



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

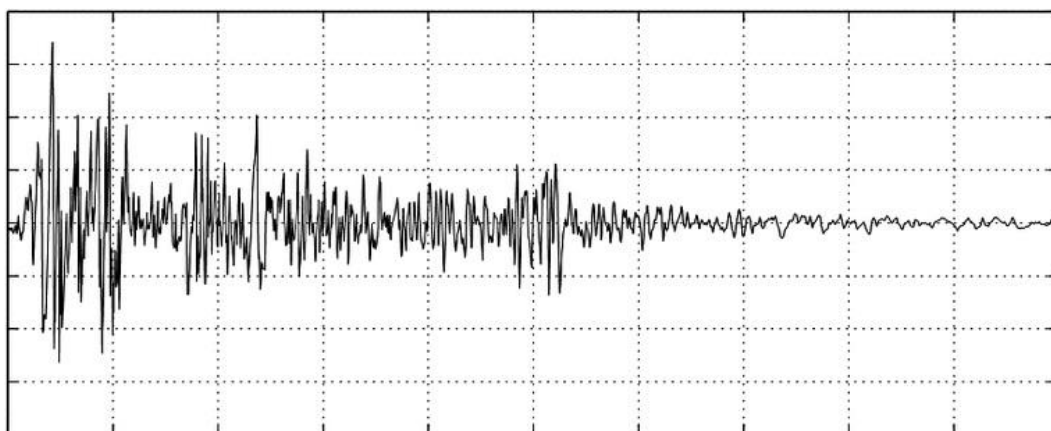
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ



ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΕ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΑ
ΚΤΙΡΙΑ ΚΑΙ ΑΣΤΙΚΑ ΣΥΝΟΛΑ
ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ | ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΗ | ΧΩΡΙΚΕΣ ΑΝΑΠΛΑΣΕΙΣ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥΠΟΛΗ ΣΕΡΡΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



**“ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΜΕ
ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ - ΑΝΑΠΤΥΞΗ WEB
ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ”**

ΑΡΓΥΡΙΟΣ ΛΑΜΠΡΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΣΤΑΥΡΟΣ ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ

ΣΕΡΡΕΣ | ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2022

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίας στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

*Πρέπει να `σαι πάντα μεθυσμένος.
Εκεί είναι όλη η ιστορία, είναι το μοναδικό πρόβλημα.*

*Αλλά με τι;
Με κρασί, με ποίηση ή με αρετή, όπως σας αρέσει.*

Αλλά μεθύστε.

(Διάφανα Κρίνα, από ποίημα του Charles Baudelaire)

Πρόλογος

Η παρούσα μελέτη αποτελεί διπλωματική εργασία για το Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΠΜΣ) με τίτλο "Επεμβάσεις σε υφιστάμενα κτίρια και αστικά σύνολα: Ενισχύσεις, επανάχρηση και χωρικές αναπλάσεις" του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος. Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν για το άρτιο του αποτελέσματος της παρούσας εργασίας.

Αρχικά, τον επιβλέποντα καθηγητή, κ. Παπαϊωάννου Σταύρο, για την επίβλεψη και καθοδήγησή του από την αρχή έως το τέλος της εργασίας, όπως και για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχολήθω με το αντικείμενο της εργασίας, το οποίο όσο εξελισσόταν τόσο μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσίαζε.

Ειδική μνεία θα ήθελα να κάνω στον λέκτορα Εφαρμογών του Δι.ΠΑ.Ε, κ. Παναγόπουλο Γεώργιο, για τις αναρίθμητες ώρες ασχολίας του, την διαθεσιμότητα του και την στοχευμένη επιστημονική του καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια της εργασίας. Συνέβαλε τα μέγιστα και κάτι παραπάνω, για την επιτυχή ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

Για το τέλος το προφανές. Την ευρύτερη οικογένεια μου, την πρώτη κατά χρονολογική σειρά - τους γονείς μου Δημήτρη και Χρυσούλα και τον αδερφό μου Βασίλη - και την δεύτερη χρονολογικά - την γυναίκα μου Γιοβάννα και τα αγόρια μου Δημήτρη και Στέλιο. Όλοι με τον τρόπο τους (και δεδομένα με την υπομονή τους) κατέστησαν δυνατή την ολοκλήρωση της φοίτησης μου στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών.

Περίληψη

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματεύεται την εδαφική απόκριση υπό σεισμική διεγέρση, διαφορετικού τύπου και ιδιοτήτων επιφανειακών εδαφών και υπεδάφους, μέσω της μεταφοράς της σεισμικής κίνησης με την μορφή σεισμικών κυμάτων. Η παραμετροποίηση πραγματοποιείται με την βοήθεια ανοιχτού λογισμικού και την χρήση ανοιχτής βιβλιοθήκης κωδικοποιημένης με την γλώσσα προγραμματισμού Python.

Γίνεται συνοπτική παρουσίαση βασικών ορισμών της Εδαφοδυναμικής και ακολουθεί θεωρητική επισκόπηση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν επάνω στο ζήτημα της ισχυρής εδαφικής κίνησης. Συγχρόνως περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται μέσα από την μεθοδολογία ενός συγκεκριμένου μοντέλου, του μονοδιάστατου μοντέλου (1D) της γραμμικής ελαστικής και της ισοδύναμης προς γραμμική ανάλυσης για την εκτίμηση της σεισμικής κίνησης στην επιφάνεια του εδάφους.

Γίνεται αναφορά και καταδεικνύεται η σημασία της δυναμικής συμπεριφοράς των εδαφών μέσα από τις καμπύλες κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης και απόσβεσης σχετιζόμενα με την διατμητική παραμόρφωση. Ειδική μνεία γίνεται σε τρία συγκεκριμένα μοντέλα καμπυλών αναφοράς, το μοντέλο καμπυλών των Vucetic & Dobry (1991), το μοντέλο καμπυλών του Darendeli (2001) και το μοντέλο του Kishida (2012).

Αναπτύσσονται βασικές έννοιες της γλώσσας προγραμματισμού Python και καθορίζονται οι απαιτούμενες παράμετροι για τον υπολογισμό των αναλύσεων μέσα από διαφορετικά σενάρια αντιμετώπισης του προβλήματος της εδαφικής απόκρισης. Επίσης παρουσιάζονται τα εξαγόμενα αποτελέσματα μέσα από την προσομοίωση του λογισμικού και την βιβλιοθήκη ανοιχτού κώδικα.

Τέλος, αναπτύσσεται μία εύχρηστη web εφαρμογή που ενσωματώνει όλα τα απαραίτητα για τον υπολογισμό του μονοδιάστατου μοντέλου μέσα από την γραμμική ελαστική και την ισοδύναμη γραμμική ανάλυση. Τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων παρουσιάζονται σε ένα γραφικό περιβάλλον (Graphical User Interface) με την χρήση εικονιδίων, μενού πλαισίων ορισμού και γραφημάτων.

Λέξεις Κλειδιά:

Εδαφική απόκριση, τοπικές εδαφικές συνθήκες, μονοδιάστατο μοντέλο, γραμμική ελαστική ανάλυση, ισοδύναμη γραμμική ανάλυση, καμπύλες G-γ-D, web εφαρμογή

Summary

This postgraduate thesis deals with the soil response under seismic excitation, of different types and properties of surface soils and subsoil, through the transfer of seismic movement in the form of seismic waves. The parameterization is carried out with the help of open software and the use of an open library coded with the Python programming language.

A brief presentation of basic definitions of Soil Dynamics is made, followed by a theoretical overview of the models developed on the issue of strong ground motion. At the same time, the procedure followed through the methodology of a specific type of analysis, the one-dimensional model (1D) of linear elastic analysis and equivalent to linear analysis for the estimation of the seismic movement on the ground surface is described.

The importance of the dynamic behavior of soils through normalized shear modulus and damping curves related to shear strain is reported and demonstrated. Special mention is made for three specific reference curves models, the curves model by Vucetic and Dobry (1991), the curves model by Darendeli (2001) and the curves model by Kishida (2012).

Basic concepts of the Python programming language are developed and the required parameters are defined to calculate the analyzes through different scenarios to deal with the ground response problem. Also presented are the results extracted through the simulation software and the open source library.

Finally, an easy-to-use web application is developed, that integrates everything necessary for the calculation of the one-dimensional model through elastic linear and equivalent linear analysis. The results of these analyses are presented in a graphical environment (Graphical User Interface) using icons, definition box menus and graphs.

Keywords:

Site response, site effects, one-dimensional model, linear elastic analysis, equivalent linear analysis, G- γ -D curves, web application

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος.....	5
Περίληψη	6
Summary	7
Πίνακας Περιεχομένων	8
Κατάλογος Εικόνων.....	11
Κατάλογος Πινάκων	15
Κεφάλαιο 1	
Εισαγωγή.....	16
Κεφάλαιο 2	
Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	18
2.1 Γενικοί ορισμοί Εδαφοδυναμικής.....	18
2.2 Σεισμική απόκριση εδαφικών σχηματισμών	21
2.3 Ισχυρή Εδαφική κίνηση.....	22
2.3.1 Βασικές έννοιες.....	22
2.3.2 Σχέσεις εκτίμησης εδαφικής κίνησης.....	25
2.3.3 Τοπικές εδαφικές συνθήκες.....	27
2.4 Αντισεισμικοί Κανονισμοί Ελλάδας και κατηγορίες εδαφών	28
2.4.1 ΕΑΚ 2000.....	28
2.4.2 Ευρωκώδικας 8.....	29
Κεφάλαιο 3	
Επιρροή τοπικών εδαφικών συνθηκών	31
3.1 Μέθοδοι εκτίμησης επιρροής τοπικών εδαφικών συνθηκών.....	31
3.1.1 Εμπειρικές -Πειραματικές μέθοδοι	31
3.1.2 Εμπειρικές μέθοδοι	32
3.1.3 Ημι-εμπειρικές μέθοδοι.....	33
3.1.4 Υβριδικές μέθοδοι.....	33
3.2 Θεωρητικές Μέθοδοι.....	33
3.2.1 Μονοδιάστατη (1D) ισοδύναμη προς γραμμική ανάλυση εδαφικής απόκρισης.....	33

3.2.2	Δυναμική συμπεριφορά εδαφών.....	36
3.2.3	Το μοντέλο καμπυλών των Vucetic και Dobry (1991).....	39
3.2.4	Το προγνωστικό μοντέλο του Darendeli (2001).....	40
3.2.5	Το προγνωστικό μοντέλο του Kishida (2012).....	43
3.2.6	Διδιάστατη (2D) - Τρισδιάστατη (3D) ανάλυση εδαφικής απόκρισης.....	44

Κεφάλαιο 4

	Εργαλεία εκτίμησης εδαφικής κίνησης	45
4.1	Επισκόπηση ιστορικής εξέλιξης υφιστάμενου λογισμικού	45
4.2	Περιγραφή παραδειγμάτων εφαρμογής με χρήση διαθέσιμου λογισμικού	48
4.3	Παράμετροι υπολογισμού γραμμικής ελαστικής ανάλυσης	50
4.3.1	Συγκριτικά αποτελέσματα γραμμικής ελαστικής ανάλυσης (Deepsoil-Strata)	51
4.4	Παράμετροι υπολογισμού ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης με το μοντέλο Darendeli (2001).....	53
4.4.1	Ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Deepsoil) με το μοντέλο Darendeli (2001)	54
4.4.2	Ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Strata) με το μοντέλο Darendeli (2001).....	56
4.4.3	Συγκριτικά αποτελέσματα ανάλυσης (Deepsoil-Strata) με το μοντέλο Darendeli (2001).....	57
4.5	Παράμετροι υπολογισμού ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης με το μοντέλο Vucetic & Dobry (1991)	59
4.5.1	Ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Deepsoil) με το μοντέλο Vucetic & Dobry (1991)....	60
4.5.2	Ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Strata) με το μοντέλο Vucetic & Dobry (1991).....	61
4.5.3	Συγκριτικά αποτελέσματα ανάλυσης (Deepsoil-Strata) με το μοντέλο Vucetic & Dobry (1991).....	62
4.6	Συγκριτικά αποτελέσματα ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης (Deepsoil-Strata) με τα μοντέλα Darendeli (2001) και Vucetic & Dobry (1991)	64

Κεφάλαιο 5

	Βιβλιοθήκη pystrata.....	66
5.1	Η γλώσσα προγραμματισμού Python	66
5.2	Jupyter Notebooks	66
5.3	Η βιβλιοθήκη pystrata.....	67
5.4	Γραμμική ελαστική ανάλυση (pystrata)	70
5.5	Ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (pystrata) για το μοντέλο Kishida (2012)	70
5.6	Ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (pystrata) για το μοντέλο Darendeli (2001)	71

5.7 Συγκριτικά αποτελέσματα γραμμικής ελαστικής ανάλυσης (Deepsoil-Strata-pystrata).....	74
5.8 Συγκριτικά αποτελέσματα ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης με το μοντέλο Darendeli (Deepsoil-Strata-pystrata).....	76
5.9 Συγκριτικά αποτελέσματα γραμμικής ελαστικής ανάλυσης - ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης με το μοντέλο Darendeli (Deepsoil-Strata-pystrata)	78
5.10 Συγκριτικά αποτελέσματα ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης (Darendeli, 2001 - Kishida, 2012)	80
Κεφάλαιο 6	
Ανάπτυξη web εφαρμογής.....	82
6.1 Δημιουργία web εφαρμογής.....	82
6.2 Διαθεσιμότητα web εφαρμογής LamPa.....	88
Κεφάλαιο 7	
Συμπεράσματα.....	89
7.1 Συμπεράσματα αναλύσεων	89
Παράρτημα Α	
Συντελεστής K_0	96
A.1 Διερεύνηση τιμών συντελεστή K_0	96
Παράρτημα Β	
Jupyter notebooks.....	99
B.1 Παράδειγμα ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης μονοδιάστατου μοντέλου (Darendeli, 2001) με την βιβλιοθήκη pystrata	100
B.2 Παράδειγμα γραμμικής ελαστικής ανάλυσης μονοδιάστατου μοντέλου με την βιβλιοθήκη pystrata	105
B.3 Παράδειγμα ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης μονοδιάστατου μοντέλου (Kishida, 2012) με την βιβλιοθήκη pystrata	110

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1. Σεισμικά κύματα χώρου	19
Εικόνα 2.2. Σεισμικά Κύματα Rayleigh, Love	20
Εικόνα 2.3. Άφιξη σεισμικών κυμάτων σε σχέση με τον χρόνο.....	20
Εικόνα 2.4. Κανονικό και Ανάστροφο ρήγμα.....	23
Εικόνα 2.5. Οριζόντιας μεταθέσης ρήγματα.....	23
Εικόνα 3.1. Σχηματική αποτύπωση μονοδιάστατης ανάλυσης εδαφικής στήλης	34
Εικόνα 3.2. Μεταβλητές ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης	34
Εικόνα 3.3. Μη γραμμική σχέση διατμητικών τάσεων, παραμορφώσεων-Μετρο διάτμησης, λόγος απόσβεσης σε έναν πλήρη κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης (Darendeli, 2001).....	37
Εικόνα 3.4. Καμπύλες G/G_{max} , $D\%$ με διατμητική παραμόρφωση (Idriss, 1990)	38
Εικόνα 3.5. Καμπύλες G/G_{max} , $D\%$ με διατμητική παραμόρφωση (Seed et al., 1986)	38
Εικόνα 3.6. Καμπύλες G/G_{max} , $D\%$ με διατμητική παραμόρφωση (Vucetic & Dobry, 1991).....	39
Εικόνα 3.7. Καμπύλες G/G_{max} , $D\%$ με διατμητική παραμόρφωση (Darendeli, 2001)	42
Εικόνα 3.8. Συγκριτικές καμπύλες G/G_{max} , $D\%$ με διατμητική παραμόρφωση (Darendeli, 2001 - Vucetic & Dobry, 1991)	42
Εικόνα 3.9. Συγκριτικές καμπύλες G/G_{max} , $D\%$ με διατμητική παραμόρφωση (Darendeli, 2001 - Seed et al., 1986)	42
Εικόνα 3.10. Μεταβολή καμπυλών G/G_{max} , $D\%$ με την διατμητική παραμόρφωση (Kishida, 2012)	43
Εικόνα 4.1. Εξώφυλλο εγχειριδίου χρήσης προγράμματος SHAKE (1972).....	46
Εικόνα 4.2. Εξώφυλλο εγχειριδίου χρήσης προγράμματος SHAKE 2000	46
Εικόνα 4.3. Λογότυπο λογισμικού Deepsoil V7.0	47
Εικόνα 4.4. Πληροφορίες λογισμικού Strata	48
Εικόνα 4.5. Επιταχυνσιογράφημα Chi-Chi (1999).....	49
Εικόνα 4.6. Επιταχυνσιογράφημα Kocaeli (1999).....	49
Εικόνα 4.7. Επιταχυνσιογράφημα Athens (1999).....	50

Εικόνα 4.8. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων Chi Chi (1999) γραμμικής ελαστικής ανάλυσης - Deepsoil, Strata	51
Εικόνα 4.9. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων Kocaeli (1999) γραμμικής ελαστικής ανάλυσης - Deepsoil, Strata	52
Εικόνα 4.10. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων Athens (1999) γραμμικής ελαστικής ανάλυσης - Deepsoil, Strata	52
Εικόνα 4.11. Διαστρωμάτωση Deepsoil.....	55
Εικόνα 4.12. Καμπύλες αναφοράς Darendeli - Deepsoil	55
Εικόνα 4.13. Φάσμα επιταχύνσεων Chi-Chi (λογαριθμική μορφή, γραμμική μορφή) - Darendeli (2001), Deepsoil	56
Εικόνα 4.14. Διαστρωμάτωση, καμπύλες αναφοράς Darendeli - Strata	57
Εικόνα 4.15. Φάσμα επιταχύνσεων Chi-Chi (λογαριθμική μορφή, γραμμική μορφή) - Darendeli (2001), Strata	57
Εικόνα 4.16. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων Chi Chi (1999) με το μοντέλο του Darendeli (2001) - Deepsoil, Strata	58
Εικόνα 4.17. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων Kocaeli (1999) με το μοντέλο του Darendeli (2001) - Deepsoil, Strata.....	58
Εικόνα 4.18. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων Athens (1999) με το μοντέλο του Darendeli (2001) - Deepsoil, Strata.....	59
Εικόνα 4.19. Καμπύλες αναφοράς Vucetic & Dobry - Deepsoil.....	60
Εικόνα 4.20. Φάσμα επιταχύνσεων Chi-Chi (λογαριθμική μορφή, γραμμική μορφή) - Vucetic & Dobry (1991), Deepsoil.....	61
Εικόνα 4.21. Διαστρωμάτωση, καμπύλες αναφοράς Vucetic & Dobry - Strata	61
Εικόνα 4.22. Φάσμα επιταχύνσεων Chi-Chi (λογαριθμική μορφή, γραμμική μορφή) - Vucetic & Dobry (1991), Strata	62
Εικόνα 4.23. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων Chi Chi (1999) με το μοντέλο των Vucetic & Dobry (1991) - Deepsoil, Strata	62
Εικόνα 4.24. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων Kocaeli (1999) με το μοντέλο των Vucetic & Dobry (1991) - Deepsoil, Strata	63
Εικόνα 4.25. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων Athens (1999) με το μοντέλο των Vucetic & Dobry (1991) - Deepsoil, Strata	63
Εικόνα 4.26. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων, Chi-Chi(1999) - Vucetic & Dobry (1991), Darendeli (2001) - Deepsoil, Strata	64

Εικόνα 4.27. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων, Kocaeli(1999) - Vucetic & Dobry (1991), Darendeli (2001) - Deepsoil, Strata	65
Εικόνα 4.28. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων, Athens(1999) - Vucetic & Dobry (1991), Darendeli (2001) - Deepsoil, Strata	65
Εικόνα 5.1. Απεικόνιση χρονοϊστορίας επιταχύνσεων στην βιβλιοθήκη pystrata	71
Εικόνα 5.2. Απεικόνιση καμπυλών G-γ-D κατά Darendeli στην βιβλιοθήκη pystrata για την 1η στρώση από την επιφάνεια του εδάφους	72
Εικόνα 5.3. Φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων (λογαριθμική μορφή) στην βιβλιοθήκη pystrata	72
Εικόνα 5.4. Vs αναλόγως του βάθους.....	73
Εικόνα 5.5. Συνάρτηση μεταφοράς στην βιβλιοθήκη pystrata	73
Εικόνα 5.6. Συγκεντρωτικό γράφημα γραμμικής ανάλυσης φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων, ChiChi (1999) - Deepsoil, Strata, pystrata	74
Εικόνα 5.7. Συγκεντρωτικό γράφημα γραμμικής ανάλυσης φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων, Kocaeli (1999) - Deepsoil, Strata, pystrata	74
Εικόνα 5.8. Συγκεντρωτικό γράφημα γραμμικής ανάλυσης φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων, Athens (1999) - Deepsoil, Strata, pystrata	75
Εικόνα 5.9. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων, Chi-Chi(1999) - Darendeli (2001) - Deepsoil, Strata, pystrata	76
Εικόνα 5.10. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων, Kocaeli (1999) - Darendeli (2001) - Deepsoil, Strata, pystrata	77
Εικόνα 5.11. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων, Athens (1999) - Darendeli (2001) - Deepsoil, Strata, pystrata	77
Εικόνα 5.12. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων, Chi-Chi (1999) - γραμμική ανάλυση - ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Darendeli, 2001)	78
Εικόνα 5.13. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων, Kocaeli (1999) - γραμμική ανάλυση - ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Darendeli, 2001)	78
Εικόνα 5.14. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων, Athens (1999) - γραμμική ανάλυση - ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Darendeli, 2001)	79
Εικόνα 5.15. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων, ChiChi (1999) - ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Darendeli, 2001 - Kishida, 2012)	80
Εικόνα 5.16. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων, Kocaeli(1999) - ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Darendeli, 2001 - Kishida, 2012)	80
Εικόνα 5.17. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων, Athens(1999) - ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Darendeli, 2001 - Kishida, 2012)	81

Εικόνα 6.1. Αρχική σελίδα Streamlit	82
Εικόνα 6.2. Εισαγωγή αρχείου επιταχυνσιογραφήματος στην εφαρμογή	83
Εικόνα 6.3. Επιταχυνσιογράφημα σεισμού Chi Chi - web εφαρμογή	83
Εικόνα 6.4. Μπάρα ολίσθησης επιλογής αριθμού εδαφικών στρώσεων	84
Εικόνα 6.5. Βασικές παράμετροι εδαφικών στρώσεων.....	85
Εικόνα 6.6. Παράμετροι υπολογισμού μοντέλου Darendeli (2001)	85
Εικόνα 6.7. Αμμώδη ή αργιλικά εδάφη	85
Εικόνα 6.8. Επιλογή ανάλυσης, απόσβεσης	86
Εικόνα 6.9. Φάσμα απόκρισης (βραχώδες υπόβαθρο-επιφάνεια εδάφους), στατική εκτύπωση.....	86
Εικόνα 6.10. Διαδραστικό γράφημα αποτελεσμάτων (χρονοϊστορία επιταχύνσεων)	87
Εικόνα 6.11. Διαδραστικό γράφημα αποτελεσμάτων (φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων)	87
Εικόνα 6.12. Αποθήκευση-μεταφόρτωση json αρχείων στην web-εφαρμογή	87
Εικόνα 6.13. Αρχική σελίδα web-εφαρμογής LamPa	88
Εικόνα A.1. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων με Deepsoil για Darendeli (2001) και $K_0= 0,30 - 0,70 - 1,00$ - Athens	97
Εικόνα A.2. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων με Deepsoil για Darendeli (2001) και $K_0= 0,30 - 0,70 - 1,00$ - ChiChi	97
Εικόνα A.3. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων με Deepsoil για Darendeli (2001) και $K_0= 0,30 - 0,70 - 1,00$ - Kocaeli.....	98

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1. Συντελεστές σχέσης εκτίμησης κατά Boore et al. (1993)	27
Πίνακας 2.2. Σταθερές G_B, G_C κατά Boore et al. (1993)	27
Πίνακας 2.3. Ταξινόμηση εδαφών κατά EAK 2000	28
Πίνακας 2.4. Ταξινόμηση εδαφών κατά EC8	30
Πίνακας 4.1. Τιμές παραμέτρων εδαφικών προφίλ (Darendeli)	54
Πίνακας 4.2. Τιμές παραμέτρων εδαφικών προφίλ (Vucetic and Dobry)	60

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Το πλαίσιο της εργασίας είναι γύρω από την απόκριση και συμπεριφορά των εδαφικών σχηματισμών συσχετιζόμενα με την πορεία των σεισμικών κυμάτων από την εστία του σεισμού μέχρι και την επιφάνεια του εδάφους μέσα από το μονοδιάστατο μοντέλο γραμμικής ελαστικής και ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης, ενώ ο σκοπός της είναι η συγκριτική απόδοση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων αυτών μέσα από την χρήση προγραμμάτων ανοιχτού λογισμικού και η ανάπτυξη μίας ελεύθερης προς χρήση web εφαρμογής που θα ενσωματώνει τις παραμέτρους και θα εξάγει τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών.

Τα αντικείμενα τα οποία παρουσιάζει η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αναλύονται σε 7 Κεφάλαια. Στο 1^ο αυτό κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά η δομή της εργασίας με σύντομη περιγραφή των αντικειμένων που αναπτύσσονται σε καθένα από τα επόμενα κεφάλαια.

Το 2^ο κεφάλαιο είναι μία εισαγωγή σε βασικές έννοιες Εδαφοδυναμικής ώστε να γίνει καλύτερα αντιληπτός ο σκοπός των επόμενων κεφαλαίων. Αναφέρονται γενικοί ορισμοί της σεισμικής απόκρισης, οι παράμετροι που επηρεάζουν την εδαφική κίνηση, καθώς και βασικές θεωρήσεις γύρω από την ισχυρή εδαφική κίνηση, ενώ εισάγεται και η έννοια της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών και παρουσιάζονται οι διατάξεις των αντισεισμικών κανονισμών όσον αφορά τις εδαφικές συνθήκες και πιο συγκεκριμένα οι διατάξεις του ΕΑΚ 2000 και του Ευρωκώδικα 8 (EC8).

Στο 3^ο κεφάλαιο αναλύονται οι επικρατούσες μέθοδοι εκτίμησης των εδαφικών ενισχύσεων με αναλυτικότερη παρουσίαση των θεωρητικών μεθόδων εκτίμησης της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών και ειδικότερη αναφορά στην μονοδιάστατη θεώρηση που θα χρησιμοποιηθεί ως μοντέλο προσομοίωσης και ανάλυσης της παρούσας εργασίας.

Το 4^ο κεφάλαιο ασχολείται με τις δυνατότητες που προσφέρονται τα τελευταία χρόνια μέσα από την χρήση λογισμικού στον καθορισμό και υπολογισμό των παραμέτρων που επηρεάζουν την ισχυρή εδαφική κίνηση, ενώ εφαρμόζονται και τρία παραδείγματα εφαρμογής υπολογισμών με την χρήση των προγραμμάτων Deersoil και Strata.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιοθήκη *rystrata* για το μονοδιάστατο μοντέλο, εφαρμόζονται τα παραδείγματα του προηγούμενου κεφαλαίου και απεικονίζονται τα συγκριτικά γραφήματα από τα αποτελέσματα και με τα 3 εργαλεία των αναλύσεων.

Στο 6^ο κεφάλαιο αναφέρονται τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της web εφαρμογής ενώ παρουσιάζεται και το περιβάλλον εργασίας και χρήσης της εφαρμογής. Ταυτόχρονα παρουσιάζονται ενδεικτικώς κάποια από τα παραδείγματα του Κεφαλαίου 4 που προσομοιώνονται στην web εφαρμογή.

Στο 7^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που αφορούν την παρούσα εργασία.

Στο Παράρτημα Α αναπτύσσεται ο βαθμός επίδρασης μίας εκ των παραμέτρων της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης, του συντελεστή πίεσης της γης σε ηρεμία K_0 .

Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται τρία από τα juryter notebooks που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με την βιβλιοθήκη pystrata.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική επισκόπηση

2.1 Γενικοί ορισμοί Εδαφοδυναμικής

Η επιστήμη της Εδαφοδυναμικής διαφοροποιήθηκε σε σχέση με την Εδαφομηχανική καθότι λαμβάνει υπόψιν α) τις αδρανειακές δυνάμεις, συμπεριλαμβάνοντας τις στις δυνάμεις που δρουν και β) ότι οι παραμορφώσεις μεταβάλλονται σε σχέση με τον χρόνο (δυναμική κατάσταση).

Για την σεισμική μηχανική ο δυναμικός χαρακτήρας της θεώρησης περιλαμβάνει

- τα πλάτη των διατμητικών παραμορφώσεων γ
- τη συχνότητα των επαναληπτικών φορτίσεων
- τη διάρκεια των φορτίσεων

Όσον αφορά την γένεση των σεισμών, αυτή προκαλείται από σχετικές κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών. Η θεωρία που καλύπτει όσο το δυνατόν καλύτερα την δημιουργία των σεισμικών διεγέρσεων καλείται θεωρία της ελαστικής ανάπαλσης (Reid, 1911). Η διαρκής παραμόρφωση των πετρωμάτων συσσωρεύει μέσα τους τεράστιες ποσότητες δυναμικής ενέργειας, ήτοι ενέργειας ελαστικής παραμόρφωσης, με αποτέλεσμα να συσσωρεύονται διαρκώς σημαντικές τάσεις. Όταν οι τάσεις υπερβούν την αντοχή του πετρώματος σε μία θέση, το πέτρωμα οδηγείται σε διάρρηξη και η συσσωρευμένη ενέργεια απελευθερώνεται. Η ενέργεια αυτή απελευθερώνεται με την μορφή θερμότητας, λόγω της τριβής, κυρίως όμως με την μορφή κυμάτων τάσης που διαδίδονται στον χώρο. Η θεωρία της ελαστικής ανάπαλσης περιγράφει αυτή την διαδικασία προοδευτικής συσσώρευσης και απότομης απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης με την θραύση των πετρωμάτων στην ζώνη ρηγμάτωσης. (Πιτιλάκης, 2010).

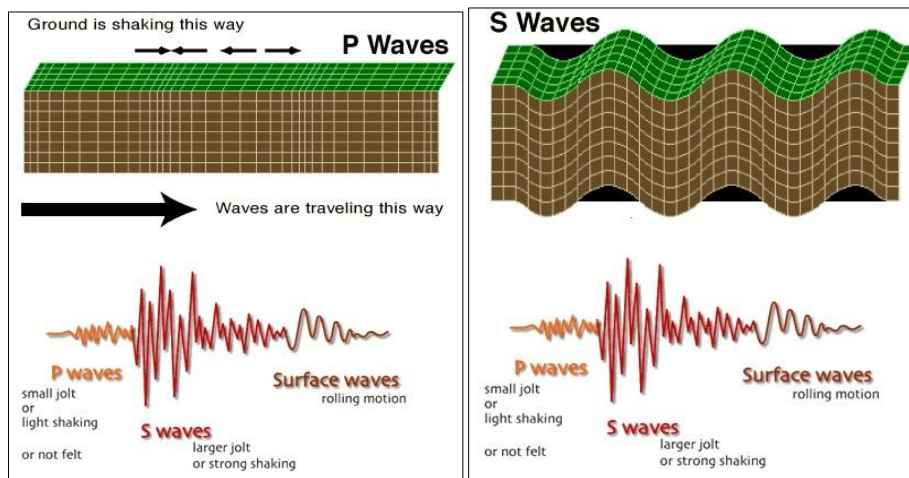
Η σεισμική ενέργεια που απελευθερώνεται σε έναν σεισμό από την διάρρηξη των πετρωμάτων διαχέεται στον χώρο με την μορφή σεισμικών κυμάτων τα οποία παράγονται στο υπόκεντρο του σεισμού. Αναλόγως την κατηγορία που ανήκει ένα σεισμικό κύμα χαρακτηρίζεται και από διαφορετικό τρόπο κίνησης και διάδοσης. Διακρίνονται σε 2 βασικές κατηγορίες, τα *κύματα χώρου* και τα *επιφανειακά κύματα*.

Τα *κύματα χώρου* μπορούν να διαδοθούν σε οποιαδήποτε κατεύθυνση στο εσωτερικό της Γης, είτε προς τα επιφανειακά στρώματα είτε προς τα βαθύτερα στρώματα αυτής. Καταγράφονται νωρίτερα από τα επιφανειακά κύματα από τους σταθμούς καταγραφής σεισμών. Στα κύματα χώρου περιλαμβάνονται 2 υποκατηγορίες, 1) τα επιμήκη κύματα και 2) τα εγκάρσια κύματα.

Τα *επιμήκη κύματα* (P-waves, Εικ.2.1) είναι τα πρώτα που καταγράφονται σε μία σεισμική διέγερση, καθότι είναι και τα γρηγορότερα είδη σεισμικών κυμάτων. Σαν κύματα χώρου κινούνται σε οποιαδήποτε κατεύθυνση στο εσωτερικό της Γης και προς οποιοδήποτε στρώμα (βαθύτερο ή επιφανειακό). Είναι λιγότερα ζημιογόνα από τα εγκάρσια κύματα και διαδίδονται τόσο στα

συμπαγή, στέρεα στρώματα όσο και στα υγρά στρώματα της γης και εμφανίζουν υψηλή συχνότητα. Ονομάζονται και ηχητικά κύματα (διότι δονούν τα πετρώματα όπως ο ήχος δονεί τα μόρια του αέρα) ή πρωτεύοντα κύματα.

Τα εγκάρσια κύματα (S-waves, Εικ.2.1) είναι τα επόμενα που καταγράφονται στα σειсмоγραφήματα, είναι λιγότερο γρήγορα σε σχέση με τα επιμήκη. Όμοια με τα επιμήκη κύματα κινούνται σε οποιαδήποτε κατεύθυνση στο εσωτερικό της Γης και προς οποιοδήποτε στρώμα και είναι περισσότερο καταστροφικά. Δεν διαδίδονται στα υγρά στρώματα εφόσον προκαλούν διατμητική παραμόρφωση στο μέσο διάδοσης (τα υγρά και η διάτμηση είναι έννοιες ασύμβατες) και διακρίνονται από χαμηλότερη συχνότητα σε σχέση με τα επιμήκη. Ονομάζονται και δευτερεύοντα κύματα, διότι έπονται των επιμήκων κυμάτων.



Εικόνα 2.1. Σεισμικά κύματα χώρου

Τα επιφανειακά κύματα διαδίδονται μόνο στα επιφανειακά στρώματα της Γης, και χαρακτηρίζονται από χαμηλές συχνότητες, μεγάλο πλάτος και διάρκεια, χαρακτηριστικά που τα κατατάσσουν στα πιο επικίνδυνα είδη σεισμικών κυμάτων. Περιλαμβάνουν 2 βασικές υποκατηγορίες, τα κύματα Love (Εικ.2.3) και τα κύματα Rayleigh (Εικ.2.2).

Τα κύματα Love είναι τα ταχύτερα των επιφανειακών κυμάτων και προκαλούν οριζόντια εδαφική κίνηση, ενώ δεν εμφανίζουν κατακόρυφη συνιστώσα. Είναι ιδιαίτερως καταστρεπτικά παρόλο που διανύουν την διαδρομή από την σεισμική πηγή μέχρι και την επιφάνεια σε μεγάλο χρόνο.

Τα κύματα Rayleigh είναι τα πιο αργά του συνόλου των σεισμικών κυμάτων και διαγράφουν ελλειπτικές τροχιές προσομοιώνοντας την κίνηση των θαλάσσιων κυμάτων στο έδαφος. Κατ'αυτόν τον τρόπο προκαλεί εδαφική κίνηση επάνω-κάτω-εμπρός-πίσω, ενώ ελέω της μικρής ταχύτητας που τα διακρίνει καταγράφονται τελευταία σε σχέση με όλα τα προναφερθέντα είδη κυμάτων στους σειсмоγράφους.

Η σεισμική κίνηση στην επιφάνεια εξαρτάται από την διάδοση των σεισμικών κυμάτων εντός της εδαφικής απόθεσης, ενώ οι δυναμικές αναλύσεις αυτής αναφέρονται στην κίνηση που λαμβάνει χώρα σε οριζόντιο επίπεδο, δηλ. στα διατμητικά κύματα S.

Η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{m/s}) \quad \text{Εξ. 2.1}$$

όπου:

G : είναι το μέτρο διάτμησης του εδάφους (kPa)

ρ : είναι η πυκνότητα του εδαφικού υλικού (t/m^3)

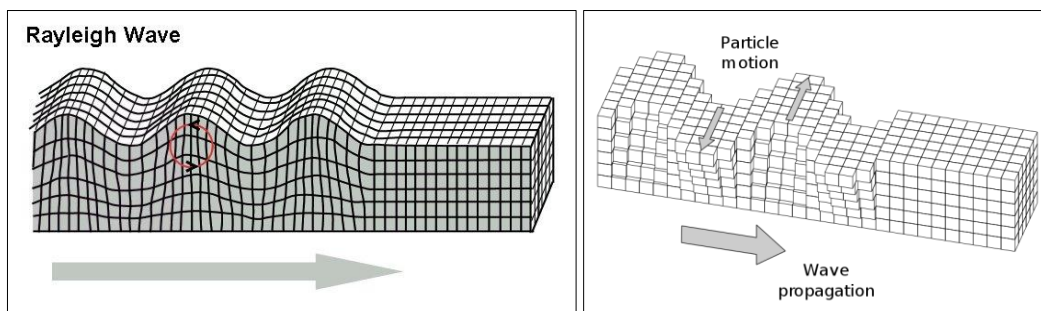
με $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, όπου E το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους,

Η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων αντίστοιχα υπολογίζεται από την σχέση :

$$V_p = V_s \sqrt{\frac{2-2\nu}{1-2\nu}} \quad (\text{m/s}) \quad \text{Εξ. 2.2}$$

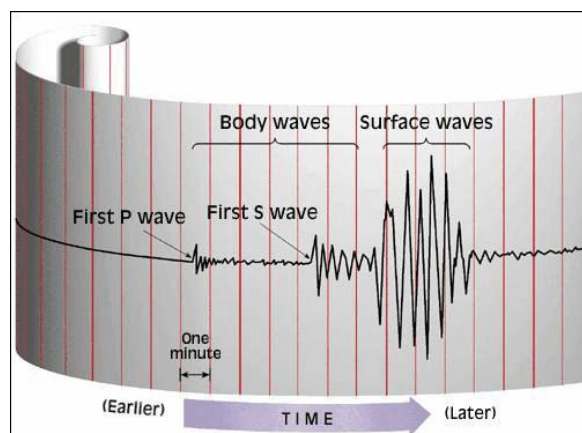
όπου:

ν : είναι ο δείκτης Poisson του εδάφους (kPa)



Εικόνα 2.2. Σεισμικά κύματα Rayleigh, Love

Συνοψίζοντας, τα σεισμικά κύματα - επιφανειακά και χώρου - δεν εμφανίζονται την ίδια χρονική στιγμή στο έδαφος, έχουν διαφορετική ταχύτητα διάδοσης στα στρώματα της γης, ενώ ποικίλλουν στην εδαφική κίνηση που προκαλούν όπως και στον βαθμό που μπορεί να καταστούν επιζήμια για τις δομικές κατασκευές στην επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα 2.3. Άφιξη σεισμικών κυμάτων σε σχέση με τον χρόνο

Η τελική σεισμική κίνηση στην επιφάνεια είναι αποτέλεσμα των διαδοχικών ανακλάσεων των σεισμικών κυμάτων στις επιμέρους εδαφικές στρώσεις συνδυαστικά με την ενίσχυση που δεχονται από τις εδαφικές στρώσεις. Η συνήθης προσοδευτική μείωση της εδαφικής δυσκαμψίας όσο πλησιάζουμε προς την επιφάνεια του εδάφους συνεπάγεται την ενίσχυση της σεισμικής κίνησης από το βραχώδες υπόβαθρο. Εδαφικές αποθέσεις με διαφορετικά χαρακτηριστικά (πάχος στρώσης, εδαφικές παράμετροι) επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο την σεισμική κίνηση.

Στα επιταχυνσιογραφήματα στην κορυφή της κάθε εδαφικής στρώσης παρατηρείται η ενίσχυση της εδαφικής κίνησης από το βραχώδες υπόβαθρο στην επιφάνεια του εδάφους.

Οι τοπικές εδαφικές συνθήκες μεταβάλλουν σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο διάδοσης της σεισμικής κίνησης στην επιφάνεια του εδάφους, λαμβάνοντας παραδείγματος χάριν υπόψιν τα διαφορετικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του εδάφους στην ίδια περιοχή (βραχώδεις ή μη σχηματισμοί), την διαφοροποίηση στο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι και το βραχώδες υπόβαθρο κ.α.

Τα χαρακτηριστικά της εδαφικής απόθεσης αλλά και η τοπική γεωμορφολογία στην θέση ενδιαφέροντος πιθανά να μεταβάλλουν σημαντικά τη μορφή της σεισμικής κίνησης από το βραχώδες υπόβαθρο στην επιφάνεια. Σεισμοί ενδιάμεσου ή μεγάλου μεγέθους εμφανίζουν φάσματα απόκρισης πλούσια σε χαμηλές συχνότητες. Αντίστοιχα σεισμική κίνηση σε μικρή απόσταση από το ρήγμα είναι πλούσια σε υψηλές συχνότητες.

Λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους, η ανάλυση που γίνεται για να ληφθεί υπόψιν η παραπάνω παράμετρος ονομάζεται ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (equivalent linear analysis). Έτσι, με την ισοδύναμη γραμμική ανάλυση γίνονται επαναλήψεις της γραμμικής ανάλυσης μεταβάλλοντας κάθε φορά τα G (μέτρο διάτμησης εδάφους) και D (υστερητική απόσβεση) αναλόγως της διατμητικής παραμόρφωσης που εμφανίζει η κάθε στρώση.

Η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της εδαφικής απόθεσης προκύπτει από την σχέση :

$$T = \frac{4H}{V_s} \quad (\text{s}) \quad \text{Εξ. 2.3}$$

όπου:

V_s : είναι η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων (m/s)

H : είναι το πάχος των εδαφικών αποθέσεων (m)

Στις περιπτώσεις πολυστρωματικών εδαφικών αποθέσεων η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος με την χρήση των ανωτέρω σχέσεων προκύπτει προσεγγιστικά υπολογίζοντας μία σταθμισμένη συνολική μέση τιμή της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων της κάθε στρώσης.

2.2 Σεισμική απόκριση εδαφικών σχηματισμών

Ως εδαφική απόκριση (σεισμική απόκριση εδαφών) νοείται ως ο τρόπος με τον οποίο αλλάζουν και μεταβάλλονται βασικές παράμετροι μίας σεισμικής δόνησης (πλάτος, διάρκεια, ένταση, συχνότητα) από το βραχώδες υπόβαθρο μέχρι και την επιφάνεια του εδάφους. Με λίγα λόγια ο τρόπος ταλάντωσης του εδάφους σε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας αυτού θα είναι πάντοτε διαφορετικός και επηρεάζεται από την τοπογραφία της κάθε θέσης, την γεωμετρία των γεωλογικών σχηματισμών της επιφάνειας και του υποβάθρου σε κάθε θέση, από την ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στους εδαφικούς σχηματισμούς, από την μη-γραμμική ανελαστική συμπεριφορά των εδαφών κλπ.

Οι βασικές παράμετροι από την γένεση ενός σεισμού αφορούν στην εστία ή υπόκεντρο του σεισμού όπως και στην επικεντρική και υποκεντρική απόσταση από την περιοχή ενδιαφέροντος. Η ένταση ενός σεισμού διαφέρει από θέση σε θέση σε αντίθεση με το μέγεθος του.

Η ανάπτυξη δυνάμεων στο εσωτερικό της γης, έως του σημείου θραύσης μέσω των κινήσεων των πλακών της λιθόσφαιρας, συνεπάγονται την δημιουργία σεισμικών διεγέρσεων. Ως αποτέλεσμα των σεισμικών αυτών διεγέρσεων είναι η ανάπτυξη τάσεων, οι οποίες υπερβαίνοντας την διατμητική αντοχή των σχηματισμών (πετρωμάτων) οδηγούν σε απελευθέρωση ενέργειας με την μορφή των σεισμικών κυμάτων όπως προαναφέρθηκε.

Αναλόγως των μηχανικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν τα υλικά των πετρωμάτων μεταβάλλεται και η συμπεριφορά αυτών, άρα και το κατά πόσο το αποτέλεσμα που παράγεται γίνεται, ή δεν γίνεται, αισθητό. Έτσι, η εδαφική ταλάντωση διαφέρει στα μαλακά εδάφη σε σχέση με τους βραχώδεις σχηματισμούς.

Στην περίπτωση υλικών που έχουν την ιδιότητα να εμφανίζουν μεγάλες παραμορφώσεις πριν την θραύση τους (ολκιμότητα) η απελευθέρωση ενέργειας δεν είναι απότομη και εκρηκτική - εφόσον έχουν μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πριν την τελική αστοχία - με συνεπακόλουθο και η παραμόρφωση αυτών να είναι προοδευτική.

