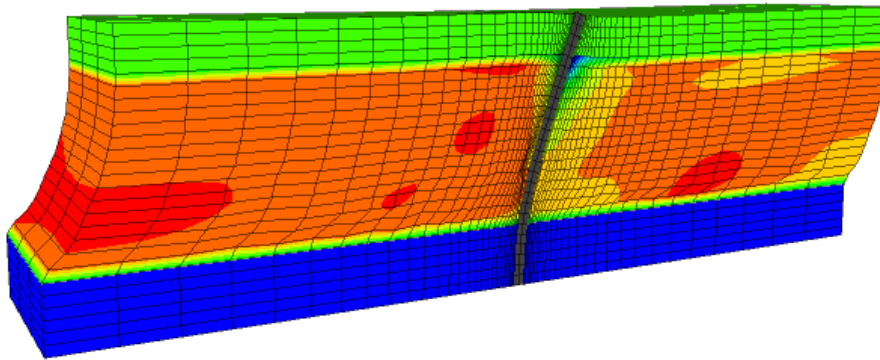




ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΣΣΑΛΟΥ
υπό καθεστώσ
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ & ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΕΞΑΠΛΩΣΗΣ:
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΡΓΙΛΙΚΗΣ ΚΡΟΥΣΤΑΣ

Χαράλαμπος Τσιφής

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



DIPLOMA THESIS
NUMERICAL INVESTIGATION OF PILE RESPONSE
under
LIQUEFACTION & GROUND LATERAL SPREADING:
EFFECT OF NONLIQUEFIABLE CLAY CAP

Charalampos Tsifis

*Supervisor: George D. Bouckovalas, Prof. N.T.U.A.
Dr. Yannis Chaloulos*

Οκτώβριος/October 2015

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας μου, νιώθω την ανάγκη να εκφράσω γραπτώς τις ευχαριστίες μου στα άτομα, η συμβολή και η καθοδήγηση των οποίων υπήρξε καθοριστική για την εκπόνησή της.

Κατ' αρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή, κ. Γιώργο Μπουκοβάλα για τη πολύτιμη και συνεχή καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Οι γνώσεις του πάνω στο αντικείμενο και το οργανωτικό του πνεύμα με βοήθησαν να ξεπεράσω τις δυσκολίες που αντιμετώπισα οι οποίες στα άπειρα μάτια μου φάνταζαν ανυπέρβλητες. Κάθε φορά που ένιωθα πελαγωμένος, οι συμβουλές και το ομαδικό του πνεύμα μου έδιναν δύναμη να συνεχίσω. Παρόλο που δεν είχα και το πιο εύκολο θέμα, παρόλο που οι αβεβαιότητες ήταν πολλές, μου κέντρισε το ενδιαφέρον και με ενθάρρυνε να το αγαπήσω. Στην αρχή όλα μου φαινονταν ένα ατελείωτο βουνό, αλλά με τη συνεχή καθοδήγηση του κατάφερα να δω τους καρπούς των κόπων μου να παίρνουν μορφή. Μέσα από τη συνεχή μας επαφή, έμαθα να προβληματίζομαι, να συνδυάζω τις γνώσεις μου και να προσεγγίζω τα άγνωστα προβλήματα με περιέργεια και όχι με φόβο. Η επιστημονική του κατάρτιση και η επαγγελματικότητα του, με διαμόρφωσαν σε μηχανικό και οι υψηλές απαιτήσεις του αποτελούν για και δικές μου απαιτήσεις για το επίπεδο της δουλειάς μου. Σε προσωπικό επίπεδο, ο κ. Μπουκοβάλας, όποτε τον χρειάστηκα ήταν πάντα εκεί να με συμβουλεύει και να καθησυχάζει τις ανησυχίες μου. Οφείλω να πω ότι χαίρομαι που ολοκληρώνω τη φοιτητική μου θητεία με μια τόσο εποικοδομητική και ευχάριστη συνεργασία.

Για το μεταδιδακτορικό ερευνητή Γιάννη Χαλούλο, τα λόγια ωχριούν μπροστά στα συναισθήματα που αναδύονται όταν ανακαλώ εκείνες τις στιγμές. Κατ' αρχήν, πρέπει να αναφέρω ότι η διπλωματική εργασία αποτελεί συνέχεια του ερευνητικού

έργου του οπότε ο Γιάννης ήταν εκείνο το άτομο που με καταλάβαινε απόλυτα όταν ήμουν γεμάτος απορίες και αμφιβολίες. Το αστείρευτο ενδιαφέρον του και η συνεχής καθοδήγηση του συνέβαλαν καθοριστικά στην εκπόνηση της εργασίας. Η επιστημονική του κατάρτιση και οι συμβουλές του με βοήθησαν να ξεπεράσω όλες τις δυσκολίες. Μου δίδαξε να σκέφτομαι σα «μηχανικός» και πλέον το ποιοτικό επίπεδο της δουλειάς μου αντικατοπτρίζεται στο επίπεδο της επαγγελματικότητας του. Πέρα όμως απ' αυτά, θυμάμαι τις συζητήσεις μας (μικρές και μεγάλες...), τα πειράγματα του, ακόμη και εκείνα τα μικρά ψεματάκια που μου έλεγε κατά καιρούς για να δει την αντίδραση μου και να γελάσει, και λέω στον εαυτό μου «Ρε το Γιάννη...». Όλες αυτές οι στιγμές διαπερνούσαν τη μονοτονία της διπλωματικής και τη κούραση, και αν θέλετε ήταν το «αλατοπίπερο» όλου του ταξιδιού. Οφείλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο Γιάννη Χαλούλο για την άριστη συνεργασία μας καθώς και για όλες εκείνες τις στιγμές τις οποίες, όπως και το Γιάννη, κρατάω σε ένα ιδιαίτερο μέρος στην καρδιά μου.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ νιώθω την ανάγκη να πω και στο μεταδιδακτορικό ερευνητή Αλέξανδρο Βαλοσαμή καθώς και στους διδακτορικούς ερευνητές Γιάννη Τοιάπα και Κωνσταντίνο Μπαζαίο για τη συνεχή ενθάρρυνση και καθοδήγηση. Από τη πρώτη στιγμή με έκαναν να νιώσω μέλος της μικρής τους οικογένειας και όσο για την ηθική τους υποστήριξη δεν υπάρχουν λόγια...

Τέλος, θέλω να εκφράσω την απέραντη ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου και στους φίλους μου για την συμπαράστασή τους και τη συνεχή τους ενθάρρυνση κατά τη διάρκεια ενασχόλησής μου με τη διπλωματική εργασία, καθώς και στην Ταξιαρχούλα για την υπομονή και την υποστήριξή της.

Extended Summary

I. Problem description

Recent earthquakes (e.g. Christchurch, 2011; Chile, 2010) reveal that liquefaction and lateral spreading still remains a major threat for pile foundations. Lateral spreading occurs when a slightly inclined soil layer (e.g. 2-4%) liquefies and displaces horizontally, to distances ranging from some centimeters to a few meters. In such cases, the kinematic interaction of single piles and pile groups with the laterally spreading ground may induce significant residual horizontal deflections, shear forces and bending moments to the pile foundations. Hence, it is no surprise that a large number of research studies have been dedicated to identifying the interaction mechanisms between laterally spreading soils and piles and developing guidelines for the evaluation of the ultimate soil pressures. The latter, according to current practice, are based on the corresponding pressures for the case of the nonliquefied soil after applying an appropriate multiplier (m_p multiplier), which depends on the relative density of the sand and is significantly lower than unity, i.e. the pressures of the laterally spreading soil are much lower compared to the pressures of the nonliquefied soil.

However, Gonzalez et al. (2009) shown that, **in the case of a soil stratigraphy solely consisted of liquefiable sand**, soil dilation, as a result of permanent ground deformation, can substantially increase soil pressures near the ground surface. Chaloulos (2012) confirmed the above findings and developed empirical relationships which can capture the effect of dilation. The investigation revealed that current methodologies, which do not account for dilation phenomena, can significantly underestimate both the displacements and the bending moments of the pile.

II. Scope of the thesis

In this context the scope of the present thesis is to expand the above findings for the case of a single pile embedded in a soil profile of liquefiable sand, **underlying a non-liquefiable clay cap**. More specifically, the study focuses on the following two aspects of the problem:

- (i) How does the presence of the crust affect the overall response of the pile?
- (ii) How does the presence of the crust affects dilation phenomena and the loads imposed from the crust?

III. Numerical Methodology

The numerical model built to simulate the problem at hand involved a flexible pile built in a uniform layer of Nevada sand underlying a nonliquefiable clay crust. The Nevada sand layer overlaid a nonliquefiable layer of cemented sand used to simulate the elastic rotational constraint at the base of the pile as shown in **Figure 1**.

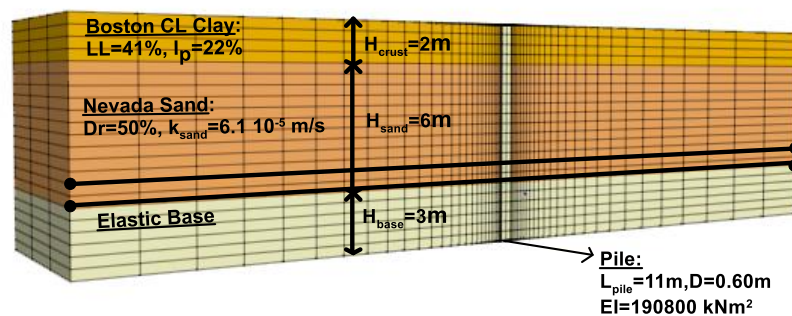


Figure 1: Numerical model built to simulate the problem in question.

The critical aspects of the numerical methodology include:

- The finite difference code FLAC3D v5.0 was used. The specific code employs an explicit integration scheme appropriate for highly nonlinear problems (e.g. liquefaction). Furthermore it allows for coupling between pore fluid flow and dynamic calculations.
- The response of the liquefiable sand was simulated the NTUA_Sand constitutive model (Papadimitriou and Bouckovalas 2002, Adrianopoulos et al 2010), implemented in FLAC 3D by Karamitros (2010). It incorporates the Critical State Theory of Soil Mechanics, so that the effects of initial state (relative density and

mean effective stress) are simulated in terms of a uniquely defined state parameter ψ (Been and Jefferies 1985). In parallel, the hysteretic Ramberg-Osgood formulation is adopted for small strain increments, allowing for the accurate simulation of the non-linear hysteretic response of sands (decrease of shear modulus and increase of hysteretic damping with increasing cyclic shear strain amplitude) over a wide range of strain amplitude levels. Shake-down effects and liquefaction-induced softening during cyclic loading are properly simulated by quantifying the effect of fabric evolution on plastic strain increments. The pile was considered elastic, while the clay crust was modeled as an elastic-perfectly plastic material.

- Ground surface inclination was simulated through a horizontal gravitational acceleration component superimposed to vertical gravity g , while a sinusoidal motion is applied at the base of the model. Contact (slip and separation) elements are used to simulate the pile-soil interface, while the corresponding soil pressures are consequently obtained from integration of the normal and shear stresses developing at the nodes of the interface elements during each step of the analysis.
- The well-known "tied-node" method (see Figure 1) is incorporated in order to simulate free field (periodic) lateral boundaries in the direction of the applied seismic excitation. This method reproduces essentially the kinematic response of horizontally arranged laminar boxes, commonly used in centrifuge and shaking table experiments, by enforcing equal horizontal and vertical displacements at opposite boundary nodes of the same laminar ring (e.g. Ghosh and Madabhushi 2003; Elgamal et al. 2005; Popescu et al. 2006). Note that the conventional tied-node formulation has been properly modified for the present study (Chaloulos 2012; Chaloulos et al. 2013), in order to take into account that the water table remains horizontal, thus yielding a hydrostatic pore pressure surplus at the down slope free field boundary.

IV. Effect of crust on the response of the pile

- a. Depending on the relative pile-crust stiffness, two response mechanisms have been identified (**Figure 2**). **For stiff crusts or very flexible piles, the response mechanism is that of a beam fixed at both ends (red line)**. Due to the gripping effect of the superficial crust, negative bending moments develop. Their minimum value (M_{\min}) does not necessarily coincide with the corresponding

value at the sand-crust interface (M_{cr}). For soft crusts of stiff piles, the response mechanism is that of a cantilever (black line). In this case, the pile is strong enough to resist the movement of the crust, hence no negative bending moments develop.

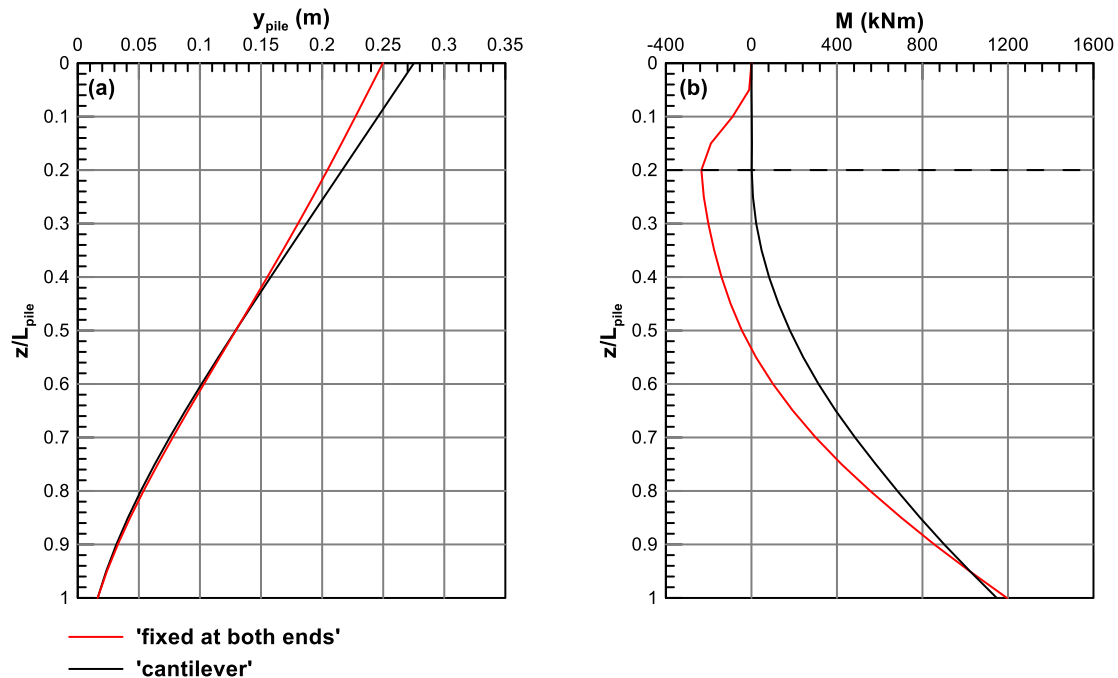


Figure 2: Variation of (a) pile deflection and (b) bending moment with depth for a “fixed-end” and a “cantilever” pile.

- b. The above response mechanisms can be quantitatively described by introducing either a rotational (I_{rot}) or a translational index (I_{trans}) mathematically described as follows:

$$I_{rot} = \frac{c_u \cdot D \cdot H_{crust}^2}{EI / H_{sand}} \quad (1)$$

$$I_{trans} = \frac{c_u \cdot D \cdot H_{crust}}{EI / H_{sand}^2} \quad (2)$$

where c_u is the undrained shear strength of the clay crust, D is the pile diameter, H_{crust} is the thickness of the clay crust, H_{sand} is the thickness of the liquefiable sand layer and EI is the pile bending stiffness. **Figure 3** shows the variation of pile bending moment at the crust-sand interface (M_{cr}) normalized with the maximum bending moment ($M_{max,o}$) developing at the base of the pile for the case where no crust is present, with $I_{cr,rot}$ and $I_{cr,trans}$. Similarly, **Figure 4** shows the corresponding variation

for the case of pile minimum bending moment (M_{\min}). The aforementioned normalization was used in order to eliminate any sand effect and capture more effectively the crust's effect on pile response. The following limits can be considered for the different response mechanisms described previously:

“Cantilever”: $I_{cr,rot} < 10^{-3}$ and $I_{cr,trans} < 5 \times 10^{-3}$

“Fixed-at-both-ends”: $I_{cr,rot} > 2 \times 10^{-2}$ and $I_{cr,trans} > 9 \times 10^{-1}$

For intermediate values of $I_{cr,rot}$ and $I_{cr,trans}$ the response gradually switches from “cantilever” to “fixed-at-both-ends”.

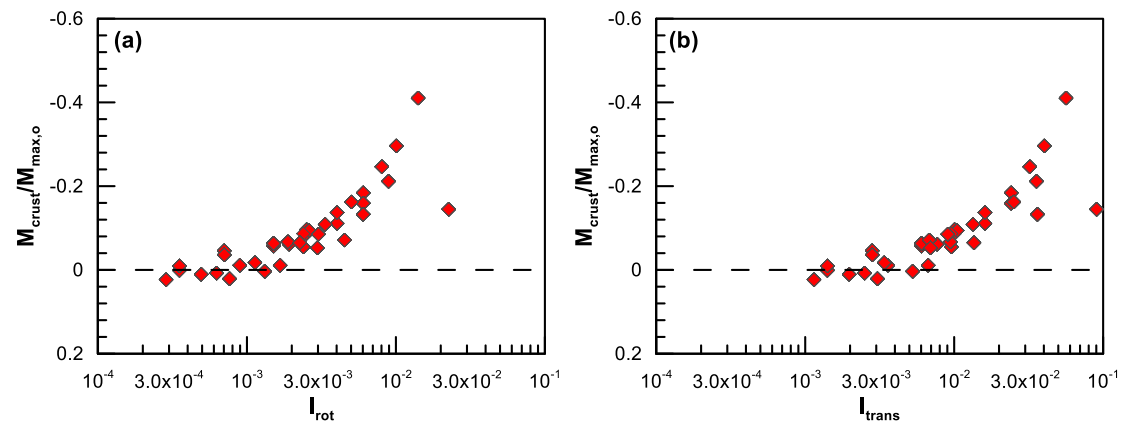


Figure 3: Variation of pile bending moment at the crust-sand interface, with the maximum bending moment ($M_{\max,o}$) developing at the base of the pile for the case where no crust is present with (a) I_{rot} and (b) I_{trans} .

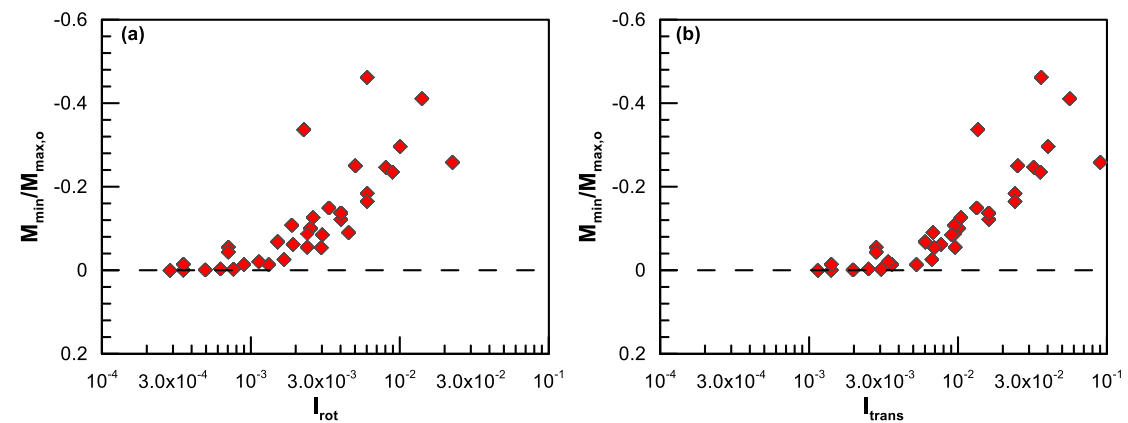


Figure 4: Variation of minimum pile bending moment, normalized with the maximum bending moment ($M_{\max,o}$) developing at the base of the pile for the case where no crust is present with (a) I_{rot} and (b) I_{trans} .

V. Effect of crust on the ultimate loads of the liquefied soil

a. Ultimate soil pressures imposed from the laterally spreading soil ($p_{ult,liq}$) are a unique function of the excess pore pressure ratio near the pile ($r_{u,pile}$), as shown in **Figure 5** (red symbols). The grey symbols in the same figure correspond to the case where a nonliquefiable crust is not present. Both sets of data follow the same trend, however the presence of the crust differentiates the response. This is indicated in **Figure 6a** which shows the variation with depth of the excess pore pressure ratio near the pile ($r_{u,pile}$), normalized with the corresponding values for the case where a crust is not present ($r_{u,pile,o}$). Results are demonstrated for a small and a large value of the crust index, I_{cr} . Finally, **Figure 6b** shows the corresponding distribution in terms of normalized ultimate loads, $p_{ult}/p_{ult,o}$. First of all, the existence of the crust on top of the liquefied layer and the subsequent increase of confinement stress resulted in less intense dilation on top of the liquefied layer. Namely, minimum $r_{u,pile}$ values reached $r_{u,pile}=0.2-0.3$, while for the case where the crust was not present $r_{u,pile,o}$ exceeded up to -3 to -4 . Furthermore, the crust affects the development of excess pore pressures as follows:

- i. Small Crust Index (flexible crust or stiff pile): At the **upper part** of the pile, excess pore pressures increase compared to the case where the crust is not present ($r_{u,pile}/r_{u,pile,o}>1.0$). At **intermediate depths** excess pore pressures appear to decrease compared to the analyses without crust ($r_{u,pile}/r_{u,pile,o}<1.0$). However, it should be noted that the effect of the crust at this part is much less intense compared to the upper part of the pile. Finally, at **large depths**, excess pore pressures remain essentially constant ($r_{u,pile}/r_{u,pile,o}\approx 1.0$). Subsequently, ultimate pressures decrease at the upper part, slightly increase in the middle and remain essentially constant near the base.
- ii. Large Crust Index (stiff crust or flexible pile): At the **upper part** of the pile, excess pore pressures decrease compared to the case where the crust is not present ($r_{u,pile}/r_{u,pile,o}<1.0$). At **intermediate and large depths**, the observed patterns are very similar compared to cases with small I_{cr} , i.e. slight decrease at the middle part and essentially no effect near base. As a result, ultimate pressures increase close to the crust-sand interface with a decreasing rate, while the ratio $p_{ult,liq}/p_{ult,liq,o}$ becomes approximately 1.0 near the base.

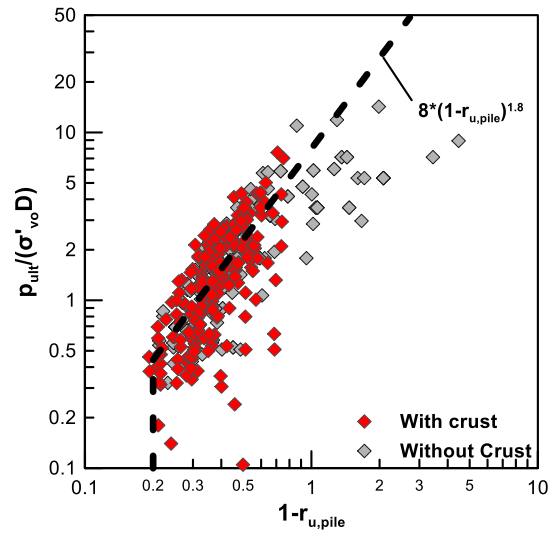


Figure 5: Correlation of $p_{ult,liq}/(\sigma'_{vo}D)$ and $1-r_{u,pile}$ for all the analyses performed in the present thesis.

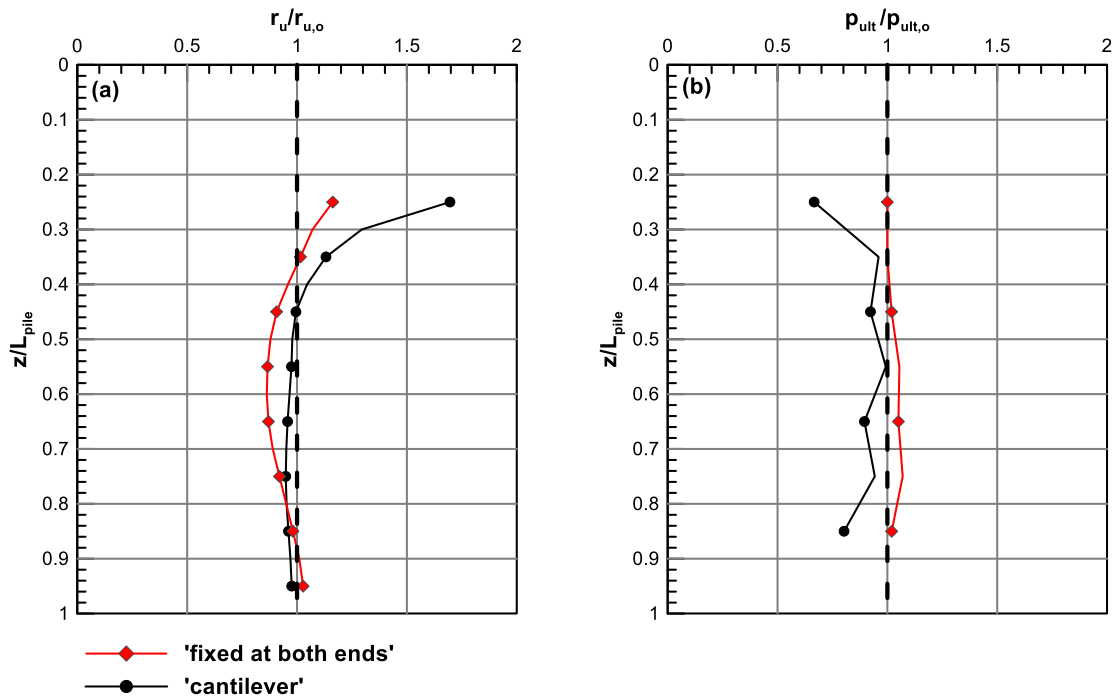


Figure 6: Correlation of (a) normalized r_u ratio and (b) normalized ultimate sand loads with depth.

- b. Overall the presence of the crust affects the ultimate loads imposed by the laterally spreading sand by a factor of $p_{ult,liq}/p_{ult,liq,o}=0.5-1.5$, where $p_{ult,liq}$ and $p_{ult,liq,o}$ the ultimate loads with and without clay crust respectively. The lower bound corresponds to small values of the crust index I_{cr} i.e. flexible crusts and stiff piles, and the upper to large crust indices i.e. stiff crusts or flexible piles.

Furthermore, the variation is more intense in the area below the crust-sand interface, while at large depths the ratio is mostly close to one.

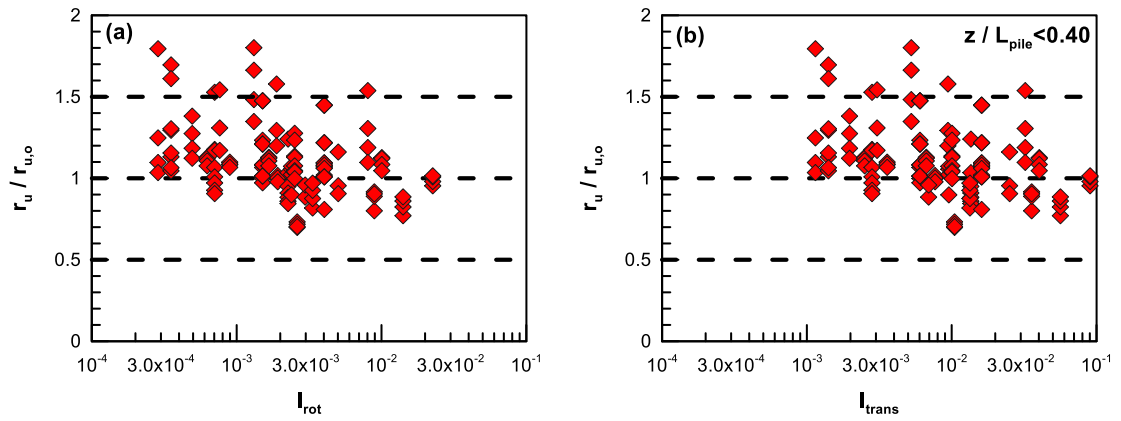


Figure 7: Correlation of crust indexes with the ratio of $r_u/r_{u,o}$ [(a) & (b)] for depth $z/L_{pile} < 0.40$.

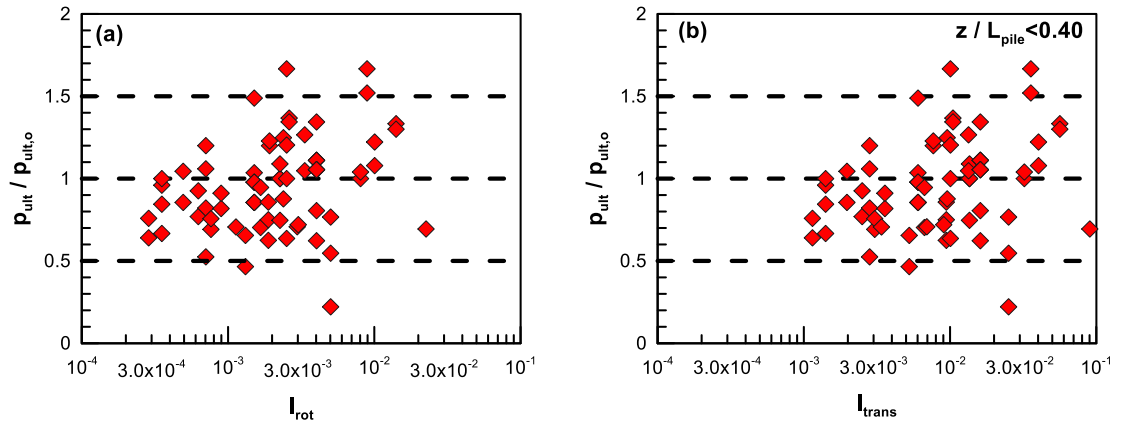


Figure 8: Correlation of crust indexes with the ratio of $p_{ult}/p_{ult,o}$ [(a) & (b)] for depth $z/L_{pile} < 0.40$.

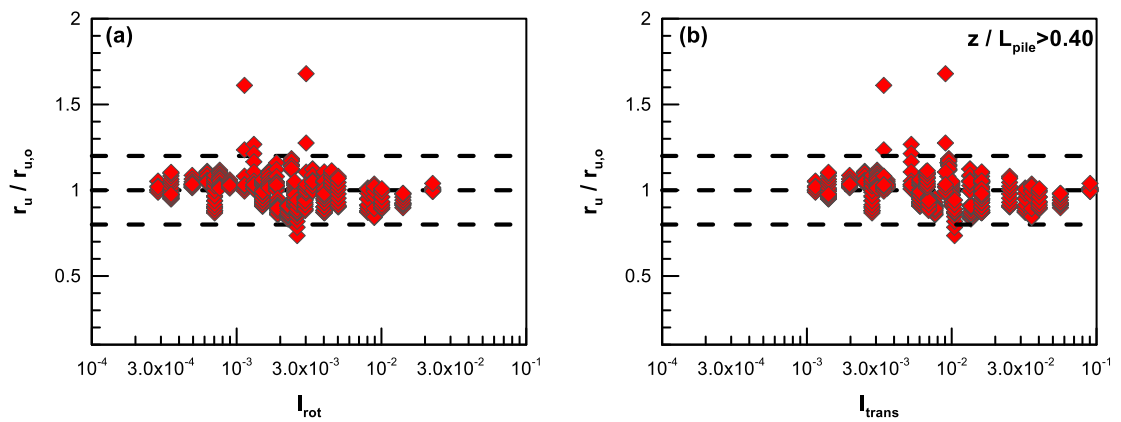


Figure 9: Correlation of crust indexes with the ratio of $r_u/r_{u,o}$ [(a) & (b)] for depth $z/L_{pile} > 0.40$.

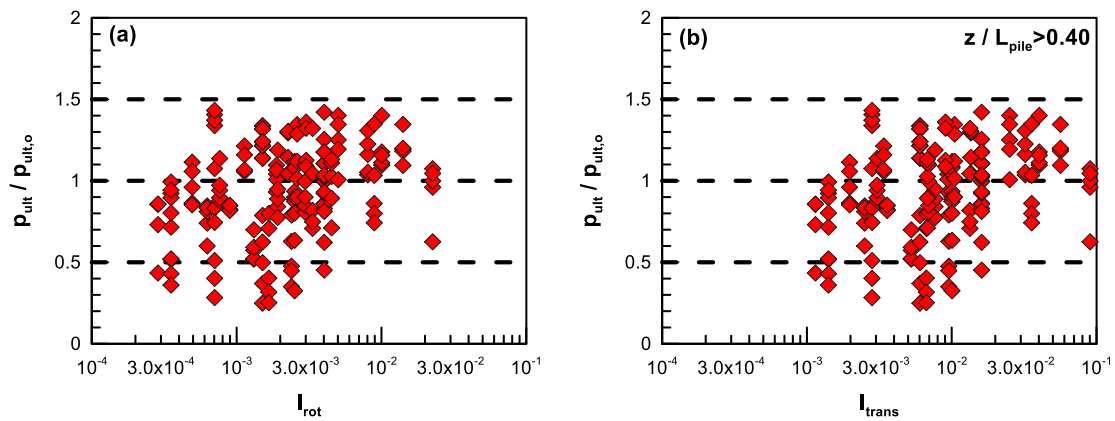


Figure 10: Correlation of crust indexes with the ratio of $p_{ult}/p_{ult,o}$ [(a) & (b)] for depth $z/L_{pile} > 0.40$.

VI. Effect of ultimate soil pressure of the liquefied layer in pile response

The effect of the loads imposed by the laterally spreading sand on the response of the pile was investigated by means of pseudo-static p-y analyses with the finite element code Ansys v12.1. Selective cases from the database of parametric analyses performed with FLAC3D were analyzed. Each p-y analysis was performed twice: First, the ultimate soil loads from the liquefied layer imposed on the pile, in the case of a soil profile with superficial crust were used and then, the analysis was repeated using the loads that were measured in the case of a soil profile absent of non-liquefiable crust. **Figure 11** and **Figure 12** demonstrate the comparison for a case with large and small crust index respectively, in terms of pile displacements and bending moments. The comparison reveals that consideration of crust effects on the loads imposed by the liquefied soil has a minor effect on the response of the pile. The results are also compared with the corresponding from the numerical simulation with FLAC. In both cases shown herein, the observed differences with and without considering crust effects did not exceed 10%.

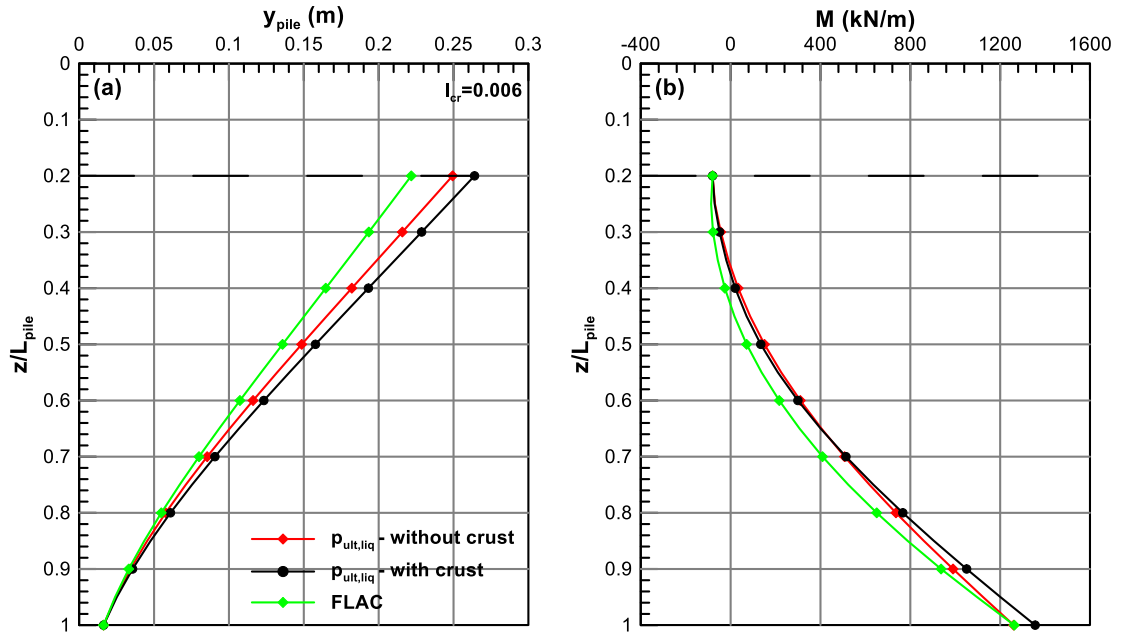


Figure 11: Variation of (a) pile deflection and (b) bending moments with depth for crust index $I_{cr}=0.006$.

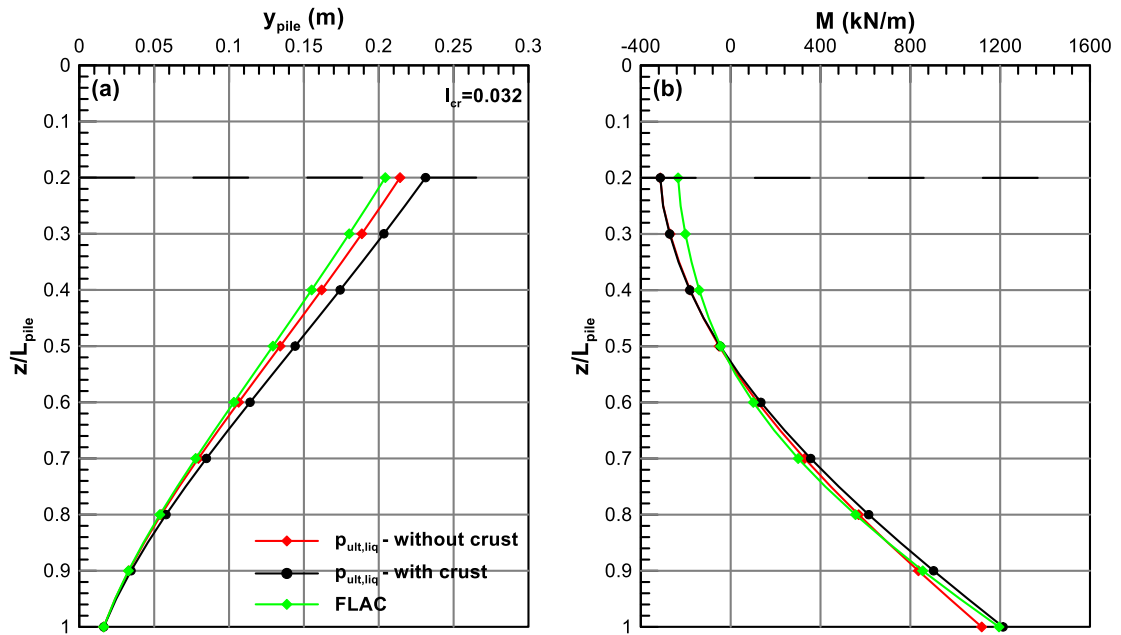


Figure 12: Variation of (a) pile deflection and (b) bending moments with depth for crust index $I_{cr}=0.032$.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	5
1.1 Περιγραφή του προβλήματος.....	5
1.2 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας	8
1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας.....	8
2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση	11
2.1 Γενικά	11
2.2 Απόκριση πασσάλου σε οριζόντια φόρτιση λόγω πλευρικής εξάπλωσης στρώματος ρευστοποιήσιμης άμμου	11
2.3 Επίδραση μη ρευστοποιήσιμης εδαφικής κρούστας.....	28
2.4 Σύνοψη.....	42
3. Αριθμητική Μεθοδολογία	43
3.1 Γενικά	43
3.2 Κώδικας FLAC 3D.....	44
3.3 Αριθμητικό Προσομοίωμα	46
3.3.1 Στάδιο 1: Εισαγωγή του σωστού τασικού πεδίο για το απειρομήκες πρανές ...	48
3.3.2 Στάδιο 2: Εγκατάσταση του πασσάλου.....	61
3.3.3 Στάδιο 3: Σεισμική Διέγερση στη βάση του μοντέλου.....	63
3.4 Τοπικά Αποτελέσματα	64
4. Παραμετρικές Αναλύσεις & Τυπικά Αποτελέσματα.....	67
4.1 Γενικά	67

4.2	Παραμετρικές Αναλύσεις	68
4.3	Τυπικά Αποτελέσματα: Επίδραση αντοχής & διαπερατότητας κρούστας ...	71
4.4	Τυπικά Αποτελέσματα: Επίδραση ροπής αδράνειας στη δυσκαμψία του πασσάλου	77
4.5	Τυπικά Αποτελέσματα: Επίδραση ελεύθερου μήκους πασσάλου	82
4.6	Συμπεράσματα	88
5.	Επίδραση Κρούστας στην Απόκριση του Πασσάλου	89
5.1	Γενικά	89
5.2	Επίδραση Αντοχής Κρούστας	89
5.3	Επίδραση Ροπής Αδράνειας Πάσσαλου	100
5.4	Επίδραση Μήκους Πασσάλου	106
5.5	Επίδραση δυσκαμψίας του πασσάλου	112
5.6	Δείκτες Ποσοτικοποίησης της Επίδρασης της Κρούστας	118
5.7	Συμπεράσματα	125
6.	Επίδραση Κρούστας στα Οριακά φορτία της Ρευστοποιημένης Άμμου	127
6.1	Γενικά	127
6.2	Επίδραση Αντοχής Κρούστας	131
6.3	Επίδραση Διαπερατότητας Κρούστας	137
6.4	Επίδραση Ροπής Αδράνειας Πασσάλου	141
6.5	Επίδραση Μήκους Πασσάλου	145
6.6	Συμπεράσματα	149
7.	Επίδραση Φορτίων Ρευστοποιημένης Άμμου στην απόκριση του Πασσάλου ..	153
7.1	Γενικά	153
7.2	Αναλύσεις Πεπερασμένων Στοιχείων	154
7.3	Επίδραση Φορτίων Άμμου στην Απόκριση του πασσάλου	158
7.4	Συμπεράσματα	164

8. Συμπεράσματα.....	165
8.1 Γενικά	165
8.2 Επίδραση κρούστας στην απόκριση του πασσάλου	167
8.3 Επίδραση κρούστας στα οριακά φορτία της ρευστοποιημένης άμμου.....	168
8.4 Επίδραση φορτίων ρευστοποιημένης άμμου στην απόκριση πασσάλου ...	170
9. Βιβλιογραφικές Αναφορές	171

1

Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του προβλήματος

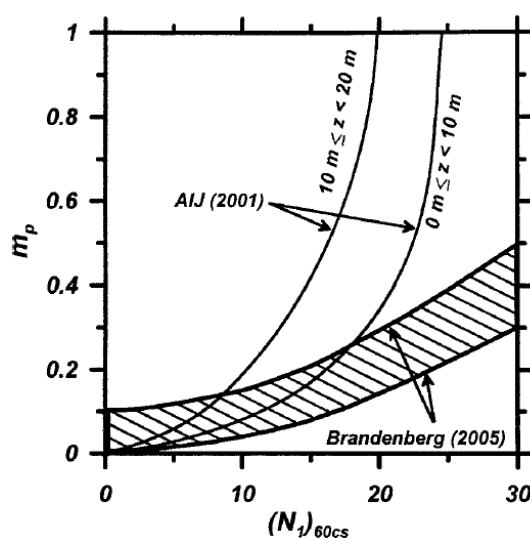
Ένα από τα πιο σημαντικά συνοδευτικά φαινόμενα της σεισμικής ρευστοποίησης είναι η «πλευρική εξάπλωση» (lateral spreading) του φυσικού εδάφους, κατά την οποία μεγάλες εδαφικές εκτάσεις μετακινούνται οριζόντια, από μερικά εκατοστά έως και μερικά μέτρα. Για την εκδήλωση αυτού του φαινομένου είναι αρκετή ακόμη και μικρή κλίση του εδάφους (π.χ. 2÷4%) ή παρουσία μικρού σχετικά αναβαθμού, ύψους 1÷2m, όπως για παράδειγμα στις όχθες ποταμών. Στην περίπτωση πρανών το φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης μπορεί να έχει δραματικές επιπτώσεις σε επιφανειακές και βαθιές θεμελιώσεις. Ειδικά στις θεμελιώσεις με πασσάλους έχουν παρατηρηθεί εκτεταμένες βλάβες καθώς ακόμη και αστοχίες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Παραδείγματα αστοχίας πασσάλων λόγω ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης σε πρόσφατους σεισμούς

Η ισχύουσα πρακτική για την ανάλυση των πασσάλων υπό οριζόντια φόρτιση βασίζεται συνήθιστα στη μέθοδο της "Ελαστικής Δοκού επί μη γραμμικού Ελατηριωτού Εδάφους (BNWF)", ευρύτερα και γνωστής ως μέθοδος «p-y». Ο κρίσιμος ρόλος των καμπυλών p-y για το σχεδιασμό οριζόντια φορτιζόμενων πασσάλων αποτέλεσε κίνητρο για την εκπόνηση σημαντικής, σε όγκο και πρωτοτυπία, πειραματικής κυρίως έρευνας η οποία επικεντρώθηκε αρχικά σε «ξηρές» άμμους και ακολούθως στην περίπτωση «ρευστοποιημένων» άμμων υπό πλευρική εξάπλωση (Det Norske Veritas 1980; Georgiadis et al. 1992; Abdoun et al. 2003; Ashour and Norris 2003; Branderberg et al. 2005; Cubrinovski et al. 2006; Liyanapathirana and Poulos 2005; Rollins et al. 2007; Tokimatsu and Suzuki 2009; Gonzales et al. 2009). Αποτέλεσμα αυτών των προσπαθειών ήταν η διερεύνηση των μηχανισμών που ελέγχουν την αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους, καθώς και η διατύπωση σχέσεων για τις καμπύλες p-y τόσο σε «ξηρές» όσο και σε «ρευστοποιημένες» άμμους.

Στην περίπτωση των «ρευστοποιημένων» άμμων οι προτεινόμενες καμπύλες p-y βασίζονται στις αντίστοιχες καμπύλες για «ξηρές» άμμους, με δραστική απομείωση της οριακής εδαφικής αντίδρασης ή της αρχικής δυσκαμψίας. Η απομείωση γίνεται είτε θεωρώντας εμπειρικούς συντελεστές (m_p multipliers, Σχήμα 1.2) είτε με αναγωγή στην παραμένουσα αντοχή του ρευστοποιημένου εδάφους. Οι προκύπτουσες τελικά καμπύλες p-y εξαρτώνται μόνο από τις αρχικές συνθήκες (σχετική ποκνότητα και τάση εγκιβωτισμού) καθώς και από την διάμετρο του πασσάλου.



Σχήμα 1.2: Μειωτικός συντελεστής (m_p multiplier) για την επίδραση της ρευστοποίησης στις στατικές καμπύλες p-y.

Ωστόσο, πρόσφατα πειραματικά αποτελέσματα καταδεικνύουν την ύπαρξη και άλλων παραμέτρων εξίσου σημαντικών. Για παράδειγμα κατά τους Suzuki και Tokimatsu (2009), Branderberg et al. (2005) κ.α., εκτός από τις αρχικές συνθήκες και την αρχική διάμετρο του πασσάλου, η συμπεριφορά φαίνεται να εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά του πασσάλου (ακαμψία, τρόπος εγκατάστασης, συνθήκες στήριξης της κεφαλής), καθώς και τις συνθήκες στράγγισης (διαπερατότητα εδάφους και περίοδος διέγερσης). Επιπλέον, οι Gonzalez et al.(2009) κατέδειξαν ότι για τυπικές τιμές διαπερατότητας του εδάφους, είναι δυνατόν να αναπτυχθούν σημαντικές αρνητικές πιέσεις πόρων σε μικρά βάθη γύρω από τον πάσσαλο ως αποτέλεσμα της έντονης διαστολικότητας που αναπτύσσεται λόγω ροής του ρευστοποιημένου εδάφους γύρω από τον πάσσαλο. Το φαινόμενο αυτό, δεν λαμβάνεται υπόψη στις υπάρχουσες μεθοδολογίες, παρά το γεγονός ότι προκαλεί αύξηση και όχι μείωση των εδαφικών ωθήσεων σε σύγκριση με το «ξηρό» έδαφος, επιβαρύνοντας την καταπόνηση του πασσάλου.

Στο πλαίσιο της ερευνητικής δραστηριότητας του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων του Ε.Μ.Π. (Chaloulos, 2012) διερευνήθηκαν συστηματικά οι μηχανισμοί που επιδρούν στις καμπύλες p - y για πασσάλους σε άμμους υπό οριζόντια φορτία λόγω μετακίνησης του εδάφους και διατυπώθηκαν βελτιωμένες πολύ-παραμετρικές σχέσεις υπολογισμού συναρτήσει των χαρακτηριστικών του εδάφους, του πασσάλου και της σεισμικής διέγερσης.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην περίπτωση πάσσαλων σε έδαφος υπό καθεστώς ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης η οποία εκτείνεται έως την επιφάνεια του εδάφους. Δεν εξετάστηκε δηλαδή η περίπτωση μη ρευστοποίησης σε ένα επιφανειακό εδαφικό στρώμα (κρούστα).

Συνοπτικά, τα κύρια αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραπάνω διερεύνηση είναι:

- Τα οριακά φορτία της ρευστοποιημένης άμμου εξαρτώνται μονοσήμαντα από το λόγο $r_{u,pile}$ κοντά στο πάσσαλο.
- Ο λόγος $r_{u,pile}$ στα μεγάλα βάθη πλησιάζει τη μονάδα. Σε μικρότερα βάθη μπορεί να λάβει έντονα αρνητικές τιμές, καθώς επηρεάζεται από τρεις σύνθετους μηχανισμούς: (α) Αρχικές εδαφικές συνθήκες (β) τις συνθήκες στράγγισης και (γ) τη σχετική μετακίνηση πασσάλου-εδάφους.

- Ως εκ τούτου, τα οριακά φορτία της ρευστοποιημένης άμμου, στα μικρά βάθη αυξάνονται σημαντικά και ίσως και παραπάνω από την αντίστοιχη τιμή για μη-ρευστοποιημένα εδάφη.
- Οι υπάρχουσες μεθοδολογίες σχεδιασμού δεν λαμβάνουν υπόψη τα ανωτέρω φαινόμενα με αποτέλεσμα να υποεκτιμούν σημαντικά την καταπόνηση του πασσάλου και να καθιστούν επισφαλή το σχεδιασμό.

1.2 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Τα παραπάνω καταδεικνύουν την ανάγκη επανεξέτασης του σχεδιασμού πασσάλων σε έδαφος υπό πλευρική εξάπλωση. Στο πλαίσιο αυτό, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επέκταση των ευρημάτων των Chaloulos (2012) για την περίπτωση που το περιβάλλον έδαφος δεν αποτελείται μόνο από ρευστοποιήσιμη άμμο αλλά και από ένα **μικρού πάχους επιφανειακό μη-ρευστοποιήσιμο στρώμα αργίλου υψηλής αντοχής**. Η διπλωματική εργασία στοχεύει στην διερεύνηση της επιρροής της εδαφικής κρούστας στα φαινόμενα που αναφέρθηκαν παραπάνω, καθώς και στη συνολική απόκριση του συστήματος πασσάλου-εδάφους.

1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

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

Στο **Κεφάλαιο 2** πραγματοποιείται βιβλιογραφική αναδρομή σε υπάρχουσες έρευνες και προτεινόμενες μεθοδολογίες σχετικά με την επιρροή της εδαφικής επιφανειακής κρούστας στο σύστημα έδαφος-πασσάλος. Επιπλέον, παρουσιάζονται πρόσφατες αναλύσεις σχετικά με την απόκριση πασσάλων σε ρευστοποιήσιμο έδαφος με lateral spreading.

Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η αριθμητική μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του προβλήματος που αντιμετωπίζεται καθώς και η βαθμονόμησή της με βάση υπάρχοντα πειράματα και αναλυτικά δεδομένα.

Στο **κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται αναλυτικά οι παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν και παρουσιάζονται ορισμένα πρώτα τυπικά αποτελέσματα.

Στο **κεφάλαιο 5** διερευνάται εκτενώς η επίδραση του αργιλικού στρώματος στα στην απόκριση του πασσάλου. Κατόπιν διερεύνησης παρουσιάζονται οι δύο βασικοί

μηχανισμοί απόκρισης καθώς και οι δείκτες που δημιουργήθηκαν για τη ποσοτικοποίηση της επίδρασης της κρούστας.

Στο **κεφάλαιο 6** διερευνάται η επίδραση της κρούστας στα φορτία που η ρευστοποιημένη άμμος ασκεί στον πάσσαλο. Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η αναγνώριση του μηχανισμού που καθορίζει το μέγεθος των οριακών φορτίων του ρευστοποιημένου στρώματος και η επαλήθευση της μονοσήμαντης συσχέτισης των οριακών φορτίων με την ανάπτυξη των υπερπιέσεων πόρων γύρω από τον πάσσαλο. Επιπλέον, γίνεται προσπάθεια ποσοτικοποίησης της επίδρασης της κρούστας στο μέγεθος των φορτίων της άμμου.

Στο **κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται οι παραμετρικές αναλύσεις στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Σκοπός αυτών των επιπλέον αναλύσεων είναι η διερεύνηση στην διαφοροποίηση της απόκρισης του πασσάλου όταν ο πάσσαλος επιβαρύνεται με τα οριακά φορτία που αναπτύσσονται στη ρευστοποιημένη άμμου στην περίπτωση της ύπαρξης της κρούστας και απουσία αυτής.

Στο **κεφάλαιο 8** παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα Διπλωματική Εργασία.

Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1 Γενικά

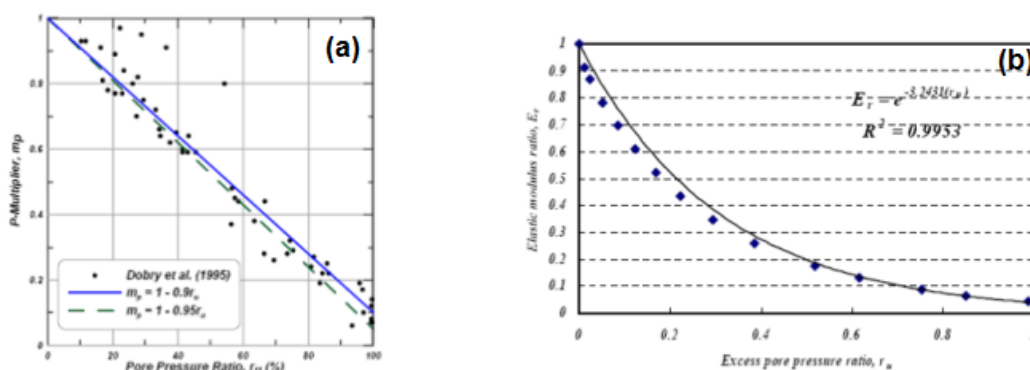
DisplayText cannot span more than one line! Πληθώρα πειραματικών (π.χ. Abdoun 2003, Dobry 2003, Brandenburg 2005, Cubrinvoski and Ishihara 2006, Gonzalez 2009) και αναλυτικών (π.χ. Ignatius Lam 2009, Χαλούλος 2012, Qiang Li 2013) μελετών έχουν πραγματοποιηθεί ως τώρα προκειμένου να μελετηθεί η κινηματική αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους, υπό καθεστώς ρευστοποίησης και οριζόντιας πλευρικής εξάπλωσης, με έμφαση στους μηχανισμούς που επιδρούν στην ανάπτυξη των εδαφικών αντιδράσεων. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η βασική βιβλιογραφία στο θέμα αυτό και περιγράφεται αναλυτικά η ισχύουσα μεθοδολογία σχεδιασμού των πασσάλων συνοψίζοντας παράλληλα τα κυριότερα ευρήματα πρόσφατων ερευνών. Η επισκόπηση της βιβλιογραφίας που ακολουθεί, γίνεται σε δύο μέρη. Πρώτα, γίνεται σύντομη αναφορά στις εξελίξεις σχετικά με τις καμπύλες p - y της ρευστοποιημένης άμμου, ανεξάρτητα από την ύπαρξη ή μη μη-ρευστοποιημένης επιφανειακής κρούστας. Ακολούθως, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην ύπαρξη τέτοιας κρούστας καθώς και στην επίδρασή στην συμπεριφορά των πασσάλων.

2.2 Απόκριση πασσάλου σε οριζόντια φόρτιση λόγω πλευρικής εξάπλωσης στρώματος ρευστοποιήσιμης άμμου

Η ρευστοποίηση και η πλευρική εξάπλωση, αλλάζουν σημαντικά την απόκριση του πασσάλου σε σύγκριση με την περίπτωση που το έδαφος δεν ρευστοποιείται. Συγκεκριμένα, η αύξηση της πίεσης των πόρων προκαλεί εδαφική χαλάρωση (μείωση της ενεργού κατακόρυφης τάσης) και μείωση της οριακής εδαφικής πίεσης, με αποτέλεσμα να είναι διαφορετικός ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης πασσάλου-εδάφους.

Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται για τον σχεδιασμό των πασσάλων βασίζεται στη μείωση της οριακής εδαφικής αντίστασης ενός μη-ρευστοποιήσιμου εδάφους με την εφαρμογή κατάλληλου μειωτικού συντελεστή στο φορτίο p . Αυτός ο συντελεστής ονομάζεται m_p multiplier και συνήθως εκτιμάται από εμπειρικά διαγράμματα (Dobry et al 1995; AIJ 2001; Brandenberg 2005; Cubrinovski et al 2005; Han et al 2007) στα οποία η σταθερά m_p συσχετίζεται με διάφορες (εδαφικές και μη) παραμέτρους (σχετική πυκνότητα D_r , λόγος υπερπίεσεων πόρων προς αρχική ενεργό κατακόρυφο τάση r_u , σχετική μετακίνηση πασσάλου-εδάφους). Πρόσφατες μελέτες (Haigh 2002; Boulanger 2007; Gonzalez et al 2009; Tokimatsu and Suzuki, 2009) υποδεικνύουν ότι το φαινόμενο της ρευστοποίησης είναι πολύ πιο πολύπλοκο και ότι η υφιστάμενη μεθοδολογία με την εφαρμογή του μειωτικού συντελεστή m_p είναι υπέρ-απλουστευτική. Επιπλέον, οι διάφορες προτεινόμενες τιμές για τη σταθερά m_p , δίνουν και διαφορετικά αποτελέσματα.

Μία από τις πρώτες προσπάθειες για να εκτιμηθεί ο μειωτικός συντελεστής έγινε από τους **Dobry et al. (1995)**. Οι συγγραφείς συσχέτισαν τον παράγοντα απομείωσης m_p με το λόγο των υπερπίεσεων πόρων στο ελεύθερο πεδίο προς την αρχική κατακόρυφο ενεργό τάση (r_u), βασιζόμενοι σε δεδομένα από πειράματα φυγοκεντριστή σε άμμους μέσης πυκνότητας ($D_r=40\%$). Η συσχέτιση φαίνεται στο **Σχήμα 2.1a** και δείχνει ότι η σταθερά m_p μειώνεται γραμμικά μέχρι την τιμή 0.10 η οποία περιγράφει την ρευστοποίηση του αμμώδους στρώματος.



Σχήμα 2.1: Μειωτική σταθερά m_p συναρτήσει του λόγου r_u στο ελεύθερο πεδίο (a) Dobry et al. (1995) (b) Han et al. (2007)

Παρόμοια με την προσέγγιση του Dobry, οι **Han et al. (2007)** χρησιμοποίησαν δεδομένα από πειράματα σεισμικής τράπεζας (shake-table tests) και αριθμητικές

αναλύσεις για να προσεγγίσουν τη σταθερά m_p συναρτήσει του λόγου r_u . Η σχέση που προτείνουν φαίνεται στο **Σχήμα 2.1b** και περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$m_p = e^{-3.2431r_u} \quad (2.1)$$

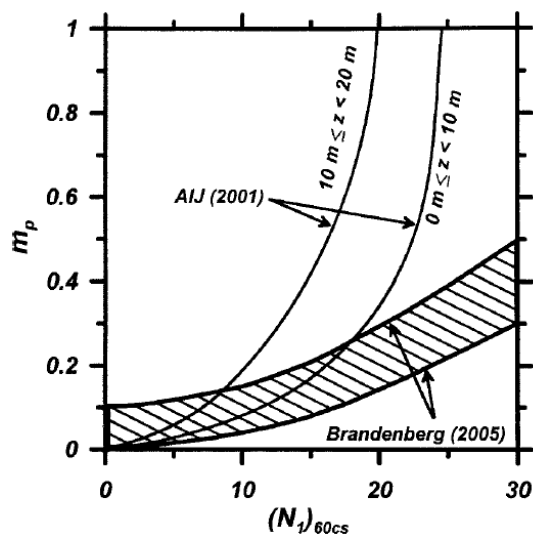
Η εκθετική μορφή της εξίσωσης δίνει μικρότερες τιμές για το m_p , συγκριτικά με τις τιμές από την προσέγγιση του Dobry. Κύριο μειονέκτημα και των δύο παραπάνω συσχετίσεων είναι ότι δεν λαμβάνουν υπόψη την επίδραση της συσσώρευσης της πίεσης πόρων στην περιοχή γύρω από τον πάσσαλο, μία κυρίαρχη παράμετρος που επηρεάζει την εδαφική αντίδραση.

Οι **Wilson et al. (1999)** πραγματοποίησαν πειράματα φυγοκεντριστή στις εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου UC. Davis, σε οριζόντια εδαφικά προφίλ αποτελούμενα από ομοιόμορφη κορεσμένη άμμο. Έγιναν πειράματα για διαφορετικά χαρακτηριστικά πασσάλων, διαφορετικές εδαφικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά διέγερσης. Ο ανάστροφος υπολογισμός (back-calculation) της απόκρισης σε όρους p - y έδειξε ότι η εδαφική αντίσταση ήταν μεγαλύτερη για άμμους με μεγάλη σχετική πυκνότητα D_r ενώ αμελητέα εδαφική αντίσταση προέβλεπαν οι πολύ χαλαρές άμμοι. Επιπλέον, όταν η σχετική μετακίνηση εδάφους-πασσάλου ξεπερνούσε ορισμένες τιμές παρατηρήθηκε εδαφική σκλήρυνση (soil hardening effect) υποδηλώνοντας την εξάρτηση της απόκρισης σε όρους p - y από την επιβαλλόμενη σχετική παραμόρφωση. Παρόλα αυτά, σε όλη τη διάρκεια της διέγερσης η εδαφική αντίσταση μειωνόταν παραπέμποντας σε εδαφική χαλάρωση (soil softening effect). Οι συγγραφείς απέδωσαν αυτή την υποβάθμιση της εδαφικής αντίστασης στη συσσώρευση πίεσης πόρων λόγω του αστράγγιστου χαρακτήρα της φόρτισης και στις μετακινήσεις στο τέλος της διέγερσης οι οποίες ήταν μικρότερες από τις προηγούμενες μέγιστες ώστε το έδαφος να εμφανίσει συμπεριφορά σκλήρυνσης. Τελικά, οι συγγραφείς αναγνώρισαν τη σημασία του ρυθμού φόρτισης και των συνθηκών στράγγισης στην απόκριση της κορεσμένης άμμου πέρα από τους παράγοντες που επηρεάζουν τον αστράγγιστο χαρακτήρα της (σχετική πυκνότητα D_r , ιστορία παραμορφώσεων).

Οι **Brandenberg et al. (2005)** πραγματοποίησαν πειράματα φυγοκεντριστή για να μελετήσουν την απόκριση πασσάλων σε εδαφικό σχηματισμό ήπιας κλίσης που αποτελείται από άμμο ευαίσθητη σε ρευστοποίηση και υπερκείμενη μη-

ρευστοποιήσιμη εδαφική κρούστα. Από ανάστροφο υπολογισμό της εδαφικής απόκρισης παρατηρήθηκαν παροδικές πτώσεις στις υπερπιέσεις των πόρων με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλων πλευρικών παροδικών φορτίων στους πασσάλους. Οι πτώσεις αυτές οφείλονται στη διαστολική συμπεριφορά του εδάφους και ήταν διαφορετικές για διεγέρσεις με διαφορετική συχνότητα υποδηλώνοντας εξάρτηση της απόκρισης του εδάφους από τον ρυθμό φόρτισης που επιβάλλει η διέγερση (loading rate effects). Ακόμη, παρατηρήθηκε πως για πασσάλους μικρής δυσκαμψίας το ρευστοποιημένο έδαφος προέβαλλε αντίσταση στη μετακίνηση του πασσάλου καθώς αυτή ήταν μεγαλύτερη της εδαφικής.

Με βάση τα αποτελέσματα από τα πειράματα, ο Brandenberg (2005) και οι Brandenberg et al. (2007) πρότειναν το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.2) για τον υπολογισμό της σταθεράς m_p . Παρά το γεγονός ότι τα πειράματα έδειξαν σαφή εξάρτηση της εδαφικής απόκρισης από το συχνοτικό περιεχόμενο της διέγερσης και τη δυσκαμψία του πασσάλου, ο μειωτικός συντελεστής συσχετίστηκε μόνο με τη σχετική πυκνότητα D_r της άμμου. Οι προτεινόμενες τιμές των συγγραφέων συγκρίνονται και με τις οδηγίες του AIJ (2001) και φαίνεται ότι υπάρχει συμφωνία των δύο μεθόδων για μικρές τιμές του $N_{1(60)CS}$, ενώ για πιο πυκνά υλικά οι συγγραφείς προτείνουν χαμηλότερες τιμές για τον συντελεστή m_p .



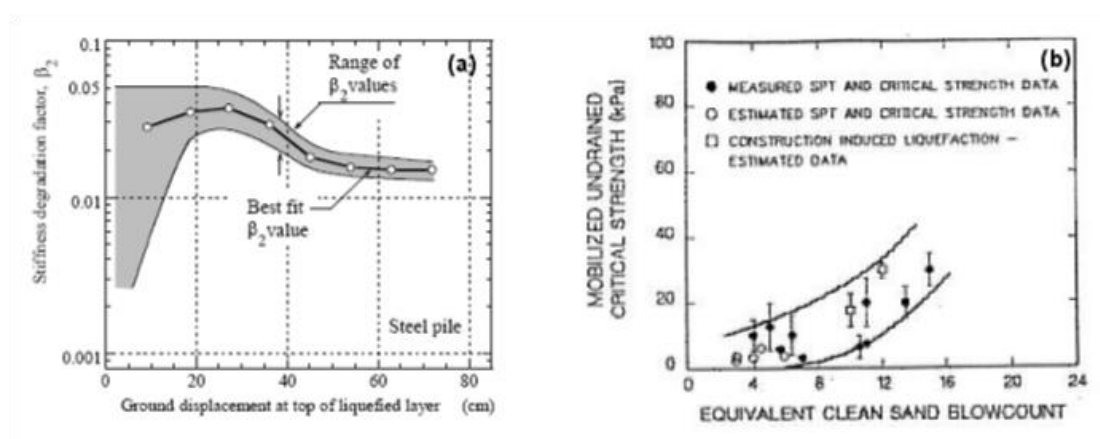
Σχήμα 2.2: Μειωτικός συντελεστής m_p συναρτήσει της Σχετικής Πυκνότητας [D_r ή $N_{1(60)CS}$] (Brandenberg et al. 2007).

Για περιπτώσεις όπου έχει συντελεστεί μερική ρευστοποίηση του εδάφους οι συγγραφείς προτείνουν ο συντελεστής m_p να υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$m_p = 1 - r_u (1 - m_{p,liq}) \quad (2.2)$$

όπου $m_{p,liq}$ είναι η τιμή για πλήρη ρευστοποίηση και r_u ο λόγος της υπερπίεσης πόρων (Δu) στο ελεύθερο πεδίο προς την αρχική κατακόρυφο ενεργό τάση ($\sigma'_{vo,ini}$). Τελικώς, πρέπει να τονιστεί ότι η προτεινόμενη συσχέτιση των Brandenberg et al. (2007) προέκυψε από ανάστροφο υπολογισμό με χρήση της μεθόδου p-y και των μητρικών καμπυλών p-y της μεθοδολογίας του API (1993) για άμμους, από δεδομένα πειραμάτων σε φυγοκεντρική. Επομένως, η χρήση της προτεινόμενης μεθοδολογίας με άλλες μητρικές καμπύλες p-y δεν προτείνεται.

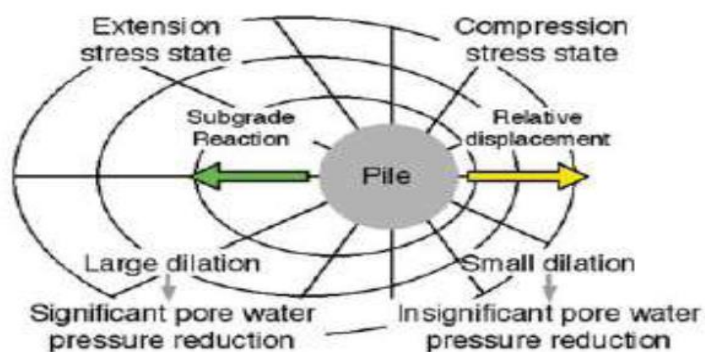
Οι Cubrinvoski et al. (2006) από ανάστροφο υπολογισμό (back-calculation) εκτίμησαν τα εδαφικά φορτία λόγω πλευρικής εξάπλωσης για (εύκαμπτους και άκαμπτους) πασσάλους, τοποθετημένους σε μη-ρευστοποιήσιμη εδαφική κρούστα που υπέρκειται ρευστοποιημένου στρώματος, αξιοποιώντας δεδομένα από πειράματα σεισμικής τράπεζας (shake-table tests). Ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων οδήγησε στο διάγραμμα που φαίνεται στο **Σχήμα 2.3a** για την εκτίμηση ενός συντελεστή απομείωσης της αρχικής δυσκαμψίας β . Αυτή η σταθερά β συσχετίζεται με τη σχετική μετακίνηση μεταξύ πασσάλου και εδάφους. Επίσης, για μικρές τιμές της σχετικής μετακίνησης παρατηρείται μεγάλη διασπορά δεδομένων σε αντίθεση για τις μεγάλες σχετικές μετακινήσεις. Η παρατήρηση αυτή υποδηλώνει την εξάρτηση της καμπύλης p-y από την δυσκαμψία του πασσάλου, καθώς οι μικρές και οι μεγάλες σχετικές μετακινήσεις είναι ενδεικτικές άκαμπτων και εύκαμπτων πασσάλων αντίστοιχα.



Σχήμα 2.3: (a) Απομειωτικός παράγοντας δυσκαμψίας β συναρτηθεί της εδαφικής μετατόπισης (Cubrinvoski et al. 2005) και (b) Αστράγγιστη παραμένουσα διατμητική αντοχή (Seed and Harder, 1990).

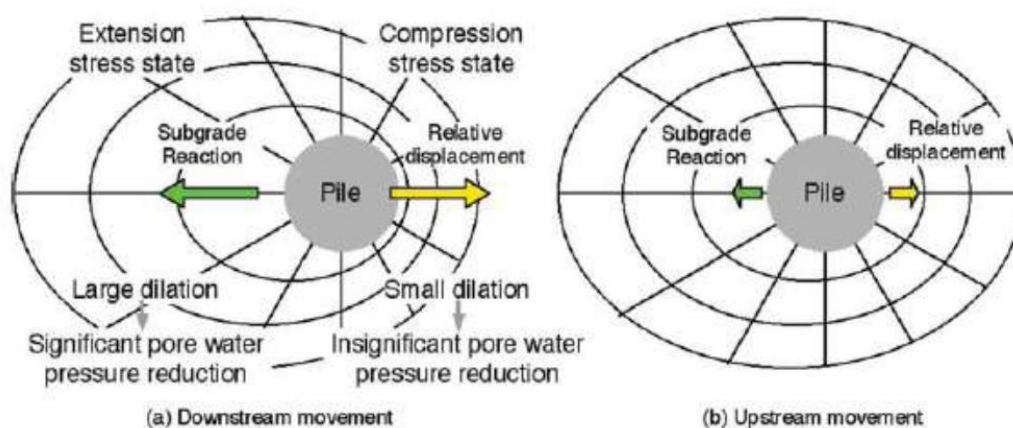
Η προτεινόμενη συσχέτιση αναπτύχθηκε με τη θεώρηση γραμμικής απόκρισης p - y για το μη-ρευστοποιημένο έδαφος. Σε μία μετέπειτα μελέτη (**Cubrinovski and Ishihara, 2007**) οι συγγραφείς προτείνουν τη χρήση μια διγραμμικής σχέσης για την εκτίμηση της πλευρικής πίεσης p με άνω όριο το οποίο καθορίζεται μέσα από εμπειρικές συσχετίσεις για την παραμένουσα αστράγγιστη διατμητική αντοχή της ρευστοποιημένης άμμου όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.3b (Seed and Harder, 1990)**.

Οι **Tokimatsu and Suzuki (2004)**, **Suzuki et al. (2005)** και **Tokimatsu and Suzuki (2009)** διερεύνησαν τους μηχανισμούς που διέπουν την απόκριση πάσσων σε ρευστοποιημένα εδάφη μέσα από πειράματα σε μεγάλη σεισμική τράπεζα. Τα εδαφικά προφίλ που εξετάστηκαν ήταν μηδενικής ή πολύ ήπιας κλίσης και αποτελούνταν από στρώμα ομοιόμορφης ρευστοποιήσιμης άμμου και επιφανειακό στρώμα ξηρής άμμου. Δοκιμάστηκαν πάσσαλοι εδκαμπτοι αλλά και άκαμπτοι. Οι συγγραφείς παρατήρησαν την εδαφική απόκριση να επηρεάζεται από την αλλαγή των πιέσεων πόρων και τη διαστολική συμπεριφορά του εδάφους γύρω από τον πάσσαλο, γεγονός που διαφοροποιεί την κινηματική συμπεριφορά ρευστοποιημένων άμμων έναντι των ξηρών στις οποίες καθορίζεται από τη συμπίεση του εδάφους λόγω της ταλάντωσης του πάσσалу. Για εδαφικά προφίλ μηδενικής κλίσης ο μηχανισμός της εδαφικής απόκρισης φαίνεται στο **Σχήμα 2.4**. Στην πλευρά της επέκτασης, η συνδυασμένη επίδραση της εδαφικής διαστολικής συμπεριφοράς και της αποφόρτισης έχει ως αποτέλεσμα μεγάλα πλευρικά φορτία τα οποία τραβούν τον πάσσαλο. Στην πλευρά της συμπίεσης τα φαινόμενα διαστολικότητας είναι περιορισμένα και τα πλευρικά φορτία που αναπτύσσονται είναι αμελητέα σε σύγκριση με πριν.



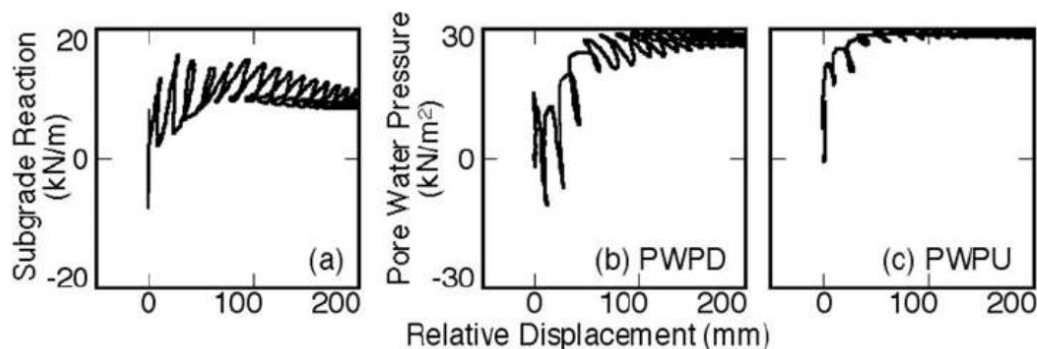
Σχήμα 2.4: Μηχανισμός εδαφικής απόκρισης σε εδαφικό προφίλ μηδενικής κλίσης (Tokimatsu and Suzuki, 2009).

Για κεκλιμένο έδαφος, ο μηχανισμός απόκρισης φαίνεται στο **Σχήμα 2.5** για κίνηση προς τα κάτω (παράλληλα στην κλίση του στρώματος) και κίνηση προς τα πάνω (αντίθετα με την κλίση του στρώματος). Στην πρώτη περίπτωση, τα φαινόμενα διαστολικότητας είναι έντονα στην πλευρά της επέκτασης όπως είδαμε πριν και για τα επίπεδα εδαφικά προφίλ. Αντίθετα, στην κίνηση προς τα πάνω η διαστολική συμπεριφορά του εδάφους είναι μικρή και στις δύο πλευρές του πασσάλου επειδή συσσωρεύονται μετακινήσεις στα χαμηλότερα τμήματα και η σχετική μετακίνηση πασσάλου-εδάφους μειώνεται.



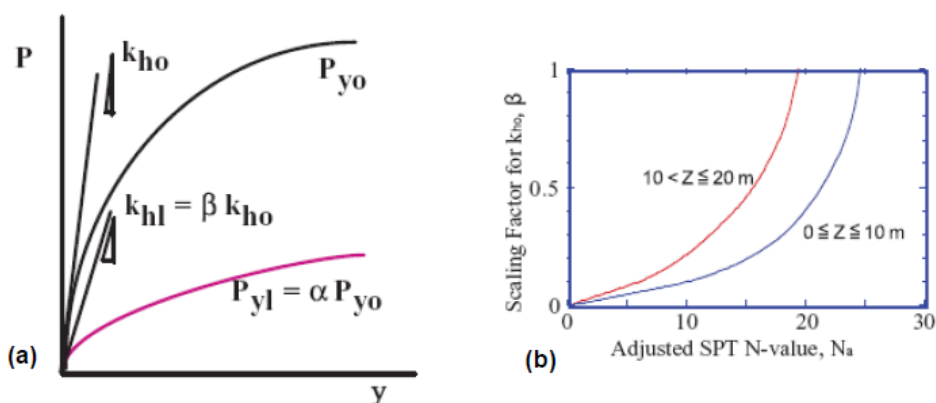
Σχήμα 2.5: Μηχανισμός εδαφικής απόκρισης σε κεκλιμένο έδαφος για (a) κίνηση προς τα κάτω (downstream movement) και (b) κίνηση προς τα πάνω (upstream movement) (Tokimatsu and Suzuki, 2009).

