

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ "ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ"

Αξιολόγηση προτεινόμενης μεθοδολογίας για τον αναλυτικό υπολογισμό ελαστικών φασμάτων απόκρισης σε ρευστοποιήσιμα εδάφη

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασιλική Ζωντανού - Χαρίκλεια Καλογεράκη Επιβλέπων: **Γεώργιος Δ. Μπουκοβάλας**, Καθηγητής ΕΜΠ



Περίοδος

Evaluation of a proposed methodology for the analytical estimation of the elastic response spectra of liquefiable soils

MASTER THESIS

Vasiliki Zontanou - Chariklia Kalogeraki Supervisor: George D. Bouckovalas, Professor NTUA

AΘHNA - ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2015/ATHENS - OCTOBER 2015

Ευχαριστίες

Με τη Μεταπτυχιακή αυτή εργασία ολοκληρώνεται πια και ο δεύτερος κύκλος των ακαδημαϊκών μας σπουδών και θέλουμε να ευχαριστήσουμε όλους όσους στάθηκαν δίπλα μας και συνετέλεσαν στην επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Αρχικά, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε το δάσκαλό μας Δρ. Γιώργο Μπουκοβάλα για τη συνεχή βοήθεια και στήριξή του. Όντας πάντα ενθαρρυντικός αποτελεί για μας πηγή έμπνευσης και αισιοδοξίας.

Πολύ σημαντική υπήρξε αδιαμφισβήτητα και η βοήθεια του υποψήφιου διδάκτορα Ι.Τσιάπα, ο οποίος - για ακόμη μία φορά – ήταν παρόν σε κάθε πρόβλημα που προέκυπτε.

Ακόμα θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε όλους τους διδακτορικούς και τους μεταδιδακτορικούς φοιτητές του τομέα Γεωτεχνικής, που δύο χρόνια τώρα έχει αποτελέσει για μας ένα φιλόξενο και ευχάριστο χώρο εργασίας και μάθησης.

Κλείνοντας, ένα θερμό ευχαριστώ οφείλουμε σε όλους τους αγαπημένους μας ανθρώπους, τους φίλους μας και τις οικογένειές μας, που είναι πάντα εδώ για μας. Μας στηρίζουν σε όλες τις δύσκολες στιγμές, δείχνουν κατανόηση στα άγχη και τις παραξενιές μας και με την αγάπη τους μας δίνουν κουράγιο και μας βοηθούν να προοδεύουμε. Αμέριστη στήριξη και κατανόηση έχουμε βρει βεβαίως και η μία στο πρόσωπο της άλλης. Πολύ καλές φίλες ήδη από το τρίτο έτος της σχολής, έχουμε συνεργαστεί σε πολλά μαθήματα και έχουμε πραγματοποιήσει μαζί δύο διπλωματικές εργασίες. Εξάλλου, πάντα δύο μυαλά είναι καλύτερα από ένα!

Βάλια - Χαρά

Εκτενής Περίληψη

Η ρευστοποίηση του εδάφους σε σεισμό αποτελεί ένα σημαντικό, κυρίως ως προς τις καταστροφικές του συνέπειες, φαινόμενο και έχει αποτελέσει πρόσφορο αντικείμενο μελέτης για την Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική τις τελευταίες δεκαετίες. Κύριος στόχος της διεξαγόμενης έρευνας ήταν διαχρονικά η δυνατότητα πρόβλεψης της σεισμικής απόκρισης του εδάφους και τα τελευταία χρόνια η -ει δυνατόν- αξιοποίηση των «ευεργετικών» παράπλευρων συνεπειών του φαινομένου, της απομείωσης δηλαδή των φασματικών επιταχύνσεων στις μικρές περιόδους (σεισμική μόνωση).

Η αναγνώριση του κινδύνου ρευστοποίησης καθίσταται εφικτή μέσω της ψευδοστατικής μεθόδου υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας FS_L όπως προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Seed & Idriss (1970), η οποία μας δίνει όμως μόνο προσεγγιστικά αποτελέσματα. Χάρη στις αναλύσεις Πεπερασμένων Στοιχείων ή Πεπερασμένων Διαφορών με σοφιστευμένα καταστατικά μοντέλα υπάρχει πλέον η δυνατότητα πιο αξιόπιστης ποσοτικά πρόβλεψης των αποτελεσμάτων του φαινομένου. Παρ' όλα αυτά η πολυπλοκότητα των αριθμητικών αναλύσεων είναι αρκετά αυξημένη και δεν μπορεί να γίνει χρήση των ανωτέρω καταστατικών μοντέλων από μη-εξειδικευμένους χρήστες. Θεωρείται, επομένως, σκόπιμη η ανάπτυξη απλούστερων μεθοδολογιών που κάνουν χρήση περισσότερο διαδεδομένων και απλούστερων υπολογιστικών μεθόδων και μπορούν να έχουν ευρύτερη εφαρμογή στην πράξη.

Τέτοιες είναι οι δύο μεθοδολογίες που έχουν προταθεί από τους Bouckovalas & Tsiapas (2015): (α) της «γραμμικής παρεμβολής» και (β) της «επαλληλίας». Η παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία σχετίζεται με την δεύτερη από τις παραπάνω μεθοδολογίες. Το στοιχείο που διαφοροποιεί την μεθοδολογία αυτή από προηγούμενες εργασίες, στις οποίες η ρευστοποίηση αγνοείτο ή θεωρείτο ότι ξεκινούσε από την αρχή της δόνησης, είναι ότι λαμβάνει υπόψη τη χρονική στιγμή κατά την οποία εκδηλώνεται η ρευστοποίηση στην

iii

επιφάνεια του εδάφους (t_{L,gr}). Συγκεκριμένα, η αρχική διέγερση χωρίζεται από το t_{L,gr} σε δύο επιμέρους τμήματα, «προ» και «μετά» της ρευστοποίησης, για τα οποία πραγματοποιούνται δύο ανεξάρτητες ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις τύπου SHAKE (Schnabel et al. 1972) με τα χαρακτηριστικά του μη-ρευστοποιημένου και του πλήρως ρευστοποιημένου εδάφους αντίστοιχα. Το τελικό φάσμα προκύπτει από την υπέρθεση των δύο επιμέρους φασμάτων.

Η παρούσα εργασία θέτει ως βασικό στόχο την καταρχήν επιβεβαίωση της ισχύος της μεθοδολογίας και στη συνέχεια τη λεπτομερή της βαθμονόμηση, χρησιμοποιώντας ήδη υπάρχοντα αποτελέσματα παραμετρικών, πλήρως συζευγμένων, μη-γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων που έχουν πραγματοποιηθεί στον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC. Για την προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης της ρευστοποιήσιμης άμμου έχει χρησιμοποιηθεί το καταστατικό προσομοίωμα κρίσιμης κατάστασης NTUA-Sand (Andrianopoulos et al. 2010). Ακολουθεί συνοπτικά η περιγραφή των επιμέρους εργασιών καθώς και τα τελικά συμπεράσματα για την εφαρμογή της μεθοδολογίας.

Αξιολόγηση μεθοδολογίας - Εφαρμογή για πραγματικό t_{L,gr}

Γνωρίζοντας εκ των προτέρων από τις αναλύσεις FLAC τις χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων στην επιφάνεια του εδάφους προσδιορίζεται η χρονική στιγμή t_{Lgr}. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα Ι**, συγκρίνονται οι παλμοί στις δύο καταγραφές και η δόνηση χωρίζεται τη στιγμή που αρχίζει να αλλοιώνεται το συχνοτικό της περιεχόμενο και να μειώνεται αισθητά το πλάτος της επιτάχυνσης.



Σχήμα Ι: Παράδειγμα προσδιορισμού της χρονικής στιγμής t_{L,gr.}

Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η μεθοδολογία για το δεδομένο αυτό t_{L,gr} έτσι ώστε να ελεγχθεί εάν πράγματι οδηγεί σε ικανοποιητική πρόβλεψη της εδαφικής συμπεριφοράς. Οι αναλύσεις που αντιστοιχούν στο πρώτο τμήμα της δόνησης (t $\leq t_{L,gr}$) πραγματοποιούνται θεωρώντας πλήρη απουσία ρευστοποίησης, δηλαδή θεωρώντας μηδενικό συντελεστή υπερπιέσεων πόρων (r_u = 0). Για τις αναλύσεις που αντιστοιχούν στο δεύτερο τμήμα της δόνησης (t > t_{L,gr}), υιοθετείται η μεθοδολογία των Miwa & Ikeda (2006), καθώς το ελαστικό μέτρο διάτμησης G_{max} μειώνεται σε μια συγκεκριμένη σταθερή τιμή (G_{liq} = ρV_{s,liq}²), ενώ η τιμή του λόγου υστερητικής απόσβεσης ξ είναι συνάρτηση της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης γ, όπως αυτή προκύπτει από τις τυπικές καμπύλες ξ-γ για άμμους. Οι εν λόγω αναλύσεις πραγματοποιούνται στην παρούσα φάση για τη βέλτιστη ταχύτητα μετάδοσης σεισμικού κύματος στο ρευστοποιημένο έδαφος V_{s,liq}, η οποία προκύπτει παραμετρικά. Πιο συγκεκριμένα, γίνονται ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις γ*ια ολόκληρη τη δόνηση* χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές του λόγου της ταχύτητας V_{s,liq}/V_{s,o}) και επιλέγεται η καταλληλότερη τιμή που επιτυγχάνει τη βέλτιστη πρόβλεψη του πραγματικού φάσματος σε μεγάλες περιόδους.

Η σύγκριση μεταξύ των αριθμητικών αναλύσεων (FLAC) και των απλοποιημένων αναλύσεων με την προτεινόμενη μεθοδολογία γίνεται με τις μέσες φασματικές τιμές σε τέσσερα εύρη περιόδων (T = 0-0.15sec, 0.15-0.40sec, 0.40-0.80sec και 0.80-1.60sec). Διαπιστώνεται μία υπερεκτίμηση των τιμών στις μικρές περιόδους του φάσματος, εύρος που επηρεάζεται από το κομμάτι της δόνησης πριν τη ρευστοποίηση. Για το λόγο αυτό, επαναλήφθηκαν οι αναλύσεις για t ≤ $t_{L,gr}$ θεωρώντας μειωμένη ταχύτητα διατμητικών κυμάτων καθ' ύψος της στήλης του εδάφους, καθώς στο κομμάτι αυτό της δόνησης έχουν ήδη αναπτυχθεί σημαντικές υπερπιέσεις πόρων Γελικά, επιλέγεται λόγος $V_s / V_{s,o} = \sqrt[4]{1-r_u}$ που αντιστοιχεί σε λόγο υπερπίεσης πόρων $r_u = 0.6$.

Η σύγκριση των τελικών φασμάτων (**Σχήμα ΙΙ**) θεωρείται ικανοποιητική, καθώς μετά από στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων διαπιστώνεται ένα μέσο σφάλμα στην τελική εκτίμηση των φασματικών τιμών της τάξης του 13% για τις μικρές περιόδους (T = 0-0.80 sec) και 1% για τις μεγαλύτερες. Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι η μέθοδος μπορεί να οδηγήσει σε επιτυχημένη πρόβλεψη της εδαφικής συμπεριφοράς με αποκλίσεις οι οποίες είναι υπέρ της ασφαλείας. Πηγή αβεβαιοτήτων για την πρακτική εφαρμογή της παραμένει η πρόβλεψη του t_{L,gr} και η ορθή εκτίμηση του λόγου V_{s,liq}/V_{s,o}.



Σχήμα ΙΙ: Σύγκριση μέσων φασματικών επιταχύνσεων θεωρώντας $r_u = 0.6$ στο πρώτο τμήμα ($t \le t_{L,gr}$).

Πρόβλεψη της επιφανειακής εκδήλωσης ρευστοποίησης $t_{L,gr}$

Στις αριθμητικές αναλύσεις, η χρονική στιγμή έναρξης της ρευστοποίησης t_L σε κάθε βάθος μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια μέσω των αντίστοιχων χρονοϊστοριών του r_u. Σε πρακτικές εφαρμογές, με δεδομένο μόνο την κατανομή του FS_L με το βάθος, η οποία έχει εκτιμηθεί σύμφωνα με την εμπειρική μεθοδολογία Youd et al. (2001), ο χρόνος έναρξης της ρευστοποίησης μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής:

$$t_{L} = T_{exc} \cdot N_{EQ} \cdot FS_{L}^{1/b}$$

όπου b η κλίση της καμπύλης ρευστοποίησης της άμμου και T_{exc} , N_{EQ} η θεμελιώδης περίοδος και οι ισοδύναμοί κύκλοι της διέγερσης αντίστοιχα. Τυπικά εύρη τιμών για την κλίση b είναι b = 0.3 ÷ 0.4. Για τη χρήση της προηγούμενης εξίσωσης απαιτείται η προσεγγιστική μετατροπή της ανομοιόμορφης δόνησης σχεδιασμού σε ισοδύναμη ομοιόμορφη με N_{EQ} κύκλους φόρτισης, περίοδο T_{exc} και σταθερό εύρος επιτάχυνσης, ίσο με την «ενεργό» επιτάχυνση a_{eff} ως εξής:

$$N_{EQ} = \frac{\pi^2 \int_{t=0}^{N \cdot T} |v(t)| dt}{a_{eff} T_{exc}^2}$$

όπου v(t) είναι η χρονοϊστορία της ταχύτητας της διέγερσης. Επισημαίνεται ότι η σχέση αυτή ισχύει με απόλυτη ακρίβεια για αρμονικές διεγέρσεις, ενώ έχει επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία της στην αναλυτική πρόβλεψη φαινομένων ρευστοποίησης υπό πραγματικές διεγέρσεις (Karamitros et al. 2013). Ως θεμελιώδης περίοδος της διέγερσης T_{exc} λαμβάνεται η μέση περίοδος του τμήματος του φάσματος επιταχύνσεων για το οποίο ισχύει Sa > 2.5PGA (PGA: μέγιστη εδαφική επιτάχυνση), ενώ η «ενεργός» επιτάχυνση a_{eff} υπολογίζεται ως εξής (Tokimatsu & Yoshimi 1983):

$$a_{eff} = \left[\left(M_w - 1 \right) / 10 \right] a_{max}$$

Εν συνεχεία, προσδιορίζεται κάθε φορά η μέση και η ελάχιστη τιμή του χρόνου ρευστοποίησης οι οποίες συγκρίνονται με το γνωστό $t_{L,gr}$. Ικανοποιητική γραμμική συσχέτιση παρουσιάζεται για την ελάχιστη τιμή του t_L καθ' ύψος της στήλης $t_{L,min}$ και συγκεκριμένα: $t_{L,gr} = 0.84 \cdot t_{L,min}$. Επιπρόσθετα, για να επιτευχθούν προβλέψεις υπέρ της ασφαλείας, προτείνεται και ένα άνω όριο: $t_{L,gr} = 0.95 \cdot t_{L,min}$.



Σχήμα ΙΙΙ: Σύγκριση t_{L,gr} - ελάχιστης τιμής του t_L για το σύνολο των αναλύσεων και προτεινόμενα κριτήρια πρόβλεψης.

Αξιολόγηση μεθοδολογίας - Εφαρμογή για προβλεπόμενο t_{L,gr}

Στο τελευταίο κεφάλαιο της Μεταπτυχιακής Εργασίας παρουσιάζονται τα βήματα της μεθοδολογίας πρόβλεψης ελαστικών φασμάτων απόκρισης σε ρευστοποιήσιμο έδαφος «με επαλληλία» με όλες τις προτεινόμενες τροποποιήσεις της βαθμονόμησης της και κατόπιν εφαρμόζεται βήμα προς βήμα για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Τα βασικά σημεία στα οποία θα πρέπει να εστιάσει ο μελλοντικός χρήστης είναι τα ακόλουθα:

- Για t \leq t_{L,gr} πρέπει να ληφθεί μειωμένη ταχύτητα διατμητικών κυμάτων η οποία να αντιστοιχεί σε λόγο υπερπίεσης πόρων r_u = 0.4 0.6.
- Για t > t_{L,gr} μπορεί να λαμβάνεται ο λόγος V_{S,liq}/V_{S,o} συναρτήσει του μέσου καθ' ύψος FS_L, σύμφωνα με τα προτεινόμενα εύρη των Miwa & Ikeda (2006) τα οποία φαίνονται στον ακόλουθο Πίνακα Ι. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μέσες τιμές του Πίνακα Ι είναι συστηματικά μεγαλύτερες από τους βέλτιστους λόγους που προέκυψαν από την παραμετρική διερεύνηση, με αποτέλεσμα το σχετικό σφάλμα στις μεγάλες περιόδους να αυξάνεται σημαντικά -περί το 20%- πάντα όμως υπέρ της ασφαλείας. Προτείνεται, λοιπόν, η χρήση των κατώτατων ορίων, ειδικά για μικρές σχετικές πυκνότητες (π.χ. D_r ≤ 40%).

Πίνακας Ι: Προτεινόμενες τιμές του λόγου V_{S,liq}/V_{S,o} κατά Miwa & Ikeda (2006).

FS∟	0.3 - 0.6	0.6 - 0.9	0.9 - 1.0
V _{S,liq} /V _{S,o}	0.10 - 0.14	0.12 - 0.16	0.14 - 0.19

Η πρόβλεψη της χρονικής στιγμής επιφανειακής εκδήλωσης της ρευστοποίησης
μπορεί να γίνει σύμφωνα με τη σχέση:

 $t_{L,gr} = 0.84 \cdot t_{L,min} = 0.84 \cdot min(T_{exc} \cdot N_{EQ} \cdot FS_{L}^{1/0.35})$

Η χρήση της προτεινόμενης σχέσης οδηγεί σε σχετικό σφάλμα της τάξης του 13% για T < 0.40sec και 20% περίπου για περιόδους μεταξύ T = 0.40 - 1.60sec. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης των μέσων φασματικών επιταχύνσεων παρουσιάζονται στο **Σχήμα IV**.



Σχήμα ΙV: Σύγκριση μέσων φασματικών επιταχύνσεων θεωρώντας την μέση εκτίμηση του t_{L.gr}.

• Συντηρητική εκτίμηση του ελαστικού φάσματος μπορεί να επιτευχθεί με το άνω όριο του $t_{L,gr}$ (ήτοι $t_{L,gr} = 0.95 \cdot t_{L,min}$) και το κάτω όριο του r_u για το πρώτο τμήμα της δόνησης (ήτοι $r_u = 0.4$). Η υπερεκτίμηση που παρέχει είναι της τάξης του 34% για τις μικρές περιόδους (T = 0 - 0.80 sec) και 20% για τις μεγαλύτερες.

Extended Abstract

Earthquake induced liquefaction is an important phenomenon mainly due to its devastating effects and has been a prosperous subject of research for the Geotechnical Earthquake Engineering community during the last decades. The conducted research was diachronically focused on the prediction of the seismic response of the soil and lately on the utilization of the positive side effects of liquefaction, namely the significant reduction of the spectral accelerations in the range of small periods (seismic isolation).

The identification of the liquefaction hazard has been accomplished through the pseudostatic methodology for the estimation of the factor of safety FS_L firstly introduced by Seed & Idriss (1970), which culminates only in approximate results. Numerical analysis with Finite Element or Finite Difference Codes and sophisticated constitutive models have contributed to the more accurate and reliable quantitative prediction of liquefaction. Nevertheless, these non-linear numerical algorithms and constitutive models are still out of bounds for the majority of engineers due to their advanced complexity. Therefore, the development of simpler methodologies employing more widespread computational means and easily applicable in practice is proved necessary.

Along this line, two new analytical methodologies have been proposed by Bouckovalas & Tsiapas (2015): (a) the "interpolation methodology" and (b) the "superposition methodology" to which the present Master Thesis is related. The innovation of this methodology is that it takes consistently into account the pre- as well as the post-liquefaction segment of the seismic excitation, compared to the existing methodologies, which assume that liquefaction occurs on the onset of the seismic excitation. In particular, the input seismic motion is separated in 2 parts, the first for t \leq t_{L,gr} and the second for t > t_{L,gr}, where t_{L,gr} corresponds to the trigger time of liquefaction effects on the seismic motion of the ground surface. Separate equivalent linear analyses (Schnabel et al. 1972) for each

part of the input seismic motion, using the non-liquefied soil properties for the first part and the liquefied soil properties for the second part respectively. The elastic response spectrum is defined as the envelope of the response spectra computed for the first and the second part of the seismic motion.

The present thesis sets as its primary goal the verification of the proposed methodology at first and subsequently the detailed calibration using existing results of parametric, fully-coupled, non-linear numerical analysis conducted with the Finite Difference Code FLAC. The plasticity critical state constitutive model NTUA-Sand (Andrianopoulos et al. 2010) was employed for the simulation of the seismic response of the liquefiable sand. In the following, a short description of the chapters as well as the final conclusions for the practical application of the methodology is given.

Methodology evaluation – Application for the actual t_{L,gr}

In the numerical analyses, the liquefaction onset time at the ground surface, $t_{L,gr}$, can be accurately estimated from the numerically simulated acceleration time-histories at the ground surface. In particular, as shown in **Figure I**, the recordings at the bedrock outcrop and at the surface are compared and the $t_{L,gr}$ is selected as the minimum time in which the frequency content has significantly changed and the acceleration amplitude has been reduced.



Figure I: Estimation of the liquefaction onset time $t_{L,gr}$.

The next step is the application of the proposed methodology considering the actual value of $t_{L,gr}$, in order to evaluate the prediction of the seismic response spectra.

The analyses of part-I (t \leq t_{L,gr}) are conducted, assuming absence of liquefaction effect, namely zero excess pore pressure ratio (r_u = 0). The analyses of the second part of the seismic motion (t > t_{L,gr}) are conducted according to the Miwa & Ikeda (2006) methodology, as the elastic shear modulus, G_{max} , is reduced to a pre-scribed constant value ($G_{liq} = \rho V_{S,liq}^2$), whereas the hysteretic damping ratio ξ is related to cyclic shear strain amplitude γ , using the common empirical ξ - γ curves for sands. These analyses are conducted in this stage, using the optimum shear wave velocity of the liquefied ground, $V_{S,liq}$, which has been estimated parametrically. More specifically, equivalent linear analysis are conducted for the whole seismic motion using different values of the shear velocity $V_{S,liq}$ to the corresponding one without liquefaction $V_{S,o}$ ratio ($V_{S,liq}/V_{S,o}$). The final selection is based on the optimum prediction of the real spectrum in the range of large periods.

The comparison between the results of the numerical analyses (FLAC) and the simplified predictions of the proposed methodology is conducted in terms of the average spectral accelerations in four period ranges (T = 0-0.15sec, 0.15-0.40sec, 0.40-0.80sec και 0.80-1.60sec). An overestimation of the values for the small periods of the spectrum is identified, range that is affected mainly from the part of the motion before the liquefaction. Therefore, the analysis for t \leq t_{L,gr} were repeated taking into account reduced values for the shear wave velocity as the excess pore pressure development during this part of the motion is significant. Finally, the velocity ratio $V_s / V_{s,o} = \sqrt[4]{1-r_u}$ that is selected corresponds to a value of excess pore pressure equal to $r_u = 0.6$.

The comparison of the final spectra (**Figure II**) is satisfying, as after a statistical procession of the results the median relative error for the final estimation of the spectral values is 13% for small periods (T = 0-0.80 sec) and 1% for larger ones. As a result, it is concluded that the methodology can lead to successful prediction of the soil response with deviations that are on the safe side. Source of uncertainties for its practical application remains the prediction of t_{L,gr} and the right estimation of the V_{S,liq}/V_{S,o} ratio.



Figure II: Comparison of the average spectral accelerations, assuming $r_u = 0.6$ in the first part ($t \le t_{L,gr}$).

Estimation of the liquefaction onset time t_{L,gr}

In the numerical analyses, the variation of the liquefaction onset time t_L with depth can be accurately defined from the r_u time-histories. For practical applications, the liquefaction onset time in each depth can be computed as a function of FS_L, which has been estimated according to the empirical methodology of Youd et al. (2001), as follows:

$$t_{L} = T_{exc} \cdot N_{FO} \cdot FS_{L}^{1/l}$$

where b is the slope of the liquefaction resistance curve of the liquefiable sand and T_{exc} , N_{EQ} the predominant excitation period and the equivalent number of cycles respectively. Typical values for the slope b are b = 0.3 - 0.4. The application of this equation to actual seismic excitations, with irregular acceleration time-history, requires definition of an "equivalent" harmonic motion with N_{EQ} loading cycles, excitation period T_{exc} and constant acceleration amplitude, equal to the effective acceleration value a_{eff} as follows:

$$N_{EQ} = \frac{\pi^2 \int_{t=0}^{N \cdot T} \left| v(t) \right| dt}{a_{eff} T_{exc}^2}$$

where v(t) denotes the time-history of the seismic velocity. Note that this equation is strictly accurate for harmonic excitations, but also provide reasonable estimations of N_{EQ} for the analytical computation of liquefaction related effects under irregular seismic loading (Karamitros et al. 2013). The predominant excitation period T_{exc} is taken as the mean period for Sa ≥ 2.5 ·PGA (PGA: peak ground acceleration), while the effective acceleration is calculated as follows (Tokimatsu & Yoshimi 1983):

$$a_{eff} = \left[\left(M_w - 1 \right) / 10 \right] a_{max}$$

For each numerical analyses, the average and the minimum value of the liquefaction onset time are computed and are compared with the known value of $t_{L,gr}$. The best correlation and the minimum scatter are observed with the linear fitting of the minimum t_L values and, in particular, for: $t_{L,gr} = 0.84 \cdot t_{L,min}$. In addition, a conservative upper limit is proposed, as follows: $t_{L,gr} = 0.95 \cdot t_{L,min}$. (Figure III).



Figure III: Comparison of $t_{L,gr}$ with the min value of t_L for the sum of the analyses and proposed prediction equations.

Methodology evaluation – Application for the predicted t_{L,gr}

In the last chapter of this Master Thesis, the steps of the proposed "superposition" methodology for the estimation of elastic response spectra for liquefiable ground, are listed incorporating all the proposed calibration improvements, and then is applied step-by-step for the sum of the examined cases. The basic points that require attention from a perspective user are the following:

- For t ≤ t_{L,gr} the shear wave velocity in the liquefiable layers should be reduced in order to correspond to excess pore pressure ratio r_u = 0.4 0.6.
- For t > t_{L,gr} the values of V_{S,liq}/V_{S,o} can be estimated as a function of the average (with depth) FS_L, according to the proposed ratios of Miwa & Ikeda (2006), as presented in **Table I**. Note that the average V_{S,liq}/V_{S,o} ratios of **Table I** are systematically bigger that the optimum ones, which were defined in the aforementioned parametric study, resulting in a significant increase in the relative error (approximately 20%), towards the conservative side. Consequently, it is advised to use the lower bound of **Table I**, especially for smaller relative densities (i.e. D_r ≤ 40%).

Table I:Proposed V_{S,liq}/V_{S,o} ratios by Miwa & Ikeda (2006)

FS∟	0.3 - 0.6	0.6 - 0.9	0.9 - 1.0
V _{S,liq} /V _{S,o}	0.10 - 0.14	0.12 - 0.16	0.14 - 0.19

• The liquefaction onset time t_{L,gr} can be adequately predicted with the following equation:

$$t_{L,gr} = 0.84 \cdot t_{L,min} = 0.84 \cdot min(T_{exc} \cdot N_{EQ} \cdot FS_{L}^{1/0.35})$$

The relative error, when the previous equation is used, is approximately 13% and 20% for T < 0.40sec and for T = 0.40 - 1.60sec respectively. The comparison of the average spectral accelerations are presented in **Figure IV**.



Figure IV: Comparison of the average spectral accelerations using the average prediction of $t_{L,gr}$.

• Conservative estimation of the elastic response spectra can be achieved using the upper limit of $t_{L,gr}$ (namely $t_{L,gr} = 0.95 \cdot t_{L,min}$) and the lower limit of r_u in Part-I (namely $r_u = 0.4$). The resultant over-prediction is approximately 34% in the short period range (T = 0 - 0.80 sec) and 20% for longer periods.

Περιεχόμενα

Ευχαρισ	πίες
Εκτενής	Περίληψηii
Extende	d Abstractx
1. Εισ	αγωγή1
1.1	Περιγραφή του προβλήματος1
1.2	Σκοπός της μεταπτυχιακής εργασίας2
1.3	Δομή μεταπτυχιακής εργασίας
2. Βιβ	διογραφική έρευνα5
2.1	Γενικά5
2.2	Βιβλιογραφική Αναδρομή
2.2	.1 Αναλύσεις Youd & Carter (2003)6
2.2	.2 Αναλύσεις Miwa & Ikeda (2006)14
2.2	.3 Αναλύσεις Kramer et al. (2011)19
2.3	Η μέθοδος της «γραμμικής παρεμβολής» των Bouckovalas & Tsiapas (2015) 21
2.4	Η μέθοδος της «επαλληλίας» των Bouckovalas & Tsiapas (2015)
2.5	Συμπεράσματα
3. Περ	ριγραφή παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων29
3.1	Γενικά

	3.2	Κατο	αστατικό προσομοίωμα NTUA-Sand	29
	3.3	Κώδ	ικας Πεπερασμένων Διαφορών FLAC	33
	3.4	Παρο	αμετρικές αριθμητικές αναλύσεις	35
	3.4.	1	Εδαφική τομή και αριθμητικό προσομοίωμα	35
	3.4.	2	Σεισμικές διεγέρσεις	36
	3.4.	3	Παραμετρικές αναλύσεις	39
	3.4.	4	Επεξεργασία και αξιολόγηση αποτελεσμάτων	40
	3.4.	5	Ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος ρευστοποιημένου εδάφους	42
	3.5	Υπολ	λογισμός συντελεστή ασφαλείας έναντι σεισμικής ρευστοποίησης	43
	3.5.	1	Μεθοδολογία εκτίμησης συντελεστή ασφαλείας	43
	3.5.	2	Εκτίμηση συντελεστή ασφαλείας	45
4	Προ	καταρ	ρτική αξιολόγηση προτεινόμενης μεθοδολογίας	49
	4.1	Γενικ	<ά	49
	4.2	Ισοδ	ύναμες Γραμμικές Αναλύσεις ΕΕRΑ	49
	4.2.	1	Περιγραφή μεθοδολογίας	49
	4.2.	2	Δεδομένα αναλύσεων	50
	4.3	Τυπι	κά αποτελέσματα	56
	4.4	Αξιο	λόγηση αποτελεσμάτων	61
	4.4.	1	Αναλύσεις για $V_{s,liq}/V_{s,0}$ όπως προτείνονται από τους Miwa & Ikeda (2006)	67
	4.5	Βαθμ	μονόμηση Προτεινόμενης Μεθοδολογίας	71
	4.5.	1	Επίδραση καμπυλών G/G _{max} – γ και ξ – γ	72
	4.5.	2	Επίδραση υπερπίεσης πόρων	76
	4.6	Συμτ	τεράσματα	82
5.	Πρό	βλεψ	η του χρόνου επιφανειακής εκδήλωσης της ρευστοποίησης t _{L,gr}	85
	5.1	Γενικ	<ά	85
	5.2	Χρόν	νος ρευστοποίησης t∟εδαφικής στρώσης υπό αρμονική διέγερση	85
	5.3	Χρόν	νος ρευστοποίησης τ∟ εδαφικής στρώσης υπό πραγματική διέγερση	86

5.4	Διερεύνηση της σχέσης [t _L (z) - t _{L,gr}] μέσω αριθμητικών αναλύσεων87	
5.4.	1 Υπολογισμός της κατανομής του χρόνου t _L (z) με το βάθος	
5.4.	2 Συγκρίσεις	
5.4.	3 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων τη στιγμή της επιφανειακής εκδήλωσης της	
ρευ	στοποίησης98	
5.5	Συμπεράσματα	
6. Τελ	ική αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας103	
6.1	Γενικά	
6.2	Βήματα προτεινόμενης μεθοδολογίας103	
6.3	Αποτελέσματα τελικής εφαρμογής της μεθόδου113	
6.4	Συμπεράσματα	
Βιβλιογραφία		
Παράρτημα Α: Ελαστικά φάσματα απόκρισης125		

κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του προβλήματος

Η ρευστοποίηση του εδάφους λόγω σεισμού αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα κεφάλαια της Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής. Συνειδητοποιήθηκε ουσιαστικά μετά το σεισμό της Niigata το 1964 στην Ιαπωνία, με μέγεθος M_w = 7.5, όπου τεράστιες εκτάσεις στο σύστημα των ποταμών Shinano και Agano, αποτελούμενες από αμμώδεις αποθέσεις, έχασαν την αντοχή τους και παρουσίασαν εκτενείς καθιζήσεις, μετακινήσεις και αστοχίες θεμελιώσεων. Έκτοτε και τουλάχιστον όσον αφορά τους αντισεισμικούς κανονισμούς διεθνώς αλλά και στη χώρα μας, το φαινόμενο της ρευστοποίησης θεωρείται καταστροφικό και απαιτείται απλά ο εκ των προτέρων εντοπισμός του, έτσι ώστε να αποφευχθεί η κατασκευή έργων υποδομής στην "απαγορευμένη" κατηγορία των ρευστοποιήσιμων εδαφών.