Για τα υλικά όμως εκείνα που έχουν την ιδιότητα να εμφανίζουν μικρές παραμορφώσεις πριν την θραύση τους (ψαθυρότητα) η απελευθέρωση ενέργειας είναι απότομη και εκρηκτική - εφόσον έχουν μικρή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πριν την τελική αστοχία - με συνεπακόλουθο και η παραμόρφωση αυτών να είναι απότομη.

Η διάδοση της σεισμικής κίνησης γίνεται αρχικά μέσα από τους βραχώδεις σχηματισμούς του υπεδάφους και στη συνέχεια εντός των εδαφικών αποθέσεων, οι τοπικές εδαφικές συνθήκες των οποίων επηρεάζουν σημαντικά την μορφή της σεισμικής κίνησης.

Τα βραχώδη υλικά εκτείνονται από την επιφάνεια μέχρι και το βάθος των 30 km και τον στερεό φλοιό της γης, οι ημίβραχοι εκτείνονται μεταξύ του στρώματος των βραχωδών υλικών και των εδαφικών υλικών και τα εδαφικά υλικά εκτείνονται από την επιφάνεια έως και μερικές δεκάδες μέτρα και μάλιστα καλύπτουν το μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειας της γης.

2.3 Ισχυρή Εδαφική κίνηση

2.3.1 Βασικές έννοιες

Ως γενική θεώρηση έχει επικρατήσει ότι η τελική εδαφική κίνηση μπορεί να υπολογιστεί ως το γινόμενο τριών παραγόντων, δηλαδή :

Εδαφική κίνηση = (Επιρροή πηγής) x (Επιρροή διαδρομής) x (Τοπικές εδαφικές συνθήκες)

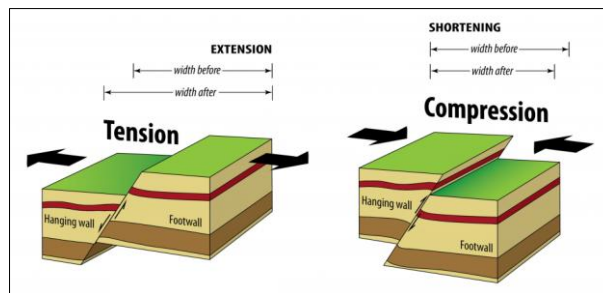
Η **επιρροή πηγής** αφορά κατά κύριο λόγο στο είδος και το μέγεθος (μήκος) του ρήγματος, στο βάθος και την επικεντρική απόσταση.

Ως **ρήγμα** νοείται μια ρωγμή (διάρρηξη) στον στερεό φλοιό της Γης που προκαλείται από ένα σεισμικό φαινόμενο. Κατά την διάρρηξη αυτή προκαλείται έκλυση ενέργειας, η οποία υπό προϋποθέσεις γίνεται αντιληπτή μέχρι και την επιφάνεια του εδάφους. Αναλόγως το μέγεθος του σεισμού τα σεισμικά ρήγματα μπορεί να καταλαμβάνουν επιφάνεια μέχρι και εκατοντάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα και μπορεί να προκαλέσουν τόσο μικρής, όσο και μεγάλης ισχύος σεισμούς.

Σχετιζόμενα με την κίνηση τους (φορά και διεύθυνση) στο σημείο που εμφανίζεται η αστοχία τα ρήγματα κατηγοριοποιούνται σε κανονικά, ανάστροφα και ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης.

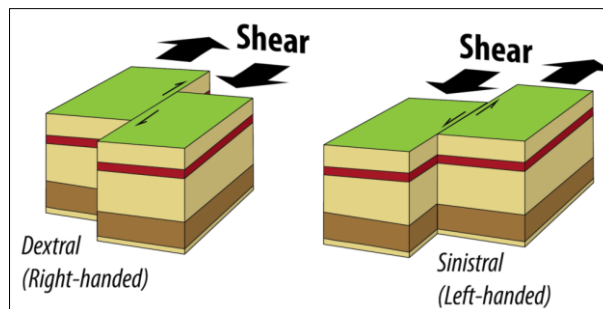
Στο *κανονικό ρήγμα*, η άνω πλευρά του τμήματος που διαρρηγνύεται κινείται προς τα κάτω. Ουσιαστικά οι δύο επιφάνειες εκατέρωθεν της γραμμής του ρήγματος απομακρύνονται η μία από την άλλη.

Στο *ανάστροφο ρήγμα*, η άνω πλευρά του τμήματος που διαρρηγνύεται κινείται προς τα πάνω. Ουσιαστικά οι δύο επιφάνειες (τεμάχη) εκατέρωθεν της γραμμής του ρήγματος πλησιάζουν η μία την άλλη. Οι δυνάμεις συμπίεσης που αναπτύσσονται ωθούν το άνω τμήμα να κινηθεί προς τα πάνω και το κάτω τμήμα να κινηθεί προς τα κάτω.



Εικόνα 2.4. Κανονικό ρήγμα(αριστερά) και Ανάστροφο ρήγμα (δεξιά)

Στο *οριζόντιας μετάθεσης ρήγμα* η διάρρηξη γίνεται κατακόρυφα στα πετρώματα των στρωμάτων και τα δύο τεμάχη του ρήγματος μετατοπίζονται μόνο οριζόντια χωρίς την ύπαρξη κίνησης προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα ρήγματα μετασχηματισμού που διακρίνονται σε αριστερόστροφα και δεξιόστροφα (παρατηρώντας από την μία πλευρά του ρήγματος πως κινείται η άλλη πλευρά, από δεξιά προς τα αριστερά για τα αριστερόστροφα και από αριστερά προς τα δεξιά για τα δεξιόστροφα).



Εικόνα 2.5. Οριζόντιας μετάθεσης ρήγματα

Επιγραμματικά, τα γεωμετρικά στοιχεία των σεισμικών ρηγμάτων είναι το μήκος L , η επιφάνεια διάρρηξης S και η μετάθεση D του ρήγματος. Οι Wells and Coppersmith (1994) ανέπτυξαν τις παρακάτω σχέσεις υπολογισμού των γεωμετρικών παραμέτρων ενός ρήγματος με βάση την σεισμική ροπή, αναλόγως τον τύπο του ρήγματος

Κανονικό ρήγμα

$$\log L = 0.50M_w - 2.01 \quad \text{Εξ. 2.4}$$

$$\log S = 0.82M_w - 2.87 \quad \text{Εξ. 2.5}$$

$$\log D = 0.89M_w - 5.90 \quad \text{Εξ. 2.6}$$

Ανάστροφο ρήγμα

$$\log L = 0.63M_w - 2.86 \quad \text{Εξ. 2.7}$$

$$\log S = 0.98M_w - 3.99 \quad \text{Εξ. 2.8}$$

$$\log D = 0.29M_w - 1.84 \quad \text{Εξ. 2.9}$$

Οριζόντιας μετάθεσης ρήγμα

$$\log L = 0.74M_w - 3.55 \quad \text{Εξ. 2.10}$$

$$\log S = 0.90M_w - 3.42 \quad \text{Εξ. 2.11}$$

$$\log D = 1.03M_w - 7.03 \quad \text{Εξ. 2.12}$$

όπου:

- M_w : είναι το μέγεθος της σεισμικής ροπής
 L : είναι το μήκος θραύσης του ρήγματος (km)
 S : είναι η επιφάνεια θραύσης του ρήγματος (km²)
 D : είναι η μετάθεση του ρήγματος (m)

ενώ για τον Ελλαδικό χώρο ο Παπαζάχος (1989) πρότεινε τις παρακάτω σχέσεις υπολογισμού :

$$\log L = 0.51M_s - 1.85 \quad \text{Εξ. 2.13}$$

$$\log S = 0.70M_s - 1.98 \quad \text{Εξ. 2.14}$$

$$\log D = 0.82M_s - 3.71 \quad \text{Εξ. 2.15}$$

όπου:

- M_s : είναι το μέτρο κλίμακας επιφανειακού μεγέθους
 L : είναι το μήκος θραύσης του ρήγματος (km)
 S : είναι η επιφάνεια θραύσης του ρήγματος (km²)
 D : είναι η μετάθεση του ρήγματος (km)

Τα ρήγματα μπορεί να είναι ενεργά ή μη και εντοπίζονται τόσο στην ξηρά όσο και στην θάλασσα. Ενεργά θεωρούνται εκείνα που έχουν προκαλέσει τουλάχιστον έναν σεισμό εδώ και 10.000 χρόνια. Με την θεωρία της ελαστικής ανάπαλσης οι τάσεις που αναπτύσσονται σε μία επιφάνεια του ρήγματος υπερβαίνουν την διατμητική αντοχή του ρήγματος και κατ'επέκταση προκαλείται ο σεισμός. Με την ολοκλήρωση της σεισμικής διέγερσης η επιφάνεια του ενεργού ρήγματος ηρεμεί, καθώς ατονεί η ανάπτυξη τάσεων εκεί. Όσο μεγαλώνει το χρονικό διάστημα συγκέντρωσης -εκ

νέου- τάσεων κατά μήκος του ρήγματος, τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα εμφάνισης σεισμού εκεί. Γνωρίζοντας λοιπόν την ταυτότητα ενός ρήγματος, είναι δυνατός ο προσδιορισμός του μεγέθους του σεισμού που μπορεί να προκαλέσει.

Το σημείο εκκίνησης του σεισμικού φαινομένου, αρά της εκκίνησης της θραύσης του ρήγματος, καλείται *εστία ή υπόκεντρο*. Η κάθετη προβολή της εστίας στην επιφάνεια του εδάφους καλείται *επίκεντρο* και η απόσταση μεταξύ της εστίας και του επίκεντρου *εστιακό ή υποκεντρικό βάθος*. Για εστιακό βάθος μέχρι 60km οι σεισμοί χαρακτηρίζονται επιφανειακοί, από 60 έως και 180km ενδιάμεσοι και άνω των 180 km μακρινοί. *Επικεντρική* και *υποκεντρική απόσταση* τέλος, ονομάζεται η απόσταση από το επίκεντρο και το υπόκεντρο αντίστοιχα, της περιοχής ενδιαφέροντος στην επιφάνεια του εδάφους. Για επικεντρική απόσταση έως 10km οι σεισμοί χαρακτηρίζονται κοντινοί, ενώ για πάνω από 10km μακρινοί. Όσον αφορά το μέγεθος ενός σεισμού επικρατούσα μονάδα αποτελεί η προκύπτουσα από την κλίμακα Richter, η οποία και αποτελεί μέτρο της ολικής ενέργειας ενός σεισμού που απελευθερώνεται και διαδίδεται με την μορφή των σεισμικών κυμάτων.

Η **επιρροή διαδρομής** αναφέρεται στο εδαφικό προφίλ των στρωμάτων που παρεμβάλλονται μεταξύ της εστίας και της θέσης που μας απασχολεί να μελετηθεί.

Η μορφή των πετρωμάτων στην εστία και στην τοποθεσία μελέτης της επιφάνειας του εδάφους, όπως και η απόσταση του υποκέντρου με την θέση παρατήρησης επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της σεισμικής κίνησης.

Για τις **τοπικές εδαφικές συνθήκες** γίνεται αναφορά σε επόμενο υποκεφάλαιο (2.3.3).

2.3.2 Σχέσεις εκτίμησης εδαφικής κίνησης

Έχοντας σε πρώτο πλάνο τις προαναφερθείσες παραμέτρους επιρροής της εδαφικής κίνησης διαμορφώθηκαν εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης της εδαφικής κίνησης - διατηρώντας πάντως έναν βαθμό αβεβαιότητας - προς εξαγωγή αποτελεσμάτων σε βασικά χαρακτηριστικά, όπως το μέγιστο πλάτος επιτάχυνσης, το μέγιστο πλάτος ταχύτητας, το μέγιστο πλάτος μετακίνησης.

Όσο αυξάνεται η απόσταση του σημείου παρατήρησης από το επίκεντρο μειώνεται η ένταση του κραδασμού του σεισμού. Η μείωση αυτή οφείλεται στο πλήθος των αποσβέσεων εξαιτίας της απόστασης του σημείου από την πηγή του σεισμού (όπου πηγή εννοείται το μέγεθος και ο μηχανισμός διάρρηξης του ρήγματος) με αποτέλεσμα να επηρεάζεται ο κραδασμός στην επιφάνεια του εδάφους (Πιτιλάκης, 2010).

Ενδεικτικά αναφέρονται οι παρακάτω σχέσεις εκτίμησης :

Skarlatoudis et al. (2003) - για $4.5 \leq M_w \leq 7$ και $PGA \geq 0.05g$

$$\log PGA = 0.86 + 0.45M - 1.27 \log \sqrt{(R^2 + h^2)} + 0.10F + 0.06S \pm 0.286 \quad \text{Εξ. 2.16}$$

$$\log PGA = 1.07 + 0.45M - 1.35 \log(R + 6) + 0.09F + 0.06S \pm 0.286 \quad \text{Εξ. 2.17}$$

που αφορούν σε μέγιστη εδαφική επιτάχυνση σε cm/s^2 ,

$$\log PGV = -1.66 + 0.65M - 1.224 \log \sqrt{(R^2 + h^2)} + 0.03F + 0.15S \pm 0.321 \quad \text{Εξ. 2.18}$$

$$\log PGV = -1.46 + 0.64M - 1.29 \log(R + 6) + 0.02F + 0.14S \pm 0.32 \quad \text{Εξ. 2.19}$$

που αφορούν σε μέγιστη εδαφική ταχύτητα σε cm/s ,

$$\log PGD = -4.08 + 0.88M - 1.27 \log \sqrt{(R^2 + h^2)} - 0.02F + 0.25S \pm 0.424 \quad \text{Εξ. 2.20}$$

$$\log PGD = -3.87 + 0.87M - 1.31 \log(R + 6) - 0.04F + 0.24S \pm 0.428 \quad \text{Εξ. 2.21}$$

που αφορούν σε μέγιστη εδαφική μετακίνηση σε cm,

όπου:

$M=M_w$: είναι το μέγεθος της σεισμικής ροπής

R : είναι η επικεντρική απόσταση (km)

h : είναι το εστιακό βάθος (km)

S : είναι μία παράμετρος εδαφικών συνθηκών (ακέραια τιμή από 0 έως 2)

F : είναι μία παράμετρος τύπου ρήγματος (ακέραια τιμή από 0 έως 2)

\pm : είναι μία τυπική απόκλιση από τον μέσο όρο

Θεοδουλίδης και Παπαζάχος (1992) - για $4.5 \leq M_w \leq 7$ και βάθος $< 18\text{km}$

$$\ln PGA = 3.88 + 1.12M_s - 1.65 \ln(R + 15) + 0.41S + 0.71P \quad \text{Εξ. 2.22}$$

για μέγιστη εδαφική επιτάχυνση σε cm/s^2

$$\ln PGV = -0.79 + 1.41M_s - 1.62 \ln(R + 10) - 0.22S + 0.80P \quad \text{Εξ. 2.23}$$

για μέγιστη εδαφική ταχύτητα σε cm/s

$$\ln PGD = -5.92 + 2.08M_s - 1.85 \ln(R + 5) - 0.97S + 1.23P \quad \text{Εξ. 2.24}$$

για μέγιστη εδαφική μετακίνηση σε cm

όπου:

M_s : είναι το επιφανειακό μέγεθος σεισμού

R : είναι η επικεντρική απόσταση

S : είναι μία παράμετρος εδαφικών συνθηκών (ακέραια τιμή από 0 έως 1)

P : είναι ένας δείκτης πιθανότητας υπέρβασης της τιμής υπολογισμού $\ln PGD$ (ακέραια τιμή από 0 έως 1)

Boore et al. (1993) - για $5 \leq M_w \leq 7.7$ και $d < 100\text{km}$

$$\ln PGA = c_1 + c_2(M_w - 6) + c_3(M_w - 6)^2 + c_4d + c_5 \log d + c_6G_B + c_7G_C \quad \text{Εξ. 2.25}$$

για μέγιστη εδαφική επιτάχυνση σε g

όπου:

$c_1 - c_7$: είναι συντελεστές της σχέσης εκτίμησης (Πιν. 2.1)

d : $\sqrt{(R^2 + h_0^2)}$, με R την επικεντρική απόσταση και h_0 συντελεστής (από Πιν 2.1) km

G_B, G_C : είναι σταθερές που εξαρτώνται από την μέση ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων έως το βάθος των 30 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους (Πιν. 2.2)

Πίνακας 2.1. Συντελεστές σχέσης εκτίμησης κατά Boore et al. (1993)

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	h_0
Δύο οριζώντιες συνιστώσες	-0.105	0.229	0.0	0.0	-0.778	0.162	0.251	5.57
Μέγιστη οριζόντια συνιστώσα	-0.038	0.216	0.0	0.0	-0.777	0.158	0.254	5.48

Πίνακας 2.2. Σταθερές G_B , G_C κατά Boore et al. (1993)

Κατηγορία	$V_{s,30}$	G_B	G_C	Περιγραφή εδάφους
A	>750m/sec	0	0	Βράχος
B	360-750 m/sec	1	0	Συμπαγή (στιφρά) εδάφη
C	180-360 m/sec	0	1	Μαλακά εδάφη

2.3.3 Τοπικές εδαφικές συνθήκες

Τα γεωλογικά δεδομένα των εδαφικών στρωμάτων επηρεάζουν εντόνως την σεισμική ταλάντωση της επιφάνειας εδάφους. Οι διαμορφωμένες συνθήκες των εδαφικών σχηματισμών χαρακτηρίζονται ως τοπικές εδαφικές συνθήκες (site effects). Αυτές περιλαμβάνουν την αντίθεση της δυσκαμψίας μεταξύ βράχου και εδαφικών αποθέσεων, δηλ. την αντίθεση διάδοσης της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων μεταξύ εδαφικών αποθέσεων και βράχου και της δυστημψίας που εμφανίζουν τα δύο στρώματα (βραχώδες και υπερκείμενο αυτού). Η επιρροή αυτή των τοπικών εδαφικών συνθηκών (εμπέδηση, δυστημψία) περιγράφεται με ικανοποιητική επάρκεια με τα μονοδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης (1D), γραμμικών, ισοδύναμων γραμμικών και μη γραμμικών αναλύσεων.

Η επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών περιλαμβάνει επίσης την επίδραση των βαθιών ιζηματογενών λεκανών που οφείλονται στις πλευρικές γεωλογικές ασυνέχειες (γεωλογικές ανωμαλίες, ρήγματα). Η επίδραση αυτή, που κυριαρχείται από επιφανειακά κύματα πέρα από τα κύματα χώρου, μελετάται μόνο με την χρήση διδιάστατων (2D) και τρισδιάστατων μοντέλων (3D) αριθμητικών προσομοιωμάτων. Το ίδιο ισχύει και για την μελέτη της διαφοροποίησης των χαρακτηριστικών της εδαφικής κίνησης λόγω της επιφανειακής τοπογραφίας (Πιτιλάκης, 2010). Ως επιφανειακή τοπογραφία, με μία πρώτη σχετικά απλουστευμένη θεώρηση, μπορούν να αντιμετωπιστούν ως οι κοίλες και κυρτές επιφάνειες που έχουν σχηματιστεί στην επιφάνεια της Γης με την πάροδο των χρόνων. Τέτοιες είναι τα βουνά, οι λόφοι, οι πεδιάδες κλπ.

Συμπερασματικά, ως επιρροή τοπικών εδαφικών συνθηκών μπορεί να θεωρηθεί η μεταβολή των παραμέτρων των εισερχόμενων σεισμικών κυμάτων, ήτοι α) πλάτος, β) διάρκεια και γ) συχνοτικό

περιεχόμενο, εξαιτίας των διαφορετικών χαρακτηριστικών των εδαφών και λόγω της τοπογραφίας της επιφάνειας του εδάφους.

Με βάση τα παραπάνω ορίζεται ως προαπαιτούμενο η σφαιρική και πλήρης γνώση των ιδιοτήτων των υλικών που συνθέτουν τις εδαφικές στρώσεις και το βραχώδες υπόβαθρο, της συμπεριφοράς των εδαφών ως ενιαία οντότητα, των χαρακτηριστικών των σεισμικών κυμάτων που προκαλούν την εδαφική κίνηση και των χαρακτηριστικών της επιφάνειας εδάφους (τοπογραφία περιοχής).

Μία περιγραφή που εμπεριέχει όλα τα παραπάνω στην επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών είναι και η παρακάτω: Η τοπογραφία της επιφάνειας του εδάφους με την συνεπικουρία των επιφανειακών εδαφικών στρώσεων μεταβάλλουν το πλάτος, την διάρκεια και το συχνοτικό περιεχόμενο του κυματικού πεδίου, οδηγώντας σε ενίσχυση ή ελάττωση του πλάτους εδαφικής κίνησης και διαφοροποιεί κατ' επέκταση την διάρκεια και το συχνοτικό περιεχόμενο. Με ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια τα ανωτέρω εκτιμώνται με τις θεμελιώδεις συχνότητες συντονισμού και με τον συντελεστή ενίσχυσης δύο διαφορετικών σημείων, κατά κανόνα μεταξύ επιφάνειας και βραχώδους υποβάθρου.

2.4 Αντισεισμικοί κανονισμοί Ελλάδας και κατηγορίες εδαφών

2.4.1 ΕΑΚ 2000

Ο πρώτος Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός θεσμοθετήθηκε και ξεκίνησε η εφαρμογή του το 1959. Μετά από πρόσθετες διατάξεις που ενσωματώθηκαν το 1984 καταργήθηκε τελικώς το 1995 οπότε και ξεκίνησε η περίοδος εφαρμογής του Νέου Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (Ν.Ε.Α.Κ.). Ο ΕΑΚ 2000 αποτελεί αναθεωρημένο κείμενο του Ν.Ε.Α.Κ. και περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, τροποποιήσεις με σκοπό την εναρμόνισή του με τον Ευρωκώδικα 8.

Ο χαρακτηρισμός των εδαφών κατά ΕΑΚ 2000 ακολουθεί τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των τύπων των εδαφών χωρίς να υπεισέρχεται σε λεπτομερή χαρακτηριστικά ιδιοτήτων των παραμέτρων του κάθε τύπου εδάφους. Στον πίνακα 2.3 παρουσιάζονται οι κατηγορίες ανάλογα την περιγραφή των υλικών που συνθέτουν την κάθε εδαφική στρώση.

Πίνακας 2.3. Ταξινόμηση εδαφών κατά ΕΑΚ 2000

Κατηγορία	Περιγραφή εδάφους
A	Βραχώδεις ή ημιβραχώδεις σχηματισμοί εκτεινόμενοι σε αρκετή έκταση και βάθος με την προϋπόθεση ότι δεν παρουσιάζουν έντονη αποσάθρωση. Στρώσεις πυκνού κοκκώδους υλικού με μικρό ποσοστό ιλυοαργιλικών προσμίξεων, πάχους μικρότερου των 70 μέτρων. Στρώσεις πολύ σκληρής προσυμπιεσμένης αργίλου πάχους μικρότερου των 70 μέτρων.
B	Εντόνως αποσαθρωμένα βραχώδη ή εδάφη που από μηχανική άποψη μπορούν να εξομοιωθούν με κοκκώδη. Στρώσεις κοκκώδους υλικού μέσης πυκνότητας και πάχους μεγαλύτερου των 5 μέτρων ή μεγάλης πυκνότητας και πάχους μεγαλύτερου των 70 μέτρων.

Γ	Στρώσεις κοκκώδους υλικού μικρής σχετικής πυκνότητας και πάχους μεγαλύτερου των 5 μέτρων ή μέσης πυκνότητας και πάχους μεγαλύτερου των 70 μέτρων. Ιλυοαργιλικά εδάφη μικρής αντοχής σε πάχος μεγαλύτερο των 5 μέτρων.
Δ	Έδαφος με μαλακές αργίλους υψηλού δείκτη πλαστιμότητας ($I_p > 50$) συνολικού πάχους μεγαλύτερου των 10 μέτρων.
Χ	Χαλαρά λεπτόκοκκα αμμοιλιώδη εδάφη υπό τον υδάτινο ορίζοντα, που ενδέχεται να ρευστοποιηθούν (εκτός αν ειδική μελέτη αποκλείσει τέτοιο κίνδυνο ή γίνει βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων). Εδάφη που βρίσκονται δίπλα σε εμφανή τεκτονικά ρήγματα. Απότομες κλιτείες καλυπτόμενες με προϊόντα χαλαρών πλευρικών κορημάτων. Χαλαρά κοκκώδη ή μαλακά ιλυοαργιλικά εδάφη, εφόσον έχει αποδειχθεί ότι είναι επικίνδυνα από άποψη δυναμικής συμπυκνώσεως ή απώλειας αντοχής. Πρόσφατες χαλαρές επιχωματώσεις (μπάζα). Οργανικά εδάφη. Εδάφη κατηγορίας Γ με επικινδύνως μεγάλη κλίση.

2.4.2 Ευρωκώδικας 8

Ο Ευρωκώδικας 8 δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα από τον ΕΑΚ 2000 στις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Στην ταξινόμηση των εδαφών, λοιπόν, βασική παράμετρος της κατηγοριοποίησης αποτελεί η μέση τιμή της διατμητικής ταχύτητας V_s στα 30 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους και υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση :

$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1, N} \frac{h_i}{V_i}} \quad \text{Εξ. 2.26}$$

όπου:

h_i, V_i : το πάχος ανά εδαφική στρώση και η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων σε N σχηματισμούς στρώσεων που υπάρχουν στα 30 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους.

Οι λοιπές δύο παράμετροι του Πίνακα 2.4 είναι ο αριθμός κρούσεων ανά 0,30m στην πρότυπη δοκιμή διείδυσης N_{SPT} και η αστράγγιστη αντοχή των εδαφών C_u . Η χρήση των δύο τελευταίων παραμέτρων είναι λιγότερη συχνή και μάλιστα χρησιμοποιούνται συνήθως στις περιπτώσεις που δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός ή η εκτίμηση της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων που αποτελεί και την βασική παράμετρο ταξινόμησης των εδαφών.

Πίνακας 2.4. Ταξινόμηση εδαφών κατά EC8

Κατηγορία	Περιγραφή εδάφους	Παράμετροι		
		$V_{s,30}$	N_{SPT}	C_u (kPa)
A	Βράχος ή άλλος βραχώδης γεωλογικός σχηματισμός που περιλαμβάνει το πολύ 5 μέτρα ασθενέστερου επιφανειακού υλικού.	> 800	-	-
B	Αποθέσεις πολύ πυκνής άμμου, χαλίκων, ή πολύ σκληρής αργίλου, πάχους τουλάχιστον αρκετών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος.	360-800	> 50	> 250
C	Βαθιές αποθέσεις πυκνής ή μετρίως πυκνής άμμου, χαλίκων ή σκληρής αργίλου πάχους από δεκάδες έως πολλές εκατοντάδες μέτρων.	180 - 360	15 - 50	70 - 250
D	Αποθέσεις χαλαρών έως μετρίως χαλαρών μη συνεκτικών υλικών (με ή χωρίς κάποια μαλακά στρώματα συνεκτικών υλικών), ή κυρίως μαλακά έως μετρίως σκληρά συνεκτικά υλικά.	< 180	< 15	< 70
E	Εδαφική τομή που αποτελείται από ένα επιφανειακό στρώμα ιλύος με τιμές V_s κατηγορίας C ή και D και πάχος που ποικίλλει μεταξύ περίπου 5 και 20 μέτρων, με υπόστρωμα από πιο σκληρό υλικό με $V_s > 800\text{m/s}$.			
S_1	Αποθέσεις που αποτελούνται ή περιέχουν ένα στρώμα πάχους τουλάχιστον 10 μέτρων μαλακών αργίλων/ιλών με υψηλό δείκτη πλαστιμότητας ($PI > 40$) και υψηλή περιεκτικότητα σε νερό.	< 100 (ενδεικτικό)	-	10 - 20
S_2	Στρώματα ρευστοποιήσιμων εδαφών, ευαίσθητων αργίλων ή οποιαδήποτε άλλη εδαφική τομή που δεν περιλαμβάνεται στους τύπους A - E ή S_1			

Κεφάλαιο 3

Επιρροή τοπικών εδαφικών συνθηκών

3.1 Μέθοδοι εκτίμησης επιρροής τοπικών εδαφικών συνθηκών

Ως και σήμερα αναπτύσσονται διάφοροι τύποι μεθόδων εκτίμησης της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών, αναλόγως το επίπεδο της πληροφορίας που υπάρχει και το επίπεδο πληροφορίας που ζητείται στα εξαγόμενα αποτελέσματα, αναλόγως την σπουδαιότητα της δομικής κατασκευής για την μελετάται η εδαφική απόκριση κλπ. Σε γενικές γραμμές κατηγοριοποιούνται στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Εμπειρικές-πειραματικές μέθοδοι. Χρησιμοποιώντας δεδομένα από καταγραφές εδαφικών κινήσεων, από καταγραφές του εσώτερου γαιώδους θορύβου εκτιμώνται τα χαρακτηριστικά που αναμένεται να έχει η κίνηση των εδαφών (μετακίνηση, επιτάχυνση).
- Εμπειρικές μέθοδοι. Χρησιμοποιώντας δεδομένα που αφορούν στην ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων S , το μέγεθος του σεισμού, την κατηγορία των εδαφών, την τοπογραφία στην περιοχή ενδιαφέροντος υπολογίζονται μέσω των αναλύσεων θεμελιώδεις ιδιότητες των σεισμικών κινήσεων όπως επιτάχυνση, φάσματα απόκρισης.
- Ημι-εμπειρικές μέθοδοι. Μέσα από την χρήση δεδομένων από την δημιουργία του σεισμού και κατ' επέκταση την διάρρηξη των ρηγμάτων, υπολογίζονται χρονοϊστορίες κινήσεων που προκαλούνται από τις σεισμικές διεγέρσεις.
- Θεωρητικές μέθοδοι. Στις μεθόδους αυτές συμπεριλαμβάνεται και η μονοδιάστατη ανάλυση που αφορά την παρούσα εργασία. Αναλόγως την ανάλυση, μονοδιάστατη-διδιάστατη-τριδιάστατη, δίνεται η ευχέρεια χρήσης δεδομένων από την τοπογραφία της περιοχής, των εδαφικών στρώσεων μέχρι και το βραχώδες υπόβαθρο, για διαφορετικά είδη σεισμικών κυμάτων (χώρου, επιφανειακά) όπως και για την συμπεριφορά των υλικών των εδαφών (γραμμική, μη γραμμική).
- Υβριδικές μέθοδοι.

Στις επόμενες υποενότητες θα γίνει μία σύντομη περιγραφή τεσσάρων από τις παραπάνω μεθόδους, ενώ οι θεωρητικές μέθοδοι που αφορούν το πλαίσιο της εργασίας θα αναλυθούν εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 3.2

3.1.1 Εμπειρικές – Πειραματικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών στο φάσμα των συχνοτήτων με την χρήση σεισμικών καταγραφών, οι οποίες (σεισμικές καταγραφές) αποκωδικοποιούνται σε όρους συχνοτήτων μέσα από τον υπολογισμό του γινομένου των φασμάτων Fourier (επιρροή πηγής), της επιρροής της διαδρομής των σεισμικών κυμάτων και των

τοπικών εδαφικών συνθηκών. Εστιάζοντας στις τοπικές εδαφικές συνθήκες, χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν η επιρροή πηγής και η επιρροή διαδρομής αναφέρονται οι παρακάτω τεχνικές που αναπτύχθηκαν για αυτό τον σκοπό και προς εκτίμηση των βασικών χαρακτηριστικών της εδαφικής απόκρισης (θεμελιώδης ιδιοπερίοδος, θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα, πλάτος φασμάτων Fourier).

Τεχνική κυμάτων Coda

Με την τεχνική αυτή αναλύονται τα σεισμικά κύματα που καταγράφονται μεταγενέστερα των αρχικών καταγραφών των κυμάτων και συγκεκριμένα η χρήση δεδομένων ξεκινά από το σημείο εκείνο που τα σεισμικά κύματα καταγράφονται με διπλάσιο χρόνο άφιξης σε σχέση με την άφιξη των πρώτων εγκάρσιων κυμάτων S. Ονομάζονται και κύματα 'ουράς'.

Πρότυπος λόγος φασμάτων Fourier

Η τεχνική αυτή (Borcherd, 1970) θεωρείται η πλέον διαδεδομένη για την εκτίμηση της επιρροής των εδαφικών συνθηκών. Ο πρότυπος λόγος φασμάτων είναι ουσιαστικά το πηλίκο του φάσματος πλάτους Fourier από καταγραφή εδάφους, προς το φάσμα πλάτους Fourier από καταγραφή σε κοντινό βράχο. Οι καταγραφές αυτές είναι από τον ίδιο σεισμό (επιρροή πηγής) και η διαδρομή των κυμάτων θεωρείται η ίδια (επιρροή διαδρομής), καθώς τα δύο σημεία ενδιαφέροντος, το έδαφος και ο βράχος, παρουσιάζουν εγγύτητα. Ως σημείο αναφοράς του βράχου συχνά επιλέγονται θέσεις επιφανειακών εξάρσεων των βράχων. Οι παραδοχές εφαρμογής της τεχνικής αυτής αφορούν στην εγγύτητα μεταξύ επιφάνειας εδάφους και επιφανειακής εξάρσης βράχου, σε ίδιες χρονικά καταγραφές των δύο σημείων και στην μη επιρροή της τοπογραφίας στο σημείο αναφοράς του βράχου.

Τεχνική γενικευμένης αντιστροφής

Με την μεθοδολογία αυτή (Andrews, 1986) η επιρροή της διαδρομής θεωρείται γνωστή και δεδομένη μέσα από μία μεγάλη βάση δεδομένων καταγραφής. Έτσι μέσω μιας αντιστροφής ελαχίστων τετραγώνων τα φάσματα πλάτους Fourier για την επιρροή της πηγής και των τοπικών εδαφικών συνθηκών, εκτιμώνται μέσα από την ευρεία βάση δεδομένων που αναφέρθηκε.

Λόγος φασμάτων Fourier οριζόντιας προς κατακόρυφη συνιστώσα

Η μέθοδος αυτή σε αντίθεση με όλες τις προηγούμενες δεν προϋποθέτει την ύπαρξη μίας θέσης καταγραφής και ενός σημείου αναφοράς, καθώς η θέση του σημείου αναφοράς πολλές φορές στο πεδίο δεν είναι εφικτό να εντοπιστεί με τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται. Με την τεχνική αυτή υπολογίζονται τα πλάτη Fourier, σε σχέση με τις συχνότητες, με τον υπολογισμό του λόγου φασμάτων της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα της κίνησης του εδάφους. Η κύρια παραδοχή της μεθόδου έχει να κάνει με το ότι στις περιπτώσεις της οριζόντιας διαστρωμάτωσης των εδαφών, οι περιπτώσεις δηλαδή που θα μελετηθούν στην μεταπτυχιακή εργασία, η κατακόρυφη συνιστώσα της εδαφικής κίνησης ταυτίζεται με την αντίστοιχη οριζόντια συνιστώσα του βραχώδους υποβάθρου μετρά από την καταγραφή της ιστορίας αυτών (οριζόντιων συνιστωσών). Έτσι η κατακόρυφη συνιστώσα δεν έχει καμμία εξάρτηση από την επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην θέση καταγραφής.

3.1.2 Εμπειρικές μέθοδοι

Με τις μεθόδους αυτές υπολογίζονται προσεγγιστικά οι συντελεστές ενίσχυσης της μέγιστης ταχύτητας / μέγιστης επιτάχυνσης του εδάφους, συναρτήσει της ταχύτητας διάδοσης των

διατμητικών κυμάτων σχετιζόμενα με την ένταση του σεισμού και την κατηγορία των εδαφών, ενώ εφαρμόζονται συνήθως σε διατάξεις αντισεισμικών κανονισμών. Στην περίπτωση βάσει δεδομένων από πολλαπλές καταγραφές σε διαφορετικά είδη εδαφών και βράχου ως σημείων αναφοράς, οι μέθοδοι αυτές θα παρουσιάζαν εν δυνάμει αρκετά καλή αξιοπιστία. Λόγω έλλειψης όμως επαρκούς αριθμού τέτοιων καταγραφών μέχρι σήμερα, θεωρούνται προσεγγιστικές.

3.1.3 Ημι-εμπειρικές μέθοδοι

Στην συγκεκριμένη μέθοδο μέσα από πραγματικές καταγραφές σχετικά μικρών σεισμών γίνονται προβλέψεις των σεισμικών κινήσεων που θα προκληθούν από ισχυρότερους σεισμούς και βασίζεται στις συναρτήσεις Green. Οι συναρτήσεις Green έχουν ως βασική θεώρηση πως το σύνολο της εδαφικής κίνησης σε ένα σημείο είναι το άθροισμα των κινήσεων που προκαλούνται από την διάρρηξη πολλών μικρών τμημάτων του ρήγματος που ευθύνεται για την πρόκληση της σεισμικής διέγερσης. Ως μειονέκτημα θεωρείται ότι δεν μπορεί να έχει ευρεία εφαρμογή, καθώς εφαρμόζεται για ένα συγκεκριμένο ρήγμα κάθε φορά, δηλαδή για μία συγκεκριμένη σεισμική διέγερση. Παρόλα αυτά είναι εξαιρετικά χρήσιμη σαν μέθοδος στις περιπτώσεις που απαιτούν την ενσωμάτωση στην διαδικασία υπολογισμού των χαρακτηριστικών της διάρρηξης ενός ρήγματος. Για την ορθή πρακτική της μεθόδου απαιτούνται προσεγγιστικές τιμές σε πλήθος παραμέτρων, όπως η ταχύτητα διάδοσης από την πηγή στο σημείο ενδιαφέροντος, η ταχύτητα διάρρηξης των πετρωμάτων κ.α.

3.1.4 Υβριδικές μέθοδοι

Όμοια με τις ημι-εμπειρικές, υπολογίζονται με αυτές τις μεθόδους ιστορίες σεισμικών κινήσεων αξιοποιώντας ταυτοχρόνως τόσο ένα θεωρητικό μοντέλο σεισμικών ρηγμάτων όσο και ένα εμπειρικό μοντέλο διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Με το θεωρητικό μοντέλο υπολογίζονται οι σεισμικές κινήσεις σε χαμηλές συχνότητες, ενώ με το εμπειρικό μοντέλο υπολογίζεται η διάδοση των σεισμικών κυμάτων σε υψηλές συχνότητες. Με την σύμπραξη των δύο παραπάνω μοντέλων εξάγονται οι ιστορίες εδαφικής κίνησης λόγω των σεισμικών διεγέρσεων.

3.2 Θεωρητικές μέθοδοι

Με τις θεωρητικές μεθόδους ανάλυσης εξάγονται συμπεράσματα για τις τοπικές εδαφικές συνθήκες με την χρήση μοντέλων 1D, 2D, 3D σε σχέση με την διάδοση των σεισμικών κυμάτων.

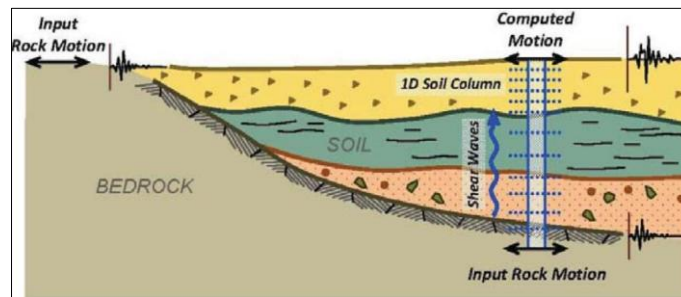
Με τις αναλύσεις αυτές λαμβάνονται υπόψη οι επιρροές των τοπικών εδαφικών συνθηκών μέσω της δυνατότητας παραδοχών για 1) οριζόντια στρώματα εδαφικών αποθέσεων, 2) επίδραση των βαθιών ιζηματογενών λεκανών και 3) επίδραση της τοπογραφίας του εδάφους. Μέσα από την χρήση σύνθετων σχέσεων και την ενσωμάτωση δεδομένων τοπογραφίας και εδαφικών στρωμάτων εξάγονται τα αποτελέσματα – συμπεράσματα της εδαφικής απόκρισης σε σεισμική διέγερση.

3.2.1 Μονοδιάστατη (1D) ανάλυση εδαφικής απόκρισης

Η ταλάντωση των εδαφών γενικώς ενισχύεται και αυξάνεται σε οριζόντιες αποθέσεις εδαφών, μέσα από μηχανισμούς που 'παγιδεύουν' τα εισερχόμενα σεισμικά κύματα εντός των εδαφικών στρώσεων.

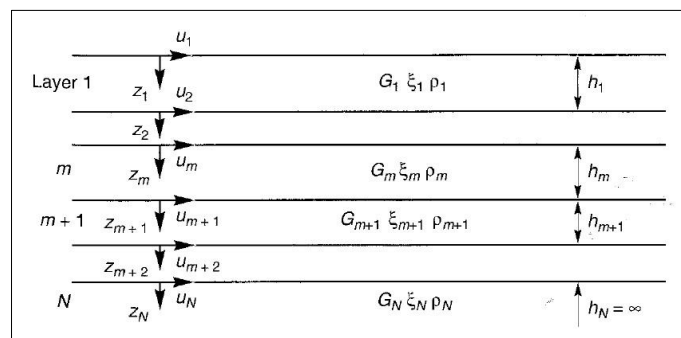
Στις περιπτώσεις, λοιπόν, της οριζόντιας στρωματογραφίας του εδάφους (1D αναλύσεις), η 'παγίδευση' των κυμάτων αφορά στα κύματα χώρου τα οποία κινούνται προς τα πάνω και προς τα κάτω. Στην περίπτωση όμως επιρροής και των ιζηματογενών λεκάνων και της επίδρασης της τοπογραφίας (2D και 3D μοντέλα ανάλυσης) η 'παγίδευση' περιλαμβάνει και τα επιφανειακά κύματα που εμφανίζονται στην διεπιφάνεια των εδαφικών στρώσεων. Με τον όρο 'παγίδευση' περιγράφεται η διαδρομή των σεισμικών κυμάτων από το βραχώδες υπόβαθρο προς ανώτερη εδαφική στρώση και η διατήρησή τους στην στρώση αυτή διαμέσου της ανάκλασης. Το φαινόμενο αυτό προκαλείται εξαιτίας της μεταβαλλόμενης αντίστασης στην μοριακή κίνηση (εμπέδηση) που παρουσιάζουν τα υλικά που αποτελούν την κάθε στρώση.

Σε κάθε περίπτωση η επίδραση μεγιστοποιείται όταν βρίσκονται σε φάση τα ανακλώμενα κύματα με επακόλουθο την ύπαρξη συντονισμού. Στην περίπτωση των μονοδιάστατων δομών που θα απασχολήσουν την παρούσα εργασία το φαινόμενο του συντονισμού μεταφράζεται σε κατακόρυφο συντονισμό των σεισμικών κυμάτων χώρου.



Εικόνα 3.1. Σχηματική αποτύπωση μονοδιάστατης ανάλυσης εδαφικής στήλης

Για τα πολυστρωματικά εδάφη έχει γίνει ήδη αναφορά σε απλό αναλυτικό μοντέλο υπολογισμού της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου (Εξ. 2.3). Το μοντέλο που θα μελετηθεί σε αυτή την εργασία είναι το μοντέλο μονοδιάστατης ανάλυσης (Εικ.3.1). Τα μονοδιάστατα μοντέλα (1D) εδαφικής απόκρισης έχουν ως βάση θεωρίας τους τις αλληπάλληλες ανακλάσεις των εγκάρσιων κυμάτων σε οριζόντια στρώματα εδαφικών αποθέσεων. Σύμφωνα με την θεωρία αυτή η εδαφική στήλη διεγείρεται από τα εισερχόμενα στην βάση της κατακόρυφα εγκάρσια σεισμικά κύματα. Τα δεδομένα που απαιτούνται για την μονοδιάστατη ανάλυση γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους είναι α) η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων, β) η πυκνότητα της κάθε εδαφικής στρώσης, γ) το πάχος της κάθε στρώσης, δ) η υστερητική απόσβεση του εδάφους. Για την περίπτωση θεώρησης μη γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους απαιτείται να οριστούν επιπροσθέτως και η μεταβολή του μέτρου διάτμησης και της απόσβεσης σε σχέση με την διατμητική παραμόρφωση (καμπύλες G-γ-D).



Εικόνα 3.2. Μεταβλητές ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης σε οριζόντια στρωματογραφία (Schnabel et al., 1972)

Για την ισοδύναμη γραμμική ανάλυση μέσα από επαναληπτικούς υπολογισμούς -ανά δύο εδαφικές στρώσεις- μέχρι και την τελευταία εδαφική στρώση ενδιαφέροντος της ανάλυσης, προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις υπολογισμού.

Η συνάρτηση μεταφοράς (ή και συντελεστής μεγέθυνσης του πλάτους $F(\omega)$), είναι ένα μέγεθος που δείχνει πόσο ενισχύεται η σεισμική κίνηση σε διαφορετικές συχνότητες εντός των εδαφικών αποθέσεων) που συνδέει και αντιστοιχίζει τις μετακινήσεις στο ανώτατο σημείο των στρώσεων m και n δίδεται ως:

$$A_{mn}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} \quad \text{Εξ. 3.1}$$

ενώ η ταχύτητα και η επιτάχυνση προκύπτουν με την μορφή εξίσωσης ως εξής:

$$\dot{u}(z, t) = \frac{\partial u}{\partial t} = i\omega u(z, t) \quad \text{Εξ. 3.2}$$

$$\ddot{u}(z, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 u(z, t) \quad \text{Εξ. 3.3}$$

όπου E_m , E_n , F_m , F_n είναι συντελεστές που αφορούν τα πλάτη των αρμονικών διατμητικών κυμάτων στις εδαφικές στρώσεις m , n .

