



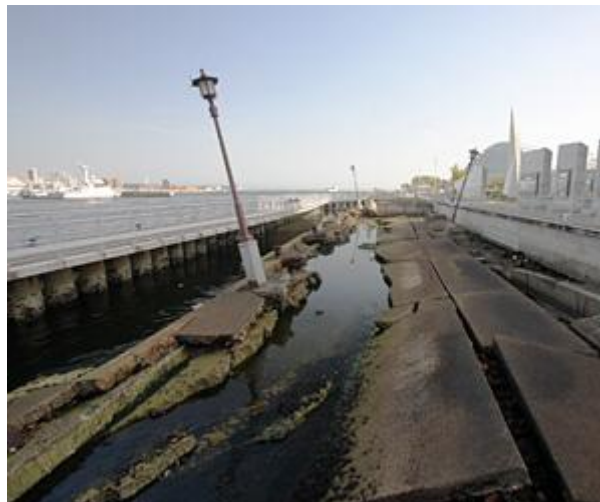
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ**

**ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΦΑΣΜΑΤΩΝ  
ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΓΙΑ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ**

Διπλωματική Εργασία

**ΜΑΛΙΣΙΑΝΟΥ ΜΑΡΙΑ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΓΕΩΡΓΙΟΣ Δ. ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ



**SIMPLIFIED ESTIMATION OF ELASTIC RESPONSE  
SPECTRA FOR LIQUEFIED GROUND**

DIPLOMA THESIS

**MALISIANOU MARIA**

SUPERVISOR: GEORGE D. BOUCKOVALAS, PROFESSOR NTUA

**ΙΟΥΛΙΟΣ/JULY 2013**

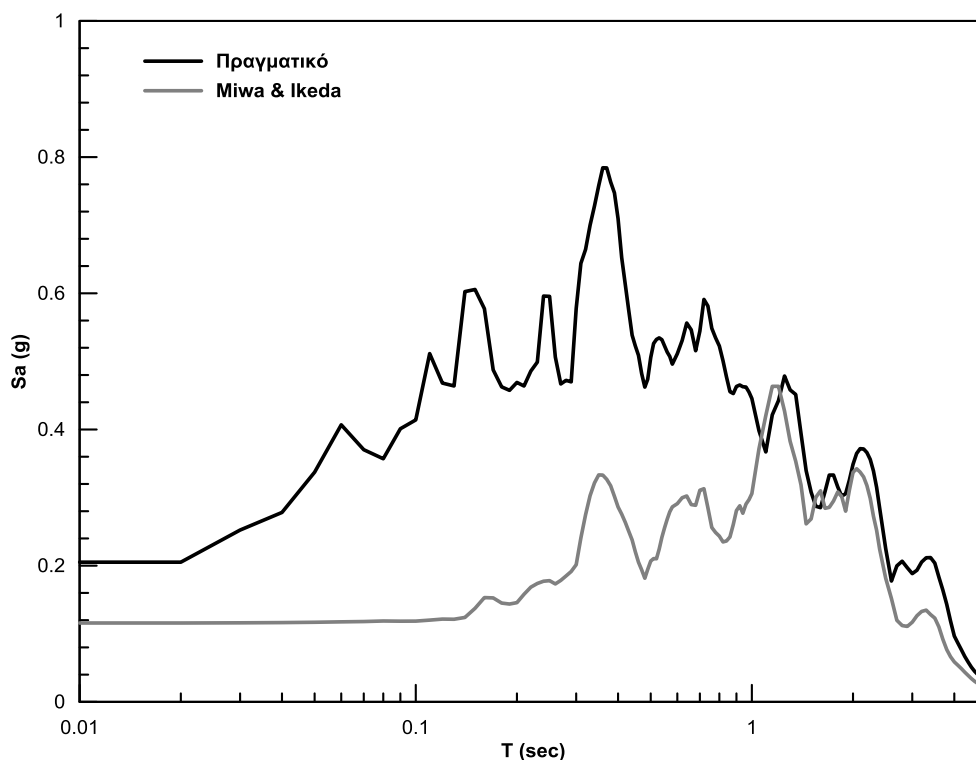


## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ρευστοποιημένα εδάφη και η σεισμική απόκρισή τους αποτελούν ένα δύσκολο πρόβλημα για τον Πολιτικό Μηχανικό. Παρ' όλα αυτά, το φαινόμενο αυτό δεν έχει τεθεί ως αντικείμενο έρευνας από τους μελετητές σε βαθμό ανάλογο των δυσμενών επιπτώσεων που δημιουργεί η αδυναμία πρόβλεψης της συμπεριφοράς του ρευστοποιήσιμου εδάφους. Αυτή η διπλωματική εργασία, στοχεύει στην ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας πρόβλεψης του φάσματος ρευστοποιημένου εδάφους, μέσω ισοδύναμων γραμμικών αναλύσεων.

Για να επιτευχθεί αυτό, αρχικά έγινε ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας ώστε να αποκτηθεί το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο και να εντοπιστούν οι προϋπάρχουσες έρευνες σχετικά με το αντικείμενο. Οι Youd & Carter (2005) εκτίμησαν με ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις την σεισμική απόκριση που θα είχε καταγραφεί σε ρευστοποιημένες περιοχές, εάν αυτές δεν είχαν ρευστοποιηθεί. Στη συνέχεια, συνέκριναν τα αποτελέσματα με την πραγματική καταγραφή για να εντοπιστούν οι διαφορές που προκαλεί στο φάσμα της επιφάνειας η ρευστοποίηση. Από τη σύγκριση αυτή προέκυψε ότι η φασματική επιτάχυνση για μικρές περιόδους καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το τμήμα της δόνησης πριν το έδαφος ρευστοποιηθεί. Οι Miwa & Ikeda (2006) ανέπτυξαν μία μεθοδολογία πρόβλεψης του φάσματος ρευστοποιημένου εδάφους με ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις. Στις αναλύσεις αυτές, το αρχικό μέτρο διάτμησης μειώνεται κατάλληλα για να συμπεριλάβει την επίδραση της ρευστοποίησης και παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια της ανάλυσης ( $G/G_{max} = 1$ ). Για τη μειωμένη τιμή του μέτρου διάτμησης προτείνουν διαγράμματα συναρτήσεως του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης  $FS_L$ . Να σημειωθεί, πως η μεθοδολογία αυτή αναφέρεται σε πλήρως ρευστοποιημένα εδάφη και δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η επίδραση της δόνησης πριν στη ρευστοποίηση στις φασματικές επιταχύνσεις.

Στο Σχήμα I, παρουσιάζεται ενδεικτικά η σύγκριση του πραγματικού φάσματος στο σεισμό Superstition Hills, κατά τον οποίο το έδαφος ρευστοποιήθηκε προς το τέλος της διέγερσης, και του αντίστοιχου υπολογισμένου με την μεθοδολογία των Miwa & Ikeda. Είναι φανερό πως το υπολογισμένο φάσμα απέχει πολύ από το πραγματικό.



**Σχήμα Ι :** Σύγκριση πραγματικού φάσματος στη επιφάνεια και αντίστοιχα υπολογισμένου από ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις σύμφωνα μεθοδολογία των Miwa & Ikeda στον σεισμό Superstition Hills (1987)

Επομένως, κρίθηκε απαραίτητο να προσδιοριστεί μία βελτιωμένη, σε σχέση με τις υπάρχουσες, μεθοδολογία που να προβλέπει πιο ρεαλιστικά το πραγματικό φάσμα ρευστοποιημένου εδάφους, στηριζόμενη όμως και στα συμπεράσματα των ανωτέρω μελετητών.

Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιήθηκαν οι καταγραφές σε δύο περιοχές που ρευστοποιήθηκαν (WLA, California και Port Island, Kobe) και για τις οποίες υπάρχουν οι καταγραφές τόσο στη βάση του ρευστοποιημένου στρώματος όσο και στην επιφάνεια. Αρχικά, προσδιορίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης των περιοχών αυτών από διαθέσιμες δοκιμές SPT και CPT. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις με το πρόγραμμα EERA, για μη ρευστοποιημένο και για ρευστοποιημένο έδαφος και συγκρίθηκαν τα προκύπτοντα φάσματα της επιφάνειας με το καταγεγραμμένο. Στις αναλύσεις με ρευστοποίηση χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που προτείνουν οι Miwa & Ikeda

και έγινε παραμετρική διερεύνηση του ποσοστού μείωσης της ταχύτητας  $V_s$  του εδάφους ( $V_{s_{iig}}/V_s$ ). Στη συνέχεια, το πραγματικό φάσμα συσχετίστηκε μέσω γραμμικής παρεμβολής με τα φάσματα από τις ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε και για τα κανονικοποιημένα φάσματα.

Βρέθηκε ότι με την μεθοδολογία των Miwa & Ikeda, προσεγγίζεται σε ικανοποιητικό βαθμό το πραγματικό φάσμα μόνο σε ορισμένο εύρος ιδιοπεριόδων, ενώ εκτός αυτού, το φάσμα χωρίς ρευστοποίηση δίνει καλύτερη σύγκριση. Πιο συγκεκριμένα, στις μεγάλες ιδιοπεριόδους το πραγματικό φάσμα βρίσκεται πιο κοντά στο αντίστοιχο για ρευστοποιημένο έδαφος, ανεξαρτήτως του συντελεστή ασφαλείας ή της στιγμής έναρξης της ρευστοποίησης. Αντίθετα, για μικρές ιδιοπεριόδους η σύγκριση του πραγματικού φάσματος με το υπολογισμένο από γραμμικές αναλύσεις εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης  $FS_L$ . Όσο μειώνεται ο  $FS_L$ , τόσο το φάσμα του πλήρως ρευστοποιημένου εδάφους προσεγγίζει το πραγματικό και ως εκ τούτου μειώνεται η επίδραση της ρευστοποίησης ακόμα και σε μικρές ιδιοπεριόδους.

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι οι συντελεστές συσχέτισης των φασμάτων δίνουν πιο συμβατά αποτελέσματα από τους αντίστοιχους για κανονικοποιημένα φάσματα και ότι οι επιλεγόμενοι λόγοι  $V_{s_{iig}}/V_s$  συμβαδίζουν με τις προτεινόμενες τιμές των Miwa & Ikeda.

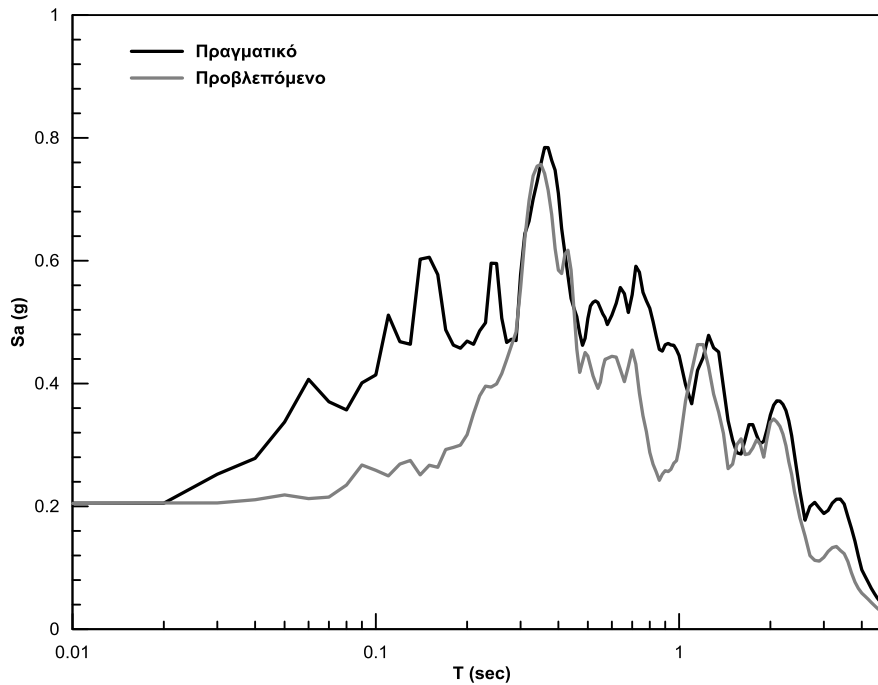
Η μεθοδολογία που τελικώς προτείνεται περιλαμβάνει αρχικά τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης. Στη συνέχεια, με ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις, γίνεται η εκτίμηση των φασμάτων για μη ρευστοποιημένο και πλήρως (εξ' αρχής) ρευστοποιημένο έδαφος χρησιμοποιώντας στη δεύτερη περίπτωση την ταχύτητα  $V_{s_{iig}}$  που προτείνουν οι Miwa & Ikeda. Κατόπιν γίνεται η εκτίμηση του πραγματικού φάσματος ρευστοποιημένου εδάφους από τα υπολογισθέντα φάσματα, με βάση την καμπύλη του συντελεστή συσχέτισης. Η τιμή του συντελεστή συσχέτισης για μικρές περιόδους ( $T < 1\text{sec}$ ) εξαρτάται από τον συντελεστή  $FS_L$ , ενώ για μεγαλύτερες είναι ανεξάρτητος αυτού και το φάσμα ταυτίζεται με το αντίστοιχο για πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος.

Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας παρουσιάζονται στο Σχήμα II. Προφανώς η διαδικασία αυτή είναι απλοποιητική λόγω του μικρού αριθμού

## Περίληψη

---

διαθέσιμων ιστορικών περιστατικών. Παρ' όλα αυτά, είναι εμφανές ότι το νέο υπολογισμένο φάσμα προσεγγίζει καλύτερα το πραγματικό, χωρίς όμως να υπάρχει απόλυτη ταύτιση μεταξύ των δύο.



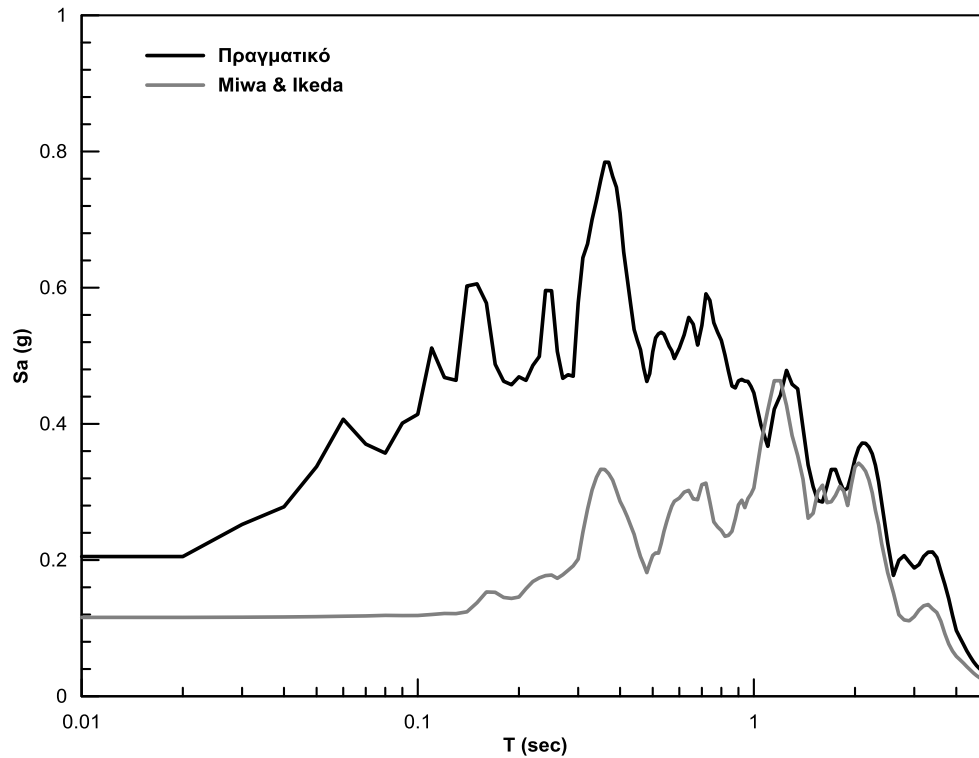
**Σχήμα II :** Σύγκριση πραγματικού φάσματος με το υπολογισμένο σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία στον σεισμό Superstition Hills (1987)

## **ABSTRACT**

Liquefied ground and its seismic response is a difficult issue for Civil Engineers. However, this phenomenon has not been adequately studied by the Scientific Community, given the devastating consequences caused by the insufficient estimation of the seismic response of the liquefied ground. This diploma thesis aims to propose a methodology for the estimation of the elastic response spectra for liquefied soils via equivalent linear analyses.

For this purpose, a literature survey had been initially conducted in order to acquire the necessary theoretical background and to be informed about similar research on this subject. Youd & Carter (2005) performed equivalent linear analyses and estimated the seismic response that would have been recorded on liquefied sites in absence of liquefaction. The authors compared the results of their analyses with the real recordings in order to identify the effect of liquefaction on the response spectra. The main conclusion of this comparison was the fact that the spectral acceleration at short periods is mainly affected by the seismic motion before liquefaction occurs. Miwa & Ikeda (2006) developed an analytical methodology for the estimation of the liquefied response spectra using equivalent linear analyses. More specific, the initial shear modulus is properly reduced to incorporate the effect of liquefaction and remains constant during the analysis ( $G/G_{\max} = 1$ ). The authors proposed diagrams correlating the shear modulus reduction to the factor of safety against liquefaction. However, it must be noted that this methodology refers to fully liquefied ground and is not taking into account the effect of the seismic motion before liquefaction occurs.

At Figure I, the comparison between the recorded response spectra at the Wildlife Liquefaction Array during Superstition Hills earthquake (1987), in which the ground was liquefied almost at the end of shaking, and the estimated one according to Miwa & Ikeda is presented. It is evident that spectral acceleration is significantly underestimated at short periods.



**Figure 1 :** Comparison between real response spectrum on the surface and the estimated one using the methodology of Miwa & Ikeda during Superstition Hills earthquake (1987)

Therefore, a new methodology needs to be developed for a more realistic estimation of the response spectrum of liquefied ground, based however on the previous methods. To achieve that, the recordings of two liquefied sites (WLA, California and Port Island, Kobe), in which the seismic motion was recorded both at the base and on the surface of the liquefied layer, were used. Initially, the factor of safety against liquefaction was estimated for these sites, using SPT and CPT results. At the second step, equivalent linear analyses were performed using “EERA” software for both non-liquefied and liquefied ground and the results were compared with the real recordings on the soil surface. The Miwa & Ikeda approach was followed at the analyses of liquefied ground, while a parametric investigation was conducted on the shear wave reduction ratio ( $V_{s_{liq}}/V_s$ ). After that, the real response spectrum was correlated, using linear interpolation, to the computed response spectra via equivalent linear analysis. The same procedure was repeated for the normalized spectra.

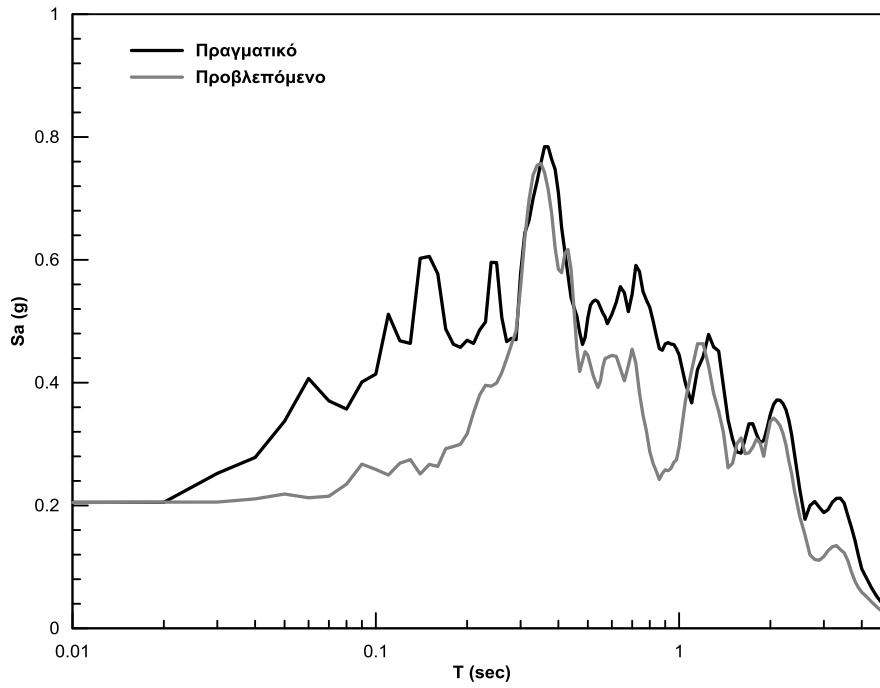


It was found that, following the methodology of Miwa & Ikeda, the recorded response spectra is successfully estimated only in a specific range of periods, whereas for other periods the spectrum for non – liquefied ground is more representative. More specific, for large periods, the real spectrum approaches the liquefied one, independently of the factor of safety or the time that liquefaction occurs. On the other hand, for short periods, the comparison between the real spectrum and the one for liquefied ground depends on the factor of safety against liquefaction  $FS_L$ . As  $FS_L$  reduces, the spectrum for liquefied ground approached the recorded one and hence the effect of the time that liquefaction occurs is reduced even in short periods.

The evaluation of the results revealed that the correlation coefficients of response spectra provide better results compared to the ones of normalized spectra and that the selected values of  $V_{S_{liq}}/V_s$  ratio are in good agreement with the values that Miwa & Ikeda propose.

According to the proposed methodology, the factor of safety against liquefaction is initially calculated. The second step consists of the estimation of response spectra for non – liquefied and totally (initially) liquefied response spectra, following for the latter the shear wave velocity  $V_{S_{liq}}$  that Miwa & Ikeda propose. After that, the real response spectrum is predicted using the calculated spectra and the correlation coefficient. The value of the correlation coefficient for short periods ( $T < 1\text{sec}$ ) depends on  $FS_L$ , whereas for longer periods it is independent and the predicted spectrum is equal to the one for fully liquefied ground.

The results of the proposed methodology are presented on Figure II. Even though this procedure is simplified, due to the small number of available case histories; it is evident that the predicted spectrum is in better agreement with the real one.



**Figure II** : Comparison between real response spectrum on the surface and the estimated one using the proposed methodology during Superstition Hills earthquake (1987)

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Τελειώνοντας τη διπλωματική εργασία μου, νιώθω πως πρέπει να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν με ποικίλους τρόπους, ώστε να καταφέρω να την ολοκληρώσω.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου, κ. Γεώργιο Δ. Μπουκοβάλα ο οποίος ήταν πάντα διαθέσιμος, παρά τον περιορισμένο ελεύθερο χρόνο του, να μου προσφέρει απλόχερα τις γνώσεις και την εμπειρία του και με στήριζε σε κάθε μου βήμα. Η καθοδήγησή του ήταν πολύτιμη, καθώς με περισσή εφευρετικότητα έδινε λύση σε όποιο πρόβλημα παρουσιαζόταν και με αυτό τον τρόπο με ενέπνευε να συνεχίσω με περισσότερη όρεξη.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα Ιωάννη Τσιάπα για την ανιδιοτελή βοήθειά που μου προσέφερε, πραγματικά οποιαδήποτε στιγμή την χρειαζόμουν. Ένιωσα πως σε αυτή την προσπάθεια που έκανα, είχα δίπλα μου έναν φίλο. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δημήτρη Καραμήτρο ο οποίος με τον εύστοχο σχολιασμό του συνέβαλε στο να έχει η διπλωματική την τελική μορφή της.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στη οικογένειά μου και στους ανθρώπους που με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ:.....	i
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 Αντικείμενο .....	1
1.2 Σκοπός .....	2
1.2 Περιεχόμενα - Δομή .....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....	5
2.1 Γενικά.....	5
2.2 Περιοχή “Wildlife Liquefaction Array” (WLA).....	5
2.3 Περιοχή “PORT ISLAND” .....	12
2.4 Youd and Carter (2005).....	16
2.5 Miwa and Ikeda (2006) .....	24
2.6 Συμπεράσματα.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΟΧΗ WILDLIFE LIQUEFACTION ARRAY (WLA) – ΣΕΙΣΜΟΣ ELMORE RANCH.....	33
3.1 Γενικά.....	33
3.2 Υπολογισμός Συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης ( $FS_L$ ) .....	33
3.3 Αναλύσεις Σεισμικής Απόκρισης Μη Ρευστοποιημένου Εδάφους .....	40
3.4 Αναλύσεις με μειωμένη ταχύτητα ( $V_{s,liq}$ ) λόγω ρευστοποίησης.....	47
3.5 Συμπεράσματα.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΟΧΗ WILDLIFE LIQUEFACTION ARRAY (WLA) – ΣΕΙΣΜΟΣ SUPERSTITION HILLS .....	63
4.1 Γενικά.....	63
4.2 Υπολογισμός Συντελεστή Ασφαλείας Έναντι Ρευστοποίησης ( $FS_L$ ).....	63

4.3 Αναλύσεις Σεισμικής Απόκρισης Μη Ρευστοποιημένου Εδάφους .....	69
4.4 Αναλύσεις με μειωμένη ταχύτητα ( $V_{s,liq}$ ) λόγω ρευστοποίησης.....	72
4.5 Συμπεράσματα.....	83
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΙΟΧΗ PORT ISLAND (PI) – ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΟΒΕ .....</b>	<b>85</b>
5.1 Γενικά.....	85
5.2 Υπολογισμός Συντελεστή Ασφαλείας Έναντι Ρευστοποίησης ( $FS_L$ ).....	85
5.3 Αναλύσεις Σεισμικής Απόκρισης.....	86
5.4 Αναλύσεις με μειωμένη ταχύτητα ( $V_{s,liq}$ ) λόγω ρευστοποίησης.....	90
5.5 Συμπεράσματα.....	100
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ .....</b>	<b>101</b>
6.1 Γενικά.....	101
6.2 Εύρεση Τελικής Μορφής Καμπύλης Συντελεστή Συσχέτισης “ $\alpha^*$ ” ...	101
6.3 Εύρεση Τελικής Μορφής Καμπύλης Συντελεστή Συσχέτισης “ $\alpha$ ” .....	109
6.4 Επιλογή κατάλληλου συντελεστή συσχέτισης.....	115
6.5 Προτεινόμενη Μεθοδολογία .....	119
6.6 Συμπεράσματα.....	122
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Τελικά Συμπεράσματα – Προτάσεις.....</b>	<b>123</b>
7.1 Τελικά Συμπεράσματα .....	123
7.2 Προτάσεις Για Μελλοντική Έρευνα.....	126
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>127</b>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 Αντικείμενο**

Σεισμική δόνηση ορίζεται η αισθητή ανατάραξη της επιφάνειας της γης που συνοδεύεται από σεισμικά κύματα που μεταφέρουν την ενέργεια του σεισμού. Καθώς τα κύματα διαδίδονται μέσω των εδαφικών στρωμάτων, σε ορισμένες περιπτώσεις προκαλούν αλλαγές στα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Ειδικά, όταν έχουμε κορεσμένο αμμώδη σχηματισμό κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, δύναται, εξ αιτίας της έντονης ταλάντωσής του λόγω του σεισμού, να προκληθεί αύξηση της πίεσης πόρων που ακολούθως θα οδηγήσει στην σταδιακή χαλάρωση του εδαφικού του ιστού, μέχρι την πλήρη ρευστοποίησή του.

Τα ρευστοποιήσιμα, αυτά, εδάφη, όπως είναι γνωστό, αποτελούν έναν πραγματικό “εφιάλτη” για τον Πολιτικό Μηχανικό, δεδομένου ότι συνδυάζονται με απώλεια διατμητικής αντοχής του εδάφους θεμελίωσης, μεγάλες μετατοπίσεις επιφανειακών και βαθιών θεμελιώσεων και αστοχία. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι ισχύοντες στη χώρα μας, αλλά και διεθνώς, αντισεισμικοί κανονισμοί, κατατάσσουν τα ρευστοποιήσιμα εδάφη στην “απαγορευμένη” κατηγορία, όπου η δόμηση επιτρέπεται μόνον μετά από ειδικές έρευνες βασισμένες στη βελτίωση του εδάφους θεμελίωσης (π.χ. βαθιά δονητική συμπύκνωση, κατασκευή χαλικοπασσάλων κλπ).

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. Ακόμα και σε αυτήν την περίπτωση όμως, δεν υπάρχουν συγκεκριμένες προτάσεις για τις εν λόγω δράσεις αντισεισμικού σχεδιασμού των κατασκευών.

## 1.2 Σκοπός

Από τα ανωτέρω, γίνεται σαφές ότι το θέμα της θεμελίωσης τεχνικών έργων σε ρευστοποιήσιμα εδάφη είναι ιδιαίτερα αμφιλεγόμενο και, παρά το γεγονός ότι δημιουργεί εύλογες προσδοκίες στην τεχνική κοινότητα, χρήζει συστηματικής περαιτέρω διερεύνησης. Μερικά από τα πρακτικά ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν είναι τα ακόλουθα:

- i. Η ρευστοποίηση του εδάφους προκαλεί πάντοτε απομείωση της σεισμικής δόνησης στην επιφάνεια, όπως είναι ευρύτερα αποδεκτό, ή μπορεί να προκαλέσει και ενίσχυση;
- ii. Υπάρχουν πειστήρια από πραγματικές καταγραφές υπέρ της μιας ή της άλλης από τις παραπάνω εκδοχές;
- iii. Είναι δυνατόν να γίνει εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης ρευστοποιήσιμου εδάφους με τις αναλυτικές μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για συμβατικά εδάφη (π.χ. με ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις);

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία θα προσπαθήσει να απαντήσει στα ανωτέρω ερωτήματα, αρχικά μέσω εκτεταμένης βιβλιογραφικής έρευνας, και ακολούθως μέσω παραμετρικών αριθμητικών και αναλυτικών υπολογισμών.

## 1.3 Περιεχόμενα - Δομή

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται μία σύντομη ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας, ώστε να αποκτήσει ο αναγνώστης το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο, αλλά και για να διαπιστωθεί και να αξιολογηθεί το επίπεδο της ήδη υπάρχουσας γνώσης επί του θέματος.

Στο **Κεφάλαιο 3** μελετάται η εδαφική απόκριση της περιοχής Wildlife Liquefaction Array, στον σεισμό Elmore Ranch  $M=6.2$  (1987) και γίνονται ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις σεισμικής απόκρισης για συνθήκες απουσίας και πλήρους ρευστοποίησης, με σκοπό τον προσδιορισμό κατάλληλων συντελεστών συσχέτισης για την πρόβλεψη του πραγματικού φάσματος ενός ρευστοποιημένου εδάφους.



Στο **Κεφάλαιο 4** η περιοχή Wildlife Liquefaction Array αποτελεί και πάλι αντικείμενο έρευνας, όμως υπό τη σεισμική διέγερση Superstition Hills  $M=6.6$  (1987) αυτή τη φορά και ακολουθείται η ίδια διαδικασία με προηγούμενως.

Στο **Κεφάλαιο 5** ερευνάται η σεισμική απόκριση της περιοχής Port Island στο Kobe της Ιαπωνίας, στο σεισμό του Kobe  $M=7.2$  (1995) και πραγματοποιούνται αντίστοιχες αναλύσεις, όπως στα προηγούμενα κεφάλαια.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζεται η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και προτείνονται οι συντελεστές συσχέτισης των φασμάτων απόκρισης, χωρίς και με πλήρη ρευστοποίηση.

Στο **Κεφάλαιο 7** αναφέρονται τα τελικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ**

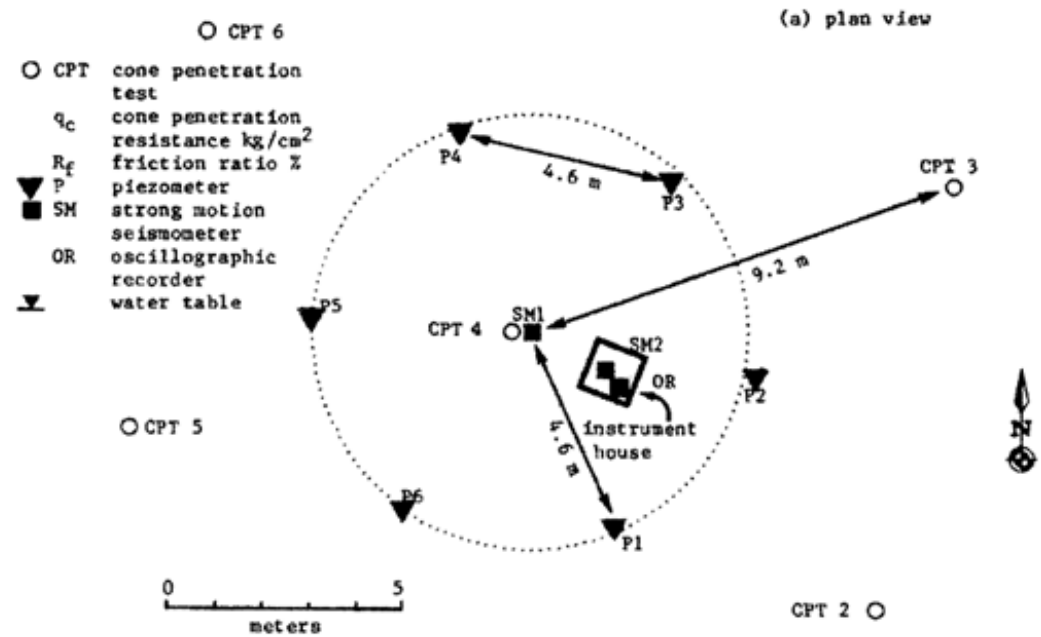
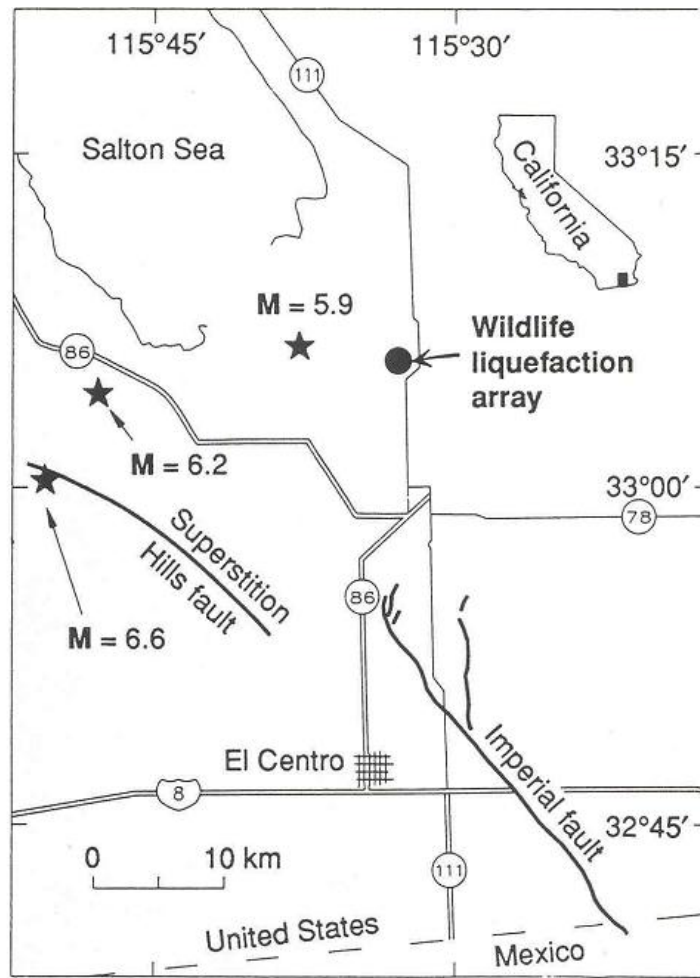
### **2.1 Γενικά**

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται αρχικά σε δύο περιοχές, οι οποίες έχουν ρευστοποιηθεί κατά το παρελθόν υπό την επίδραση ισχυρής σεισμικής διέγερσης και για τις οποίες υπάρχουν καταγραφές τόσο στην επιφάνεια του εδάφους, όσο και κάτω από το ρευστοποιημένο στρώμα. Ακολούθως, γίνεται σύντομη περιγραφή δημοσιευμένων εργασιών οι οποίες αποβλέπουν στην ποσοτική εκτίμηση των χαρακτηριστικών της σεισμικής δόνησης του ρευστοποιημένου εδάφους με απλές σχετικά μεθοδολογίες. Τέλος εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τα ερωτήματα που ετέθησαν στην εισαγωγή, εάν δηλαδή, η ρευστοποίηση προκαλεί πάντα απομείωση της σεισμικής δόνησης στην επιφάνεια και κατά πόσο η επίδραση αυτή μπορεί να προβλεφθεί με απλές μεθοδολογίες.

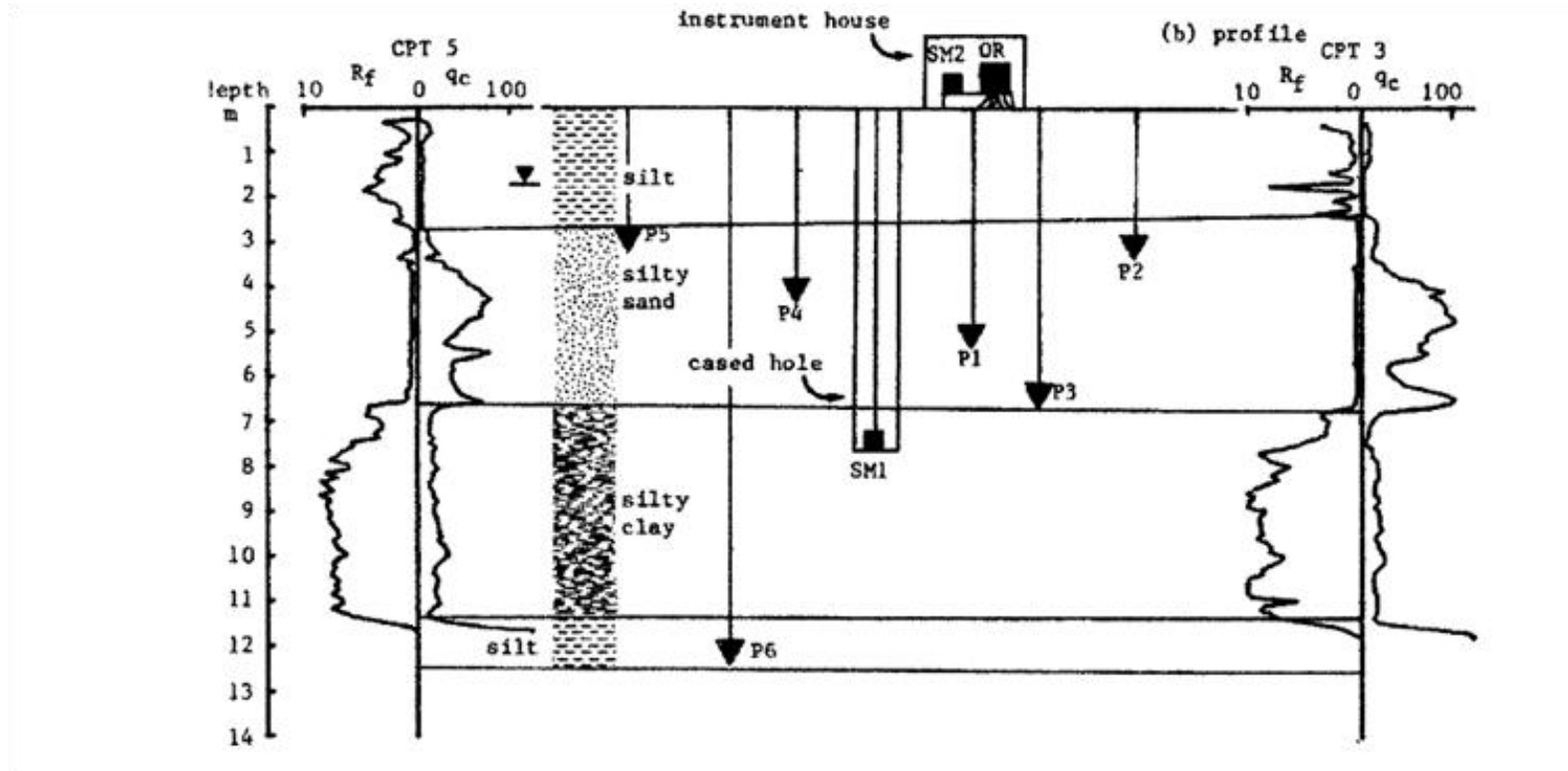
### **2.2 Περιοχή “Wildlife Liquefaction Array” (WLA)**

Η πρώτη περιοχή, που ρευστοποιήθηκε και στην οποία υπάρχουν καταγραφές στην επιφάνεια και στη βάση του ρευστοποιήσιμου εδάφους, είναι η “Wildlife Liquefaction Array” (WLA) που βρίσκεται στην περιοχή Imperial Valley, 160 km ανατολικά της πόλης Σαν Ντιέγκο, στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Η περιοχή έχει μεγάλη σεισμική επικινδυνότητα, καθώς πλήττεται από σεισμούς ικανούς να προκαλέσουν ρευστοποίηση με συχνότητα κατά μέσο όρο μία φορά στα 12 χρόνια. Για το λόγο αυτό, το 1982 η Εθνική Υπηρεσία Γεωτεχνικών Ερευνών της Αμερικής (United States Geological Survey, USGS) εγκατέστησε δύο επιταχυνσιογράφους (έναν σε βάθος 7.5m, σχεδόν στη βάση δηλαδή, του ρευστοποιήσιμου εδάφους και έναν στην επιφάνεια) καθώς και έξι πιεζόμετρα σε διαφορετικά βάθη.

Η περιοχή WLA αποτελείται στα 2.5 πρώτα μέτρα από λυώδεις και αργιλώδεις ποτάμιες αποθέσεις, στα επόμενα 4 μέτρα από χαλαρή ρευστοποιήσιμη λυώδη άμμο και τέλος από από εναλλαγές υπερ-στερεοποιημένης λύος και αργίλου πάχους 20 m. Ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε βάθος 1.5m. Το εδαφικό προφίλ της περιοχής μαζί με τα όργανα μέτρησης, σε κάτοψη και τομή, φαίνεται στα Σχήματα 2.1 & 2.2 αντίστοιχα.



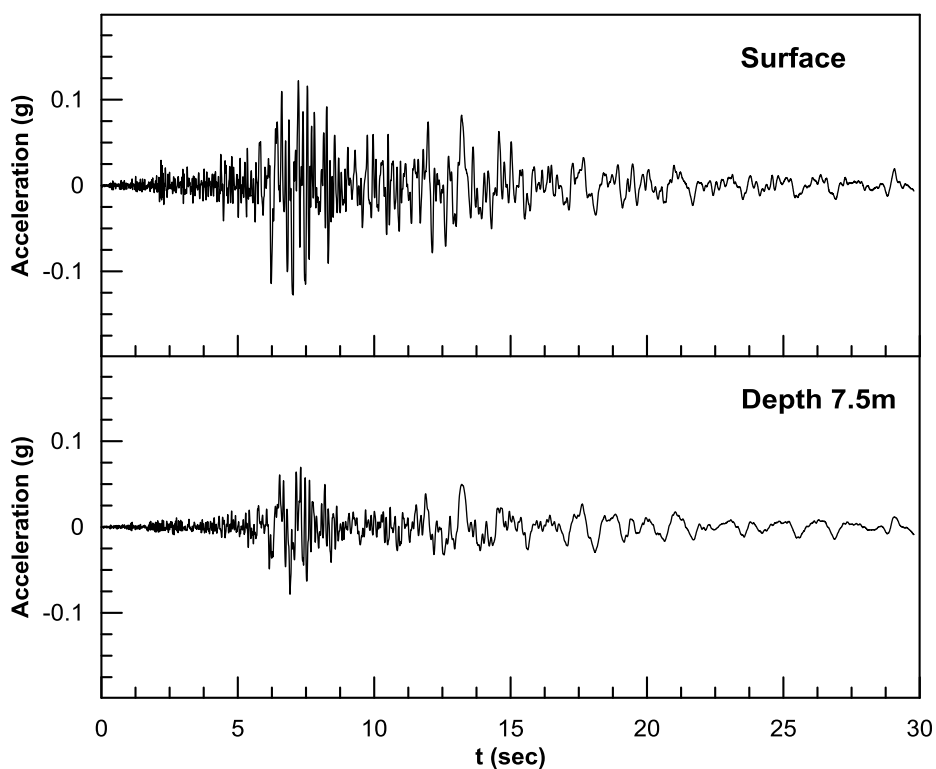
Σχήμα 2.1: Κάτοψη (α) ευρύτερης περιοχής και (β) θέσεων καταγραφικών οργάνων (Youd & Carter 2003)



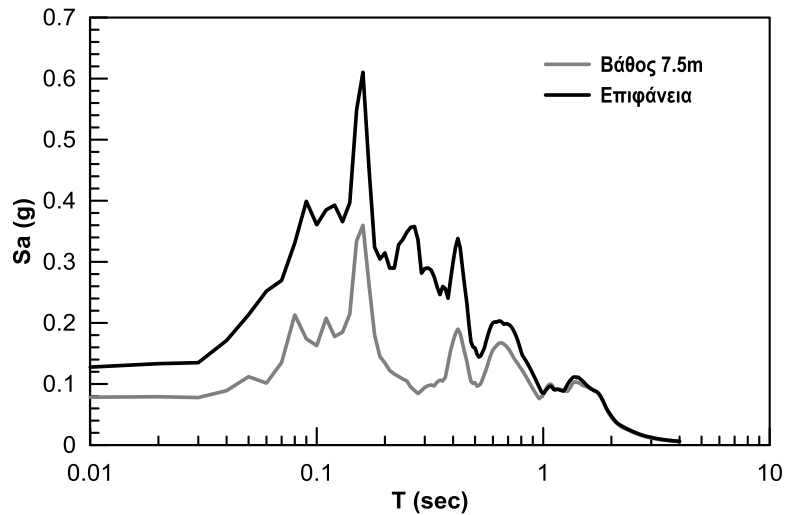
Σχήμα 2.2: Εδαφική τομή του WLA με τις θέσεις των καταγραφικών οργάνων (Youd & Carter 2003)

Μετά την εγκατάσταση των οργάνων μέτρησης, έχουν καταγραφεί δύο σημαντικές σεισμικές δονήσεις :

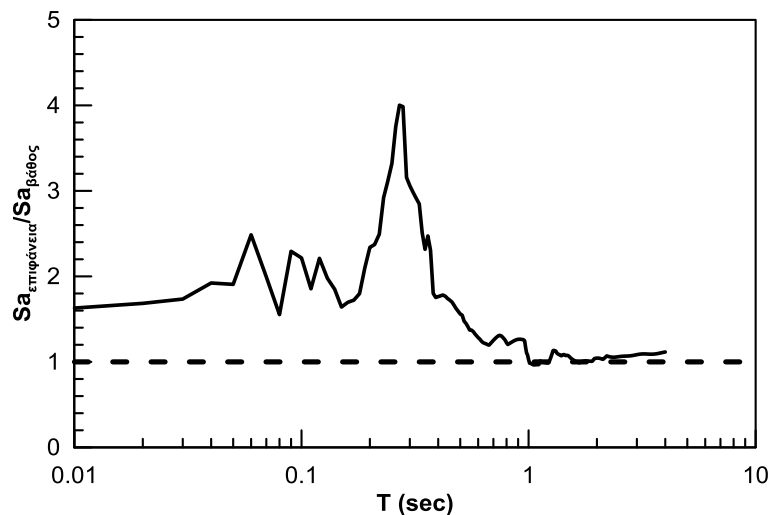
ι. Στις 23 Νοεμβρίου 1987, συνέβη ο σεισμός Elmore Ranch, σε απόσταση 23 km από το WLA, με μέγεθος  $M_w = 6.2$  και με μέγιστη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση ίση με  $0.13g$ , ο οποίος, όμως, δεν οδήγησε σε αύξηση των υπερπιέσεων πόρων. Οι χρονοιστορίες των επιταχύνσεων, τόσο στην επιφάνεια όσο και σε βάθος 7.5m, τα αντίστοιχα φάσματα, καθώς και ο λόγος τους παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.3 ÷ 2.5. Παρατηρούμε ότι στον σεισμό, αυτό, κατά τον οποίο δεν παρατηρήθηκε αύξηση της πίεσης πόρων, η φασματική επιτάχυνση αυξάνεται για ιδιοπεριόδους  $T < 1\text{sec}$ , ενώ δεν μεταβάλλεται αισθητά για μεγαλύτερες περιόδους.



**Σχήμα 2.3:** Χρονοιστορίες επιταχύνσεων στο WLA στον σεισμό του Elmore Ranch, 1987 στην επιφάνεια και σε βάθος 7.5m (Holzer et al., 1989)



**Σχήμα 2.4:** Φάσματα απόκρισης στην επιφάνεια και σε βάθος 7.5m στον σεισμό του Elmore Ranch (1987) στο WLA

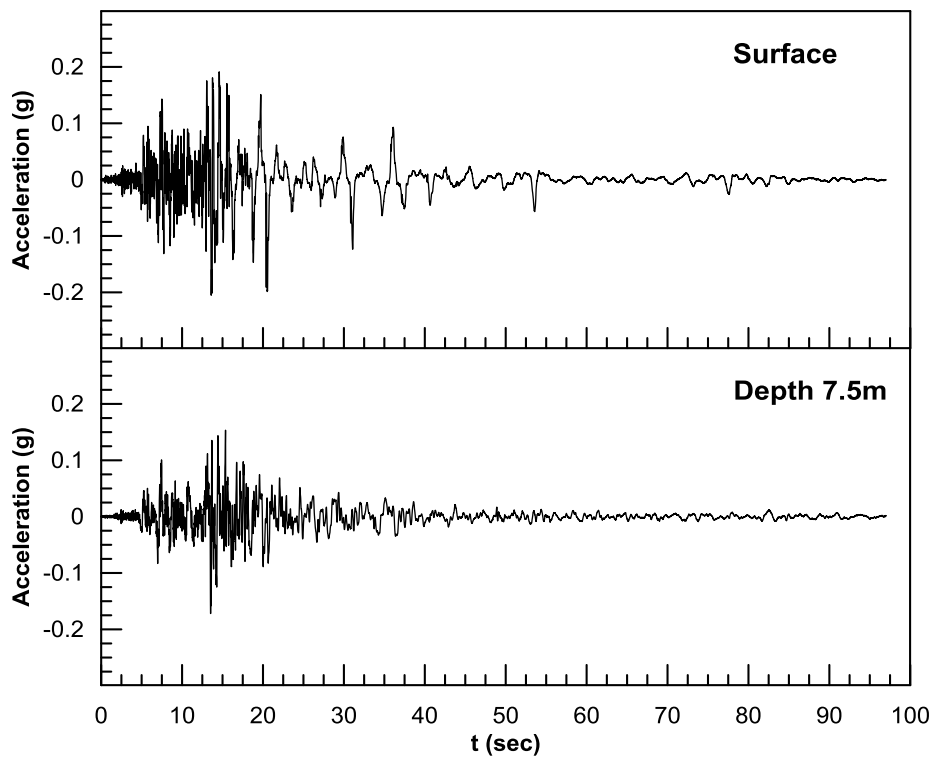


**Σχήμα 2.5:** Λόγος φασμάτων απόκρισης της επιφάνειας προς το βάθος των 7.5m στον σεισμό του Elmore Ranch (1987) στο WLA

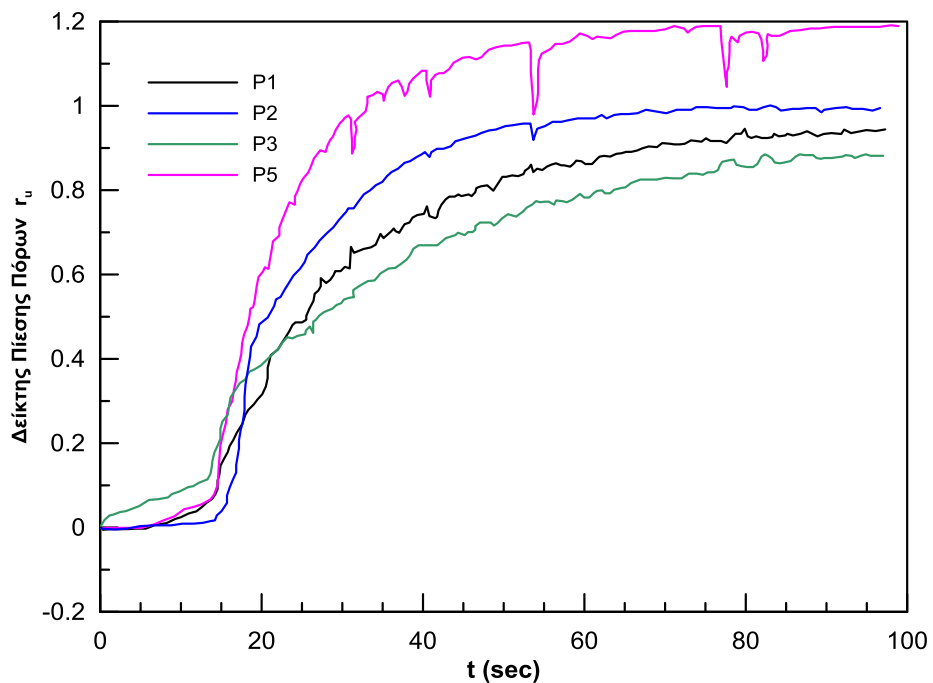
ii. Ο σεισμός Superstition Hills, μεγέθους  $M_w = 6.6$  και απόστασης 28km από το WLA, που συνέβη στις 24 Νοεμβρίου 1987, είναι ο δεύτερος που έχει καταγραφεί (Σχήμα 2.6). Σε αυτή την περίπτωση, καταγράφηκε σημαντική αύξηση των υπερπιέσεων πόρων ( $\Delta u$ ) που οδήγησε σε πλήρη ρευστοποίηση, δηλαδή σε δείκτη υπερπιέσεων πόρων  $r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} = 1$  (Σχήμα 2.7), ενώ η μέγιστη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση στην επιφάνεια ήταν 0.21g. Οι χρονιοστορίες των επιταχύνσεων, τόσο στην επιφάνεια και στη βάση του ρευστοποιημένου στρώματος, τα αντίστοιχα

φάσματα, καθώς και ο λόγος τους παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.8 & 2.9. Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να τονιστεί, ότι ο λόγος φασμάτων υποδεικνύει πως υπάρχει ενίσχυση της σεισμικής κίνησης στην επιφάνεια, ανεξαρτήτως ιδιοπεριόδου κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, η κορυφαία σεισμική επιτάχυνση (PGA) στη επιφάνεια ενισχύεται περίπου κατά 25% σε σύγκριση με την αντίστοιχη της βάσης και για περιόδους μεγαλύτερες από 0.5sec η διαφορά των δύο φασμάτων γίνεται εντονότερη. Η παρατήρηση αυτή, έρχεται εν γένει σε αντίθεση με την κυρίαρχη άποψη ότι η ρευστοποίηση προκαλεί απομείωση της σεισμικής διέγερσης.

