



**Πανεπιστήμιο Κύπρου**  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών  
και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Διατριβή Master of Science (MSc)

**ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΦΡΕΑΤΟΠΑΣΣΑΛΩΝ ΣΕ  
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΑ ΕΛΑΦΗ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ  
ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 8**

**Ευστάθιος Παπαδόπουλος**

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2021

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΦΡΕΑΤΟΠΑΣΣΑΛΩΝ ΣΕ**  
**ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΑ ΕΛΑΦΗ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ**  
**ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 8**

Διατριβή Master of Science (MSc)

**Ευστάθιος Παπαδόπουλος**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΛΟΥΚΙΔΗΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος  
Πανεπιστήμιο Κύπρου

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΠΑΝΟΣ ΠΑΠΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ, Καθηγητής  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος  
Πανεπιστήμιο Κύπρου

ΜΑΡΙΟΣ ΜΑΥΡΟΣ, Λέκτορας  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος  
Πανεπιστήμιο Κύπρου

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΛΟΥΚΙΔΗΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος  
Πανεπιστήμιο Κύπρου

Δεκέμβριος 2021

---

---

## Ευχαριστίες

---

---

Για την επίτευξη των στόχων της παρούσας διατριβής, θα ήθελα καταρχάς να ευχαριστήσω των επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημήτριο Λουκίδη για την άψογη συνεργασία που είχαμε. Οι γνώσεις του τόσο σε θέματα εδαφομηχανικής και τεχνικής σεισμολογίας όσο και σε βαθιές θεμελιώσεις, έδωσαν λύσεις στις προκλήσεις της παρούσας μελέτης και παρείχαν πλούσιες γνώσεις προς εμένα ως μηχανικό.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους Πάνο Παπαναστασίου και Μάριο Μαύρο, μέλη της επιτροπής εξέτασης, για το χρόνο που αφιέρωσαν στην αξιολόγηση της διατριβής μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη βοήθεια και τη στήριξή της στην ακαδημαϊκή μου πορεία.

---

---

## Περίληψη

---

---

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής ανήκει στο επιστημονικό πεδίο της σεισμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-κατασκευής σε ρευστοποιήσιμα εδάφη. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζει το κατά πόσο είναι εφικτή η χρήση φρεατοπασσάλων για θεμελίωση κτιρίων σε εδαφικά προφίλ που περιέχουν ρευστοποιήσιμο στρώμα άμμου ακολουθώντας τις σχετικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 5 (EC8-5) και χρησιμοποιώντας συμβατικές υπολογιστικές μεθόδους ανάλυσης.

Για το σκοπό αυτό καταστρώθηκαν υπολογιστικά μοντέλα κτιρίων θεμελιωμένων σε πασσάλους στο πρόγραμμα SAP 2000, όπου το έδαφος αναπαρίσταται από γραμμικώς ελαστικά ελατήρια Winkler συνδεδεμένα στους κόμβους των διακριτοποιημένων πασσάλων. Τα εδαφικά προφίλ που εξετάστηκαν περιείχαν ρευστοποιήσιμο στρώμα άμμου σε επαφή με μη ρευστοποιήσιμα στρώματα αργίλου. Σύμφωνα με τη συντηρητική διάταξη του EC8-5, η δυσκαμψία των ελατηρίων που αντιστοιχούν σε ρευστοποιημένο στρώμα, τέθηκε ίση με το μηδέν. Αφού καταστρώθηκαν τα υπολογιστικά μοντέλα, εκτελέστηκαν σειρές παραμετρικών αναλύσεων με τη φασματική μέθοδο για τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών στους πασσάλους και εν συνεχεία έγινε διαστασιολόγηση του όπλισμού τους σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2. Στις παραμετρικές αναλύσεις εξετάστηκε η επίδραση των εξής παραμέτρων: πάχος ρευστοποιημένου στρώματος, διάμετρος πασσάλου, σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού, το ύψος του κτιρίου, το μήκος του πασσάλου, το πάχος του πρώτου και τελευταίου αργιλικού στρώματος, καθώς και ο αριθμός των πασσάλων σε κάτοψη. Στη διαστασιολόγηση των όπλισμών των πασσάλων λήφθηκε υπόψη και το ενδεχόμενο αστοχίας του πασσάλου σε λυγισμό κατά την ρευστοποίηση.

Σκοπός της παρούσας μελέτης, ήταν ο εντοπισμός των περιπτώσεων όπου είναι αδύνατη η όπλιση των φρεατοπασσάλων με βάση τη συντηρητική θεώρηση μηδενικής δυσκαμψίας ελατηρίων εδάφους που αντιστοιχούν στο ρευστοποιημένο στρώμα και τη χρήση της φασματικής μεθόδου ανάλυσης σε υπολογιστικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται από τους μηχανικούς στην πράξη για τον σχεδιασμό τυπικών κτιριακών κατασκευών. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων έδειξαν ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων όπου παρεμβάλλεται αργιλικό στρώμα μεταξύ του κτιρίου και του ρευστοποιήσιμου στρώματος, ήταν εφικτή η όπλιση των

φρεατοπασσάλων χωρίς υπέρβαση των συνιστώμενων ορίων. Σε αυτή την περίπτωση, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η έδραση ενός κτιρίου σε πασσάλους χωρίς προηγούμενη βελτίωση του ρευστοποιήσιμου εδάφους αποτελεί μια δόκιμη λύση. Αντίθετα, σε περιπτώσεις όπου το κτίριο θεμελιώνεται απευθείας σε ρευστοποιήσιμο στρώμα, είναι εξαιρετικά δύσκολη η επαρκής όπλιση των πασσάλων, ανεξαρτήτου πάχους στρώματος άμμου.

Ευστάθιος Παπαδόπουλος

---

---

# Περιεχόμενα

---

---

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1. ΠΑΣΣΑΛΟΙ-ΓΕΝΙΚΑ .....	1
1.2. ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗ.....	1
1.3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΣΕ ΣΕΙΣΜΟ.....	3
1.3.1. Σεισμός της Niigata 1964 .....	3
1.3.2. Σεισμός του Kobe 1995 .....	6
1.3.3. Σεισμός της πόλης του Μεξικού 1985 .....	7
1.4. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ .....	8
1.5. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΣΕΙΣΜΟΥ ...	10
1.6. ΣΚΟΠΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	11
<b>2. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΦΡΕΑΤΟΠΑΣΣΑΛΩΝ.....</b>	<b>13</b>
2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ .....	14
2.2. ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ .....	14
2.2.1. Διαστασιολόγηση σε κάμψη .....	14
2.2.2. Έλεγχος φαινομένων 2 <sup>ος</sup> τάξεως.....	16
2.2.3. Ποσοστά οπλισμού πασσάλων .....	21
2.2.4. Διαστασιολόγηση σε διάτμηση .....	23
<b>3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....</b>	<b>27</b>
3.1. ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ .....	27
3.1.1. Στατικό ανάλογο .....	27
3.1.2. Πλευρική δυσκαμψία και απόσβεση πασσαλομάδας .....	30
3.2. ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΠΑΣΣΑΛΩΝ .....	32
3.2.1. Στατικό ανάλογο .....	32
3.2.2. Συντελεστής απόδοσης πασσαλομάδας .....	36
3.3. ΜΟΡΦΩΣΗ ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΦΟΡΕΑ.....	37
3.4. ΦΑΣΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	38
3.4.1. Φορτία και συνδυασμός φόρτισης.....	39
3.5. ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	40
3.5.1. Τύποι εδαφικών προφίλ .....	40
3.6. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	43
3.6.1. Περιγραφή του προγράμματος ανάλυσης .....	43
3.6.2. Εισαγωγή δεδομένων κι εξαγωγή των αποτελεσμάτων .....	44
3.7. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ .....	49
<b>4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>53</b>
4.1. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΡΟΠΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΜΗΣΕΩΝ .....	53
4.2. ΠΟΣΟΣΤΟ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ .....	57
4.3. ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΩΔΟΜΗΣ-ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ .....	76
4.4. ΔΙΑΤΜΗΣΗ .....	79
4.5. ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	81
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>82</b>

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>84</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - ΘΕΣΕΙΣ ΠΑΣΣΑΛΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>86</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ - ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....</b>	<b>93</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ - ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ. ....</b>	<b>104</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙV - ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΛΕΥΡΙΚΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΛΑΦΟΥΣ .....</b>	<b>116</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΕΜΝΟΥΣΩΝ ΚΑΙ ΡΟΠΩΝ .....</b>	<b>118</b>

---

---

## Επεξήγηση Συμβόλων

---

---

$\rho$ : πυκνότητα εδάφους

$V_s$ : ταχύτητα διατμητικών κυμάτων

$g$ : επιτάχυνση της βαρύτητας

$N_{60}$ : αριθμός χτύπων σφύρας στο 60%

$D$ : διάμετρος πασσάλου

$s_u$ : αστράγγιστη διατμητική αντοχή

$Q_{b,L}$ : οριακή πλευρική τριβή

$Q_{s,L}$ : οριακή αντίσταση αιχμής

$Q_{L,d}$ : φέρουσα ικανότητα πασσάλου

$W$ : βάρος κτιρίου

$\gamma_c$ : συντελεστής ασφαλείας σκυροδέματος

$k_f$ : πολλαπλασιαστής  $\gamma_c$  για θεμελιώσεις

$M_{top}$ : ροπή σε άνω κόμβο του πασσάλου

$M_{bot}$ : ροπή σε κάτω κόμβο του πασσάλου

$N_{ed}$ : τιμή αξονικής σχεδιασμού

$l_0$ : ελεύθερο μήκος πασσάλου

$h$ : βάθος διατομής

$\lambda$ : λυγηρότητα

$\lambda_{lim}$ : όριο λυγηρότητας

$\varphi_{ef}$ : συντελεστής ερπυσμού

$\omega$ : μηχανικό ποσοστό οπλισμού

$A_c$ : εμβαδόν διατομής σκυροδέματος

$f_{cd}$ : όριο σχεδιασμού σκυροδέματος

$G_{k,j}$ : μόνιμο φορτίο

$Q_{k,i}$ : κινητό φορτίο

$v_{ed}$ : ανηγμένη αξονική

$\mu_{ed}$ : ανηγμένη ροπή

$f_{yd}$ : όριο σχεδιασμού χάλυβα

$C_{s,i}$ : απόσβεση  $i$  κόμβου

$K_{s,i}$ : δυσκαμψία  $i$  κόμβου

$E, E_p$ : μέτρο ελαστικότητας

$z$ : βάθος εδάφους

$s_p$ : απόσταση πασσάλων

$G_{max}$ : μέγιστο μέτρο διάτμησης εδάφους

$G_{ave}$ : μέσος όρος μέτρων διάτμησης

$G_L$ : μέτρο διάτμησης στο άκρο του πασσάλου

$G_{base}$ : μέτρο διάτμησης στη βάση του πασσάλου

$\nu$ : λόγος Poisson

$L$ : μήκος πασσάλου

$K_b$ : δυσκαμψία βάσης στην καθίζηση πασσάλου

$C_b$ : απόσβεση βάσης στην καθίζηση πασσάλου

$R$ : ακτίνα πασσάλου

$A_p$ : εμβαδόν πασσάλου

$E_{Edx}$ : σεισμική φόρτιση κατά  $x$

$E_{Edy}$ : σεισμική φόρτιση κατά  $y$

$E_{Edz}$ : σεισμική φόρτιση κατά  $z$



# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1. Πάσσαλοι-Γενικά

Σκοπός της μηχανικής των θεμελιώσεων είναι η ασφαλής παραλαβή των φορτίων της ανωδομής από το έδαφος χωρίς μεγάλες παραμορφώσεις. Αυτό δεν είναι δυνατό να επιτυγχάνεται πάντα διότι οι κατασκευές μπορεί να θεμελιώνονται σε αδύναμα και μαλακά εδάφη τα οποία να μην είναι ικανά να συγκρατήσουν την ανωδομή. Σε άλλες περιπτώσεις, ενώ μπορεί υπό στατικές συνθήκες να μπορούν να παραλάβουν με ασφάλεια τα φορτία της ανωδομής, αυτό να μην είναι δυνατό σε μια ενδεχόμενη δυναμική φόρτιση. Για το λόγο αυτό, αναζητούνται υποστρώματα σε μεγαλύτερα βάθη τα οποία να μπορούν να φέρουν την κατασκευή. Ένας από τους τρόπους να μεταφερθούν τα φορτία σε αυτά τα βάθη, είναι οι θεμελιώσεις με πασσάλους. Εκτός από κτιριακές κατασκευές, οι πάσσαλοι χρησιμοποιούνται επίσης σε παράκτιες κατασκευές και βάθρα γεφυρών. Επίσης, θεωρείται ότι αποτελούν την πλέον δόκιμη λύση για κατασκευές οι οποίες θεμελιώνονται σε εδάφη τα οποία ενδέχεται να ρευστοποιηθούν κατά τη διάρκεια σεισμού.

Ανάλογα με το βάθος και το είδος της κατασκευής, οι πάσσαλοι διακρίνονται σε πασσάλους αιχμής ή τριβής, και σε εμπηγνυόμενους ή έγχυτους (φρεατοπασσάλους). Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τους φρεατοπασσάλους. Η φέρουσα ικανότητα των πασσάλων έχει δυο συνιστώσες: την αντοχή αιχμής και την αντοχή πλευρικής τριβής. Ανάλογα με τα φορτία του κτιρίου και τη φέρουσα ικανότητα κάθε πασσάλου προκύπτει ο αριθμός των πασσάλων που απαιτούνται για τη θεμελίωση.

Λόγω της φύσης των φρεατοπασσάλων, υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα που τους χαρακτηρίζουν. Δεδομένου ότι είναι έγχυτοι, μπορούν να κατασκευαστούν σε διάφορες διαμέτρους και διάφορα μήκη σε οποιονδήποτε τύπο εδάφους. Επειδή γίνεται διάνοιξη οπής με μηχανικά μέσα, δεν δημιουργούνται δονήσεις κατά την κατασκευή τους, σε αντίθεση με τους εμπηγνυόμενους πασσάλους, πράγμα που τους κάνει κατάλληλους για χρήση δίπλα σε υφιστάμενες κατασκευές.

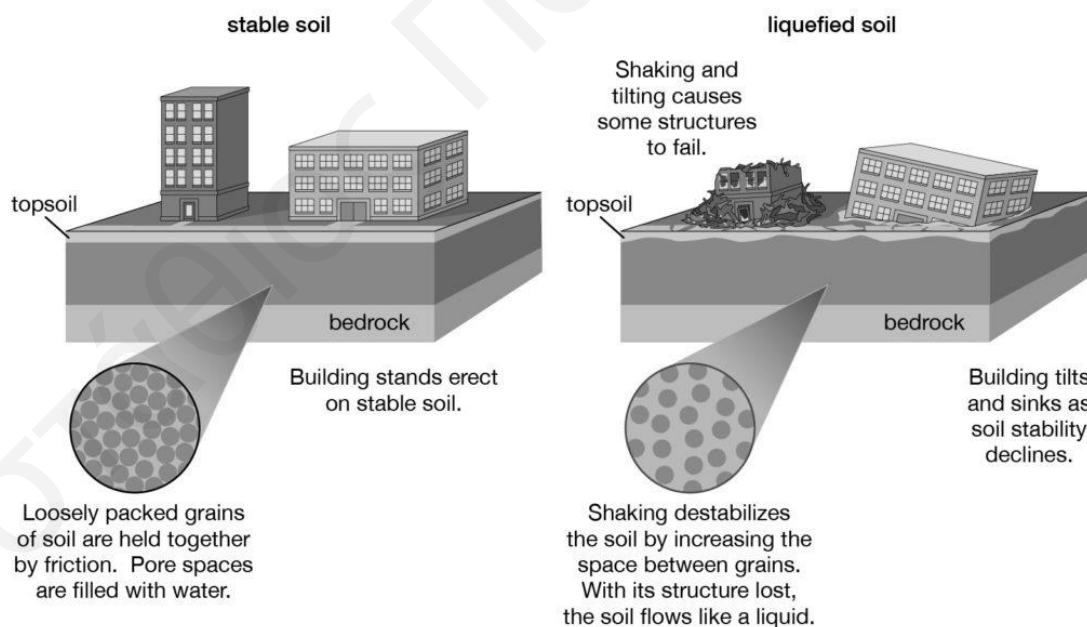
## 1.2. Ρευστοποίηση

Ρευστοποίηση ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο όταν ένα μη συνεκτικό και κορεσμένο έδαφος, υπόκειται σε δυναμική φόρτιση όπως η σεισμική, χάνει μέρος της

διατμητικής του αντοχής και της δυσκαμψίας του λόγω αύξησης της πίεσης του νερού στους πόρους του. Πρακτικά το νερό, ως ασυμπίεστο ρευστό και μη έχοντας τρόπους άμεσης διαφυγής από τους πόρους του εδαφικού υλικού κατά τη σύντομη διάρκεια ενός σεισμού (αστράγγιστες συνθήκες), αντιδρά στην τάση για συρρίκνωση του εδαφικού ιστού κατά την ανακυκλική φόρτιση αυξάνοντας την πίεση των πόρων με αποτέλεσμα να μειώνονται οι ενεργές τάσεις μέχρι μηδενισμού τους και το έδαφος να συμπεριφέρεται πλέον ως ρευστό. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ρευστοποίηση εδάφους λόγω σεισμού. Ρευστοποιήσιμα, είναι κατά κύριο λόγο τα χαμηλής και μέσης πυκνότητας αμμώδη εδάφη, ειδικά όσο πιο ομοιόμορφα είναι και όσο μικρότερη είναι η περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο κλάσμα.

Η απώλεια της εδαφικής αντοχής κατά τη ρευστοποίηση, συνεπάγεται τη δραματική μείωση της φέρουσας ικανότητας των αβαθών θεμελιώσεων που εδράζονται σε αυτά και σε θεαματικές καταστροφές στα κτίρια (Εικόνα 1). Οι βαθιές θεμελιώσεις, όπως οι πάσσαλοι, έχουν το πλεονέκτημα έναντι των αβαθών θεμελιώσεων να μπορούν να μεταφέρουν τα φορτία σε μη ρευστοποιήσιμα στρώματα.

### Soil liquefaction



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

**Εικόνα 1:** Μικροσκοπική επεξήγηση ρευστοποίησης (από Encyclopaedia Britannica, 2012).

Εντούτοις, όπως παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα, η απώλεια αντοχής και δυσκαμψίας του πασσάλου στο εύρος όπου διαπερνά ρευστοποιημένα εδαφικά στρώματα, δύναται να προκαλέσει σημαντικές βλάβες έως και πλήρη αστοχία των πασσάλων. Ως εκ τούτου, οι πάσσαλοι που πρόκειται να κατασκευαστούν σε εδαφικά προφίλ που περιέχουν ρευστοποιήσιμες άμμους, πρέπει να σχεδιάζονται κατάλληλα ώστε να μπορούν να παραλάβουν τα επιπλέον εντατικά μεγέθη που προκαλούνται από την απώλεια στήριξης από τα ρευστοποιημένα στρώματα.

Σύμφωνα με την §5.4.2. (4)P του EC8-Μέρος 5, η πλευρική αντίσταση των τμημάτων των πασσάλων που βρίσκονται σε ρευστοποιήσιμα εδάφη, πρέπει να αγνοείται κατά την ανάλυση. Αυτό ισχύει τόσο για τον γεωτεχνικό σχεδιασμό της πασσαλοθεμελίωσης όσο και για την αντισεισμική ανάλυση της ανωδομής. Στις επιπτώσεις της εφαρμογής της συγκεκριμένης παραγράφου εστιάζει η παρούσα διατριβή, και συγκεκριμένα στο αν δύναται να διαστασιολογηθούν φρεατοπάσσαλοι σε τέτοιες περιπτώσεις.

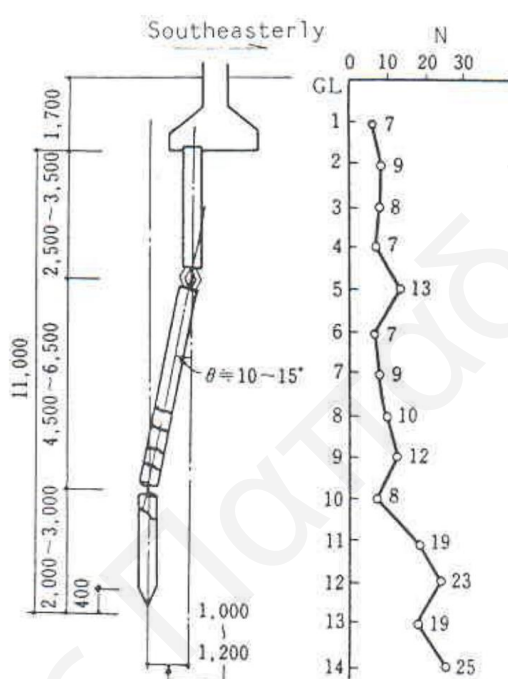
### **1.3. Παραδείγματα αστοχιών θεμελιώσεων σε σεισμό**

Αν και οι πάσσαλοι ανέκαθεν χρησιμοποιούνταν για την παραλαβή των φορτίων της ανωδομής και της μεταφοράς αυτών σε πιο ικανά βαθιά εδαφικά στρώματα, η κατανόηση της συμπεριφοράς τους, ειδικά υπό συνθήκες δυναμικής φόρτισης, δεν ήταν πάντα γνωστή ή κατανοητή. Ως αποτέλεσμα, έχουν καταγραφεί πολλά περιστατικά καταστροφικών ζημιών σε πασσάλους που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια σημαντικών σεισμικών γεγονότων, ιδιαίτερα σε χαλαρές άμμους ή μαλακές αργίλους.

#### **1.3.1. Σεισμός της Niigata 1964**

Ο σεισμός του 1964 στη Niigata της Ιαπωνίας προκάλεσε εκτεταμένες ζημιές και καταστροφές σε κατασκευές αναδεικνύοντας την βαρύτητα του αντίκτυπου των ρευστοποιήσιμων εδαφών στα έργα του πολιτικού μηχανικού. Η πόλη της Niigata βρίσκεται σε χαλαρά και αμμώδη εδάφη (αριθμός κτύπων  $N_{SPT} < 10$ ). Αν και η ρευστοποίηση κράτησε την σεισμική επιτάχυνση (PGA) στα 0.19g, οι πάσσαλοι σε πολλές κατασκευές υπέστησαν μεγάλες βλάβες.

Η ζημιά των πασσάλων του κτιρίου NHK αποκαλύφθηκε κατά τη διάρκεια εργασιών αναστύλωσης του. Οι αστοχίες εντοπίστηκαν στα όρια της άμμου με τα ρευστοποιήσιμα στρώματα (Σχήμα 1). Επιπρόσθετα, λόγω της πλευρικής μετατόπισης (lateral spreading), το έδαφος σε γειτονικά κτίρια μετατοπίστηκε κατά 2m ενώ οι κεφαλόδεσμοι των πασσάλων μετατοπίστηκαν 1-1.2m. Παρόμοιας μορφής αστοχίες πασσάλων λόγω κάμψης παρατηρήθηκαν στη θεμελίωση του κτιρίου Hotel Niigata (Εικόνα 2).

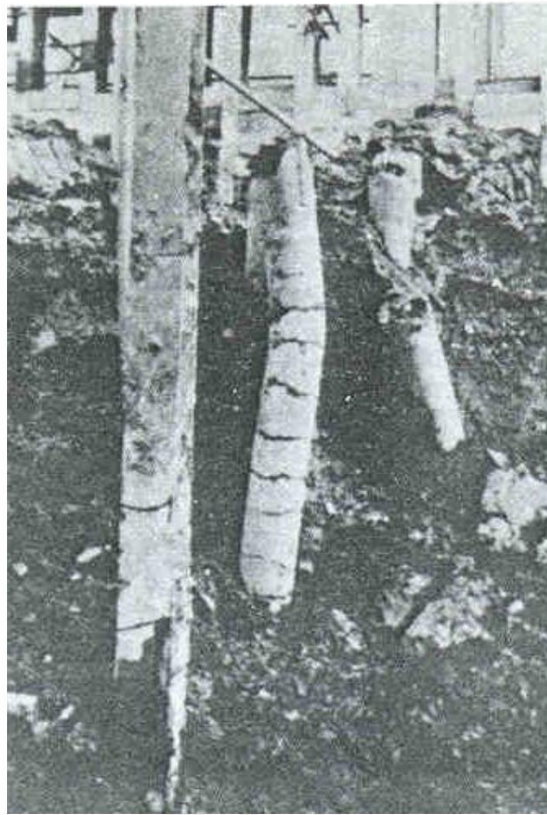


**Σχήμα 1:** Αστοχία πασσάλου από οπλισμένο σκυρόδεμα στο κτίριο NHK, Niigata, 1964 (από Kawamura et al., 1985).

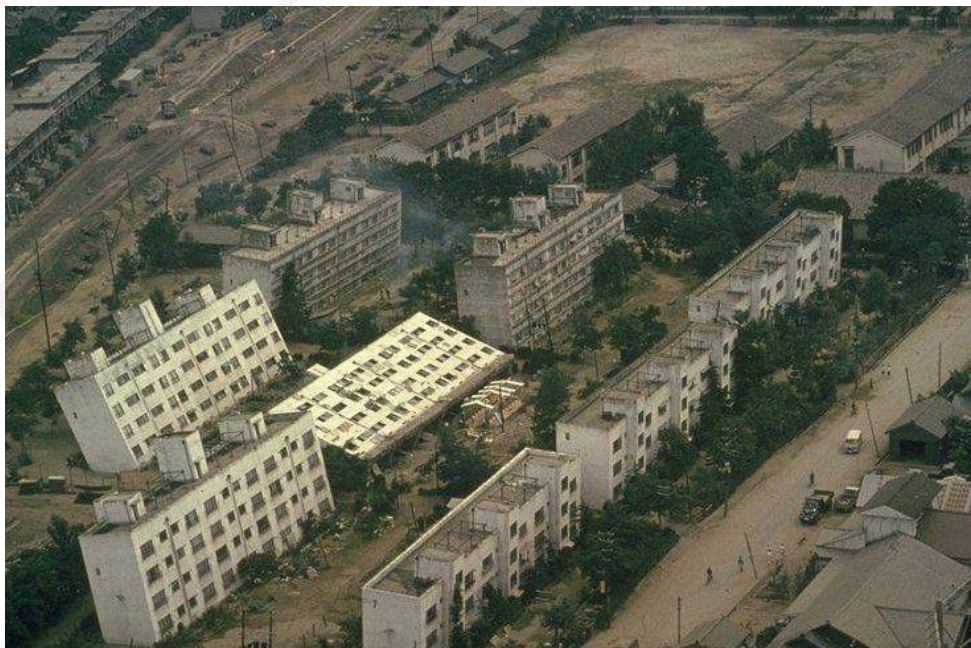
Αξιοσημείωτη είναι η περίπτωση των κτιρίων διαμερισμάτων Kawagishi-Cho, τα οποία αν και παρέμειναν δομικά σχεδόν άθικτα, έγειραν ή ανατράπηκαν λόγω της ρευστοποίησης του εδάφους (Εικόνα 3). Σε αυτή την περίπτωση, τα κτίρια ήταν θεμελιωμένα με γενική κοιτόστρωση (αβαθής θεμελίωση).

Το κτίριο NFCH ήταν ένα κτίριο το οποίο θεμελιώθηκε με πασσάλους σε έδαφος αποτελούμενο από χαλαρή άμμο ( $N_{STP}=5-10$ ). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, ο υδροφόρος ορίζοντας ήταν μόλις στα 2m βάθος. Οι αστοχίες λόγω κάμψης έλαβαν χώρα στο τμήμα των πασσάλων που βρισκόταν μέσα στο ρευστοποιήσιμο στρώμα. Η

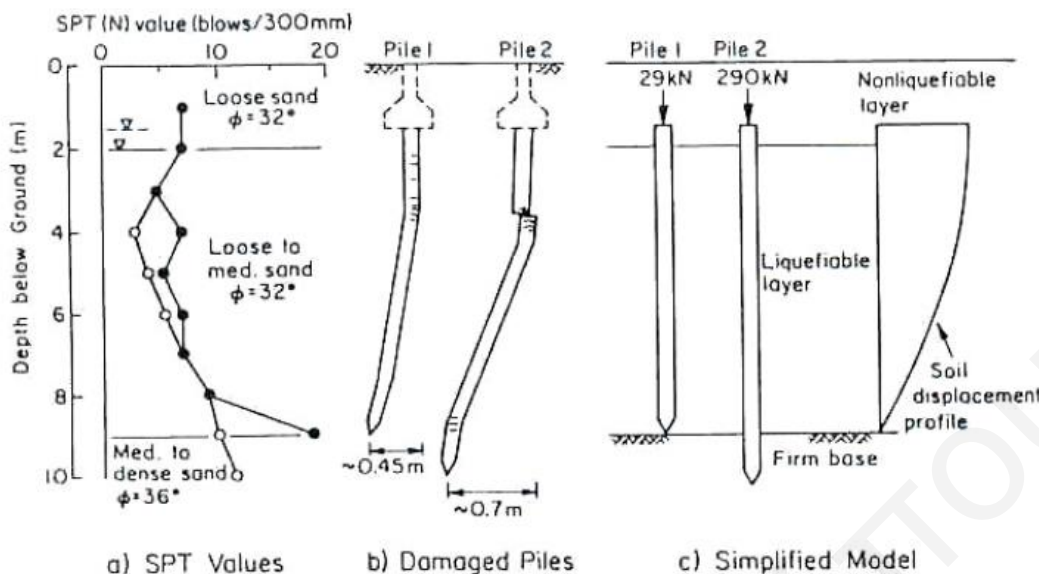
ρευστοποίηση συνέβαλε στη μείωση της πλευρικής αντίστασης του ρευστοποιήσιμου εδάφους κατά ένα συντελεστή 0.02-0.03 επί της αρχικής μελέτης.



**Εικόνα 2:** Αστοχίες εμπηγνυόμενων πασσάλων του κτιρίου Hotel Niigata (Kawamura et al., 1985).



**Εικόνα 3:** Αποτέλεσμα ρευστοποίησης στα κτίρια Kawagishi-Cho (από <https://depts.washington.edu/liquefy/html/quakes/niigata/niigata.html>).



**Σχήμα 2:** Συνθήκες εδάφους και παραμόρφωση πασσάλου στο κτίριο NFCH, Niigata 1964 (από Chaudhuri et al., 1995).

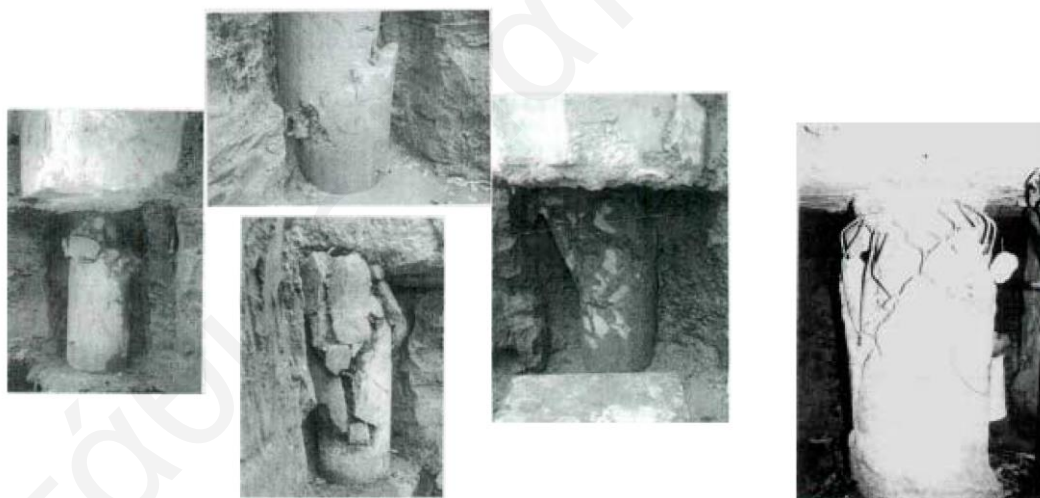
### 1.3.2. Σεισμός του Kobe 1995

Ο σεισμός του Kobe αποτελεί σημείο αναφοράς στη μελέτη των πασσάλων καθώς παρατηρήθηκε, στις θεμελιώσεις μετά τον σεισμό, κάθε δυνατός τύπος αστοχίας. Στη μεγάλη τους πλειοψηφία, οι κατασκευές ήταν θεμελιωμένες σε πασσάλους, είτε βρίσκονταν σε τοποθεσίες με πυκνά εδαφικά προφίλ είτε σε τοποθεσίες με ρευστοποιήσιμα εδάφη.

Τα κτίρια στην περιοχή του τεχνητού νησιού Port island ήταν θεμελιωμένα σε εδαφικά προφίλ τα οποία αποτελούνταν από χαλαρές επιχώσεις από άμμο με χαλίκια στα ανώτερα 10-15m (reclaimed land) του εδαφικού προφίλ ακολουθούμενες από ιλυοαργιλώδη εδάφη και στρώσεις μαλακών αργίλων. Μελέτες που πραγματοποιήθηκαν μετά τον σεισμό, έδειξαν πως και σε αυτή τη περίπτωση οι ρωγμές και οι αστοχίες στους πασσάλους σημειώθηκαν μέσα στα ρευστοποιήσιμα στρώματα. Αξιοσημείωτη είναι όμως η περίπτωση ενός κτιρίου στην ίδια περιοχή οι πάσσαλοι του οποίου ήταν κατασκευασμένοι από προεντεταμένο σκυρόδεμα με διάμετρο 0.5m αλλά ήταν ταυτόχρονα υπενδεδυμένοι με χαλύβδινο μανδύα (steel jacket) στα ανώτερα 8m, με αποτέλεσμα την μην εμφανίσουν καμία βλάβη.

Πάσσαλοι σχολικής μονάδας οι οποίοι μελετήθηκαν με ηχητικές μεθόδους για την ανίχνευση ασυνεχειών, βρέθηκαν να έχουν υποστεί ρωγμές σε βάθη μεταξύ 6m και 15m μέτρων, δηλαδή στα όρια μεταξύ ρευστοποιήσιμων-μη ρευστοποιήσιμων στρωμάτων. Στην ίδια περιοχή, η μελέτη της ανωδομής κτιρίου επεξεργασίας απορριμμάτων έδειξε πως αυτή δεν είχε υποστεί ζημιές. Αντιθέτως, τα θεμέλιά του κτιρίου που αποτελούνταν από φρεατοπασσάλους διαμέτρου 1-1.2m είχαν υποστεί εκτεταμένες ρηγματώσεις στην περιοχή του κεφαλόδεσμου αλλά και στα όρια μεταξύ ρευστοποιήσιμων-μη ρευστοποιήσιμων στρωμάτων.

Η σεισμική επιτάχυνση σε εκτεταμένες περιοχές του Kobe ήταν τόσο μεγάλη (0.5g – 0.9g) που οδήγησε σε αστοχία πασσάλων ακόμη και σε μη ρευστοποιήσιμα εδαφικά προφίλ. Στην Εικόνα 4 φαίνονται χαρακτηριστικές αστοχίες κεφαλών πασσάλων πολυώροφων κτιρίων που βρίσκονταν μέσα σε μη ρευστοποιήσιμες αλλουβιακές αποθέσεις. Οι αστοχίες του σκυροδέματος φαίνεται να είναι περισσότερο λόγω θλίψης και διάτμησης παρά λόγω κάμψης.



(από Mizuno, 1996)

(από Tokimatsu et al., 1996)

**Εικόνα 4:** Παραδείγματα αστοχιών κεφαλών πασσάλων θεμελίωσης κτιρίων σε μη ρευστοποιημένα εδάφη κατά το σεισμό του Kobe, 1995.

### 1.3.3. Σεισμός της πόλης του Μεξικού 1985

Η πόλη του Μεξικού είναι χτισμένη πάνω σε μια αποστραγγισμένη λίμνη με αποτέλεσμα η εξαιρετικά πλαστική και μαλακή άργιλος που καταλαμβάνει μεγάλο

μέρος του ανώτερου εδαφικού προφίλ να μεγεθύνει τις δονήσεις χαμηλής συχνότητας. Ως αποτέλεσμα, αν και χτισμένη μακριά από το σειсмоγόνο ρήγμα του 1985, η σεισμική επιτάχυνση ανήλθε στα 0.2g εξαιτίας του εδαφικού συντονισμού. Αρκετά κτίρια είχαν παρόμοια συμπεριφορά με αυτά των διαμερισμάτων της Kawagishi-Cho, δηλαδή έγειραν ή ανατράπηκαν. Ορισμένα από αυτά ήταν θεμελιωμένα σε πασσάλους έμπηξης οι οποίοι βασίζονταν στην πλευρική αντίσταση για την φέρουσα ικανότητά τους, η οποία ήταν εν γένει χαμηλή, με αποτέλεσμα να εξολκευτούν μαζί με τα κτίρια κατά την ανατροπή τους (Εικόνα 5). Αντίθετα, κτίρια των οποίων οι πάσσαλοι έφταναν μέχρι το υγιές βραχώδες υπόστρωμα στα 30m βάθος έμειναν εντελώς άθικτα από το σεισμό.

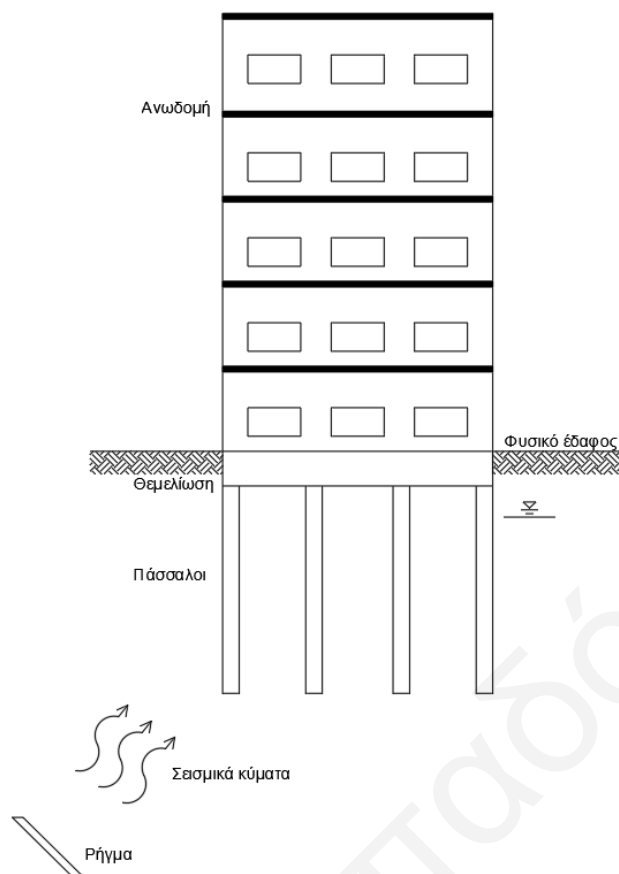


**Εικόνα 5:** Ανατροπή οκταώροφου κτιρίου θεμελιωμένο σε πασσάλους τριβής κατά το σεισμό της Πόλης του Μεξικού του 1985 (από Auvinet, 2018).

#### **1.4. Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής**

Η αμφίδρομη σχέση της απόκρισης του εδάφους (που επηρεάζει την ανωδομή) και της απόκρισης της ανωδομής (που με τη σειρά της επηρεάζει το έδαφος) κατά τη διάρκεια μιας δυναμικής φόρτισης, ονομάζεται αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής.



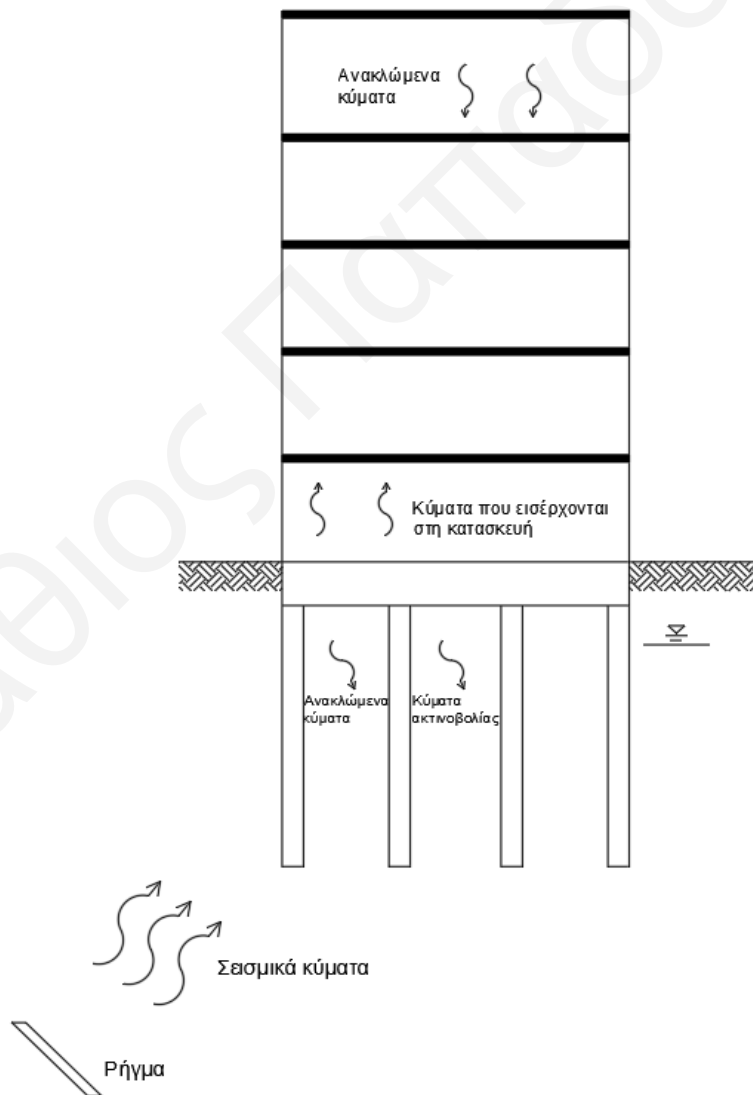


**Σχήμα 3:** Σχηματική απεικόνιση στατικού φορέα.

Η αλληλεπίδραση αυτή, αν και συμβαίνει πάντα, είναι πιο έντονη σε μαλακά ή ρευστοποιήσιμα εδάφη και στην περίπτωση κατασκευών μεγάλου ύψους. Η σχέση αλληλεπίδρασης επηρεάζεται επιπρόσθετα από τον τύπο και το βάθος της θεμελίωσης. Πιο συγκεκριμένα, αυτό που κρίνεται αναγκαίο να μελετηθεί, είναι οι παράμετροι του εδάφους πάνω στο οποίο θα θεμελιωθεί μια κατασκευή. Στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής παίζουν ισχυρό ρόλο η δυσκαμψία του εδάφους, το πόσο κοντά είναι η ιδιοπερίοδος της κατασκευής σε σχέση με αυτή του εδαφικού προφίλ και της σεισμική κίνησης (συντονισμός), και η απόσβεση του εδάφους, η οποία έχει δυο συνιστώσες: την απόσβεση ακτινοβολίας και την υστερητική απόσβεση εντός του εδαφικού υλικού. Σε ότι αφορά τον συντονισμό, όταν η συχνότητα ενός σεισμικού κύματος πλησιάζει ή εξισώνεται με την ιδιοπερίοδο του εδάφους, τότε αυτό συντονίζεται με αποτέλεσμα την δραματική αύξηση των δονήσεων στο έδαφος. Αυτό εξαρτάται από το πάχος του εδαφικού στρώματος και από την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων  $V_s$  που το χαρακτηρίζει.

### 1.5. Αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής κατά τη διάρκεια σεισμού

Συνοπτικά, τα σεισμικά κύματα που προκαλούν την αλληλεπίδραση μεταξύ του εδάφους και της κατασκευής, είναι τα κύματα που εισάγονται στην κατασκευή και τα κύματα τα οποία ανακλώνται πίσω στο έδαφος. Τα κύματα που εισάγονται στην κατασκευή φτάνουν στην κορυφή της κατασκευής και ανακλώνται πάλι πίσω στη θεμελίωση ξεκινώντας έτσι τον κύκλο της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής (Σχήμα 4). Τα κύματα τα οποία ανακλώνται πίσω στο έδαφος χάνουν την ενέργειά τους κυρίως λόγω της απόσβεσης ακτινοβολίας. Η απόσβεση αυτή, συμβάλλει στην αύξηση της ολικής απόσβεσης του συστήματος εδάφους-κατασκευής. Η αλληλεπίδραση έχει δυο συνιστώσες: την αδρανειακή και την κινηματική.



**Σχήμα 4:** Σχηματική αναπαράσταση αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής.

Η αδρανειακή αλληλεπίδραση είναι αυτή που προκύπτει από την ταλάντωση της κατασκευής επί μιας θεμελίωσης που αλληλεπιδρά με το έδαφος λόγω της παραμορφωσιμότητάς του και της απόσβεσης που παρέχει στα στοιχεία θεμελίωσης. Η αδρανειακή αλληλεπίδραση μπορεί να ληφθεί υπόψη στις δυναμικές αναλύσεις μιας κατασκευής απλά θέτοντας ελατήρια και αποσβεστήρες που αναπαριστούν το έδαφος στους κόμβους των στοιχείων θεμελίωσης. Η κινηματική αλληλεπίδραση αφορά στην αλληλεπίδραση μεταξύ των κυμάτων που διαδίδονται εντός του εδαφικού προφίλ και επί της ελεύθερης επιφάνειας με τα στοιχεία θεμελίωσης. Τα στοιχεία θεμελίωσης (π.χ. πάσσαλοι) είναι όντως πιο δύσκαμπτα από το παραμορφούμενο, λόγω της κυματικής διάδοσης, έδαφος και αλλοιώνουν την απόκρισή του σε σχέση με αυτή που θα είχε στο ελεύθερο πεδίο.

Η αδρανειακή αλληλεπίδραση είναι σαφώς μεγαλύτερης σημασίας από ότι η κινηματική αλληλεπίδραση. Σύμφωνα με την §5.4.2.(6)P του EC8-Μέρος 5, η κινηματική αλληλεπίδραση δύναται να αγνοηθεί στους υπολογισμούς για κατασκευές κατηγορίας σπουδαιότητας II, π.χ. συνήθη κτίρια κατοικιών και γραφείων. Συνεπώς, για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, η κινηματική αλληλεπίδραση δεν λαμβάνεται υπόψη.

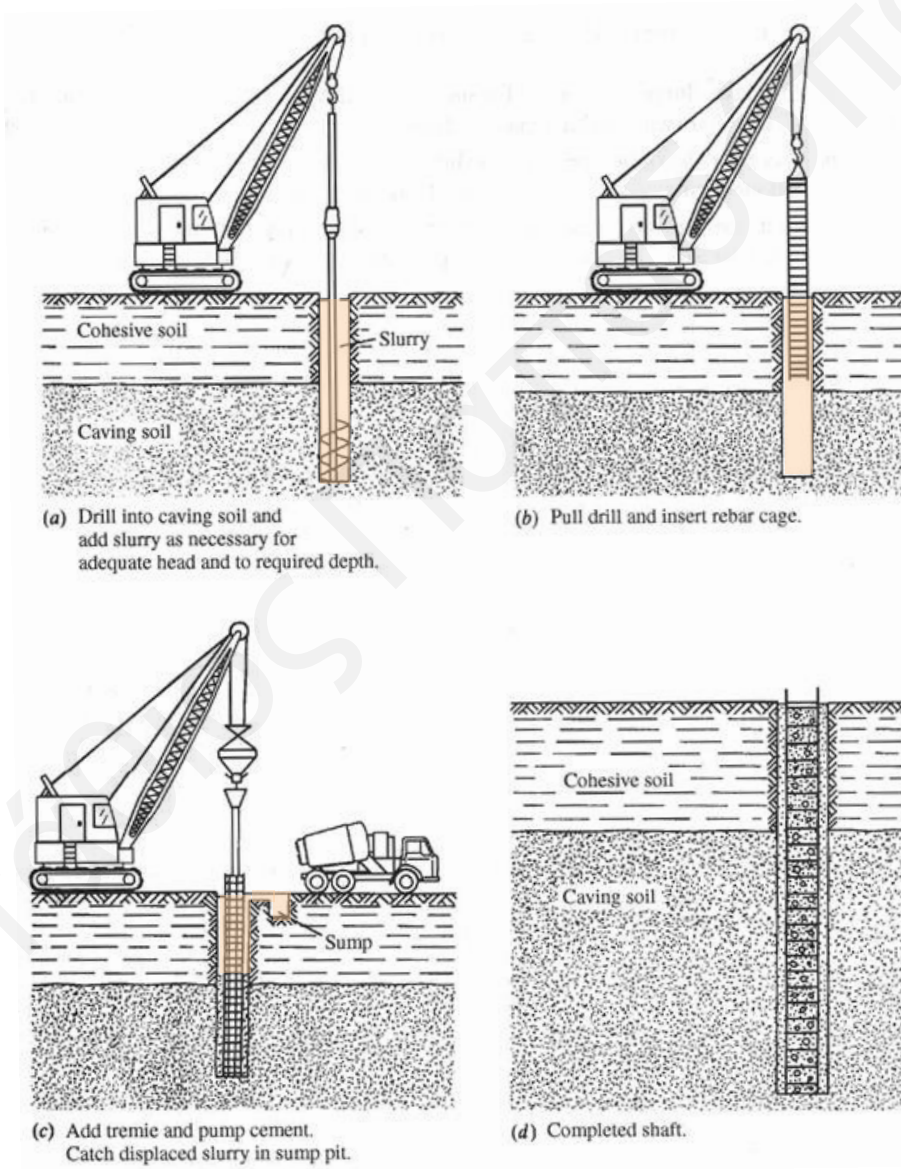
## **1.6. Σκοπός μελέτης**

Ιστορικά παραδείγματα καταδεικνύουν ότι ισχυροί σεισμοί δύνανται να προκαλέσουν σημαντικές λάβες σε πασσάλους εντός εδαφικού προφίλ που περιέχει ρευστοποιησίμα στρώματα. Δεδομένου ότι οι πασσαλοθεμελίώσεις είναι από τους ισχυρότερους τύπους θεμελίωσης που είναι διαθέσιμοι στο μηχανικό για τυπικά κτιριακά έργα και τις τελευταίες δεκαετίες τυγχάνουν ευρείας και συνεχώς αυξανόμενης εφαρμογής, τίθεται το ερώτημα ποιες είναι γενικά οι διαστάσεις πασσάλων που απαιτούνται για να μην αστοχήσουν. Επιπλέον, η διάταξη της §5.4.2.(4)P του EC8-Μέρος 5, που επιβάλλει να μην λαμβάνεται υπόψη η οποιαδήποτε πλευρική αντίσταση που μπορεί να παρέχεται στους πασσάλους από ρευστοποιημένα στρώματα, σημαίνει ότι σε μια ανάλυση αδρανειακής αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής, οι σταθερές ελατηρίων και αποσβεστήρων εδάφους που αντιστοιχούν στα ρευστοποιημένα στρώματα, πρέπει να τίθενται ίσες με μηδέν. Αυτό αποτελεί μια αρκετά συντηρητική προσέγγιση, που εγείρει το ερώτημα αν υπάρχουν περιπτώσεις ρευστοποιησίμου εδαφικού προφίλ ή

διαμόρφωσης πασσάλων για τις οποίες είναι πρακτικά αδύνατος ο δομοστατικός σχεδιασμός των πασσάλων (π.χ. η διαστασιολόγηση του οπλισμού τους) με συνήθη μέσα ανάλυσης όπως μοντέλα στο SAP2000 με θεώρηση ελατηρίων και αποσβεστήρων εδάφους. Για την απάντηση των παραπάνω ερωτημάτων, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής πραγματοποιούνται παραμετρικές αναλύσεις απόκρισης πολυώροφων κτιρίων θεμελιωμένων σε φρεατοπασσάλους που κατασκευάζονται σε εδαφικά προφίλ που περιέχουν ένα ρευστοποιήσιμο στρώμα άμμου σημαντικού πάχους. Οι αναλύσεις γίνονται με τη φασματική μέθοδο στο πρόγραμμα SAP2000, εφαρμόζοντας τις πρόνοιες του Ευρωκώδικα 8. Τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από τις αναλύσεις χρησιμοποιούνται για τη διαστασιολόγηση του οπλισμού των φρεατοπασσάλων, ώστε να διαπιστωθεί σε ποιες περιπτώσεις απαιτείται πυκνότητα οπλισμού που ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια.

## 2. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΦΡΕΑΤΟΠΑΣΣΑΛΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του γνωστικού υποβάθρου σε ότι αφορά τον δομοστατικό σχεδιασμό φρεατοπασσάλων, με έμφαση στη διαστασιολόγηση του οπλισμού. Ταυτόχρονα παρουσιάζεται μια σχέση που προσεγγίζει το διάγραμμα αλληλεπίδρασης θλίψης-κάμψης για κυκλικές διατομές και εξάγεται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής για τον αυτοματοποιημένο υπολογισμό του απαιτούμενου μηχανικού ποσοστού διαμήκους οπλισμού.



**Σχήμα 5:** Στάδια κατασκευής φρεατοπασσάλων με χρήση μεντονιτικής λάσπης (από Bowles, 1996).

## 2.1. Περιγραφή κατασκευής

Οι φρεατοπάσσαλοι ή έγχυτοι πάσσαλοι είναι ένας από τους αρκετούς τύπους πασσάλων που χρησιμοποιούνται ευρέως στις βαθιές θεμελιώσεις. Συγκεκριμένα στην Κύπρο, αποτελούν τον πλέον συνηθέστερο τύπο πασσάλων. Όπως αναφέρει και το όνομά τους, είναι πάσσαλοι οι οποίοι σκυροδετούνται στο εργοτάξιο.

Η διαδικασία περιλαμβάνει την διάνοιξη οπών με μηχανικά μέσα, με την εισαγωγή σωλήνων χάλυβα για την συγκράτηση σε σαθρά/χαλαρά εδάφη των τοιχωμάτων της οπής ή τη χρήση λάσπης μπεντονίτη (Σχήμα 5), την τοποθέτηση του οπλισμού, και τη σκυροδέτηση με ταυτόχρονη αφαίρεση του χαλύβδινου σωλήνα ή εκτόπιση της λάσπης μπεντονίτη.

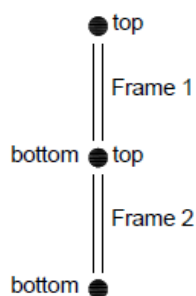
## 2.2. Κανονιστικό πλαίσιο

### 2.2.1. Διαστασιολόγηση σε κάμψη

Γενικά για τη διαστασιολόγηση στοιχείων σκυροδέματος όπως οι φρεατοπάσσαλοι, χρησιμοποιείται ο Ευρωκώδικας 2. Η επιβολή σεισμικών δράσεων οδηγεί και στη χρήση του Ευρωκώδικα 8. Για έγχυτους πασσάλους, η παράγραφος §2.4.2.5 (2) του EC2, αναφέρει πως ο μερικός συντελεστής υλικού για το σκυρόδεμα  $\gamma_c$  πρέπει να πολλαπλασιαστεί με έναν αυξητικό παράγοντα  $k_f$ , δηλαδή:

$$\gamma'_c = \gamma_c k_f \quad (2.0)$$

όπου  $\gamma_c=1.5$ . Ο παράγοντας  $k_f$  καθορίζεται στο εθνικό προσάρτημα κάθε χώρας με την προτεινόμενη τιμή του να είναι 1.1. Οι πάσσαλοι διαστασιολογήθηκαν ως υποστυλώματα. Κατά τα άλλα, εφαρμόζεται το μοντέλο της διαστασιολόγησης υποστυλωμάτων.



Σχήμα 6: Ορισμός  $M_{top}$  και  $M_{bot}$ .

Σε ένα περιβάλλον δομοστατικής ανάλυσης (π.χ. SAP2000, ETABS, STAAD, Tekla), ο πάσσαλος συνήθως διακριτοποιείται με κόμβους ανά ένα μέτρο, όπου εφαρμόζονται ελατήρια Winkler με τιμές για τη δυσκαμψία και απόσβεση οι οποίες προκύπτουν με βάση τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Για τους σκοπούς εξαγωγής των αποτελεσμάτων μιας ανάλυσης, σε κάθε τμήμα πασσάλου, ο κορυφαίος κόμβος αποτελεί το top των εντατικών μεγεθών και ο αμέσως επόμενος τον bottom των εντατικών μεγεθών (Σχήμα 6).

Ακολουθώντας τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 2, οι ροπές  $M_{top}$  και  $M_{bot}$  που λαμβάνονται από το πρόγραμμα δομοστατικής ανάλυσης στους κόμβους μετατρέπονται με βάση τους παρακάτω τύπους, όπου λαμβάνονται υπόψη και οι κατασκευαστικές εκκεντρότητες:

$$M_{01} = \text{Min}\{|M_{top}|, |M_{bot}|\} + e_i N_{ed} \quad (2.1\alpha)$$

$$M_{02} = \text{Max}\{|M_{top}|, |M_{bot}|\} + e_i N_{ed} \quad (2.1\beta)$$

όπου  $e_i$  η εκκεντρότητα:

$$e_i = \max\{l_0/400, h/30, 20\} \text{ (mm)} \quad (2.2)$$

όπου  $l_0$  είναι το ενεργό μήκος του πασσάλου και  $h$  η διάμετρος του.

Επειδή σε τρισδιάστατη κατασκευή υπάρχουν καμπτικές ροπές και κατά τον άξονα  $x$  και κατά τον  $y$ , (κοινώς  $M_2$  και  $M_3$  σε ορολογία SAP2000), στη παρούσα διατριβή για την εξαγωγή μίας τιμής ροπής σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκε η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των δύο επιμέρους τιμών για κάθε κόμβο, δηλαδή:

$$M_{tot,top} = \sqrt{(M_{2top}^2 + M_{3top}^2)} \quad (2.3\alpha)$$

και

$$M_{tot,bot} = \sqrt{(M_{2bot}^2 + M_{3bot}^2)} \quad (2.3\beta)$$

Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN1536 που διέπει τους πασσάλους θεμελίωσης στο κεφάλαιο 7 προέβλεπε μεγαλύτερες κατασκευαστικές εκκεντρότητες:

1. Απόκλιση των πασσάλων σε κάτοψη:

$$e \leq e_{\max} = 0,10 \text{ m για πασσάλους με } D \leq 1.0 \text{ m}$$

$$e \leq e_{\max} = 0,1 \times D \text{ για πασσάλους με } 1.0 \text{ m} < D \leq 1.5 \text{ m}$$

$$e \leq e_{\max} = 0,15 \text{ m για πασσάλους με } D > 1.5 \text{ m}$$

2. Απόκλιση των πασσάλων σε κλίση  $n \geq 15$  ( $\Theta \geq 86^\circ$ ):

$$i \leq i_{\max} = 0.02 \text{ (0.02 m/m)}$$

όπου  $n$  η κάθετη προβολή πασσάλου σε κλίση και  $\Theta$  η γωνία κλίσης σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο

3. Απόκλιση των πασσάλων σε κλίση με  $4 \leq n < 15$  ( $76^\circ \leq \Theta < 86^\circ$ ):

- $i \leq i_{\max} = 0.04 \text{ (0.04 m/m)}$

4. Απόκλιση λόγω μεγέθυνσης σε σχέση με τον άξονα:

- $e \leq e_{\max} = 0.1 \times D$

Επομένως, συνοπτικά για τους σκοπούς της διπλωματικής, η κατασκευαστική εκκεντρότητα προκύπτει ως:

$$e_i = \max \left\{ \frac{l_0}{50}, 100 \right\} \text{ (σε mm) για } D \leq 1 \text{ m} \quad (2.4)$$

δεδομένου ότι δεν εξετάζονται φρεατοπάσσαλοι διαμέτρου μεγαλύτερης από 1m.

### 2.2.2. Έλεγχος φαινομένων 2<sup>ας</sup> τάξεως

Σε πασσάλους που διαπερνούν μαλακές αργίλους ή ρευστοποιήσιμα εδάφη, πρέπει να ελεγχθεί κατά πόσο ο υπό διαστασιολόγηση πάσσαλος είναι λυγηρός. Απουσία ρευστοποίησης ή μαλακής αργίλου, το θεωρητικό (υπολογιστικό) ελεύθερο ύψος του πασσάλου είναι ουσιαστικά η απόσταση μεταξύ των κόμβων στους οποίους διακριτοποιείται και στους οποίους τοποθετούνται τα ελατήρια Winkler (συνήθως ανά 1m απόσταση). Υπό αυτές τις συνθήκες, δεδομένων των τυπικών τιμών διαμέτρου φρεατοπασσάλων ( $D > 0.5\text{m}$ ), η λυγηρότητα είναι πάρα πολύ μικρή. Αντίθετα, σε συνθήκες ρευστοποίησης, πρέπει να γίνεται έλεγχος λυγηρότητας διότι μηδενίζονται οι τιμές της δυσκαμψίας και απόσβεσης του ρευστοποιημένου στρώματος και έτσι αυξάνεται κατά πολύ το ελεύθερο αστήρικτο ύψος του πασσάλου.



Για κυκλικές διατομές, η λυγηρότητα υπολογίζεται ως:

$$\lambda = 4l_0/D \quad (2.5)$$

όπου  $l_0$  το ελεύθερο μήκος.

Σύμφωνα με τον EC2, το όριο λυγηρότητας δίνονται από τον τύπο:

$$\lambda_{lim} = 20ABC/\sqrt{n} \leq 154C/\sqrt{n} \quad (2.6)$$

όπου

$$A = 1/(1 + 0.2\varphi_{ef}) \quad (2.7\alpha)$$

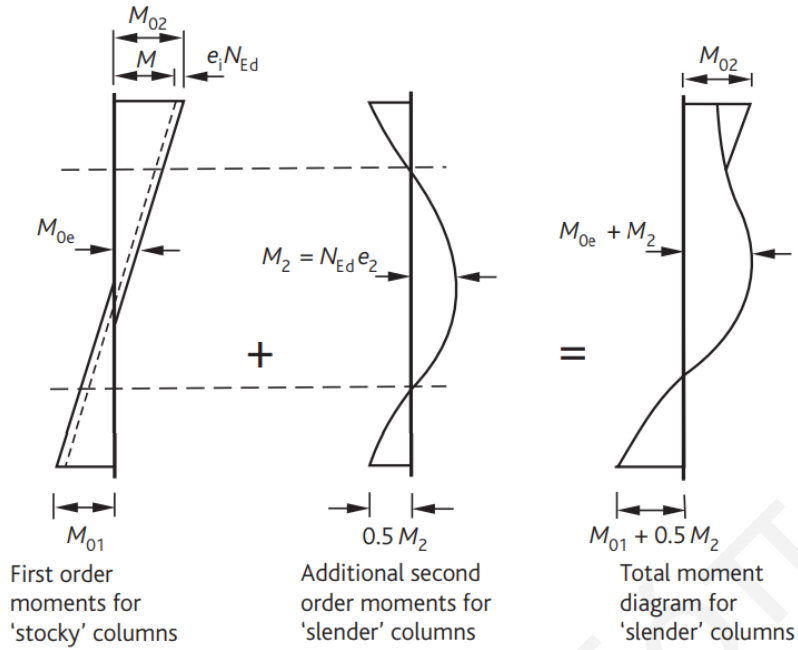
$$B = \sqrt{1 + 2\omega} \quad (2.7\beta)$$

$$C = 1.7 - r_m \quad (2.7\gamma)$$

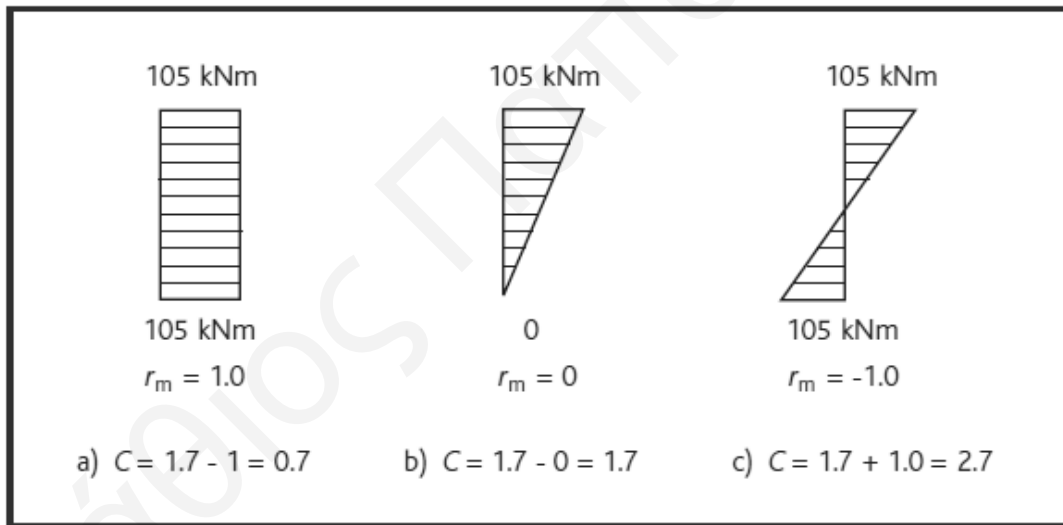
Η παράμετρος  $\varphi_{ef}$  σχετίζεται με φαινόμενα ερπυσμού. Σύμφωνα με τον EC2, §5.8.3 (1), στην περίπτωση που η τιμή της  $\varphi_{ef}$  δεν είναι γνωστή, το A μπορεί να ληφθεί ίσο με 0,7. Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής, ο ερπυσμός αγνοήθηκε δεδομένου ότι μια σεισμική φόρτιση έχει διάρκεια μόλις λίγων δεκάδων δευτερολέπτων και δεν εξετάζονται μακροχρόνιες συνθήκες. Για την τιμή του B, αν δεν είναι γνωστό ο ριζοειδής μηχανικός ποσοστό οπλισμού  $\omega$ , αυτή μπορεί να ληφθεί ίση με 1.1 πάλι σύμφωνα με την παραπάνω παράγραφο του EC2. Το C ήταν ο πιο σημαντικός παράγοντας στον υπολογισμό του ορίου λυγηρότητας. Το  $r_m$  δίνεται από τον τύπο

$$r_m = M_{01}/M_{02} \quad (2.8)$$

όπου  $M_{01}$  και  $M_{02}$  είναι οι καμπτικές ροπές στα άκρα του ελεύθερου μήκους (Σχήμα 7), με  $M_{02}$  να είναι η μεγαλύτερη κατά απόλυτο τιμή από τις δύο. Παράδειγμα υπολογισμού του  $r_m$  δίνεται στο Σχήμα 8. Εάν οι ροπές ήταν αντίθετου πρόσημου, το  $r_m$  ήταν αρνητικό με αποτέλεσμα να προστίθεται στο 1.7.