Υπάρχουν βέβαια και νεότερες απόψεις (Ishihara, 1995, Naesgaard, 1998, Karamitros, 2012) οι οποίες υποστηρίζουν ότι δεν θα πρέπει να αποκλείεται η θεμελίωση δομικών έργων σε ρευστοποιήσιμα εδάφη, υπό την προϋπόθεση ότι: (α) έχει εξασφαλισθεί ικανοποιητική αντοχή με βελτίωση των επιφανειακών στρώσεων και (β) έχει ληφθεί υπ' όψη ότι η ρευστοποίηση του εδάφους μπορεί να λειτουργήσει ως φυσική, σεισμική μόνωση, απομειώνοντας έτσι τις σεισμικές δράσεις που ασκούνται στην ανωδομή.

Η αριθμητική προσομοίωση ωστόσο της σεισμικής απόκρισης του εδάφους υπό καθεστώς ρευστοποίησης (μέσω μη γραμμικών προγραμμάτων Πεπερασμένων Στοιχείων ή Πεπερασμένων Διαφορών) απαιτεί εξειδικευμένους χρήστες και ενέχει κινδύνους πραγματοποίησης σοβαρών λαθών στην εκτίμηση των εδαφικών και φασματικών επιταχύνσεων. Για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον έχει στραφεί σε απλούστερες μεθοδολογίες υπολογισμού, οι οποίες απαιτούν τη χρήση συνήθων υπολογιστικών τεχνικών και δεδομένων, όπως η ευρύτατα διαδεδομένη μέθοδος της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης (Schnabel et al. 1972). Στη λογική αυτή και σε επέκταση

1

της ήδη δημοσιευμένης αλλά περιορισμένης έρευνας έχουν προταθεί από τους Bouckovalas & Tsiapas (2015) δύο βελτιωμένες μεθοδολογίες υπολογισμού των ελαστικών φασμάτων απόκρισης οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τη χρονική υστέρηση με την οποία εκδηλώνεται η ρευστοποίηση: (α) η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής – "interpolation methodology" και (β) η μέθοδος της επαλληλίας – "superposition methodology". Εκ των δύο αυτών μεθοδολογιών, μόνο η πρώτη έχει προς το παρόν ελεγχθεί και βαθμονομηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό ενώ η δεύτερη έχει ελεγχθεί μόνο επί της αρχής, ποιοτικά δηλαδή, και η ποσοτική της διαπίστευση εκκρεμεί.

1.2 Σκοπός της μεταπτυχιακής εργασίας

Κατ' επέκταση των ανωτέρω, η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στη δεύτερη εκ των ανωτέρω μεθόδων (μέθοδος «επαλληλίας»), με σκοπό:

(α) Να διαπιστώσει κατά πόσον η εν λόγω μεθοδολογία, πέραν της ποιοτικής ορθότητας, παρουσιάζει και πρακτικό ενδιαφέρον για ποσοτικά ακριβείς αναλύσεις σε μεγάλο εύρος γεωτεχνικών εφαρμογών.

(β) Να βαθμονομήσει την εν λόγω απλοποιητική μεθοδολογία έναντι πραγματικών περιστατικών και, κυρίως, αριθμητικών state-of-the-art (σοφιστευμένων) αναλύσεων.

(γ) Να αποτιμήσει το περιθώριο του στατιστικού λάθους που είναι δυνατόν να προκύψει από τη συγκεκριμένη μεθοδολογία, έτσι ώστε η εφαρμογή της στην πράξη να γίνεται με τον απαιτούμενο κατά περίπτωση συντηρητισμό.

1.3 Δομή μεταπτυχιακής εργασίας

Συνοπτικά, τα περιεχόμενα της μεταπτυχιακής εργασίας έχουν ως ακολούθως:

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται μία σύντομη ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας, ώστε να σκιαγραφηθεί σε γενικές γραμμές το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζονται οι δύο προτεινόμενες μεθοδολογίες, στη βασική φιλοσοφία των οποίων εισάγεται επίσης ο αναγνώστης.

Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφονται οι πλήρως συζευγμένες, μη – γραμμικές, αριθμητικές προσομοιώσεις ρευστοποίησης σε εδαφική στήλη με τον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC, βάσει των οποίων πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται μία προκαταρκτική εφαρμογή της μεθοδολογίας λαμβάνοντας ως χρονική στιγμή διαχωρισμού της δόνησης t_{L,gr} αυτή που προκύπτει από τις χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης στη επιφάνεια του εδάφους των αναλύσεων FLAC. Εν συνεχεία βαθμονομείται η προτεινόμενη μεθοδολογία ώστε να προβλέπει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις φασματικές τιμές για μικρές περιόδους.

Στο **Κεφάλαιο 5** επιχειρείται η πρόβλεψη της χρονικής στιγμής διαχωρισμού της δόνησης t_{L,gr} αξιοποιώντας και πάλι τις αναλύσεις FLAC. Το t_{L,gr} συσχετίζεται με την ελάχιστη τιμή του χρόνου ρευστοποίησης καθ΄ ύψος της ρευστοποιήσιμης στρώσης t_{L,min} ενώ διατυπώνεται και ένα δεύτερο κριτήριο για μια πιο συντηρητική εφαρμογή της μεθόδου.

Στο **Κεφάλαιο 6** διατυπώνονται τα βήματα της μεθόδου όπως αυτά προέκυψαν έπειτα από τη βαθμονόμηση της και το κριτήριο υπολογισμού του t_{L,gr} και εφαρμόζονται για το σύνολο των 100 αριθμητικών αναλύσεων.

κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική έρευνα

2.1 Γενικά

Η προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης του εδάφους υπό καθεστώς ρευστοποίησης αποτελεί ένα κατ' εξοχήν σύνθετο πρόβλημα της Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής, το οποίο αντιμετωπίζεται αριθμητικά με κατάλληλα καταστατικά προσομοιώματα, ενσωματωμένα σε μη-γραμμικά προγράμματα Πεπερασμένων Στοιχείων ή Πεπερασμένων Διαφορών. Οι αναλύσεις αυτές απαιτούν εν γένει εξειδικευμένους χρήστες και σημαντικό αριθμό δεδομένων που δεν είναι πάντοτε γνωστά και επομένως ενέχουν τον κίνδυνο πραγματοποίησης σοβαρών λαθών στην εκτίμηση των σεισμικών δράσεων (μέγιστη εδαφική επιτάχυνση και ελαστικό φάσμα απόκρισης). Για τον λόγο αυτό, το ενδιαφέρον έχει εύλογα στραφεί σε απλούστερες μεθοδολογίες υπολογισμού, οι οποίες να μπορούν να εφαρμοστούν κάνοντας χρήση συνήθων υπολογιστικών τεχνικών και δεδομένων, όπως η ευρύτατα διαδεδομένη μέθοδος της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης (Schnabel et al. 1972).

Όπως προκύπτει όμως από την βιβλιογραφική αναδρομή που ακολουθεί, η έως σήμερα σχετική έρευνα είναι περιορισμένη, και επικεντρώνεται σε ποιοτικά κυρίως κριτήρια και διαπιστώσεις σχετικά με την επίδραση της ρευστοποίησης στις εδαφικές και τις φασματικές επιταχύνσεις. Οι λιγοστές συστάσεις με ποσοτικό χαρακτήρα στηρίζονται συνήθως στην παραδοχή ότι η ρευστοποίηση πραγματοποιείται πρακτικά ακαριαία, γεγονός που παρατηρείται μόνο σε πολύ ισχυρές σεισμικές δονήσεις και σε πολύ μικρούς συντελεστές ασφάλειας έναντι ρευστοποίησης, FS_L. Η παραδοχή αυτή δεν είναι συντηρητική. Συγκεκριμένα, από προσεκτική επισκόπηση πραγματικών περιστατικών, προκύπτει ότι η φασματική επιτάχυνση για μικρές περιόδους καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το τμήμα της δόνησης πριν το έδαφος ρευστοποιηθεί και είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτή για το «ακαριαία» ρευστοποιημένο έδαφος. Η επίδραση του φαινομένου αυτού σχετίζεται άμεσα

5

με τον συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης, καθώς όσο μεγαλώνει η τιμή του, τόσο καθυστερεί η εκδήλωση του φαινομένου της ρευστοποίησης.

Κατ' επέκταση των ανωτέρω, έχουν προταθεί από τους Bouckovalas & Tsiapas (2015) δύο βελτιωμένες μεθοδολογίες υπολογισμού των ελαστικών φασμάτων απόκρισης οι οποίες λαμβάνουν υπόψη το χρόνο εκδήλωσης της ρευστοποίησης (τα τμήματα της διέγερσης πριν και μετά την εκδήλωση του φαινομένου) ή ισοδύναμα τον συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης, FS_L. Κατά την εφαρμογή της πρώτης μεθοδολογίας (της γραμμικής παρεμβολής – «interpolation methodology») λαμβάνονται τα φάσματα του μηρευστοποιημένου και του πλήρως ρευστοποιημένου εδάφους ως άνω και κάτω όρια του πραγματικού φάσματος και γίνεται γραμμική παρεμβολή μεταξύ αυτών ανάλογα με τον συντελεστή ασφαλείας FS_L. Όσον αφορά τη δεύτερη μεθοδολογία, (της επαλληλίας – «superposition methodology») το πραγματικό φάσμα λαμβάνεται ως η περιβάλλουσα των φασμάτων που προκύπτουν χωριστά για τα δύο τμήματα της σεισμικής διέγερσης (πριν και μετά τη ρευστοποίηση). Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στην δεύτερη μεθοδολογία, για τη βαθμονόμηση της οποίας αξιοποιήθηκαν τόσο καταγραφές ιστορικών περιστατικών όσο και αποτελέσματα πλήρως συζευγμένων, μη-γραμμικών, αριθμητικών προσομοιώσεων.

2.2 Βιβλιογραφική Αναδρομή

2.2.1 Αναλύσεις Youd & Carter (2003)

Οι Youd and Carter (2005) εξέτασαν την επίδραση της ρευστοποίησης στην σεισμική απόκριση του εδάφους με απώτερο σκοπό να ελέγξουν την επάρκεια των φασμάτων σχεδιασμού των Αντισεισμικών Κανονισμών σε περιπτώσεις ρευστοποιήσιμων εδαφών. Αρχικά μελέτησαν 5 διαφορετικές περιοχές που έχουν ρευστοποιηθεί και στις οποίες υπάρχουν καταγραφές σεισμικών επιταχύνσεων. Οι περιοχές αυτές είναι: το "Wildlife Liquefaction Array" (Bennett et al. 1984), το "Port Island" (Iwasaki and Tai 1996), το "Treasure Island" (Rollins et al. 1994), το "Alameda Naval Air Station" (Carlisle and Rollins 1994) και η "Niigata" στην Ιαπωνία (Kawasumi 1968). Στις δύο πρώτες περιοχές υπάρχουν καταγραφές τόσο στην επιφάνεια όσο και στη βάση του ρευστοποιήσιμου εδάφους. Για τις 2 επόμενες, υπάρχουν οι καταγραφές στην επιφάνεια του εδάφους και σε γειτονικό βράχο ("Yerba Buena Island"), ενώ για την τελευταία υπάρχει μόνο η καταγραφή στην επιφάνεια του εδάφους.

Για κάθε μία περιοχή πραγματοποίησαν ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις με το πρόγραμμα PROSHAKE (Schnabel et al. 1972), εκτίμησαν τις χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων και τα φάσματα απόκρισης που θα είχαν καταγραφεί χωρίς ρευστοποίηση, και τα συνέκριναν με τις πραγματικές καταγραφές. Για την πραγματοποίηση των αναλύσεων χρησιμοποιήθηκαν οι καταγραφές κάτω από το ρευστοποιημένο έδαφος ή μετά από κατάλληλη επεξεργασία οι καταγραφές σε αναδυόμενο βράχο. Οι εδαφικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις, μετρήθηκαν είτε πριν το σεισμό ή αρκετό χρόνο μετά από αυτόν, ενώ για τις άμμους χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες καμπύλες G/G_{max} – logy και απόσβεσης που προτείνονται από τους Seed & Idriss (1970).

Για την περιοχή "Wildlife Liquefaction Array" έγιναν δύο ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις. Αρχικά, οι εδαφικές ιδιότητες και η μεθοδολογία της ανάλυσης πιστοποιήθηκαν συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για το σεισμό Elmore Ranch (1987), κατά τον οποίο το έδαφος δεν ρευστοποιείται και επομένως οι αναλύσεις θα πρέπει να συμπίπτουν με τις πραγματικές καταγραφές. Στη συνέχεια, επανέλαβαν τις αναλύσεις τους για το σεισμό Superstition Hills (1987), χρησιμοποιώντας τις ίδιες ακριβώς ιδιότητες. Οι πραγματικές και οι εκτιμώμενες χωρίς ρευστοποίηση χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στην επιφάνεια και τα αντίστοιχα φάσματα απόκρισης συγκρίνονται στο Σχήμα 2.1. Παρατηρείται ότι οι επιταχύνσεις είναι παρόμοιες μέχρι την άφιξη της μέγιστης επιτάχυνσης (13.5 sec), καθώς οι αναπτυσσόμενες υπερπιέσεις πόρων είναι μικρές μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή, ενώ έπειτα οι πραγματικές καταγραφές διαφοροποιούνται. Στο τέλος της διέγερσης οι υπερπιέσεις πόρων αυξήθηκαν μόνο έως $r_u = 0.40 \div 0.50$, οι οποίες όμως συνέχισαν να αυξάνουν εξαιτίας της ταλάντωσης του εδάφους. Όσον αφορά στα φάσματα απόκρισης, οι πραγματικές φασματικές επιταχύνσεις είναι αισθητά μικρότερες (έως 3 φορές) για περιόδους 0.20 – 0.50 sec, ενώ είναι μεγαλύτερες για περιόδους μεγαλύτερες του 1.0 sec, υποδεικνύοντας ενίσχυση του σεισμικού κύματος σε αυτά τα εύρη περιόδων.

Αντίστοιχη ανάλυση έγινε για την περιοχή του Port Island στο Κόμπε της Ιαπωνίας, χρησιμοποιώντας ως διέγερση βάσης την καταγραφή σε βάθος 16 m. Η σύγκριση των πραγματικών και εκτιμώμενων επιταχύνσεων και φασμάτων απόκρισης από το ρευστοποιημένο στρώμα άμμου φαίνεται στο **Σχήμα 2.2**. Σε αντίθεση με πριν, οι πραγματικές και οι προβλεπόμενες επιταχύνσεις αρχίζουν να διαφοροποιούνται σχεδόν αμέσως μετά τη δόνηση, γεγονός που υποδεικνύει ότι η περιοχή ρευστοποιήθηκε πολύ γρήγορα. Παρατηρείται επίσης ότι για περιόδους μικρότερες από 1 sec υπάρχει μεγάλη μείωση των φασματικών επιταχύνσεων (έως 4 φορές) λόγω ρευστοποίησης, ενώ για μεγαλύτερες περιόδους τα φάσματα είναι πρακτικά τα ίδια.

7



Σχήμα 2.1: Σύγκριση πραγματικών και εκτιμώμενων (α) επιταχύνσεων και (β) φασμάτων απόκρισης στην επιφάνεια του WLA από το σεισμό του Superstition Hills, 1987 (Youd & Carter, 2005).



Σχήμα 2.2: Σύγκριση πραγματικών και εκτιμώμενων (α) επιταχύνσεων και (β) φασμάτων απόκρισης στην επιφάνεια του Port Island από το σεισμό του Κόμπε, 1995 (Youd & Carter, 2005).

Για την ανάλυση του "Treasure Island" και του "Alameda Naval Air Station" χρησιμοποιήθηκε ως διέγερση βάσης στο υποκείμενο βραχώδες υπόβαθρο η καταγραφή στο "Yerba Buena Island", μετά από κατάλληλη επεξεργασία στο πρόγραμμα PROSHAKE (deconvolution). Οι πραγματικές καταγραφές και τα φάσματα απόκρισης για το "Treasure Island" και το "Alameda Naval Air Station" συγκρίνονται με τα εκτιμώμενα στα **Σχήματα 2.3÷2.4** αντίστοιχα. Αντίθετα από τις προηγούμενες περιπτώσεις, οι προβλεπόμενες φασματικές επιταχύνσεις πρακτικά ταυτίζονται με τις πραγματικές καθώς δεν μειώνονται σε μικρές περιόδους. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ρευστοποίηση επέρχεται μετά την άφιξη του πιο έντονου τμήματος της σεισμικής διέγερσης (όπως φαίνεται από την αλλαγή της κυματομορφής στις αντίστοιχες καταγραφές).



Σχήμα 2.3: Σύγκριση πραγματικών και εκτιμώμενων (α) επιταχύνσεων και (β) φασμάτων απόκρισης στην επιφάνεια του Treasure Island από το σεισμό της Loma Prieta, 1989 (Youd & Carter, 2005).



Σχήμα 2.4: Σύγκριση πραγματικών και εκτιμώμενων (α) επιταχύνσεων και (β) φασμάτων απόκρισης στην επιφάνεια του Alameda Naval Air Station στο σεισμό της Loma Prieta (Youd & Carter, 2005).

Στη συνέχεια, για να βρεθεί πότε ξεκίνησε χρονικά η απομείωση της σεισμικής δόνησης, υπολόγισαν και συνέκριναν τα φάσματα απόκρισης σε συγκρεκριμένα χρονικά διαστήματα. Στο **Σχήμα 2.5** συγκρίνονται τα πραγματικά φάσματα απόκρισης του Port Island στο σεισμό του Kobe για τα πρώτα 8.3 sec και 14.5 sec της δόνησης (actual) με τα αντίστοιχα φάσματα από τις αναλύσεις (predicted) αλλά και με το πραγματικό φάσμα για όλη τη διέγερση (full actual). Στην πρώτη περίπτωση το προβλεπόμενο και το πραγματικό φάσμα παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα, γεγονός που υποδηλώνει ότι δεν είχαν αναπτυχθεί σημαντικές υπερπιέσεις πόρων. Αντίθετα, στα πρώτα 14.6 sec της διέγερσης, το πραγματικό φάσμα παρουσιάζει κατά πολύ μικρότερες επιταχύνσεις για T < 1sec. Η ίδια εικόνα παρουσιάζεται και για T=1.7 ÷ 2.1sec και άρα γίνεται φανερό ότι οι ταλαντώσεις με αυτή την περίοδο φιλτραρίστηκαν από το ρευστοποιημένο έδαφος.



Σχήμα 2.5: Σύγκριση πραγματικών και εκτιμώμενων φασμάτων απόκρισης στην επιφάνεια του Port Island από το σεισμό του Κόμπε, 1995 για (α) 0 - 8.3sec, (β) 0 - 14.5sec (Youd & Carter, 2005)

Στο **Σχήμα 2.6** παρουσιάζονται οι αντίστοιχες συγκρίσεις των φασμάτων απόκρισης του WLA στο σεισμό Superstition Hills, για τα πρώτα 13.6 sec, 15 sec και 20 sec της δόνησης. Παρατηρείται ότι στα πρώτα 13.6 sec, όπου δεν έχουν αναπτυχθεί υπερπιέσεις πόρων, τα 2 φάσματα ταυτίζονται πρακτικά μεταξύ τους. Αντίθετα, στα πρώτα 15 sec, όταν έχουν καταγραφεί οι πιο έντονοι παλμοί, υπάρχει σημαντική απομείωση της σεισμικής δόνησης στην πραγματική καταγραφή κυρίως για μικρές ιδιοπεριόδους, παρά το γεγονός ότι ο δείκτης υπερπιέσεων πόρων έφτασε μόλις μέχρι την τιμή r_u = 0.20. Επίσης, παρατηρείται ότι το πραγματικό φάσμα για τα πρώτα 15 sec ταυτίζεται πλήρως για T < 0.8 sec με το πραγματικό φάσμα για όλη τη διέγερση. Το γεγονός αυτό επισημαίνει τη σημαντική επίδραση που έχει το τμήμα της δόνησης πριν επέλθει η ρευστοποίηση στο τελικο φάσμα απόκρισης του ρευστοποιήσιμου εδάφους, ειδικά σε μικρές ιδιοπεριόδωνς. Στα πρώτα 20 sec, όπου οι υπερπιέσεις πόρων κυμαίνονται έως την τιμή r_u = 0.70, τα φάσματα απόκρισης διαφοροποιούνται μεταξύ τους σε μεγαλύτερο εύρος ιδιοπεριόδων (T < 1.5 sec), σε σχέση με τα 15 sec. Παράλληλα, το πραγματικό φάσμα για τ = 20sec ταυτίζεται με το πλήρες πραγματικό για T < 1.3 sec, δηλαδή για μεγαλύτερο εύρος ιδιοπεριόδων από πριν.



Σχήμα 2.6: Σύγκριση πραγματικών και εκτιμώμενων φασμάτων απόκρισης στην επιφάνεια του WLA για τα πρώτα (α) 13.6sec, (β) 15sec και (γ) 20sec της διέγερσης Superstition Hills, 1987 (Youd & Carter, 2005).

Τέλος, εξετάστηκε κατά πόσο τα φάσματα σχεδιασμού που προτείνονται από τους διάφορους Αντισεισμικούς Κανονισμούς θα μπορούσαν να επεκταθούν και στην περίπτωση ρευστοποιημένων εδαφών. Πιο συγκεγκριμένα, τα πραγματικά φάσματα απόκρισης των τεσσάρων ιστορικών περιστατικών συγκρίνονται με τα φάσματα σχεδιασμού των αντίστοιχων Αντισεισμικών Κανονισμών στην κάθε περιοχή (UBC 1999, IBC 2000, AASHTO 1998, NEHRP 2000). Η σύγκριση των φάσματων παρουσιάζεται στα **Σχήματα 2.7 και 2.8**, στα οποία τα φάσματα σχεδιασμού για «μέτρια προς μαλακά» και «μαλακά» εδάφη έχουν την ονομασία "CSPT III" και "CSPT IV" αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι τα φάσματα σχεδιασμού είναι σε όλες τις περιπτώσεις πολύ συντηρητικά για περιόδους μικρότερες από 1 sec καθώς υπάρχει σημαντική μείωση των φασματικών επιταχύνσεων λόγω ρευστοποίησης. Για μεγαλύτερες περιόδους, τα φάσματα σχεδιασμού για την κατηγορία των πιο μαλακών εδαφών περιβάλλουν επαρκώς τα φάσματα απόκρισης των ρευστοποιημένων εδαφών.



Period (sec)



Σχήμα 2.7: Σύγκριση πραγματικών φασμάτων απόκρισης στο (α) WLA και (β) Port Island με τα φάσματα σχεδιασμού (Youd & Carter, 2005).


Σχήμα 2.8: Σύγκριση πραγματικών φασμάτων απόκρισης στο (α) Treasure Island και (β) Alameda Naval Air Station με τα φάσματα σχεδιασμού (Youd & Carter, 2005).

2.2.2 Αναλύσεις Miwa & Ikeda (2006)

Οι Miwa and Ikeda (2006) πρότειναν μια απλοποιημένη μεθοδολογία πρόβλεψης της σεισμικής συμπεριφοράς ενός ρευστοποιημένου εδάφους με ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις. Στις αναλύσεις αυτές, το μέτρο διάτμησης του ρευστοποιημένου εδάφους μειώνεται κατάλληλα για να συμπεριλάβει την επίδραση της ρευστοποίησης. Αρχικά, έψαξαν στη βιβλιογραφία για εκτιμήσεις του μέτρου διάτμησης μετά τη ρευστοποίηση στο Port Island κατά το σεισμό του Κόμπε (Πίνακας 2.1). Οι εκτιμήσεις αυτές προέκυψαν από αναλύσεις των καταγραφών και καταλήγουν σε μια μείωση του μέτρου διάτμησης της τάξεως του 1/20 ÷ 1/100 της αρχικής τιμής. Με βάση τις τιμές αυτές, εκτέλεσαν ακολούθως ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις με το πρόγραμμα SHAKE για την περιοχή "East Kobe Bridge" που επίσης ρευστοποιήθηκε στο σεισμό του Κόμπε και στην οποία υπάρχουν καταγραφές σε βάθος 2 και 34m (Σχήμα 2.9). Η παραμετρική διερεύνηση έδειξε ότι η συμφωνία μεταξύ των πραγματικών και των αριθμητικών αποτελεσμάτων είναι ικανοποιητική όταν ο μειωτικός συντελεστής του μέτρου διάτμησης είναι 1/50 – 1/100 (Σχήμα 2.10α). Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε για την περίπτωση του "Wildlife Liquefaction Array" στο σεισμό Superstition Hills χρησιμοποιώντας μειωτικό συντελεστή

1/100. Σε αυτή την περίπτωση, δεν υπάρχει τόσο καλή σύγκριση των αποτελεσμάτων σε όλο το εύρος των περιόδων καθώς για περιόδους μικρότερες από 1 sec η αριθμητική μεθοδολογία υποεκτιμά τα αποτελέσματα (**Σχήμα 2.10β**). Η σύγκριση είναι ελαφρώς καλύτερη όταν τα αποτελέσματα συγκρίνονται με το φάσμα για το τμήμα της δόνησης μετά τη ρευστοποίηση. Βέβαια και σε αυτή την περίπτωση, για περιόδους μικρότερες από 0.7sec υπάρχει σημαντική απόκλιση.

Πίνακας 2.1: Εκτιμήσεις της μείωσης του	μέτρου διάτμησης στο ρευστοποιημένο στρώμα του Port
	Island (Miwa & Ikeda, 2006)

No.	Ref. No	Author	Reduction ratio of shear modulus	Shear strain	Method
1	2	Kazama & Yanagisawa	0.04 ~ 0.06	1~2	Stress strain relationship of soil is estimated from vertical array records
2	3	Kokusho et al.	0.04 ~ 0.06	1 ~ 2.3	Identified from vertical array records by backward analysis
3	4	Yoshida & Kurita	0.01 ~ 0.02	1~3	Identified from vertical array records by backward analysis
4	5	Kawase et al.	0.06	4	Stress strain velocity is estimated by the propagation time of peak of coefficient of cross-correlation
5	6	Suzuki	0.01	-	Identified from vertical array records by backward analysis
6	7	Morio et al.	0.05	_	Propagation velocity from Phase spectrum and cross-correlation. Stress strain relation
7	8	Miyata et al.	0.01 ~ 0.015	_	Propagiation velocity of peak of observation records
8	9	Mochizuki et al.	0.05	-	Cross-correlation analysis

Depth (G.Lm)	Soil Profile	SPT N-value	Density (f/m^3)	Vs (m/sec)	G (KN/m²)	Nonlinear Caracte- ristics		F 1	L 0	Equivalent Liquefied I Damping G (KN/m ²)	Model Ratio
2-		N=2 8	1 80	113	22980) a)	1 2 3			4596	0. 12
4- 6- <u>-6.75</u>			1.00	110	22000	α/	4 5 6 7			1/20. 1/50	0. 20
8- 10-	Fill	N≖5.0	2.00	137	37540	a)	8 9 10 11				0. 20
12							12			1/100. 1/200	
14-	Fill	N=10.8	2.00	177	62660	a)	14 15 16				0. 20
10							17	'			
20-	Clay	N=3. 3	1.64	150	36900	b)	20			8477	0. 16
22-							22 23 24				
24 -25.25	Sand	<u>N</u> =29. 8	1.85	248	113800) ()	25			42600	0. 11
26-							26 27 28				
28-	Sand	N=4,2.9	2.00	280	156800) c)	29			72680	0. 10
30							31 32				
32 -33.00	Sand	N-42 0	2 00	280	156000	-	33				
34	Sand	N-42. 9	2.00	200	100800	,		1.	0		
Fill:Decom	Eill:Decomposed Gramite Soil, Vs:Sbear Waye Velocity, G:Sbear Modulus										

Σχήμα 2.9: Εδαφικό προφίλ του "East Kobe Bridge" (Miwa & Ikeda, 2006)



Σχήμα 2.10: Σύγκριση φασμάτων ψεύδο – ταχύτητας στην επιφάνεια του "East Kobe Bridge" (Miwa & Ikeda, 2006).



Σχήμα 2.11: Σύγκριση φασμάτων ψεύδο – ταχύτητας στην επιφάνεια του "Wildlife Liquefaction Array" (Miwa & Ikeda, 2006).

Στη συνέχεια, εκτίμησαν τον μειωτικό συντελεστή του μέτρου διάτμησης για διάφορες περιοχές που έχουν ρευστοποιηθεί, είτε μέσω προσέγγισης (fitting) των πραγματικών καταγραφών ή μέσω της προτεινομένης μεθοδολογίας (Πίνακας 2.2) και τον συσχέτισαν με τον συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης (Σχήμα 2.12α). Παρατηρείται ότι το μέτρο διάτμησης μειώνεται όσο μικραίνει ο συντελεστής ασφαλείας. Οι πυκνές άμμοι εμφανίζουν ένα μέσο μειωτικό συντελεστή 1/50 και οι αναπτυσσόμενες διατμητικές παραμορφώσεις φτάνουν το 1 ÷1.5 %, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για χαλαρές άμμους είναι 1/100 και 2 ÷ 6 %. Με βάση τα συμπεράσματα αυτά, οι συγγραφείς προτείνουν να επιλέγεται ο κατάλληλος μειωτικός συντελεστής του μέτρου διάτμησης, που θα χρησιμοποιηθεί στις ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις της μεθοδολογίας τους, συναρτήσει του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης μέσω του Σχήματος 2.11β.

