



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΓΚΟΙΛΩΝ ΜΙΚΡΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΣΤΟΝ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟ ΣΕΙΣΜΙΚΟ ΚΡΑΔΑΣΜΟ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΤΡΟΣ ΟΛΥΜΠΙΟΣ

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2023



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΓΚΟΙΛΩΝ ΜΙΚΡΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΣΤΟΝ
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟ ΣΕΙΣΜΙΚΟ ΚΡΑΔΑΣΜΟ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΤΡΟΣ ΟΛΥΜΠΙΟΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής Ιωάννης Τσομπανάκης (Επιβλέπων)

Καθηγητής Κωνσταντίνος Προβιδάκης

Δρ. Πρόδρομος Ψαρρόπουλος

«Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή της προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.»

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής, Καθηγητή του Πολ. Κρήτης κ. Ιωάννη Τσομπανάκη, για το ενδιαφέρον θέμα που μου υπέδειξε, την πολύτιμη καθοδήγηση του, τις συμβουλές του, τον άφθονο χρόνο που μου αφιέρωσε και την υπομονή που έδειξε κατά την πραγματοποίηση της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω, τον Δρ. κ Πρόδρομο Ψαρρόπουλο για τον χρόνο που αφιέρωσε για τις συμβουλές του, που ήταν καθοριστικές για την ολοκλήρωση της εργασίας. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Πολ. Κρήτης κ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη, για τον χρόνο που αφιέρωσε, τόσο για τη μελέτη της διπλωματικής εργασίας, όσο και για την παρουσίαση και την αξιολόγηση της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Κυριάκο και Αλεξάνδρα, και των αδελφό μου Αντρέα για τις θυσίες που έκαναν και την αμέριστη στήριξη και συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, που με στήριξαν και ήταν πάντα δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια σε ότι και αν χρειάστηκα.

Γενικά, η επίδραση των τοπικών συνθηκών, δηλαδή των στρωματογραφικών, γεωμορφικών (βλ. ανάγλυφο βραχώδους υποβάθρου) και τοπογραφικών (βλ. επιφανειακό ανάγλυφο) συνθηκών, είναι πολύ σημαντική στη διάδοση των σεισμικών κυμάτων και την επίδρασή τους στις κατασκευές που βρίσκονται στην επιφάνεια. Πιο σύνθετες γεωμετρίες, όπως είναι η ύπαρξη φυσικών ή τεχνητών υπογείων εγκοίλων, δημιουργούν ακόμα πιο πολύπλοκες συνθήκες διάδοσης. Υπό αυτό το πλαίσιο, η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη της επίδρασης φυσικών υπογείων εγκοίλων σχετικά μικρών διαστάσεων στον επιφανειακό σεισμικό κραδασμό. Σκοπός της μελέτης είναι να εξεταστεί κατά πόσο η ύπαρξη των εγκοίλων ή άλλων γεωμορφολογικών ανωμαλιών σχετικά μικρών διαστάσεων κοντά στην επιφάνεια είναι ικανή να επηρεάσει τις δονήσεις που καταγράφονται από επιταχυνσιογράφους κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμών.

Αρχικά, περιγράφονται βασικές έννοιες οι οποίες βοηθούν στην κατανόηση του θέματος, όπως τα βασικά χαρακτηριστικά και η διαδικασία διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Στη συνέχεια, δίδεται έμφαση στην περιγραφή της μεθοδολογίας αριθμητικής προσομοίωσης που εφαρμόστηκε και την επαλήθευση της μέσω κατάλληλης αναλυτικής διαδικασίας. Συγκεκριμένα, για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS για την πραγματοποίηση των δυναμικών αναλύσεων, καθώς και το λογισμικό SeismoSignal για την παραγωγή των φασμάτων και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στο πλαίσιο της διερεύνησης μελετήθηκαν οι κυριότερες παράμετροι που επηρεάζουν το πολύπλοκο φαινόμενο που εξετάστηκε. Γίνεται αναλυτική περιγραφή των προσομοιωμάτων αναφορικά με τη γεωμετρία των εγκοίλων, τις ιδιότητες των υλικών και των χαρακτηριστικών των επιβαλλόμενων δυναμικών διεγέρσεων.

Μελετήθηκαν διάφοροι τύποι εγκοίλων ευρισκόμενων σε διαφορετικά βάθη, είτε μικρών διαστάσεων, είτε μορφής τάφρου ή σήραγγας. Ακόμη, έγινε σύγκριση για διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης διατμητικών σεισμικών κυμάτων, V_s , της επιφανειακής στρώσης. Σύγκριση έγινε επίσης και για την περίπτωση όπου το έγκοιλο είναι είτε κενό, είτε γεμάτο με υλικό πλήρωσης που χαρακτηρίζεται από μικρότερη V_s σε σχέση με τη V_s της περιβάλλουσας εδαφικής στρώσης. Τέλος, ως διεγέρσεις βάσης χρησιμοποιήθηκαν δύο παλμοί Ricker με συχνότητες 2Hz και 6Hz, οι οποίοι διαθέτουν το κατάλληλο συχνотικό περιεχόμενο για τα υπό εξέταση προβλήματα.

Με βάση τις αναλύσεις που διεξήχθησαν, εξάγεται το γενικό συμπέρασμα ότι, υπό προϋποθέσεις, τα υπόγεια έγκοιλα ενδέχεται να προκαλέσουν τροποποίηση του σεισμικού κραδασμού στην επιφάνεια του εδάφους. Καθώς το γεγονός αυτό μπορεί να δράσει είτε ευεργετικά είτε επιβαρυντικά στη σεισμική καταπόνηση μίας υπερκείμενης κατασκευής, κρίνεται ως απαραίτητος ο αξιόπιστος εντοπισμός των εγκοίλων και η ποσοτική εκτίμηση του ρόλου τους.

Abstract

In general, local site conditions, such as stratigraphic, geomorphic (bedrock) and topographical (surface geometry) are very important in the propagation of seismic waves and their impact on the structures at the ground surface. More complicated geometries, such as the existence of near-surface underground cavities, increase the complexity of these phenomena. In this context, the present diploma thesis focuses on the study of the impact of small-scale underground voids on the seismic motion at the ground surface. The purpose of the study is to examine whether the existence of underground cavities or other geomorphological anomalies of relatively small dimensions near the surface are capable of affecting the measurements recorded by accelererographs during strong earthquakes.

Initially, basic concepts are described that help to understand the problem at hand, such as the basic characteristics and propagation of seismic waves. Emphasis is then given on describing the adopted numerical simulation methodology, which has been verified utilizing an analytical procedure. In particular, ABAQUS finite-element software has been used to perform the dynamic analyses, whereas SeismoSignal software is employed to generate the spectra in order to compare the results. The parametric study examined the main factors affecting the complex phenomenon under consideration. A detailed description of the simulations is provided regarding the geometry of the cavities, the properties of the materials and the characteristics of the imposed base excitations.

Different types of cavities at different depths have been studied, having either small dimensions or shaped like trenches or tunnels. Furthermore, comparisons were made for different seismic shear-wave velocities, V_s , of the soil layer. Comparisons were also made for the case where the cavity is either empty or filled with a soft material having smaller V_s compared to the V_s of the surrounding soil layer. Lastly, two Ricker pulses with frequencies 2 Hz and 6 Hz have been used as base excitations, as they have a suitable frequency content for the examined problems.

On the basis of the derived results, it can be concluded that, under certain conditions, the underground cavities may influence the propagation of seismic waves near the surface. As this can either be beneficial or detrimental on the seismic distress of adjacent structures, a reliable identification of their presence and a quantitative assessment of their role is deemed necessary.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
Περίληψη	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Abstract	iv
Περιεχόμενα	v
Ευρετήριο Πινάκων	vii
Ευρετήριο Εικόνων	vii
Ευρετήριο Διαγραμμάτων	viii
1. Γενικά χαρακτηριστικά εδάφους και σεισμών	1
1.1. Εισαγωγή.....	1
2. Βιβλιογραφική επισκόπηση	5
2.1. Σεισμός.....	5
2.2. Κίνηση εδάφους	5
2.3. Θεωρία τεκτονικών πλακών	5
2.4. Αποτελέσματα σεισμών στο έδαφος	6
2.5. Σεισμικά κύματα.....	8
2.5.1. Διαμήκη Κύματα P.....	9
2.5.2. Εγκάρσια Κύματα ή διατμητικά S	10
2.5.3. Κύματα Rayleigh (R)	11
2.5.4. Κύματα Love	12
2.6. Σταθερές του Lamé.....	12
2.7. Μακροσεισμικές παράμετροι περιγραφής των σεισμών	13
2.7.1. Εστία – Επίκεντρο.....	13
2.7.2. Μέγεθος σεισμού	13
2.7.3. Σεισμική ενέργεια	16
2.7.4. Ένταση σεισμού	16
2.8. Βάθος σεισμού	16
2.9. Παράμετροι κίνησης εδάφους.....	16
2.9.1. Πλάτος.....	16
2.9.2. Συχνότητα.....	18
2.10. Κυματική διάδοση	20

2.10.1.	Μονοδιάστατη διάδοση κύματος	20
2.10.2.	Τριδιάστατη διάδοση κύματος.....	21
2.11.	Δομικοί κίνδυνοι	23
2.12.	Συμπεριφορά εδαφικών στρώσεων κατά τον σεισμό.....	23
2.13.	Μέγιστο μέτρο διάτμησης G_{max}	24
2.14.	Ημιτονοειδής διέγερση	24
2.15.	Μονοδιάστατα κύματα σε «κλειστό μέσο»	25
2.16.	Υπόγεια έγκοιλα	26
2.16.1.	Φυσικά έγκοιλα	27
2.16.2.	Τεχνητά έγκοιλα.....	27
2.17.	Χαρακτηριστικά εδαφών	27
2.18.	Κατάσταση εδαφών.....	28
2.18.1.	Μηχανικές ιδιότητες εδάφους	28
2.19.	Αλληλεπίδραση εδάφους – θεμελίωσης.....	29
2.20.	Μέθοδοι προσομοίωσης	30
3.	Μεθοδολογία Ανάλυσης.....	31
3.1.	Εισαγωγικά στοιχεία	31
3.2.	3Δ προσομοίωση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.....	31
3.2.1.	Περιγραφή Abaqus	31
3.2.2.	Περιγραφή εδαφικών ιδιοτήτων.....	32
3.2.3.	Μέθοδος διακριτοποίησης.....	33
3.2.4.	Προσομοίωση διάδοσης σεισμικών κυμάτων	34
3.2.5.	Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος	34
3.2.6.	SeismoSignal.....	35
4.	Περιγραφή προσομοιωμάτων σε Abaqus & Seismosignal.....	39
4.1.	Εισαγωγή για το Abaqus.....	39
4.2.	Περιγραφή των παραμετρικών αναλύσεων.....	40
4.2.1.	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εδάφους	40
4.3.	Γεωμετρίες προσομοιωμάτων.....	43
4.4.	Διεγέρσεις προσομοιωμάτων	48
5.	Αποτελέσματα παραμετρικής διερεύνησης	51
6.	Συμπεράσματα & Προτάσεις Μελλοντικής Έρευνας.....	61

7. Βιβλιογραφία	65
Παραρτήμα Α	69

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Παράμετροι κυματικής θεωρίας (Πιπιλάκης, 2010).	21
Πίνακας 4.1: Χαρακτηρίστηκα εδαφικής στρώσης για την 1η περίπτωση προσομοίωσης.....	41
Πίνακας 4.2: Χαρακτηρίστηκα εδαφικής στρώσης για την 2 ^η περίπτωση προσομοίωσης.	41
Πίνακας 4.3: Χαρακτηρίστηκα εδαφικής στρώσης για την 3 ^η περίπτωση προσομοίωσης.	42

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1: Στρώματα της γης.....	1
Εικόνα 1.2: Οι λιθοσφαιρικές πλάκες Πηγή: (Προβιδάκης, 2008).	2
Εικόνα 1.3: Διαφορετικά είδη εγκοίλων.	3
Εικόνα 2.1: Κανονικό ρήγμα.	7
Εικόνα 2.2: Ανάστροφο ρήγμα.	8
Εικόνα 2.3: Ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης Πηγή: (APOD NASA, 2000).	8
Εικόνα 2.4: Διαμήκη κύματα Ρ Πηγή: (GEIN, 2022).	10
Εικόνα 2.5: Διατμητικά κύματα, όπου αριστερά είναι ένα κύμα SV και δεξιά πρόκειται για κύμα SH Πηγή: (Κουτρομάνος και Σπυράκος, 2010).	11
Εικόνα 2.6: Εγκάρσια ή διατμητικά κύματα S Πηγή: (GEIN, 2022).	11
Εικόνα 2.7: Κύματα Rayleigh (R) Πηγή: (Τσόκας, 2011).	12
Εικόνα 2.8: Κύματα Love Πηγή: (Τσόκας, 2011).	12
Εικόνα 2.9: Χρονοϊστορίες εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης Πηγή: (Πιπιλάκης, 2010).	17
Εικόνα 2.10: Φάσματα πλάτους Fourier Πηγή: (Πιπιλάκης, 2010).	18
Εικόνα 2.11: Φάσμα απόκρισης Πηγή: (Πιπιλάκης, 2010).	19
Εικόνα 2.12: Τάσεις στοιχείου σε άπειρο ελαστικό χώρο.....	22
Εικόνα 2.13: Εύρος τιμών Vs και Gmax για διάφορους τύπους εδαφών (Χατζηβασιλείου, 2017).	24
Εικόνα 2.14: Βραχώδεις υπόβαθρο και ελεύθερο άκρο.	25
Εικόνα 3.1: Ενότητες Abaqus.	32
Εικόνα 3.2: Σύστημα συντεταγμένων xyz. Πηγή: (Abaqus/CAE User's Guide, 2016).....	34
Εικόνα 3.3: Αρχική εικόνα όταν ενεργοποιείται το πρόγραμμα SeismoSignal.	35
Εικόνα 3.4: Γραφήματα από SeismoSignal.....	36
Εικόνα 3.5: Γραφήματα χρονοϊστοριών επιταχυνσεων από το SeismoSignal.....	36
Εικόνα 3.6: Απεικόνιση φάσματος Fourier σε σημείο της κορυφής προσομοιώματος.	37
Εικόνα 3.7: Απεικόνιση φάσματος Fourier σε σημείο της βάσης προσομοιώματος.	37
Εικόνα 4.1:Εδαφική στρώση.....	39

Εικόνα 4.2:Διαστάσεις εδαφικής στρώσης σε μέτρα.....	40
Εικόνα 4.3:Πάχος (Hs) και πλάτος (Ls) της εδαφικής στρώσης.....	43
Εικόνα 4.4:Απεικόνιση κενού διαστάσεων 4mx4mx4m.....	44
Εικόνα 4.5:Απεικόνιση σημείων δειγματοληψίας κενού διαστάσεων 4mx4mx4m.	44
Εικόνα 4.6:Απεικόνιση σημείων δειγματοληψίας κενού διαστάσεων 4mx4mx4m, με απεικόνιση και του ύψους.	44
Εικόνα 4.7:Απεικόνιση σημείων δειγματοληψίας κενού διαστάσεων 4mx4mx24m.	45
Εικόνα 4.8:Απεικόνιση σημείων δειγματοληψίας κενού διαστάσεων 4mx4mx24m.	45
Εικόνα 4.9:Πλάγια απεικόνιση τάφρου διαστάσεων 4mx110mx4m.	46
Εικόνα 4.10:Πλάγια απεικόνιση τάφρου διαστάσεων 4mx110mx4m	46
Εικόνα 4.11:Πλάγια απεικόνιση τάφρου διαστάσεων 4mx110mx12m.....	46
Εικόνα 4.12:Πλάγια απεικόνιση τάφρου διαστάσεων 4mx110mx24m.....	47
Εικόνα 4.13:Πλάγια απεικόνιση σήραγγας διάστασης 4mx110mx6m.	47
Εικόνα 4.14:Απεικόνιση σήραγγας διάστασης 4mx110mx6m.....	48
Εικόνα 4.15:Εδαφική στρώση με έγκοιλο σε βάθος 6m	48
Εικόνα 4.16:Χρονοϊστορία και φάσματα διέγερσης Ricker 6Hz.	49
Εικόνα 4.17:Χρονοϊστορία και φάσματα διέγερσης Ricker 2Hz.	49

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3.1: Διάγραμμα ομαλοποιημένου λόγου απόσβεσης.	33
Διάγραμμα 4.1:Επίδραση του Vs για κενό διαστάσεων 4mx4m και βάθους 4m	43
Διάγραμμα 5.1:Επίδραση του Vs για κενό διαστάσεων 4mx4m και βάθους 4m	51
Διάγραμμα 5.2: Επίδραση του Vs για κενό διαστάσεων 4mx4m και βάθους 12m.....	51
Διάγραμμα 5.3: Επίδραση του Vs για κενό διαστάσεων 4mx4m και βάθους 24m.....	52
Διάγραμμα 5.4: Επίδραση του υλικού πλήρωσης για κενό διαστάσεων 4mx4m και βάθους 4m	53
Διάγραμμα 5.5: Έδαφος και κενά Vs 200 m/s.	53
Διάγραμμα 5.6: Έδαφος και κενά Vs 400 m/s.....	54
Διάγραμμα 5.7: Έδαφος και κενά Vs 800m/s.	54
Διάγραμμα 5.8:Έδαφος και διαφορετικά βάθη τάφρων.....	55
Διάγραμμα 5.9: Ομογενές έδαφος, κενό και τάφρος βάθους 4 μέτρων.	55
Διάγραμμα 5.10: Ομογενές έδαφος, κενό και τάφρος βάθους 12 μέτρων.....	56
Διάγραμμα 5.11: Ομογενές έδαφος, κενό και τάφρος βάθους 24 μέτρων.....	56
Διάγραμμα 5.12: Σύγκριση κενού και τάφρου βάθους 24m Vs 400 m/s.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Διάγραμμα 5.13: Σύγκριση κενού και τάφρου βάθους 24m Vs 800 m/s.....	57
Διάγραμμα 5.14: Σύγκριση κενού και τάφρου βάθους 12m Vs 400 m/s.....	58
Διάγραμμα 5.15: Σύγκριση κενού και τάφρου βάθους 12m Vs 800 m/s.....	58
Διάγραμμα 5.16: 1 ή 2 έγκοιλα και σήραγγα για Vs 400 m/s.....	59
Διάγραμμα 5.17: 1 ή 2 έγκοιλα και σήραγγα για Vs 800 m/s.....	59

Διάγραμμα 8.1:Κενό διαστάσεων 4m×4m×4m και V_s 200 m/s.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Διάγραμμα 8.2: Κενό διαστάσεων 4m×4m×4m και V_s 400 m/s.	69
Διάγραμμα 8.3: Κενό διαστάσεων 4m×4m×4m και V_s 800 m/s.	70
Διάγραμμα 8.4: Κενό διαστάσεων 4m×4m×12m και V_s 200 m/s.	70
Διάγραμμα 8.5: Κενό διαστάσεων 4m×4m×12m και V_s 400 m/s.	70
Διάγραμμα 8.6: Κενό διαστάσεων 4m×4m×12m και V_s 800 m/s.	71
Διάγραμμα 8.7: Κενό διαστάσεων 4m×4m×24m και V_s 200 m/s.	71
Διάγραμμα 8.8 Κενό διαστάσεων 4m×4m×24m και V_s 400 m/s.	71
Διάγραμμα 8.9: Κενό διαστάσεων 4m×4m×24m και V_s 800 m/s.	72
Διάγραμμα 8.10: Συμπαγές έδαφος V_s 200 m/s.	72
Διάγραμμα 8.11: Συμπαγές έδαφος V_s 400 m/s.	72
Διάγραμμα 8.12: Συμπαγές έδαφος V_s 800 m/s.	73
Διάγραμμα 8.13: Τάφος διαστάσεων 4m×110m×4m και V_s 800 m/s.....	73
Διάγραμμα 8.14: Τάφος διαστάσεων 4m×110m×12m και V_s 800 m/s.	73
Διάγραμμα 8.15: Τάφος διαστάσεων 4m×110m×24m και V_s 800 m/s.	74
Διάγραμμα 8.16: Συμπαγές έδαφος με Ricker2 Hz και V_s 400 m/s.	74
Διάγραμμα 8.17: Κενό διαστάσεων 4m×4m×12m με Ricker2 Hz και V_s 400 m/s.	74
Διάγραμμα 8.18: Κενό διαστάσεων 4m×4m×24m με Ricker2 Hz και V_s 400m/s.	75
Διάγραμμα 8.19: Τάφος διαστάσεων 4m×110m×12m με Ricker2Hz και V_s 400m/s.	75
Διάγραμμα 8.20: Τάφος διαστάσεων 4m×110m×24m με Ricker2 Hz και V_s 400m/s.....	75
Διάγραμμα 8.21: Κενό διαστάσεων 8m×8m×12m με Ricker2 Hz και V_s 800 m/s.	76
Διάγραμμα 8.22: Έγκοιλο που ξεκινάει στα 6 μέτρα μέχρι τα 12 με Ricker2 Hz και V_s 400m/s.	
Διάγραμμα 8.23: Έγκοιλο που ξεκινάει στα 6 μέτρα μέχρι τα 12 με Ricker6 Hz και V_s 800 m/s.	76
Διάγραμμα 8.24: Σήραγγα με Ricker2 Hz και V_s 400 m/s.	77
Διάγραμμα 8.25: Σήραγγα με Ricker6 Hz και V_s 800 m/s.	77
Διάγραμμα 8.26: Δύο έγκοιλα με Ricker2 Hz και V_s 400 m/s.	77
Διάγραμμα 8.27: Δύο έγκοιλα με Ricker6 Hz και V_s 800 m/s.	78

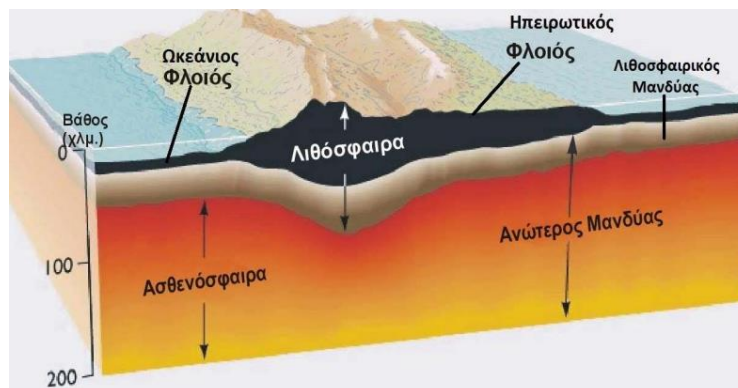
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Γενικά χαρακτηριστικά εδάφους και σεισμών

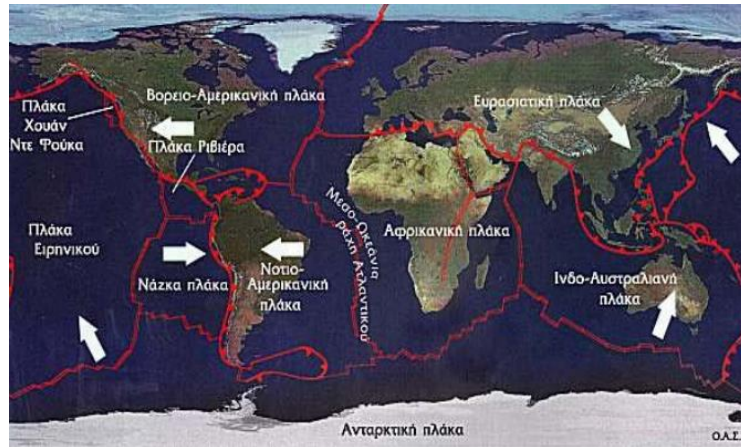
1.1. Εισαγωγή

Η Λιθόσφαιρα αποτελείται από τον φλοιό και το τμήμα του Ανώτατου Μανδύα που συμπεριφέρεται ελαστικά σε χρονικές κλίμακες χιλιάδων ετών και άνω. Η λιθόσφαιρα, χωρίζεται σε δώδεκα κύριες λιθοσφαιρικές πλάκες. Οι κυριότερες από αυτές είναι η πλάκα του Ειρηνικού, της Βορείου και Νοτίου Αμερικής, της Αυστραλίας, της Ανταρκτικής, η Αφρικανική και η Ευρασιατική. Αυτές οι τεκτονικές πλάκες έχουν πάχος περίπου ίσο με 80 χιλιόμετρα (Προβιδάκης, 2008). Η πρόκληση ενός σεισμού γίνεται εξαιτίας της απότομης κίνησης μεταξύ των πλακών. Οι κινήσεις που μπορούν να προκύψουν είναι τριών ειδών:

- *Αποκλίνοντα σύνορα πλακών:* Να απομακρύνονται η μια από την άλλη.
- *Συγκλίνοντα σύνορα πλακών:* Να πλησιάζουν και να συγκρούονται μεταξύ τους.
- *Μετασχηματισμένα σύνορα πλακών:* Να κινούνται παράλληλα ολισθαίνοντας η μια ως προς την άλλη.



Εικόνα 1.1: Στρώματα της γης.



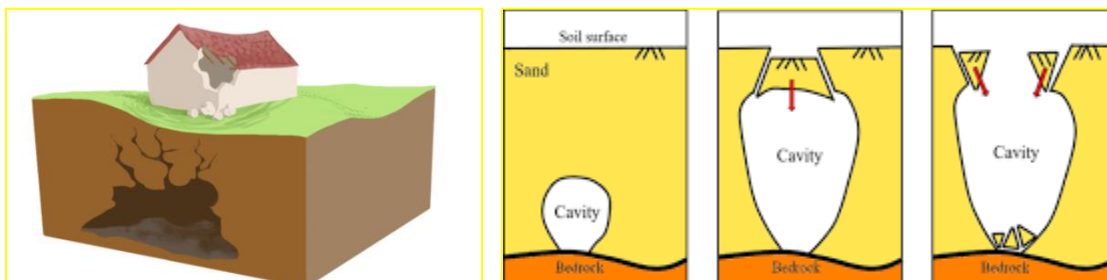
Εικόνα 1.2: Οι λιθοσφαιρικές πλάκες Πηγή: (Προβιδάκης, 2008).

Οι σεισμικές δονήσεις μπορεί να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες, στις τεκτονικές και στις ηφαιστιογενείς, όπου προηγούνται ή ακολουθούν ηφαιστειακές εκρήξεις και στις εγκατακρημνισιγενείς που οφείλονται σε καταπτώσεις οροφών φυσικών εγκοίλων και σπηλαίων. Η πρώτη κατηγορία, δηλαδή οι τεκτονικοί σεισμοί, είναι δονήσεις του εδάφους που προκαλούνται από την απότομη διάρρηξη των γήινων πετρωμάτων και είναι οι πιο συνηθισμένοι, αφού το 90% των επιφανειακών σεισμών πρόκειται για τεκτονικούς (Προβιδάκης, 2008).

Η σεισμική απόκριση ενός στρώματος εδάφους, δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο η σεισμική κίνηση μεταφέρεται από βράχο στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους, είναι αλληλένδετο με πολλούς παράγοντες. Μερικοί από αυτούς τους παράγοντες είναι τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών της επιφάνειας και του βραχώδους υπόβαθρου, γεωλογικές ασυνέχειες, επίσης οι αντιθέσεις των ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων που διαδίδονται σε διαφορετικά στρώματα, αλλά και η μη γραμμική εδαφική συμπεριφορά.

Ο ελλαδικός χώρος χαρακτηρίζεται από έντονη σεισμικότητα, καθώς η Ευρασιατική πλάκα βρίσκεται στα όρια επαφής και σύγκλισης με την Αφρικανική. Η Ελλάδα βάση στατιστικών, είναι η πρώτη χώρα σε σεισμικότητα στη Μεσόγειο και την Ευρώπη, ενώ κατέχει την έκτη θέση παγκοσμίως (Προβιδάκης, 2008).

Οι κοιλότητες ή έγκοιλα που εμφανίζονται γενικά σε ασβεστούχα εδάφη (καρστικό), ή λόγω εξορυκτικής δραστηριότητας μπορεί να αποτελούν πραγματικό κίνδυνο για κάθε είδους δραστηριότητα στην επιφάνεια του εδάφους. Ένα έγκοιλο, σε γενικές γραμμές, είναι ικανό να δημιουργήσει καθίζηση στην επιφάνεια του εδάφους, προκαλώντας από ρωγμές στην τοιχοποιία μέχρι την ολική κατάρρευση του κτιρίου. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να συμβεί και σε φράγματα. Σε όλες τις περιπτώσεις, η έγκαιρη ανίχνευση μίας κοιλότητας/ έγκοιλου είναι ο μόνος τρόπος για να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος.



Εικόνα 1.3: Διαφορετικά είδη εγκοίλων.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής μελέτης είναι η αριθμητική προσομοίωση της επίδρασης υπόγειων εγκοίλων μικρού βάθους στον επιφανειακό σεισμικό κραδασμό. Με την χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων Abaqus έγινε προσομοίωση μιας συμπαγούς εδαφικής στρώσης. Στη συνέχεια, προστέθηκε εγκοίλο διαφόρων διαστάσεων, στο κέντρο της στρώσης. Το έγκοιλο μελετήθηκε για διάφορες περιπτώσεις, με διαφορετικό υλικό πλήρωσης κάθε φορά. Ο σκοπός αυτής της δοκιμής ήταν να μελετηθεί, τι εναλλαγές μπορεί να επιφέρει το κάθε υλικό πλήρωσης. Στη συνέχεια και για να προκύψουν ολοκληρωμένα συμπεράσματα, έγινε μια ακόμη προσομοίωση για την περίπτωση που στην εδαφική στρώση των συγκεκριμένων διαστάσεων προστέθηκε τάφος.

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ακόλουθη:

- Το παρόν 1^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει την εισαγωγή και την περιγραφή του αντικείμενου της διπλωματικής. Επιπλέον, ερμηνεύονται και αναλύονται βασικοί όροι που σχετίζονται με το αντικείμενο της.
- Το 2^ο κεφάλαιο αποτελεί μια βιβλιογραφική επισκόπηση, που αφορά τον σεισμό, τα είδη των σεισμικών κυμάτων που υπάρχουν, το μέγεθος, την ένταση του και το βάθος του σεισμού. Επιπρόσθετα, γίνεται αναφορά στα υπόγεια έγκοιλα και στα χαρακτηριστικά του εδάφους.
- Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφεται ο κώδικας των πεπερασμένων στοιχείων Abaqus ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.
- Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση των τριδιάστατων προσομοιωμάτων που επιλέχθηκαν, επίσης παρουσιάζεται ένα υπόδειγμα προσομοίωσης ενός συγκεκριμένου προβλήματος για την επαλήθευση της διαδικασίας με μία αναλυτική λύση.
- Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων και συγκρίνονται μεταξύ τους.
- Τέλος, στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα και ο σχολιασμός επ' αυτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Βιβλιογραφική επισκόπηση

2.1. Σεισμός

Ένα σεισμός αποτελεί ένα γεωλογικό φαινόμενο, που είναι η έντονη εδαφική δόνηση, η οποία προκαλείται από κινήσεις στο εξωτερικότερο στρώμα της γης. Οι κινήσεις αυτές διαταράσσουν τη μηχανική ισορροπία των πετρωμάτων στο εσωτερικό της, λόγω της μηχανικής ενέργειας που απελευθερώνεται αιφνίδια προς την επιφάνεια. Η εκτόνωση της μηχανικής ενεργείας μπορεί να συμβεί είτε στη ξηρά, είτε στη θάλασσα με τη μορφή ενός τσουνάμι. Ο σεισμός διαδίδεται μέσω των σεισμικών κυμάτων. Οι μοντέρνοι σειсмоγράφοι δύνανται να μετρούν την ένταση και τη διάρκεια των σεισμικών κυμάτων σε διαφορετικές διευθύνσεις. Με τη χρήση των κατάλληλων ποσοτικών περιγραφών μπορούν να προκύψουν άμεσα ή έμμεσα πληροφορίες για την καταστρεπτικότητα ενός σεισμού. Οι δύο παράμετροι που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα γι' αυτόν τον προσδιορισμό είναι το Μέγεθος (M) και η Ένταση (I) (Τσελέντης, 1997).

2.2. Κίνηση εδάφους

Όταν συμβαίνει ένας σεισμός, τα σεισμικά κύματα ακτινοβολούν προς τα έξω από την πηγή και ταξιδεύουν γρήγορα μέσω του φλοιού της Γης. Όταν αυτά τα κύματα φτάνουν στην επιφάνεια, δημιουργούν δονήσεις που διαρκούν από μερικά δευτερόλεπτα έως λίγα λεπτά. Η ένταση και η διάρκεια των δονήσεων σε μια δεδομένη τοποθεσία, εξαρτώνται από το μέγεθος και τη θέση του σεισμού, καθώς και από τα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας.

Κοντά στην πηγή ενός μεγάλου σεισμού, η δόνηση του εδάφους μπορεί να προκαλέσει τεράστιες ζημιές. Στην πραγματικότητα, η δόνηση του εδάφους μπορεί να θεωρηθεί ο πιο σημαντικός από όλους τους κινδύνους σεισμού, αφού οι υπόλοιποι κίνδυνοι προκαλούνται λόγω εκείνης. Όπου η δόνηση του εδάφους είναι λιγότερο έντονη, οι άλλοι σεισμικοί κίνδυνοι μπορεί να είναι μικροί ή ανύπαρκτοι. Ωστόσο, η ισχυρή δόνηση του εδάφους μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένες ζημιές από διάφορους σεισμικούς κινδύνους (διάδοση κυμάτων, εμφάνιση της διάρρηξης ρήγματος, ρευστοποίηση, κατολισθήσεις).

2.3. Θεωρία τεκτονικών πλακών

Η αρχική διατύπωση της θεωρίας απαξιώθηκε από τους περισσότερους επιστήμονες, καθώς υποστήριζε πως οι ήπειροι ωθούνται μέσα από τις θάλασσες και τον πυθμένα του ωκεανού. Το παραπάνω χαρακτηρίστηκε ανυπόστατο, καθώς ο πυθμένας των ωκεανών είναι αδιαπέραστος για τέτοιες κινήσεις.

Η βασική υπόθεση της θεωρίας των τεκτονικών πλακών, επικεντρώνεται στην ιδέα ότι η επιφάνεια της γης αποτελείται από αρκετές άκαμπτες πλάκες, οι οποίες κινούνται η μία σε σχέση με την άλλη. Οι τεκτονικές πλάκες βρίσκονται στη λιθόσφαιρα της γης και για το λόγο αυτό, ονομάζονται κάποιες φορές και λιθοσφαιρικές πλάκες. Η λιθόσφαιρα έχει πάχος περίπου 100 χιλιόμετρα, όπου το επάνω τμήμα της είναι ο φλοιός της γης και το κάτω είναι πυκνότερο και αποτελείται από το ανώτερο μέρος του άνω μανδύα. Η κίνηση των πλακών μπορεί να εξηγηθεί με την κυκλική κίνηση μεταφοράς ρευμάτων, αφού ο θερμός μανδύας ανεβαίνει στις περιοχές κάτω από τις μεσωκεάνιες ράχες και ο ψυχρός, πυκνότερος μανδύας κατεβαίνει στις περιοχές κατάδυσης. Οι έξι κύριες ηπειρωτικές πλάκες είναι, η Αφρικανική, η Αμερικανική, η Ανταρκτική, η Αυστραλο-Ινδική, η Ευρασιατική και του Ειρηνικού. Ενώ υπάρχουν και περίπου δεκατέσσερις ακόμη μικρότερες, όπως της Καραϊβικής, των Φιλιππίνων κ.ά. (Kramer, 1996)

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις πάνω από τις λιθοσφαιρικές πλάκες προκαλούνται καθώς το μάγμα (λιωμένο πέτρωμα) ανεβαίνει από τα βαθύτερα σημεία προς την επιφάνεια της Γης. Η σχετική παραμόρφωση μεταξύ των πλακών εμφανίζεται μόνο σε στενές ζώνες κοντά στα όριά τους. Η θεωρία των τεκτονικών πλακών είναι μια κινηματική θεωρία, εξετάζοντας τη γεωμετρία της κίνησης τους. Η πηγή που προκαλεί την κίνηση αυτή, είναι η διατήρηση της θερμομηχανικής ισορροπίας των υλικών της Γης.

