



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Διπλωματική εργασία:

*ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΚΟΙΛΑΔΩΝ ΚΑΙ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ*



ΓΑΛΑΝΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Επιβλέποντες:
ΜΑΡΙΝΟΣ ΚΑΤΤΗΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π
ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ ΨΑΡΡΟΠΟΥΛΟΣ, Ε.ΔΙ.Π/Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αντικατοπτρίζει το τελευταίο στάδιο της ολοκλήρωσης των προπτυχιακών μου σπουδών στο Ε.Μ.Π ως Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός. Παρά τις δύσκολες συνθήκες και τα εμπόδια που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου ως φοιτητής, η πραγματοποίηση του στόχου μου, μου επιφέρει μόνο χαρά και ευγνωμοσύνη. Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα τους επιβλέποντες καθηγητές μου κ.Καττή και Ψαρρόπουλο για την ευκαιρία που μου έδωσαν να ασχοληθώ με ένα θέμα πάρα πολύ ενδιαφέρον, για τις πολύτιμες επιστημονικές γνώσεις που μου προσέφεραν, αλλά και για την υποστήριξη και καθοδήγηση που μου παρείχαν μέσα από τις συμβουλές τους. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Γιώργο Καπράλη και τον Μανώλη Κατσιράκη για την βοήθεια που μου παρείχαν σε κομβικά σημεία της παρούσας εργασίας και για τον χρόνο που διέθεσαν. Επιπρόσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Σχολή μου και όλο το διδακτικό προσωπικό, με το οποίο ήρθα σε επαφή που με βοήθησε να σκέφτομαι και να πράττω σαν Μηχανικός μέσα από το μεγάλο εύρος γνώσεων και συμβουλών που μου παρείχε. Θα ήθελα να ευχαριστήσω του συμφοιτητές μου και τους φίλους για την υποστήριξη τους και για όλες τις στιγμές εντός και εκτός της Σχολής που περάσαμε. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου την οικογένεια μου Ηλία, Δέσποινα και Έλενα για όλη την ηθική και υλική υποστήριξη τους, τους αφιερώνω την εργασία και τους είμαι βαθύτατα ευγνώμων, γιατί ότι έχω καταφέρει και θα καταφέρω οφείλεται σε αυτούς.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σύμφωνα με τις σύγχρονες σχεδιαστικές τεχνικές, κατά την ανάλυση μιας γέφυρας δίνεται περισσότερη προσοχή στη μελέτη της σεισμικής απόκρισης της ανωδομής, απ' ό,τι στη μελέτη του εδάφους στο οποίο θεμελιώνεται. Αστοχίες μεγάλων έργων σε ολόκληρο τον κόσμο που προκλήθηκαν μετά από σεισμικά γεγονότα, αποδεικνύουν πόσο απαραίτητη είναι η ανάλυση της απόκρισης του εδαφικού σχηματισμού για τη δυναμική ανάλυση μιας κατασκευής, καθώς η σεισμική απόκρισή της επηρεάζεται από τις γεωλογικές και γεωτεχνικές ιδιότητες του εδάφους θεμελίωσης. Η παρούσα διπλωματική εργασία δίνει έμφαση στην δυναμική απόκριση της κοιλάδας πάνω στην οποία είναι θεμελιωμένη η γέφυρα Ohba-Hashi στην Ιαπωνία. Σε πρώτο στάδιο παρουσιάζονται εισαγωγικές έννοιες σχετικά με την επιρροή των τοπικών συνθηκών στη σεισμική διέγερση με αναφορές σε σημαντικά σεισμικά γεγονότα. Στη συνέχεια μέσω μονοβάθμιων δυναμικών συστημάτων χρησιμοποιώντας αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους εκτιμάται η αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους και κατασκευής στην παρουσίαση συντονιστικών φαινομένων και εφαρμόζεται μία μέθοδος ενίσχυσης του εδάφους η οποία θα μπορούσε να αποτελέσει μέθοδο αντιμετώπισης των φαινομένων αυτών. Τέλος πραγματοποιείται προσομοίωση με αριθμητικές μεθόδους της σεισμικής απόκρισης της κοιλάδας με την χρήση ενόργανων καταγραφών προκειμένου να διαπιστωθεί η έντονη διαφοροποίηση του επιφανειακού σεισμικού κραδασμού από θέση σε θέση και την αλληλεπίδραση που επιφέρει αυτή η διαφοροποίηση, στην ενίσχυση της κατασκευής και επαναλαμβάνεται η χρήση της ενίσχυσης του εδάφους προκειμένου να εξεταστούν τα αποτελέσματα που επιφέρει η μέθοδος σε πιο σύνθετα προσομοιώματα.

ABSTRACT

According to modern design techniques, when analyzing a bridge, more attention is paid to the study of the seismic response of the superstructure than to the study of the ground on which it is based. Failures of major structures around the world caused by seismic events prove how necessary the analysis of the soil formation response is for the dynamic analysis of a structure, as its seismic response is influenced by the geological and geotechnical properties of the supporting soil. This diploma thesis highlights the dynamic response of the valley on which the Ohba-Hashi bridge in Japan is based. In the first stage, introductory concepts are presented regarding the impact of local conditions on seismic excitation with references to important seismic events. Then, through one-dimensional dynamic systems using analytical and numerical methods, the interaction between soil and structure is evaluated in the presentation of resonance phenomena and a soil-improvement method is applied, which may be a way of dealing with these phenomena. Finally, numerical methods are used to simulate the seismic response of the valley using instrumental recordings in order to determine the strong differentiation of surface seismic vibration from position to position and the interaction that this differentiation brings, in the strengthening of the structure and the use of the soil-improvement method is repeated in order to examine the results of the method in more complex simulations.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ABSTRACT	2
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	6
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 Σύντομη ανασκόπηση	8
1.2 Δομή της εργασίας	9
2.ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΤΟΠΙΚΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ.....	11
2.1 Εισαγωγή	11
2.2 Μονοδιάστατες συνθήκες (Στρωματογραφία)	16
2.3 Διδιάστατες (γεωμορφικές) συνθήκες	17
2.4 Διδιάστατες (τοπογραφικές) συνθήκες.....	19
3.ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	21
3.1 Εισαγωγή	21
3.2 Λογισμικό Plaxis & Λογισμικό SeismoSignal.....	22
3.3 Μονοδιάστατες αναλύσεις	23
3.3.1 Πρώτο προκαταρκτικό προσομοίωμα.....	23
3.3.2 Δεύτερο προκαταρκτικό προσομοίωμα.....	29
3.3.3 Τρίτο προκαταρκτικό προσομοίωμα.....	36
3.4 Τρόποι αποφυγής συντονιστικών φαινομένων	40
3.4.1 Εισαγωγή	40
3.4.2 Μέθοδος τοπικής ενίσχυσης εδάφους	42
3.5 Συμπεράσματα	50
4.ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΟΙΛΑΔΑΣ ΟΗΒΑ-ΟHASHI	52
4.1 Εισαγωγή	52
4.2 Περιγραφή της κοιλάδας.....	52
4.3 Ενόργανες καταγραφές	54
4.4 Σεισμική απόκριση κοιλάδας	57
4.4.1 Μονοδιάστατη προσομοίωση.....	58
4.4.2 Διδιάστατη προσομοίωση	64
4.5 Ανάλυση συστήματος εδάφους-κατασκευής	74
4.6 Μέθοδος Grouting.....	79
5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	84

5.1 Συμπεράσματα	84
5.2 Μελλοντικές προτάσεις.....	86
6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	87

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

AF: συντελεστής ενίσχυσης
b: παράμετρος που καθορίζει την δεσπόζουσα συχνότητα f
D: εστιακό βάθος
d: πάχος πλάκας
EI: δυσκαμψία των ιδιοτήτων του υλικού
EA : δυστένεια
f: συχνότητα
f_c: ιδιοσυχνότητα ταλαντωτή
f_s: ιδιοσυχνότητα εδαφικής στρώσης
GBA: εδαφική επιτάχυνση στη βάση του εδαφικού στρώματος
GSA: επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδαφικού στρώματος
G₀: αρχικό μέτρο διάτμησης
G/G_{MAX} : κανονικοποιημένο μέτρο διάτμησης
H : πάχος εδαφικής στρώσης
h : ύψος ταλαντωτή
h₁: βάθος
k: συντελεστής ακαμψίας
L: μήκος
M_L: τοπικό μέγεθος
M_S: επιφανειακό μέγεθος
m: μάζα
N_{SPT}: μετρηθείσα τιμή αριθμού κτύπων πρότυπης δοκιμής διείδυσης
PI: δείκτης πλασιμότητας
PGA: μέγιστη εδαφική επιτάχυνση
R: επίκεντρη απόσταση
Rayleigh α: πρώτος συντελεστής Rayleigh
Rayleigh β : δεύτερος συντελεστής Rayleigh
SV: κατακορύφως διαδιδόμενα κύματα
t: χρονική στιγμή
t₀: παράμετρος που καθορίζει τη χρονική στιγμή που παρουσιάζει μέγιστο ο παλμός
T : περίοδος
u_x: μετατόπιση κατά χ
u_y: μετατόπιση κατά γ
V_p: ταχύτητα διάδοσης διαμήκων κυμάτων
V_s: ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων
γ: ειδικό βάρος
γ_c : διατμητική παραμόρφωση
ξ : απόσβεση υλικού
ν : δείκτης Poisson

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σύντομη ανασκόπηση

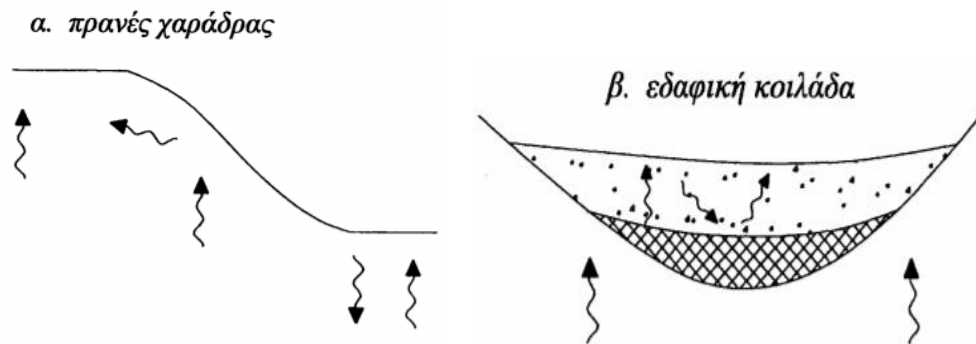
Κατά της εμφάνιση ενός σεισμικού φαινομένου, οι αστοχίες που προκαλούνται σε μία γέφυρα μπορεί να έχουν σοβαρές συνέπειες. Είναι σαφές ότι η κατάρρευση μιας γέφυρας θέτει σε κίνδυνο πολλές ανθρώπινες ζωές. Εκτός από τις υλικές ζημιές, η ανακατασκευή της και ακόμα και η διακοπή λειτουργίας της για κάποιο χρονικό διάστημα έχουν τεράστια οικονομική επίπτωση. Κάθε κατασκευή, και τμήμα αυτής, συμπεριλαμβανομένων και των μη δομικών στοιχείων, πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται προκειμένου να αντιστέκονται στις επιπτώσεις των σεισμικών κινήσεων, όπως ορίζεται από τους αντισεισμικούς κανονισμούς. Σύμφωνα όμως με τις σύγχρονες σχεδιαστικές τεχνικές, κατά την ανάλυση μιας γέφυρας δίνεται περισσότερη προσοχή στη μελέτη της σεισμικής απόκρισης της ανωδομής, απ' ό,τι στη μελέτη του εδάφους στο οποίο θεμελιώνεται.