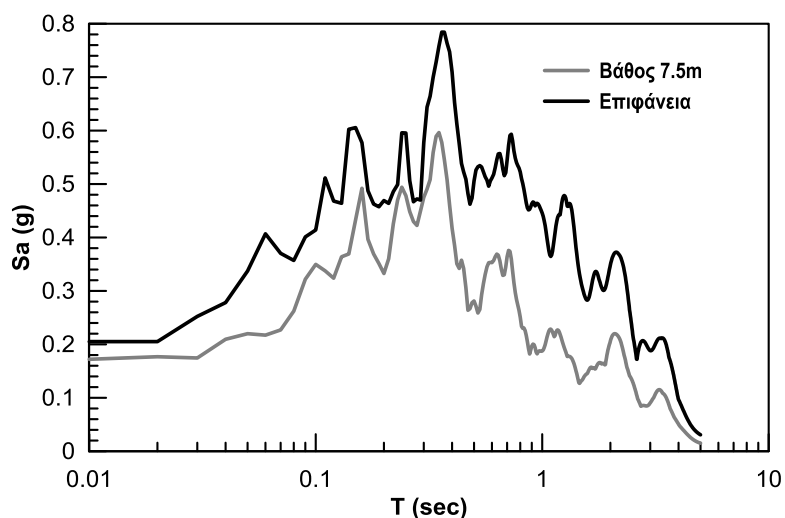




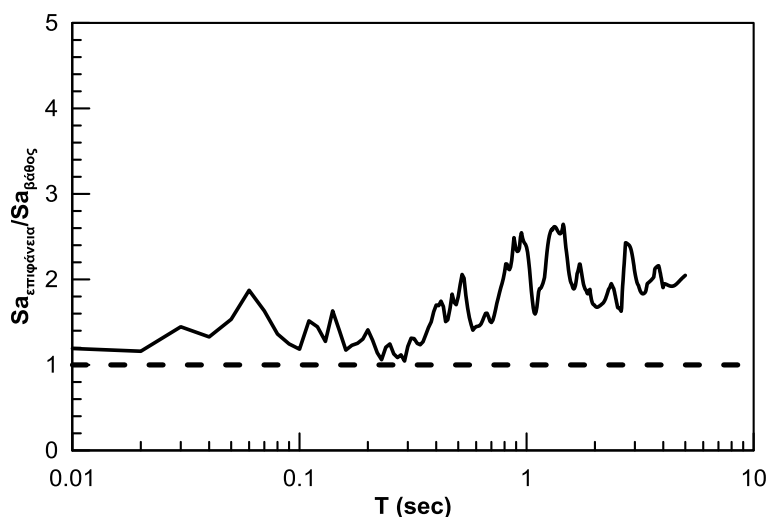
**Σχήμα 2.6:** Χρονοιστορίες επιταχύνσεων στο WLA στον σεισμό του Superstition Hills, 1987 στην επιφάνεια και σε βάθος 7.5m (Holzer et al., 1989)



**Σχήμα 2.7:** Χρονοιστορία του δείκτη υπερπίεσεων πόρων  $r_u$  στο WLA στον σεισμό του Superstition Hills, 1987 ( $M_w = 6.6$ ) (Holzer et al., 1989)



**Σχήμα 2.8:** Φάσματα στην επιφάνεια και σε βάθος 7.5m στον σεισμό του Superstition Hills (1987) στο WLA



**Σχήμα 2.9:** Λόγος φασμάτων απόκρισης της επιφάνειας προς το βάθος των 7.5m στον σεισμό του Superstition Hills (1987) στο WLA

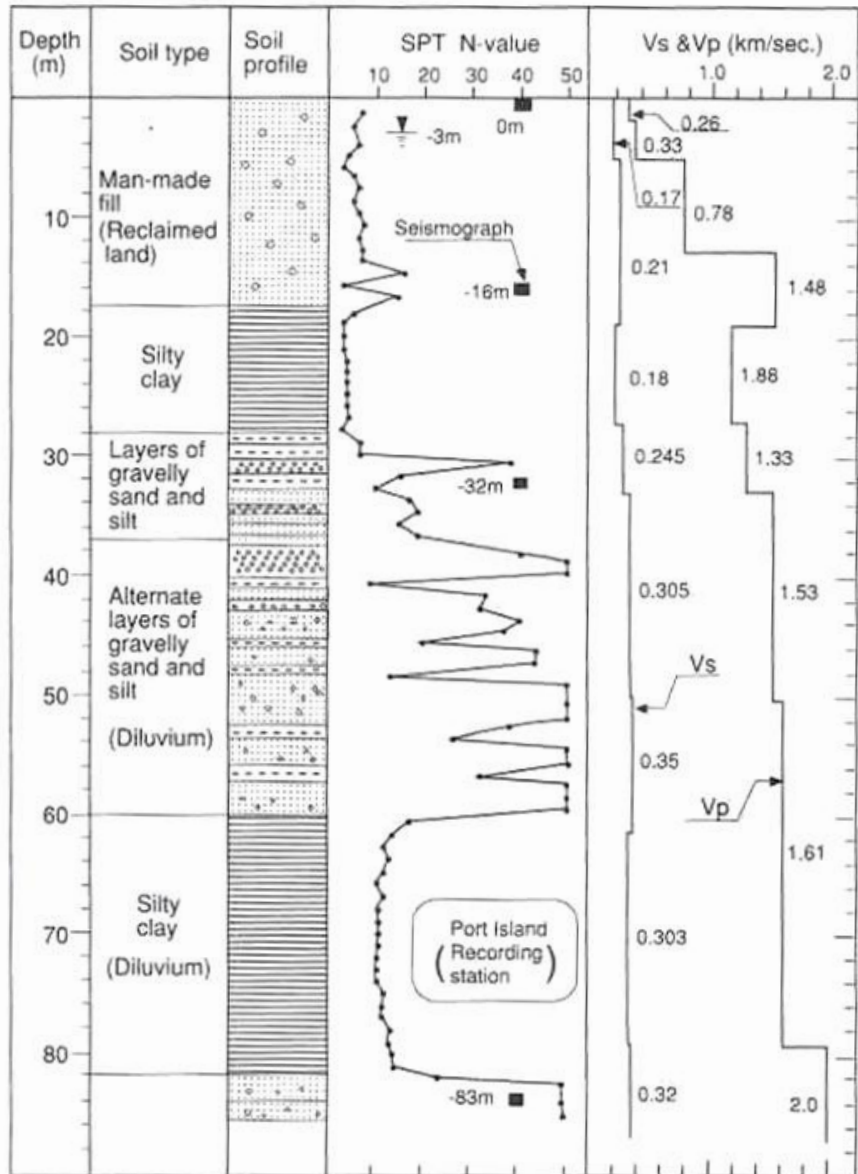
### 2.3 Περιοχή “PORT ISLAND”

Το δεύτερο ιστορικό περιστατικό που παρουσιάζεται, προέρχεται από τον σεισμό του Kobe ( $M_w = 7.2$ ) στην Ιαπωνία το 1995, μια χώρα που έχει υποστεί μεγάλους και ιδιαίτερα καταστροφικούς σεισμούς λόγω του ότι βρίσκεται στην ηφαιστειακή ζώνη του Ειρηνικού Ωκεανού στη συμβολή τριών τεκτονικών πλακών. Ο σεισμός αυτός προκάλεσε μεγάλες καταστροφές στις γύρω περιοχές και ιδιαίτερα στο τεχνητό νησί

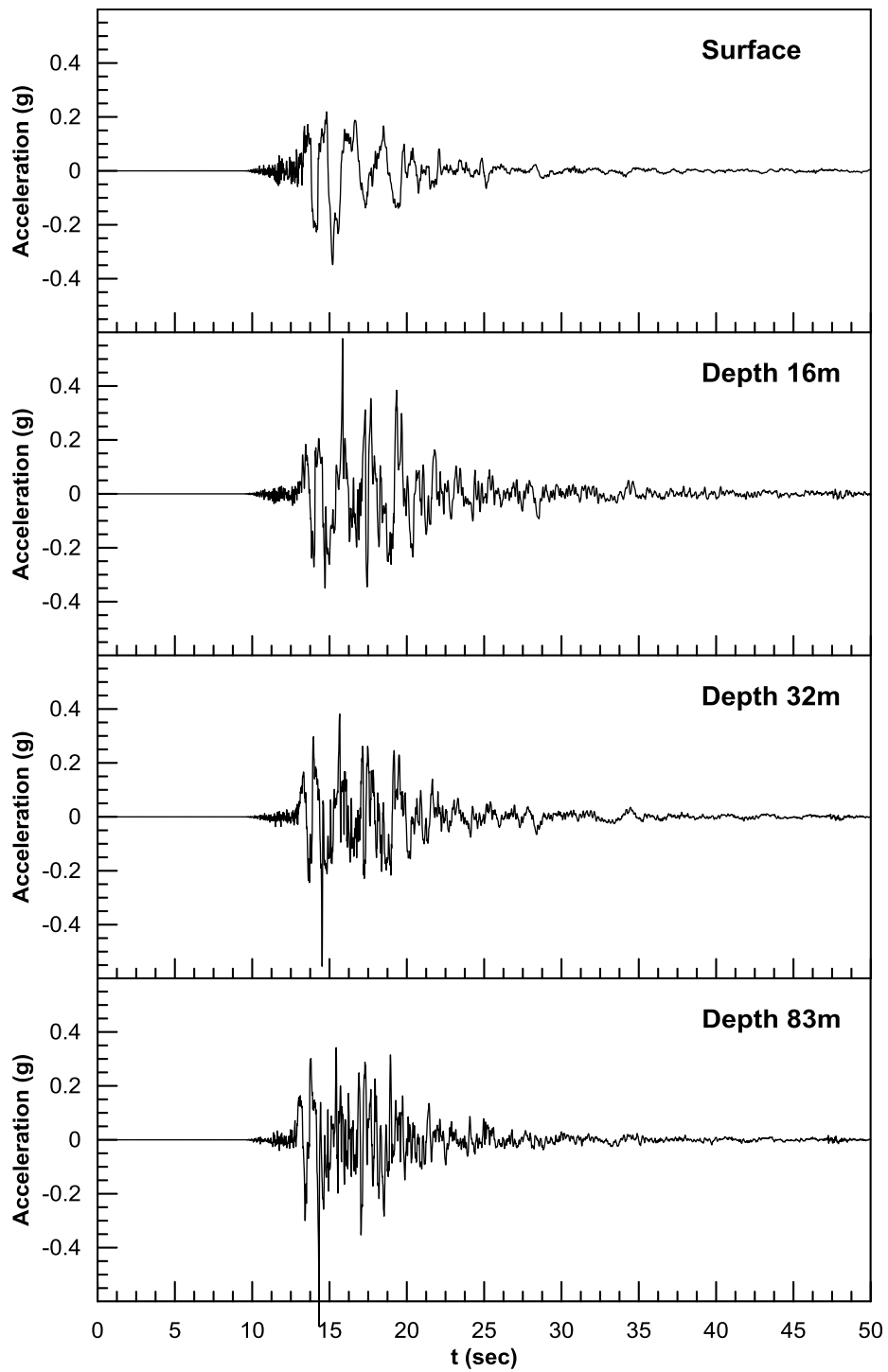
Port Island, το οποίο απείχε 5km από το επίκεντρο του σεισμού και αποτελεί αντικείμενο της έρευνάς μας.

Το Port Island κατασκευάστηκε από χαλαρά κοκκώδη εδαφικά υλικά, προερχόμενα από τα βουνά της γύρω περιοχής, μικρό μέρος των οποίων συμπυκνώθηκε κατά την τοποθέτησή του στη τελική θέση, ώστε και να αποφευχθεί ο κίνδυνος ρευστοποίησης. Κατά την κατασκευή του, τοποθετήθηκαν τέσσερις επιταχυνσιογράφοι (στην επιφάνεια και σε βάθη 16, 32, 83 m), χωρίς αυτό να συνδυάζεται από αντίστοιχη τοποθέτηση πιεζομέτρων, όπως στο WLA. Το εδαφικό προφίλ στην θέση του νησιού αποτελείται από ένα στρώμα συμπυκνωμένου επιχώματος πάχους 4 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, από 15 m χαλαρού επιχώματος που αποτελείται κυρίως από αμμοχάλικα, από 8 m αλλουβιακής αργίλου, από εναλλαγές πυκνής άμμου και συφρής αργίλου συνολικού πάχους 34 m και τέλος από 20 m υπερ-στερεοποιημένης αργίλου(Σχήμα 2.10).

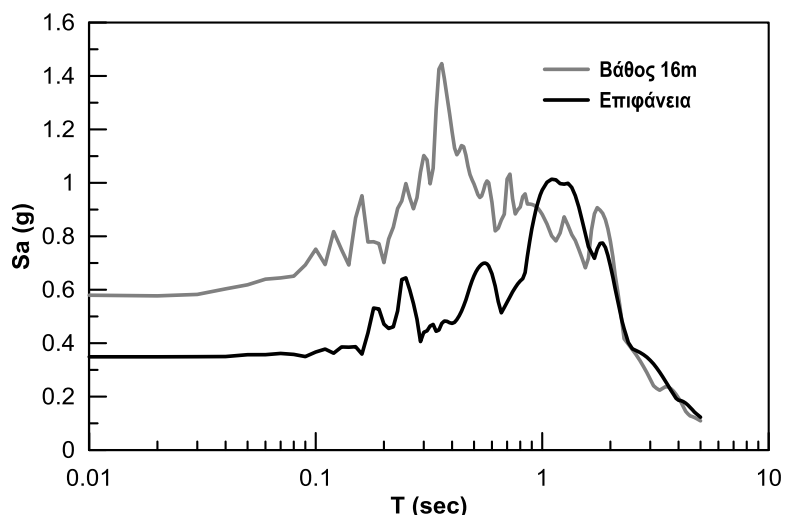
Λόγω του ισχυρού σεισμού, ρευστοποιήθηκε το στρώμα χαλαρού επιχώματος και παρά το γεγονός ότι δεν υπήρχαν εγκατεστημένα πιεζόμετρα, η ρευστοποίηση ήταν εμφανής από τις εκτεταμένες καθιζήσεις και τους κρατήρες άμμου στην επιφάνεια του νησιού. Στο Σχήμα 2.11 φαίνονται οι καταγραφές της σεισμικής επιτάχυνσης στα τέσσερα διαφορετικά βάθη και στο Σχήμα 2.12 τα φάσματα στην επιφάνεια και κάτω από την ρευστοποιημένη στρώση σε βάθος 16 m. Ο λόγος φασμάτων απόκρισης (επιφάνεια προς βάση) στο Σχήμα 2.13 υποδεικνύει ότι υπάρχει μεγάλη απομείωση της δόνησης στην επιφάνεια λόγω ρευστοποίησης για περιόδους  $T < 1$  sec, ενώ για μεγαλύτερες ο λόγος αυξάνεται και γίνεται ελαφρώς μεγαλύτερος της μονάδας. Η κορυφαία σεισμική επιτάχυνση μειώθηκε κατά 40%.



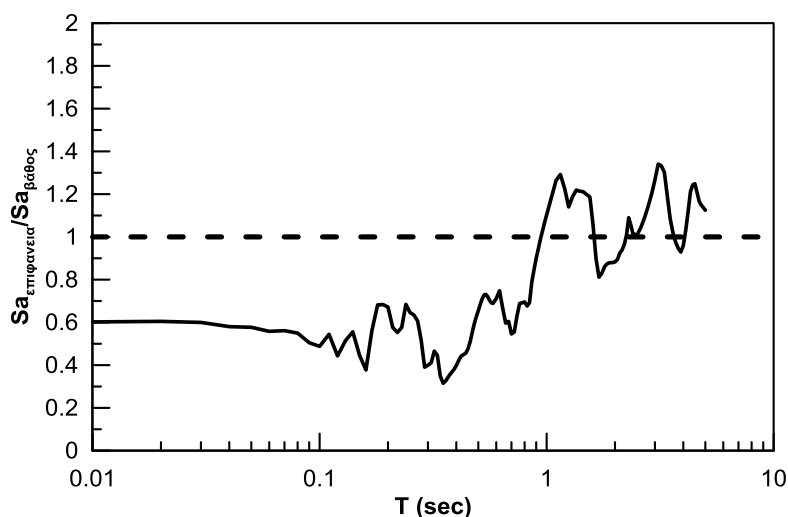
Σχήμα 2.10: Εδαφική τομή του Port Island και θέσεις των καταγραφών (Ishihara et al., 1996)



**Σχήμα 2.11:** Χρονοιστορίες επιταχύνσεων από το σεισμό του Kobe (1995) στο Port Island (Iwasaki, 1995)



**Σχήμα 2.12:** Φάσματα στην επιφάνεια και σε βάθος 16m από τον σεισμό του Kobe (1995) στο Port Island

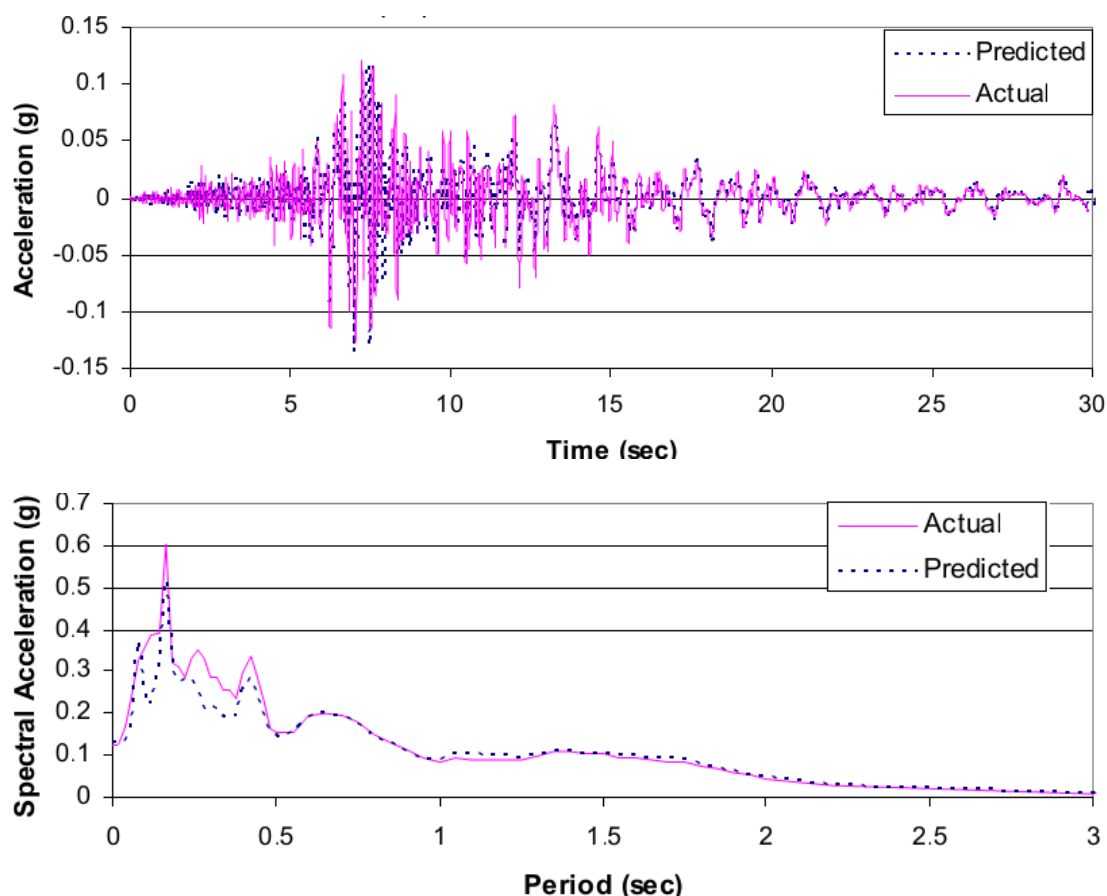


**Σχήμα 2.13:** Λόγος φασμάτων στην επιφάνεια προς το βάθος των 16m στον σεισμό του Kobe (1995) στο Port Island

## 2.4 Youd and Carter (2005)

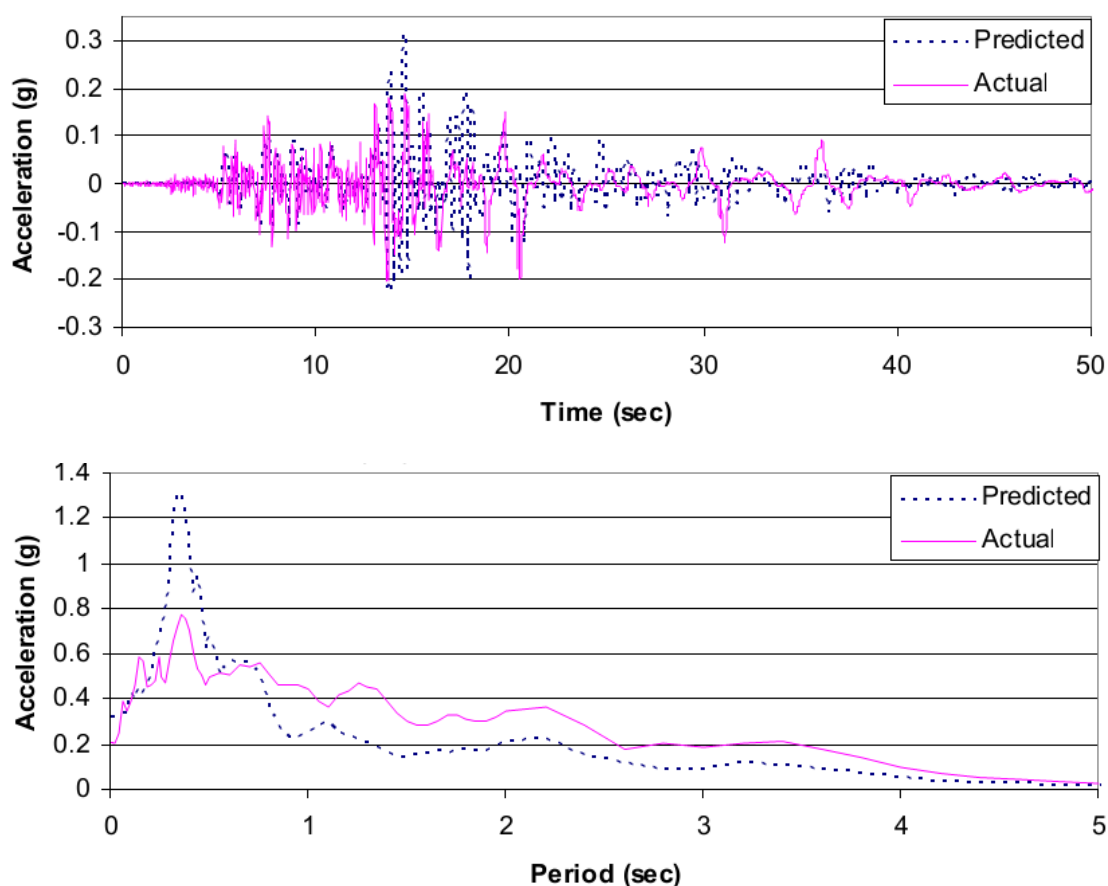
Οι Youd και Carter (2005) εξέτασαν την επίδραση της ρευστοποίησης στην σεισμική απόκριση του εδάφους με απώτερο σκοπό να ελέγξουν την επάρκεια των φασμάτων σχεδιασμού των Αντισεισμικών Κανονισμών σε περιπτώσεις ρευστοποιήσιμων εδαφών. Αρχικά, μελέτησαν την περιοχή WLA, υπό την επίδραση δύο σεισμικών δονήσεων, του σεισμού Elmore Ranch και του Superstition Hills. Χρησιμοποιώντας το επιταχυνσιογράφημα που καταγράφηκε σε βάθος 7.5m,

έκαναν για κάθε δόνηση ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις με το πρόγραμμα PROSHAKE (Schubel et al. 1972), εκτίμησαν τις χρονοϊστορίες των επιταχύνσεων και τα φάσματα απόκρισης που θα είχαν καταγραφεί στη επιφάνεια του εδάφους, αν δεν είχε πραγματοποιηθεί ρευστοποίηση, και τα συνέκριναν με τις πραγματικές καταγραφές. Οι εδαφικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις, μετρήθηκαν είτε πριν το σεισμό ή αρκετό χρόνο μετά το αυτόν, ενώ για τις άμμους χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες καμπύλες  $G/G_{max} - \log \gamma$  και απόσβεσης που προτείνονται από τους Seed & Idriss (1970). Οι εδαφικές αυτές ιδιότητες, καθώς και η μεθοδολογία της ανάλυσης πιστοποιήθηκαν συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των αναλύσεων για το σεισμό Elmore Ranch (1987) με τα πραγματικά και καθώς το έδαφος δεν ρευστοποιήθηκε, θα έπρεπε να ταυτίζονται. Οι πραγματικές και οι εκτιμώμενες χωρίς ρευστοποίηση χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στην επιφάνεια και τα αντίστοιχα φάσματα απόκρισης συγκρίνονται στο Σχήμα 2.14.



**Σχήμα 2.14:** Σύγκριση πραγματικών και εκτιμώμενων (α) επιταχύνσεων και (β) φασμάτων απόκρισης στην επιφάνεια του WLA από το σεισμό του Elmore Ranch, 1987 (Youd & Carter, 2005)

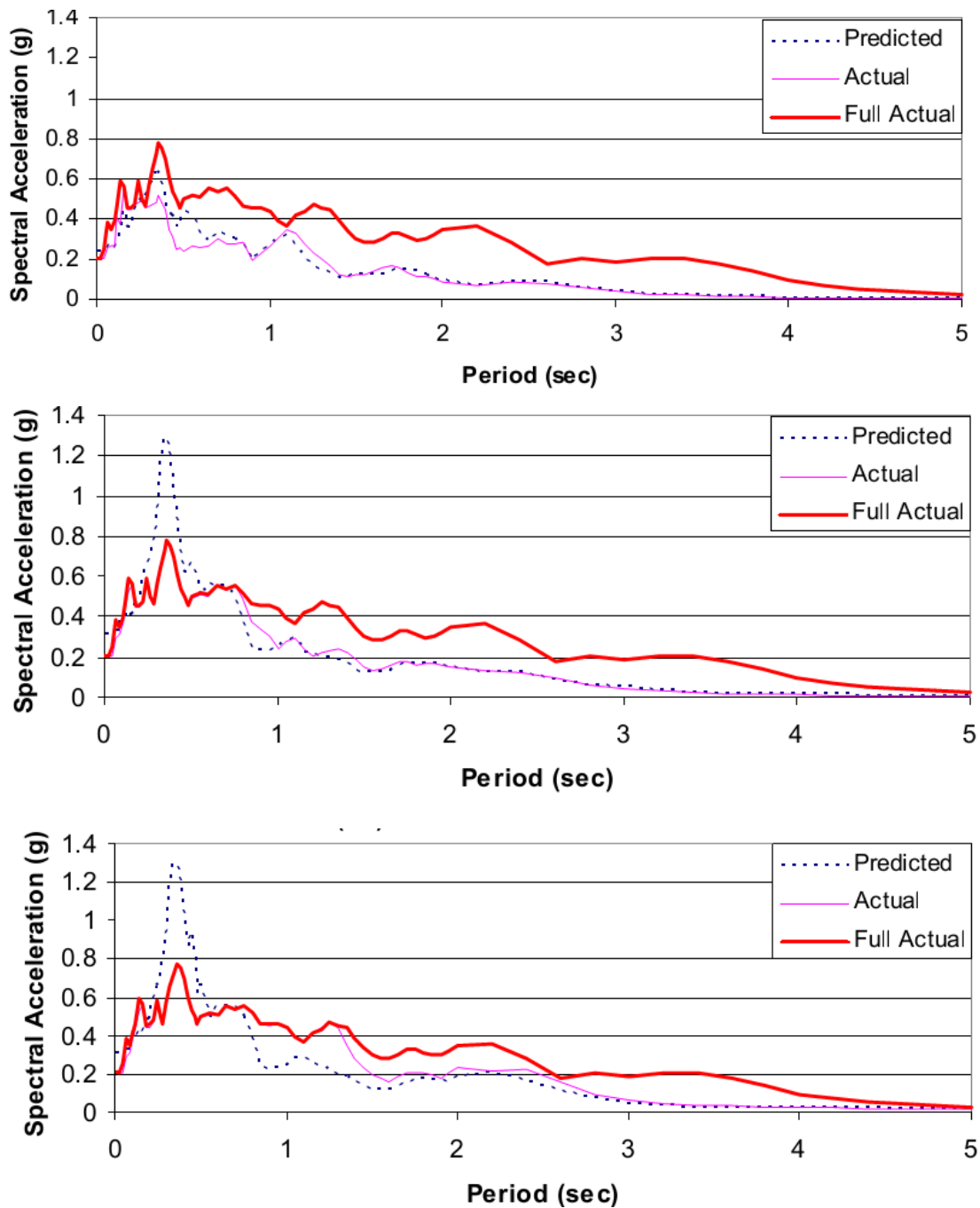
Παρατηρήθηκε ότι το προβλεπόμενο επιταχυνσιογράφημα, ταιριάζει με το πραγματικό, με τη διαφορά ότι υποεκτιμούνται σε μικρό βαθμό οι μέγιστες επιταχύνσεις. Επιπλέον τα δύο φάσματα ταυτίζονται για περιόδους  $T > 0.4$  sec, ενώ για μικρότερες περιόδους τα φάσματα έχουν την ίδια μορφή, με το εκτιμώμενο να βρίσκεται ελαφρώς κάτω από το πραγματικό. Τελικώς, οι εν λόγω διαφορές στα φάσματα θεωρήθηκαν μικρές οπότε στη συνέχεια, επανέλαβαν τις αναλύσεις τους για το σεισμό Superstition Hills (1987), χρησιμοποιώντας τις ίδιες ακριβώς ιδιότητες του εδάφους. Οι πραγματικές και οι εκτιμώμενες χωρίς ρευστοποίηση χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στην επιφάνεια και τα αντίστοιχα φάσματα απόκρισης παρατίθενται στο Σχήμα 2.15. Όπως γίνεται φανερό, οι μεγάλες προβλεπόμενες επιταχύνσεις για  $T < 0.8$  sec απουσιάζουν από το πραγματικό φάσμα. Αντίθετα για  $T > 1$  sec, οι πραγματικές επιταχύνσεις είναι μεγαλύτερες από τις εκτιμώμενες, γεγονός που υποδηλώνει αύξηση των μακροπερίοδων ταλαντώσεων.



**Σχήμα 2.15:** Σύγκριση πραγματικών και εκτιμώμενων (α) επιταχύνσεων και (β) φασμάτων απόκρισης στην επιφάνεια του WLA από το σεισμό του Superstition Hills, 1987 (Youd & Carter, 2005)



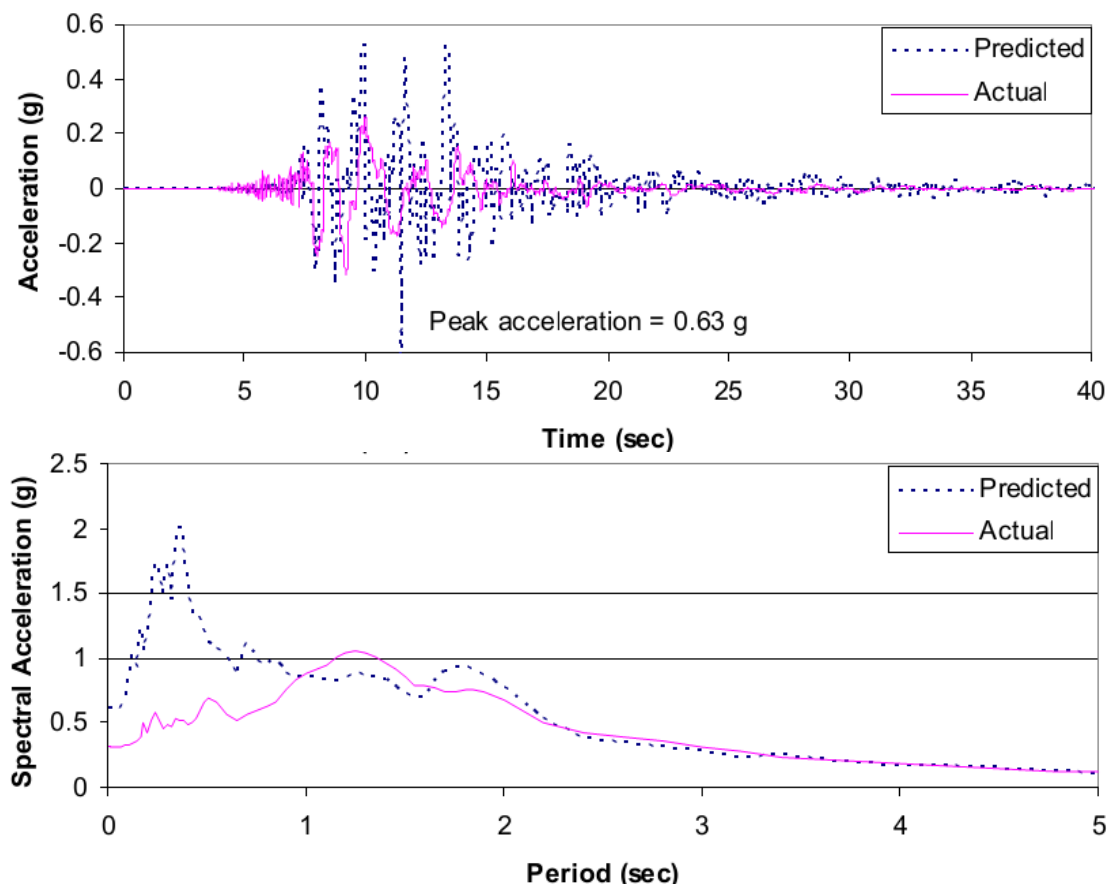
Στη συνέχεια, για να εξακριβώσουν πότε απομειώθηκαν οι υψίσυχνες ταλαντώσεις και πότε ενισχύθηκαν οι μακροπερίοδες “έκοψαν” τα επιταχυνσιογραφήματα σε κάποιες χρονικές στιγμές και υπολόγισαν τα αντίστοιχα φάσματα (Σχήμα 2.16). Παρατηρείται ότι για τη διέγερση από την αρχή μέχρι τα 13.6sec, τη στιγμή δηλαδή του πρώτου μεγάλου παλμού, το πραγματικό φάσμα ταυτίζεται, σχεδόν, με το προβλεπόμενο, καθώς δεν έχει πραγματοποιηθεί ακόμα σημαντική χαλάρωση του εδάφους. Στο επόμενο 1.4sec της διέγερσης (δηλαδή μέχρι τα 15 sec) στο WLA φτάνουν οι πιο ισχυροί παλμοί, γεγονός που προκαλεί μεγάλες επιταχύνσεις στο εκτιμώμενο φάσμα, οι οποίες όμως απουσιάζουν από το πραγματικό. Ο συντελεστής υπερπίεσεων πόρων αυξάνεται σε αυτό το χρονικό διάστημα από 0.05 σε 0.20 (Σχήμα 2.7) με επακόλουθο την χαλάρωση του εδάφους και την απορρόφηση των υψίσυχνων ταλαντώσεων. Ομοίως για τα πρώτα 20 sec του σεισμού, οι πραγματικές φασματικές επιταχύνσεις για μικρές περιόδους ( $T < 0.8\text{sec}$ ) είναι απομειωμένες σε σχέση με αυτές που προέκυψαν την ανάλυση με PROSHAKE. Μετά τα 20sec οι ταλαντώσεις που έφταναν στην επιφάνεια ήταν αποκλειστικά μακροπερίοδες λόγω ρευστοποίησης, με αποτέλεσμα να ενισχυθούν οι επιταχύνσεις για περιόδους μεγαλύτερες από 1.2sec.



**Σχήμα 2.16:** Σύγκριση εκτιμώμενων και πραγματικών φασμάτων απόκρισης στην επιφάνεια του WLA από το σεισμό του Superstition Hills (1987) για (α)0-13.6sec, (β) 0-15sec, (γ)0-20sec (Youd & Carter, 2005)

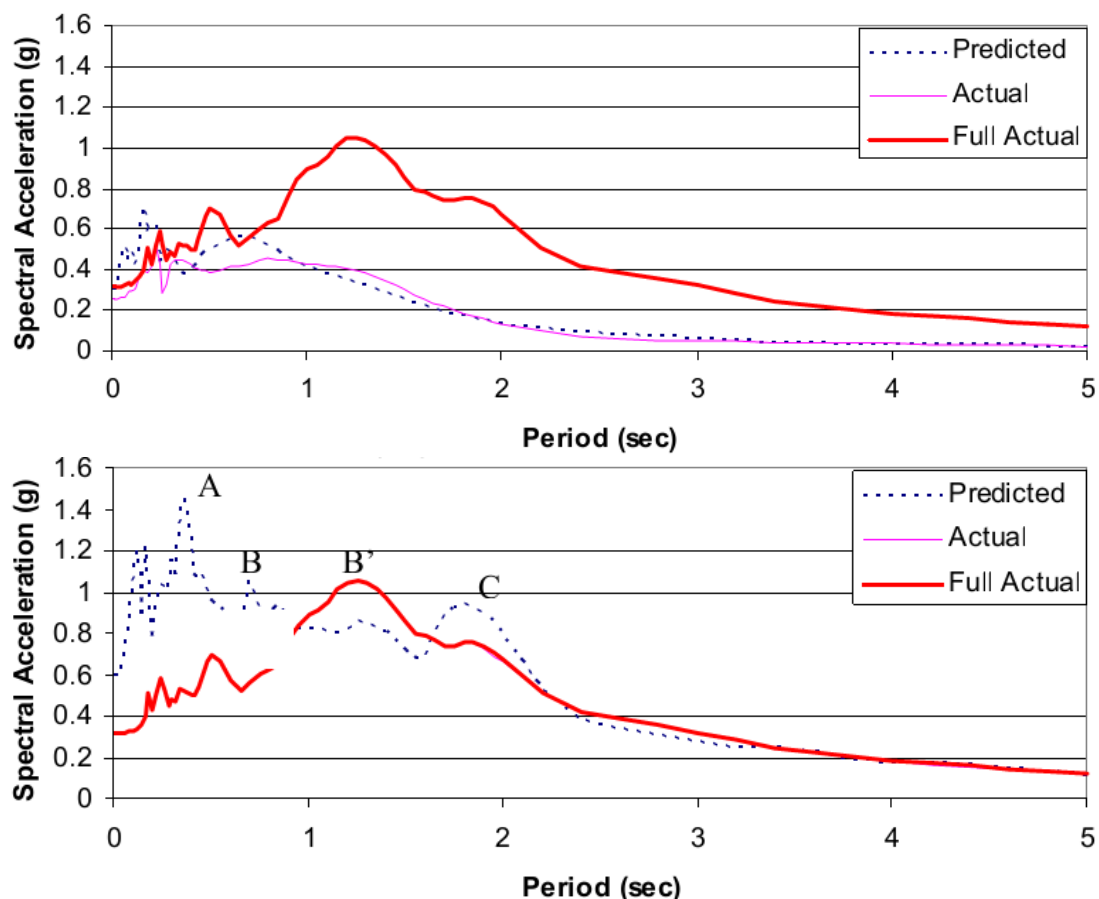
Στη συνέχεια, ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με πριν, μελέτησαν το σεισμό του Kobe (1995) στην Ιαπωνία για την περιοχή του Port Island, χρησιμοποιώντας ως διέγερση βάσης την καταγραφή σε βάθος 16m. Σε αυτόν τον σεισμό οι πραγματικές και οι εκτιμώμενες χρονοιστορίες (Σχήμα 2.17α) ταυτίζονται σχεδόν μέχρι τα 7sec από την έναρξη της δόνησης, στιγμή κατά την οποία φτάνει στην επιφάνεια ο

πρώτος παλμός με πλάτος μεγαλύτερος από 0.2g. Από αυτή τη στιγμή και έπειτα η περίοδος της πραγματικής διέγερσης αρχίζει να μεγαλώνει και αντίστοιχα να μειώνεται το πλάτος ταλάντωσης (γεγονός που υποδεικνύει ότι η περιοχή ρευστοποιήθηκε πολύ γρήγορα), καταλήγοντας μετά τα 10sec να χάνεται οποιαδήποτε συνοχή μεταξύ των δύο διεγέρσεων. Αξιοσημείωτη είναι η μείωση της προβλεπόμενης μέγιστης επιτάχυνσης από 0.63g σε 0.34g. Από τα φάσματα απόκρισης (Σχήμα 2.17β) προκύπτει ότι η χαλάρωση του εδάφους συνέβη γρήγορα και κατ' επέκταση υπάρχει απομείωση των φασματικών επιταχύνσεων (έως 4 φορές) για  $T < 1\text{sec}$ , ενώ παρατηρείται μικρή ενίσχυση της επιτάχυνσης για  $1\text{sec} < T < 1.6\text{sec}$ . Τέλος για πολύ μεγάλες περιόδους ( $T > 2.3\text{sec}$ ) το προβλεπόμενο φάσμα απόκρισης ταυτίζεται με το πραγματικό.



**Σχήμα 2.17:** Σύγκριση πραγματικών και εκτιμώμενων (α)επιταχύνσεων και (β)φασμάτων απόκρισης στην επιφάνεια του Port Island από το σεισμό του Κόμπε, 1995 (Youd & Carter, 2005)

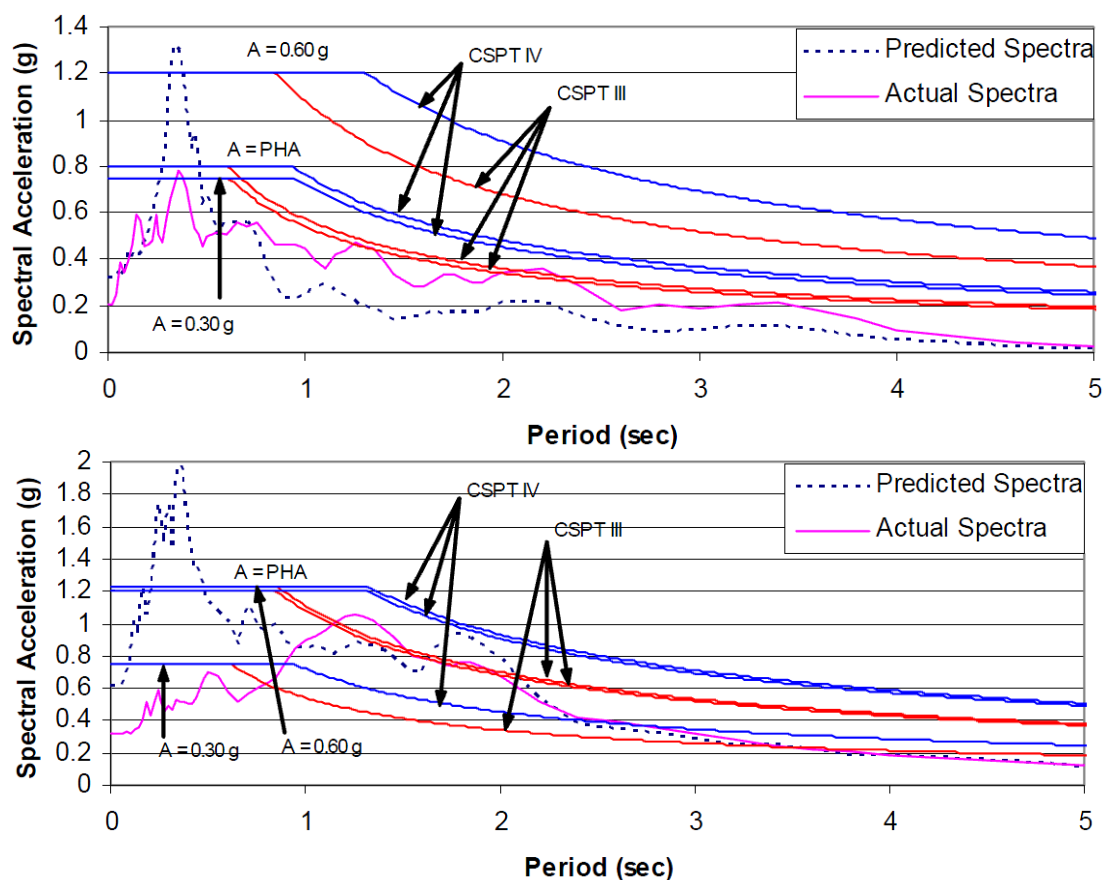
Κατόπιν, για να εξετάσουν, το πώς επηρεάζει την σεισμική απόκριση του εδάφους η χρονική στιγμή έναρξης της ρευστοποίησης, υπολόγισαν τα φάσματα απόκρισης για τα πρώτα 8.3 και 14.5 sec της δόνησης (Σχήμα 2.18). Στην πρώτη περίπτωση το προβλεπόμενο και το πραγματικό φάσμα παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα, 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  $T < 1\text{sec}$ . Η ίδια εικόνα παρουσιάζεται και για  $T=1.7 \div 2.1\text{sec}$  και άρα γίνεται φανερό ότι οι ταλαντώσεις με αυτή την περίοδο φιλτραρίστηκαν από το ρευστοποιημένο έδαφος. Επισημαίνεται ότι το γεγονός αυτό δεν παρατηρήθηκε στο WLA (Σχήμα 2.16).



**Σχήμα 2.18:** 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)

Στη συνέχεια, ερευνήθηκε κατά πόσο τα φάσματα σχεδιασμού που προτείνονται από τους διάφορους Αντισεισμικούς Κανονισμούς θα μπορούσαν να επεκταθούν και στην περίπτωση ρευστοποιημένων εδαφών. Πιο συγκεκριμένα, 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 φάσματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.19, στο οποίο 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 1sec 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.



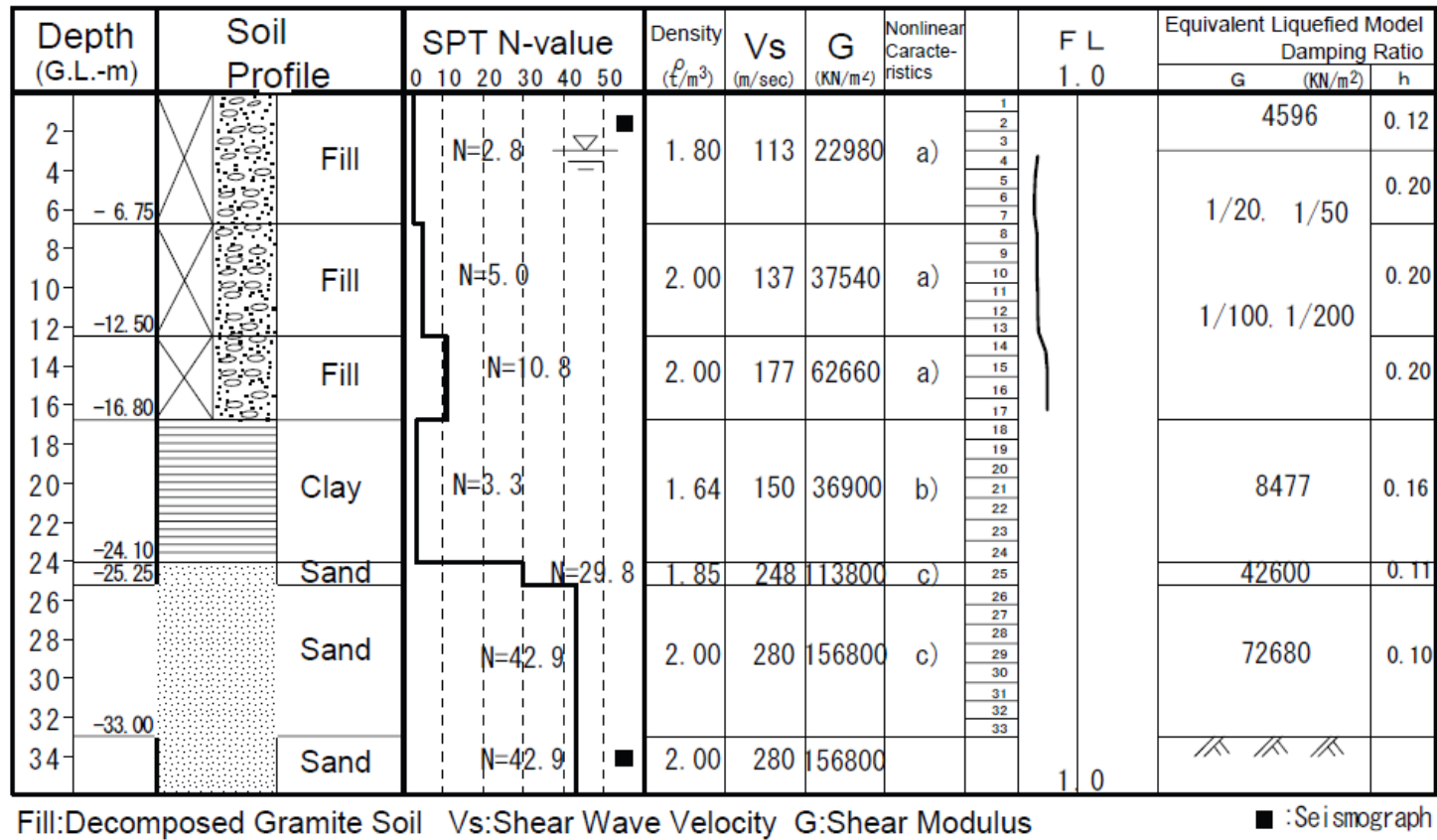
**Σχήμα 2.19:** Σύγκριση πραγματικών φασμάτων απόκρισης στο (α)WLA, (β)Port Island με τα φάσματα αντίστοιχων Αντισεισμικών Κανονισμών ( Youd & Carter, 2005)

## 2.5 Miwa and Ikeda (2006)

Οι Miwa και Ikeda (2006) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία πρόβλεψης της σεισμικής απόκρισης 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, ανέσυραν από τη βιβλιογραφία εκτιμήσεις του μέτρου διάτμησης μετά τη ρευστοποίηση στο Port Island κατά το σεισμό του Κόμπε (Πίνακας 2.1). Οι εκτιμήσεις αυτές προέκυψαν από ανάστροφες αναλύσεις των καταγραφών και καταλήγουν σε μια μείωση του μέτρου διάτμησης της τάξεως του  $1/20 \div 1/100$  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 2.20). Η παραμετρική διερεύνηση έδειξε ότι υπάρχει καλή ταύτιση των πραγματικών και των αριθμητικών αποτελεσμάτων όταν ο μειωτικός συντελεστής του μέτρου διάτμησης είναι  $1/50 - 1/100$  (Σχήμα 2.21α). 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 2.21β).

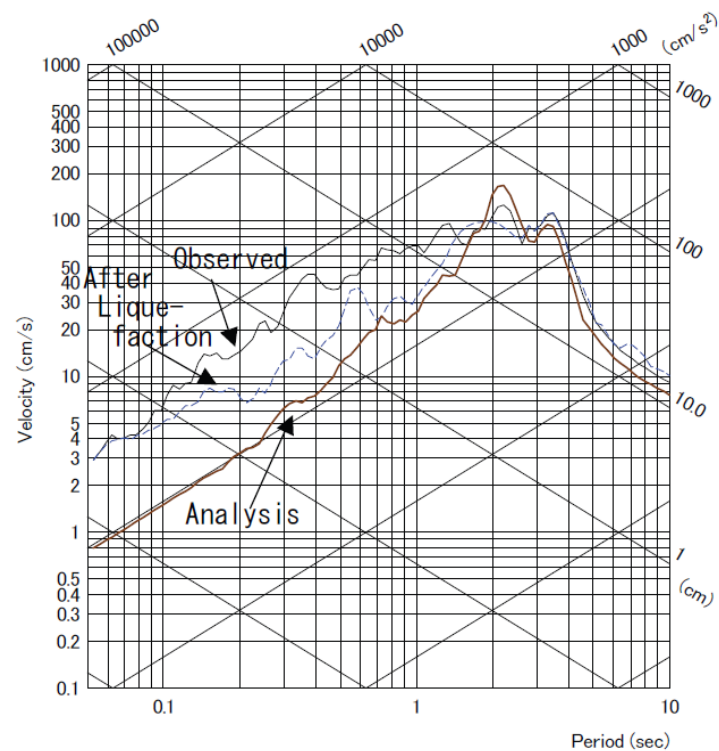
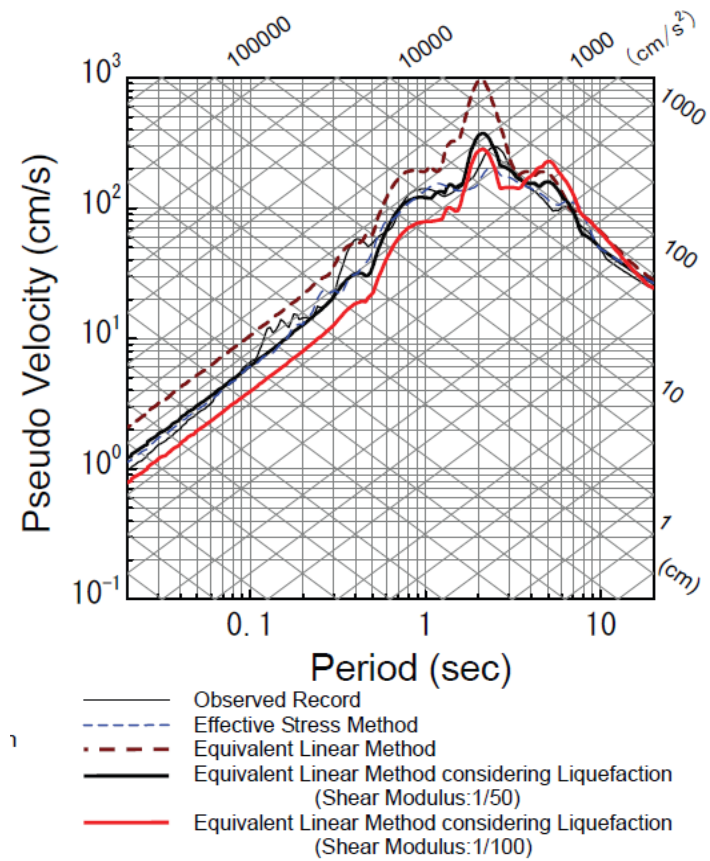
**Πίνακας 2.1:** Εκτιμήσεις της μείωσης του μέτρου διάτμησης στο ρευστοποιημένο στρώμα του PortIsland (Miwa&Ikeda, 2006)

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	Shear wave 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	—	propagation velocity of peak of observation records
8	9	Mochizuki et al.	0.05	—	Cross-correlation analysis



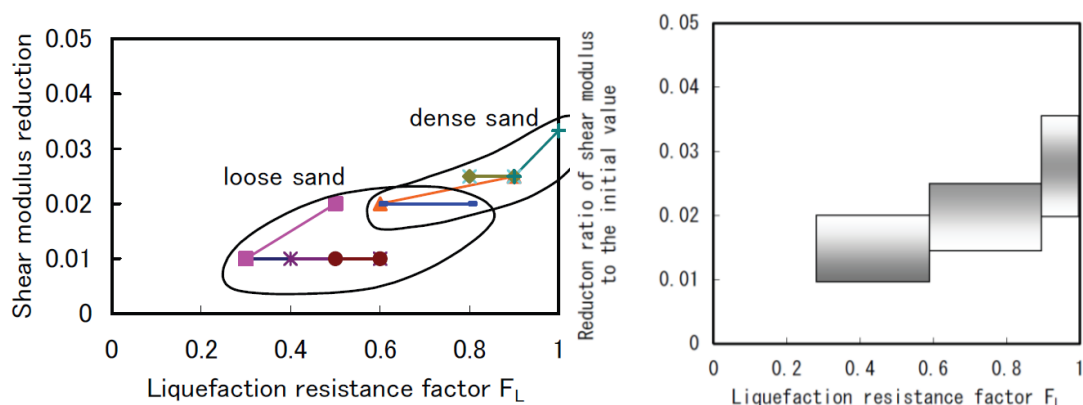
Σχήμα 2.20: Εδαφικό προφίλ του “East Kobe Bridge” (Miwa & Ikeda, 2006)





**Σχήμα 2.21:** Σύγκριση φασμάτων ψεύδο – ταχύτητας στην επιφάνεια (α) του “East Kobe Bridge” και (β) του “Wildlife Liquefaction Array” (Miwa & Ikeda, 2006)

Στη συνέχεια, εκτίμησαν τον μειωτικό συντελεστή του μέτρου διάτμησης για διάφορες περιοχές που έχουν ρευστοποιηθεί, είτε μέσω των πραγματικών καταγραφών ή μέσω της προτεινομένης μεθοδολογίας (Πίνακας 2.2) και τον συσχέτισαν με τον συντελεστή ασφάλειας έναντι ρευστοποίησης (Σχήμα 2.22α). Παρατηρείται ότι το μέτρο διάτμησης μειώνεται όσο μικραίνει ο συντελεστής ασφάλειας. Οι πυκνές άμμοι εμφανίζουν ένα μέσο μειωτικό συντελεστή 1/50 και οι αναπτυσσόμενες διατμητικές παραμορφώσεις φτάνουν το  $1 \div 1.5$  %, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για χαλαρές άμμους είναι 1/100 και  $2 \div 6$  %. 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 ασφάλειας έναντι ρευστοποίησης μέσω του Σχήματος 2.22β. Επισημαίνεται όμως ότι δεν γίνονται προτάσεις για τις καμπύλες απόσβεσης του ρευστοποιήσιμου εδάφους που είναι απαραίτητες για την πραγματοποίηση των ισοδύναμων γραμμικών αναλύσεων και δεν διευκρινίζεται τι καμπύλες χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν.