Μετά από ανάστροφο υπολογισμό των καμπυλών p - y φάνηκε το έδαφος να εμφανίζει συνολικά χαλάρωση με παροδικά χαρακτηριστικά σκλήρυνσης. Αυτές οι παροδικές μεταβολές στην απόκριση (ως αποτέλεσμα της διαστολικότητας του εδάφους) ήταν πιο έντονες στα πειράματα με πυκνές άμμους και άκαμπτους πασσάλους, υποδηλώνοντας έτσι την εξάρτηση της απόκρισης σε όρους p - y από τη σχετική πυκνότητα D_r και την δυσκαμψία του πασσάλου. Τυπικά αποτελέσματα της εδαφικής πίεσης και της αύξησης της πίεσης πόρων, παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.6**.



Σχήμα 2.6: Ανάστροφος υπολογισμός καμπλών p - y και πίεσης πόρων (Tokimatsu and Suzuki, 2009).

Τελικά, οι συγγραφείς προτείνουν τη χρήση της μεθοδολογίας του AIJ (2001) για τον υπολογισμό του K_h για έδαφος μη-ρευστοποιήσιμο όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.3) και του μειωτικού συντελεστή β_1 (έχει αναφερθεί παραπάνω ως m_p -multiplier) που περιγράφει τη μείωση της εδαφικής δυσκαμψίας λόγω ρευστοποίησης. Οι σχέσεις για τα K_h και β_1 φαίνονται στο **Σχήμα 2.7**.



Σχήμα 2.7: (α) Εκτίμηση της απομειωμένης καμπόλης p - y σε ρευστοποιημένο έδαφος και (β) εκτίμηση του συντελεστή β_1 (Tokimatsu and Suzuki, 2009).

Στη μεθοδολογία του **AIJ (2001)** η τιμή του K_h υπολογίζεται ως εξής:

$$K_h = \alpha \cdot \xi \cdot E_o \cdot B^{-3/4} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (2.3)$$

$$E_o = 700 \cdot N \quad (\text{kN/m}^2) \quad (2.4)$$

όπου α : σταθερά ($\alpha=80$ όταν το E_o εκτιμάται συναρτήσει του αριθμού N για

αμμώδες έδαφος)

ξ : σταθερά για ομάδες πασσάλων (1.0 για μονούς πασσάλους)

E_o : μέτρο ελαστικότητας του Young (kN/m²)

B : πλάτος πασσάλου (cm)

Η εδαφική οριακή αντίσταση υπολογίζεται ως εξής:

$$p_{y1} = \alpha_1 \cdot p_{yo} \quad (2.5)$$

όπου p_{y1} η πλευρική πίεση του ρευστοποιημένου εδάφους, α_1 ένας εμπειρικός συντελεστής ίσος με β_1 και p_{yo} η μέγιστη πλευρική εδαφική αντίδραση κατά Brom και εκτιμάται από τη σχέση (2.6).

$$p_{yo} = 3k_p \sigma'_{vo} \quad (2.6)$$

όπου σ'_{vo} η αρχική κατακόρυφος ενεργός τάση και k_p ο συντελεστής παθητικής ώθησης κατά Rankine. Η εκτίμηση της απομειωμένης καμπύλης p - y από την αρχική παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.7a**.

Οι **Rollins et al. (2005)** ανέπτυξαν μια αναλυτική σχέση για να περιγράψει την απόκριση p - y ρευστοποιημένης άμμου, βασιζόμενοι σε πειράματα στο ελεύθερο πεδίο στο Treasure Island, California. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε ομάδες εμπηγνυόμενων πασσάλων σε οριζόντιο εδαφικό προφίλ αποτελούμενο από στρώσεις λεπτόκοκκης άμμου και αμμοϊλύος και η ρευστοποίηση προκλήθηκε από ελεγχόμενη έκρηξη. Η προτεινόμενη σχέση παρουσιάζεται γραφικά στο **Σχήμα 2.8** και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$p = A \cdot (B \cdot y)^C \quad (2.7)$$

όπου

$$A = 3 \cdot 10^{-7} \cdot (z + 1)^{6.05} \quad (2.8)$$

$$B = 2.80 \cdot (Z + 1)^{0.11} \quad (2.9)$$

$$C = 2.85 \cdot (z + 1)^{-0.41} \quad (2.10)$$

και p η εδαφική πίεση (kN/m), y η οριζόντια μετακίνηση (mm), z το βάθος (m).

Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η χρήση της εξίσωσης (2.7) πρέπει να εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που οι συνθήκες είναι ίδιες με αυτές των πειραμάτων. Προτείνεται δηλαδή, να χρησιμοποιείται για τις παρακάτω συνθήκες:

Ενεργός κατακόρυφος τάση, $\sigma'_{vo}=15$ kPa

Άμμοι με αρχική σχετική πυκνότητα, $Dr=50\%$

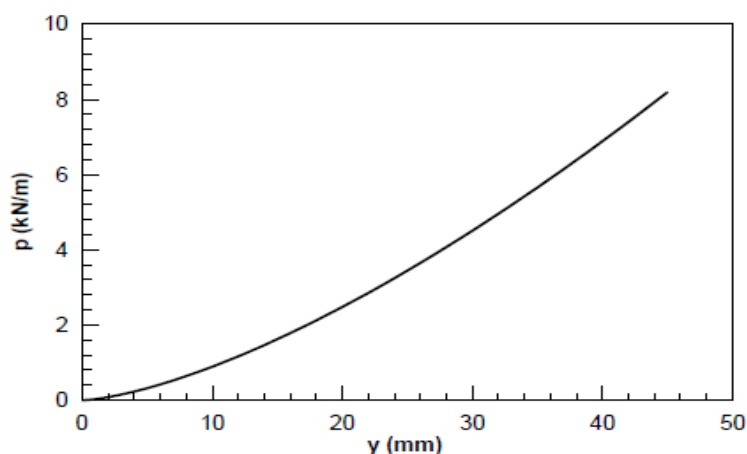
Βάθος στρώματος < 6 m

Πλευρική μετακίνηση < 15 cm

Η διάμετρος των πασσάλων σε όλα τα πειράματα ήταν $D=0.324$ m. Σε μία πιο πρόσφατη μελέτη (**Rollins et al., 2007**), για να ληφθεί υπόψη και η επίδραση της διαμέτρου του πασσάλου προτάθηκε η παρακάτω σχέση:

$$p_d = 3.81 \cdot \ln(D) + 5.6 \quad (2.11)$$

όπου p_d πολλαπλασιαστής του φορτίου του πασσάλου και D η διάμετρος του.

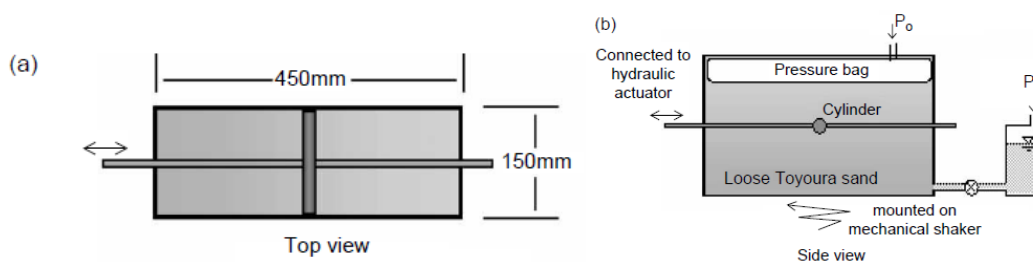


Σχήμα 2.8: Καμπύλη φορτίου-μετακίνησης για ρευστοποιημένα εδάφη (Rollins et al, 2005).

Συνοψίζοντας, η προτεινόμενη σχέση των συγγραφέων για την εκτίμηση της απόκρισης του ρευστοποιημένου εδάφους προβλέπει σκλήρυνση του εδάφους (soil hardening). Αυτή η συμπεριφορά στην απόκριση είναι τυπική για κάθε ξεχωριστό κύκλο φόρτισης (ιδίως για τους πρώτους κύκλους) αλλά δε μπορεί να περιγράψει τη συνολική απόκριση της άμμου που χαρακτηρίζεται από χαλάρωση (soil softening).

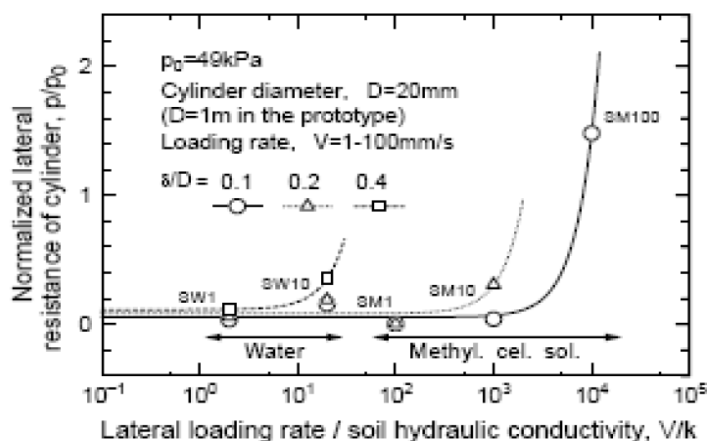
Με άλλα λόγια, η προτεινόμενη σχέση περιγράφει καλά την παροδική συνιστώσα της απόκρισης (transient response) αλλά όχι τη μόνιμη (residual response).

Οι **Dungca et al. (2006)** μελέτησαν την επίδραση της εδαφικής διαπερατότητας (k) και του ρυθμού φόρτισης στα πλευρικά εδαφικά φορτία που ασκούνται στους πασσάλους. Τις δοκιμές τις πραγματοποίησαν σε ένα κιβώτιο από αλουμίνιο με διαστάσεις 450 mm μήκος, 150 mm πλάτος και ύψος 250 mm, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.9**. Προσομοίωσαν τμήμα πασσάλου με μία ράβδου αλουμινίου πάνω στην οποία τοποθέτησαν μετρητές για την πίεση των πόρων και τις εδαφικές πιέσεις. Ως εδαφικό υλικό χρησιμοποίησαν χαλαρή ανομοιόμορφη Άμμο Toyoura ($D_{50}=0.19$ mm) την οποία και στερεοποίησαν σε τάση $p_0=49$ kPa. Η διέγερση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια δύο ράβδων (πάνω στις οποίες τοποθέτησαν δυναμό-κυψέλες για να μετρήσουν την καθαρή πλευρική δύναμη που δέχεται ο πάσσαλος) που είχαν ενωθεί με το «τμήμα πασσάλου» .



Σχήμα 2.9: Σχηματική απεικόνιση του κιβωτίου δοκιμών όπου (α) κάτοψη και (β) πλαϊνή όψη (Dungca et al., 2006).

Οι συγγραφείς παρατήρησαν αύξηση της εδαφικής αντίστασης για αύξηση του λόγου του ρυθμού φόρτισης προς τη διαπερατότητα του εδάφους. Ενδεικτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.10** όπου απεικονίζεται η πλευρική πίεση κανονικοποιημένη προς τη τάση στερεοποίησης (p_0) για διαφορές τιμές του λόγου V/k (αποτελεί το λόγο του ρυθμού φόρτισης προς την εδαφική διαπερατότητα) και για διάφορα βάθη δ/D (το βάθος κανονικοποιήθηκε ως προς τη διάμετρο πασσάλου D), ενισχύοντας την άποψη ότι η εδαφική διαπερατότητα και ο ρυθμός φόρτισης θα πρέπει να εξετάζονται μαζί.



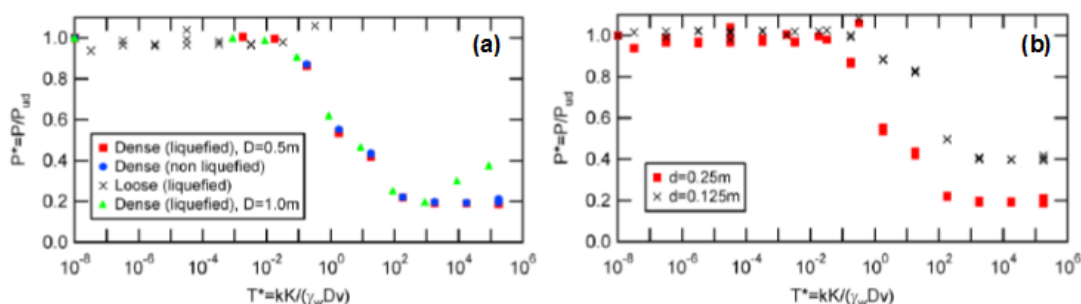
Σχήμα 2.10: Πλευρική αντίσταση συναρτήσει του λόγου ρυθμός φόρτισης προς εδαφική διαπερατότητα (Dunga et al., 2006).

Παρόμοιες ήταν και οι παρατηρήσεις των **Uzuoka et al. (2005)**, οι οποίοι μελέτησαν παραμετρικά τις επιδράσεις του ρυθμού φόρτισης (rate effects) στα πλευρικά φορτία που δέχονται οι πάσσαλοι μέσα από αριθμητικές αναλύσεις. Στις αναλύσεις αυτές για τη ρευστοποιήσιμη άμμο υιοθετήθηκε ένα απλοποιημένο μη-ιζώδες καταστατικό προσομοίωμα το οποίο λαμβάνει υπόψη την επίδραση της ρευστοποίησης κάνοντας χρήση της θεώρησης της ελάχιστης ενεργού τάσης. Για τη χωρική διαφοροποίηση της εξίσωσης ισορροπίας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (F.E.M.) ενώ για τις πιέσεις πόρων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών (F.D.M.). Στις αριθμητικές αναλύσεις, οι παράμετροι που εξετάστηκαν περιλάμβαναν τη διάμετρο του πασσάλου, την εδαφική διαπερατότητα, το βαθμό της στερεοποίησης και το ρυθμό φόρτισης. Οι συγγραφείς συσχέτισαν την εδαφική αντίδραση με έναν αδιάστατο χρονικό παράγοντα T^* που ορίζεται ως εξής:

$$T^* = \frac{k \cdot K}{\gamma_w D \cdot v} \quad (2.12)$$

όπου k η διαπερατότητα του εδάφους, K το μέτρο ισότροπης συμπίεσης, D η διάμετρος του πασσάλου, v η ταχύτητα του πασσάλου και γ_w το ειδικό βάρος του νερού. Η συσχέτιση της εδαφικής αντίστασης με τον αδιάστατο χρονικό παράγοντα T^* φαίνεται στο **Σχήμα 2.11a** για μετακίνηση πασσάλου $d=0.25m$ και στο **Σχήμα 2.11b** για μετακίνηση $d=0.125$ και $d=0.25m$. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι ο αδιάστατος χρονικός παράγων λαμβάνει υπόψη του την επίδραση όλων των

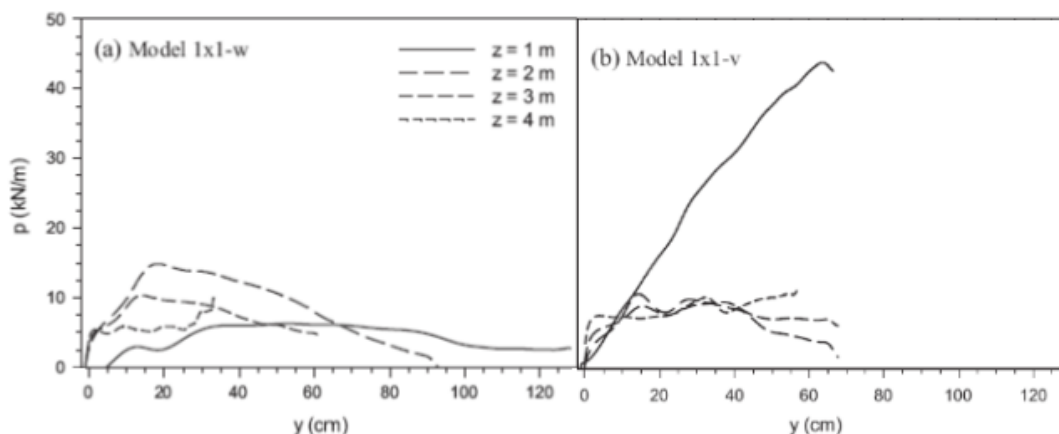
παραμέτρων αλλά και πάλι η τελική απόκριση εξαρτάται από τη μετακίνηση του πασσάλου.



Σχήμα 2.11: Εδαφική αντίδραση συναρτήσει του αδιάστατου χρονικού παράγοντα T^* για μετακίνηση του πασσάλου (a) $d=0.25m$ και (b) $d=0.125$ και $d=0.25m$.

Οι **Gonzalez et al. (2009)** επίσης εξέτασαν την επίδραση της διαπερατότητας στην απόκριση του εδάφους, διεξάγοντας πειράματα φυγοκεντριστή για πασσάλους αιχμής. Τα εδαφικά προφίλ που μελετήθηκαν, αποτελούνταν από ένα στρώμα ρευστοποιήσιμης άμμου και για να πετύχουν τον κορεσμό της άμμου χρησιμοποίησαν νερό και ένα ιζώδες υγρό. Είναι φανερό ότι ήθελαν να μελετήσουν δυο διαφορετικές διαπερατότητες για το έδαφος, με την μικρότερη να την έχει το πείραμα με το ιζώδες υγρό. Στη περίπτωση του ιζώδους υγρού των πόρων, παρατηρήθηκε η δημιουργία μιας ζώνης ανάποδου κωνικού σχήματος από μη-ρευστοποιημένο εδαφικό υλικό κοντά στην εδαφική επιφάνεια γύρω από τον πάσσαλο. Λόγω της διαστολικής συμπεριφοράς του εδάφους κοντά στην επιφάνεια και της χαμηλής διαπερατότητας, οι αρνητικές πιέσεις πόρων που είχαν αναπτυχθεί δεν πρόλαβαν να εκτονωθούν και συνέπεια αυτού ήταν να δεχτούν οι πάσσαλοι μεγάλα πλευρικά φορτία από το περιβάλλον έδαφος.

Ο ανάστροφος υπολογισμός της απόκρισης σε όρους p - y για την περίπτωση της μικρής και της μεγάλης διαπερατότητας αντίστοιχα, που φαίνονται στο **Σχήμα 2.12a** και στο **Σχήμα 2.12b**, υποστηρίζει αυτή την υπόθεση. Σε κάθε περίπτωση αυτή η μελέτη τονίζει τη σημασία της διαπερατότητας ως κρίσιμο παράγοντα στην εδαφική απόκριση και χρήζει περαιτέρω έρευνας.



Σχήμα 2.12: Υπολογισμός της απόκρισης p - y για (a) υψηλή διαπερατότητα και (b) χαμηλή διαπερατότητα (Gonzalez et al., 2009).

Ο **Chaloulos (2012)** πραγματοποίησε αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC-3D με σκοπό τη διερεύνηση των μηχανισμών αλληλεπίδρασης πασσάλου-εδάφους όταν συμβαίνει πλευρική εξάπλωση εδάφους ήπιας κλίσης έπειτα από ρευστοποίηση. Μέσα από τις αριθμητικές αναλύσεις προσπάθησε να μελετήσει τους μηχανισμούς που ελέγχουν την εδαφική διαστολική συμπεριφορά στο επάνω μέρος του πασσάλου κατά τη ροή, να αναγνωρίσει τις κύριες παραμέτρους του εδάφους, του πασσάλου και της διέγερσης που επηρεάζουν τις πιέσεις του ρευστοποιημένου εδάφους και τελικά να ποσοτικοποιήσει αυτές τις επιδράσεις μέσα από πολυπαραμετρικές εμπειρικές σχέσεις. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για ένα πάσσαλο αιχμής σε ομοιόμορφο και πλήρες κορεσμένο στρώμα Άμμου Νεβάδα ήπιας κλίσης. Το καταστατικό μοντέλο που επιλέχθηκε για να προσομοιάσει την εδαφική απόκριση ήταν το NTUA-Sand model (**Papadimitriou & Bouckovalas 2002; Andrianopoulos et al. 2010**) και προγραμματίστηκε στο FLAC από τον **Karamitros (2010)**.

Στο πρώτο μέρος της μελέτης, ο συγγραφέας προσομοίωσε αριθμητικά τα πειράματα φυγοκεντριστή των **Gonzalez et al. (2009)**, με στόχο να επαληθεύσει αριθμητικά τη μεθοδολογία ανάλυσης, αλλά και να τη βαθμονομήσει ως προς την εδαφική διαπερατότητα, μία παράμετρος που δεν έχει απόλυτα κατανοηθεί σε ρευστοποιημένα εδάφη. Πρέπει να αναφερθεί πως στις αριθμητικές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν 3 διαφορετικές διαπερατότητες:

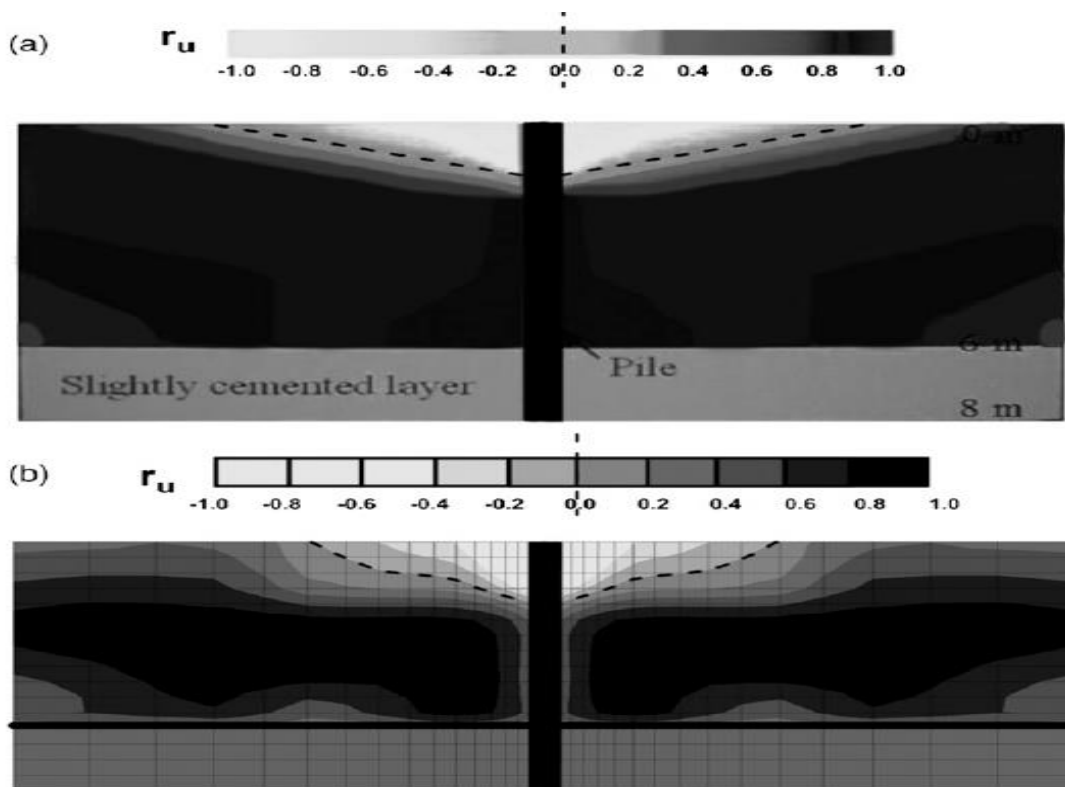
- Η στατική διαπερατότητα $k=6.6 \times 10^{-5}$ m/s όπως προσδιορίστηκε από πειράματα διαπερατότητας κάτω από βαρυτική επιτάχυνση 1g για $Dr = 40\%$ (**Arulmoli et al. 1992**).
- Η δυναμική διαπερατότητα $k=2.1 \times 10^{-5}$ m/s προτεινόμενη από τους **Liu and Dobry (1997)** για να ληφθεί υπόψη και η εναλλακτική διεύθυνση ροής μέσα στον εδαφικό σκελετό της άμμο κατά τη διέγερση.
- Η μεταβλητή διαπερατότητα

$$k_b = k_{ini} \cdot [1+(\alpha-1)r_u^\beta] \quad (2.13)$$

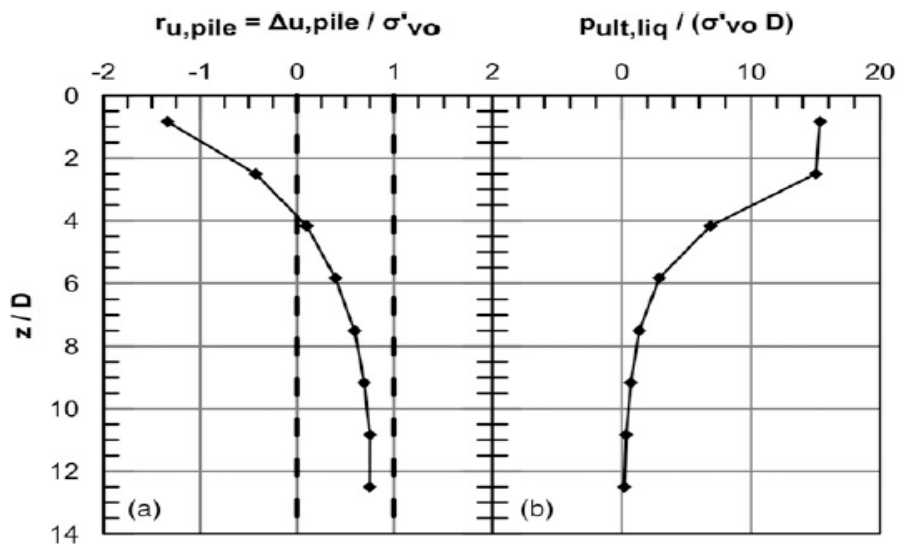
όπως προτείνεται από τους **Shahir et al. (2012)** για να ληφθεί υπόψη η δημιουργία επιπλέον καναλιών ροής μέσα στον εδαφικό σκελετό καθώς οι εδαφικοί κόκκοι χάνουν την επαφή τους λόγω ρευστοποίησης. Στην εξίσωση (2.13) ως $k_{ini} = 2.1 \times 10^{-5}$ m/s. Επίσης, με βάση τους **Shahir et al. (2012)**, εκτιμάται $\alpha = 10$ και $\beta = 1$.

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων έδειξαν ότι μερική ή πλήρης ρευστοποίηση ($r_u=0.50-1.00$) λαμβάνει μέρος σε μεγάλα βάθη κατά μήκος του πασσάλου και στο ελεύθερο πεδίο. Αντίθετα, παρατηρήθηκε σημαντική διαστολική συμπεριφορά κοντά στην κεφαλή του πασσάλου οδηγώντας στο σχηματισμό ενός ανάστροφου κώνου υψηλών αρνητικών πιέσεων πόρων. Τα παραπάνω συμπεράσματα βρίσκονται σε συμφωνία και με τα αντίστοιχα από τα πειράματα των **Gonzalez et al. (2009)** για ιξώδες υγρό των πόρων, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.13**.

Στο δεύτερο μέρος της μελέτης, διερευνήθηκε πιο διεξοδικά ο μηχανισμός που ορίζει την εδαφική απόκριση. Συγκεκριμένα, κοντά στην εδαφική επιφάνεια οι μεγάλες σχετικές μετακινήσεις μεταξύ εδάφους και πασσάλου οδηγούν σε διαστολική συμπεριφορά λόγω διάτμησης και μεγάλες αρνητικές υποπίεσεις πόρων. Σε μεγαλύτερα βάθη, καθώς αυξάνονται οι ενεργές τάσεις και μειώνονται οι σχετικές μετακινήσεις τα φαινόμενα διαστολικότητας είναι περιορισμένα και αναπτύσσονται θετικές υπερπίεσεις πόρων. Πρέπει να τονιστεί πως πλήρης ρευστοποίηση δεν εμφανίζεται στο περιβάλλον έδαφος γύρω από τον πάσσαλο. Η κατανομή r_u κοντά στον πάσσαλο και του κανονικοποιημένου μέγιστου οριακού φορτίου με το βάθος παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.14**.



Σχήμα 2.13: (a) Πειραματικές μετρήσεις (Gonzalez et al. 2009, © ASCE) και (b) αριθμητικές προβλέψεις του r_u στο τέλος της διέγερσης για $k = 6.6 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.



Σχήμα 2.14: Κατανομή (a) του r_u και (b) της κανονικοποιημένης εδαφικής πίεσης $p_{ult,liq} / (\sigma'_{vo} D)$.

Η σχέση που προτάθηκε για την περιγραφή της εδαφικής απόκρισης:

$$\frac{P_{ult,liq}}{\sigma'_{vo}} = A \cdot \left(\frac{z}{L}\right)^{-B} \leq C \quad (2.14)$$

Το φυσικό νόημα της εξίσωσης (2.14) εξηγείται στο **Σχήμα 2.15** όπου φαίνεται ότι η μέγιστη κανονικοποιημένη εδαφική πίεση αυξάνεται λογαριθμικά-γραμμικά μέχρι να φτάσει τη μέγιστη τιμή της κοντά στην κεφαλή του πασσάλου. Επομένως, η σταθερά A αποτελεί την κανονικοποιημένη πίεση κοντά στην αιχμή του πασσάλου, ενώ η σταθερά C αποτελεί την κανονικοποιημένη εδαφική πίεση στα μικρά βάθη. Τελικά η σταθερά B αντικατοπτρίζει το ρυθμό μετάβασης από τα μεγάλα βάθη και τις μικρές εδαφικές πιέσεις στα μικρά βάθη κοντά στην επιφάνεια και τις μεγάλες εδαφικές πιέσεις.

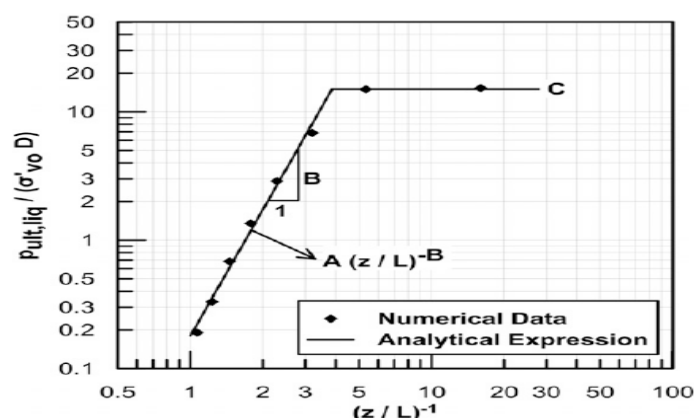
Οι τρεις σταθερές μπορούν να υπολογιστούν από τις παρακάτω πολυπαραμετρικές σχέσεις:

$$A = 0.045 \cdot Dr^{0.9} \cdot T^{1.55} \cdot (k \cdot 10^4)^{0.06} \quad (2.15)$$

$$B = 1.35 \cdot \exp(-0.023 \cdot Dr) \cdot T^{-0.95} \cdot (k \cdot 10^4)^{-0.11} \cdot \exp(1.3 \cdot D) \quad (2.16)$$

$$C = 0.063 \cdot \exp(-0.025 \cdot Dr) \cdot \min[(EI \cdot 10^{-5})^{0.3}, 8.6 \cdot (EI \cdot 10^{-5})^{-0.45}] \cdot \left(\frac{k \cdot T}{D}\right)^{-0.6} \quad (2.17)$$

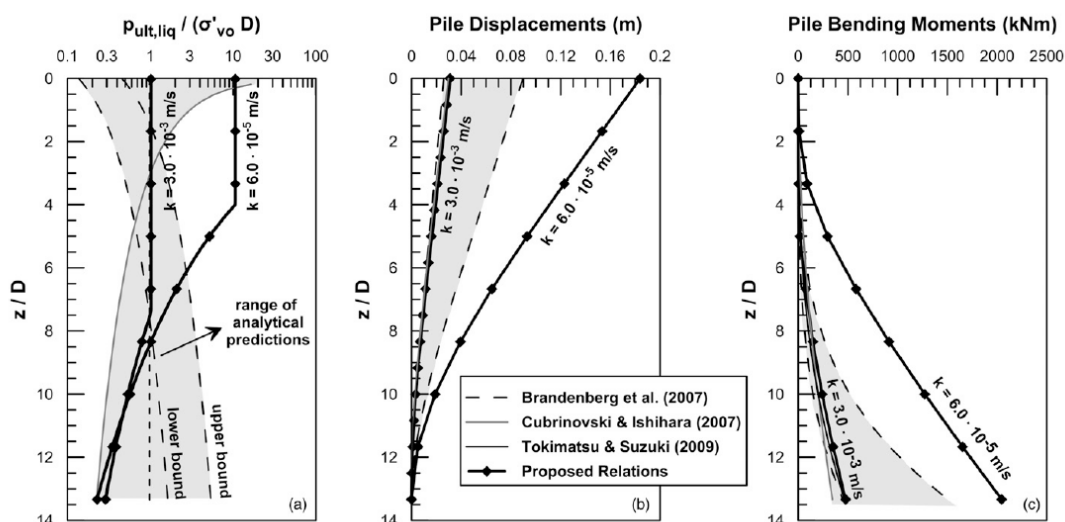
Όπου Dr (%) η σχετική πυκνότητα της άμμου, T (sec) η δεσπόζουσα περίοδος διέγερσης, k (m/s) η εδαφική διαπερατότητα, D (m) η διάμετρος, E (kN/m²) το μέτρο ελαστικότητας και I (m⁴) η ροπή αδράνειας του πασσάλου.



Σχήμα 2.15: Κατανομή της κανονικοποιημένης οριακής πίεσης $p_{ult,liq}/(\sigma'_{vo}D)$ συναρτήσει του κανονικοποιημένου βάθους, z/L

Η βασική καινοτομία της μεθοδολογίας είναι ότι λαμβάνει υπόψη την επίδραση της εδαφικής διαστολικότητας στο ανώτερο μέρος του πασσάλου στην εκτίμηση των μέγιστων πλευρικών πιέσεων. Κυρίαρχο ρόλο διαδραματίζει η σχετική μετακίνηση πασσάλου- εδάφους η οποία κρύβεται πίσω από τη διαστολική συμπεριφορά κοντά στην κεφαλή του πασσάλου.

Συνοψίζοντας, στο **Σχήμα 2.16** συγκρίνεται η μεθοδολογία του συγγραφέα με άλλες προτεινόμενες μεθοδολογίες για δύο τιμές διαπερατότητας, μία υψηλή $k = 3.0 \times 10^{-3}$ m/s, και μία χαμηλότερη $k=6.0 \times 10^{-5}$ m/s. Παρατηρείται πως για υψηλές τιμές διαπερατότητας όλες οι μεθοδολογίες συμφωνούν καθώς τα φαινόμενα διαστολικότητας είναι περιορισμένα. Αντίθετα στις μικρές τιμές, όπου τα φαινόμενα διαστολικότητας γίνονται έντονα και αυξάνονται δραματικά οι εδαφικές πιέσεις, οι υπόλοιπες μεθοδολογίες είναι μη συντηρητικές και υποεκτιμούν την εδαφική απόκριση.



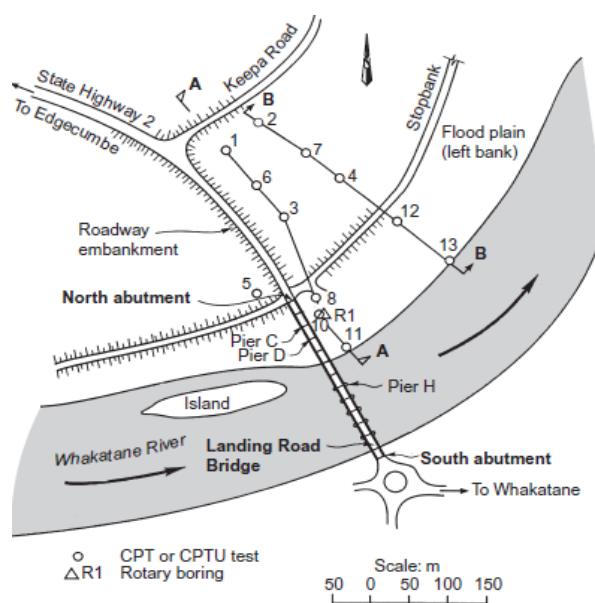
Σχήμα 2.16: Επίδραση της διαπερατότητας και της διαστολικότητας (a) στις οριακές πλευρικές πιέσεις, (b) στη μετακίνηση του πασσάλου και (c) στις καμπτικές ροπές του πασσάλου.

2.3 Επίδραση μη ρευστοποιήσιμης εδαφικής κρούστας

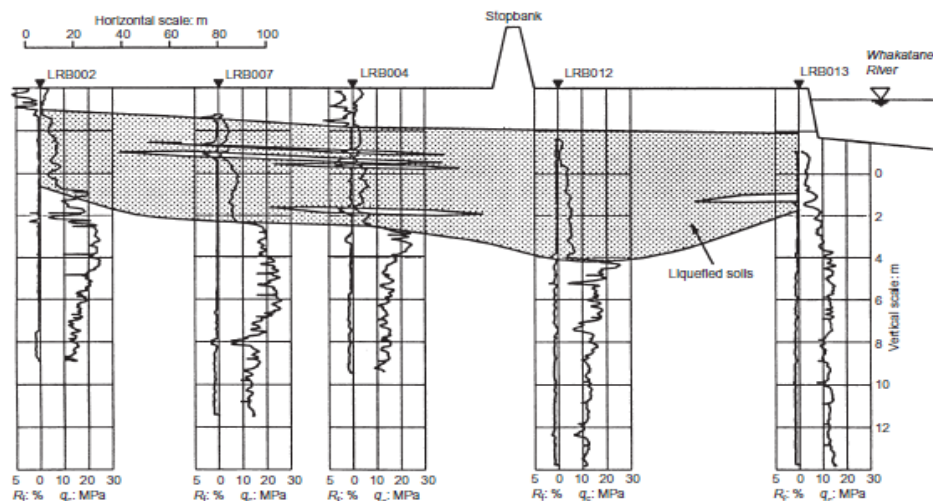
Συνήθως, ένα επιφανειακό εδαφικό στρώμα που δεν ρευστοποιείται (επειδή είναι πιο ψηλά από τον υδροφόρο ορίζοντα ή έχει μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκου) υπέρκειται ενός ρευστοποιήσιμου. Η ύπαρξη αυτού του στρώματος αλλάζει εντελώς την

απόκριση διότι μεγάλα πλευρικά φορτία ασκούνται στις θεμελιώσεις κατά την πλευρική εξάπλωση.

Οι **Berrill et al. (2001)** δημοσίευσαν μια μελέτη για τις ζημιές που προκλήθηκαν στις θεμελιώσεις (από ομάδες πασσάλων) των βάθρων της γέφυρας Landing Road Bridge, Whakatane στη Νέα Ζηλανδία, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.17**, στο σεισμό του 1987 ($M_L=6.7$). Τα αίτια των βλαβών στις θεμελιώσεις από πασσάλους των βάθρων αποδόθηκαν στην πλευρική εξάπλωση του εδάφους. Το έδαφος θεμελίωσης είχε περίπου ομοιόμορφη στρωματογραφία και αποτελούταν από ένα επιφανειακό στρώμα αργιλώδους ιλύος πάχους 1-2 m και ένα στρώμα άμμου μικρής ή μεσαίας σχετικής και πάχους 6 m. Οι πάσσαλοι των βάθρων είχαν οδηγηθεί 2-3 m περίπου στο βαθύτερο στρώμα της πυκνής άμμου και των αμμοχάλικων. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.18** η αντοχή κώνου q_c για τη χαλαρή άμμο ήταν μικρότερη από 8 MPa και γενικά κυμαινόταν από 4-6 MPa, ενώ για την πυκνή άμμο κυμαινόταν στα 15-20 MPa. Για τις εδαφικές ιδιότητες της αργιλώδους ιλύος, από τις επιτόπου δοκιμές απευθείας διάτμησης στις θέσεις θεμελίωσης των βάθρων εκτιμήθηκε $c=10$ kPa, $\phi=44^\circ$ και $\gamma=12.50$ kN/m³ αλλά για αυτό το έδαφος το οποίο βρίσκεται σε χαλαρή κατάσταση και έχει τόσο μικρό γ , η γωνία τριβής θεωρείται πολύ υψηλή. Έτσι, λόγω έλλειψης περαιτέρω στοιχείων δεν είναι εύκολο να εξαχθούν ποσοτικά συμπεράσματα για τα πλευρικά φορτία που προκαλεί αυτό το στρώμα κατά την πλευρική εξάπλωση.

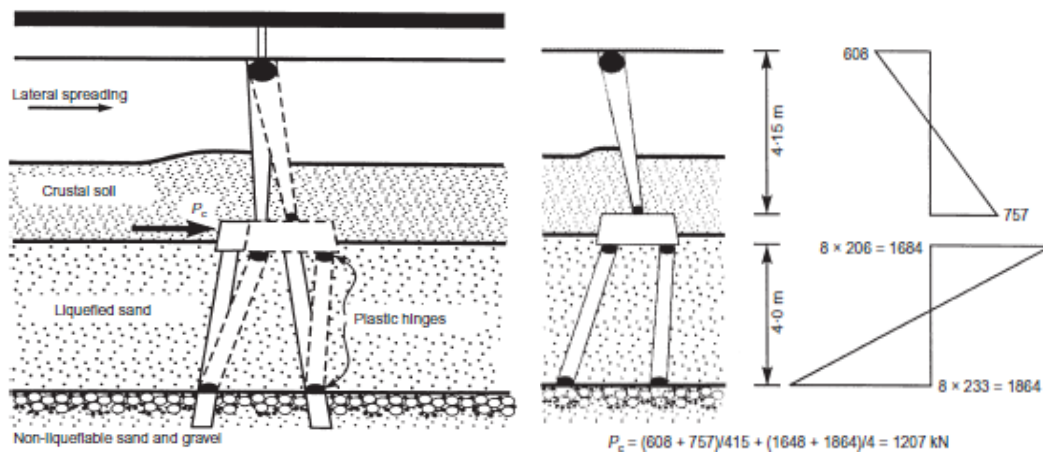


Σχήμα 2.17: Σχέδιο της περιοχής γύρω από τη γέφυρα και θέσεις των διάφορων δοκιμών (Berrill et al., 2001).



Σχήμα 2.18: Τομή Β-Β. Η χαλαρή άμμος φαίνεται σκιασμένη και ρευστοποίηση προβλέπεται σε όλο το βάθος της (Berrill et al. ,2001).

Εκτεταμένη πλευρική εδαφική εξάπλωση, συνοδευόμενη από εδαφικές ρωγμές και κρατήρες άμμου παρατηρήθηκε γύρω από τη γέφυρα. Ειδικότερα κοντά σε αυτή, υπήρχαν 5 ρωγμές ανοίγματος μεγαλύτερου από 200 mm και κοντά στα βάρθα το έδαφος είχε αστοχήσει παθητικά. Στο **Σχήμα 2.19** φαίνεται ο μηχανισμός αστοχίας και δίνεται μια εκτίμηση της δύναμης που επιβλήθηκε στους πασσάλους.

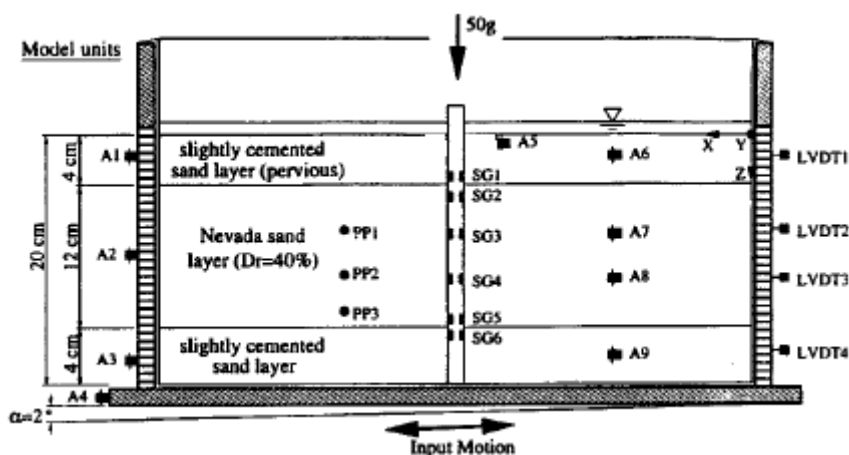


Σχήμα 2.19: Μηχανισμός αστοχίας και κατανομή των καμπτικών ροπών που δέχθηκαν οι πάσσαλοι (P_c είναι το οριζόντιο φορτίο που αναπτύχθηκε) (Berrill et al. ,2001).

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η παθητική δύναμη που επιβλήθηκε στους πασσάλους ήταν περίπου 1 MN τη στιγμή που 50 KN ήταν η δύναμη που δέχτηκαν από το ρευστοποιημένο έδαφος λόγω ροής. Οι παραπάνω τιμές είναι προφανές πως

εξαρτούνται από την εκάστοτε στρωματογραφία και από τη μορφή της θεμελίωσης από πασσάλους αλλά υποδηλώνει ξεκάθαρα τη δραματική αύξηση πλευρικού φορτίου που επιβάλλει μια μη-ρευστοποιήσιμη εδαφική κρούστα υπό καθεστώς εδαφικής εξάπλωσης.

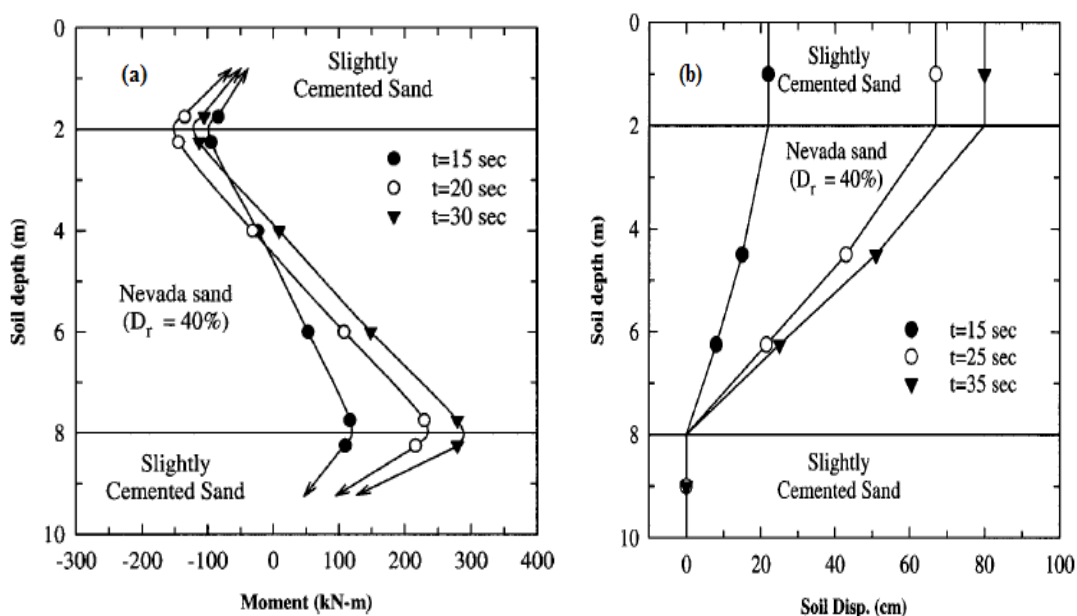
Οι **Abdoun et al. (2003)** διεξήγαγαν πειράματα σε φυγοκεντριστή προσομοιώνοντας ένα βυθισμένο απειρομήκες πρανές κλίσης 2° [4.8° στο ελεύθερο πεδίο μετά από διορθώσεις του οργάνου, (**Taboada 1995**)] για να διερευνήσουν την αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους όταν υπάρχει επιφανειακή κρούστα που δεν ρευστοποιείται. Θέλησαν να αξιολογήσουν την επίδραση σημαντικών παραμέτρων στην εδαφική απόκριση όπως η μετακίνηση κατά την πλευρική εξάπλωση, το πάχος και οι ιδιότητες του μη-ρευστοποιήσιμου στρώματος. Το εδαφικό προφίλ που χρησιμοποιήθηκε περιλάμβανε τοιμεντωμένη άμμο (μη-ρευστοποιήσιμη) πάχους 2 m, ρευστοποιήσιμη άμμο Nevada με $D_r=40\%$ και πάχος 6 m και 2 m ακόμη, τοιμεντωμένης άμμου στην οποία είχε εμπευχθεί ο μεμονωμένος πάσσαλος όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.20**. Στην επιφανειακή στρώση είχαν ανοιχτεί τρύπες για να προσομοιώσουν ένα διαπερατό στρώμα και να δημιουργήσουν συνθήκες ελεύθερης στράγγισης.



Σχήμα 2.20: Διάταξη πειράματος φυγοκεντριστή (Abdoun et al. 2003).

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, παρατηρήθηκε πως στον πάσσαλο αναπτύχθηκαν δύο μέγιστες καμπτικές ροπές αντίθετου πρόσημου, μία στην κορυφή και μία στη βάση της ρευστοποιημένου άμμου όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.21a** για τις συχρονικές στιγμές $t=15,20,30$ sec. Η πρώτη μέγιστη ροπή σε βάθος 2 m, άρχισε να αυξάνει κατά τη διάρκεια της διέγερσης μέχρι τη μέγιστη τιμή και στη συνέχεια άρχισε να φθίνει, σε αντίθεση με τη δεύτερη μέγιστη ροπή η οποία σε όλη τη διάρκεια

της διέγερσης αυξανόταν μέχρι να μεγιστοποιηθεί στο τέλος της κίνησης. Αυτό συνέβη διότι η εδαφική κρούστα λόγω της πλευρικής εξάπλωσης αστόχησε παθητικά, μπροστά από τον πάσσαλο, πριν η μετακίνηση φτάσει τη μέγιστη τιμή ($y_{max}=80$ cm) της. Η δεύτερη ροπή συνέχισε να αυξάνει διότι, ακόμη και μετά την αστοχία της κρούστας ο πάσσαλος συνέχισε να μετακινείται. Επιπλέον, οι καμπτικές ροπές μεταβάλλονται γραμμικά στο ρευστοποιημένο στρώμα υποδηλώνοντας τη μικρή επίδραση του σε αυτές (βέβαια, η σχετική μετακίνηση πασσάλου-εδάφους ήταν μικρή). Επομένως, η απόκριση του πασσάλου ελέγχεται από τις ιδιότητες (δυσκαμψία, πάχος και αντοχή) της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής κρούστας παρά από τη ροή του ρευστοποιημένου στρώματος γύρω από τον πάσσαλο.



Σχήμα 2.21: (a) Κατανομή καμπτικών (kNm) ροπών με το βάθος (m) και (b) κατανομή πλευρικής μετακίνησης (cm) με το βάθος(m) (Abdoun et al., 2003).

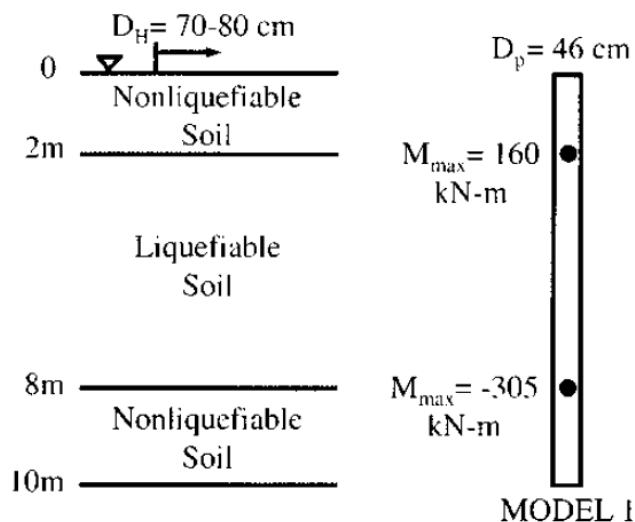
Οι συγγραφείς διερευνώντας την επίδραση της κρούστας κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα:

- Σε κάθε χρονική στιγμή, οι ροπές μέσα στο στρώμα της ρευστοποιημένης άμμου μεταβάλλονται γραμμικά, υποδηλώνοντας τη μικρή επιρροή του στην απόκριση του πασσάλου. Αυτό, μάλλον μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι σε ίδιο ύψος, πάσσαλος και έδαφος είχαν παρόμοιες μετακινήσεις. Η απόκριση, επομένως, ελέγχεται από τις ιδιότητες της κρούστας.

- Στο άνω μέρος του πάσσαλου η μετακίνηση του ήταν μεγαλύτερη από την εδαφική και ο πάσσαλος διεισδύσε στην κρούστα προκαλώντας την αστοχία (pile snapping effect). Γι' αυτό το λόγο η ροπή στο άνω μέρος αφού έφτασε τη μέγιστη τιμή της, άρχισε πάλι να μειώνεται πριν η μετακίνηση του ελεύθερου πεδίου φθάσει τη μέγιστη τιμή των 80 cm.
- Στη βάση της ρευστοποιήσιμης άμμου όπου εμφανίζεται η δεύτερη μέγιστη ροπή, δεν υπάρχει καμία ένδειξη αστοχίας. Η ροπή μεγιστοποιείται στο τέλος της διέγερσης.

Οι **Dobry et al. (2003)** χρησιμοποίησαν τα πειραματικά αποτελέσματα των **Abdoun et al. (2003)** και, μέσα από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων (όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.22**) για τις καμπτικές ροπές των πασσάλων, πρότειναν μία μέθοδο οριακής ισορροπίας για την εκτίμηση της μέγιστης καμπτικής ροπής. Η προτεινόμενη μέθοδος οριακής ισορροπίας εκτιμά τα άνω όρια των μέγιστων καμπτικών ροπών και βασίζεται στην υπόθεση ότι όλα τα εδαφικά στρώματα ασκούν πλευρική πίεση στατικά στον πάσσαλο, συνήθως στη διεύθυνση της εδαφικής μετακίνησης. Η πλευρική πίεση λαμβάνεται ως η μέγιστη από τις καμπύλες $p-y$.

Από πειραματικές παρατηρήσεις στο ελεύθερο πεδίο (**Youd et al. 1992; Berrill et al. 1997**) και από πειράματα στο φυγοκεντριστή (**Abdoun et al. 2003**), έχει δειχθεί ότι αν η θεμελίωση από πασσάλους έχει μεγαλύτερη δυσκαμψία από το περιβάλλον έδαφος τότε αστοχεί το έδαφος παθητικά πριν οι πάσσαλοι αστοχήσουν σε κάμψη (η ροπή μεγιστοποιείται και μετά την εδαφική αστοχία μειώνεται ή παραμένει σταθερή). Εάν όμως, το περιβάλλον έδαφος έχει μεγαλύτερη αντοχή από τους πασσάλους, τότε οι πάσσαλοι θα αστοχήσουν σε κάμψη χωρίς το έδαφος να αναπτύξει την πλήρη παθητική πίεση.



Σχήμα 2.22: Μοντέλο από το πείραμα φυγοκεντριστή (Abdoun et al., 2003). Πάνω στον πάσσαλο αναγράφονται οι τιμές των δύο μέγιστων ροπών καθώς και της μετακίνησης της κεφαλής σε ύψος 0.5 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους.

Πέρα από τη μέθοδο οριακής ισορροπίας, οι συγγραφείς προσπάθησαν να προβλέψουν πλήρως την ανάπτυξη των καμπτικών ροπών στον πάσσαλο συναρτήσει της μετακίνησης στην κεφαλή του (D_H) μέσα από το συνδυασμό ελαστικής και πλαστικής ανάλυσης για το έδαφος. Η μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική κατάσταση γίνεται όταν η ροπή στη διεπιφάνεια μη ρευστοποιήσιμης κρούστας και ρευστοποιήσιμης άμμου μεγιστοποιηθεί, οπότε και το έδαφος αστοχεί παθητικά.

Ελαστική Ανάλυση

Αν η επίδραση του ρευστοποιημένου αμμώδους στρώματος θεωρηθεί αμελητέα και τα δύο μη ρευστοποιήσιμα στρώματα αντικατασταθούν από πλήρεις πακτώσεις τότε :

$$M_A = M_B = \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} \cdot D_H \quad (2.18)$$

Και για D_H η μετακίνηση της κεφαλής του πασσάλου, $L=6 \text{ m}$ και $EI=8000 \text{ kNm}^2$ όπως έχουν προκύψει από το πείραμα των **Abdoun et al. 2003**, η (2.18) παίρνει τη μορφή :

$$M_A = M_B = 1333D_H \quad (2.19)$$

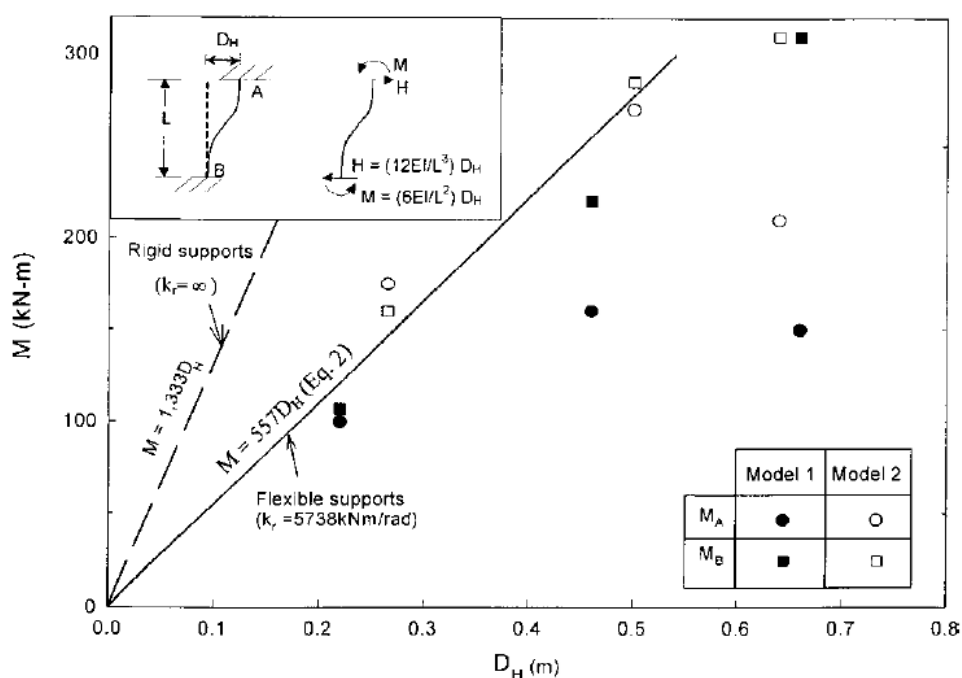
Η υπόθεση ότι τα δύο μη-ρευστοποιήσιμα στρώματα αποτελούν πλήρεις πακτώσεις είναι υπέρ-συντηρητική και προβλέπει πολύ μεγαλύτερες ροπές από τις πραγματικές,

όπως επιβεβαιώνεται και από το **Σχήμα 2.23** όπου συγκρίνονται οι μετρηθείς ροπές του πειράματος με τις προβλεπόμενες. Αντίθετα, εάν τα δύο μη ρευστοποιήσιμα στρώματα αντικατασταθούν από ελαστικές πακτώσεις και οι ροπές στις δύο διεπιφάνειες υπολογιστούν από τη (2.20), οι υπολογιζόμενες ροπές βρίσκονται κοντά στις μετρημένες και αυτή η εκτίμηση αποτελεί καλή προσέγγιση για μικρές τιμές της μετακίνησης D_H , όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.23**.

$$M_A = M_B = \frac{D_H}{L \cdot (L/6 \cdot E \cdot I + 1/K_r)} \quad (2.20)$$

Και για τις παραπάνω τιμές των L & EI προκύπτει:

$$M_A = M_B = 557 \cdot D_H \quad (2.21)$$



Σχήμα 2.23: Μετρημένες ροπές στις διεπιφάνειες (σημεία A και B) των μη ρευστοποιήσιμων στρωμάτων με τη ρευστοποιημένη άμμο και υπολογισμένες ροπές για πλήρεις και ελαστικές πακτώσεις στα σημεία A και B.

Μέθοδος Οριακής Ισορροπίας για την εκτίμηση της μέγιστης ροπής στη διεπιφάνεια επιφανειακής κρούστας με τη ρευστοποιημένη άμμο

Στο **Σχήμα 2.24** παρουσιάζονται τα διαγράμματα ελευθέρου σώματος για τον υπολογισμό της μέγιστης καμπτικής ροπής στη διεπιφάνεια της εδαφικής κρούστας

με το ρευστοποιήσιμο στρώμα. Παρόλο που είναι ανάλυση οριακής ισορροπίας, η ροπή M_A δε μπορεί να υπολογιστεί αποκλειστικά από στατική διότι αλλάζει η κατεύθυνση της πλευρικής πίεσης στον πάσσαλο σε άγνωστο βάθος z_{ps} στο πρώτο διάγραμμα ελευθέρου σώματος. Από το **Σχήμα 2.24** οι εξισώσεις ισορροπίας που προκύπτουν είναι οι εξής:

$$\alpha = \frac{z_{ps}}{h}$$

$$\frac{M_A}{p_0 \cdot h^3} = \alpha^2 - \frac{2}{3} \cdot \alpha^3 - \frac{1}{6} \quad (2.22)$$

$$\frac{H_A}{p_0 \cdot h^2} = 0.5 - \alpha^2 \quad (2.23)$$

$$\frac{M_B}{p_0 \cdot h^3} = \left(\frac{H_A}{p_0 \cdot h^2} \right) \cdot \left(\frac{L}{h} \right) - \frac{M_A}{p_0 \cdot h^3} \quad (2.24)$$

Η τέταρτη εξίσωση για να λυθεί το παραπάνω σύστημα προκύπτει από την παρατήρηση των συγγραφέων πως για μικρές έως και μεσαίες τιμές του D_H ($D_H < 0.29$ m), $M_A = M_B$ και η υπόθεση αυτή ισχύει και για τη στιγμή που η επιφανειακή κρούστα αστοχεί παθητικά και η ροπή παίρνει τη μέγιστη τιμή της ($M_A = M_{A,max}$).

$$M_A = M_B \quad (2.25)$$

Με τον συνδυασμό των (2.22),(2.23),(2.24) και (2.25) η εξίσωση για την εκτίμηση της μέγιστης M_A δίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

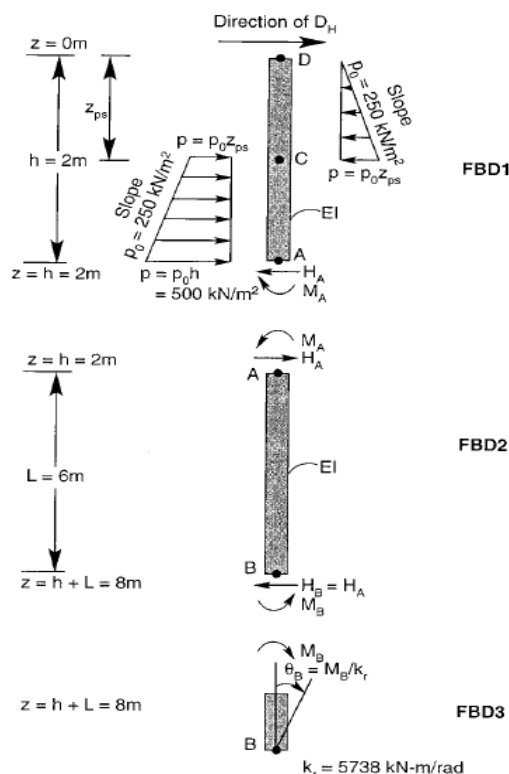
$$3 \cdot \left[1 + \frac{2}{(L/h)} \right] \cdot \left[\frac{M_{A,max}}{p_0 \cdot h^3} \right] = 1 - 2 \cdot \left\{ 0.5 - \left[\frac{2}{(L/h)} \right] \cdot \left[\frac{M_{A,max}}{p_0 \cdot h^3} \right] \right\}^{1.5} \quad (2.26)$$

Όπου p_0 η εδαφική παθητική πίεση (εκτιμάται από την καμπύλη p - y) (kN/m^2), L το μήκος του πασσάλου μέσα στο ρευστοποιημένο έδαφος (m), h το πάχος του μη ρευστοποιήσιμου στρώματος.

Η εκτίμηση της μέγιστης αυτής ροπής απαιτεί μόνο τη γνώση μόνο δύο γεωμετρικών παραμέτρων (h & L) και την παθητικής πίεση της εδαφικής κρούστας. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η προβλεπόμενη μέγιστη ροπή $M_{A,max}$ παρουσιάζει ευαισθησία στην τιμή της παθητικής αντίστασης του εδάφους (p_0).

Σε μεγάλες τιμές της μετακίνησης της κεφαλής του πασσάλου (D_H) η σχέση (2.25) δεν ισχύει με αποτέλεσμα το παραπάνω σύστημα να χρειάζεται μια επιπλέον εξίσωση. Αν θέλει κανείς να είναι πολύ ακριβής, η μετακίνηση D_H είναι ίση με τη μετατόπιση του πασσάλου στο βάθος $z=z_{ps}$. Απλοποιητικά, γίνεται η παραδοχή ότι $D_H=D_{p,A}$ και προκύπτει η παρακάτω εξίσωση (2.27), η οποία είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό των ροπών M_A και M_B .

$$\left(\frac{E \cdot I}{p_0 \cdot h^3 \cdot L^2}\right) \cdot D_H = \left(\frac{1}{3}\right) \cdot \left(\frac{H_A}{p_0 \cdot h^2}\right) \cdot \left(\frac{L}{h}\right) - \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{M_A}{p_0 \cdot h^3}\right) + \left(\frac{E \cdot I}{p_0 \cdot h^3 \cdot L}\right) \cdot \left(\frac{M_B}{k_r}\right) \quad (2.27)$$

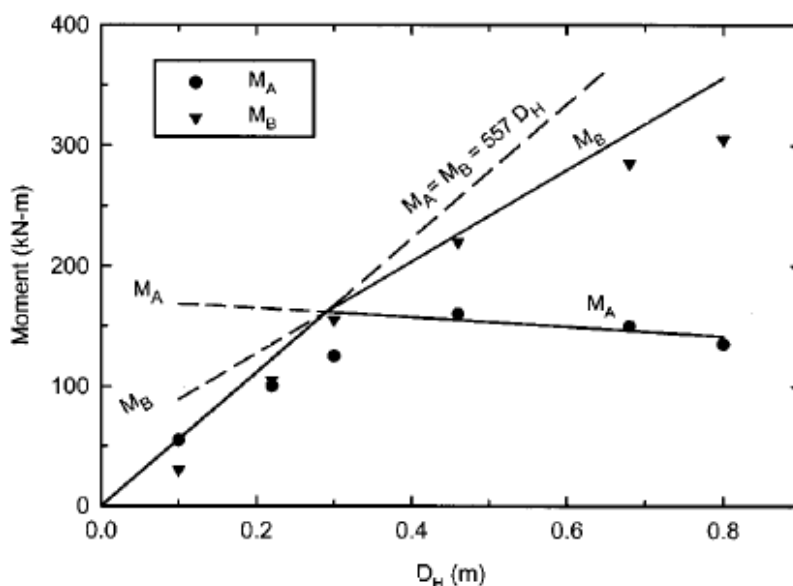


Σχήμα 2.24: Διαγράμματα ελεύθερου σώματος για την εκτίμηση της M_A και M_B με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας (οι τιμές για το p_0 και το k_r) (Dobry et al. 2003).

Το αναλυτικό ελαστο-πλαστικό μοντέλο περιγράφεται στο **Σχήμα 2.25** . Το σημείο όπου $M_A=M_B$ υποδηλώνοντας την πλαστικοποίηση της επιφανειακής εδαφικής κρούστας, προκύπτει από την τομή τριών γραμμών:

- Την ελαστική γραμμή, $M_A=M_B=557 D_H$ η οποία υπολογίζει τις ροπές για μικρές έως και μεσαίες τιμές του D_H .

- Την πλαστική γραμμή για την M_A συναρτήσει του D_H ($D_H > 0.29$ m) που προκύπτει από την επίλυση των εξισώσεων (2.22)-(2.25) και (2.27)
- Την πλαστική γραμμή για την M_B συναρτήσει του D_H που προκύπτει και αυτή από την επίλυση των (2.22)-(2.25) και (2.27).



Σχήμα 2.25: Ελαστο-πλαστικό αναλυτικό μοντέλο (συνεχείς γραμμές) για την εκτίμηση των ροπών και μετρημένες ροπές M_A και M_B (κυκλικά και τρίγωνα σημεία).

Συνοψίζοντας, οι συγγραφείς καταλήγουν στα εξής:

- Το αναλυτικό μοντέλο για την πρόβλεψη των δύο ροπών στις διεπιφάνειες της κρούστας με τη ρευστοποιημένη άμμο, υποθέτει ότι το επιφανειακό εδαφικό στρώμα να εμφανίζει ελαστική συμπεριφορά για χαμηλές τιμές της μετακίνησης D_H . Συγκεκριμένα, η ελαστική ζήτηση σε ροπή ($M_A = 557 D_H$, $D_H < 0.29$ m) είναι μικρότερη από την παθητική αντίσταση της κρούστας.
- Για μεγαλύτερες τιμές του D_H ($D_H > 0.29$ m), το ανώτερο εδαφικό στρώμα πλαστικοποιείται. Η ροπή M_A μεγιστοποιείται για $D_H = 0.29$ m και έπειτα μειώνεται ενώ ο πάσσαλος συνεχίζει να μετακινείται.
- Η συνεχιζόμενη μονοτονική αύξηση της ροπής M_B παρά την παθητική αστοχία της επιφανειακής κρούστας οφείλεται στην αύξηση της μετακίνησης της κεφαλής του πασσάλου μέχρι το τέλος της διέγερσης.

Οι **Brandenberg et al. (2005)** διεξήγαγαν πειράματα σε φυγοκεντριστή για να μελετήσουν την απόκριση πασσάλου-εδάφους υπό καθεστώς πλευρικής εξάπλωσης όταν μια μη-ρευστοποιήσιμη και αδιαπέρατη εδαφική κρούστα με ήπια κλίση υπέρκειται στρώμα χαλαρής άμμου. Λόγω ρευστοποίησης του αμμώδους στρώματος, η σχετική μετακίνηση μεταξύ του πασσάλου και του εδάφους που απαιτείται για την κινητοποίηση των μέγιστων πλευρικών πιέσεων είναι μεγαλύτερη από ότι αναμένεται με βάση πειράματα στατικής φόρτισης πασσάλων σε μη-ρευστοποιήσιμα εδάφη. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, παρατηρήθηκε η μέγιστη καμπτική ροπή κάθε χρονική στιγμή να επιβάλλεται στον πάσσαλο όταν και η εδαφική κρούστα εξαπλωνόταν πλευρικά. Επιπλέον, το ρευστοποιημένο στρώμα της άμμου εκείνη τη στιγμή προέβαλλε μία δύναμη αντίθετη στη διεύθυνση της μετακίνησης, σε αντίθεση με την πεποίθηση ότι η φόρτιση από την άμμο έχει ίδια διεύθυνση με τη μετακίνηση του εδάφους (**JRA 2002; Dobry et al. 2003**). Η παραπάνω συμπεριφορά της άμμου οφείλεται σε μικρότερη μετακίνηση της προς τα κάτω συγκριτικά με τον πάσσαλο.

Οι τιμές τ_u βρέθηκαν υψηλότερες στη άνω διεπιφάνεια των δύο εδαφικών στρώσεων καθώς λόγω της μικρής διαπερατότητας της εδαφικής κρούστας συσσωρεύτηκαν πιέσεις πόρων. Αυτή η συσώρευση είχε ως αποτέλεσμα η χαλαρή άμμος να γίνει ακόμη πιο χαλαρή και η κρούστα να μπορεί να μετακινηθεί πιο εύκολα. Η μεγάλη ασυνέχεια που προέκυψε στη μεταβολή των μετακινήσεων με το βάθος οδήγησε στην παθητική αστοχία της κρούστας γύρω από τον πάσσαλο για σχετικά μικρή μετακίνηση της ρευστοποιημένης άμμου.

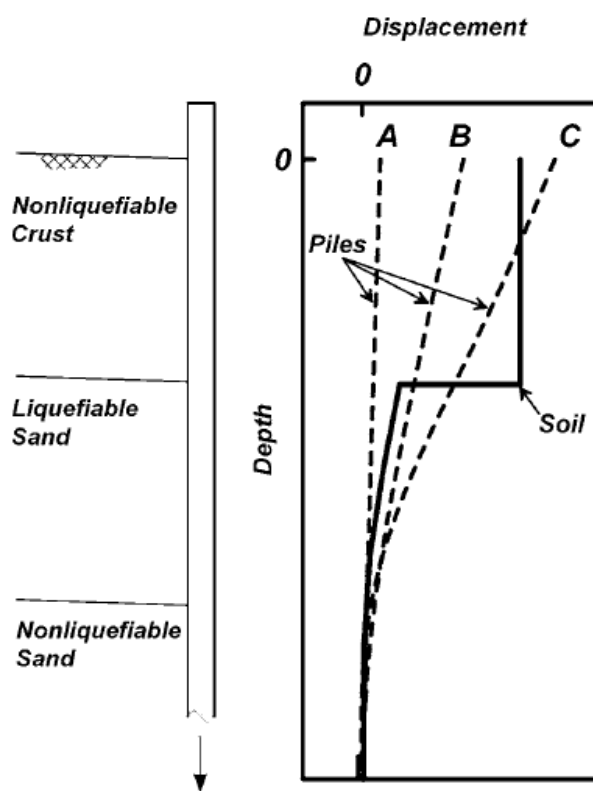
Οι συγγραφείς προσπάθησαν να αξιολογήσουν και την επίδραση της δυσκαμψίας του πασσάλου στη συνολική απόκριση. Στο **Σχήμα 2.26** φαίνεται αυτή η επίδραση και οι συγγραφείς προσπαθώντας να περιγράψουν πλήρως τη συμπεριφορά του πασσάλου ανάλογα με τη δυσκαμψία του κατέληξαν στα εξής:

- Εάν ο πάσσαλος είναι άκαμπτος (πάντα σχετικά με το έδαφος) αντιστέκεται στα φορτία που του επιβάλλει η κρούστα και μετακινείται λιγότερο από το ρευστοποιημένο στρώμα. Επακόλουθα, δέχεται πλευρικά φορτία προς τη διεύθυνση της εδαφικής μετακίνησης.
- Στην περίπτωση που έχει μεσαία δυσκαμψία αντιτίθεται στα φορτία της κρούστας αλλά μετακινείται περισσότερο από το στρώμα άμμου και δέχεται την δύναμη αντίστασης αντίθετα στη φορά της μετακίνησης όπως αναφέρθηκε και

παραπάνω. Αυτό συμβαίνει λόγω της συγκέντρωσης υπερπίεσεων του νερού των πόρων στη διεπιφάνεια της κρούστας με την ρευστοποιημένη άμμο, με αποτέλεσμα η κρούστα να «γλιστράει» πάνω στην άμμο και να μετακινεί μαζί της και τον πάσσαλο ο οποίος μετατοπίζεται περισσότερο από τη χαλαρή άμμο.

- Τέλος, εάν ο πάσσαλος είναι εύκαμπος, η κρούστα δεν αναπτύσσει την πλήρη παθητική πίεση ανάντη του πασσάλου και η μετακίνηση της κεφαλής του υπερβαίνει την εδαφική.

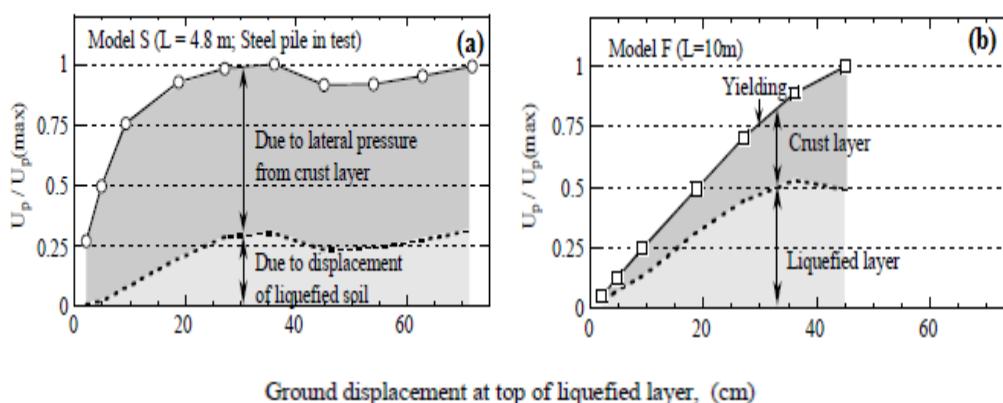
Επομένως, η σχετική δυσκαμψία πασσάλου-εδάφους αποτελεί κύρια παράμετρο στη διεύθυνση της φόρτισης από το ρευστοποιήσιμο στρώμα της άμμου.



Σχήμα 2.26: Σχηματική απεικόνιση των μετακινήσεων του πασσάλου και του εδάφους για την περίπτωση που ο πάσσαλος δε μπορεί να αντισταθεί στην παθητική δύναμη της κρούστας (C), ο πάσσαλος αντιστέκεται στη δύναμη της κρούστας και δέχεται από την χαλαρή άμμο δυνάμεις είτε προς τη διεύθυνση της μετακίνησης (A) είτε αντίθετα από αυτή (B).