Με την Εξ. 3.1 ορίστηκε η συνάρτηση μεταφοράς σε σχέση με την μετακίνηση. Η συνάρτηση μεταφοράς που συνδέει την ταχύτητα και την επιτάχυνση στην κορυφογραμμή των στρωμάτων m και n δίδεται ως:

$$A_{mn}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} = \frac{\dot{u}_m}{\dot{u}_n} = \frac{\ddot{u}_m}{\ddot{u}_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} \quad \text{Εξ. 3.4}$$

Τέλος η διατμητική παραμόρφωση και η διατμητική τάση στον χρόνο t και στο βάθος z υπολογίζονται σύμφωνα με τα παρακάτω:

$$\gamma(z, t) = \frac{\partial u}{\partial t} = ik * (E e^{ik*z} - F e^{-ik*z}) e^{i\omega t} \quad \text{Εξ. 3.5}$$

$$\tau(z, t) = G * \gamma(z, t) \quad \text{Εξ. 3.6}$$

Όλες οι παραπάνω εξισώσεις περιγράφουν με πληρότητα τα της μονοδιάστατης *ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης* της εδαφικής απόκρισης. Με τον ορισμό των εννοιών α) της εδαφικής ταλάντωσης εδαφικής επιφάνειας και βραχώδους υποβάθρου (το οποίο βραχώδες υπόβαθρο διεγείρει την βάση της εδαφικής απόθεσης) και β) την κίνηση στην επιφανειακή έξαρση του βραχώδους υποβάθρου ολοκληρώνεται η μεθοδολογία της υπό μελέτη μονοδιάστατης ανάλυσης.

Το πλάτος του αρμονικού διατμητικού κύματος που διαδίδεται στο βραχώδες υπόβαθρο είναι E_N . Στην διεπιφάνεια βράχου και εδαφικών αποθέσεων είναι $E_N + F_N$, με $F_N < E_N$. Όμοια, το πλάτος στην επιφανειακή έξαρση του βραχώδους υποβάθρου είναι $2E_N$.

Ο συντελεστής ενίσχυσης του πλάτους της κίνησης από το βραχώδες υπόβαθρο στην επιφάνεια του εδάφους εκφράζεται με την *συνάρτηση μεταφοράς* και είναι

$$A_{NN}(\omega) = \frac{2E_N}{E_N + F_N} \quad \text{Εξ. 3.7}$$

Ολοκληρώνοντας το θεωρητικό υπόβαθρο, τα δεδομένα που απαιτούνται για την μονοδιάστατη ανάλυση μη γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους είναι τα προαναφερθέντα (πάχος στρώσης, ταχύτητα κυμάτων, πυκνότητα ή ειδικό βάρος υλικών) και επιπρόσθετα η μεταβολή του μέτρου διάτμησης (G) και της απόσβεσης ($D\%$) με την διατμητική παραμόρφωση του εδάφους γ .

Με την ανάλυση αυτή η μη γραμμική συμπεριφορά προσεγγίζεται με μία *ισοδύναμη γραμμική συμπεριφορά* μέσω επαναλήψεων κατά τις οποίες μεταβάλλονται το μέτρο διάτμησης G και η απόσβεση D ώστε να είναι συμβατές οι τιμές τους με την διατμητική παραμόρφωση γ μέσα από την χρήση των καμπυλών $G - \gamma - D$. Οι επαναλήψεις της ανάλυσης πραγματοποιούνται σύμφωνα με τα κάτωθι:

α) Σε κάθε εδαφική στρώση γίνεται μία αρχική εκτίμηση των τιμών G και ξ για μικρές παραμορφώσεις.

β) Οι εκτιμώμενες τιμές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της διατμητικής παραμόρφωσης γ της κάθε στρώσης.

γ) Υπολογίζεται η δρώσα διατμητική παραμόρφωση (γ_{eff}) από την παρακάτω σχέση: $\gamma_{eff,j}^{(i)} = R_\gamma * \gamma_{max,j}^{(i)}$, όπου i είναι ο αριθμός της επανάληψης, j είναι η κάθε εδαφική στρώση και R είναι το πηλίκο της δρώσας διατμητικής παραμόρφωσης προς την μέγιστη διατμητική παραμόρφωση και υπολογίζεται ως $R = \frac{M-1}{10}$, με M το μέγεθος του σεισμού.

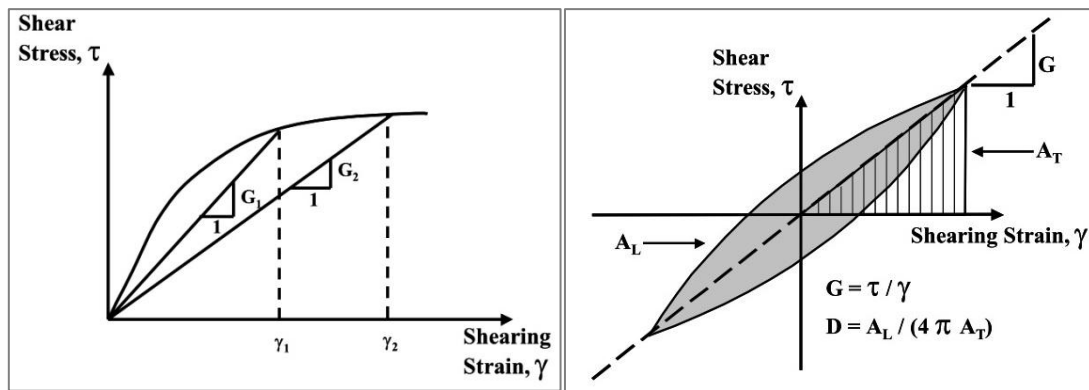
δ) Από την δρώσα τιμή της διατμητικής παραμόρφωσης γ_{eff} υπολογίζονται από τις καμπύλες $G-\gamma-D$ οι νέες τιμές των G και ξ και επαναλαμβάνεται εκ νέου η διαδικασία έως ότου να προκύψει μικρή διαφορά των τιμών G και ξ μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων οπότε και ολοκληρώνεται η διαδικασία.

3.2.2 Δυναμική συμπεριφορά εδαφών

Κατά την σεισμική διέγερση τα εδάφη υπόκεινται σε διατμητική φόρτιση, έτσι η μη γραμμική συμπεριφορά των εδαφών έχει ως επακόλουθο την μεταβολή της δυσκαψίας και της απόσβεσης των εδαφικών στρώσεων σχετιζόμενα και επηρεαζόμενα από την διατμητική παραμόρφωση.

Η δυσκαμψία (δυστημσία) χαρακτηρίζεται και περιγράφεται από το μέτρο διάτμησης G , ενώ η απόσβεση του υλικού ορίζεται ως D . Τα δύο αυτά μεγέθη περιγράφουν την δυναμική συμπεριφορά των εδαφών σε σεισμική φόρτιση. Το μέτρο διάτμησης ορίζεται ως η κλίση της γραφικής παράστασης των τάσεων-παραμορφώσεων (Εικ.3.3) και η απόσβεση ως ο λόγος της καταναλωθείσας ενέργειας προς την μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης.

Στην θεώρηση της ανακυκλιζόμενης φόρτισης το μέτρο διάτμησης και η απόσβεση απαντώνται για έναν πλήρη κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης (Εικ3.3).



Εικόνα 3.3. (αριστερά) Μη γραμμική σχέση διατμητικών τάσεων, παραμορφώσεων - (δεξιά) Μέτρο διάτμησης, λόγος απόσβεσης σε έναν πλήρη κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης (Darendeli, 2001)

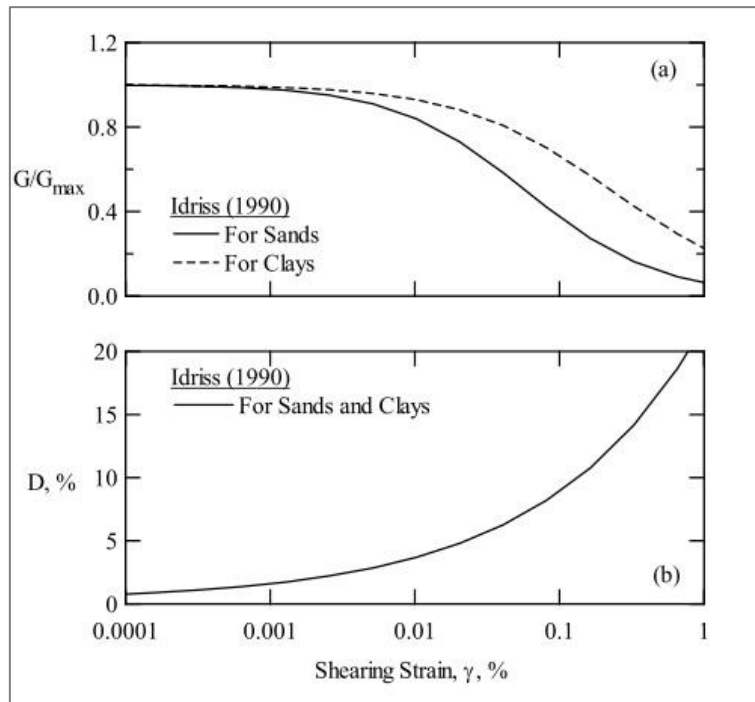
Το μέτρο διάτμησης και η απόσβεση του υλικού αποτυπώνονται με την βοήθεια των καμπυλών G-γ-D. Γενικά για πολύ μικρές παραμορφώσεις της τάξεως $\gamma < 10^{-4}$ %, τα εδάφη έχουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά ενώ όσο κλιμακώνεται η τιμή των διατμητικών παραμορφώσεων τα εδάφη ακολουθούν ελαστική μη γραμμική και ανελαστική μη γραμμική συμπεριφορά.

Με την πάροδο των χρόνων, έχουν αναπτυχθεί πλείστα μοντέλα προτεινόμενων καμπυλών όσον αφορά μη πλαστικά εδάφη (χαλικώδη, αμμώδη) και πλαστικά εδάφη (αργιλικά), όσον αφορά την συσχέτιση των παραμέτρων στην επιρροή του μέγιστου μέτρου διάτμησης G_{max} και της απόσβεσης υλικού D, όσον αφορά το πλάτος των διατμητικών παραμορφώσεων (μικρό, μεσαίο, μεγάλο) κ.α.

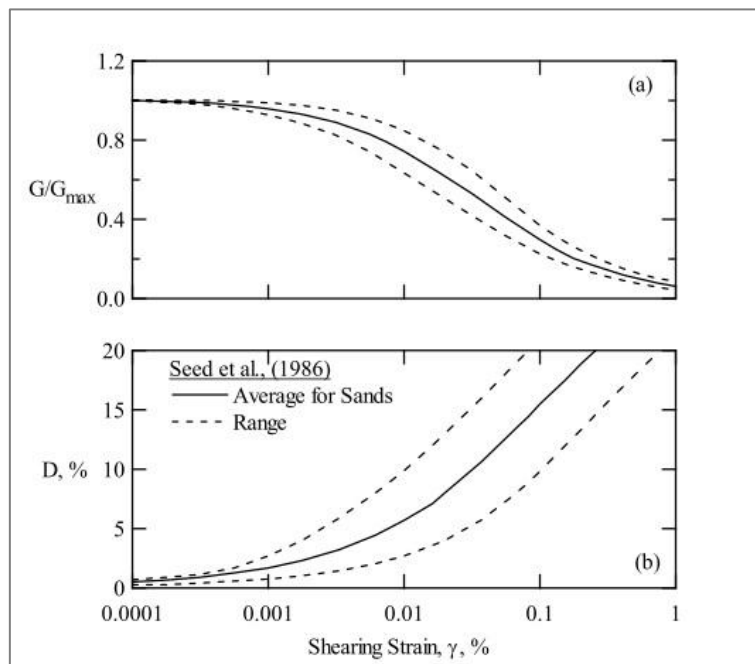
Οι παράγοντες, που επηρεάζουν τις τιμές των G_{max} , D_{min} λαμβάνονται υπόψιν (το σύνολό τους ή μέρος αυτών) στα εμπειρικά μοντέλα και ελήφθησαν υπόψιν και στα παραδείγματα εφαρμογής των επόμενων κεφαλαίων της μεταπτυχιακής εργασίας (στο σύνολό τους), συνοψίζονται στους εξής:

- Μέση ενεργός τάση (mean effective stress)
- Δείκτης πλαστικότητας (plasticity index)
- Συχνότητα διέγερσης (Hz)
- Συντελεστής προστερεοποίησης (over consolidation ratio)
- Αριθμός κύκλων φόρτισης (N)

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζονται χαρακτηριστικές, προτεινόμενες από την διεθνή βιβλιογραφία, καμπύλες G-γ-D και συγκεκριμένα η καμπύλη του Idriss (1990) για αμμώδη και αργιλικά εδάφη (Εικ.3.4) και η καμπύλη των Seed et al. (1986) για αμμώδη εδάφη (Εικ.3.5), ενώ στα επόμενα υποκεφάλαια παρουσιάζονται αναλυτικότερα η καμπύλη των Vucetic & Dobry (1991) για αμμώδη και αργιλικά εδάφη, οι καμπύλες G-γ-D του Darendeli (2001) και οι προτεινόμενες καμπύλες του Kishida (2012) που χρησιμοποιήθηκαν στην μεταπτυχιακή εργασία για την ισοδύναμη γραμμική ανάλυση.



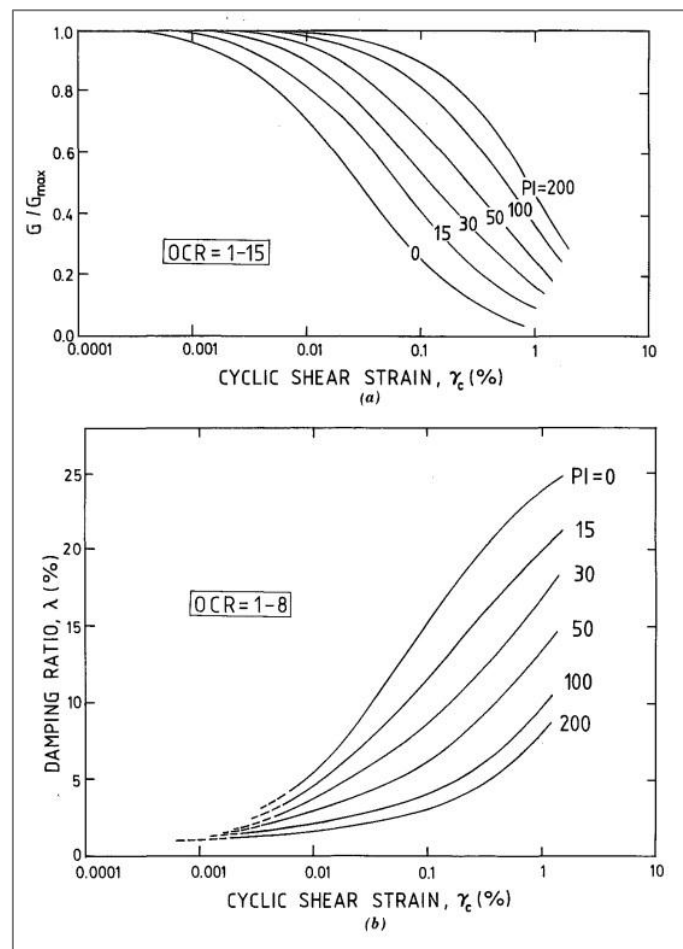
Εικόνα 3.4. Καμπύλες G/G_{max} , $D\%$ με διατμητική παραμόρφωση (Idriss, 1990)



Εικόνα 3.5. Καμπύλες G/G_{max} , $D\%$ με διατμητική παραμόρφωση (Seed et al., 1986)

3.2.3 Το μοντέλο καμπυλών των Vuceti & Dobry (1991)

Οι Vucetic και Dobry το 1991 παρουσίασαν την δική τους πρόταση για τις καμπύλες του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης και της απόσβεσης του υλικού με την διατμητική παραμόρφωση (Εικ.3.6) μέσα από εργαστηριακά δεδομένα για αργιλικά και αμμώδη εδάφη (Vucetic M. and Dobry R., 1991). Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε είχε ως παράμετρο επιρροής τον δείκτη πλαστικότητας (PI) στην μεταβολή του μέτρου διάτμησης και της απόσβεσης του υλικού τόσο σε αργιλικά όσο και για αμμώδη εδάφη (PI=0). Για τα αμμώδη εδάφη οι καμπύλες G-γ-D συμπίπτουν και με τις αντίστοιχες προτεινόμενες καμπύλες των Seed et al. (Seed H. B., Wong R. T., Idriss I. M. and Tokomatsu K., 1986).



Εικόνα 3.6. Καμπύλες G/G_{max} , $D\%$ με διατμητική παραμόρφωση (Vucetic & Dobry, 1991)

Από τα παραπάνω προκύπτει η διαπίστωση ότι χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των καμπυλών διαφορετικός βαθμός προστερεοποίησης (OCR) ένα έως δεκαπέντε (καμπύλη G-γ) και ένα έως οκτώ (καμπύλη D-γ) και ο βαθμός πλαστικότητας και για τις καμπύλες ελήφθη ίσος με $PI(\%) = 0, 15, 30, 50, 100, 200$. Επίσης, συμπερασματικά, όσο αυξάνεται ο δείκτης πλαστικότητας αυξάνεται και το κανονικοποιημένο μέτρο διάτμησης και μειώνεται η απόσβεση του υλικού, ενώ όσο αυξάνεται η διατμητική παραμόρφωση μειώνεται το μέτρο διάτμησης και αυξάνεται η απόσβεση.

3.2.4 Το προγνωστικό μοντέλο του Darendeli (2001)

Για την μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους στα παραδείγματα και τις εφαρμογές που υλοποιούνται στην παρούσα εργασία, υιοθετήθηκε και το προγνωστικό μοντέλο του Darendeli το οποίο έχει ως βάση αναφοράς το μοντέλο των Hardin & Drnevich (1972). Η σχέση μείωσης του μέτρου διάτμησης που προτείνεται από τον Darendeli είναι η παρακάτω:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a} \quad \text{Εξ. 3.8}$$

όπου a ορίζεται ένας συντελεστής καμπυλότητας που συσχετίζει την καμπύλη μεταβολής του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης με τον τύπο του εδάφους και τις συνθήκες φόρτισης και γ_r η διατμητική παραμόρφωση αναφοράς (εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης με διατμητική αντοχή τ_f) για $G/G_{max} = 0.5$, η οποία υπολογίζεται αναλυτικά με την παρακάτω σχέση:

$$\gamma_r = \left(\frac{\sigma'_v}{p_a}\right)^{0.3483} (0.0352 + 0.0010 * PI * OCR^{0.3246}) \quad \text{Εξ. 3.9}$$

όπου αντίστοιχα, σ'_v είναι η μέση ενεργός τάση, p_a η ατμοσφαιρική πίεση, PI ο δείκτης πλαστικότητας, OCR ο συντελεστής προστερεοποίησης.

Για τον υπολογισμό της απόσβεσης του υλικού, που ουσιαστικά είναι ένα μέτρο του λόγου της απώλειας ενέργειας προς την μέγιστη διατηρηθείσα ενέργεια καταπόνησης, ο Darendeli κατέληξε στην χρήση της εξίσωσης 3.10:

$$D = b \left(\frac{G}{G_{max}}\right)^{0.1} * D_{Masing} + D_{min} \quad \text{Εξ. 3.10}$$

όπου b είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από τον αριθμό των κύκλων φόρτισης N . Ως φυσική σημασία ο αριθμός των κύκλων φόρτισης ισούται με τον αναγκαίο αριθμό κύκλων φόρτισης για να αναπτυχθεί τόση πίεση στους πόρους των υλικών όση θα αναπτυσσόταν σε μία πραγματική σεισμική φόρτιση με διατμητική τάση ίση προς το 65% της μέγιστης πραγματικής διατμητικής τάσης (Πιτιλάκης, 2010). Ο συντελεστής b υπολογίζεται σύμφωνα με τα παρακάτω:

$$b = 0.6329 - 0.0057 \ln(N) \quad \text{Εξ. 3.11}$$

ενώ D_{Masing} , $D_{Masing, a=1}$ ορίζονται από τις εξισώσεις 3.12 και 3.13 και αφορούν το προσομοίωμα που αναπτύχθηκε από τον Masing (1926) για την εκτίμηση του λόγου απόσβεσης. Επιγραμματικά αναφέροντας, ο κανόνας του Masing έθεσε τις βάσεις περιγραφής της δυναμικής συμπεριφοράς

των εδαφών και υπολογισμού των μη γραμμικών σχέσεων τάσεων και παραμορφώσεων μέσα από επαναληπτικούς κύκλους φορτίσεων.

$$D_{Masing} (\%) = c_1 D_{Masing,a=1} + c_2 D_{Masing,a=1}^2 + c_3 D_{Masing,a=1}^3 \quad \text{Εξ. 3.12}$$

$$D_{Masing,a=1} (\%) = \frac{100}{\pi} \left\{ 4 \left[\frac{\gamma - \gamma_r \ln\left(\frac{\gamma + \gamma_r}{\gamma_r}\right)}{\frac{\gamma^2}{\gamma + \gamma_r}} \right] - 2 \right\} \quad \text{Εξ. 3.13}$$

και c_1 , c_2 , c_3 είναι συντελεστές που υπολογίζονται:

$$c_1 = -1.1143a^2 + 1.8618a + 0.2533 \quad \text{Εξ. 3.14}$$

$$c_2 = 0.0805a^2 - 0.0710a - 0.0095 \quad \text{Εξ. 3.15}$$

$$c_3 = -0.0005a^2 + 0.0002a + 0.0003 \quad \text{Εξ. 3.16}$$

Ο τελευταίος όρος της εξίσωσης 3.10 αφορά την απόσβεση D_{min} σε πολύ μικρές διατμητικές παραμορφώσεις ως εξαρτώμενη από τις γνωστές παραμέτρους σ'_0 , PI , OCR και του f που είναι η συχνότητα διέγερσης.

$$D_{min} (\%) = (\sigma'_0)^{-0.2889} (0.8005 + 0.0129 * PI * OCR^{-0.1069}) [1 + 0.2919 \ln(f)] \quad \text{Εξ. 3.17}$$

Ενδεικτικές καμπύλες G-γ-D και από την μέθοδο του Darendeli παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν με παραδοχές τις εξής:

- $\sigma'_0 = 1 \text{ atm}$, $PI = 0\%$, $OCR = 1$, $f = 1 \text{ Hz}$, $N = 10$ κύκλοι φόρτισης - (Εικ. 3.7)

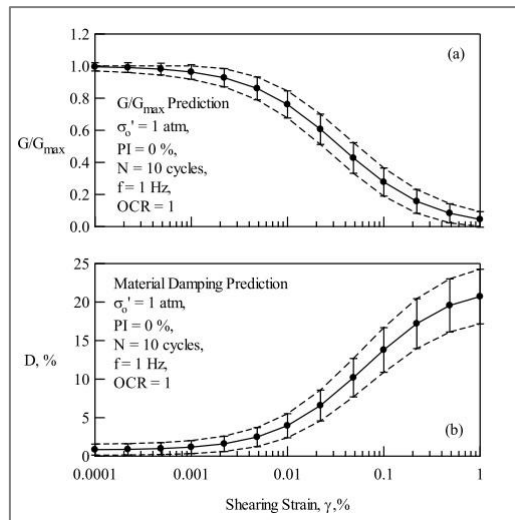
Καμπύλες με βάση το μοντέλο του Darendeli (2001)

- $\sigma'_0 = 1 \text{ atm}$, $PI = 0\% - 15\% - 30\% - 50\% - 100\%$, $OCR = 1$, $f = 1 \text{ Hz}$, $N = 10$ κύκλοι φόρτισης - (Εικ. 3.8)

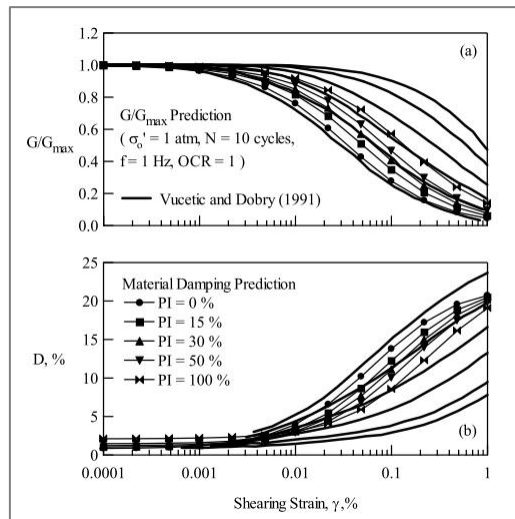
Συγκριτικές καμπύλες Darendeli (2001) - Vucetic and Dobry (1991)

- $\sigma'_0 = 0.25 - 1 - 4 - 16 \text{ atm}$, $PI = 0\%$, $OCR = 1$, $f = 1 \text{ Hz}$, $N = 10$ κύκλοι φόρτισης - (Εικ. 3.9)

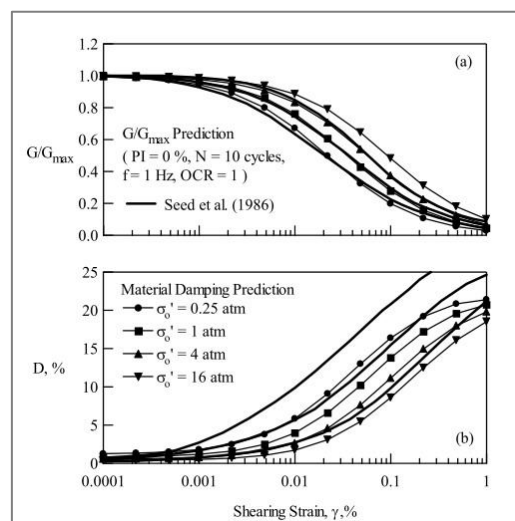
Συγκριτικές καμπύλες για αμμώδη εδάφη Darendeli (2001) - Seed et al. (1986)



Εικόνα 3.7. Καμπύλες G/G_{max} , $D\%$ με διατμητική παραμόρφωση (Darendeli, 2001)



Εικόνα 3.8. Συγκριτικές καμπύλες G/G_{max} , $D\%$ με διατμητική παραμόρφωση (Darendeli, 2001 - Vucetic & Dobry 1991)



Εικόνα 3.9. Συγκριτικές καμπύλες G/G_{max} , $D\%$ με διατμητική παραμόρφωση για αμμώδη εδάφη (Darendeli, 2001 - Seed et al. 1986)

3.2.5 Το προγνωστικό μοντέλο του Kishida (2012)

Για την μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους χρησιμοποιήθηκε στην διπλωματική εργασία και το μοντέλο από τον Kishida (2012), για εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη. Το συγκεκριμένο μοντέλο δεν υπάρχει ως επιλογή εδαφικού μοντέλου με τα προγράμματα Deepsoil και Strata, είναι ενσωματωμένο όμως στην βιβλιοθήκη pystrata. Για τα προγράμματα και την βιβλιοθήκη θα γίνει εκτενής αναφορά στα επόμενα κεφάλαια.

Με το μοντέλο αυτό ορίζονται ως παράμετροι:

το πάχος της κάθε εδαφικής στρώσης (m),

το ειδικό βάρος των υλικών (kN/m^3),

η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων (m/sec),

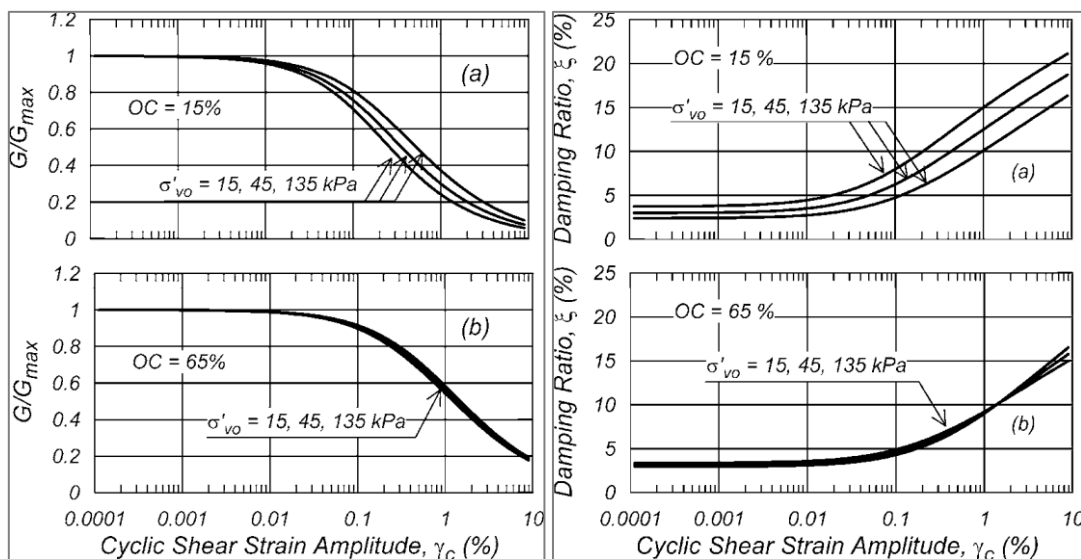
η ενεργός τάση (kPa),

η εργαστηριακή τιμή του συντελεστή προστερεοποίησης OCR.

Εισάγεται τέλος, το μέγεθος (σε μορφή ποσοστού) της περιεκτικότητας σε οργανική ύλη των εδαφικών στρώσεων OC (organic content), το οποίο δεν συναντάται σε κανένα από τα υπόλοιπα μοντέλα που αφορούν την μεταπτυχιακή εργασία. Η συγκεκριμένη μέθοδος αναπτύχθηκε για εφαρμογή κυρίως σε τυρφώδη (οργανικά) εδάφη όπου και το ποσοστό σε οργανική ύλη μπορεί και να ξεπερνάει και το 60%. Για τα ορυκτά εδάφη (ανόργανα), που αποτελούν και τα συνήθη εδάφη, το παραπάνω ποσοστό συνήθως δεν ξεπερνάει την τιμή του 5%.

Οι συγκριτικές αναλύσεις που εφαρμόστηκαν για τα προγνωστικά μοντέλα του Darendeli (2001) και του Kishida (2012) αποτυπώνονται στο κεφάλαιο 5, όπου και εισάγεται η βιβλιοθήκη pystrata στα διαθέσιμα εργαλεία πραγματοποίησης αναλύσεων εδαφικής απόκρισης.

Ενδεικτικές καμπύλες του ανωτέρω μοντέλου παρουσιάζονται στην εικόνα 3.10:



Εικόνα 3.10. Μεταβολή καμπυλών G/G_{max} , $D\%$ με την διατμητική παραμόρφωση (Kishida, 2012)

3.2.6 Διδιάστατη (2D) – Τρισδιάστατη (3D) ανάλυση εδαφικής απόκρισης

Πέρα από το μονοδιάστατο μοντέλο που εξετάζεται στην διπλωματική εργασία, έχει ήδη αναφερθεί και η ανάπτυξη διδιάστατων (2D) και τρισδιάστατων (3D) μοντέλων υπολογισμού της επιρροής των τοπικών εδαφικών σχηματισμών.

Πρωτεύοντα ρόλο στις αναλύσεις αυτές έχουν τα επιφανειακά κύματα, πέρα από τα κύματα χώρου, ενώ συνεκτιμάται στις αναλύσεις και η επιφανειακή τοπογραφία. Έτσι, όταν τα εδαφικά στρώματα προσομοιώνονται σε διδιάστατη ή τρισδιάστατη μορφή οι θεμελιώδεις ιδιοσυχνότητες επηρεάζονται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μορφών αυτών.

Θεωρητικά τα παραπάνω μοντέλα συνεισφέρουν στην ενσωμάτωση του πλήθους των παραμέτρων που συμβάλλουν στην περιπλοκότητα των εδαφικών κινήσεων.

Παρόλα αυτά, η πλειοψηφία των μεθόδων αυτών είναι γραμμική ελαστική με σταθερή απόσβεση, κυρίως λόγω του μεγάλου κόστους που τις συνοδεύει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την χρήση τους, προς ώρας, στην αποκωδικοποίηση των συμβάντων διάδοσης και διαδρομής των σεισμικών κυμάτων από την φυσική σκοπιά και όχι για υιοθέτησή τους σε κανονιστικές διατάξεις και εφαρμογές σχεδιασμού.

Κεφάλαιο 4

Εργαλεία εκτίμησης εδαφικής κίνησης

4.1 Επισκόπηση ιστορικής εξέλιξης υφιστάμενου λογισμικού

Έχει γίνει αναφορά στα προηγούμενα κεφάλαια ότι η εδαφική κίνηση μπορεί να εκφραστεί ως το γινόμενο της επιρροής της πηγής, της επιρροής της διαδρομής και των τοπικών εδαφικών συνθηκών και αποτυπώνεται ως χρονοϊστορία της παραμέτρου που ενδιαφέρει τον αναλυτή. Η μεταβλητή αυτή μπορεί να είναι η επιτάχυνση, η ταχύτητα ή η μετακίνηση με συνηθέστερη χρήση περιγραφής του αποτελέσματος του κραδασμού την επιτάχυνση του εδάφους.

Το βασικό ενδιαφέρον του πολιτικού μηχανικού στις αναλύσεις εκτιμήσεων εδαφικής κίνησης μπορεί να συμπυκωθεί σε τρεις εκ των μεταβλητών της εδαφικής κίνησης :

- το μέγιστο πλάτος της κίνησης
- το συχνотικό περιεχόμενο και
- την διάρκεια της σεισμικής διέγερσης

όπου ως πλάτος λογίζεται η επιτάχυνση, η ταχύτητα ή η μετακίνηση του εδάφους, το συχνотικό περιεχόμενο επηρεάζει την μεταβολή του πλάτους της κίνησης αναλόγως την συχνότητα και αποτιμάται με την βοήθεια των φασμάτων Fourier και των ελαστικών φασμάτων απόκρισης και η διάρκεια επηρεάζει την σπουδαιότητα των ζημιών που εν δυνάμει προκαλούνται.

Ενδεικτικά αναφέροντας λοιπά μεγέθη αποτίμησης της εδαφικής κίνησης, μπορεί να γίνει λόγος για την ένταση *Arias* και την δρώσα εδαφική επιτάχυνση.

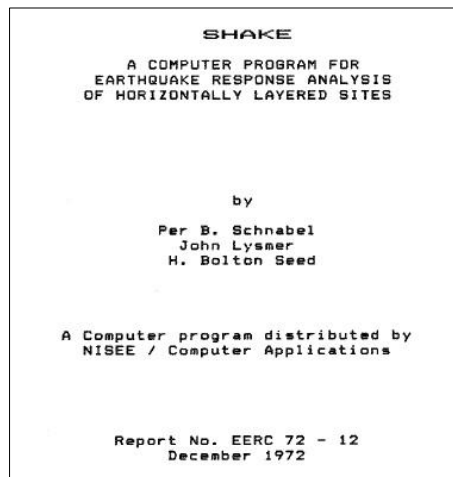
Η ένταση *Arias* αποτελεί μέτρο έντασης της ενέργειας των σεισμικών καταγραφών (του σεισμού) και συναρτήσει του χρόνου προκύπτει το διάγραμμα *Husid* από το οποίο εξάγονται συμπεράσματα για την σημαντική διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης.

Η δρώσα (ενεργός) εδαφική επιτάχυνση έχει εφαρμογή περισσότερο σε ότι αφορά τις δομικές κατασκευές. Αυτό συμβαίνει διότι λαμβάνεται μειωμένη τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης που καταγράφεται από τα επιταχυνσιογραφήματα προς αποφυγή της υπερδιαστασιολόγησης της δομικής κατασκευής. Έτσι αντί να χρησιμοποιείται η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης που προκύπτει από μία καταγραφή και η οποία αποτελεί μόνο μία αιχμή στο σειсмоγράφημα, εφαρμόζεται ένα ποσοστό αυτής για τις ανάγκες υπολογισμού (2/3 της μέγιστης τιμής, 125% της τρίτης μεγαλύτερης τιμής καταγραφής κλπ.)

Όλα τα παραπάνω μεγέθη προσομοιώνονται και εξάγονται με την μορφή δεδομένων, στην ολότητά τους ή τμηματικά, σε λογισμικό ηλεκτρονικών υπολογιστών που έχουν αναπτυχθεί εδώ και πολλές δεκαετίες για την εκτίμηση της ισχυρής εδαφικής κίνησης. Στις επόμενες παραγράφους θα

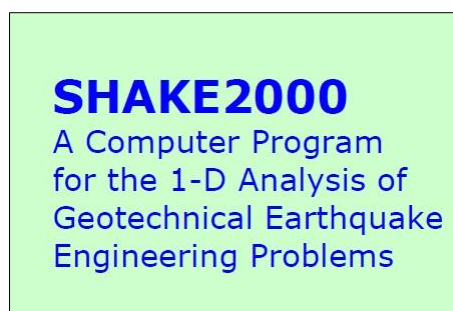
αναφερθούν ενδεικτικά ορισμένα από τα προγράμματα που εξυπηρετούν της ανάγκες ανάλυσης της ισχυρής εδαφικής κίνησης.

Ένα από τα πρώτα προγράμματα για ηλεκτρονικό υπολογιστή που ασχολήθηκε με το ζήτημα της εδαφικής κίνησης με την θεώρηση της οριζόντιας στρωματογραφίας, ήταν το SHAKE (1972) το οποίο αναπτύχθηκε από τους P.B. Schnabel, J. Lysmer, H.B. Seed στο Πανεπιστήμιο του Berkeley στην Καλιφόρνια.



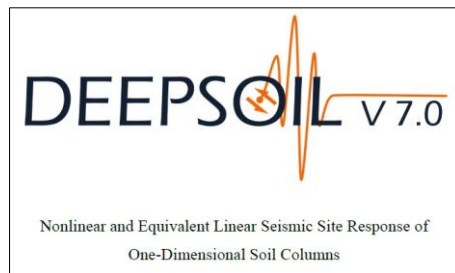
Εικόνα 4.1. Εξώφυλλο εγχειριδίου χρήσης προγράμματος SHAKE (1972)

Το πρόγραμμα αναπτύχθηκε σε υπολογιστή CDC 6400 με την χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Fortran (έκδοση IV). Ακολουθούσε όλους τους κανόνες που διέπουν τα μονοδιάστατα μοντέλα με την μεθοδολογία της ισοδύναμης προς γραμμική ανάλυσης, με αποτύπωση της σεισμικής κίνησης με την βοήθεια χρονοϊστορίας μετακινήσεων, του φάσματος Fourier και της συνάρτησης μεταφοράς. Χρησιμοποιήθηκε για λόγους έρευνας σε μία εποχή που η λειτουργία και οι δυνατότητες των υπολογιστών διέφεραν σε σημαντικό βαθμό από το σήμερα και πριν από την τεχνολογική επανάσταση με την έκρηξη του διαδικτύου. Μία μετεξέλιξη του προγράμματος SHAKE είναι και το SHAKE2000, το οποίο ενσωματώνει λειτουργίες και μεθοδολογία του αρχικού προγράμματος 30 χρόνια μετά.



Εικόνα 4.2. Εξώφυλλο εγχειριδίου χρήσης προγράμματος SHAKE 2000

Το Deepsoil είναι ένα ανάλογο πρόγραμμα (1-D) δυναμικής ανάλυσης εδαφικής απόκρισης που μπορεί να εκτελεί μη γραμμικές αναλύσεις και είναι νεότερης γενιάς από τα παραπάνω αναφερθέντα προγράμματα. Οι λειτουργίες του που περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω είναι πανομοιότυπες με τις λειτουργίες που έχουν όλα τα νεότερα προγράμματα γύρω από την εδαφική κίνηση.



Εικόνα 4.3. Λογότυπο λογισμικού Deepsoil

Στο λογισμικό Deepsoil υπάρχουν ενσωματωμένα δεδομένα από σεισμούς που συνέβησαν ανά τον κόσμο, υπάρχει όμως και η δυνατότητα στον χρήστη να συμπεριλάβει και άλλα επιταχυνσιογραφήματα ενδιαφέροντός του.

Με την επιλογή του επιταχυνσιογραφήματος εμφανίζονται σε μορφή πίνακα, ενώ απεικονίζονται και γραφικά, οι χρονοϊστορίες επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μετακινήσεων όπως και λοιπά διαγράμματα ενδιαφέροντος (φάσμα απόκρισης, φάσμα Fourier, ένταση Arias).

Με την δυνατότητα επιλογής της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης (όμοια και στην γραμμική ελαστική με ορισμό λιγότερων παραμέτρων) και μέσα από την χρήση των καμπυλών G-γ-D, σε αρχικό στάδιο παραμετροποιούνται οι ιδιότητες των εδαφών μέχρι και την επιφάνεια:

α) του βραχώδους υποβάθρου (ταχύτητα διατμητικών κυμάτων, ειδικό βάρος, απόσβεση)

β) των στρώσεων των εδαφικών αποθέσεων με βάση το βάθος της κάθε εδαφικής απόθεσης, την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων, το ειδικό βάρος του υλικού, τον δείκτη πλαστικότητας και την μέση ενεργό τάση ανά εδαφική στρώση. Παρουσιάζεται η δυνατότητα ορισμένες από τις προαναφερθείσες παραμέτρους (πάχος στρώσης, ταχύτητα διατμητικών κυμάτων) του βραχώδους υποβάθρου και των εδαφικών στρώσεων να απεικονίζονται σε γραφήματα.

Προσδιορίζεται η ενεργός τιμή της διατμητικής παραμόρφωσης γ_{eff} , ενώ ελέγχεται η συμβατότητα του μέτρου διάτμησης και της απόσβεσης με το γ_{eff} μέσω των καμπυλών G-γ-D που έχουν αναπτυχθεί και αποτυπώνονται στην διεθνή βιβλιογραφία. Στην περίπτωση μη συμβατότητας υπολογίζονται κατάλληλες τιμές στο μέτρο διάτμησης και την απόσβεση ώστε να προκύψει συμβατότητα, οπότε λαμβάνει χώρα η ανάλυση και εξάγονται τελικά αποτελέσματα.

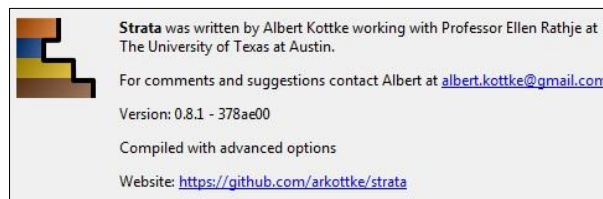
Γενικά, αυξημένη διατμητική παραμόρφωση συνεπάγεται αύξηση της απόσβεσης και απομείωση του μέτρου διάτμησης.

Με την ολοκλήρωση της ανάλυσης δίνεται η δυνατότητα συγκριτικών αποτελεσμάτων περισσότερων του ενός επιταχυνσιογραφήματων κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων αυτής, πάντοτε σε σχέση με τις ίδιες παραμέτρους των εδαφικών στρώσεων και του βραχώδους υποβάθρου που έχει επιλεγεί σε προηγούμενα βήματα τόσο με την μορφή γραφημάτων όσο και με την μορφή πινάκων.

Οι επιμέρους τιμές επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μετακινήσεων ανά βήμα χρόνου που παρουσιάζονται με την μορφή πίνακα δίνουν την ευχέρεια για λεπτομερέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Κοινά χαρακτηριστικά με το Deepsoil έχει και το λογισμικό Strata. Δίνει την ευχέρεια στον χρήστη μέσα από δεδομένα που έχει ενσωματωμένα, αλλά και από δεδομένα που δύναται να εισαχθούν, να αναλυθεί η εδαφική κίνηση με την μέθοδο της γραμμικής ελαστικής και της ισοδύναμης

γραμμικής ανάλυσης με την χρήση των γνωστών διαγραμμάτων (φάσματα Fourier, συνάρτηση μεταφοράς κτλ.). Είναι ένα σχετικά νεότερο freeware λογισμικό (με τελευταία έκδοση τον Σεπτέμβριο 2021) σε σχέση με τα προηγούμενα.



Εικόνα 4.4. Πληροφορίες λογισμικού Strata

Άλλα παρόμοιας λειτουργίας προγράμματα είναι το Cyclic 1-D, το Proshake κλπ, τα οποία με μικρές παραλλαγές παρουσιάζουν τις ίδιες παραμέτρους επιρροής όσον αφορά την εκτίμηση και αποτύπωση της ισχυρής εδαφικής κίνησης.

4.2 Περιγραφή παραδειγμάτων εφαρμογής με χρήση διαθέσιμου λογισμικού

Θα εφαρμοστούν στην εργασία τρία παραδείγματα για τις αναλύσεις που θα πραγματοποιηθούν, μέσα από συγκεκριμένα βήματα που αναλύονται παρακάτω.

Βήμα 1ο:

Επιλέγεται η μέθοδος ανάλυσης της εδαφικής απόκρισης και συγκεκριμένα η γραμμική ελαστική και η ισοδύναμη γραμμική ανάλυση με την προσέγγιση της μεθόδου της χρονοϊστορίας.