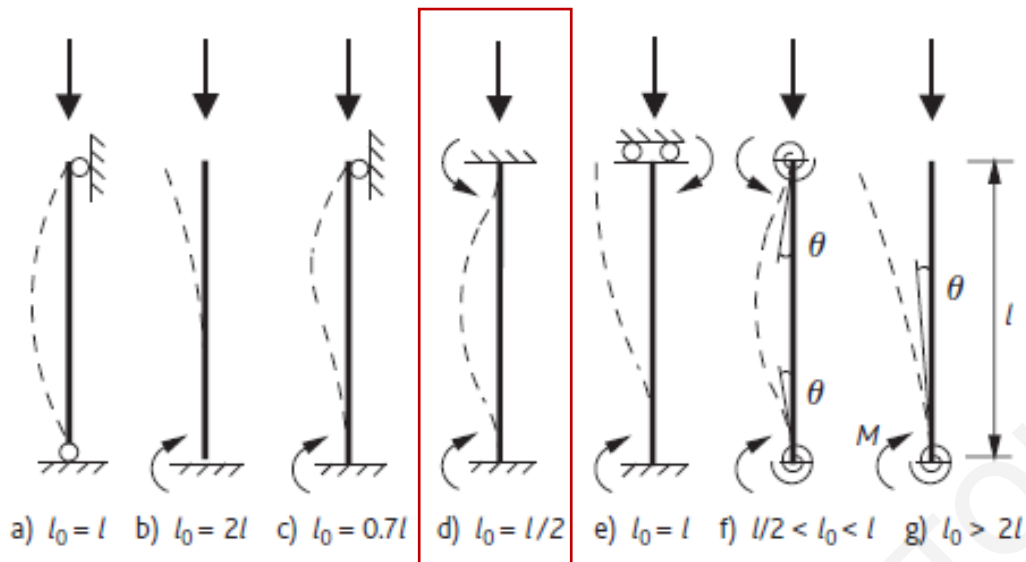
Σχήμα 7: Σχηματική αναπαράσταση φαινομένων 2<sup>ας</sup> τάξεως (από Bond et al., 2006).



Σχήμα 8: Υπολογισμός συντελεστή C βάσει καμπτικού σχήματος (από Bond et al., 2006).

Η παράμετρος  $n$  δίνεται από τον τύπο

$$n = \frac{N_{ed}}{A_c f_{cd}} \quad (2.9)$$



**Σχήμα 9:** Συντελεστές ενεργού μήκους για την περίπτωση του λυγισμού (Bond et al., 2006).

Όσον αφορά το ελεύθερο μήκος του πασσάλου, η τιμή 0.5 για το συντελεστή του ενεργού μήκους, δηλαδή θεωρώντας τα δύο άκρα του πασσάλου πακτωμένα (Σχήμα 9) είναι η πλέον δόκιμη ( $l_0=l/2$ ). Αν το ρευστοποιήσιμο έδαφος αποτελεί ένα ενδιάμεσο στρώμα στο εύρος βάθους που διαπερνά ο πάσσαλος, τότε υπάρχει συνέχεια του πασσάλου πάνω και κάτω από το ελεύθερο μήκος όπου πρακτικώς πακτώνεται στα μη ρευστοποιήσιμα στρώματα. Αν το ρευστοποιημένο στρώμα είναι σε επαφή με τη βάση του κτιρίου, τότε το πάνω μέρος του ελεύθερου μήκους ταυτίζεται με την κεφαλή του πασσάλου που είναι εκ των πραγμάτων πακτωμένη σε κοιτόστρωση ή κεφαλόδεσμο.

Το μήκος  $l$  του αστήρικτου τμήματος δεν ταυτίζεται απόλυτα με το πάχος του ρευστοποιημένου στρώματος, αλλά είναι ελαφρώς μεγαλύτερο διότι, λόγω της παραμορφωσιμότητας των υποκείμενων ή/και υπερκείμενων μη ρευστοποιημένων στρωμάτων, η πάκτωση λαμβάνει υπόσταση σε κάποια απόσταση από τις επαφές μεταξύ των στρωμάτων. Στη παράγραφο 1810.2.1 του International Building Code (IBC) γίνεται μνεία για το ελεύθερο μήκος του πασσάλου που βρίσκεται σε “ρευστά εδάφη”. Συγκεκριμένα, αναφέρει μεταξύ άλλων πως οι πάσσαλοι μπορούν να θεωρηθούν πλευρικώς στηριζόμενοι σε σημείο 1.50m μέσα σε υποκείμενο ή υπερκείμενο σκληρό στρώμα εδάφους (πυκνή άμμος ή χαλίκι, ή υπερστερεοποιημένη άργιλος). Αυτή η απόσταση αυξάνεται σε 3m αν το μη ρευστοποιήσιμο στρώμα είναι μαλακό (π.χ. μαλακή άργιλος), δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση αυτό της αργίλου.

Αν ισχύει ότι  $\lambda < \lambda_{lim}$ , τότε τα φαινόμενα 2<sup>ας</sup> τάξεως δεν λαμβάνονται υπόψη και η ροπή σχεδιασμού είναι ίση με την  $M_{02}$ . Σε αντίθετη περίπτωση, ο πάσσαλος καθίσταται λυγηρός και πρέπει να γίνει εύρεση της ροπής λόγω φαινομένων 2<sup>ας</sup> τάξεως. Συγκεκριμένα, προσδιορίζεται η εκκεντρότητα η οποία δίνεται ως:

$$e_2 = 0.1 \left( \frac{K_r K_\phi f_{yd}}{0.45 d E_s} \right) l_0^2 \quad (2.10)$$

όπου  $E_s$  το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα οπλισμού (200 GPa)

Η μεταβλητή  $K_r$  υπολογίζεται ως:

$$K_r = \frac{n_u - n}{n_u - n_{bal}} \leq 1 \quad (2.11)$$

όπου

$$n = N_{ed} / A_c f_{cd} \quad (2.12)$$

$$n_u = 1 + \omega \quad (2.13)$$

$$n_{bal} = 0.4 \quad (2.14)$$

$$\omega = \frac{A_{s,est} f_{yd}}{A_c f_{cd}} \quad (2.15)$$

με  $A_c$  το εμβαδόν διατομής σκυροδέματος,  $A_{s,est}$  το δοκιμαστικό εμβαδόν του οπλισμού, και  $\omega$  το μηχανικό ποσοστό οπλισμού.

Η μεταβλητή  $K_\phi$  υπολογίζεται από τον τύπο

$$K_\phi = 1 + \beta \phi_{ef} \geq 1 \quad (2.16)$$

Το  $\phi_{ef}$  συνδέεται με φαινόμενα ερπυσμού. Εφόσον αυτά αγνοούνται, το γινόμενο  $\beta \phi_{ef}$  είναι μηδέν. Έτσι, οι ροπές είναι:

$$M_{0e} = 0.6 M_{02} + 0.4 M_{01} \geq 0.4 M_{02} \quad (2.17)$$

$$M_2 = e_2 N_{ed} \quad (2.18)$$

Και η ροπή σχεδιασμού:

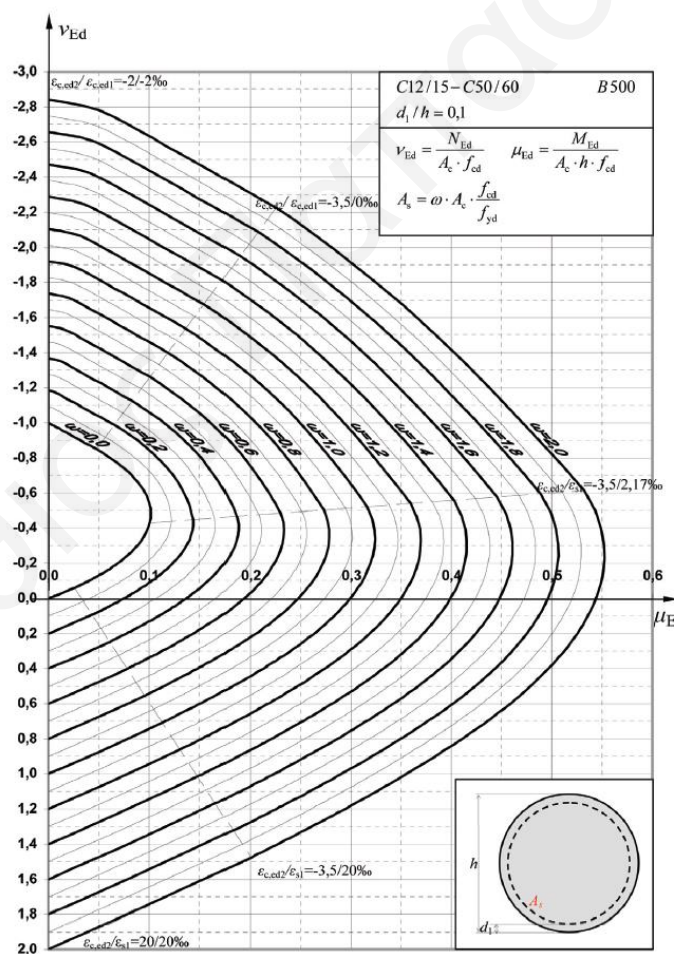
$$M_{ed} = \text{Max}\{M_{02}, M_{0e} + M_2, M_{01} + 0.5 M_2\} \quad (2.19)$$

Αν το δοκιμαστικό εμβαδόν του οπλισμού ικανοποιείται, προχωράμε στην ανάλυση. Αν όχι, το αυξάνουμε και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία. Στην παρούσα

διπλωματική εξετάστηκε αν το ποσοστό διαμήκους οπλισμού 4% ήταν επαρκές για την περίπτωση φαινομένων 2<sup>ας</sup> τάξεως.

### 2.2.3. Ποσοστά οπλισμού πασσάλων

Οι φρεατοπάσσалоι έχουν κυλινδρική γεωμετρία. Επομένως, για τη διαστασιολόγηση του διαμήκους οπλισμού χρειάζεται να γίνει χρήση διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης που ισχύουν για κυκλική διατομή, όπως αυτά των Smolčić και Grandić (2012). Στο Σχήμα 10 παρατίθεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης των Smolčić και Grandić (2012) για σκυροδέματα χαμηλής και μέτριας αντοχής (από C12/15 έως C50/60), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για φρεατοπασσάλους, αφού αυτοί είθισται να κατασκευάζονται από σκυρόδεμα κατηγορίας C30/37 ή C40/50. Γνωρίζοντας την κανονικοποιημένη αξονική δύναμη στον πάσσαλο ( $v_{Ed}$ ) και την κανονικοποιημένη ροπή ( $\mu_{Ed}$ ), από το διάγραμμα προσδιορίζεται το μηχανικό ποσοστό οπλισμού  $\omega$ .



**Σχήμα 10:** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης για κυκλικές διατομές υποστλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα (από Smolčić και Grandić, 2012).

Για τον αυτοματοποιημένο προσδιορισμό του  $\omega$  σε περιβάλλον MS Excel, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής έγινε προσαρμογή μιας μαθηματικής συνάρτησης παρεμβολής μορφής σειρών Fourier στα δεδομένα του Σχήματος 10, η οποία προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια τις καμπύλες του  $\omega$ . Η συνάρτηση βασίζεται σε σειρές Fourier και έχει την εξής μορφή:

$$\omega = \frac{A_s f_{yd}}{A_{cd} f_{cd}} = D_0 + \sum_{j=1}^3 \left\{ (R^{n_j} + D_j) \sum_{i=1}^4 \left( \alpha_{i,j} \cos(\gamma_{i,j} \theta) + \beta_{i,j} \cos(\gamma_{i,j} \theta) \right) \right\} \quad (2.20)$$

Οι σταθερές της συνάρτησης προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων με τη βοήθεια του Excel Solver και δίνονται στον Πίνακα 1.

**Πίνακας 1:** Τιμές παραμέτρων εξίσωσης παρεμβολής για τον υπολογισμό του μηχανικού ποσοστού οπλισμού  $\omega$ .

j	$\alpha_{i,j}$				$\beta_{i,j}$			
	i=1	i=2	i=3	i=4	i=1	i=2	i=3	i=4
1	0.40578	0.31352	0.23938	0.11695	0.04135	-0.20562	-0.04732	-0.04665
2	0.02682	0.03289	0.03892	0.04479	0.01125	0.01248	0.01384	0.01537
3	-0.23034	-0.18906	0.06707	-0.32224	0.33862	0.04838	0.14527	-0.20687
j	$\gamma_{i,j}$				$D_j$	$n_j$		
	i=1	i=2	i=3	i=4				
1	-1.76623	-0.15583	-0.14951	-2.95028	-1.9832	1.1591		
2	-0.43643	-0.47731	-0.52426	-0.57850	1.2774	-0.8072		
3	-0.39617	-2.74478	-0.24928	-0.96468	-2.1539	1.2625		

Οι μεταβλητές R και  $\theta$  αποτελούν πολικές συντεταγμένες που ορίζονται από τα κανονικοποιημένα εντατικά μεγέθη  $\mu_{Ed}$  και  $\nu_{Ed}$  μέσω των εξής εκφράσεων:

$$R = \sqrt{\left( C_1 (\mu_{Ed} + X_0) \right)^2 + \left( C_2 (\nu_{Ed} + Y_0) \right)^2} \quad (2.21)$$

$$\theta = \arctan \left[ \frac{\nu_{Ed} + Y_0}{\mu_{Ed} + X_0} \right] \quad (2.22)$$

όπου  $X_0=0.09653$ ,  $Y_0=0.57274$ ,  $C_1=15.128$  και  $C_2=11.618$ .

Για τις καμπύλες  $0 < \omega \leq 2$  του Σχήματος 10, η προτεινόμενη συνάρτηση παρεμβολής παράγει τιμές  $\omega$  με μέγιστο σχετικό σφάλμα 2.3% και μέσο σφάλμα 0.8%, το οποίο πλησιάζει την ακρίβεια ανάγνωσης τιμών γραφικά. Για την καμπύλη που αντιστοιχεί σε  $\omega=0$ , το μέγιστο απόλυτο σφάλμα στο  $\omega$  είναι 0.012 και το μέσο σφάλμα είναι 0.0047.

Στη παράγραφο 9.8.5 του EC2 δίνονται οι απαιτήσεις για τον ελάχιστο διαμήκη οπλισμό των φρεατοπασσάλων (Πίνακας 2), όπου το ελάχιστο ποσοστό οπλισμού ποικίλει από 0,25% έως 0,50%.

**Πίνακας 2:** Ελάχιστο εμβαδόν οπλισμού έγχυτων πασσάλων κατά EC2.

Εμβαδό διατομής πασσάλου $A_c$	Ελάχιστο εμβαδόν διαμήκους οπλισμού $A_s$
$A_c \leq 0.5 \text{ m}^2$	$A_s \geq 0.005A_c$
$0.5 \text{ m}^2 < A_c \leq 1.0 \text{ m}^2$	$A_s \geq 25 \text{ cm}^2$
$A_c > 1.0 \text{ m}^2$	$A_s \geq 0.0025A_c$

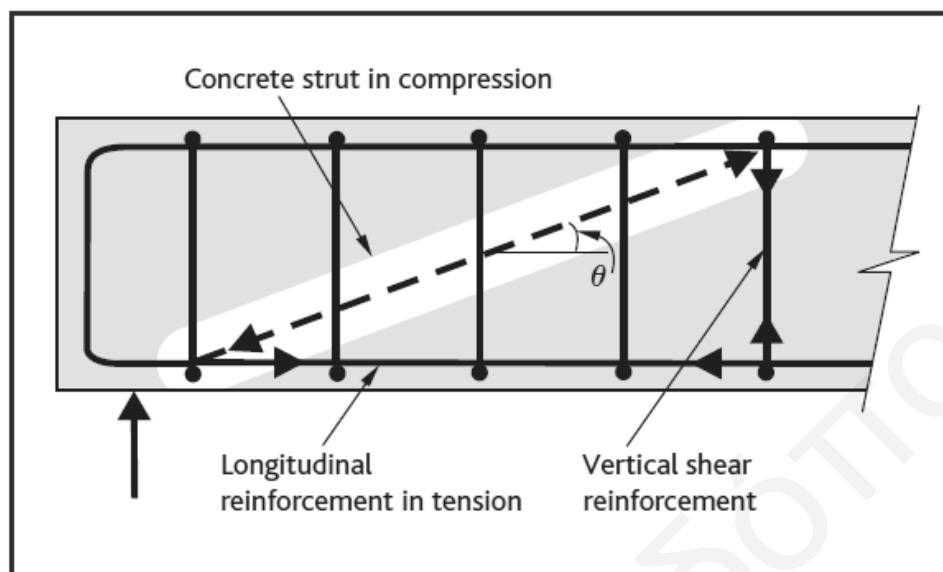
Εντούτοις, ο EC8 έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις από τον EC2. Ο EC8-Μέρος 1 στην παράγραφο 5.8.4 απαιτεί 1% στην κεφαλή του πασσάλου μέχρι 2-3 διαμέτρους κάτω, και επίσης 1% όπου έχουμε αλλαγή εδαφικών στρωμάτων εντός περιοχής 2 διαμέτρους πάνω και κάτω από το επίπεδο επαφής των δυο στρωμάτων. Στο υπόλοιπο, θεωρεί ελάχιστο 0,5%. Επειδή στην πράξη είναι σπάνιο να γνωρίζουμε με ακρίβεια κάτω του 1m πού είναι η αλλαγή στρωμάτων σε όλη τη έκταση ενός οικοπέδου, ενδείκνυται να θεωρείται ως ελάχιστο απαιτούμενο ποσοστό οπλισμού το 1% σε όλο το μήκος των πασσάλων.

Τέλος, σύμφωνα με τον EC2 το ποσοστό διαμήκους οπλισμού δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 4%, εκτός αν μπορεί να αποδειχθεί ότι η μεγάλη πυκνότητα οπλισμού δεν επηρεάζει την ακεραιότητα του σκυροδέματος λόγω διαχωρισμού αδρανών.

#### **2.2.4. Διαστασιολόγηση σε διάτμηση**

Επιπρόσθετα πέραν του διαμήκους οπλισμού, στους πασσάλους τοποθετείται και εγκάρσιος οπλισμός έναντι διάτμησης. Αν δεν υπάρχουν υπόγειοι όροφοι, οι κεφαλές των πασσάλων καλούνται κατά τη διάρκεια ενός σεισμού να αναλάβουν το σύνολο της τέμνουσας βάσης του κτιρίου. Από τα ιστορικά περιστατικά που παρουσιάστηκαν στο

προηγούμενο κεφάλαιο, διαφαίνεται ότι οι διατμητικές αστοχίες στις κεφαλές δεν αποτελούν σπάνιο φαινόμενο.



**Σχήμα 11:** Μοντέλο δικτυώματος για τον υπολογισμό της διάτμησης μέλους (Bond et al., 2006).

Η διαδικασία υπολογισμού του EC2 βασίζεται στη μέθοδο του δικτυώματος (Σχήμα 11) και εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο στον σχεδιασμό των δοκών (strut inclination method). Η διατμητική τάση σχεδιασμού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{0,9b_wd} \quad (2.23)$$

με το ενεργό βάθος της διατομής:

$$d = b_w - c - \phi/2 \quad (2.24)$$

όπου  $c$  το πάχος της επικάλυψης και  $\phi$  η διάμετρος του οπλισμού διάτμησης. Επειδή σε τρισδιάστατη κατασκευή υπάρχουν τέμνουσες και κατά τον άξονα  $x$  και κατά τον  $y$ , (κοινώς  $V_2$  και  $V_3$  σε ορολογία SAP2000), για την εξαγωγή της τέμνουσας σχεδιασμού  $V_{Ed}$  χρησιμοποιείται εδώ η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των δύο επιμέρους τιμών για κάθε κόμβο, δηλαδή:

$$V_{Ed} = V_{tot} = \sqrt{(V_2^2 + V_3^2)} \quad (2.25)$$



Το πλάτος της διατομής  $b_w$ , εφόσον πρόκειται για πάσσαλο κυκλικής διατομής, μπορεί να ληφθεί προσεγγιστικά ίσο με το πλάτος του ισοδύναμου τετραγώνου δηλαδή:

$$b_w = \sqrt{\frac{\pi D^4}{4}} \quad (2.26)$$

όπου  $D$  η διάμετρος του φρεατοπασσάλου.

Αν και η γωνία  $\theta$  (Σχήμα 11) εξαρτάται το μέγεθος της τέμνουσας δύναμης και τη χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος, το πιο σύνηθες είναι να προκύπτει  $v_{Ed} \leq V_{Rd,max \cot\theta=2.5}$  (με το  $V_{Rd,max \cot\theta=2.5}$  να προσδιορίζεται από τον Πίνακα 3). Σε αυτή την περίπτωση απλά χρησιμοποιείται η τιμή των  $\theta=21.8^\circ$  ( $\cot\theta=2.5$ ) και το εμβαδόν του οπλισμού ανά στάθμη εγκάρσιου οπλισμού υπολογίζεται από το εμβαδόν του οπλισμού διάτμησης ως:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{v_{Ed} b_w}{f_{ywd} \cot\theta} \quad (2.27)$$

όπου  $f_{ywd}$  η αντοχή σχεδιασμού του χάλυβα και  $s$  το spacing του εγκάρσιου οπλισμού.

**Πίνακας 3:** Πίνακας μέγιστων διατμητικών τάσεων ανά κατηγορία σκυροδέματος (από Bond et al., 2006).

$f_{ck}$	$V_{Rd,max \cot \theta = 2.5}$	$V_{Rd,max \cot \theta = 1.0}$
20	2.54	3.68
25	3.10	4.50
28	3.43	4.97
30	3.64	5.28
32	3.84	5.58
35	4.15	6.02
40	4.63	6.72
45	5.08	7.38
50	5.51	8.00

Εάν  $v_{Ed} > V_{Rd,max \cot\theta=2.5}$ , τότε ελέγχεται αν  $v_{Ed} < V_{Rd,max \cot\theta=1.0}$ . Αν η ανισότητα ισχύει, τότε υπολογίζεται η τιμή της γωνίας  $\theta$  ως:

$$\theta = 0.5 \sin^{-1} \left[ \frac{v_{Ed}}{0.2 f_{ck} \left( 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right)} \right] \quad (2.28)$$

για να εισαχθεί στην εξίσωση (2.27). Εάν η  $v_{Ed}$  προκύπτει μεγαλύτερη και από την τιμή του  $V_{Rd,max \cot\theta=1.0}$ , δεν μπορεί να εξαχθεί η ποσότητα απαιτούμενου οπλισμού και η διάμετρος του πασσάλου πρέπει να αυξηθεί και να γίνουν εκ νέου υπολογισμοί.

Οι κατασκευαστικοί περιορισμοί που ισχύουν για την πυκνότητα του οπλισμού διάτμησης αναφέρονται στις παραγράφους 9.5.3 και 8.2(2) του EC2 που θέτουν άνω και κάτω όρια στις αποστάσεις του οπλισμού διάτμησης ( $s_{max}$  και  $s_{min}$ ), αντίστοιχα. Σύμφωνα με την §9.5.3, η απόσταση  $s$  δεν μπορεί να υπερβαίνει τα εξής:

- 20 φορές την ελάχιστη διάμετρο του διαμήκους οπλισμού
- την ελάχιστη διάσταση του μέλους
- τα 400mm

Αντίστοιχα, η §8.2(2) καθορίζει ότι η  $s$  δεν μπορεί να είναι μικρότερη από:

- $k_1 * \emptyset$  σε mm με  $k_1 = 1$
- $d_g + k_2$  σε mm με  $k_2 = 5$ mm
- 20 mm

όπου  $d_g$  το μέγιστο μέγεθος σκύρου. Τα ελάχιστα όρια αποστάσεων διαμήκους οπλισμού τίθενται ώστε να μπορεί να γίνει σκυροδέτηση του μέλους χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα του σκυροδέματος λόγω ανισοκατανομής και διαχωρισμού των αδρανών.

Στην παρούσα διατριβή, θεωρήθηκε ένα μέγιστο μέγεθος σκύρου 9.5mm και μια μέγιστη διάμετρος  $\emptyset$  οπλισμού διάτμησης τύπου σπιράλ ίση με 16 mm. Με αυτά τα δεδομένα, η ελάχιστη απόσταση  $s_{min}$  προκύπτει ίση με 36 mm.

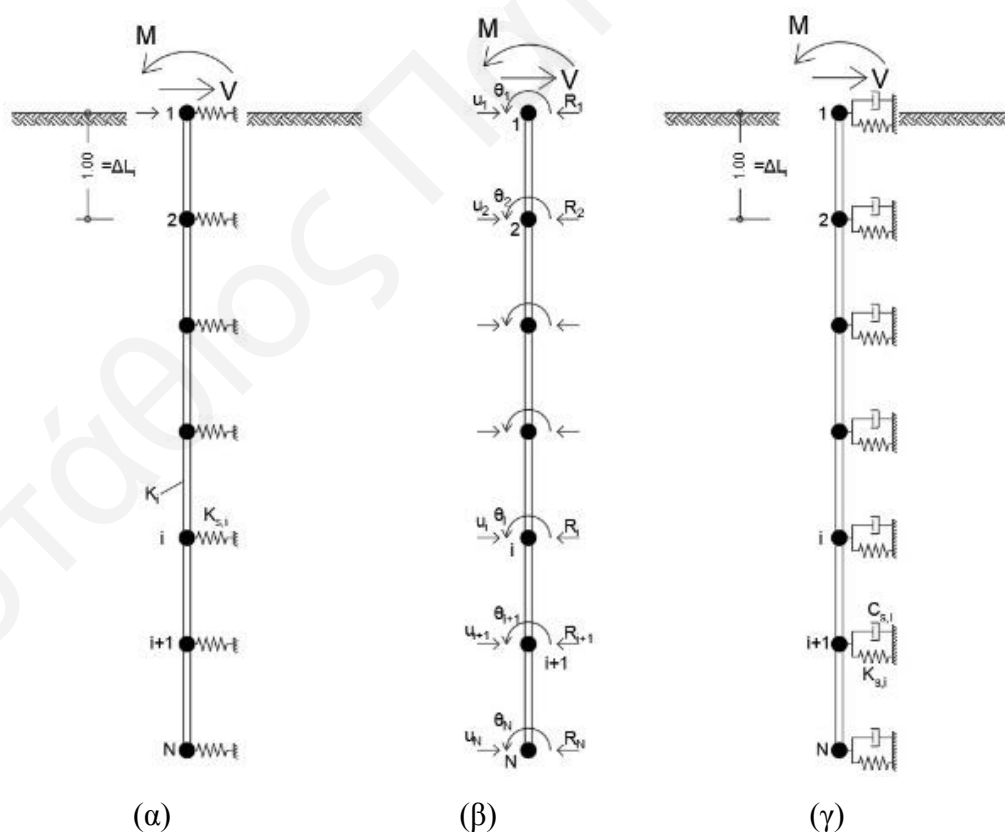
### 3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία των παραμετρικών αναλύσεων αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-κατασκευής που εκτελέστηκαν στο πρόγραμμα SAP2000. Συγκεκριμένα, επεξηγούνται οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των σταθερών των ελατηρίων και αποσβεστήρων εδάφους που συνδέονται στους πασσάλους και η μορφοποίηση του υπολογιστικού μοντέλου κτιρίου στο πρόγραμμα ανάλυσης.

#### 3.1. Πλευρική αντίσταση εδάφους

##### 3.1.1. Στατικό ανάλογο

Η πλευρική δυσκαμψία και απόσβεση που παρέχει το έδαφος σε ένα πάσσαλο εξαρτάται από το εδαφικό προφίλ στο οποίο κατασκευάζεται. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, αυτές οι αντιδράσεις προσομοιώθηκαν με ελατήρια Winkler όπως φαίνεται στο στατικό ανάλογο του Σχήματος 12.



**Σχήμα 12:** Σχηματική απεικόνιση στατικού μοντέλου πλευρικής αντίστασης πασσάλων: α) στατικό ανάλογο υπό στατικές συνθήκες, β) βαθμοί ελευθερίας, γ) στατικό ανάλογο για δυναμικές αναλύσεις.

Υπό στατικές συνθήκες (απουσία δυναμικής φόρτισης), τα παραπάνω ελατήρια επαρκούν για να προσομοιώσουν την αντίδραση του εδάφους. Για τον αντισεισμικό σχεδιασμό όμως, είναι απαραίτητη η τοποθέτηση αποσβεστήρων εν παραλλήλω έτσι ώστε να αναπαρασταθεί η απόσβεση ακτινοβολίας και η υστερητική απόσβεση της ενέργειας ταλάντωσης εντός του εδάφους. Ο πάσσαλος διακριτοποιείται σε πεπερασμένα στοιχεία δοκού και τα ελατήρια και οι αποσβεστήρες συνδέονται στους κόμβους των στοιχείων δοκού.

Οι σταθερές των ελατηρίων και των αποσβεστήρων σε κάθε κόμβο  $i$  ενός πασσάλου υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$K_{s,i} = (0,5\Delta L_{i-1} \cdot D \cdot k_{s,i-1}) + (0,5\Delta L_i \cdot D \cdot k_{s,i}) \quad (3.1)$$

$$C_{s,i} = (0,5\Delta L_{i-1} \cdot D \cdot c_{s,i-1}) + (0,5\Delta L_i \cdot D \cdot c_{s,i}) + C_{hys,i} \quad (3.2)$$

όπου  $D$  η διάμετρος του πασσάλου,  $L_{i-1}$  το μήκος του στοιχείου δοκού που υπέρκειται του κόμβου  $i$  και  $L_i$  το μήκος του στοιχείου που υπόκειται του κόμβου. Το  $k_s$  αποτελεί τον δείκτη εδάφους και υπολογίζεται από τον τύπο του Broms (1964a) ως:

$$k_s = \frac{1.67E}{D} \quad (3.3)$$

όπου  $E$  το μέτρο Young του εδάφους. Η παράμετρος  $c_s$  εκφράζει την απόσβεση ακτινοβολίας και υπολογίζεται συντηρητικά με βάση τους Novak et al. (1978) από τη σχέση:

$$c_s = 2\rho r V_s \quad (3.4)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του εδάφους και  $V_s$  η ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων του εδάφους.

Λόγω της μη γραμμικότητας του εδάφους, οι τιμές  $E$  και  $V_s$  οφείλουν να είναι οι απομειωμένες τιμές που ισχύουν κατά της διάρκειας της ισχυρής εδαφικής κίνησης που προκαλεί ένας σεισμός. Οι λόγοι απομείωσης της  $V_s$  και του μέτρου διάτμησης  $G$  μπορούν να εκτιμηθούν σύμφωνα με τον πίνακα 4.1 του EC8-Μέρος 5 (Πίνακας 4).

**Πίνακας 4:** Πίνακας 4.1 του EC8-Μέρος 5

Ground acceleration ratio, $\alpha S$	Damping ratio	$\frac{v_z}{v_{z,max}}$	$\frac{G}{G_{max}}$
0,10	0,03	0,9( $\pm 0,07$ )	0,80( $\pm 0,10$ )
0,20	0,06	0,7( $\pm 0,15$ )	0,50( $\pm 0,20$ )
0,30	0,10	0,6( $\pm 0,15$ )	0,35( $\pm 0,20$ )

Η  $C_{hys}$  αποτελεί την υστερητική συνιστώσα της σταθεράς του αποσβεστήρα και υπολογίζεται συναρτήσει της σταθεράς του ελατηρίου  $K$  από την εξής έκφραση (Gazetas, 1991):

$$C_{hys} = \frac{2K}{\omega\xi} \quad (3.5)$$

όπου  $\xi$  είναι ο λόγος υστερητικής απόσβεσης του εδάφους και  $\omega$  είναι η κυκλική συχνότητα ταλάντωσης. Η  $\omega$  μπορεί να ληφθεί ίση με την κυκλική ιδιοσυχνότητα του υπό εξέταση κτιρίου, δεδομένου ότι η ταλάντωση του συστήματος κτιρίου-εδάφους σε αδρανειακή αλληλεπίδραση κυριαρχείται από την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής.

Ο λόγος υστερητικής απόσβεσης μπορεί να ληφθεί επίσης από τον πίνακα 4.1 του EC8-Μέρος 5. Ρευστοποίηση αναμένουμε να συμβεί σε περιοχές με υψηλό σεισμικό συντελεστή (π.χ. ζώνη II στην Ελλάδα με  $a_{gR}=0.24g$  και ζώνη III στην Κύπρο με  $a_{gR}=0.25g$ ) και τα εδαφικά προφίλ που περιέχουν ρευστοποιήσιμα εδάφη αναμένεται να είναι κατηγορίας D και E πριν συμβεί η ρευστοποίηση, με συντελεστές εδαφικής ενίσχυσης τουλάχιστον 1.35 και 1.4 αντίστοιχα. Συνεπώς, το πιθανότερο είναι η επιτάχυνση σχεδιασμού στην επιφάνεια του εδάφους να είναι  $a_{gRS}>0.3g$  κι έτσι στις παρούσες αναλύσεις υιοθετήθηκε η τιμή  $\xi=0.1$  (10%).

Το παραπάνω μοντέλο πλευρικής αντίδρασης εδάφους είναι γραμμικά ελαστικό αφού αυτό απαιτείται αυστηρά για τη διενέργεια φασματικών αναλύσεων σεισμικής απόκρισης όπως αυτές που εκτελούνται στην παρούσα διατριβή. Εντούτοις, θα πρέπει να γίνει έλεγχος αν οι ωθήσεις που ασκούν οι κόμβοι των πασσάλων, ειδικά στη στάθμη των κεφαλών, είναι τόσο μεγάλες που φέρουν το έδαφος σε αστοχία. Δηλαδή σε κάθε ανάλυση θα πρέπει να ελέγχεται αν τα ελατήρια εδάφους μπορούν να θεωρηθούν ότι παραμένουν ελαστικά σε όλη τη διάρκεια της ανάλυσης (έλεγχος πλευρικής φέρουσας

ικανότητας). Συγκεκριμένα, λόγω της πεπερασμένης αντοχής του εδάφους, υπάρχει μια οριακή τιμή στην αντίδραση που μπορεί να παρέχει ένα ελατήριο εδάφους:

$$R_{L,i} = (0,5 \cdot p_{L,i-1} \cdot D \cdot \Delta L_{i-1}) + (0,5 \cdot p_{L,i} \cdot D \cdot \Delta L_i) \quad (3.6)$$

Η οριακή πίεση  $p_L$  για λεπτόκοκκα εδάφη (π.χ. αργίλου) και για χονδρόκοκκα εδάφη (π.χ. άμμους) υπολογίζονται εδώ σύμφωνα με τη θεωρία του Broms. Συγκεκριμένα, για άργιλο (Broms, 1964a):

$$p_L = \min \left\{ \left( 3 + 0.5 \frac{z}{D} \right) s_u + \sigma'_{v0}, 9s_u \right\} \quad (3.7)$$

όπου  $s_u$  είναι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους και  $z$  είναι το θεωρούμενο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ για άμμους:

$$p_L = 3\sigma'_{v0} \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} \quad (3.8)$$

όπου  $\sigma'_{v0}$  η κατακόρυφη ενεργός τάση και  $\phi$  η γωνία τριβής της άμμου. Επειδή η άμμοι που εξετάζονται εδώ είναι ρευστοποιήσιμες και άρα χαλαρές, η γωνία εσωτερικής τριβής για την άμμο ορίστηκε στις  $30^\circ$ .

### 3.1.2. Πλευρική δυσκαμψία και απόσβεση πασσαλομάδας

Οι εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα ισχύουν για μεμονωμένο πάσσαλο, δηλαδή για πάσσαλο που βρίσκεται αρκετά μακριά από τον γειτονικό του. Σε πασσαλομάδες θεμελίωσης κτιρίων, ενδέχεται οι πάσσαλοι να είναι τοποθετημένοι τόσο πυκνά που να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Σε σχέση με την αντίσταση που μπορεί να δεχτεί ένας μεμονωμένος πάσσαλος από το έδαφος, όταν αυτός βρεθεί σε μια πυκνή πασσαλομάδα, η αντίσταση μειώνεται. Για το λόγο αυτό, η πλευρική αντίσταση (τιμές δυσκαμψίας και απόσβεσης) χρειάστηκε να πολλαπλασιαστούν με μειωτικούς συντελεστές οι οποίοι διαφέρουν ανάλογα την θέση των πασσάλων σε κάτοψη. Συγκεκριμένα, έγινε χρήση των πολλαπλασιαστών  $f$  που προτείνονται από τον Salgado (2008):

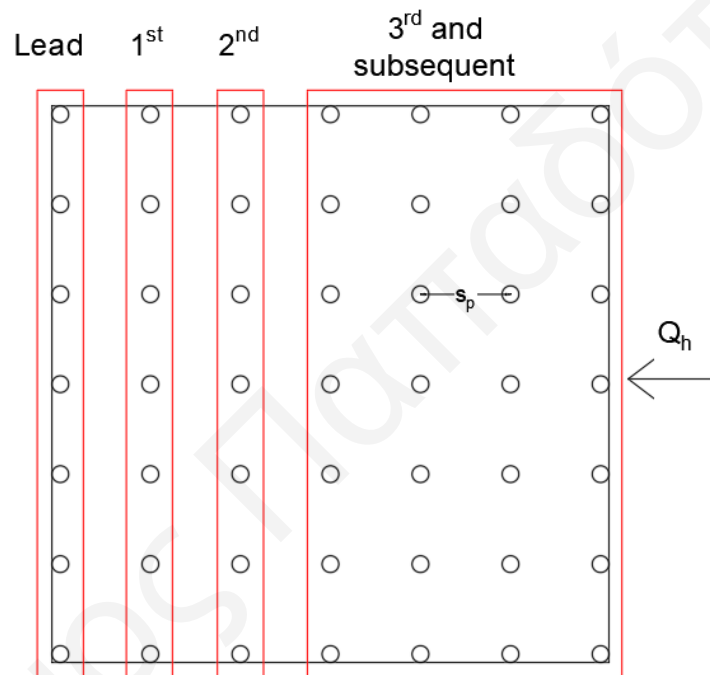
$$f_L = 0,64 + 0,06 \left( \frac{s_p}{D} \right) \leq 1 \quad (3.9\alpha)$$

$$f_{1st} = 0,34 + 0,11 \left( \frac{s_p}{D} \right) \leq 1 \quad (3.9\beta)$$

$$f_{2nd} = 0,16 + 0,14 \left( \frac{s_p}{D} \right) \leq 1 \quad (3.9\gamma)$$

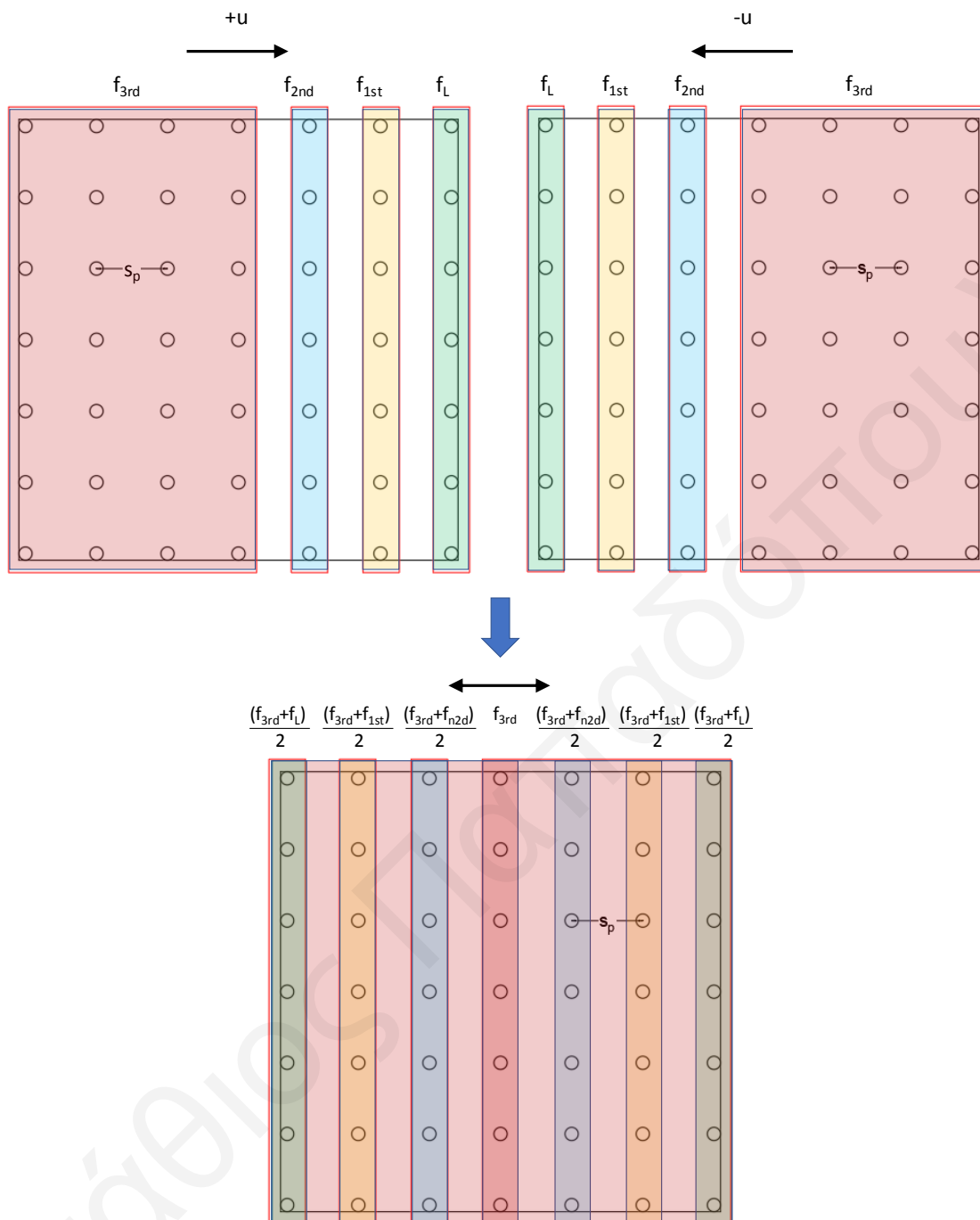
$$f_{3rd} = 0,04 + 0,16 \left( \frac{s_p}{D} \right) \leq 1 \quad (3.9\delta)$$

όπου  $s_p$  η απόσταση μεταξύ των πασσάλων (κεφαλή προς κεφαλή) σε ένα τετραγωνικό κάναβο. Ο πολλαπλασιαστής  $f_L$  εφαρμόζεται στη «μετωπική» σειρά πασσάλων, δηλαδή τη σειρά που βρίσκεται στην περίμετρο του κτιρίου προς τη μεριά της κατεύθυνσης της κίνησης του κτιρίου (Σχήμα 13). Οι  $f_{1st}$  και  $f_{2nd}$  εφαρμόζονται στη επόμενη και μεθεπόμενη σειρά, ενώ ο  $f_{3rd}$  σε όλους τους υπόλοιπους πασσάλους της κάτοψης.



**Σχήμα 13:** Σειρές πασσάλων για την εφαρμογή μειωτικών συντελεστών  $f$  για μονοτονική κίνηση κατά τη διεύθυνση του  $x$ -άξονα.

Επειδή στο πρόβλημα που εξετάζεται εδώ, το κτίριο κινείται και προς τις δυο φορές (αμφίδρομη κίνηση), αφού πρόκειται για ταλάντωση, έγινε θεώρηση της κατανομής του Σχήματος 13 και για τις δυο φορές (προς τα «δεξιά»,  $+u$  και προς τα «αριστερά»,  $-u$ ), και οι μειωτικοί συντελεστές  $f$  που εφαρμόστηκαν στις σταθερές ελατηρίων και στις σταθερές των αποσβεστήρων κατά τον  $x$ -άξονα πάρθηκαν προσεγγιστικά ως οι μέσοι όροι των δυο περιπτώσεων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 14. Η ίδια θεώρηση έγινε και για τους συντελεστές ελατηρίων και αποσβεστήρων κατά τον  $y$ -άξονα.



**Σχήμα 14:** Ζώνες εφαρμογής μειωτικών συντελεστών  $f$  για ταλάντωση κατά τη  $x$ -διεύθυνση για πασσαλομάδα 7x7.

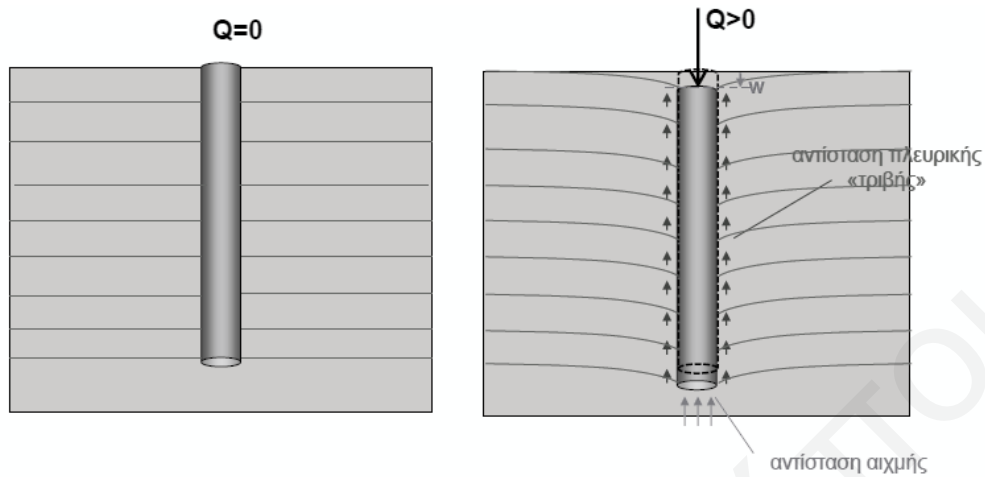
### 3.2. Κατακόρυφη αντίσταση πασσάλων

#### 3.2.1. Στατικό ανάλογο

Όταν ένας πάσσαλος δεχτεί μια κατακόρυφη θλιπτική δύναμη, αρχίζει να βυθίζεται. Καθώς το κάνει αυτό, αναπτύσσονται τάσεις αντίδρασης από το έδαφος στην

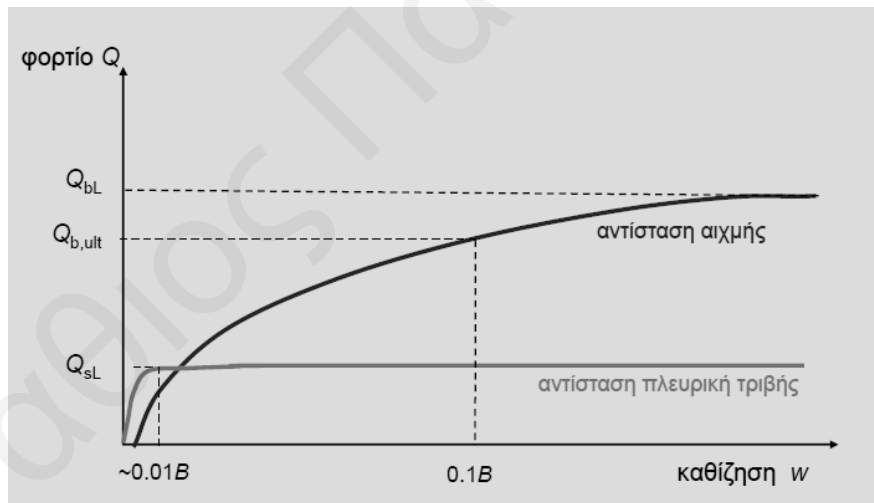


παράπλευρη επιφάνειά του (αντίσταση πλευρικής τριβής) και στη βάση του (αντίσταση αιχμής) (Σχήμα 15).



**Σχήμα 15:** Σχηματική απεικόνιση αντίστασης αιχμής και αντίστασης πλευρικής τριβής λόγω κατακόρυφης κίνησης του πασσάλου.

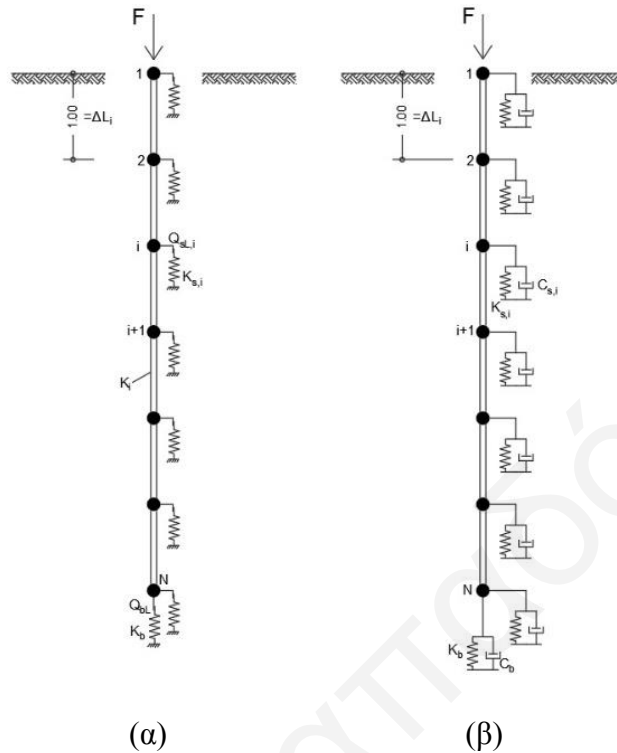
Η αντίσταση πλευρικής τριβής φτάνει σχετικά γρήγορα στην οριακή της τιμή  $Q_{sL}$  ενώ η αντίσταση αιχμής αυξάνεται με πιο βραδύ ρυθμό με την μετατόπιση (Σχήμα 16).



**Σχήμα 16:** Γραφική παράσταση εξέλιξης αντίστασης πλευρικής τριβής και αντίστασης αιχμής.

Παρά την έντονη μη γραμμικότητα, ειδικά στην περίπτωση της πλευρικής τριβής, το στατικό ανάλογο που θεωρήθηκε είναι γραμμικά ελαστικό με κατακόρυφα ελατήρια και αποσβεστήρες (Σχήμα 17), αφού οι αναλύσεις που πραγματοποιούνται στα πλαίσια της διατριβής γίνονται με τη φασματική μέθοδο. Τα περισσότερα ζεύγη ελατηρίων-

αποσβεστήρων αναπαριστούν την αντίσταση στα πλευρά του πασσάλου. Στον κατώτερο κόμβο τοποθετείται επιπλέον ένα ζεύγος το οποίο αναπαριστά την αντίσταση του εδάφους στην αιχμή του πασσάλου.



**Σχήμα 17:** Μοντέλο στατικού ανάλογου κατακόρυφης αντίστασης: α) υπό στατικές συνθήκες, β) υπό δυναμικές συνθήκες.

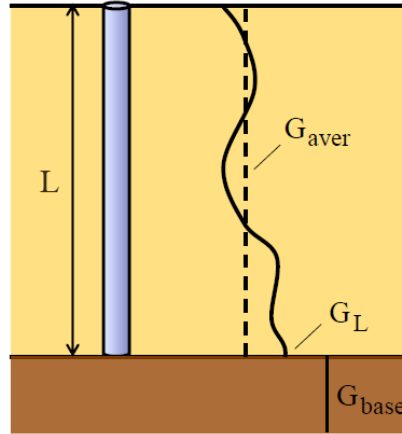
Οι σταθερές των ελατηρίων υπολογίζονται με βάση τη θεωρία των Randolph & Wroth (1978):

$$K_{s,i} = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{r_m}{R}\right)} \left[ (0,5\Delta L_{i-1} G_{s,i-1}) + (0,5\Delta L_i G_{s,i}) \right] \quad (3.10)$$

όπου  $R$  η ακτίνα του πασσάλου και  $G$  το μέτρο διάτμηση του εδάφους. Το  $r_m$  είναι η ακτίνα της πλευρικής επιρροής του πασσάλου και υπολογίζεται ως:

$$r_m = \left[ 0.25 + \left( 2.5(1 - \nu) \frac{G_{ave}}{G_L} - 0.25 \right) \frac{G_L}{G_{base}} \right] L \quad (3.11)$$

όπου  $\nu$  ο λόγος του Poisson του εδάφους και  $L$  το μήκος του πασσάλου. Το  $G_{ave}$  είναι η μέση τιμή του μέτρου διάτμησης του εδάφους που βρίσκεται περίξ του πασσάλου,  $G_L$  η τιμή στο κατώτερο άκρο του κορμού του πασσάλου και  $G_{base}$  η τιμή στην αιχμή (Σχήμα 18).



**Σχήμα 18:** Επεξήγηση τιμών  $G$  για τον υπολογισμό της ακτίνας πλευρικής επιρροής.

Το μέτρο διάτμηση  $G$  συνδέεται άμεσα με το μέτρο του Young μέσω του λόγου του Poisson ( $E=2G(1+\nu)$ ). Θεωρώντας ότι η στάθμη του Υ.Ο. είναι κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και λαμβάνοντας υπόψη ότι στη σύντομη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος οι συνθήκες είναι αστράγγιστες, ο λόγος του Poisson λαμβάνεται ίσος με 0,5 ( $G=E/3$ ).

Οι υπολογισμοί των τιμών των αποσβέσεων και των δυσκαμψιών σε κάθε κόμβο του πασσάλου, έγιναν βάσει των παρακάτω εξισώσεων. Για την απόσβεση:

$$C_{s,i} = (0.5\Delta L_{i-1}\pi D c_{s,i-1}) + (0.5\Delta L_i\pi D c_{s,i}) \quad (3.12)$$

όπου η σταθερά  $c_s$  προέρχεται από τους Novak et al. (1978):

$$c_s = \rho V_s = \sqrt{\rho G} \quad (3.13)$$

Η δυσκαμψία του ελατηρίου της βάσης του πασσάλου υπολογίζεται από τη σχέση των Loukidis et al. (2008):

$$K_b = \frac{4RG}{1-\nu} (1.27 - 0.12 \ln \nu) \quad (3.14)$$

ενώ η σταθερά του αποσβεστήρα της βάσης επιλέχθηκε να υπολογιστεί συντηρητικά από τη σχέση των Lysmer & Richards (1966):

$$C_b = \frac{3.4R^2}{1-\nu} \sqrt{\rho G} \quad (3.15)$$

### 3.2.2. Συντελεστής απόδοσης πασσαλομάδας

Όπως αναφέρθηκε και στην πλευρική αντίσταση των πασσάλων, η ύπαρξη ενός πασσάλου σε μια πυκνή πασσαλομάδα έχει ως αποτέλεσμα αυτός να αλληλεπιδρά με τους υπόλοιπους πασσάλους προκαλώντας έτσι μείωση της δυσκαμψίας του συστήματος εδάφους-πασσάλου. Αυτή η μείωση μπορεί να εκφραστεί μέσω ενός συντελεστή απόδοσης  $e_g$ . Ο συντελεστής αυτός υπολογίστηκε με βάση τη μεθοδολογία των Mylonakis & Gazetas (1998) ως εξής:

$$e_g = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_{ij}} \quad (3.16)$$

όπου  $N$  το πλήθος των πασσάλων σε μια πασσαλομάδα. Το  $\alpha_{ij}$  ορίζεται ως

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{για } i = j \\ \max \left[ \Lambda \frac{\ln(r_m/d_{ij})}{\ln(r_m/R)}, 0 \right] & \text{για } i \neq j \end{cases} \quad (3.17)$$

όπου  $d_{ij}$  είναι η απόσταση μεταξύ των πασσάλων  $i$  και  $j$  από κέντρο σε κέντρο:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3.18)$$

Ο συντελεστής  $\Lambda$  υπολογίζεται ως

$$\Lambda = \frac{2\lambda L + \sinh(2\lambda L) + \Omega^2 [\sinh(2\lambda L) - 2\lambda L] + 2\Omega [\cosh(2\lambda L) - 1]}{2 \sinh(2\lambda L) + 2\Omega^2 \sinh(2\lambda L) + 4\Omega \cosh(2\lambda L)} \quad (3.19)$$

όπου

$$\lambda = \sqrt{\frac{2\pi R k_{s,ave}}{E_p A_p}} \quad (3.20)$$

$$\Omega = \frac{K_b}{\lambda E_p A_p} \quad (3.21)$$

$$k_{s,ave} = \frac{G_{ave}}{R \ln\left(\frac{r_m}{R}\right)} \quad (3.22)$$

όπου  $E_p$  και  $A_p$  είναι το μέτρο του Young του υλικού του πασσάλου και το εμβαδόν διατομής του πασσάλου αντίστοιχα.

Υπό στατικές συνθήκες, όλες οι σταθερές κατακόρυφων ελατηρίων πολλαπλασιάζονται με τον συντελεστή απόδοσης  $e_g$ . Εντούτοις, με τις πρώτες παραμετρικές αναλύσεις που μελετήθηκαν, διαπιστώθηκε πως η παλινδρομική κίνηση

των πασσάλων στην κατακόρυφη διεύθυνση z-z' υπό δυναμικές συνθήκες φόρτισης, δεν αφορούσε ταυτόχρονα όλη τη πασσαλομάδα. Αντίθετα, όταν οι μισοί πάσσαλοι κινούνταν προς τα κάτω, οι άλλοι μισοί κινούνταν προς τα πάνω. Επίσης, το πλάτος ταλάντωσης είναι μεγαλύτερο όσο πιο μακριά από το κέντρο της θεμελίωσης είναι τοποθετημένοι οι πάσσαλοι. Συνεπώς, η υιοθέτηση ενός συντελεστή μείωσης που υπολογίστηκε με βάση όλους τους πασσάλους, θα ήταν πολύ συντηρητική και μη ρεαλιστική με ελάττωση της δυσκαμψίας έως και 80%. Για το λόγο αυτό, για τους σκοπούς υπολογισμού του  $e_g$  θεωρήθηκε κατά προσέγγιση ότι υπάρχουν δυο πασσαλομάδες ανά πάσα στιγμή, η ανερχόμενη και η κατερχόμενη, που περιλαμβάνουν η κάθε μία μόνο τις δύο ακραίες σειρές των πασσάλων.

Τέλος, αν και η σχετική βιβλιογραφία αναφέρεται στις τιμές της δυσκαμψίας, ο συντελεστής μείωσης  $e_g$  εφαρμόστηκε αυτούσιος και στις σταθερές των αποσβεστήρων, δηλαδή:

$$K_s^* = e_g K_s \quad (3.23\alpha)$$

$$K_b^* = e_g K_b \quad (3.23\beta)$$

$$C_s^* = e_g C_s \quad (3.23\gamma)$$

$$C_b^* = e_g C_b \quad (3.23\delta)$$

### 3.3. Μόρφωση Στατικού Φορέα

Για την εκτέλεση των παραμετρικών αναλύσεων σεισμικής απόκρισης κτιρίου, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SAP2000. Οι κατόψεις των κτιρίων με τη διάταξη των πασσάλων και των υποστυλωμάτων υπάρχουν στο Παράρτημα Ι. Η ανωδομή προσομοιώθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε η ιδιοπερίοδός της με πάκτωση να είναι όσον το δυνατό πλησιέστερα στην τιμή που προβλέπει η σχέση 4.6 της §4.3.2.2 του EC8-1

$$T = C_t H^{3/4} \quad (3.24)$$

όπου  $H$  το ύψος του κτιρίου και  $C_t=0,075$  για κτίρια από σκυρόδεμα.

Όλα τα μοντέλα κτιρίων που θεωρήθηκαν, είχαν τετραγωνική κάτοψη διαστάσεων 20m×20m. Τα ύψη των κτιρίων στις παραμετρικές κυμαίνονταν από 15m έως 36m (δηλαδή από 5 έως 12 ορόφους). Στις πλάκες ορίστηκε διαφραγματική λειτουργία καθ'

ύψος. Στη στάθμη θεμελίωσης, όλοι οι πάσσαλοι καταλήγουν σε μια κοιτόστρωση πάχους 1.50m εν είδει ενιαίου κεφαλόδεσμου.

Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε για την ανωδομή ήταν C40/50 και ο χάλυβας οπλισμού B500. Το σκυρόδεμα για τους φρεατοπασσάλους ήταν C30/37 και ο χάλυβας οπλισμού B500. Το έδαφος προσομοιώθηκε με ελατήρια Winkler και αποσβεστήρες σε κάθε κόμβο καθ' ύψος των πασσάλων, οι οποίοι διακριτοποιήθηκαν με κόμβους ανά 1m βάθους.

### 3.4. Φάσμα σχεδιασμού

Εν τη απουσία ειδικής ανάλυσης για τον προσδιορισμό του φάσματος επιτάχυνσης στο ρευστοποιημένο εδαφικό προφίλ, είναι ακόμη κάτι το εξεζητημένο και ενέχει πολλές αβεβαιότητες, ο σχεδιασμός γίνεται με το φάσμα που ισχύει αν το μαλακό/χαλαρό έδαφος δεν ρευστοποιηθεί. Το φάσμα που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις, επιλέχθηκε συντηρητικά να είναι αυτό του EC8 για εδάφη κατηγορίας D (προ-ρευστοποίησης), για την οποία ο συντελεστής εδαφικής ενίσχυσης  $S$  είναι 1.35 και οι τετμημένες του φάσματος να είναι:

$$T_B = 0.20\text{sec}$$

$$T_C = 0.80\text{sec}$$

$$T_D = 2.00\text{sec}$$

Το ελαστικό φάσμα απόκρισης του EC8 διαμορφώνεται από τις εξής εξισώσεις:

$$0 \leq T \leq T_B: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2.5 - 1) \right] \quad (3.25\alpha)$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \quad (3.25\beta)$$

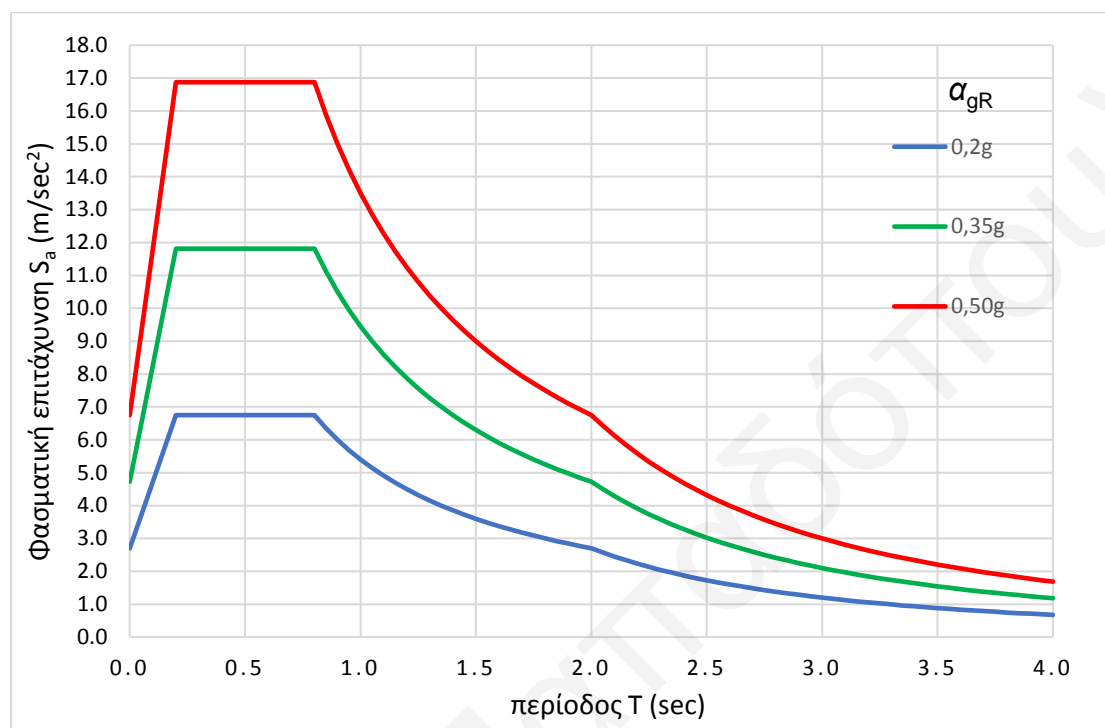
$$T_C \leq T \leq T_D: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \left[ \frac{T_C}{T} \right] \quad (3.25\gamma)$$

$$T_D \leq T \leq 4\text{sec}: S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \left[ \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \quad (3.25\delta)$$

όπου ο παράγοντας  $\eta$  εισάγει την επίδραση του λόγου απόσβεσης  $\xi$ :

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \quad (3.26)$$

Στις αναλύσεις, για την ανωδομή θεωρήθηκε η συνήθης τιμή 5% για τον λόγο απόσβεσης. Στο Σχήμα 19 παρουσιάζονται τα ελαστικά φάσματα απόκρισης για κατηγορία εδάφους D για τις τρεις τιμές επιτάχυνσης σε βράχο  $a_{gR}$  (έδαφος κατηγορίας A) που θεωρήθηκαν στις παραμετρικές αναλύσεις (0,2g, 0,35g, και 0,5g).