Οι **Cubrinovski et al. (2006)**, χρησιμοποίησαν δεδομένα από πειράματα φυγοκεντριστή για να μελετήσουν την επίδραση της δυσκαμψίας του πασσάλου (και επακόλουθα της σχετικής δυσκαμψίας πασσάλου-εδάφους) στην αλληλεπίδραση

πασάλου-εδάφους σε καθεστώς πλευρικής εξάπλωσης. Εξετάστηκε η περίπτωση εδαφικού προφίλ που αποτελούνταν από μία επιφανειακή, διαπερατή εδαφική κρούστα και από κάτω βρισκόταν ένα ρευστοποιήσιμο εδαφικό στρώμα. Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η συνεισφορά της επιφανειακής κρούστας στην απόκριση μειώνεται με την αύξηση της ευκαμψίας του πασσάλου. Στην περίπτωση του άκαμπτου πασσάλου, η μετακίνηση της κεφαλής ήταν αποτέλεσμα του πλευρικού φορτίου του επιφανειακού στρώματος. Η μέγιστη απόκριση του πασσάλου εξαρτάται επομένως από την μέγιστη οριακή πίεση p_{ult} (άρα και από τις ιδιότητες αυτού του στρώματος). Αντίθετα, στην περίπτωση του εύκαμπτου πασσάλου, η μετακίνηση του και εν τέλει η απόκριση του καθορίζονται από τη μετακίνηση του ρευστοποιημένου εδάφους ενώ το πλήρες παθητικό φορτίο δε μπορεί να αναπτυχθεί λόγω μικρής σχετικής μετακίνησης πασσάλου και εδαφικής κρούστας. Βέβαια, σε κάποιο βαθμό και το επιφανειακό στρώμα επηρεάζει την απόκριση του πασσάλου και τη μετατόπισή του. Οι παραπάνω παρατηρήσεις φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν στο **Σχήμα 2.27**.



Σχήμα 2.27: Κανονικοποιημένη μετακίνηση προς εδαφική μετακίνηση στην κορυφή του ρευστοποιημένου στρώματος για (a) Μοντέλο S (άκαμπτος πάσσαλος) και (b) Μοντέλο F (εύκαμπτος πάσσαλος).

Ανακεφαλαιώνοντας, οι συγγραφείς αφού εξέτασαν ενδελεχώς τα πειραματικά δεδομένα κατέληξαν στα εξής:

- Η απόκριση ενός εύκαμπτου πασσάλου (σχετικά με τη δυσκαμψία της κρούστας) επηρεάζεται από το μέγεθος των πλευρικών μετακινήσεων.
- Αντίθετα, ένας δύσκαμπτος πάσσαλος δεν ακολουθεί την εδαφική μετακίνηση και επιδεικνύει ισχυρή πλευρική αντίσταση. Η απόκριση του εξαρτάται από το

πλευρικό φορτίο της κρούστας και τη μέγιστη καμπτική ροπή τη δέχεται όταν η κρούστα αστοχεί παθητικά. Μετά από την αστοχία, η ροπή παραμένει σταθερή παρά την αυξανόμενη πλευρική μετακίνηση.

2.4 Σύνοψη

Πολλές πρόσφατες έρευνες σχετικά με την απόκριση πασσάλων σε καθεστώς πλευρικής εξάπλωσης έχουν διεξαχθεί με σκοπό τη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης πασσάλου εδάφους προσανατολισμένες σε δύο ξεχωριστά εδαφικά προφίλ. Το πρώτο αποτελείται μόνο από ρευστοποιήσιμα στρώματα και η απόκριση σε όρους p - y κυριαρχείται από 2 κύριους παράγοντες την εδαφική διαπερατότητα που είναι υπεύθυνη για συσσώρευση πιέσεων πόρων (στην κεφαλή του πασσάλου κυρίως υποπιέσεων, **Gonzalez et al., 2009; Chaloulos 2012**) και τη σχετική μετακίνηση μεταξύ του πασσάλου και του εδάφους. Το δεύτερο διαφοροποιείται από το πρώτο καθότι στην εδαφική επιφάνεια του εδάφους εντοπίζεται μη-ρευστοποιήσιμη κρούστα η οποία αλλάζει δραματικά την απόκριση. Πλέον, η αλληλεπίδραση επηρεάζεται έντονα από τις εδαφικές ιδιότητες της κρούστας (διαπερατότητα και αντοχή) και οι μετακινήσεις καθορίζονται και από τα χαρακτηριστικά των πασσάλων (μήκος και διάμετρος που επιδρούν στη δυσκαμψία). Οπότε, στα επόμενα κεφάλαια θα διερευνηθούν οι μηχανισμοί που διέπουν αυτή την αλληλεπίδραση μέσα από αριθμητικές αναλύσεις και θα σχολιαστεί εκτενώς η επιρροή τους.

Αριθμητική Μεθοδολογία

3.1 Γενικά

DisplayText cannot span more than one line! Η αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους υπό καθεστώς ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης έχει προκαλέσει έντονο ενδιαφέρον στην κοινότητα των μηχανικών τα τελευταία χρόνια καθώς παρατηρούνται όλο και περισσότερες βλάβες σε θεμελιώσεις από πασσάλους μετά από κάθε ισχυρό σεισμό. Μέχρι στιγμής, το πρόβλημα αυτό έχει μελετηθεί κυρίως μέσα από πειράματα σεισμικής τράπεζας ή φυγοκεντρική, τα οποία έχουν εντοπίσει τους βασικούς μηχανισμούς που διέπουν την αλληλεπίδραση μεταξύ του ρευστοποιημένου εδάφους και του πασσάλου και έχουν οδηγήσει στην κατάστρωση εμπειρικών σχέσεων p - y . Παρόλα αυτά, υπάρχουν διαφοροποιήσεις στις διάφορες οπτικές του προβλήματος και κατ' επέκταση στις διάφορες εμπειρικές μεθοδολογίες που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

Κατ' επέκταση των παραπάνω, είναι γενικώς αποδεκτό ότι η απόκριση ενός πασσάλου σε καθεστώς ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης πρέπει να διερευνηθεί περισσότερο. Όμως, περαιτέρω εμβάθυνση μόνο με πειραματικά μέσα παρουσιάζει αντικειμενική δυσκολία λόγω του μεγάλου αριθμού των παραμέτρων σχετικών με το πρόβλημα και επακόλουθα του μεγάλου αριθμού πειραμάτων που πρέπει να διεξαχθούν. Από την άλλη πλευρά, η πρόοδος στις αριθμητικές μεθόδους μπορεί να προσφέρει τα μέσα για μία εναλλακτική, πλέον προσιτή διερεύνηση. Έτσι, στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά η αριθμητική μεθοδολογία που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης πασσάλου-εδάφους υπό καθεστώς ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης, στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.

3.2 Κώδικας FLAC 3D

Οι αναλύσεις εκτελέστηκαν με τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC 3D v5. Το λογισμικό FLAC είναι ένα πρόγραμμα Πεπερασμένων Διαφορών μη-πεπλεγμένης μορφής (Explicit Finite Difference Method) με εφαρμογή σε υπολογιστικά προβλήματα γεωτεχνικής φύσης. 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).

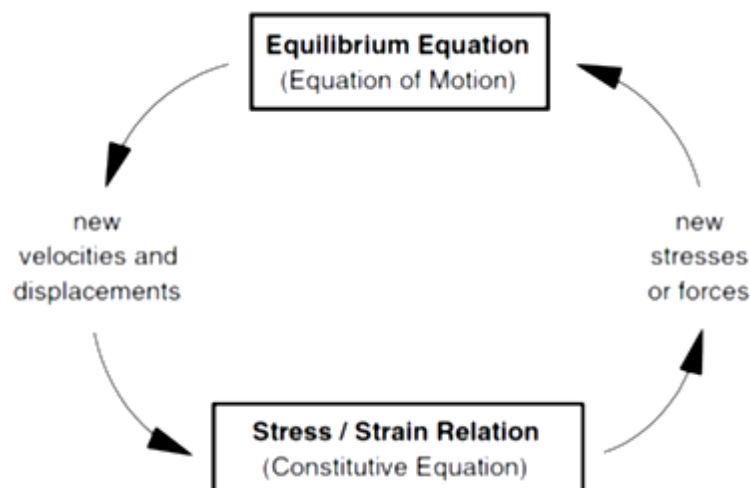
Η δομή ενός υπολογιστικού βήματος απεικονίζεται σχηματικά στο **Σχήμα 3.1**. Κατά τη διάρκεια ενός βήματος θεωρούνται γνωστές οι τάσεις του προηγούμενου βήματος. Από τις τάσεις στις ζώνες προκύπτουν οι ισοδύναμες δυνάμεις στους κόμβους του δικτύου, που οφείλονται στην εντατική κατάσταση του μέσου. Αυτές επαλληλίζονται με τη δύναμη απόσβεσης και τις εξωτερικές δυνάμεις δίνοντας τη μη ισορροπούσα δύναμη ΣF σε κάθε κόμβο. Εν συνεχεία, η μη ισορροπούσα δύναμη χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ταχυτήτων κάθε κόμβου, σύμφωνα με την πλήρη εξίσωση κίνησης. Με παραγωγή των ταχυτήτων προκύπτουν οι ρυθμοί μεταβολής των ανηγμένων παραμορφώσεων (strain rates) κάθε πεπερασμένης ζώνης, και από αυτούς (μέσω του καταστατικού νόμου που έχει επιλεγεί) προκύπτουν οι επαυξήσεις των τάσεων για το τρέχον υπολογιστικό βήμα. Αν η μη ισορροπούσα δύναμη είναι μηδενική τότε το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση πλήρους ισορροπίας (absolute equilibrium) ή αστοχεί υπό συνθήκες μόνιμης πλαστικής ροής (steady state flow).

Η βασική παραδοχή του μη πεπλεγμένου αλγορίθμου (explicit, time-marching scheme) που χρησιμοποιεί το FLAC είναι πως κατά τη διάρκεια ενός βήματος οι υπολογισμοί γίνονται μία φορά, δηλαδή οι τιμές των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις παραμένουν σταθερές. Για παράδειγμα, οι τάσεις που υπολογίζονται στο τέλος ενός βήματος θεωρείται πως δεν επηρεάζουν εκ νέου τις ταχύτητες στους κόμβους. Η παραδοχή αυτή είναι ευσταθής μόνο υπό την προϋπόθεση ότι το χρονικό βήμα της ανάλυσης είναι αρκετά μικρό, ώστε η πληροφορία να μην προλάβει να διαδοθεί (σε κάθε υλικό υπάρχει μια μέγιστη ταχύτητα διάδοσης οποιασδήποτε πληροφορίας). 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. Η συγκεκριμένη διαδικασία επίλυσης εμφανίζει ένα σημαντικό πλεονέκτημα και ένα σημαντικό μειονέκτημα:

- Το μειονέκτημα συνίσταται στο ότι απαιτείται ένας αρκετά μεγάλος αριθμός υπολογιστικών βημάτων για την ανάλυση οποιουδήποτε προβλήματος, ακόμα κι αν αυτό αφορά γραμμικά υλικά.
- Το πλεονέκτημα έγκειται στο γεγονός ότι ο αλγόριθμος δεν προϋποθέτει κανενός είδους επαναληπτική διαδικασία καθώς και μόνωση και αντιστροφή μητρώων, καθώς οι ζώνες δεν «επικοινωνούν» κατά την διάρκεια του υπολογιστικού βήματος. Ως εκ τούτου ο κώδικας καθίσταται σημαντικά πιο αποτελεσματικός σε έντονα μη-γραμμικά προβλήματα, όπως αυτά που αφορούν ρευστοποίηση.

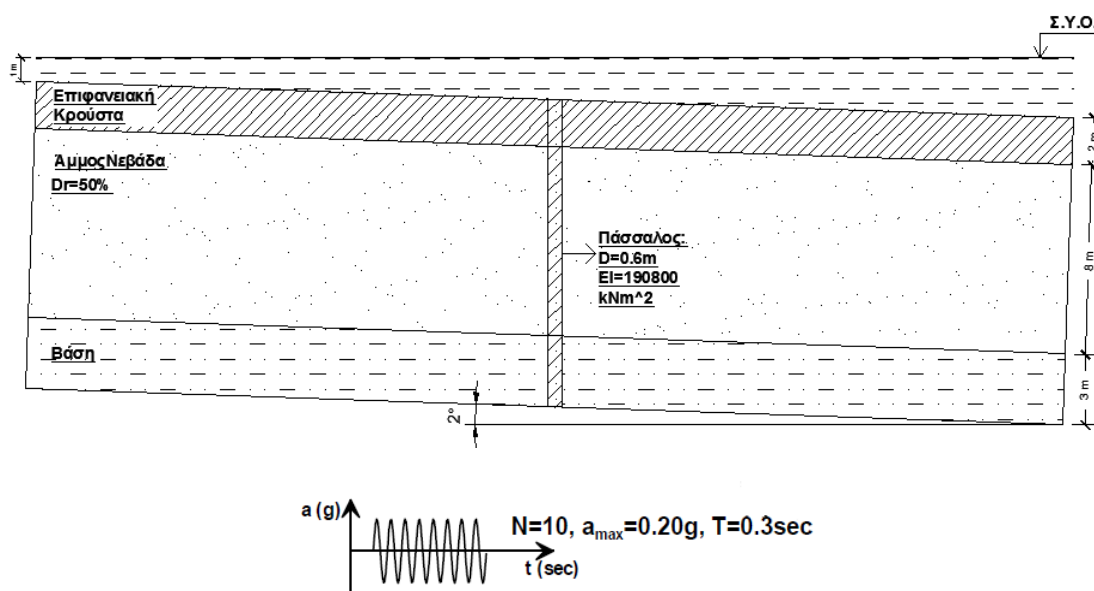
Επιπρόσθετα, ο κώδικας FLAC επιτρέπει την ενσωμάτωση από τον χρήστη εξειδικευμένων καταστατικών προσομοιωμάτων για την προσομοίωση της απόκρισης του εδάφους και επιτρέπει την εκτέλεση συζευγμένων δυναμικών αναλύσεων με ταυτόχρονη προσομοίωση της ροής του υγρού των πόρων, ενσωματώνοντας την θεωρία του Biot.



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

3.3 Αριθμητικό Προσομοίωμα

Το προσομοίωμα του φυσικού προβλήματος απεικονίζεται σχηματικά στο **Σχήμα 3.2** και περιγράφει ένα απειρομήκης πρανές βυθισμένο σε νερό (το γεγονός ότι είναι βυθισμένο εξασφαλίζει το πρανές να παραμείνει πλήρως κορεσμένο κατά τη διάρκεια της δυναμικής φόρτισης). Στην προκειμένη αριθμητική προσομοίωση της αλληλεπίδρασης πάσσαλου-εδάφους, ο πάσσαλος έχει μήκος 13m και δυσκαμψία $EI=190800 \text{ kNm}^2$ (έχει υπολογιστεί ως πάσσαλος εκσκαφής από οπλισμένο σκυρόδεμα, η κεφαλή του είναι ελεύθερη και η βάση του θεωρείται πακτωμένη με βάθος έμμηξης 3 m). Το εδαφικό προφίλ αποτελείται από 2 m επιφανειακής μη ρευστοποιήσιμης εδαφικής κρούστας, 8 m ομοιόμορφης Άμμου Νεβάδα σχετικής πυκνότητας $D_r=50\%$ και ακολουθούν 3 m αργίλου στην οποία έχει εμμηχτεί ο πάσσαλος και θεωρείται ότι του εξασφαλίζει συνθήκες πάκτωσης. Το εδαφικό προφίλ έχει ήπια κλίση 2° και είναι ολόκληρο υπό τον Υδροφόρο Ορίζοντα (το αριστερό πλευρικό όριο βρίσκεται 1 m χαμηλότερα από το Υ.Ο.). Στη βάση του μοντέλου, επιβάλλεται οριζόντια ημιτονική διέγερση η οποία προκαλεί ρευστοποίηση του αμμώδους στρώματος και μεγάλες πλευρικές παραμορφώσεις. Όλα τα παραπάνω βασικά δεδομένα των αναλύσεων συνοψίζονται στους **Πίνακες 3.1** και **3.2**.



Σχήμα 3.2: Φυσικό προσομοίωμα προς ανάλυση.

Πίνακας 3.1: Ιδιότητες Άμμου Νεβάδα.

Πυκνότητα στερεών κόκκων, ρ_s (Mgr/m ³)	2.67
Μέγιστος λόγος κενών, e_{max}	0.887
Ελάχιστος λόγος κενών, e_{min}	0.511
Μέγεθος κόκκου, D_{50} (mm)	0.1
Συντελεστής Ομοιομορφίας, C_u	1.41

Πίνακας 3.2: Συνολική παρουσίαση των εδαφικών ιδιοτήτων, του πασσάλου και της διέγερσης.

Εδαφικές Ιδιότητες				Ιδιότητες Πασσάλου		Διέγερση	
Λόγος Poisson, $\nu=0.33$	Κρούστα	Άμμος Νεβάδα	Αργιλική Βάση	Μήκος, L (m)	13	Αριθμός κόκκων, N	14
Μέτρο Διάτμησης, G (MPa)	27.11	54.23	11.28				
Ξηρή Πυκνότητα, ρ_{dry} (Mgr/m ³)	1.543	1.543	1.543	Διάμετρος D(m)	0.60	Περίοδος, T (sec)	0.30
Διαπερατότητα, k (m/sec)	6.1×10^{-6}	6.1×10^{-6}	10^{-9}	Δυσκαμψία, EI (kNm ²)	190800	Πλάτος, a_{max} (g)	0.20

Η αριθμητική ανάλυση στοχεύει στον υπολογισμό των κινηματικών φορτίων σε όρους καμπύλων p - y , που εφαρμόζονται στον πάσσαλο λόγω της εδαφικής μετακίνησης. Η ανάλυση πραγματοποιείται σε 3 στάδια:

- Στάδιο 1 : Εισαγωγή του σωστού τασικού πεδίο για το απειρομήκης πρηνές
- Στάδιο 2 : Εγκατάσταση του πασσάλου
- Στάδιο 3 : Εφαρμογή της διέγερσης στη βάση του προσομοιώματος

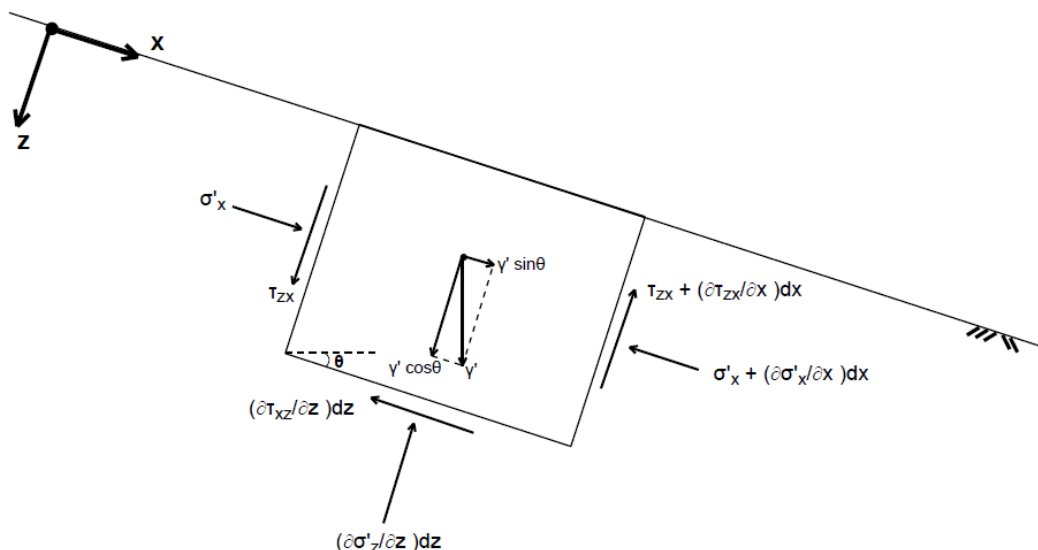
3.3.1 Στάδιο 1: Εισαγωγή του σωστού τασικού πεδίο για το απειρομήκες πρανές

Το τασικό πεδίο ενός απειρομήκους πρανούς διαφοροποιείται από το αντίστοιχο ενός επίπεδου εδαφικού προφίλ, κυρίως λόγω της επιπλέον διατμητικής τάσης στη βάση του απειρομήκους που απαιτείται να εξισοσταθμίσει τη συνιστώσα της βαρυτικής δύναμης παράλληλη στη βάση του πρανούς. Γενικά, οι κύριοι παράγοντες που χαρακτηρίζουν ένα απειρομήκες πρανές είναι τρεις (3):

- Απαιτούνται επιπλέον διατμητικές τάσεις για να εξισοσταθμίσουν τη συνιστώσα της βαρυτικής δύναμης, παράλληλη στη βάση του πρανούς.
- Οι κάθετες και οι παράλληλες στην εδαφική επιφάνεια, ορθές τάσεις δεν ισοσταθμίζουν όλη τη βαρυτική δύναμη, αλλά μόνο τη συνιστώσα που είναι κάθετη στην επιφάνεια του εδάφους.
- Οι διάφορες κάθετες τομές, στην εδαφική επιφάνεια πρέπει να είναι ισοδύναμες, δηλαδή να χαρακτηρίζονται από τις ίδιες ορθές και διατμητικές τάσεις.

Οι κατάλληλες τιμές για τις τάσεις του απειρομήκους πρανούς, εισάγονται στο μοντέλο από τον χρήστη μέσα από αναλυτικές σχέσεις που προκύπτουν από την ισορροπία του απειρομήκους πρανούς.

Για να αναπτυχθούν αυτές οι αναλυτικές εκφράσεις για τον υπολογισμό των τάσεων, εξετάζεται η ισορροπία ενός τμήματος του απειρομήκους πρανούς, διαστάσεων $dz \cdot dx$ όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.3**. Η γωνία κλίσης του είναι θ και το ενεργό (υπό άνωση) ειδικό βάρος του εδάφους είναι γ' . Στο αριστερό άκρο του τμήματος, η ορθή τάση είναι σ'_x και η διατμητική τ_{zx} . Στο δεξιό άκρο, η ορθή τάση είναι $\sigma'_x + (\partial \sigma'_x / \partial x) dx$ και η διατμητική παίρνει τιμή $\tau_{zx} + (\partial \tau_{zx} / \partial x) dx$. Στην εδαφική επιφάνεια δεν αναπτύσσονται καθόλου τάσεις αφού είναι ελεύθερο σύνορο, ενώ στη βάση του τμήματος αναπτύσσεται ορθή τάση $(\partial \sigma'_z / \partial z) dz$ και διατμητική $(\partial \tau_{xz} / \partial z) dx$.



Σχήμα 3.3: Σχηματική απεικόνιση των τάσεων σε ένα τμήμα απειρομήκους πρανούς ειδικού βάρους γ' .

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, όλες οι κάθετες τομές στην επιφάνεια ενός απειρομήκους πρανού πρέπει να είναι ισοδύναμες και αυτό συνεπάγεται να χαρακτηρίζονται από τις ίδιες ορθές (σ'_x) και διατμητικές (τ_{zx}) τάσεις. Με άλλα λόγια, δεν υπάρχει διακύμανση της σ'_x και τ_{zx} στη διεύθυνση του άξονα x και επομένως:

$$\frac{\partial \sigma'_x}{\partial x} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} = 0 \quad (3.2)$$

Επιπλέον, υποθέτοντας ότι το τμήμα που εξετάζεται έχει πλάτος 1 m (στη διεύθυνση κάθετη στο σύστημα συντεταγμένων x-z) η ισορροπία των δυνάμεων στη διεύθυνση x γράφεται ακολούθως:

$$\Sigma F_x = 0 \Rightarrow \gamma' \cdot \sin\theta \cdot dx \cdot dz \cdot 1 - \frac{\partial \sigma'_x}{\partial x} \cdot dx \cdot dz \cdot 1 - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \cdot dx \cdot dz \cdot 1 = 0 \quad (3.3)$$

η οποία σε συνδυασμό με την (3.1) δίνει :

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \gamma' \cdot \sin\theta \quad (3.4)$$

Αντίστοιχα από την ισορροπία των δυνάμεων στη διεύθυνση z προκύπτει:

$$\Sigma F_z = 0 \Rightarrow \gamma' \cdot \cos\theta \cdot dx \cdot dz \cdot 1 - \frac{\partial \sigma'_z}{\partial z} \cdot dx \cdot dz \cdot 1 = 0 \quad (3.5)$$

η οποία σε συνδυασμό με την (3.2) δίνει:

$$\frac{\partial \sigma'_z}{\partial z} = \gamma' \cdot \cos\theta \quad (3.6)$$

Οι εξισώσεις (3.4) και (3.6) αντιπροσωπεύουν τη μεταβολή με το βάθος των ορθών και διατμητικών τάσεων αντίστοιχα που εξισορροπούν τις βαρυτικές συνιστώσες κατά x και κατά z. Επομένως, οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον αναλυτικό υπολογισμό της κατανομής όλων των τάσεων σε ένα ελαφρώς κεκλιμένο εδαφικό προφίλ.

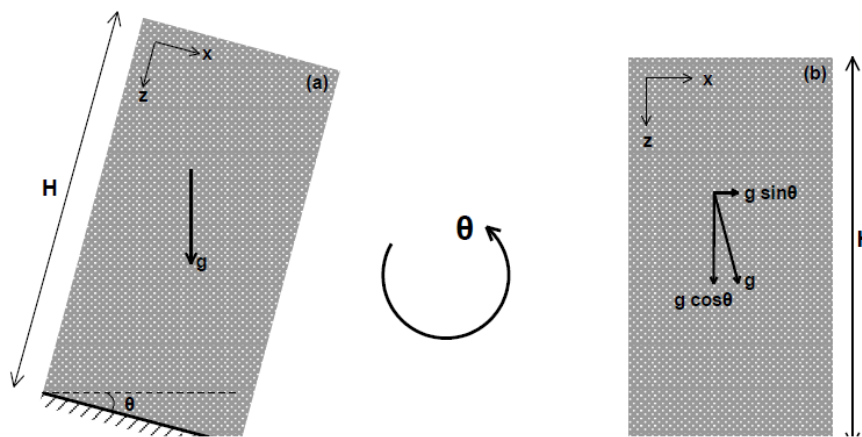
Γι' αυτό το σκοπό, θεωρείται το κεκλιμένο εδαφικό προφίλ στο **Σχήμα 3.4**. Όπως φαίνεται, το εδαφικό προφίλ έχει πάχος H και γωνία κλίσης θ . Υποθέτοντας πως το διάνυσμα της βαρύτητας περιστρέφεται κατά θ , ένα ισοδύναμο οριζόντιο εδαφικό προφίλ μπορεί να υιοθετηθεί στο οποίο η εδαφική κλίση προσομοιώνεται από την ανάλυση του διανύσματος της βαρύτητας σε δύο συνιστώσες (μία οριζόντια και μία κατακόρυφη). Οι τελευταίες υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} g_x &= g \cdot \sin\theta \\ g_z &= g \cdot \cos\theta \end{aligned} \quad (3.7)$$

όπου g_x : η οριζόντια συνιστώσα της βαρύτητας

g_z : η κατακόρυφη συνιστώσα της βαρύτητας

g : η βαρυτική επιτάχυνση ($=9.81 \text{ m/s}^2$)

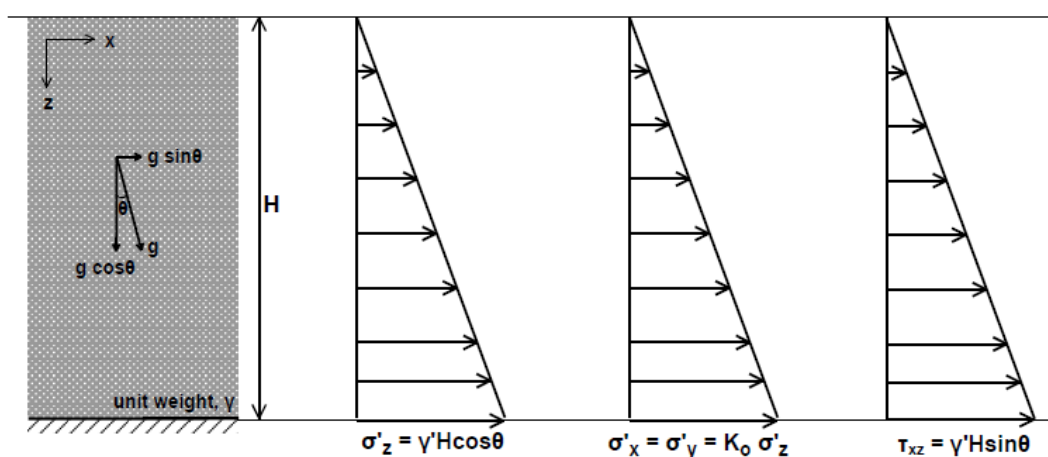


Σχήμα 3.4: Περιστροφή του κεκλιμένου προφίλ και υπολογισμός του ισοδύναμου οριζόντιου προφίλ.

Άρα, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί η αριθμητική ανάλυση υποθέτοντας ένα οριζόντιο εδαφικό προφίλ και προσομοιώνοντας την εδαφική κλίση με τις δύο συνιστώσες της βαρύτητας, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Η υιοθέτηση του ισοδύναμου οριζόντιου προφίλ προσδίδει μεγαλύτερη ευελιξία στην ανάλυση, καθώς αντίστοιχες αναλύσεις σε κεκλιμένα προφίλ εμφανίζουν ιδιαιτερότητες που τις δυσκολεύουν. Για παράδειγμα, οι τελευταίες δεν επιτρέπουν τη χρήση ορθογωνικών στοιχείων (που αριθμητικά είναι πιο ευσταθή), η εφαρμογή των κινηματικών περιορισμών (ειδικά στην εισαγωγή των tied-node boundaries όπως εξηγείται παρακάτω) στα πλευρικά όρια είναι πολύπλοκη, και γενικά εμφανίζονται δυσκολίες στο διαχωρισμό του καννάβου σε ομάδες και στην εισαγωγή διαφορετικών ιδιοτήτων για αυτές. Παρά τα πλεονεκτήματα, η παραπάνω μέθοδος έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα, ο πάσσαλος μετά την περιστροφή του μοντέλου γίνεται κεκλιμένος αλλά για μικρές τιμές της κλίσης η επίδραση στην ανάλυση είναι αμελητέα.

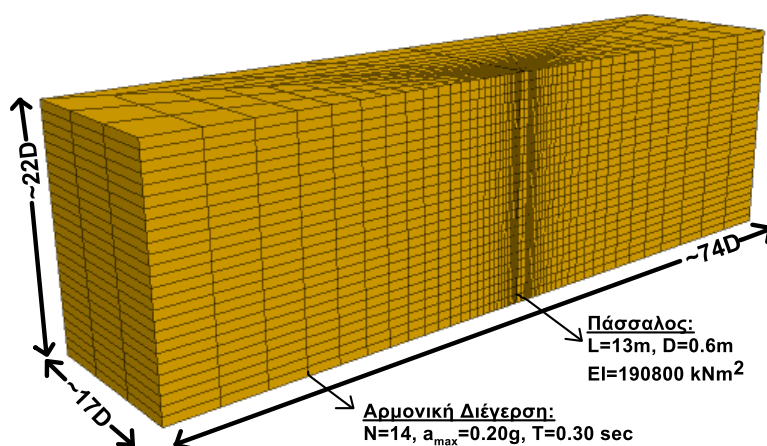
Σύμφωνα με τις σχέσεις (3.4) και (3.6), οι ενεργές τάσεις στη βάση του ισοδύναμου εδαφικού προφίλ, των οποίων η κατανομή με το βάθος απεικονίζεται στο μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$\begin{aligned}
 \sigma'_z &= \gamma' \cdot H \cdot \cos\theta \\
 \sigma'_x &= \sigma'_y = K_o \cdot \sigma'_z \\
 \tau_{xz} &= \gamma' \cdot H \cdot \sin\theta \\
 \tau_{xy} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

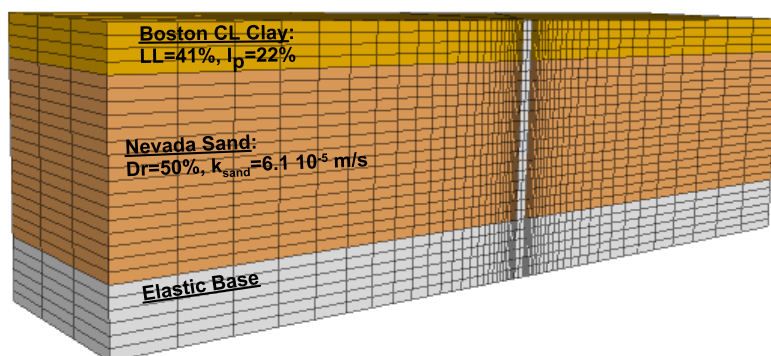


Σχήμα 3.5: Κατανομή των τάσεων με το βάθος ενός απειρομήκους πρανούς με κλίση στη βάση του θ .

Ο κάρναβος που δημιουργήθηκε για την ανάλυση φαίνεται στο **Σχήμα 3.6** ενώ στο **Σχήμα 3.7** απεικονίζεται ο ίδιος κάρναβος με τη διαφορά ότι διακρίνονται ξεκάθαρα οι 3 διαφορετικές εδαφικές στρώσεις. Το μοντέλο έχει ύψος 13m, μήκος 44m και πλάτος 10m. Έχει σχεδιαστεί το μισό προσομοίωμα, καθώς το κατακόρυφο επίπεδο που ορίζεται από τον άξονα του πασσάλου και τη διεύθυνση της κλίσης αποτελεί επίπεδο συμμετρίας. Η αιχμή του πασσάλου εντοπίζεται στις συντεταγμένες $x=0, y=0, z=0$. Όσον αφορά τη διακριτοποίηση, το πάχος των ζωνών (zones) στην οριζόντια διεύθυνση είναι 0.10m και το μέγεθος αυξάνει σταδιακά όσο απομακρύνονται ακτινικά από τον πάσσαλο.

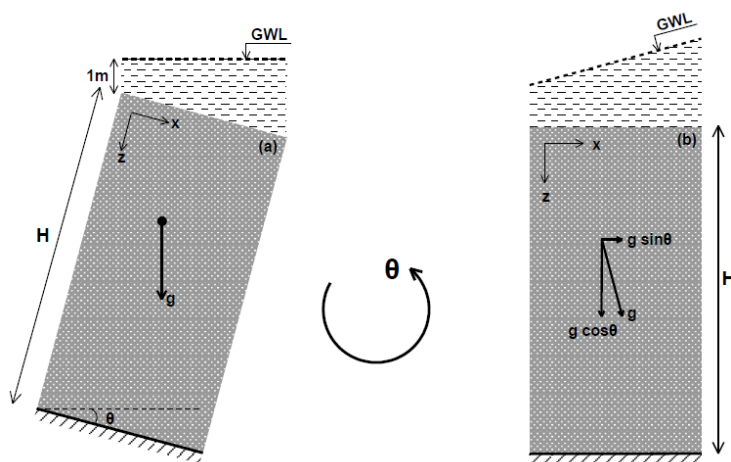


Σχήμα 3.6: Αριθμητικό Μοντέλο και διαστάσεις (διάμετρος πασσάλου D=0.6m).



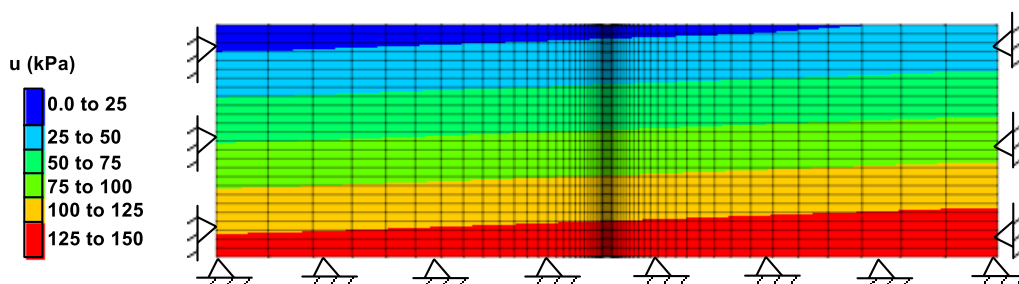
Σχήμα 3.7: Εδαφικό προφίλ του αριθμητικού μοντέλου.

Με την υιοθέτηση του ισοδύναμου οριζώντιου εδαφικού προφίλ και γνωρίζοντας πως το φυσικό απειρομήκης πρανές είναι ολόκληρο βυθισμένο σε νερό, πρέπει να περιστραφεί και η στάθμη του Υδροφόρου Οριζοντα αντίστοιχα, ο οποίος στο αριστερό (θέση στον κάρναβο στο $x = -22$ m) άκρο του πρανούς βρίσκεται 1 m υψηλότερα από την εδαφική επιφάνεια. Υπενθυμίζεται, ότι το πρανές θεωρήθηκε ολόκληρο βυθισμένο σε νερό ώστε να παραμείνει κορεσμένο σε όλη τη διάρκεια της διέγερσης. Το βυθισμένο κεκλιμένο προφίλ και το ισοδύναμο οριζόντιο παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.8**.



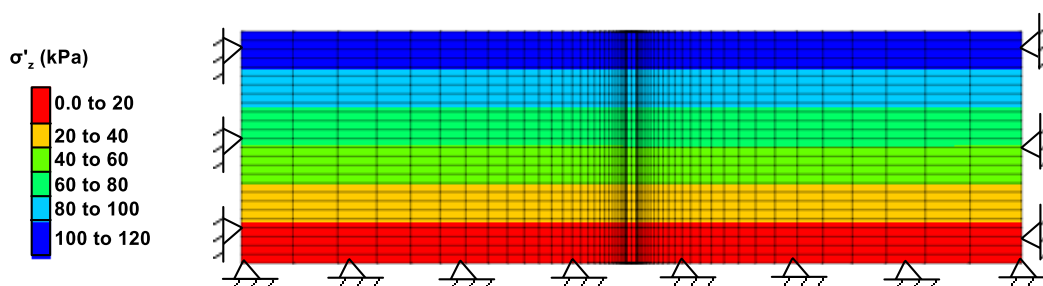
Σχήμα 3.8: Ισοδύναμο εδαφικό προφίλ για την περίπτωση του βυθισμένου απειρομήκους πρανούς.

Εφόσον περιστρέφεται το διάνυσμα της βαρύτητας για να προσομοιωθεί η εδαφική κλίση, πρέπει να περιστραφεί και η στάθμη του Υ.Ο. Σε αντίθετη περίπτωση, θα δημιουργηθεί ροή κατά την οριζόντια διεύθυνση. Αποτέλεσμα αυτού, είναι η κεκλιμένη η κατανομή με το βάθος των πιέσεων των πόρων, η οποία παρατηρείται στο **Σχήμα 3.9**.

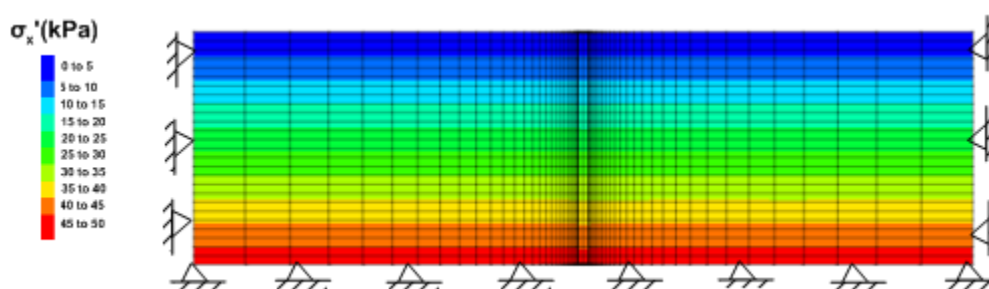


Σχήμα 3.9: Κατανομή των υδροστατικών πιέσεων για την περίπτωση του απειρομήκους πρανούς.

Αντίστοιχα με τις τάσεις, και οι πιέσεις πόρων εισάγονται από το χρήστη στο μοντέλο πριν αυτό ισορροπήσει. Οι ενεργές τάσεις (σ_z' & σ_x'), όπως υπολογίσθηκαν από τις αναλυτικές σχέσεις (3.4) και (3.6) αλλά και μετά από την αριθμητική ισορροπία του μοντέλου δεν παρουσιάζουν διακόμανση στην οριζόντια διεύθυνση, όπως προκύπτει από το **Σχήμα 3.10** και το **Σχήμα 3.11**. Αν όμως, ληφθεί και υπόψη η κεκλιμένη διακόμανση της κατανομής των πιέσεων των πόρων, τότε είναι προφανές πως και η κατανομή των ολικών τάσεων (ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στις ολικές οριζόντιες τάσεις) θα είναι επίσης κεκλιμένη (ειδικά στις ολικές οριζόντιες τάσεις οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στο δεξί όριο του μοντέλου). Αυτή η παρατήρηση είναι κρίσιμη για την αριθμητική ευστάθεια του προσομοιώματος και θα εξηγηθεί αναλυτικότερα παρακάτω.

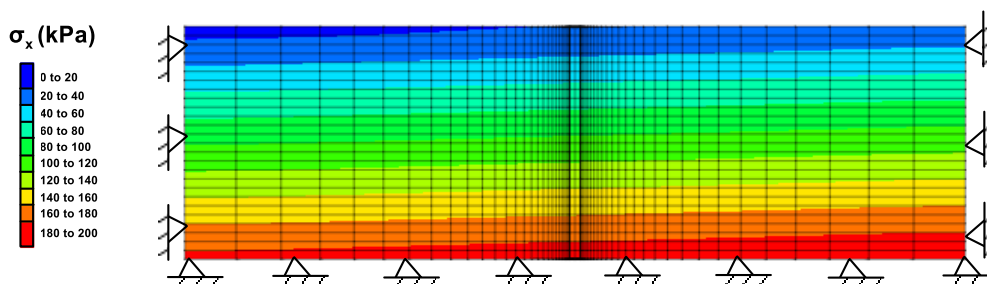


Σχήμα 3.10: Κατανομή των ενεργών κατακόρυφων τάσεων για το απειρομήκες πρανές.



Σχήμα 3.11: Κατανομή των ενεργών οριζόντιων τάσεων (σ_x') για το απειρομήκες πρανές.

Στο **Σχήμα 3.12** φαίνεται η κατανομή των ολικών οριζόντιων τάσεων με το βάθος και επαληθεύεται ότι είναι κεκλιμένη λόγω της περιστροφής της στάθμης του Υ.Ο..



Σχήμα 3.12: Κατανομή των ολικών οριζόντιων τάσεων (σ_x) για το απειρομήκες πρανές.

Στην αριθμητική ανάλυση είναι πολύ σημαντικό τα πλευρικά πεπερασμένα όρια για το προσομοίωμα του απειρομήκους πρανούς να συμπεριφέρονται όπως και στο ελεύθερο πεδίο (free field boundaries). Η δέσμευση των πλευρικών ορίων με αρθρώσεις ή κυλίσεις δεν αντιπροσωπεύει τη πραγματική κίνηση τους και για αυτό δεν είναι ρεαλιστικό να εφαρμοστούν. Με την εφαρμογή της μεθόδου των tied-nodes μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά η συμπεριφορά στα άκρα του ελεύθερου πεδίου.

Σε δυναμικά προβλήματα, το κύριο μειονέκτημα τους είναι ότι τα κύματα που διαδίδονται κοντά στα πλευρικά όρια μπορεί να ανακλαστούν, επηρεάζοντας τα αριθμητικά αποτελέσματα. Όμως, για εντόνως μη-γραμμικά προβλήματα σαν το εξεταζόμενο, σχεδόν όλη η ενέργεια από τα ανακλώμενα κύματα απορροφάται από τη μεγάλη υστερητική απόσβεση που αναπτύσσεται.

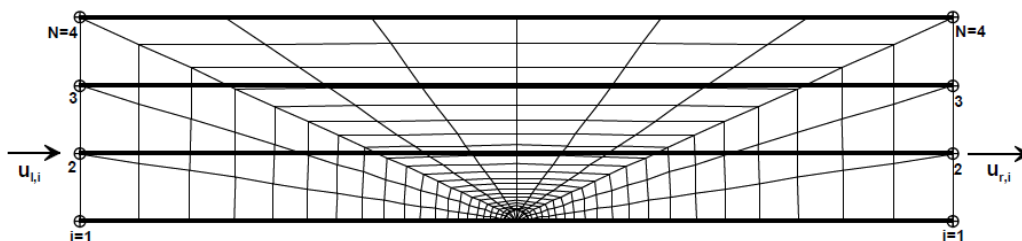
Η εφαρμογή των tied-nodes γίνεται μέσω μιας συνάρτησης γραμμής στη γλώσσα προγραμματισμού του FLAC, τη FISH. Η συνάρτηση εκτελείται σε κάθε βήμα της επίλυσης και η δράση της μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια του **Σχήμα 3.13**, στο οποίο απεικονίζεται μια τυπική οριζόντια τομή του καννάβου σε ύψος z και παρουσιάζει σχηματικά τον τρόπο εφαρμογής της συνάρτησης. Πιο συγκεκριμένα:

- Στην αρχή του υπολογιστικού βήματος, οι ταχύτητες $u_{l,i}$ και $u_{r,i}$ στην αριστερή και στη δεξιά πλευρά του προσομοιώματος, υπολογίζονται από το FLAC με βάση τις τάσεις στις κοντινές ζώνες γύρω από αυτά τα σημεία.
- Σε αυτό το σημείο του αλγορίθμου επίλυσης, καλείται η συνάρτηση των tied-node και επιβάλλει μια μέση ταχύτητα σε όλα τα σημεία που ανήκουν στα πλευρικά όρια και έχουν κοινό ύψος z . Η μέση ταχύτητα υπολογίζεται από τον τύπο

$$u_{av} = \frac{\sum(u_{l,i} + u_{r,i})}{2N} \tag{3.9}$$

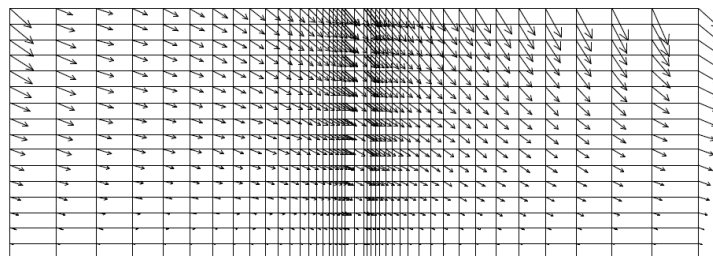
Όπου $2N$ είναι ο αριθμός των σημείων στα οποία επιβάλλεται η κοινή ταχύτητα u_{av} (π.χ. για το **Σχήμα 3.13**, $2N=8$).

- Τελικά οι ταχύτητες $u_{l,i}$ και $u_{r,i}$ στα σημεία αυτά αντικαθίστανται από τη νέα κοινή ταχύτητα u_{av} .
- Το υπολογιστικό βήμα ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό των παραμορφώσεων (βάσει της ταχύτητας) και των νέων τάσεων (βάσει των παραμορφώσεων και του καταστατικού νόμου που έχει υιοθετηθεί)



Σχήμα 3.13: Τυπική τομή που απεικονίζει τη λειτουργία της συνάρτησης των tied-nodes.

Στην περίπτωση του βυθισμένου απειρομήκους πρανούς, η εφαρμογή της συμβατικής συνάρτησης των tied-nodes δεν αποδίδει με ακρίβεια την κινηματική του προβλήματος. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, λόγω της περιστροφής της στάθμης του Υ.Ο., η κατανομή των ολικών οριζόντιων τάσεων προέκυψε κεκλιμένη σύμφωνα με το **Σχήμα 3.12** και οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στο δεξιό άκρο του μοντέλου. Αυτό υποδηλώνει μια τάση για μετακίνηση προς τα κάτω που είναι μη ρεαλιστικό μιας και τα απειρομήκη πρανά δεν παρουσιάζουν τέτοια συμπεριφορά. Το **Σχήμα 3.14** ενισχύει αυτή την παρατήρηση.



Σχήμα 3.14: Ανάπτυξη μόνιμης μετακίνησης προς τα κάτω σε ένα βυθισμένο απειρομήκες πρανές μετά από ισορροπία με εφαρμογή της συμβατικής συνάρτησης των tied-nodes.

Η σωστή απόκριση των πλευρικών πεπερασμένων ορίων του προσομοιώματος μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή μιας τροποποιημένης συνάρτησης tied-nodes. Πρώτα όμως, πρέπει να ερευνηθεί πιο αναλυτικά η λειτουργία των συμβατικών tied-nodes όπως αυτά έχουν προγραμματιστεί στο FLAC 3D. Εάν θεωρηθεί ένα μικρό τμήμα στο οποίο υπάρχουν δύο κόμβοι και σε αυτούς εφαρμόζεται η συνάρτηση των tied-nodes, όπως στο **Σχήμα 3.15**. Λόγω της κεκλιμένης φρεατικής γραμμής, η υδροστατική πίεση στο B είναι μεγαλύτερη από του A ($u_B > u_A$). Υποθέτοντας ότι το απειροστικό πρηνές αρχικά ισορροπεί, οι ενεργές οριζόντιες τάσεις (σ_x') είναι ίσες στα δύο σημεία ($\sigma_{x,B}' = \sigma_{x,A}'$) σε αντίθεση με τις ολικές που είναι μεγαλύτερες στο B ($\sigma_{x,B} > \sigma_{x,A}$). Με την εφαρμογή της συνάρτησης των tied-nodes, το σύστημα αφήνεται να ισορροπήσει και ένας κύκλος επίλυσης έχει την εξής σειρά:

Βήμα 1: Υπολογίζεται η οριζόντια δύναμη F στα σημεία A και B βάσει των ολικών τάσεων $\sigma_{x,A}$ και $\sigma_{x,B}$. Για θετικές προς τα κάτω δυνάμεις, ταχύτητες και επιταχύνσεις οι δυνάμεις υπολογίζονται:

$$\begin{aligned} F_A &= -\sigma_{x,A} \cdot A_s \\ F_B &= \sigma_{x,B} \cdot A_s \end{aligned} \tag{3.10}$$

όπου A_s το εμβαδόν που αντιστοιχεί στα σημεία A και B.



Σχήμα 3.15: Ισορροπία ενός απειροστικού τμήματος εδάφους μεταξύ των σημείων A και B.

Βήμα 2: Υπολογίζονται η επιτάχυνση και η ταχύτητα για τα δύο σημεία βάσει των δυνάμεων F_A και F_B ως εξής:

$$\begin{aligned} \alpha_A &= \frac{F_A}{m} \\ v_A &= \alpha_A \cdot dt = -\left(\frac{\sigma_{x,A} \cdot A_s}{m}\right) \cdot dt \end{aligned} \tag{3.11}$$

&

$$\alpha_B = \frac{F_B}{m} \quad (3.12)$$

$$v_B = \alpha_B \cdot dt = -\left(\frac{\sigma_{x,B} \cdot A_s}{m}\right) \cdot dt$$

όπου m η μάζα που αντιστοιχεί στα σημεία A και B και dt το χρονικό βήμα της ανάλυσης.

Βήμα 3: Η συμβατική συνάρτηση των tied-node, σε αυτό το σημείο καλείται και αντικαθιστά την ταχύτητα που έχει καθένα από τα σημεία A και B με μία μέση κοινή ταχύτητα:

$$v_{av} = \frac{v_A + v_B}{2} \quad (3.13)$$

Πρέπει να παρατηρηθεί πως λόγω της διαφοράς στις ολικές οριζόντιες τάσεις στα σημεία A και B , η ταχύτητα στο B είναι μεγαλύτερη από το A ($|v_B| > |v_A|$) και ως αποτέλεσμα η μέση ταχύτητα (v_{av}) δεν μηδενίζεται αλλά λαμβάνει θετική τιμή με κατεύθυνση προς τα κάτω.

Βήμα 4: Υπολογίζονται οι παραμορφώσεις (με βάση τη v_{av}) και οι νέες αυξήσεις των τάσεων (με βάση τον υιοθετημένο καταστατικό νόμο).

Τα βήματα 1-4 επαναλαμβάνονται μέχρι η v_{av} να λάβει την τιμή μηδέν. Εφόσον η ταχύτητα v_{av} είναι το αποτέλεσμα της διαφοράς των ολικών τάσεων, η ισορροπία μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν οι ολικές τάσεις στα δύο όρια εξισωθούν. Αυτό μεταφράζεται σε κεκλιμένη κατανομή τάσεων για το απειρομήκες πρανές και δεν είναι ρεαλιστικό.

Έχοντας κατανοήσει το μηχανισμό της συνάρτησης των tied-nodes και το λόγο που δεν είναι συμβατή με την κινηματική απόκριση του απειρομήκους πρανούς, μπορεί να προταθεί μια τροποποίηση της συνάρτησης που αποφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα πρέπει να εφαρμοστεί μια ταχύτητα αντίθετη προς τη τάση για μετακίνησης ώστε η ταχύτητα v_{av} να μηδενιστεί παρά τη διαφορά στις ολικές τάσεις στα σημεία A και B των πλευρικών ορίων. Με άλλα λόγια η εξίσωση (3.13) πρέπει να ξαναγραφτεί ως:

$$v_{av} = \frac{v_A + v_B + v_{up}}{2} \quad (3.14)$$

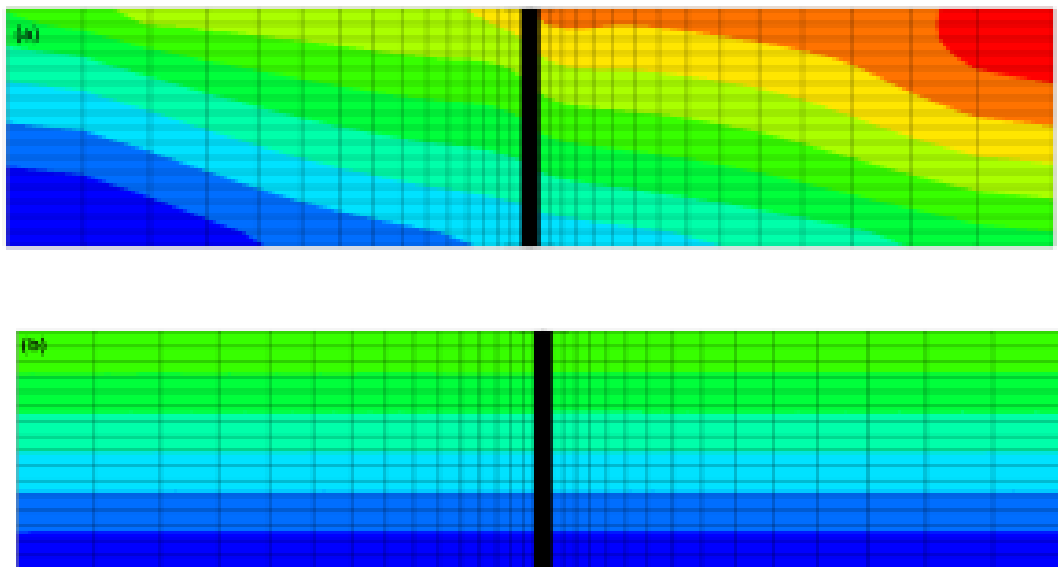
όπου

$$v_{up} = -(v_B - v_A) \quad (3.15)$$

Επιπλέον, αν συνδυαστούν οι εξισώσεις (3.10) και (3.11), δεδομένου ότι $\sigma_{x,B}' = \sigma_{x,A}'$ από τη (3.15) προκύπτει:

$$v_{up} = \frac{A_s \cdot dt}{m} \cdot (\sigma_{x,A}' - \sigma_{x,B}') = \frac{A_s \cdot dt}{m} \cdot (u_A - u_B) \quad (3.16)$$

Πρέπει να τονισθεί πως όλοι οι παράμετροι στην εξίσωση (3.16) υπολογίζονται εξ αρχής με βάση τη γεωμετρία του προβλήματος και η v_{up} εκτιμάται στην αρχή της ανάλυσης. Στο **Σχήμα 3.16** συγκρίνεται η κατανομή των ενεργών τάσεων για τις δύο περιπτώσεις [(a) εφαρμογή της συμβατικής συνάρτησης των tied-nodes και (b) εφαρμογή της τροποποιημένης συνάρτησης των tied-nodes] και παρατηρείται πως για τη δεύτερη περίπτωση αυτή είναι οριζόντια στην εδαφική επιφάνεια και συμφωνεί με τις αναλυτικές σχέσεις που περιγράφονται από τις εξισώσεις (3.8).



Σχήμα 3.16: (a) κατανομή των ενεργών οριζόντιων τάσεων (σ_x') με εφαρμογή της συμβατικής συνάρτησης των tied-nodes και (b) κατανομή των ενεργών οριζόντιων τάσεων (σ_x') με εφαρμογή της τροποποιημένης συνάρτησης των tied-nodes.

Όπως φαίνεται και από το **Σχήμα 3.7**, το εδαφικό προφίλ, αποτελείται από τρία εδαφικά στρώματα, για καθένα από τα οποία επιλέχθηκαν διαφορετικές καταστατικές σχέσεις μηχανικής συμπεριφοράς. Πιο συγκεκριμένα:

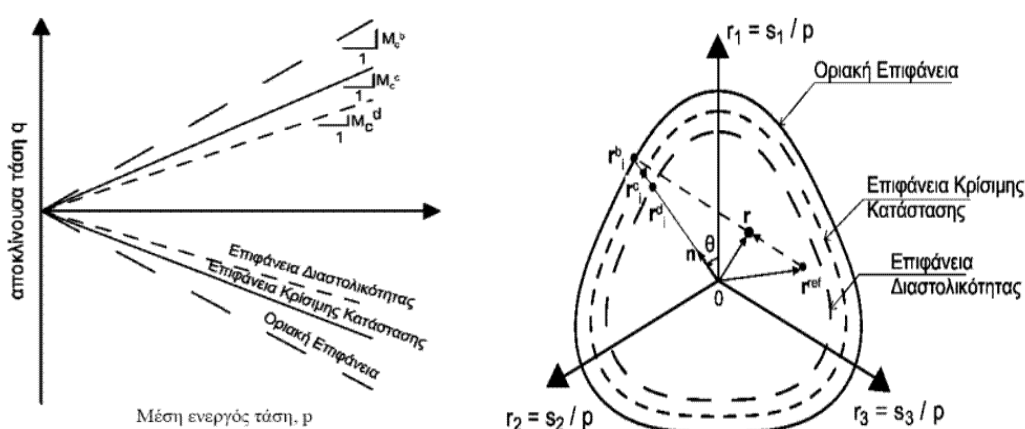
Για τα πρώτα 2 m της μη-ρευστοποιήσιμης κρούστας επιλέχθηκε το ευρύτατα χρησιμοποιούμενο καταστατικό προσομοίωμα Mohr-Coulomb. Το συγκριτικό πλεονέκτημα του εν λόγω προσομοιώματος είναι η ευκολία στην βαθμονόμηση ενώ η αξιολόγηση σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα δείχνει ότι μπορεί να προβλέψει με αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια την απόκριση του μη-ρευστοποιήσιμου εδάφους.

Για τα επόμενα 8 m ρευστοποιήσιμης Άμμου Nevada και επακόλουθα για την απόκριση της ρευστοποιημένης άμμου επιλέχθηκε το καταστατικό προσομοίωμα NTUA Sand. Πρόκειται για ένα καταστατικό προσομοίωμα βασισμένο στη θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης και της Πλαστικότητας που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του Ε.Μ.Π. 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 το εν λόγω εφαρμόζεται αποτελεσματικά τόσο σε μονοτονικές όσο και σε 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 3.17** φαίνονται οι μορφές των επιφανειών του προσομοιώματος για τριαξονική εντατική κατάσταση καθώς και οι προβολές των επιφανειών στο επίπεδο q (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 Andrianopoulos 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.



Σχήμα 3.17: Επιφάνειες του προσομοιώματος στο χώρο p-q και η προβολή τους στο επίπεδο π.

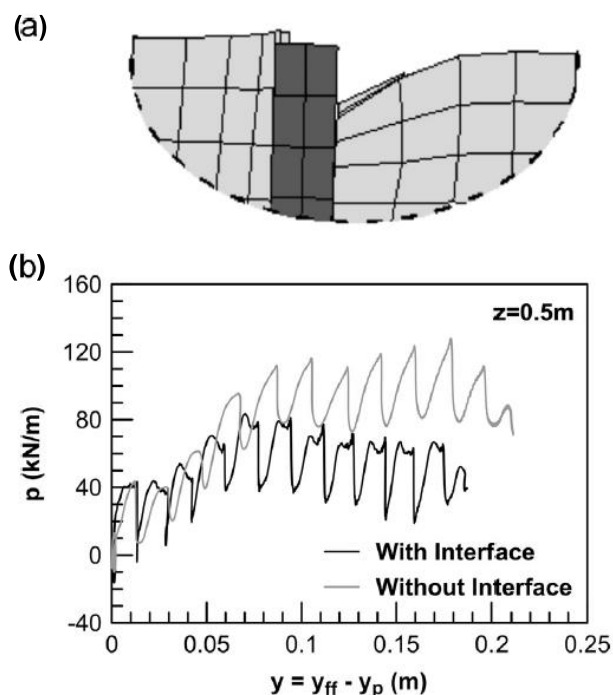
Τέλος, για τα τελευταία 3 m της αργλικής βάσης επιλέχθηκε το απλό ελαστικό καταστατικό προσομοίωμα. Η αργλική βάση πρακτικά προσφέρει συνθήκες πάκτωσης στον πάσσαλο και δεν επηρεάζει την απόκριση του όταν αυτός φορτίζεται από το πλευρικά εξαπλωμένο έδαφος. Δεν υιοθετήθηκε κάποιο πιο πολύπλοκο προσομοίωμα ώστε η ανάλυση να μην επιβαρυνθεί σε υπολογιστικό χρόνο.

3.3.2 Στάδιο 2: Εγκατάσταση του πασσάλου

Σε αυτό το στάδιο προσομοιώνεται η εγκατάσταση του πασσάλου στο έδαφος. Αριθμητικά, αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας τις μηχανικές ιδιότητες του πασσάλου στις κατάλληλες ζώνες (zones) του καννάβου και δημιουργώντας στοιχεία διεπιφάνειας (interface elements) μεταξύ του εδάφους και του πασσάλου τα οποία μπορούν να προσομοιώσουν την ολίσθηση και την αποκόλληση. Η απόκριση του πασσάλου, θεωρείται ελαστική με την υπόθεση ότι δε θα αναπτυχθούν καθόλου

πλαστικές αρθρώσεις. Η ελαστική προσομοίωση επιλέχθηκε διότι δεν επιτρέπεται η πλαστική ανάλυση για το σχεδιασμό των πασσάλων. Πλαστικές αρθρώσεις μπορούν να αναπτυχθούν λόγω μεγάλων πλευρικών φορτίων και μετά το τέλος του κραδασμού, οδηγώντας τη θεμελίωση σε αστοχία. Επιπλέον, η πρόσβαση και επιδιόρθωση τμημάτων με βλάβες αποτελεί ένα δύσκολο και σε πολλές περιπτώσεις ένα ακατόρθωτο έργο.

Τα στοιχεία διεπιφάνειας στο FLAC 3D παρουσιάζουν μια ελαστική-απολύτως πλαστική απόκριση που καθορίζεται από τις βασικές παραμέτρους όπως ελαστική ακαμψία, συνοχή, γωνία τριβής καθώς και εφελκυστική αντοχή. Οι τρεις πρώτες ελέγχουν την ολίσθηση και η τέταρτη το διαχωρισμό και την αποκόλληση, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.18a**. Η επιλογή κατάλληλων τιμών για αυτές τις παραμέτρους πρέπει να έχει φυσικό νόημα και ταυτόχρονα να ικανοποιεί και τα αριθμητικά κριτήρια. Για παράδειγμα, η ελαστική ακαμψία πρέπει να έχει μεγάλη τιμή για να αποφευχθούν έντονες παραμορφώσεις πριν τη διαρροή, αλλά παράλληλα να παραμείνει και χαμηλότερη από ένα όριο για να μη γίνει το σύστημα ασταθές. Επομένως, είναι απαραίτητος ένας αριθμός αναλύσεων ευαισθησίας για τον προσδιορισμό των κατάλληλων τιμών. Στο **Σχήμα 3.18b** συγκρίνεται η απόκριση σε όρους καμπυλών p - y ενός πασσάλου σε καθεστώς ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης όταν έχουν δημιουργηθεί στοιχεία διεπιφάνειας και χωρίς αυτά. Στην περίπτωση χωρίς τα στοιχεία διεπιφάνειας, παρατηρείται πως τα αποτελέσματα είναι υπερσυντηρητικά.



Σχήμα 3.18: (a) Χρήση των στοιχείων διεπιφάνειας για την προσομοίωση της σχετικής ολίσθησης μεταξύ πασσάλου-εδάφους και (b) επίδραση των στοιχείων διεπιφάνειας στις καμπύλες p - y .

3.3.3 Στάδιο 3: Σεισμική Διέγερση στη βάση του μοντέλου

Σε αυτό το στάδιο της ανάλυσης μια οριζόντια ημιτονική διέγερση επιβάλλεται στη βάση του μοντέλου και η αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους αξιολογείται μέσα από τις καμπύλες p - y . Οι εδαφικές πιέσεις υπολογίζονται αριθμητικά από τις τάσεις που αναπτύσσονται στα διάφορα σημεία (gridpoints) του καννάβου. Επίσης, για την περίπτωση που και ο πάσσαλος και το έδαφος αναπτύσσουν πλευρικές μετατοπίσεις, υπολογίζεται η σχετική μετατόπιση y ως η διαφορά μεταξύ των μετακινήσεων του ελεύθερου πεδίου και του πασσάλου. Η πρώτη αποτελεί τη μετακίνηση στο αριστερό πλευρικό όριο του μοντέλου (να είναι ίδια με την μετακίνηση στο δεξιό όριο λόγω της συνάρτησης των tied-nodes) και η δεύτερη είναι η μετατόπιση στον άξονα του πασσάλου:

$$y = y_{ff} - y_p \quad (3.17)$$

όπου:

y_p : η οριζόντια μετακίνηση στον άξονα του πασσάλου

y_{ff} : η οριζόντια μετακίνηση στο πλευρικό όριο του μοντέλου

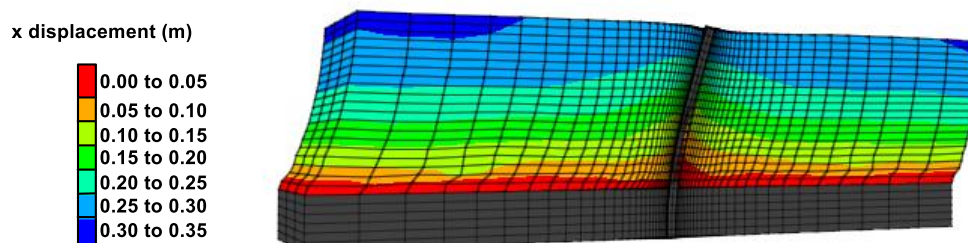
Όμως, εφόσον η παρουσία του πασσάλου επηρεάζει τις εδαφικές μετακινήσεις γύρω από την περιοχή του πασσάλου (rinning effects), πρέπει να επαληθευτεί ότι τα πλευρικά όρια του μοντέλου είναι αρκετά μακριά από τον πάσσαλο και αποτελούν όρια ελεύθερου πεδίου. Από παραμετρικές αναλύσεις ευαισθησίας, έχει προκύψει ότι οι διαστάσεις του καννάβου ικανοποιούν αυτό τον περιορισμό.

Όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες, τα πλευρικά όρια στις θέσεις $y=0$ και $y=+10$ δεσμεύτηκαν στη διεύθυνση y και παρέμειναν ελεύθερα να κινηθούν στις άλλες δύο διευθύνσεις. Στα πλευρικά όρια στις θέσεις $x=-22$ και $x=+22$ εφαρμόστηκε η συνάρτηση των tied-nodes.

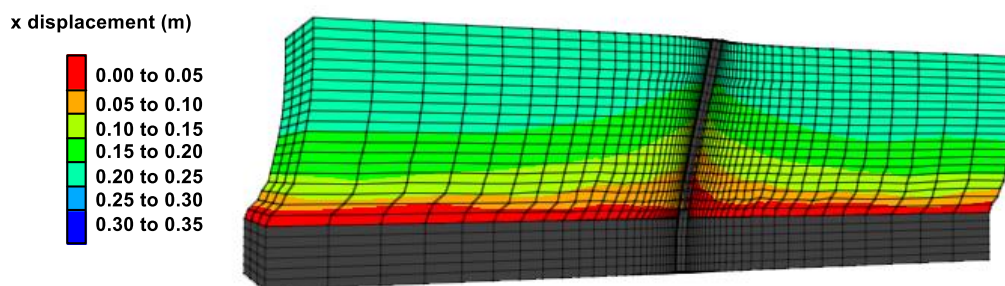
3.4 Τυπικά Αποτελέσματα

Σε αυτό το τελευταίο τμήμα του κεφαλαίου παρουσιάζονται ορισμένα τυπικά αποτελέσματα από 2 διαφορετικές αριθμητικές αναλύσεις, οι οποίες έχουν επιλεγεί προκειμένου να εξαχθούν κάποια αρχικά συμπεράσματα για την αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους σε πλευρικά εξαπλωμένο έδαφος όταν πάνω από το ρευστοποιημένο στρώμα υπάρχει μη-ρευστοποιήσιμη εδαφική κρούστα. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας ανάλυσης μόνο με άμμο και μιας ανάλυσης με επιφανειακή εδαφική κρούστα αντοχής $c_u=40$ kPa.

Στο **Σχήμα 3.19** και στο **Σχήμα 3.20** φαίνονται οι κατανομές των οριζόντιων μετακινήσεων για τις δύο προαναφερθέντες αναλύσεις. Παρατηρείται πως η ύπαρξη της κρούστας μειώνει τις μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου και το βέλος του πασσάλου.

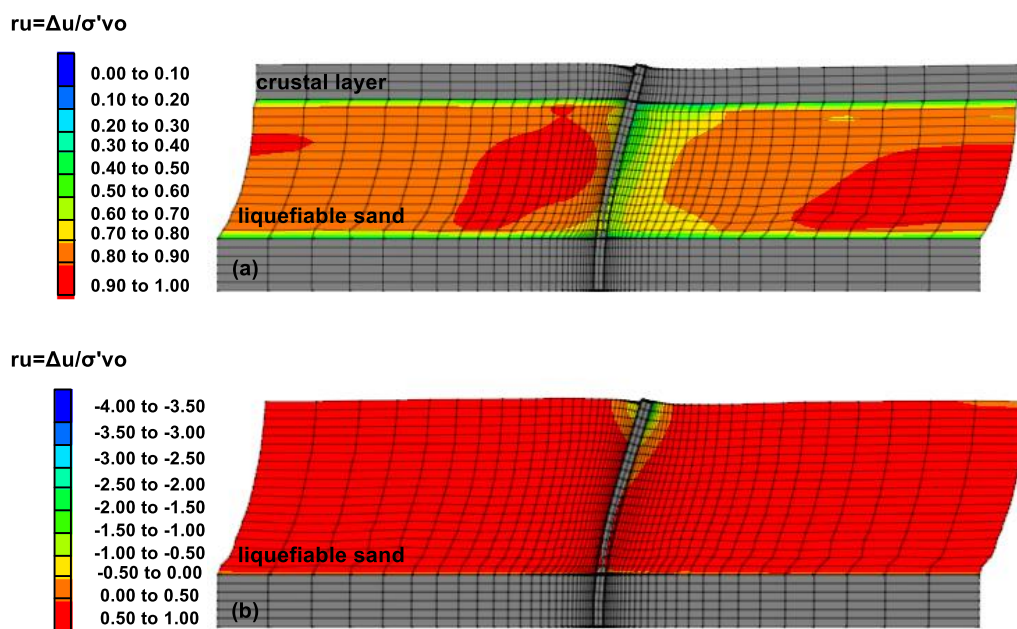


Σχήμα 3.19: Κατανομή των οριζόντιων μετακινήσεων για την ανάλυση χωρίς κρούστα στο τέλος της διεγερσης.



Σχήμα 3.20: Κατανομή των οριζόντιων μετακινήσεων για την ανάλυση με κρούστα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $c_u=40$ kPa.

Αν συγκριθούν οι λόγοι r_u για ένα προφίλ όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.21(a και b)** στο προφίλ της άμμου φαίνεται ο σχηματισμός της ζώνης ανάποδου κωνικού σχήματος από μη-ρευστοποιημένο εδαφικό υλικό στο άνω μέρος του πασσαλού με την ανάπτυξη αρνητικών πιέσεων πόρων. Αντίθετα, στο άλλο προφίλ η ύπαρξη της κρούστας φαίνεται πως εμποδίζει τη διαστολική συμπεριφορά και προκαλεί θετικούς λόγους r_u σε όλο το πάχος της ρευστοποιημένης άμμου.



Σχήμα 3.21: Λόγοι r_u και παραμορφωμένος κώνναβος σε (a) εδαφικό προφίλ με επιφανειακή αργιλική κρούστα (αντοχής $c_u=40$ kPa) και (b) εδαφικό προφίλ από ρευστοποιήσιμη άμμο. Με γκρι χρώμα δίνεται ο πάσσαλος και η αργιλική βάση και στην περίπτωση (a) και η κρούστα.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα από τις παραμετρικές αναλύσεις και εξηγείται πλήρως η απόκριση του πασσάλου σε πλευρικά εξαπλώμενο έδαφος με επιφανειακή μη ρευστοποιήσιμη κρούστα. Ιδιαίτερο βάρος δίνεται στις καμπύλες p - y που προκύπτουν από την ανάλυση.

4

Παραμετρικές Αναλύσεις & Τυπικά Αποτελέσματα

4.1 Γενικά

DisplayText cannot span more than one line! Πολλές πρόσφατες έρευνες έχουν προσανατολιστεί στη διερεύνηση της απόκρισης πασσάλων υπό καθεστώς ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης, σε δύο κυρίαρχα εδαφικά προφίλ. Το πρώτο εδαφικό προφίλ αφορά πασσάλους τοποθετημένους μέσα σε ρευστοποιήσιμα στρώματα όπου πρωταρχικό ρόλο στην απόκριση διαδραματίζουν η εδαφική διαπερατότητα (Gonzalez et al., 2009; Chaloulos 2012) και η σχετική μετακίνηση μεταξύ πασσάλου και εδάφους. Το δεύτερο εδαφικό προφίλ διαφοροποιείται του πρώτου λόγω της ύπαρξης ενός επιφανειακού εδαφικού στρώματος μη ρευστοποιήσιμου (κατά κύριο λόγο αργιλικό). Έτσι, η αλληλεπίδραση πλέον επηρεάζεται έντονα από τις εδαφικές ιδιότητες της κρούστας (διαπερατότητα και αντοχή) και οι μετακινήσεις καθορίζονται και από τα χαρακτηριστικά των πασσάλων (μήκος και διάμετρος) που επιδρούν στη δυσκαμψία του.

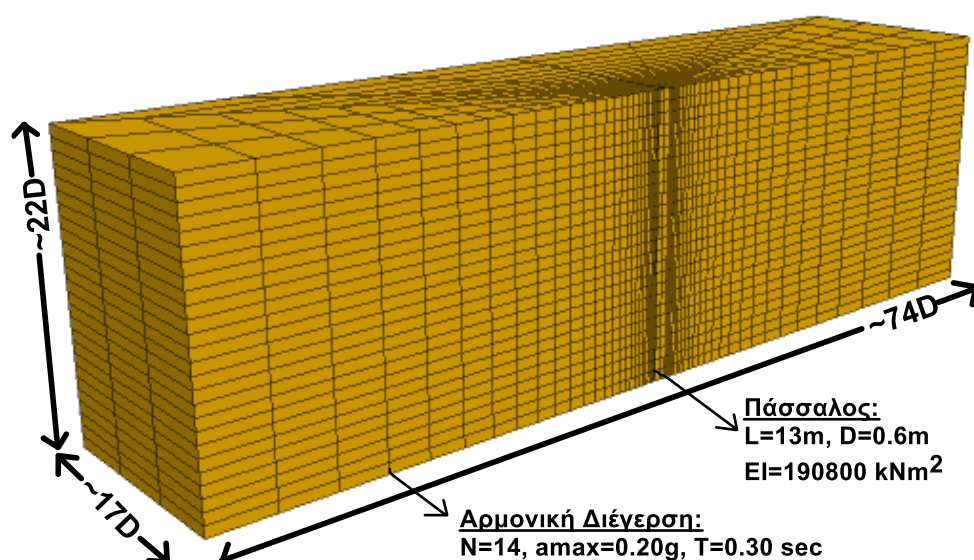
Η ουσιαστική διαφορά στα παραπάνω εδαφικά προφίλ προκύπτει από την ύπαρξη διαφορετικών μηχανισμών αλληλεπίδρασης που επηρεάζουν με τη σειρά τους, την απόκριση του πασσάλου. Ιδιαίτερα στην περίπτωση της εδαφικής κρούστας, οι μηχανισμοί δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως, προσθέτοντας περισσότερες αβεβαιότητες στο υπάρχον πρόβλημα. Για τη διερεύνηση λοιπόν, αυτών των μηχανισμών, χρησιμοποιείται η αριθμητική μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, μέσα από μια σειρά παραμετρικών αναλύσεων οι οποίες παρατίθενται λεπτομερώς στη συνέχεια.