Οι γέφυρες αποτελούν έργα μεγάλου μήκους τα οποία κατασκευάζονται πάνω σε ποτάμια και κοιλάδες, με αποτέλεσμα η θεμελίωση των βάθρων και των ακροβάθρων τους να πραγματοποιείται σε σημεία τα οποία διαφέρουν ως προς τις στρωματογραφικές, γεωμορφικές και τοπογραφικές συνθήκες. Συνεπώς, η υποεκτίμηση των τοπικών εδαφικών συνθηκών και η αγνόηση της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κατάρρευση του αυτοκινητοδρόμου Hanshin από τον σεισμό στο Kobe της Ιαπωνίας (το 1995) (βλ. Εικόνα 1.1). Τα τεράστια βάθρα του υπερυψωμένου αυτοκινητόδρομου, που συνδέει το Kobe με την Osaka, αστόχησαν στη βάση τους, με αποτέλεσμα ένα κομμάτι του αυτοκινητόδρομου 500 μέτρων να ανατραπεί. Παρόμοια γεγονότα έλαβαν μέρος στο σεισμό Loma Prieta (το 1989) στον κόλπο του San Fransisco με την κατάρρευση της οδογέφυρας του San Fransisco - Oakland .



Εικόνα 1.1 Κατάρρευση του υπερυψωμένου αυτοκινητόδρομου Hanshin, Kobe 1995 (Πηγή: Philip Esper, Clarke Bond et al. 1996)

Η επίδραση του εδάφους στην ένταση της σεισμικής διέγερσης αλλά και στο φασματικό περιεχόμενο της καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική. Αποδεικνύεται πώς εκτός από την επίδραση των στρωματογραφικών συνθηκών, σύμφωνα με καταγραφές από καταστρεπτικούς σεισμούς (Μεξικό 1985, Loma Prieta 1989), οι τοπογραφικές και γεωμορφικές συνθήκες ασκούν σημαντική επιρροή στη σεισμική απόκριση του εδάφους (βλ. Εικόνα 1.2), με αποτέλεσμα ο τρόπος με τον οποίο αποκρίνεται το έδαφος να διαφέρει από θέση σε θέση. *Ο όρος τοπικές εδαφικές συνθήκες περιγράφει, τόσο την τοπογραφική διάταξη του ανάγλυφου, όσο και την επιφανειακή στρωματογραφία (που στην πραγματικότητα είναι και οι δύο τρισδιάστατες).* Αξίζει να αναφερθεί πως, κατά την μελέτη της σεισμικής απόκρισης μιας κατασκευής ενώ το σύστημα έδαφος-κατασκευή και η δυναμική τους αλληλεπίδραση αποτελούν κύριο παράγοντα για την βιωσιμότητα του έργου, αυτή αντιμετωπίζεται με προσεγγιστικό τρόπο, γεγονός που οδηγεί σε αρκετές λανθασμένες εκτιμήσεις.



Εικόνα 2.1 α) Εδαφική ενίσχυση λόγω τοπογραφικών συνθηκών β) Εδαφική ενίσχυση λόγω γεωμορφικών συνθηκών (Πηγή: Ψαρρόπουλος, 2000)

1.2 Δομή της εργασίας

Το Κεφάλαιο 2 αναφέρεται στην επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών σε μία σεισμική διέγερση. Οι τοπικές εδαφικές συνθήκες αναφέρονται στις στρωματογραφικές συνθήκες (ύπαρξη οριζόντιων εδαφικών σχηματισμών) που περιγράφουν τις μονοδιάστατες συνθήκες, στις γεωμορφικές συνθήκες (ύπαρξη γεωμετρικών στρωματογραφικών ανωμαλιών) που περιγράφουν τις διδιάστατες συνθήκες και στις τοπογραφικές συνθήκες (ύπαρξη επιφανειακών γεωμετρικών ανωμαλιών). Αρχικά παρουσιάζεται μία εισαγωγική ενότητα σχετικά με τις τοπικές συνθήκες και γίνεται αναφορά στις πρώτες καταγραφές του σεισμού του Μεξικού και του San Fransisco, οι οποίες αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα για την σημασία της διαφοροποίησης των σεισμικών κυμάτων που οδηγούν σε ενισχυμένες εδαφικές κινήσεις. Στη συνέχεια περιγράφονται τα φυσικά φαινόμενα που διέπουν την επίδραση των τοπικών συνθηκών στη σεισμική διέγερση (στρωματογραφικές, γεωμορφικές, τοπογραφικές συνθήκες).

Στο Κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται (με τη χρήση του κώδικα Plaxis), μονοδιάστατη ανάλυση σε τρία προκαταρκτικά προσομοιώματα χρησιμοποιώντας περιπτώσεις εύκαμπτων και άκαμπτων εδαφικών στρώσεων, στα οποία εδράζεται ένας μονοβάθμιος ταλαντωτής. Η μονοδιάστατη ανάλυση απόκρισης εδάφους είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη διερεύνηση της τοπικής ενίσχυσης που συμβαίνει μέσα σε μια απόθεση εδάφους, επιλύοντας το πρόβλημα των οριζόντιων διατμητικών κυμάτων που διαδίδονται κατακόρυφα μέσω ενός άπειρου οριζόντια πολυεπίπεδου εδαφικού συστήματος. Στα πρώτα δύο προσομοιώματα ελέγχεται η αξιοπιστία του λογισμικού συγκρίνοντας τα αναλυτικά με τα αριθμητικά αποτελέσματα και προσδιορίζοντας τον συντελεστή ενίσχυσης και την αντίστοιχη ιδιοσυχνότητά του. Στο τρίτο προσομοίωμα γίνεται αντιληπτή η αλληλεπίδραση του εδάφους με την κατασκευή σε μία σεισμική διέγερση, με το φαινόμενο του διπλού συντονισμού όπου η ιδιοσυχνότητα της εδαφικής στρώσης ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα του συστήματος έδαφος-κατασκευή. Στη συνέχεια εφαρμόζεται στο τελευταίο προσομοίωμα μια μέθοδος τοπικής ενίσχυσης του εδάφους (ευέλικτη μέθοδος με την οποία πραγματοποιείται η έγχυση αντλούμενων υλικών στο έδαφος για τη δημιουργία επιτόπου μηχανικών γεωμετριών με σκοπό την αλλαγή των φυσικών χαρακτηριστικών του) προκειμένου οι τοπικές εδαφικές συνθήκες να μην ενισχύουν τη σεισμική απόκριση του εδάφους και της κατασκευής αλλά να δρουν αποσυντονιστικά.

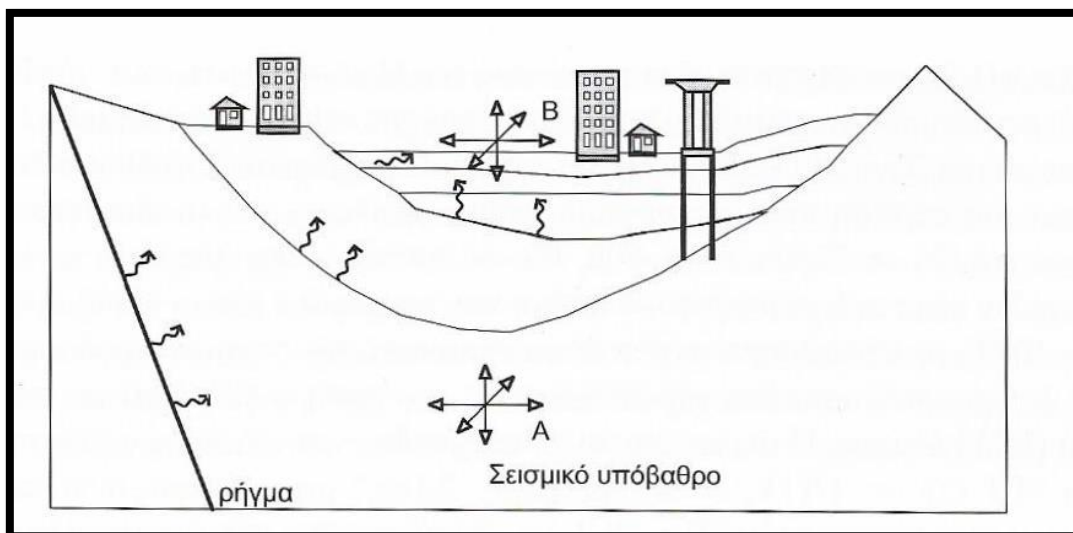
Στο Κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται προσομοίωση της κοιλάδας, Ohba-Ohashi η οποία χαρακτηρίζεται από πολύ μαλακές εδαφικές εναποθέσεις με διδιάστατη γεωμετρία (γεωμορφικές συνθήκες). Αρχικά, αφού πραγματοποιείται μία σύντομη περιγραφή για την κοιλάδα, παρουσιάζονται οι πραγματικές διαθέσιμες καταγραφές επιταχυνσιογράφων στην επιφάνεια και στο σεισμικό υπόβαθρο της κοιλάδας από τέσσερα διαφορετικά σεισμικά γεγονότα. Στην συνέχεια παρουσιάζεται προσπάθεια των Gazetas και Fan για τη μονοδιάστατη προσομοίωση της κοιλάδας, η οποία κρίνεται ανεπιτυχής λόγω των ιδιαίτερων μηχανικών και γεωμορφικών χαρακτηριστικών της. Σε επόμενο στάδιο προσομοιώνεται με αριθμητικές μεθόδους η σεισμική απόκριση της κοιλάδας, εφαρμόζοντας ως φόρτιση στη βάση του προσομοιώματος τις σεισμικές δονήσεις από τις πραγματικές καταγραφές όπου επιβεβαιώνονται οι έντονες καταγραφείσες ενισχύσεις στην επιφάνεια του μοντέλου, και διαπιστώνεται η έντονη διαφοροποίηση του επιφανειακού σεισμικού κραδασμού από θέση σε θέση. Επιπροσθέτως εξετάζεται η επιρροή που επιφέρουν οι γεωμορφικές συνθήκες στην κατασκευή της ανωδομής, τοποθετώντας τρεις μονοβάθμιους ταλαντωτές σε σημεία που πραγματοποιείται αλλαγή στη μορφολογία του εδαφικού στρώματος και συγκρίνοντας την ενίσχυση που αναπτύσσεται σε κάθε ταλαντωτή αντίστοιχα. Τέλος εφαρμόζεται και στην παρούσα περίπτωση η μέθοδος ενίσχυσης του εδάφους εξετάζοντας τα αποτελέσματα που επιφέρει στην ενίσχυση της απόκρισης σε πιο πολύπλοκα εδαφικά προσομοιώματα.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται μία σύνοψη των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης και εξάγονται τα συμπεράσματα σχετικά με την σεισμική απόκριση του εδάφους και της κατασκευής, με βάση τις τοπικές συνθήκες που επικρατούν. Τέλος γίνονται προτάσεις σχετικά με τη βελτιστοποίηση και τη μελλοντική περαιτέρω εμβάθυνση της παρούσας μελέτης.

