_{15} το συνολικό πάχος μη συνεκτικών εδαφικών στρώσεων με διορθωμένα $(N_1)_{60} < 15$ σε μέτρα (m), F_{15} η μέση τιμή λεπτόκοκκων για τα κοκκώδη υλικά των στρώσεων T_{15} , σε ποσοστό και $D50_{15}$ η μέση τιμή της κοκκομετρικής διαμέτρου $D50$ για τα κοκκώδη υλικά των στρώσεων T_{15} , σε χιλιοστά (mm)

Σημειώνεται ότι, στην εφαρμογή της παραπάνω σχέσης των Youd et al. (2002) ισχύουν οι περιορισμοί που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

- Η υπό εξέταση τοποθεσία πρέπει να είναι ρευστοποιήσιμη διότι αλλιώς δεν θα συμβεί πλευρική εξάπλωση. Επίσης, ρευστοποιήσιμα στρώματα με όλες τις τιμές SPT $(N_1)_{60}$ μεγαλύτερες από 15 είναι πολύ πυκνά και διαστολικά για να συμβεί πλευρική εξάπλωση (Youd et al. 2002).
- Το μέγεθος του σεισμού πρέπει να είναι μεταξύ 6 και 8 καθώς τα δεδομένα στη βάση δεδομένων προέρχονται σε μεγάλο βαθμό από σεισμούς με μεγέθη μεταξύ $M_w = 6$ και 8. Η εφαρμογή σε μεγέθη έξω από αυτό το εύρος αυξάνει την αβεβαιότητα των προβλεπόμενων μετατοπίσεων. Επειδή οι μετατοπίσεις πλευρικής εξάπλωσης είναι γενικά μικρές για σεισμούς με μεγέθη μικρότερα από $M_w = 6$, οι εξισώσεις μπορούν να εφαρμοστούν για ασθενείς σεισμούς, υπό τον όρο βέβαια ότι παρέχεται η δυνατότητα για μεγαλύτερη, συντηρητικού χαρακτήρα αβεβαιότητα. Λόγω της σποραδικότητας των δεδομένων για σεισμούς με μεγέθη μεγαλύτερα από $M_w = 8$, οι προβλεπόμενες μετατοπίσεις για αυτούς τους μεγάλους σεισμούς είναι εν γένει αβέβαιες και είναι προτιμητέο να αποφεύγονται καθώς απαιτούνται περισσότερα δεδομένα ιστορικών περιστατικών για την πλήρη επαλήθευση των εξισώσεων για μεγάλους σεισμούς (Youd et al. 2002).
- Τιμές για το μέγεθος κόκκων άμμου $D50_{15}$ με μέγεθος έως 10 mm, αντιπροσωπεύονται επαρκώς στη βάση δεδομένων και παρέχουν επαρκή ακρίβεια στη χρήση της εξίσωσης MLR (Youd et al. 2002).

- Η εφαρμογή των εξισώσεων MLR για περιεχόμενο λεπτόκοκκων άνω του 60% δεν τεκμηριώνεται από τα εμπειρικά δεδομένα και οδηγεί σε αβέβαιες προβλέψεις. Μάλιστα, για κοινά μη παγετώδη και μη ευαίσθητα ιζήματα, η μέγιστη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα σε τοποθεσίες όπου εντοπίστηκε πλευρική εξάπλωση, σύμφωνα με τη βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των εξισώσεων MLR, ήταν 50%. Επομένως η τιμή αυτή αποτελεί και τη μέγιστη που μπορεί να εφαρμοστεί αξιόπιστα (Youd et al. 2018).
- Στη βάση δεδομένων των Youd et al. (2002), το λεπτότερο πιθανώς ρευστοποιήσιμο στρώμα είναι 1.0 m. Εφαρμογή για εκτίμηση πλευρικής εξάπλωσης σε στρώματα λεπτότερα από 1.0 m (με χρήση SPT) και σε πιο λεπτόκοκκα υλικά ή υλικά περισσότερο πλάσιμα από τη μη-πλάσιμη αμμώδη ιλύ προσθέτει αβεβαιότητα στις προβλέψεις πλευρικής μετατόπισης. Αυτή η αβεβαιότητα αυξάνεται όσο πιο λεπτόκοκκα είναι τα εδάφη εντός των ρευστοποιήσιμων στρωμάτων. Γενικά, η εφαρμογή σε λεπτά στρώματα επίσης οδηγεί σε υπερεκτίμηση της μετατόπισης (Youd 2018).
- Κατά την εφαρμογή της εξίσωσης MLR σε τοποθεσίες με μεγάλη απόσταση από το μέτωπο του αναβαθμού, πρέπει κανείς να αποφασίσει εάν θα εφαρμόσει την εξίσωση για οριζόντιο έδαφος με αναβαθμό ή την Εξ. (2.2) για επικλινές έδαφος (sloping ground conditions, Youd et al. (2002)):

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

Οι προβλεπόμενες μετατοπίσεις χρησιμοποιώντας την Εξ. (2.1) για αναβαθμό είναι συνήθως μικρές για αποστάσεις μεγαλύτερες από 100 φορές το ύψος του αναβαθμού (δηλ. $W < 1\%$). Για τέτοιες μικρές τιμές W , οι συνθήκες επικλινούς εδάφους γενικά ελέγχουν την προβλεπόμενη μετατόπιση και επομένως θα πρέπει να χρησιμοποιείται η Εξ. (2.2). Όπου υπάρχει το ερώτημα ποια εξίσωση πρέπει να χρησιμοποιηθεί, το D_H μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας και τις δύο εξισώσεις (2.1) και (2.2) και να εφαρμοστεί η μεγαλύτερη προβλεπόμενη μετατόπιση, καθώς η άθροιση των δύο προβλεπόμενων μετατοπίσεων είναι υπερβολικά συντηρητική. Για τιμές W μεγαλύτερες από 5%, οι συνθήκες οριζόντιου εδάφους με αναβαθμό γενικά ελέγχουν τη συμπεριφορά μετατόπισης και θα πρέπει να χρησιμοποιείται η Εξ. (2.1). Επειδή η βάση δεδομένων MLR αποτελείται κυρίως από περιπτώσεις με $W = H/L$ μικρότερες από 20% (δηλαδή για $L > 5H$), απαιτείται προσοχή κατά την εφαρμογή της Εξ. (2.1) σε μικρότερες αποστάσεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να προκύψει καθίζηση ή ακόμα και αστοχία ροής και να δημιουργήσει μετατοπίσεις μεγαλύτερες από αυτές που προβλέπονται από την Εξ. (2.1). Ομοίως, για τοποθεσίες όπου η

κλίση του εδάφους, S , υπερβαίνει το 6%, η Εξ. (2.2) μπορεί να υποπροβλέψει τη μετατόπιση λόγω της πιθανής εμφάνισης αστοχίας ροής σε συστολικά εδάφη (Youd et al. 2002, Youd 2018).

- Για περιπτώσεις χονδρόκοκκων υλικών η Εξ. (2.1) ισχύει μόνο για εδάφη με εμποδιζόμενη στράγγιση. Επισημαίνεται ότι όλες οι χαλικώδεις στρώσεις που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων έχουν επαρκή περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα, ώστε η υδραυλική τους αγωγιμότητα να είναι ισοδύναμη με άμμο ή ιλυώδη άμμο. Αυτές οι χαμηλές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας παρεμποδίζουν την στράγγιση κατά τη διάρκεια της ισχυρής δόνησης του εδάφους και επιτρέπουν την πλήρη ανάπτυξη της πλευρικής μετατόπισης. Όπου η αποστράγγιση μπορεί να συμβεί γρήγορα, η Εξ. (2.1) μπορεί να υπερεκτιμήσει τη μετατόπιση (Youd et al. 2002).

2.2.2 Zhang et al. (2004)

Το μοντέλο των Zhang et al. (2004) είναι ημι-εμπειρικό και υπολογίζει την μετατόπιση (Lateral Displacement) λόγω πλευρικής εξάπλωσης χρησιμοποιώντας το δείκτη πλευρικής μετατόπισης (Lateral Displacement Index), δηλαδή το ολοκλήρωμα του προφίλ μέγιστης διατμητικής τάσης (γ_{\max}) με το βάθος.

$$LDI = \int_0^{z_{\max}} \gamma_{\max} dz \quad (2.3)$$

όπου z_{\max} το μέγιστο βάθος κάτω από όλα τα πιθανώς ρευστοποιήσιμα στρώματα με υπολογισμένο συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης $FS_L < 2.0$.

Για την εκτίμηση της μέγιστης διατμητικής τάσης γ_{\max} καθαρής άμμου για δεδομένο σεισμό, και επομένως και τον προσδιορισμό του δείκτη πλευρικής μετατόπισης (Lateral Displacement Index), απαιτούνται τόσο ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L όσο και η σχετική πυκνότητα D_r .

Για την εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L μπορούν να εφαρμοστούν αναλύσεις εκτίμησης του κινδύνου ρευστοποίησης χρησιμοποιώντας μεθόδους βασισμένες σε επιτόπου δοκιμές πρότυπης διείδυσης SPT και διείδυσης κώνου CPT (π.χ. κατά Youd et al. 2001).

Η σχετική πυκνότητα μπορεί να εκτιμηθεί από συσχετίσεις με αποτελέσματα δοκιμών SPT ή CPT. Για την εκτίμηση των σχετικών πυκνοτήτων καθαρής άμμου από μετρήσεις χτύπων SPT χρησιμοποιείται από τους Zhang et al. (2004) μια τροποποιημένη έκδοση της εμπειρικής σχέσης του Meyerhof (1957):

$$D_r = 16 \cdot \sqrt{(N_1)_{78}} = 14 \cdot \sqrt{(N_1)_{60}} \quad \text{για: } [(N_1)_{60} \leq 42] \quad (2.4)$$

όπου D_r η σχετική πυκνότητα μιας καθαρής άμμου σε ποσοστό (%), $(N_1)_{60}$ η κανονικοποιημένη τιμή χτύπων N_{SPT} διορθωμένη για την αναλογία ενέργειας τροχαλίας-κρούσης (60% της ενέργειας αναφοράς), την ενεργό τάση λόγω υπερκείμενων (τιμή αναφοράς ενεργού τάσης 100 kPa), το μήκος σχοινού, τη διάμετρο της γεώτρησης και τη μέθοδο δειγματοληψίας, όπως αναλύεται στους Youd et al. (2001).

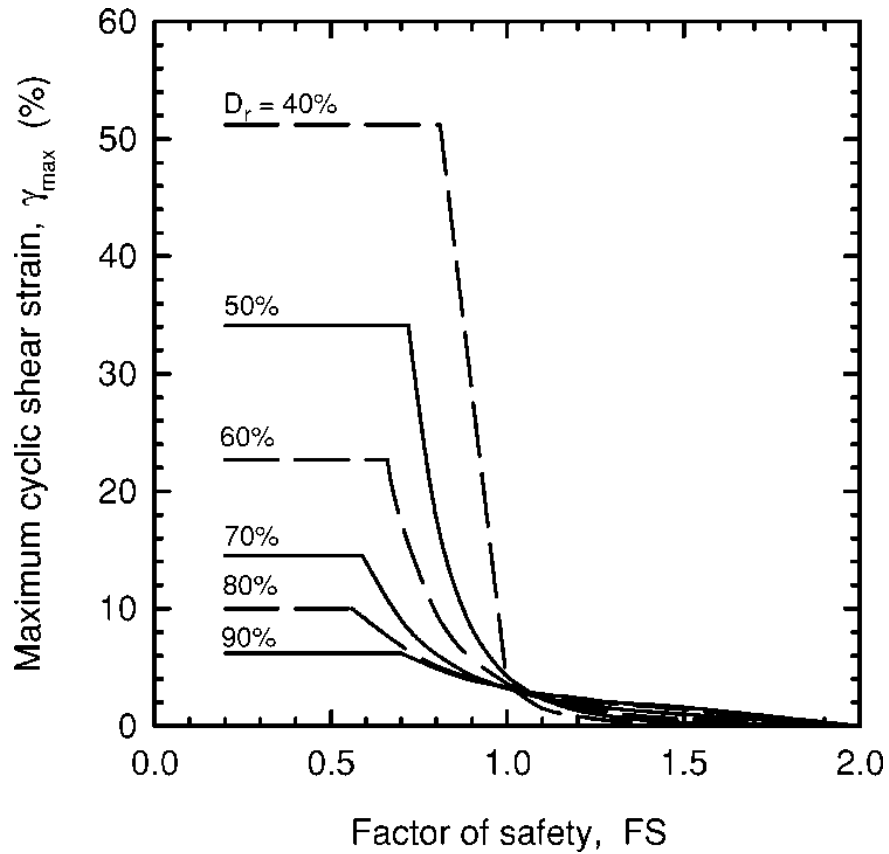
Για την εκτίμηση της σχετικής πυκνότητας της άμμου από μετρήσεις δοκιμών CPT χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση των Tatsuoka et al. (1990):

$$D_r = -85 + 76 \cdot \log(q_{c1N}) \quad \text{για: } [q_{c1N} \leq 200] \quad (2.5)$$

όπου D_r η σχετική πυκνότητα μιας καθαρής άμμου σε ποσοστό (%) και q_{c1N} η κανονικοποιημένη τιμή αντίστασης κώνου αιχμής CPT διορθωμένη για ενεργό τάση λόγω υπερκείμενων που αντιστοιχεί σε 100 kPa (Robertson & Wride 1998).

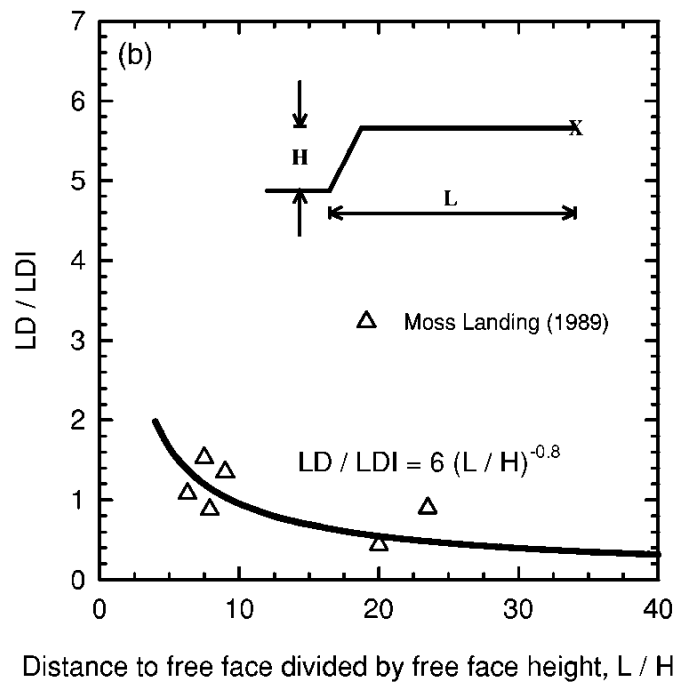
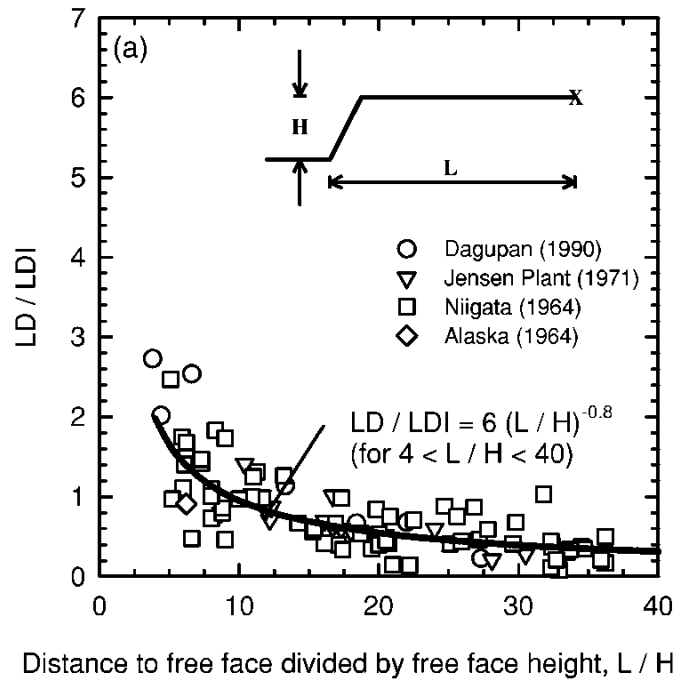
Σημειώνεται ότι για να ληφθεί υπόψιν η επίδραση των χαρακτηριστικών των κόκκων (ή της περιεκτικότητας σε λεπτόκοκκα κλάσματα) στην αξιολόγηση πιθανώς ρευστοποιήσιμων ιλυωδών άμμων, αντί των τιμών των κανονικοποιημένων χτύπων SPT $(N_1)_{60}$ ή CPT (q_{c1N}) , χρησιμοποιούνται αντίστοιχα οι ισοδύναμες ως προς αυτές των καθαρών άμμων τιμές, $(N_1)_{60cs}$ και $(q_{c1N})_{cs}$ (Youd et al. 2001). Οι τιμές $(N_1)_{60cs}$ και $(q_{c1N})_{cs}$, για μία ιλυώδη άμμο μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας για την εκτίμηση της μέγιστης διατμητικής τάσης γ_{max} ωσάν ήταν οι τιμές $(N_1)_{60}$ ή CPT (q_{c1N}) , που αφορούν καθαρές άμμους.

Η συσχέτιση μεταξύ μέγιστης σεισμικής διατμητικής παραμόρφωσης γ_{max} και συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L για διαφορετικές σχετικές πυκνότητες D_r για καθαρές άμμους δίδεται από το ακόλουθο **Σχήμα 2.1** βασισμένο σε δεδομένα των Ishihara & Yoshimine (1992) και Seed (1979).



Σχήμα 2.1: Σχέση μεταξύ της μέγιστης διατμητικής τάσης και του συντελεστή ασφάλειας έναντι ρευστοποίησης για διαφορετικές τιμές της σχετικής πυκνότητας D_r καθαρής άμμου βάσει δεδομένων από Ishihara & Yoshimine (1992) και Seed (1979), (Zhang et al. 2004).

Τελικώς η συσχέτιση μεταξύ της πραγματικής πλευρικής μετατόπισης (LD) για οριζόντιο έδαφος με αναβαθμό, του δείκτη πλευρικής μετατόπισης (LDI) και των γεωμετρικών παραμέτρων παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.2** που ακολουθεί.



Σχήμα 2.2: Λόγος της μετρούμενης πλευρικής μετατόπισης (LD) προς το δείκτη πλευρικής μετατόπισης (LDI) συναρτήσει του λόγου L/H για ιστορικά περιστατικά με επίπεδο έδαφος και αναβαθμό, για δεδομένα που βασίζονται (α) σε δοκιμές SPT και (β) σε δοκιμές CPT (Zhang et al. 2004).

Για **οριζόντιο έδαφος με αναβαθμό** η εξίσωση που συνδέει την τιμή του δείκτη πλευρικής μετατόπισης (LDI) με την μετρούμενη πλευρική μετατόπιση τόσο για μετρήσεις SPT όσο και για CPT είναι η ακόλουθη:

$$\frac{LD}{LDI} = 6 \cdot \left(\frac{L}{H}\right)^{-0.8} \rightarrow LD = 6 \cdot \left(\frac{L}{H}\right)^{-0.8} \cdot LDI \quad \text{για: } [4 < L/H < 40] \quad (2.6)$$

όπου H = το ύψος του αναβαθμού και L = η απόσταση του εξεταζόμενου σημείου από τη βάση του αναβαθμού.

Σημειώνεται ότι η ως άνω προτεινόμενη προσέγγιση συνιστάται για χρήση εντός του εύρους των ιδιοτήτων του σεισμού και των συνθηκών του εδάφους που λήφθηκαν υπόψιν για την εξαγωγή των τελικών σχέσεων. Πιο συγκεκριμένα:

- Το μέγεθος του σεισμού πρέπει να είναι μεταξύ $M_w = 6.4 - 9.2$.
- Η μέγιστη επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους πρέπει να είναι μεταξύ $PGA = 0.19g - 0.6g$.
- Το ύψος του ελεύθερου μετώπου (αναβαθμού) πρέπει να είναι μικρότερο από $H = 18$ m.
- Τέλος για τα 13 περιστατικά πλευρικής εξάπλωσης που χρησιμοποιήθηκαν από τους συγγραφείς για να επαληθεύσουν τη μεθοδολογία τους, το λεπτότερο ρευστοποιήσιμο στρώμα ήταν περίπου 0.6 m. Επίσης, τα εδάφη εντός των στρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση ήταν άμμοι, ιλυώδεις άμμοι και μη πλαστικές ιλυώδεις άμμοι. Έτσι, η διαδικασία των Zhang et al. (2004) έχει επαληθευτεί μόνο για μη πλαστικά κοκκώδη εδάφη με πάχος στρώσης μεγαλύτερο από 0.6 m. Εφαρμογή προβλέψεων πλευρικής εξάπλωσης σε στρώματα λεπτότερα από 0.6 m (με χρήση CPT) και σε πιο λεπτόκοκκα υλικά ή υλικά περισσότερο πλαστικά από τη μη πλαστική αμμώδη ιλύ προσθέτει αβεβαιότητα στις προβλέψεις πλευρικής μετατόπισης (Youd 2018).

2.2.3 Valsamis et al. (2012)

Η αναλυτική σχέση των Valsamis et al. (2012) προέκυψε από παραμετρική διερεύνηση του φαινομένου της πλευρικής εξάπλωσης σε συνθήκες οριζόντιου εδάφους με αναβαθμό (συνθήκες ελεύθερου μετώπου). Οι Valsamis et al. (2012) πραγματοποίησαν αριθμητικές αναλύσεις ως εναλλακτική προσέγγιση στις υπάρχουσες εμπειρικές μεθοδολογίες που βασίζονται σε στατιστική ανάλυση μετρήσεων πεδίου. Πιο συγκεκριμένα, με σκοπό την υπέρβαση ορισμένων αντικειμενικών περιορισμών που σχετίζονται με την ερμηνεία των δεδομένων πεδίου, χρησιμοποίησαν αριθμητικές αναλύσεις για να διερευνήσουν τις κύριες παραμέτρους που επηρεάζουν την αναμενόμενη μέγιστη μετατόπιση της επιφάνειας του εδάφους και να ποσοτικοποιήσουν την επίδρασή τους με τη μορφή μιας απλής αναλυτικής σχέσης. Για να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία της αριθμητικής μεθοδολογίας, αυτή επιβεβαιώθηκε πλήρως από δεκαενέα (19) πειράματα φυγοκεντριστή. Επιπλέον, η ακρίβεια της νέας σχέσης αξιολογήθηκε μέσω συστηματικής σύγκρισης με τις αριθμητικές προβλέψεις μετατόπισης της επιφάνειας του εδάφους, καθώς και με ικανά τεκμηριωμένες μετρήσεις πεδίου από τη βάση δεδομένων των Youd et al. (2002).

Τελικώς η σχέση που προέκυψε για οριζόντιο έδαφος με αναβαθμό (συνθήκες ελεύθερου μετώπου) είναι η ακόλουθη:

$$D_H = 0.035 \cdot \frac{W^{0.33} \cdot H_{face}^{0.60} \cdot (H_{liq})^{0.64} \cdot (a_{mean})^{0.44} \cdot [T_d]^{1.15} (1-FC)^{9.06}}{[(N_{1,60})_{CS}]^{0.54}} \quad (2.7)$$

Όπου: $a_{mean} = \left(\int_0^{t_d} |a(t)| dt \right) / t_d$ η μέση επιτάχυνση του σεισμού, σε m/s^2 , $T_d = T(N_{cyc} - N_L)$ η διάρκεια της σεισμικής δόνησης σε sec, T η δεσπόζουσα περίοδος της σεισμικής δόνησης σε sec, N_{cyc} ο αριθμός σημαντικών κύκλων διέγερσης, N_L ο αριθμός κύκλων δόνησης μετά τη ρευστοποίηση, $(N_{1,60})_{CS}$ ο διορθωμένος αριθμός κρούσεων SPT, H_{liq} το συνολικό πάχος των στρώσεων που ρευστοποιούνται, σε m, FC το ποσοστό των λεπτόκοκκων, H_{face} το ύψος του αναβαθμού και W ο λόγος του H_{face} προς την απόσταση L του σημείου ελέγχου από τη βάση-πόδα του αναβαθμού.

2.3 Επίδραση πλάτους καναλιού στις εκτιμώμενες μετατοπίσεις λόγω πλευρικής εξάπλωσης

Οι συνθήκες επίπεδου εδάφους με αναβαθμό ή αλλιώς συνθήκες ελεύθερου μετώπου (free-face conditions) που αναφέρονται παραπάνω συναντώνται και περιγράφουν από πλευράς γεωμετρικών παραμέτρων περιπτώσεις μονού αναβαθμού, όπως σε θαλάσσιες ακτές, όχθες λιμνών καθώς και απομακρυσμένες όχθες ποταμών. Παρά το γεγονός αυτό, και λόγω έλλειψης πιο λεπτομερών αναλυτικών ή εμπειρικών σχέσεων, οι εν λόγω σχέσεις εφαρμόζονται στην πράξη και σε συνήθεις περιπτώσεις διπλού αναβαθμού (π.χ. περιπτώσεις ρεμάτων, ρυακιών και αρδευτικών καναλιών) όπου η απόσταση μεταξύ δύο «αντιμέτωπων» πρανών είναι πεπερασμένη. Στην διεθνή βιβλιογραφία δεν γίνεται εκτενής και ξεκάθαρη αναφορά στην επίδραση που μπορεί να έχει το σχετικά περιορισμένο πλάτος ενός καναλιού στην εκτίμηση των εδαφικών μετατοπίσεων λόγω ρευστοποίησης. Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται οι λίγες ομολογουμένως δημοσιεύσεις οι οποίες εντοπίστηκαν και παρέχουν έστω και έμμεσα κάποιες αξιόλογες πληροφορίες για το πρόβλημα που εξετάζεται.

2.3.1 Chu et al. (2006)

Με το παρόν άρθρο τους οι Chu et al. (2006) τεκμηριώνουν και αναλύουν περιστατικά πλευρικής παραμόρφωσης προκληθέντων από ρευστοποίηση σε πέντε θέσεις που βρίσκονται κοντά στην περιοχή του ρήγματος του σεισμού Chi-Chi του 1999 στην Ταϊβάν, στις πόλεις Wufeng και Nantou. Κάθε μία από τις αναφερόμενες περιπτώσεις πλευρικής εξάπλωσης περιελάμβανε περιστροφική αστοχία πρόσφατων αλλουβιακών αποθέσεων προς το ελεύθερο μέτωπο καναλιών της περιοχής. Σε κάθε περίπτωση, η πλευρική εξάπλωση παρήγαγε σχετικά περιορισμένες πλευρικές μετατοπίσεις, περίπου 10–200 cm.

Για κάθε τοποθεσία, παρουσιάζουν διανύσματα μετατόπισης σε όλη την έκταση της εξάπλωσης, τα οποία βασίζονται σε χαρτογράφηση που πραγματοποιήθηκε εντός τριών εβδομάδων από τον σεισμό. Παράλληλα, εξετάζουν τα αποτελέσματα λεπτομερούς έρευνας του υπεδάφους που διεξήχθη σε κάθε μία τοποθεσία, και περιελάβανε επιτόπου δοκιμές διείσδυσης κώνου (CPT), επιτόπου δοκιμές πρότυπης διείσδυσης (SPT) και άλλες εργαστηριακές δοκιμές. Μέσω ανάστροφης ανάλυσης (back-analysis), χρησιμοποιώντας εμπειρικές (Youd et al. 2002) και ημι-εμπειρικές (Zhang et al. 2004) μεθοδολογίες, διαπιστώνουν ότι οι εν λόγω μεθοδολογίες υπερεκτιμούν τις παρατηρούμενες μετατοπίσεις εδάφους. Ως πιθανές αιτίες της παρατηρηθείσας απόκλισης των υπολογισμών από τις μετρήσεις των μετατοπίσεων αναφέρουν:

- Τη χαμηλή αλλά μετρήσιμη πλασιμότητα ορισμένων από τα λεπτόκοκκα κλάσματα των εδαφών, ειδικότερα για τοποθεσίες όπου τα επιφανειακά εδάφη έχουν αργιλώδη κλάσματα που φαίνεται να έχουν περιορίσει την πλευρική εξάπλωση. *(Σημειώνεται επιπλέον ότι τα εξαιρετικά πλάσιμα λεπτόκοκκα κλάσματα είναι γενικά μη ρευστοποιήσιμα και ως εκ τούτου δεν υφίστανται πλευρική εξάπλωση κατά Youd et al. 2002).*
- Τη μερική αποστράγγιση των ρευστοποιημένων εδαφών κατά τη δόνηση. Οι πλευρικές μετατοπίσεις του εδάφους στις προς εξέταση τοποθεσίες συχνά εμφανίζονται σε σχετικά επιφανειακά τμήματα εδάφους (βάθη < 4 - 5 m) μερικές φορές χωρίς σημαντικό υπερκείμενο στρώμα χαμηλής διαπερατότητας. Τέτοιες συνθήκες μπορεί να είναι ευνοϊκές για να συμβεί μερική αποστράγγιση των υδατικών υπερπιέσεων κατά τη διάρκεια των 25-30 sec της ισχυρής δόνησης κατά τη διάρκεια του βασικού σεισμού Chi-Chi, που με τη σειρά της θα αύξανε την αντοχή του εδάφους σε διάτμηση και θα μείωνε την πλευρική εξάπλωση.
- Την επίδραση των ακρόβαθρων γεφυρών σε περίπτωση που η πλευρική εξάπλωση εντοπίζεται στην περιοχή τους.
- Την απουσία από τις βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των μεθοδολογιών, πιθανών θέσεων με ρευστοποίηση όπου όμως δεν έχουν εκδηλωθεί σημαντικές μετατοπίσεις. Με άλλα λόγια, δεν περιλαμβάνονται τοποθεσίες με μικρή (μη μετρήσιμη) μετατόπιση, παρόλο που τέτοιες τοποθεσίες μπορεί να αποτελούνται από ρευστοποιήσιμα ιζήματα και ως εκ τούτου θα έπρεπε να αναμένεται να εκδηλωθεί πλευρική εξάπλωση. Επομένως η εξαίρεση μηδενικών μετατοπίσεων από τη βάση δεδομένων σε θέσεις με ρευστοποίηση μπορεί να ωθήσει τα μοντέλα προς την υπερεκτίμηση, ιδιαίτερα στο εύρος μικρών μετατοπίσεων, όπου οι συνθήκες που διαχωρίζουν εάν θα παρουσιαστούν μηδενικές ή μικρές μετατοπίσεις μπορεί να μην έχουν προσδιοριστεί με επαρκή ακρίβεια.
- Τη λανθασμένη ή ελλιπή καταγραφή και συγκεκριμένα την υποεκτίμηση των μετατοπίσεων κατά την μέτρηση στο πεδίο. Εάν οι αληθινές μετατοπίσεις πεδίου ήταν μεγαλύτερες από

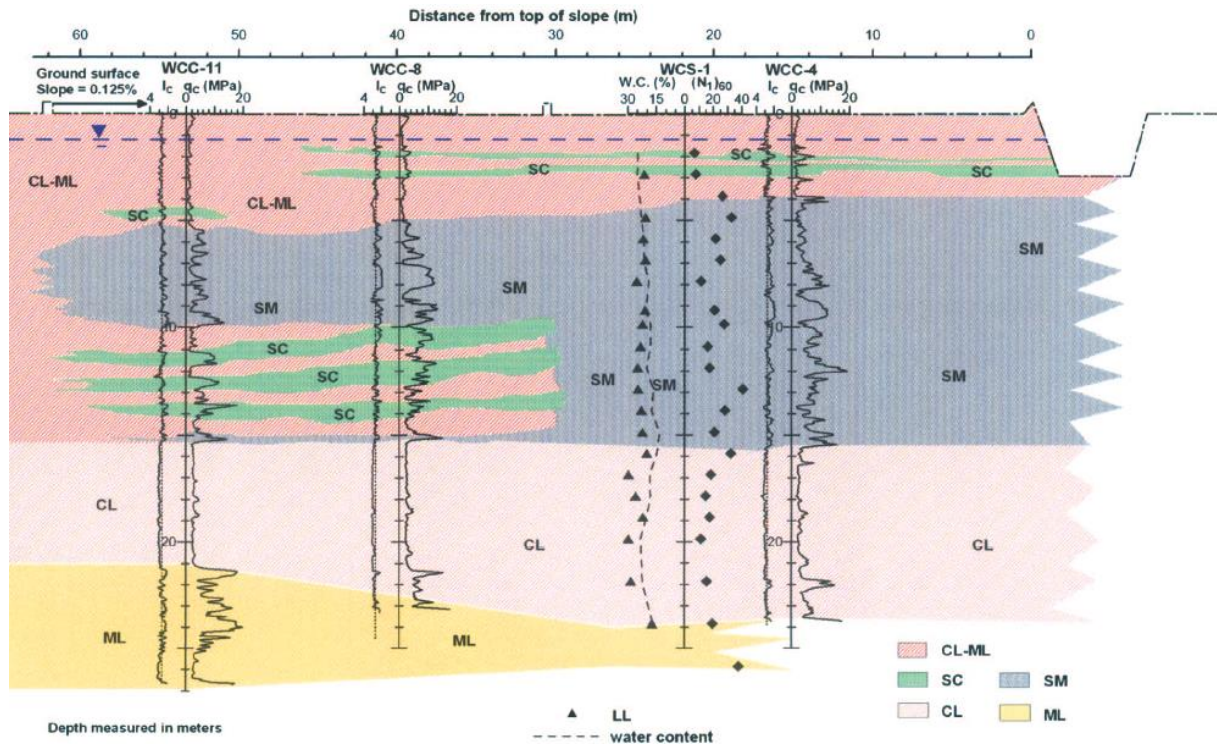
αυτές που εκτιμήθηκαν υπολογιστικά, τότε τα σφάλματα στις μετρήσεις θα εξηγούσαν μέρος της αναφερόμενης τάσης των μοντέλων για υπερεκτίμηση.

Εντούτοις, εξετάζοντας τα δεδομένα και τα στοιχεία που παρουσιάζονται και χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της συμπεριφοράς του εδάφους για κάθε θέση ξεχωριστά, μπορεί κανείς να εντοπίσει περιπτώσεις όπου το πλάτος του καναλιού θα μπορούσε πιθανώς να έχει επηρεάσει σημαντικά τις προκληθείσες μετατοπίσεις. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτές τις περιπτώσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια, το γεγονός ότι η παρατηρηθείσα υπερεκτίμηση των μετατοπίσεων από τις σχέσεις των Youd et al. 2002 και Zhang et al. 2004 μπορεί ενδεχομένως να αποδοθεί στο ότι η επίδραση του πλάτους του καναλιού δεν λαμβάνεται υπόψιν στους υπολογισμούς.

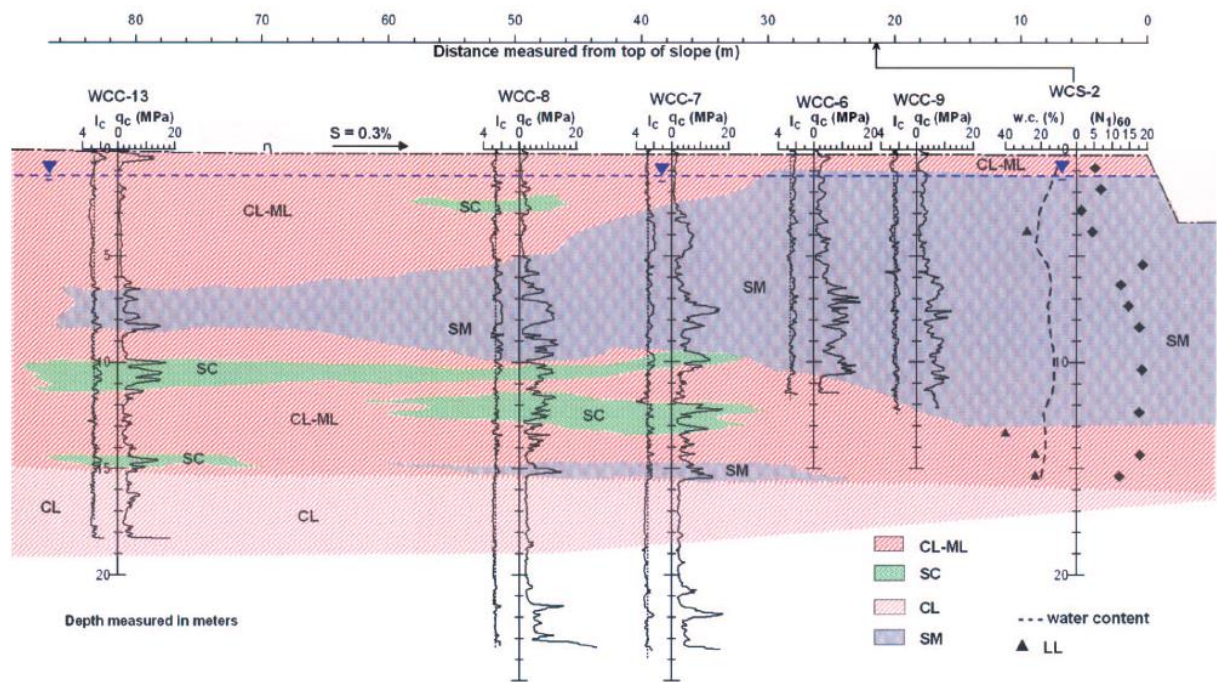
Ενδεικτικά, τα στοιχεία για την τοποθεσία Wufeng, Site C παρουσιάζονται στον χάρτη του **Σχήμα 2.3** και στις τομές A-A' (**Σχήμα 2.4**), B-B' (**Σχήμα 2.5**) και C-C' (**Σχήμα 2.6**).

Για το ρέμα Ger-Niao-Ken Creek αναφέρεται ότι είχε βάθος περίπου 3 m ενώ γενικά η γύρω περιοχή ήταν επίπεδη, εκτός από μια μικρή κλίση 0.3% που παρατηρήθηκε στα βόρεια. Ειδικότερα, όπως προκύπτει από το **Σχήμα 2.4** (τομή A-A' της θέσης "Wufeng Site C") και από το **Σχήμα 2.6** (τομή C-C' της θέσης "Wufeng Site C"), φαίνεται ότι το ρέμα Ger-Niao-Ken Creek έχει πλάτος περίπου 13 - 15 m.

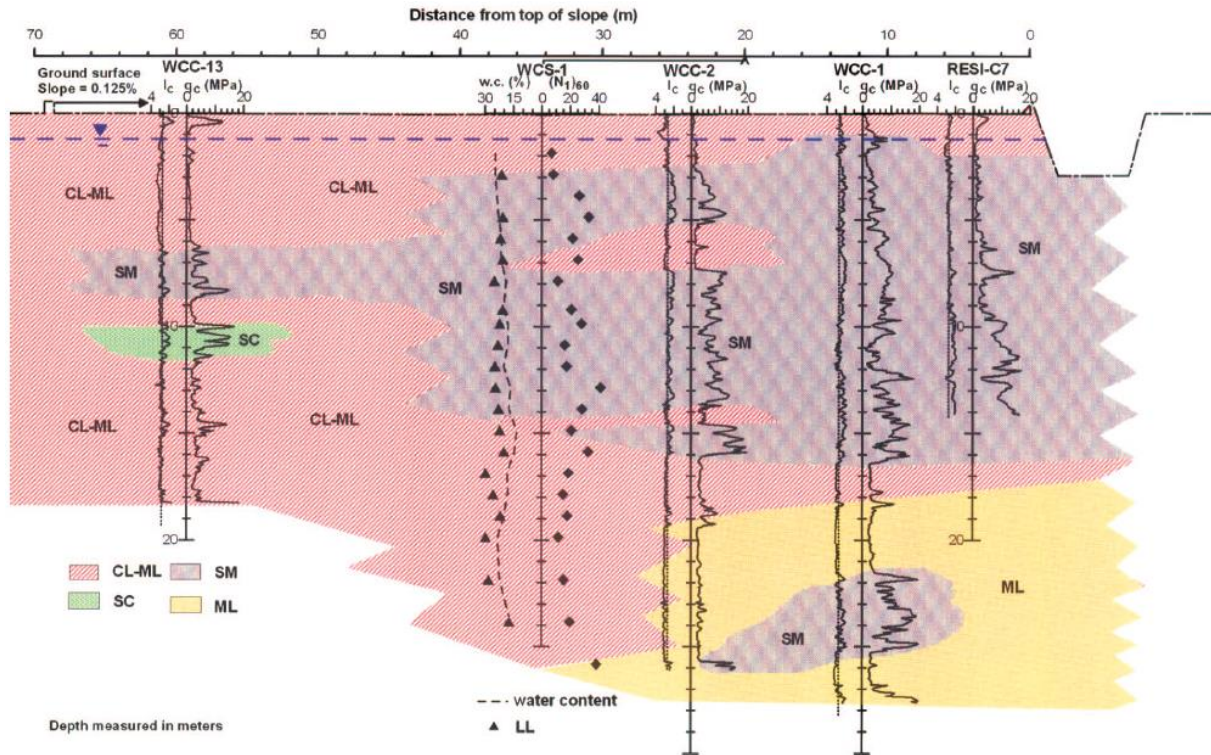
Στην περιοχή εκδηλώθηκε ρευστοποίηση και πλευρική εξάπλωση με κατεύθυνση προς το Ger-Niao-Ken Creek. Η μορφή των ρωγμών στο έδαφος υποδηλώνει δύο διαφορετικές κατευθύνσεις πλευρικής εξάπλωσης: (α) μία προς στα ανατολικά, κατά μήκος της τομής A-A', (**Σχήμα 2.4**), με πλευρικές μετακινήσεις στα 2.1 m περίπου, και (β) μία δεύτερη προς τα βόρειοανατολικά, κατά μήκος της τομής B-B' (**Σχήμα 2.5**), και πλευρικές μετακινήσεις της τάξης των 0.5 m. Τέλος, κατά μήκος της τομής C-C' (**Σχήμα 2.6**), στο νοτιότερο σημείο της περιοχής, δεν παρατηρήθηκαν μετακινήσεις.



Σχήμα 2.4: Τομή A-A' της θέσης "Wufeng Site C", (B. Chu et al. 2006).



Σχήμα 2.5: Τομή B-B' της θέσης "Wufeng Site C", (B. Chu et al. 2006).



Σχήμα 2.6: Τομή C-C' της θέσης "Wufeng Site C", (B. Chu et al. 2006).

Ο Πίνακας 2.1 συνοψίζει τις μετατοπίσεις που μετρήθηκαν στην εν λόγω περιοχή έναντι αυτών που εκτιμήθηκαν από τις σχέσεις των Youd et al. (2002) και Zhang et al. (2004). Οι αποκλίσεις μεταξύ των πραγματικών τιμών και των τιμών των μετατοπίσεων που δίνονται από τις σχέσεις των Youd et al. (2002) και Zhang et al. (2004) είναι εμφανείς για όλες τις τοποθεσίες που εξετάστηκαν. Ειδικότερα, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα όλων των θέσεων, παρατηρήθηκε ότι τα σχετικά σφάλματα που προκύπτουν μεταξύ των πραγματικών και των υπολογισθεισών μετακινήσεων (Πίνακας 2.2) είναι κατάτι μεγαλύτερα στην περίπτωση της θέσης Wufeng, Site C (τομές A-A' έως C-C'). Παρότι για τη συγκεκριμένη θέση οι Chu et al. (2006) αποδίδουν τις αποκλίσεις αυτές στην πλαστιμότητα των λεπτόκοκκων κλασμάτων, στην μερική στράγγιση (τομές B-B' και C-C') ή στην ύπαρξη ακροβάθρου γέφυρας κοντά στο σημείο ενδιαφέροντος (τομή B-B'), είναι σημαντικό να υπογραμμιστεί το μικρό σχετικά πλάτος του ρέματος Ger-Niao-Ken Creek, που οδηγεί σε λόγο πλάτους προς βάθος καναλιού $B/H = 4 - 5$.

Πίνακας 2.1: Παράμετροι και αποτελέσματα ανάλυσης για κάθε τιμή μετατόπισης (Chu et al. 2006).

Displacement vector	Displacement (cm)	Common parameters			Youd et al. (2002) model ^a						Zhang et al. (2004) model ^c			
		M	PHA	W (%)	r_{eq} (km)	T_{15} (m)	F_{15} (%)	$D50_{15}$ (mm)	LD ^b (cm)	z_{max} Zhang		$z_{max}=2H$		
										LDI (cm)	LD (cm)	LDI (cm)	LD (cm)	
Wuf. C, Sec A-V1	0	7.6	0.67	5.3	5	0	N.A.	N.A.	0	62	35	22	12	
Wuf. C, Sec A-V2	0	7.6	0.67	7.4	5	0.5	20.8	0.11	293	70	52	29	21	
Wuf. C, Sec A-V3	45	7.6	0.67	13.7	5	0.8	20.8	0.11	543	100	122	49	60	
Wuf. C, Sec A-V4	55	7.6	0.67	18.4	5	0.8	20.8	0.11	647	92	142	48	75	
Wuf. C, Sec A-V5	80	7.6	0.67	25.2	5	0.8	20.8	0.11	779	95	N.A.	45	N.A.	
Wuf. C, Sec A-V6	105	7.6	0.67	37.3	5	0.8	20.8	0.11	983	104	N.A.	48	N.A.	
Wuf. C, Sec A-V7	205	7.6	0.67	49.9	5	0.8	20.8	0.11	1167	111	N.A.	51	N.A.	
Wuf. C, Sec B-V1 ^{†d}	0	7.6	0.67	3.5	5	0	N.A.	N.A.	0	13	7	0	0	
Wuf. C, Sec B-V2 [†]	0	7.6	0.67	5.7	5	0.5	13.0	0.18	275	70	42	29	17	
Wuf. C, Sec B-V3 [†]	10	7.6	0.67	6.6	5	0.75	13.0	0.18	373	101	69	68	47	
Wuf. C, Sec B-V4 [†]	17	7.6	0.67	7.9	5	0.75	13.0	0.18	415	115	90	73	57	
Wuf. C, Sec B-V5 [†]	23	7.6	0.67	9.0	5	0.75	13.0	0.18	448	119	104	77	67	
Wuf. C, Sec B-V6 [†]	29	7.6	0.67	15	5	0.75	13.0	0.18	607	125	165	82	108	
Wuf. C, Sec B-V7 [†]	49	7.6	0.67	21.2	5	0.75	13.0	0.18	744	125	217	81	140	
Wuf. C, Sec C-V1	0	7.6	0.67	4.8	5	0	N.A.	N.A.	0	13	7	0	0	
Wuf. C, Sec C-V2	0	7.6	0.67	11.9	5	1.1	20.8	0.11	183	79	86	38	42	
Wuf. C, Sec C-V3	0	7.6	0.67	26.3	5	1.1	20.8	0.11	293	152	N.A.	71	N.A.	
Wuf. C1, Sec A-V1	40	7.6	0.67	12.2	5	0.45	30.0	0.13	227	81	91	39	44	
Wuf. C1, Sec A-V2	65	7.6	0.67	14.3	5	0.45	30.0	0.13	249	122	154	83	104	
Wuf. C1, Sec A-V3	100	7.6	0.67	24.6	5	0.45	30.0	0.13	344	175	343	139	272	
Wuf. C1, Sec A-V4	124	7.6	0.67	57.7	5	0.45	30.0	0.13	569	196	N.A.	161	N.A.	
Wuf. B, Sec A-V1	35	7.6	0.67	8.0	5	1.0	31.4	0.10	284	185	146	106	84	
Wuf. B, Sec A-V2	61	7.6	0.67	10.5	5	1.0	31.4	0.10	333	172	171	101	100	
Wuf. B, Sec A-V3	96	7.6	0.67	19	5	1.0	31.4	0.10	473	144	228	101	160	
Wuf. B, Sec A-V4	296	7.6	0.67	31.3	5	1.0	31.4	0.10	634	176	N.A.	103	N.A.	
Wuf. M, Sec A-V1 [†]	35	7.6	0.67	9.6	5	1.8	48.5	0.10	166	51	47	51	47	
Wuf. M, Sec A-V2 [†]	52	7.6	0.67	11.7	5	1.8	48.5	0.10	187	58	63	58	63	
Wuf. M, Sec A-V3 [†]	62	7.6	0.67	13.3	5	1.8	48.5	0.10	202	56	68	56	68	
Wuf. M, Sec A-V4 [†]	162	7.6	0.67	23.7	5	1.8	48.5	0.10	284	50	94	50	94	
Nantou, N, Sec A-V1	5	7.6	0.39	5.9 (S=3.8)	13	1.7	22.3	0.12	217 (377)	60	37	60	37	
Nantou, N, Sec A-V2	25	7.6	0.39	16.2 (S=3.8)	13	1.7	22.3	0.12	395 (377)	39	54	39	54	

^aN.A.=data field not defined, because $T_{15}=0$ or $W>20\%$ (model not applicable).

^bLD values are based on free face model except for values in parentheses, which are based on ground slope model.

^cN.A.= $W>25\%$ (model not applicable).

^d†=displacement vectors within 25 m of abutment (exception: no † indicated if direction of displacement is away from abutment).

Οι ίδιες συνθήκες επικρατούν και στις υπόλοιπες θέσεις, πλην της Nantou – Site N, όπου οι συνθήκες διαφοροποιούνται καθώς στους μηχανισμούς ανάπτυξης της πλευρικής εξάπλωσης υπεισέρχεται και η σημαντική κλίση του εδάφους (επίδραση στις στατικές διατμητικές τάσεις) και παράλληλα το πλάτος του ποταμιού αυξάνεται σημαντικά. Η παραπάνω ομοιότητα αποτυπώνεται και στις αποκλίσεις που παρουσιάζονται κατά τη σύγκριση των σχετικών σφαλμάτων (Πίνακας 2.2).

Πίνακας 2.2: Αποτίμηση προβλέψεων εμπειρικών μεθοδολογιών για κάθε τιμή μετατόπισης (Chu et al. 2006).

Displacement Vector	Displacement (cm)	Zhang et al. (2004)			ΣΧΕΤΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ			ΠΛΑΤΟΣ ΡΕΜΑΤΟΣ (m)	Μ.Ο. ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ		
		Youd et al. (2002)	z_{max} Zhang	$z_{max}=2H$	Youd et al. (2002)	Zhang et al. (2004)			Youd et al. (2002)	Zhang et al. (2004)	
		LD (cm)	LD (cm)	LD (cm)	z_{max} Zhang	$z_{max}=2H$	z_{max} Zhang		$z_{max}=2H$		
Wuf. C, Sec A-V1	0	0	35	12	-	-	-	13	90.8	62.2	25.8
Wuf. C, Sec A-V2	0	293	52	21	100.0	-	-				
Wuf. C, Sec A-V3	45	543	122	60	91.7	63.1	25.0				
Wuf. C, Sec A-V4	55	647	142	75	91.5	61.3	26.7				
Wuf. C, Sec A-V5	80	779	N.A.	N.A.	89.7	-	-				
Wuf. C, Sec A-V6	105	983	N.A.	N.A.	89.3	-	-				
Wuf. C, Sec A-V7	205	1167	N.A.	N.A.	82.4	-	-				
Wuf. C, Sec B-V1	0	0	7	0	-	-	-	15	96.1	80.9	70.5
Wuf. C, Sec B-V2	0	275	42	17	100.0	-	-				
Wuf. C, Sec B-V3	10	373	69	47	97.3	85.5	78.7				
Wuf. C, Sec B-V4	17	415	90	57	95.9	81.1	70.2				
Wuf. C, Sec B-V5	23	448	104	67	94.9	77.9	65.7				
Wuf. C, Sec B-V6	29	607	165	108	95.2	82.4	73.1				
Wuf. C, Sec B-V7	49	744	217	140	93.4	77.4	65.0				
Wuf. C, Sec C-V1	0	0	7	0	-	-	-	13	100.0	-	-
Wuf. C, Sec C-V2	0	183	86	42	100.0	-	-				
Wuf. C, Sec C-V3	0	293	N.A.	N.A.	100.0	-	-				
Wuf. C1, Sec A-V1	40	227	91	44	82.4	56.0	9.1	17	76.4	61.6	36.6
Wuf. C1, Sec A-V2	65	249	154	104	73.9	57.8	37.5				
Wuf. C1, Sec A-V3	100	344	343	272	70.9	70.8	63.2				
Wuf. C1, Sec A-V4	124	569	N.A.	N.A.	78.2	-	-				
Wuf. B, Sec A-V1	35	284	146	84	87.7	76.0	58.3	13	75.6	66.1	45.8
Wuf. B, Sec A-V2	61	333	171	100	81.7	64.3	39.0				
Wuf. B, Sec A-V3	96	473	228	160	79.7	57.9	40.0				
Wuf. B, Sec A-V4	296	634	N.A.	N.A.	53.3	-	-				
Wuf. M, Sec A-V1	35	166	47	47	78.9	25.5	25.5	15	65.8	-5.1	-5.1
Wuf. M, Sec A-V2	52	187	63	63	72.2	17.5	17.5				
Wuf. M, Sec A-V3	62	202	68	68	69.3	8.8	8.8				
Wuf. M, Sec A-V4	162	284	94	94	43.0	-72.3	-72.3				
Nantoy, N, Sec A-V1	5	217 (377)	37	37	97.7 (98.7)	86.5	86.5	50	95.7 (96.0)	70.1	70.1
Nantoy, N, Sec A-V2	25	395 (377)	54	54	93.7 (93.4)	53.7	53.7				

Επομένως η διαφορά μεταξύ των υπολογισμών και των πραγματικών μετρήσεων των μετατοπίσεων, μπορεί να αποδοθεί ενδεχομένως στο ότι οι υπάρχουσες μεθοδολογίες δεν λαμβάνουν υπόψη την παράμετρο αυτή του περιορισμένου πλάτους. Ενδεχομένως εάν στη θέση Wufeng, Site C (Σχήμα 2.3) όπου εντοπίζεται η πιο συστηματική απόκλιση, αλλά και στις υπόλοιπες, είχε ληφθεί με κάποιο τρόπο υπόψη η επίδραση του πλάτους του καναλιού, η απόκλιση μεταξύ των εκτιμώμενων και μετρηθεισών μετακινήσεων να ήταν μικρότερη.

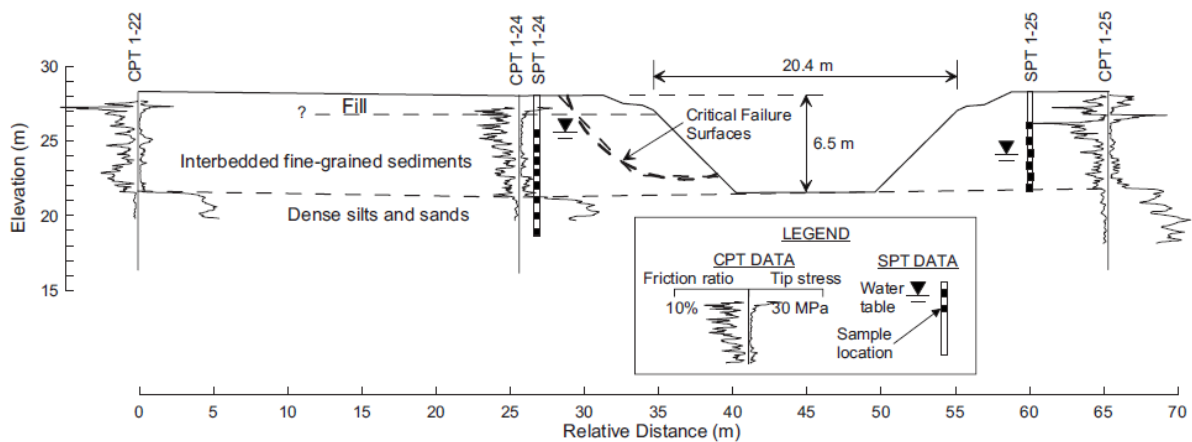
2.3.2 Youd et al. (2009)

Στο παρόν άρθρο τους οι Youd et al. (2009) αναλύουν τρεις θέσεις, οι οποίες ήταν «ύποπτες» για εμφάνιση πλευρικής εξάπλωσης, αλλά τελικώς εμφάνισαν αμελητέες μετατοπίσεις κατά τον σεισμό του 1999 στο Kocaeli της Τουρκίας ($M_w=7.5$). Οι τοποθεσίες αυτές περιλαμβάνουν το Κανάλι Çark και τη λεωφόρο Cumhuriyet, στο Adapazarı, που υπέρκειται λεπτόκοκκων ιζημάτων καθώς και την περιοχή Degirmendere Nose, που υπέρκειται μετρίως πυκνής ιλυώδους άμμου. Στις θέσεις αυτές, παρόλο που πιθανώς συνέβη ρευστοποίηση, δεν συνέβη πλευρική εξάπλωση, γεγονός που οι συγγραφείς αποδίδουν είτε στη διαστολική φύση των αμμωδών λεπτόκοκκων ιζημάτων ή στην εγγενή αντοχή των αργιλωδών ιζημάτων που εντοπίζονται στην περιοχή.

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.7** και στο **Σχήμα 2.8**, το Κανάλι Çark έχει βάθος 6.5 m με τραπεζοειδή διατομή πλάτους 20 m στην επιφάνεια και 6 m στη βάση και κλίση στις όχθες 1:1 (οριζόντια : κάθετα). Επομένως, το κανάλι παρέχει τις συνθήκες ελεύθερου μετώπου προς το οποίο θα έπρεπε να έχει αναπτυχθεί πλευρική εξάπλωση του εδάφους εφόσον η περιοχή υπέρκειται ευαίσθητων σε ρευστοποίηση ιζημάτων. Προσεκτικές όμως έρευνες μετά το σεισμό του Kocaeli (1999) δεν αποκάλυψαν στοιχεία που να υποδηλώνουν ότι υπήρξε μετατόπιση της επιφάνειας του εδάφους κοντά στο κανάλι. Συγκεκριμένα, υπήρχε έλλειψη εδαφικών ρωγμών ή ρωγμών στο οδόστρωμα κοντά στις όχθες του καναλιού, παραμορφώσεων ή ζημιών στη γέφυρα, στους εκτεθειμένους αγωγούς και σε άλλες κατασκευές που διασχίζουν το κανάλι (**Σχήμα 2.7**) καθώς και έλλειψη ανιχνεύσιμων παραμορφώσεων ή ρωγμών στην επένδυση του καναλιού.



Σχήμα 2.7: Φωτογραφία της τοποθεσίας του καναλιού Çark που δείχνει γέφυρα, αγωγό και κανάλι που δεν υπέστησαν ζημιά κατά τον σεισμό του Kocaeli το 1999 (Youd et al. 2009).



Σχήμα 2.8: Διατομή της τοποθεσίας του Καναλιού Çark που δείχνει τη στρωματογραφία, τις θέσεις CPT και SPT και τις κρίσιμες επιφάνειες αστοχίας που προσδιορίζονται από αναλύσεις ευστάθειας οριακής ισορροπίας (Youd et al. 2009).

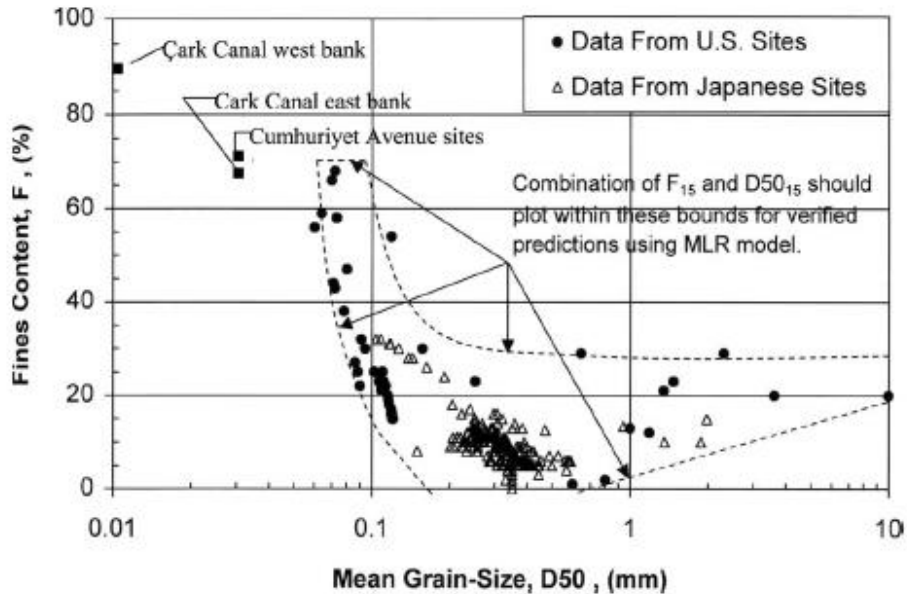
Οι Youd et al. (2009) για να αιτιολογήσουν αυτή την έλλειψη πλευρικών μετατοπίσεων, παρά το γεγονός της εκδήλωσης ρευστοποίησης, εφάρμοσαν παραμετρικά τη μεθοδολογία των Youd et al. (2002) και συγκεκριμένα την Εξ. (2.1) σε τρία διαφορετικά προφίλ εδάφους.

- Στην πρώτη ανάλυση θεώρησαν ύπαρξη ενός συνεχούς στρώματος ιλυώδους άμμου (SM), πάχους 0.3 m, που τέμνει το μέτωπο του καναλιού και εκτείνεται εκατέρωθεν των όχθων του, καθώς επίσης και ότι τα λεπτόκοκκα κλάσματα από άργιλο χαμηλής πλασιμότητας (CL) και από ιλύ χαμηλής πλασιμότητας (ML) που εντοπίζονται στην περιοχή (Interbedded Fine-Grained Sediment στο **Σχήμα 2.8**) είναι μη-ρευστοποιήσιμα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2.3** κυμαίνονται από 0.7 έως 2.6 m, με μέσες μετατοπίσεις ίσες με 1.3 m, υπερεκτιμούν δηλαδή σημαντικά τις μηδενικές μετατοπίσεις που εκδηλώθηκαν στην πραγματικότητα. Ως αιτία για την εν λόγω υπερεκτίμηση αναφέρουν είτε την λανθασμένη θεώρηση συνεχούς στρώματος ιλυώδους άμμου (SM), είτε την αδυναμία του μοντέλου MLR να εφαρμοστεί για στρώμα πάχους μόλις 0.3 m (βλ. Ενότητα 2.2.1).

Πίνακας 2.3: Παράμετροι μοντέλου και αποτελέσματα ανάλυσης για κάθε διάλυσμα μετατόπισης (Youd et al. 2009)

Parameter	West bank	East bank
Magnitude, M	7.5	7.5
Source distance, R	7 km	7 km
Free face, W	20%	20%
Layer thickness, T_{15}	0.3 m	0.3 m
Fines content, F_{15}	33%	34%
Mean grain size, $D_{50_{15}}$	0.1 mm	0.1 mm
Mean predicted displacement	1.3 m	1.3 m
Measured displacement	0 m	0 m

- Στην δεύτερη ανάλυση θεώρησαν ότι οι αποθέσεις ιλυώδους άμμου που εντοπίζονται στην περιοχή αποτελούν φακούς και όχι συνεχή στρώματα, με αποτέλεσμα το ενδιάμεσο αυτών έδαφος να παρέχει την απαραίτητη αντίσταση σε πλευρική εξάπλωση. Σε αυτή την περίπτωση, τα αποτελέσματα της ανάλυσης δίνουν μηδενικές μετατοπίσεις, σύμφωνες με τις μετρήσεις πεδίου.
- Στην τρίτη ανάλυση θεώρησαν ότι τα λεπτόκοκκα κλάσματα από άργιλο χαμηλής πλασιμότητας (CL) και από ιλύ χαμηλής πλασιμότητας (ML) που εντοπίζονται στην περιοχή είναι ρευστοποιήσιμα, με μέσο ποσοστό λεπτόκοκκων και μέση διάμετρο κόκκων έξω από το εύρος εφαρμογής της μεθοδολογίας των Youd et al. (2002), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.9**.



Σχήμα 2.9: Γράφημα της μέσης περιεκτικότητας σε λεπτόκοκκα έναντι της μέσης διαμέτρου κόκκου από τους Youd et al. 2002 με πρόσθετα δεδομένα από το κανάλι Çark (Youd et al. 2009).

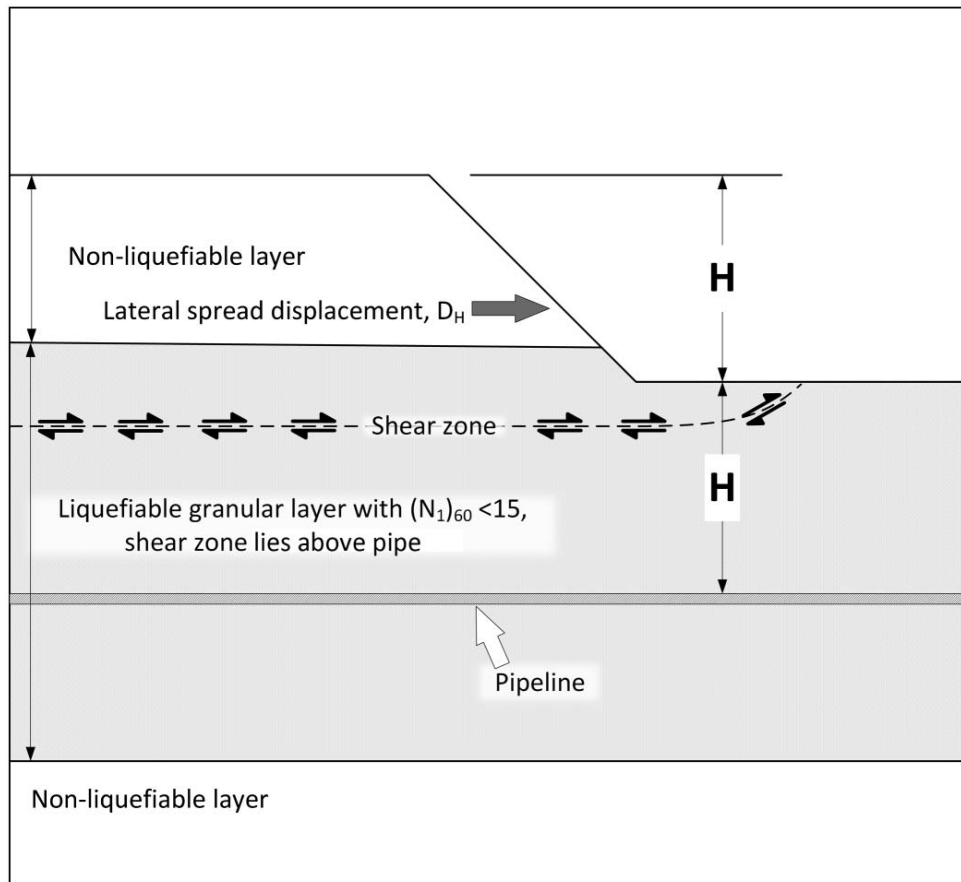
Παρά το γεγονός αυτό, εκτέλεσαν τις αναλύσεις, με αποτέλεσμα: (α) οι εκτιμώμενες μετατοπίσεις να είναι μηδενικές στα δυτικά του καναλιού λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε λεπτόκοκκα κλάσματα (94%), επιβεβαιώνοντας έτσι τις μετρηθείσες μετατοπίσεις πεδίου. Αντίθετα, στα δυτικά του καναλιού, η μεθοδολογία υπερεκτιμά τις μετατοπίσεις καθώς τα αποτελέσματα κυμαίνονται μεταξύ 0.35 και 1.4 m με μέσες μετατοπίσεις ίσες με 0.7 m. Θεωρήθηκε ότι τα αιτία για την εν λόγω υπερεκτίμηση αποτελεί η εφαρμογή της μεθοδολογίας MLR εκτός του εύρους εφαρμογής της.