**Σχήμα 2.22:** Συσχέτιση του μειωτικού συντελεστή του μέτρου διάτμησης και του συντελεστή ασφάλειας έναντι ρευστοποίησης (α)με βάση της καταγραφές και (β)προτεινόμενο διάγραμμα

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

Site	Earthquake	Soil	Observed maximum velocity (cm/s)	Equivalent SPT N-Value (N <sub>a</sub> )	Shear strain (%)	Reduction of shear modulus	FL	Evaluation Method
East Kobe Bridge	1995 Hyogoken-Nambu earthquake	Decomposed granite soil	89	11	3-6	1/50-1/100	0.3-0.5	Observed record, effective stress analysis and equivalent linear analysis considering liquefaction
Fukaehama	1995 Hyogoken-Nambu earthquake	Decomposed granite soil	(102)	14	4-6	1/100	0.3-0.5	Damage investigation, Observed record, effective stress analysis and equivalent linear analysis considering liquefaction
Port Island	1995 Hyogoken-Nambu earthquake	Decomposed granite soil	91	14	2-5	1/50-1/100	0.3-0.5	Observed record, effective stress analysis and equivalent linear analysis considering liquefaction (shear strain is estimated only for liquefied layer, so shear strain is different from the value on P2)
Nishinomiya ham	1995 Hyogoken-Nambu earthquake	Decomposed granite soil (Improved)	(121)	18	5	1/40-1/50	0.6-0.9	Effective stress analysis and equivalent linear analysis considering liquefaction
Rokko Island	1995 Hyogoken-Nambu earthquake	Mud rock	(74)	18	3-5	1/40	0.8-0.9	Effective stress analysis and equivalent linear analysis considering liquefaction
Wildlife	1987 Superstitions Hill earthquake	Loose silty sand	31	11	2-3	1/100	0.4-0.6	Observed record, effective stress analysis and equivalent linear analysis considering liquefaction
Sakaiminato 1	2000 Tottoriken-Seibu earthquake	Medium sand	57	15	2-5	1/100	0.5-0.6	Observed record, effective stress analysis and equivalent linear analysis considering liquefaction
Sakaiminato 2	2000 Tottoriken-Seibu earthquake	Dense medium sand	57	22	1-1.5	1/40	0.8-0.9	Observed record, effective stress analysis and equivalent linear analysis considering liquefaction
Kushiro Port	1993 Kushiro-Oki earthquake	Dense sand	61	23	1	1/30-1/40	0.9-1.0	Observed record, effective stress analysis and equivalent linear analysis considering liquefaction
Kusiro west port	1994 Hokkaido Toho-oki earthquake	Loose sand	19	11	1	1/50	0.6-0.8	Observed record and equivalent linear analysis considering liquefaction

( ): analysis

\*Shear strain is estimated by analysis

## 2.6 Συμπεράσματα

i. Η ρευστοποίηση, προκαλεί χαλάρωση του εδαφικού σκελετού, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της μορφής του φάσματος στην επιφάνεια, καθώς το ρευστοποιημένο έδαφος δρα εν γένει ως φίλτρο των υψίσυχνων ταλαντώσεων, αλλά παράλληλα ενισχύει τις μακροπερίοδες ταλαντώσεις. Αυτό θα είχε ως συνέπεια την απομείωση των επιταχύνσεων για μικρές περιόδους ( $T < 0.6-0.8 \text{sec}$ ) και, πιθανόν, την αύξηση τους σε μεγαλύτερες περιόδους. Επομένως η ρευστοποίηση δεν είναι πάντοτε ευεργετική για τις κατασκευές, ως προς την μέγιστη επιτάχυνση που δέχονται, αλλά και δυσμενής, καθώς μπορεί η σεισμική δόνηση μπορεί να ενισχυθεί.

ii. Ο βαθμός της απομείωσης- ενίσχυσης καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την στιγμή έναρξης της ρευστοποίησης. Όταν η χαλάρωση του εδάφους συμβαίνει γρήγορα, μικρότερο ποσοστό των έντονων παλμών φτάνει στην επιφάνεια και πλήττει την ανωδομή. Δηλαδή, όσο πιο εύκολα ρευστοποιείται ένα έδαφος (δηλαδή έχει μικρό συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης), τόσο πιο ευνοϊκό είναι για τις συνήθεις κατασκευές που έχουν σχετικά μικρές περιόδους. Αυτό είναι εμφανές στα παραδείγματα από σεισμικές διεγέρσεις, που αναφέραμε. Στον σεισμό Superstition Hills, στο WLA, η ρευστοποίηση πραγματοποιήθηκε μετά από σχεδόν 14sec, με αποτέλεσμα να ενισχυθεί η φασματική επιτάχυνση για το μεγαλύτερο μέρος των περιόδων. Αντίθετα στον σεισμό του Kobe, όπου το έδαφος ρευστοποιήθηκε σχεδόν αμέσως, φιλτραρίστηκε μεγάλο μέρος της δόνησης και οι επιταχύνσεις που δέχθηκε η ανωδομή (κυρίως για  $T < 1 \text{sec}$ ) ήταν πολύ απομειωμένες.

iii. Οι Youd & Carter (2005) πραγματοποίησαν ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις PROSHAKE για αυτούς τους σεισμούς και τα αντίστοιχα εδαφικά χαρακτηριστικά, σε συνθήκες πλήρους απουσίας ρευστοποίησης.

iv. Οι Miwa & Ikeda(2006) διενέργησαν αντίστοιχες αναλύσεις, αλλά θεώρησαν ότι το έδαφος ήταν εξ' αρχής πλήρως ρευστοποιημένο. Είναι εύκολα κατανοητό ότι τα φάσματα απόκρισης που προέκυψαν από τις αναλύσεις και στις δύο περιπτώσεις, δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, καθώς το έδαφος ρευστοποιείται μετά από κάποια δευτερόλεπτα, από την έναρξη της δόνησης.

Επομένως μία πιο σωστή προσέγγιση θα ήταν πιθανώς, η προσπάθεια προσδιορισμού μιας μεθοδολογίας πρόβλεψης της πραγματικής σεισμικής συμπεριφοράς του ρευστοποιημένου εδάφους, λαμβάνοντας υπόψιν τον συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης.



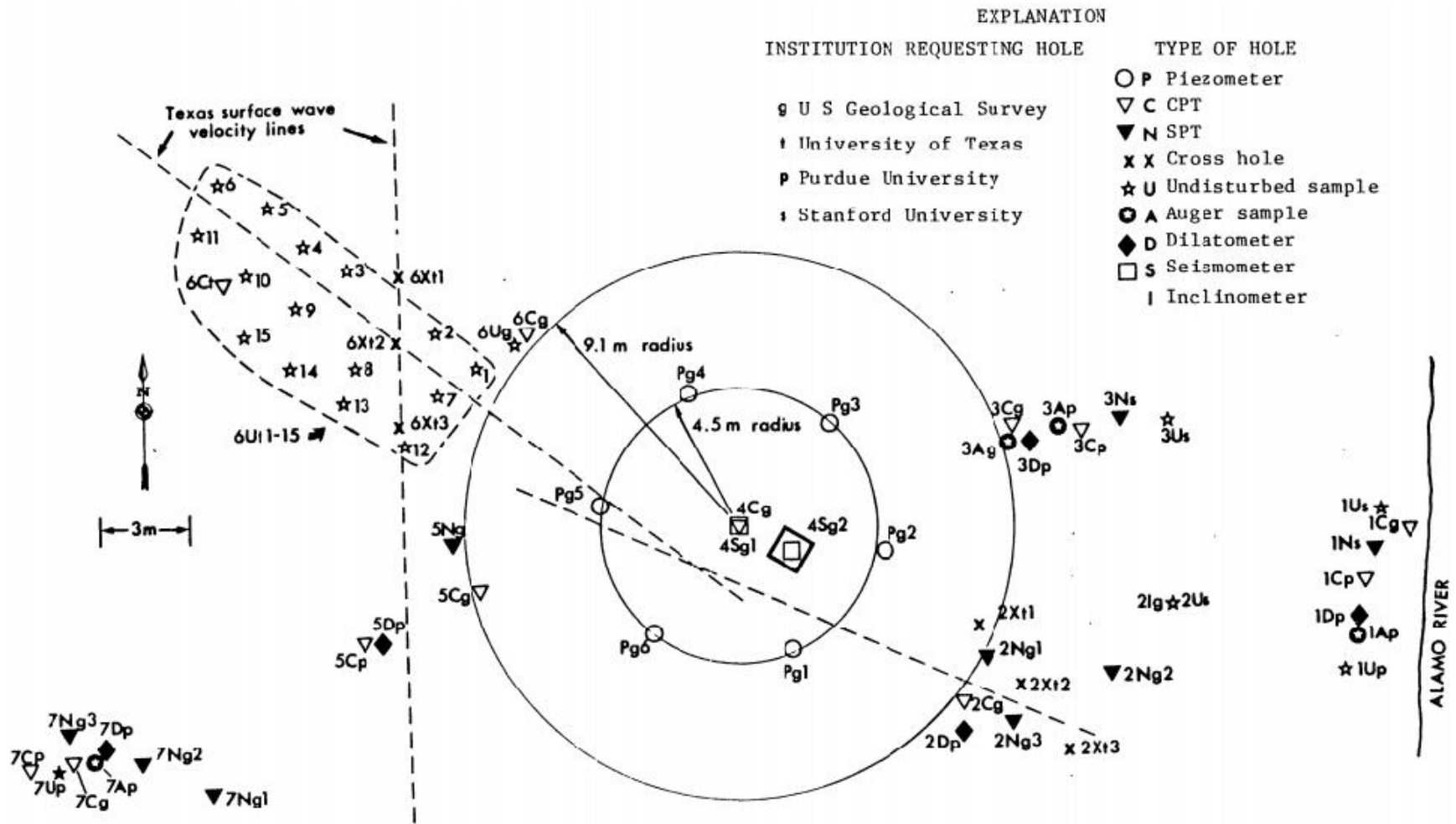
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΟΧΗ WILDLIFE LIQUEFACTION ARRAY (WLA) – ΣΕΙΣΜΟΣ ELMORE RANCH**

### **3.1 Γενικά**

Στο κεφάλαιο αυτό, διερευνάται η σεισμική απόκριση της περιοχής WLA, υπό τη σεισμική διέγερση Elmore Ranch, κατά την οποία παρατηρήθηκε αμελητέα αύξηση πίεσης πόρων. Αρχικά υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας ( $FS_L$ ) έναντι ρευστοποίησης και στη συνέχεια πραγματοποιούνται ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις σε συνθήκες απουσίας ρευστοποίησης, ακολουθώντας τη διαδικασία των Youd & Carter (2005). Κατόπιν, επαναλαμβάνονται οι παραπάνω αναλύσεις, θεωρώντας ότι η περιοχή έχει ήδη ρευστοποιηθεί κατά την έναρξη της διέγερσης, ακολουθώντας δηλαδή την μεθοδολογία των Miwa and Ikeda (2006). Σκοπός είναι να συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων με τις πραγματικές καταγραφές και να προσδιοριστεί μία μεθοδολογία για να προβλέπεται το πραγματικό φάσμα, ως συνάρτηση των δύο φασμάτων που υπολογίστηκαν προηγουμένως και του συντελεστή ασφαλείας  $FS_L$ .

### **3.2 Υπολογισμός Συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης ( $FS_L$ )**

Οι Bennett et al(1984) εκτίμησαν το εδαφικό προφίλ του WLA (Σχήμα 2.2), μέσω της κοκκομετρικής διαβάθμισης του εδάφους των Δοκιμών Πρότυπης διείσδυσης (SPT) και των Δοκιμών Στατικής Πενετρομέτρησης (CPT) που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή WLA από την Εθνική Υπηρεσία Γεωτεχνικών Ερευνών της Αμερικής (USGS). Τα σημεία, όπου πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές SPT και CPT, φαίνονται στο Σχήμα 3.1, ενώ τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.4 και 3.5 αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας το σύνολο των αποτελεσμάτων των δοκιμών αυτών και ακολουθώντας τη μεθοδολογία των Youd et al. (2001), τόσο για τις δοκιμές SPT, όσο και για τις CPT, υπολογίστηκε ακολούθως ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης ( $FS_L$ ) για τον σεισμό Elmore Ranch στο WLA.



Σχήμα 3.1: Κάτοψη θέσεων δοκιμών στην περιοχή WLA (Bennette et al. 1984)



Σύμφωνα με την μεθοδολογία των Youd et al. ο συντελεστής ασφαλείας  $FS_L$  προκύπτει από τον λόγο του συντελεστή αντίστασης σε ρευστοποίηση (CRR) προς το συντελεστή σεισμικών δράσεων (CSR):

$$FS_L = \frac{CRR}{CSR} \quad (3.1)$$

Ο συντελεστής σεισμικών δράσεων CSR υπολογίζεται από τη σχέση:

$$CSR = \frac{\tau_d}{\sigma'_{v0}} = \frac{0.65 \cdot \alpha_{max} \cdot \sigma_{v0} \cdot r_d}{g \cdot \sigma'_{v0}} \quad (3.2)$$

όπου  $\tau_d$ : διατμητική τάση

$\alpha_{max}$ : η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση στην επιφάνεια

$\sigma_{v0}, \sigma'_{v0}$ : ολικές και ενεργές κατακόρυφες τάσεις αντίστοιχα

$g$ : επιτάχυνση βαρύτητας

$r_d$ : μειωτικός συντελεστής με το βάθος που δίνεται από τη σχέση

$$r_d = 1 - 0.00765 \cdot d \text{ (m)} \quad (3.3)$$

Όσον αφορά τις δοκιμές SPT, ο συντελεστής αντίστασης σε ρευστοποίηση για σεισμό μεγέθους  $M_w=7.5$  ( $CRR_{M=7.5} = 7.5$ ) προσδιορίζεται μέσω του Σχήματος 3.2, συναρτήσεως του διορθωμένου αριθμού κρούσεων  $(N_1)_{60}$ , ο οποίος προσδιορίζεται ως εξής:

$$(N_1)_{60} = \alpha + \beta \cdot (N_m \cdot C_N \cdot C_E) \quad (3.4)$$

όπου  $N_m$ : ο αριθμός των κρούσεων κατά τη δοκιμή

$C_N$ : συντελεστής διόρθωσης βάθους, οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_N = \frac{100}{\sigma'_{v0}}^{0.5} \quad (3.5)$$

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

$\alpha, \beta$ : συντελεστές συναρτήσεως της περιεκτικότητας του εδάφους σε ιλύ για τους

οποίους ισχύει  $\alpha = 5$  και  $\beta = 1.2$  όταν το ποσοστό ιλύος ξεπερνάει το 35%,  $\alpha = 0$  και

$\beta = 1$  όταν δεν υπάρχει ποσότητα ιλύος στο έδαφος ( $FC=0$ ), ενώ για ενδιάμεσες

τιμές:

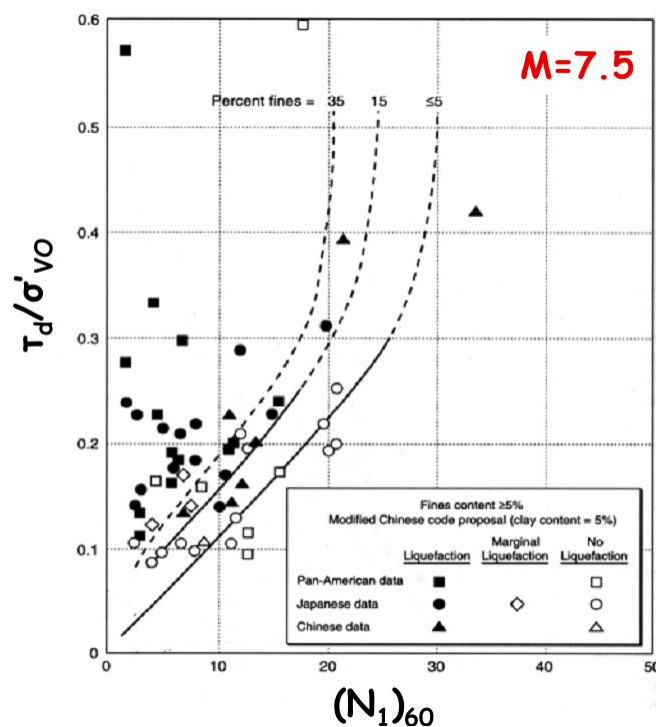
$$\alpha = \exp \left( 1.76 - \frac{190}{FC^2} \right) \quad (3.6)$$

$$\beta = 0.99 + \frac{FC^{1.50}}{1000} \quad (3.7)$$

Η εκτίμηση του συντελεστή αντίστασης σε ρευστοποίηση (CRR), για το εκάστοτε μέγεθος σεισμού  $M_w$ , γίνεται μέσω του διορθωτικού συντελεστή MSF:

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.6}} \quad (3.8)$$

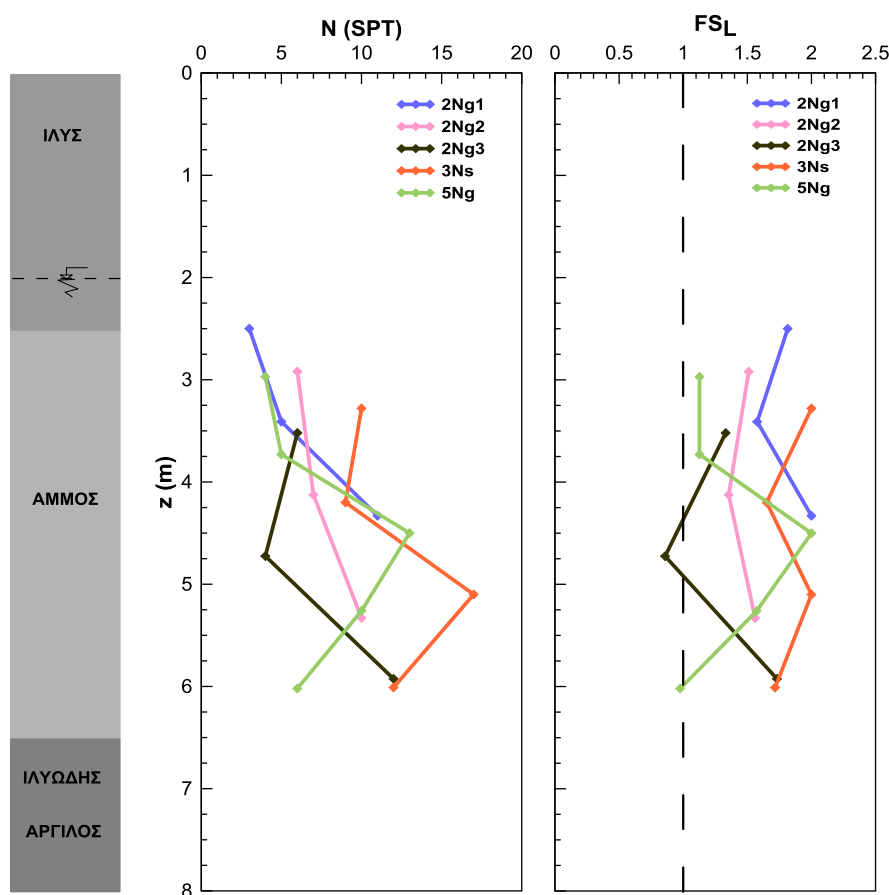
$$CRR = CRR_{Mw=7.5} \cdot MSF \quad (3.9)$$



**Σχήμα 3.2 :** Διάγραμμα υπολογισμού της αντίστασης σε ρευστοποίηση για σεισμό μεγέθους  $M=7.5$  συναρτήσει του διορθωμένου αριθμού χτύπων σε δοκιμές SPT.

Ακολουθώντας την προαναφερθείσα μεθοδολογία, προσδιορίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης για το ρευστοποιήσιμο αμμώδες στρώμα του WLA, που βρίσκεται από 2.5 έως 7.5m βάθος, κατά τον σεισμό Elmore Ranch, με μέγεθος  $M_w = 6.2$  και μέγιστη επιτάχυνση  $a_{max} = 0.13g$ . Τα ειδικά βάρη των εδαφικών στρώσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 και το ποσοστό υλός στο πρώτο 0.5m της άμμου είναι 70% ενώ για το

υπόλοιπο βάθος κυμαίνεται γύρω στο 20%. Τέλος, ο μηχανισμός πτώσης της σφύρας είναι με σκοινί μέσω τροχαλίας, και επομένως ο συντελεστής  $C_E$  ισούται με τη μονάδα. Στο Σχήμα 3.3, φαίνεται η μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας με το βάθος για κάθε δοκιμή SPT. Παρατηρείται ότι ο συντελεστής ασφαλείας για το ρευστοποιήσιμο στρώμα άμμου είναι μεγαλύτερος της μονάδας, όπως άλλωστε αναμενόταν, καθώς δεν καταγράφηκε ανάπτυξη υπερπιέσεων πόρων κατά τη σεισμική δόνηση με μέση τιμή περίπου  $FS_L = 1.5$ . Να σημειωθεί ότι ο  $FS_L = 2$  είναι μία ανώτατη συμβολική τιμή.



**Σχήμα 3.3 :** (α) Εδαφικό προφίλ και διάγραμμα (β) αριθμού χτύπων N από δοκιμές SPT (γ) αντίστοιχου συντελεστή ασφαλείας συναρτήσεως του βάθους

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας  $FS_L$  για τις Δοκιμές Στατικής Πενετρομέτρησης (CPT) για το στρώμα της άμμου σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Youd et al. (2001) που αναπτύχθηκε προηγουμένως και με εμπειρικές συσχετίσεις του λόγου  $q_c/N'$  και του τύπου του εδάφους. Από την αντίσταση αιχμής του κώνου ( $q_c$ ) και την πλευρική

τριβή ( $f_s$ ), υπολογίζεται ο δείκτης εδάφους  $I_c$ , με τη βοήθεια των συντελεστών  $Q$  και  $F$ , όπου:

$$Q = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{p_a} \cdot \left( \frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (3.10)$$

όπου  $p_a$ : ατμοσφαιρική πίεση

$n$  = μεταβλητή που εξαρτάται από το είδος του εδάφους, για άμμους ισούται με 0.5 ενώ μπορεί να πάρει μέχρι και την τιμή 1 για αργιλικά εδάφη

$q_c$  = αντίσταση αιχμής του κώνου

$f_s$  = πλευρική τριβή

$$F = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{v0}} \cdot 100\% \quad (3.11)$$

$$I_c = [(3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2]^{0.5} \quad (3.12)$$

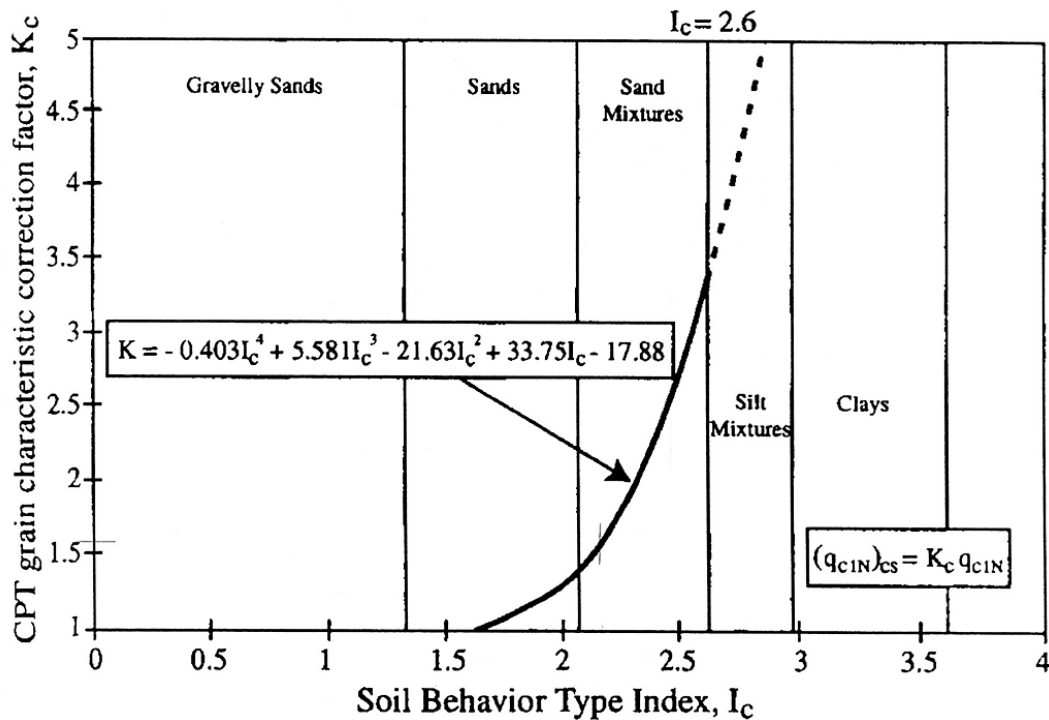
Για τον υπολογισμό της “διορθωμένης” αντοχής αιχμής  $q_{c1N}$  έγινε χρήση του τύπου

$$q_{c1N} = \frac{(p_a - \sigma'_{v0})^n \cdot K_{CS} \cdot q_c}{p_a} \quad (3.13)$$

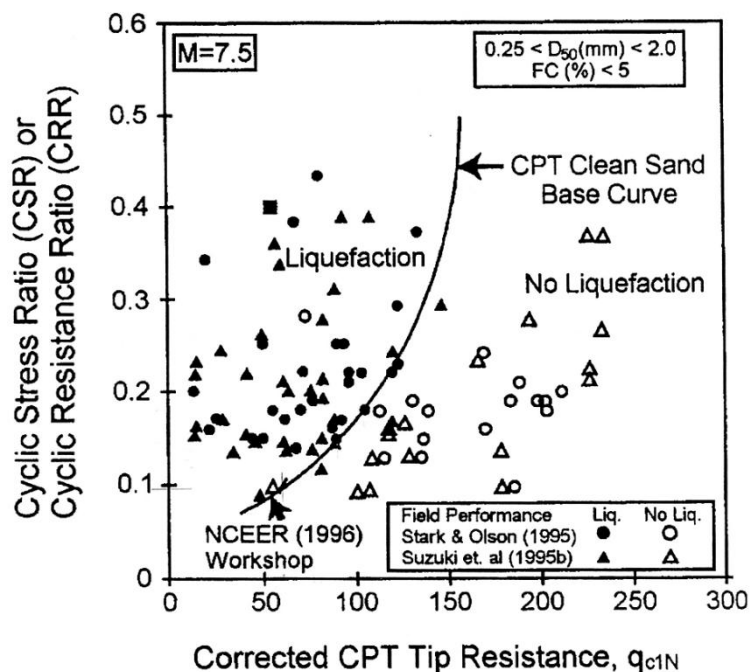
όπου  $K_{CS}$  μεταβλητή συναρτήσει του δείκτη εδάφους  $I_c$  που εκτιμάται από το Σχήμα 3.4

Η αντίσταση σε ρευστοποίηση υπολογίζεται από τη σχέση (3.9), με τη διαφορά σε αυτή την περίπτωση, ότι ο  $CRR_{M=7,5}$  προκύπτει από το Σχήμα 3.5 συναρτήσει της διορθωμένης αντίστασης αιχμής. Κατά τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας, θεωρήθηκε μειωμένη αντίσταση τριβής κώνου κατά 20% ( $q_{c1N}$ ), καθώς σύμφωνα με τους Μπουκοβάλα & Παπαδημητρίου (2006), η μεθοδολογία για τα CPT υπερεκτιμά τον συντελεστή ασφαλείας σε σύγκριση με αυτή για τα SPT. Τα αποτελέσματα των δοκιμών καθώς και ο αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.6. Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος της μονάδας με μέση τιμή  $FS_L = 1.3 \div 1.5$ . Αξίζει να σημειωθεί, ότι ο μέσος όρος των καμπυλών από τις τέσσερις δοκιμές CPT ταυτίζεται σχεδόν με την δοκιμή στη θέση 4Cg, η οποία βρίσκεται σε πολύ μικρή απόσταση τον σειсмоγράφο. Συνοψίζοντας, μπορεί να ειπωθεί ότι και με τις δύο μεθόδους υπολογισμού ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης είναι επί τω

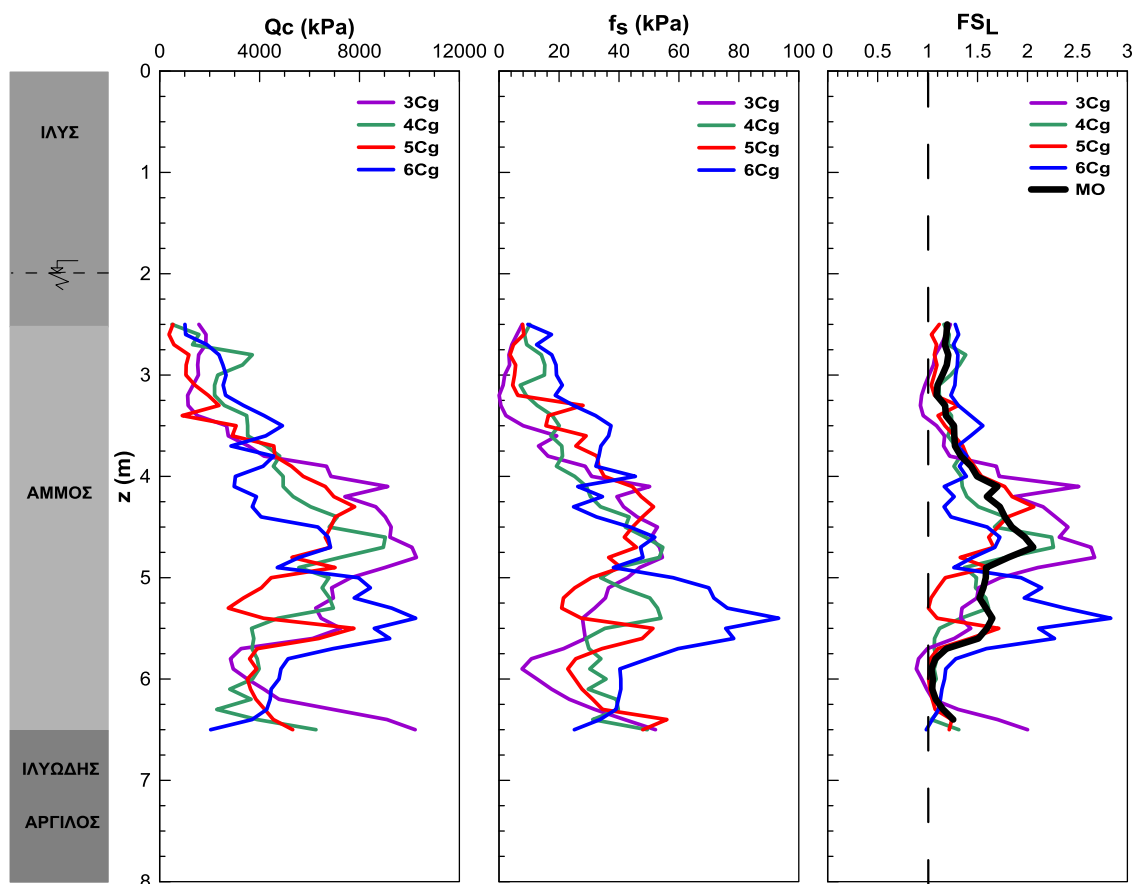
πλείστον μεγαλύτερος από τη μονάδα, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τον πραγματικό σεισμό, κατά τον οποίο δεν σημειώθηκε σημαντική αύξηση της πίεσης πόρων.



Σχήμα 3.4 : Διάγραμμα υπολογισμού της μεταβλητής  $K_{cs}$  συναρτήσει του δείκτη εδάφους  $I_c$



Σχήμα 3.5 : Διάγραμμα υπολογισμού της αντίστασης σε ρευστοποίηση για σεισμό μεγέθους  $M=7.5$  συναρτήσει της διορθωμένης αντοχής αιχμής



**Σχήμα 3.6 :** (α) Εδαφικό προφίλ (β) αντοχής αιχμής  $Q_c$  (γ) αντίσταση πλευρικής τριβής  $f_s$  και (δ) αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας συναρτήσει του βάθους από δοκιμές CPT

### 3.3 Αναλύσεις Σεισμικής Απόκρισης Μη Ρευστοποιημένου Εδάφους

Η σεισμική απόκριση του φυσικού εδάφους υπολογίστηκε αναλυτικά, υποθέτοντας ότι η σεισμική διέγερση, μπορεί να προσομοιωθεί ως ένα σύνολο οριζόντια πολωμένων διατμητικών κυμάτων, που μεταδίδονται κατακόρυφα, από το σεισμικό υπόβαθρο προς την επιφάνεια του εδάφους. Με βάση την παραπάνω παραδοχή, οι υπολογισμοί για την απόκριση του εδάφους μπορούν να αναλυθούν στο ισοδύναμο, απλούστερο πρόβλημα μονοδιάστατης μετάδοσης διατμητικών κυμάτων διαμέσου του εδάφους. Το πρόβλημα επιλύεται αριθμητικά με την ισοδύναμη γραμμική μέθοδο (Schnabel et al. 1972). Πιο συγκεκριμένα:

- η τυχούσα σεισμική διέγερση αναλύεται σε πεπερασμένο αριθμό αρμονικών διεγέρσεων, με χρήση της ανάλυσης Fourier,

- 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.

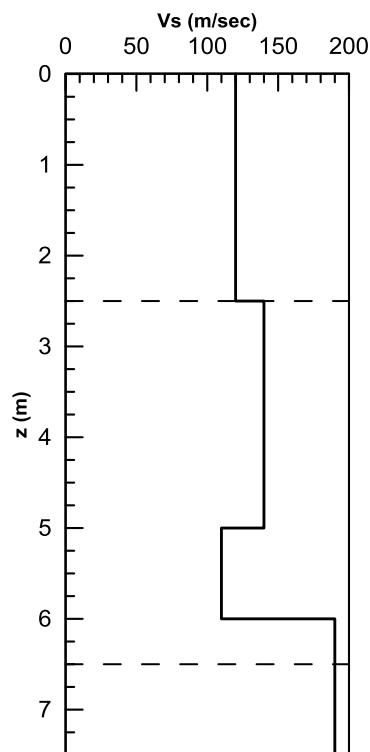
Η ακριβής εφαρμογή της ανωτέρω μεθοδολογίας προϋποθέτει ένα γραμμικώς ελαστικό μέσο, με σταθερό μέτρο διατμητικής παραμόρφωσης ( $G$ ) και σταθερό λόγο υστερητικής απόσβεσης ( $\xi$ ). Η πραγματική μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους υπό δυναμική-επαναλαμβανόμενη φόρτιση, όπου τόσο το  $G$  όσο και το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

Προσπαθώντας να αναπαραχθεί η σεισμική απόκριση του εδάφους χωρίς ρευστοποίηση, προσομοιώθηκε το πραγματικό έδαφος με το εδαφικό προφίλ του Σχήματος 3.3α. Στη συνέχεια υποβλήθηκε στη διέγερση που καταγράφηκε σε βάθος 7.5m και με το πρόγραμμα "EERA", που εκτελεί ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις, υπολογίστηκε η απόκριση του εδάφους στην επιφάνεια.

Οι εδαφικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις, μετρήθηκαν είτε πριν το σεισμό ή αρκετό χρόνο μετά το αυτόν (Πίνακας 3.1) Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων συναρτήσει του βάθους, χωρίς ρευστοποίηση. Για τις άμμους χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες καμπύλες  $G/G_{\max} - \log \gamma$  και απόσβεσης που προτείνονται από τους Seed & Idriss (1970), ενώ για την ιλύ και την ιλυώδη άργιλο χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες των Vucetic & Dobry (1991) για  $PI=15\%$  και  $PI=7.5\%$  αντίστοιχα (Σχήματα 3.8÷3.9). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν προτείνονται άμεσα καμπύλες για  $PI=7.5\%$  αλλά αυτές προήλθαν από γραμμική παρεμβολή των υπαρχουσών καμπυλών για  $PI=0\%$  και  $PI=15\%$ .

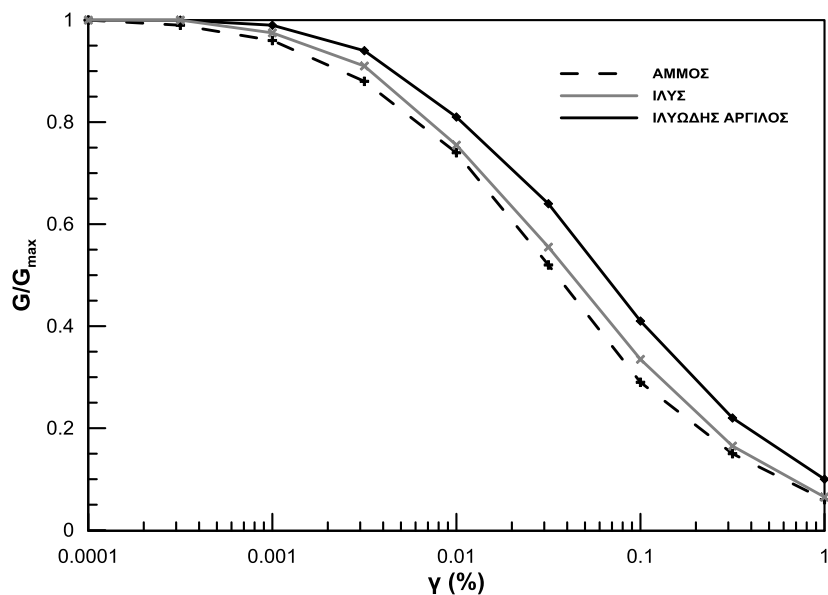
Πίνακας 3.1 : Εδαφικά χαρακτηριστικά της περιοχής WLA

ΕΔΑΦΙΚΟ ΠΡΟΦΙΛ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (m)	ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ (kN/m) <sup>3</sup>	G <sub>max</sub> (MPa)	V <sub>s</sub> (m/sec)
ΙΛΥΣ	1	0.5	15.7	23.1	120
	2	0.5	15.7	23.1	120
	3	0.5	15.7	23.1	120
	4	0.5	15.7	23.1	120
	5	0.5	15.7	23.1	120
ΧΑΛΑΡΗ ΑΜΜΟΣ	6	0.5	17.3	25.4	120
	7	0.5	17.3	34.5	140
	8	0.5	17.3	34.5	140
	9	0.5	17.3	34.5	140
	10	0.5	17.3	34.5	140
	11	0.5	17.3	21.3	110
	12	0.5	17.3	21.3	110
	13	0.5	17.3	63.6	190
	14	0.5	17.3	63.6	190
ΙΛΥΩΔΗΣ ΑΡΓΙΛΟΣ	15	0.5	20.4	75.2	190
	16	∞	20.4	75.2	190

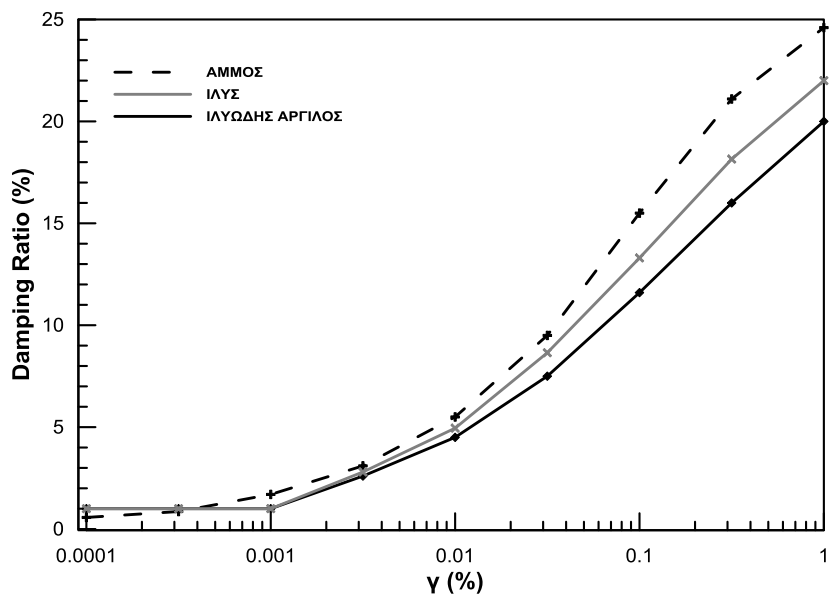


Σχήμα 3.7 : Διάγραμμα ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων συναρτήσει του βάθους





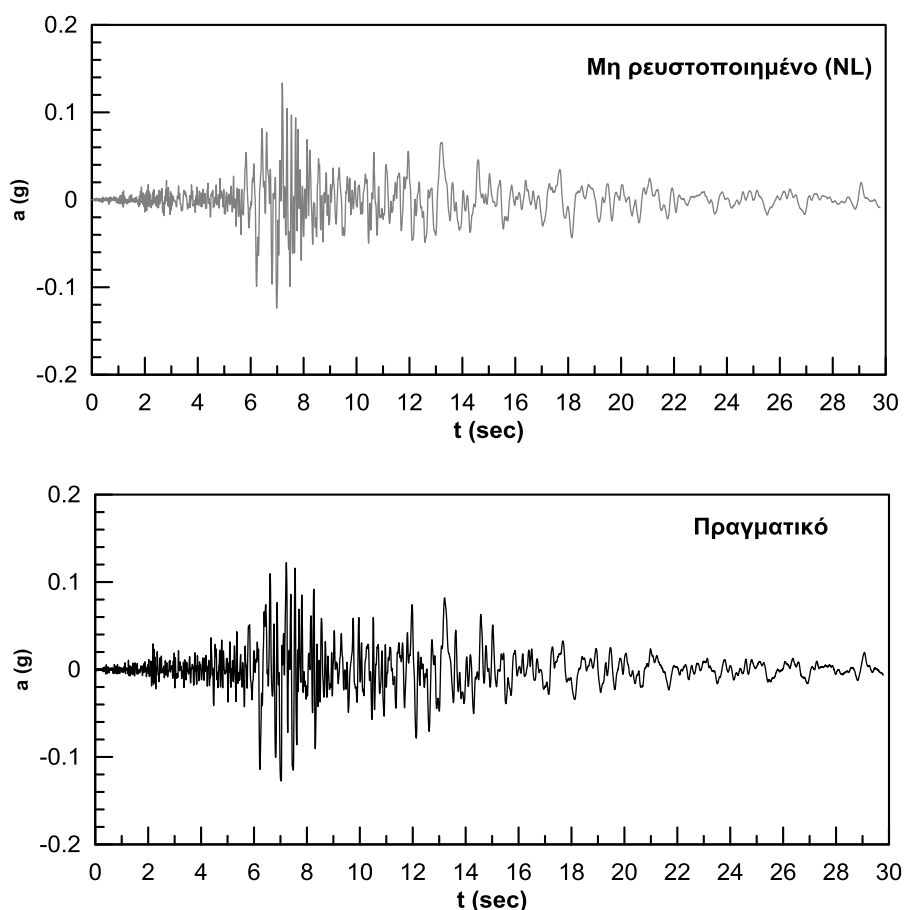
**Σχήμα 3.8 :** Καμπύλες μεταβολής του μέτρου διάτμησης  $G/G_{max}$  συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$



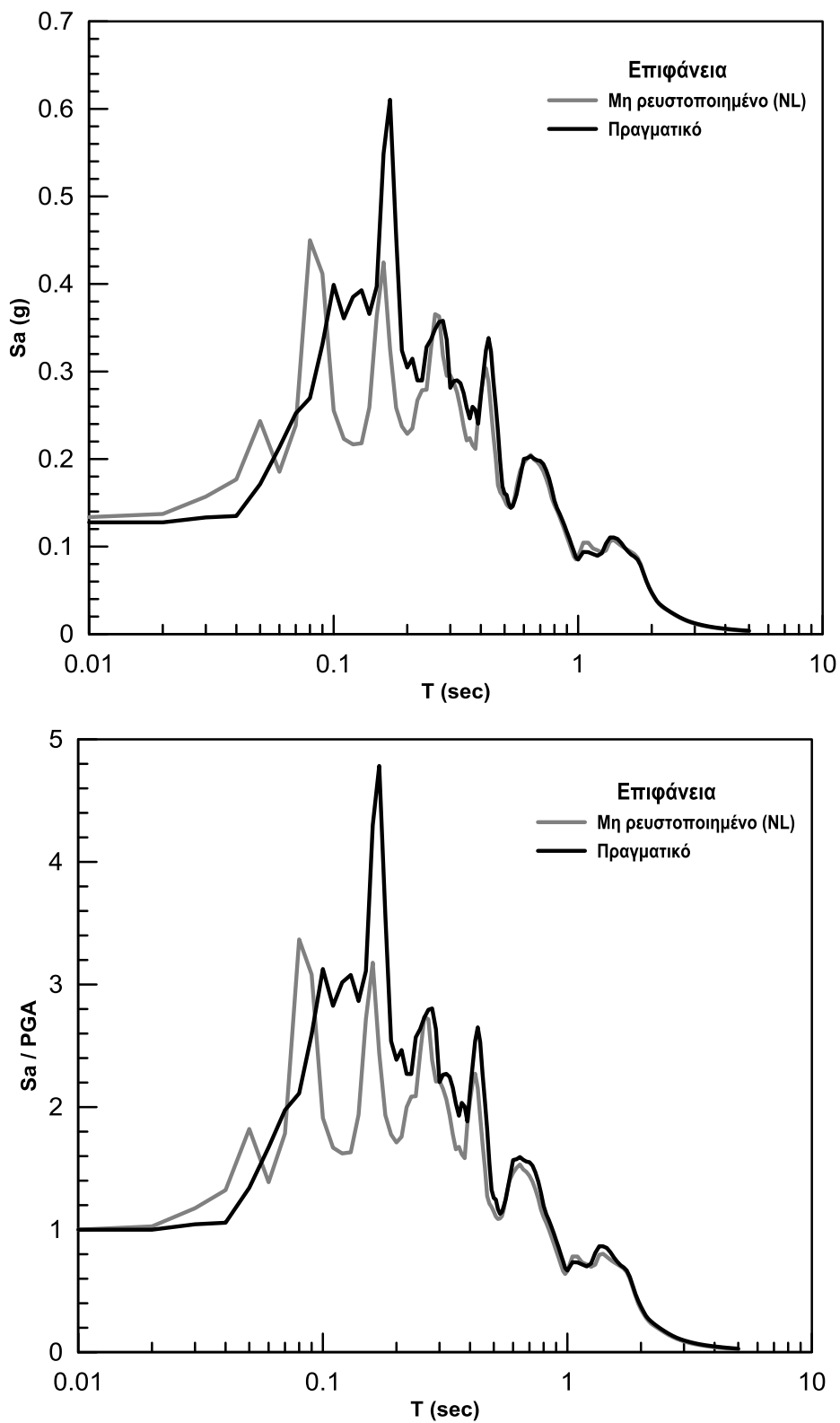
**Σχήμα 3.9 :** Καμπύλες μεταβολής του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση  $\gamma$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις αυτές συγκρίθηκαν με την πραγματική απόκριση της περιοχής. Τα επιταχυνσιογραφήματα της επιφάνειας, καθώς και τα αντίστοιχα φάσματα φαίνονται στα Σχήματα 3.10 ÷ 3.11 . Δεδομένου ότι δεν

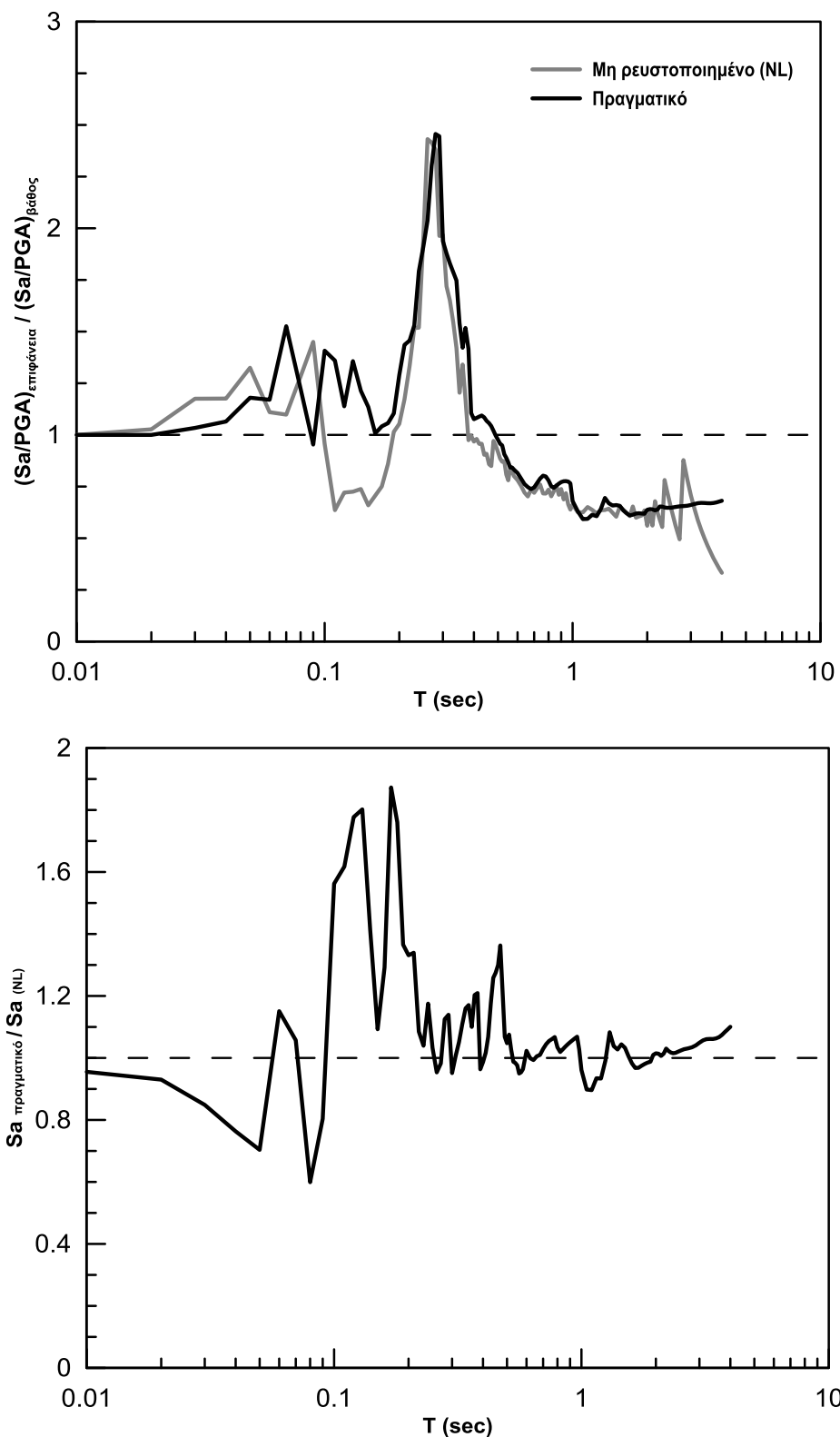
πραγματοποιήθηκε ρευστοποίηση, κατά τη διάρκεια του σεισμού, θα έπρεπε τα δύο φάσματα να ταυτίζονται. Συγκρίνοντάς τα, παρατηρούμε ότι για περιόδους  $T$  μεγαλύτερες από 0.2sec το πραγματικό φάσμα σχεδόν ταυτίζεται με αυτό που προέκυψε από τις αναλύσεις μας χωρίς ρευστοποίηση, γεγονός που υποδηλώνει ότι έχουμε προσομοιώσει το έδαφος και τη συμπεριφορά του σε σεισμό με ικανοποιητική ακρίβεια. Αυτό είναι πιο εμφανές στον μεταξύ τους λόγο (Σχήμα 3.12β), ο οποίος για αυτές τις περιόδους είναι κοντά στη μονάδα. Ένα επιπλέον στοιχείο που ενισχύει την πεποίθηση ότι οι αναλύσεις είναι αντιπροσωπευτικές της πραγματικότητας, είναι ότι ο κανονικοποιημένος λόγος επιφάνεια προς βάση για την πραγματική καταγραφή και την ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση (Σχήμα 3.12α) παρουσιάζει το ίδιο μέγιστο στην ίδια ιδιοπερίοδο ( $T \approx 0.3\text{sec}$ ) και άρα έχουμε θεωρήσει ορθώς την ιδιοπερίοδο του εδαφικού σχηματισμού.



**Σχήμα 3.10 :** Χρονοιστορίες (α)αναλύσεων της έρευνάς μας με το EERA για μη ρευστοποιημένο έδαφος και (β) πραγματικής καταγραφής στην επιφάνεια



**Σχήμα 3.11 :** Σύγκριση (α) φασμάτων και (β) αδιαστατοποιημένων φασμάτων των αναλύσεων της έρευνάς μας με το EERA χωρίς ρευστοποίηση και πραγματικής καταγραφής



**Σχήμα 3.12 :** Σύγκριση (α) κανονικοποιημένων αδιαστατοποιημένων φασμάτων αναλύσεων της έρευνάς μας με το EERA χωρίς ρευστοποίηση και πραγματικής καταγραφής και (β) λόγος των δύο φασμάτων στην επιφάνεια

### 3.4 Αναλύσεις με μειωμένη ταχύτητα ( $V_{s,liq}$ ) λόγω ρευστοποίησης

Στη συνέχεια, οι αναλύσεις επαναλήφθηκαν θεωρώντας ότι το έδαφος είναι ρευστοποιημένο και υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα φάσματα στην επιφάνεια, σύμφωνα με τη μεθοδολογία των Miwa & Ikeda (2006). Οι Miwa & Ikeda (2006) πρότειναν ένα διάγραμμα για τη μείωση του μέτρου διάτμησης του υπεδάφους κατά τη ρευστοποίηση συναρτήσει του συντελεστή ασφάλειας έναντι αυτής (Σχήμα 2.24). Πιο συγκεκριμένα, για εύκολα ρευστοποιήσιμα εδάφη με  $FS_L=0.2\div 0.4$ , ο λόγος  $G/G_{max}$  κυμαίνεται στις τιμές  $0.01\div 0.02$  και η ταχύτητα διατμητικού κύματος, αντίστοιχα, περίπου στις τιμές  $0.1\div 0.15$  της αρχικής. Αντίθετα, για αμμώδη εδάφη που ρευστοποιούνται σχετικά δύσκολα, με συντελεστή ασφάλειας κοντά στη μονάδα, το τελικό μέτρο διάτμησης ισούται περίπου με το 40% του αρχικού και ο λόγος  $V_{s,liq}/V_s$  μπορεί να πάρει την τιμή 0.20.

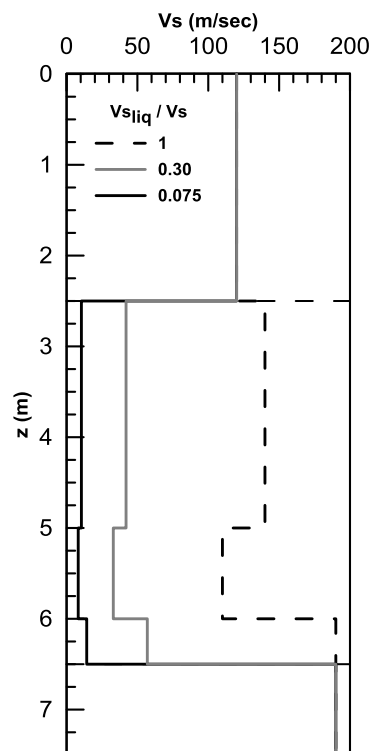
Έτσι, για να καλυφθούν όλες οι περιπτώσεις για τους συντελεστές ασφαλείας, επαναλήφθηκαν έξι φορές τις αναλύσεις μας, ορίζοντας κάθε φορά το λόγο  $V_{s,liq}/V_s$  ίσο με 0.075, 0.10, 0.125, 0.15, 0.20, 0.30. Στο σχήμα 3.13 γίνεται σύγκριση της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων, που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις, για την άμμο πριν την επίδραση της ρευστοποίησης και μετά από αυτήν. Χάριν απλότητας του σχήματος αποτυπώθηκαν οι ακραίες τιμές του λόγου  $V_{s,liq}/V_s$  που χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή 0.075 και 0.30. Οι καμπύλες μεταβολής του λόγου απόσβεσης συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$ , που χρησιμοποιήθηκαν για το ρευστοποιημένο στρώμα, είναι οι ίδιες με αυτές των αναλύσεων για μη ρευστοποιημένο στρώμα (Σχήμα 3.9), ενώ ο λόγος  $G/G_{max}$ , για το ρευστοποιημένο στρώμα, κρατήθηκε σταθερός και ίσος με τη μονάδα ανεξαρτήτως του ποσοστού διατμητικής παραμόρφωσης ( $G/G_{max}=1$ ).

Στον Πίνακα 3.2 φαίνονται τα νέα  $G_{max}$  που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις για κάθε λόγο  $V_{s,liq}/V_s$ , ενώ τα αποτελέσματα των αναλύσεων για ρευστοποιημένο έδαφος παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.14 ÷ 3.17. Παρατηρούμε από τα φάσματα ότι για ανάλυση με  $V_{s,liq}/V_s = 0.30$ , η υπολογισμένη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA), προσεγγίζει περισσότερο την καταγεγραμμένη. Συγκρίνοντας, λοιπόν, τα δύο αυτά φάσματα προκύπτει, ότι το υπολογισμένο για  $T < 0.2\text{sec}$  και για  $0.5\text{sec} < T < 2\text{sec}$ , έχει την ίδια μορφή με το πραγματικό αλλά με μικρότερες επιταχύνσεις, ενώ για  $T > 2\text{sec}$  οι καμπύλες των δύο

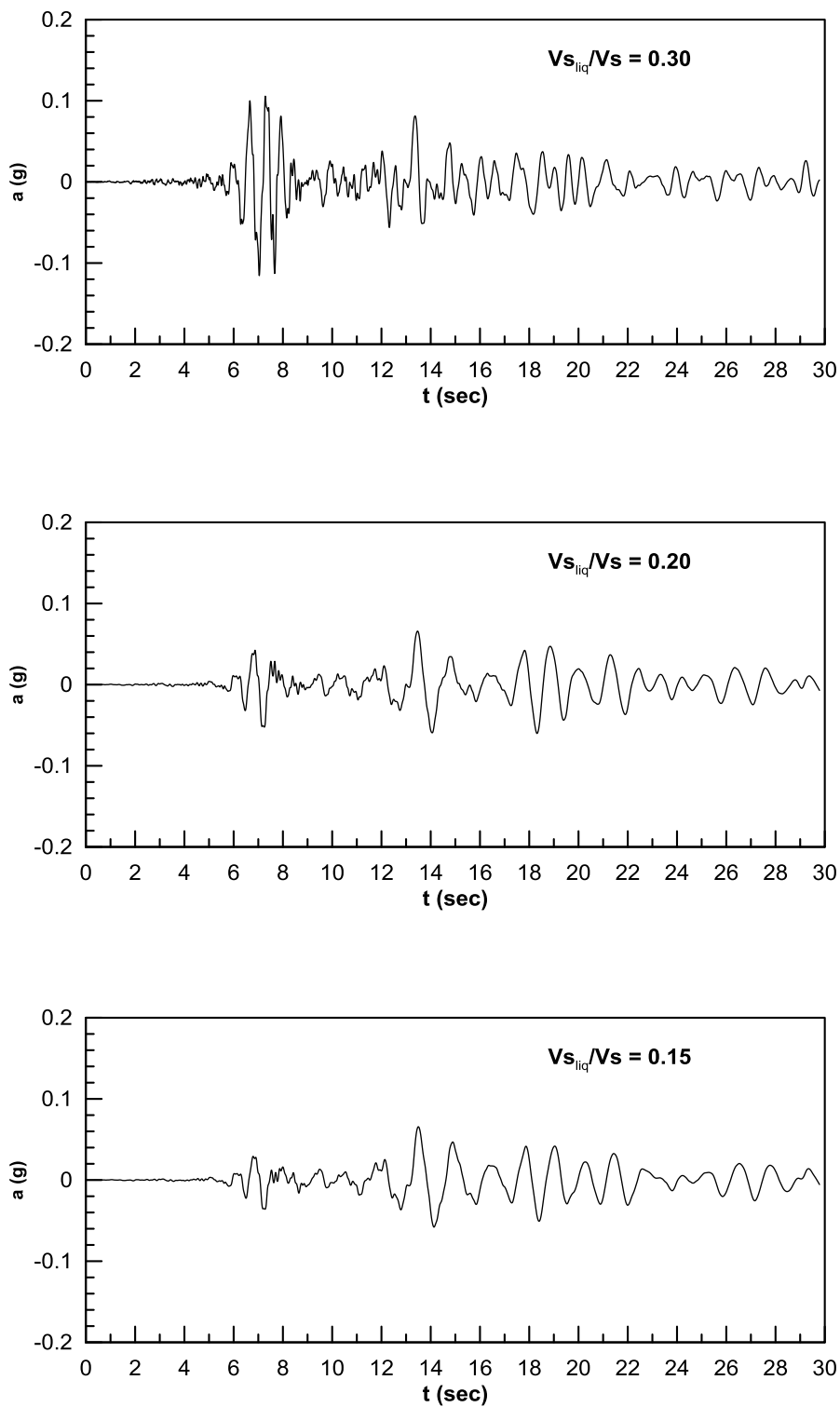
φασμάτων είναι πολύ κοντά ή και ταυτίζονται. Τα φάσματα που προέκυψαν από αναλύσεις με  $V_{s,liq}/V_s = 0.20 \div 0.075$  εμφανίζουν ιδιαίτερα απομειωμένο PGA, σε σύγκριση με την πραγματική καταγραφή και γενικά η μορφή τους απέχει πολύ από το πραγματικό φάσμα. Το γεγονός αυτό, ότι δηλαδή το φάσμα που αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη  $V_s$  θα αντιπροσώπευε καλύτερα το καταγεγραμμένο φάσμα, ήταν σε γενικές γραμμές αναμενόμενο, καθώς στη σεισμική διέγερση Elmore Ranch, δεν πραγματοποιήθηκε αύξηση της πίεσης πόρων και επομένως η ταχύτητα της άμμου δεν υπέστη μείωση. Στόχος αυτής της μεθοδολογίας είναι να αναπαράγουμε το φάσμα της πραγματικής καταγραφής ως μία “ενδιάμεση” κατάσταση συναρτήσει των δύο υπολογισθέντων φασμάτων (του πλήρους και μη ρευστοποιημένου εδάφους).