2.ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΤΟΠΙΚΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Η σεισμική απόκριση του εδάφους και συνεπώς ο τρόπος με τον οποίο αποκρίνονται οι κατασκευές (Εικόνα 2.1) εξαρτώνται από την επιφανειακή γεωλογία και τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των εδαφικών αποθέσεων. Η μεταβολή της εδαφικής κίνησης στο χώρο και η μεταβολή της έντασης, της συχνότητας και της διάρκειας της ταλάντωσης του εδάφους, είναι γεγονότα που χαρακτηρίζουν την επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών (site effects) και της επιφανειακής γεωλογίας και τοπογραφίας. Η διαφοροποίηση των σεισμικών κυμάτων που προκύπτει μεταξύ των εδαφικών αποθέσεων και του σκληρού υπόβαθρου, αντικατοπτρίζει την επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών η οποία μπορεί να περιγραφεί με την χρήση μονοδιάστατων (1Δ) γραμμικών η μη προσομοιωμάτων. Είναι αξιοσημείωτο ότι, η επίδραση των βαθιών ιζηματογενών κοιλάδων και των ορίων τους περιλαμβάνεται και αυτή στην επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών λόγω της ιδιαίτερης γεωμορφολογίας που εμφανίζεται (π.χ ανάγλυφο του υπεδάφους, ρήγματα, απότομα πρανή) που μπορεί να μελετηθεί με την χρήση αριθμητικών προσομοιωμάτων δύο και τριών διαστάσεων (2Δ και 3Δ) αντίστοιχα. Το ίδιο ισχύει και για την μελέτη της διαφοροποίησης των χαρακτηριστικών της εδαφικής κίνησης λόγω της επιφανειακής τοπογραφίας.

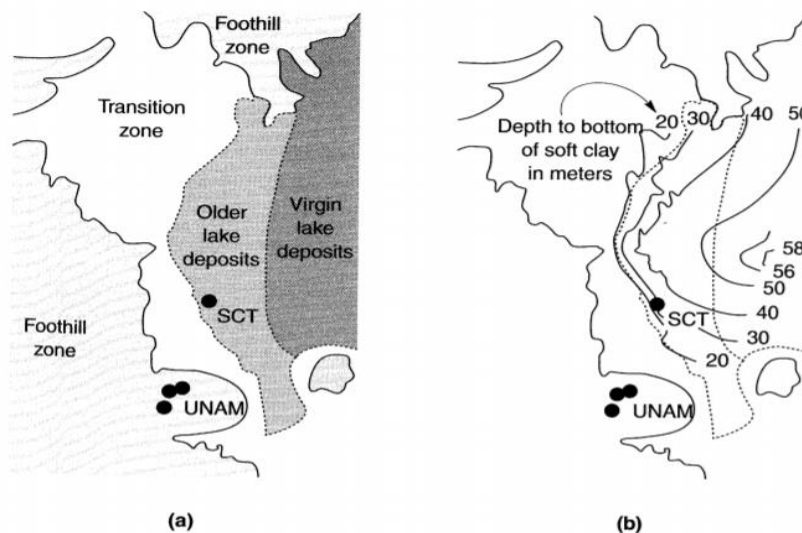


Εικόνα 2.1. Σχηματική περιγραφή της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων σε επιφανειακούς γεωλογικούς σχηματισμούς (Πηγή: Πιτιλάκης, 2010)

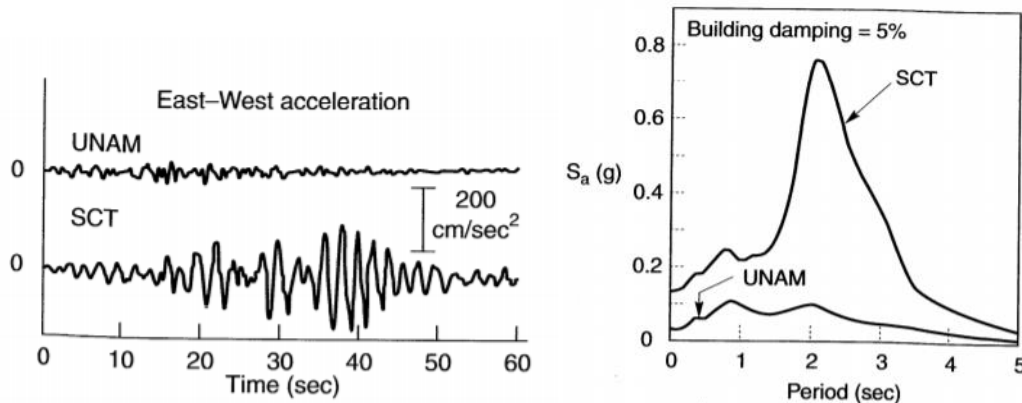
Με τη δημιουργία πυκνών δικτύων επιταχυνσιογράφων σε ολόκληρο το κόσμο, γίνεται ευκολότερα κατανοητή η φυσική που διέπει την πολύπλοκη διάδοση των σεισμικών

κυμάτων στους επιφανειακούς γεωλογικούς και εδαφικούς σχηματισμούς, η εκτίμηση της σπουδαιότητας και η ποσοτικοποίηση των φαινομένων που σχετίζονται με την επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών. Οι καταγραφές που προέκυψαν στους σεισμούς στην πόλη του Μεξικού (1985) και στον σεισμό του San Francisco, από σταθμούς που βρίσκονταν εγκατεστημένοι σε περιοχές όπου επικρατούσαν διαφορετικές συνθήκες, αποτέλεσαν προκαταρκτικό παράγοντα για την σημασία της διαφοράς στην ενίσχυση των σεισμικών κυμάτων κατά πολύ ακριβή τεκμηριωμένο τρόπο.

Στο Μεξικό, το 1985, ο σεισμός Michoacan ($M_s=8.1$) προκάλεσε μέτριες ζημιές στις περιοχές που βρίσκονταν κοντά στο επίκεντρο, αλλά σε απόσταση 400 km περίπου παρατηρήθηκαν εκτεταμένες ζημιές. Από αρκετές καταγραφές της εδαφικής κίνησης που πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες πόλεις του Μεξικού, αναδεικνύουν τη σχέση μεταξύ των τοπικών εδαφικών συνθηκών και των καταστρεπτικών εδαφικών κινήσεων. Η πόλη του Μεξικού χωρίζεται σε τρεις ζώνες ανάλογα με το είδος το συνθηκών που επικρατούν στο υπέδαφος, στη ζώνη με ρηχές συμπαγείς αποθέσεις (Foothill Zone), στη ζώνη με πυκνές αποθέσεις μαλακού εδάφους (Lake Zone) και στη ζώνη μαλακού εδάφους με αλλουβιακές εναποθέσεις (Transition Zone), στις οποίες προϋπήρχαν πριν από τον σεισμό Michoacan σεισμικά όργανα που κατέγραφαν την εδαφική κίνηση. Όπως διακρίνεται στην Εικόνα 2.2.α, τα όργανα αυτά ήταν τοποθετημένα σε σταθμό που εδράζεται πάνω σε σκληρό έδαφος (UNAM) και σε σταθμό με μαλακό έδαφος. Στο σεισμό Michoacan οι καταγραφές της μέγιστης επιτάχυνσης στο μαλακό έδαφος του σταθμού (SCT) ήταν σχεδόν πενταπλάσια σε μέγεθος από εκείνες του (Unam) Εικόνα 2.3. Περισσότερο επλήγησαν τα κτίρια ύψους 15-60 μέτρων στη ζώνη (Lake Zone). Εξαιτίας του μαλακού εδάφους η ιδιοπερίοδος της εδαφικής απόθεσης συντονίστηκε με την ιδιοπερίοδο των κατασκευών αυτών, γεγονός που οδήγησε στην κατάρρευσή τους. Σε κτίρια μικρού ύψους ή ουρανοξύστες παρατηρήθηκαν μέτριες ζημιές. Διαπιστώνεται πως το φαινόμενο του διπλού συντονισμού (ενίσχυση του σκληρού υπόβαθρου με τις εδαφικές εναποθέσεις και η ενίσχυση της εδαφικής κίνησης με την κατασκευή στην ανωδομή), σε συνδυασμό με τυχόν κατασκευαστικές αστοχίες, δημιουργεί καταστροφικές αστοχίες σε τοπικό επίπεδο.