Βήμα 2ο:

Περιγράφονται στην συνέχεια οι στρώσεις των προς ανάλυση εδαφών. Και στα τρία παραδείγματα επιλέχθηκαν 3 στρώσεις εδαφών πάνω από το βραχώδες υπόβαθρο ενώ ορίζονται και οι βασικές ιδιότητες των εδαφών και του βραχώδους υποβάθρου στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) και συγκεκριμένα:

α) το πάχος της κάθε εδαφικής στρώσης (όχι του βραχώδους υποβάθρου που θεωρείται άπειρο) σε m,

β) το ειδικό βάρος των υλικών της κάθε στρώσης και του βραχώδους υποβάθρου σε kN/m^3 και

γ) η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων σε κάθε στρώση και στο βραχώδες υπόβαθρο σε m/sec

Βήμα 3ο (ισοδύναμη γραμμική ανάλυση):

Λόγω της σεισμικής κίνησης το έδαφος υπόκειται σε διατμητική παραμόρφωση γ . Η δυναμική εδαφική απόκριση επηρεάζεται και εξαρτάται από το μέτρο διάτμησης του εδάφους G και την υστερητική απόσβεση D (εσωτερική απώλεια ενέργειας των εδαφών, ονομάζεται και απόσβεση υλικού).

Επιλέγεται το μοντέλο καμπυλών αναφοράς $G-\gamma-D$ της δυναμικής συμπεριφοράς των εδαφών για κάθε εδαφική στρώση (όχι για το βραχώδες υπόβαθρο) και συγκεκριμένα το μοντέλο του Darendeli (2001) και το μοντέλο των Vucetic & Dobry (1991). Για το μοντέλο του Darendeli απαιτείται ο ορισμός περισσότερων παραμέτρων σε σχέση με το μοντέλο των Vucetic & Dobry.

Πρέπει να αναφερθεί πως για τις καμπύλες του μέτρου διάτμησης με την διατμητική παραμόρφωση, όπως και της υστερητικής απόσβεσης με την διατμητική παραμόρφωση, έχει αναπτυχθεί πλήθος διαγραμμάτων στην διεθνή βιβλιογραφία (Seed & Idriss 1991, Vucetic & Dobry 1991, Darendeli 2001, κ.α.) αρκετές από τις οποίες υπάρχουν ενσωματωμένες και στα προγράμματα.

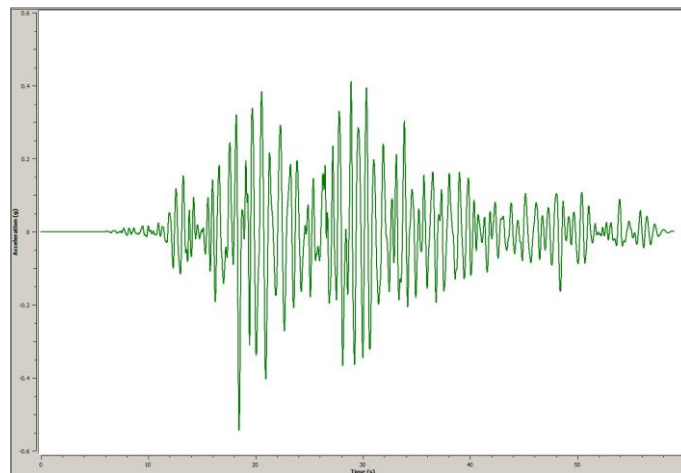
Βήμα 4ο:

Εισάγονται τα δεδομένα του επιταχυνσιογραφήματος του κάθε παραδείγματος. Για τα παραδείγματα εφαρμογών που θα αναλυθούν επιλέγονται:

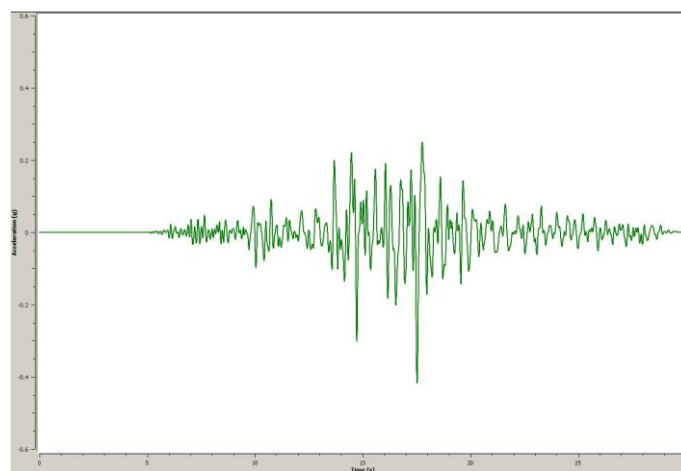
α) Εφαρμογή 1^η - το επιταχυνσιογράφημα από τον σεισμό στην Ταϊβάν μεγέθους 7,3 βαθμών της κλίμακας Richter τον Σεπτέμβριο του 1999 (Chi-Chi, Εικ.4.5),

β) Εφαρμογή 2^η - οι καταγραφές από τον σεισμό στο Ιζμίτ της Τουρκίας μεγέθους 7,6 βαθμών της κλίμακας Richter τον Αύγουστο του 1999 (Kocaeli, Εικ.4.6) και

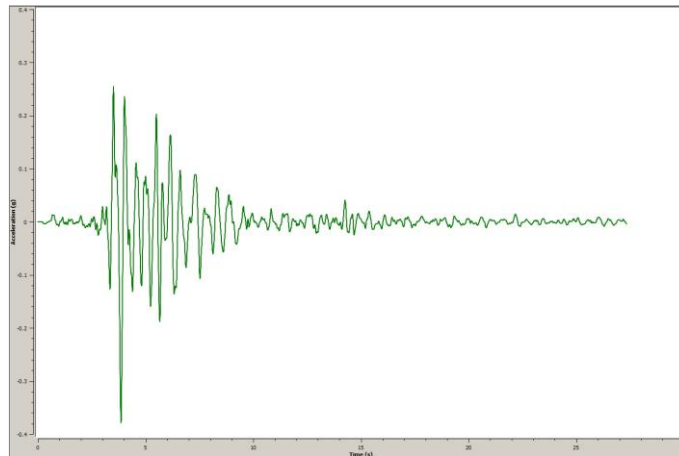
γ) Εφαρμογή 3^η - το επιταχυνσιογράφημα από τον σεισμό της Πάρνηθας στην Αθήνα μεγέθους 5,9 βαθμών της κλίμακας Richter τον Σεπτέμβριο του 1999 (Εικ.4.7).



Εικόνα 4.5. Επιταχυνσιογράφημα Chi-Chi (1999)



Εικόνα 4.6. Επιταχυνσιογράφημα Kocaeli(1999)



Εικόνα 4.7. Επιταχυνσιογράφημα Athens (1999)

Βήμα 5ο (ισοδύναμη γραμμική ανάλυση):

Ως επόμενο βήμα για την ανάλυση, ορίζονται τα επιμέρους στοιχεία της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης μέσα από το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού.

Επιλέγεται η σχέση υπολογισμού του μιγαδικού μέτρου διάτμησης G^* (ή σύνθετο μέτρο διάτμησης, που εκφράζει την αντίσταση του υλικού σε επαναλαμβανόμενη διάτμηση) όπως και ο αριθμός των επαναλήψεων μέχρι να υπάρξει σύγκλιση τιμών των G , D . Οι επαναλήψεις συνεχίζονται έως ότου υπάρχει απόκλιση των τιμών (προηγούμενης με επόμενη επανάληψη) σε ποσοστό που ορίζεται από τον χρήστη ενώ δίδεται και το πηλίκο της δρώσας διατμητικής παραμόρφωσης προς την μέγιστη διατμητική παραμόρφωση. Στα παραδείγματα που εφαρμόστηκαν ορίστηκαν τα παρακάτω :

- $G^* = G(1 + 2i\xi)$,

- αριθμός επαναλήψεων ανάλυσης = 20, με ποσοστό απόκλισης τιμών ίσο με 2%,

- λόγος δρώσας διατμητικής παραμόρφωσης προς μέγιστη διατμητική παραμόρφωση = 0.65.

Βήμα 6ο:

Επιλέγονται τα εξαγομένα αποτελέσματα και πραγματοποιείται η ανάλυση. Για τα τρία παραδείγματα εφαρμογής επιλέχθηκε το φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων για την επιφάνεια του εδάφους.

Στα επόμενα υποκεφάλαια παρουσιάζονται όλα τα μεγέθη που απαιτείται να οριστούν ώστε να πραγματοποιηθούν οι δύο τύποι των αναλύσεων, γραμμική ελαστική και ισοδύναμη γραμμική, καθώς και τα φάσματα απόκρισης που προκύπτουν από τις αναλύσεις αυτές.

4.3 Παράμετροι υπολογισμού γραμμικής ελαστικής ανάλυσης

Εφαρμόζονται τα τρία παραδείγματα εφαρμογών μονοδιάστατου μοντέλου εδαφικής απόκρισης που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 4.2 με την χρήση δύο εκ των προαναφερθέντων προγραμμάτων λογισμικού, Deepsoil και Strata. Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος ανάλυσης είναι η γραμμική ανάλυση (Linear Analysis).

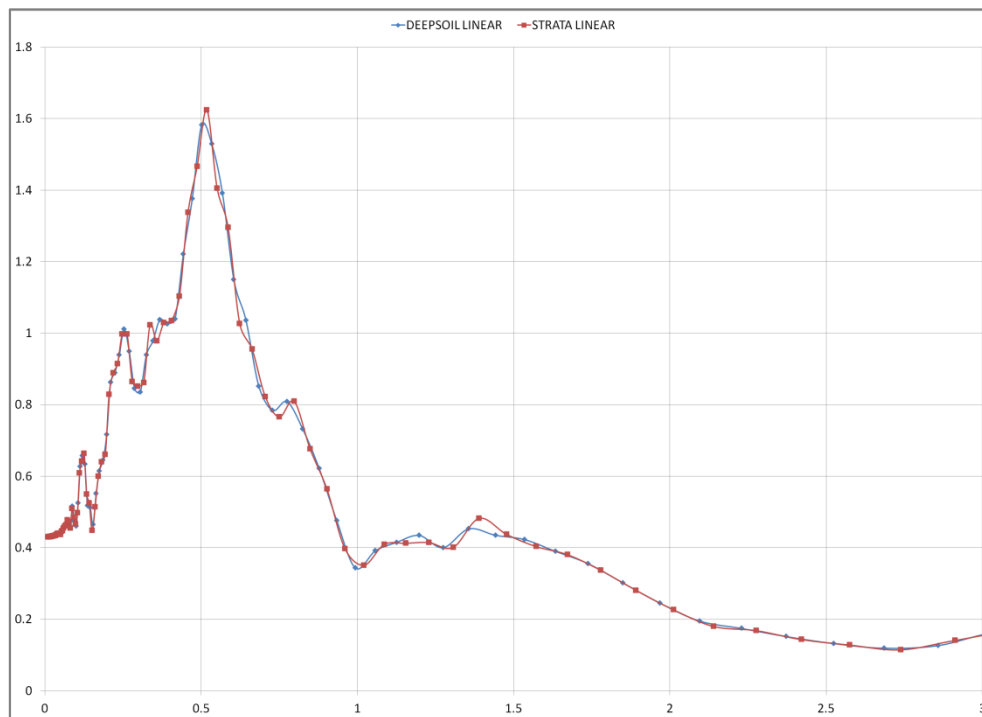
Από την επιφάνεια του εδάφους και προς το βραχώδες υπόβαθρο η διαστρωμάτωση αποτελείται από τα παρακάτω:

- Αμμώδης απόθεση (χαλαρή άμμος) πάχους 5 μέτρων, ειδικού βάρους 16 kN/m^3 και ταχύτητας διατμητικών κυμάτων $V_s = 140 \text{ m/s}$.
- Αργιλική απόθεση πάχους 15 μέτρων, ειδικού βάρους 18 kN/m^3 και ταχύτητας διατμητικών κυμάτων $V_s = 250 \text{ m/s}$.
- Αμμώδης απόθεση (πυκνή άμμος) πάχους 30 μέτρων, ειδικού βάρους 20 kN/m^3 και ταχύτητας διατμητικών κυμάτων $V_s = 450 \text{ m/s}$.

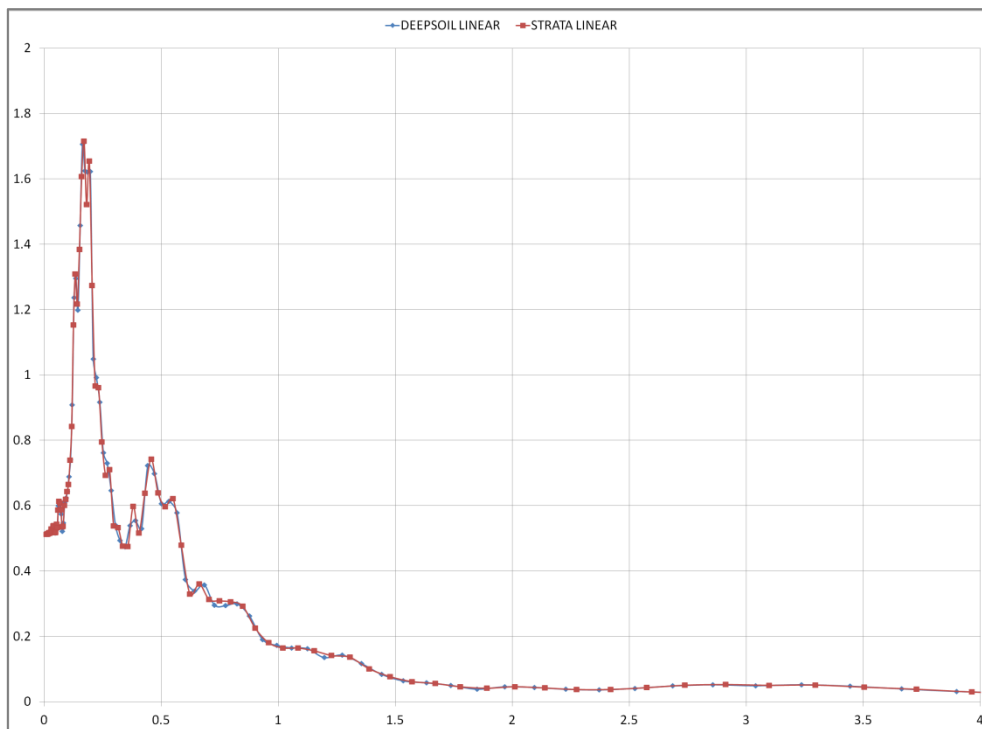
Το βραχώδες υπόβαθρο θεωρείται συνεχές και ημιάπειρο, με το ειδικό βάρος των υλικών που το αποτελούν ίσο με 23 kN/m^3 και ταχύτητα διατμητικών κυμάτων ίση με 1200 m/s .

Με τον ορισμό των παραπάνω πραγματοποιείται η γραμμική ανάλυση των τριών σεισμικών διεγερσεων που περιγράφηκαν στο υποκεφάλαιο 4.2 με τα συνολικά γραφήματα να εμφανίζονται στο επόμενο υποκεφάλαιο 4.3.1.

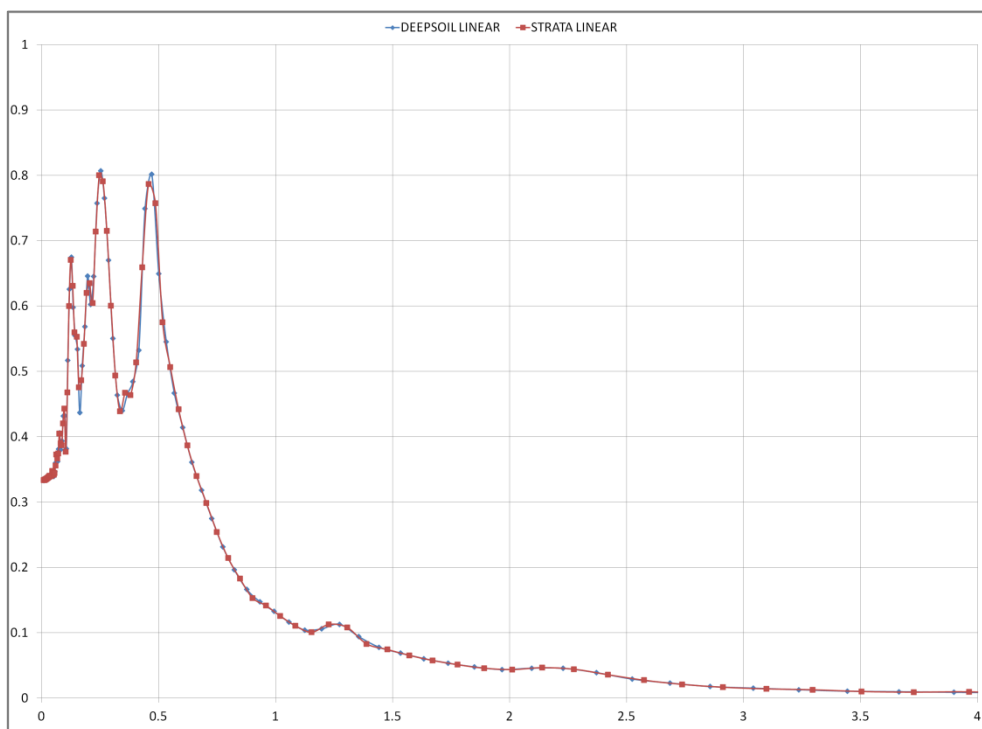
4.3.1 Συγκριτικά αποτελέσματα γραμμικής ελαστικής ανάλυσης (Deepsoil-Strata)



Εικόνα 4.8. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Chi Chi (1999) γραμμικής ανάλυσης - Deepsoil, Strata



Εικόνα 4.9. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Kocaeli (1999) γραμμικής ανάλυσης - Deepsoil, Strata



Εικόνα 4.10. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Athens (1999) γραμμικής ανάλυσης - Deepsoil, Strata

Στο σύνολο των γραφημάτων των γραμμικών αναλύσεων είναι εμφανής η ταύτιση που παρουσιάζεται στα αποτελέσματα και με τα 2 προγράμματα.

4.4 Παράμετροι υπολογισμού ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης με το μοντέλο Darendeli (2001)

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα τρία παραδείγματα εφαρμογής του μονοδιάστατου μοντέλου εδαφικής απόκρισης με την χρήση δύο εκ των προαναφερθέντων προγραμμάτων λογισμικού, Deepsoil και Strata, με τις ίδιες παραδοχές παραμέτρων εδαφικών στρωμάτων, επιταχυνσιογραφημάτων, καμπύλες G-γ-D κλπ.

Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος ανάλυσης εδώ είναι η ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Equivalent Linear Analysis) και η δυναμική συμπεριφορά των εδαφών μέσα από τις καμπύλες G-γ-D λαμβάνεται υπόψιν σύμφωνα με το μοντέλο καμπυλών του Darendeli (2001). Παρακάτω περιγράφεται λεπτομερέστερα η διαδικασία μέχρι και την ολοκλήρωση της ανάλυσης.

Εδαφικά στρώματα

Το εδαφικό προφίλ που χρησιμοποιείται αποτελείται από 3 εδαφικά στρώματα, αμμώδη και αργιλικά, ενώ το βραχώδες υπόβαθρο θεωρείται ελαστικός ημίχωρος ώστε να μπορούν να εισαχθούν οι βασικές ιδιότητες περιγραφής του χώρου αυτού (ταχύτητα διατμητικών κυμάτων και ειδικό βάρος).

Από την επιφάνεια του εδάφους και προς το βραχώδες υπόβαθρο η διαστρωμάτωση αποτελείται από τα παρακάτω:

- *Αμμώδης απόθεση (χαλαρή άμμος)*, με δείκτη πλαστικότητας $PI=0$, πάχους 5 μέτρων, ειδικού βάρους 16 kN/m^3 και ταχύτητας διατμητικών κυμάτων $V_s = 140 \text{ m/s}$.
- *Αργιλική απόθεση* με δείκτη πλαστικότητας $PI=25$, πάχους 15 μέτρων, ειδικού βάρους 18 kN/m^3 και ταχύτητας διατμητικών κυμάτων $V_s = 250 \text{ m/s}$.
- *Αμμώδης απόθεση (πυκνή άμμος)*, με δείκτη πλαστικότητας $PI=0$, πάχους 30 μέτρων, ειδικού βάρους 20 kN/m^3 και ταχύτητας διατμητικών κυμάτων $V_s = 450 \text{ m/s}$.

Το βραχώδες υπόβαθρο θεωρείται συνεχές και άπειρο, με ειδικό βάρος των υλικών που αποτελείται ίσο με 23 kN/m^3 και ταχύτητα διατμητικών κυμάτων ίση με 1200 m/s .

Στο συγκεκριμένο μοντέλο απαιτείται και ο προσδιορισμός συγκεκριμένων παραμέτρων ανά εδαφική στρώση, όπως η μέση (κατακόρυφη) ενεργός τάση, η συχνότητα διέγερσης και ο συντελεστής προστερεοποίησης του εδάφους OCR (OverConsolidation Ratio) που ουσιαστικά αφορά το κλάσμα με αριθμητή την μέγιστη τάση που έχει εφαρμοστεί κατά το παρελθόν στην εδαφική στρώση και παρνομαστή την τάση που εφαρμόζεται σήμερα στο εδαφικό στρώμα. Για τις περιπτώσεις που λαμβάνεται $OCR=1$, η εδαφική στρώση θεωρείται φυσιολογικής στερεοποιημένη (normally consolidated), για $OCR<1$ η εδαφική στρώση θεωρείται "υπο-στερεοποιημένη" (underconsolidated) και για $OCR>1$ "υπερ-στερεοποιημένη" (overconsolidated).

Στα υπό εξέταση παραδείγματα οι τιμές των περιγραφόμενων παραμέτρων της προηγούμενης παραγράφου για το μοντέλο καμπυλών που επιλέχθηκε, δόθηκαν ως εξής για κάθε στρώση :

- *Αμμώδης απόθεση (χαλαρή άμμος)*, μέση τάση 40 kPa , $OCR=1$ (φυσιολογικά στερεοποιημένο εδαφικό στρώμα), συχνότητα διέγερσης 1Hz .
- *Αργιλική απόθεση*, μέση τάση 215 kPa , $OCR=1$ (φυσιολογικά στερεοποιημένο εδαφικό στρώμα), συχνότητα διέγερσης 1Hz .

- *Αμμώδης απόθεση (πυκνή άμμος), μέση τάση 650 kPa, OCR=1 (φυσιολογικά στερεοποιημένο εδαφικό στρώμα), συχνότητα διέγερσης 1Hz.*

Πρέπει να αναφερθεί ότι στις αναλύσεις με το Deepsoil, εν αντιθέσει με το Strata, απαιτείται να δοθεί τιμή και στον συντελεστή K_0 για το μοντέλο καμπυλών του Darendeli, που είναι ένας συντελεστής πλευρικών ωθήσεων σε κατάσταση ηρεμίας και χρησιμοποιείται για μη γραμμικές αναλύσεις, ενώ εξαρτάται από την γωνία τριβής ϕ των κόκκων των υλικών των εδαφικών στρώσεων και τον συντελεστή προστερεοποίησης OCR. Για τα παραδείγματα επιλέχθηκε $K_0=1$, με αποτέλεσμα οι καμπύλες αναφοράς του Darendeli για το Deepsoil και το Strata να είναι όμοιες. Για έλεγχο του βαθμού σημασίας του συγκεκριμένου συντελεστή στις καμπύλες αναφοράς του Darendeli κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθούν αναλύσεις για όλα τα παραδείγματα εφαρμογής της μεταπτυχιακής εργασίας για τιμές $K_0 = 0,30$ και $K_0 = 0,70$. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

Συνοψίζοντας με την χρήση του Πίνακα 4.1, οι τιμές όλων των παραμέτρων για κάθε έδαφος όπως και για το βραχώδες υπόβαθρο θα είναι:

Πίνακας 4.1. Τιμές παραμέτρων εδαφικών στρωμάτων (Darendeli)

ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ	Βάθος (m)	Πάχος στρώσης (m)	Δείκτης Πλαστικότητας (PI %)	Ειδικό Βάρος (kN/m^3)	Ταχύτητα V_s (m/s)	Μέση ενεργή τάση (kPa)	OCR	F (Hz)	K_0 (Deepsoil)
Χαλαρή άμμος	0.00 - 5.00	5.00	0	16	140	40	1	1	1
Άργιλος	5.00 - 20.00	15.00	25	18	250	215	1	1	1
Πυκνή άμμος	20.00 - 50.00	30.00	0	20	450	650	1	1	1
Βραχώδες υπόβαθρο	50.00 - ∞	-	-	23	1200	-	-	-	-

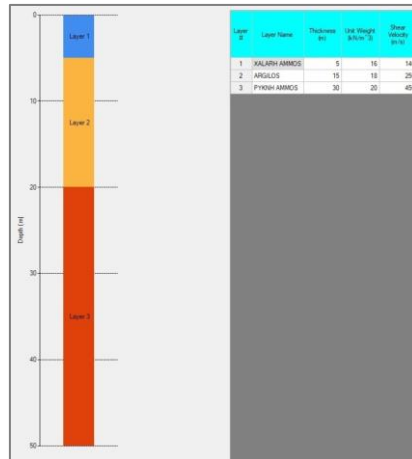
Με την ολοκλήρωση της περιγραφής του τύπου των εδαφών της ανάλυσης επιλέγεται η σεισμική κίνηση για το κάθε παράδειγμα ξεχωριστά, μέσα από επιταχυνσιογραφήματα που έχουν ως δεδομένα τον χρόνο και την επιτάχυνση και αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 4.2.

4.4.1 Ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Deepsoil) με το μοντέλο Darendeli (2001)

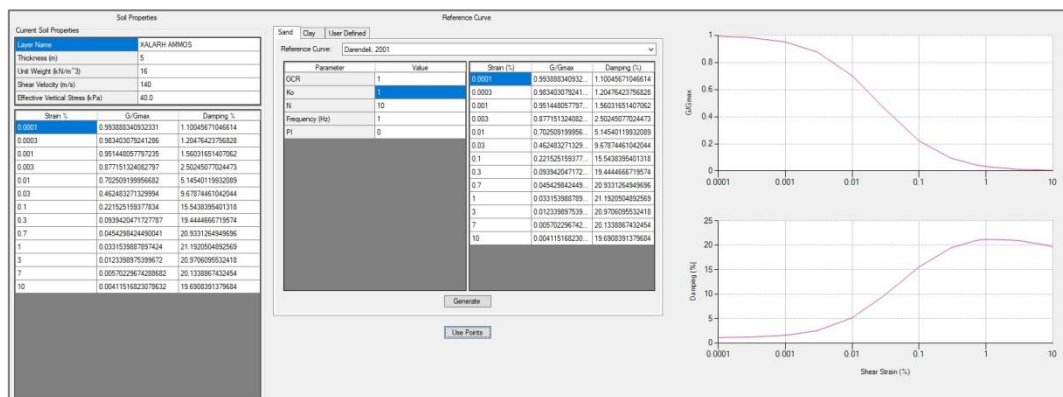
Με την εισαγωγή των δεδομένων και των παραμέτρων υπολογισμού εξάγονται σε μορφή πινάκων και γραφημάτων τα αποτελέσματα της ανάλυσης (φάσμα επιταχύνσεων, διατμητική παραμόρφωση σε σχέση με τον χρόνο, ο λόγος των διατμητικών τάσεων σε σχέση με τον χρόνο, φάσμα Fourier, ένταση Arias κλπ.).

Τα αποτελέσματα παράγονται αυτόματα για μία ή και για όλες τις εδαφικές στρώσεις που θα επιλεγούν, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα εξαγωγής των δεδομένων σε αρχείο τύπου Excel για περαιτέρω επεξεργασία-μορφοποίηση από τον χρήστη. Οι επιλύσεις πραγματοποιήθηκαν με την έκδοση Deepsoil V6.1 και στις επόμενες σελίδες παρουσιάζεται η απεικόνιση των εδαφικών στρώσεων και μία εκ των απεικονίσεων για τις καμπύλες αναφοράς του Darendeli όπως και μία ενδεικτική

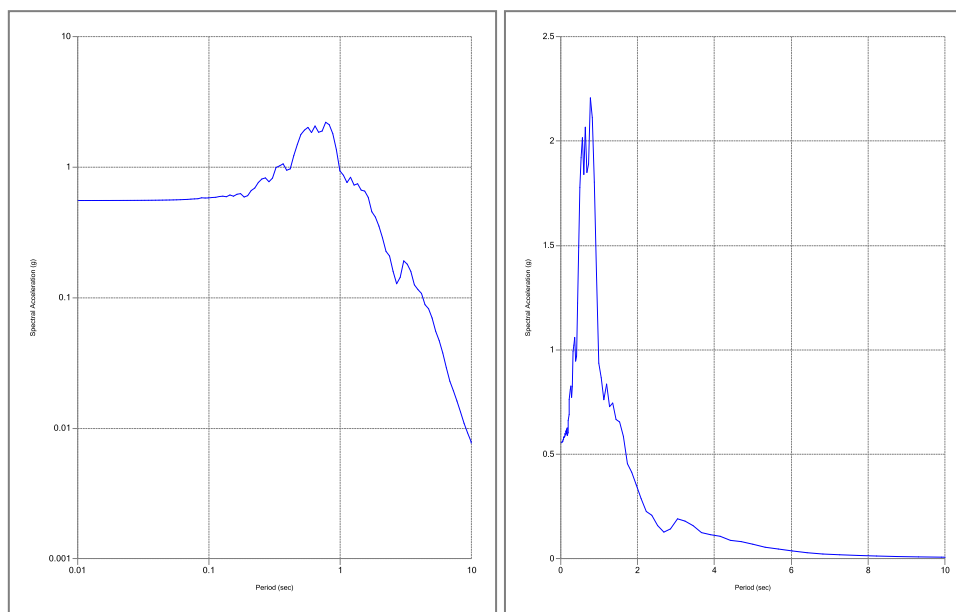
απεικόνιση φάσματος επιταχύνσεων του προγράμματος για ένα από τα επιταχυνσιογραφήματα που αναλύθηκαν, στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (χαλαρή άμμος) σε λογαριθμική και γραμμική μορφή αξόνων.



Εικόνα 4.11. Διαστρωμάτωση Deepsoil



Εικόνα 4.12. Καμπύλες αναφοράς Darendeli - Deepsoil

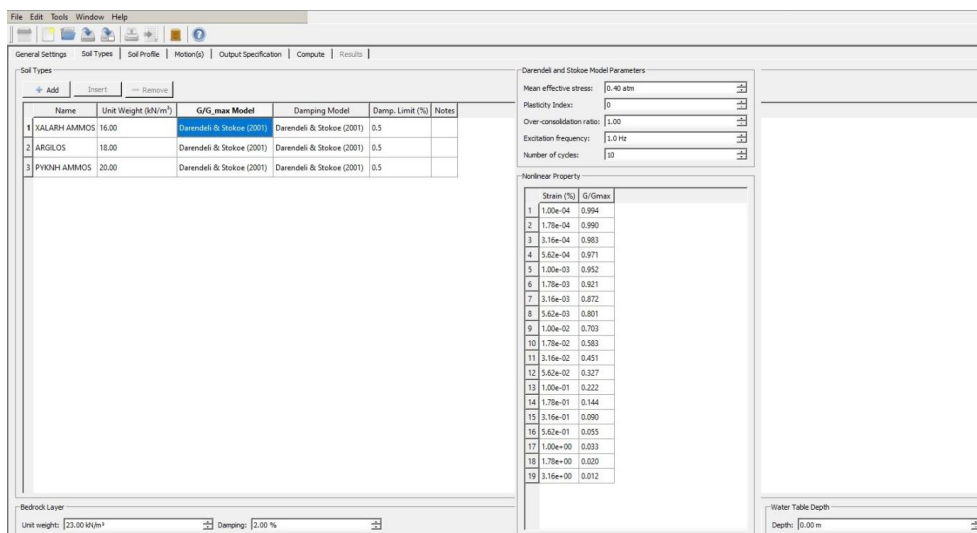


Εικόνα 4.13. Φάσμα επιταχύνσεων Chi-Chi (λογαριθμική μορφή, γραμμική μορφή) - Deepsoil - Darendeli (2001)

4.4.2 Ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Strata) με το μοντέλο Darendeli (2001)

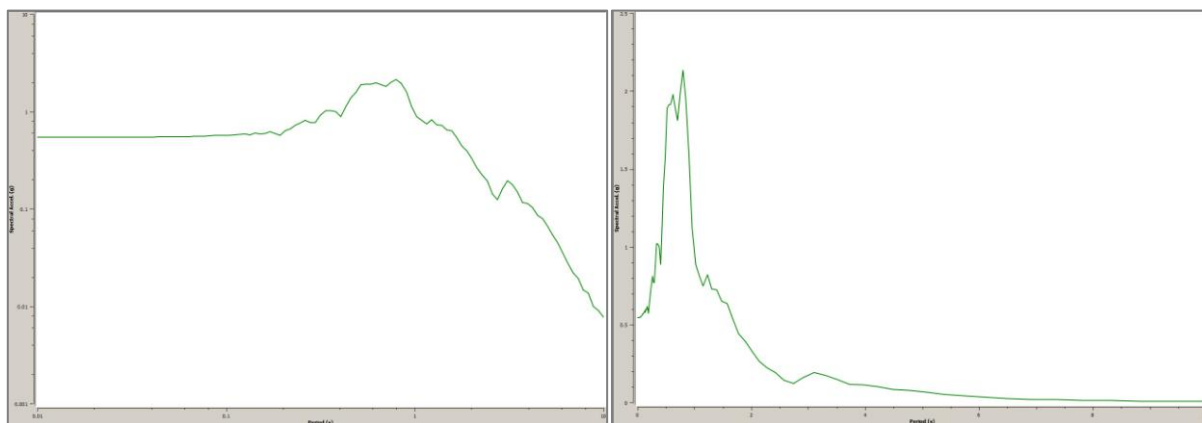
Με την εισαγωγή των δεδομένων και των παραμέτρων υπολογισμού στο πρόγραμμα Strata εξάγονται σε μορφή πινάκων και γραφημάτων τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Πριν την ανάλυση δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη επιλογής των υπολογισμών και των εκτυπώσεων που θα εκτελεστούν από το πρόγραμμα, για συγκεκριμένη εδαφική στρώση ή και για όλες τις στρώσεις συμπεριλαμβανομένου και του βραχώδους υποβάθρου. Οι επιλογές που παρέχονται είναι πλείστες και αφορούν τα προφίλ των εδαφικών στρώσεων (μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, ταχύτητα, μετακίνηση, ένταση Arias κ.α.), τις χρονοϊστορίες (επιταχύνσεων, ταχυτήτων, μετακινήσεων, διατμητικών παραμορφώσεων κ.α.), τα φάσματα (επιταχύνσεων και πλάτους Fourier) και τους λόγους (ratio) (φασματικός, συνάρτηση μεταφοράς επιταχύνσεων, συνάρτηση μεταφοράς τάσεων).

Κατά την διάρκεια της ανάλυσης εμφανίζονται οι επαναλήψεις που πραγματοποιούνται με το αντίστοιχο ποσοστό λάθους (απόκλισης τιμών) για καθεμία από τις επαναλήψεις. Μόλις το ποσοστό απόκλισης των τιμών της προηγούμενης με την επόμενη επανάληψη γίνει μικρότερο ή ίσο του δοθέντος από τον χρήστη (στις περιπτώσεις που μελετώνται το όριο είναι το 2%) ολοκληρώνεται η ανάλυση. Στην περίπτωση που ολοκληρωθεί ο αριθμός των επαναλήψεων (στις εφαρμογές που μελετώνται το όριο είναι το 20) και δεν ικανοποιείται η απαίτηση του ορίου απόκλισης, υπάρχει η δυνατότητα αύξησης του αρχικού αριθμού των επαναλήψεων με εκ νέου ανάλυση της εδαφικής απόκρισης.



Εικόνα 4.14. Διαστρωμάτωση, καμπύλες αναφοράς Darendeli - Strata

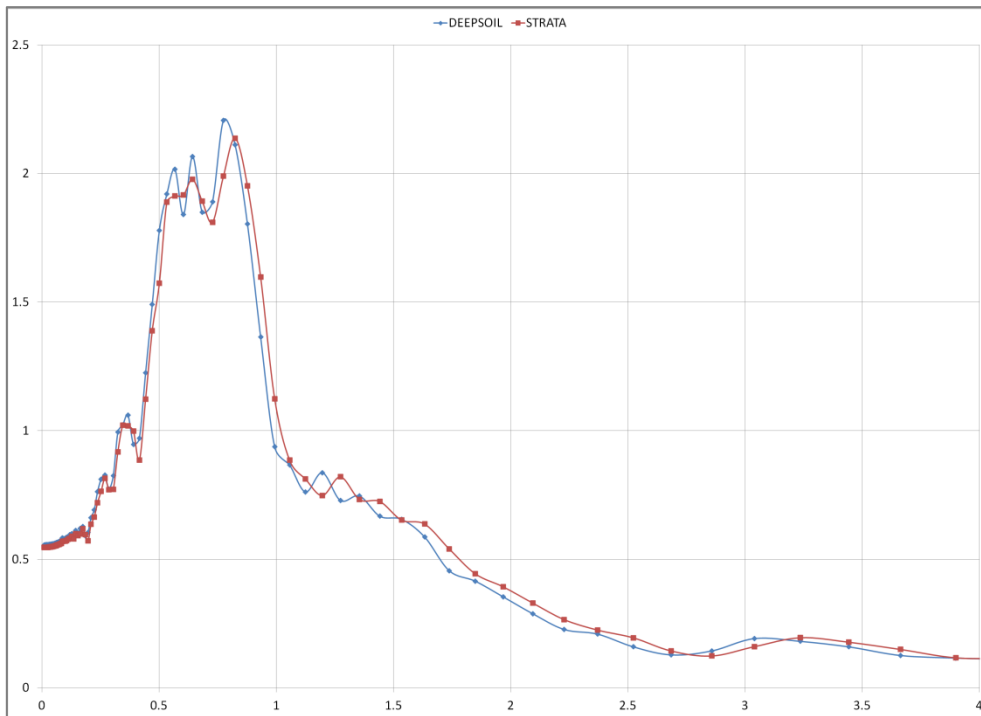
Παρακάτω παρουσιάζεται μία ενδεικτική απεικόνιση φάσματος επιταχύνσεων του προγράμματος για ένα από τα επιταχυνσιογραφήματα που αναλύθηκαν, στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (χαλαρή άμμος) σε λογαριθμική και γραμμική μορφή αξόνων.



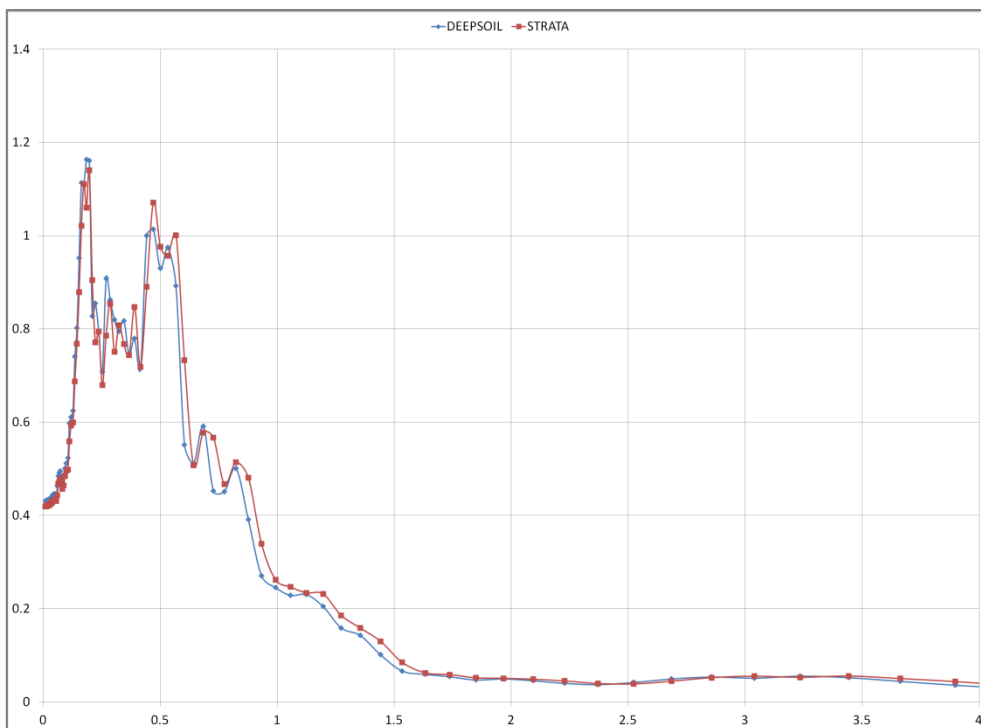
Εικόνα 4.15. Φάσμα επιταχύνσεων Chi-Chi (λογαριθμική μορφή, γραμμική μορφή) - Strata - Darendeli (2001)

4.4.3 Συγκριτικά αποτελέσματα ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης (Deerpsoil-Strata) με το μοντέλο Darendeli (2001)

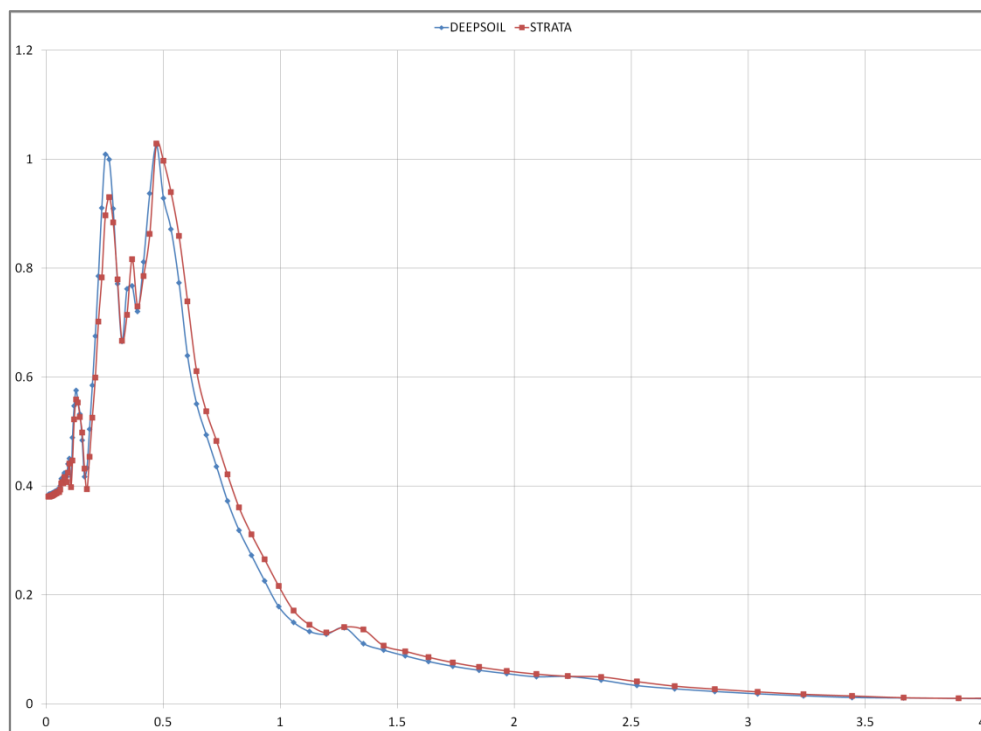
Η σύγκριση των τριών αναλύσεων με τα δύο προγράμματα για το μοντέλο Darendeli παρουσιάζονται στα γραφήματα των εικόνων 4.16, 4.17, 4.18.



Εικόνα 4.16. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Chi Chi (1999) με το μοντέλο του Darendeli (2001) - Deepsoil, Strata



Εικόνα 4.17. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Kocaeli (1999) με το μοντέλο του Darendeli (2001) - Deepsoil, Strata



Εικόνα 4.18. Συγκεντρικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Athens (1999) με το μοντέλο του Darendeli (2001) - Deepsoil, Strata

4.5 Παράμετροι υπολογισμού ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης με το μοντέλο Vucetic & Dobry (1991)

Όμοια με το προηγούμενο μοντέλο καμπυλών χρησιμοποιούμενη μέθοδος ανάλυσης είναι η ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Equivalent Linear Analysis). Η δυναμική συμπεριφορά των εδαφών μέσα από τις καμπύλες G-γ-D λαμβάνεται υπόψιν σύμφωνα με το μοντέλο καμπυλών Vucetic and Dobry (1991).

Υπενθυμίζεται το προφίλ των εδαφικών στρωμάτων:

- Αμμώδης απόθεση (χαλαρή άμμος), με δείκτη πλαστικότητας $PI=0$, πάχους 5 μέτρων, ειδικού βάρους 16 kN/m^3 και ταχύτητας διατμητικών κυμάτων $V_s = 140 \text{ m/s}$.
- Αργιλική απόθεση με δείκτη πλαστικότητας $PI=30$, πάχους 15 μέτρων, ειδικού βάρους 18 kN/m^3 και ταχύτητας διατμητικών κυμάτων $V_s = 250 \text{ m/s}$.
- Αμμώδης απόθεση (πυκνή άμμος), με δείκτη πλαστικότητας $PI=0$, πάχους 30 μέτρων, ειδικού βάρους 20 kN/m^3 και ταχύτητας διατμητικών κυμάτων $V_s = 450 \text{ m/s}$.

Το βραχώδες υπόβαθρο θεωρείται ελαστικός ημίχωρος, με το ειδικό βάρος υλικών ίσο με 23 kN/m^3 και την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων ίση με 1200 m/s .