4.2 Παραμετρικές Αναλύσεις

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, κυρίαρχοι παράγοντες που διέπουν την αλληλεπίδραση μεταξύ πασσάλου και εδάφους στην περίπτωση της μη-ρευστοποιήσιμης εδαφικής κρούστας είναι οι ιδιότητες της (αντοχή και διαπερατότητα) καθώς και τα χαρακτηριστικά του πασσάλου (διάμετρος και μήκος). Βάσει αυτών πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις με τους εξής άξονες:

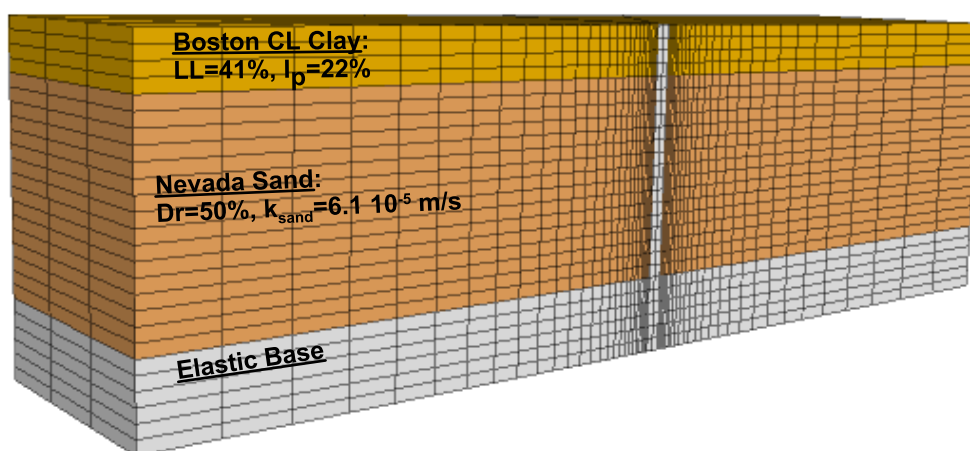
- Επίδραση της αντοχής της κρούστας
- Επίδραση της ροπής της αδράνειας του πασσάλου
- Επίδραση του μήκους του πασσάλου

Για τις αναλύσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε η διακριτοποίηση πασσάλου και εδάφους, που φαίνεται στο **Σχήμα 4.1**. Ο κάνναβος έχει μήκος 44m, πλάτος 10m και ύψος 13m. Ο πάσσαλος έχει μήκος 13m, διάμετρο $D=0.60\text{m}$ και καμπτική δυσκαμψία $EI=190800\text{ kNm}^2$ (η δυσκαμψία λαμβάνει αυτή τη τιμή για τις αναλύσεις όπου η ροπή αδράνειας του πασσάλου δεν αλλάζει, όπως θα αναφερθεί και παρακάτω) ενώ στην κεφαλή του δεν έχει επιβληθεί κανένας κινηματικός περιορισμός. Στη βάση του μοντέλου επιβάλλεται αρμονική διέγερση περιόδου $T=0.30\text{sec}$ και $N=14$ κύκλων με πλάτος ταλάντωσης αντίστοιχο προς $a_{\max}=0.20\text{g}$, όπως φαίνεται και στο σχήμα.



Σχήμα 4.1: Διακριτοποιημένος κάνναβος των παραμετρικών αναλύσεων και τιμές βασικών παραμέτρων.

Στο **Σχήμα 4.2** παρουσιάζεται η στρωματογραφία του αριθμητικού προσομοιώματος που υιοθετήθηκε για τις παραμετρικές αναλύσεις. Το εδαφικό προφίλ απαρτίζεται από μία αργλική κρούστα Boston clay (CL) πάχους 2m και ρευστοποιήσιμη Άμμο Nevada σχετικής πυκνότητας $Dr=50\%$ και πάχους 8m. Τα τελευταία 3m τα οποία εξασφαλίζουν κινηματικά την αιχμή του πάσσαλου έναντι στροφής και μετακίνησης αποτελούνται από μια αδιαπέρατη, αργλική βάση που παραμένει ελαστική κατά τη διάρκεια της διέγερσης.



Σχήμα 4.2: Στρωματογραφία αριθμητικού προσομοιώματος (με λευκό χρώμα απεικονίζονται η ελαστική βάση και ο πάσσαλος).

Η άργιλος Boston clay (CL) έχει όριο υδαρότητας $LL=41\%$ και δείκτη πλαστιμότητας $I_p=22\%$, όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 4.1**. Το μέτρο ελαστικότητας υπό αστράγγιστες συνθήκες για την άργιλο (E_u), εκτιμήθηκε από το **Σχήμα 4.3**, ως ο μέσος όρος για δύο τιμές του λόγου της διατμητικής τάσης (τ_h) προς την αντοχή c_u , για την καμπύλη που αντιστοιχεί στην άργιλο Boston CL clay (καμπύλη 2). Για τιμές του OCR μεγαλύτερες από δέκα ($OCR>10$), θεωρήθηκε ότι η αντιστοιχη καμπύλη διατηρείται σταθερή.

Ο λόγος OCR προκύπτει από την εξίσωση (4.1) συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής (c_u):

$$OCR = \left(\frac{c_u}{0.20 \cdot \sigma'_{vo}} \right)^{1.25} \quad (4.1)$$

και σ'_{vo} η κατακόρυφη ενεργός τάση (απλοποιητικά) στο μέσον του στρώματος.

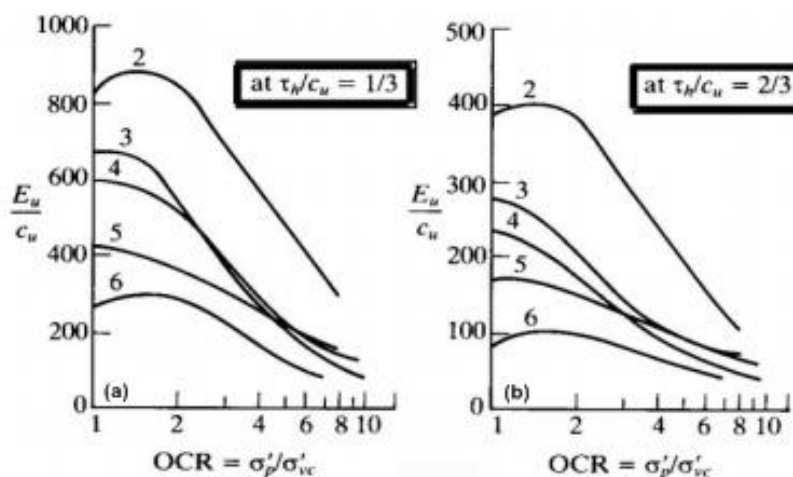
No.	Description	c_u/σ'_{vc}
1 ⁽¹⁾	Portsmouth sensitive CL clay $S_f \geq 10, LL = 35, I_p = 15$	0.20
2 ⁽¹⁾	Boston CL clay $LL = 41, I_p = 22$	0.20
3 ⁽¹⁾	Bangkok CH clay $LL = 65, I_p = 41$	0.27
4 ⁽¹⁾	Maine organic CH - OH clay $LL = 65, I_p = 38$	0.285
5 ⁽²⁾	AGS CH clay $LL = 71, I_p = 40$	0.255
6 ⁽¹⁾	Atchafalaya CH clay $LL = 95, I_p = 75$	0.24
7 ⁽³⁾	Taylor River peat $w_n = 500\%$	0.46

(1) From Ladd and Edgers (1972)

(2) MIT for Dames and Moore

(3) MIT for Haley and Aldrich

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά κανονικά στερεοποιημένων αργίλων. Στο No. 2 παραθέτονται τα χαρακτηριστικά της αργίλου Boston CL clay που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις.



Σχήμα 4.3: Τιμές του λόγου E_u/c_u σε υπερ-στερεοποιημένες αργίλους για τιμές της διατμητικής τάσης (τ_h), (a) $\tau_h=0.33c_u$ και (b) $\tau_h=0.67c_u$. Η καμπύλη 2 αποτυπώνει τη μεταβολή του λόγου E_u/c_u συναρτήσει του OCR για την άργιλο Boston CL clay.

Παρακάτω αναλύονται περισσότερο οι παραμετρικές αναλύσεις για καθεμία από τις τρεις κατηγορίες και παρατίθενται κάποια τυπικά αποτελέσματα, πριν αξιολογηθεί

πλήρως η επίδραση τους στην απόκριση του πασσάλου, συγκρίνοντας τη με την περίπτωση όπου η εδαφική κρούστα απουσιάζει.

4.3 Τυπικά Αποτελέσματα: Επίδραση αντοχής & διαπερατότητας κρούστας

Για την περίπτωση της επίδρασης στην απόκριση του πασσάλου, των εδαφικών χαρακτηριστικών της αργλικής κρούστας πραγματοποιήθηκαν εννέα παραμετρικές αναλύσεις με διαφορετική αστράγγιστη διατμητική αντοχή. Σκοπός των αναλύσεων ήταν να αποτυπωθεί πλήρως αυτή η επίδραση κατά τη μετάβαση από μία πιο μαλακή σε μία πιο σφιχρή άργιλο συναρτήσει του λόγου προστερεοποίησης (OCR).

Στον Πίνακα 4.2 απεικονίζονται οι διάφορες τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής (c_u), ο λόγος OCR και το μέτρο Ελαστικότητας σε αστράγγιστες συνθήκες (E_u).

α/α	c_u (kPa)	OCR	E_u (MPa)	D_{out} (m)	EI (kNm ²)	H_{crust} (m)	H_{sand} (m)	L_{free} (m)	k_{crust} (m/s)	k_{sand} (m/s)
1	3.5	1	2.19	0.60	190800	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
2	7	3	2.63	0.60	190800	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
3	15	7-8	3.08	0.60	190800	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
4	25	15	5.13	0.60	190800	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
5	40	25	8.20	0.60	190800	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
6	60	42	12.3	0.60	190800	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
7	80	61	16.4	0.60	190800	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
8	100	80	20.5	0.60	190800	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
9	140	122	28.7	0.60	190800	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
10	3.5	1	2.19	0.60	190800	2	8	10	6.10E-05	6.10E-05
11	7	3	2.63	0.60	190800	2	8	10	6.10E-05	6.10E-05
12	15	7-8	3.08	0.60	190800	2	8	10	6.10E-05	6.10E-05
13	25	15	5.13	0.60	190800	2	8	10	6.10E-05	6.10E-05
14	40	25	8.20	0.60	190800	2	8	10	6.10E-05	6.10E-05
15	60	42	12.3	0.60	190800	2	8	10	6.10E-05	6.10E-05

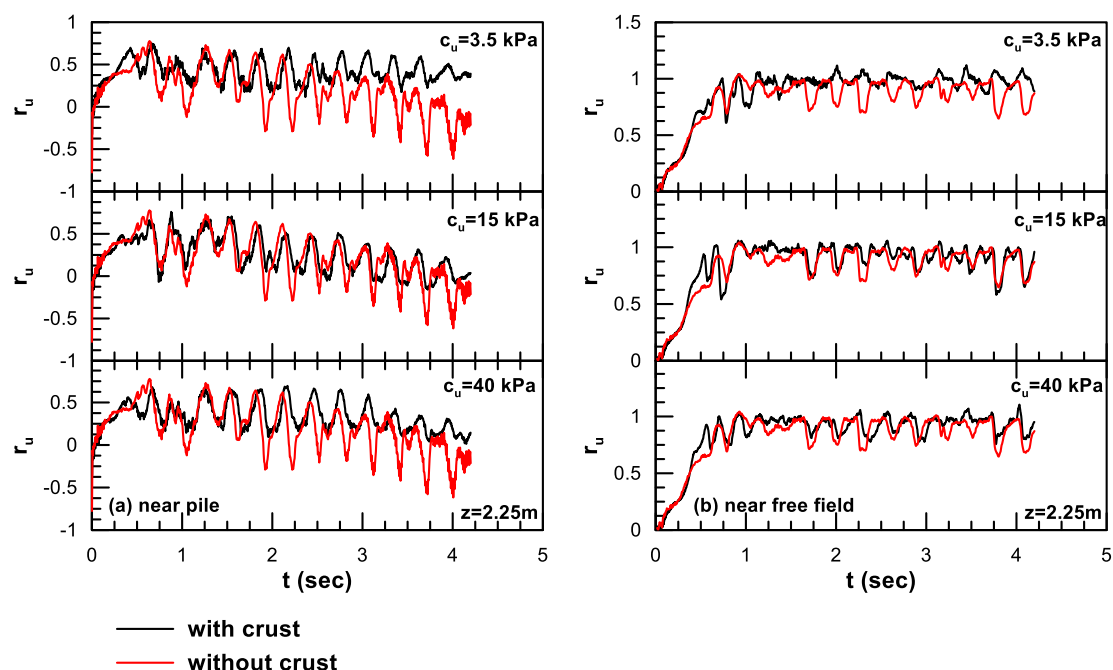
Πίνακας 4.2: Εδαφικές ιδιότητες της αργλικής κρούστας που χρησιμοποιήθηκαν στις παραμετρικές αναλύσεις.

Οι αναλύσεις για διατμητική αντοχή $c_u=60$ kPa έως και $c_u=140$ kPa ίσως δεν αποτελούν ρεαλιστικές τιμές για διατμητική αντοχή επιφανειακής κρούστας πάχους δύο μέτρων. Παρόλο αυτά, βοήθησε στην κατανόηση και την ερμηνεία των διαφόρων μηχανισμών που διέπουν την αλληλεπίδραση εδάφους και πασσάλου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον πέρα από την διερεύνηση της αντοχής της κρούστας, παρουσιάζει και η επιρροή της διαπερατότητας καθώς και πώς η μετάβαση από αδιαπερατή σε διαπερατή κρούστα αλλάζει τελικά την απόκριση του πασσάλου.

Έτσι, οι έξι πρώτες αναλύσεις του Πίνακα 4.1 πραγματοποιήθηκαν για δύο διαφορετικές διαπερατότητες:

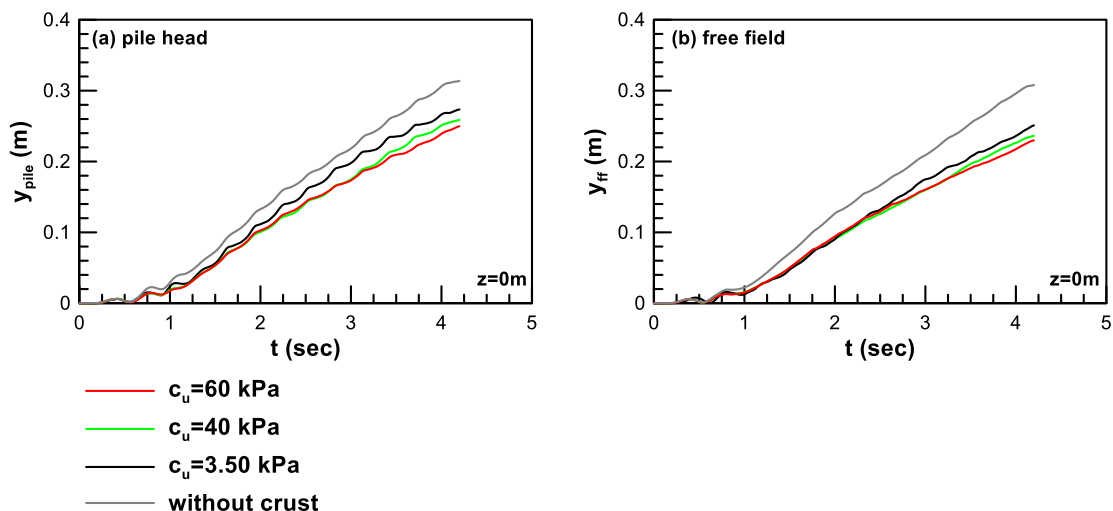
- $k_{crust}=10^{-8}$ m/s, που υποδηλώνει ότι η κρούστα είναι αδιαπέρατη.
- $k_{crust}=k_{sand}=6.1 \cdot 10^{-5}$ m/s, που υποδηλώνει ότι η κρούστα είναι αρκετά διαπερατή παραπέμποντας σε ρηγματωμένες αργιλικές κρούστες (fissured clays).

Από τις αναλύσεις για **αδιαπέρατη αργιλική κρούστα** και μετά από επεξεργασία των αποτελεσμάτων, ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι χρονοϊστορίες του λόγου r_u . Για τρεις διαφορετικές αντοχές c_u , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.4, παρατηρείται ότι σε αντίθεση με την περίπτωση που το έδαφος αποτελείται μόνο από άμμο και στο άνω μέρος του πάσσαλου κυριαρχεί η διαστολική συμπεριφορά με την ανάπτυξη αρνητικών πιέσεων πόρων και αντίστοιχα λόγων r_u μικρότερων του μηδενός, τώρα αναπτύσσονται θετικές (υπερ)πιέσεις πόρων. Στο ελεύθερο πεδίο είναι λογικό οι πιέσεις πόρων (που είναι θετικές) για την περίπτωση του εδάφους μόνο από άμμο και του εδάφους με επιφανειακή κρούστα να έχουν παραπλήσιες τιμές, γεγονός που επαληθεύεται και από το σχήμα.



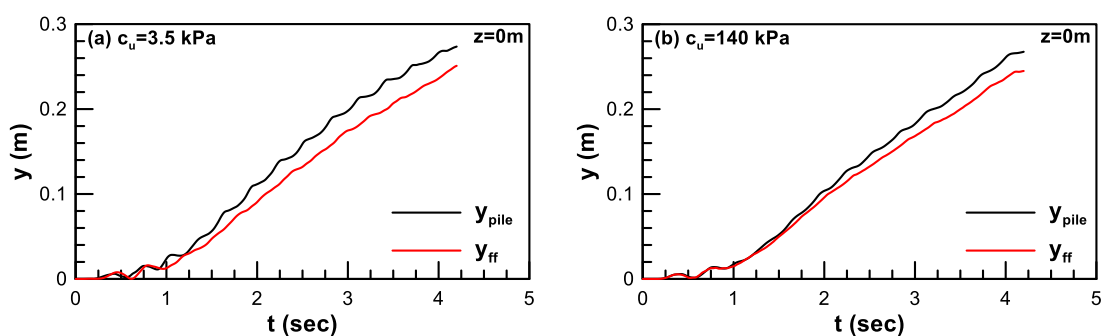
Σχήμα 4.4: Χρονοϊστορίες του λόγου r_u για τρεις αναλύσεις αδιαπέρατης κρούστας σε βάθος $z=2.25$ m από την επιφάνεια του εδάφους, (a) κοντά στο πάσσαλο και (b) στο ελεύθερο πεδίο.

Συγκρίνοντας τις χρονοϊστορίες της μετακίνησης της κεφαλής του πασσάλου παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η αντοχή του επιφανειακού μη-ρευστοποιήσιμου στρώματος [Σχήμα 4.5(a)], η μετατόπιση της κεφαλής του πασσάλου μειώνεται. Το ίδιο φαινόμενο μπορεί να παρατηρηθεί και για τις μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.5(b).



Σχήμα 4.5: Χρονοϊστορίες μετατοπίσεων για την (a) κεφαλή του πασσάλου και (b) για το ελεύθερο πεδίο στο ίδιο βάθος.

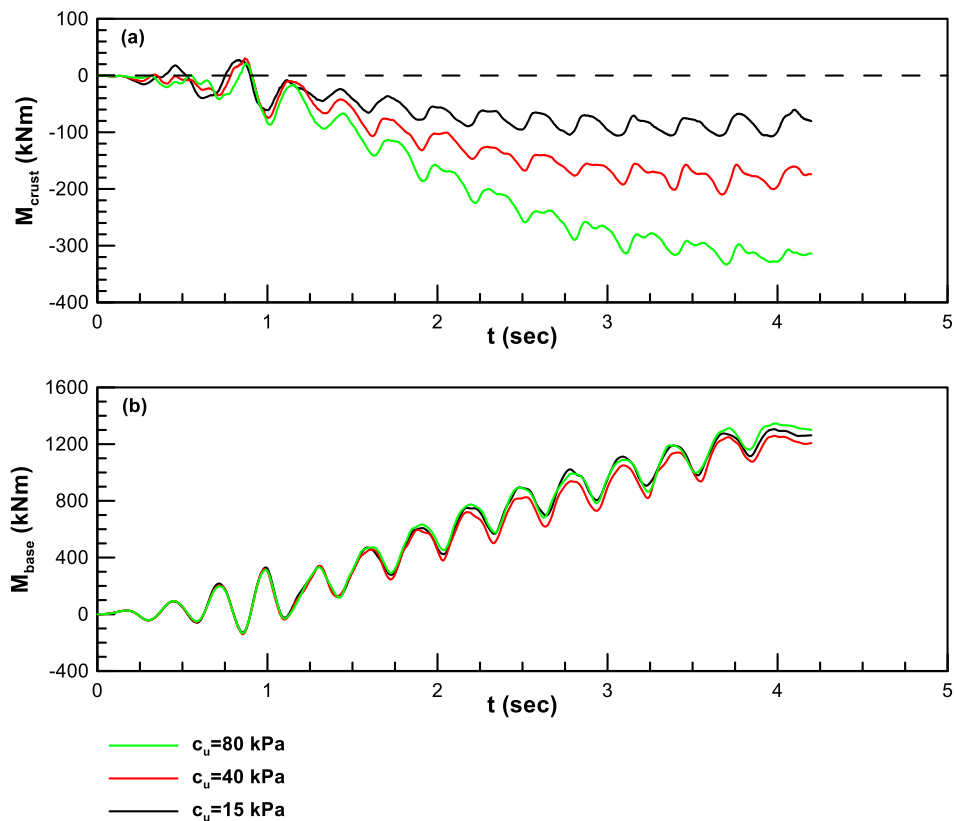
Στο Σχήμα 4.6, συγκρίνονται οι χρονοϊστορίες μετατοπίσεων για την πιο μαλακή αργιλική κρούστα και τη πιο σιφρή. Και στις δύο περιπτώσεις, η μετακίνηση της κεφαλής του πασσάλου υπερβαίνει τη μετακίνηση του ελεύθερου πεδίου.



Σχήμα 4.6: Χρονοϊστορίες μετατοπίσεων στο ίδιο βάθος, για (a) αστράγγιστη διατμητική αντοχή κρούστας $c_u=3.5$ kPa και (b) αστράγγιστη διατμητική αντοχή κρούστας $c_u=140$ kPa.

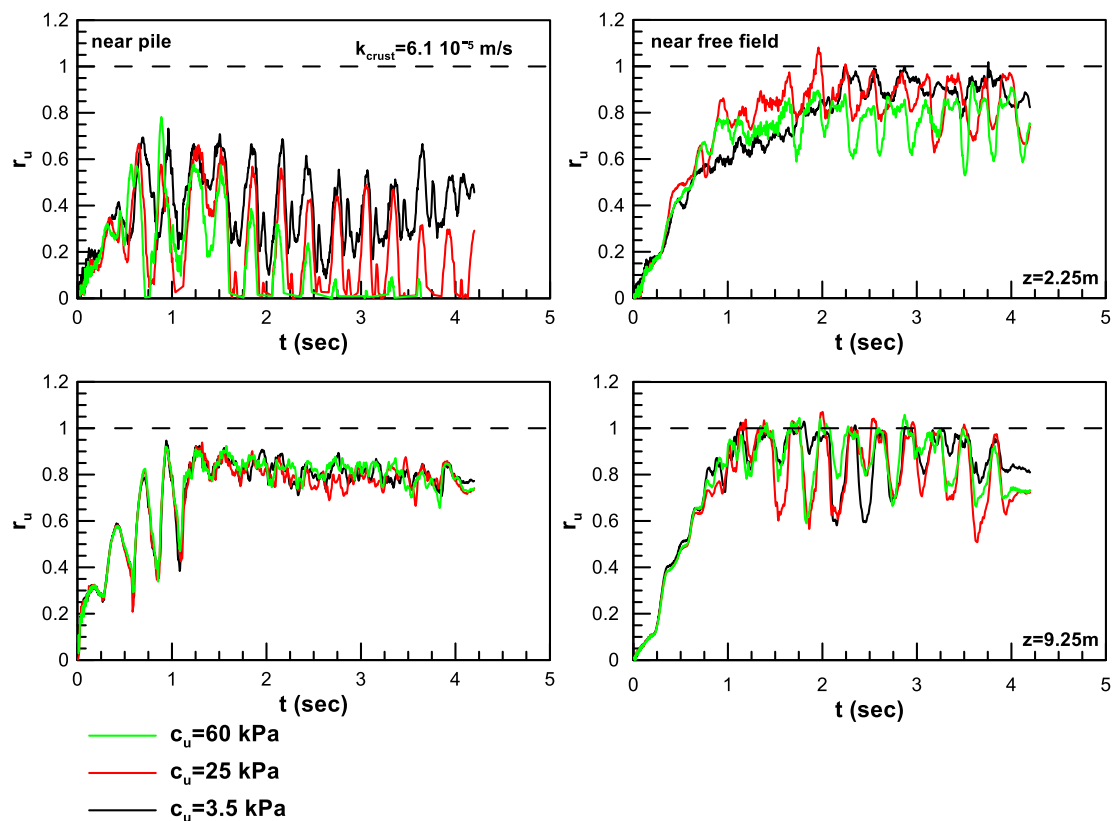
Από τη κατανομή των ροπών συναρτήσει του χρόνου, στο Σχήμα 4.7(a), φαίνεται η εξάρτηση του μεγέθους της ροπής στη διεπιφάνεια μεταξύ της αργιλικής κρούστας

και της άμμου από την αντοχή της κρούστας. Αντίθετα, οι ροπές που αναπτύσσονται στη βάση (όπου η βάση είναι στο τέλος της άμμου και εκεί θεωρείται ο πάσσαλος πακτωμένος), δεν παρουσιάζουν αυτή την εξάρτηση και εμφανίζουν παραπλήσιες τιμές[**Σχήμα 4.7(b)**].



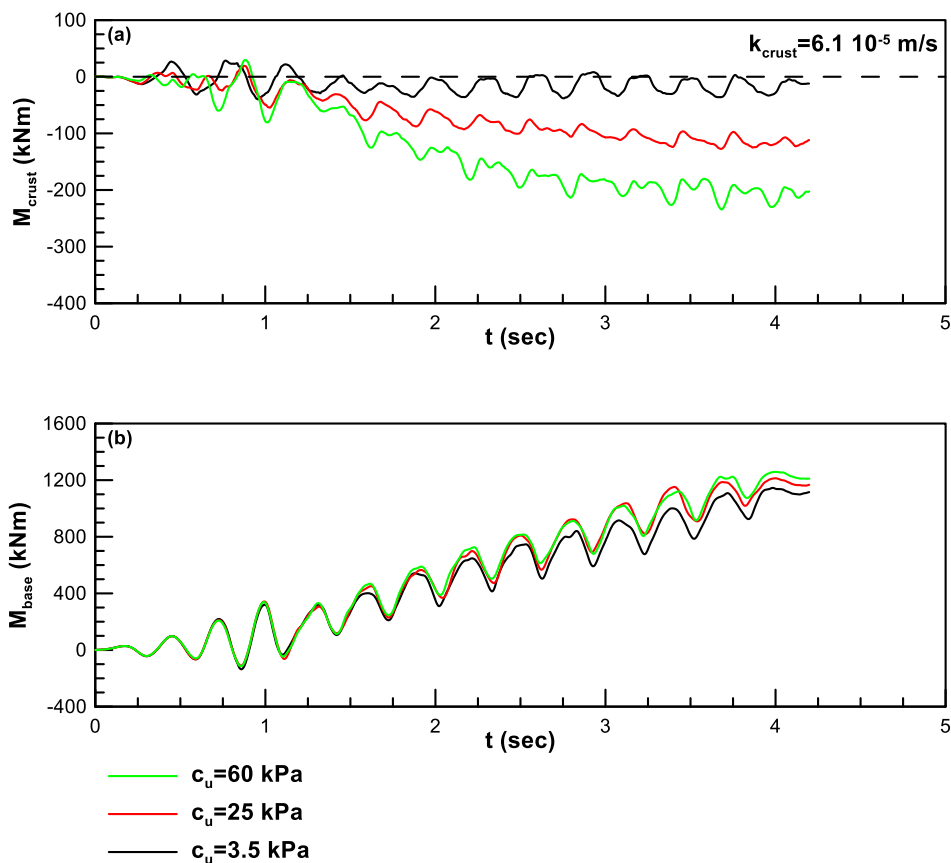
Σχήμα 4.7: Χρονοϊστορίες για (a) ροπή M_{crust} στη διεπιφάνεια αργλικής κρούστας και άμμου και (b) ροπή M_{base} στο τέλος της άμμου.

Από τις διάφορες αναλύσεις για τις **διαπερατές κρούστες**, μια πρώτη παρατήρηση είναι η μείωση του λόγου r_u με την αύξηση της αντοχής της κρούστας κοντά στον πάσσαλο στα μικρά βάθη, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4.8**. Αντίθετα, στα μεγάλα βάθη οι πιέσεις πόρων και κατά συνέπεια και ο λόγος r_u , είναι ανεπηρέαστες από την αντοχή της κρούστας. Στο ελεύθερο πεδίο, ανεξαρτήτου βάθους και διαπερατότητας, ο λόγος r_u για διάφορες τιμές της αντοχής παρουσιάζει μικρές αποκλίσεις.

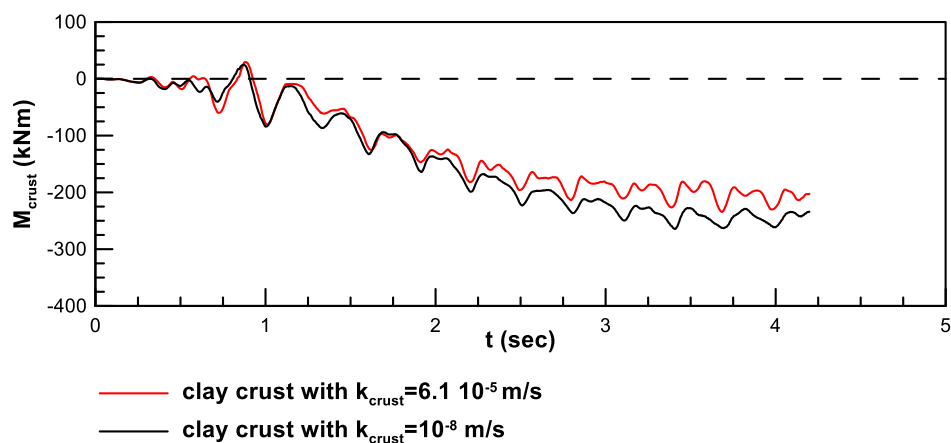


Σχήμα 4.8: Χρονοϊστορίες του λόγου r_u για τρεις αναλύσεις διαπερατής κρούστας σε βάθος $z=2.25\text{m}$ και $z=9.25\text{m}$, κοντά στον πάσσαλο και στο ελεύθερο πεδίο.

Παρόμοιες παρατηρήσεις με τη περίπτωση της αδιαπερατής κρούστας μπορούν να γίνουν και στην περίπτωση της διαπερατής, για την εξέλιξη των ροπών στη διεπιφάνεια κρούστας και άμμου και στο τέλος της άμμου (ροπή κρούστας). Στο **Σχήμα 4.9(a)** φαίνεται πως η εξέλιξη των ροπών εξαρτάται από την αντοχή της κρούστας, με τη μεγαλύτερη ροπή να αναπτύσσεται στην πιο στιφρή. Η ροπή στο τέλος της άμμου (ροπή βάσης), αντιθέτως όπως και στην περίπτωση της μη-διαπερατής κρούστας δεν εμφανίζει αυτή την εξάρτηση. Επίσης, αν συγκριθούν οι ροπές στη βάση της κρούστας, προκύπτει ότι η μη-διαπερατή κρούστα επιβαρύνει τον πάσσαλο με μεγαλύτερη ροπή, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4.10**, όπου συγκρίνονται οι αντίστοιχες ροπές για τις δύο διαπερατότητες με αντοχή $c_u=60\text{ kPa}$.



Σχήμα 4.9: Χρονοϊστορίες των αναλύσεων με διαπερατή κρούστα, για (α) ροπή M_{crust} στη διεπιφάνεια αργιλικής κρούστας και άμμου και (β) ροπή M_{base} στο τέλος της άμμου.



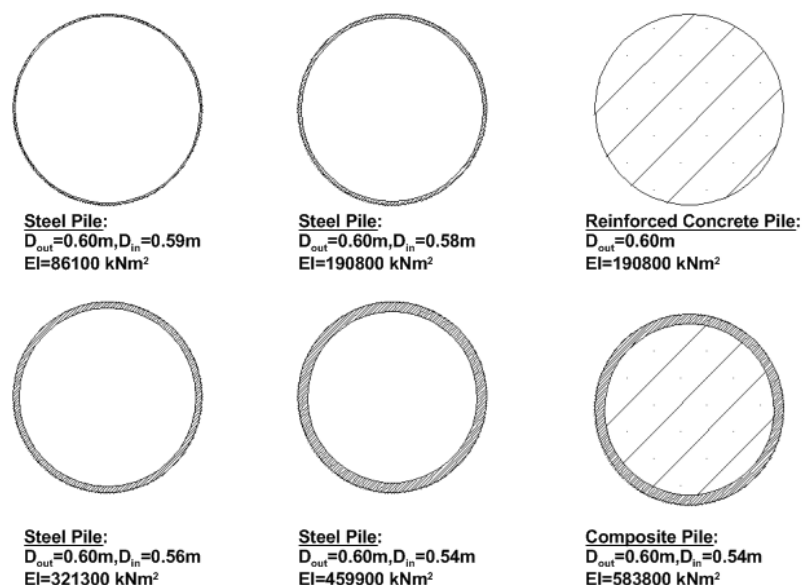
Σχήμα 4.10: Χρονοϊστορίες ρομών στη βάση της κρούστας για τις διαφορετικές διαπερατότητες.

4.4 Τυπικά Αποτελέσματα: Επίδραση ροπής αδράνειας στη δυσκαμψία του πασσάλου

Στις παραμετρικές αναλύσεις που εξετάζουν την επίδραση της αντοχής της κρούστας και την επίδραση του μήκους του πασσάλου η καμπτική δυσκαμψία του πασσάλου είναι $EI=190800 \text{ kNm}^2$. Αντιστοιχεί είτε σε πάσσαλο έγχυτο από οπλισμένο σκυρόδεμα διαμέτρου $D=0.6\text{m}$ είτε σε χαλύβδινο, κοίλο εμπηγνυόμενο πάσσαλο εξωτερικής διαμέτρου $D=0.6\text{m}$ και εσωτερικής διαμέτρου $D=0.58\text{m}$. Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η επίδραση της δυσκαμψίας του πασσάλου, με στόχο τη διερεύνηση της επιρροής της κρούστας στην απόκριση του πασσάλου κατά τη μετάβαση από ένα πιο εύκαμπτο σε ένα εντελώς δύσκαμπτο πάσσαλο. Έτσι πραγματοποιήθηκαν οι εξής αναλύσεις:

- Χαλύβδινος κοίλος πάσσαλος εξωτερικής διαμέτρου $D=0.6\text{m}$, εσωτερικής διαμέτρου $D=0.59\text{m}$ και δυσκαμψίας $EI=86100 \text{ kNm}^2$.
- Χαλύβδινος κοίλος πάσσαλος εξωτερικής διαμέτρου $D=0.6\text{m}$, εσωτερικής διαμέτρου $D=0.58\text{m}$ και δυσκαμψίας $EI=190800 \text{ kNm}^2$.
- Χαλύβδινος κοίλος πάσσαλος εξωτερικής διαμέτρου $D=0.6\text{m}$, εσωτερικής διαμέτρου $D=0.56\text{m}$ και δυσκαμψίας $EI=321300 \text{ kNm}^2$.
- Χαλύβδινος κοίλος πάσσαλος εξωτερικής διαμέτρου $D=0.6\text{m}$, εσωτερικής διαμέτρου $D=0.54\text{m}$ και δυσκαμψίας $EI=459900 \text{ kNm}^2$.
- Σύμμικτος πάσσαλος. Το χαλύβδινο μέρος έχει τις διαστάσεις του προηγούμενου πασσάλου και η κοιλότητα διαμέτρου $D=0.54\text{m}$ έχει πληρωθεί με οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Πάσσαλος με δυσκαμψία $EI=1005670 \text{ kNm}^2$, χωρίς να υπάγεται σε κάποιο τύπο πασσάλου.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι διατομές των διαφόρων τύπων που χρησιμοποιήθηκαν στις παραμετρικές αναλύσεις της ενότητας. Στον Πίνακα 4.3 καταγράφονται πλήρως τα στοιχεία των αναλύσεων για τις δύο διαφορετικές αντοχές κρούστας. Οι ανωτέρω αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για δύο διαφορετικές αντοχές ($c_u=15 \text{ kPa}$ & $c_u=40 \text{ kPa}$) μη-διαπερατής κρούστας.



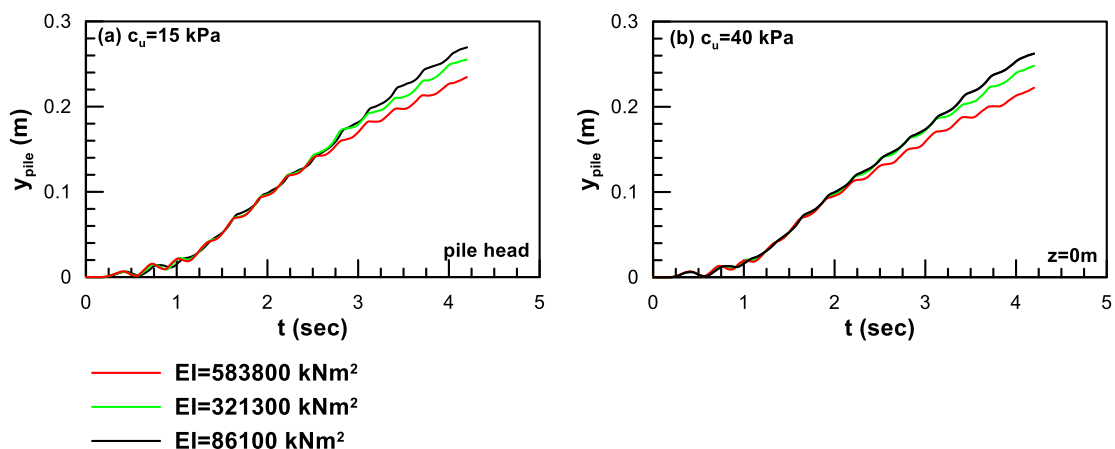
Σχήμα 4.11: Διατομές των πασσάλων που χρησιμοποιήθηκαν στις παραμετρικές αναλύσεις.

α/α	c_u (kPa)	D_{out} (m)	EI (kNm ²)	H_{crust} (m)	H_{sand} (m)	L_{free} (m)	k_{crust} (m/s)	k_{sand} (m/s)
1	15	0.60	12750	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
2	15	0.60	86100	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
3	15	0.60	110000	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
4	15	0.60	150000	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
5	15	0.60	190800	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
6	15	0.60	321300	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
7	15	0.60	459900	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
8	15	0.60	583800	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
9	15	0.60	1005670	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
10	40	0.60	86100	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
11	40	0.60	190800	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
12	40	0.60	321300	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
13	40	0.60	459900	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
14	40	0.60	583800	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
15	40	0.60	1005670	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05

Πίνακας 4.3: Στοιχεία των παραμετρικών αναλύσεων.

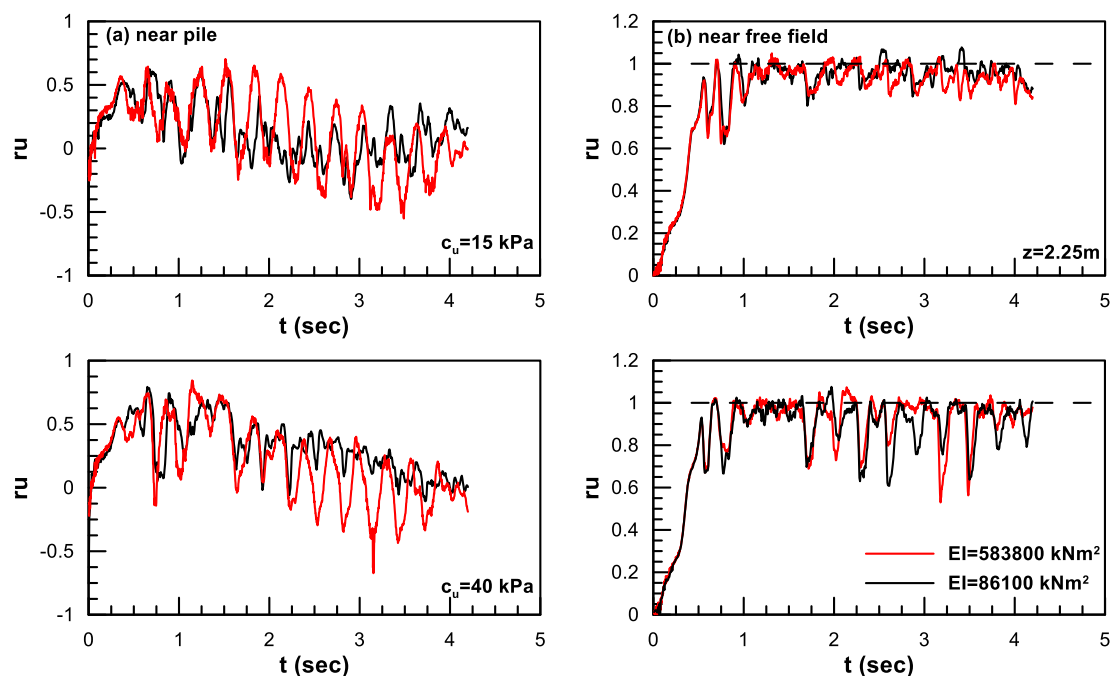
Για την κρούστα με αστράγγιστη διατμητική αντοχή $c_u=15$ kPa πραγματοποιήθηκαν τρεις επιπλέον αναλύσεις με δυσκαμψίες που υπάρχουν στον παραπάνω πίνακα (α/α 1,3,6) και δεν αντιπροσωπεύουν κάποιο συγκεκριμένο τύπο πασσάλου.

Στο Σχήμα 4.12 φαίνεται η χρονοϊστορία της μετακίνησης της κεφαλής του πασσάλου για τις δύο διαφορετικές κρούστες. Χαρακτηριστικό και των δύο είναι η μείωση της μετακίνησης με την αύξηση της καμπτικής δυσκαμψίας.



Σχήμα 4.12: Χρονοϊστορίες μετατοπίσεων της κεφαλής του πασσάλου για (a) $c_u = 15$ kPa και (b) $c_u = 40$ kPa.

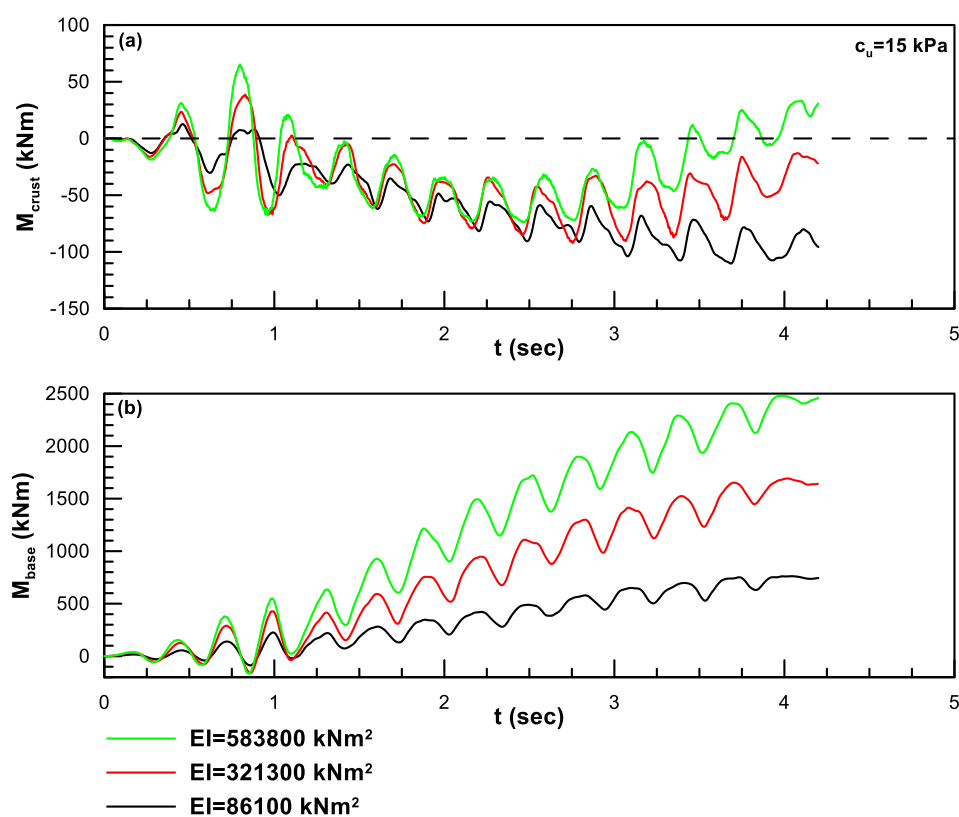
Από τις χρονοϊστορίες του λόγου r_u και για τις δύο κρούστες παρατηρείται μικρή μείωση του r_u στο άνω μέρος του πασσάλου καθώς ο πάσσαλος γίνεται πιο δύσκαμπτος, όπως φαίνεται και Σχήμα 4.13(a).



Σχήμα 4.13: Χρονοϊστορίες του λόγου r_u σε βάθος $z = 2.25$ m από την επιφάνεια του εδάφους, (a) κοντά στον πάσσαλο και (b) στο ελεύθερο πεδίο.

Αντίθετα, στο ελεύθερο πεδίο στο ίδιο βάθος, ο λόγος r_u δεν εμφανίζει τη παραπάνω συμπεριφορά και αγνοεί την επιρροή της δυσκαμψίας του πάσσαλου [Σχήμα 4.13(b)].

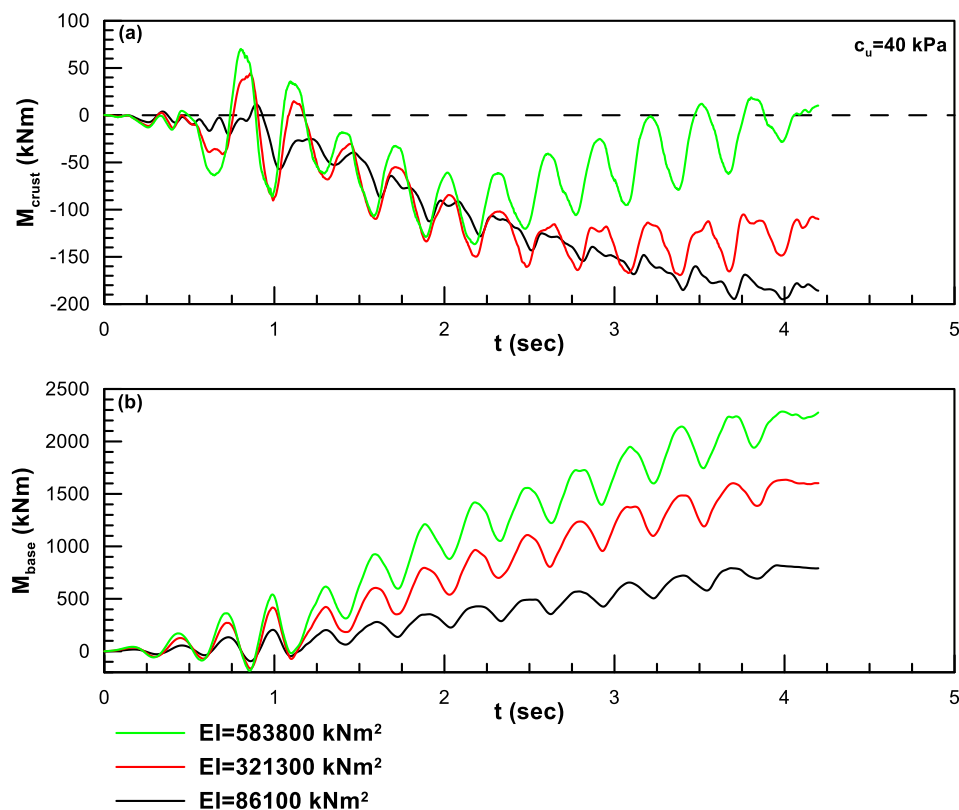
Όσον αφορά τις καμπτικές ροπές, από την χρονοϊστορία της ροπής στη βάση της κρούστας φαίνεται ότι η επίδραση της κρούστας περιορίζεται καθώς ο πάσσαλος αποκτά μεγαλύτερη δυσκαμψία, σύμφωνα με το Σχήμα 4.14(a) για την κρούστα με αντοχή $c_u=15$ kPa. Για τη ροπή στη βάση της άμμου, στο Σχήμα 4.14(b) παρατηρείται ότι αυτή αυξάνεται λόγω της αντίστοιχης αύξησης της δυσκαμψίας και έρχεται σε αντίθεση με τις παρατηρήσεις που έγιναν για την επίδραση της αντοχής της κρούστας στην προηγούμενη ενότητα, όπου η ροπή στη βάση για τις διάφορες αντοχές δεν άλλαζε ιδιαίτερα.



Σχήμα 4.14: Χρονοϊστορίες αναλύσεων μη-διαπερατής κρούστας αντοχής $c_u=15$ kPa, για (a) ροπή M_{crust} στη διεπιφάνεια αργιλικής κρούστας και άμμου και (b) ροπή M_{base} στο τέλος της άμμου.

Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα και για τις αναλύσεις με αντοχή κρούστας $c_u=40$ kPa, που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.15. Μόνη διαφορά με τα προηγούμενα αποτελεί η μεγαλύτερη ροπή στην βάση της κρούστας αφού η κρούστα είναι πιο

ισχυρή. Το επιχείρημα πως η ροπή στη βάση της άμμου δεν επηρεάζεται από την αντοχή της κρούστας ενισχύεται περαιτέρω καθώς στο **Σχήμα 4.15(b)**, φαίνεται ότι οι χρονοϊστορίες των ροπών εκεί είναι ίδιες με τις αντίστοιχες για τη κρούστα με αντοχή $c_u=15$ kPa.



Σχήμα 4.15: Χρονοϊστορίες αναλύσεων μη-διαπερατής κρούστας αντοχής $c_u=40$ kPa, για (a) ροπή M_{crust} στη διεπιφάνεια αργιλικής κρούστας και άμμου και (b) ροπή M_{base} στο τέλος της άμμου.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει για τις δύο διαφορετικές αντοχές κρούστας, η μείωση της ροπής που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια κρούστας και άμμου (bounce back) καθώς κάτι παρόμοιο δεν προκύπτει από τις κατανομές των μετακινήσεων της κεφαλής του πασσάλου. Αυτό οφείλεται στην αστοχία της αργιλικής κρούστας στα κατάντη του πασσάλου με αποτέλεσμα τη μείωση της ροπής ενώ αντιθέτως, στα ανάντη, η κρούστα που δεν έχει αστοχήσει συνεχίζει να πιέζει τον πάσσαλο προς τα κατάντη αυξάνοντας τη μετακίνηση της κεφαλής του.

4.5 Τυπικά Αποτελέσματα: Επίδραση ελεύθερου μήκους πασσάλου

Ως ελεύθερο μήκος πασσάλου ορίζεται το μήκος μέσα στο στρώμα της άμμου και το στρώμα της αργίλου. Τα τελευταία 3m μέσα στο στρώμα της αργλικής βάσης θεωρούνται ότι δημιουργούν συνθήκες πάκτωσης (ίσως όχι πλήρους πάκτωσης) και δε λαμβάνονται στον υπολογισμό του ελεύθερου μήκους.

Σε αντίθεση με την προηγούμενη ενότητα παραμετρικών αναλύσεων όπου μεταβαλλόταν η ροπή αδράνειας του πάσσαλου, η δυσκαμψία του πασσάλου μεταβάλλεται λόγω αλλαγής του μήκους του πασσάλου. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις για δύο διαφορετικές αντοχές μη-διαπερατής κρούστας ($c_u=15$ kPa & $c_u=40$ kPa) και τα εξής μήκη πασσάλων:

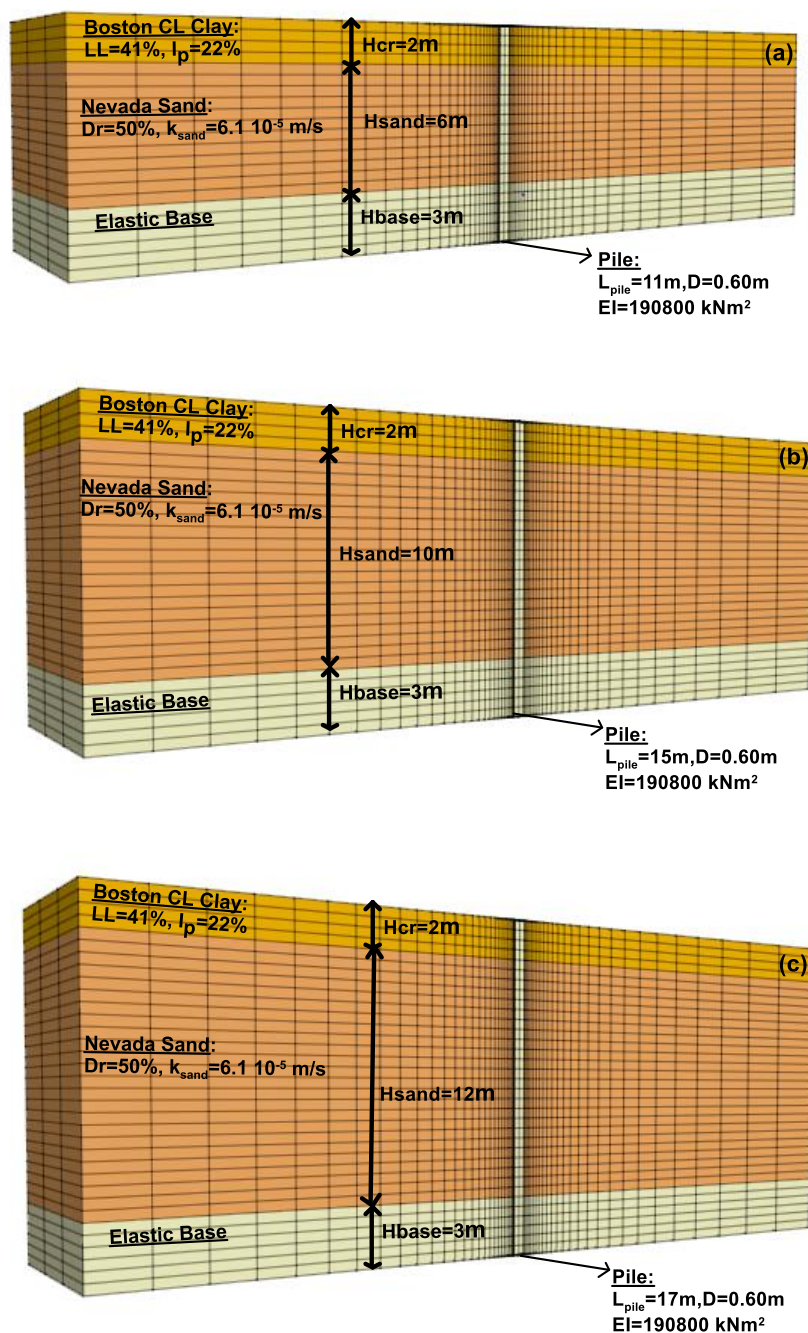
- $L_{free}=8m$, όπου το πάχος της κρούστας είναι 2m ($H_{crust}=2m$) και το πάχος της άμμου είναι 6m ($H_{sand}=6m$).
- $L_{free}=10m$, όπου το πάχος της κρούστας είναι 2m ($H_{crust}=2m$) και το πάχος της άμμου είναι 8m ($H_{sand}=8m$).
- $L_{free}=12m$, όπου το πάχος της κρούστας είναι 2m ($H_{crust}=2m$) και το πάχος της άμμου είναι 10m ($H_{sand}=10m$).
- $L_{free}=14m$, όπου το πάχος της κρούστας είναι 2m ($H_{crust}=2m$) και το πάχος της άμμου είναι 12m ($H_{sand}=12m$).

Για την αργλική κρούστα με αστράγγιστη διατμητική αντοχή $c_u=15$ kPa, πραγματοποιήθηκαν δύο επιπλέον παραμετρικές αναλύσεις στις οποίες μεταβλήθηκε το πάχος της κρούστας ενώ το ελεύθερο μήκος του πασσάλου παρέμεινε σταθερό στα 10m. Δηλαδή:

- $L_{free}=10m$, όπου το πάχος της κρούστας (με αντοχή $c_u=15$ kPa) είναι 3m ($H_{crust}=3m$) και το πάχος της άμμου είναι 7m ($H_{sand}=7m$).
- $L_{free}=10m$, όπου το πάχος της κρούστας (με αντοχή $c_u=15$ kPa) είναι 4m ($H_{crust}=4m$) και το πάχος της άμμου είναι 6m ($H_{sand}=6m$).

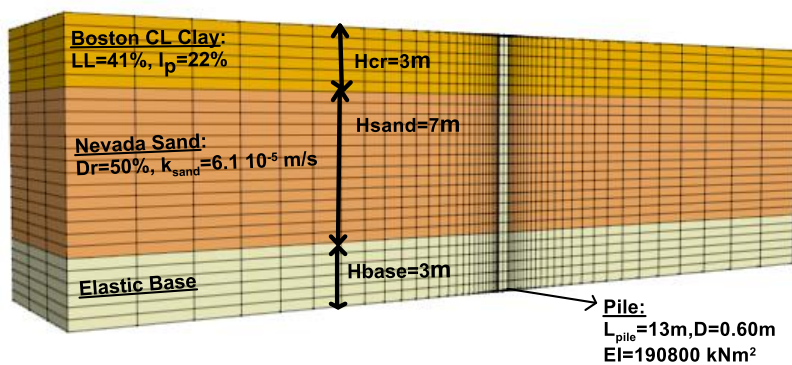
Στις αναλύσεις που αλλάζει το ελεύθερο μήκος του πασσάλου, αλλάζει και η γεωμετρία του προβλήματος. Ο αρχικός διακριτοποιημένος κάρναβος, ο οποίος αντιστοιχεί σε ελεύθερο μήκος πασσάλου $L_{free}=10m$ του Σχήματος 4.2, πρέπει να

επαναπροσδιοριστεί. Στο Σχήμα 4.16(a) παρουσιάζεται το νέο αριθμητικό μοντέλο για $L_{free}=8m$ μαζί με τα βασικά χαρακτηριστικά της στρωματογραφίας και του πασσάλου. Πέρα από το ύψος του καννάβου, καμία άλλη διάσταση δεν έχει μεταβληθεί. Στο Σχήμα 4.16(b) και Σχήμα 4.16(c) φαίνονται οι κάνναβοι για τις αναλύσεις με $L_{free}=12m$ και $L_{free}=14m$ αντίστοιχα.



Σχήμα 4.16: Προσομοιώματα για τις αναλύσεις με διαφορετικό ελεύθερο μήκος πασσάλου.

Στις αναλύσεις όπου αλλάζει το πάχος της κρούστας και το πάχος της άμμου, το αριθμητικό προσομοίωμα δεν απαιτείται να μεταβληθεί και είναι το ίδιο με αυτό του Σχήματος 4.2. Ενδεικτικά στο Σχήμα 4.17, παρουσιάζεται το αριθμητικό προσομοίωμα για την ανάλυση με πάχος αργλικής κρούστας $H_{crust}=3m$ και πάχος άμμου $H_{sand}=7m$.



Σχήμα 4.17: Αριθμητικό Προσομοίωμα για την ανάλυση με πάχος αργλικής κρούστας $H_{crust}=3m$ και πάχος άμμου $H_{sand}=7m$.

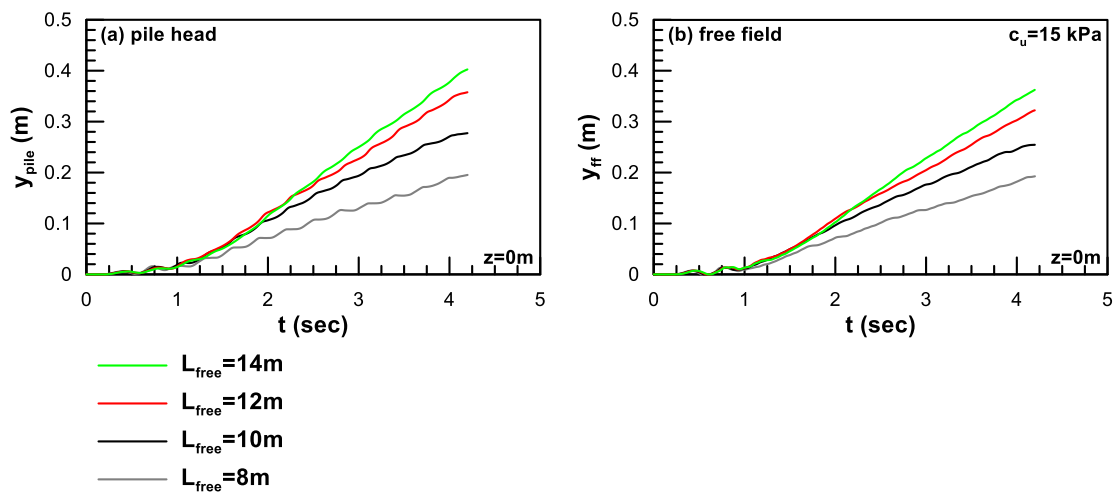
Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται όλες οι παραμετρικές αναλύσεις της ενότητας με τα χαρακτηριστικά τους.

α/α	c_u (kPa)	D_{out} (m)	EI (kNm ²)	H_{crust} (m)	H_{sand} (m)	L_{free} (m)	k_{crust} (m/s)	k_{sand} (m/s)
1	15	0.60	190800	2	6	8	1.00E-08	6.10E-05
2	15	0.60	190800	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
3	15	0.60	190800	2	10	12	1.00E-08	6.10E-05
4	15	0.60	190800	2	12	14	1.00E-08	6.10E-05
5	15	0.60	190800	3	7	10	1.00E-08	6.10E-05
6	15	0.60	190800	4	6	10	1.00E-08	6.10E-05
7	40	0.60	190800	2	6	8	1.00E-08	6.10E-05
8	40	0.60	190800	2	8	10	1.00E-08	6.10E-05
9	40	0.60	190800	2	10	12	1.00E-08	6.10E-05
10	40	0.60	190800	2	12	14	1.00E-08	6.10E-05

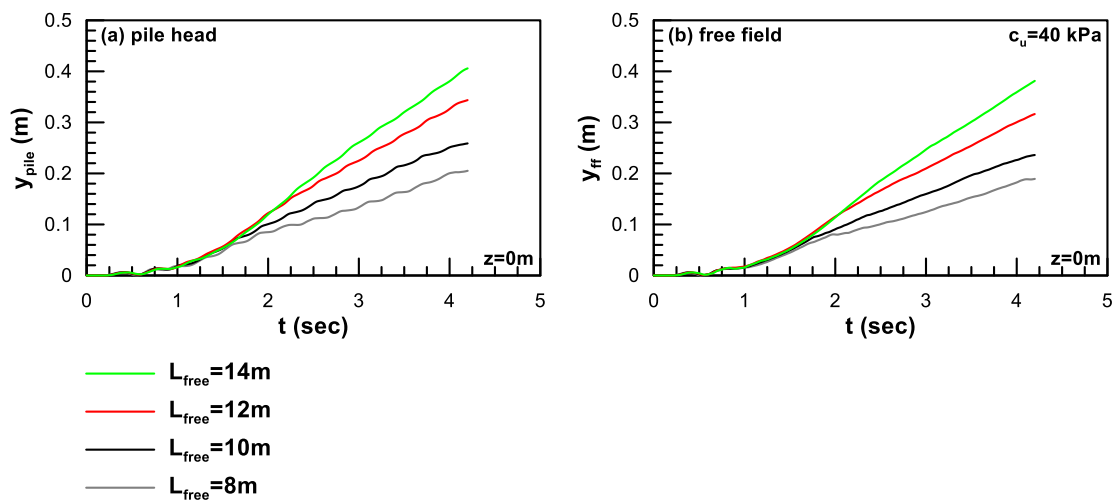
Πίνακας 4.4: Στοιχεία των παραμετρικών αναλύσεων.

Ένα πρώτο αποτέλεσμα των αναλύσεων για την αργλική κρούστα με αντοχή $c_u=15$ kPa είναι η αύξηση της μετακίνησης της κεφαλής του πασσάλου με τη αύξηση του μήκους του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.18(a). Στο Σχήμα 4.18(b) όπου παρουσιάζεται η κατανομή του ελεύθερου πεδίου με το χρόνο, φαίνεται και πάλι η αύξηση των μετακινήσεων στο ελεύθερο πεδίο με την αύξηση του μήκους, πιθανόν

λόγω της μεταβολής του πάχους του στρώματος της άμμου. Οι ίδιες παρατηρήσεις εξάγονται και για την επιφανειακή κρούστα με αντοχή $c_u=40$ kPa, σύμφωνα με το **Σχήμα 4.19**.



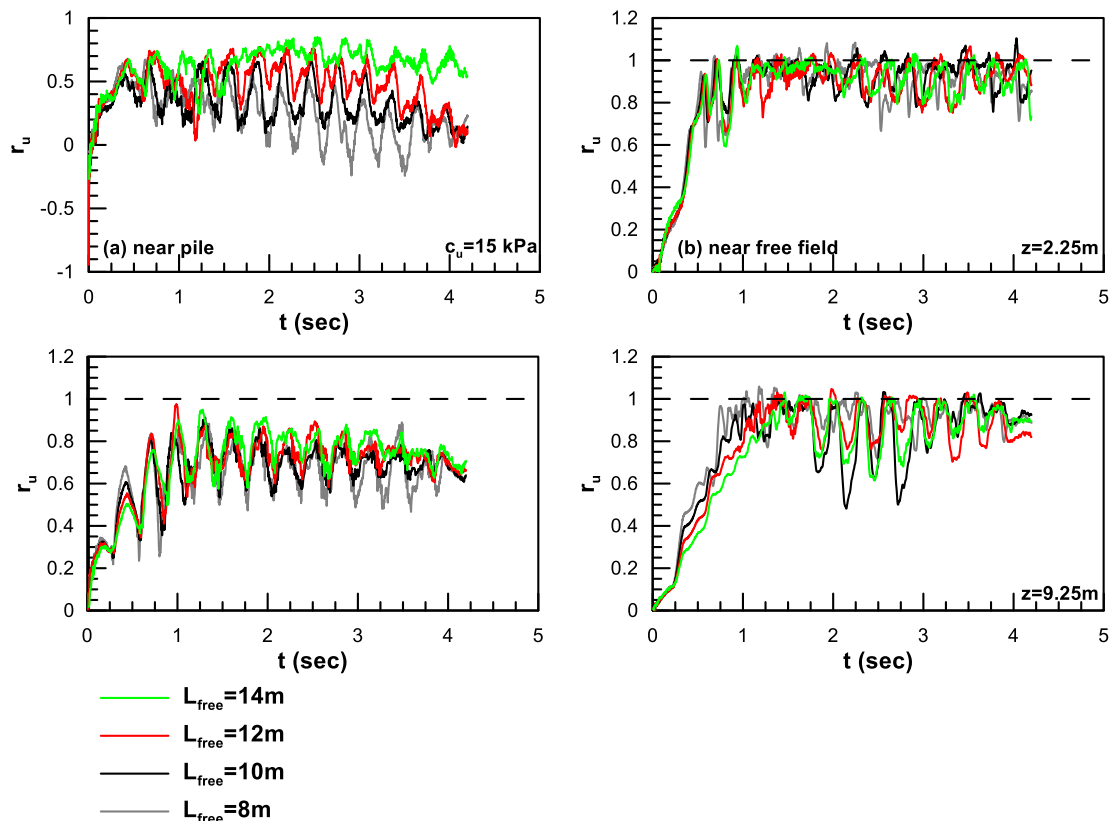
Σχήμα 4.18: Χρονοϊστορίες μετατοπίσεων του εδαφικού προφίλ με επιφανειακή κρούστα αντοχής $c_u=15$ kPa για την (a) κεφαλή του πασσάλου και (b) για το ελεύθερο πεδίο στο ίδιο βάθος.



Σχήμα 4.19: Χρονοϊστορίες μετατοπίσεων του εδαφικού προφίλ με επιφανειακή κρούστα αντοχής $c_u=40$ kPa για την (a) κεφαλή του πασσάλου και (b) για το ελεύθερο πεδίο στο ίδιο βάθος.

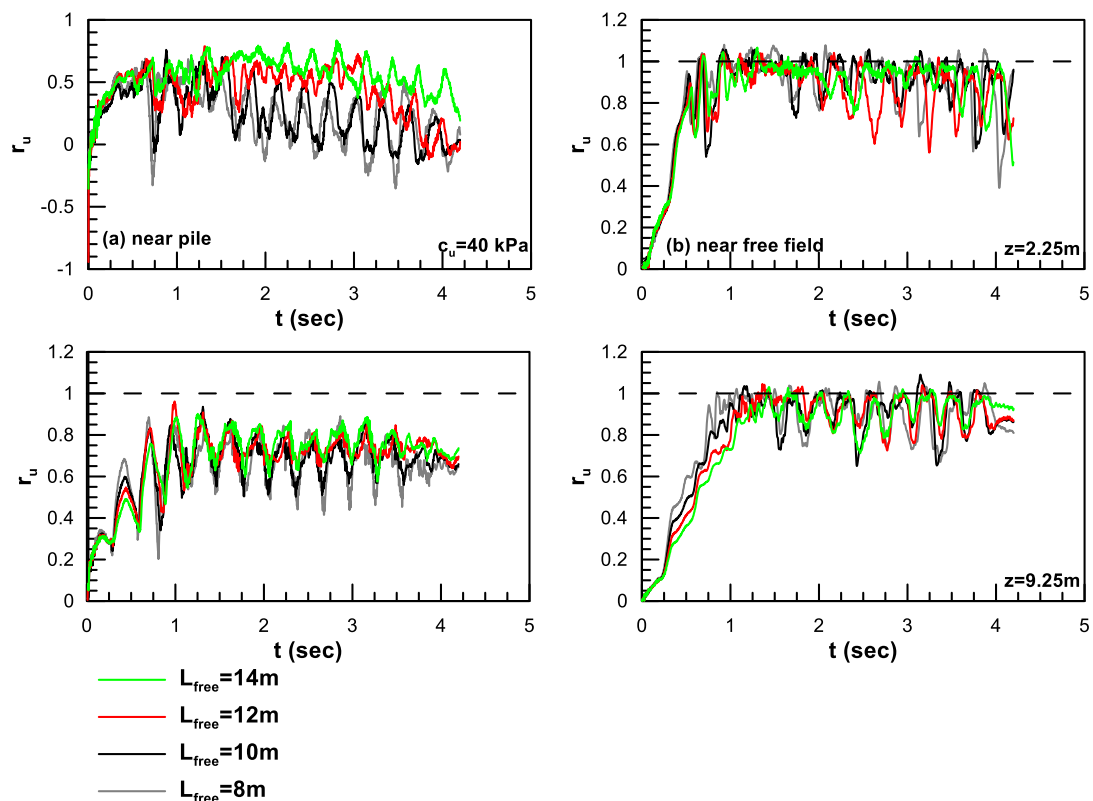
Επίσης, καθώς μεταβάλλεται το μήκος του πασσάλου, υπάρχουν μεταβολές και στο λόγο r_u . Συγκεκριμένα, όσο μεγαλώνει το μήκος, αυξάνεται και το r_u στα μικρά βάθη κοντά στον πάσσαλο, σύμφωνα με το **Σχήμα 4.20(a)**. Στα μεγάλα βάθη, αντιθέτως, ο λόγος δείχνει ανεπηρέαστος από την αλλαγή του μήκους. Παρόμοια είναι και η

συμπεριφορά στο ελεύθερο πεδίο ανεξάρτητα από το βάθος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.20(b).



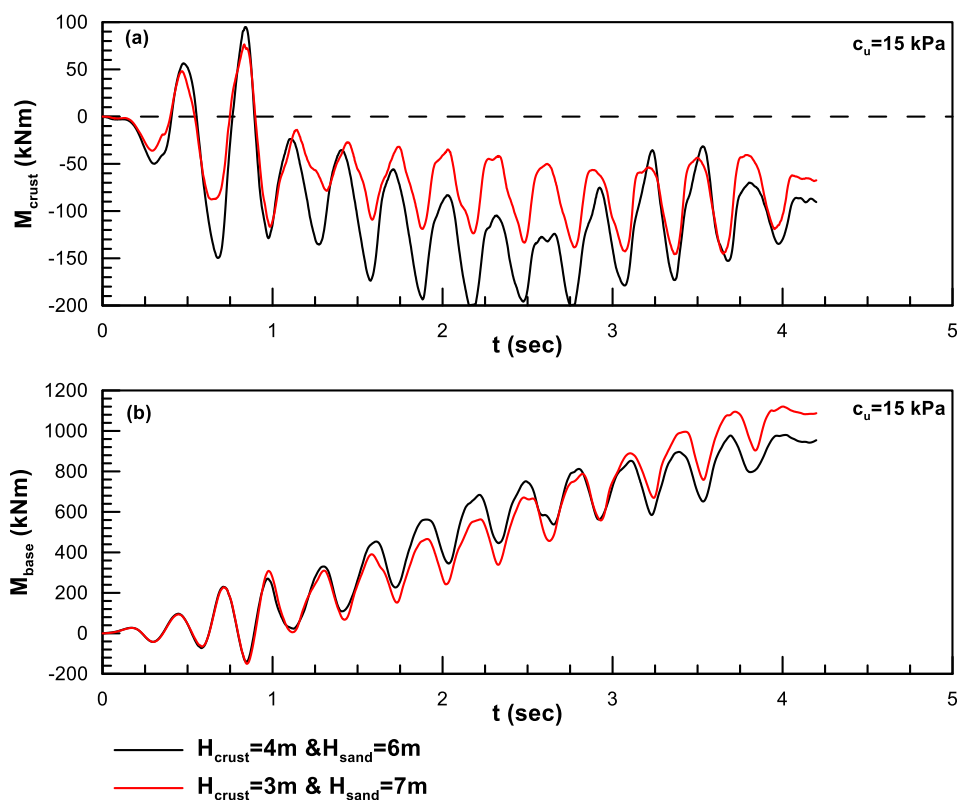
Σχήμα 4.20: Χρονοϊστορίες του λόγου r_u σε βάθος $z=2.25\text{m}$ και $z=9.25\text{m}$ από την επιφάνεια του εδάφους, (a) κοντά στον πάσσαλο και (b) στο ελεύθερο πεδίο.

Η αντοχή της επιφανειακής εδαφικής κρούστας δε φαίνεται να επηρεάζει την κατανομή του λόγου r_u καθώς οι παρατηρήσεις που αναφέρθηκαν για τη κρούστα αντοχής $c_u=15 \text{ kPa}$ ισχύουν και για τη κρούστα αντοχής $c_u=40 \text{ kPa}$ σύμφωνα με το Σχήμα 4.21. Συγκεκριμένα, οι διαφορές των κατανομών r_u για τις διαφορετικές αντοχές είναι αμελητέες και η απόκριση του πασσάλου όσον αφορά το λόγο r_u δείχνει να εξαρτάται περισσότερο από το πάχος του στρώματος της άμμου.



Σχήμα 4.21: Χρονοϊστορίες του λόγου r_u σε βάθος $z=2.25m$ και $z=9.25m$ από την επιφάνεια του εδάφους, (a) κοντά στον πάσσαλο και (b) στο ελεύθερο πεδίο.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι χρονοϊστορίες των ροπών για τις αναλύσεις με διαφορετικό πάχος κρούστας και αντοχής $c_u=15$ kPa, που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.22**. Προκύπτει για το συγκεκριμένο πάσσαλο ότι οι ροπές διαφοροποιούνται λίγο τόσο στη βάση της κρούστας όσο και στη βάση της άμμου. Η απόκριση του πασσάλου υποδηλώνει ότι και στις δύο περιπτώσεις έχει σχεδόν ίδια καμπτική δυσκαμψία.



Σχήμα 4.22: Χρονοϊστορίες αναλύσεων μη-διαπερατής κρούστας αντοχής $c_u=15$ kPa, για (a) ροπή M_{crust} στη διεπιφάνεια αργιλικής κρούστας και άμμου και (b) ροπή M_{base} στο τέλος της άμμου.

4.6 Συμπεράσματα

Για τη κατανόηση των μηχανισμών αλληλεπίδρασης μεταξύ πασσάλου και εδάφους όταν υπάρχει επιφανειακή αργιλική κρούστα πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις που διερεύνησαν την επίδραση της αντοχής και διαπερατότητας της κρούστας και της καμπτικής δυσκαμψίας (μήκος και διάμετρος) του πασσάλου στο εξεταζόμενο πρόβλημα. Μετά από επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι η διαστολική συμπεριφορά του εδάφους στο άνω μέρος του πασσάλου απουσία της αργιλικής κρούστας περιορίζεται και τελικά στη περιοχή γύρω από τον πάσσαλο αναπτύσσονται κυρίως θετικές υπερπίεσεις πόρων. Επιπλέον, οι μετακινήσεις του πασσάλου και κατ' επέκταση οι καμπτικές ροπές που αναπτύσσονται, καθορίζονται από τη σχετική δυσκαμψία του πασσάλου και του περιβάλλοντος εδάφους. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικοί μηχανισμοί που διέπουν την πολύπλοκη αλληλεπίδραση πασσάλου και εδάφους.