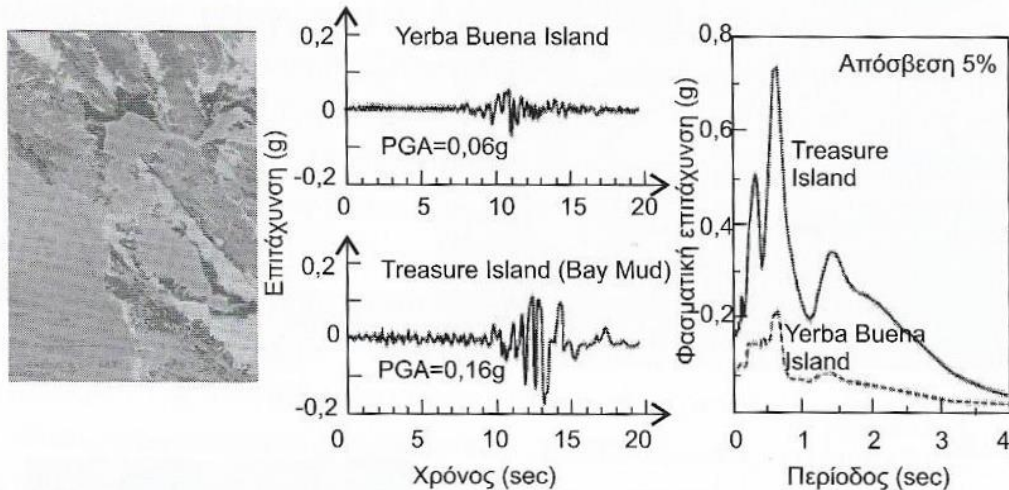


Εικόνα 2.2 (α) Όργανα σεισμικών καταγραφών και οι ζώνες εδαφικής διαφοροποίησης (β) ισούψεις μαλακών εναποθέσεων (Πηγή: Kramer, 1995)



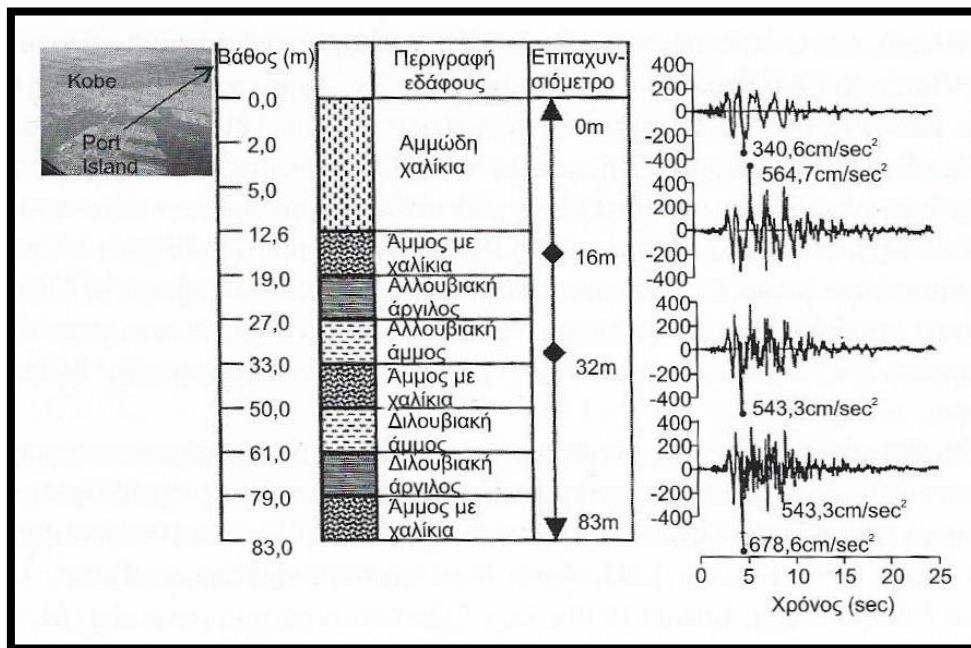
Εικόνα 2.3 Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και φασματική απόκριση των SCT-UNAM (Πηγή: Kramer, 1995)

Παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του σεισμού του Μεξικού καταγράφηκε το 1989 στη Loma Prieta ($M_s=6.9$) 100 km νότια από τον κόλπο του San Francisco. Η ένταση σε περιοχές κοντά στο επίκεντρο ήταν ασθενέστερες από ότι σε μερικές περιοχές στο κόλπο του Oakland και του San Francisco. Το γεγονός ότι ο σεισμός δημιούργησε μεγαλύτερες καταστροφές σε συγκεκριμένες περιοχές αποδεικνύει ότι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες είναι σημαντικές. Η σύσταση του εδάφους στον κόλπο του San Francisco αποτελείται από επιφανειακά πολύ χαλαρούς σχηματισμούς αργιλιώδους λάσπης (*San Francisco Bay Mud*). Επιταχυνσιογράφοι τοποθετημένοι στη θέση του *Yerba Buena Island* (βράχος) και στη θέση *Treasure Island* (17 m ήλις του κόλπου San Francisco, επικαθήμενη σε 14 m αμμώδους στρώσης που υπέρκειται του βραχώδους υπόβαθρου). Οι καταγραφές στη θέση του Yerba Buena Island και Treasure Island, παρότι οι σταθμοί βρίσκονταν σε περίπου ίδια απόσταση από το επίκεντρο του σεισμού, διέφεραν σημαντικά Εικόνα 2.4. Η ενίσχυση της εδαφικής κίνησης των μαλακών εδαφικών εναποθέσεων δημιούργησε το φαινόμενο του συντονισμού οδηγώντας σε μεγάλες καταστροφές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κατάρρευση του διώροφου αυτοκινητοδρόμου-γέφυρας Cypress Viaduct.



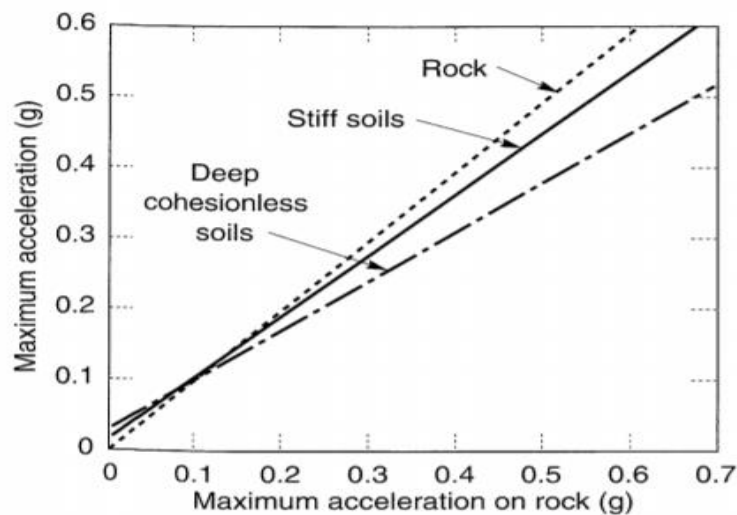
Εικόνα 2.4. Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και φασματική απόκριση στις περιοχές Yerba Buena Island και Treasure Island (Bay Mud) (Πηγή: Πιτιλάκης, 2010)

Εκτός από τους σεισμούς στο Μεξικό(1985) και στο κόλπο του San Francisco (1989) μεταγενέστεροι σεισμοί (Armenia 1998, Philippines 1990, Northridge 1994, Kobe 1995, Turkey 1999, Αθήνα 1999, Chi-Chi Taiwan 1999 κ.λπ) αποτέλεσαν αποδείξεις για την σημαντική επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών. Ειδικά στον σεισμό του Kobe ($M_s=7.2$, 1995) δόθηκε η ευκαιρία να διαπιστωθεί ο ρόλος των μαλακών και χαλαρών εδαφικών σχηματισμών και της μη-γραμμικής συμπεριφοράς των εδαφών, στην περίπτωση ισχυρών κραδασμών. Στην Εικόνα 2.5 παρουσιάζονται οι καταγραφές της οριζόντιας επιτάχυνσης (NS) σε ένα κατακόρυφο δίκτυο επιταχυνσιογράφων στο Port Island.



Εικόνα 2.5. Καταγραφές ισχυρής εδαφικής ταλάντωσης σε κατακόρυφο δίκτυο επιταχυνσιογράφων κατά τον σεισμό Kobe 1995 (Πηγή: Πιτιλάκης, 2010)

Οι τοπικές εδαφικές συνθήκες που επικρατούν, αποτελούν σημαντική επίδραση στην αύξηση ή μείωση της οριζόντιας επιτάχυνσης και του μεγέθους του φάσματος απόκρισης αντίστοιχα, λόγω των ιδιαίτερων εδαφικών χαρακτηριστικών και γεωμετρικών παραμέτρων της εδαφικής απόθεσης και της επιφανειακής τοπογραφίας. Συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών τύπου εδαφών, επιφέρουν διαφορετικά αποτελέσματα αναφορικά με τη συμπεριφορά της ενίσχυσης (Seed et al. 1976). Σύμφωνα με το διάγραμμα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.6, οι επιτάχυνση στην επιφάνεια εδαφικών εναποθέσεων είναι μεγαλύτερη από την επιτάχυνση σε βραχώδες υπόβαθρο. Αυτή η διαφοροποίηση εξαρτάται από παραμέτρους που εξαρτώνται από τη δυναμική συμπεριφορά (π.χ. ένταση του προσπίπτοντος κυματικού πεδίου), τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους (π.χ. ο δείκτης πλαστικότητας P_I , οι ταχύτητες V_s , V_p , το μέτρο διάτμησης G_0 κ.λ.π) και με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής (π.χ. η τοπογραφία, απότομα πρανή, έντονο ανάγλυφο).



Εικόνα 2.6. Προσεγγιστικές σχέσεις της μέγιστης επιτάχυνσης μεταξύ βραχώδους υπόβαθρου και άλλων τοπικών εδαφικών συνθηκών (Πηγή: Seed et al., 1976)

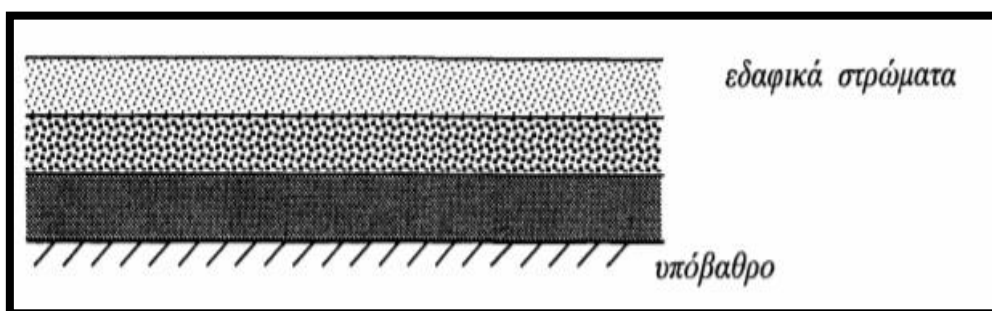
Αναγκαία προϋπόθεση αποτελεί η ακριβής περιγραφή των χαρακτηριστικών του εδάφους για την περιοχή μελέτης, για την καλύτερη κατανόηση της χωρικής μεταβολής της κίνησης του εδάφους σε κάθε περίπτωση, καθώς και για την ποσοτικοποίησή της. Ο χαρακτηρισμός της θέσης και των εδαφών που συνθέτουν την επιφανειακή γεωλογία είναι μια σημαντική και απολύτως αναγκαία παράμετρος για τις αναλύσεις. Οι τοπικές εδαφικές συνθήκες και η γεωμετρία που χαρακτηρίζει την περιοχή είναι σημαντικές για την εφαρμογή και τη σωστή αξιολόγηση ερευνητικών μελετών.

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου παρουσιάζονται οι συνιστώσες της επίδρασης των τοπικών συνθηκών οι οποίες αναφέρονται στις μονοδιάστατες συνθήκες (εδαφική στρωματογραφία), στις διδιάστατες συνθήκες (γεωμορφικές συνθήκες που περιλαμβάνουν την γεωλογική δομή και την χωρική διάταξη τού υποβάθρου) και στις τοπογραφικές συνθήκες.