Στο μοντέλο καμπυλών Vucetic δεν απαιτούνται λοιπές παράμετροι υπολογισμού όπως στο μοντέλο Darendeli (2001) και έτσι διαμορφώνεται ο πίνακας 4.2.

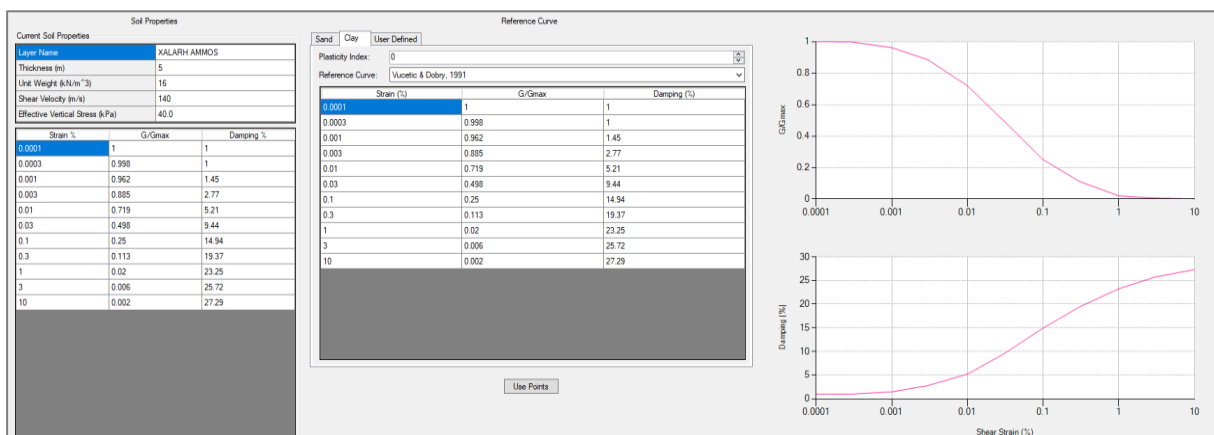
Πίνακας 4.2. Τιμές παραμέτρων εδαφικών στρωμάτων (Vucetic and Dobry)

ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ	Βάθος (m)	Πάχος στρώσης (m)	Δείκτης Πλαστικότητας (PI %)	Ειδικό Βάρος (kN/m ³)	Ταχύτητα V _s (m/s)
Χαλαρή άμμος	0.00 - 5.00	5.00	0	16	140
Άργιλος	5.00 - 20.00	15.00	30	18	250
Πυκνή άμμος	20.00 - 50.00	30.00	0	20	450
Βραχώδες υπόβαθρο	50.00 - ∞	-	-	23	1200

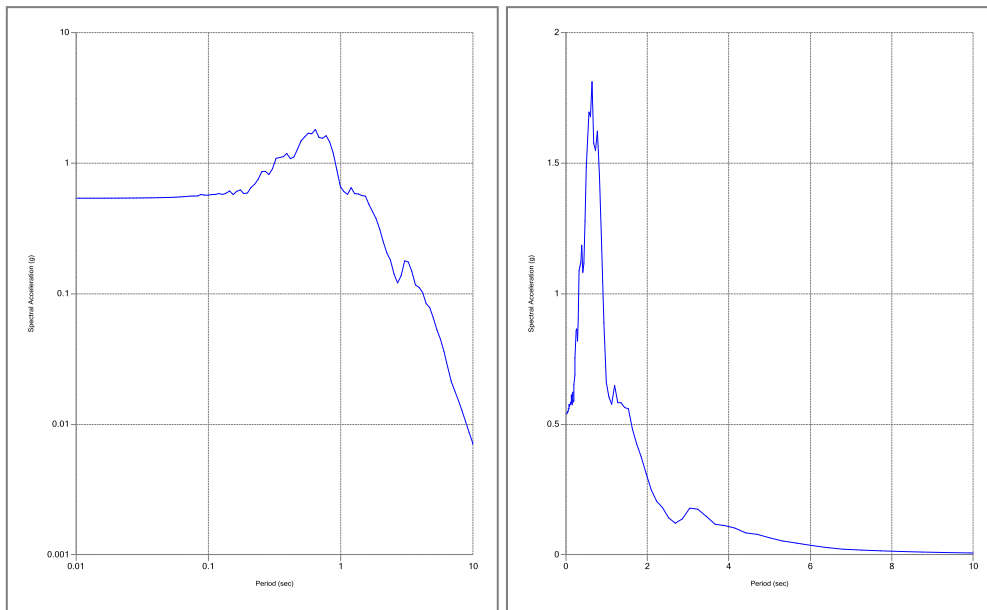
Με την ολοκλήρωση της περιγραφής του τύπου των εδαφών της ανάλυσης επιλέγεται η σεισμική κίνηση για το κάθε παράδειγμα ξεχωριστά, μέσα από επιταχυνσιογραφήματα που έχουν ως δεδομένα τον χρόνο και την επιτάχυνση και αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 4.2.

4.5.1 Ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Deepsoil) με το μοντέλο Vucetic & Dobry (1991)

Παρομοίως με το μοντέλο Darendeli, παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες αναφοράς και μία απεικόνιση από το φάσμα επιταχύνσεων του προγράμματος για ένα από τα επιταχυνσιογραφήματα που αναλύθηκαν, στο επιφανειακό στρώμα εδάφους (χαλαρή άμμος) σε λογαριθμική και γραμμική μορφή αξόνων.



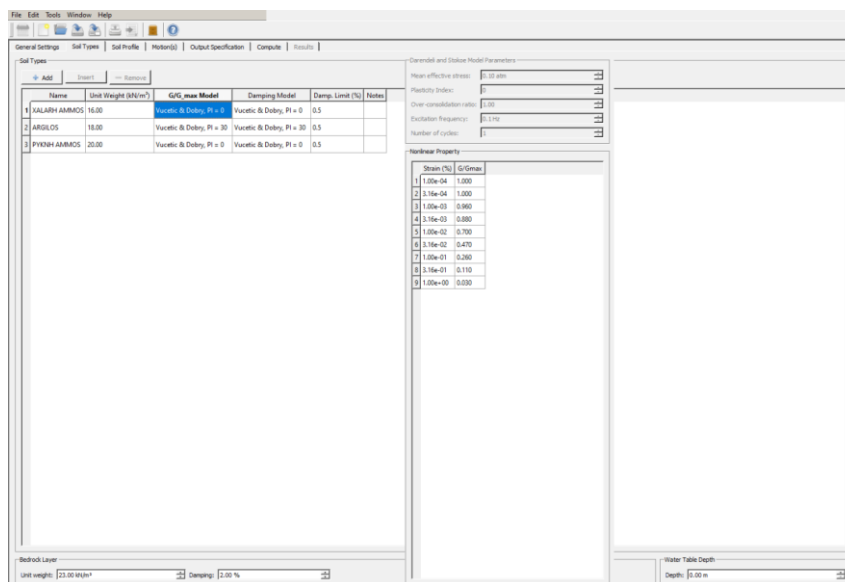
Εικόνα 4.19. Καμπύλες αναφοράς Vucetic & Dobry - Deepsoil



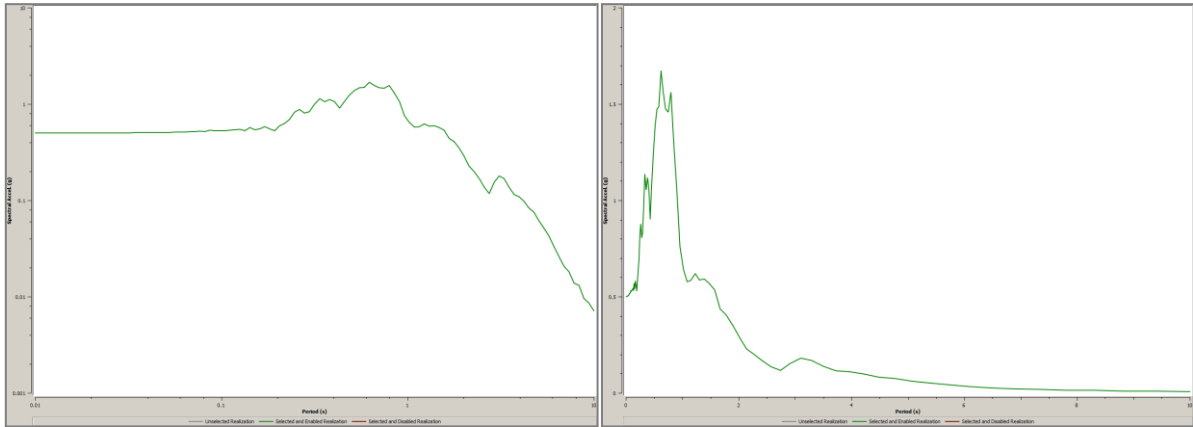
Εικόνα 4.20. Φάσμα επιταχύνσεων Chi-Chi (λογαριθμική μορφή, γραμμική μορφή) - Deepsoil - Vucetic & Dobry (1991)

4.5.2 Ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Strata) με το μοντέλο Vucetic & Dobry (1991)

Οι καμπύλες αναφοράς όπως και τα αποτελέσματα της ανάλυσης με όρους φασμάτος απόκρισης επιταχύνσεων για ένα εκ των επιταχυνσιογραφημάτων φαίνονται ως εξής:



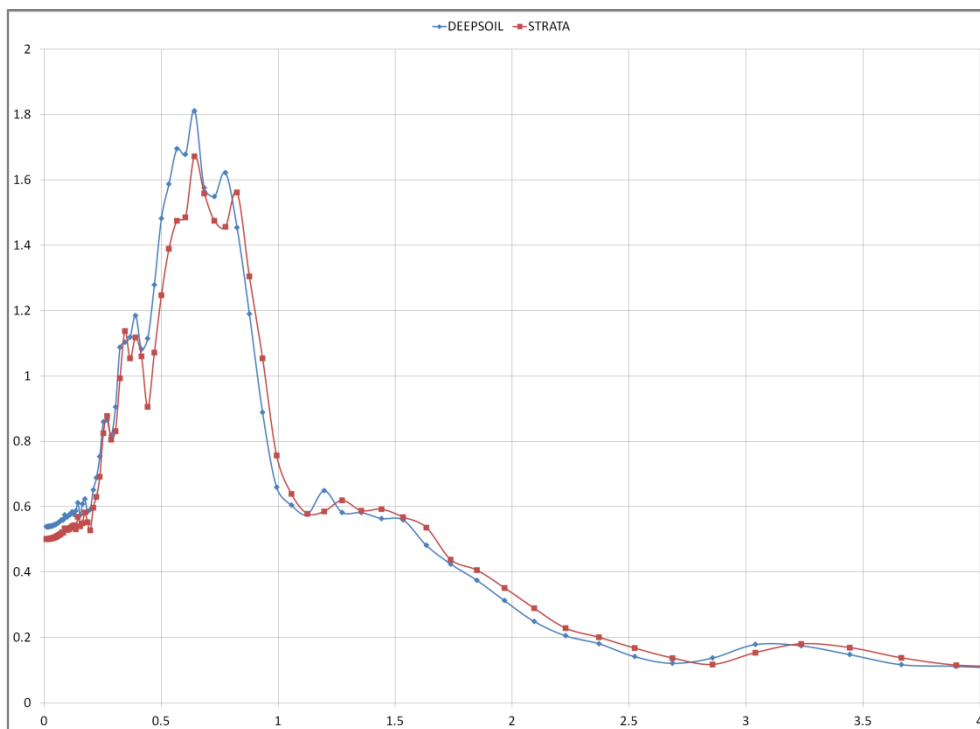
Εικόνα 4.21. Διαστρωμάτωση, καμπύλες αναφοράς Vucetic & Dobry - Strata



Εικόνα 4.22. Φάσμα επιταχύνσεων Chi-Chi (λογαριθμική μορφή, γραμμική μορφή) - Strata - Vucetic & Dobry (1991)

4.5.3 Συγκριτικά αποτελέσματα ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης (Deepsoil-Strata) με το μοντέλο Vucetic & Dobry (1991)

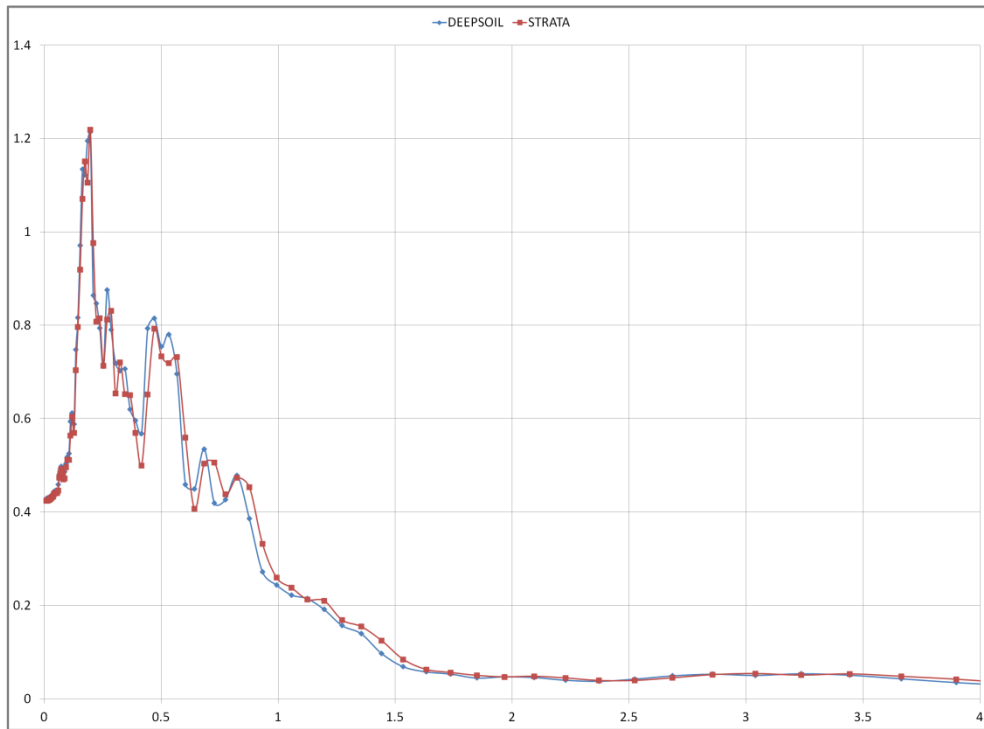
Η σύγκριση της ανάλυσης των τριών παραδειγμάτων εφαρμογής ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης, χρησιμοποιώντας τα δύο προγράμματα για το μοντέλο Vuceti & Dobry παρουσιάζονται στα γραφήματα των εικόνων 4.23, 4.24, 4.25.



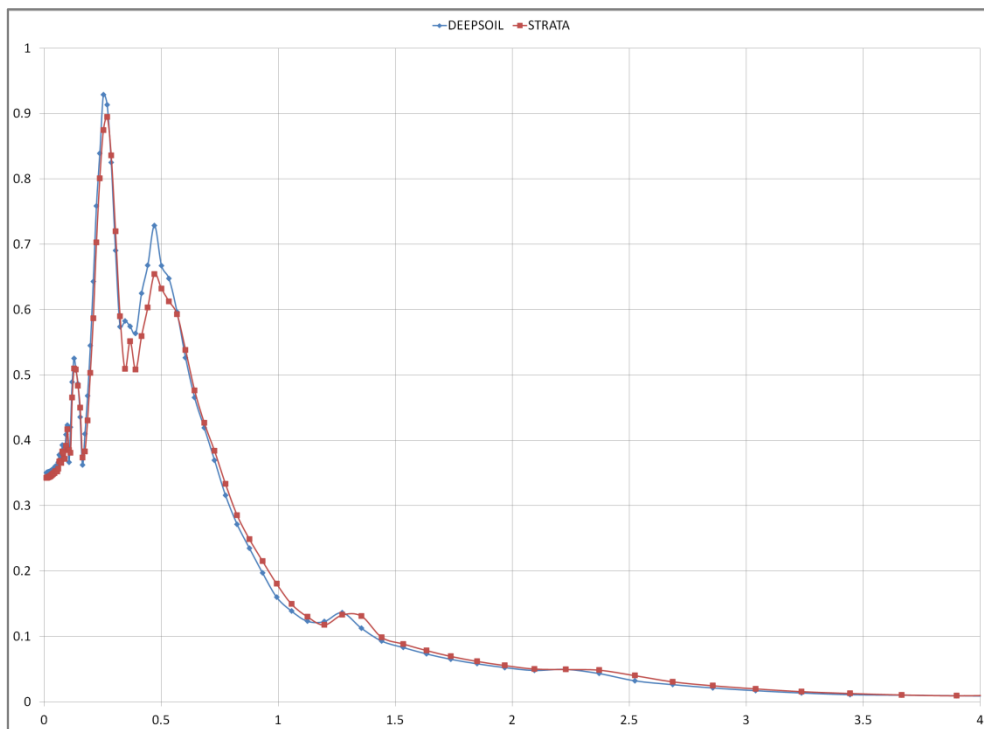
Εικόνα 4.23. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Chi Chi (1999) με το μοντέλο των Vucetic & Dobry (1991) - Deepsoil, Strata

Στο σύνολο των τριών συγκεντρωτικών γραφημάτων υπάρχει σε μεγάλο βαθμό ταύτιση στις τιμές των επιταχύνσεων από τα φάσματα απόκρισης επιταχύνσεων, με την υψηλότερη τιμή εδαφικής

επιτάχυνσης να εντοπίζεται στα 0,65 sec για την διέγερση στο ChiChi, στα 0,20 sec για την διέγερση στο Kocaeli και στα 0,25 sec για την σεισμική διέγερση Athens.



Εικόνα 4.24. Συγκεντρικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Kocaeli (1999) με το μοντέλο των Vucetic & Dobry (1991) - Deepsoil, Strata



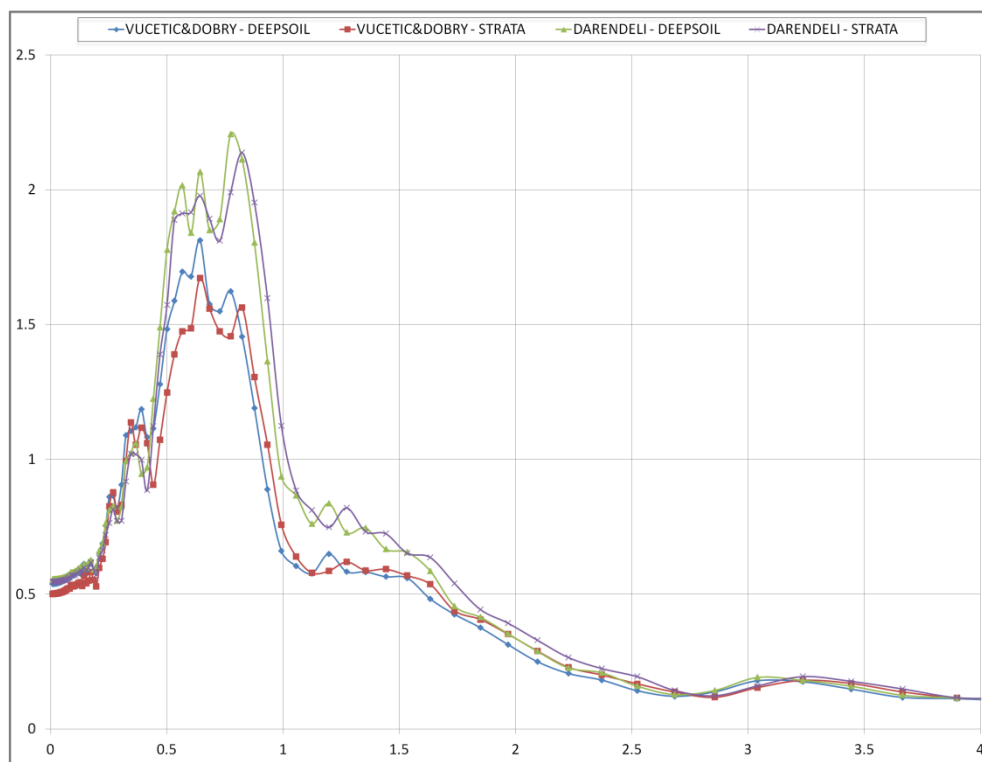
Εικόνα 4.25. Συγκεντρικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Athens (1999) με το μοντέλο των Vucetic & Dobry (1991) - Deepsoil, Strata

4.6 Συγκριτικά αποτελέσματα ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης (Deepsoil-Strata) με τα μοντέλα Darendeli (2001) και Vucetic & Dobry (1991)

Τελικώς παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σε ένα γράφημα για κάθε χρονοϊστορία (ChiChi, Kocaeli, Athens) οι επιλύσεις των προγραμμάτων Deepsoil και Strata και για τα δύο μοντέλα καμπυλών αναφοράς, Darendeli (2001) και Vucetic & Dobry (1991).

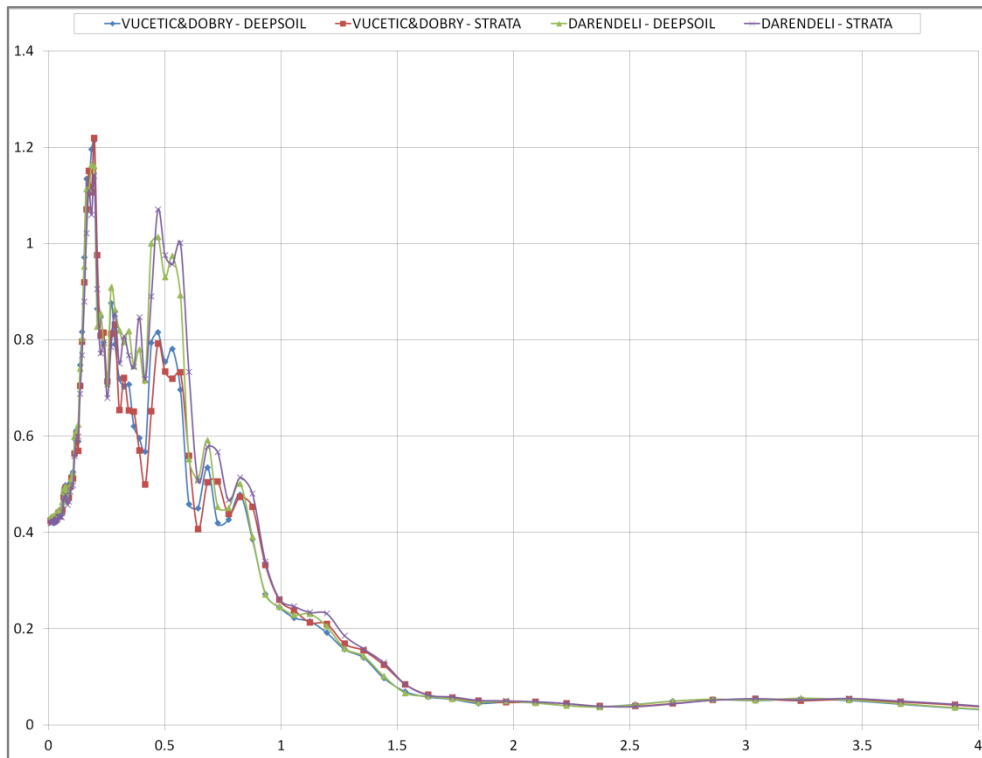
Τα γραφήματα παρουσιάζονται στις επόμενες δύο σελίδες στις εικόνες 4.26, 4.27, 4.28.

Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός πως ο δείκτης πλαστικότητας στην αργλική στρώση για το μοντέλο του Darendeli (2001) τέθηκε ίσος με 25%, ενώ για το μοντέλο των Vucetic & Dobry 30%, διότι οι καμπύλες αναφοράς G-γ-D που ανέπτυξαν οι Vucetic & Dobry και περιλαμβάνονται στα προγράμματα ήταν για συγκεκριμένους δείκτες πλαστικότητας, PI = 0, 15, 30, 50, 100, 200 %.

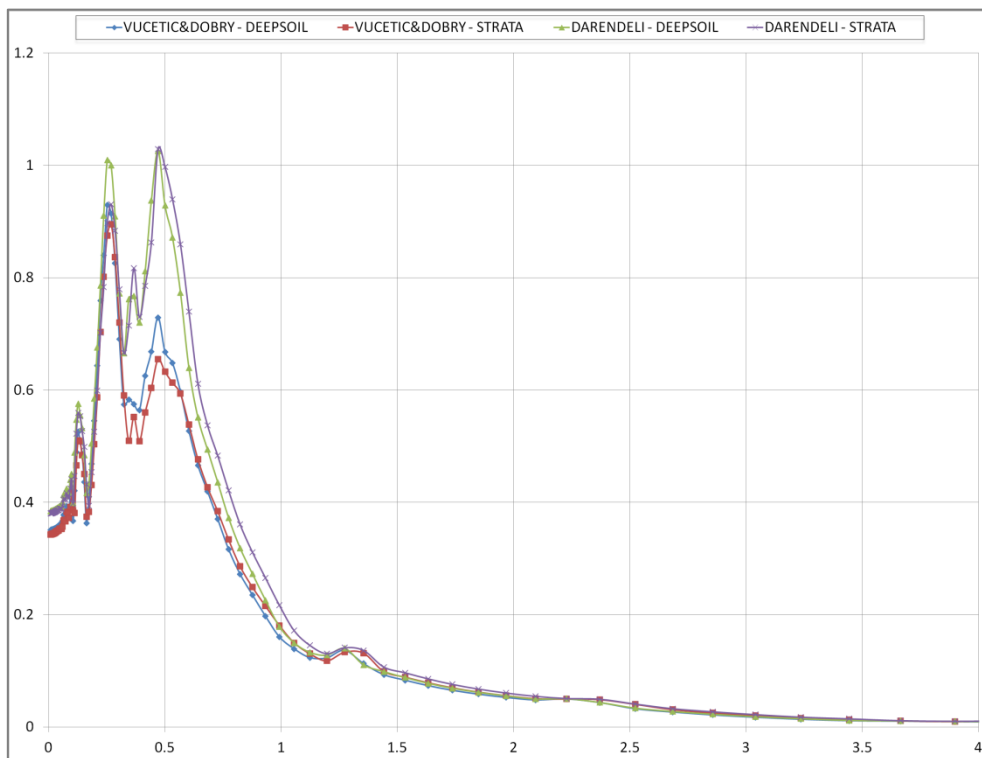


Εικόνα 4.26. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Chi-Chi (1999) - Vucetic & Dobry (1991), Darendeli (2001) - Deepsoil, Strata

Στο σύνολο των συγκεντρωτικών γραφημάτων υπάρχει διαφορά στις τιμές των επιταχύνσεων από τα φάσματα απόκρισης επιταχύνσεων για τα δύο προγράμματα, με την υψηλότερη τιμή εδαφικής επιτάχυνσης να εντοπίζεται στο εύρος 0,60-0,80 sec για την διέγερση στο ChiChi, στα 0,20 sec για την διέγερση στο Kocaeli και στο εύρος 0,25-0,50 sec για την σεισμική διέγερση Athens.



Εικόνα 4.27. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Kocaeli (1999) - Vucetic & Dobry (1991), Darendeli (2001) - Deepsoil, Strata



Εικόνα 4.28. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Athens (1999) - Vucetic & Dobry (1991), Darendeli (2001) - Deepsoil, Strata

Κεφάλαιο 5

Βιβλιοθήκη pystrata

5.1 Η γλώσσα προγραμματισμού Python

Η γλώσσα προγραμματισμού Python δημιουργήθηκε από τον Guido van Rossum στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και πρωτοκυκλοφόρησε το 1991 και είναι η συνέχεια της γλώσσας προγραμματισμού ABC. Θεωρείται ως η πλέον αναπτυσσόμενη γλώσσα προγραμματισμού και στα πλεονεκτήματά της είναι η ευκολία στην μάθηση της και στην χρήση της, όπως και η ελευθερία που δίνει στον χρήστη όσον αφορά τον τρόπο προγραμματισμού.

Επιπλέον, η Python, είναι ελεύθερου ανοικτού λογισμικού κώδικα (Open Source Software, OSS), δηλαδή ο χρήστης μπορεί να διαβάσει τον κώδικα και να κάνει όποιες αλλαγές απαιτεί ή να διαμοιράσει αντίγραφα του λογισμικού όπως και να χρησιμοποιήσει τμήματα του κώδικα για την ανάπτυξη νέων ελεύθερων προγραμμάτων. Αυτή η δυνατότητα μοιράσματος της γνώσης, αυξάνει περισσότερο τη δημοφιλία της γλώσσας. Εξαιτίας του ανοικτού της κώδικα, όλα τα προγράμματά της μπορούν να υλοποιηθούν σε οποιαδήποτε πλατφόρμα, ενώ η βιβλιοθήκη της γλώσσας είναι πλούσια και διαρκώς επεκτείνεται (πηγή : <https://en.wikipedia.org>).

Η Python χρησιμοποιεί μεταβλητές. Για τη συγγραφή του κώδικα, μέσω ενός κειμενογράφου, οι μεταβλητές έχουν κάποιους συγκεκριμένους κανόνες, όπως ότι είναι γράμματα και αριθμοί, τα γράμματα είναι πεζά και κεφαλαία και αυτή η διάκριση μεταβάλλει το αποτέλεσμα της μεταβλητής ενώ δεν επιτρέπεται η ονομασία τους να ταυτίζεται με συγκεκριμένες λέξεις κλειδιά που έχει η Python (πχ false, if, else κλπ). Καθότι, όπως αναφέρθηκε, η Python είναι μία δυναμική γλώσσα προγραμματισμού, οι τύποι των μεταβλητών δεν δηλώνονται πριν να χρησιμοποιηθούν αλλά κατά τη διάρκεια της γραφής του πηγαίου κώδικα.

5.2 Jupyter notebook

Τα jupyter notebook είναι μία web εφαρμογή ανοικτού κώδικα και χρησιμοποιούνται για την δημιουργία και τον διαμοιρασμό επιστημονικών δεδομένων μέσω εγγράφων που περιέχουν κώδικα προγραμματισμού (κείμενα, γραφήματα, μαθηματικές εξισώσεις) ενώ υποστηρίζουν περισσότερες από τριάντα γλώσσες προγραμματισμού, συμπεριλαμβανομένης και της Python.

Προσφέρουν την δυνατότητα γραφής του κώδικα διαδραστικά μέσω ενός τοπικού διακομιστή Python. Παρέχουν την δυνατότητα αποθήκευσης μίας εργασίας γραφής κώδικα σε τμήματα, ανάκτησής της και επεξεργασίας της ανά πάσα στιγμή επιλέξει ο χρήστης, μέσω μίας αποθηκευμένης λίστας αρχείων. Η διεπαφή των jupyter notebook επιτρέπει την πλοήγηση με την βοήθεια μενού, συντομεύσεων πληκτρολογίου κάτι που τα καθιστά μία ιδιαιτέρως εύχρηστη

πλατφόρμα. Χρησιμοποιούνται αυτόνομα ή σαν ενσωματώμενα τμήματα εργαλειοθηκών της επιστήμης των δεδομένων, όπως το Anaconda Data Science.

Η εργασία που αποθηκεύεται σαν αρχείο με την χρήση των jupyter notebook έχει την προέκταση *.ipynb, το οποίο αρχείο ουσιαστικά είναι ένα σημειωματάριο (notebook).

Όπως αναφέρθηκε, τα jupyter notebook είναι εφαρμογές ελεύθερου ανοικτού κώδικα. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να γίνει κοινή χρήση του κώδικα που περιλαμβάνεται σε ένα σημειωματάριο, είτε με την μορφή τελικού αποτελέσματος (μη διαδραστική κοινοποίηση) είτε με συνεργασία με λοιπές διαδικτυακές πλατφόρμες (GitHub) προς εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος (διαδραστική διαδικασία). Τα jupyter notebook έχουν ενσωματωμένη υποστήριξη ώστε τα αποτελέσματα που εξάγονται να είναι και σε ευρέως διαδεδομένες μορφές αρχείων, όπως html, pdf.

Το GitHub θεωρείται η πιο δημοφιλής ανεξάρτητη πλατφόρμα διαμοιρασμού και κοινής χρήσης των jupyter notebook (ολοκληρωμένου κώδικα ή και αποσπασμάτων κώδικα).

5.3 Η βιβλιοθήκη pystrata

Η βιβλιοθήκη pystrata δημιουργήθηκε από τον Albert R. Kottke για μονοδιάστατα μοντέλα ανάλυσης εδαφικής απόκρισης. Είναι ανοιχτή προς χρήση και επεξεργασία, έχει αναπτυχθεί με την χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python, ενώ είναι διαθέσιμη στην πλατφόρμα διαμοιρασμού και κοινής χρήσης GitHub (<https://github.com/arkottke/pystrata>).

Η εν λόγω βιβλιοθήκη συμπεριλαμβάνει παραμετροποιημένους, σε αρχεία μορφής Python, όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς για την μονοδιάστατη ανάλυση εδαφικής απόκρισης. Πιο συγκεκριμένα συνοδεύεται από ξεχωριστά αρχεία για τον τρόπο εισαγωγής των δεδομένων όσον αφορά την σεισμική κίνηση (motion), την διαστρωμάτωση (site), την ανάλυση μέσα από την διάδοση των διατμητικών κυμάτων (propagation), την κατηγοριοποίηση των εδαφών (variation) και τα εξαχθέντα προϊόντα των αναλύσεων (outputs). Ταυτόχρονα πρέπει να αναφερθεί ότι για τους υπολογισμούς, όπως και για την εξαγωγή, μορφή και γραφικές απεικονίσεις των αποτελεσμάτων, η pystrata χρησιμοποιεί και αξιοποιεί άλλες υπάρχουσες, επίσης ανοιχτού τύπου, βιβλιοθήκες Python. Οι δυνατότητες που παρέχει αναπτύσσονται στις επόμενες παραγράφους.

Η βιβλιοθήκη χρησιμοποιεί κλάσεις (class) που αποτελούν πρότυπα και περιέχουν δεδομένα και συναρτήσεις. Ουσιαστικά παρέχουν την πληροφορία που απαιτείται για να εκτελεστούν οι αναλύσεις του μονοδιάστατου μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα μερικές από τις δυνατότητες που προσφέρονται μέσα από τις κλάσεις περιγράφονται παρακάτω σε ότι αφορά στα εδάφη, στο είδος διέγερσης, στο είδος ανάλυσης που υποστηρίζεται, στα παραγόμενα αποτελέσματα.

Δυναμική συμπεριφορά εδαφών

Υπάρχει η δυνατότητα ορισμού εδαφών τόσο με γραμμική ελαστική συμπεριφορά όσο και με μη γραμμική συμπεριφορά. Τα χαρακτηριστικά των εδαφών μπορούν να οριστούν με βάση ερευνητικά μοντέλα μέσα από την διεθνή βιβλιογραφία που βρίσκονται ενσωματωμένα στην βιβλιοθήκη, όπως Darendeli, Kishida, Toro. Μεταξύ άλλων αναφέρονται:

1) site.NonlinearProperty

Με την συγκεκριμένη κλάση παρέχεται η δυνατότητα ορισμού των μη γραμμικών ιδιοτήτων των εδαφών μέσα από την χρήση των καμπυλών αναφοράς G/G_{max} , $D(\%)$. Εφόσον δεν οριστεί να εκτελεστεί η συγκεκριμένη κλάση η εδαφική στρώση θεωρείται ότι έχει γραμμική συμπεριφορά.

2) site.DarendeliSoilType

Ορισμός παραμέτρων των εδαφικών στρώσεων μέσα από τον μοντέλο του Darendeli (2001). Παρέχεται ονομασία στην στρώση και αριθμητικές τιμές για το ειδικό βάρος (kN/m^3), τον δείκτη πλαστικότητας PI , τον συντελεστή προστερεοποίησης OCR , την μέση τάση (kN/m^2), την συχνότητα διέγερσης (Hz) και τον αριθμό των κύκλων φόρτισης. Η βιβλιοθήκη έχει προεπιλεγμένες τιμές για όλα τα παραπάνω.

3) site.KishidaSoilType

Ορισμός παραμέτρων των εδαφικών στρώσεων μέσα από τον μοντέλο του Kishida. Παρέχεται ονομασία στην στρώση, ενώ εισάγονται αριθμητικές τιμές για το ειδικό βάρος (kN/m^3), την κατακόρυφη τάση (kN/m^2), το ποσοστό οργανικής ύλης της στρώσης σε % και τον εργαστηριακό συντελεστή προστερεοποίησης OCR . Η βιβλιοθήκη έχει προεπιλεγμένες τιμές για όλα τα παραπάνω.

4) site.Profile

ορισμός απλής εδαφικής στρώσης με ορισμό του πάχους σε m , της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων σε m/sec , του ειδικού βάρους σε kN/m^3 και της σταθερής απόσβεσης και ορισμός του βραχώδους υποβάθρου ως άπειρου (κατ' επέκταση δεν απαιτείται ορισμός του πάχους της στρώσης του βραχώδους υποβάθρου). Συνεργάζεται με κλασεις που αναφέρθηκαν παραπάνω.

5) variation.ToroVelocityVariation

Το μοντέλο Toro (1995) διακύμανσης της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων των εδαφικών στρώσεων. Υπολογισμός της ταχύτητας μέσω ταξινόμησης κατηγορίας εδαφών κατά Geomatrix, USGS. Αναλόγως του τύπου εδάφους που επιλέγεται από την ταξινόμηση των εδαφών αντιστοιχίζεται η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων.

Όσον αφορά τις καμπύλες μέτρου διάτμησης και απόσβεσης με την διατμητική παραμόρφωση η βιβλιοθήκη έχει ενσωματωμένα τα μοντέλα καμπυλών των Darendeli (2001), Kishida (2012) και ERPI SPID (2014). Μία απόδειξη της διαρκούς εξέλιξης της βιβλιοθήκης είναι ότι με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής εργασίας ανακοινώθηκε η δυνατότητα χρήσης και λοιπών καμπυλών αναφοράς στο αμέσως επόμενο διάστημα, όπως:

Vucetic & Dobry (91), EPRI (93), GEI (83), GeoMatrix (1990), Idriss (1990), Imperial Valley Soils, Iwasaki, Peninsular Range, Seed & Idriss.

Διεγέρσεις

1) motion.TimeSeriesMotion

ορισμός της διέγερσης με την μέθοδο της χρονοϊστορίας.

2) motion.RvtMotion

ορισμός της διέγερσης με την μέθοδο των τυχαίων δονήσεων (Random Vibration Theory).

3) motion.SourceTheoryRvtMotion

ορισμός της διέγερσης με την μέθοδο των τυχαίων δονήσεων (Random Vibration Theory) με την θεωρία της πηγής και ορισμό ποσοτήτων όπως το μέγεθος της σεισμικής διέγερσης, η απόσταση του σημείου ενδιαφέροντος από την εστία κλπ.

Μέθοδοι Αναλύσεων

1) propagation.LinearElasticCalculator

επιλογή για γραμμική ελαστική ανάλυση εδαφικής απόκρισης.

2) propagation.EquivalentLinearCalculator

επιλογή για ισοδύναμη προς γραμμική ανάλυση εδαφικής απόκρισης.

3) propagation.FrequencyDependentEqLCalculator

επιλογή για ισοδύναμη προς γραμμική ανάλυση εδαφικής απόκρισης με το μέτρο διάτμησης και την απόσβεση εξαρτώμενα από την συχνότητα.

Εξαγόμενα αποτελέσματα

1) output.ResponseSpectrumOutput

υπολογισμός του φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων στην επιφάνεια του εδάφους.

2) output.AccelTransferFunctionOutput

υπολογισμός της συνάρτησης μεταφοράς.

3) output.FourierAmplitudeSpectrumOutput

υπολογισμός του φάσματος Fourier.

4) output.AriasIntensityTSOutput

υπολογισμός της έντασης κατά Arias.

Με την χρήση των ανωτέρω και πριν την εισαγωγή στα της ανάπτυξης της web εφαρμογής στο επόμενο κεφάλαιο, εφαρμόστηκαν τα δεδομένα και οι παραδοχές από τις εφαρμογές του προηγούμενου κεφαλαίου προς εξαγωγή συγκριτικών αποτελεσμάτων από την χρήση των Deepsoil, Strata και της ανοιχτής βιβλιοθηκής pystrata με χρήση τμημάτων κώδικα από την βιβλιοθήκη και γραφή τμημάτων καινούργιου κώδικα προσαρμοσμένου στα παραδείγματα που προσομοιώνονται. Όλα τα παραπάνω υλοποιήθηκαν με την χρήση των jupyter notebook.

Το σύνολο των συγκριτικών γραφημάτων της γραμμικής ανάλυσης και της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης με την χρήση Deepsoil, Strata και της ανοιχτής βιβλιοθήκης pystrata (<https://github.com/arkottke/pystrata>) για το μοντέλο καμπυλών του Darendeli (2001) και το προγνωστικό μοντέλο του Kishida (2012) παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου 5.

5.4 Γραμμική ελαστική ανάλυση (pystrata)

Διατηρώντας παραδοχές και δεδομένα όμοια με όσα έχουν περιγραφεί στο Κεφάλαιο 4 για τα παραδείγματα εφαρμογής των σεισμικών διεγέρσεων Chi-Chi, Kocaeli, Athens ακολουθεί η περιγραφή των βημάτων και η απεικόνιση των αποτελεσμάτων με την χρήση της βιβλιοθήκης pystrata μέσω των jupyter notebooks

Αρχικά καλούνται οι βιβλιοθήκες της Python στο περιβάλλον εργασίας των jupyter notebooks και εισάγεται το επιταχυνσιογράφημα μορφής .txt για την ανάλυση.

Έπειτα εισάγονται τα εδαφικά προφίλ και καλείται σαν ανάλυση η γραμμική ελαστική ανάλυση. Τελικά ζητείται να υπολογιστεί το φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων στην επιφάνεια του εδάφους και να απεικονιστεί με την μορφή γραφήματος. Η βιβλιοθήκη απεικονίζει τα αποτελέσματα σε λογαριθμικούς άξονες και υπολογίζει τις επιταχύνσεις σε σχέση με την συχνότητα, ενώ υπάρχει η δυνατότητα να εξαχθούν τα ζεύγη τιμών επιτάχυνσης-συχνότητας με την μορφή λίστας για περαιτέρω επεξεργασία, ώστε να γίνει η αναγωγή σε ζεύγη τιμών επιτάχυνσης-χρόνου, κάτι που έγινε και για τα τρία παραδείγματα της μεταπτυχιακής εργασίας.

Το σύνολο των βημάτων που ακολουθούνται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας παρουσιάζονται με την μορφή των jupyter notebook στο Παράρτημα Β, ενώ τα συγκριτικά γραφήματα της γραμμικής ελαστικής ανάλυσης με Deepsoil, Strata, pystrata εμφανίζονται στο υποκεφάλαιο 5.7.

5.5 Ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (pystrata) για το μοντέλο Kishida (2012)

Ακολουθώντας την σειρά των βημάτων που περιγράφηκαν για την γραμμική ελαστική ανάλυση ορίζονται οι βασικές παράμετροι των εδαφικών στρώσεων (πάχος, ειδικό βάρος, ενεργός τάση, ταχύτητα διατμητικών κυμάτων).

Για το μοντέλο του Kishida ορίζεται ο συντελεστής προστερεοποίησης (εργαστηριακός) ίσος με την μονάδα, όπως και στο μοντέλο του Darendeli.

Όσον αφορά το ποσοστό της οργανικής ύλης ανά εδαφική στρώση επιλέχθηκαν διαφορετικά σενάρια για το κάθε επιταχυνσιογράφημα:

- για την σεισμική διέγερση Chi-Chi (1999) 2 σενάρια, όπου στο πρώτο το ποσοστό ορίστηκε σε 5% - 2% - 0% από την επιφάνεια του εδάφους και προς το εσωτερικό της γης για κάθε εδαφική στρώση αντίστοιχα, ενώ στο δεύτερο το ποσοστό ορίστηκε ίσο με 50% ανά εδαφική στρώση.
- για την σεισμική διέγερση Kocaeli (1999) 2 σενάρια, όπου στο πρώτο το ποσοστό ορίστηκε σε 5% - 2% - 0% από την επιφάνεια του εδάφους και προς το εσωτερικό της γης για κάθε εδαφική στρώση αντίστοιχα, ενώ στο δεύτερο το ποσοστό ορίστηκε ίσο με 80% ανά εδαφική στρώση.
- για την σεισμική διέγερση Athens (1999) 3 σενάρια, όπου στο πρώτο το ποσοστό ορίστηκε σε 5% - 2% - 0% από την επιφάνεια του εδάφους και προς το εσωτερικό της γης για κάθε εδαφική στρώση αντίστοιχα, στο δεύτερο το ποσοστό ορίστηκε ίσο με 20% ανά εδαφική στρώση και στο τρίτο ίσο με 80% ανά στρώση.

Στην συνέχεια επιλέγεται ως ανάλυση η ισοδύναμη γραμμική ανάλυση και προκύπτουν τα εξαγόμενα αποτελέσματα για επεξεργασία, με παρόμοιο τρόπο όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 5.4.

Το σύνολο των βημάτων που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας παρουσιάζονται με την μορφή ενός jupyter notebook στο Παράρτημα Β, ενώ τα συγκριτικά γραφήματα της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης για τα μοντέλα Kishida-Darendeli στην βιβλιοθήκη pystrata εμφανίζονται στο υποκεφάλαιο 5.10.