**Σχήμα 19:** Ελαστικό φάσμα σχεδιασμού Κύπρου για κατηγορία εδάφους D.

Δεδομένου ότι οι αναλύσεις πραγματοποιούνται για τη διαστασιολόγηση των στοιχείων θεμελίωσης (πασσάλους), τα παραπάνω ελαστικά φάσματα διαιρέθηκαν με ένα συντελεστή συμπεριφοράς  $q$  ίσο με 1.5 ακολουθώντας τη διάταξη της παραγράφου 4.4.2.6(3) του EC-Μέρος 1, ανεξάρτητα από το αν η ανωδομή είναι χαμηλής ή υψηλής πλαστιμότητας, αποφεύγοντας έτσι την απαίτηση για διαστασιολόγηση βάσει ικανοτικού σχεδιασμού.

### 3.4.1. Φορτία και συνδυασμός φόρτισης

Τα κινητά φορτία της κατασκευής ορίσθηκαν βάσει της χρήσης του κτιρίου, η οποία θεωρείται ότι είναι γραφεία, σε  $2.0 \text{ kN/m}^2$  σύμφωνα με τον πίνακα 6.2-Κατηγορία Β της § 6.3.1.2 του EC2. Τα μόνιμα φορτία υπολογίστηκαν βάσει των υλικών που τυπικά

μπορεί να έχει μια κατασκευή όπως δρομική τοιχοποιία, στρώσεις δαπέδων κλπ. Η τιμή του μόνιμου φορτίου ήταν  $2.2 \text{ kN/m}^2$ .

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός φόρτισης διότι η φύση της διπλωματικής εργασίας αφορά την διαστασιολόγηση των πασσάλων στις πιο κρίσιμες συνθήκες, η οποίες είναι εκ των πραγμάτων η σεισμική φόρτιση με το έδαφος να έχει ρευστοποιηθεί. Η σεισμική φόρτιση ορίζεται από EC8-1 §4.3.3.5.2 ως:

$$E_{Edx} \pm 0.30E_{Edy} \quad (3.27)$$

$$0.30E_{Edx} \pm E_{Edy} \quad (3.28)$$

Οι κατακόρυφες σεισμικές δράσεις σχεδιασμού  $E_{Edz}$  δεν λαμβάνονται υπόψιν διότι στα μοντέλα που αναλύθηκαν δεν υφίστανται οι συνθήκες που αναφέρονται στην EC8-1 §4.3.3.5.2(1) που θα υποχρέωναν τη θεώρηση κατακόρυφων σεισμικών δράσεων. Επίσης, λόγω της πλήρους συμμετρίας των θεωρούμενων κατασκευών και στους δυο οριζόντιους άξονες, μόνο για έναν από τους παραπάνω συνδυασμούς χρειάστηκε να γίνουν υπολογισμοί. Επομένως, ο σεισμικός συνδυασμός φόρτισης σε συνδυασμό με τα φορτία της ανωδομής διαμορφώνεται ως:

$$\Sigma G_{k,j} + \Sigma \psi_2 Q_{k,i} \pm E_{Edx} \pm 0.30E_{Edy} \quad (3.29)$$

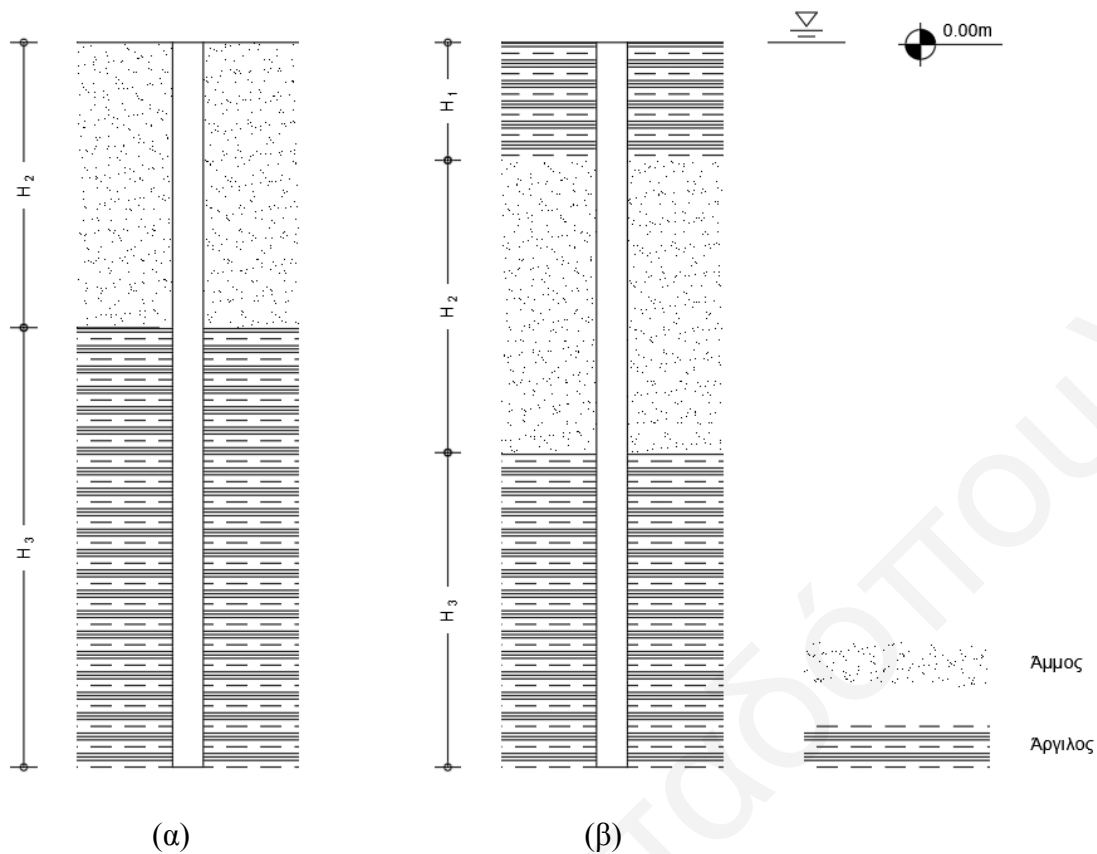
όπου ο συντελεστής συνδυασμού για τα κινητά φορτία  $\psi_2 = 0.3$ .

### 3.5. Εδαφομηχανικά Στοιχεία

#### 3.5.1. Τύποι εδαφικών προφίλ

Οι παραμετρικές αναλύσεις εξετάζουν δύο τύπους εδαφικών προφίλ (Σχήμα 20). Στον πρώτο τύπο, το ανώτερο στρώμα είναι ρευστοποιήσιμη άμμος πάχους  $h_2$  που υπέρκειται στρώματος αργίλου, το οποίο αποτελεί και το στρώμα όπου τοποθετείται η αιχμή του πασσάλου. Σε αυτή την περίπτωση η βάση του κτιρίου εδράζεται πάνω στο ρευστοποιήσιμο στρώμα και οι κεφαλές των πασσάλων βρίσκονται μέσα σε αυτό. Στον δεύτερο τύπο, το ρευστοποιήσιμο στρώμα με πάχος  $h_2$  βρίσκεται μεταξύ δυο στρωμάτων αργίλου, και το κτίριο εδράζεται πάνω στο ανώτερο στρώμα αργίλου με πάχος  $h_1$ . Χάριν απλότητας, ο υδροφόρος ορίζοντας θεωρείται και στις δυο περιπτώσεις στην ελεύθερη επιφάνεια.





**Σχήμα 20:** Εξεταζόμενα εδαφικά προφίλ: α) τύπος Α - άμμος ακολουθούμενη από άργιλο, β) τύπος Β - άμμος μεταξύ δυο στρωμάτων αργίλου.

Τα στρώματα της αργίλου θεωρούνται μέτρια ελαφρά έως μέτρια υπερστερεοποιημένα με τιμή αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $s_u$  ίση με 120 kPa. Το μέγιστο (δηλαδή για μικρές παραμορφώσεις) μέτρο διάτμησης  $G_{max}$  αργίλων μπορεί να θεωρηθεί μια γραμμική συνάρτηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της μορφής (Gazetas, 1991):

$$\frac{G_{max}}{s_u} = 1000 \text{ έως } 2500 \text{ (Gazetas, 1991)} \quad (3.30)$$

Για τους σκοπούς της παρούσας διατριβής θεωρήθηκε:

$$G_{max} = 1000s_u \quad (3.31)$$

Το στρώμα άμμου θεωρείται ότι αποτελείται από καθαρή ομοιόμορφη άμμο και είναι ρευστοποιήσιμο με αριθμό κτύπων της σφύρας SPT  $N_{60}$  ίσο με 10. Το  $G_{max}$  της άμμου εκτιμήθηκε από τον τύπο των Imai & Tonouchi (1982):

$$G_{max} = 15561N_{60}^{0,68} \quad (3.32)$$

όπου το αποτέλεσμα να προκύπτει σε kPa. Έχοντας υπολογίσει το  $G_{max}$ , η αντίστοιχη τιμή της ταχύτητας διάδοσης διατμητικών κυμάτων υπολογίζεται από:

$$V_{s,max} = \sqrt{\frac{G_{max}}{\rho}} \quad (3.33)$$

Για την άμμο και την άργιλο θεωρήθηκε ότι η πυκνότητά  $\rho$  είναι  $1.8tn/m^3$ .

Με βάση τον χαρακτηρισμό της άμμου ως χαλαρή ( $N_{60}=10$ ) και την άργιλο ως μέτρια υπερστερεοποιημένη, η κατηγορία εδάφους θεωρήθηκε συντηρητικά ότι είναι η D (Πίνακας 5), η οποία αντιστοιχεί σε συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης προ-ρευστοποίησης ίσο με 1.35. Λόγω της μη γραμμικότητας του εδάφους, για τον υπολογισμό των σταθερών των ελατηρίων και αποσβεστήρων, οι τιμές  $G_{max}$  και  $V_{s,max}$  πρέπει να απομειωθούν σε αυτές που ισχύουν κατά της διάρκειας της ισχυρής εδαφικής κίνησης που προκαλεί ένας σεισμός. Οι λόγοι απομείωσης της  $V_s$  και του μέτρου διάτμησης  $G$  μπορούν να εκτιμηθούν σύμφωνα με τον πίνακα 4.1 του EC8-Μέρος 5.

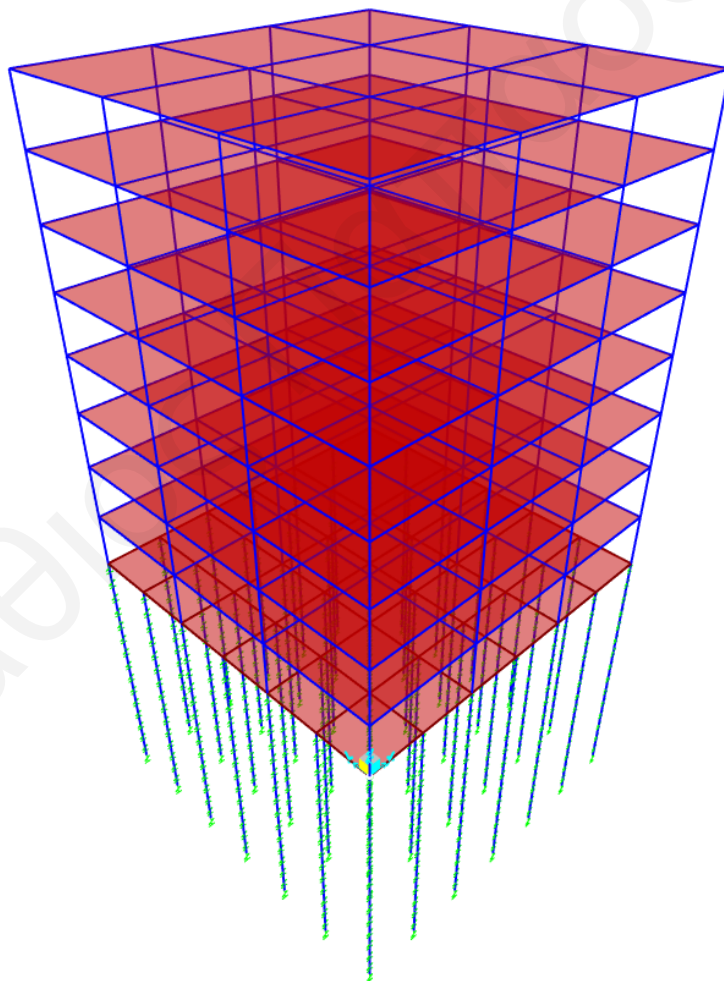
**Πίνακας 5:** Κατηγορίες εδαφών βάσει EC8.

Ground type	Description of stratigraphic profile	Parameters		
		$v_{s,30}$ (m/s)	$N_{SPPT}$ (blows/30cm)	$c_u$ (kPa)
A	Rock or other rock-like geological formation, including at most 5 m of weaker material at the surface.	> 800	–	–
B	Deposits of very dense sand, gravel, or very stiff clay, at least several tens of metres in thickness, characterised by a gradual increase of mechanical properties with depth.	360 – 800	> 50	> 250
C	Deep deposits of dense or medium-dense sand, gravel or stiff clay with thickness from several tens to many hundreds of metres.	180 – 360	15 - 50	70 - 250
D	Deposits of loose-to-medium cohesionless soil (with or without some soft cohesive layers), or of predominantly soft-to-firm cohesive soil.	< 180	< 15	< 70
E	A soil profile consisting of a surface alluvium layer with $v_s$ values of type C or D and thickness varying between about 5 m and 20 m, underlain by stiffer material with $v_s > 800$ m/s.			
$S_1$	Deposits consisting, or containing a layer at least 10 m thick, of soft clays/silts with a high plasticity index ( $PI > 40$ ) and high water content	< 100 (indicative)	–	10 - 20
$S_2$	Deposits of liquefiable soils, of sensitive clays, or any other soil profile not included in types A – E or $S_1$			

### 3.6. Διαδικασία Ανάλυσης

#### 3.6.1. Περιγραφή του προγράμματος ανάλυσης

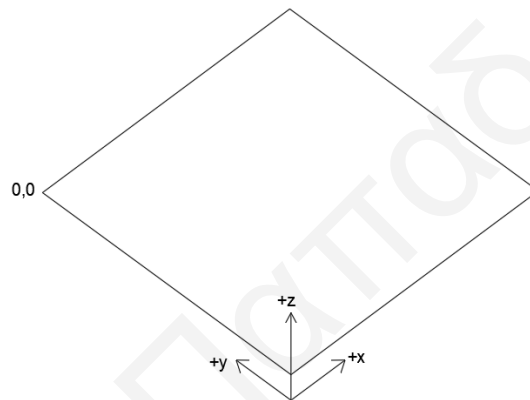
Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των φορέων ήταν το SAP2000. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα δομοστατικής ανάλυσης ικανό να αναλύσει κάθε είδους κατασκευή υπό ποικίλες συνθήκες φόρτισης. Για τους σκοπούς της διατριβής, η ανάλυση της εκάστοτε παραμετρικής ανάλυσης περιλάμβανε την μόρφωση του στατικού φορέα, την επιβολή μόνιμων και κινητών φορτίων σε πλάκες με διαφραγματική λειτουργία, τον ορισμό του φάσματος σχεδιασμού για την επιβολή σεισμικών φορτίων, και την εξαγωγή των εντατικών μεγεθών στους πασσάλους.



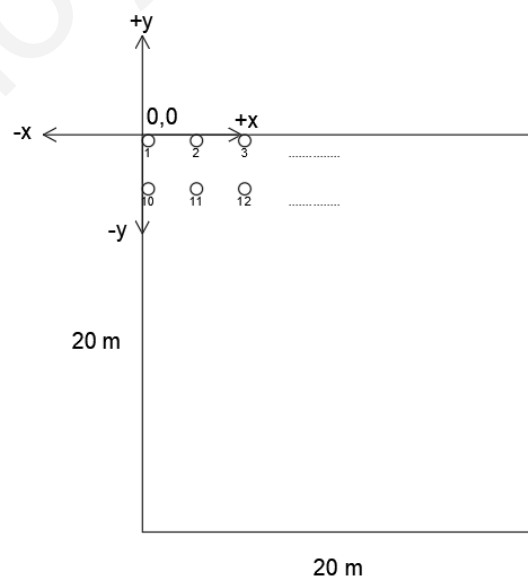
**Σχήμα 21:** Παράδειγμα μόρφωσης στατικού φορέα στο πρόγραμμα SAP2000.

### 3.6.2. Εισαγωγή δεδομένων κι εξαγωγή των αποτελεσμάτων

Οι παραμετρικές αναφέρονταν σε κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα με ύψος από 15m έως 36m, τα οποία θεμελιώνονται με φρεατοπασσάλους διαμέτρου από 0.6m έως 1.0m των οποίων οι κεφαλές δένονται με μια γενική κοιτόστρωση πάχους 1.5m εν είδη ενιαίου κεφαλόδεσμου (Σχήμα 21). Οι διαστάσεις των κτιρίων σε κάτοψη ήταν 20m×20m και ο αριθμός των πασσάλων μεταξύ των παραμετρικών κυμαίνετο από 16 (4×4) έως 81 (9×9). Στα Σχήματα 22 και 23 δίνονται κάποια στοιχεία σχετικά με το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων και την αρχή αρίθμησης των πασσάλων που χρησιμοποιήθηκαν. Η αρχή των αξόνων σε κάθε κάτοψη ορίστηκε στην πάνω και αριστερή γωνία της κάτοψης σε τρισδιάστατη απεικόνιση (Σχήμα 22).



Σχήμα 22: Σύστημα συντεταγμένων στις αναλύσεις.



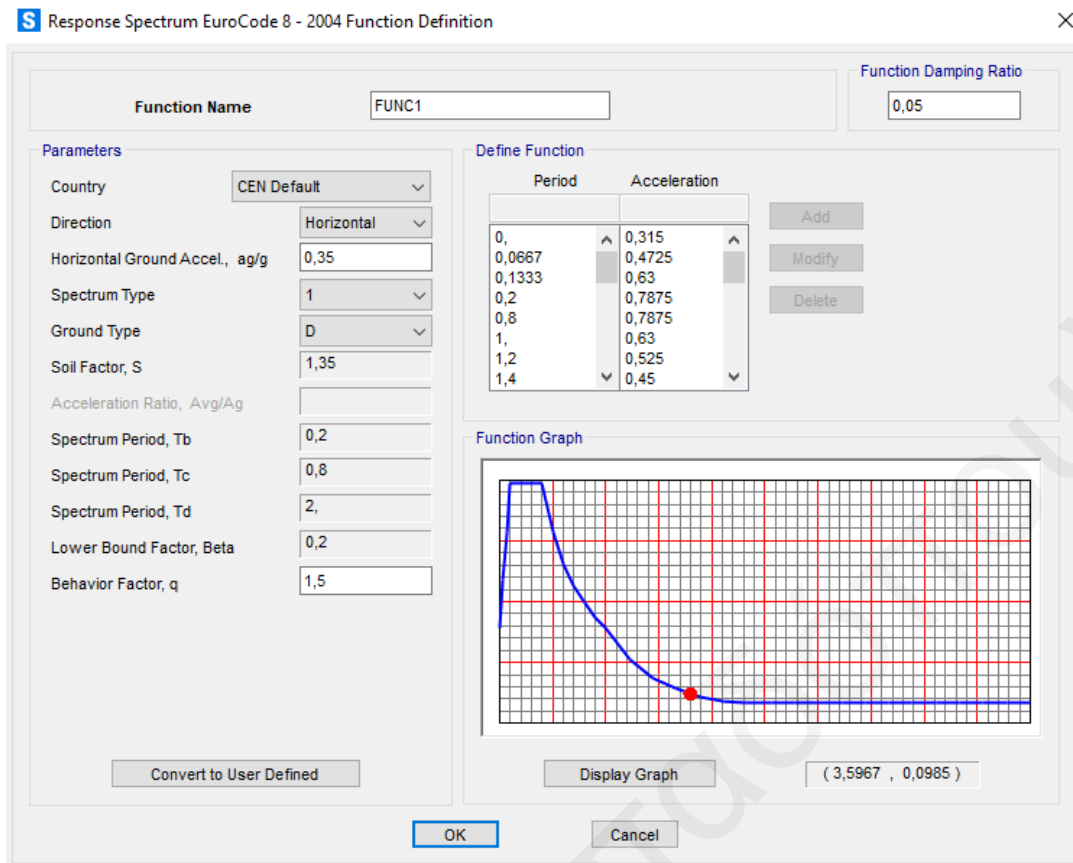
Σχήμα 23: Αρχή αρίθμησης πασσάλων στην κάτοψη.

Η φορά αρίθμησης των πασσάλων γίνεται κατά σειρά κατά μήκος του άξονα x με έναρξη την αρχή του συστήματος αξόνων. Μόλις εξαντληθεί η μια σειρά, συνεχίζει η επόμενη στην αμέσως μεγαλύτερη τιμή y (Σχήμα 23).

Όπως προαναφέρθηκε, οι διατομές των στοιχείων της ανωδομής ήταν τέτοιες ώστε η ιδιοπερίοδος των κτηρίων αν ήταν πακτωμένα (χωρίς πασσάλους) να είναι περίπου ίση με αυτή που προβλέπει ο τύπος του Ευρωκώδικα 8. Για την ανωδομή χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα C40/50 και για τους πασσάλους C30/37. Ο χάλυβας οπλισμού ήταν B500. Οι πλάκες των οροφών είχαν πάχος 0.17m. Η μάζα του κτιρίου μαζί με κάθε επιπλέον μάζα για τον σεισμικό υπολογισμό ορίσθηκε στο mass source του SAP2000 ως τα ίδια βάρη της ανωδομής σε συνδυασμό με τα κινητά (με τον συντελεστή 0.3) και τα μόνιμα καταναμημένα φορτία που επιβάλλονται στις πλάκες (Εικόνα 6). Στην Εικόνα 7 φαίνεται ο καθορισμός του φάσματος απόκρισης που εισήχθη στο SAP2000.

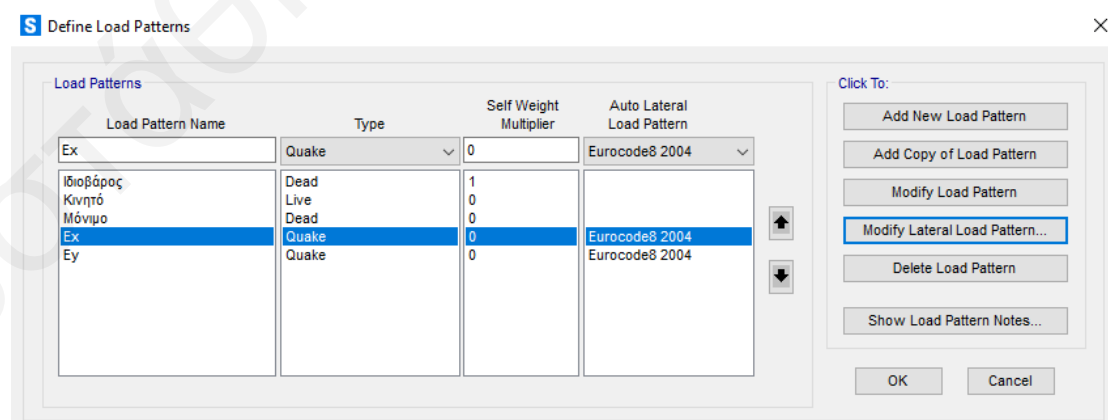
Load Pattern	Multiplier
Μόνιμο	1,
Κινητό	0,3

**Εικόνα 6:** Ορισμός μάζας προσομοιώματος.



**Εικόνα 7:** Ορισμός φάσματος απόκρισης στο SAP2000.

Τα φορτία που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν τα σεισμικά σε δύο διευθύνσεις  $E_x$  και  $E_y$ , το ίδιο βάρος της κατασκευής, και τα κατανεμημένα κινητό και μόνιμο (Εικόνα 8).



**Εικόνα 8:** Ορισμός φορτίσεων στο SAP2000.

Μετά την εισαγωγή των φορτίων, καθορίστηκε ο συνδυασμός δράσεων στο κτίριο με τους συντελεστές μείωσης στο κινητό φορτίο και στη σεισμική δράση  $E_y$  (Εικόνα 9).

**S** Load Combination Data

Load Combination Name (User-Generated)

Notes

Load Combination Type

Options

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Mode	Scale Factor
Ex	Response Spectrum		1,
Ex	Response Spectrum		1,
Ιδιοβάρος Μόνιμο	Linear Static		1,
Κινητό	Linear Static		0,3
Ey	Response Spectrum		0,3

**Εικόνα 9:** Ορισμός συνδυασμού φόρτισης.

Το έδαφος προσομοιώθηκε αποκλειστικά με ελατήρια Winkler και αποσβεστήρες που ορίζονται στο SAP2000 ως links node-to-ground τύπου linear, τα οποία τοποθετήθηκαν σε κάθε κόμβο των πασσάλων (Εικόνα 10). Οι κόμβοι απείχαν μεταξύ τους μια απόσταση  $\Delta L=1.0m$ . Οι ιδιότητες τους αφορούσαν μόνο στους τρεις μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας των κόμβων και όχι τους στρωφικούς (Εικόνα 11).

**S** Link/Support Property Data ×

Link/Support Type:    
 Property Name:  Set Default Name   
 Property Notes: Modify/Show...

**P-Delta Parameters**   
 Shear Couple   
 Equal End Moments   
 Advanced Modify/Show

**Total Mass and Weight**   
 Mass:    
 Weight:    
 Rotational Inertia 1:    
 Rotational Inertia 2:    
 Rotational Inertia 3:

**Factors For Line, Area and Solid Springs**   
 Property is Defined for This Length In a Line Spring:    
 Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs:

**Directional Properties**

Direction	Fixed	Properties	Direction	Fixed	Nonlinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<span>Modify/Show for All...</span>	<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>		

Fix All Clear All

**Stiffness Options**   
 Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases:    
 Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping:    
 Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor:

OK Cancel

**Εικόνα 10:** Επιλογή τύπου link για την προσομοίωση ελατηρίων και αποσβεστήρων.

**S** Linear Link/Support Directional Properties ×

Link/Support Name:

**Stiffness Values Used For All Load Cases**   
 Stiffness is Uncoupled   
 Stiffness is Coupled   
 U1:  U2:  U3:  R1:  R2:  R3:

**Damping Values Used For All Load Cases**   
 Damping is Uncoupled   
 Damping is Coupled   
 U1:  U2:  U3:  R1:  R2:  R3:

**Directional Control**   
 Direction Fixed   
 U1    
 U2    
 U3    
 R1    
 R2    
 R3

**Shear Distance from End J**   
 U2:    
 U3:

**Units**

OK Cancel

**Εικόνα 11:** Εισαγωγή τιμών σταθερών δυσκαμψίας και απόσβεσης.



Οι στηρίξεις ολόκληρου του προσομοιώματος κτιρίου είναι απλά τα ελατήρια εδάφους που συνδέονται στους κόμβους των πασσάλων. Η κοιτόστρωση θεωρείται ότι στηρίζεται πλήρως από τους πασσάλους και το έδαφος δεν ασκεί αντίδραση σε αυτή. Οπότε δεν χρειάστηκε ο καθορισμός συνοριακών συνθηκών με τη μορφή πακτώσεων, αρθρώσεων ή κυλίσεων. Οι πάσσαλοι δεν είχαν κάποια συνθήκη στήριξης στην κοιτόστρωση εφόσον προσομοιώθηκε το έδαφος με ελατήρια.

Τα κτίρια θεωρούνται ότι δεν έχουν υπόγειους ορόφους. Χάριν απλότητας και για ευκολία ερμηνείας των αποτελεσμάτων, η κοιτόστρωση θεωρείται ότι βρίσκεται στην επιφάνεια του εδαφικού προφίλ και ότι δεν είναι θαμμένη στο σύνολο του πάχους της, όπως αναμένεται να ισχύει στην πραγματικότητα.

Ως αποτελέσματα των αναλύσεων χρησιμοποιήθηκαν κυρίως οι τιμές των καμπτικών ροπών και των αξονικών δυνάμεων στους κόμβους τους πασσάλους, καθώς και της τέμνουσας στην κεφαλή των πασσάλων. Τα αποτελέσματα αυτά εξήχθησαν στο Excel στο οποίο έγινε και η ανάπτυξη της μεθοδολογίας για εύρεση των ποσοστών οπλισμού όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης των πασσάλων αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο, όπου γίνεται σύγκριση της διαστασιολόγησης χωρίς και με ρευστοποίηση στο στρώμα της άμμου, δηλαδή με ενεργά και απενεργοποιημένα τα links που αντιστοιχούν στο στρώμα της άμμο, αντίστοιχα.

### **3.7. Καθορισμός παραμετρικών αναλύσεων**

Το σετ παραμετρικών αναλύσεων περιλάμβανε 52 συνδυασμούς παραμέτρων που αφορούσαν τόσο τα εδαφικά χαρακτηριστικά όσο και τη διαμόρφωση της πασσαλοθεμελίωσης και της ανωδομής. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής σε κτίρια με 5, 8, και 12 ορόφους, με 16 (4×4), 25 (5×5), 49 (7×7), και 81 (9×9) πασσάλους σε κάτοψη οι οποίοι είχαν διάμετρο 0.6m, 0.8m, και 1m και μήκη 8m, 15m, 17m, και 25m. Οι αποστάσεις  $s_p$  μεταξύ των πασσάλων (spacing) είναι οι ίδιες και κατά τους δυο οριζόντιους άξονες. Σε όλες τις περιπτώσεις το  $s_p$  είναι μεγαλύτερο από τρεις φορές τη διάμετρο των πασσάλων.

Εξετάστηκαν τρεις στάθμες σεισμικής επιτάχυνσης 0.2g, 0.35g, και 0.50g σε κατηγορία εδάφους A ( $a_{gR}$ ), που αντιστοιχούν σε επιτάχυνση στην επιφάνεια του

εδάφους 0.27g, 0.47g και 0.68g. Εξετάσθηκαν δυο τύποι εδαφικών προφίλ, Α: στρώμα άμμου υπερκείμενο στρώμα αργίλου, και Β: στρώμα άμμου μεταξύ δυο στρωμάτων αργίλου. Αναλυτικά οι 52 παραμετρικές παρουσιάζονται Πίνακα 6.

**Πίνακας 6:** Κατάλογος παραμετρικών αναλύσεων.

a/a	D (m)	L (m)	Ύψος κτιρίου H (m)	a <sub>gR</sub> (g)	Πάχος πάνω στρώματος αργίλου h <sub>1</sub> (m)	Πάχος στρώματος άμμου h <sub>2</sub> (m)	Πλήθος πασσάλων N <sub>piles</sub>	FS <sub>v</sub>
1	0,8	15	24	0,35	2	6	49	2.11
2	0,6	15	24	0,35	2	6	49	1.40
3	1	15	24	0,35	2	6	25	1.44
4	0,8	25	24	0,35	2	6	16	1.15
5	0,8	15	15	0,35	2	6	25	1.47
6	0,8	15	36	0,35	2	6	49	1.47
7	0,8	15	24	0,2	2	6	49	2.00
8	0,8	15	24	0,5	2	6	49	2.00
9	0,8	15	24	0,35	0	6	49	2.00
10	0,8	15	24	0,35	5	6	49	2.00
11	0,8	15	24	0,35	2	3	25	1.33
12	0,8	15	24	0,35	2	10	49	1.31
13	0,6	15	24	0,35	0	6	49	1.40
14	1	15	24	0,35	0	6	25	1.43
15	0,6	15	24	0,35	5	6	49	1.40
16	1	15	24	0,35	5	6	25	1.40
17	0,6	15	24	0,35	2	3	49	1.77
18	1	15	24	0,35	2	3	25	1.77
19	0,6	15	24	0,35	2	10	81	1.58
20	1	15	24	0,35	2	10	49	1.85
21	0,8	8	24	0,35	2	3	49	1.35
22	0,8	25	24	0,35	2	3	16	1.32
23	0,8	25	24	0,35	2	10	25	1.62
24	0,8	15	24	0,2	0	6	49	1.89
25	0,8	15	24	0,2	5	6	49	1.89
26	0,8	15	24	0,5	0	6	49	1.89
27	0,8	15	24	0,5	5	6	49	1.89
28	0,6	25	24	0,35	2	6	25	1.41
29	0,6	10	24	0,35	0	6	81	1.39
30	0,6	25	24	0,35	0	6	25	1.42
31	1	25	24	0,35	2	6	16	1.54
32	1	8	24	0,35	0	6	49	1.24

Πίνακας 6 (συνέχεια).

a/a	D (m)	L (m)	Ύψος κτιρίου H (m)	a <sub>gR</sub> (g)	Πάχος πάνω στρώματος αργίλου h <sub>1</sub> (m)	Πάχος στρώματος άμμου h <sub>2</sub> (m)	Πλήθος πασσάλων N <sub>piles</sub>	FS <sub>v</sub>
33	1	25	24	0,35	0	6	16	1.60
34	0,6	15	24	0,5	2	10	81	1.61
35	1	15	24	0,5	2	10	49	1.85
36	0,6	17	36	0,5	2	10	81	1.51
37	1	15	36	0,5	2	10	49	1.37
38	0,6	15	24	0,5	0	10	81	1.58
39	0,6	17	36	0,5	0	10	81	1.32
40	0,6	25	24	0,5	0	10	49	2.14
41	0,6	25	36	0,5	0	10	49	1.57
42	0,6	25	24	0,5	5	10	49	2.11
43	0,6	25	36	0,5	5	10	49	1.57
44	1	15	24	0,5	0	10	49	1.85
45	1	15	36	0,5	0	10	49	1.37
46	1	25	24	0,5	0	10	16	1.27
47	1	25	36	0,5	0	10	25	1.56
48	1	25	24	0,5	5	10	16	1.27
49	1	25	36	0,5	5	10	25	1.56
50	0,6	15	24	0,5	0	3	49	1.77
51	0,6	25	24	0,5	0	3	25	1.64
52	0,6	25	24	0,5	5	3	25	1.64

Σε όλες τις αναλύσεις, το πλήθος των πασσάλων είναι μεγαλύτερο από ότι χρειάζεται για να στηρίξει το κτίριο μόνο με την αντίσταση που παρέχουν τα στρώματα αργίλου, δηλαδή κατά τη διάρκεια που η άμμος βρίσκεται σε καθεστώς ρευστοποίησης. Η αιχμή του πασσάλου σε όλες τις περιπτώσεις βρίσκεται εντός στρώματος αργίλου, με τη φέρουσα ικανότητα της Q<sub>bL</sub> να υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο (O'Neil & Reese, 1999):

$$Q_{bL} = 9s_u \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.34)$$

Εν τη απουσία αντίστασης από τη ρευστοποιημένη άμμο, η οριακή αντίσταση πλευρικής τριβής υπολογίζεται με βάση την “alpha method” ως εξής:

$$Q_{sL} = \alpha \cdot s_u (h_1 + h_3) \pi D \quad (3.35)$$

όπου  $\alpha=0.55$  δεδομένου ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου είναι μικρότερη από 150kPa (O'Neil & Reese, 1999). Η συνολική φέρουσα ικανότητα είναι απλά το άθροισμα των  $Q_{bL}$  και  $Q_{sL}$ :

$$Q_L = Q_{bL} + Q_{sL} \quad (3.36)$$

Σε όλες τις αναλύσεις, οι αποστάσεις  $s_p$  μεταξύ γειτονικών πασσάλων είναι μεγαλύτερες από τρεις φορές τη διάμετρο του πασσάλου. Επομένως, δεν υφίσταται θέμα αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων στην πασσαλομάδα σε ότι αφορά τη φέρουσα ικανότητα και η συνολική φέρουσα ικανότητα της πασσαλοθεμελίωσης είναι απλά η φέρουσα ικανότητα του ενός πασσάλου πολλαπλασιασμένη με το πλήθος των πασσάλων στην πασσαλομάδα ( $N \times Q_L$ ). Σύμφωνα με το ελλαδικό εθνικό προσάρτημα στον EC8, δεν απαιτείται η απομείωση της φέρουσας ικανότητας με μερικό συντελεστή ασφαλείας αντίστασης ( $\gamma_R=1$ ).

Ο συντελεστής ασφαλείας για τα κατακόρυφα φορτία  $FS_v$  κατά τη διάρκεια της ρευστοποίησης είναι:

$$FS_v = \frac{N \times Q_L}{\Sigma F_v} \quad (3.37)$$

όπου  $\Sigma F_v$  το σύνολο των κατακόρυφων φορτίων του κτιρίου. Οι τιμές  $FS_v$  που προκύπτουν φαίνονται στον Πίνακα 6 και κυμαίνονται από 1.15 σε 2.14, με μέση τιμή 1.6.

Αξίζει να σημειωθεί πληροφοριακά, ότι στα μισά περίπου από τα 52 μοντέλα, το πλήθος των πασσάλων είναι αρκετό για να στηρίξει πλήρως το κτίριο για τον κύριο στατικό συνδυασμό σχεδιασμού ULS (δηλαδή με προσαύξηση των μόνιμων και κινητών φορτίων κατά 1.35 και 1.5, αντίστοιχα, και με διαιρεμένη τη φέρουσα ικανότητα με συντελεστή αντίσταση  $\gamma_R$ ). Στα υπόλοιπα μοντέλα οι κατακόρυφες φορτίσεις σχεδιασμού υπερβαίνουν την κατακόρυφη αντίσταση σχεδιασμού των πασσάλων, που σημαίνει ότι σε αυτές τις περιπτώσεις, υπό στατικές συνθήκες οριακής κατάστασης αστοχίας (ULS), μέρος των φορτίων του κτιρίου θα αναλάβει να τα μεταφέρει στο έδαφος η κοιτόστρωση και η θεμελίωση θα λειτουργήσει ως πασσαλοκοιτόστρωση (piled raft).

## 4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων. Τα μέγιστα εντατικά μεγέθη (και από τις δυο φορές κίνησης) από τις αναλύσεις σεισμικής απόκρισης με τη φασματική μέθοδο (spectral response analysis) στο SAP2000, χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του απαιτούμενου διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού σύμφωνα με τις διατάξεις του EC2 που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2. Υπολογιστικά παραδείγματα υπολογισμού απαιτούμενου διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού δίνονται στο Παράρτημα I και Παράρτημα II αντίστοιχα. Στη συνέχεια, εντοπίστηκαν οι περιπτώσεις όπου απαιτείται πυκνότητα οπλισμού πέρα από τα συμβατικά ανεκτά όρια και εξετάστηκαν οι λόγοι που συμβαίνει αυτό, δηλαδή ποιες παράμετροι του προβλήματος είναι πιο πιθανό να οδηγήσουν σε αδυναμία όπλισης των πασσάλων.

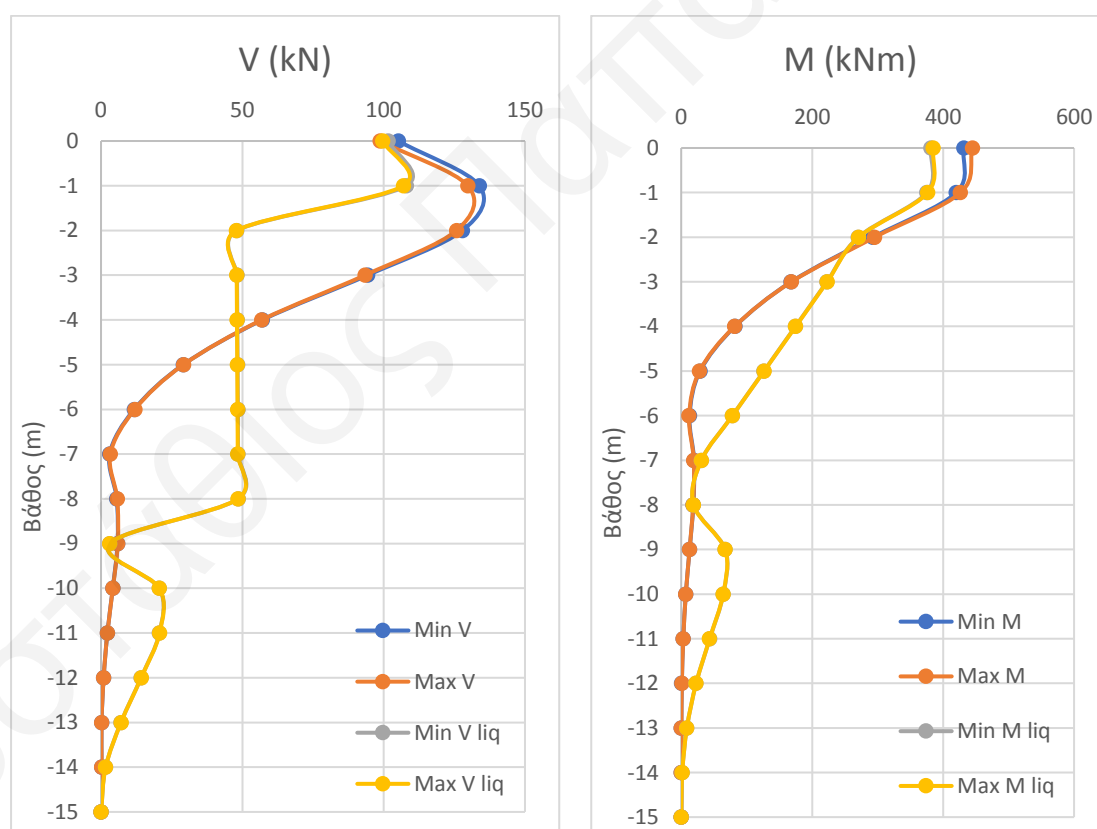
### 4.1. Διαγράμματα ροπών και διατμήσεων

Παρακάτω, παρουσιάζονται ενδεικτικά τα διαγράμματα ροπών και διατμήσεων για μερικές από παραμετρικές (Σχήματα 24 έως 28). Το σύνολο το διαγραμμάτων για όλη της σειρά παραμετρικών αναλύσεων παρατίθεται στο Παράρτημα IV. Τα σχήματα παρουσιάζουν τα διαγράμματα μέγιστων (κατά απόλυτη τιμή) εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται κατά το σεισμό για τους πλέον καταπονούμενους πασσάλους των πασσαλομάδων. Παρατηρούμε ότι χωρίς ρευστοποίηση τα μέγιστα εντατικά μεγέθη αναπτύσσονται κοντά στην κεφαλή του πασσάλου. Αυτό ισχύει και για τις τέμνουσες και για τις ροπές σε ένα εύρος από 0 έως 2m βάθος. Αντίθετα, στην περίπτωση που έχουμε ρευστοποίηση του στρώματος άμμου και απώλεια της αντίστασης που παρέχει, η μορφή των εντατικών διαγραμμάτων αλλάζει δραματικά.

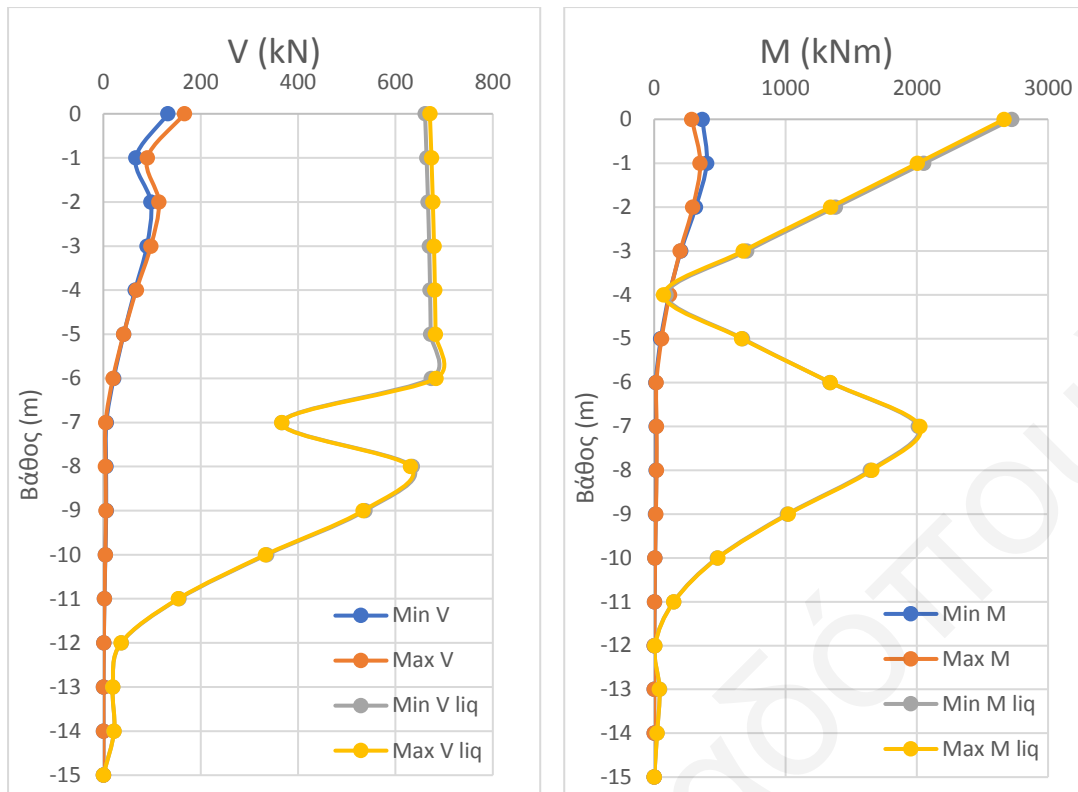
Κοινό χαρακτηριστικό των διαγραμμάτων τεμνουσών στην περίπτωση ρευστοποίησης είναι ότι στο εύρος βάθους του ρευστοποιημένου στρώματος, η τέμνουσα παραμένει σταθερή λόγω της απουσίας αντίδρασης από το έδαφος. Αντίστοιχα, στο ίδιο διάστημα βάθους και για τον ίδιο λόγο, η ροπή εμφανίζει γραμμική εξάρτηση με το βάθος. Στις παραμετρικές αναλύσεις 1 και 36 υπάρχει επιφανειακό στρώμα αργίλου πάχους 2m. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρέχεται ικανοποιητική αντίσταση στις κεφαλές των πασσάλων και, παρά τη ρευστοποίηση του υποκείμενου στρώματος άμμου, η μέγιστη

τέμνουσα και η μέγιστη ροπή παραμένουν περίπου στα ίδια επίπεδα με την περίπτωση που δεν ρευστοποιείται το στρώμα άμμου. Μάλιστα, στην περίπτωση της ρευστοποίησης, οι κορυφαίες (peak) τιμές τέμνουσας και ροπής είναι ελαφρώς μικρότερες χάρη στην αύξηση της ιδιοπεριόδου του συστήματος και την συνεπαγόμενη μείωση της φασματικής επιτάχυνσης.

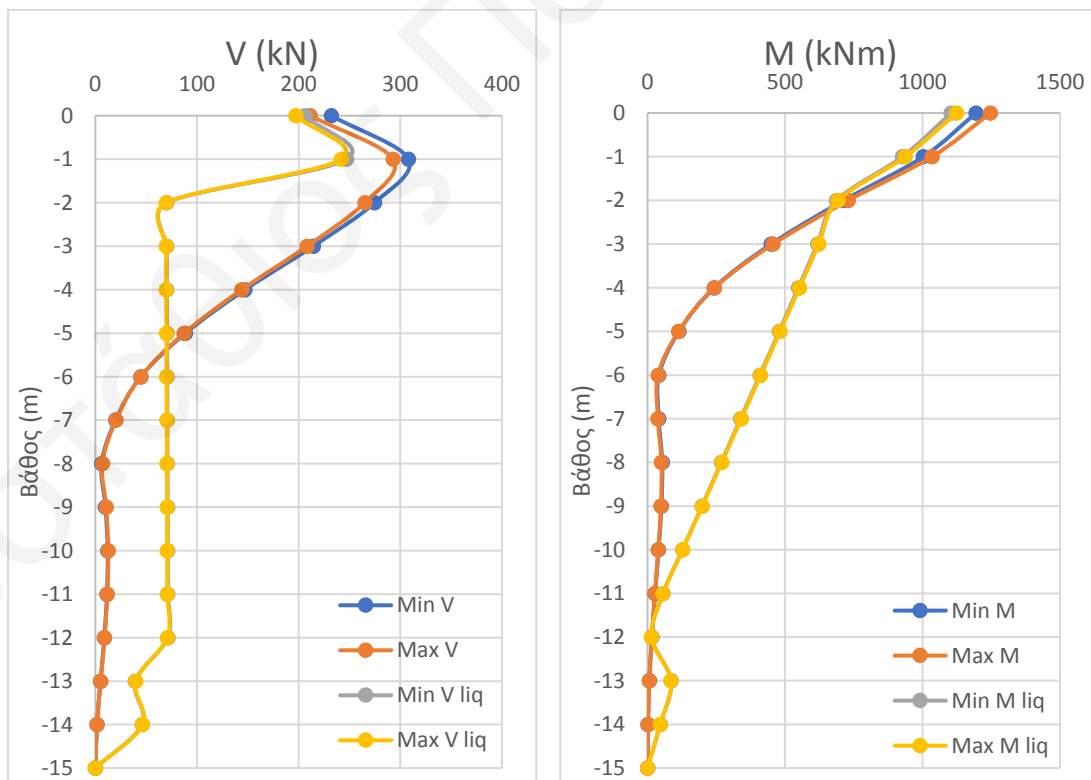
Στις αναλύσεις 9, 46 και 47, δεν υπάρχει επιφανειακό στρώμα αργίλου και οι κεφαλές των πασσάλων βρίσκονται εντός του ρευστοποιήσιμου στρώματος. Η απώλεια στήριξης στην περιοχή των κεφαλών έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση των κορυφαίων τιμών τέμνουσας και ροπής διότι καλείται ο πάσσαλος αποκλειστικά να μεταφέρει τα φορτία από την ανωδομή στο υποκείμενο στρώμα αργίλου. Ειδικά στην περίπτωση της ανάλυσης 9, η αύξηση είναι δραματική, με περίπου τριπλασιασμό της τέμνουσας στην κεφαλή του πασσάλου και εξαπλασιασμό της αντίστοιχης καμπτικής ροπής. Η αύξηση δεν είναι τόσο μεγάλη για τις αναλύσεις 46 και 47 χάρη στη μεγάλη διάμετρο των πασσάλων, δηλαδή 1m έναντι 0.6 της ανάλυσης 9.



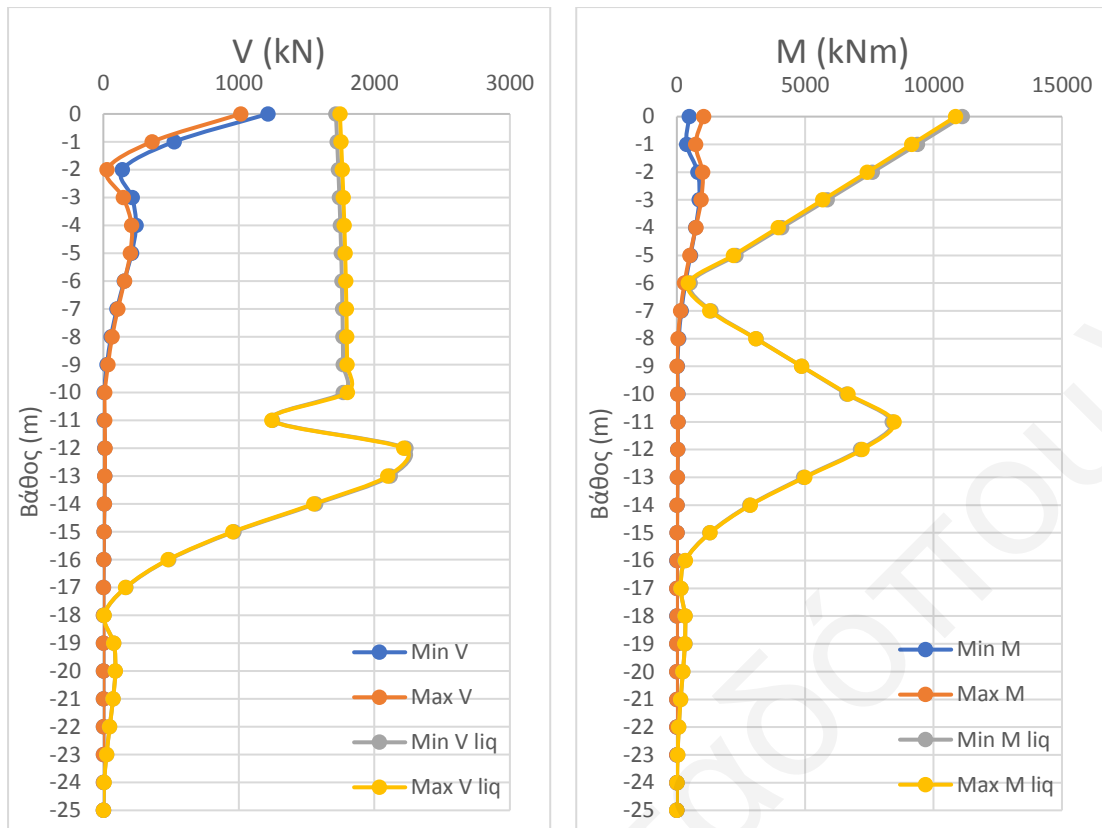
**Σχήμα 24:** Διαγράμματα ροπών και τεμνουσών από ανάλυση 1.



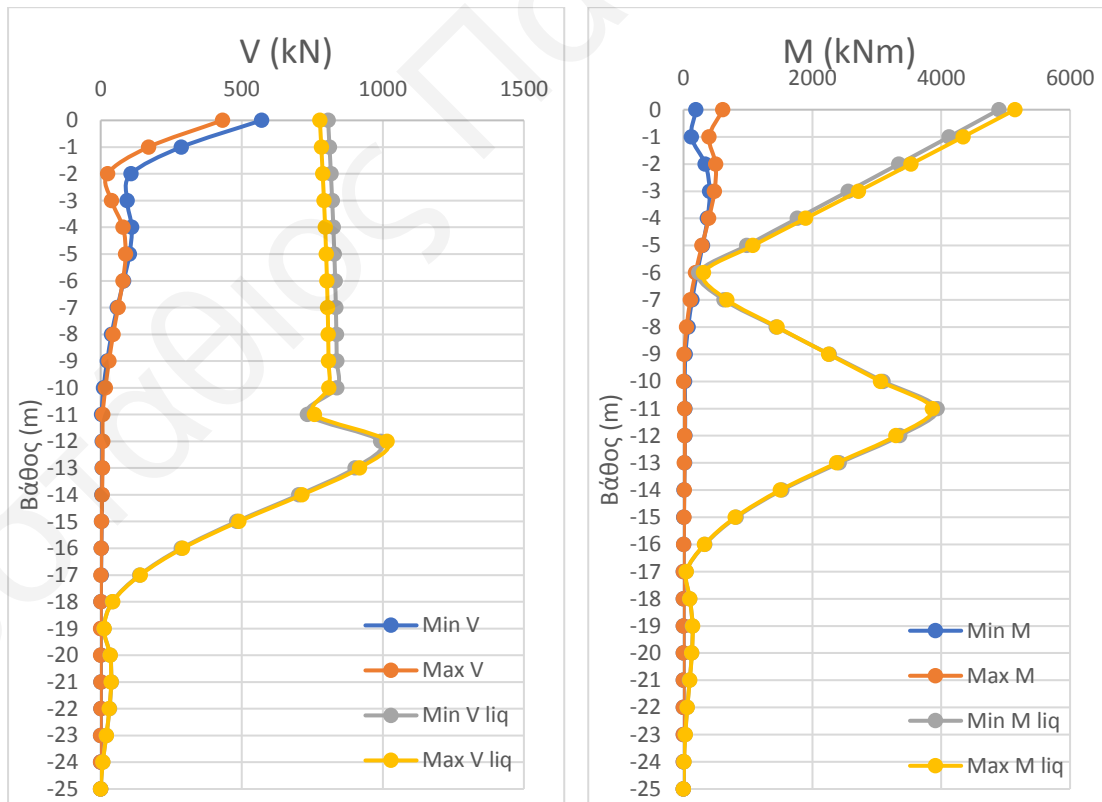
Σχήμα 25: Διαγράμματα ροπών και τεμνουσών από ανάλυση 9.



Σχήμα 26: Διαγράμματα ροπών και τεμνουσών από ανάλυση 36.



Σχήμα 27: Διαγράμματα ροπών και τεμνουσών από ανάλυση 46.

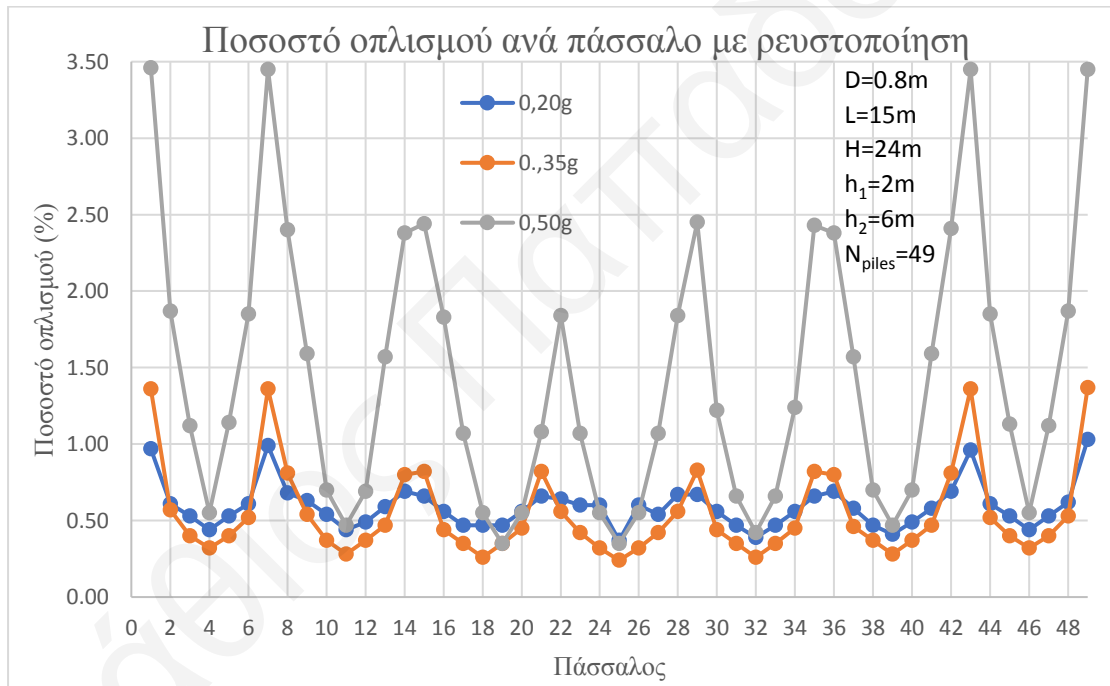
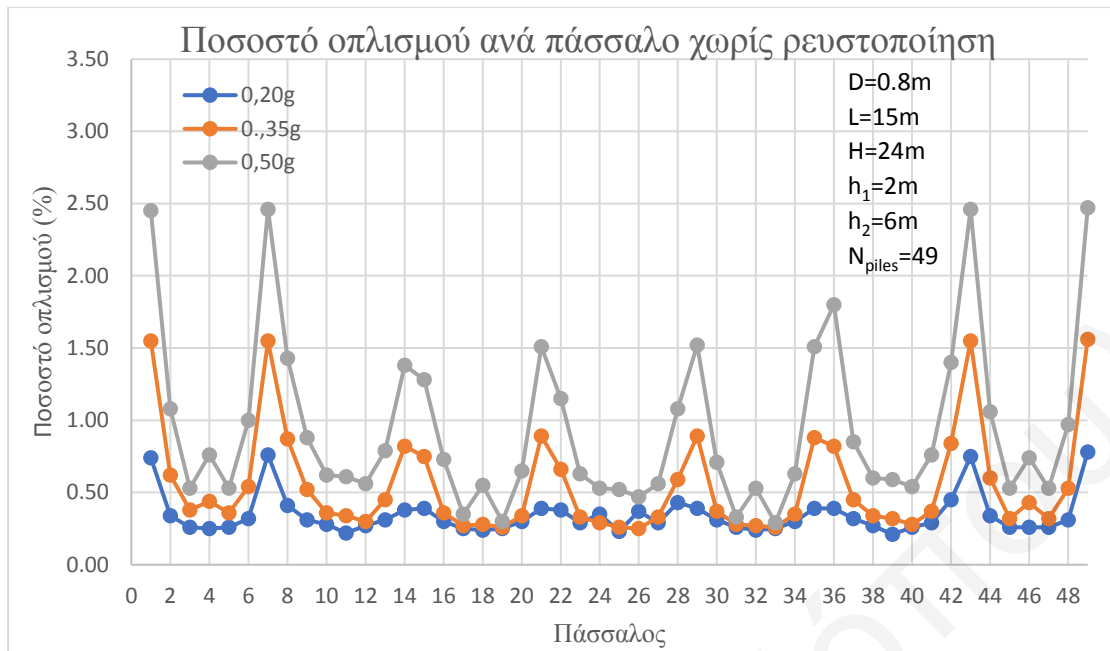


Σχήμα 28: Διαγράμματα ροπών και τεμνουσών από ανάλυση 47.