2.2 Μονοδιάστατες συνθήκες (Στρωματογραφία)

Η απλοποίηση της σύνθετης πραγματικότητας επιτυγχάνεται με την παρουσία ενός ή περισσότερων οριζοντίων εδαφικών στρωμάτων τα οποία θεωρείται πως εκτείνονται στο άπειρο (μονοδιάστατες εδαφικές συνθήκες) Εικόνα 2.5. Η σεισμική συμπεριφορά των εδαφικών στρωμάτων οφείλεται αποκλειστικά στην κατακόρυφη διάδοση οριζοντίων διατμητικών κυμάτων από το υποκείμενο υπόβαθρο προς την επιφάνεια μέσω του εδάφους, και η φυσική ερμηνεία του φαινομένου της εδαφικής ενίσχυσης (ή της εδαφικής απομείωσης σε ορισμένες περιπτώσεις) έγκειται στην παγίδευση των κυμάτων αυτών λόγω της σταδιακής απομείωσης τόσο της ταχύτητας διαδόσεως διατμητικών κυμάτων όσο και της πυκνότητας των εδαφικών υλικών. Το κάθε εδαφικό στρώμα αποτελεί φίλτρο των κυμάτων που διαδίδονται, ενισχύοντας τις αρμονικές συνιστώσες των προσπίπτοντων κυμάτων των οποίων η συχνότητα πλησιάζει τις ιδιοσυχνότητες του. Στην περίπτωση όπου αυτές ταυτιστούν παρατηρείται το φαινόμενο του συντονισμού, και η εδαφική ενίσχυση μεγιστοποιείται (Roesset & Whitman 1969, Seed & Idriss 1969).

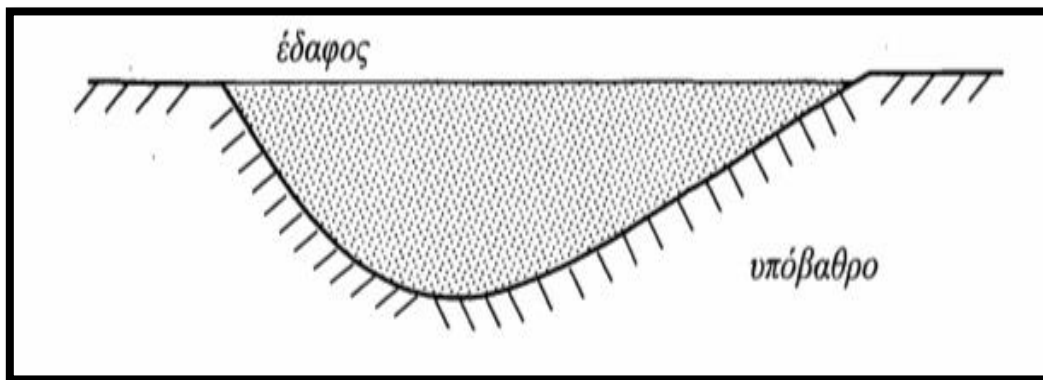
Τα αποτελέσματα του μονοδιάστατου προσομοιώματος (οριζόντια στρωματογραφία) πλησιάζουν την πραγματικότητα όταν παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ μονοδιάστατων αναλύσεων και καταγραφών. Όταν όμως οι γεωμορφολογικές συνθήκες παρουσιάζουν χωρική ποικιλομορφία χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση, η απλούστερη δυνατή λύση, όπου πραγματοποιούνται πολλαπλές μονοδιάστατες αναλύσεις για κάθε εδαφικό στρώμα στη θέση ενδιαφέροντος. Η μονοδιάστατη θεώρηση αδυνατεί να επιφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα αριθμητικών λύσεων στην προσομοίωση όταν παρουσιάζονται έντονες γεωμορφικές και τοπογραφικές διακυμάνσεις. Η διδιάστατη ή τρισδιάστατη θεώρηση αποτελεί λύση του παραπάνω προβλήματος διότι μπορεί να λάβει υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της προ μελέτη περιοχής.



Εικόνα 2.5. Στρωματογραφικές (μονοδιάστατες) συνθήκες (Πηγή: Ψαρρόπουλος, 2001)

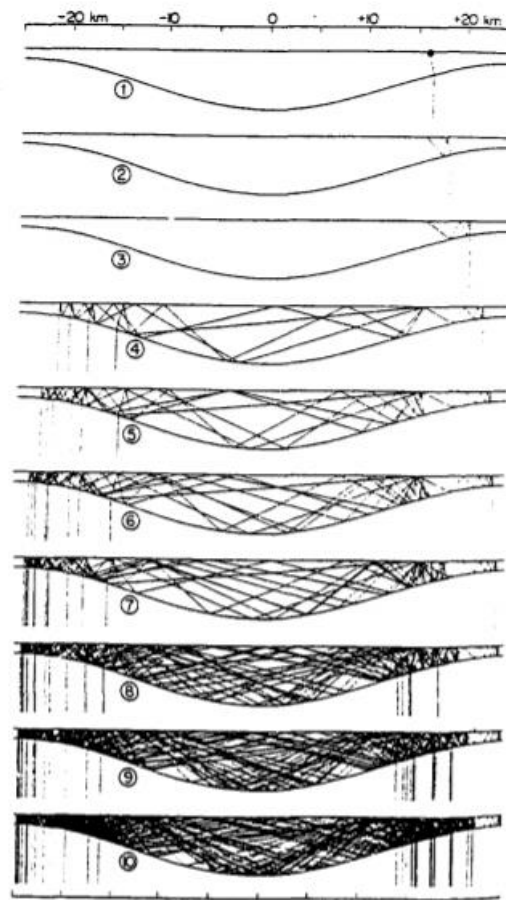
2.3 Διδιάστατες (γεωμορφικές) συνθήκες

Σύμφωνα με μελέτες έχει αποδειχθεί πως η σεισμική ενίσχυση στο έδαφος οφείλεται στις γεωμορφολογικές συνθήκες εξίσου όπως και στις συνθήκες της στρωματογραφίας. Συνεπώς οι μονοδιάστατες αναλύσεις (1D) δεν παρουσιάζουν αξιοπιστία σε πολύπλοκες γεωμετρίες της περιοχής και σε μεγάλες διακυμάνσεις που εμφανίζονται στις καταγραφές των επιταχύνσεων με αποτέλεσμα να υποεκτιμάται ο συντελεστής της εδαφικής ενίσχυσης. Χαρακτηριστική περίπτωση γεωμορφολογικής ανωμαλίας αποτελούν οι κοιλάδες εδαφικών αποθέσεων Εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.6. Διδιάστατες (γεωμορφικές) συνθήκες (Πηγή: Ψαρρόπουλος, 2001)

Αξίζει να σημειωθεί ότι πολλές μελέτες τα τελευταία χρόνια σε διδιάστατα προσομοιώματα για τη διερεύνηση της επίδρασης των κοιλάδων στον επιφανειακό σεισμικό κραδασμό έχουν δείξει ότι ένα σεισμικό κύμα όταν εισχωρήσει σε μία κοιλάδα μέσω του κυρτού βραχώδους υποβάθρου της μπορεί να παγιδευτεί μέσα σε αυτήν αν αναπτυχθούν υπερκρίσιμες γωνίες πρόσπτωσης, ενώ τα κύματα χώρου που εισέρχονται από τα άκρα της κοιλάδας μετατρέπονται σε επιφανειακά κύματα που πηγαινοέρχονται και συγκρούονται μεταξύ των δύο άκρων της κοιλάδας γεγονός που οδηγεί σε υψηλές εδαφικές ενισχύσεις Εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7. Πρόβλεψη των Hong & Helmberger (1978) για τις διαδρομές κυμάτων που διέρχονται από ένα συγκεκριμένο σημείο (16 km από το μέσον) μιας εδαφικής κοιλάδας (Πηγή: Ψαρρόπουλος, 2001)

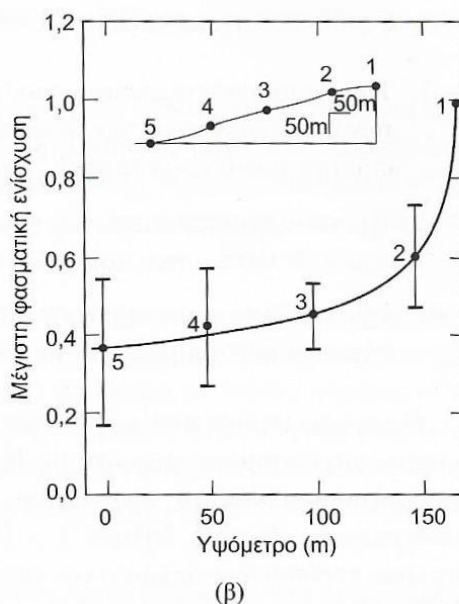
Όπως αποδεικνύεται από τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώματων στα παρακάτω κεφάλαια (Κεφάλαια 3,4) ο τρόπος με τον οποίο συμπεριφέρεται μία κοιλάδα σε μία σεισμική διέγερση εξαρτάται από τα μηχανικά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τα οποία την απαρτίζουν. Αυτοί οι δύο παράγοντες σε ισχυρούς σεισμούς και σε ευαίσθητες κατασκευές μπορούν να οδηγήσουν στην αύξηση των κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης των δυναμικών τάσεων και παραμορφώσεων το οποίο συνεπάγεται επιπρόσθετη καταπόνηση στις κατασκευές της ανωδομής.

Κατά την προσομοίωση κοιλάδων με έντονες γεωμορφολογικές ασυνέχειες και σχηματισμούς χρησιμοποιούνται αριθμητικοί μέθοδοι (π.χ μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων) σε συνδυασμό με πραγματικές καταγραφές οι οποίες προέρχονται από τη χρήση monitor σε διάφορα σημεία μέσα στο υπέδαφος και την κατασκευή, που οδηγούν σε ποιοτικά αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση των γεωμορφικών συνθηκών. Γενικά οι γεωμορφικές συνθήκες (σε συνδυασμό βεβαίως με την στρωματογραφία) μπορεί να αποδειχθούν καθοριστικός παράγοντας για τη σεισμική απόκριση μιας περιοχής και των κατασκευών που βρίσκονται θεμελιωμένες σε αυτή. Παραδόξως οι αντισεισμικοί κανονισμοί επιλέγουν να βασιστούν σε πιο απλοϊκά μοντέλα όπως αυτό της οριζόντιας στρωματογραφίας διότι η κατηγοριοποίηση των γεωμορφικών συνθηκών και η ρεαλιστική μοντελοποίηση τους καθίσταται δύσκολη.