Προς κατανόηση των τεκτονικών πλακών και της κίνησής τους, έχουν κατηγοριοποιηθεί τρεις τύποι περιθωρίων των πλακών. Ο πρώτος τύπος είναι όταν τα σημεία δύο γειτονικών πλακών απομακρύνονται (αποκλίνουν), ο δεύτερος τύπος είναι όταν οι δύο γειτονικές πλάκες πλησιάζουν (συγκλίνουν) και ο τρίτος τύπος είναι όταν κινούνται παράλληλα μεταξύ τους. Τα χαρακτηριστικά των ορίων των πλακών, επηρεάζουν τη φύση των σεισμών που συμβαίνουν κατά μήκος τους. Επίσης η ηφαιστειακή δραστηριότητα κατανέμεται κυρίως στα όρια των πλακών, όπου αποκλίνουν ή συγκλίνουν (Kramer, 1996).

2.4. Αποτελέσματα σεισμών στο έδαφος

Στο έδαφος μπορεί να παρατηρηθούν εδαφικές διαρρήξεις. Οι εδαφικές ρωγμές ή ρήγματα είναι επιφανειακές μικρές διαρρήξεις των πετρωμάτων του φλοιού της γης, που οφείλονται σε ολισθήσεις ή σε μετακίνηση τεμαχίων του βραχώδους υπεδάφους. Υπάρχουν τρεις τύποι ρηγμάτων:

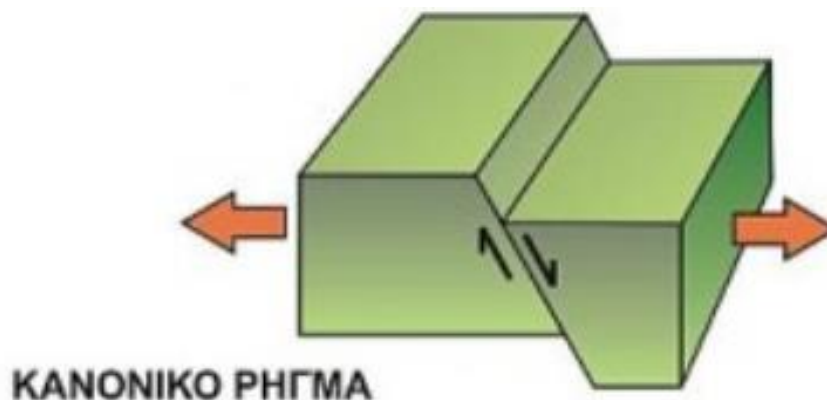
- Κανονικά ρήγματα: Το επίπεδο του ρήγματος κλίνει προς το μέρος του κατεβασμένου τεμάχους και δημιουργούνται όταν επικρατούν εφελκυστικές κινήσεις. Συνοδεύονται από αύξηση χώρου.
- Ανάστροφα ρήγματα: Σε αυτά, το επίπεδο του ρήγματος κλίνει προς το μέρος του ανεβασμένου τεμάχους και δημιουργούνται όταν επικρατούν συμπιεστικές δυνάμεις. Αυτά συνοδεύονται από ελάττωση του χώρου.
- Οριζόντια ρήγματα: Είναι τα ρήγματα που επικρατεί η οριζόντια κίνηση.

Ακόμη τα ρήγματα χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες. Τα μη ενεργά, τα δυνητικά ενεργά, τα ενεργά και τα σεισμικά. Αρχικά, τα μη ενεργά θεωρούνται αυτά που βάση στοιχείων από παλαιότερα έχουν μηδενικές πιθανότητες ενεργοποίησης. Τα δυνητικώς

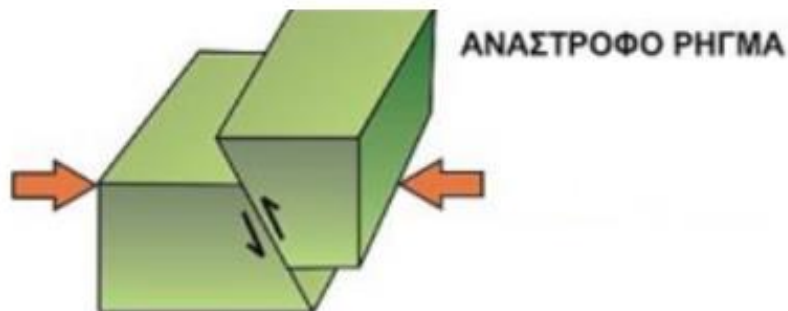
ενεργά ρήγματα που έχουν δραστηριοποιηθεί τουλάχιστον μια φορά τα τελευταία περίπου 2,6 εκατομμύρια έτη (Άνω Πλειόκαινο Τεταρτογενές). Τέλος, τα σεισμικά ρήγματα αποτελούν ένα ενεργό ρήγμα που η ενεργοποίηση του συνδέεται με ένα ισχυρό σεισμό, ο οποίος έχει καταγράψει την εκδήλωση επιφανειακών εδαφικών διαρρήξεων (Kramer, 1996).

Τα εδαφικά χάσματα, μπορεί να είναι δεκάδες ή εκατοντάδες χιλιόμετρα. Τα ορατά βάθη τους φθάνουν περίπου τα 100m και το άνοιγμά τους μπορεί να είναι μόλις λίγα μέτρα. Αυτά θεωρούνται ως τα επιφανειακά ίχνη των ρηγμάτων και μας δίνουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη γένεση του σεισμού.

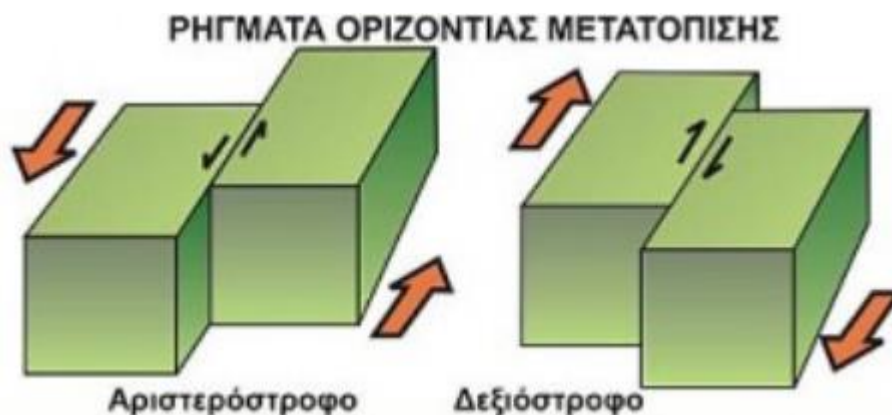
Ακόμη οι εδαφικές κατολισθήσεις προκαλούνται από την ελάττωση των δυνάμεων τριβής που προκαλεί ο σεισμός μεταξύ διαφόρων στρωμάτων του εδάφους. Οι δυνατοί σεισμοί μπορεί να προκαλέσουν κατολισθήσεις, ιδιαίτερα όταν ψαθυρά (χαλαροί σχηματισμοί) στρώματα επικάθονται πάνω σε συνεκτικά (σκληρά πετρώματα). Οι πλείστες από αυτές είναι μικρές, όμως έχουν υπάρξει και περιπτώσεις που προκλήθηκε μέχρι και η εξαφάνιση ολόκληρων πόλεων ή χωριών. Η πλειονότητα των κατολισθήσεων που προκύπτουν από σεισμό, αφορούν πτώσεις σε κτήρια ή γέφυρες. Φαινόμενα ρευστοποίησης που είναι απόρροια ενός σεισμού, είναι ικανά να προκαλέσουν κατολισθήσεις (Kramer, 1996).



Εικόνα 2.1: Κανονικό ρήγμα.



Εικόνα 2.2: Ανάστροφο ρήγμα.



Εικόνα 2.3: Ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης

2.5. Σεισμικά κύματα

Τα σεισμικά κύματα είναι ενεργειακά ελαστικά κύματα, τα οποία διαδίδονται μέσω των διαφόρων στρωμάτων από το βραχώδες υπόβαθρο ως την επιφάνεια, εξαιτίας των μετακινήσεων κάποιου ενεργού σεισμικού ρήγματος. Η διάδοσή τους υφίσταται σε στερεά και σε υγρά μέσα. Μπορούν να παραχθούν είτε φυσικά, είτε με τεχνητό τρόπο μέσω της χρήσης εκρηκτικών. Για τη μελέτη των σεισμών μελετώνται κύματα με περιόδους που κυμαίνονται από 0.01s έως 3000s (ή και μεγαλύτερες).

Υπάρχουν διαφορετικά είδη σεισμικών κυμάτων, τα οποία κατηγοριοποιούνται στα κύματα χώρου (πρωτεύοντα και δευτερεύοντα ή διατμητικά) και στα επιφανειακά κύματα. Κάθε είδος κύματος κινείται με διαφορετική ταχύτητα και προκαλεί διαφορετικό τρόπο ταλάντωσης του εδάφους. Η απόκριση στην επιφάνεια του εδάφους κατά τη διάρκεια μιας

σεισμικής διέγερσης εξαρτάται από το μέσο διάδοσης και τις τοπικές εδαφικές συνθήκες (στρωματογραφία, μορφολογία υποβάθρου και τοπογραφία ανάγλυφου).

- Τα κύματα χώρου μεταδίδουν ενέργεια μέσω του εσωτερικού της Γης και μπορούν να διαδοθούν σε οιαδήποτε διεύθυνση στο εσωτερικό της, από το κέντρο έως τα ανωτέρα στρώματα. Σε αυτά τα κύματα κατατάσσονται τα διαμήκη κύματα P και τα εγκάρσια κύματα S.
- Τα επιφανειακά κύματα ταξιδεύουν ακριβώς κάτω και κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους και διαδίδονται μόνο σε ορισμένες επιφάνειες και στρώματα της Γης. Γενικά πρόκειται για κύματα με πιο αργή ταχύτητα (3-4 km/s), με την κίνησή τους να είναι περιστροφική και ακανόνιστη. (Προβιδάκης, 2008) Ακόμη, λόγω της μικρής τους συχνότητας, του αυξημένου πλάτους και της μεγάλης τους διάρκειας, μπορεί να είναι ιδιαίτερος καταστροφικά. Χαρακτηριστικό των Επιφανειακών Κυμάτων είναι οι μεγάλες περίοδοι και τα μεγάλα πλάτη. Τα πλάτη των επιφανειακών κυμάτων μειώνονται με το βάθος και είναι αντιστρόφως ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα της απόστασης. Οι δύο πιο κοινοί τύποι επιφανειακών κυμάτων είναι τα Rayleigh και τα Love κύματα (Προβιδάκης, 2008).

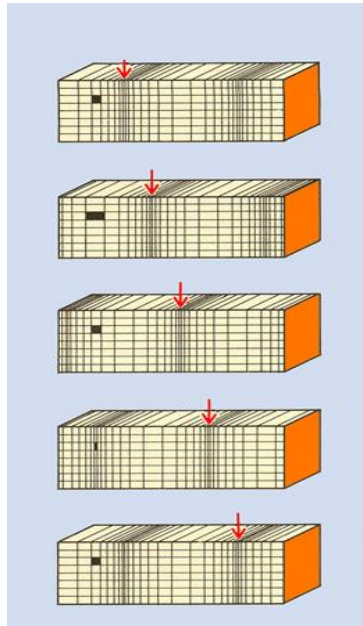
2.5.1. Διαμήκη Κύματα P

Τα κύματα P είναι αυτά που ορίζονται ως κύματα που εμφανίζονται σε πολύ συμπιεσμένα εδάφη και διαστέλλονται προς την κατεύθυνση της διάδοσης του κύματος. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των σεισμικών κυμάτων είναι ότι μπορούν να περάσουν από οποιοδήποτε υλικό, ανεξαρτήτως από την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το υλικό. Η τυπική ταχύτητα στο φλοιό είναι 6-8 km/s και καταγράφονται πρώτα στο σειсмоγράφημα, γιατί η ταχύτητα διάδοσής τους είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων που παράγονται συγχρόνως με τα διαμήκη κύματα στην ίδια εστία. Στα διαμήκη κύματα, η διεύθυνση ταλάντωσης κάθε υλικού σημείου είναι παράλληλη στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η κίνηση του κύματος είναι διαμήκης, όπως αυτή του ηχητικού κύματος, προς την κατεύθυνση της διάδοσής του και προκαλεί εναλλασσόμενη συμπίεση και διόγκωση του υλικού της Γης διαμέσου του οποίου περνά. Οι ταχύτητες τέτοιων κυμάτων εκφράζονται με τη συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας E και του λόγου Poisson ν (Κουτρομάνος και Σπυράκος, 2010):

$$V_p = \sqrt{\frac{(1 - \nu) \cdot E}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}} \quad (2.1)$$

Όπου:

$$V_p = \sqrt{\frac{D}{\rho}} \quad (2.2)$$



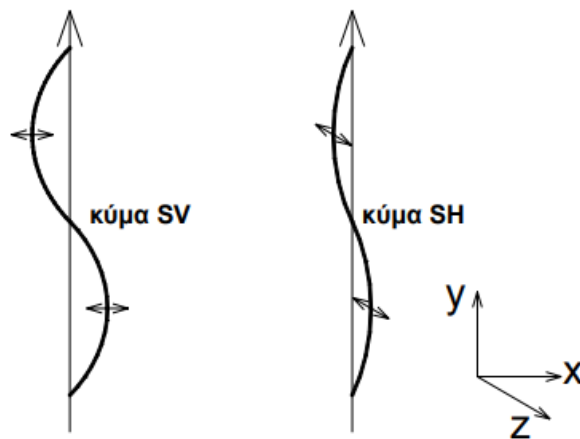
Εικόνα 2.4: Διαμήκη κύματα P
Πηγή: (GEIN, 2022).

2.5.2. Εγκάρσια Κύματα ή διατμητικά S

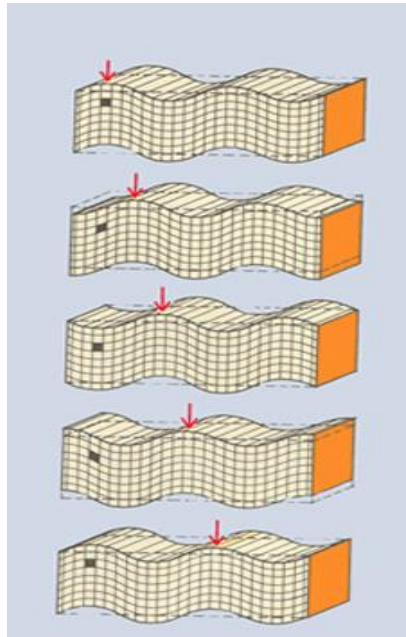
Τα κύματα S είναι ο τύπος των κυμάτων που έχει μετατόπιση εγκάρσια προς την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος. Τα διατμητικά κύματα δεν προκαλούν μεταβολές στον όγκο του υλικού στο οποίο διαδίδονται, αλλά επιβάλλουν διατμητικές παραμορφώσεις με ακριβέστερο χαρακτηρισμό των διεκτροπικές παραμορφώσεις στον ελαστικό χώρο, υπό σταθερό όγκο (Κουτρομάνος και Σπυράκος, 2010). Έχουν χαμηλότερη ταχύτητα από τα κύματα τύπου P, με τυπική ταχύτητα στον φλοιό 3-5 km/s, για το λόγο αυτό εμφανίζονται πολύ αργότερα στο πεδίο και καταγράφονται δεύτερα στο σεισμόγραμμα. Η κύρια διαφορά τους είναι πώς αυτά τα κύματα δεν μπορούν να διαδοθούν μέσω υγρών. Τα εγκάρσια κύματα αναλύονται σε δύο συνιστώσες ανάλογα με την διεύθυνση ταλάντωσής τους. Όταν η διάδοση τέμνει το οριζόντιο επίπεδο, τότε τα κύματα είναι SH, ενώ όταν η διεύθυνση περιέχει το διάνυσμα της κατακόρυφου, τότε τα κύματα είναι SV. Τα διατμητικά κύματα γενικά προκαλούν καταστροφική κίνηση του εδάφους και είναι πολύ επιζήμια στις κατασκευές. Η ταχύτητα των κυμάτων εκφράζεται συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας E και του λόγου Poisson ν (Κουτρομάνος και Σπυράκος, 2010):

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1 + \nu) * \gamma} * g} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.3)$$

όπου, μ : σταθερά διάτμησης Lamé.



Εικόνα 2.5: Διατμητικά κύματα, όπου αριστερά είναι ένα κύμα SV και δεξιά πρόκειται για κύμα SH Πηγή: (Κουτρομάνος και Σπυράκος, 2010).

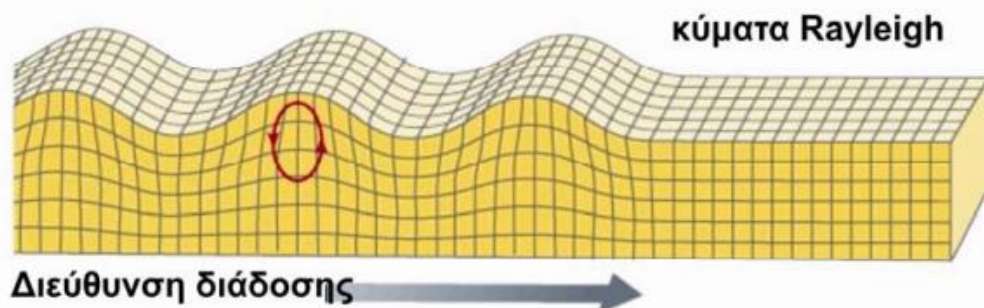


Εικόνα 2.6: Εγκάρσια ή διατμητικά κύματα S Πηγή: (GEIN, 2022).

2.5.3. Κύματα Rayleigh (R)

Τα κύματα που μπορούν να υπάρξουν στην ανώτερη επιφάνεια της Γης, με την προϋπόθεση του ομογενούς ελαστικού ημίχωρου, είναι τα Rayleigh. Αυτού του τύπου τα κύματα κάτω από κατάλληλες διεργασίες διαδίδονται στον άξονα y , με μηδενική μετακίνηση στον άξονα x . Στον κατακόρυφο άξονα z , η ταχύτητα ελαττώνεται έως ότου μηδενιστεί. Στα κύματα Rayleigh, οι τροχιές κίνησης των υλικών σημείων είναι ελλειπτικές (οπότε υπάρχει

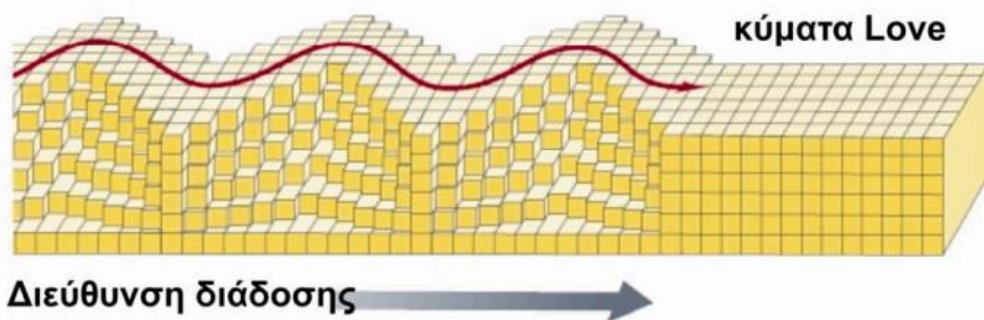
τόσο οριζόντια, όσο και κατακόρυφη συνιστώσα ταλάντωσης), με κάθετες και μπρος-πίσω παλινδρομικές κινήσεις (Κουτρομάνος και Σπυράκος, 2010). Πρόκειται για τα κύματα που καταγράφονται τελευταία στο σειсмоγράφημα.



Εικόνα 2.7: Κύματα Rayleigh (R) Πηγή: (Τσόκας, 2011).

2.5.4. Κύματα Love

Πρόκειται για επιφανειακά κύματα που καταγράφονται από τους σειсмоγράφους, όπου τα υλικά σημεία πραγματοποιούν οριζόντιες ταλαντώσεις κατά την διεύθυνση διάδοσης του κύματος τέτοιου τύπου. Αυτά τα κύματα δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση των SH κυμάτων με ένα στρώμα ορισμένου πάχους που βρίσκονται πάνω σε ημίχωρο, με φυσικές ιδιότητες οι οποίες διαφέρουν από τις ιδιότητες του ημιχώρου. Τα κύματα αυτά είναι γραμμικώς πολωμένα, προκαλώντας διατμητική κίνηση όμοια με την κίνηση των κυμάτων S, έχοντας όμως μόνο την συνιστώσα SH, με την ταλάντωση να είναι κάθετη στο διάνυσμα διάδοσης του κύματος. Η τυπική ταχύτητα εξαρτάται από τη δομή της Γης, είναι όμως μικρότερη από την ταχύτητα των κυμάτων S και καταγράφονται συνήθως στο σεισμόγραμμα μετά από τα κύματα S και πριν από τα κύματα Rayleigh (Τσόκας, 2011).



Εικόνα 2.8: Κύματα Love Πηγή: (Τσόκας, 2011).

2.6. Σταθερές του Lamé

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, ένα υλικό χαρακτηρίζεται ομογενές όταν οι ιδιότητες του είναι ανεξάρτητες ως προς την θέση παρατήρησης και ισότροπο, όταν οι ελαστικές του ιδιότητες είναι ίδιες ως προς όλες τις κατευθύνσεις. Έτσι, σε ένα ομογενές και

ισότροπο υλικό, οι ελαστικές του ιδιότητες περιγράφονται από τις σταθερές του Lamé, οι οποίες συμβολίζονται με λ και μ και δίνονται από τους τύπους:

$$\lambda = \frac{Ev}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (2.4)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.5)$$

όπου E , το μέτρο ελαστικότητας του Young, που εκφράζει την παραμόρφωση ενός μονοδιάστατου σώματος και ισούται με την τάση που εφαρμόζεται στο σώμα και το παραμορφώνει κατά μήκος, προς την μεταβολή του μήκους του. Ενώ ν είναι ο λόγος του Poisson, που εκφράζει το μέτρο της γεωμετρικής μεταβολής στο σχήμα ενός ελαστικού σώματος. Το μέτρο ελαστικότητας του Young και ο λόγος του Poisson, μπορούν να γραφούν συναρτήσει των σταθερών του Lamé ως εξής (Kramer, 1996):

$$E = \mu \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} \quad (2.6)$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (2.7)$$

2.7. Μακροσεισμικές παράμετροι περιγραφής των σεισμών

2.7.1. Εστία – Επίκεντρο

Κατά σύμβαση έχει επικρατήσει το σημείο όπου ξεκινά η διαδοχική θραύση του ρήγματος να θεωρείται εστία ή υπόκεντρο. Από την εστία, το ρήγμα συνεχίζει με ταχύτητα περίπου 2-3km/sec. Επίσης, συμβατικά ορίζεται το επίκεντρο, όπου είναι η κάθετη προβολή της εστίας στην επιφάνεια του εδάφους. Οι δυο παραπάνω παράμετροι προσδιορίζονται με βάση την παρατήρηση του χρόνου μέτρησης των S και P κυμάτων (Κουτρομάνος και Σπυράκος, 2010).

2.7.2. Μέγεθος σεισμού

Το μέγεθος του σεισμού (M) σχετίζεται με την ολική ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη διάρρηξη του σεισμογόνου ρήγματος και υπολογίζεται από τις σεισμικές καταγραφές. Το σειсмоγράφημα είναι μία οπτική καταγραφή του χρόνου άφιξης και του μεγέθους της σεισμικής κίνησης που προκαλείται από το σεισμικό κύμα. Η ανάλυση του σεισμογραφήματος επιτρέπει την μέτρηση του μεγέθους ενός σεισμού. Ο όρος μέγεθος χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Αμερικάνο σεισμολόγο C. Richter και πρόκειται για αδιάστατο αριθμό (Κουτρομάνος και Σπυράκος, 2010). Παρακάτω αναφέρονται μερικά από τα πιο διαδεδομένα είδη μεγέθους.

Τοπικό μέγεθος (Richter) (M_L)

Ο Richter εισήγαγε την έννοια του σεισμικού μεγέθους. Γνωρίζοντας την απόσταση μεταξύ σεισμογράφου και επίκεντρου, και καταγράφοντας το μέγιστο εύρος της επιτάχυνσης, είναι δυνατή η εμπειρική βαθμονόμηση του μεγέθους του σεισμού. Η κλίμακα Richter δηλαδή, μετράει το μέγεθος ενός σεισμού βασιζόμενη στο σεισμόγραμμα ανεξάρτητα από την έντασή του. Οπότε τοπικό μέγεθος σεισμού ονομάζεται ο δεκαδικός λογάριθμος του μέγιστου πλάτους αναγραφής σε μm το έχει και παρακάτω απλά υπογραμμίζεται για έλεγχο από το πρότυπο βραχείας περιόδου σεισμόμετρο στρέψης που βρίσκεται σε επίκεντρη απόσταση 100 km.

$$M_L = \log(A) - \log(A') + S \quad (2.8)$$

όπου:

A: ο μέσος όρος (mm) των μέγιστων πλατών αναγραφής των κυμάτων από δύο οριζόντιους σεισμογράφους,

A': το αντίστοιχο πλάτος (mm) αναγραφής των κυμάτων του πρότυπου σεισμού στην ίδια απόσταση,

S: σταθερά διόρθωσης που εξαρτάται από τη θέση καταγραφής (Τσελέντης, 1997).

Χωρικό μέγεθος (M_B)

Τα χωρικά κύματα διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τα πρωτεύοντα κύματα ή κύματα P (που ονομάζονται επίσης διαμήκη) και τα δευτερεύοντα κύματα ή κύματα S. Η κλίμακα του χωρικού μεγέθους βασίζεται σε μετρήσεις κυμάτων χώρου τα οποία καταγράφονται από όλους τους σεισμούς, ανεξαρτήτως βάθους. Χρησιμοποιείται κυρίως όταν οι καταγραφές λαμβάνονται σε μικρή απόσταση από το σεισμογόνο ρήγμα (Κουτρομάνος και Σπυράκος, 2010):

$$M_B = \log\left(\frac{A}{T}\right) + Q(\Delta, h) + C \quad (2.9)$$

όπου:

A: το μέγιστο πλάτος των κυμάτων σε μm

T: η περίοδος των P, S κυμάτων σε sec

$Q(\Delta, h)$: η συνάρτηση επίκεντρης απόστασης και εστιακού βάθους

C: η σταθερά σταθμού παρατήρησης (Τσελέντης, 1997).

Επιφανειακό μέγεθος (M_S)

Χρησιμοποιείται κυρίως όταν οι καταγραφές λαμβάνονται σε μεγάλη απόσταση από το σεισμογόνο ρήγμα (επίκεντρο), όπου η εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται κυρίως από επιφανειακά κύματα. Οι Gutenberg και Richter ανέπτυξαν μία κλίμακα μεγέθους η οποία στηρίζεται στο πλάτος των κυμάτων Rayleigh. Το επιφανειακό μέγεθος χρησιμοποιείται κυρίως για επιφανειακούς σεισμούς (Προβιδάκης, 2008):

$$M_S = \log A + 1,66 \log \Delta + 2 \quad (2.10)$$

A = Η μέγιστη μετατόπιση εδάφους σε μm .

Δ = Η απόσταση του σεισμογράφου από το επίκεντρο, σε μοίρες ($1^\circ = 111\text{km}$).

Επίσης, ισχύει η σχέση:

$$M_S = 0,95 M_L + 0,72 \quad (2.11)$$

Μέγεθος σεισμικής ροπής (M_W)

Ένας μεγάλος σεισμός έχει διάρκεια αρκετά δευτερόλεπτα και απελευθερώνει ενέργεια σε απόσταση εκατοντάδων χιλιομέτρων, έτσι είναι αναγκαίος ο υπολογισμός του αθροίσματος της συνολικής ενέργειας που καταγράφεται. Το μέγεθος ροπής που βασίζεται στην σεισμική ροπή (Kanamori, 1977) δεν εξαρτάται από το επίπεδο κίνησης του εδάφους. Επίσης το μέγεθος ροπής αποτελεί το μοναδικό μέγεθος όπου μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε είδος σεισμού (Προβιδάκης, 2008). Η σεισμική ροπή δίνεται από τη σχέση:

$$M_0 = u \cdot A \cdot \mu \quad (2.12)$$

όπου:

u: η μέση τιμή μετακίνησης του σεισμογόνου ρήγματος

A: η επιφάνεια διάρρηξης

μ : παράμετρος που δίνει την ακαμψία του φλοιού της γης (Κουτρομάνος και Σπυράκος, 2010).

Το μέγεθος ροπής υπολογίζεται από τον τύπο (Κουτρομάνος και Σπυράκος, 2010):

$$M_W = \frac{\log M_0}{10,5} - 10,7 \quad (2.13)$$

2.7.3. Σεισμική ενέργεια

Το μέγεθος όσο και η σεισμική ροπή ενός σεισμού συνδέονται με την ενέργεια (E), που είναι κυματικής φύσεως και προκύπτει από τη συσσωρευμένη δυναμική ενέργεια, από την αλλαγή τη μορφής των πετρωμάτων και από την ξαφνικό μετασχηματισμό της σε κινηματική ενέργεια. Οι Gutenberg και Richter ανέπτυξαν μία σχέση μεταξύ του επιφανειακού μεγέθους και της ενέργειας (Προβιδάκης, 2008) :

$$\log(E) = 12,24 + 1,44M_s \quad (2.14)$$

Η ενέργεια (E) δίνεται σε ergs, όπου ισχύει ότι $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ Joules}$

2.7.4. Ένταση σεισμού

Με τον προσδιορισμό της αριθμητικής τιμής της έντασης ενός σεισμού, μπορούν επίσης να προσδιοριστούν ποιοτικά οι συνέπειες που προκλήθηκαν από αυτόν σε μία περιοχή. Επομένως η τιμή της έντασης δεν είναι σε κάθε περιοχή ίδια, αλλά διαφοροποιείται ανάλογα με την περιοχή που εξετάζεται. Η μέτρηση της έντασης γίνεται κατά την τροποποιημένη κλίμακα Mercalli, (MMI), η οποία λαμβάνει τιμές από 1 έως 12, και αποτελεί μια εξελιγμένη εκδοχή της αυθεντικής δεκαβάθμιας κλίμακας Mercalli (Προβιδάκης, 2008).

2.8. Βάθος σεισμού

Οι σεισμοί συμβαίνουν σε ορισμένο βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Τα βάθη υπολογίζονται και αυτά από τις σεισμικές καταγραφές. Οι σεισμοί ταξινομούνται σε επιφανειακούς, με εστιακό βάθος μικρότερο από 70 km, σε ενδιάμεσους, με εστιακό βάθος 70-300 km, και σε σεισμούς μεγάλου βάθους, με εστιακό βάθος 300-700 km. Τα εστιακά βάθη στο 90% είναι μικρότερα από 100 km, ενώ οι ισχυροί σεισμοί συνήθως έχουν εστιακό βάθος μικρότερο από 60 km (Προβιδάκης, 2008)

2.9. Παράμετροι κίνησης εδάφους

Οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν ποσοτικά την κίνηση του εδάφους είναι διάφοροι, κάποιες από τις σημαντικότερες είναι το πλάτος, το περιεχόμενο της συχνότητας και η διάρκεια των ισχυρών κινήσεων του εδάφους.

2.9.1. Πλάτος

Η κίνηση του εδάφους είναι μια χρονοσειρά μιας παραμέτρου όπως η επιτάχυνση, η ταχύτητα, η μετατόπιση ή ο συνδυασμός των τριών μεταβλητών. Μόνο μια από τις παραπάνω παραμέτρους μπορεί να μετρηθεί απευθείας, ενώ οι υπόλοιπες υπολογίζονται με μαθηματικές μεθόδους διαφοροποίησης ή/και ολοκλήρωσης. Επίσης το πλάτος της εδαφικής κίνησης μεταβάλλεται με το χρόνο. Οι συνθήκες που καθορίζουν το πλάτος είναι το έδαφος, η τοπογραφία και ο μηχανισμός διάρρηξης. Οι μέγιστες τιμές της επιτάχυνσης, της ταχύτητας

και της μετατόπισης είναι εκείνες που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. (Πιτιλάκης, 2010)

Μέγιστη επιτάχυνση

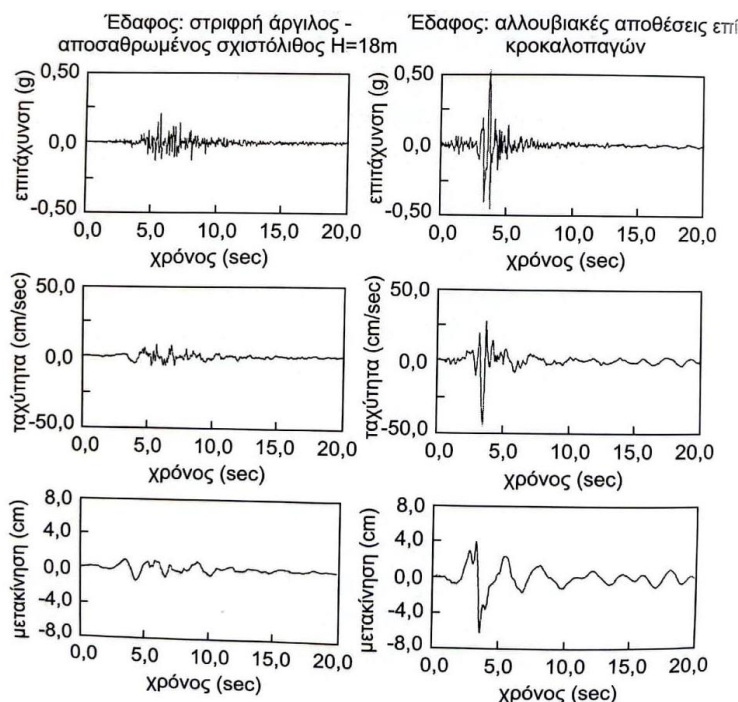
Η μέγιστη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση (PHA ή a_{\max}) είναι αυτή που χρησιμοποιείται περισσότερο για την περιγραφή του σεισμού και συχνά συσχετίζεται με την έντασή του. Η κατακόρυφη εδαφική επιτάχυνση (PVA) δεν είναι τόσο σημαντική καθώς είναι η λιγότερο επικίνδυνη, αφού οι περισσότερες κατασκευές έχουν μεγάλους συντελεστές ασφαλείας για τα κατακόρυφα φορτία. Επίσης η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση από μόνη της δεν μπορεί να παρέχει αρκετές πληροφορίες για την ισχυρή εδαφική κίνηση.

Μέγιστη ταχύτητα

Η μέγιστη οριζόντια εδαφική ταχύτητα (PHV ή u_{\max}) παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον και είναι η πιο αξιόπιστη, καθώς δεν επηρεάζεται από τις ύψισυχνες συνιστώσες της δόνησης. Μια απλή αρμονική ταλάντωση με περίοδο T ισχύει $u_{\max}/a_{\max} = T/2\pi$. Ο λόγος u_{\max}/a_{\max} μπορεί να αποτελέσει δείκτη του συχνотικού περιεχομένου.

Μέγιστη μετατόπιση

Οι μέγιστες εδαφικές μετατοπίσεις (PGD ή d_{\max}) συνδέονται με τις πιο χαμηλές συχνότητες του σεισμικού κραδασμού. Η ακριβής εκτίμηση τους γίνεται με διπλή ολοκλήρωση, που μπορεί να επιφέρει λάθη και γι' αυτό δεν χρησιμοποιείται γενικότερα. Ωστόσο υπάρχουν ήδη και συνεχίζουν να αναπτύσσονται τεχνολογίες για ψηφιακή εκτίμηση αυτής της παραμέτρου. Οι μέγιστες εδαφικές μετατοπίσεις εξαρτώνται από όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την εδαφική κίνηση (Πιτιλάκης, 2010).



Εικόνα 2.9: Χρονοϊστορίες εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης Πηγή: (Πιτιλάκης, 2010).