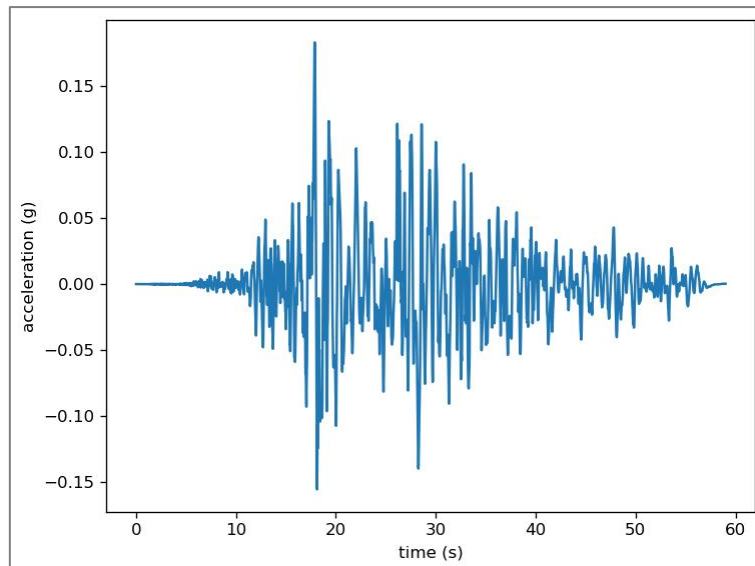
5.6 Ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (pystrata) για το μοντέλο Darendeli (2001)

Διατηρώντας παραδοχές και δεδομένα όμοια με όσα έχουν περιγραφεί στο Κεφάλαιο 4 για το παράδειγμα εφαρμογής του επιταχυνσιογραφήματος Chi-Chi ακολουθεί η περιγραφή των βημάτων και η απεικόνιση των αποτελεσμάτων με την χρήση της βιβλιοθήκης pystrata μέσω των jupyter notebooks.

Εφαρμογή 1^η - (επιταχυνσιογράφημα Chi-Chi)

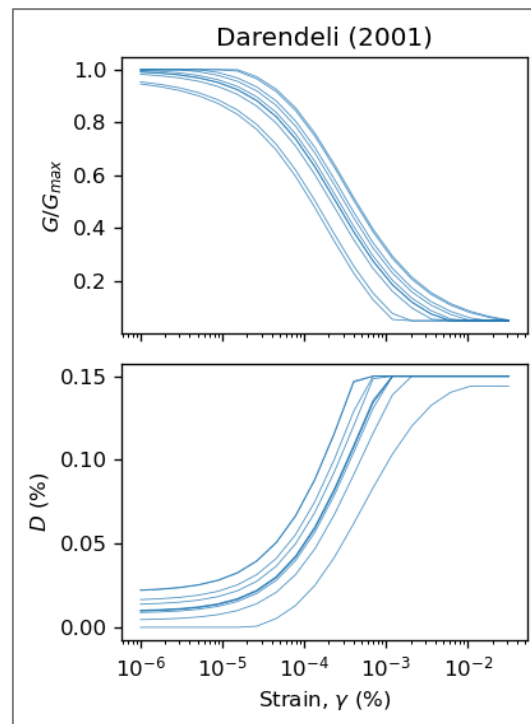
Αρχικά καλούνται οι απαραίτητες για την ισοδύναμη γραμμική ανάλυση βιβλιοθήκες Python στο περιβάλλον εργασίας των jupyter notebooks και εισάγεται το επιταχυνσιογράφημα μορφής .txt για την ανάλυση.

Στην συνέχεια ζητείται η απεικόνιση της χρονοϊστορίας επιταχύνσεων για εποπτικούς λόγους



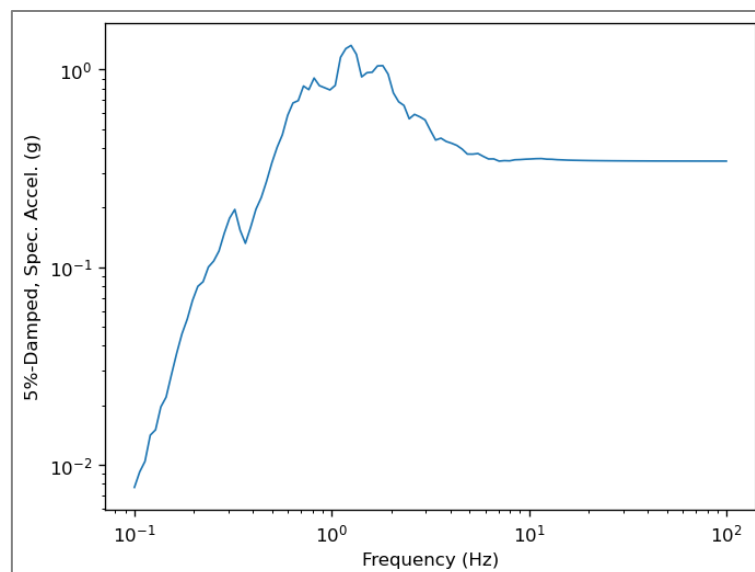
Εικόνα 5.1. Απεικόνιση χρονοϊστορίας επιταχύνσεων στην βιβλιοθήκη pystrata

Έπειτα εισάγονται τα εδαφικά προφίλ κατά Darendeli (2001) και καλείται σαν ανάλυση η ισοδύναμη γραμμική ανάλυση ενώ ζητείται και απεικονίζονται οι καμπύλες αναφοράς G-γ-D. Για όλες τις απεικονίσεις υπάρχει η δυνατότητα μεγέθυνσης ή και σμίκρυνσης αυτών.



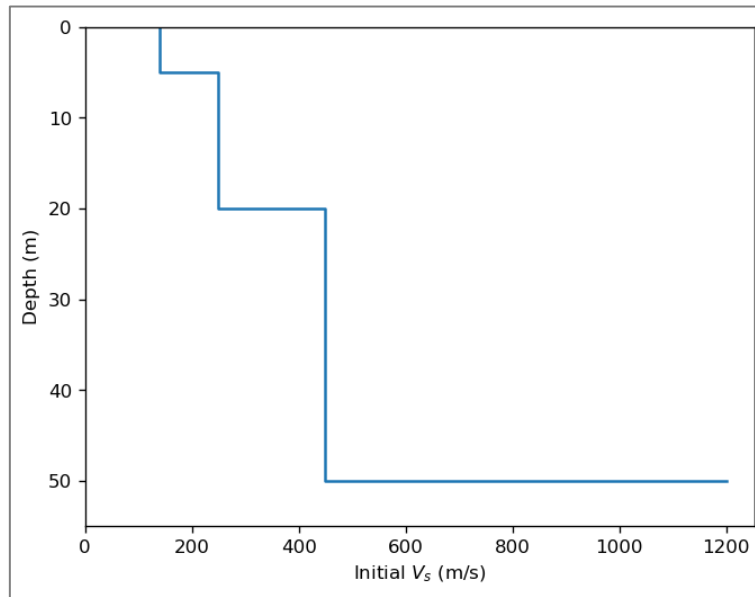
Εικόνα 5.2. Απεικόνιση καμπυλών G - γ - D κατά Darendeli στην βιβλιοθήκη pystrata για την 1η στρώση από την επιφάνεια του εδάφους

Τελικώς ζητείται να υπολογιστεί το φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων στην επιφάνεια του εδάφους και να απεικονιστεί με την μορφή γραφήματος. Η βιβλιοθήκη απεικονίζει τα αποτελέσματα σε λογαριθμικούς άξονες και υπολογίζει τις επιταχύνσεις σε σχέση με την συχνότητα ενώ υπάρχει η δυνατότητα να εξαχθούν τα ζεύγη τιμών επιτάχυνσης-συχνότητας με την μορφή λίστας για περαιτέρω επεξεργασία, ώστε να γίνει η αναγωγή σε ζεύγη τιμών επιτάχυνσης-χρόνου, κάτι που έγινε και για τα τρία παραδείγματα της μεταπτυχιακής εργασίας.

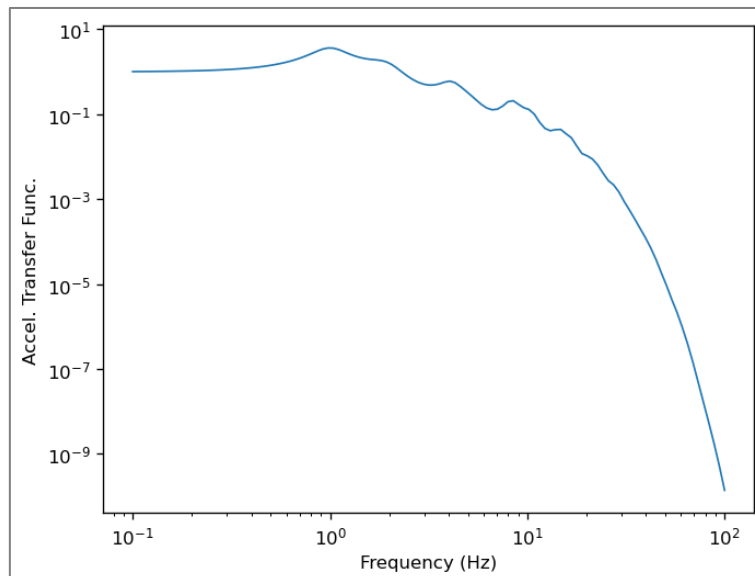


Εικόνα 5.3. Φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων (λογαριθμική μορφή) στην βιβλιοθήκη pystrata

Πέραν του φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων ζητούνται με την μορφή γραφήματος η διακύμανση της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων αναλόγως του βάθους και η συνάρτηση μεταφοράς.



Εικόνα 5.4. V_s αναλόγως του βάθους

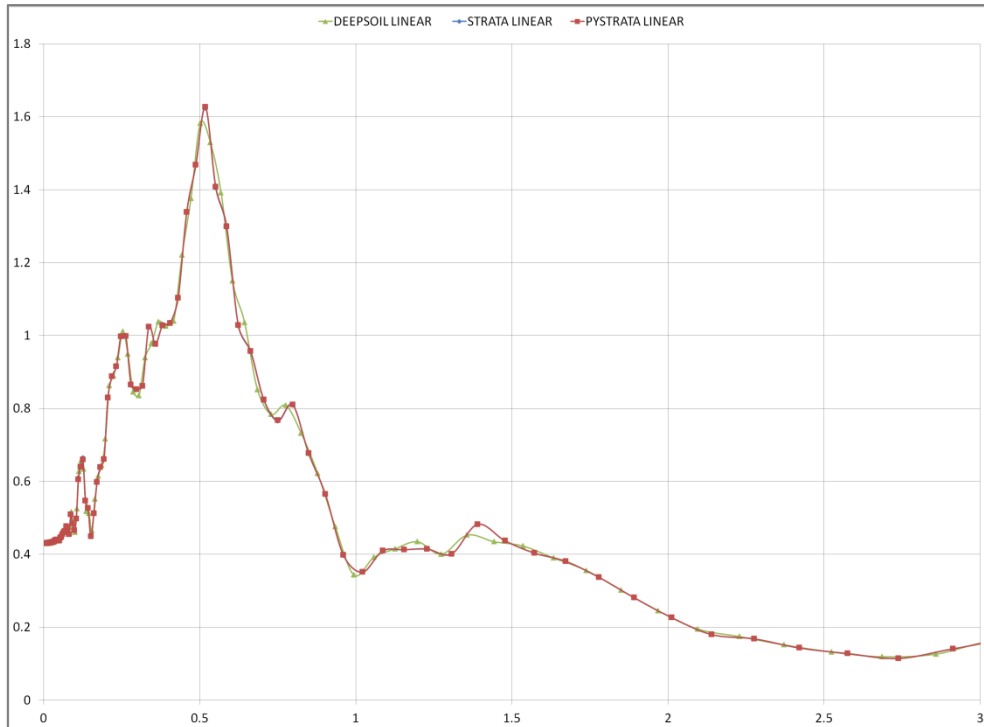


Εικόνα 5.5. Συνάρτηση μεταφοράς στην βιβλιοθήκη pystrata

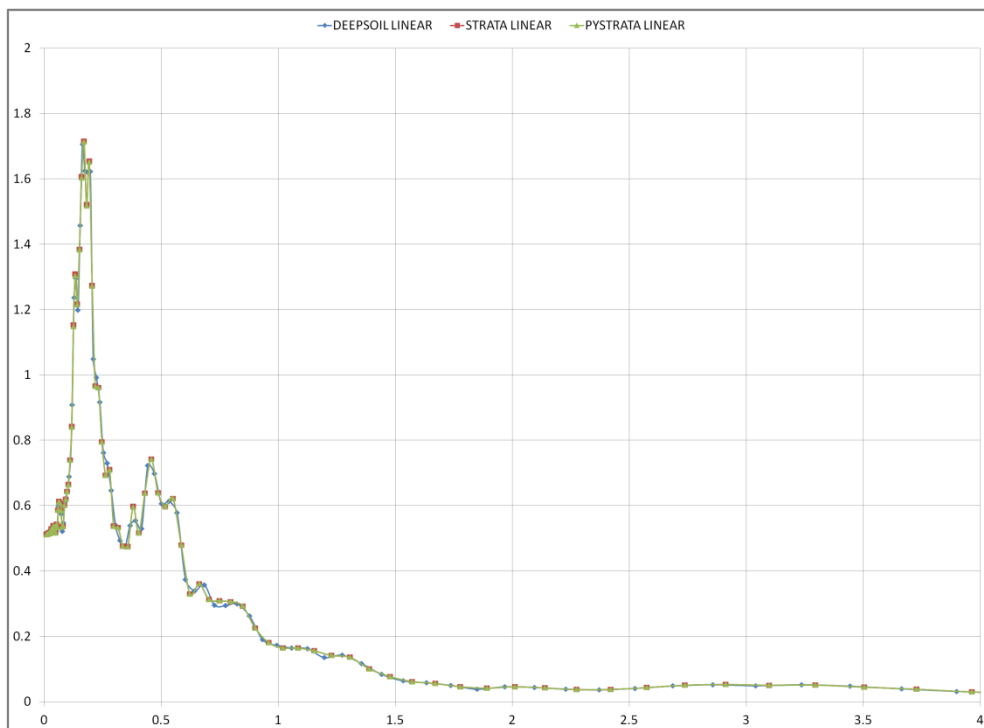
Ομοίως πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις και στα υπόλοιπα δύο παραδείγματα εφαρμογής του Κεφαλαίου 4, οι οποίες παρουσιάζονται στα συγκεντρωτικά γραφήματα προς το τέλος του κεφαλαίου.

5.7 Συγκριτικά αποτελέσματα γραμμικής ελαστικής ανάλυσης (Deepsoil-Strata-pystrata)

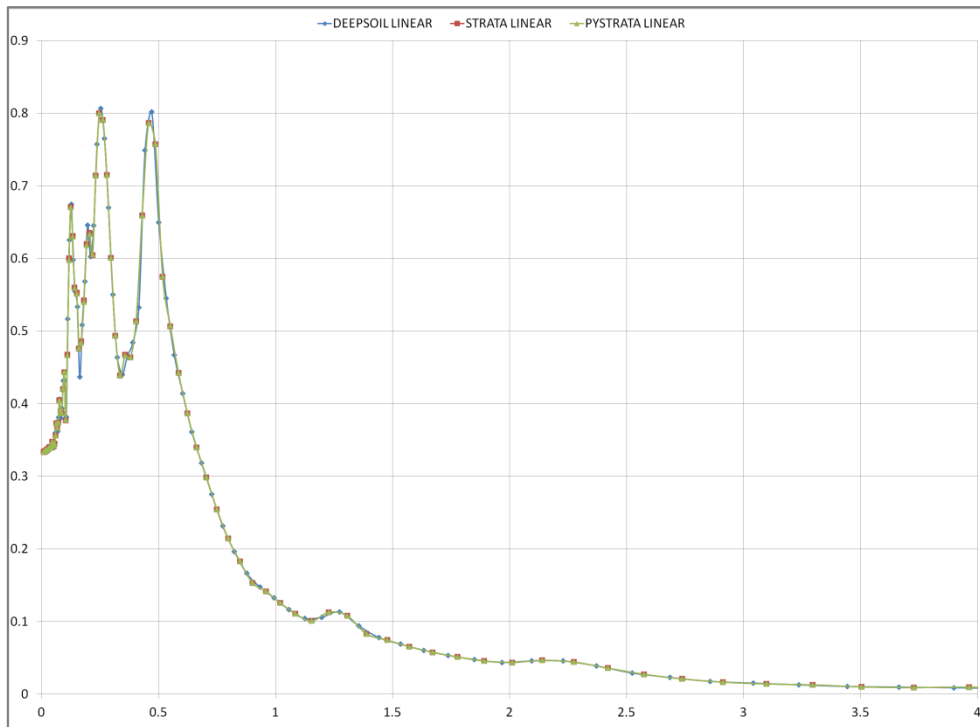
Τα γραφήματα από την γραμμική ανάλυση και με τα 3 εργαλεία υπολογισμού είναι τα κάτωθι:



Εικόνα 5.6. Συγκεντρικό γράφημα γραμμικής ανάλυσης φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), ChiChi (1999) - Deepsoil, Strata, pystrata



Εικόνα 5.7. Συγκεντρικό γράφημα γραμμικής ανάλυσης φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Kocaeli (1999) - Deepsoil, Strata, pystrata

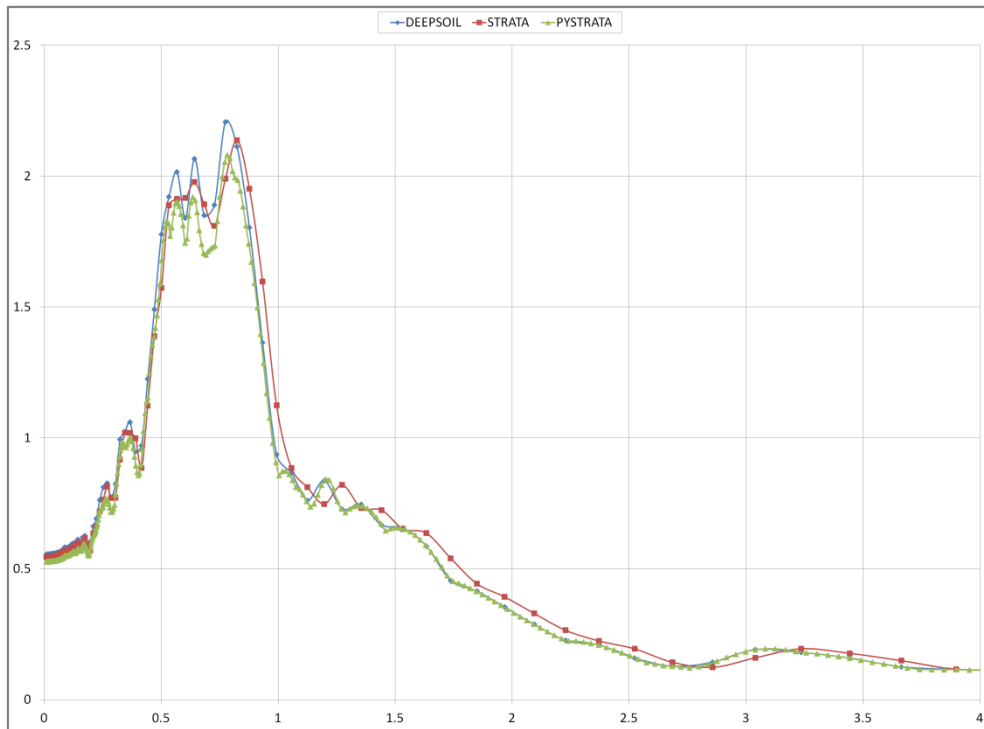


Εικόνα 5.8. Συγκεντρικό γράφημα γραμμικής ανάλυσης φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Athens (1999) - Deepsoil, Strata, pystrata

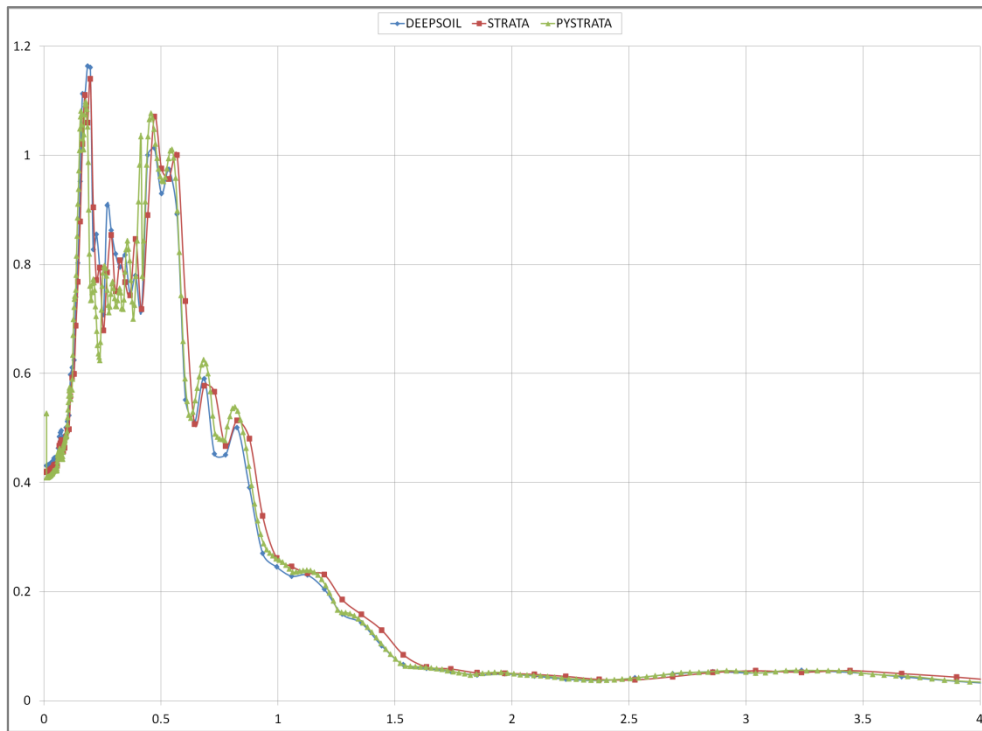
Στο σύνολο των συγκεντρικών γραφημάτων της γραμμικής ελαστικής ανάλυσης υπάρχει σχεδόν απόλυτη ταύτιση στις τιμές των επιταχύνσεων από τα φάσματα απόκρισης επιταχύνσεων και για τα τρία εργαλεία υπολογισμού, με την υψηλότερη τιμή εδαφικής επιτάχυνσης να εντοπίζεται στα 0,50 sec για την διέγερση στο ChiChi, στα 0,20 sec για την διέγερση στο Kocaeli και για τις τιμές 0,25 και 0,50 sec για την σεισμική διέγερση Athens.

5.8 Συγκριτικά αποτελέσματα ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης με το μοντέλο Darendeli (Deepsoil-Strata-pystrata)

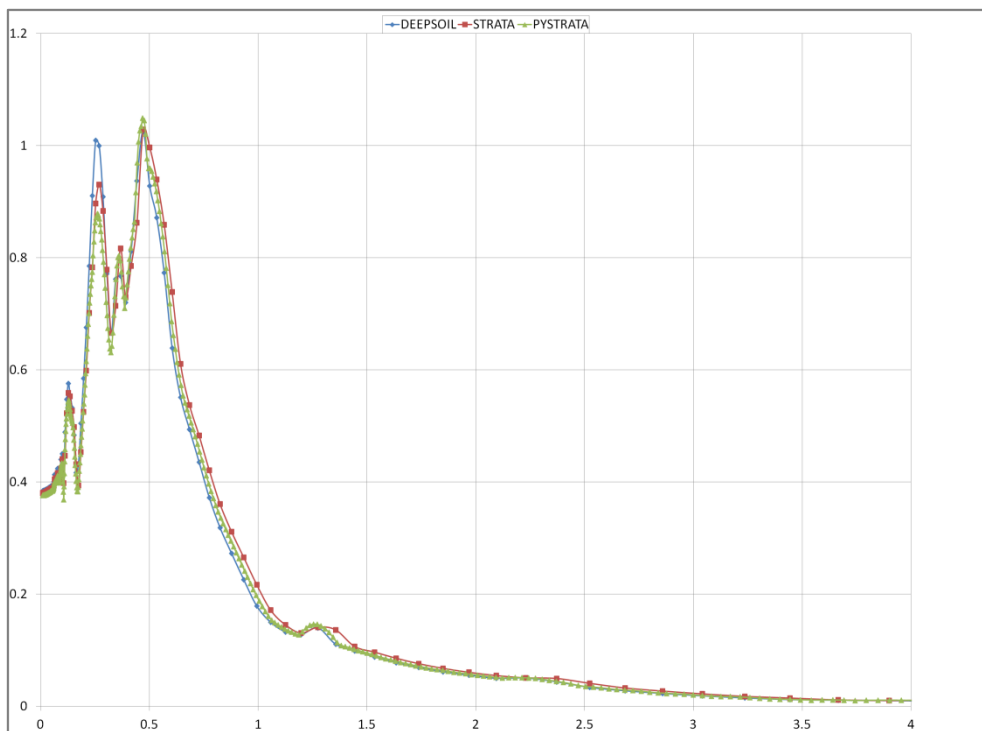
Με το πέρας των αναλύσεων και κατάλληλη τροποποίηση του ζεύγους τιμών επιταχύνσεων - συχνοτήτων που εξάγονται από την βιβλιοθήκη, σε ζεύγη τιμών επιταχύνσεων - περιόδων, παρουσιάζονται τα παρακάτω 3 γραφήματα συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης και με τα τρία εργαλεία υπολογισμού - Deepsoil, Strata, pystrata.



Εικόνα 5.9. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Chi-Chi (1999) - Darendeli (2001) - Deepsoil, Strata, pystrata

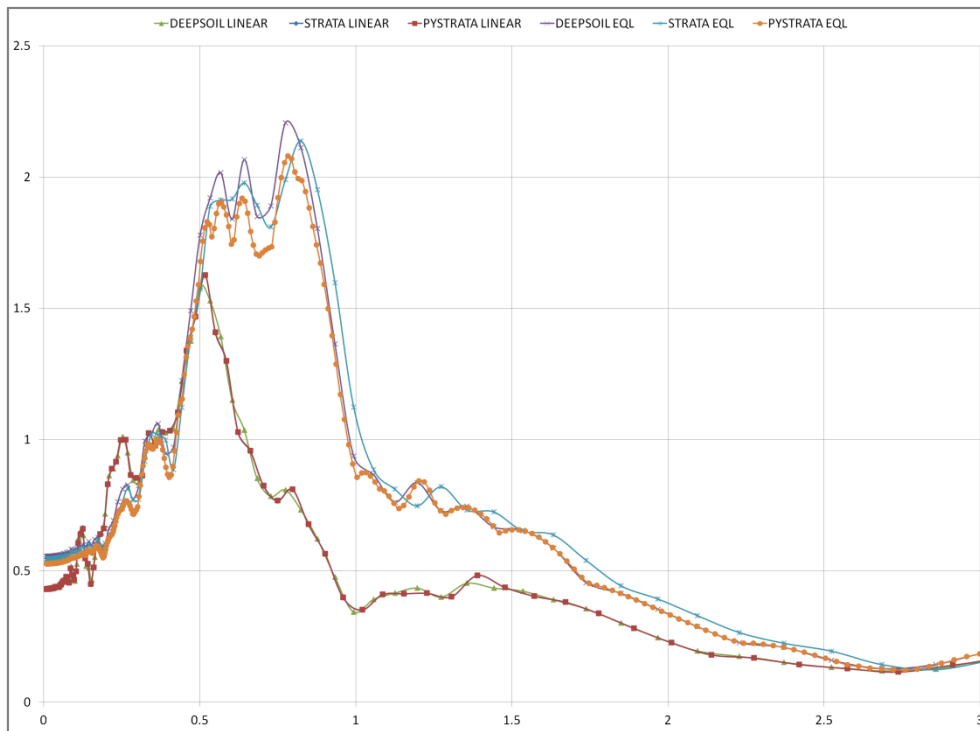


Εικόνα 5.10. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Kocaeli (1999) - Darendeli (2001) - Deepsoil, Strata, pystrata

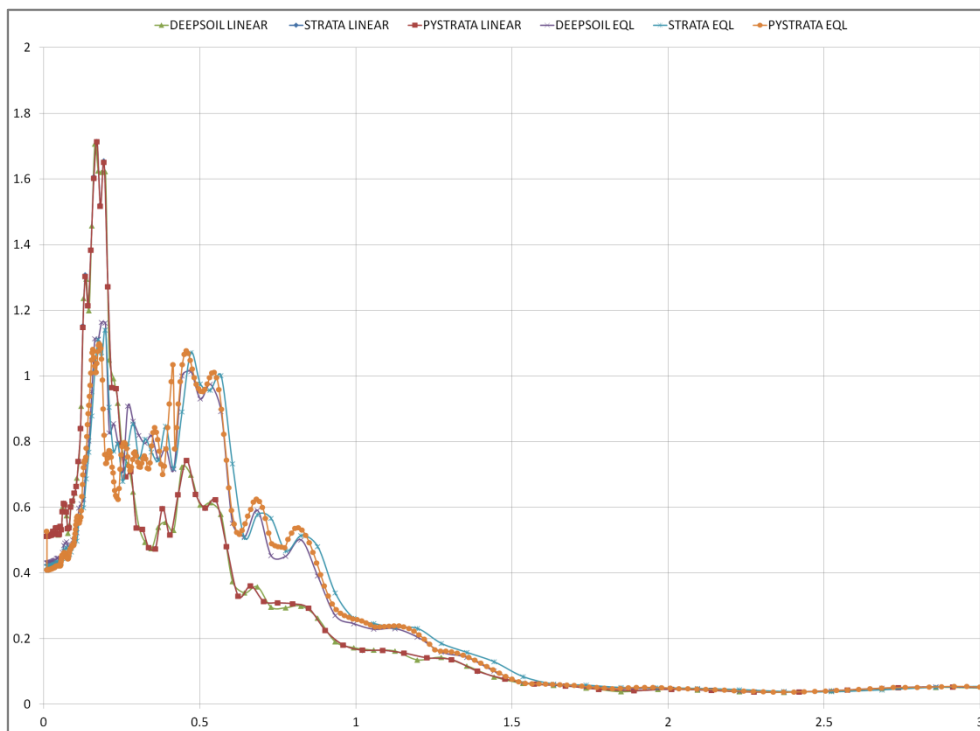


Εικόνα 5.11. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Athens (1999) - Darendeli (2001) - Deepsoil, Strata, pystrata

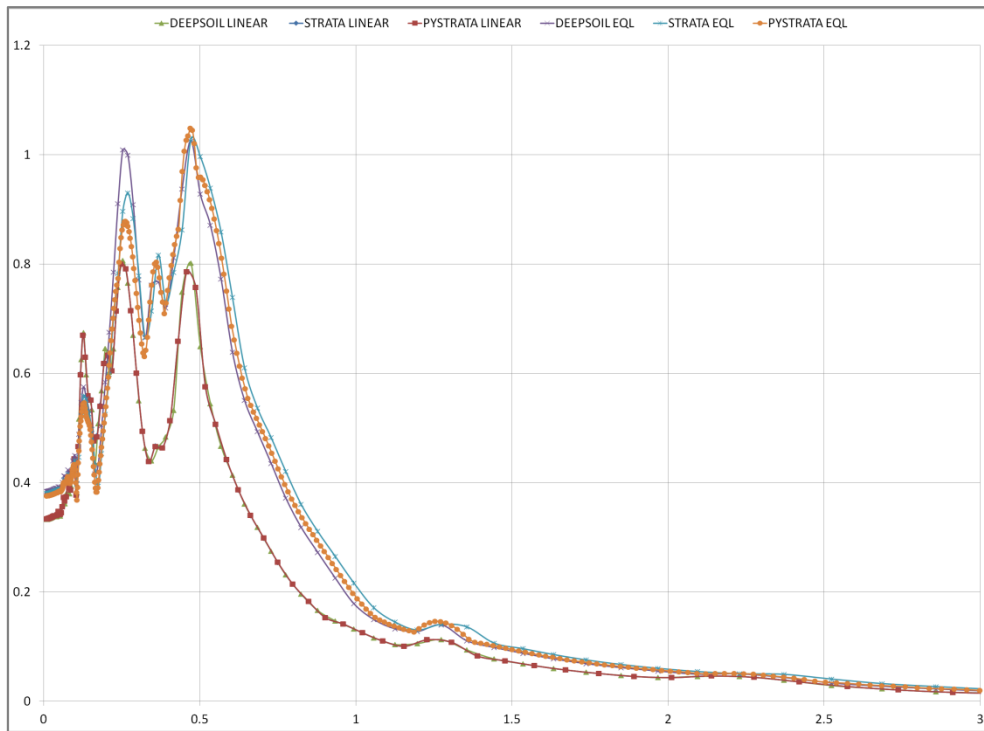
5.9 Συγκριτικά αποτελέσματα γραμμικής ανάλυσης - ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης με το μοντέλο Darendeli (Deepsoil-Strata-pystrata)



Εικόνα 5.12. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Chi-Chi (1999) - γραμμική ανάλυση - ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Darendeli, 2001)



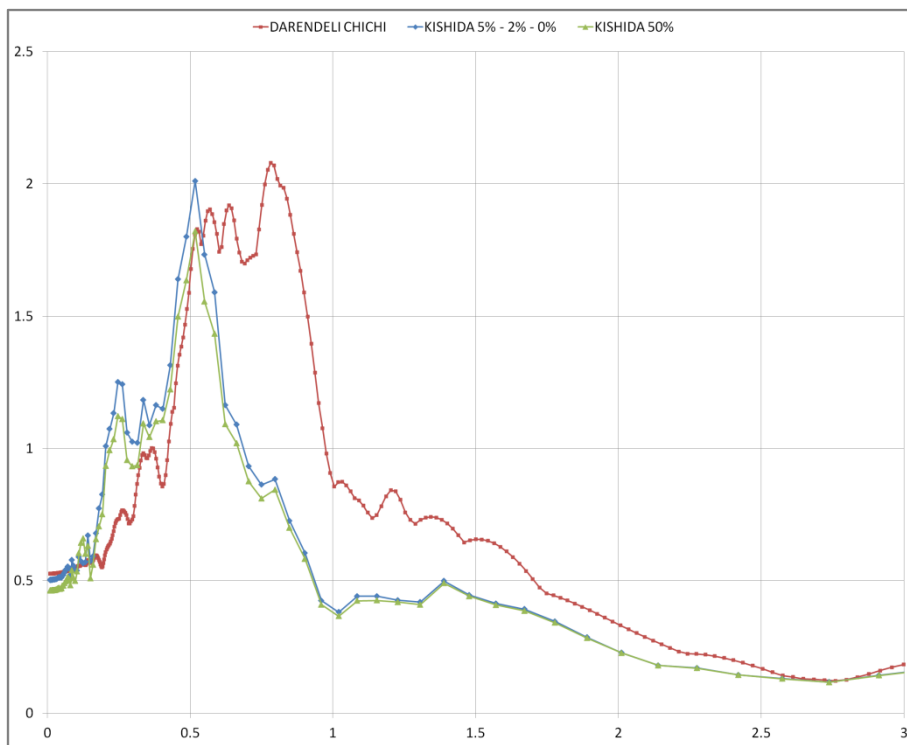
Εικόνα 5.13. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Kocaeli (1999) - γραμμική ανάλυση - ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Darendeli, 2001)



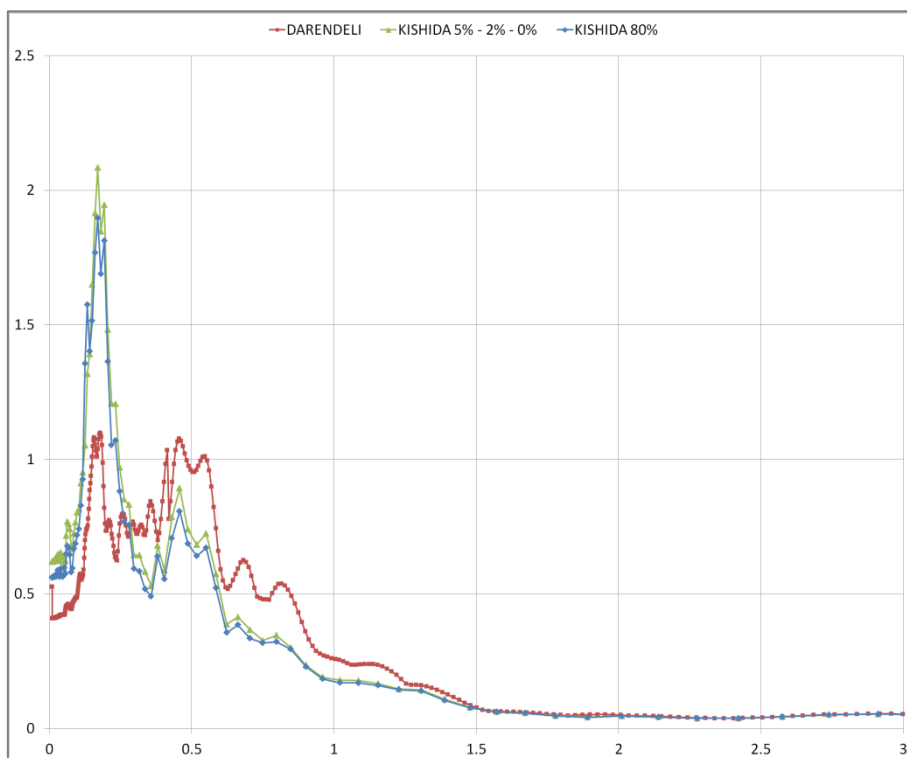
Εικόνα 5.14. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Athens (1999) - γραμμική ανάλυση - ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Darendeli, 2001)

Εξαιρώντας το γράφημα από την σεισμική διέγερση Athens, όπου και πάλι υπάρχουν συγκριτικές διαφορές, στα υπόλοιπα δύο επιταχυνσιογραφήματα οι διαφορές είναι αξιοσημείωτες (και ιδιαίτερα στην σεισμική διέγερση στο ChiChi).

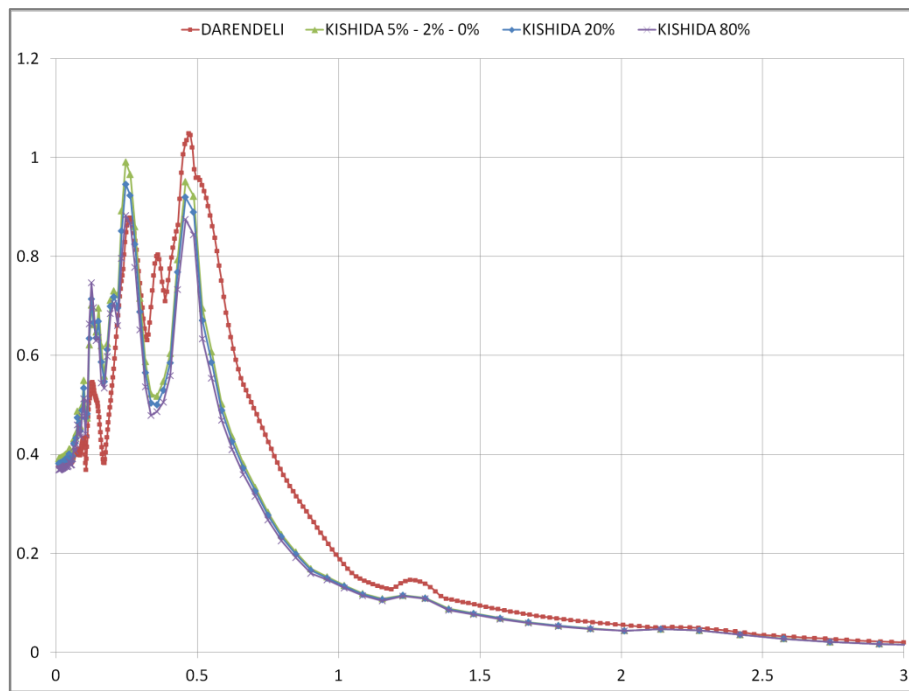
5.10 Συγκριτικά αποτελέσματα ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης με τα μοντέλα Darendeli (2001) - Kishida (2012)



Εικόνα 5.15. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Chi-Chi (1999) - ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Darendeli, 2001 - Kishida, 2012)



Εικόνα 5.16. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Kocaeli (1999) - ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Darendeli, 2001 - Kishida, 2012)



Εικόνα 5.17. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g), Athens (1999) - ισοδύναμη γραμμική ανάλυση (Darendeli, 2001 - Kishida, 2012)

Κεφάλαιο 6

Ανάπτυξη web εφαρμογής

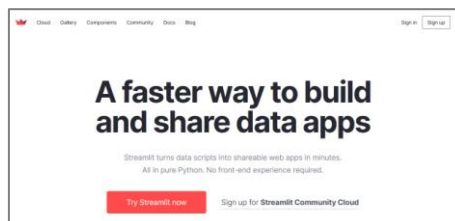
6.1 Δημιουργία web εφαρμογής

Με την χρήση των δυνατοτήτων που παρέχουν τα εργαλεία που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο θα αναπτυχθεί η web εφαρμογή με την οποία θα εισάγονται όλα τα απαραίτητα δεδομένα και θα εξάγονται τα αποτελέσματα για το μονοδιάστατο μοντέλο 1D της γραμμικής ελαστικής ή της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης (Darendeli, Kishida).

Σκοπός δημιουργίας της web εφαρμογής είναι η ενσωμάτωση της γραμμικής ελαστικής και της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης για το μονοδιάστατο μοντέλο σε μία διαδικτυακή εφαρμογή. Προκειμένου να αναπτυχθεί η web εφαρμογή χρησιμοποιείται το περιβάλλον εργασίας του Streamlit (Εικ.5.4).

Το Streamlit (<https://streamlit.io/>) είναι ένα περιβάλλον μέσα στο οποίο, με την χρήση του κώδικα της γλώσσας προγραμματισμού Python, παρέχεται η δυνατότητα δημιουργίας μίας web εφαρμογής των επιστημονικών δεδομένων που παράγονται στην μεταπτυχιακή εργασία. Η χρήση της ανοιχτής αυτής εφαρμογής επιδέχεται εμπλουτισμό δεδομένων, ενώ έχει και διαδραστικό χαρακτήρα.

Ο χρήστης με την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων δημιουργεί μία εφαρμογή όπου παρουσιάζονται όλες οι πληροφορίες με την μορφή λίστας ή πινάκων ενώ εμφανίζονται και οπτικοποιημένες με την μορφή διαγραμμάτων και γραφημάτων, όχι απαραίτητα στατικών (πχ με την μορφή μίας εικόνας), αλλά και δυναμικών. Με την επεξεργασία και μορφοποίηση της εφαρμογής αυτής τελικά, ο κάθε χρήστης επιλέγει τα δεδομένα που θα εξετάσει, τις εκτυπώσεις (plots) που θα παρουσιάζονται κλπ.



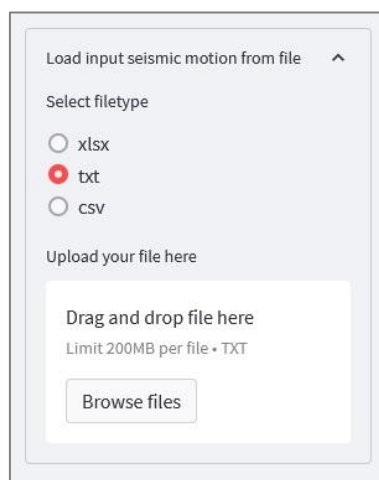
Εικόνα 6.1. Αρχική σελίδα Streamlit

Η εφαρμογή που θα αναπτυχθεί δομείται με τον τρόπο που περιγράφεται στις παρακάτω παραγράφους.

Αρχικά αναγράφεται ο τίτλος μαζί με μία σύντομη περιγραφή για την χρησιμότητα της εφαρμογής ενώ υποδεικνύεται και γίνεται ειδική αναφορά στην έτοιμη βιβλιοθήκη της Python, pystrata που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5 η οποία και αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο ανάπτυξης της εφαρμογής.

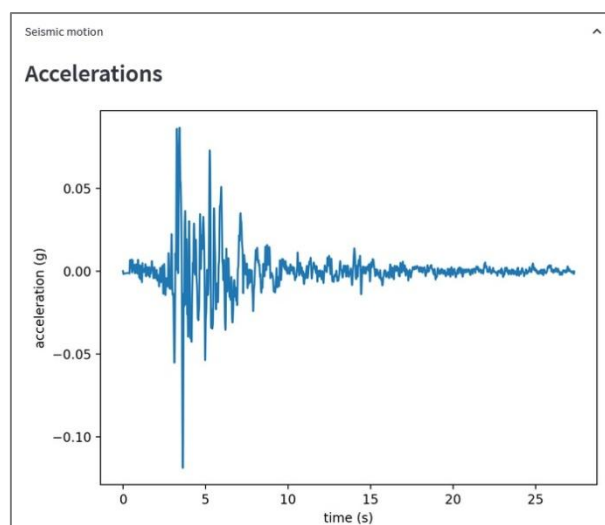
Εν συνεχεία εισάγονται όλα τα δεδομένα που απαιτούνται για να πραγματοποιηθεί η γραμμική ελαστική είτε η ισοδύναμη ελαστική ανάλυση του μονοδιάστατου μοντέλου διαστρωμάτωσης που έχει επιλεγεί, μέσω ενός πλευρικού μενού στα αριστερά της οθόνης. Ως μέθοδος χρησιμοποιείται η μέθοδος της χρονοϊστορίας (Time Series Method). Τα βήματα της μεθοδολογίας διακρίνονται στα παρακάτω περιγραφόμενα:

Αρχικά εισάγεται το αρχείο του επιταχυνσιογραφήματος και αυτόματα στην κεντρική οθόνη εμφανίζεται η εκτύπωση των δεδομένων του επιταχυνσιογραφήματος με την μορφή μίας στατικής εικόνας. Το αρχείο εισάγεται μέσω επιλογής που υπάρχει στο πλευρικό μενού της εφαρμογής (Εικ.6.2) και οι υποστηριζόμενοι τύποι αρχείων είναι txt, csv, xls.