2.4 Διδιάστατες (τοπογραφικές) συνθήκες

Το έντονο ανάγλυφο, με απότομα και ψηλά πρανή, βαθιές χαράδρες και πολλές εδαφικές διακυμάνσεις, έχει αποδειχθεί πως μετά την εμφάνιση ενός σεισμικού φαινομένου επιφέρει σημαντικές και μεγαλύτερες καταστροφές σε κατασκευές που εδράζονται σε περιοχές με τα παραπάνω χαρακτηριστικά από κατασκευές που δεν βρίσκονται τόσο κοντά αντίστοιχα. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελούν οι σεισμοί: Friuli, Italy 1976, Irpinia, Italy 1980, Vina del Mar, Chile 1985, Whittier-Narrows, California, USA 1987.

Στη σύγχρονη εποχή, υπάρχουν λίγες ενόργανες ενδείξεις που αποδεικνύουν την επίδραση της τοπογραφίας στην ενίσχυση της συχνότητας στην εδαφική στρώση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι ενδείξεις ενός επιταχυνσιογράφου σεισμό του San Fernando 1971 στο φράγμα Rasoima Dam. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα καταγράφηκαν οριζόντιες επιταχύνσεις 1.25g σε δύο κάθετες κατευθύνσεις, οι οποίες για σεισμό κλίμακας $M_L=6.4$ καθίστανται πολύ μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες. Ο επιταχυνσιογράφος ήταν τοποθετημένος σε μία βραχώδης κορυφογραμμή πλησίον στο φράγμα (Trifunac and Hudson, 1971). Αξιοσημείωτη είναι και η περίπτωση στην πλαγιά του λόφου Matsuzaki στην Ιαπωνία (Jibson 1987), όπου καταγράφηκε η ενίσχυση κοντά στην κορυφογραμμή σε πέντε σεισμούς. Στην Εικόνα 2.8 φαίνεται πως η τιμή της επιτάχυνσης διαφοροποιείται σε διάφορα σημεία κατά μήκος της κορυφογραμμής. Η μέση επιτάχυνση στην κορυφή είναι 2.5 φορές από αυτή στη βάση της πλαγιάς.



Εικόνα 2.8 Μέγιστη φασματική ενίσχυση της κίνησης κατά μήκος του πρανούς Matsuzaki, Ιαπωνία (Πηγή: Πιτιλάκης, 2010)

Σύμφωνα με τους Geli et al (1988), η ταυτόχρονη επίδραση των αυξομειώσεων στις ταχύτητες του κύματος V_s του υπεδάφους μπορεί να είναι εξίσου σημαντικές, αν και το τελευταίο δεν είναι τόσο καλά τεκμηριωμένο. Η ενίσχυση, παρατηρείται να λαμβάνει μέγιστες τιμές σε τοπογραφικές διατάξεις με απότομη κλίση. Τα φαινόμενα αυτά οδηγούν σε σύνθετα φαινόμενα ενίσχυσης, απομείωσης και στη δημιουργία διαφορικών κινήσεων κατά μήκος των πρηνών.

Η επίδραση της τοπογραφίας στη σεισμική εδαφική κίνηση σχετίζεται κυρίως με τρία φυσικά φαινόμενα (Bard 1990):

1. Την ευαισθησία της εδαφικής κίνησης στη γωνία πρόσπτωσης των κυμάτων, η οποία λαμβάνει μέγιστες τιμές για κύματα SV στην κρίσιμη γωνία και διαφοροποιείται με βάση την κλίση του πρηνούς.
2. Την εστίαση και την από-εστίαση των κυμάτων της σεισμικής διέγερσης συναρτήσει της τοπογραφικής ανωμαλίας
3. Τη διάθλαση των κυμάτων χώρου κι επιφάνειας, που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις.

Αρκετές μελέτες αναπτύχθηκαν, προσπαθώντας να εξετάσουν τη σημασία κάθε παράγοντα που επηρεάζει το πρόβλημα τοπογραφικής επιρροής. Αξιοσημείωτη είναι η μελέτη από τους Ashford and Sitar (1972) οι οποίοι παρατήρησαν ότι τα κατακόρυφα διαδιδόμενα κύματα επιφέρουν μεγαλύτερη απόλυτη επιτάχυνση. Σε παρόμοιο συμπέρασμα οδηγήθηκαν οι Assimaki and Gazetas (2004) μετά από σειρά παραμετρικών αναλύσεων, που έδειξαν πως η ενίσχυση μεγιστοποιείται για κύματα SV υπό κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης. Η συχνότητα της εδαφικής κίνησης μαζί με τα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εδάφους καθορίζει το μήκος κύματος, καθώς για μεγάλα μήκη κύματος (πολύ μικρές συχνότητες) η επίδραση της τοπογραφίας είναι αμελητέα, ενώ γίνεται για μήκη κύματος συγκρίσιμα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αναγλύφου (Ashfor and Sitar, 1972, Ohtsuki and Harmoni, 1983). Σημαντική είναι επίσης η μελέτη των Boore et al (1981), Ashford and Sitar (1972), Bouchon (1973), η οποία περιγράφει την επίδραση της γεωμετρίας του πρηνούς στην ενίσχυση καθώς απότομη αύξηση της κλίσης επιφέρει αύξηση της ενίσχυσης.

Εν κατακλείδι, τα θεωρητικά αποτελέσματα συμφωνούν ποιοτικά με τις παρατηρήσεις για την ενίσχυση που δημιουργείται λόγω της ύπαρξης του φαινομένου της τοπογραφικής επιρροής. Η επιρροή στην οριζόντια συνιστώσα (διατμητική κίνηση S) της εδαφικής κίνησης είναι ισχυρότερη από ότι στην κατακόρυφη (κίνηση P) και η ενίσχυση στην κορυφή αυξάνεται συναρτήσει της κλίσης του πρηνούς. Η σχέση μεταξύ των γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών και του μήκους κύματος αποτελούν ιδιαίτερη σημασία. Σύμφωνα με τον Geli et al (1988) η εκτίμηση της επιρροής της στρωματογραφίας και της τοπογραφίας αντίστοιχα, δεν μπορεί να επιτευχθεί ξεχωριστά. Τα τρισδιάστατα φαινόμενα και η ύπαρξη γειτονικών τοπογραφικών εξάρσεων δυσκολεύουν την εκτίμηση της τοπογραφικής επιρροής εκτός από την τοπογραφία και τις ιδιότητες του εδάφους.

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

3.1 Εισαγωγή

Το έδαφος και οι κατασκευές συχνά υπόκεινται, όχι μόνο σε στατικές φορτίσεις, αλλά και σε δυναμικές φορτίσεις. Εάν τα φορτία είναι μεγάλα, όπως στους σεισμούς, ενδέχεται να προκαλέσουν σοβαρές ζημιές. Σκοπός του αντισεισμικού σχεδιασμού μέσα από την γεωτεχνική σεισμική μηχανική είναι η μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς του συστήματος έδαφος-κατασκευή προκειμένου οι κατασκευές να ανθίστανται επαρκώς σε σεισμικές διεγέρσεις, με τελικό σκοπό τη μεγιστοποίηση της ασφάλειας των ανθρώπινων ζωών και την μείωση των υλικών καταστροφών. Προκειμένου να μελετηθεί η σεισμική συμπεριφορά μία κατασκευής, η ανάλυση της απόκρισης του εδαφικού σχηματισμού μπορεί να θεωρηθεί ως απαραίτητη προκαταρκτική μελέτη, καθώς η σεισμική απόκριση της κατασκευής επηρεάζεται από τις γεωλογικές και γεωτεχνικές ιδιότητες του εδάφους θεμελίωσης.

Η εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης του εδαφικού σχηματισμού επιτυγχάνεται μέσω αριθμητικών αναλύσεων (κυρίως με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων) χρησιμοποιώντας δυναμικά προσομοιώματα. Αφού ληφθούν υπόψη τα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος εδάφους-κατασκευής και ολοκληρωθεί η προσομοίωσή τους, επιβάλλεται στη βάση του συστήματος μία σεισμική διέγερση η οποία διαδίδεται μέσω του εδάφους στη βάση της θεμελίωσης (επιφάνεια του εδάφους), και από εκεί μέσω της ανωδομής φτάνει τελικά στην κορυφή της κατασκευής. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αποτελούν τα διαγράμματα των χρονοϊστοριών της οριζόντιας επιτάχυνσης. Το μέγιστο όμως πλάτος της εδαφικής κίνησης δεν αρκεί για να περιγράψει την σεισμική συμπεριφορά της διότι ο σεισμός αποτελεί μία σύνθετη κίνηση η οποία καλύπτει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων και σε κάθε μία από τις συχνότητες αντιστοιχεί ένα πλάτος κίνησης. Το συχνοτικό περιεχόμενο μιας σεισμικής κίνησης εκτιμάται μέσω του μετασχηματισμού Fourier. Με τη χρήση ειδικού προγράμματος, από την χρονοϊστορία της επιτάχυνσης μέσω του μετασχηματισμού Fourier, παράγεται το φάσμα Fourier, που δίνει τη μέγιστη απόκριση.

Η εκτίμηση της μέγιστης ταλάντωσης που θα επιφέρει στην κατασκευή μία εδαφική κίνηση είναι το ζητούμενο πρόβλημα κατά τον σχεδιασμό. Σε ένα περιοδικό φαινόμενο η μέγιστη ταλάντωση ενός συστήματος συμβαίνει για τη συχνότητα εκείνη που ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Ο λόγος του φάσματος Fourier στην κορυφή προς το φάσμα απόκρισης στη βάση της δίνει τον συντελεστή ενίσχυσης AF συναρτήσει της συχνότητας ή του χρόνου. Όταν η συχνότητα της μέγιστης τιμής του συντελεστή ενίσχυσης ταυτίζεται με τη συχνότητα του συστήματος τότε παρατηρείται το φαινόμενο του συντονισμού.

Στην ενότητα αυτή βασικό ζητούμενο αποτελεί ο προσδιορισμός του συντελεστή ενίσχυσης AF και της συχνότητας που επιτυγχάνεται η μέγιστη ταλάντωση του συστήματος με μια σειρά από δυναμικές αναλύσεις και οι τρόποι με τους οποίους μπορούμε να αποτρέψουμε την συχνότητα της εδαφικής κίνησης να ταυτίζεται με αυτή του συστήματος (φαινόμενο συντονισμού). Οι παραπάνω αναλύσεις πραγματοποιούνται σε προκαταρκτικά προσομοιώματα με τη χρήση του προγράμματος PLAXIS v.8.2 .