2.9.2. Συχνότητα

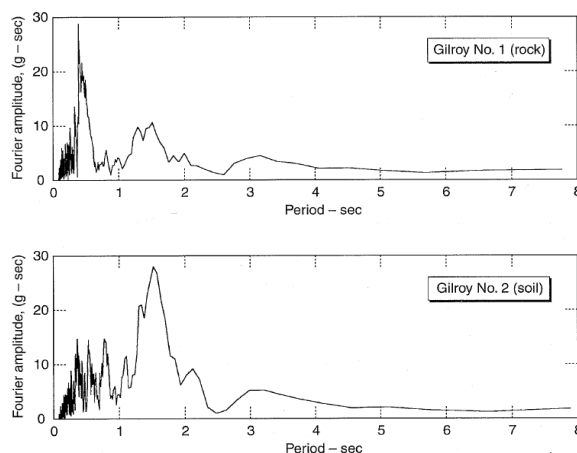
Οι σεισμικές κινήσεις προκαλούν περίπλοκη φόρτιση με τα στοιχεία κίνησης που εκτείνονται σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Το περιεχόμενο συχνότητας, είναι σημαντική παράμετρος και περιγράφει πως το πλάτος μιας κίνησης του εδάφους κατανέμεται μεταξύ διαφορετικών συχνοτήτων. Η συχνότητα συνδέεται άμεσα με το μέγεθος του σεισμού, αφού οι μεγάλοι σεισμοί προκαλούν μεγαλύτερης και περισσότερης διάρκειας κίνηση του εδάφους σε σχέση με τους μικρότερους σεισμούς. Επίσης το περιεχόμενο της συχνότητας αλλάζει και με βάση την απόσταση. Οι κυριότεροι τρόποι που εκτιμάται το συχνотικό περιεχόμενο μίας σεισμικής κίνησης είναι τα φάσματα Fourier και τα ελαστικά φάσματα απόκρισης (Πιπιλάκης, 2010).

Φάσματα Fourier

Η σειρά Fourier παρέχει μια πλήρη περιγραφή της κίνησης του εδάφους, όπως κάθε περιοδική κίνηση, αφού η κίνηση μπορεί να ανακτηθεί πλήρως από τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier. Ένα διάγραμμα πλάτους Fourier συναρτήσει της συχνότητας, ονομάζεται φάσμα πλάτους Fourier. Με αυτό περιγράφεται πώς το πλάτος της κίνησης κατανέμεται σε σχέση με τη συχνότητα και δίνει μια σαφή απεικόνιση του περιεχομένου της συχνότητας μια κίνησης (Πιπιλάκης, 2010):

- Ένα στενό φάσμα υποδηλώνει ότι η κίνηση έχει μια κυρίαρχη συχνότητα (ή περίοδο), η οποία μπορεί να παράγει ένα ομαλό, σχεδόν ημιτονοειδές χρονικό ιστορικό.
- Ένα ευρύ φάσμα αντιστοιχεί σε μια κίνηση που περιέχει μια ποικιλία συχνοτήτων που παράγουν ένα πιο οδοντωτό, ακανόνιστο χρονικό ιστορικό.
- Οι αιχμές στη γραμμή του φάσματος προσδιορίζουν τις περιόδους (ή συχνότητες), όπου η σεισμική ενέργεια είναι η μέγιστη.

Όταν τα φάσματα πλάτους Fourier των πραγματικών σεισμικών κινήσεων εξομαλύνονται και σχεδιάζονται σε λογαριθμικές κλίμακες, τα χαρακτηριστικά τους σχήματα μπορούν να φανούν πιο εύκολα. Στην εικόνα 2.10 φαίνονται τα φάσματα πλάτους Fourier για δυο περιπτώσεις, στην επάνω εικόνα για την περίπτωση βράχου και στην κάτω για την περίπτωση εδάφους.

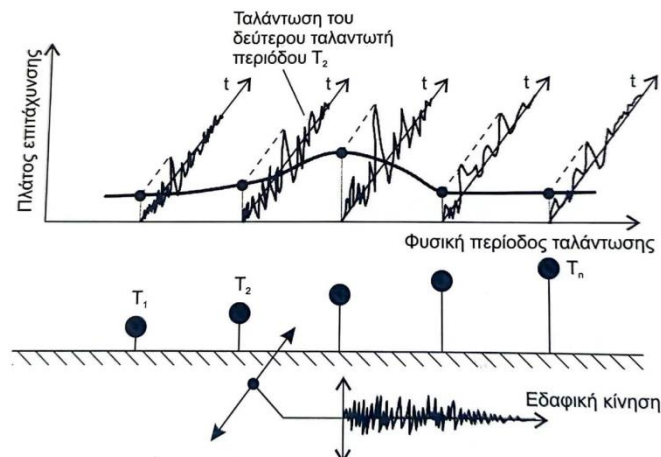


Εικόνα 2.10: Φάσματα πλάτους Fourier Πηγή: (Πιπιλάκης, 2010).

Φάσματα απόκρισης

Αυτά τα φάσματα δίνουν τη μεγαλύτερη δυνατή απόκριση (μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση), ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή με απόσβεση, σε μια συγκεκριμένη διέγερση στη βάση, συναρτήσει της ιδιοσυχνότητας ή της ιδιοπεριόδου και του συντελεστή απόσβεσης του δεδομένου μονοβάθμιου ταλαντωτή. Γενικά, ως φάσμα απόκρισης μιας παραμέτρου r_{max} ορίζεται η γραφική παράσταση της r_{max} για διάφορες ιδιοπεριόδους (ή ιδιοσυχνότητες). (Προβιδάκης, 2008) Είναι απλά στον υπολογισμό, έχουν τη δυνατότητα να ενσωματωθούν σε υπολογισμούς πολύπλοκων φαινομένων και τέλος είναι εύκολα στην προσαρμογή τους στη φιλοσοφία των αντισεισμικών κανονισμών (Προβιδάκης, 2008):

$$r_{max}(T_i) = \max|r(t)|_{T_i} \quad (2.14)$$



Εικόνα 2.11: Φάσμα απόκρισης Πηγή: (Πιπλάκης, 2010).

Φάσματα απόκρισης - Fourier

Εάν ο υπολογισμός του φάσματος απόκρισης λαμβάνει υπόψη όλη τη διάρκεια του σεισμού, τα δύο φάσματα θα είναι πανομοιότυπα (για $\xi = 0$), αν η μέγιστη τιμή της απόκρισης συμπίπτει με το τέλος της σεισμικής διέγερσης. Γενικά, το φάσμα Fourier θα είναι μικρότερο. Το φάσμα Fourier μπορεί να περιγράψει την απόκριση μόνο εάν η κατασκευή παρουσιάζει μικρή απόσβεση ξ (Προβιδάκης, 2008).

Φάσμα ισχύος

Η συχνότητα της κίνησης του εδάφους μπορεί να περιγραφεί και από το φάσμα ισχύος ή φασματικής πυκνότητας ισχύος. Με συνάρτηση φασματικής πυκνότητας ισχύος επεξηγείται μια στατική τυχαία διαδικασία, όπου οι στατιστικές παράμετροι δεν μεταβάλλονται με τον χρόνο. Από τα διαγράμματα επιτάχυνσης μπορεί να είναι φανερό πως η ένταση φτάνει στη

μεγίστη τιμή στην αρχή της κίνησης, όπου για κάποιο χρόνο παραμένει σταθερή, ενώ προς το τέλος μειώνεται (Πιτιλάκης, 2010).

2.10. Κυματική διάδοση

Γενικά τα κύματα μπορούν να θεωρηθούν ως ελαστικά κύματα. Προκειμένου να γίνει κατανοητή η διάδοση των κυμάτων στο χώρο, θα αναλυθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου κάποιες βασικές έννοιες γι' αυτή. Ο μηχανισμός λειτουργίας της κυματικής διάδοσης γίνεται σαφέστερος, αν για αρχή θεωρηθεί πως η διάδοση γίνεται σε ένα άπειρο και απεριόριστο μονοδιάστατο μέσο, όπως μια μακριά ράβδος. Όλες οι σχέσεις που αναπτύσσονται για την κυματική μηχανική είναι βασισμένες στην απαραίτητη ισορροπία δυνάμεων και παραμορφώσεων, καθώς και στη χρήση κλασικών σχέσεων τάσεων – παραμορφώσεων και παραμορφώσεων – μετακινήσεων από τη θεωρία ελαστικότητας (Πιτιλάκης, 2010). Με την παραπάνω απλούστευση, χρησιμοποιώντας τις ίδιες σχέσεις, μπορεί να γίνει ανάλυση και μίας πιο σύνθετης περίπτωσης σε τριδιάστατο μέσο.

2.10.1. Μονοδιάστατη διάδοση κύματος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω θα γίνει αναγωγή της ανάλυσης, αρχικά στην απλή περίπτωση της ράβδου. Μια ράβδος μπορεί να δεχθεί τρία είδη δόνησης, διαμήκη και στροφική δόνηση χωρίς πλευρική μετατόπιση και καμπτική δόνηση με τον άξονα να κινείται πλευρικά.

Η ταχύτητα της διάδοσης του κύματος (v_p) είναι η ταχύτητα με την οποία τα κύματα διαδίδονται κατά μήκος της ράβδου και αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο προσδιορισμού της δυναμικής του εδάφους αλλά και γενικά στη Γεωτεχνική σεισμική μηχανική. Επιπλέον, η ταχύτητα διάδοσης του κύματος εξαρτάται από τις ιδιότητες των υλικών της ράβδου (ακαμψία και πυκνότητα), ενώ μεγεθύνεται με την αύξηση της ακαμψίας και για μειωμένες τιμές πυκνότητας. Για τη μονοδιάστατη ανάλυση ο τύπος της ταχύτητας μπορεί να δοθεί από τη διαφορική εξίσωση 2.15, ενώ μπορεί να γραφεί και με τη μορφή 2.16:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_p^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.15)$$

$$u(x, t) = f(vt - x) + g(vt + x) \quad (2.16)$$

Όπου f και g , οποιεσδήποτε συναρτήσεις των $(vt - x)$ και $(vt + x)$, που ικανοποιούν την 2.16 εξίσωση. Η συνάρτηση f παραμένει σταθερή όσο αυξάνεται η μετατόπιση x για χρόνο t , ενώ η συνάρτηση g παραμένει σταθερή όσο μειώνεται η μετατόπιση x με τον χρόνο t . Ακόμη, από την τελευταία εξίσωση συμπεραίνεται πως το σχήμα του κύματος δεν επηρεάζεται από τη θέση ή το χρόνο.

Υπό σταθερές συνθήκες τάση δίνεται από:

$$\sigma(t) = \sigma_o \cos \omega t \quad (2.17)$$

Όπου σ_0 είναι η τάση του πλάτους κύματος και ω η κυκλική συχνότητα της επιβληθείσας φόρτισης. Το μήκος κύματος λ συσχετίζεται με τον αριθμό των κυμάτων k ,

$$\lambda = vT = \frac{v}{f} = \frac{2\pi}{\omega} v = \frac{2\pi}{k} \quad \text{Όπου } f = \frac{1}{T} \quad (2.18)$$

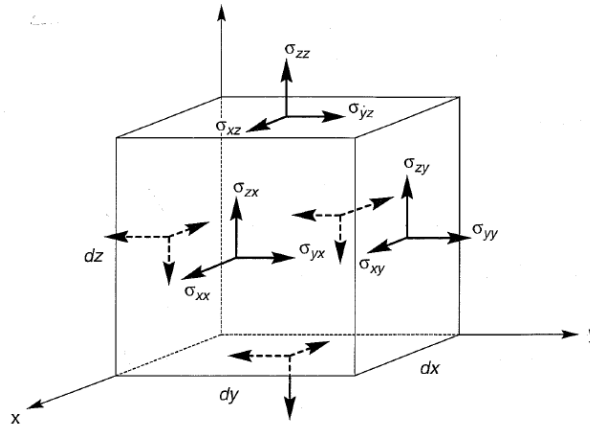
Με T συμβολίζεται η περίοδος της εφαρμοζόμενης φόρτισης. Στον Πίνακα 2.1 φαίνονται συνοπτικά όλες οι παράμετροι της κυματικής θεωρίας (Πιπιάκης, 2010).

Πίνακας 2.1: Παράμετροι κυματικής θεωρίας (Πιπιάκης, 2010).

Ποσότητα	Διαστάσεις	Τύπος
Ταχύτητα	Απόσταση/ Χρόνος	$V = \frac{\omega}{k} = f \cdot \lambda$
Συχνότητα	1/Χρόνος	$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T} = \frac{V}{\lambda}$
Κυκλική συχνότητα	1/Χρόνος	$\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T}$
Περίοδος	Χρόνος	$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$
Μήκος κύματος	Απόσταση	$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{V}{f} = V \cdot T$
Αριθμός κυμάτων	1/ Απόσταση	$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{V}$

2.10.2. Τριδιάστατη διάδοση κύματος

Η προηγούμενη μονοδιάστατη προσέγγιση, της άπειρης ράβδου, δεν είναι επαρκής για να περιγράψει την περίπτωση διάδοσης κυμάτων στη γη. Οι τάσεις που ασκούνται σε ένα στοιχείο άπειρου, ομογενούς, ισότροπου, ελαστικού χώρου στην αρχή των αξόνων x , y , z , φαίνονται στην Εικόνα 2.12.



Εικόνα 2.12: Τάσεις στοιχείου σε άπειρο ελαστικό χώρο.

Πηγή εικόνας: (Πιπλάκης, 2010)

Οι τάσεις σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} είναι ορθές τάσεις, ενώ οι υπόλοιπες έξι είναι διατμητικές. Στην ισορροπία ισχύει ότι $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$ & $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$ & $\sigma_{yz} = \sigma_{zy}$ (Kramer, 1996). Η εξίσωση κίνησης στις τρεις διαστάσεις για ελαστικό στερεό για τη διεύθυνση x, y και z αντίστοιχα, δίνονται από τις σχέσεις (Kramer, 1996):

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \quad (2.19)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \quad (2.20)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (2.21)$$

Η ογκομετρική παραμόρφωση ϵ , η οποία περιγράφει παραμορφώσεις που δεν συνεπάγονται διάτμηση ή περιστροφή, η κυματική εξίσωση αυτή περιγράφει ένα μη περιστροφικό, σφαιρικής διάγκωσης ή συστολής λόγω του κύματος. Αυτό το κύμα θα διαδοθεί μέσα στο σώμα με ταχύτητα:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.22)$$

Συνοψίζοντας, τα κύματα P δεν περιλαμβάνουν καμία περιστροφή του υλικού από το οποίο διέρχονται και ταξιδεύουν με ταχύτητα V_p . Τα κύματα S δεν συνεπάγονται καμία μεταβολή του όγκου και ταξιδεύουν με ταχύτητα, V_s . Οι ταχύτητες των κυμάτων P και S εξαρτώνται από τις δυσκαμψίες του στερεού σε σχέση με τους τύπους παραμόρφωσης που προκαλούνται από κάθε κύμα. Συγκρίνοντας τις ταχύτητες αυτές μπορεί να διαπιστωθεί ότι η ταχύτητα των P κυμάτων υπερβαίνει την ταχύτητα των S κυμάτων κατά ένα ποσοστό που εξαρτάται από το λόγο Poisson του σώματος. Για έναν τυπικό λόγο Poisson 0,3 για τα

γεωλογικά υλικά, ο λόγος V_p/V_s ισούται με 1,87 (Kramer, 1996) Ένα έδαφος θεωρείται πρακτικά ασυμπύεστο για λόγο Poisson περίπου 0,5. Σε αυτές τις περιπτώσεις η ταχύτητα V_p τείνει στο άπειρο, αφού η προσπάθεια μεταβολής του όγκου αντιμετωπίζει άπειρη αντίσταση. Στη πραγματικότητα όμως ο λόγος του Poisson είναι μικρότερος από 0,5 (Πιπιλάκης, 2010).

2.11. Δομικοί κίνδυνοι

Σε πολλούς σεισμούς, οι δομικές ζημιές είναι ο πρωταρχικός παράγοντας τόσο των θανάτων, όσο και των οικονομικών απωλειών. Όμως οι σεισμοί δεν αποτελούν το μόνο κίνδυνο για ενδεχόμενο θάνατο, πρόκληση ζημίας ή κατάρρευση κτιρίων. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου έχουν υπάρξει τραυματισμοί ή και θάνατοι λόγω πτώσης βαρέων αντικειμένων, όπως τούβλα, άλλα υλικά δόμησης και διάφορα άλλα. Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, οι εσωτερικές εγκαταστάσεις, συμπεριλαμβανομένων των σωληνώσεων και του φωτισμού, μπορούν επίσης να υποστούν ζημιές. Με την πάροδο των ετών, έχουν γίνει σημαντικές βελτιώσεις στα πρότυπα σεισμικού σχεδιασμού, στους οικοδομικούς κώδικες και στον αντισεισμικό σχεδιασμό κτιρίων. Η απαίτηση για ακριβείς σεισμικές προβλέψεις έχει γίνει αναγκαία, καθώς η εστίαση του αντισεισμικού σχεδιασμού έχει μετατοπιστεί από την εστίαση, αποκλειστικά, στη δομική αντοχή, στην εστίαση τόσο στην αντοχή, όσο και στην πλαστικότητα (Kramer, 1996).

2.12. Συμπεριφορά εδαφικών στρώσεων κατά τον σεισμό

Όταν τα υπόγεια ρήγματα εντός του φλοιού διαρρηγνύονται, τα σεισμικά κύματα ταξιδεύουν προς όλες τις κατευθύνσεις. Λόγω της συνεχούς διάθλασης, η κατεύθυνση διάδοσης του κύματος τερματίζει κατακόρυφα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το στρώμα του εδάφους είναι οριζόντιο και η κατεύθυνση διάδοσης των κυμάτων κατακόρυφη, το φαινόμενο αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με μονοδιάστατη ανάλυση. Σε μια εδαφική απόθεση θεωρείται πως στο βάθος της υπάρχει βράχος, έτσι η περίοδος της πρώτης κανονικής εδαφικής στρώσης θεωρείται και ως συνολική. Η εδαφική απόθεση δίνεται από τον τύπο:

$$T = \frac{4H}{V_s} \quad (2.23)$$

Όπου H το πάχος της εδαφικής στρώσης και V_s η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων μέσα στα πρώτα 30 μέτρα της εδαφικής στρώσης.

Επίσης η ταχύτητα υπολογίζεται με δοκιμές Cross-hole που γίνονται με δύο γεωτρήσεις, όπου στη μία υπάρχει ένας πομπός-πηγή κυμάτων και στην άλλη καταγραφικό. Ο χρόνος άφιξης του κύματος προσδιορίζει τη ταχύτητα V_s των διατμητικών κυμάτων:

$$V_s = \sqrt{G/\rho} \quad (2.234)$$

Όπου G είναι το μέτρο διατμήσεως του και ρ η πυκνότητά του υλικού.

2.13. Μέγιστο μέτρο διάτμησης G_{max}

Το μέγιστο μέτρο διάτμησης υπολογίζεται με έμμεσο τρόπο μέσω των μετρήσεων της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (V_s) και της πυκνότητας (ρ) του προς μελέτη σχηματισμού ως εξής (Γεωργιανού, 2008):

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (2.25)$$

Μελέτες σε διάφορα είδη εδάφους έχουν δείξει πως οι καμπύλες μεγέθυνσης της εδαφικής κίνησης δίδονται για διαφορετικές ιδιοπεριόδους και μεγέθη σεισμού. Σε μεγάλους σεισμούς για μικρές περιόδους, η απόκριση της εδαφικής στρώσης είναι μικρότερη από την κίνηση του βραχώδους υποβάθρου και στην περίπτωση αυτή θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι το έδαφος φιλτράρει το περιεχόμενο της εδαφικής κίνησης σε υψηλές συχνότητες και μικρές περιόδους.

Το μέγιστο μέτρο διάτμησης αντιπροσωπεύει την αρχική δυσκαμψία του εδάφους και είναι ανεξάρτητο από το πλάτος παραμόρφωσης, όπως και άλλες ιδιότητες του εδάφους σε περιοχές μικρής παραμόρφωσης. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως έμμεση ένδειξη διαφόρων εδαφικών παραμέτρων, όπως η πυκνότητα και η διαταραχή του δείγματος (Καλλιόγλου, 2013).

Έδαφος	Πυκνότητα ρ (kg/m ³)	V_s (m/s)	G_{max} (MPa)
Μαλακή άργιλος	1.600	40-90	2.6-13
Στιφρή άργιλος	1.680	65-140	7-33
Χαλαρή άμμος	1.680	130-280	28.4-131.7
Πυκνή άμμος και χάλικες	1.760	200-410	70.4-300

Εικόνα 2.13: Εύρος τιμών V_s και G_{max} για διάφορους τύπους εδαφών (Χατζηβασιλείου, 2017).

Εν κατακλείδι, το γενικό συμπέρασμα εργαστηριακών μελετών πολλών ερευνητών είναι πως το μέγιστο μέτρο διάτμησης (G_{max}) εξαρτάται από τη κατάσταση του εδάφους, η οποία εκφράζεται ως συνδυασμός του δείκτη πόρων του εδάφους και του μεγέθους της ενεργού τάσης, καθώς και τη σύσταση και τη δομή του εδάφους αντικατοπτρίζουν τις συνθήκες κατά την εναπόθεση (διεργασίες ιζηματογένεσης) και μετά την απόθεση (διεργασίες γένεσης, ανάπτυξη συγκολλήσεων κ.λπ.) (Χατζηβασιλείου, 2017).

2.14. Ημιτονοειδής διέγερση

Αυτή είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος παραγωγής κυμάτων, όπου ο πομπός διεγείρεται από ένα μόνο ημιτονοειδές κύμα. Αυτή είναι μια μέθοδος διέγερσης με ένα μόνο ημιτονοειδές κύμα. Η επιλογή του ημιτονοειδούς κύματος είναι η πιο συνηθισμένη περίπτωση και κρίνεται ως η πιο αποτελεσματική και ότι είναι η καλύτερη επιλογή.

Οι πεπερασμένες διαστάσεις του μετρούμενου εδαφικού δείγματος σε σύγκριση με το μήκος κύματος του παλμού δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για ανάκλαση στα πλευρικά τοιχώματα του δείγματος. Οι ανακλάσεις είναι πιο πιθανό να συμβούν σε πραγματικό χρόνο όταν το εγκάρσιο κύμα φτάνει στο δείγμα. Η εμφάνιση τέτοιων ανακλάσεων επηρεάζει την άφιξη του εγκάρσιου κύματος στο δέκτη και οδηγεί σε εσφαλμένες εκτιμήσεις. Για το λόγο αυτό, η επιλογή ενός μόνο παλμού (συνήθως ημιτονοειδούς κύματος) θεωρείται η καλύτερη λύση. Θεωρείται βέλτιστη και χρησιμοποιείται ευρέως για τέτοιου είδους μετρήσεις. (Χατζηβασιλείου, 2017)

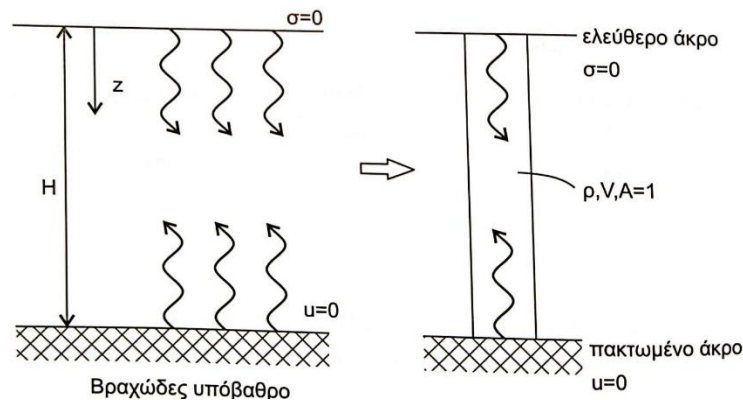
Η γενική σχέση περιγραφής ενός τέτοιου σήματος συνεχούς χρόνου δίνεται από τη σχέση:

$$x(t) = A \cos(\omega_o t + \theta) = A \sin\left(\omega_o t + \theta + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.24)$$

Η περίοδος είναι θεμελιώδης $T_o = 2\pi/\omega_o$ (sec) και η συχνότητα $f_o = \omega_o/2\pi = 1/T_o$ (Hertz). Επίσης, σήματα που δεν θεωρούνται ημιτονοειδή, δίνεται η δυνατότητα να γραφούν ως άθροισμα ημιτονοειδών σημάτων μέσω της ανάλυσης Fourier.

2.15. Μονοδιάστατα κύματα σε «κλειστό μέσο»

Ένα εδαφικό στρώμα με πάχος (H) που καταλήγει σε βράχο, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κλειστό μέσο, με το κάτω άκρο ακίνητο ($u=0$) και την ελεύθερη επιφάνεια ως το ελεύθερο άκρο ($\sigma=0$).



Εικόνα 2.14: Βραχώδες υπόβαθρο και ελεύθερο άκρο.

Πηγή εικόνας: (Πιπλάκης, 2010)

Σε αυτήν την περίπτωση οι ιδιοσυχνότητες και ιδιοπερίοδοι, δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις αντίστοιχα:

$$f_n = (2n - 1) \frac{V}{4H} \quad (2.25)$$

$$T_n = \frac{4H}{V(2n-1)} \quad (2.28)$$

Όταν επιβάλλεται αρμονική διέγερση (συμπίεσης ή στρέψης) στο ελεύθερο άκρο, η κυματική εξίσωση είναι της μορφής:

$$u = (B^+ e^{-ikz} + B^- e^{+ikz}) e^{i\Omega z} \quad (2.26)$$

Στο ελεύθερο άκρο της στήλης ($z=0$) ισχύει:

$$u_{z=0} = -i \frac{P_0 H}{\rho A V^2} \frac{\tan\left(\frac{\omega H}{V}\right)}{\frac{\omega H}{V}} e^{i\Omega t} \quad (2.30)$$

Από την παραπάνω σχέση μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως το πλάτος της ταλάντωσης στο ελεύθερο άκρο μπορεί να γίνει άπειρα μεγάλο όταν:

$$\Omega = (2n-1) \frac{\pi V}{2H} \quad (2.271)$$

Όταν δηλαδή η διεγείρουσα συχνότητα συμπίπτει με μια από τις ιδιοσυχνότητες (Πιπιλάκης, 2010).

2.16. Υπόγεια έγκοιλα

Η ύπαρξη κενών/εγκοίλων στο μονοπάτι διάδοσης των σεισμικών κυμάτων μπορεί να τροποποιήσει τον σεισμικό κραδασμό στην επιφάνεια και κατ' επέκταση την καταπόνηση των υπερκείμενων και των γειτονικών κατασκευών. Γενικά, η ύπαρξη κενών μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε μεγάλων διαστάσεων, συνήθως επιμήκη, όπως είναι οι σήραγγες, που μπορεί να βρίσκονται και σε μεγάλο βάθος, αλλά και σε κενά πεπερασμένων διαστάσεων που βρίσκονται σε μικρό βάθος και πολύ συχνά κάτω ή δίπλα σε κτίρια. Σημειώνεται ότι η πρώτη κατηγορία προβλημάτων έχει μελετηθεί εκτενώς, ενώ αντιθέτως για τη δεύτερη δεν υπάρχουν πολλές συναφείς μελέτες.

Έγκοιλα τέτοιου είδους στο υπέδαφος μπορεί να δημιουργηθούν με φυσικό τρόπο (π.χ., σπηλαιώσεις), αλλά κυρίως μετά από ανθρώπινη παρέμβαση (π.χ., πηγάδια, (σηπτικές) δεξαμενές). Επιπροσθέτως, πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι μπορεί τα έγκοιλα να είναι κενά, ενώ αρκετές φορές είναι γεμάτα με κάποιο υγρό ή ακόμα και με κάποιο εδαφικό υλικό. Προφανώς, η ύπαρξη και οι ιδιότητες του (πιθανού) υλικού πλήρωσης σε συνδυασμό με τις ιδιότητες του υλικού που περιβάλλει το έγκοιλο μπορεί να οδηγήσει σε πολύ διαφορετικά αποτελέσματα. Προφανώς, η γεωμετρία και το βάθος, καθώς και τα χαρακτηριστικά της διέγερσης παίζουν σημαντικό ρόλο.

Τα έγκοιλα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, αυτά που προήλθαν φυσικά κατά τη δημιουργία των πετρωμάτων και στα έγκοιλα που δημιουργήθηκαν μέσω ανθρώπινης παρέμβασης.

2.16.1. Φυσικά έγκοιλα

Τα φυσικά έγκοιλα διακρίνονται σε πρωτογενή και δευτερογενή.

- Τα πρωτογενή είναι αυτά που έχουν σχηματιστεί κατά το στάδιο της δημιουργία των πετρωμάτων και μπορεί να βρεθούν και μέσα σε ηφαιστειογενή πετρώματα, σε κοραλλιογενής ασβεστόλιθους, σε ασβεστολιθικούς τόφφους και σε άλλα πετρώματα.
- Τα δευτερογενή είναι τα σπήλαια που σχηματίζονται από τεκτονικές δυνάμεις από τη δράση του ανέμου ή των κυμάτων και κυρίως από τη μηχανική και χημική δράση του νερού που κινείται μέσα στους ασβεστόλιθους. Τη χημική αποσάθρωση την προκαλεί η διαλυτική ικανότητα του νερού με τα διάφορα υλικά που μεταφέρει.

Μερικά πετρώματα διαλύονται πιο εύκολα όπως ο γύψος, το ορυκτό αλάτι, ο ασβεστόλιθος και άλλα, ενώ υπάρχουν και πετρώματα που διαλύονται δυσκολότερα όπως οι αργιλικοί σχιστόλιθοι, οι ασβεστιτικοί ψαμμίτες και τα ασβεστιτικά κροκαλοπαγή (Μελέντη & Παπαζάχος, 1980).

2.16.2. Τεχνητά έγκοιλα

Τα τεχνητά έγκοιλα είναι εκείνα, τα οποία δημιουργήθηκαν από ανθρώπινη παρέμβαση για χρήσεις όπως η αποθήκευση ποσότητας νερού κάτω από το έδαφος ώστε να μειωθεί η εξάτμιση από τον ήλιο ή για λόγους οσμών που προέρχονται από υγρά απόβλητα. Στη μηχανική συναντάμε μεγάλου μήκους έγκοιλα για τη δημιουργία δρόμων, για τη λειτουργία του υπόγειου συρμού (μέτρο) καθώς και για άλλους λόγους.

2.17. Χαρακτηριστικά εδαφών

Το υπέδαφος χωρίζεται σε δυο κατηγορίες:

- Βράχος: αποτελεί το κατώτερο τμήμα κάθε εδαφικής απόθεσης. Σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να υπάρξει η εμφάνισή του και σε επιφανειακές στρώσεις (βραχώδης έξαρση).
- Έδαφος: αναφέρεται σε χωμάτινους σχηματισμούς και αποτελεί τον συνήθη τύπο υπεδάφους που συναντάται στις θεμελιώσεις και στα υπόγεια έργα μικρού βάθους.

Η συμπεριφορά του εδάφους επηρεάζει τα διάφορα τεχνικά έργα σε αρκετά θέματα, μεταξύ των οποίων τη φέρουσα ικανότητα του εδάφους (αντοχή), τις αναπτυσσόμενες καθιζήσεις, τις αναπτυσσόμενες εδαφικές ωθήσεις (στατικές και δυναμικές), την ευστάθεια πρανών (μορφές γενικής αστοχίας εδάφους), τη μετάδοση σεισμικών κυμάτων (δυναμική συμπεριφορά εδάφους), την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής (κυρίως δυναμική αλληλεπίδραση). Γενικά το έδαφος, σήμερα χρησιμοποιείται ως υλικό κατασκευής σε διάφορα τεχνικά έργα όπως οδικά και σιδηροδρομικά επιχώματα, χωμάτινα φράγματα, επιχώσεις περιοχών που κατακλύζονται από θάλασσα ή λίμνες. Μέσω του εδάφους διαδίδονται πάσης

φύσης κραδασμοί, όπως δονήσεις που οφείλονται σε ανθρώπινες δραστηριότητες και σεισμικά κύματα (Κίρτας και Παναγόπουλος, 2017).

2.18. Κατάσταση εδαφών

Με βάση τον τρόπο μεταφοράς και τελικής απόθεσης των προϊόντων της αποσάθρωσης, τα εδάφη διακρίνονται σε αυτόχθονα και ιζηματογενή. Τα ιζηματογενή εδάφη αποτελούν το σύνολο σχεδόν των εδαφικών σχηματισμών και διακρίνονται σε χονδρόκοκκα (χάλικες και άμμοι) και λεπτόκοκκα (ιλείς και άργιλοι).

Το έδαφος μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα μη συμπαγές πολυφασικό υλικό, που αποτελείται από ασύνδετους ή ελαφρά συνδεδεμένους στερεούς κόκκους, τα κενά μεταξύ των οποίων (πόροι), περιέχουν υγρά (συνήθως νερό) ή/και αέρια (συνήθως αέρα). Τα εδαφικά υλικά προέρχονται από τη μηχανική ή/και χημική αποσάθρωση των πετρωμάτων. Η μηχανική αποσάθρωση προκαλείται λόγω παγετού, συνεχών θερμοκρασιακών μεταβολών κ.ά., ενώ η χημική αποσάθρωση προκαλεί την αποσύνθεση των πετρωμάτων λόγω οξείδωσης, ενανθράκωσης, αναγωγής και άλλων χημικών διαδικασιών. Γενικά, η χημική αποσάθρωση είναι ο κυριότερος παράγοντας δημιουργίας λεπτόκοκκων εδαφικών σχηματισμών (ιλύων και αργίλων), ενώ η μηχανική αποσάθρωση συντελεί κυρίως στη δημιουργία των χονδρόκοκκων εδαφών (χαλίκων και άμμων), χωρίς όμως να αποκλείεται και η μερική συμμετοχή της εναλλακτικής μεθόδου αποσάθρωσης στη γένεση εδαφικών σχηματισμών κάθε τύπου.

Η ταξινόμηση των εδαφών γενικά μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Μια πολύ βασική ταξινόμηση είναι ο διαχωρισμός σε συνεκτικά (άργιλοι και ιλείς) ή μη (άμμοι και αμμοχάλικα) εδάφη καθώς και η μείξη των δύο παραπάνω (αργιλώδεις άμμοι, αμμώδεις άργιλοι). Το είδος του εδάφους αλλά και οι γενικότερες συνθήκες (υπόγειος ορίζοντας, μορφή φόρτισης) καθορίζουν τη συμπεριφορά του όσων αφορά την αντοχή του και τις αναπτυσσόμενες καθιζήσεις (Κίρτας και Παναγόπουλος, 2017).

2.18.1. Μηχανικές ιδιότητες εδάφους

Η μηχανική συμπεριφορά του εδάφους είναι ιδιαίτερα σύνθετη, σε αυτή συντελούν η εξάρτηση της συμπεριφοράς του εδάφους από το είδος της φόρτισης (ταχύτητα, ένταση και τρόπος επιβολής της) καθώς και οι συνθήκες που μεσολάβησαν από τη γένεσή του μέχρι σήμερα (δηλαδή προηγούμενες φορτίσεις και αποφορτίσεις, ανάπτυξη δομής, απόπλυση του νερού των πόρων και άλλα).

Επομένως οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες των εδαφών μεταξύ άλλων είναι οι εξής (Κίρτας και Παναγόπουλος, 2017):

- Πλαστικότητα (plasticity): η ικανότητα του εδάφους για παραμόρφωση.
- Συνεκτικότητα (consistency): η ιδιότητα του εδάφους που σχετίζεται με τη συνοχή και τη συνάφεια.
- Όριο υδαρότητας LL (liquidity limit): η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία όπου το έδαφος αλλάζει κατάσταση από τη ρευστή (υδαρή) στην πλαστική.

- Όριο πλαστικότητας PL (plasticity limit): η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία για την οποία το έδαφος μεταβαίνει από την πλαστική κατάσταση στην ημι-στερεή και μπορεί να κυλινδρωθεί σε ραβδίσκο χωρίς αυτός να θραύεται.
- Όριο συρρίκνωσης SL (shrinkage limit) είναι το ποσοστό της υγρασίας κατά το οποίο ο όγκος του εδάφους με συνεχόμενη ξήρανση παραμένει σταθερός.
- Το δυναμικό συστολής-διαστολής στο έδαφος: εκφράζει (contraction – expansion): την ικανότητα να χάνει ή να προσροφά νερό.
- Η διαβρωσιμότητα (corrodibility): αναφέρεται στην ευκολία με την οποία τα εδαφικά υλικά μετακινούνται από το νερό ή τον αέρα.

2.19. Αλληλεπίδραση εδάφους – θεμελίωσης

Μια κατασκευή θεμελιωμένη σε σκληρό βράχο υποβάλλεται στην κίνηση του βραχώδους υποβάθρου στο σημείο επαφής, χωρίς να επηρεάζεται η ταλάντωσή της. Όταν η μάζα του συστήματος είναι σημαντικά μεγάλη, η ταλάντωση της κατασκευής είναι δυνατό να διαφοροποιηθεί από αυτή του εδάφους, αν και η διαφοροποίηση αυτή είναι μικρή σε βραχύδη υπόβαθρα.