5

Επίδραση Κρούστας στην Απόκριση του Πασσάλου

5.1 Γενικά

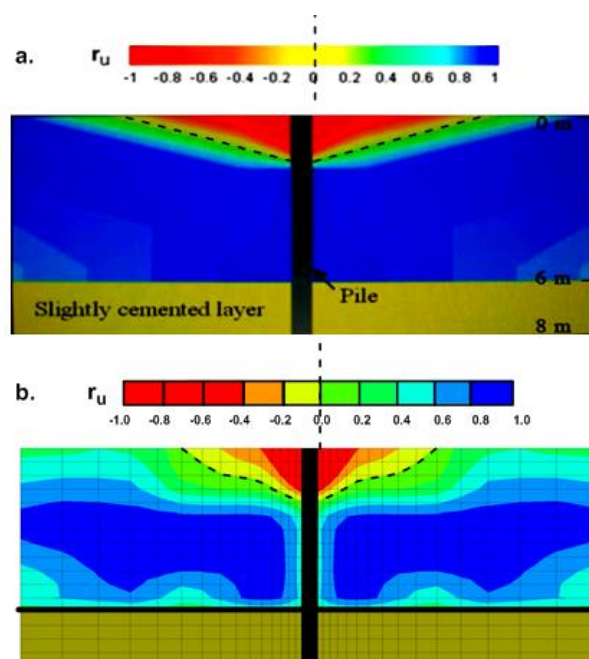
DisplayText cannot span more than one line!Οι παραμετρικές αναλύσεις για τη διερεύνηση του προβλήματος αλληλεπίδρασης μεταξύ πασσάλου και εδάφους πραγματοποιήθηκαν με άξονες την επίδραση της αντοχής και της διαπερατότητας της κρούστας, την επίδραση της ροπής αδρανείας του πασσάλου και τέλος την επίδραση του μήκους του πασσάλου. Οι δύο τελευταίοι άξονες των αναλύσεων μπορούν να ενοποιηθούν και αφορούν την επίδραση της καμπτικής δυσκαμψίας στην απόκριση του πασσάλου. Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κάθε κατηγορίας παραμετρικών αναλύσεων και τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν και τελικά προτείνονται δύο δείκτες διαχωρισμού και κατηγοριοποίησης των βασικών μηχανισμών απόκρισης ανάλογα με την αντοχή της κρούστας και τη δυσκαμψία του πασσάλου.

5.2 Επίδραση Αντοχής Κρούστας

Με την ολοκλήρωση των παραμετρικών αναλύσεων, το βασικό ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί είναι πως αλλάζει η απόκριση του πασσάλου λόγω ύπαρξης της κρούστας και γιατί διαφοροποιείται από την περίπτωση όπου ο πάσσαλος περιβάλλεται μόνο από ρευστοποιήσιμη άμμο.

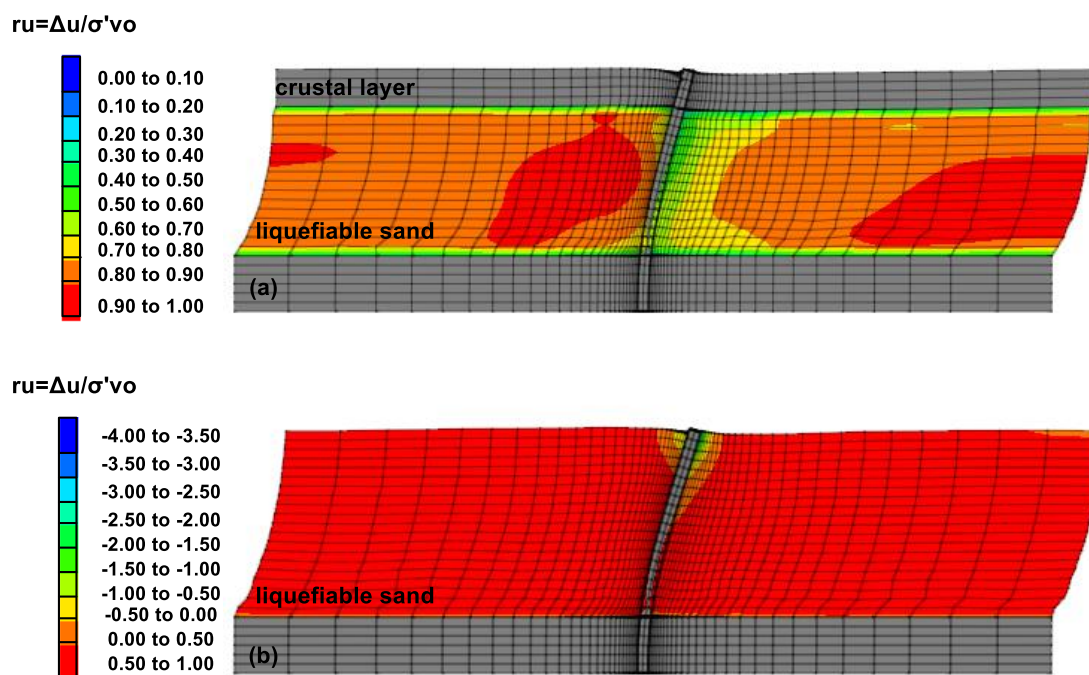
Αρχικά, πρέπει να υπενθυμιστεί η απόκριση του πασσάλου σε ένα εδαφικό προφίλ αποτελούμενο αποκλειστικά από (ρευστοποιήσιμη) άμμο. Συγκεκριμένα, ανάλογα με τη δυσκαμψία του πασσάλου, στο άνω μέρος του αναπτύσσονται αρνητικές (υπό-) πιέσεις πόρων λόγω της σχετικής μετακίνησης μεταξύ εδάφους και πασσάλου. Σε

αυτό το κομμάτι του πασσάλου, το έδαφος βρίσκεται υπό καθεστώς διόγκωσης (διαστολική συμπεριφορά) που οφείλεται σε διάτμηση και σε συνδυασμό με τον αστράγγιστο χαρακτήρα της φόρτισης αναπτύσσει τις προαναφερθείσες αρνητικές πιέσεις πόρων, αυξάνοντας δραματικά τα φορτία που επιβάλλονται στον πάσσαλο. Σύμφωνα με τους **Gonzalez et al. (2009)** και **Chaloulos et al. (2012)**, παρατηρείται ο σχηματισμός μιας ζώνης ανάποδου κωνικού σχήματος από μη-ρευστοποιημένο εδαφικό υλικό κοντά στην εδαφική επιφάνεια γύρω από τον πάσσαλο, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.1**.



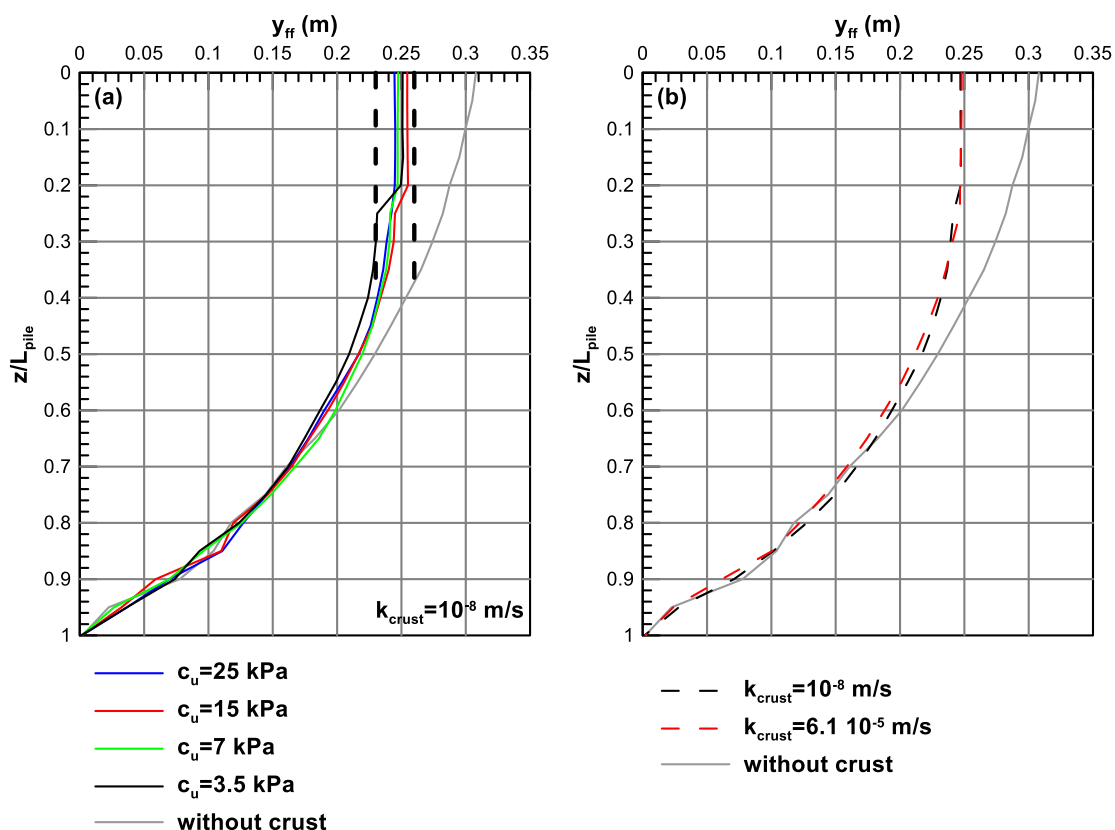
Σχήμα 5.1: (a) Πειραματικές μετρήσεις (Gonzalez et al., 2009) και (b) αριθμητικές προβλέψεις του r_u στο τέλος της διέγερσης για $k = 6.1 \times 10^{-5}$ m/s (Chaloulos et al., 2012).

Στο **Σχήμα 5.2** συγκρίνονται οι λόγοι r_u για ένα προφίλ αποτελούμενο μόνο από ρευστοποιήσιμη άμμο και ένα προφίλ με μαλακή αργλική κρούστα (αντοχής $c_u=3.5$ kPa και πάχους 2m). Στο προφίλ της άμμου, φαίνεται ο σχηματισμός εκείνης της ζώνης ανάποδου κωνικού σχήματος από μη-ρευστοποιημένο εδαφικό υλικό στο άνω μέρος του πασσάλου με την ανάπτυξη αρνητικών πιέσεων πόρων. Αντίθετα, στο άλλο προφίλ η ύπαρξη της κρούστας φαίνεται πως εμποδίζει τη διαστολική συμπεριφορά και προκαλεί θετικούς λόγους r_u σε όλο το πάχος της ρευστοποιημένης άμμου.



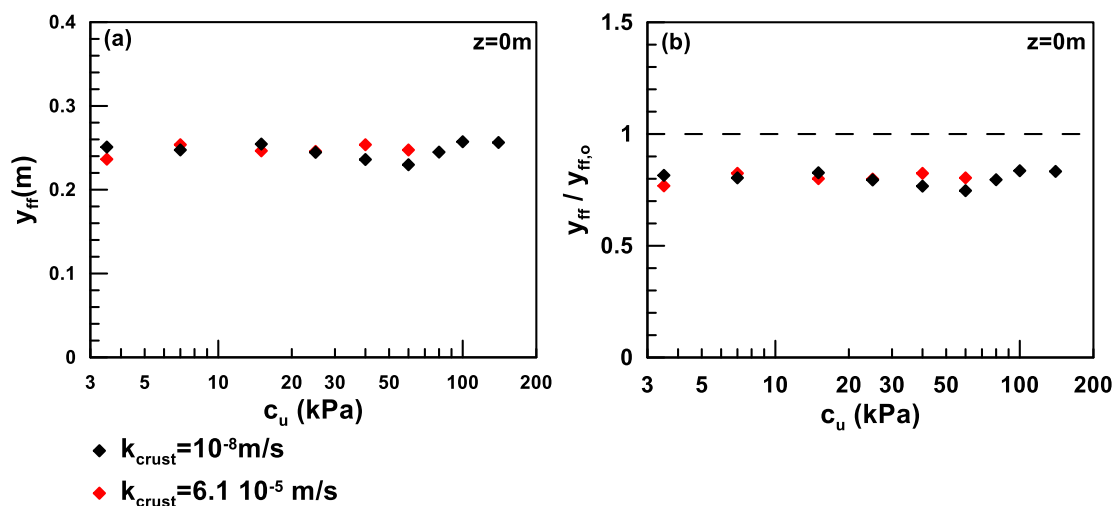
Σχήμα 5.2: Λόγοι r_u και παραμορφωμένος κώνναβος σε (a) εδαφικό προφίλ με επιφανειακή αργιλική κρούστα (αντοχής $c_u=3.5$ kPa) και (b) εδαφικό προφίλ από ρευστοποιήσιμη άμμο. Με γκρι χρώμα δίνεται ο πάσσαλος και η αργιλική βάση και στην περίπτωση (a) και η κρούστα.

Οι κατανομές των μετακινήσεων στο ελεύθερο πεδίο (y_H) για τα δύο προαναφερθέντα προφίλ παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.3(a)**. Δεν αποτυπώνονται όλες οι καμπύλες για τις διαφορετικές αντοχές μη-διαπερατής κρούστας για λόγους ευκρίνειας του σχήματος και παρουσιάζονται ενδεικτικά μόνο τέσσερις από αυτές. Φαίνεται πως ανεξάρτητα από την αντοχή της κρούστας (όλες οι καμπύλες κυμαίνονται μεταξύ των διακεκομμένων γραμμών), οι μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου περιορίζονται και είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες ενός αμμώδους προφίλ. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το **Σχήμα 5.3(b)**, που φαίνεται η μέση κατανομή μετακινήσεων και συγκρίνεται με την κατανομή που προκύπτει από την ανάλυση δίχως την αργιλική κρούστα. Η μέση κατανομή των μετακινήσεων προέκυψε από το μέσο όρο των τιμών μετακίνησης του ελεύθερου πεδίου σε κάθε βάθος, όλων των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε αυτή την ενότητα παραμετρικών αναλύσεων.



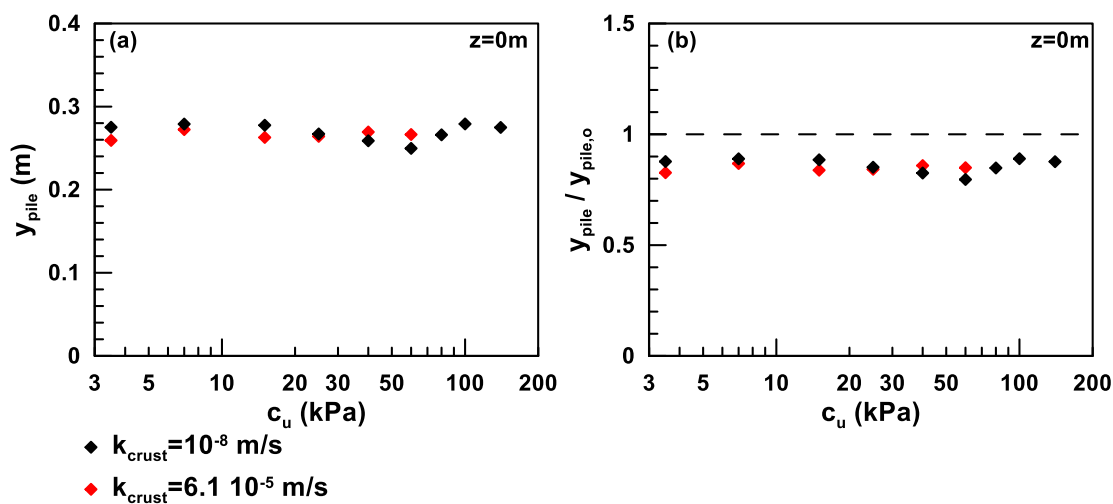
Σχήμα 5.3: Κατανομές (a) μετακινήσεων του ελεύθερου πεδίου για 5 διαφορετικές αντοχές κρούστας (η περίπτωση χωρίς κρούστα θεωρείται ως αμμόδης κρούστα με αντοχή $c_u = 0 \text{ kPa}$) και (b) των μέσων μετακινήσεων για τις δύο περιπτώσεις διαπερατότητας, συναρτήσει του βάθους κανονικοποιημένου με το μήκος του πασσάλου.

Ο περιορισμός των μετακινήσεων του ελεύθερου πεδίου επεκτείνεται και στην περίπτωση της διαπερατής κρούστας. Στο **Σχήμα 5.3(b)**, φαίνεται και η μέση κατανομή των μετακινήσεων για τις αναλύσεις με διαπερατή κρούστα και σχεδόν ταυτίζεται με την μέση κατανομή της μη-διαπερατής κρούστας. Το επιχείρημα ότι οι μετακινήσεις περιορίζονται και δεν υπάρχει επιρροή της αντοχής της κρούστας ή της διαπερατότητάς της, ενισχύεται και από το **Σχήμα 5.4**. Φαίνεται πράγματι ότι αυτές παρουσιάζουν μικρή αυξομείωση για διαφορετικές τιμές του c_u ενώ οι κανονικοποιημένες μετακινήσεις ως προς τις αντίστοιχες μετακινήσεις χωρίς την κρούστα παίρνουν τιμές μικρότερες της μονάδας. Επομένως, το μέγεθος των μετακινήσεων του ελεύθερου πεδίου εξαρτάται από το πάχος του στρώματος της άμμου και η ύπαρξη επιφανειακής κρούστας έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες μετακινήσεις κατά τη διέγερση εάν συγκριθεί με ένα αντίστοιχο εδαφικό προφίλ όπου στη θέση της κρούστας υπάρχει άμμος.



Σχήμα 5.4: (a) μετακινήσεις ελεύθερου πεδίου και (b) κανονικοποιημένες μετακινήσεις ως προς τις αντίστοιχες μετακινήσεις προφίλ από ρευστοποιήσιμη άμμο, στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u .

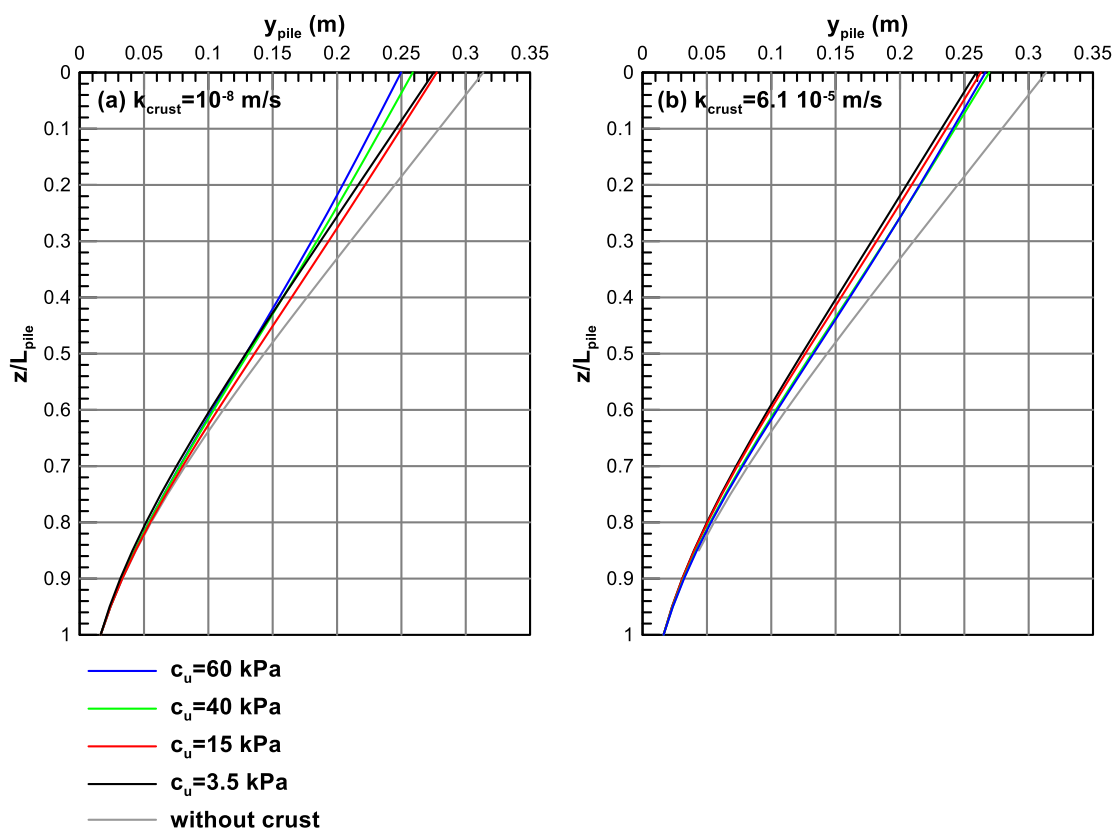
Πριν αξιολογηθούν τα βέλη κάμψης του πασσάλου ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι παρατηρήσεις που προκύπτουν από το **Σχήμα 5.5**. Φαίνεται πως η μετακίνηση στην κεφαλή του πασσάλου είναι ανεξάρτητη της αντοχής της κρούστας και της διαπερατότητας και ίσως υποδηλώνει την εξάρτηση της από τη μετακίνηση του αμώδους στρώματος που είναι ίδιο σε όλες τις αναλύσεις.



Σχήμα 5.5: (a) Μετακίνηση κεφαλής πασσάλου και (b) κανονικοποιημένη μετακίνηση στην κεφαλή σε βάθος $z=0m$ από την επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της αντοχής c_u .

Αντίστοιχα με τις μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου, η μετακίνηση της κεφαλής στην περίπτωση της κρούστας είναι μικρότερη σε σύγκριση με τη περίπτωση που αυτή απουσιάζει, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.5(b)**.

Η αργλική κρούστα λοιπόν, περιορίζει τις μετακινήσεις του πασσάλου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.6**. Από τις κατανομές των μετακινήσεων με το βάθος προκύπτει ότι η κρούστα αντιστέκεται στη μετακίνηση του πασσάλου, μειώνοντας το τελικό βέλος του. Αυτό συμβαίνει διότι καθώς η ρευστοποιημένη άμμος ρέει γύρω από τον πάσσαλο, τον ωθεί σε μεγαλύτερες μετακινήσεις και αυτός με τη σειρά του πιέζει την εδαφική κρούστα. Η κρούστα αναπτύσσει τα πλήρη φορτία της γιατί αστοχεί υπό μορφή παθητικής σφήνας στα κατάντη του πασσάλου, και αντιστέκεται στην μετακίνηση που επιβάλλει ο πάσσαλος.

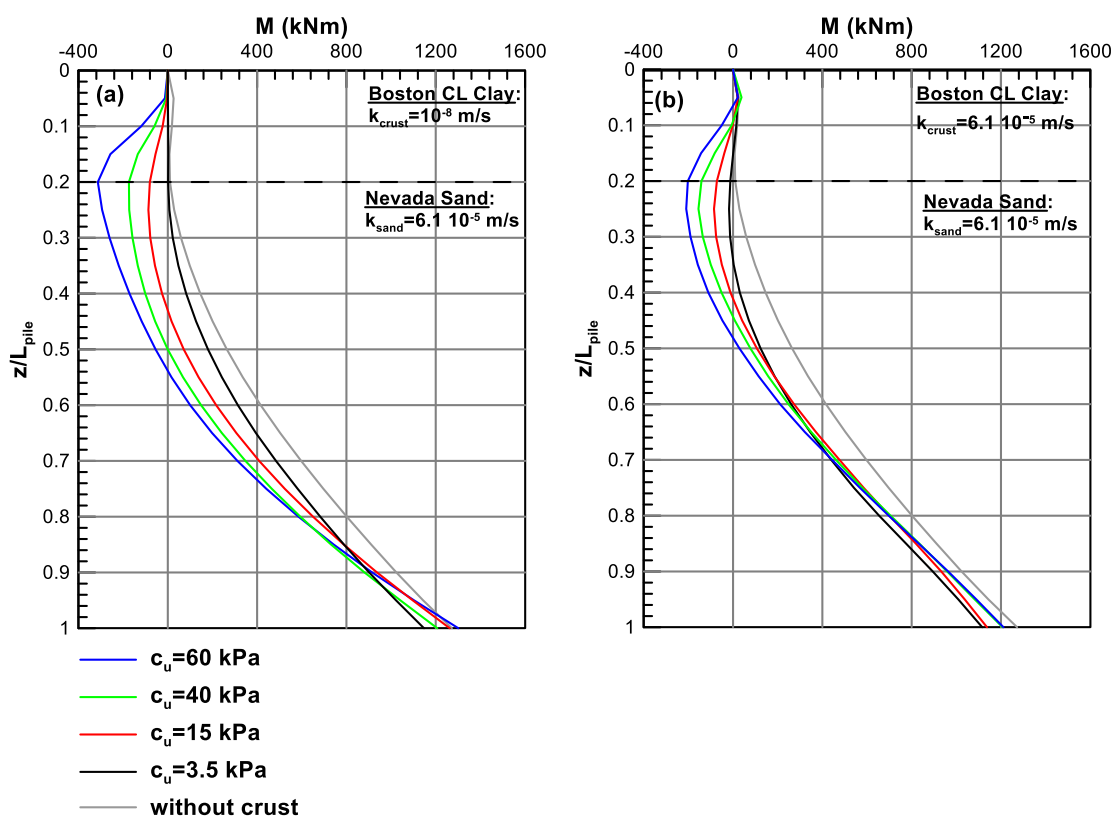


Σχήμα 5.6: Κατανομή της μετακίνησης του πασσάλου με το βάθος για (a) μη-διαπερατή κρούστα με $k_{crust}=10^{-8}$ m/s και (b) διαπερατή κρούστα με $k_{crust}=6.1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Επίσης, εφόσον μειώνονται οι μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου, περιορίζονται αναμενόμενα και οι μετακινήσεις στις οποίες υποβάλλεται ο πάσσαλος, και τελικά περιορίζεται το βέλος του. Οι μετακινήσεις του πασσάλου δηλαδή, περιορίζονται

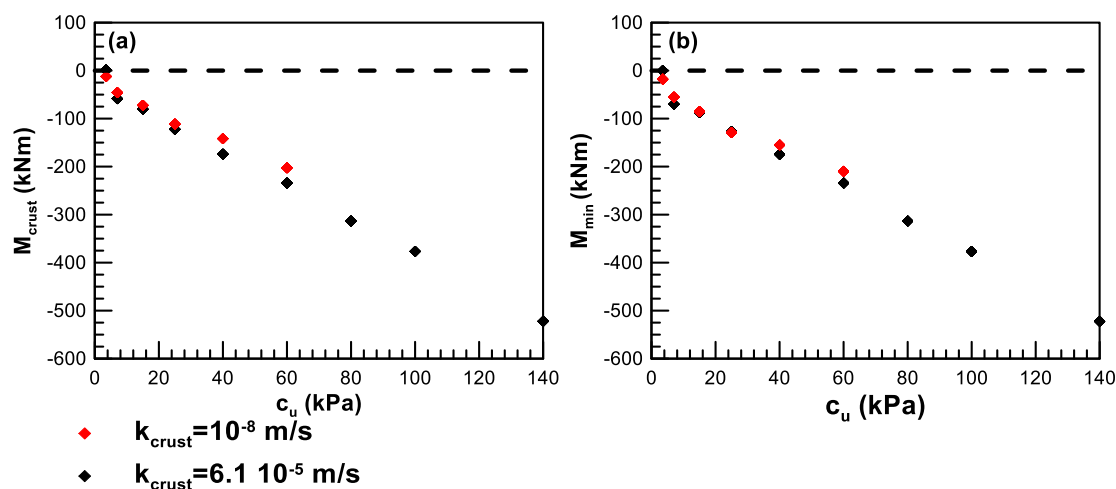
λόγω μικρότερων μετακινήσεων του ελεύθερου πεδίου και λόγω της αντίστασης της κρούστας στη μετακίνησή του (gripping effect). Στο **Σχήμα 5.6(b)**, παρουσιάζεται η κατανομή των βελών για διαφορετικές αντοχές διαπερατής κρούστας και παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά που διέπει και τις μη-διαπερατές κρούστες.

Η παθητική αστοχία της κρούστας στα κατόντη του πασσάλου (downslope) έχει σαν αποτέλεσμα την επιβολή μεγάλων κινηματικών φορτίων στο άνω μέρος του αλλάζοντας αρκετά και την απόκριση του σε όρους καμπτικών ροπών. Στο **Σχήμα 5.7(a)** παρουσιάζονται οι καμπτικές ροπές για μη-διαπερατή κρούστα και στο **Σχήμα 5.7(b)** για διαπερατή κρούστα αντίστοιχα. Η κατανομή της ροπής για τη περίπτωση που δεν υπάρχει κρούστα δίνεται με ελαφρύ γκρι και φαίνεται ότι στο άνω μέρος του πασσάλου αναπτύσσονται ροπές πολύ μικρές έως και μηδενικές. Όμως, η απόκριση όταν υπάρχει κρούστα διαφοροποιείται και σε αντίθεση με πριν, στο άνω μέρος του πασσάλου αναπτύσσονται μεγάλες αρνητικές ροπές.



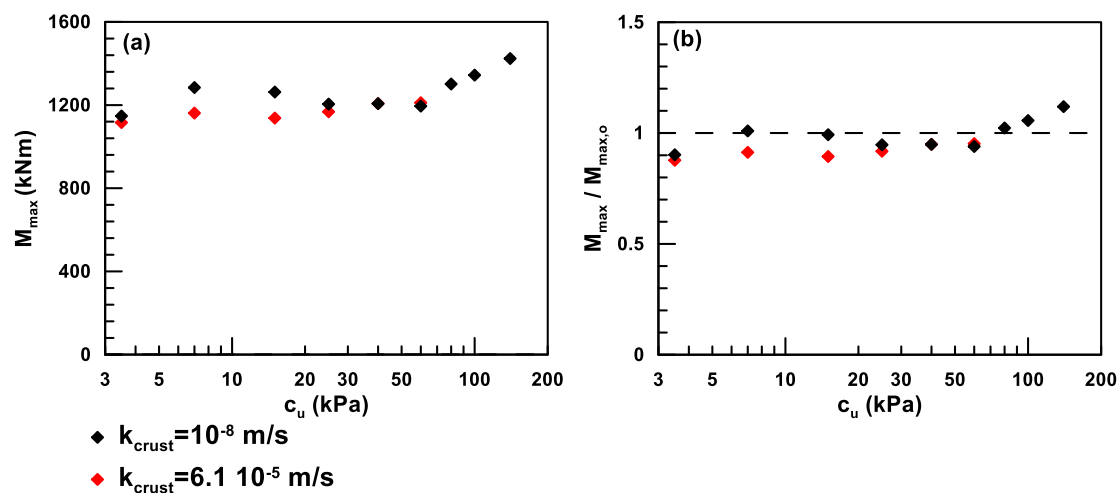
Σχήμα 5.7: Κατανομές καμπτικών ροπών με το βάθος για (a) μη-διαπερατή κρούστα με $k_{crust} = 10^{-8}$ m/s και (b) διαπερατή κρούστα με $k_{crust} = 6.1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Είναι λογικό όσο πιο στιφρή (μεγάλες τιμές αντοχής c_u) είναι η αργιλική κρούστα, τα κινηματικά φορτία τη στιγμή της αστοχίας να είναι εξίσου μεγάλα με αποτέλεσμα να επιβαρύνεται ο πάσσαλος από αρνητικές ροπές που δεν μπορούν να αμεληθούν. Το επιχείρημα αυτό ενισχύεται περισσότερο αν ληφθεί υπόψη το **Σχήμα 5.8**, όπου παρουσιάζεται η ροπή στη βάση της κρούστας και η ελάχιστη ροπή στον πάσσαλο ως γραμμική συνάρτηση της διατμητικής αντοχής c_u . Η μόνη διαφορά διαπερατής και αδιαπερατής κρούστας είναι η ανάπτυξη μικρότερων αρνητικών ροπών για τη περίπτωση της διαπερατής κρούστας, που επιβεβαιώνεται και από τα σχήματα.



Σχήμα 5.8: (a) Ροπή στη βάση της κρούστας και (b) ελάχιστη ροπή στον πάσσαλο συναρτήσει της αντοχής c_u .

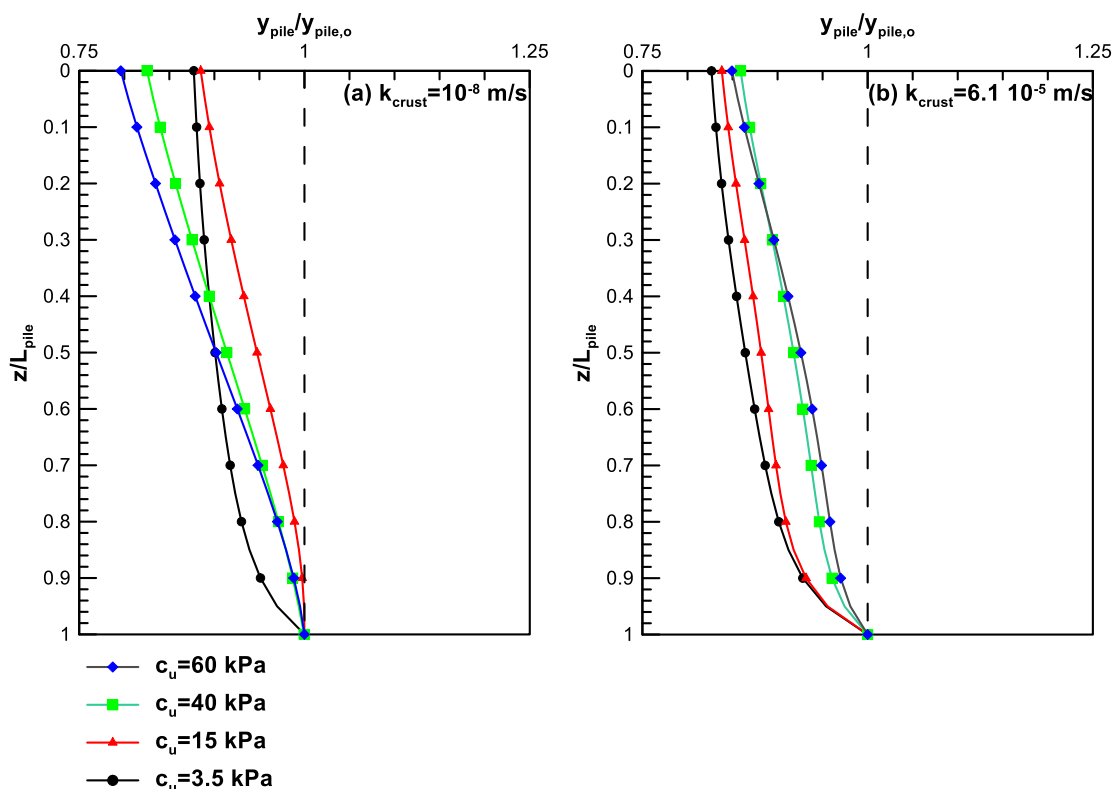
Η ροπή στη βάση της άμμου (M_{max}) δεν εξαρτάται από την αντοχή της κρούστας και επηρεάζεται και από τα φορτία της άμμου. Για μικρές έως και μεσαίες τιμές της αντοχής κρούστας, η ροπή έχει περίπου σταθερή τιμή και σε μεγάλες τιμές της αντοχής παρουσιάζει μικρή αύξηση. Παρόλο που η ροπή στη βάση δεν εξαρτάται από την κρούστα, σε μεγάλες τιμές c_u ($c_u > 80 \text{ kPa}$) τα φορτία της άμμου είναι αυξημένα και για αυτό παρουσιάζεται η μικρή αύξηση στη ροπή όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5.9**.



Σχήμα 5.9: (a) Ροπή στη βάση της άμμου και (b) κανονικοποιημένη ροπή ως προς την ανάλυση χωρίς κρούστα, συναρτήσει της αντοχής της κρούστας.

Αν οι μετατοπίσεις του πασσάλου για τις αναλύσεις που υπάρχει η κρούστα, κανονικοποιηθούν με τις αντίστοιχες για τις αναλύσεις που απουσιάζει η κρούστα προκύπτει το **Σχήμα 5.10(a)** και **Σχήμα 5.10(b)**. Στην ουσία αυτές οι κατανομές περιγράφουν τον μηχανισμό απόκρισης του πασσάλου. Στην περίπτωση ενός προφίλ αποτελούμενο μόνο από ρευστοποιήσιμη άμμο, ο πάσσαλος στατικά λειτουργεί ως πρόβολος και τα εντατικά του μεγέθη καθορίζονται από τα φορτία της άμμου.

Αντίθετα, στην περίπτωση της μη-διαπερατής κρούστας ανάλογα με την αντοχή της κρούστας παρατηρούνται δύο μηχανισμοί. Για μικρές τιμές αντοχής ($c_u < 7$ kPa), η κρούστα είναι αρκετά αδύναμη και δε μπορεί να επιβάλει κινηματικούς περιορισμούς στην κεφαλή του πασσάλου, με συνέπεια ο πάσσαλος να λειτουργεί στατικά ως πρόβολος. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί στο **Σχήμα 5.10(a)** από τη σταδιακή απομείωση της μετακίνησης του πασσάλου για τη μαύρη καμπύλη ($c_u = 3.5$ kPa).



Σχήμα 5.10: Κανονικοποιημένες κατανομές μετακινήσεων του πασσάλου συναρτήσει του βάθους για (a) μη-διαπερατή κρούστα με $k_{crust}=10^{-8}$ m/s και (b) διαπερατή κρούστα με $k_{crust}=6.1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Για τιμές αστράγγιστης διατμητικής αντοχής $c_u > 7$ kPa, παρατηρείται ότι η κρούστα είναι αρκετά δυνατή να επιβάλει κινηματικούς περιορισμούς στη κεφαλή του πασσάλου. Όσο αυξάνει η αντοχή της, ο πάσσαλος μετακινείται και στρίβει λιγότερο μέσα στη κρούστα και αφού το άλλο άκρο του θεωρείται πακτωμένο στην αργλική βάση 3m, λειτουργεί ως αμφίπακτο μέλος που καταπονείται σε οριζόντια μετακίνηση στην κεφαλή. Αυτό το υποδηλώνουν οι τιμές του λόγου της μετακίνησης στο **Σχήμα 5.10(a)**, που στα μεγάλα βάθη πλησιάζουν τη μονάδα.

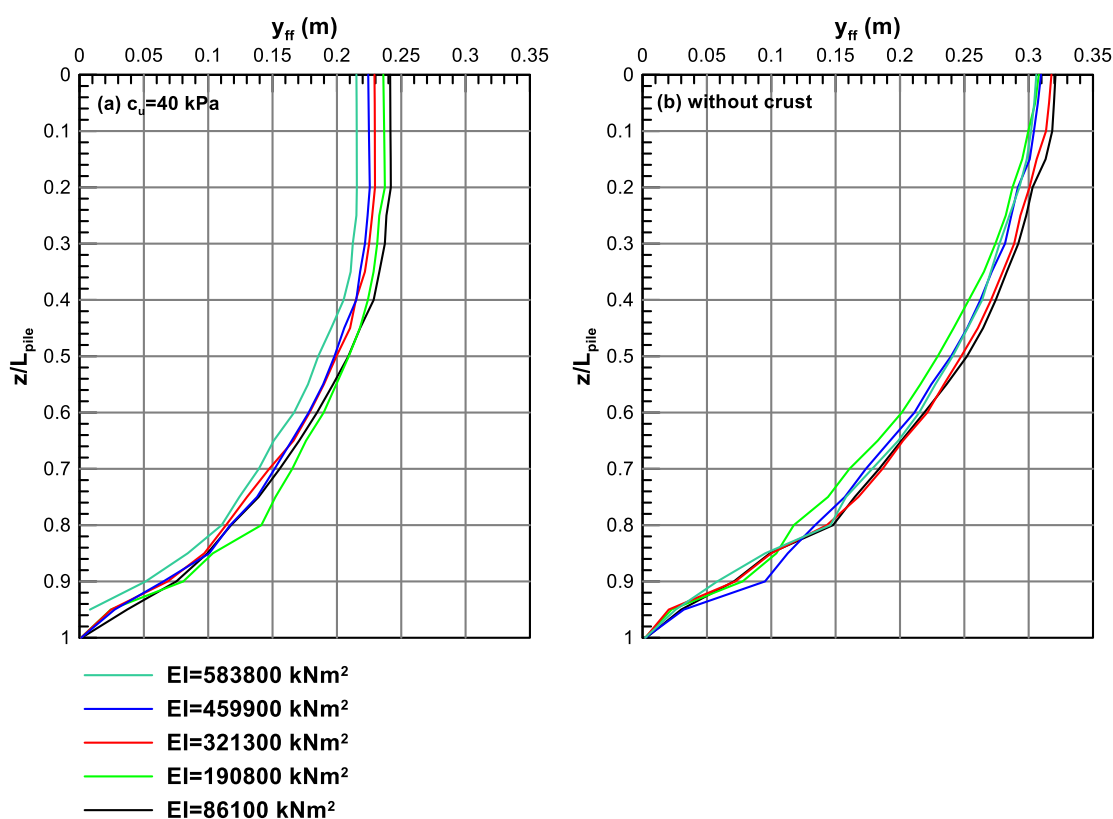
Όταν η κρούστα είναι διαπερατή, φαίνεται πως ο πάσσαλος αποκρίνεται με στατική λειτουργία προβόλου, όπως και στην περίπτωση ενός προφίλ αποτελούμενο μόνο από ρευστοποιήσιμη άμμο. Λόγω μεγάλης διαπερατότητας, η στράγγιση γίνεται πιο γρήγορα και ρευστοποιείται λιγότερο μέρος της άμμου. Η ροή εδάφους γύρω από τον πάσσαλο περιορίζεται και δέχεται μικρότερα φορτία από την άμμο με αποτέλεσμα να περιορίζεται η δύναμη που ασκεί στην κρούστα και αντίστοιχα η δύναμη που δέχεται από αυτή. Έτσι, η κρούστα δεν επιβάλλει τους κινηματικούς περιορισμούς σε σύγκριση με πριν.

Επιγραμματικά τα βασικά συμπεράσματα από την επίδραση της αντοχής της μη-ρευστοποιήσιμης κρούστας είναι τα εξής:

- Μειώνονται οι μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου λόγω της παρουσίας της κρούστας
- Μειώνονται οι μετακινήσεις του πασσάλου διότι η κρούστα στηρίζει περιστροφικά το άνω μέρος του πασσάλου (gripping effect).
- Αναπτύσσονται αρνητικές ροπές στη βάση της κρούστας, ανάλογες της αντοχής της.
- Οι ροπές στη βάση της άμμου δεν εξαρτώνται από τη κρούστα και τις εδαφικές ιδιότητές της.
- Για την αδιαπέρατη κρούστα υπάρχουν δύο μηχανισμοί απόκρισης, ο οιονεί πρόβολος για κρούστες με μικρή αντοχή ($c_u < 7$ kPa) και το οιονεί αμφίπακτο μέλος για κρούστες με αντοχή $c_u > 7$ kPa.
- Για τη διαπερατή κρούστα ο μηχανισμός απόκρισης είναι ο οιονεί πρόβολος για όλες τις αντοχές κρούστας.

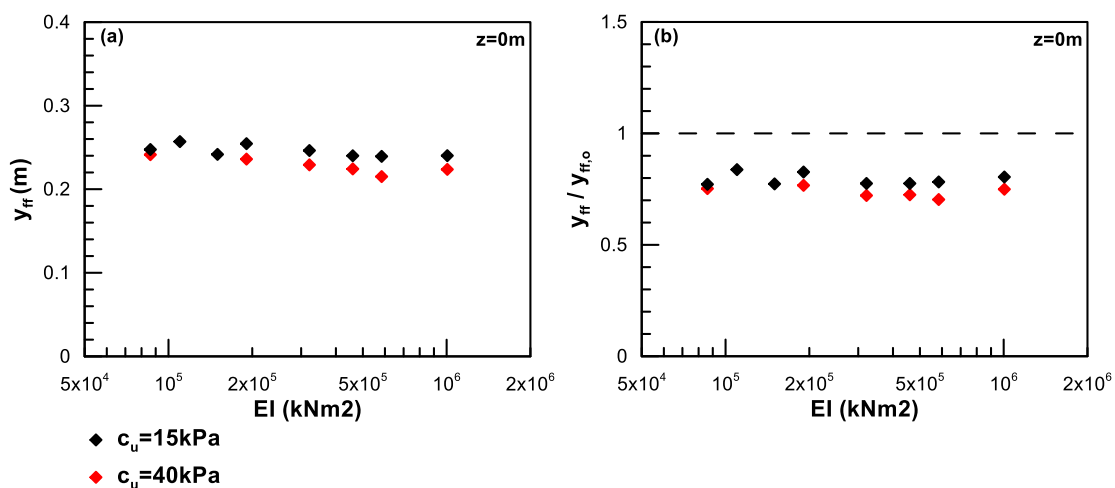
5.3 Επίδραση Ροπής Αδράνειας Πάσσαλου

Οι παραμετρικές αναλύσεις αυτής της ενότητας πραγματοποιήθηκαν για δύο διαφορετικές αντοχές αργιλικής κρούστας ($c_u=15$ kPa & $c_u=40$ kPa). Όπως ειπώθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, οι μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου όταν υπάρχει αργιλική κρούστα αναμένεται να είναι μικρότερες από τις μετακινήσεις ελεύθερου πεδίου ενός αμμώδους εδαφικού προφίλ. Πράγματι, αυτό προκύπτει και από το **Σχήμα 5.11**.



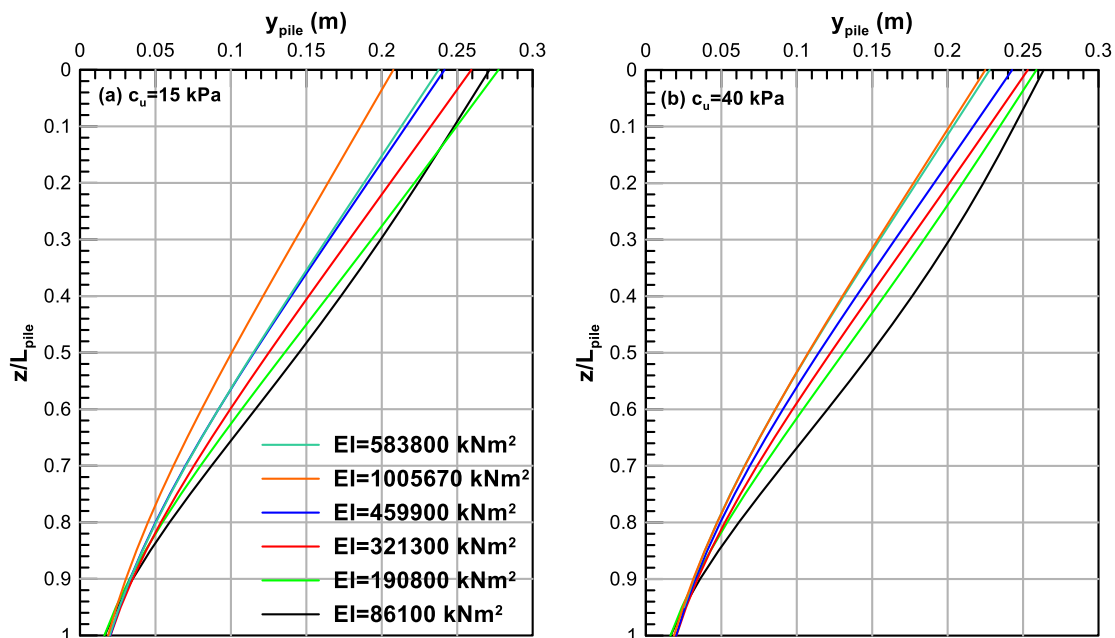
Σχήμα 5.11: Κατανομές μετακινήσεων του ελεύθερου πεδίου συναρτήσει του βάθους κανονικοποιημένου με το μήκος του πασσάλου, για (a) προφίλ με αργιλική κρούστα αντοχής $c_u=40$ kPa και (b) προφίλ άμμου.

Πέρα από τη μείωση λόγω της παρουσίας της αργιλικής κρούστας, οι μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου δεν εξαρτώνται από τη καμπτική δυσκαμψία του πασσάλου και για τις διάφορες δυσκαμψίες των αναλύσεων εμφανίζει σχεδόν σταθερή τιμή, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.12(a)**. Στο **Σχήμα 5.12(b)** παρουσιάζεται ο λόγος των μετακινήσεων του ελεύθερου πεδίου με κρούστα και χωρίς κρούστα.



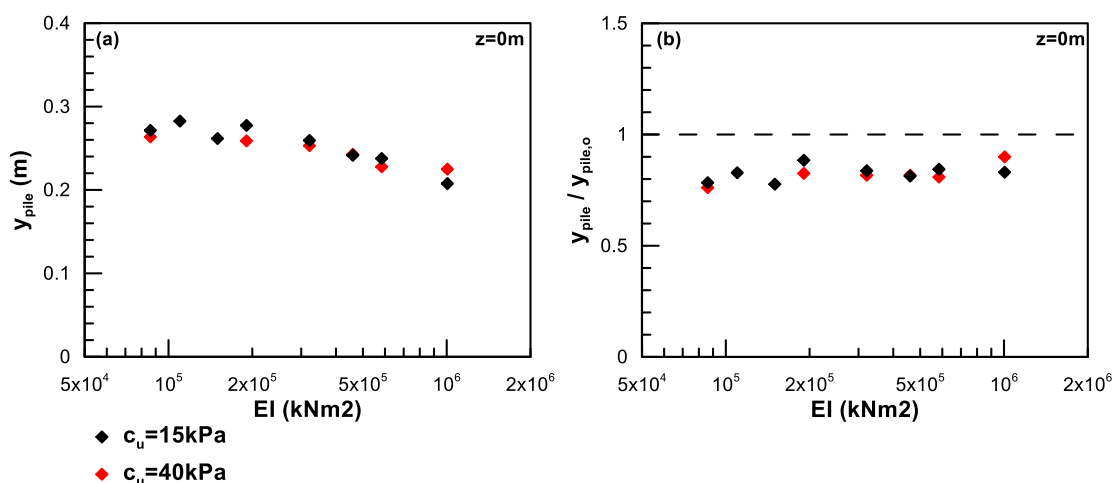
Σχήμα 5.12: (a) μετακινήσεις ελεύθερου πεδίου και (b) κανονικοποιημένες μετακινήσεις ως προς τις αντίστοιχες μετακινήσεις προφίλ από ρευστοποιήσιμη άμμο, στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσεως της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u .

Αντίθετα με τις μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου, το βέλος κάμψης του πασσάλου, που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.13**, επηρεάζεται άμεσα από τη μεταβολή της δυσκαμψίας. Καθώς ο πάσσαλος γίνεται πιο δύσκαμπτος, αντιστέκεται περισσότερο στις μετακινήσεις που του επιβάλει το περιβάλλον έδαφος με αποτέλεσμα να μειώνονται οι μετακινήσεις του.



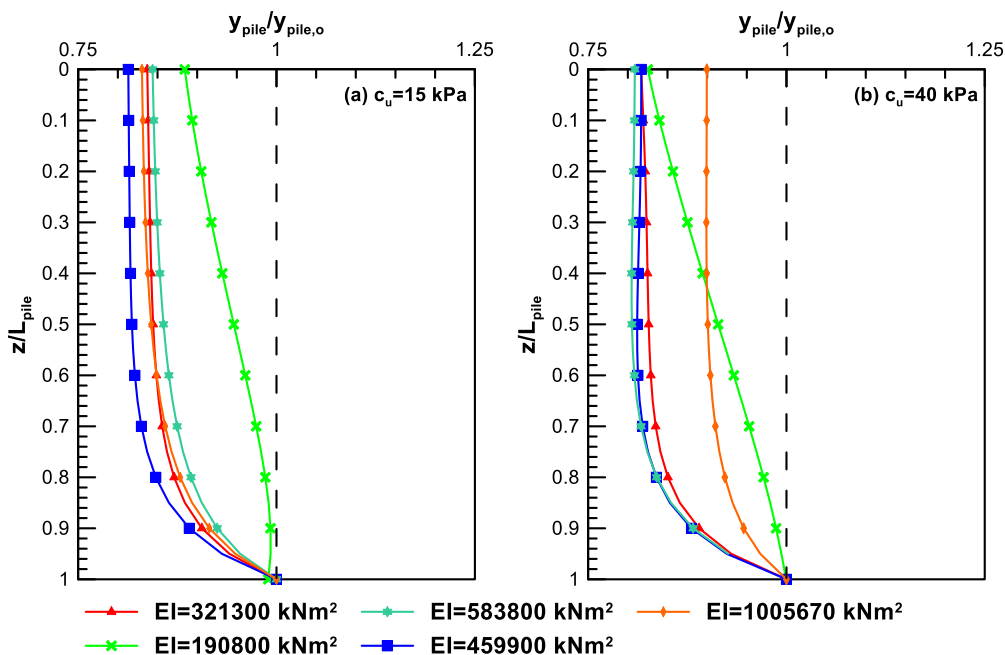
Σχήμα 5.13: Κατανομή της μετακίνησης του πασσάλου με το βάθος για (a) μη-διαπερατή κρούστα με $c_u=15 kPa$ και (b) μη-διαπερατή κρούστα με $c_u=40 kPa$.

Στο **Σχήμα 5.14(a)** παρουσιάζεται η μείωση της μετακίνησης της κεφαλής του πασσάλου συναρτήσει της καμπτικής δυσκαμψίας και στο **Σχήμα 5.14(b)**, η μεταβολή του λόγου των μετακινήσεων στην κεφαλή.

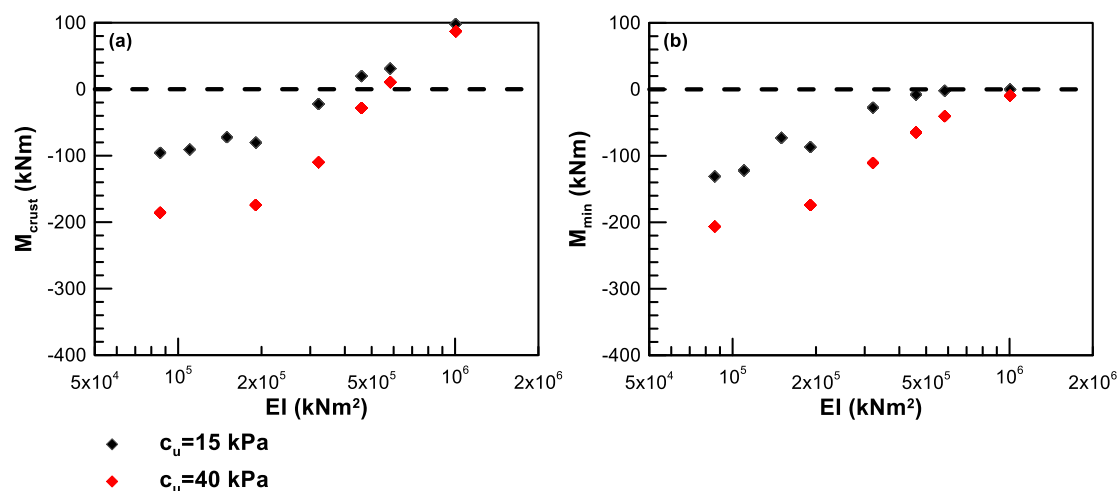


Σχήμα 5.14: (a) Μετακίνηση κεφαλής πασσάλου και (b) κανονικοποιημένη μετακίνηση στην κεφαλή σε βάθος $z=0m$ από την επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει της αντοχής c_u .

Αν οι μετατοπίσεις του πασσάλου για τις αναλύσεις που υπάρχει η κρούστα, κανονικοποιηθούν με τις αντίστοιχες για τις αναλύσεις που απουσιάζει η κρούστα προκύπτουν τα **Σχήμα 5.15(a)** και **Σχήμα 5.15(b)**. Αντίστοιχα με την επίδραση της αντοχής της κρούστας, οι δύο κατανομές καθορίζουν την απόκριση του πασσάλου όταν μεταβάλλεται η δυσκαμψία του για μια κρούστα με καθορισμένες εδαφικές ιδιότητες. Στην περίπτωση ενός εύκαμπτου πασσάλου [βλέπε στο **Σχήμα 5.15(a)** τη καμπύλη δυσκαμψίας $EI=190800$ kNm² ή στο **Σχήμα 5.15(b)** την αντίστοιχη καμπύλη] που δεν μπορεί να αντισταθεί στις μετακινήσεις του περιβάλλοντος εδάφους, η κρούστα διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο και του επιβάλλει κινηματικούς περιορισμούς στη κεφαλή. Λόγω της σχετικής ευκαμψίας του πασσάλου ως προς το έδαφος, η στατική λειτουργία του πασσάλου είναι η αμφίπακτη και αναμένεται να επιβαρυνθεί με αρνητικές ροπές σημαντικού μεγέθους κοντά στη διεπιφάνεια κρούστας και άμμου, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5.16(a)**.



Σχήμα 5.15: Κανονικοποιημένες κατανομές μετακινήσεων του πασσάλου συναρτήσει του βάθους για (a) μη-διαπερατή κρούστα με $c_u=15$ kPa και (b) μη-διαπερατή κρούστα με $c_u=40$ kPa.

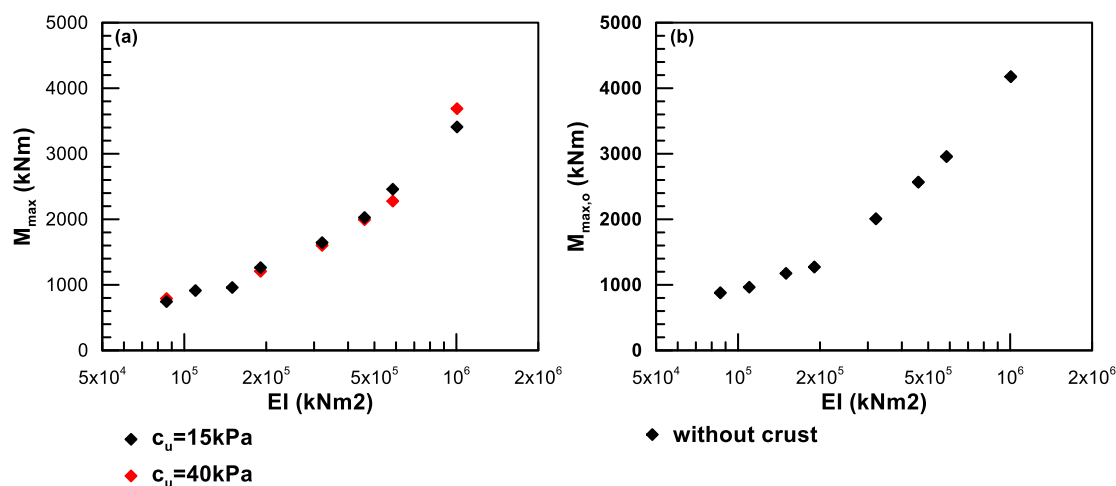


Σχήμα 5.16: (a) Ροπή στη βάση της κρούστας και (b) ελάχιστη ροπή στον πάσσαλο συναρτήσει της δυσκαμψίας.

Στην περίπτωση ενός δύσκαμπτου πασσάλου [βλέπε στο **Σχήμα 5.15(a)** τη καμπύλη δυσκαμψίας $EI=321300$ kNm² ή στο **Σχήμα 5.15(b)** την αντίστοιχη καμπύλη], μειώνεται η επιρροή της κρούστας στον πάσσαλο. Η διαφορά σχετικής δυσκαμψίας μεταξύ πασσάλου και εδάφους είναι τέτοια ώστε ο πάσσαλος να μπορεί να συγκρατεί την ρευστοποιημένη άμμο αλλά δεν είναι εντελώς άκαμπτος ώστε να συγκρατεί και

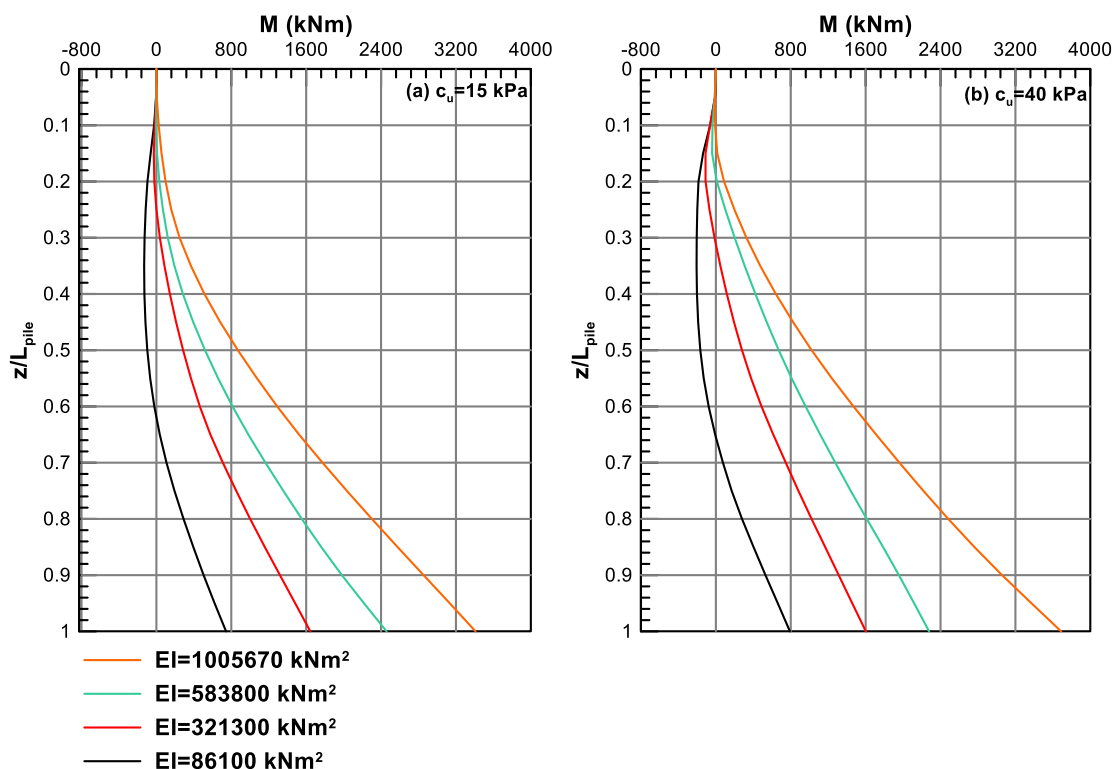
την κρούστα. Συνεπεία αυτού, είναι η κεφαλή του πάσσαλου να μετακινείται περισσότερο από το έδαφος στην αντίστοιχη θέση και ο πάσσαλος να δέχεται και πάλι μια αρνητική ροπή αλλά μικρότερη. Ο τελείως άκαμπτος πάσσαλος μπορεί να συγκρατήσει ολόκληρο το περιβάλλον έδαφος (rinning effect) και δέχεται θετικές ροπές σε όλο το μήκος του, όπως δείχνει και το **Σχήμα 5.16(b)** και για δυσκαμψία μεγαλύτερη από $EI=500000 \text{ kNm}^2$ η ελαχίστη ροπή είναι μηδέν.

Ενδιαφέρουν παρουσιάζουν και οι ροπές στη βάση της άμμου αν συγκριθούν με τις αντίστοιχες ροπές όταν η κρούστα απουσιάζει (**Σχήμα 5.17**). Για τις αναλύσεις με κρούστα και χωρίς κρούστα, η μεταβολή της ροπής στη βάση της άμμου συναρτήσει της δυσκαμψίας είναι η ίδια, γεγονός που ενισχύει όσα ειπώθηκαν προηγουμένως μιας και στις αναλύσεις μόνο με άμμο ο πάσσαλος συμπεριφέρεται εξολοκλήρου σαν πρόβολος. Συγκεκριμένα, φαίνεται πως για δυσκαμψίες μέχρι $EI=200000 \text{ kNm}^2$, οι ροπές στη βάση είναι περίπου σταθερές. Με την αύξηση της δυσκαμψίας, αυξάνονται και οι ροπές αφού ο πάσσαλος συμπεριφέρεται όλο και περισσότερο σαν πρόβολος.



Σχήμα 5.17: Ροπές στη βάση της άμμου για αναλύσεις με και χωρίς κρούστα.

Τέλος παρουσιάζονται οι κατανομές των ροπών με το βάθος για τις αναλύσεις διαφορετική αντοχή κρούστας στο **Σχήμα 5.18**. Είναι εμφανές πως με την αύξηση της δυσκαμψίας οι αρνητικές ροπές κοντά στη διεπιφάνεια κρούστας και άμμου ολοένα μειώνονται, υποδηλώνοντας τη μείωση της επιρροής της κρούστας στον πάσσαλο.



Σχήμα 5.18: Κατανομές καμπτικών ροπών με το βάθος για (a) μη-διαπερατή κρούστα με $c_u=15$ kPa και (b) μη-διαπερατή κρούστα με $c_u=40$ kPa.

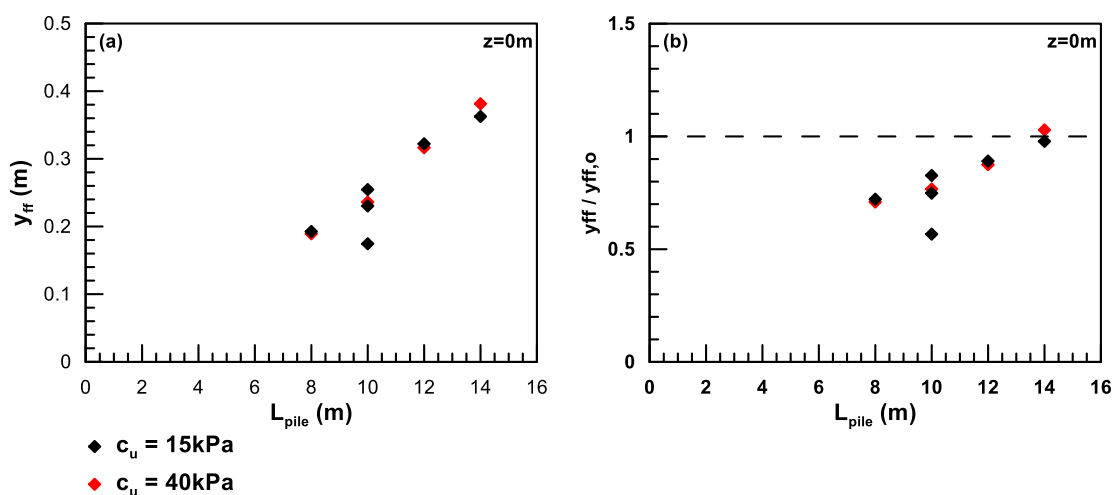
Συνοψίζοντας, τα βασικά συμπεράσματα για την επίδραση της ροπής αδράνειας είναι τα εξής:

- Οι μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου δεν επηρεάζονται από τη δυσκαμψία και δεν παρουσιάζουν διαφορές.
- Οι μετακινήσεις του πασσάλου μειώνονται καθώς αυξάνει η δυσκαμψία του και ο πάσσαλος γίνεται πιο στιβαρός.
- Οι αρνητικές ροπές που δημιουργούνται στον πάσσαλο λόγω της κρούστας μειώνονται καθώς αυξάνεται η δυσκαμψία του πασσάλου ενώ οι θετικές ροπές στη βάση της άμμου συνεχώς αυξάνονται.
- Παρατηρούνται δύο βασικοί τύποι απόκρισης του πασσάλου ανάλογα με τη δυσκαμψία του. Για μικρές τιμές της δυσκαμψίας $EI \leq 200000$ kNm², ο πάσσαλος συμπεριφέρεται σαν αμφίπακτο μέλος και κυρίαρχο ρόλο στα εντατικά του μεγέθη διαδραματίζει η κρούστα. Για μεσαίες τιμές της δυσκαμψίας $EI \geq 200000$ kNm² και $EI \leq 500000$ kNm², ο πάσσαλος συμπεριφέρεται ως πρόβολος αλλά η κρούστα επιδρά ακόμη στα εντατικά του μεγέθη. Τέλος, για μεγάλες τιμές της

δυσκαμψίας $EI \geq 500000 \text{ kNm}^2$, ο πάσσαλος συνεχίζει να συμπεριφέρεται σαν πρόβολος, αλλά λόγω της μεγάλης ακαμψίας του, η κρούστα δεν επηρεάζει την απόκριση του.

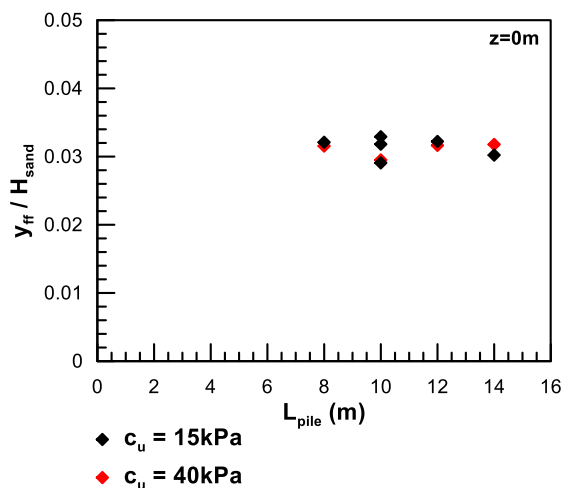
5.4 Επίδραση Μήκους Πασσάλου

Η αλλαγή του μήκους του πασσάλου επηρεάζει τη καμπτική δυσκαμψία με τρόπο παρόμοιο με την επίδραση της ροπής αδράνειας. Χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας των παραμετρικών αναλύσεων είναι η αύξηση του πάχους του στρώματος της άμμου. Είναι λογικό με την αύξηση του πάχους να παρατηρηθεί ανάλογη αύξηση των μετακινήσεων του ελεύθερου πεδίου, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5.19(a)**. Στο **Σχήμα 5.19(b)**, οι κανονικοποιημένες μετακινήσεις είναι μικρότερες της μονάδας γιατί γενικά η ύπαρξη της κρούστας μειώνει τις μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου.



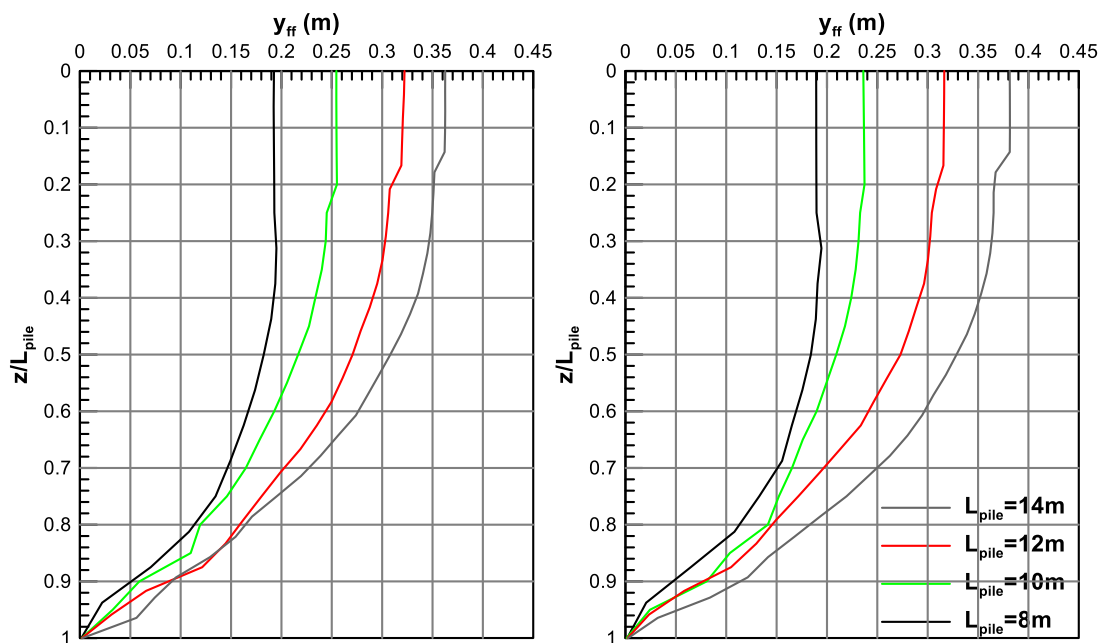
Σχήμα 5.19: (a) μετακινήσεις ελεύθερου πεδίου και (b) κανονικοποιημένες μετακινήσεις ως προς τις αντίστοιχες μετακινήσεις προφίλ από ρευστοποιήσιμη άμμο, στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσεως του ελεύθερου μήκους του πασσάλου.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το **Σχήμα 5.20** όπου παρουσιάζεται η μεταβολή των μετακινήσεων του ελεύθερου πεδίου κανονικοποιημένων ως προς το πάχος της άμμου συναρτήσεως του ελεύθερου μήκους του πασσάλου. Η μεταβολή των μετακινήσεων φαίνεται σταθερή και υποδηλώνεται ότι το μέγεθος τους καθορίζεται κυρίως από το στρώμα της άμμου.



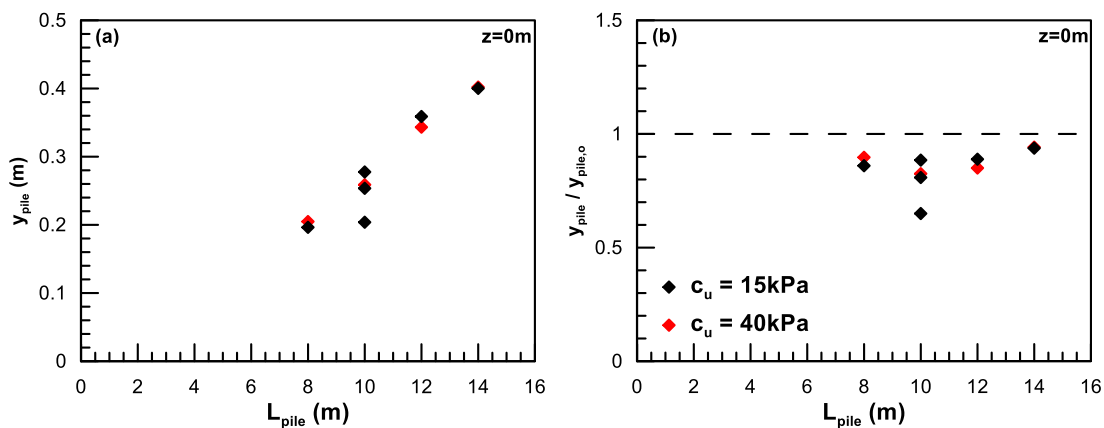
Σχήμα 5.20: Μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου κανονικοποιημένες ως προς το πάχος της άμμου.

Επίσης, η διάφορα στην αντοχή της αργλικής κρούστας δεν επηρεάζει τις μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου και αυτό φαίνεται από το **Σχήμα 5.19(a)** και το **Σχήμα 5.21**, όπου παρουσιάζονται οι κατανομές των μετακινήσεων του ελεύθερου πεδίου με το βάθος.



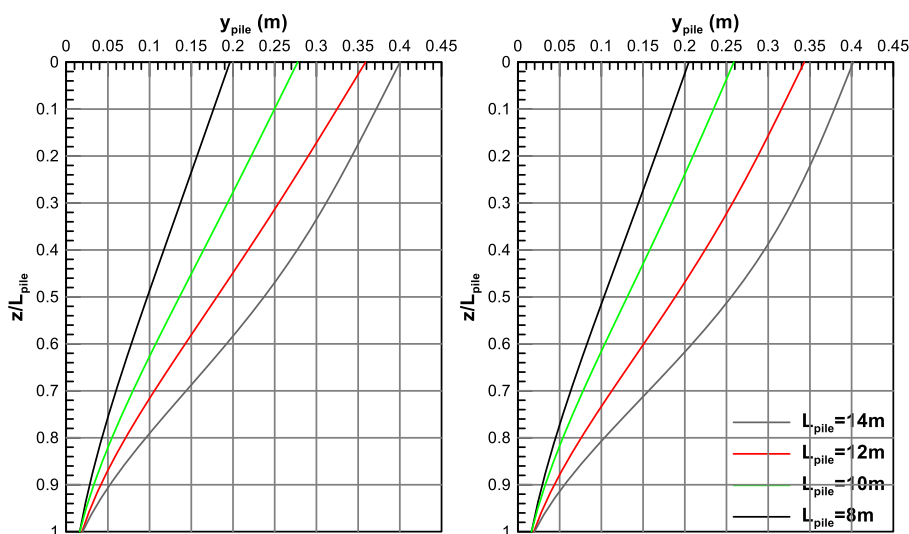
Σχήμα 5.21: Κατανομές μετακινήσεων του ελεύθερου πεδίου συναρτήσει του βάθους κανονικοποιημένου με το μήκος του πασσάλου, για (a) προφίλ με αργλική κρούστα αντοχής $c_u=15$ kPa και (b) προφίλ με αργλική κρούστα αντοχής $c_u=40$ kPa.

Στις μετακινήσεις της κεφαλής του πασσάλου παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά με τις μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το πάχος της άμμου, οι μετακινήσεις του πασσάλου καθορίζονται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις μετακινήσεις της άμμου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.22(a). Μάλιστα, η μεταβολή των μετακινήσεων της κεφαλής του πασσάλου είναι ίδια με την αντίστοιχη μεταβολή των μετακινήσεων του ελεύθερου πεδίου.