Παρόλα τα παραπάνω, λόγω της γεωμετρίας της τοποθεσίας στο Κανάλι Çark, ενδέχεται η απουσία μετακινήσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης να μπορεί να αποδοθεί και στην επίδραση που έχει το πλάτος του καναλιού στο μηχανισμό ανάπτυξής τους. Παρότι αυτό το ενδεχόμενο δεν εξετάζεται από τους συγγραφείς, είναι πιθανόν ότι το μικρό πλάτος καναλιού ($B = 6$ m στον πυθμένα και $B = 20$ m στην επιφάνεια) σχετικά με το βάθος του ($H = 6$ m), να οδήγησε σε «ανταγωνιστικούς» μηχανισμούς πλευρικής εξάπλωσης του εδάφους στις αντικρινές όχθες, με αποτέλεσμα την αναίρεση τελικά των πλευρικών μετατοπίσεων που θα αναπτύσσονταν εάν οι δύο όχθες ήταν πιο απομακρυσμένες.

2.3.3 Youd (2018)

Στο παρόν άρθρο ο Youd (2018) αναφέρεται και παραθέτει λύσεις σε πρακτικά προβλήματα πλευρικής εξάπλωσης που έχει κληθεί να αντιμετωπίσει ως Μελετητής (τοποθέτηση αγωγών σε σημεία τομής με ρέματα, σχεδιασμός γεφυρών, κλπ.). Το συναφές με την παρούσα Διπλωματική Εργασία θέμα στο οποίο υπεισέρχεται είναι το πόσο βαθιά πρέπει να θαφτεί ένας αγωγός στο σημείο όπου διασταυρώνεται με κάποιο ρέμα για τον μετριασμό του κινδύνου πλευρικής εξάπλωσης. Η

απάντηση που δίνει είναι σε βάθος διπλάσιο από το ύψος του αναβαθμού της όχθης ($2H$) κάτω από το σημείο τομής-διασταύρωσης καναλιού και αγωγού ή $1H$ κάτω από το χαμηλότερο σημείο της κοίτης του καναλιού. Για ρηχά ρευστοποιήσιμα στρώματα, που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια, δηλαδή υπόκεινται λεπτής επιφανειακής μη-ρευστοποιήσιμης κρούστας, υποστηρίζει ότι θα σχηματιστεί μια επιφάνεια αστοχίας σε μικρό βάθος ώστε να μην βλάψει τον αγωγό, ενώ για ρευστοποιήσιμα στρώματα που εντοπίζονται βαθιά, κάτω από μη-ρευστοποιήσιμη κρούστα μεγάλου πάχους, θεωρεί ότι το μη ρευστοποιήσιμο έδαφος πάνω από τον αγωγό θα πρέπει να στηρίζει το κανάλι έναντι πλευρικής εξάπλωσης. Σχετικό σκαρίφημα παρατίθεται στο **Σχήμα 2.10** που ακολουθεί.



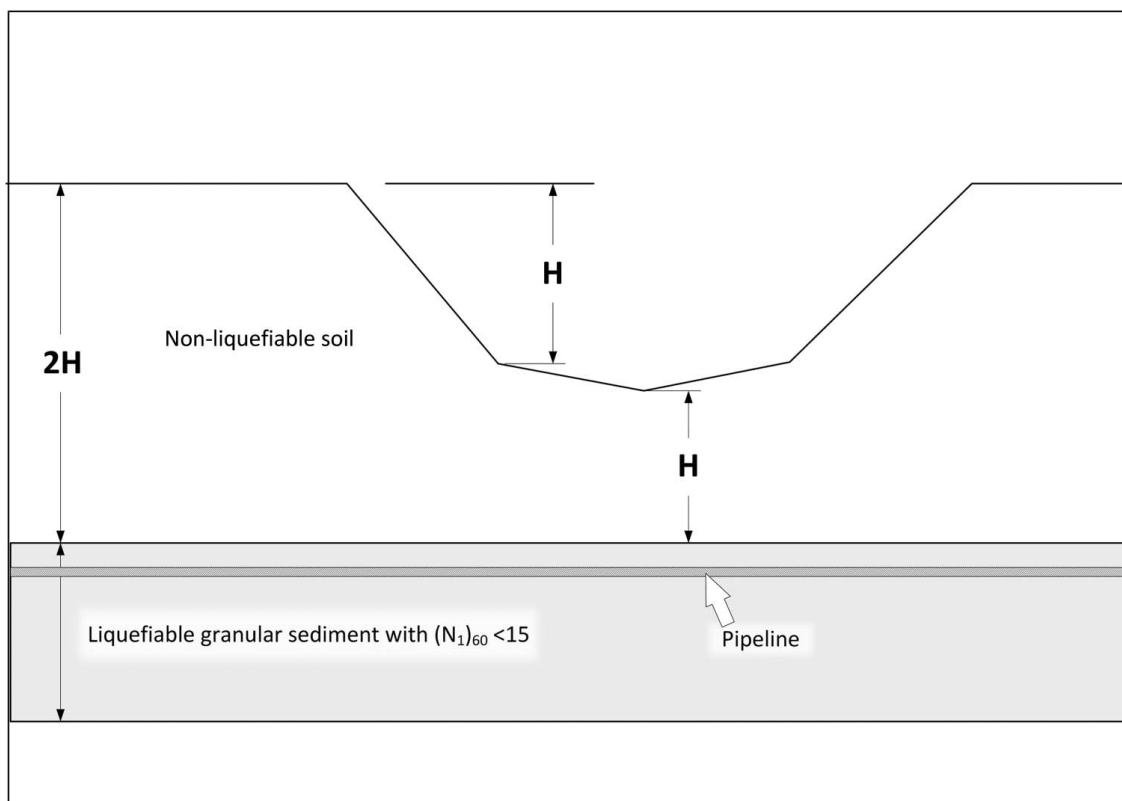
Σχήμα 2.10: Σκαρίφημα ρηχού ρευστοποιήσιμου στρώματος και θαμμένου αγωγού κάτω από το κανάλι ροής. Το βάθος ταφής που απαιτείται για την προστασία του σωλήνα έναντι ζημιών από πλευρική εξάπλωση είναι $2H$ κάτω από το πρηνές της όχθης του καναλιού ή $1H$ κάτω το χαμηλότερο σημείο του καναλιού, (Youd 2018).

Το σκεπτικό του Youd για αυτά τα κριτήρια που θέτει βασίζεται στην ακόλουθη λογική:

- i. Για ένα παχύ ρευστοποιήσιμο στρώμα που εκτείνεται περισσότερο από $1H$ κάτω από τον πυθμένα του καναλιού (**Σχήμα 2.10**), η ζώνη διάτμησης που δημιουργείται από την πλευρική εξάπλωση θα σχηματιζόταν εντός του ρευστοποιήσιμου στρώματος και κοντά στο υψόμετρο του πόδα του αναβαθμού (ελεύθερου μετώπου), δεν θα εκτεινόταν δηλαδή πολύ κάτω από

τον πυθμένα του καναλιού. Αυτή η ζώνη διάτμησης θα βρισκόταν αρκετά ψηλά επομένως ώστε να μην επηρεάσει έναν αγωγό θαμμένο σε βάθος $1H$ κάτω από το κανάλι.

- ii. Για ένα ρευστοποιήσιμο στρώμα, που βρίσκεται βαθύτερα από $2H$ κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ή $1H$ κάτω από το χαμηλότερο σημείο της κοίτης του καναλιού (εντοπίζεται επομένως μη ρευστοποιήσιμο έδαφος πάχους τουλάχιστον $1H$ πάνω από τον αγωγό) και πλάτος καναλιού (χωρίς να διευκρινίζεται εάν αυτό ορίζεται στην βάση ή στην κορυφή του καναλιού) μικρότερο από περίπου $4H$ (Σχήμα 2.11), το υπερκείμενο μη ρευστοποιήσιμο έδαφος πρέπει να έχει επαρκή δύναμη για να στηρίξει το κανάλι έναντι του φαινομένου της πλευρικής εξάπλωσης. Για την εφαρμογή όμως αυτού του κριτηρίου, η αντοχή του υπερκείμενου εδάφους θα πρέπει να επαληθεύεται μέσω επιτόπου ή εργαστηριακών δοκιμών.



Σχήμα 2.11: Σκαρίφημα βαθιάς ρευστοποιήσιμης στρώσης και θαμμένου αγωγού. Το βάθος ταφής που απαιτείται για την προστασία του αγωγού από ζημιές λόγω πλευρικής εξάπλωσης είναι $2H$ κάτω από την όχθη ή $1H$ κάτω από το χαμηλότερο σημείο του πυθμένα του καναλιού, με την προϋπόθεση ότι το μη ρευστοποιήσιμο έδαφος έχει επαρκή αντοχή για να στηρίξει το κανάλι ενάντια στην πλευρική εξάπλωση (Youd 2018).

Επομένως στην απάντηση που δίνει ο Youd στο αρχικό ερώτημα της τοποθέτησης ενός αγωγού με στόχο τον μετριασμό του κινδύνου πλευρικής εξάπλωσης λαμβάνει έμμεσα υπόψιν και το πλάτος του καναλιού, χωρίς όμως να επεξηγεί τους λόγους που το περιορίζει στην απόσταση των $4H$ (όπου H το ύψος του αναβαθμού). Παρόλα αυτά με την αναφορά που κάνει υποδεικνύει ότι περιορίζοντας το

πλάτος του καναλιού δημιουργείται κάποιος μηχανισμός που αντιδρά στην πλευρική εξάπλωση των πρηνών στις όχθες του καναλιού, με αποτέλεσμα την μείωση των σχετικών μετατοπίσεων.

2.4 Σύνοψη

Τα ευρήματα της βιβλιογραφικής αναδρομής μπορούν ενδεχόμενα να επιβεβαιώσουν την αρχική ιδέα για την επίδραση του πλάτους του καναλιού στην εκτίμηση των μετατοπίσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης, που διατυπώθηκε στην Εισαγωγή. Όλες οι περιπτώσεις που αναλύθηκαν στην Ενότητα 2.3 συγκλίνουν στο ότι το πλάτος του καναλιού θα μπορούσε να επηρεάσει τα αποτελέσματα που δίνουν τα υπάρχοντα μοντέλα καθώς σε όλες τις περιπτώσεις που δεν λαμβάνεται υπόψιν, οι υπολογιστικές εκτιμήσεις είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις πραγματικές μετατοπίσεις που εμφανίζονται. Σε επόμενα κεφάλαια, οι προαναφερθείσες ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις θα συναξιολογηθούν, με τα αποτελέσματα από την διεξοδική, παραμετρική διερεύνηση για την επίδραση που μπορεί να έχει το πλάτος ενός καναλιού στην εκτίμηση των μετατοπίσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης.

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή Αριθμητικής Μεθοδολογίας

3.1 Γενικά

Στις ακόλουθες παραγράφους περιγράφεται η μεθοδολογία με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι αριθμητικές αναλύσεις της σεισμικής απόκρισης του ρευστοποιήσιμου εδάφους στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται αναλυτικά η Μεθοδολογία των Αριθμητικών Αναλύσεων (Ενότητα 3.2) με τα βασικά στοιχεία του κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC 2D (Ενότητα 3.2.1), του καταστατικού προσομοίωματος NTUA-Sand (Ενότητα 3.2.2) και του αριθμητικού προσομοίωματος του αρδευτικού καναλιού επί ρευστοποιήσιμου εδάφους (Ενότητα 3.2.3). Ακόμη περιγράφεται η Βασική Σειρά Αναλύσεων (Ενότητα 3.3) που εκτελέστηκε με στόχο α) την κατανόηση των μηχανισμών, οι οποίοι καθορίζουν την ανάπτυξη των μετακινήσεων κατά την ρευστοποίηση και την επακόλουθη πλευρική εξάπλωση και β) την ποιοτική και ποσοτική περιγραφή της τυπικής συμπεριφοράς του καναλιού η οποία θα γενικευθεί στη συνέχεια (Κεφάλαιο 4) με τη βοήθεια παραμετρικών αναλύσεων. Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται ειδικότερα η επίδραση του πλάτους του καναλιού στις οριζόντιες μετακινήσεις (Ενότητα 3.3.1), γίνεται ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Ενότητα 3.3.2) και τέλος αναπτύσσεται η αναλυτική συσχέτιση (Ενότητα 3.3.3) μεταξύ των μετακινήσεων για ένα απείρου πλάτους κανάλι (συνθήκες ελεύθερου μετώπου με αναβαθμό) και των μετακινήσεων που αναπτύσσονται σε περιπτώσεις μικρότερων λόγων πλάτους προς βάθους (B/H), όπου πρακτικά λαμβάνεται υπόψιν το περιορισμένο πλάτος του καναλιού και η επίδραση της απέναντι όχθης.

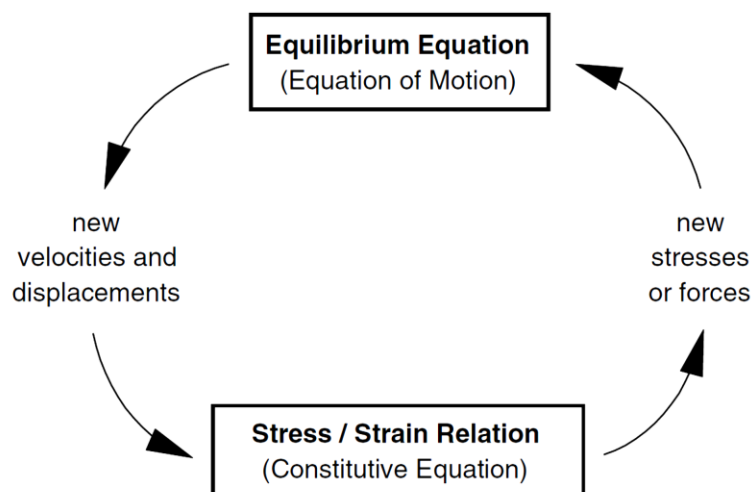
3.2 Μεθοδολογία Αριθμητικών Αναλύσεων

3.2.1 Κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών FLAC

Το λογισμικό FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) είναι ένα πρόγραμμα Πεπερασμένων Διαφορών μη-πεπλεγμένης μορφής (Explicit Finite Difference Method) με εφαρμογή σε υπολογιστικά προβλήματα γεωτεχνικής φύσης (Itasca 2019). Παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων που σχετίζονται κυρίως με συνεχή μέσα σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Το συνεχές μέσο διακριτοποιείται σε

τμήματα πεπερασμένων διαστάσεων, τα οποία στο FLAC ονομάζονται ζώνες (zones), ενώ οι εξισώσεις ισορροπίας επιλύονται στα σημεία που ορίζουν το δίκτυο των ζωνών, δηλαδή στους κόμβους (gridpoints). Κάθε ζώνη ακολουθεί κάποιο γραμμικό ή μη-γραμμικό καταστατικό νόμο συμπεριφοράς, ο οποίος είτε είναι ενσωματωμένος στο πρόγραμμα (π.χ. Mohr-Coulomb) είτε εισάγεται εξολοκλήρου από το χρήστη (π.χ. NTUA-Sand) σύμφωνα με τον οποίο υπολογίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις κάτω από τις επιβαλλόμενες δυνάμεις/μετατοπίσεις και συνοριακές συνθήκες.

Στη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών κάθε παράγωγος της διαφορικής εξίσωσης κίνησης αντικαθίσταται από μια αλγεβρική έκφραση με όρους τις μεταβλητές του προβλήματος (τάσεις, παραμορφώσεις) σε διακεκριμένα σημεία στο χώρο, χωρίς να απαιτείται ο καθορισμός ενός νόμου μεταβολής για αυτές στο εσωτερικό των στοιχείων - ζωνών. Στο **Σχήμα 3.1** φαίνεται ένας τυπικός κύκλος υπολογισμών του FLAC (timestep). Συγκεκριμένα, ξεκινώντας από μία δεδομένη παραμορφωσιακή κατάσταση (μετακινήσεις κόμβων) υπολογίζονται οι επαυξητικές παραμορφώσεις για μία δεδομένη αρχική ταχύτητα. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι τάσεις που αναπτύσσονται σε κάθε ζώνη σύμφωνα με το χρησιμοποιούμενο κάθε φορά καταστατικό προσομοίωμα και μέσω των τάσεων υπολογίζονται οι δυνάμεις στους κόμβους. Αν οι δυνάμεις αυτές τείνουν να μηδενιστούν, θεωρούμε ότι το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία υπό σταθερή ταχύτητα. Σε αντίθετη περίπτωση, οι μη ισορροπούσες δυνάμεις των κόμβων (unbalanced force) δημιουργούν κομβικές επιταχύνσεις, ξεκινάει νέος κύκλος υπολογισμών και η διαδικασία συνεχίζεται επαναληπτικά έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση.



Σχήμα 3.1: Μη πεπλεγμένη διαδικασία υπολογισμού που χρησιμοποιείται στον κώδικα FLAC.

Η ειδοποιός διαφορά της μη-πεπλεγμένης μεθόδου που χρησιμοποιείται στο εν λόγω πρόγραμμα σε σχέση με τις πεπλεγμένες μεθόδους που χρησιμοποιούνται συνήθως στα προγράμματα Πεπερασμένων Στοιχείων (Implicit Finite Element Method) είναι ότι κατά τη διάρκεια ενός

υπολογιστικού βήματος οι τιμές των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις παραμένουν σταθερές. Κάτι τέτοιο απαιτεί την υιοθέτηση επαρκώς μικρού βήματος ολοκλήρωσης (Δt_{crit}) ώστε η ταχύτητα μετάδοσης του «φυσικού μετώπου» να είναι μικρότερη από την «υπολογιστική ταχύτητα». Αντίθετα στις πεπλεγμένες μεθόδους κάθε στοιχείο αλληλεπιδρά με τα γειτονικά του κατά τη διάρκεια ενός υπολογιστικού βήματος και απαιτούνται αρκετές επαναλήψεις έως ότου επιτευχθεί ισορροπία. Μεγάλο πλεονέκτημα των μεθόδων Πεπερασμένων Διαφορών αποτελεί το γεγονός ότι οι εξισώσεις του προβλήματος μορφώνονται και επιλύονται σε κάθε υπολογιστικό βήμα χωρίς να απαιτείται η μόρφωση και στη συνέχεια η αντιστροφή ενός συνολικού μητρώου δυσκαμψίας του συστήματος, όπως συμβαίνει με τα Πεπερασμένα Στοιχεία.

3.2.2 Καταστατικό προσομοίωμα NTUA-Sand

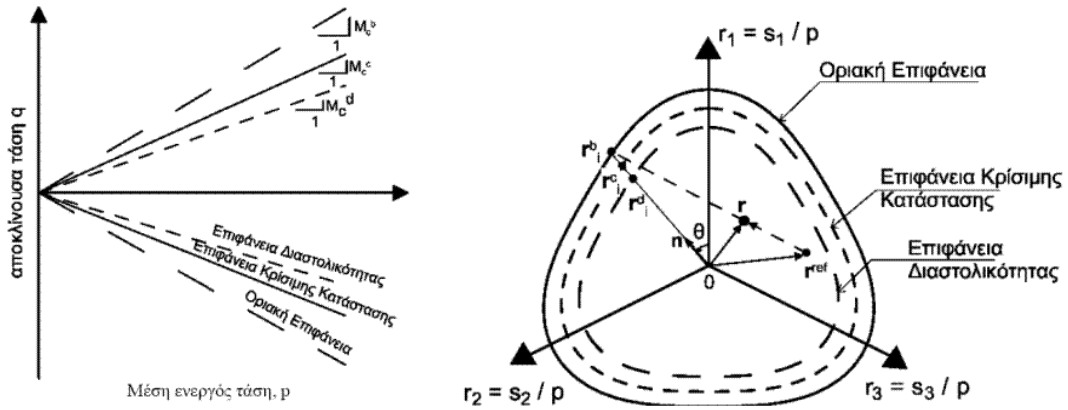
Η απόκριση της ρευστοποιήσιμης άμμου προσομοιώνεται με το εξελιγμένο καταστατικό προσομοίωμα NTUA-Sand, το οποίο αναπτύχθηκε και ενσωματώθηκε στον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Paradimitriou & Bouckonallas 2002, Andrianoopoulos et al. 2010, Karamitros 2010). Πρόκειται για ένα καταστατικό προσομοίωμα βασισμένο στη θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης και της Πλαστικότητας που αναπτύχθηκε με σκοπό να προσομοιώσει ικανοποιητικά την απόκριση μη-συνεκτικών εδαφών υπό ανακυκλική διάτμηση σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες παραμορφώσεις καθώς και σε συνθήκες ρευστοποίησης. Επισημαίνεται ότι προσομοιώνει αποτελεσματικά τόσο μονοτονικές όσο και ανακυκλικές φορτίσεις ενσωματώνοντας τα παρακάτω βασικά χαρακτηριστικά:

- Περιλαμβάνει τρεις επιφάνειες στο χώρο των τάσεων: την επιφάνεια Διαστολικότητας, Κρίσιμης Κατάστασης και την Οριακή, που αντιστοιχούν στην Γραμμή Αλλαγής Φάσης, Κρίσιμης Κατάστασης και Οριακής Αντοχής, φάσεις από τις οποίες διέρχεται το υλικό κατά τη διάρκεια της διατμητικής του φόρτισης. Στο **Σχήμα 3.2** φαίνονται οι μορφές των επιφανειών του προσομοιώματος για τριαξονική εντατική κατάσταση καθώς και οι προβολές των επιφανειών στο επίπεδο π (αποκλίνον επίπεδο) σε συνδυασμό με το νόμο προβολής του προσομοιώματος.
- Οι κλίσεις της επιφάνειας Διαστολικότητας και της Οριακής επιφάνειας, M_c^d και M_c^b αντίστοιχα, ορίζονται μέσω της παραμέτρου κατάστασης $\psi = e - e_{cs}$ (όπου e ο δείκτης πόρων και e_{cs} ο δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση για την ίδια ενεργό τάση p') μέσω της οποίας λαμβάνεται υπόψη τόσο η επίδραση της σχετικής πυκνότητας όσο και της αρχικής ενεργού τάσης με ένα μοναδικό σετ παραμέτρων. Η κλίση M_c^c εισάγεται ως παράμετρος του προσομοιώματος.

- Η θεώρηση σημειακής επιφάνειας διαρροής και η επακόλουθη απουσία ελαστικής περιοχής, τροποποίηση που εισήχθη από τους Andrianoopoulos et al. (2010). Αποτέλεσμα αυτού είναι η ελαστοπλαστική απόκριση του υλικού σε κάθε υπολογιστικό βήμα και η ομαλή μετάβαση σε μεγάλες παραμορφώσεις αποκομίζοντας οφέλη αριθμητικής ευστάθειας και εξοικονόμησης υπολογιστικού χρόνου.
- Η χρήση καταστατικού προσομοιώματος τύπου Ramberg-Osgood για την «ελαστική» απόκριση άμμων σε μικρές παραμορφώσεις, λαμβάνοντας υπόψη την μείωση του μέτρου διάτμησης και την επακόλουθη υστερητική απόσβεση.
- Η χρήση ενός εμπειρικού δείκτη που εκφράζει μακροσκοπικά την επίδραση της αλλαγής της δομής στο μέτρο πλαστικών παραμορφώσεων προβλέποντας με ακρίβεια την ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων και την εκδήλωση της ρευστοποίησης.

Ο **Πίνακας 3.1** συνοψίζει το σύνολο των εξισώσεων του καταστατικού προσομοιώματος και τις βασικές παραμέτρους που το ορίζουν. Παρατηρείται ότι το προσομοίωμα απαιτεί τη βαθμονόμηση 13 συνολικά αδιάστατων και θετικών παραμέτρων από τις οποίες οι 11 αναφέρονται σε μονοτονική φόρτιση και οι λοιπές 2 σε ανακυκλική. Όσον αφορά στη διαδικασία βαθμονόμησης, οι τιμές των παραμέτρων προκύπτουν από επί τόπου και εργαστηριακές δοκιμές για τις 10 από τις 13 παραμέτρους και από δοκιμαστικές αναλύσεις (trial-and-error) που προσομοιώνουν πειραματικά αποτελέσματα για τις υπόλοιπες 3. Ο **Πίνακας 3.2** συνοψίζει τις τιμές των παραμέτρων μαζί με μια επιγραμματική περιγραφή της φυσικής τους σημασίας.

Η βαθμονόμηση του προσομοιώματος έχει πραγματοποιηθεί από τους Andrianoopoulos et al. (2010), για άμμο τύπου Nevada. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα του ερευνητικού προγράμματος VELACS (Aguiloli et al. 1992), και συγκεκριμένα: δοκιμές συντονισμού στήλης εδάφους με $p_o' = 40 - 320$ kPa και ανακυκλικές δοκιμές ρευστοποίησης (απλής διάτμησης και τριαξονικές) με $p_o' = 40 - 160$ kPa και σχετικές πυκνότητες $D_r = 40$ και 60 %. Η ακρίβεια της εν λόγω βαθμονόμησης έχει επαληθευτεί μέσω της επιτυχούς σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων και αριθμητικών αναλύσεων τόσο σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου, όσο και σε μεγάλης κλίμακας πειράματα φυγοκεντριστή που έχουν πραγματοποιηθεί με άμμο Nevada.



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

Πίνακας 3.1: Εξισώσεις προσομοιώματος NTUA-Sand.

Περιγραφή	Εξίσωση	Σταθερές
Κλίση της Οριακής Επιφάνειας για τριαξονική θλίψη (TC)	$M_c^b = M_c^c + k_c^b \langle -\psi \rangle$ (3.1)	M_c^c, k_c^b
Κλίση της Επιφάνειας Διαστολικότητας για TC	$M_c^d = M_c^c + k_c^d \psi$ (3.2)	k_c^d
Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης	$\psi = e - e_{cs} = e - \Gamma_{cs} + \lambda \ln(p)$ (3.3)	Γ_{cs}, λ
Γενίκευση των επιφανειών στον χώρο των τάσεων	$M_{\theta}^{c,b,d} = g(\theta, c^c) M_c^{c,b,d}$ (3.4)	$c = M_e^c / M_c^c$
Σχήμα των επιφανειών του προσομοιώματος στο επίπεδο π	$g(\theta, c) = \frac{4c}{(1+c) - (1-c)\cos(3\theta)} - \left[\frac{(1+c) - (1-c)\cos(3\theta)}{2} \right]$ (3.5)	
Γωνία Lode θ	$\cos(3\theta) = (3/2)\sqrt{3} (r_{ij} r_{ij} r_{ij}) / (0.5 r_{ij} r_{ij})^{3/2}$ (3.6)	
Μοναδιαίο διάνυσμα για τη διεύθυνση φόρτισης	$n_{ij} = r_{ij}^{IP} / \sqrt{r_{kl}^{IP} r_{kl}^{IP}}$ (3.7)	
Συζυγές σημείο στις επιφάνειες του προσομοιώματος	$r_{ij}^{IP,c,b,d} = \sqrt{2/3} M_{\theta}^{c,b,d} n_{ij}$ (3.8)	
Απόσταση συζυγούς σημείου από την τρέχουσα κατάσταση	$d^{c,b,d} = (r_{ij}^{IP,c,b,d} - r_{ij}) n_{ij}$ (3.9)	
Απόσταση αναφοράς	$d_{ref}^{b,d} = \sqrt{2/3} (M_{\theta}^{b,d} + M_{\theta+\pi}^{b,d})$ (3.10)	
Αρχικό μέτρο διάτμησης	$G_{max} = B p_a \sqrt{p/p_a} / (0.3 + 0.7e)$ (3.11)	B
Εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης	$G_t = G_{max} / T$ (3.12) $T = 1 + \left(\frac{1}{a_1} - 1 \right) \left(\frac{\sqrt{0.5} (r_{ij} - r_{ij}^{ref}) (r_{ij} - r_{ij}^{ref})}{a_1 (G_{max}^{LR} / p^{LR}) \gamma_1} \right)$ (3.13)	a_1, γ_1
Εφαπτομενικό μέτρο ισότροπης συμπίεσης	$K_t = (2/3) G_t (1 + \nu) / (1 - 2\nu)$ (3.14)	ν
Επαύξηση "ελαστικών" παραμορφώσεων	$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \dot{\epsilon}_{ij}^e + (\dot{\epsilon}_{vol}^e / 3) \delta_{ij} = (\dot{s}_{ij} / 2G_t) + (\dot{p} / K_t) \delta_{ij}$ (3.15)	
Επαύξηση πλαστικών παραμορφώσεων	$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\epsilon}_{ij}^p + (\dot{\epsilon}_{vol}^p / 3) \delta_{ij} = \langle \Lambda \rangle R_{ij}$ (3.16)	
Διεύθυνση φόρτισης	$L_{ij} = n_{ij} - (V/3) \delta_{ij} = n_{ij} - (n_{kl} r_{kl} / 3) \delta_{ij}$ (3.17)	
Διεύθυνση επαυξητικής πλαστικής παραμόρφωσης	$R_{ij} = n_{ij} + (D/3) \delta_{ij}$ (3.18)	
Επαύξηση της ενεργού τάσης	$\dot{\sigma}_{ij} = 2G_t \dot{\epsilon}_{ij} + K_t \dot{\epsilon}_{vol} \delta_{ij} - \langle \Lambda \rangle (2G_t n_{ij} + K_t D \delta_{ij})$ (3.19)	

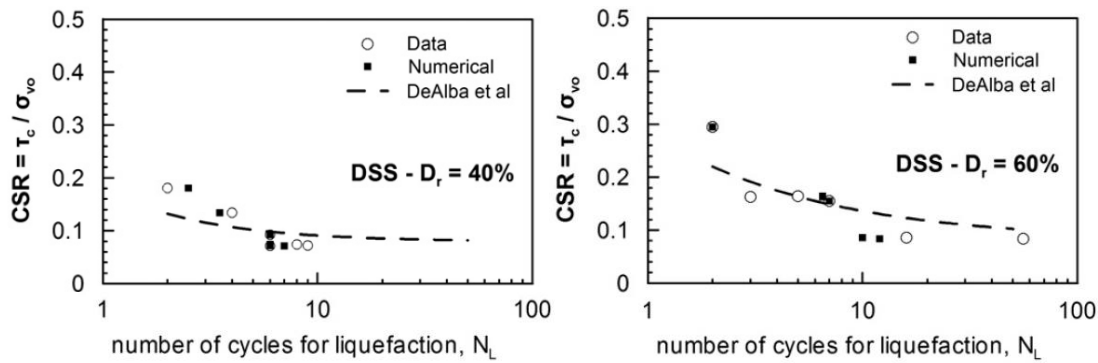
Περιγραφή	Εξίσωση	Σταθερές
Δείκτης φόρτισης	$\Lambda = \frac{2G_t n_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - VK_t \dot{\epsilon}_{vol}}{K_p + 2G_t - VK_t D} \quad (3.20)$	
Συντελεστής διαστολικότητας	$D = A_o d^d \left(2 - \sqrt{d^d / d_{ref}^d} \right) \quad (3.21)$	A_o
Πλαστικό μέτρο κράτυνσης	$K_p = \rho h_b h_t d^b \quad (3.22)$	
Εξίσωση νόμου παρεμβολής	$h_b = h_o d^b ^3 / \left\langle d_{ref}^b - d^b \right\rangle \quad (3.23)$	h_o
Επίδραση της αλλαγής της δομής	$h_f = \left(1 + \langle f_p \rangle^2 \right) / \left(1 + \langle f_{ij} n_{ij} \rangle \right) \quad (3.24)$	N_o
	$\dot{f}_p = N \dot{\epsilon}_{vol}^p \quad (3.25)$	
	$\dot{f}_{ij} = -N \langle -\dot{\epsilon}_{vol}^p \rangle \left[\left(4 \max f_p ^2 \right) n_{ij} + f_{ij} \right] \quad (3.26)$	
	$N = N_o \left(\sigma_{1,o} / p_a \right) \langle -\psi_o \rangle \quad (3.27)$	

Πίνακας 3.2: Παράμετροι προσομοιώματος NTUA-Sand: φυσική σημασία και τιμές.

#	Φυσική Σημασία	Τιμή
M_c^c	Κλίση της επιφάνειας Κρίσιμης Κατάστασης για τριαξονική θλίψη (TC)	1.25
c	Λόγος της κλίση της επιφάνειας Κρίσιμης Κατάστασης για τριαξονικό εφελκισμό (TE) προς την αντίστοιχη κλίση για τριαξονική θλίψη (TC)	0.72
Γ_{cs}	Δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση για $p=1kPa$	0.910
λ	Κλίση της γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης στο επίπεδο $[e-\ln p]$	0.022
B	Σταθερά του ελαστικού μέτρου διάτμησης	600*
ν	Λόγος Poisson	0.33
k_c^b	Επίδραση του ψ στην κλίση της Οριακής Επιφάνειας για TC	1.45
k_c^d	Επίδραση του ψ στην κλίση της Επιφάνειας Διαστολικότητας για TC	0.30
γ_1	Χαρακτηριστική διατμητική παραμόρφωση	0.025%
α_1	Ρυθμός απομείωσης του ελαστικού μέτρου διάτμησης	0.6*
A_o	Σταθερά του συντελεστή διαστολικότητας	0.8
N_o	Σταθερά της επίδρασης της αλλαγής της δομής	40000
h_o	Σταθερά του πλαστικού μέτρου κράτυνσης	15000

* για μονοτονική φόρτιση: $B = 180, \alpha_1 = 1.0$

Τέλος, στις καμπύλες ρευστοποίησης του **Σχήμα 3.3**, δηλαδή στα διαγράμματα μεταβολής της κανονικοποιημένης διατμητικής τάσης CSR με τον αριθμό κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για ρευστοποίηση N_L , συγκρίνονται πειραματικά αποτελέσματα από ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης των Aguiloli et al. (1992) για $\sigma'_{vo} = 160kPa$ και $D_r = 40$ και 60% με τις αντίστοιχες αριθμητικές προβλέψεις και από όπου επαληθεύεται η ακρίβεια του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-Sand.



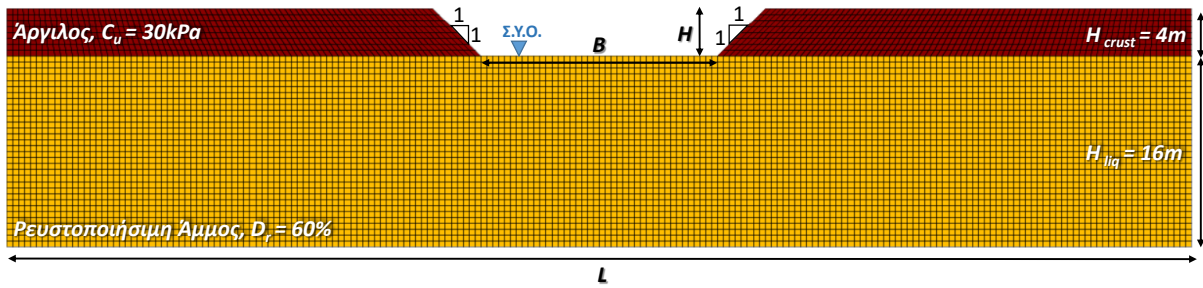
Σχήμα 3.3: Σύγκριση καμπυλών ρευστοποίησης αριθμητικής προσομοίωσης (Numerical) του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-Sand με τα ακριβή πειραματικά δεδομένα (Data) των Arulmoli et al. (1992) για $\sigma'_{vo} = 160$ kPa και $D_r = 40$ και 60% .

3.2.3 Αριθμητική προσομοίωση καναλιού

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας διεξήχθησαν δισδιάστατες (2D) δυναμικές αριθμητικές αναλύσεις επίπεδης παραμόρφωσης για την εκτίμηση των οριζόντιων και κατακόρυφων μετατοπίσεων κοντά σε υδάτινα ρέματα (π.χ. κανάλια άρδευσης) ως αποτέλεσμα ρευστοποίησης του εδάφους. Σκοπός των αναλύσεων ήταν να αξιολογηθεί η επίδραση του πλάτους B του καναλιού στις εκτιμώμενες μετατοπίσεις της ελεύθερης επιφάνειας των όχθων του.

Οι εν λόγω μη-γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC (Itasca 2019) χρησιμοποιώντας το εδαφικό προσομοίωμα που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.4**. Για την βασική σειρά αναλύσεων που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο, το εδαφικό προφίλ είχε συνολικό πάχος 20 m, με τα ανώτερα 4 m να αποτελούνται από αργιλικό μη-ρευστοποιήσιμο έδαφος με αστράγγιστη διατμητική αντοχή $C_u = 30$ kPa. Τα υποκείμενα 16 m αποτελούνταν από ρευστοποιήσιμη άμμο σχετικής πυκνότητας $D_r = 60\%$, υπό του υδροφόρου οριζοντα που εντοπίζεται σε βάθος 4 m από την επιφάνεια του εδάφους. Για την άμμο θεωρήθηκε φαινόμενη πυκνότητα $\rho = 1.578$ Mg/m³, με πορώδες $n = 0.3981$, ενώ για την άργιλο $\rho = 1.6$ Mg/m³ και πορώδες $n = 0.4$.

Το κανάλι είχε σταθερό ύψος $H = 4$ m και κλίση στις όχθες $1:1$ (Κάθετη : Οριζόντια). Το συνολικό πλάτος του αριθμητικού μοντέλου ήταν επαρκές ($L = 600$ m έως 1000 m, ανάλογα το πλάτος του καναλιού) ώστε να επιτυγχάνεται η εξάλειψη της επίπτωσης των συνόρων στις μετατοπίσεις που αναπτύχθηκαν προς το κανάλι.

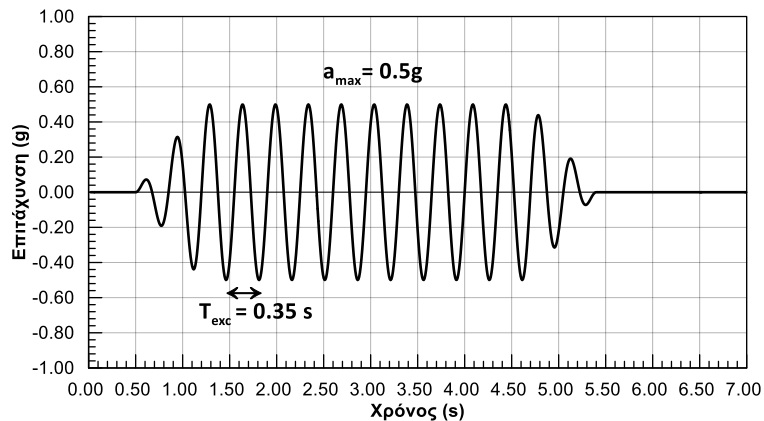


Σχήμα 3.4: Τυπικό αριθμητικό προσομοίωμα και κάρναβος Πεπερασμένων Διαφορών (παράδειγμα γραφήματος για $B = 20\text{m}$).

Όπως αναφέρθηκε, για τη ρευστοποιήσιμη άμμο χρησιμοποιήθηκε το προσομοίωμα NTUA-Sand, το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του ΕΜΠ (Andrianopoulos et al. 2010, Karamitros 2010) και έχει βαθμονομηθεί έναντι μονοτονικών και ανακυκλικών εργαστηριακών δοκιμών σε άμμο Nevada (Arulmoli et al. 1992).

Αντίστοιχα, για τη μη-ρευστοποιήσιμη αργιλική στρώση χρησιμοποιήθηκε συνδυασμένο κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb με ένα υστερητικό καταστατικό προσομοίωμα. Έτσι, στο πλαίσιο του καταστατικού προσομοιώματος Mohr-Coulomb θεωρήθηκε μέτρο συμπίεστικότητας $K = 18 \text{ GPa}$, μέτρο διάτμησης $G = 4.5 \text{ GPa}$, γωνία εσωτερικής τριβής $\phi = 0^\circ$, συνοχή $c = 30 \text{ kPa}$ και γωνία διαστολικότητας $\psi = 0^\circ$. Παράλληλα, η μη-γραμμική-υστερητική απόκριση της αργίλου προσομοιώθηκε με το καταστατικό προσομοίωμα των Ramberg & Osgood (1943), βαθμονομημένο ως προς τις πειραματικές καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης και αύξησης του λόγου υστερητικής απόσβεσης των Vucetic & Dobry (1991) για δείκτη πλασιμότητας $PI = 50\%$. Και για τις δύο στρώσεις θεωρήθηκε εξαιρετικά μικρός συντελεστής διαπερατότητας k (αστράγγιστη φόρτιση).

Η δόνηση που εφαρμόστηκε στη βάση του προσομοιώματος, υπό συνθήκες άκαμπτου υποβάθρου, ήταν αρμονική (ημιτονοειδής) με περίοδο $T_{exc} = 0.35 \text{ sec}$ και με $N = 14$ κύκλους, εκ των οποίων οι δύο πρώτοι είναι κύκλοι προσαρμογής με στόχο τη σταδιακή αύξηση του πλάτους έως την προδιαγεγραμμένη τιμή της μέγιστης επιτάχυνσης $\alpha_{max} = 0.50g$, και οι δύο τελευταίοι είναι κύκλοι προσαρμογής με στόχο το μηδενισμό του πλάτους. (Σχήμα 3.5). Επιπρόσθετα, για λόγους αριθμητικής ευστάθειας προηγείται ένα «ήσυχο» χρονικό διάστημα 0.5 sec πριν την έναρξη της διέγερσης και έπεται ένα αντίστοιχο χρονικό διάστημα 1.6 sec μετά τη δόνηση.



Σχήμα 3.5: Χρονοϊστορία επιβαλλόμενης διέγερσης στη βάση του εδαφικού προφίλ.

Για την προσομοίωση συνθηκών «ελεύθερου πεδίου», επιβλήθηκαν συνοριακές συνθήκες «συζευγμένων κόμβων» (Tied Nodes), οι οποίες εξασφαλίζουν την ίδια μετακίνηση στους ακραίους κόμβους της ίδιας στάθμης, τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφα.

Τέλος, η απόσβεση που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις ήταν τύπου «local» με αρχική τιμή απόσβεσης 2% στην περίπτωση της άμμου και υστερητική τύπου «hysteretic sig3» στην περίπτωση της αργίλου.

3.3 Βασική Σειρά Αναλύσεων

3.3.1 Επίδραση πλάτους καναλιού στις οριζόντιες μετακινήσεις

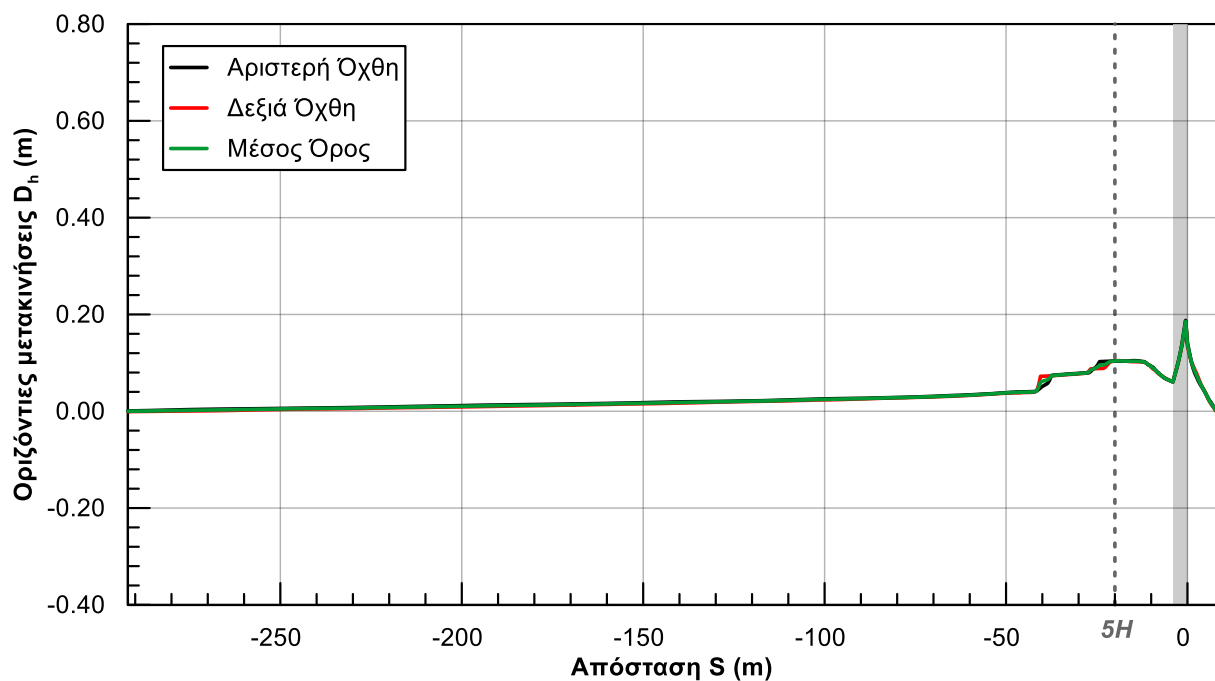
Με στόχο την κατανόηση της επίδρασης του πλάτους του καναλιού στις μετακινήσεις που αναπτύσσονται εκτελέστηκαν αναλύσεις για διάφορους λόγους B/H όπου B το πλάτος του καναλιού και H το βάθος του. Στις περιπτώσεις που το πλάτος B του καναλιού ξεπερνούσε τα $25H$, όπου H το βάθος του καναλιού, χρησιμοποιήθηκε κάρναβος συνολικού πλάτους $L = 1000m$ (2000 zones) ενώ στις περιπτώσεις που το πλάτος ήταν μικρότερο ή ίσο με $25H$ χρησιμοποιήθηκε κάρναβος συνολικού πλάτους $L = 600m$ (1200 zones).

Πραγματοποιήθηκαν 32 συνολικά αναλύσεις για διαφορετικές τιμές του λόγου B/H . Το εύρος των λόγων B/H που εξετάστηκε κυμαινόταν από πολύ μικρές τιμές, ($B/H = 0.5$), όπου τα δύο πρηνή των όχθων βρίσκονταν πολύ κοντά μεταξύ τους κι επομένως η επίδραση του ενός στο άλλο θα ήταν πλέον εμφανής, έως αρκετά μεγάλες ($B/H = 135$) όπου οι δύο όχθες του καναλιού δεν αλληλεπιδρούν.

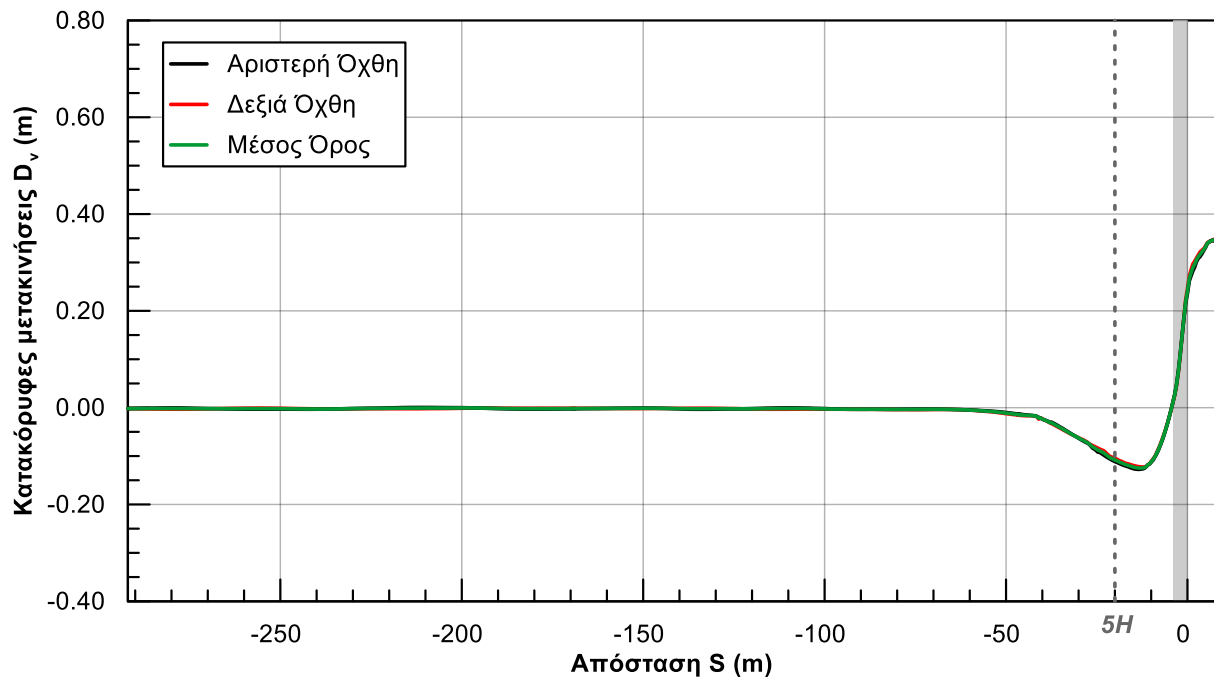
Στη συνέχεια, έγινε επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις αναλύσεις αυτές. Οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις που προέκυψαν για κάθε πλευρά του καναλιού (αριστερό και δεξί ήμισυ του προσομοιώματος) επεξεργάστηκαν και εντοπίστηκαν οι μέγιστες τιμές τους, καθώς και η τιμή τους σε απόσταση $5H$ στα ανάντη από τον πόδα του πρηνούς. Από τις τιμές των

μετακινήσεων αυτών για την δεξιά και αριστερή όχθη εξήχθη ο μέσος όρος και βάσει αυτού έγινε η περαιτέρω επεξεργασία.

Ενδεικτικά λοιπόν, για την τεκμηρίωση της χρήσης των μέσων όρων των μετακινήσεων των δύο όχθων, στα **Σχήμα 3.6** και **Σχήμα 3.7** παρουσιάζονται αντίστοιχα οι οριζόντιες (D_h) και κατακόρυφες (D_v) μετακινήσεις στην δεξιά και την αριστερή όχθη καναλιού με πλάτος πυθμένα $B = 16\text{m}$ (ήτοι $B/H = 4$) και ο μέσος όρος των τιμών αυτών που προέκυψαν από τις αναλύσεις. Όπως φαίνεται, η απόκλιση που εντοπίζεται μεταξύ των μετακινήσεων για το δεξί και αριστερό ήμισυ του καννάβου μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα και ως εκ τούτου στο εξής θα εξετάζονται και θα παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των μετακινήσεων των δύο όχθων.

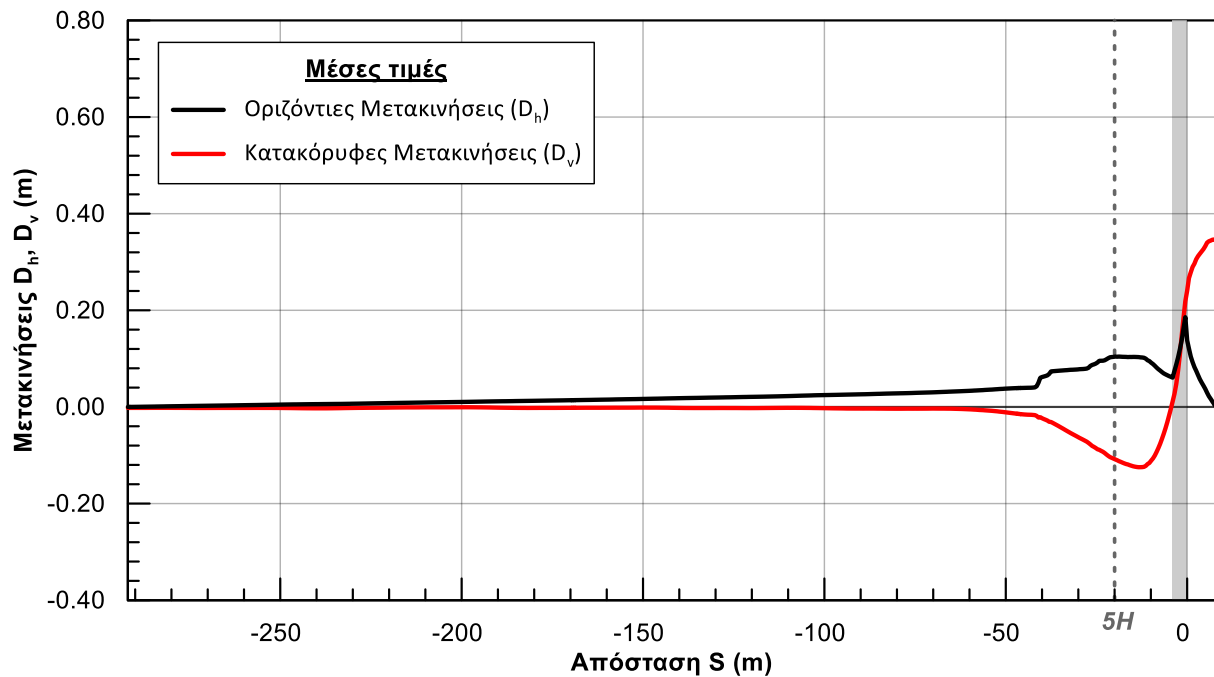


Σχήμα 3.6: Οριζόντιες μετακινήσεις στην δεξιά και αριστερή όχθη καναλιού με πυθμένα πλάτους $B=16\text{m}$.



Σχήμα 3.7: Κατακόρυφες μετακινήσεις στην δεξιά και αριστερή όχθη καναλιού με πυθμένα πλάτους $B=16\text{m}$.

Στη συνέχεια (**Σχήμα 3.8**) παρουσιάζονται ενδεικτικά τα διαγράμματα μεταβολής των μέσων οριζόντιων D_h και κατακόρυφων D_v μετακινήσεων συναρτήσει της απόστασης S (m) από τον πόδα του πρανούς της όχθης. Οι αποστάσεις αφορούν σε μισό κάρναβο (δεξί και αριστερό τμήμα, καθότι συμμετρικός ως προς το μέσον του), ξεκινώντας την αρίθμηση (σημείο 0) από τον πόδα του κάθε πρανούς και μετρώντας τα θετικά εντός του καναλιού και τα αρνητικά από τον πόδα του πρανούς και πίσω, έως το τέλος του καννάβου. Επιπλέον σημειώνεται γραμμοσκιασμένη η περιοχή της όχθης, από τον πόδα έως το φρύδι του πρανούς και με διακεκομμένη γραμμή η απόσταση $5H$ (όπου H το βάθος του καναλιού) πίσω από τον πόδα του πρανούς, που αναφέρεται από τους Youd et al. (2002) ως μέση απόσταση εκδήλωσης των μέγιστων οριζόντιων μετακινήσεων D_h . Οι προς τα άνω κατακόρυφες μετακινήσεις είναι θετικές.

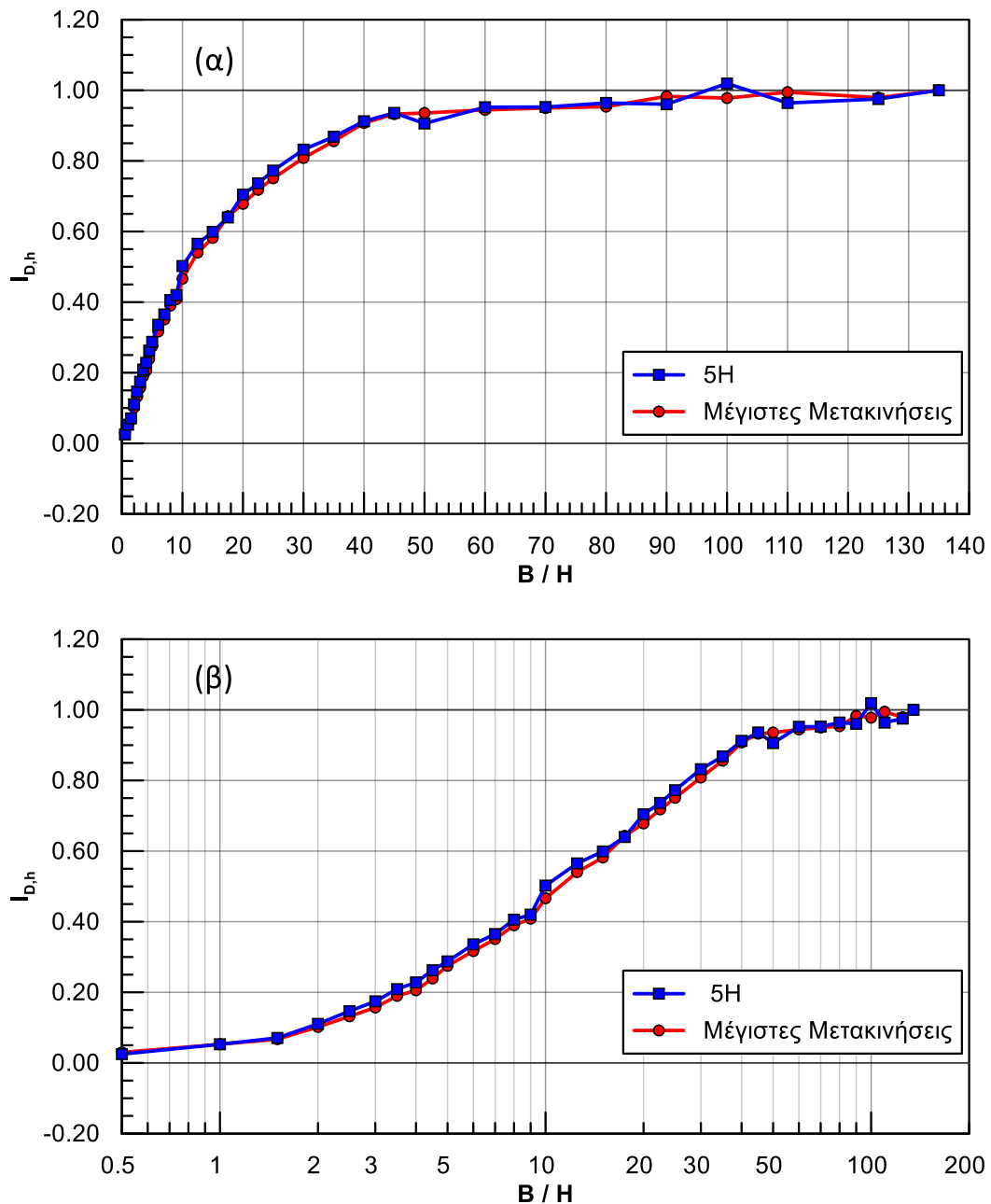


Σχήμα 3.8: Οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις για $B/H = 4$ (ήτοι $B = 16\text{m}$).

Αφού λοιπόν πραγματοποιήθηκε η παραπάνω επεξεργασία για όλους τους λόγους B/H που εξετάστηκαν, οι τιμές της οριζόντιας μετακίνησης D_h που προέκυψαν από τις αναλύσεις αυτές κανονικοποιήθηκαν ως προς την αντίστοιχη τιμή D_h της ανάλυσης για $(B/H) = 135$, ώστε τελικώς να προκύψει η καμπύλη του **Σχήμα 3.9**. Η κανονικοποίηση έγινε βάσει της Εξ. (3.28) που ακολουθεί.

$$I_{D_h} = \frac{D_h}{(D_h)_{(B/H)=135}} \quad (3.28)$$

Στο **Σχήμα 3.9** λοιπόν παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες τιμές $I_{D,h}$ των οριζόντιων μετακινήσεων συναρτήσει του λόγου B/H τόσο σε γραμμική όσο και σε λογαριθμική κλίμακα. Απεικονίζονται δύο καμπύλες, με μπλε χρώμα η καμπύλη που προέκυψε από την κανονικοποίηση των τιμών των μετακινήσεων σε απόσταση $5H$ από τον πόδα του πρσανούς και με κόκκινο εκείνη που προέκυψε από την κανονικοποίηση των μέγιστων μετακινήσεων που σημειώθηκαν στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 3.9: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσεως του λόγου B/H σε (α) γραμμική και (β) λογαριθμική κλίμακα.

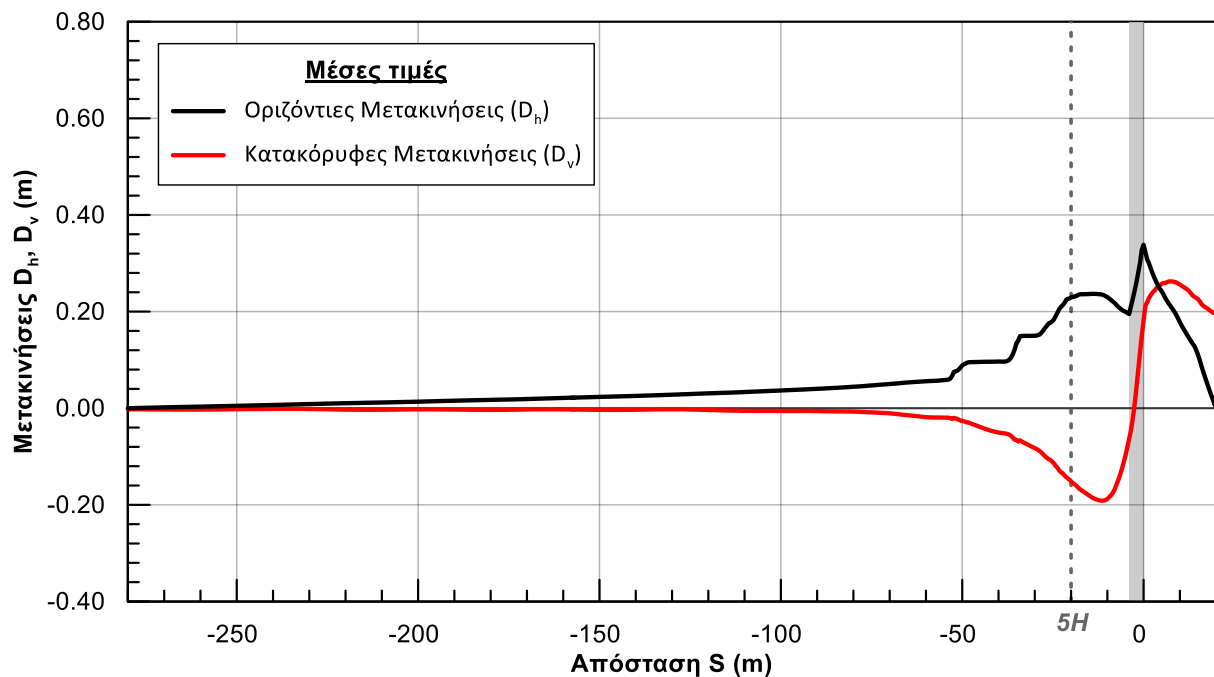
Από τη μορφή των καμπυλών φαίνεται πως πράγματι η επίδραση του πλάτους είναι καθοριστική για τις οριζόντιες μετακινήσεις. Συγκεκριμένα, οι τιμές των κανονικοποιημένων μετακινήσεων ξεκινούν για λόγο $B/H = 0.5$ από την τιμή 0.025 για τις μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ και από την τιμή 0.030 για τις μέγιστες μετακινήσεις, ενώ και για τις δύο περιπτώσεις φτάνουν πρακτικά τη μονάδα για λόγο $(B/H) > 100$. Επομένως φαίνεται ότι για επαρκώς μεγάλα ανηγμένα πλάτη B/H , η επίδραση του πλάτους στις οριζόντιες μετακινήσεις είναι μηδενική.

Στην επόμενη ενότητα επιβεβαιώνεται η επίδραση αυτή και εξηγείται εκτενέστερα πώς η τιμή του πλάτους επηρεάζει πράγματι την έκταση του πρίσματος αστοχίας της όχθης και κατ' επέκταση τις μετακινήσεις οριζόντιας εξάπλωσης.

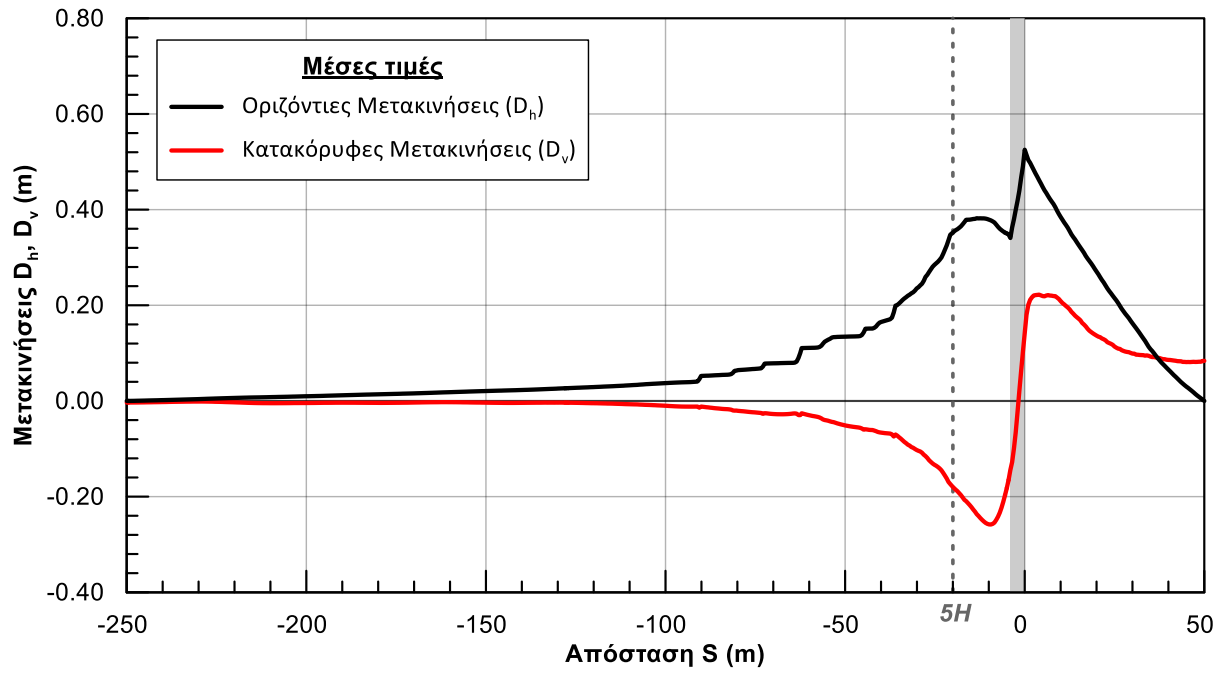
3.3.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Στην Ενότητα 3.3.1 παρουσιάστηκε η καμπύλη της βασικής ανάλυσης (**Σχήμα 3.9**) και δόθηκε μία πρώτη εικόνα για την επίδραση του πλάτους ενός καναλιού στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h . Για την επιβεβαίωση όμως και την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου και του τρόπου με τον οποίο επιδρά τελικά το πλάτος του καναλιού στις οριζόντιες μετακινήσεις, αποφασίστηκε μια πιο λεπτομερής εξέταση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων για διαφορετικές τιμές του λόγου B/H .