Πίνακας 2.2: Εκτιμήσεις της μείωσης του μέτρου διάτμησης σε περιοχές που έχουν ρευστοποιηθεί (Miwa & Ikeda, 2006).

FL Evaluation Method	Described record, effective stress analy sis and equivalent linear analy sis considering liquefaction	Damage investigation, bserved record, effective stress analysis and equivalent linear analysis considering liquefaction	Observed record, effective stress analysis and equivalent linear analysis considering liquefaction (shear strain is estimated only for liquefied lay er, so shear strain is different from the value on P2)).6-0.9 Effective stress analysis and equivalent linear analysis considering liquefaction).8-0.9 Effective stress analysis and equivalent linear analysis considering liquefaction).4.0.6 Observed record, effective stress analysis and equivalent linear analysis considering liquefaction).5-0.6 Observed record, effective stress analysis and equivalent linear analysis considering liquefaction).8-0.9 Observed record, effective stress analy sis and equivalent linear analy sis considering liquefaction).9-1.0 Observed record, effective stress analy sis and equivalent linear analy sis considering liquefaction).6-0.8 Observed record and equivalent linear analysis considering liquefaction	ed bv analvsis
Reduction of shear modulus	1/50-1/100	1/100	1/50-1/100	1/40-1/50	1/40	1/100	1/100	1/40	1/30-1/40	1/50	rain is estimat
Shear strain (%)	3-6	4-6	2-5	5	3-5	2-3	2-5	1-1.5	1	1	*Shear st
Equivalent SPT N- Value (Na)	11	14	14	18	18	11	15	22	23	11	
Observed maximum velocity (cm/s)	68	(102)	91	(121)	(74)	31	57	57	61	19	(): analysis
Soil	Decomposed granite soil	Decomposed granite soil	Decomposed granite soil	Decomposed granite soil (improved)	Mud rock	Loose silty sand	Medium sand	Dense medium sand	Dense sand	Loose sand	
Earthquake	1995 Hy ogoken-Nambu earthquake	1995 Hy ogoken-Nambu earthquake	1995 Hy ogoken-Nambu earthquake	1995 Hy ogoken-Nambu earthquake	1995 Hy ogoken-Nambu earthquake	1987 Superstitions Hill earthquake	2000 Tottoriken-Seibu earthquake	2000 Tottoriken-Seibu earthquake	1993 Koshiro-Oki earthquake	1994 Hokkaido Toho-oki earthquake	
Site	East Kobe Bridge	Fukaehama	Port Island	Nishinomiya ham	Rokko Island	Wildlife	Sakaiminato 1	Sakaiminato 2	Kushiro Port	Kusiro west port	



Σχήμα 2.12: Συσχέτιση του μειωτικού συντελεστή του μέτρου διάτμησης και του συντελεστή ασφάλειας έναντι ρευστοποίησης (α) με βάση της καταγραφές και (β) προτεινόμενο διάγραμμα (Miwa & Ikeda, 2006).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συγγραφείς δεν προτείνουν τιμές για το λόγο απόσβεσης που είναι εξ' ίσου απαραίτητος για την πραγματοποίηση των ισοδύναμων γραμμικών αναλύσεων και επηρεάζει σημαντικά την απόκριση ενός εδαφικού σχηματισμού. Επίσης, η προτεινόμενη μεθοδολογία δείχνει να δουλεύει αρκετά καλά στο "East Kobe Bridge", ενώ για το "Wildlife Liquefaction Array" η σύγκριση δεν ήταν τόσο καλή. Το γεγονός αυτό, οφείλεται πιθανώς στην επίδραση της δόνησης πριν τη ρευστοποίηση, η οποία στο WLA βρέθηκε να είναι σημαντική (Youd & Carter, 2005). Επομένως, χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση της αξιοπιστίας της μεθόδου που προτείνουν μέσω σύγκρισης με άλλες πραγματικές καταγραφές, πειραματικά αποτελέσματα ή και αριθμητικές αναλύσεις.

2.2.3 Αναλύσεις Kramer et al. (2011)

Οι Kramer et al. (2011) εξέτασαν παραμετρικά την επίδραση που έχει η ρευστοποίηση στην σεισμική απόκριση του εδάφους μέσω μη – γραμμικών αναλύσεων και συνέκριναν την απόκριση του εδάφους με και χωρίς ρευστοποίηση. Αρχικά, προσομοίωσαν την καταγραφή του Superstition Hills στο WLA με τα προγράμματα "D-MOD2000" και "WAVE" που εκτελούν μη - γραμμικές αναλύσεις ενεργών τάσεων. Η κύρια διαφορά των προγραμμάτων αυτών είναι ότι το πρώτο δεν λαμβάνει υπόψη την διαστολική συμπεριφορά της άμμου (phase transformation). Οι επιταχύνσεις και τα φάσματα απόκρισης συγκρίνονται στα **Σχήματα 2.12 ÷ 2.13**. Παρατηρείται ότι καλή σύγκριση με την πραγματική καταγραφή υπάρχει μόνο για τα αποτελέσματα του προγράμματος "WAVE" και αυτή για περιόδους μεγαλύτερες από 0.7sec.



Σχήμα 2.13: Σύγκριση επιταχύνσεων στην επιφάνεια του WLA: (α) καραγραφή, (β) πρόβλεψη D-MOD2000 και (γ) πρόβλεψη WAVE (Kramer et al. 2011)



Σχήμα 2.14: Σύγκριση φασμάτων απόκρισης στην επιφάνεια του WLA (Kramer et al., 2011)

Στη συνέχεια, εκτέλεσαν έναν μεγάλο αριθμό ανεξάρτητων παραμετρικών αναλύσεων χρησιμοποιώντας ένα μη – γραμμικό πρόγραμμα σεισμικής απόκρισης και επανέλαβαν τις αναλύσεις τόσο θεωρώντας ότι αναπτύσσονται υπερπιέσεις πόρων (ανάλυση ενεργών τάσεων), όσο και χωρίς (ανάλυση ολικών τάσεων). Το εδαφικό προφίλ που χρησιμοποίησαν έχει πάχος 20 m και αποτελείται από 4, 9 ή 14 m χαλαρής άμμου που εδράζεται σε πυκνό χαλίκι. Ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στα 2 m και επομένως το πάχος των ρευστοποιήσιμων στρώσεων είναι 2, 7 και 12 m, ενώ η διορθωμένη τιμή της δοκιμής SPT για τη χαλαρή άμμο ήταν 8, 16 και 24. Στα 9 διαφορετικά εδαφικά προφίλ επιβλήθηκαν οι ίδιες 139 σεισμικές διεγέρσεις.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε με βάση το λόγο των φασμάτων απόκρισης των αναλύσεων ενεργών τάσεων προς ολικών, σύμφωνα με τη σχέση:

$$RSR(T) = S_a^{eff}(T) / S_a^{tot}(T)$$
(2.1)

Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση της δόνησης στη ρευστοποίηση, χρησιμοποιήθηκε η παράμετρος L που ισούται με το αντίστροφο του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης *FS*_L ο οποίος υπολογίστηκε με βάση τη μεθοδολογία Youd et al. (2001) και χρησιμοποιώντας την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση στην επιφάνεια των αναλύσεων ολικών τάσεων:

$$L = \frac{CSR}{CRR} = \frac{1}{FS_{L}}$$
(2.2)

Στο **Σχήμα 2.15** παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου φασματικής απόκρισης RSR με την περίοδο για 3 διαφορετικά εύρη τιμών του L (0.4 < L < 0.6, 1.0 < L < 1.2, 1.8 < L < 2.0). Σε όλες τις περιπτώσεις, όπου L > 1 (δηλαδή: FS_L < 1) υπάρχει απομείωση της σεισμικής κίνησης λόγω ρευστοποίησης (δηλαδή RSR < 1) για μικρές περιόδους, ενώ ενίσχυση για μεγαλύτερες περιόδους. Όσο μειώνεται ο FS_L , η απομείωση στις μικρές περιόδους είναι μεγαλύτερη, ενώ η ενίσχυση στις μεγάλες περιόδους δείχνει να παραμένει σταθερή. Βέβαια, θα πρέπει να τονιστεί ότι υπάρχει μεγάλη διασπορά στα αποτελέσματα του **Σχήματος 2.14**. Ως εκ τούτου, όπως αναφέρουν και οι ίδιοι οι συγγραφείς, τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για την εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων και όχι για μια πιο λεπτομερή ανάλυση της επίδρασης της ρευστοποίησης στην σεισμική απόκριση.



Σχήμα 2.15: Μεταβολή του λόγου φασματικής απόκρισης (RSR) με την περίοδο για (α) 0.4 < L < 0.6, (β) 1.0 < L < 1.2 και (γ) 1.8 < L < 2.0 (Kramer et al., 2011)

2.3 Η μέθοδος της «γραμμικής παρεμβολής» των Bouckovalas & Tsiapas (2015)

Βασική αρχή της νέας αυτής μεθοδολογίας είναι ότι το φάσμα απόκρισης ρευστοποιημένου εδάφους, (Sa_{REAL}) μπορεί να εκτιμηθεί με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των φασμάτων απόκρισης για μη ρευστοποιημένο, (Sa_{NL}) και για πλήρως (εξαρχής) ρευστοποιημένο έδαφος, (Sa_L) τα οποία υπολογίζονται μέσω ισοδύναμων γραμμικών αναλύσεων. Στη δεύτερη περίπτωση, υιοθετείται ουσιαστικά η μεθοδολογία των Miwa & Ikeda (2006), καθόσον το ελαστικό μέτρο διάτμησης G_{max} μειώνεται σε μια συγκεκριμένη σταθερή τιμή $(G_{liq} = \rho V_{S,liq}^2)$, ενώ η τιμή του ξ είναι συνάρτηση της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης γ, όπως αυτή προκύπτει από τις τυπικές καμπύλες ξ - γ για άμμους.

Για την γραμμική παρεμβολή μεταξύ των ανωτέρω φασμάτων απόκρισης, ορίζεται ο ακόλουθος συντελεστής παρεμβολής, α, ως συνάρτηση της περιόδου, Τ:

$$\alpha(T) = \frac{Sa_{NL}(T) - Sa_{REAL}(T)}{Sa_{NL}(T) - Sa_{L}(T)}$$
(2.3)

$$Sa_{REAL}(T) = Sa_{NL}(T) + \alpha(T) \cdot \left[Sa_{NL}(T) - Sa_{L}(T)\right]$$
(2.4)

Εν απουσία ρευστοποίησης (FS_L > 1), είναι προφανές ότι το πραγματικό φάσμα απόκρισης, Sa_{REAL}, ταυτίζεται με το φάσμα για «μη ρευστοποιημένο» έδαφος, Sa_{NL}, και επομένως θα πρέπει α = 0. Αντίθετα, σε περίπτωση έντονης ρευστοποίησης, όπου ο FS_L τείνει στο μηδέν, το έδαφος ρευστοποιείται αμέσως και το πραγματικό φάσμα απόκρισης ταυτίζεται με το φάσμα για «πλήρως ρευστοποιημένο» έδαφος, με αποτέλεσμα α = 1. Ως εκ τούτου, οι τιμές του συντελεστή παρεμβολής περιορίζονται στο εύρος α = 0 – 1.

Για τη χρήση της νέας μεθοδολογίας, απαιτείται να καθοριστούν δύο παράμετροι: η τιμή του λόγου V_{S,liq}/V_S που θα χρησιμοποιηθεί στις ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις για «πλήρως ρευστοποιημένο» έδαφος και η φασματική μεταβολή του συντελεστή «α». Ξεκινώντας από το λόγο V_{S,liq}/V_S, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικά ανάστροφες αναλύσεις για διάφορες τιμές του λόγου (V_{S,liq}/V_S = 0.065 – 0.2) και επιλέχθηκε σε κάθε περίπτωση η τιμή του λόγου η οποία έδωσε την καλύτερη ταύτιση με το πραγματικό φάσμα σε μεγάλες περιόδους. Στο **Σχήμα 2.16α** παρουσιάζονται οι τιμές που προέκυψαν από τις ανάστροφες αναλύσεις αναλύσεις συναρτήσει του συντελεστή ασφαλείας FS_L, και συγκρίνονται με τις προτεινόμενες από τους Miwa & Ikeda (2006) για FS_L ≤ 1 (**Σχήμα 2.12α** και **Σχήμα 2.12β**). Η συμφωνία μεταξύ των δύο ομάδων δεδομένων είναι ικανοποιητική και συνηγορεί υπέρ της υιοθέτησης των ορίων των Miwa & Ikeda (2006) - τα οποία συνοψίζονται στον **Πίνακα 2.3** - για περαιτέρω εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

FS∟	0.3 - 0.6	0.6 - 0.9	0.9 - 1.0		
V _{s,liq} /V _s	0.10 - 0.14	0.12 - 0.16	0.14 - 0.19		

Πίνακας 2.3: Προτεινόμενες τιμές του λόγου V_{s,liq}/V_s κατά Miwa & Ikeda (2006).

Η βαθμονόμηση του συντελεστή παρεμβολής βασίστηκε: (α) σε 3 ιστορικά περιστατικά, σε περιοχές για τις οποίες υπάρχουν καταγραφές των επιταχύνσεων στην επιφάνεια και στη βάση του ρευστοποιήσιμου στρώματος, και (β) σε αποτελέσματα παραμετρικών, πλήρως συζευγμένων, μη-γραμμικών, αριθμητικών προσομοιώσεων, που πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό Πεπερασμένων Διαφορών FLAC. Για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν έγινε ανάστροφος υπολογισμός των συντελεστών α με χρήση ισοδύναμων γραμμικών αναλύσεων για «μη-ρευστοποιημένο» και για «πλήρως ρευστοποιημένο» έδαφος.

Τελικά, παρατηρήθηκε ότι οι τιμές του συντελεστή α για τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (α_{PGA}) σχετίζονται μονοσήμαντα με τον συντελεστή FS_L (**Σχήμα 2.16β**) και μπορούν να εκφρασθούν αναλυτικά ως:

$$\alpha_{PGA} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{FS_L}{\beta} \right)^{1.20} \right] \right\}$$
(2.5)

όπου β = 0.67 ÷ 0.82, με μέση τιμή της παραμέτρου β = 0.75.

Όσον αφορά τη μορφή των καμπυλών του συντελεστή «α» (**Σχήμα 2.17**) οι οποίες ξεκινούν από την τιμή α_{PGA} και καταλήγουν στην τιμή α = 1 για T ≈ 1sec, προτείνεται (μετά από στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων) η ακόλουθη σχέση για τη φασματική διακύμανση του συντελεστή α:

$$\alpha(T) = \left(\frac{1+\alpha_{PGA}}{2}\right) + \left(\frac{1-\alpha_{PGA}}{2}\right) \tanh\left[10(T-0.8)\right]$$
(2.6)



Σχήμα 2.16: Διαγράμματα υπολογισμού του λόγου V_{s,liq}/V_s και του συντελεστή παρεμβολής α_{PGA} συναρτήσει του FS_L.



Σχήμα 2.17: Αριθμητική και απλοποιημένη φασματική κατανομή του συντελεστή "α".

Στο **Σχήμα 2.18** φαίνεται η σύγκριση των πραγματικών φασμάτων με τα φάσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας της «γραμμικής παρεμβολής» και διαπιστώνεται ότι η σύγκλιση είναι ικανοποιητική ενώ υπάρχει σημαντική βελτίωση συγκριτικά με τη μεθοδολογία των Miwa & Ikeda (2006).



Σχήμα 2.18: Σύγκριση φασμάτων απόκρισης της μεθοδολογιας «της γραμμικής παρεμβολής» (α) στην επιφάνεια του WLA κατά τη διάρκεια του σεισμού Superstition Hills, (β) τη διέγερση του Port Island, (γ) την ανάλυση Α5 και (δ) την ανάλυση B1.

2.4 Η μέθοδος της «επαλληλίας» των Bouckovalas & Tsiapas (2015)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη θεώρηση ότι η σεισμική απόκριση του εδάφους επηρεάζεται από τη ρευστοποίηση μόνον αφότου ο δείκτης υπερπίεσης πόρων σε ένα εδαφικό στρώμα επαρκούς πάχους υπερβεί ένα δεδομένο όριο, της τάξης περίπου του r_u = 0.40 ÷ 0.60. Αυτό εξηγείται καθώς η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων είναι ανάλογη της τέταρτης ρίζας του (1 - r_u) και ως εκ τούτου η αλλαγή της ιδιοπεριόδου του εδάφους για μικρότερες τιμές του λόγου r_u δεν είναι σημαντική (της τάξης του 14 – 25%).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι Youd & Carter (2005) επιβεβαιώνουν τα ανωτέρω συγκρίνοντας τα φάσματα απόκρισης που προέκυψαν στην επιφάνεια του εδάφους για ολόκληρη την καταγραφή του WLA (Superstition Hills) και για τα πρώτα 15sec (**Σχήμα 2.6β** και **Σχήμα 2.19c**). Σημειώνεται εδώ ότι η επιφανειακή εκδήλωση της ρευστοποίησης γίνεται εμφανής μετά τα πρώτα 18.5sec της δόνησης (**Σχήμα 2.19a**), ενώ στα πρώτα 15 sec η καταγεγραμμένη τιμή του λόγου υπερπίεσης πόρων δεν ξεπερνάει την τιμή r_u ≈ 0.20 (**Σχήμα 2.19b**). Από τη σύγκριση αυτή παρατηρείται ότι το φάσμα για *T* < 0.8sec εξαρτάται κυρίως από το πρώτο τμήμα της διέγερσης, αφού τα δύο φάσματα συμπίπτουν απόλυτα σε αυτό το εύρος ιδιοπεριόδων.



Σχήμα 2.19: Εκδήλωση της ρευστοποίησης και επιφανειακά φάσματα απόκρισης για όλόκληρη τη σεισμική διέγερση του WLA κατά το σεισμό του Superstition Hills καθώς και για τα πρώτα 15sec.

Λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη ότι τα φάσματα απόκρισης στο εύρος των μεγάλων ιδιοπεριόδων (*T* > 0.8 – 1.0sec) αντικατοπτρίζουν κυρίως την απόκριση του ρευστοποιημένου εδάφους, προτείνονται τα ακόλουθα βήματα για την εκτίμηση του ελαστικού φάσματος απόκρισης:

- (α) Η επιβαλλόμενη διέγερση χωρίζεται σε δύο τμήματα, το πρώτο για χρόνους $t \leq t_{L,gr}$ και το δεύτερο για $t > t_{L,gr}$, όπου $t_{L,gr}$ ο χρόνος επιφανειακής εκδήλωσης της ρευστοποίησης.
- (β) Πραγματοποιούνται ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις για κάθε ένα τμήμα της διέγερσης χωριστά, χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες του μη ρευστοποιημένου υλικού για το πρώτο τμήμα της δόνησης και του πλήρως ρευστοποιημένου για το δεύτερο (σύμφωνα με τη μεθοδολογία Miwa & Ikeda, 2006).
- (γ) Προσδιορίζεται το ελαστικό φάσμα απόκρισης ως η περιβάλλουσα των φασμάτων που προκύπτουν από τα δύο τμήματα της διέγερσης.

Από τα ανωτέρω γίνεται προφανές ότι καθοριστική παράμετρος ώστε να εφαρμοστεί η μεθοδολογία είναι η ορθή πρόβλεψη του χρόνου επιφανειακής εκδήλωσης της ρευστοποίησης *t_{L,gr}*. Το θέμα αυτό αποτελεί ένα από τα κύρια αντικείμενα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, όταν βέβαια δεν είναι δεδομένη η καταγραφή της σεισμικής δόνησης στην επιφάνεια του εδάφους ή η ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων.

26

2.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε τμήμα της έρευνας που έχει πραγματοποιηθεί πάνω στη σεισμική απόκριση ρευστοποιημένου εδάφους καθώς και οι δύο προτεινόμενες μεθοδολογίες από τους Bouckovalas & Tsiapas (2015) οι οποίες στηρίζονται θεωρητικά σε αυτή και την επεκτείνουν. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα ακόλουθα:

(α) Η ρευστοποίηση προκαλεί χαλάρωση του εδαφικού σκελετού και μεταβολή της μορφής του φάσματος στην επιφάνεια, καθώς το ρευστοποιημένο έδαφος δρα εν γένει ως φίλτρο των υψίσυχνων ταλαντώσεων, ενώ παράλληλα ενισχύει τις μακροπερίοδες ταλαντώσεις. Αυτό, εν γένει, έχει ως συνέπεια την απομείωση των επιταχύνσεων για μικρές περιόδους (T < 0.6 - 0.8sec) και την αύξηση τους σε μεγαλύτερες περιόδους.</p>

(β) Ο βαθμός της απομείωσης / ενίσχυσης καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την χρονική στιγμή έναρξης της ρευστοποίησης. Όταν η ρευστοποίηση του εδάφους συμβαίνει γρήγορα (όπως για παράδειγμα στο σεισμό του Κόμπε) παρατηρείται το αρχικώς αναμενόμενο - απομείωση των επιταχύνσεων στις μικρές περιόδους του φάσματος και ενίσχυση στις μεγαλύτερες. Αντίθετα, όταν το φαινόμενο της ρευστοποίησης αργεί να εκδηλωθεί (π.χ. στον σεισμό Superstition Hills στο WLA) μεγαλύτερο ποσοστό των έντονων υψίσυχνων παλμών «προλαβαίνει» να φτάσει στην επιφάνεια με αποτέλεσμα να ενισχυθεί η φασματική επιτάχυνση για το μεγαλύτερο μέρος των περιόδων και να μην «απολαμβάνουμε» τα ευεργετικά αποτελέσματα του φαινομένου για τις συνήθεις – υψίσυχνες κατασκευές.

(γ) Οι Youd & Carter (2005) πραγματοποίησαν ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις PROSHAKE για 5 ιστορικά περιστατικά χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα εδαφικά χαρακτηριστικά σε συνθήκες πλήρους απουσίας ρευστοποίησης και συνέκριναν με τα αντίστοιχα πραγματικά φάσματα που προέκυψαν για τις συγκεκριμένες διεγέρσεις. Διαπίστωσαν ότι τα αποτελέσματα της ρευστοποίησης δεν είναι μονοσήμαντα για όλο το εύρος περιόδων καθώς και ότι η χρονική στιγμή κατά την οποία εκδηλώνεται το φαινόμενο καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις φασματικές τιμές σε μικρές περιόδους.

(δ) Οι Miwa & Ikeda (2006) προτείνουν τη διενέργεια αντίστοιχων αναλύσεων, αλλά θεωρούν ότι το έδαφος ήταν εξ΄ αρχής πλήρως ρευστοποιημένο. Είναι εύκολα κατανοητό ότι τα φάσματα απόκρισης που προκύπτουν από τις αναλύσεις των Miwa & Ikeda (2006) οδηγούν σε υποεκτίμηση των φασματικών τιμών σε μικρές περιόδους καθώς η ρευστοποίηση δεν συμβαίνει ακαριαία μετά την έναρξη της δόνησης.

27

(ε) Οι Bouckovalas & Tsiapas (2015)προτείνουν δύο νέες απλοποιημένες μεθοδολογίες για την πρόβλεψη των ελαστικών φασμάτων απόκρισης οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τους το χρόνο επιφανειακής εκδήλωσης του φαινομένου είτε άμεσα είτε έμμεσα μέσω του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης. Κατά την εφαρμογή της πρώτης μεθοδολογίας, η οποία έχει βαθμονομηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό, πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στα φάσματα του μη – ρευστοποιημένου και του πλήρως ρευστοποιημένου εδάφους. Η δεύτερη μεθοδολογία βασίζεται στο διαχωρισμό της αρχικής διέγερσης σε δύο τμήματα, πριν και μετά την επιφανειακή εκδήλωση της ρευστοποίησης, και έχει βαθμονομηθεί μερικώς για δεδομένο t_{L.gr}. Η πρόβλεψη του t_{L.gr}, για πρακτική εφαρμογή της μεθόδου, δεν έχει ακόμη ορισθεί και αποτελεί αντικείμενο τη παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας.

κεφάλαιο 3

Περιγραφή παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων

3.1 Γενικά

Στο Κεφάλαιο αυτό, περιγράφονται συνοπτικά οι αριθμητικές αναλύσεις, τα αποτελέσματα των οποίων θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία για την αξιολόγηση και την τελική βαθμονόμηση της μεθοδολογίας πρόβλεψης ελαστικών φασμάτων απόκρισης ρευστοποιήσιμου εδάφους μέσω «επαλληλίας». Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής έρευνας του Ιωάννη Τσιάπα με τον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC version 7 (Itasca 2011), ενώ η απόκριση της ρευστοποιήσιμης άμμου προσομοιώνεται με το καταστατικό προσομοίωμα κρίσιμης κατάστασης NTUA-Sand, τα οποία και περιγράφονται συνοπτικά στις επόμενες παραγράφους αυτού του Κεφαλαίου. Οι παραμετρικές αναλύσεις αφορούν στην σεισμική απόκριση μιας εδαφικής τομής που περιλαμβάνει μια στρώση ρευστοποιήσιμης άμμου, διαφόρων σχετικών πυκνοτήτων και πάχους, όταν επιβάλλονται σε αυτή πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις.

3.2 Καταστατικό προσομοίωμα NTUA-Sand

Η απόκριση της ρευστοποιήσιμης άμμου προσομοιώνεται με το εξελιγμένο καταστατικό προσομοίωμα NTUA-Sand, το οποίο αναπτύχθηκε και ενσωματώθηκε στον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Papadimitriou & Bouckovalas 2002; Andrianopoulos et al. 2010; Karamitros 2010). Πρόκειται για ένα καταστατικό προσομοίωμα βασισμένο στη θεωρία της Κρίσιμης Κατάστασης και της Πλαστικότητας που αναπτύχθηκε με σκοπό να προσομοιώσει ικανοποιητικά την απόκριση μη-συνεκτικών εδαφών υπό ανακυκλική διάτμηση σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες παραμορφώσεις καθώς και σε συνθήκες ρευστοποίησης. Επισημαίνεται ότι προσομοιώνει αποτελεσματικά χαρακτηριστικά:

- Περιλαμβάνει τρεις επιφάνειες στο χώρο των τάσεων: την επιφάνεια Διαστολικότητας, Κρίσιμης Κατάστασης και την Οριακή, που αντιστοιχούν στην Γραμμή Αλλαγής Φάσης, Κρίσιμης Κατάστασης και Οριακής Αντοχής, φάσεις από τις οποίες διέρχεται το υλικό κατά τη διάρκεια της διατμητικής του φόρτισης. Στο Σχήμα 3.1 φαίνονται οι μορφές των επιφανειών του προσομοιώματος για τριαξονική εντατική κατάσταση καθώς και οι προβολές των επιφανειών στο επίπεδο π (αποκλίνον επίπεδο) σε συνδυασμό με το νόμο προβολής του προσομοιώματος.
- Οι κλίσεις της επιφάνειας Διαστολικότητας και της Οριακής επιφάνειας, M_c^d και M_c^b αντίστοιχα, ορίζονται μέσω της παραμέτρου κατάστασης ψ = e e_{cs} (όπου e o δείκτης πόρων και e_{cs} o δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση για την ίδια ενεργό τάση p') μέσω της οποίας λαμβάνεται υπόψη τόσο η επίδραση της σχετικής πυκνότητας όσο και της αρχικής ενεργού τάσης με ένα μοναδικό σετ παραμέτρων. Η κλίση M_c^c εισάγεται ως παράμετρος του προσομοιώματος.
- Η θεώρηση σημειακής επιφάνειας διαρροής και η επακόλουθη απουσία ελαστικής περιοχής, τροποποίηση που εισήχθη από τους Andrianopoulos et al. (2010).
 Αποτέλεσμα αυτού είναι η ελαστοπλαστική απόκριση του υλικού σε κάθε υπολογιστικό βήμα και η ομαλή μετάβαση σε μεγάλες παραμορφώσεις αποκομίζοντας οφέλη αριθμητικής ευστάθειας και εξοικονόμησης υπολογιστικού χρόνου.
- Η χρήση καταστατικού προσομοιώματος τύπου Ramberg–Osgood για την «ελαστική» απόκριση άμμων σε μικρές παραμορφώσεις, λαμβάνοντας υπόψη την μείωση του μέτρου διάτμησης και την επακόλουθη υστερητική απόσβεση.
- Η χρήση ενός εμπειρικού δείκτη που εκφράζει μακροσκοπικά την επίδραση της αλλαγής της δομής στο μέτρο πλαστικών παραμορφώσεων προβλέποντας με ακρίβεια την ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων και την εκδήλωση της ρευστοποίησης.

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

Η βαθμονόμηση του προσομοιώματος έχει πραγματοποιηθεί από τους Andrianopoulos et al. (2010), για άμμο τύπου Nevada. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα του ερευνητικού προγράμματος VELACS (Arulmoli et al. 1992), και συγκεκριμένα: δοκιμές συντονισμού στήλης εδάφους με $p_0' = 40 - 320$ kPa και ανακυκλικές δοκιμές ρευστοποίησης (απλής διάτμησης και τριαξονικές) με $p_0' = 40 - 160$ kPa και σχετικές πυκνότητες $D_r = 40$ και 60%. Η ακρίβεια της εν λόγω βαθμονόμησης έχει επαληθευτεί μέσω της επιτυχούς σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων και αριθμητικών αναλύσεων τόσο σε επίπεδο εδαφικού στοιχείου, όσο και σε μεγάλης κλίμακας πειράματα φυγοκεντριστή που έχουν πραγματοποιηθεί με άμμο Nevada.



Σχήμα 3.1: Επιφάνειες του προσομοιώματος στο χώρο p – q και η προβολή τους στο επίπεδο π.

Στα διαγράμματα CSR – N/N_L του **Σχήματος 3.2** συγκρίνονται πειραματικά αποτελέσματα από ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης των Arulmoli et al. (1992) για σ'_{v0} = 160kPa και $D_r = 40$ και 60% με τις αντίστοιχες αριθμητικές προβλέψεις. Είναι φανερό ότι επαληθεύεται η ακρίβεια του καταστατικού προσομοιώματος.



Σχήμα 3.2: Σύγκριση καμπυλών ρευστοποίησης αριθμητικής προσομοίωσης (Numerical) για τη βαθμονόμηση «VELACS» του καταστατικού προσομοιώματος NTUA-Sand με τα ακριβή πειραματικά δεδομένα (Data) των Arulmoli et al. (1992) για σ΄_{v0} = 160 kPa και D_r = 40 και 60%.