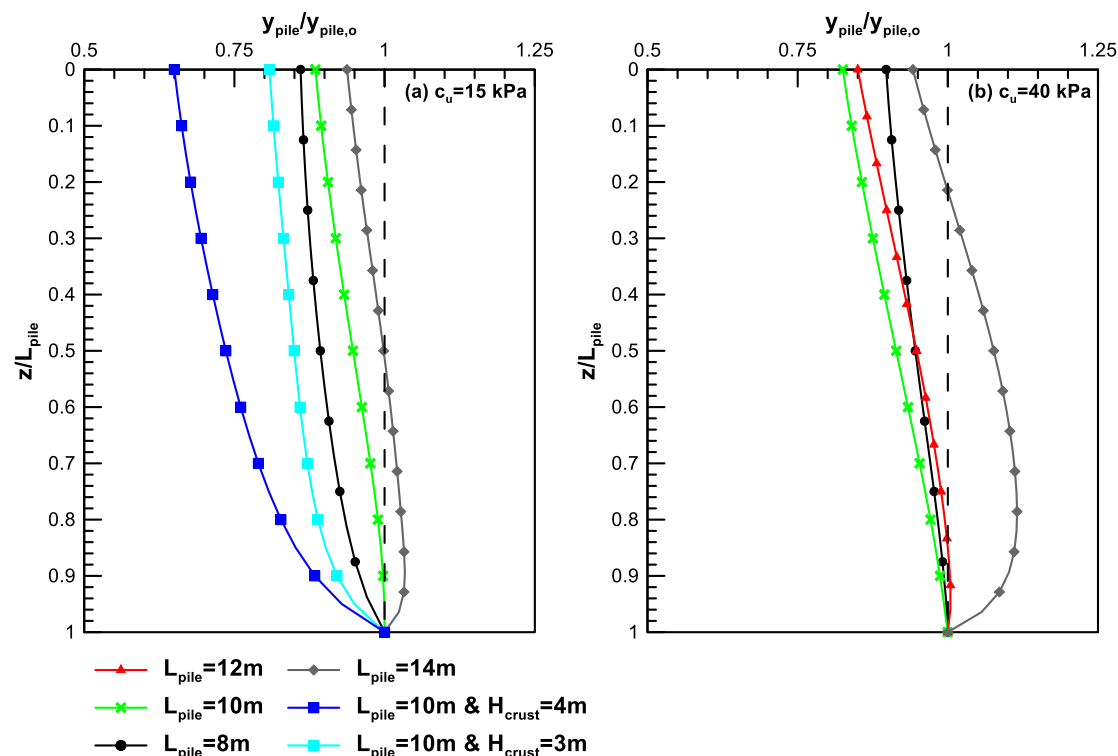
Σχήμα 5.22: (a) Μετακίνηση κεφαλής πασσάλου και (b) κανονικοποιημένη μετακίνηση στην κεφαλή σε βάθος $z=0\text{m}$ από την επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει του ελεύθερου μήκους του πασσάλου.

Από την κατανομή των μετακινήσεων του πασσάλου με το βάθος στο Σχήμα 5.23, δε μπορεί να αναγνωριστεί κάποιος μηχανισμός απόκρισης που να εξηγεί πλήρως την επίδραση του μήκους.



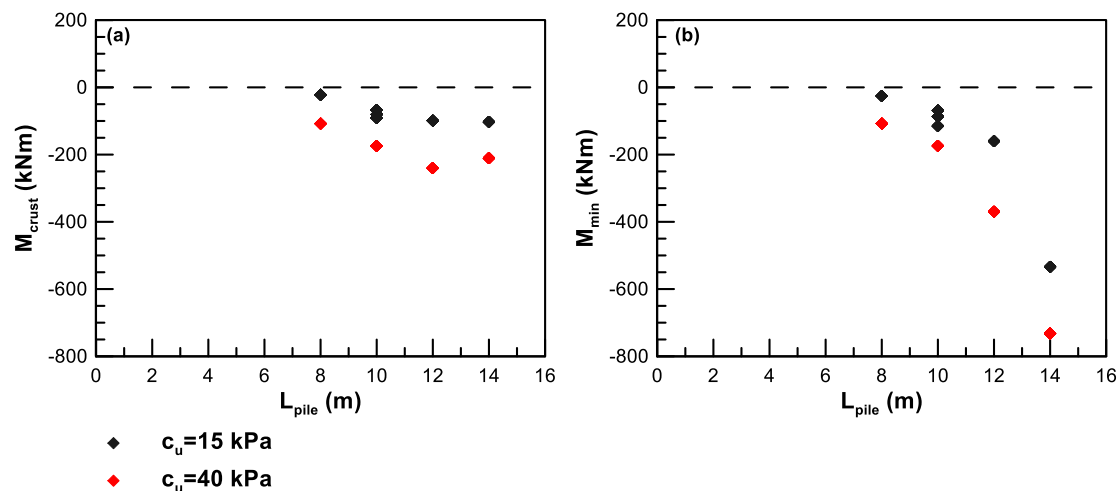
Σχήμα 5.23: Κατανομή της μετακίνησης του πασσάλου με το βάθος για (a) μη-διαπερατή κρούστα με $c_u=15\text{kPa}$ και (b) μη-διαπερατή κρούστα με $c_u=40\text{kPa}$.

Αν όμως, οι μετατοπίσεις του πασσάλου για τις αναλύσεις που υπάρχει η κρούστα, κανονικοποιηθούν με τις αντίστοιχες για τις αναλύσεις που απουσιάζει η κρούστα προκύπτει το **Σχήμα 5.24(a)** και **Σχήμα 5.24(b)**. Αντίστοιχα με την επίδραση της ροπής αδράνειας, οι δύο κατανομές καθορίζουν την απόκριση του πασσάλου όταν μεταβάλλεται το μήκος του πασσάλου για μια κρούστα με καθορισμένες εδαφικές ιδιότητες. Στο **Σχήμα 5.24(a)** παρουσιάζονται επιπλέον, και οι αναλύσεις με διαφορετικό πάχος κρούστας.



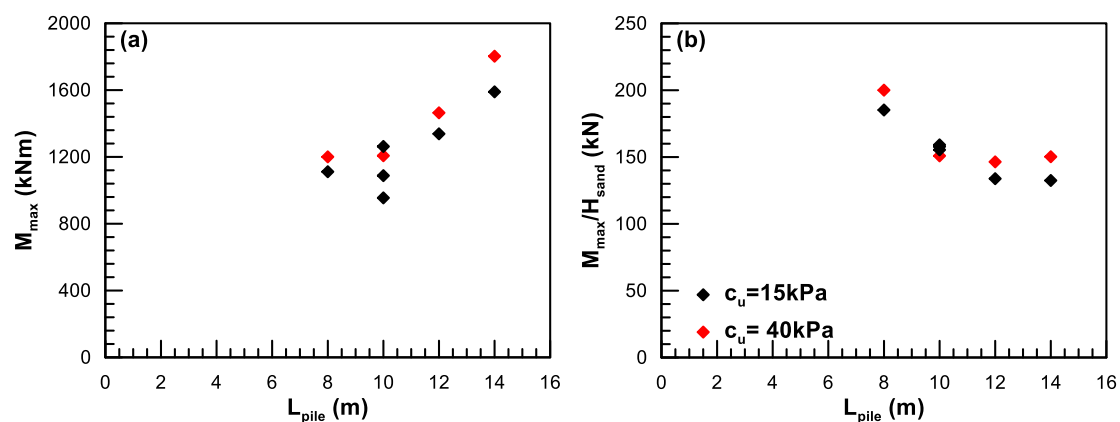
Σχήμα 5.24: Κανονικοποιημένες κατανομές μετακινήσεων του πασσάλου συναρτήσει του βάθους για (a) μη-διαπερατή κρούστα με $c_u=15$ kPa και (b) μη-διαπερατή κρούστα με $c_u=40$ kPa.

Οι μετακινήσεις είτε ελεύθερου πεδίου είτε πασσάλου εξαρτώνται από το πάχος της άμμου και η συμβολή της κρούστας είναι μικρή. Στην περίπτωση ενός πασσάλου με μήκος μέσα στην άμμο μικρότερο από $H_{sand} < 8m$, φαίνεται πως η στατική λειτουργία του είναι αυτή του δύσκαμπτου προβόλου. Αυτό συμβαίνει γιατί η άμμος δεν έχει αρκετά μεγάλο πάχος να επιβάλλει μεγάλες μετακινήσεις οπότε ο πάσσαλος αντιστέκεται και μετακινείται λιγότερο. Η κρούστα δημιουργεί αρνητικές ροπές στον πάσσαλο αλλά είναι μικρές γιατί και η μετακίνηση του πασσάλου είναι περιορισμένη, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.25(a)**.



Σχήμα 5.25: (a) Ροπή στη βάση της κρούστας και (b) ελάχιστη ροπή στον πάσσαλο συναρτήσει του μήκους του.

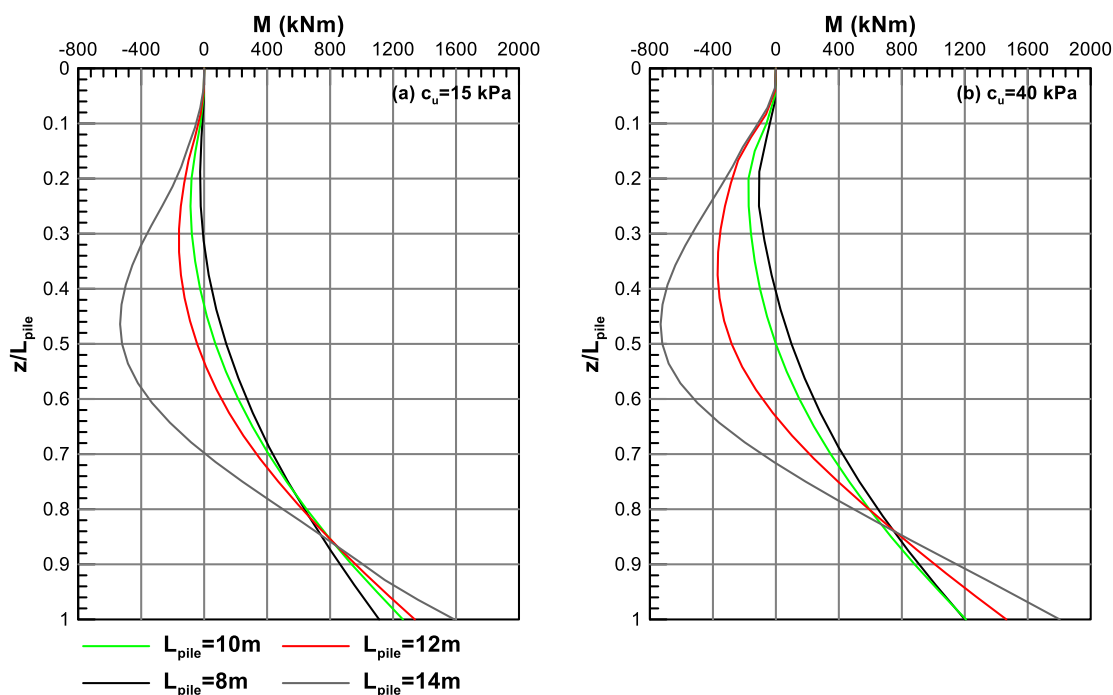
Στην περίπτωση που το ύψος της άμμου είναι $H_{sand} > 8m$, η άμμος επιβάλλει μεγάλες μετακινήσεις ενώ μειώνεται η καμπτική δυσκαμψία του πασσάλου από την αύξηση του μήκους. Ο πάσσαλος είναι περισσότερο εύκαμπτος και δε μπορεί να αντισταθεί στις επιβαλλόμενες μετακινήσεις πιάζοντας την κρούστα και οδηγώντας τη στην αστοχία. Η κρούστα, στη συνέχεια, επιβάλλει στον πάσσαλο μεγάλα κινηματικά φορτία και του δημιουργεί αρνητικές ροπές κοντά στη διεπιφάνεια με την άμμο, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.25(a). Σε αυτή την περίπτωση ο πάσσαλος λειτουργεί σαν αμφίπακτο μέλος. Οι ροπές στη βάση της άμμου εξαρτώνται από τη μετακίνηση που επιβάλλεται στον πάσσαλο. Καθώς αυξάνεται το πάχος της άμμου, αυξάνονται και οι επιβαλλόμενες μετακινήσεις και αντίστοιχη αύξηση αναμένεται στις ροπές. Πράγματι αυτό επαληθεύεται από το Σχήμα 5.26(a).



Σχήμα 5.26: (a) Ροπές στη βάση της άμμου και (b) ροπές στη βάση κανονικοποιημένες, συναρτήσει του μήκους του πασσάλου.

Στο **Σχήμα 5.26(b)**, παρουσιάζεται η ροπή στη βάση κανονικοποιημένη με το πάχος της άμμου. Στα μεγάλα μήκη, φαίνεται να σταθεροποιείται αποδεικνύοντας τη σαφή εξάρτηση της ροπής της βάσης από το πάχος της άμμου.

Τέλος παρουσιάζονται οι κατανομές των ροπών με το βάθος για τις δύο ομάδες αναλύσεων με διαφορετική αντοχή κρούστας στο **Σχήμα 5.27**. Είναι εμφανές πως με την αύξηση του μήκους οι αρνητικές ροπές κοντά στη διεπιφάνεια κρούστας και άμμου ολοένα και μεγαλώνουν, υποδηλώνοντας τη αύξηση της επιρροής της κρούστας στον πάσσαλο.



Σχήμα 5.27: Κατανομές καμπτικών ροπών με το βάθος για (a) μη-διαπερατή κρούστα με $c_u=15$ kPa και (b) μη-διαπερατή κρούστα με $c_u=40$ kPa.

Εν κατακλείδι, τα βασικά συμπεράσματα της επίδρασης του μήκους του πασσάλου είναι τα εξής:

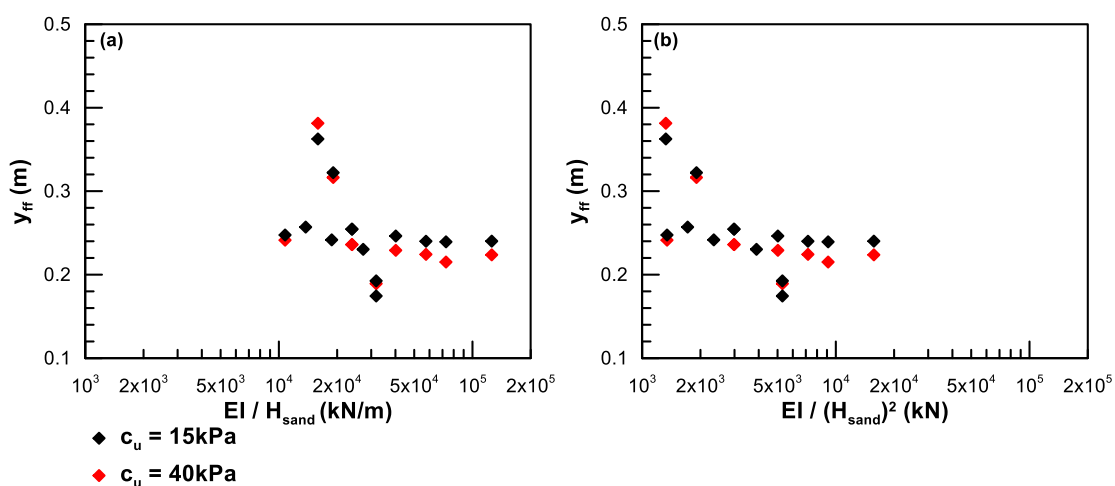
- Οι μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου αυξάνονται με την αύξηση του μήκους.
- Οι μετακινήσεις της κεφαλής του πασσάλου αυξάνονται επίσης με την αύξηση του μήκους.
- Οι αρνητικές ροπές που δημιουργούνται στον πάσσαλο λόγω της κρούστας και οι θετικές ροπές στη βάση της άμμου αυξάνονται καθώς μεγαλώνει το μήκος του πασσάλου.

- Αναγνωρίστηκαν δύο μηχανισμοί απόκρισης του πασσάλου. Όταν το πάχος της άμμου είναι μικρότερο από $H_{\text{sand}} < 8\text{m}$, ο πάσσαλος λειτουργεί ως πρόβολος και η κρούστα δεν διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στα εντατικά του μεγέθη. Αντίθετα, όταν το πάχος της άμμου είναι μεγαλύτερο από $H_{\text{sand}} > 8\text{m}$, ο πάσσαλος λειτουργεί ως αμφίπακτος και η κρούστα επηρεάζει σημαντικά τα εντατικά του μεγέθη.

5.5 Επίδραση δυσκαμψίας του πασσάλου

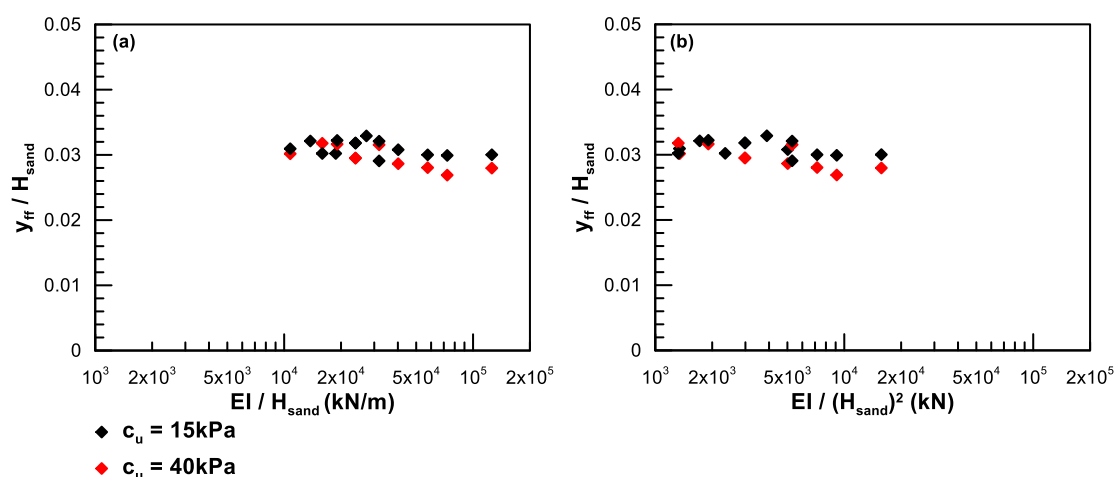
Σε αυτήν την ενότητα έγινε να προσπαθεία ενοποίησης των αποτελεσμάτων των δύο προηγούμενων ενοτήτων οι οποίες επιδρούν στην καμπτική δυσκαμψία του πασσάλου με διαφορετικό τρόπο. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων συσχετίστηκαν με τη στρωφική και τη μετακινησιακή δυσκαμψία του πασσάλου εάν θεωρηθεί ότι το ενεργό μήκος του είναι ίσο με το πάχος της άμμου.

Στο **Σχήμα 5.28(a και b)** που παρουσιάζεται η μεταβολή της μετακίνησης του ελεύθερου πεδίου με το δείκτη EI/H_{sand} (στρωφική δυσκαμψία) και το δείκτη $EI/(H_{\text{sand}})^2$ (μετακινησιακή δυσκαμψία), φαίνεται η συνδυασμένη επίδραση της καμπτικής δυσκαμψίας του πασσάλου. Συγκεκριμένα, όπως ειπώθηκε και στην **Ενότητα 5.3**, η μεταβολή της ροπής αδράνειας του πασσάλου δεν επηρεάζει τις μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου σε αντίθεση με τη μεταβολή του μήκους του πασσάλου (**Ενότητα 5.4**) διότι στη δεύτερη περίπτωση καθοριστικό ρόλο στις μετακινήσεις διαδραματίζει το πάχος της άμμου.



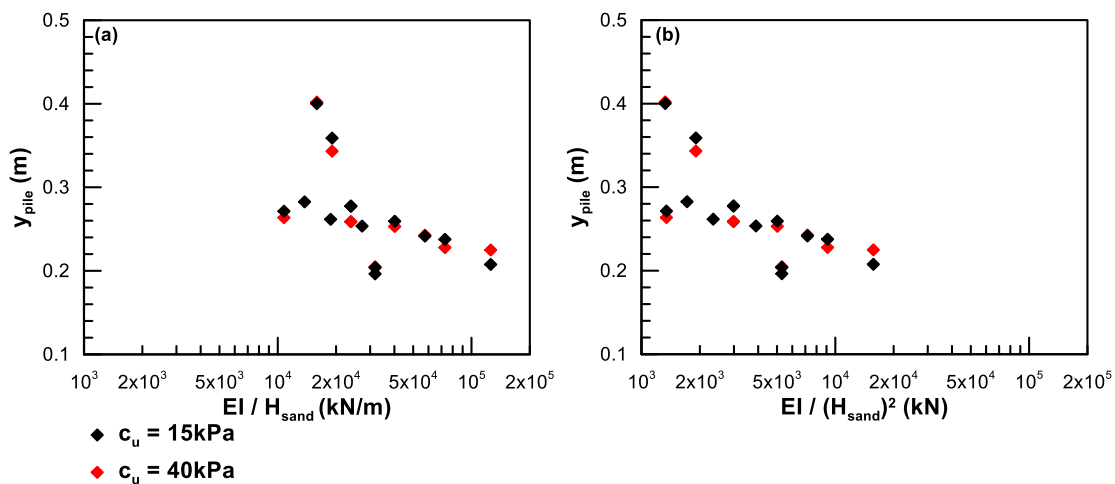
Σχήμα 5.28: Μετακινήσεις ελεύθερου πεδίου σε βάθος $z=0\text{m}$ (a) συναρτήσει του λόγου EI/H_{sand} και (b) συναρτήσει του λόγου $EI/(H_{\text{sand}})^2$.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι μετακινήσεις ελεύθερου πεδίου αν κανονικοποιηθούν ως προς το πάχος της άμμου, όπως στο Σχήμα 5.29(a και b). Με αυτή τη κανονικοποίηση αφαιρείται η επίδραση της άμμου από τα αποτελέσματα και αποτυπώνεται πιο καθαρά η επίδραση της καμπτικής δυσκαμψίας στις μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου. Παρατηρείται πως πράγματι η μεταβολή της στιβαρότητας του πασσάλου δεν επιφέρει μεταβολές στην κατανομή των μετακινήσεων. Επίσης, ο λόγος $EI/(H_{\text{sand}})^2$ φαίνεται να μειώνει τη διασπορά των αποτελεσμάτων.



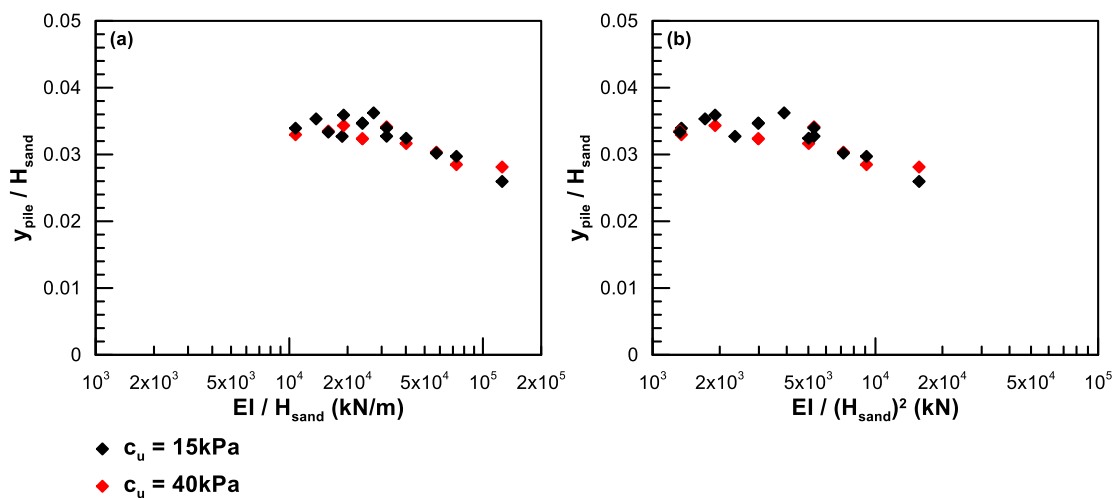
Σχήμα 5.29: Μετακινήσεις ελεύθερου πεδίου κανονικοποιημένες ως προς το πάχος της άμμου (a) συναρτήσει του λόγου EI/H_{sand} και (b) συναρτήσει του λόγου $EI/(H_{\text{sand}})^2$.

Στο Σχήμα 5.30 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις στη κεφαλή του πασσάλου συναρτήσει των δύο δεικτών. Η μετακίνηση στη κεφαλή του πασσάλου συσχετίζεται άμεσα με την καμπτική δυσκαμψία του καθώς όσο πιο δύσκαμπτος γίνεται μειώνεται αντίστοιχα και η μετακίνηση. Όμως, λόγω των δύο διαφορετικών τρόπων μεταβολής της δυσκαμψίας που αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες από τα σχήματα δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο σαφές συμπέρασμα.



Σχήμα 5.30: Μετακίνηση στη κεφαλή του πασσάλου (a) συναρτήσει του λόγου EI/H_{sand} και (b) συναρτήσει του λόγου $EI/(H_{sand})^2$.

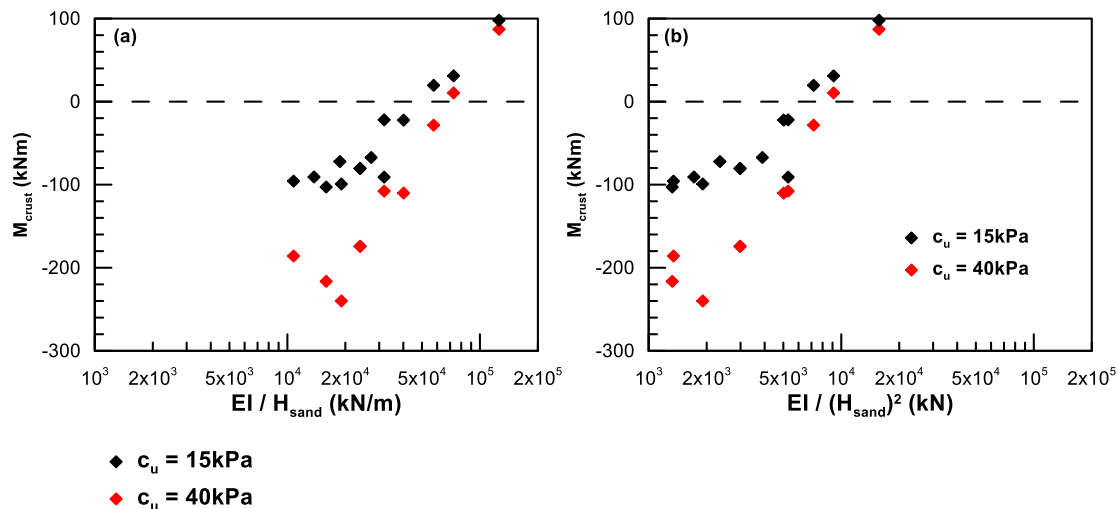
Για να καταστεί πιο σαφής η συνδυασμένη επίδραση της δυσκαμψίας στη μετακίνηση του πασσάλου, εφαρμόζεται η προηγούμενη κανονικοποίηση, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5.31(a και b)**. Αφού αφαιρέθηκε η επίδραση της άμμου, παρατηρείται πως όταν αυξάνεται η δυσκαμψία μειώνεται η μετακίνηση.



Σχήμα 5.31: Μετακινήσεις κεφαλής του πασσάλου κανονικοποιημένες ως προς το πάχος της άμμου (a) συναρτήσει του λόγου EI/H_{sand} και (b) συναρτήσει του λόγου $EI/(H_{sand})^2$.

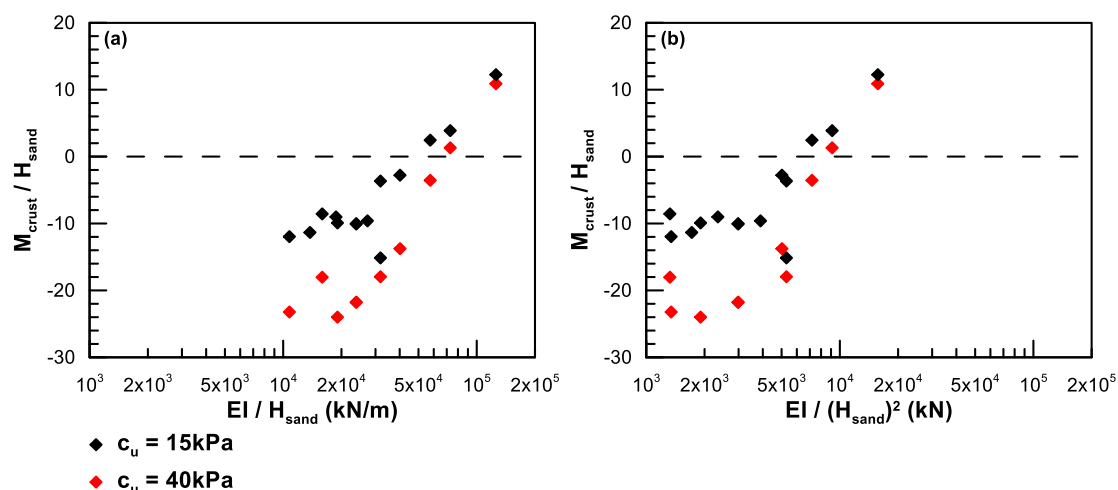
Οι ροπές στην διεπιφάνεια της κρούστας με την άμμο παρουσιάζουν πιο σαφή εξάρτηση από την καμπτική δυσκαμψία σύμφωνα με το **Σχήμα 5.32(a)** και με το **Σχήμα 5.32(b)**. Για μικρές τιμές της δυσκαμψίας, οι ροπές φαίνονται περίπου σταθερές υποδηλώνοντας την μεγάλη επιρροή της κρούστας στην κινηματική

απόκριση του πασσάλου και καθώς η δυσκαμψία μεγαλώνει οι ροπές μειώνονται γιατί ο πάσσαλος αντιστέκεται στην κρούστα. Στο Σχήμα 5.32(b) που αποτυπώνονται οι ροπές συναρτήσει του λόγου $EI/(H_{sand})^2$ παρατηρείται λιγότερη διασπορά των αποτελεσμάτων.



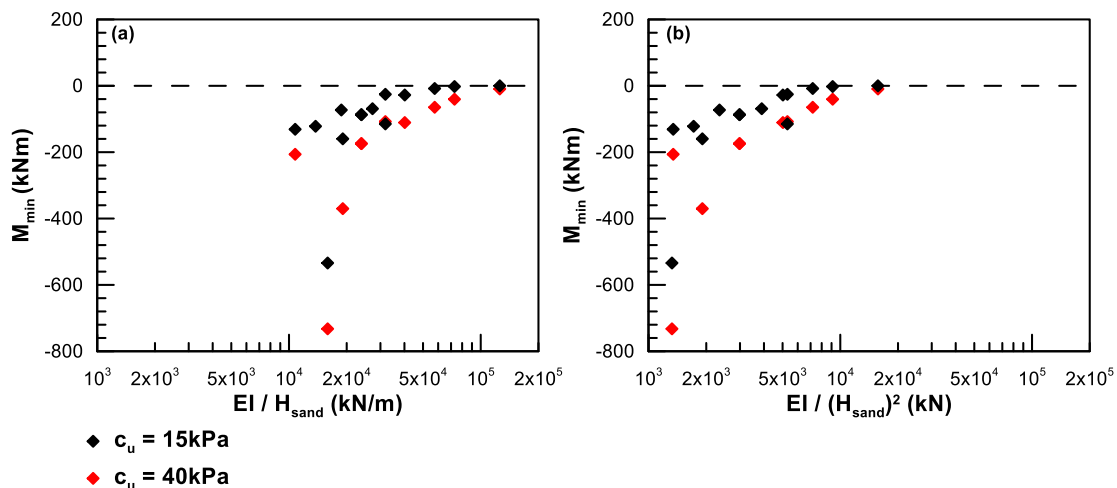
Σχήμα 5.32: Ροπές πασσάλου στη διεπιφάνεια κρούστας και άμμου (a) συναρτήσει του λόγου EI/H_{sand} και (b) συναρτήσει του λόγου $EI/(H_{sand})^2$.

Η κανονικοποίηση των ροπών στη διεπιφάνεια κρούστας άμμου με το πάχος της άμμου, δε προσφέρει κάποιο επιπλέον ποιοτικό συμπέρασμα αλλά λόγω της αφαίρεσης της επίδρασης της άμμου μειώνεται η διασπορά των αποτελεσμάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.33 και για τους δύο δείκτες δυσκαμψίας.

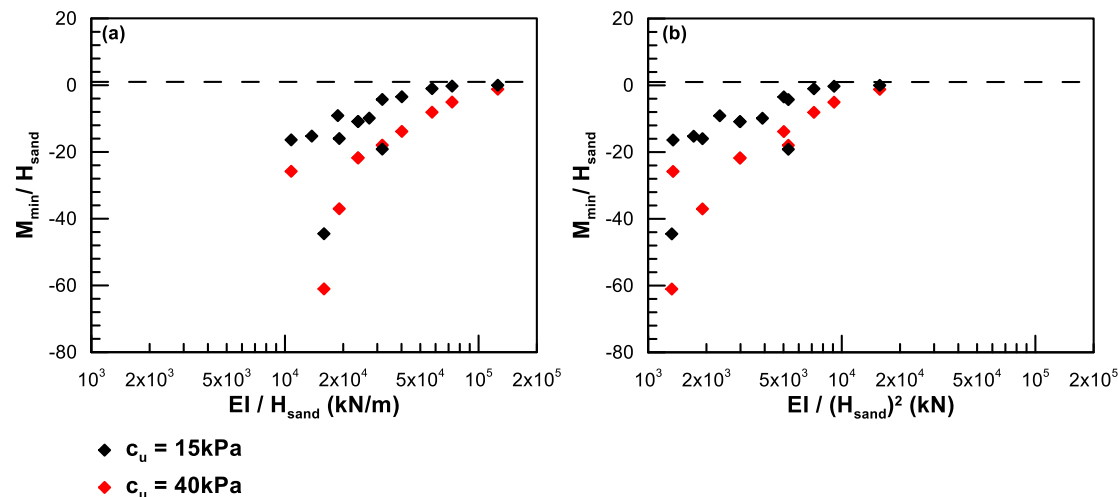


Σχήμα 5.33: Ροπές πασσάλου στη διεπιφάνεια κρούστας και άμμου κανονικοποιημένες ως προς το πάχος της άμμου (a) συναρτήσει του λόγου EI/H_{sand} και (b) συναρτήσει του λόγου $EI/(H_{sand})^2$.

Στο Σχήμα 5.34 και στο Σχήμα 5.35 παρουσιάζεται η μεταβολή των ελάχιστων ροπών που δημιουργούνται στον πάσσαλο συναρτήσει των δύο δεικτών δυσκαμψίας. Οι ελάχιστες ροπές ακολουθούν πλήρως τη μεταβολή των ροπών στη διεπιφάνεια κρούστας με άμμου και στις μεγάλες δυσκαμψίες παρατηρείται ότι μηδενίζονται υποδηλώνοντας ότι ο πάσσαλος καταπονείται πλέον μόνο από θετικές ροπές.



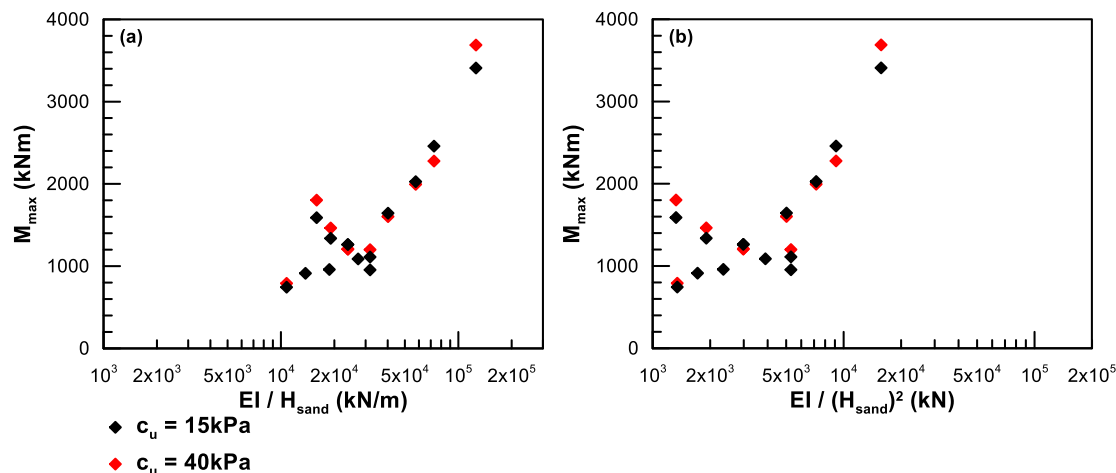
Σχήμα 5.34: Ελάχιστες ροπές πάσσαλου (a) συναρτήσει του λόγου EI/H_{sand} και (b) συναρτήσει του λόγου $EI/(H_{sand})^2$.



Σχήμα 5.35: Ελάχιστες ροπές πάσσαλου κανονικοποιημένες ως προς το πάχος της άμμου (a) συναρτήσει του λόγου EI/H_{sand} και (b) συναρτήσει του λόγου $EI/(H_{sand})^2$.

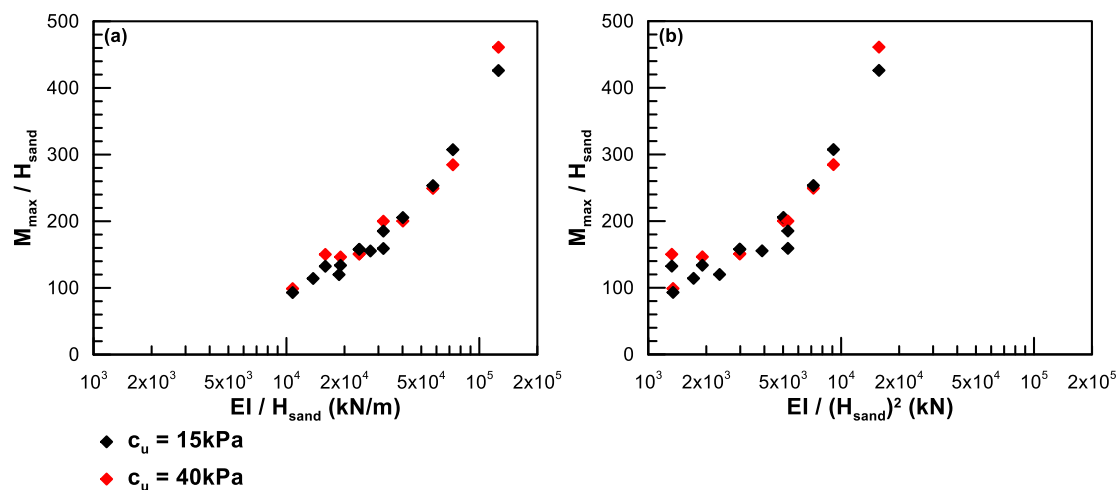
Τέλος, στο Σχήμα 5.36, παρουσιάζεται η ροπή στη βάση της άμμου για τους δύο δείκτες δυσκαμψίας. Η επίδραση της ροπής αδράνειας παρατηρείται από τη συνεχή

αύξηση της ροπής καθώς οι δείκτες λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές. Η επίδραση του μήκους του πασσάλου φαίνεται από τη μείωση της ροπής για αύξηση των δεικτών.



Σχήμα 5.36: Ροπές πασσάλου στη βάση της άμμου (a) συναρτήσει του λόγου EI/H_{sand} και (b) συναρτήσει του λόγου $EI/(H_{sand})^2$.

Για να ενοποιηθεί η επίδραση των επιμέρους παραμέτρων που επηρεάζουν τη δυσκαμψία (δηλαδή ροπή αδράνειας και μήκος) εφαρμόζεται η κανονικοποίηση που έγινε και στις προηγούμενες παραμέτρους (μετακίνηση ελεύθερου πεδίου και πασσάλου, ελάχιστη ροπή και ροπή στη διεπιφάνεια κρούστας με άμμο). Μετά την κανονικοποίηση στο **Σχήμα 5.37**, φαίνεται πως η αύξηση της δυσκαμψίας του πάσσαλου οδηγεί και σε μεγαλύτερες ροπές στη βάση.



Σχήμα 5.37: Ροπές στη βάση του πασσάλου κανονικοποιημένες ως προς το πάχος της άμμου (a) συναρτήσει του λόγου EI/H_{sand} και (b) συναρτήσει του λόγου $EI/(H_{sand})^2$.

Επίσης, πρέπει να παρατηρηθεί πως η μεταβολή της ροπής στη βάση συναρτήσει του λόγου $EI/(H_{\text{sand}})^2$ φαίνεται να σταθεροποιείται για τιμές του δείκτη $EI/(H_{\text{sand}})^2 < 5 \times 10^{-3}$ που σημαίνει ότι πάσσαλος λειτουργεί στατικά ως αμφίπακτος διότι οι κινηματικοί περιορισμοί που του επιβάλλει η κρούστα επηρεάζουν με τη σειρά τους τη δυσκαμψία.

5.6 Δείκτες Ποσοτικοποίησης της Επίδρασης της Κρούστας

Μετά την αναγνώριση των βασικών μηχανισμών που διέπουν την απόκριση του πασσάλου, κρίθηκε απαραίτητο να βρεθεί ένας δείκτης που διαχωρίζει και οριοθετεί τους δύο βασικούς τύπους απόκρισης του πασσάλου. Όπως ειπώθηκε στις **Ενότητες 5.2** έως και **5.4** ανάλογα με τις εδαφικές ιδιότητες της κρούστας και τα χαρακτηριστικά του πασσάλου (ροπή αδράνειας και μήκος), ο πάσσαλος συμπεριφέρεται με δύο τρόπους, σαν πρόβολος όταν έχει μεγάλη καμπτική δυσκαμψία ή η κρούστα είναι μικρής αντοχή και σαν αμφίπακτο μέλος όταν αντίστοιχα έχει μικρή δυσκαμψία ή η κρούστα είναι πιο στιφρή.

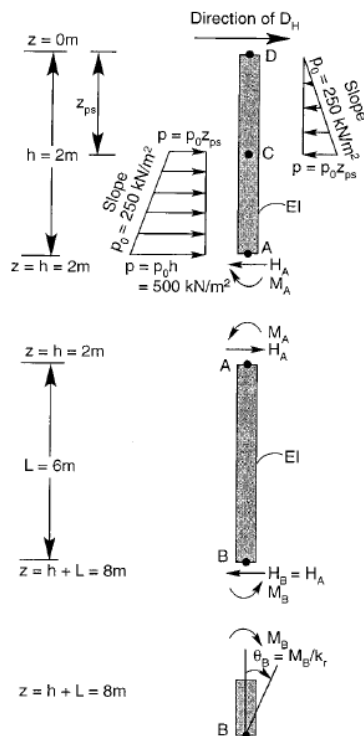
Ο ποσοτικός δείκτης πρέπει να μπορεί να διαχωρίζει τους δύο τύπους απόκρισης και παράλληλα να δείχνει τη μετάβαση από τον πρόβολο στο αμφίπακτο μέλος. Με βάση το μοντέλο οριακής ισορροπίας των **Dobry et al., 2003** που φαίνεται στο **Σχήμα 5.38**, αναπτύχθηκαν δύο δείκτες που περιγράφουν την επίδραση της κρούστας. Οι **Dobry et al. (2003)** χώρισαν τον πάσσαλο σε τρία μέρη και στη διεπιφάνεια της κρούστας με την άμμο επέβαλαν τη ροπή και την οριζόντια δύναμη που δημιουργεί η κρούστα στον πάσσαλο. Οι συγγραφείς βέβαια κάνουν την παραδοχή ότι η άμμος έχει αμελητέα επίδραση στα εντατικά μεγέθη του πασσάλου κάτι το οποίο δεν ισχύει όπως αποδείχτηκε στις προηγούμενες ενότητες (και ιδιαίτερα στην περίπτωση που το μήκος του πασσάλου μέσα στην άμμο μεταβάλλεται). Παρόλο αυτά, προέκυψαν δύο δείκτες ποσοτικοποίησης του φαινομένου, ο I_{rot} και ο I_{trans} που παρουσιάζονται παρακάτω:

$$I_{\text{rot}} = \left(\frac{c_u \cdot D \cdot H_{\text{crust}}^2}{(EI / H_{\text{sand}})} \right) \quad (5.1)$$

&

$$I_{\text{trans}} = \left(\frac{c_u \cdot D \cdot H_{\text{crust}}}{(EI / (H_{\text{sand}})^2)} \right) \quad (5.2)$$

όπου c_u η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της κρούστας (kPa), D η διάμετρος του πασσάλου (m), H_{crust} το πάχος της κρούστας (m), H_{sand} το πάχος της άμμου και EI η καμπτική δυσκαμψία του πασσάλου (kNm^2).

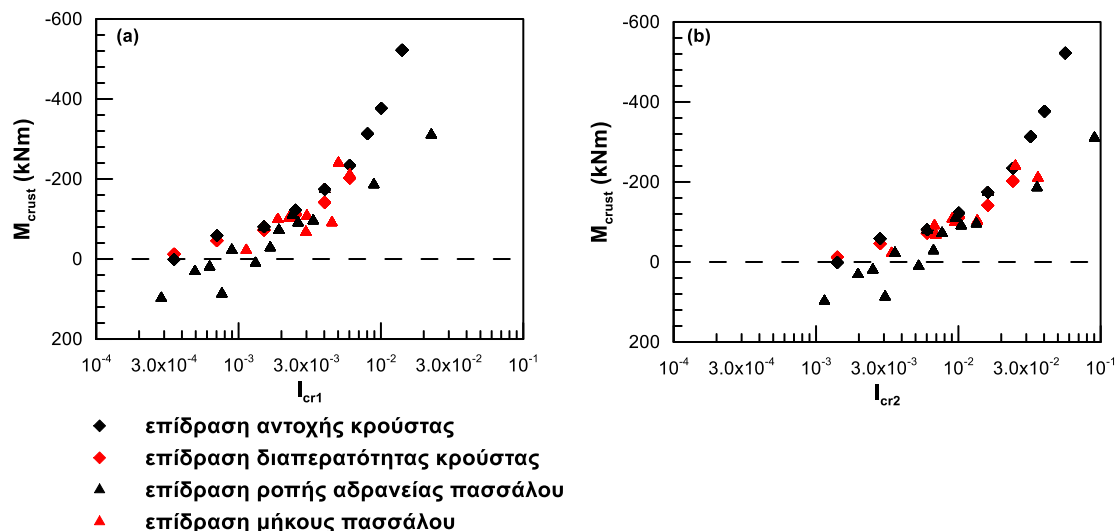


Σχήμα 5.38: Μοντέλο Οριακής Ισορροπίας των Dobry et al.,2003.

Ο I_{rot} έχει στον αριθμητή ένα μέγεθος αντίστοιχο με τη ροπή που δημιουργεί η κρούστα στον πάσσαλο συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u και στον παρονομαστή τη στροφική ακαμψία του πασσάλου εάν θεωρηθεί ως ενεργό μήκος του, το μήκος μέσα στην άμμο. Αντιπροσωπεύει τη στροφική επίδραση της αργλικής κρούστας. Ο I_{trans} έχει στον αριθμητή την οριζόντια δύναμη που δημιουργεί η κρούστα στον πάσσαλο συναρτήσει της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u και στον παρονομαστή τη μετακινησιακή ακαμψία του πασσάλου εάν θεωρηθεί ως ενεργό μήκος του, το μήκος μέσα στην άμμο. Αντιπροσωπεύει τη μετακινησιακή επίδραση της αργλικής κρούστας.

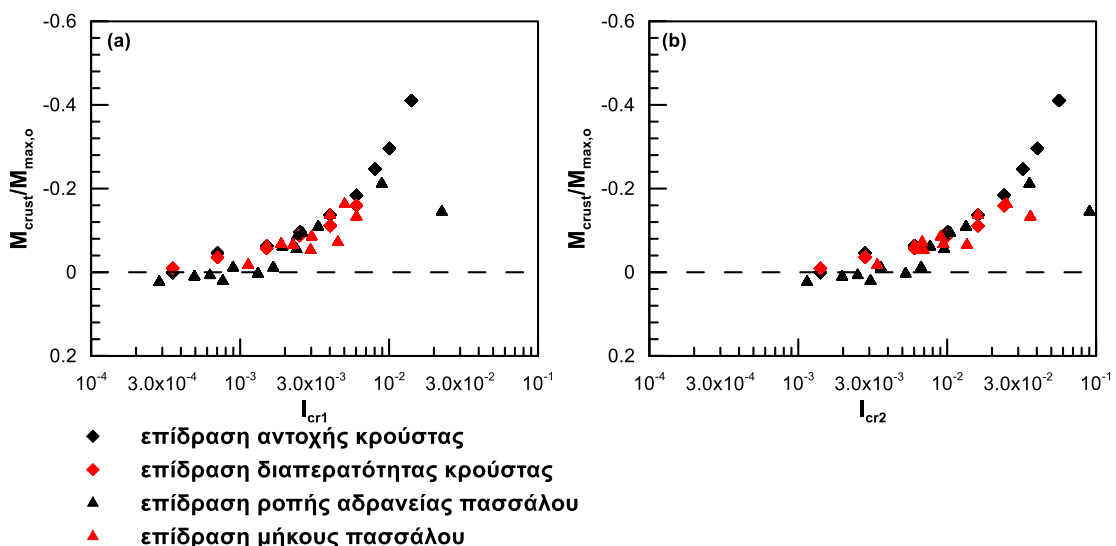
Στο Σχήμα 5.39(a και b), παρουσιάζεται η μεταβολή της ροπής στη διεπιφάνεια της κρούστας με την άμμο. Φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η τιμή και των δύο δεικτών, η ροπή μειώνεται αλγεβρικά (αυξάνεται κατά απόλυτο) υποδηλώνοντας ότι μεγαλώνει η επιρροή της κρούστας στην κινηματική απόκριση του πασσάλου. Στις μικρές τιμές των δεικτών ($I_{cri} < 1.0 \times 10^{-3}$), η ροπή στη διεπιφάνεια παίρνει τιμές κοντά στο μηδέν

και ο πάσσαλος αποκρίνεται ως πρόβολος. Για τιμές των δεικτών $I_{cr1} > 3.0 \times 10^{-3}$, η κρούστα «πακτώνει» τη κεφαλή του πασσάλου.



Σχήμα 5.39: Μεταβολή των ροπών στη διεπιφάνεια της κρούστας με την άμμο (a) συναρτήσει του δείκτη I_{cr1} και (b) συναρτήσει του δείκτη I_{cr2} .

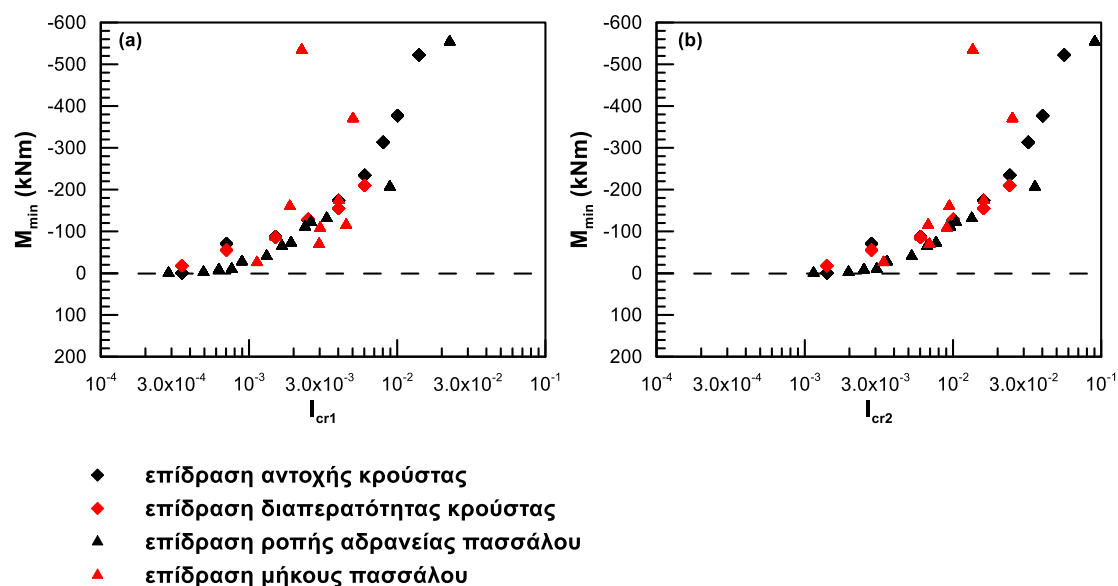
Αν οι παραπάνω ροπές κανονικοποιηθούν με τη ροπή στη βάση της άμμου των αναλύσεων χωρίς επιφανειακή κρούστα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.40(a και b) η διασπορά των αποτελεσμάτων περιορίζεται σημαντικά αφού αφαιρείται η επίδραση της άμμου.



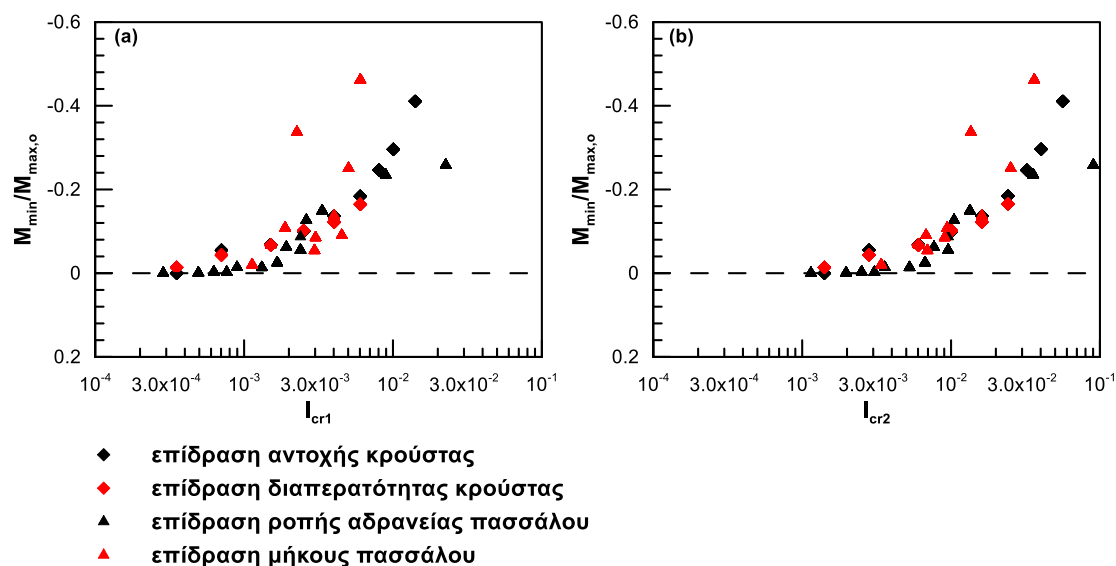
Σχήμα 5.40: Ροπές του πασσάλου στη διεπιφάνεια κρούστας-άμμου κανονικοποιημένες ως προς τις ροπές στη βάση της άμμου για τις αναλύσεις χωρίς κρούστα συναρτήσει (a) του δείκτη I_{cr1} και (b) του δείκτη I_{cr2} .

Τα όρια που διαχωρίζουν τις διαφορετικές συμπεριφορές του πασσάλου δεν επηρεάζονται από την κανονικοποίηση.

Τη μεταβολή των ροπών στην διεπιφάνεια κρούστας και άμμου ακολουθούν και οι ελάχιστες ροπές στον πάσσαλο όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.41**. Τα όρια που προσδιορίστηκαν προηγουμένως για τη διαφοροποίηση της απόκρισης του πασσάλου γίνονται πιο διακριτά τώρα καθώς για τιμές των δεικτών $I_{cr1} < 1.0 \times 10^{-3}$ η ελάχιστη ροπή που αναπτύσσεται στον πάσσαλο είναι μηδενική και επομένως ο πάσσαλος συμπεριφέρεται σαν πρόβολος. Όσο μειώνεται αλγεβρικά (αυξάνεται κατά απόλυτο) η ελάχιστη ροπή, η κρούστα επιβάλλει μεγαλύτερες αρνητικές ροπές στον πάσσαλο ο οποίος συμπεριφέρεται πλέον σαν αμφίπακτο μέλος. Εάν εφαρμοστεί και στις ελάχιστες ροπές η προηγούμενη κανονικοποίηση προκύπτουν τα ίδια ποιοτικά συμπεράσματα με πριν αλλά με λιγότερη διασπορά, σύμφωνα με το **Σχήμα 5.42(a και b)**.

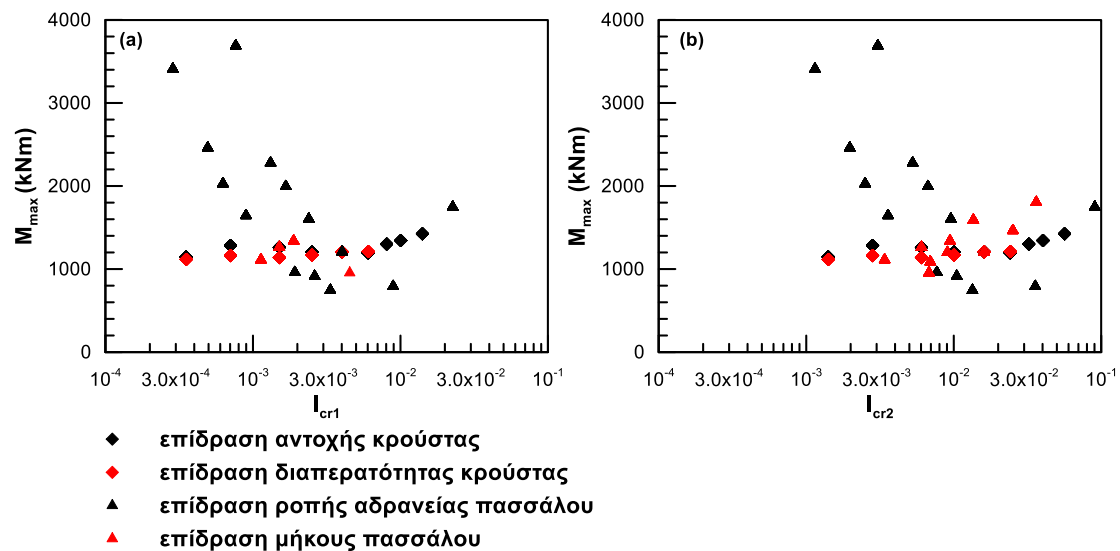


Σχήμα 5.41: Ελάχιστες ροπές πασσάλου (a) συναρτήσει του δείκτη I_{cr1} και (b) συναρτήσει του δείκτη I_{cr2}

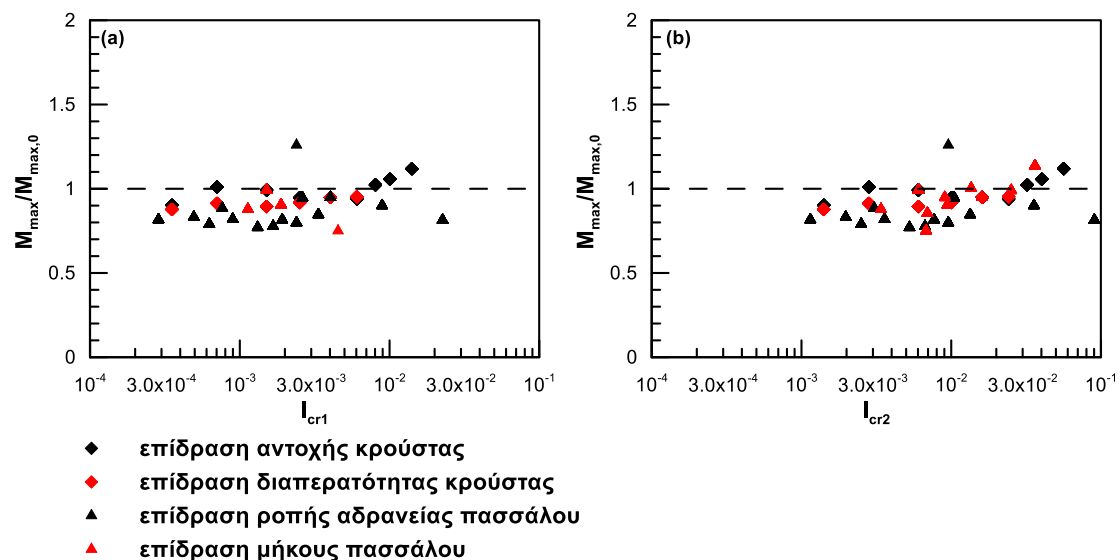


Σχήμα 5.42: Ελάχιστες ροπές πασσάλου κανονικοποιημένες (a) συναρτήσει του δείκτη I_{cr1} και (b) συναρτήσει του δείκτη I_{cr2} .

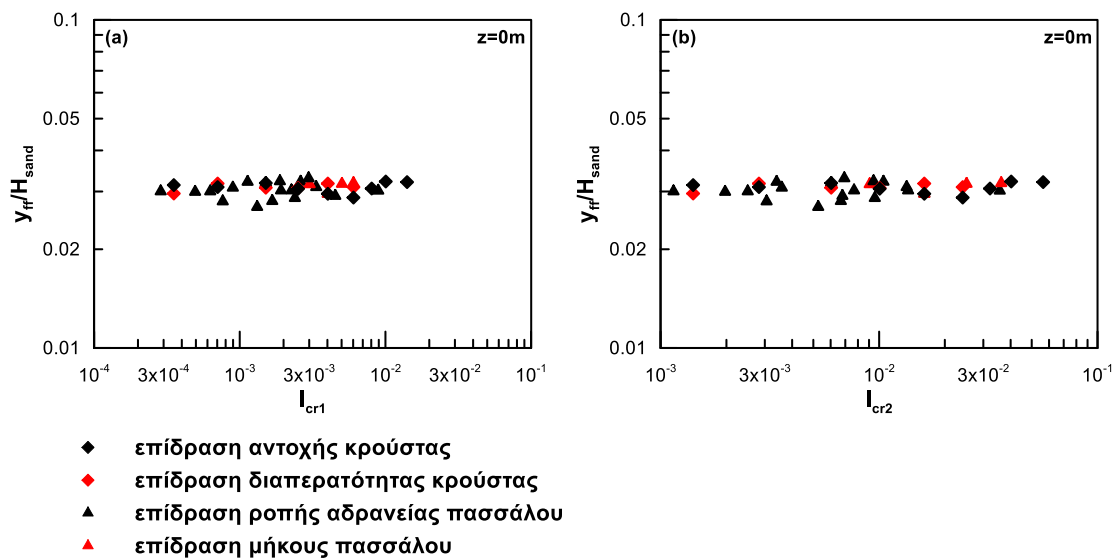
Στο **Σχήμα 5.43** έως και **Σχήμα 5.46** παρουσιάζονται οι μεταβολές της μέγιστης ροπής (στη βάση της άμμου), της κανονικοποιημένης μετακίνησης του ελεύθερου πεδίου και της κεφαλής του πασσάλου στην επιφάνεια του εδάφους συναρτήσει των δύο προτεινόμενων δεικτών. Οι μεταβολές των παραπάνω παραμέτρων είναι ακανόνιστες και δεν υποδηλώνουν κάποια τάση. Επομένως, ο συνδυασμός των δεικτών με αυτές τις παραμέτρους δε μπορεί να προσφέρει κάποιο επιπλέον συμπέρασμα στη διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του πασσάλου διότι οι μετακινήσεις είτε στον πάσσαλο είτε στο ελεύθερο πεδίο και η ροπή στη βάση της άμμου καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τη ρευστοποιήσιμη άμμο ενώ οι δείκτες είναι ευαίσθητοι στις ιδιότητες της αργιλικής κρούστας.



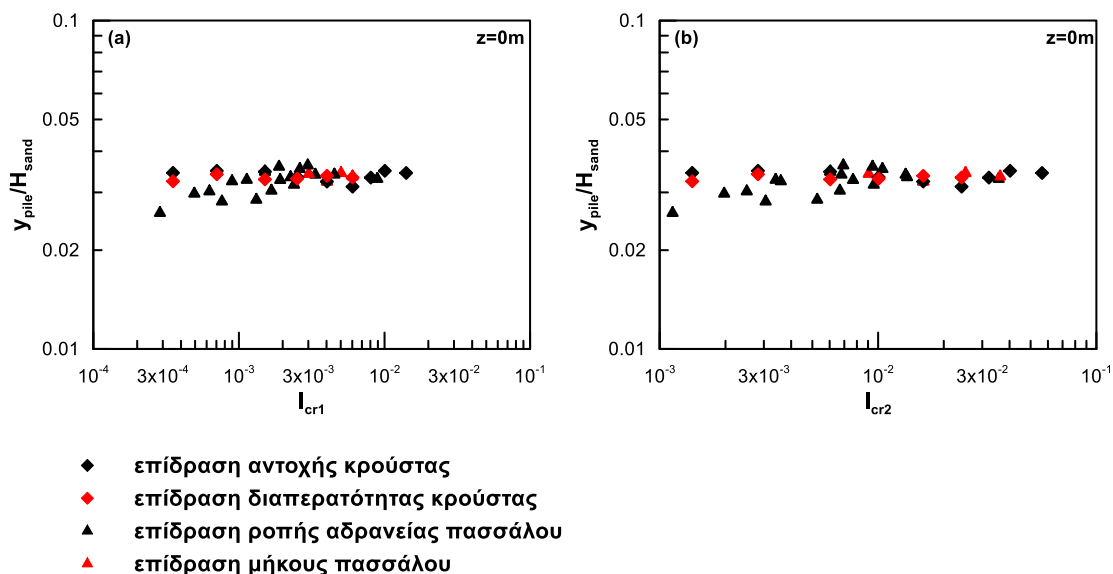
Σχήμα 5.43: Ροπές πασσάλου στη βάση της άμμου (a) συναρτήσει του δείκτη I_{cr1} και (b) συναρτήσει του δείκτη I_{cr2} .



Σχήμα 5.44: Ροπές πασσάλου στη βάση της άμμου κανονικοποιημένες (a) συναρτήσει του δείκτη I_{cr1} και (b) συναρτήσει του δείκτη I_{cr2} .



Σχήμα 5.45: Κανονικοποιημένες μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου με το πάχος του στρώματος της άμμου σε βάθος $z=0m$ από την επιφάνεια του εδάφους (a) συναρτήσει του δείκτη I_{cr1} και (b) συναρτήσει του δείκτη I_{cr2} .



Σχήμα 5.46: Κανονικοποιημένες μετακινήσεις της κεφαλής του πασσάλου με το πάχος του στρώματος της άμμου σε βάθος $z=0m$ από την επιφάνεια του εδάφους (a) συναρτήσει του δείκτη I_{cr1} και (b) συναρτήσει του δείκτη I_{cr2} .

Συνοψίζοντας, οι δύο προτεινόμενοι δείκτες οριοθετούν τους διαφορετικούς τρόπους απόκρισης του πασσάλου σε συνδυασμό με τη ροπή στη διεπιφάνεια της κρούστας και την ελάχιστη ροπή που αναπτύσσεται στον πάσσαλο. Αν συνδυαστούν με μεγέθη

όπως η ροπή στη βάση της άμμου, τα αποτελέσματα είναι ασαφή. Τέλος, ανάμεσα στους δύο δείκτες, ο I_{cr2} που αφορά τη μετακινησιακή δυσκαμψία δίνει τη μικρότερη διασπορά καθώς η κρούστα επιβάλλει στον πάσσαλο κυρίως μετακινήσεις.

5.7 Συμπεράσματα

Στις ενότητες που προηγήθηκαν παρουσιάστηκαν αρχικά, τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων και έγινε προσπάθεια αναγνώρισης των βασικών μηχανισμών που διέπουν την απόκριση του πασσάλου. Η διαφοροποίηση των μηχανισμών απόκρισης πραγματοποιήθηκε και με τη βοήθεια δύο νέων προτεινόμενων δεικτών εμπνευσμένων από το μοντέλο των **Dobry et al.,2003**. Τα βασικά συμπεράσματα που περιγράφουν την επίδραση της κρούστας είναι τα εξής:

- Η παρουσία επιφανειακής αργιλικής κρούστας η οποία υπέρκειται ενός στρώματος από ρευστοποιήσιμη άμμο γενικά μειώνει τις μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου. Σε αντίθεση με την άμμο, η κρούστα μετακινείται λιγότερο και περιορίζει τις μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου. Βέβαια, αν συγκριθούν δύο εδαφικά προφίλ με διαφορετικά μήκη πασσάλου στην άμμο και ίδιο πάχος κρούστας, το προφίλ με το μεγαλύτερο πάχος άμμου το οποίο είναι και ο κύριος παράγοντας που καθορίζει τις μετακινήσεις, αναμένονται μεγαλύτερες μετακινήσεις ελεύθερου πεδίου χωρίς όμως να ξεπεράσουν εκείνες ενός προφίλ αποκλειστικά από άμμο.
- Η αργιλική κρούστα μειώνει τις μετακινήσεις του πασσάλου. Συγκεκριμένα, πέρα από το γεγονός ότι μετακινείται λιγότερο από την άμμο, δρα ως στήριγμα στο άνω μέρος του πασσάλου (gripping effect) και τελικά περιορίζει τις μετακινήσεις του.
- Ανάλογα με τις εδαφικές ιδιότητες της κρούστας και τα χαρακτηριστικά του πασσάλου, παρατηρούνται δύο μηχανισμοί απόκρισης. Για κρούστες με αντοχή $c_u > 7$ kPa και για πασσάλους με τιμές της δυσκαμψίας $EI \leq 200000$ kNm² ή με μήκος μέσα στην άμμο μεγαλύτερο από $H_{sand} > 8m$ η συμπεριφορά είναι αυτή του αμφίπακτου μέλους. Ο πάσσαλος περιορίζεται κινηματικά στην κεφαλή του από την κρούστα και επιβαρύνεται με αρνητικές ροπές που μπορούν να αποκτήσουν σημαντικό μέγεθος όταν η κρούστα είναι πολύ στιφρή ή ο πάσσαλος πολύ εύκαμπος. Οι ροπές στη βάση της άμμου δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα όταν ο πάσσαλος συμπεριφέρεται αμφίπακτα. Για κρούστες με μικρή αντοχή ($c_u < 7$

kPa) και για πασσάλους με τιμές της δυσκαμψίας $EI \geq 200000 \text{ kNm}^2$ ή με μήκος μέσα στην άμμο μικρότερο από $H_{\text{sand}} < 8\text{m}$ η συμπεριφορά είναι αυτή του προβόλου. Ο πάσσαλος είναι αρκετά δύσκαμπτος να αντισταθεί στις επιβαλλόμενες μετακινήσεις και η επιρροή της κρούστας είναι μειωμένη. Όσο μεγαλώνει η δυσκαμψία του, επιβαρύνεται με ολόένα και μικρότερες οι αρνητικές ροπές. Οι ροπές στη βάση, σε αντίθεση με την περίπτωση της αμφίπακτης λειτουργίας επηρεάζονται από την απόκριση του πασσάλου που διέπεται από τη καμπτική δυσκαμψία και παρουσιάζουν αύξηση με την αύξηση της σιβαρότητας του πασσάλου.

- Οι δύο δείκτες ποσοτικοποίησης της επίδρασης της κρούστας είναι οι:

$$I_{\text{rot}} = \left(\frac{c_u \cdot D \cdot H_{\text{crust}}^2}{(EI / H_{\text{sand}})} \right) \quad (5.3)$$

&

$$I_{\text{trans}} = \left(\frac{c_u \cdot D \cdot H_{\text{crust}}}{(EI / (H_{\text{sand}})^2)} \right) \quad (5.4)$$

όπου c_u η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της κρούστας (kPa), D η διάμετρος του πασσάλου (m), H_{crust} το πάχος της κρούστας (m), H_{sand} το πάχος της άμμου και EI η καμπτική δυσκαμψία του πασσάλου (kNm^2).

Οι δύο προτεινόμενοι δείκτες οριοθετούν τους διαφορετικούς τρόπους απόκρισης του πασσάλου σε συνδυασμό με τη ροπή στη διεπιφάνεια της κρούστας και την ελάχιστη ροπή που αναπτύσσεται στον πάσσαλο. Αν συνδυαστούν με μεγέθη όπως η ροπή στη βάση της άμμου, τα αποτελέσματα είναι ασαφή. Τέλος, ανάμεσα στους δύο δείκτες, ο I_{trans} που αφορά τη μετακινησιακή δυσκαμψία δίνει τη μικρότερη διασπορά καθώς η κρούστα επιβάλλει στον πάσσαλο κυρίως μετακινήσεις.

6

Επίδραση Κρούστας στα Οριακά φορτία της Ρευστοποιημένης Άμμου

6.1 Γενικά

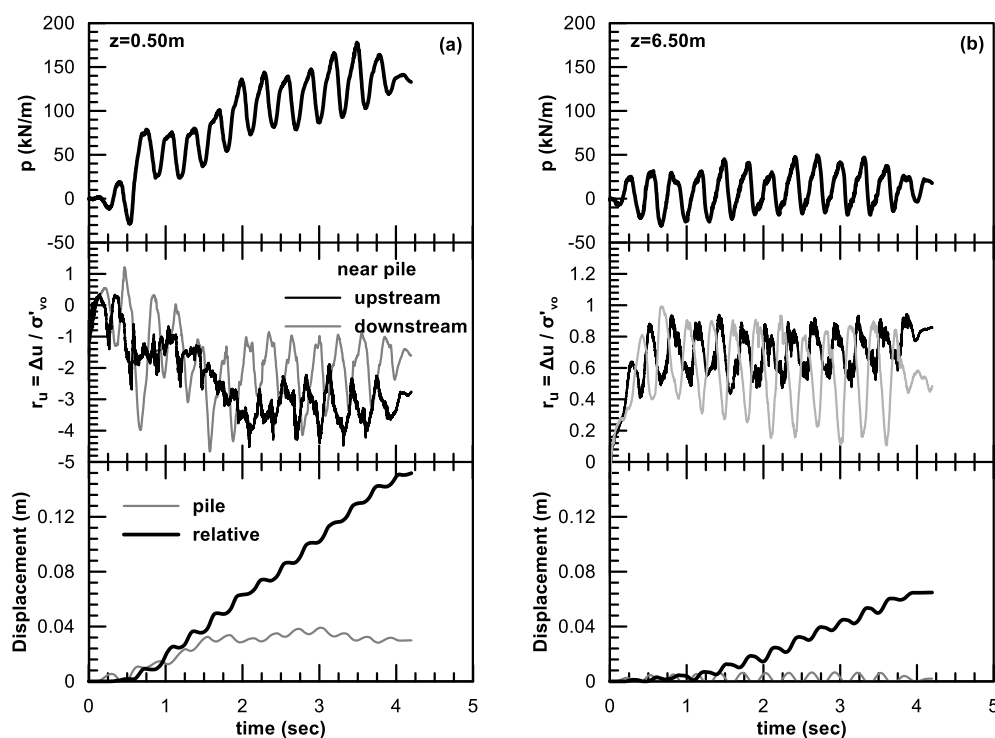
Στο προηγούμενο κεφάλαιο διερευνήθηκε η επίδραση της κρούστας στην απόκριση του πασσάλου και, ανάλογα με την αντοχή της κρούστας και τη δυσκαμψία του πασσάλου, αναγνωρίστηκαν δύο βασικοί μηχανισμοί απόκρισης. Τώρα, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην επίδραση της κρούστας στα οριακά φορτία που ασκεί στον πάσσαλο η ρευστοποιημένη άμμος.

Για να μπορεί να διερευνηθεί καλύτερα η επίδραση της κρούστας στα φορτία της άμμου, παραθέτονται πρώτα οι μηχανισμοί που επηρεάζουν την εδαφική απόκριση σε όρους p - y σε ένα αμμώδες εδαφικό προφίλ. Η χρονοϊστορία της εδαφικής απόκρισης φαίνεται στο **Σχήμα 6.1(a)** και στο **Σχήμα 6.1(b)** για ρηχά ($z=0.5\text{m}$) και μεγάλα βάθη ($z=6.5\text{m}$). Στα σχήματα αυτά, παρουσιάζονται ακόμη και οι χρονοϊστορίες του λόγου r_u , της μετακίνησης του πασσάλου καθώς και της σχετικής μετακίνησης πασσάλου-εδάφους. Οι τελευταίες παρουσιάζονται για να διερευνηθεί η πιθανή συσχέτιση της εδαφικής αντίδρασης από τη μία με το λόγο r_u και από την άλλη με την επιβαλλόμενη μετακίνηση.

Σχετικά με την απόκριση του εδάφους μπορούν να παρατηρηθούν τα εξής:

- Η εδαφική αντίδραση χαρακτηρίζεται από μία παροδική (λόγω της ανακυκλικής φύσης της φόρτισης) και από μια μόνιμη (λόγω της συσσώρευσης μετακινήσεων) συνιστώσα.