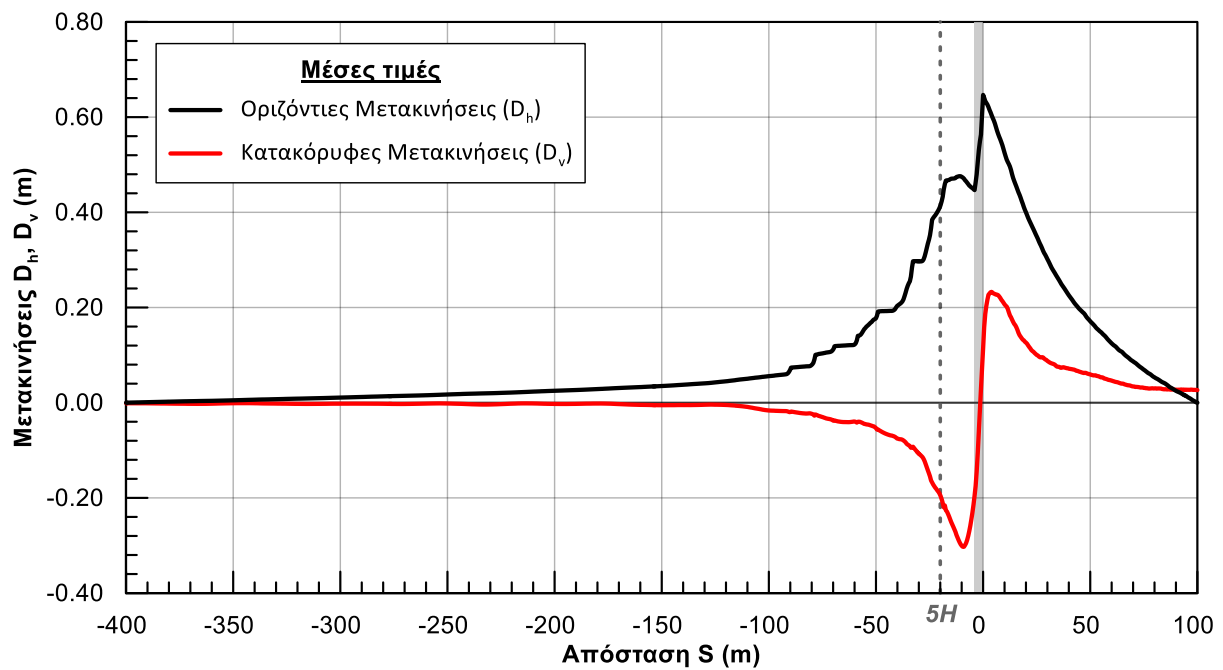
Έτσι, συμπληρωματικά με το **Σχήμα 3.8** που έχει παρατεθεί ήδη, στο **Σχήμα 3.10** έως και στο **Σχήμα 3.14** παρουσιάζεται η εξέλιξη των μετακινήσεων, οριζόντιων D_h και κατακόρυφων D_v , συναρτήσει της απόστασης S (m) από τον πόδα του πρανού της όχθης, για $B/H = 4, 10, 25, 50, 100$ και 135 . Η μορφή της παρουσίασης είναι η ίδια με το **Σχήμα 3.8**.



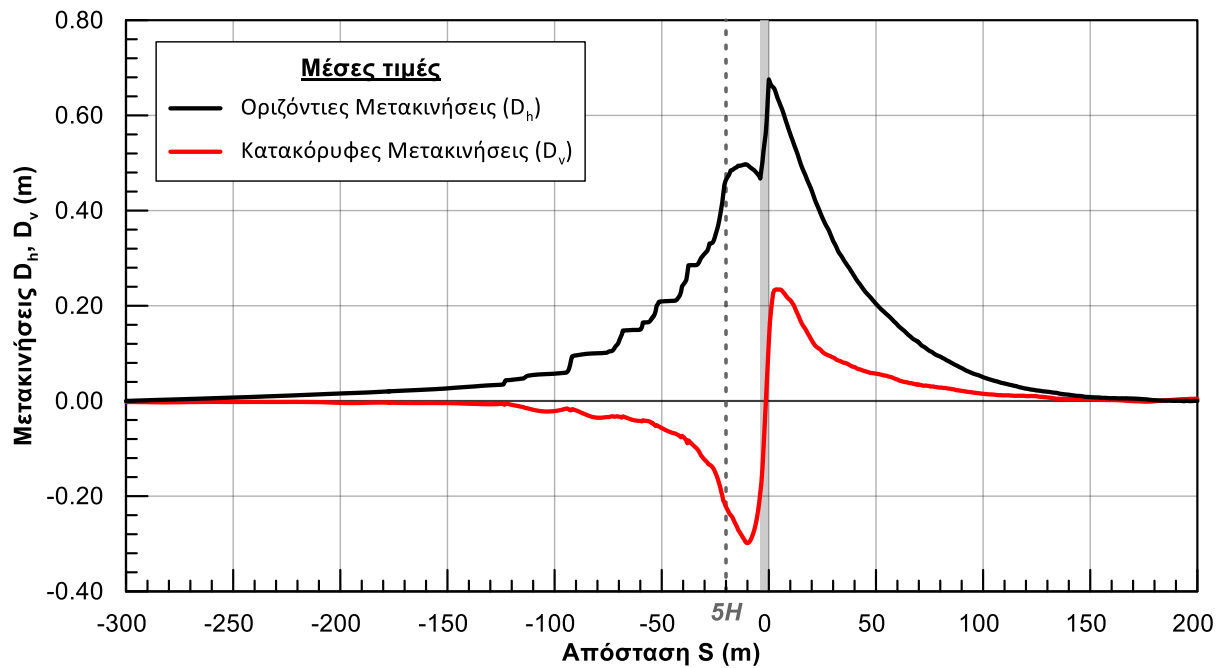
Σχήμα 3.10: Οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις για $B/H = 10$ (ήτοι $B = 40\text{m}$).



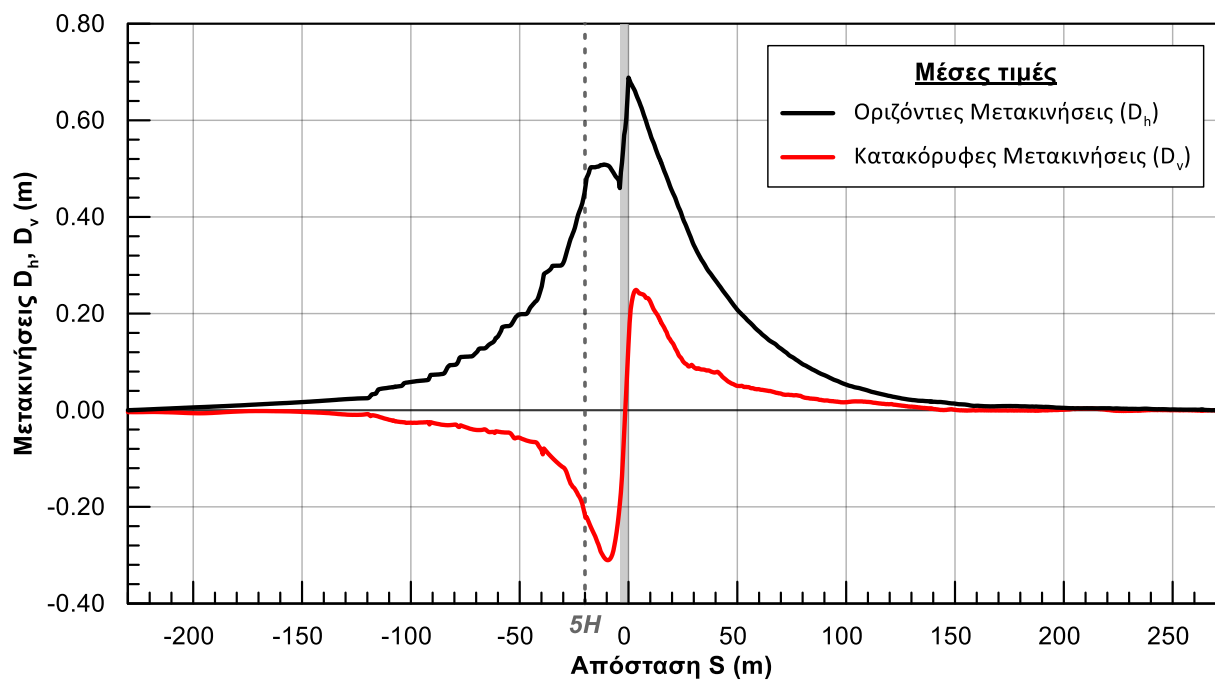
Σχήμα 3.11: Οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις για $B/H = 25$ (ήτοι $B = 100\text{m}$).



Σχήμα 3.12: Οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις για $B/H = 50$ (ήτοι $B = 200\text{m}$).



Σχήμα 3.13: Οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις για $B/H = 100$ (ήτοι $B = 400m$).



Σχήμα 3.14: Οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις για $B/H = 135$ (ήτοι $B = 540m$).

Όσον αφορά στις οριζόντιες μετακινήσεις D_h παρατηρούμε ότι εντός του καναλιού (από τον πόδα του πρηνούς και μετά) σημειώνεται αρχικά αύξηση των μετακινήσεων και στη συνέχεια σταδιακή απομείωσή τους όσο πλησιάζουμε στο μέσον του καναλιού. Εκτός του καναλιού, στην ελεύθερη επιφάνεια από τη στέψη του πρηνούς και πίσω, η εικόνα είναι όμοια. Σημειώνεται αύξηση των μετακινήσεων έως μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια σταδιακή απομείωση και μηδενισμός τους έως το πέρας του καννάβου. Παρατηρούμε μάλιστα ότι η μέγιστη τιμή των μετακινήσεων D_h πράγματι

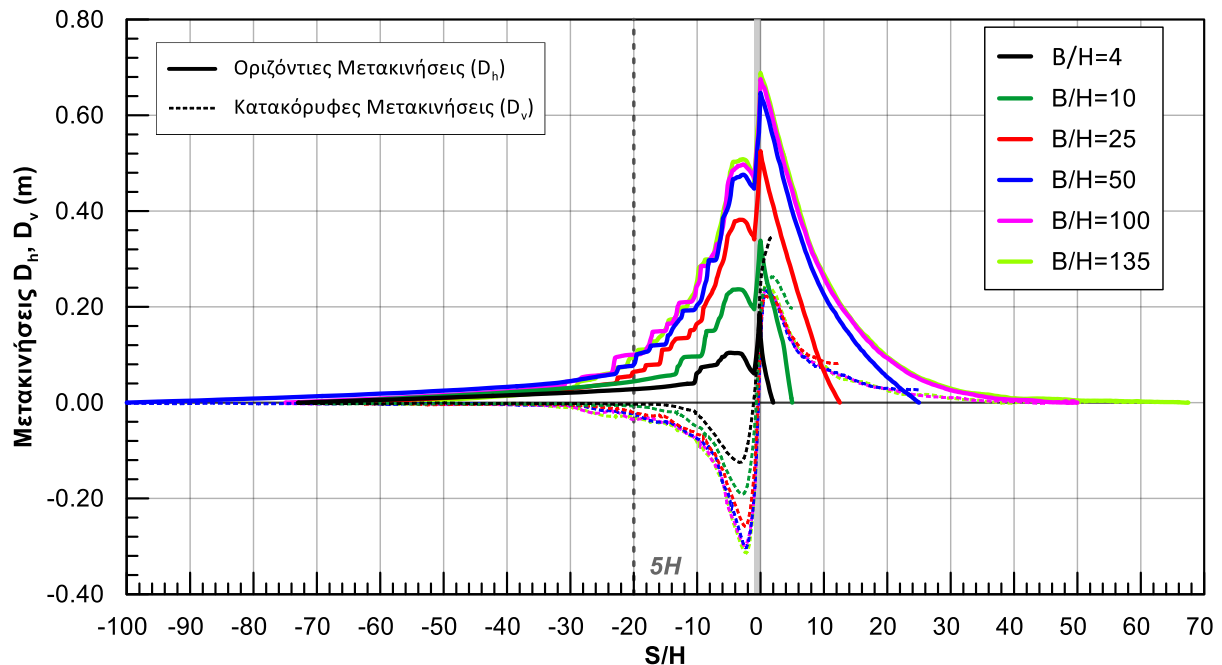
εντοπίζεται κοντά στην απόσταση των 5H πίσω από τον πόδα του πρανούς, όπως αναφέρεται από τον Youd στην βιβλιογραφία (Youd et al. 2002, 2009 & Youd 2018), αλλά όχι με απόλυτη συνέπεια, ακρίβεια και συστηματικό τρόπο σε ακριβή απόσταση 5H. Για το λόγο αυτό και καθώς οι μέγιστες μετακινήσεις είναι όμοιες με αυτές των 5H αλλά παρουσιάζουν περισσότερο ικανοποιητική συμπεριφορά και τείνουν να δίνουν πιο ομοιόμορφα αποτελέσματα, στα επόμενα Κεφάλαια θα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και για τις δύο περιπτώσεις. Τέλος, επί της κεκλιμένης επιφάνειας του πρανούς, οι μετακινήσεις παρουσιάζουν αρκετά απότομη μείωση από την τιμή που εντοπίζεται στον πόδα έως αυτή που σημειώνεται στη στέψη.

Όσον αφορά στις κατακόρυφες μετακινήσεις D_v , παρατηρούμε ότι εντός του καναλιού (από τον πόδα του πρανούς και μετά) σημειώνεται αρχικά αύξηση των μετακινήσεων και στη συνέχεια σταδιακή απομείωσή τους όσο πλησιάζουμε στο μέσον του καναλιού. Εκτός του καναλιού, στην ελεύθερη επιφάνεια από τη στέψη του πρανούς και πίσω, η εικόνα είναι όμοια, δηλαδή αύξηση των μετακινήσεων έως μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια σταδιακή απομείωση και μηδενισμός τους έως το πέρασ του καννάβου, αλλά με αντίθετες μετακινήσεις (τα διανύσματα των μετακινήσεων εμφανίζονται αντίρροπα). Δηλαδή στην ελεύθερη επιφάνεια πίσω από τη στέψη του πρανούς σημειώνεται υποχώρηση του εδάφους, όπως είναι αναμενόμενο, λόγω της κυκλικής αστοχίας που εκδηλώνεται στο πρανές της όχθης. Τέλος, επί της κεκλιμένης επιφάνειας του πρανούς, οι μετακινήσεις παρουσιάζουν αρκετά απότομη αύξηση από την τιμή που εντοπίζεται στον πόδα έως αυτή που σημειώνεται στη στέψη.

Επιπλέον παρατηρούμε ότι ο μηδενισμός των κατακόρυφων μετακινήσεων D_v στο μέσον δεν επέρχεται για όλες τις περιπτώσεις. Όπως προκύπτει από το αντίστοιχα σχήματα για λόγους $B/H = 4, 10, 25, 50$ και 100 (**Σχήμα 3.8** και **Σχήμα 3.10** έως **Σχήμα 3.13**) οι κατακόρυφες μετακινήσεις στο μέσον του καναλιού δεν φαίνεται να έχουν απομειωθεί πλήρως. Αντίθετα, στο **Σχήμα 3.14** γίνεται εμφανές ότι για το λόγο $B/H = 135$ και το αντίστοιχο πλάτος καναλιού $B = 540$ m, οι κατακόρυφες μετακινήσεις στο μέσον του καναλιού πρακτικά είναι μηδενικές. Ο μηδενισμός των κατακόρυφων μετακινήσεων στο μέσον του καναλιού δηλώνει ότι δεν υπάρχει αλληλεμπλοκή μεταξύ των κύκλων αστοχίας των δύο πρανών των όχθων. Επομένως ο λόγος $B/H = 135$ θεωρήθηκε ότι πράγματι αντιστοιχεί σε ένα πολύ μεγάλο πλάτος καναλιού B , το οποίο αρκεί ώστε να εκδηλωθούν οι αστοχίες καθεμίας από τις όχθες ξεχωριστά, χωρίς να επηρεάζεται η μία από την άλλη. Επομένως να αναπτυχθούν οι κύκλοι αστοχίας απρόσκοπτα, σαν σε συνθήκες ελεύθερου μετώπου με αναβαθμό, χωρίς καμία επίδραση του πλάτους στις μετακινήσεις.

Στο **Σχήμα 3.15** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές των μετακινήσεων για τις επιλεγμένες τιμές του λόγου $B/H = 4, 10, 25, 50, 100$ και 135 , συναρτήσε του λόγου S/H , όπου S η απόσταση από τον πόδα του πρανούς και H το βάθος του καναλιού. Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, και εδώ

παρατηρούμε πως η μορφή των μετακινήσεων είναι παρεμφερής για όλους τους λόγους B/H , με μόνη διαφορά την απομείωση των κατακόρυφων μετακινήσεων καθώς προσεγγίζουμε το μέσον του καναλιού.



Σχήμα 3.15: Οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις για το μισό κάρναβο της βασικής ανάλυσης και για λόγους $B/H = 4, 10, 25, 50, 100, 135$, συναρτήσει του λόγου S/H .

Όσα περιεγράφηκαν ανωτέρω επιβεβαιώνονται εξετάζοντας τα διανύσματα και τις ισοϋψείς των μετακινήσεων D_h και D_v ενδεικτικά για τον μικρότερο και μεγαλύτερο λόγο που αναφέρθηκαν παραπάνω, $B/H = 4$ και $B/H = 135$ αντίστοιχα. Κατ' αρχάς στο **Σχήμα 3.16**, στο **Σχήμα 3.17** και στο **Σχήμα 3.18** που ακολουθούν παρουσιάζονται τα διανύσματα και οι τιμές (σε μορφή ισοϋψών) των μετακινήσεων που εκδηλώθηκαν στην περίπτωση της ανάλυσης για $B/H = 4$. Τα σχήματα δεν αφορούν στο πλήρες μήκος του καννάβου αλλά στην κρίσιμη περιοχή του μισού καννάβου. Έτσι απεικονίζεται ο κάρναβος από το μέσον αυτού έως και 150 m πίσω από αυτόν.

Παρατηρούμε ότι ο κρίσιμος κύκλος αστοχίας που διαγράφεται από το νέφος των διανυσμάτων των μετακινήσεων φαίνεται να συμπίπτει με την περιοχή του βασικού πυρήνα των ισοϋψών των μετακινήσεων D_h και D_v . Επιπλέον, η παρουσία κατακόρυφων μετακινήσεων στο μέσον του καναλιού που προκύπτει από το **Σχήμα 3.8** επιβεβαιώνεται από την ύπαρξη ισοϋψών της τάξης των 32.5 cm. Αντίστοιχα και η τιμή των μετακινήσεων στην ελεύθερη επιφάνεια πίσω από τη στέψη του πρανούς, επιβεβαιώνεται από τις ισοϋψείς με τιμές της τάξης των 12.5 cm. Ανάλογα και για τις οριζόντιες μετακινήσεις, η ύπαρξη ισοϋψών της τάξης των 17.5 cm στην κεκλιμένη επιφάνεια του πρανούς των όχθων επιβεβαιώνουν το **Σχήμα 3.8**. Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι οι μέγιστες τιμές τους δεν εντοπίζονται επιφανειακά, αλλά βαθύτερα, στην περιοχή γύρω από τον πόδα του πρανούς.

Συμπεραίνουμε λοιπόν πως στην προκειμένη περίπτωση, ο μηχανισμός αστοχίας έχει επίδραση στην ανάπτυξη μετακινήσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης, περιορίζοντάς τες, όπως δείχνει και η καμπύλη του Σχήματος 3.9. Αυτό πράγματι αποδεικνύεται από την ύπαρξη κατακόρυφων μετακινήσεων στο μέσον του καναλιού, που σημαίνει ότι οι κύκλοι αστοχίας των δύο πρανών των όχθων συναντώνται.



Σχήμα 3.16: Διανύσματα των μετακινήσεων για την κρίσιμη περιοχή του μισού καννάβου και $B/H = 4$ (ήτοι $B = 16\text{m}$).

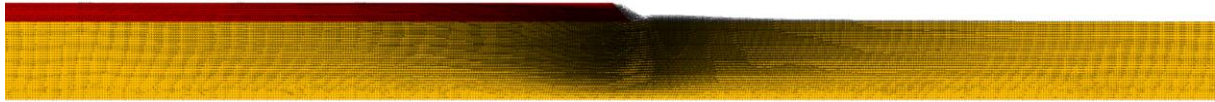


Σχήμα 3.17: Ισοϋψείς των οριζόντιων μετακινήσεων D_h για την κρίσιμη περιοχή του μισού καννάβου και $B/H = 4$ (ήτοι $B = 16\text{m}$).

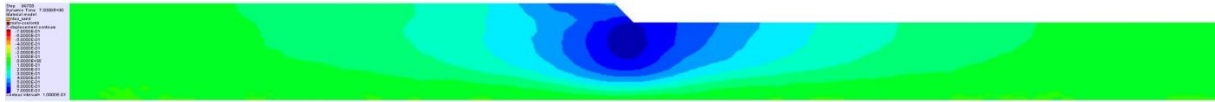


Σχήμα 3.18: Ισοϋψείς των κατακόρυφων μετακινήσεων D_v για την κρίσιμη περιοχή του μισού καννάβου και $B/H = 4$ (ήτοι $B = 16\text{m}$).

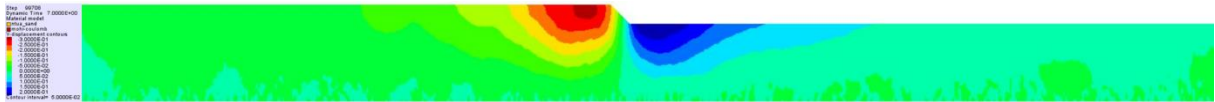
Κατ' αναλογία με τα παραπάνω, στο **Σχήμα 3.19**, στο **Σχήμα 3.20** και στο **Σχήμα 3.21** που ακολουθούν παρουσιάζονται τα διανύσματα και οι τιμές (σε μορφή ισοϋψών) των μετακινήσεων που εκδηλώθηκαν στην περίπτωση της ανάλυσης για $B/H = 135$. Τα σχήματα δεν αφορούν στο πλήρες μήκος του καννάβου αλλά στην κρίσιμη περιοχή του καννάβου από την απόσταση των 150 m έως και των 400 m από το μέσον αυτού. Συμπληρωματικά παρατίθεται το **Σχήμα 3.22** με τις ισοϋψείς των κατακόρυφων μετακινήσεων D_v από το μέσον του καννάβου έως και 400 m πίσω από αυτό.



Σχήμα 3.19: Διανύσματα των μετακινήσεων για την κρίσιμη περιοχή του μισού καννάβου και $B/H = 135$ (ήτοι $B = 540\text{m}$).



Σχήμα 3.20: Ισοϋψείς των οριζόντιων μετακινήσεων D_h για την κρίσιμη περιοχή του μισού καννάβου και $B/H = 135$ (ήτοι $B = 540\text{m}$).



Σχήμα 3.21: Ισοϋψείς των κατακόρυφων μετακινήσεων D_v για την κρίσιμη περιοχή του μισού καννάβου και $B/H = 135$ (ήτοι $B = 540\text{m}$).

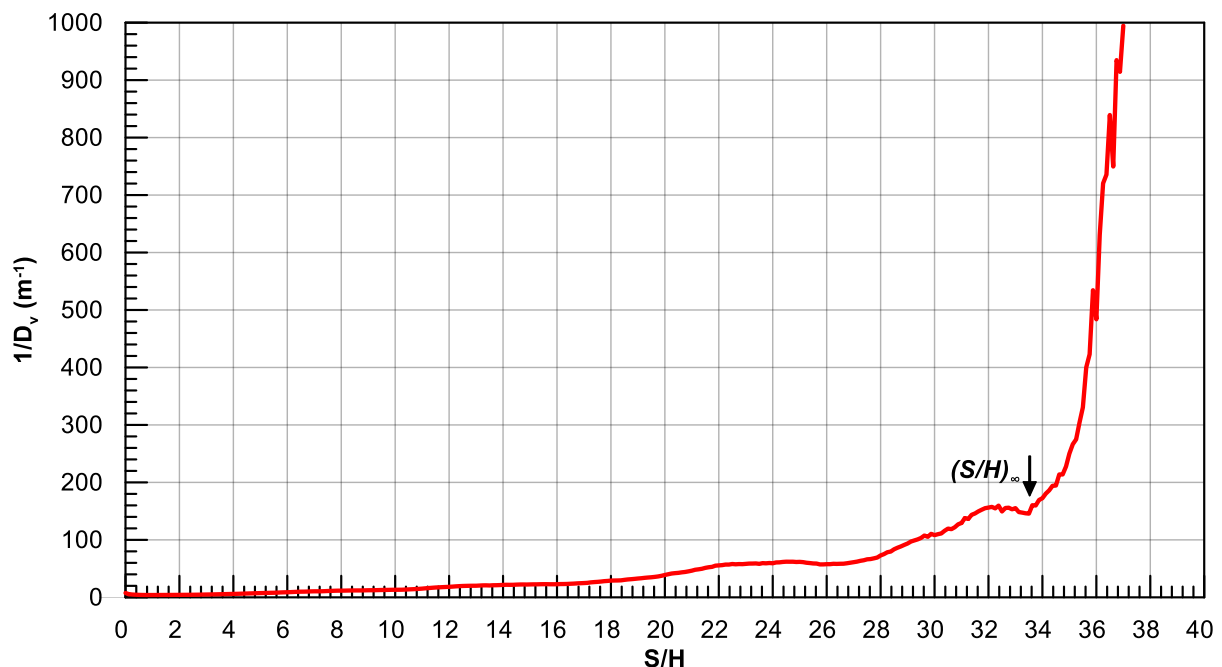


Σχήμα 3.22: Ισοϋψείς των κατακόρυφων μετακινήσεων D_v από το μέσον του καννάβου έως και 400 m πίσω από αυτό, για $B/H = 135$ (ήτοι $B = 540\text{m}$).

Παρατηρούμε ότι ο κρίσιμος κύκλος αστοχίας που διαγράφεται από το νέφος των διανυσμάτων των μετακινήσεων φαίνεται να συμπίπτει με την περιοχή του βασικού πυρήνα των ισοϋψών των μετακινήσεων D_h και D_v . Επιπλέον, η απουσία κατακόρυφων μετακινήσεων στο μέσον του καναλιού που προέκυψε από το **Σχήμα 3.14**, επιβεβαιώνεται εδώ από την ύπαρξη ισοϋψών της τάξης των 0 έως 5 cm στη θέση αυτή (**Σχήμα 3.22**). Αντίστοιχα και η τιμή των μετακινήσεων στην ελεύθερη επιφάνεια πίσω από τη στέψη του πρανούς, επιβεβαιώνεται από τις ισοϋψείς με τιμές της τάξης των 30 cm. Αντίστοιχα και για τις οριζόντιες μετακινήσεις, η ύπαρξη ισοϋψών της τάξης των 70 cm στον πόδα του πρανούς και η απομείωσή τους με την απόσταση από αυτόν επιβεβαιώνουν τη μορφή που αποτυπώνεται στο **Σχήμα 3.14**.

Συμπεραίνουμε λοιπόν πως στην προκειμένη περίπτωση, ο κρίσιμος μηχανισμός αστοχίας δεν μπορεί να έχει επίδραση στην ανάπτυξη μετακινήσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης καθώς η αστοχία και των δύο πρανών φαίνεται να ολοκληρώνεται εντός του περιθωρίου των 540 m που ισοδυναμεί με το πλάτος του καναλιού. Εφόσον λοιπόν οι αστοχίες αναπτύσσονται ελεύθερα, χωρίς να υπάρχει πιθανότητα αλληλεμπλοκής τους αποδεικνύεται ότι ο λόγος $B/H = 135$ είναι αρκούντως ικανός ώστε να θεωρηθεί ανάλογος με έναν λόγο $(S/H)_{\infty}$ που αντιστοιχεί σε συνθήκες ελεύθερου μετώπου με αναβαθμό.

Η επιβεβαίωση της θέσης μηδενισμού των κατακόρυφων μετακινήσεων έγινε εξετάζοντας την καμπυλότητα του διαγράμματος των τελευταίων συναρτήσεων του λόγου S/H , όπου S η απόσταση από τον πόδα του πρανού και H το βάθος του καναλιού. Συγκεκριμένα στο **Σχήμα 3.23** υπολογίστηκε και παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου $1/D_v$, όπου D_v οι μέσες τιμές των κατακόρυφων μετακινήσεων, για S/H από 0 έως 40. Ο μηδενισμός των κατακόρυφων μετακινήσεων εντοπίζεται συμβατικά στο σημείο μέγιστης καμπυλότητας του διαγράμματος (βλέπε βέλος), σε ανηγμένη απόσταση $(S/H)_\infty = 33.5$. Επομένως γίνεται και με αυτόν τον τρόπο αντιληπτό ότι οι κατακόρυφες μετακινήσεις D_v μηδενίζονται πολύ νωρίτερα από το μέσον του καννάβου καθότι ο λόγος $(S/H)_\infty = 33.5$ απέχει κατά πολύ από τον λόγο $(S/H) = 67.5$, που αντιστοιχεί στο μέσον του καννάβου για το προσομοίωμα με λόγο $B/H = 135$.



Σχήμα 3.23: Κατακόρυφες μετακινήσεις στο κανάλι, για τη βασική ανάλυση και λόγο $B/H = 135$.

3.3.3 Ανάπτυξη αναλυτικής συσχέτισης

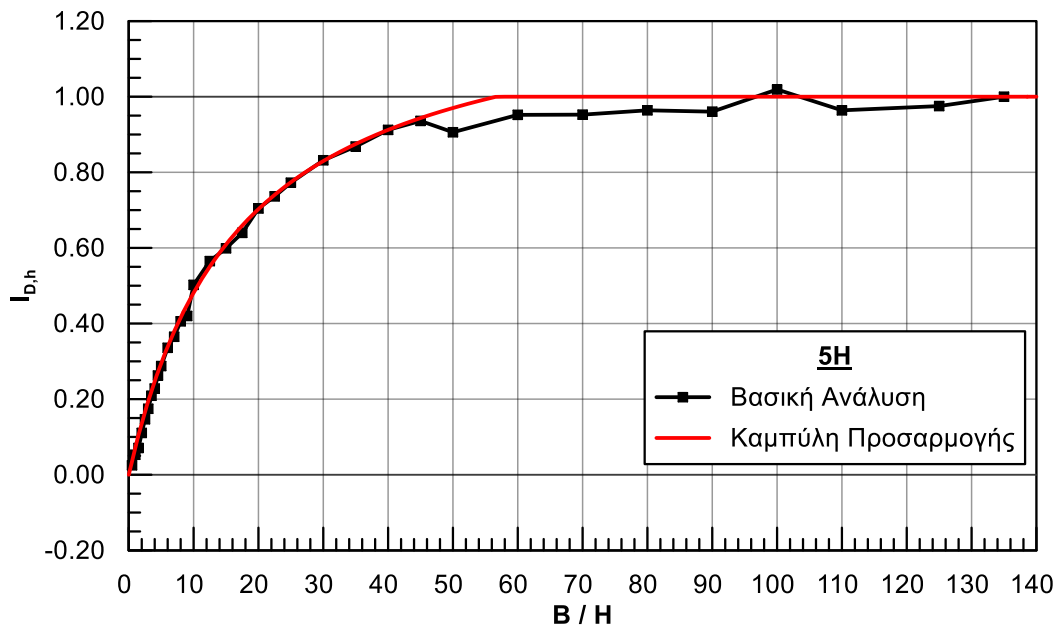
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μέρος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η ποσοτική εκτίμηση του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ [Εξ. (3.28)] που λαμβάνει υπόψιν την επίδραση του πλάτους του καναλιού στον υπολογισμό των μετακινήσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης, καθώς κάτι τέτοιο δεν προβλέπεται από τις βασικές σχέσεις που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία (βλ. Ενότητα 2.2).

Όπως αποδεικνύεται από την καμπύλη της βασικής ανάλυσης (**Σχήμα 3.9**) η επίδραση αυτή είναι δεδομένη καθώς για μικρές τιμές του λόγου B/H οι μετακινήσεις είναι ανάλογα μικρές και ο διορθωτικός συντελεστής $I_{D,h}$ αρκετά μικρότερος της μονάδας, ενώ όσο αυξάνεται ο λόγος B/H και προσεγγίζει την τιμή $B/H = 135$ ο διορθωτικός συντελεστής τείνει κι αυτός στη μονάδα.

Έγινε λοιπόν προσπάθεια να διατυπωθεί μια αναλυτική σχέση που να περιγράφει αυτή τη συμπεριφορά και τη σχετική επίδραση (relative effect) του πλάτους του καναλιού στις μετακινήσεις που αναπτύσσονται. Για την προσέγγιση επομένως της μορφής των καμπυλών που προέκυψαν από τις αναλύσεις, χρησιμοποιήθηκαν υπερβολικές καμπύλες, τόσο για τις μετακινήσεις των 5H, όσο και για τις μέγιστες μετακινήσεις.

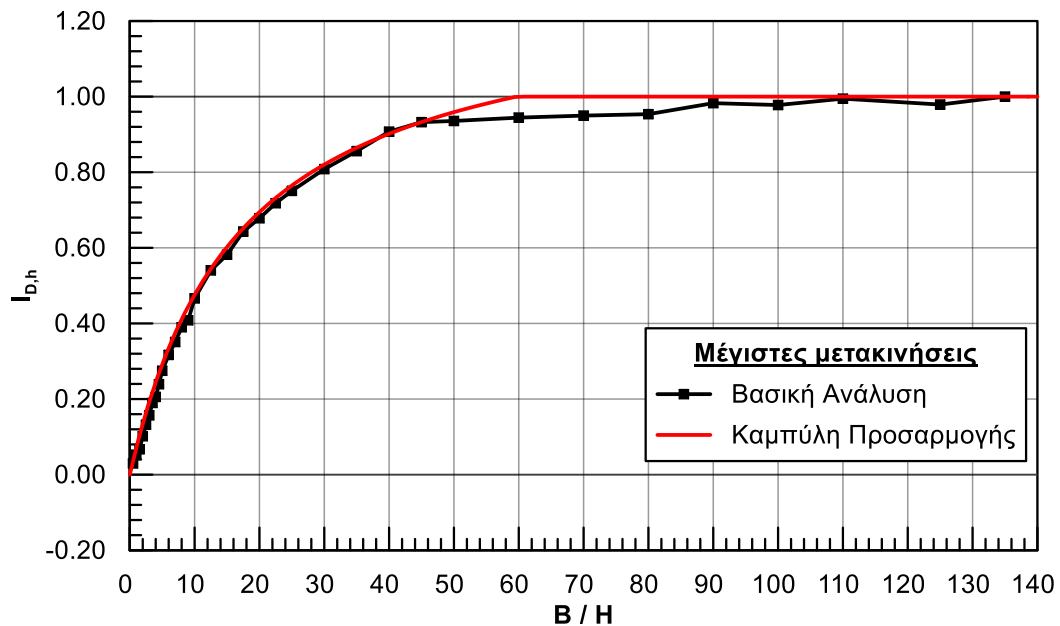
Έτσι στο **Σχήμα 3.24** και στο **Σχήμα 3.25** παρουσιάζεται η καμπύλη των κανονικοποιημένων οριζόντιων μετακινήσεων $I_{D,h}$ για τις μετακινήσεις που αναπτύσσονται στην ελεύθερη επιφάνεια σε απόσταση 5H πίσω από τον πόδα του πρηνούς της όχθης και για τις μέγιστες μετακινήσεις αντίστοιχα, συναρτήσει του λόγου B/H. Επιπλέον, αντίστοιχα για τις καμπύλες αυτές, έχουν σχεδιαστεί οι βέλτιστες υπερβολικές καμπύλες προσαρμογής (best fitting) που αντιστοιχούν στα αποτελέσματα για απόσταση 5H [Εξ. (3.29)] και για τις μέγιστες μετακινήσεις [Εξ. (3.30)].

$$I_{D,h} = 1.30 \frac{B/H}{17 + B/H} \leq 1 \quad (3.29)$$



Σχήμα 3.24: Βέλτιστη καμπύλη προσαρμογής (best fitting) για την καμπύλη των κανονικοποιημένων οριζόντιων μετακινήσεων $I_{D,h}$ σε απόσταση 5H από τον πόδα του πρηνούς για τη βασική ανάλυση.

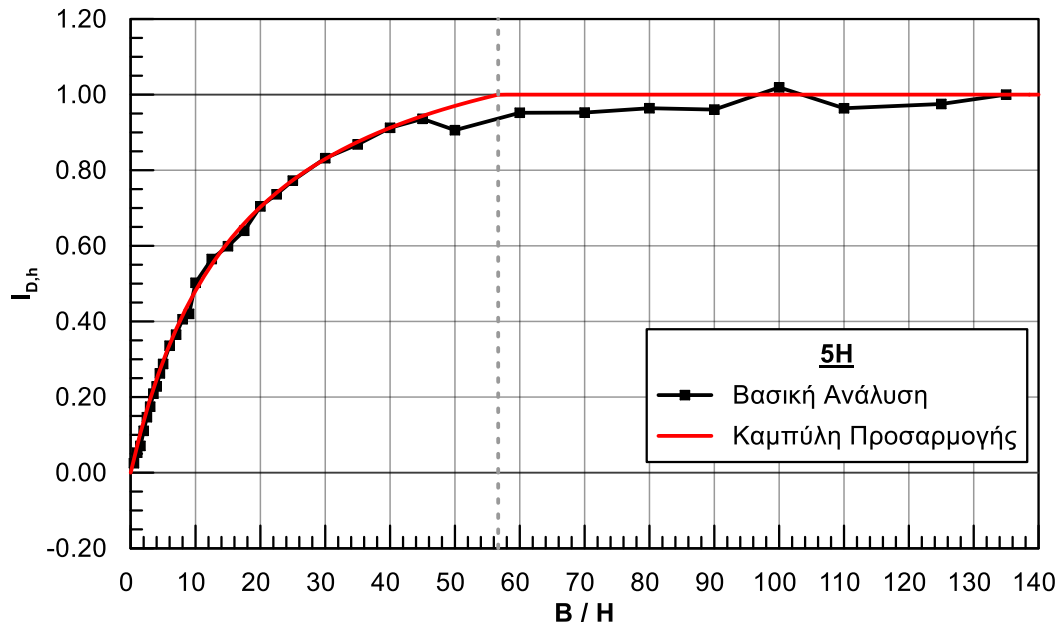
$$I_{D,h} = 1.285 \frac{B/H}{17 + B/H} \leq 1 \quad (3.30)$$



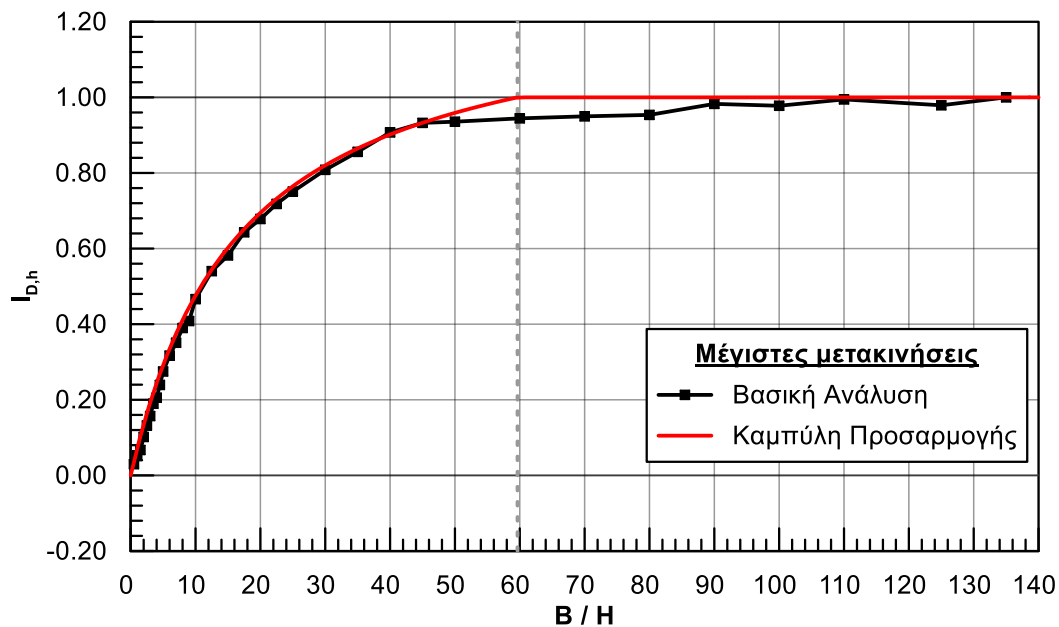
Σχήμα 3.25: Βέλτιστη καμπύλη προσαρμογής (best fitting) για την καμπύλη των κανονικοποιημένων μέγιστων οριζόντιων μετακινήσεων $I_{D,h}$ για τη βασική ανάλυση.

Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες των αναλυτικών σχέσεων προσεγγίζουν με πολύ καλή ακρίβεια την καμπύλη της βασικής ανάλυσης. Για μικρούς λόγους B/H , όπου ο διορθωτικός συντελεστής $I_{D,h}$ φαίνεται να έχει μεγάλη επίδραση, η καμπύλη προσαρμογής βρίσκεται οριακά πάνω από τα σημεία της βασικής καμπύλης, ενώ στη συνέχεια, για μεγαλύτερες τιμές του λόγου B/H φαίνεται να ξεπερνά την τιμή της μονάδας. Για το λόγο αυτό τίθεται ο περιορισμός $I_{D,h} \leq 1$, καθώς η τιμή αυτή (μονάδα) δηλώνει πρακτικά μηδενική σχετική επίδραση του πλάτους καναλιού στις μετακινήσεις. Υποδεικνύει δηλαδή ότι δεν απαιτείται κάποια διόρθωση και είναι καθόλα συντηρητικό οι μετακινήσεις λόγω πλευρικής εξάπλωσης να υπολογίζονται με εφαρμογή και μόνο των σχέσεων που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία.

Στο πλαίσιο αυτό έγινε και η σύγκριση μεταξύ της τιμής του λόγου B/H που προκύπτει από την αναλυτική σχέση για την καμπύλη προσαρμογής για τιμή του $I_{D,h}$ ίση με τη μονάδα και της τιμής του μέγιστου λόγου $B/H = 135$. Όπως φαίνεται από το **Σχήμα 3.26** που ακολουθεί, η κόκκινη καμπύλη που χρησιμοποιείται για να προσεγγίσει αναλυτικά την καμπύλη της βασικής ανάλυσης (για μετακινήσεις στα 5H), για διορθωτικό συντελεστή $I_{D,h}$ ίσο με τη μονάδα αντιστοιχεί σε τιμή $B/H = 56.67$. Η αντίστοιχη τιμή για τις μέγιστες μετακινήσεις είναι $B/H = 59.65$ (**Σχήμα 3.27**). Οι τιμές που προκύπτουν λοιπόν από την βασική καμπύλη για τους λόγους αυτούς ($B/H = 56.67$ και $B/H = 59.65$) είναι αντίστοιχα $I_{D,h} = 0.937$ και $I_{D,h} = 0.944$. Επομένως πράγματι η θεώρηση της μονάδας ως άνω ορίου ξεκινώντας από αυτούς τους λόγους B/H φαίνεται να είναι συντηρητική, αλλά όχι υπερβολικά συντηρητική, καθώς οι τιμές της βασικής καμπύλης στα σημεία αυτά δεν παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από την μονάδα.



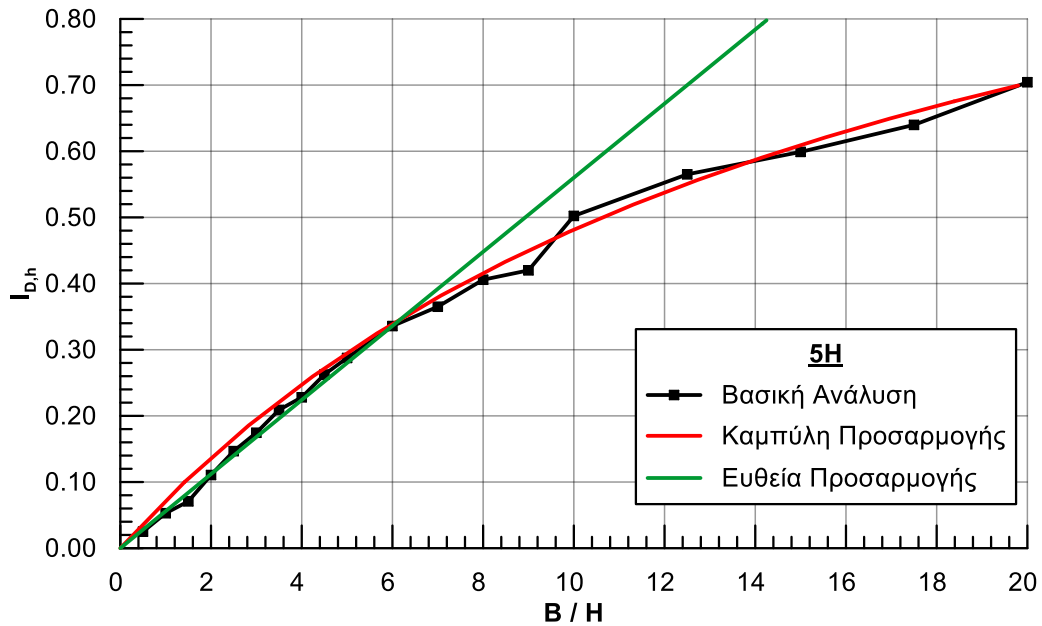
Σχήμα 3.26: Best fitting για την καμπύλη των κανονικοποιημένων οριζόντιων μετακινήσεων $I_{D,h}$ σε απόσταση $5H$ από τον πόδα του πρικού για τη βασική ανάλυση.



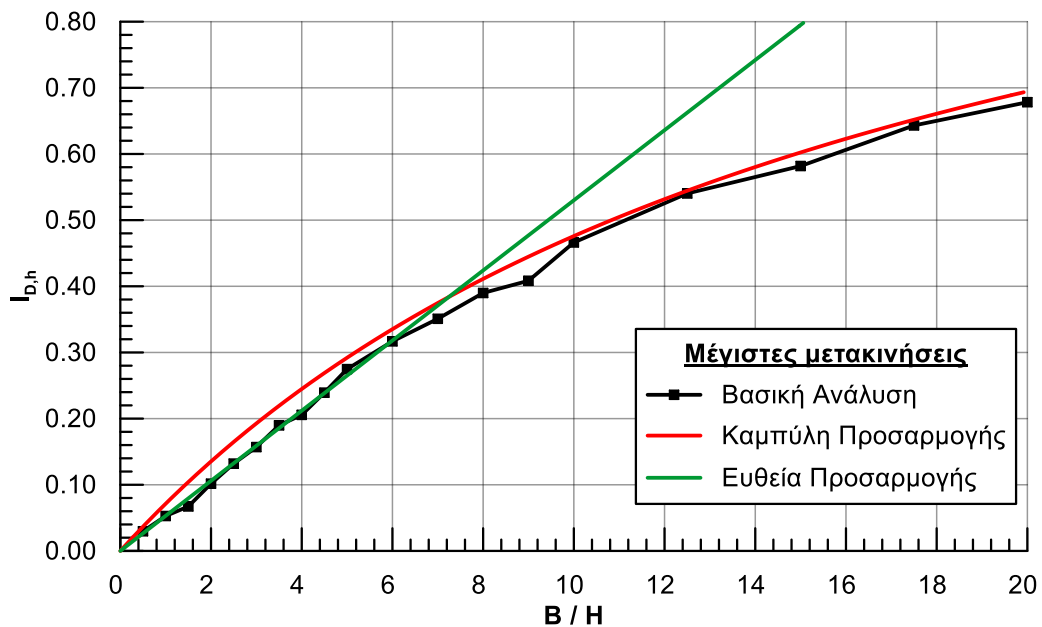
Σχήμα 3.27: Best fitting για την καμπύλη των κανονικοποιημένων μέγιστων οριζόντιων μετακινήσεων $I_{D,h}$ για τη βασική ανάλυση.

Ειδικότερα, για μικρούς λόγους B/H φαίνεται ότι η αναλυτική σχέση (fitting) που προσεγγίζει την βασική καμπύλη μπορεί να λάβει και γραμμική μορφή. Συγκεκριμένα, η ευθεία που μπορεί να προσεγγίσει βέλτιστα τα σημεία της καμπύλης για την βασική ανάλυση, είναι η ίδια για τις μετακινήσεις στα $5H$ και τις μέγιστες μετακινήσεις, δίδεται από την Εξ. (3.31) και παρουσιάζεται στα **Σχήμα 3.28** και **Σχήμα 3.29**.

$$I_{D,h} = 0.056 \frac{B}{H} \leq 1 \quad (3.31)$$



Σχήμα 3.28: Best fitting για την καμπύλη των κανονικοποιημένων οριζόντιων μετακινήσεων $I_{D,h}$ σε απόσταση 5H από τον πόδα του πρανούς για τη βασική ανάλυση.



Σχήμα 3.29: Best fitting για την καμπύλη των κανονικοποιημένων μέγιστων οριζόντιων μετακινήσεων $I_{D,h}$ για τη βασική ανάλυση.

3.4 Συμπεράσματα

Οι αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τη μελέτη της επίδρασης που έχει το πλάτος ενός καναλιού στις οριζόντιες μετακινήσεις που αναπτύσσονται λόγω πλευρικής εξάπλωσης (Ενότητες 3.2 και 3.3 αντίστοιχα) οδήγησαν στα ακόλουθα συμπεράσματα πρακτικού ενδιαφέροντος για την παρούσα Διπλωματική Εργασία:

- i. Η θεώρηση της απόστασης των $5H$, όπου H το βάθος του καναλιού, ως κρίσιμη για την ανάπτυξη των μέγιστων οριζόντιων μετακινήσεων D_h (Youd et al. 2002, 2009 & Youd 2018) δεν αποτελεί πράγματι την πλέον συστηματική μέθοδο για τον εντοπισμό των μέγιστων μετακινήσεων. Συνεπώς για την παρούσα Διπλωματική Εργασία, στο πλαίσιο της τεκμηρίωσης της συμπεριφοράς και της σχετικής επίδρασης του πλάτους στις μετακινήσεις, στην επεξεργασία των δεδομένων για την εξαγωγή συμπερασμάτων χρησιμοποιήθηκαν και οι μέγιστες μετακινήσεις που εντοπίζονται πίσω από τη στέψη του πρανούς. Αυτές φαίνεται να συνιστούν έναν πιο σταθερό και συνεπή δείκτη καθώς και η μορφή της καμπύλης της βασικής ανάλυσης που προκύπτει από αυτές παρουσιάζει πιο ομαλή συμπεριφορά.
- ii. Ο κρίσιμος μηχανισμός που καθορίζει την επίδραση του πλάτους είναι ο κύκλος αστοχίας των πρανών των όχθων. Όταν ο κύκλος αστοχίας καθενός από τα δύο πρανά των όχθων έχει ολοκληρωθεί εντός του διατιθέμενου ημι-πλάτους καναλιού, δεν υπάρχει επίδραση του πλάτους στις οριζόντιες μετακινήσεις D_h . Η επίδραση ξεκινάει όταν υπάρξει αλληλεμπλοκή μεταξύ των δύο κύκλων αστοχίας.
- iii. Η σχετική επίδραση του πλάτους στις οριζόντιες μετακινήσεις μπορεί να αποτυπωθεί αναλυτικά μέσω μιας υπερβολικής καμπύλης, σύμφωνα με την οποία ο διορθωτικός συντελεστής $I_{D,h}$ δίδεται από τη σχέση $I_{D,h} = 1.30 \left(\frac{B}{H} \right) / \left(17 + \frac{B}{H} \right) \leq 1$ για τις μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρανούς και από τη σχέση $I_{D,h} = 1.285 \left(\frac{B}{H} \right) / \left(17 + \frac{B}{H} \right) \leq 1$ για τις μέγιστες μετακινήσεις. Οι καμπύλες αυτές μπορούν να αποτυπώσουν με μεγάλη ακρίβεια τη σχετική επίδραση του πλάτους στις οριζόντιες μετακινήσεις για μικρούς λόγους B/H , ενώ για μεγαλύτερες τιμές αυτών ($B/H \geq 56.67$ και 59.65 αντίστοιχα) φαίνεται η θεώρηση του $I_{D,h} = 1$ να είναι ικανοποιητική.

Κεφάλαιο 4

Παραμετρική Διερεύνηση

4.1 Γενικά

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 1, κύριος σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης που μπορεί να έχει το πλάτος ενός καναλιού στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h κατά την ρευστοποίηση και την επακόλουθη πλευρική εξάπλωση του εδάφους (στις όχθες). Στο Κεφάλαιο 3 που προηγήθηκε εξετάστηκε και επιβεβαιώθηκε ο μηχανισμός που περιορίζει την ανάπτυξη των μετακινήσεων σε τέτοιου τύπου γεωμετρίες. Αντικείμενο επομένως, του Κεφαλαίου 4 αποτελεί η παραμετρική διερεύνηση του εν λόγω μηχανισμού και η ποιοτική και ποσοτική αποτίμηση της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων στην εκδήλωσή του.

Προκειμένου να εξετασθούν οι παράμετροι σχεδιασμού που επιδρούν στο φαινόμενο, πραγματοποιήθηκαν συνολικά περίπου 200 παραμετρικές μη-γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC (Itasca 2019). Οι παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν εστιάζουν στην επίδραση των εξής παραγόντων: (α) της κλίσης i των πρανών των όχθων, (β) της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της αργιλικής στρώσης C_u , (γ) της σχετικής πυκνότητας D_r της στρώσης της άμμου, (δ) των συνθηκών φόρτισης (αστράγγιστες/στραγγιζόμενες συνθήκες), (ε) του συντελεστή υδατοπερατότητας k , (στ) του αριθμού των κύριων κύκλων φόρτισης N_{cyc} της σεισμικής διέγερσης, (η) του πάχους της υπερκείμενης αργιλικής στρώσης H_{crust} , η οποία στο εξής θα αναφέρεται ως αργιλική κρούστα, (θ) της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης PGA, (ι) της περιόδου της σεισμικής διέγερσης T_{exc} , (κ) του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης της άμμου H_{liq} , και τέλος (λ) του βάθους του καναλιού H .

Ο Πίνακας 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζει συγκεντρωτικά όλες οι παραμετρικές αναλύσεις που εκτελέστηκαν με τις τιμές των παραμέτρων που εφαρμόστηκαν. Οι πρώτες 19 αφορούν σε παραμετρική διερεύνηση μεμονωμένων παραμέτρων. Σημειώνεται ότι οι αναλύσεις αυτές εκτελέστηκαν αλλάζοντας κάθε φορά την τιμή της υπό εξέταση παραμέτρου και διατηρώντας όλες τις

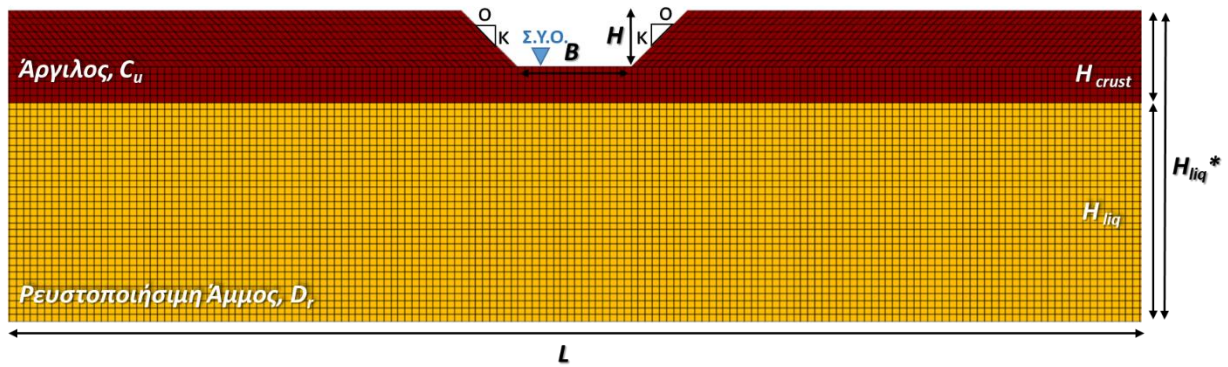
υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές προκειμένου να απομονωθεί η σχετική επίδραση καθεμίας από αυτές.

Οι υπόλοιπες αναλύσεις που ακολούθησαν (20 έως 24), εκτελέστηκαν στο πλαίσιο της περαιτέρω έρευνας για την απόκτηση πληρέστερης εικόνας συμπεριφοράς ορισμένων παραμέτρων που εξετάστηκαν, επιβεβαιώνοντας ταυτόχρονα και την επίδραση που έχουν στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h .

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά παραμετρικών αναλύσεων.

A/A	Slope i	C_u (kPa)	D_r (%)	K (m/s)	N_{cyc}	H_{crust} (m)	PGA (g)	T_{exc} (sec)	H (m)	H_{liq} (m)	H^*_{liq} (m)
1	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.35	4	16	20
2	2:1	30	60	-	10	4	0.5	0.35	4	16	20
3	1:1	45	60	-	10	4	0.5	0.35	4	16	20
4	1:1	30	40	-	10	4	0.5	0.35	4	16	20
5	1:1	30	60	$6.6*10^{-4}$	10	4	0.5	0.35	4	16	20
6	1:1	30	60	$6.6*10^{-5}$	10	4	0.5	0.35	4	16	20
7	1:1	30	60	$6.6*10^{-6}$	10	4	0.5	0.35	4	16	20
8	1:1	30	60	-	15	4	0.5	0.35	4	16	20
9	1:1	30	60	-	10	6	0.5	0.35	4	16	22
10	1:1	30	60	-	10	4	0.25	0.35	4	16	20
11	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.20	4	16	20
12	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.50	4	16	20
13	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.70	4	16	20
14	1:1	30	60	-	10	1	0.5	0.35	1	4	5
15	1:1	30	60	-	10	2	0.5	0.35	2	8	10
16	1:1	30	60	-	10	3	0.5	0.35	3	12	15
17	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.35	4	8	12
18	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.35	4	12	16
19	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.35	4	20	24
20	1:1	30	60	-	10	1	0.5	0.35	1	19	20
21	1:1	30	60	-	10	1	0.25	0.35	1	19	20
22	1:1	30	60	-	10	2	0.5	0.35	2	18	20
23	1:1	30	60	-	10	3	0.5	0.35	3	17	20
24	1:1	30	60	-	10	6	0.5	0.35	4	14	20
25	1:1	30	60	-	10	2	0.5	0.35	4	18	20

Στο **Σχήμα 4.1** παρουσιάζεται ένα σκαρίφημα (τμήμα καννάβου εκτός κλίμακας), όπου σημειώνονται όλες οι παράμετροι που εξετάζονται στη συνέχεια και αφορούν στις εδαφικές ιδιότητες και στη γεωμετρία του προσομοιώματος.



Σχήμα 4.1: Τυπικό αριθμητικό προσομοίωμα και κάρναβος πεπερασμένων διαφορών 2D.

Όλες οι αναλύσεις έγιναν για λόγους $B/H = 2, 4, 10, 25, 50, 80$ και 135 ενώ κατά περίπτωση εκτελέστηκαν αναλύσεις και για επιπλέον τιμές του B/H . Στο **Σχήμα 4.2** έως και το **Σχήμα 4.19** του παρόντος κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των 19 πρώτων παραμετρικών αναλύσεων του **Πίνακα 4.1** σε διαγράμματα «1 προς 1». Συγκεκριμένα, στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζονται οι τιμές του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για τις οριζόντιες μετακινήσεις D_h που προέκυψαν από τη βασική ανάλυση που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3, για διάφορους λόγους B/H . Στον κατακόρυφο άξονα εντοπίζονται ανάλογα οι τιμές του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για τις οριζόντιες μετακινήσεις D_h που προέκυψαν από την εκάστοτε παραμετρική ανάλυση, για τους αντίστοιχους λόγους B/H .

Στα εν λόγω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο για τις μετακινήσεις που εντοπίζονται σε απόσταση $5H$ (όπου H το βάθος του καναλιού) πίσω από τον πόδα του πρανούς όσο και για τις μέγιστες μετακινήσεις.

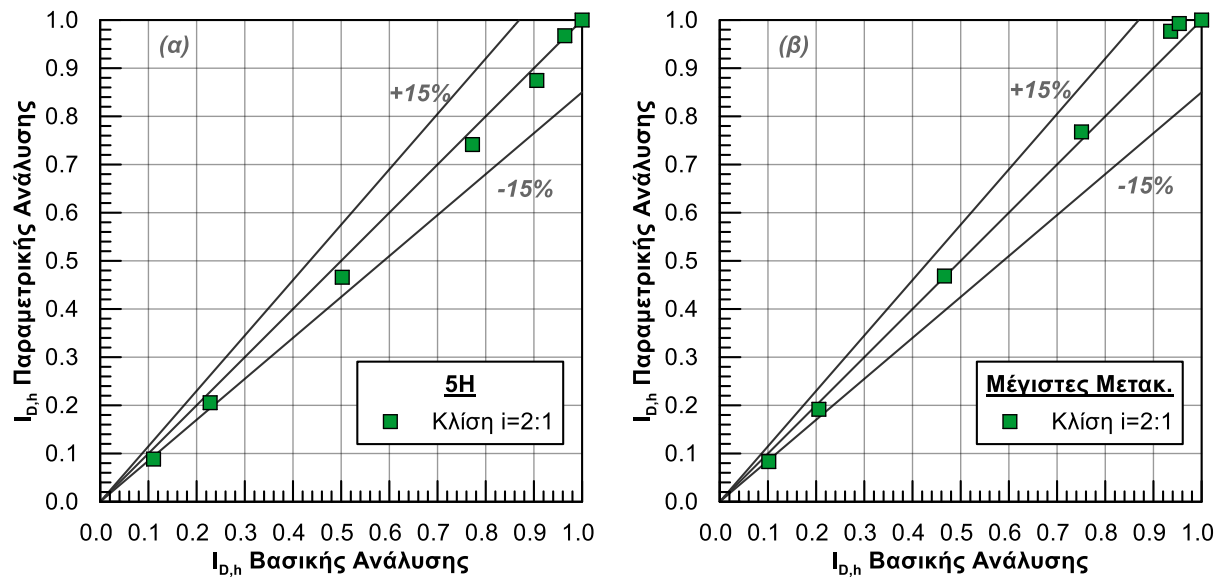
Σημειώνεται ότι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των παραμετρικών αναλύσεων μέσω των συγκεκριμένων διαγραμμάτων εξυπηρετεί εποπτικούς λόγους. Η διχοτόμος των διαγραμμάτων αυτών είναι η ευθεία $y = x$ που αντιπροσωπεύει την βασική ανάλυση. Επομένως εάν τα σημεία της παραμετρικής ανάλυσης βρίσκονται πάνω σε αυτήν, προκύπτει ότι η παράμετρος αυτή πρακτικά δεν έχει επίδραση στις οριζόντιες μετακινήσεις D_h που θα αναπτυχθούν, ενώ αντίθετα απόκλιση από την διαγώνιο σημαίνει αξιόλογη επίδραση. Τα λεπτομερή αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

4.2 Επίδραση της Κλίσης των Πρανών

Η πρώτη παράμετρος που διερευνήθηκε ήταν η κλίση i των πρανών των όχθων. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν 7 αριθμητικές αναλύσεις με σταθερή κλίση $i = 2:1$ (Κατακόρυφη: Οριζόντια), για λόγους τους λόγους $B/H = 2, 4, 10, 25, 50, 80$ και 135 που προαναφέρθηκαν. Όπως και στη βασική ανάλυση, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργλικής κρούστας παρέμεινε ίση με $C_u = 30$ kPa, η σχετική πυκνότητα της ρευστοποιήσιμης άμμου ίση με $D_r = 60\%$, οι συνθήκες αστράγγιστες (Flow Off),

ο αριθμός των κύριων κύκλων φόρτισης ίσος με $N_{cyc} = 10$, η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ίση με $PGA = 0.5g$, η περίοδος της διέγερσης ίση με $T_{exc} = 0.35 \text{ sec}$, το βάθος του καναλιού ίσο με $H = 4 \text{ m}$, το πάχος της αργιλικής κρούστας $H_{cr} = 4 \text{ m}$ και αυτό της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου $H_{liq} = 16 \text{ m}$.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών συνοψίζονται στο **Σχήμα 3.1** σε σύγκριση με τα αποτελέσματα για την βασική ανάλυση, όπου η κλίση είναι $i = 1:1$. Παρατηρείται ότι τα σημεία που προκύπτουν από τις νέες παραμετρικές αναλύσεις αποκλίνουν ελάχιστα από τη διχοτόμο. Επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η κλίση αποτελεί παράμετρο που δεν απαιτείται να εξεταστεί περαιτέρω στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, καθώς φαίνεται να μην επηρεάζει τις οριζόντιες μετακινήσεις D_h . Η απόκλιση των σημείων από την ευθεία που αντιπροσωπεύει την βασική ανάλυση είναι πολύ μικρότερη του $\pm 15\%$.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{d,h}$ (σε απόσταση 5H και μέγιστες) για κλίση πρανών 2:1 συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{d,h}$ της βασικής ανάλυσης (κλίση πρανών 1:1).

Επομένως στη συνέχεια του κεφαλαίου και στην παρουσίαση των υπολοίπων αποτελεσμάτων στο Παράρτημα Α, οι τιμές των λόγων B/H αναφέρονται στο B ως πλάτος του πυθμένα του καναλιού και δεν εξετάζεται περαιτέρω η επίδραση της κλίσης με σύγκριση των λόγων B_{top}/H ή $B_{average}/H$ όπου τα B_{top} και $B_{average}$ αναφέρονται στο πλάτος στο μέσον του καναλιού και στην επιφάνεια αυτού αντίστοιχα, ενσωματώνοντας έτσι την όποια επίδραση της κλίσης, εφόσον αυτή θεωρήθηκε μηδενική.