Περιγραφή	Εξίσωση	Σταθερές
Κλίση της Οριακής Επιφάνειας για	$M_{c}^{b} = M_{c}^{c} + k_{c}^{b} \left\langle -\psi \right\rangle $ (3.1)	M_c^c, k_c^b
κλίση της Επιφάνειας	$\mathbf{M}_{c}^{d} = \mathbf{M}_{c}^{c} + \mathbf{k}_{c}^{d} \boldsymbol{\Psi} $ (3.2)	k ^d _c
Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης	$\psi = e - e_{cs} = e - \Gamma_{cs} + \lambda \ln(p) $ (3.3)	Γ _{cs} ,λ
Γενίκευση των επιφανειών στον χώρο των τάσεων	$\mathbf{M}_{\theta}^{c,b,d} = g(\theta, c^{c}) \mathbf{M}_{c}^{c,b,d} $ (3.4)	$c = M_e^c / M_c^c$
Σχήμα των επιφανειών του προσομοιώματος στο επίπεδο π	$g(\theta,c) = \frac{4c}{(1+c)-(1-c)\cos(3\theta)} - \left[\frac{(1+c)-(1-c)\cos(3\theta)}{2}\right] $ (3.5)	
Γωνία Lode ϑ	$\cos(3\theta) = (3/2)\sqrt{3} \left(r_{ij}r_{ij}r_{ij}\right) / \left(0.5r_{ij}r_{ij}\right)^{3/2} $ (3.6)	
Μοναδιαίο διάνυσμα για τη διεύθυνσης φόρτισης	$n_{ij} = r_{ij}^{IP} / \sqrt{r_{kl}^{IP} r_{kl}^{IP}}$ (3.7)	
Συζυγές σημείο στις επιφάνειες του προσομοιώματος	$r_{ij}^{\text{IP,c,b,d}} = \sqrt{2/3} M_{\theta}^{\text{c,b,d}} n_{ij}$ (3.8)	
Απόσταση συζυγούς σημείου από την τρέχουσα κατάσταση	$d^{c,b,d} = \left(r_{ij}^{IP,c,b,d} - r_{ij}\right)n_{ij} $ (3.9)	
Απόσταση αναφοράς	$d_{\rm ref}^{\rm b,d} = \sqrt{2/3} \left(M_{\theta}^{\rm b,d} + M_{\theta+\pi}^{\rm b,d} \right) \tag{3.10}$	
Αρχικό μέτρο διάτμησης	$G_{max} = Bp_a \sqrt{p/p_a} / (0.3 + 0.7e)$ (3.11)	В
	$G_{t} = G_{max}/T $ (3.12)	
Εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης	$T = 1 + \left(\frac{1}{a_{1}} - 1\right) \left(\frac{\sqrt{0.5(r_{ij} - r_{ij}^{ref})(r_{ij} - r_{ij}^{ref})}}{a_{1}(G_{max}^{LR}/p^{LR})\gamma_{1}}\right) $ (3.13)	a_1, γ_1
Εφαπτομενικό μέτρο ισότροπης συμπίεσης	$K_{t} = (2/3)G_{t}(1+v)/(1-2v) $ (3.14)	v
Επαύξηση "ελαστικών" παραμορφώσεων	$\dot{\hat{\epsilon}}_{ij}^{e} = \dot{e}_{ij}^{e} + (\dot{\hat{\epsilon}}_{vol}^{e}/3)\delta_{ij} = (\dot{s}_{ij}/2G_{t}) + (\dot{p}/K_{t})\delta_{ij}$ (3.15)	
Επαύξηση πλαστικών	$\dot{\varepsilon}_{i}^{p} = \dot{e}_{i}^{p} + \left(\dot{\varepsilon}_{vol}^{p}/3\right)\delta_{ij} = \langle\Lambda\rangle R_{ij} $ (3.16)	
Λιούθυματη φάρτιστο	$\frac{1}{L_{ii} = n_{ii} - (V/3)\delta_{ii} = n_{ii} - (n_{kl}r_{kl}/3)\delta_{ii}}$	
	(3.17)	
Διεύθυνση επαυξητικής πλαστικής παραμόρφωσης	$R_{ij} = n_{ij} + (D/3)\delta_{ij} $ (3.18)	
Επαύξηση της ενεργού τάσης	$\dot{\sigma}_{ij} = 2G_t \dot{e}_{ij} + K_t \dot{\epsilon}_{vol} \delta_{ij} - \left\langle \Lambda \right\rangle \left(2G_t n_{ij} + K_t D \delta_{ij} \right) \ \text{(3.19)}$	
Δείκτης φόρτισης	$\Lambda = \frac{2G_{t}n_{ij}\dot{e}_{ij} - VK_{t}\dot{e}_{vol}}{K_{p} + 2G_{t} - VK_{t}D} $ (3.20)	
Συντελεστής διαστολικότητας	$D = A_{o}d^{d} \left(2 - \sqrt{\left\langle d^{d} \right\rangle / d_{ref}^{d}} \right) $ (3.21)	A _o
Πλαστικό μέτρο κράτυνσης	$K_{p} = ph_{b}h_{f}d^{b} $ (3.22)	
Εξίσωση νόμου παρεμβολής	$\mathbf{h}_{b} = \mathbf{h}_{o} \left \mathbf{d}^{b} \right ^{3} / \left\langle \mathbf{d}^{b}_{ref} - \left \mathbf{d}^{b} \right \right\rangle $ (3.23)	h _o
	$\mathbf{h}_{\mathrm{f}} = \left(1 + \left\langle \mathbf{f}_{\mathrm{p}} \right\rangle^{2}\right) / \left(1 + \left\langle \mathbf{f}_{\mathrm{ij}} \mathbf{n}_{\mathrm{ij}} \right\rangle\right) \tag{3.24}$	
	$\dot{f}_{p} = N\dot{\epsilon}_{vol}^{p}$ (3.25)	
Επίδραση της αλλαγής της δομής	$\dot{f}_{ij} = -N \left\langle -\dot{\epsilon}_{vol}^{p} \right\rangle \left[\left(4 \max \left f_{p} \right ^{2} \right) n_{ij} + f_{ij} \right] $ (3.26)	N _o
	$\mathbf{N} = \mathbf{N}_{o} \left(\sigma_{1,o} / p_{a} \right) \left\langle -\psi_{o} \right\rangle $	

Πίνακας 3.1: Εξισώσεις προσομοιώματος NTUA-Sand.

#	Φυσική Σημασία	Τιμή						
Mcc	Κλίση της επιφάνειας Κρίσιμης Κατάστασης για τριαξονική θλίψη (TC)	1.25						
с	Λόγος της κλίση της επιφάνειας Κρίσιμης Κατάστασης για τριαξονικό εφελκισμό (ΤΕ) προς την αντίστοιχη κλίση για τριαξονική θλίψη (TC)	0.72						
Γ _{cs}	Δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση για p=1kPa							
λ	Κλίση της γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης στο επίπεδο [e-lnp]	0.022						
В	Σταθερά του ελαστικού μέτρου διάτμησης	600*						
v	Λόγος Poisson	0.33						
k _c ^b	Επίδραση του ψ στην κλίση της Οριακής Επιφάνειας για ΤC	1.45						
k_c^d	Επίδραση του ψ στην κλίση της Επιφάνειας Διαστολικότητας για ΤC	0.30						
γ 1	Χαρακτηριστική διατμητική παραμόρφωση	0.025%						
α1	Ρυθμός απομείωσης του ελαστικού μέτρου διάτμησης	0.6*						
Ao	Σταθερά του συντελεστή διαστολικότητας	0.8						
No	Σταθερά της επίδρασης της αλλάγης της δομής	40000						
h₀	Σταθερά του πλαστικού μέτρου κράτυνσης	15000						

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

* για μονοτονική φόρτιση: B = 180, α₁ = 1.0

3.3 Κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών FLAC

Το λογισμικό FLAC είναι ένα πρόγραμμα Πεπερασμένων Διαφορών μη-πεπλεγμένης μορφής (explicit finite difference method) με εφαρμογή σε υπολογιστικά προβλήματα γεωτεχνικής φύσης. Παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων που σχετίζονται κυρίως με συνεχή μέσα σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Το συνεχές μέσο διακριτοποιείται σε τμήματα πεπερασμένων διαστάσεων, τα οποία στο FLAC ονομάζονται ζώνες (zones), ενώ οι εξισώσεις ισορροπίας επιλύονται στα σημεία που ορίζουν το δίκτυο των ζωνών, δηλαδή στους κόμβους (gridpoints). Κάθε ζώνη ακολουθεί κάποιο γραμμικό ή μη-γραμμικό καταστατικό νόμο συμπεριφοράς, ο οποίος είτε είναι ενσωματωμένος στο πρόγραμμα (π.χ. Mohr-Coulomb) είτε εισάγεται εξολοκλήρου από το χρήστη (π.χ. NTUA-Sand) σύμφωνα με τον οποίο υπολογίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις κάτω από τις επιβαλλόμενες δυνάμεις/μετατοπίσεις και συνοριακές συνθήκες.

Στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών κάθε παράγωγος της διαφορικής εξίσωσης κίνησης αντικαθίσταται από μια αλγεβρική έκφραση με όρους τις μεταβλητές του προβλήματος (τάσεις, παραμορφώσεις) σε διακεκριμένα σημεία στο χώρο, χωρίς να απαιτείται ο καθορισμός ενός νόμου μεταβολής για αυτές στο εσωτερικό των στοιχείων - ζωνών. Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται ένας τυπικός κύκλος υπολογισμών του FLAC (timestep). Συγκεκριμένα, ξεκινώντας από μία δεδομένη παραμορφωσιακή κατάσταση (μετακινήσεις κόμβων) υπολογίζονται οι επαυξητικές παραμορφώσεις για μία δεδομένη αρχική ταχύτητα. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι τάσεις που αναπτύσσονται σε κάθε ζώνη σύμφωνα με το χρησιμοποιούμενο κάθε φορά καταστατικό προσομοίωμα και μέσω των τάσεων υπολογίζονται οι δυνάμεις στους κόμβους. Αν οι δυνάμεις αυτές τείνουν να μηδενιστούν, θεωρούμε ότι το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία υπό σταθερή ταχύτητα. Σε αντίθετη περίπτωση, οι μη ισορροπούσες δυνάμεις των κόμβων (unbalanced force) δημιουργούν κομβικές επιταχύνσεις, ξεκινάει νέος κύκλος υπολογισμών και η διαδικασία συνεχίζεται επαναληπτικά έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση.

Η ειδοποιός διαφορά της μη-πεπλεγμένης μεθόδου που χρησιμοποιείται στο εν λόγω πρόγραμμα σε σχέση με τις πεπλεγμένες μεθόδους που χρησιμοποιούνται συνήθως στα προγράμματα Πεπερασμένων Στοιχείων (implicit/finite element method) είναι ότι κατά τη διάρκεια ενός υπολογιστικού βήματος οι τιμές των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις παραμένουν σταθερές. Κάτι τέτοιο καθίσταται δυνατό με την υιοθέτηση επαρκώς μικρού βήματος ολοκλήρωσης (Δt_{crit}) ώστε η ταχύτητα μετάδοσης του «φυσικού μετώπου» να είναι μικρότερη από την «υπολογιστική ταχύτητα». Αντίθετα στις πεπλεγμένες μεθόδους κάθε στοιχείο αλληλεπιδρά με τα γειτονικά του κατά τη διάρκεια ενός υπολογιστικού βήματος επαναλήψεις έως ότου επιτευχθεί ισορροπία. Μεγάλο πλεονέκτημα των μεθόδων Πεπερασμένων Διαφορών αποτελεί το γεγονός ότι οι εξισώσεις του προβλήματος μορφώνονται και επιλύονται σε κάθε υπολογιστικό βήμα χωρίς να απαιτείται η μόρφωση και στη συνέχεια η αντιστροφή ενός συνολικού μητρώου δυσκαμψίας του συστήματος, όπως συμβαίνει με τα Γεπερασμένα Στοιχεία.



Σχήμα 3.3: Μη πεπλεγμένη διαδικασία υπολογισμού που χρησιμοποιείται στον κώδικα FLAC.

3.4 Παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις

3.4.1 Εδαφική τομή και αριθμητικό προσομοίωμα

Στο **Σχήμα 3.4** παρουσιάζεται η εδαφική τομή που επιλέχτηκε για τις αριθμητικές αναλύσεις καθώς και ο αντίστοιχος κάνναβος πεπερασμένων διαφορών του FLAC. Το εδαφικό στρώμα έχει πάχος 14m και αποτελείται μία ρευστοποιήσιμη αμμώδη στρώση μεταβλητού πάχους, μεταξύ δύο μη ρευστοποιήσιμων αργιλικών στρώσεων, εκ των οποίων η επιφανειακή έχει σταθερό πάχος ίσο προς 2m. Το αριθμητικό προσομοίωμα αποτελείται από μια στήλη εδάφους με στοιχεία (πλάτος x ύψος) 1m x 0.5m, ενώ στα πλευρικά σύνορα έχουν εισαχθεί «ιδεατά καλώδια» (tied nodes), τα οποία επιβάλλουν ίσες μετατοπίσεις στους ακραίους κόμβους της ίδιας στάθμης. Για την προσομοίωση συνθηκών εύκαμπτου βραχώδους υποβάθρου, προστίθεται ένα επιπλέον στοιχείο στη βάση του προσομοιώματος με ελαστικές ιδιότητες. Ως εκ τούτου το αριθμητικό προσομοίωμα έχει συνολικό πάχος 14.5m.



Σχήμα 3.4: Εδαφική τομή και κάνναβος πεπερασμένων διαφορών.

Όπως έχει προαναφερθεί, η προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης και της ρευστοποίησης της αμμώδους στρώσης πραγματοποιείται με το καταστατικό προσομοίωμα NTUA-Sand, χρησιμοποιώντας την βαθμονόμηση για άμμο Nevada, το οποίο και έχει ενσωματωθεί στο λογισμικό FLAC με χρήση υπο-ρουτίνας UDM (User Defined Model). Αντίστοιχα, για την προσομοίωση της απλούστερης σχετικά υστερητικής απόκρισης των αργιλικών στρώσεων, χρησιμοποιήθηκε το προσομοίωμα των Ramberg & Osgood (1943). Το προσομοίωμα αυτό μπορεί να προσεγγίσει ικανοποιητικά τόσο την απομείωση του μέτρου διάτμησης, G, όσο και την αύξηση του ποσοστού κρίσιμης υστερητικής απόσβεσης, ξ, συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης, γ, του εδάφους, όπως φαίνεται και από το **Σχήμα 3.5**. Έχει ενσωματωθεί και αυτό στον κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC ως UDM, όπως παρουσιάζεται λεπτομερώς σε ερευνητικές εκθέσεις του Τομέα Γεωτεχνικής του ΕΜΠ (Papadimitriou & Bouckovalas 2002; Andrianopoulos et al. 2010). Τέλος, σημειώνεται ότι η βαθμονόμηση του έχει πραγματοποιηθεί βάσει των πειραματικών καμπυλών ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς γεω-υλικών (G/G_{max} – γ και ξ – γ) των Vucetic & Dobry (1991).



Σχήμα 3.5: Ελαστικό-υστερητική, μη γραμμική συμπεριφορά εδάφους σε ανακυκλική φόρτιση με βάση το μοντέλο Ramberg-Osgood.

Αναφορικά με τις εδαφικές παραμέτρους που επιλέχτηκαν στις αναλύσεις, σε όλα τα εδαφικά στρώματα η ξηρή και η κορεσμένη πυκνότητα ήταν ίσες με $ρ_{\xi} = 1.6 Mg/m^3$ και $ρ_{\kappa o \rho} = 2,0 Mg/m^3$, ενώ θεωρήθηκε συντελεστής ουδέτερων ωθήσεων ίσος με $K_0 = 0.50$. Για τις αργίλους, θεωρήθηκε δείκτης πλασιμότητας PI = 30%, λόγος Poission v = 0.30 και ταχύτητα μετάδοσης διατμητικού κύματος $V_s = 100$ και 300 m/sec, για την υπερκείμενη και την υποκείμενη στρώση αντίστοιχα. Για το βραχώδες υπόβαθρο θεωρήθηκε v = 0.25 και $V_s = 650$ m/sec. Τέλος, θεωρήθηκαν 2 τιμές σχετικής πυκνότητας για την άμμο: $D_r = 40$ και 60%, ενώ για κάθε σχετική πυκνότητα, εξετάστηκαν 5 διαφορετικές τιμές του πάχους της ρευστοποιήσιμης άμμου: $H_{liq} = 2, 4, 6, 8$ και 10m, με αποτέλεσμα να προκύψουν 10 διαφορετικά εδαφικά προφίλ.

3.4.2 Σεισμικές διεγέρσεις

Για τις παραμετρικές αναλύσεις επιλέγονται 5 πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις που καταγράφηκαν σε αναδυόμενο βραχώδες υπόβαθρο με μέγεθος M_w = 6.6 - 6.9. Η επιλογή των δονήσεων έγινε ανάμεσα από τις 14 σεισμικές διεγέρσεις που χρησιμοποίησαν οι Bouckovalas & Tsiapas (2015) στην εργασία τους (Πίνακας 3.3) και συγκεκριμένα

επιλέχτηκαν οι δονήσεις: «A5», «A6», «B1», «B4» και «B6». Επισημαίνεται ότι αυτή η αρίθμηση των σεισμικών διεγέρσεων υιοθετείται στην παρούσα εργασία. Για τη μείωση του υπολογιστικού κόστους, σε κάθε δόνηση απομονώθηκε το σημαντικό κομμάτι της διέγερσης, το οποίο και θα χρησιμοποιηθεί στις αναλύσεις (Σχήμα 3.6). Θα πρέπει να τονιστεί ότι το φάσμα απόκρισης του επιλεγόμενου τμήματος διαφέρει ελάχιστα από αυτό της συνολικής δόνησης, ενώ ο χρόνος της κάθε αριθμητικής ανάλυσης μειώνεται σημαντικά. Στη συνέχεια, οι 5 διεγέρσεις προσαρμόστηκαν αναλογικά (scaling), έτσι ώστε το μέσο φάσμα τους να έχει μέγιστη εδαφική επιτάχυνση 0.30g και 0.15g. Με τον τρόπο αυτό, προκύπτουν συνολικά 10 σεισμικές διεγέρσεις, με τις 5 πρώτες να ονομάζονται: «ισχυρές» δονήσεις (strong), ενώ οι άλλες 5: «ασθενείς» δονήσεις (weak). Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζονται τα ελαστικά φάσματα απόκρισης των 5 «ισχυρών» δονήσεων καθώς και η σύγκριση του μέσου φάσματος με το αντίστοιχο φάσμα σχεδιασμού του Ευρωκώδικα 8 για έδαφος κατηγορίας Β, τα οποία βρέθηκαν σε καλή συμφωνία. Για λόγους οικονομίας δεν παρουσιάζονται τα φάσματα για τις «ασθενείς» δονήσεις, δεδομένου ότι είναι ίδια με τα αντίστοιχα των «ισχυρών» δονήσεων, διαιρεμένα στο μισό. Ο Πίνακας 3.4 στο τέλος του Κεφαλαίου συνοψίζει τις 10 επιλεγόμενες διεγέρσεις που θα χρησιμοποιηθούν στις αριθμητικές αναλύσεις, ενώ οι χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων για τις «ισχυρές» διεγέρσεις παρουσιάζονται και αυτές στο τέλος του Κεφαλαίου (Σχήμα 3.9 -**Σχήμα 3.13**).

	Σεισμικό	Σενάριο Α	1	Σεισμικό Σενάριο Β			
Διεγερση #	Σεισμική Διέγερση	PGA (g)	Mw	Σεισμική Διέγερση	PGA (g)	FS∟	
1	ITALY-BAG	0.180	6.9	NEWZEAL	0.280	6.6	
2	ITALY-VLT	0.136	6.9	NORTHR-BLD	0.251	6.7	
3	KOBE-AMA	0.394	6.9	NORTHR-CEN	0.589	6.7	
4	КОВЕ-КАК	0.330	6.9	NORTHR-FLE	0.172	6.6	
5	KOBE-TDO	0.383	6.9	SFERN-L	0.150	6.6	
6	LOMAP-AND	0.320	6.9	SFERN-PEL	0.211	6.6	
7	LOMAP-GIL	0.484	6.9	SPITAK	0.207	6.8	

Πίνακας 3.3: Σύνοψη σεισμικών διεγέρσεων από Bouckovalas & Tsiapas (2015).



Σχήμα 3.6: Συνολική χρονοϊστορία επιταχύνσεων στο αναδυόμενο βραχώδες υπόβαθρο και επιλεγόμενο κομμάτι.



Σχήμα 3.7: Φάσματα απόκρισης στο αναδυόμενο υπόβαθρο για τις ισχύρες δονήσεις και σύγκριση του μέσου φάσματος απόκρισης με τα αντίστοιχα φάσματα σχεδιασμού του ΕC8.

3.4.3 Παραμετρικές αναλύσεις

Έχοντας ως δεδομένο ότι οι επιλεγόμενες σεισμικές διεγέρσεις, έχουν καταγραφεί στο αναδυόμενο βραχώδες υπόβαθρο, επιλέγεται η θεώρηση εύκαμπτης βάσης στο FLAC. Πιο συγκεκριμένα, προστίθενται αποσβεστήρες στους κόμβους της βάσης τόσο σε οριζόντιο όσο και σε κατακόρυφο επίπεδο, ενώ η σεισμική διέγερση εισάγεται στη ζώνη της βάσης ως χρονοϊστορία διατμητικής τάσης, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\tau = 2(\rho V_s) \upsilon_s \tag{3.28}$$

όπου τ η επιβαλλόμενη διατμητική τάση, ρ και $V_{\rm S}$ η πυκνότητα και η ταχύτητα διατμητικού κύματος της βάσης αντίστοιχα (ρ = 2Mg/m³ και V_S = 650m/sec) και $u_{\rm S}$ η χρονοϊστορία της επιβαλλόμενης ταχύτητας (**Σχήμα 3.9 – Σχήμα 3.13**). Με τον τρόπο αυτό, εισάγονται και οι 10 σεισμικές διεγέρσεις στο αριθμητικό προσομοίωμα.

Έχοντας ως δεδομένο ότι τα καταστατικά προσομοιώματα Ntua-Sand και Ramberg-Osgood δεν προβλέπουν την ανάπτυξη υστερητικής απόσβεσης σε πολύ μικρές διατμητικές παραμορφώσεις, χρησιμοποιήθηκε απόσβεση τύπου Rayleigh με ελάχιστο λόγο απόσβεσης ξ_{min} = 2%. Σημειώνεται ότι ο ίδιος τύπος και λόγος απόσβεσης χρησιμοποιήθηκε και στην ελαστική βάση. Η απόσβεση τύπου Rayleigh δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από την συχνότητα. Πιο συγκεκριμένα, ο λόγος απόσβεσης παίρνει την ελάχιστη τιμή ξ_{min} σε μία συγκεκριμένη συχνότητα f_{min}, ενώ είναι πρακτικά σταθερός σε μια περιοχή συχνοτήτων πριν και μετά την f_{min}. Για τον προσδιορισμό της κατάλληλης f_{min} για κάθε αριθμητική ανάλυση, ακολουθείται η, προτεινόμενη από το λογισμικό, τυποποιημένη διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται μία αρχική δυναμική ανάλυση με μηδενική απόσβεση και προσδιορίζεται το φάσμα ταχυτήτων στην επιφάνεια της εδαφικής στήλης. Με τον τρόπο αυτό, εκτιμάται το εύρος των σημαντικών συχνοτήτων της ανάλυσης. Τέλος, επιλέγεται η βέλτιστη τιμή της f_{min} για την οποία το εύρος των συχνοτήτων με πρακτικά σταθερό λόγο απόσβεσης (και ίσο με ξ_{min}) να αντιστοιχεί στις σημαντικές συχνότητες της ανάλυσης.

Με χρήση της προαναφερθείσας μεθοδολογίας, οι 10 σεισμικές διεγέρσεις εφαρμόστηκαν και στα 10 διαφορετικά εδαφικά προφίλ με αποτέλεσμα να προκύψουν συνολικά 100 παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις. Θα πρέπει να σημειωθεί, τέλος, ότι οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν υπό αστράγγιστες συνθήκες, καθώς δεν επιτρέπονταν η υδατική ροή.

3.4.4 Επεξεργασία και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Η επεξεργασία των αριθμητικών αναλύσεων ανέδειξε το πρόβλημα του αριθμητικού θορύβου στις εκτιμώμενες χρονοϊστορίες επιταχύνσεων του FLAC, δηλαδή την ανάπτυξη σχετικά υψίσυχνων παλμών με μεγάλο πλάτος ταλάντωσης, οι οποίοι επηρεάζουν σημαντικά τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση και τις φασματικές επιταχύνσεις σε σχετικά μικρές περιόδους. Η ανάπτυξη αριθμητικού θορύβου είναι αναμενόμενη σε όλες τις αναλύσεις στις οποίες αναπτύσσονται πλαστικές παραμορφώσεις και το φαινόμενο γίνεται πιο έντονο όσο μεγαλύτερες είναι αυτές. Ως εκ τούτου, ο αριθμητικός θόρυβος είναι αισθητά μικρότερος και πιο υψίσυχνος μέχρι τη ρευστοποίηση του εδάφους, ενώ μετά γίνεται αρκετά πιο έντονος και καλύπτει μεγαλύτερο εύρος περιόδων, λόγω της ανάπτυξης πλαστικών παραμορφώσεων που επιφέρει η μείωση της δυσκαμψίας του εδάφους.

40

Επομένως, είναι αρκετά σημαντικό να εκτιμηθεί ο χρόνος εκδήλωσης της ρευστοποίησης στην επιφάνεια του εδάφους, t_{L,gr} σε κάθε αριθμητική ανάλυση. Η τιμή του οποίου εκτιμάται εποπτικά συγκρίνοντας τους παλμούς της καταγραφής στο αναδυόμενο βραχώδες υπόβαθρο με αυτούς στην επιφάνεια του εδάφους. Ως t_{L,gr} θεωρείται ο χρόνος στον οποίο τόσο το συχνοτικό περιεχόμενο όσο και το πλάτος ταλάντωσης των παλμών στην επιφάνεια του εδάφους αρχίζουν να αλλοιώνονται από τα αντίστοιχα του αναδυόμενου υποβάθρου (**Σχήμα 3.8**). Περισσότερη διερεύνηση γύρω από τη σημασία και το φυσικό νόημα του t_{L,gr} θα παρουσιαστεί στα επόμενα Κεφάλαια.

Για την μείωση του αριθμητικού θορύβου, γίνεται φιλτράρισμα των εκτιμώμενων χρονοϊστοριών επιταχύνσεων στην επιφάνεια του εδάφους, χρησιμοποιώντας, όμως, διαφορετική συχνότητα φίλτρου για το πρώτο τμήμα της καταγραφής (t < t_{L,gr}) και διαφορετική για το δεύτερο (t \ge t_{L,gr}). Για την αποφυγή φιλτραρίσματος σημαντικών συχνοτήτων της σεισμικής διέγερσης, η συχνότητα φίλτρου, f_{filter}, επιλέγεται να είναι τουλάχιστον 3 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα του εδάφους, f_{soil}, για το πρώτο και το δεύτερο κομμάτι αντίστοιχα (f_{filter} \ge 3f_{soil}). Για την εκτίμηση της ιδιοσυχνότητας του εδάφους σε κάθε τμήματος, εξετάζεται ο λόγος των φασμάτων Fourier στην επιφάνεια του εδάφους προς τη βάση. Στο **Σχήμα 3.8** παρουσιάζεται μια τυπική χρονοϊστορία στην επιφάνεια του εδάφους πριν και μετά το φιλτράρισμα.



Σχήμα 3.8: Τυπικές χρονοϊστορίες στην επιφάνεια του εδάφους (πριν και μετά το φιλτράρισμα) και στο αναδυόμενο υπόβαθρο.

Με βάση την επιτυχία του φιλτραρίσματος και την μείωση του αριθμητικού θορύβου, οι αριθμητικές αναλύσεις χωρίζονται σε 3 κατηγορίες: «αξιόπιστες», «ικανοποιητικές» και «μη-αξιόπιστες». Στις «αξιόπιστες» συγκαταλέγονται όσες αναλύσεις δεν παρουσιάζουν αριθμητικό θόρυβο μετά το φιλτράρισμα, στις «ικανοποιητικές» αυτές που έχουν περιορισμένο αριθμητικό θόρυβο, με μικρή επιρροή στα αποτελέσματα (μέγιστη εδαφική επιτάχυνση και φασματικές επιταχύνσεις), ενώ στις «μη-αξιόπιστες» όσες παρουσιάζουν σημαντικό αριθμητικό θόρυβο, παρά το φιλτράρισμα. Από το σύνολο των 100 αναλύσεων, 62 αναλύσεις χαρακτηρίζονται ως «αξιόπιστες», οι 22 ως «ικανοποιητικές» και 16 ως «μηαξιόπιστες».

3.4.5 Ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος ρευστοποιημένου εδάφους

Σε όλες τις παραμετρικές αναλύσεις, εκτιμήθηκε αριθμητικά η ταχύτητα μετάδοσης διατμητικών κυμάτων σε ρευστοποιημένο έδαφος V_{s,liq}, με την «μέθοδο του παλμού». Πιο συγκεκριμένα, μετά το τέλος της διέγερσης, το αριθμητικό προσομοίωμα αφήνεται σε ηρεμία υπό αστράγγιστες συνθήκες για περίπου 2–3sec, έτσι ώστε να αποσβεστούν τα εναπομείναντα σεισμικά κύματα και να σταματήσει η ταλάντωση του εδάφους, χωρίς όμως να εκτονωθούν οι πιέσεις πόρων. Στη συνέχεια, επιβάλλεται στη βάση του ένας ημιτονικός παλμός (υπό τη μορφή διατμητικής τάσης) με μέγιστη επιτάχυνση a_{max} = 0.03g και περίοδο Τ = 0.5sec, τιμές που προέκυψαν μετά από αναλύσεις ευαισθησίας. Η τιμή του V_{s,liq} εκτιμάται από τη χρονική υστέρηση Δt στο χρόνο πρώτης άφιξης του παλμού μεταξύ της κορυφής και της βάσης του ρευστοποιημένου στρώματος ως εξής:

$$V_{\rm S,lig} = H_{\rm lig} / \Delta t \tag{3.29}$$

Με αντίστοιχο τρόπο εκτιμήθηκε και η ταχύτητα μετάδοσης διατμητικών κυμάτων V_{s,o} του φυσικού εδάφους, πριν την επιβολή της διέγερσης και την ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων. Διευκρινίζεται ότι, και στις δύο περιπτώσεις, κριτήριο για τον καθορισμό του χρόνου πρώτης άφιξης είναι η πρώτη υπέρβαση της τιμής 0.001g στις χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων.