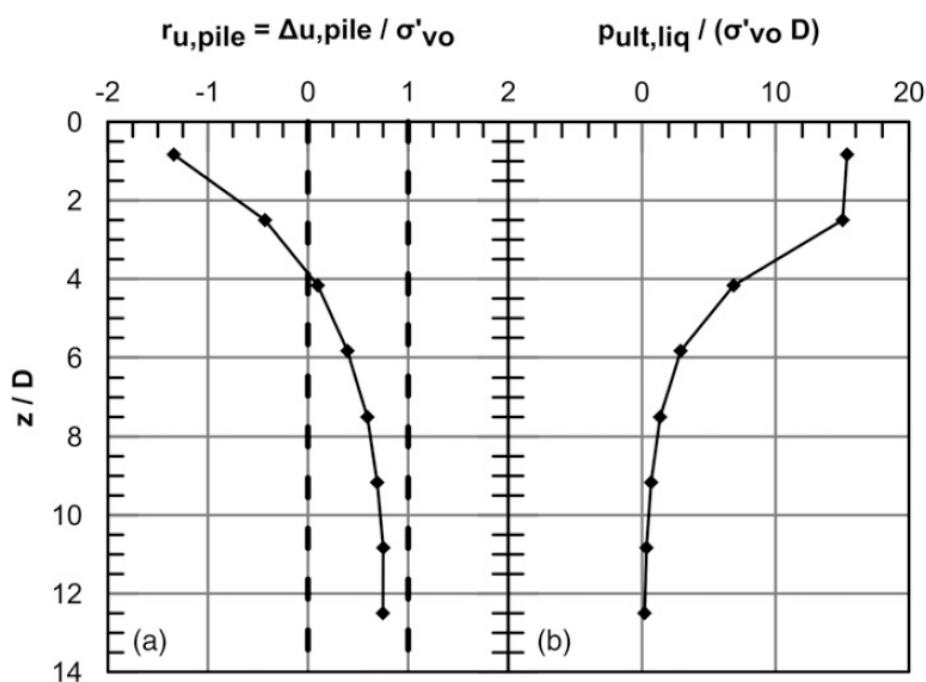
- Όπως φαίνεται και στα δύο σχήματα, η παροδική συνιστώσα συνδέεται άμεσα με την εξέλιξη των πιέσεων πόρων αφού οι διακυμάνσεις της εδαφικής αντίδρασης είναι σύγχρονες με την εξέλιξη των πτώσεων του λόγου r_u (dilation spikes).
- Η μόνιμη συνιστώσα της εδαφικής απόκρισης σχετίζεται επίσης με τη συσσώρευση πιέσεων πόρων. Στα μεγάλα βάθη όπου οι τιμές του r_u είναι θετικές και υψηλές ($r_u=0.6-0.8$), η εδαφική αντίδραση είναι μειωμένη. Αντίθετα, λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές κοντά στην επιφάνεια του όπου αναπτύσσονται σημαντικές υποπίεσεις πόρων.
- Τέλος, φαίνεται ότι, οι μεγάλες αρνητικές υπερπίεσεις πόρων, δεν είναι αποτέλεσμα μόνο των τοπικών εδαφικών συνθηκών (σχετική πυκνότητα D_r και τάση εγκιβωτισμού) αλλά και της σχετικής μετακίνησης πασσάλου-εδάφους και της διάτμησης του εδάφους γύρω από τον πάσσαλο. Κοντά στην εδαφική επιφάνεια, οι υπερπίεσεις πόρων γίνονται περισσότερο αρνητικές καθώς η μετακίνηση του πασσάλου αυξάνει. Όταν αυτή σταθεροποιείται, σταθεροποιούνται και οι πιέσεις πόρων αντίστοιχα.



Σχήμα 6.1: Χρονοϊστορίες της εδαφικής αντίδρασης συσχετισμένης με τη συσσώρευση πιέσεων πόρων (λόγος r_u) και μετακινήσεων για (a) $z=0.5m$ και (b) $z=6.5m$ από την επιφάνεια του εδάφους (σε προφίλ χωρίς επιφανειακή κρούστα).

Τα παραπάνω υποδηλώνουν ότι η εδαφική απόκριση συσχετίζεται με τη συσσώρευση υπερπιέσεων πόρων γύρω από τον πάσσαλο. Επομένως, οι παράγοντες που ελέγχουν την εδαφική αντίδραση είναι οι ίδιοι που ελέγχουν και τις πιέσεις πόρων σε αυτή την περιοχή του πασσάλου.

Στο **Σχήμα 6.2(a)** φαίνεται η κατανομή του λόγου $r_{u,pile}$ με το κανονικοποιημένο βάθος z/D κοντά στον πάσσαλο στο τέλος της διέγερσης όπως έχει προκύψει από την αριθμητική ανάλυση. Παρατηρείται πως κοντά στην εδαφική επιφάνεια ο λόγος $r_{u,pile}$ παίρνει μεγάλες αρνητικές τιμές και αυξάνεται αλγεβρικά με το βάθος φθάνοντας μια σχεδόν σταθερή τιμή $r_{u,pile} \approx 0.75$.



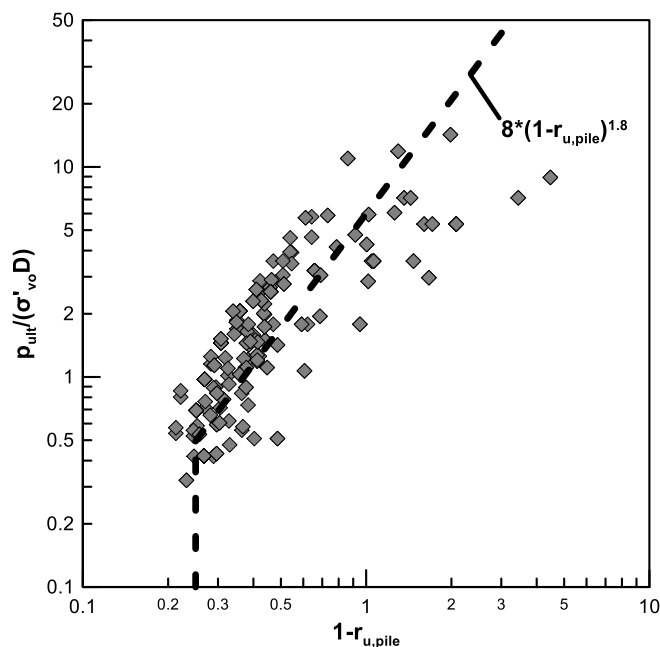
Σχήμα 6.2: Κατανομή (a) του λόγου υπερπιέσεων πόρων r_u κοντά στον πάσσαλο με το βάθος και (b) της κανονικοποιημένης οριακής εδαφικής αντίδρασης $p_{ult,liq} / (\sigma'_{vo} D)$ με το βάθος (σε προφίλ χωρίς επιφανειακή εδαφική κρούστα).

Από τα ανωτέρω, γίνεται αντιληπτό ότι η εδαφική απόκριση οφείλεται σε δύο βασικούς παράγοντες: τις αρχικές εδαφικές συνθήκες σχετικά με τη κρίσιμη κατάσταση και τη διαστολικότητα που αποδίδεται στη σχετική μετακίνηση εδάφους και πασσάλου. Συγκεκριμένα, κοντά στην εδαφική επιφάνεια, επιβάλλονται μεγάλες σχετικές μετατοπίσεις υπό μικρές ενεργές τάσεις με αποτέλεσμα την εμφάνιση διαστολικότητας λόγω διάτμησης και μεγάλες αρνητικές υπερπιέσεις πόρων. Σε

μεγαλύτερα βάθη, οι ενεργές τάσεις αυξάνονται ενώ οι σχετικές μετατοπίσεις μειώνονται οπότε τα φαινόμενα διαστολικότητας περιορίζονται και οι υπερπίεσεις πόρων σταδιακά αλλάζουν από αρνητικές σε θετικές. Πρέπει να παρατηρηθεί ότι ποτέ δεν επιτυγχάνεται πλήρης ρευστοποίηση ($r_u=1.0$) γύρω από τον πάσσαλο.

Στο **Σχήμα 6.2(b)** φαίνεται η κατανομή της κανονικοποιημένης οριακής πίεσης $p_{ult,liq}/(\sigma'_{vo}D)$ με το κανονικοποιημένο βάθος z/D . Η συσχέτιση στο **Σχήμα 6.2(a)** και στο **Σχήμα 6.2(b)** υποδηλώνει ότι η οριακή εδαφική αντίδραση συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη των υπερπίεσεων πόρων κοντά στον πάσσαλο. Συγκεκριμένα, το $p_{ult,liq}/(\sigma'_{vo}D)$ παίρνει μεγάλες τιμές κοντά στην εδαφική επιφάνεια λόγω των μεγάλων αρνητικών υπερπίεσεων και σταδιακά μειώνεται με το βάθος καθώς οι υπερπίεσεις πόρων μεταβάλλονται από αρνητικές σε θετικές.

Για να διερευνηθεί περαιτέρω η συσχέτιση μεταξύ της οριακής εδαφικής απόκρισης και των υπερπίεσεων πόρων κοντά στον πάσσαλο, το **Σχήμα 6.3** παρουσιάζει την κανονικοποιημένη εδαφική αντίδραση $p_{ult,liq}/(\sigma'_{vo}D)$ συναρτήσει του $1-r_{u,pile}$ για όλες τις αναλύσεις με άμμο. Φαίνεται ότι όλα τα σημεία μαζεύονται γύρω από τη μαύρη διακεκομμένη γραμμή υποδηλώνοντας τη μοναδική συσχέτιση των φορτίων της άμμου με τις υπερπίεσεις πόρων στην περιοχή κοντά στον πάσσαλο.

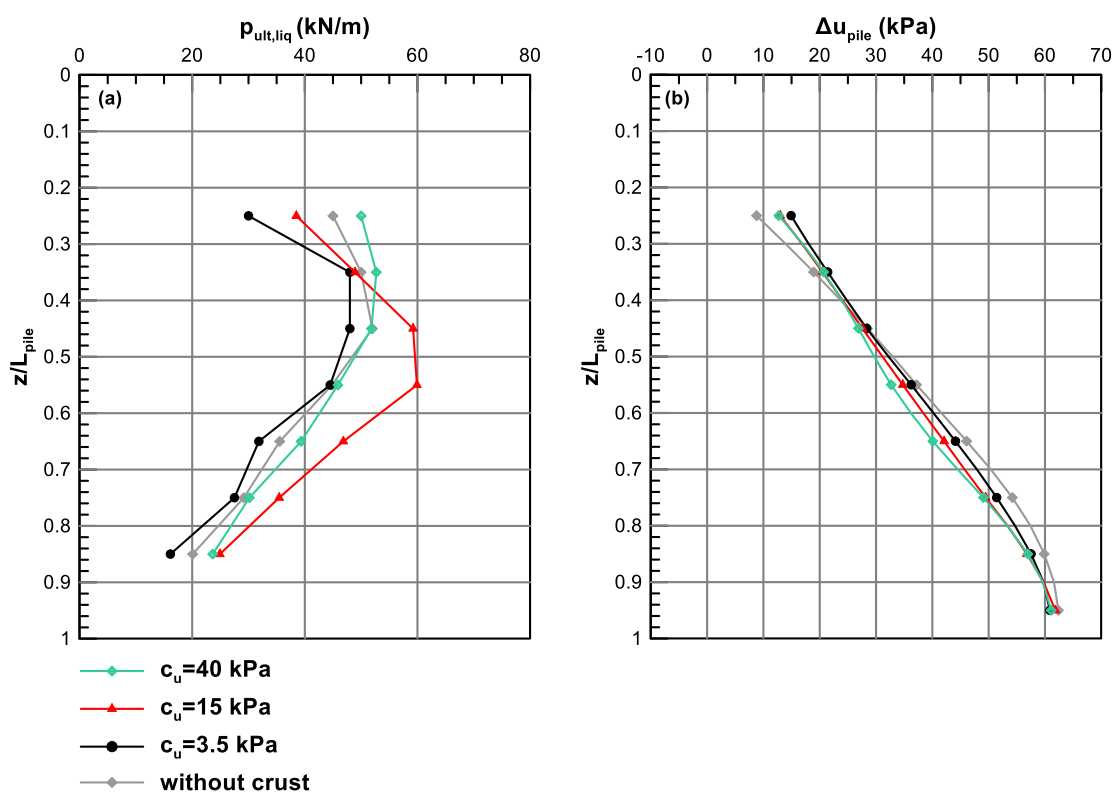


Σχήμα 6.3: Συσχέτιση μεταξύ $p_{ult,liq}/(\sigma'_{vo}D)$ και $1-r_{u,pile}$ για όλες τις αριθμητικές αναλύσεις.

6.2 Επίδραση Αντοχής Κρούστας

Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, σε ένα αμμόδες εδαφικό προφίλ υπάρχει άμεση συσχέτιση των οριακών φορτίων της άμμου με την ανάπτυξη των υπερπίεσεων πόρων κοντά στον πάσσαλο. Στην περίπτωση που μια αργλική και μη διαπερατή κρούστα υπέρκειται της ρευστοποιήσιμης άμμου, η παραπάνω συσχέτιση και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

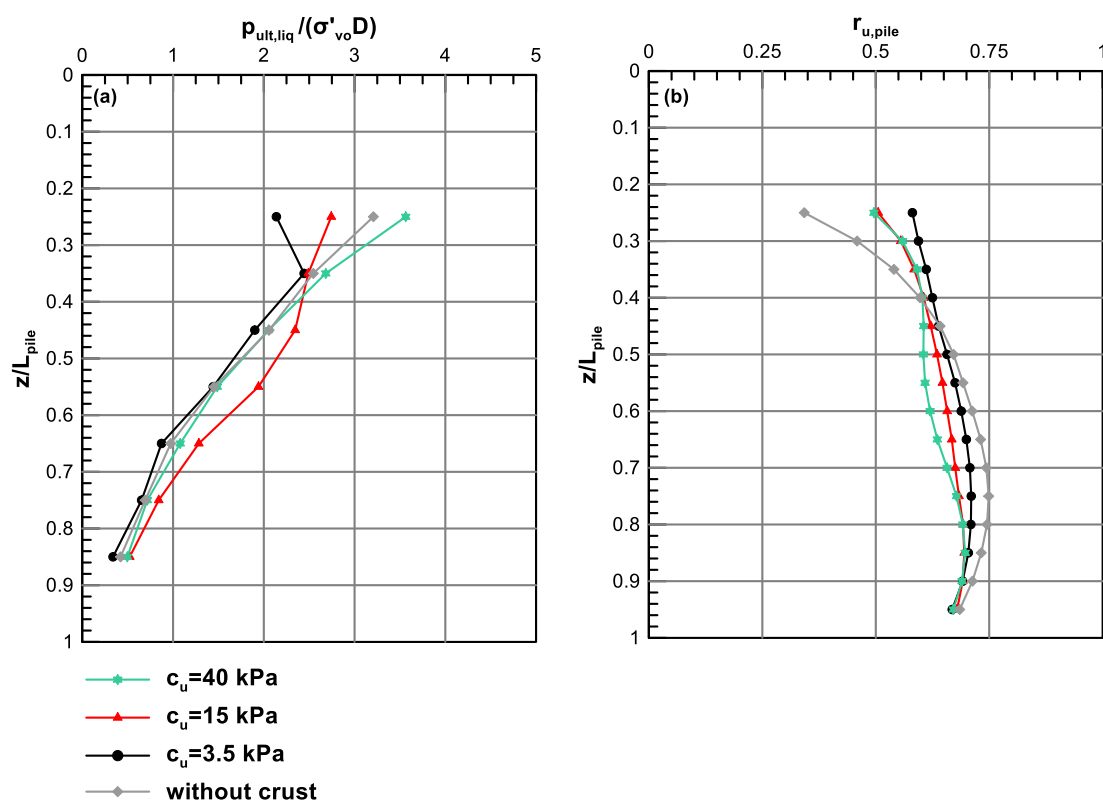
Στο **Σχήμα 6.4** παρουσιάζεται η κατανομή των οριακών φορτίων της άμμου με το βάθος z/L_{pile} και συσχετίζεται με τη κατανομή των υπερπίεσεων των πόρων κοντά στον πάσσαλο. Οι υπερπίεσεις πόρων κοντά στη διεπιφάνεια της κρούστας με την άμμου έχουν θετικές τιμές και σταδιακά αυξάνονται με το βάθος σχεδόν γραμμικά. Πρέπει να τονισθεί πως όλες οι κατανομές των υπερπίεσεων πόρων για τις διάφορες αντοχές κρούστας ακολουθούν τη μεταβολή των υπερπίεσεων για την περίπτωση χωρίς κρούστα.



Σχήμα 6.4: Κατανομή (a) των οριακών φορτίων της άμμου και (b) των υπερπίεσεων πόρων με το βάθος κανονικοποιημένο με το μήκος του πασσάλου (z/L_{pile}).

Αντίστοιχα με τη μεταβολή των υπερπύεσεων πόρων, τα οριακά φορτία της ρευστοποιημένης άμμου εμφανίζουν πιο μεγάλες τιμές στα μικρά βάθη και σταδιακά μειώνονται με το βάθος.

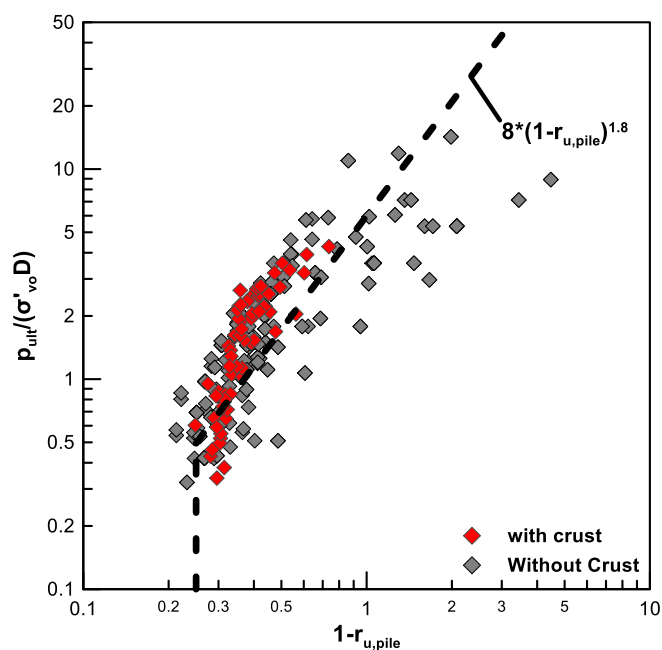
Η μονοσήμαντη συσχέτιση της οριακής εδαφικής αντίδρασης με τις πιέσεις πόρων στην περιοχή κοντά στον πάσσαλο φαίνεται πιο έντονα στο **Σχήμα 6.5**, το οποίο συσχετίζει την ανηγμένη εδαφική αντίδραση με το λόγο r_u κοντά στον πάσσαλο. Ο λόγος $r_{u,pile}$ παίρνει πιο χαμηλές τιμές κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και αυξάνεται σταδιακά με το βάθος όπου φαίνεται να σταθεροποιείται στη τιμή $r_{u,pile} \approx 0.65$. Η ανηγμένη εδαφική αντίδραση αντίστοιχα, στα μικρά βάθη εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές και έπειτα μειώνεται με το βάθος χωρίς να σταθεροποιείται σε κάποια τιμή.



Σχήμα 6.5: Κατανομή (a) της κανονικοποιημένης οριακής εδαφικής αντίδρασης $\rho_{ult,liq} / (\sigma'_{vo} D)$ με το βάθος και (b) του λόγου υπερπύεσεων πόρων r_u κοντά στον πάσσαλο με το βάθος.

Για να διερευνηθεί περαιτέρω η συσχέτιση μεταξύ της οριακής εδαφικής απόκρισης και των υπερπύεσεων πόρων κοντά στον πάσσαλο όταν υπάρχει η επιφανειακή κρούστα, το **Σχήμα 6.6** παρουσιάζει την κανονικοποιημένη εδαφική αντίδραση

$p_{ult,liq}/(\sigma'_{vo}D)$ συναρτήσει του $1-r_{u,pile}$ για όλες τις αναλύσεις. Φαίνεται και πάλι ότι όλα τα σημεία, ακόμη και αυτά των αναλύσεων με κρούστα μαζεύονται γύρω από τη μαύρη διακεκομμένη γραμμή. Επομένως, είναι αδιαμφισβήτητη η μονοσήμαντη συσχέτιση των οριακών φορτίων της άμμου με τις πιέσεις πόρων γύρω από τον πάσσαλο και στην περίπτωση που στο εδαφικό προφίλ υπάρχει επιφανειακή κρούστα.



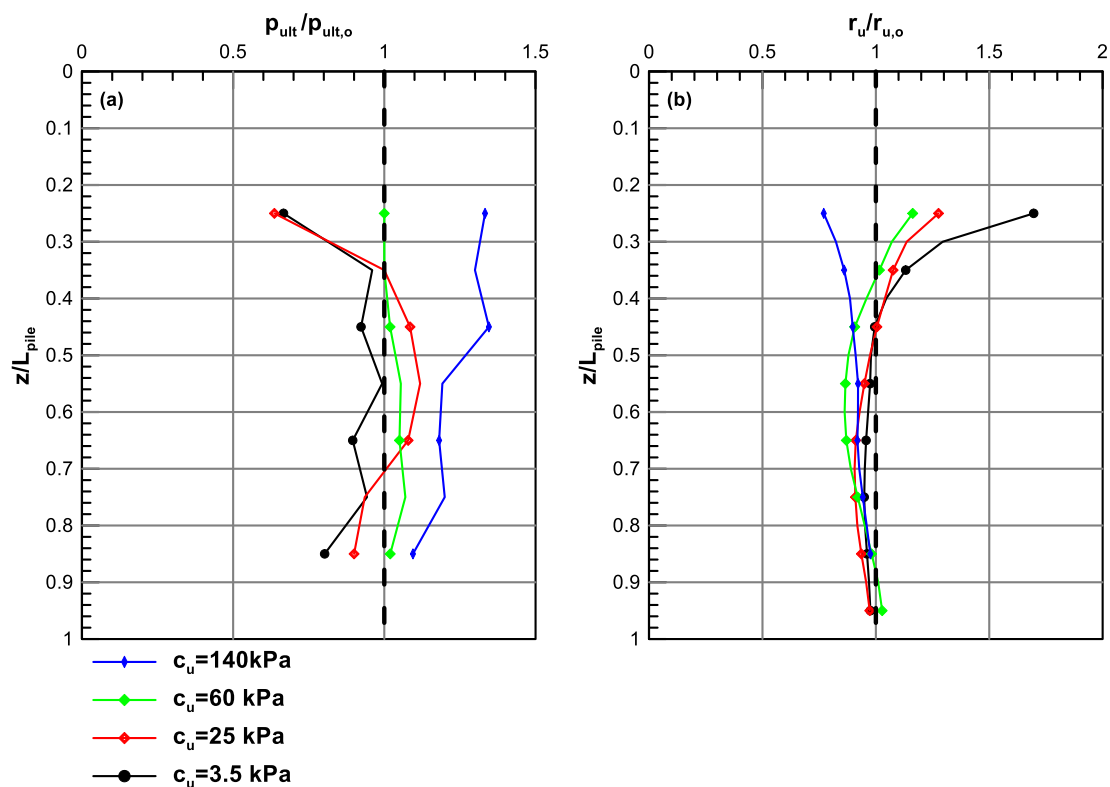
Σχήμα 6.6: Συσχέτιση μεταξύ $p_{ult,liq}/(\sigma'_{vo}D)$ και $1-r_{u,pile}$ για όλες τις αριθμητικές αναλύσεις.

Εφόσον αποδείχτηκε ότι ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την ανηγμένη εδαφική αντίδραση είναι ο λόγος υπερπίεσης πόρων κοντά στον πάσσαλο ανεξάρτητα με την ύπαρξη εδαφικής κρούστας ή μη, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην επίδραση της κρούστας στο λόγο υπερπίεσεων πόρων στην περιοχή γύρω από τον πάσσαλο.

Μια πρώτη παρατήρηση από το **Σχήμα 6.4(b)** και το **Σχήμα 6.5(b)** είναι ότι η κρούστα περιορίζει τα φαινόμενα διαστολικότητας. Στην περίπτωση του εδαφικού προφίλ μόνο από άμμο στο άνω μέρος του πασσάλου επιβάλλονται μεγάλες σχετικές μετατοπίσεις υπό μικρές ενεργές τάσεις με αποτέλεσμα την εμφάνιση διαστολικότητας λόγω διάτμησης του εδάφους και μεγάλες αρνητικές υπερπίεσεις πόρων. Όμως, δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο στην περίπτωση που υπάρχει μία

αδιαπερατή κρούστα και μάλιστα στη διεπιφάνεια της κρούστας με την άμμο αναπτύσσονται θετικές υπερπιέσεις πόρων.

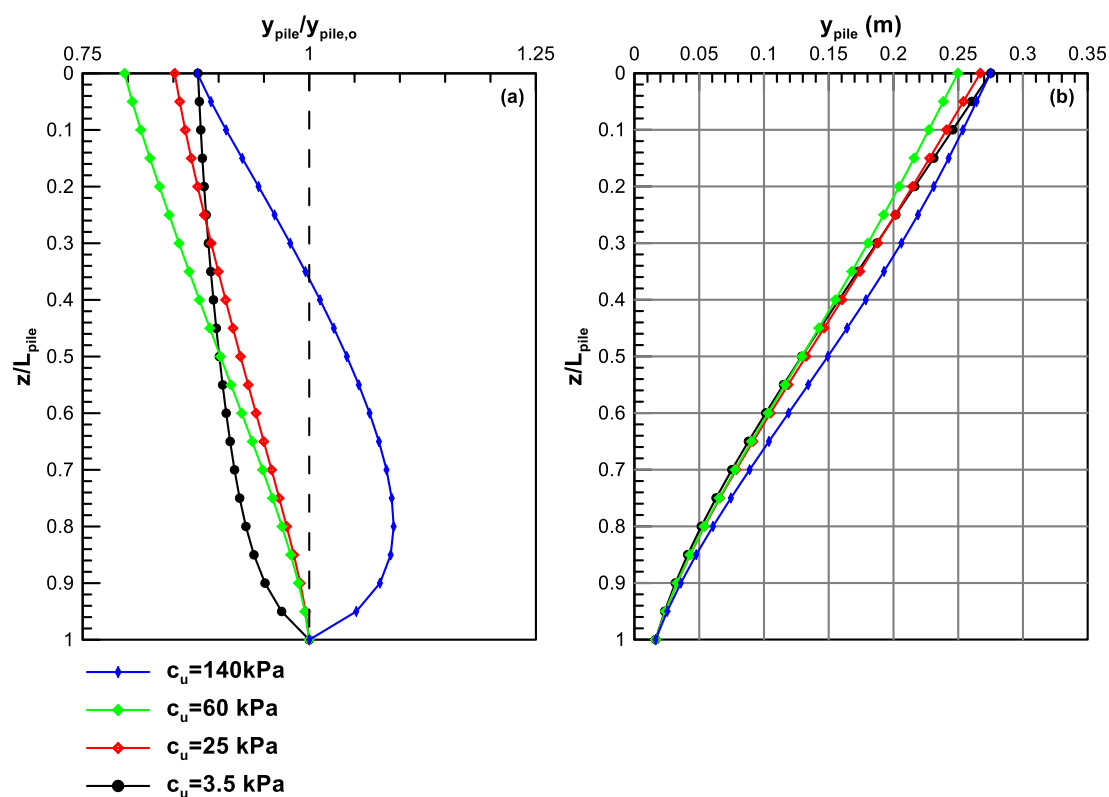
Στο **Σχήμα 6.7(b)** παρουσιάζεται η κατανομή των κανονικοποιημένων r_u κοντά στον πάσσαλο. Φαίνεται πως στα μικρά βάθη ($z/L_{pile} \leq 0.40$) η αύξηση της αντοχής της κρούστας οδηγεί σε μείωση του λόγου r_u . Στα μεγάλα βάθη ($z/L_{pile} > 0.40$) φαίνεται ότι ο λόγος των r_u να σταθεροποιείται κοντά στη μονάδα.



Σχήμα 6.7: Κανονικοποιημένη με τα αντίστοιχα στοιχεία για την ανάλυση μόνο με άμμο, κατανομή με το βάθος (a) των οριακών φορτίων της άμμου για την περίπτωση της κρούστας και (b) του λόγου r_u .

Τα παραπάνω εξηγούνται αν λάβουμε υπόψη τους δύο μηχανισμούς απόκρισης του πασσάλου που παρουσιάστηκαν στη **Ενότητα 4.3** του **Κεφαλαίου 4**. Στο **Σχήμα 6.8** αποτυπώνονται οι δύο τύποι απόκρισης του πασσάλου για τέσσερις διαφορετικές αντοχές κρούστας καθώς και τα βέλη των πασσάλων για αυτές τις περιπτώσεις. Σημειώνεται ότι δεν παρουσιάζονται οι κατανομές για όλες τις αριθμητικές αναλύσεις για τη καλύτερη ευκρίνεια του σχήματος. Στην περίπτωση που η αργιλική κρούστα είναι μικρής αντοχής ($c_u < 7$ kPa), ο πάσσαλος αποκρίνεται σαν οιονεί πρόβολος και στα μικρά βάθη εμφανίζει μεγάλες μετατοπίσεις. Εφόσον, ο πάσσαλος

μετατοπίζεται περισσότερο, η σχετική μετακίνηση εδάφους και πασσάλου είναι μειωμένη με αποτέλεσμα η διαστολική συμπεριφορά του εδάφους να περιορίζεται και οι υπερπίεσεις πόρων να παίρνουν μεγαλύτερες θετικές τιμές. Αντίθετα στην περίπτωση που η κρούστα έχει αντοχή μεγαλύτερη από $c_u > 7$ kPa, η απόκριση του πασσάλου αλλάζει και συμπεριφέρεται σαν οιονεί αμφίπακτη δοκός. Έτσι, στα μικρά βάθη μετακινείται λιγότερο από τον αντίστοιχο πρόβολο και αυξάνεται η σχετική μετακίνηση πασσάλου και εδάφους. Στην περιοχή κοντά στον πάσσαλο με την αύξηση της σχετικής μετακίνησης λόγω της ανάλογης αύξησης της αντοχής της κρούστας, το έδαφος συμπεριφέρεται διαστολικά και μειώνει τις υπερπίεσεις πόρων (χωρίς όμως να γίνουν ποτέ αρνητικές) και αντίστοιχα μειώνεται και ο λόγος r_u .

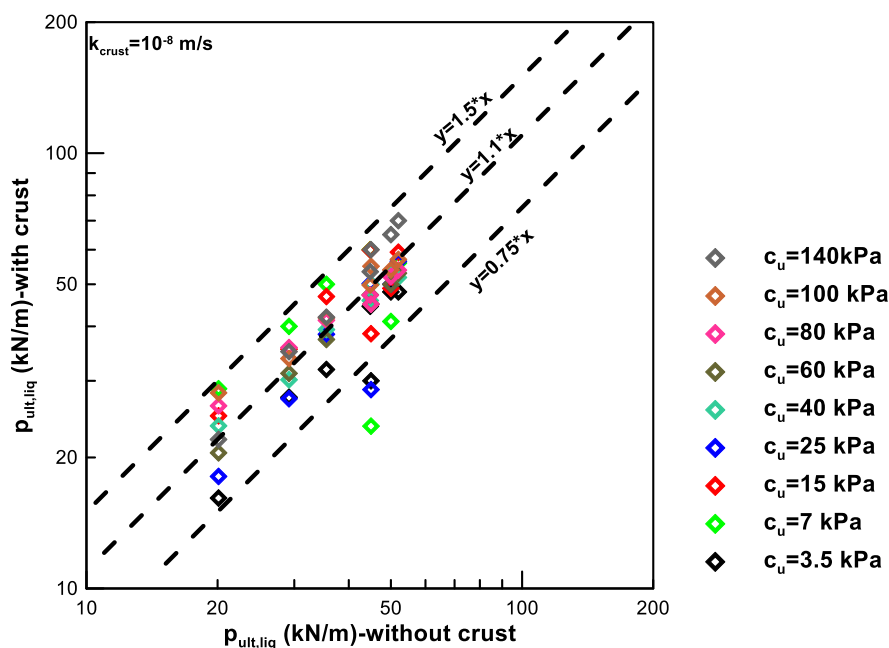


Σχήμα 6.8: (a) Κανονικοποιημένες κατανομές μετακινήσεων του πασσάλου και (b) κατανομές μετακινήσεων του πασσάλου, συναρτήσει του βάθους.

Στα μεγάλα βάθη που ο κανονικοποιημένος λόγος r_u φαίνεται να σταθεροποιείται, ο τύπος απόκρισης του πασσάλου δε διαδραματίζει σημαντικό ρόλο διότι οι μετακινήσεις είναι μειωμένες και ανάλογη μείωση έχουν και οι σχετικές μετακινήσεις. Η επιρροή της σχετικής μετακίνησης είναι περιορισμένη και το έδαφος συμπεριφέρεται συστολικά.

Αυτές οι μεταβολές του λόγου r_u εξηγούν και τις μεταβολές των οριακών φορτίων της άμμου στο **Σχήμα 6.7(a)**. Στα μικρά βάθη όσο αυξάνεται η αντοχή της κρούστας η εδαφική αντίδραση παίρνει μεγαλύτερες τιμές και για κρούστες με αντοχές μεγαλύτερες από $c_u=60$ kPa τα οριακά φορτία της άμμου είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα όταν δεν υπάρχει η κρούστα. Στα μεγάλα βάθη που οι μετακινήσεις μειώνονται και ο λόγος r_u σταθεροποιείται, οπότε και οι ανηγμένες εδαφικές αντιδράσεις πλησιάζουν κοντά στη τιμή $p_{ult}/p_{ult,o}=1$. Βέβαια, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 6.7(a)** καθώς αυξάνεται η αντοχή της κρούστας, τα οριακά φορτία της άμμου παρουσιάζουν αύξηση σε βάθος $z/L_{pile} = 0.7-0.9$ διότι αυξάνεται επακόλουθα ο βαθμός της πάκτωσης και ο πάσσαλος γίνεται πιο δύσκαμπτος και μετακινείται λιγότερο με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η σχετική μετακίνηση εδάφους πασσάλου. Όμως, η αύξηση στη σχετική μετακίνηση είναι μικρή και αν παρατηρήσει κανείς τις κατανομές των μετακινήσεων στο **Σχήμα 6.8(b)** στο βάθος $z/L_{pile} = 0.7-0.9$, οι διαφορές είναι αμελητέες για αυτό τα ανηγμένα φορτία της άμμου δε διαφέρουν πολύ.

Τέλος στο **Σχήμα 6.9** συσχετίζονται τα οριακά φορτία της άμμου για τις αναλύσεις με κρούστα με τα οριακά φορτία της άμμου για τις αναλύσεις χωρίς κρούστα. Παρατηρείται ότι τα φορτία της άμμου όταν υπάρχει η κρούστα διαφέρουν 0.75 έως και 1.5 φορές από τα αντίστοιχα όταν η κρούστα απουσιάζει.

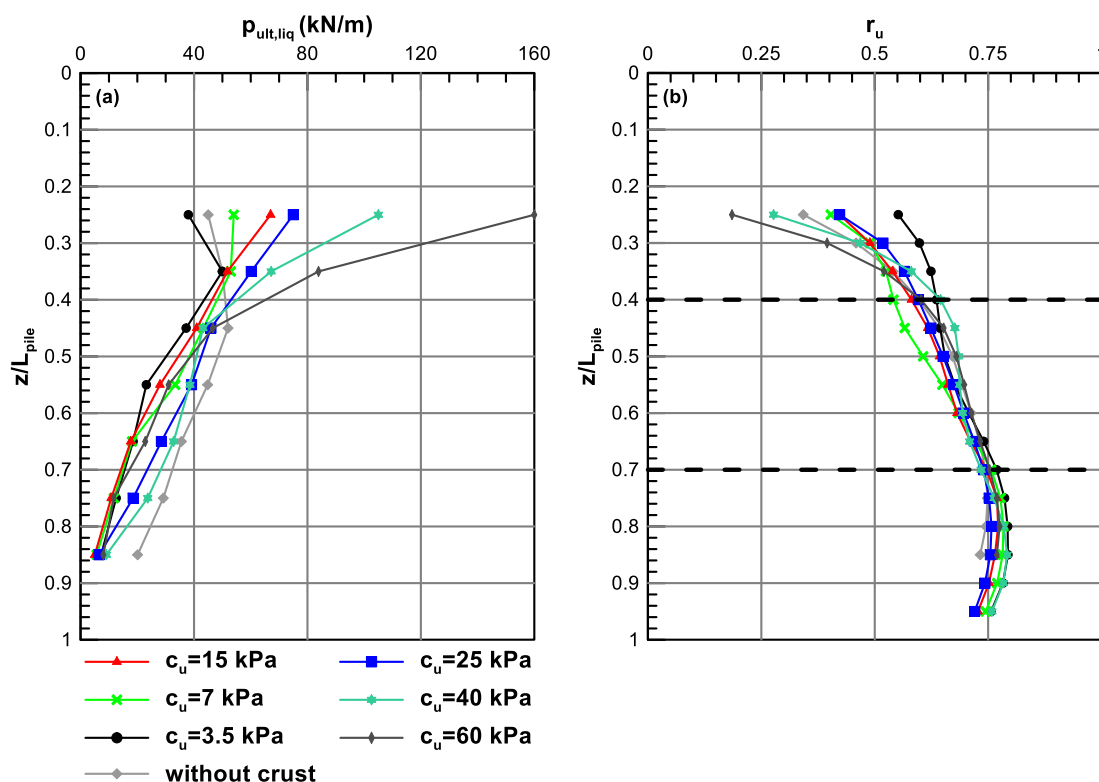


Σχήμα 6.9: Συσχέτιση των οριακών φορτίων της άμμου για τη περίπτωση της κρούστας με τα οριακά φορτία της άμμου της ανάλυσης χωρίς κρούστα

6.3 Επίδραση Διαπερατότητας Κρούστας

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η επίδραση της διαπερατότητας της κρούστας. Η μη διαπερατή κρούστα είχε διαπερατότητα $k_{crust}=10^{-8}$ m/s και για να διερευνηθεί η επίδραση μιας πιο διαπερατής κρούστας πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις με νέα διαπερατότητα για την κρούστα $k_{crust}=k_{sand}=6.1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

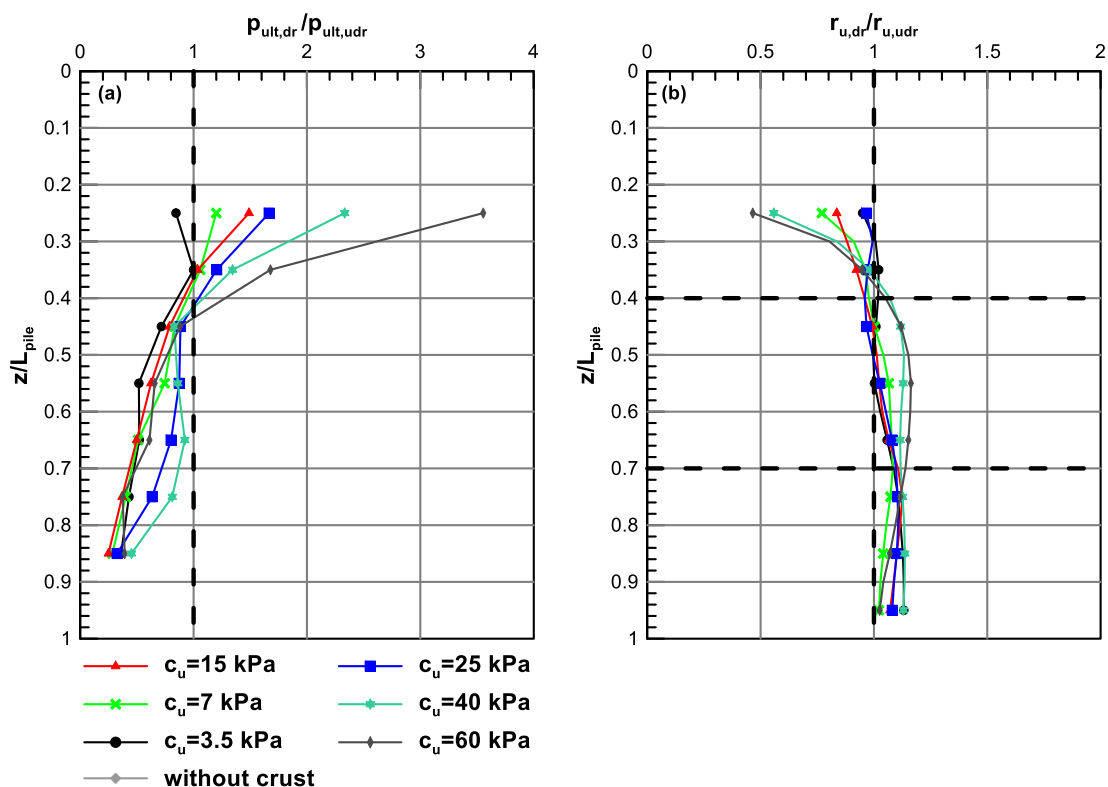
Στο **Σχήμα 6.10(b)** αποτυπώνεται η κατανομή του λόγου r_u συναρτήσει του βάθους z/L_{pile} . Παρατηρείται πως στα μικρά βάθη ($z/L_{pile} < 0.4$) όσο μεγαλώνει η αντοχή της κρούστας είναι έντονη η μείωση του λόγου r_u που σημαίνει ότι κοντά στον πάσσαλο αναπτύσσονται μικρές θετικές υπερπίεσεις πόρων. Σε βάθη από $0.4 < z/L_{pile} < 0.7$ ο λόγος των υπερπίεσεων πόρων προς τις αρχικές ενεργές τάσεις σταδιακά αυξάνεται με το βάθος μέχρι την τιμή $r_u \approx 0.75$. Από εκεί και κάτω, δηλαδή $z/L_{pile} > 0.7$, ο λόγος δείχνει να σταθεροποιείται στην προηγούμενη τιμή.



Σχήμα 6.10: Κατανομή (α) της οριακής εδαφικής αντίδρασης $p_{ult,liq}$ με το βάθος και (β) του λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u κοντά στον πάσσαλο με το βάθος.

Αντίστοιχα με τη μη διαπερατή κρούστα, τα οριακά φορτία της άμμου συσχετίζονται μονοσήμαντα με την ανάπτυξη των υπερπίεσεων των πόρων κοντά στον πάσσαλο όπως αποδείχτηκε στην προηγούμενη ενότητα. Η μεταβολή των φορτίων ακολουθεί τη μεταβολή του λόγου r_u και συγκεκριμένα στα μικρά βάθη αυξάνεται η τιμή της εδαφικής αντίδρασης όσο αυξάνεται η αντοχή της κρούστας λόγω μεγαλύτερων σχετικών μετατοπίσεων πασσάλου και εδάφους (**Σχήμα 6.12(b)**) ενώ στα μεγάλα βάθη με την αύξηση του λόγου r_u παρατηρείται μείωση της χωρίς να σταθεροποιείται σε κάποια τιμή.

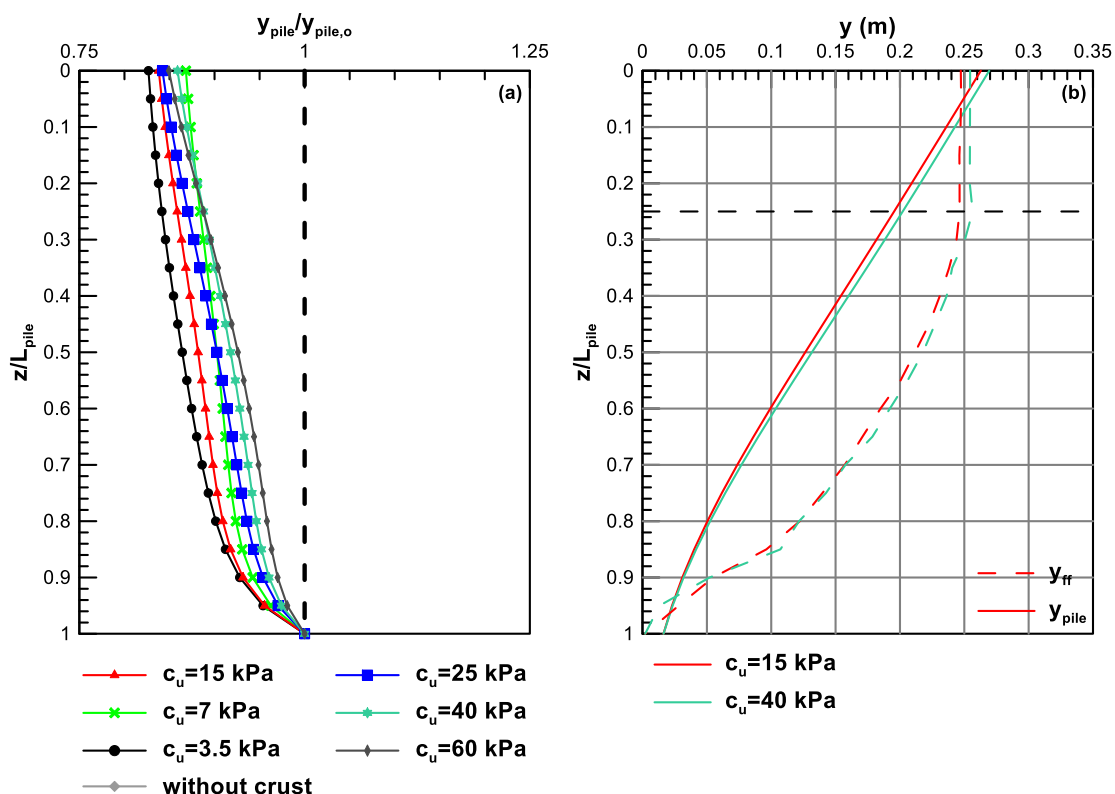
Όμως, συγκριτικά με τα φορτία της άμμου που αναπτύσσονται στην περίπτωση της μη-διαπερατής κρούστας, η εδαφική απόκριση για διαπερατή κρούστα εμφανίζει πολύ μεγαλύτερες τιμές στα μικρά βάθη, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 6.11(b)**. Η διαφοροποίηση στην εδαφική απόκριση οφείλεται σε δύο καθοριστικούς παράγοντες: (α) την μεγαλύτερη διαπερατότητα της κρούστας και (β) τη διαφορετική απόκριση του πασσάλου.



Σχήμα 6.11: Κατανομή με το βάθος (a) των οριακών φορτίων της άμμου κανονικοποιημένων με τα αντίστοιχα φορτία για τη μη διαπερατή κρούστα και (b) του λόγου r_u κανονικοποιημένου με το λόγο r_u για τη μη διαπερατή κρούστα.

Η μεγαλύτερη διαπερατότητα οδηγεί σε γρηγορότερη στράγγιση κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και οι υπερπίεσεις πόρων δεν συσσωρεύονται πλέον στη διεπιφάνεια κρούστας και άμμου. Είναι λογικό οι υπερπίεσεις πόρων στο άνω μέρος του πασσάλου να είναι μικρότερες (μικρότερος και ο λόγος r_u) από τις αντίστοιχες που αναπτύσσονται στην περίπτωση της μη-διαπερατής κρούστας χωρίς όμως να γίνονται αρνητικές, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 6.12(b)**.

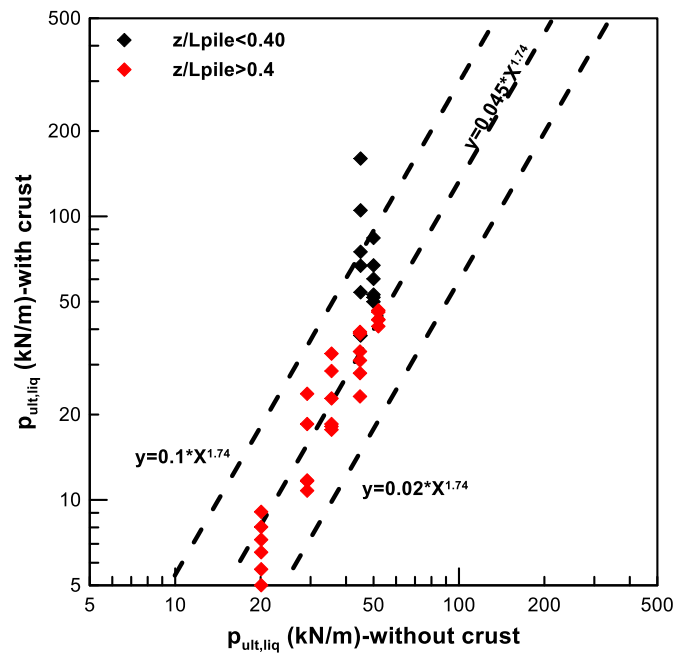
Σε συνδυασμό με την απόκριση του πασσάλου η οποία στατικά προσομοιάζει ένα πρόβολο σύμφωνα με το **Σχήμα 6.12(b)** για όλες τις αντοχές κρούστας, στα μικρά βάθη ($z/L_{pile} < 0.4$) οι μετακινήσεις του πασσάλου μπορεί να είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση της διαπερατής κρούστας αλλά λόγω της μεγάλης διαπερατότητας, αναπτύσσονται μικρότερες υπερπίεσεις πόρων που υποδηλώνουν διαστολική συμπεριφορά του εδάφους και οδηγούν σε υψηλές τιμές της εδαφικής αντίδρασης.



Σχήμα 6.12: (a) Κανονικοποιημένες κατανομές μετακινήσεων του πασσάλου συναρτήσει του βάθους και (b) κατανομές μετακινήσεων του πασσάλου και του ελεύθερου πεδίου με το βάθος.

Στα μεγάλα βάθη ($z/L_{pile} > 0.4$) τώρα, μειώνονται οι μετακινήσεις και του πασσάλου και του περιβάλλοντος εδάφους και οι υπερπίεσεις πόρων αυξάνονται. Παρατηρείται πως ο κανονοποιημένος λόγος r_u πλησιάζει τη μονάδα (είναι ελαφρώς μεγαλύτερος) υποδηλώνοντας ότι και στις δυο περιπτώσεις διαπερατότητας αναπτύσσονται παρόμοιες υπερπίεσεις αφού το έδαφος δεν συμπεριφέρεται διαστολικά αλλά συστολικά πλέον. Αυτή η παρατήρηση δεν σχετίζεται με την απόκριση του πάσσαλου και είναι αναμενόμενο τα οριακά φορτία της άμμου στη διαπερατή κρούστα στα μεγάλα βάθη να είναι ελαφρώς μικρότερα, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 6.11(a)**.

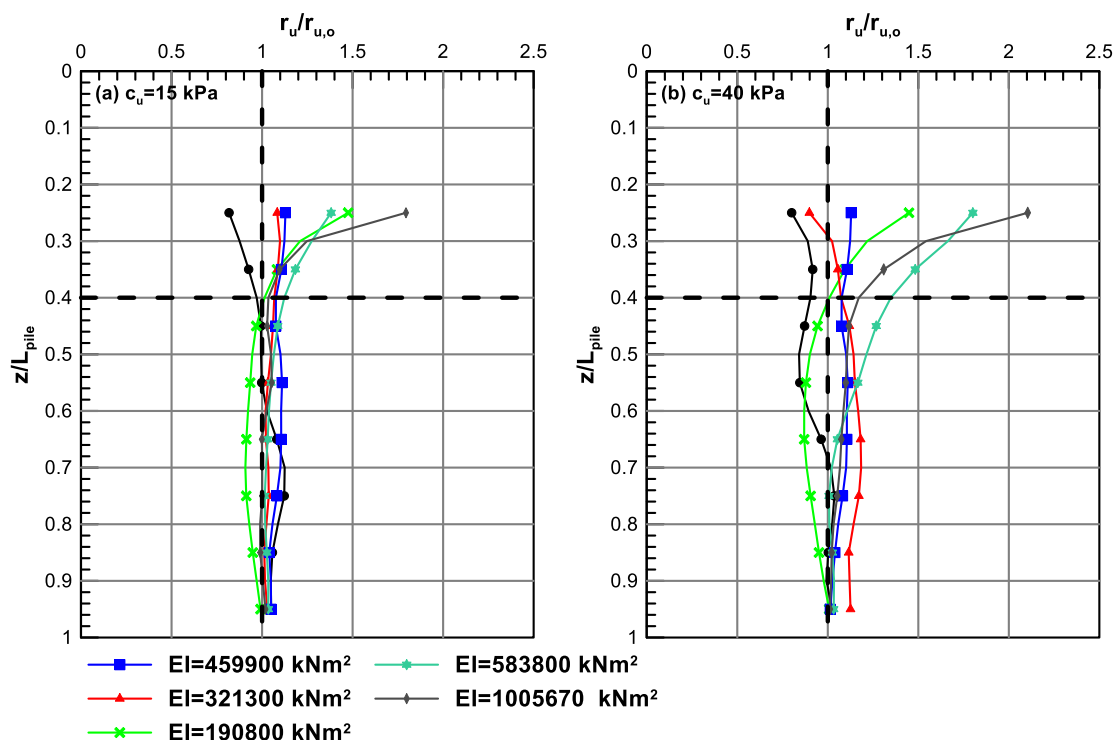
Τέλος στο **Σχήμα 6.13** συσχετίζονται τα οριακά φορτία της άμμου για τις αναλύσεις με κρούστα με τα οριακά φορτία της άμμου για τις αναλύσεις χωρίς κρούστα.



Σχήμα 6.13: Συσχέτιση των οριακών φορτίων της άμμου για τη περίπτωση της διαπερατής κρούστας με τα οριακά φορτία της άμμου της ανάλυσης χωρίς κρούστα.

6.4 Επίδραση Ροπής Αδράνειας Πασσάλου

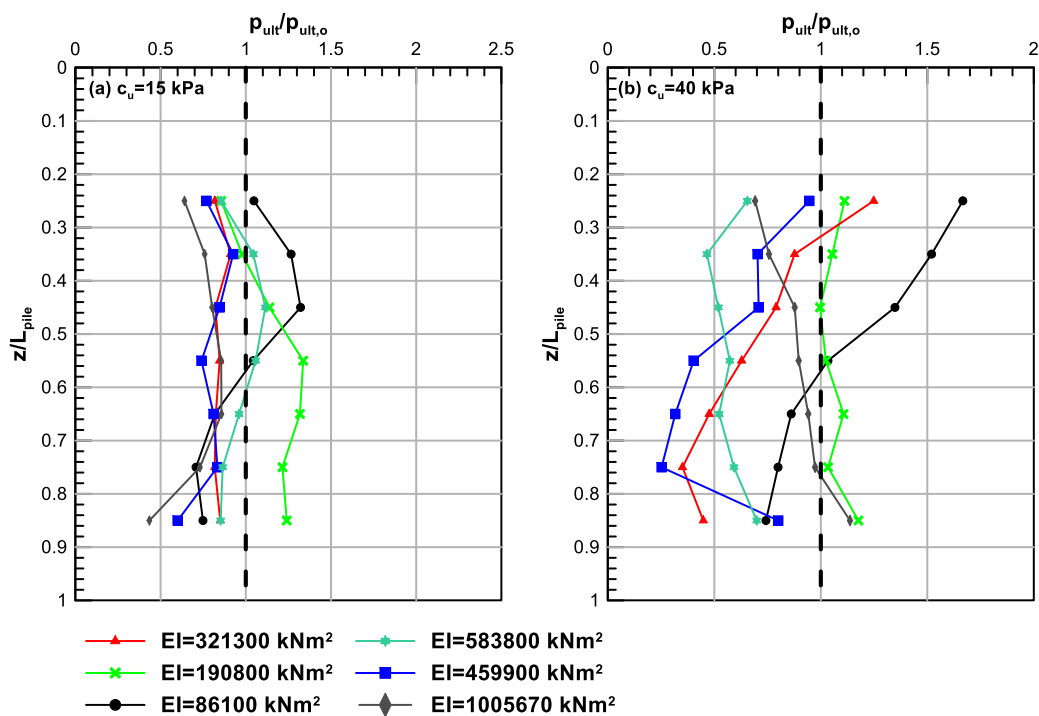
Στην ενότητα αυτή διερευνάται η επίδραση της ροπής αδράνειας στα οριακά φορτία της άμμου όταν στην επιφάνεια του εδάφους εντοπίζεται αργλική κρούστα. Στα **Σχήμα 6.14(a)** και **Σχήμα 6.14(b)** παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες κατανομές του λόγου r_u για τις αναλύσεις με διαφορετική αντοχή κρούστας. Οι κατανομές κανονικοποιήθηκαν για να αφαιρεθεί η επίδραση της άμμου και να διερευνηθεί καλύτερα η επίδραση της καμπτικής δυσκαμψίας.



Σχήμα 6.14: Κατανομή με το βάθος των κανονικοποιημένων λόγων r_u για (a) την κρούστα με αντοχή $c_u=15$ kPa και (b) για την κρούστα με αντοχή $c_u=40$ kPa.

Φαίνεται πως και για τις δύο αντοχές κρούστας, οι κατανομές ακολουθούν τις ίδιες τάσεις. Συγκεκριμένα, στα μικρά βάθη ($z/L_{pile} < 0.40$) κοντά στον πάσσαλο η αύξηση της δυσκαμψίας οδηγεί σε αύξηση των υπερπίεσεων πόρων και αντίστοιχη αύξηση του λόγου r_u . Σε βάθη μεγαλύτερα από $z/L_{pile} > 0.40$, παρατηρείται ότι οι κανονικοποιημένοι λόγοι για τις διαφορετικές δυσκαμψίες συγκλίνουν κοντά στη μονάδα.

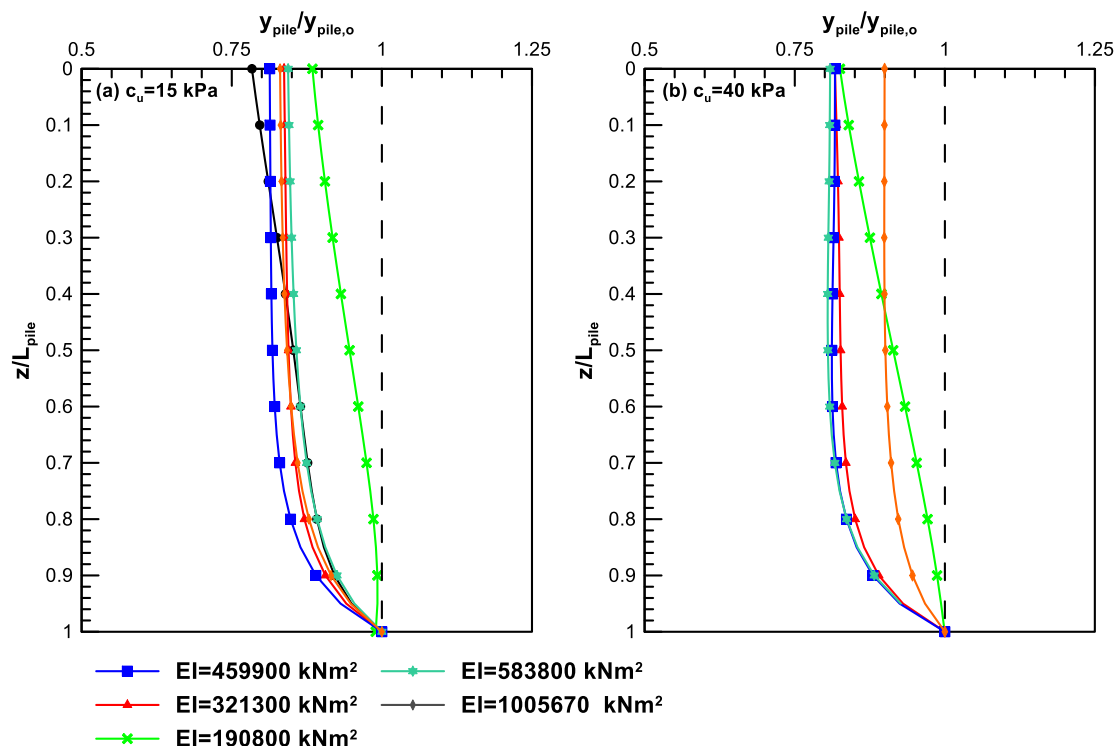
Παρόμοια συμπεριφορά αναμένεται και στη μεταβολή της εδαφικής αντίδρασης με το βάθος όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.15(a και b)**. Τα οριακά φορτία της άμμου κανονικοποιήθηκαν για τον ίδιο λόγο με τα r_u . Ακολουθώντας τη μεταβολή του λόγου r_u , στα μικρά βάθη όπου υπάρχει αύξηση των υπερπίεσεων για τις μεγαλύτερες ακαμψίες αναμένεται μείωση του οριακού φορτίου. Αντίθετα, σε μεγαλύτερα βάθη όπου οι κατανομές r_u συγκλίνουν στη μονάδα, τα οριακά φορτία ή μάλλον οι λόγοι των οριακών φορτίων πλησιάζουν κοντά στη μονάδα (με μικρές αποκλίσεις).



Σχήμα 6.15: Κατανομή της κανονικοποιημένης οριακής εδαφικής αντίδρασης $\rho_{ult}/\rho_{ult,o}$ με το βάθος για (a) τη κρούστα με αντοχή $c_u=15$ kPa και (b) για την κρούστα με αντοχή $c_u=40$ kPa.

Η εξήγηση για αυτή τη συμπεριφορά προκύπτει από τους διαφορετικούς μηχανισμούς απόκρισης ανάλογα με τη δυσκαμψία του πάσσαλου. Στο **Σχήμα 6.16** φαίνονται οι διαφορετικοί μηχανισμοί απόκρισης όπως παρουσιάστηκαν στην **Ενότητα 4.4** του **Κεφαλαίου 4**. Για καμπτικές δυσκαμψίες $EI \leq 190800$ kNm², η κρούστα επιβάλλει κινηματικούς περιορισμούς στον πάσσαλο ο οποίος στατικά λειτουργεί σαν οιονεί αμφίπακτο μέλος. Επομένως, στα μικρά βάθη για αυτές τις δυσκαμψίες η κρούστα μειώνει τη μετακίνηση του πάσσαλου και αυξάνεται η σχετική μετακίνηση πάσσαλου και εδάφους. Το έδαφος κοντά στον πάσσαλο αποκρίνεται διαστολικά μειώνοντας τις υπερπίεσεις πόρων χωρίς όμως να γίνουν ποτέ αρνητικές και αναμένεται αύξηση των οριακών φορτίων της άμμου. Όταν ο πάσσαλος γίνεται πιο δύσκαμπτος ($EI > 190800$ kNm²) η απόκριση του αλλάζει και από αμφίπακτο μέλος συμπεριφέρεται σαν πρόβολος με αποτέλεσμα να αυξάνονται και οι μετακινήσεις του πάσσαλου ενώ τα φαινόμενα διαστολικότητας περιορίζονται. Σε πολύ μεγάλες καμπτικές δυσκαμψίες [βλέπε στο **Σχήμα 6.14(b)** και στο **Σχήμα 6.16(b)**] ο πάσσαλος είναι αρκετά στιβαρός ώστε να αντισταθεί στη μετακίνηση του περιβάλλοντος εδάφους (pinning effects) και μειώνονται οι σχετικές μετακινήσεις

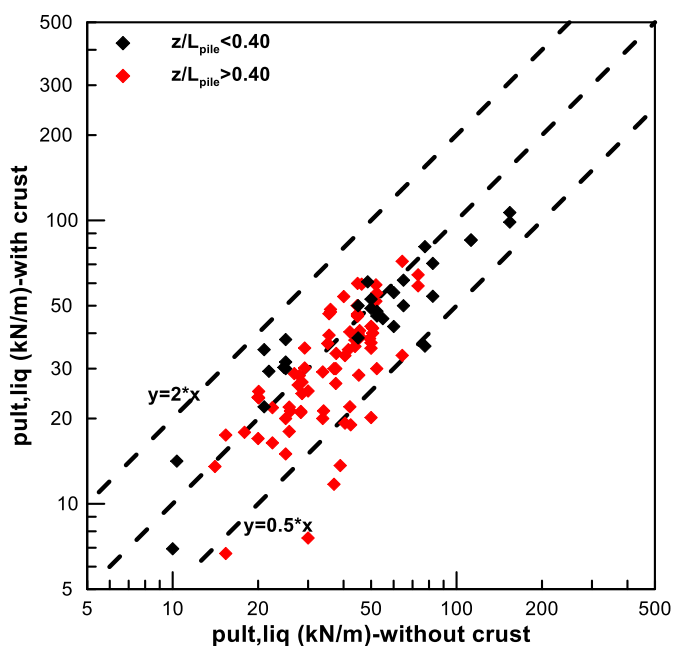
πασάλου και εδάφους περιορίζοντας ακόμη περισσότερο τα φαινόμενα διαστολικότητας στο άνω μέρος του πασσάλου και το μέγεθος της εδαφικής αντίδρασης.



Σχήμα 6.16: Κανονικοποιημένες κατανομές μετακινήσεων του πασσάλου συναρτήσει του βάθους για (a) μη-διαπερατή κρούστα με $c_u=15$ kPa και (b) μη-διαπερατή κρούστα με $c_u=40$ kPa.

Στα μεγαλύτερα βάθη, παρατηρείται πως ανεξάρτητα από το μηχανισμό απόκρισης οι σχετικές μετακινήσεις πασσάλου και εδάφους είναι μικρές και δεν επιδρούν ιδιαίτερα στην απόκριση του εδάφους. Οι εδαφικές αντιδράσεις επηρεάζονται άμεσα από τη συστολική πλέον συμπεριφορά του περιβάλλοντος εδάφους γύρω από τον πάσσαλο οπότε και τα οριακά φορτία της άμμου ανεξάρτητα από την ύπαρξη της κρούστας αναμένεται να μην έχουν μεγάλες διαφορές.

Τέλος στο **Σχήμα 6.17** συσχετίζονται τα οριακά φορτία της άμμου για τις αναλύσεις με κρούστα με τα οριακά φορτία της άμμου για τις αναλύσεις χωρίς κρούστα. Παρατηρείται ότι τα φορτία της άμμου όταν υπάρχει η κρούστα διαφέρουν 0.5 έως και 2 φορές από τα αντίστοιχα όταν η κρούστα απουσιάζει.

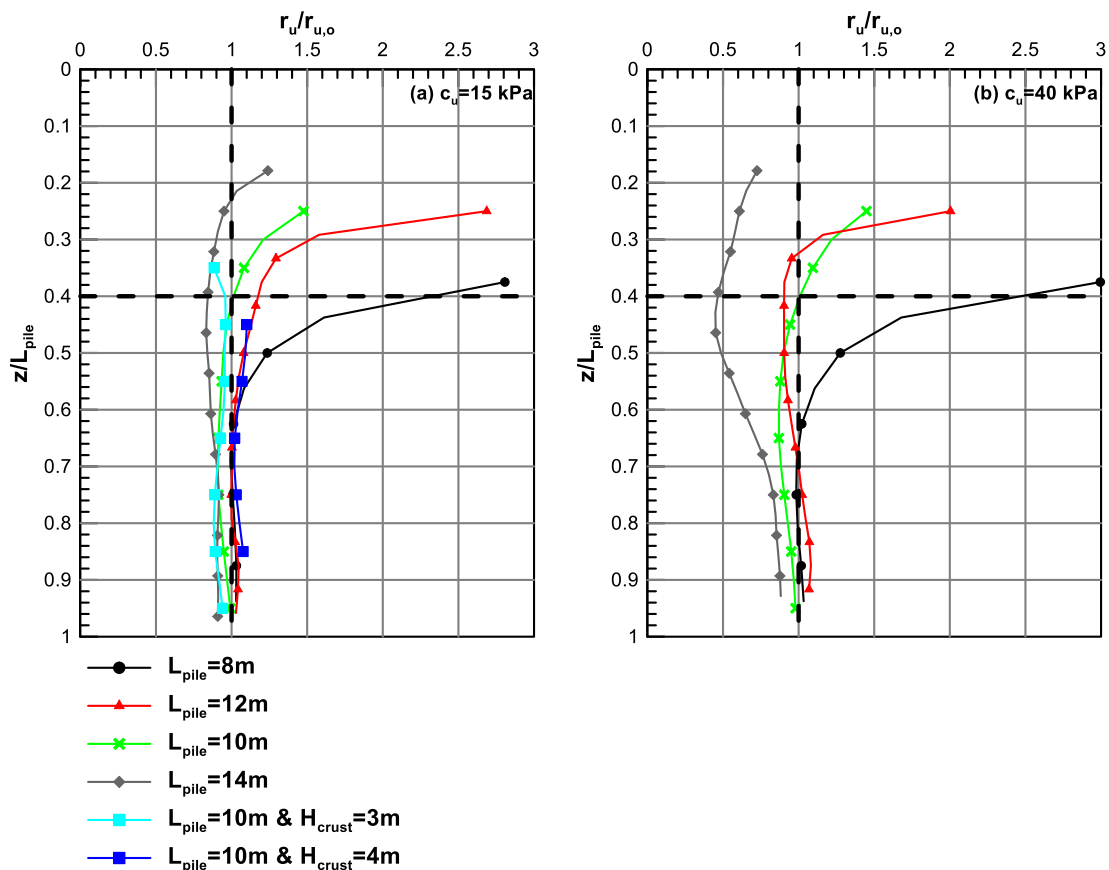


Σχήμα 6.17: Συσχέτιση των οριακών φορτίων της άμμου για τη περίπτωση της διαπερατής κρούστας με τα οριακά φορτία της άμμου της ανάλυσης χωρίς κρούστα.

6.5 Επίδραση Μήκους Πασσάλου

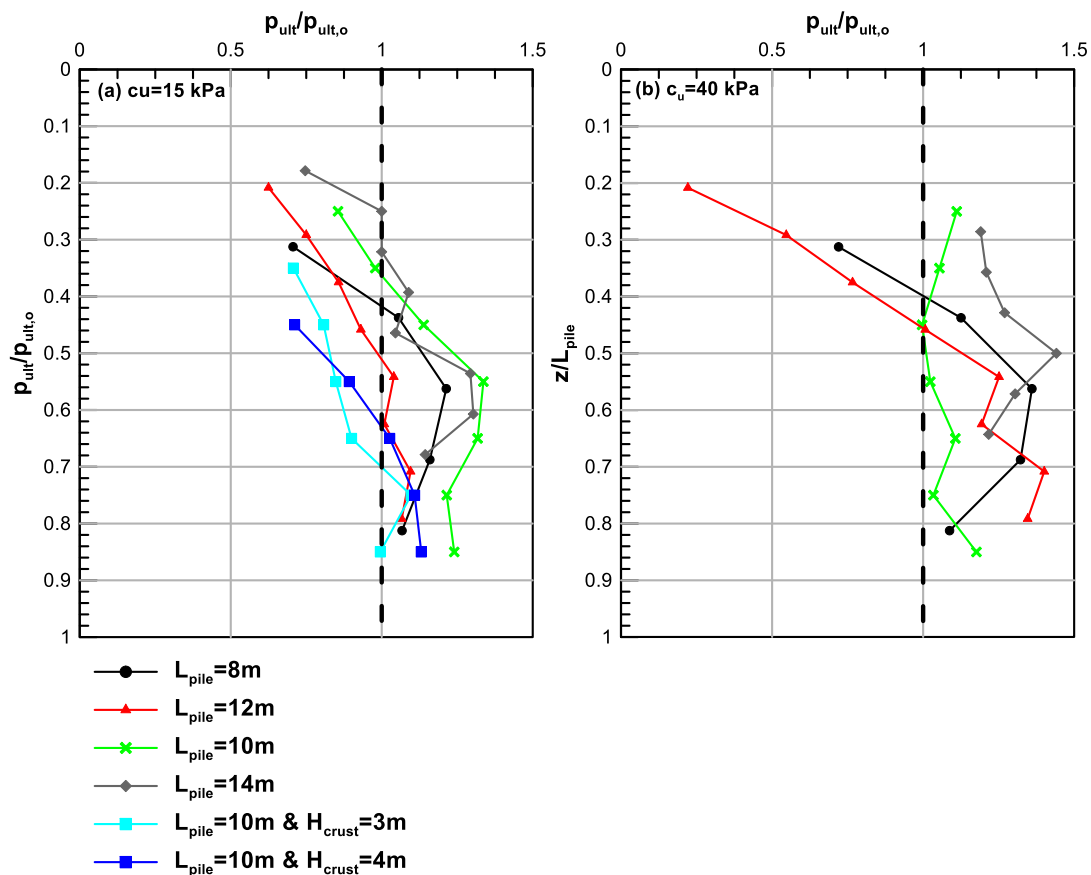
Στην προηγούμενη ενότητα διερευνήθηκε η επίδραση της δυσκαμψίας μέσω της ροπής αδράνειας στην εδαφική αντίδραση της άμμου. Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται και πάλι η επίδραση της δυσκαμψίας στην απόκριση της ρευστοποιημένης άμμου με τη διαφορά ότι τώρα μεταβάλλεται το μήκος του πασσάλου.

Στο **Σχήμα 6.18(a και b)** φαίνονται οι κατανομές των κανονικοποιημένων λόγων r_u για τις δύο κρούστες με διαφορετική αντοχή. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι στα μικρά βάθη ($z/L_{pile} < 0.40$) γύρω από τον πάσσαλο, όσο αυξάνεται το μήκος του ο λόγος r_u μειώνεται υποδεικνύοντας διαστολική συμπεριφορά του εδάφους σε αυτή την περιοχή. Πάσσαλοι με μικρότερα μήκη, σε αυτά τα βάθη εμφανίζουν σημαντικά αυξημένες υπερπίεσεις πόρων. Από την άλλη, οι υπερπίεσεις πόρων σε πιο μεγάλα βάθη ($z/L_{pile} > 0.40$) δε φαίνεται να εξαρτώνται από το μήκος του πάσσαλου και σταθεροποιούνται κοντά στη μονάδα. Δηλαδή, σε μεγαλύτερα βάθη ανεξάρτητα από την ύπαρξη της κρούστας αναμένονται περίπου ίδιες πιέσεις πόρων.



Σχήμα 6.18: Κατανομή με το βάθος των κανονικοποιημένων λόγων r_u για (a) την κρούστα με αντοχή $c_u=15$ kPa και (b) για την κρούστα με αντοχή $c_u=40$ kPa.

Τις μεταβολές του λόγου r_u ακολουθούν και τα οριακά φορτία της ρευστοποιημένης άμμου. Πιο συγκεκριμένα, στα μικρά βάθη ($z/L_{pile} < 0.40$) είναι έντονη η μείωση του οριακού φορτίου με την αύξηση του μήκους (εξαιρείται η κόκκινη καμπύλη στο **Σχήμα 6.19**). Σε βάθη μεγαλύτερα από $z/L_{pile} > 0.40$, η εδαφική αντίδραση πλησιάζει τη μονάδα όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.19**, καθώς και οι αντιστοιχοί λόγοι r_u που την καθορίζουν τείνουν στη μονάδα.

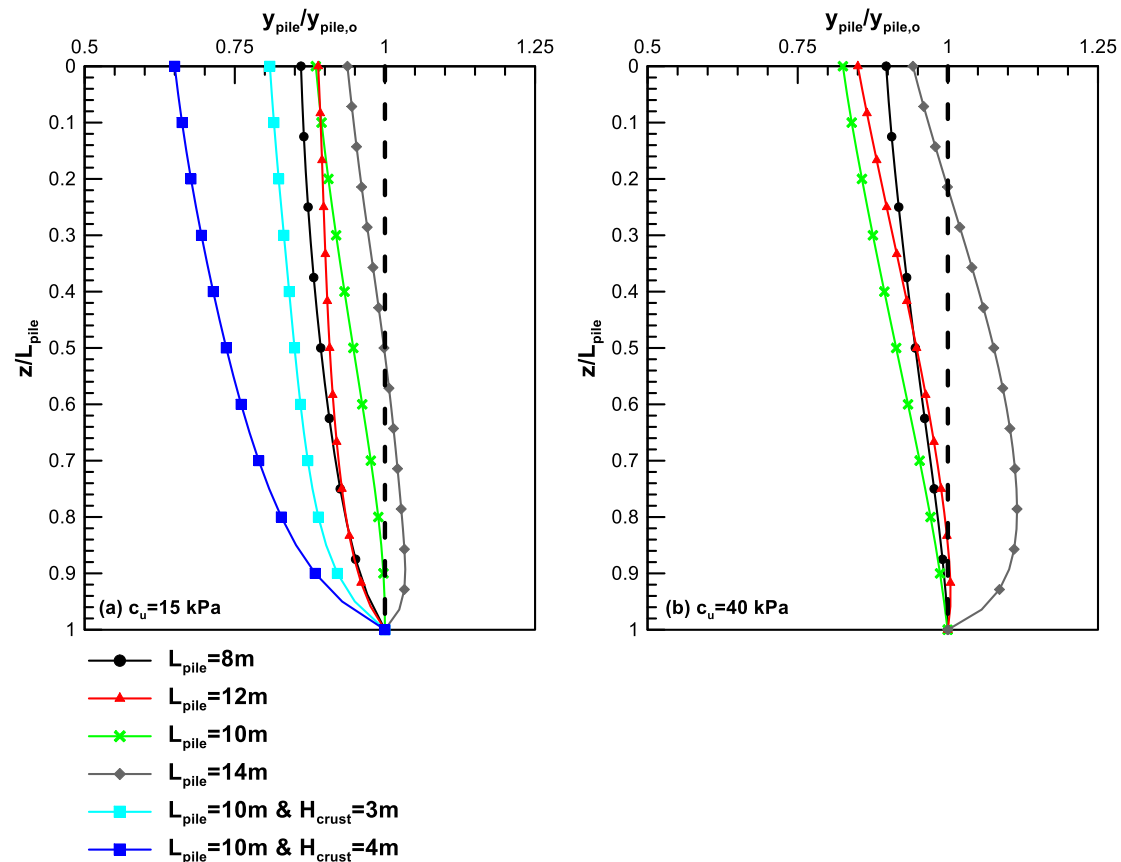


Σχήμα 6.19: Κατανομή της κανονικοποιημένης οριακής εδαφικής αντίδρασης $p_{ult}/p_{ult,o}$ με το βάθος για (a) τη κρούστα με αντοχή $c_u=15$ kPa και (b) για την κρούστα με αντοχή $c_u=40$ kPa.

Η εξήγηση της παραπάνω συμπεριφοράς προκύπτει παρατηρώντας του μηχανισμούς απόκρισης του πασσάλου που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6.20(a και b)** για τα διαφορετικά μήκη πασσάλου. Στην περίπτωση ενός πασσάλου με μήκος μέσα στην άμμο μικρότερο από $H_{sand} < 8m$, φαίνεται πως η στατική λειτουργία του είναι αυτή του δόσκαμπτου προβόλου ενώ στην περίπτωση που το ύψος της άμμου είναι $H_{sand} \geq 8m$ ο πάσσαλος συμπεριφέρεται σαν αμφίπακτο μέλος.