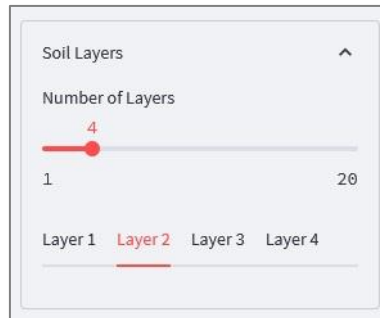
Εικόνα 6.2. Εισαγωγή αρχείου επιταχυνσιογραφήματος στην web εφαρμογή

Με την επιτυχή εισαγωγή του αρχείου του επιταχυνσιογραφήματος στο κέντρο της σελίδας εμφανίζεται η εκτύπωση των δεδομένων του, χρόνος-επιτάχυνση, η μορφοποίηση της οποίας είναι όμοια με την μορφοποίηση των γραφημάτων της βιβλιοθήκης pystrata (Εικ.6.3).



Εικόνα 6.3. Επιταχυνσιογράφημα σεισμού - web εφαρμογή

Στο επόμενο βήμα επιλέγεται το πλήθος των εδαφικών στρώσεων που θα αναλυθούν με μέγιστο αριθμό για την web εφαρμογή τις 20. Με την χρήση μίας μπάρα ολίσθησης (slider) επιλέγεται με ευκολία ο αριθμός των στρώσεων της ανάλυσης, ενώ ταυτόχρονα με την επιλογή των στρωμάτων εμφανίζονται από κάτω οι καρτέλες που αφορούν το κάθε εδαφικό στρώμα.



Εικόνα 6.4. Μπάρα ολίσθησης επιλογής αριθμού εδαφικών στρώσεων

Επιλέγοντας την αντίστοιχη καρτέλα (Layer 1, Layer 2, Layer 3, Layer 4 κλπ) εμφανίζονται οι παράμετροι υπολογισμού που πρέπει να δωθούν για το κάθε στρώμα ξεχωριστά. Ξεκινώντας από τις βασικές παραμέτρους δηλ.:

- το πάχος της κάθε στρώσης σε m.
- το ειδικό βάρος του υλικού της κάθε στρώσης σε kN/m^3
- η διατμητική ταχύτητα σε m/sec
- ο συντελεστής απόσβεσης του βραχώδους υποβάθρου

με τις παραπάνω παραμέτρους (Εικ.6.5) να αποτελούν και τα βασικά μεγέθη υπολογισμού της γραμμικής ελαστικής ανάλυσης.

Για την ισοδύναμη γραμμική ανάλυση, αναλόγως του μοντέλου καμπυλών που θα επιλεγεί ορίζονται και οι αντίστοιχες παράμετροι (Εικ.6.6). Πιο συγκεκριμένα, για να εφαρμοστεί το μοντέλο του Darendeli (2001) ορίζονται:

- ο δείκτης πλαστικότητας P_I
- ο συντελεστής προστερεοποίησης OCR
- η μέση τάση σε κάθε στρώση σε kPa
- η συχνότητα διέγερσης σε Hz
- ο αριθμός των κύκλων φόρτισης

Για την εφαρμογή του μοντέλου του Kishida (2001) ορίζονται:

- η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη για την κάθε στρώση (OC)
- ο συντελεστής προστερεοποίησης OCR (εργαστηριακές τιμές)
- η κατακόρυφη τάση σε κάθε στρώση σε kPa

Thickness [m]	5.00	-	+
Unit weight of the material [kN/m ³]	18.00	-	+
Vs [m/s]	150	-	+

Εικόνα 6.5. Βασικές παράμετροι εδαφικών στρώσεων

Οι τιμές που εμφανίζονται είναι οι προεπιλεγμένες τιμές που έχουν δοθεί στην εφαρμογή και για την αλλαγή αυτών υπάρχει η δυνατότητα χρήσης των κουμπιών +, - για μεταβολή κατά μία μονάδα, ή αλλιώς με την πληκτρολόγηση μέσα στο κάθε κελί της ακριβούς τιμής που θέλουμε.

Plasticity index [percent]	0.00	-	+
Over-consolidation ratio	1	-	+
Mean effective stress [kN/m ²]	200	-	+
Excitation frequency [Hz]	30	-	+
Number of cycles of loading	50	-	+

Εικόνα 6.6. Παράμετροι υπολογισμού μοντέλου Darendeli (2001)

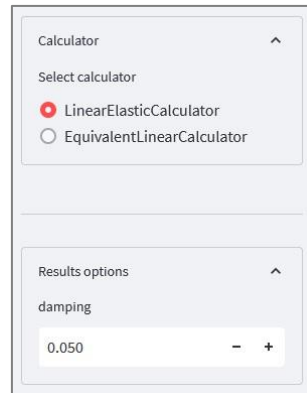
Στην συνέχεια δίνεται η επιλογή του τύπου του υλικού του κάθε εδαφικού στρώματος με την δυνατότητα ανάμεσα σε αμμώδη και αργιλικά εδάφη (Εικ.6.7). Η παραπάνω επιλογή χρησιμοποιείται για εποπτικούς σκοπούς για το κάθε στρώμα που έχει περιγραφεί με τις παραμέτρους σύμφωνα με τα προηγούμενα και κυρίως για λόγους ονομασίας της κάθε στρώσης, καθώς δεν επηρεάζει την ανάλυση (πχ αν αμμώδης στρώση, σημασία έχει να επιλεγεί προηγουμένως PI=0 και όχι αν θα ονομαστεί sand).

Select Soil Type
Sand
Sand
Clay

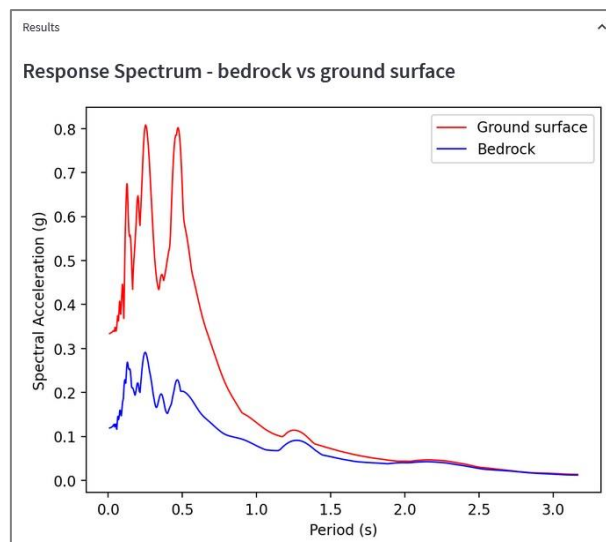
Εικόνα 6.7. Αμμώδη ή αργιλικά εδάφη

Έπειτα από τα ανωτέρω και με χρήση της κωδικοποίησης από την βιβλιοθήκη pystrata επιλέγεται η ανάλυση που θέλουμε να πραγματοποιηθεί μαζί με τον συντελεστή απόσβεσης στην επιφάνεια του

εδάφους. Αυτόματα μετά τον ορισμό ολοκληρώνεται η ανάλυση και εξάγονται τα αποτελέσματα (που αφορούν το γράφημα βάθους-ταχύτητας διατμητικών κυμάτων, το φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων στο βραχώδες υπόβαθρο και στην επιφάνεια του εδάφους συγκεντρωτικά, την συνάρτηση μεταφοράς, το φάσμα Fourier κ.α.) με την μορφή στατικής εκτύπωσης.



Εικόνα 6.8. Επιλογή ανάλυσης, απόσβεσης

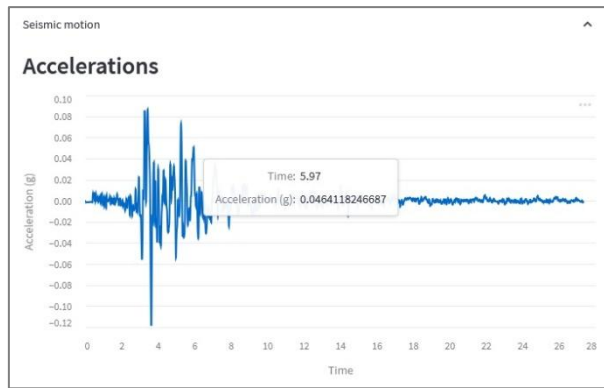


Εικόνα 6.9. Φάσμα απόκρισης (βραχώδες υπόβαθρο-επιφάνεια εδάφους), στατική εκτύπωση

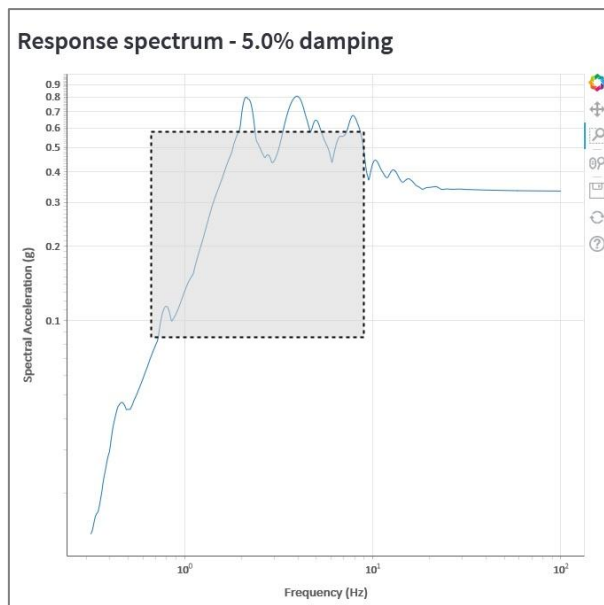
Στο πλευρικό μενού της εφαρμογής τέλος, δίνεται η δυνατότητα θέασης των εκτυπώσεων των αποτελεσμάτων όπως και του επιταχυνσιογραφήματος και με την μορφή διαδραστικής εκτύπωσης.

Ο χρήστης μπορεί να περιηγηθεί εντός του χώρου του γραφήματος όπου σε κάθε σημείο δίνεται η πληροφορία των τιμών των αξόνων του γραφήματος, δύναται να μεγενθύνει μία περιοχή ενδιαφέροντος στο γράφημα, να αποθηκεύσει το γράφημα κ.α. (Εικ.6.10, 6.11).

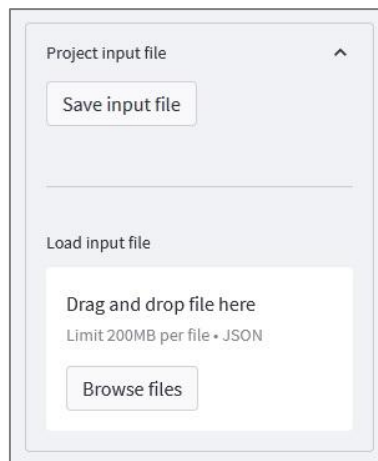
Όλα τα δεδομένα για την πραγματοποίηση των αναλύσεων υπάρχει η δυνατότητα να αποθηκεύονται και να μεταφορτώνονται εκ νέου από το πλευρικό μενού. Η μορφή των αρχείων αυτών έχει την προέκταση *.json (Javascript Object Notation) και ουσιαστικά αποτελούν πρότυπα κειμένου που μπορεί διαβαστούν με την χρήση Notepad, προγραμμάτων περιήγησης (browsers) (Εικ 6.12) κ.α.



Εικόνα 6.10. Διαδραστικό γράφημα αποτελεσμάτων (χρονοϊστορία επιταχύνσεων)



Εικόνα 6.11. Διαδραστικό γράφημα αποτελεσμάτων (φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων)



Εικόνα 6.12. Αποθήκευση-μεταφόρτωση json αρχείων στην web-εφαρμογή

6.2 Διαθεσιμότητα web εφαρμογής

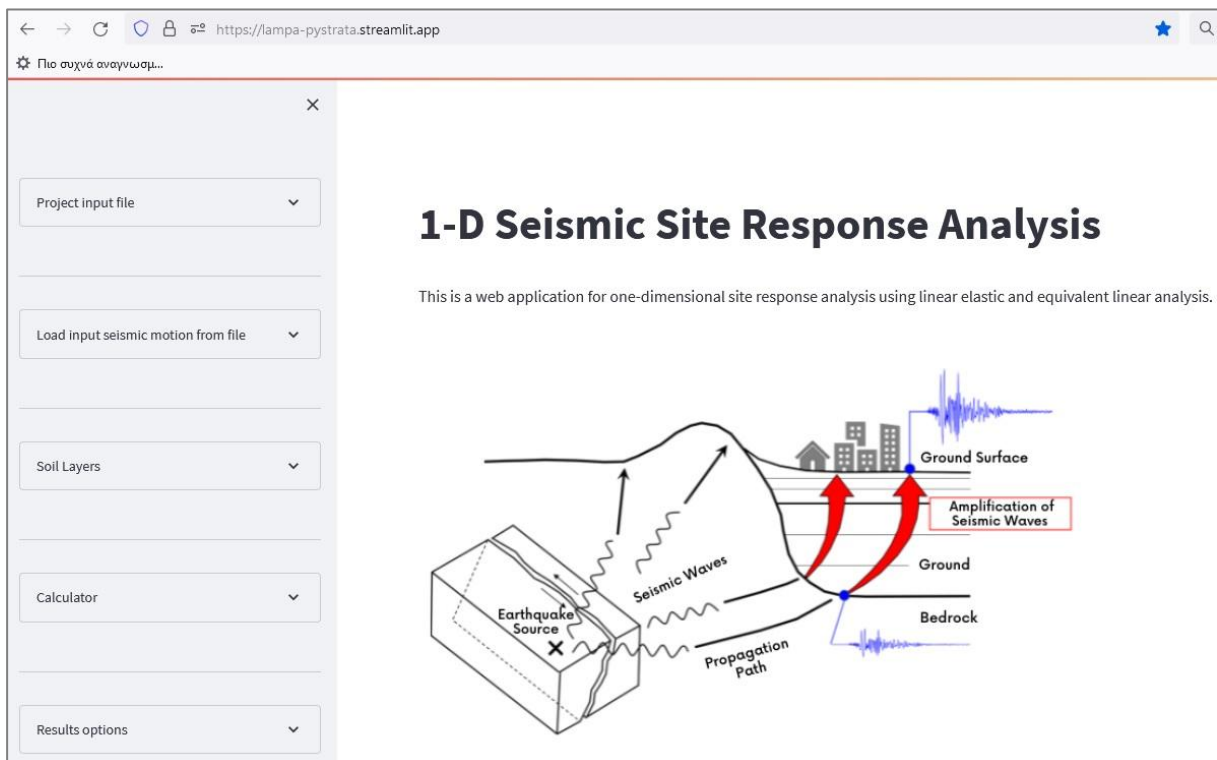
Η web εφαρμογή ονομάστηκε LamPa και ο σύνδεσμος (link) στον οποίο είναι διαθέσιμη για οποιονδήποτε χρήστη είναι ο παρακάτω:

<https://lampa-pystrata.streamlit.app/>

Με την επίσκεψη στον συγκεκριμένο σύνδεσμο εμφανίζεται η αρχική σελίδα της εφαρμογής (Εικ.6.13). Κατα τα γνωστά από το υποκεφάλαιο 6.1 ο χρήστης έχει την δυνατότητα υπολογισμού της εδαφικής απόκρισης για κάθε τύπο παραδείγματος που επιθυμεί.

Η κωδικοποίηση της εφαρμογής με όλα τα απαραίτητα αρχεία λειτουργίας της είναι διαθέσιμα στην διαδικτυακή πλατφόρμα διαμοιρασμού GitHub και συγκεκριμένα στον σύνδεσμο:

<https://github.com/panagop/lampa>



Εικόνα 6.13. Αρχική σελίδα web-εφαρμογής LamPa

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

7.1 Συμπεράσματα αναλύσεων

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή της μεταπτυχιακής εργασίας στόχος της αποτελεί η συγκριτική απόδοση των αναλύσεων της εδαφικής απόκρισης μέσα από την χρήση των προγραμμάτων ανοιχτού λογισμικού και της κωδικοποιημένης, σε γλώσσα προγραμματισμού Python, βιβλιοθήκης, καθώς και η ανάπτυξη μίας web εφαρμογής που θα ενσωματώνει τις παραμέτρους και θα εξάγει τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών.

Στο πρώτο σκέλος, λαμβάνοντας υπόψιν τις αναλύσεις που έλαβαν χώρα στα Κεφάλαια 4 και 5, οι οποίες και προσομοιώθηκαν στο περιβάλλον της web εφαρμογής, ακολουθεί μία σύνοψη των αποτελεσμάτων των αναλύσεων αυτών, μέσα και από την γραφική απεικόνιση που παρατίθεται στο κυρίως κείμενο της εργασίας.

Αρχικά, στην γραμμική ελαστική ανάλυση το ποσοστό σύγκλισης που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα του κάθε παραδείγματος με τα τρία διαφορετικά εργαλεία υπολογισμού του φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων προσεγγίζουν το όριο της πλήρους ταύτισης.

Όσον αφορά την ισοδύναμη γραμμική ανάλυση με το μοντέλο του Darendeli (2001) τα εξαγόμενα δεδομένα είναι πανομοιότυπα κάτι που ενισχύει και τον βαθμό αξιοπιστίας και των τριών εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς (Deerpsoil, Strata, pystrata). Κάτι αντίστοιχο ισχύει και για το μοντέλο καμπυλών αναφοράς των Vucetic & Dobry (1991) με τις αναλύσεις εδώ όμως να περιορίζονται στην χρήση μόνο των δύο προγραμμάτων Deerpsoil και Strata.

Στα επιμέρους στοιχεία των αναλύσεων, το χρονικό διάστημα υπολογισμού των επιταχύνσεων ορίστηκε σε $T=10\text{sec}$, όμως για λόγους καλύτερης επισκόπησης στα γραφήματα εμφανίζονται τα αποτελέσματα μέχρι και $T=4\text{sec}$. Η παραπάνω χρονική περίοδος επιλέχθηκε και διότι από τα 4 έως και τα 10 sec οι τιμές των επιταχύνσεων είναι πάρα πολύ μικρές, άρα και η πληροφορία που δίδεται σε αυτό το εύρος δεν θεωρείται ότι προσδίδει μεγάλη βαρύτητα στα συγκριτικά αποτελέσματα των αναλύσεων της εργασίας.

Πρέπει να αναφερθεί ότι το μοντέλο καμπυλών αναφοράς των Vucetic & Dobry δεν λαμβάνει υπόψιν ως παραμέτρους τον συντελεστή προστερεοποίησης OCR και τον συντελεστή πλευρικών ωθήσεων σε ηρεμία K_0 σε αντίθεση με το μοντέλο Darendeli, ενώ στο μοντέλο του Kishida εισάγεται και η παράμετρος της περιεκτικότητας σε οργανική ύλη για την κάθε εδαφική στρώση.

Τα ζεύγη σημείων (χρόνος-επιτάχυνση) υπολογίστηκαν με βάση τις προεπιλεγμένες τιμές των προγραμμάτων Deerpsoil και Strata και προσαρμογή των προεπιλεγμένων τιμών της βιβλιοθήκης pystrata. Για τα δύο προγράμματα είναι 113 ζεύγη σημείων, ενώ για την βιβλιοθήκη pystrata η

προεπιλεγμένη τιμή είναι 500 ζεύγη σημείων, η οποία σε κάποια παραδείγματα διατηρήθηκε ως έχει, ενώ σε άλλα προσαρμόστηκε σε 113 όπως και στα προγράμματα.

Στα παραδείγματα ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης που εξετάστηκαν με το μοντέλο καμπυλών Vucetic & Dobry στο λογισμικό των Deepsoil και Strata συγκρινόμενα με τα παραδείγματα που αναλύθηκαν με το μοντέλο καμπυλών Darendeli (Deepsoil, Strata, pystrata) που φανερώνονται στα γραφήματα των εικόνων του Κεφαλαίου 4 πρέπει να σχολιαστεί πως στο μοντέλο Darendeli παρουσιάζεται σημαντική αύξηση των τιμών των επιταχύνσεων (σε εύρος από 0,2 - 0,5g) στην εδαφική κίνηση σε σχέση με το μοντέλο των Vucetic & Dobry για τιμές της περιόδου από 0,5 έως και 1,00 sec. Σε όλα τα άλλα διαστήματα του χρόνου οι τιμές του ενός μοντέλου προσεγγίζουν τις τιμές του άλλου.

Ομοίως εμφανείς διαφορές υπάρχουν και μεταξύ των μοντέλων Darendeli και Kishida, όπου για την σεισμική διέγερση ChiChi το μοντέλο του Darendeli εμφανίζει πιο ισχυρή εδαφική κίνηση και μεγαλύτερη διάρκεια αυτής, από αυτό του Kishida. Στο επιταχυνσιογράφημα Kocaeli διατηρείται το παραπάνω μοτίβο με την διαφορά ότι εμφανίζεται μία έξαρση στο μοντέλο του Kishida, όσον αφορά την επιτάχυνση του εδάφους στα 0,20 sec, της τάξης του 1g σε σχέση με το μοντέλο του Darendeli. Τέλος, στον σεισμό της Αθήνας παρατηρείται αυξημένη τιμή επιτάχυνσης στο μοντέλο Kishida στα 0,30 sec, με το μοντέλο του Darendeli να εμφανίζει και πάλι ισχυρότερη εδαφική κίνηση και μεγαλύτερη διάρκεια αυτής.

Σημαντικές επίσης διαφορές παρουσιάζονται στις συγκρίσεις της γραμμικής ελαστικής με την ισοδύναμη γραμμική ανάλυση με το μοντέλο του Darendeli (2001). Εξαιρώντας την σεισμική διέγερση στο Kocaeli, όπου μέχρι τα 0,3 sec η επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους έχει σημαντικά υψηλότερες τιμές στην γραμμική ελαστική ανάλυση, σε κάθε άλλη περίπτωση και χρονική στιγμή, η ισοδύναμη γραμμική ανάλυση με το μοντέλο του Darendeli παρουσιάζει υψηλότερες τιμές επιταχύνσεων σε σχέση με την γραμμική ελαστική ανάλυση, καταδεικνύοντας την ορθότητα της θεώρησης περί σημασίας και επιρροής της δυναμικής συμπεριφοράς των εδαφών στην ενίσχυση της διέγερσης στην επιφάνεια του εδάφους.

Για την περίπτωση των αποτελεσμάτων της γραμμικής ελαστικής ανάλυσης σε σχέση με την ισοδύναμη γραμμική ανάλυση με τις καμπύλες G-γ-D των Vucetic & Dobry (1991), μετρίζονται σε κάποιο βαθμό οι διαφορές που αναφέρονται στην προηγούμενη παράγραφο και πάλι όμως η μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους στην περίπτωση της σεισμικής διέγερσης στο ChiChi δίνει αρκετά υψηλότερες τιμές συγκρινόμενη με την γραμμική.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα που παρήχθησαν στα φάσματα απόκρισης επιταχύνσεων μπορούν αναφερθούν τα κάτωθι:

- Για το επιταχυνσιογράφημα από τον σεισμό στην Ταϊβάν (Chi-Chi) μεγέθους 7,3 βαθμών της κλίμακας Richter διαπιστώνονται από το φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων υψηλές τιμές επιταχύνσεων (0,25-2,2g) για τα πρώτα 2,5 sec ενώ μέχρι τα 4 sec η τιμή της επιτάχυνσης διατηρείται περίπου σε 0,2g.
- Για το επιταχυνσιογράφημα από τον σεισμό στο Ιζμίτ της Τουρκίας (Kocaeli) μεγέθους 7,6 βαθμών της κλίμακας Richter διαπιστώνονται από το φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων υψηλές τιμές επιταχύνσεων (0,2-1,1g) για το πρώτο 1 sec ενώ μέχρι τα 4 sec η τιμή της επιτάχυνσης μειώνεται περί τα 0,05g.

- Για το επιταχυνσιογράφημα από τον σεισμό της Πάρνηθας στην Αθήνα (Athens) μεγέθους 5,9 βαθμών της κλίμακας Richter διαπιστώνονται από το φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων υψηλές τιμές επιταχύνσεων (0,2-1,05g) για το πρώτο 1 sec ενώ μέχρι τα 4 sec η τιμή της επιτάχυνσης μειώνεται αισθητά και σχεδόν μηδενίζεται.

Σε ότι αφορά την χρήση της web εφαρμογής, παρουσιάζει με εύχρηστο τρόπο τα αποτελέσματα και τις οπτικοποιήσεις των αναλύσεων, ενώ μέσα από την εξέλιξη της "δυναμικού τύπου" βιβλιοθήκης *pystrata* για αναλύσεις του μονοδιάστατου μοντέλου εδαφικής απόκρισης, παρέχεται η δυνατότητα διαρκούς εμπλουτισμού και βελτίωσης της εφαρμογής.

Ο εμπλουτισμός αυτός μπορεί να αφορά την χρήση και άλλων καμπυλών αναφοράς G-γ-D της βιβλιογραφίας πέραν αυτών που χρησιμοποιήθηκαν στην μεταπτυχιακή εργασία, επιλογή αναλύσεων μη γραμμικών, προσδιορισμό V_s των εδαφικών στρώσεων μέσα από ταξινομήσεις κανονιστικών κειμένων (EC8), επιλογή αναλύσεων με την προσέγγιση της θεωρίας των τυχαίων δονήσεων (Random Vibration Theory) αντί της προσέγγισης της χρονοϊστορίας που επιλέχθηκε για την διπλωματική εργασία, υπολογισμός περισσότερων μεγεθών ενδιαφέροντος, όπως η ένταση κατά Arias κ.α.

Βιβλιογραφικές αναφορές

ΈΝΤΥΠΕΣ ΠΗΓΕΣ ΚΕΙΜΕΝΟΥ

- Andrews, D. (1986). Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size. *Earthquake Source Mechanics*, American Geophys. Union.
- Boore, D., Joyner, W.B., and Fumal, T. (1993). Estimation of response spectra and peak acceleration from Western North America earthquakes : An interim report. Technical Report Open-GFile Report 93-509, U.S. Geological Survey, Menlo Park, California.
- Borcherd, R. (1970). Effecty of local geology on ground motion near San Francisco bay. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60:29-61
- CEN (2004). EN 1998–1: *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardisation.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Reid, H. (1911). *The elastic rebound theory of earthquakes*. University of California Department of Geology Bulletin.
- Skarlatoudis, A., Papazachos, C., Margaris, B., Thedoulidis, N., Papaioannou, C., Kalogeras, I., Scordilis, E., and Karakostas, V. (2003). Empirical peak ground motion predictive relations for shallow earthquakes in Greece. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93:2591-2603
- Υ.Π.Ε.Χ.Ω.Δ.Ε. (2000). *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, ΕΑΚ2000*. Αθήνα: Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ).
- Θεοδουλίδης, Ν. και Παπαζάχος, Β. (1992). Ισχυρή σεισμική κίνηση στον Ελληνικό χώρο, Απόσβεση μέγιστων εδαφικών και φασματικών τιμών. Πρακτικά 1^{ου} Ελληνικού Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας.
- Παπαζάχος, Β. (1989). *Μέτρα της ισχύος των σεισμών στην Ελλάδα*. Πρακτικά 1^{ου} συνεδρίου Συλλόγου Ελλήνων Γεωφυσικών.
- Πιτιλάκης, Κ. (2010). *Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΚΕΙΜΕΝΟΥ

- Vucetic, M. and Dobry, B. (1991), *Effect of soil plasticity on cyclic response*. Journal of Geotechnical Engineering, 117, 89-107. Ανακτήθηκε 26 Αυγούστου, 2022, από <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9410%281991%29117%3A1%2889%29>
- Darendeli, M. B. (2001), *Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves*. Department of Civil, Architectural and Enviromental Engineering, The University of Texas, Austin, Texas. Ανακτήθηκε 26 Αυγούστου, 2022, από <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/10396/darendelimb016.pdf>
[https://en.wikipedia.org/wiki/Python_\(programming_language\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Python_(programming_language))

Kishida, K., Boulanger, R., Abrahamson, N.A., Driller, M.W., Wehling, T.M. (2009), *Site effects for the Sacramento-San Joaquin Delta*. Earthquake Spectra Journal 25(2). Ανακτήθηκε 26 Αυγούστου, 2022, από https://www.researchgate.net/publication/256932489_Site_Effects_for_the_Sacramento-San_Joaquin_Delta
<https://docs.streamlit.io/>

ΈΝΤΥΠΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 3.2: Figure 7.9 Nomenclature for layered soil deposit on elastic bedrock (Kramer, S. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, page 268).

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα εξώφυλλου: North-south ground motion acceleration component from the El-Centro earthquake. Ανακτήθηκε 05 Ιουλίου, 2022, από https://www.researchgate.net/figure/North-south-ground-motion-acceleration-component-from-the-El-Centro-earthquake_fig2_333119345

Εικόνα 2.1: Body Waves and Surface Waves. Ανακτήθηκε 02 Ιουλίου, 2022, από <https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=P%20wave>
<https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=S%20wave>

Εικόνα 2.2: Rayleigh Waves. Ανακτήθηκε 02 Ιουλίου, 2022, από https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_wave, Love Waves. Ανακτήθηκε 02 Ιουλίου, 2022, από https://en.wikipedia.org/wiki/Love_wave

Εικόνα 2.3: Body Waves and Surface Waves. Ανακτήθηκε 02 Ιουλίου, 2022, από <https://www.sms-tsunami-warning.com/pages/seismograph#.YysyUstBwS0>

Εικόνα 2.4: Figure 13.25 Dip slip faults. Normal faults are caused by tension, while reverse faults happen during compression. *Source: Karla Panchuk (2018) CC BY-SA 4.0, modified after Woudloper (2010) CC BY-SA 3.0*. Ανακτήθηκε 02 Ιουλίου, 2022, από <https://openpress.usask.ca/physicalgeology/chapter/13-3-fractures-faults-and-joints-2/>

Εικόνα 2.5: Figure 13.26 Strike-slip faults. Rocks on either side of the fault move parallel to the fault. In dextral strike-slip faults the far side moves to the right of the observer. In sinistral strike-slip faults the far side moves to the left of the observer. *Source: Karla Panchuk (2018) CC BY 4.0*. Ανακτήθηκε 02 Ιουλίου, 2022, από <https://openpress.usask.ca/physicalgeology/chapter/13-3-fractures-faults-and-joints-2/>

Εικόνα 3.1: Figure 1.1. Illustration of 1-D seismic site response analysis that is simplified into a 1D soil column (Nikolaou & Go, 2009). Ανακτήθηκε 10 Αυγούστου, 2022 από <https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-One-Dimensional-Seismic-Site-Response-Hutabarat/f9421c15a79a17c9a3e5a7dd5b1d1038e61ead18>

Εικόνα 3.3: Figure 1.4. Nonlinear stress-strain curve of soils and variation of secant shear modulus with shearing strain amplitude - Figure 1.5. Estimation of shear modulus and material damping during cyclic loading (Darendeli, M.B. (2001) *Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves*. Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, The University of Texas, Austin, Texas, pages 5, 6). Ανακτήθηκε 10

- Αυγούστου, 2022 από <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/10396/darendelimb016.pdf>
- Εικόνα 3.4: Figure 5.8. Empirical (a) normalized modulus reduction, and (b) material damping curves proposed by Idriss (1990) (Darendeli, M.B. (2001) *Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves*. Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, The University of Texas, Austin, Texas, page 121). Ανακτήθηκε 10 Αυγούστου, 2022 από <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/10396/darendelimb016.pdf>
- Εικόνα 3.5: Figure 5.6. Empirical (a) normalized modulus reduction, and (b) material damping curves proposed by Seed et al. (1986) (Darendeli, M.B. (2001) *Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves*. Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, The University of Texas, Austin, Texas, page 118). Ανακτήθηκε 10 Αυγούστου, 2022 από <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/10396/darendelimb016.pdf>
- Εικόνα 3.6: Figure 5.9. Empirical (a) normalized modulus reduction, and (b) material damping curves proposed by Vucetic and Dobry (1991) (Darendeli, M.B. (2001) *Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves*. Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, The University of Texas, Austin, Texas, page 122). Ανακτήθηκε 10 Αυγούστου, 2022 από <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/10396/darendelimb016.pdf>
- Εικόνα 3.7: Figure 12.3. Mean values and standard deviations associated with the point estimates of (a) normalized modulus reduction and (b) material damping curves (Darendeli, M.B. (2001) *Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves*. Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, The University of Texas, Austin, Texas, page 302). Ανακτήθηκε 10 Αυγούστου, 2022 από <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/10396/darendelimb016.pdf>
- Εικόνα 3.8: Figure 12.2. Comparison of the effect of soil plasticity on nonlinear soil behavior predicted by the calibrated model and the empirical curves proposed by Vucetic and Dobry (1991) (Darendeli, M.B. (2001) *Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves*. Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, The University of Texas, Austin, Texas, page 300). Ανακτήθηκε 10 Αυγούστου, 2022 από <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/10396/darendelimb016.pdf>
- Εικόνα 3.9: Figure 12.1. Comparison of the effect of confining pressure on nonlinear soil behavior of sand (PI = 0%) predicted by the calibrated model and the empirical curves proposed for sands by Seed et al. (1986) (Darendeli, M.B. (2001) *Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves*. Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, The University of Texas, Austin, Texas, page 299). Ανακτήθηκε 10 Αυγούστου, 2022 από <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/10396/darendelimb016.pdf>
- Εικόνα 3.10: Normalized modulus reduction curves for (a) low organic content soils (b) high organic content soils. - Damping ratio curves for (a) low organic content soils (b) high organic content soils. Ανακτήθηκε 10 Αυγούστου, 2022 από https://www.researchgate.net/figure/Normalized-modulus-reduction-curves-for-a-low-organic-content-soils-b-high-organic_fig4_256932489, https://www.researchgate.net/figure/Damping-ratio-curves-for-a-low-organic-content-soils-b-high-organic-content-soils_fig5_256932489

Εικόνα 4.1: Εγχειρίδιο χρήσης προγράμματος SHAKE (P.B. Schnabel, J. Lysmer, H.Bolton Seed, 1972). Ανακτήθηκε 10 Αυγούστου, 2022 από <https://www.resolutionmineeis.us/documents/schnabel-lysmer-seed-1972>

Εικόνα 4.2: Εγχειρίδιο χρήσης προγράμματος SHAKE 2000 (G.A. Ordonez, 2009). Ανακτήθηκε 10 Αυγούστου, 2022 από <http://www.geomotions.com>

Εικόνα 4.3: Λογότυπο λογισμικού Deepsoil (Y.M.A. Hashash, 2020). Ανακτήθηκε 10 Αυγούστου, 2022 από <http://deepsoil.cee.illinois.edu/>

Εικόνα 4.4: Πληροφορίες λογισμικού Strata (A.Kottke, E.M.Rathje, 2019). Ανακτήθηκε 10 Αυγούστου, 2022 από <https://github.com/arkottke/strata/releases>

Εικόνα 6.1: Αρχική σελίδα streamlit. Ανακτήθηκε 05 Σεπτεμβρίου, 2022 από <https://streamlit.io/>

Παράρτημα Α

Συντελεστής K_0

Α.1 Διερεύνηση τιμών συντελεστή K_0

Έχει αναφερθεί ότι ο συντελεστής K_0 εξαρτάται από την γωνία τριβής των κόκκων των υλικών των εδαφικών στρωμάτων και από τον συντελεστή προστερεοποίησης OCR. Υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση (Jaky, 1948):

$$K_0 = (1 - \sin\phi) * OCR^{\sin\phi}$$

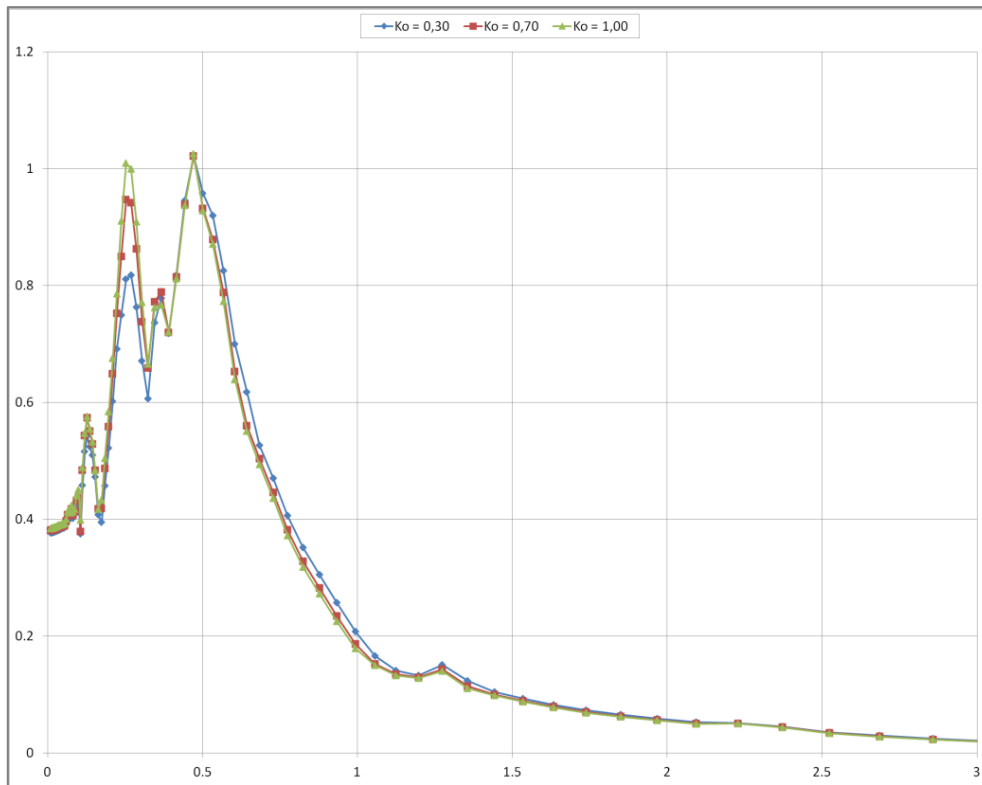
Εφαρμόστηκαν αρχικά δύο νέα σενάρια ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης με το πρόγραμμα Deepsoil για τις καμπύλες αναφοράς του Darendeli (2001) με διαφοροποίηση των τιμών στον συντελεστή K_0 . Χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές 0,30 - 0,70 μόνο για το επιταχυνσιογράφημα Athens (1999) με τα ίδια δεδομένα για τις εδαφικές στρώσεις που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4 της μεταπτυχιακής εργασίας.

Συνεπικουρικά με την ανάλυση που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4 για $K_0 = 1,00$ τα γραφήματα των αποτελεσμάτων της ανάλυσης για το κάθε K_0 ξεχωριστά, όπως και το συγκεντρωτικό γράφημα και των 3 αναλύσεων μαζί παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.

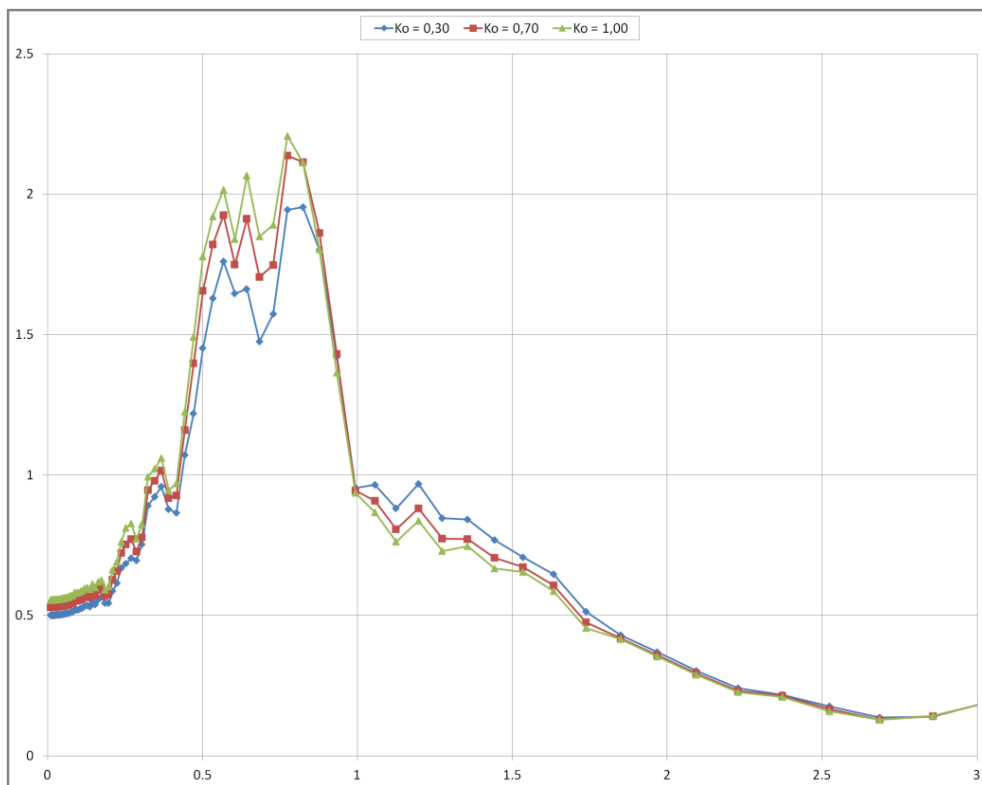
Γίνεται φανερό με την βοήθεια του συγκεντρωτικού γραφήματος στην εικόνα Α.1 πως ιδιαίτερος για τιμή της περιόδου περίπου 0,3 sec εμφανίζονται διαφορές στις τιμές των επιταχύνσεων με εμφανέστερη την απόκλιση τιμών στις αναλύσεις για $K_0 = 0,30$ και $K_0 = 1,00$.

Λόγω της διαφοράς που παρατηρήθηκε θεωρήθηκε σκόπιμο να διερευνηθούν και οι αναλύσεις με τα υπόλοιπα 2 επιταχυνσιογραφήματα που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις της εργασίας.

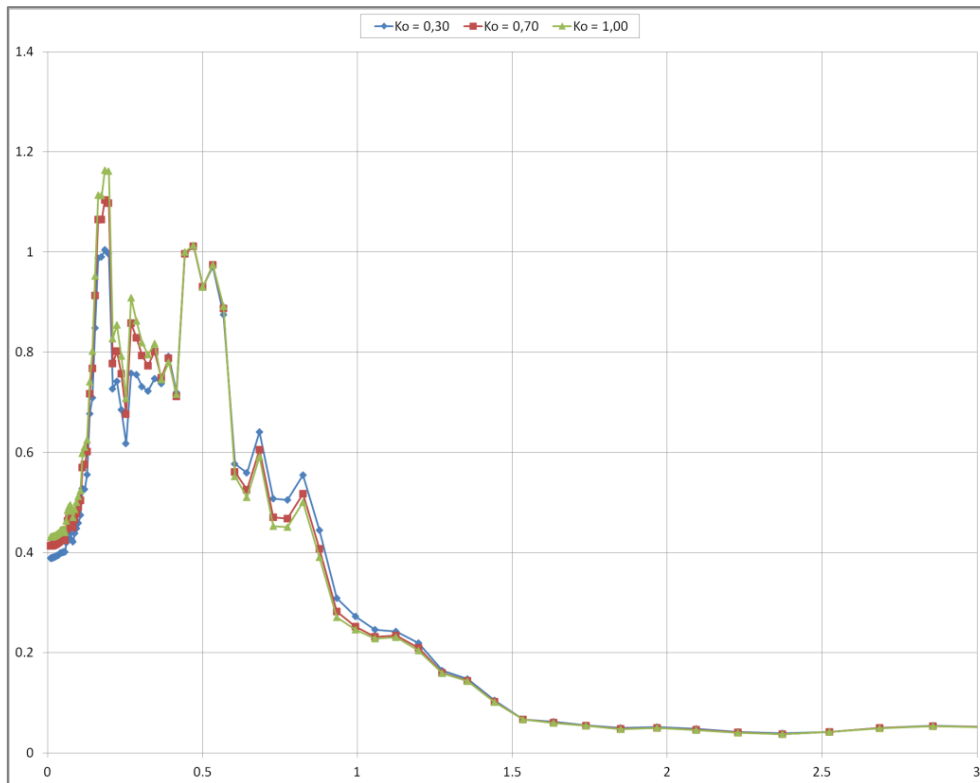
Τα συγκεντρωτικά γραφήματα και των 3 αναλύσεων μαζί ($K_0 = 0,30$, $K_0 = 0,70$ και $K_0 = 1,00$) παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες. Ως διαπίστωση παρατηρείται και πάλι η μεγαλύτερη απόκλιση στις τιμές των επιταχύνσεων στις αναλύσεις για $K_0 = 0,30$ και $K_0 = 1,00$.