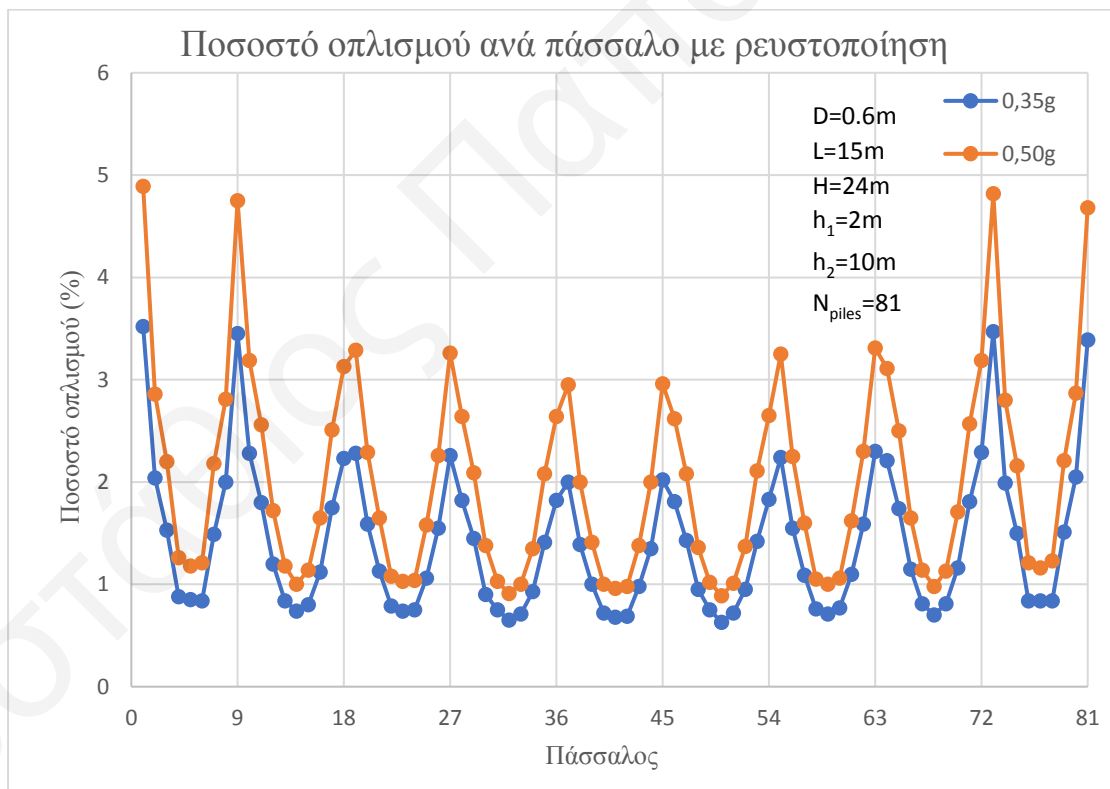
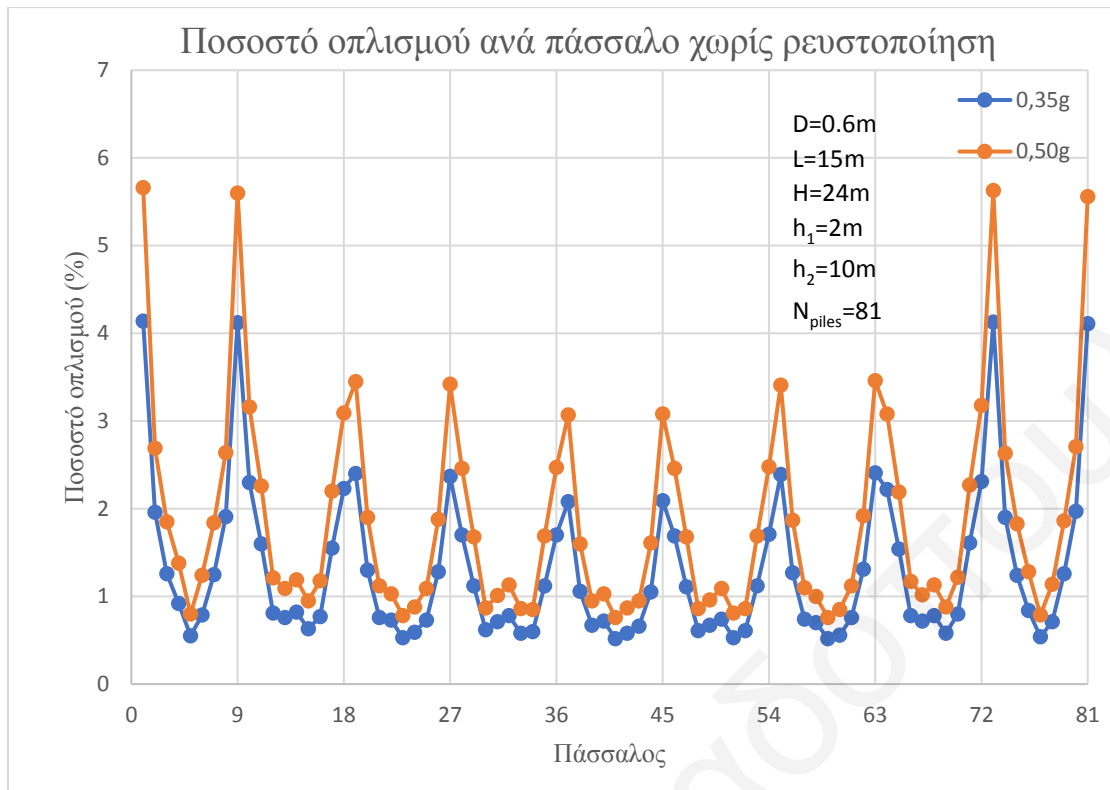


#### 4.2. Ποσοστό διαμήκους οπλισμού

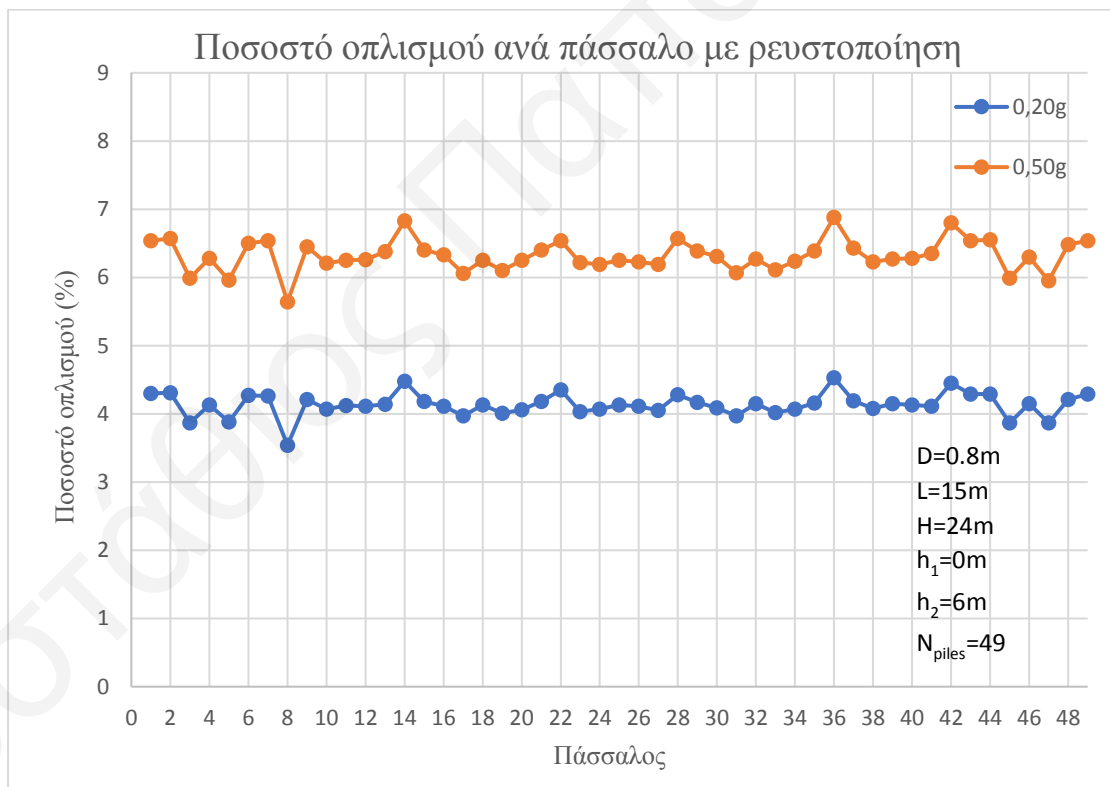
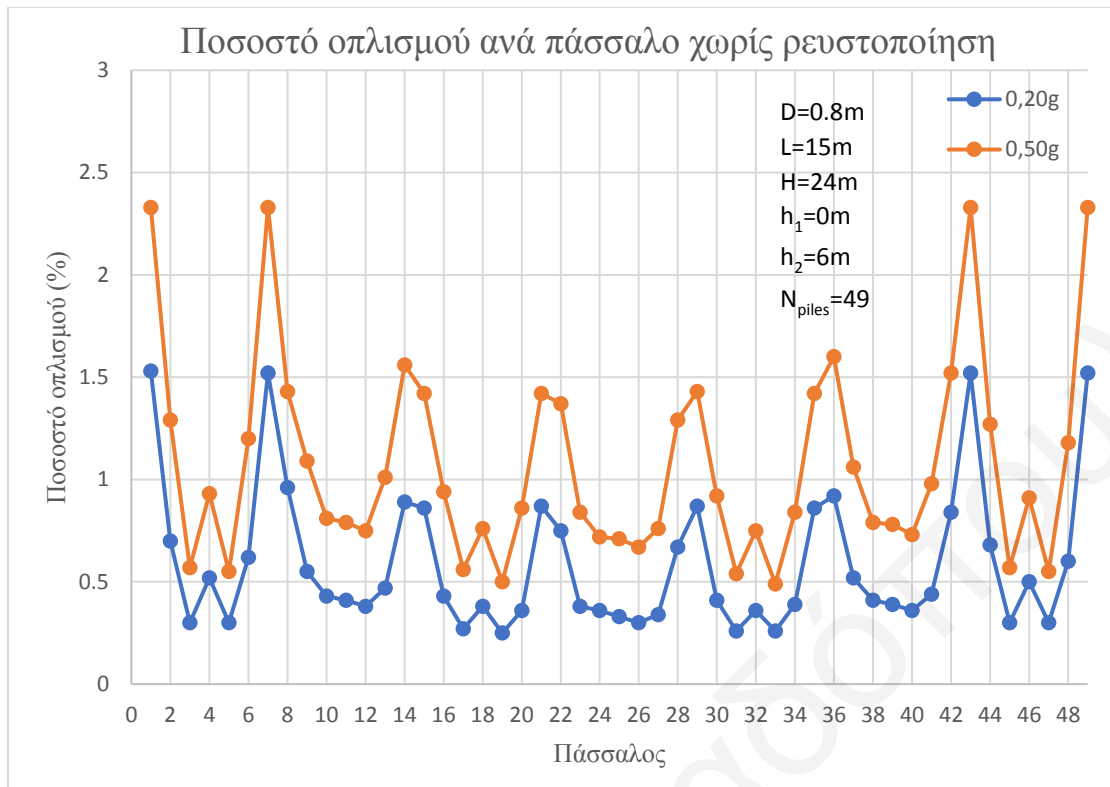
Στα Σχήματα 29 έως 33 δίνονται οι τιμές του απαιτούμενου διαμήκους οπλισμού στη δυσμενέστερη διατομή του κάθε πασσάλου στην πασσαλομάδα, για επιλεγμένες περιπτώσεις (αναλύσεις 1-7-8, 19-34, 24-26, 25-27, και 20-35). Όπως ήταν αναμενόμενο, σε όλες τις αναλύσεις ισχύει ότι οι πλέον καταπονούμενοι πάσσαλοι είναι γωνιακοί. Το Σχήμα 29 περιλαμβάνει αποτελέσματα αναλύσεων που έχουν διαφορετικές τιμές σεισμικής επιτάχυνσης εδάφους ενώ έχουν όλες τις άλλες παραμέτρους κοινές. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μια σαφής εξάρτηση του απαιτούμενου ποσοστού διαμήκους οπλισμού  $\rho$  από την επιτάχυνση όταν δεν υπάρχει ρευστοποίηση. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η επιτάχυνση σχεδιασμού, τόσο αυξάνεται το  $\rho$  σχεδόν σε όλους τους πασσάλους στη πασσαλομάδα. Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται από τα υπόλοιπα σχήματα με αναλύσεις με διαφορετικά σετ χαρακτηριστικών. Παρουσία ρευστοποίησης, η εξάρτηση είναι πιο μη γραμμική. Υπάρχει έντονη αύξηση του  $\rho$  για 0.5g, αλλά για 0.35g άλλοι πάσσαλοι εμφανίζουν αυξημένη απαίτηση σε οπλισμό και άλλοι μειωμένη σε σύγκριση με την ανάλυση με την μικρότερη επιτάχυνση (0.2g).



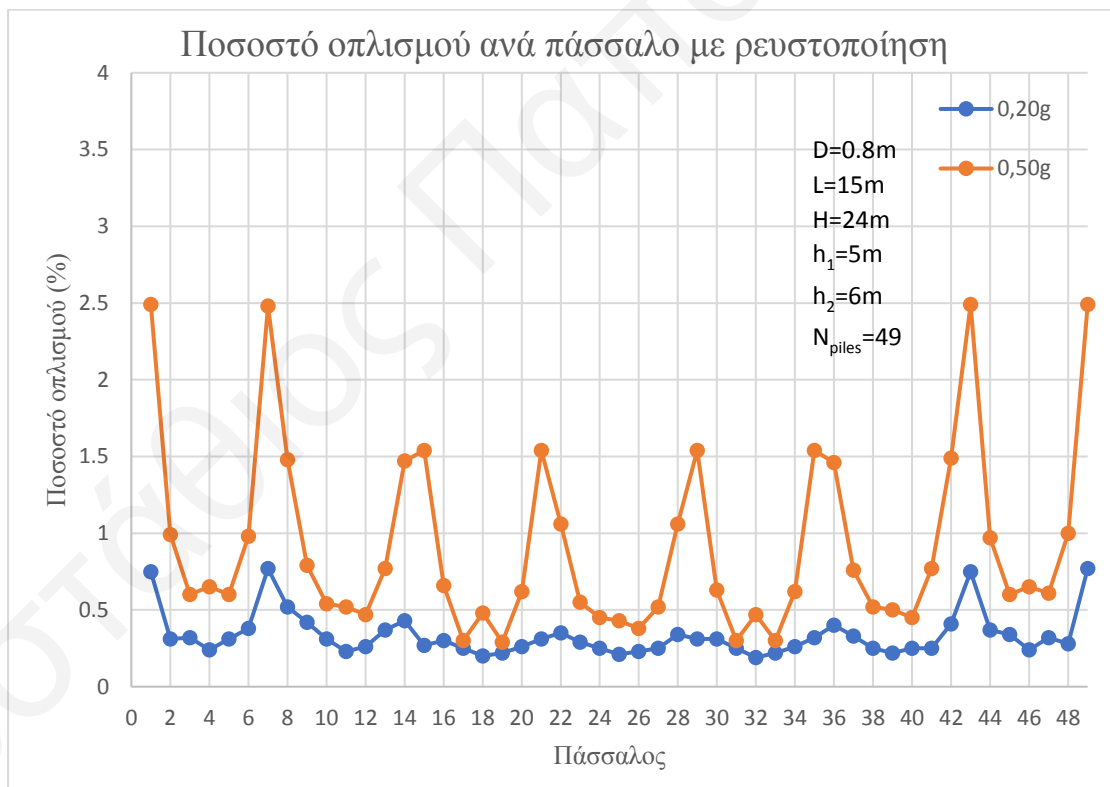
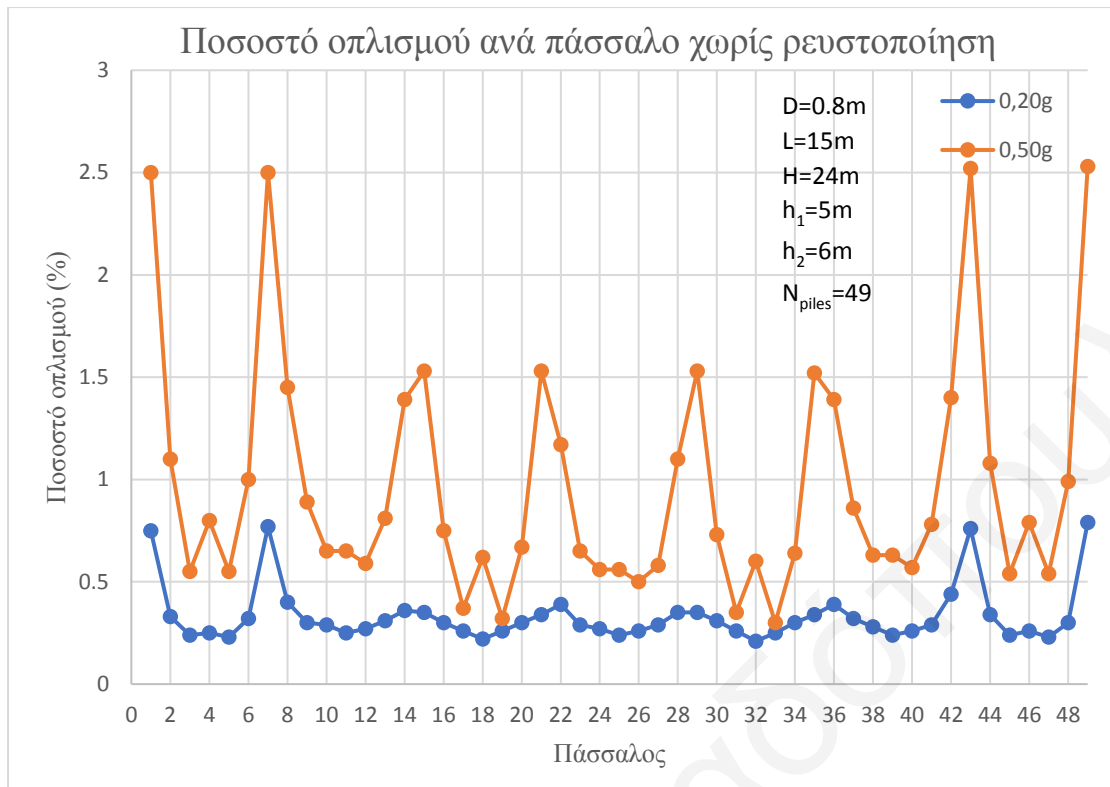
**Σχήμα 29:** Μέγιστο απαιτούμενο ποσοστό διαμήκους οπλισμού ανά πάσσαλο από παραμετρικές αναλύσεις 1,7 και 8.



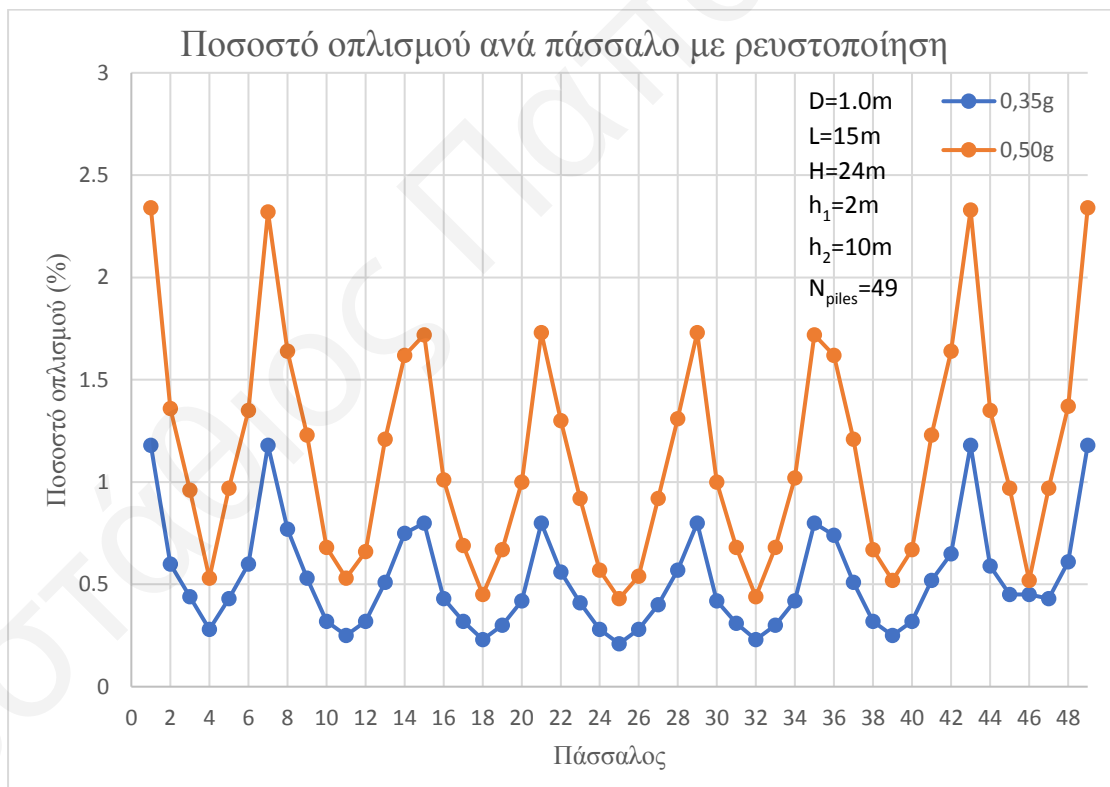
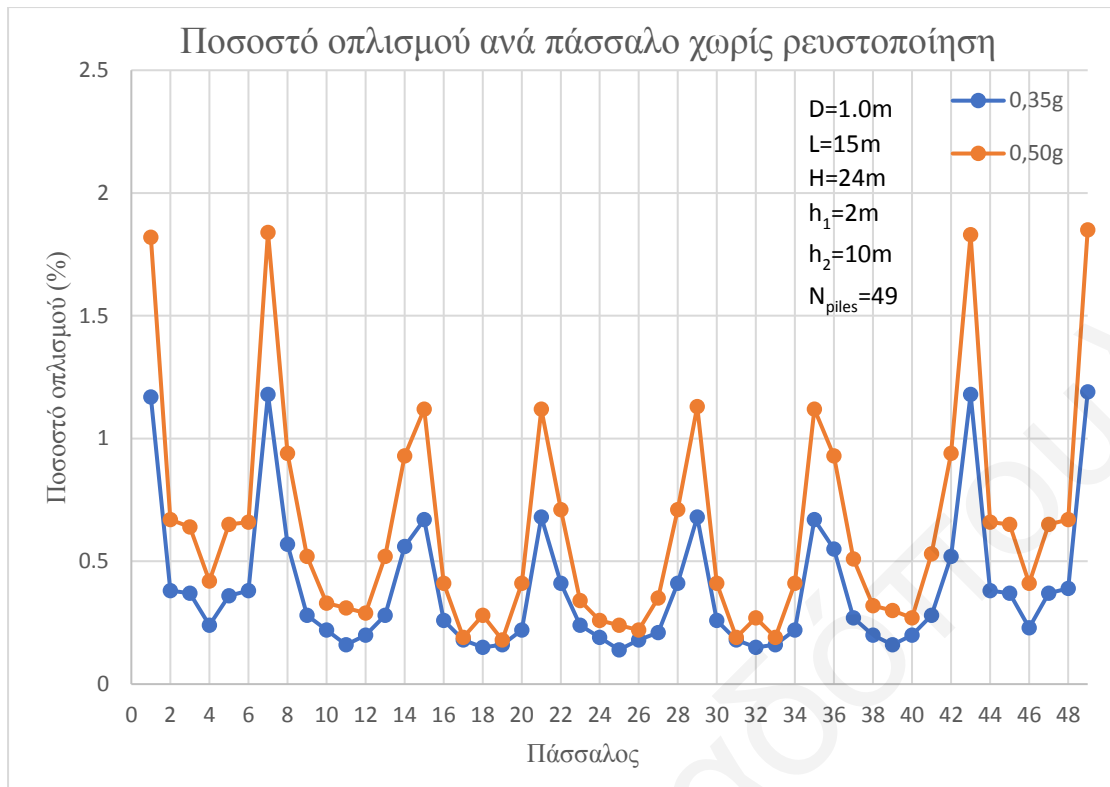
**Σχήμα 30:** Μέγιστο απαιτούμενο ποσοστό διαμήκους οπλισμού ανά πάσσαλο από παραμετρικές αναλύσεις 19 και 34.



**Σχήμα 31:** Μέγιστο απαιτούμενο ποσοστό διαμήκους οπλισμού ανά πάσσαλο από παραμετρικές αναλύσεις 24 και 26.



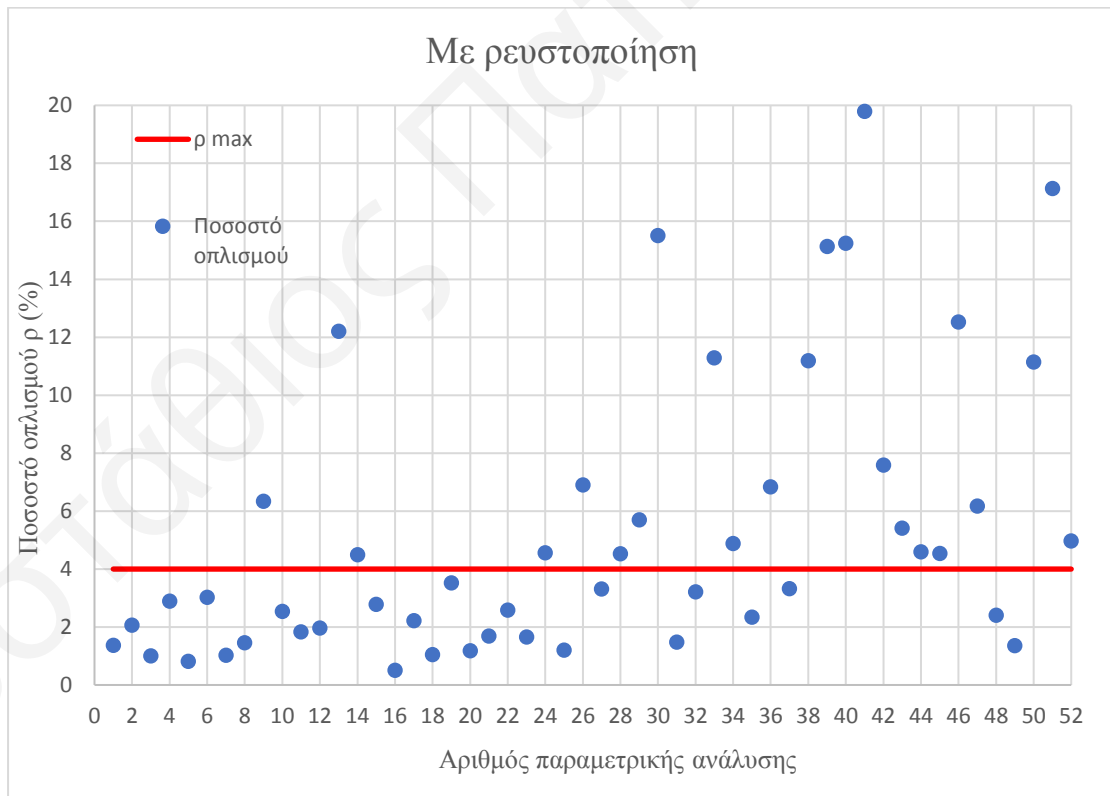
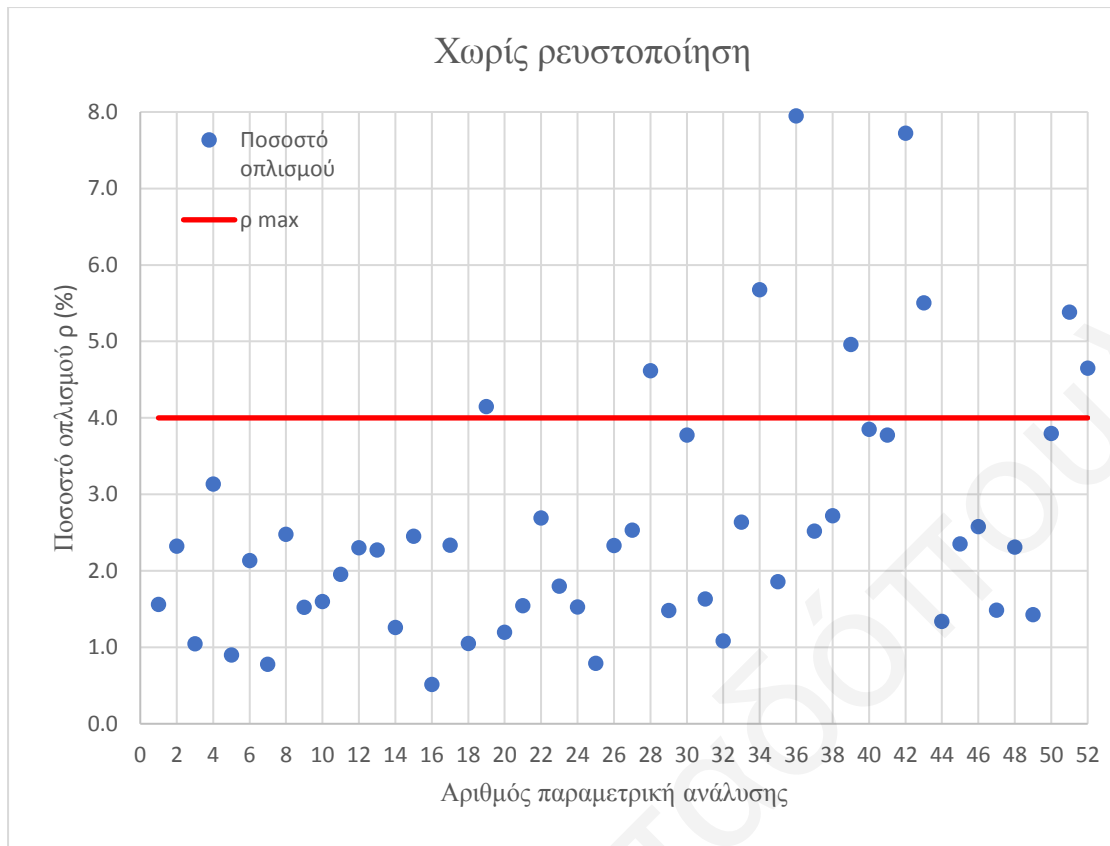
**Σχήμα 32:** Μέγιστο απαιτούμενο ποσοστό διαμήκους οπλισμού ανά πάσσαλο από παραμετρικές αναλύσεις 25 και 27.



**Σχήμα 33:** Μέγιστο απαιτούμενο ποσοστό διαμήκους οπλισμού ανά πάσσαλο από παραμετρικές αναλύσεις 20 και 35.

Στο Σχήμα 34 δίνονται οι τιμές ποσοστού οπλισμού στη πιο δυσμενή διατομή του πλέον καταπονούμενου πασσάλου για κάθε μια από τις 52 παραμετρικές αναλύσεις εν τη απουσία ρευστοποίησης (δηλαδή τα ελατήρια για το στρώμα άμμου έχουν μη μηδενική δυσκαμψία). Παρατηρούμε ότι στις περισσότερες αναλύσεις δεν υπάρχει υπέρβαση του ορίου του 4% ποσοστού διαμήκους οπλισμού. Εξετάζοντας τις παραμετρικές αναλύσεις όπου έχουμε υπέρβαση του ορίου (9 από το σύνολο των 52), διαπιστώνεται ότι αυτές αφορούν αποκλειστικά πασσάλους με διάμετρο 0.6m. Αυτό σημαίνει ότι, παρόλο που ο γεωτεχνικός σχεδιασμός της κατασκευής χωρίς ρευστοποίηση είναι επαρκής, η πασσαλοθεμελίωση είναι ανεπαρκής δομοστατικά. Με ρευστοποίηση, οι αναλύσεις που δίνουν απαιτούμενο ποσοστό οπλισμού μεγαλύτερο από 4% είναι πολύ περισσότερες, σχεδόν οι μισές (24 από τις 52).

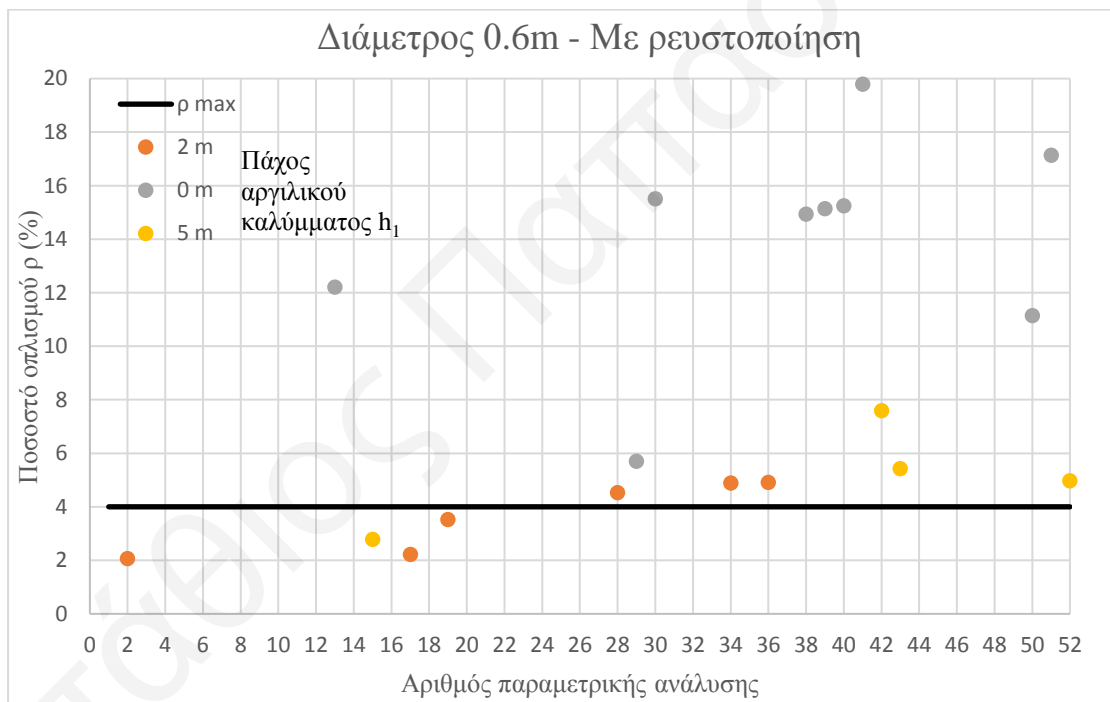
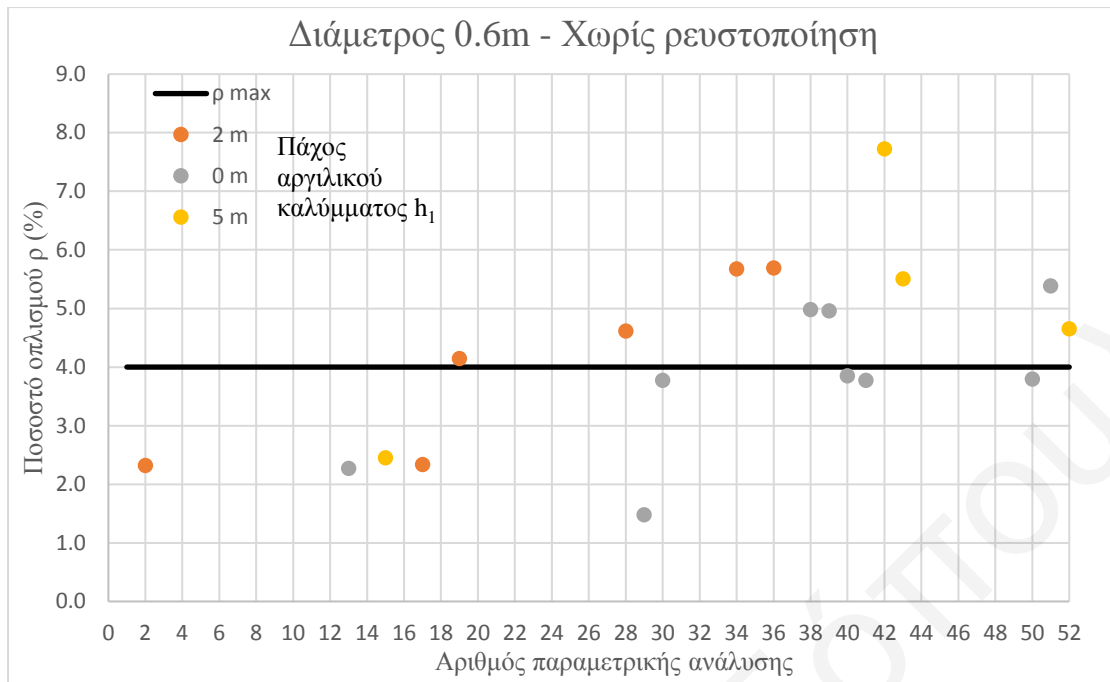
Τα αποτελέσματα χωρίς ρευστοποίηση είναι ανεξάρτητα της σεισμικής επιτάχυνσης, του αριθμού των πασσάλων, και των εδαφικών προφίλ όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα. Χωρίς ρευστοποίηση, 9 παραμετρικές δεν διαστασιολογούνται αφού παρουσιάζουν ποσοστό οπλισμού άνω του 4%. Κατά τη ρευστοποίηση, η συμπεριφορά της κατασκευής παρουσίασε εξαιρετικό ενδιαφέρον. Η διάμετρος, αν και πάλι ήταν η κύρια παράμετρος, δεν ήταν ανεξάρτητη των υπόλοιπων μεταβλητών που προαναφέρθηκαν. Στη ρευστοποίηση, μελετήθηκε και ο λυγισμός ο οποίος εξαρτώνταν τόσο από τη διάμετρο όσο και από το πάχος του ρευστοποιήσιμου στρώματος το οποίο επηρέαζε το ελεύθερο ύψος του πασσάλου. Από τις 52 παραμετρικές, οι 42 βγήκαν λυγερές. Από αυτές, οι 19 ήταν ικανές για διαστασιολόγηση κυρίως λόγω του μεγάλου πάχους του πρώτου αργιλικού στρώματος ή/και της μεγάλης διαμέτρου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα. Σε αυτή την περίπτωση, η αδυναμία όπλισης δεν αφορά αποκλειστικά αναλύσεις με μικρή διάμετρο πασσάλου. Σε 6 μάλιστα αναλύσεις η διάμετρος πασσάλου είναι 1m. Ο κοινός, μεταξύ των αναλύσεων, λόγος που ακόμη και μεγάλης διαμέτρου πάσσαλοι δεν μπορούν να οπλιστούν είναι ότι το στρώμα ρευστοποιημένης άμμου είναι επιφανειακό, δηλαδή απουσιάζει το αργιλικό κάλυμμα ( $h_1=0$ ). Σε αυτές τις περιπτώσεις, το ανώτερο μέρος των πασσάλων είναι αστήρικτο κατά τη ρευστοποίηση και καλείται να λειτουργήσει ως ένα υπόγειο υποστύλωμα με ύψος όσο το ρευστοποιημένο στρώμα (π.χ. 6m ή 10m), με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται στον πάσσαλο μεγάλες καμπτικές ροπές.



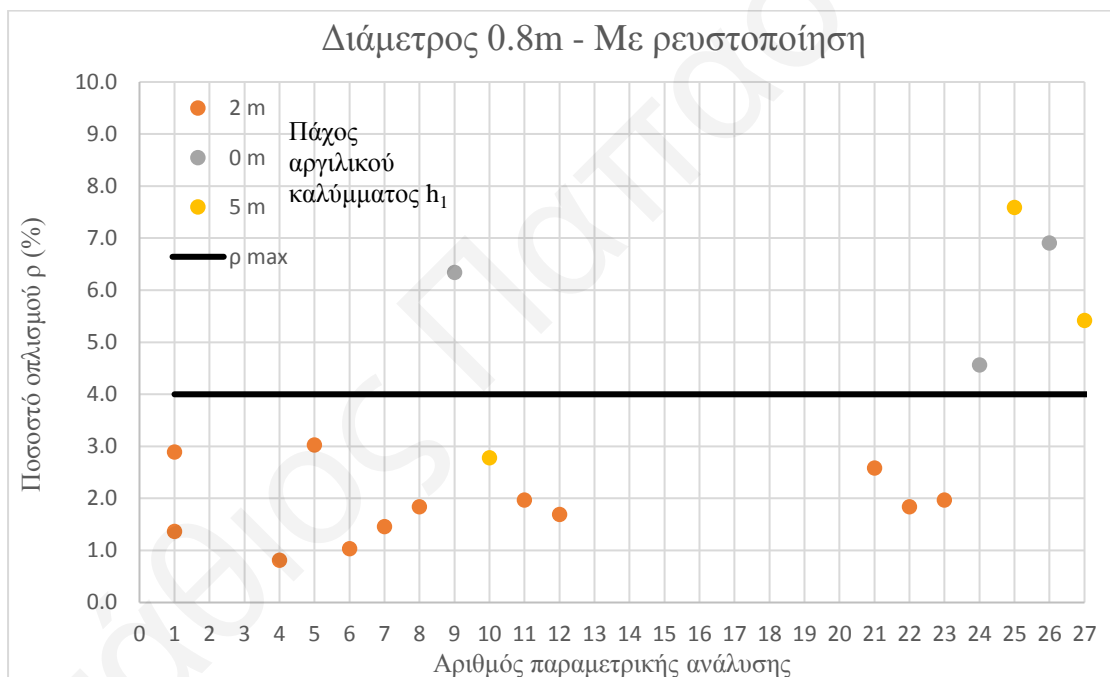
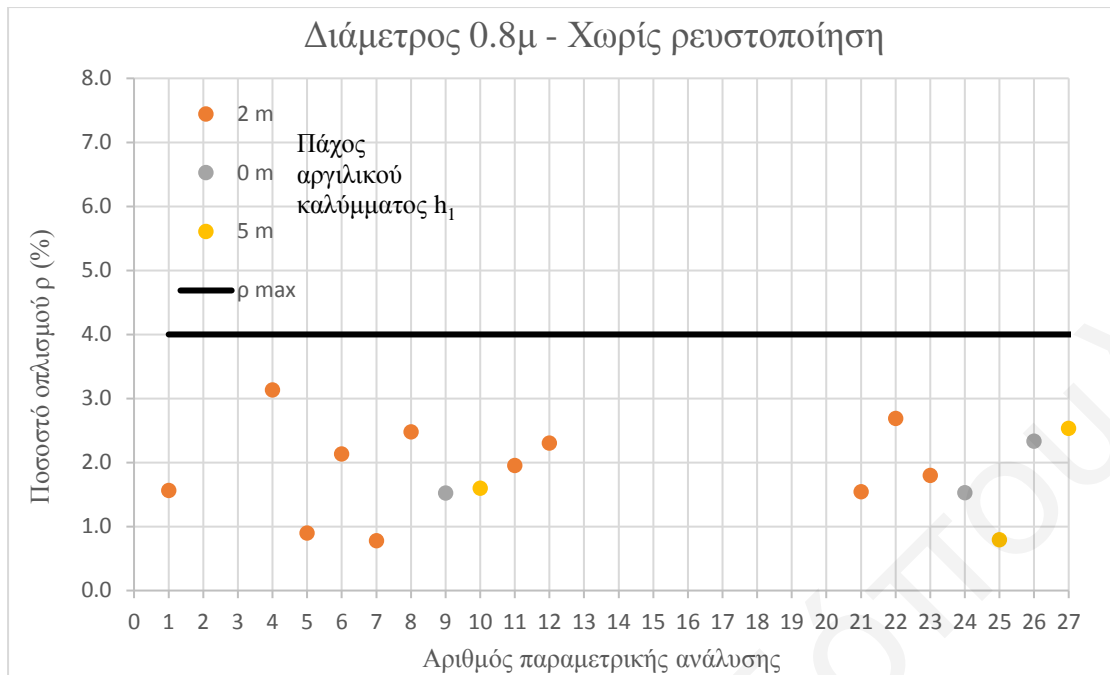
**Σχήμα 34:** Μέγιστο απαιτούμενο ποσοστό διαμήκους σπλισμού στον πλέον καταπονούμενο πάσσαλο της πασσαλομάδας.



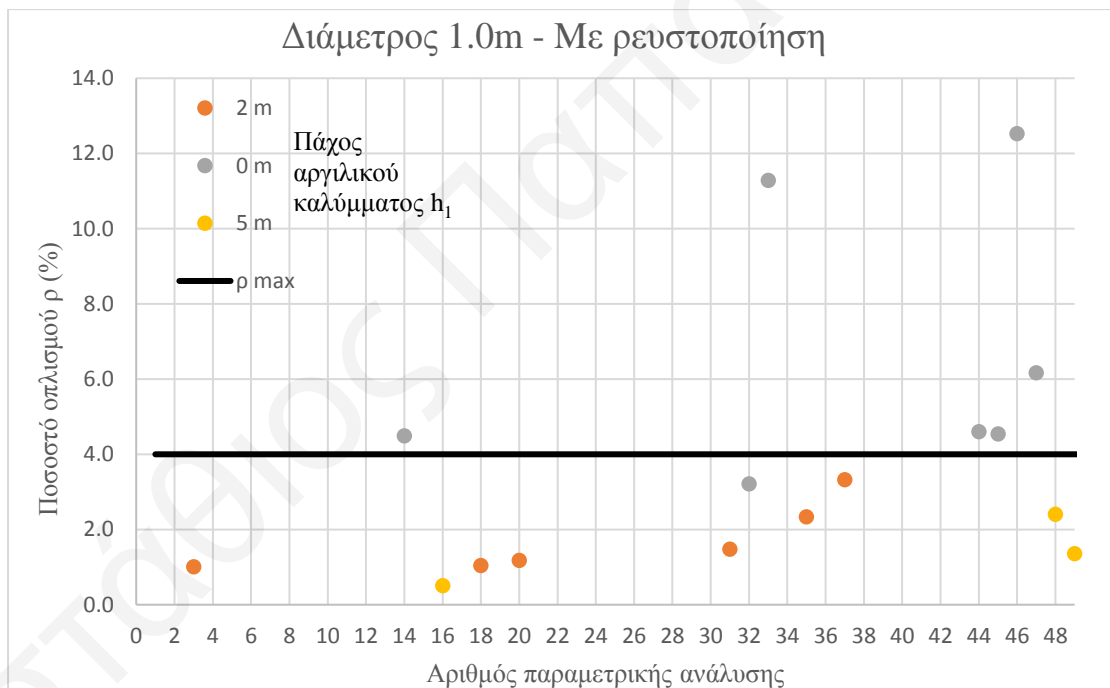
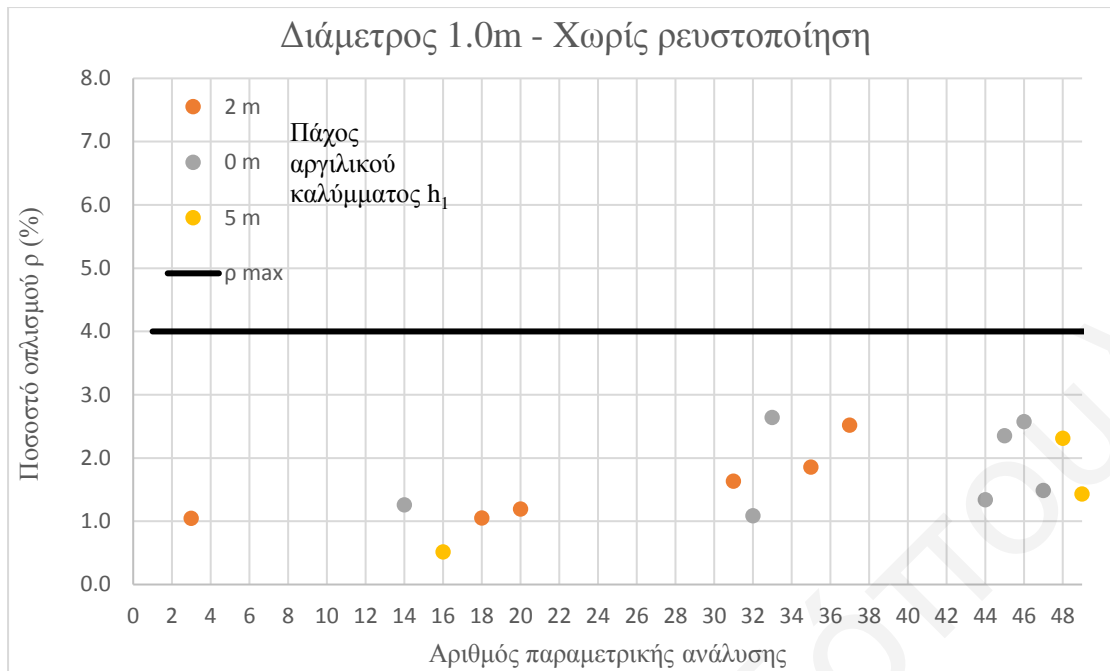
Το Σχήμα 35 που ακολουθεί δείχνει την επιρροή του πάχους  $h_1$  όταν οι πάσσαλοι είναι μικρής διαμέτρου ( $D=0.6m$ ). Χωρίς ρευστοποίηση δεν υπάρχει σαφής επίδραση του πάχους της υπερκείμενης αργίλου. Μάλιστα, φαίνεται ότι η παρουσία της αργίλου δρα δυσμενώς, αφού για τις αναλύσεις με αύξων αριθμό 25 και πάνω, το να είναι το  $h_1=0$  (απουσία αργιλικού καλύμματος) οδηγεί σε μάλλον μικρότερα ποσοστά απαιτούμενου οπλισμού. Αντίθετα, όταν το στρώμα άμμου είναι ρευστοποιημένο όλες οι αναλύσεις με  $h_1=0$  δίνουν  $\rho > 4\%$  ενώ οι αναλύσεις με  $h_1 = 2m$  ή  $5m$  δίνουν  $\rho$  στα ίδια επίπεδα με την περίπτωση της απουσίας ρευστοποίησης. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει για τις αναλύσεις με  $D=0.8m$  και  $D=1m$  (Σχήματα 36 και 37), μόνο που σε αυτή την περίπτωση η υπέρβαση του ορίου 4% είναι σαφώς μικρότερη χάρη στα σχετικώς μεγαλύτερα περιθώρια όπλισης που προσφέρει η μεγαλύτερη διάμετρος. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι σε αντίθεση με τις αναλύσεις με  $D=0.6m$ , όλοι οι πάσσαλοι με  $D=0.8m$  και  $D=1m$  δύναται να οπλισθούν ( $\rho < 4\%$ ) όταν δεν συμβαίνει ρευστοποίηση.



**Σχήμα 35:** Επίδραση πάχους αργιλικού καλύμματος στον απαιτούμενο διαμήκη οπλισμό πασσάλων διαμέτρου 0.6m.



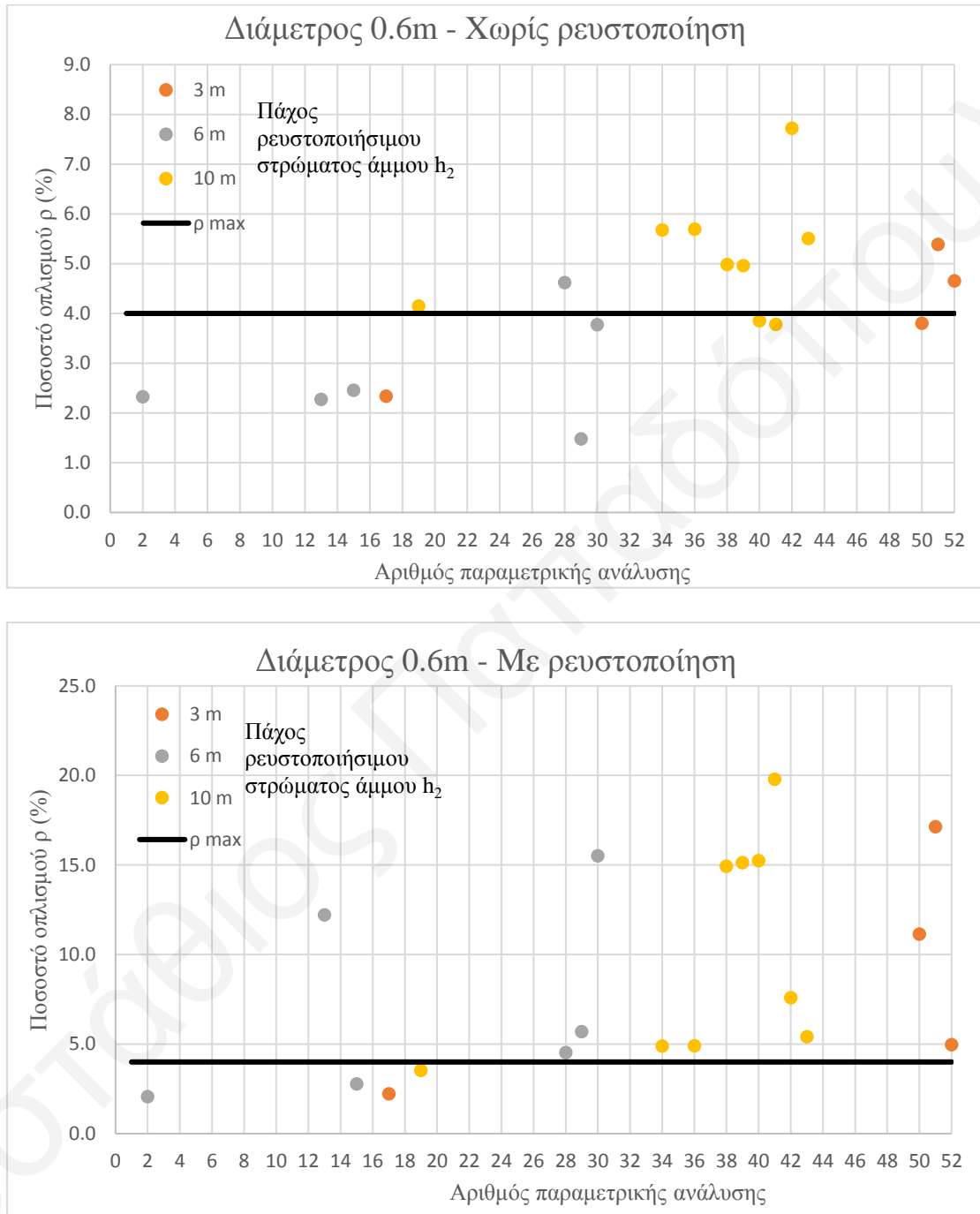
**Σχήμα 36:** Επίδραση πάχους αργιλικού καλύμματος στον απαιτούμενο διαμήκη σπλισμό πασσάλων διαμέτρου 0.8m.



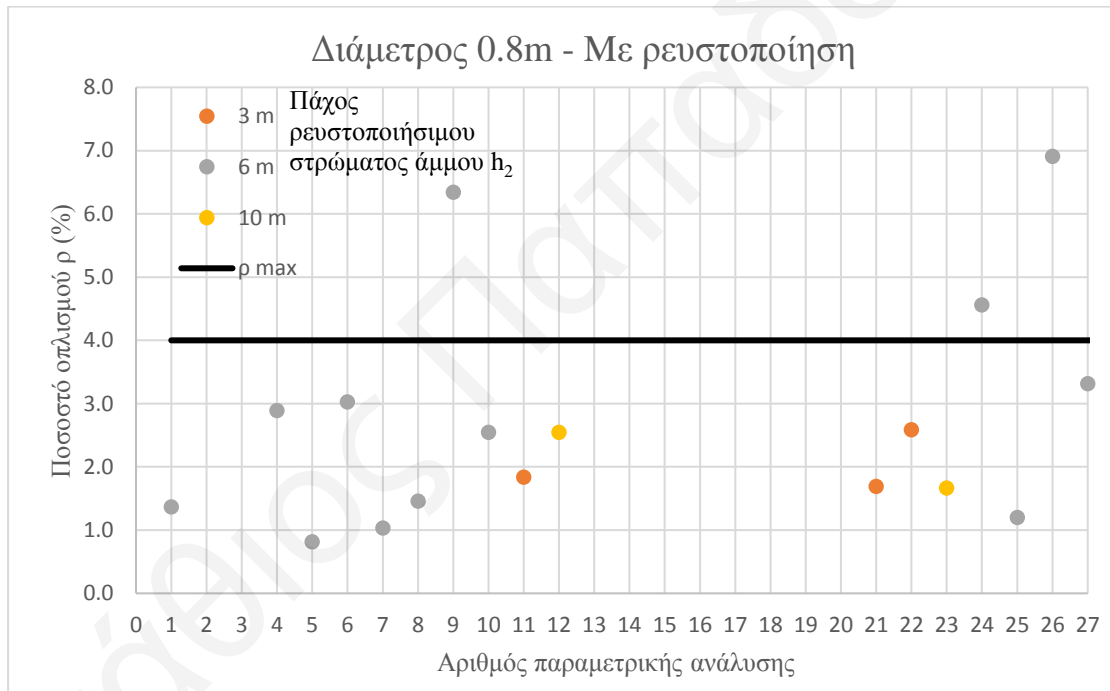
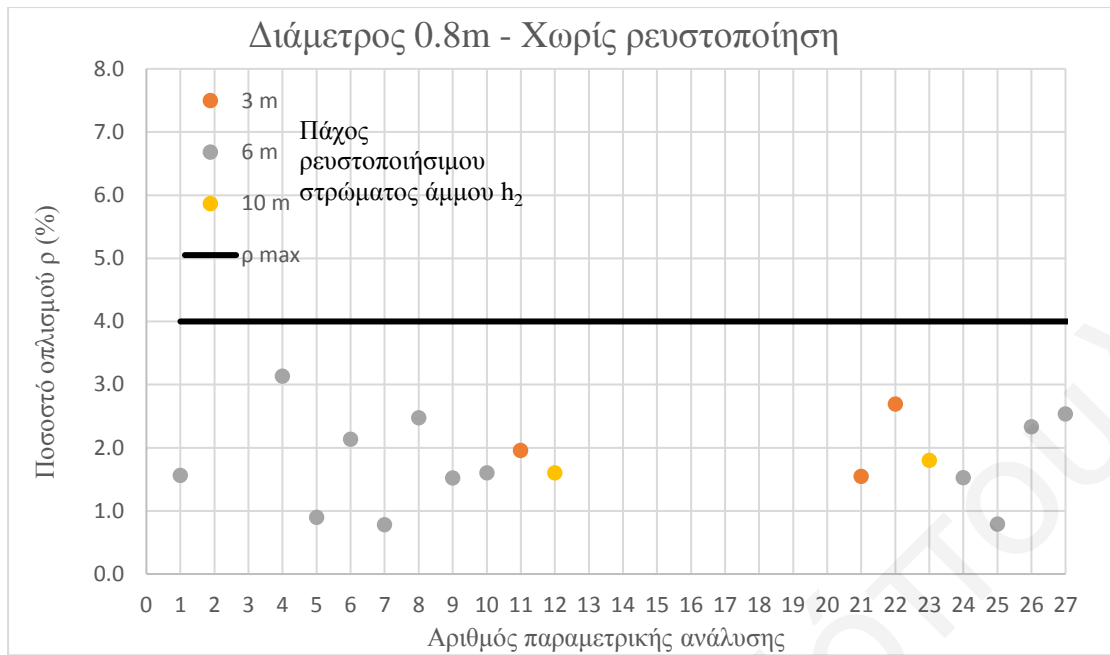
**Σχήμα 37:** Επίδραση πάχους αργιλικού καλύμματος στον απαιτούμενο διαμήκη οπλισμό πασσάλων διαμέτρου 1.0m.

Στα Σχήματα 38 έως 40 εξετάζεται η επιρροή του πάχους  $h_2$  του ρευστοποιήσιμου στρώματος. Σε αντίθεση με το πάχος της αργίλου  $h_1$ , το πάχος του στρώματος άμμου

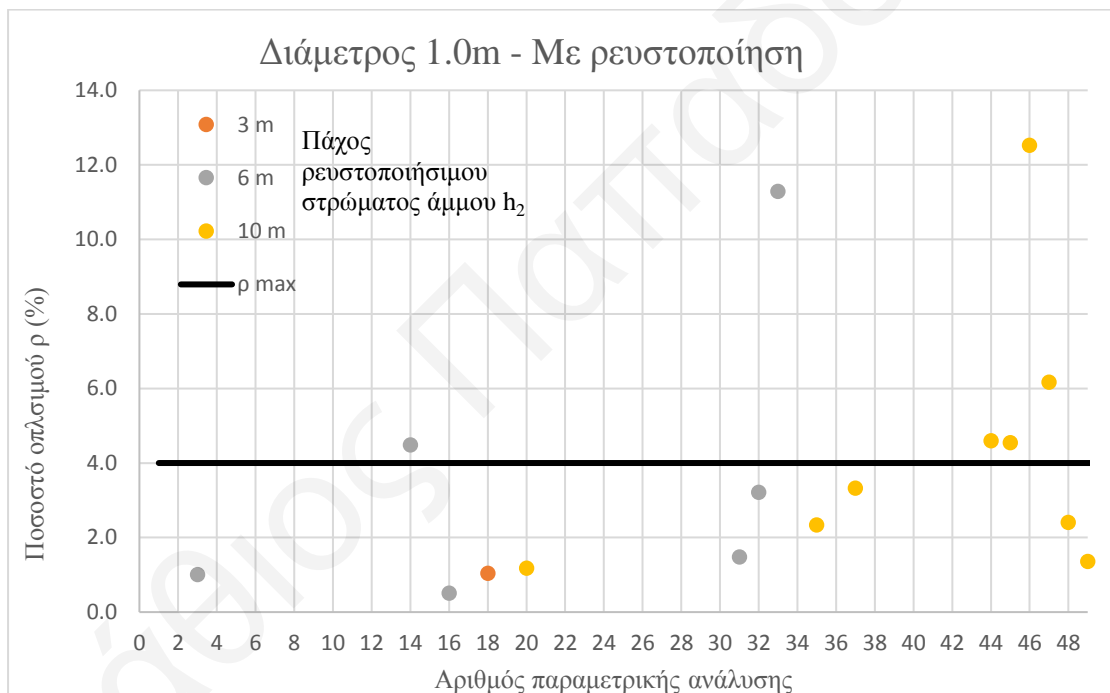
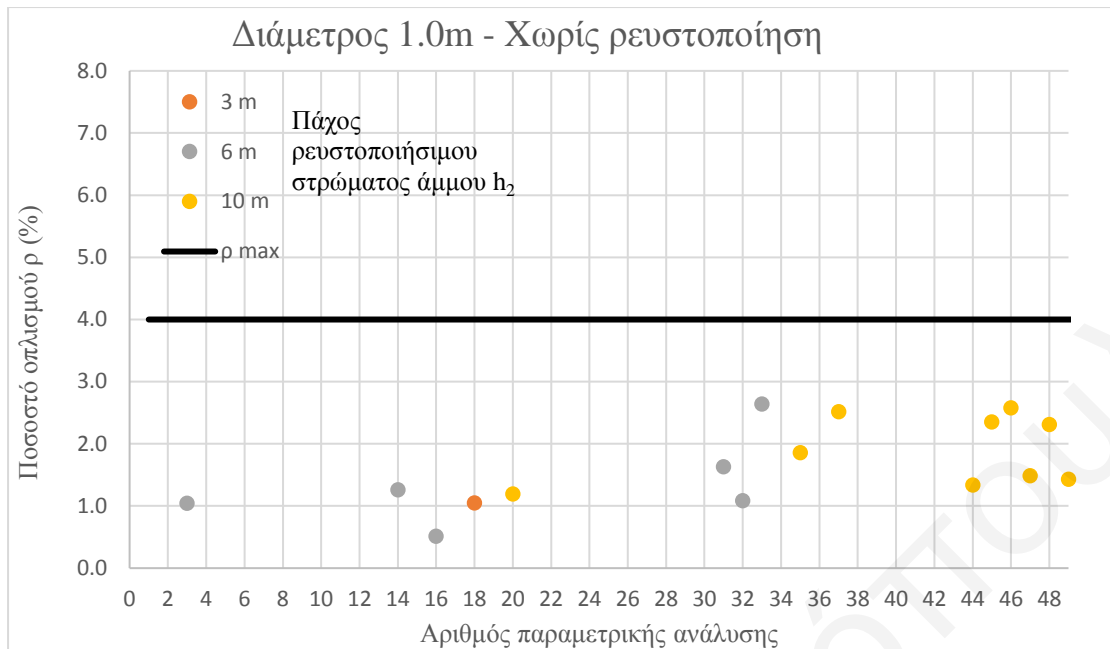
δεν φαίνεται να έχει επίδραση στην αύξηση των απαιτήσεων οπλισμού από την περίπτωση χωρίς ρευστοποίηση σε αυτή με ρευστοποίηση.