3.2 Λογισμικό Plaxis & Λογισμικό Seismosignal

Το Plaxis είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων δύο διαστάσεων, ειδικού σκοπού, που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση αναλύσεων παραμόρφωσης και σταθερότητας για ποικίλους τύπους γεωτεχνικών κυρίως εφαρμογών. Η ανάλυση της σεισμικής συμπεριφοράς του εδάφους, αλλά και της επίδρασης του στις γειτονικές περιοχές αναλύεται από το δυναμικό μέρος.

Η γεωμετρία του συστήματος που αφορούν το έδαφος και τις κατασκευές της ανωδομής ορίζονται κατά την διαδικασία της προσομοίωσης. Παράλληλα, ορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των στοιχείων που χρησιμοποιούνται, οι συνοριακές συνθήκες, καθώς και πιθανές φορτίσεις (στατικές ή/και δυναμικές) που ασκούνται στο προσομοίωμα. Σχετικά με την προσομοίωση της δυναμικής απόκρισης του εδάφους, λαμβάνεται υπόψη η αδράνεια του υπεδάφους και η χρονική εξάρτηση του φορτίου. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη η απόσβεση του υλικού και της γεωμετρίας. Στον κώδικα PLAXIS για την προσομοίωση του εδαφικού υλικού χρησιμοποιείται ένα πλέγμα δεκαπεντάκομβων (15-nodes) ή εξάκομβων (6-nodes) πεπερασμένων στοιχείων τριγωνικού σχήματος. Ανάλογα με τα επιθυμητά αποτελέσματα που θέλουμε να πετύχουμε, είναι δυνατή η πύκνωση ή η αραιώση αυτού του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, η επιβολή της σεισμικής διέγερσης σχετίζεται άμεσα με τις συνοριακές συνθήκες, διότι, στην πραγματικότητα, η σεισμική διέγερση προέρχεται από τον ημίχωρο, τον οποίο όμως προσπαθούμε με τεχνητά σύνορα να περιορίσουμε. Κατά την προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης του εδάφους με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η έκταση του εδάφους στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση δεν είναι πεπερασμένη. Θεωρείται ως ένα ημι-άπειρο μέσο που δημιουργεί ένα πλασματικό κιβώτιο παγίδευσης, σύμφωνα με το οποίο η ενέργεια του συστήματος παγιδεύεται εντός των συνόρων αλλοιώνοντας τα δυναμικά του χαρακτηριστικά. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό, τοποθετούνται απορροφητικά σύνορα ακτινοβολίας εκατέρωθεν στο μοντέλο. Έτσι τα σεισμικά κύματα εισέρχονται μέσα στο προσομοίωμα, ανακλώνται/διαθλώνται στην ελεύθερη επιφάνεια και απορροφούνται από τα πλευρικά σύνορα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αριθμητική προσομοίωση με την χρήση του λογισμικού αφορούν τις αναπτυσσόμενες τάσεις, παραμορφώσεις, επιταχύνσεις, ταχύτητες, μετατοπίσεις καθώς και τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Το λογισμικό SeismoSignal της εταιρείας SeismoSoft αποτελεί αποτελεσματικό τρόπο επεξεργασίας δεδομένων με δυναμικό χαρακτήρα με στόχο την παραγωγή μιας σειράς παραμέτρων που απαιτούνται συχνά για την αντιμετώπιση θεμάτων της σεισμικής μηχανικής. Το πρόγραμμα επεξεργάζεται τις χρονοϊστορίες (επιτάχυνσης, μετατόπισης κ.λπ) και τις μετατρέπει σε διαφορετικές μορφές αρχείου όπως για παράδειγμα η εξαγωγή των φασμάτων Fourier με την χρήση του μετασχηματισμού Fourier.

3.3 Μονοδιάστατες αναλύσεις

Η δυναμική ανάλυση της απόκρισης του εδάφους για συγκεκριμένη θέση διεξάγεται για την αξιολόγηση των επιδράσεων της θέσης σε κινήσεις του εδάφους στην επιφάνεια και για την παροχή του βελτιστοποιημένου φάσματος σεισμικού σχεδιασμού. Η μονοδιάστατη ανάλυση απόκρισης εδάφους είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη διερεύνηση της τοπικής ενίσχυσης που συμβαίνει μέσα σε μια απόθεση εδάφους, επιλύοντας το πρόβλημα των οριζόντιων διατμητικών κυμάτων που διαδίδονται κατακόρυφα μέσω ενός άπειρου οριζόντια πολυεπίπεδου εδαφικού συστήματος. *Η μελέτη της συμπεριφοράς μονοβάθμιων δυναμικών συστημάτων υπό τη δράση διαφόρων μορφών δυναμικής καταπόνησης, οδηγεί στην κατανόηση των κύριων συνιστωσών του δυναμικού προβλήματος και παρέχει τη βάση για τη μελέτη πιο σύνθετων συστημάτων.*

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εκμάθηση του λογισμικού Plaxis και να διασφαλιστεί πως τα αποτελέσματα που θα προκύψουν στις περεταίρω αναλύσεις που αφορούν την προς μελέτη κοιλάδα, είναι αξιόπιστες αναπτύχθηκαν τρία προκαταρκτικά προσομοιώματα. Το πρώτο προσομοίωμα αποτελείται από μία οριζόντια εδαφική στρώση με πάχος H και μήκος L , η οποία βρίσκεται πάνω σε άκαμπτη εδαφική στρώση. Το δεύτερο προσομοίωμα αφορά ένα μονοβάθμιο ταλαντωτή ο οποίος εδραιώνεται πάνω σε οριζόντια άκαμπτη εδαφική στρώση και το τρίτο προσομοίωμα αφορά ένα συνδυασμό του πρώτου και του δεύτερου προκαταρκτικού προσομοιώματος, με έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή που εδράζεται πάνω σε εδαφική στρώση επί βράχου. Πρέπει να σημειωθεί ότι και τα τρία προσομοιώματα μελετήθηκαν ως γραμμικά ελαστικά μοντέλα για στραγγισμένες συνθήκες. Επιπροσθέτως μετά το πέρας των αναλύσεων πραγματοποιείται η εφαρμογή της μεθόδου τοπικής ενίσχυσης του εδάφους προκειμένου να αποτραπεί η εμφάνιση των συντονιστικών φαινομένων μεταξύ εδάφους και κατασκευής.

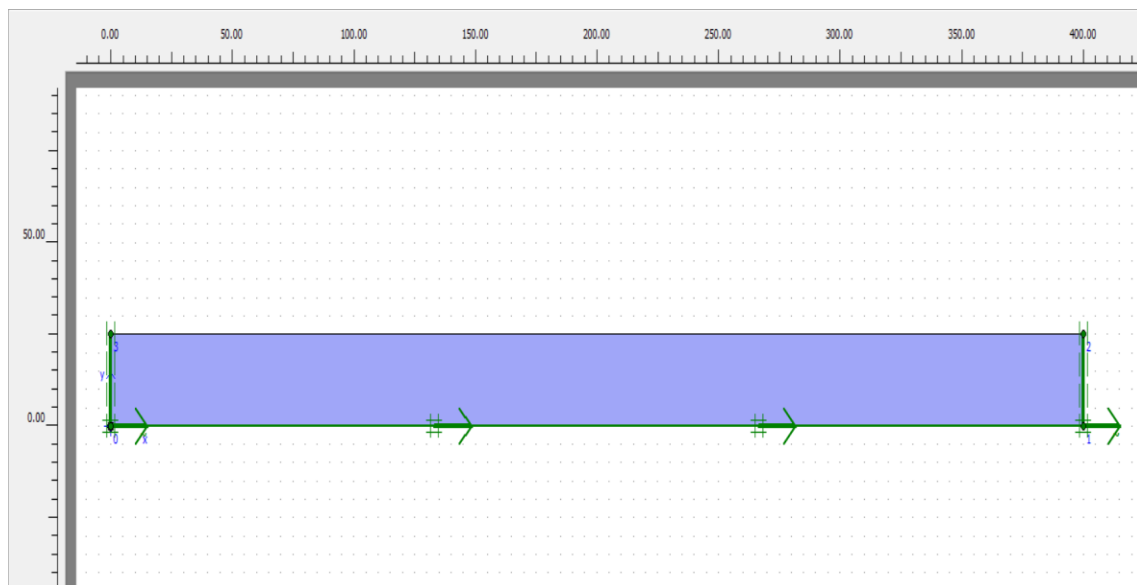
3.3.1 Πρώτο προκαταρκτικό προσομοίωμα

Το πρώτο προσομοίωμα αποτελείται από μία οριζόντια εδαφική στρώση η οποία εδράζεται πάνω σε βραχώδες υπόβαθρο με τα εξής χαρακτηριστικά:

- 1) $V_s=200$ m/s
- 2) $\gamma=17$ kN/m³
- 3) $\nu=0.3$
- 4) $L=400$ m
- 5) $H=25$ m
- 6) $\xi=5\%$

Ο σεισμός προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας στη βάση του προσομοιώματος προδιαγεγραμμένη μετατόπιση (prescribed displacement), ορίζοντας την τιμή $u_x=0.01$ m για και $u_y=0.00$ m. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν απορροφητικά σύνορα εκατέρωθεν και το πολύ

πυκνό πλέγμα (τριγωνικό δίκτυο). Το δίκτυο αποτελείται από δεκαπέντα-κομβικά τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία. Προκειμένου να προκύψει μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα της απόκρισης ενός μοντέλου, κρίνεται σκόπιμη η φόρτιση του με ένα σύνολο αρμονικών διεγέρσεων διαφόρων μορφών. Για αυτό θα πραγματοποιηθούν δύο περιπτώσεις διεγέρσεων. Μία περίπτωση με διεγερση στη βάση με μία αρμονική ταλάντωση-ημίτονο για $f=2\text{Hz}$ και μία δεύτερη περίπτωση με παλμό Ricker για $f=2\text{ Hz}$. Ο συνολικός χρόνος της περιόδου στη παρούσα φάση υπολογισμού είναι 10 sec. Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται η γεωμετρία και οι συνοριακές συνθήκες του προσομοιώματος .