Οι εκτιμώμενες τιμές του λόγου V_{s,liq}/V_{s,o} κυμαίνονται στο εύρος V_{s,liq}/V_{s,o} = 0.07 – 0.24, με μέση τιμή: 0.15 και τυπική απόκλιση: 0.04. Το εύρος αυτό συμφωνεί ικανοποιητικά με ανεξάρτητες εκτιμήσεις (Davis & Berrill 2001; Elgamal et al. 1996; Miwa & Ikeda 2006; Pease & O'Rourke 1997; Zeghal & Elgamal 1994), βάσει ανάστροφων αναλύσεων πραγματικών καταγραφών σε περιοχές που έχουν ρευστοποιηθεί. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι οι μέσες εκτιμώμενες τιμές του V_{S,o} με το βάθος είναι κατά 12% μικρότερες από τις αντίστοιχες ελαστικές τιμές του V_S, όπως αυτές προκύπτουν από την σχέση υπολογισμού του ελαστικού μέτρου διάτμησης G_{max} στο καταστατικό προσομοίωμα Ntua-Sand [σχέση (3.11)]. Δηλαδή ισχύει ότι: V_{S,o} \approx 0.88 (G_{max}/ρ)^{0.5}. Η μείωση αυτή οφείλεται στη θεώρηση σημειακής επιφάνειας διαρροής στο Ntua-Sand και, άρα, στην επακόλουθη απουσία ελαστικής περιοχής, γεγονός που οδηγεί σε άμεση διαρροή και σε μειωμένες τιμές στο μέτρο διάτμησης.

3.5 Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας έναντι σεισμικής ρευστοποίησης

3.5.1 Μεθοδολογία εκτίμησης συντελεστή ασφαλείας

Στην παρούσα ενότητα, περιγράφεται η μεθοδολογία εκτίμησης του συντελεστή ασφάλειας έναντι ρευστοποίησης, FS_L, που αντιστοιχεί στη δεδομένη σεισμική απόκριση του εδαφικού υλικού των αριθμητικών αναλύσεων, δηλαδή στις ακριβείς χρονοϊστορίες αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων και υπερπίεσης πόρων, όπως αυτές καταγράφηκαν από το FLAC.

Τα πειραματικά αποτελέσματα ρευστοποίησης (προερχόμενα από τριαξονικές ανακυκλικές δοκιμές, δοκιμές ανακυκλικής διάτμησης, πειράματα σε φυγοκεντριστή κλπ), δηλαδή τα ζεύγη τιμών CSR - N_L, γνωστά και ως καμπύλες ρευστοποίησης, μπορούν να περιγραφούν αναλυτικά από εξισώσεις δύναμης της μορφής:

$$CSR = a \cdot N_{L}^{-b} \tag{3.30}$$

όπου CSR είναι ο κανονικοποιημένος (ως προς την κατακόρυφη ενεργό τάση) λόγος της σταθερής επιβαλλόμενης ανακυκλικής τάσης, ενώ οι συντελεστές α και b εξαρτώνται κυρίως από το είδος της δοκιμής και τη σχετική πυκνότητα της άμμου.

Για δεδομένη τιμή του λόγου επιβαλλόμενων διατμητικών τάσεων CSR, η παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ελάχιστου αριθμού κύκλων φόρτισης, Ν_L, που απαιτούνται για να προκληθεί ρευστοποίηση. Αντίστοιχα, με δεδομένο τον αριθμό ομοιόμορφων επιβαλλόμενων κύκλων φόρτισης, Ν_{EQ}, μπορεί να εκτιμηθεί η ελάχιστη τιμή της ανηγμένης διατμητικής αντοχής σε ρευστοποίηση CRR συγκεκριμένου εδαφικού υλικού που θα το οδηγήσει σε ρευστοποίηση:

$$CRR = a \cdot N_{FO}^{-b} \tag{3.31}$$

Επομένως, για εδαφικό υλικό με δεδομένη καμπύλη ρευστοποίησης, ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση του λόγου Ν_L/Ν_{EQ}:

$$FS_{L} = \frac{CSR}{CRR} = \left(\frac{N_{L}}{N_{EQ}}\right)^{b}$$
(3.32)

Σε περιπτώσεις που δεν έχει εκδηλωθεί ρευστοποίηση κατά τη διάρκεια της δόνησης, αλλά έχει αναπτυχθεί σημαντική υπερπίεση πόρων (0 < $r_{u,max}$ < 1.0), οι απαιτούμενοι κύκλοι για ρευστοποίηση δεν είναι γνωστοί, ούτε είναι δυνατόν να εκτιμηθούν. Τότε, για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, χρησιμοποιείται η μεθοδολογία των Tokimatsu & Yoshimi (1983), η οποία συσχετίζει τον FS_L με τη μέγιστη αναπτυχθείσα τιμή της υπερπίεσης πόρων r_{u,max}. Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στην εμπειρική σχέση των Seed et al. (1976):

$$r_{u} = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left[\left(\frac{N_{EQ}}{N_{L}} \right)^{-1/(2 \cdot A)} \right]$$
(3.33)

όπου Α είναι ένας εμπειρικός συντελεστής. Με αντικατάσταση της σχέσης (3.33) στη σχέση (3.32) προσδιορίζεται ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης συναρτήσει του εμπειρικού εκθέτη Α, της παραμέτρου b και του r_{u,max} :

$$FS_{L} = \left[\sin\left(\frac{\pi}{2}r_{u,\max}\right)\right]^{-2\cdot A \cdot b}$$
(3.34)

Για πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις, η χρήση της σχέσης (3.32) δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμη αφού η περίοδος της διέγερσης δεν είναι σταθερή. Απαιτείται η μετατροπή της ανομοιόμορφης χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης σε μια ισοδύναμη αρμονική με ομοιόμορφο «ενεργό» πλάτος a_{eff} και σταθερή περίοδο T_{exc}, η οποία αντιστοιχεί σε συνολικό αριθμό κύκλων Ν_{EQ}. Στην παρούσα εργασία οι ισοδύναμες αυτές παράμετροι συσχετίζονται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$a_{eff}T_{exc}^{2}N_{EQ} = \pi^{2} \int_{t=0}^{NT} |v(t)| dt$$
(3.35)

η οποία μετασχηματίζεται ως εξής:

$$N_{EQ} = \frac{\pi^2 \int_{t=0}^{N-T} |v(t)| dt}{a_{eff} T_{exc}^2}$$
(3.36)

όπου v(t) είναι η χρονοϊστορία της ταχύτητας της διέγερσης. Επισημαίνεται ότι η σχέση αυτή ισχύει με απόλυτη ακρίβεια για αρμονικές διεγέρσεις, ενώ έχει επιβεβαιωθεί η

αξιοπιστία της στην αναλυτική πρόβλεψη φαινομένων ρευστοποίησης υπό πραγματικές διεγέρσεις (Karamitros et al. 2013). Ως θεμελιώδης περίοδος της διέγερσης T_{exc} στη σχέση (3.36) λαμβάνεται η μέση περίοδος του τμήματος του φάσματος επιταχύνσεων για το οποίο ισχύει Sa > 2.5PGA, ενώ η «ενεργός» επιτάχυνση a_{eff} υπολογίζεται σύμφωνα με τους Tokimatsu & Yoshimi (1983) ως εξής:

$$a_{eff} = [(M_w - 1)/10]a_{max}$$
 (3.37)

3.5.2 Εκτίμηση συντελεστή ασφαλείας

Η προαναφερθείσα μεθοδολογία εύρεσης των ισοδύναμων κύκλων και του υπολογισμού του συντελεστή ασφάλειας έναντι ρευστοποίησης εφαρμόστηκε στο σύνολο των αριθμητικών αναλύσεων. Αρχικά, μέσω της σχέσης (3.36) εκτιμήθηκαν οι χρονοϊστορίες των κύκλων φόρτισης για όλες τις διεγέρσεις στο αναδυόμενο βραχώδες υπόβαθρο και ως εκ τούτου και οι ισοδύναμοι κύκλοι φόρτισης Ν_{ΕΩ}. Οι χρονοΪστορίες επιταχύνσεων, ταχυτήτων και κύκλων φόρτισης για τις 5 «ισχυρές» διεγέρσεις φαίνονται στο Σχήμα 3.9 – Σχήμα 3.13. Ο Πίνακας 3.4 συνοψίζει τα δεδομένα των 10 σεισμικών διεγέρσεων, τις εκτιμώμενες τιμές του Ν_{EQ}, καθώς και τη θεμελιώδης περίοδο της κάθε διέγερσης, που υπολογίστηκε με βάση την προτιμώμενη μεθοδολογία. Στη συνέχεια, μέσω των χρονοϊστοριών του συντελεστή υπερπιέσεων πόρων ru εκτιμήθηκε ο χρόνος έναρξης της ρευστοποίησης, tL, σε κάθε βάθος της ρευστοποιήσιμης άμμου. Κριτήριο για την επιλογή του t_L ήταν ο ελάχιστος χρόνος για τον οποίο ίσχυει ότι $r_u \ge 0.95$. Με γνωστό το t_L , εκτιμήθηκε ο αριθμός κύκλων φόρτισης για ρευστοποίηση Νι μέσω των αντίστοιχων χρονοϊστοριών αριθμού κύκλων (Σχήμα 3.9 -Σχήμα 3.13). Τονίζεται ότι η εκτίμηση των κύκλων φόρτισης πραγματοποιείται από την αντίστοιχη χρονοϊστορία στο αναδυόμενο βραχώδες υπόβαθρο και όχι στην αντίστοιχη καταγραφή του FLAC στο ίδιο βάθος. Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας, είτε μέσω της σχέσης (3.32) για $r_{u,max}$ = 1, είτε μέσω της (3.34) για $r_{u,max}$ < 1, απαιτείται η γνώση του συντελεστή b των καμπυλών ρευστοποίησης που αντιστοιχούν στη βαθμονόμηση για άμμο τύπου Nevada. Οι Zontanou & Kalogeraki (2014) εκτίμησαν τις καμπύλες ρευστοποίησης που αντιστοιχούν στην παρούσα βαθμονόμηση του προσομοιώματος από αριθμητικές αναλύσεις σε εδαφική στήλη και βρέθηκε ότι για Dr = 40% η παράμετρος b παίρνει την τιμή b = 0.56, ενώ για D_r = 60% είναι ίση με b = 0.42. Στην ίδια Εργασία εκτιμήθηκε η τιμή του εμπειρικού εκθέτη Α της σχέσης (3.33), η οποία είναι ίση με Α = 1.40, τόσο για D_r = 40%, όσο και για D_r = 60%. Μέσω αυτής της διαδικασίας εκτιμήθηκαν οι τιμές του FS_L για όλες τις αναλύσεις, οι μέσες τιμές του οποίου με το βάθος κυμαίνονται στο εύρος FS_{Lav} = 0.20 – 0.84 για το σύνολο των 100 παραμετρικών αναλύσεων.

Διέγερση	Σεισμική	NA	T _{exc}	N	PGA (g)		
#	Διέγερση	IVIW	w (sec) ^{INEQ}	INEQ	Ισχυρή	Ασθενής	
A5	KOBE-TDO	6.9	0.24	65.3	0.424	0.212	
A6	LOMAP-AND	6.9	0.35	28.7	0.354	0.177	
B1	NEWZEAL	6.6	0.35	26.5	0.297	0.149	
B4	NORTHR-FLE	6.6	0.34	34.5	0.190	0.095	
B6	SFERN-PEL	6.6	0.24	68.3	0.234	0.117	

Πίνακας 3.4: Σύνοψη επιλεγόμενων σεισμικών διεγέρσεων



Σχήμα 3.9: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και αριθμού κύκλων στην επιφάνεια του αναδυόμενου βραχώδους υποβάθρου για την διέγερση A5-strong.



Σχήμα 3.10: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και αριθμού κύκλων στην επιφάνεια του αναδυόμενου βραχώδους υποβάθρου για την διέγερση A6-strong.



Σχήμα 3.11: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και αριθμού κύκλων στην επιφάνεια του αναδυόμενου βραχώδους υποβάθρου για την διέγερση B1-strong.



Σχήμα 3.12: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και αριθμού κύκλων στην επιφάνεια του αναδυόμενου βραχώδους υποβάθρου για την διέγερση B4-strong.



Σχήμα 3.13: Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και αριθμού κύκλων στην επιφάνεια του αναδυόμενου βραχώδους υποβάθρου για την διέγερση B6-strong.

Κεφάλαιο 4

Προκαταρκτική αξιολόγηση προτεινόμενης μεθοδολογίας

4.1 Γενικά

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η κατ' αρχήν επιβεβαίωση της βασικής φιλοσοφίας της προτεινόμενης μεθοδολογίας για την εκτίμηση των φασμάτων απόκρισης. Για το σκοπό αυτό γίνεται μία προκαταρκτική εφαρμογή της μεθόδου της επαλληλίας, χρησιμοποιώντας ως χρονική στιγμή διαχωρισμού της δόνησης t_{L,gr}, αυτή που προκύπτει από τις χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους των αριθμητικών αναλύσεων με το FLAC. Για τις δύο επιμέρους χρονοϊστορίες, πριν και μετά την εκδήλωση της ρευστοποίησης πραγματοποιούνται ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις με το πρόγραμμα ΕΕRA και εν συνεχεία προσδιορίζεται η περιβάλλουσα των δύο φασμάτων. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των προβλεπόμενων με τα πραγματικά φάσματα για τις 100 αριθμητικές αναλύσεις με τον κώδικα FLAC σε όρους απόλυτων και κανονικοποιημένων φασματικών επιταχύνσεων.

4.2 Ισοδύναμες Γραμμικές Αναλύσεις ΕΕRA

4.2.1 Περιγραφή μεθοδολογίας

Βασίζεται στην υπόθεση της μονοδιάστατης μετάδοσης οριζόντια πολωμένων διατμητικών κυμάτων διαμέσου του εδάφους, και επιλύεται αριθμητικά με την ισοδύναμη γραμμική μέθοδο (Schnabel et al. 1972). Για τυχούσα σεισμική διέγερση, οι διαφορικές εξισώσεις της μετάδοσης σεισμικών κυμάτων επιλύονται με χρήση της ανάλυσης Fourier (frequency domain analysis). Συγκεκριμένα:

- η τυχούσα σεισμική διέγερση αναλύεται σε πεπερασμένο αριθμό αρμονικών διεγέρσεων,
- η απόκριση της εδαφικής στήλης υπολογίζεται αναλυτικά για κάθε μια αρμονική συνιστώσα της διέγερσης, και
όλες οι επιμέρους συνιστώσες που υπολογίσθηκαν κατ' αυτόν τον τρόπο επαλληλίζονται με αντίστροφη μεθοδολογία Fourier, προκειμένου να δώσουν την τελική απόκριση στην επιφάνεια του εδάφους.

Αυστηρή εφαρμογή της ανωτέρω μεθοδολογίας προϋποθέτει ένα γραμμικώς ιξωδοελαστικό μέσο, με σταθερό μέτρο διατμητικής παραμόρφωσης (G) και σταθερό λόγο υστερητικής απόσβεσης (ξ). Η πραγματική μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους υπό δυναμική-επαναλαμβανόμενη φόρτιση, όπου τόσο το G όσο και το ξ αποτελούν συναρτήσεις της επιβαλλόμενης διατμητικής παραμόρφωσης (γ), λαμβάνεται υπόψη με επαναληπτική εφαρμογή της ανωτέρω μεθοδολογίας. Κατ' αυτή, οι χρησιμοποιούμενες τιμές των παραμέτρων G και ξ τροποποιούνται διαδοχικά μέχρι να γίνουν τελικώς συμβατές με τις αντίστοιχες τιμές της διατμητικής παραμόρφωσης (γ) που προκύπτουν από την ανάλυση.

Τα βασικά δεδομένα τα οποία απαιτούνται για την εφαρμογή της ανωτέρω μεθοδολογίας περιλαμβάνουν:

- Το βάθος και το πάχος των διάφορων εδαφικών στρώσεων.
- Την πυκνότητα μάζας (ρ) της κάθε στρώσης.
- Την ταχύτητα μετάδοσης σεισμικών (διατμητικών) κυμάτων (V_s) της κάθε στρώσης,
 ή το αντίστοιχο ελαστικό μέτρο διάτμησης (G_{max}=ρ·V_s²).
- Το βάθος και τις ιδιότητες (Vs και ρ) του «σεισμικού υποβάθρου».
- Τις καμπύλες (G/G_{max}-γ) και (ξ-γ) που περιγράφουν τη μη γραμμική ιξωδο-ελαστική συμπεριφορά της κάθε στρώσης.
- Τη σεισμική διέγερση, υπό μορφή επιταχυνσιογραφήματος, και την εδαφική στρώση στην οποία επιβάλλεται.

4.2.2 Δεδομένα αναλύσεων

Τα παραπάνω βασικά δεδομένα που απαιτούνται για την εφαρμογή των αναλύσεων ΕΕRA επιλέχθηκαν με τρόπο ώστε να είναι συμβατά με τις αριθμητικές αναλύσεις στο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών FLAC, όπως αυτές έχουν περιγραφεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3. Προς διευκόλυνση του αναγνώστη χωρίζονται ακολούθως σε τρεις υποενότητες που περιλαμβάνουν τη γεωμετρία και τις ιδιότητες των εδαφικών στρώσεων και του υποβάθρου, την ιξωδο-ελαστική συμπεριφορά των στρώσεων καθώς και τη σεισμική διέγερση που επιβάλλεται. **Γεωμετρία & Ιδιότητες εδαφικών στρώσεων & υποβάθρου.** Το εδαφικό προφίλ που καταστρώνεται (συνολικού ύψους 14 μέτρων) περιλαμβάνει ως γνωστόν δύο στρώματα αργίλου και ένα ενδιάμεσο στρώμα ρευστοποιήσιμης άμμου για τις δύο περιπτώσεις των σχετικών πυκνοτήτων 40% και 60%. Η επιφανειακή στρώση αργίλου έχει σταθερό πάχος ίσο προς 2 m. Αντίθετα, η υποκείμενη άργιλος έχει μεταβλητό πάχος, έτσι ώστε για τα πέντε διαφορετικά πάχη άμμου των αναλύσεων (H = 2, 4, 6, 8 & 10) να διατηρείται σταθερό το συνολικό πάχος αργίλου - άμμου - αργίλου στα 14 m. Τέλος η διακριτοποίηση διατηρείται σε στρώσεις πάχους 0.5 m.

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των στρώσεων, το ειδικό βάρος της αργίλου, της άμμου και του σεισμικού υποβάθρου λαμβάνεται ίσο με 19,62 kN/m³, το οποίο αντιστοιχεί στην κορεσμένη πυκνότητα $\rho_{\kappa o \rho} = 2 Mg/m^3$. Τα χαρακτηριστικά των αργιλικών στρώσεων λαμβάνονται όπως και στις αναλύσεις FLAC, ήτοι για την υπερκείμενη στρώση G_{max} = 22.5 MPa και V_s = 106,07m/sec ενώ για την υποκείμενη G_{max} = 180 MPa και V_s = 300m/sec. Για το αναδυόμενο σεισμικό υπόβαθρο λαμβάνονται χαρακτηριστικά ημι-βράχου και συγκεκριμένα G_{max} = 845 MPa και V_s = 650m/sec.

Ο προσδιορισμός της κατανομής του μέτρου διατμήσεως G_{max} με το βάθος για την αμμώδη στρώση ακολουθεί την παρακάτω σχέση σύμφωνα με τον Hardin (1978) όπως ακριβώς και στις αναλύσεις FLAC:

$$G_{\max} = \frac{600 p_a}{0.3 + 0.7e} \sqrt{\frac{p}{p_a}}$$
(4.1)

όπου p είναι η μέση ισοτροπική (οκταεδρική) τάση, p_a η ατμοσφαιρική πίεση και e o δείκτης πόρων της άμμου. Λόγω της ιδιαιτερότητας του καταστατικού μοντέλου NTUA-Sand αναφορικά με την θεώρηση σημειακής επιφάνειας διαρροής και την επακόλουθη απουσία ελαστικής περιοχής, η τιμή του αρχικού μέτρου διάτμησης G_{max} μειώνεται αμέσως μετά την εφαρμογή ανακυκλικής φόρτισης στις αριθμητικές αναλύσεις. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη αυτό το φαινόμενο στις ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις εφαρμόζεται ένας μειωτικός συντελεστής της τάξης του 0.88 στην υπολογιζόμενη ταχύτητα μετάδοσης των διατμητικών κυμάτων V_{s0}. Ο συντελεστής αυτός βασίζεται σε προγενέστερες εργασίες (Koutsogoula 2012; Theocharis 2011) και έχει εξαχθεί με την εφαρμογή της «μεθόδου του παλμού». Πιο συγκεκριμένα, πριν την επιβολή της διέγερσης, επιβάλλεται στη βάση του αριθμητικού προσομοιώματος ένας ημιτονικός παλμός με a_{max}=0.03g και T=0.5sec, τιμές που προέκυψαν μετά από αναλύσεις ευαισθησίας. Η τιμή του V_s εκτιμάται από τη χρονική

υστέρηση Δt στο χρόνο πρώτης άφιξης του παλμού μεταξύ της κορυφής και της βάσης του ρευστοποιημένου στρώματος ως εξής:

$$V_{\rm s} = H/\Delta t \tag{4.2}$$

Διευκρινίζεται ότι κριτήριο για τον καθορισμό του χρόνου πρώτης άφιξης είναι η πρώτη υπέρβαση της τιμής 0.01g στις χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων.

Στο **Σχήμα 4.1** που ακολουθεί φαίνονται τα προφίλ του αρχικού μέτρου διάτμησης G_{max} και της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων V_{s0} που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις EERA για τις δύο σχετικές πυκνότητες $D_r = 40\%$ & 60% και πάχος ρευστοποιήσιμης στρώσης ίσο προς 10 m (2 έως 12 m βάθος).



Σχήμα 4.1: Κατανομή με το βάθος του μέτρου διάτμησης G_{max} και της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων V₅₀ για πάχος ρευστοποιήσιμης άμμου 10 μέτρα και για τις δύο σχετικές πυκνότητες D_r = 40% & 60%.

Ιξωδο-ελαστική συμπεριφορά των στρώσεων. Για την προσομοίωση της ιξωδο-ελαστικής συμπεριφοράς των εδαφικών στρώσεων χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες Vucetic & Dobry (1991). Συγκεκριμένα, για τις στρώσεις της αργίλου χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες απομείωσης του μέτρου διατμήσεως (G/G_{max}) και οι καμπύλες απόσβεσης (ξ) συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης (γ) για δείκτη πλαστιμότητας PI = 22,5 – 40% ενώ για την αμμώδη στρώση οι αντίστοιχες καμπύλες για PI = 0 – 7,5%. Οι καμπύλες αυτές παρουσιάζονται στα ακόλουθα **Σχήματα (4.2** και **4.3)** και στον **Πίνακα 4.1**.



Σχήμα 4.2: Καμπύλες μεταβολής του μέτρου διάτμησης G/G_{max} συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης γ.



Σχήμα 4.3: Καμπύλες μεταβολής του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση γ.

Vucetic - Dobry (PI = 0 - 7,5%)			Vucetic - Dobry (PI = 22,5 - 40%)		
γ (%)	G/G _{max}	ξ (%)	γ (%)	G/G _{max}	ξ (%)
0,0001	1,00	1,64	0,0001	1,00	1,19
0,0003	1,00	1,91	0,0003	1,00	1,43
0,0010	0,95	2,14	0,0010	1,00	1,67
0,0032	0,87	3,09	0,0032	0,97	2,14
0,0100	0,71	5,71	0,0100	0,89	3,93
0,0316	0,47	9,76	0,0316	0,74	5,95
0,1000	0,25	15,24	0,1000	0,53	8,57
0,3160	0,11	20,00	0,3160	0,33	12,38
1,0000	0,03	23,81	1,0000	0,15	16,91
3,1600	0,01	26,07	3,1600	0,06	21,30
10,0000	0,01	27,38	10,0000	0,03	24,05

Πίνακας 4.1: Καμπύλες G/Gmax και ξ συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης γ.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω καμπύλες χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση των αναλύσεων με το πρώτο τμήμα της δόνησης, προτού δηλαδή επέλθει δηλαδή η ρευστοποίηση. Για τις αναλύσεις υπό καθεστώς ρευστοποίησης, μετά τη χρονική στιγμή $t_{L,gr}$, επιλέγεται μία απομειωμένη τιμή της ταχύτητας διάδοσης V_s και κατ' επέκταση του μέτρου διάτμησης G_{max} η οποία διατηρείται σταθερή κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων της μεθόδου, ήτοι $G/G_{max} = 1$ ανεξαρτήτως του ποσοστού διατμητικής παραμόρφωσης. Οι καμπύλες μεταβολής του λόγου απόσβεσης ξ συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης γ, που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές τις αναλύσεις, είναι οι ίδιες με αυτές των αναλύσεων για μη ρευστοποιημένο στρώμα.

Σεισμική διέγερση. Η καταγραφή στον αναδυόμενο βράχο (outcropping bedrock) επιβάλλεται ως διέγερση βάσης στο βραχώδες υπόβαθρο, έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία στο λογισμικό EERA (deconvolution).

Επειδή η χρονική στιγμή t_{L,gr} προσδιορίζεται από την καταγραφή της επιτάχυνσης στην επιφάνεια του ρευστοποιημένου εδάφους, αντιστοιχεί σε τυχαίο σημείο στην χρονοϊστορία της επιτάχυνσης του αναδυόμενου υποβάθρου. Προκειμένου να μην διαταραχθεί το συχνοτικό περιεχόμενο των διεγέρσεων που θα προκύψουν από τη διαίρεση της χρονοϊστορίας στο τυχαίο αυτό σημείο, επιλέγεται το «κόψιμο» να γίνει στο πλησιέστερο σημείο στο οποίο η επιτάχυνση μηδενίζεται, κλείνει δηλαδή ένας κύκλος, πριν ή μετά τη χρονική στιγμή t_{L,gr} (η διορθωμένη τιμή συμβολίζεται με t_{L,gr}^{*}). Το παραπάνω αποτυπώνεται στο **Σχήμα 4.4** που ακολουθεί:

54



Σχήμα 4.4: Διόρθωση χρονικής στιγμής t_{L,gr} στη χρονοϊστορία της επιτάχυνσης του αναδυόμενου βραχώδους υποβάθρου για την ανάλυση με H = 10m, D_r = 40% & διέγερση B4s.

Στη συνέχεια -για το παράδειγμα του σχήματος- πραγματοποιούνται οι ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις «κόβοντας» τη χρονοϊστορία της επιτάχυνσης και στα δύο εναλλακτικά σημεία. Όπως φαίνεται από τις συγκρίσεις του **Σχήμα 4.5** ουσιαστικά δεν υπάρχει διαφορά και συνεπώς η διόρθωση εφαρμόζεται στο σύνολο των περιπτώσεων.



Σχήμα 4.5: Ελαστικά φάσματα απόκρισης λαμβάνοντας υπόψη την αρχική και τη διορθωμένη χρονική στιγμή t_{L,gr} για την ανάλυση με H = 10m, Dr = 40% & διέγερση B4s.

4.3 Τυπικά αποτελέσματα

Με βάση όσα παρουσιάστηκαν ανωτέρω σχετικά με τη μέθοδο της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης, πραγματοποιήθηκαν στη συνέχεια δύο αναλύσεις ΕΕRA για κάθε μία από τις 100 αριθμητικές αναλύσεις:

- Μία ισοδύναμη γραμμική ανάλυση για t ≤ t_{L,gr}* και τα αρχικά χαρακτηριστικά της αμμώδους στρώσης.
- II. Μία ισοδύναμη γραμμική ανάλυση για t ≥ t_{L,gr}* με τα απομειωμένα –λόγω ρευστοποίησης- χαρακτηριστικά της άμμου, δηλαδή με μειωμένη ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος V_{sliq}. Η ταχύτητα αυτή εκφράζεται ως ποσοστό της αρχικής ταχύτητας μη ρευστοποιημένου εδάφους (V_{sliq}/V_s) και επιλέχθηκε με βάση προγενέστερη εργασία του Ι.Tsiapas (2014), στην οποία είχαν πραγματοποιηθεί ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις σύμφωνα με τη μεθοδολογία των Miwa & Ikeda (2006) για το σύνολο της σεισμικής διέγερσης και για εφτά διαφορετικές τιμές του λόγου V_{sliq}/V_s [0,065 0,075 0,100 0,125 0,150 0,175 0,200]. Από σύγκριση των φασματικών τιμών που προέκυψαν με τις πραγματικές σε μεγάλες περιόδους, επιλέχθηκε για κάθε ανάλυση η τιμή του λόγου V_{sliq}/V_s για την οποία επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ταύτιση και η οποία χρησιμοποιήθηκε και στις παρούσες αναλύσεις.

Ακολούθως υπολογίστηκαν μέσω του λογισμικού ΕΕRΑ τα ελαστικά φάσματα των αναλύσεων Ι και ΙΙ στην επιφάνεια του εδάφους (για συντελεστή απόσβεσης 5%) καθώς και η περιβάλλουσα τους. Η σύγκριση με τις αναλύσεις του FLAC γίνονται ως ακολούθως:

- Συγκρίσεις απόλυτων φασμάτων πρόβλεψης σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία και των φασμάτων που έχουν προκύψει από τις πρωταρχικές αναλύσεις.
- Συγκρίσεις κανονικοποιημένων φασμάτων έτσι ώστε να διερευνηθούν οι τυχόν διαφοροποιήσεις που προκύπτουν.
- Συγκρίσεις σε διαγράμματα «1-1» των μέσων τιμών των προβλεπόμενων και των πραγματικών φασματικών επιταχύνσεων για συγκεκριμένα εύρη περιόδων. Τα εύρη αυτά επιλέχθηκαν ώστε να αντιστοιχούν στα διάφορα είδη κατασκευών και συγκεκριμένα:
 - T = 0 ÷ 0.15, που προσεγγιστικά αντιστοιχεί στην μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) και αφορά κατασκευές με 1 – 2 ορόφους,

- T = 0,15 ÷ 0.40, που αντιστοιχεί στην περιοχή σταθερών φασματικών επιταχύνσεων και μικρών περιόδων ενώ αφορά κατασκευές με 3 6 ορόφους,
- T = 0,40 ÷ 0.80, που αποτελεί την περιοχή μεσαίων περιόδων και σχετίζεται με κατασκευές 6 – 12 ορόφων, και τέλος
- T = 0,80 ÷ 1,60, που είναι η περιοχή μεγάλων περιόδων και έχει αντιστοιχία σε κατασκευές με πάνω από 12 ορόφους.

Ενδεικτικά στο **Σχήμα 4.6** παρουσιάζεται το σύνολο των συγκρίσεων μεταξύ του φάσματος πρόβλεψης της προτεινόμενης μεθοδολογίας και του φάσματος που έχει προκύψει από τις πρωταρχικές αναλύσεις FLAC για την περίπτωση αμμώδους στρώσης με πάχος 8 m και σχετικής πυκνότητας D_r = 60%. Οι συγκρίσεις για τις υπόλοιπες περιπτώσεις παρουσιάζονται στην ίδια μορφή στο Παράρτημα Α. Στο επόμενο **Σχήμα 4.7** φαίνονται οι ίδιες συγκρίσεις σε κανονικοποιημένη μορφή και τέλος στο **Σχήμα 4.8** οι συγκρίσεις των μέσων φασματικών τιμών για τα προαναφερθέντα εύρη.



Σχήμα 4.6: Σύγκριση προβλεπόμενων (με κόκκινο χρώμα) και πραγματικών (με μαύρο χρώμα) ελαστικών φασμάτων απόκρισης για το σύνολο των διεγέρσεων της περίπτωσης με Η = 8m & D_r = 60%.