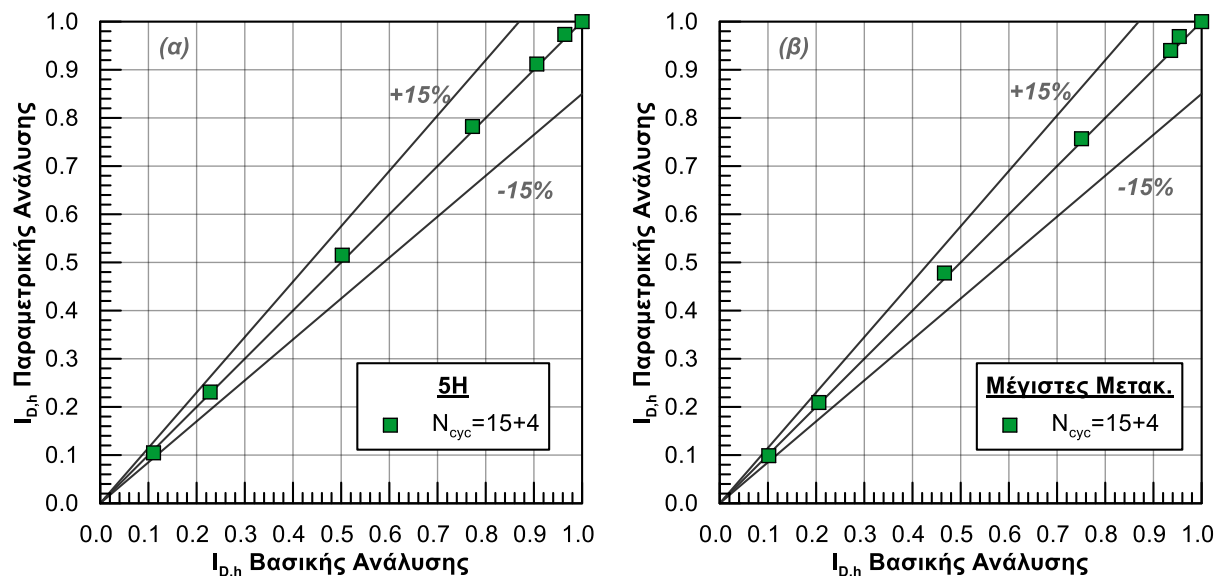
4.3 Επίδραση της Σεισμικής Διέγερσης

4.3.1 Επίδραση των κύριων κύκλων φόρτισης

Στο πλαίσιο της έρευνας για την επιρροή των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης που επιβάλλεται στη βάση του προσομοιώματος στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h ,

εξετάστηκε αρχικά ο αριθμός κύκλων φόρτισης N_{cyc} . Ο έλεγχος έγινε για τιμή της παραμέτρου μεγαλύτερη από αυτή για τη βασική ανάλυση (δηλαδή $N_{cyc} = 10$). Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν 7 αριθμητικές αναλύσεις, για λόγους $B/H = 2, 4, 10, 25, 50, 80$ και 135 , με $N_{cyc} = 15 + 4$, όπου οι 15 κύκλοι είναι κύριοι και οι υπόλοιποι τέσσερις είναι κύκλοι προσαρμογής. Για λόγους αριθμητικής ευστάθειας επιβλήθηκε ένα «ήσυχο» χρονικό διάστημα 0.5 δευτερολέπτων πριν την έναρξη της διέγερσης και ένα αντίστοιχο χρονικό διάστημα 1.65 δευτερολέπτων μετά τη δόνηση, με αποτέλεσμα ο συνολικός χρόνος φόρτισης να ανέλθει στα 8.8 δευτερόλεπτα. Όπως και στη βασική ανάλυση, η κλίση i των πρανών στις όχθες παρέμεινε 1:1, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργλικής κρούστας ίση με $C_u = 30$ kPa, η σχετική πυκνότητα της ρευστοποιήσιμης άμμου ίση με $D_r = 60\%$, οι συνθήκες αστράγγιστες (Flow Off), η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ίση με $PGA = 0.5g$, η περίοδος της διέγερσης ίση με $T_{exc} = 0.35$ sec, το βάθος του καναλιού ίσο με $H = 4$ m, το πάχος της αργλικής κρούστας $H_{cr} = 4$ m και το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου $H_{liq} = 16$ m.

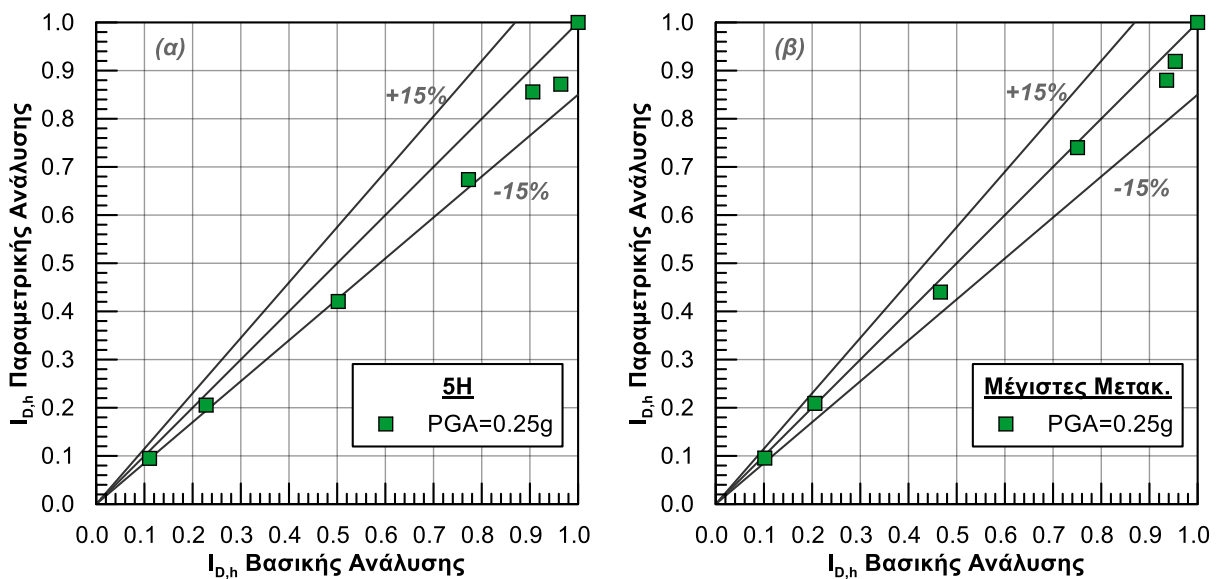
Όπως φαίνεται από το **Σχήμα 4.3** που ακολουθεί, τα σημεία που αντιστοιχούν στις νέες παραμετρικές αναλύσεις βρίσκονται πάνω στην διχοτόμο ευθεία $y = x$, που αντιπροσωπεύει την βασική ανάλυση, τόσο για τις μέγιστες μετακινήσεις όσο και γι' αυτές που εντοπίζονται σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρανούς. Συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί πως ο αριθμός των κύκλων φόρτισης δεν επιδρά στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h , εφόσον πράγματι τα νέα σημεία που σημειώνονται με πράσινο χρώμα αποκλίνουν λιγότερο από $\pm 15\%$ από αυτά που αναλογούν στη βασική ανάλυση (ευθεία $y = x$).



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για 15 κύριους κύκλους φόρτισης συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης (10 κύριοι κύκλοι φόρτισης).

4.3.2 Επίδραση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης

Στη συνέχεια, για την επιρροή των χαρακτηριστικών της σεισμικής διέγερσης στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h , εξετάστηκε η επίδραση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης PGA. Πραγματοποιήθηκαν 7 αριθμητικές αναλύσεις, για λόγους $B/H = 2, 4, 10, 25, 50, 80$ και 135 με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ίση με $PGA = 0.25g$, σημαντικά μικρότερη δηλαδή από αυτήν της βασικής ανάλυσης του Κεφαλαίου 3 ($PGA = 0.50g$). Οι τιμές των υπολοίπων παραμέτρων δεν μεταβλήθηκαν: (κλίση 1:1, $C_u = 30$ kPa, $D_r = 60\%$, αστράγγιστες συνθήκες, $N_{cyc} = 10$, $T_{exc} = 0.35$ sec, $H = 4$ m, $H_{cr} = 4$ m και $H_{liq} = 16$ m). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.4**, όπου αποτυπώνεται η επίδραση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης PGA σε όρους μέγιστων εδαφικών μετακινήσεων αλλά και μετακινήσεων σε απόσταση 5H από τον πόδα του πρανούς. Η επίδραση στις μέγιστες μετακινήσεις παρουσιάζεται μικρότερη από ό,τι στις μετακινήσεις σε απόσταση 5H. Αυτό αποδίδεται στη γενική τάση των μέγιστων μετακινήσεων να δίνουν πιο ομοιόμορφα αποτελέσματα. Επιπλέον, εντοπίζεται μία τάση για μετακίνηση των σημείων των παραμετρικών αναλύσεων κάτω από την διχοτόμο ευθεία $y = x$. Παρόλα αυτά, και στις δύο περιπτώσεις τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων αποκλίνουν λιγότερο από το αποδεκτό όριο $\pm 15\%$ από τις τιμές της βασικής ανάλυσης, ώστε να θεωρείται ότι και η επίδραση του PGA δεν είναι σημαντική.



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{d,h}$ για μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $PGA = 0.25g$ συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{d,h}$ της βασικής ανάλυσης ($PGA = 0.5g$).

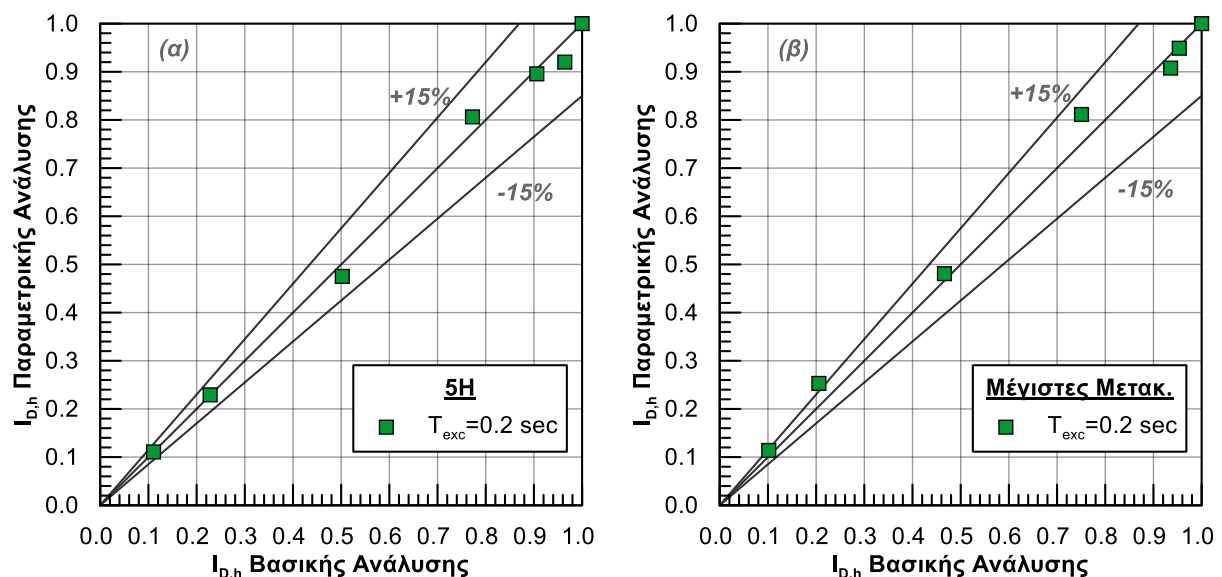
4.3.3 Επίδραση της περιόδου διέγερσης

Τέλος, στο πλαίσιο της διερεύνησης των χαρακτηριστικών της επιβαλλόμενης σεισμικής διέγερσης, εξετάστηκε η επίδραση της περιόδου διέγερσης T_{exc} στην εκδήλωση των οριζόντιων μετακινήσεων D_h . Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν 21 αριθμητικές αναλύσεις, για $B/H = 2$ έως 135 και μεταβλητή

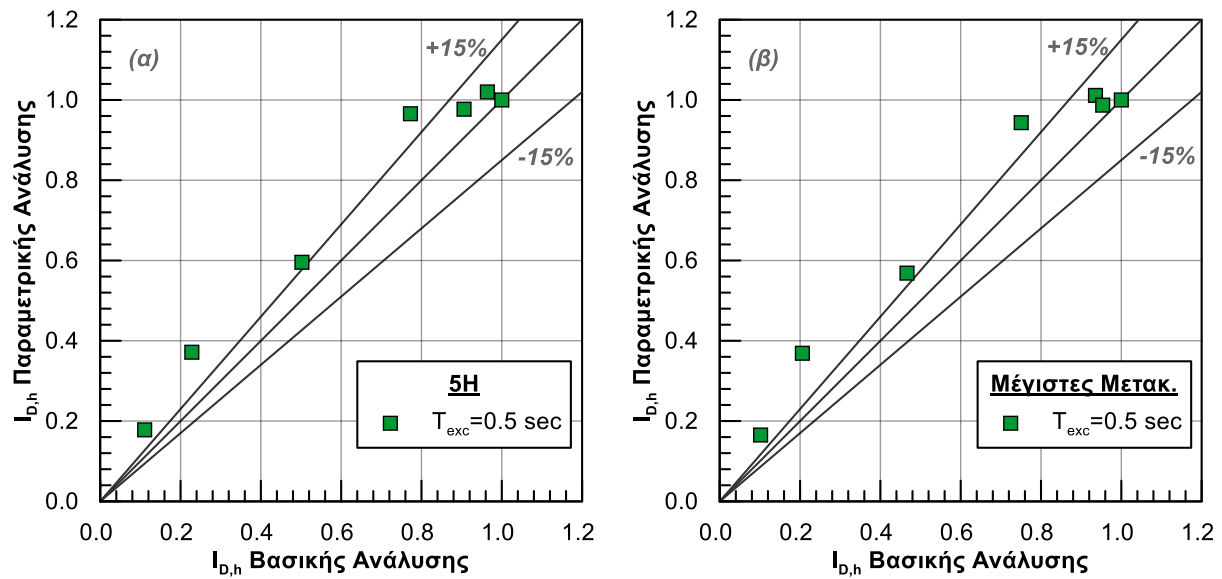
περίοδο διέγερσης $T_{exc} = 0.2 \text{ sec}$, 0.5 sec και 0.7 sec . Σε αυτήν την ομάδα των παραμετρικών αναλύσεων, οι τιμές των υπολοίπων παραμέτρων δεν μεταβλήθηκαν σε σχέση με τη βασική ανάλυση.

Τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων για $T_{exc} = 0.2\text{sec}$, 0.5sec και 0.7sec αξιολογούνται στο **Σχήμα 4.5**, στο **Σχήμα 4.6** και στο **Σχήμα 4.7** αντίστοιχα. Όπως φαίνεται από το **Σχήμα 4.5**, τα σημεία που αντιστοιχούν στις νέες παραμετρικές αναλύσεις για περίοδο διέγερσης $T_{exc} = 0.2 \text{ sec}$ εντοπίζονται διάσπαρτα εντός ενός εύρους απόκλισης από τη διχοτόμο που αντιπροσωπεύει την βασική ανάλυση, $\pm 15\%$. Η εικόνα αυτή επιβεβαιώνεται τόσο για τις μέγιστες μετακινήσεις όσο και γι' αυτές που εντοπίζονται σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρανούς. Για μεγαλύτερες περιόδους διέγερσης όμως, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.6** για περίοδο διέγερσης ίση με $T_{exc} = 0.5 \text{ sec}$ και στο **Σχήμα 4.7** για περίοδο διέγερσης ίση με $T_{exc} = 0.7 \text{ sec}$, τα νέα σημεία που προκύπτουν από τις παραμετρικές αναλύσεις μετακινούνται σημαντικά πάνω από την διχοτόμο που αντιπροσωπεύει τη βασική ανάλυση με την απόκλιση να ξεπερνά το αποδεκτό όριο του $\pm 15\%$ και να αυξάνει αυξανόμενης της περιόδου διέγερσης T_{exc} .

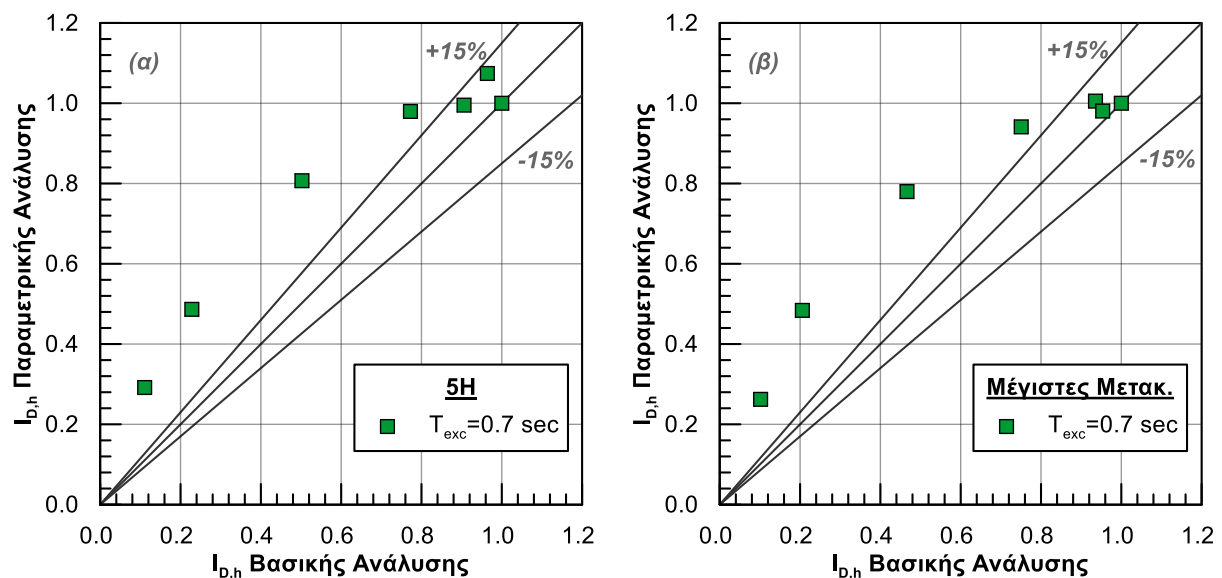
Συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί πως η περίοδος διέγερσης T_{exc} δεν επιδρά στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h , για μικρότερες τιμές από αυτή της βασικής ανάλυσης ($T_{exc} = 0.35 \text{ sec}$) έως την τιμή $T_{exc} = 0.2 \text{ sec}$ που εξετάστηκε εδώ, ενώ για τιμές μεγαλύτερες αυτής και έως την τιμή $T_{exc} = 0.7 \text{ sec}$ που εξετάζεται, η επίδραση είναι σημαντική εφόσον πράγματι τα νέα σημεία που σημειώνονται με πράσινο χρώμα αποκλίνουν περισσότερο από $\pm 15\%$ από αυτά που αναλογούν στη βασική ανάλυση (ευθεία $y = x$).



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για περίοδο διέγερσης $T_{exc} = 0.2 \text{ sec}$ συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης ($T_{exc} = 0.35 \text{ sec}$).



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για περίοδο διέγερσης $T_{exc} = 0.5$ sec συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης ($T_{exc} = 0.35$ sec).



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για περίοδο διέγερσης $T_{exc} = 0.7$ sec συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης ($T_{exc} = 0.35$ sec).

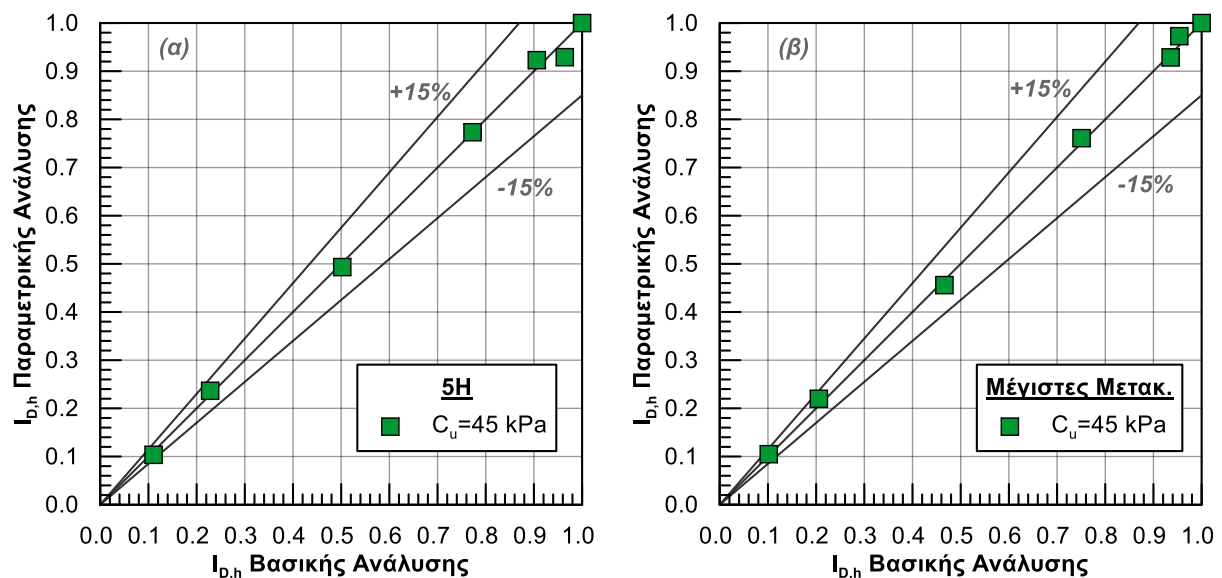
4.4 Επίδραση Εδαφικών Χαρακτηριστικών

4.4.1 Επίδραση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής

Στο πλαίσιο της έρευνας για την πιθανή επιρροή των εδαφικών χαρακτηριστικών του εδαφικού προφίλ (βλ. **Σχήμα 4.1**) στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h , εξετάστηκε αρχικά η επίδραση της τιμής της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής C_u της αργλικής κρούστας. Ο έλεγχος έγινε για τιμή της παραμέτρου κατά 50% μεγαλύτερη από αυτή για τη βασική ανάλυση. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν 7 αριθμητικές αναλύσεις, για λόγους $B/H = 2, 4, 10, 25, 50, 80$ και 135 , με $C_u = 45$ kPa, κλίση i των πρανών στις όχθες ίση με 1:1, σχετική πυκνότητα της ρευστοποιήσιμης άμμου ίση

με $D_r = 60\%$, συνθήκες αστράγγιστες (Flow Off), αριθμό κύκλων φόρτισης ίσο με $N_{cyc} = 10$, μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ίση με $PGA = 0.5g$, περίοδο διέγερσης ίση με $T_{exc} = 0.35 \text{ sec}$, βάθος καναλιού ίσο με $H = 4 \text{ m}$, πάχος αργιλικής κρούστας $H_{cr} = 4 \text{ m}$ και ρευστοποιήσιμης άμμου $H_{liq} = 16 \text{ m}$.

Όπως φαίνεται από το **Σχήμα 4.8** που ακολουθεί, τα σημεία που προέκυψαν από τις νέες παραμετρικές αναλύσεις βρίσκονται με καλή ακρίβεια πάνω στην διχοτόμο ευθεία $y = x$, που αντιπροσωπεύει την βασική ανάλυση, τόσο για τις μέγιστες μετακινήσεις όσο και γι' αυτές που εντοπίζονται σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρανούς. Συνεπώς θεωρήθηκε ότι και η τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής C_u δεν επιδρά στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h , εφόσον τα σημεία των παραμετρικών αναλύσεων αποκλίνουν πολύ λιγότερο από $\pm 15\%$ από τα αποτελέσματα της βασικής ανάλυσης (ευθεία $y = x$).



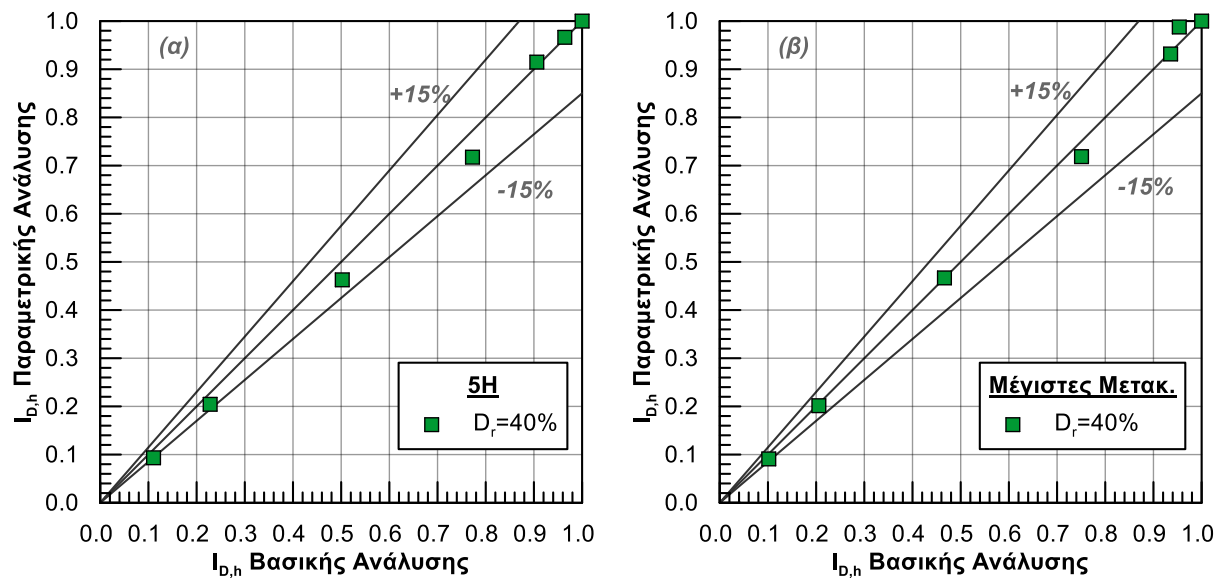
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για αστράγγιστη διατμητική αντοχή $C_u = 45 \text{ kPa}$ συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης ($C_u = 30 \text{ kPa}$).

4.4.2 Επίδραση της σχετικής πυκνότητας

Στη συνέχεια, για την επιρροή των εδαφικών χαρακτηριστικών στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h , εξετάστηκε η επίδραση της σχετικής πυκνότητας D_r της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκαν 7 αριθμητικές αναλύσεις, για λόγους $B/H = 2, 4, 10, 25, 50, 80$ και 135 με τιμή σχετικής πυκνότητας ίση με $D_r = 40\%$, μικρότερη δηλαδή από αυτήν της βασικής ανάλυσης του Κεφαλαίου 3, όπου $D_r = 60\%$. Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων παρέμειναν οι ίδιες όπως και στη βασική ανάλυση.

Τα αποτελέσματα των ανωτέρω παραμετρικών αναλύσεων αποτυπώνονται στο **Σχήμα 4.9**. Παρατηρείται ότι η συμπεριφορά των οριζόντιων μετακινήσεων D_h και συνεπώς των διορθωτικών συντελεστών $I_{D,h}$ δεν διαφοροποιείται στην περίπτωση των παραμετρικών αναλύσεων συγκριτικά με

τα αποτελέσματα που έδωσε η βασική σειρά αναλύσεων του Κεφαλαίου 3. Πράγματι, τα σημεία των παραμετρικών αναλύσεων εντοπίζονται πρακτικά πάνω στη διχοτόμο του διαγράμματος, που αντιπροσωπεύει τη βασική ανάλυση με κάποιες κατά περίπτωση αποκλίσεις που όμως είναι πολύ μικρότερες του $\pm 15\%$. Επομένως θεωρήθηκε ότι η σχετική πυκνότητα D_r της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου δεν επηρεάζει την ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h όσον αφορά στις τιμές του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$.



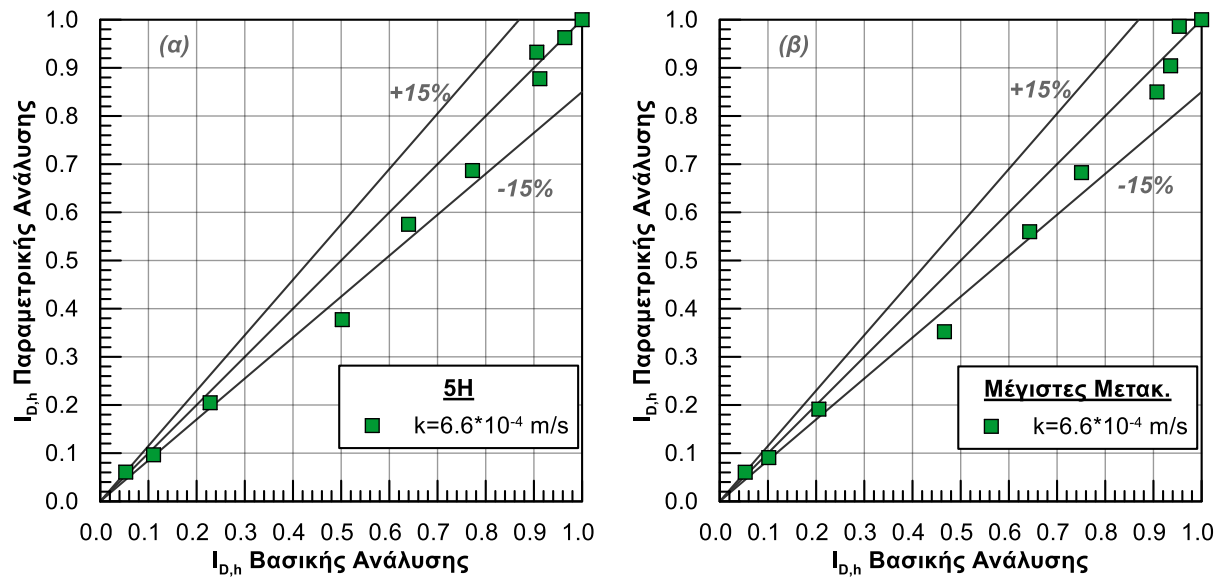
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για σχετική πυκνότητα $D_r = 40\%$ συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης ($D_r = 60\%$).

4.4.3 Επίδραση του συντελεστή υδατοπερατότητας k

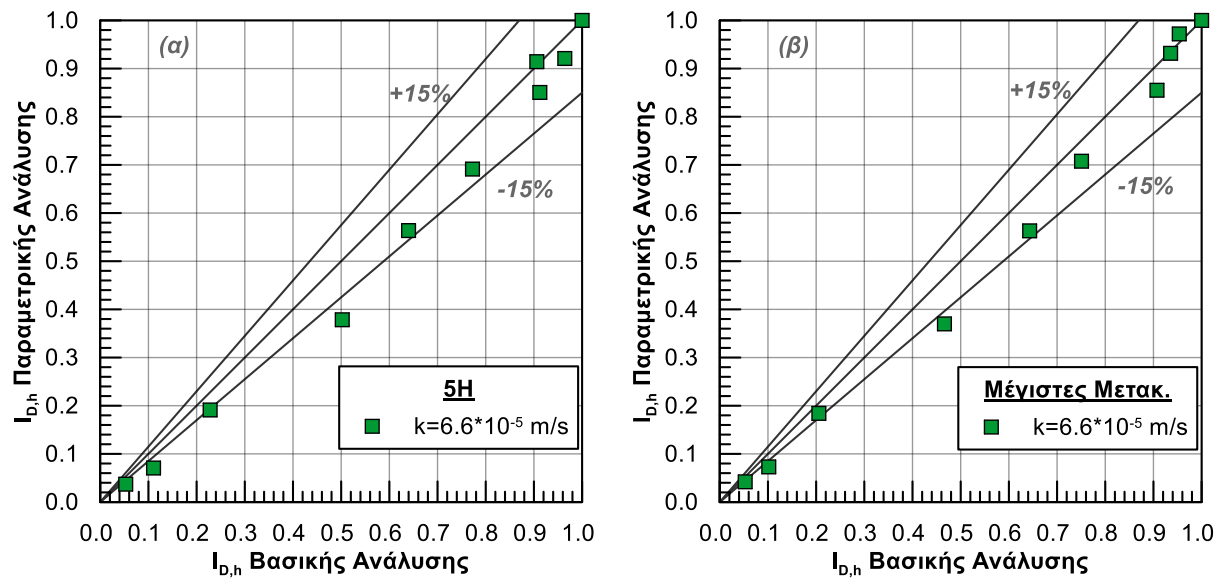
Τέλος, στο πλαίσιο της διερεύνησης της επιρροής των εδαφικών χαρακτηριστικών του προσομοιώματος στην εκδήλωση των οριζόντιων μετακινήσεων D_h εξετάστηκε και η επίδραση της παραμέτρου του συντελεστή υδατοπερατότητας k .

Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν 30 αριθμητικές αναλύσεις (3 σετ των δέκα αναλύσεων με $B/H = 1, 2, 4, 10, 17.5, 25, 40, 50, 80$ και 135) με μη μηδενικό (δηλαδή με flow on) συντελεστή υδατοπερατότητας της στρώσης άμμου, ίσο προς $k = 6.6 \times 10^{-4}$ m/s, 6.6×10^{-5} m/s και 6.6×10^{-6} m/s. Κατ' αντιστοιχίαν με τα προηγούμενα και σε αυτές τις ομάδες αριθμητικών αναλύσεων, οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων παρέμειναν σταθερές σε σχέση με τη βασική ανάλυση.

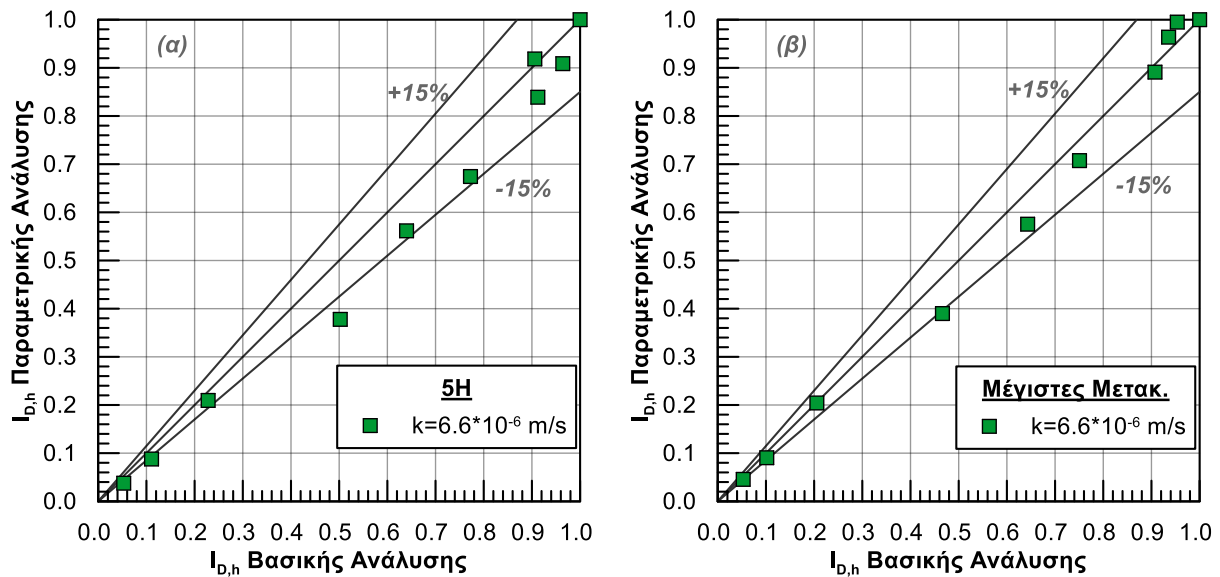
Τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων αξιολογούνται στα Σχήματα που ακολουθούν για τιμές του συντελεστή υδατοπερατότητας $k = 6.6 \times 10^{-4}$ m/s (Σχήμα 4.10), $k = 6.6 \times 10^{-5}$ m/s (Σχήμα 4.11) και $k = 6.6 \times 10^{-6}$ m/s (Σχήμα 4.12) αντίστοιχα.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για συντελεστή υδατοπερατότητας $k = 6.6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης ($k \rightarrow 0$).



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για συντελεστή υδατοπερατότητας $k = 6.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης ($k \rightarrow 0$).



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για συντελεστή υδατοπερατότητας $k = 6.6 \times 10^{-6}$ m/s συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης ($k \rightarrow 0$).

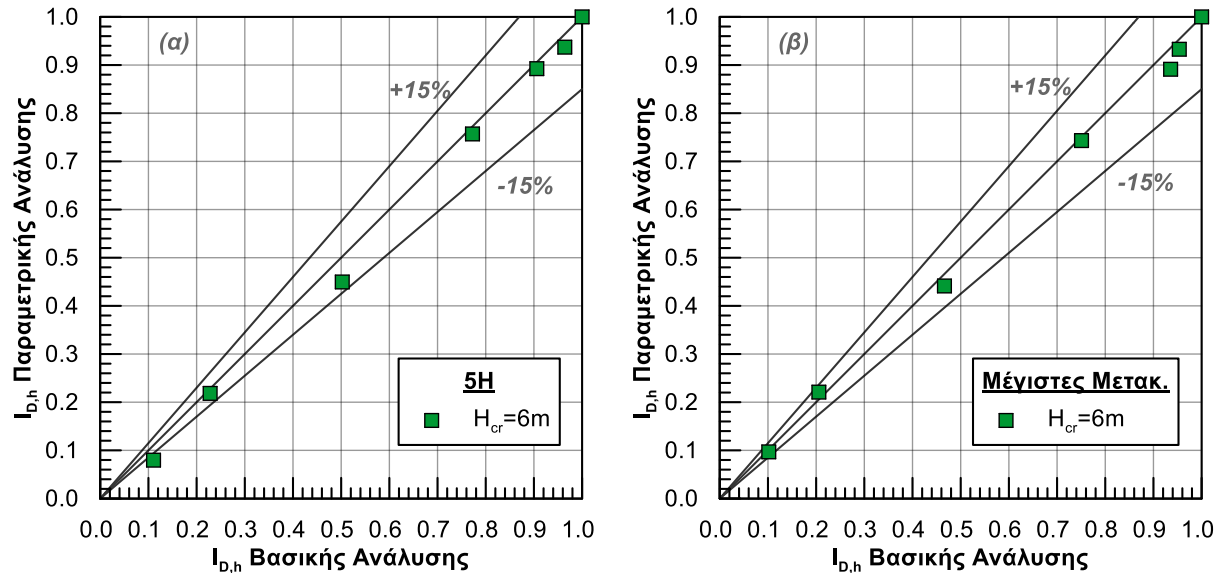
Όπως φαίνεται με τη σταδιακή αύξηση του συντελεστή υδατοπερατότητας k κατά μία τάξη μεγέθους σε κάθε ομάδα αναλύσεων που εκτελέστηκε, τα νέα σημεία που προέκυψαν από τις παραμετρικές αναλύσεις αντιστοιχούν σε μικρότερο διορθωτικό συντελεστή $I_{D,h}$ από αυτόν της βασικής ανάλυσης του Κεφαλαίου 3. Και στις τρεις περιπτώσεις παρουσιάζεται συστηματική απόκλιση, περίπου στο όριο του $\pm 15\%$ από την ευθεία $y = x$ του διαγράμματος, που αντιπροσωπεύει τη βασική ανάλυση. Είναι ενδιαφέρον ότι απλά και μόνο η μετάβαση από αστράγγιστες συνθήκες (flow off) σε σταρραγγιζόμενες (flow on) επέφερε ενιαία μείωση 15% στις τιμές του $I_{D,h}$, ανεξάρτητα από την τιμή του B/H και την τιμή του συντελεστή υδατοπερατότητας k που εξετάστηκε.

4.5 Επίδραση του Πάχους της Αργιλικής Κρούστας

Ο επόμενος παράγοντας που διερευνήθηκε είναι το πάχος H_{cr} της αργιλικής κρούστας. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν 7 αριθμητικές αναλύσεις, για 7 διαφορετικούς λόγους $B/H = 2, 4, 10, 25, 50, 80$ και 135 με κοινό πάχος αργιλικής κρούστας $H_{cr} = 6$ m. Όπως και στη βασική ανάλυση, σε αυτήν την ομάδα αριθμητικών αναλύσεων οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων δεν μεταβλήθηκε (δηλαδή κλίση 1:1, $C_u = 30$ kPa, $D_r = 60\%$, αστράγγιστες συνθήκες, $N_{cyc} = 10$, $PGA = 0.5g$, $T_{exc} = 0.35$ sec, $H = 4$ m και $H_{liq} = 16$ m). Επομένως, το συνολικό πάχος του εδαφικού προφίλ στις ανωτέρω αναλύσεις αυξήθηκε σε $H_{liq}^* = 22$ m, από $H_{liq}^* = 20$ m στην βασική ανάλυση, αλλά ο λόγος H_{liq}/H παρέμεινε σταθερός.

Στο **Σχήμα 4.13** που ακολουθεί αξιολογούνται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων με $H_{cr} = 6$ m. Παρατηρούμε ότι τα νέα σημεία που προέκυψαν βρίσκονται πρακτικά επί της διαγωνίου $y = x$ του διαγράμματος που αντιπροσωπεύει τη βασική ανάλυση, εντός του εύρους $\pm 15\%$ που έχει οριστεί

στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ως όριο για την επίδραση ή όχι κάποιας παραμέτρου στην τιμή του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$. Συνεπώς, θεωρήθηκε ότι η επιρροή του πάχους H_{cr} της αργλικής κρούστας δεν είναι υπολογίσιμη και επομένως δεν θα εξεταστεί περαιτέρω.



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για πάχος αργλικής κρούστας $H_{cr} = 6$ m συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης ($H_{cr} = 4$ m).

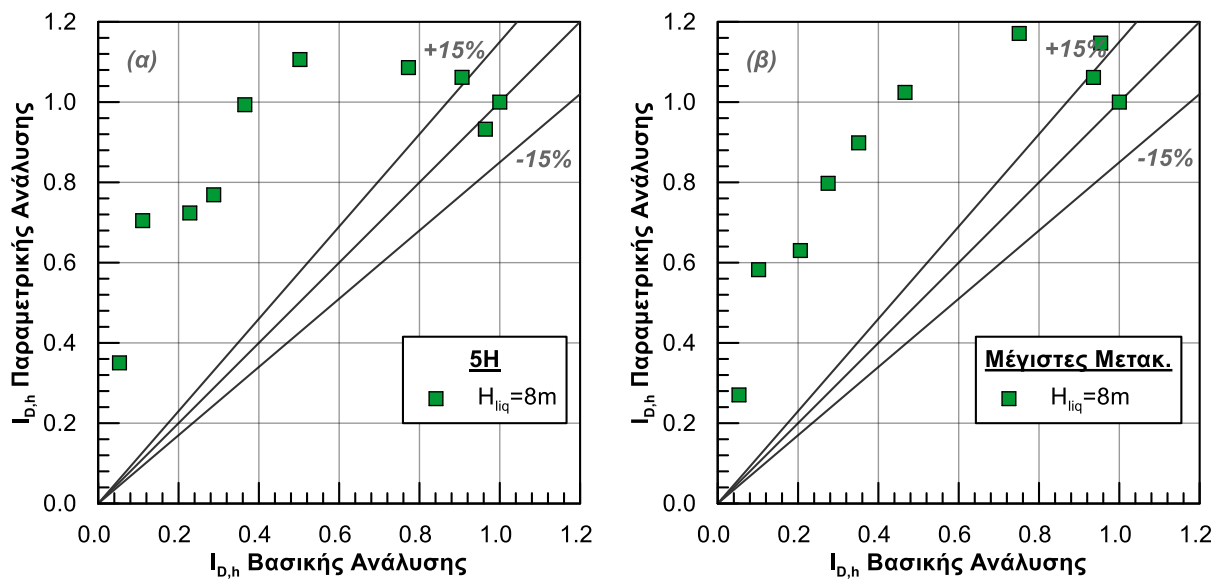
4.6 Επίδραση του Πάχους της Ρευστοποιήσιμης Στρώσης

Επόμενη παράμετρος για την οποία εξετάστηκε η επίδρασή της στην απόκριση του ρευστοποιήσιμου εδάφους και των συνεπαγόμενων οριζόντιων μετακινήσεων D_h λόγω πλευρικής εξάπλωσης, ήταν το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_{liq} . Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν 30 αριθμητικές αναλύσεις (3 ομάδες των 10 αναλύσεων με $B/H = 1, 2, 4, 5, 7, 10, 25, 50, 80$ και 135) με σταθερή τιμή όλων των παραμέτρων πλην του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου που διέφερε σε κάθε ομάδα αναλύσεων. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν μεγαλύτερα και μικρότερα πάχη από αυτό που είχε θεωρηθεί στη βασική σειρά αναλύσεων ($H_{liq} = 16$ m), ίσα με $H_{liq} = 8$ m, $H_{liq} = 12$ m και $H_{liq} = 20$ m.

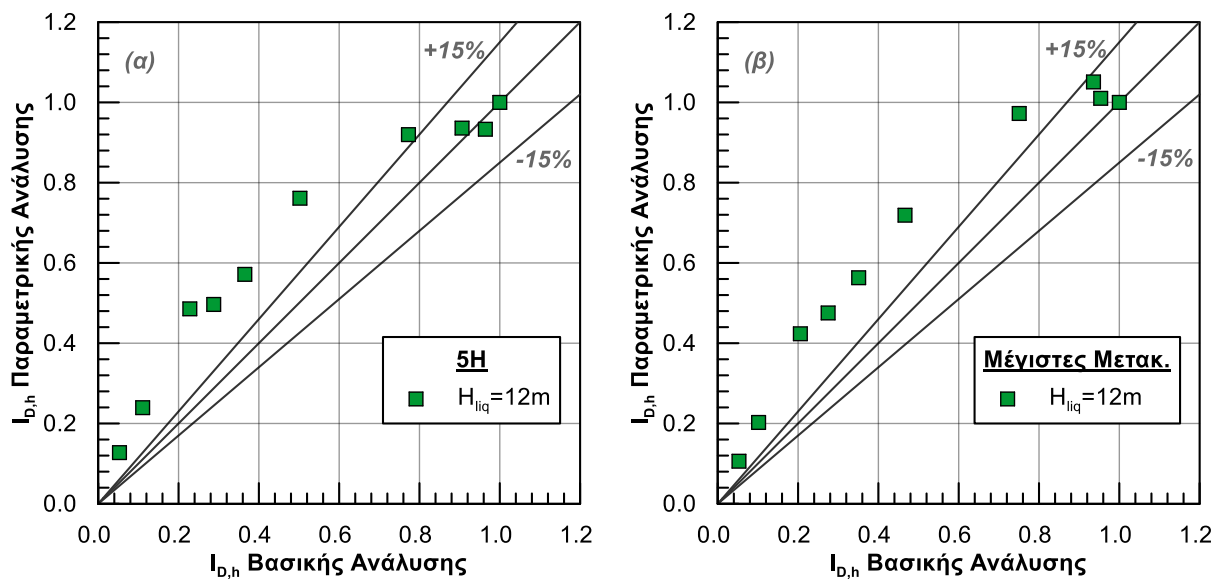
Στα παρακάτω Σχήματα αξιολογούνται τα αποτελέσματα των παραπάνω παραμετρικών αναλύσεων για πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης $H_{liq} = 8$ m (Σχήμα 4.14), $H_{liq} = 12$ m (Σχήμα 4.15) και $H_{liq} = 20$ m (Σχήμα 4.16) αντίστοιχα. Παρατηρείται αύξηση της τιμής του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ συγκριτικά με τις τιμές της βασικής ανάλυσης του Κεφαλαίου 3 στις περιπτώσεις όπου το πάχος H_{liq} μειώθηκε, ενώ στις παραμετρικές αναλύσεις όπου το πάχος H_{liq} αυξήθηκε, οι τιμές του διορθωτικού συντελεστή μειώθηκαν σε σχέση με τις αντίστοιχες της βασικής ανάλυσης.

Και στις τρεις περιπτώσεις η απόκλιση είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από το αποδεκτό όριο του $\pm 15\%$ από την ευθεία $y = x$ του διαγράμματος, που αντιπροσωπεύει τη βασική ανάλυση. Συμπεραίνουμε

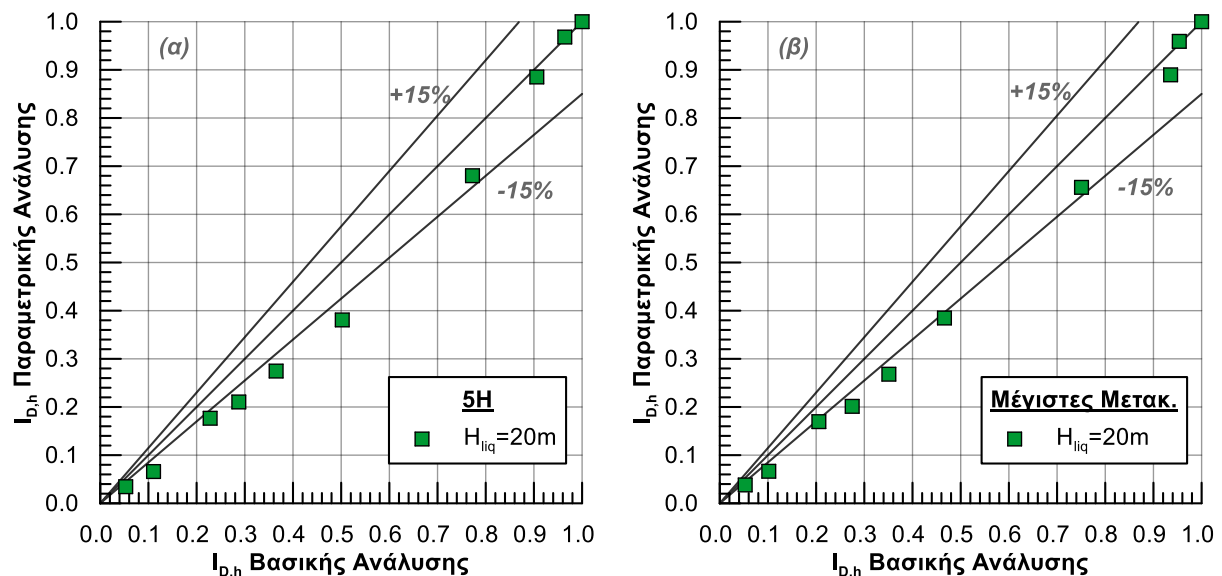
επομένως ότι για ολόκληρο το εύρος των τιμών του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου που εξετάστηκε, η παράμετρος έχει σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h λόγω πλευρικής εξάπλωσης. Η επίδραση μάλιστα παρουσιάζεται εντονότερη για μικρότερες τιμές του λόγου B/H . Επιπλέον παρατηρούμε ότι για την περίπτωση όπου το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης H_{liq} αυξήθηκε σε $H_{liq} = 20$ m και μάλιστα ισόποσα με την περίπτωση όπου μειώθηκε σε $H_{liq} = 12$ m (κατά 4 m σε σχέση με αυτό της βασικής ανάλυσης), η επίδραση που σημειώθηκε στον διορθωτικό συντελεστή $I_{D,h}$ στην πρώτη περίπτωση είναι εμφανώς μικρότερη.



Σχήμα 4.14: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για πάχος ρευστοποιήσιμης άμμου $H_{liq} = 8$ m συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης ($H_{liq} = 16$ m).



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για πάχος ρευστοποιήσιμης άμμου $H_{liq} = 12$ m συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης ($H_{liq} = 16$ m).



Σχήμα 4.16: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για πάχος ρευστοποιήσιμης άμμου $H_{liq} = 20$ m συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης ($H_{liq} = 16$ m).

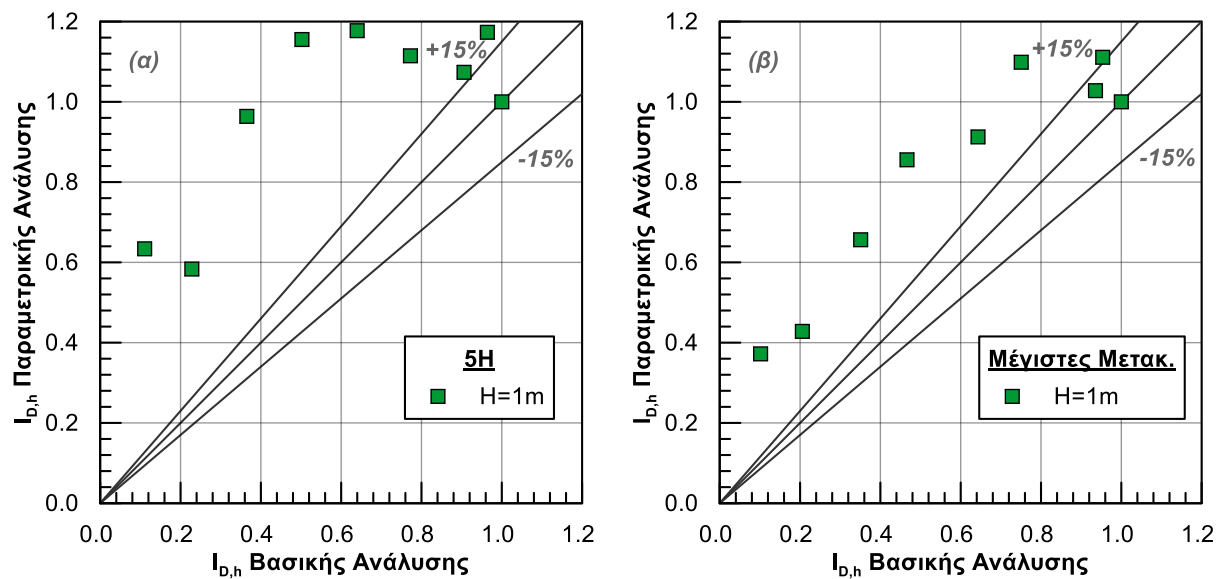
4.7 Επίδραση του Βάθους του Καναλιού

Η τελευταία παράμετρος η επίδραση της οποίας εξετάστηκε στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, είναι το βάθος H του καναλιού. Πραγματοποιήθηκαν 3 ομάδες αριθμητικών αναλύσεων για $H = 1, 2$ και 3 m, με εννέα αναλύσεις ανά ομάδα, για τιμές του λόγου $B/H = 2, 4, 7, 10, 17.5, 25, 50, 80$ και 135 .

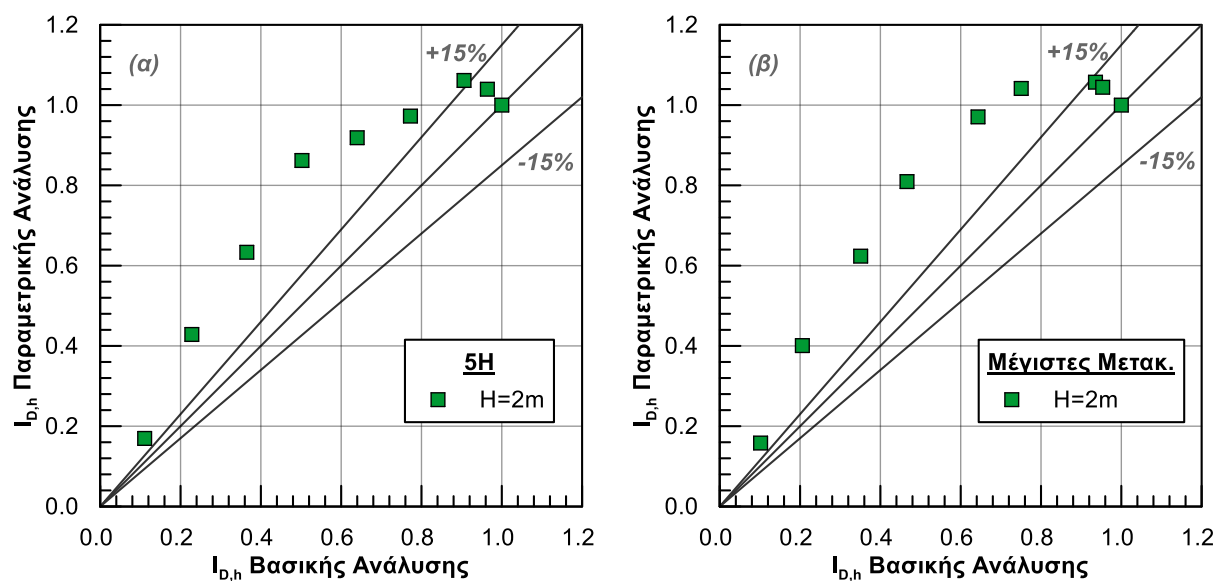
Όπως και στη βασική ανάλυση, η κλίση των πρανών στις όχθες παρέμεινε ίση με 1:1, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργλικής κρούστας ίση με $C_u = 30$ kPa, η σχετική πυκνότητα της ρευστοποιήσιμης άμμου ίση με $D_r = 60\%$, οι συνθήκες αστράγγιστες (Flow Off), ο αριθμός των κύριων κύκλων φόρτισης ίσος με $N_{cyc} = 10$, η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ίση με $PGA = 0.5g$ και η περίοδος της διέγερσης ίση με $T_{exc} = 0.35$ sec. Το πάχος της αργλικής κρούστας H_{cr} θεωρήθηκε ίσο με το βάθος του καναλιού H ($H_{cr} = H$) και το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου H_{liq} ίσο με το τετραπλάσιο του βάθους του καναλιού H ($H_{liq} = 4 \cdot H$), αναλογίες που ισχύουν και για την βασική σειρά αναλύσεων. Στις συγκεκριμένες αναλύσεις λοιπόν οι διαστάσεις του προσομοιώματος που σχεδιάστηκε αποτέλεσαν σμίκρυνση του αρχικού προσομοιώματος της βασικής ανάλυσης, κατά 4, 2 και 1.33 φορές. Επομένως και το συνολικό πάχος του εδαφικού προφίλ στις ανωτέρω αναλύσεις λήφθηκε ίσο με $H_{liq}^* = 5$ m, $H_{liq}^* = 10$ m και $H_{liq}^* = 15$ m προκειμένου ο κάρναβος που χρησιμοποιήθηκε να έχει όμοια γεωμετρία σε κάθε ομάδα αναλύσεων.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.17**, στο **Σχήμα 4.18** και στο **Σχήμα 4.19** που παρατίθενται στη συνέχεια. Από αυτά προκύπτει ότι όσο μικρότερο είναι το βάθος του καναλιού κι επομένως και οι διαστάσεις του προσομοιώματος, οι τιμές του διορθωτικού

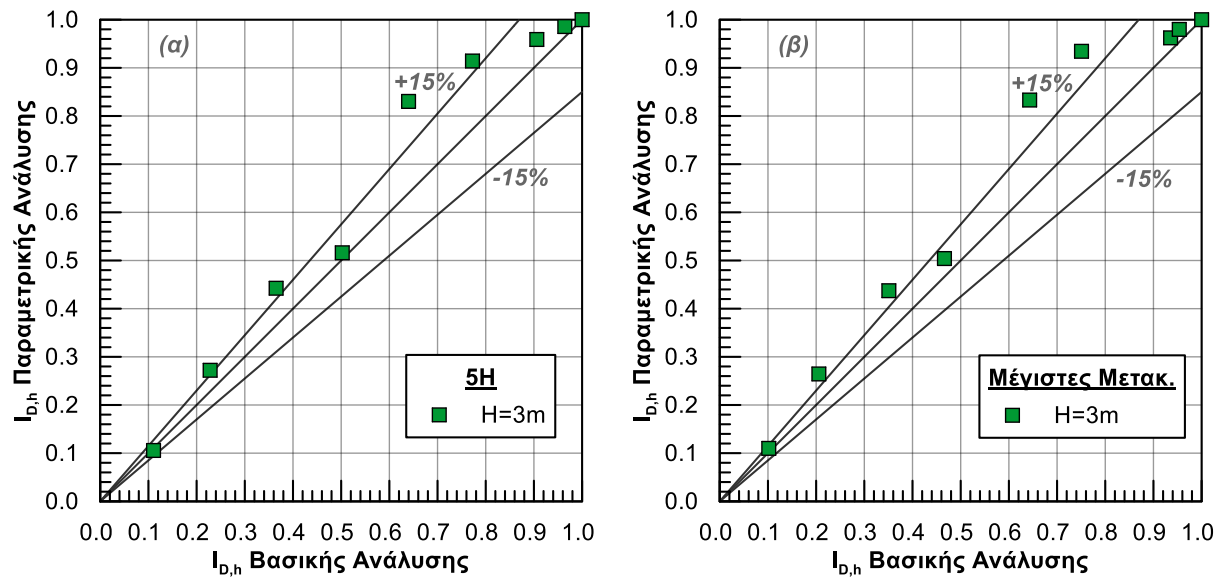
συντελεστή $I_{D,h}$ αυξάνονται συγκριτικά με τις τιμές της βασικής ανάλυσης του Κεφαλαίου 3. Και για τις τρεις περιπτώσεις παρουσιάζεται συστηματική απόκλιση, κατά πολύ μεγαλύτερη από το όριο του $\pm 15\%$ από την ευθεία $y = x$ του διαγράμματος, που αντιπροσωπεύει τη βασική ανάλυση. Η απόκλιση βέβαια βαίνει μειούμενη όσο πλησιάζουμε την τιμή του βάθους καναλιού και τις διαστάσεις της βασικής ανάλυσης και εγγίζει το αποδεκτό όριο του $+15\%$ για $H = 3$ m. Συμπεραίνουμε επομένως ότι για ολόκληρο το εύρος των τιμών του βάθους καναλιού που εξετάστηκε, η παράμετρος αυτή έχει σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h λόγω πλευρικής εξάπλωσης, η οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη.



Σχήμα 4.17: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για βάθος καναλιού $H = 1$ m συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης ($H = 4$ m).



Σχήμα 4.18: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για βάθος καναλιού $H = 2$ m συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης ($H = 4$ m).



Σχήμα 4.19: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για βάθος καναλιού $H = 3 \text{ m}$ συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης ($H = 4 \text{ m}$).

4.8 Πρόσθετες Παραμετρικές Αναλύσεις

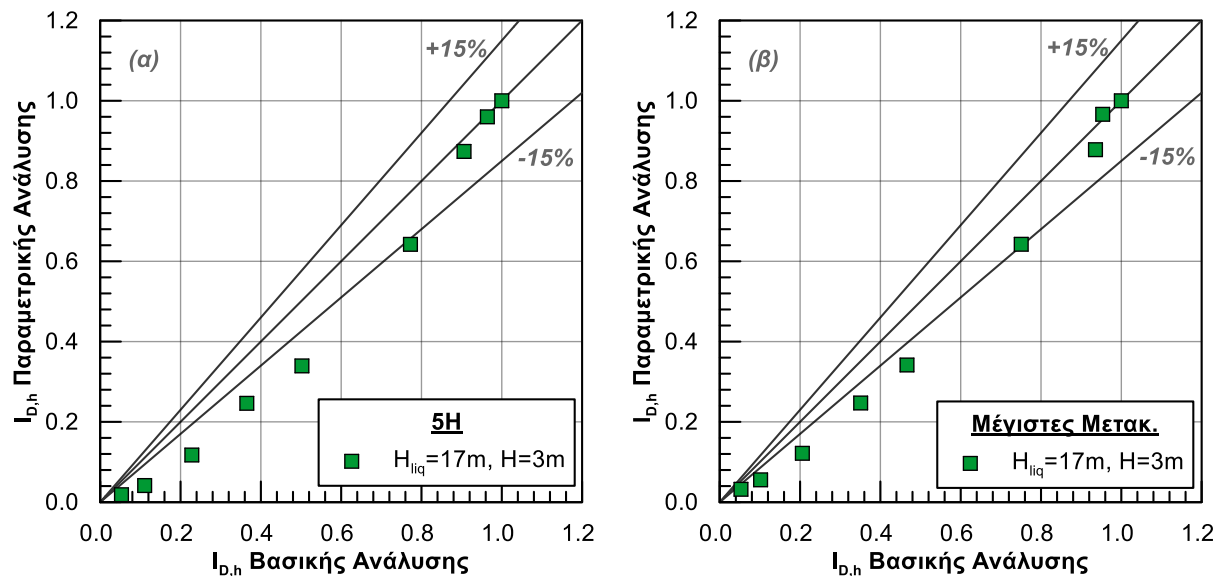
4.8.1 Συνδυαστική επίδραση πάχους ρευστοποιήσιμης στρώσης και βάθους καναλιού

Για τον συστηματικότερο έλεγχο της επίδρασης του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου H_{liq} και του βάθους του καναλιού H εκτελέστηκαν επιπλέον 3 ομάδες των 9 αναλύσεων με $B/H = 1, 2, 4, 7, 10, 25, 50, 80$ και 135 όπου μεταβλήθηκαν και οι δύο παράμετροι συνδυαστικά $H = 1 - 3 \text{ m}$ & $H_{liq} = 19 - 17 \text{ m}$ αντίστοιχα) έτσι ώστε $H^*_{liq} = H + H_{liq} = 20 \text{ m}$ (σταθερό). Το πάχος της αργλικής κρούστας λήφθηκε ίσο με το βάθος του καναλιού ($H_{cr} = H$). Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρήθηκαν ίδιες με αυτές της βασικής ανάλυσης, ήτοι κλίση πρανών $i = 1:1$, $C_u = 30 \text{ kPa}$, $D_r = 60\%$, αστράγγιστες συνθήκες (Flow Off), $N_{cyc} = 10$, $PGA = 0.5g$, $T_{exc} = 0.35 \text{ sec}$.