Στα μικρά βάθη ($z/L_{pile} < 0.40$), οι πάσσαλοι με μικρότερα μήκη συμπεριφέρονται σαν πρόβολοι και μετακινούνται περισσότερο από τους πασσάλους με μεγαλύτερα μήκη που λειτουργούν σαν αμφίπακτα μέλη. Αυτή η διαφορά στην απόκριση οδηγεί σε μεγαλύτερες σχετικές μετακινήσεις για τους δεύτερους και λόγω των μικρών ενεργών τάσεων, το έδαφος αποκρίνεται διαστολικά μειώνοντας τις υπερπίεσεις πόρων και αυξάνοντας τα οριακά φορτία. Οι πάσσαλοι που συμπεριφέρονται ως

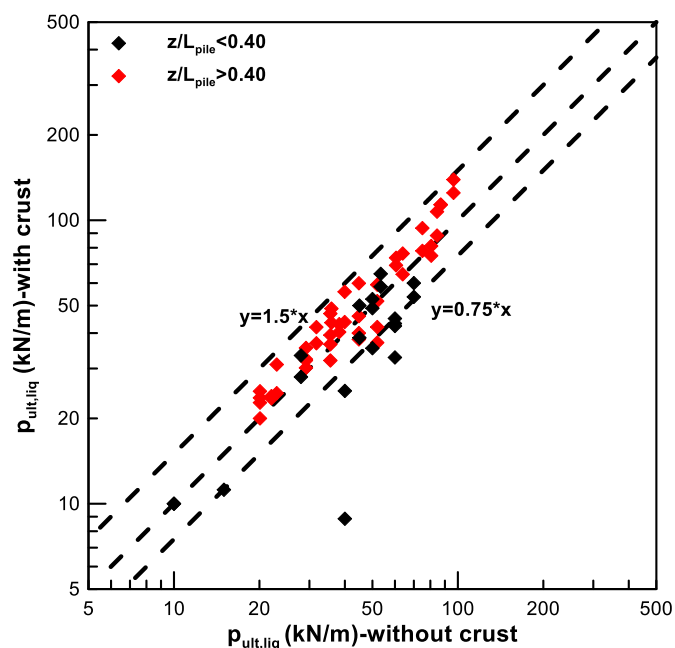
πρόβολοι δέχονται μικρότερα φορτία από τη ρευστοποιημένη άμμου διότι η τάση του εδάφους για διαστολικότητα είναι περιορισμένη.



Σχήμα 6.20: Κανονικοποιημένες κατανομές μετακινήσεων του πασσάλου συναρτήσει του βάθους για (a) μη-διαπερατή κρούστα με $c_u=15$ kPa και (b) μη-διαπερατή κρούστα με $c_u=40$ kPa.

Στα μεγάλα βάθη ($z/L_{pile} > 0.40$) η διαφορετική απόκριση του πασσάλου δε διαδραματίζει σημαντικό ρόλο καθώς οι μετακινήσεις για κάθε περίπτωση είναι μικρές και η εδαφική απόκριση εμφανίζει συστολικές τάσεις. Ο λόγος r_u για τα διαφορετικά μήκη και τα φορτία της ρευστοποιημένης άμμου δε παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις. Επομένως, στα μεγάλα βάθη κοντά στον πάσσαλο η εδαφική απόκριση είναι ανεξάρτητη από την επίδραση της κρούστας.

Τέλος στο **Σχήμα 6.21** συσχετίζονται τα οριακά φορτία της άμμου για τις αναλύσεις με κρούστα με τα οριακά φορτία της άμμου για τις αναλύσεις χωρίς κρούστα. Πρέπει να παρατηρηθεί πως υπάρχει μικρή απόκλιση των φορτίων για τις αναλύσεις με κρούστα και χωρίς κρούστα.

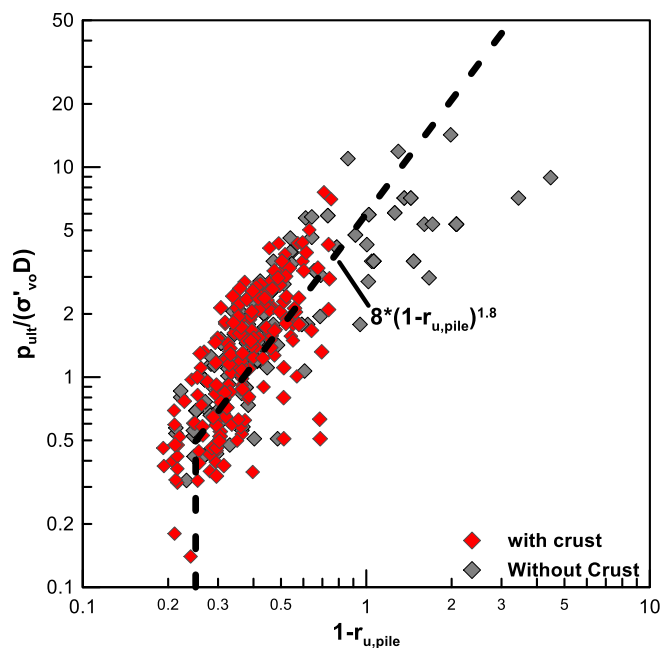


Σχήμα 6.21: Συσχέτιση των οριακών φορτίων της άμμου για τη περίπτωση της διαπερατής κρούστας με τα οριακά φορτία της άμμου της ανάλυσης χωρίς κρούστα.

6.6 Συμπεράσματα

Στις προηγούμενες ενότητες διευρύνθηκε συστηματικά η επίδραση της κρούστας στα φορτία που ασκεί στον πάσσαλο η ρευστοποιημένη άμμος. Εξετάστηκαν πλήρως οι μεταβολές στις κατανομές της εδαφικής αντίδρασης για τις περιπτώσεις που μεταβάλλεται η αντοχή της κρούστας και η δυσκαμψία του πασσάλου (μεταβολή της ροπής αδρανείας και του μήκους του). Τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

- Στην περίπτωση που υπάρχει επιφανειακή εδαφική κρούστα, τα οριακά φορτία της ρευστοποιημένης άμμου συσχετίζονται μονοσήμαντα με τις πιέσεις πόρων που αναπτύσσονται στην περιοχή γύρω από το πάσσαλο, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.22**. Η παρατήρηση είναι πολύ σημαντική διότι αποδεικνύει ότι ο κυρίαρχος μηχανισμός που διέπει την εδαφική απόκριση, ανεξάρτητα από την ύπαρξη υπερκείμενης κρούστας ή μη, είναι άμεσα ο λόγος υπερπίεσης πόρων γύρω από τον πάσσαλο, και έμμεσα η σχετική μετακίνηση πασσάλου-εδάφους καθώς και η διαπερατότητα της άμμου και της κρούστας.

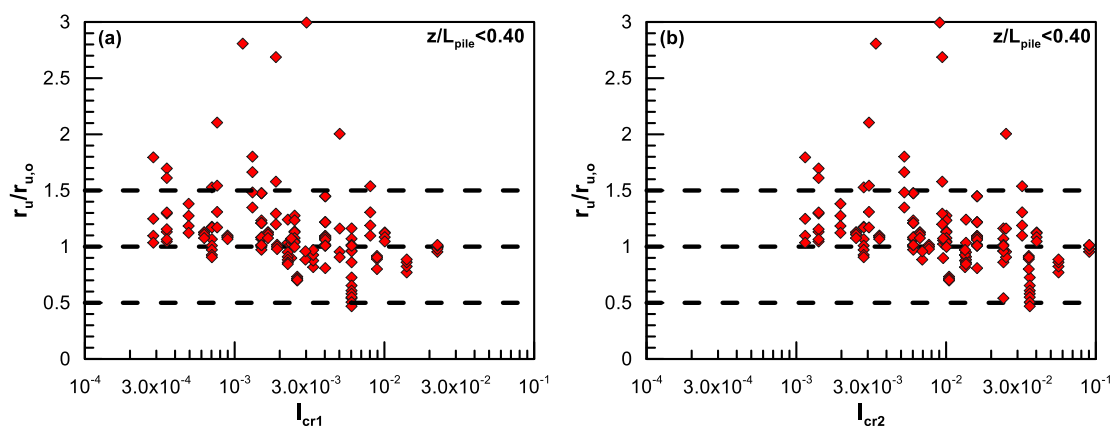


Σχήμα 6.22: Συσχέτιση μεταξύ $p_{ult,liq}/(\sigma'_{vo}D)$ και $1-r_{u,pile}$ για όλες τις αριθμητικές αναλύσεις.

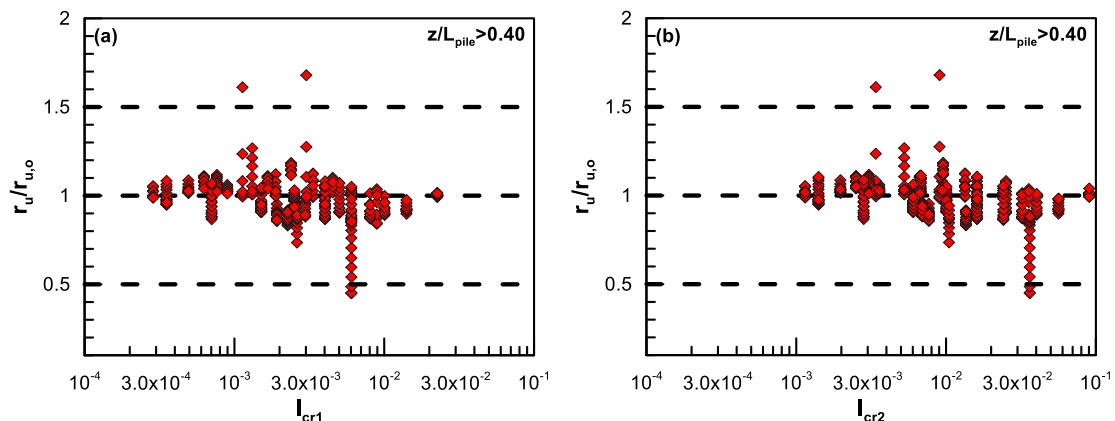
- Στα μικρά βάθη ($z/L_{pile} < 0.40$) η διαφοροποίηση της απόκρισης του πάσσαλου επηρεάζει την εδαφική αντίδραση. Συγκεκριμένα, όταν ο πάσσαλος αποκρίνεται σαν οιονεί αμφίπακτο μέλος, οι σχετικές μετακινήσεις πάσσαλου και εδάφους είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες όταν λειτουργεί σαν πρόβολος. Το έδαφος λόγω διάτμησης υπό χαμηλές ενεργές τάσεις συμπεριφέρεται διαστολικά και στην περιοχή γύρω από τον πάσσαλο αναπτύσσονται μικρότερες πιέσεις πόρων και επακόλουθα επιβαρύνεται ο πάσσαλος με μεγαλύτερα οριακά φορτία από τη ρευστοποιημένη άμμο. Αυτή η συμπεριφορά παρατηρείται για μεγάλες αντοχές κρούστας ($c_u > 7$ kPa), μικρές δυσκαμψίες πάσσαλου ($EI \leq 190800$ kNm²) και πάσσλους με μήκος μέσα στην άμμο μεγαλύτερο από $H_{sand} \geq 8$ m. Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις ο πάσσαλος συμπεριφέρεται ως πρόβολος και η εδαφική απόκριση χαρακτηρίζεται από μικρότερες πιέσεις πόρων και ανάλογα μικρότερα οριακά φορτία στην άμμο. Πρέπει να τονισθεί πως η διαστολική συμπεριφορά του εδάφους στο άνω μέρος του πάσσαλου δεν οδηγεί σε αρνητικές υπερπιέσεις πόρων σε αντίθεση με τις αντίστοιχες υπερπιέσεις που αναπτύσσονται σε ένα αμμόδες εδαφικό προφίλ. Τέλος, η επίδραση της διαπερατότητας της κρούστας παρατηρείται μόνο στα μικρά βάθη γιατί παρόλο που ο πάσσαλος αποκρίνεται ως πρόβολος και μειώνονται οι σχετικές μετατοπίσεις, η μεγαλύτερη

διαπερατότητα οδηγεί σε μικρότερες πιέσεις πόρων λόγω γρηγορότερης στράγγισης και επομένως, σε μεγαλύτερα οριακά φορτία.

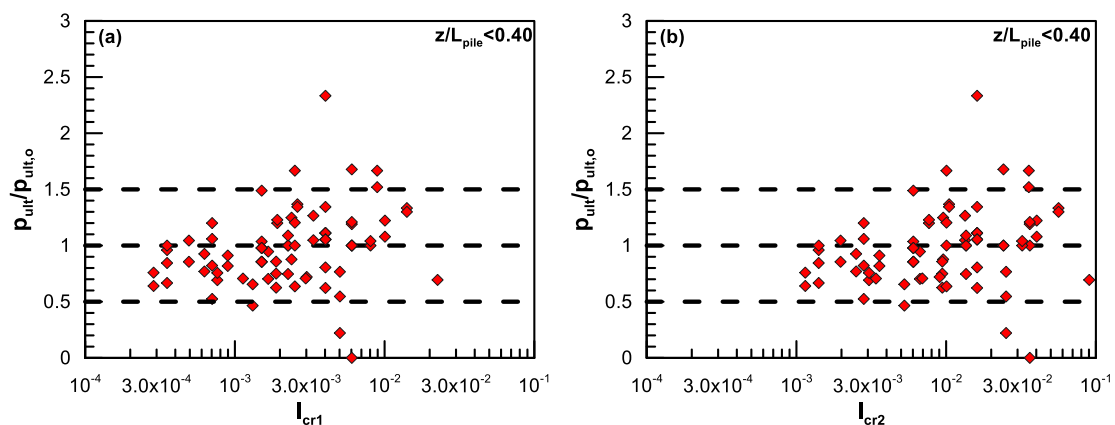
- Σε βάθη μεγαλύτερα ($z/L_{pile} > 0.40$), η εδαφική αντίδραση δεν εξαρτάται πλέον από τον τύπο απόκρισης του πασσάλου. Οι σχετικές μετακινήσεις μειώνονται και το έδαφος λόγω υψηλών ενεργών τάσεων συμπεριφέρεται συστολικά με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι (θετικές) υπερπιέσεις πόρων και ο πάσσαλος να επιβαρύνεται με μικρότερα φορτία από τη ρευστοποιημένη άμμο. Επομένως, στα μεγάλα βάθη αναμένονται παρόμοια οριακά φορτία που δεν επηρεάζονται από την αντοχή της κρούστας και τη δυσκαμψία του πασσάλου (ροπή αδράνειας και μήκος).
- Από το **Σχήμα 6.23** έως και το **Σχήμα 6.26**, παρουσιάζονται οι συσχετίσεις των ανηγμένων λόγων r_u καθώς και των ανηγμένων φορτίων που ασκεί η ρευστοποιημένη άμμος στον πάσσαλο συναρτήσει των δεικτών ποσοτικοποίησης της επίδρασης της κρούστας για βάθη $z/L_{pile} < 0.40$ και $z/L_{pile} > 0.40$ αντίστοιχα. Φαίνεται πως λόγω της ύπαρξης της επιφανειακής κρούστας, τα φορτία της άμμου στα μικρά βάθη παρουσιάζουν μείωση ενώ στα μεγάλα βάθη όπου και οι λόγοι r_u πλησιάζουν στη μονάδα, τα οριακά φορτία παραμένουν ίδια παρόλη τη διασπορά που εμφανίζουν. Κάποιο ποιοτικό συμπέρασμα για το τύπο απόκρισης του πασσάλου από τη παραπάνω συσχέτιση δε μπορεί να εξαχθεί καθώς οι δύο δείκτες λαμβάνουν υπόψη μόνο τα μηχανικά χαρακτηριστικά της κρούστας.



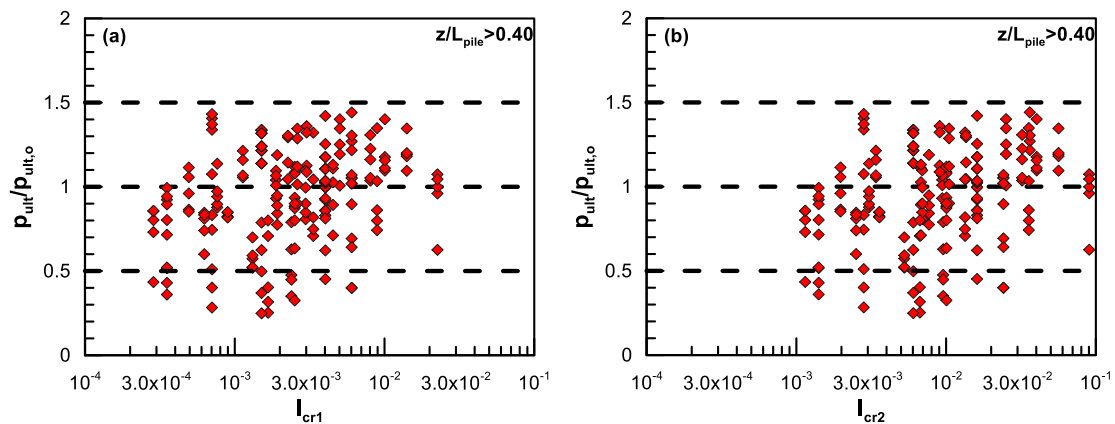
Σχήμα 6.23: Συσχέτιση των ανηγμένων υπερπιέσεων πόρων της άμμου για βάθος $z/L_{pile} < 0.40$ (a) συναρτήσει του δείκτη I_{cr1} , (b) συναρτήσει του δείκτη I_{cr2} .



Σχήμα 6.24: Συσχέτιση των ανηγμένων υπερπίεσεων πόρων της άμμου για βάθος $z/L_{pile} > 0.40$ (a) συναρτήσει του δείκτη I_{cr1} , (b) > 0.40 συναρτήσει του δείκτη I_{cr2} .



Σχήμα 6.25: Συσχέτιση των ανηγμένων φορτίων της άμμου για βάθος $z/L_{pile} < 0.40$ (a) για συναρτήσει του δείκτη I_{cr1} , (b) συναρτήσει του δείκτη I_{cr2} .



Σχήμα 6.26: Συσχέτιση των ανηγμένων φορτίων της άμμου για βάθος $z/L_{pile} > 0.40$ συναρτήσει (a) του δείκτη I_{cr1} και (b) του δείκτη I_{cr2} .

Επίδραση Φορτίων Ρευστοποιημένης Άμμου στην απόκριση του Πασσάλου

7.1 Γενικά

DisplayText cannot span more than one line! Το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης πασσάλου και εδάφους υπό καθεστώς ρευστοποίησης και πλευρικής εδαφικής εξάπλωσης, σε ένα προφίλ αποτελούμενο αποκλειστικά από άμμο, είναι ήδη πολύπλοκο και πολυπαραμετρικό. Η προσθήκη μιας μη ρευστοποιήσιμης κρούστας στην εδαφική επιφάνεια προσθέτει περισσότερες αβεβαιότητες στο υπάρχον πρόβλημα. Στα κεφάλαια που προηγήθηκαν διερευνήθηκε διεξοδικά η διαφοροποίηση της απόκρισης του πασσάλου λόγω της ύπαρξης της κρούστας και αναγνωρίστηκαν οι βασικοί μηχανισμοί απόκρισης. Επιπλέον, με τη βοήθεια των μηχανισμών απόκρισης του πασσάλου και των εδαφικών χαρακτηριστικών που κυριαρχούν ανάλογα με το βάθος, διερευνήθηκε η επίδραση της επιφανειακής κρούστας στα οριακά φορτία της υποκείμενης ρευστοποιήσιμης άμμου.

Στο παρόν κεφάλαιο το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην επίδραση των οριακών φορτίων της ρευστοποιημένης άμμου (που προκύπτουν όταν υπάρχει και όταν δεν υπάρχει η κρούστα) στην απόκριση του πασσάλου. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται, εάν τα εντατικά μεγέθη του πασσάλου αλλάζουν δραματικά από τα διαφορετικά φορτία της ρευστοποιημένης άμμου λόγω της ύπαρξης της κρούστας και εάν τελικά κατά το σχεδιασμό μιας θεμελίωσης από πασσάλους σε ένα προφίλ όπου μια επιφανειακή κρούστα υπέρκειται ενός στρώματος ρευστοποιήσιμης άμμου απαιτείται επαναπροσδιορισμός της εδαφικής αντίδρασης.

7.2 Αναλύσεις Πεπερασμένων Στοιχείων

Για τη διερεύνηση της επίδρασης των οριακών φορτίων της άμμου στην απόκριση του πασσάλου πραγματοποιήθηκαν δεκαοκτώ (18) επιπλέον αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Ansys v12.1. Οι πρώτες έξι (6) αφορούν πάσσαλο καμπτικής δυσκαμψίας $EI=190800 \text{ kNm}^2$ σε εδαφικό προφίλ με αργλική κρούστα διαφορετικής αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u κάθε φορά και οι υπόλοιπες δώδεκα (12) περιλαμβάνουν πασσάλους διαφορετικής καμπτικής δυσκαμψίας μέσα σε κρούστα με αντοχές $c_u=15, 40 \text{ kPa}$. Τα στοιχεία των αναλύσεων παρουσιάζονται πιο αναλυτικά παρακάτω.

Αλγόριθμος μη γραμμικής επίλυσης.-Η μετατόπιση της κεφαλής, σύμφωνα με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, προκύπτει από το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων, μητρικής μορφής:

$$[K]\{u\} = \{F^a\} \quad (7.1)$$

όπου:

$[K]$ Μητρώο δυσκαμψίας

$\{u\}$ Διάνυσμα των άγνωστων τιμών των βαθμών ελευθερίας

$\{F_a\}$ Διάνυσμα των επιβαλλόμενων φορτίων

Στην περίπτωση που το μητρώο δυσκαμψίας $[K]$ αποτελεί συνάρτηση των αγνώστων τιμών των βαθμών ελευθερίας, ή των παραγώγων αυτών, τότε η εξίσωση (7.1) είναι μη γραμμική. Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την επίλυση τέτοιων μη γραμμικών εξισώσεων είναι η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson, η οποία περιγράφεται στο **Σχήμα 7.1** και συνοψίζεται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$[K_i^T]\{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F^{nr}\} \quad (7.2)$$

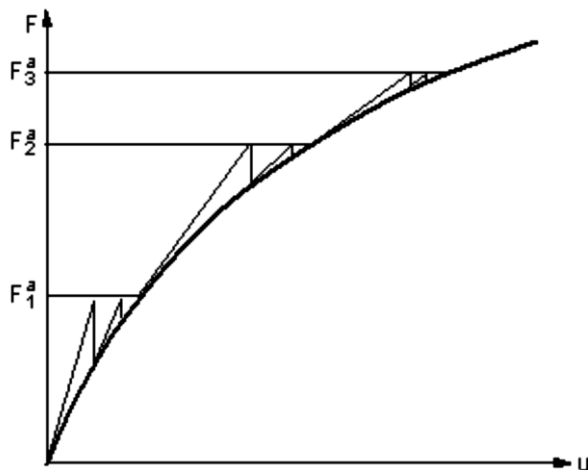
$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} - \{\Delta u_i\} \quad (7.3)$$

όπου:

$[K_i^T]$ Εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας

i Δείκτης που υποδηλώνει την τρέχουσα επανάληψη

$\{F^{nr}\}$ Διάνυσμα επικόμβιων δράσεων που απαιτούνται για την εξισορρόπηση των εσωτερικών τάσεων των στοιχείων



Σχήμα 7.1: Επαυξητική μέθοδος Newton-Raphson (Ansys, 2009)

Σε κάθε επανάληψη, τα $[K_i^T]$ και $\{F^{nr}\}$ υπολογίζονται συναρτήσει των τιμών του $\{u_i\}$. Έτσι, το δεξί τμήμα της εξίσωσης (7.1) είναι ουσιαστικά το διάνυσμα των απομενοντών (εκτός-ισορροπίας) φορτίων. Αποτελεί, δηλαδή, μέτρο της «απόκλισης» από την τελική λύση.

Προσομοίωση χαλύβδινου πασσάλου. Ο πάσσαλος διακριτοποιήθηκε σε 2-κομβικά ισοπαραμετρικά, 3-διάστατα ελαστικά στοιχεία δοκού, μήκους 0.50m το καθένα, με τα αδρανειακά χαρακτηριστικά ενός κυλινδρικού αγωγού με εξωτερική διάμετρο **D=0.60m** και πάχος τοιχώματος **t=11.3mm** για τις αναλύσεις που μεταβάλλεται μόνο η αντοχή της κρούστας ενώ για τις αναλύσεις που μεταβάλλεται η δυσκαμψία του πασσάλου το πάχος του τοιχώματος λαμβάνει τιμές **t=5, 11.3, 40.2mm**.

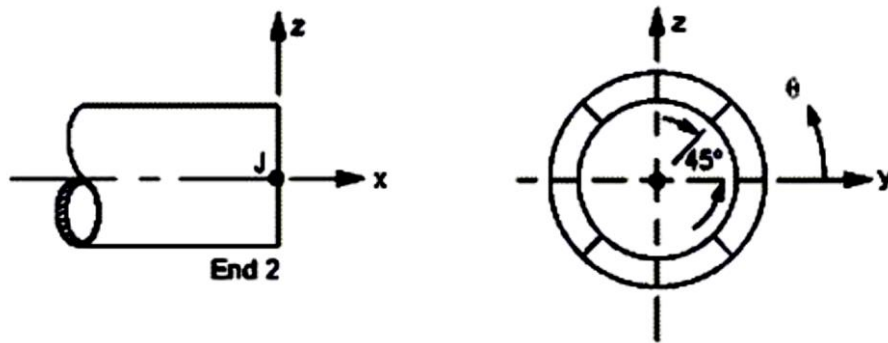
Οκτώ (8) σημεία ολοκλήρωσης ορίζονται κατά μήκος της περιμέτρου κάθε διατομής, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 7.2** (ο τοπικός z-άξονας είναι πάντοτε κατακόρυφος). Οι τάσεις και οι παραμορφώσεις του αγωγού υπολογίζονται στα ανωτέρω οκτώ σημεία, λαμβάνοντας υπόψη τη δράση αξονικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών. Τέλος ο πάσσαλος θεωρήθηκε ελαστικός με μέτρο ελαστικότητας $E=210\text{GPa}$ και λόγο του Poisson $\nu=0.20$. Οι **Πίνακες 7.1** και **7.2** συνοψίζουν τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του πασσάλου για όλες τις αναλύσεις.

Πίνακας 7.1: Γεωμετρικά και Μηχανικά χαρακτηριστικά χαλύβδινου πασσάλου κατά τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων όπου μεταβάλλεται η αντοχή της κρούστας.

Εξωτερική Διάμετρος, D (m)	0.60
Πάχος τοιχώματος, t (mm)	11.3
Εμβαδό Διατομής, A (m ²)	0.20883
Ροπή αδράνειας, I (m ⁴)	0.000904
Μέτρο Ελαστικότητας, E (GPa)	210
Λόγος Poisson, ν	0.20

Πίνακας 7.2: Γεωμετρικά και Μηχανικά χαρακτηριστικά χαλύβδινου πασσάλου κατά τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων όπου μεταβάλλεται η μεταβάλλεται η καμπτική δυσκαμψία.

cu (kPa)	15			40		
Εξωτερική Διάμετρος, D (m)	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Πάχος τοιχώματος, t (mm)	5	11.3	40.2	5	11.3	40.2
Εμβαδό Διατομής, A (m ²)	0.009339	0.020883	0.070463	0.009339	0.020883	0.070463
Ροπή Αδράνειας, I (m ⁴)	0.00041	0.000904	0.00278	0.00041	0.000904	0.00278
Μέτρο Ελαστικότητας, E (GPa)	210	210	210	210	210	210



Σχήμα 7.2: Σημεία ολοκλήρωσης στη διατομή στοιχείων δοκού. (Ansys, 2009)

Αλληλεπίδραση εδάφους-πασσάλου (οριζόντια φόρτιση). Στην περίπτωση οριζόντιας φόρτισης, η αλληλεπίδραση εδάφους-πασσάλου στο στρώμα της άμμου προσομοιώθηκε μέσω οριζόντιων μη γραμμικών ελατηρίων, ενώ για την εκτίμηση της σχέσης δύναμης μετατόπισης οι αντίστοιχες καμπύλες p - y υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση:

$$p = \left(\frac{y}{\frac{1}{k_{ini,liq} \cdot z} + \frac{y}{P_{ult,liq}}} \right) \quad (7.4)$$

όπου:

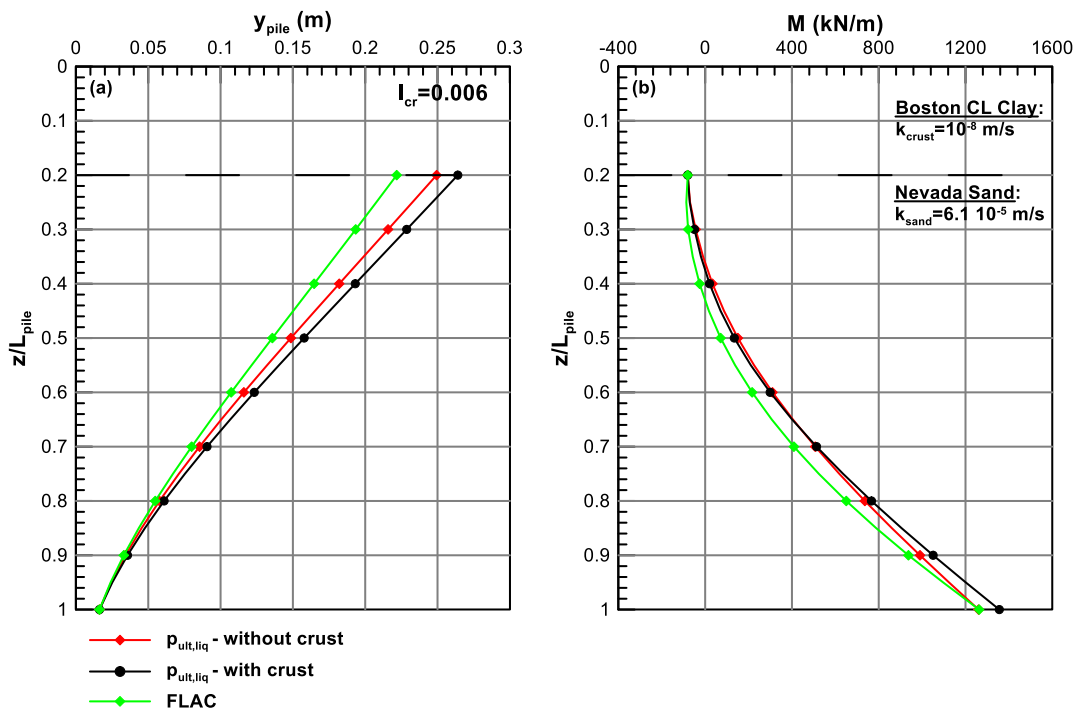
- p : Πλευρική αντίσταση
- $p_{ult,liq}$: Μέγιστη πλευρική αντίσταση σε κάθε βάθος
- y : Πλευρική μετατόπιση του εκάστοτε κόμβου
- $k_{ini,liq}$: Μέτρο αρχικής δυσκαμψίας του εδάφους
- z : το αντίστοιχο βάθος

Το τμήμα του πασσάλου μέσα στην αργιλική κρούστα αφαιρέθηκε και για λόγους ισορροπίας του αριθμητικού μοντέλου, επιβλήθηκαν στην κεφαλή του πασσάλου (η οποία τώρα βρίσκεται στη διεπιφάνεια κρούστας και άμμου) η αντίστοιχη ροπή και τέμνουσα ως εξωτερικές φορτίσεις. Πρέπει να αναφερθεί πως τα δύο αυτά εντατικά μεγέθη έχουν προκύψει από τις αριθμητικές αναλύσεις με το FLAC v5.0.

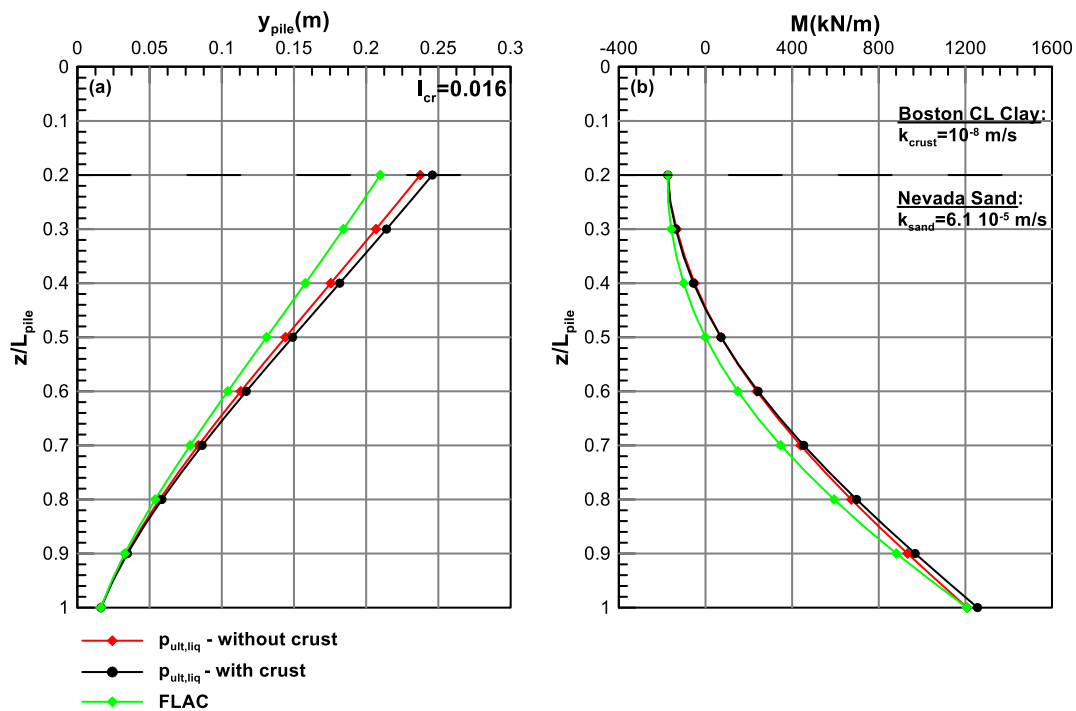
7.3 Επίδραση Φορτίων Άμμου στην Απόκριση του πασσάλου

Όπως αναφέρθηκε στο **Κεφάλαιο 6**, η ύπαρξη επιφανειακής αργιλικής κρούστας που υπέρκειται στρώματος ρευστοποιήσιμης άμμου επηρεάζει και διαφοροποιεί τα οριακά φορτία της άμμου με αποτέλεσμα να γεννάται το ερώτημα «κατά πόσο η προκειμένη διαφοροποίηση επιδρά στα εντατικά μεγέθη του πασσάλου». Η διαφοροποίηση στην εντατική κατάσταση του πασσάλου μπορεί να αποτυπωθεί όταν αυτός εντείνεται ψευδοστατικά. Συγκεκριμένα, η ένταση του πασσάλου οφείλεται στην αλληλεπίδραση του με τα μη-γραμμικά ελατήρια που προσομοιώνουν τη ρευστοποιημένη άμμο. Σύμφωνα με τη ψευδοστατική μέθοδο, στο δεσμευμένο άκρο των ελατηρίων επιβάλλονται οι μετακινήσεις του ελευθέρου πεδίου που προέκυψαν από την αρμονική (σεισμική) διέγερση του εδάφους και ο πάσσαλος εντείνεται αντίστοιχα αλλά οι δυνάμεις που δέχεται καθορίζονται από τον υπερβολικό νόμο [εξίσωση(7.4)] στον οποίο υπακούν τα ελατήρια και που λαμβάνει υπόψη του και τη μέγιστη εδαφική αντίδραση που αναπτύσσει η ρευστοποιημένη άμμος. Καθώς το ενδιαφέρον του κεφαλαίου επικεντρώνεται στη διαφοροποίηση της απόκρισης του πασσάλου ανάλογα με τα διαφορετικά φορτία της άμμου, κάθε μία από τις παραμετρικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκε δύο φορές και η απόκριση των ελατηρίων τα οποία αντιπροσωπεύουν την αλληλεπίδραση πασσάλου και εδάφους, τη πρώτη φορά καθορίστηκε από τα οριακά φορτία της ρευστοποιημένης άμμου που προέκυψαν από τις αναλύσεις με κρούστα και τη δεύτερη φορά, από τα οριακά φορτία της ρευστοποιημένης άμμου που προέκυψαν από τις αναλύσεις χωρίς κρούστα. Τελικά, τα αποτελέσματα των αναλύσεων συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα του κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC.

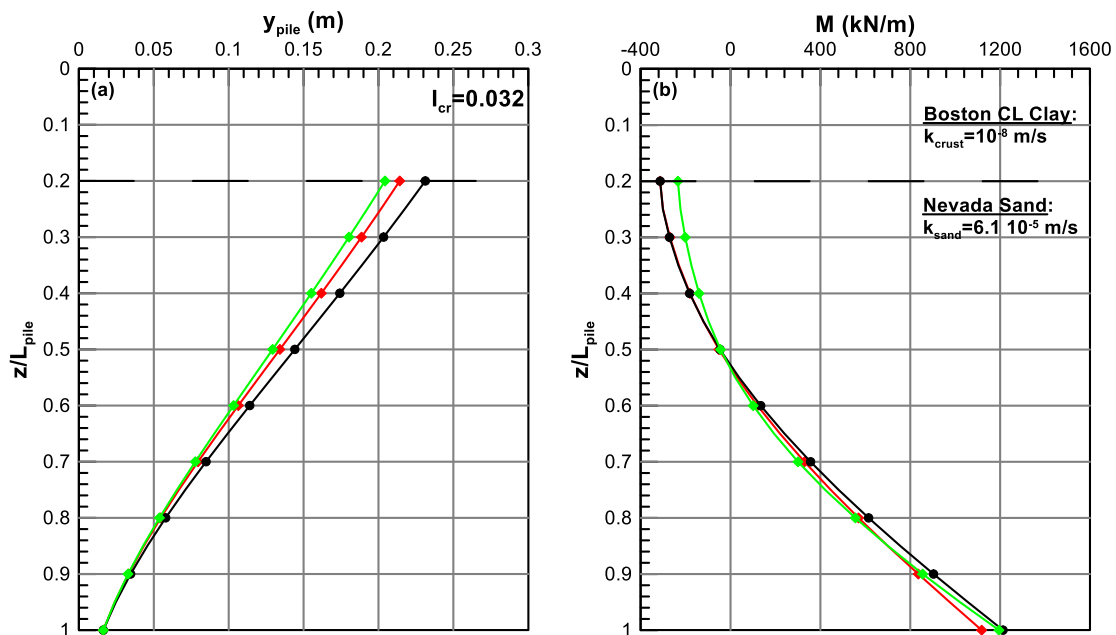
Από το **Σχήμα 7.3** έως και το **Σχήμα 7.11** παρουσιάζονται οι κατανομές των ροπών και των μετακινήσεων του πασσάλου με το βάθος το οποίο έχει κανονικοποιηθεί με το μήκος του μήκος του. Σε αυτά τα σχήματα αποτυπώνονται επίσης και οι κατανομές των μετακινήσεων και ροπών που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις με το κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC v5.0.



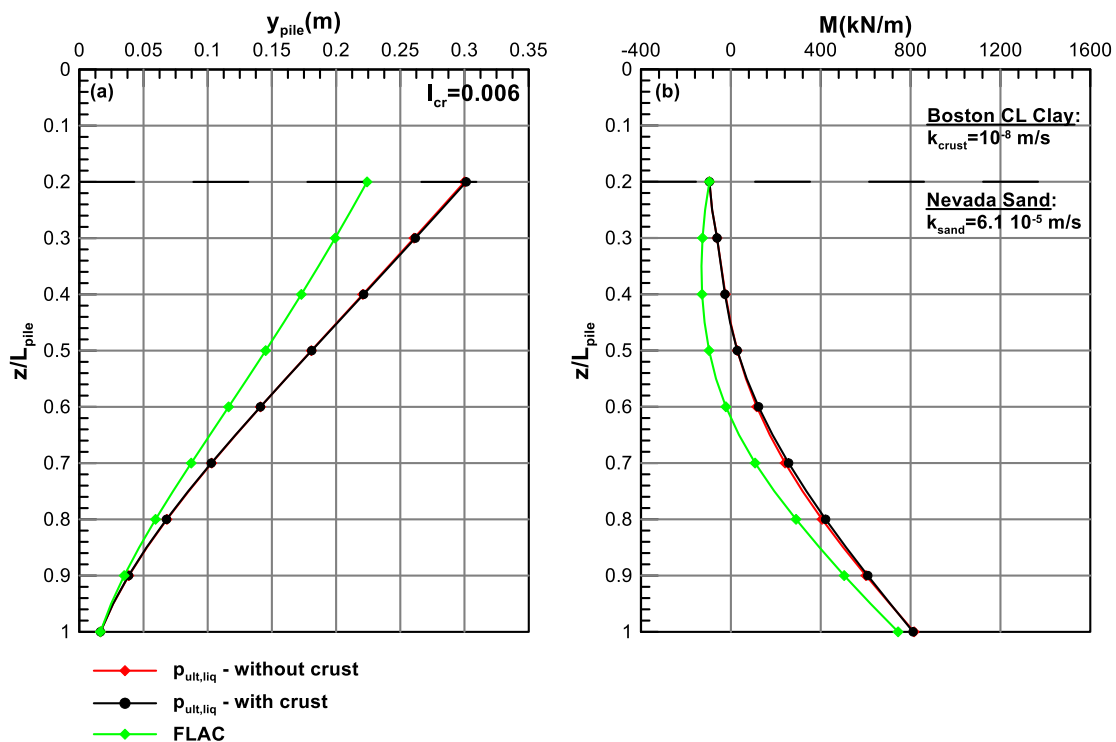
Σχήμα 7.3: Κατανομή με το βάθος (a) της μετακίνησης και (b) των ροπών του πασσάλου στην περίπτωση αργλικής κρούστας με δείκτη $I_{cr}=0.006$.



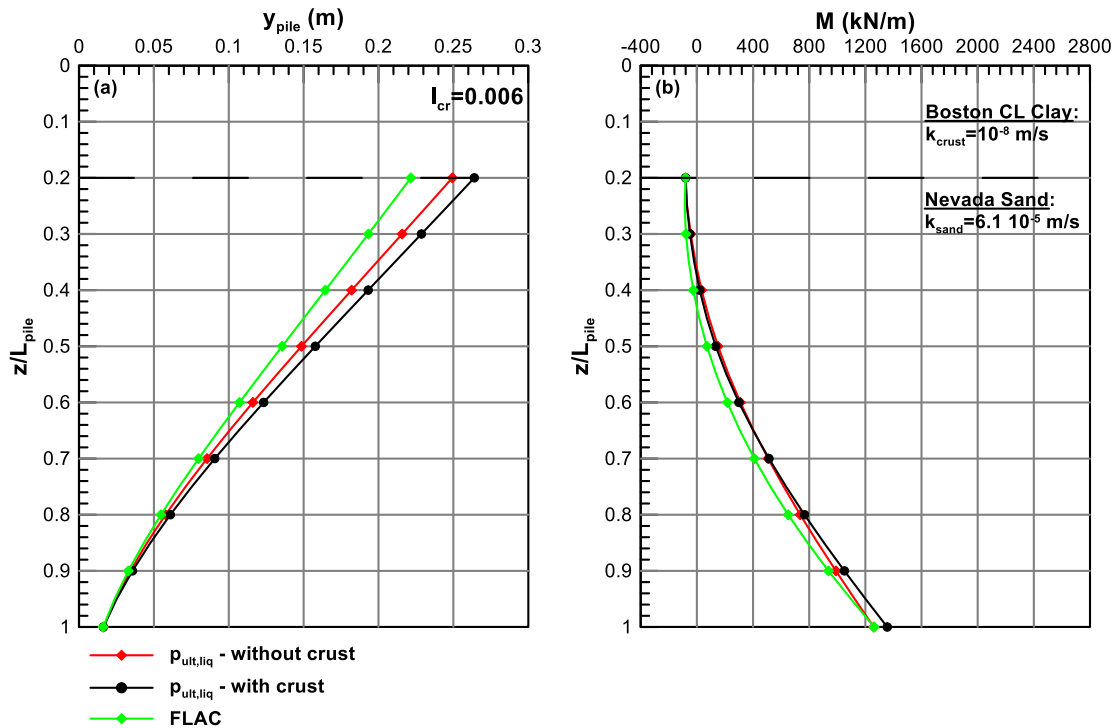
Σχήμα 7.4: Κατανομή με το βάθος (a) της μετακίνησης και (b) των ροπών του πασσάλου στην περίπτωση αργλικής κρούστας με δείκτη $I_{cr}=0.016$.



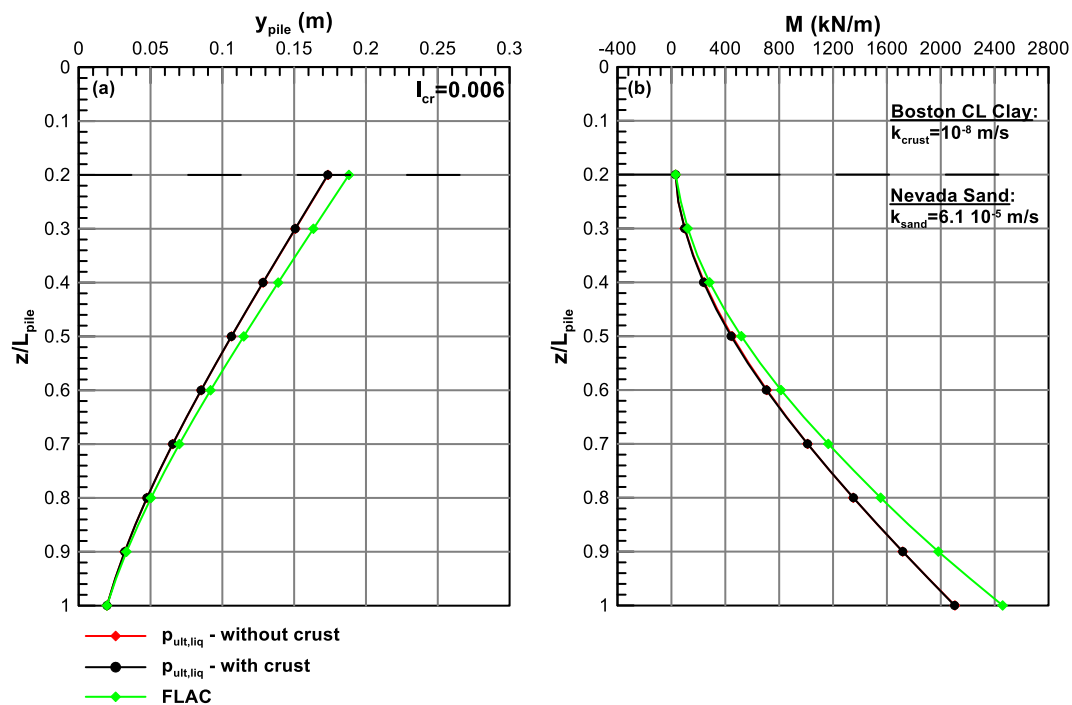
Σχήμα 7.5: Κατανομή με το βάθος (a) της μετακίνησης και (b) των ροπών του πασσάλου στην περίπτωση αργλικής κρούστας με δείκτη $I_{cr}=0.032$.



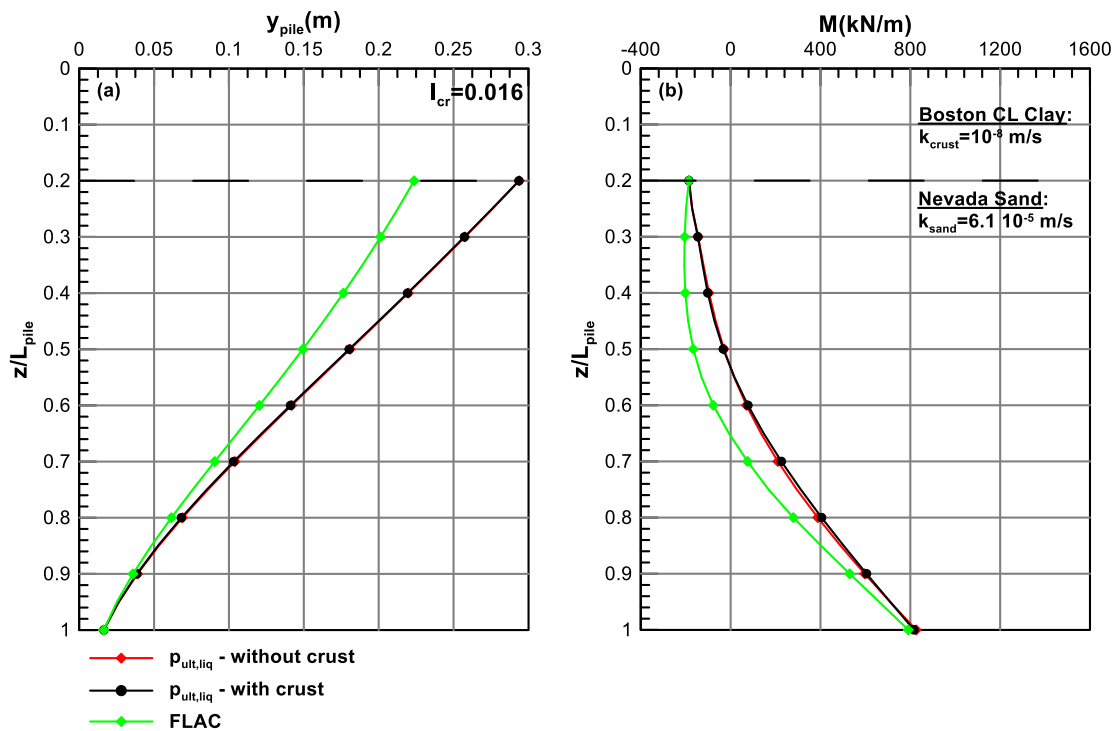
Σχήμα 7.6: Κατανομή με το βάθος (a) της μετακίνησης και (b) των ροπών πασσάλου δυσκαμψίας $EI=86100$ kNm² στην περίπτωση αργλικής κρούστας με δείκτη $I_{cr}=0.006$.



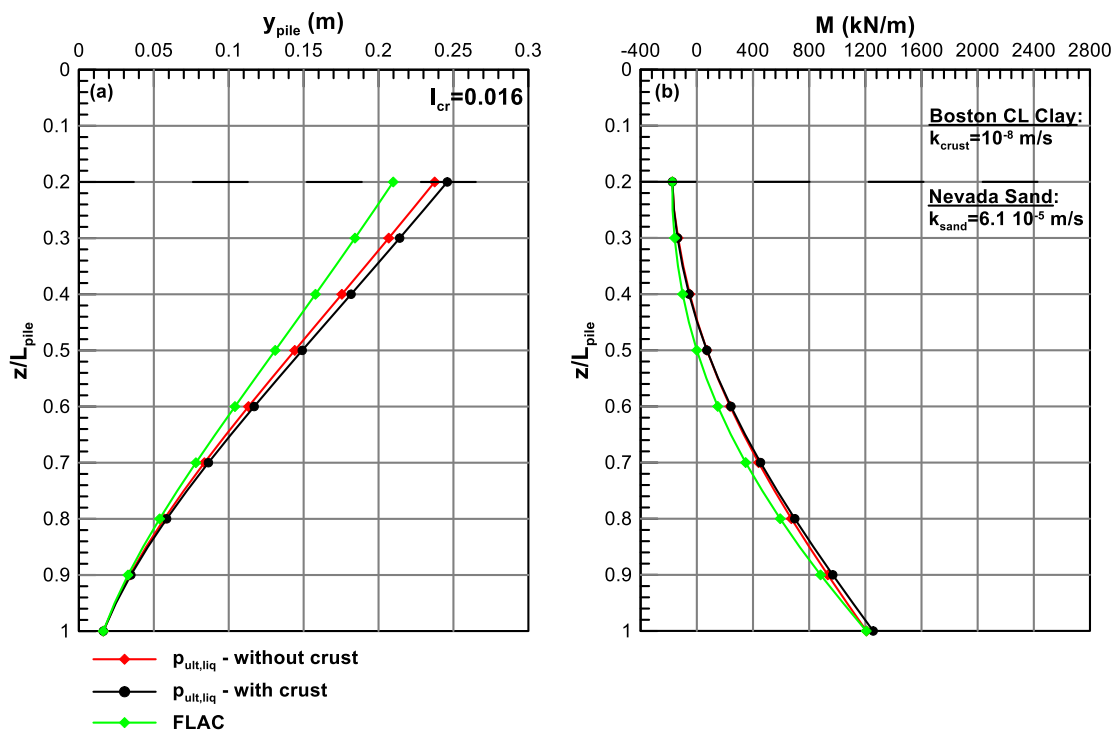
Σχήμα 7.7: Κατανομή με το βάθος (α) της μετακίνησης και (β) των ροπών πασσάλου δυσκαμψίας $EI=190800$ kNm² στην περίπτωση αργιλικής κρούστας με δείκτη $I_{cr}=0.006$.



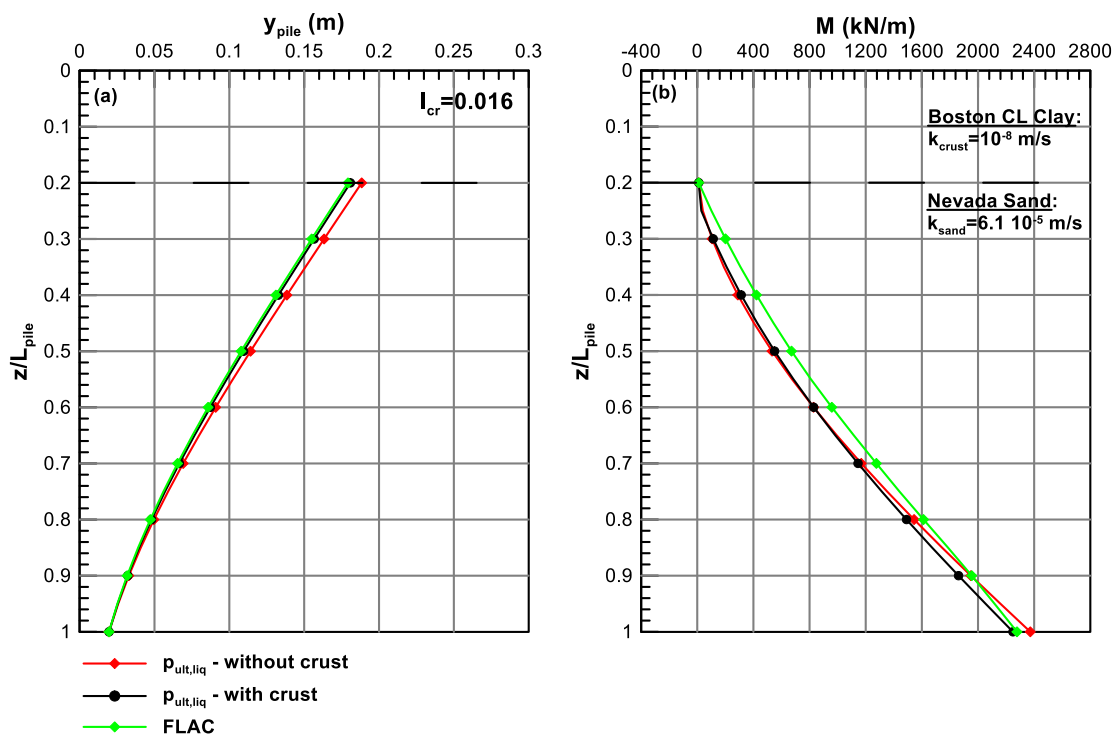
Σχήμα 7.8: Κατανομή με το βάθος (α) της μετακίνησης και (β) των ροπών πασσάλου δυσκαμψίας $EI=583800$ kNm² στην περίπτωση αργιλικής κρούστας με δείκτη $I_{cr}=0.006$.



Σχήμα 7.9: Κατανομή με το βάθος (a) της μετακίνησης και (b) των ροπών πασσάλου δυσκαμψίας $EI=86100$ kNm² στην περίπτωση αργλικής κρούστας με δείκτη $I_{cr}=0.016$.



Σχήμα 7.10: Κατανομή με το βάθος (a) της μετακίνησης και (b) των ροπών πασσάλου δυσκαμψίας $EI=190800$ kNm² στην περίπτωση αργλικής κρούστας με δείκτη $I_{cr}=0.016$.



Σχήμα 7.11: Κατανομή με το βάθος (a) της μετακίνησης και (b) των ροπών πασσάλου δυσκαμψίας $EI=583800$ kNm² στην περίπτωση αργιλικής κρούστας με δείκτη $I_{cr}=0.016$.

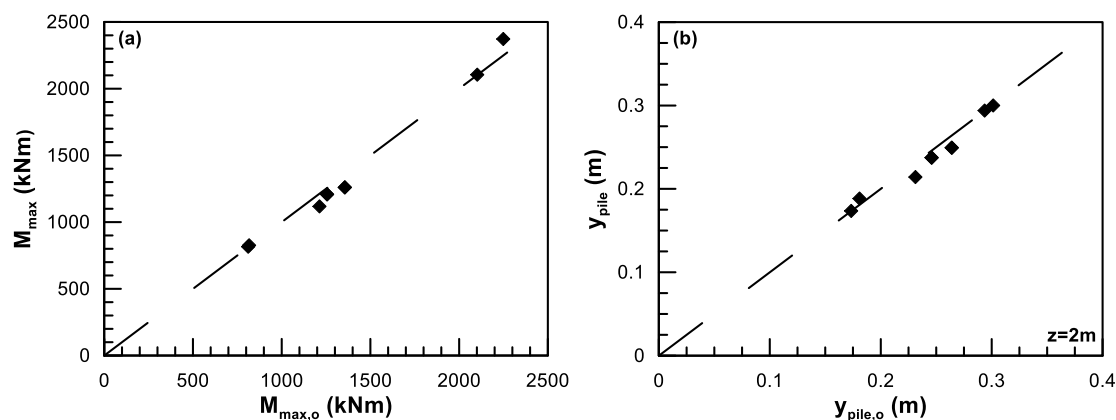
Παρατηρείται πως σε όλες τις αναλύσεις η κατανομή των καμπτικών ροπών στην περίπτωση της ύπαρξης της κρούστας (μαύρη γραμμή στα σχήματα) ταυτίζεται σχεδόν με την αντίστοιχη κατανομή όταν ο πάσσαλος επιβαρύνεται από τα οριακά φορτία της άμμου απουσία της κρούστας (κόκκινη γραμμή στα σχήματα). Επιπλέον, μικρές είναι και οι διαφορές των κατανομών των ροπών μεταξύ των κωδίκων FLAC και Ansys.

Όσον αφορά τις μετακινήσεις, φαίνεται ότι τελικά η επίδραση της κρούστας στα οριακά φορτία της άμμου είναι μικρή και πρακτικά αμελητέα αφού οι κατανομές των μετακινήσεων για τις δύο περιπτώσεις είναι σχεδόν ίδιες. Διαφορές παρατηρούνται στις κατανομές των μετακινήσεων μεταξύ των δύο κωδίκων ανάλυσης κυρίως στις αναλύσεις με μικρή καμπτική δυσκαμψία του πασσάλου.

7.4 Συμπεράσματα

Από τις αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Ansys προκύπτουν αμελητέες διαφορές στις κατανομές των ροπών που προκαλεί η οριακή εδαφική αντίδραση για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, η παρουσία επιφανειακής κρούστας μπορεί να επηρεάζει την εδαφική απόκριση του υποκείμενου στρώματος ρευστοποιήσιμης άμμου αλλά αυτή η επιρροή δεν αλλάζει την απόκριση του πασσάλου είτε σε όρους μετακινήσεων είτε σε όρους ροπών. Το επιχείρημα αυτό ενισχύεται και από το **Σχήμα 7.12** όπου συσχετίζονται οι ροπές στη βάση του πασσάλου και οι μετακινήσεις του σε βάθος $z=2\text{m}$ από την επιφάνεια του εδάφους για τις δύο περιπτώσεις.

Επομένως, κατά τον σχεδιασμό μιας θεμελίωσης πασσάλων σε ένα προφίλ που αποτελείται από στρώμα ρευστοποιήσιμης άμμου και υπερκείμενη μη ρευστοποιήσιμη κρούστα δεν είναι απαραίτητο να επαναπροσδιοριστούν τα οριακά φορτία της άμμου λόγω της ύπαρξης της κρούστας. Η εκτίμηση της εδαφικής αντίδρασης στην άμμο μπορεί να γίνει με χρήση των ήδη εφαρμοζόμενων κανονισμών.



Σχήμα 7.12: Συσχέτιση (α) των ροπών στη βάση του πασσάλου και (β) των μετακινήσεων στην κεφαλή του πασσάλου (σε βάθος $z=2\text{m}$ από την επιφάνεια του εδάφους εφόσον έχει αφαιρεθεί το τμήμα του πασσάλου στην κρούστα) για τις περιπτώσεις που η κρούστα υπάρχει και όταν απουσιάζει.

Συμπεράσματα

8.1 Γενικά

Ένα από τα πιο σημαντικά συνοδευτικά φαινόμενα της σεισμικής ρευστοποίησης είναι η «πλευρική εξάπλωση» (lateral spreading) του φυσικού εδάφους, κατά την οποία μεγάλες εδαφικές εκτάσεις μετακινούνται οριζόντια, από μερικά εκατοστά έως και μερικά μέτρα. Για την εκδήλωση αυτού του φαινομένου είναι αρκετή ακόμη και μικρή κλίση του εδάφους (π.χ. 2÷4%) ή παρουσία μικρού σχετικά αναβαθμού, ύψους 1÷2m, όπως για παράδειγμα στις όχθες ποταμών. Στην περίπτωση πρανών το φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης μπορεί να έχει δραματικές επιπτώσεις σε επιφανειακές και βαθιές θεμελιώσεις. Πολλές πρόσφατες έρευνες έχουν προσανατολιστεί στη διερεύνηση της απόκρισης πασσάλων υπό καθεστώς ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης οι οποίοι είναι τοποθετημένοι μέσα σε ρευστοποιήσιμα στρώματα όπου πρωταρχικό ρόλο στην απόκριση διαδραματίζουν η εδαφική διαπερατότητα (Gonzalez et al., 2009; Chaloulos 2012) και η σχετική μετακίνηση μεταξύ πασσάλου και εδάφους.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η απόκριση πασσάλων υπό καθεστώς ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης του εδάφους ενός εδαφικού προφίλ στο οποίο μη-ρευστοποιήσιμη επιφανειακή κρούστα υπέρκειται ρευστοποιήσιμου στρώματος άμμου και αποτελεί συνέχεια της ερευνητικής προσπάθειας του Chaloulos (2012). Στοχεύει στην διερεύνηση της επιρροής της εδαφικής κρούστας στα φαινόμενα που αναφέρθηκαν παραπάνω, καθώς και στη συνολική απόκριση του συστήματος πασσάλου-εδάφους. Πρώτο βήμα της παρούσας εργασίας ήταν η ανάπτυξη αριθμητικής μεθοδολογίας για τη διερεύνηση του προβλήματος. Γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων διαφορών FLAC 3D v5.0 και ο

κώδικας πεπερασμένων στοιχείων Ansys v12.1. Στον κώδικα FLAC 3D, για τη μη-ρευστοποιήσιμη εδαφική κρούστα χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό μοντέλο Mohr-Coulomb και για τη ρευστοποιήσιμη άμμο χρησιμοποιήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα NTUA Sand. Στον κώδικα Ansys ο πάσσαλος προσομοιώθηκε από ελαστικά στοιχεία δοκού και η αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους πραγματοποιήθηκε με μη-γραμμικά ελατήρια τα οποία για την εκτίμηση της σχέσης δύναμης μετατόπισης χρησιμοποιούν τις καμπύλες p-y που υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση:

$$p = \left(\frac{y}{\frac{1}{k_{ini,liq} \cdot z} + \frac{y}{p_{ult,liq}}} \right) \quad (8.1)$$

όπου:

- p: Πλευρική αντίσταση
 p_{ult,liq}: Μέγιστη πλευρική αντίσταση σε κάθε βάθος
 y: Πλευρική μετατόπιση του εκάστοτε κόμβου
 k_{ini,liq}: Μέτρο αρχικής δυσκαμψίας του εδάφους
 z: το αντίστοιχο βάθος

Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη διπλωματική εργασία σχετίζονται με:

- την επίδραση της κρούστας στην απόκριση του πασσάλου
- την επίδραση της κρούστας στα οριακά φορτία της ρευστοποιημένης άμμου
- επίδραση φορτίων της ρευστοποιημένης άμμου στην απόκριση του πασσάλου με τη βοήθεια των παραμετρικών αναλύσεων στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Ansys v12.1.

8.2 Επίδραση κρούστας στην απόκριση του πασσάλου

- a. Η παρουσία επιφανειακής αργιλικής κρούστας η οποία υπέρκειται ενός στρώματος από ρευστοποιήσιμη άμμο γενικά μειώνει τις μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου. Σε αντίθεση με την άμμο, η κρούστα μετακινείται λιγότερο και περιορίζει τις μετακινήσεις του ελεύθερου πεδίου. Βέβαια, αν συγκριθούν δύο εδαφικά προφίλ με διαφορετικά μήκη πασσάλου στην άμμο και ίδιο πάχος κρούστας, το προφίλ με το μεγαλύτερο πάχος άμμου το οποίο είναι και ο κύριος παράγοντας που καθορίζει τις μετακινήσεις, αναμένονται μεγαλύτερες μετακινήσεις ελεύθερου πεδίου χωρίς όμως να ξεπεράσουν εκείνες ενός προφίλ αποκλειστικά από άμμο.
- b. Η αργιλική κρούστα μειώνει τις μετακινήσεις του πασσάλου. Συγκεκριμένα, πέρα από το γεγονός ότι μετακινείται λιγότερο από την άμμο, δρα ως στήριγμα στο άνω μέρος του πασσάλου (gripping effect) και τελικά περιορίζει τις μετακινήσεις του.
- c. Ανάλογα με τις εδαφικές ιδιότητες της κρούστας και τα χαρακτηριστικά του πασσάλου, παρατηρούνται δύο μηχανισμοί απόκρισης. Για κρούστες με αντοχή $c_u > 7$ kPa και για πασσάλους με τιμές της δυσκαμψίας $EI \leq 200000$ kNm² ή με μήκος μέσα στην άμμο μεγαλύτερο από $H_{sand} > 8$ m η συμπεριφορά είναι αυτή του αμφίπακτου μέλους. Ο πάσσαλος περιορίζεται κινηματικά στην κεφαλή του από την κρούστα και επιβαρύνεται με αρνητικές ροπές που μπορούν να αποκτήσουν σημαντικό μέγεθος όταν η κρούστα είναι πολύ στιφρή ή ο πάσσαλος πολύ εύκαμπος. Οι ροπές στη βάση της άμμου δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα όταν ο πάσσαλος συμπεριφέρεται αμφίπακτα. Για κρούστες με μικρή αντοχή ($c_u < 7$ kPa) και για πασσάλους με τιμές της δυσκαμψίας $EI \geq 200000$ kNm² ή με μήκος μέσα στην άμμο μικρότερο από $H_{sand} < 8$ m η συμπεριφορά είναι αυτή του προβόλου. Ο πάσσαλος είναι αρκετά εύκαμπος να αντισταθεί στις επιβαλλόμενες μετακινήσεις και η επιρροή της κρούστας είναι μειωμένη. Όσο μεγαλώνει η δυσκαμψία του, επιβαρύνεται με ολοένα και μικρότερες οι αρνητικές ροπές. Οι ροπές στη βάση, σε αντίθεση με την περίπτωση της αμφίπακτης λειτουργίας επηρεάζονται από την απόκριση του πασσάλου που διέπεται από τη καμπτική δυσκαμψία και παρουσιάζουν αύξηση με την αύξηση της στιβαρότητας του πασσάλου.

d. Οι δύο δείκτες ποσοτικοποίησης της επίδρασης της κρούστας είναι οι:

$$I_{rot} = \left(\frac{c_u \cdot D \cdot H_{crust}^2}{(EI / H_{sand})} \right) \quad (8.2)$$

&

$$I_{trans} = \left(\frac{c_u \cdot D \cdot H_{crust}}{(EI / (H_{sand})^2)} \right) \quad (8.3)$$

όπου c_u η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της κρούστας (kPa), D η διάμετρος του πασσάλου (m), H_{crust} το πάχος της κρούστας (m), H_{sand} το πάχος της άμμου και EI η καμπτική δυσκαμψία του πασσάλου (kNm²).

Οι δύο προτεινόμενοι δείκτες οριοθετούν τους διαφορετικούς τρόπους απόκρισης του πασσάλου σε συνδυασμό με τη ροπή στη διεπιφάνεια της κρούστας και την ελάχιστη ροπή που αναπτύσσεται στον πάσσαλο. Αν συνδυαστούν με μεγέθη όπως η ροπή στη βάση της άμμου, τα αποτελέσματα είναι ασαφή. Τέλος, ανάμεσα στους δύο δείκτες, ο I_{cr2} που αφορά τη μετακινησιακή δυσκαμψία δίνει τη μικρότερη διασπορά καθώς η κρούστα επιβάλλει στον πάσσαλο κυρίως μετακινήσεις.

8.3 Επίδραση κρούστας στα οριακά φορτία της ρευστοποιημένης άμμου

- Στην περίπτωση που υπάρχει επιφανειακή εδαφική κρούστα, τα οριακά φορτία της ρευστοποιημένης άμμου συσχετίζονται μονοσήμαντα με τις πιέσεις πόρων που αναπτύσσονται στην περιοχή γύρω από το πάσσαλο. Η παρατήρηση είναι πολύ σημαντική διότι αποδεικνύει ότι ο κυρίαρχος μηχανισμός που διέπει την εδαφική απόκριση, ανεξάρτητα από την ύπαρξη υπερκείμενης κρούστας ή μη, είναι άμεσα ο λόγος υπερπίεσης πόρων γύρω από τον πάσσαλο, και έμμεσα η σχετική μετακίνηση πασσάλου-εδάφους καθώς και η διαπερατότητα της άμμου και της κρούστας.
- Στα μικρά βάθη ($z/L_{pile} < 0.40$) η διαφοροποίηση της απόκρισης του πασσάλου επηρεάζει την εδαφική αντίδραση. Συγκεκριμένα, όταν ο πάσσαλος αποκρίνεται σαν οιονεί αμφίπακτο μέλος, οι σχετικές μετακινήσεις πασσάλου και εδάφους είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες όταν λειτουργεί σαν πρόβολος. Το έδαφος λόγω διάτμησης υπό χαμηλές ενεργές τάσεις συμπεριφέρεται διαστολικά και στην

περιοχή γύρω από τον πάσσαλο αναπτύσσονται μικρότερες πιέσεις πόρων και επακόλουθα επιβαρύνεται ο πάσσαλος με μεγαλύτερα οριακά φορτία από τη ρευστοποιημένη άμμο. Αυτή η συμπεριφορά παρατηρείται για μεγάλες αντοχές κρούστας ($c_u > 7$ kPa), μικρές δυσκαμψίες πασσάλου ($EI \leq 190800$ kNm²) και πασσάλους με μήκος μέσα στην άμμο μεγαλύτερο από $H_{sand} \geq 8$ m. Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις ο πάσσαλος συμπεριφέρεται ως πρόβολος και η εδαφική απόκριση χαρακτηρίζεται από μικρότερες πιέσεις πόρων και ανάλογα μικρότερα οριακά φορτία στην άμμο. Πρέπει να τονισθεί πως η διαστολική συμπεριφορά του εδάφους στο άνω μέρος του πασσάλου δεν οδηγεί σε αρνητικές υπερπιέσεις πόρων σε αντίθεση με τις αντίστοιχες υπερπιέσεις που αναπτύσσονται σε ένα αμμόδες εδαφικό προφίλ. Τέλος, η επίδραση της διαπερατότητας της κρούστας παρατηρείται μόνο στα μικρά βάθη γιατί παρόλο που ο πάσσαλος αποκρίνεται ως πρόβολος και μειώνονται οι σχετικές μετατοπίσεις, η μεγαλύτερη διαπερατότητα οδηγεί σε μικρότερες πιέσεις πόρων λόγω γρηγορότερης στράγγισης και επομένως, σε μεγαλύτερα οριακά φορτία.

- c. Σε βάθη μεγαλύτερα ($z/L_{pile} > 0.40$), η εδαφική αντίδραση δεν εξαρτάται πλέον από τον τύπο απόκρισης του πασσάλου. Οι σχετικές μετακινήσεις μειώνονται και το έδαφος λόγω υψηλών ενεργών τάσεων συμπεριφέρεται συστολικά με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι (θετικές) υπερπιέσεις πόρων και ο πάσσαλος να επιβαρύνεται με μικρότερα φορτία από τη ρευστοποιημένη άμμο. Επομένως, στα μεγάλα βάθη αναμένονται παρόμοια οριακά φορτία που δεν επηρεάζονται από την αντοχή της κρούστας και τη δυσκαμψία του πασσάλου (ροπή αδράνειας και μήκος).
- d. Λόγω της ύπαρξης της επιφανειακής κρούστας, τα φορτία της άμμου διαφέρουν από 0.50 μέχρι 1.50 φορές με τα αντίστοιχα στην περίπτωση που η κρούστα δεν υπάρχει.

8.4 Επίδραση φορτίων ρευστοποιημένης άμμου στην απόκριση πασσάλου

Από τις αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Ansys, η παρουσία επιφανειακής κρούστας μπορεί να επηρεάζει την εδαφική απόκριση του υποκείμενου στρώματος ρευστοποιήσιμης άμμου αλλά αυτή η επιρροή δεν αλλάζει την απόκριση του πασσάλου είτε σε όρους μετακινήσεων είτε σε όρους ροπών. Επομένως, κατά τον σχεδιασμό μιας θεμελίωσης πασσάλων σε ένα προφίλ που αποτελείται από στρώμα ρευστοποιήσιμης άμμου και υπερκείμενη μη ρευστοποιήσιμη κρούστα δεν είναι απαραίτητο να επαναπροσδιοριστούν τα οριακά φορτία της άμμου λόγω της ύπαρξης της κρούστας. Η εκτίμηση της εδαφικής αντίδρασης στην άμμο μπορεί να γίνει με χρήση των ήδη εφαρμοζόμενων κανονισμών.

9

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- Abdoun T., Dobry R., O'Rourke T. D. and Goh S. H. (2003). "Pile Response to Lateral Spreads: Centrifuge Modeling". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE.
- Berrill J. B., Christensen S. A., Keenan R. P., Okadas W., Pettinga J. R. (2001). "Case Study of lateral spreading forces on a piled foundation". *Geotechnique* 51, No 6, 501-517.
- Brandenberg S. J., Boulanger Ross W., Kutter Bruce L. and Dongdong Chang (2005). "Behavior of Pile Foundations in Laterally Spreading Ground during Centrifuge Tests". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE.
- Chaloulos Y. K., Bouckovalas G. D. and Karamitros D. K. (2013). "Analysis of Liquefaction Effects on Ultimate Pile Reaction to Lateral Spreading". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE.
- Chaloulos Y.K., Bouckovalas G. D., Karamitros D. K. (2013). "Pile response in submerged lateral spreads: Common pitfalls of numerical and physical modeling techniques". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE.
- Cubrinovski M., Kokusho T., Ishihara K. (2006). "Interpretation from large-scale shake table tests on piles undergoing lateral spreading in liquefied soils". *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Dobry R., Abdoun T., O'Rourke T. D. and Goh S. H. (2003). "Single Piles in Lateral Spreads: Field Bending Moment Evaluation". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE.

- Dungca J.R, Kuwano J., Takahashi A., Saruwatari T., Izawa J., Suzuki H., Tokimatsu K. (2006). "Shaking table tests on the lateral response of a pile buried in liquefied sand".
- González L., Abdoun, T., and Dobry R. (2009). "Effect of soil permeability on centrifuge modeling of pile response to lateral spreading." *Journal of Geotechnica and Geoenvironmental Engineering*, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Chile, Avda. Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile. 135(1), pp. 62-73.
- Han, J. T., Kim, S. R., Hwang, J. I., and Kim, M. M. (2007). "Evaluation of the dynamic characteristics of soil-pile system in liquefiable ground by shaking table tests." 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, K.Pitilakis, ed., Thessaloniki, Greece.
- Rollins, K. M., and Sparks, A. (2002). "Lateral resistance of full-scale pile cap with gravel backfill." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 128(9), pp. 711-723.
- Rollins, K. M., Gerber, T. M., Lane, J. D., and Ashford, S. A. (2005). "Lateral resistance of a full-scale pile group in liquefied sand." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Dept. of Civil/Environ. Engineering, Brigham Young Univ., 368 CB, Provo, UT 84602, United States, 131(1), pp. 115-125.
- Suzuki, H., Tokimatsu, K., Sato, M., and Abe, A. (2005). "Factor Affecting Horizontal Subgrade Reaction of Piles During Soil Liquefactions and Lateral Spreading." *Seismic Performance and Simulation of Pile Foundations in Liquefied and Laterally Spreading Ground*, R. W. Boulanger and K. Tokimatsu, eds., University of California, Davis, CA, pp. 1-10.
- Tokimatsu, K., Suzuki, H., and Sato, M. (2005). "Effects of inertial and kinematic interaction on seismic behavior of pile with embedded foundation." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Department of Architecture and Building Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan, 25(7-10), pp. 753-762.

- Uzuoka R., Sento N., and Kazama M. (2005). "Numerical Analysis of Rate-Dependent Reaction of Pile in Saturated or Liquefied Soil." *Seismic Performance and Simulation of Pile Foundations in Liquefied and Laterally Spreading Ground*, R. W. Boulanger and K. Tokimatsu, eds., University of California, Davis, CA, pp. 204-217.
- Wilson, D. W., Boulanger, R. W., and Kutter, B. L. (1999). "Lateral resistance of piles in liquefying sand." *Geotechnical Special Publication*, Department of Civil Engineering, University of California at Davis, One Shields Avenue, Davis, CA 95616, United States, (88), pp. 165-179.