**Πίνακας 3.2 :** Τιμές των  $G_{max}$  που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις με ρευστοποίηση

ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΑΡΧΙΚΟ $G_{max}$ (MPa)	NEA $G_{max}$ (MPa)					
		$V_{s,liq}/V_s$ = 0.075	$V_{s,liq}/V_s$ = 0.10	$V_{s,liq}/V_s$ = 0.125	$V_{s,liq}/V_s$ = 0.15	$V_{s,liq}/V_s$ = 0.20	$V_{s,liq}/V_s$ = 0.30
<b>1</b>	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1
<b>2</b>	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1
<b>3</b>	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1
<b>4</b>	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1
<b>5</b>	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1
<b>6</b>	25.4	0.14	0.35	0.40	0.78	1.02	2.29
<b>7</b>	34.5	0.19	0.35	0.54	0.78	0.85	3.11
<b>8</b>	34.5	0.19	0.35	0.54	0.78	0.85	3.11
<b>9</b>	34.5	0.19	0.35	0.54	0.78	0.85	3.11
<b>10</b>	34.5	0.19	0.35	0.54	0.78	0.85	3.11
<b>11</b>	21.3	0.12	0.21	0.33	0.48	0.85	3.11
<b>12</b>	21.3	0.12	0.21	0.33	0.48	0.85	3.11
<b>13</b>	63.6	0.36	0.64	0.99	1.43	2.55	5.73
<b>14</b>	63.6	0.36	0.64	0.99	1.43	2.55	5.73
<b>15</b>	75.2	75.2	75.2	75.2	75.2	75.2	75.2
<b>16</b>	75.2	75.2	75.2	75.2	75.2	75.2	75.2

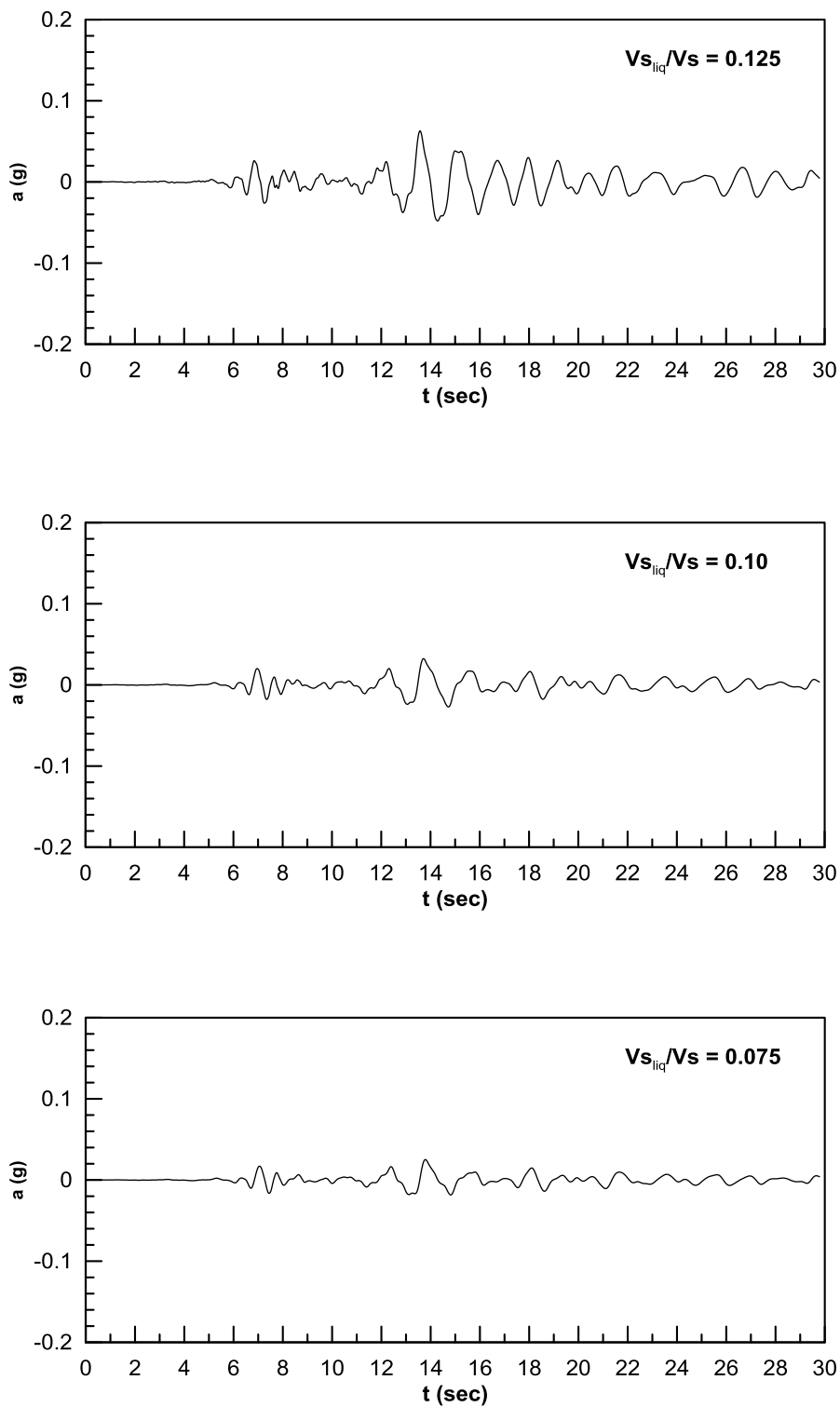


**Σχήμα 3.13 :** Διάγραμμα ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων μη ρευστοποιημένου εδάφους και ρευστοποιημένου εδάφους με  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.075$  και  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.30$

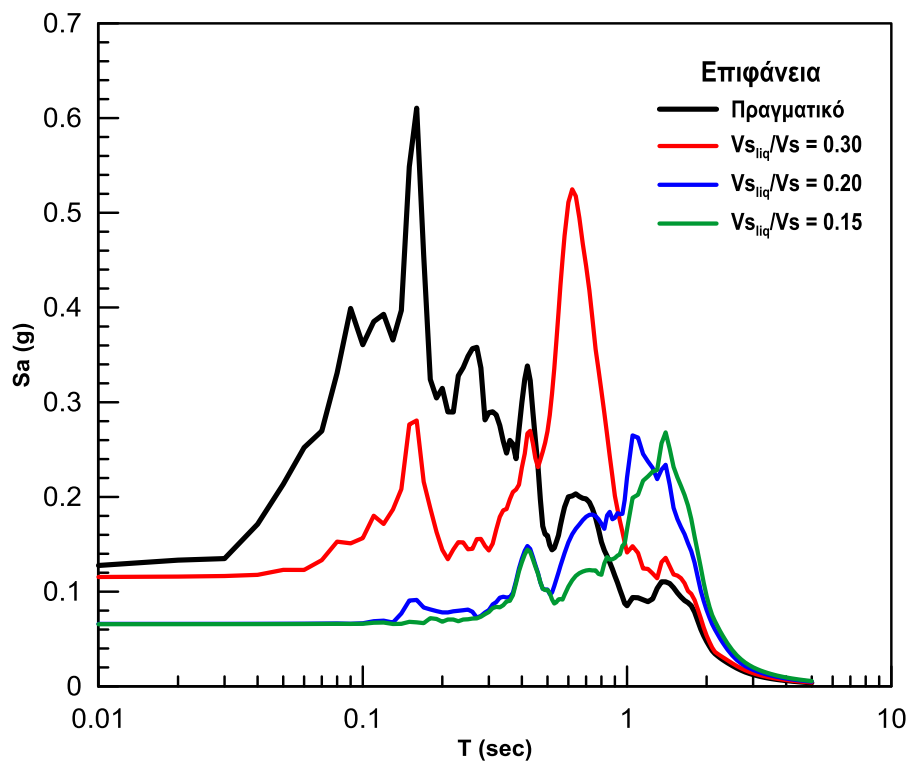


**Σχήμα 3.14 :** Επιταχυνσιογραφήματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις με το EERA για πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος για (α)  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.30$  (β)  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.20$  (γ)  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.15$

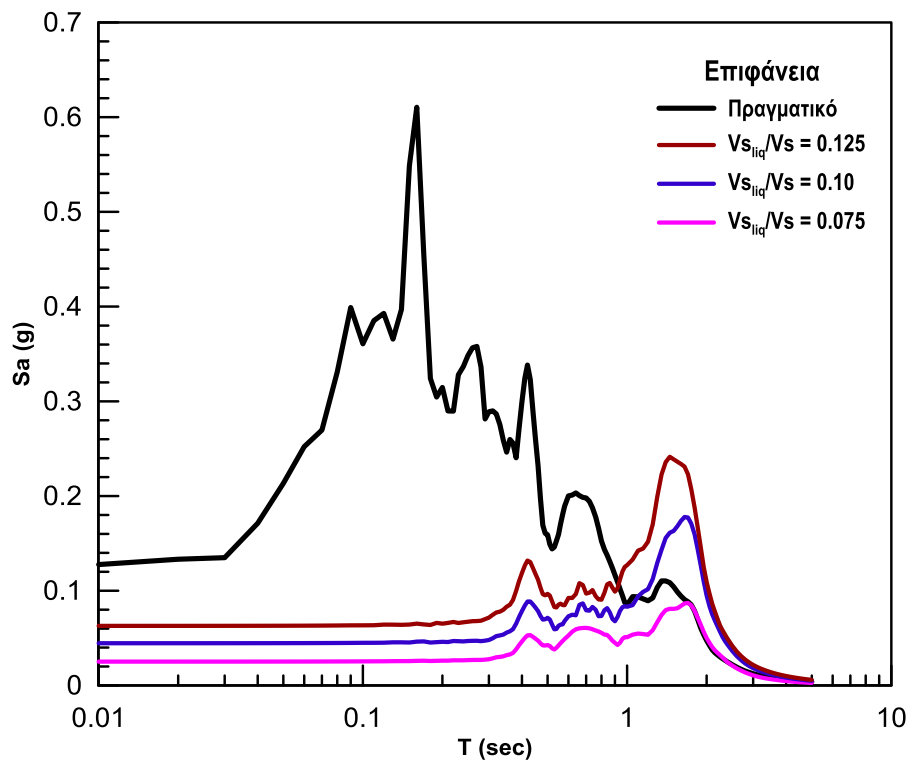




**Σχήμα 3.15 :** Επιταχυνσιογραφήματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις με το EERA για πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος για (α)  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.125$  (β)  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.10$  (γ)  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.075$



**Σχήμα 3.16 :** Φάσματα απόκρισης από την πραγματική καταγραφή και από τις αναλύσεις ρευστοποιημένου εδάφους με  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.30$ ,  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.20$  και  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.15$



**Σχήμα 3.17 :** Φάσματα απόκρισης από την πραγματική καταγραφή και από τις αναλύσεις ρευστοποιημένου εδάφους με  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.125$ ,  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.10$  και  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.075$

Για να υπολογιστεί το τελικό φάσμα, το οποίο θα προκύψει από το μη ρευστοποιημένο στρώμα και το πλήρως ρευστοποιημένο στρώμα άμμου, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός κάποιων συντελεστών συσχέτισης, οι οποίοι θα συνδέουν, με γραμμική παρεμβολή, αυτά τα δύο φάσματα με το πραγματικό.

$$\alpha = \frac{S_{aNL} - S_{aREAL}}{S_{aNL} - S_{aL}} \quad (3.14)$$

$$\beta = \frac{S_{aREAL} - S_{aL}}{S_{aNL} - S_{aL}} \quad (3.15)$$

όπου:  $S_{a,NL}$  και  $S_{a,L}$  η φασματική επιτάχυνση που υπολογίστηκε με το EERA στην επιφάνεια για μη ρευστοποιημένο και πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος αντίστοιχα  
 $S_{aREAL}$  η φασματική επιτάχυνση του πραγματικού φάσματος στην επιφάνεια

Αντίστοιχοι συντελεστές, οι οποίοι προκύπτουν από τα αδιαστατοποιημένα φάσματα είναι οι εξής:

$$\alpha^* = \frac{(S_{a PGA})_{NL} - (S_{a PGA})_{REAL}}{(S_{a PGA})_{NL} - (S_{a PGA})_L} \quad (3.16)$$

$$\beta^* = \frac{(S_{a PGA})_{REAL} - (S_{a PGA})_L}{(S_{a PGA})_{NL} - (S_{a PGA})_L} \quad (3.17)$$

Εύκολα διαπιστώνεται ότι ισχύουν οι σχέσεις:

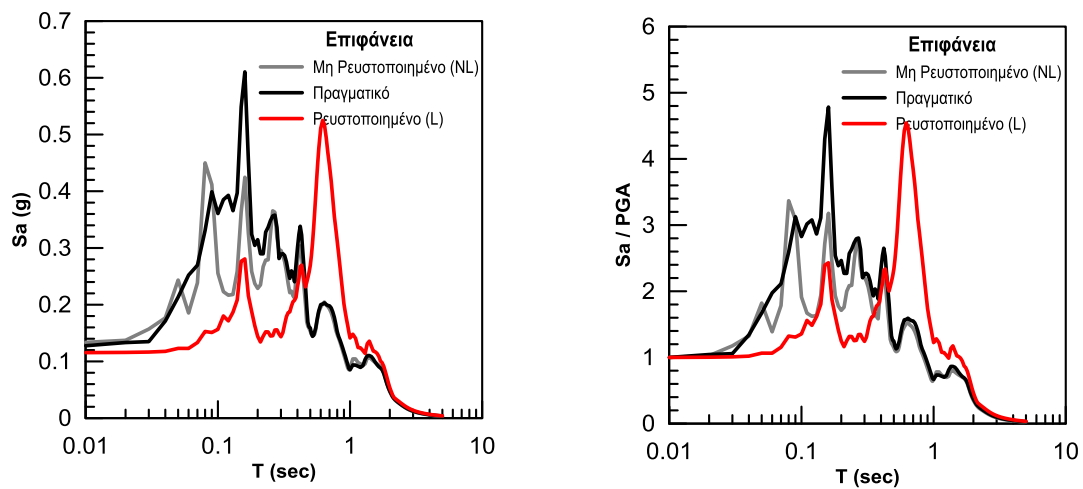
$$\beta = 1 - \alpha \quad \text{και} \quad \beta^* = 1 - \alpha^*$$

και επομένως η περαιτέρω επεξεργασία των συντελεστών  $\beta$  και  $\beta^*$  και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της είναι πλεονάζουσα και για αυτό αποφασίστηκε να παραληφθεί.

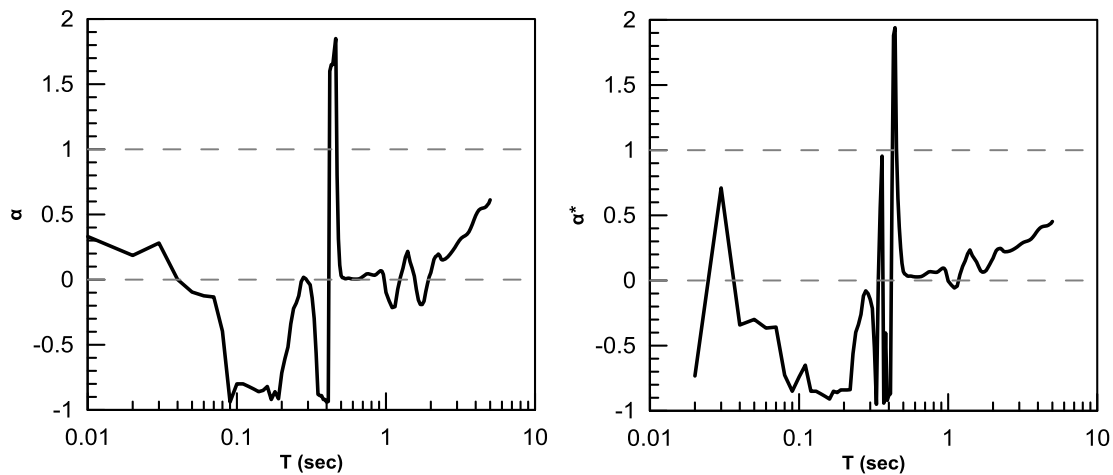
Από τις Σχέσεις 3.14 και 3.15, γίνεται αντιληπτό πως όταν ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης είναι αρκετά μεγαλύτερος από τη μονάδα, το εκτιμώμενο φάσμα χωρίς ρευστοποίηση (NL), ταυτίζεται με το πραγματικό, και οι συντελεστές  $\alpha$  και  $\alpha^*$  παίρνουν την τιμή μηδέν. Αντίθετα, οι συντελεστές  $\alpha$  και  $\alpha^*$  παίρνουν τιμή ίση με τη μονάδα όταν ο συντελεστής ασφαλείας  $FS_L$  είναι πολύ μικρός με συνέπεια το έδαφος να ρευστοποιείται αμέσως και ο αριθμητής να γίνεται ίσος με τον παρονομαστή. Άρα η μέγιστη και η ελάχιστη δυνατή τιμή για τους  $\alpha$  και  $\alpha^*$  είναι η μονάδα και το μηδέν αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, παρατίθενται τα φάσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις στο EERA για ρευστοποιημένο έδαφος, για έξι διαφορετικές περιπτώσεις, ανάλογα με τον λόγο  $V_{s_{liq}}/V_s$  και οι αντίστοιχοι συντελεστές. Σύμφωνα με τα όσα προαναφέρθηκαν οι τιμές των συντελεστών  $\alpha$  και  $\alpha^*$ , θα πρέπει να κυμαίνονται γύρω από το μηδέν. Να σημειωθεί ότι στο πρώτο διάγραμμα συντελεστών για κάθε ανάλυση, παρουσιάζεται ο τρεχούμενος μέσος όρος για πέντε τιμές, αφού περικόπηκαν οι τιμές που είναι μικρότερες από -1 και μεγαλύτερες από 2. Στο δεύτερο διάγραμμα, επειδή η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που μπορούν να πάρουν οι συντελεστές είναι το μηδέν και η μονάδα, κρατήθηκαν μόνο οι ενδιάμεσες τιμές και όταν ξεπερνούν το άνω και κάτω όριο αντικαθίστανται αντίστοιχα από αυτό.

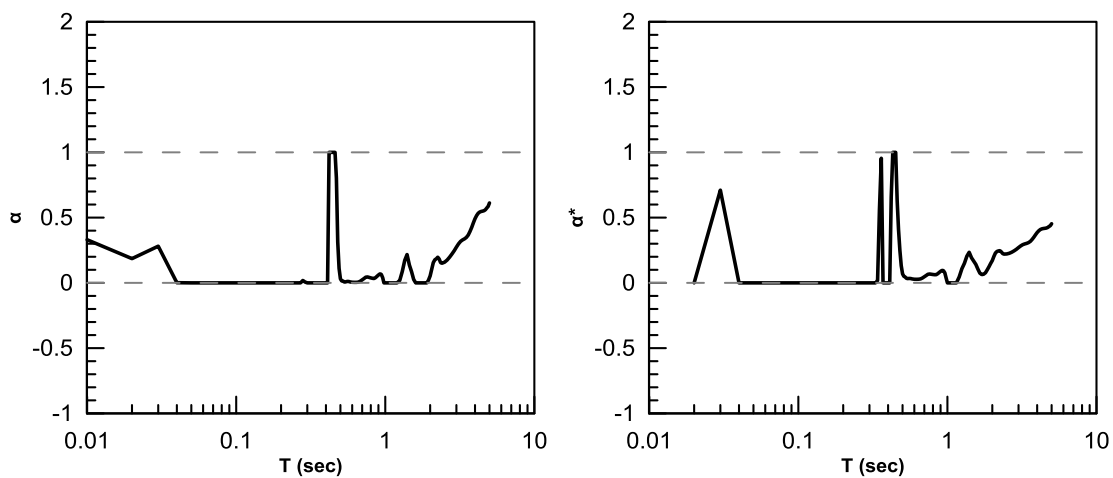
Τελικά, οι συντελεστές συσχέτισης, όπως ήταν αναμενόμενο, είναι κοντά στην τιμή μηδέν για τις περισσότερες περιόδους, ενώ παρατηρείται πως σε κάποια σημεία αγγίζει τη μονάδα. Αυτό συμβαίνει, στις περιόδους κατά τις οποίες το φάσμα που προέκυψε από τις αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση, ταυτίζεται με το φάσμα του ρευστοποιημένου εδάφους. Ένα σημείο που πρέπει να αναφερθεί, είναι ότι περίπου για  $T > 2\text{sec}$  η τιμή των συντελεστών αρχίζει να έχει ελαφρώς ανοδική πορεία και κυμαίνεται μεταξύ του 0 και 0.5 περίπου. Αυτό συμβαίνει όταν το φάσμα ρευστοποιημένου εδάφους είναι ψηλότερα από το φάσμα του μη ρευστοποιημένου και γίνεται πιο έντονο για  $V_{s_{liq}}/V_s$  ίσο με 0.30 και 0.20. Για λόγο  $V_{s_{liq}}/V_s$  ίσο με 0.30, οι συντελεστές συσχέτισης παίρνουν μη αναμενόμενη μορφή και επομένως δεν θεωρείται αυτός ο λόγος ταχυτήτων κατάλληλος για τη μεθοδολογία που θέλουμε να ακολουθήσουμε για τον υπολογισμό του ενδιάμεσου φάσματος. Γενικά πάντως το διάγραμμα του συντελεστή “ $\alpha$ ”, για όλες τις ταχύτητες, παίρνει πιο ομαλή μορφή σε σύγκριση με τον συντελεστή  $\alpha^*$ .



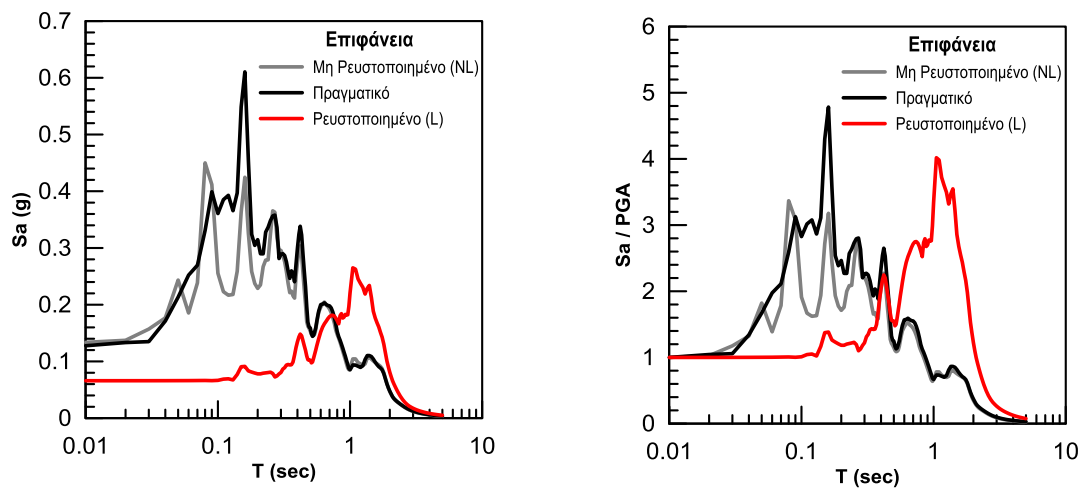
**Σχήμα 3.18 :** Φάσματα απόκρισης και αδιαστατοποιημένα φάσματα πραγματικής καταγραφής και από τις αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση και με  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.30$



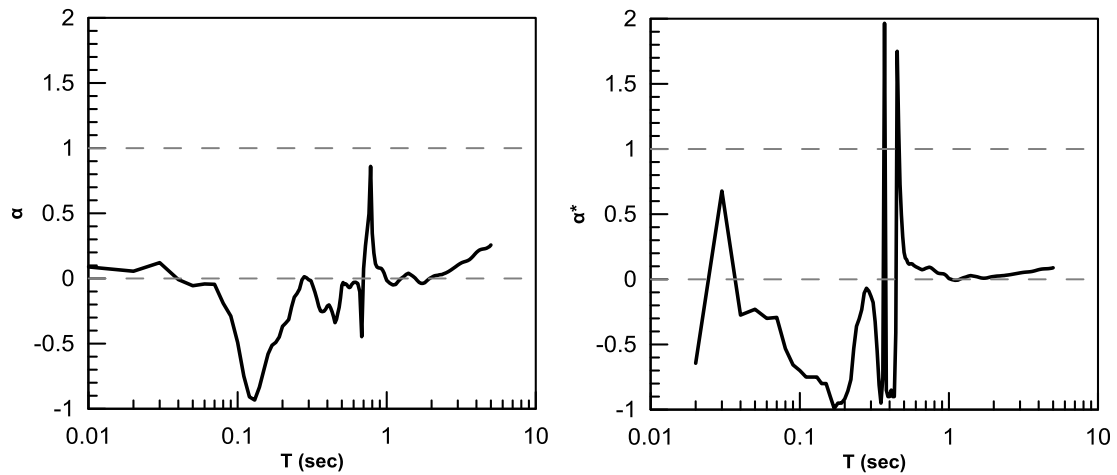
**Σχήμα 3.19 :** Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” συναρτήσει της T για  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.30$



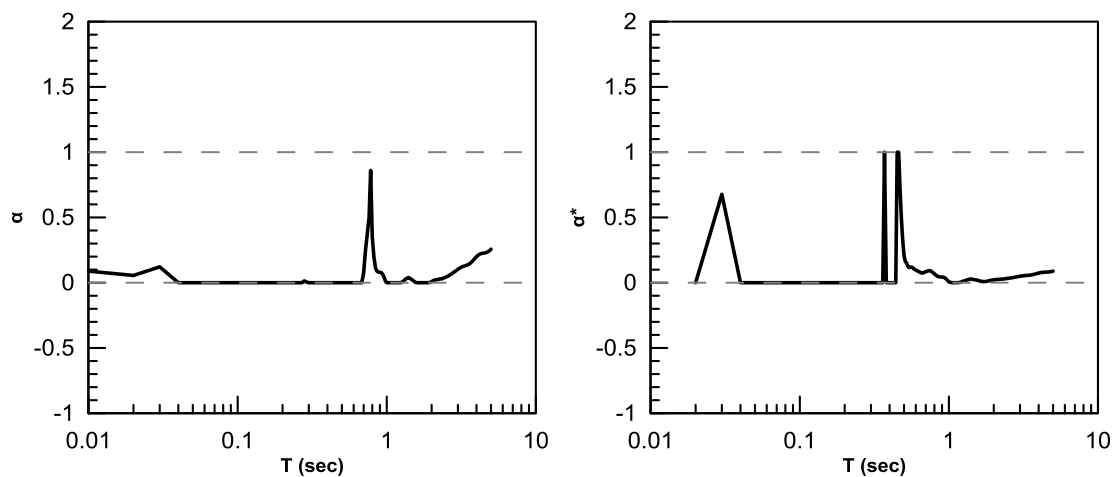
**Σχήμα 3.20 :** Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” με εύρος τιμών  $0 \div 1$  συναρτήσει της T για  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.30$



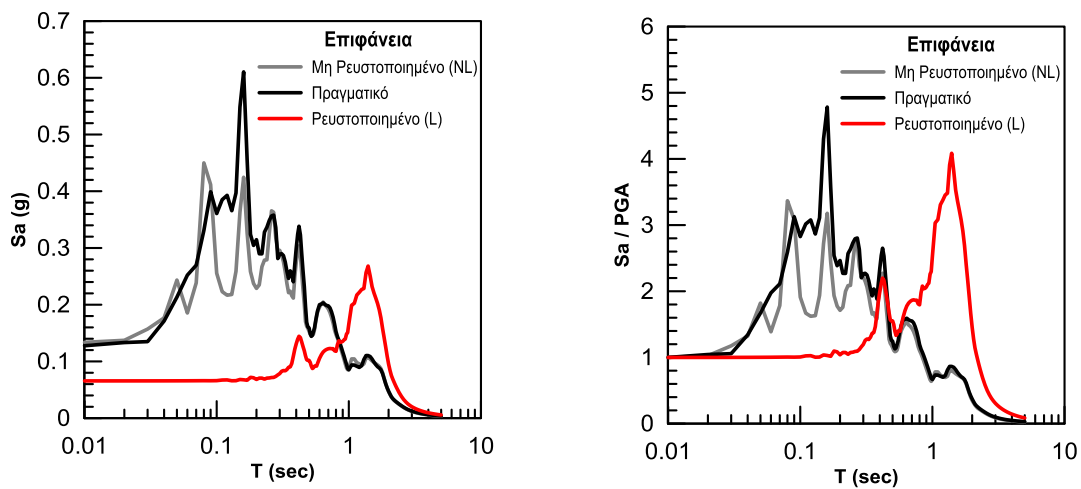
**Σχήμα 3.21 :** Φάσματα απόκρισης και αδιαστατοποιημένα φάσματα πραγματικής καταγραφής και από τις αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση και με  $V_{sliq} / V_s = 0.20$



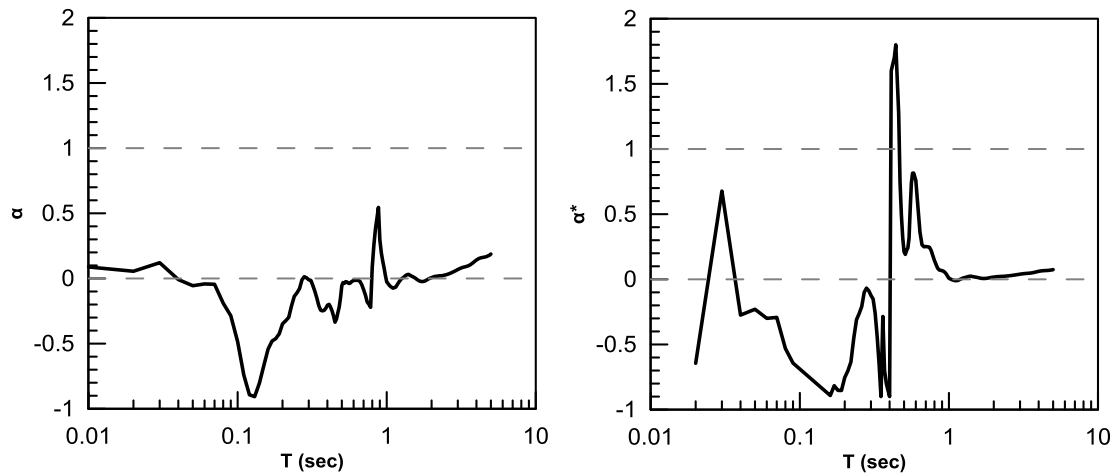
**Σχήμα 3.22 :** Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” συναρτήσει T για  $V_{sliq}/V_s = 0.20$



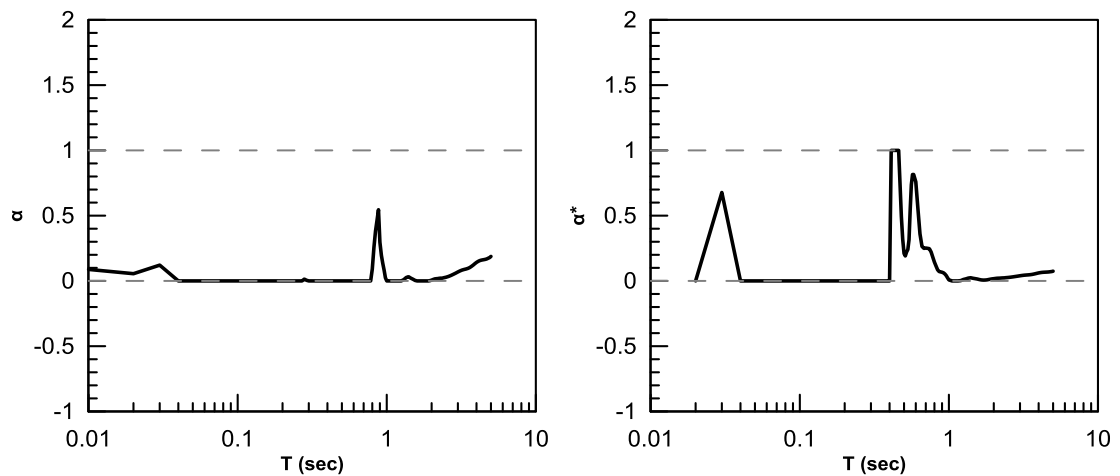
**Σχήμα 3.23 :** Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” με εύρος τιμών  $0 \div 1$  συναρτήσει της T για  $V_{sliq}/V_s = 0.20$



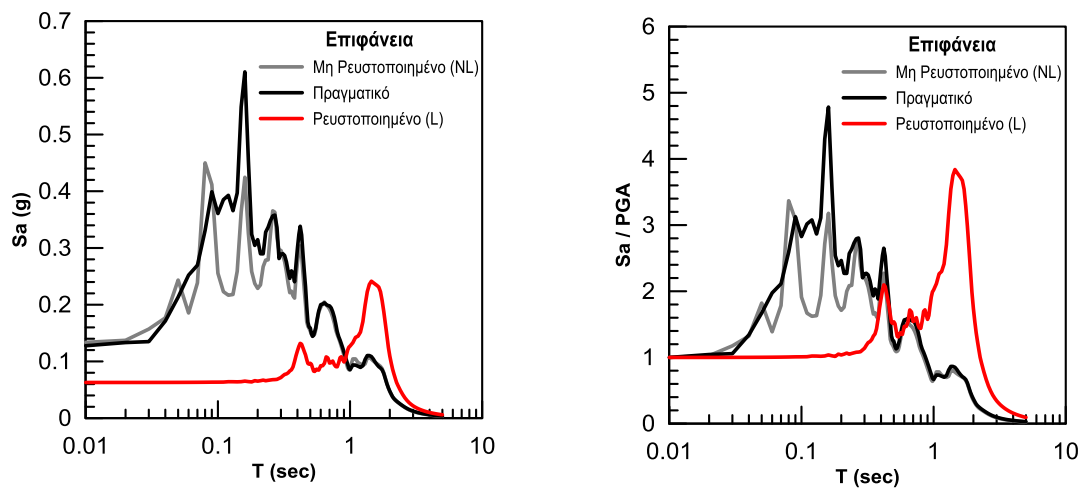
**Σχήμα 3.24 :** Φάσματα απόκρισης και αδιαστατοποιημένα φάσματα πραγματικής καταγραφής και από τις αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση και με  $V_{sliq} / V_s = 0.15$



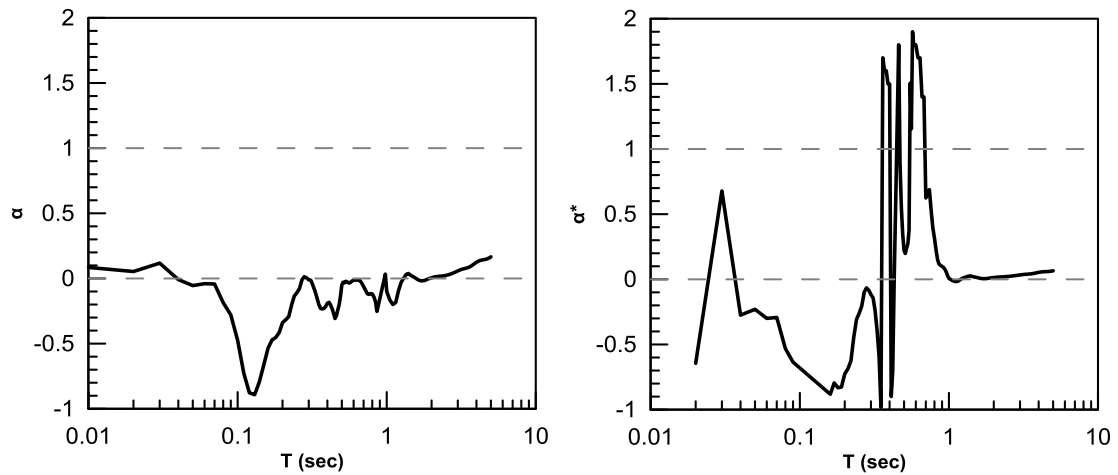
**Σχήμα 3.25 :** Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” συναρτήσει της ιδιοπεριόδου T για  $V_{sliq} / V_s = 0.15$



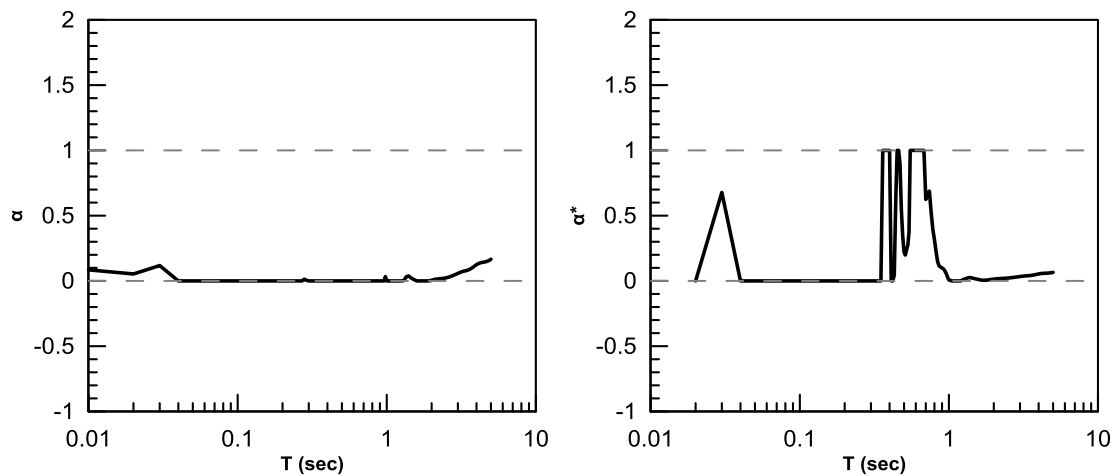
**Σχήμα 3.26 :** Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” με εύρος τιμών  $0 \div 1$  συναρτήσει της ιδιοπεριόδου T για  $V_{sliq} / V_s = 0.15$



**Σχήμα 3.27 :** Φάσματα απόκρισης και αδιαστατοποιημένα φάσματα πραγματικής καταγραφής και από τις αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση και με  $V_{sliq} / V_s = 0.125$

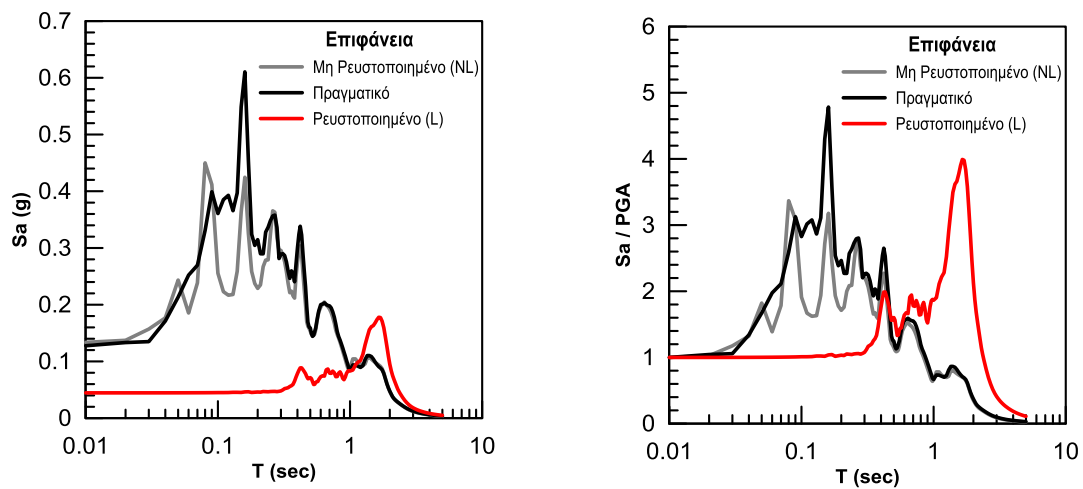


**Σχήμα 3.28 :** Συντελεστές συσχέτισης “ $\alpha$ ” και “ $\alpha^*$ ” συναρτήσει της ιδιοπεριόδου  $T$  για  $V_{sliq} / V_s = 0.125$

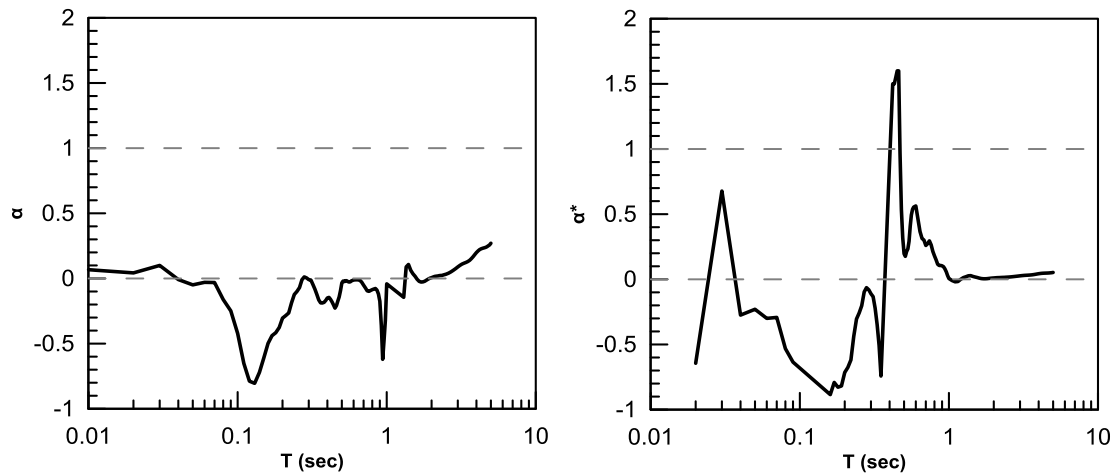


**Σχήμα 3.29 :** Συντελεστές συσχέτισης “ $\alpha$ ” και “ $\alpha^*$ ” με εύρος τιμών  $0 \div 1$  συναρτήσει της ιδιοπεριόδου  $T$  για  $V_{sliq} / V_s = 0.125$

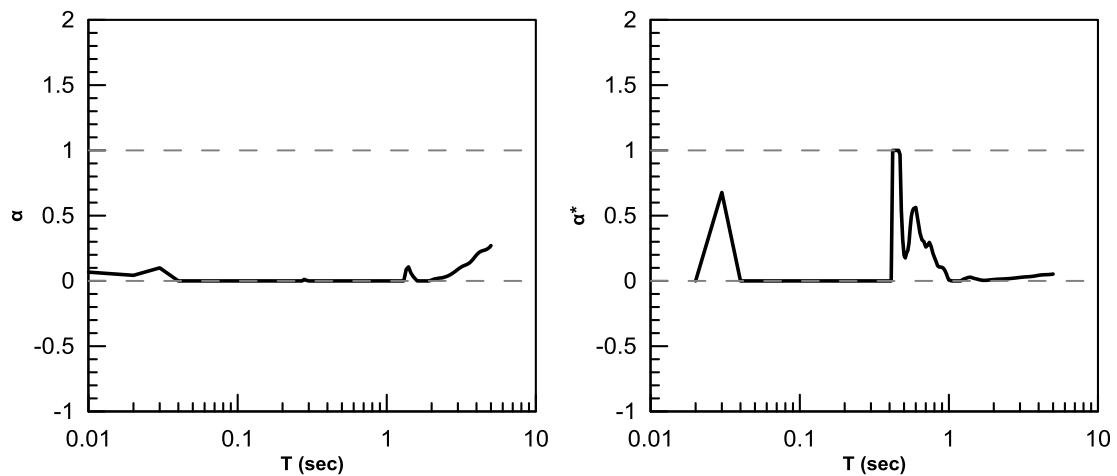




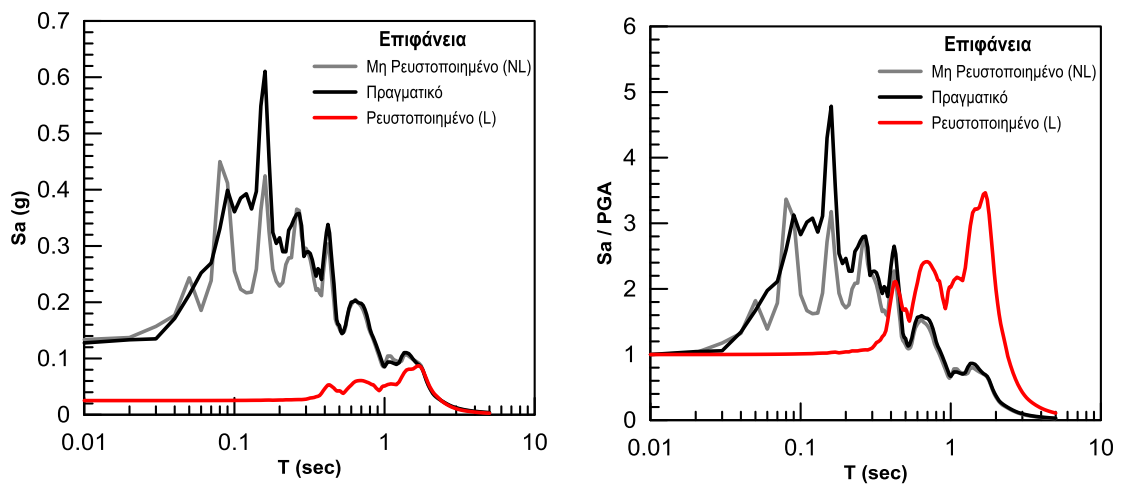
**Σχήμα 3.30 :** Φάσματα απόκρισης και αδιαστατοποιημένα φάσματα πραγματικής καταγραφής και από τις αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση και με  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.10$



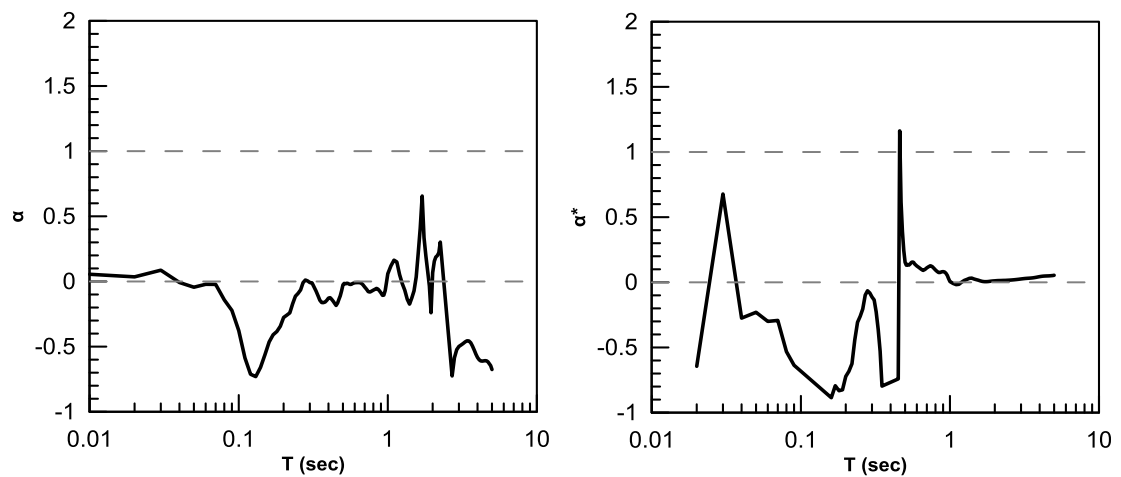
**Σχήμα 3.31 :** Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” συναρτήσει της ιδιοπεριόδου T για  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.10$



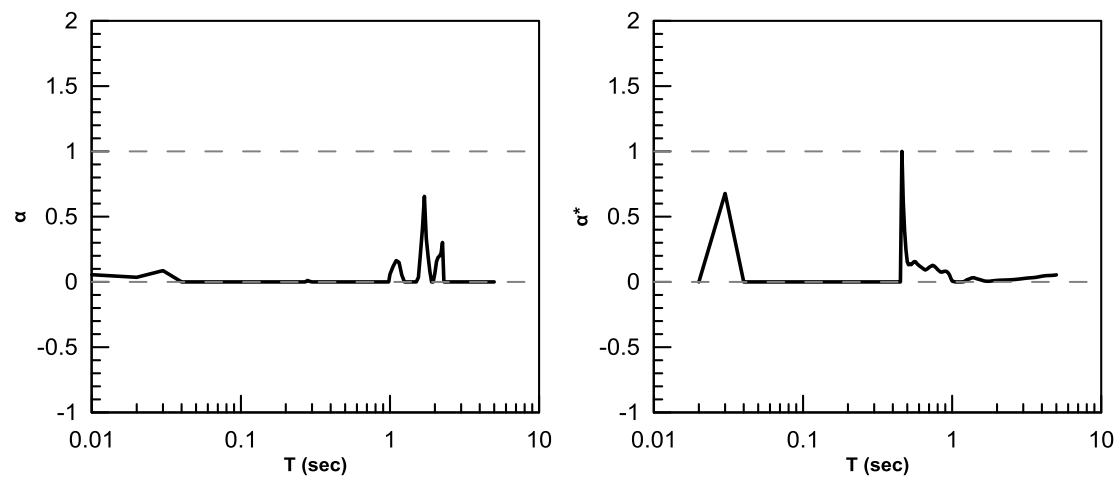
**Σχήμα 3.32 :** Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” με εύρος τιμών  $0 \div 1$  συναρτήσει της ιδιοπεριόδου T για  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.10$



**Σχήμα 3.33 :** Φάσματα απόκρισης και αδιαστατοποιημένα φάσματα πραγματικής καταγραφής και από τις αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση και με  $V_{Sliq} / V_s = 0.075$



**Σχήμα 3.34 :** Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” συναρτήσει της ιδιοπεριόδου T για  $V_{Sliq} / V_s = 0.075$



**Σχήμα 3.35 :** Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” με εύρος τιμών  $0 \div 1$  συναρτήσει της ιδιοπεριόδου T για  $V_{Sliq} / V_s = 0.075$

### 3.5 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, στο κεφάλαιο αυτό, εξετάστηκε η απόκριση της περιοχής WLA κατά τη διάρκεια του σεισμού Elmore Ranch. Ο συντελεστής  $FS_L$  υπολογίστηκε, βάσει δοκιμών SPT και CPT, μεγαλύτερος της μονάδας (περίπου ίσος με 1.5), γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την πραγματική συμπεριφορά του εδάφους στο σεισμό, κατά τον οποίο δεν εμφανίστηκε ρευστοποίηση. Στη συνέχεια έγιναν αναλύσεις με το EERA, για ρευστοποιημένο έδαφος, με έξι τιμές του λόγου  $V_{S_{liq}}/V_s$ , και για πλήρη απουσία ρευστοποίησης. Το φάσμα μη ρευστοποιημένου εδάφους για  $T > 0.2\text{sec}$  συγκρίνεται ικανοποιητικά με το πραγματικό, γεγονός που υποδεικνύει ότι το πραγματικό έδαφος έχει προσομοιωθεί με πολύ καλή ακρίβεια στις αναλύσεις.

Από τα φάσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις με και χωρίς ρευστοποίηση, υπολογίστηκαν οι συντελεστές συσχέτισης  $\alpha$  και  $\alpha^*$ , ώστε με τη βοήθειά τους να προβλεφθεί ένα φάσμα το οποίο θα προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια το πραγματικό. Όσον αφορά τις τιμές των συντελεστών " $\alpha$ " και " $\alpha^*$ ", θα πρέπει να βρίσκονται μεταξύ της μονάδας και του μηδενός για να υπάρχει φυσικό νόημα. Όπως ήταν αναμενόμενο για μη ρευστοποιημένο έδαφος, οι συντελεστές για τις περισσότερες περιόδους είναι κοντά στην τιμή μηδέν για όλες τις πιθανές τιμές του λόγου  $V_{S_{liq}} / V_s$  που εξετάστηκαν, με εξαίρεση για λόγο  $V_{S_{liq}}/V_s$  ίσο με 0.30, στον οποίο για  $T > 1\text{sec}$  το διάγραμμα παρουσιάζει έντονα ανοδική πορεία.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΟΧΗ WILDLIFE LIQUEFACTION ARRAY (WLA) – ΣΕΙΣΜΟΣ SUPERSTITION HILLS**

### **4.1 Γενικά**

Στο κεφάλαιο αυτό, διερευνάται πάλι η σεισμική απόκριση της περιοχής Wildlife Liquefaction Array, όμως αυτή τη φορά υπό τη σεισμική διέγερση Superstition Hills ( $M_w = 6.6$ ), κατά την οποία παρατηρήθηκε έντονα το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Αρχικά, θα υπολογίσουμε τον συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης της περιοχής, για αυτόν τον πιο έντονο σεισμό, χρησιμοποιώντας τις ίδιες δοκιμές SPT και CPT με το προηγούμενο κεφάλαιο. Στη συνέχεια, θα πραγματοποιήσουμε αναλύσεις, με άμεση και χωρίς καθόλου ρευστοποίηση, υπό τη σεισμική διέγερση Superstition Hills και από τα φάσματα που θα προκύψουν, θα υπολογιστούν κατάλληλοι συντελεστές συσχέτισης για την πρόβλεψη του πραγματικού φάσματος στην επιφάνεια. Στις αναλύσεις αυτές, θα γίνει χρήση του προφίλ εδάφους που χρησιμοποιήθηκε και στις αναλύσεις με τον σεισμό Elmore Ranch, καθώς, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, προσομοιάζουν με επαρκή ακρίβεια το πραγματικό έδαφος.

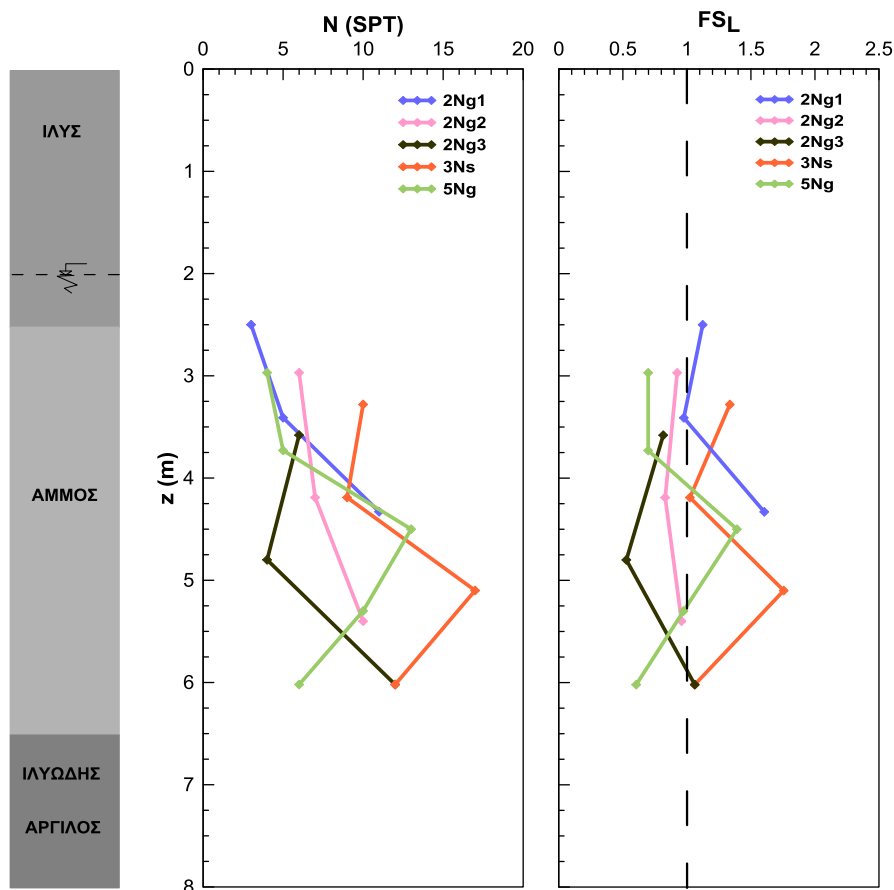
### **4.2 Υπολογισμός Συντελεστή Ασφαλείας Έναντι Ρευστοποίησης ( $FS_L$ )**

**Συμβατικός Υπολογισμός.** Για να υπολογιστεί ο συντελεστής ασφαλείας για διάφορα βάθη, θα γίνει χρήση των Δοκιμών Πρότυπης Διείσδυσης (SPT) και Στατικής Πενετρομέτρησης (CPT) που διεξήγαγε η Εθνική Υπηρεσία Γεωτεχνικών Ερευνών της Αμερικής (USGS) στις θέσεις οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 3.1. Στην σεισμική διέγερση Superstition Hills, με  $M_w = 6.6$  και  $\alpha_{max} = 0.21g$ , οι πιέσεις πόρων άργησαν να αυξηθούν (Σχήμα 2.7) και επομένως ο συντελεστής  $FS_L$  του ρευστοποιήσιμου αμμώδους στρώμα του WLA, που βρίσκεται από 2.5 έως 7.5m, αναμένεται να είναι λίγο μικρότερος της μονάδας.

Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί για τον υπολογισμό του  $FS_L$ , περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.2. Το χαρακτηριστικά του εδάφους (Πίνακας 3.1) και οι συντελεστές διόρθωσης λόγω του τύπου της δοκιμής είναι οι ίδιοι που υπολογίστηκαν για τον

σεισμό Elmore Ranch. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν, για τον σεισμό Superstition Hills βάσει των δοκιμών SPT, φαίνονται στο Σχήμα 4.1.

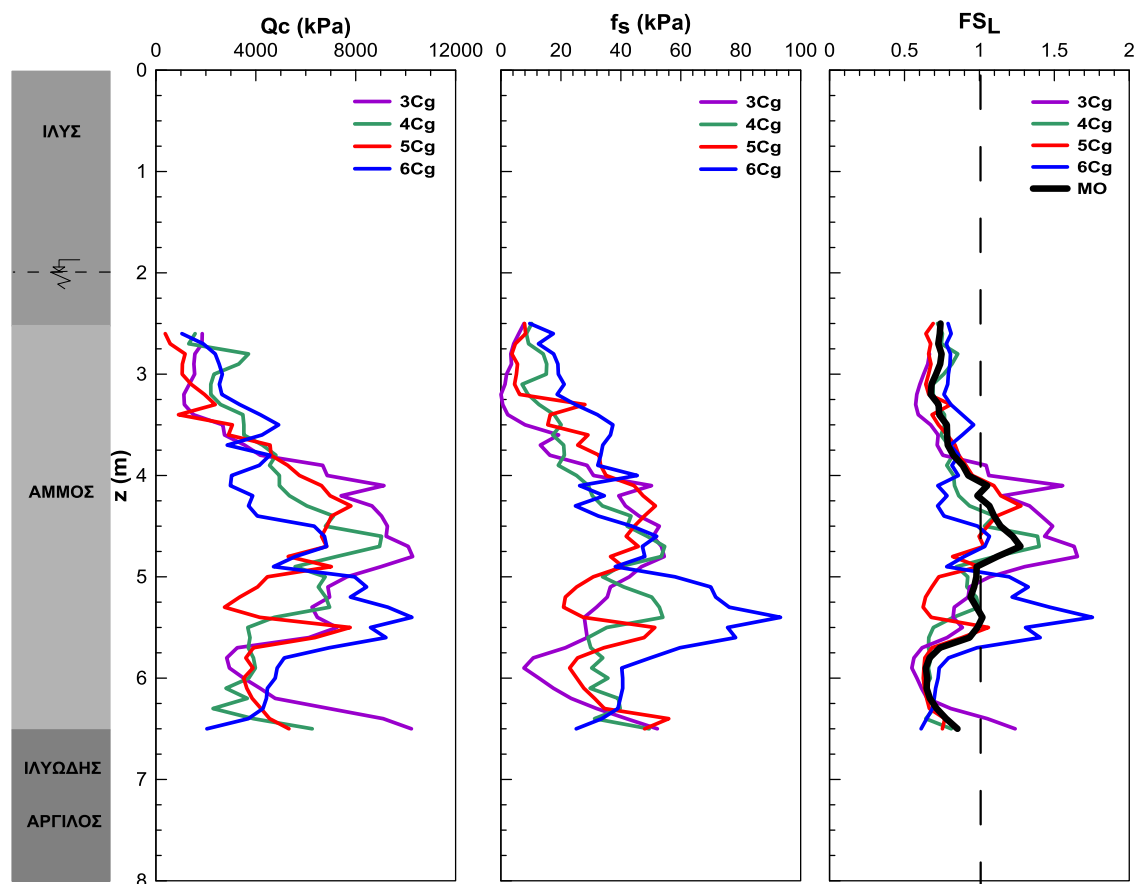
Παρατηρούμε ότι στις θέσεις 2Ng2, 2Ng3, 5Ng ο συντελεστής ασφαλείας είναι κατά μέσο όρο μικρότερος της μονάδας με ελάχιστη τιμή  $FS_L = 0.5$  και μέση τιμή με το βάθος  $FS_L = 0.6 \div 0.7$ . Οι θέσεις των δοκιμών SPT 2Ng1, 2Ng2 και 2Ng3 βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους (Σχήμα 3.1) και επομένως θα έπρεπε ο συντελεστής ασφαλείας να παίρνει παρόμοιες τιμές. Οι διαφορές στις τιμές που παρατηρούνται στη θέση 2Ng1, πιθανόν να οφείλονται στην ύπαρξη τοπικά χαλίκων οι οποίοι προκαλούν αποκλίσεις στις δοκιμές CPT και SPT. Όσον αφορά στη θέση 3Ns, λόγω του ότι το έδαφος είναι αλλουβιακό, τοπικά μπορεί να υπάρχει μία πιο συμπυκνωμένη στρώση. Γενικά πάντως ο μέσος όρος του συντελεστή ρευστοποίησης κυμαίνεται στις τιμές  $FS_L = 0.7 \div 0.8$ . Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής  $FS_L$  δεν υπολογίστηκε για το στρώμα της άμμου ή της ιλύος, καθώς τα εδάφη αυτά είναι μη ρευστοποιήσιμα.



**Σχήμα 4.1 :** (α) Εδαφικό προφίλ και διάγραμμα (β) αριθμού χτύπων N από δοκιμές SPT (γ) αντίστοιχου συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει του βάθους

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε ο συντελεστής ασφαλείας  $FS_L$  (Σχήμα 4.2) για τις Δοκιμές Στατικής Πενετρομέτρησης (CPT) για το στρώμα της άμμου σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Youd et al.(2001) που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παρατηρούμε ότι το εύρος τιμών του συντελεστή έναντι ρευστοποίησης είναι αρκετά μεγάλο ( $FS_L = 0.5 \div 1.75$ ) και ιδιαίτερα οι θέσεις 6Cg και 3Cg, παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές. Οι τιμές που είναι μεγαλύτερες από τη μονάδα, προκύπτει ότι δεν είναι αντιπροσωπευτικές της πραγματικότητας, καθώς δημιουργήθηκαν υπερπιέσεις πόρων στα βάθη αυτά λόγω του σεισμού. Να σημειωθεί ότι η δοκιμή SPT στη θέση 3Ns και η δοκιμή CPT στη θέση 3Cg είναι σε μικρή απόσταση μεταξύ τους και δίνουν και οι δύο μεγάλο συντελεστή ρευστοποίησης σε κάποια βάθη. Επομένως, στην περιοχή εκείνη, όντως, το έδαφος ρευστοποιείται πιο δύσκολα και δεν έχει γίνει κάποιο λάθος κατά την δοκιμή SPT στη θέση εκείνη. Είναι σημαντικό, πως στη θέση 4Cg, που βρίσκεται ακριβώς στο σημείο όπου έχουμε την σεισμική

καταγραφή, ο  $FS_L$ , ταυτίζεται σχεδόν με την καμπύλη του μέσου όρου των συντελεστών και κυμαίνεται στις τιμές  $0.7 \div 0.9$ . Οι ελάχιστες τιμές του συντελεστή για όλες τις θέσεις δοκιμών, κυμαίνονται γύρω στο 0.6. Συνοψίζοντας, παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα από τα δύο είδη δοκιμών είναι παραπλήσια, αλλά δεν ταυτίζονται.

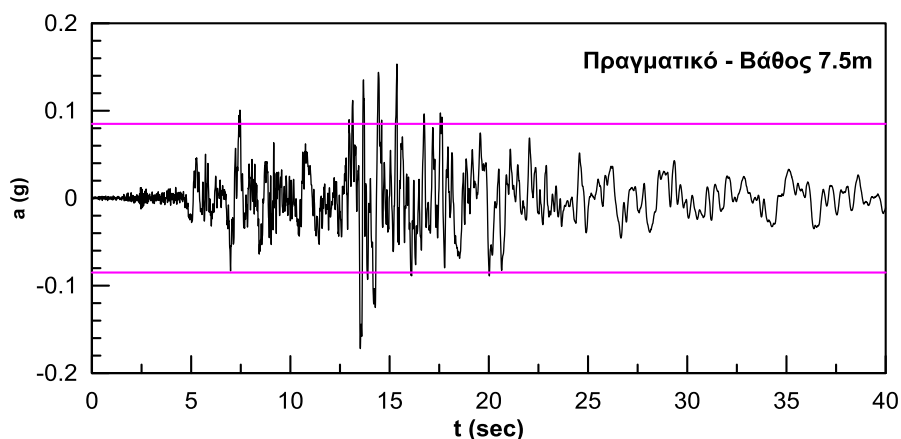


**Σχήμα 4.2 :** (α)Εδαφικό προφίλ (β) αντοχή αιχμής  $Q_c$ , (γ) αντίσταση πλευρικής τριβής  $f_s$  και (δ) αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας συναρτήσεως του βάθους από δοκιμές CPT

**Διόρθωση Μεγέθους Σεισμού.** Το μέγεθος του σεισμού  $M_w$  εξαρτάται από τον αριθμό των κύκλων μεγάλου πλάτους που φτάνουν στην επιφάνεια. Επειδή, για τον σεισμό Superstition Hills είναι διαθέσιμη η πραγματική καταγραφή, είναι δυνατή η απ' ευθείας μέτρηση των ισοδύναμων κύκλων, ώστε να μη χρειαστεί να συσχετιστούν με το μέγεθος του σεισμού. Επομένως θεωρήθηκε πιο σωστό να υπολογιστεί το μέγεθος του σεισμού εκ νέου, από τον αριθμό κύκλων της διέγερσης σε βάθος 7.5 m. Θεωρήσαμε σημαντικούς κύκλους της διέγερσης όσους έχουν



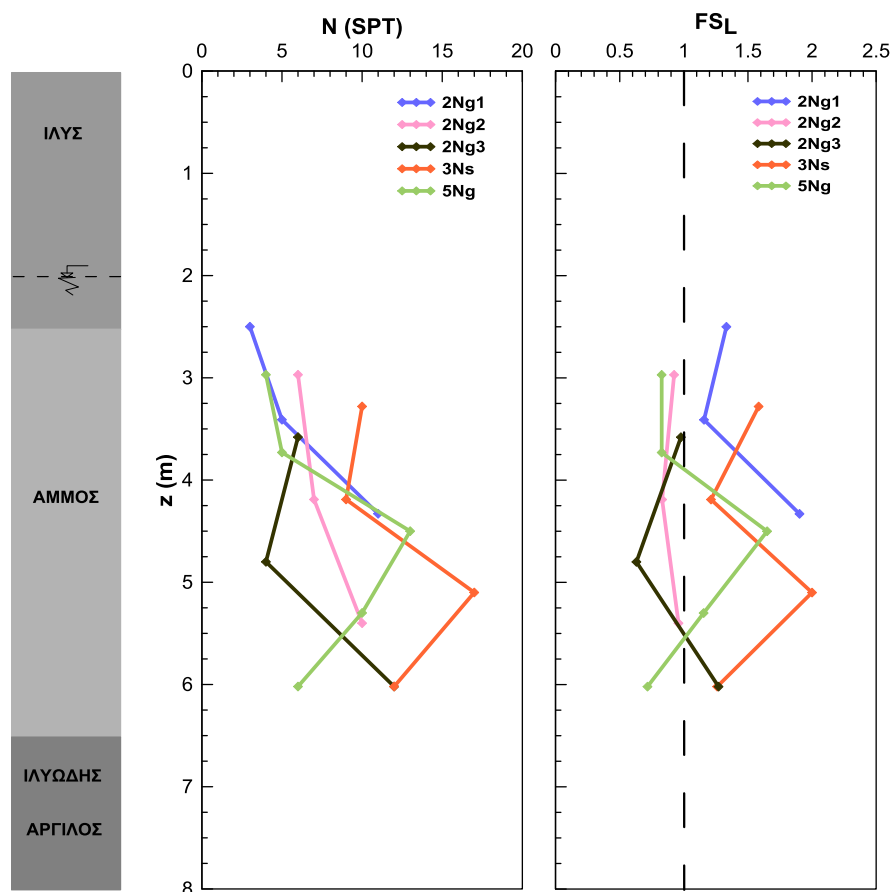
επιτάχυνση μεγαλύτερη από το μισό της μέγιστης και προέκυψαν 6 σημαντικοί κύκλοι (Σχήμα 4.3). Από τον Πίνακα 4.1 (Steven L. Kramer) το ισοδύναμο μέγεθος του σεισμού υπολογίστηκε με γραμμική παρεμβολή ίσο με  $M_w = 6.15$ . Ο πίνακας αυτός συσχετίζει το μέγεθος του σεισμού με τον αριθμό σημαντικών κύκλων της διέγερσης. Από τη Σχέση (3.8) υπολογίστηκε ο νέος διορθωτικός συντελεστής  $MSF = 1.66$  και με αυτόν επαναλήφθηκαν οι υπολογισμοί του  $FS_L$  για τις δοκιμές SPT (Σχήμα 4.4). Προφανώς, εφ' όσον μειώθηκε το μέγεθος του σεισμού, ο συντελεστής ασφαλείας γενικά θα αυξηθεί με ελάχιστη τιμή πλέον το  $FS_L = 0.65$ . Ο μέσος όρος κυμαίνεται γύρω στο 0.8 με 1.2 που υποδεικνύει ένα έδαφος που ρευστοποιείται μεν, αλλά δύσκολα. Η εικόνα αυτή αντιστοιχεί και στην πραγματικότητα.



**Σχήμα 4.3 :** Μέτρηση αριθμού κύκλων από πραγματικό επιταχυνσιογράφημα σε βάθος 7.5 m

**Πίνακας 4.1 :** Μέγεθος σεισμού  $M_w$  συναρτήσει αριθμού σημαντικών κύκλων n (Geotechnical Earthquake Engineering, Steven L. Kramer)

<b><math>M_w</math></b>	5.25	6	6.75	7.5	8.5
<b>n</b>	2.5	5	10	15	26

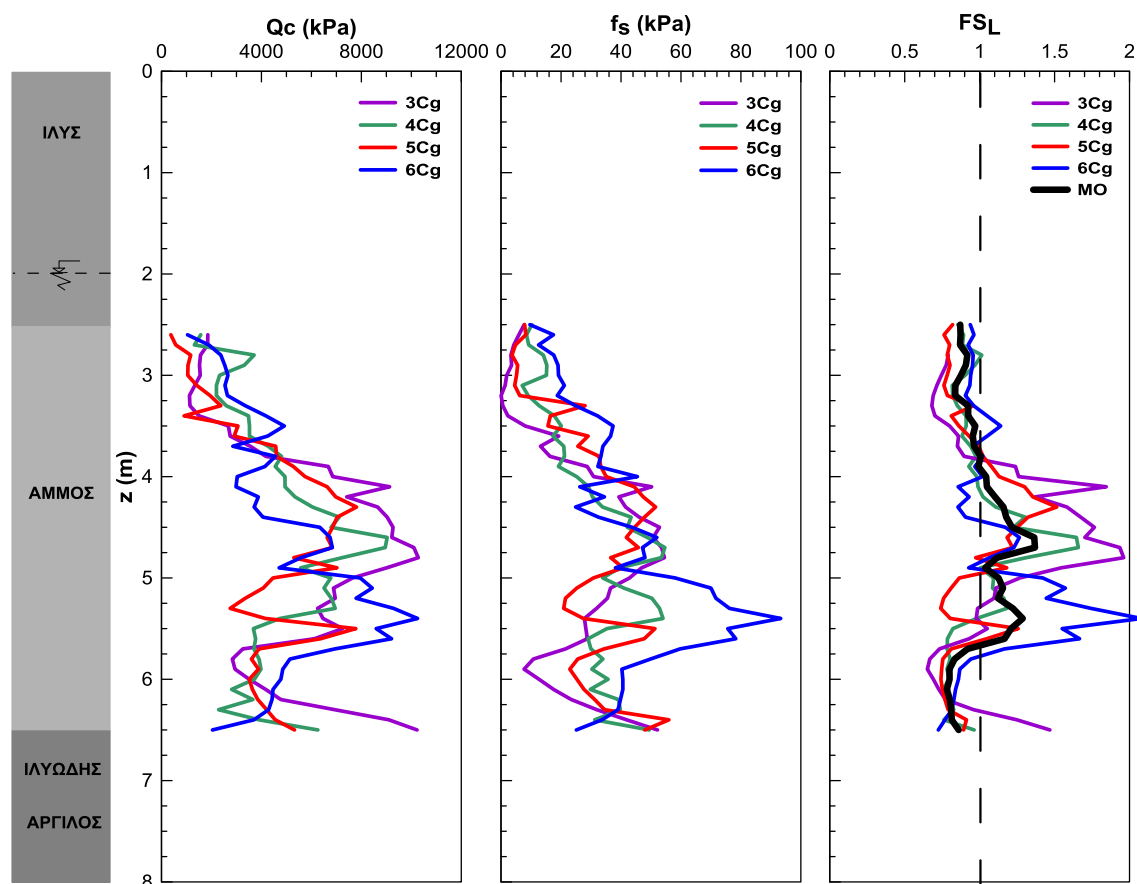


**Σχήμα 4.4 :** (α) Εδαφικό προφίλ και διάγραμμα (β) αριθμού χτύπων N από δοκιμές SPT (γ) αντίστοιχου συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει του βάθους για  $M_w = 6.15$

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο νέος συντελεστής ασφαλείας από τις δοκιμές CPT και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 4.5. Όλες οι καμπύλες φυσικά είναι ελαφρώς μετατοπισμένες προς τα δεξιά, με μέση τιμή  $FS_L = 0.9 \div 1.1$ . Στη θέση που βρισκόταν ο επιταχυνσιογράφος (4Cg), το έδαφος παρουσιάζει κατά μέσο όρο  $FS_L$  κοντά στη μονάδα, όπως ήταν αναμενόμενο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο συντελεστής ασφαλείας της άμμου στο πρώτο 1.5m, παίρνει τιμές γύρω στο  $FS_L = 0.9$  που δείχνουν ένα έδαφος, όπως προειπώθηκε, που είναι πιθανόν να ρευστοποιηθεί αλλά με κάποιο βαθμό δυσκολίας.

Συνοψίζοντας, η μέση τιμή του συντελεστή ασφαλείας με μέγεθος σεισμού  $M_w = 6.6$ , ισούται περίπου με  $FS_L = 0.8$  και προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική εδαφική απόκριση στο σεισμό, καθώς το έδαφος ρευστοποιήθηκε, αλλά με δυσκολία. Αντίθετα, με μέγεθος σεισμού  $M_w = 6.15$ , το έδαφος προκύπτει οριακά μη ρευστοποιήσιμο, με μέση τιμή του συντελεστή  $FS_L = 1.0$ . Επομένως υιοθετείται

ακολουθώς η πρώτη μέθοδος υπολογισμού, που θεωρεί δεδομένο το μέγεθος του σεισμού  $M_w$ , ως αντιπροσωπευτικότερη της πραγματικότητας.



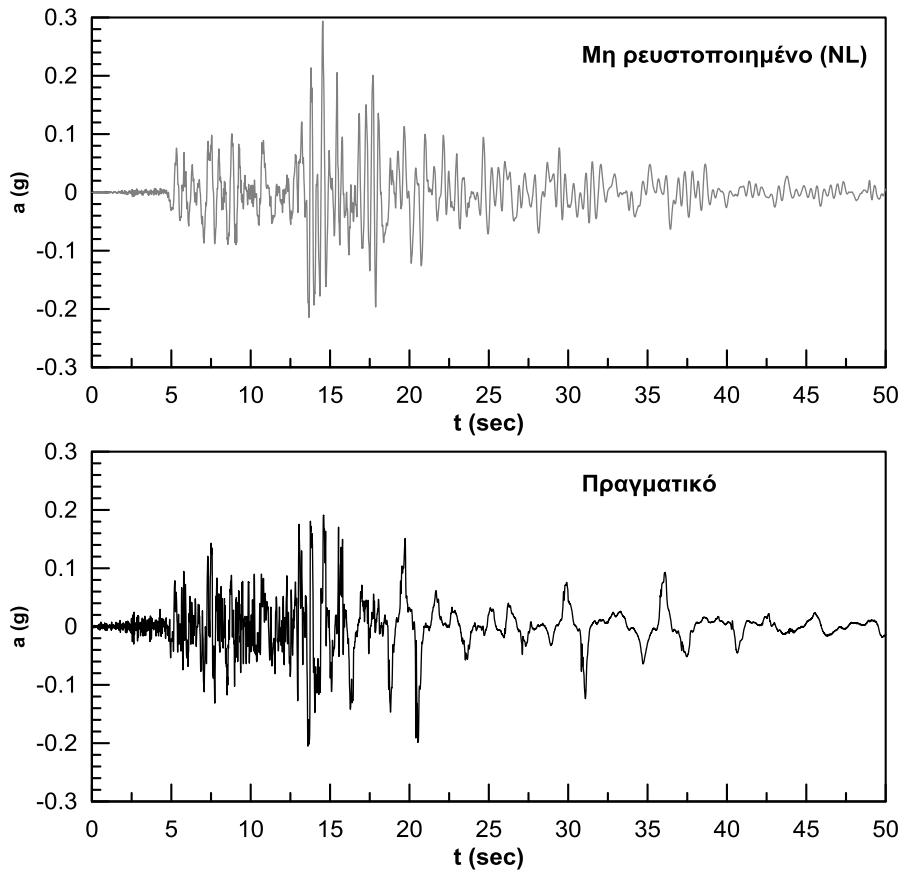
**Σχήμα 4.5 :** (α)Εδαφικό προφίλ και (β)αντοχή αιχμής  $Q_c$ , (γ) αντίσταση πλευρικής τριβής  $f_s$  και (δ) αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας συναρτήσει του βάθους από δοκιμές CPT για  $M_w = 6.15$

### 4.3 Αναλύσεις Σεισμικής Απόκρισης Μη Ρευστοποιημένου Εδάφους

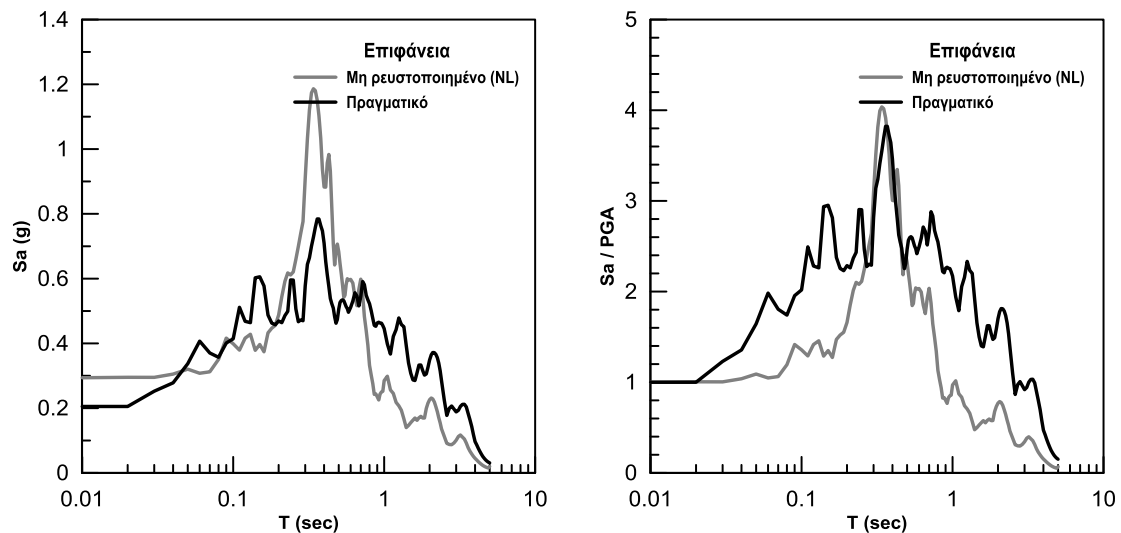
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στόχος είναι να αναπαραχθεί το καταγεγραμμένο φάσμα ενός σεισμού, μιας περιοχής στην οποία έχει εμφανιστεί το φαινόμενο της ρευστοποίησης, από τα φάσματα που υπολογίζονται από ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις που πραγματοποιούνται με το πρόγραμμα EERA για απόλυτα ρευστοποιημένο και για μη ρευστοποιημένο έδαφος. Έτσι, τέθηκε πάλι την περιοχή WLA στη διέγερση που καταγράφηκε στον σειсмоγράφο σε βάθος 7.5m και προέκυψε η χρονοιστορία του εδάφους στην επιφάνεια (Σχήμα 4.6).

Προφανώς οι ιδιότητες του εδάφους είναι όμοιες με αυτές κατά τον σεισμό Elmore Ranch, αφού αναφέρονται στην ίδια ακριβώς περιοχή. Έτσι τα εδαφικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον πίνακα 3.1 και οι καμπύλες  $G/G_{max} - \log\gamma$  και απόσβεσης στα Σχήματα 3.8÷3.9. Σε σύγκριση με την πραγματική καταγραφή, στην οποία είναι εμφανής η παρουσία ιδιαίτερα μακροπερίοδων ταλαντώσεων μετά τα 15 sec περίπου, η προβλεφθείσα διέγερση αποτελείται από υψίσυχνους παλμούς μεγαλύτερου πλάτους. Η πραγματική καταγραφείσα PGA βρίσκεται κάτω από αυτή που προέκυψε από τις αναλύσεις με το EERA και η μέγιστη φασματική επιτάχυνση που υπολογίστηκε είναι 1.5 φορά μεγαλύτερη από την καταγραφείσα (Σχήμα 4.7). Αυτό δείχνει πως το έδαφος με τη ρευστοποίησή του “απορρόφησε” τους έντονους παλμούς στο εύρος των περιόδων των συνήθων κατασκευών στην επιφάνεια. Αντίθετα, λόγω της παρουσίας των μακροπερίοδων παλμών, το πραγματικό φάσμα για περιόδους μεγαλύτερες από 0.8sec βρίσκεται πάνω από το υπολογισμένο και ο λόγος των δύο φασμάτων (Σχήμα 4.8β) είναι κοντά στο 3.

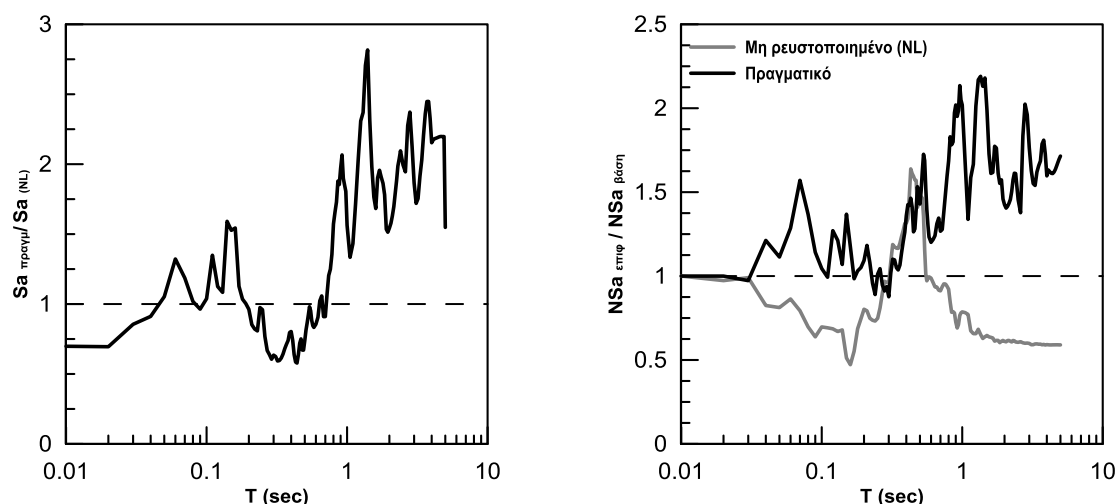
Μία σημαντική διαφορά με τον σεισμό Elmore Ranch, είναι ότι οι κανονικοποιημένοι λόγοι των φασμάτων απόκρισης στην επιφάνεια προς τη βάση (Σχήμα 4.8α), της πραγματικής διέγερσης και της ανάλυσης χωρίς ρευστοποίηση, δεν έχουν την ίδια μορφή, γεγονός που υποδεικνύει ότι με τη ρευστοποίηση άλλαξε η ιδιοπερίοδος T του εδάφους.



**Σχήμα 4.6 :** Χρονοιστορίες (α) αναλύσεων της έρευνάς μας με το EERA για έδαφος μη ρευστοποιημένο και (β) πραγματικής καταγραφής στην επιφάνεια



**Σχήμα 4.7 :** Σύγκριση (α) φασμάτων και (β) αδιαστατοποιημένων φασμάτων των αναλύσεων της έρευνάς μας με το SHAKE χωρίς ρευστοποίησης και πραγματικής καταγραφής



**Σχήμα 4.8 :** (α) λόγος των δύο φασμάτων στην επιφάνεια και (β) σύγκριση κανονικοποιημένων αδιαστατοποιημένων φασμάτων αναλύσεων της έρευνάς μας με το SHAKE χωρίς ρευστοποίηση και πραγματικής καταγραφής

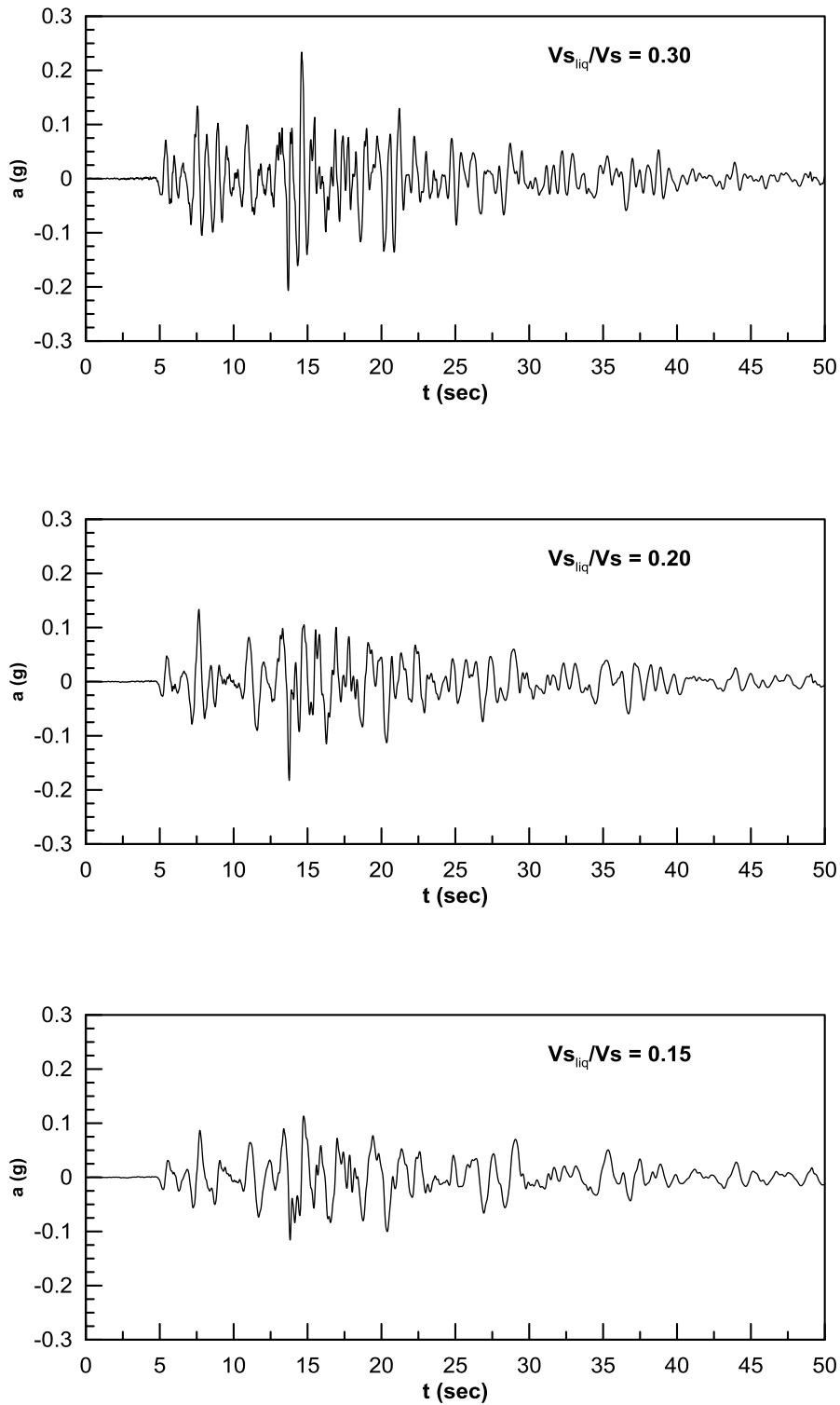
#### 4.4 Αναλύσεις με μειωμένη ταχύτητα ( $V_{s,liq}$ ) λόγω ρευστοποίησης

Στη συνέχεια επαναλήφθηκαν οι αναλύσεις για εξ' αρχής ρευστοποιημένο έδαφος με λόγο  $V_{s,liq}/V_s$  ίσο με 0.075, 0.10, 0.125, 0.15, 0.20 και 0.30. Σύμφωνα με τους Miwa & Ikeda (2006), για έδαφος με  $FS_L$  γύρω στο  $0.8 \div 1$  ο λόγος  $G / G_{max}$  κυμαίνεται γύρω στο  $0.15 \div 0.35$  (Σχήμα 2.22) και αντίστοιχα η ταχύτητα ρευστοποιημένου στρώματος με το  $12\% \div 19\%$  της αρχικής.

Στις αναλύσεις, οι καμπύλες μεταβολής του λόγου απόσβεσης συναρτήσεως της διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  (Σχήμα 3.9), που χρησιμοποιήθηκαν για το ρευστοποιημένο στρώμα, είναι οι ίδιες με αυτές των αναλύσεων χωρίς ρευστοποίηση και ο λόγος  $G/G_{max}$ , για το ρευστοποιημένο στρώμα, κρατήθηκε πάλι σταθερός και ίσος με τη μονάδα, ενώ τα νέα  $G_{max}$  έχουν παρουσιαστεί στον Πίνακα 3.2. Οι χρονοιστορίες του ρευστοποιημένου εδάφους φαίνονται στα Σχήματα 4.9  $\div$  4.10, ενώ η σύγκριση των φασμάτων απόκρισης για εξ' αρχής ρευστοποιημένο έδαφος με το πραγματικό φαίνεται στα Σχήματα 4.11  $\div$  4.12.

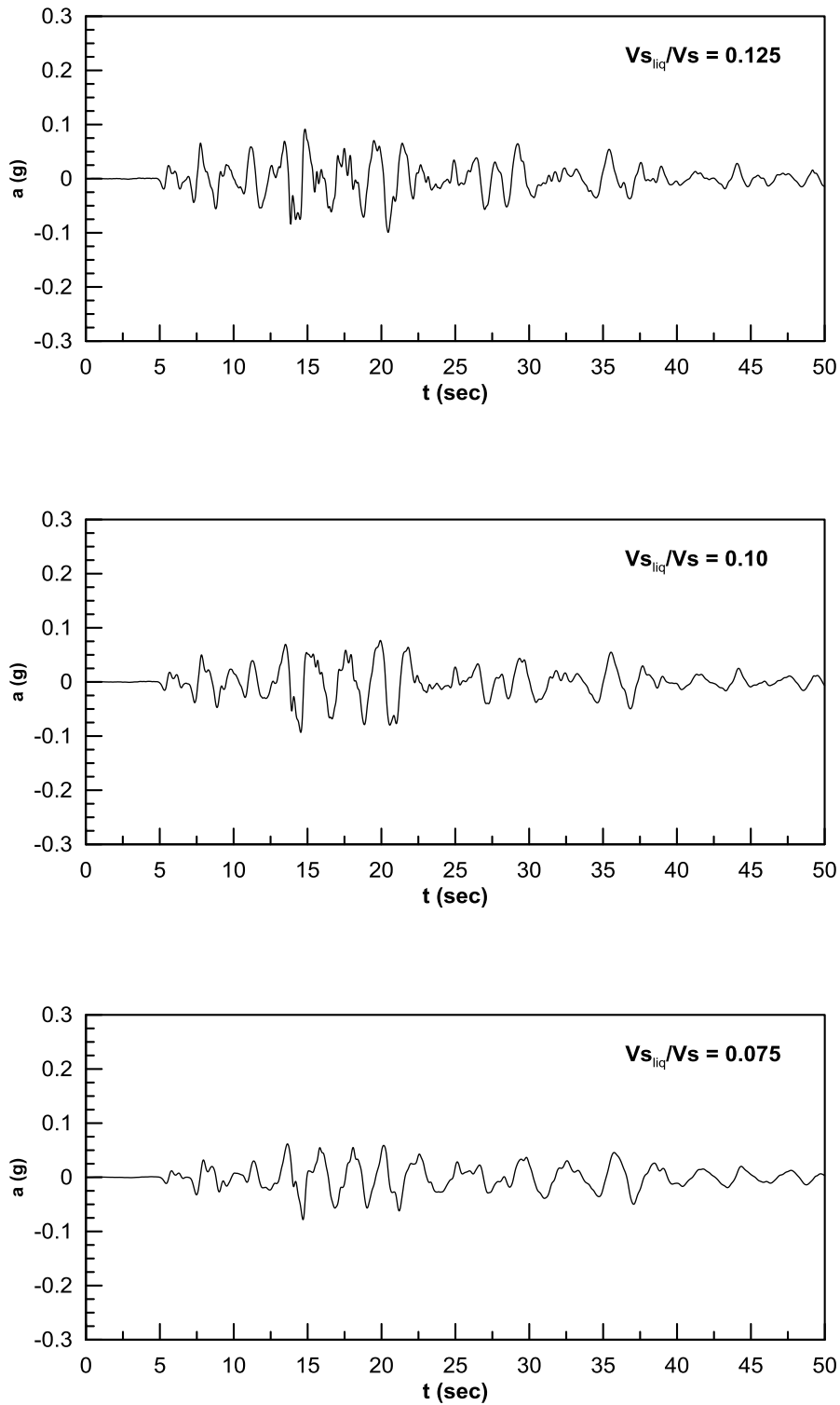
Ας υπενθυμιστεί ότι το πραγματικό φάσμα θα πρέπει να βρίσκεται ενδιάμεσα του μη ρευστοποιημένου και του εξ αρχής ρευστοποιημένου εδάφους, ώστε να υπάρχει δυνατότητα παρεμβολής σύμφωνα με τη μεθοδολογία που ακολουθείται στην παρούσα διπλωματική. Από τα φάσματα αρχικά παρατηρείται ότι στην ανάλυση με

$V_{s_{liq}} / V_s = 0.30$  η PGA είναι μεγαλύτερη από την πραγματική, γεγονός που υπαινίσσεται ότι η εδαφική ενίσχυση με πλήρη ρευστοποίηση είναι μεγαλύτερη και επομένως η περίπτωση αυτή απορρίπτεται και δεν θα εξεταστεί στον υπολογισμό των συντελεστών συσχέτισης. Η PGA στην ανάλυση για  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.20$  είναι περίπου το 0.90 της πραγματικής και το αντίστοιχο φάσμα για  $T > 0.8$  sec έχει την ίδια μορφή και βρίσκεται πολύ κοντά με το πραγματικό. Άρα θεωρείται το πλησιέστερο της πραγματικής καταγραφής. Όσον αφορά στις υπόλοιπες αναλύσεις, αναπαράγουν το πραγματικό φάσμα για μεγαλύτερες περιόδους ( $T > 1.5 \div 2$  sec) ενώ οι φασματικές επιταχύνσεις τους για μικρές περιόδους είναι πολύ μικρότερες από τις καταγεγραμμένες. Αυτό συμβαίνει γιατί το έδαφος υπό τη σεισμική διέγερση άργησε να ρευστοποιηθεί και επομένως έφτασαν στην επιφάνεια του εδάφους υψίσυχνες ταλαντώσεις οι οποίες απουσιάζουν από το πλήρως εξ αρχής ρευστοποιημένο στρώμα.

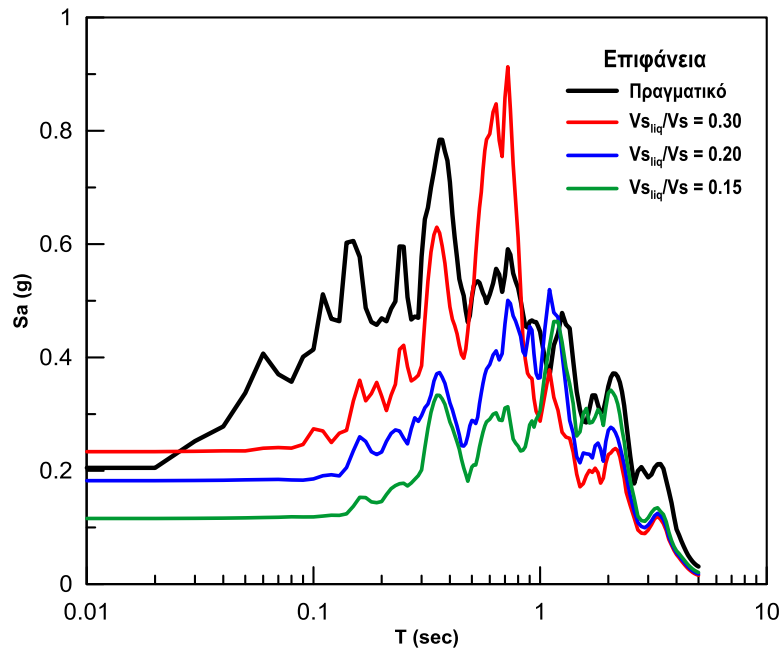


**Σχήμα 4.9 :** Επιταχυνσιογραφήματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις με το EERA για πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος για (α)  $Vs_{liq} / Vs = 0.30$  (β)  $Vs_{liq} / Vs = 0.20$  (γ)  $Vs_{liq} / Vs = 0.15$

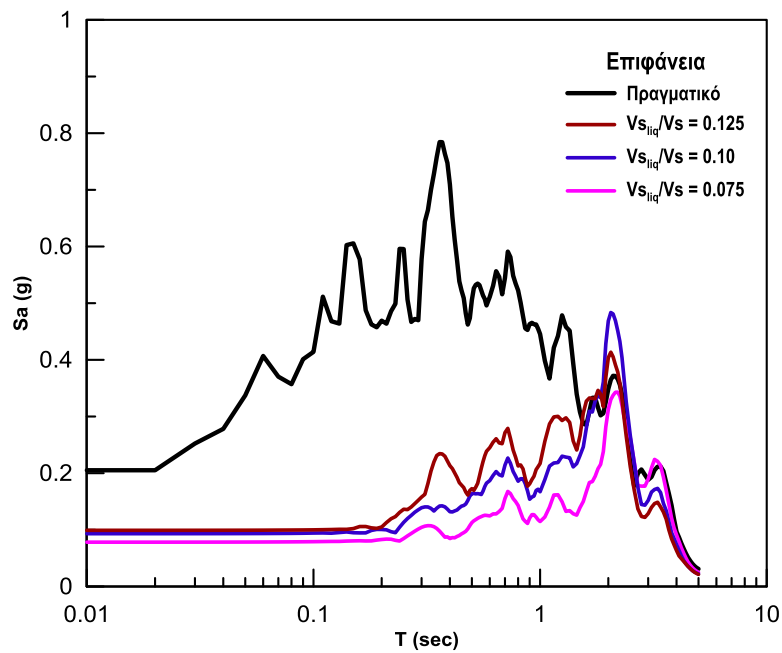




**Σχήμα 4.10** : Επιταχυνσιογραφήματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις με το EERA για πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος για (α)  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.125$  (β)  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.10$  (γ)  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.075$



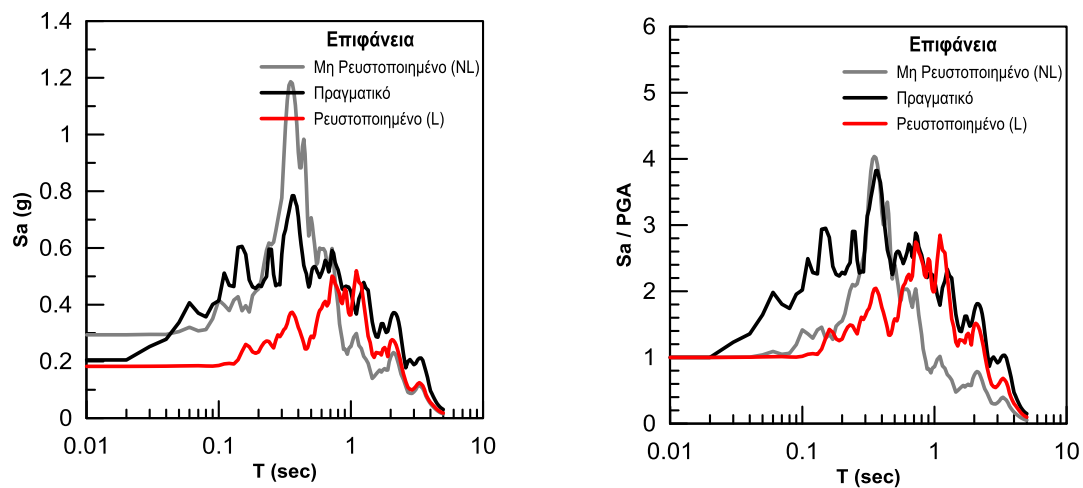
**Σχήμα 4.11 :** Φάσματα απόκρισης από την πραγματική καταγραφή και από τις αναλύσεις ρευστοποιημένου εδάφους με  $V_{sliq} / V_s = 0.30$ ,  $V_{sliq} / V_s = 0.20$  και  $V_{sliq} / V_s = 0.15$



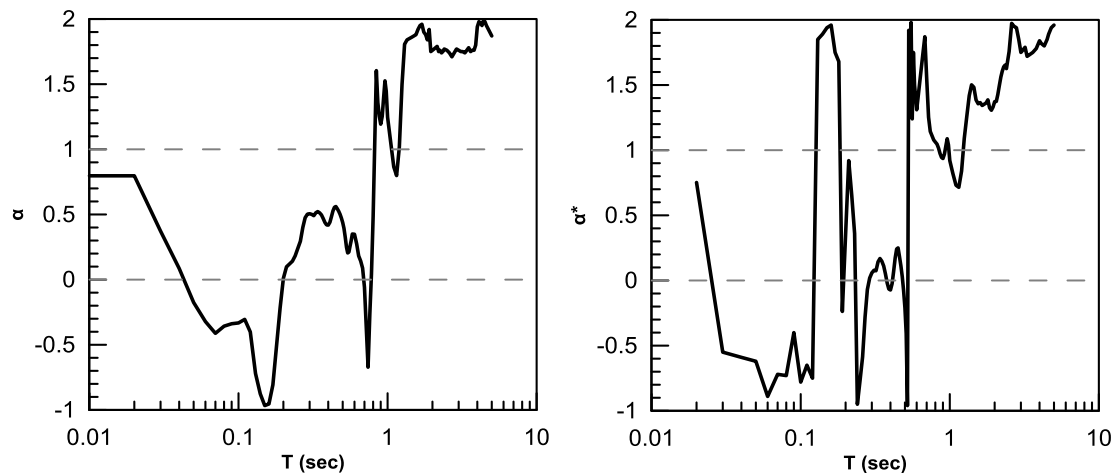
**Σχήμα 4.12 :** Φάσματα απόκρισης από την πραγματική καταγραφή και από τις αναλύσεις ρευστοποιημένου εδάφους με  $V_{sliq} / V_s = 0.125$ ,  $V_{sliq} / V_s = 0.10$  και  $V_{sliq} / V_s = 0.075$

Από τα φάσματα στην επιφάνεια που προέκυψαν από τις αναλύσεις αυτές, για κάθε μία περίπτωση υπολογίστηκαν οι αντίστοιχοι συντελεστές “ $\alpha$ ” και “ $\alpha^*$ ” από τις Σχέσεις 3.8 ÷ 3.9 (Σχήματα 4.13 ÷ 4.27 ). Να υπενθυμιστεί ότι στο πρώτο διάγραμμα συντελεστών για κάθε ανάλυση, παρουσιάζεται ο τρεχούμενος μέσος όρος (running average) για πέντε τιμές, αφού περικόπηκαν οι τιμές που είναι μικρότερες από -1 και μεγαλύτερες από 2. Στο δεύτερο διάγραμμα, επειδή η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που μπορούν να πάρουν οι συντελεστές είναι το μηδέν και η μονάδα, κρατήθηκαν μόνο οι ενδιάμεσες τιμές και όταν ξεπερνούν το άνω και κάτω όριο αντικαθίστανται αντίστοιχα από αυτό.

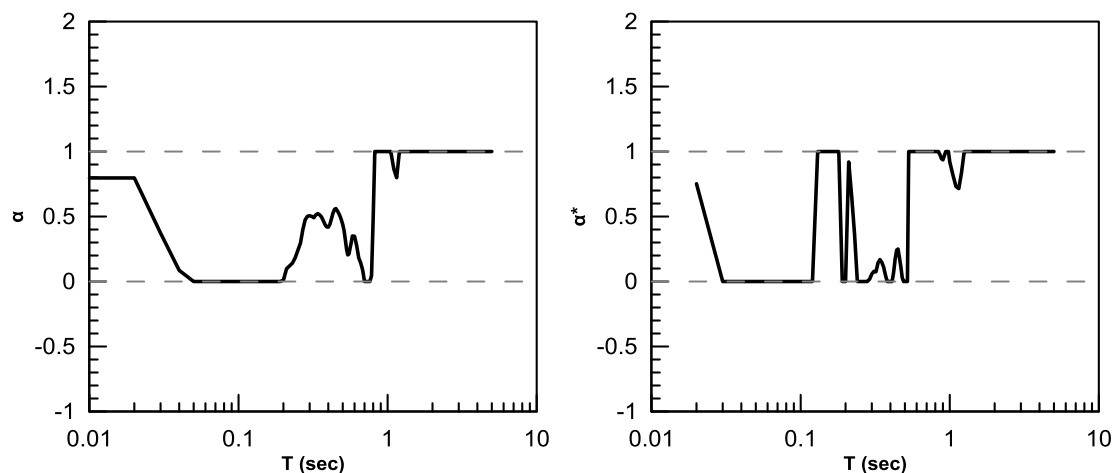
Παρατηρώντας τα διαγράμματα των συντελεστών, προκύπτει ότι για μικρές περιόδους, δεν ισχύει  $\alpha = 1$ , όπως προτείνουν οι Miwa & Ikeda (2006). Μάλιστα οι ίδιοι ερευνητές, θεωρούν ότι, για τον συγκεκριμένο σεισμό, η ταχύτητα ρευστοποιημένου στρώματος ισούται με το 15% ÷ 35% της αρχικής. Βέβαια, ο λόγος  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.30$ , έχει απορριφθεί προηγουμένως. Ας σημειωθεί ότι όσο μειώνεται ο λόγος  $V_{s_{liq}} / V_s$ , τόσο αργεί το φάσμα του ρευστοποιημένου εδάφους να ταυτιστεί με το πραγματικό ( $\alpha = \alpha^* = 1$ ). Άρα γενικά για ταχύτητα ρευστοποιημένου εδάφους ίση με το 15% ÷ 20% της αρχικής υπάρχει καλύτερη σύγκλιση με τα αποτελέσματα των ανωτέρω ερευνητών. Τέλος, είναι εμφανές πως ο συντελεστής “ $\alpha^*$ ” είναι πιο ευαίσθητος στις μικρές μεταβολές των φασμάτων. Συνεπώς, η τιμή του μεταβάλλεται αρκετά επειδή οι καμπύλες είναι κοντά.