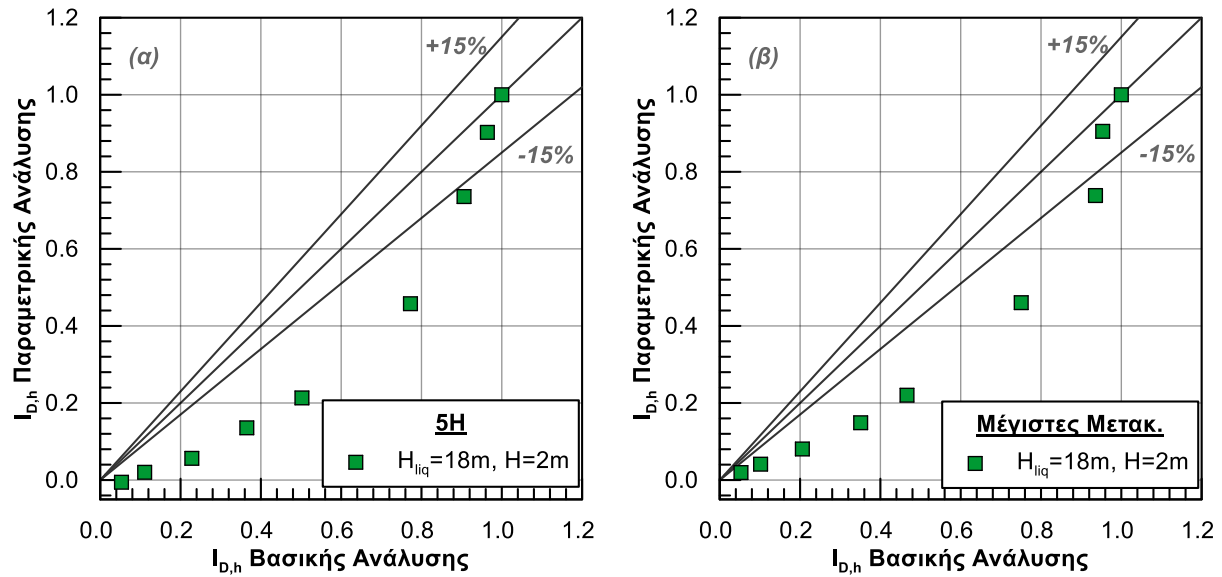
Τα αποτελέσματα των εν λόγω παραμετρικών αναλύσεων αξιολογούνται στο **Σχήμα 4.20** έως και το **Σχήμα 4.22** που ακολουθούν. Και για τις 3 ομάδες αναλύσεων οι τιμές των νέων σημείων είναι μικρότερες συγκριτικά με αυτές που αναλογούν στην βασική ανάλυση (ευθεία $y = x$). Ήδη από την ανάλυση για $H_{liq} = 17 \text{ m}$ και $H = H_{cr} = 3 \text{ m}$ η διαφορά φαίνεται να είναι σημαντική καθώς τα σημεία αποκλίνουν περισσότερο από -15% . Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι για τις αναλύσεις με $H_{liq} = 19 \text{ m}$ και $H = H_{cr} = 1 \text{ m}$ και με $H_{liq} = 18 \text{ m}$ και $H = H_{cr} = 2 \text{ m}$, τα σημεία των παραμετρικών αναλύσεων δεν προσεγγίζονται πλέον από μια ευθεία γραμμή, όπως σε όλες τις παραμετρικές αναλύσεις που εξετάστηκαν έως τώρα, αλλά ακολουθούν μια σχεδόν εκθετική τροχιά. Επιπλέον, εμφανίζονται και μικρές μεν αλλά αρνητικές τιμές του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ οι οποίες δεν μπορούν να έχουν φυσικό νόημα. Οι εν λόγω αρνητικές τιμές υποδεικνύουν αλλαγή των μηχανισμών που διέπουν την πλευρική εξάπλωση του εδάφους στις όχθες των καναλιών. Πιο συγκεκριμένα, προσεκτική θεώρηση

της μετατόπισης των πρανών στο τέλος της δόνησης (**Σχήμα 4.23α**) έδειξε ότι για τόσο επιφανειακές αργιλικές κρούστες και για την ισχυρή δόνηση που εξετάστηκε, δεν προλαβαίνουν να αναπτυχθούν 2 «ανταγωνιστικοί» κύκλοι αστοχίας αλλά μόνο ένας ο οποίος καθορίζει όλες τις μετακινήσεις και τις επιβάλλει προς μία μόνο κατεύθυνση.

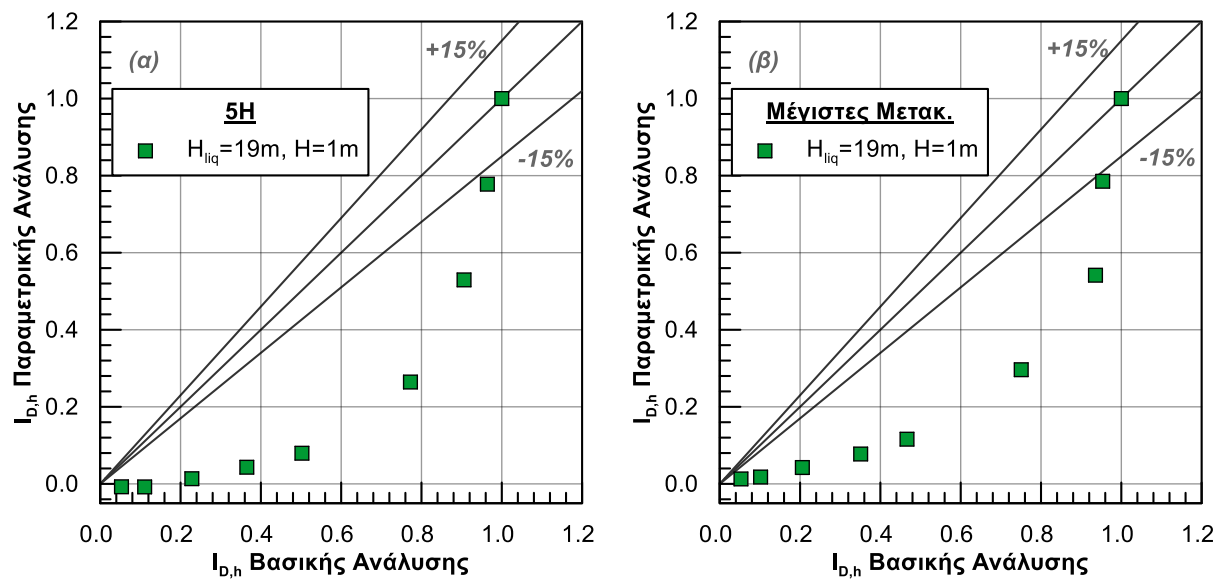
Για το λόγο αυτό προτείνεται επιπλέον μελέτη και αναλύσεις πέραν της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Προς αυτή την κατεύθυνση, εκτελέστηκε ενδεικτικά μία επιπλέον σειρά αναλύσεων για $H_{liq} = 19$ m και $H = H_{cr} = 1$ m ως άνω, με μόνη διαφορά στην τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, που μειώθηκε σε $PGA = 0.25g$. Σε αυτή την περίπτωση αναπτύχθηκαν δύο «ανταγωνιστικοί» κύκλοι αστοχίας στις όχθες του καναλιού (**Σχήμα 4.23β**). Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης αξιολογούνται στο **Σχήμα 4.25**, όπου η μορφή της καμπύλης των σημείων παραμένει όμοια, αλλά οι αρνητικές τιμές περιορίζονται καθώς πλέον προλαβαίνουν να αναπτυχθούν και οι δύο κύκλοι αστοχίας και στις δύο όχθες του καναλιού.



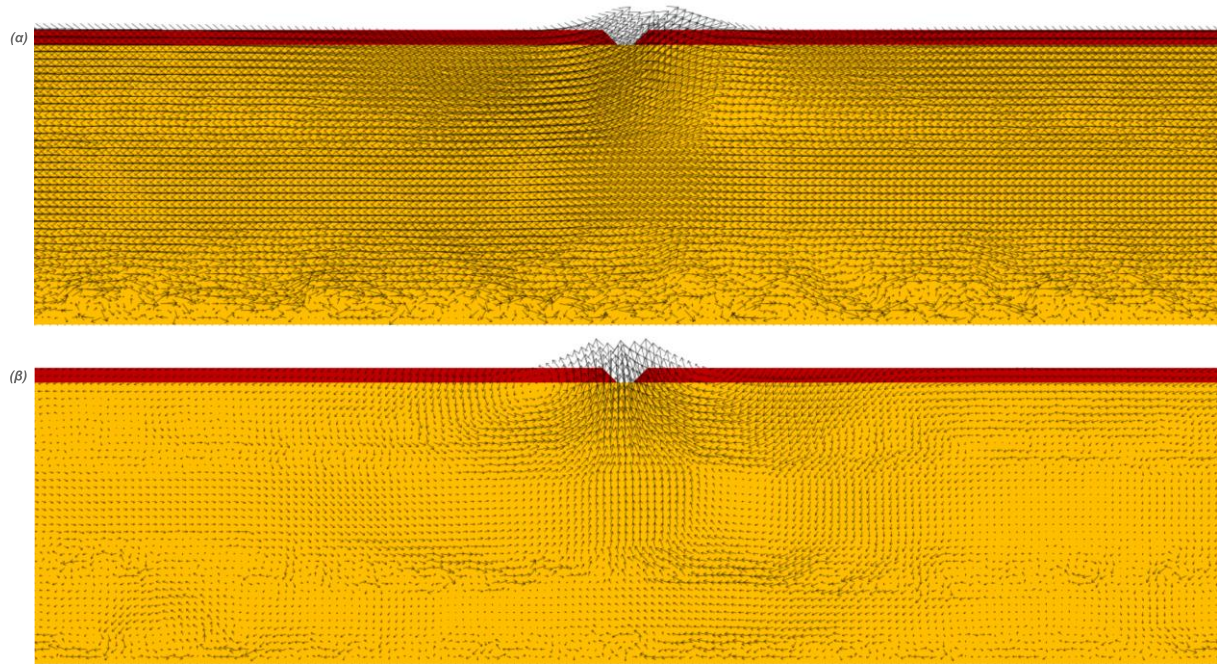
Σχήμα 4.20: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου $H_{liq} = 17$ m, βάθος καναλιού ίσο με πάχος αργιλικής κρούστας $H = H_{cr} = 3$ m και με $H_{liq}^* = 20$ m, συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης.



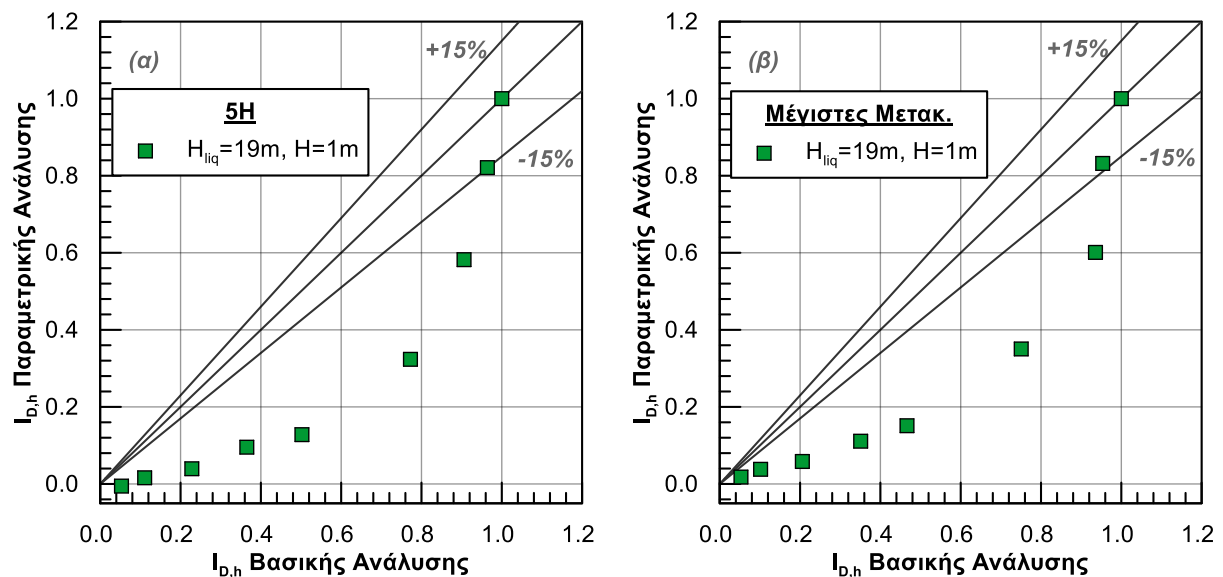
Σχήμα 4.21: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου $H_{liq} = 18$ m, βάθος καναλιού ίσο με πάχος αργιλικής κρούστας $H = H_{cr} = 2$ m και με $H_{liq}^* = 20$ m, συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης.



Σχήμα 4.22: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου $H_{liq} = 19$ m, βάθος καναλιού ίσο με πάχος αργιλικής κρούστας $H = H_{cr} = 1$ m και με $H_{liq}^* = 20$ m, συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης.



Σχήμα 4.23: Διανύσματα των μετακινήσεων για την κρίσιμη περιοχή του καννάβου για πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου $H_{liq} = 19$ m, βάθος καναλιού ίσο με πάχος αργιλικής κρούστας $H = H_{cr} = 1$ m, $H_{liq}^* = 20$ m και $B/H = 1$ (α) για $PGA = 0.50g$ όπου αναπτύσσεται μόνο ένας κύκλος αστοχίας και (β) για $PGA = 0.25g$ όπου αναπτύσσονται δύο κύκλοι αστοχίας.

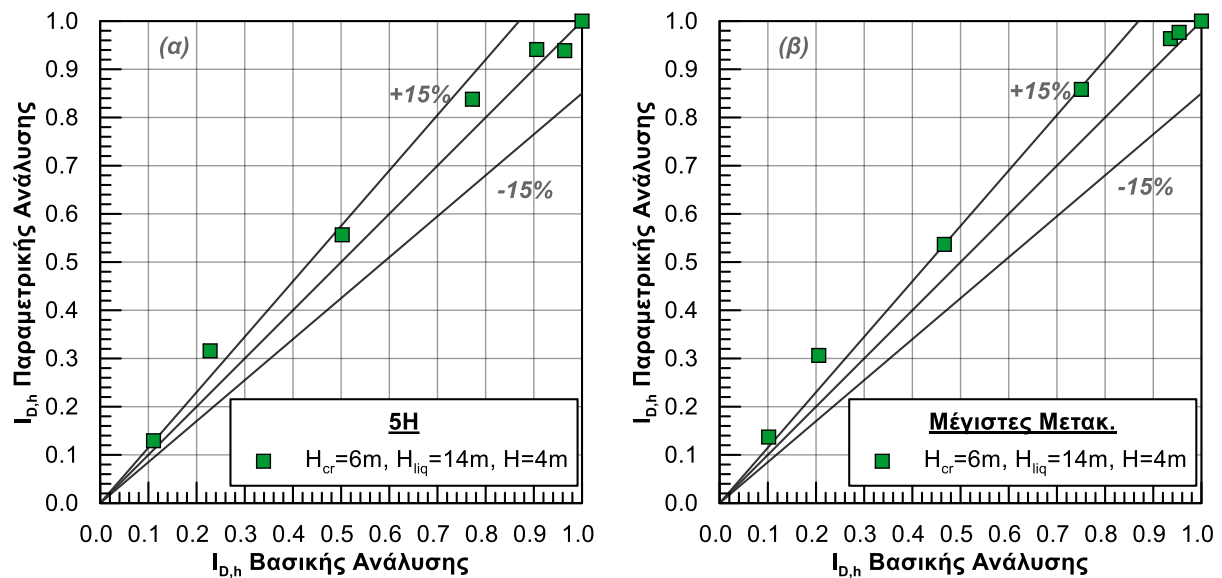


Σχήμα 4.24: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{d,h}$ για πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου $H_{liq} = 19$ m, βάθος καναλιού ίσο με πάχος αργιλικής κρούστας $H = H_{cr} = 1$ m, $H_{liq}^* = 20$ m και $PGA = 0.25g$, συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{d,h}$ της βασικής ανάλυσης.

4.8.2 Επίδραση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου και της αργιλικής κρούστας

Στο πλαίσιο του ελέγχου της επίδρασης που μπορεί να έχει το πάχος της αργιλικής κρούστας H_{cr} στις οριζόντιες μετακινήσεις D_h , εκτελέστηκαν συμπληρωματικά δύο επιπλέον ομάδες αναλύσεων.

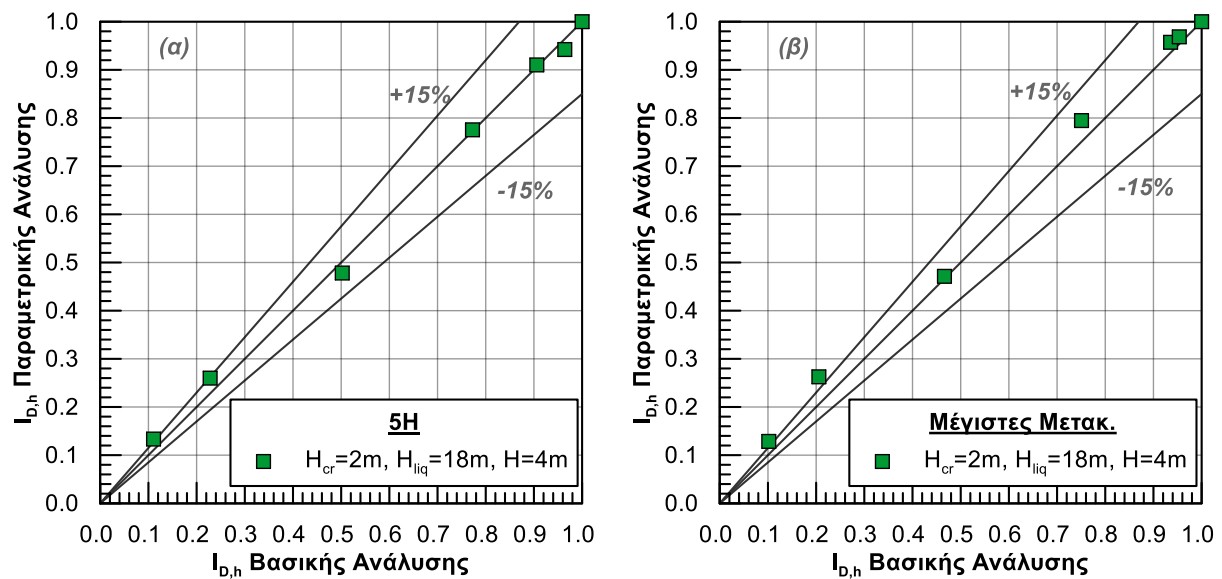
Για την πρώτη ομάδα, έγιναν 7 αναλύσεις για λόγους $B/H = 2, 4, 10, 25, 50, 80$ και 135 , τα χαρακτηριστικά των οποίων ήταν ίδια με όσα αναφέρονται στην Ενότητα 4.5, για $H_{cr} = 6$ m, με μόνη διαφορά το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου, το οποίο λήφθηκε ίσο με $H_{liq} = 14$ m (αντί για $H_{liq} = 16$ m). Επομένως σε αυτές τις αναλύσεις το συνολικό πάχος του εδαφικού προφίλ ήταν ίσο με $H_{liq}^* = 20$ m (αντί για $H_{liq}^* = 22$ m), όσο δηλαδή και το πάχος του προσομοιώματος στη βασική σειρά αναλύσεων. Τα αποτελέσματα αυτής παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.25**.



Σχήμα 4.25: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για πάχος αργιλικής κρούστας $H_{cr} = 6$ m, με $H_{liq}^* = 20$ m, συναρτήσεως του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης ($H_{cr} = 4$ m).

Παρατηρούμε ότι τα νέα σημεία που προέκυψαν αποκλίνουν προς τα άνω σε σχέση με την διχοτόμο του διαγράμματος, που αντιπροσωπεύει τη βασική ανάλυση, ξεπερνώντας όμως οριακά την τιμή του 15% μόνο για τιμή του λόγου $B/H = 4$. Για το λόγο αυτό και συνυπολογίζοντας την μορφή των καμπυλών των αντίστοιχων Σχημάτων του Παραρτήματος Α, θεωρούμε πως η παράμετρος του πάχους της αργιλικής κρούστας H_{cr} δεν έχει σημαντική αυτοδύναμη επίδραση στις οριζόντιες μετακινήσεις D_h και άρα και στις τιμές του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$.

Για τη δεύτερη ομάδα αναλύσεων εκτελέστηκαν αντίστοιχα 7 αναλύσεις για λόγους $B/H = 2, 4, 10, 25, 50, 80$ και 135 , τα χαρακτηριστικά των οποίων ήταν όμοια με όσα αναφέρονται για την πρώτη ομάδα. Οι παράμετροι που διαφοροποιήθηκαν εδώ ήταν το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου, το οποίο λήφθηκε ίσο με $H_{liq} = 18$ m και συνεπώς το πάχος της αργιλικής κρούστας, που λήφθηκε ίσο με $H_{cr} = 2$ m, καθότι το συνολικό πάχος του εδαφικού προφίλ διατηρήθηκε ίσο με $H_{liq}^* = 20$ m, όσο δηλαδή και το πάχος του προσομοιώματος στη βασική σειρά αναλύσεων. Τα αποτελέσματα αυτής της ομάδας αναλύσεων αξιολογούνται στο **Σχήμα 4.26**.



Σχήμα 4.26: Διάγραμμα του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ για πάχος αργιλικής κρούστας $H_{cr} = 2$ m, με $H_{liq}^* = 20$ m και συνοχή ρευστοποιήσιμης άμμου $c = 10$ kPa, συναρτήσει του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ της βασικής ανάλυσης ($H_{cr} = 4$ m).

Παρατηρούμε ότι τα νέα σημεία που προέκυψαν δεν αποκλίνουν, παρά ελάχιστα, από τη διχοτόμο που αντιπροσωπεύει τη βασική ανάλυση. Και σε αυτή την ομάδα αναλύσεων η εντονότερη απόκλιση που σημειώνεται εντοπίζεται για τιμή του λόγου $B/H = 4$ όπου μάλιστα ξεπερνάται οριακά η τιμή του +15%. Για το λόγο αυτό και συνυπολογίζοντας την μορφή των καμπυλών των αντίστοιχων Σχημάτων του Παραρτήματος Α, καθώς και τις αναλύσεις της προηγούμενης ομάδας αλλά και της Ενότητας 4.5, θεωρούμε πως η παράμετρος του πάχους της αργιλικής κρούστας H_{cr} δεν έχει σημαντική αυτοδύναμη επίδραση στις οριζόντιες μετακινήσεις D_h και άρα και στις τιμές του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$.

4.9 Συμπεράσματα

Οι παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για την ποιοτική διερεύνηση των παραμέτρων σχεδιασμού που απομειώνουν την ανάπτυξη οριζόντιων μετακινήσεων D_h λόγω πλευρικής εξάπλωσης στις όχθες καναλιών πεπερασμένου πλάτους, οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα πρακτικού ενδιαφέροντος:

- i. Η περίοδος διέγερσης T_{exc} επιδρά σημαντικά στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h , για τιμές μεγαλύτερες από $T_{exc} = 0.35$ sec (T_{exc} της βασικής ανάλυσης) έως και την τιμή $T_{exc} = 0.7$ sec που εξετάστηκε εδώ. Ειδικότερα, για μικρούς λόγους B/H η επίδραση της περιόδου διέγερσης T_{exc} φαίνεται να είναι μεγαλύτερη για μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου, ενώ σε μεγαλύτερες τιμές του λόγου B/H , ο διορθωτικός συντελεστής $I_{D,h}$ φαίνεται να τείνει σχεδόν στην ίδια τιμή για τις περιόδους $T_{exc} = 0.5$ sec και $T_{exc} = 0.7$ sec. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της περιόδου διέγερσης T_{exc} , τόσο μικρότερη φαίνεται να είναι η απομείωση των οριζόντιων μετακινήσεων D_h και συνεπώς

μεγαλύτερη η τιμή του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$. Η ανωτέρω επίδραση είναι περισσότερο εμφανής για μικρές τιμές του λόγου B/H .

- ii. Το πάχος H_{liq} της ρευστοποιήσιμης στρώσης επιδρά σημαντικά στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h , γεγονός που επιβεβαιώνεται από την επίδραση που έχει στην τιμή του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$. Παρατηρήθηκε ότι για πάχος μικρότερο από αυτό της βασικής ανάλυσης ($H_{liq} = 16$ m) η τιμή του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ αυξάνεται, ενώ αντίθετα για μεγαλύτερο πάχος από αυτό της βασικής ανάλυσης ($H_{liq} = 16$ m), οι τιμές του διορθωτικού συντελεστή μειώνονται. Η απόκλιση που σημειώνεται και στις δύο περιπτώσεις είναι κατά πολύ μεγαλύτερη του $\pm 15\%$ από την ευθεία $y = x$ του διαγράμματος, που αντιπροσωπεύει τη βασική ανάλυση. Συμπεραίνουμε επομένως ότι τουλάχιστον για ολόκληρο το εύρος των τιμών του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου που εξετάστηκε ($H_{liq} = 8, 12, 16, 20$ m) η παράμετρος αυτή έχει σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h λόγω πλευρικής εξάπλωσης.
- iii. Το βάθος H του καναλιού έχει επίσης σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h λόγω πλευρικής εξάπλωσης στο εύρος τιμών που εξετάστηκε. Ειδικότερα, όσο μειώνεται το βάθος του καναλιού κι επομένως και οι διαστάσεις της εκάστοτε γεωμετρίας-προσομοιώματος, οι τιμές του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ αυξάνονται (συγκριτικά με τις τιμές της βασικής ανάλυσης).
- iv. Οι υπόλοιπες παράμετροι που εξετάστηκαν, ήτοι:
 - η κλίση των πρανών των όχθων
 - ο αριθμός των κύκλων φόρτισης N_{cyc}
 - η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση PGA
 - η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργιλικής κρούστας C_u
 - η σχετική πυκνότητα D_r της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου
 - ο συντελεστής διαπερατότητας k
 - το πάχος H_{cr} της αργιλικής κρούστας

δεν έχουν υπολογίσιμη επιρροή στην απομείωση των οριζόντιων μετακινήσεων D_h .

- v. Ειδικότερα, ο συντελεστής διαπερατότητας δεν επιδρά σημαντικά στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h καθώς στο εύρος τιμών που εξετάστηκαν, ($k = 6.6 \cdot 10^{-4}$ m/s έως $k = 6.6 \cdot 10^{-6}$ m/s) η διαφορά είναι -15% ανεξάρτητα από την τιμή του k . Επομένως καταλήγουμε ότι η παραδοχή αστράγγιστων συνθηκών φόρτισης ($k = 0$ m/s ή flow off) είναι ελαφρώς συντηρητική καθώς οδηγεί σε μικρότερη απομείωση των εδαφικών μετατοπίσεων.

Κεφάλαιο 5

Αναλυτική Μεθοδολογία Εκτίμησης του Διορθωτικού Συντελεστή $I_{D,h}$

5.1 Γενικά

Στο Κεφάλαιο 3 έγινε σαφές ότι το πλάτος ενός καναλιού επιδρά σημαντικά στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h κατά την ρευστοποίηση και την επακόλουθη πλευρική εξάπλωση του εδάφους στις όχθες. Επιπλέον, οι παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 4 εντόπισαν τους παράγοντες που επιδρούν στο φαινόμενο αυτό. Ωστόσο υπολείπεται η ανάπτυξη μιας αναλυτικής μεθοδολογίας μέσω της οποίας θα εκτιμάται ποσοτικά η επίδραση του πλάτους του καναλιού και των ανωτέρω παραγόντων. Αντικείμενο λοιπόν του Κεφαλαίου 5 αποτελεί η διατύπωση «κλειστών» μαθηματικών σχέσεων για την εκτίμηση του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ που θα αποτυπώνει την επίδραση όλων των παραπάνω παραμέτρων στην εκτίμηση των οριζόντιων μετακινήσεων D_h .

Διευκρινίζεται ότι με τη χρήση του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ που προτείνεται εδώ, οι εκτιμώμενες μετακινήσεις D_h θα είναι μικρότερες, δίνοντας έτσι συστηματικά ευνοϊκότερα αποτελέσματα σε σχέση με τα αυτά που προκύπτουν με χρήση μόνον των υπάρχουσών σχέσεων της βιβλιογραφίας, όπου πρακτικά μπορούμε να θεωρήσουμε πως η τιμή του προτεινόμενου συντελεστή $I_{D,h}$ είναι ίση με τη μονάδα. Για τον λόγο αυτό, κάθε στάδιο της διαδικασίας ανάπτυξης ενός τέτοιου συντελεστή έγινε συνειδητά με εύλογο συντηρητισμό, λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη ότι το πρόβλημα που εξετάζεται είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο και δεν έχουν ακόμη κατανοηθεί πλήρως οι μηχανισμοί που το διέπουν.

5.2 Διατύπωση Αναλυτικής Σχέσης

Στο Κεφάλαιο 3 καταλήξαμε πως η βασική σχέση που συνδέει τις μετακινήσεις D_h με τον διορθωτικό συντελεστή $I_{D,h}$ είναι η ακόλουθη:

$$D_h = I_{D,h} \cdot D_{h,\infty} \quad (5.1)$$

όπου:

- $D_{h,\infty}$ οι οριζόντιες μετακινήσεις που προέκυψαν από την ανάλυση απείρου πλάτους, δηλαδή για λόγο $(B/H)_{\infty} = 135$ που αντιστοιχεί σε συνθήκες ελεύθερου μετώπου με αναβαθμό
- και $I_{D,h}$ ο διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψιν μόνο τη σχετική επίδραση του πλάτους στις οριζόντιες μετακινήσεις και δίδεται από την Εξ. (5.2) που ακολουθεί:

$$I_{D,h} = A \frac{B/H}{17 + B/H} \leq 1 \quad (5.2)$$

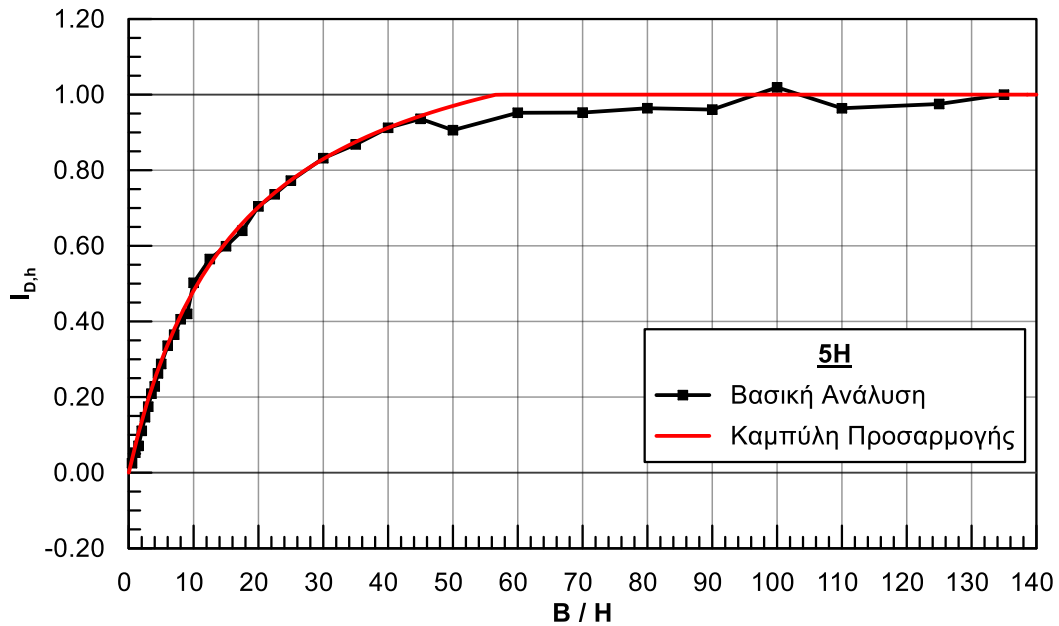
Έτσι, η διατύπωση της επιθυμητής αναλυτικής σχέσης για τον διορθωτικό συντελεστή $I_{D,h}$ εστιάζεται ουσιαστικά στην διατύπωση αντίστοιχης αναλυτικής σχέσης για τον συντελεστή A στην Εξ. (5.2). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον σκοπό αυτό περιελάμβανε τα ακόλουθα βήματα 1 έως 3.

ΒΗΜΑ 1: Εύρεση του συντελεστή A για κάθε ομάδα αναλύσεων

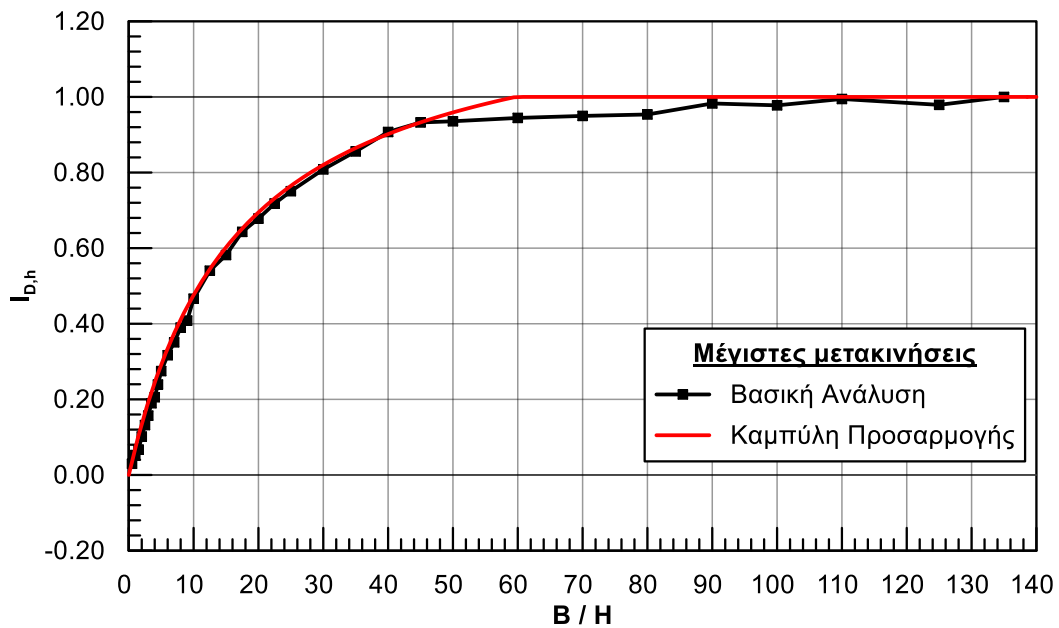
Στο Κεφάλαιο 3, για την προσέγγιση της μορφής της καμπύλης των αποτελεσμάτων της βασικής σειράς αναλύσεων, τόσο για τις μετακινήσεις σε συμβατική απόσταση $5H$, όσο και για τις μέγιστες μετακινήσεις, χρησιμοποιήθηκαν οι βέλτιστες υπερβολικές καμπύλες προσαρμογής (best fitting), οι οποίες εκφράζονται μέσω των Εξ. (5.3) & (5.4) και παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.24** και στο **Σχήμα 3.25** αντίστοιχα. Σύμφωνα με αυτές, $A = 1.30$ για την μετατόπιση στη συμβατική απόσταση $5H$ [Εξ. (5.3)] και $A = 1.285$ [Εξ. (5.4)] για την μέγιστη μετατόπιση.

$$I_{D,h} = 1.30 \frac{B/H}{17 + B/H} \leq 1 \quad (5.3)$$

$$I_{D,h} = 1.285 \frac{B/H}{17 + B/H} \leq 1 \quad (5.4)$$



Σχήμα 5.1: Βέλτιστη καμπύλη προσαρμογής (best fitting) για την καμπύλη των κανονικοποιημένων οριζόντιων μετακινήσεων $I_{D,h}$ σε απόσταση $5H$ από τον πόδα του πρανούς για τη βασική ανάλυση, συναρτήσει του λόγου B/H .



Σχήμα 5.2: Βέλτιστη καμπύλη προσαρμογής (best fitting) για την καμπύλη των κανονικοποιημένων μέγιστων οριζόντιων μετακινήσεων $I_{D,h}$ για τη βασική ανάλυση, συναρτήσει του λόγου B/H .

Αντίστοιχη λοιπόν διαδικασία ακολουθήθηκε και για την προσέγγιση της μορφής των καμπυλών που προέκυψαν από τις παραμετρικές αναλύσεις του Κεφαλαίου 4. Χρησιμοποιήθηκαν ανάλογες υπερβολικές καμπύλες με εφαρμογή της Εξ. (5.2), τόσο για τις μετακινήσεις των $5H$, όσο και για τις μέγιστες μετακινήσεις. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων, μαζί με τις βέλτιστες καμπύλες

προσαρμογής (best fitting) παρουσιάζονται αναλυτικά στα Σχήματα του Παραρτήματος Α. Όλες οι καμπύλες προσαρμογής έχουν την ίδια μορφή [βλ. Εξ. (5.2)], με μεταβλητό όμως το συντελεστή Α. Ο ακόλουθος Πίνακας 5.1 συνοψίζει τις διάφορες τιμές του συντελεστή Α.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά μεγέθη αναλύσεων και τιμές του συντελεστή Α.

A/A	Slope i	C_u (kPa)	D_r (%)	K (m/s)	N_{cyc}	H_{crust} (m)	PGA (g)	T_{exc} (sec)	H (m)	H_{liq} (m)	H^*_{liq} (m)	H_{liq}/H (m)	H^*_{liq}/H (m)	A	
														max displ.	5H
1	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.35	4	16	20	4	5	1.285	1.30
2	2:1	30	60	-	10	4	0.5	0.35	4	16	20	4	5	1.30	1.28
3	1:1	45	60	-	10	4	0.5	0.35	4	16	20	4	5	1.28	1.30
4	1:1	30	40	-	10	4	0.5	0.35	4	16	20	4	5	1.27	1.27
5	1:1	30	60	$6.6 \cdot 10^{-4}$	10	4	0.5	0.35	4	16	20	4	5	1.20	1.20
6	1:1	30	60	$6.6 \cdot 10^{-5}$	10	4	0.5	0.35	4	16	20	4	5	1.20	1.20
7	1:1	30	60	$6.6 \cdot 10^{-6}$	10	4	0.5	0.35	4	16	20	4	5	1.23	1.20
8	1:1	30	60	-	15	4	0.5	0.35	4	16	20	4	5	1.30	1.30
9	1:1	30	60	-	10	6	0.5	0.35	4	16	22	4	5.5	1.27	1.29
10	1:1	30	60	-	10	4	0.25	0.35	4	16	20	4	5	1.25	1.15
11	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.20	4	16	20	4	5	1.30	1.30
12	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.50	4	16	20	4	5	1.62	1.65
13	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.70	4	16	20	4	5	2.30	2.35
14	1:1	30	60	-	10	1	0.5	0.35	1	4	5	4	5	2.30	3.40
15	1:1	30	60	-	10	2	0.5	0.35	2	8	10	4	5	2.20	2.30
16	1:1	30	60	-	10	3	0.5	0.35	3	12	15	4	5	1.55	1.55
17	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.35	4	8	12	2	3	3.80	4.20
18	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.35	4	12	16	3	4	2.10	2.20
19	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.35	4	20	24	5	6	1.16	1.18
20	1:1	30	60	-	10	1	0.5	0.35	1	19	20	19	20	1.12	1.12
21	1:1	30	60	-	10	1	0.25	0.35	1	19	20	19	20	1.12	1.12
22	1:1	30	60	-	10	2	0.5	0.35	2	18	20	9	10	1.12	1.12
23	1:1	30	60	-	10	3	0.5	0.35	3	17	20	5.7	6.7	1.18	1.18
24	1:1	30	60	-	10	6	0.5	0.35	4	14	20	3.5	5	1.40	1.45
25	1:1	30	60	-	10	2	0.5	0.35	4	18	20	4.5	5	1.33	1.32

Σημειώνεται πως όσο μικρότερη είναι η τιμή του συντελεστή Α, τόσο πιο έντονο είναι το φαινόμενο της επίδρασης που αποτυπώνει ο συντελεστής $I_{D,h}$ (η απομείωση του D_h αρχίζει δηλαδή για μεγαλύτερες τιμές του ανηγμένου πλάτους B/H του καναλιού). Επιπλέον τονίζεται ότι η διαδικασία εύρεσης του βέλτιστου συντελεστή Α, και επομένως της βέλτιστης καμπύλης προσαρμογής (best fitting) που προσεγγίζει με την μεγαλύτερη ακρίβεια τα αποτελέσματα των αναλύσεων, έγινε συντηρητικά. Επομένως η καμπύλη προσαρμογής βρίσκεται οριακά πάνω από τα θεωρούμενα ως κρίσιμα σημεία των αναλύσεων τα οποία λήφθηκαν υπόψιν για την διαδικασία προσαρμογής (fitting). Ταυτόχρονα λοιπόν, για την ίδια ανάλυση και για σταθερή τιμή του λόγου B/H , όσο μεγαλύτερη η τιμή του συντελεστή Α, τόσο πιο συντηρητική είναι και η προσέγγιση για τη δεδομένη παράμετρο.

Τελικώς, μέσω της διαδικασίας αυτής, για κάθε μία από τις παραμέτρους του Κεφαλαίου 4 διατυπώνεται η σχέση που προσεγγίζει βέλτιστα τη μορφή του διορθωτικού συντελεστή που τους αντιστοιχεί, ο οποίος μέχρις στιγμής λαμβάνει υπόψιν μόνο την επίδραση της εκάστοτε παραμέτρου. Έτσι στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να γενικευτεί η σχέση του $I_{D,h}$ λαμβάνοντας υπόψιν, εκπεφρασμένης μέσω του συντελεστή Α, την

επίδραση όλων των παραμέτρων που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

ΒΗΜΑ 2: Εξαγωγή μέσης τιμής A_0 από τις αναλύσεις που δεν έχουν επίδραση στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h

Στο Κεφάλαιο 4 λοιπόν, όπου έγιναν οι παραμετρικές αναλύσεις, προέκυψε ότι από τις παραμέτρους που εξετάστηκαν, ορισμένες μόνον είχαν επίδραση στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h , ενώ η πλειοψηφία αυτών δεν είχε ουσιαστική επίδραση. Συγκεκριμένα οι παράμετροι αυτές που τελικώς θεωρήθηκε πως δεν έχουν υπολογίσιμη επιρροή στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h είναι η κλίση των πρανών των όχθων, ο αριθμός των κύκλων φόρτισης N_{cyc} , η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση PGA, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργιλικής κρούστας C_u , η σχετική πυκνότητα D_r της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου και το πάχος H_{cr} της αργιλικής κρούστας. Γι' αυτές κρίθηκε ότι η σχετική επίδραση που έχουν στο φαινόμενο μπορεί, στο πλαίσιο της εξαγωγής μιας αναλυτικής σχέσης να εκφραστεί και να συμπεριληφθεί στη διατύπωση του διορθωτικού συντελεστή, μέσω ενός κοινού, μέσου συντελεστή A_0 . Επομένως η τιμή του μέσου συντελεστή A_0 εξήχθη ως ο μέσος όρος των τιμών των συντελεστών A των δέκα πρώτων αναλύσεων που συνοψίζει ο Πίνακας 5.1 και που αναφέρονται σε αυτές τις παραμέτρους. Έτσι, προέκυψαν δύο τιμές A_0 με ελάχιστη διαφορά μεταξύ τους: μία ίση με $A_0 = 1.25$ για τις αναλύσεις που αφορούν στις μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρανού και μία δεύτερη ίση με $A_0 = 1.26$ για τις αναλύσεις σε όρους μέγιστων μετακινήσεων.

Επομένως η σχέση (5.2) μετασχηματίζεται στην ακόλουθη (5.5), λαμβάνοντας μόνον υπόψιν όλες τις παραμέτρους που εξετάστηκαν και κρίθηκε ότι δεν επιδρούν στις οριζόντιες μετακινήσεις D_h .

$$I_{D,h} = A_0 \frac{B/H}{17 + B/H} \leq 1 \quad (5.5)$$

ΒΗΜΑ 3: Εξαγωγή συναρτήσεων που αποτυπώνουν ποσοτικά την επίδραση των παραμέτρων με επιρροή, στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h

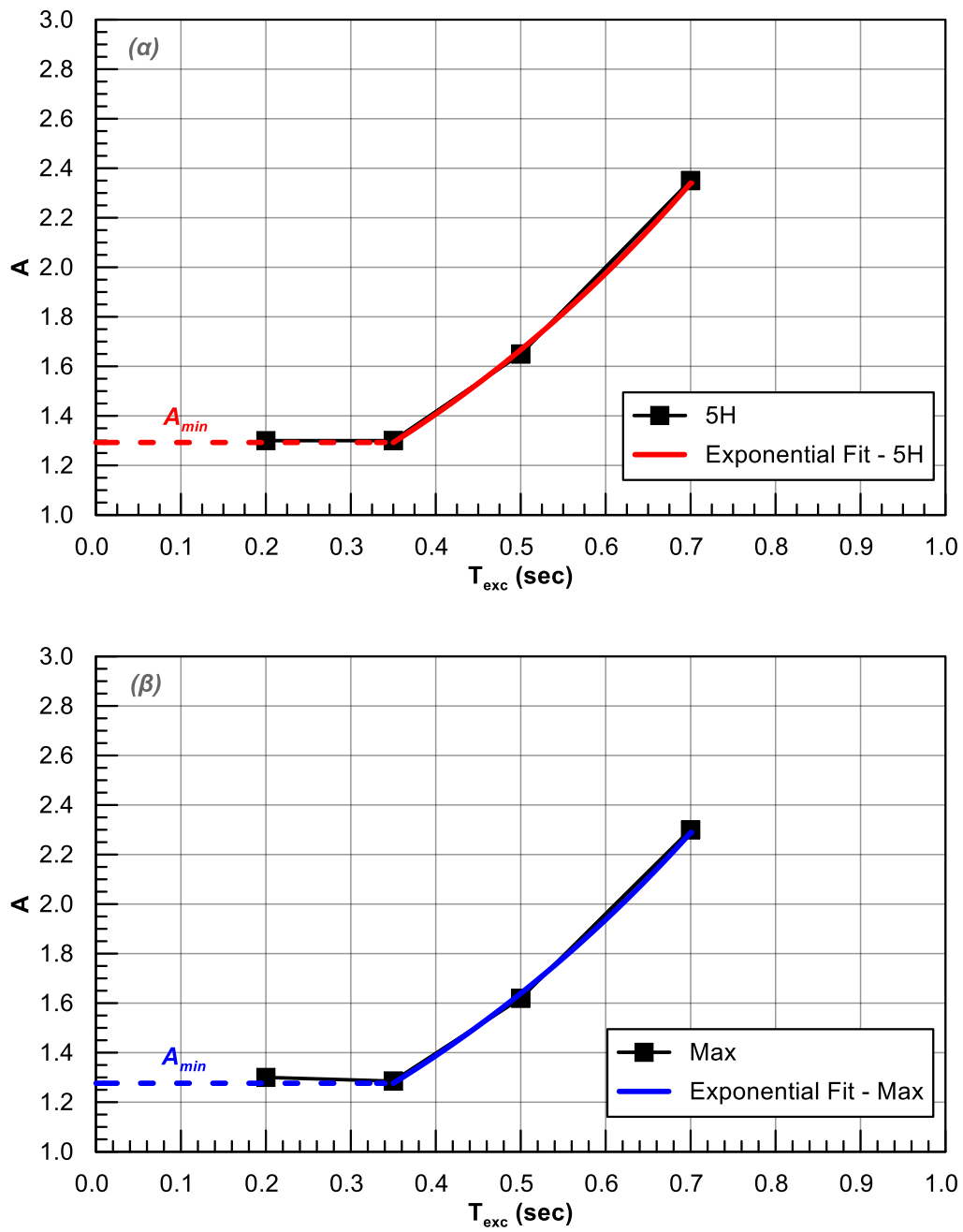
Αντίστοιχα με τα όσα περιεγράφηκαν στο ΒΗΜΑ 2 για τις παραμέτρους που παρατηρήθηκε ότι έχουν σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h , δηλαδή για την περίοδο διέγερσης T_{exc} , το πάχος H_{liq} της ρευστοποιήσιμης στρώσης και το βάθος H του καναλιού, χρειάστηκε η διατύπωση μίας σχέσης-εξίσωσης που να αποτυπώνει την επίδρασή τους στο υπό εξέταση φαινόμενο για τις διάφορες τιμές που αυτές λαμβάνουν. Στο πλαίσιο αυτό ακολουθήθηκε η εξής μεθοδολογία-διαδικασία:

- i. Αρχικά οι τιμές του συντελεστή A που προέκυψαν από κάθε ομάδα αναλύσεων (**Πίνακας 5.1**, αναλύσεις 11-19) για κάθε παράμετρο χωριστά (T_{exc} , H_{liq} , H) αποτυπώθηκαν σε διαγράμματα συναρτήσεων των διαφορετικών τιμών της εκάστοτε παραμέτρου (καμπύλη μαύρου χρώματος στο **Σχήμα 5.4** έως το **Σχήμα 5.6**).

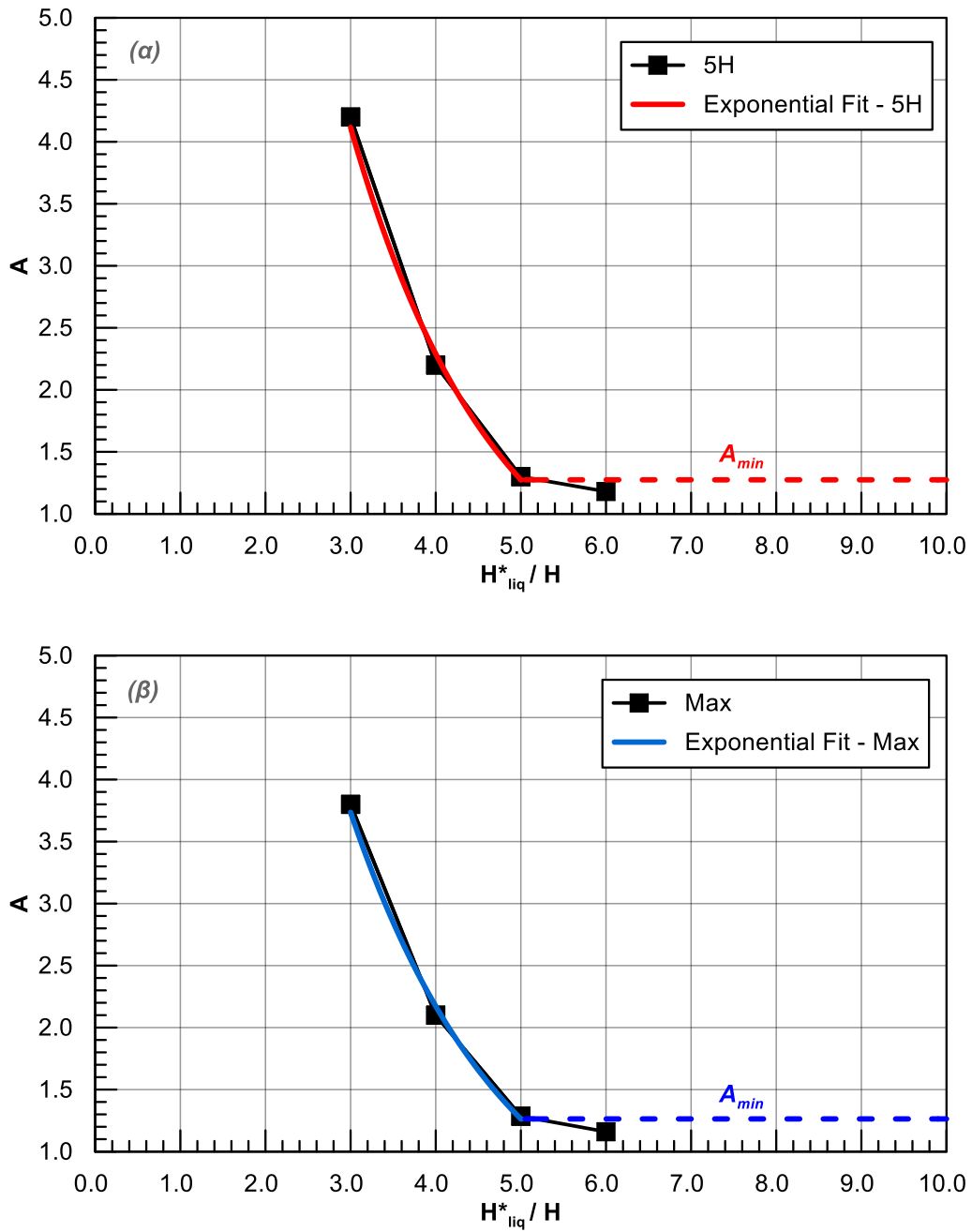
Σημειώνεται ότι ειδικά για την παράμετρο του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου H_{liq} εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις ώστε να διατυπωθεί η καταλληλότερη σχέση που να εκτιμά ποσοτικά την επίδρασή του με το μικρότερο στατιστικό λάθος. Στην πρώτη περίπτωση η υπό εξέταση παράμετρος εισήχθη ως λόγος H^*_{liq}/H , ενώ στη δεύτερη ως λόγος H_{liq}/H . Η κανονικοποίηση των τιμών των H^*_{liq} και H_{liq} έγινε διαιρώντας με την παράμετρο του βάθους του καναλιού H ούτως ώστε να απομονωθεί η επίδραση της παραμέτρου που βρίσκεται στον αριθμητή. Αυτό έγινε καθώς στις αναλύσεις που εκτελέστηκαν για μεταβλητό βάθος καναλιού H (αναλύσεις 14-16), μεταβλήθηκαν και οι παράμετροι H_{liq} και H^*_{liq} , επηρεαζόμενες έμμεσα από την αλλαγή στο βάθος H του καναλιού, ενώ οι λόγοι H^*_{liq}/H και H_{liq}/H παρέμεναν σταθεροί (βλ. **Πίνακας 5.1**).

- ii. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η βέλτιστη καμπύλη προσαρμογής (best fitting) στην καμπύλη των ανωτέρω σημείων (βλ. **Σχήμα 5.3** έως **Σχήμα 5.6**). Για τη διαδικασία προσέγγισης της καμπύλης (fitting), χρησιμοποιήθηκαν κάθε φορά τα σημεία εκείνα τα οποία διαφοροποιούνται συστηματικά με τη μεταβολή της εκάστοτε παραμέτρου. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για το **Σχήμα 5.3** έως και το **Σχήμα 5.5** όπου φαίνεται ότι οι τιμές του συντελεστή A φτάνουν σε κάποιο «πλατώ», δηλαδή τείνουν προς μία ελάχιστη τιμή A_{min} , η οποία παραμένει πρακτικά σταθερή για περαιτέρω μεταβολή της παραμέτρου που εξετάζεται.

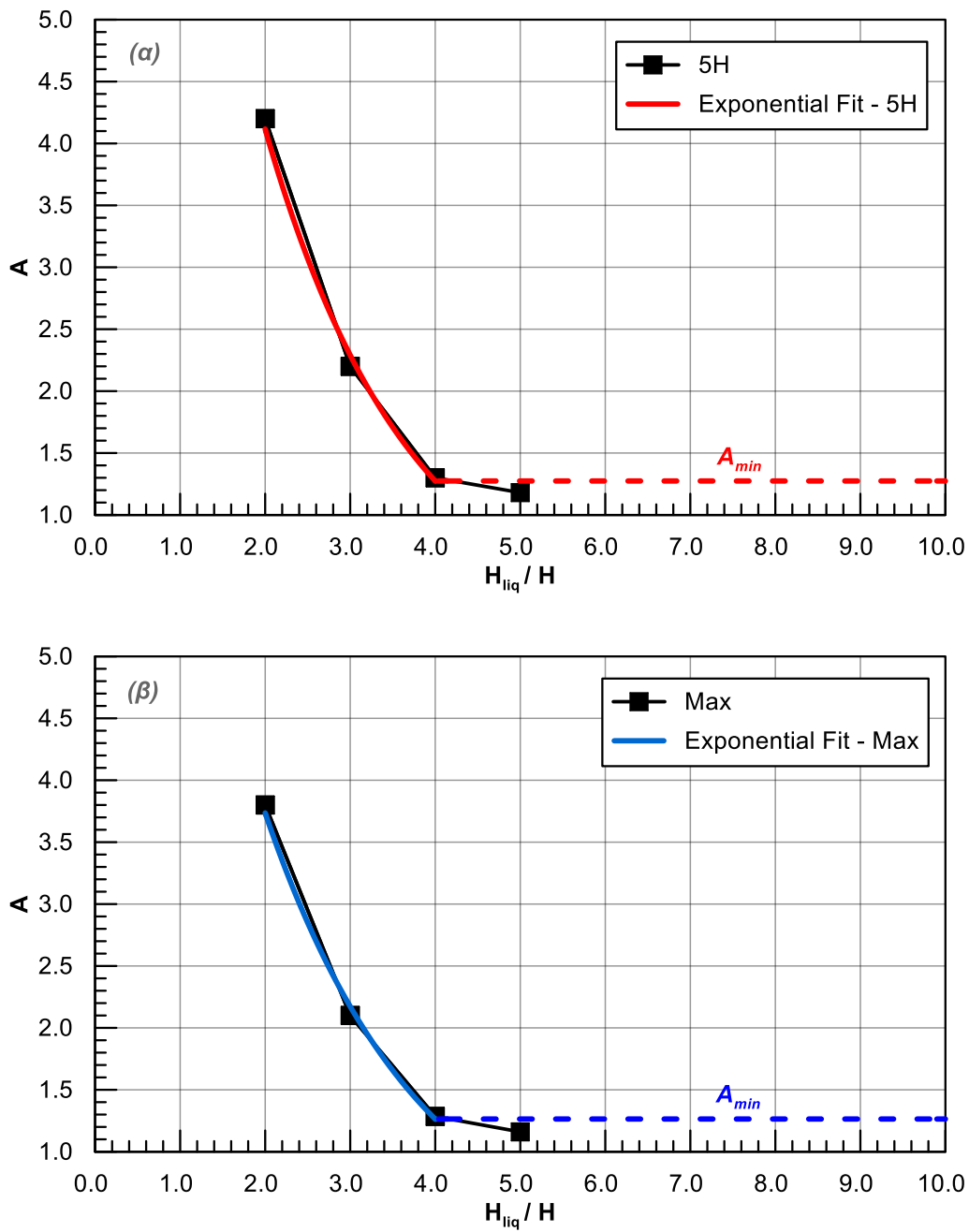
Η διαδικασία προσαρμογής σπ **Σχήμα 5.3** έως και το **Σχήμα 5.6** έγινε με χρήση εκθετικών συναρτήσεων καθώς αυτές παρουσίασαν το μικρότερο στατιστικό λάθος. Οι αναλυτικές σχέσεις των εκθετικών καμπυλών προσαρμογής παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον ακόλουθο πίνακα (**Πίνακας 5.2**), τόσο για τα αποτελέσματα για τις μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρανούς, όσο και για τις μέγιστες μετακινήσεις που σημειώθηκαν. Οι σχέσεις αυτές αποτυπώνουν την συμπεριφορά των συντελεστών A για μεταβαλλόμενες τιμές των παραμέτρων, στα όρια όμως των τιμών αυτών που έχουν χρησιμοποιηθεί και στο Κεφάλαιο 4. Όπως φαίνεται, στην διατύπωσή τους, για κάθε μία από αυτές τις συναρτήσεις υπάρχει ένα κάτω όριο, το οποίο συμβολίζεται στα διαγράμματα ως A_{min} και δηλώνει την ελάχιστη τιμή που μπορεί να λάβει ο συντελεστής A . Αυτή καθορίζεται από την τιμή που έχει υπολογιστεί αναλυτικά ήδη από το ΒΗΜΑ 1 (**Πίνακας 5.1**, αναλύσεις 11-19).



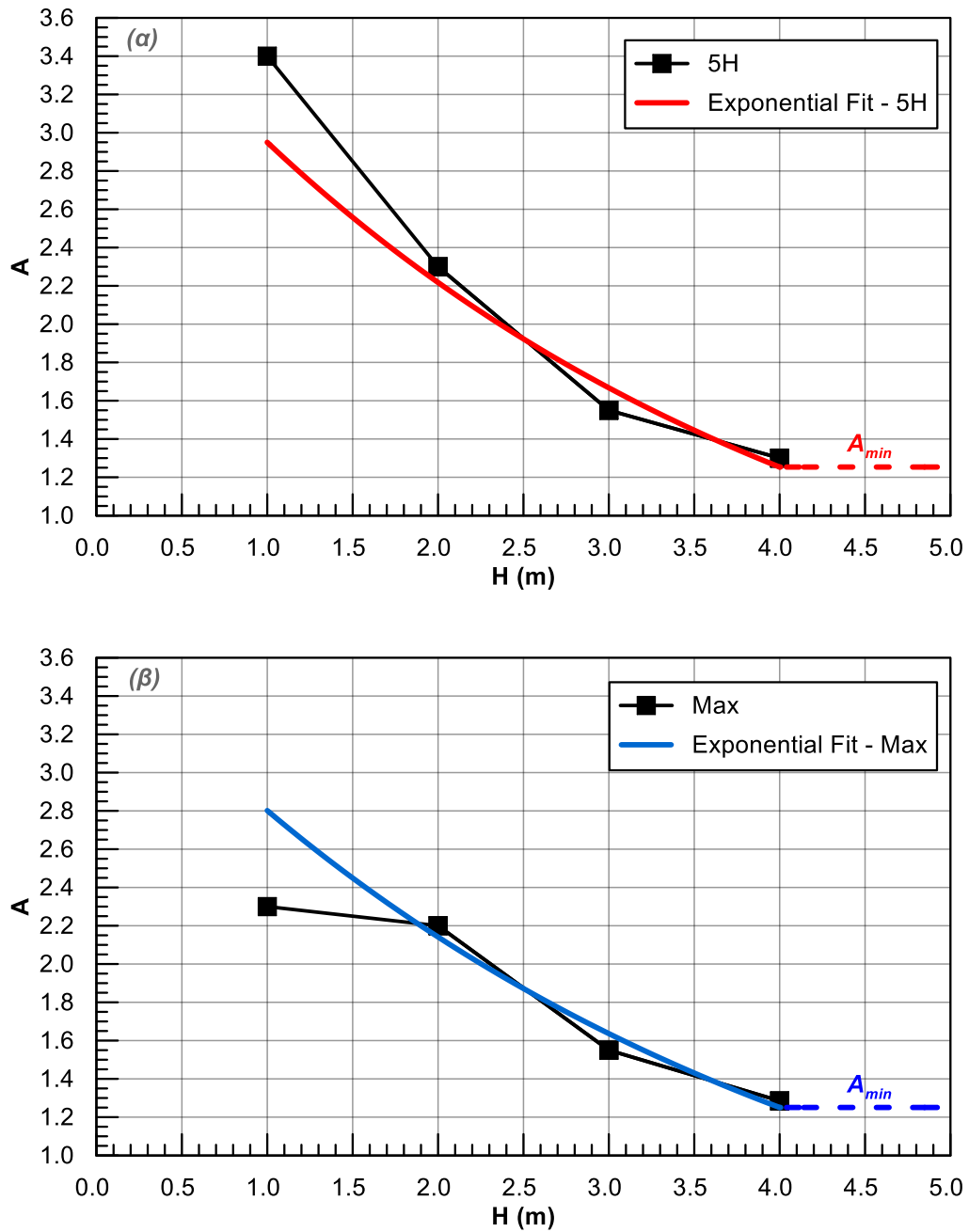
Σχήμα 5.3: Βέλτιστη καμπύλη προσαρμογής (best fitting) για την καμπύλη των τιμών του συντελεστή A συναρτήσει του T_{exc} .



Σχήμα 5.4: Βέλτιστη καμπύλη προσαρμογής (best fitting) για την καμπύλη των τιμών του συντελεστή A συναρτήσει του λόγου H^*_{liq} / H .



Σχήμα 5.5: Βέλτιστη καμπύλη προσαρμογής (best fitting) για την καμπύλη των τιμών του συντελεστή A συναρτήσει του λόγου H_{liq}/H .



Σχήμα 5.6: Βέλτιστη καμπύλη προσαρμογής (best fitting) για την καμπύλη των τιμών του συντελεστή A συναρτήσει του H.

Πίνακας 5.2: Εξισώσεις καμπυλών προσαρμογής (best fitting).

Παράμετρος	Μετακινήσεις σε απόσταση 5H	Μέγιστες Μετακινήσεις
T_{exc} (sec)	$A = 0.714 \cdot \exp(1.696T_{exc}) \geq 1.30$ (5.6)	$A = 0.712 \cdot \exp(1.668T_{exc}) \geq 1.29$ (5.7)
H^*_{liq} / H	$A = 23.905 \cdot \exp\left(-0.586 \frac{H^*_{liq}}{H}\right) \geq 1.18$ (5.8)	$A = 18.999 \cdot \exp\left(-0.542 \frac{H^*_{liq}}{H}\right) \geq 1.16$ (5.9)
H_{liq} / H	$A = 13.299 \cdot \exp\left(-0.586 \frac{H_{liq}}{H}\right) \geq 1.18$ (5.10)	$A = 11.048 \cdot \exp\left(-0.542 \frac{H_{liq}}{H}\right) \geq 1.16$ (5.11)
H (m)	$A = 3.924 \cdot \exp(-0.285H) \geq 1.30$ (5.12)	$A = 3.666 \cdot \exp(-0.269H) \geq 1.29$ (5.13)

iii. Κατόπιν της διατύπωσης των συναρτήσεων (**Πίνακας 5.2**), έγινε η κανονικοποίησή τους και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (**Πίνακας 5.3**). Συγκεκριμένα, η κανονικοποίηση αφορά στη διόρθωση των σχέσεων ούτως ώστε το αποτέλεσμα κάθε εξίσωσης, για τις τιμές των παραμέτρων που αντιστοιχούν στη βασική ανάλυση (ήτοι $T_{exc} = 0.35$ sec, $H^*_{liq}/H = 5$, $H_{liq}/H = 4$, $H = 4$ m), να ισούται με τη μονάδα, τιμή που υποδεικνύει μηδενική επιρροή (ίση δηλαδή με αυτή της βασικής ανάλυσης). Επομένως, καθεμία από τις Εξ. (5.6) έως (5.13) διαιρέθηκε με την αντίστοιχη τιμή που προκύπτει εάν σε καθεμία από αυτές αντικαταστήσουμε την τιμή της αντίστοιχης παραμέτρου της βασικής ανάλυσης.

Ενδεικτικά, η Εξ. (5.6) για τιμή περιόδου διέγερσης ίση με $T_{exc} = 0.35$ sec (ήτοι τιμή της βασικής ανάλυσης) δίνει τιμή συντελεστή ίση με $A = 1.293$. Έτσι διαιρώντας την Εξ. (5.6) με την τιμή αυτή, προκύπτει η Εξ. (5.14) που αποτυπώνει την ακριβή επίδραση της παραμέτρου στο φαινόμενο. Ανάλογη διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις υπόλοιπες εξισώσεις των οποίων οι τελικές μορφές παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον ακόλουθο πίνακα (**Πίνακας 5.3**).

Πίνακας 5.3: Εξισώσεις παραμέτρων με επίδραση στο συντελεστή $I_{D,h}$.