Αντιθέτως, για κατασκευές χτισμένες πάνω σε εδάφη, και συγκεκριμένα όταν πρόκειται για πελώριες και δύσκαμπτες κατασκευές η αλληλεπίδραση είναι εντονότερη. Υπάρχει έτσι σημαντική επιρροή στην συνολική απορρόφηση ενέργειας μεταξύ της κατασκευής και του εδάφους, η οποία οφείλεται στην πρόσθετη γεωμετρικού τύπου απόσβεση, καθώς επίσης και στη μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών του συστήματος. Αυτό το φαινόμενο κυρίως περιλαμβάνει τη μείωση των σεισμικών δράσεων (δυνάμεων και ροπών) που μεταβιβάζονται στην ανωδομή, αλλά και την αύξηση των παραμορφώσεων (Newmark & Hall, 1969).

Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να εξηγηθεί ότι η παραδοσιακή θεώρηση ακλόνητης στήριξης (πάκτωσης) στη βάση που ακολουθείται για την πλειοψηφία των κτιρίων. Η κίνηση της θεμελίωσης μπορεί να οδηγήσει σε διαφοροποίηση των δυναμικών χαρακτηριστικών του συστήματος, καθώς επίσης και σε διαφορετική απόσβεση, προκαλώντας μείωση ή αύξηση των σεισμικών απαιτήσεων (Mylonakis & Gazetas, 2000). Επίσης, η μη-γραμμική συμπεριφορά της θεμελίωσης που παρουσιάζεται λόγω αποκόλλησης, ολίσθησης και στροφής της θεμελίωσης δημιουργεί έντονη διαφοροποίηση στα αποτελέσματα μιας ολοκληρωμένης ανάλυσης του συνολικού συστήματος (Kennedy *et al.*, 1976).

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας στο φαινόμενο της αλληλεπίδρασης είναι η ενσωμάτωση της κατασκευής στο έδαφος, με αποτέλεσμα μείωση της συνολικής απόκρισης λόγω του φαινομένου αλληλεπίδρασης, αλλά και αύξηση των πλευρικών πιέσεων που ασκούνται στους τοίχους των κατασκευών, οι οποίοι είναι θαμμένοι στο έδαφος (Saxena & Paul, 2012· Newmark & Hall, 1969).

2.20. Μέθοδοι προσομοίωσης

Η χρήση αριθμητικών μεθόδων και ηλεκτρονικού υπολογιστή για την επίλυση διαφόρων μαθηματικών προσομοιωμάτων αποτελεί μια αριθμητική προσομοίωση ενός φαινομένου. Λόγω της συνεχούς ανάπτυξης των δυνατοτήτων των υπολογιστών τις τελευταίες δεκαετίες, η χρήση προγραμμάτων αριθμητικής προσομοίωσης, ειδικά η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, η οποία περιλαμβάνει την αναπαράσταση μιας περιοχής ως σύνολο διακριτών υποπεριοχών, χρησιμοποιείται πλέον ευρέως και η ανάλυση δομών υπό διάφορες συνθήκες φόρτωσης κοινή πρακτική. Η επίσημη παρουσίαση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων αποδίδεται στον Turner et al. (1956) και τους Argyris & Kelsey (1960), ενώ ο όρος «πεπερασμένα στοιχεία» αποδίδεται στον Clough(1960).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Μεθοδολογία Ανάλυσης

3.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Υπάρχουν πολλά προγράμματα που σχετίζονται με προβλήματα προσομοίωσης, μερικά από τα οποία έχουν συναρτήσεις ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Τα τελευταία χρόνια, έχει γίνει πολύ δημοφιλής η χρήση του λογισμικού Abaqus για έργα σε οποιοδήποτε κλάδο της μηχανικής. Το εν λόγω λογισμικό χρησιμοποιείται και στην παρούσα διπλωματική εργασία. Ο σκοπός της χρήσης του είναι να μελετηθεί η σεισμική απόκριση του εδάφους, με έγκοιλα ή χωρίς, σε τρεις διαστάσεις, ενώ παράλληλα αλλάζουν διάφορες παράμετροι στο υλικό του εδάφους αλλά και στη γεωμετρία του.

3.2. 3Δ προσομοίωση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

3.2.1. Περιγραφή Abaqus

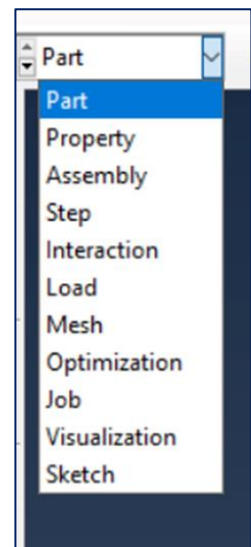
Το Abaqus είναι ένα λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων γενικής χρήσης για ανάλυση τάσεων δομών. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα σύνολο ισχυρών προγραμμάτων προσομοίωσης μηχανικής. Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, μπορούν να λυθούν προβλήματα που κυμαίνονται από πολύ απλές γραμμικές αναλύσεις έως τις πιο απαιτητικές μη γραμμικές προσομοιώσεις. Στο Abaqus περιέχετε μία μεγάλη βιβλιοθήκη στοιχείων, τα οποία δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να διαμορφώσει οποιαδήποτε γεωμετρία. Επίσης δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη που δεν είναι εξοικειωμένος με τον σχεδιασμό μέσω του προγράμματος αυτού, να σχεδιάσει ένα προσομοίωμα μέσω άλλου προγράμματος (όπως το Autocad) και έπειτα να το εισάγει στο Abaqus.

Η βασική έκδοση του Abaqus αποτελείται από τα εξής:

- Abaqus /CAE: Αποτελεί τον διαδραστικό προ-επεξεργαστή του Abaqus.
- Abaqus /Standard: Είναι ένας εκ των δύο επιλυτών του Abaqus.
- Abaqus / Explicit: Είναι ο δεύτερος επιλύτης του Abaqus.
- Abaqus / VIEWER: Αποτελεί τον διαδραστικό μετά-επεξεργαστή του Abaqus.

Το Abaqus διαιρείται σε ενότητες που ονομάζονται modules (Εικόνα 3.1). Η κάθε ενότητα περιέχει μόνο τα εργαλεία που σχετίζονται με τη διαδικασία προσομοίωσης. Οι ενότητες είναι οι παρακάτω:

- Part - Εισαγωγή «τμήματος» προσομοιώματος
- Property - Εισαγωγή δεδομένων (υλικό - γεωμετρία τμήματος)
- Assembly - Σύνδεση «τμημάτων» προσομοιώματος
- Step - Ορισμός είδους ανάλυσης - βημάτων ανάλυσης
- Interaction - Ορισμός δεσμεύσεων - αλληλεπιδράσεων
- Load - Εισαγωγή φορτίσεων - συνοριακών συνθηκών
- Mesh - Ορισμός διακριτοποίησης
- Job - Ορισμός εργασίας ανάλυσης
- Visualization - Επεξεργασία αποτελεσμάτων (Abaqus)
- Sketch- Σχεδιασμός



Εικόνα 3.1:
Ενότητες Abaqus.

3.2.2. Περιγραφή εδαφικών ιδιοτήτων

Για πολύ μικρές παραμορφώσεις που υφίστανται σε μικρούς σεισμούς, το έδαφος θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ελαστικά. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια μεγάλων σεισμών, το εδάφος συμπεριφέρεται μη γραμμική. Προς αποφυγή υπολογιστικά χρονοβόρων και δύσκολων ανελαστικών αναλύσεων, χρησιμοποιούνται συχνά ισοδύναμες γραμμικές μέθοδοι. Στην ελαστική ανάλυση στο Abaqus, πρώτα περιγράφεται το έδαφος με κάποιους ελαστικούς νόμους και στη συνέχεια προκύπτει η δυσκαμψία και η απόσβεση. Οι ελαστικές ιδιότητες ορίζονται από το μέτρο ελαστικότητας (E) και τον λόγο Poisson (ν).

Η σχέση τάσεων παραμορφώσεων δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\nu = \frac{1 - 2 \cdot \left(\frac{\nu_s}{\nu_p}\right)^2}{2 - 2 \cdot \left(\frac{\nu_s}{\nu_p}\right)^2} \quad (3.1)$$

Όπου το μέτρο ελαστικότητας δίνεται από τη σχέση:

$$E = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G \quad (3.2)$$

Το μέτρο διάτμησης G από τη σχέση:

$$G_{\max} = \rho \cdot V_S^2 \quad (3.3)$$

Όπου:

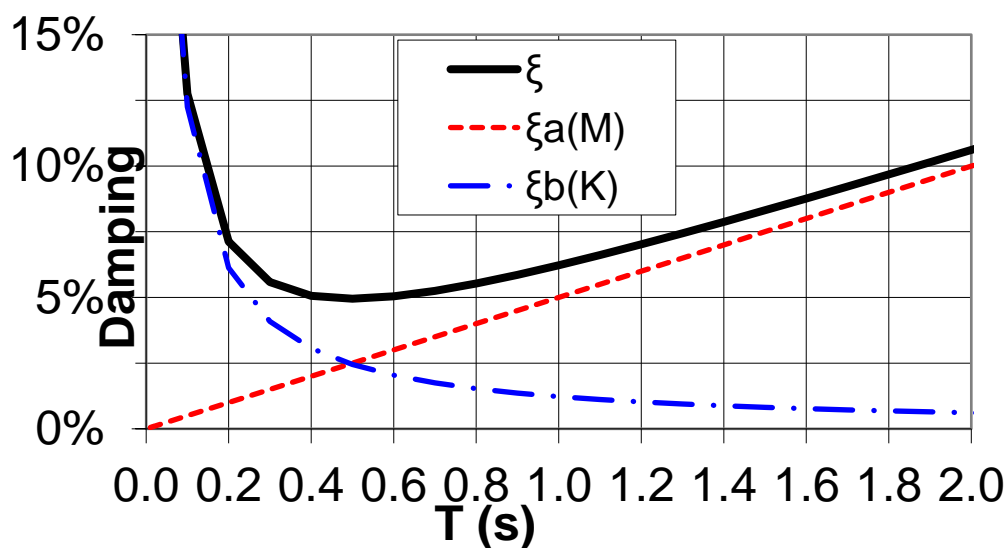
V_S : Η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων.

ρ : Η σχετική πυκνότητα του υλικού.

Η απόσβεση σε μια συγκεκριμένη συχνότητα ω δίνεται από τη σχέση:

$$\xi = \left(\alpha_1 \cdot \frac{\omega}{2} \right) + \left(\frac{\alpha_0}{2} \cdot \omega \right) \quad (3.4)$$

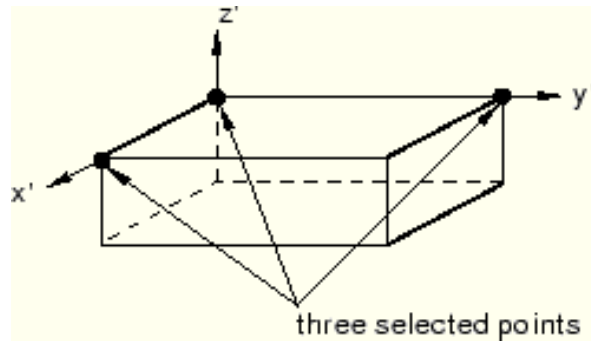
Ως συνδυασμός προσομοίωσης δυσκαμψίας και προσομοίωσης μάζας. Ο συντελεστής $\alpha_1 = \alpha$, υπολογίζεται με βάση την επιλογή απόσβεσης σε δύο συγκεκριμένες συχνότητες, που ορίζουν το εύρος συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί συντελεστής απόσβεσης 5%, ο οποίος φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Το εύρος ορίζεται από τις υψηλότερες και χαμηλότερες συχνότητες διέγερσης.



Διάγραμμα 3.1: Διάγραμμα ομαλοποιημένου λόγου απόσβεσης.

3.2.3. Μέθοδος διακριτοποίησης

Η μέθοδος διακριτοποίησης στο Abaqus, έχει διαθέσιμη μια ευρεία ποικιλία πεπερασμένων στοιχείων προς το χρήστη που διαχειρίζεται μια πολύπλοκη ανάλυση. Χρησιμοποιούνται συνεχή στερεά στοιχεία (C3D8R), για τη ρεαλιστική αναπαράσταση της εδαφικής κίνησης.



Εικόνα 3.2: Σύστημα συντεταγμένων xyz. Πηγή: (Abaqus/CAE User's Guide, 2016)

Θεωρώντας ότι τα πεπερασμένα στοιχεία λειτουργούν στο σύστημα συντεταγμένων xyz τότε ισχύει ότι:

$$\begin{bmatrix} u_x = u_x(x, y, z) \\ u_y = u_y(x, y, z) \\ u_z = u_z(x, y, z) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Όπου u_x , u_y , u_z είναι οι συνιστώσες του διανύσματος μετατόπισης u .

3.2.4. Προσομοίωση διάδοσης σεισμικών κυμάτων

Το μέγεθος των επιφανειακών στοιχείων που χρησιμοποιούνται καθορίζεται από τη μέγιστη συχνότητα των προσομοιωμένων σεισμικών κυμάτων. Στην πραγματικότητα, αυτή η παράμετρος ορίζει το ανώτερο όριο συχνοτήτων που μπορούν να διαδοθούν στην προσομοίωση. Στην περίπτωση αυτή, τα επιφανειακά στοιχεία μπορούν να έχουν μέγιστο μήκος μεταξύ 1/8 και 1/10 του μήκους κύματος που δημιουργείται από τη μέγιστη συχνότητα.

Αν T_u είναι η περίοδος που αντιστοιχεί στη συχνότητα του μεγαλύτερου ενδιαφέροντος και V_s η ταχύτητα του κύματος διάτμησης εδάφους, τότε το μήκος κύματος που διαδίδεται στο έδαφος είναι:

$$L_u = V_s \cdot T_u \quad (3.6)$$

Το μέγιστο μήκος του επιφανειακού στοιχείου που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση, βάση των παραπάνω είναι:

$$L_{max} = \frac{L_u}{10} \quad (3.7)$$

3.2.5. Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος

Σε μια τρισδιάστατη δυναμική ανάλυση, ένα σύνθετο πρόβλημα είναι η επιλογή των συνοριακών συνθηκών, καθώς και η σωστή προσομοίωση της απόσβεσης.

- Πλευρικές συνοριακές συνθήκες

Το Abaqus δεν υποστηρίζει συγκεκριμένες λειτουργίες για προσομοιώματα υπό συνθήκες ελεύθερου πεδίου. Συνήθως, στις τριδιάστατες δυναμικές αναλύσεις, οι εγκάρσιες συνοριακές συνθήκες προσαρτίζονται στην περίμετρο του προσομοιώματος ,προκειμένου να προσομοιωθεί βέλτιστα η απόσβεση υλικού καθώς και η γεωμετρική απόσβεση.

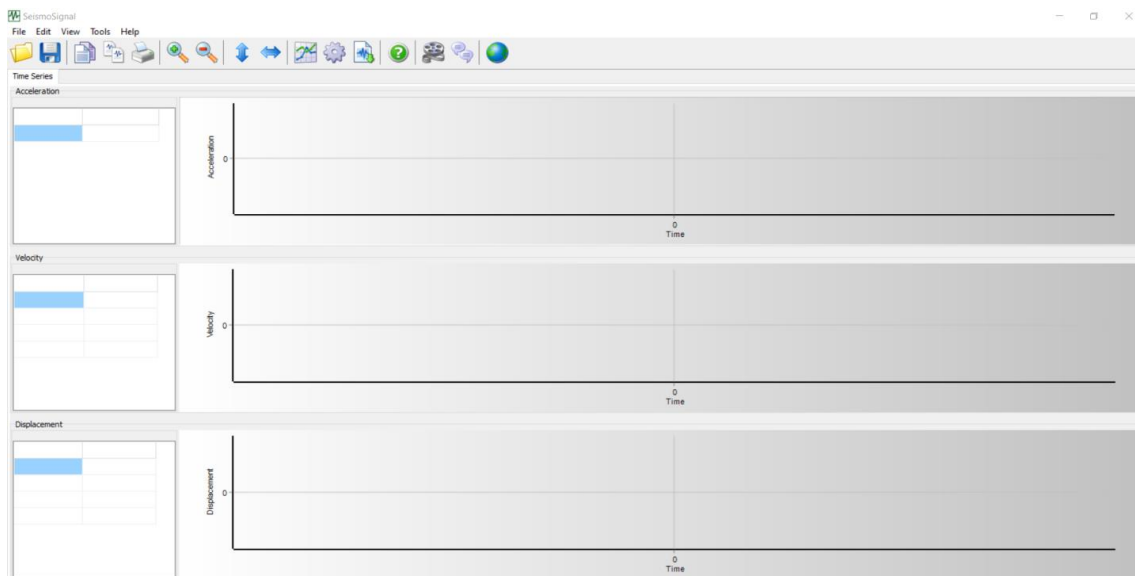
Σε αυτήν την εργασία, η προσομοίωση της συνθήκης ελεύθερου πεδίου πραγματοποιείται με κινηματικούς περιορισμούς στα πλευρικά όρια. Τα παραπάνω επιτρέπουν την οριζόντια και μη περιστροφική κίνηση, λύνοντας έτσι το πρόβλημα της διάδοσης των κυμάτων.

- Οριακές συνθήκες στη βάση του προσομοιώματος

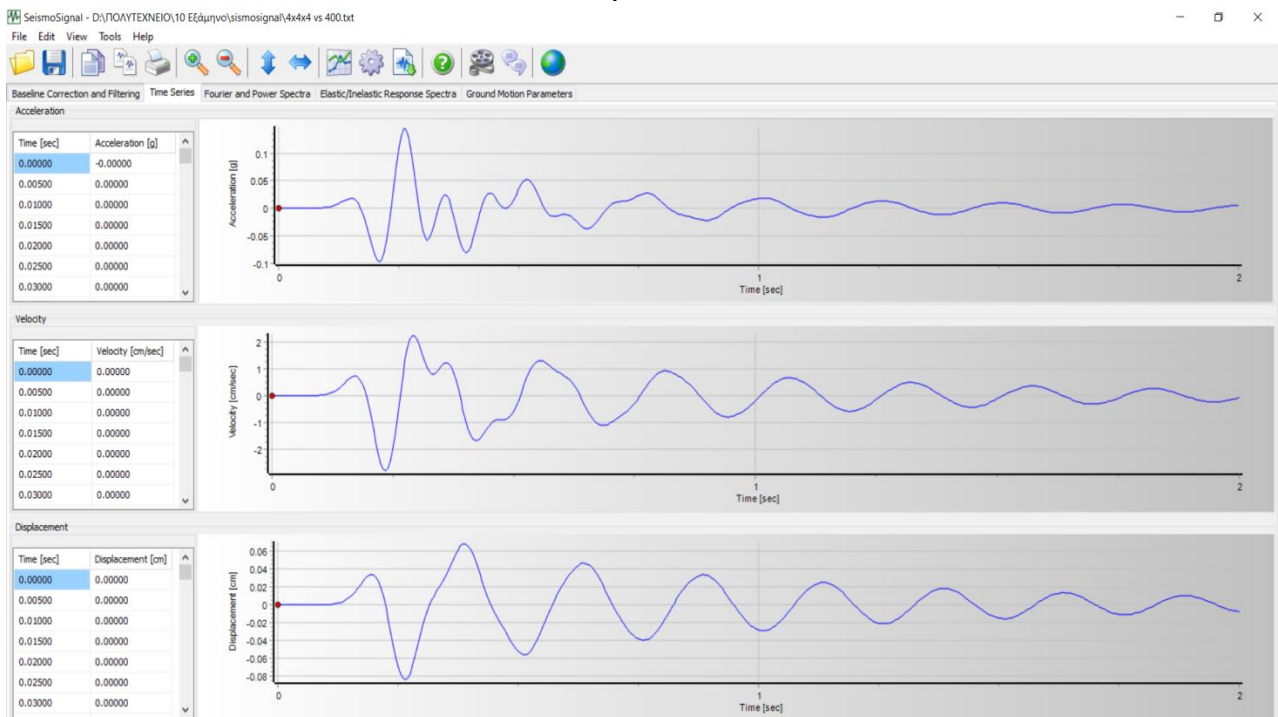
Στη βάση του προσομοιώματος εισάγονται όρια μέσω ορισμένων στοιχείων που εξυπηρετούν ως αποσβεστήρες και στις δυο συνιστώσες (οριζόντια και κατακόρυφη), προς αποφυγή πιθανών ανακλάσεων.

3.2.6. SeismoSignal

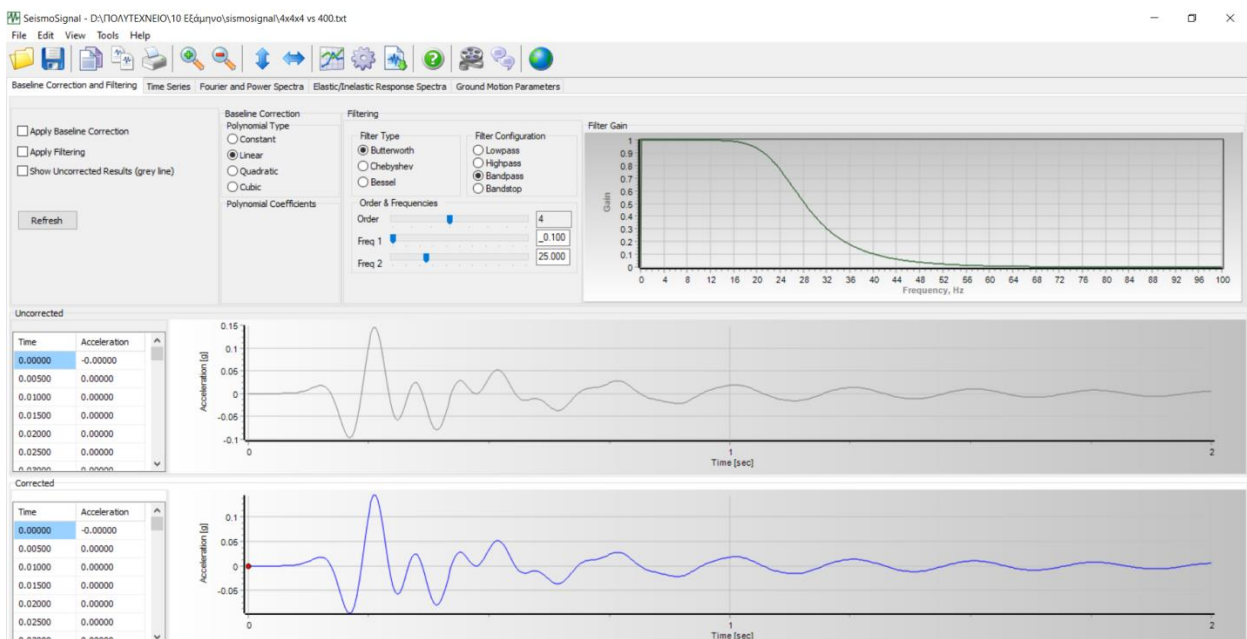
Το SeismoSignal αποτελεί έναν εύκολο και αποτελεσματικό τρόπο για την επεξεργασία σήματος δεδομένων ισχυρής κίνησης. Έχει φιλικό περιβάλλον γραφικών για τον χρήστη και είναι ικανό να εξάγει έναν αριθμό παραμέτρων ισχυρής κίνησης που απαιτούνται συχνά από δομοστατικούς μηχανικούς. Το λογισμικό είναι σε θέση να διαβάζει διαγράμματα επιτάχυνσης που είναι αποθηκευμένα σε διαφορετικές μορφές αρχείων κειμένου, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να φιλτραριστούν και να διορθωθούν στη γραμμή βάσης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολυώνυμα έως και 3ης τάξης για το τελευταίο, ενώ είναι διαθέσιμοι τρεις διαφορετικοί τύποι ψηφιακών φίλτρων, τα οποία μπορούν όλα να πραγματοποιήσουν φιλτράρισμα υψηλού και χαμηλού περάσματος.



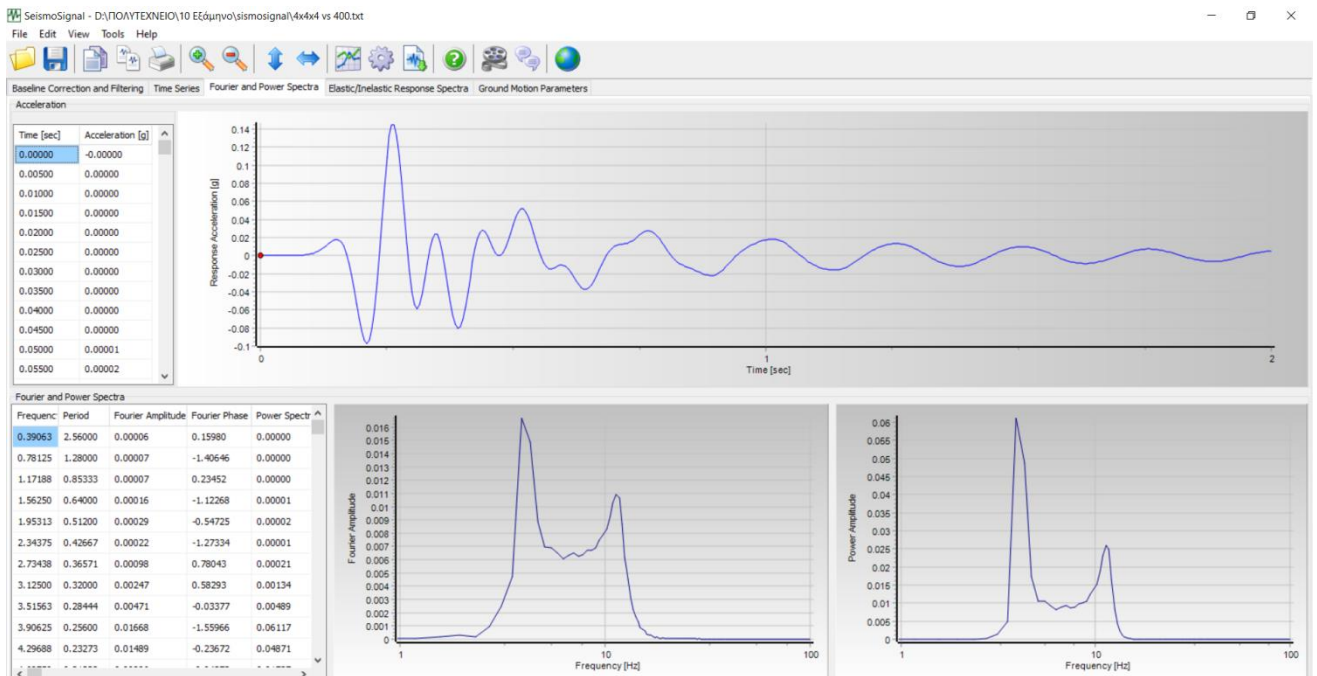
Εικόνα 3.3: Αρχική εικόνα όταν ενεργοποιείται το πρόγραμμα SeismoSignal.



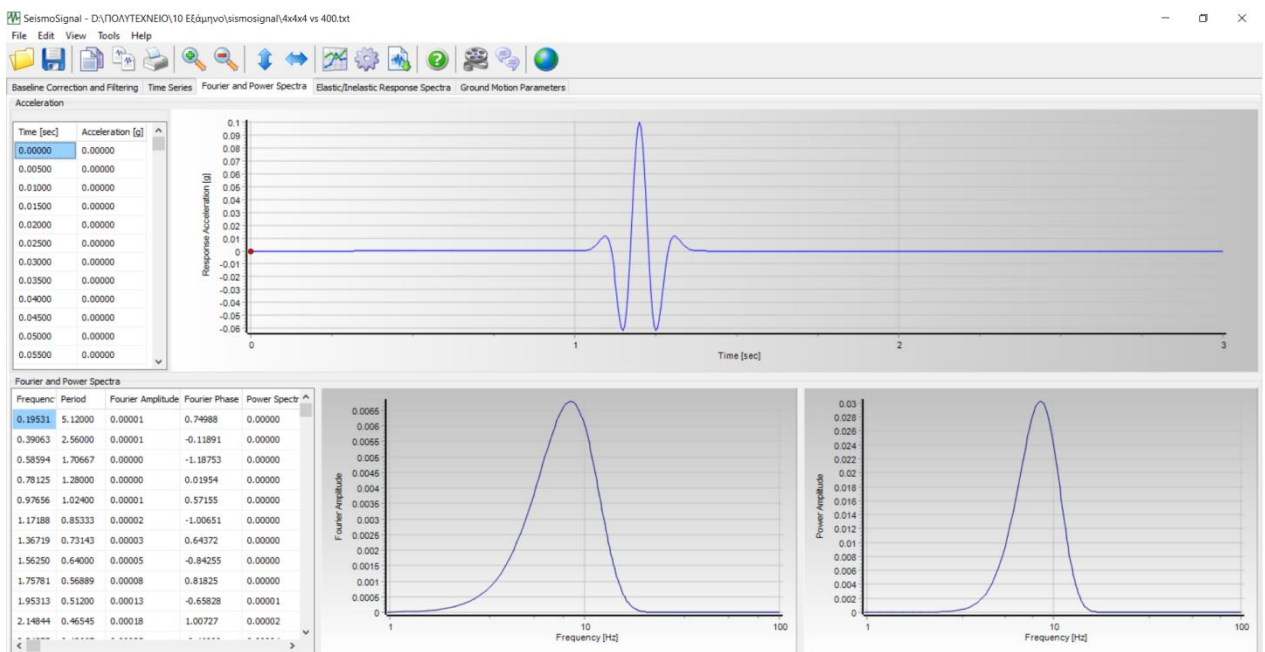
Εικόνα 3.4: Γραφήματα από SeismoSignal.



Εικόνα 3.5: Γραφήματα χρονιστοριών επιταχυνσεων από το SeismoSignal.



Εικόνα 3.6: Απεικόνιση φάσματος Fourier σε σημείο της κορυφής προσομοιώματος.



Εικόνα 3.7: Απεικόνιση φάσματος Fourier σε σημείο της βάσης προσομοιώματος

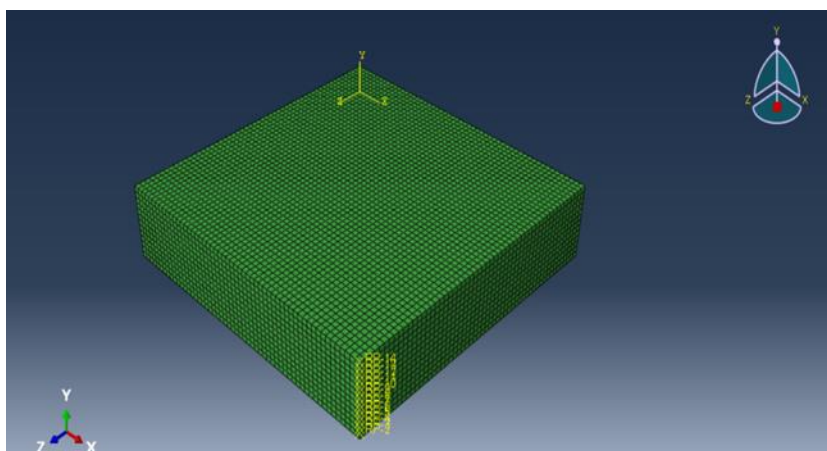
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Περιγραφή προσομοιωμάτων σε Abaqus & Seismosignal

4.1. Εισαγωγή για το Abaqus

Αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζει τη διαδικασία προσομοίωσης για την τριδιάστατη προσομοίωση που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση. Συνοπτικά:

- Διεξάγονται 3-Δ δυναμικές αναλύσεις με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.
- Γίνεται παλήθευση αριθμητικής διαδικασίας προσομοίωσης με την αναλυτική λύση για ημιτονειδή διέγερση σε συνθήκες συντονισμού 1-Δ εδαφικής στρώσης για απόσβεση $\xi=5\%$. Τιμή ανάλυσης \approx Θεωρητική τιμή \Rightarrow Αξιοπιστία προσομοίωσης, δυνατότητα εξέτασης πιο πολύπλοκων προσομοιωμάτων με έγκοιλα.
- Μετά την επαλήθευση γίνεται περιγραφή της παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφεται η γεωμετρία του εδάφους με κενά ή έγκοιλα, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι διεγέρσεις.
- Τέλος, η σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω φασμάτων Fourier των επιταχύνσεων που προκύπτουν από τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες με χρήση του λογισμικού SeismoSignal.



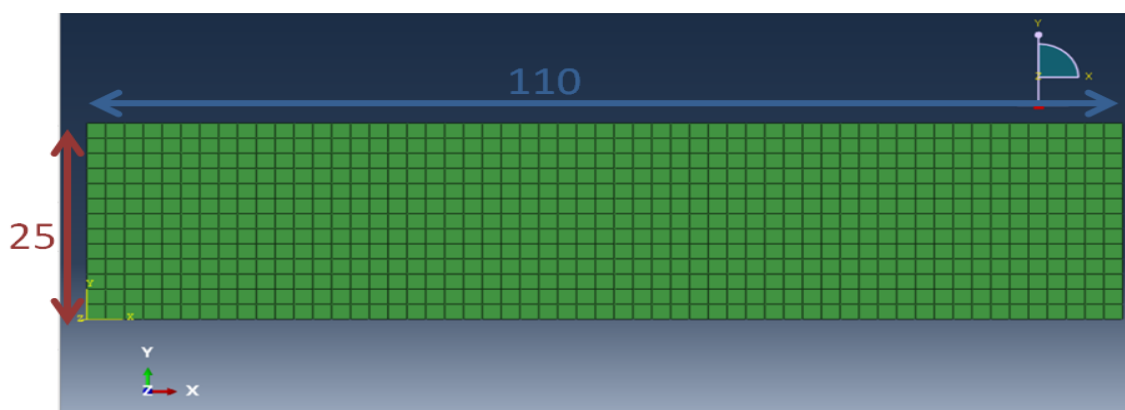
Εικόνα 4.1: Εδαφική στρώση.

4.2. Περιγραφή των παραμετρικών αναλύσεων

4.2.1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εδάφους

Για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης, μετά από δοκιμές επιλέχθηκαν οι κατάλληλες διαστάσεις της εδαφικής στρώσης, ώστε να γίνει ορθά η ανάλυση του φαινομένου. Η χρήση πολύ μεγάλης ή πολύ μικρής εδαφικής στρώσης, δεν δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα. Μετά από δοκιμές, επιλέχθηκε εδαφική στρώση διαστάσεων 110m x 110m x 25m. Γι' αυτές τις διαστάσεις εδαφικής στρώσης, εξετάστηκαν παραλλαγές της γεωμετρίας με προσθήκη κενού ή εγκοίλου διαφόρων διαστάσεων, στο κέντρο της στρώσης. Επίσης, το κενό μελετήθηκε για διάφορες περιπτώσεις και με υλικό πλήρωσης αντί να είναι κενό, ο σκοπός αυτής της δοκιμής ήταν να μελετηθεί, τι αλλαγές μπορεί να επιφέρει το κάθε υλικό πλήρωσης (πχ., μπάζωμα κενού).

Στη συνέχεια, και για να προκύψουν ολοκληρωμένα συμπεράσματα, έγινε μια ακόμη προσομοίωση για την περίπτωση όπου στην εδαφική στρώση των συγκεκριμένων διαστάσεων προστέθηκε τάφρος, καθώς κι ένα ή δύο υπόγεια έγκοιλα.



Εικόνα 4.2: Διαστάσεις εδαφικής στρώσης σε μέτρα.

Η παραμετρική διερεύνηση έγινε για τρεις περιπτώσεις εδάφους, με ίδιες διαστάσεις κάθε φορά (110m x 110m x 25m). Στους παρακάτω πίνακες 4.1-4.3, φαίνονται αναλυτικά οι ιδιότητες για κάθε περίπτωση εδάφους που διερευνήθηκε. Να αναφερθεί πως η απόσβεση και για τις 3 περιπτώσεις είναι 5%, όπως προέκυψε από το διάγραμμα της Εικόνας 4.2 και γενικά οι ιδιότητες του κάνναβου (μέγεθος, συναριακές συνθήκες, κ.α.) ήταν κοινές με το βασικό προσομοίωμα επαλήθευσης.