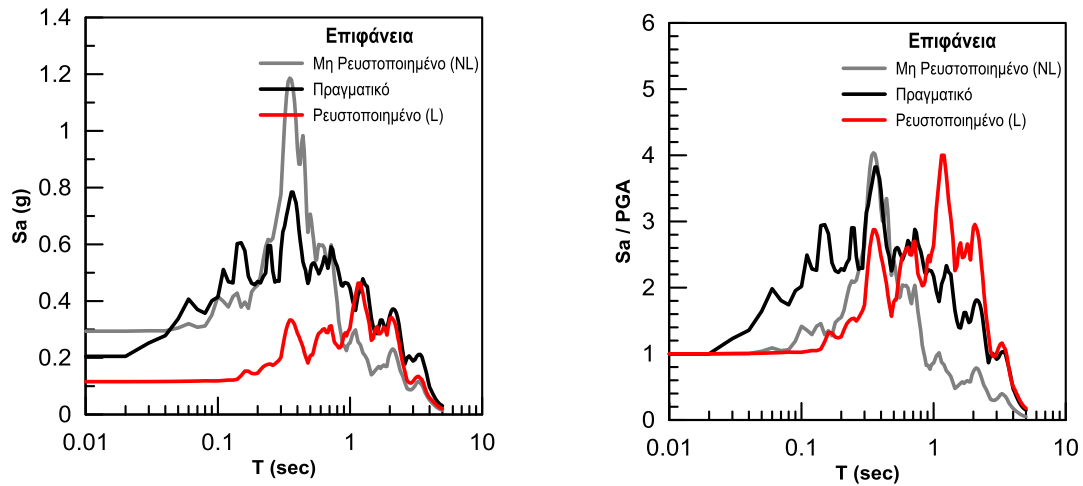
**Σχήμα 4.13 :** Φάσματα απόκρισης και αδιαστατοποιημένα φάσματα πραγματικής καταγραφής και από τις αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση και με  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.20$



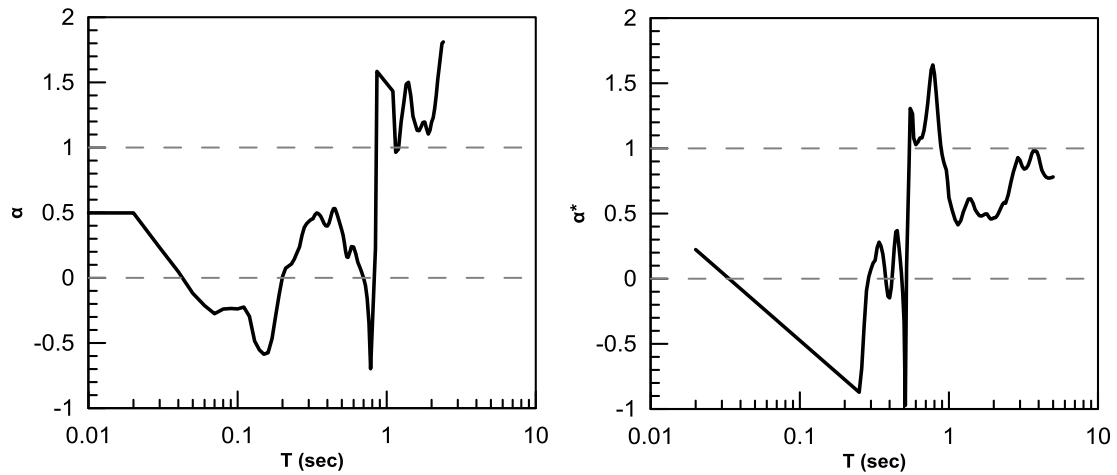
**Σχήμα 4.14 :** Συντελεστές συσχέτισης “ $\alpha$ ” και “ $\alpha^*$ ” συναρτήσει της ιδιοπεριόδου  $T$  για  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.20$



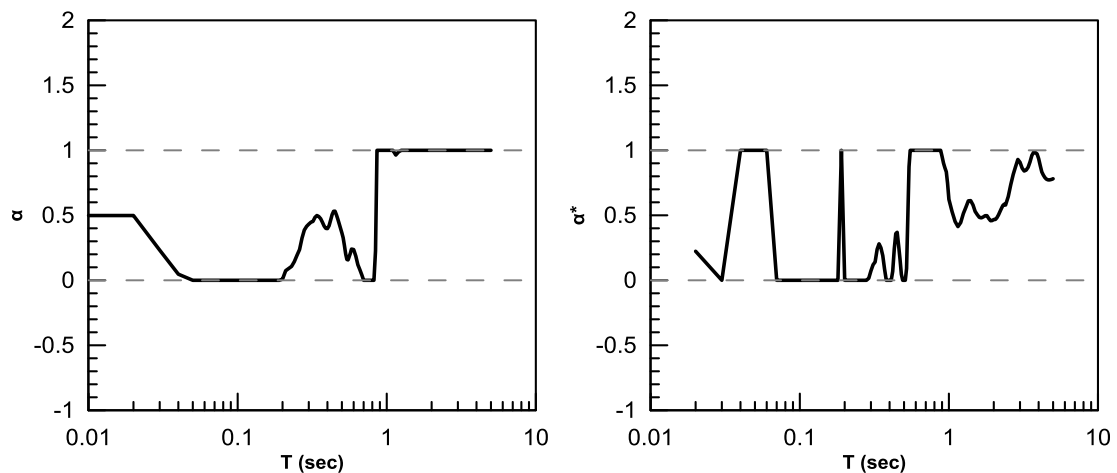
**Σχήμα 4.15 :** Συντελεστές συσχέτισης “ $\alpha$ ” και “ $\alpha^*$ ” με εύρος τιμών  $0 \div 1$  συναρτήσει της ιδιοπεριόδου  $T$  για  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.20$



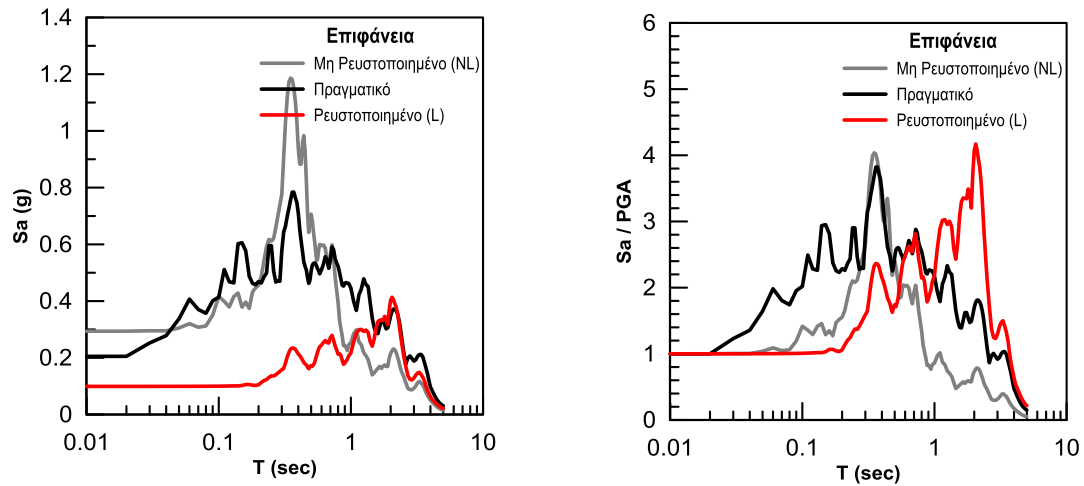
**Σχήμα 4.16 :** Φάσματα απόκρισης και αδιαστατοποιημένα φάσματα πραγματικής καταγραφής και από τις αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση και με  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.15$



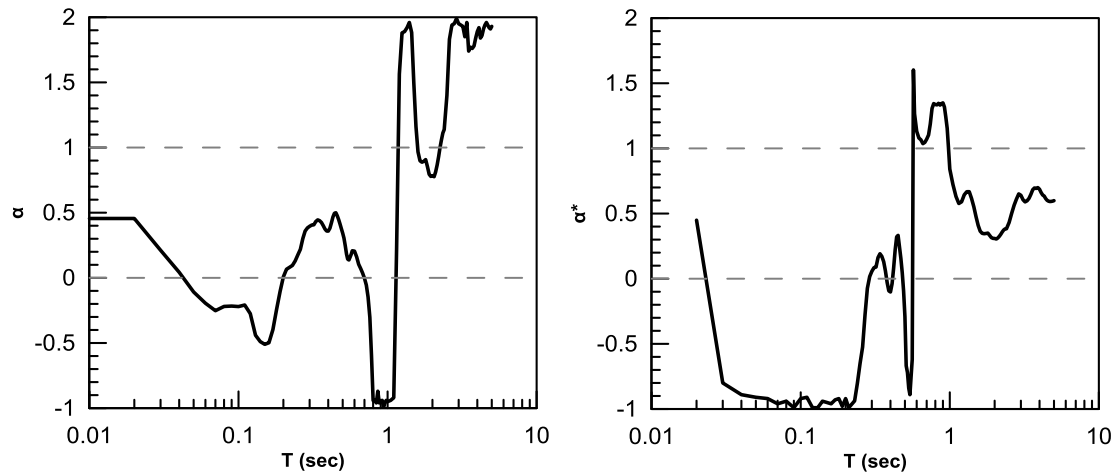
**Σχήμα 4.17 :** Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” συναρτήσει της ιδιοπεριόδου T για  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.15$



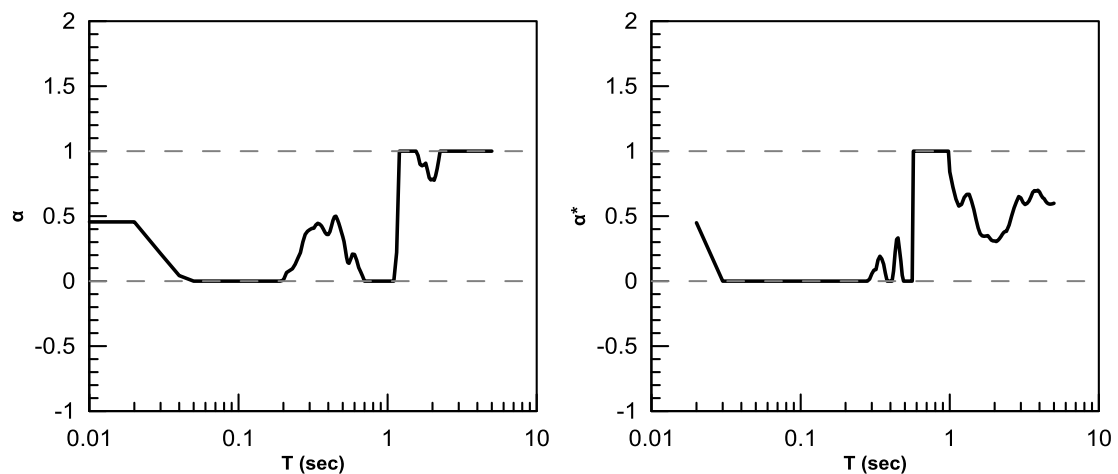
**Σχήμα 4.18 :** Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” με εύρος τιμών  $0 \div 1$  συναρτήσει της ιδιοπεριόδου T για  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.15$



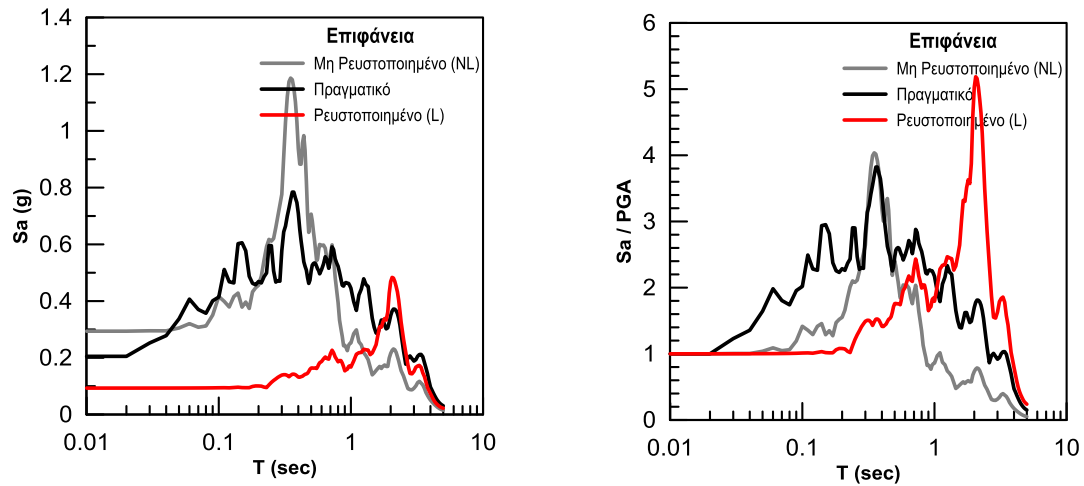
**Σχήμα 4.19 :** Φάσματα απόκρισης και αδιαστατοποιημένα φάσματα πραγματικής καταγραφής και από τις αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση και με  $V_{sliq} / V_s = 0.125$



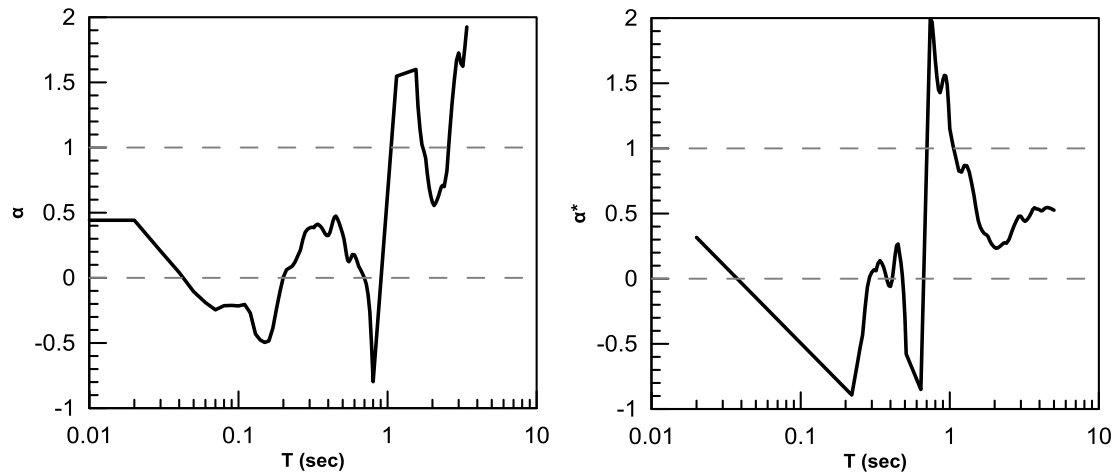
**Σχήμα 4.20 :** Τρεχόμενος μέσος όρος των συντελεστών συσχέτισης “α” και “α\*” συναρτήσει της ιδιοπεριόδου T για  $V_{sliq} / V_s = 0.125$



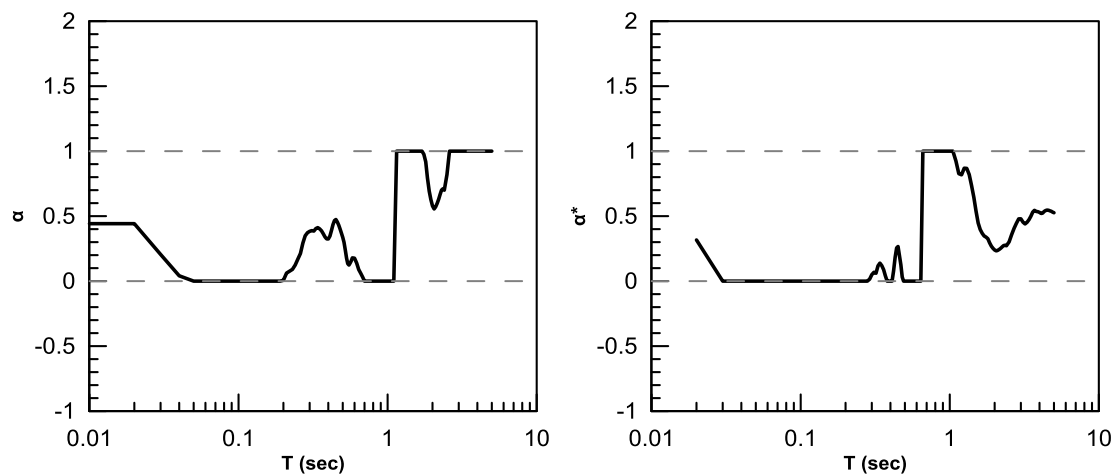
**Σχήμα 4.21 :** Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” με εύρος τιμών  $0 \div 1$  συναρτήσει της ιδιοπεριόδου T για  $V_{sliq} / V_s = 0.125$



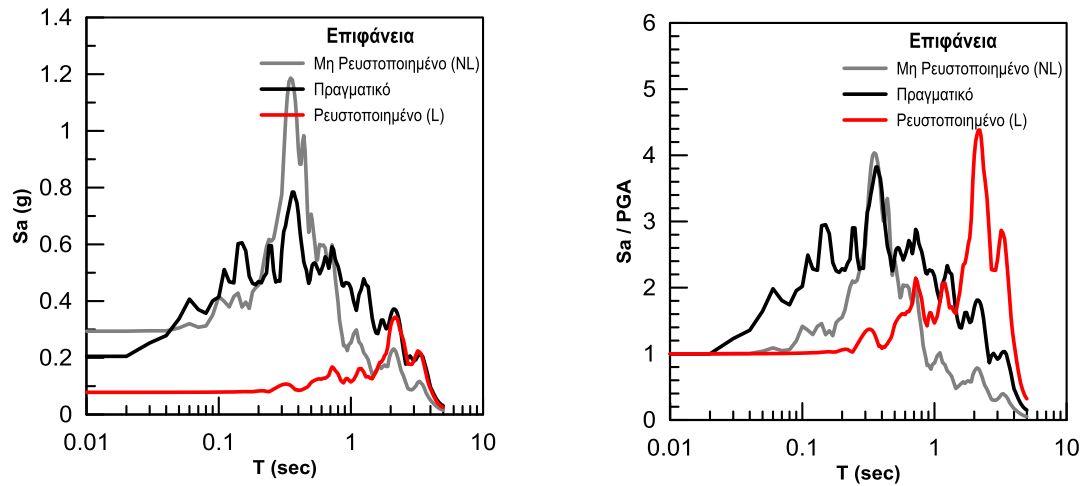
**Σχήμα 4.22 :** Φάσματα απόκρισης και αδιαστατοποιημένα φάσματα πραγματικής καταγραφής και από τις αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση και με  $V_{sliq} / V_s = 0.10$



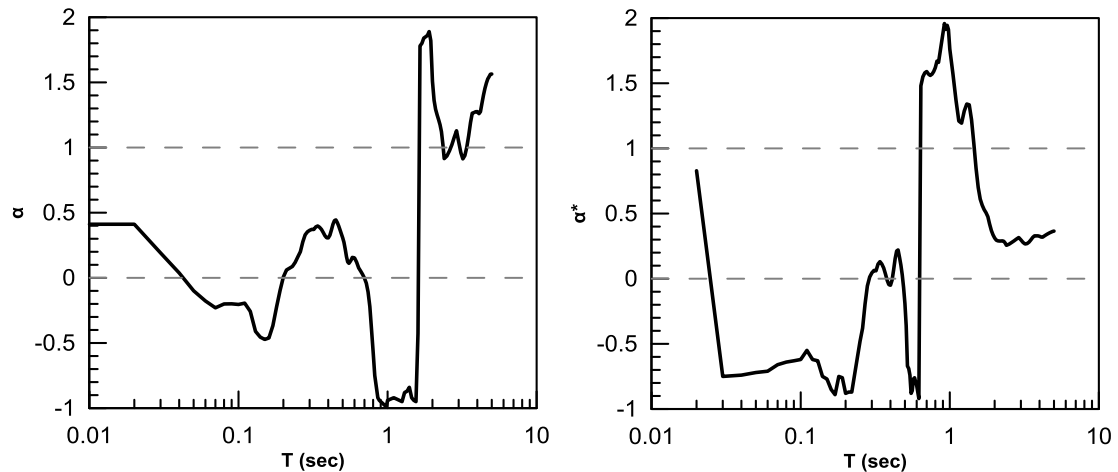
**Σχήμα 4.23 :** Τρεχόμενος μέσος όρος των συντελεστών συσχέτισης “α” και “α\*” συναρτήσει της ιδιοπεριόδου T για  $V_{sliq} / V_s = 0.10$



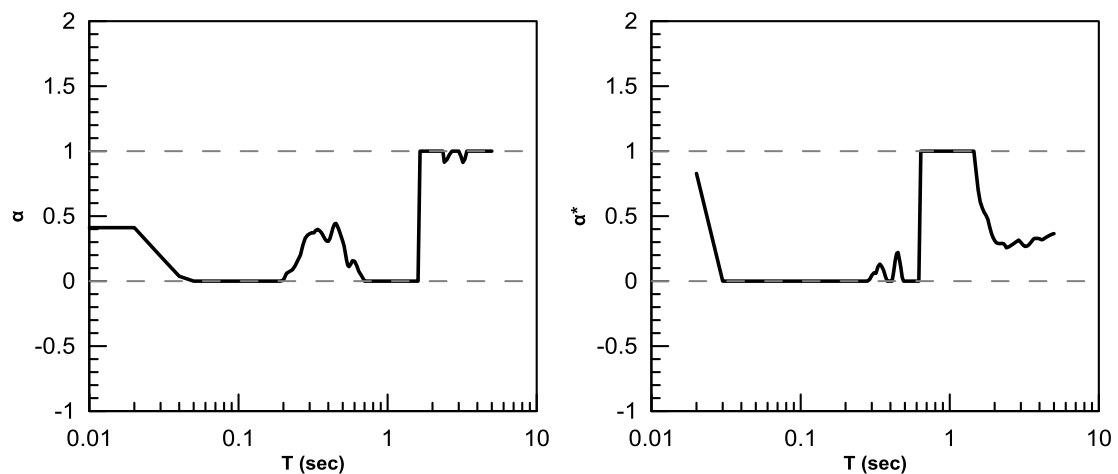
**Σχήμα 4.24 :** Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” με εύρος τιμών  $0 \div 1$  συναρτήσει της ιδιοπεριόδου T για  $V_{sliq} / V_s = 0.10$



Σχήμα 4.25 : Φάσματα απόκρισης και αδιαστατοποιημένα φάσματα πραγματικής καταγραφής και από τις αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση και με  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.075$



Σχήμα 4.26 : Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” συναρτήσει της ιδιοπεριόδου T για  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.075$



Σχήμα 4.27 : Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” με εύρος τιμών  $0 \div 1$  συναρτήσει της ιδιοπεριόδου T για  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.075$



#### 4.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό, εξετάστηκε η απόκριση της ίδιας περιοχής με το προηγούμενο κεφάλαιο υπό την επίδραση του σεισμού Superstition Hills κατά τον οποίο, αυτή τη φορά, παρατηρήθηκαν σημαντικές υπερπιέσεις πόρων που οδήγησαν σε ρευστοποίηση του εδάφους. Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης υπολογίστηκε για 2 μεγέθη σεισμού  $M_w$ : το καταγεγραμμένο και το ισοδύναμο που προέκυψε από την μέτρηση σημαντικών κύκλων της δόνησης. Τα αποτελέσματα από την πρώτη περίπτωση έδειξαν μέση τιμή του συντελεστή ρευστοποίησης ίση με 0.75 και 0.80 για δοκιμές SPT και CPT αντίστοιχα. Στην δεύτερη περίπτωση οι καμπύλες των συντελεστών ήταν ελαφρώς μετατοπισμένοι προς τα δεξιά και επομένως ο μέσος όρος του συντελεστή προσδιορίστηκε ίσος με τη μονάδα ( $FS_L = 1$ ). Αποδεκτή προφανώς, έγινε η πρώτη μεθοδολογία, καθώς στην πραγματικότητα το έδαφος ρευστοποιήθηκε με δυσκολία.

Στη συνέχεια έγιναν ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις στο EERA για απουσία ρευστοποίησης του εδάφους και για πλήρη ρευστοποίηση με τον λόγο  $V_{s,liq}/V_s$  να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών  $0.075 \div 0.30$ . Στις αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση για το πραγματικό PGA υπερεκτιμήθηκε η φασματική επιτάχυνση για  $T > 0.8$  sec υπολογίστηκε μικρότερη από την πραγματική. Όσον αφορά στις αναλύσεις ρευστοποιημένου εδάφους, η ανάλυση με ταχύτητα ίση με το 30% της αρχικής απορρίφθηκε, καθώς το PGA ήταν μεγαλύτερο από το πραγματικό. Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις υπολογίστηκαν κανονικά οι συντελεστές “α” και “α\*”, με τη συμβολή των οποίων θα γίνει προσπάθεια να αναπαραχθεί το πραγματικό καταγεγραμμένο φάσμα στην επιφάνεια. Σύμφωνα με τους Miwa & Ikeda, οι οποίοι προτείνουν για τον συγκεκριμένο σεισμό  $V_{s,liq}/V_s$  γύρω στο  $0.15 \div 0.35$ , οι συντελεστές πρέπει να ισούνται με τη μονάδα, το οποίο όμως δεν συμβαίνει για όλες τις περιόδους, ανεξαρτήτως του λόγου  $V_{s,liq}/V_s$  που χρησιμοποιείται.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΙΟΧΗ PORT ISLAND (PI) – ΣΕΙΣΜΟΣ**

### **KOBE**

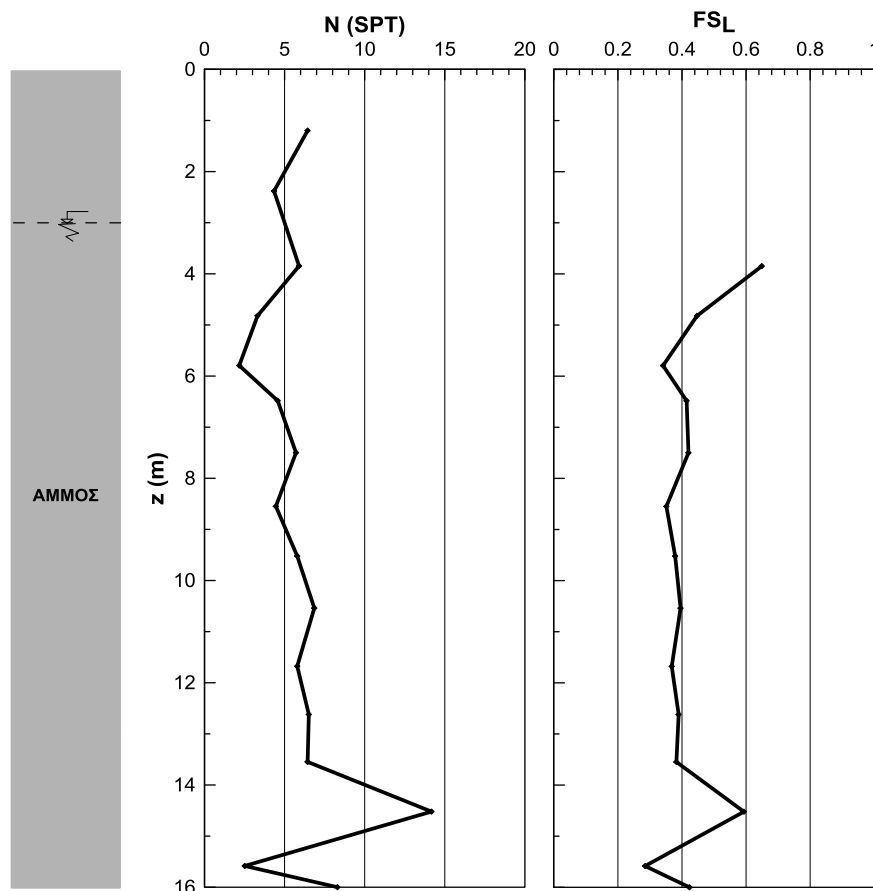
#### **5.1 Γενικά**

Σε αυτό το κεφάλαιο, αντικείμενο της έρευνας αποτελεί ο σεισμός που έπληξε την περιοχή Port Island με επίκεντρο το Kobe, κατά τον οποίο προκλήθηκε εκτεταμένη ρευστοποίηση με την έναρξη σχεδόν του σεισμού. Ακολουθώντας αντίστοιχη διαδικασία με αυτήν που ακολουθήθηκε για τα προηγούμενα σεισμικά γεγονότα, αρχικά θα υπολογιστεί ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης. Στη συνέχεια, θα επιχειρηθεί να αποτιμηθούν οι συντελεστές παρεμβολής (“α” και “α\*”) της καταγραφής και των αναλύσεων με το SHAKE για εξ’ αρχής παρουσία και για πλήρη απουσία ρευστοποίησης. Να τονιστεί, πως επειδή το έδαφος ρευστοποιήθηκε πολύ γρήγορα σε σχέση με τον σεισμό Superstition Hills, τα αποτελέσματα στους συντελεστές συσχέτισης αναμένονται τώρα τελείως διαφορετικά από ότι στη θέση WLA.

#### **5.2 Υπολογισμός Συντελεστή Ασφαλείας Έναντι Ρευστοποίησης ( $FS_L$ )**

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας  $FS_L$  θα γίνει χρήση της μοναδικής διαθέσιμης Δοκιμής Πρότυπης Διείσδυσης SPT για την περιοχή που εξετάζεται. Η διαδικασία υπολογισμού είναι η ίδια με τις προηγούμενες περιπτώσεις και περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.2. Το μέγεθος του σεισμού είναι  $M_w = 7.2$  και η μέγιστη επιτάχυνση που καταγράφηκε  $a_{max} = 0.34g$ . Το έδαφος αποτελείται από καθαρό αμμοχάλικο και άρα οι τιμές των συντελεστών  $\alpha$ ,  $\beta$  για τη διόρθωση του αριθμού κρούσεων λόγω ιλύος είναι  $\alpha = 0$  και  $\beta = 1$ . Τα εδαφικά χαρακτηριστικά φαίνονται στον Πίνακα 5.1 και τα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς στο Σχήμα 5.1. Επειδή η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται στα 3 m, δεν υπολογίστηκε ο συντελεστής έναντι ρευστοποίησης μέχρι αυτό το βάθος. Τελικώς προκύπτει ότι ο συντελεστής ασφαλείας κυμαίνεται κυρίως γύρω από την τιμή  $FS_L = 0.4$ , που δείχνει ένα έδαφος πολύ επιρρεπές σε φαινόμενα ρευστοποίησης, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την πραγματική απόκριση της περιοχής, η οποία

φαίνεται (Σχήμα 2.11) ότι ρευστοποιήθηκε από τα πρώτα κίολας δευτερόλεπτα της διέγερσης.



Σχήμα 5.1 : (α)Εδαφικό προφίλ και (β) διάγραμμα αριθμού χτύπων (N) από δοκιμές SPT, (γ)αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας

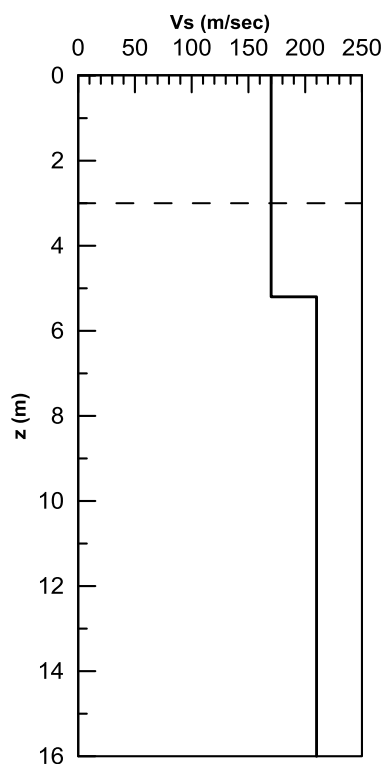
### 5.3 Αναλύσεις Σεισμικής Απόκρισης

Επιχειρώντας να προβλεφθεί η συμπεριφορά του εδάφους στην επιφάνεια, έγιναν αρχικά αναλύσεις με το πρόγραμμα EERA με τα αρχικά εδαφικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Για να επιτευχθεί αυτό προσομοιώθηκε η περιοχή Port Island, με το εδαφικό προφίλ του σχήματος 5.1(α) και στη συνέχεια του επιβλήθηκε η καταγραφή από τον σειсмоγράφο σε βάθος -16m (σχήμα 2.11) ώστε να υπολογιστεί η απόκρισή του στην επιφάνεια εάν δεν είχαμε ρευστοποίηση. Οι τιμές των εδαφικών χαρακτηριστικών που τέθηκαν στις αναλύσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1, ενώ ο λόγος  $G/G_{max}$  και οι καμπύλες μεταβολής του λόγου απόσβεσης συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτές

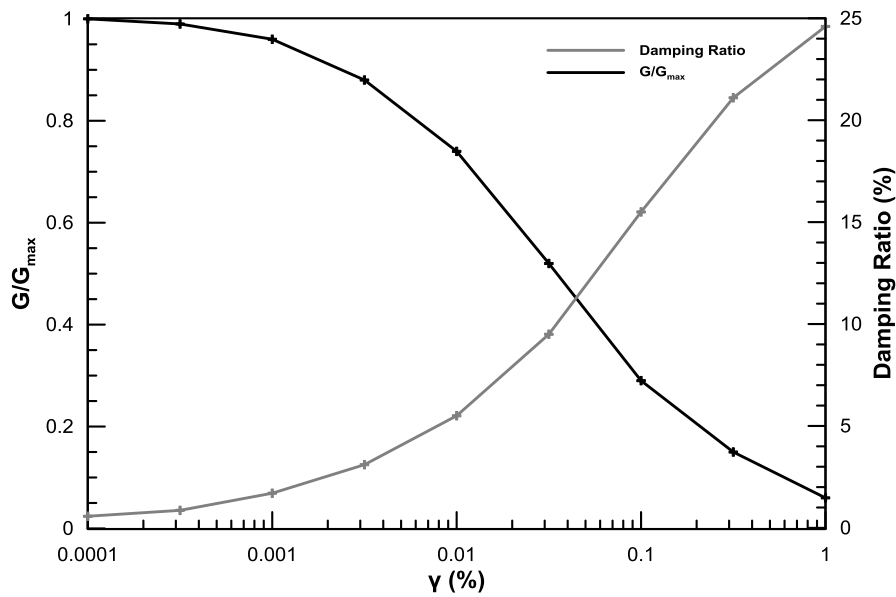
που προτείνονται από τους Seed & Idriss (1970) και φαίνονται στα Σχήμα 5.3. Να σημειωθεί πως η ταχύτητα διατμητικού κύματος στα διάφορα βάθη προέκυψε από μετρήσεις πεδίου (Σχήμα 5.2).

**Πίνακας 5.1:** Εδαφικά χαρακτηριστικά της περιοχής Port Island

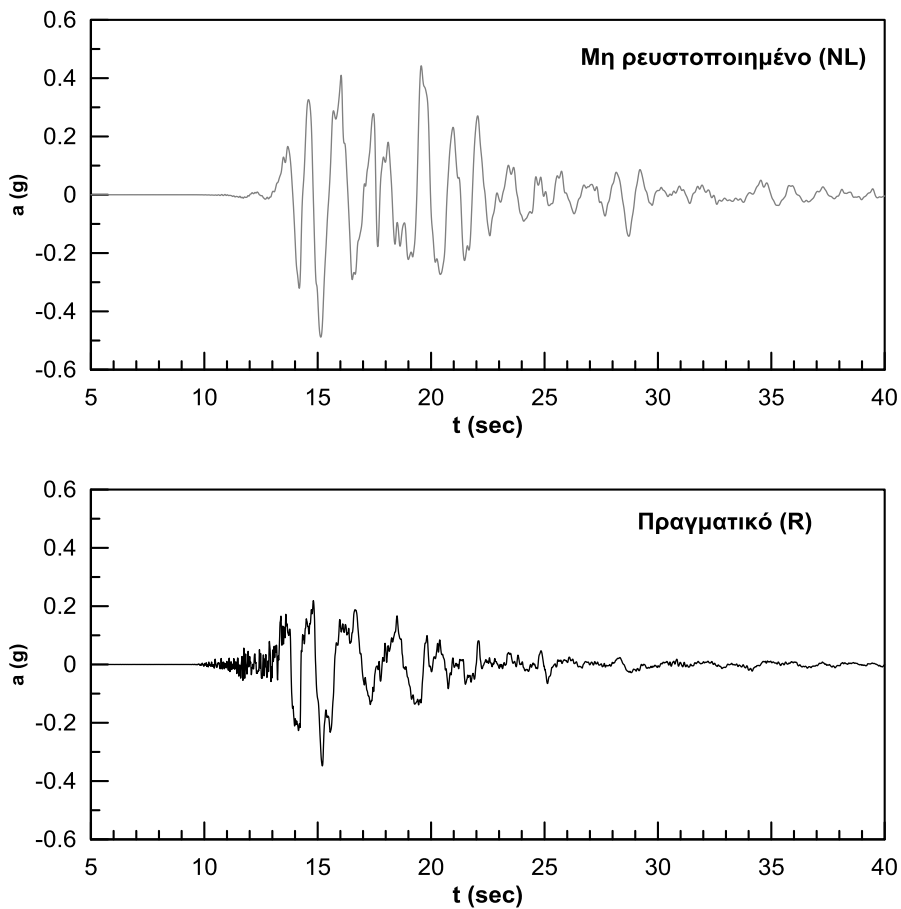
ΕΔΑΦΙΚΟ ΠΡΟΦΙΛ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (m)	ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ (kN/m) <sup>3</sup>	G <sub>max</sub> (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)
ΑΜΜΟΣ	1	1.3	20.60	60.69	170
	2	1.3	20.60	60.69	170
	3	1.3	20.60	60.69	170
	4	1.3	20.60	60.69	170
	5	1.3	20.60	92.61	210
	6	1.3	20.60	92.61	210
	7	1.3	20.60	92.61	210
	8	1.3	20.60	92.61	210
	9	1.5	20.60	92.61	210
	10	1.5	20.60	92.61	210
	11	1.5	20.60	92.61	210
	12	1.5	20.60	92.61	210
	13	∞	20.60	92.61	210



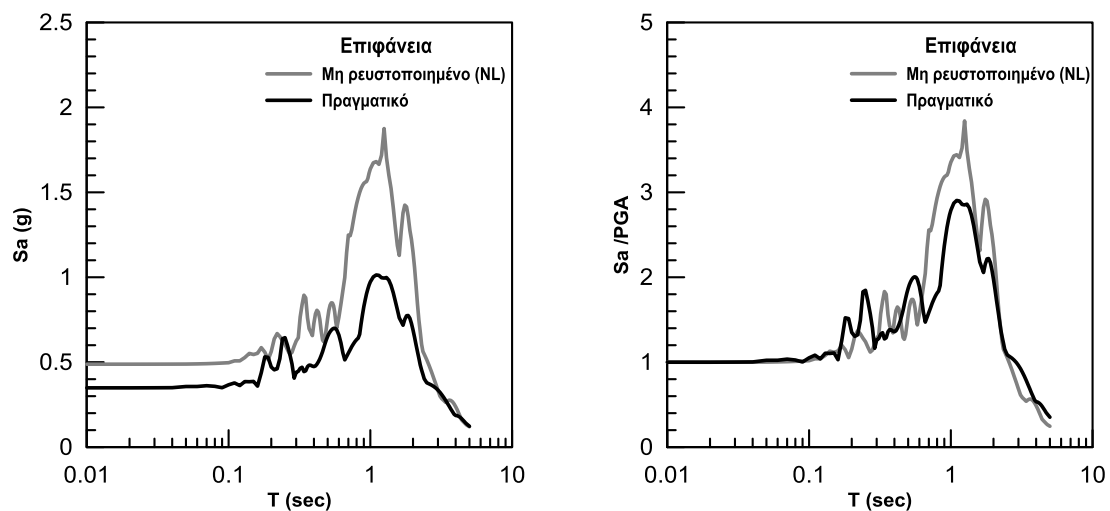
**Σχήμα 5.2 :** Διάγραμμα ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων συναρτήσει του βάθους



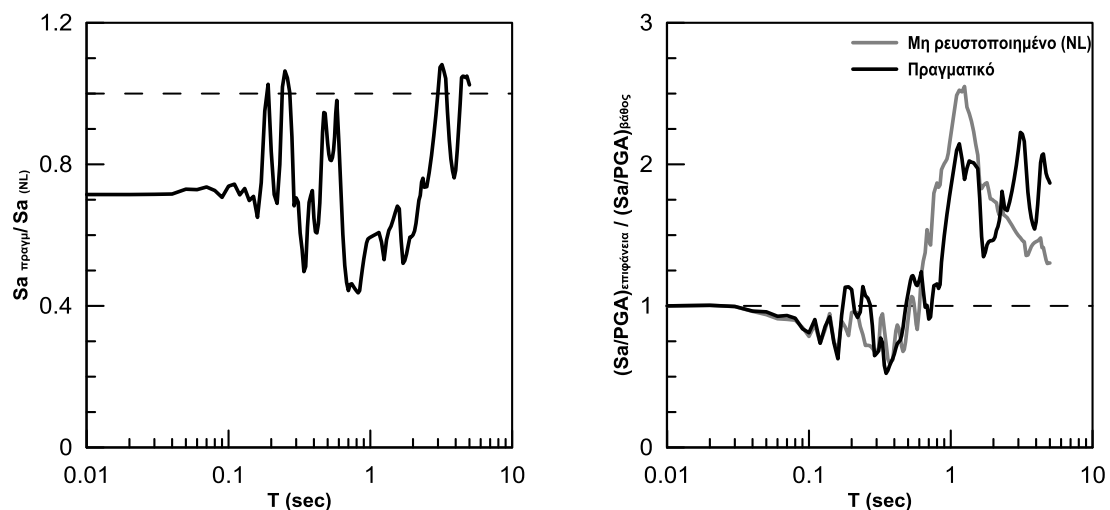
**Σχήμα 5.3 :** Καμπύλες μεταβολής της απόσβεσης και του μέτρου διάτμησης  $G/G_{max}$  συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$



**Σχήμα 5.4 :** Χρονοιστορίες (α) αναλύσεων της έρευνάς μας με το SHAKE για μη ρευστοποιημένο έδαφος και (β) πραγματικής καταγραφής στην επιφάνεια



**Σχήμα 5.5 :** Σύγκριση (α) φασμάτων και (β) αδιαστατοποιημένων φασμάτων των αναλύσεων της έρευνάς μας με το SHAKE χωρίς ρευστοποίησης και πραγματικής καταγραφής



**Σχήμα 5.6 :** (α) Λόγος των δύο φασμάτων στην επιφάνεια και (β) σύγκριση κανονικοποιημένων αδιαστατοποιημένων φασμάτων αναλύσεων της έρευνάς μας με το SHAKE χωρίς ρευστοποίηση και πραγματικής καταγραφής

Από τη σύγκριση της συμπεριφοράς του εδάφους που προέκυψε από τις αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση και της πραγματικής (Σχήματα 5.4 ÷ 5.5), προκύπτουν τα ακόλουθα χρήσιμα συμπεράσματα :

- Είναι ιδιαίτερα εμφανές από το επιταχυνσιογράφημα, ότι το πραγματικό έδαφος έχει απορροφήσει σε μεγάλο βαθμό τους έντονους παλμούς της διέγερσης και έχει μεγαλώσει η περίοδός τους, σε σύγκριση με αυτούς που θα έφταναν στην επιφάνεια αν δεν είχε ρευστοποιηθεί.

- Όσον αφορά στην καμπύλη του φάσματος που υπολογίστηκε χωρίς ρευστοποίηση, βρίσκεται στην συντριπτική πλειοψηφία των περιόδων, πάνω από το πραγματικό, γι αυτό και ο λόγος των δύο φασμάτων είναι πολύ μικρότερος της μονάδας. Μάλιστα η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση στην επιφάνεια (PGA), έχει μειωθεί περίπου κατά 30%.

- Αξίζει να τονιστεί ότι παρατηρήθηκε η ανάπτυξη μεγάλων παραμορφώσεων ( $\gamma$ ) που οδήγησε σε μεγάλη μείωση του λόγου  $G/G_{max}$ . Επιπλέον, αυξήθηκε αρκετά η περίοδος του εδαφικού σχηματισμού και μάλιστα είναι περίπου ίση με την πραγματικό το οποίο δεν παρατηρήθηκε στον σεισμό Superstition Hills.

#### 5.4 Αναλύσεις με μειωμένη ταχύτητα ( $V_{s,liq}$ ) λόγω ρευστοποίησης

Στη συνέχεια επαναλήφθηκαν οι αναλύσεις, θεωρώντας ότι το έδαφος έχει ρευστοποιηθεί εξ' αρχής με την ταχύτητα κύματος  $V_{s,liq}$  να παίρνει τιμές  $0.075 \div 0.30$  της αρχικής (Σχήμα 5.7) και υπολογίστηκαν οι συντελεστές  $\alpha$  και  $\alpha^*$  από τις σχέσεις 3.8 και 3.9. Επειδή η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται σε βάθος 3m, μέχρι αυτό το βάθος κρατήθηκαν ίδια τα εδαφικά χαρακτηριστικά και τις καμπύλες  $G/G_{max} - \log \gamma$  και απόσβεσης, καθώς στην άμμο δεν υπάρχει νερό στους πόρους ώστε να εκδηλωθεί το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Για το υπόλοιπο έδαφος, όπως και στους προηγούμενους σεισμούς, κρατήθηκε ίδια η καμπύλη μεταβολής του λόγου απόσβεσης συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$  (Σχήμα 5.3), ενώ ο λόγος  $G/G_{max}$ , κρατήθηκε σταθερός και ίσος με τη μονάδα ανεξαρτήτως ποσοστού διατμητικής παραμόρφωσης. Στον Πίνακα 5.2 φαίνονται τα νέα  $G_{max}$  που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις για κάθε λόγο  $V_{s,liq}/V_s$ . Να σημειωθεί, ότι οι ερευνητές Miwa & Ikeda (2006) προτείνουν, για τον συγκεκριμένο σεισμό, μείωση του μέτρου διάτμησης  $G$  ίση με  $80\% \div 90\%$  και άρα λόγο  $V_{s,liq}/V_s = 0.10 \div 0.15$ .

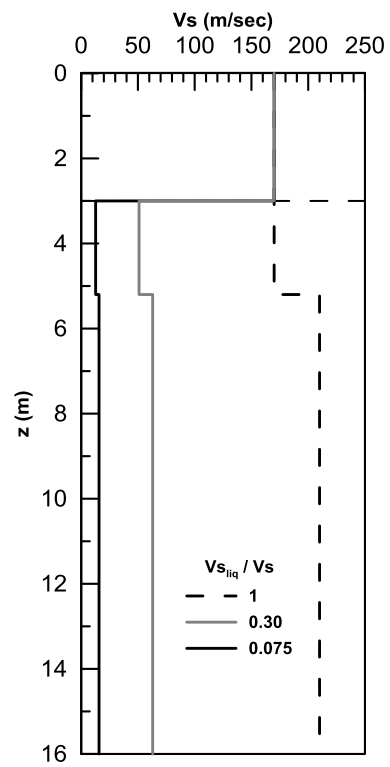
Από τις χρονοιστορίες που προέκυψαν, (Σχήματα 5.8  $\div$  5.9) παρατηρείται εύκολα πως όσο μειώνεται η ταχύτητα μετάδοσης διατμητικού κύματος, η τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης μειώνεται σημαντικά και το εύρος των περιόδων μεγαλώνει. Τα φάσματα των αναλύσεων με  $V_{s,liq}/V_s = 0.30 \div 0.15$  (Σχήμα 5.10) παρουσιάζουν μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) μεγαλύτερη από το πραγματικό, γεγονός το



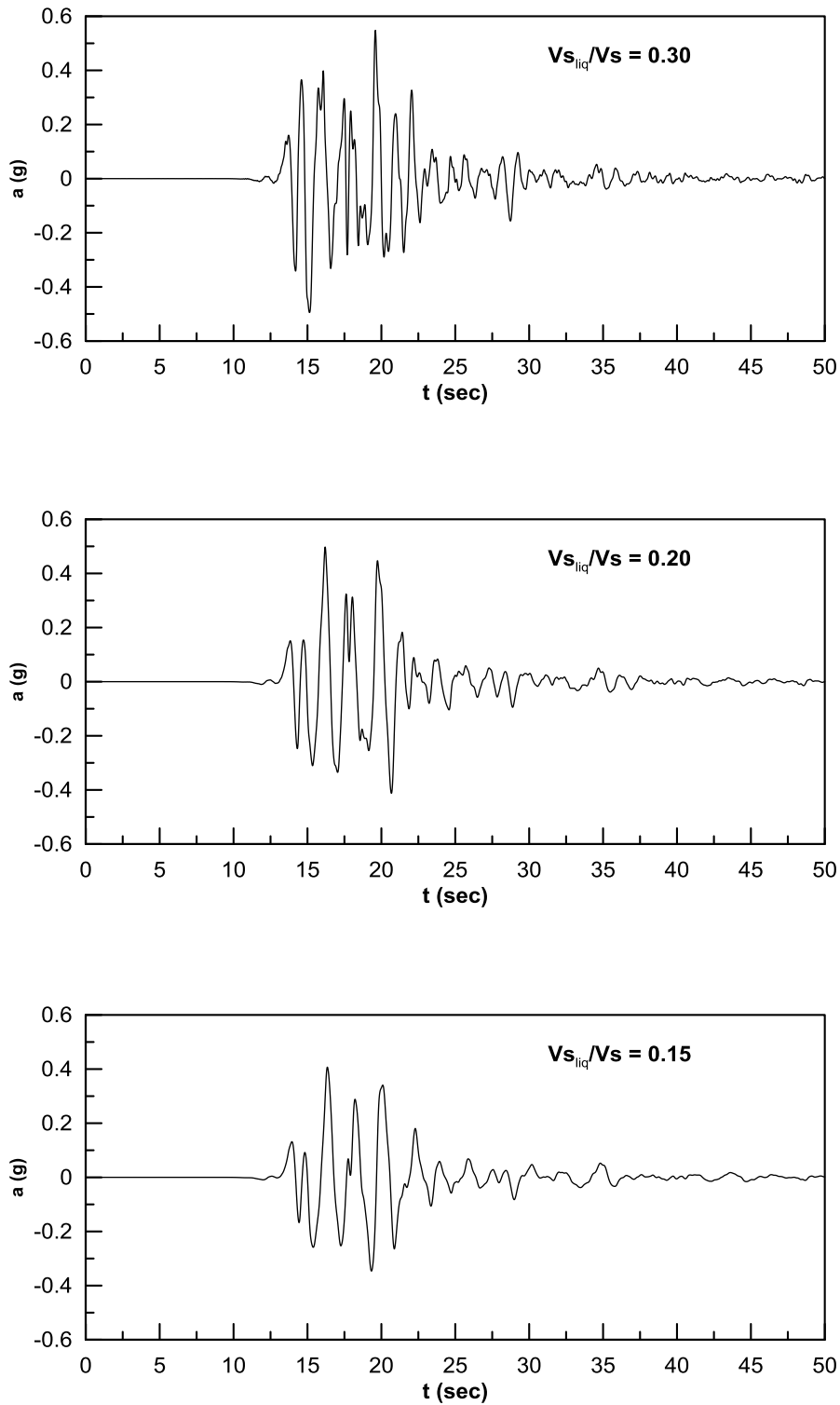
οποίο δεν συμβαδίζει με την μεθοδολογία που έχει παρουσιαστεί, καθώς το πραγματικό φάσμα πρέπει να βρίσκεται μεταξύ του πλήρως και του μη ρευστοποιημένου. Επομένως, οι περιπτώσεις αυτές δεν κρίνονται κατάλληλες προς επεξεργασία και δεν θα υπολογιστούν οι συντελεστές συσχέτισης για αυτές τις αναλύσεις. Στην ανάλυση με ταχύτητα ρευστοποιημένου στρώματος ίση με το 12.5% της αρχικής, από το αντίστοιχο φάσμα προκύπτει ότι η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) σχεδόν ταυτίζεται με την πραγματική (Σχήμα 5.11). Τα δύο φάσματα, για  $T < 1.6$  sec βρίσκονται σχετικά κοντά ή ταυτίζονται, με το φάσμα από την πραγματική καταγραφή όμως να βρίσκεται πάντα πάνω από το αντίστοιχο υπολογισμένο με ρευστοποίηση. Για τις περιόδους μεγαλύτερες από 1.6 sec, η εικόνα αυτή αλλάζει και η φασματική επιτάχυνση του ρευστοποιημένου εδάφους παίρνει τιμές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες πραγματικές. Όσο μειώνεται η ταχύτητα  $V_s$ , το υπολογισμένο φάσμα παρουσιάζει μικρότερες φασματικές επιταχύνσεις και άρα απομακρύνεται από το καταγεγραμμένο στις μικρές περιόδους, ενώ για  $T > 2$  sec το πλησιάζει. Μάλιστα στις μεγάλες περιόδους, το φάσμα με λόγο ταχυτήτων ίσο με 0.075, προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια το πραγματικό και σχεδόν ταυτίζεται με αυτό.

**Πίνακας 5.2 :** Τιμές των  $G_{max}$  που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις με ρευστοποίηση

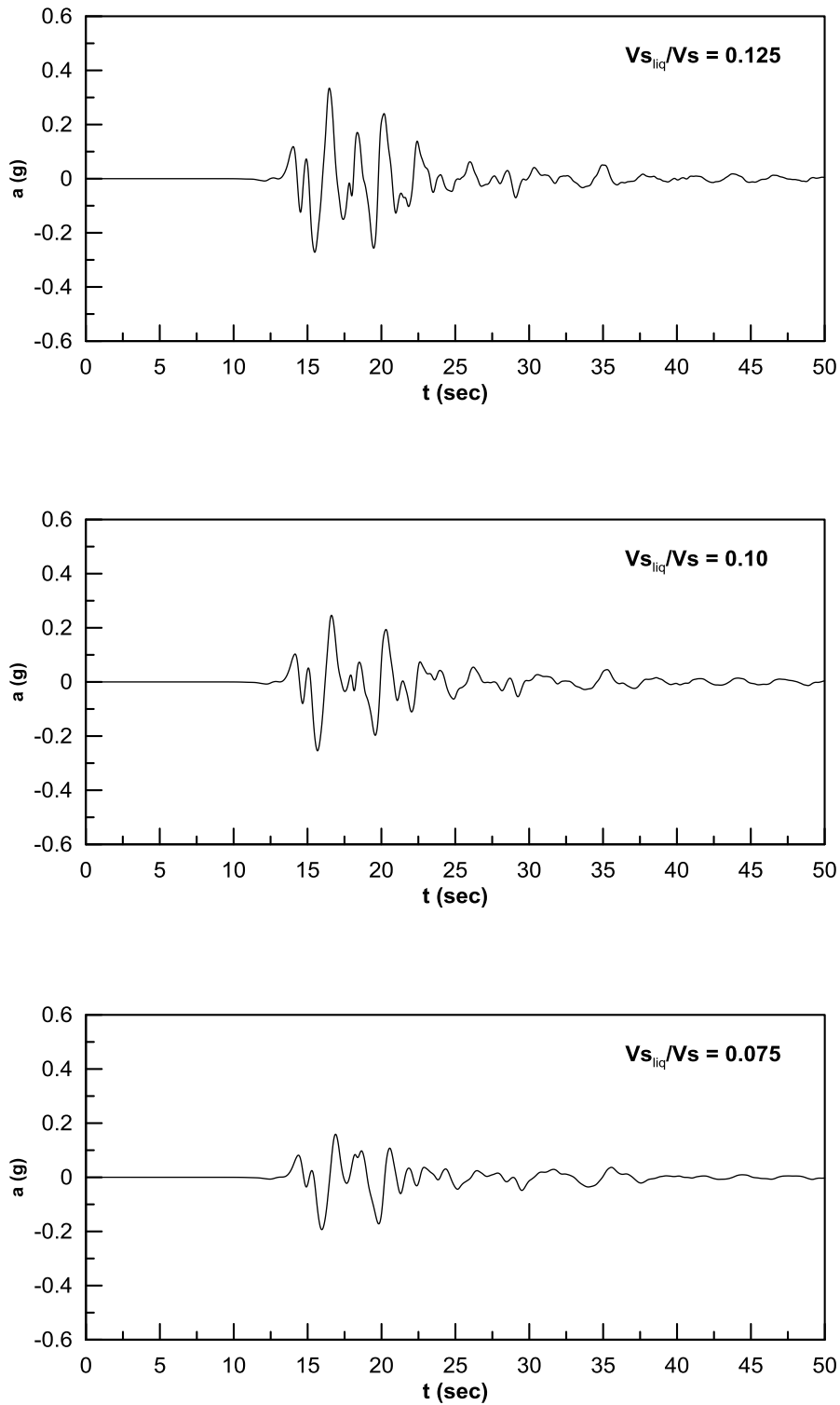
ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	ΑΡΧΙΚΟ $G_{max}$ (Mpa)	NEA $G_{max}$					
		$V_{sliq}/V_s$ = 0.075	$V_{sliq}/V_s$ = 0.10	$V_{sliq}/V_s$ = 0.125	$V_{sliq}/V_s$ = 0.15	$V_{sliq}/V_s$ = 0.20	$V_{sliq}/V_s$ = 0.30
1	60.69	60.69	60.69	60.69	60.69	60.69	60.69
2	60.69	60.69	60.69	60.69	60.69	60.69	60.69
3	60.69	0.34	0.61	0.95	1.37	2.43	5.46
4	60.69	0.34	0.61	0.95	1.37	2.43	5.46
5	92.61	0.52	0.93	1.45	2.08	3.70	8.33
6	92.61	0.52	0.93	1.45	2.08	3.70	8.33
7	92.61	0.52	0.93	1.45	2.08	3.70	8.33
8	92.61	0.52	0.93	1.45	2.08	3.70	8.33
9	92.61	0.52	0.93	1.45	2.08	3.70	8.33
10	92.61	0.52	0.93	1.45	2.08	3.70	8.33
11	92.61	0.52	0.93	1.45	2.08	3.70	8.33
12	92.61	0.52	0.93	1.45	2.08	3.70	8.33
13	92.61	92.61	92.61	92.61	92.61	92.61	92.61



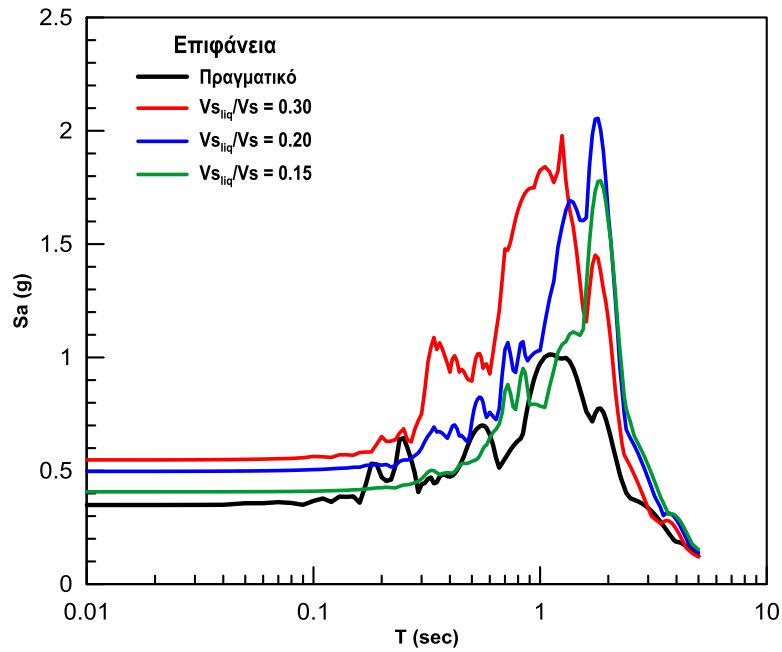
**Σχήμα 5.7 :** Διάγραμμα ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων μη ρευστοποιημένου εδάφους και ρευστοποιημένου εδάφους με  $V_{s,liq} / V_s = 0.075$  και  $V_{s,liq} / V_s = 0.30$



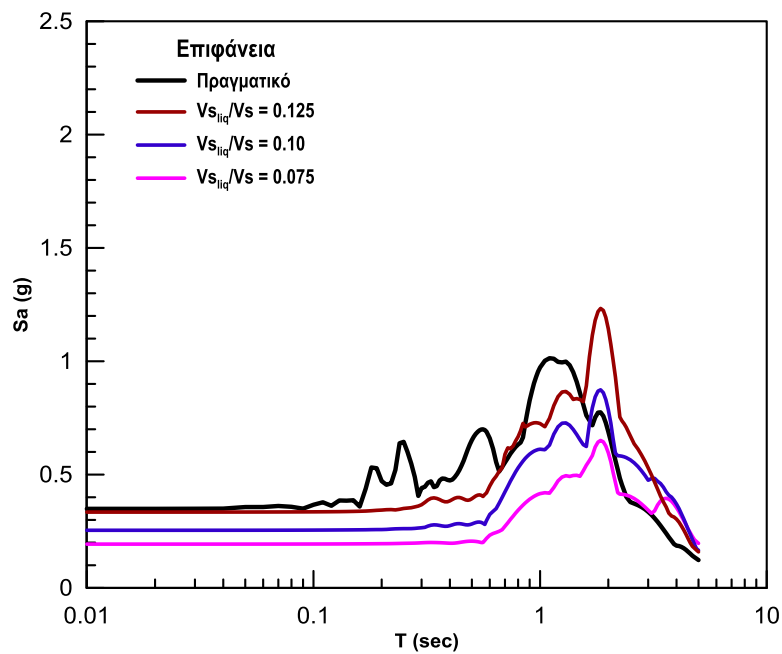
**Σχήμα 5.8 :** Επιταχυνσιογραφήματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις με το EERA για πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος για (α)  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.30$  (β)  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.20$  (γ)  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.15$



**Σχήμα 5.9 :** Επιταχυνσιογραφήματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις με το EERA για πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος για (α)  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.125$  (β)  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.10$  (γ)  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.075$



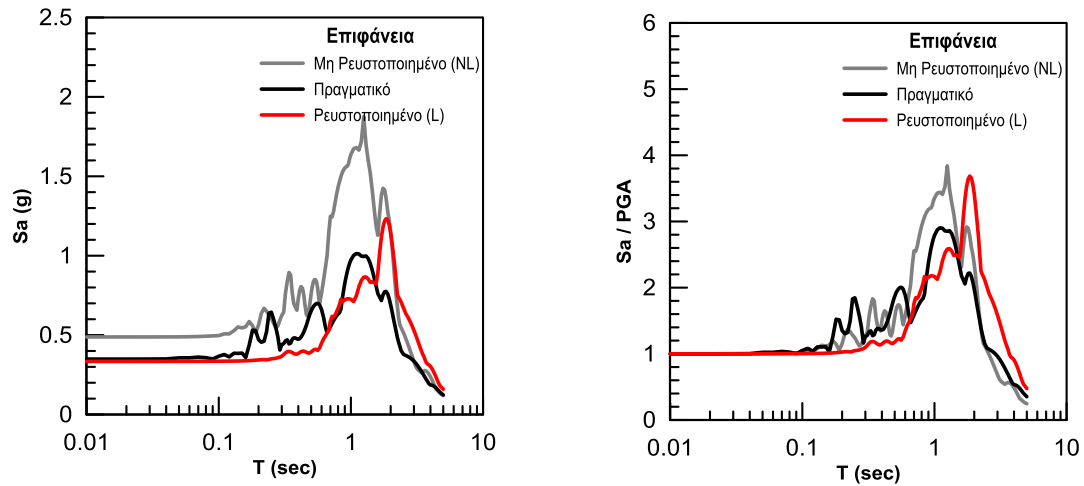
**Σχήμα 5.10 :** Φάσματα απόκρισης από την πραγματική καταγραφή και από τις αναλύσεις ρευστοποιημένου εδάφους με  $V_{sliq} / V_s = 0.30$ ,  $V_{sliq} / V_s = 0.20$  και  $V_{sliq} / V_s = 0.15$



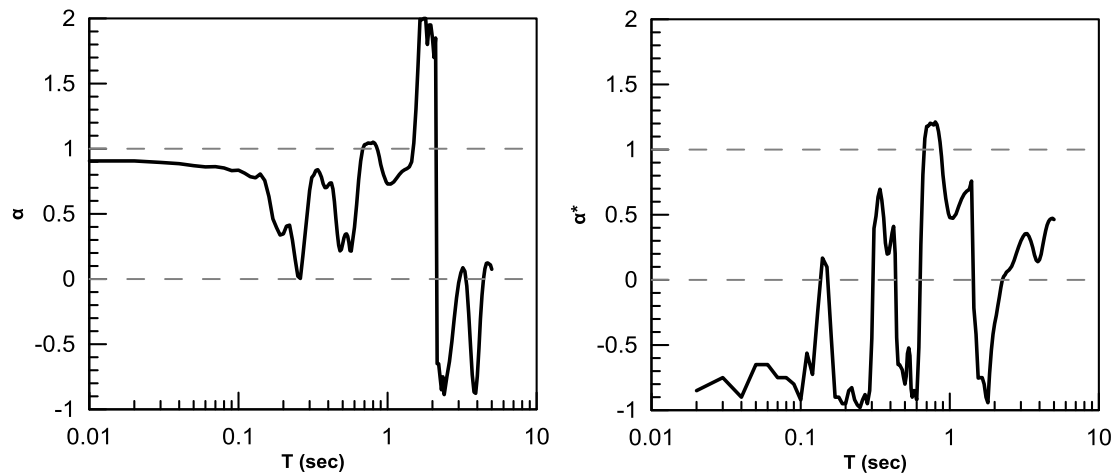
**Σχήμα 5.11 :** Φάσματα απόκρισης από την πραγματική καταγραφή και από τις αναλύσεις ρευστοποιημένου εδάφους με  $V_{sliq} / V_s = 0.125$ ,  $V_{sliq} / V_s = 0.10$  και  $V_{sliq} / V_s = 0.075$

Με βάση τα φάσματα που προέκυψαν για τους λόγους  $V_{s_{iiq}} / V_s$  που έγιναν δεκτοί, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχοι συντελεστές “α” και “α\*” από τις σχέσεις  $3.8 \div 3.9$  (Σχήματα 5.12  $\div$  5.20). Παρατηρείται ότι η καμπύλη του συντελεστή “α” είναι πιο ομαλή από την αντίστοιχη του συντελεστή “α\*” και συμφωνεί περισσότερο με τα αποτελέσματα των ερευνητών Miwa & Ikeda (2006). Υπενθυμίζεται ότι οι ερευνητές αυτοί εκτιμούν ότι το πραγματικό φάσμα ρευστοποιημένου εδάφους ισούται απολύτως με το φάσμα που υπολογίζεται με ταχύτητα διατμητικού κύματος μειωμένη σε σχέση με την πραγματική και άρα ισχύει  $\alpha = \alpha^* = 1$ . Στην συγκεκριμένη περίπτωση σεισμού, προτείνουν ταχύτητα ρευστοποιημένου στρώματος ίση με το 15% της αρχικής. Από τις αναλύσεις, για την ταχύτητα ρευστοποιημένου στρώματος ίση με το 12.5% της αρχικής, στην οποία το υπολογισμένο φάσμα προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια το πραγματικό, ο συντελεστής “α” για πολλές περιόδους που είναι μικρότερες από  $T < 1.6$  sec, βρίσκεται σχετικά κοντά στη μονάδα ή ταυτίζεται με αυτή. Για μεγαλύτερες περιόδους τα τρία φάσματα (Σχήμα 5.14) βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους, με αποτέλεσμα η τιμή του “α” να είναι αρκετά ευαίσθητη στις μικρές μεταβολές των φασμάτων, γεγονός όμως που είναι αδιάφορο. Όσο μειώνεται η ταχύτητα διατμητικού κύματος, το φάσμα πλήρως ρευστοποιημένου εδάφους απομακρύνεται από το πραγματικό και άρα ο συντελεστής α μειώνεται για τις μικρές ιδιοπεριόδους των συνήθων κατασκευών, αλλά χωρίς η μέση τιμή του να γίνεται μικρότερη από 0.4-0.5.