**Σχήμα 38:** Επίδραση πάχους ρευστοποιήσιμου στρώματος άμμου στον απαιτούμενο διαμήκη οπλισμό πασσάλων διαμέτρου 0.6m.

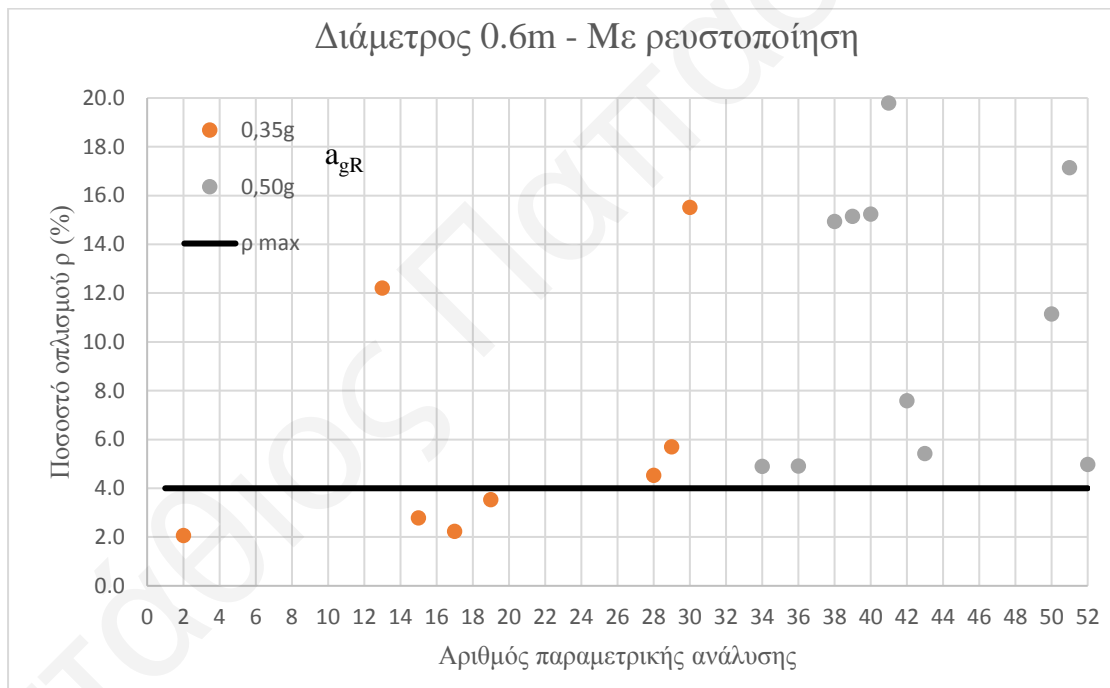
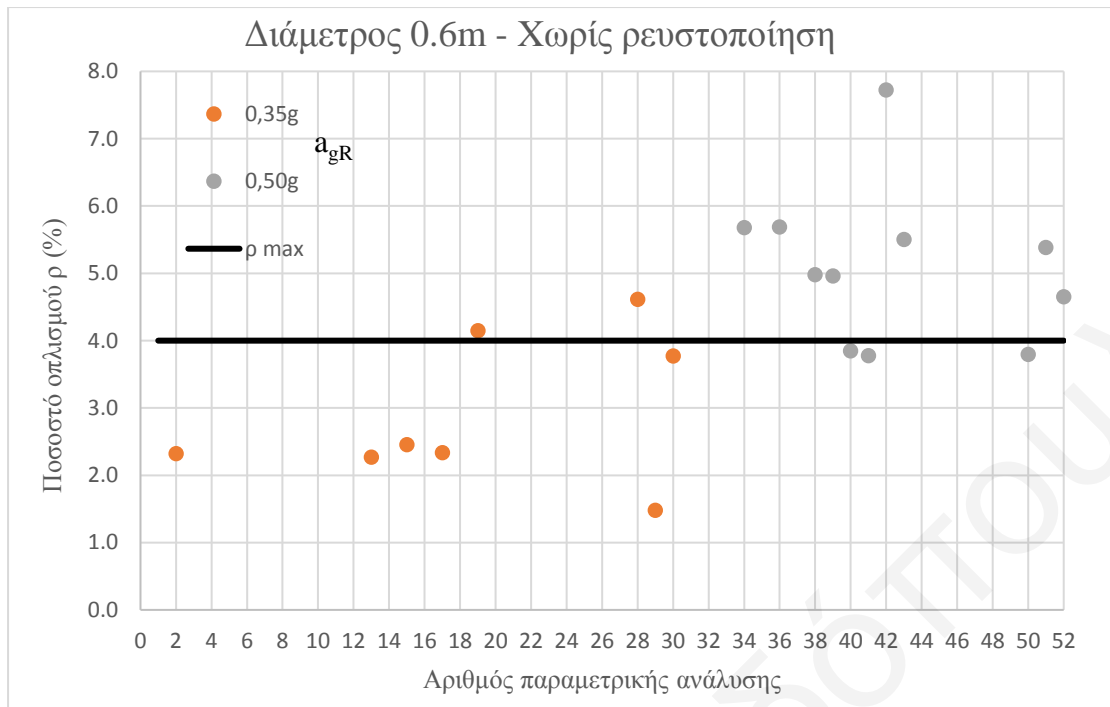


**Σχήμα 39:** Επίδραση πάχους ρευστοποιήσιμου στρώματος άμμου στον απαιτούμενο διαμήκη οπλισμό πασσάλων διαμέτρου 0.8m.



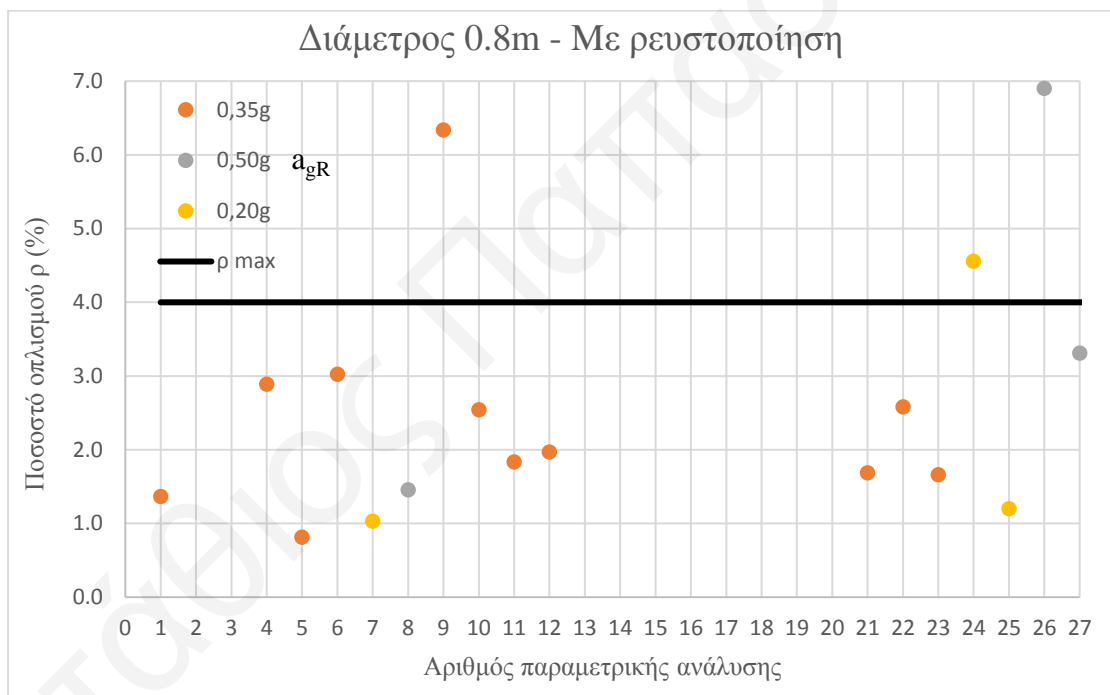
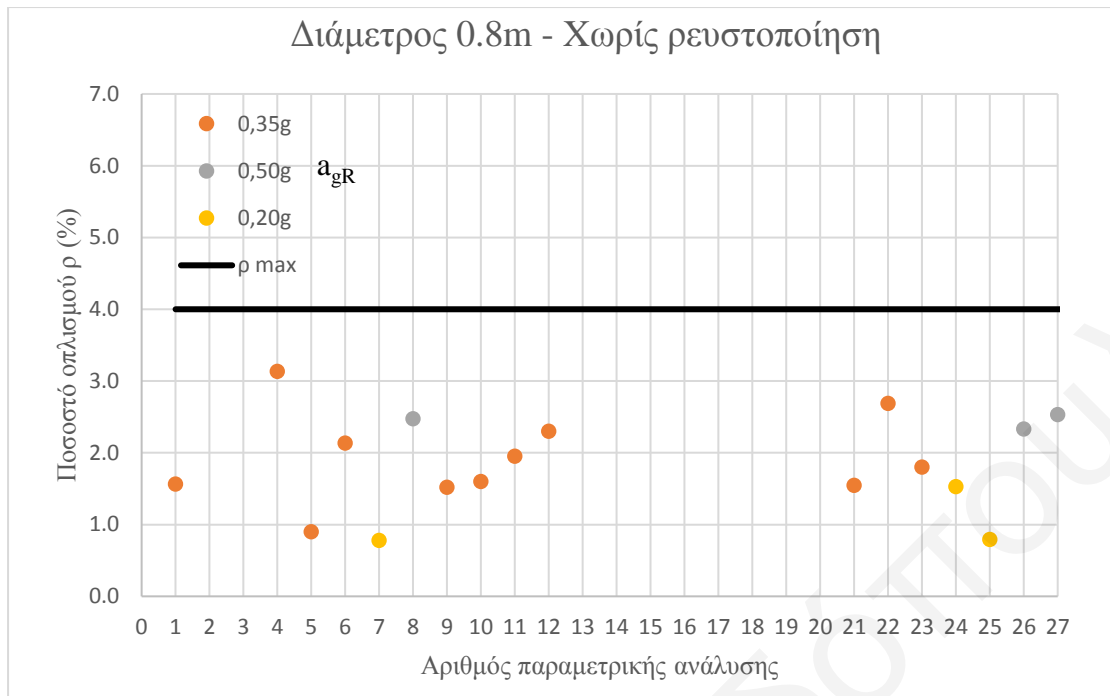
**Σχήμα 40:** Επίδραση πάχους ρευστοποιήσιμου στρώματος άμμου στον απαιτούμενο διαμήκη οπλισμό πασσάλων διαμέτρου 1.0m.

Σε ότι αφορά την επίδραση της εδαφικής επιτάχυνσης, μια αύξησή της οδηγεί σε αύξηση του απαιτούμενου ρ είτε υπάρχει είτε δεν υπάρχει ρευστοποίηση (Σχήματα 41 έως 43) με τον ίδιο βαθμό.

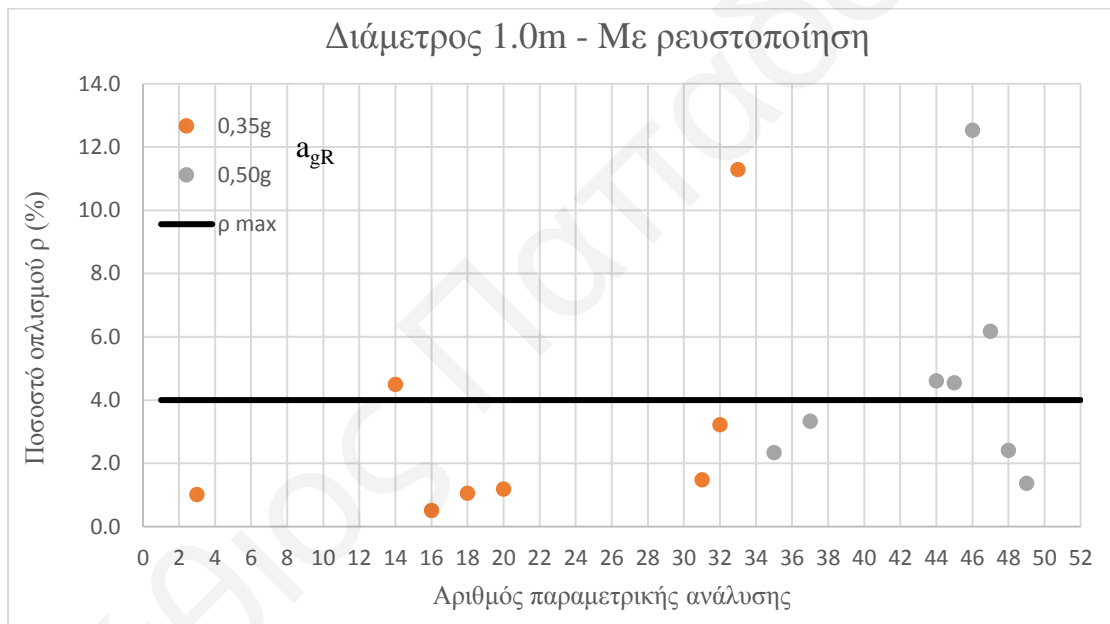
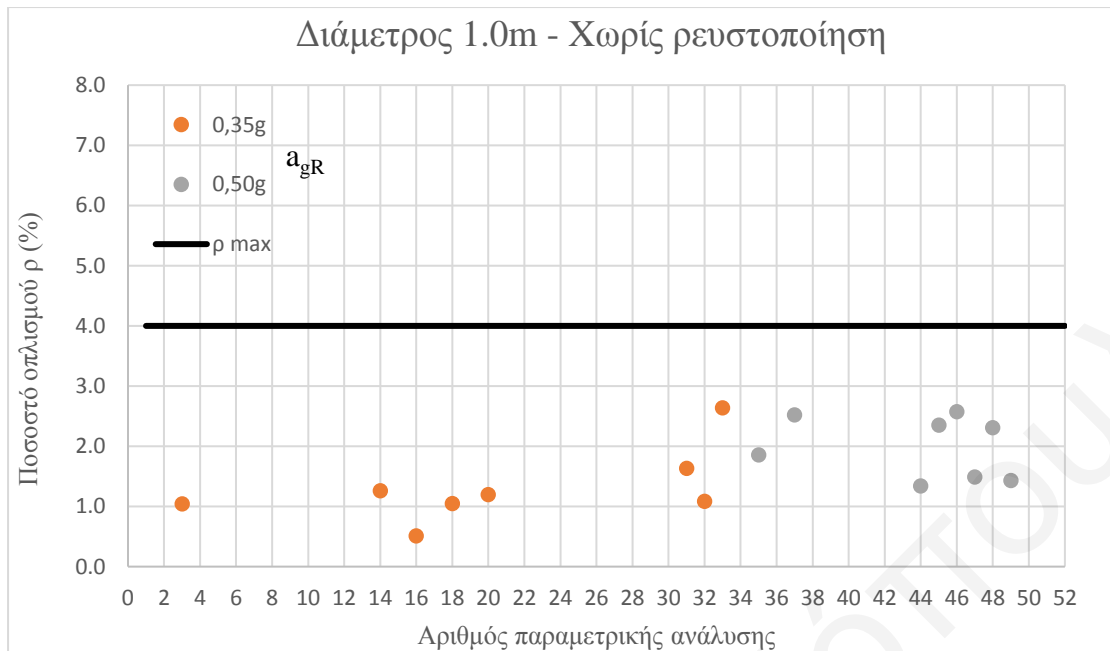


**Σχήμα 41:** Επίδραση σεισμική επιτάχυνσης σχεδιασμού  $a_{gR}$  στον απαιτούμενο διαμήκη οπλισμό πασσάλων διαμέτρου 0.6m.





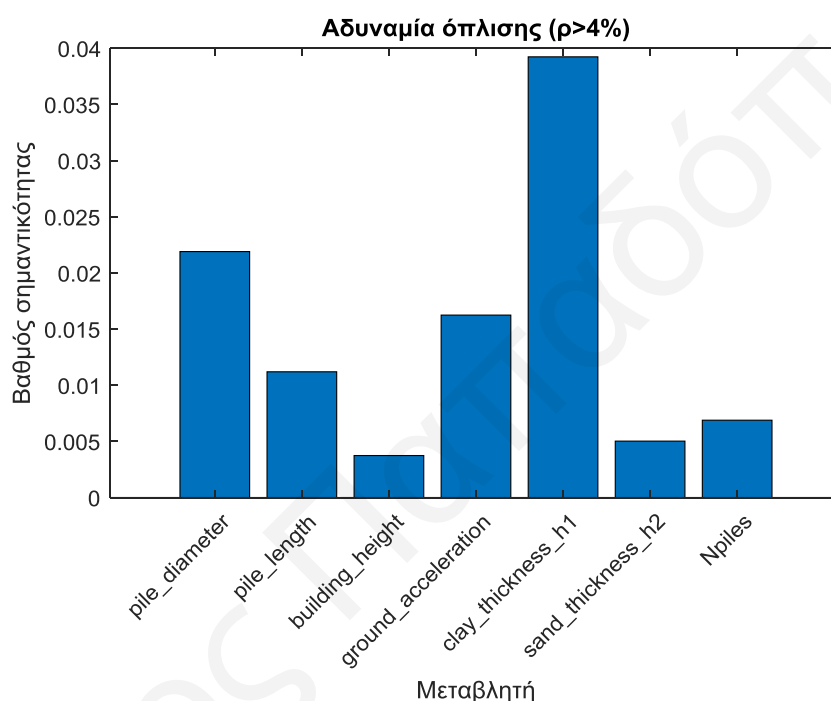
**Σχήμα 42:** Επίδραση σεισμική επιτάχυνσης σχεδιασμού  $a_{gR}$  στον απαιτούμενο διαμήκη οπλισμό πασσάλων διαμέτρου 0.8m.



**Σχήμα 43:** Επίδραση σεισμική επιτάχυνσης σχεδιασμού  $a_{gR}$  στον απαιτούμενο διαμήκη σπλισμό πασσάλων διαμέτρου 1.0m.

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του προβλήματος που επηρεάζουν περισσότερο στο να προκύψει το ενδεχόμενο ένας πάσσαλος να μην μπορεί να σπλιστεί ( $\rho > 4\%$ ) όταν υπάρχει ρευστοποίηση, εκτελέστηκε random forest regression στο Matlab όπου οι μεταβλητές  $X$  είναι η διάμετρος και το μήκος του πασσάλου, το ύψος του κτιρίου, η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού, το πάχος του επιφανειακού στρώματος αργίλου  $h_1$ , το πάχος της ρευστοποιήσιμης άμμου  $h_2$  και ο αριθμός των πασσάλων

στην πασσαλομάδα ( $N_{piles}$ ), ενώ η μεταβλητή  $Y$  είναι το αν υπάρχει υπέρβαση του ορίου του 4% ή όχι (αν  $\rho \leq 4\% \rightarrow index=0$ , αν  $\rho > 4\% \rightarrow index=1$ ). Τα αποτελέσματα ανάλυσης της σημαντικότητας των εξεταζόμενων μεταβλητών παρουσιάζονται στο Σχήμα 44. Ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  που επιτυγχάνεται με τη random forest σε αυτή την περίπτωση είναι ίσος με 0.64. Ο βαθμός σημαντικότητας προκύπτει βάσει της βελτίωσης (μείωσης) στο μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα (mean squared error MSE) που προσφέρει η θεώρηση στο decision tree model η εκάστοτε μεταβλητή.

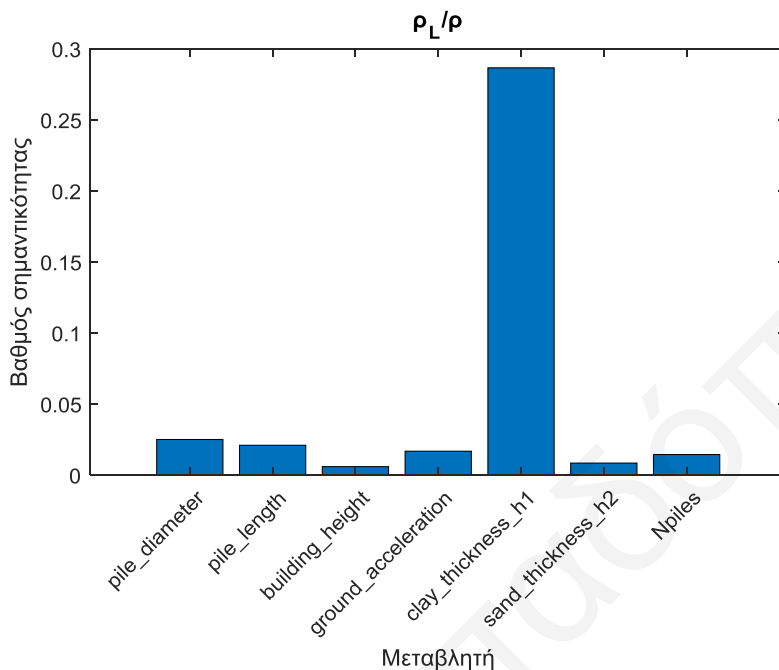


**Σχήμα 44:** Προσδιορισμός σημαντικότητας με βάση random forest regression των μεταβλητών του προβλήματος όσον αφορά το ενδεχόμενο αδυναμίας όπλισης για την περίπτωση ρευστοποίησης.

Παρατηρούμε ότι μακράν σημαντικότερη μεταβλητή για το αν θα προκύψει αδυναμία όπλισης ( $\rho > 4\%$ ) είναι το πάχος του αργιλικού καλύμματος  $h_1$ , ενώ έπεται η διάμετρος του πασσάλου  $D$ . Τρίτη σε σημαντικότητα έρχεται η εδαφική επιτάχυνση, επιβεβαιώνοντας τις διαπιστώσεις που έγιναν με βάση τα προηγούμενα σχήματα. Οι υπόλοιπες παράμετροι του προβλήματος έχουν μάλλον ασήμαντο ρόλο.

Εναλλακτικά μπορεί να εξεταστεί η επίδραση των παραμέτρων του προβλήματος στο πόσο δυσχεραίνει την απαίτηση όπλισης η παρουσία ρευστοποίησης θεωρώντας ως

μεταβλητή  $Y$  στο random forest regression τον λόγο ποσοστού οπλισμού με ρευστοποίηση  $\rho_L$  δια του αντίστοιχου ποσοστού χωρίς ρευστοποίηση  $\rho$  (Σχήμα 45).



**Σχήμα 45:** Προσδιορισμός σημαντικότητας με βάση random forest regression των μεταβλητών του προβλήματος όσον αφορά την αυξημένη απαίτηση για οπλισμό στην περίπτωση ρευστοποίησης.

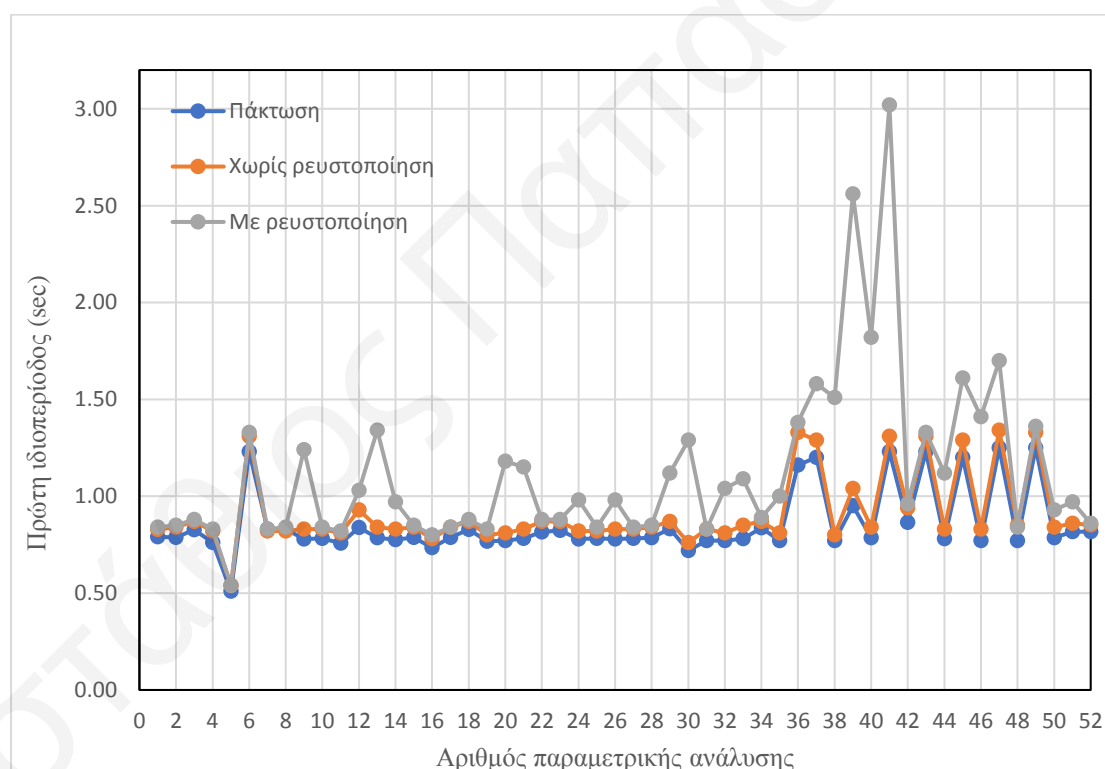
Ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  που επιτυγχάνεται με την random forest σε αυτή την περίπτωση είναι ίσος με 0.85. Η σημαντικότητα του πάχους του αργιλικού καλύμματος  $h_1$  στο πόσο μεγαλύτερος θα είναι ο λόγος  $\rho_L/\rho$  είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι των άλλων παραμέτρων. Πάντως, και σε αυτή τη εφαρμογή της random forest regression, ως δεύτερη σημαντικότερη παράμετρος είναι η διάμετρος του πασσάλου  $D$ . Τρίτη σημαντικότερη προκύπτει το μήκος του πασσάλου  $L$ , αντί για την εδαφική επιτάχυνση.

#### 4.3. Ιδιοπερίοδος συστήματος ανωδομής-θεμελίωσης

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα μοντέλα των κτιρίων διαμορφώθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν ρεαλιστικά χαρακτηριστικά δυσκαμψίας και μάζας για το εκάστοτε ύψος κτηρίου και έτσι η πρώτη ιδιοπερίοδος

τους  $T_1$  (περίοδος πρώτης ιδιομορφής) θεωρώντας πακτωμένη βάση να είναι περίπου ίση με αυτή που προβλέπει η εμπειρική σχέση του EC8 (δηλαδή  $T_1=0.075H^{3/4}$ ).

Οι προκύπτουσες τιμές  $T_1$  για όλα τα μοντέλα δίνονται στο Σχήμα 46. Όταν τα κτίρια στηρίζονται σε πασσάλους με ελατήρια εδάφους αλλά εν τη απουσία ρευστοποίησης, η  $T_1$  είναι 4% έως 13% μεγαλύτερη από αυτή αν το κτίριο αναλυθεί ως πακτωμένο στη βάση του (πλήρως δεσμευμένη πλάκα κοιτόστρωσης). Αντίθετα, η απώλεια εδαφικής στήριξης λόγω ρευστοποίησης της άμμου έχει ως αποτέλεσμα την έντονη αύξηση της ιδιοπεριόδου. Συγκεκριμένα, η διαφορά των ιδιοπεριόδων μεταξύ μη ρευστοποίησης και ρευστοποίησης μπορεί να φτάσει μέχρι και 146% (υπερδιπλασιασμός). Η εντονότερη αύξηση παρατηρείται όταν η βάση του κτιρίου εδράζεται απευθείας στο ρευστοποιήσιμο στρώμα άμμου (απουσία αργιλικού καλύμματος), π.χ. ανάλυση 9 ( $h_1=0$ ) έναντι ανάλυσης 10 ( $h_1=5m$ ), και ιδιαίτερα αν ταυτόχρονα η διάμετρος των πασσάλων είναι μικρή (0.6m), π.χ. αναλύσεις 38-41.

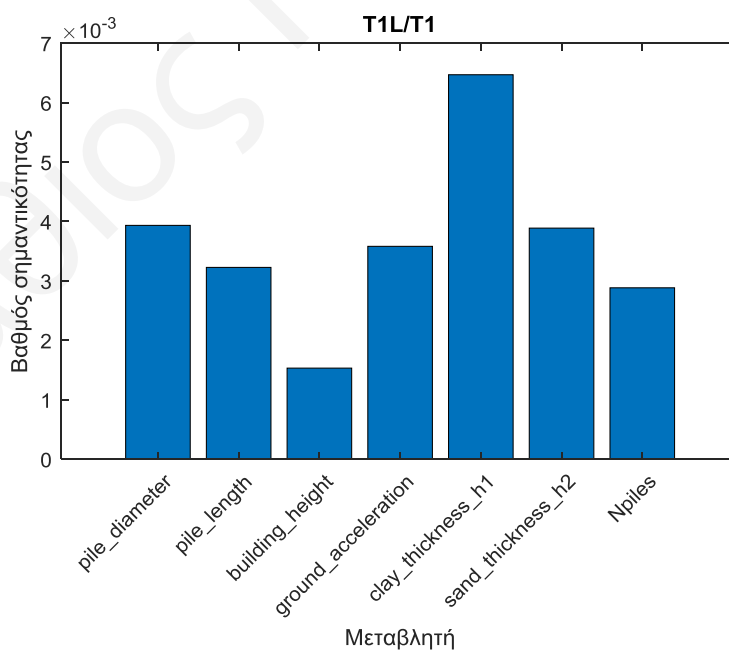


**Σχήμα 46:** Σύγκριση ιδιοπεριόδων παραμετρικών μοντέλων ανάλυσης.

Σε αυτές τις περιπτώσεις, το ανώτερο μέρος των πασσάλων είναι αστήρικτο κατά τη ρευστοποίηση και καλείται να λειτουργήσει ως ένα υπόγειο υποστύλωμα με ύψος όσο το ρευστοποιημένο στρώμα (π.χ. 6m ή 10m), αυξάνοντας έτσι σε πολύ μεγάλο βαθμό την ευκαμψία του συστήματος ανωδομής-θεμελίωσης. Αν μάλιστα η διάμετρος των

πασσάλων είναι μικρή, η αύξηση αυτή είναι ακόμη μεγαλύτερη. Αντίθετα, στις παραμετρικές αναλύσεις στις οποίες υπήρχε ως ανώτερο στρώμα ένα αργιλικό έδαφος πάχους 2m ή 5m, η ιδιοπερίοδος δεν αυξάνεται πολύ σε σχέση με αυτή που ισχύει χωρίς ρευστοποίηση.

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του προβλήματος που επηρεάζουν περισσότερο την αύξηση της ιδιοπεριόδου όταν υπάρχει ρευστοποίηση, εκτελέστηκε random forest regression όπου οι μεταβλητές X είναι η διάμετρος και το μήκος του πασσάλου, το ύψος του κτιρίου, η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού, το πάχος του επιφανειακού στρώματος αργίλου  $h_1$ , το πάχος της ρευστοποιήσιμης άμμου  $h_2$  και ο αριθμός των πασσάλων στην πασσαλομάδα ( $N_{piles}$ ), ενώ η μεταβλητή Y είναι ο λόγος  $T_{1L}/T_1$  των ιδιοπεριόδων με ρευστοποίηση ( $T_{1L}$ ) και χωρίς ρευστοποίηση ( $T_1$ ). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της σημαντικότητας των εξεταζόμενων μεταβλητών παρουσιάζονται στο Σχήμα 47. Ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  που επιτυγχάνεται με την random forest σε αυτή την περίπτωση είναι χαμηλός και ίσος με 0.29. Ο βαθμός σημαντικότητας προκύπτει βάσει της βελτίωσης (μείωσης) στο μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα (mean squared error MSE) που προσφέρει η θεώρηση στο decision tree model η εκάστοτε μεταβλητή.



**Σχήμα 47:** Προσδιορισμός σημαντικότητας των μεταβλητών που επηρεάζουν την ιδιοπερίοδο στην περίπτωση ρευστοποίησης με βάση random forest regression.

Από το ραβδόγραμμα του Σχήματος 47 συμπεραίνουμε ότι η αύξηση της ιδιοπεριόδου της κατασκευής είναι περισσότερο συνδεδεμένη με το πάχος  $h_1$  του αργιλικού καλύμματος, ενώ ο ρόλος του ύψους του κτιρίου είναι αμελητέος.

Τα περισσότερα μοντέλα κτιρίων του σετ παραμετρικών αναλύσεων έχουν τέτοια ιδιοπερίοδο θεωρώντας τα πακτωμένα που η φασματική επιτάχυνση της πρώτης ιδιομορφής είναι στο πλατό του φάσματος απόκρισης σχεδιασμού και άρα έχει τη μέγιστη δυνατή τιμή. Σημαντική αύξηση στην  $T_1$  λόγω ρευστοποίησης της άμμου σήμαινε ταυτόχρονα και την μετατόπιση της  $T_1$  στον φθίνοντα κλάδο του φάσματος απόκριση, με αποτέλεσμα την εισαγωγή μικρότερης φασματικής επιτάχυνσης στην ανάλυση με ρευστοποίηση και την ανάπτυξη μικρότερων εντατικών μεγεθών στα δομικά μέλη της ανωδομής. Αξιοσημείωτο είναι πάντως το γεγονός πως ακόμα και με αυτή η μικρότερη σεισμική φόρτιση στην κατασκευή, στις περισσότερες από αυτές τις περιπτώσεις είναι αδύνατη η όπλιση των πασσάλων με ποσοστό μικρότερο από 4%. Αυτό οφείλεται τόσο σε θεμελίωση σε απευθείας ρευστοποιήσιμο έδαφος και το μεγάλο βάθος του, όσο και στις αποστάσεις των πασσάλων.

#### 4.4. Διάτμηση

Η διάτμηση ελέγχθηκε σύμφωνα με τις διατάξεις του EC2 όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.2.4. της παρούσας διπλωματικής. Οι παραμετρικές αναλύσεις στις οποίες είναι αδύνατη η διαστασιολόγηση των πασσάλων σε διάτμηση, τόσο χωρίς ρευστοποίηση όσο και με ρευστοποίηση, αφορούσαν αποκλειστικά πασσάλους με διάμετρο 0.6m (Πίνακας 7). Η αστοχία τους αφορούσε τόσο την υπέρβαση των ορίων των εντατικών μεγεθών που ορίστηκαν στον Πίνακα 3 της παραγράφου 2.2.4. ή στην υπέρβαση της ελάχιστης απόστασης του εγκάρσιου οπλισμού, όπως φαίνεται στο Παράρτημα III. Οι αναλύσεις 19, 34, και 36 ενώ παρουσιάζουν διατμητική αστοχία σε συνθήκες μη ρευστοποίησης, φαίνεται πως δεν αστοχούν κατά τη ρευστοποίηση. Αυτό κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται στην αύξηση της ιδιοπεριόδου η οποία, αν και μικρή για της παραμετρικές αναλύσεις αυτές, ήταν ικανή ώστε οριακά να αποφεύγεται η αστοχία σε διάτμηση.

Πίνακας 7: Αστοχία παραμετρικών αναλύσεων σε διάτμηση.

a/a	D (m)	L (m)	Ύψος κτιρίου H (m)	a <sub>gR</sub> (g)	Πάχος πάνω στρώματος αργίλου h <sub>1</sub> (m)	Πάχος στρώματος άμμου h <sub>2</sub> (m)	Αριθμός πασσάλων στον κάναβο	Έλεγχος διάτμησης χωρίς ρευστ.	Έλεγχος διάτμησης με ρευστ.
1	0,8	15	24	0,35	2	6	49		
2	0,6	15	24	0,35	2	6	49	Αστοχία	Αστοχία
3	1	15	24	0,35	2	6	25		
4	0,8	25	24	0,35	2	6	16		
5	0,8	15	15	0,35	2	6	25		
6	0,8	15	36	0,35	2	6	49		
7	0,8	15	24	0,2	2	6	49		
8	0,8	15	24	0,5	2	6	49		
9	0,8	15	24	0,35	0	6	49		
10	0,8	15	24	0,35	5	6	49		
11	0,8	15	24	0,35	2	3	25		
12	0,8	15	24	0,35	2	10	49		
13	0,6	15	24	0,35	0	6	49	Αστοχία	Αστοχία
14	1	15	24	0,35	0	6	25		
15	0,6	15	24	0,35	5	6	49	Αστοχία	Αστοχία
16	1	15	24	0,35	5	6	25		
17	0,6	15	24	0,35	2	3	49	Αστοχία	Αστοχία
18	1	15	24	0,35	2	3	25		
19	0,6	15	24	0,35	2	10	81	Αστοχία	
20	1	15	24	0,35	2	10	49		
21	0,8	8	24	0,35	2	3	49		
22	0,8	25	24	0,35	2	3	16		
23	0,8	25	24	0,35	2	10	25		
24	0,8	15	24	0,2	0	6	49		
25	0,8	15	24	0,2	5	6	49		
26	0,8	15	24	0,5	0	6	49		
27	0,8	15	24	0,5	5	6	49		
28	0,6	25	24	0,35	2	6	25	Αστοχία	Αστοχία
29	0,6	10	24	0,35	0	6	81		Αστοχία
30	0,6	25	24	0,35	0	6	25	Αστοχία	Αστοχία
31	1	25	24	0,35	2	6	16		
32	1	8	24	0,35	0	6	49		
33	1	25	24	0,35	0	6	16		
34	0,6	15	24	0,5	2	10	81	Αστοχία	
35	1	15	24	0,5	2	10	49		
36	0,6	17	36	0,5	2	10	81	Αστοχία	
37	1	15	36	0,5	2	10	49		
38	0,6	15	24	0,5	0	10	81	Αστοχία	Αστοχία



**Πίνακας 7** (συνέχεια).

a/a	D (m)	L (m)	Ύψος κτιρίου H (m)	a <sub>gR</sub> (g)	Πάχος πάνω στρώματος αργίλου h <sub>1</sub> (m)	Πάχος στρώματος άμμου h <sub>2</sub> (m)	Αριθμός πασσάλων στον κάναβο	Έλεγχος διάτμησης χωρίς ρευστ.	Έλεγχος διάτμησης με ρευστ.
39	0,6	17	36	0,5	0	10	81	Αστοχία	Αστοχία
40	0,6	25	24	0,5	0	10	49	Αστοχία	Αστοχία
41	0,6	25	36	0,5	0	10	49	Αστοχία	Αστοχία
42	0,6	25	24	0,5	5	10	49	Αστοχία	Αστοχία
43	0,6	25	36	0,5	5	10	49	Αστοχία	Αστοχία
44	1	15	24	0,5	0	10	49		
45	1	15	36	0,5	0	10	49		
46	1	25	24	0,5	0	10	16		
47	1	25	36	0,5	0	10	25		
48	1	25	24	0,5	5	10	16		
49	1	25	36	0,5	5	10	25		
50	0,6	15	24	0,5	0	3	49	Αστοχία	Αστοχία
51	0,6	25	24	0,5	0	3	25	Αστοχία	Αστοχία
52	0,6	25	24	0,5	5	3	25	Αστοχία	Αστοχία

#### 4.5. Πλευρική φέρουσα ικανότητα εδάφους

Σε καμία παραμετρική δεν παρατηρήθηκε αστοχία σε πλευρική φέρουσα ικανότητα του εδάφους (άμμου ή του επιφανειακού στρώματος αργίλου) στην περίπτωση χωρίς ρευστοποίηση ή στο επιφανειακό στρώμα αργίλου όταν το υποκείμενο στρώμα άμμου είναι ρευστοποιημένο. Αυτό δείχνει ότι οι πασσαλομάδες που θεωρήθηκαν δεν είναι υποδιαστασιολογημένες σε ότι αφορά την πλευρική φέρουσα ικανότητα και έτσι η προσομοίωση των εδαφών «ισοδύναμα γραμμικά» χρησιμοποιώντας ελατήρια με τις ιδιότητες που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια κρίνεται ικανοποιητική. Παράδειγμα ελέγχου πλευρικής αστοχίας του εδάφους παρατίθεται στο Παράρτημα ΙΙΙ.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκαν οι επιπτώσεις της ρευστοποίησης εδάφους στον σχεδιασμό θεμελιώσεων κτιρίων με φρεατοπασσάλους. Συγκεκριμένα, εκτελέστηκαν παραμετρικές αναλύσεις κτιρίων θεμελιωμένα σε πασσαλομάδες στο πρόγραμμα SAP2000 χρησιμοποιώντας τη φασματική μέθοδο και ακολουθώντας τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 8. Το έδαφος αναπαρίσταται στις αναλύσεις με τη μορφή γραμμικώς ελαστικών ελατηρίων σε συνδυασμό με αποσβεστήρες. Παρακάτω συνοψίζονται τα βασικότερα πρακτικά συμπεράσματα της διατριβής όπως αυτά πηγάζουν από αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων και την επεξεργασία τους:

- 1) Η ύπαρξη ρευστοποιήσιμου στρώματος στο εδαφικό προφίλ δεν σημαίνει απαραίτητα ότι θα πρέπει να προηγηθεί βελτίωση του εδάφους πριν την κατασκευή ενός κτιρίου, παρά τη συντηρητική διάταξη του Ευρωκώδικα 8 για πλήρη μηδενισμό της αντίστασης του ρευστοποιημένου εδάφους στους υπολογισμούς (EC8-5 §5.4.2.(4)P). Μια κατάλληλα σχεδιασμένη πασσαλοθεμελίωση μπορεί να αποτελέσει μια δόκιμη λύση στις περισσότερες των περιπτώσεων, ειδικά αν μεταξύ της στάθμης έδρασης του κτιρίου και του ρευστοποιήσιμου στρώματος παρεμβάλλεται ένα μη ρευστοποιήσιμο στρώμα ικανής αντοχής, όπως π.χ. μιας όχι ιδιαίτερα μαλακής αργίλου, έστω και 2m πάχους. Ένα τέτοιο στρώμα παρέχει επαρκή δυσκαμψία στις κεφαλές των πασσάλων και φαίνεται πως συμβάλλει ως μια οιονεί “πάκτωση” του κτιρίου, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη σημαντικά μικρότερων εντατικών μεγεθών στους πασσάλους από ότι αν απουσίαζε αυτό το εδαφικό κάλυμμα. Ως αποτέλεσμα, η ύπαρξη ή όχι ενός αργιλικού καλύμματος πάνω από το ρευστοποιήσιμο στρώμα αποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο του προβλήματος σε ότι αφορά την απαίτηση για διαμήκη οπλισμό.
- 2) Σε ότι αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πασσάλων, η διάμετρος των 0.60m δεν ενδείκνυται για θεμελίωση σε ρευστοποιήσιμα εδάφη. Ανάλογα με τα δεδομένα του προβλήματος, οι πάσσαλοι με αυτή τη διάμετρο μπορεί να μη δύναται να οπλιστούν (χωρίς υπέρβαση των ανεκτών ορίων του EC2) για να αναλάβουν με ασφάλεια τα μεγάλα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται σε αυτούς, είτε σε κάμψη-θλίψη είτε σε διάτμηση. Η διάμετρος του πασσάλου αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα αδυναμίας διαστασιολόγησης του

πασσάλου όσον αφορά αστοχία σε διάτμηση, ανεξάρτητα αν υπάρχει ρευστοποίηση ή όχι.

- 3) Η έδραση της βάσης ενός κτιρίου απευθείας σε ρευστοποιήσιμο στρώμα είναι εξαιρετικά δυσμενής, διότι εκθέτει τις κεφαλές των πασσάλων σε απώλεια πλευρικής στήριξης κατά της διάρκεια της ρευστοποίησης. Μια τέτοια πρακτική οδηγεί τους πασσάλους σε μια κατάσταση όπου καλούνται να λειτουργήσουν ως υπόγεια υποστυλώματα μεγάλου ύψους (όσο το πάχος του ρευστοποιημένου στρώματος) όπου αναπτύσσονται πολύ μεγάλες καμπτικές ροπές, με αποτέλεσμα την αδυναμία κατάλληλης όπλισης τους. Αυτό ισχύει ακόμη και αν χρησιμοποιηθούν φρεατοπάσσαλοι διαμέτρου 1m. Εάν οι κατασκευές πρέπει οπωσδήποτε να θεμελιωθούν σε τέτοια εδάφη, ίσως είναι προτιμότερο να γίνει βελτίωση του στρώματος άμμου με βαθιά δονητική συμπύκνωση (vibrofloatation) από το να κατασκευαστούν πιο πυκνοί και μεγαλύτερης διαμέτρου πάσσαλοι (1.4m-1.5m) ή μπαρέτες.
- 4) Η σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού στην επιφάνεια του εδάφους παίζει σημαντικό ρόλο. Όμως, επειδή στις πλέον δυσμενείς συνθήκες ρευστοποίησης (επιφανειακό στρώμα ρευστοποιήσιμης άμμου σημαντικού πάχους) η ιδιοπερίοδος του συστήματος ανωδομής-θεμελίωσης αυξάνεται σημαντικά, μειώνοντας έτσι τις φασματικές επιταχύνσεις και τις αδρανειακές δυνάμεις της ανωδομής, ο ρόλος της εδαφικής επιτάχυνσης στο αν θα είναι εφικτή η όπλιση των πασσάλων είναι μικρότερης σημασίας σε σύγκριση με τη θέση και το πάχος του ρευστοποιήσιμου στρώματος, καθώς και τη διάμετρο των πασσάλων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Auvinet, G. (2018). *Seismic response of subsoil and building foundations in Mexico City (1985-2017)*. ISSMGE Touring Lecture.
- Bobet, A., Salgado, R., Loukidis, D. (2001), *Seismic Design of Deep Foundations*, Final Report. Purdue University, FHWA/IN/JTRP-2000/22, SPR-2410.
- Bond, A. J., Brooker, O., Harris, A. J., Harrison, T., Moss, R. M., Narayanan, R. S., & Webster, R. (2006). *How to design concrete structures using Eurocode 2*. The Concrete Centre, Surrey, UK.
- British Standards Institution (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings*. London: BSI
- British Standards Institution (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. London: BSI
- Broms, B. B. (1964a). Lateral resistance of piles in cohesive soils. *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 90(2), 27-63.
- Broms, B. B. (1964b). Lateral resistance of piles in cohesionless soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 90(3), 123-158.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation engineering and design.*, McGraw-Hill.
- CSI (2003). *SAP2000 Analysis reference manual*. Computers and Structures Inc., Berkley, California, USA.
- Fleming, K., Weltman, A., Randolph, M., & Elson, K. (2008). *Piling engineering*. CRC press.
- Gazetas, G. (1991). *Foundation vibrations*. In *Foundation engineering handbook* (pp. 553-593). Springer, Boston, MA.
- International Building Code (2012). *Chapter 18-Soils and Foundations, section 1810*
- Loukidis, D., Salgado, R., & Abou-Jaoude, G. (2008). *Assessment of Axially-Loaded Pile Dynamic Design Methods and Review of INDOT Axially-Loaded Design Procedure*. Joint Transportation Research Program, 326.
- Mylonakis, G. & Gazetas, G. (1998). Settlement and additional internal forces of grouped piles in layered soil. *Géotechnique*, 48(1), 55-72.
- Novak, M., Aboul-Ella, F., & Nogami, T. (1978). Dynamic soil reactions for plane strain case. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 104(4), 953-959.
- O'Neill, M. W. & L. C. Reese (1999). *Drilled Shafts: Construction Procedure and Design Methods*. FHWA Report No. IF-99-025.

- Randolph, M. F. & Wroth, C. P. (1978). Analysis of deformation of vertically loaded piles. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 104, No. 12, 1465–1488.
- Salgado, R. (2007). *The engineering of foundations*. McGraw-Hill.
- Smolcic, Z.& Grandic, D. (2012). Interaction diagrams for reinforced concrete circular cross-section, *Revija GraĐevinar*, 64(1), 23-31.
- Βαλσαμής, Α., Θεμελιώσεις: Βαθιές Θεμελιώσεις-Πάσσαλοι-Ομάδες Πασσάλων.
- Κίρτας Ε. (2010), *Θεμελιώσεις-Κεφάλαιο 4: Βαθιές Θεμελιώσεις, 6<sup>ο</sup> Εξαμήνου*. Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων (Σ.Τ.Ε.Φ. ΤΕΙ Σερρών)
- Λουκίδης, Δ. Προχωρημένα Θέματα Θεμελιώσεων- Σημειώσεις: Ανάλυση Σεισμικής Απόκρισης Κατασκευών με Αλληλεπίδραση Εδάφους Κατασκευής. Πανεπιστήμιο Κύπρου
- Λουκίδης, Δ. Προχωρημένα Θέματα Θεμελιώσεων- Σημειώσεις: Υπολογισμός Καθιζήσεων Πασσάλων. Πανεπιστήμιο Κύπρου
- Λουκίδης, Δ. Προχωρημένα Θέματα Θεμελιώσεων- Σημειώσεις: Πλευρική Αντίσταση Πασσάλων. Πανεπιστήμιο Κύπρου
- Μανώλης, Γ. (2015). Κεφάλαιο 6: Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής. Δράση Κάλλιπος-Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα.

---

---

## Παραρτήματα

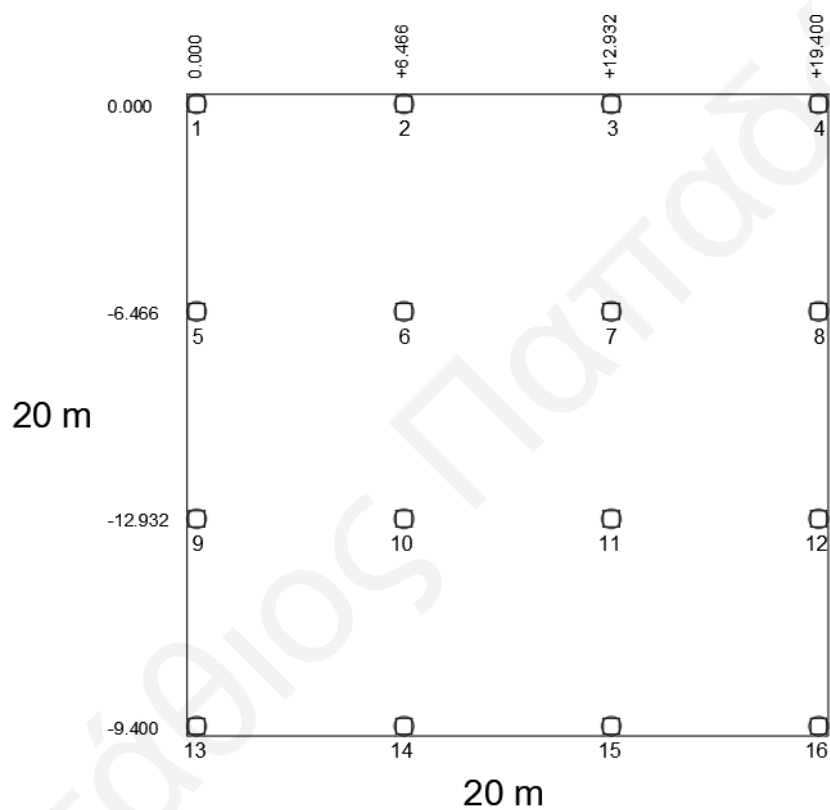
---

---

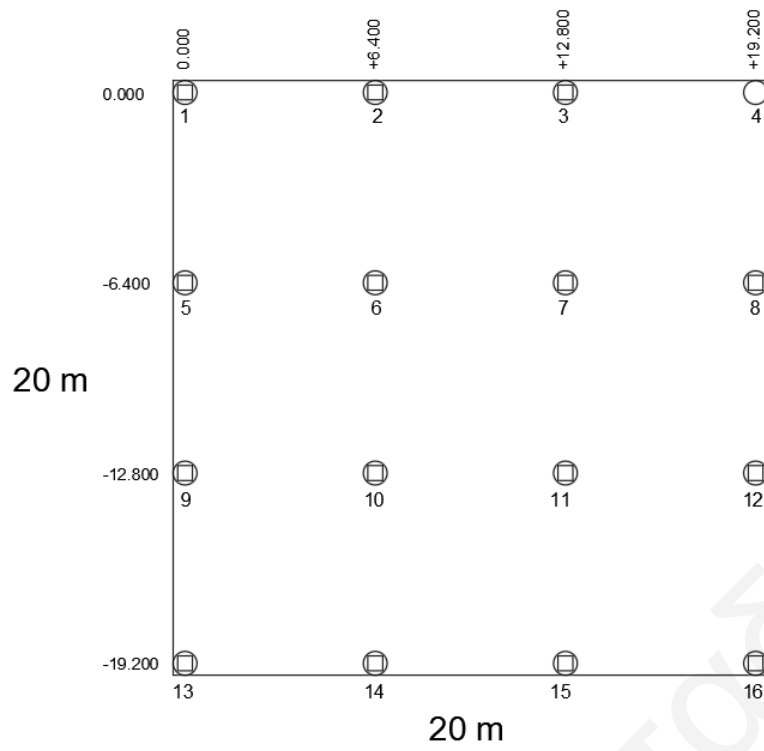
### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - Θέσεις πασσάλων και υποστυλωμάτων

Για N=16 πασσάλους

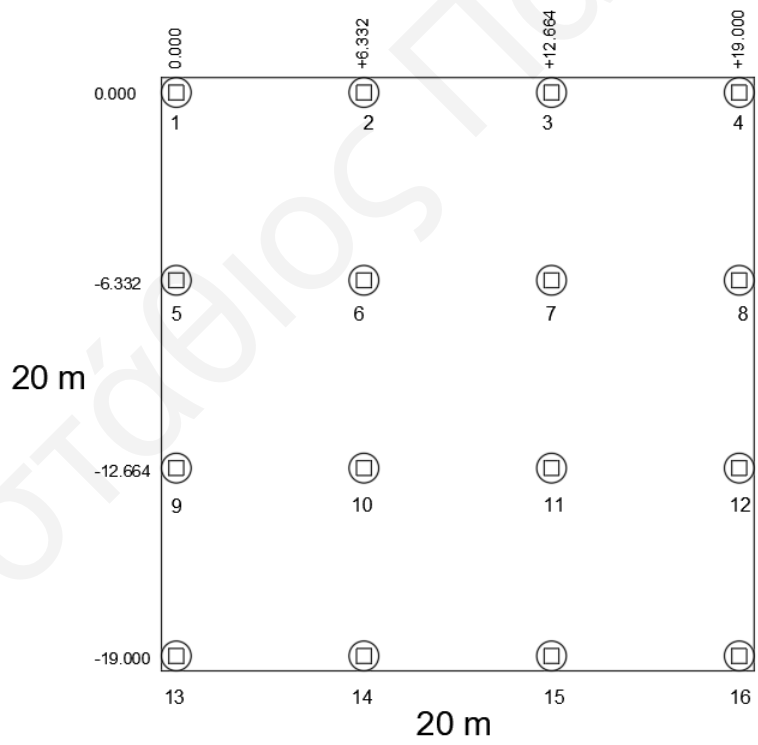
Διάμετρος=0.60 m.



Διάμετρος=0.80 m.

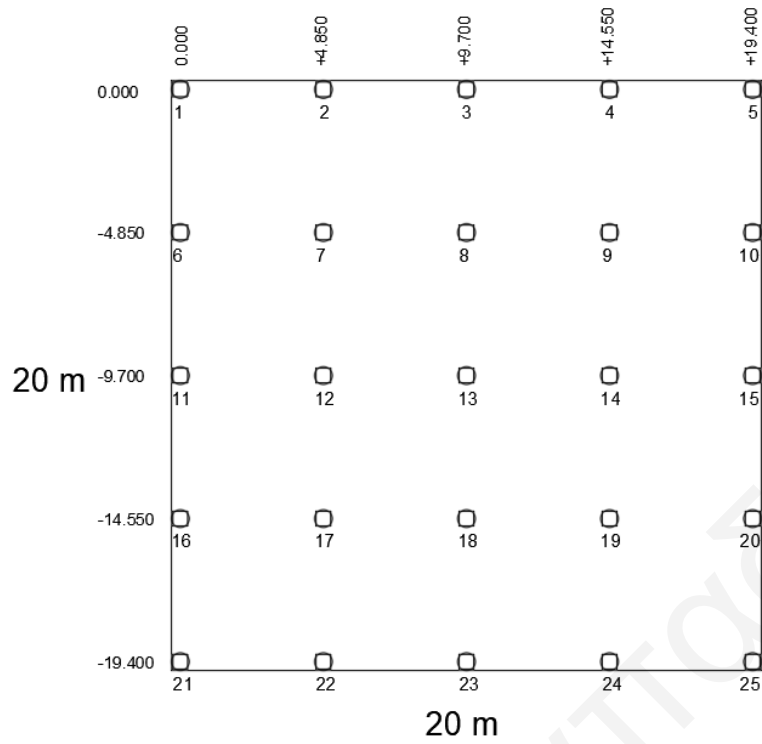


Διάμετρος=1.00 m.

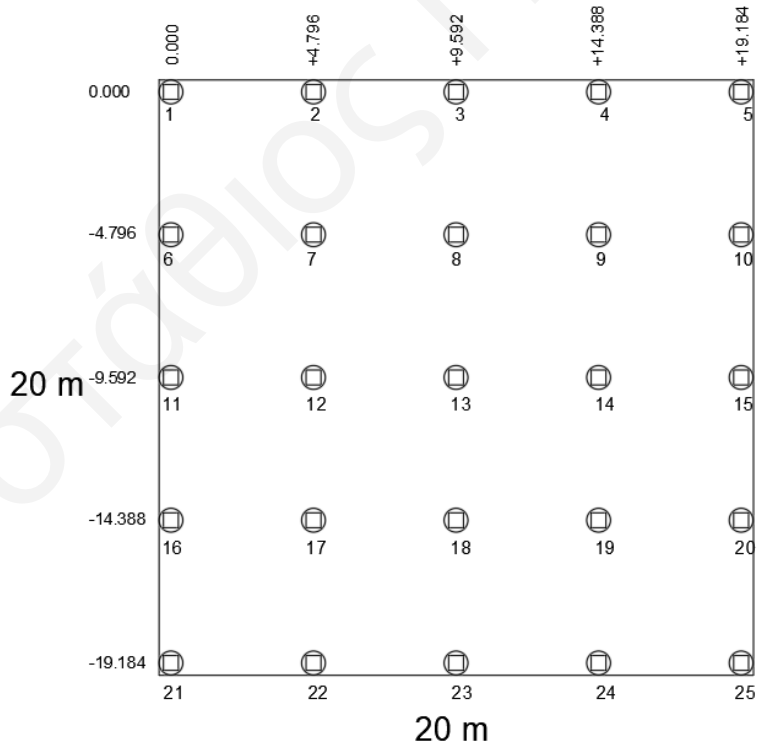


Για N=25 πασσάλους

Διάμετρος=0.60 m.

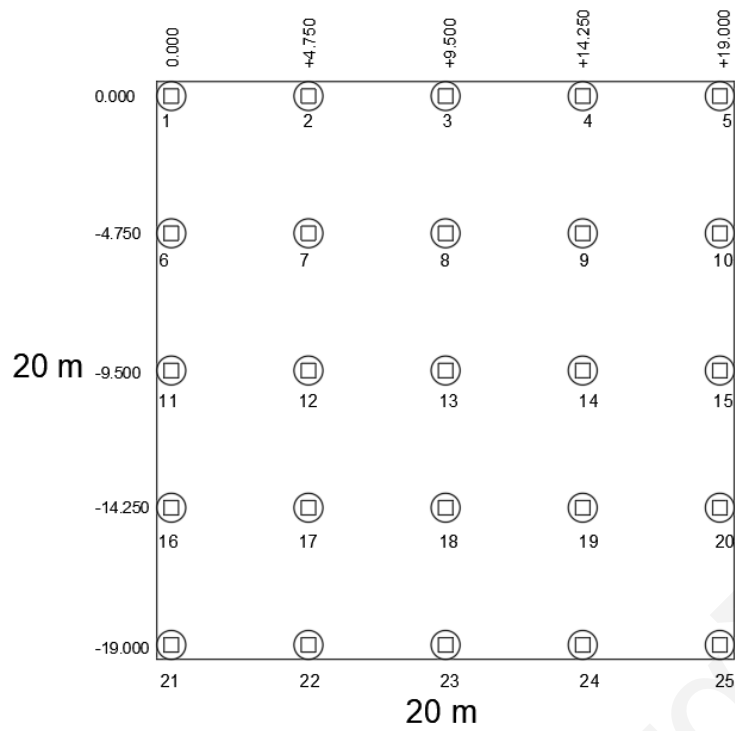


Διάμετρος=0.80 m.



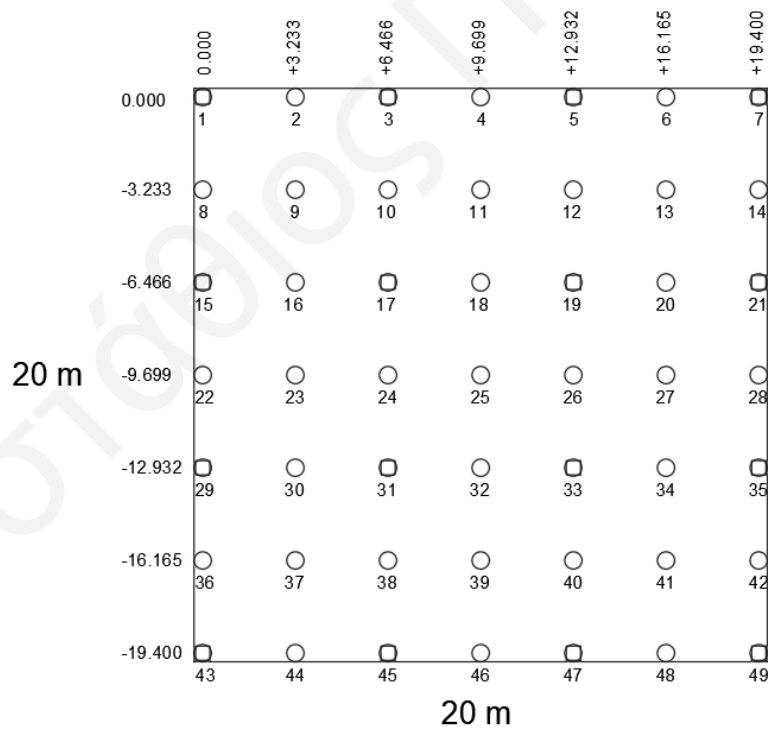


Διάμετρος=1.00 m.

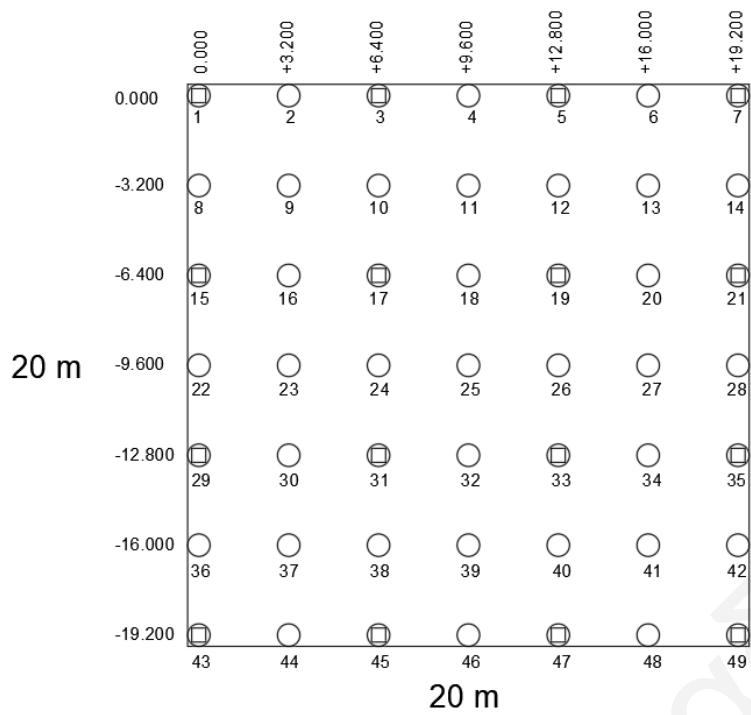


Για N=49 πασσάλους

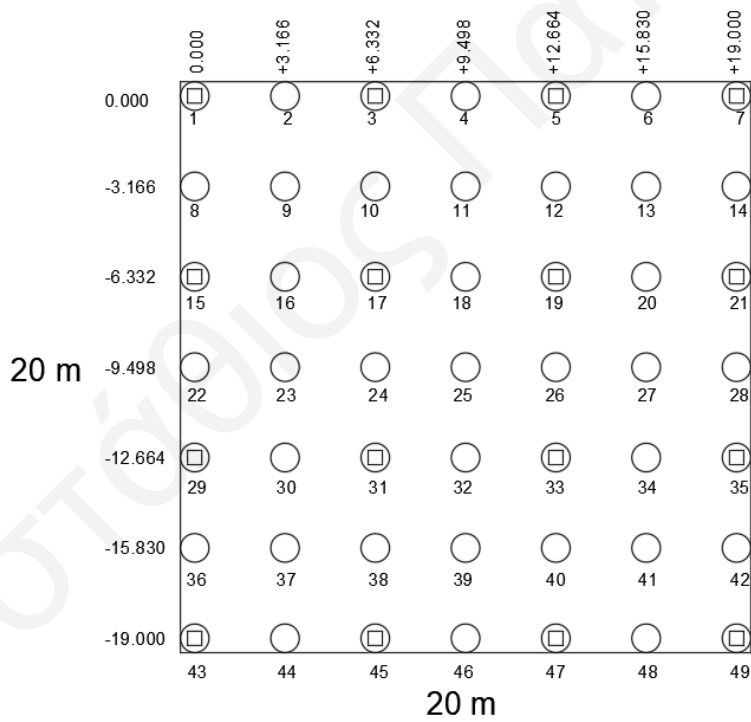
Διάμετρος=0.60 m.



Διάμετρος=0.80 m.

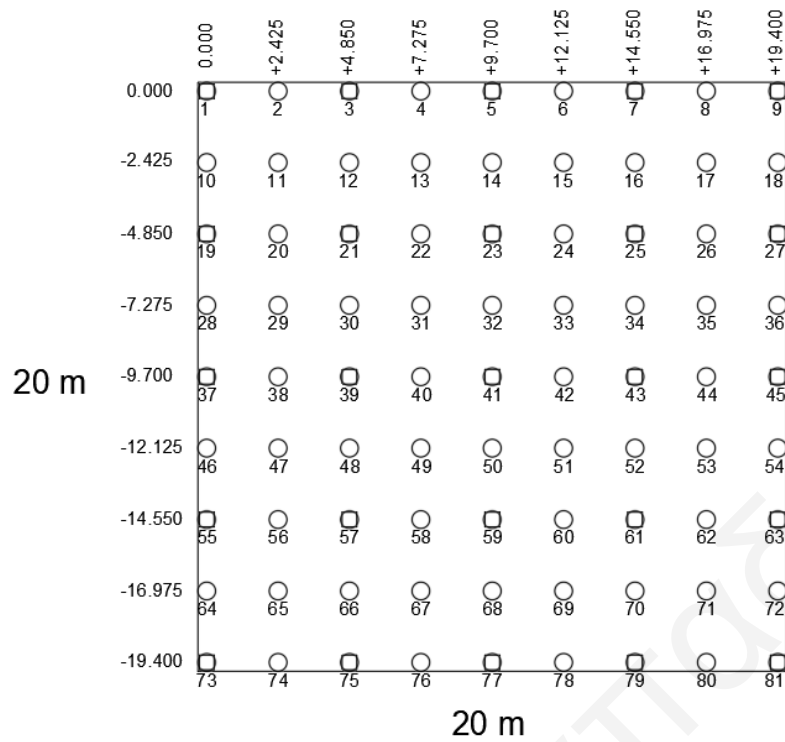


Διάμετρος=1.00 m.