Εικόνα Α.1. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g) με Deepsoil για Darendeli (2001) και $K_0 = 0,30 - 0,70 - 1,00$ - Athens



Εικόνα Α.2. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g) με Deepsoil για Darendeli (2001) και $K_0 = 0,30 - 0,70 - 1,00$ - ChiChi



Εικόνα Α.3. Συγκεντρωτικό γράφημα φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (g) με Deepsoil για Darendeli (2001) και $K_0 = 0,30 - 0,70 - 1,00 - Kocaeli$

Συμπερασματικά το γενικότερο μοτίβο γύρω από τον συντελεστή K_0 δείχνει ότι όσο αυξάνεται η τιμή του αυξάνεται και η τιμή της επιτάχυνσης της εδαφικής απόκρισης.

Για ορθότερη επιλογή της τιμής του K_0 είναι προφανές ότι απαιτούνται εργαστηριακοί και in situ υπολογισμοί και των λοιπών παραμέτρων που επηρεάζουν την τιμή του (γωνία ϕ , συντελεστής OCR) για κάθε εδαφική στρώση. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν προτεινόμενες σχέσεις που συνδέουν τον συντελεστή K_0 και με τον δείκτη πλαστικότητας PI, ενώ κάποιες ενδεικτικές προτεινόμενες τιμές είναι 0.60 για μαλακή άργιλο με PI=30 και 0.80 για αμμώδη εδάφη συμπυκνωμένα σε περισσότερες της μίας στρώσεις.

Παράρτημα Β

Jupyter notebook

Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται αυτούσια κάποια από τα jupyter notebook, μέσω των οποίων εξετάστηκε με την βιβλιοθήκη *rystrata* το σύνολο των παραδειγμάτων εφαρμογής της διπλωματικής εργασίας για την γραμμική ελαστική και την ισοδύναμη γραμμική ανάλυση.

Πιο συγκεκριμένα εμφανίζεται το σύνολο των βημάτων για την σεισμική διέγερση στο Chi-Chi σε γραμμική ελαστική ανάλυση και σε ισοδύναμη γραμμική ανάλυση με τις καμπύλες αναφοράς κατά Darendeli.

Όμοια με παραπάνω εξετάστηκαν και οι σεισμικές διεγέρσεις στο Kocaeli και στην Αθήνα με το αντίστοιχο περιβάλλον εργασίας των jupyter notebook.

Επιπρόσθετα παρουσιάζεται και ένα σενάριο ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης με βάση το προγνωστικό μοντέλο του Kishida (2012) για εδάφη πλούσια σε περιεκτικότητα οργανικής ύλης. Η συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιήθηκε για λόγους ενσωμάτωσής της στην web εφαρμογή, χωρίς όμως να υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης αποτελεσμάτων με τα προγράμματα *Deepsoil* και *Strata* καθώς τα προαναφερθέντα προγράμματα δεν παρέχουν την επιλογή για το μοντέλο του Kishida. Οι συγκρίσεις με το μοντέλο του Darendeli για την ισοδύναμη γραμμική ανάλυση χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης μιας και ο Kishida εισάγει διαφορετικές παραμέτρους ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, λαμβάνει υπόψιν στους υπολογισμούς το ποσοστό οργανικής ύλης στην κάθε εδαφική στρώση ως παράγοντα επιρροής, ενώ ο συντελεστής προστερεοποίησης OCR ορίζεται με βάση εργαστηριακές αναλύσεις (*laboratory consolidation ratio*).

Στο παράδειγμα με το μοντέλο Kishida (επιταχυνσιογράφημα Kocaeli) διατηρήθηκαν οι τιμές σε όλα τα βασικά μεγέθη των εδαφικών στρώσεων, όπως στα παραδείγματα των αναλύσεων της εργασίας, ενώ εδώ παρουσιάζεται το σενάριο όπου για το ποσοστό οργανικής ύλης ελήφθησαν οι τιμές 5%-2%-0% από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι και το βραχώδες υπόβαθρο και η εργαστηριακή τιμή για τον συντελεστή προστερεοποίησης ορίστηκε ίση με την μονάδα και για τις τρεις στρώσεις.

B.1 Παράδειγμα ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης μονοδιάστατου μοντέλου (Darendeli, 2001) με την βιβλιοθήκη pystrata (ChiChi)

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ PYSTRATA ΚΑΙ ΛΟΙΠΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ ΡΥΘΜΩΝ

```
In [1]: import pystrata
```

```
In [2]: from matplotlib import pyplot as plt
import numpy as np
import pandas as pd
from pystrata.motion import TimeSeriesMotion
```

ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΑΠΟ txt ΑΡΧΕΙΟ

```
In [3]: def time_accel_txt_to_pystrata_motion(filename: str) -> TimeSeriesMotion:
df = pd.read_csv(filename, header=None, skiprows=2, encoding = "utf-8", delim_whitespace=True)
accels = df[1].to_numpy()
time_step = df[0][1] - df[0][0]

return TimeSeriesMotion(filename=filename, description='', time_step=time_step, accels=accels)
```

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΑΡΧΕΙΟΥ

```
In [4]: ts = time_accel_txt_to_pystrata_motion('ChiChi.txt')
```

```
In [5]: ts.accels
```

```
Out[5]: array([9.034156e-06, 9.026870e-06, 9.016792e-06, ..., 2.630041e-04,
2.612812e-04, 2.595061e-04])
```

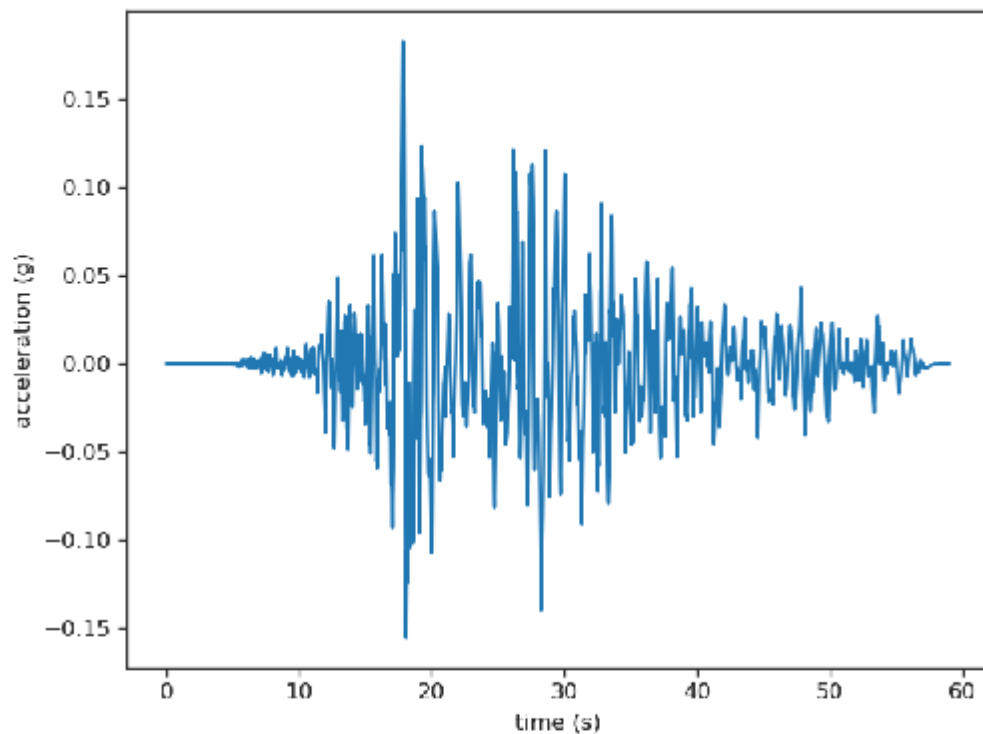
```
In [6]: print(ts.time_step)

0.004999999999999999
```

```
In [7]: # Increased figure sizes
plt.rcParams["figure.dpi"] =120
```

ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ

```
In [8]: fig, ax = plt.subplots()
ax.plot(ts.times, ts.accels)
ax.set(xlabel='time (s)', ylabel='acceleration (g)')
fig.tight_layout()
```



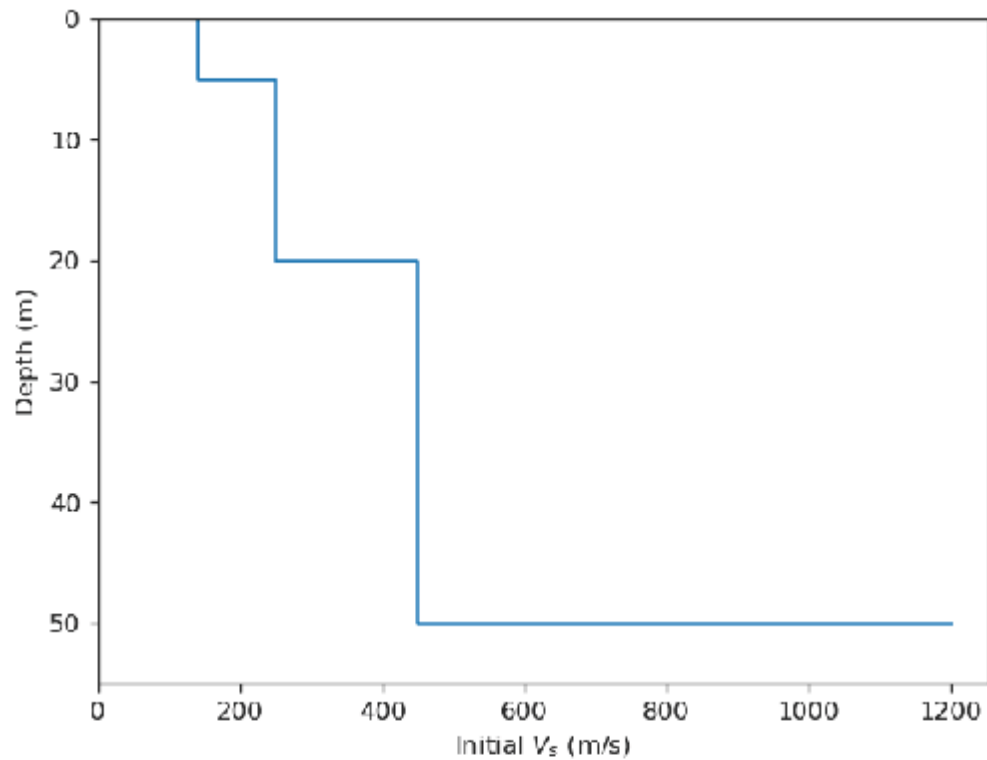
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

```
In [9]: profile = pystrata.site.Profile(
    [
        pystrata.site.Layer(
            pystrata.site.DarendeliSoilType(16.0, plas_index=0, ocr=1, stress_mean=40),
            5,
            140,
        ),
        pystrata.site.Layer(
            pystrata.site.DarendeliSoilType(18.0, plas_index=25, ocr=1, stress_mean=215),
            15,
            250,
        ),
        pystrata.site.Layer(
            pystrata.site.DarendeliSoilType(20.0, plas_index=0, ocr=1, stress_mean=650),
            30,
            450,
        ),
        pystrata.site.Layer(pystrata.site.SoilType("Rock", 23.0, None, 0.02), 0, 1200),
    ]
).auto_discretize()
```

ΓΡΑΦΗΜΑ ΒΑΘΟΥΣ-ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

```
In [10]: profile.plot("initial_shear_vel")
```

```
Out[10]: <AxesSubplot:xlabel='Initial $V_s$ (m/s)', ylabel='Depth (m)'>
```



ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

```
In [11]: calcs = [
    pystrata.propagation.EquivalentLinearCalculator()
]
```

ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΞΑΓΟΜΕΝΩΝ

```
In [12]: freqs = np.logspace(-1, 2, num=113)

outputs = pystrata.output.OutputCollection(
    [
        pystrata.output.ResponseSpectrumOutput(
            # Frequency
            freqs,
            # Location of the output
            pystrata.output.OutputLocation("outcrop", index=0),
            # Damping
            0.05,
        ),
        pystrata.output.AccelTransferFunctionOutput(
            # Frequency
            freqs,
            # Location in (denominator),
            pystrata.output.OutputLocation("outcrop", index=-1),
            # Location out (numerator)
            pystrata.output.OutputLocation("outcrop", index=0),
        ),
    ]
)
```

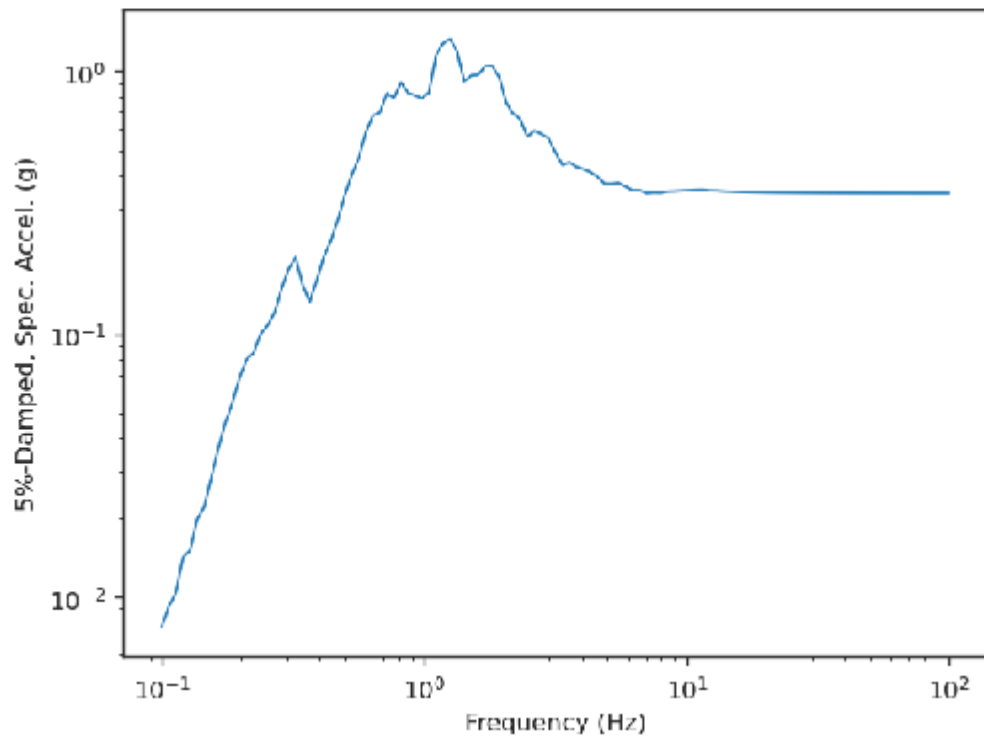
```
In [13]: motion = pystrata.motion.TimeSeriesMotion('ChiChi.txt', description='', time_step=ts.time_ste
```

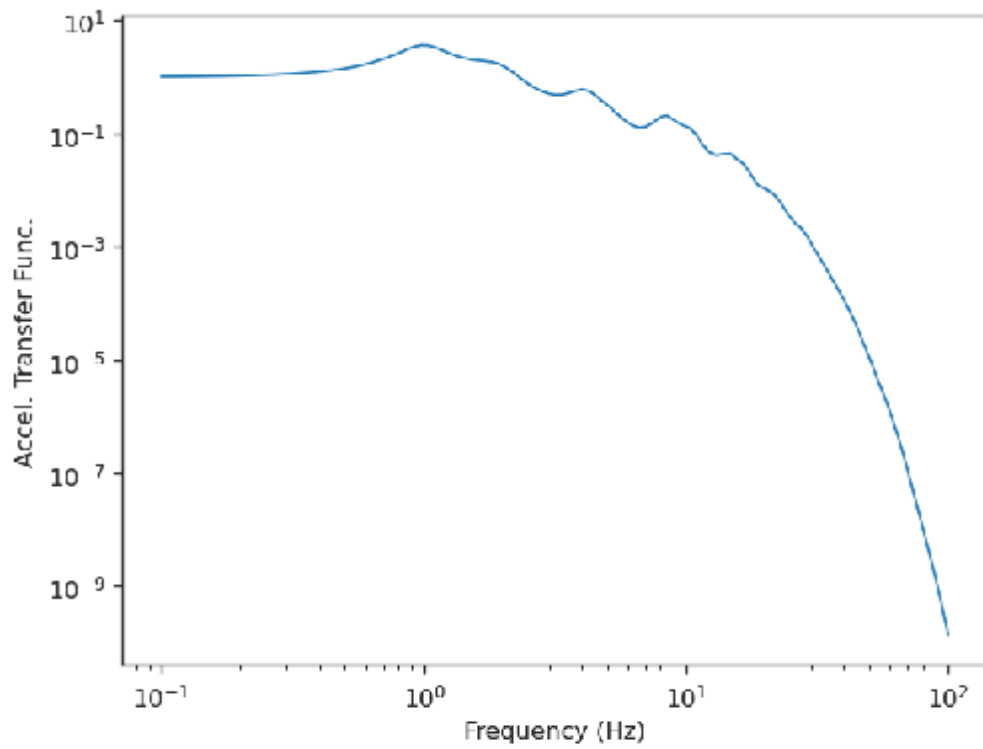
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

```
In [14]: for c in calcs:
          c(motion, profile, profile.location("outcrop", index=-1))
          outputs(c, f"{c.strain_limit:0.2f}")
```

ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

```
In [15]: for o in outputs[:2]:
          ax = o.plot(style="indiv")
```





```
In [18]: df = outputs[0].to_dataframe()
df.to_excel('CHICHI EQL.xlsx', index=True)
```

```
In [20]: df = outputs[1].to_dataframe()
df.to_excel('CHICHI EQL TRANSFER FUNCTION.xlsx', index=True)
```


B.2 Παράδειγμα γραμμικής ελαστικής ανάλυσης μονοδιάστατου μοντέλου με την βιβλιοθήκη pystrata (ChiChi)

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ PYSTRATA ΚΑΙ ΛΟΙΠΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ ΡΥΘΜΟΝ

```
In [1]: import pystrata
```

```
In [2]: from matplotlib import pyplot as plt
import numpy as np
import pandas as pd
from pystrata.motion import TimeSeriesMotion
```

ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΑΠΟ txt ΑΡΧΕΙΟ

```
In [3]: def time_accel_txt_to_pystrata_motion(filename: str) -> TimeSeriesMotion:
df = pd.read_csv(filename, header=None, skiprows=2, encoding = "utf-8", delim_whitespace=True)
accels = df[1].to_numpy()
time_step = df[0][1] - df[0][0]

return TimeSeriesMotion(filename=filename, description='', time_step=time_step, accels=accels)
```

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΑΡΧΕΙΟΥ

```
In [4]: ts = time_accel_txt_to_pystrata_motion('ChiChi.txt')
```

```
In [5]: ts.accels
```

```
Out[5]: array([9.034156e-06, 9.026870e-06, 9.016792e-06, ..., 2.630041e-04,
2.612812e-04, 2.595061e-04])
```

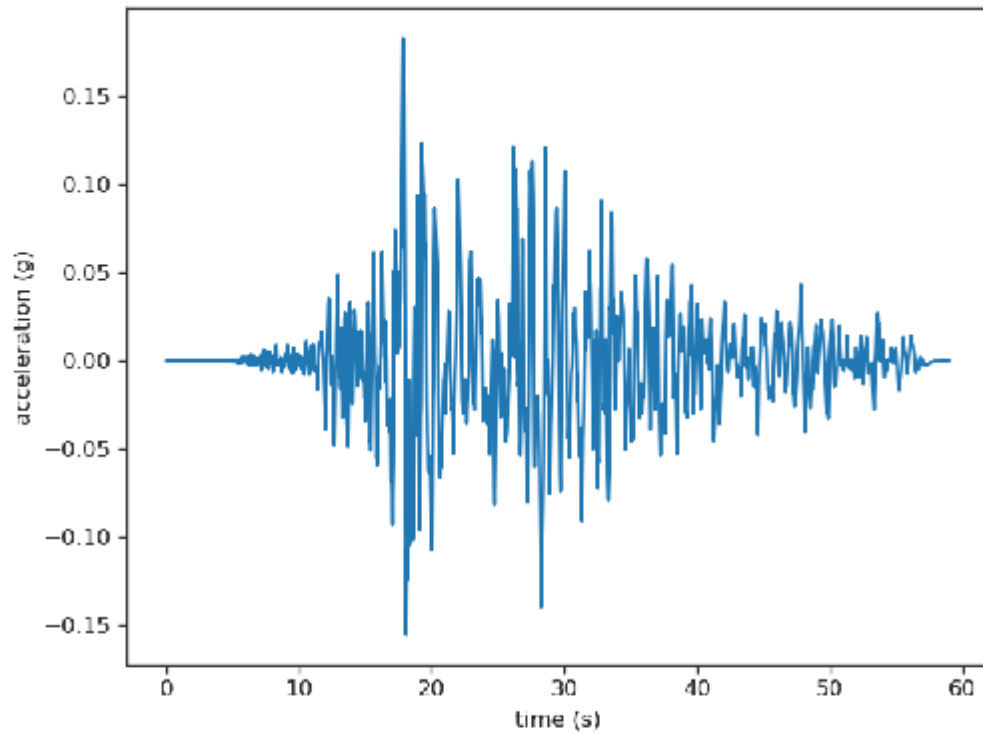
```
In [6]: print(ts.time_step)
```

```
0.004999999999999999
```

```
In [7]: # Increased figure sizes
plt.rcParams["figure.dpi"] =120
```

ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ

```
In [8]: fig, ax = plt.subplots()
ax.plot(ts.times, ts.accels)
ax.set(xlabel='time (s)', ylabel='acceleration (g)')
fig.tight_layout()
```



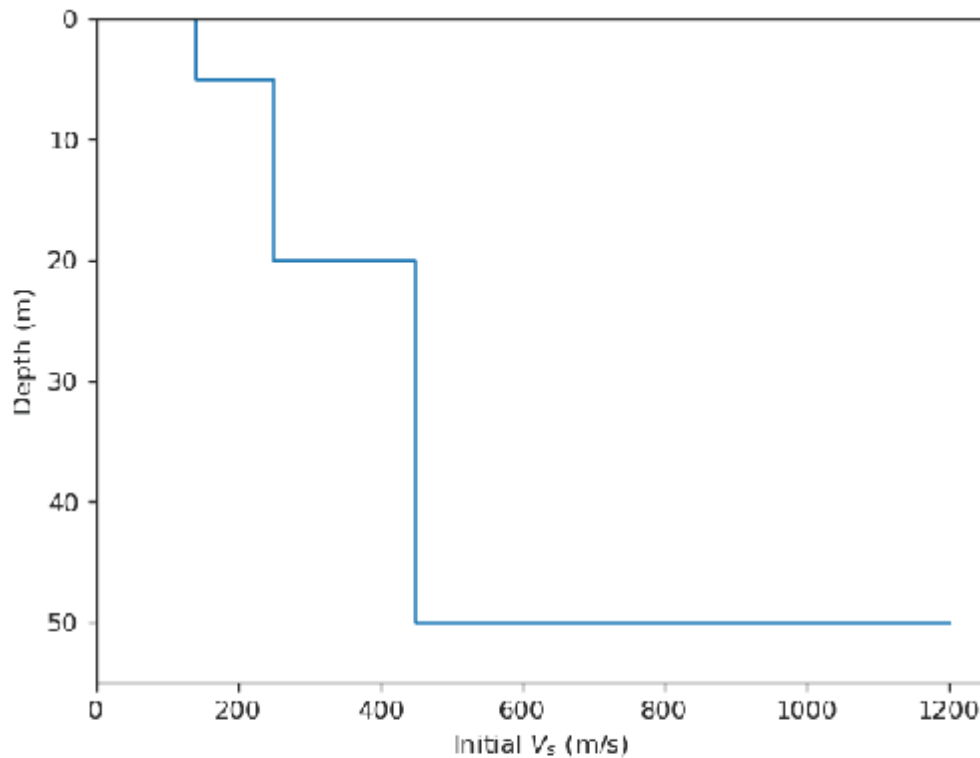
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

```
In [9]: profile = pystrata.site.Profile(
    [
        pystrata.site.Layer(pystrata.site.SoilType("Loose Sand", 16.0, None, 0.05), 5, 140),
        pystrata.site.Layer(pystrata.site.SoilType("Clay", 18.0, None, 0.05), 15, 250),
        pystrata.site.Layer(pystrata.site.SoilType("Dense Sand", 20.0, None, 0.05), 30, 450),
        pystrata.site.Layer(pystrata.site.SoilType("Rock", 23.0, None, 0.02), 0, 1200),
    ]
).auto_discretize()
```

ΓΡΑΦΗΜΑ ΒΑΘΟΥΣ-ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

```
In [10]: profile.plot("initial_shear_vel")
```

```
Out[10]: <AxesSubplot:xlabel='Initial $V_s$ (m/s)', ylabel='Depth (m)'>
```



ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

```
In [11]: calc = pystrata.propagation.LinearElasticCalculator()
```

ΟΡΙΣΜΟΣ ΞΕΛΑΓΟΜΕΝΩΝ

```
In [12]: freqs = np.logspace(-1, 2, num=113)

outputs = pystrata.output.OutputCollection(
    [
        pystrata.output.ResponseSpectrumOutput(
            # Frequency
            freqs,
            # Location of the output
            pystrata.output.OutputLocation("outcrop", index=0),
            # Damping
            0.05,
        ),
        pystrata.output.AccelTransferFunctionOutput(
            # Frequency
            freqs,
            # Location in (denominator),
            pystrata.output.OutputLocation("outcrop", index=-1),
            # Location out (numerator)
            pystrata.output.OutputLocation("outcrop", index=0),
        ),
    ]
)
```

```
In [13]: motion = pystrata.motion.TimeSeriesMotion('ChiChi.txt', description='', time_step=ts.time_ste
```

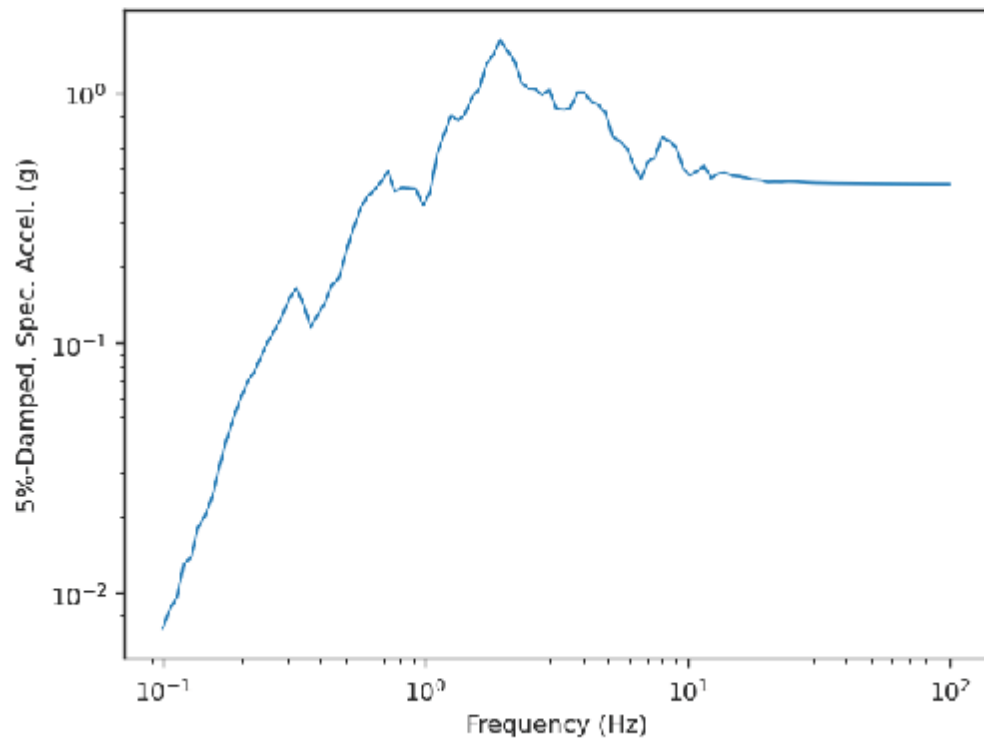
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

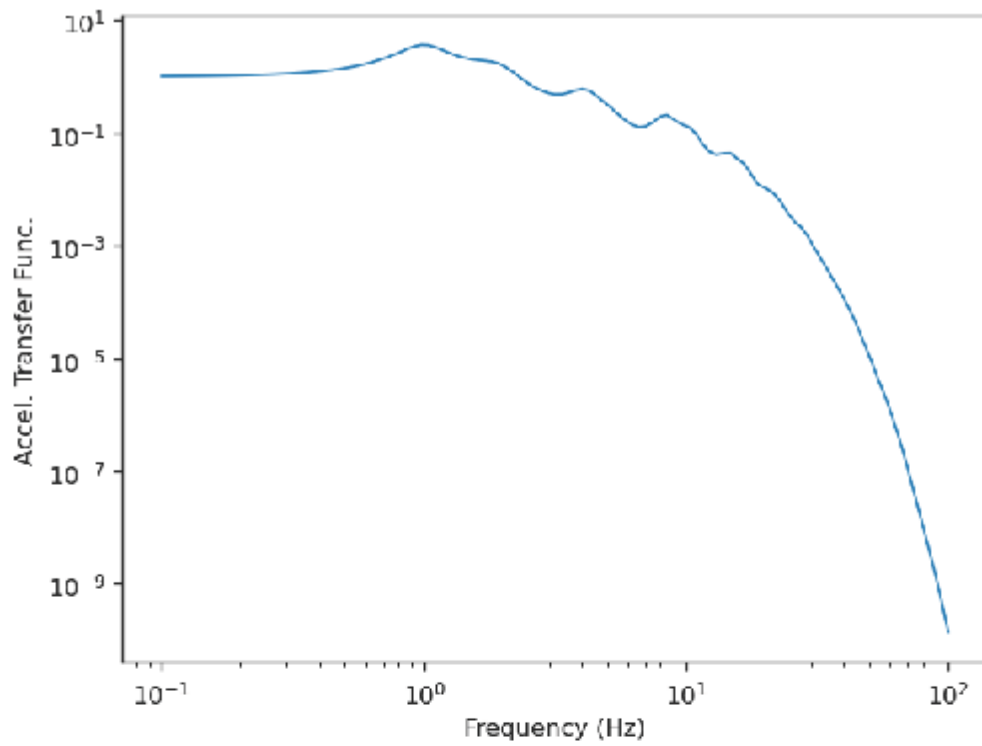
```
In [14]: calc(ts, profile, profile.location("outcrop", index=-1))
```

```
In [15]: outputs(calc)
```

ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

```
In [16]: for o in outputs:  
         o.plot(style="indiv")
```





```
In [16]: df = outputs[0].to_dataframe()
df
```

ΕΞΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΑΡΧΕΙΟ .xls

```
In [19]: df = outputs[0].to_dataframe()
df.to_excel('ChiChi LINEAR.xlsx', index=True)
```

```
In [20]: df = outputs[1].to_dataframe()
df.to_excel('ChiChi LINEAR TRANSFER FUNCTION.xlsx', index=True)
```

B.3 Παράδειγμα ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης μονοδιάστατου μοντέλου (Kishida, 2012) με την βιβλιοθήκη pystrata (Kocaeli)

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ PYSTRATA ΚΑΙ ΛΟΙΠΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ ΡΥΘΜΟΝ

```
In [1]: import pystrata
```

```
In [2]: from matplotlib import pyplot as plt
import numpy as np
import pandas as pd
from pystrata.motion import TimeSeriesMotion
```

ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΑΠΟ txt ΑΡΧΕΙΟ

```
In [3]: def time_accel_txt_to_pystrata_motion(filename: str) -> TimeSeriesMotion:
df = pd.read_csv(filename, header=None, skiprows=2, encoding = "utf-8", delim_whitespace=True)
accels = df[1].to_numpy()
time_step = df[0][1] - df[0][0]

return TimeSeriesMotion(filename=filename, description='', time_step=time_step, accels=accels)
```

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΑΡΧΕΙΟΥ

```
In [4]: ts = time_accel_txt_to_pystrata_motion('Kocaeli.txt')
```

```
In [5]: ts.accels
```

```
Out[5]: array([5.890857e-06, 6.174527e-06, 6.471501e-06, ..., 1.994855e-03,
2.009481e-03, 2.024089e-03])
```

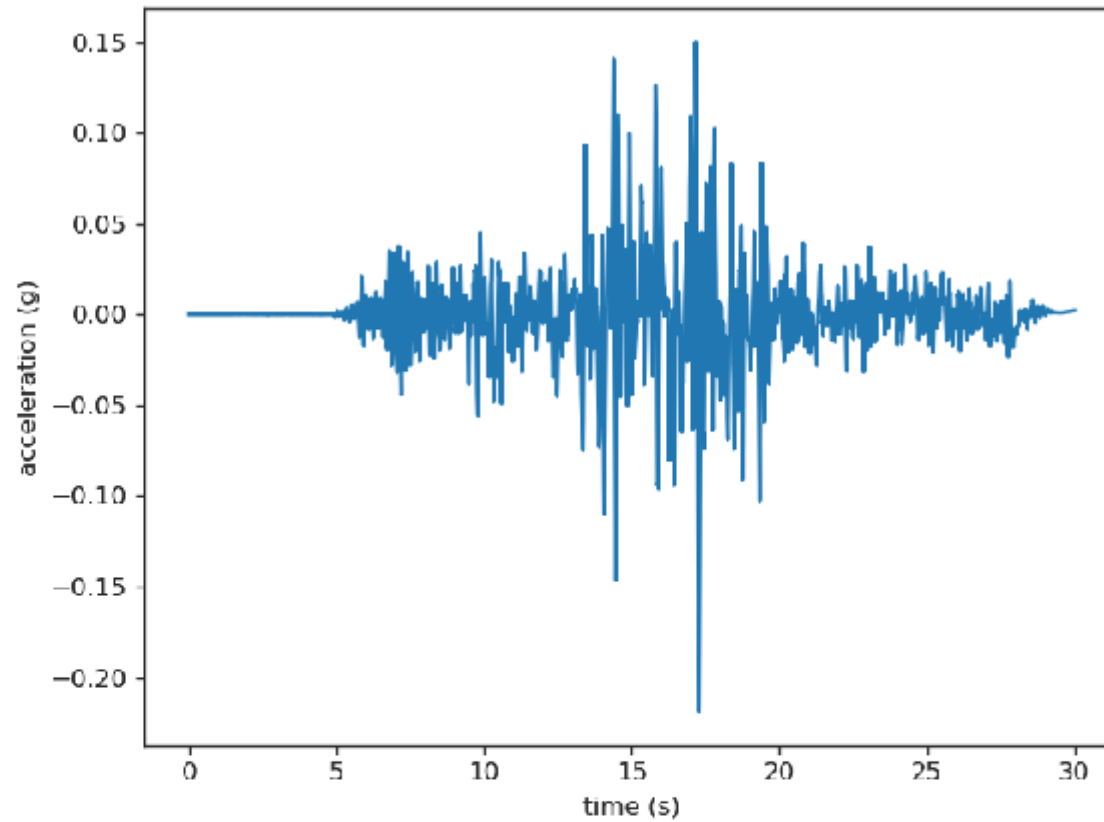
```
In [6]: print(ts.time_step)
```

```
0.004999999999999999
```

```
In [7]: # Increased figure sizes
plt.rcParams["figure.dpi"] =120
```

ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ

```
In [8]: fig, ax = plt.subplots()
ax.plot(ts.times, ts.accels)
ax.set(xlabel='time (s)', ylabel='acceleration (g)')
fig.tight_layout()
```



ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

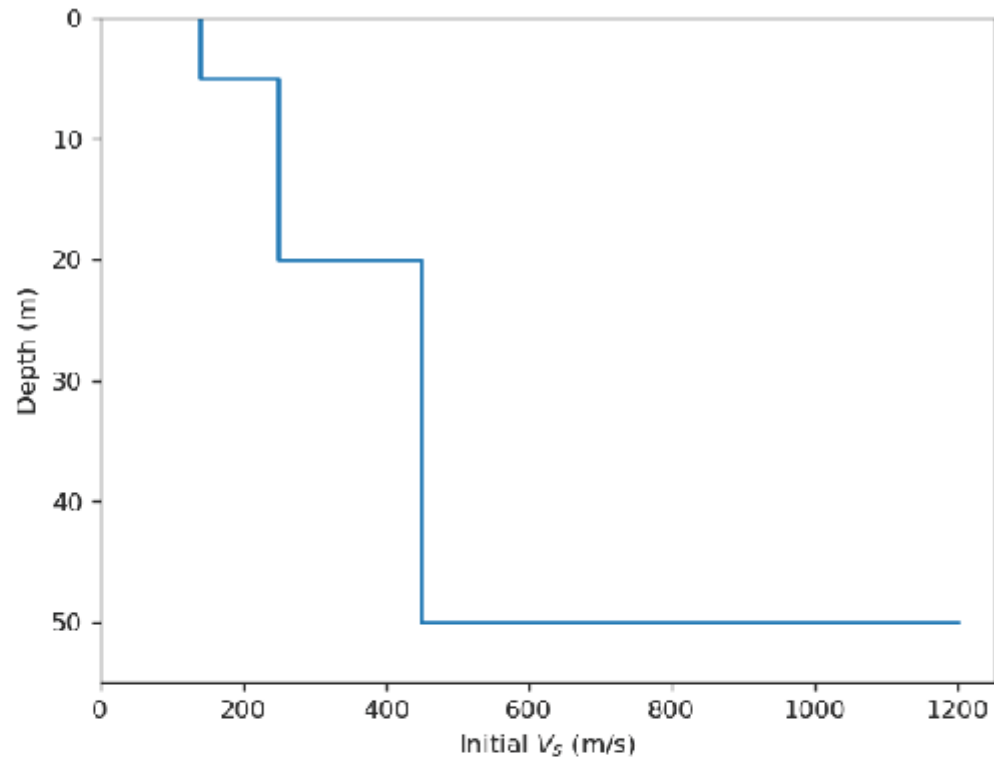
```
In [9]: profile = pystrata.site.Profile(  
    [  
        pystrata.site.Layer(  
            pystrata.site.KishidaSoilType(unit_wt=16.0, stress_vert=40, organic_content=5, lab_consol_ratio=1),  
            5,  
            140,  
        ),  
        pystrata.site.Layer(  
            pystrata.site.KishidaSoilType(unit_wt=18.0, stress_vert=215, organic_content=2, lab_consol_ratio=1),
```

```
    15,  
    250,  
),  
pystrata.site.Layer(  
    pystrata.site.KishidaSoilType(unit_wt=20.0, stress_vert=650, organic_content=0, lab_consol_ratio=1),  
    30,  
    450,  
),  
pystrata.site.Layer(pystrata.site.SoilType("Rock", 23.0, None, 0.02), 0, 1200),  
]  
) .auto_discretize()
```

ΓΡΑΦΗΜΑ ΒΑΘΟΥΣ-ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

In [10]: `profile.plot("initial_shear_vel")`

Out[10]: `<AxesSubplot:xlabel='Initial V_s (m/s)', ylabel='Depth (m)'>`



ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

```
In [11]: calcs = [  
    pystrata.propagation.EquivalentLinearCalculator()  
]
```

ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΞΑΓΟΜΕΝΩΝ

```
In [12]: freqs = np.logspace(-1, 2, num=113)  
outputs = pystrata.output.OutputCollection(  
    [  
]
```

```
pystrata.output.ResponseSpectrumOutput(  
    # Frequency  
    freqs,  
    # Location of the output  
    pystrata.output.OutputLocation("outcrop", index=0),  
    # Damping  
    0.05,  
),  
pystrata.output.AccelTransferFunctionOutput(  
    # Frequency  
    freqs,  
    # Location in (denominator),  
    pystrata.output.OutputLocation("outcrop", index=-1),  
    # Location out (numerator)  
    pystrata.output.OutputLocation("outcrop", index=0),  
),  
]  
)
```

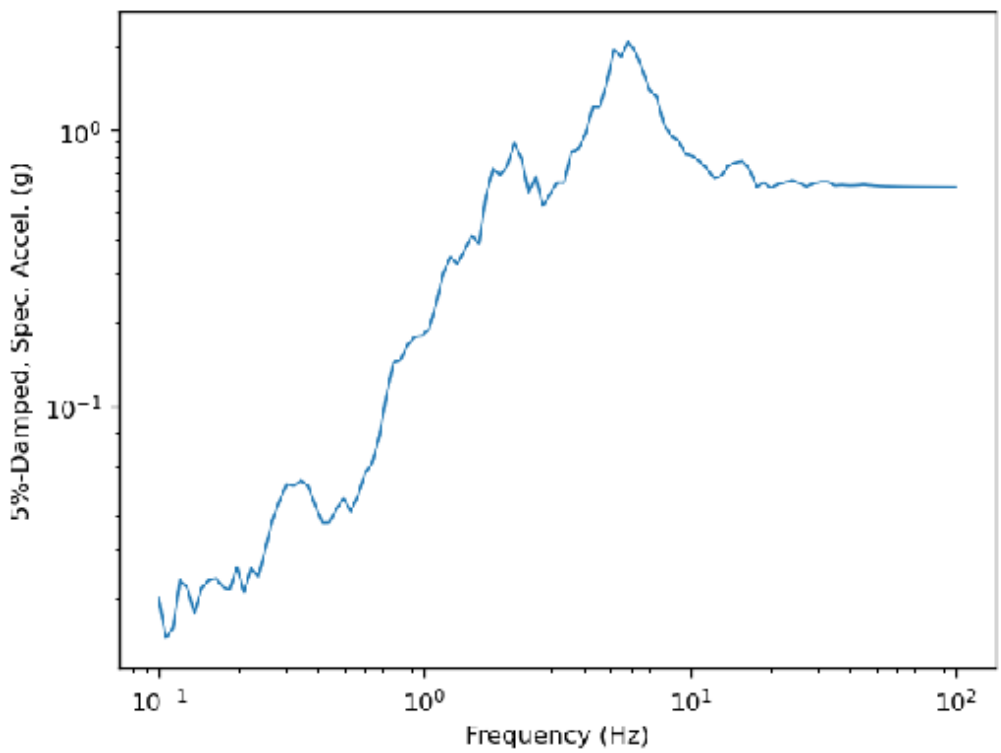
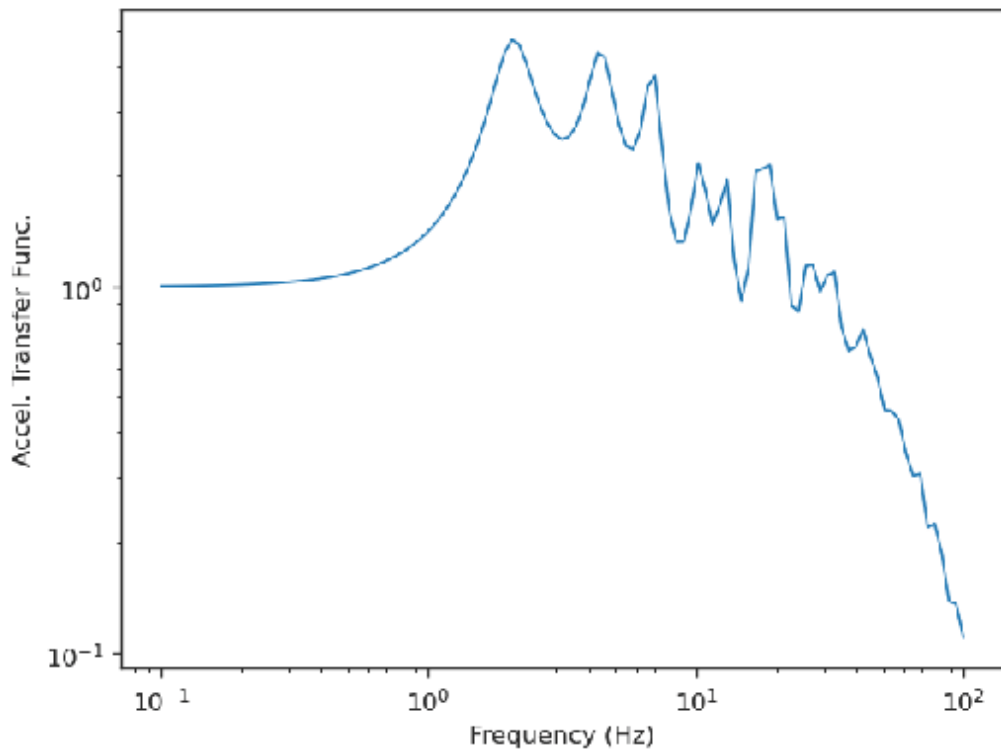
```
In [13]: motion = pystrata.motion.TimeSeriesMotion('Kocaeli.txt', description='', time_step=ts.time_step, accels=ts.accels)
```

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

```
In [14]: for c in calcs:  
    c(motion, profile, profile.location("outcrop", index=-1))  
    outputs(c, f"{c.strain_limit:0.2f}")
```

ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

```
In [15]: for o in outputs[:2]:  
    ax = o.plot(style="indiv")
```



Με ατομική μου ευθύνη και γνωρίζοντας τις κυρώσεις που προβλέπονται στον Οργανισμό και στον Εσωτερικό Κανονισμό του Ιδρύματος, δηλώνω υπεύθυνα ότι για τη συγγραφή της Διπλωματικής μου Εργασίας δεν χρησιμοποίησα ολόκληρο ή μέρος έργου άλλου συγγραφέα χωρίς να γίνεται αναφορά στην πηγή προέλευσης (βιβλίο, άρθρο από επιστημονικό περιοδικό ή εφημερίδα, ιστοσελίδα κ.λπ.) και ότι χρησιμοποίησα μόνο τις πηγές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

[ΥΠΟΓΡΑΦΗ]

[ΛΑΜΠΡΟΥ ΑΡΓΥΡΗΣ]