Εξετάστηκαν οι ακόλουθες περιπτώσεις υπεδάφους:

1η περίπτωση:

Για μαλακό εδαφικό σχηματισμό με ταχύτητα διατμητικών κυμάτων $V_s=200$ m/s, που αντιστοιχεί στην κατηγορία C του Ευρωκώδικα 8 (CEN, 2004). Η πυκνότητα του εδαφικού υλικού είναι $\rho=1,700$ kg/m³, το μέτρο ελαστικότητας είναι $E=163,2$ MPa, ενώ ο λόγος Poisson είναι $\nu=0,2$.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηρίστηκα εδαφικής στρώσης για την 1η περίπτωση προσομοίωσης.

Μαλακός εδαφικός σχηματισμός					
Ταχύτητα διατμητικών κυμάτων (V_s)	Κατηγορία Ευρωκώδικα	Πυκνότητα (ρ)	Μέτρο ελαστικότητας (E)	Λόγος Poisson (ν)	Απόσβεση
200 m/s	C του Ευρωκώδικα 8 (CEN, 2004)	1,700 kg/m ³	163,2 MPa	0,2	5%

2η περίπτωση:

Η πυκνότητα του εδάφους μεσαίας σκληρότητας είναι $\rho=1,900$ kg/m³, το μέτρο ελαστικότητας $E=760$ MPa, ο λόγος Poisson είναι $\nu=0,25$, οπότε προκύπτει ότι η ταχύτητα ισούται περίπου με $V_s=400$ m/s.

Πίνακας 4.2: Χαρακτηρίστηκα εδαφικής στρώσης για την 2^η περίπτωση προσομοίωσης.

Μεσαίας δυστημσίας εδαφικός σχηματισμός					
Ταχύτητα διατμητικών κυμάτων (V_s)	Κατηγορία Ευρωκώδικα	Πυκνότητα (ρ)	Μέτρο ελαστικότητας (E)	Λόγος Poisson (ν)	Απόσβεση
400 m/s	B του Ευρωκώδικα 8 (CEN, 2004)	1,900 kg/m ³	760MPa	0,25	5%

3η περίπτωση:

Η πυκνότητα του βραχώδους εδάφους είναι $\rho=2,200$ kg/m³, το μέτρο ελαστικότητας $E=3801,2$ MPa, ο λόγος Poisson είναι $\nu=0,35$, οπότε προκύπτει ότι η ταχύτητα ισούται περίπου με $V_s=800$ m/s.

Πίνακας 4.3: Χαρακτηρίστηκα εδαφικής στρώσης για την 3^η περίπτωση προσομοίωσης.

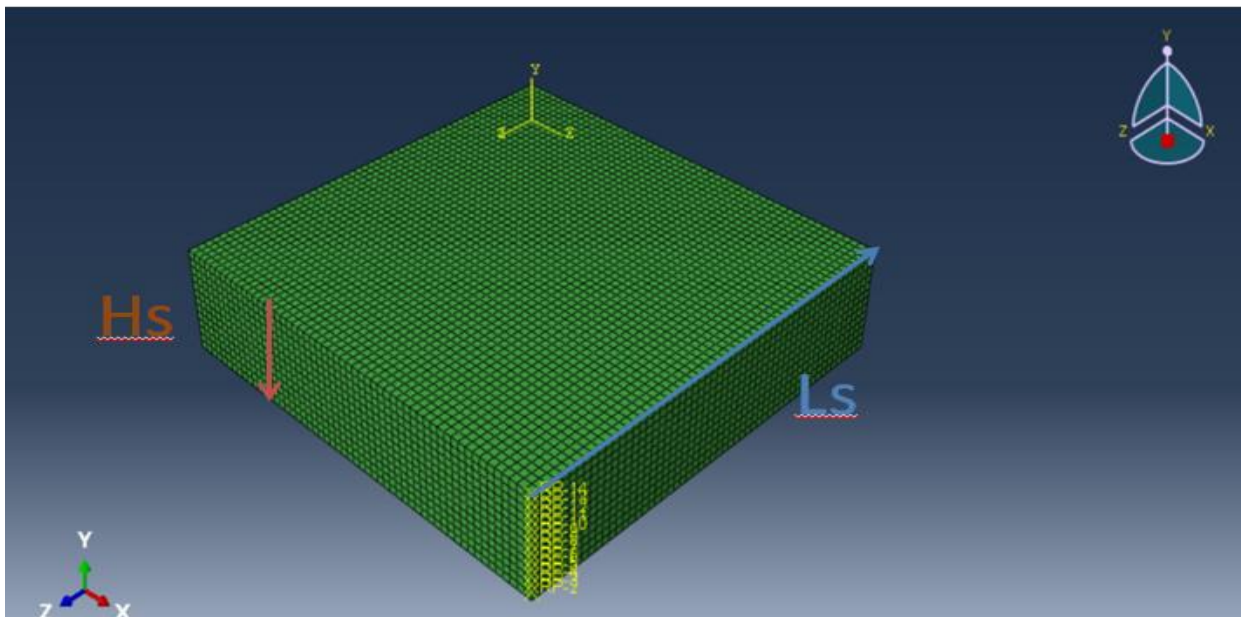
Βραχώδης εδαφικός σχηματισμός					
Ταχύτητα διατμητικών κυμάτων (Vs)	Κατηγορία Ευρωκώδικα	Πυκνότητα (ρ)	Μέτρο ελαστικότητας (E)	Λόγος Poisson (ν)	Απόσβεση
800 m/s	A του Ευρωκώδικα 8 (CEN, 2004)	2,200 kg/m ³	3801,2MPa	0,35	5%

Το πάχος της εδαφικής στρώσης είναι ίσο με 25m (Hs), το οποίο αντιστοιχεί σε ιδιοπερίοδο:

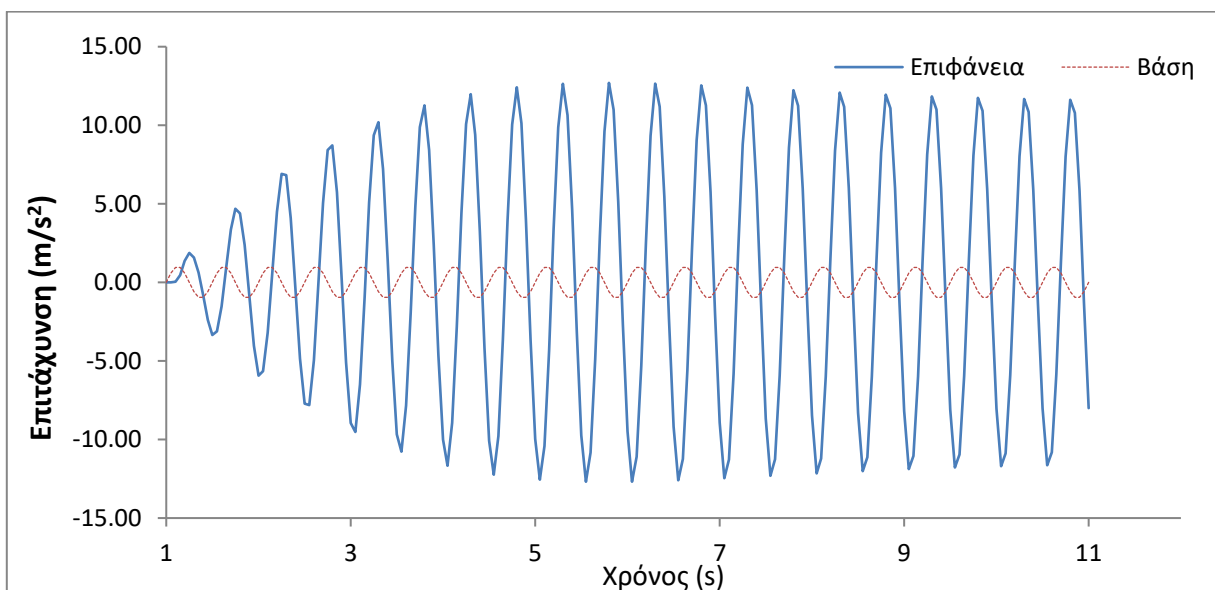
$$T = 4 \frac{H_s}{V_s} = 0,5 \text{ sec} \quad (4.1)$$

Το πλάτος του εδαφικού προσομοιώματος είναι ίσο με 110 m (Ls), ενώ το μέγεθος του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων είναι 2m, όπως αυτό φαίνεται και στην Εικόνα 3.3. Στη βάση του εδαφικού προσομοιώματος επιβάλλονται οι σεισμικές διεγέρσεις στον οριζόντιο άξονα, ενώ στα πλευρικά όρια είναι ελεύθερη η κίνηση στον κατακόρυφο άξονα. Ταυτόχρονα, σε κάθε επίπεδο καθ' ύψος του πλέγματος επιβάλλονται περιορισμοί τύπου «PIN» σε όλους τους εξωτερικούς πλευρικούς κόμβους για την αποφυγή ανάκλασης των σεισμικών κυμάτων (Sextos et al., 2017).

Πριν ολοκληρωθεί το τρέξιμο των προγραμμάτων, έγινε έλεγχος του εδάφους σε δύο στάδια: (α) επαλήθευση της αναλυτικής λύσης του συντελεστή ενίσχυσης και (β) έλεγχος επάρκειας των μη-ανακλώμενων οριζόντιων συνόρων. Αρχικά, επιβλήθηκε στους κόμβους της βάσης του εξεταζόμενου προσομοιώματος μια αρμονική διέγερση με θεμελιώδη περίοδο ίση με 0,5 sec. Η επαλήθευση απεικονίζεται στην Εικόνα 4.3, όπου ο μέγιστος συντελεστής ενίσχυσης επαληθεύει την αντίστοιχη αναλυτική λύση, από την οποία προκύπτει ότι $AF=2/\pi \xi \cong 12,7$ στην επιφάνεια της εδαφικής στρώσης. Δεν παρατηρούνται ανακλάσεις των σεισμικών κυμάτων στα σύνορα του αριθμητικού προσομοιώματος. Συνεπώς, οι υποθέσεις σχετικά με το μέγεθος του πλέγματος, τις διαστάσεις και τις συνοριακές συνθήκες του εδαφικού προσομοιώματος είναι ακριβείς.



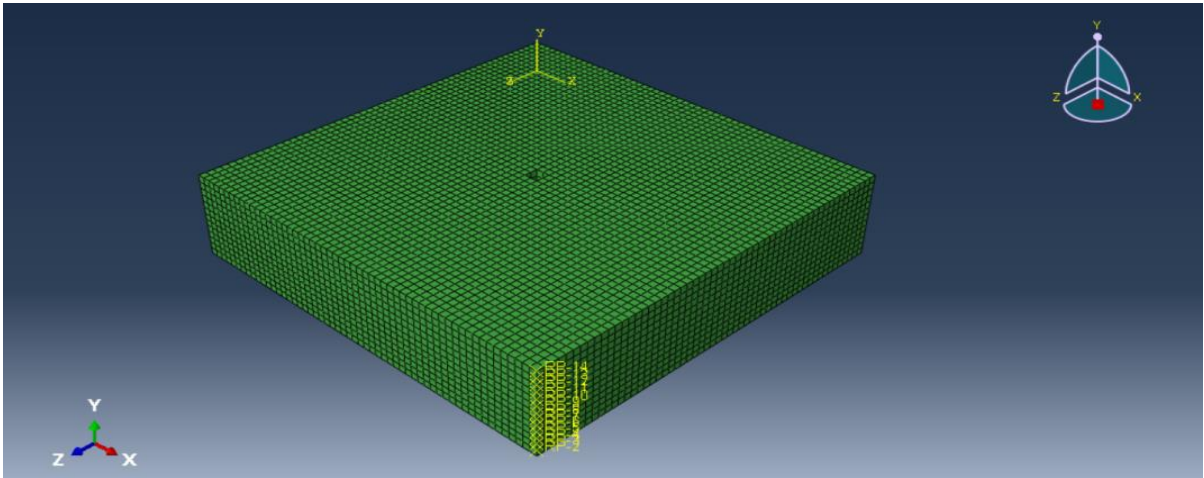
Εικόνα 4.3: Πάχος (H_s) και πλάτος (L_s) της εδαφικής στρώσης.



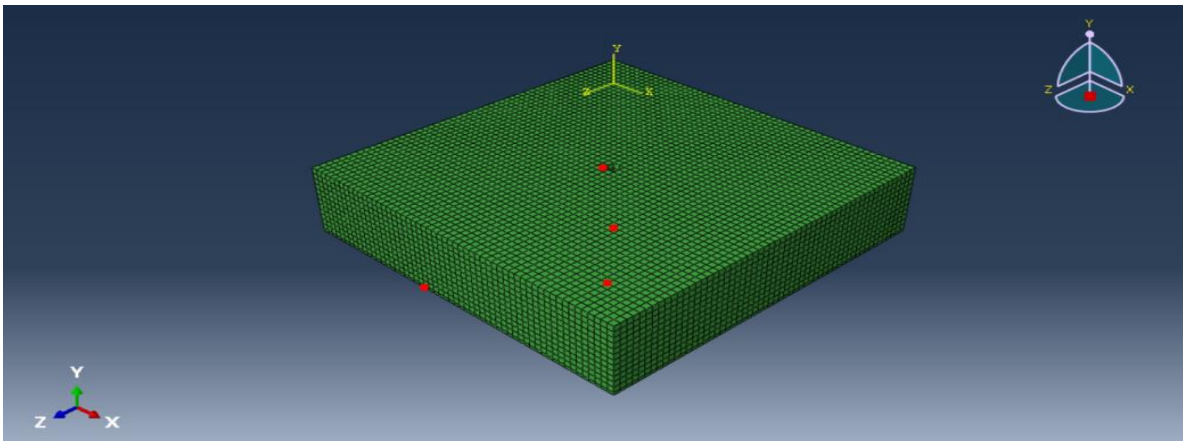
Διάγραμμα 4.1: Επίδραση του V_s για κενό διαστάσεων $4m \times 4m$ και βάθους $4m$

4.3. Γεωμετρίες προσομοιωμάτων

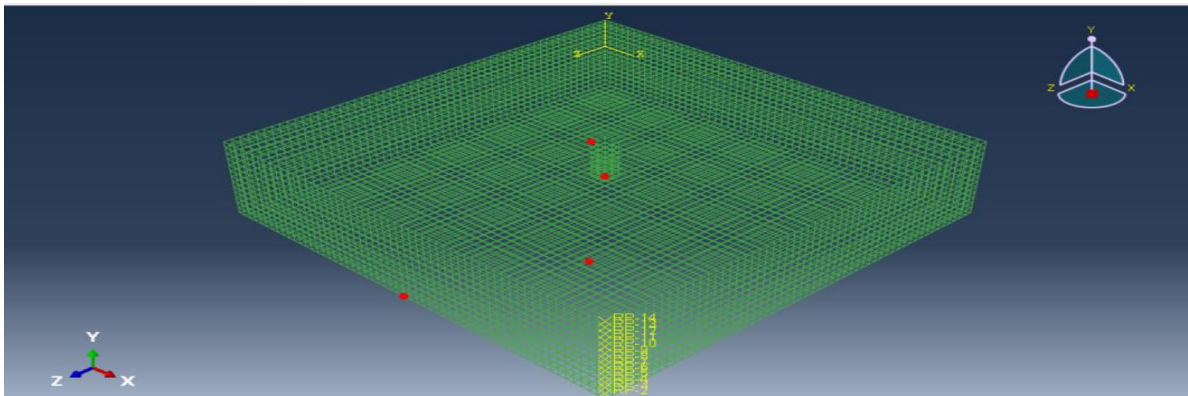
Αφού επαληθεύτηκε πώς η εδαφική στρώση με διέγερση ημιτόνου δίνει τα σωστά αποτελέσματα, στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν οι γεωμετρίες με κενό, τάφρο, σήραγγα και ένα ή δύο έγκοιλα.



Εικόνα 4.4:Απεικόνιση κενού διαστάσεων $4m \times 4m \times 4m$.



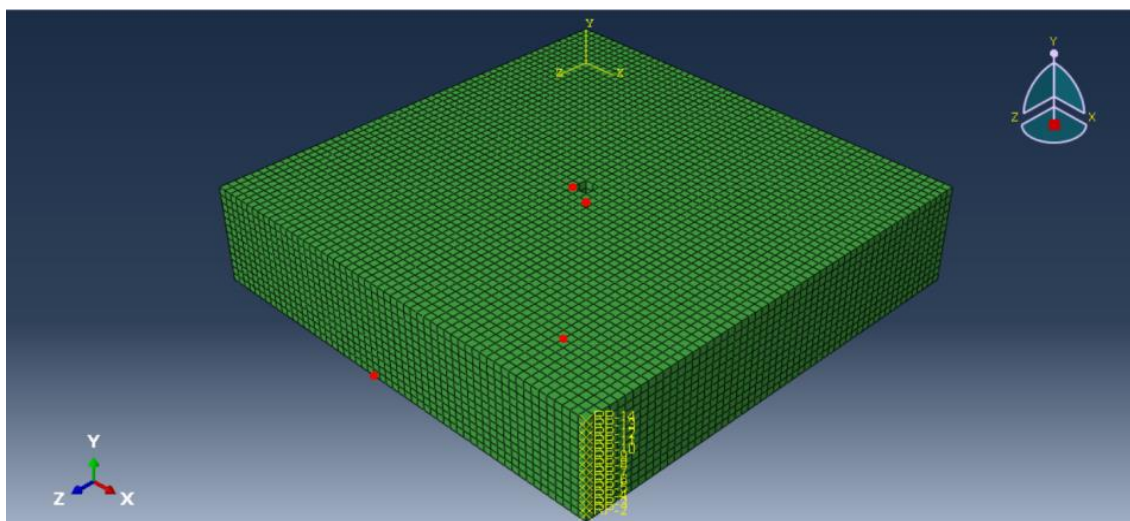
Εικόνα 4.5:Απεικόνιση σημείων δειγματοληψίας κενού διαστάσεων $4m \times 4m \times 4m$.



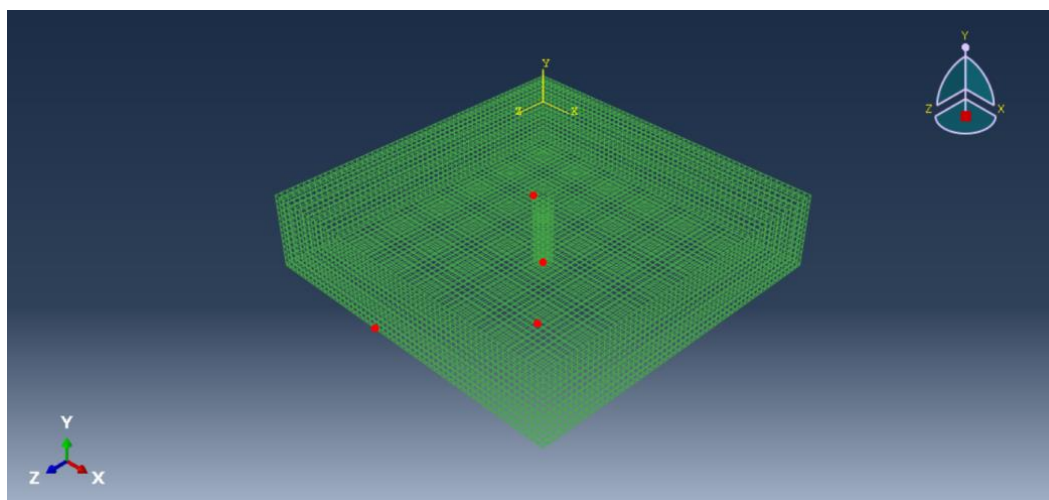
Εικόνα 4.6:Απεικόνιση σημείων δειγματοληψίας κενού διαστάσεων $4m \times 4m \times 4m$, με απεικόνιση και του ύψους.

Προς επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων καταγράφονται οι ενδείξεις από τέσσερα σημεία στο κενό. Η πρώτη ένδειξη είναι στη βάση, ώστε να ελεγχθεί ότι το προσομοίωμα δεν αντιμετωπίζει κάποιο πρόβλημα. Η επόμενη ένδειξη είναι στην επιφάνεια του κενού, όπου αυτή καθώς και η πρώτη ένδειξη αποτελούν τις σημαντικότερες τιμές. Ακόμη τοποθετήθηκε ένα μακρινό σημείο στην επιφάνεια του εδάφους, ώστε να ελεγχθεί αν υπάρχουν μεταβολές μεταξύ αυτού και του σημείου που είναι δίπλα από το κενό.

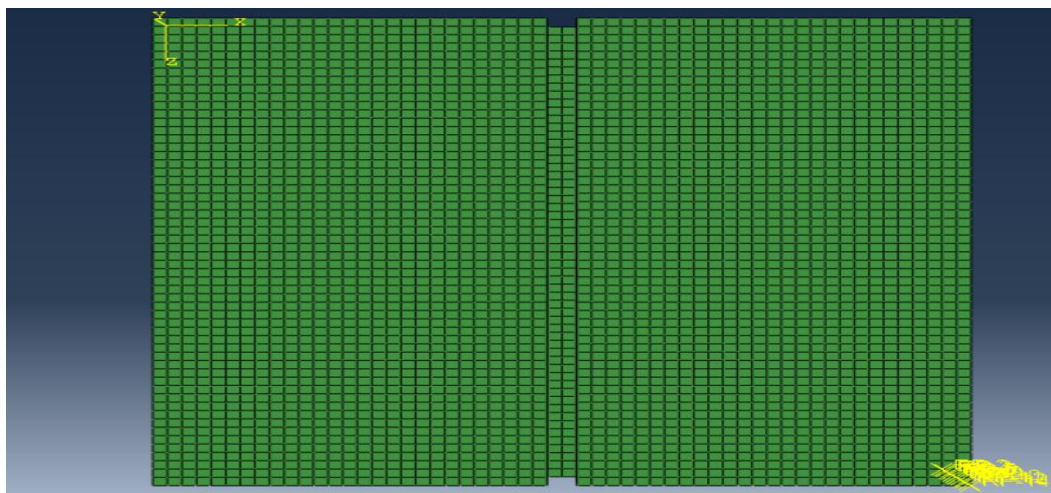
Τα ίδια σημεία ελέγχθηκαν για όλα τα προσομοιώματα των κενών με διαφορετικό βάθος, το σημείο στη βάση του κενού μετακινείται ανάλογα στον πυθμένα του εκάστοτε κενού.



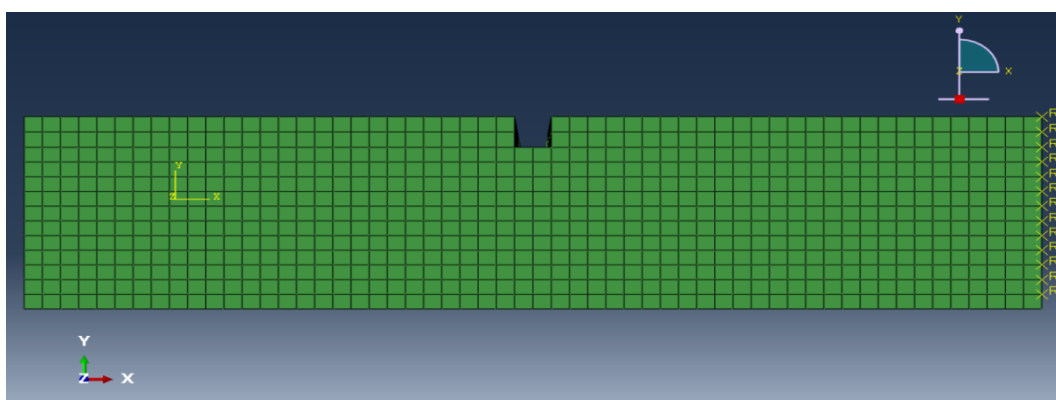
Εικόνα 4.7:Απεικόνιση σημείων δειγματοληψίας κενού διαστάσεων 4m x 4m x 24m.



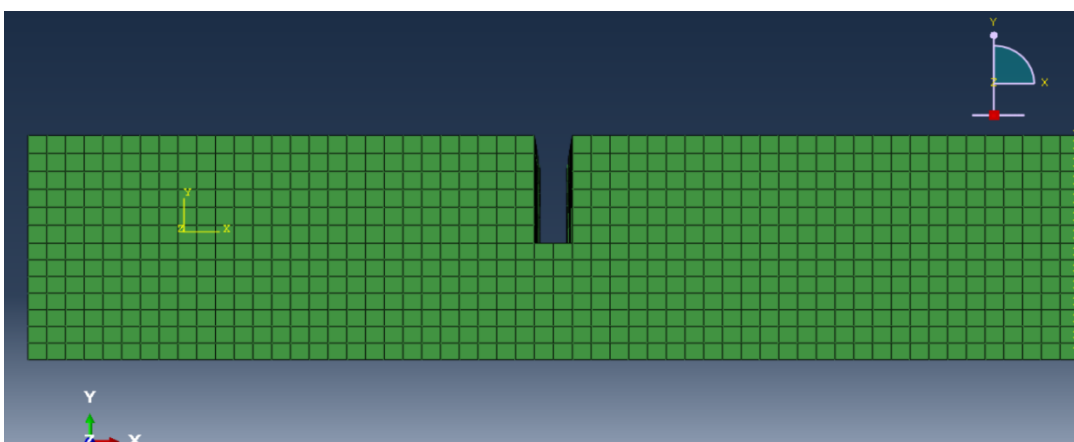
Εικόνα 4.8:Απεικόνιση σημείων δειγματοληψίας κενού διαστάσεων 4m x 4m x 24m.



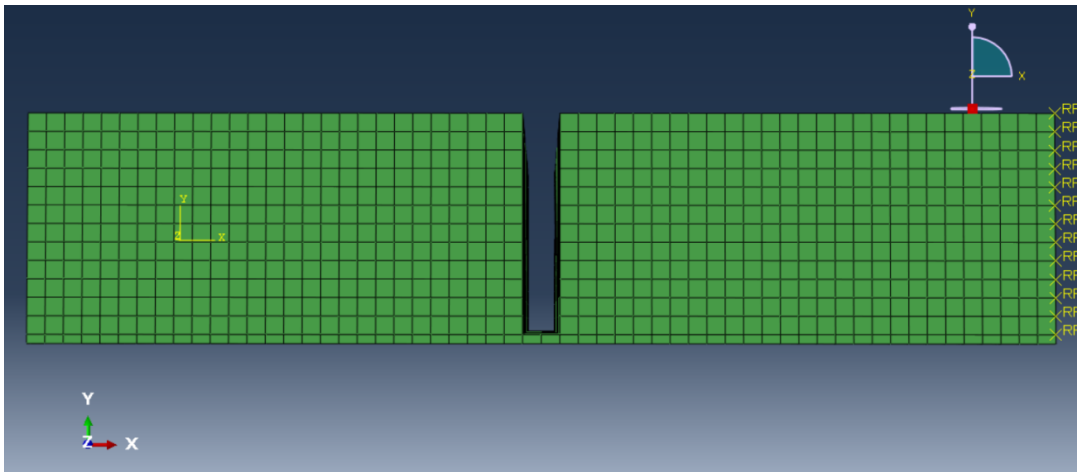
Εικόνα 4.9:Πλάγια απεικόνιση τάφρου διαστάσεων $4m \times 110m \times 4m$.



Εικόνα 4.10:Πλάγια απεικόνιση τάφρου διαστάσεων $4m \times 110m \times 4m$



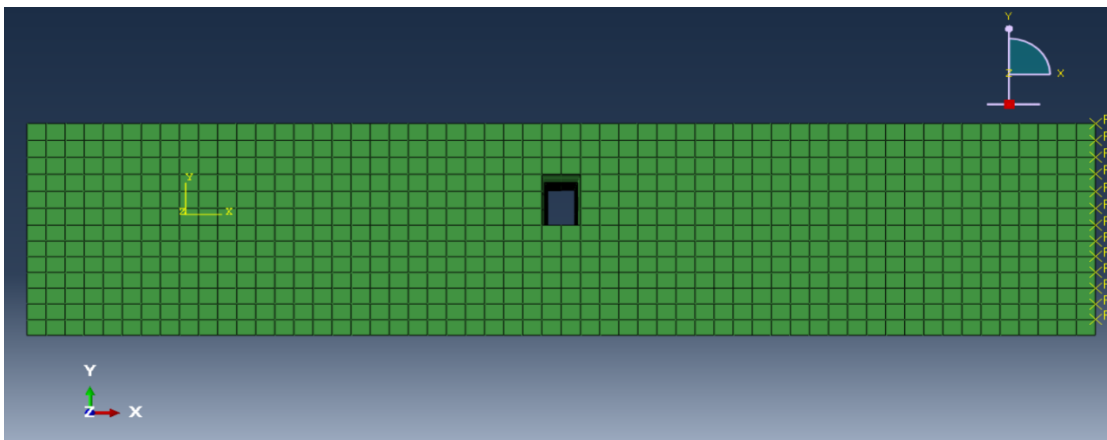
Εικόνα 4.11:Πλάγια απεικόνιση τάφρου διαστάσεων $4m \times 110m \times 12m$.



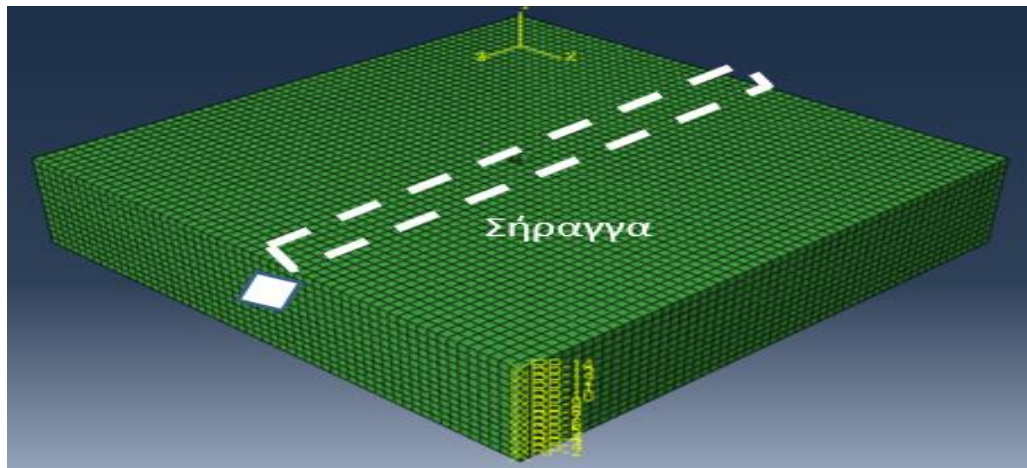
Εικόνα 4.12:Πλάγια απεικόνιση τάφρου διαστάσεων 4mX110mX24m.

Τα προσομοιώματα της τάφρου έχουν δημιουργηθεί με τομή σε όλο το μήκος του εδάφους. Τα σημεία που έγινε η συλλογή των δεδομένων είναι η βάση εδάφους, η βάση τάφρου, η άκρη της τάφρου και ένα μακρινό σημείο στην επιφάνεια του εδάφους.

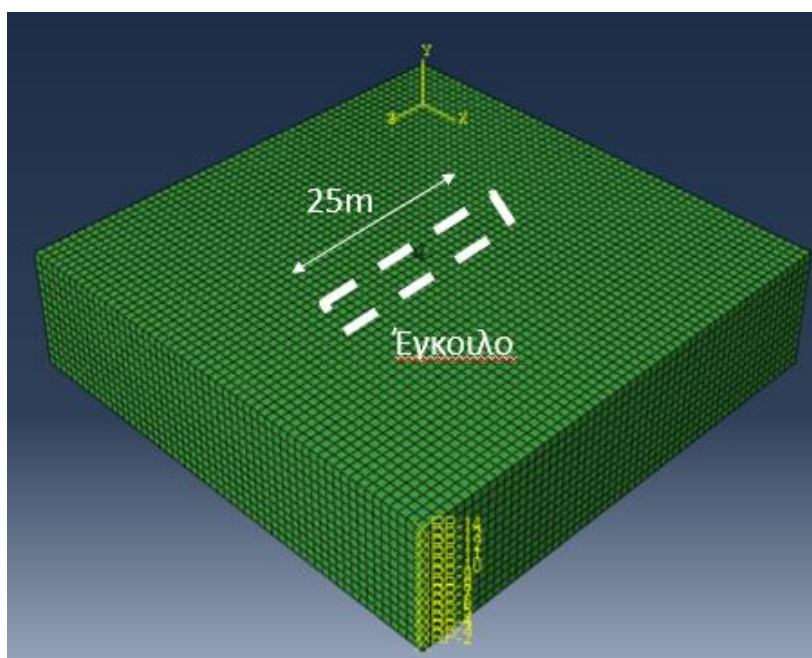
Η σήραγγα έχει την ίδια εδαφική σύσταση περιμετρικά του κενού, στο οποίο έγιναν η μετρήσεις στα ίδια σημεία με τα προηγούμενα προσομοιώματα. Αντίστοιχα, σημεία χρησιμοποιήθηκαν και στα προσομοιώματα με ένα ή και δύο έγκοιλα το ένα κάτω από το άλλο, δηλαδή ενός εγκοίλου 4mX6m και μήκους 25m σε βάθος 6m και δύο εγκοίλων 4mX6m και μήκους 25m σε βάθος 6m και μεταξύ τους απόσταση καθ' ύψος 6m.



Εικόνα 4.13:Πλάγια απεικόνιση σήραγγας διάστασης 4mX110mX6m.



Εικόνα 4.14: Απεικόνιση σήραγγας διάστασης $4\text{m} \times 110\text{m} \times 6\text{m}$

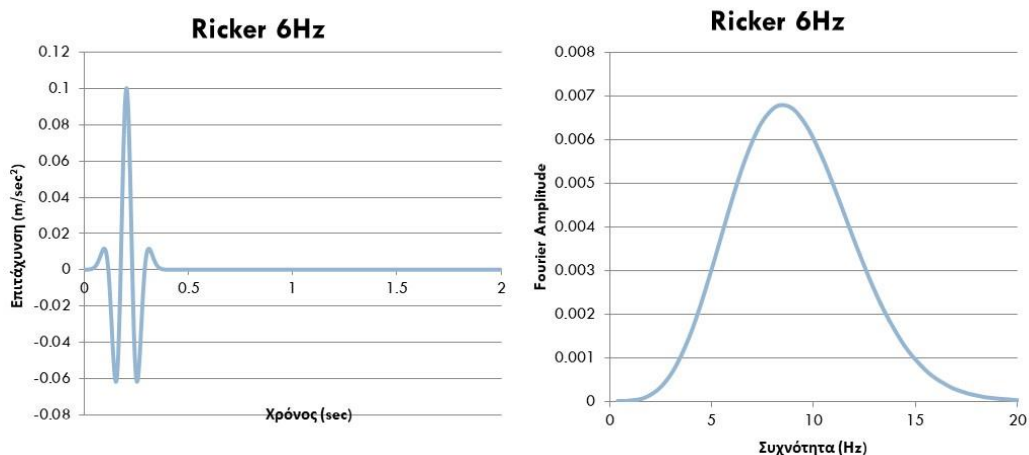


Εικόνα 4.15: Εδαφική στρώση με έγκοιλο σε βάθος 6m

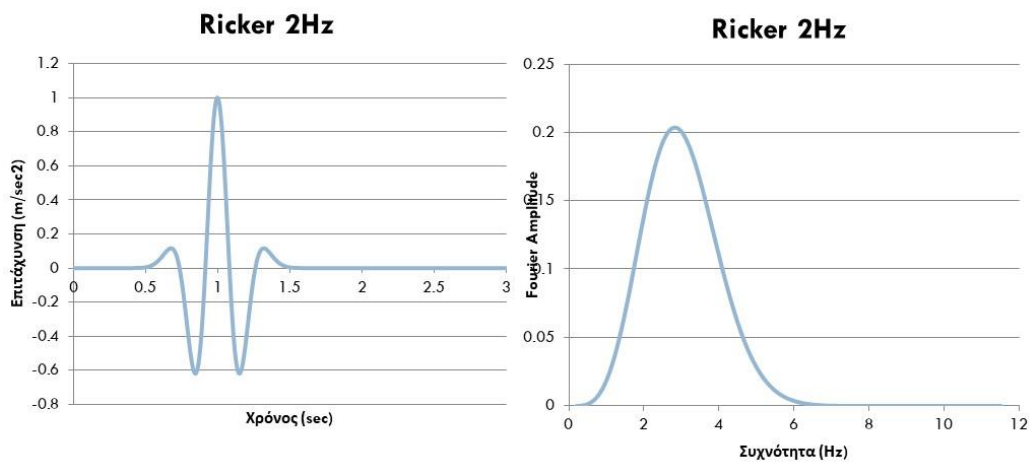
4.4. Διεγέρσεις προσομοιωμάτων

Όπως προαναφέρθηκε αρχικά επαληθεύτηκε η εδαφική στρώση με διέγερση ημιτόνου, στη συνέχεια στη βάση της κάθε γεωμετρίας επιβάλλονται πιο σύνθετες διέγερσης, πάλι με απόσβεση Rayleigh 5%. Συγκεκριμένα, για την αριθμητική ανάλυση των εξεταζόμενων συστημάτων χρησιμοποιήθηκαν διεγέρσεις παλμών Ricker με κεντρική συχνότητα 2Hz

(βραχύσυχνος) και 6 Hz (υψίσυχνος), οι οποίοι διαθέτουν το κατάλληλο συχνοτικό περιεχόμενο για τα υπό εξέταση προβλήματα (αλλά και για τις υπερκείμενες συνήθειες κτιριακές κατασκευές).