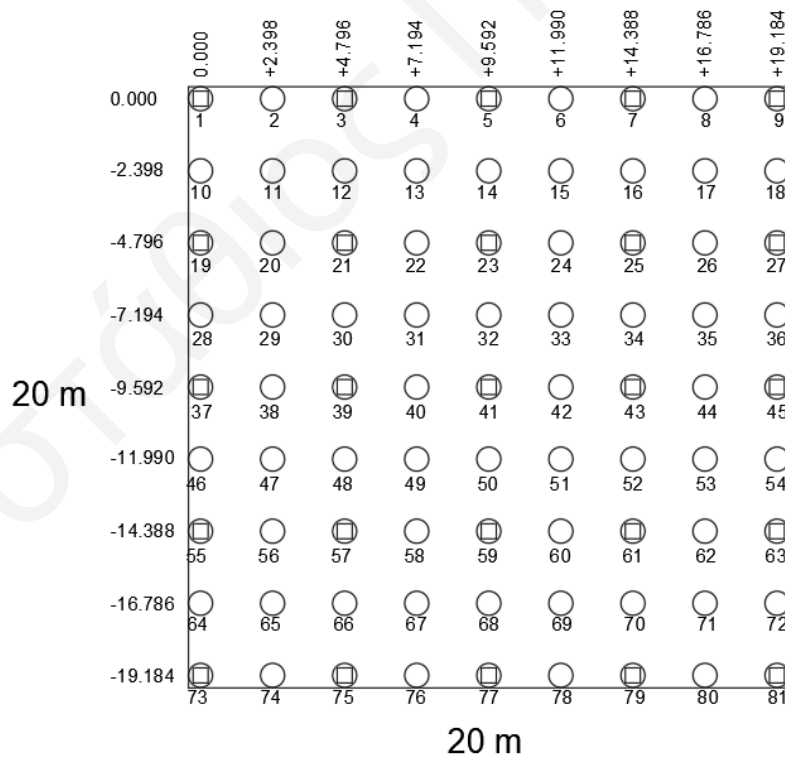


Για N=81 πασσάλους

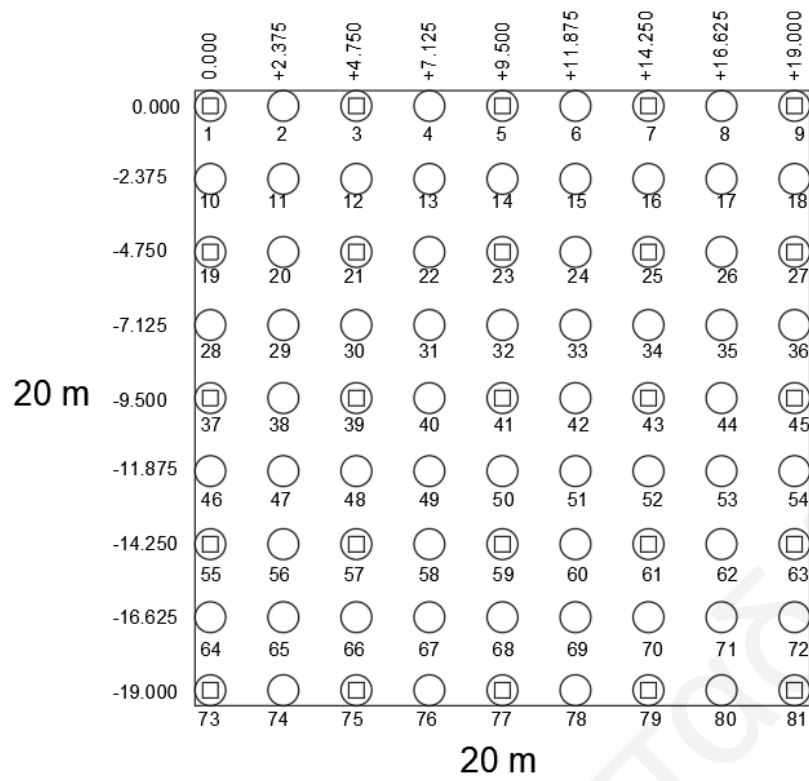
Διάμετρος=0.60 m.



Διάμετρος=0.80 m.



Διάμετρος=1.00 m.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ - Παράδειγμα υπολογισμού δεδομένων εισόδου παραμετρικής ανάλυσης

Το παράδειγμα που παρουσιάζεται εδώ αφορά την παραμετρική ανάλυση 48. Η παραμετρική αυτή έχει 16 πασσάλους στην κάτοψη και κατά συνέπεια σε σχετικά μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Ως αποτέλεσμα, οι συντελεστές  $f$  μείωσης της πλευρικής δυσκαμψίας και απόσβεσης είναι ίσοι με 1.0 πράγμα, που σημαίνει πως όλοι οι πάσσαλοι έχουν τις ίδιες σταθερές ανεξαρτήτως σειράς στη κάτοψη.

<b>Εδαφικά Χαρακτηριστικά</b>			
$S_u$ (αργίλου)	120	kPa	Αστράγγιστη διατμητική αντοχή
$N_{60}$ (άμμου)	10	Blows	Αριθμός κτύπων σφύρας
$G_{max}$ (αργίλου)	120000	kPa	Μέτρο διάτμησης εδαφών
$G_{max}$ (άμμου)	74479,63	kPa	
Επιτ. Εδάφους	0,5	g	
Κατ. Εδάφους	D		
Συντ. Εδαφ. Εν.	1,35		
$G/G_{max}$	0,36		
$V_s/V_{s,max}$	0,60		
$\xi$	0,10		Συντ. υστερητικής απόσβεσης
<b>Χαρακτηριστικά Πάσσαλου</b>			
L	25,00	m	Μήκος πασσάλου
D	1,00	m	Διάμετρος πασσάλου
$s_p$	6,3	m	Πλευρική απόσταση πασσάλων
$\nu$	0,50		Λόγος Poisson
Κατ. σκυροδέματος	30/37		Πασσάλων
$E_p$	33000000	kPa	Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος
$A_p$	0,79	m <sup>2</sup>	Εμβαδόν πασσάλου
<b>Χαρακτηριστικά Θεμελίωσης</b>			
B	20	m	Μήκος
H	20	m	Πλάτος

<b>Χαρακτηριστικά Κτιρίου</b>		
Αρ. Ορόφων	8	
Ύψος	24,00	m
$T_1$	0,81	sec
$\omega$	7,72	rad/s

Πλευρική Αντίσταση										
Έδαφος	G (kPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	z (m)	D (m)	k <sub>s</sub> (kPa/m)	ΔL <sub>i</sub> (m)	K <sub>s</sub> (kN/m)	ρ (tn/m <sup>3</sup> )	c <sub>s</sub> (kPa*s/m)	C <sub>s,i</sub> (kN*s/m)
Αργίλος	43200,00	154,92	0,00	1,00	216432,00	1,00	108216,00	1,80	557,71	3678,78
	43200,00	154,92	1,00	1,00	216432,00	1,00	216432,00	1,80	557,71	7357,56
	43200,00	154,92	2,00	1,00	216432,00	1,00	216432,00	1,80	557,71	7357,56
	43200,00	154,92	3,00	1,00	216432,00	1,00	216432,00	1,80	557,71	7357,56
	43200,00	154,92	4,00	1,00	216432,00	1,00	216432,00	1,80	557,71	7357,56
	43200,00	154,92	5,00	1,00	216432,00	1,00	175381,73	1,80	557,71	6108,50
Άμμος	26812,67	122,05	6,00	1,00	134331,46	1,00	134331,46	1,80	439,38	4859,45
	26812,67	122,05	7,00	1,00	134331,46	1,00	134331,46	1,80	439,38	4859,45
	26812,67	122,05	8,00	1,00	134331,46	1,00	134331,46	1,80	439,38	4859,45
	26812,67	122,05	9,00	1,00	134331,46	1,00	134331,46	1,80	439,38	4859,45
	26812,67	122,05	10,00	1,00	134331,46	1,00	134331,46	1,80	439,38	4859,45
	26812,67	122,05	11,00	1,00	134331,46	1,00	134331,46	1,80	439,38	4859,45
	26812,67	122,05	12,00	1,00	134331,46	1,00	134331,46	1,80	439,38	4859,45
	26812,67	122,05	13,00	1,00	134331,46	1,00	134331,46	1,80	439,38	4859,45
	26812,67	122,05	14,00	1,00	134331,46	1,00	134331,46	1,80	439,38	4859,45
	26812,67	122,05	15,00	1,00	134331,46	1,00	175381,73	1,80	439,38	6108,50
Αργίλος	43200,00	154,92	16,00	1,00	216432,00	1,00	216432,00	1,80	557,71	7357,56
	43200,00	154,92	17,00	1,00	216432,00	1,00	216432,00	1,80	557,71	7357,56
	43200,00	154,92	18,00	1,00	216432,00	1,00	216432,00	1,80	557,71	7357,56
	43200,00	154,92	19,00	1,00	216432,00	1,00	216432,00	1,80	557,71	7357,56
	43200,00	154,92	20,00	1,00	216432,00	1,00	216432,00	1,80	557,71	7357,56
	43200,00	154,92	21,00	1,00	216432,00	1,00	216432,00	1,80	557,71	7357,56
	43200,00	154,92	22,00	1,00	216432,00	1,00	216432,00	1,80	557,71	7357,56
	43200,00	154,92	23,00	1,00	216432,00	1,00	216432,00	1,80	557,71	7357,56
	43200,00	154,92	24,00	1,00	216432,00	1,00	216432,00	1,80	557,71	7357,56
	43200,00	154,92	25,00	1,00	216432,00	1,00	108216,00	1,80	557,71	3678,78

Πλευρική δυσκαμψία πασσαλομάδας / f-multipliers				
Leading Row	f <sub>L</sub>	1,00	≤1	OK
1st trailing row	f <sub>T1</sub>	1,00		OK
2nd trailing row	f <sub>T2</sub>	1,00		OK
3rd trailing row	f <sub>T3</sub>	1,00		OK

Σεισμική φορά "W-E & N-S"		Τιμές πασσάλων	
Έδαφος	K <sub>s</sub> (kN/m)	κατά x	κατά y
Άργιλος	108216,00	108216,00	108216,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	175381,73	175381,73	175381,73
Άμμος	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	175381,73	175381,73	175381,73
Άργιλος	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	108216,00	108216,00	108216,00

Σεισμική φορά "E-W & S-N"		Τιμές πασσάλων	
Έδαφος	K <sub>s</sub> (kN/m)	κατά x	κατά y
Άργιλος	108216,00	108216,00	108216,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	175381,73	175381,73	175381,73
Άμμος	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	175381,73	175381,73	175381,73
Άργιλος	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	108216,00	108216,00	108216,00



Μέσος όρος τιμών		Τιμές πασσάλων	
Έδαφος	K <sub>s</sub> (kN/m)	κατά x	κατά y
Άργιλος	108216,00	108216,00	108216,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	175381,73	175381,73	175381,73
Άμμος	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	134331,46	134331,46	134331,46
	175381,73	175381,73	175381,73
Άργιλος	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	216432,00	216432,00	216432,00
	108216,00	108216,00	108216,00

Σεισμική φορά "W-E & N-S"		Τιμές πασσάλων	
Έδαφος	C <sub>s</sub> (kN*s/m)	κατά x	κατά y
Άργιλος	3678,78	3678,78	3678,78
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	6108,50	6108,50	6108,50
Άμμος	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	6108,50	6108,50	6108,50
Άργιλος	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	3678,78	3678,78	3678,78

Σεισμική φορά "E-W & S-N"		Τιμές πασσάλων	
Έδαφος	C <sub>s</sub> (kN*s/m)	κατά x	κατά y
Αργίλος	3678,78	3678,78	3678,78
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	6108,50	6108,50	6108,50
Άμμος	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	6108,50	6108,50	6108,50
Αργίλος	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	3678,78	3678,78	3678,78

Μέσος όρος τιμών		Τιμές πασσάλων	
Έδαφος	C <sub>s</sub> (kN*s/m)	κατά x	κατά y
Αργίλος	3678,78	3678,78	3678,78
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	6108,50	6108,50	6108,50
Άμμος	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	4859,45	4859,45	4859,45
	6108,50	6108,50	6108,50
Αργίλος	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	7357,56	7357,56	7357,56
	3678,78	3678,78	3678,78

Κατακόρυφη αντίσταση											
Έδαφος	z (m)	R (m)	G (kPa)	$\rho$ (tn/m <sup>3</sup> )	$\nu$	V <sub>s</sub> (m/s)	r <sub>m</sub> (m)	$\Delta L_i$ (m)	c <sub>s</sub> (kPa*s/m)	C <sub>s,i</sub> (kN*s/m)	K <sub>s,i</sub> (kN/m)
Αργίλος	0,00	0,50	43200,00	1,80	0,50	154,92	26,51	1,00	278,85	1323,28	34180,38
	1,00	0,50	43200,00	1,80	0,50	154,92	26,51	1,00	278,85	2646,55	68360,77
	2,00	0,50	43200,00	1,80	0,50	154,92	26,51	1,00	278,85	2646,55	68360,77
	3,00	0,50	43200,00	1,80	0,50	154,92	26,51	1,00	278,85	2646,55	68360,77
	4,00	0,50	43200,00	1,80	0,50	154,92	26,51	1,00	278,85	2646,55	68360,77
	5,00	0,50	43200,00	1,80	0,50	154,92	26,51	1,00	278,85	2217,81	55394,90
Άμμος	6,00	0,50	26812,67	1,80	0,50	122,05	26,51	1,00	219,69	1789,06	42429,04
	7,00	0,50	26812,67	1,80	0,50	122,05	26,51	1,00	219,69	1789,06	42429,04
	8,00	0,50	26812,67	1,80	0,50	122,05	26,51	1,00	219,69	1789,06	42429,04
	9,00	0,50	26812,67	1,80	0,50	122,05	26,51	1,00	219,69	1789,06	42429,04
	10,00	0,50	26812,67	1,80	0,50	122,05	26,51	1,00	219,69	1789,06	42429,04
	11,00	0,50	26812,67	1,80	0,50	122,05	26,51	1,00	219,69	1789,06	42429,04
	12,00	0,50	26812,67	1,80	0,50	122,05	26,51	1,00	219,69	1789,06	42429,04
	13,00	0,50	26812,67	1,80	0,50	122,05	26,51	1,00	219,69	1789,06	42429,04
	14,00	0,50	26812,67	1,80	0,50	122,05	26,51	1,00	219,69	1789,06	42429,04
	15,00	0,50	26812,67	1,80	0,50	122,05	26,51	1,00	219,69	2217,81	55394,90
Αργίλος	16,00	0,50	43200,00	1,80	0,50	154,92	26,51	1,00	278,85	2646,55	68360,77
	17,00	0,50	43200,00	1,80	0,50	154,92	26,51	1,00	278,85	2646,55	68360,77
	18,00	0,50	43200,00	1,80	0,50	154,92	26,51	1,00	278,85	2646,55	68360,77
	19,00	0,50	43200,00	1,80	0,50	154,92	26,51	1,00	278,85	2646,55	68360,77
	20,00	0,50	43200,00	1,80	0,50	154,92	26,51	1,00	278,85	2646,55	68360,77
	21,00	0,50	43200,00	1,80	0,50	154,92	26,51	1,00	278,85	2646,55	68360,77
	22,00	0,50	43200,00	1,80	0,50	154,92	26,51	1,00	278,85	2646,55	68360,77
	23,00	0,50	43200,00	1,80	0,50	154,92	26,51	1,00	278,85	2646,55	68360,77
	24,00	0,50	43200,00	1,80	0,50	154,92	26,51	1,00	278,85	2646,55	68360,77
	25,00	0,50	43200,00	1,80	0,50	154,92	26,51	1,00	278,85	1323,28	34180,38

<b>K<sub>base</sub> (kN/m)</b>	233829,10
<b>C<sub>base</sub> (tn/s)</b>	6530,09
<b>k<sub>s,ave</sub> (kN/m)</b>	18458,18
<b>λ</b>	0,05
<b>Ω</b>	0,19
<b>2λL</b>	2,37
<b>Λ</b>	0,63
<b>G<sub>ave</sub> (kPa)</b>	36645,07
<b>G<sub>L</sub> (kPa)</b>	43200,00
<b>G<sub>base</sub> (kPa)</b>	43200,00
<b>ν<sub>ave</sub></b>	0,50

		Πάσσαλος		1	2	3	4	5	6	7	8
	$x_j$		<b>0,000</b>	<b>6,332</b>	<b>12,664</b>	<b>19,000</b>	<b>0,000</b>	<b>6,332</b>	<b>12,664</b>	<b>19,000</b>	
$x_i$	$y_i$	$y_j$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>-6,332</b>	<b>-6,332</b>	<b>-6,332</b>	<b>-6,332</b>	
0,000	0,000	<b><math>d_{ij}</math></b>	0,000	6,332	12,664	19,000	6,332	8,955	14,159	20,027	
6,332	0,000		6,332	0,000	6,332	12,668	8,955	6,332	8,955	14,162	
12,664	0,000		12,664	6,332	0,000	6,336	14,159	8,955	6,332	8,958	
19,000	0,000		19,000	12,668	6,336	0,000	20,027	14,162	8,958	6,332	
0,000	-6,332		6,332	8,955	14,159	20,027	0,000	6,332	12,664	19,000	
6,332	-6,332		8,955	6,332	8,955	14,162	6,332	0,000	6,332	12,668	
12,664	-6,332		14,159	8,955	6,332	8,958	12,664	6,332	0,000	6,336	
19,000	-6,332		20,027	14,162	8,958	6,332	19,000	12,668	6,336	0,000	
		<b><math>a_{ij}</math></b>	1,000	0,226	0,117	0,053	0,226	0,171	0,099	0,044	
			0,226	1,000	0,226	0,116	0,171	0,226	0,171	0,099	
			0,117	0,226	1,000	0,226	0,099	0,171	0,226	0,171	
			0,053	0,116	0,226	1,000	0,044	0,099	0,171	0,226	
			0,226	0,171	0,099	0,044	1,000	0,226	0,117	0,053	
			0,171	0,226	0,171	0,099	0,226	1,000	0,226	0,116	
			0,099	0,171	0,226	0,171	0,117	0,226	1,000	0,226	
			0,044	0,099	0,171	0,226	0,053	0,116	0,226	1,000	

<b>Sum (<math>a_{ij}</math>)</b>	16,68
<b>Πλήθος Πασσάλων</b>	8
<b>Συντελεστής μείωσης e</b>	0,48

Τροποποιημένες δυσκαμψίες καθίζησης				
z (m)	K <sub>s,i</sub> (kN/m)	e*K <sub>s,i</sub> (kN/m)	K <sub>base</sub> (kN/m)	e*K <sub>base</sub> (kN/m)
0	34180,38	16393,49		
-1	68360,77	32786,99		
-2	68360,77	32786,99		
-3	68360,77	32786,99		
-4	68360,77	32786,99		
-5	55394,90	26568,34		
-6	42429,04	20349,69		
-7	42429,04	20349,69		
-8	42429,04	20349,69		
-9	42429,04	20349,69		
-10	42429,04	20349,69		
-11	42429,04	20349,69		
-12	42429,04	20349,69		
-13	42429,04	20349,69		
-14	42429,04	20349,69		
-15	55394,90	26568,34		
-16	68360,77	32786,99		
-17	68360,77	32786,99		
-18	68360,77	32786,99		
-19	68360,77	32786,99		
-20	68360,77	32786,99		
-21	68360,77	32786,99		
-22	68360,77	32786,99		
-23	68360,77	32786,99		
-24	68360,77	32786,99		
-25	34180,38	16393,49	233829,10	112148,42

Τροποποιημένες αποσβέσεις καθίζησης				
z (m)	C <sub>s,i</sub> (kN*s/m)	e*C <sub>s,i</sub> (kN*s/m)	C <sub>base</sub> (kN*s/m)	e*C <sub>base</sub> (kN*s/m)
0	1323,28	634,67		
-1	2646,55	1269,33		
-2	2646,55	1269,33		
-3	2646,55	1269,33		
-4	2646,55	1269,33		
-5	2217,81	1063,70		
-6	1789,06	858,06		
-7	1789,06	858,06		
-8	1789,06	858,06		
-9	1789,06	858,06		
-10	1789,06	858,06		
-11	1789,06	858,06		
-12	1789,06	858,06		
-13	1789,06	858,06		
-14	1789,06	858,06		
-15	2217,81	1063,70		
-16	2646,55	1269,33		
-17	2646,55	1269,33		
-18	2646,55	1269,33		
-19	2646,55	1269,33		
-20	2646,55	1269,33		
-21	2646,55	1269,33		
-22	2646,55	1269,33		
-23	2646,55	1269,33		
-24	2646,55	1269,33		
-25	1323,28	634,67	6530,09	3131,94

Η δυσκαμψία και η απόσβεση της βάσης βγαίνουν με τον μέσο όρο των τιμών:

$$\frac{eK_{s,i} + eK_{base}}{2}$$

και

$$\frac{eC_{s,i} + eC_{base}}{2}$$

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ - Παράδειγμα διαστασιολόγησης οπλισμού

### Διαστασιολόγηση χωρίς ρευστοποίηση

Frame	Station	StepType	P	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>
Text	m	Text	kN	kN	kN	kNm	kNm
11	1	Max	158	0,171	0,055	0,0496	0,1655
11	1	Min	-328,884	-0,165	-0,05	-0,0554	-0,1713
12	1	Max	315,257	0,28	0,084	0,1349	0,4486
12	1	Min	-657,146	-0,284	-0,087	-0,1373	-0,451
13	1	Max	472,706	0,321	0,095	0,2555	0,7964
13	1	Min	-985,829	-0,349	-0,123	-0,2298	-0,7706
14	1	Max	630,444	0,266	0,077	0,4002	1,127
14	1	Min	-1315,14	-0,334	-0,146	-0,3062	-1,033
15	1	Max	788,571	0,097	0,025	0,5367	1,3089
15	1	Min	-1645,28	-0,22	-0,148	-0,3201	-1,0924
16	1	Max	947,185	0,283	0,079	0,6165	1,1634
16	1	Min	-1976,47	-0,467	-0,264	-0,2158	-0,7628
17	1	Max	1106,385	0,947	0,278	0,7243	0,9869
17	1	Min	-2308,9	-1,186	-0,517	-0,0847	-0,3473
18	1	Max	1266,272	1,986	0,59	1,4836	2,932
18	1	Min	-2642,79	-2,246	-0,85	-0,5839	-2,0323
19	1	Max	1426,946	3,397	1,016	2,6861	6,4734
19	1	Min	-2978,36	-3,602	-1,221	-1,5815	-5,3688
20	1	Max	1588,506	5,057	1,522	4,2085	11,5046
20	1	Min	-3315,8	-5,07	-1,535	-3,0908	-10,3869
21	1	Max	1751,054	6,701	2,265	5,8115	17,6962
21	1	Min	-3655,34	-6,312	-1,876	-5,0827	-16,9673
22	1	Max	1914,691	7,661	3,012	7,1835	24,0449
22	1	Min	-3997,18	-6,585	-1,936	-7,5305	-24,3919
23	1	Max	2079,521	6,948	3,482	8,5002	28,6703
23	1	Min	-4341,54	-4,851	-1,386	-10,9437	-31,1138
24	1	Max	2245,646	5,03	3,802	8,1368	27,8148
24	1	Min	-4688,65	-1,602	-0,374	-14,0077	-33,6857
25	1	Max	2413,171	14,495	7,639	4,7058	16,8559
25	1	Min	-5038,71	-9,589	-2,734	-15,4826	-27,6327
26	1	Max	2582,199	33,419	14,158	2,7991	11,0523
26	1	Min	-5391,95	-27,28	-8,019	-19,715	-27,9682
27	1	Max	2752,837	60,78	22,57	17,5069	60,5771
27	1	Min	-5748,58	-54,372	-16,162	-40,8303	-83,9005
28	1	Max	2925,192	95,117	31,682	44,2425	149,8981
28	1	Min	-6108,84	-90,536	-27,101	-72,1468	-177,802
29	1	Max	3099,372	131,228	39,242	83,7348	281,0493



29	1	Min	-6472,95	-132,127	-40,141	-110,74	-308,055
30	1	Max	3275,485	159,709	47,394	134,7151	449,232
30	1	Min	-6841,15	-171,605	-59,29	-149,825	-464,342
31	1	Max	3453,642	160,34	47,002	199,882	634,4359
31	1	Min	-7213,65	-190,554	-77,216	-184,778	-619,332
32	1	Max	3633,954	106,621	30,093	284,8398	791,3019
32	1	Min	-7590,7	-163,484	-86,956	-212,872	-719,334
33	1	Max	3816,535	43,725	10,29	356,6335	828,1044
33	1	Min	-7972,53	-134,559	-101,124	-193,832	-665,303
34	1	Max	4001,497	290,473	83,436	383,9318	634,382
34	1	Min	-8359,39	-417,792	-210,754	-93,8119	-344,262
35	1	Max	4188,958	765,181	225,416	546,5115	827,4191
35	1	Min	-8751,51	-920,622	-380,858	-100,95	-381,858

$M_{tot}$	$e_i$	$e_i$	$M_{01}$	$M_{02}$	$M_{ed}$	$\mu_{ed}$	$V_{ed}$
kNm	mm	m	kNm	kNm	kNm		
0,172773	100	0,1	15,88997	15,97277	15,97277	0,001119	0,011066
0,180036	100	0,1	33,06844	33,20895	33,20895	0,002326	-0,02303
0,468444	100	0,1	31,85136	31,99414	31,99414	0,002241	0,022079
0,471436	100	0,1	66,18604	66,36615	66,36615	0,004648	-0,04602
0,836381	100	0,1	47,90755	48,10698	48,10698	0,003369	0,033106
0,804135	100	0,1	99,38703	99,59865	99,59865	0,006975	-0,06904
1,195947	100	0,1	63,98486	64,24035	64,24035	0,004499	0,044153
1,077426	100	0,1	132,5912	132,8176	132,8176	0,009302	-0,09211
1,414661	100	0,1	79,96382	80,27176	80,27176	0,005622	0,055228
1,138333	100	0,1	165,6663	165,8846	165,8846	0,011618	-0,11523
1,316652	100	0,1	95,67651	96,03515	96,03515	0,006726	0,066336
0,792738	100	0,1	198,4392	198,7302	198,7302	0,013918	-0,13842
1,224166	100	0,1	111,0223	111,8627	111,8627	0,007834	0,077486
0,357479	100	0,1	231,2474	233,0362	233,0362	0,016321	-0,1617
3,285984	100	0,1	127,7575	129,9132	129,9132	0,009098	0,088684
2,114517	100	0,1	266,3938	269,4103	269,4103	0,018868	-0,18509
7,008569	100	0,1	146,537	149,7032	149,7032	0,010484	0,099936
5,596888	100	0,1	303,4325	307,4569	307,4569	0,021533	-0,20859
12,2502	100	0,1	167,0614	171,1008	171,1008	0,011983	0,111251
10,83701	100	0,1	342,417	347,0109	347,0109	0,024303	-0,23222
18,62603	100	0,1	189,3749	193,7314	193,7314	0,013568	0,122635
17,71223	100	0,1	383,2458	387,3284	387,3284	0,027127	-0,256
25,09502	100	0,1	213,0257	216,5641	216,5641	0,015167	0,134096
25,52789	100	0,1	425,2458	427,2048	427,2048	0,029919	-0,27994
29,90384	100	0,1	237,1893	237,8559	237,8559	0,016658	0,14564
32,98232	100	0,1	463,5594	467,1367	467,1367	0,032716	-0,30406
28,98052	100	0,1	253,5451	259,2463	259,2463	0,018156	0,157274

36,48208	100	0,1	491,8422	505,3469	505,3469	0,035392	-0,32837
17,50045	100	0,1	258,8176	275,0782	275,0782	0,019265	0,169007
31,67455	100	0,1	511,2401	535,5453	535,5453	0,037507	-0,35289
11,40124	100	0,1	269,6211	284,3683	284,3683	0,019916	0,180845
34,21844	100	0,1	573,4129	574,8174	574,8174	0,040257	-0,37763
63,05614	100	0,1	337,3157	338,3398	338,3398	0,023696	0,192795
93,30813	100	0,1	668,1663	684,2788	684,2788	0,047924	-0,4026
156,2909	100	0,1	434,7923	448,8101	448,8101	0,031432	0,204866
191,8824	100	0,1	802,7667	835,5285	835,5285	0,058516	-0,42783
293,258	100	0,1	569,3768	603,1952	603,1952	0,042245	0,217065
327,3548	100	0,1	974,6502	1028,305	1028,305	0,072018	-0,45333
468,9963	100	0,1	735,0123	796,5448	796,5448	0,055786	0,229399
487,9146	100	0,1	1172,029	1248,386	1248,386	0,087431	-0,47912
665,178	100	0,1	909,6394	1010,542	1010,542	0,070774	0,241876
646,3083	100	0,1	1367,673	1473,987	1473,987	0,103231	-0,50521
841,0068	100	0,1	1061,316	1204,402	1204,402	0,084351	0,254505
750,171	100	0,1	1509,241	1628,926	1628,926	0,114082	-0,53162
901,6343	100	0,1	1102,158	1283,288	1283,288	0,089875	0,267292
692,964	100	0,1	1490,217	1607,607	1607,607	0,112589	-0,55836
741,5148	100	0,1	915,5768	1141,664	1141,664	0,079957	0,280246
356,8152	100	0,1	1192,754	1495,906	1495,906	0,104766	-0,58545
991,6134	100	0,1	577,7452	1410,509	1410,509	0,098785	0,293374
394,9765	100	0,1	875,241	1270,127	1270,127	0,088954	-0,61291

$\omega$	$A_{st}$	$\rho$	$\rho$ (%)
	$m^2$		
0,016073	0,000528	0,000672	0,067207
0,015134	0,000497	0,000633	0,063283
0,029708	0,000976	0,001242	0,124219
0,032468	0,001066	0,001358	0,135761
0,043383	0,001425	0,001814	0,1814
0,04962	0,00163	0,002075	0,20748
0,057093	0,001875	0,002387	0,238728
0,066589	0,002187	0,002784	0,278437
0,070825	0,002326	0,002961	0,296147
0,083381	0,002738	0,003487	0,348651
0,084558	0,002777	0,003536	0,353569
0,099985	0,003284	0,004181	0,418079
0,098352	0,00323	0,004112	0,41125
0,116063	0,003812	0,004853	0,485306
0,112574	0,003697	0,004707	0,470717
0,131443	0,004317	0,005496	0,549614
0,127152	0,004176	0,005317	0,531675

0,14612	0,004799	0,00611	0,610988
0,142075	0,004666	0,005941	0,59407
0,160037	0,005256	0,006692	0,66918
0,157287	0,005165	0,006577	0,657681
0,173235	0,005689	0,007244	0,724366
0,172626	0,005669	0,007218	0,721818
0,185848	0,006103	0,007771	0,777104
0,187803	0,006168	0,007853	0,785281
0,197638	0,006491	0,008264	0,826402
0,203101	0,00667	0,008492	0,849248
0,208837	0,006858	0,008732	0,873232
0,217567	0,007145	0,009097	0,909733
0,220791	0,007251	0,009232	0,923215
0,231033	0,007587	0,00966	0,966041
0,229148	0,007525	0,009582	0,958159
0,252248	0,008284	0,010547	1,05475
0,216533	0,007111	0,009054	0,905411
0,283504	0,00931	0,011854	1,185443
0,186434	0,006123	0,007796	0,779554
0,323114	0,010611	0,013511	1,35107
0,135463	0,004449	0,005664	0,566424
0,370749	0,012176	0,015502	1,550248
0,066432	0,002182	0,002778	0,277778
0,423486	0,013908	0,017708	1,770766
0,012084	0,000397	0,000505	0,050528
0,473561	0,015552	0,019801	1,980149
0,071053	0,002333	0,002971	0,297101
0,50168	0,016476	0,020977	2,097726
0,071496	0,002348	0,00299	0,298954
0,48665	0,015982	0,020349	2,034879
0,042204	0,001386	0,001765	0,17647
0,55259	0,018147	0,023106	2,310599
0,024903	0,000818	0,001041	0,104128

### Έλεγχος διάτμησης

$V_{ed}$	$V_{ed}$	$v_{Ed}$	$A_w/s$	$s$ (m)	Έλεγχος απόστασης
MN	kN	MPa	m		
0,00018	0,179627	0,000364	2,65E-07	1516,463	OK
0,000172	0,172409	0,000349	2,54E-07	1579,95	OK
0,000292	0,292329	0,000592	4,31E-07	931,822	OK
0,000297	0,297027	0,000601	4,38E-07	917,0825	OK
0,000335	0,334763	0,000677	4,94E-07	813,7056	OK
0,00037	0,370041	0,000749	5,46E-07	736,1307	OK
0,000277	0,276921	0,00056	4,09E-07	983,6691	OK
0,000365	0,364516	0,000738	5,38E-07	747,2872	OK
0,0001	0,10017	0,000203	1,48E-07	2719,363	OK
0,000265	0,265149	0,000537	3,91E-07	1027,34	OK
0,000294	0,29382	0,000595	4,34E-07	927,0932	OK
0,000536	0,536456	0,001086	7,92E-07	507,7737	OK
0,000987	0,986961	0,001997	1,46E-06	275,9968	OK
0,001294	1,293787	0,002618	1,91E-06	210,5433	OK
0,002072	2,071786	0,004193	3,06E-06	131,4799	OK
0,002401	2,401461	0,00486	3,54E-06	113,4302	OK
0,003546	3,545683	0,007175	5,23E-06	76,82532	OK
0,003803	3,80332	0,007697	5,61E-06	71,62116	OK
0,005281	5,281073	0,010687	7,79E-06	51,58009	OK
0,005297	5,297275	0,01072	7,82E-06	51,42233	OK
0,007073	7,073445	0,014314	1,04E-05	38,50998	OK
0,006585	6,584886	0,013326	9,72E-06	41,36719	OK
0,008232	8,231832	0,016659	1,21E-05	33,09084	OK
0,006864	6,863696	0,01389	1,01E-05	39,68681	OK
0,007772	7,771681	0,015727	1,15E-05	35,0501	OK
0,005045	5,045116	0,01021	7,45E-06	53,99246	OK
0,006305	6,305244	0,01276	9,31E-06	43,20185	OK
0,001645	1,645078	0,003329	2,43E-06	165,5838	OK
0,016385	16,38473	0,033158	2,42E-05	16,62513	OK
0,009971	9,971142	0,020179	1,47E-05	27,31866	OK
0,036294	36,29433	0,073448	5,36E-05	7,505255	OK
0,028434	28,43418	0,057542	4,2E-05	9,579956	OK
0,064835	64,83528	0,131207	9,57E-05	4,201389	OK
0,056723	56,72323	0,11479	8,37E-05	4,802234	OK
0,100255	100,2546	0,202884	0,000148	2,717063	OK
0,094505	94,50519	0,191249	0,000139	2,882362	OK
0,13697	136,9698	0,277184	0,000202	1,988747	OK
0,13809	138,09	0,279451	0,000204	1,972614	OK
0,166593	166,5928	0,337132	0,000246	1,635114	OK
0,181559	181,5588	0,367419	0,000268	1,500331	OK

0,167087	167,0871	0,338133	0,000247	1,630277	OK
0,205604	205,6043	0,416079	0,000303	1,324866	OK
0,110786	110,7864	0,224197	0,000163	2,458769	OK
0,185171	185,1712	0,374729	0,000273	1,471062	OK
0,044919	44,91948	0,090903	6,63E-05	6,064144	OK
0,168322	168,3217	0,340631	0,000248	1,618319	OK
0,302219	302,2187	0,611597	0,000446	0,901328	OK
0,46794	467,9395	0,946965	0,000691	0,582123	OK
0,797693	797,6931	1,614284	0,001177	0,341482	OK
0,996292	996,292	2,016186	0,00147	0,273412	OK

### Διαστασιολόγηση με ρευστοποίηση

Frame	Station	StepType	P	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>
Text	m	Text	kN	kN	kN	kNm	kNm
11	1	Max	465,062	0,674	0,219	0,1953	0,65
11	1	Min	-1056,35	-0,65	-0,195	-0,219	-0,6737
12	1	Max	711,462	0,357	0,107	0,3037	1,0103
12	1	Min	-1585,93	-0,363	-0,113	-0,3219	-1,0284
13	1	Max	958,745	1,613	0,484	0,2827	0,7183
13	1	Min	-2117,53	-1,728	-0,599	-0,1862	-0,6218
14	1	Max	1207,221	5,394	1,62	2,2043	6,4046
14	1	Min	-2651,8	-5,7	-1,926	-1,8017	-6,002
15	1	Max	1457,203	10,907	3,276	6,046	17,8762
15	1	Min	-3189,44	-11,474	-3,842	-5,0766	-16,9068
16	1	Max	1709,006	17,352	5,212	12,1003	36,07
16	1	Min	-3731,11	-18,195	-6,055	-10,2878	-34,2575
17	1	Max	1962,946	22,475	6,751	19,8562	59,5484
17	1	Min	-4277,51	-23,481	-7,757	-17,0383	-56,7304
18	1	Max	2219,343	21,708	6,522	27,1887	82,0629
18	1	Min	-4829,31	-22,519	-7,334	-23,5589	-78,4331
19	1	Max	2478,519	7,546	2,337	29,3239	89,4231
19	1	Min	-5387,22	-7,432	-2,223	-25,8088	-85,9079
20	1	Max	2740,8	32,989	11,48	17,8699	56,5211
20	1	Min	-5951,94	-30,731	-9,222	-16,6132	-55,2644
21	1	Max	2758,929	32,879	11,446	7,2027	24,112
21	1	Min	-5930,81	-30,621	-9,188	-8,2045	-25,1138
22	1	Max	2777,038	32,713	11,395	2,1319	7,2097
22	1	Min	-5909,66	-30,454	-9,137	-5,3922	-10,47
23	1	Max	2795,128	32,493	11,327	10,8832	36,3855
23	1	Min	-5888,49	-30,234	-9,069	-16,402	-41,9044
24	1	Max	2813,198	32,23	11,246	19,8211	66,1904
24	1	Min	-5867,3	-29,971	-8,988	-27,5984	-73,9677
25	1	Max	2831,249	31,94	11,157	28,6867	95,7617

25	1	Min	-5846,1	-29,681	-8,899	-38,7225	-105,798
26	1	Max	2849,281	31,642	11,066	37,4607	125,0348
26	1	Min	-5824,87	-29,384	-8,807	-49,755	-137,329
27	1	Max	2867,293	31,356	10,978	46,1418	154,0041
27	1	Min	-5803,62	-29,098	-8,72	-60,6946	-168,557
28	1	Max	2885,287	31,098	10,9	54,7376	182,6923
28	1	Min	-5782,36	-28,84	-8,641	-71,5489	-199,504
29	1	Max	2903,26	30,882	10,835	63,263	211,145
29	1	Min	-5761,07	-28,623	-8,577	-82,3328	-230,215
30	1	Max	2921,215	30,717	10,788	71,7393	239,4278
30	1	Min	-5739,77	-28,459	-8,529	-93,0676	-260,756
31	1	Max	3168,791	155,553	46,322	121,8895	405,4303
31	1	Min	-6259,19	-169,381	-60,15	-129,39	-412,931
32	1	Max	3474,092	198,957	58,818	220,787	648,13
32	1	Min	-6913,09	-245,699	-105,56	-181,546	-608,889
33	1	Max	3783,752	84,338	23,851	335,7538	817,5129
33	1	Min	-7575,72	-178,059	-117,571	-202,792	-684,551
34	1	Max	4098,161	200,342	58,166	399,534	687,6908
34	1	Min	-8247,92	-349,862	-207,686	-117,052	-405,209
35	1	Max	4417,714	869,9	258,992	575,2782	821,8911
35	1	Min	-8930,54	-1066,28	-455,369	-96,4196	-343,033

$M_{tot}$	$e_i$	$e_i$	$M_{01}$	$M_{02}$	$M_{ed}$	$\mu_{ed}$	$V_{ed}$
kNm	mm	m	kNm	kNm	kNm		
0,678706	100	0,1	46,86035	47,18491	47,18491	0,003305	0,032571
0,708402	100	0,1	106,3436	106,5018	106,5018	0,007459	-0,07398
1,05496	100	0,1	72,03903	72,20116	72,20116	0,005057	0,049827
1,077602	100	0,1	158,8548	159,6708	159,6708	0,011183	-0,11107
0,771929	100	0,1	96,08598	96,64643	96,64643	0,006769	0,067146
0,649081	100	0,1	212,4017	215,519	215,519	0,015094	-0,1483
6,773318	100	0,1	124,1741	127,4954	127,4954	0,008929	0,084548
6,266588	100	0,1	271,447	278,002	278,002	0,01947	-0,18572
18,87095	100	0,1	157,6793	164,5912	164,5912	0,011527	0,102055
17,65253	100	0,1	336,5966	347,402	347,402	0,02433	-0,22337
38,04553	100	0,1	197,6111	208,9461	208,9461	0,014634	0,119691
35,76891	100	0,1	408,8803	423,5197	423,5197	0,029661	-0,26131
62,77165	100	0,1	243,7957	259,0663	259,0663	0,018144	0,137475
59,23379	100	0,1	486,9846	502,361	502,361	0,035183	-0,29958
86,44967	100	0,1	292,4983	308,384	308,384	0,021598	0,155432
81,89489	100	0,1	564,8259	573,2088	573,2088	0,040145	-0,33822
94,10835	100	0,1	333,6487	341,9603	341,9603	0,023949	0,173584
89,70096	100	0,1	615,4044	628,4229	628,4229	0,044012	-0,37729
59,27873	100	0,1	333,3587	347,7741	347,7741	0,024356	0,191952

57,70747	100	0,1	637,1594	652,9012	652,9012	0,045726	-0,41684
25,16481	100	0,1	301,0577	317,6998	317,6998	0,02225	0,193222
26,42001	100	0,1	602,1614	619,5008	619,5008	0,043387	-0,41537
7,518296	100	0,1	285,2221	289,521	289,521	0,020277	0,19449
11,77696	100	0,1	602,7428	613,352	613,352	0,042956	-0,41388
37,97827	100	0,1	307,5166	317,4911	317,4911	0,022236	0,195757
45,00005	100	0,1	633,849	642,3606	642,3606	0,044988	-0,4124
69,09446	100	0,1	343,2676	350,4143	350,4143	0,024541	0,197023
78,94867	100	0,1	665,6789	671,2501	671,2501	0,047011	-0,41092
99,96614	100	0,1	378,9189	383,091	383,091	0,02683	0,198287
112,6612	100	0,1	697,2707	699,8478	699,8478	0,049014	-0,40943
130,5259	100	0,1	414,2832	415,454	415,454	0,029096	0,19955
146,0645	100	0,1	728,1268	728,5513	728,5513	0,051024	-0,40795
160,7679	100	0,1	447,4972	449,3303	449,3303	0,031469	0,200811
179,1515	100	0,1	756,0976	759,5137	759,5137	0,053193	-0,40646
190,7162	100	0,1	479,2449	484,0705	484,0705	0,033902	0,202072
211,9456	100	0,1	783,7968	790,1813	790,1813	0,05534	-0,40497
220,4187	100	0,1	510,7447	518,5396	518,5396	0,036316	0,20333
244,4945	100	0,1	811,2831	820,6018	820,6018	0,057471	-0,40348
249,9444	100	0,1	542,0659	552,7964	552,7964	0,038715	0,204588
276,867	100	0,1	850,8439	910,5734	910,5734	0,063772	-0,40199
423,3566	100	0,1	671,5579	740,2357	740,2357	0,051843	0,221927
432,7281	100	0,1	1058,647	1177,868	1177,868	0,082492	-0,43836
684,7039	100	0,1	879,5073	1032,113	1032,113	0,072284	0,243309
635,3774	100	0,1	1326,686	1474,798	1474,798	0,103288	-0,48416
883,7748	100	0,1	1052,654	1262,15	1262,15	0,088395	0,264996
713,9575	100	0,1	1471,529	1591,48	1591,48	0,11146	-0,53057
795,3276	100	0,1	973,9399	1205,144	1205,144	0,084402	0,287015
421,7768	100	0,1	1246,569	1428,085	1428,085	0,100016	-0,57764
1003,22	100	0,1	517,0282	1444,991	1444,991	0,1012	0,309395
356,3257	100	0,1	893,4112	1249,38	1249,38	0,087501	-0,62545

$\omega$	$A_{st}$	$\rho$	$\rho$ (%)
	$m^2$		
0,042695	0,001402	0,001785	0,178527
0,05331	0,001751	0,002229	0,222911
0,064086	0,002105	0,00268	0,267967
0,080431	0,002641	0,003363	0,336315
0,08547	0,002807	0,003574	0,357384
0,106447	0,003496	0,004451	0,445098
0,108025	0,003548	0,004517	0,451696
0,130411	0,004283	0,005453	0,545299
0,131762	0,004327	0,005509	0,550948

0,15189	0,004988	0,006351	0,635111
0,15689	0,005152	0,00656	0,656021
0,170392	0,005596	0,007125	0,712478
0,183205	0,006017	0,007661	0,766055
0,186058	0,00611	0,00778	0,777982
0,209626	0,006884	0,008765	0,876531
0,200561	0,006587	0,008386	0,838626
0,233593	0,007671	0,009767	0,976747
0,21518	0,007067	0,008998	0,899755
0,253022	0,008309	0,01058	1,057986
0,233559	0,00767	0,009766	0,976604
0,249143	0,008182	0,010418	1,041766
0,241961	0,007946	0,010117	1,011734
0,245617	0,008066	0,01027	1,027024
0,242763	0,007973	0,010151	1,015091
0,251653	0,008264	0,010523	1,052264
0,233892	0,007681	0,00978	0,977998
0,258565	0,008491	0,010812	1,081164
0,225027	0,00739	0,009409	0,94093
0,265469	0,008718	0,0111	1,110032
0,216219	0,007101	0,009041	0,904097
0,272352	0,008944	0,011388	1,138812
0,207357	0,00681	0,00867	0,867044
0,279532	0,00918	0,011688	1,168837
0,197838	0,006497	0,008272	0,82724
0,286901	0,009422	0,011996	1,199648
0,188375	0,006186	0,007877	0,787673
0,294259	0,009664	0,012304	1,230413
0,178958	0,005877	0,007483	0,748296
0,301615	0,009905	0,012612	1,261172
0,152422	0,005006	0,006373	0,637338
0,352906	0,01159	0,014756	1,475642
0,084309	0,002769	0,003525	0,35253
0,42904	0,01409	0,01794	1,793989
0,010116	0,000332	0,000423	0,042299
0,495244	0,016264	0,020708	2,070812
0,05779	0,001898	0,002416	0,241643
0,505684	0,016607	0,021145	2,114469
0,015259	0,000501	0,000638	0,063804
0,575187	0,01889	0,024051	2,405088
0,025466	0,000836	0,001065	0,106485



## Έλεγχος διάτμησης

V <sub>ed</sub>	V <sub>ed</sub>	v <sub>Ed</sub>	A <sub>w</sub> /s	s (m)	Έλεγχος απόστασης
MN	kN	MPa	m		
0,000709	0,708687	0,001434	1,05E-06	384,3704	OK
0,000679	0,67862	0,001373	1E-06	401,4003	OK
0,000373	0,37269	0,000754	5,5E-07	730,8971	OK
0,00038	0,380182	0,000769	5,61E-07	716,4951	OK
0,001684	1,68405	0,003408	2,49E-06	161,7518	OK
0,001829	1,828875	0,003701	2,7E-06	148,943	OK
0,005632	5,632019	0,011397	8,31E-06	48,366	OK
0,006017	6,0166	0,012176	8,88E-06	45,27444	OK
0,011388	11,38836	0,023047	1,68E-05	23,919	OK
0,0121	12,10015	0,024487	1,79E-05	22,51197	OK
0,018118	18,11786	0,036665	2,67E-05	15,03479	OK
0,019176	19,17605	0,038806	2,83E-05	14,20512	OK
0,023467	23,46703	0,04749	3,46E-05	11,6077	OK
0,024729	24,7291	0,050044	3,65E-05	11,01529	OK
0,022667	22,66658	0,04587	3,35E-05	12,01762	OK
0,023683	23,68318	0,047927	3,5E-05	11,50176	OK
0,0079	7,8996	0,015986	1,17E-05	34,48253	OK
0,007757	7,757342	0,015698	1,14E-05	35,11489	OK
0,034929	34,92942	0,070686	5,15E-05	7,798532	OK
0,032085	32,08488	0,06493	4,74E-05	8,489924	OK
0,034814	34,81436	0,070453	5,14E-05	7,824307	OK
0,03197	31,96975	0,064697	4,72E-05	8,520498	OK
0,034641	34,64082	0,070102	5,11E-05	7,863504	OK
0,031795	31,79514	0,064344	4,69E-05	8,567291	OK
0,034411	34,4107	0,069637	5,08E-05	7,916091	OK
0,031565	31,56488	0,063878	4,66E-05	8,629788	OK
0,034136	34,13569	0,06908	5,04E-05	7,979865	OK
0,03129	31,28969	0,063321	4,62E-05	8,705685	OK
0,033833	33,83256	0,068467	4,99E-05	8,051362	OK
0,030986	30,98635	0,062707	4,57E-05	8,79091	OK
0,033521	33,52122	0,067837	4,95E-05	8,126141	OK
0,030675	30,67544	0,062078	4,53E-05	8,88001	OK
0,033222	33,22221	0,067231	4,9E-05	8,19928	OK
0,030377	30,3765	0,061473	4,48E-05	8,967398	OK
0,032953	32,95293	0,066687	4,86E-05	8,266282	OK
0,030107	30,10668	0,060927	4,44E-05	9,047765	OK
0,032728	32,72759	0,066231	4,83E-05	8,323198	OK
0,02988	29,88045	0,060469	4,41E-05	9,11627	OK
0,032556	32,55634	0,065884	4,8E-05	8,36698	OK
0,02971	29,70957	0,060123	4,38E-05	9,168703	OK

0,162304	162,3036	0,328452	0,00024	1,678325	OK
0,179744	179,7441	0,363746	0,000265	1,515478	OK
0,207469	207,4691	0,419853	0,000306	1,312958	OK
0,267415	267,4152	0,541166	0,000395	1,018634	OK
0,087646	87,6457	0,177368	0,000129	3,107947	OK
0,213373	213,3728	0,4318	0,000315	1,276631	OK
0,208615	208,615	0,422172	0,000308	1,305746	OK
0,406862	406,8623	0,823363	0,0006	0,66951	OK
0,907636	907,6359	1,836774	0,001339	0,300118	OK
1,159443	1159,443	2,346353	0,001711	0,234939	OK

### Έλεγχος λυγισμού

Πάσσαλος	Top			Bottom		
	P (kN)	M <sub>3</sub> (kNm)	M <sub>2</sub> (kNm)	P (kN)	M <sub>3</sub> (kNm)	M <sub>2</sub> (kNm)
<b>1</b>	-5739,76	239,43	93,06	-5950,44	56,52	17,86
<b>2</b>	-3669,37	271,62	93,52	-3872,22	57,92	17,87
<b>5</b>	-5486,06	250,31	91,25	-5675,25	57,21	17,75
<b>6</b>	-3331,51	272,3	91,13	-3532,28	58	17,74

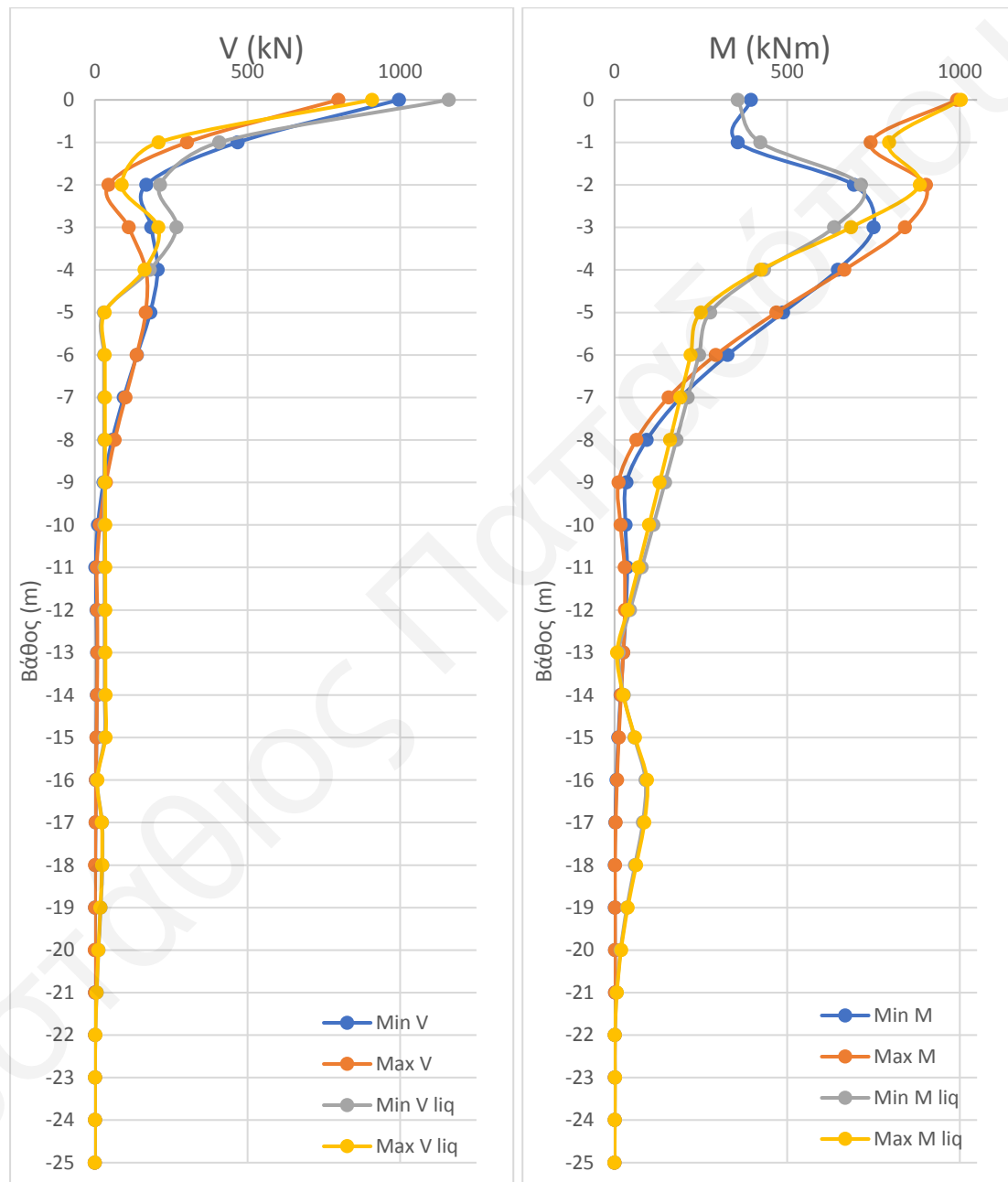
N <sub>ed</sub> (kN)	n	λ	λ <sub>lim</sub>	Check λ <sub>lim</sub> ≤15,4C/sqrt(n)	λ>=λ <sub>lim</sub> ?
-5845,1	0,41	26,00	16,85	16,85	<b>Slender</b>
-3770,795	0,26	26,00	20,98	20,98	<b>Slender</b>
-5580,655	0,39	26,00	17,24	17,24	<b>Slender</b>
-3431,895	0,24	26,00	21,99	21,99	<b>Slender</b>

A <sub>est</sub> (m <sup>2</sup> )	ω <sub>est</sub>	n <sub>u</sub>	K <sub>r</sub>	K <sub>r</sub> Check	e <sub>z</sub> (m)
0,03	0,96	1,96	0,99	0,99	0,13
0,03	0,96	1,96	1,09	1,00	0,13
0,03	0,96	1,96	1,01	1,00	0,13
0,03	0,96	1,96	1,10	1,00	0,13

M <sub>top</sub> (kNm)	M <sub>bot</sub> (kNm)	M <sub>01</sub> (kNm)	M <sub>02</sub> (kNm)	M <sub>0e</sub> (kNm)	M <sub>0e</sub> (kNm) Check	M <sub>2</sub> (kNm)	M <sub>ed</sub> (kNm)	μ	v
256,88	59,27	819,14	1016,74	937,70	937,70	759,86	1697,56	0,1189	-0,4019
287,27	60,61	550,82	777,47	686,81	686,81	490,20	1177,01	0,0824	-0,2570
266,42	59,90	785,39	991,91	909,30	909,30	725,49	1634,78	0,1145	-0,3842
287,14	60,65	506,80	733,29	642,69	642,69	446,15	1088,84	0,0762	-0,2333

$\omega$	$A_{st,req}$	$\rho$	$\rho$ (%)	$\rho$ max (%)
0,0879	0,0029	0,0037	0,3678	0,3678
0,0083	0,0003	0,0003	0,0348	
0,0722	0,0024	0,0030	0,3018	
0,0040	0,0001	0,0002	0,0166	

### Διαγράμματα ροπών-διατμήσεων



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV - Παράδειγμα ελέγχου πλευρικής φέρουσας ικανότητας εδάφους

Ο έλεγχος της πλευρικής φέρουσας ικανότητας του εδάφους συνδέεται άμεσα με την μετατόπιση και της αντιδράσεις των κόμβων. Για τον υπολογισμό της αντίδρασης των ελατηρίων, εφαρμόστηκαν οι μέγιστες μετατοπίσεις των κόμβων του πρώτου (“μετωπικού”) πασσάλου αφού σε αυτόν εμφανίστηκαν οι μεγαλύτερες τιμές και υπάρχει γεωμετρικά η δυνατότητα ανάπτυξης του κωνικού μηχανισμού αστοχίας που προβλέπει η θεωρία Broms (1964a,b). Ουσιαστικά αυτό που μελετήθηκε, ήταν κατά πόσο η δύναμη του ελατηρίου  $F_{tot}$  είναι ικανή να υπερβεί την οριακή πλευρική οριζόντια αντίσταση  $R_i$  που προβλέπεται από τους τύπους του Broms.