Παράμετρος	Μετακινήσεις σε απόσταση 5H	Μέγιστες Μετακινήσεις
T_{exc} (sec)	$f(T_{exc}) = 0.552 \cdot \exp(1.696T_{exc}) \geq 1.000$ (5.14)	$f(T_{exc}) = 0.558 \cdot \exp(1.668T_{exc}) \geq 1.011$ (5.15)
H_{liq}^* / H	$g(H_{liq}^* / H) = 18.727 \cdot \exp\left(-0.586 \frac{H_{liq}^*}{H}\right) \geq 0.925$ (5.16)	$g(H_{liq}^* / H) = 15.029 \cdot \exp\left(-0.542 \frac{H_{liq}^*}{H}\right) \geq 0.918$ (5.17)
H_{liq} / H	$g(H_{liq} / H) = 10.423 \cdot \exp\left(-0.586 \frac{H_{liq}}{H}\right) \geq 0.925$ (5.18)	$g(H_{liq} / H) = 8.741 \cdot \exp\left(-0.542 \frac{H_{liq}}{H}\right) \geq 0.918$ (5.19)
H (m)	$h(H) = 3.127 \cdot \exp(-0.285H) \geq 1.036$ (5.20)	$h(H) = 2.933 \cdot \exp(-0.269H) \geq 1.032$ (5.21)

iv. Τελικώς, η σταθερά A στην σχέση (5.2) υπολογίζεται ως:

$$A = A_0 \cdot f(T_{exc}) \cdot g(H_{liq}^* / H) \cdot h(H) \quad (5.22)$$

ή

$$A = A_0 \cdot f(T_{exc}) \cdot g(H_{liq} / H) \cdot h(H) \quad (5.23)$$

Επομένως, η έκφραση του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ λαμβάνει πλέον υπόψιν, εκτός από την επιρροή του πλάτους του καναλιού B/H , και την επίδραση όλων των παραμέτρων που εξετάστηκαν στο πλαίσιο των παραμετρικών αναλύσεων του Κεφαλαίου 4, μεταπίπτοντας από τη σχέση (5.2) στις ακόλουθες σχέσεις (5.24) και (5.25):

$$I_{D,h} = A_0 \cdot f(T_{exc}) \cdot g(H_{liq}^* / H) \cdot h(H) \cdot \frac{B/H}{17 + B/H} \leq 1 \quad (5.24)$$

$$I_{D,h} = A_0 \cdot f(T_{exc}) \cdot g(H_{liq} / H) \cdot h(H) \cdot \frac{B/H}{17 + B/H} \leq 1 \quad (5.25)$$

όπου

- $A_0 = 1.25$ για τις αναλύσεις που αφορούν στις μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και μία δεύτερη ίση με $A_0 = 1.26$ για τις αναλύσεις σε όρους μέγιστων μετακινήσεων.
- $f(T_{exc})$ ο διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψιν την επίδραση της περιόδου διέγερσης T_{exc} στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h σταθμίζοντας ανάλογα το διορθωτικό συντελεστή $I_{D,h}$

- $g(H^*_{liq}/H)$ ο διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψιν την επίδραση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου H_{liq} στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h μέσω της παραμέτρου H^*_{liq}/H , σταθμίζοντας ανάλογα το διορθωτικό συντελεστή $I_{D,h}$
- $g(H_{liq}/H)$ ο διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψιν την επίδραση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου H_{liq} στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h μέσω της παραμέτρου H_{liq}/H , σταθμίζοντας ανάλογα το διορθωτικό συντελεστή $I_{D,h}$
- $h(H)$ ο διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψιν την επίδραση του βάθους του καναλιού στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h , σταθμίζοντας ανάλογα το διορθωτικό συντελεστή $I_{D,h}$.

Κεφάλαιο 6

Αξιολόγηση Αναλυτικών Σχέσεων

6.1 Γενικά

Για την επιβεβαίωση και επαλήθευση της αξιοπιστίας των αναλυτικών σχέσεων που διατυπώθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο, έγινε ακολούθως η αξιολόγησή τους μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή τους με αυτά που έχουν προκύψει αριθμητικά. Οι συγκρίσεις γίνονται σε όρους των συντελεστών A και $I_{D,h}$, ενώ τελικώς υπολογίζεται και το Σχετικό Σφάλμα μεταξύ των αναλυτικών και των αριθμητικών τιμών του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$. Υπενθυμίζεται ότι οι αναλυτικές σχέσεις που διατυπώθηκαν είναι οι ακόλουθες:

$$I_{D,h}^{5H} = 1.25 \cdot f(T_{exc}) \cdot g(H_{liq}^*/H) \cdot h(H) \cdot \frac{B/H}{17+B/H} \leq 1 \quad (6.1)$$

$$I_{D,h}^{max} = 1.26 \cdot f(T_{exc}) \cdot g(H_{liq}^*/H) \cdot h(H) \cdot \frac{B/H}{17+B/H} \leq 1 \quad (6.2)$$

$$I_{D,h}^{5H} = 1.25 \cdot f(T_{exc}) \cdot g(H_{liq}/H) \cdot h(H) \cdot \frac{B/H}{17+B/H} \leq 1 \quad (6.3)$$

$$I_{D,h}^{max} = 1.26 \cdot f(T_{exc}) \cdot g(H_{liq}/H) \cdot h(H) \cdot \frac{B/H}{17+B/H} \leq 1 \quad (6.4)$$

Ο ακόλουθος Πίνακας 6.1 συνοψίζει τις εξισώσεις υπολογισμού των $f(T_{exc})$, $g(H_{liq}/H)$, $g(H_{liq}^*/H)$ και $h(H)$.

Πίνακας 6.1: Εξισώσεις παραμέτρων με επίδραση στο συντελεστή $I_{D,h}$.

Παράμετρος	Μετακινήσεις σε απόσταση 5H	Μέγιστες Μετακινήσεις
T_{exc} (sec)	$f(T_{exc}) = 0.552 \cdot \exp(1.696T_{exc}) \geq 1.000$	$f(T_{exc}) = 0.558 \cdot \exp(1.668T_{exc}) \geq 1.011$
H^*_{liq} / H	$g(H^*_{liq} / H) = 18.727 \cdot \exp\left(-0.586 \frac{H^*_{liq}}{H}\right) \geq 0.925$	$g(H^*_{liq} / H) = 15.029 \cdot \exp\left(-0.542 \frac{H^*_{liq}}{H}\right) \geq 0.918$
H_{liq} / H	$g(H_{liq} / H) = 10.423 \cdot \exp\left(-0.586 \frac{H_{liq}}{H}\right) \geq 0.925$	$g(H_{liq} / H) = 8.741 \cdot \exp\left(-0.542 \frac{H_{liq}}{H}\right) \geq 0.918$
H (m)	$h(H) = 3.127 \cdot \exp(-0.285H) \geq 1.036$	$h(H) = 2.933 \cdot \exp(-0.269H) \geq 1.032$

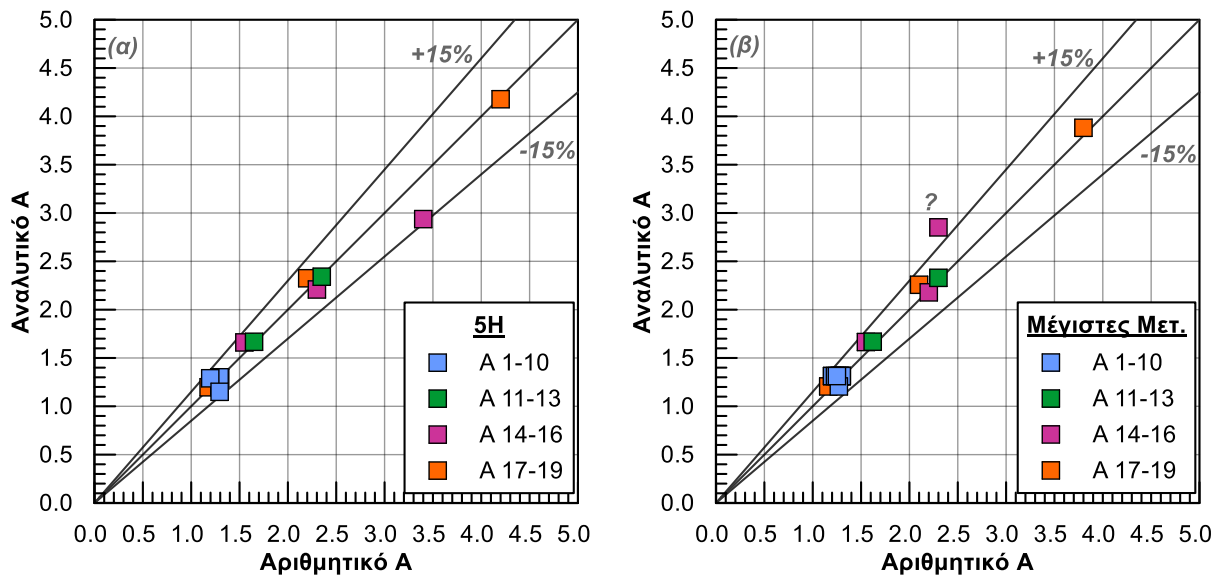
6.2 Αξιολόγηση Αναλυτικών Σχέσεων

6.2.1 Συγκριτική αξιολόγηση σχέσεων για τον συντελεστή A

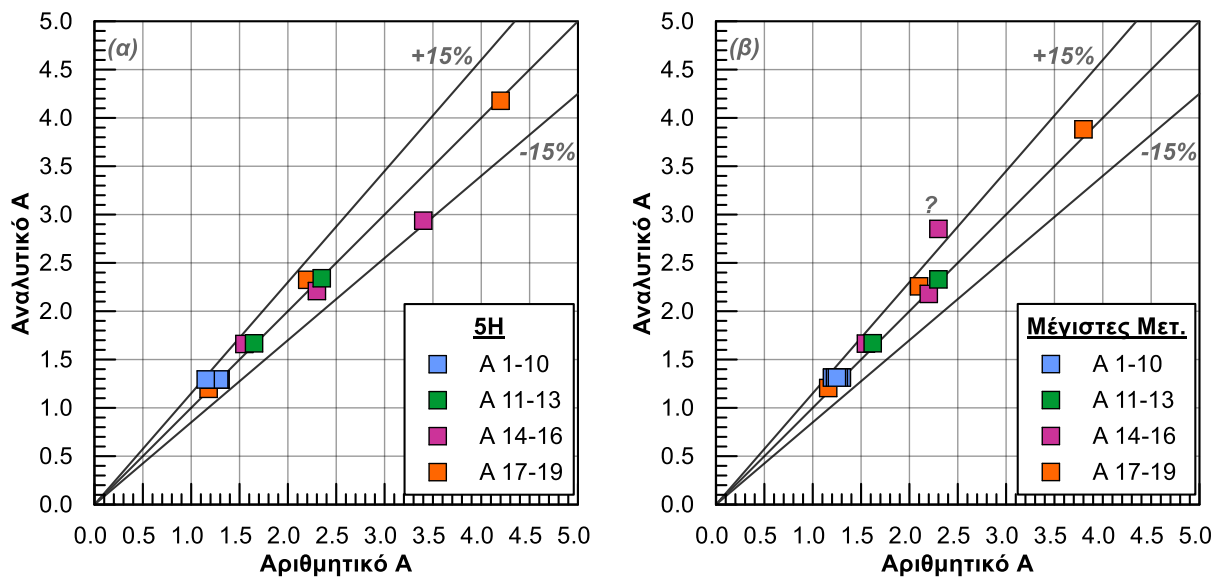
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των αναλυτικών σχέσεων για τον υπολογισμό του συντελεστή A παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.1** και στο **Σχήμα 6.2** όπου συγκρίνονται απευθείας με τις αντίστοιχες αριθμητικές τιμές που εκτιμήθηκαν αρχικά για τις πρώτες 19 αναλύσεις, όπως περιγράφεται στο ΒΗΜΑ 1 της Ενότητας 5.2.

Η σύγκριση δηλαδή γίνεται σε διάγραμμα μορφής «1 προς 1», όπου στον κατακόρυφο άξονα βρίσκονται οι τιμές του συντελεστή A που προέκυψαν με χρήση των Εξ. (6.1) έως (6.4) και στον οριζόντιο άξονα οι τιμές που προέκυψαν αριθμητικά.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με εφαρμογή των Εξ. (6.1) και (6.2) για την παράμετρο H^*_{liq}/H , παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.1**, ενώ τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν με εφαρμογή των Εξ. (6.3) και (6.4) για την παράμετρο H_{liq}/H , παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.2**. Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις τα σημεία που προκύπτουν από τη σύγκριση αυτή εντοπίζονται εντός ενός εύρους απόκλισης $\pm 15\%$, που για την παρούσα Διπλωματική Εργασία θεωρείται ικανοποιητικής ακρίβειας κι επομένως θεωρούμε ότι οι τιμές του A που προκύπτουν από τις αναλυτικές Εξ. (6.1) & (6.2) και (6.3) & (6.4) είναι σε συστηματικά καλή συμφωνία με τις αντίστοιχες των αριθμητικών αναλύσεων. Συγκρίνοντας επιπλέον μεταξύ τους τα δύο Σχήματα, δεν φαίνεται να προκύπτει εμφανής διαφορά ούτως ώστε να τεκμηριωθεί η καλύτερη συμπεριφορά μίας από τις δύο παραμέτρους H^*_{liq}/H και H_{liq}/H όσον αφορά στην εκτίμηση του συντελεστή A.



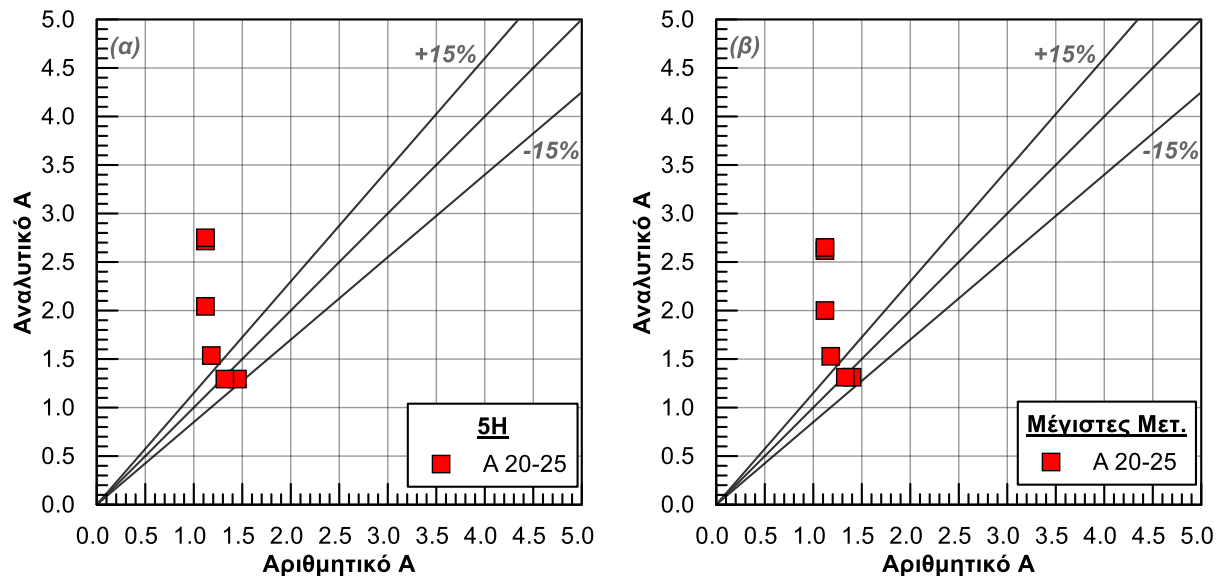
Σχήμα 6.1: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου μέσω των Εξισώσεων (6.1) & (6.2) συντελεστή A, με τον αντίστοιχο από τις αριθμητικές αναλύσεις 1-19 (α) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανού και (β) για τις μέγιστες μετακινήσεις.



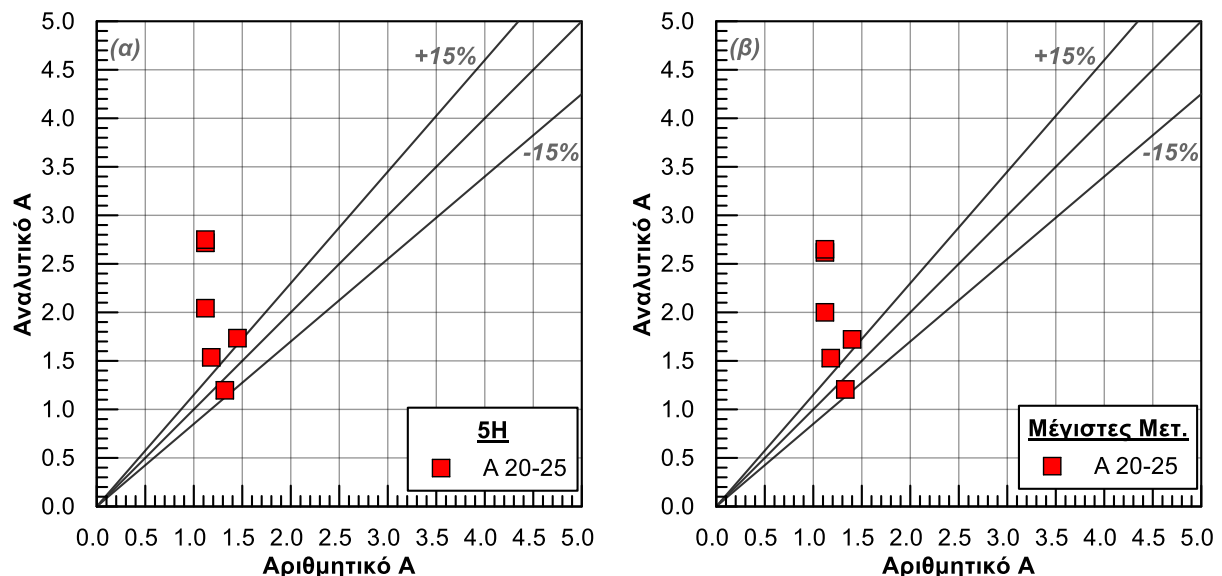
Σχήμα 6.2: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου μέσω των Εξ. (6.3) & (6.4) συντελεστή A, με τον αντίστοιχο από τις αριθμητικές αναλύσεις 1-19 (α) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανού και (β) για τις μέγιστες μετακινήσεις.

Παρατηρούμε επίσης πως για όλα σχεδόν τα σημεία η ακρίβεια των αναλυτικών προβλέψεων είναι εξίσου καλή για τις μετακινήσεις σε απόσταση 5H και για τις μέγιστες μετακινήσεις. Το μοναδικό σημείο που φαίνεται να ξεπερνάει οριακά το όριο του $\pm 15\%$ για αυτές τις 19 αναλύσεις είναι εκείνο που αντιστοιχεί στην ανάλυση 14 ($H = 1\text{ m}$) για μέγιστες μετακινήσεις, και σημειώνεται με μωβ χρώμα (ομάδα αναλύσεων με μεταβλητό βάθος καναλιού H). Κατά τα άλλα οι διαφορές μεταξύ των δύο ομάδων προβλέψεων είναι μικρές και δεν τεκμηριώνουν συστηματικό και σημαντικό προβάδισμα της μίας έναντι της άλλης.

Η ίδια διαδικασία σύγκρισης ακολουθήθηκε και για τις επιπλέον αναλύσεις 20 έως 25, των οποίων τα χαρακτηριστικά δεν χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή και διατύπωση των αναλυτικών σχέσεων υπολογισμού του A. Έτσι αναμένεται ότι τα αποτελέσματα αυτών των συγκρίσεων θα έχουν μεγαλύτερη διασπορά. Τα εν λόγω αποτελέσματα αξιολογούνται στο **Σχήμα 6.3** και στο **Σχήμα 6.4** που ακολουθούν.



Σχήμα 6.3: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου μέσω των Εξ. (6.1) & (6.2) συντελεστή A, με τον αντίστοιχο από τις αριθμητικές αναλύσεις 20-25 (α) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και (β) για τις μέγιστες μετακινήσεις.



Σχήμα 6.4: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου μέσω των Εξ. (6.3) & (6.4) συντελεστή A, με τον αντίστοιχο από τις αριθμητικές αναλύσεις 20-25 (α) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και (β) για τις μέγιστες μετακινήσεις.

Παρατηρούμε ότι τα σημεία που αντιστοιχούν στις αναλύσεις 23 έως 25 ικανοποιούν έστω και οριακά το κριτήριο του $\pm 15\%$, που στην παρούσα Διπλωματική Εργασία θεωρείται ικανοποιητικής ακρίβειας, ενώ τα υπόλοιπα τρία σημεία των αναλύσεων 20 έως 22 ξεφεύγουν συντηρητικά, σημειώνοντας απόκλιση από τη διαγώνιο μεγαλύτερη του $+15\%$. Αυτό οφείλεται πρώτον στην ιδιαιτερότητα και στους μηχανισμούς των δεδομένων αναλύσεων (20 έως 22) που διαφέρουν των υπολοίπων, όπως έχει ήδη περιγραφεί στα Κεφάλαια 4 & 5. Κατά δεύτερον μπορεί να αποδοθεί στο ότι τα δεδομένα των αναλύσεων αυτών βρίσκονται εκτός του εύρους τιμών που χρησιμοποιήθηκαν για την διατύπωση των Εξ. (6.1) έως (6.4). Επομένως οι τιμές αυτές βρίσκονται εκτός του «πεδίου ορισμού» των συναρτήσεων $g(H^*_{liq}/H)$ και $g(H_{liq}/H)$ και άρα τα αποτελέσματα δεν μπορούν να είναι αντιπροσωπευτικά. Παρόλα αυτά, εφόσον οι τιμές του συντελεστή A που εκτιμώνται αναλυτικά, αποκλίνουν προς τα θετικά του $+15\%$, είναι περισσότερο συντηρητικές από τις αντίστοιχες αριθμητικές και ως εκ τούτου μπορούν να χαρακτηριστούν αποδεκτές.

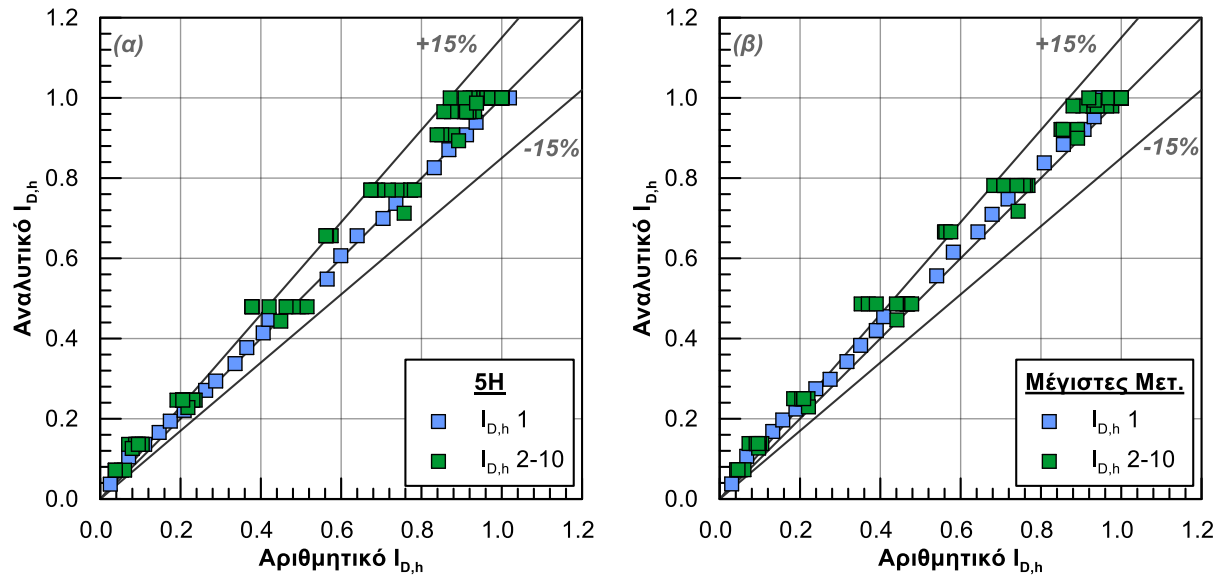
Τέλος η εφαρμογή των Εξ. (6.1) & (6.2) (**Σχήμα 6.3**) έναντι των (6.3) & (6.4) (**Σχήμα 6.4**) φαίνεται να δίνει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα, υποδεικνύοντας ενδεχομένως μεγαλύτερη αξιοπιστία στη χρήση της παραμέτρου H^*_{liq}/H έναντι της H_{liq}/H . Η παρατήρηση αυτή απαιτεί όμως περαιτέρω διερεύνηση λόγω του περιορισμένου αριθμού των αναλύσεων.

6.2.2 Συγκριτική αξιολόγηση σχέσεων για το συντελεστή $I_{D,h}$

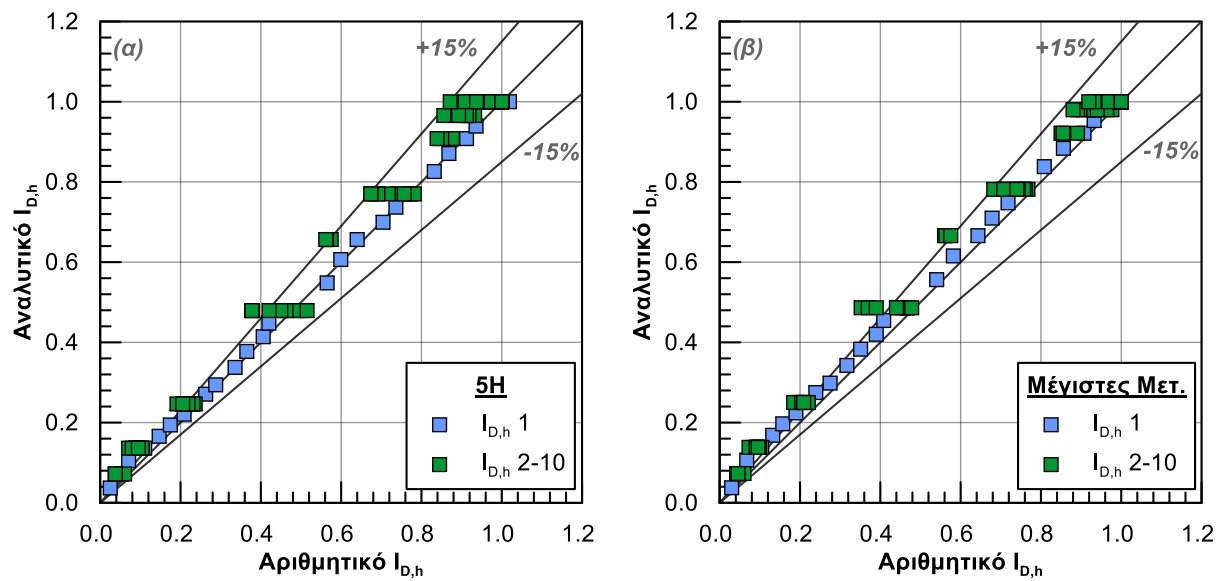
Κατ' αναλογία με την Ενότητα 6.2.1, στην παρούσα Ενότητα γίνεται εφαρμογή των αναλυτικών σχέσεων που διατυπώθηκαν για τον υπολογισμό του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ και τα αποτελέσματα αυτών συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα που έχουν προκύψει από το σύνολο των αναλύσεων. Η σύγκριση γίνεται μέσω των συγκριτικών διαγραμμάτων «1 προς 1» στο **Σχήμα 6.5** έως και το **Σχήμα 6.16** που ακολουθούν. Στον οριζόντιο άξονα αντιστοιχούν οι «αριθμητικές» τιμές του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ που προέκυψαν απευθείας από τις αναλύσεις του Κεφαλαίου 4, ενώ στον κατακόρυφο άξονα αντιστοιχούν οι τιμές του εκτιμώμενου διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ από τις Εξ. (6.1) έως (6.4).

Στα **Σχήμα 6.5** και **Σχήμα 6.6** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις αναλύσεις 1 έως 10 (**Πίνακας 5.1**). Αντίστοιχα στο **Σχήμα 6.7** και στο **Σχήμα 6.8** αξιολογούνται τα αποτελέσματα για την ομάδα αναλύσεων με μεταβλητή περίοδο διέγερσης T_{exc} (αναλύσεις 11-13), στο **Σχήμα 6.9** και στο **Σχήμα 6.10** για την ομάδα αναλύσεων με μεταβλητό βάθος καναλιού H (αναλύσεις 14-16), ενώ στο **Σχήμα 6.11** και στο **Σχήμα 6.12** για την ομάδα αναλύσεων με μεταβλητό πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου H_{liq} (αναλύσεις 17-19).

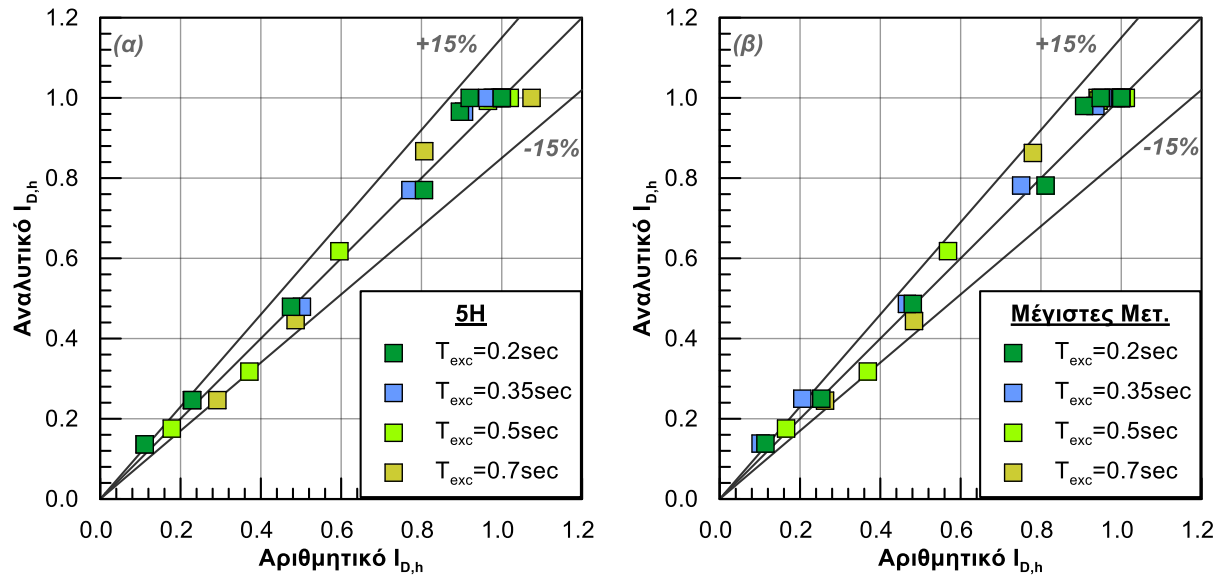
Για λόγους σύγκρισης και πιο άμεσης εποπτείας, σε όλα τα διαγράμματα σημειώνονται με θαλασσί χρώμα τα σημεία που αντιστοιχούν στη βασική σειρά αναλύσεων (ανάλυση 1).



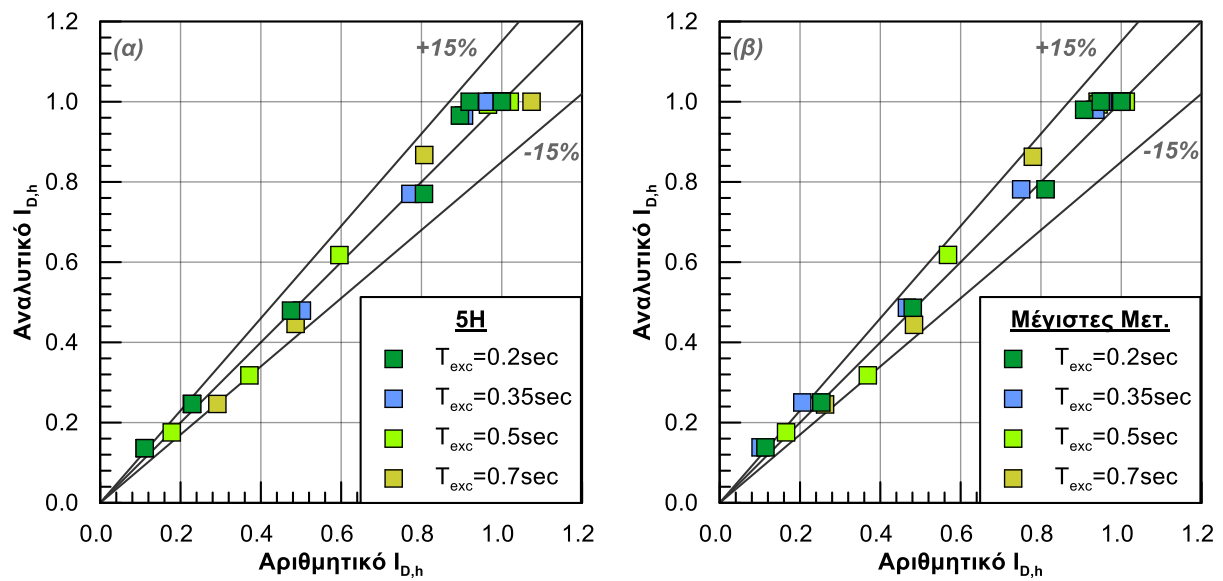
Σχήμα 6.5: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου μέσω των Εξ. (6.1) & (6.2) διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, με τον αντίστοιχο από τις αριθμητικές αναλύσεις 1-10 (α) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και (β) για τις μέγιστες μετακινήσεις.



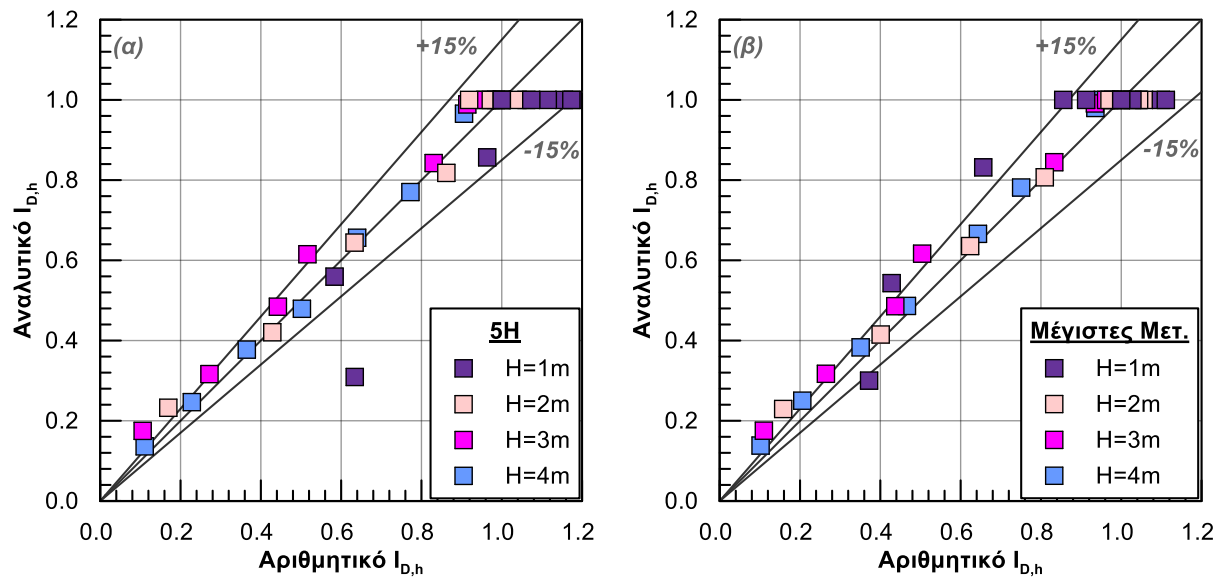
Σχήμα 6.6: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου μέσω των Εξ. (6.3) & (6.4) διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, με τον αντίστοιχο από τις αριθμητικές αναλύσεις 1-10 (α) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και (β) για τις μέγιστες μετακινήσεις.



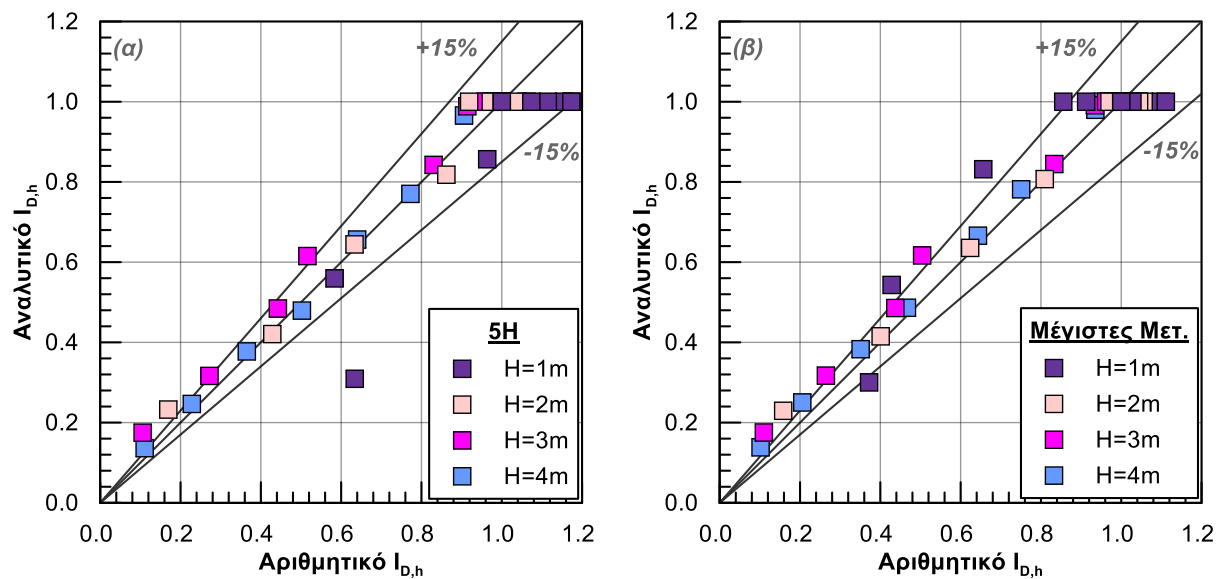
Σχήμα 6.7: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου μέσω των Εξ. (6.1) & (6.2) διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, με τον αντίστοιχο από τις αριθμητικές αναλύσεις 11-13 (α) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και (β) για τις μέγιστες μετακινήσεις.



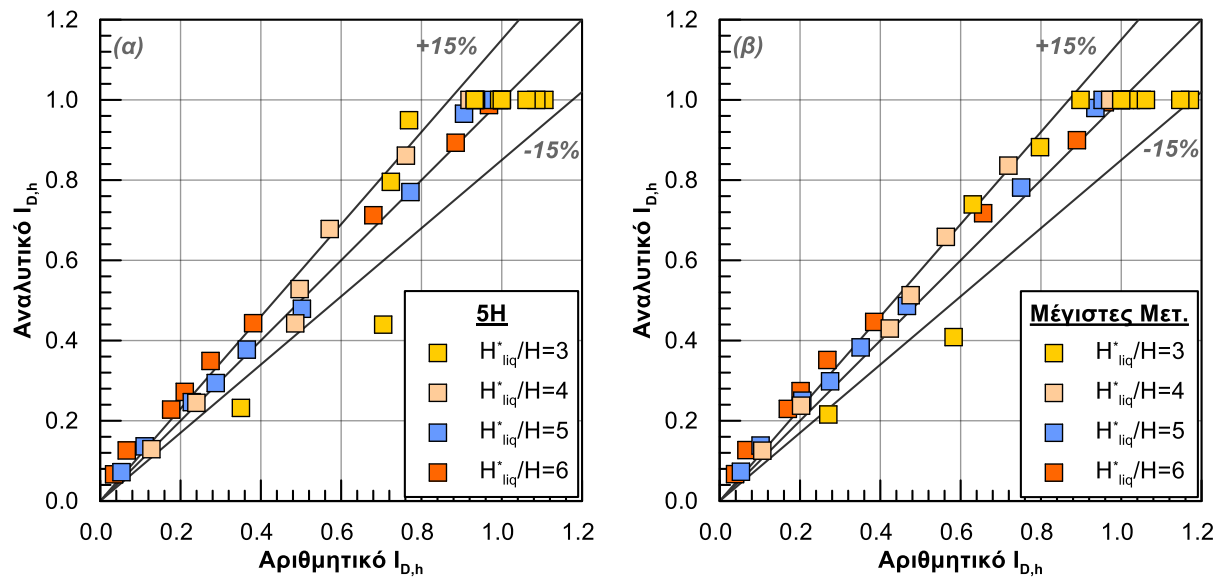
Σχήμα 6.8: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου μέσω των Εξ. (6.3) & (6.4) διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, με τον αντίστοιχο από τις αριθμητικές αναλύσεις 11-13 (α) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και (β) για τις μέγιστες μετακινήσεις.



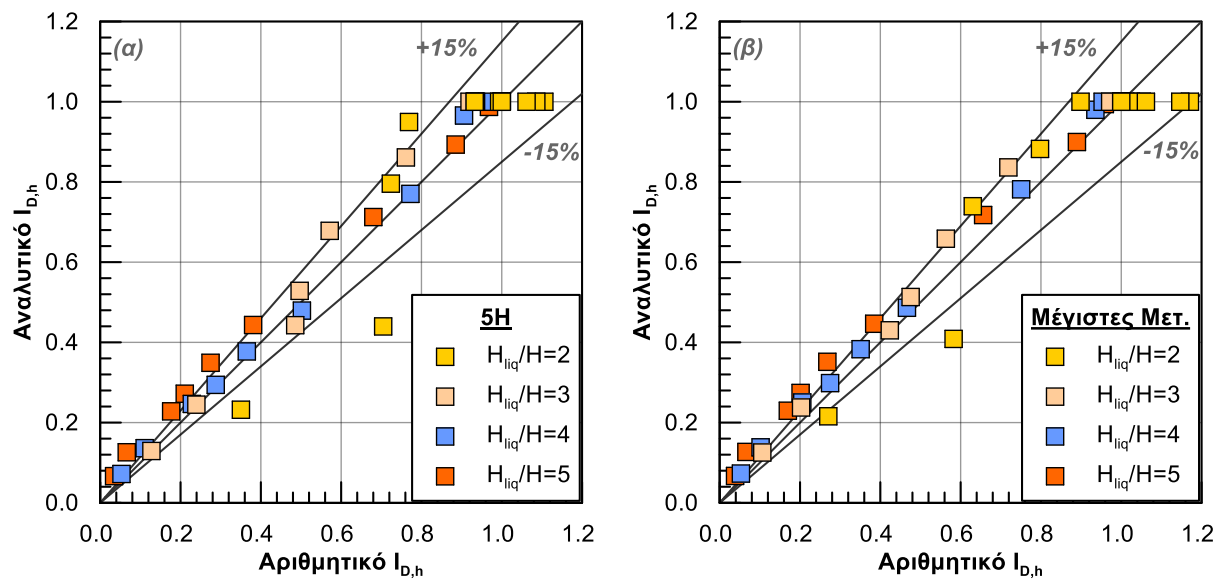
Σχήμα 6.9: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου μέσω των Εξ. (6.1) & (6.2) διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, με τον αντίστοιχο από τις αριθμητικές αναλύσεις 14-16 (α) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και (β) για τις μέγιστες μετακινήσεις.



Σχήμα 6.10: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου μέσω των Εξ. (6.3) & (6.4) διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, με τον αντίστοιχο από τις αριθμητικές αναλύσεις 14-16 (α) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και (β) για τις μέγιστες μετακινήσεις.



Σχήμα 6.11: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου μέσω των Εξ. (6.1) & (6.2) διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, με τον αντίστοιχο από τις αριθμητικές αναλύσεις 17-19 (α) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και (β) για τις μέγιστες μετακινήσεις.



Σχήμα 6.12: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου μέσω των Εξ. (6.3) & (6.4) διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, με τον αντίστοιχο από τις αριθμητικές αναλύσεις 17-19 (α) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και (β) για τις μέγιστες μετακινήσεις.

Φαίνεται λοιπόν να υπάρχει καλή συμφωνία ανάμεσα στις προβλεπόμενες τιμές και σε εκείνες των αριθμητικών αναλύσεων. Ειδικότερα για την ομάδα αναλύσεων με μεταβλητή τιμή περιόδου διέγερσης T_{exc} , όλες οι εκτιμώμενες τιμές του $I_{D,h}$ μέσω των αναλυτικών σχέσεων αποκλίνουν έως και $\pm 15\%$ από τις προβλεπόμενες αριθμητικές τιμές τους.

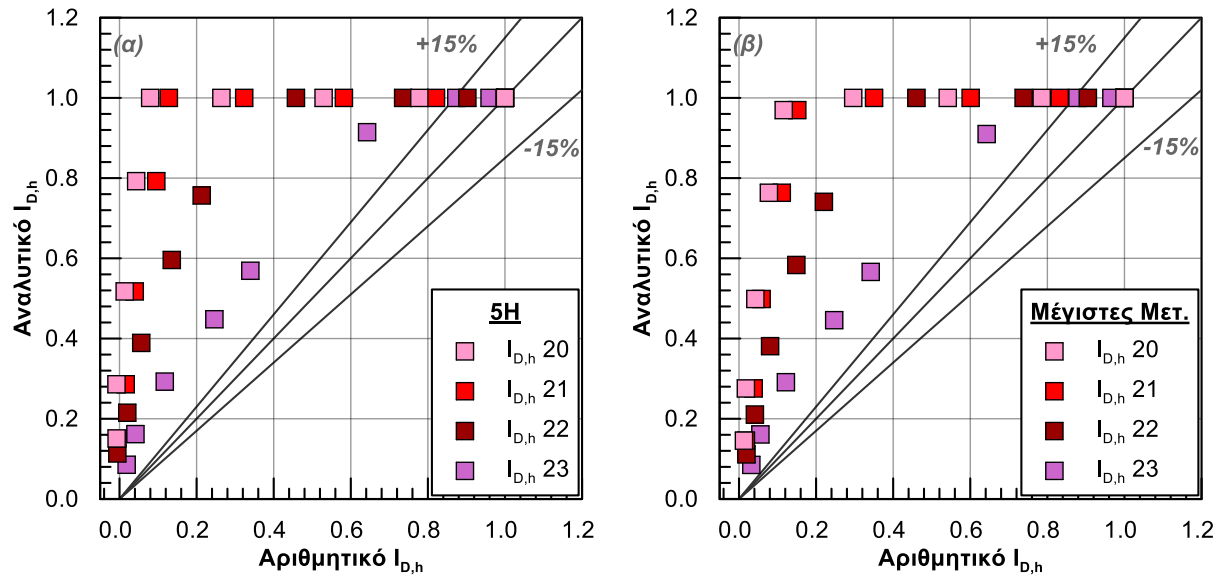
Για τις ομάδες αναλύσεων με μεταβλητό βάθος καναλιού H , η συμπεριφορά είναι παρόμοια. Επιπλέον όμως εντοπίζεται μία ελαφριά τάση για υπερεκτίμηση του συντελεστή $I_{D,h}$, ιδιαίτερα στις πιο χαμηλές τιμές αυτού, που αντιστοιχούν κατά κανόνα σε μικρές τιμές του λόγου B/H . Το γεγονός

αυτό οδηγεί σε ελαφρώς μικρότερη απομείωση των εκτιμώμενων οριζόντιων μετακινήσεων D_h , δρώντας έτσι υπέρ της ασφαλείας. Εξαιρέση αποτελούν και πάλι τα αποτελέσματα για την ανάλυση με βάθος καναλιού $H = 1$ m, για την οποία δεν εντοπίζεται συστηματική συμπεριφορά στην εκτίμηση του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, ο οποίος για τις μέγιστες μετακινήσεις υπερ-εκτιμάται, ενώ για τις μετακινήσεις σε όρους $5H$ υπο-εκτιμάται.

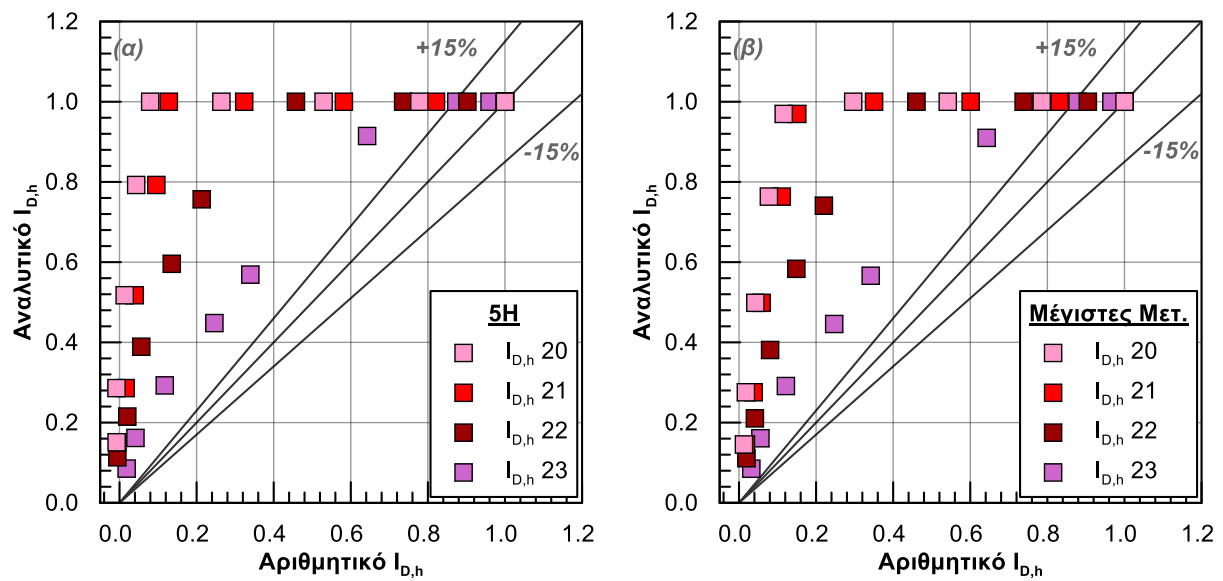
Όμοια εικόνα με την ανωτέρω παρατηρείται και για τις ομάδες αναλύσεων με μεταβλητό πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου H_{liq} . Μόνη εξαιρέση αποτελούν τα σημεία που αντιστοιχούν στην ανάλυση για $H_{liq} = 8$ m και $B/H = 1$ & 2 που υποδεικνύουν μη συντηρητική υπο-εκτίμηση του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, πέραν του ορίου απόκλισης -15% , αντίθετα με όλες τις υπόλοιπες τιμές που δείχνουν συντηρητική υπερ-εκτίμηση έως $+15\%$. Έτσι, και για την τιμή αυτή το H_{liq} μπορούμε να θεωρήσουμε πως οι αναλυτικές εκτιμήσεις του $I_{D,h}$ είναι αποδεκτές.

Τέλος, σε όλα τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται πύκνωση των σημείων για αναλυτική πρόβλεψη της τιμής του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h} \approx 1.0$. Αυτό συμβαίνει καθώς η μέγιστη τιμή του αναλυτικού διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ είναι εξ' ορισμού ίση με τη μονάδα, σε αντίθεση με τις τιμές που έχουν προκύψει αριθμητικά από τις αναλύσεις που τυχαίνει για ορισμένους μεγάλους λόγους B/H να είναι μεγαλύτερες από $I_{D,h} = 1.0$. Συνεπώς όλα τα σημεία που στα διαγράμματα του Παρατήματος Α ξεπερνούσαν την τιμή $I_{D,h} = 1.0$, φαίνεται να αποκλίνουν μη συντηρητικά από τη διαγώνιο στο **Σχήμα 6.5** έως και το **Σχήμα 6.12**. Η απόκλιση όμως αυτή μπορεί να θεωρηθεί πλασματική, δεδομένου ότι ο διορθωτικός συντελεστής έχει πρακτικό νόημα μόνο για $I_{D,h} \leq 1$.

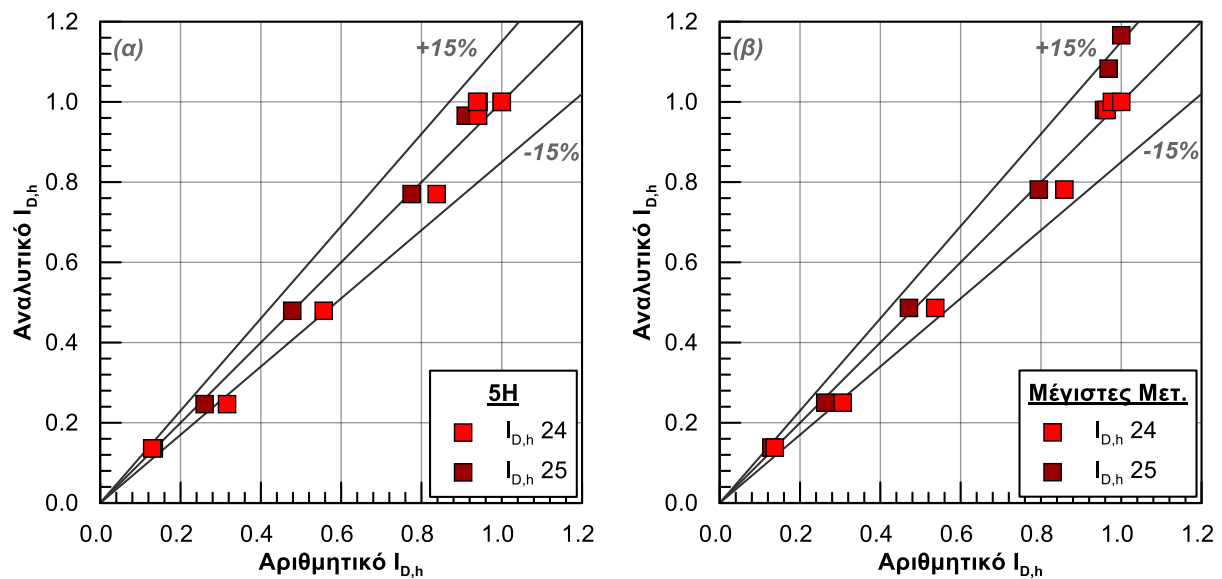
Η ίδια διαδικασία σύγκρισης ακολουθήθηκε για τις επιπλέον αναλύσεις 20 έως 25.. Τα αποτελέσματα αξιολογούνται στο **Σχήμα 6.13** έως και το **Σχήμα 6.16** που ακολουθούν. Στα δύο πρώτα διαγράμματα (**Σχήμα 6.13** και **Σχήμα 6.14**) γίνεται η σύγκριση για τις ομάδες των αναλύσεων με μεταβλητό πάχος κρούστας (ίσο με το βάθος καναλιού $H_{cr} = H$) και μεταβλητό πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου H_{liq} (αναλύσεις 20-23), ενώ στα δύο επόμενα (**Σχήμα 6.15** και **Σχήμα 6.16**) γίνεται η σύγκριση για τις ομάδες των αναλύσεων 24 και 25, όπου το πάχος της αργιλικής κρούστας H_{cr} και το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου H_{liq} είναι μεταβλητά, ενώ το βάθος του καναλιού παραμένει σταθερό.



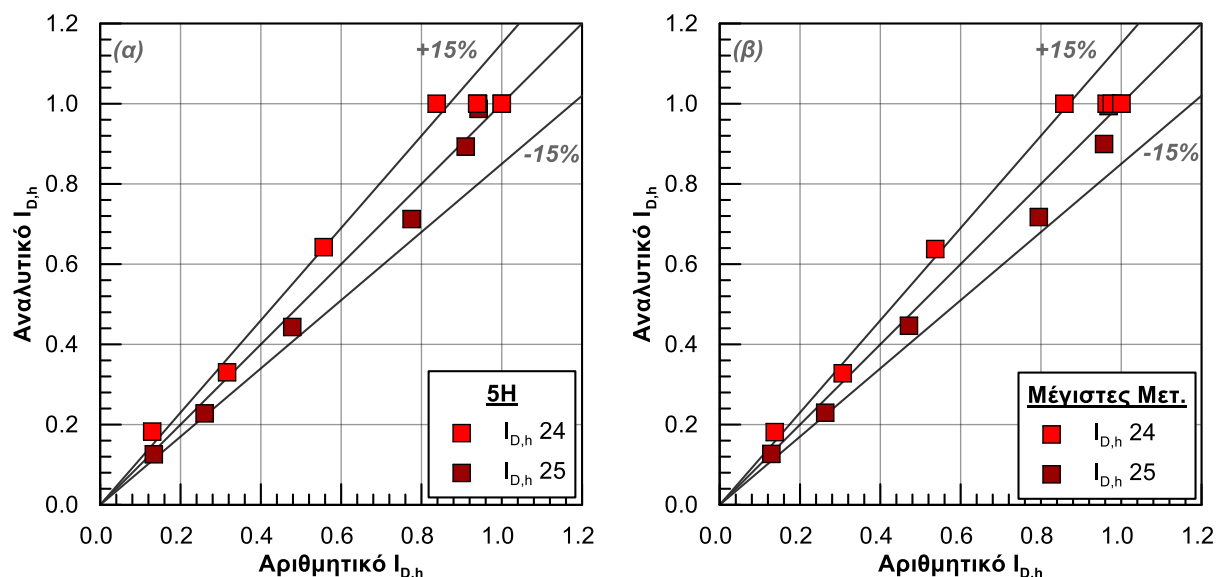
Σχήμα 6.13: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου μέσω των Εξ. (6.1) & (6.2) διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, με τον αντίστοιχο από τις αριθμητικές αναλύσεις 20-23 (α) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και (β) για τις μέγιστες μετακινήσεις.



Σχήμα 6.14: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου μέσω των Εξ. (6.3) & (6.4) διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, με τον αντίστοιχο από τις αριθμητικές αναλύσεις 20-23 (α) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και (β) για τις μέγιστες μετακινήσεις.



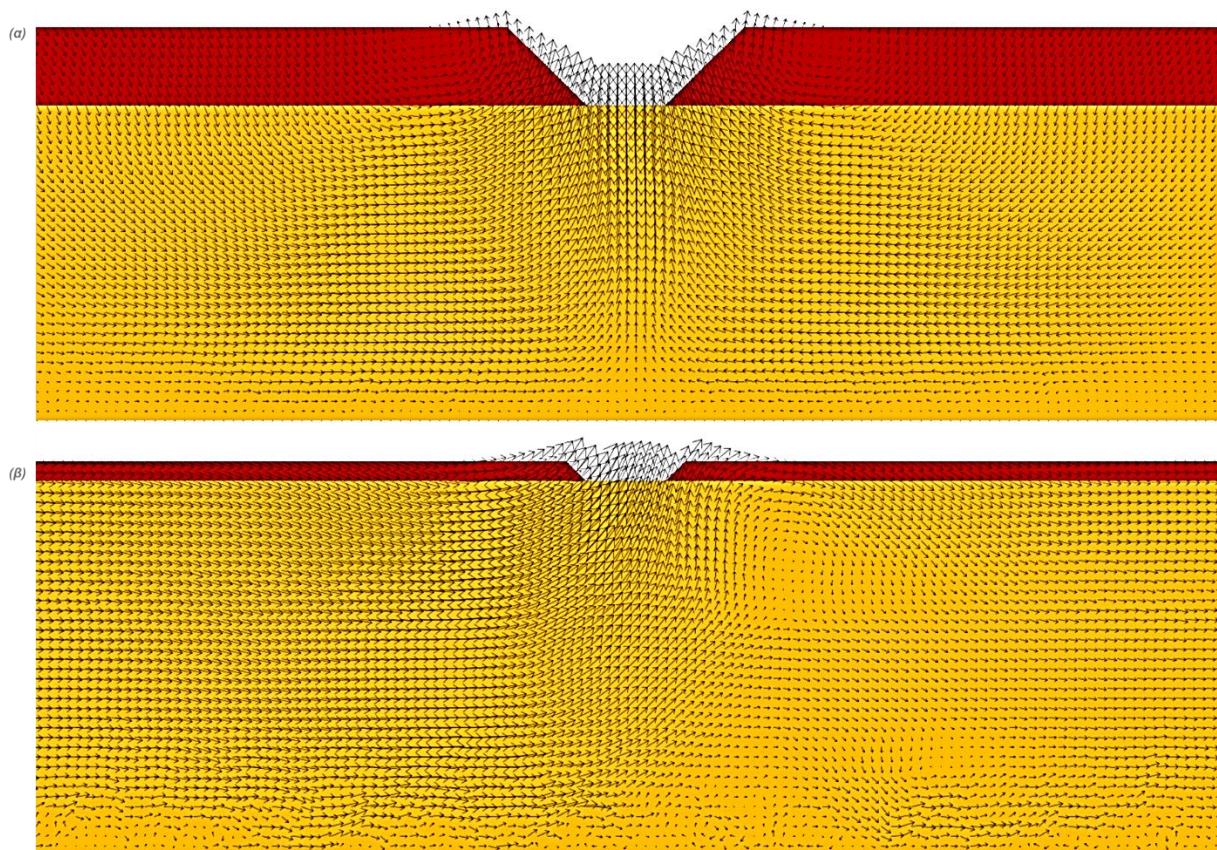
Σχήμα 6.15: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου μέσω των Εξ. (6.1) & (6.2) διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, με τον αντίστοιχο από τις αριθμητικές αναλύσεις 24-25 (α) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και (β) για τις μέγιστες μετακινήσεις.



Σχήμα 6.16: Συγκριτικό διάγραμμα του εκτιμώμενου μέσω των Εξ. (6.3) & (6.4) διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, με τον αντίστοιχο από τις αριθμητικές αναλύσεις 24-25 (α) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και (β) για τις μέγιστες μετακινήσεις.

Παρατηρείται ότι για τις αναλύσεις 24 και 25 (Σχήμα 6.15 και Σχήμα 6.16) η αναλυτική πρόβλεψη του $I_{D,h}$ είναι ικανοποιητικά ακριβής, παρά το γεγονός ότι οι εν λόγω αναλύσεις δεν χρησιμοποιήθηκαν για την διατύπωση των αναλυτικών σχέσεων. Αντίθετα, για τις ομάδες αναλύσεων 20-23, οι αναλυτικές σχέσεις είναι λίγο (ανάλυση 23) έως πολύ (αναλύσεις 20-22) υπέρ-συντηρητικές καθώς υπερ-εκτιμούν σημαντικά τις τιμές του $I_{D,h}$ που προέκυψαν απ'ευθείας από τις αριθμητικές αναλύσεις. Από προκαταρκτική διερεύνηση των αιτιών αυτής της απόκλισης προέκυψε ότι ο λόγος δεν είναι τόσο ότι οι παράμετροι σχεδιασμού δεν εμπίπτουν στο «πεδίο ορισμού» των αναλυτικών

σχέσεων, όσο ότι αλλάζουν οι μηχανισμοί που διέπουν τις μετακινήσεις του εδάφους στις αντικρινές όχθες. Για παράδειγμα, στο **Σχήμα 6.17** συγκρίνονται οι παραμορφωμένοι κάρναβοι των αριθμητικών αναλύσεων από την βασική ανάλυση (#1) καθώς και από την ανάλυση (#20) με $H = 1$ m. Παρατηρείται ότι στην δεύτερη ανάλυση, οι παραμένουσες μετατοπίσεις στο τέλος της δόνησης δεν είναι συμμετρικές, όπως στην βασική ανάλυση, αλλά δείχνουν μονόπλευρη αστοχία, (από αριστερά προς τα δεξιά) που περιλαμβάνει και τις δύο όχθες. Δεν γνωρίζουμε επί του παρόντος που οφείλεται αυτή η διαφοροποίηση. Αποτελεί όμως ευτύχημα ότι αφορά περιπτώσεις μειωμένου πρακτικού ενδιαφέροντος και επιπλέον οδηγεί σε συντηρητικά αποτελέσματα.



Σχήμα 6.17: Διανύσματα των μετακινήσεων για την κρίσιμη περιοχή του καννάβου, για $B = 4$ m **(α)** για τη βασική ανάλυση 1, όπου αναπτύσσονται δύο κύκλοι αστοχίας και **(β)** για την ανάλυση 20 όπου αναπτύσσεται μόνο ένας κύκλος αστοχίας.

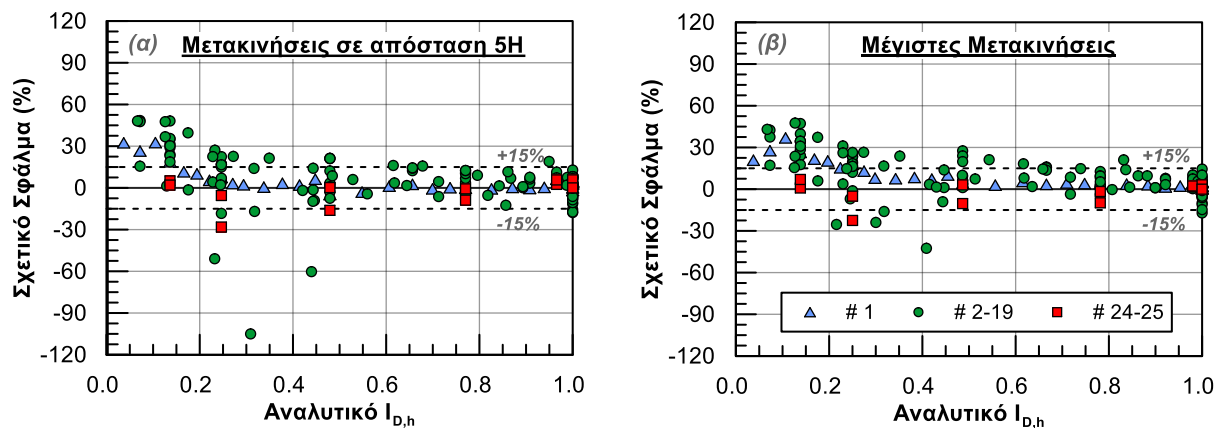
6.3 Εκτίμηση «Σχετικού Σφάλματος» Αναλυτικών Σχέσεων

Στην παρούσα ενότητα γίνεται η συγκριτική αξιολόγηση των αναλυτικών σχέσεων που διατυπώθηκαν στο Κεφάλαιο 5 για τον υπολογισμό του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με (α) τη χρήση των μετακινήσεων σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρανούς ή των μέγιστων μετακινήσεων, (β) τη χρήση του όρου H^*_{liq}/H έναντι του H_{liq}/H στον υπολογισμό του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, και (γ) το εύρος των παραμέτρων σχεδιασμού για το οποίο τα αποτελέσματα θεωρούνται αποδεκτά.