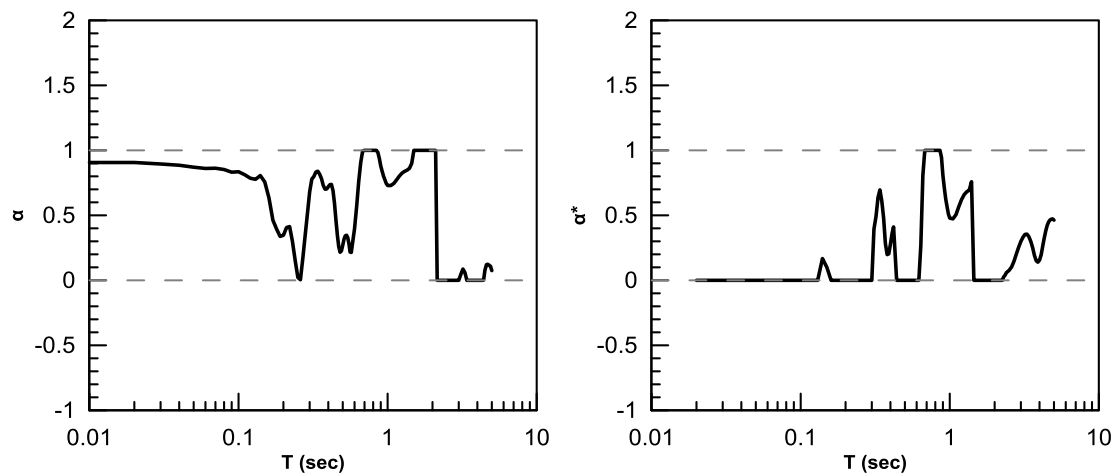
Μία σημαντική διαφορά που παρατηρείται σε σχέση με τους υπολογισμένους συντελεστές συσχέτισης του προηγούμενου κεφαλαίου είναι ότι επειδή κατά τον σεισμό Superstition Hills άργησε το έδαφος να ρευστοποιηθεί, για μικρές και συνήθεις ιδιοπεριόδους κατασκευών οι συντελεστές απείχαν πολύ από τη μονάδα ή έπαιρναν ακόμα και την τιμή μηδέν. Έτσι γίνεται κατανοητό πως όσο πιο γρήγορα ρευστοποιείται ένα έδαφος, τόσο περισσότερο επαληθεύεται η μεθοδολογία των Miwa & Ikeda (2006) για τον υπολογισμό του φάσματος.



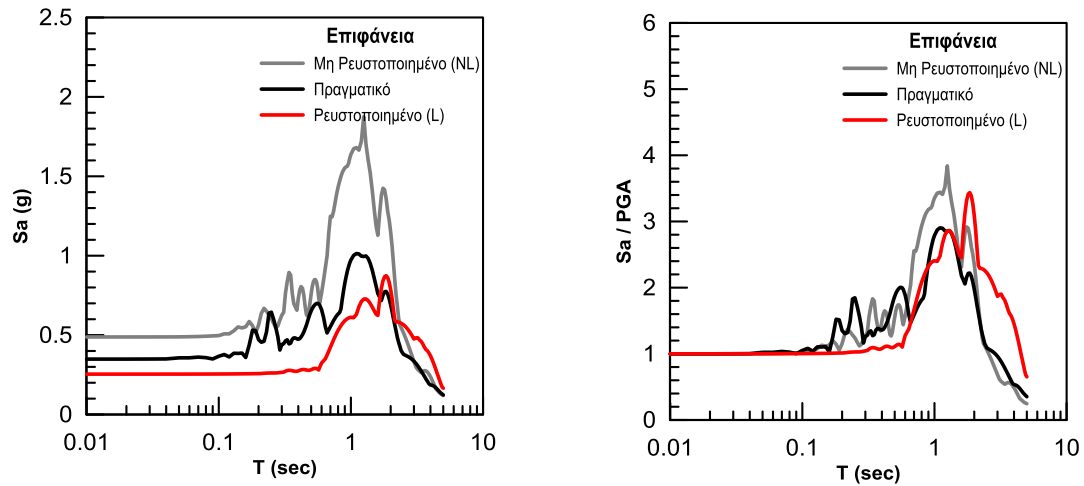
**Σχήμα 5.12 :** Φάσματα απόκρισης και αδιαστατοποιημένα φάσματα πραγματικής καταγραφής και από τις αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση και με  $V_{s_{i,q}} / V_s = 0.125$



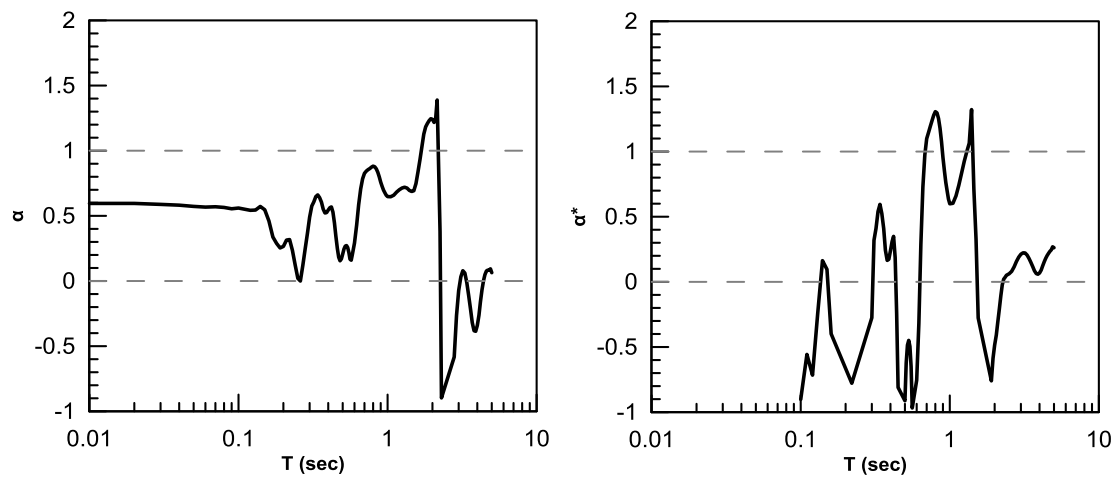
**Σχήμα 5.13 :** Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” συναρτήσει της ιδιοπεριόδου T για  $V_{s_{i,q}} / V_s = 0.125$



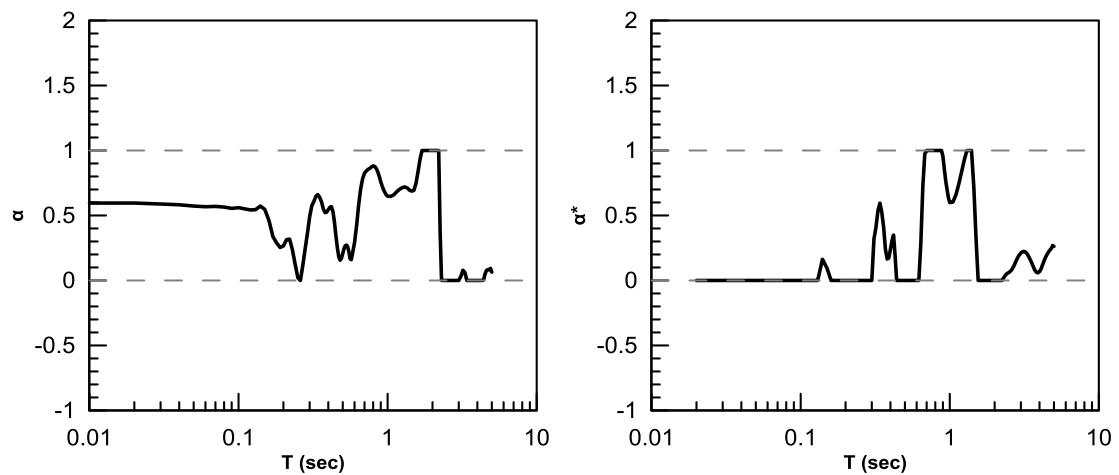
**Σχήμα 5.14 :** Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” με εύρος τιμών  $0 \div 1$  συναρτήσει της ιδιοπεριόδου T για  $V_{s_{i,q}} / V_s = 0.125$



**Σχήμα 5.15 :** Φάσματα απόκρισης και αδιαστατοποιημένα φάσματα πραγματικής καταγραφής και από τις αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση και με  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.10$

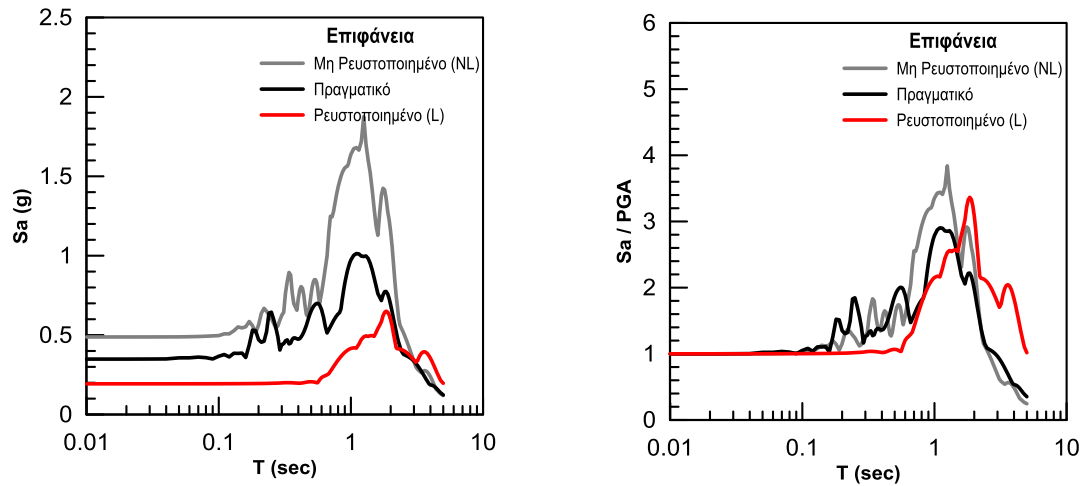


**Σχήμα 5.16 :** Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” συναρτήσει της ιδιοπεριόδου T για  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.10$

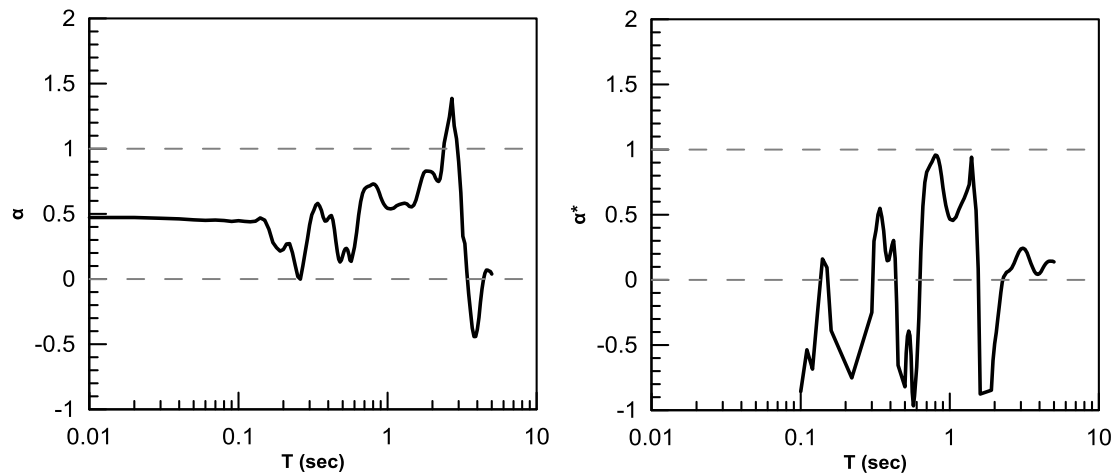


**Σχήμα 5.17 :** Συντελεστές συσχέτισης “α” και “α\*” με εύρος τιμών  $0 \div 1$  συναρτήσει της ιδιοπεριόδου T για  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.10$

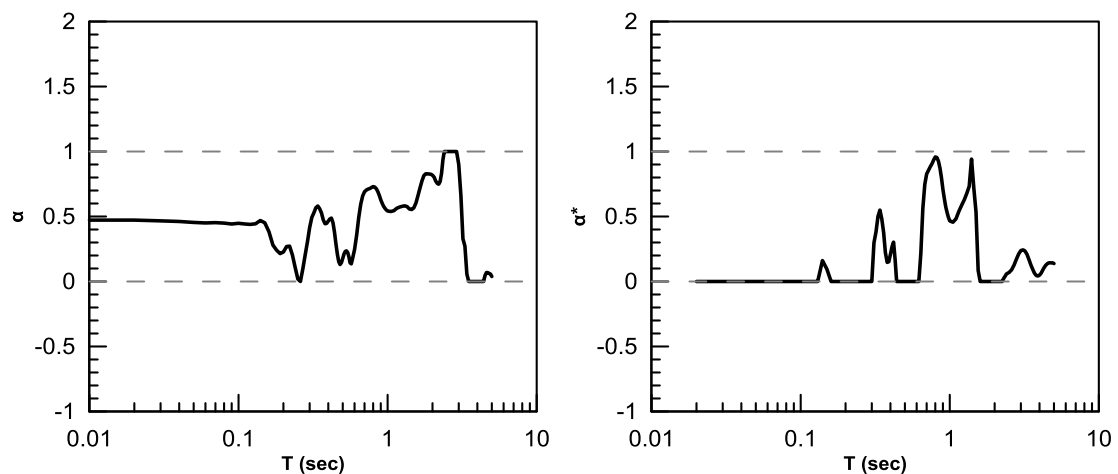




**Σχήμα 5.18 :** Φάσματα απόκρισης και αδιαστατοποιημένα φάσματα πραγματικής και από τις αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση καταγραφής με  $V_{S_{liq}} / V_s = 0.075$



**Σχήμα 5.19 :** Συντελεστές συσχέτισης “ $\alpha$ ” και “ $\alpha^*$ ” συναρτήσει της ιδιοπεριόδου  $T$  για  $V_{S_{liq}} / V_s = 0.075$



**Σχήμα 5.20 :** Συντελεστές συσχέτισης “ $\alpha$ ” και “ $\alpha^*$ ” με εύρος τιμών  $0 \div 1$  συναρτήσει της ιδιοπεριόδου  $T$  για  $V_{S_{liq}} / V_s = 0.075$

## 5.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό διερευνήθηκε την απόκριση της περιοχής Port Island κατά τον σεισμό του Kobe, ο οποίος προκάλεσε εκτεταμένη ρευστοποίηση. Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης υπολογίστηκε σε όλο το βάθος πολύ μικρότερος της μονάδας ( $FS_L = 0.4$ ), όπως αναμενόταν. Από τις αναλύσεις που διεξήχθησαν με το EERA για μη ρευστοποιημένο έδαφος, και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την συμπεριφορά της περιοχής στην επιφάνεια, με την πραγματική καταγραφή, παρατηρείται ότι επειδή η ρευστοποίηση πραγματοποιήθηκε πολύ γρήγορα από την έναρξη της διέγερσης, οι έντονοι παλμοί απορροφήθηκαν και η δεσπόζουσα περίοδος αυξήθηκε. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα το πραγματικό φάσμα, σχεδόν για όλες τις περιόδους να δίνει πολύ μικρότερες επιταχύνσεις από τις προβλεπόμενες. Εδώ αξίζει να επισημανθεί η διαφορά αυτού του γεγονότος ρευστοποιημένου εδάφους με τον σεισμό Superstition Hills, ο οποίος επίσης προκάλεσε έντονη εδαφική χαλάρωση αλλά μετά από αρκετό χρόνο από την έναρξη της διέγερσης και έτσι δεν υπήρξε το ίδιο σημαντική απομείωση των επιταχύνσεων.

Κατόπιν, οι ίδιες αναλύσεις επαναλήφθηκαν για ρευστοποιημένο έδαφος για  $V_{s,liq}$  ίσο με το  $7.5 \div 30\%$  του αρχικού. Παρατηρούμε ότι για λόγο  $V_{s,liq}/V_s$  μεγαλύτερο από 0.125 το φάσμα πλήρους ρευστοποιημένου εδάφους βρίσκεται πάνω από το κανονικό και άρα οι συντελεστές που υπολογίστηκαν με αυτή την ταχύτητα δεν είναι κατάλληλοι για τον προσδιορισμό του πραγματικού φάσματος ως ενδιάμεσο των δύο από τις αναλύσεις. Στις υπόλοιπες αναλύσεις ο συντελεστής “α” ξεκινάει από μία ενδιάμεση τιμή του μηδέν και του ένα και έχει σε γενικές γραμμές ανοδική πορεία μέχρι τη μονάδα.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ**

### **6.1 Γενικά**

Στα προηγούμενα κεφάλαια προσδιορίστηκαν, για διαφορετικά ιστορικά περιστατικά, οι συντελεστές συσχέτισης (“ $\alpha$ ” και “ $\alpha^*$ ”) των φασμάτων για ρευστοποιημένο και μη έδαφος με τα πραγματικά. Σύμφωνα με τους Miwa & Ikeda (2006), το φάσμα απόκρισης μιας περιοχής που έχει υποστεί ρευστοποίηση μπορεί να προβλεφθεί, μέσω ισοδύναμων γραμμικών αναλύσεων όπου η ταχύτητα μετάδοσης διατμητικού κύματος  $V_s$  για το ρευστοποιήσιμο στρώμα μειώνεται ανάλογα του συντελεστή ασφαλείας και παραμένει σταθερή σε όλη την ανάλυση ( $G / G_{\max} = 1$ ). Η θεώρηση αυτή υπονοεί ότι η ρευστοποίηση συμβαίνει στην αρχή της δόνησης (πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος) και, ως εκ τούτου, οι συντελεστές συσχέτισης είναι συνεχώς ίσοι με τη μονάδα (δηλαδή  $\alpha = \alpha^* = 1.0$ ).

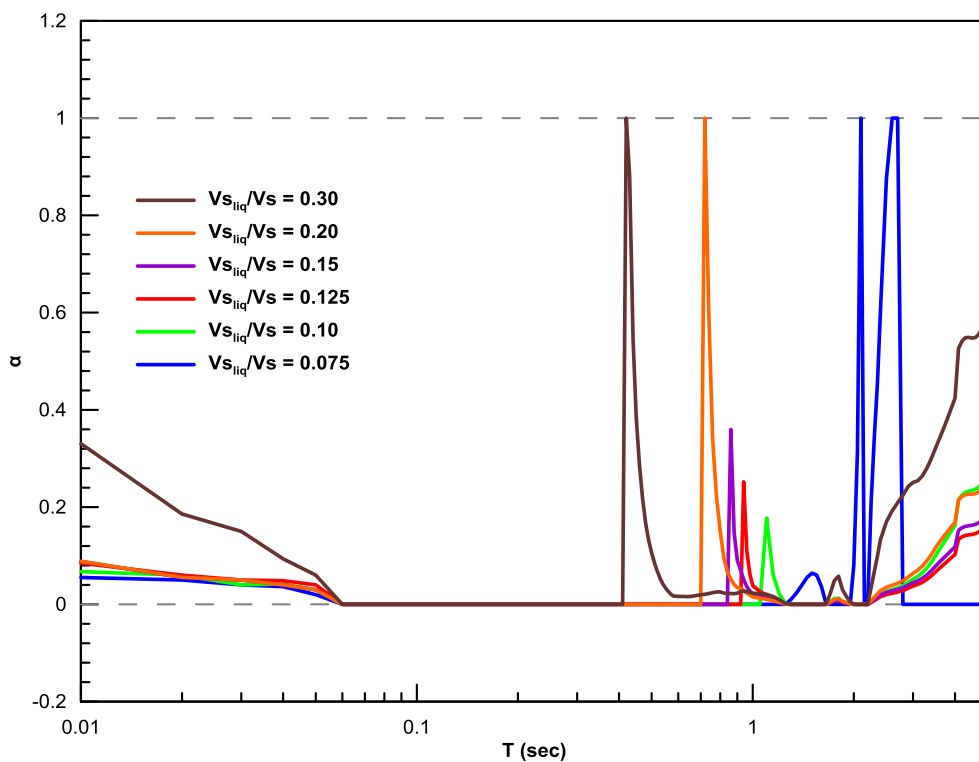
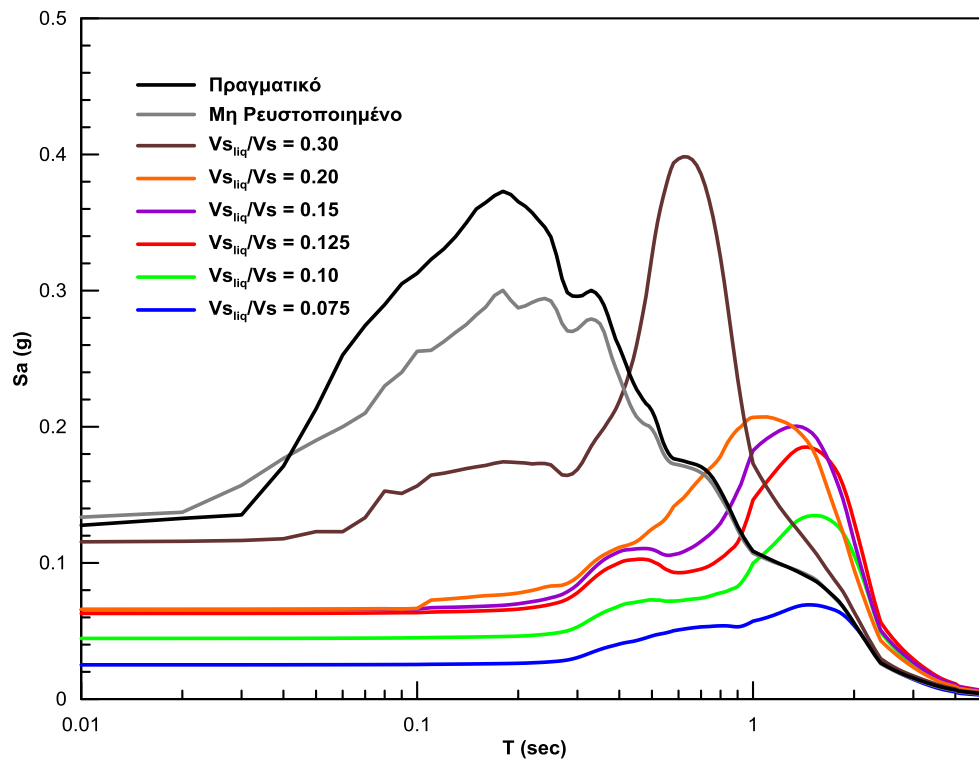
Όμως, αποδείχτηκε προηγουμένως πως αυτή η άποψη δεν περιγράφει απόλυτα την πραγματικότητα. Για παράδειγμα, βρέθηκε ότι οι συντελεστές για περιοχές που έχουν υποστεί ρευστοποίηση κυμαίνονται μεταξύ  $\alpha = 0 \div 1$  για μικρές περιόδους, ενώ για μεγαλύτερες παίρνουν όντως την τιμή  $\alpha = 1$ . Στόχος, λοιπόν, αυτού του κεφαλαίου, είναι να προταθεί μία αντιπροσωπευτική ομαλοποιημένη καμπύλη των συντελεστών “ $\alpha$ ” και “ $\alpha^*$ ” συναρτήσει της περιόδου  $T$  και του συντελεστή ασφαλείας  $FS_L$ . Λόγω του μικρού αριθμού διαθέσιμων ιστορικών περιστατικών, η εν λόγω καμπύλη θα έχει αναγκαστικά απλή μορφή και θα έχει στόχο να υπολογίζει ένα φάσμα το οποίο προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα το πραγματικό. Η διαδικασία προσδιορισμού της ομαλοποιημένη καμπύλη των συντελεστών συσχέτισης περιγράφεται στις παρακάτω ενότητες.

### **6.2 Προσδιορισμός Καμπύλης Συντελεστή Συσχέτισης $\alpha$**

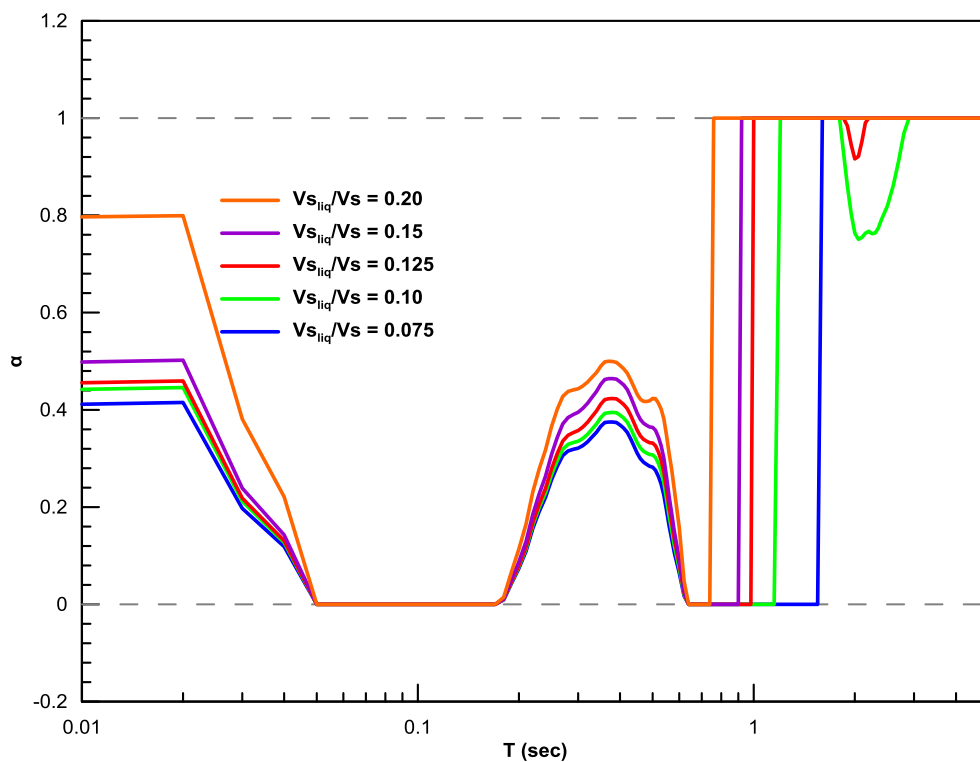
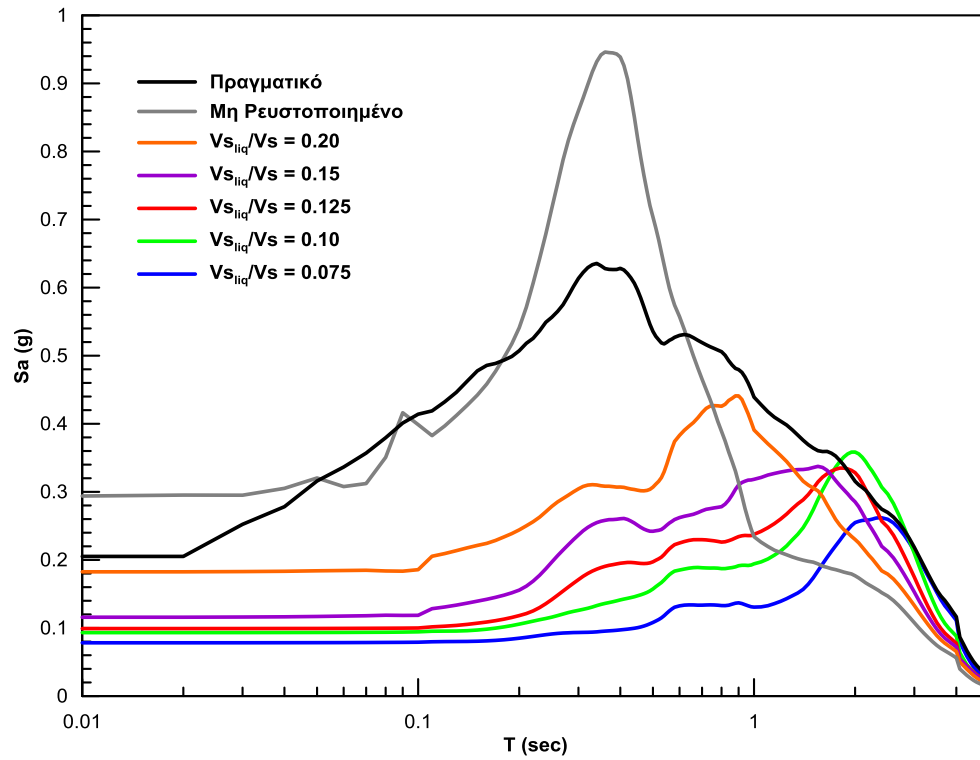
Αρχικά, θα προταθεί η μορφή των καμπυλών συσχέτισης για τα φάσματα απόκρισης, δηλαδή οι καμπύλες του συντελεστή “ $\alpha$ ”. Στόχος της διπλωματικής είναι να προσομοιωθεί όσο τον δυνατόν καλύτερα η γενική μορφή του πραγματικού φάσματος χωρίς να δίνεται ιδιαίτερη σημασία στις επιμέρους λεπτομέρειες (όπως

κάποιες μεμονωμένες τιμές φασματικής επιτάχυνσης). Έτσι, αποφασίστηκε να υπολογιστεί ο τρεχούμενος μέσος όρος (Running Average) των φασμάτων και από τα νέα ομαλοποιημένα φάσματα θα προκύψουν οι καινούριες καμπύλες των συντελεστών συσχέτισης με βάση τις οποίες θα γίνει η περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια, για κάθε σεισμική διέγερση, τοποθετήθηκε στο ίδιο διάγραμμα το σύνολο των φασμάτων απόκρισης χωρίς ρευστοποίηση και με ρευστοποίηση για διάφορους λόγους  $V_{s_{iqa}}/V_s$ , στην ομαλοποιημένη τους μορφή. Το ίδιο έγινε και για τις καμπύλες των αντίστοιχων συντελεστών “α” (Σχήματα 6.1 ÷ 6.3), με βάση τις οποίες θα προβλεφθούν τα πραγματικά φάσματα.

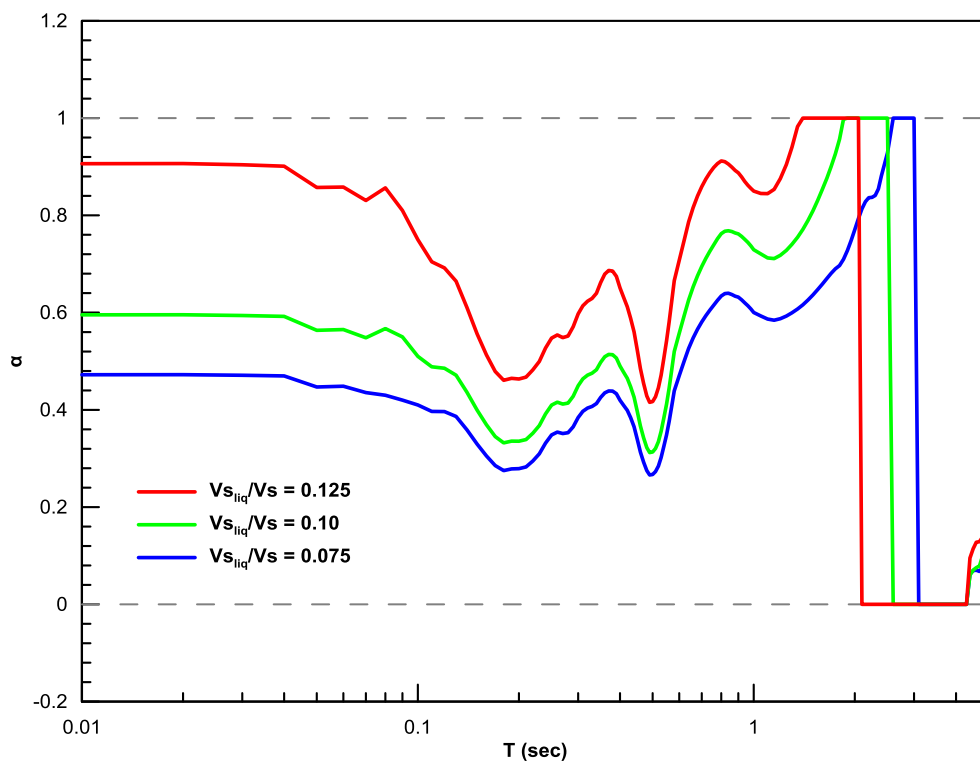
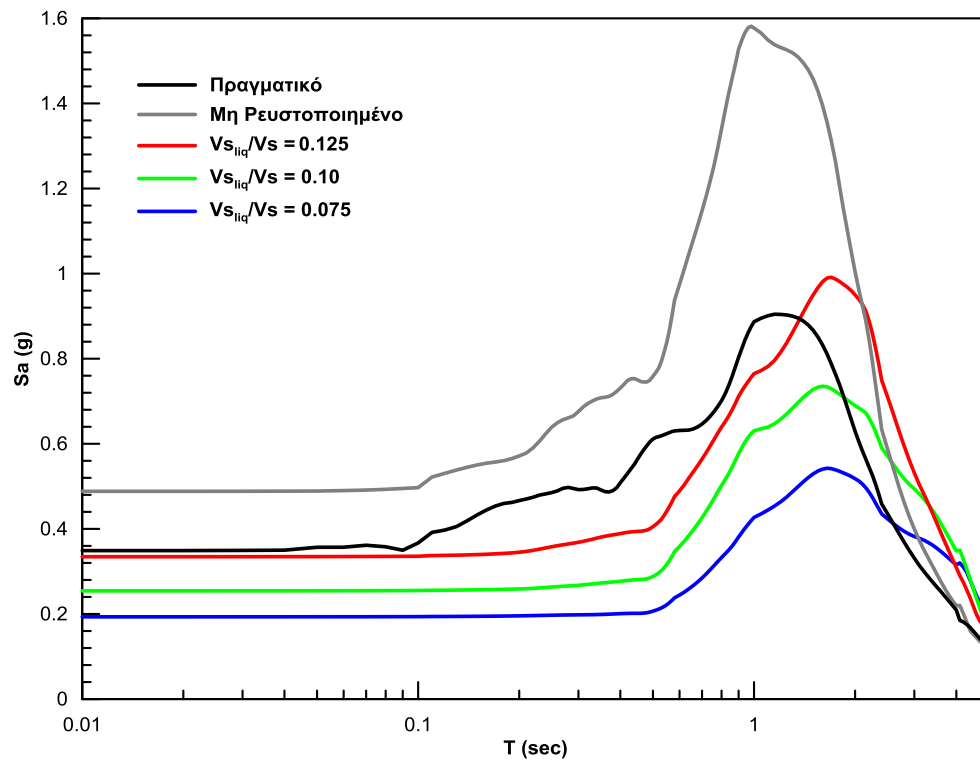
Παρατηρείται ότι στον σεισμό Elmore Ranch, ο συντελεστής συσχέτισης “α” στην πλειοψηφία των περιόδων βρίσκεται κοντά στο μηδέν. Στον σεισμό Superstition Hills, με εξαίρεση για την τιμή  $V_{s_{iqa}}/V_s = 0.20$ , ο συντελεστής για  $T = 0.01 \text{ sec}$ , ισούται με  $\alpha \approx 0.4 \div 0.5$ . Στη συνέχεια, μειώνεται έως την τιμή  $\alpha = 0$  για  $T < 0.2 \text{ sec}$ , ενώ έπειτα αποκτά ανοδική πορεία παίρνοντας τη μέγιστη τιμή του για  $T \approx 1 \text{ sec}$ . Σε γενικές γραμμές, παρουσιάζουν παρόμοια μορφή όλες οι καμπύλες ανεξαρτήτως της ταχύτητας του ρευστοποιημένου στρώματος. Κατά τον σεισμό Port Island, οι τιμές του “α” στην αρχή του διαγράμματος διαφοροποιούνται πολύ μεταξύ τους, αλλά για μεγαλύτερες περιόδους παρουσιάζουν παρεμφερή μορφή, με το συντελεστή “α” να παίρνει τη μέγιστη τιμή  $\alpha = 1$  για  $T = 2 \div 3 \text{ sec}$ .



Σχήμα 6.1 : (α) Πραγματικό φάσμα και φάσματα από αναλύσεις για ρευστοποιημένο και μη έδαφος (β) αντίστοιχος συντελεστής  $\alpha$  του σεισμού Elmore Ranch

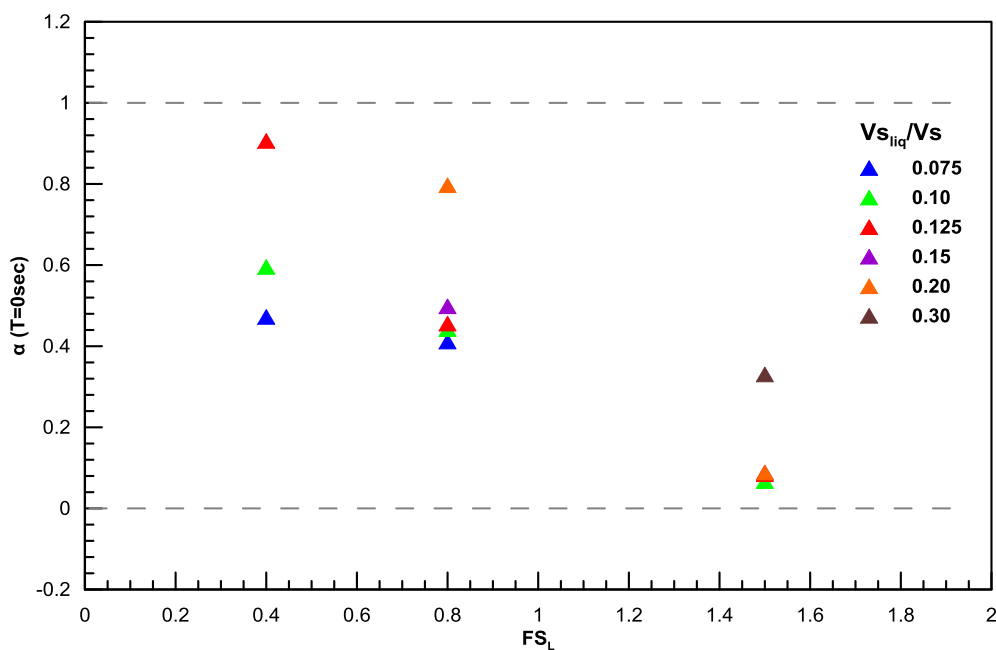


Σχήμα 6.2 : (α) Πραγματικό φάσμα και φάσματα από αναλύσεις για ρευστοποιημένο και μη έδαφος (β) αντίστοιχος συντελεστής  $\alpha$  του σεισμού Superstition Hills



Σχήμα 6.3 : (α) Πραγματικό φάσμα και φάσματα από αναλύσεις για ρευστοποιημένο και μη έδαφος (β) αντίστοιχος συντελεστής  $\alpha$  του σεισμού Port Island

Εκτός από τη μορφή των καμπυλών των συντελεστών συσχέτισης, ιδιαίτερη σημασία έχει η τιμή του “α” για  $T = 0 \text{ sec}$  ( $\alpha_{\text{PGA}}$ ), που αντιστοιχεί στη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση PGA και γι’ αυτό το λόγο θα ερευνηθεί ξεχωριστά. Αναμένεται ότι για μικρούς  $FS_L$ , δηλαδή για ένα έδαφος που ρευστοποιείται πολύ γρήγορα, το πραγματικό φάσμα προσεγγίζει το υπολογισμένο φάσμα ρευστοποιημένου εδάφους και άρα η τιμή του  $\alpha_{\text{PGA}}$  θα είναι κοντά στη μονάδα. Αντίθετα για συντελεστές ασφαλείας κοντά στη μονάδα ή και μεγαλύτερους, η τιμή του  $\alpha_{\text{PGA}}$  θα είναι ίση με το μηδέν, δηλαδή το πραγματικό φάσμα υπολογίζεται με αναλύσεις χωρίς ρευστοποίηση. Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζονται οι τιμές του  $\alpha_{\text{PGA}}$  για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε συναρτήσει του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης.



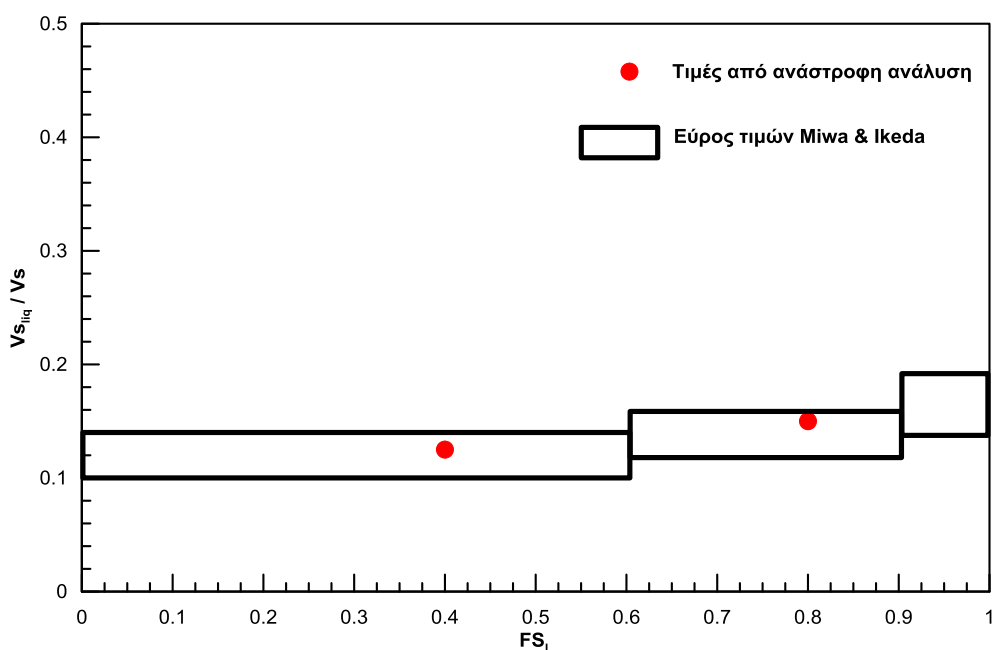
**Σχήμα 6.4 :** Διάγραμμα συντελεστή “α” για το PGA συναρτήσει του συντελεστή  $FS_L$  για κάθε τιμή του  $V_{s_{liq}}/V_s$

Παρατηρείται ότι από τις τιμές του Port Island ( $FS_L = 0.4$ ), η ανάλυση με  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.125$  συμβαδίζει καλύτερα με την παραπάνω θεώρηση και άρα επιλέγεται ως καταλληλότερη για αναλύσεις με ρευστοποίηση. Όσον αφορά στον σεισμό Superstition Hills ( $FS_L = 0.8$ ) προκύπτει από το ίδιο σχήμα ότι για λόγο  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.20$ , ο τιμή του συντελεστή “α” διαφέρει πολύ από τις αντίστοιχες τιμές των υπολοίπων αναλύσεων και γι αυτό απορρίπτεται η συγκεκριμένη ταχύτητα ρευστοποιημένου



στρώματος. Επιλέγεται για τον συγκεκριμένο σεισμό ως καταλληλότερη τιμή του λόγου  $V_{s_{liq}}/V_s$ , η τιμή  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.15$ , καθώς δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Ένας επιπλέον λόγος που δεν θεωρείται καταλληλότερος ο λόγος ταχυτήτων  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.125$ , για τον σεισμό Superstition Hills, είναι ότι εφ' όσον έχει μεγαλύτερο συντελεστή ασφαλείας η ταχύτητα διάδοσης κύματος θα έχει μειωθεί λιγότερο και άρα θα πρέπει να έχει λόγο  $V_{s_{liq}}/V_s$  μεγαλύτερο από τον αντίστοιχο του Port Island, γεγονός που συμβαδίζει και με τη λογικά των Miwa & Ikeda.

Στο Σχήμα 6.5 φαίνεται το εύρος των λόγων  $V_{s_{liq}}/V_s$  που προτείνουν οι Miwa & Ikeda για κάθε συντελεστή ασφαλείας και αντίστοιχα οι λόγοι που επιλέχθηκαν για τους υπό ανάλυση σεισμούς αυτής της εργασίας. Είναι εμφανές ότι οι επιλεγείς λόγοι συμβαδίζουν με τα αποτελέσματα των ερευνητών.