*Χωρίς ρευστοποίηση*

$U_1$	$U_2$	GlobalZ	$U_{tot}$	$\sigma_{v0}'$	$\Delta l_i$	$F_1$	$F_2$	$F_{tot}$
m	m	m	m	kPa	m	kN	kN	kN
0,0066	0,002	0	0,006896	0	1	716,3	215,91	748,1329
0,0048	0,0016	-1	0,00506	120	1	511,14	172,61	539,4982
0,0031	0,0011	-2	0,003289	230	1	320,95	120,96	342,9872
0,0017	0,0007	-3	0,001838	340	1	172,25	74,53	187,6827
0,0008	0,0003	-4	0,000854	450	1	71,38	39,29	81,47888
0,0002	0,0001	-5	0,000224	560	1	27,78	20,58	34,5726
$R_i$ συνόρου	$R_i$ άμμου	$R_i$ αργίλου	$R_i$ άκρης	Σύνολο $F_{tot}$	Σύνολο $R_i$	$F_{tot} > R_i?$	Αστοχία	
kN	kN	kN	kN	kN	kN			
0	0	0	108	1934,35	4014	No	Όχι	
0	0	348	0					
0	0	474	0					
0	0	600	0					
0	0	648	0					
1836	0	0	0					

*Με ρευστοποίηση*

$U_1$	$U_2$	GlobalZ	$U_{tot}$	$\sigma_{v0}'$	$\Delta l_i$	$F_1$	$F_2$	$F_{tot}$
m	m	m	m	kPa	m	kN	kN	kN
0,0051	0,0015	0	0,005316	0	1	552,55	166,38	577,0562
0,0034	0,0012	-1	0,003606	120	1	725,46	250,41	767,4616
0,0018	0,007	-2	0,007228	230	1	388,48	155,13	418,3085
0,0006	0,0003	-3	0,000671	340	1	139,4	74,13	157,8848
0,0004	0,0002	-4	0,000447	450	1	77,81	45,86	90,31908
0,0008	0,0003	-5	0,000854	560	1	141,62	53,4	151,3532

R <sub>i</sub> συνόρου	R <sub>i</sub> άμμου	R <sub>i</sub> αργίλου	R <sub>i</sub> άκρης	Σύνολο F <sub>tot</sub>	Σύνολο R <sub>i</sub>	F <sub>tot</sub> >R <sub>i</sub> ?	Αστοχία
kN	kN	kN	kN	kN	kN		
0	0	0	108	2162,38	4014	No	Όχι
0	0	348	0				
0	0	474	0				
0	0	600	0				
0	0	648	0				
1836	0	0	0				

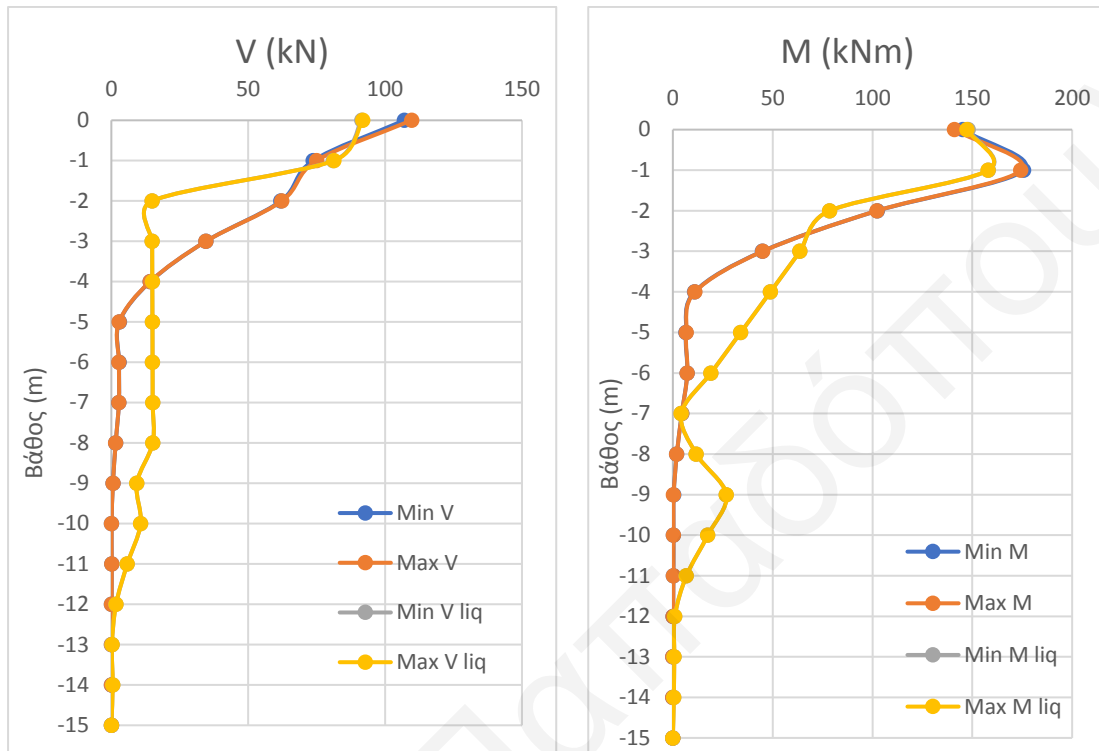
Οι τιμές R<sub>i</sub> συνόρου, R<sub>i</sub> άμμου, R<sub>i</sub> αργίλου, και R<sub>i</sub> άκρης συμβολίζουν τις τιμές της αντίστασης του εδάφους ανάλογα με το βάθος εφαρμογής τους και υπολογίζονται σύμφωνα με το κεφάλαιο 3 της παρούσας διπλωματικής. Τα U<sub>tot</sub> και F<sub>tot</sub> υπολογίζονται ως:

$$U_{tot} = \sqrt{(F_1^2 + F_2^2)}$$

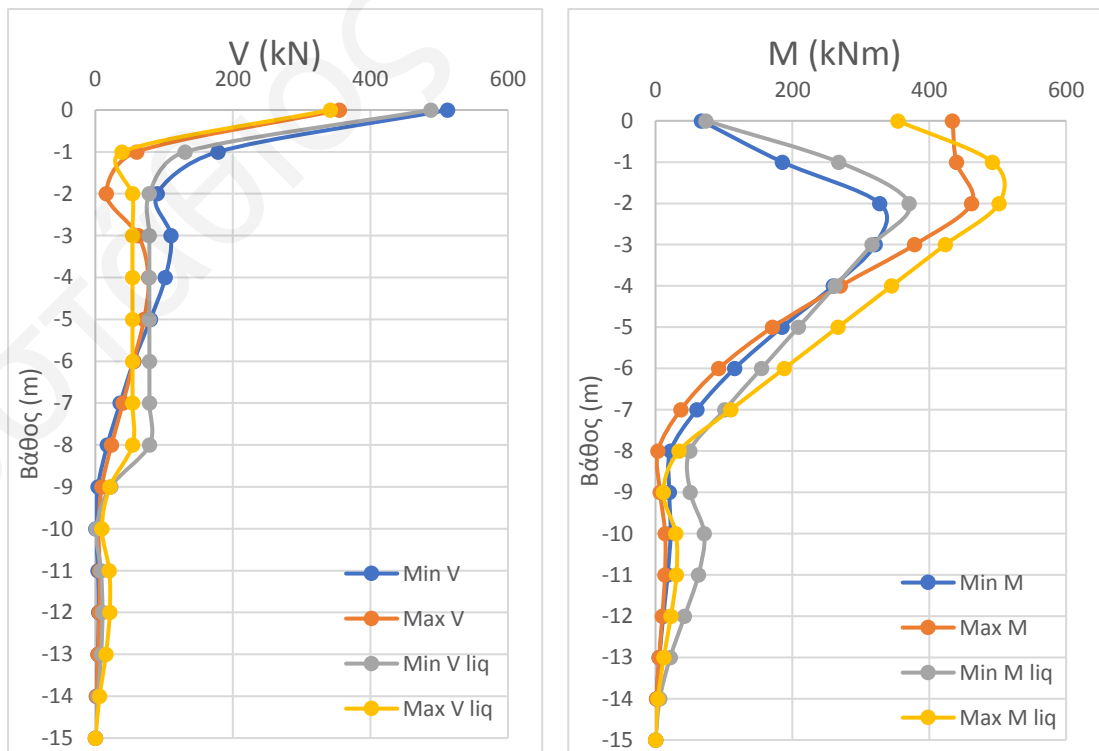
$$U_{tot} = \sqrt{(U_1^2 + U_2^2)}$$

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V - Διαγράμματα τεμνουσών και ροπών

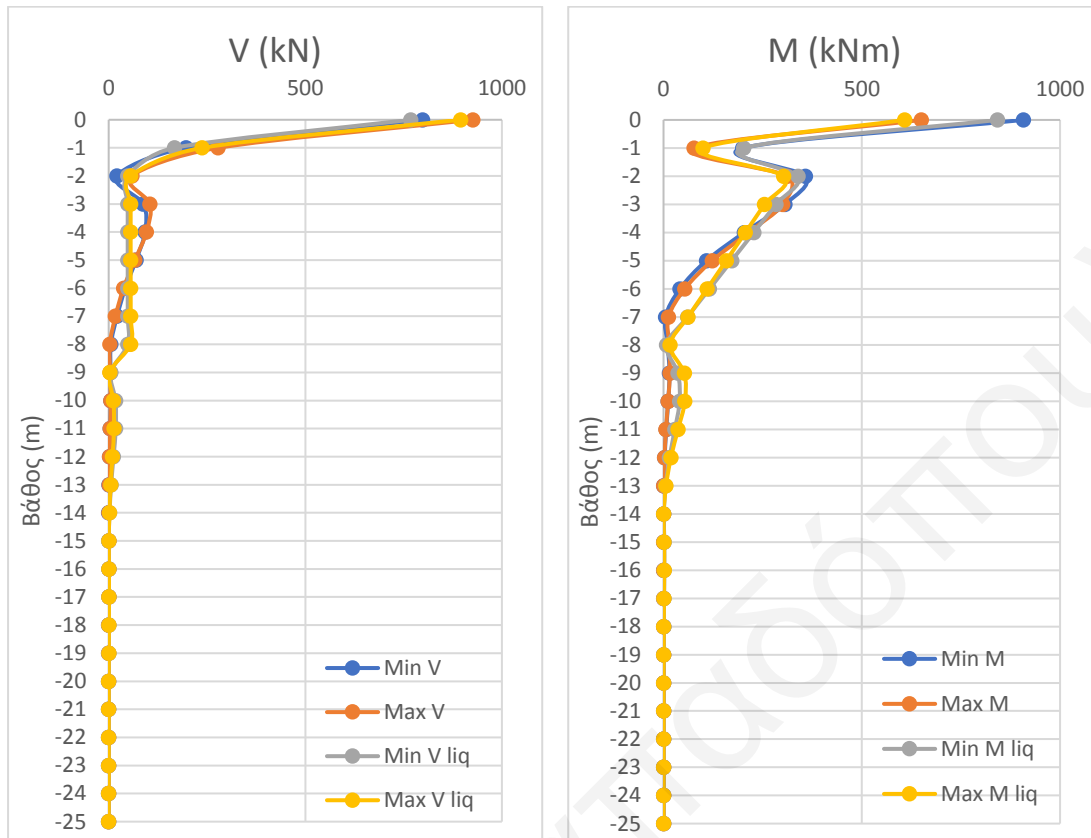
### Παραμετρική Ανάλυση 2



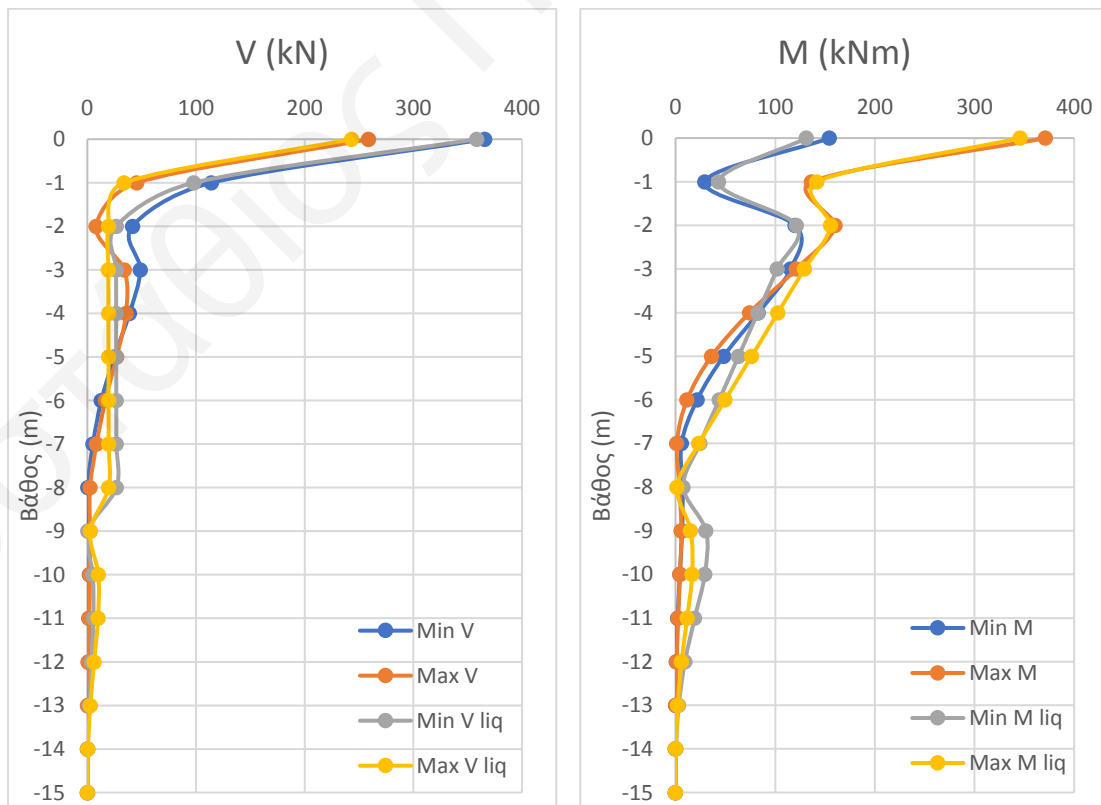
### Παραμετρική Ανάλυση 3



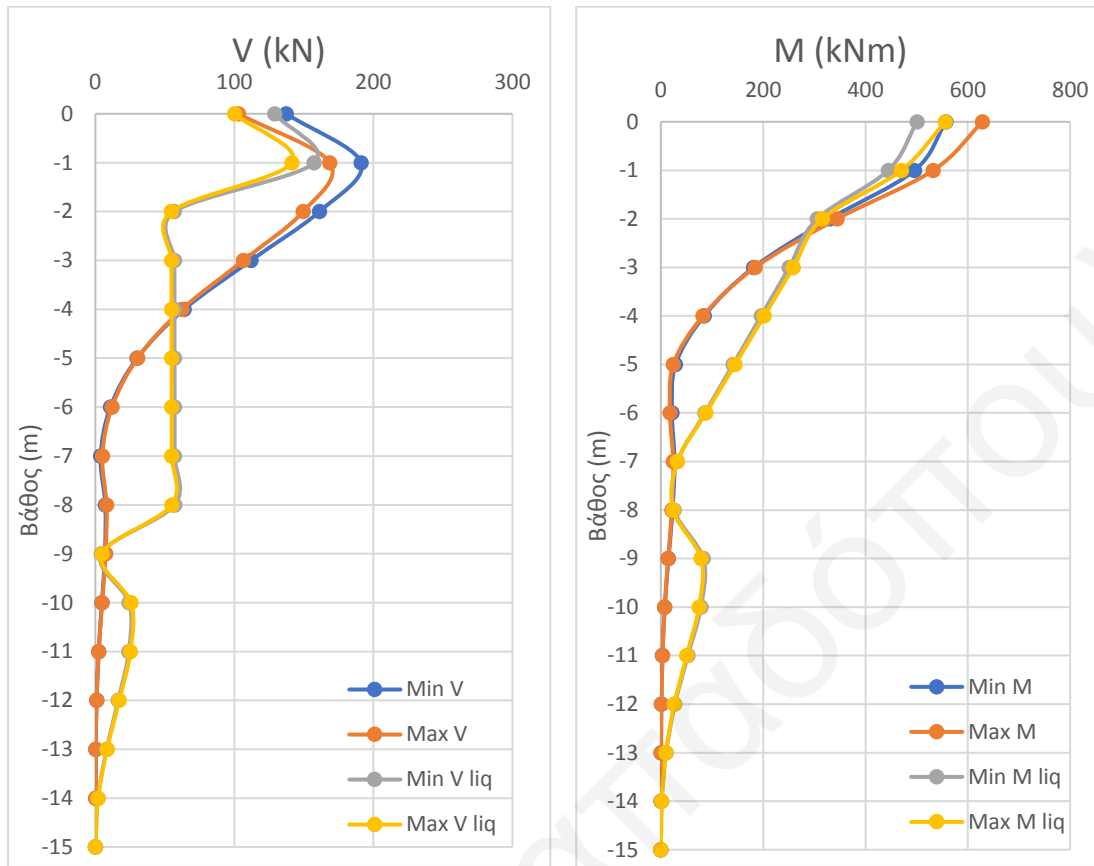
### Παραμετρική Ανάλυση 4



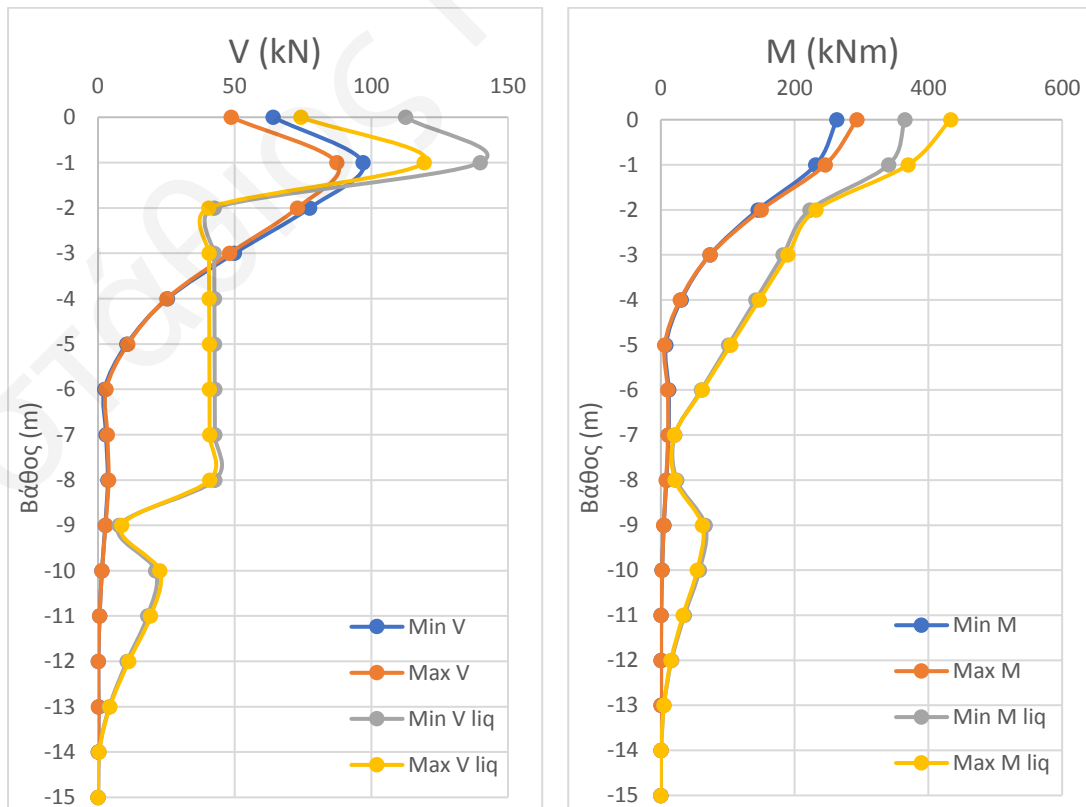
### Παραμετρική Ανάλυση 5



### Παραμετρική Ανάλυση 6

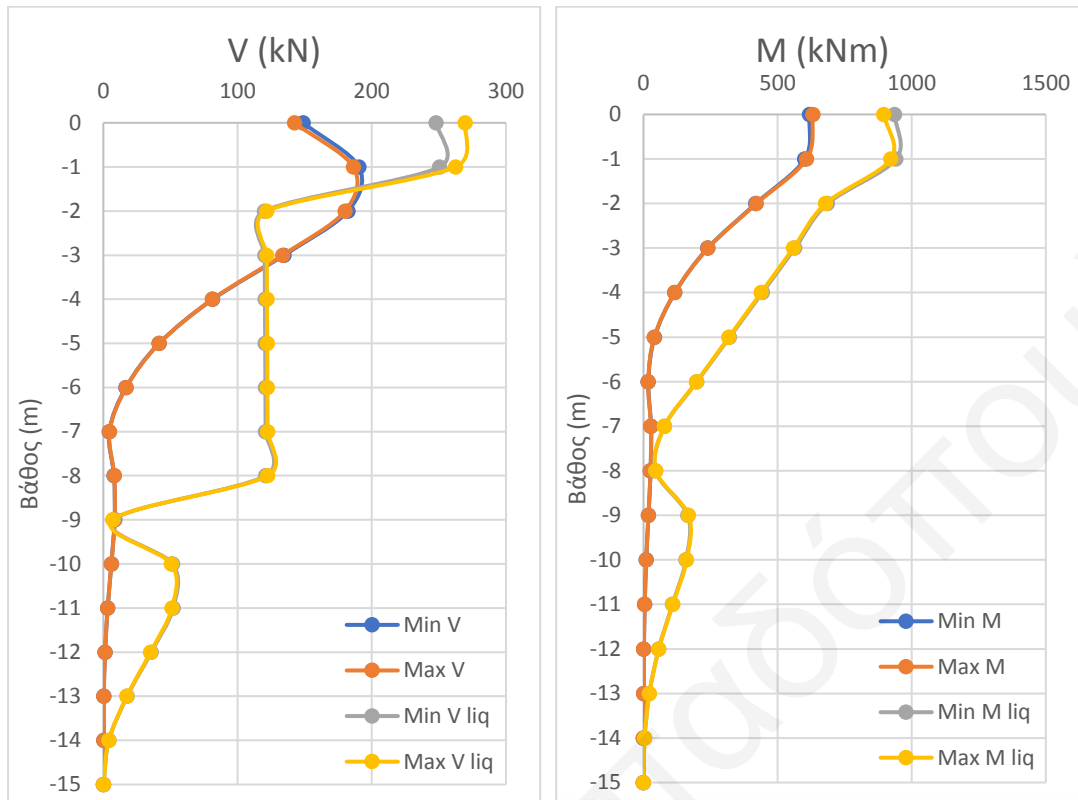


### Παραμετρική Ανάλυση 7

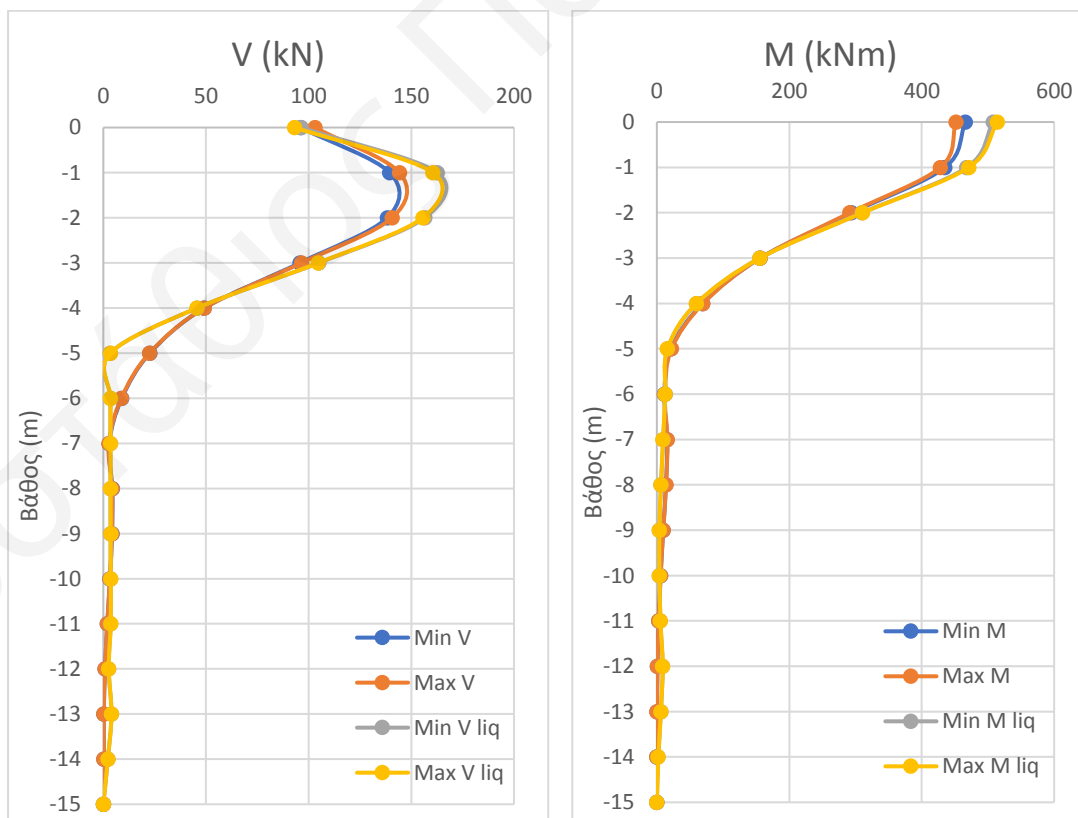




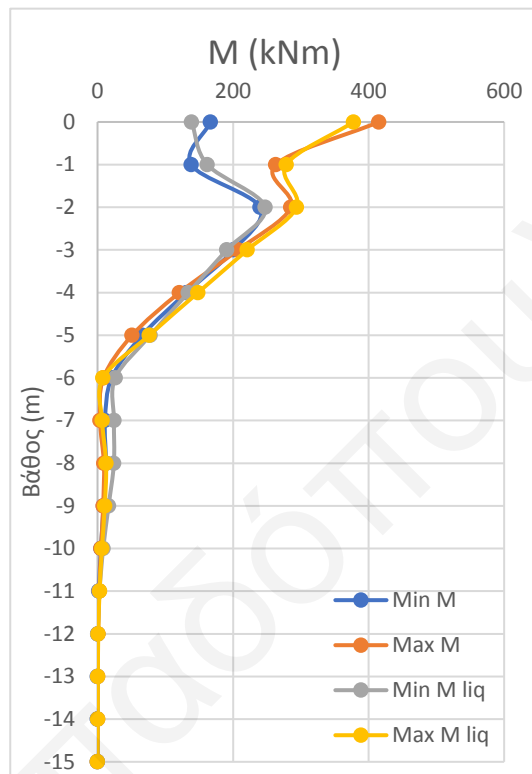
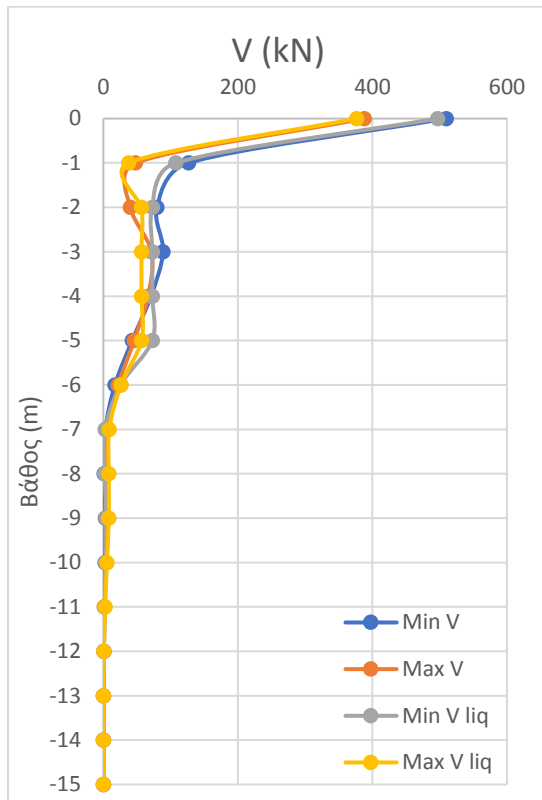
### Παραμετρική Ανάλυση 8



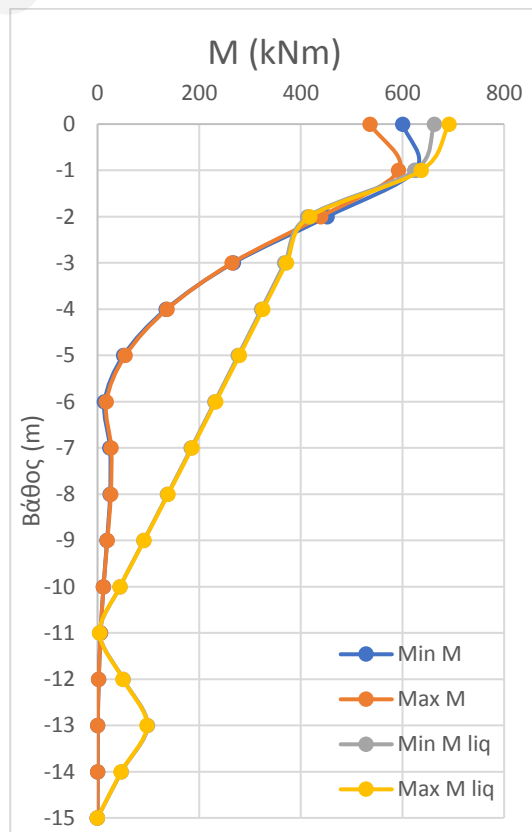
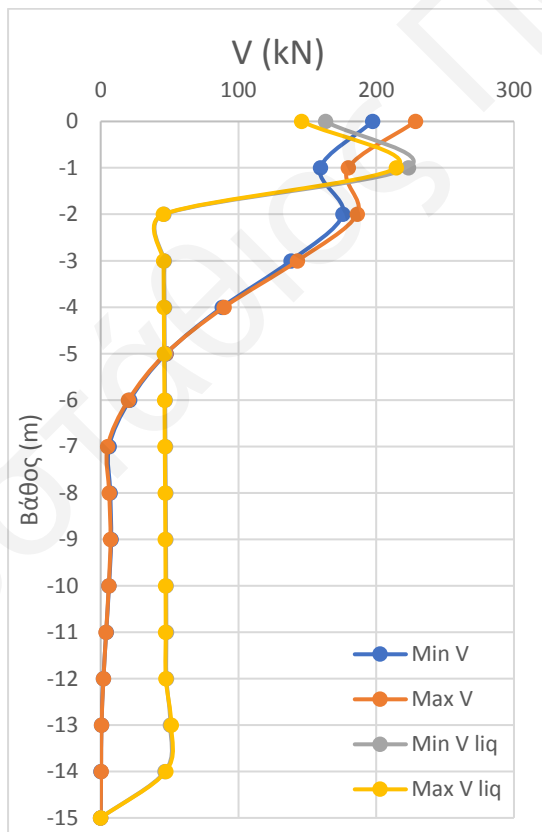
### Παραμετρική Ανάλυση 10



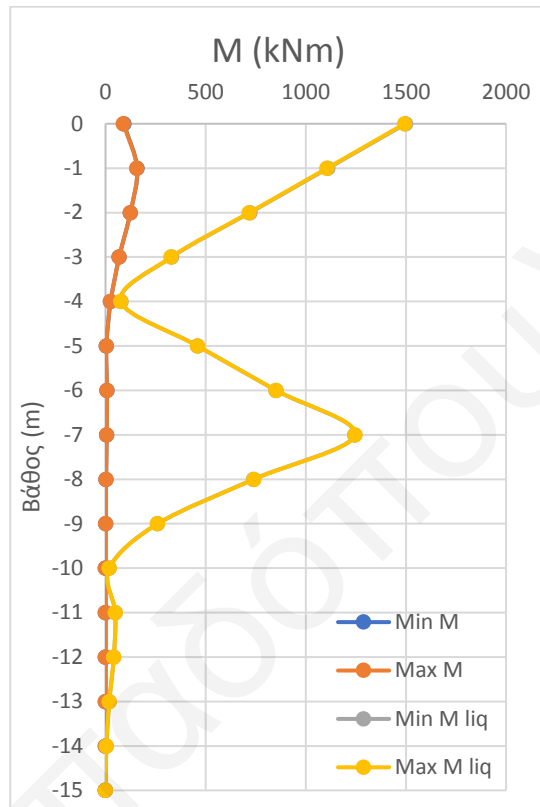
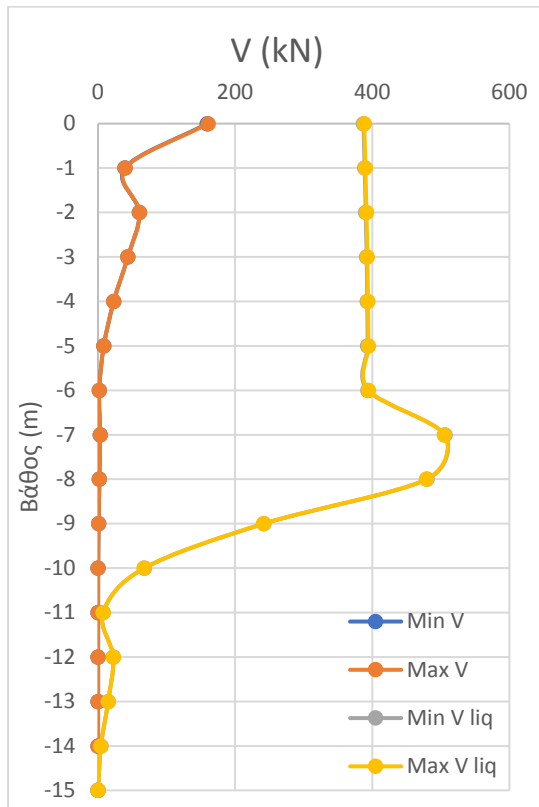
### Παραμετρική Ανάλυση 11



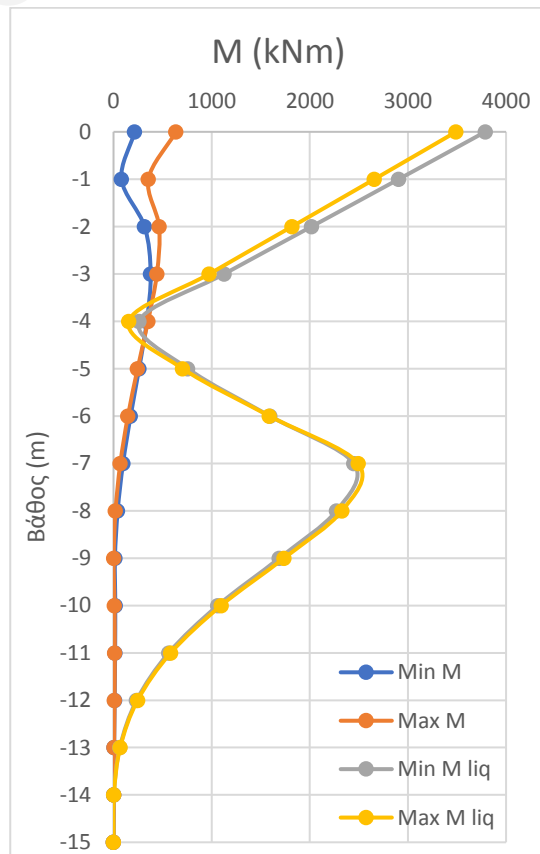
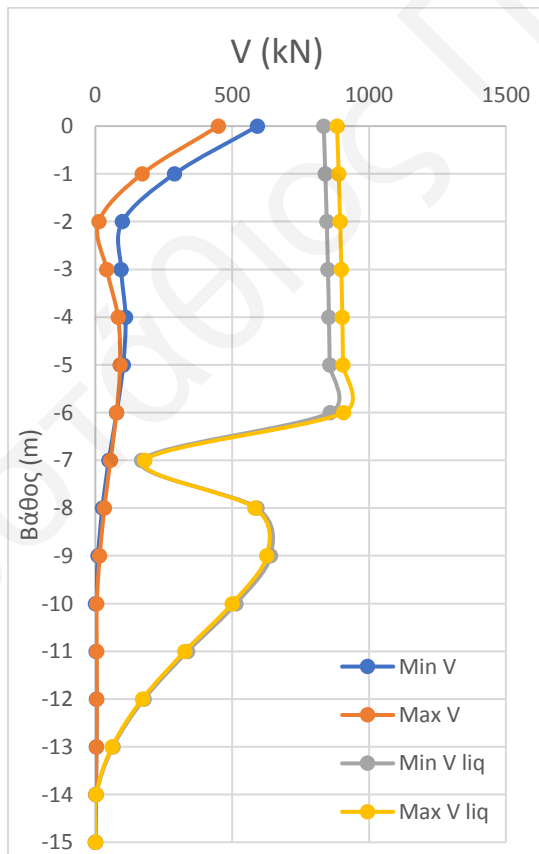
### Παραμετρική Ανάλυση 12



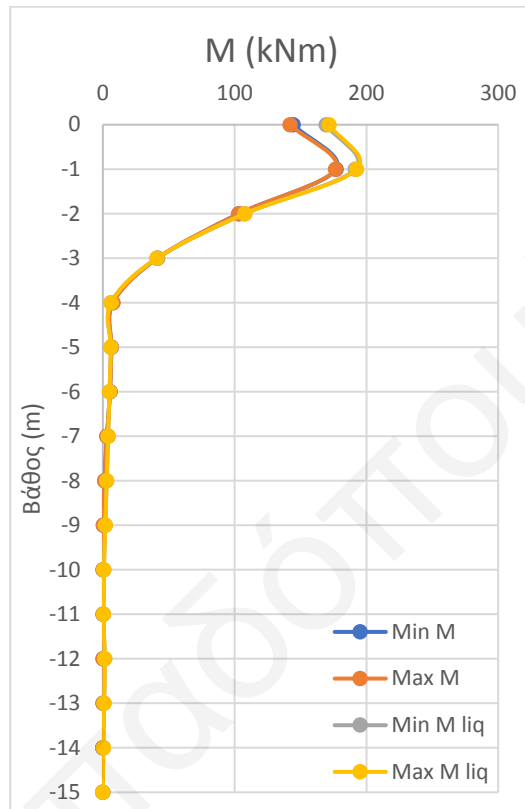
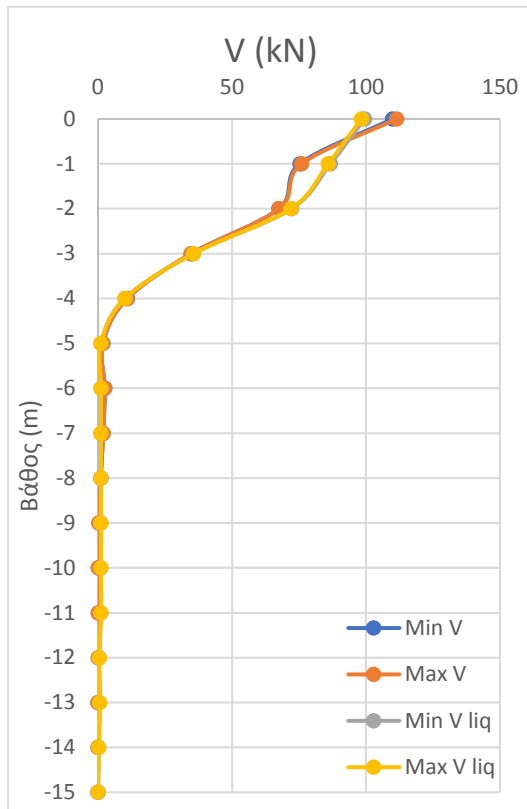
### Παραμετρική Ανάλυση 13



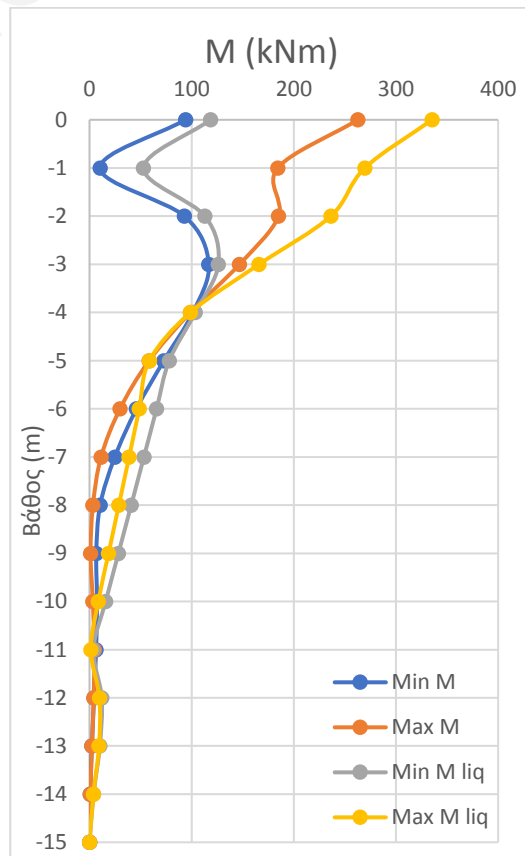
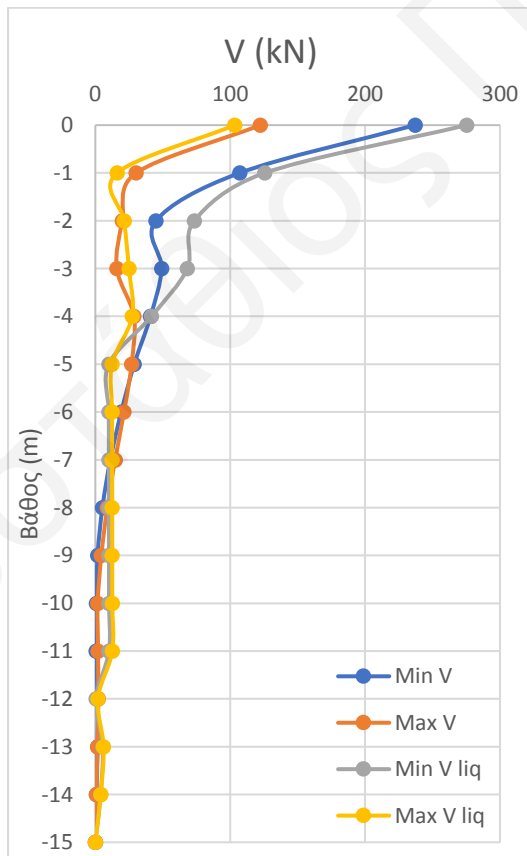
### Παραμετρική Ανάλυση 14



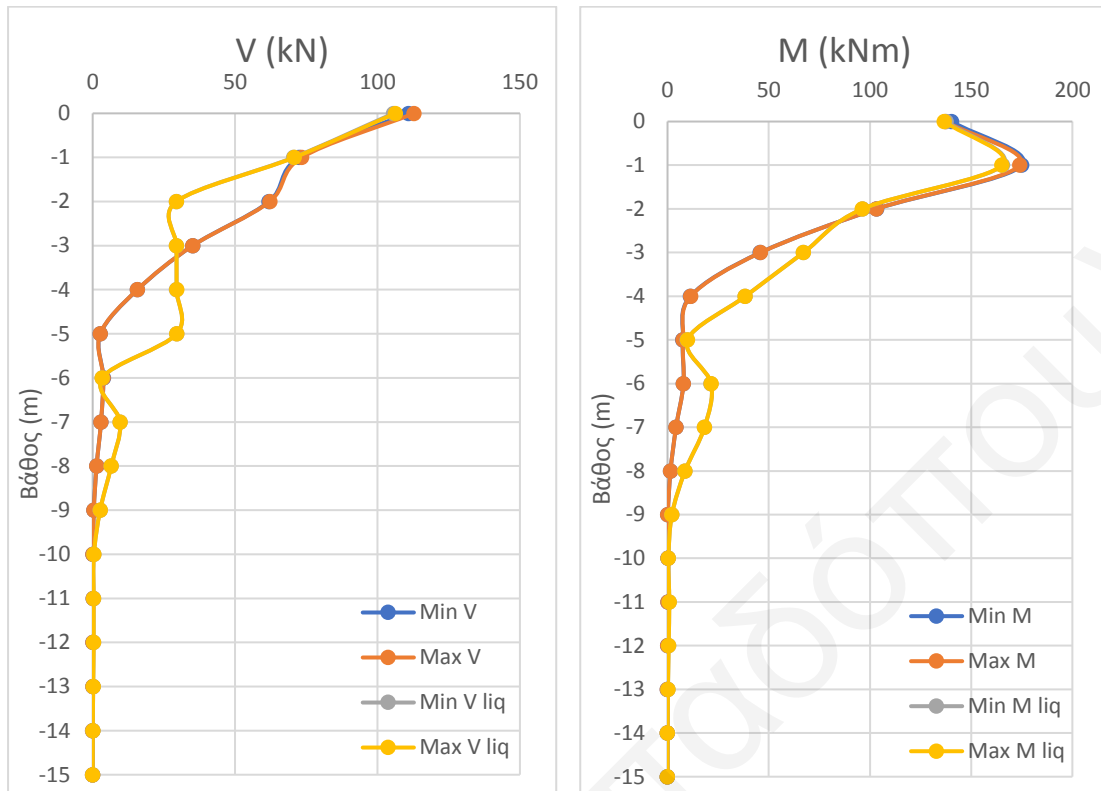
### Παραμετρική Ανάλυση 15



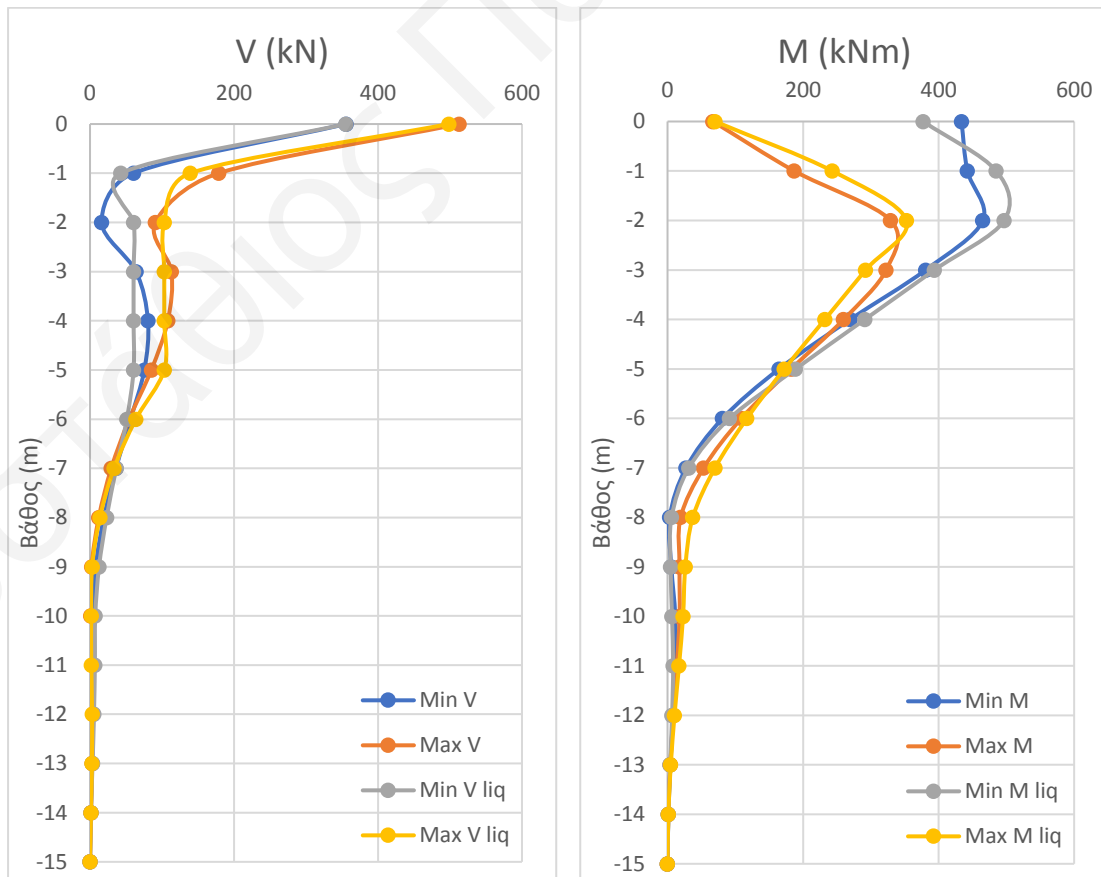
### Παραμετρική Ανάλυση 16



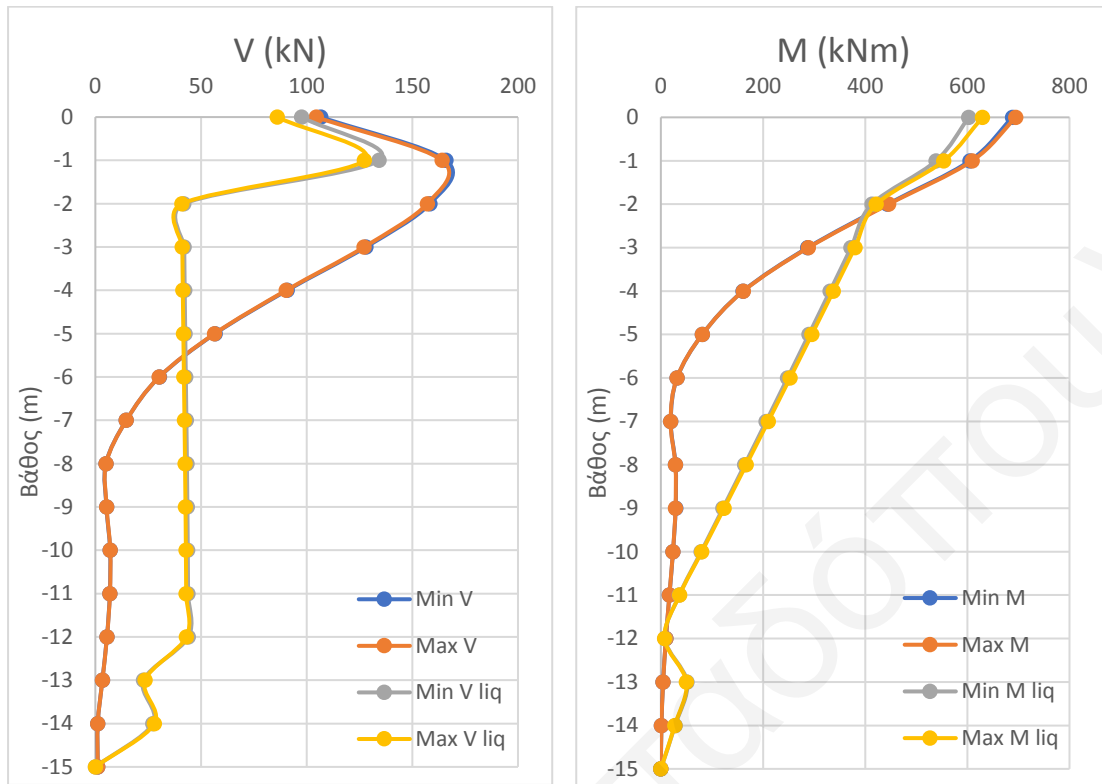
### Παραμετρική Ανάλυση 17



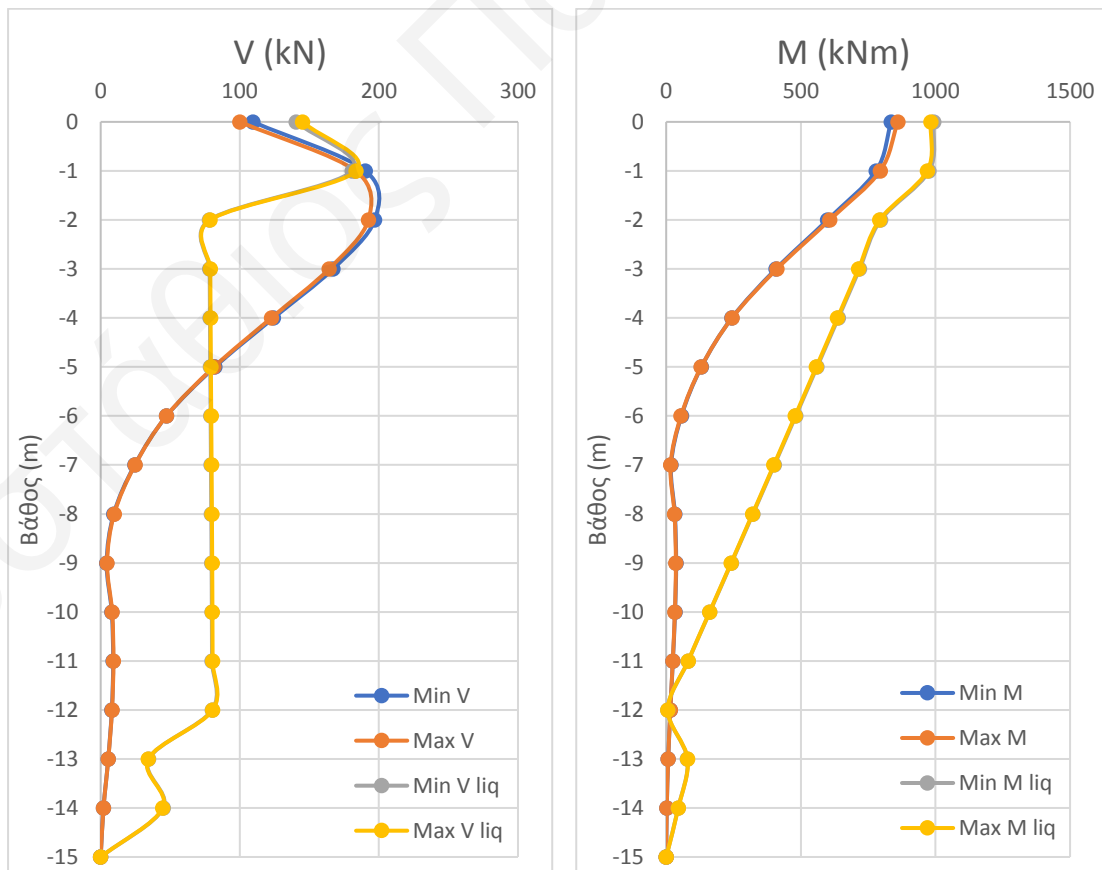
### Παραμετρική Ανάλυση 18



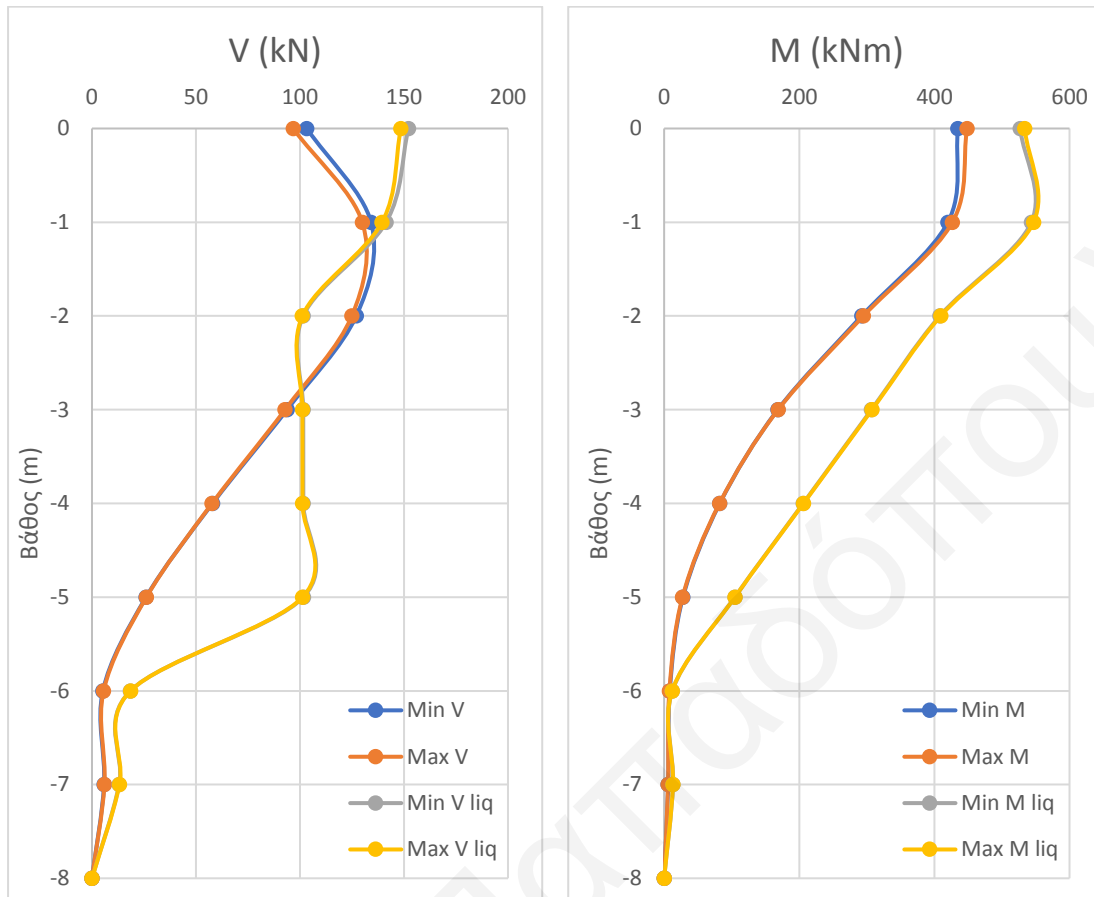
### Παραμετρική Ανάλυση 19



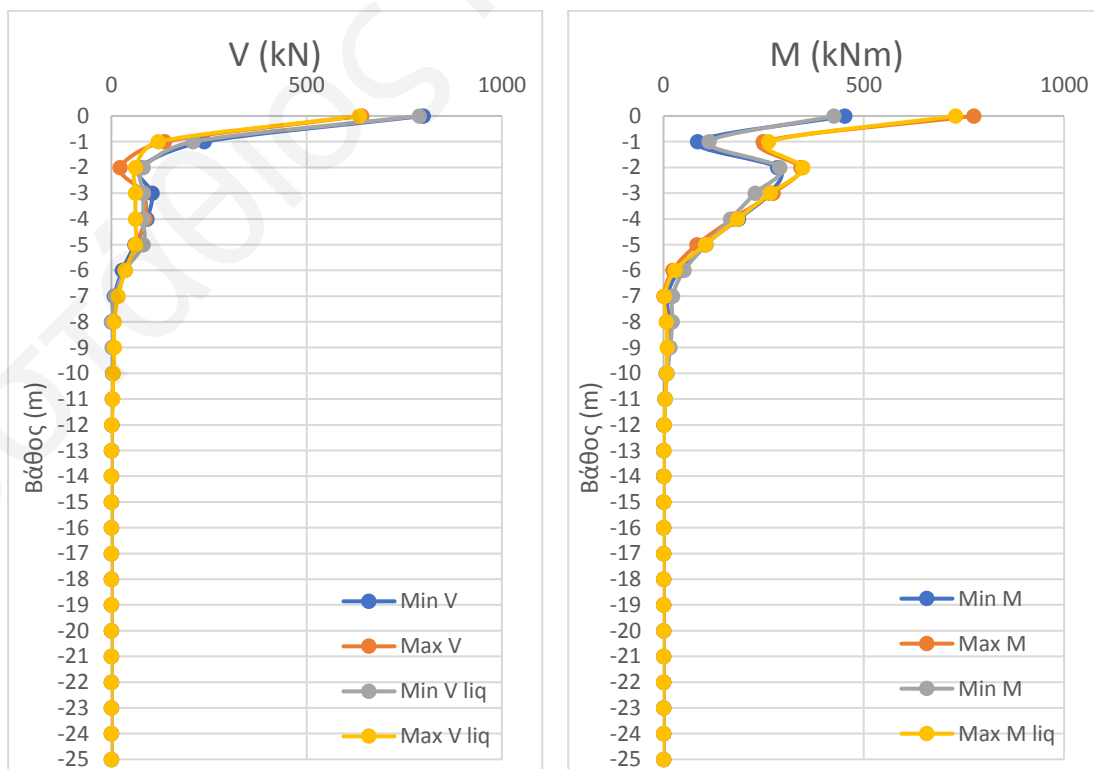
### Παραμετρική Ανάλυση 20



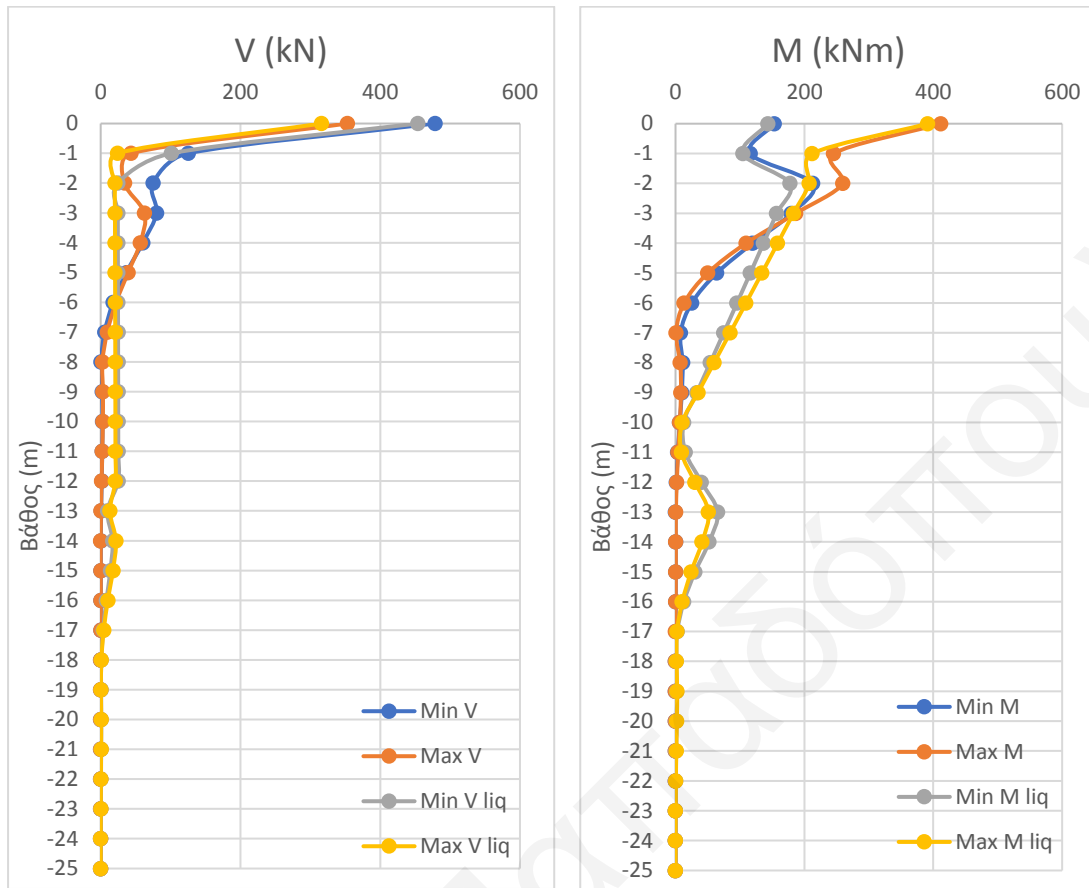
### Παραμετρική Ανάλυση 21



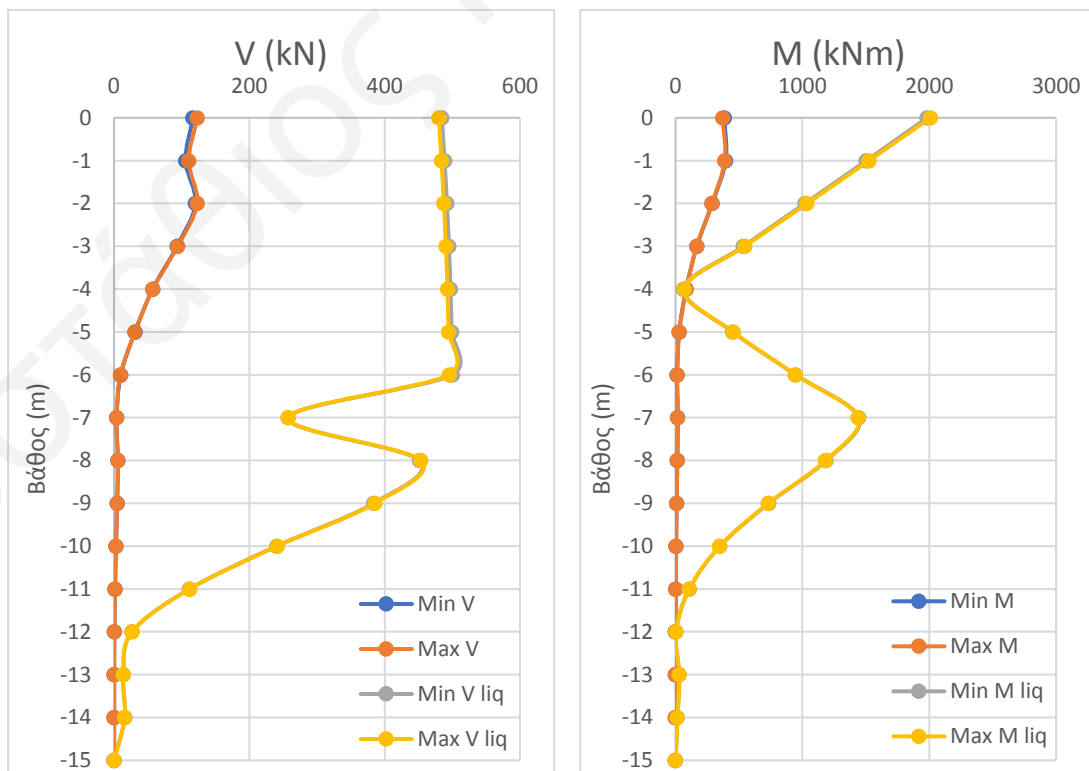
### Παραμετρική Ανάλυση 22



### Παραμετρική Ανάλυση 23

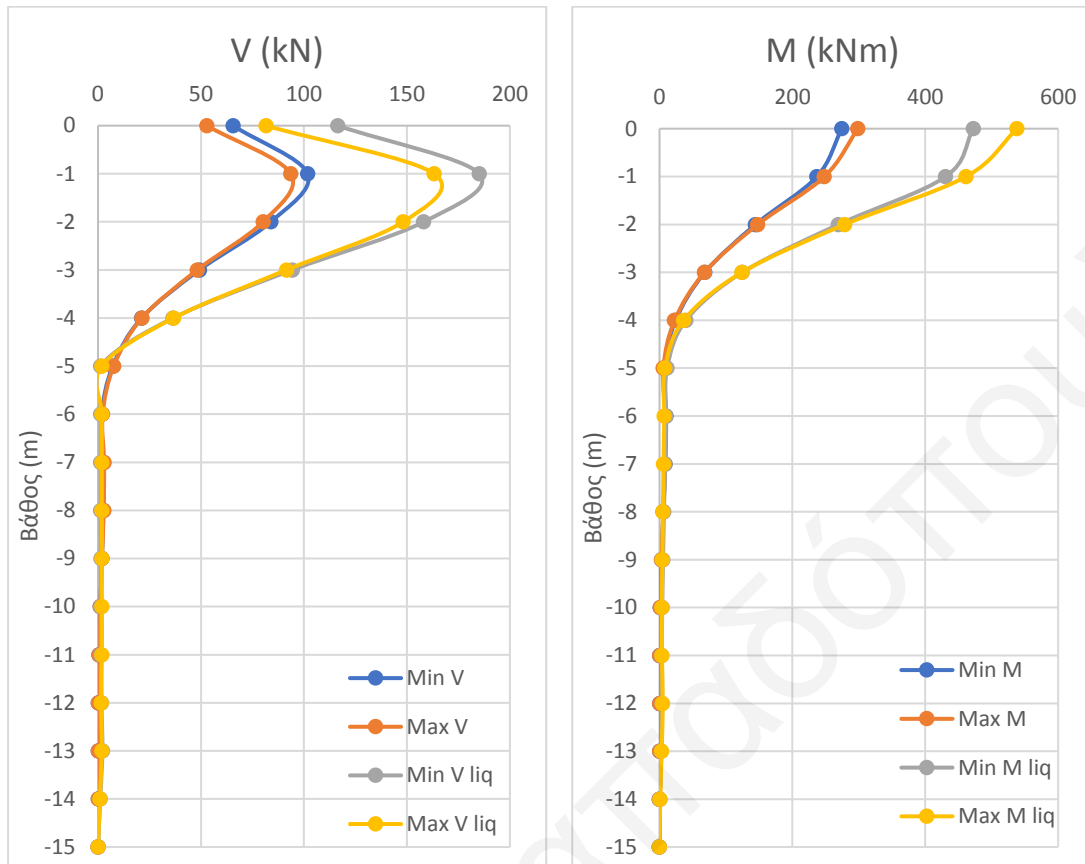


### Παραμετρική Ανάλυση 24

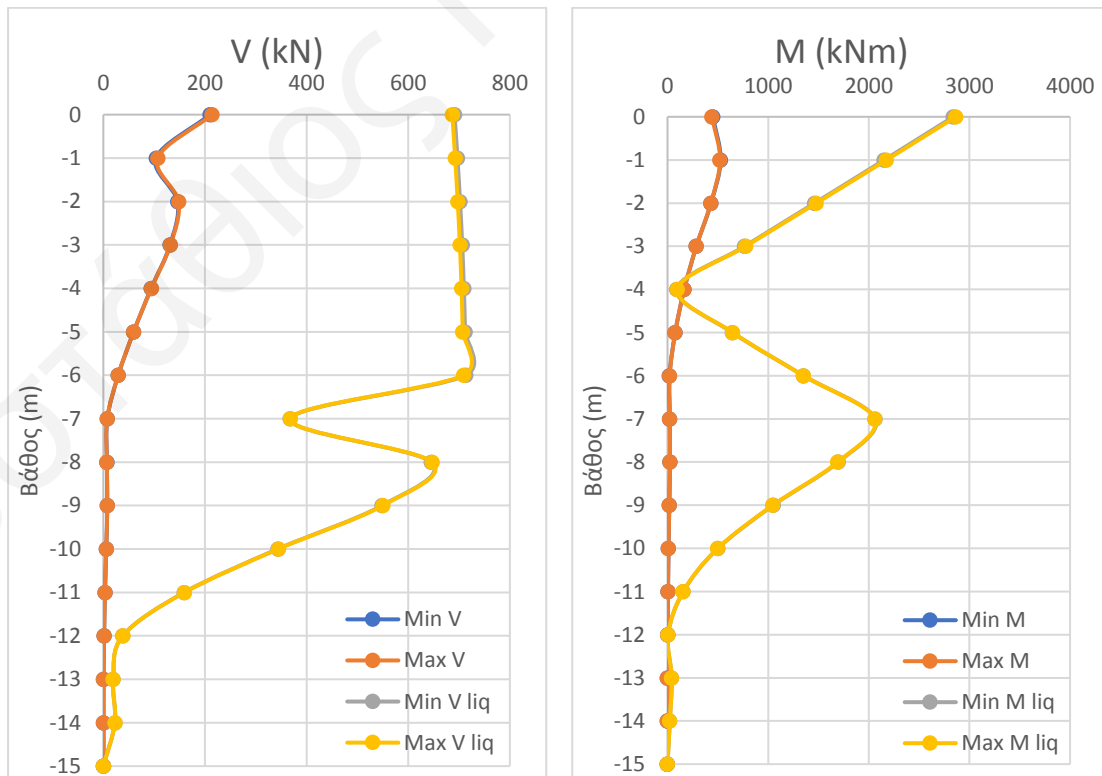




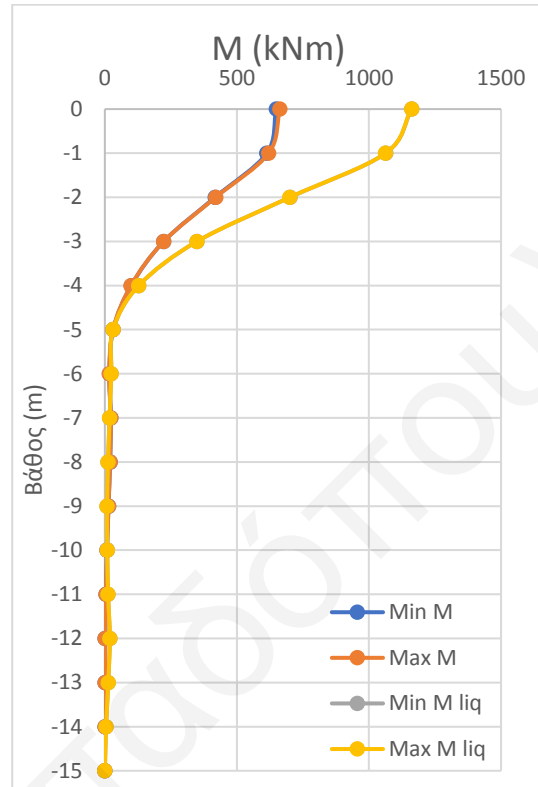
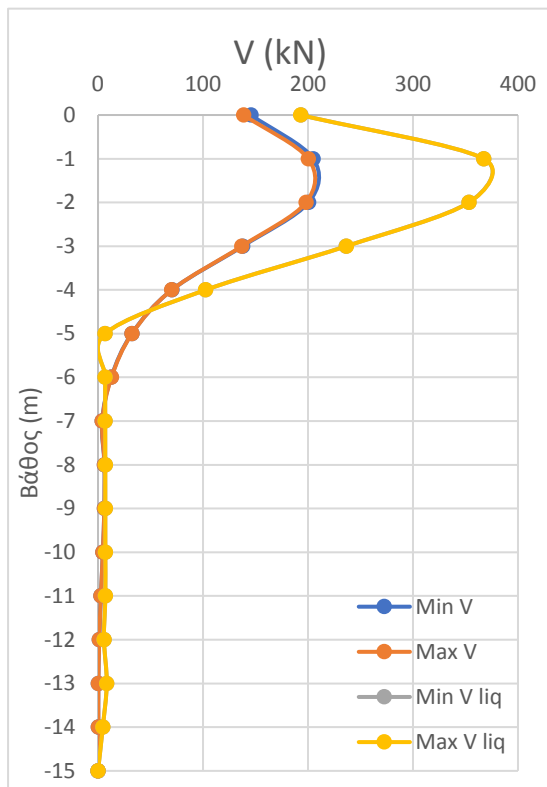
Παραμετρική Ανάλυση 25