Εικόνα 4.16:Χρονοϊστορία και φάσματα διέγερσης Ricker 6Hz.



Εικόνα 4.17:Χρονοϊστορία και φάσματα διέγερσης Ricker 2Hz.

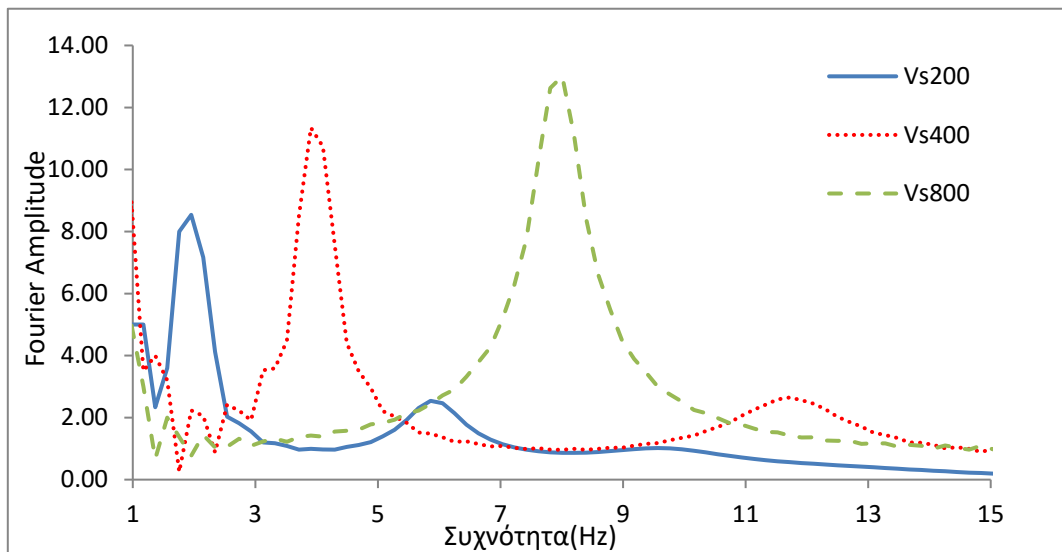
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αποτελέσματα παραμετρικής διερεύνησης

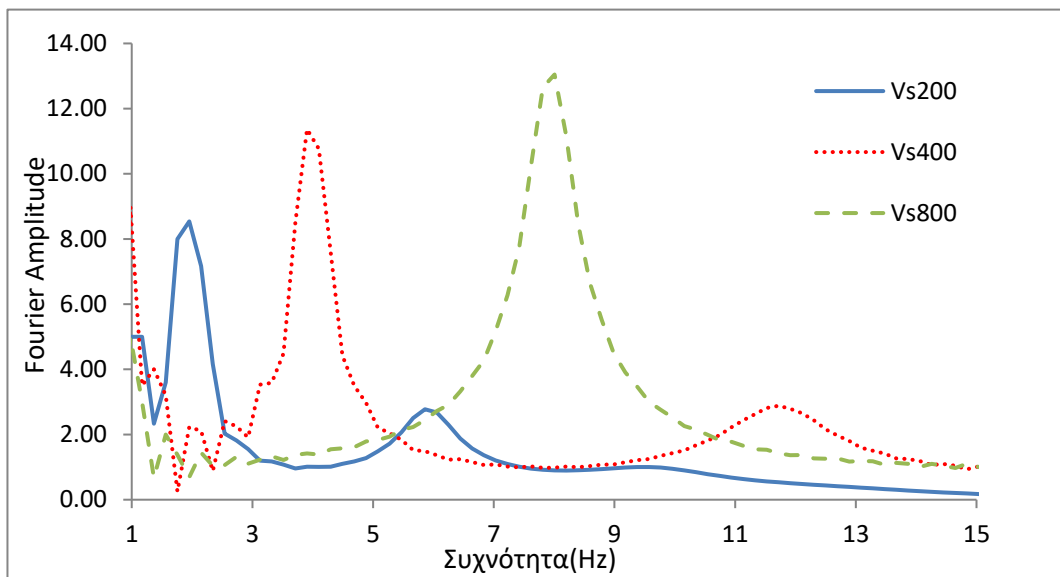
Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η αριθμητική προσομοίωση εφαρμόστηκε σε μία επιφανειακή στρώση πάχους $H=25\text{ m}$ με τρία διαφορετικά είδη υλικού εδάφους, μαλακό (C κατηγορίας κατά Ευρωκώδικα 8), μεσαίος δυστησίας (B κατηγορίας κατά Ευρωκώδικα 8) και βραχώδες (A κατηγορίας κατά Ευρωκώδικα 8) με V_s ίσο με 200m/s, 400m/s και 800m/s αντίστοιχα για κάθε είδος εδάφους. Η εδαφική στρώση έχει διαστάσεις 110mX110mX25m και κατάλληλες συνοριακές συνθήκες και περίοδο $T=4Hs/V_s$. Στην παραμετρική διερεύνηση εξετάστηκαν πέντε περιπτώσεις. Αρχικά μελετήθηκε η επίδραση του κραδασμού στην επιφάνεια με ύπαρξη κενών 4mX4m με βάθος: 4m, 12m, 24m, με ή χωρίς μαλακό υλικό πλήρωσης. Επίσης, εξετάστηκε η επίδραση στην ύπαρξη επιφανειακής τάφρου πλάτους 4m με βάθος: 4m, 12m, 24m, καθώς και η ύπαρξη συνεχούς σήραγγας 4mX6m σε βάθος 6m. Τέλος, ελέγχθηκε και η επίδραση που μπορεί να έχει η ύπαρξη ενός εγκοίλου 4mX6m και μήκους 25m σε βάθος 6m ή δύο εγκοίλων 4mX6m και μήκους 25m σε βάθος 6m και μεταξύ τους απόσταση καθ' ύψος 6m.

Επίδραση ύπαρξης επιφανειακού κενού:

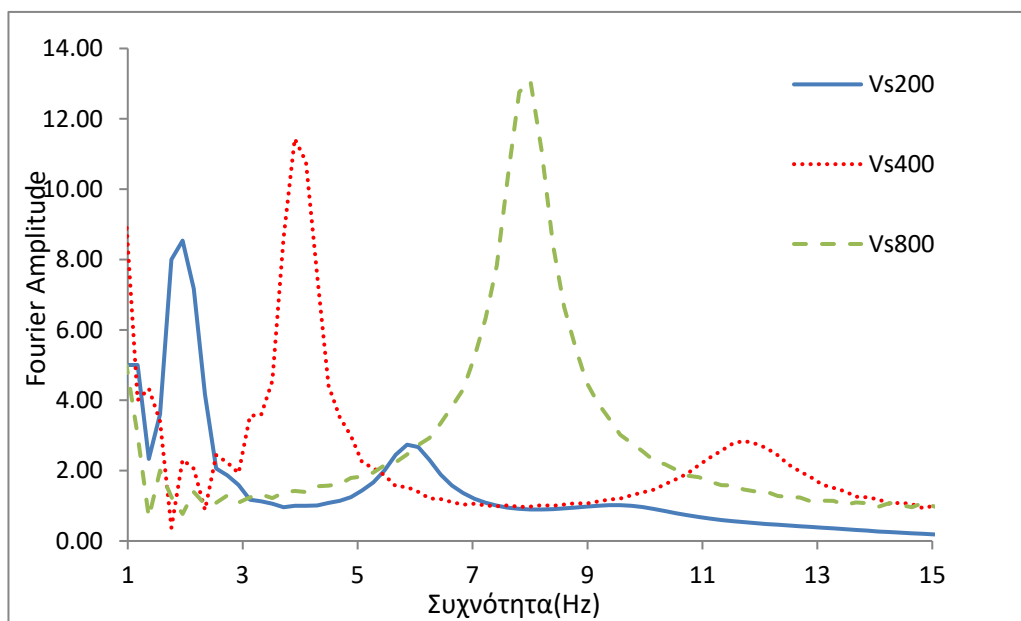
Ελέγχοντας τη συνθήκη, διαφορετικών τιμών για ταχύτητα εδάφους (V_s), σε τρεις περιπτώσεις κενών, με διαφορετικά βάθη (4m, 12m, 24m) και ίδιες τις άλλες διαστάσεις (4mX4m), προέκυψαν τα παρακάτω φάσματα. Παρατηρείται μείωση της μέγιστης φασματικής τιμής αλλά και της συχνότητας της, δηλαδή μετατόπιση του μέγιστου προς τα αριστερά στα μαλακότερα εδάφη και για τα τρία βάθη.



Διάγραμμα 5.1: Επίδραση του V_s για κενό διαστάσεων 4m x 4m και βάθους 4m



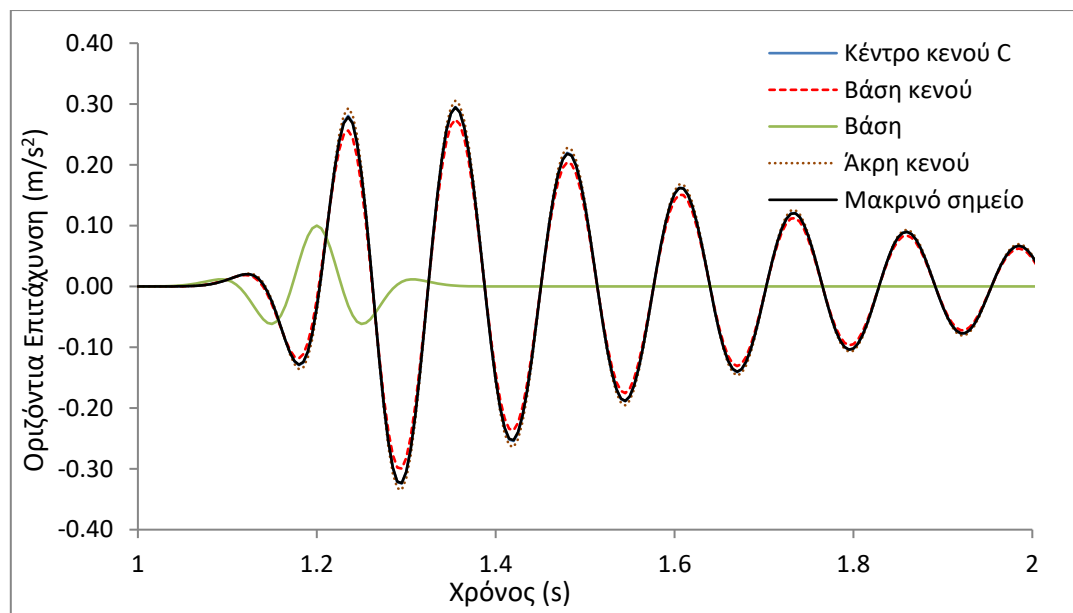
Διάγραμμα 5.2: Επίδραση του Vs για κενό διαστάσεων 4m x 4m και βάθους 12m.



Διάγραμμα 5.3: Επίδραση του Vs για κενό διαστάσεων 4m x 4m και βάθους 24m.

Επίδραση του υλικού πλήρωσης σε κενό:

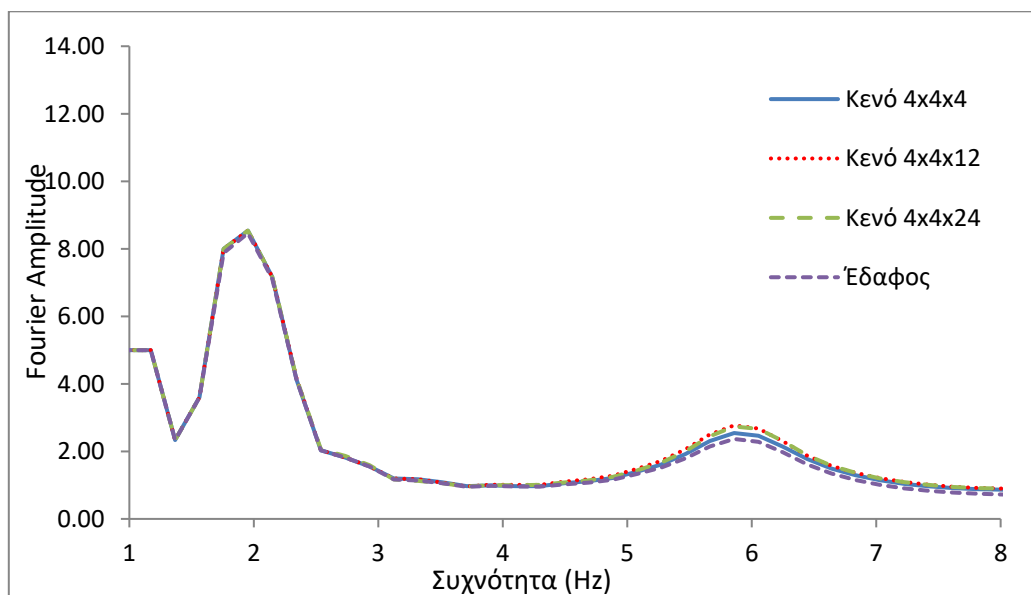
Έγινε έλεγχος και της περίπτωσης που υπάρχει κενό και πληρώνεται με υλικό διαφορετικού Vs από αυτό που έχει το έδαφος που εξετάζεται. Στη συγκεκριμένη περίπτωση εξετάζεται έδαφος κατηγορίας A με Vs 800m/s και υλικό πλήρωσης κατηγορίας C με Vs 200m/s. Αυτό που προκύπτει από τις χρονοϊστορίες επιταχύνσεων όταν έχουμε οριζόντια διέγερση είναι ότι το υλικό πλήρωσης δεν διαφοροποιεί ιδιαίτερα την απόκριση στην επιφάνεια του κενού, καθώς σχεδόν ταυτίζεται με αυτήν στην επιφάνεια του βραχώδους ανάγλυφου παραπλεύρως του κενού.



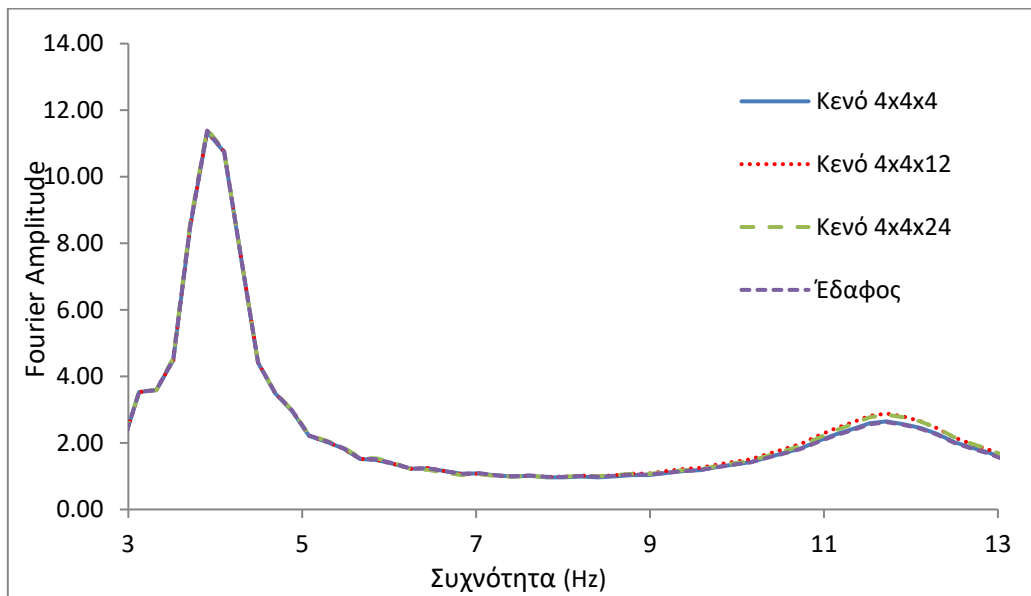
Διάγραμμα 5.4: Επίδραση του υλικού πλήρωσης για κενό διαστάσεων 4m x 4m και βάθους 4m

Επίδραση του μεταβαλλόμενου βάθους κενού:

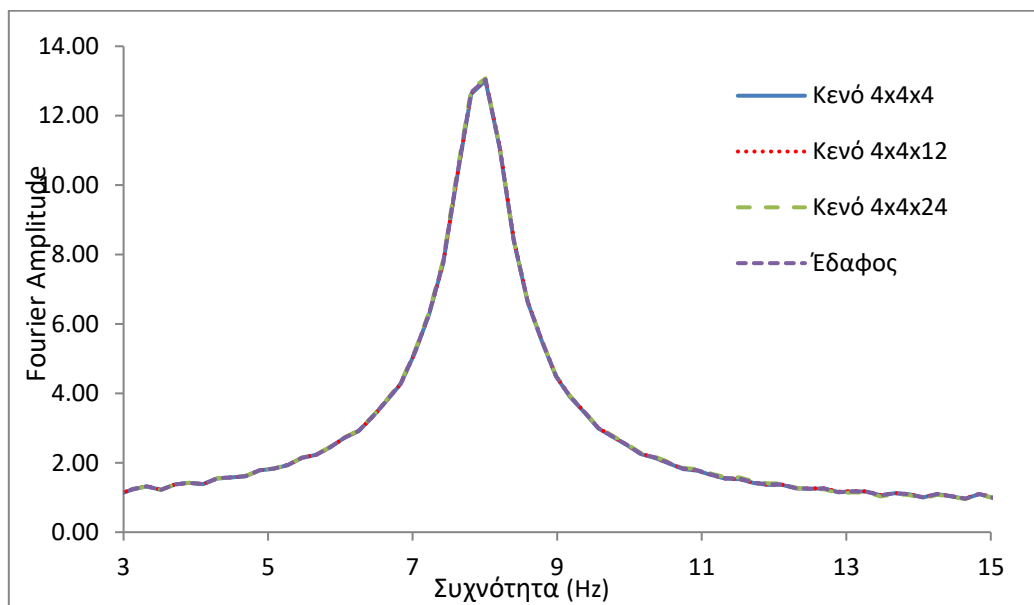
Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τα τρία διαγράμματα 5.14-5.16, με κατηγορίες εδάφους για V_s 200 m/s, 400 m/s και 800 m/s (C, B και A, αντίστοιχα). Σε όλα τα κενά ανεξαρτήτως βάθους και V_s , δεν μεταβάλλονται οι τιμές τους συγκριτικά με το εκάστοτε έδαφος. Σε κάθε περίπτωση, η ταχύτητα V_s είναι αυτή που επηρεάζει τη μεταβολή της μέγιστης τιμής του φασματικού πλάτους και τη συχνότητα εμφάνισης της.



Διάγραμμα 5.5: Έδαφος και κενά V_s 200 m/s.



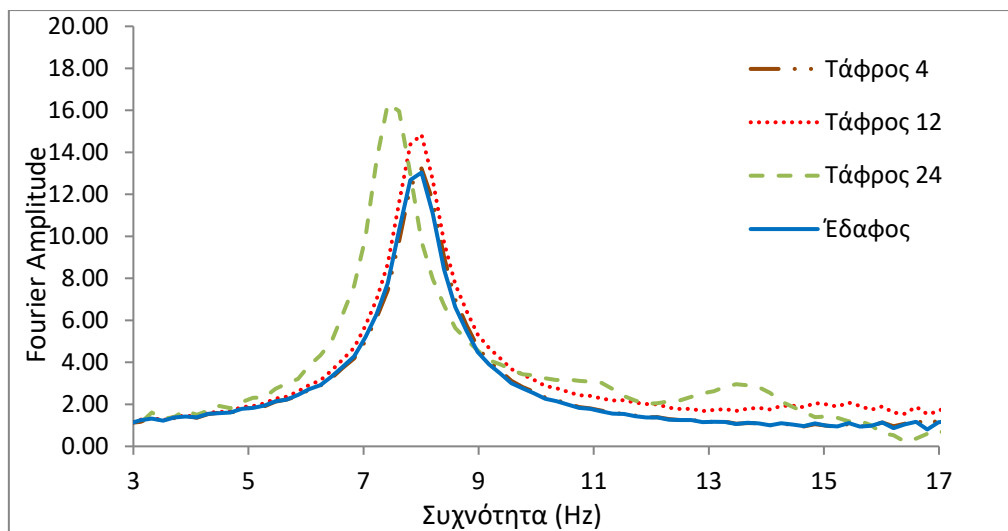
Διάγραμμα 5.6: Έδαφος και κενά V_s 400 m/s.



Διάγραμμα 5.7: Έδαφος και κενά V_s 800m/s.

Επίδραση ύπαρξης τάφρου:

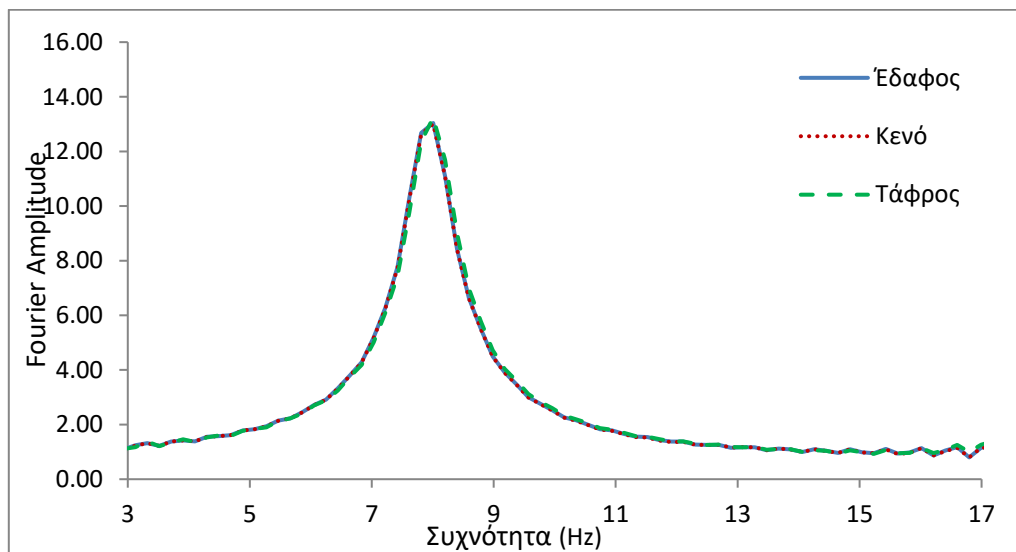
Στην περίπτωση τάφρου σε βραχώδες υπέδαφος, κατηγορίας Α Ευρωκώδικα 8, παρατηρείται αύξηση του πλάτους του φάσματος Fourier, όσο αυξάνεται το βάθος της τάφρου. Επίσης, παρατηρείται μείωση της συχνότητας της μέγιστης τιμής, δηλαδή μετατόπιση του μέγιστου προς τα αριστερά. Για μικρά βάθη και μαλακά εδάφη δεν παρατηρείται ιδιαίτερη μεταβολή.



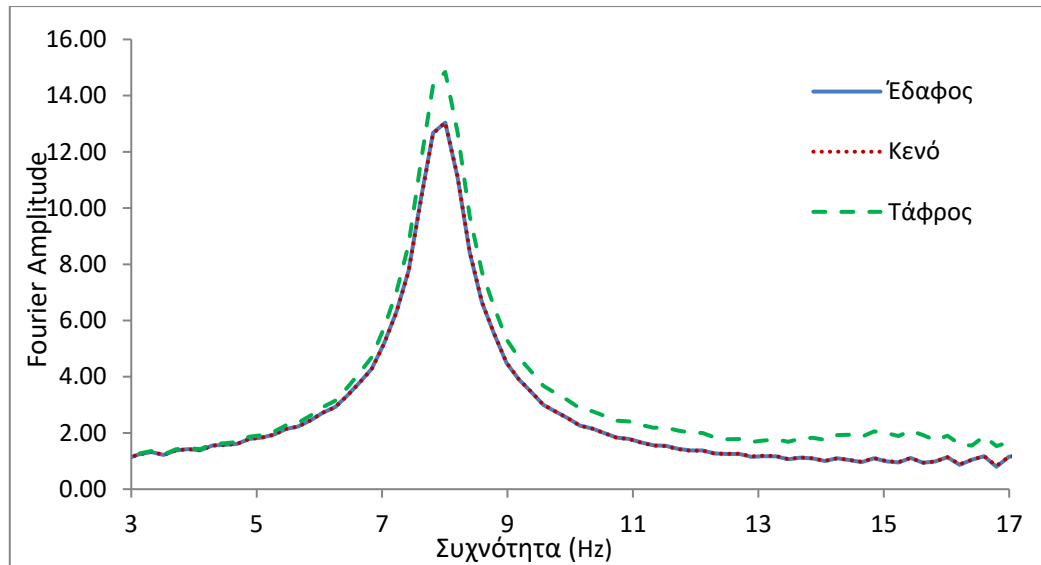
Διάγραμμα 5.8: Έδαφος και διαφορετικά βάθη τάφρων.

Επίδραση μεταβαλλόμενου βάθους:

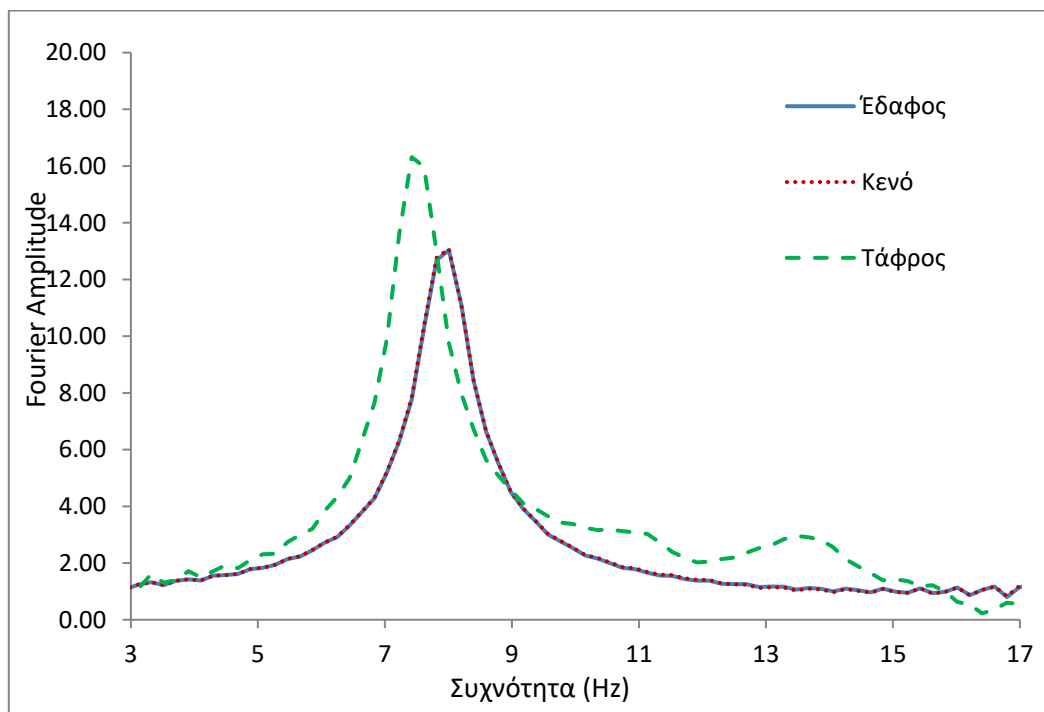
Στα τρία προσομοιώματα χρησιμοποιήθηκε έδαφος κατηγορίας A και παλμός Ricker 6 Hz. Είναι εύκολο να παρατηρηθεί από τη σύγκριση μεταξύ του εδάφους, του κενού με διαστάσεις 4x4x4 και της τάφρου βάθους 4 μέτρων, πως αυτές οι περιπτώσεις σχεδόν ταυτίζονται. Στην ίδια διερεύνηση, με την αύξηση του βάθους του κενού και το βάθος της τάφρου να φτάνει τα 12 μέτρα, είναι φανερό πως η απόκριση για το κενό δεν έχει μεταβληθεί σε σχέση με το έδαφος. Σε αντίθεση με την τάφρο, όπου το πλάτος φάσματος Fourier αυξάνεται, ενώ η συχνότητα και η μέγιστη τιμή της παραμένει ίδια και στις τρεις περιπτώσεις. Στην περίπτωση που το βάθος της τάφρου φτάνει στα 24 μέτρα, υπάρχει περισσότερη αύξηση του πλάτους φάσματος Fourier, ενώ η μέγιστη τιμή της συχνότητας μειώνεται.



Διάγραμμα 5.9: Ομογενές έδαφος, κενό και τάφρος βάθους 4 μέτρων.



Διάγραμμα 5.10: Ομογενές έδαφος, κενό και τάφρος βάθους 12 μέτρων.

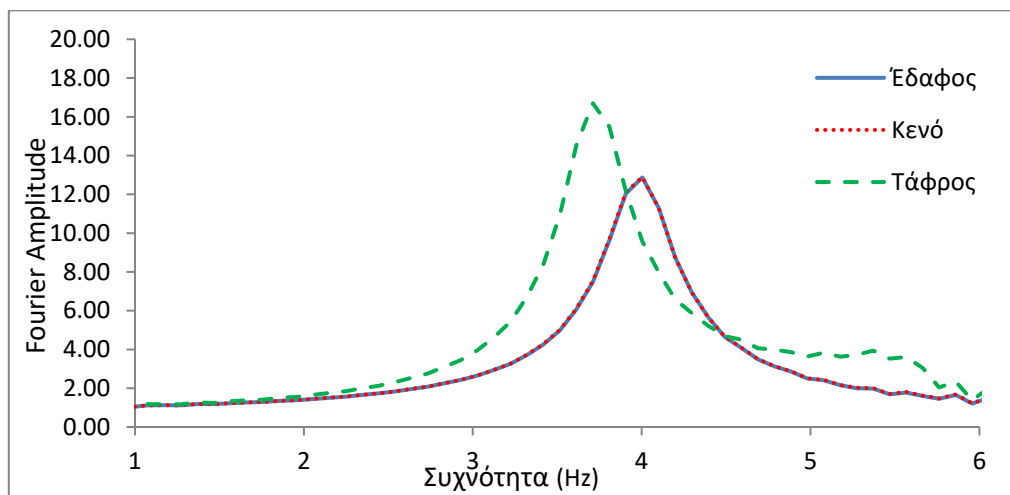


Διάγραμμα 5.11: Ομογενές έδαφος, κενό και τάφρος βάθους 24 μέτρων.

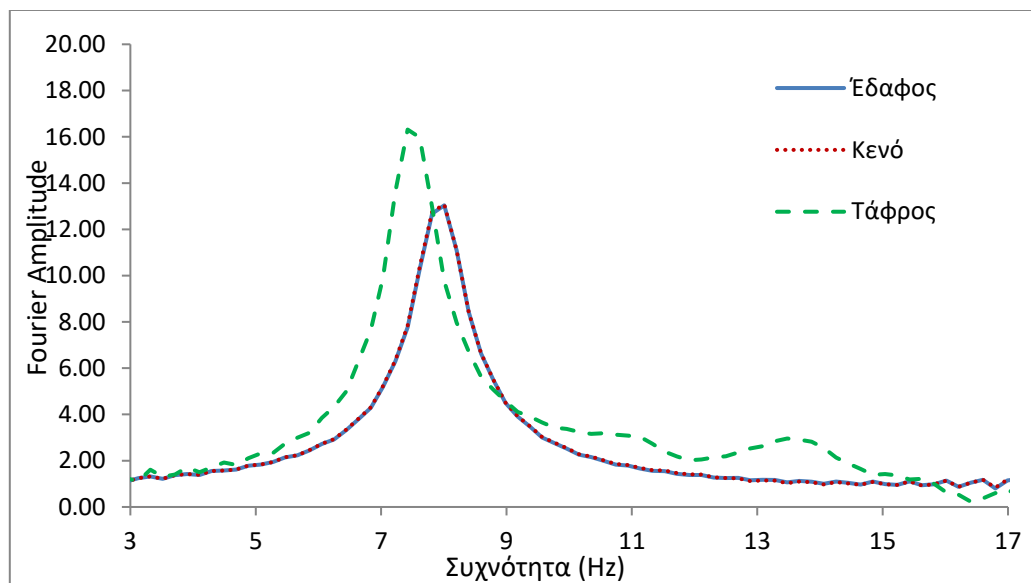
Επίδραση διαφορετικού παλμού Ricker σε βάθος 24 μέτρα:

Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιήθηκε Ricker 2 Hz, για το έδαφος με ταχύτητα εδάφους κατηγορίας B V_s 400 m/s και βάθους κενού-τάφρου 24 μέτρων. Παρατηρείται πως το συμπαγές έδαφος αντιδρά όπως το κενό. Όσο για την τάφρο, έχει μεγαλύτερο φασματικό

πλάτος, με τη μέγιστη τιμή του πλάτους να αντιστοιχεί σε μικρότερη συχνότητα. Στην περίπτωση του εδάφους κατηγορίας A με ταχύτητα V_s 800 m/s, χρησιμοποιήθηκε Ricker 6 Hz, παρατηρείται πώς το κενό δεν έχει διαφορά με το έδαφος. Ενώ η τάφος έχει μεγαλύτερο φασματικό πλάτος και σε μικρότερη συχνότητα



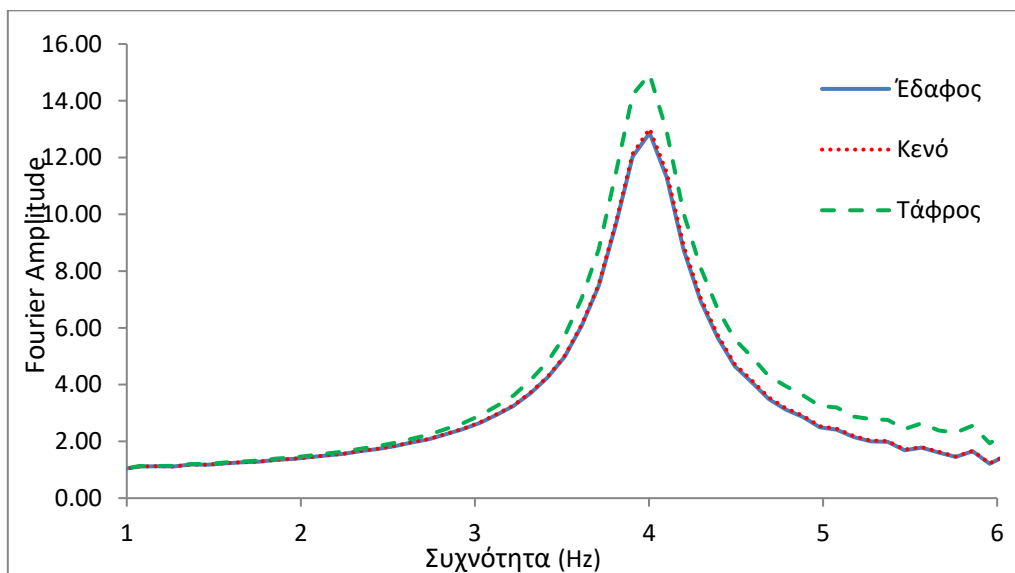
Διάγραμμα 5.12: Σύγκριση κενού και τάφρου βάθους 24m Vs 400 m/s.