Σχήμα 4.7: Σύγκριση προβλεπόμενων (με κόκκινο χρώμα) και πραγματικών (με μαύρο χρώμα) κανονικοποιημένων ελαστικών φασμάτων απόκρισης για το σύνολο των διεγέρσεων της περίπτωσης με Η = 8m & Dr = 60%.



Σχήμα 4.8: Σύγκριση μέσων φασματικών τιμών για το σύνολο των διεγέρσεων της περίπτωσης με H = 8m & D_r = 60%.

4.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συνολικά διαγράμματα σύγκρισης των μέσων φασματικών τιμών για τα επιλεγέντα εύρη περιόδων. Αρχικά στο **Σχήμα 4.9** φαίνονται όλες οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν χωρίς διάκριση ως προς τη σχετική πυκνότητα ή το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης. Στις μεγάλες περιόδους (T = 0,80 – 1,60 sec) παρατηρείται η καλύτερη σύγκλιση των φασματικών τιμών, οι οποίες συγκεντρώνονται χωρίς μεγάλη διασπορά κατά μήκος της ευθείας y = x. Η εικόνα είναι παρόμοια και στις μεσαίες περιόδους (T = 0.40 – 0.80 sec) με τη διαφορά ότι η διασπορά των δεδομένων είναι τώρα λίγο μεγαλύτερη.



Σχήμα 4.9: Σύγκριση μέσων φασματικών τιμών για το σύνολο των αναλύσεων.

Όσον αφορά τις περιοχές μικρών και πολύ μικρών περιόδων κυριαρχεί η συγκέντρωση των δεδομένων πάνω από την ευθεία y = x υποδηλώνοντας μια συστηματική απόκλιση της μεθόδου, η οποία όμως είναι προς την πλευρά της ασφαλείας. Υποεκτίμηση υπάρχει για μεμονωμένες μόνο περιπτώσεις κάτω από την διχοτόμο.

Στη συνέχεια προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της σχετικής πυκνότητας παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.10** το ίδιο διάγραμμα με διαφορετικό χρώμα για τις δύο τιμές των πυκνοτήτων, όπου δεν παρατηρείται κάποια συστηματική επίδραση αυτής της παραμέτρου στην ικανότητα πρόβλεψης της μεθόδου.



Σχήμα 4.10: Σύγκριση μέσων φασματικών τιμών για το σύνολο των αναλύσεων με διάκριση ως προς την σχετική πυκνότητα.

Παρόλα αυτά παρατηρείται ότι:

- στα εύρη περιόδων T = 0 ÷ 0.15 και T = 0.15 ÷ 0.40 sec φαίνεται να υπάρχει καλύτερη πρόβλεψη των φασματικών τιμών για σχετική πυκνότητα D_r = 60%,
- η υπερεκτίμηση των φασματικών επιταχύνσεων στα εύρη αυτά εμφανίζεται κατά βάση για σχετικές πυκνότητες D_r = 40%, των οποίων οι πραγματικές τιμές είναι ελαφρώς μικρότερες ενδεχομένως λόγω της πιο γρήγορης εκδήλωσης της ρευστοποίησης, ενώ
- τιμές υποεκτίμησης υπάρχουν και για τις δύο ομάδες αναλύσεων (D_r = 40%, 60%)
 γεγονός που υποδηλώνει την τυχαιότητα του φαινομένου.

Στο **Σχήμα 4.11** παρουσιάζονται και πάλι τα αποτελέσματα των 100 αναλύσεων, διαφοροποιημένα αυτή τη φορά ως προς τη σχετική πυκνότητα και το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης. Παρατηρείται εδώ ότι ενώ δεν υπάρχει συστηματική επίδραση του πάχους, τα σημεία υποεκτίμησης που προαναφέρθηκαν προέρχονται κυρίως από τις αναλύσεις μικρού πάχους και συγκεκριμένα με H = 2 & 4 m (στα επιμέρους σχήματα διακρίνονται με βούλες και σταυρούς στα εύρη περιόδων T = 0 ÷ 0.80 sec).

Στη συνέχεια πραγματοποιούνται οι αντίστοιχες συγκρίσεις για τα κανονικοποιημένα ως προς τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση φάσματα απόκρισης (**Σχήμα 4.12**). Σκοπός αυτής της διερεύνησης είναι να εξεταστεί κατά πόσο η υπερεκτίμηση που παρατηρείται στις μικρές περιόδους ακολουθεί τη μορφή του πραγματικού φάσματος. Πράγματι σε αυτά τα εύρη περιόδων οι τιμές συγκεντρώνονται γύρω από την ευθεία y = x, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα δύο φάσματα έχουν παρόμοιο σχήμα και η απόκλιση ως προς τις απόλυτες τιμές ενδέχεται να οφείλεται σε λανθασμένη εκτίμηση των εδαφικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις του πρώτου τμήματος της δόνησης πριν τη χρονική στιγμή t_{L,gr}. Η αύξηση της διασποράς στα εύρη μεγάλων περιόδων είναι αναμενόμενη, αφού τα απόλυτα φάσματα συνέπιπταν και τώρα διαιρούνται με διαφορετικές εν γένει τιμές του PGA.



Σχήμα 4.11: Σύγκριση μέσων φασματικών τιμών για το σύνολο των αναλύσεων με διάκριση ως προς την σχετική πυκνότητα & το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης.



Σχήμα 4.12: Σύγκριση μέσων κανονικοποιημένων φασματικών τιμών για το σύνολο των αναλύσεων με διάκριση ως προς την σχετική πυκνότητα του ρευστοποιήσιμου υλικού.

Όπως έχει ήδη εξηγηθεί στο Κεφάλαιο 3, οι 100 αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο FLAC διαχωρίζονται σε αξιόπιστες, ικανοποιητικές και μη – αξιόπιστες ως προς τον τρόπο με τον οποίο έγινε το φιλτράρισμα – «καθάρισμα» του αριθμητικού θορύβου. Στο **Σχήμα 4.13** φαίνεται και πάλι η σύγκριση των μέσων φασματικών τιμών με διαχωρισμό ως προς την αξιοπιστία της κάθε ανάλυσης.

Παρατηρείται ότι:

- Οι συγκρίσεις για τις αξιόπιστες και τις ικανοποιητικές αναλύσεις είναι αρκετά καλές και εντοπίζονται λίγες περιπτώσεις υποεκτίμησης κυρίως στα εύρη των μεγάλων περιόδων.
- Τα σημεία μεγάλης υποεκτίμησης (κυρίως από πάχη ρευστοποιήσιμης στρώσης Η =
 2 & 4 m) προέρχονται κυρίως από τις περιπτώσεις μη αξιόπιστων αναλύσεων.



Σχήμα 4.13: Σύγκριση μέσων φασματικών τιμών για το σύνολο των αναλύσεων με διάκριση ως προς την αξιοπιστία της ανάλυσης.

Το ανωτέρω συμπέρασμα υποδηλώνει ότι σημαντικό μέρος της παρατηρούμενης διασποράς σε μικρές περιόδους οφείλεται τελικώς στην ακρίβεια των αριθμητικών αναλύσεων FLAC και όχι στην προτεινόμενη απλοποιητική μέθοδο αυτή καθ' εαυτή. Επιπλέον σύμφωνα με τα παραπάνω είναι εύλογο να αποκλειστούν από την περαιτέρω διερεύνηση αναλύσεις που έχουν χαρακτηριστεί ως μη αξιόπιστες (6/50 για D_r = 40% και 10/50 για D_r = 60%).

4.4.1 Αναλύσεις για V_{s,liq}/V_{s,0} όπως προτείνονται από τους Miwa & Ikeda (2006)

Υπενθυμίζεται ότι η μέχρι τώρα εφαρμογή της μεθοδολογίας έγινε με χρήση του καταλληλότερου λόγου V_{s,liq}/V_{s,0} κατόπιν σύγκρισης των φασμάτων που προκύπτουν από διαφορετικές τιμές του λόγου με το πραγματικό φάσμα. Η σύγκριση αυτή γίνεται στα εύρη των μεγάλων περιόδων τα οποία άλλωστε επηρεάζονται κυρίως από το τμήμα της δόνησης μετά τη ρευστοποίηση.

Από τα αποτελέσματα της αρχικής αυτής εφαρμογής της μεθόδου συμπεραίνεται ότι αν γνωρίζουμε το λόγο V_{s,liq}/V_{s,0} η μέθοδος λειτουργεί ικανοποιητικά. Παρ' όλα αυτά κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας στην πράξη το πραγματικό φάσμα είναι ζητούμενο και όχι δεδομένο και ως εκ τούτου δεν μπορεί να γίνει η επιλογή του λόγου με αυτό τον τρόπο.

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου θα επαναληφθεί η εφαρμογή της μεθοδολογίας για τις 100 αναλύσεις χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά τον προτεινόμενο από τους Miwa & Ikeda (2006) λόγο V_{s,liq}/V_{s,0} (Πίνακας 4.2). Η σύγκριση των αρχικώς επιλεγμένων λόγων σε σχέση με τα προτεινόμενα εύρη φαίνεται στο **Σχήμα 4.14**.

Πίνακας 4.2: Προτεινόμενες τιμές του λόγου V_{S,liq}/V_{S,0} κατά Miwa & Ikeda (2006).

FS∟	0.3 - 0.6	0.6 - 0.9	0.9 - 1.0
Vs,liq/Vs	0.10 - 0.14	0.12 - 0.16	0.14 - 0.19



Σχήμα 4.14: Σύγκριση των αρχικά επιλεγμένων λόγων V_{s,liq}/V_{s0} με τα προτεινόμενα εύρη των Miwa & Ikeda (2006) και την επέκταση που προτάθηκε από τους Bouckovalas & Tsiapas για FS_L > 1.0.

Πιο συγκεκριμένα, για κάθε μία ανάλυση υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης καθ' ύψος της ρευστοποιήσιμης στρώσης έτσι όπως έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 3. Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση τιμή του συντελεστή για κάθε ανάλυση και λαμβάνεται:

- ο Για FS_L < 0.6 , $V_{s,liq}/V_{s,0} = 0.120$
- \circ $~\Gamma\iota\alpha~0.6$ <FSL <0.9 , V_s,Iiq/V_{s,0} = 0.140
- \circ Για 0.9 <FS_L <1.0 , V_s, liq/V_s = 0.165

Είναι εμφανές από το **Σχήμα 4.14** ότι οι περιπτώσεις αναλύσεων με σχετική πυκνότητα D_r = 40% έχουν βέλτιστους λόγους V_{s,liq}/V_{s,0} κάτω και από τα κατώτατα προτεινόμενα όρια για το εύρος των συντελεστών ασφαλείας μεταξύ 0.4 και 0.8. Η χρήση του μέσου προτεινόμενου λόγου V_{s,liq}/V_{s,0} για αυτές τις περιπτώσεις αναμένεται να αυξήσει την απόκλιση στις μεγάλες περιόδους οδηγώντας σε υπερεκτίμηση των φασματικών τιμών και ενδεχομένως να αυξήσει τη διασπορά των αποτελεσμάτων. Πράγματι όπως θα φανεί στη συνέχεια στο συνολικό **Σχήμα 4.16** επιβεβαιώνεται αυτή η υπόθεση.

Στο **Σχήμα 4.15** παρουσιάζονται ενδεικτικά τα φάσματα πρόβλεψης όπως προκύπτουν για την προκαταρκτική επιλογή του λόγου $V_{s,liq}/V_{s,0}$ και για την προτεινόμενη από τους Miwa & Ikeda (2006) για την περίπτωση αμμώδους στρώσης με σχετική πυκνότητα $D_r = 60\%$ και πάχος H = 8 m (σε αντιστοιχία με το **Σχήμα 4.6**).



Σχήμα 4.15: Ελαστικά φάσματα απόκρισης σύμφωνα με την προκαταρκτική επιλογή του λόγου V_{s,liq}/V_{s0} (κόκκινο χρώμα) και σύμωνα με τους προτεινόμενους λόγους από τους Miwa & Ikeda (μπλε χρώμα) για το σύνολο των διεγέρσεων της περίπτωσης με H = 8m & D_r = 60%.

Στο **Σχήμα 4.16** παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των μέσων φασματικών τιμών για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με τους νέους λόγους V_{s,liq}/V_{s,0} σε αντιπαραβολή με τις συγκρίσεις των αναλύσεων με τους αρχικά επιλεγμένους λόγους V_{s,liq}/V_{s,0} (γκρι κουκίδες).

Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές για τα εύρη περιόδων T = 0 – 0.15 και T = 0.15 – 0.40 sec, αφού τα εύρη αυτά επηρεάζονται από τις αναλύσεις του πρώτου τμήματος της δόνησης για t \leq t_{L,gr}. Οι διαφορές αρχίζουν να γίνονται εμφανείς στο εύρος T = 0.40 – 0.80 sec εμφανίζοντας μια ανοδική τάση. Πιο έντονες είναι οι διαφορές στις μεγάλες περιόδους όπου η σχετική πυκνότητα D_r = 40% παρουσιάζει την μεγαλύτερη υπερεκτίμηση. Κατά μέσο όρο η υπερεκτίμηση σε αυτό το εύρος και για τις δύο πυκνότητες είναι της τάξης του 20%.



Σχήμα 4.16: Σύγκριση μέσων φασματικών τιμών για το σύνολο των αξιόπιστων και ικανοποιητικών αναλύσεων με διάκριση ως προς την σχετική πυκνότητα για τους προτεινόμενους λόγους V_{s,liq}/V_{s,o} από τους Miwa & Ikeda (2006) και τους αρχικά επιλεγμένους λόγους.

4.5 Βαθμονόμηση Προτεινόμενης Μεθοδολογίας

Ο στόχος της βαθμονόμησης είναι να βελτιωθεί η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθοδολογίας στις μικρές περιόδους (T < 0,40 sec) όπου η μέση υπερεκτίμηση των αναλύσεων FLAC ανέρχεται σε 45% περίπου. Οι αιτίες αυτής της απόκλισης αναζητούνται σε δύο πιθανούς μηχανισμούς:

(α) Οι ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις ΕΕRΑ για το πρώτο σκέλος της διέγερσης έχουν πραγματοποιηθεί με βάση τις καμπύλες G/G_{max} – γ και ξ – γ των Vucetic & Dobry, οι οποίες δεν είναι κατ' ανάγκη ταυτόσημες με αυτές που προκύπτουν ισοδύναμα με το λογισμικό FLAC.

(β) Οι ανωτέρω αναλύσεις ΕΕRA έχουν επιπλέον πραγματοποιηθεί για μηδενική ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων (r_u = 0) ενώ είναι δεδομένο ότι στο τέλος αυτού του σκέλους έχουμε σημαντικές υπερπιέσεις πόρων (r_u = 0,8 – 1,0) και έναρξη της ρευστοποίησης.

Η βαθμονόμηση της μεθοδολογίας σε σχέση με τους δύο ανωτέρω μηχανισμούς θα πραγματοποιηθεί ανεξάρτητα, όπως περιγράφεται ακολούθως. Επιπλέον πραγματοποιείται για ένα μικρότερο δείγμα 20 αναλύσεων (2 αναλύσεις για κάθε πάχος και κάθε σχετική πυκνότητα - Πίνακας 4.3), το οποίο επιλέχθηκε έπειτα από παρατήρηση των μέσων φασματικών τιμών ούτως ώστε να καλύπτει το εύρος του συνόλου των δεδομένων.

Βάθος (m)	D _r = 40%	D _r = 60%	
2	B4w	B4w	
	B6w	B6w	
4	B4s	B4s	
	B1w	B1w	
6	A5w	A5w	
	B4w	B4w	
8	A6s	A6s	
	B4w	B4w	
10	B4s	B4s	
	B6s	B6s	

Πίνακας 4.3: Επιλεγείσες αναλύσεις για τη βαθμονόμηση της μεθοδολογίας.

4.5.1 Επίδραση καμπυλών G/G_{max} – γ και $\xi - \gamma$

Οι καμπύλες G/G_{max} – γ και ξ – γ που προκύπτουν από τις αναλύσεις FLAC (Πίνακας 4.4 - **Σχήμα 4.17** και **Σχήμα 4.18**) εισάγονται στο λογισμικό ΕΕRA για την αμμώδη στρώση και επαναλαμβάνονται οι αναλύσεις για το πρώτο τμήμα της δόνησης πριν το t_{L,gr}.

D _r = 40%			D _r = 60%		
γ (2%)	G/G _{max}	ξ (%)2	γ (2%)	G/G _{max}	ξ (%)2
0.0001	1.00	1.24	0.0001	1.00	1.23
0.0003	0.99	1.24	0.0003	0.99	1.23
0.001	0.97	2.54	0.001	0.96	2.54
0.003	0.90	4.15	0.003	0.89	4.17
0.01	0.74	7.64	0.01	0.74	7.67
0.03	0.55	12.67	0.03	0.55	12.66
0.1	0.34	20.63	0.1	0.34	19.89
0.3	0.18	36.53	0.3	0.17	35.32
1	0.06	50.36	1	0.06	44.19
3	0.02	53.17	3	0.03	48.42
10	0.01	62.07	10	0.01	56.20

Πίνακας 4.4: Καμπύλες G/G_{max} και ξ συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης γ από τις αναλύσεις FLAC.



Σχήμα 4.17: Καμπύλες μεταβολής του μέτρου διάτμησης G/G_{max} συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης γ.



Σχήμα 4.18: Καμπύλες μεταβολής του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση γ.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων ΕΕRΑ για τις ακριβείς καμπύλες που προκύπτουν για την άμμο από το λογισμικό FLAC σε σύγκριση με τις αρχικές εκτιμήσεις για τις καμπύλες Vucetic & Dobry παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.19** και στο **Σχήμα 4.20**.

Παρατηρούμε ότι οι διαφορές μεταξύ των δύο περιπτώσεων είναι πολύ μικρές για τις μικρές περιόδους (T = 0 ÷ 0.40 sec) έως ανύπαρκτες για τις μεγαλύτερες (T = 0.40 ÷ 1.60 sec). Συνεπώς η μεγαλύτερη ακρίβεια στην περιγραφή της ιξωδο-ελαστικής συμπεριφοράς της άμμου δεν προσδίδει την αντίστοιχη βελτίωση στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθοδολογίας στο εύρος μικρών περιόδων, όπου εντοπίζεται η υπερεκτίμηση των μέσων φασματικών τιμών.



Σχήμα 4.19: Σύγκριση μέσων φασματικών τιμών για τις ενδεικτικές αναλύσεις και περιόδους $T = 0 \div 0.15$ sec και $T = 0.15 \div 0.40$ sec.



Σχήμα 4.20: Σύγκριση μέσων φασματικών τιμών για τις ενδεικτικές αναλύσεις και περιόδους T = 0.40 ÷ 0.80sec και T = 0.80 ÷ 1.60sec.

4.5.2 Επίδραση υπερπίεσης πόρων

Στο **Σχήμα 4.21** φαίνεται το πρώτο τμήμα της δόνησης πριν την επιφανειακή εκδήλωση της ρευστοποίησης $t_{L,gr}$ και η ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων κατά τη διάρκεια αυτού του διαστήματος για μία ενδεικτική ανάλυση (H = 8m, D_r = 40% & διέγερση B6w). Είναι εμφανές ότι μέχρι το σημείο διαχωρισμού της δόνησης έχει ήδη αναπτυχθεί μεγάλο ποσοστό της μέγιστης τιμής της υπερπίεσης πόρων r_u και μάλιστα η αύξηση αυτή δεν είναι γραμμική. Οι δύο παραπάνω παρατηρήσεις συνηγορούν στην υιοθέτηση μιας μέσης τιμής για το r_u περί το 0.4 ÷ 0.6 προκειμένου να πραγματοποιηθούν εκ νέου οι αναλύσεις ΕΕRΑ για t ≤ $t_{L,gr}$.



Σχήμα 4.21: Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων κατά τη διάρκεια του πρώτου τμήματος της δόνησης για την ανάλυση με H = 8m, Dr = 40% & διέγερση B6w.

Βάσει της σχέσης (4.1) προκύπτει ότι:

$$\frac{V_s}{V_{s,0}} = \sqrt{\frac{G}{G_{\text{max}}}} = \sqrt[4]{\frac{p}{p_0}} = \sqrt[4]{\frac{p_0(1-r_u)}{p_0}} = \sqrt[4]{1-r_u}$$
(4.3)

- Για r_u = 0.4 είναι V_s /V_{s,0} = 0.88
- $\Gamma_{L} = 0.6 \epsilon i v \alpha V_s / V_{s,0} = 0.80$



Σχήμα 4.22: Σύγκριση μέσων φασματικών τιμών για τις ενδεικτικές αναλύσεις και περιόδους T = 0 ÷ 0.15sec και T = 0.15 ÷ 0.40sec.



Σχήμα 4.23: Σύγκριση μέσων φασματικών τιμών για τις ενδεικτικές αναλύσεις και περιόδους T = 0.40 ÷ 0.80sec και T = 0.80 ÷ 1.60sec.

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.22** και στο **Σχήμα 4.23** η τροποποίηση της μεθοδολογίας λαμβάνοντας υπόψη την ήδη αναπτυχθείσα υπερπίεση πόρων βελτιώνει επαρκώς την ακρίβεια πρόβλεψης της μεθόδου στις μικρές περιόδους, ιδιαίτερα μάλιστα για την τιμή r_u = 0.6. Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 4.24** και στο **Σχήμα 4.25** παρουσιάζονται τα τροποποιημένα αποτελέσματα σύμφωνα με την τιμή αυτή για το σύνολο των 84 αξιόπιστων και ικανοποιητικών αναλύσεων, όπου είναι εμφανής η μετατόπιση των δεδομένων για τις πολύ μικρές περιόδους προς την ευθεία y = x.



Σχήμα 4.24: Σύγκριση μέσων φασματικών τιμών για το σύνολο των αξιόπιστων και ικανοποιητικών αναλύσεων για τη βέλτιστη δυνατή πρόβλεψη της μεθοδολογίας σε περιόδους T = 0 – 0.15 και T = 0.15 – 0.40 sec.



Σχήμα 4.25: Σύγκριση μέσων φασματικών τιμών για το σύνολο των αξιόπιστων και ικανοποιητικών αναλύσεων για τη βέλτιστη δυνατή πρόβλεψη της μεθοδολογίας σε περιόδους T = 0.40 – 0.80 και T = 0.80 – 1.60 sec

Στη συνέχεια κρίνεται σκόπιμη για την τελική αξιολόγηση της μεθοδολογίας η παρουσίαση του σχετικού σφάλματος πρόβλεψης της. Στο **Σχήμα 4.26** φαίνεται με διαφορετικό χρώμα για κάθε σχετική πυκνότητα το σχετικό σφάλμα το οποίο ορίζεται ως εξής:

$$\frac{\operatorname{average}(\operatorname{Sa}_{\operatorname{PRED}}) - \operatorname{average}(\operatorname{Sa}_{\operatorname{REAL}})}{\operatorname{average}(\operatorname{Sa}_{\operatorname{REAL}})}\%$$
(4.4)

συναρτήσει της μέσης τιμής της πραγματικής φασματικής επιτάχυνσης.

Υπενθυμίζεται ότι οι αναλύσεις αφορούν τη βέλτιστη δυνατή πρόβλεψη που μπορεί να επιτευχθεί με την προτεινόμενη μεθοδολογία αφού έχουν πραγματοποιηθεί ως εξής:

- Η χρονική στιγμή διαχωρισμού της δόνησης t_{L,gr} είναι δεδομένη από τις χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης στην επιφάνεια του εδάφους.
- Έχουν χρησιμοποιηθεί οι βέλτιστοι λόγοι V_{s,liq}/V_{s,0} όπως περιγράφτηκε παραπάνω στο παρόν Κεφάλαιο.
- Για το πρώτο τμήμα της δόνησης έχει χρησιμοποιηθεί μειωμένη ταχύτητα διατμητικών κυμάτων αντίστοιχη προς r_u = 0.6.

Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει απόλυτη ταύτιση των προβλέψεων της μεθοδολογίας με τις ακριβείς προβλέψεις του λογισμικού FLAC. Συγκεκριμένα, οι προβλέψεις των φασματικών τιμών υπερεκτιμούν εν γένει τα αποτελέσματα του FLAC σε μικρές περιόδους (η μέση απόκλιση για περιόδους T < 0.80 sec είναι +13%). Αντίθετα, στο εύρος μεγάλων περιόδων (T > 0.80 sec) οι προβλέψεις είναι πολύ ικανοποιητικές με μέση απόκλιση \approx 0%. Όσον αφορά το σύνολο των αποτελεσμάτων, υπάρχει κατά μέσο όρο μία υπερεκτίμηση της τάξης του 10% ενώ η τυπική απόκλιση του σχετικού σφάλματος είναι ± 26%. Με γνωστά εκ των προτέρων τα t_{L,gr} και τους βέλτιστους λόγους V_{s,liq}/V_{s0}, οι αποκλίσεις που προκύπτουν υποδηλώνουν τις διαφορές μεταξύ των αναλύσεων FLAC και της ισοδύναμης γραμμικής μεθόδου καθώς και τις αβεβαιότητες της μεθοδολογίας. Το θετικό στοιχείο παρόλα αυτά, είναι ότι στο σύνολο των περιόδων άμεσου ενδιαφέροντος η μέση απόκλιση είναι προς την πλευρά της ασφαλείας.



Σχήμα 4.26: Σχετικό σφάλμα των μέσων φασματικών τιμών (Sa_{PRED} – Sa_{REAL})/Sa_{REAL} για την βέλτιστη δυνατή πρόβλεψη της μεθοδολογίας.

4.6 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία προκαταρκτική εφαρμογή της μεθόδου της επαλληλίας με χρήση του ήδη γνωστού (από τις αναλύσεις FLAC) χρόνου επιφανειακής εκδήλωσης της ρευστοποίησης t_{Lgr}. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται δύο φορές για το δεύτερο τμήμα της χρονοϊστορίας: την πρώτη για το βέλτιστο λόγο V_s, μα νο σύγκριση με το ήδη γνωστό πραγματικό φάσμα) και τη δεύτερη για τους προτεινόμενους λόγους από τους Miwa & lkeda (2006) συναρτήσει του συντελεστή ασφαλείας FS_L. Επιπλέον πραγματοποιείται βαθμονόμηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας προκειμένου να βελτιωθούν οι αποκλίσεις στις μικρές περιόδους, τροποποιώντας πρώτον τις καμπύλες G/G_{max} & ξ συναρτήσει του γ και δεύτερον τον λόγο V_{s, liq}/V_{s,0} λόγω της ανάπτυξης υπερπίεσης πόρων. Η σύγκριση των τελικών φασμάτων (από επαλληλία) με τα πραγματικά (από FLAC) οδηγεί στα ακόλουθα συμπεράσματα:

(α) Η απλοποιητική μέθοδος (κατά την εφαρμογή της με τους βέλτιστους λόγους $V_{s,liq}/V_{s0}$) υπερεκτιμά τις φασματικές επιταχύνσεις για μικρές περιόδους (T < 0.40sec) κατά 45%

περίπου (μέση απόκλιση) ενώ παρουσιάζει ικανοποιητική ακρίβεια σε μεγάλες περιόδους (T > 0.40sec).

(β) Η διασπορά των αρχικών συγκρίσεων δεν οφείλεται μόνο στις παραδοχές της απλοποιημένης μεθοδολογίας, αλλά και σε αβεβαιότητες σε ορισμένα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων με το λογισμικό FLAC (μη – αξιόπιστες αναλύσεις).

(γ) Δεν παρατηρείται κάποια συστηματική επίδραση της σχετικής πυκνότητας και του πάχους ρευστοποιήσιμης στρώσης στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

(δ) Όπως ήταν αναμενόμενο, η κατ' εκτίμηση επιλογή του λόγου V_{s,liq}/V_{s0} από τα διαγράμματα Miwa & Ikeda αυξάνει την απόκλιση για μεγάλες περιόδους T > 0,40 sec και ιδιαίτερα για τις μικρότερες σχετικές πυκνότητες, πάντα όμως υπέρ της ασφαλείας.

(ε) Η χρήση των ακριβέστερων καμπυλών G/G_{max} – γ & ξ – γ των αναλύσεων FLAC στις αναλύσεις EERA έναντι αυτών που προτείνονται από τους Vucetic & Dobry δεν επιφέρει ουσιαστική βελτίωση στις μικρές περιόδους.

(στ) Η χρήση απομειωμένου λόγου V_s/V_{s0} λόγω της ανάπτυξης σημαντικής υπερπίεσης πόρων πριν τη χρονική στιγμή $t_{L,gr}$ ($r_u \approx 0.6$) βελτιώνει επαρκώς την ακρίβεια των φασματικών τιμών στις μικρές περιόδους (η υπερεκτίμηση μειώνεται από 45% σε 13%) και προτείνεται η υιοθέτηση του στην εφαρμογή της μεθοδολογίας.

κεφάλαιο 5

Πρόβλεψη του χρόνου επιφανειακής εκδήλωσης της ρευστοποίησης t_{L,gr}

5.1 Γενικά

Όπως έχει γίνει ήδη σαφές, η χρονική στιγμή που ξεκινούν να γίνονται εμφανή τα αποτελέσματα της ρευστοποίησης στην επιφάνεια του εδάφους αποτελεί το πλέον καθοριστικό ίσως στοιχείο της μεθόδου της επαλληλίας για τον προσδιορισμό του ελαστικού φάσματος σε έναν εν δυνάμει ρευστοποιήσιμο εδαφικό σχηματισμό. Έχοντας ως δεδομένα τα γεωτεχνικά του χαρακτηριστικά (δοκιμές SPT ή CPT) καθώς και ένα σεισμικό σενάριο σχεδιασμού είναι δυνατός ο υπολογισμός της κατανομής του συντελεστή ασφαλείας με το βάθος FS_L(z) και εν συνεχεία με κατάλληλους μετασχηματισμούς -οι οποίοι περιγράφονται παρακάτω- της κατανομής της χρονικής έναρξης της ρευστοποίησης με το βάθος t_L(z) στην υποκείμενη ρευστοποιήσιμη στρώση. Ωστόσο η συσχέτιση των t_L(z) με τη χρονική στιγμή t_{Lgr} της επιφανειακής εκδήλωσης δεν είναι γνωστή ούτε προφανής αφού η τελευταία ενσωματώνει την απόκριση ολόκληρου του εδαφικού συστήματος. Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται ο προσδιορισμός μιας μονοσήμαντης συσχέτισης μεταξύ αυτών των χρονικών μεγεθών, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα των 100 αριθμητικών αναλύσεων ρευστοποίησης με τον κώδικα Πεπερασμένων Διαφορών FLAC στις οποίες έχει γίνει αναλυτική αναφορά σε προηγούμενο κεφάλαιο.