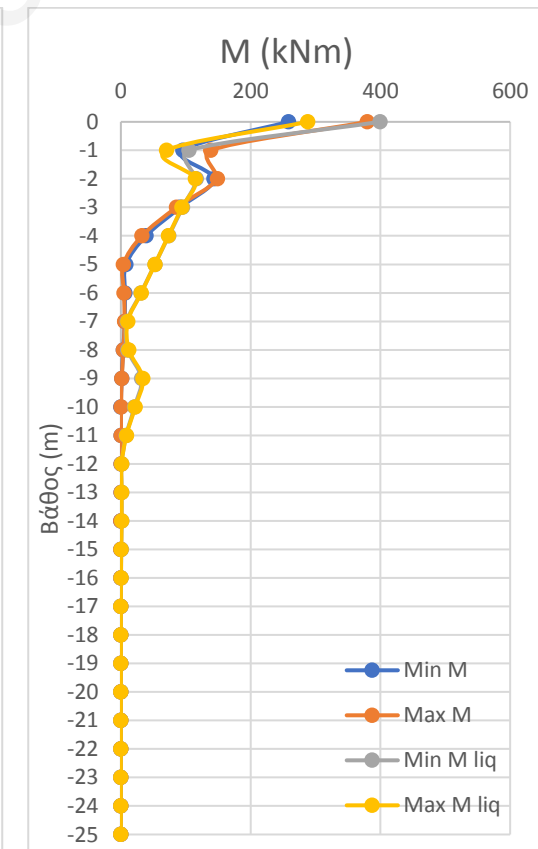
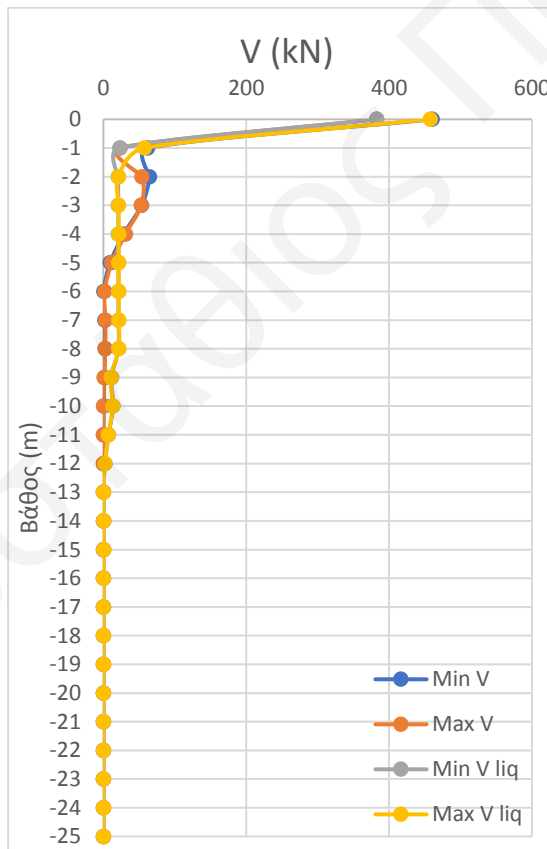
Παραμετρική Ανάλυση 26



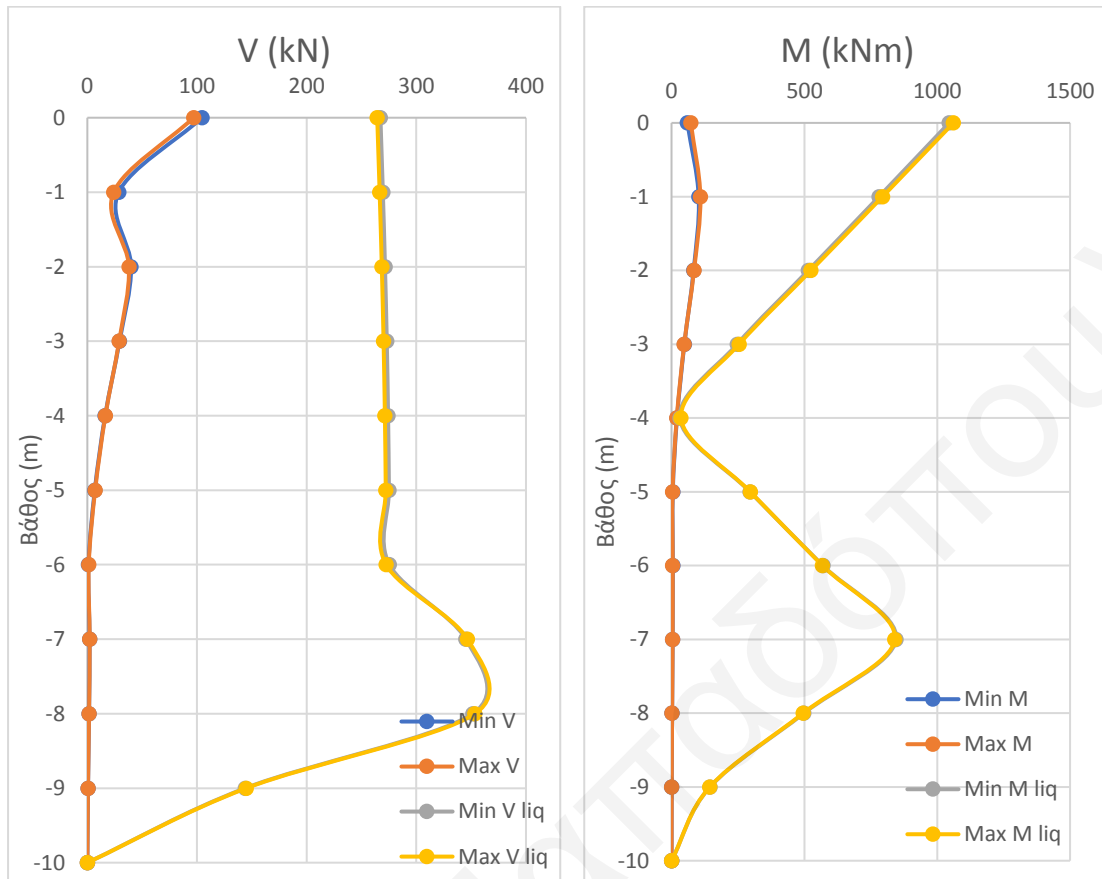
Παραμετρική Ανάλυση 27



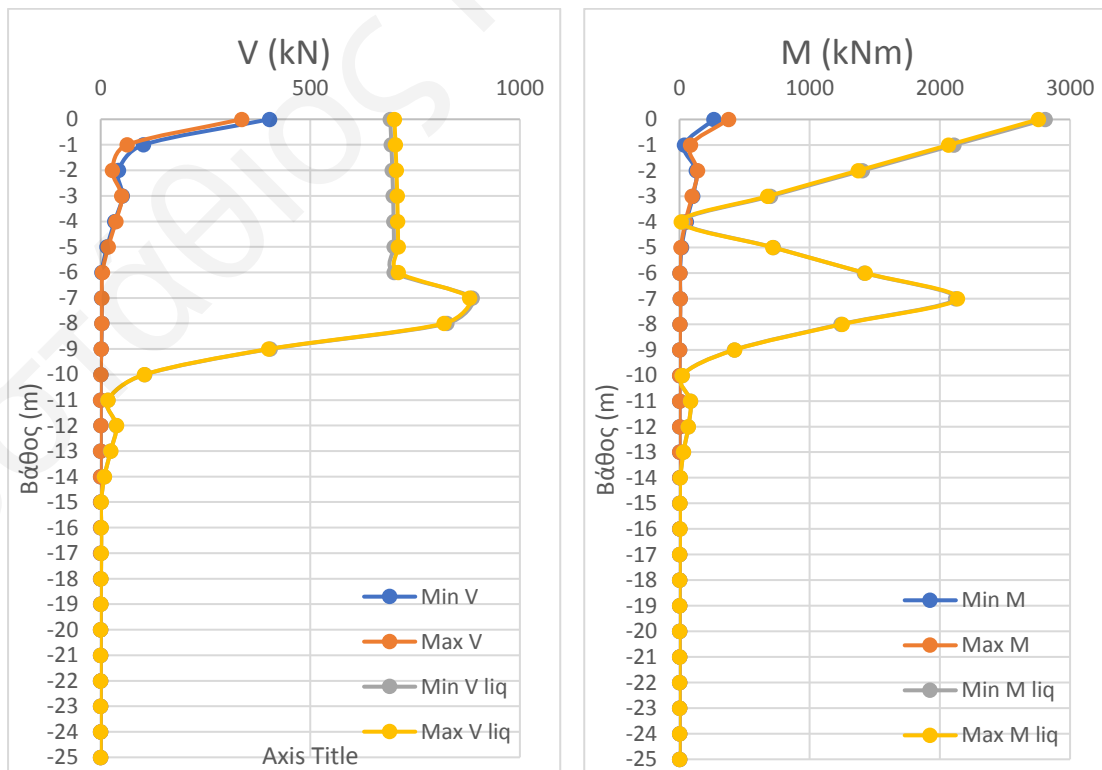
Παραμετρική Ανάλυση 28



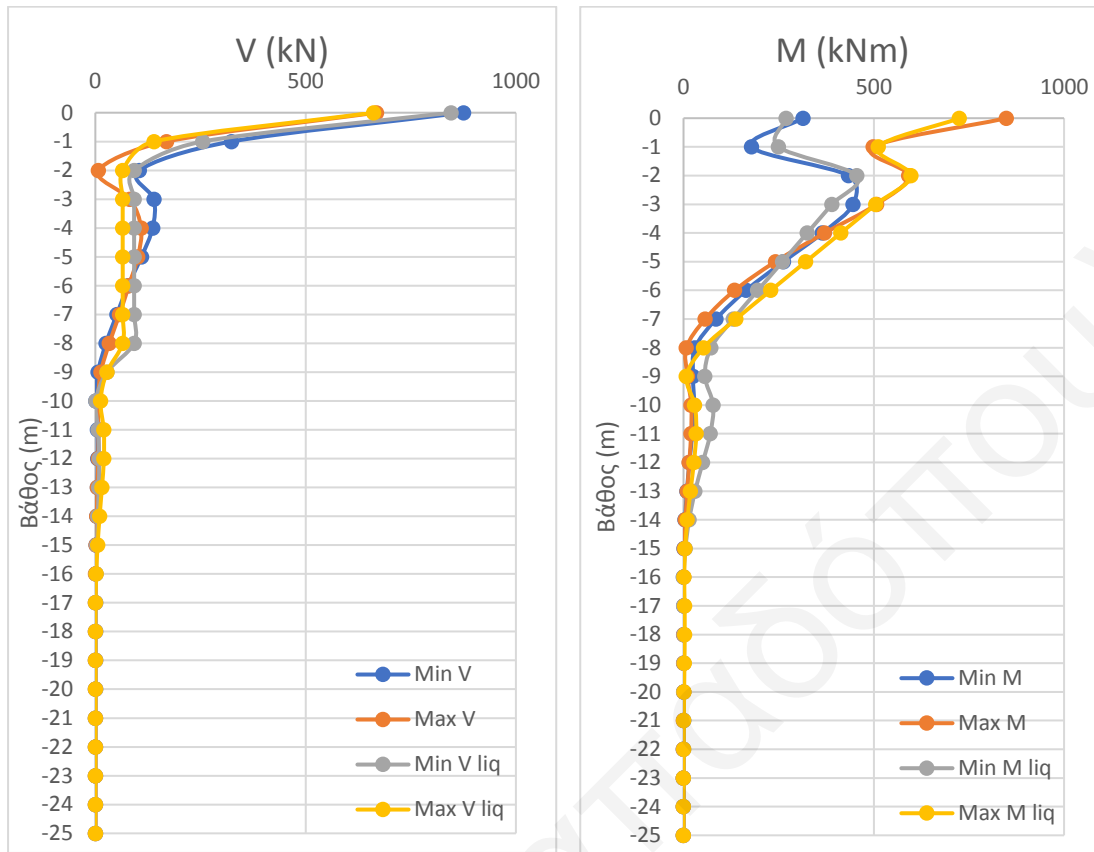
### Παραμετρική Ανάλυση 29



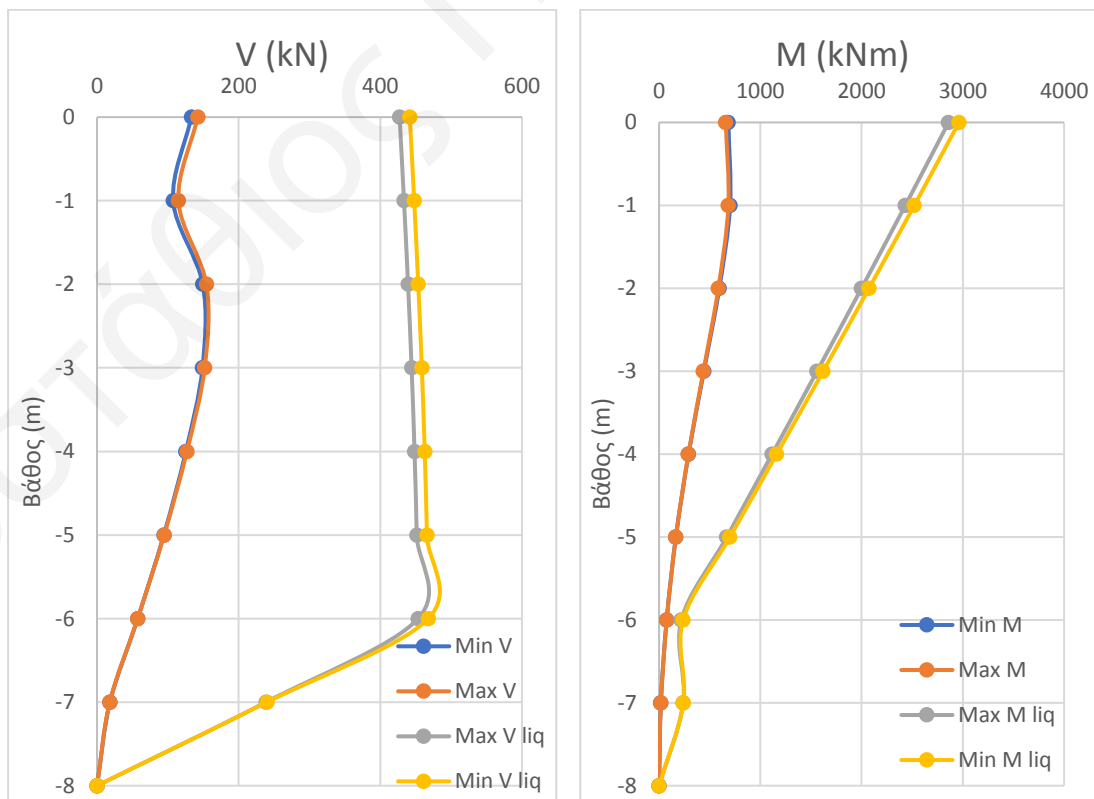
### Παραμετρική Ανάλυση 30



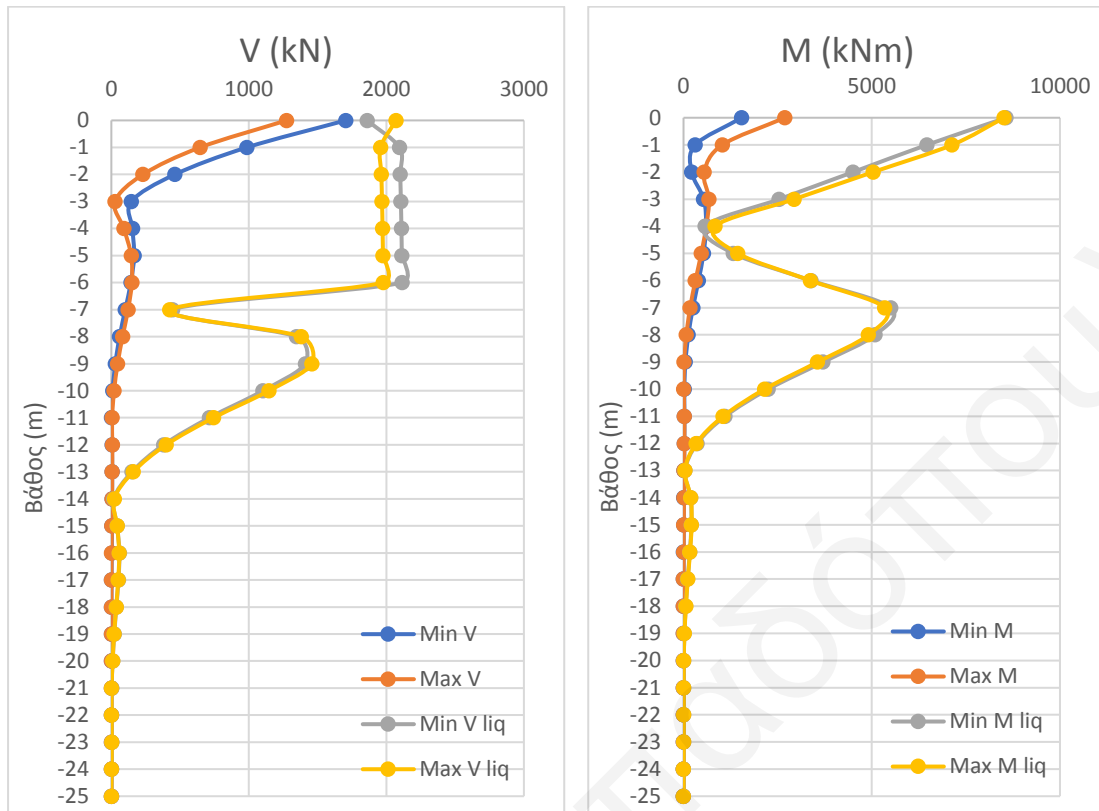
Παραμετρική Ανάλυση 31



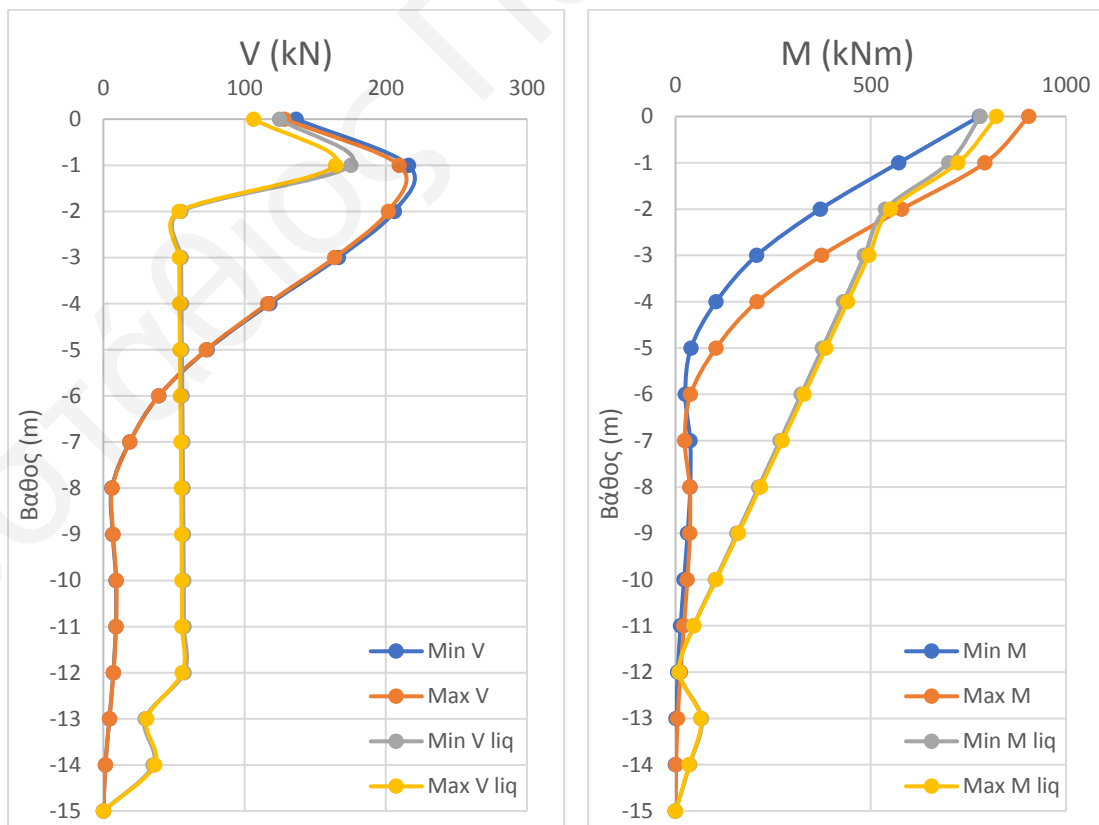
Παραμετρική Ανάλυση 32



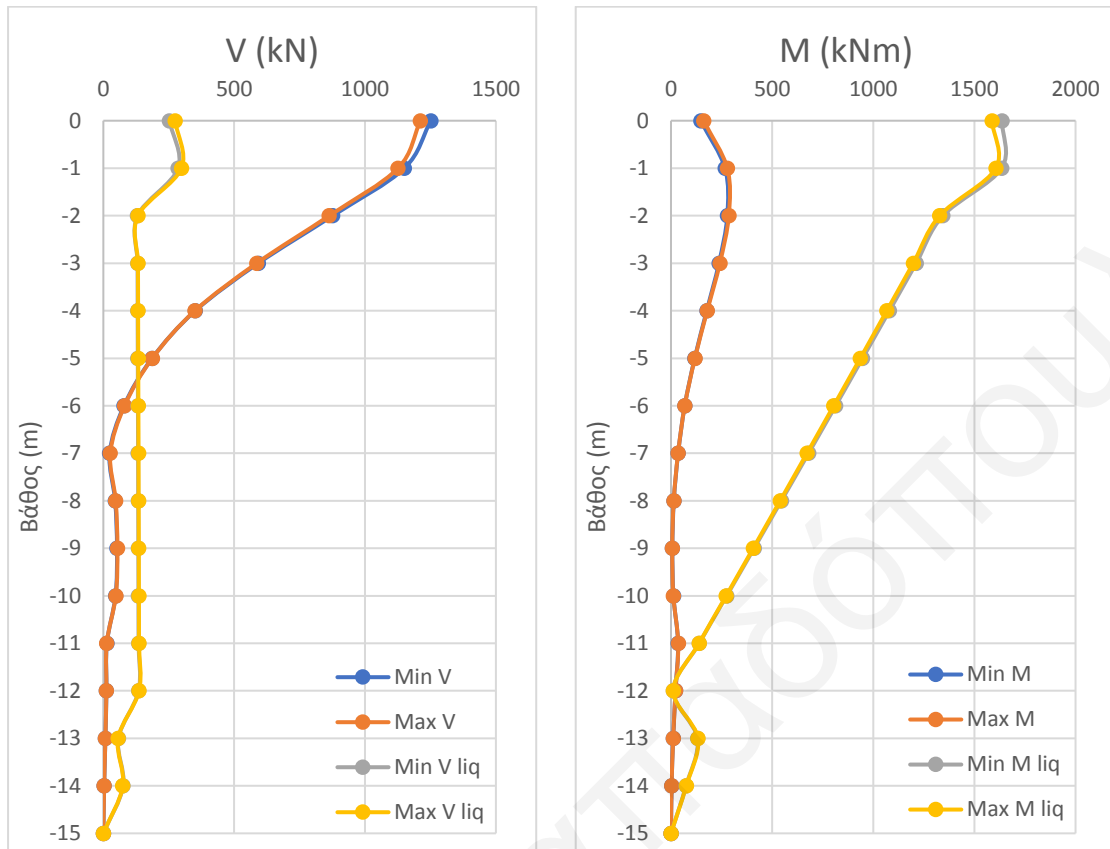
### Παραμετρική Ανάλυση 33



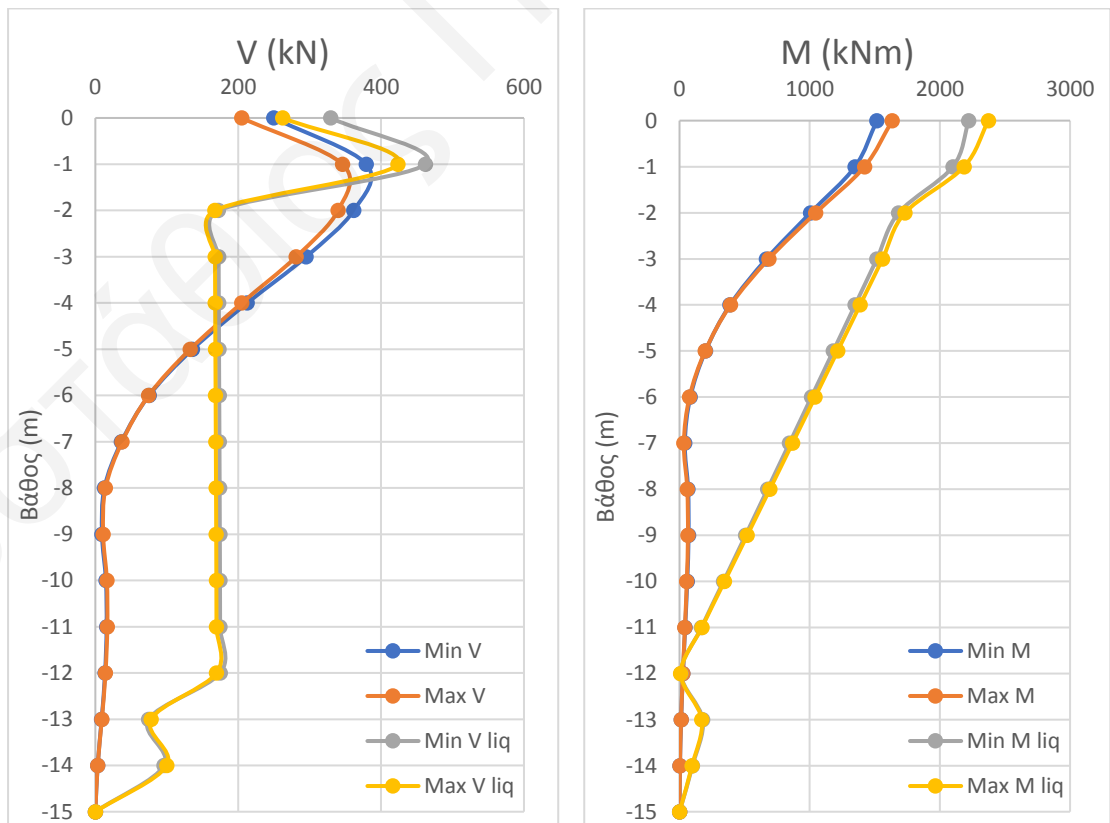
### Παραμετρική Ανάλυση 34



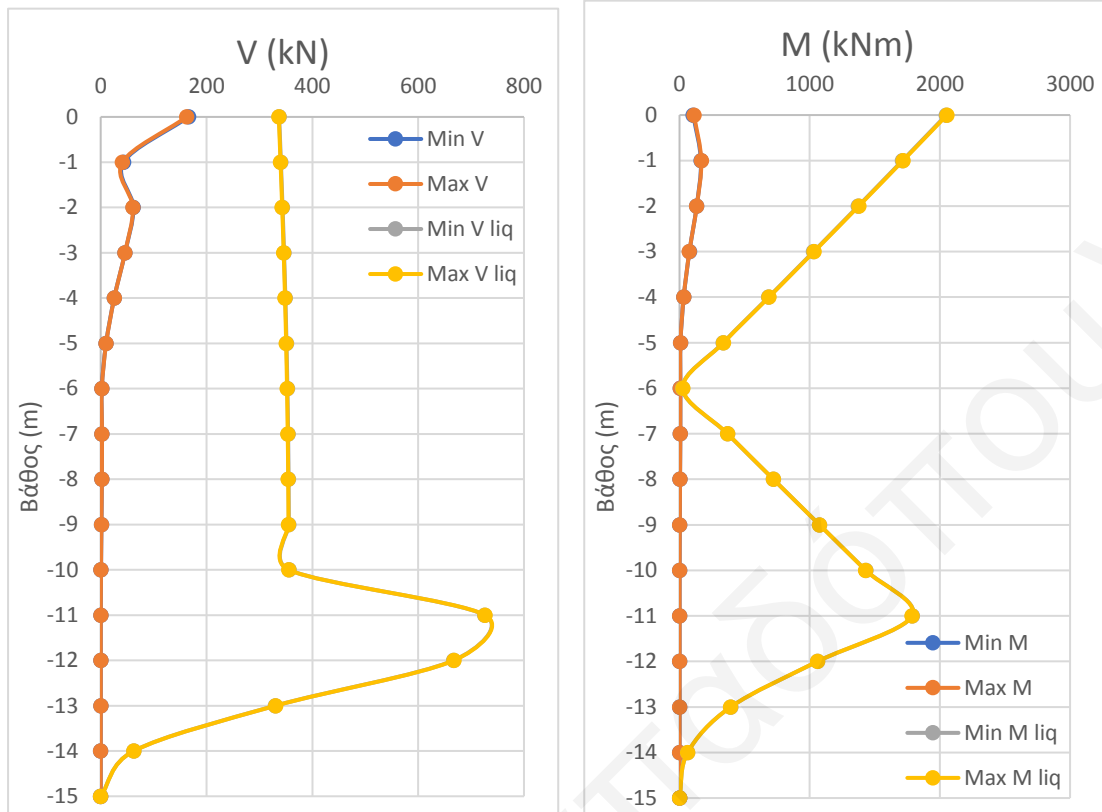
Παραμετρική Ανάλυση 35



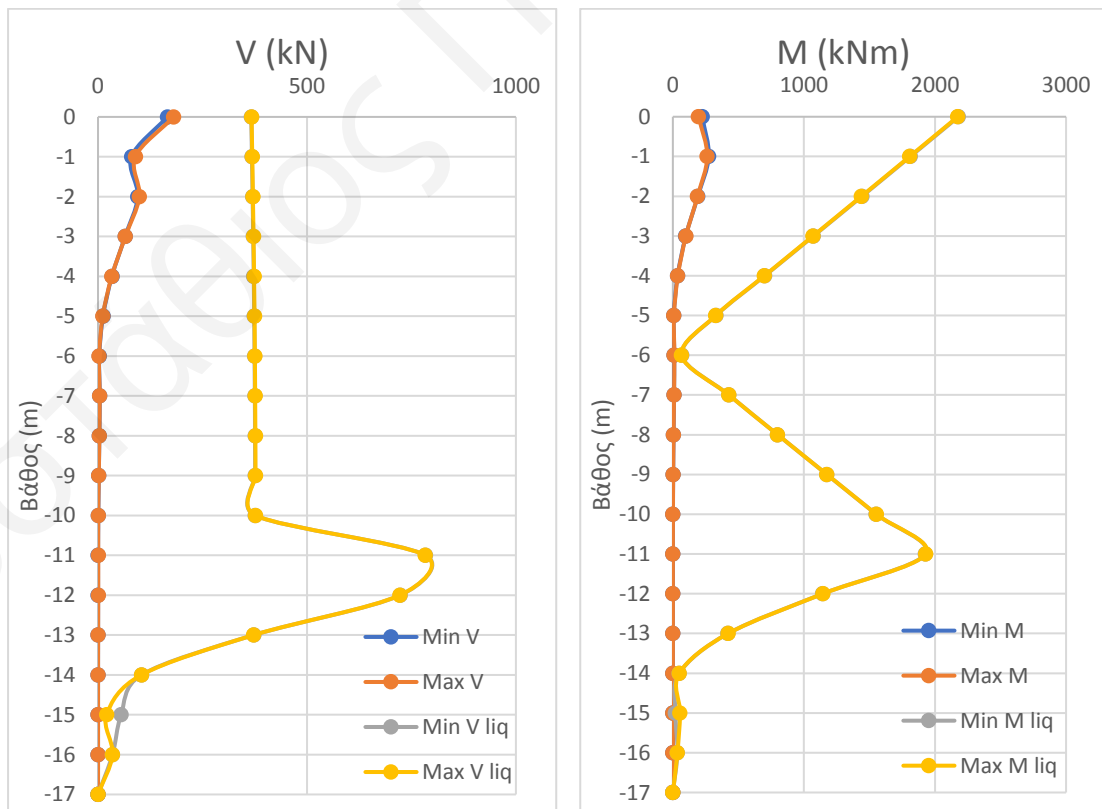
Παραμετρική Ανάλυση 37



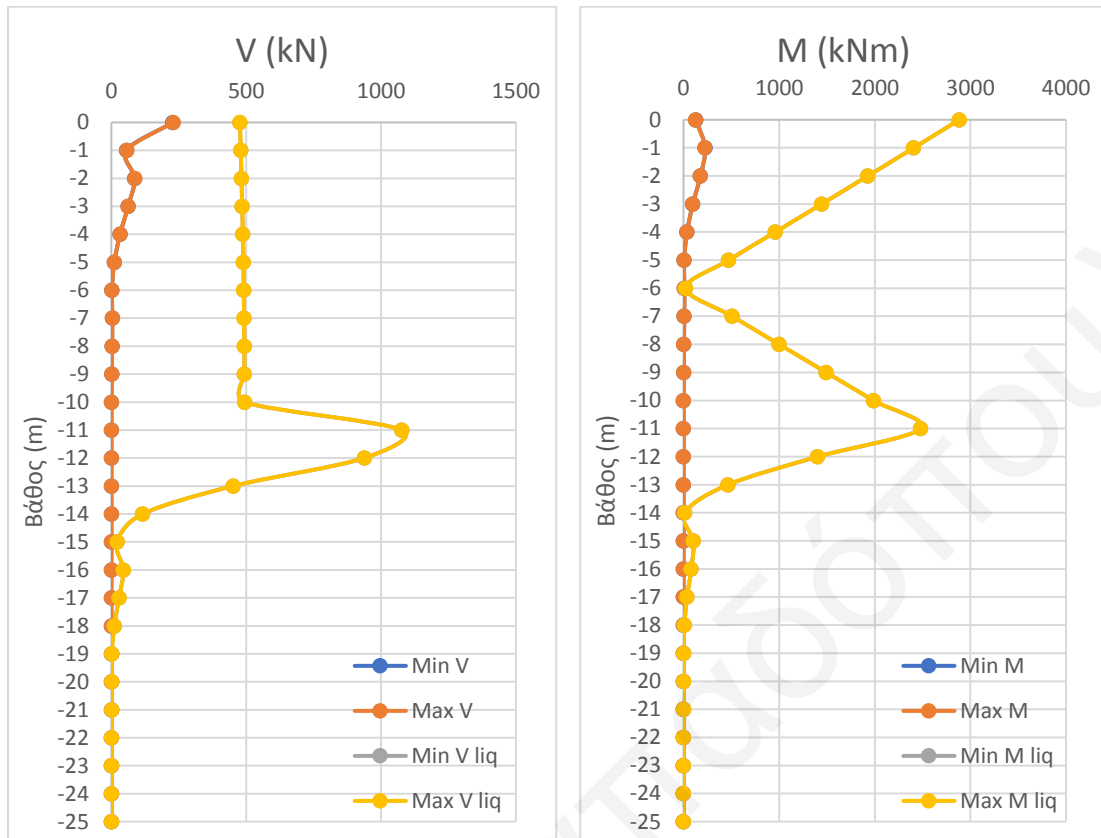
Παραμετρική Ανάλυση 38



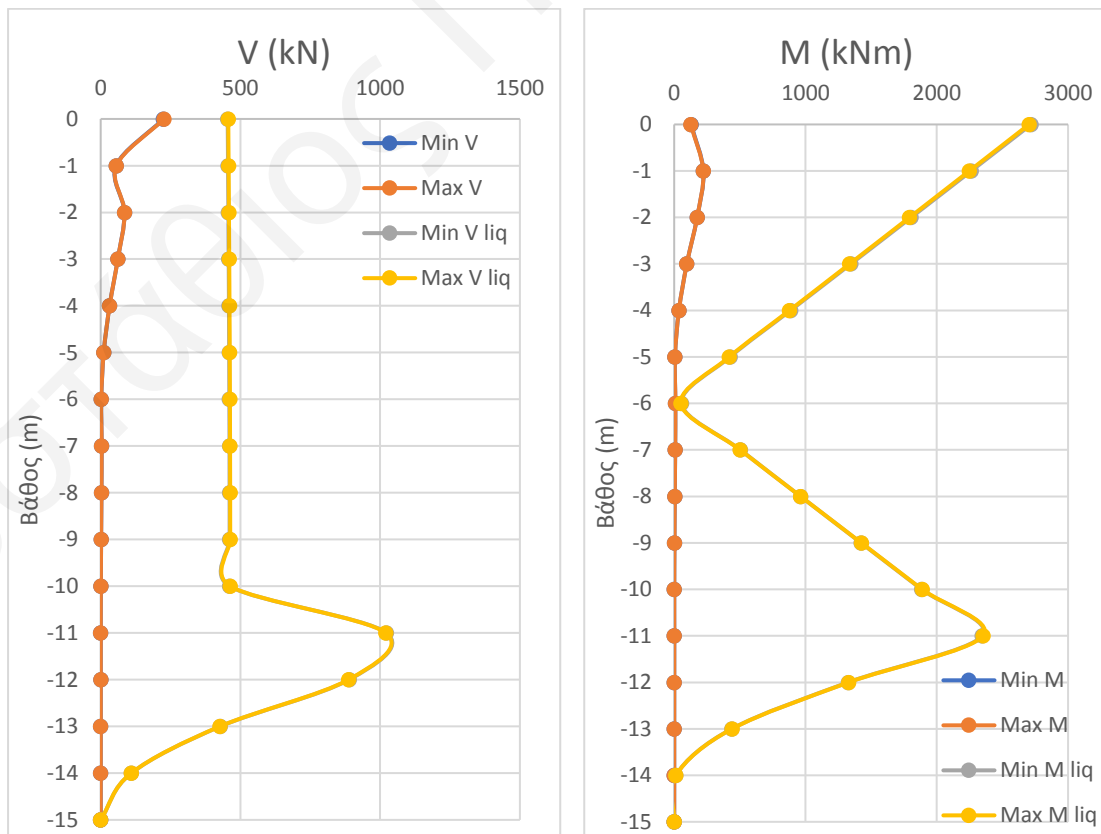
Παραμετρική Ανάλυση 39



### Παραμετρική Ανάλυση 40

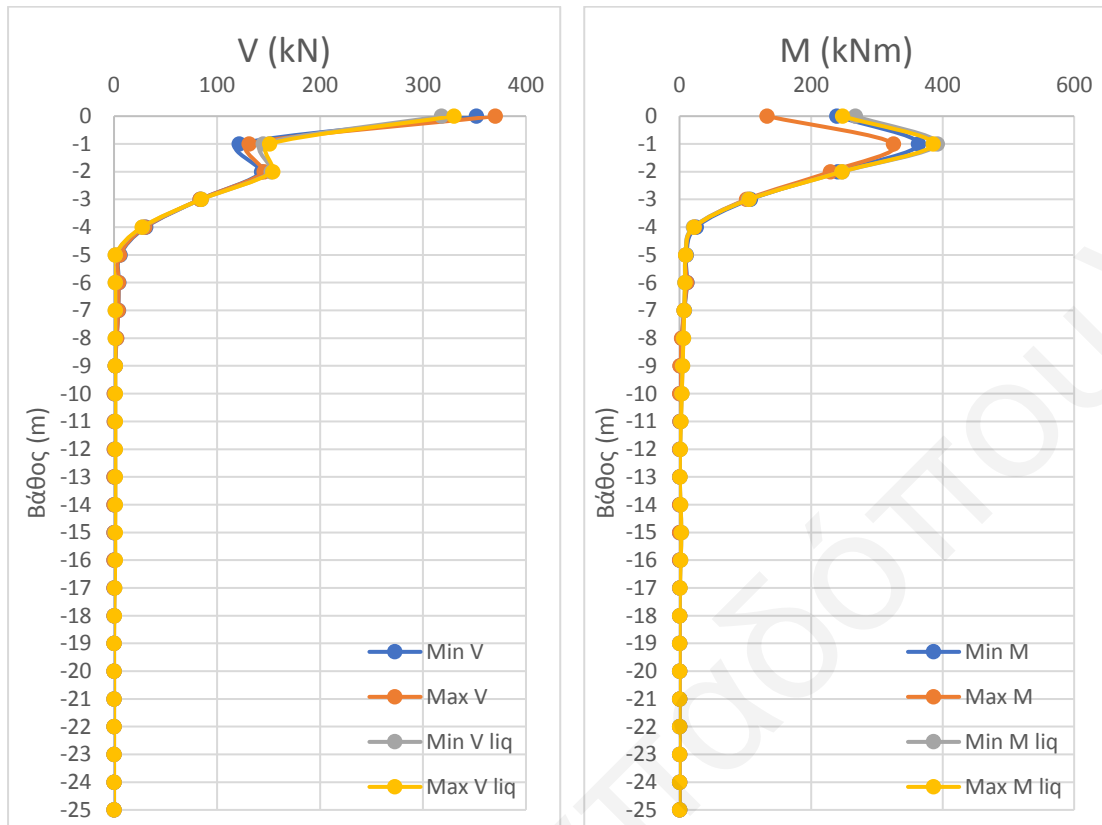


### Παραμετρική Ανάλυση 41

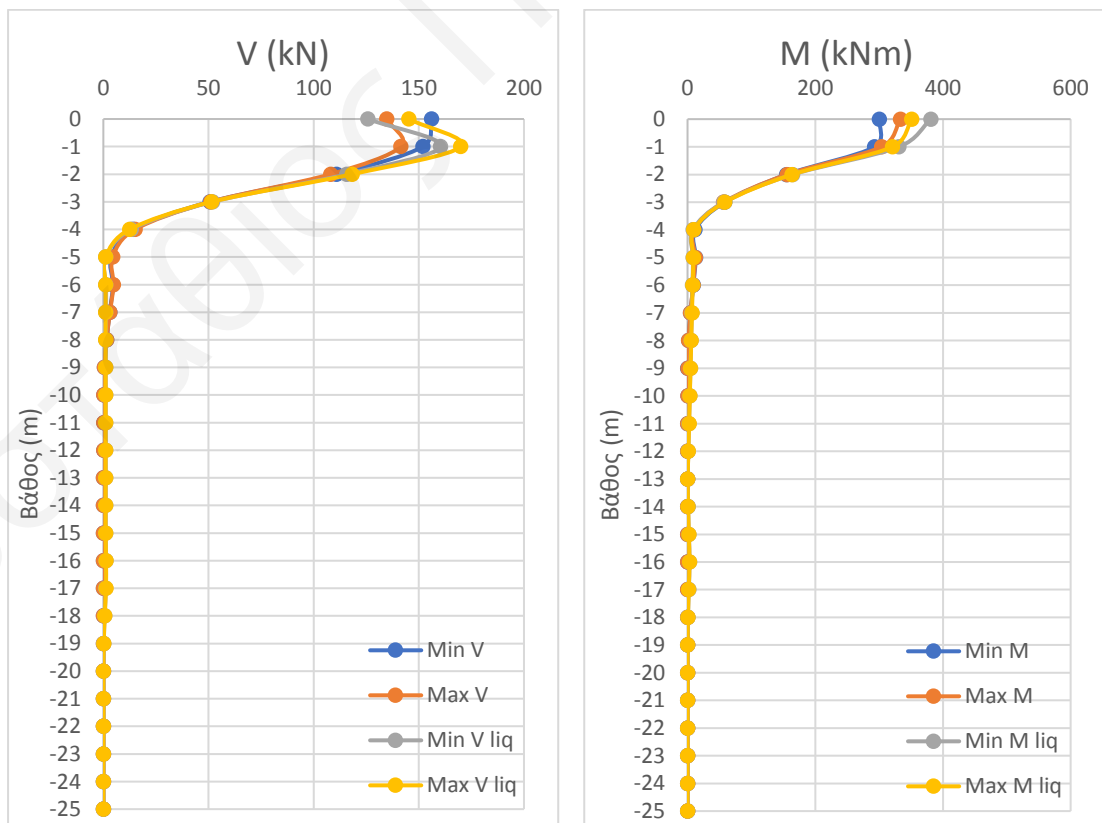




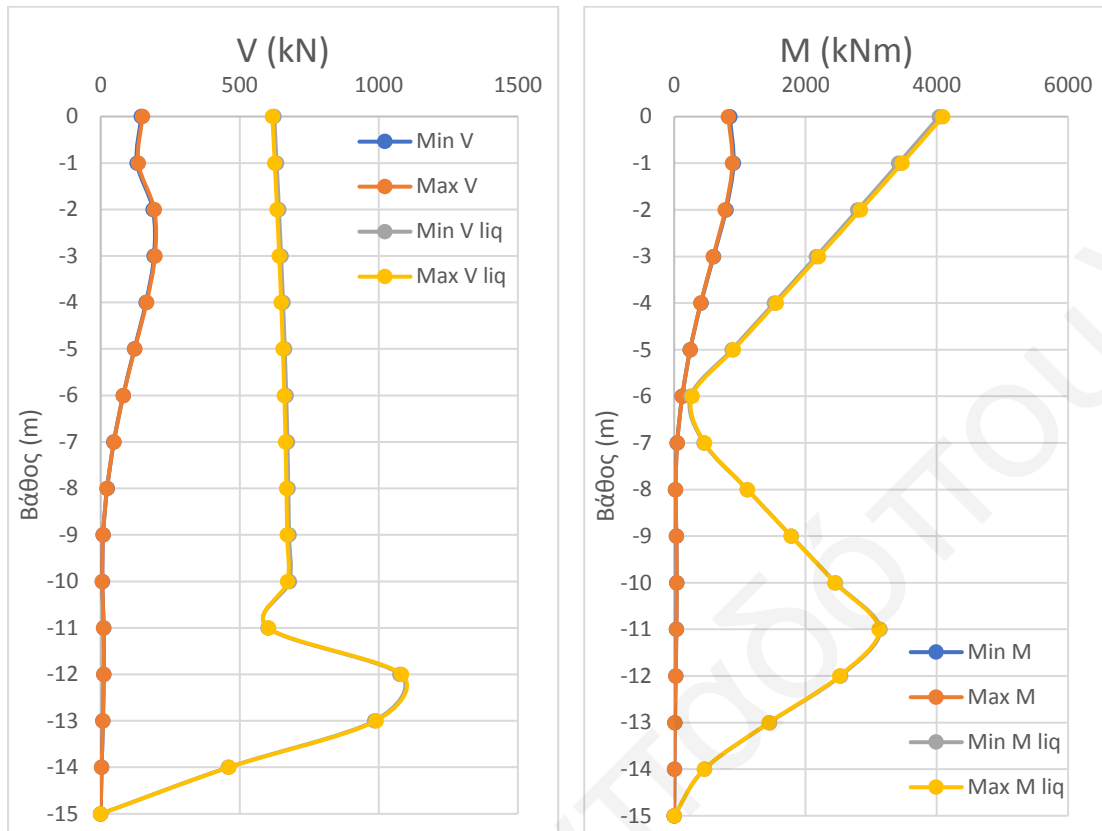
### Παραμετρική Ανάλυση 42



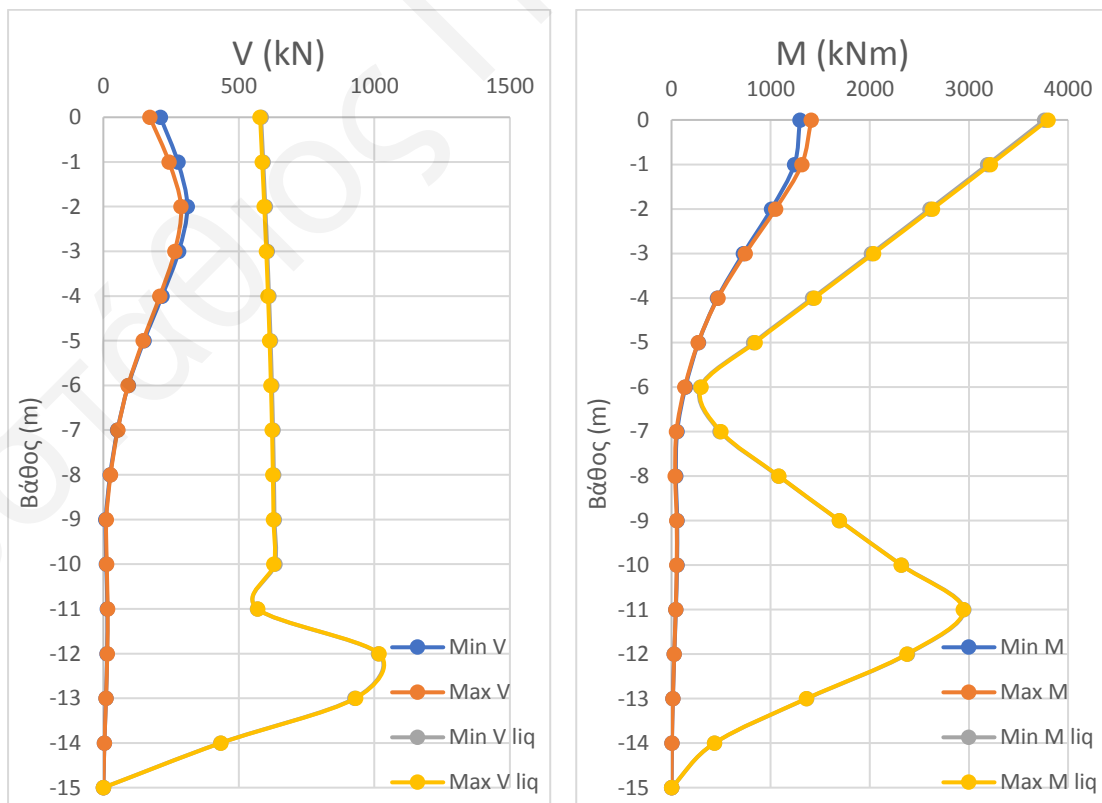
### Παραμετρική Ανάλυση 43



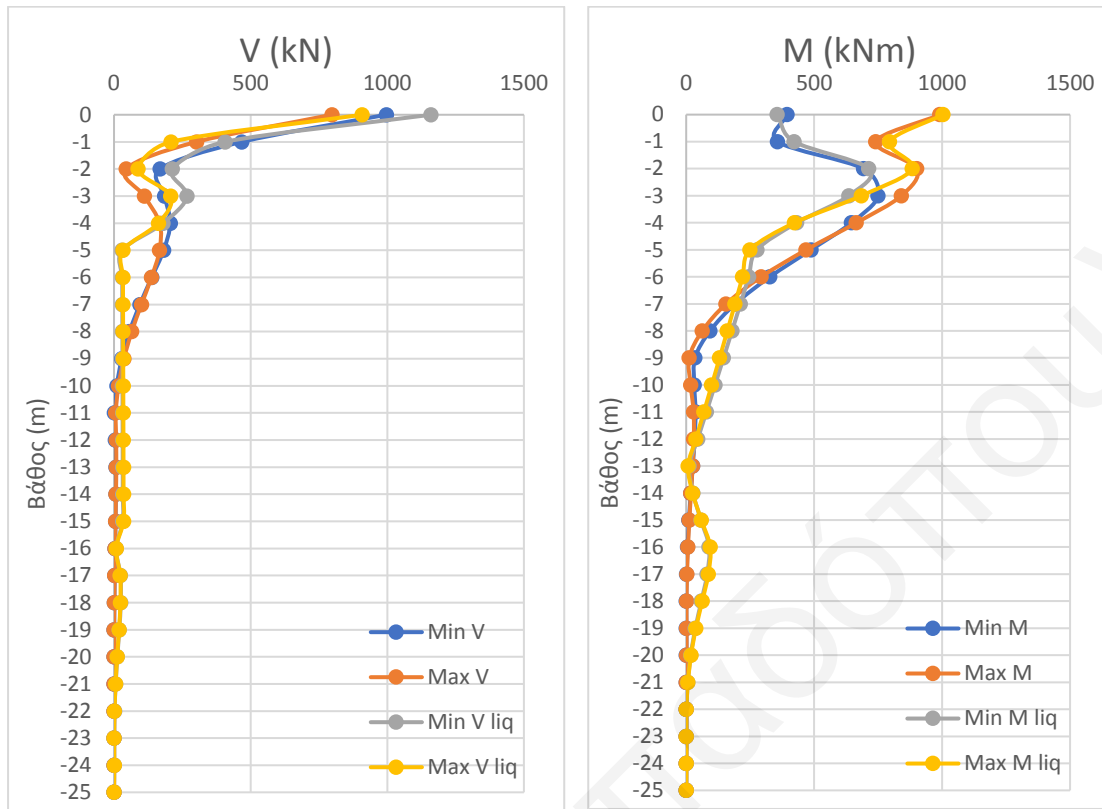
Παραμετρική Ανάλυση 44



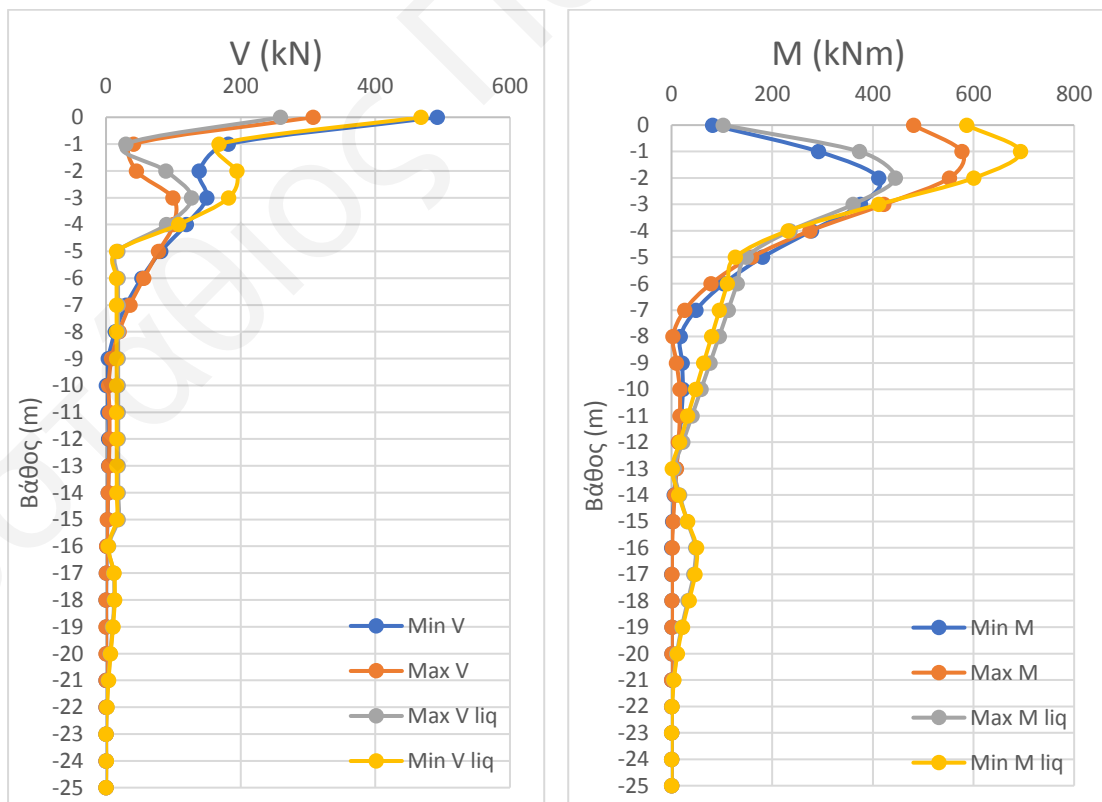
Παραμετρική Ανάλυση 45



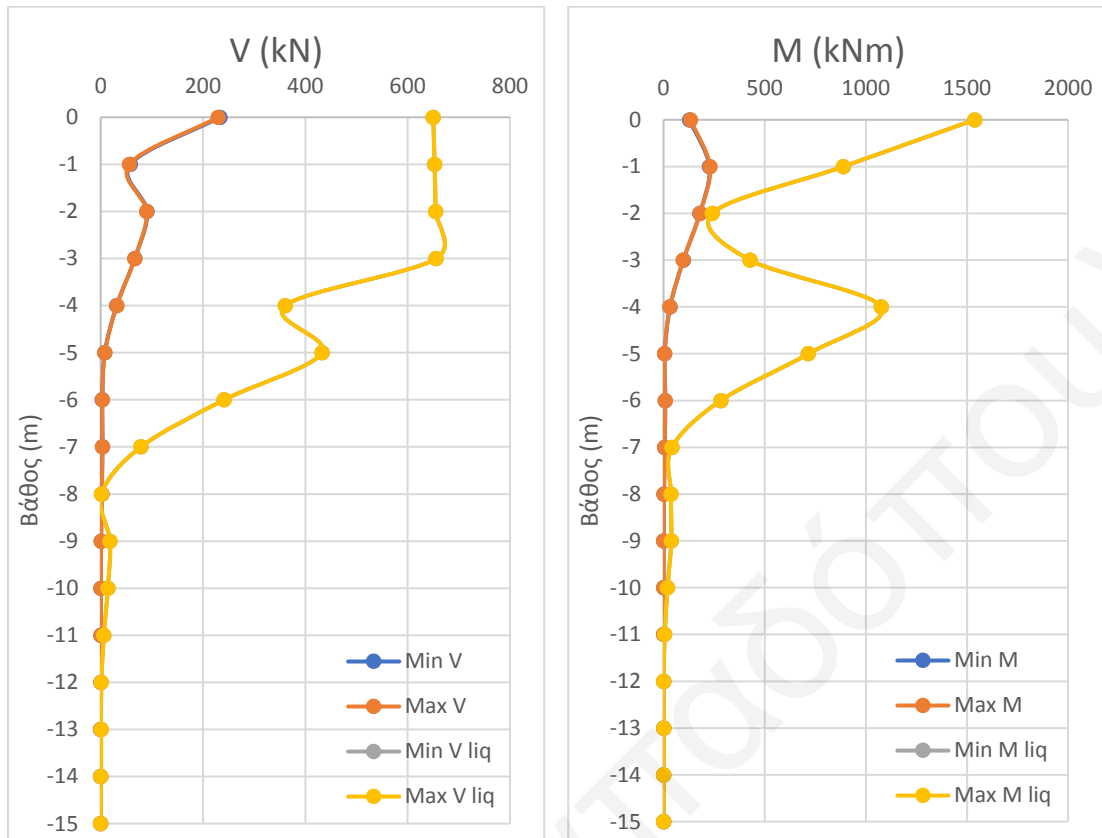
Παραμετρική Ανάλυση 48



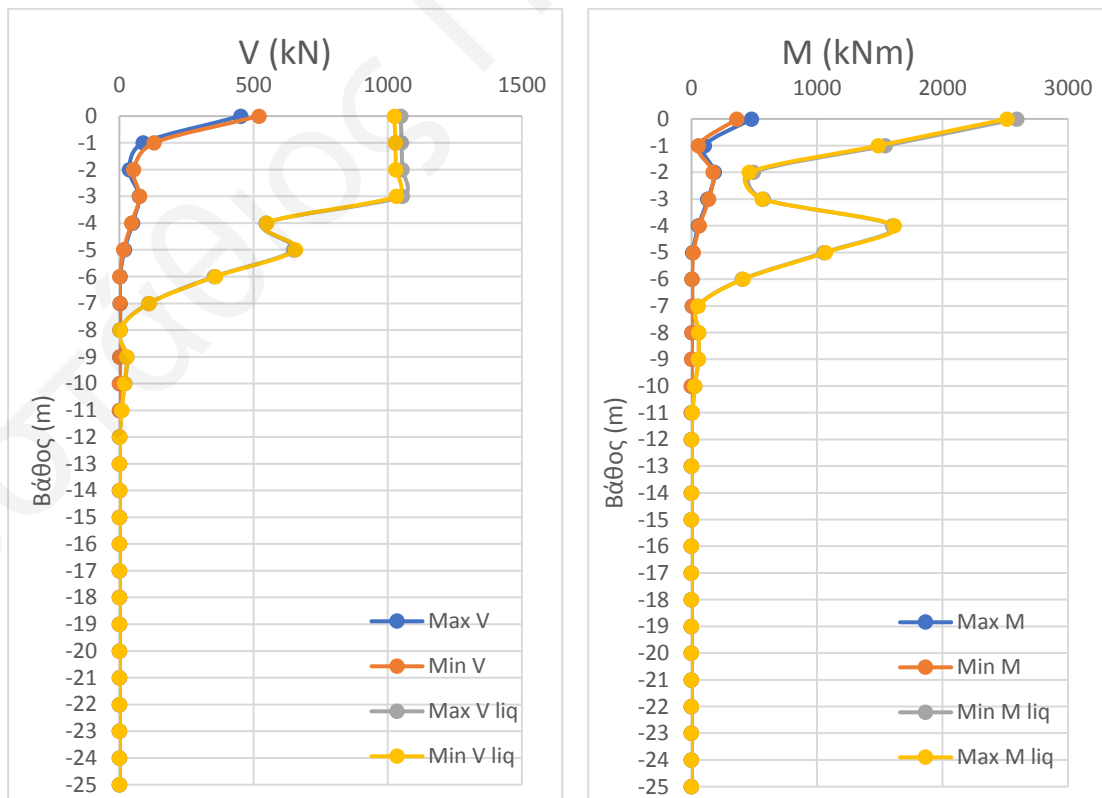
Παραμετρική Ανάλυση 49



### Παραμετρική Ανάλυση 50



### Παραμετρική Ανάλυση 51



Παραμετρική Ανάλυση 52