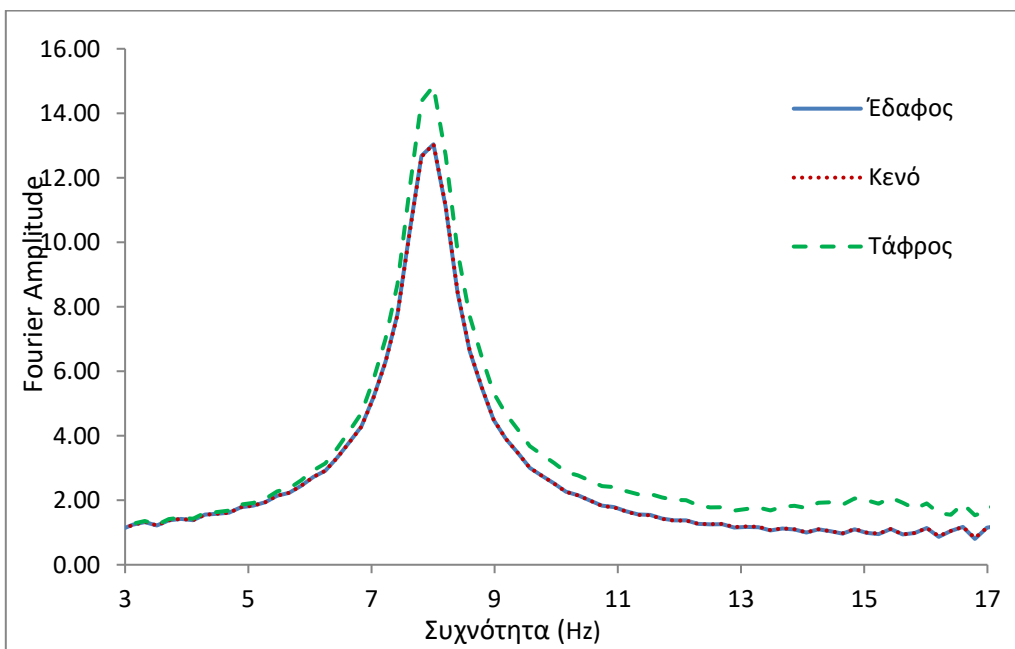
Διάγραμμα 5.13: Σύγκριση κενού και τάφρου βάθους 24m Vs 800 m/s.

Επίδραση διαφορετικού παλμού Ricker σε βάθος 12 μέτρα:

Στην προκειμένη περίπτωση, το βάθος κενού και τάφρου μειώνεται στα 12 μέτρα. Παρατηρείται ότι και στα τρία προσομοιώματα, έδαφος, κενό και τάφος, εμφανίζεται η μέγιστη τιμή τους στην ίδια συχνότητα, με τη διαφορά πως η τάφος και στις δύο περιπτώσεις για V_s 400 m/s και 800 m/s έχει μεγαλύτερο φασματικό πλάτος.



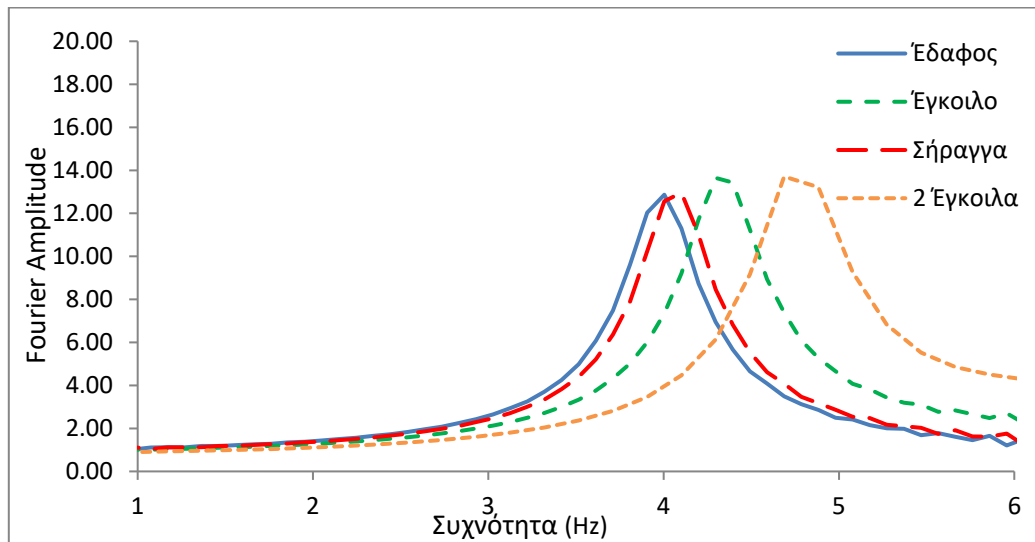
Διάγραμμα 5.14: Σύγκριση κενού και τάφρου βάθους 12m Vs 400 m/s.



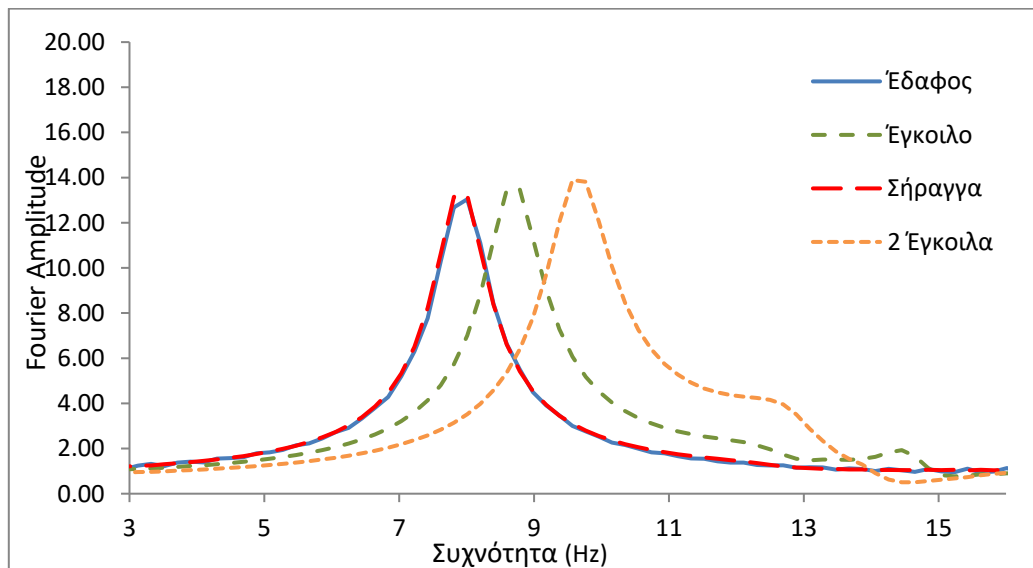
Διάγραμμα 5.15: Σύγκριση κενού και τάφρου βάθους 12m Vs 800 m/s.

Επίδραση ύπαρξης εγκοίλων και σήραγγας:

Τέλος, γίνεται σύγκριση του εδάφους με τη σήραγγα, τον έγκοιλο, και του προσομοιώματος με τα δύο έγκοιλα. Μία άμεση παρατήρηση είναι το γεγονός ότι το έδαφος με τη σήραγγα έχουν σχεδόν τις ίδιες τιμές πλάτους και συχνότητας, για ταχύτητα εδάφους (V_s) 400 m/s και 800 m/s. Επίσης, παρατηρείται πως το έγκοιλο και στα δύο γραφήματα, έχει μεγαλύτερη συχνότητα από το έδαφος και πως το φασματικό πλάτος αυξάνεται λίγο. Ομοίως και στην περίπτωση που συνυπάρχουν τα δύο έγκοιλα μαζί, όπου αυτό έχει περεταίρω αύξηση της συχνότητας και του πλάτους συγκριτικά με το έδαφος, τη σήραγγα και από το μόνο έγκοιλο.



Διάγραμμα 5.16: Ένα ή δύο έγκοιλα και σήραγγα για V_s 400 m/s



Διάγραμμα 5.17: Ένα ή δύο έγκοιλα και σήραγγα για V_s 800 m/s.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα & Προτάσεις Μελλοντικής Έρευνας

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την αριθμητική προσομοίωση της επίδρασης κενών ή υπόγειων εγκοίλων μικρού βάθους στον επιφανειακό σεισμικό κραδασμό. Οι σεισμικές διεγέρσεις αυξάνονται τα τελευταία χρόνια και εντοπίζονται σε μέρη που παλιότερα δεν υπήρχαν σεισμικά δεδομένα με αποτέλεσμα να υπάρχει άγνοια για τα γεωλογικά δεδομένα των περιοχών αυτών.

Για τον σωστό υπολογισμό των σεισμικών παραμέτρων που καταγράφουν τα όργανα, επιδρά σημαντικά στην εγκυρότητα της μέτρησης το γεγονός να μην είναι γνωστές οι ιδιότητες και η στρωματογραφία του υπεδάφους στη θέση που τοποθετείται ένας επιταχυνσιογράφος. Επίσης σημαντικός παράγοντας, είναι η γνώση της σύστασης του εδάφους, δηλαδή αν είναι συμπαγές ή αν υπάρχουν έγκοιλα ή σπηλαιώσεις. Κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής δραστηριότητας ο επιταχυνσιογράφος καταγράφει την επιτάχυνση που υφίσταται εκείνη τη στιγμή στην επιφάνεια. Όμως στη περίπτωση που δεν είναι προσδιορισμένα τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τότε η καταγραφή δεν είναι ρεαλιστική. Αυτό συμβαίνει κυρίως επειδή δεν είναι γνωστό το υλικό του εδάφους στο οποίο, αλλά και η μορφολογία του υπεδάφους στην περιοχή που τοποθετείται. Αυτές οι τοπικές συνθήκες επηρεάζουν προφανώς και τις υπερκείμενες/παρακείμενες κατασκευές, καθώς δύνανται να αλλάξουν, ευμενώς ή δυσμενώς για την καταπόνηση των κατασκευών, τα χαρακτηριστικά της διέγερσης σε σύγκριση με τις συνθήκες ελευθέρου πεδίου

Στην εργασία αυτή μελετήθηκαν διαφορετικά είδη εδάφους με διαφορετικές ιδιότητες. Επίσης μελετήθηκαν διαφορετικά σενάρια εδάφους συνδυαστικά με την ύπαρξη κενού, τάφρου, σήραγγας, ενός εγκοίλου. Επιπλέον, μελετήθηκε και το σενάριο να υφίστανται δύο έγκοιλα μαζί το ένα πάνω από το άλλο. Για όλα τα σενάρια έγινε σύγκριση σε σχέση με το πώς θα αντιδρούσε ένα ομοιγενές έδαφος ίδιων χαρακτηριστικών. Το κενό και η τάφος ελεγχθήκαν και ως προς τη συμπεριφορά τους ανάλογα με το μέγεθος που έχουν. Ο έλεγχος αυτός έγινε ώστε να υπάρξει μια τεκμηριωμένη άποψη, όχι μόνο για το αν επηρεάζουν γενικά, αλλά και από ποια γεωμετρία και βάθος επηρεάζουν αισθητά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων.

Αρχικά, από τα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν από τα δεδομένα που έδωσε το Abaqus και το SeismoSingal, διαπιστώνεται πως το υλικό της εδαφικής στρώσης σε κάθε περίπτωση έχει σημασία και ασκεί επιρροή στα αποτελέσματα. Επομένως, παρατηρείται ότι, όσο μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας έχει το έδαφος, τόσο μεγαλώνει η συχνότητα στην οποία συναντάται η μέγιστη επιτάχυνση.

Ένα συμπέρασμα που είναι εφικτό να εξαχθεί βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, είναι ότι το έδαφος θα έχει την ίδια συμπεριφορά ανεξάρτητα με το πόσο βαθύ είναι ένα κενό σχετικά μικρών διαστάσεων που βρίσκεται στη μέση της εδαφικής στρώσης. Το

παραπάνω επιβεβαιώνεται από το ότι και για τις τρεις περιπτώσεις η μέγιστη τιμή του φασματικού πλάτους των τριών ταχυτήτων V_s είναι πάντα στην ίδια συχνότητα, γεγονός που υποδεικνύει ότι το βάθος του εγκοίλου δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα. Για επιπλέον διερεύνηση, μελετήθηκε η πλήρωση του κενού με διαφορετικό υλικό από αυτό του συμπαγούς εδάφους. Το υλικό πλήρωσης είχε μικρότερο μέτρο ελαστικότητας με V_s ίσο με 200 m/s, σε σχέση με το συμπαγές έδαφος που ήταν V_s ίσο με 800 m/s. Μετά από αυτήν την προσθήκη παρατηρήθηκε ότι η επιφάνεια λειτουργεί ως ένα ομοιόμορφο σύστημα, χωρίς να έχει διακυμάνσεις στην οριζόντια επιτάχυνση.

Στην περίπτωση της τάφρου παρατηρείται ότι η αλλαγή του βάθους έχει σημαντική επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα. Συγκρίνοντας την τάφρο με το ομογενές έδαφος διατηρώντας τα ίδια χαρακτηριστικά εδάφους με V_s ίσο με 800 m/s, παρατηρείται να μεταβάλλεται και η τιμή της συχνότητας που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του πλάτους Fourier. Το φασματικό πλάτος αυξάνεται επίσης. Στο προσομοίωμα με βάθος τέσσερα μέτρα είναι πολύ μικρές η διαφοροποιήσεις σε σχέση με το συμπαγές έδαφος. Στην περίπτωση που το βάθος της τάφρου φτάνει τα δώδεκα μέτρα παρατηρείται η μέγιστη τιμή να παραμένει στην ίδια συχνότητα, αλλά να αυξάνεται αρκετά το φασματικό πλάτος. Η μεγαλύτερη διαφορά παρατηρείται όταν η τάφρος έχει βάθος είκοσι τέσσερα μέτρα. Σε αυτή τη περίπτωση φαίνεται αύξηση του πλάτους αλλά και μεταφορά της μέγιστης τιμής σε διαφορετική συχνότητα. Το φασματικό πλάτος Fourier έχει μέγιστη τιμή στα 16,31 όπου συναντάται στη συχνότητα 7,42 Hz. Σε αντίθεση με τις άλλες τάφρους και το συμπαγές έδαφος που έχουν μικρότερο πλάτος και τη συχνότητα τους στα 8,00 Hz.

Μελετήθηκε επίσης και έγινε σύγκριση μεταξύ κενού και τάφρου στο σενάριο που έχουν ίδιο βάθος με το συμπαγές έδαφος, με τα ίδια χαρακτηριστικά. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι σε μικρά βάθη κενού και τάφρου, το αποτέλεσμα που καταγράφεται δεν επηρεάζεται σχεδόν καθόλου. Αντίθετα όταν το βάθος αυξάνεται στα δώδεκα μέτρα, υπάρχει μια αύξηση στο μέγιστο πλάτος της τάφρου, αλλά η μέγιστη τιμή διατηρείται στην ίδια συχνότητα. Μεγάλη αλλαγή θα παρατηρηθεί στην τάφρο των είκοσι τεσσάρων μέτρων, που η μέγιστη τιμή συναντάται σε μικρότερη συγκέντρωση και σε μεγαλύτερο πλάτος. Το πλάτος Fourier είναι στα 16,31 ενώ το συμπαγές έδαφος και το κενό ιδίου βάθους ήταν στα 13,07.

Με αυτά τα δεδομένα για το έδαφος με V_s ίσο με 800 m/s ερευνήθηκε αν υπάρχει η ίδια αντίδραση σε πιο μαλακά πετρώματα, γι' αυτόν το νλόγο έγινε δοκιμή και σε V_s ίσο με 400 m/s. Απόρροια της δοκιμής αυτής είναι να φανεί ότι η τάφρος έχει την ίδια συμπεριφορά με το πιο σκληρό έδαφος, με μεγαλύτερη διαφορά όμως στην μέγιστη τιμή. Η τάφρος έχει μέγιστη τιμή φασματικού πλάτους στα 16,95 ενώ το συμπαγές έδαφος και το κενό στα 12,89. Η διαφορά τους στα V_s 400 m/s είναι 4,06 αντί 5,24 που είχαμε στο V_s ίσο με 800 m/s. Αντίθετα όταν επαναλάβουμε τον ίδιο συνδυασμό εδαφών στα V_s ίσο με 800 m/s και V_s ίσο με 400 m/s για τα δώδεκα μέτρα βάθος οι διαφορές ήταν πολύ μικρές.

Στην περίπτωση πολυπλοκότερων περιπτώσεων παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στη συχνότητα της μέγιστης τιμής που είναι κοντά σε αυτή του συμπαγούς εδάφους. Στην περίπτωση της σήραγγας οι διαφορές που εντοπίστηκαν σε μεσαίας δυστημσίας έδαφος αλλά και βραχώδους έδαφος είναι πολύ μικρές σε σχέση με το έδαφος που μελετάται.

Επίσης, στην περίπτωση ύπαρξης ενός εγκοίλου, που δεν έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του εδάφους, φαίνεται ότι έχουμε μια μικρή αύξηση στο πλάτος. Η αύξηση αυτή είναι από το 12,55 στο 13,64 στο μεσαίο έδαφος με V_s ίσο με 400 m/s, ενώ αντίθετα στο πιο σκληρό έδαφος με V_s ίσο με 800 m/s είναι πολύ μικρή η διαφορά τους. Αυτό που προκύπτει και στις δύο περιπτώσεις, είναι ότι στα 0,29 Hz και 0,59 Hz αντίστοιχα, η συχνότητα είναι μεγαλύτερη από αυτή του εδάφους που εξετάζεται. Το τελευταίο σενάριο που διερευνήθηκε, είναι η πιο σπάνια περίπτωση με δυο έγκοιλα το ένα πάνω από το άλλο, χωρίς να έρχονται σε επαφή μεταξύ τους ούτε και με την επιφάνεια. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται η μεγαλύτερη διαφορά από όλα τα σενάρια στο σημείο που η συχνότητα έχει το μεγαλύτερο πλάτος. Η συχνότητα στην περίπτωση των δυο εγκοίλων μαζί για το V_s ίσο με 800 m/s είναι στα 9,76 Hz ενώ του συμπαγούς εδάφους στα 8,00 Hz.

Εν κατακλείδι μπορεί να εξαχθεί το γενικό συμπέρασμα, ότι τα επιφανειακά κενά μικρών διαστάσεων με ή χωρίς υλικό πλήρωσης δεν επηρεάζουν σημαντικά τη διάδοση των κυμάτων. Αντίθετα, η ύπαρξη μίας συνεχούς τάφρου μεσαίου/μεγάλου βάθους, προκαλεί αύξηση στο φασματικό πλάτος και διαφοροποιεί τα συχνοτικά χαρακτηριστικά της επιφανειακής απόκρισης. Αυτό είναι πολύ σημαντικό στην πραγματική συμπεριφορά του σεισμού. Ενώ στο ενδεχόμενο ενός ή δυο υπόγειων εγκοίλων, προκαλείται μεταβολή στη μέγιστη τιμή του πλάτους, σε πιο μεγάλη συχνότητα, ειδικά στην περίπτωση του βράχου.

Με βάση τις αναλύσεις που διεξήχθησαν, εξάγεται το γενικό συμπέρασμα ότι, υπό προϋποθέσεις, τα υπόγεια έγκοιλα ενδέχεται να προκαλέσουν τροποποίηση του σεισμικού κραδασμού στην επιφάνεια του εδάφους. Καθώς το γεγονός αυτό μπορεί να δράσει είτε ευεργετικά είτε επιβαρυντικά στη σεισμική καταπόνηση μίας υπερκείμενης κατασκευής, κρίνεται ως απαραίτητος ο αξιόπιστος εντοπισμός των εγκοίλων (μέσω γεωφυσικών διασκοπήσεων) και η ποσοτική εκτίμηση του ρόλου τους όχι μόνο σε δυναμικές, αλλά και σε στατικές συνθήκες, αφού η παρουσία τους μπορεί να προκαλέσει σημαντικές καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους. Ο αξιόπιστος εντοπισμός είναι ακόμα πιο απαραίτητος στην περίπτωση που πρόκειται να τοποθετηθεί κάποιος επιταχυνσιογράφος, ώστε να είναι εκ των προτέρων γνωστές οι συνθήκες που επικρατούν στο υπέδαφος για να λαμβάνονται ακριβέστερες και πιο αξιόπιστες καταγραφές.

Γενικά, το πρόβλημα είναι πολύ σύνθετο και δεν μπορεί να καλυφτεί στο πλαίσιο μιας διπλωματικής εργασίας. Πιθανές προεκτάσεις είναι:

- Η επιβολή και κατακόρυφης διέγερσης.
- Η εξέταση πραγματικών καταγραφών.
- Η διερεύνηση της επίδρασης της μη-γραμμικότητας των υλικών για υψηλά επίπεδα σεισμικής επιτάχυνσης.
- Η επίδραση της στρωματογραφίας και άλλων τοπικών συνθηκών.
- Η προσομοίωση της ύπαρξης ανωδομής άνωθεν ή κοντά στο κενό ή στο έγκοιλο για την εξέταση φαινομένων αλληλεπίδρασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Βιβλιογραφία

Διεθνής Βιβλιογραφία

Abaqus/CAE user's Manual (V6.6). (2016). Available at: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/Abaqus/docs/v6.6/books/usi/default.htm?startat=pt06ch40s09h1b01.html> (Accessed: March 3, 2023).

Abaqus. Analysis user's manual. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2014.

APOD: 2000 december 7 - earths san andreas fault (no date) NASA. Available at: <https://apod.nasa.gov/apod/ap001207.html> (Accessed: 05 September 2023).

Argyris, J., & Kelsey, S. (1960). Energy theorems and structural analysis. London: Butterworth.

Chopra AK. Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering. 5th edn., Pearson, 2017.

Clough, R. W. (1960). The finite element method in plane stress analysis. Paper presented at the 2nd ASCE Conference on Electronic Computation, Pittsburgh, PA.

Davis CA, Lee VW, Bardet JP. Transverse response of underground cavities and pipes to incident SV waves. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2001;30:383-410

De Barros FCP, Luco JE. Diffraction of obliquely incident waves by a cylindrical cavity embedded in a layered viscoelastic halfspace. Soil Dynamics & Earthquake Engineering. 1993;12:159-171

European Standard EN 1998-1:2004 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels: ComiteEuropeen de Normalisation.

European Standard EN 1998-5:2004 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 5: Foundations, retaining structures, geotechnical aspects. Brussels: ComiteEuropeen de Normalisation.

GEIN – Institute of Geodynamics (2022). Available at: <https://www.gein.noa.gr/> (Accessed: November 2022).

Gelis C, Leparoux D, Virieux J, Bitri A, Operto S, Grandjean G. Numerical modeling of surface waves over shallow cavities. Journal of Environmental & Engineering Geophysics 2005;10(2), 111-121.

Kramer SL. Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, New Jersey, USA, 1996.

Kennedy, R. P., Short, S. A., Wesley, D. A., & Lee, T. H. (1976). "Effect on non-linear soil-structure interaction due to base slab uplift on the seismic response of a high-temperature gas-cooled reactor (HTGR)". *Nuclear Engineering and Design*, 38 (2), 323-355.

Lee VW, Karl J. On the deformations near a circular underground cavity subjected to incident plane P waves. *European Earthquake Engineering*. 1993;1:29-39

Luco JE, De Barros FCP. Dynamic displacements and stresses in the vicinity of a cylindrical cavity embedded in a half-space. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 1994;23:321-340.

Manoogian ME, Lee VW. Diffraction of SH-waves by subsurface inclusions of arbitrary shape. *ASCE Journal of Engineering Mechanics Division*. 1996;122:123-129.

Mylonakis, G., & Gazetas, G. (2000). "Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental?". *Journal of earthquake engineering*, 4 (3), 277-301.

Newmark, N. M., and Hall, W. J. (1969). "Seismic design criteria for nuclear reactor facilities". In *Proceedings of the 4th World conference on Earthquake Engineering* (Vol. 4, pp. 37-50).

Saxena, N. and Paul, DK. (2012). "Effects of embedment including slip and separation on seismic SSI response of a nuclear reactor building". *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier B.V., 247, 23-33.

Sextos, A.G., Manolis, G.D., Athanasiou, A., and Ioannidis, N. (2017). "Seismically induced uplift effects on nuclear power plants. Part 1: containment building rocking spectra". *Nuclear Engineering and Design*, 318, 276-287. Science direct

Sica, S., Dello Russo, A., Rotili, F. et al. Ground motion amplification due to shallow cavities in nonlinear soils. *Natural Hazards* 2014;71:1913-1935.

Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C., & Top, L. J. (1956). "Stiffness and deflection analysis of complex structures". *Journal of Aeronautical Science*, 23, 805-823.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Γεωργιάννου, Β.Ν. Τσομώκος, Α., (2006). «Measurement of Gmax Using Bender Elements», 5^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη

Εισαγωγή σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων - βασικές έννοιες (nodate) Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων - Βασικές έννοιες. Available at: http://repfiles.kallipos.gr/html_books/1284/chapter_01.html (Accessed: March 4, 2023).

Καλλιόγλου Π., (2003), «Μελέτη των δυναμικών ιδιοτήτων εδαφών στη συσκευή στήλης – συντονισμού», Διδακτορική διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη

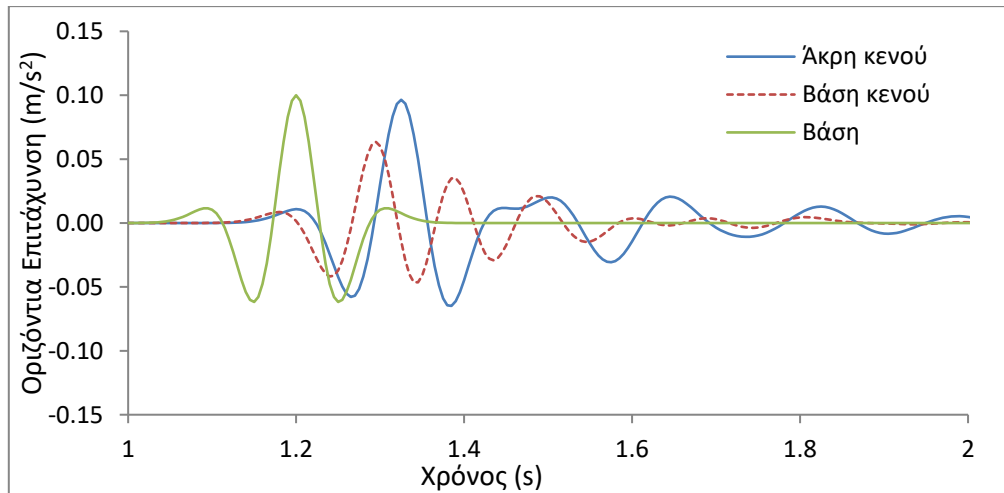
Κίρτας Ε. & Παναγόπουλος Γ. (2017). Chap.1. Εισαγωγή στις θεμελιώσεις – αντιστηρίξεις. Κατεύθυνση Πολιτικών Μηχανικών ΤΕ. ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας, Σέρρες

Πιπιλάκης, Κ. (2010). *Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική*. Θεσσαλονίκη: Ζήτη.

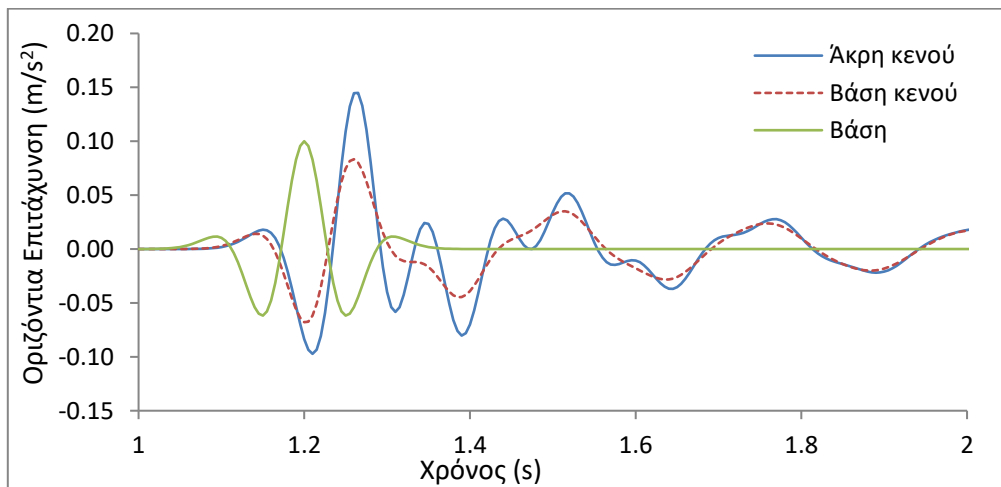
- Μελέντη, Ι. & Παπαζάχος Β. (1980). *Η σεισμικότητα του Ελληνικού χώρου*. Μαλλιάρης Παιδεία, Θεσσαλονίκη
- Προβιδάκης, Κ. (2008). *Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής. Γενικό Τμήμα*. Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Σπυράκος, Κ. & Κουτρομάνος Ι. (2010). *Αντισεισμικές Κατασκευές: Στοιχεία Τεχνικής Σεισμολογίας και Σεισμικής Μηχανικής*. ΕΜΠ. Αθήνα
- Σπυράκος, Κ. (2019). *Κατασκευές από τοιχοποιία, Αποτίμηση & Επέμβαση για σεισμικά φορτία*. Εργονόμος.
- Τσελέντης, Ά. (1997). *Σύγχρονη Σεισμολογία* (Vol. 2). Παπασωτηρίου.
- Τσόκας, Γ. (2011). *Εισαγωγή στη σεισμολογία: «Σεισμικά κύματα και διάδοση αυτών στο εσωτερικό της γης»*. Τομέας γεωφυσικής. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- Φαρδής, Μ.Ν.. (2011). Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 1998-1:2004 - Ευρωκώδικας 8: «Αντισεισμικός Σχεδιασμός Κατασκευών – Μέρος 1 Γενικοί Κανόνες, Σεισμικές Δράσεις, Κανόνες για Κτίρια». Πανεπιστήμιο Πατρών. Πάτρα
- Χατζηβασιλείου Ε. (2017). «Συσχέτιση της ταχύτητας εγκαρσίων και διαμήκων κυμάτων με εδαφοτεχνικές παραμέτρους» - Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

Παράρτημα Α

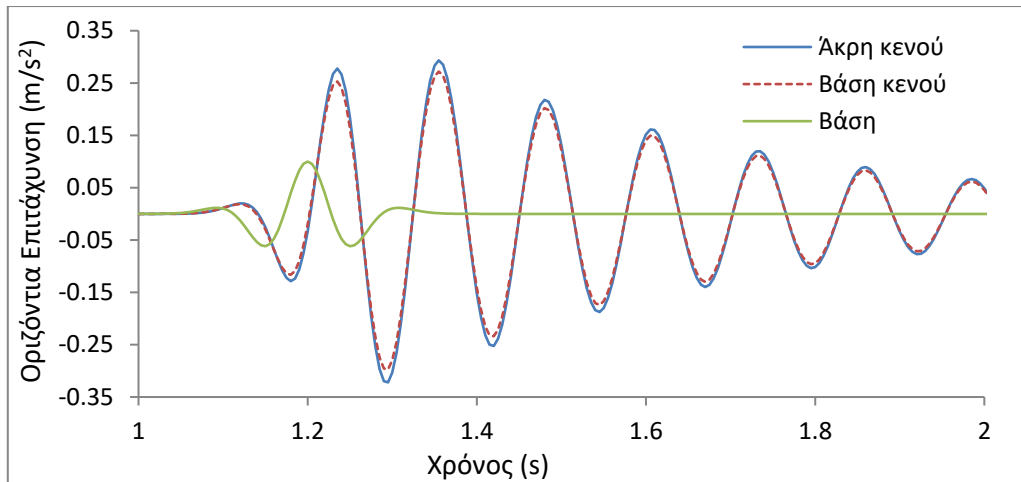
Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων για διάφορες περιπτώσεις.



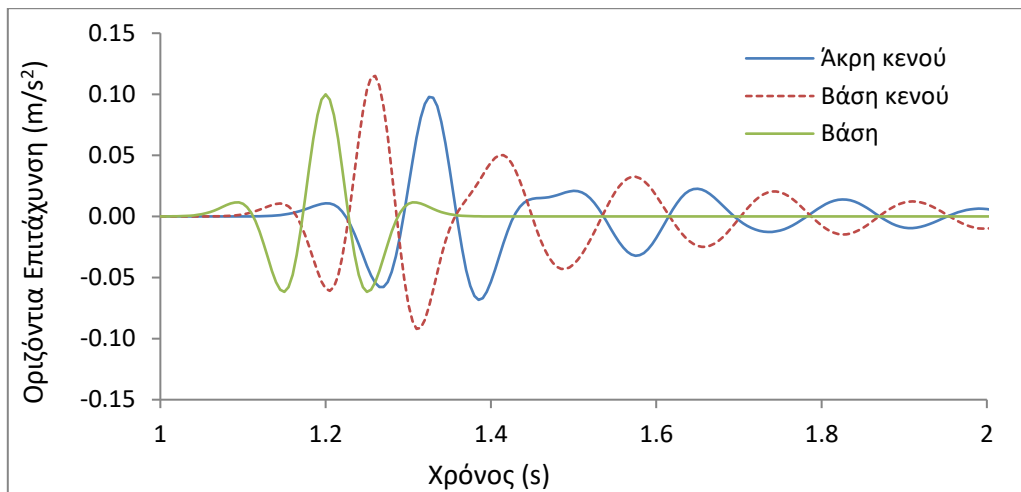
Διάγραμμα 8.1: Κενό διαστάσεων 4m x 4m x 4m και Vs 200 m/s



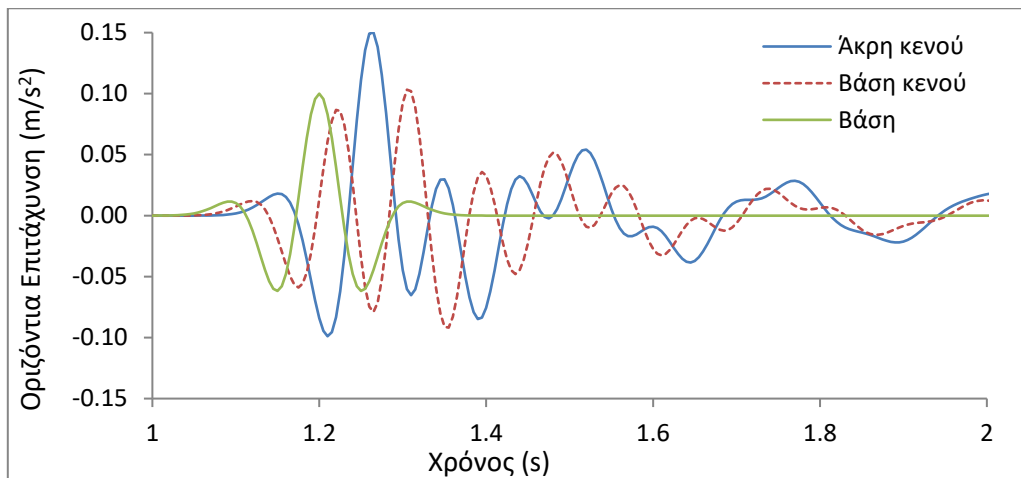
Διάγραμμα 8.2: Κενό διαστάσεων 4m x 4m x 4m και Vs 400 m/s.



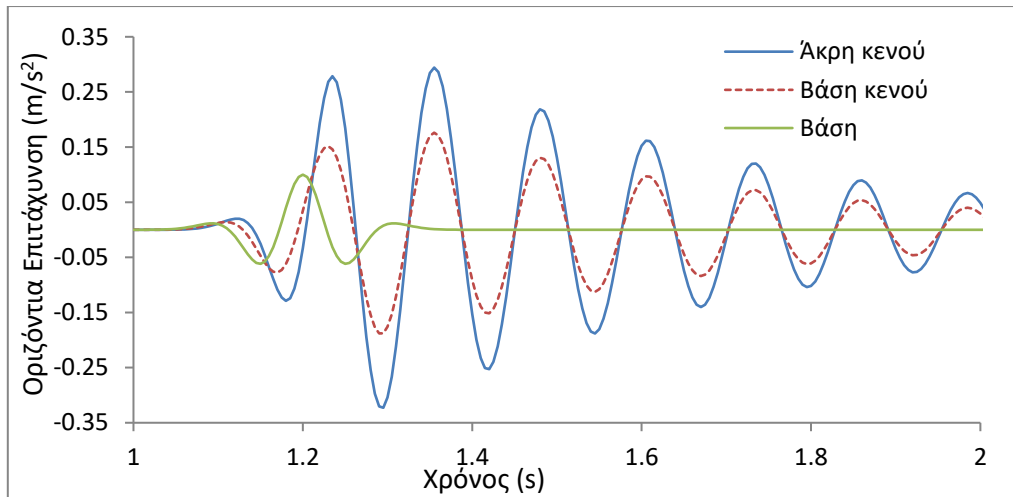
Διάγραμμα 8.3: Κενό διαστάσεων 4m x 4m x 4m και V_s 800 m/s.