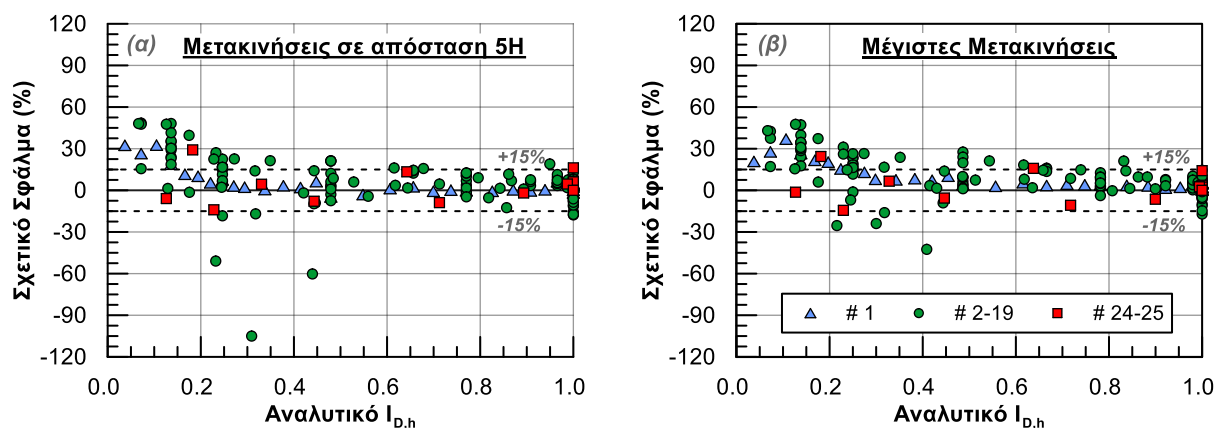
Για το σκοπό αυτό έγινε στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με τη χρήση των σχέσεων (6.1) έως (6.4), με την βοήθεια του «Σχετικού Σφάλματος». Συγκεκριμένα, για κάθε ανάλυση για την οποία εκτιμήθηκε αναλυτικά ο διορθωτικός συντελεστής $I_{D,h}$ υπολογίστηκε επιπλέον το «Σχετικό Σφάλμα» (Relative Error) σύμφωνα με τη σχέση που ακολουθεί:

$$\text{Σχετικό Σφάλμα} = \frac{\text{Αναλυτική τιμή} - \text{Αριθμητική τιμή}}{\text{Αναλυτική τιμή}} \quad (6.5)$$

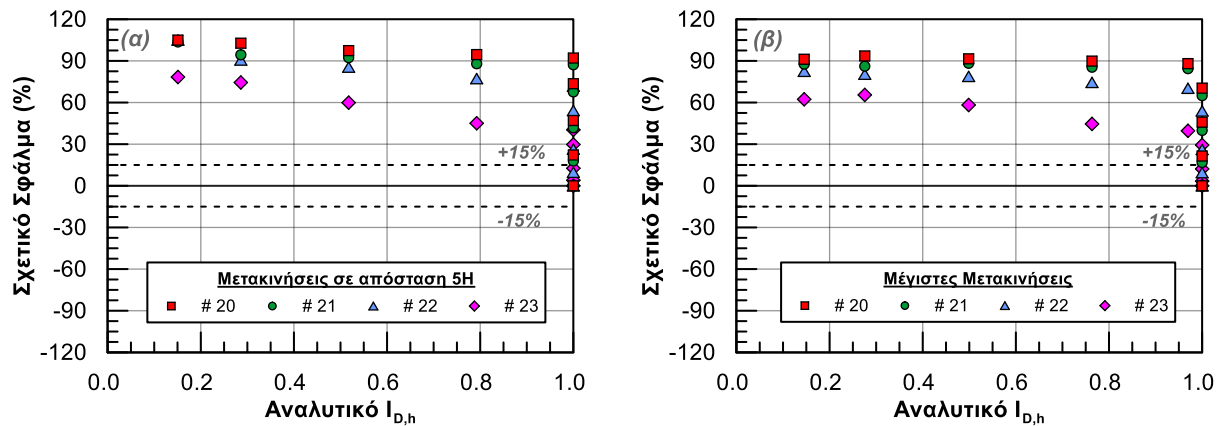
Τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας παρουσιάζονται και αξιολογούνται στο **Σχήμα 6.18** έως και το **Σχήμα 6.21**. Στον οριζόντιο άξονα των διαγραμμάτων απεικονίζεται η τιμή του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ που έχει υπολογιστεί αναλυτικά με την εκάστοτε Εξ. (6.1) έως (6.4), ενώ στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το αντίστοιχο Σχετικό Σφάλμα. Επιπλέον με διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται το αποδεκτό εύρος του Σχετικού Σφάλματος ($\pm 15\%$).



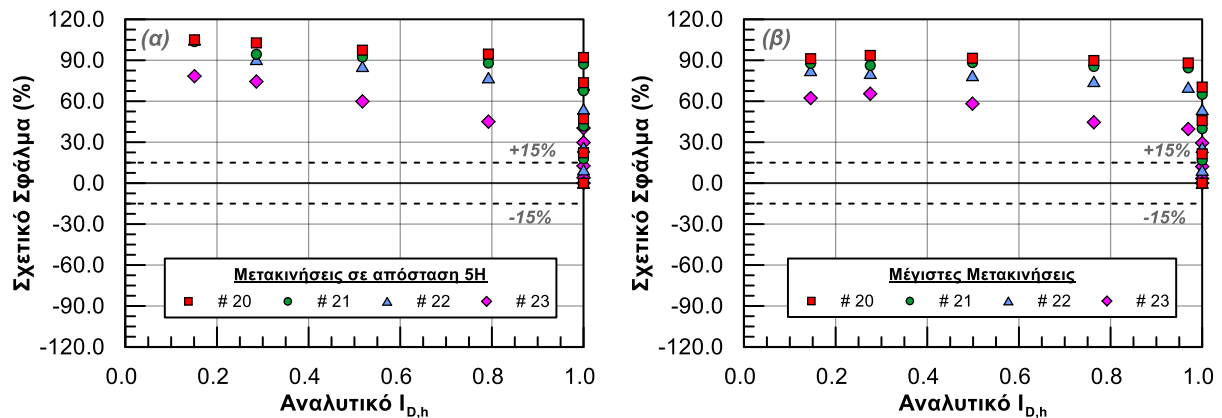
Σχήμα 6.18: Διάγραμμα του αναλυτικού διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ συναρτήσει του Σχετικού Σφάλματος (%) για τις αναλύσεις 1-19 και 24-25 **(α)** για εφαρμογή της Εξ. (6.1) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και **(β)** για εφαρμογή της Εξ. (6.2) για τις μέγιστες μετακινήσεις.



Σχήμα 6.19: Διάγραμμα του αναλυτικού διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ συναρτήσει του Σχετικού Σφάλματος (%) για τις αναλύσεις 1-19 και 24-25 **(α)** για εφαρμογή της Εξ. (6.3) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και **(β)** για εφαρμογή της Εξ. (6.4) για τις μέγιστες μετακινήσεις.



Σχήμα 6.20: Διάγραμμα του αναλυτικού διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ συναρτήσει του Σχετικού Σφάλματος (%) για τις αναλύσεις 20-23 (α) για εφαρμογή της Εξ. (6.1) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και (β) για εφαρμογή της Εξ. (6.2) για τις μέγιστες μετακινήσεις.



Σχήμα 6.21: Διάγραμμα του αναλυτικού διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ συναρτήσει του Σχετικού Σφάλματος (%) για τις αναλύσεις 20-23 (α) για εφαρμογή της Εξ. (6.3) για μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς και (β) για εφαρμογή της Εξ. (6.4) για τις μέγιστες μετακινήσεις.

Παρατηρούμε ότι για το **Σχήμα 6.18** και το **Σχήμα 6.19**, για τις αναλύσεις με αποδεκτή συνολικά ακρίβεια (δηλαδή 1-19 και 24-25), το Σχετικό Σφάλμα των σημείων που προέκυψαν από τη χρήση των Εξ. (6.1) και (6.3) που αναφέρονται σε μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς, είναι όμοιο με αυτό των σημείων που προέκυψαν με τη χρήση των Εξ. (6.2) και (6.4) για τις μέγιστες μετακινήσεις. Μόνη διαφορά συνιστά η ύπαρξη τριών σημείων στα διαγράμματα για 5H που ξεπερνούν κατά πολύ το όριο του -15%, αγγίζοντας τιμές Σχετικού Σφάλματος περίπου ίσες με -105%, -51% και -60%. Τα σημεία αυτά αντιστοιχούν στις αναλύσεις για $H = 1 \text{ m}$ (#14) και λόγο $B/H = 2$ και για $H_{liq} = 8 \text{ m}$ (#17) και λόγους $B/H = 1$ και 2 αντίστοιχα. Οι εν λόγω αποκλίσεις αφορούν μόνο σε πεπερασμένο αριθμό σημείων και δεν είναι συστηματικές. Σε κάθε περίπτωση όμως θα πρέπει να υπογραμμισθούν καθώς οι τιμές τους είναι αρκετά μεγάλες, δηλώνουν υπό-εκτίμηση του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ και διαφοροποιούν τα αποτελέσματα σε όρους 5H από αυτά των μέγιστων μετακινήσεων, καθιστώντας τα λιγότερο αξιόπιστα.

Ακόμη, για τις επιπλέον αναλύσεις 24 και 25, οι οποίες δεν χρησιμοποιήθηκαν στην διατύπωση των αναλυτικών σχέσεων (απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα στο **Σχήμα 6.18** και στο **Σχήμα 6.19**), παρατηρούμε από το **Σχήμα 6.19** ότι με χρήση των Εξ. (6.3) & (6.4) όπου λαμβάνεται υπόψιν ο λόγος H_{liq}/H , μόνο 2 από τα 14 σημεία ξεπερνούν το όριο του Σχετικού Σφάλματος +15% (για όρους 5H και μέγιστων μετακινήσεων). Αντίθετα, όταν εφαρμόζονται οι Εξ. (6.1) και (6.2) όπου λαμβάνεται υπόψιν ο λόγος H^*_{liq}/H (**Σχήμα 6.18**), για τα αποτελέσματα σε όρους 5H μόνο 2 από τα 14 σημεία ξεπερνούν το όριο του Σχετικού Σφάλματος -15% υποδηλώνοντας υπο-εκτίμηση του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, ενώ σε όρους μέγιστων μετακινήσεων μόνο 1 από τα 14 σημεία εντοπίζεται πέραν του ίδιου ορίου. Η διαφορά όμως αυτή δεν μπορεί από μόνη της να οδηγήσει σε κάποιο βέβαιο συμπέρασμα για την πρόκριση των Εξ. (6.1) & (6.2) έναντι των (6.3) & (6.4).

Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 6.20** και στο **Σχήμα 6.21** όπου απεικονίζονται τα αποτελέσματα των επιπλέον αναλύσεων 20 έως 23, για τις οποίες οι αναλυτικές σχέσεις χαρακτηρίστηκαν ως υπερ-συντηρητικές, δεν εντοπίζονται διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη χρήση του λόγου H^*_{liq}/H έναντι του H_{liq}/H . Και για τις δύο περιπτώσεις επιβεβαιώνεται και ποσοτικά πλέον ο υπερ-συντηρητικός χαρακτήρας των σχέσεων δεδομένου ότι το σχετικό σφάλμα για μικρές και μεσαίες τιμές του $I_{D,h}$ κυμαίνεται από +50% έως +100% περίπου.

Τέλος, για λόγους πληρότητας της σύγκρισης μεταξύ των σχέσεων και των αποτελεσμάτων που αυτές δίνουν, παρατίθενται στατιστικά στοιχεία που αποτυπώνουν την αξιοπιστία των Εξ. (6.1) έως (6.4). Συγκεκριμένα, τα στατιστικά κριτήρια που εφαρμόστηκαν ήταν η σύγκριση της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης των αποτελεσμάτων κάθε συνάρτησης, το ποσοστό του θετικού και αρνητικού Σχετικού Σφάλματος αυτών καθώς και ο λόγος των μέγιστων τιμών του Σχετικού Σφάλματος προς τις ελάχιστες τιμές αυτού. Τα παραπάνω συνοψίζει ο **Πίνακας 6.2** που ακολουθεί.

Πίνακας 6.2: Εξισώσεις παραμέτρων με επίδραση στο συντελεστή $I_{D,h}$

	Εξίσωση 6.1				Εξίσωση 6.2			
	Ποσοστό (%) < 0	Ποσοστό (%) ≥ 0	MAX/MIN	Μέση Τιμή ± Τυπική Απόκλιση	Ποσοστό (%) < 0	Ποσοστό (%) ≥ 0	MAX/MIN	Μέση Τιμή ± Τυπική Απόκλιση
$0.00 \leq I_{D,h} < 0.20$	0.51	99.49	48.43/-1.43	26.85 ± 15.59	0.00	100.00	47.55/0.85	27.80 ± 12.56
$0.20 \leq I_{D,h} < 0.60$	8.08	91.92	27.08/-105.02	1.99 ± 21.47	5.05	94.95	31.10/-42.54	8.12 ± 14.46
$0.60 \leq I_{D,h} < 1.00$	6.06	93.94	19.00/-16.14	4.41 ± 6.68	2.53	97.47	21.09/-9.82	5.74 ± 5.68
$I_{D,h} = 1.00$	7.07	92.93	12.83/-17.72	0.30 ± 6.10	7.07	92.93	14.45/-17.10	0.33 ± 5.02
	Εξίσωση 6.3				Εξίσωση 6.4			
	Ποσοστό (%) < 0	Ποσοστό (%) ≥ 0	MAX/MIN	Μέση Τιμή ± Τυπική Απόκλιση	Ποσοστό (%) < 0	Ποσοστό (%) ≥ 0	MAX/MIN	Μέση Τιμή ± Τυπική Απόκλιση
$0.00 \leq I_{D,h} < 0.20$	1.01	98.99	48.43/-5.91	27.65 ± 15.70	0.51	99.49	47.55/-1.33	28.63 ± 12.02
$0.20 \leq I_{D,h} < 0.60$	7.58	92.42	27.09/-105.01	2.60 ± 21.21	4.55	95.45	31.10/-42.53	9.17 ± 13.88
$0.60 \leq I_{D,h} < 1.00$	5.56	94.44	19.00/-12.50	4.91 ± 6.28	2.02	97.98	21.09/-10.76	6.19 ± 5.77
$I_{D,h} = 1.00$	6.57	93.43	16.21/-17.72	0.76 ± 6.35	7.07	92.93	14.45/-17.10	0.32 ± 5.01

Παρατηρούμε ότι για τις μικρές τιμές του αναλυτικού διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, που κατά κανόνα αντιστοιχεί και σε μικρές τιμές του λόγου B/H , το Σχετικό Σφάλμα παρουσιάζει μία μέση τιμή περίπου στο 27%. Στην περιοχή όπου $0.20 \leq I_{D,h} < 0.60$, η τιμή αυτή μειώνεται περίπου στο 8 - 9% για τις Εξ. (6.2) και (6.4) που αφορούν σε μέγιστες μετακινήσεις, ενώ για τις Εξ. (6.1) και (6.3) που αφορούν μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρανούς, η απομείωση είναι ακόμη μεγαλύτερη, με τη μέση τιμή να αγγίζει το 2% περίπου. Στη συνέχεια για όλες τις Εξ. (6.1) έως (6.4), το Σχετικό Σφάλμα προσεγγίζει την τιμή του 5% και για τιμή του αναλυτικού διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ ίση με τη μονάδα, η μέση τιμή του Σχετικού Σφάλματος πρακτικά μηδενίζεται, γεγονός που αναμένεται γιατί για πολύ μεγάλους λόγους B/H πρακτικά φτάνουμε την ανάλυση απείρου πλάτους καναλιού που αντιστοιχεί σε συνθήκες ελεύθερου μετώπου με αναβαθμό, όπου θεωρείται ότι $I_{D,h} \approx 1$.

Επιπλέον, τα αρνητικά ποσοστά του Σχετικού Σφάλματος είναι πολύ μικρά, της τάξης του 5% για κάθε τμήμα ($0.00 \leq I_{D,h} < 0.20$, $0.20 \leq I_{D,h} < 0.60$, $0.60 \leq I_{D,h} < 1.00$ και $I_{D,h} = 1.00$). Στο σύνολο, το ποσοστό αυτό φτάνει το 14% για τις Εξ. (6.2) και (6.4) ενώ για τις Εξ. (6.1) και (6.3) το 21%. Οι τιμές αυτές χαρακτηρίζονται ικανοποιητικές (ειδικότερα για τις πορβλέψεις σε όρους μέγιστων μετακινήσεων) καθώς δεν παρατηρείται μεγάλη υπό-εκτίμηση του διορθωτικού συντελεστή, υποδεικνύοντας ότι η μεθοδολογία υπολογισμού του $I_{D,h}$ με οποιαδήποτε Εξ. (6.1) έως (6.4) είναι ικανά συντηρητική.

Τέλος, το εύρος μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης τιμή του Σχετικού Σφάλματος αποτυπώνει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των μέγιστων και ελάχιστων τιμών του Σχετικού Σφάλματος για τις μικρές τιμές του αναλυτικού διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ ($0.00 \leq I_{D,h} < 0.20$). Για $0.20 \leq I_{D,h} < 0.60$, η διαφορά διευρύνεται καθώς το Σχετικό Σφάλμα ξεπρνάει περίπου το $\pm 30\%$, αλλά οι απόλυτες τιμές αυτού παραμένουν πολύ κοντά μεταξύ τους, «ισορροπώντας» γύρω από το μηδέν. Εξαιρέση αποτελούν οι τιμές ($MAX/MIN = 27.08/-105.02$ και $27.07/-105.01$) που προκύπτουν από τις Εξ. (6.1) και (6.3) γεγονός που επιβεβαιώνεται από το **Σχήμα 6.18α** και το **Σχήμα 6.19α**. Αντίστοιχα οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές του Σχετικού Σφάλματος που για $0.60 \leq I_{D,h} < 1.00$ και $I_{D,h} = 1.00$ βρίσκονται κοντά μεταξύ τους, καταδεικνύουν σχεδόν ισοκατανομή του Σχετικού Σφάλματος γύρω από το μηδέν, χωρίς να ξεφεύγουν πρακτικά από το $\pm 15\%$.

Επομένως όλες οι ανωτέρω παρατηρήσεις υποδεικνύουν μεγαλύτερη αξιοπιστία των Εξ. (6.2) και (6.4) έναντι των υπολοίπων. Αυτό επιβεβαιώνει το γεγονός του ότι οι μέγιστες μετακινήσεις, όπως έχει παρατηρηθεί ξανά στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, έχουν πιο συστηματική συμπεριφορά σε σχέση με τις μετακινήσεις που μετρούνται σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρανούς στην όχθη ενός καναλιού.

Κεφάλαιο 7

Σύνοψη – Συμπεράσματα – Προτάσεις

7.1 Σύνοψη

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας διερευνήθηκε η επίδραση που μπορεί να έχει το πλάτος ενός καναλιού στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h που προκαλούνται λόγω της ρευστοποίησης και της επακόλουθης πλευρικής εξάπλωσης του εδάφους στις δύο αντίκρυ όχθες του καναλιού.

Αρχικά έγινε έρευνα για τον εντοπισμό βιβλιογραφικών αναφορών και μελετών περιστατικών που σχετίζονται με την επίδραση του πλάτους καναλιού στην εξέλιξη του φαινομένου της πλευρικής εξάπλωσης, από την οποία διαπιστώθηκε ότι δεν έχει γίνει ολοκληρωμένη και στοχευμένη έρευνα προς αυτήν την κατεύθυνση. Έτσι ακολούθησε εκτεταμένη παραμετρική διερεύνηση του φαινομένου με βάση αριθμητικές αναλύσεις Πεπερασμένων Διαφορών με το λογισμικό FLAC2D.

Σαν πρώτο βήμα, εκτελέστηκε η Βασική Σειρά αναλύσεων που επιβεβαίωσε την επίδραση του πλάτους B στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h . Παράλληλα διατυπώθηκε η γενική μορφή της σχέσης μεταξύ των μετακινήσεων για ένα απείρου πλάτους κανάλι (συνθήκες ελεύθερου μετώπου με αναβαθμό) και των μετακινήσεων που αναπτύσσονται σε περιπτώσεις πεπερασμένου λόγου πλάτους προς βάθος καναλιού (B/H).

Σε επόμενο βήμα, πραγματοποιήθηκαν περίπου 200 αριθμητικές παραμετρικές αναλύσεις και εξετάστηκε η επίδραση που μπορεί να έχουν στην ανωτέρω σχέση οι ακόλουθες βασικές παράμετροι σχεδιασμού (α) κλίση i των πρανών των όχθων, (β) αστράγγιστη διατμητική αντοχής αργιλικής στρώσης C_u , (γ) σχετική πυκνότητα D_r της στρώσης άμμου, (δ) συντελεστής υδατοπερατότητας k , (ϵ) αριθμός κύριων κύκλων φόρτισης N_{cyc} της σεισμικής διέγερσης, (σ) πάχος της υπερκείμενης αργιλικής στρώσης H_{crust} , (ζ) μέγιστη εδαφική επιτάχυνση PGA , (η) περίοδος της σεισμικής διέγερσης T_{exc} , (θ) πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου H_{liq} , και (ι) βάθος καναλιού H που επιδρούν στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h .

Από την εν λόγω παραμετρική ανάλυση διαπιστώθηκε ότι ορισμένες μόνον από τις παραπάνω παραμέτρους έχουν συστηματική και σημαντική επίδραση στην απομείωση των μετατοπίσεων του εδάφους με την μείωση του πλάτους του καναλιού, και συγκεκριμένα: η περίοδος της σεισμικής διέγερσης T_{exc} , το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου H_{liq} , και το βάθος του καναλιού H . Έτσι, μετά από στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων από τις παραμετρικές αναλύσεις, η γενική σχέση συναρτήσεως του B/H που προέκυψε από την βασική ανάλυση επεκτάθηκε για να συμπεριλάβει την επίδραση και των υπολοίπων παραμέτρων ενδιαφέροντος (T_{exc} , H_{liq} και H).

7.2 Κύρια Συμπεράσματα

I. Επίδραση του πλάτους καναλιού στην ανάπτυξη οριζόντιων μετακινήσεων D_h λόγω πλευρικής εξάπλωσης

- i. Ο κρίσιμος μηχανισμός που καθορίζει την επίδραση του πλάτους του καναλιού είναι ο κύκλος αστοχίας των πρανών των όχθων. Όταν ο κύκλος αστοχίας καθενός από τα δύο πρανά των όχθων έχει ολοκληρωθεί εντός του διατιθέμενου ημί-πλάτους καναλιού, δεν υπάρχει επίδραση του πλάτους στις οριζόντιες μετακινήσεις D_h . Η επίδραση ξεκινάει όταν υπάρξει αλληλεμπλοκή μεταξύ των δύο κύκλων αστοχίας.
- ii. Το πλάτος ενός καναλιού επιδρά σημαντικά στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h λόγω πλευρικής εξάπλωσης. Η σχετική επίδρασή του στις οριζόντιες μετακινήσεις D_h , ως προς τις μετατοπίσεις για μονο-κλινή πρανή, μπορεί να αποτυπωθεί αναλυτικά μέσω ενός διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, ο οποίος για τη βασική ανάλυση δίδεται από τις σχέσεις $I_{D,h} = 1.30 \cdot (B/H) / (17 + B/H) \leq 1$ για τις μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρανούς και $I_{D,h} = 1.285 \cdot (B/H) / (17 + B/H) \leq 1$ για τις μέγιστες μετακινήσεις.
- iii. Η θεώρηση της απόστασης των $5H$, όπου H το βάθος του καναλιού, ως κρίσιμης για την ανάπτυξη των μέγιστων οριζόντιων μετακινήσεων D_h (Youd et al. 2002, 2009 & Youd 2018) δεν αποτελεί πράγματι την πλέον συστηματική μέθοδο για τον εντοπισμό των μέγιστων μετακινήσεων των πρανών. Στο πλαίσιο της μελέτης των οριζόντιων μετακινήσεων D_h που αναπτύσσονται λόγω πλευρικής εξάπλωσης παρατηρήθηκε ότι οι μέγιστες μετακινήσεις εντοπίζονται πράγματι πίσω από τη στέψη του πρανούς, αλλά όχι κατ' ανάγκη σε απόσταση $5H$ από τον πόδα. Αυτές οι μετατοπίσεις φαίνεται να συνιστούν έναν πιο σταθερό και συνεπή δείκτη, καθώς η αντίστοιχη καμπύλη που προέκυψε από τη βασική ανάλυση είναι πιο ομαλή.

II. Επίδραση παραμέτρων στην απομείωση των οριζόντιων μετακινήσεων D_h λόγω πλευρικής εξάπλωσης

- i. Η περίοδος διέγερσης T_{exc} επιδρά σημαντικά στην ανάπτυξη του λόγου των οριζόντιων μετακινήσεων D_h , για τιμές μεγαλύτερες από $T_{exc} = 0.35 \text{ sec}$ έως και την τιμή $T_{exc} = 0.7 \text{ sec}$ που εξετάστηκε. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της περιόδου διέγερσης T_{exc} , τόσο μικρότερη φαίνεται να είναι η απομείωση των οριζόντιων μετακινήσεων D_h και συνεπώς μεγαλύτερη η τιμή του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$. Η ανωτέρω επίδραση είναι περισσότερο εμφανής για μικρές τιμές του λόγου B/H .
- ii. Το πάχος H_{liq} της ρευστοποιήσιμης στρώσης επιδρά σημαντικά στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h , γεγονός που επιβεβαιώνεται από την επίδραση που έχει στην τιμή του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$. Παρατηρήθηκε ότι για πάχος μικρότερο από αυτό της βασικής ανάλυσης ($H_{liq} = 16 \text{ m}$) η τιμή του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ αυξάνεται, ενώ αντίθετα για μεγαλύτερο πάχος από αυτό της βασικής ανάλυσης ($H_{liq} = 16 \text{ m}$), οι τιμές του διορθωτικού συντελεστή μειώνονται. Συμπεραίνουμε επομένως ότι τουλάχιστον για ολόκληρο το εύρος των τιμών του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου που εξετάστηκε ($H_{liq} = 8, 12, 16, 20 \text{ m}$) η παράμετρος αυτή έχει σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h λόγω πλευρικής εξάπλωσης.
- iii. Το βάθος H του καναλιού έχει επίσης σημαντική επίδραση στην τιμή του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$, στο εύρος τιμών που εξετάστηκε. Ειδικότερα, για δεδομένη τιμή του λόγου B/H , όσο μειώνεται το βάθος του καναλιού, τόσο αυξάνονται οι τιμές του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ συγκριτικά με τις τιμές της βασικής ανάλυσης.
- iv. Όπως προαναφέρθηκε, οι υπόλοιπες παράμετροι που εξετάστηκαν, ήτοι:
 - η κλίση i των πρανών των όχθων
 - ο συντελεστής υδατοπερατότητας k
 - ο αριθμός των κύκλων φόρτισης N_{cyc}
 - η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση PGA
 - η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργλικής κρούστας C_u
 - η σχετική πυκνότητα D_r της ρευστοποιήσιμης στρώσης άμμου
 - το πάχος H_{cr} της αργλικής κρούστας

δεν έχουν υπολογίσιμη επιρροή στην απομείωση των οριζόντιων μετακινήσεων D_h .

III. Αναλυτική πρόβλεψη του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$

- i. Οι τιμές του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ μπορούν να υπολογιστούν προσεγγιστικά από τις ακόλουθες αναλυτικές σχέσεις:

$$I_{D,h}^{5H} = 1.25 \cdot f(T_{exc}) \cdot g(H_{liq}^*/H) \cdot h(H) \cdot \frac{B/H}{17+B/H} \leq 1 \quad (7.1)$$

$$I_{D,h}^{max} = 1.26 \cdot f(T_{exc}) \cdot g(H_{liq}^*/H) \cdot h(H) \cdot \frac{B/H}{17+B/H} \leq 1 \quad (7.2)$$

$$I_{D,h}^{5H} = 1.25 \cdot f(T_{exc}) \cdot g(H_{liq}/H) \cdot h(H) \cdot \frac{B/H}{17+B/H} \leq 1 \quad (7.3)$$

$$I_{D,h}^{max} = 1.26 \cdot f(T_{exc}) \cdot g(H_{liq}/H) \cdot h(H) \cdot \frac{B/H}{17+B/H} \leq 1 \quad (7.4)$$

όπου οι διατυπώσεις των συναρτήσεων $f(T_{exc})$, $g(H_{liq}/H)$, $g(H_{liq}^*/H)$ και $h(H)$ παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 7.1).

Πίνακας 7.1: Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού των συναρτήσεων f , g και h στις Εξ. (7.1) έως (7.4).

Παράμετρος	Μετακινήσεις σε απόσταση 5H	Μέγιστες Μετακινήσεις
T_{exc} (sec)	$f(T_{exc}) = 0.552 \cdot \exp(1.696T_{exc}) \geq 1.000$	$f(T_{exc}) = 0.558 \cdot \exp(1.668T_{exc}) \geq 1.011$
H_{liq}^*/H	$g(H_{liq}^*/H) = 18.727 \cdot \exp\left(-0.586 \frac{H_{liq}^*}{H}\right) \geq 0.925$	$g(H_{liq}^*) = 15.029 \cdot \exp\left(-0.542 \frac{H_{liq}^*}{H}\right) \geq 0.918$
H_{liq}/H	$g(H_{liq}/H) = 10.423 \cdot \exp\left(-0.586 \frac{H_{liq}}{H}\right) \geq 0.925$	$g(H_{liq}/H) = 8.741 \cdot \exp\left(-0.542 \frac{H_{liq}}{H}\right) \geq 0.918$
H (m)	$h(H) = 3.127 \cdot \exp(-0.285H) \geq 1.036$	$h(H) = 2.933 \cdot \exp(-0.269H) \geq 1.032$

- ii. Οι τιμές που εκτιμώνται μέσω των ανωτέρω αναλυτικών εξισώσεων βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις ακριβείς μετρημένες τιμές των αριθμητικών αναλύσεων με απόκλιση που δεν υπερβαίνει εν γένει το $\pm 15\%$. Η χρήση όμως των Εξ. (7.2) και (7.4) που λαμβάνουν υπόψιν τις μέγιστες μετακινήσεις δίνουν ελαφρώς ακριβέστερα αποτελέσματα έναντι των Εξ. (7.1) και (7.3) που λαμβάνουν υπόψιν τις μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρανούς κι επομένως προτιμώνται.
- iii. Για τη χρήση των Εξ. (7.1) και (7.2) όπου λαμβάνεται υπόψιν ο όρος H_{liq}^*/H έναντι των Εξ. (7.3) και (7.4) όπου λαμβάνεται υπόψιν ο όρος H_{liq}/H , δεν προκύπτει κάποια συστηματική και

σαφής διαφορά. Το συμπέρασμα όμως αυτό δεν είναι οριστικό αλλά χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

- iv. Η χρήση των αναλυτικών σχέσεων υπολογισμού του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ θα πρέπει να γίνεται εντός των ορίων των επιμέρους παραμέτρων σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή τους. Συγκεκριμένα, το εύρος εφαρμογής τους είναι για περίοδο διέγερσης $T_{exc} = 0.2 - 0.7$ s, βάθος καναλιού $H = 1 - 4$ m, $H^*_{liq}/H = 3 - 6$ και $H_{liq}/H = 2 - 5$.
- v. Γενικά, οι τιμές του $I_{D,h}$ που υπολογίζονται με εφαρμογή των αναλυτικών σχέσεων προκύπτουν ελαφρώς μεγαλύτερες κατά μέσο όρο από τις αριθμητικές. Ωστόσο η επιλογή αυτή έγινε συνειδητά κατά την διατύπωση των αναλυτικών σχέσεων δεδομένου ότι οι μεγαλύτερες τιμές του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ δρουν υπέρ της ασφαλείας, ήτοι οδηγούν σε μικρότερη απομείωση των οριζόντιων μετακινήσεων D_h που υπολογίζονται ως $D_h = I_{D,h} \cdot D_{h,\infty}$, όπου $D_{h,\infty}$ οι οριζόντιες μετακινήσεις που προκύπτουν από την ανάλυση απείρου πλάτους που αντιστοιχεί σε συνθήκες ελεύθερου μετώπου με αναβαθμό.

7.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα περιλαμβάνουν:

- i. Την εκτέλεση μεγαλύτερου αριθμού αναλύσεων, εντός και εκτός του «πεδίου ορισμού» των αναλυτικών σχέσεων που διατυπώθηκαν για την πληρέστερη και ακριβέστερη σύγκριση και εξαγωγή συμπερασμάτων για την αξιοπιστία και τον συντηρητισμό που ενσωματώνουν.

Ειδικότερα, ο μεγαλύτερος αριθμός αναλύσεων προτείνεται συγκεκριμένα και για τη διερεύνηση της διαφοράς της αξιοπιστίας μεταξύ των Εξ. (7.1) & (7.2) που ενσωματώνουν το λόγο H^*_{liq}/H έναντι των Εξ. (7.3) & (7.4) που λαμβάνουν υπόψιν το λόγο H_{liq}/H , καθώς μετά από αξιολόγηση των δεδομένων των αναλύσεων που έγιναν στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας δεν προκύπτει κάποια συστηματική και σαφής διαφορά μεταξύ των δύο παραμέτρων (H^*_{liq}/H και H_{liq}/H).

- ii. Την εκτέλεση επιπλέον αναλύσεων ειδικά για τις περιπτώσεις που προσομοιάζουν στις αναλύσεις 20-23 (Πίνακας 5.1) της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, όπου παρατηρήθηκε ότι για λεπτές επιφανειακές αργλικές κρούστες και για την ισχυρή δόνηση που εξετάσθηκε εδώ, δεν προλαβαίνουν να αναπτυχθούν δύο «ανταγωνιστικοί» κύκλοι αστοχίας αλλά μόνο ένας ο οποίος καθορίζει όλες τις μετακινήσεις και τις επιβάλλει προς μία μόνο κατεύθυνση. Επομένως προτείνεται περαιτέρω διερεύνηση των μηχανισμών που διέπουν την πλευρική εξάπλωση του εδάφους στις όχθες των καναλιών σε αυτές τις περιπτώσεις.

- iii. Την μελέτη της επίδρασης του πλάτους του καναλιού στις κατακόρυφες μετακινήσεις που αναπτύσσονται τόσο πίσω από το πρανές όσο και μέσα στο κανάλι λόγω ρευστοποίησης.

Βιβλιογραφία

- Andrianopoulos, K. I., Papadimitriou, A. G., and Bouckovalas, G. D. (2010a). "Bounding surface plasticity model for the seismic liquefaction analysis of geostructures." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(10), 895–911.
- Arulmoli, K., Muraleetharan, K. K., Hossain, M. M., and Fruth, L. S. (1992). "VELACS: verification of liquefaction analyses by centrifuge studies; Laboratory Testing Program – Soil Data Report." *Research Report, The Earth. Technology Corporation*.
- Bartlett, S. F., and Youd, T. L. (1992). "Empirical analysis of horizontal ground displacement generated by liquefaction-induced lateral spread." Technical Report No. NCEER-92-0021, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, N.Y., 114.
- Bartlett, S. F., and Youd, T. L. (1995). "Empirical prediction of liquefaction-induced lateral spread." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 121(4), 16–329.
- Chu D. B., Stewart J. P., Youd, T. L., Chu B. L. (2006). "Liquefaction-Induced Lateral Spreading in Near-Fault Regions during the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(12), 1549-1565.
- Ishihara, K., and Yoshimine, M. (1992). "Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes." *Soils and Foundations*, 32(1), 173–188.
- Itasca. (2019). "FLAC version 8.1." *Itasca Consulting Group Inc*.
- Karamitros, D. K. (2010). "Development of a Numerical Algorithm for The Dynamic Elastoplastic Analysis of Geotechnical Structures in Two and Three Dimensions." PhD Thesis, Dept of Civil Engineering, NTUA, Athens.
- Meyerhof, G. G. (1957). "Discussion on research on determining the density of sands." Proceedings, 4th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, Vol. 3, 110.
- Papadimitriou, A. G., and Bouckovalas, G. D. (2002). "Plasticity model for sand under small and large cyclic strains: A multiaxial formulation." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, National Technical University of Athens, 42 Patission Street, 10682 Athens, Greece, 22(3), 191–204.

- Ramberg, W., and Osgood, W. R. (1943). *Description of stress-strain curve by three parameters*. Technical note 902, National Advisory Committee for Aeronautics.
- Robertson, P. K., and Wride, C. E. (1998). "Evaluating cyclic liquefaction potential using the CPT." *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 442–459.
- Seed, H. B. (1979). "Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, 105(2), 201–255.
- Tatsuoka, F., Zhou, S., Sato, T., & 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., Dimitriadi V. (2010). "Parametric Investigation of Lateral Spreading in Free-Face Ground Formations." 5th International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, California, 30.
- Youd, T. L. (2018). "Application of MLR Procedure for Prediction of Liquefaction-Induced Lateral Spread Displacement." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, 144(6).
- Youd, T. L., DeDen, D. W., Bray, J. D., Sancio, R., Cetin, K. O., and Gerber, T.M. (2009). "Zero-Displacement Lateral Spreads, 1999 Kocaeli, Turkey, Earthquake." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, 135(1), 46–61.
- 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*, American Society of Civil Engineers, 128(12), 1007–1017.
- Youd, T., Idriss, I., Andrus, R., Arango, I., Castro, G., Christian, J., Dobry, R., Finn, W., Harder, L., Hynes, M., Ishihara, K., Koester, J., Liao, S., Marcuson, W., Martin, G., Mitchell, J., Moriwaki, Y., Power, M., Robertson, P., Seed, R., and Stokoe, K. (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*, American Society of Civil Engineers, 127(10), 817–833.
- Zhang G., Robertson P.K., 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*, American Society of Civil Engineers, 130(8), 861–871.

Παράρτημα **A**

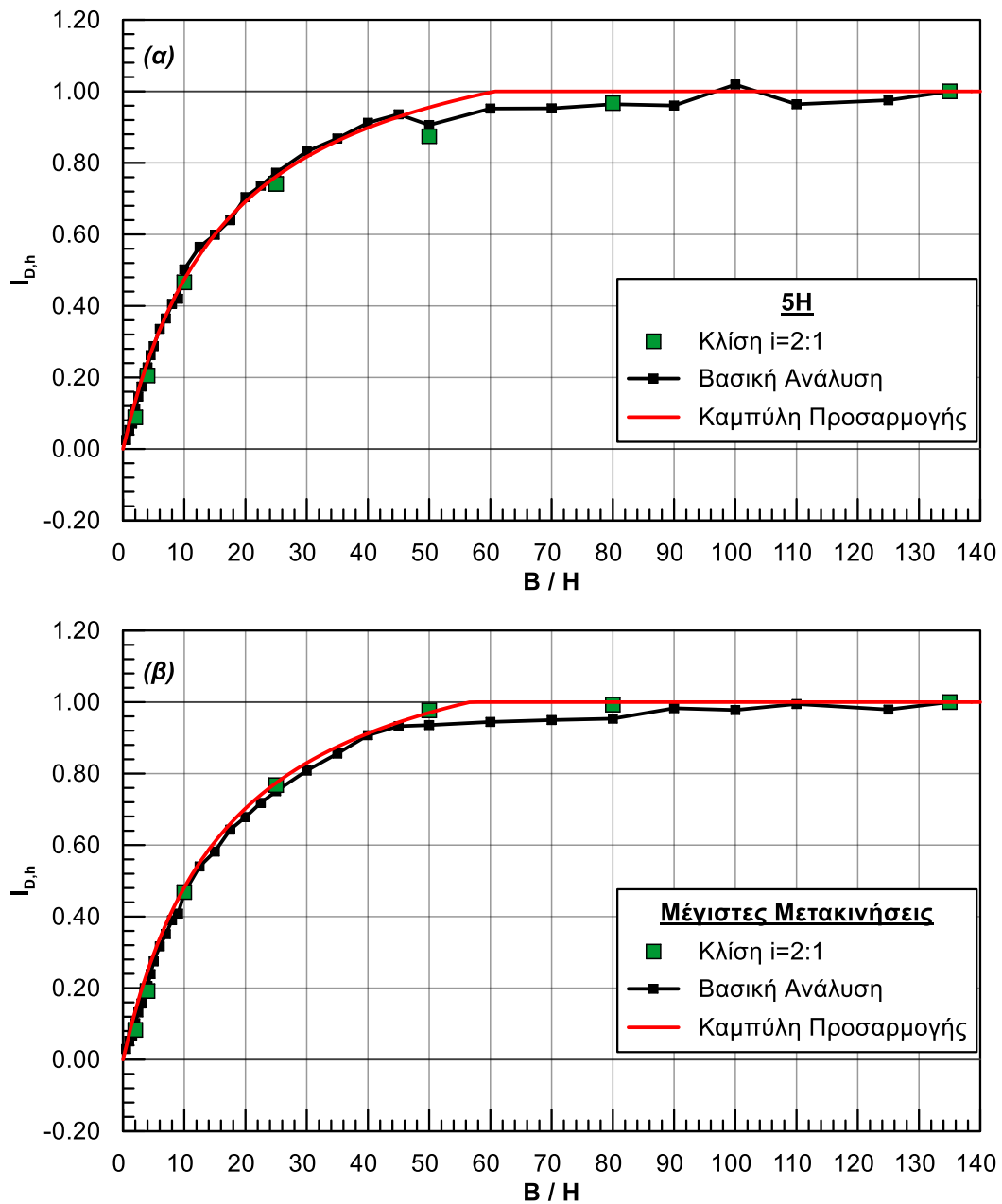
Αποτελέσματα Παραμετρικών Αναλύσεων

Στον **Πίνακα A.1** παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων για όλες τις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με μεταβλητές (α) την κλίση i των πρανών των όχθων, (β) την αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργλικής στρώσης C_u , (γ) τη σχετική πυκνότητα D_r της στρώσης άμμου, (δ) τις συνθήκες φόρτισης (αστράγγιστες/στραγγιζόμενες συνθήκες), (ε) το συντελεστή υδατοπερατότητας k , (στ) τον αριθμό των κύριων κύκλων φόρτισης N_{cyc} της σεισμικής διέγερσης, (η) το πάχος της αργλικής στρώσης H_{crust} , (θ) τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση PGA, (ι) την περίοδο της σεισμικής διέγερσης T_{exc} , (κ) το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης της άμμου H_{liq} και τέλος (λ) το βάθος του καναλιού H . Σημειώνονται επιπλέον οι τιμές του συντελεστή A που προέκυψαν από κάθε ομάδα αναλύσεων και που συνιστούν τον βασικό συντελεστή στη σχέση εξαγωγής του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h} = A \left(\frac{B}{H} \right) / \left(17 + \frac{B}{H} \right) \leq 1$.

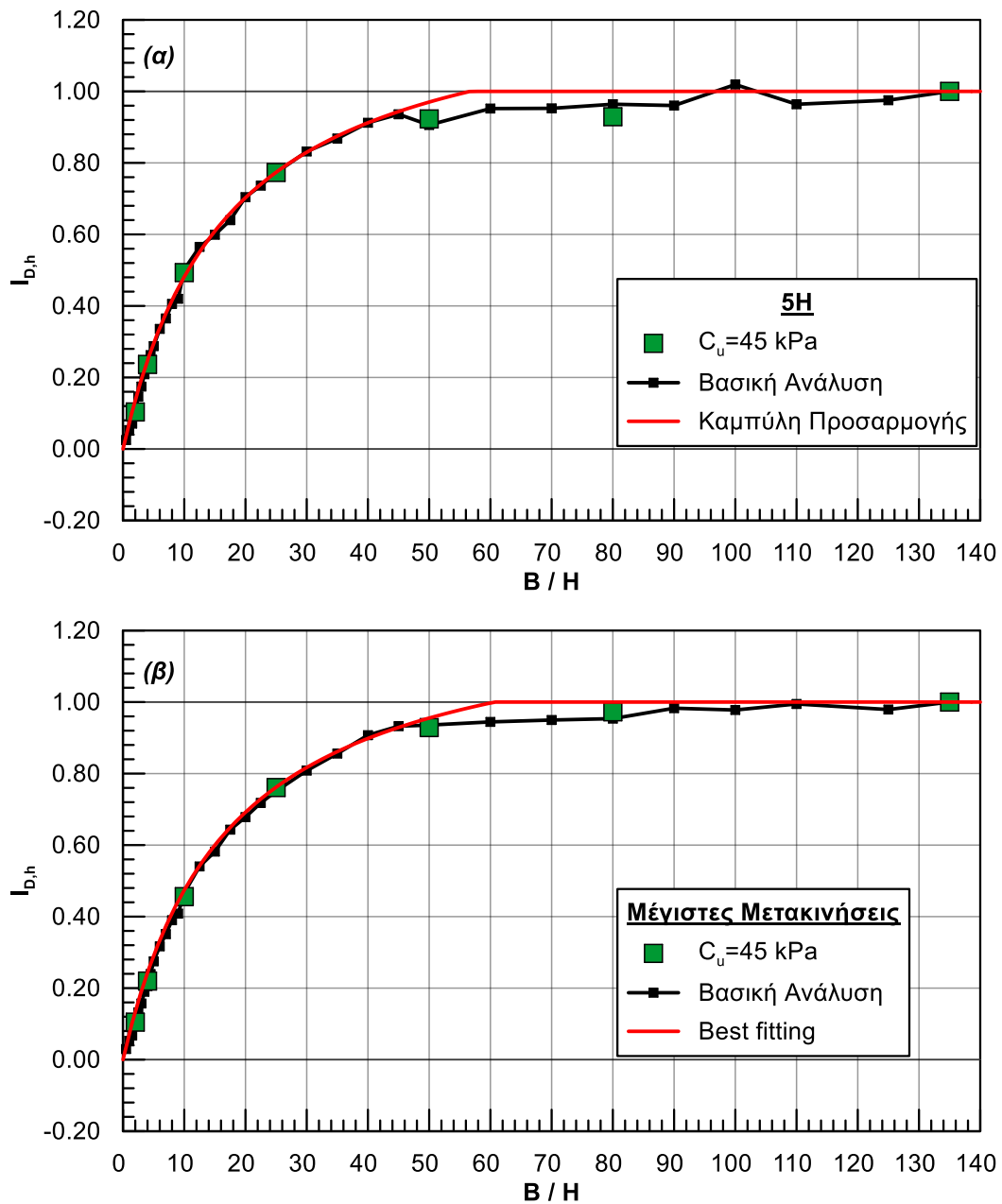
Πίνακας Α.1: Χαρακτηριστικά παραμετρικών αναλύσεων.

A/A	Slope i	C _u (kPa)	D _r (%)	K (m/s)	N _{cyc}	H _{crust} (m)	PGA (g)	T _{exc} (sec)	H (m)	H _{liq} (m)	H* _{liq} (m)	H _{liq} /H (m)	H* _{liq} /H (m)	A	
														max displ.	5H
1	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.35	4	16	20	4	5	1.285	1.30
2	2:1	30	60	-	10	4	0.5	0.35	4	16	20	4	5	1.30	1.28
3	1:1	45	60	-	10	4	0.5	0.35	4	16	20	4	5	1.28	1.30
4	1:1	30	40	-	10	4	0.5	0.35	4	16	20	4	5	1.27	1.27
5	1:1	30	60	6.6*10⁻⁴	10	4	0.5	0.35	4	16	20	4	5	1.20	1.20
6	1:1	30	60	6.6*10⁻⁵	10	4	0.5	0.35	4	16	20	4	5	1.20	1.20
7	1:1	30	60	6.6*10⁻⁶	10	4	0.5	0.35	4	16	20	4	5	1.23	1.20
8	1:1	30	60	-	15	4	0.5	0.35	4	16	20	4	5	1.30	1.30
9	1:1	30	60	-	10	6	0.5	0.35	4	16	22	4	5.5	1.27	1.29
10	1:1	30	60	-	10	4	0.25	0.35	4	16	20	4	5	1.25	1.15
11	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.20	4	16	20	4	5	1.30	1.30
12	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.50	4	16	20	4	5	1.62	1.65
13	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.70	4	16	20	4	5	2.30	2.35
14	1:1	30	60	-	10	1	0.5	0.35	1	4	5	4	5	2.30	3.40
15	1:1	30	60	-	10	2	0.5	0.35	2	8	10	4	5	2.20	2.30
16	1:1	30	60	-	10	3	0.5	0.35	3	12	15	4	5	1.55	1.55
17	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.35	4	8	12	2	3	3.80	4.20
18	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.35	4	12	16	3	4	2.10	2.20
19	1:1	30	60	-	10	4	0.5	0.35	4	20	24	5	6	1.16	1.18
20	1:1	30	60	-	10	1	0.5	0.35	1	19	20	19	20	1.12	1.12
21	1:1	30	60	-	10	1	0.25	0.35	1	19	20	19	20	1.12	1.12
22	1:1	30	60	-	10	2	0.5	0.35	2	18	20	9	10	1.12	1.12
23	1:1	30	60	-	10	3	0.5	0.35	3	17	20	5.7	6.7	1.18	1.18
24	1:1	30	60	-	10	6	0.5	0.35	4	14	20	3.5	5	1.40	1.45
25	1:1	30	60	-	10	2	0.5	0.35	4	18	20	4.5	5	1.33	1.32

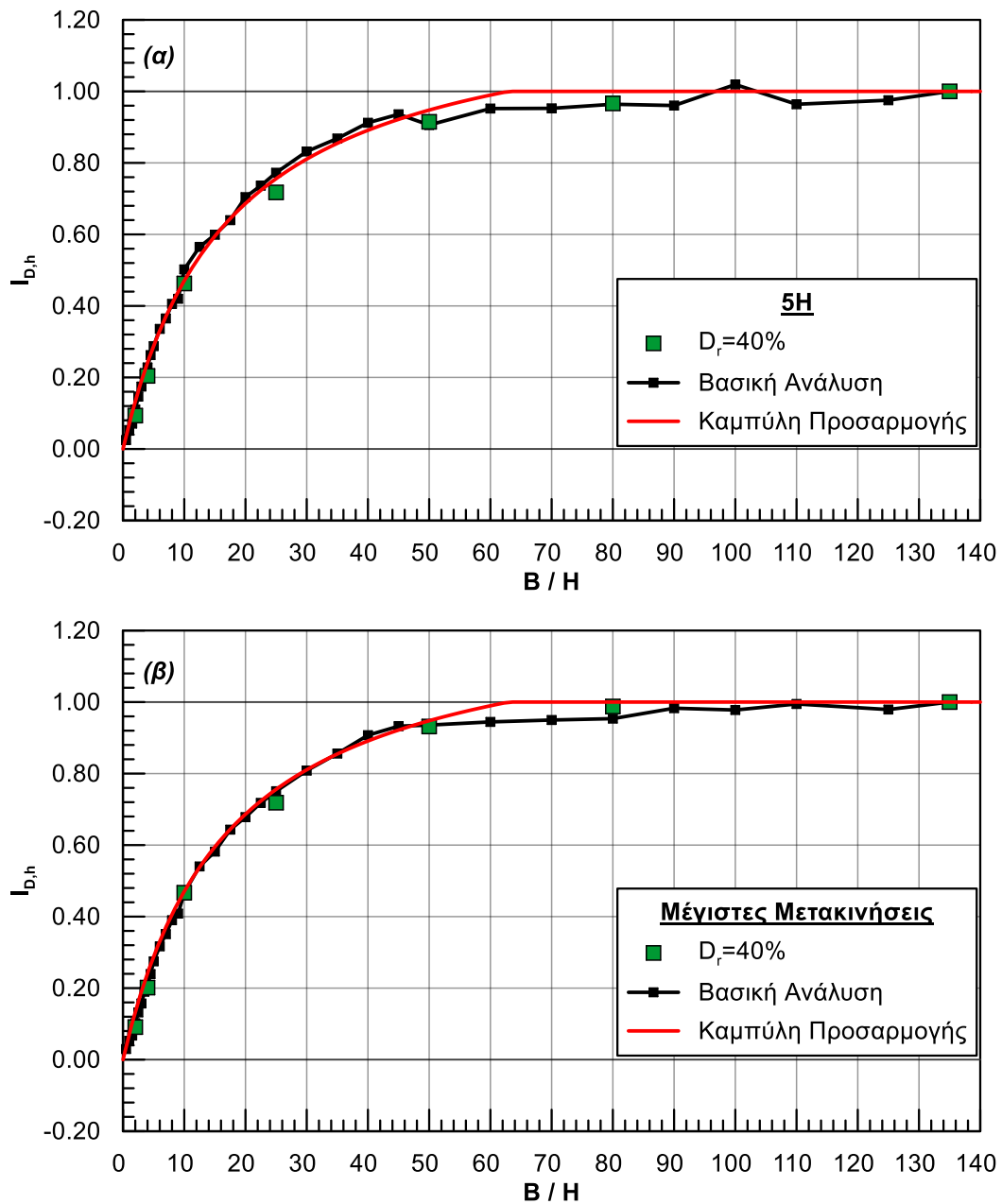
Στα **Σχήματα Α.1 - Α.24** που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων του **Πίνακα Α.1**. Συγκρίνονται οι τιμές του διορθωτικού συντελεστή $I_{D,h}$ συναρτήσει της τιμής του λόγου B/H με τις αντίστοιχες τιμές της βασικής ανάλυσης (Baseline) αποτυπώνοντας τη σχετική επίδραση κάθε παραμέτρου στην ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων D_h . Οι συγκρίσεις αυτές διενεργούνται και αξιολογούνται τόσο για τις μέγιστες μετακινήσεις όσο και για τις μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρανούς. Επιπλέον σημειώνεται η βέλτιστη καμπύλη προσαρμογής (best fitting) για κάθε ομάδα παραμετρικών αναλύσεων. Οι καμπύλες αυτές δίδονται από την σχέση $I_{D,h} = A \left(\frac{B}{H} \right) / \left(17 + \frac{B}{H} \right) \leq 1$ και σημειώνονται στα διαγράμματα με κόκκινο χρώμα.



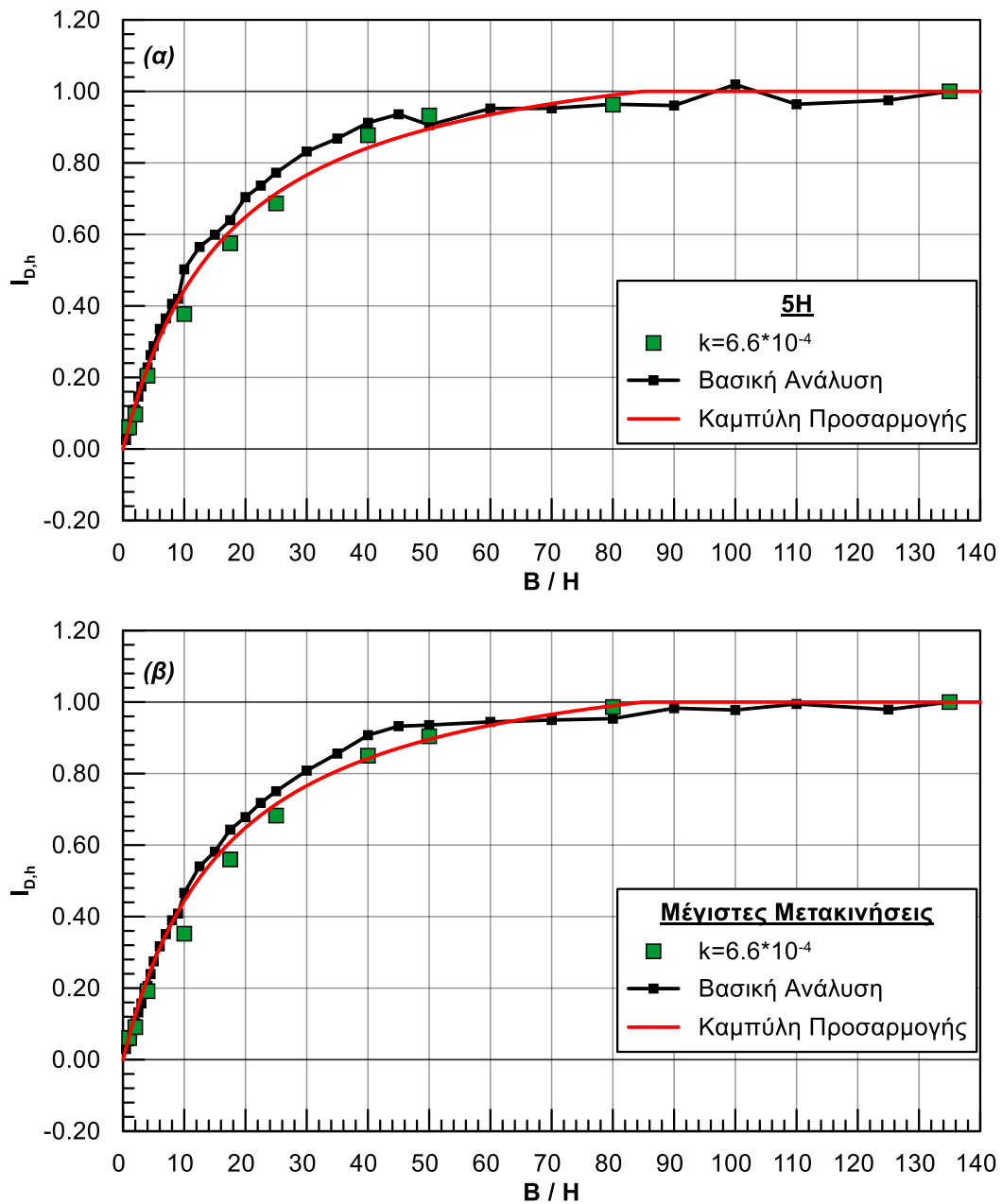
Σχήμα Α.1: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρηνούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #2).



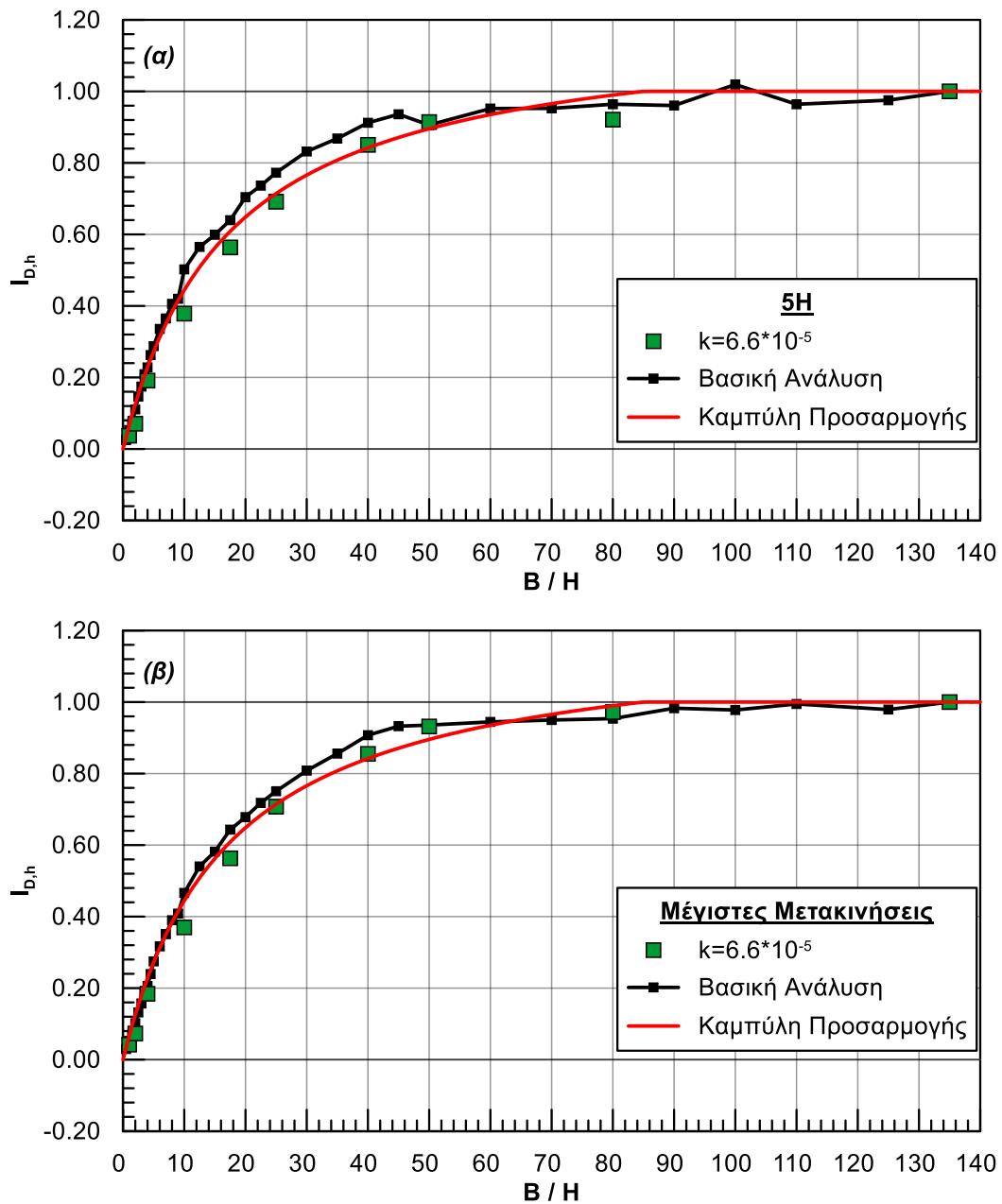
Σχήμα Α.2: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρανούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #3).



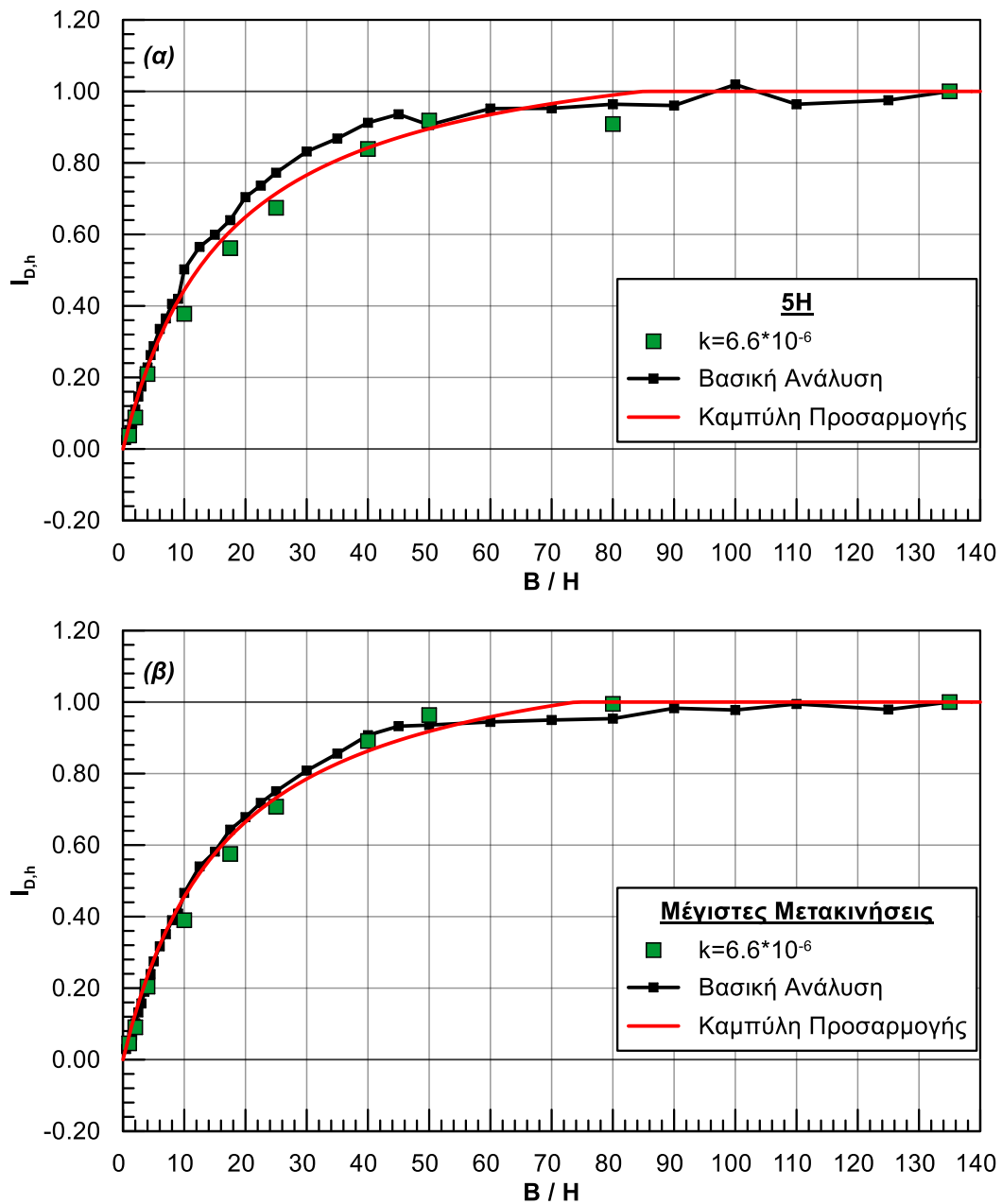
Σχήμα Α.3: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρηνούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #4).