5.2 Χρόνος ρευστοποίησης t_L εδαφικής στρώσης υπό αρμονική διέγερση

Στην περίπτωση μιας μεμονωμένης ρευστοποιήσιμης εδαφικής στρώσης η οποία υποβάλλεται σε αρμονική διέγερση στη βάση της, ο χρόνος έναρξης της ρευστοποίησης προσδιορίζεται άμεσα ως το γινόμενο των κύκλων που απαιτούνται για να επέλθει η ρευστοποίηση, Ν_L -υπό σταθερή και ομοιόμορφη τάση CSR- με την περίοδο της διέγερσης, Τ_{exc}, ήτοι:
$$t_{L} = N_{L} \cdot T_{exc} \tag{5.1}$$

Επιπροσθέτως για τον συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης ισχύει (Κεφάλαιο 3):

$$FS_{L} = \frac{CSR}{CRR} = \left(\frac{N_{L}}{N_{EQ}}\right)^{b}$$
(5.2)

Επιτυγχάνεται έτσι η συσχέτιση του χρόνου ρευστοποίησης (t_L) με τον συντελεστή ασφαλείας (FS_L) μετασχηματίζοντας τη σχέση (5.1) ως εξής:

$$t_{L} = T_{exc} \cdot N_{EQ} \cdot FS_{L}^{1/b}$$
(5.3)

5.3 Χρόνος ρευστοποίησης t_L εδαφικής στρώσης υπό πραγματική διέγερση

Για την περίπτωση πραγματικών διεγέρσεων υπενθυμίζεται εδώ ότι είναι προσεγγιστικά δυνατή η μετατροπή της ανομοιόμορφης χρονοϊστορίας σε ισοδύναμη αρμονική με ομοιόμορφο «ενεργό» πλάτος a_{eff} και σταθερή περίοδο T_{exc}, η οποία αντιστοιχεί σε συνολικό αριθμό κύκλων N_{EQ} (Κεφάλαιο 3), όπου:

$$a_{eff} = \left[\left(M_{w} - 1 \right) / 10 \right] a_{max}$$
(5.4)

$$N_{EQ} = \frac{\pi^2 \int_{t=0}^{NT} |v(t)| dt}{a_{eff} T_{exc}^2}$$
(5.5)

με v(t) είναι η χρονοϊστορία της ταχύτητας της διέγερσης, ενώ ως θεμελιώδης περίοδος λαμβάνεται η μέση περίοδος του τμήματος του φάσματος επιταχύνσεων για το οποίο ισχύει Sa > 2.5PGA.

Είναι δυνατό, λοιπόν, με χρήση των παραπάνω εξισώσεων (5.3) - (5.5) να προσδιοριστεί η κατανομή του t_L με το βάθος για ένα δεδομένο εδαφικό προφίλ και μία τυχούσα – ανομοιόμορφη σεισμική διέγερση για την οποία έχει γίνει έλεγχος ρευστοποίησης και έχουν υπολογιστεί οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας FS_L. Αυτό που απομένει είναι να βρεθεί η συσχέτιση του $t_L(z)$ με τον ζητούμενο χρόνο επιφανειακής εκδήλωσης της ρευστοποίησης $t_{L,gr}$, έτσι ώστε να ανοίξει ο δρόμος για την εφαρμογή της μεθόδου της επαλληλίας.

5.4 Διερεύνηση της σχέσης $[t_{L}(z) - t_{L,gr}]$ μέσω αριθμητικών αναλύσεων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή του κεφαλαίου, η εξαγωγή του κριτηρίου για τον προσδιορισμό της χρονικής στιγμής $t_{L,gr}$, όταν είναι γνωστή η κατανομή του συντελεστή ασφαλείας FS_L και κατ' επέκταση του χρόνου ρευστοποίησης t_L , έχει βασιστεί σε ένα δείγμα 100 αριθμητικών αναλύσεων ρευστοποίησης στο FLAC. Επιγραμματικά, υπενθυμίζεται ότι οι αναλύσεις αυτές διαφοροποιούνται ως προς την σχετική πυκνότητα (D_r = 40%, 60%) και το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης (H = 2, 4, 6, 8, 10 m) ενώ για περισσότερα στοιχεία μπορεί κανείς να ανατρέξει στο Κεφάλαιο 3. Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η πορεία της επεξεργασίας που ακολουθήθηκε και τα αποτελέσματα της συσχέτισης που προέκυψαν.

5.4.1 Υπολογισμός της κατανομής του χρόνου $t_{L}(z)$ με το βάθος.

Για όλα τα εδαφικά στοιχεία (πάχους 0.50 m) της αμμώδους στρώσης στα οποία έχει επέλθει ρευστοποίηση κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, η χρονική στιγμή $t_{\rm L}$ είναι γνωστή (λαμβάνεται ως η χρονική στιγμή για την οποία η υπερπίεση πόρων $r_{\rm u}$ εξισώνεται με τη μονάδα για πρώτη φορά). Υπάρχουν όμως και εδαφικά στοιχεία τα οποία, ενώ έχει αναπτυχθεί σημαντική υπερπίεση πόρων, δεν έχουν ρευστοποιηθεί (0 < $r_{\rm u,max}$ < 1.0) και παρουσιάζουν συντελεστή ασφαλείας FS_L > 1.

Για τα στοιχεία αυτά εφαρμόζεται η ακόλουθη μεθοδολογία για να εκτιμηθεί ο απαιτούμενος προς ρευστοποίηση αριθμός κύκλων N_L και εν συνεχεία η χρονική στιγμή t_L. Αρχικά, με χρήση της εξίσωσης (3.36) υπολογίζεται ένας ισοδύναμος αριθμός κύκλων N(t) για κάθε χρονική στιγμή της διέγερσης που επιβάλλεται στη βάση της εδαφικής στήλης και κατασκευάζεται το διάγραμμα N – t (**Σχήμα 5.1**) ενώ προσδιορίζεται και ο συνολικός ισοδύναμος αριθμός κύκλων N_{EQ}. Στη συνέχεια μέσω της σχέσης (5.6) υπολογίζεται ο απαιτούμενος αριθμός κύκλων N_L που θα προκαλούσε ρευστοποίηση και θεωρώντας περίπου σταθερή κλίση με το χρόνο (αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση – **Σχήμα 5.2**) υπολογίζεται η χρονική στιγμή t_L μέσω της σχέσης (5.7).

$$N_{L} = N_{EQ} \cdot FS_{L}^{(-1/b)}$$
(5.6)

$$t_{L} = \frac{t(r_{u,\max})}{N_{EQ}} \cdot N_{L}$$
(5.7)



Σχήμα 5.1: Χρονοϊστορία ταχύτητας και ισοδύναμος αριθμός κύκλων N(t) συναρτήσει του χρόνου για την ανάλυση με D_r = 40%, H = 10m και διέγερση B6w.



Σχήμα 5.2: Παράδειγμα εκτίμησης του χρόνου ρευστοποίσης σε εδαφικό στοιχείο με $FS_L > 1$ για την ανάλυση με $D_r = 40\%$, H = 10m και διέγερση B6w.



Σχήμα 5.3: Κατανομή του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης (FS_L) με το βάθος για την ομάδα αναλύσεων με H = 10m και D_r = 40%.



Σχήμα 5.4: Κατανομή της χρονικής στιγμής της ρεσυτοποίησης $t_{L}(z)$ με το βάθος για την ομάδα αναλύσεων με H = 10m και D_r = 40%.

Τελικά, ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία προκύπτει η κατανομή του t_L καθ' ύψος της ρευστοποιήσιμης στρώσης για κάθε μία από τις 100 αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί. Ενδεικτικά, στα **Σχήματα 5.3 και 5.4** παρουσιάζονται οι κατανομές με το βάθος του δείκτη ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L και του χρόνου ρευστοποίησης t_L αντίστοιχα, για την ομάδα αναλύσεων με πάχος εδαφικής στρώσης 10 m και σχετική πυκνότητα 40% (10 επιβαλλόμενες σεισμικές διεγέρσεις).

5.4.2 Συγκρίσεις

Εν συνεχεία, γίνεται μία διερεύνηση ώστε να προσδιοριστεί η συσχέτιση του μετρημένου – πραγματικού $t_{L,gr}$ του συστήματος με το t_L των εδαφικών στοιχείων καθ' ύψος της στήλης. Στο πρώτο στάδιο της διερεύνησης προσδιορίστηκαν για κάθε ανάλυση τρία μεγέθη:

- η μέση τιμή των t_L καθ' ύψος της στήλης για όλα τα στοιχεία τα οποία έχουν συντελεστή ασφαλείας FS_L < 1.2 (average t_L),
- η μέση τιμή μειωμένη κατά την τυπική απόκλιση (average –SD t_L) και
- η ελάχιστη τιμή τους (min t_L)

και έγινε σύγκριση του t_{L,gr} με κάθε μία από τις παραπάνω τιμές.

Όπως διαπιστώνεται αρχικά από τα συνολικά διαγράμματα και των 100 περιπτώσεων (**Σχήματα 5.5 - 5.7**) ικανοποιητική συσχέτιση παρατηρείται για την πρώτη και την τρίτη περίπτωση. Για την περίπτωση της μέσης τιμής μειωμένης κατά μία τυπική απόκλιση η διασπορά των δεδομένων είναι σημαντική και δεν προκύπτει κάποια αξιόπιστη συσχέτιση, γι' αυτό άλλωστε δεν προτείνεται κάποια εξίσωση. Όσον αφορά τη μέση καθ' ύψος τιμή του χρόνου ρευστοποίησης ικανοποιητική συσχέτιση με τον χρόνο επιφανειακής εκδήλωσης προκύπτει για εξίσωση δύναμης της μορφής:

$$t_{l,ar} = 0,54 \cdot average(t_l)^{0,80}$$
(5.8)

Ενώ η βέλτιστη εικόνα παρουσιάζεται για την ελάχιστη τιμή του t_L , με μία γραμμική συσχέτιση της μορφής:

$$t_{l,qr} = 0.84 \cdot \min(t_l) \tag{5.9}$$

να προσεγγίζει ικανοποιητικά τα δεδομένα.

Σημειώνεται ότι στην πρώτη και την τελευταία περίπτωση –όπου υφίσταται συσχέτιση των δεδομένων- εκτός από την καλύτερη δυνατή καμπύλη (συνεχής γραμμή), η οποία προσδιορίζεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, προσδιορίζεται και μία δεύτερη καμπύλη (διακεκομμένη γραμμή) έτσι ώστε να αφήνει πάνω από αυτή το 10% περίπου των παρατηρήσεων. Η δεύτερη αυτή προσέγγιση επιχειρείται ώστε να αποτελέσει ένα συντηρητικό άνω όριο για την εκτίμηση του t_{Lgr} και κατ' επέκταση για την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση καθώς και τις φασματικές επιταχύνσεις στις μικρές περιόδους.



Σχήμα 5.5: Σύγκριση t_{L,gr} - μέσης τιμής του t_L για το σύνολο των αναλύσεων (Η = 2, 4, 6, 8, 10 m & D_r = 40, 60%).



Σχήμα 5.6: Σύγκριση t_{L,gr} - μέσης τιμής μείον μία τυπική απόκλιση του t_L για το σύνολο των αναλύσεων (H = 2, 4, 6, 8, 10 m & D_r = 40, 60%).



Σχήμα 5.7: Σύγκριση t_{L,gr} - ελάχιστης τιμής του t_L για το σύνολο των αναλύσεων (H = 2, 4, 6, 8, 10 m & D_r = 40, 60%).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται και πάλι τα προηγούμενα διαγράμματα με χρήση διαφορετικών συμβόλων και χρωμάτων για αναλύσεις που αφορούν διαφορετικό ύψος ρευστοποιήσιμης στρώσης και διαφορετική σχετική πυκνότητα του υλικού προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπάρχει συστηματική επίδραση των παραμέτρων αυτών (**Σχήματα 5.8 - 5.10**).



Σχήμα 5.8: Σύγκριση t_{L,gr}- **μέσης τιμής** του t_L για το σύνολο των αναλύσεων (Η = 2, 4, 6, 8, 10m & D_r = 40, 60%).



Σχήμα 5.9: Σύγκριση t_{L,gr} - μέσης τιμής μείον μία τυπική απόκλιση του t_L για το σύνολο των αναλύσεων (H = 2, 4, 6, 8, 10m & D_r = 40, 60%).



Σχήμα 5.10: Σύγκριση t_{L,gr} - **ελάχιστης τιμής** του t_L για το σύνολο των αναλύσεων (Η = 2, 4, 6, 8, 10m & D_r = 40, 60%).

Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει συστηματική επίδραση του πάχους της ρευστοποιήσιμης στρώσης ούτε της σχετικής πυκνότητας.

Εν συνεχεία, λόγω μικρότερης διασποράς, επιλέγεται να διερευνηθεί περαιτέρω η σχέση μεταξύ του $t_{L,gr}$ και της ελάχιστης τιμής $t_{L,min}$. Η τιμή αυτή αναφέρεται στη ρευστοποίηση ενός μεμονωμένου εδαφικού στοιχείου του καννάβου της αριθμητικής ανάλυσης με πάχος μόλις 0.5 m, ενώ οι μελλοντικά διαθέσιμες δοκιμές SPT κατά την πρακτική εφαρμογή της μεθοδολογίας πραγματοποιούνται ανά 1.5 – 2.0 m. Για το λόγο αυτό υπολογίστηκαν μέσοι όροι τιμών t_L έτσι ώστε να αντιστοιχούν σε πάχος στρώσης 1.5 m καθ΄ύψος της στήλης (κυλιόμενος μέσος όρος τριών (3) σημείων). Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5.11** προσδιορίστηκαν με αυτό τον τρόπο νέες κατανομές του t_L με το βάθος, οι οποίες σε σχέση με την αρχική είναι πιο εξομαλυμένες και αποφεύγουν έτσι την τοπική εμφάνιση μίας σημαντικά μειωμένης (ως προς τις υπόλοιπες) ελάχιστης τιμής.



Σχήμα 5.11: Παράδειγμα κατανομής t∟με το βάϑος πριν και μετά την εφαρμογή του τρεχούμενου μέσου όρου 3 σημείων για την ανάλυση με D_r = 40%, H = 10m και διέγερση B6w.

Στη συνέχεια βρέθηκαν οι νέες τιμές $t_{L,min}$ για τις κατανομές του κυλιόμενου μέσου και επιχειρήθηκε εκ νέου η σύγκριση με το $t_{L,gr}$ (Σχήμα 5.12). Εξακολουθεί να υπάρχει ικανοποιητική συσχέτιση των δύο μεγεθών με μία μικρή αύξηση της διασποράς των αποτελεσμάτων που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το ακριβέστερο κριτήριο για την πρόβλεψη του $t_{L,gr}$ -όσον αφορά τουλάχιστον τις συγκεκριμένες αριθμητικές αναλύσεις-είναι αυτό που προκύπτει από την ελάχιστη τιμή της αρχικής κατανομής (πάχος στοιχείου 0.5 m). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η κατανομή του συντελεστή ασφαλείας με το βάθος (και κατά συνέπεια του t_L) είναι αρκετά ομοιόμορφη στις περιπτώσεις αυτές.



Σχήμα 5.12: Σύγκριση t_{L,gr} - ελάχιστης τιμής του t_L για το σύνολο των αναλύσεων (Η = 2, 4, 6, 8, 10m & D_r = 40, 60%).

Ενδέχεται όμως να υπάρχουν περιπτώσεις στην πράξη στις οποίες καθ' 'υψος της ρευστοποιήσιμης στρώσης μεσολαβεί κάποια εδαφική στρώση με πολύ υποβαθμισμένα χαρακτηριστικά. Ως εκ τούτου πιθανόν να προκύπτει μια ανομοιόμορφη κατανομή του αριθμού κτύπων N_{SPT} (αν πραγματοποιηθεί κρούση στο συγκεκριμένο βάθος) και επομένως μια ανομοιόμορφη κατανομή του FS_L και του t_L.Προκύπτει επομένως ένας προβληματισμός ως προς το αν θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην εφαρμογή της μεθοδολογίας τέτοια τοπικά ελάχιστα με τιμές σημαντικά μειωμένες ως προς τις υπόλοιπες τιμές καθ' ύψος. Η παρούσα εργασία δεν καταπιάνεται με το συγκεκριμένο πρόβλημα αλλά προτείνει την περαιτέρω διερέυνηση του μέσω της πραγματοποίησης αριθμητικών αναλύσεων σε εδαφικές στρώσεις όπου μεμονωμένα στοιχεία θα έχουν πολύ μικρό FS_L. Πιθανολογείται ότι στις περιπτώσεις αυτές θα πρέπει είτε να αποκλείονται οι ακραίες τιμές του συντελεστή ασφαλείας είτε να εφαρμόζεται η λογική του κυλιόμενου μέσου όρου.

5.4.3 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων τη στιγμή της επιφανειακής εκδήλωσης της ρευστοποίησης

Τη χρονική στιγμή της επιφανειακής εκδήλωσης της ρευστοποίησης t = t_{L,gr} εξετάστηκε η τιμή του λόγου υπερπίεσης πόρων r_u καθ' ύψος της στήλης. Για το συγκεκριμένο «στιγμιότυπο» της κάθε ανάλυσης βρέθηκαν οι ελάχιστες, οι μέσες και οι μέγιστες τιμές της κατανομής αυτής και στη συνέχεια έγινε σύγκριση με την τιμή του r_u που έχει αναπτυχθεί στο βάθος z όπου εμφανίστηκε η ελάχιστη τιμή του t_L (και η οποία συμβολίζεται με r_u(z_{tLmin})). Ενδεικτικά παρουσιάζονται για την ανάλυση με D_r = 40%, H = 10m και διέγερση B6w η κατανομή του r_u και οι χαρακτηριστικές του τιμές στο **Σχήμα 5.13**. Οι συγκρίσεις για το σύνολο των αναλύσεων μεταξύ της μέγιστης τιμής r_{u,max} και της μέσης τιμής r_{u,av} με την τιμή r_u(z_{tLmin}) παρουσιάζονται στη συνέχεια σε διαγράμματα 1-1 στο **Σχήμα 5.14** και στο **Σχήμα 5.15** από τα οποία φαίνεται ότι r_{u,max} ≈ r_u(z_{tLmin}). Επιπροσθέτως, στα τελευταία σχήματα με γκρι διαγράμμιση φαίνεται το εύρος του μέγιστου και του μέσου r_u αντίστοιχα (μέση τιμή ± 2*τυπική αποκλιση).



Σχήμα 5.13: Κατανομή της τιμής της υπερπίεσης πόρων r_u κατά την χρονική στιγμή της επιφανειακής εκδήλωσης της ρευστοποίησης για την ανάλυση με D_r = 40%, Η = 10m και διέγερση B6w.



Σχήμα 5.14: Σύγκριση του r_u(z_{tLmin}) με το r_{u,max} της εδαφικης στρώσης.



Σχήμα 5.15: Σύγκριση του r_u(ztLmin) με το r_{u,average} της εδαφικης στρώσης.

Επιπροσθέτως, από τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνεται ότι η ρευστοποίηση εκδηλώνεται στην επιφάνεια του εδάφους όταν (εύρη μ ± 2·σ για κάθε σχετική πυκνότητα χωριστά):

• Στο στρώμα που ρευστοποιείται πρώτο :

 $r_{\rm u}$ = 0.62 - 0.93 για $D_{\rm r}$ = 40% και $r_{\rm u}$ = 0.43 - 0.90 για $D_{\rm r}$ = 60%

- $r_{u,max} = 0.63 0.94 \gamma \iota \alpha D_r = 40\% \kappa \alpha \iota r_{u,max} = 0.44 0.92 \gamma \iota \alpha D_r = 60\%$
- $r_{u,av} = = 0.51 0.80$ yia $D_r = 40\%$ kai $r_{u,av} = 0.42 0.72$ yia $D_r = 60\%$

5.5 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάστηκε η σχέση μεταξύ του χρόνου ρευστοποίησης t_L συναρτήσει του βάθους και του χρόνου επιφανειακής εκδήλωσης της ρευστοποίησης t_{L,gr}. Για το σκοπό αυτό αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από αριθμητικές αναλύσεις εδαφικής στήλης με παραμέτρους τη σχετική πυκνότητα και το πάχος της ρευστοποιήσιμης στρώσης και τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:

(α) Τον ικανοποιητικότερο βαθμό συσχέτισης και επομένως τη μικρότερη διασπορά εμφανίζει η γραμμική συσχέτιση με την ελάχιστη τιμή t_{L,min}.

(β) Προτείνεται ως βέλτιστο κριτήριο πρόβλεψης το εξής:

• $t_{L,gr} = 0.84 \cdot t_{L,min}$

(γ) Ως συντηρητικό κριτήριο (άνω όριο – 10% των περιπτώσεων) προτείνεται:

• $t_{L,gr} = 0.95 \cdot t_{L,min}$

(δ) Η ρευστοποίηση εκδηλώνεται στην επιφάνεια του εδάφους όταν το στρώμα που ρευστοποιείται πρώτο παρουσιάζει $r_u ≈ 0.60 - 0.90$ για $D_r = 40\%$ και $r_u = 0.45 - 0.90$ για $D_r = 60\%$.

κεφάλαιο 6

Τελική αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας

6.1 Γενικά

Στο τελευταίο αυτό κεφάλαιο της παρούσας εργασίας εφαρμόζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία της «επαλληλίας» ("superposition methodology") για το σύνολο των 100 αναλύσεων FLAC λαμβάνοντας υπόψη όλες τις τροποποιήσεις που προέκυψαν κατά τη βαθμονόμηση της μεθόδου. Με τον τρόπο αυτό θα γίνει η τελική – συνολική αποτίμηση της ακρίβειας της εν λόγω μεθοδολογίας, με το σύνολο των παραδοχών τις οποίες πρέπει να κάνει ο Μελετητής Μηχανικός κατά την εφαρμογή της στην πράξη. Προτού παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των ισοδύναμων γραμμικών αναλύσεων και των αντίστοιχων συγκρίσεων κρίνεται χρήσιμο να συγκεντρωθούν λεπτομερώς τα βήματα της μεθόδου ώστε να αποτελέσουν ένα συνοπτικό «εγχειρίδιο» για τον μελλοντικό χρήστη.

6.2 Βήματα προτεινόμενης μεθοδολογίας

1° βήμα: Επιλογή δόνησης σχεδιασμού

Επιλέγεται κάποιο επιταχυνσιογράφημα σχεδιασμού στο αναδυόμενο σεισμικό υπόβαθρο, σύμφωνα με τη σεισμικότητα της περιοχής και τους εκάστοτε Αντισεισμικούς Κανονισμούς που εφαρμόζονται.

2° βήμα: Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L.

Αξιοποιούνται τα αποτελέσματα επί τόπου γεωτεχνικών δοκιμών προκειμένου να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά του εδαφικού προφίλ στην περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα, απαιτούνται αποτελέσματα από Δοκιμές Πρότυπης Διείσδυσης (SPT) ή Στατικής Πενετρομέτρησης (CPT) ώστε ακολουθώντας τη μεθοδολογία των Youd et al. (2001) να υπολογιστεί ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L. Σύμφωνα με την ψευδοστατική αυτή μεθοδολογία ο συντελεστής ασφαλείας FS_L προκύπτει από τον λόγο του συντελεστή αντίστασης σε ρευστοποίηση (CRR) προς το συντελεστή σεισμικών δράσεων (CSR):

$$FS_{L} = \frac{CRR}{CSR}$$
(6.1)

Ο συντελεστής σεισμικών δράσεων CSR ορίζεται ως ο κανονικοποιημένος λόγος της αναπτυσσόμενης ανακυκλικής διατμητικής τάσης τ_d προς την αρχική ενεργό τάση στερεοποίησης σ'_{v0} και υπολογίζεται προσεγγιστικά από την ακόλουθη σχέση, η οποία έχει προταθεί από τους Seed and Idriss (1971) με τη βασική υπόθεση ότι η εδαφική στήλη συμπεριφέρεται ως στερεό σώμα:

$$CSR = \frac{\tau_d}{\sigma'_{\nu 0}} = \frac{0.65 \cdot \alpha_{\max} \cdot \sigma_{\nu 0} \cdot r_d}{g \cdot \sigma'_{\nu 0}}$$
(6.2)

όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, α_{max} η μέγιστη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση στην επιφάνεια του μη-ρευστοποιημένου πεδίου, σ_{v0} η ολική κατακόρυφη τάση και r_d εμπειρικός διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τη μείωση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης με το βάθος και δίνεται από τη σχέση (Liao and Whitman 1986, NCEER 1998):

$$r_{d} = \begin{cases} 1 - 0.00765 \cdot z, & z \le 9.15m \\ 1.174 - 0.0267 \cdot z, & 9.15 \le z \le 23m \end{cases}$$
(6.3)

Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι δύσκολο να προταθεί μία ενιαία σχέση για τον διορθωτικό συντελεστή r_d λόγω της ποικιλίας των εδαφών και των αυξημένων αποκλίσεων σε μεγάλα βάθη. Παρά ταύτα η παραπάνω σχέση δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για συνήθεις εφαρμογές μηχανικού. Τέλος, επειδή η εδαφική σεισμική ταλάντωση περιλαμβάνει συνήθως πολλούς κύκλους φόρτισης με διαφορετικά πλάτη και συχνότητες, αντί της κορυφαίας τιμής της οριζόντιας επιτάχυνσης χρησιμοποιείται μία «ενεργός» ή «δρώσα» τιμή της, ίση με το 65% της μέγιστης επιφανειακής.

Αντίστοιχα ο συντελεστής αντίστασης σε ρευστοποίηση CRR ορίζεται ως ο κανονικοποιημένος λόγος της ελάχιστης ανακυκλικής διατμητικής τάσης τ_d, η οποία απαιτείται ώστε να επέλθει ρευστοποίηση κατά τη διάρκεια σεισμού μεγέθους M_w προς την αρχική ενεργό τάση στερεοποίησης σ'_{v0}:

$$CRR_{M_{w}} = \left(\frac{\tau_{d}}{\sigma'_{v0}}\right)_{M_{w}} = MSF\left(\frac{\tau_{d}}{\sigma'_{v0}}\right)_{M_{w}=7.5}$$
(6.4)

όπου $(\tau_d/\sigma'_{vo})_{Mw=7.5}$ είναι ο συντελεστής αντίστασης σε ρευστοποίηση για σεισμό μεγέθους $M_w=7.5$ ο οποίος αντιστοιχεί σε σεισμό 15 ισοδύναμων ομοιόμορφων κύκλων φόρτισης N_{EQ} (οι αντιστοιχίες μεταξύ M_w και N_{EQ} παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6.1**).

Μέγεθος σεισμικής δόνησης Μ _ʷ	Αριθμός ισοδύναμων ομοιόμορφων κύκλων Ν⊧α
5 1/4	2÷3
6	5÷6
6 3/4	10
7 1/2	15
8 1/2	26

Πίνακας 6.1: Αντιστοιχία μεγέθους σεισμού με αριθμό ισοδύναμων ομοιόμορφων κύκλων φόρτισης.

Ο MSF (Magnitude Scaling Factor) είναι διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη το μέγεθος του σεισμού και συγκεκριμένα χρησιμοποιείται για την προσαρμογή της βασικής καμπύλης [CRR - (N₁)₆₀] σε μεγέθη σεισμού μικρότερα ή μεγαλύτερα από 7.5. Για την αναλυτική έκφραση του MSF έχουν προταθεί σχέσεις από διάφορους ερευνητές, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.1** και παρατίθεται αυτή του Idriss (1995) η οποία αποτελεί και το κάτω όριο του προτεινόμενου από το NCEER Workshop (1998) εύρους:

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M_{W}^{2.56}}$$
(6.5)

Σημειώνεται ότι η παραπάνω σχέση έχει προέλθει από καμπύλες ρευστοποίησης της μορφής CSR = a N_L^{-b} με συντελεστή b = 0.55.



Σχήμα 6.1: Συντελεστές MSF συναρτήσει του μεγέθους σεισμού M_w από διάφορους ερευνητές.

Για την εκτίμηση της αντοχής έναντι ρευστοποίησης υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες μεθόδων, (α) μέθοδοι που στηρίζονται σε εργαστηριακά πειράματα και (β) μέθοδοι που στηρίζονται σε μετρήσεις πεδίου, και συγκεκριμένα σε αποτελέσματα δοκιμών πρότυπης διείσδυσης (SPT) και δοκιμής στατικής πενετρομέτρησης (CPT) ή ακόμα και άλλες μέθοδοι όπως η πενετρομέτρηση Becker (BPT).

Στη συνέχεια περιγράφεται η εμπειρική εκτίμηση από αποτελέσματα δοκιμών SPT (η πλέον διαδεδομένη στην πράξη δοκιμή) του συντελεστή αντίστασης σε ρευστοποίηση CRR για σεισμό μεγέθους M_w=7.5 (CRR_{Mw=7.5}) μέσω του διορθωμένου αριθμού κρούσεων (N₁)₆₀. Η σχετική καμπύλη [CRR -(N₁)₆₀] που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.2** έχει χαραχθεί ώστε να διαχωρίσει τις περιοχές του διαγράμματος που αντιστοιχούν σε θέσεις που έχουν παρατηρηθεί φαινόμενα ρευστοποίησης από αυτές στις οποίες δεν έχουν παρατηρηθεί. Τα δεδομένα του διαγράμματος έχουν προέλθει από μετρήσεις, παρατηρήσεις και δοκιμές πεδίου κυρίως στις ΗΠΑ, την Ιαπωνία και πιο πρόσφατα σε άλλες χώρες.



Σχήμα 6.2: Εμπειρικό διάγραμμα για την εκτίμηση της αντίστασης έναντι ρευστοποίησης (CRR) για σεισμό Mw=7.5 βασισμένο σε δεδομένα SPT (Youd et al. 2001)

Για την αναλυτική έκφραση της βασικής καμπύλης καθαρής άμμου προτείνεται από τους Youd et al. (2001) η εξίσωση (6.6), η οποία υποδεικνύει μία οριακή τιμή του $(N_1)_{60} = 34$ (ασύμπτωτη της καμπύλης) πάνω από την οποία το εδαφικό υλικό θεωρείται αρκετά πυκνό και χαρακτηρίζεται ως «μη-ρευστοποιήσιμο».

$$CRR_{M_{w}=7.5} = \frac{1}{34 - (N_{1})_{60}} + \frac{(N_{1})_{60}}{135} + \frac{50}{(10(N_{1})_{60} + 45)^{2}} - \frac{1}{200}$$
(6.6)
(Youd et al. 2001)

Τέλος, στην μεθοδολογία των Youd et al. (2001) λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της τάσης στερεοποίησης στην αντίσταση ενός εδαφικού υλικού έναντι ρευστοποίησης μέσω του μειωτικού συντελεστή K_σ (**Σχήμα 6.3**) για τον οποίο ισχύει:



Σχήμα 6.3: Διάγραμμα υπολογισμού του μειωτικού συντελεστή Κ_σ συναρτήσει της κατακόρυφης ενεργού τάσης σ'_{v0} και της σχετικής πυκνότητας D_r.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών SPT επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, όπως το ποσοστό ιλύος, οι υπερκείμενες πιέσεις καθώς και το είδος του χρησιμοποιούμενου μηχανισμού πτώσης της σφύρας. Οι απαραίτητες διορθώσεις του αριθμού κρούσεων λαμβάνουν υπόψη τα παραπάνω και συνοψίζονται στην παρακάτω εξίσωση:

$$\left(N_{1}\right)_{60cs} = \alpha + \beta \cdot \left(N_{m} \cdot C_{N} \cdot C_{E}\right) \tag{6.8}$$

Όπου

 N_m : ο αριθμός των κρούσεων κατά τη δοκιμή

 C_{N} : συντελεστής διόρθωσης βάθους, ο οποίος υπολογίζεται από την

εξίσωση:
$$C_{N} = \left(\frac{100}{\sigma'_{\nu 0}}\right)^{0.5} \le 1.70$$
 (6.9)

 C_E : συντελεστής διόρθωσης ενέργειας κρούσης, του οποίου η τιμή εξαρτάται από τον τύπο μηχανισμού πτώσης της σφύρας

α, β : συντελεστές οι οποίοι εκτιμώνται συναρτήσει της περιεκτικότητας του εδάφους σε ιλύ FC (%):



Σχήμα 6.4: Παράδειγμα εδαφικού προφίλ και διάγραμμα αριθμού χτύπων Ν από δοκιμές SPT και αντίστοιχου συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει του βάθους (σεισμός Elmore Ranch M_w = 6.2 περιοχή Wildlife Liquefaction Array).