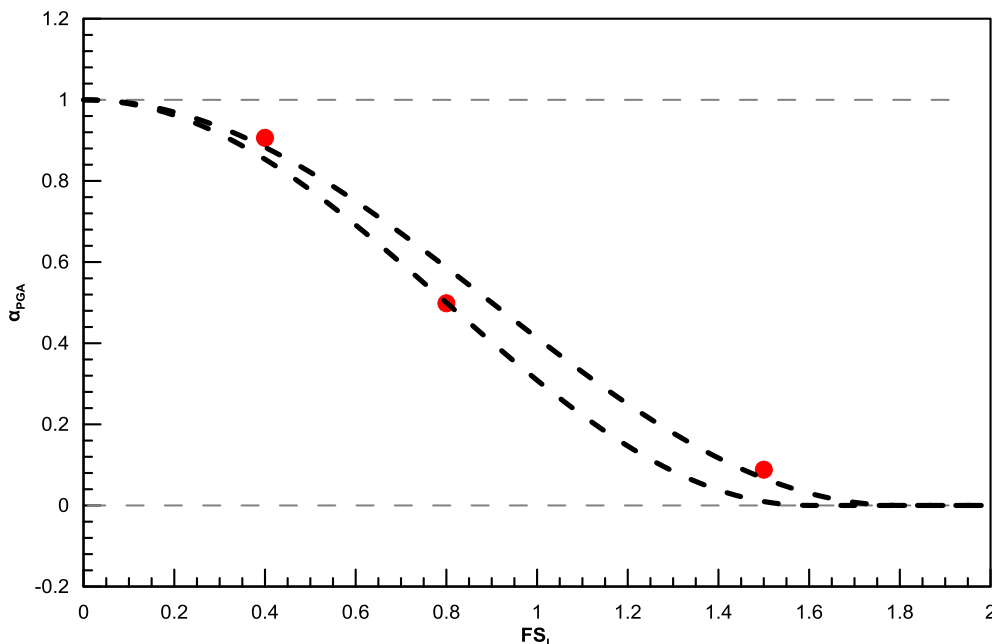
**Σχήμα 6.5 :** Διάγραμμα εύρους τιμών του λόγου  $V_{s_{liq}}/V_s$  συναρτήσει του συντελεστή  $FS_L$  σύμφωνα με τους Miwa & Ikeda

Με βάση αυτά, προκύπτει το Σχήμα 6.6, όπου παρουσιάζονται οι τιμές του  $\alpha_{PGA}$  για τις επιλεγόμενες τιμές του  $V_s / V_{s_{liq}}$  σαν συνάρτηση του συντελεστή ασφαλείας  $FS_L$ . Με βάση τις τιμές αυτές αλλά και όσα περιγράφηκαν παραπάνω για τις ακραίες

τιμές του  $\alpha_{PGA}$ , η μεταβολή του  $\alpha_{PGA}$  συναρτήσει του  $FS_L$ , μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά από τη Σχέση (6.1), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.7.

$$\alpha_{PGA} \approx \frac{1}{2} \cdot 1 + \cos \frac{\pi FS_L}{2 A} \quad (6.1)$$

όπου  $A \approx 0.80 \div 0.90$

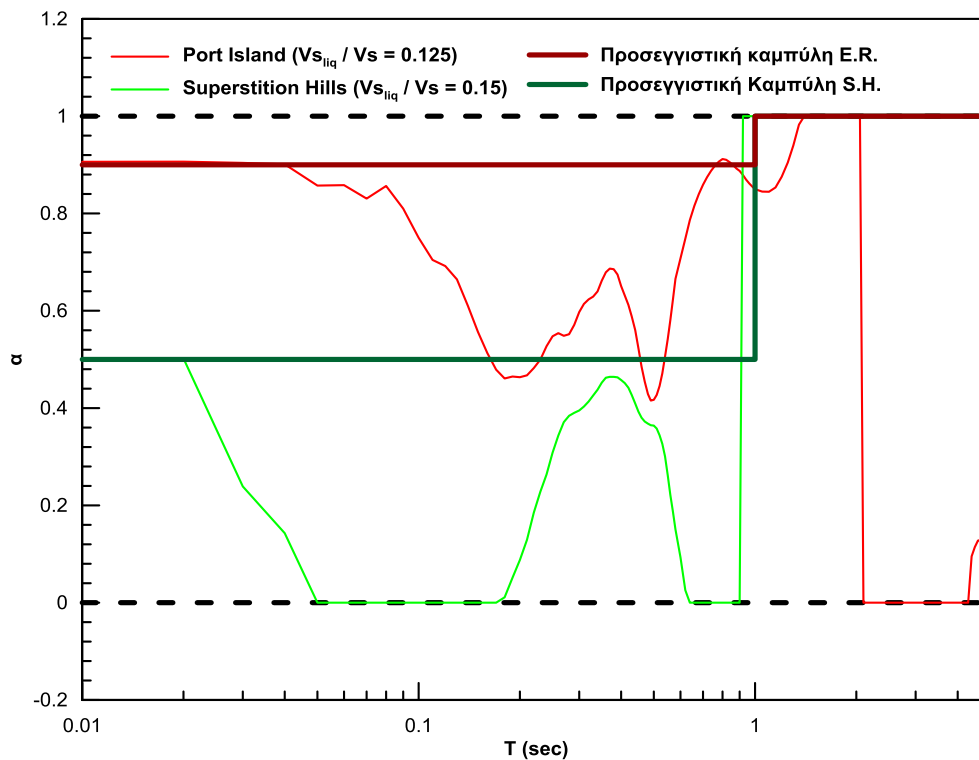


**Σχήμα 6.6 :** Διάγραμμα εύρους τιμών του συντελεστή “α” για  $T = 0.01$  sec συναρτήσει του συντελεστή  $FS_L$

Στη συνέχεια, πρέπει να προβλεφθεί μία ομαλοποιημένη προσεγγιστική καμπύλη του συντελεστών συσχέτισης “α” για τον υπολογισμό του προβλεπόμενου φάσματος. Στο Σχήμα 6.7 φαίνονται οι καμπύλες των συντελεστών συσχέτισης για τις αντίστοιχες επιλεγμένες ταχύτητες  $V_{Sliq}$ . Παρατηρείται ότι για πολύ μικρές περιόδους η τιμή του συντελεστή διαφέρει πολύ στις δύο σεισμικές διεγέρσεις και πιο συγκεκριμένα ισούται με  $\alpha = 0.9$  στο Port Island και  $\alpha = 0.5$  στο Superstition Hills. Οι τιμές αυτές ισούνται με τις αντίστοιχες τιμές για την  $\alpha_{PGA}$ . Όσον αφορά το σεισμό Superstition Hills, ο συντελεστής “α” μειώνεται για  $T < 0.9$  sec, ενώ για  $T = 0.9$  sec αποκτά απότομα την τιμή  $\alpha = 1$  και τη διατηρεί σταθερή για όλες τις μεγαλύτερες περιόδους. Αντίστοιχα, στο Port Island, το “α” μειώνεται για κάποιες ενδιάμεσες τιμές περιόδων και αποκτά την τιμή  $\alpha = 1$  για  $T = 1.3$  sec. Για λόγους ομοιομορφίας, επιλέγεται και για τις δύο περιπτώσεις μια μέση τιμή της περιόδου

στην οποία το “α” γίνεται μονάδα και συγκεκριμένα η  $T = 1 \text{ sec}$ . Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις προκύπτουν οι τελικές ομαλοποιημένες καμπύλες του συντελεστή για κάθε σεισμό, οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 6.7. Η τιμή των συντελεστών παραμένει σταθερή με την τιμή  $\alpha_{PGA}$  (Σχήμα 6.6) για  $T < 1 \text{ sec}$ , ενώ για μεγαλύτερες περιόδους ισούται με  $\alpha = 1$ :

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{PGA} \text{ για } T < 1 \text{ sec} \\ 1 \text{ για } T > 1 \text{ sec} \end{cases} \quad (6.2)$$

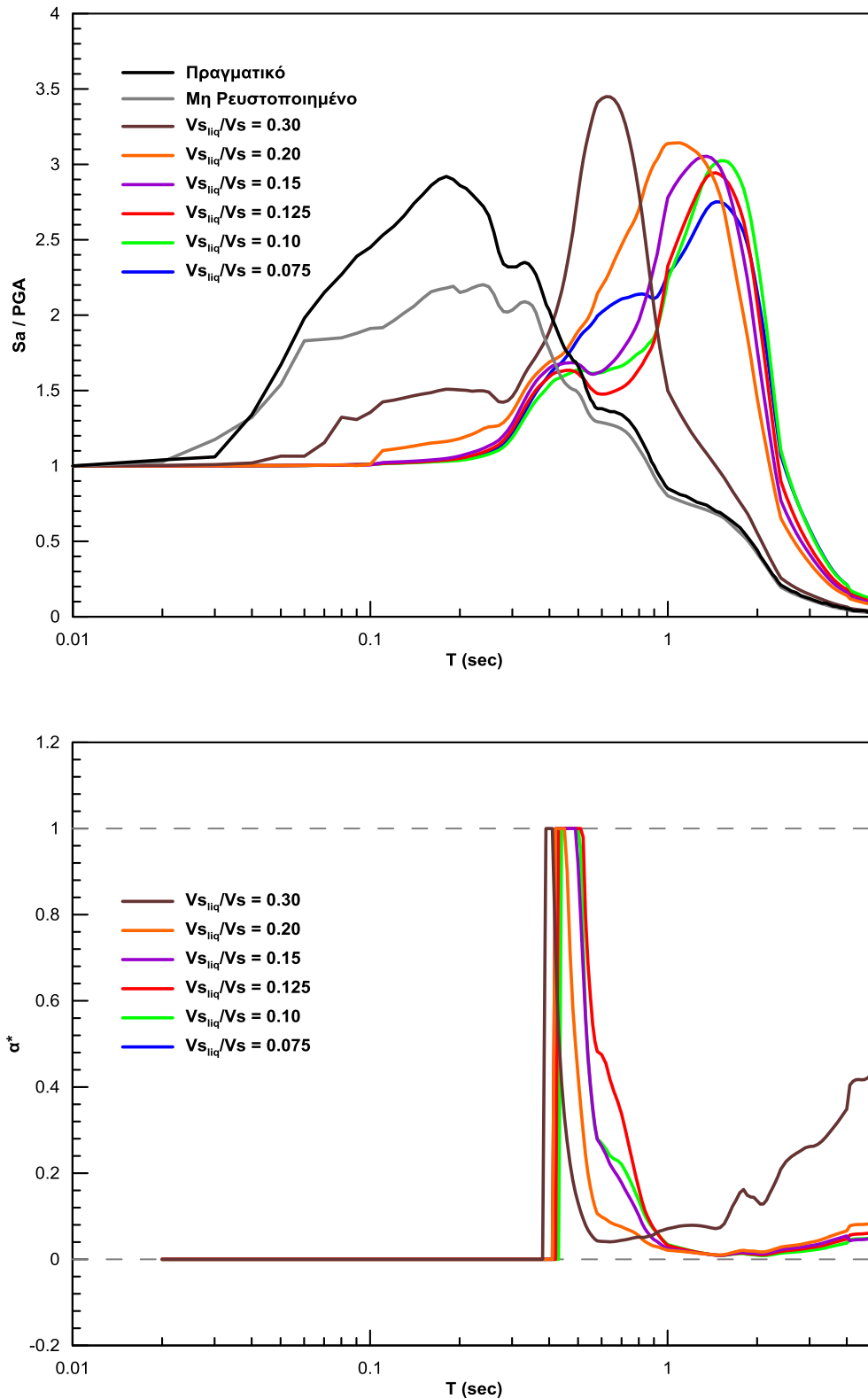


**Σχήμα 6.7 :** Διάγραμμα συντελεστή “α\*” για την επιλεγμένη ταχύτητα  $V_{s_{i,q}}$  κάθε σεισμικής διέγερσης και τελική προσεγγιστική καμπύλη

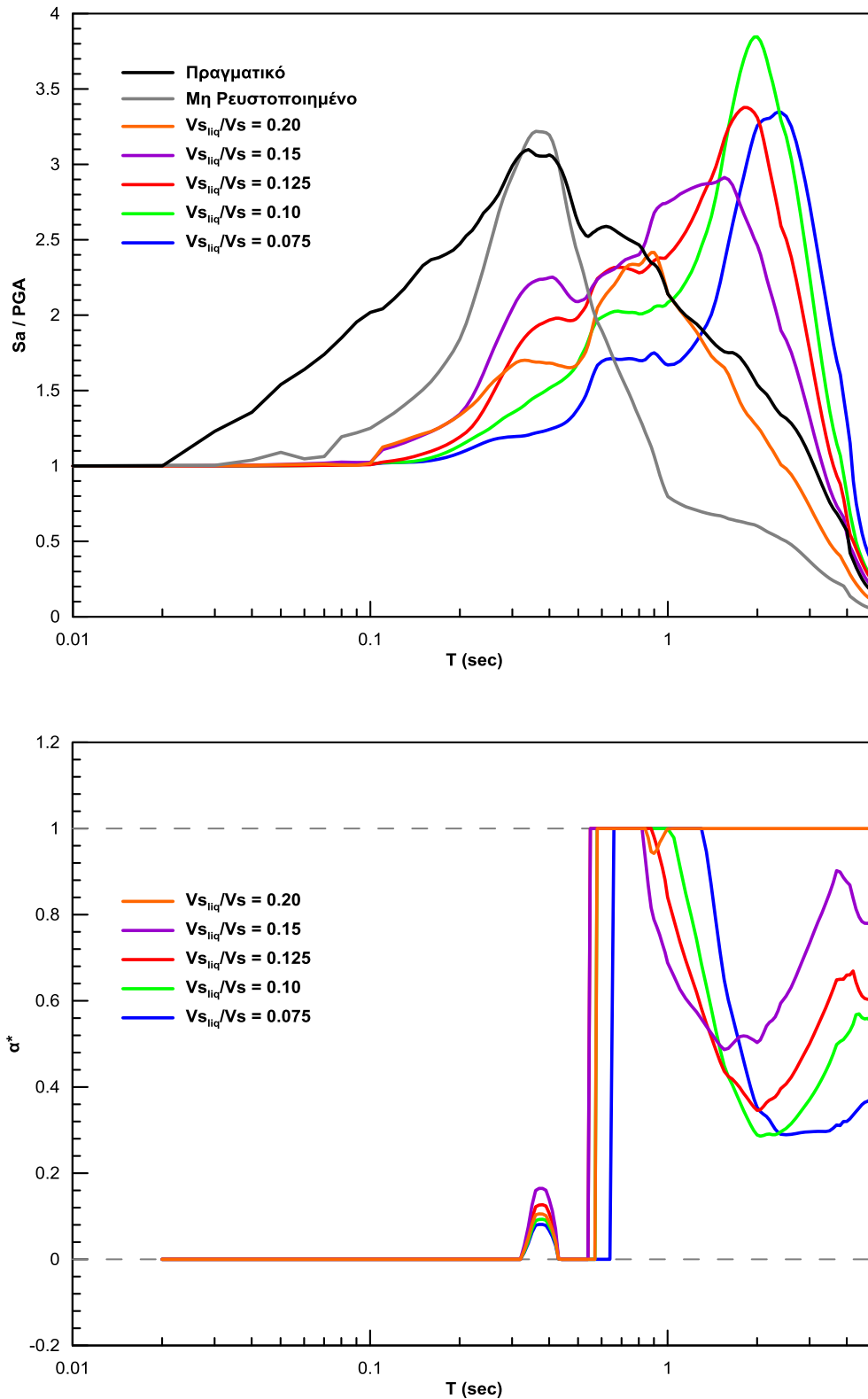
### 6.3 Προσδιορισμός Συντελεστή Συσχέτισης “α\*”

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και για τον συντελεστή “α\*” για κάθε σεισμική διέγερση. Αρχικά τοποθετήθηκαν όλα τα φάσματα και οι συντελεστές “α\*” μαζί (Σχήματα 6.8 ÷ 6.10). Πιο συγκεκριμένα, για τον σεισμό Elmore Ranch (Σχήμα

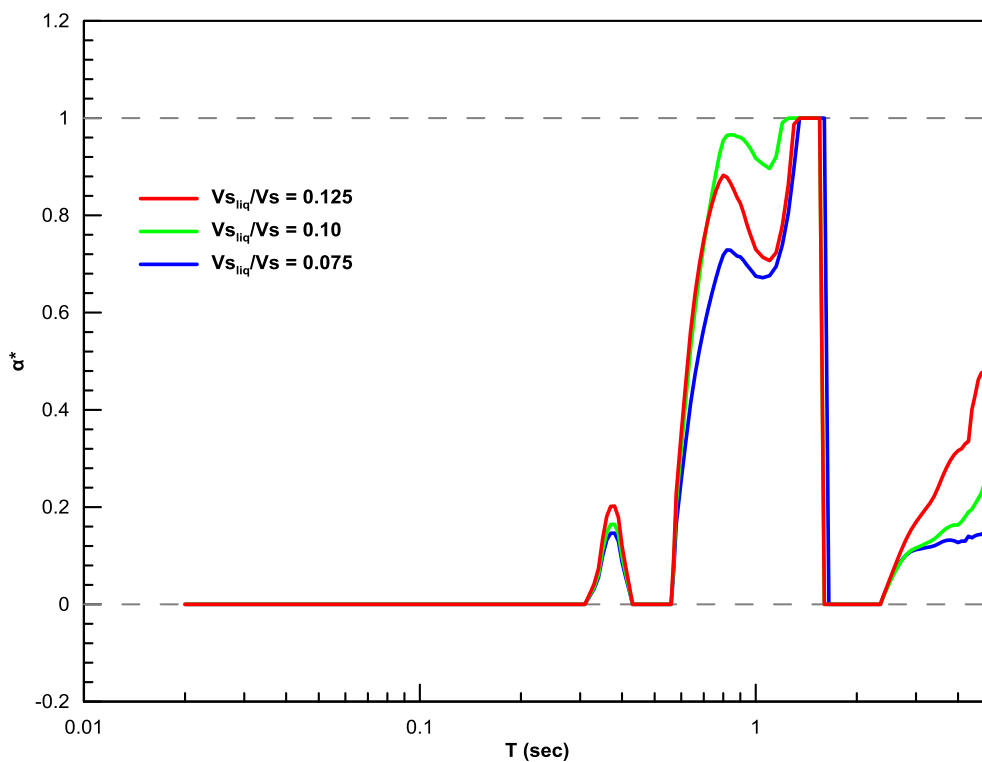
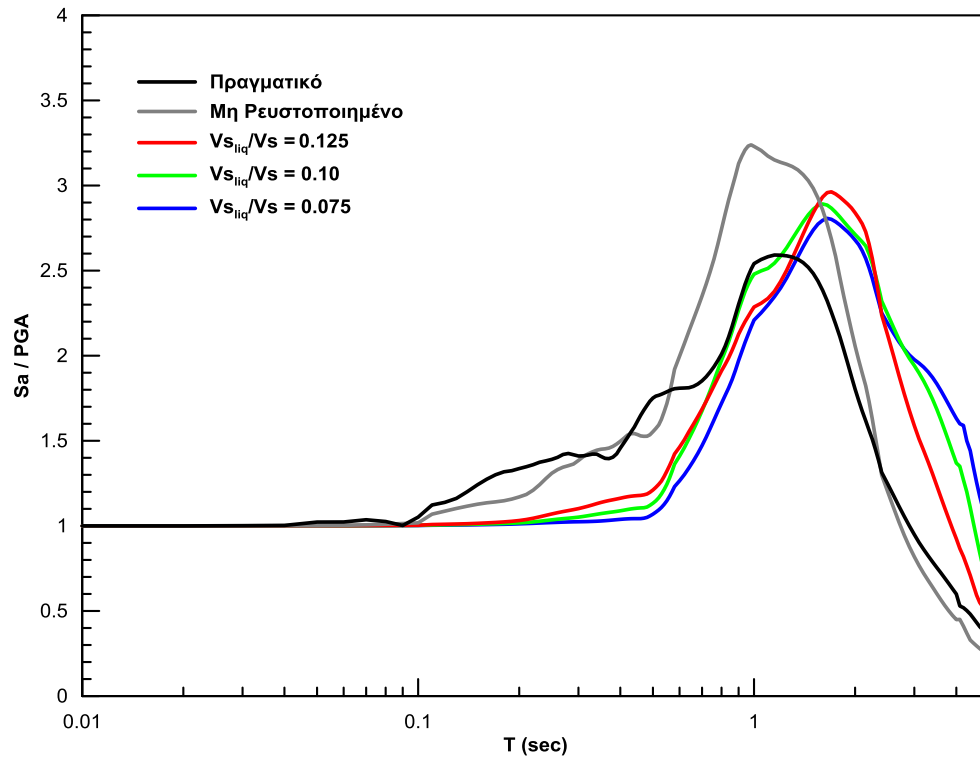
6.8), παρατηρείται ότι  $\alpha^* \approx 0$  για περιόδους μικρότερες από 0.4 sec και μεγαλύτερες από 1 sec. Για τις άλλες δύο διεγέρσεις κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκε ρευστοποίηση, ο συντελεστής ισούται με μηδέν για ιδιοπεριόδους  $T < 0.3$  sec. Στην περίπτωση του Superstition Hills (Σχήμα 6.9), η τιμή του αυξάνει απότομα και έχοντας σχεδόν κατακόρυφη κλίση παίρνει την τιμή  $\alpha = 1$  για  $T = 0.6$  sec. Αντίθετα, στην περίπτωση του Port Island (Σχήμα 6.10), αρχίζει να αυξάνει η τιμή του για  $T = 0.6$  sec αλλά με ηπιότερη κλίση μέχρι να πάρει την τελική τιμή του  $\alpha = 1$  στο 1.6 sec περίπου.



**Σχήμα 6.8 :** (α) Κανονικοποιημένο πραγματικό φάσμα και κανονικοποιημένα φάσματα από αναλύσεις για ρευστοποιημένο και μη έδαφος (β) αντίστοιχος συντελεστής  $\alpha^*$  του σεισμού Elmore Ranch



**Σχήμα 6.9 :** (α) Κανονικοποιημένο πραγματικό φάσμα και κανονικοποιημένα φάσματα από αναλύσεις για ρευστοποιημένο και μη έδαφος (β) αντίστοιχος συντελεστής  $\alpha^*$  του σεισμού Superstition Hills

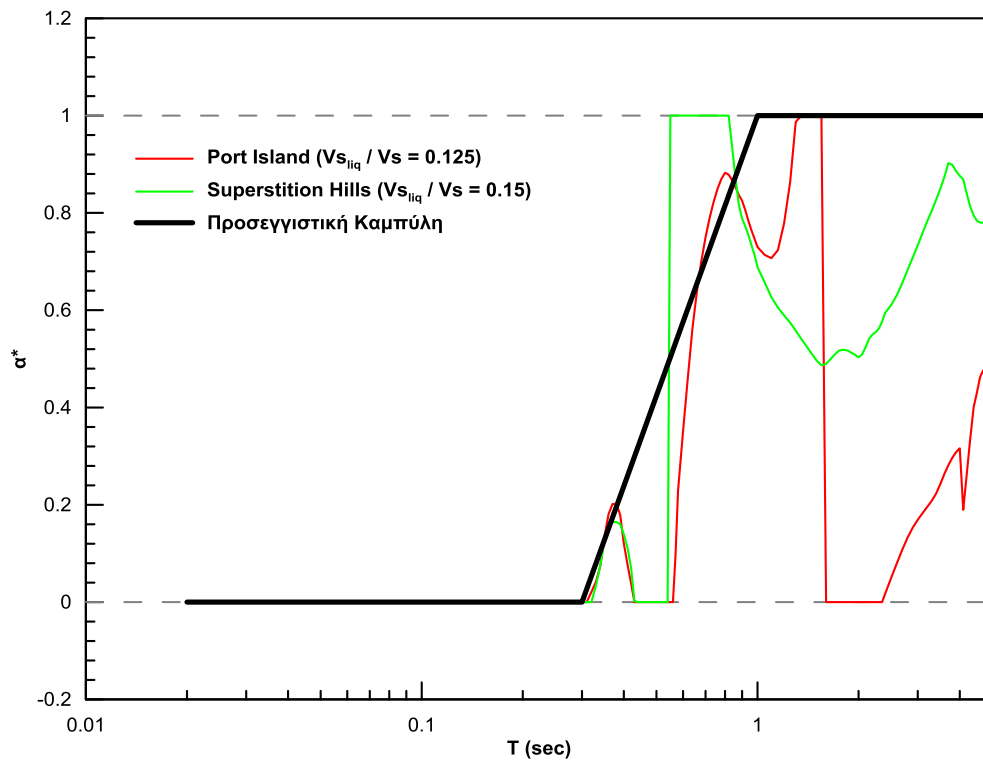


**Σχήμα 6.10 :** (α) Κανονικοποιημένο πραγματικό φάσμα και κανονικοποιημένα φάσματα από αναλύσεις για ρευστοποιημένο και μη έδαφος (β) αντίστοιχος συντελεστής  $\alpha^*$  του σεισμού Port Island

Με βάση τα ίδια κριτήρια για το συντελεστή συσχέτισης “α”, επιλέγονται οι ίδιοι λόγοι  $V_{s_{liq}} / V_s$  για τις αναλύσεις του ρευστοποιημένου στρώματος, δηλαδή για τον σεισμό Port Island επιλέγεται  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.125$ , ενώ για τον σεισμό Superstition Hills,  $V_{s_{liq}}/V_s = 0.15$ . Στο Σχήμα 6.11 φαίνονται οι συντελεστές “α\*” που προκύπτουν από την επιλεχθείσα ταχύτητα ρευστοποιημένου στρώματος για κάθε σεισμό.. Επειδή για  $T < 0.3$  sec, και για τις δύο διεγέρσεις ο συντελεστής συσχέτισης ισούται με  $\alpha^* = 0$ , και η τελική καμπύλη για αυτές τις ιδιοπεριόδους θα πάρει την ίδια τιμή. Στη περίπτωση του Superstition Hills, ο “α\*” παίρνει την τιμή  $\alpha^* = 1$  για  $T = 0.55$  sec, ενώ στο Port Island για  $T = 1.7$  sec. Έτσι ως, κατά προσέγγιση μέσος όρος των δύο ιδιοπεριόδων θεωρήθηκε η τιμή  $T = 1$  sec και για μεγαλύτερες περιόδους από αυτή, η τελική καμπύλη παίρνει την τιμή  $\alpha^* = 1$ . Στις ενδιάμεσες περιόδους η τιμή του συντελεστή αυξάνεται γραμμικά συναρτήσει του λογαρίθμου της περιόδου. Να σημειωθεί πως σε μεγάλες περιόδους η τιμή του συντελεστή μειώνεται, αλλά δεν λαμβάνεται υπ’ όψιν, καθώς το πραγματικό και τα υπολογισμένα φάσματα είναι κοντά μεταξύ τους, και επομένως δεν παίζει ιδιαίτερο ρόλο η τιμή των συντελεστών συσχέτισης.

Η τιμή του συντελεστή “α\*” για  $T = 0$  sec, δηλαδή για τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA), δεν μπορεί να υπολογιστεί καθώς και οι τρεις κανονικοποιημένες καμπύλες ταυτίζονται. Επομένως για αυτή την ιδιοπερίοδο θα γίνει χρήση του συντελεστή “ $\alpha_{PGA}$ ”, όπως αυτός υπολογίστηκε στην προηγούμενη ενότητα.





**Σχήμα 6.11 :** Διάγραμμα συντελεστή “α\*” για την επιλεγμένη ταχύτητα  $V_{s_{iiq}}$  κάθε σεισμικής διέγερσης και τελική προσεγγιστική καμπύλη

#### 6.4 Αξιολόγηση συντελεστών συσχέτισης $\alpha$ και $\alpha^*$

Προηγουμένως επιλέχτηκε η τελική μορφή της προσεγγιστικής καμπύλης των συντελεστών “α\*” και “α” και η καταλληλότερη ταχύτητα ρευστοποιημένου στρώματος για κάθε σεισμό. Με βάση αυτά τα στοιχεία και τα φάσματα που υπολογίστηκαν από τις αναλύσεις για ύπαρξη και απουσία ρευστοποίησης, θα υπολογιστεί το τελικό φάσμα για να εξεταστεί κατά πόσο προσεγγίζει το πραγματικό. Θα ακολουθηθεί διαφορετική μεθοδολογία για τον κάθε σεισμό.

Με χρήση του συντελεστή “α” αναδιατάσσοντας την Σχέση 3.14, το προβλεπόμενο φάσμα  $S_{a_{PRED}}$ , θα υπολογίζεται για κάθε τιμή της περιόδου ως εξής:

$$S_{a_{PRED}} = S_{a_{NL}} - \alpha \cdot (S_{a_{NL}} - S_{a_L}) \quad (6.2)$$

όπου  $\alpha$  η νέα τιμή από την προσεγγιστική καμπύλη (Σχήμα 6.6)

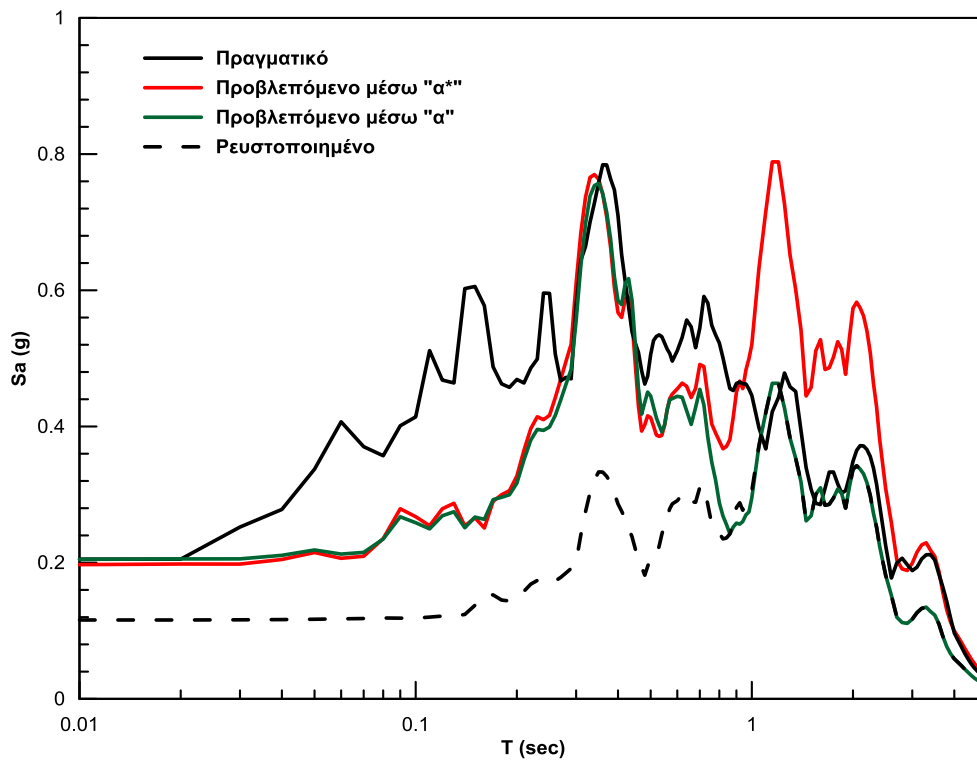
Αντίστοιχα για τον συντελεστή “α\*” χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη του πραγματικού φάσματος η σχέση :

$$\frac{S_{a_{PRED}}}{PGA_{PRED}} = \frac{S_{a_{NL}}}{PGA_{NL}} - \alpha^* \cdot \frac{S_{a_{NL}}}{PGA_{NL}} - \frac{S_{a_L}}{PGA_L} \quad (6.3)$$

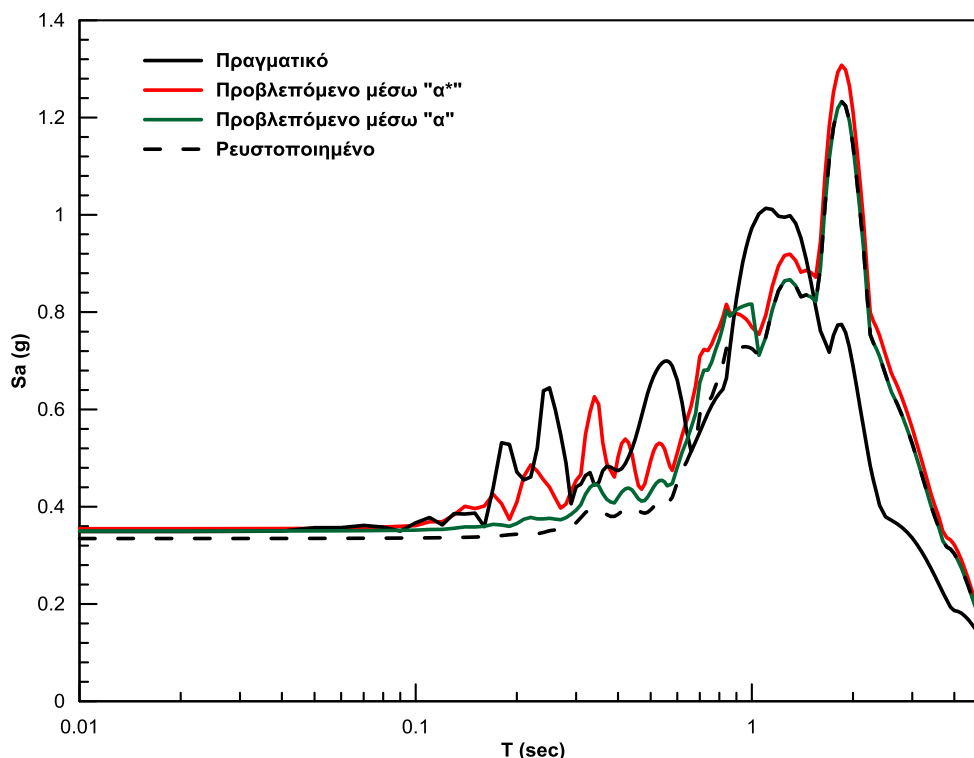
όπου  $\alpha^*$  η νέα τιμή από την προσεγγιστική καμπύλη (Σχήμα 6.11)

Η PGA υπολογίζεται με τη ίδια λογική όπως η Sa, χρησιμοποιώντας για την εκτίμηση του  $\alpha_{PGA}$  τη Σχέση 6.1 με  $A = 0.85$ :

$$PGA_{PRED} = PGA_{NL} - \alpha_{PGA} \cdot (PGA_{NL} - PGA_L) \quad (6.4)$$



**Σχήμα 6.12 :** Φάσματα απόκρισης πραγματικής καταγραφής και υπολογισμένα με τη χρήση των συντελεστών “α” και “α\*” για το σεισμό Superstition Hills



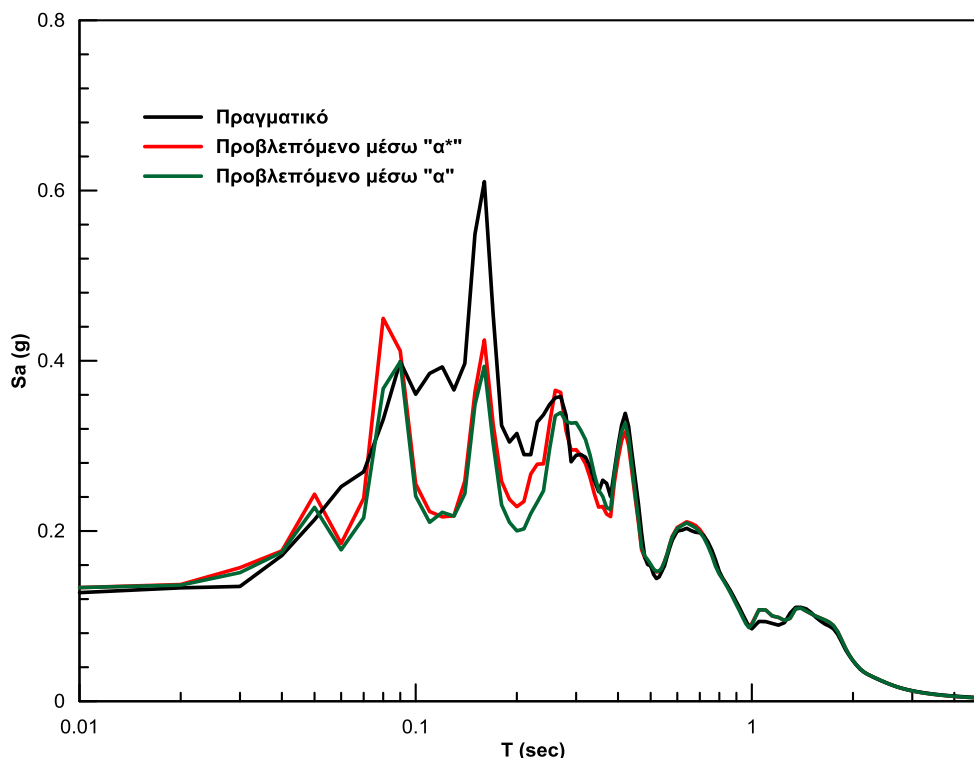
**Σχήμα 6.13 :** Φάσματα απόκρισης πραγματικής καταγραφής και υπολογισμένα με τη χρήση των συντελεστών “α” και “α\*” για τον σεισμό Port Island

Στον σεισμό Superstition Hills, παρατηρείται ότι με τις δύο μεθόδους υπολογισμού του πραγματικού φάσματος για  $T < 0.8$  sec, τα αποτελέσματα είναι ίδια. Για μεγαλύτερες περιόδους, το προβλεπόμενο φάσμα με χρήση του συντελεστή “α” δίνει καλύτερα αποτελέσματα καθώς για  $1.2\text{sec} < T < 2.8\text{sec}$  προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια το πραγματικό, σε αντίθεση με το φάσμα με τον συντελεστή “α\*” που το υπερεκτιμάει αρκετά. Βέβαια, το φάσμα με τη μέθοδο του συντελεστή “α\*” προβλέπει καλύτερα το πραγματικό για  $T > 2.8$  sec, αλλά οι διαφορές των δύο μεθόδων σε αυτές τις περιόδους είναι μικρή και οι συνήθεις κατασκευές βρίσκονται εκτός αυτού του εύρους ιδιοπεριόδων. Στον σεισμό Port Island, τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων είναι παραπλήσια, με το φάσμα της μεθοδολογίας με τον “α\*”, να δίνει σε όλο το εύρος των ιδιοπεριόδων ελαφρώς μεγαλύτερες φασματικές επιταχύνσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προσεγγίζεται καλύτερα με μικρή διαφορά η μέγιστη φασματική επιτάχυνση αλλά και να υπερεκτιμάται περισσότερο η επιτάχυνση για  $T > 1.8$  sec. Σε γενικές γραμμές, για αυτόν τον σεισμό οι δύο μεθοδολογίες κρίνονται ισοδύναμες.

Συνεπώς, καταλληλότερη μέθοδος για τον υπολογισμό του πραγματικού φάσματος του εδάφους που έχει ρευστοποιηθεί είναι με τη χρήση του συντελεστή “α” και τις προσεγγιστικές καμπύλες του Σχήματος 6.7, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε προηγουμένως.

Επειδή η μεθοδολογία που προτείνεται θα πρέπει να είναι κατάλληλη για όλες τις σεισμικές διεγέρσεις και όλα τα εδαφικά προφίλ, η κατηγοριοποίηση θα γίνει ανάλογα με τον εκάστοτε συντελεστή ασφαλείας  $FS_L$ . Υπενθυμίζεται, οι Miwa & Ikeda δεν προτείνουν τιμές του λόγου  $V_{s_{liq}} / V_s$  όταν  $FS_L > 1$  (όπως για τον σεισμό Elmore Ranch). Επομένως, για να είναι συμβατή η μεθοδολογία που προτείνεται και για αυτή την κατηγορία σεισμών, θα πρέπει να επιλεγούν τιμές του  $V_{s_{liq}} / V_s$ , που να συμβαδίζουν με την ισοδύναμη γραμμική ανάλυση χωρίς ρευστοποίηση. Για να επιτευχθεί αυτό, θα χρησιμοποιηθούν τιμές σταθερού λόγου ταχυτήτων που να συνάδουν με τη μειωμένη τιμή του G στο τέλος της ανάλυσης. Για τον σεισμό Elmore Ranch ( $FS_L = 1.5$ ) επιλέγεται τιμή  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.70$ , με βάση την οποία προκύπτει με την προτεινόμενη μεθοδολογία το προβλεπόμενο φάσμα το οποίο στο Σχήμα 6.14 συγκρίνεται με το πραγματικό. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως οι τιμές των προσεγγιστικών καμπυλών για  $T < 1 \text{ sec}$ , ισούνται με την τιμή του συντελεστή “ $\alpha_{PGA}$ ” για κάθε διεγερση.

Γενικεύοντας τα αποτελέσματα αυτά, με τις επιλεγμένες ταχύτητες  $V_{s_{liq}}$  και συντελεστών συσχέτισης για κάθε περίπτωση, θα δύναται να υπολογιστεί το φάσμα απόκρισης για σεισμικές διεγέρσεις με συντελεστή έναντι ρευστοποίησης μικρότερο της μονάδας και αρκετά μεγαλύτερό της. Όμως οι σεισμοί με  $FS_L = 1-1.2$  δεν εντάσσονται σε κάποια από τις παραπάνω περιπτώσεις, καθώς αφ’ ενός το έδαφος είναι μη ρευστοποιήσιμο, και αφ’ ετέρου οι διατμητικές παραμορφώσεις θα είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του Elmore Ranch και αντιστοίχως η μείωση του  $G/G_{max}$ . Επομένως, για αυτές τις περιπτώσεις θεωρείται κατά προσέγγιση καταλληλότερος ο λόγος  $V_{s_{liq}} / V_s = 0.35 - 0.65$ .



**Σχήμα 6.14 :** Φάσμα απόκρισης πραγματικής καταγραφής και υπολογισμένο με χρήση των συντελεστών “α” και “α\*” για τον σεισμό Elmore Ranch

## 6.5 Προτεινόμενη Μεθοδολογία

Συνοψίζοντας, η μεθοδολογία που προτείνεται για την πρόβλεψη του πραγματικού φάσματος ρευστοποιημένου εδάφους είναι η εξής :

- Υπολογισμός, από επί τόπου δοκιμές του (SPT ,CPT), του συντελεστή ασφάλειας έναντι ρευστοποίησης  $FS_L$  της εδαφικής περιοχής που εξετάζεται.
- Πραγματοποίηση ισοδύναμων γραμμικών αναλύσεων με κατάλληλο λογισμικό (π.χ. τύπου “SHAKE”) για έδαφος χωρίς ρευστοποίηση και προσδιορισμός της φασματικής επιτάχυνσης χωρίς ρευστοποίηση ( $Sa_{NL}$ )
- Επιλογή κατάλληλης ταχύτητας ρευστοποιημένου στρώματος από το Σχήμα 6.15, που εξαρτάται από τον συντελεστή  $FS_L$ .
- Πραγματοποίηση ισοδύναμων γραμμικών αναλύσεων για πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος με ταχύτητα ρευστοποιημένου στρώματος, ίση με αυτή που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα και τιμή  $G / G_{max} = 1$ . Από τις

αναλύσεις αυτές θα προκύψουν οι φασματικές επιταχύνσεις ( $S_{aL}$ ) για πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος.

- Εύρεση  $\alpha_{PGA}$  από Σχήμα 6.16 ή από τη Σχέση

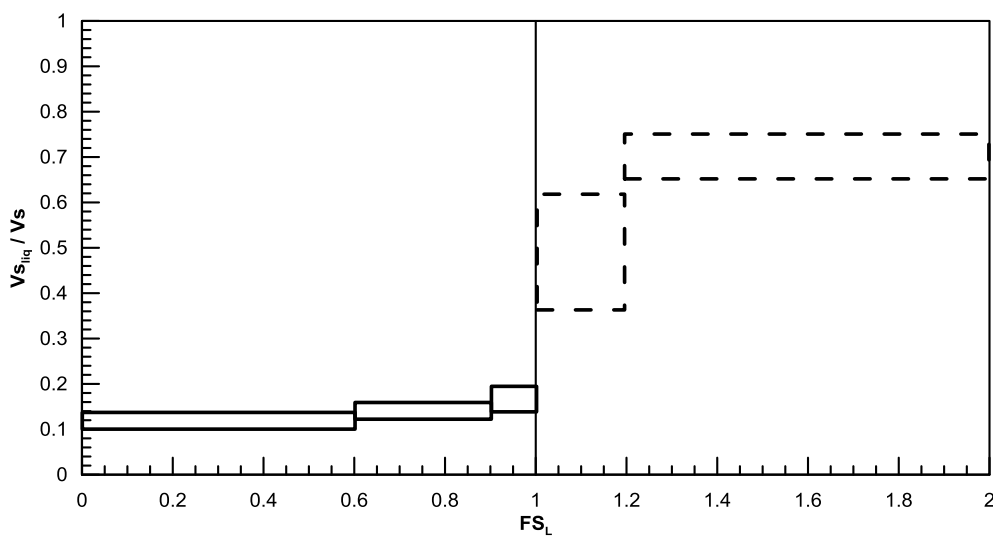
$$\alpha_{PGA} \approx \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \cos \frac{\pi F_{SL}}{2 \cdot 0.85} \right)$$

- Εύρεση της τιμής του “ $\alpha$ ” για κάθε ιδιοπερίοδο  $T$  από την ακόλουθη σχέση ή το Σχήμα 6.17:

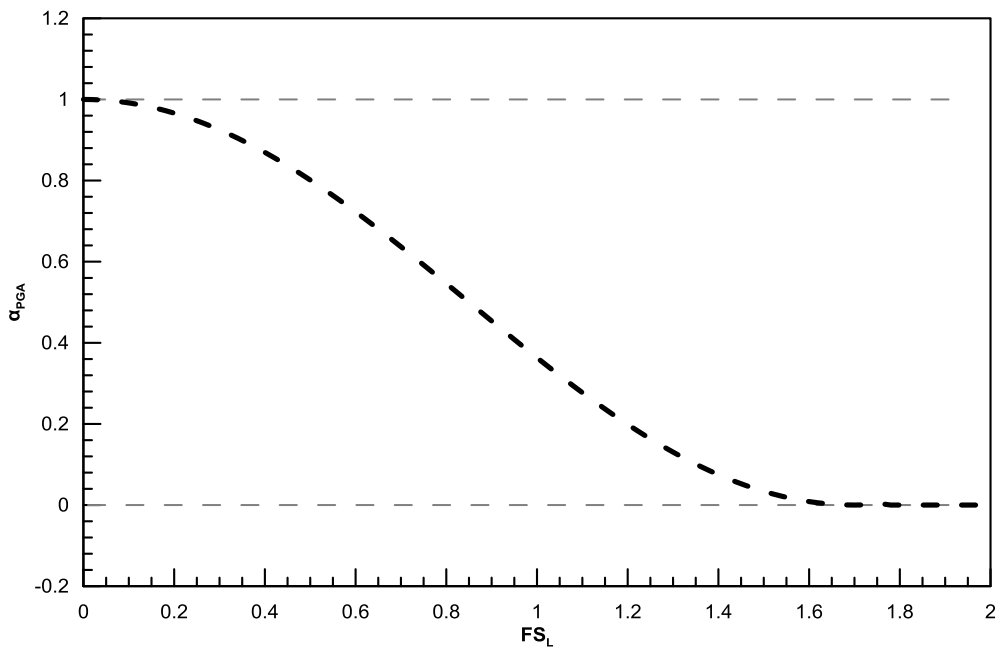
$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{PGA} \text{ για } T < 1 \text{ sec} \\ 1 \text{ για } T > 1 \text{ sec} \end{cases}$$

- Υπολογισμός της φασματικής επιτάχυνσης για κάθε ιδιοπερίοδο  $T$  από τη σχέση :

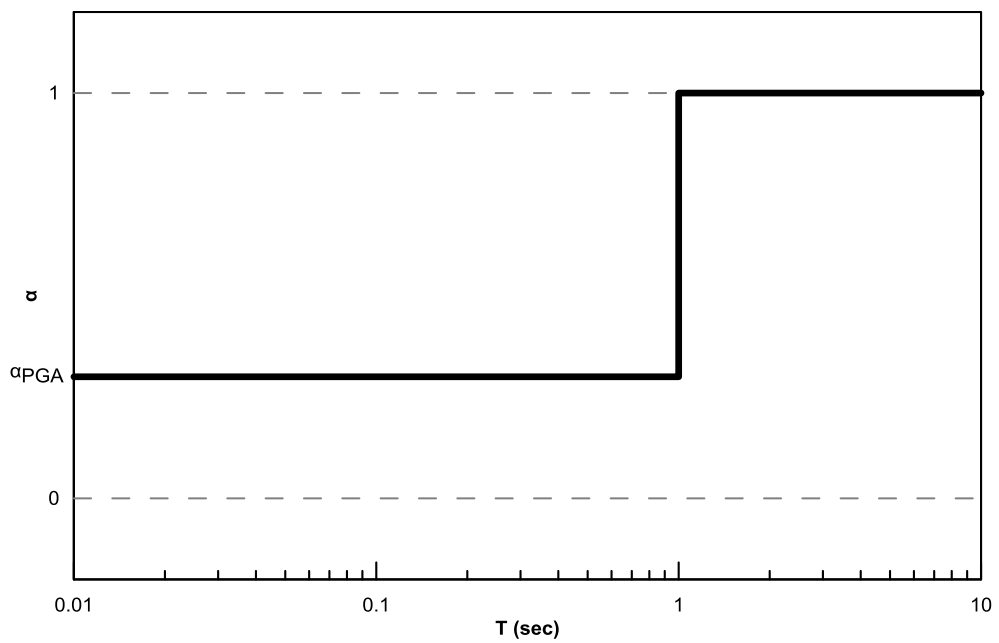
$$S_{a_{PRED}} = S_{a_{NL}} - \alpha \cdot (S_{a_{NL}} - S_{a_L})$$



**Σχήμα 6.15 :** Διάγραμμα κατάλληλης ταχύτητας ρευστοποιημένου στρώματος συναρτήσει του συντελεστή  $FS_L$



Σχήμα 6.16: Εύρεση  $\alpha_{PGA}$  συναρτήσει του συντελεστή ασφαλείας  $FS_L$



Σχήμα 6.17 : Τιμή του συντελεστή συσχέτισης “ $\alpha$ ” για κάθε ιδιοπερίοδο  $T$

## 6.6 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό προτάθηκαν προσεγγιστικές καμπύλες των συντελεστών συσχέτισης “α” και “α\*” που έχουν απλή μορφή και αντίστοιχες μεθοδολογίες με βάση τις οποίες προβλέπεται το πραγματικό φάσμα. Καταλληλότερη μέθοδος υπολογισμού της πραγματικής εδαφικής απόκρισης, κρίθηκε αυτή με χρήση του συντελεστή “α”, καθώς τα προβλεπόμενα φάσματα προσεγγίζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα πραγματικά. Η μεθοδολογία αυτή δεν προβλέπει βέβαια με απόλυτη ακρίβεια το πραγματικό φάσμα, αλλά προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα σε σύγκριση με την αντίστοιχη για τον συντελεστή “α”, καθώς και σε σχέση με την μέθοδο των Miwa & Ikeda (Σχήματα 6.12 & 6.13). Η διαφορά των μεθόδων είναι μεγαλύτερη στον σεισμό Superstition Hills, κατά τον οποίο καθυστέρησε η έναρξη της ρευστοποίησης. Επιπλέον, αξίζει να τονιστεί ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία διαφοροποιείται για το σύνολο των σεισμών, ανάλογα με τον συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης ( $FS_L$ ). Γενικά προέκυψε ότι την εισαγωγή του  $FS_L$  μπορεί να γίνει καλύτερη πρόβλεψη του πραγματικού φάσματος ρευστοποιημένου εδάφους, σε σύγκριση με τις προϋπάρχουσες μεθοδολογίες.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Τελικά Συμπεράσματα – Προτάσεις**

### **7.1 Τελικά Συμπεράσματα**

Σε αυτή τη διπλωματική αυτή εργασία, εξετάστηκε η επίδραση της ρευστοποίησης στη σεισμική απόκριση του εδάφους. Για να εξαχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα, έγινε αρχικά ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας και ακολούθως τέθηκαν ως αντικείμενο έρευνας τρία ιστορικά περιστατικά σε περιοχές που ρευστοποιήθηκαν και στις οποίες υπάρχουν καταγραφές στη βάση του ρευστοποιημένου στρώματος και στην επιφάνεια. Τα γενικά συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι τα εξής:

**α)** Η ρευστοποίηση προκαλεί έντονη χαλάρωση του εδαφικού σκελετού και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάζονται οι παλμοί που φτάνουν στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα άλλοι να ενισχύονται και άλλοι να απομειώνονται. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την γενικότερη άποψη ότι η ρευστοποίηση προκαλεί πάντα απομείωση της φασματικής επιτάχυνσης και επομένως είναι ευεργετική για τις κατασκευές.

**β)** Παρατηρείται αύξηση των φασματικών επιταχύνσεων σε σχέση με τις αντίστοιχες για απουσία ρευστοποίησης, για κατασκευές σχετικά μεγάλων ιδιοπεριόδων ( $T > 1$ ) όταν το έδαφος έχει συντελεστή ασφαλείας κοντά στη μονάδα και επομένως αργεί να ρευστοποιηθεί. Αντίθετα όταν το έδαφος ρευστοποιείται σχεδόν με την έναρξη της δόνησης, οι φασματικές επιταχύνσεις είναι απομειωμένες σε όλο σχεδόν το εύρος ιδιοπεριόδων. Ο βαθμός απομείωσης / ενίσχυσης της φασματικής επιτάχυνσης καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη στιγμή έναρξη της ρευστοποίησης. Όσο νωρίτερα ρευστοποιηθεί το έδαφος, τόσο ευνοϊκότερο είναι για τις κατασκευές, καθώς μεγαλύτερο ποσοστό των δυνατών παλμών φιλτράρονται από το αυτό και φτάνουν στην επιφάνεια απομειωμένοι.

**γ)** Η στιγμή έναρξης της ρευστοποίησης είναι συνάρτηση του συντελεστή ασφαλείας έναντι ρευστοποίησης  $FS_L$ . Όταν ο συντελεστής είναι μικρός η ρευστοποίηση πραγματοποιείται γρήγορα, ενώ για μεγαλύτερους συντελεστές ασφαλείας η ρευστοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί ακόμα και προς το τέλος της διέγερσης

**δ)** Η υπάρχουσα μεθοδολογία πρόβλεψης του φάσματος ρευστοποιημένου εδάφους με ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις των Miwa & Ikeda (2006) δεν είναι ιδιαίτερα αντιπροσωπευτική της πραγματικότητας καθώς θεωρούν ότι η έναρξη της ρευστοποίησης ταυτίζεται με την έναρξη της διέγερσης. Ως εκ τούτου δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η επίδραση της δόνησης πριν την ρευστοποίηση

**ε)** Η προτεινόμενη μείωση από τους Miwa & Ikeda του λόγου του μέτρου διάτμησης  $G / G_{max}$  και ακολούθως και της ταχύτητας διατμητικού κύματος ρευστοποιημένου στρώματος  $V_{s_{liq}}$ , είναι αντιπροσωπευτική της πραγματικότητας.

**στ)** Στις μεγάλες ιδιοπεριόδους το πραγματικό φάσμα βρίσκεται πιο κοντά στο αντίστοιχο για ρευστοποιημένο έδαφος, ανεξαρτήτως στιγμής έναρξης της ρευστοποίησης, ενώ για μικρές ιδιοπεριόδους η σύγκριση του πραγματικού φάσματος με το υπολογισμένο από γραμμικές αναλύσεις εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον συντελεστή  $FS_L$ . Όσο μειώνεται ο  $FS_L$ , τόσο το φάσμα του πλήρως ρευστοποιημένου εδάφους προσεγγίζει το πραγματικό και ως εκ τούτου μειώνεται η επίδραση ακόμα και σε μικρές ιδιοπεριόδους.

Στη συνέχεια προτάθηκε κατάλληλη μεθοδολογία πρόβλεψης του πραγματικού φάσματος με χρήση κατάλληλων συντελεστών (" $\alpha$ " και " $\alpha^*$ "). Για τη μεθοδολογία αυτή προέκυψαν τα εξής επιπλέον συμπεράσματα:

**ζ)** Οι συντελεστές συσχέτισης των φασμάτων για πλήρως και για μη ρευστοποιημένο έδαφος, παίρνουν την τιμή μηδέν όταν ο  $FS_L$  είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα. Αντίθετα για πολύ μικτή τιμή του  $FS_L$  οι συντελεστές παίρνουν την τιμή "ένα". Συνεπώς η μέγιστη κ η ελάχιστη τιμή των συντελεστών είναι το μηδέν και η μονάδα.

**η)** Το προβλεπόμενο φάσμα με χρήση του συντελεστή " $\alpha$ " προσεγγίζει το πραγματικό καλύτερα, από το αντίστοιχο με χρήση του συντελεστή " $\alpha^*$ ".

**θ)** Με την προτεινόμενη μεθοδολογία απαιτείται η γνώση μόνο του συντελεστή ασφαλείας  $FS_L$  για τον υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης και ακολούθως του πραγματικού φάσματος. Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι για  $T < 1$  sec, η τιμή

του “α” μειώνεται όσο αυξάνει ο  $FS_L$ , ενώ είναι ανεξάρτητη για μεγαλύτερες περιόδους.

Τέλος, σε σχέση με τα ερωτήματα που ετέθησαν στην εισαγωγή (i), (ii) και (iii) συμπεραίνονται τα ακόλουθα:

*i) Η ρευστοποίηση του εδάφους προκαλεί πάντοτε απομείωση της σεισμικής δόνησης στην επιφάνεια, όπως είναι ευρύτερα αποδεκτό, ή μπορεί να προκαλέσει και ενίσχυση;*

Στη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση φαίνεται να μην υπάρχει ενίσχυση, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις για μεγάλες περιόδους η φασματική επιτάχυνση αυξάνεται λόγω της ρευστοποίησης.

*ii) Υπάρχουν πειστήρια από πραγματικές καταγραφές υπέρ της μιας ή της άλλης από τις παραπάνω εκδοχές;*

Στην περιοχή Wildlife Liquefaction Array (σεισμός Superstition Hills, 1987), όπου άργησαν να εμφανιστούν υπερπιέσεις πόρων, παρατηρήθηκε αύξηση της φασματικής επιτάχυνσης για μεγάλες περιόδους. Αντίθετα, στην περιοχή Port Island (σεισμός Kobe, 1995) όπου το έδαφος ρευστοποιήθηκε σχεδόν με την έναρξη της δόνησης, οι φασματικές επιταχύνσεις μειώθηκαν σε μεγάλο βαθμό για τη συντριπτική πλειοψηφία των ιδιοπεριόδων.

*iii) Είναι δυνατόν να γίνει εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης ρευστοποιήσιμου εδάφους με τις αναλυτικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για συμβατικά εδάφη (π.χ. με ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις);*

Σε αυτή τη διπλωματική προτείνεται μία απλοποιημένη μεθοδολογία εκτίμησης των φασμάτων ρευστοποιημένου εδάφους με ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις και συνδυάζοντας το φάσμα για μη ρευστοποιημένο έδαφος και για πλήρως εξ'αρχής ρευστοποιημένο. Με δεδομένο ότι η μεθοδολογία αυτή στηρίζεται σε μικρό αριθμό καταγραφών, απαιτείται περισσότερη διερεύνηση για την πληρέστερη εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης με αναλυτικές μεθόδους.

## 7.2 Προτάσεις Για Μελλοντική Έρευνα

Η προτεινόμενη μεθοδολογία στηρίχτηκε σε τρία ιστορικά περιστατικά, καθώς είναι τα μόνα με καταγραφές τόσο στη βάση του ρευστοποιημένου στρώματος όσο και στην κορυφή. Ως εκ τούτου στηρίζεται σε αρκετές απλοποιήσεις και παραδοχές, παρά το γεγονός ότι δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τις υπάρχουσες μεθοδολογίες. Επομένως τα αποτελέσματα των αναλύσεων, της παρούσας διπλωματικής, θα πρέπει να εμπλουτιστούν και να γίνει μία πιο λεπτομερής εκτίμηση των συντελεστών συσχέτισης. Γι αυτό το λόγο κρίνεται απαραίτητο:

- i. Να χρησιμοποιηθούν συμπληρωματικά με τα ιστορικά περιστατικά, αποτελέσματα πειραμάτων φυγοκεντριστή ελεύθερου πεδίου σε ρευστοποιημένο έδαφος και να προστεθούν στα ήδη υπάρχοντα δεδομένα.
- ii. Με δεδομένο ότι τα πειραματικά αποτελέσματα είναι περιορισμένα, να γίνει εκτεταμένη παραμετρική διερεύνηση σε προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων ή διαφορών (π.χ. FLAC) με χρήση εξελεγμένων καταστατικών προσομοιωμάτων που να μπορούν να προβλέψουν με μεγάλη ακρίβεια την απόκριση του ρευστοποιημένου εδάφους, όπως είναι το NTUA – Sand (Andrianopoulos et al. 2010, Karamitros 2010). Με τον τρόπο αυτό θα γίνει πιο λεπτομερής μελέτη του φαινομένου και θα εξεταστούν και άλλες παράμετροι που πιθανώς επηρεάζουν το τελικό φάσμα, όπως για παράδειγμα το πάχος του ρευστοποιήσιμου στρώματος, η απόστασή του από την επιφάνεια.
- iii. Να χρησιμοποιηθούν στις ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις για πλήρως ρευστοποιημένο έδαφος πιο ρεαλιστικές καμπύλες  $G / G_{max} - \log \gamma$  και  $\xi - \log \gamma$  που να λαμβάνουν υπ' όψιν τη διαστολική συμπεριφορά του ρευστοποιημένου εδάφους σε μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Bennett M., McLaughlin P., Sarmiento J., Youd L., (1984), "**Geotechnical investigation of liquefaction sites, Imperial Valley, California**", U. S. Geological survey, Open-File Report 84-252

Bouckovalas G. (2006), "**Geotechnical Earthquake Engineering**", NTUA

Bouckovalas G., Dakoulas P., (2007) "**Liquefaction Performance of Shallow Foundations in Presense of a soil crust**", 4<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece.

Bouckovalas G., Papadimitriou A. (2007), "**Earthquake-induced liquefaction: new evidence and prospects**", Proceedings, 5th Hellenic Conference on Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, May 2006, Xanthi,

Bouckovalas G., Papadimitriou A., Andrianopoulos K., Valsamis A., Karamitros D. (2011), "**Numerical modeling of liquefaction and related ground and foundation performance**", Keynote Lecture, MERCEA '08, May 2008, Reggio-Calabria, Italy

Elgamal A., Zeghal M., Parra E., (1996) "**Liquefaction of reclaimed island in Kobe, Japan**", Journal of Geotechnical Engineering, (122) pp 39– 49

Ishihara K., (1995), "**Effects of at-depth liquefaction on embedded foundations during earthquakes**", Proceedings of the 11<sup>th</sup> Asian Regional Conference on Soil Mechanism and Foundation Engineering

Iwasaki Y., Tai M., (1996), "**Strong ground motion records at Kobe Port Island**" Soils and Foundation, Special Issues pp. 29-40

Karamitros D.K., Bouckovalas G.D. & Chaloulos Y.K. (2013): "**Insight into the Seismic Liquefaction Performance of Shallow Foundations**", ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 139(4), pp. 599-607.

Karamitros D.K., Bouckovalas G.D., Chaloulos Y.K. & Andrianopoulos K.I. (2013): "**Numerical analysis of liquefaction-induced bearing capacity degradation of shallow foundations on a two-layered soil profile**", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 44, pp. 99-101.

Karamitros D.K., Bouckovalas G.D. & Chaloulos Y.K. (2013): **“Seismic settlements of shallow foundations on liquefiable soil with a clay crust”**, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 46, pp. 64-76.

Kramer S. (1996), **“Geotechnical Earthquake Engineering”**, Prentice Hall

Miwa S. and Ikeda T. (2006), **“Shear modulus and strain of liquefied ground and their application to evaluation of the response spectra of foundation structures”**, Structural Eng. / Earthquake Eng. JSCE, 23 (1), pp 167–179

Miwa S., Ikeda T. and Oh-Oka H., (2000), **“A study on seismic behavior of liquefied ground using strongmotion array records of the 1995 Hyogoken – Nambu Earthquake”** , 12 WCEE, 1325

Naesgaard E., Byrne M., Ven Huizen G., (1998), **“Behaviour of light structures founded on soil ‘crust’ over liquefied ground”**, Geotechnical Special Publication (75 I), pp.422–433

Seed B., Idriss M., (1971), **Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential”**, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 97 (SM9), pp. 1249-1273

Youd L. and Carter B. (2005), **“Influence of soil softening and liquefaction on spectral acceleration”**, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131 (7), pp 811–825

Youd L. and Carter B., (2003), **“Influence of soil softening and liquefaction on response spectra for bridge design”** Report No. UT-03.07

Youd L., Steidl J., Nigbor R. (2004), **“Lessons learned and need for instrumented liquefaction sites”**, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24, pp 639 – 646

Youd L., Idriss M., Andrus D., Arrango I., Castro G., Christian T., Dobry R., Liam Finn D., Harder F. Jr, Hynes E., Ishihara K., Koester P., Liao C., Marcuson F., Martin R., Mitchell K., Moriwaski Y., Power S., Robertson K., Seed B., Stokoe 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) pp. 817-833

Zeghal M. and Elgamal A., (1994), “**Analysis of site liquefaction using earthquake records**”, Journal of Geotechnical Engineering, (120) pp 996–1017