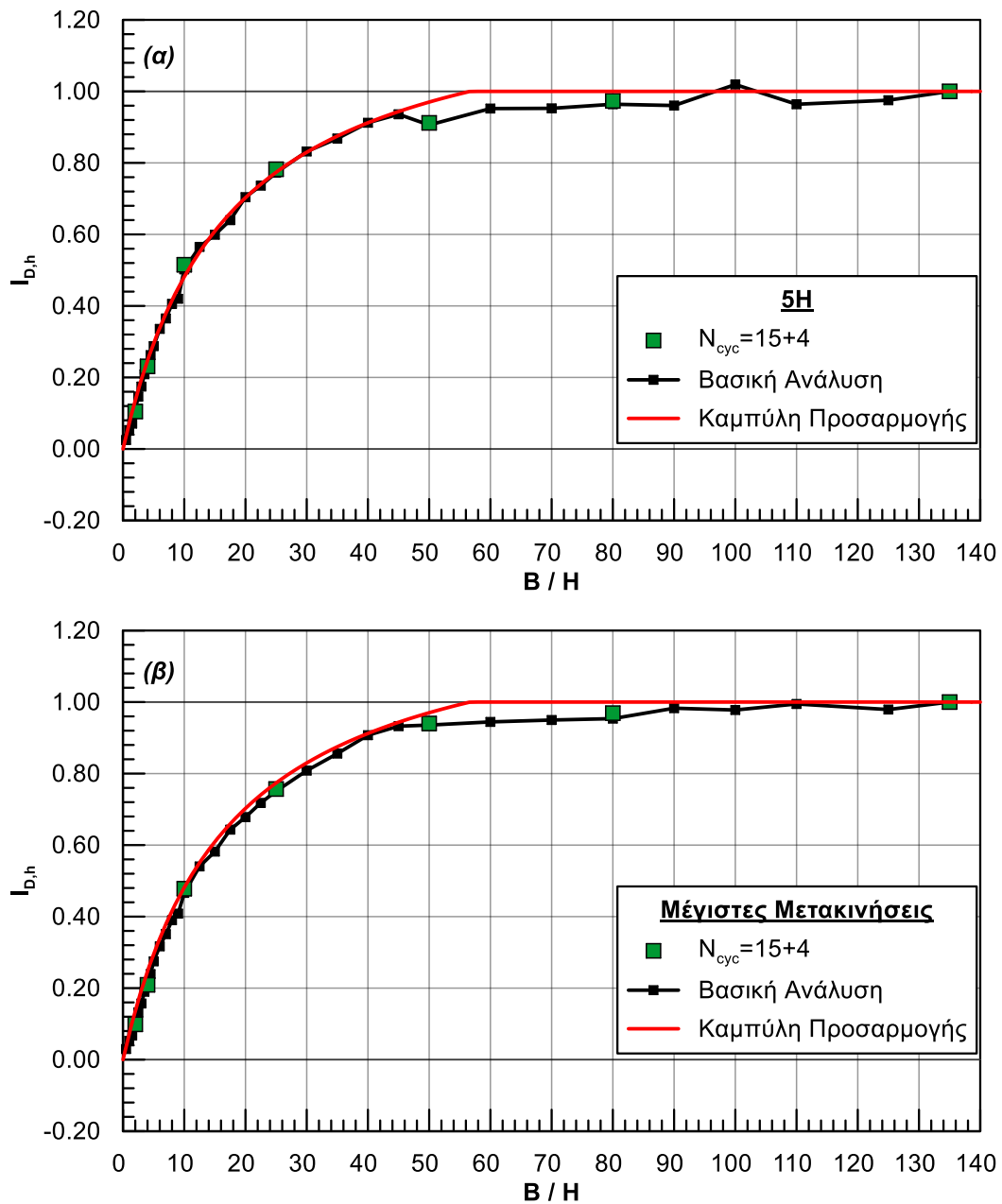
Σχήμα Α.4: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρηνούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #5).



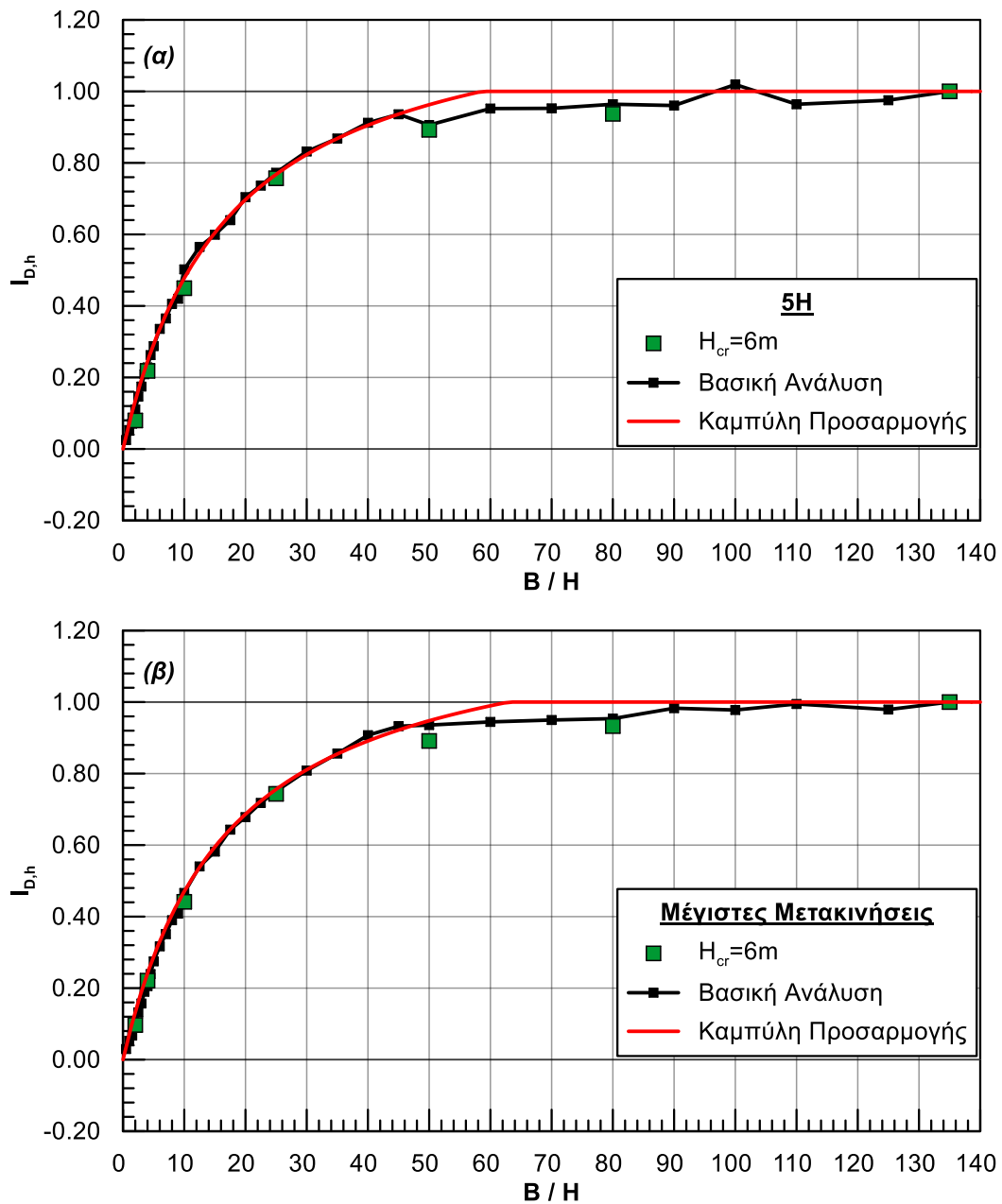
Σχήμα Α.5: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρηνούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #6).



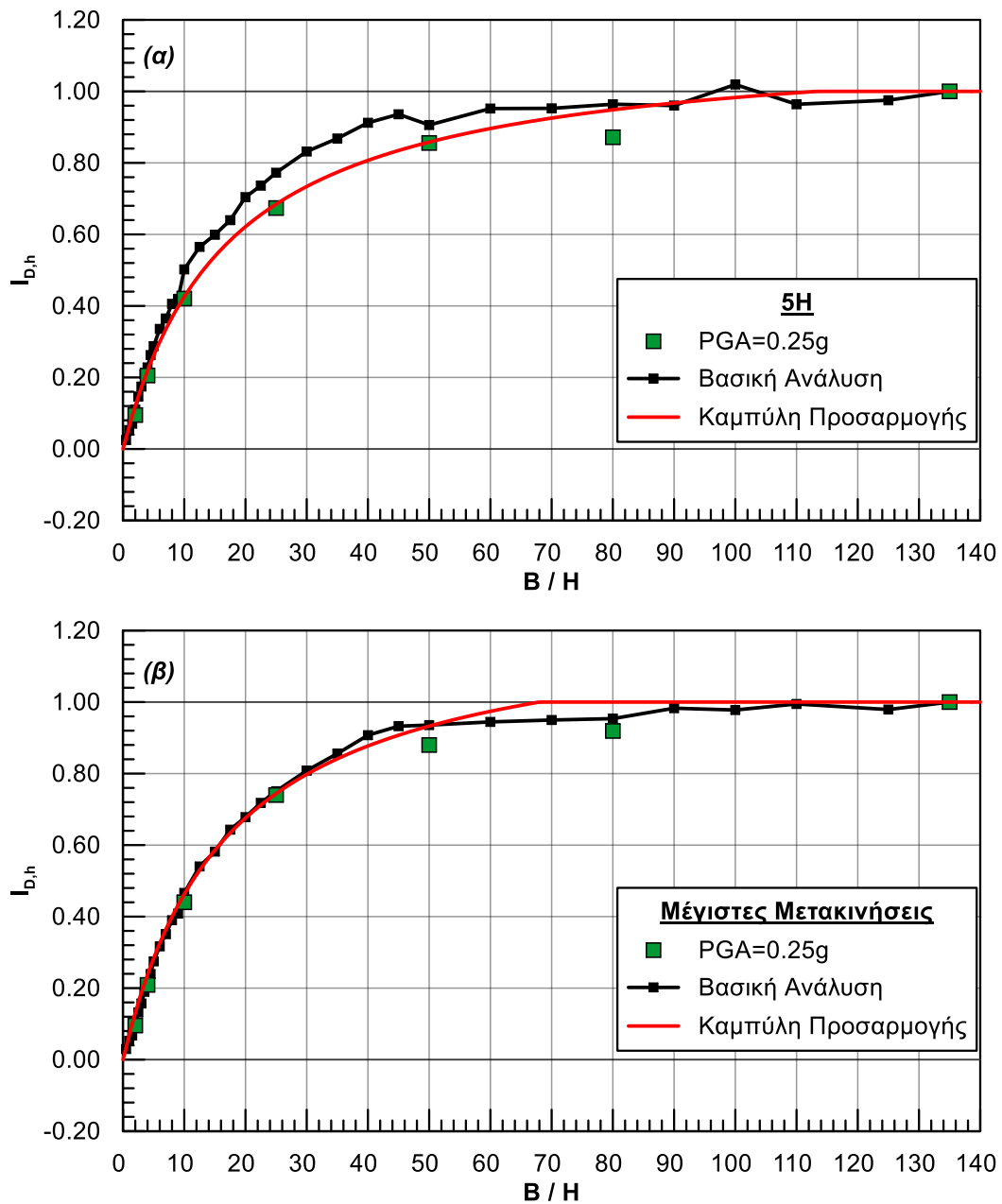
Σχήμα Α.6: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρικού και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #7).



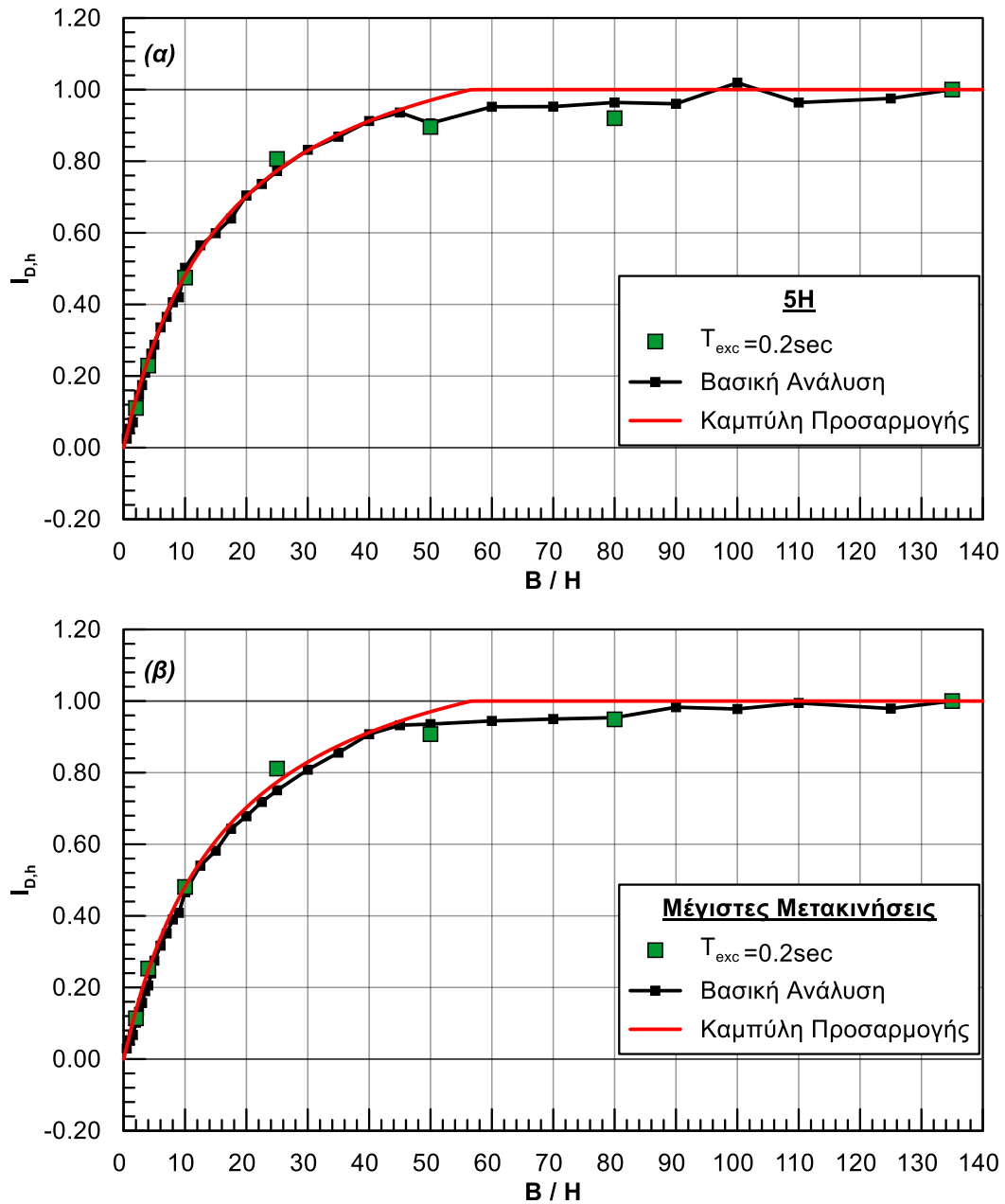
Σχήμα Α.7: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρικού και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #8).



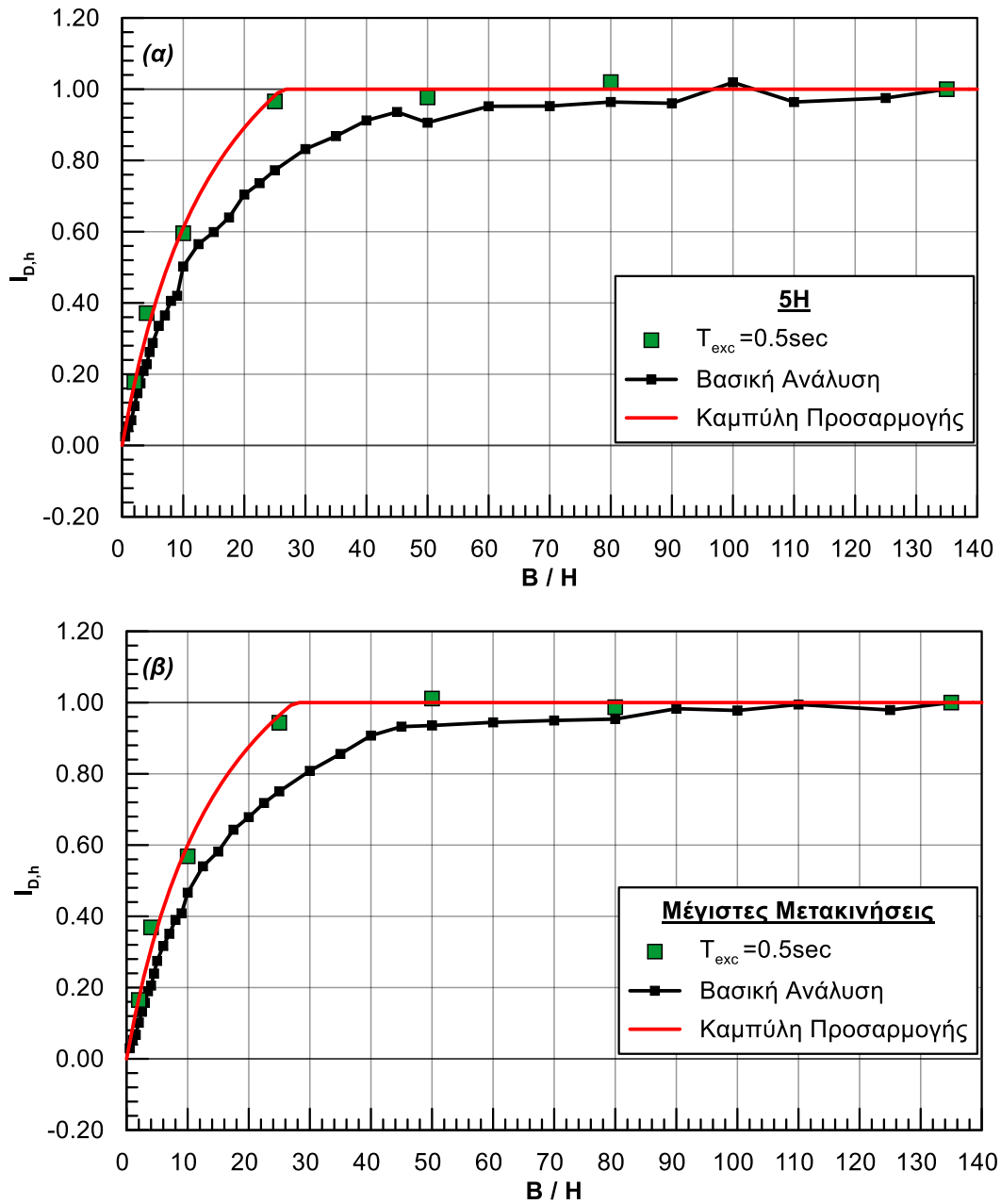
Σχήμα Α.8: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρηνούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #9).



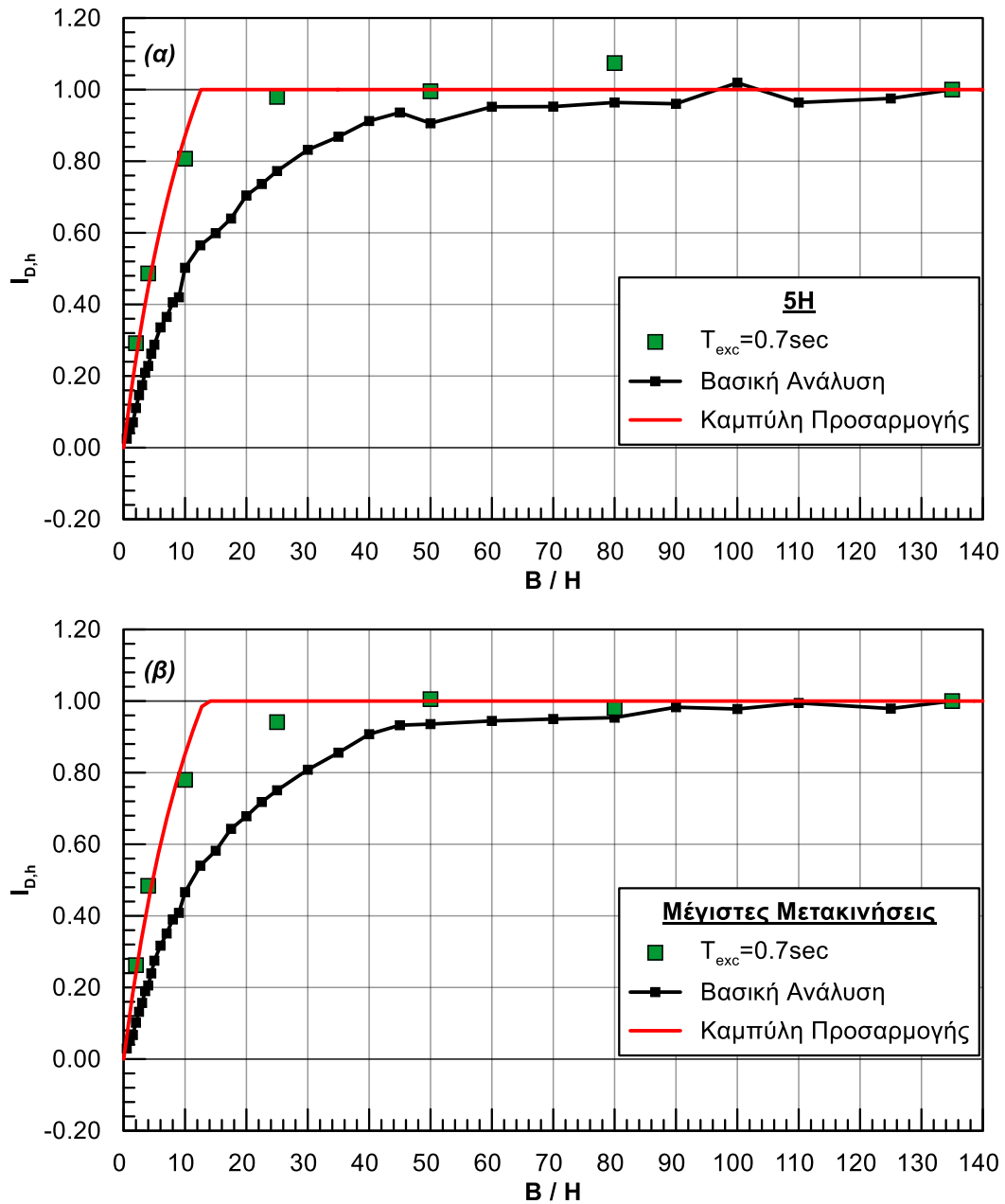
Σχήμα Α.9: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρηνούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #10).



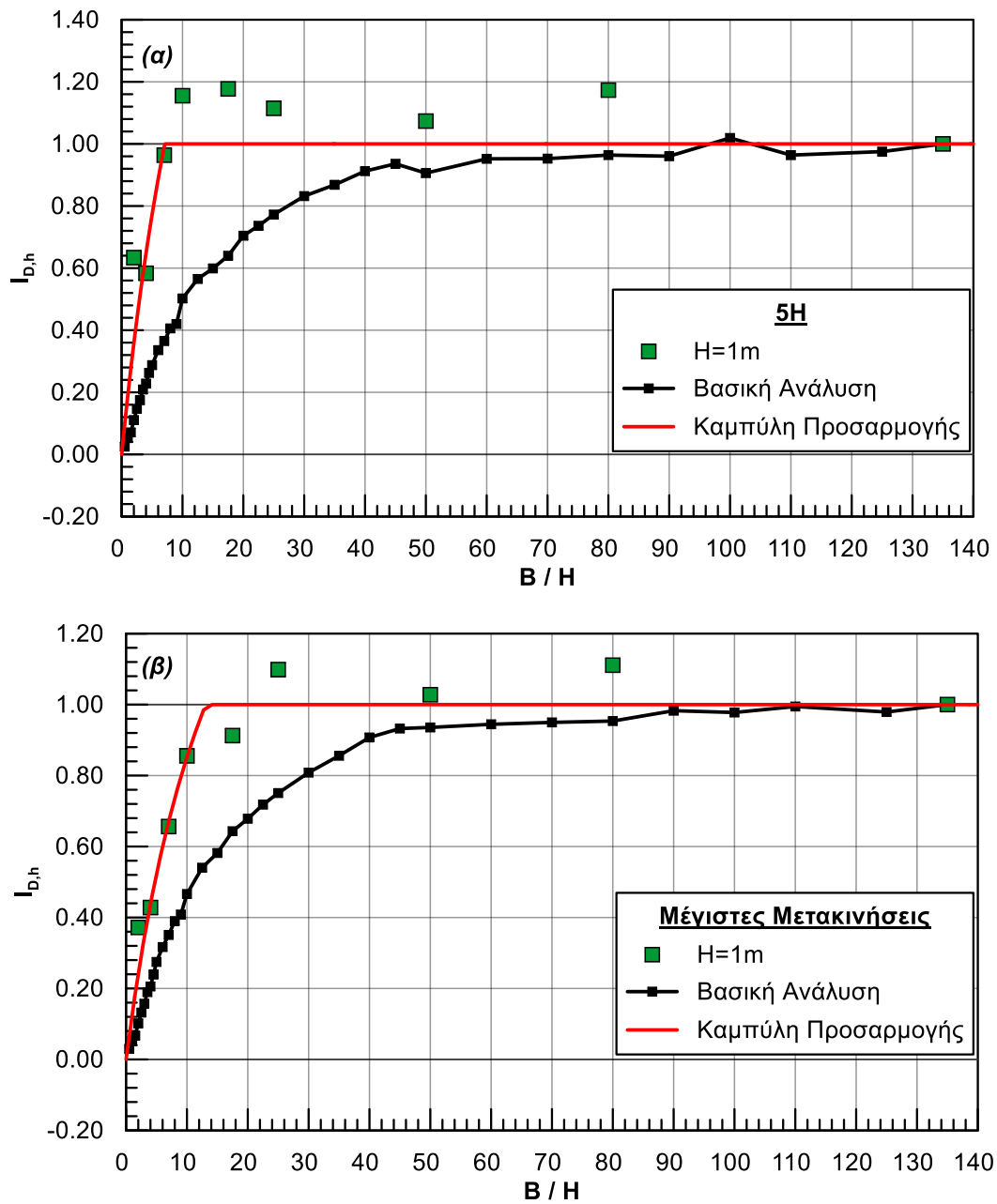
Σχήμα Α.10: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρικού και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #11).



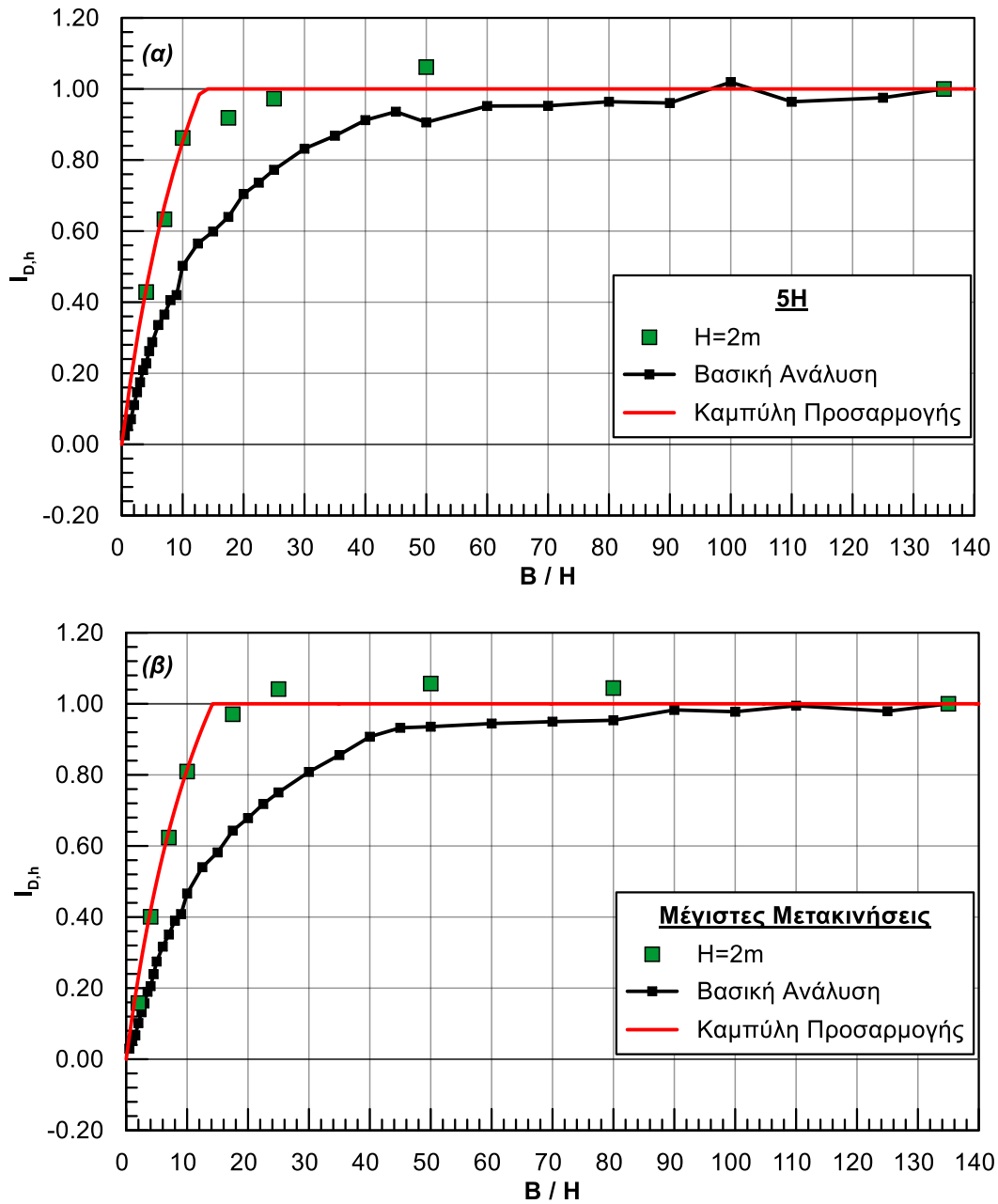
Σχήμα Α.11: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρανούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #12).



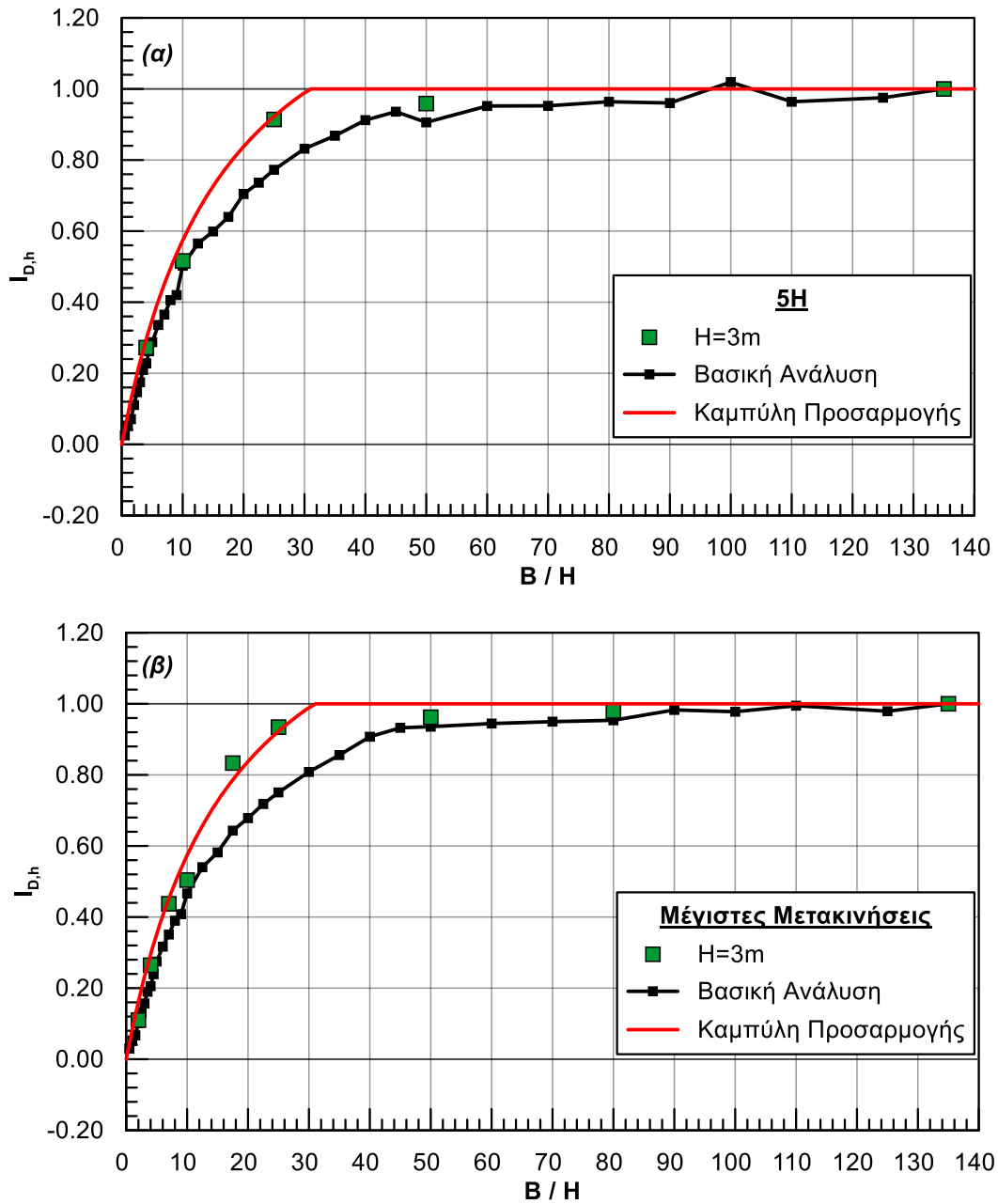
Σχήμα Α.12: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρικού και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #13).



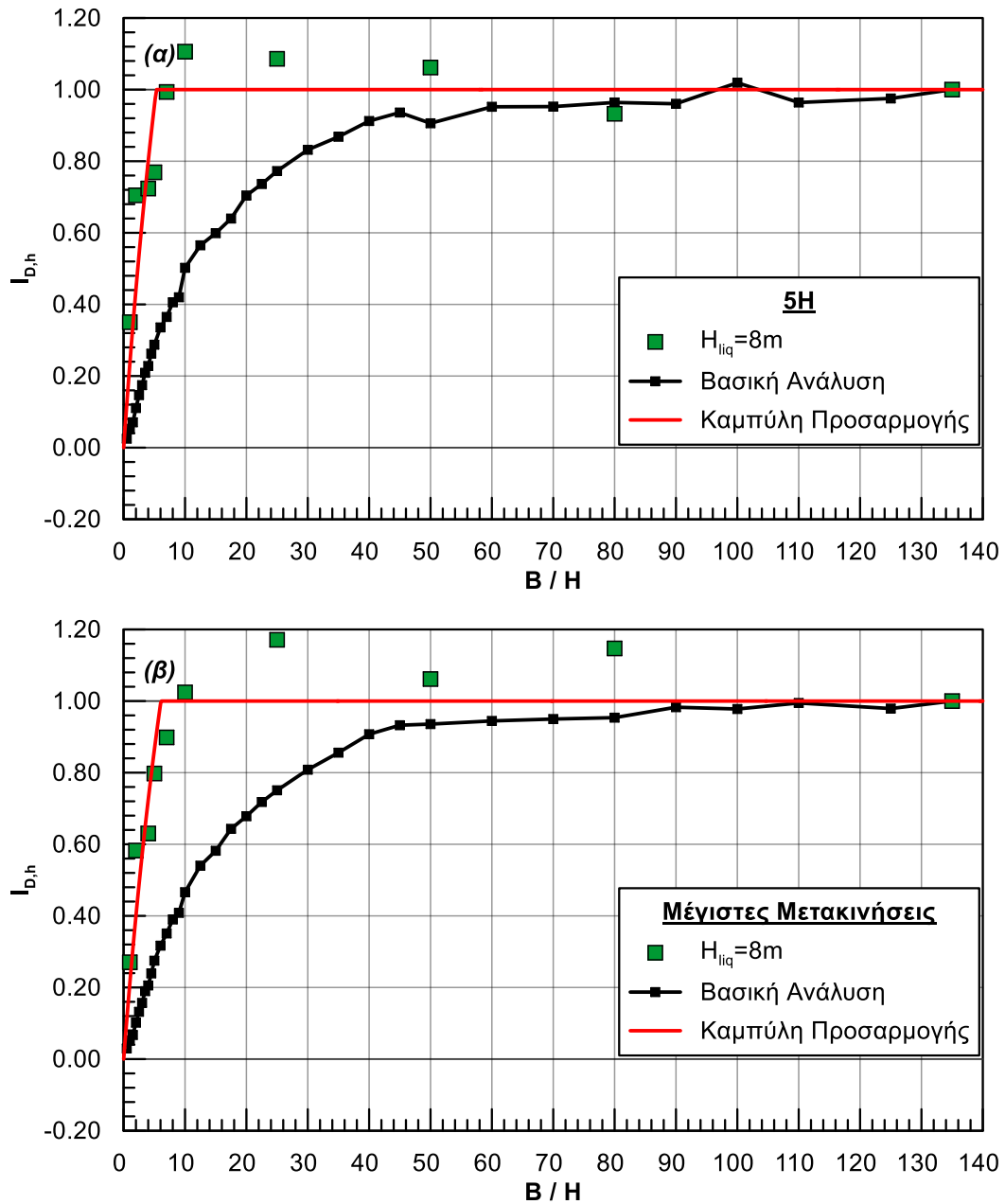
Σχήμα Α.13: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρηνούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #14).



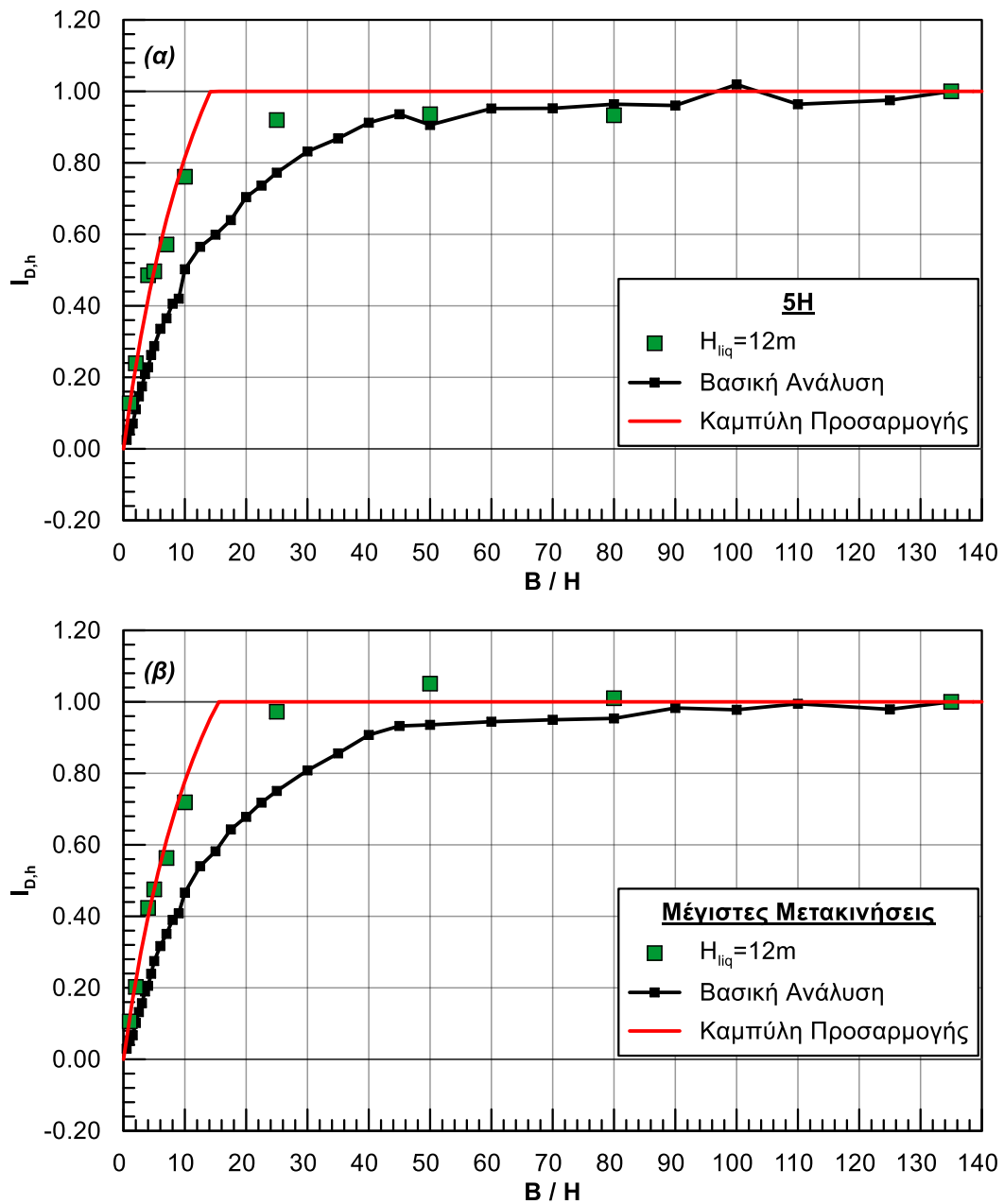
Σχήμα Α.14: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρηνούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #15).



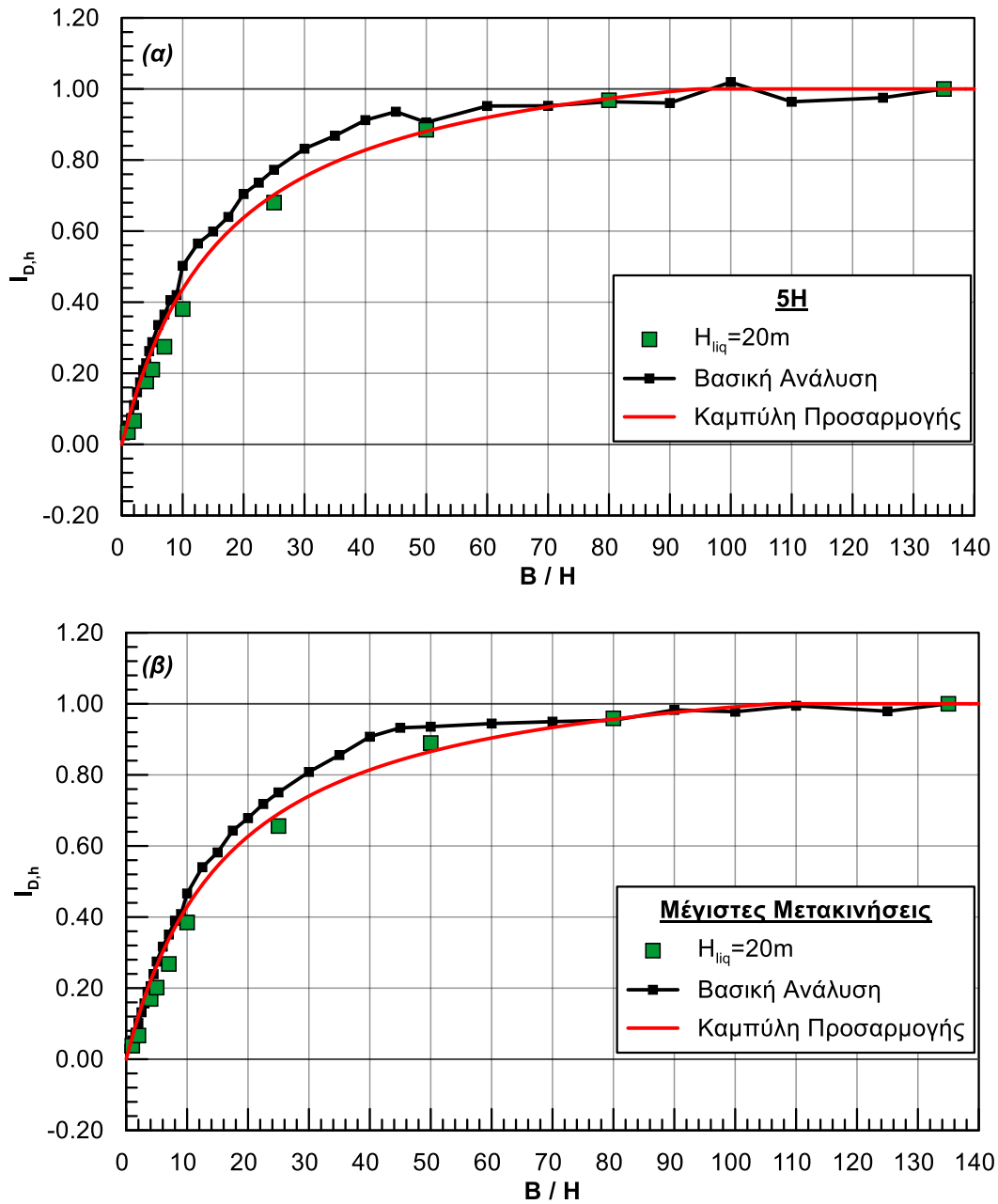
Σχήμα Α.15: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρηνούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #16).



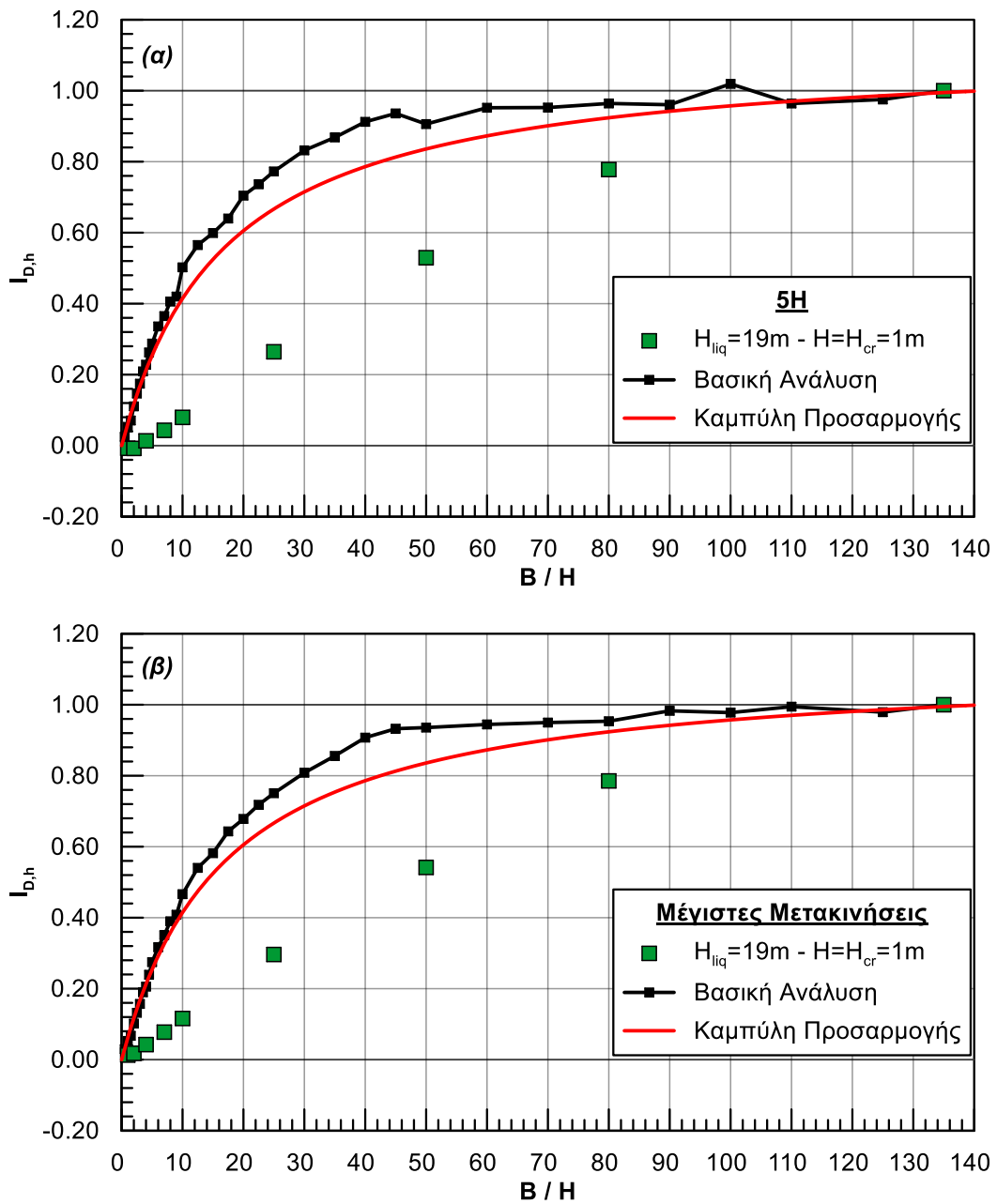
Σχήμα Α.16: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρηνούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #17).



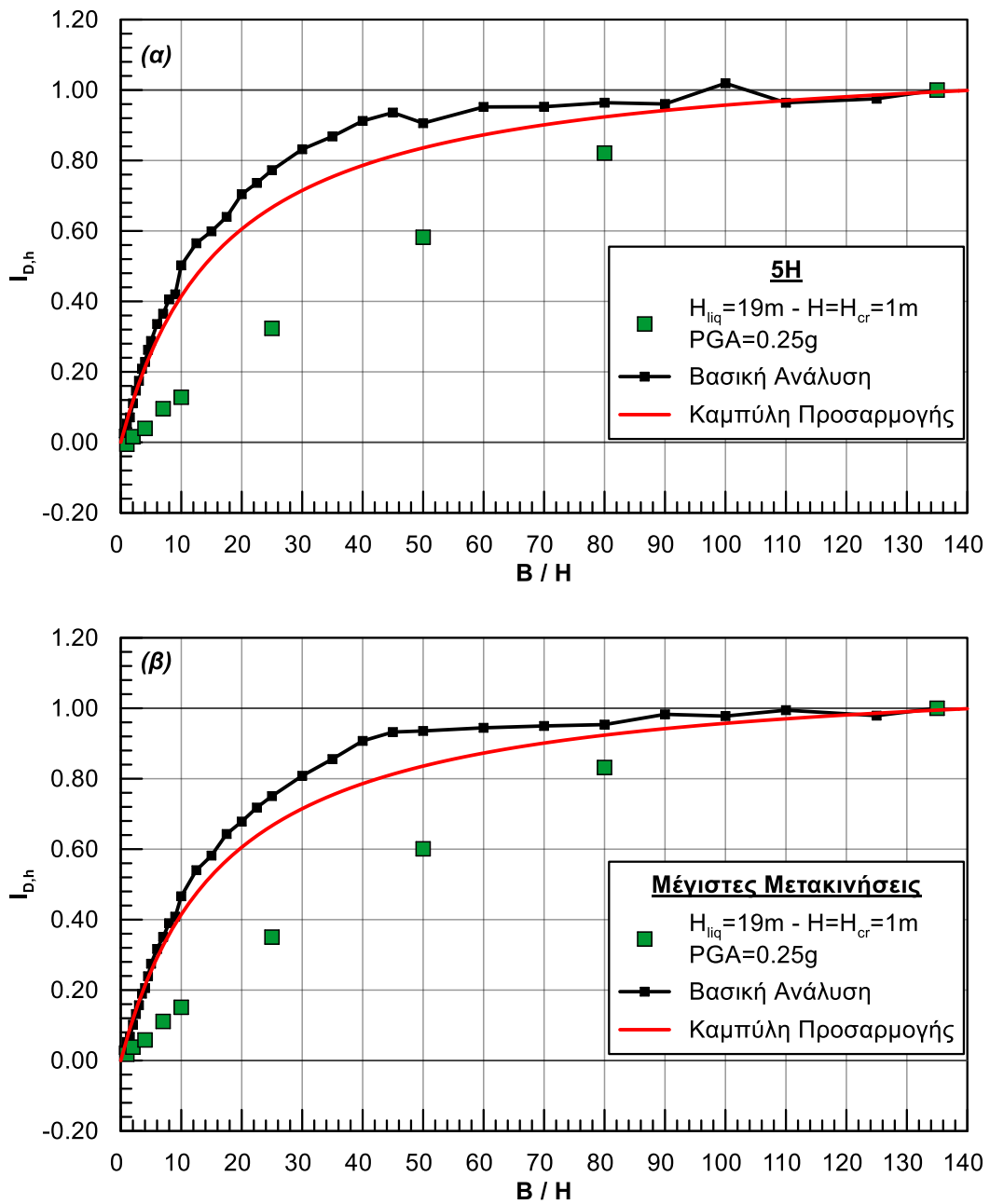
Σχήμα Α.17: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρηνούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #18).



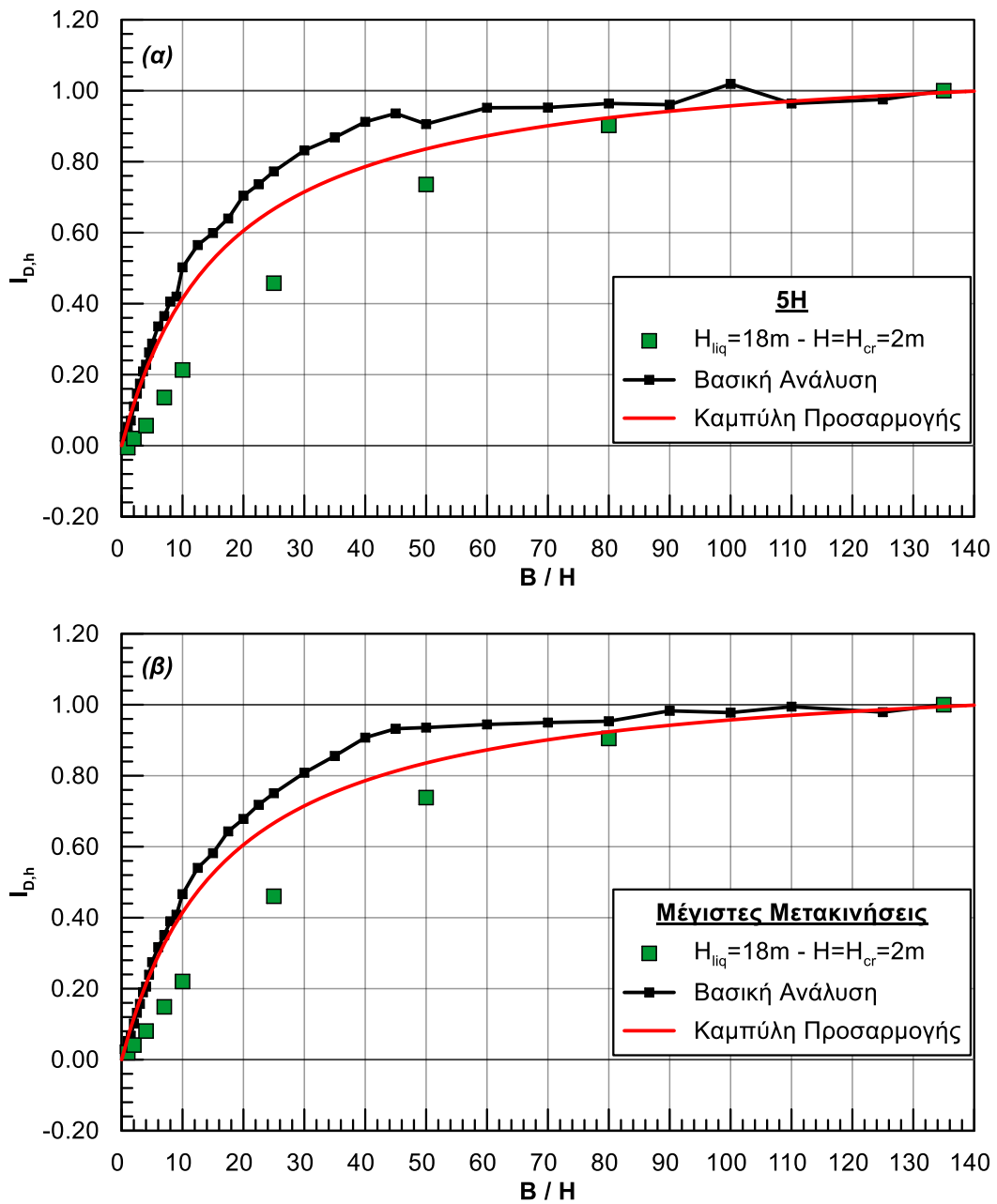
Σχήμα Α.18: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρηνούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #19).



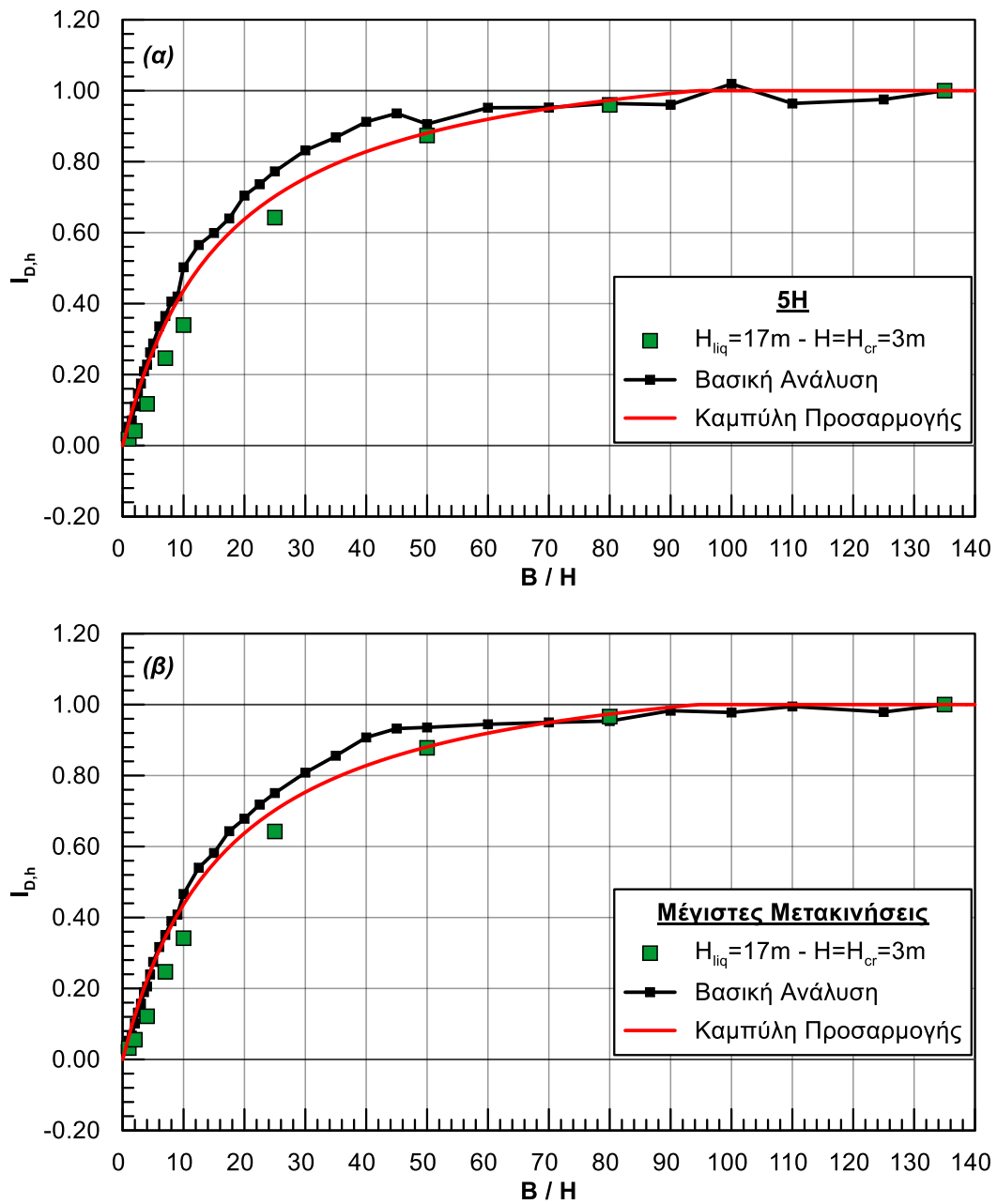
Σχήμα Α.19: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρηνούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #20).



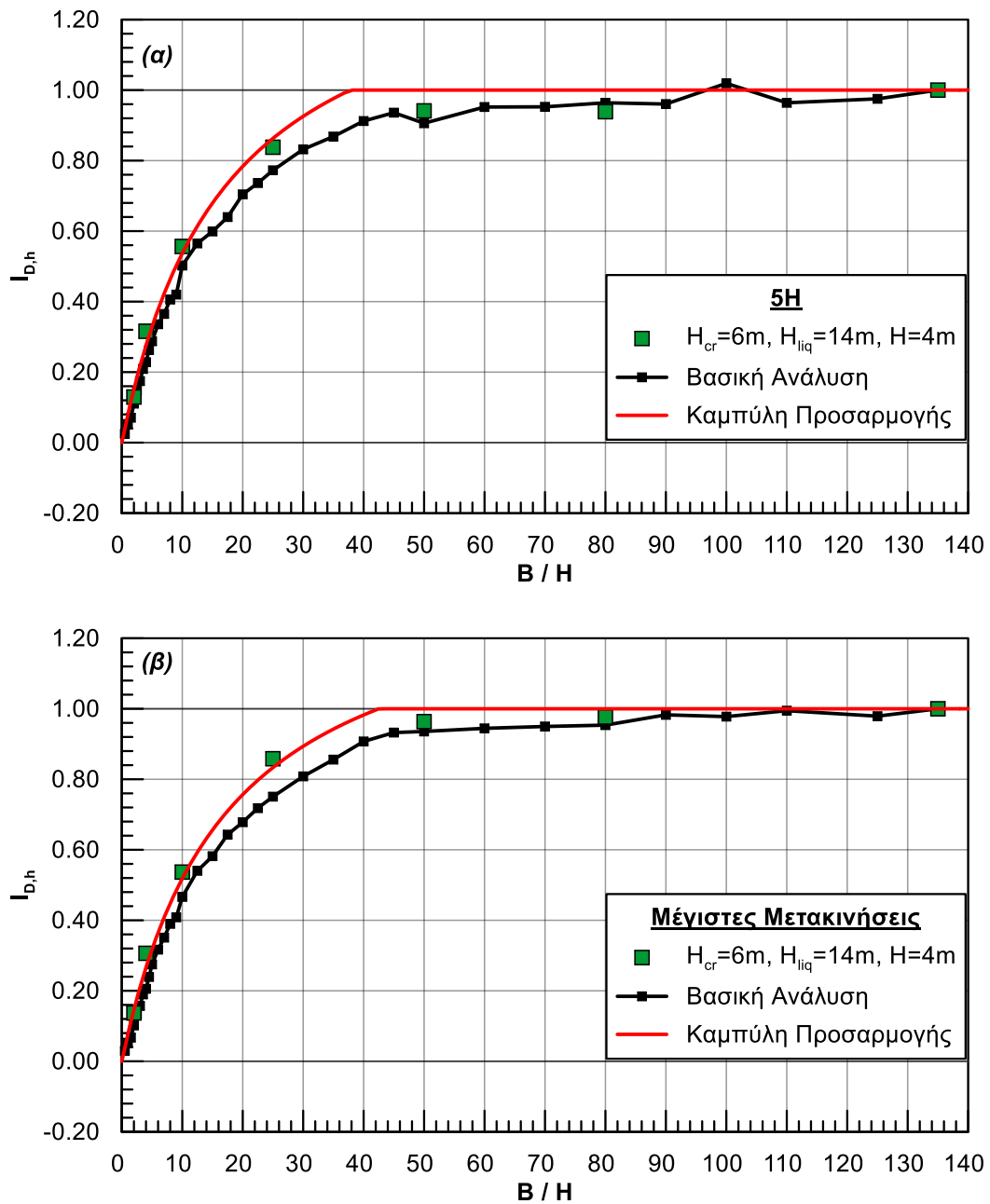
Σχήμα Α.20: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση 5H ανάντη του πόδα του πρσανούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #21).



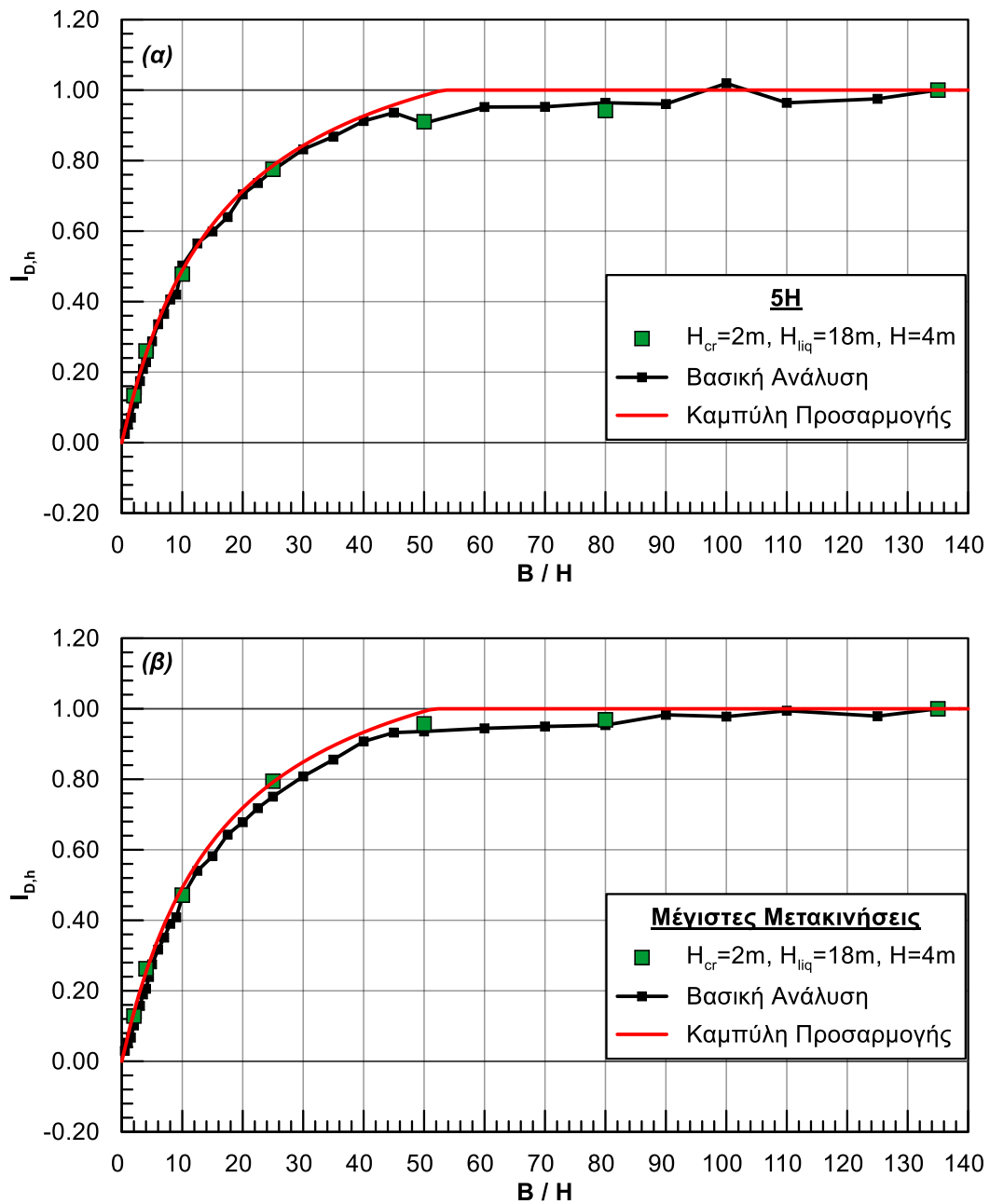
Σχήμα Α.21: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρηνούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #22).



Σχήμα Α.22: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρηνούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #23).



Σχήμα Α.23: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρηνούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #24).



Σχήμα Α.24: Κανονικοποιημένες οριζόντιες μετακινήσεις $I_{D,h}$ συναρτήσει του λόγου B/H για (α) μετακινήσεις σε απόσταση $5H$ ανάντη του πόδα του πρσανούς και (β) για μέγιστες μετακινήσεις (ανάλυση #25).