3° βήμα: Συσχέτιση εμπειρικού συντελεστή ασφαλείας FS_{L,Youd} με αριθμητικό συντελεστή FS_{L,FLAC}

Η παρούσα διερεύνηση έχει πραγματοποιηθεί για συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν από τις αριθμητικές αναλύσεις του FLAC (FS_{L,FLAC}). Προκειμένου, όμως να εφαρμοστεί η μεθοδολογία στην πράξη, απαιτείται να συσχετιστεί ο εμπειρικός συντελεστής ασφαλείας που υπολογίζεται για ένα πραγματικό εδαφικό προφίλ μέσω του αριθμού κρούσεων N_{SPT} (FS_{L,Youd}) με τον συντελεστή των αριθμητικών αναλύσεων με βάση τον οποίο έχει γίνει η βαθμονόμηση της μεθοδολογίας. Η συσχέτιση αυτή έχει διερευνηθεί από τις Zontanou and Kalogeraki (2014) και προτείνεται η αντικατάσταση του συντελεστή MSF της μεθοδολογίας Youd et al. (2001) για τη διόρθωση του CRR από ένα τροποποιημένο συντελεστή MSF, ο οποίος να αντιστοιχεί σε καμπύλες ρευστοποίησης με κλίση <u>b = 0.3 – 0.4</u>:

$$MSF = \frac{CRR_{M_{w}}}{CSR_{M_{w=7.5}}} = \frac{a \cdot N_{EQ,M_{w}}^{-b}}{a \cdot N_{EQ,M_{w}=7.5}^{-b}} = \left(\frac{N_{EQ,M_{w}}}{N_{EQ,M_{w}}}\right)^{b}$$
(6.12)

όπου οι ισοδύναμοι αριθμοί κύκλων λαμβάνονται από τους Miwa & Ikeda (2006).

4° βήμα: Μετατροπή FS_L σε χρόνο έναρξης της ρευστοποίησης t_L.

Στη συνέχεια απαιτείται η μετατροπή της κατανομής του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης FS_L σε κατανομή του χρόνου έναρξης της ρευστοποίησης t_L σύμφωνα με τη σχέση:

$$t_{L} = T_{exc} \cdot N_{EO} \cdot FS_{L}^{1/b}$$
(6.13)

η εξαγωγή της οποίας περιγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5. Η εφαρμογή της σχέσης αυτής προϋποθέτει την προσεγγιστική μετατροπή μιας ανομοιόμορφης χρονοϊστορίας σε ισοδύναμη αρμονική με ομοιόμορφο «ενεργό» πλάτος a_{eff}, σταθερή περίοδο T_{exc} και συνολικό αριθμό κύκλων N_{EQ}. Τα στοιχεία αυτά υπολογίζονται ως ακολούθως:

$$a_{eff} = \left[\left(M_{w} - 1 \right) / 10 \right] a_{max} \tag{6.14}$$

$$T_{exc} = \overline{T} : \left\{ Sa \ge 2.5PGA \right\}$$
(6.15)

$$N_{EQ} = \frac{\pi^2 \int_{t=0}^{NT} |v(t)| dt}{a_{eff} T_{exc}^2}$$
(6.16)

$$b = 0.3 \div 0.4$$
 (6.17)

Για τον εκθέτη b προτείνεται αυτή η τιμή έτσι ώστε να είναι συμβατός με το συντελεστή διόρθωσης μεγέθους MSF, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο βήμα.

5° βήμα: Εκτίμηση χρόνου επιφανειακής εκδήλωσης της ρευστοποίησης t_{L.gr}.

Η βασική παράμετρος της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι η χρονική στιγμή κατά την οποία γίνονται εμφανή τα αποτελέσματα της ρευστοποίησης στην επιφάνεια του εδάφους και στην οποία πρέπει να διαχωριστεί η δόνηση και εν συνεχεία να πραγματοποιηθούν οι ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις. Η διερεύνηση του Κεφαλαίου 5 κατέληξε στην ακόλουθη σχέση:

$$t_{L,qr} = 0.84t_{L,min}$$
 (6.18)

η οποία συσχετίζει τη ζητούμενη χρονική στιγμή t_{L,gr} με τη χρονική στιγμή κατά την οποία εκδηλώνεται για πρώτη φορά ρευστοποίηση καθ΄ ύψος της ρευστοποιήσιμης στρώσης (t_{L,min}) ή διαφορετικά για το βάθος στο οποίο παρουσιάζεται ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας.

6° βήμα: Διαχωρισμός δόνησης σε δύο τμήματα.

Προκειμένου να μην διαταραχθεί το συχνοτικό περιεχόμενο των διεγέρσεων που θα προκύψουν από τη διαίρεση της χρονοϊστορίας στο τυχαίο σημείο που υπολογίζεται από τη σχέση (6.18), επιλέγεται το «κόψιμο» να γίνει στο πλησιέστερο σημείο στο οποίο η επιτάχυνση μηδενίζεται, κλείνει δηλαδή ένας κύκλος, πριν ή μετά τη χρονική στιγμή t_{L,gr} (η διορθωμένη τιμή συμβολίζεται με t_{L,gr}*).

Στη συνέχεια η αρχική δόνηση διαιρείται σε δύο ανεξάρτητα τμήματα: (α) για t \leq t_{L,gr}^{*} και (β) για t > t_{L,gr}^{*}.

7° βήμα: Ισοδύναμη γραμμική ανάλυση για $t \le t_{L,gr}^*$.

Για το πρώτο τμήμα της δόνησης (t \leq t_{L,gr}*) πραγματοποιείται μία ισοδύναμη γραμμική ανάλυση τύπου SHAKE σε εδαφική στρώση με ταχύτητα διατμητικών κυμάτων V_s = 0.8 V_{s0}, η οποία αντιστοιχεί σε λόγο υπερπίεσης πόρων r_u = 0.6. Όπως περιγράφτηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4, δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι επικρατούν συνθήκες πλήρους απουσίας ρευστοποίησης ακόμα και για το πρώτο αυτό κομμάτι της διέγερσης.

Η αρχική κατανομή της ταχύτητας V_{s0} με το βάθος πρέπει να προσδιοριστεί είτε μέσω δοκιμών Crosshole/Downhole είτε μέσω εμπειρικών συσχετίσεων για το αρχικό μέτρο διατμήσεως G_{max} .

8° βήμα: Ισοδύναμη γραμμική ανάλυση για t > t_{L,gr}*.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται μία δεύτερη ανάλυση τύπου SHAKE για t > $t_{L,gr}^*$ με τα χαρακτηριστικά της πλήρως ρευστοποιημένης εδαφικής στρώσης ($r_u = 1.0$). Ο προσδιορισμός της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων $V_{s,liq}$ μέσω των προτεινόμενων από τους Miwa & Ikeda (2006) λόγων $V_{s,liq}/V_{s0}$ θεωρείται ως μία ικανοποιητική προσέγγιση (Πίνακας 6.2).

Πίνακας 6.2: Προτεινόμενες τιμές του λόγου Vs,lig/Vs κατά Miwa & Ikeda (2006).

FS∟	0.3 - 0.6	0.6 - 0.9	0.9 - 1.0
V _{s,liq} /V _s	0.10 - 0.14	0.12 - 0.16	0.14 - 0.19

Και για τις δύο αναλύσεις προτείνεται η χρήση των καμπυλών G/G_{max} – γ και ξ – γ των Vucetic & Dobry για την απόδοση της μη – γραμμικής ιξωδο-ελαστικής συμπεριφοράς του εδάφους.

9° βήμα: Επαλληλία ελαστικών φασμάτων.

Τελικά, το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού για το δεδομένο εδαφικό προφίλ προκύπτει από την περιβάλλουσα των δύο φασμάτων που προκύπτουν από τις ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις των δύο προηγούμενων βημάτων.

10° βήμα: Συντηρητική εκτίμηση ελαστικού φάσματος.

Η σχέση (6.18) για την εκτίμηση του χρόνου επιφανειακής εκδήλωσης της ρευστοποίησης οδηγεί σε μέσες φασματικές τιμές με ικανοποιητική σύγκριση ως προς τις αντίστοιχες πραγματικές. Παρ' όλα αυτά, λόγω των αβεβαιοτήτων που ενέχουν ο προσδιορισμός των γεωτεχνικών παραμέτρων και η συσχέτιση του εμπειρικού συντελεστή ασφαλείας με τον αριθμητικό, προτείνεται η υιοθέτηση μίας πιο συντηρητικής σχέσης και συγκεκριμένα:

$$t_{L,gr} = 0.95 t_{L,\min}$$
 (6.19)

Επιπροσθέτως, για να προκύψει ένα συντηρητικό άνω όριο των φασματικών τιμών στις μικρές περιόδους προτείνεται η θεώρηση μικρότερου λόγου υπερπίεσης πόρων για το πρώτο τμήμα της δόνησης, r_u = 0.4, το οποίο αντιστοιχεί σε V_s = 0.88 V_{s0}.

Η ανάλυση του δεύτερου τμήματος της δόνησης πραγματοποιείται ακριβώς όπως και προηγουμένως.

6.3 Αποτελέσματα τελικής εφαρμογής της μεθόδου

Εν συνεχεία, εφαρμόζεται βήμα προς βήμα η μεθοδολογία της επαλληλίας για τις 20 ενδεικτικές αναλύσεις FLAC (**Πίνακας 4.3**). Στο **Σχήμα 6.5** φαίνεται η σύγκριση των φασματικών επιταχύνσεων για τη βέλτιστη προσέγγιση του χρόνου επιφανειακής εκδήλωσης της ρευστοποίησης $t_{L,gr} = 0.84 \cdot t_{L,min}$ και $r_u = 0.6$ στο πρώτο τμήμα της δόνησης, ενώ στο **Σχήμα 6.6** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την πιο συντηρητική εκτίμηση $t_{L,gr} = 0.95 \cdot t_{L,min}$ και $r_u = 0.4$.

Στα ανωτέρω σχήματα, γίνεται χρωματική διαφοροποίηση των σημείων ανάλογα με τη σχετική πυκνότητα (D_r = 40% και D_r = 60%). Επιπλέον, στα σχήματα που αφορούν προβλέψεις άνω ορίου έχει προστεθεί ως γραμμοσκιασμένη περιοχή η σύγκριση με τις προβλέψεις μέσου όρου ($t_{L,gr}$ = 0.84· $t_{L,min}$, r_u = 0.6). Παρατηρείται ότι:

- Δεν φαίνεται να υπάρχει συστηματική επίδραση της σχετικής πυκνότητας.
- Οι «μέσες προβλέψεις» (Σχήμα 6.5) συγκρίνονται ικανοποιητικά με τα αποτελέσματα του FLAC για T > 0.8 sec.
- Οι τελικές «συντηρητικές προβλέψεις» για $t_{L,gr} = 0.95 \cdot t_{L,min}$ και $r_u = 0.4$ (Σχήμα 6.6) υπερεκτιμούν εν γένει τα αποτελέσματα του FLAC. Συγκεκριμένα, τα ακόλουθα ποσοστά των σημείων είναι άνω της διαγωνίου: 96% για T < 0.15 sec, 88% για T = 0.15 – 0.40 sec, 68% για T = 0.40 – 0.80 sec και 72% για T > 0.80 sec



Σχήμα 6.5: Σύγκριση μέσων φασματικών επιταχύνσεων που προκύπτουν από την μεθοδο «της επαλληλίας» (μέση συσχέτιση t_{L,gr} = 0.84t_{L,min} και r_u = 0.6) με τις πραγματικές τιμές που προκύπτουν από τις αναλύσεις FLAC για 20 ενδεικτικές περιπτώσεις.



Σχήμα 6.6: Σύγκριση μέσων φασματικών επιταχύνσεων που προκύπτουν από την μεθοδο «της επαλληλίας» (συντηρητική συσχέτιση t_{L,gr} = 0.95t_{L,min} με **r_u = 0.4 στο πρώτο τμήμα της δονησης**) με τις πραγματικές τιμές που προκύπτουν από τις αναλύσεις FLAC για 20 ενδεικτικές περιπτώσεις.

Με βάση τα ανωτέρω ενδεικτικά αποτελέσματα έγινε πλέον σύγκριση αναλυτικών προβλέψεων με αριθμητικές αναλύσεις για όλες τις περιπτώσεις των 84 αξιόπιστων και ικανοποιητικών αναλύσεων. Στα **Σχήματα 6.7 και 6.8** παρουσιάζεται η απευθείας σύγκριση για «μέσες» και για «συντηρητικές» προβλέψεις αντιστοίχως. Σημειώνεται ότι τα φάσματα για την «μέση» πρόβλεψη του συνόλου των αναλύσεων παρατίθενται στο Παράρτημα Α μαζί με το πραγματικό φάσμα και την καλύτερη δυνατή πρόβλεψη της μεθοδολογίας όπως αυτή έχει προσδιοριστεί στο Κεφάλαιο 4.



Σχήμα 6.7: Σύγκριση μέσων φασματικών επιταχύνσεων με χρήση της μέσης συσχέτισης t_{L,gr} = 0.84t_{L,min} και r_u = 0.6 με τις πραγματικές τιμές που προκύπτουν από τις αναλύσεις FLAC για το σύνολο των αξιόπιστων και ικανοποιητικών περιπτώσεων.



Σχήμα 6.8: Σύγκριση μέσων φασματικών επιταχύνσεων με χρήση της συντηρητικής συσχέτισης t_{L,gr} = 0.95t_{L,min} και r_u = 0.4 στο πρώτο τμήμα της δονησης με τις πραγματικές τιμές που προκύπτουν από τις αναλύσεις FLAC για το σύνολο των αξιόπιστων και ικανοποιητικών περιπτώσεων. Με γκρι γραμμοσκίαση φαίνονται οι «μέσες» προβλέψεις.

Το σχετικό λάθος των ανωτέρω προβλέψεων παρουσιάζεται ακολούθως στα **Σχήματα 6.9** και 6.10. Παρατηρείται ότι τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις ενδεικτικές συγκρίσεις των 20 περιπτώσεων, ισχύουν και για το σύνολο των αναλύσεων.

Συγκεκριμένα:

- Για περιόδους μικρότερες από 0.40 sec η «μέση» πρόβλεψη δίνει υπερεκτίμηση των φασματικών τιμών κατά 13% με διασπορά ± 24%. Για μεγαλύτερες περιόδους η μέση τιμή του σχετικού σφάλματος καθώς και η διασπορά του αυξάνονται.
- Για τις «συντηρητικές» προβλέψεις τα αποτελέσματα του FLAC υπερεκτιμούνται κατά 30% περίπου με τυπική απόκλιση σφάλματος ίση προς ± 36%.

 Τα ποσοστά των σημείων άνω του μηδενός για τις συντηρητικές προβλέψεις είναι: 71% για T < 0.15 sec, 73% για T = 0.15 – 0.40 sec, 61% για T = 0.40 – 0.80 sec και 52% για T > 0.80 sec.

Συνολικά για τις «μέσες» και «συντηρητικές» προβλέψεις, παρατηρείται ότι υπάρχει σημαντική υπερεκτίμηση των φασματικών τιμών σε μεγάλες περιόδους για εδαφική στρώση σχετικής πυκνότητας D_r = 40%. Υπενθυμίζεται εδώ (Κεφάλαιο 4) ότι οι βέλτιστοι λόγοι V_{s,liq}/V_{s,0} για τις αναλύσεις σχετικής πυκνότητας D_r = 40% είναι αρκετά μικρότεροι από τους προτεινόμενους κατά Miwa & Ikeda (2006). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υπερεκτίμηση των φασματικών τιμήμα της δόνησης). Προτείνεται, επομένως, για εδαφικά υλικά μικρής σχετικής πυκνότητας να χρησιμοποιούνται οι ελάχιστες (και όχι οι μέσες τιμές) των προτεινόμενων ορίων V_{s,liq}/V_{s,0} στις αναλύσεις του δεύτερου τμήματος της διέγερσης.



Σχήμα 6.9: Σχετικό σφάλμα των μέσων φασματικών τιμών (S_{aPRED} - S_{aREAL})/S_{aREAL} για τις «μέσες» προβλέψεις της μεθοδολογίας.



Σχήμα 6.10: Σχετικό σφάλμα των μέσων φασματικών τιμών (S_{aPRED} - S_{aREAL})/S_{aREAL} για τις «συντηρητικές» προβλέψεις της μεθοδολογίας.

6.4 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αρχικά βήμα προς βήμα η προτεινόμενη μεθοδολογία. Στη συνέχεια εφαρμόζεται για το σύνολο των αξιόπιστων και των ικανοποιητικών αναλύσεων που έχουν πραγματοποιηθεί (βλ. Κεφάλαιο 3) με χρήση του λογισμικού FLAC και προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

(α) Για εδαφική στρώση μικρής σχετικής πυκνότητας (D_r = 40%) υπερεκτιμούνται σημαντικά οι φασματικές τιμές στις μεγάλες περιόδους και για τις δύο προβλέψεις, «μέση» και «συντηρητική». Ως εκ τούτου προτείνεται να χρησιμοποιούνται το κάτω όριο του λόγου V_{s,liq}/V_{s,0} των Miwa & Ikeda (2006) για τις αναλύσεις του δεύτερου τμήματος.

(β) Με χρήση της μέσης συσχέτισης των χρόνων t_{L,gr} = 0.84·t_{L,min} και r_u = 0.6 στο πρώτο τμήμα της δόνησης προκύπτει ικανοποιητική συσχέτιση των φασματικών επιταχύνσεων στις μικρές περιόδους. Στις μεγαλύτερες περιόδους η υπερεκτίμηση καθώς και η διασπορά του σχετικού σφάλματος αυξάνονται.

(γ) Συγκεκριμένα, για τις «μέσες» προβλέψεις υπάρχει μία μέση υπερεκτίμηση της τάξης του 17% και η τυπική απόκλιση της διασποράς είναι ± 33%.

(δ) Με χρήση της συντηρητικότερης σχέσης $t_{L,gr} = 0.95 \cdot t_{L,min}$ και $r_u = 0.4$ επιτυγχάνεται μια μέση υπερεκτίμηση των φασματικών τιμών της τάξης του 30% με τυπική απόκλιση διασποράς ίση προς ± 36%.

Βιβλιογραφία

- Andrianopoulos, K. I., Papadimitriou, A. G., and Bouckovalas, G. D. (2010). "Bounding surface plasticity model for the seismic liquefaction analysis of geostructures." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(10), pp. 895–911.
- Arulmoli, K., Muraleetharan, K. K., Hossain, M. M., and Fruth, L. S. (1992). "VELACS: verification of liquefaction analyses by centrifuge studies; Laboratory Testing Program

 Soil Data Report." *Research Report, The Earth. Technology Corporation*.
- Bennett, M. J., McLaughlin, P. V, Sarmiento, J., and Youd, T. L. (1984). "Geotechnical investigation of liquefaction sites, Imperial Valley, Calif." U.S. Geological Survey Open File Report, 84-252.
- Bouckovalas, G. D., and Tsiapas, Y. Z. (2015). "Seismic Isolation Effects and Elastic Response Spectra of Liquefied Ground." *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Christchurch, New Zealand,1-4 November (in print).
- Carlisle, H., and Rollins, K. M. (1994). "Ground-response studies at the Alameda Naval Air Station." US Geological Survey Professional Paper, 1551 A, 123–143.
- Davis, R. O., and Berrill, J. B. (2001). "Liquefaction at the Imperial Valley Wildlife Site." Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 34(2), 91–106.
- Elgamal, A.-W., Zeghal, M., and Parra, E. (1996). "Liquefaction of reclaimed island in Kobe, Japan." Journal of Geotechnical Engineering, 122(1), 39–49.
- Hardin, B. O. (1978). NATURE OF STRESS-STRAIN BEHAVIOR FOR SOILS. ASCE, 3-90.
- Idriss, M. I., and Boulanger, R. W. (2008). *Soil Liquefaction During Earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, USA.
- Itasca. (2011). "FLAC version 7.0." Itasca Consulting Group Inc.
- Iwasaki, Y., and Tai, M. (1996). "Strong motion records at Kobe Port Island." Soils and Foundations.
- Karamitros, D. K. (2010). "Development of a Numerical Algorithm for The Dynamic
 Elastoplastic Analysis of Geotechnical Structures in Two and Three Dimensions." PhD
 Thesis, Dept of Civil Engineering, NTUA, Athens.
- Karamitros, D. K., Bouckovalas, G. D., and Chaloulos, Y. K. (2013). "Seismic settlements of shallow foundations on liquefiable soil with a clay crust." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 46(0), 64–76.

Kawasumi, H. (1968). General Report on the Niigata Earthquake of 1964.

- Koutsogoula, E. (2012). "Numerical Simulation of the Seismic Response of Liquefied Layer under Excitations with a Wide Range of Spectral Frequencies." Diploma Thesis, NTUA, Athens.
- Kramer, S. L., Hartvigsen, A. J., Sideras, S. S., and Ozener, P. T. (2011). "Site response modeling in liquefiable soil deposits." *4th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Strong Ground Motion*.
- Miwa, S., and Ikeda, T. (2006). "Shear modulus and strain of liquefied ground and their application to evaluation of the response of foundation structures." *Structural Engineering/Earthquake Engineering*, 23(1), 167s–179s.
- Papadimitriou, A. G., and Bouckovalas, G. D. (2002). "Plasticity model for sand under small and large cyclic strains: A multiaxial formulation." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Department of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, National Technical University of Athens, 42 Patission Street, 10682 Athens, Greece, 22(3), pp. 191–204.
- Pease, J. W., and O'Rourke, T. D. (1997). "Seismic response of liquefaction sites." *Journal of Geotechnical Engineering*, 123(1), 37–45.
- Ramberg, W., and Osgood, W. R. (1943). *Description of stress-strain curve by three parameters*. Technical note 902, National Advisory Committee for Aeronautics.
- Rollins, K. M., McHood, M. D., Hryciw, R. D., Homolka, M., and Shrewbridge, S. E. (1994). "Ground response on Treasure Island." US Geological Survey Professional Paper.
- Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B. (1972). "SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites." SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites.
- Seed, H. B., and Idriss, I. M. (1970). "Seismic response of soil deposits." J. Soil Mech. and Found. Div., 96(2), 631–638.
- Seed, H. B., and Idriss, M. I. (1971). "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(9), 1249–1273.
- Seed, H. B., Martin, P. P., and Lysmer, J. (1976). *Pore-water pressure changes during soil liquefaction*. *ASCE J Geotech Eng Div*, 323–346.

- Theocharis, A. (2011). "Numerical Analysis of Liquefied Ground Response under Harmonic Seismic Excitation: Variable Thickness of Liquefied Layer." Diploma Thesis, NTUA, Athens.
- Tokimatsu, K., and Yoshimi, Y. (1983). *Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content. Soils and Foundations*, 56–74.
- Vucetic, M., and Dobry, R. (1991). "Effect of soil plasticity on cyclic response." *Journal of geotechnical engineering*.
- Youd, T. L., and Carter, B. L. (2005). "Influence of Soil Softening and Liquefaction on Spectral Acceleration." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(7), 811–825.
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., and Stokoe, K. H. (2001). "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(10), 817–833.
- Zeghal, M., and Elgamal, A. W. (1994). "Analysis of site liquefaction using earthquake records." *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, 120(6), 996–1017.
- Zontanou, V., and Kalogeraki, C. (2014). "Re-evalution of factor of safety against seismic liquefaction." Diploma Thesis, NTUA, Athens.

Παράρτημα Α

Ελαστικά φάσματα απόκρισης

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται:

(α) Το πραγματικό φάσμα απόκρισης στην επιφάνεια του εδάφους όπως προκύπτει από τις αναλύσεις FLAC (μαύρη γραμμή).

(β) Το προβλεπόμενο φάσμα όταν η χρονική στιγμή διαχωρισμού της δόνησης tL,gr είναι γνωστή (κόκκινη γραμμή).

(γ) Το προβλεπόμενο φάσμα εφαρμόζοντας πλήρως τη μέθοδο της «επαλληλίας» (μπλε γραμμή).

D, (%)

H (m)

Δόνηση	Αξιοπιστία Ανάλυσης	D _r (%)	H (m)	Δόνηση	Αξιοπιστία Ανάλυσης
A5-str	Μη Αξιόπιστη	60	2	A5-str	Μη Αξιόπιστη
A6-str	Μη Αξιόπιστη	60	2	A6-str	Μη Αξιόπιστη
B1-str	Μη Αξιόπιστη	60	2	B1-str	Μη Αξιόπιστη
B4-str	Ικανοποιητική	60	2	B4-str	Μη Αξιόπιστη
B6-str	Ικανοποιητική	60	2	B6-str	Μη Αξιόπιστη
A5-weak	Μη Αξιόπιστη	60	2	A5-weak	Μη Αξιόπιστη
A6-weak	Ικανοποιητική	60	2	A6-weak	Ικανοποιητική
B1-weak	Ικανοποιητική	60	2	B1-weak	Ικανοποιητική
B4-weak	Αξιόπιστη	60	2	B4-weak	Αξιόπιστη
B6-weak	Αξιόπιστη	60	2	B6-weak	Αξιόπιστη
A5-str	Ικανοποιητική	60	4	A5-str	Μη Αξιόπιστη
A6-str	Μη Αξιόπιστη	60	4	A6-str	Μη Αξιόπιστη
B1-str	Μη Αξιόπιστη	60	4	B1-str	Ικανοποιητική
B4-str	Αξιόπιστη	60	4	B4-str	Αξιόπιστη
B6-str	Ικανοποιητική	60	4	B6-str	Ικανοποιητική
A5-weak	Αξιόπιστη	60	4	A5-weak	Αξιόπιστη
A6-weak	Αξιόπιστη	60	4	A6-weak	Ικανοποιητική
B1-weak	Ικανοποιητική	60	4	B1-weak	Αξιόπιστη
B4-weak	Αξιόπιστη	60	4	B4-weak	Αξιόπιστη
B6-weak	Αξιόπιστη	60	4	B6-weak	Αξιόπιστη
A5-str	Ικανοποιητική	60	6	A5-str	Μη Αξιόπιστη
A6-str	Ικανοποιητική	60	6	A6-str	Αξιόπιστη
B1-str	Αξιόπιστη	60	6	B1-str	Μη Αξιόπιστη
B4-str	Αξιόπιστη	60	6	B4-str	Αξιόπιστη
B6-str	Ικανοποιητική	60	6	B6-str	Αξιόπιστη
A5-weak	Αξιόπιστη	60	6	A5-weak	Αξιόπιστη
A6-weak	Αξιόπιστη	60	6	A6-weak	Αξιόπιστη
B1-weak	Αξιόπιστη	60	6	B1-weak	Ικανοποιητική
B4-weak	Αξιόπιστη	60	6	B4-weak	Αξιόπιστη
B6-weak	Αξιόπιστη	60	6	B6-weak	Αξιόπιστη
A5-str	Αξιόπιστη	60	8	A5-str	Ικανοποιητική
A6-str	Ικανοποιητική	60	8	A6-str	Αξιόπιστη
B1-str	Αξιόπιστη	60	8	B1-str	Ικανοποιητική
B4-str	Αξιόπιστη	60	8	B4-str	Αξιόπιστη
B6-str	Αξιόπιστη	60	8	B6-str	Ικανοποιητική
A5-weak	Αξιόπιστη	60	8	A5-weak	Αξιόπιστη
A6-weak	Αξιόπιστη	60	8	A6-weak	Αξιόπιστη
B1-weak	Αξιόπιστη	60	8	B1-weak	Αξιόπιστη
B4-weak	Αξιόπιστη	60	8	B4-weak	Αξιόπιστη
B6-weak	Αξιόπιστη	60	8	B6-weak	Αξιόπιστη
A5-str	Αξιόπιστη	60	10	A5-str	Ικανοποιητική
A6-str	Αξιόπιστη	60	10	A6-str	Ικανοποιητική
B1-str	Αξιόπιστη	60	10	B1-str	Αξιόπιστη
B4-str	Αξιόπιστη	60	10	B4-str	Αξιόπιστη
B6-str	Αξιόπιστη	60	10	B6-str	Αξιόπιστη
A5-weak	Αξιόπιστη	60	10	A5-weak	Αξιόπιστη
A6-weak	Αξιόπιστη	60	10	A6-weak	Αξιόπιστη
B1-weak	Αξιόπιστη	60	10	B1-weak	Αξιόπιστη
B4-weak	Αξιόπιστη	60	10	B4-weak	Αξιόπιστη
B6-weak	Αξιόπιστη	60	10	B6-weak	Αξιόπιστη

Πίνακας A. 1: Κατάλογος αριθμητικών αναλύσεων FLAC



Σχήμα Α. 1: Ελαστικά φάσματα απόκρισης για το σύνολο των διεγέρσεων της περίπτωσης με Η = 2m και D_r = 40%.



Σχήμα Α. 2: Ελαστικά φάσματα απόκρισης για το σύνολο των διεγέρσεων της περίπτωσης με Η = 4m και D_r = 40%.



Σχήμα Α. 3: Ελαστικά φάσματα απόκρισης για το σύνολο των διεγέρσεων της περίπτωσης με Η = 6m και D_r = 40%.



Σχήμα Α. 4: Ελαστικά φάσματα απόκρισης για το σύνολο των διεγέρσεων της περίπτωσης με Η = 8m και D_r = 40%.



Σχήμα Α. 5: Ελαστικά φάσματα απόκρισης για το σύνολο των διεγέρσεων της περίπτωσης με Η = 10m και D_r = 40%.



Σχήμα Α. 6: Ελαστικά φάσματα απόκρισης για το σύνολο των διεγέρσεων της περίπτωσης με Η = 2m και D_r = 60%.



Σχήμα Α. 7: Ελαστικά φάσματα απόκρισης για το σύνολο των διεγέρσεων της περίπτωσης με Η = 4m και D_r = 60%.



Σχήμα Α. 8: Ελαστικά φάσματα απόκρισης για το σύνολο των διεγέρσεων της περίπτωσης με Η = 6m και D_r = 60%.



Σχήμα Α. 9: Ελαστικά φάσματα απόκρισης για το σύνολο των διεγέρσεων της περίπτωσης με Η = 8m και D_r = 60%.



Σχήμα Α. 10: Ελαστικά φάσματα απόκρισης για το σύνολο των διεγέρσεων της περίπτωσης με Η = 10m και D_r = 60%.