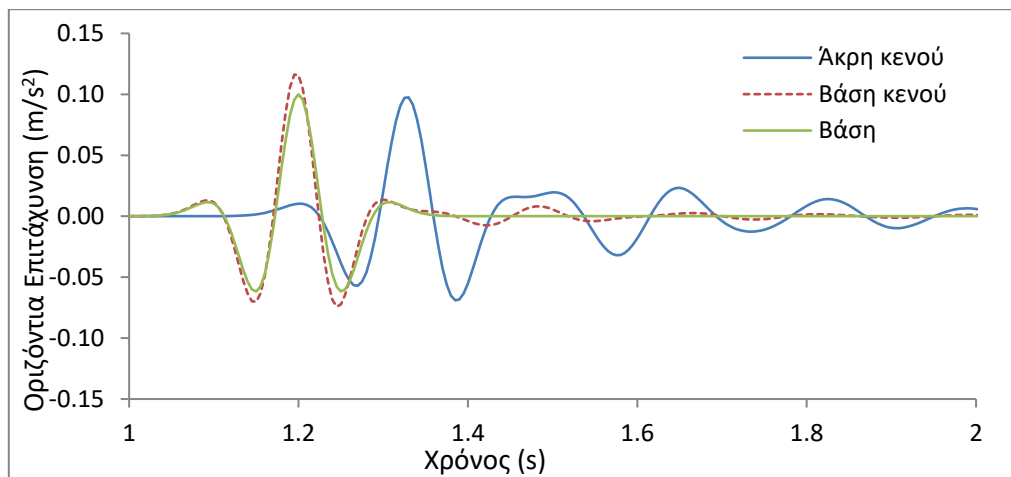
Διάγραμμα 8.4: Κενό διαστάσεων 4m x 4m x 12m και V_s 200 m/s.



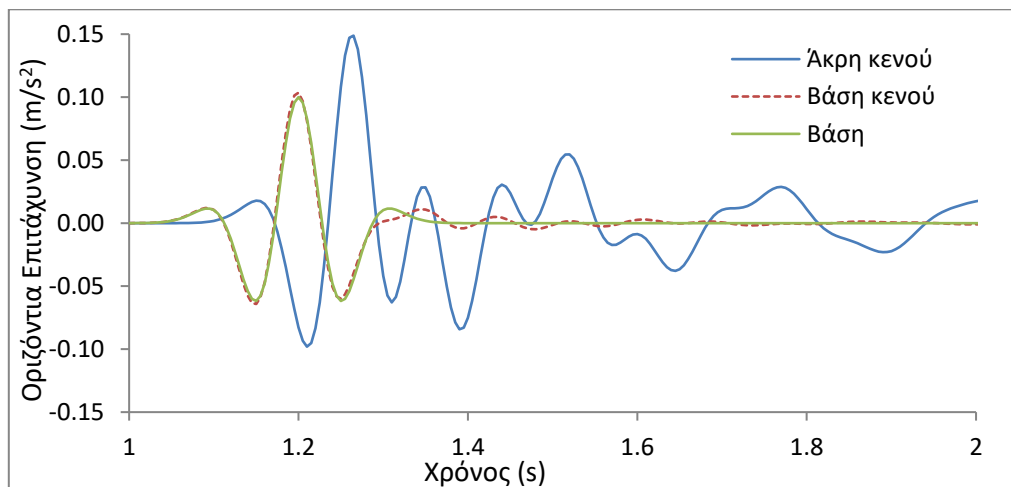
Διάγραμμα 8.5: Κενό διαστάσεων 4m x 4m x 12m και V_s 400 m/s.



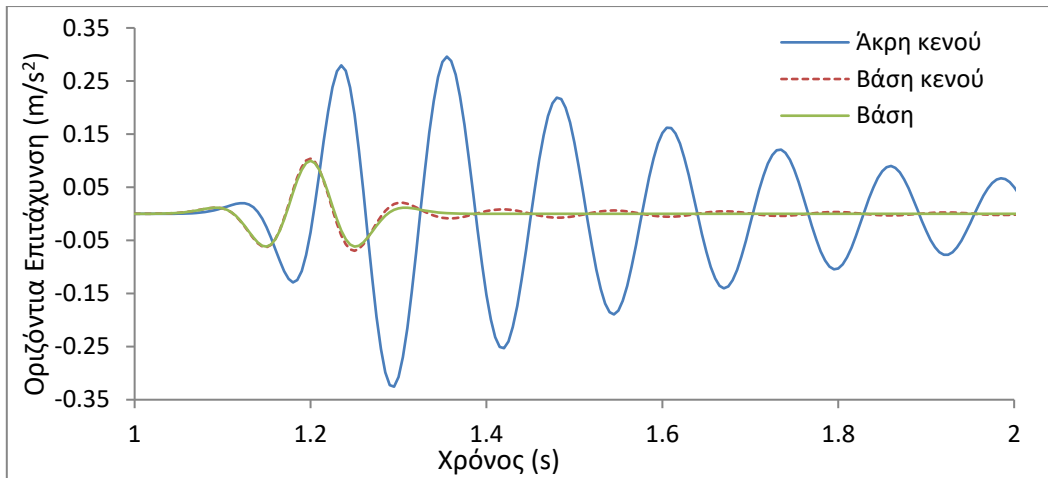
Διάγραμμα 8.6: Κενό διαστάσεων 4m x 4m x 12m και V_s 800 m/s.



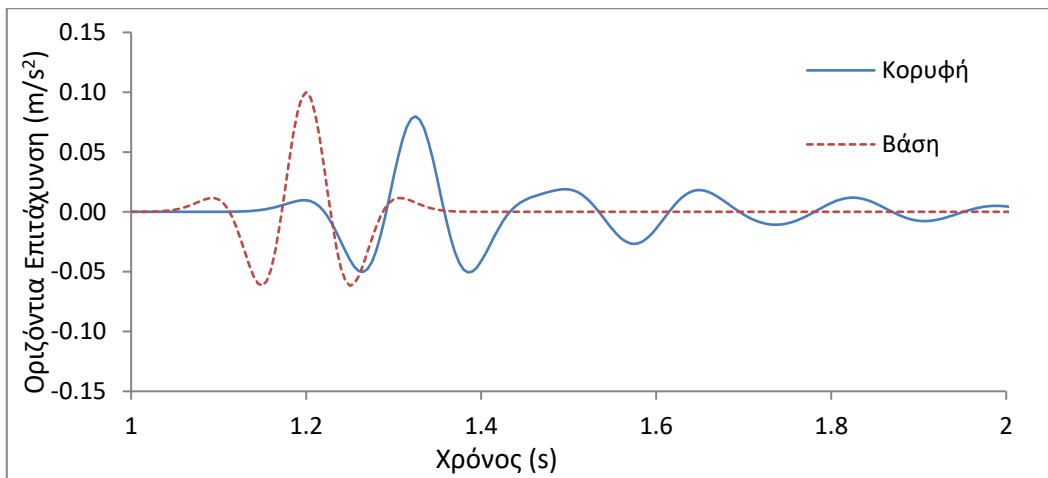
Διάγραμμα 8.7: Κενό διαστάσεων 4m x 4m x 24m και V_s 200 m/s.



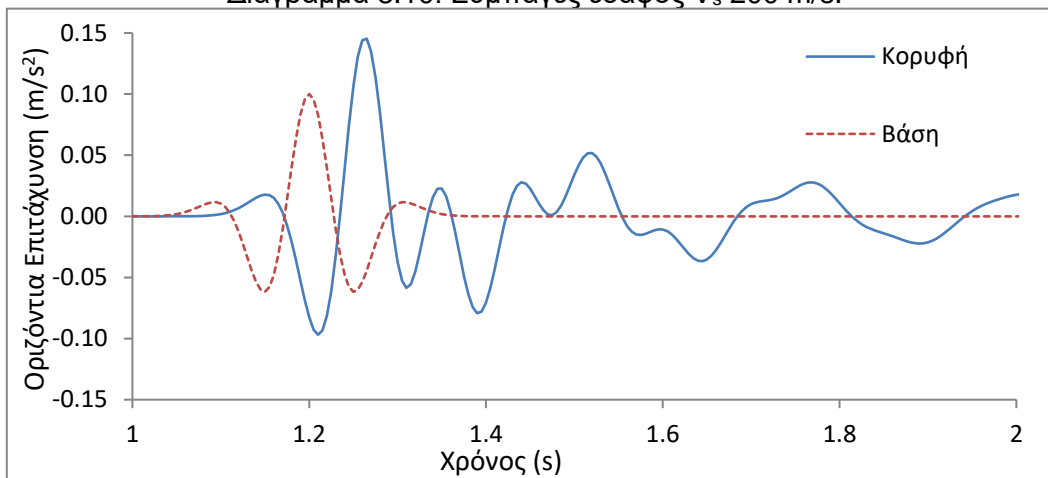
Διάγραμμα 8.8 Κενό διαστάσεων 4m x 4m x 24m και V_s 400 m/s.



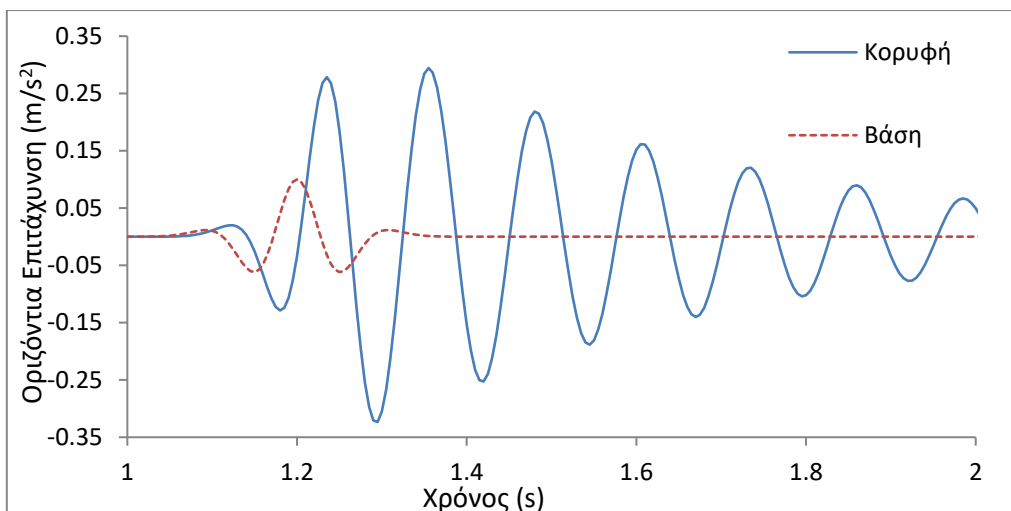
Διάγραμμα 8.9: Κενό διαστάσεων 4m x 4m x 24m και V_s 800 m/s.



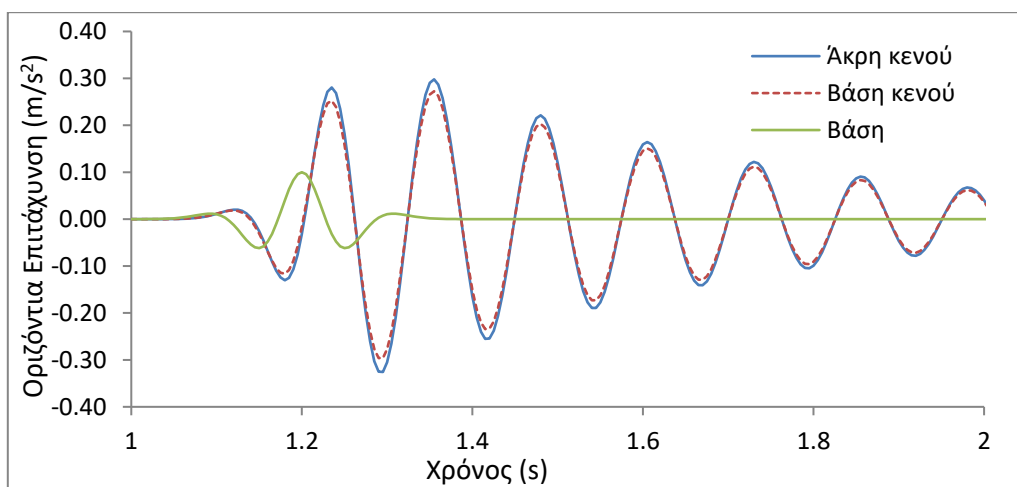
Διάγραμμα 8.10: Συμπαγές έδαφος V_s 200 m/s.



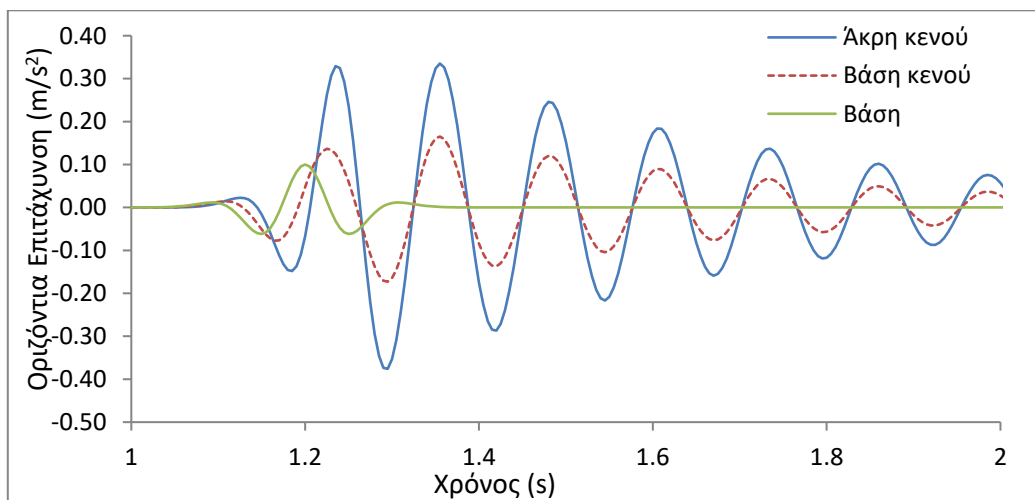
Διάγραμμα 8.11: Συμπαγές έδαφος V_s 400 m/s.



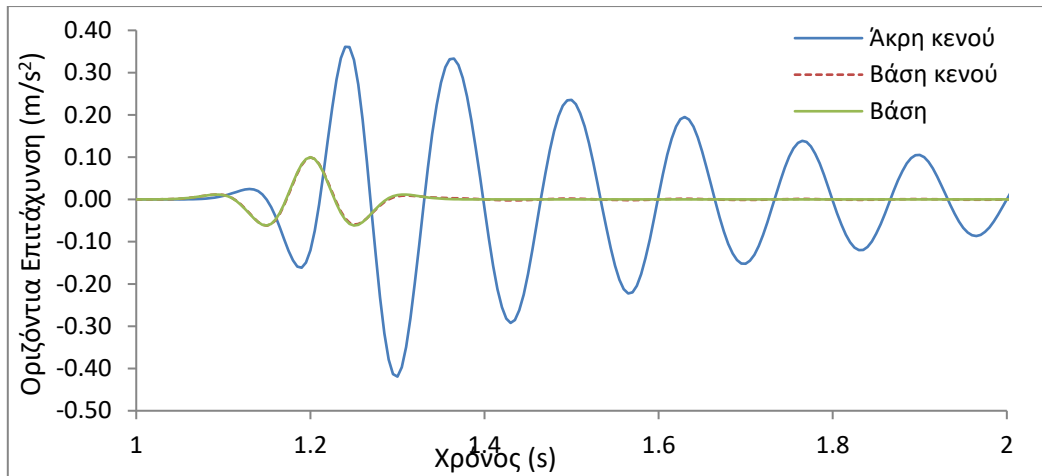
Διάγραμμα 8.12: Συμπαγές έδαφος V_s 800 m/s.



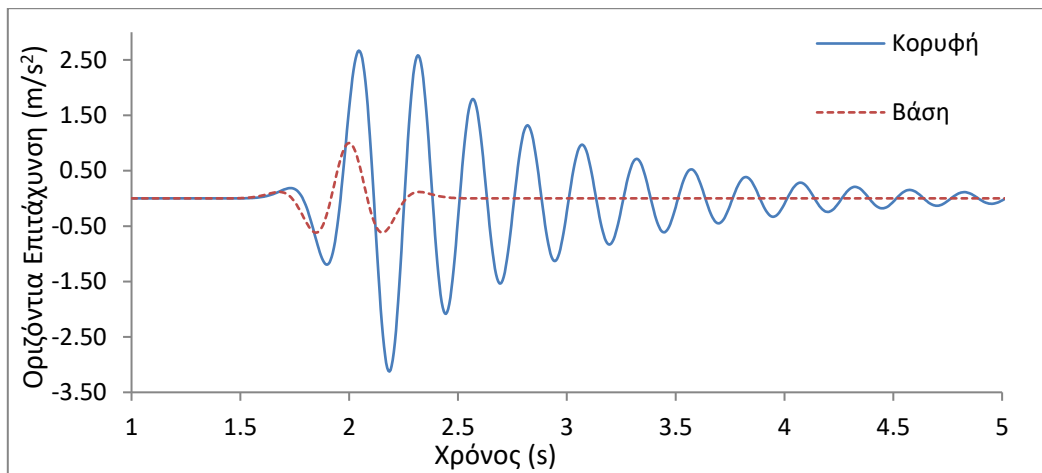
Διάγραμμα 8.13: Τάφρος διαστάσεων 4m x 110m x 4m και V_s 800 m/s.



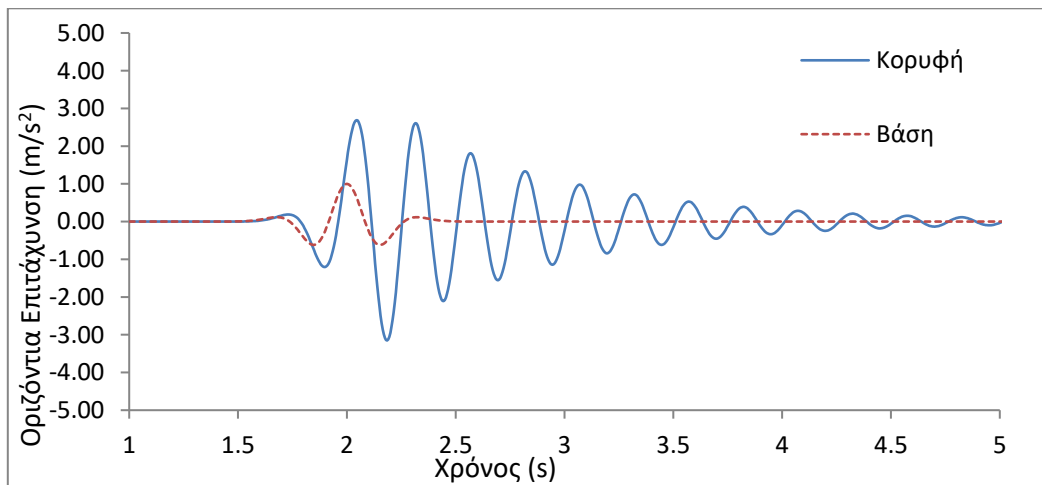
Διάγραμμα 8.14: Τάφρος διαστάσεων 4m x 110m x 12m και V_s 800 m/s.



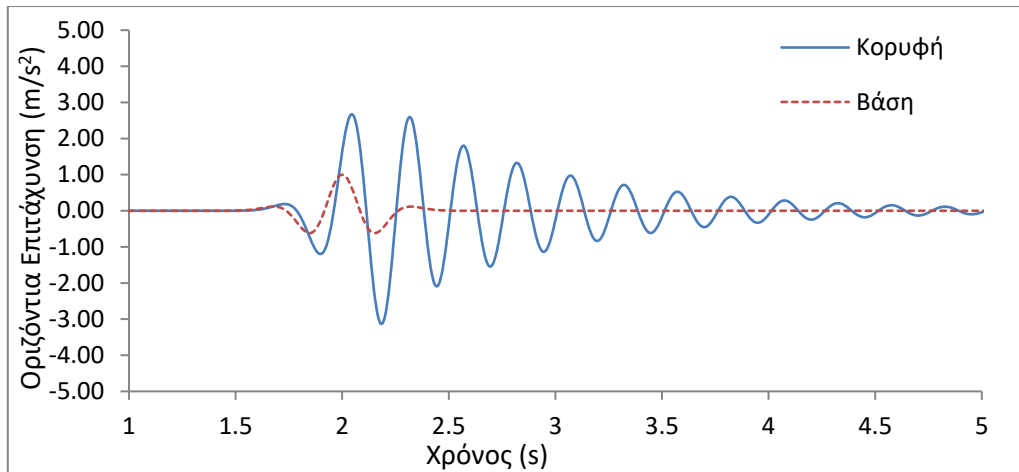
Διάγραμμα 8.15: Τάφος διαστάσεων 4m x 110m x 24m και V_s 800 m/s.



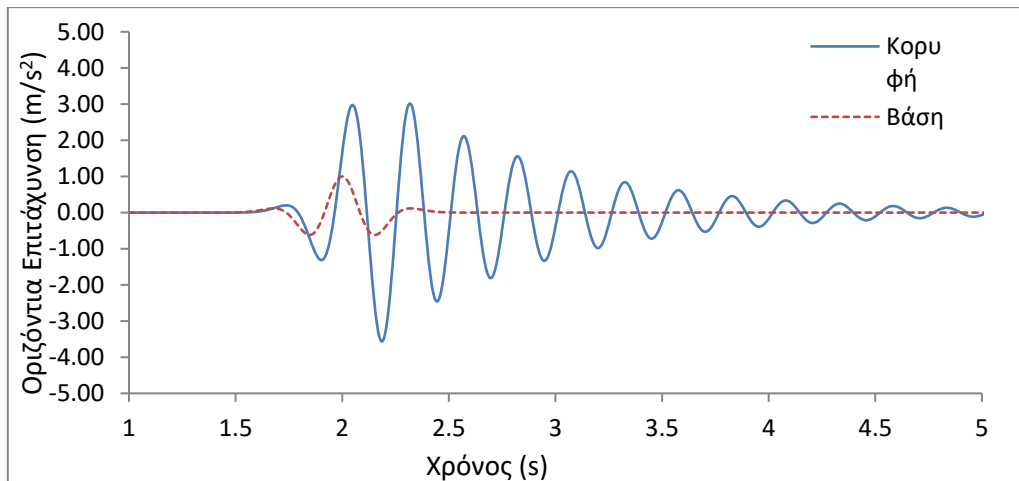
Διάγραμμα 8.16: Συμπαγές έδαφος με Ricker2 Hz και V_s 400 m/s.



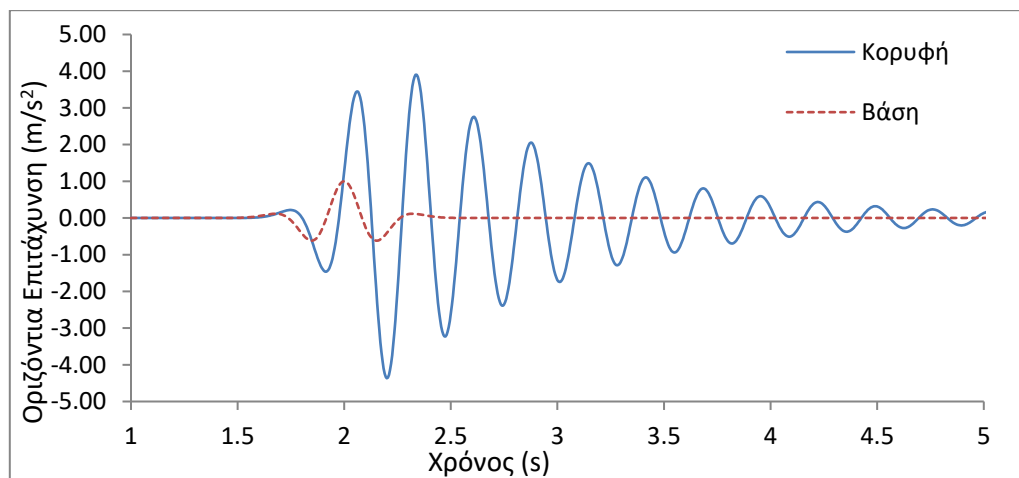
Διάγραμμα 8.17: Κενό διαστάσεων 4m x 4m x 12m με Ricker2 Hz και V_s 400 m/s.



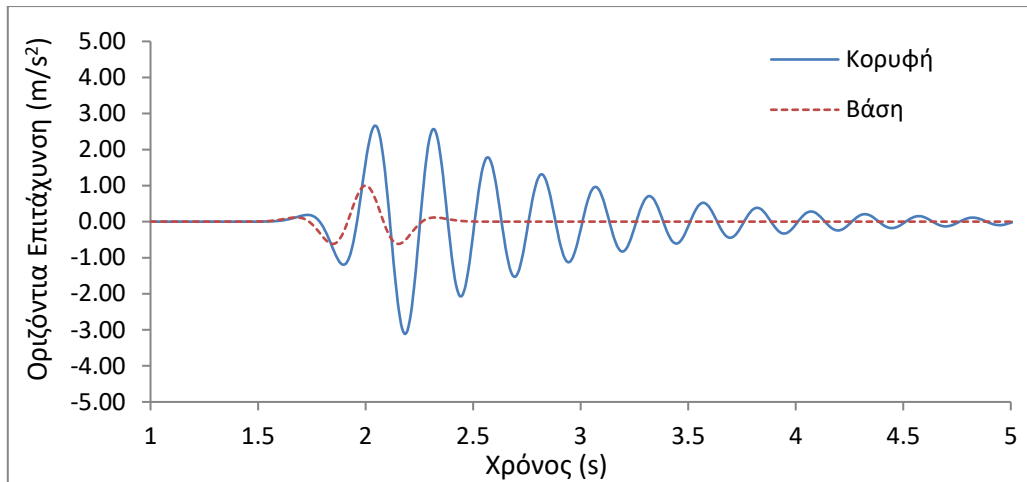
Διάγραμμα 8.18: Κενό διαστάσεων 4m x 4m x 24m με Ricker2 Hz και V_s 400m/s.



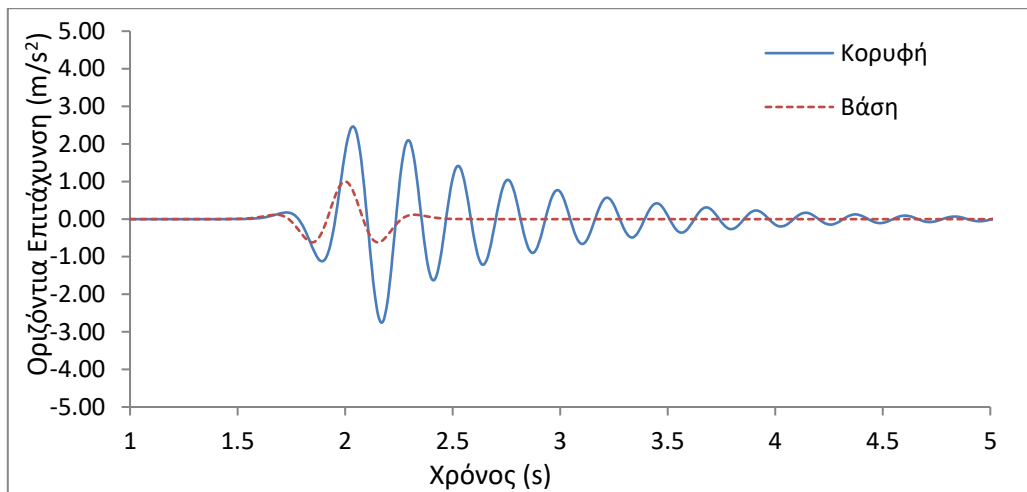
Διάγραμμα 8.19: Τάφρος διαστάσεων 4m x 110m x 12m με Ricker2Hz και V_s 400m/s.



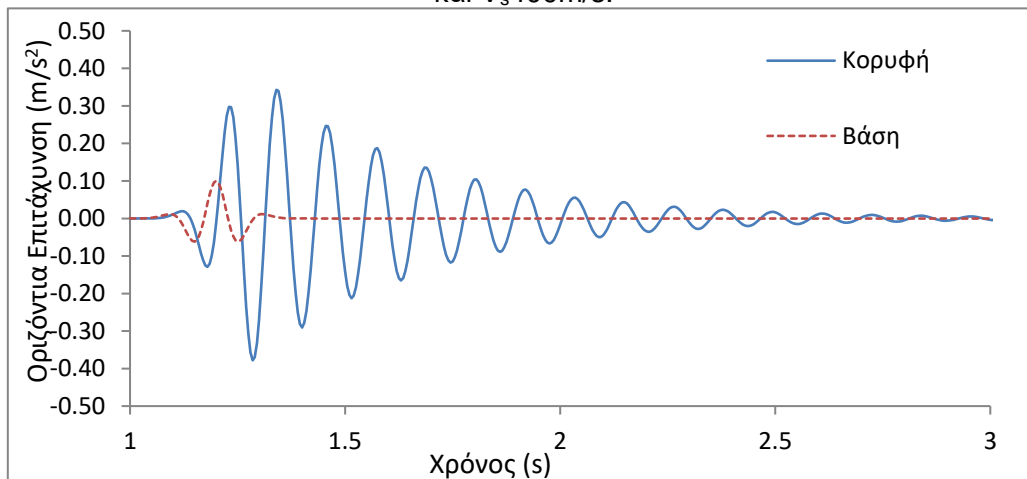
Διάγραμμα 8.20: Τάφρος διαστάσεων 4m x 110m x 24m με Ricker 2 Hz και V_s 400m/s.



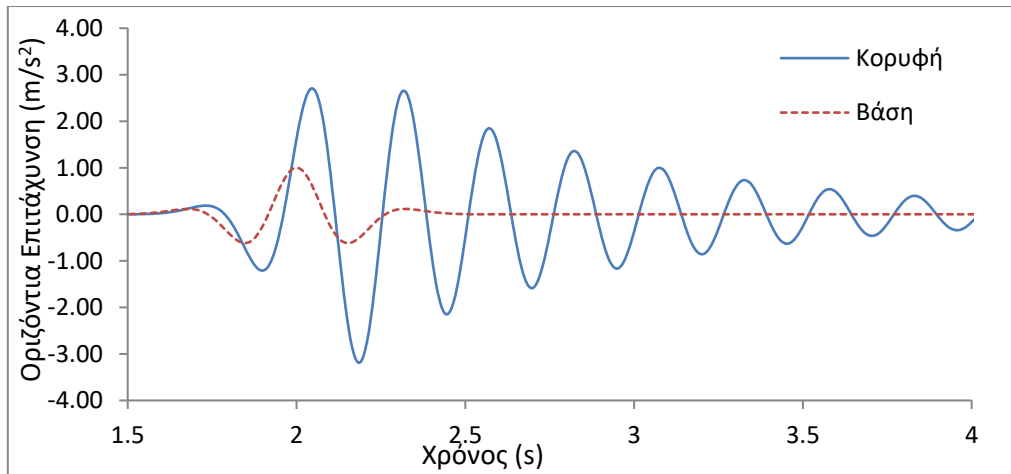
Διάγραμμα 8.21: Κενό διαστάσεων 8m x 8m x 12m με Ricker 2 Hz και V_s 800 m/s.



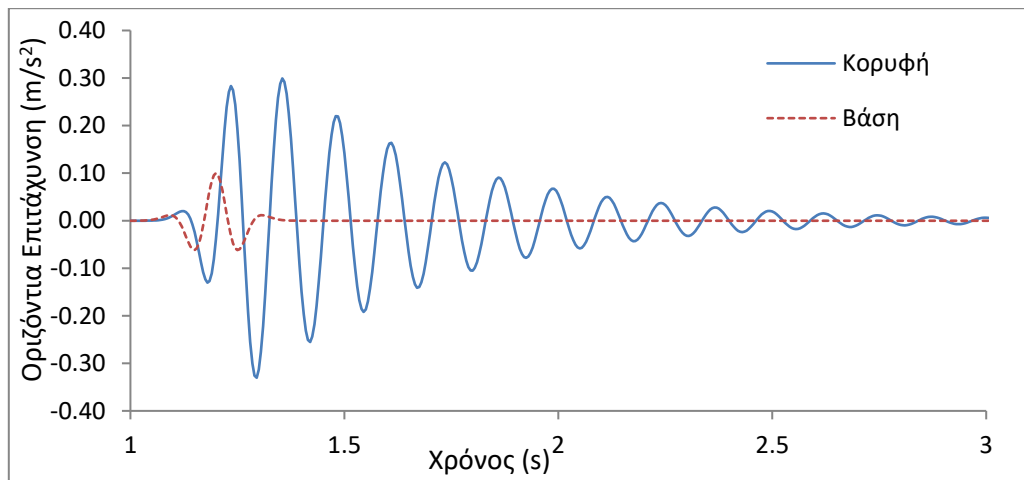
Διάγραμμα 8.22: Έγκοιλο που ξεκινάει στα 6 μέτρα μέχρι τα 12 με Ricker 2 Hz και V_s 400m/s.



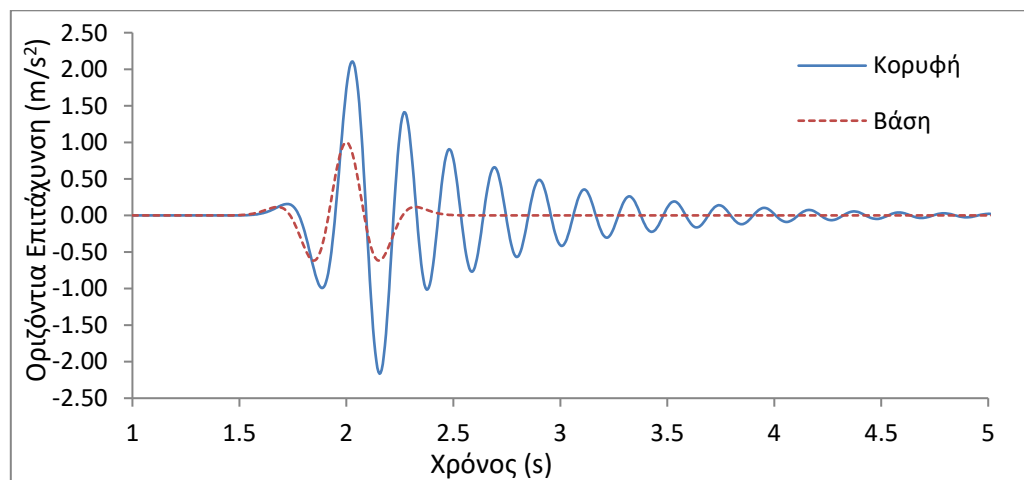
Διάγραμμα 8.23: Έγκοιλο που ξεκινάει στα 6 μέτρα μέχρι τα 12 με Ricker 6 Hz και V_s 800 m/s.



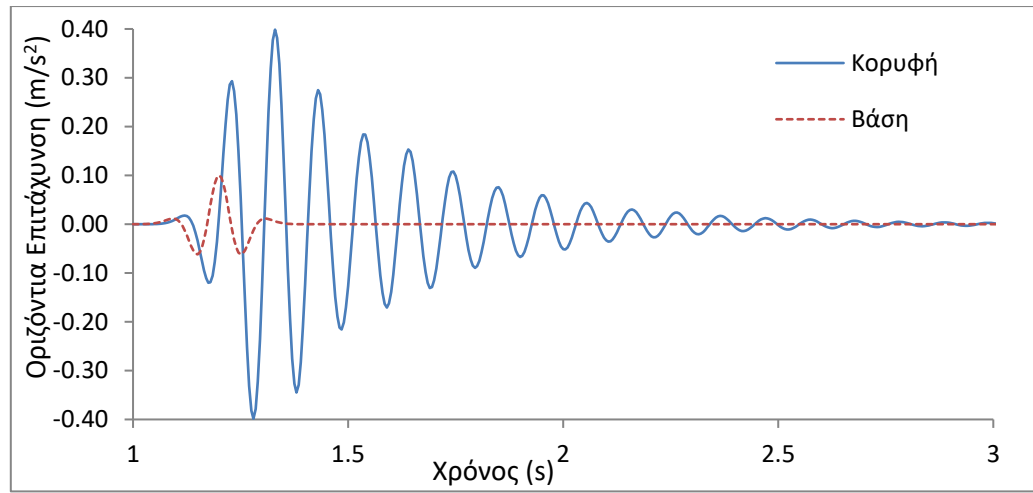
Διάγραμμα 8.24: Σήραγμα με Ricker2 Hz και V_s 400 m/s.



Διάγραμμα 8.25: Σήραγμα με Ricker6 Hz και V_s 800 m/s.



Διάγραμμα 8.26: Δύο έγκοιλα με Ricker2 Hz και V_s 400 m/s.



Διάγραμμα 8.27: Δύο έγκοιλα με Ricker6 Hz και V_s 800 m/s.