Εικόνα 3.1. Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες του προσομοιώματος

Σημειώνεται ότι η ιδιοσυχνότητα ενός εδαφικού στρώματος σε μονοδιάστατη ανάλυση δίνεται από τη σχέση:

$$f_s = \frac{V_s}{4 * H} \quad (3.1)$$

όπου H είναι το πάχος του εδαφικού στρώματος πάνω από την άκαμπτη εδαφική στρώση και V_s η ταχύτητα του διατμητικού κύματος στο στρώμα αυτό. Συνεπώς για $H=25\text{ m}$ και $V_s=200\text{ m/s}$ συνεπάγεται :

$$f_s = \frac{200}{4 * 25} = 2\text{ Hz}$$

Αναφορικά με την απόσβεση του υλικού λαμβάνεται υπόψη μέσω των συντελεστών του Rayleigh. Για απόσβεση υλικού $\xi=5\%$ και ιδιοπερίοδο $T=0.5\text{ sec}$, οι συντελεστές α και β του Rayleigh προκύπτουν ίσοι με 0.419 και 0.005 αντίστοιχα όπου :

- Rayleigh α = είναι η παράμετρος που καθορίζει την επίδραση της μάζας στην απόσβεση
- Rayleigh β = είναι η παράμετρος που καθορίζει την επίδραση της ακαμψίας στην απόσβεση

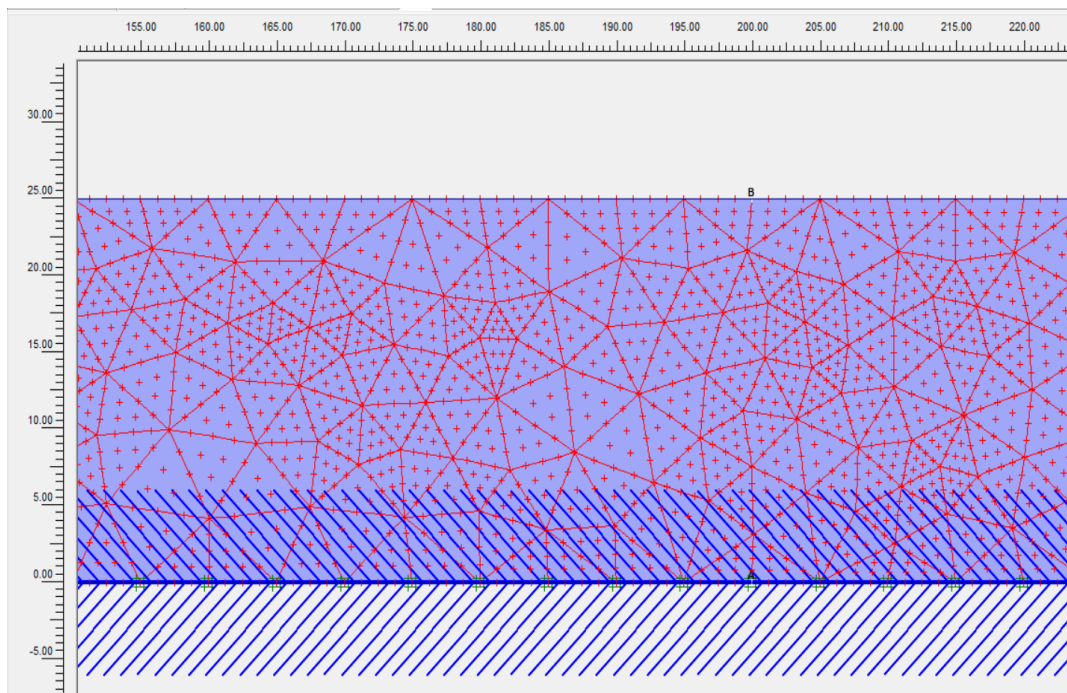
Από την αναλυτική λύση, προκύπτει ότι, η στρώση πρόκειται να συντονισθεί με τη διέγερση, ενισχύοντας την αρμονική ταλάντωση κατά $2/(\pi*\xi)$ φορές. Έτσι για $\xi=5\%$ προκύπτει ότι:

$$AF = \frac{2}{\pi * \xi} \quad (3.2)$$

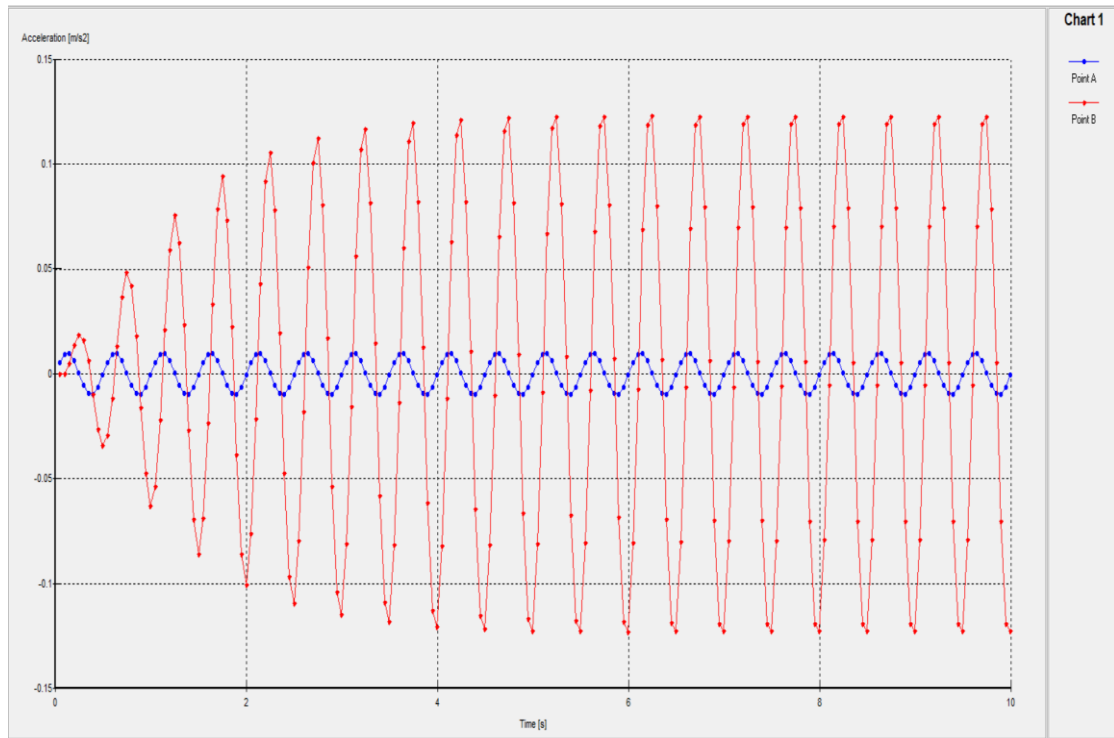
$$AF = \frac{2}{\pi * \xi} = \frac{2}{\pi * 0.05} = 12.7$$

3.3.1.1 Αρμονική διέγερση

Η αρμονική διέγερση στη βάση της στρώσης πρέπει να έχει μοναδιαίο πλάτος και η απόκριση στην επιφάνειά της αναμένεται να είναι περίπου 12.7 για να επαληθευτεί η αριθμητική προσομοίωση μέσω του PLAXIS. Στο Διάγραμμα 3.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ιστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης του σημείου A που βρίσκεται στη βάση της εδαφικής στρώσης και του σημείου B που βρίσκεται στην επιφάνεια του. Το πλάτος ταλάντωσης της οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση ισούται με 0.01 m/s^2 , ενώ στην κορυφή ισούται με 0.127 m/s^2 περίπου. Επομένως, η αριθμητική λύση επαληθεύει την αναλυτική λύση.



Εικόνα 3.2. Σημεία A και B στη βάση και κορυφή αντίστοιχα του προσομοιώματος



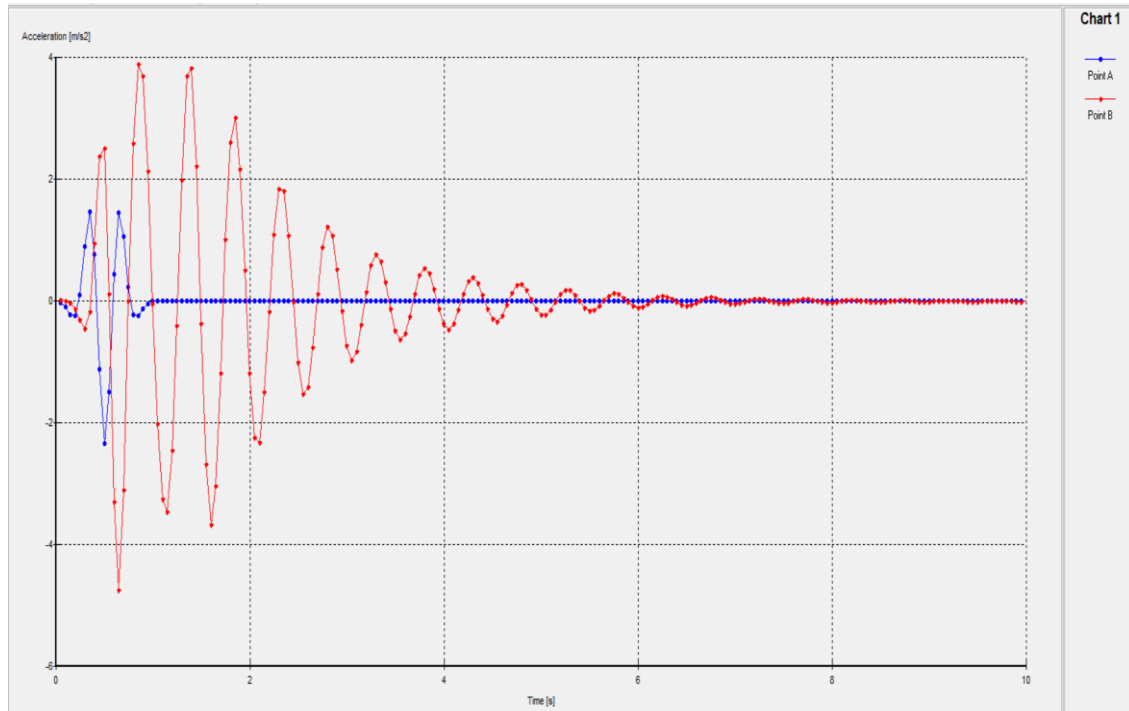
Διάγραμμα 3.1. Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση (Point A) και στην κορυφή (Point B) της εδαφικής στρώσης

3.3.1.2 Παλμός Ricker

Στη συνέχεια, για το ίδιο προσομοίωμα, υπολογίζεται ξανά η αριθμητική λύση χρησιμοποιώντας τον παλμό Ricker για συχνότητα $f=2$ Hz. Ο παλμός Ricker δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$A(t) = [-6b + 24b^2(t - t_0)^2 - 8b^3(t - t_0)^4] * e^{-b(t-t_0)^2} \quad (3.3)$$

όπου $A(t)$ η σεισμική επιτάχυνση τη χρονική στιγμή t , t_0 παράμετρος που καθορίζει τη χρονική στιγμή που παρουσιάζει μέγιστο ο παλμός και b παράμετρος που καθορίζει τη δεσπόζουσα συχνότητα f του παλμού σύμφωνα με τη σχέση $b=(\pi*f)^2$. Στο Διάγραμμα 3.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης του σημείου A που βρίσκεται στη βάση της εδαφικής στρώσης και του σημείου B στην επιφάνεια του με την χρήση του παλμού Ricker για $f=2$ Hz.

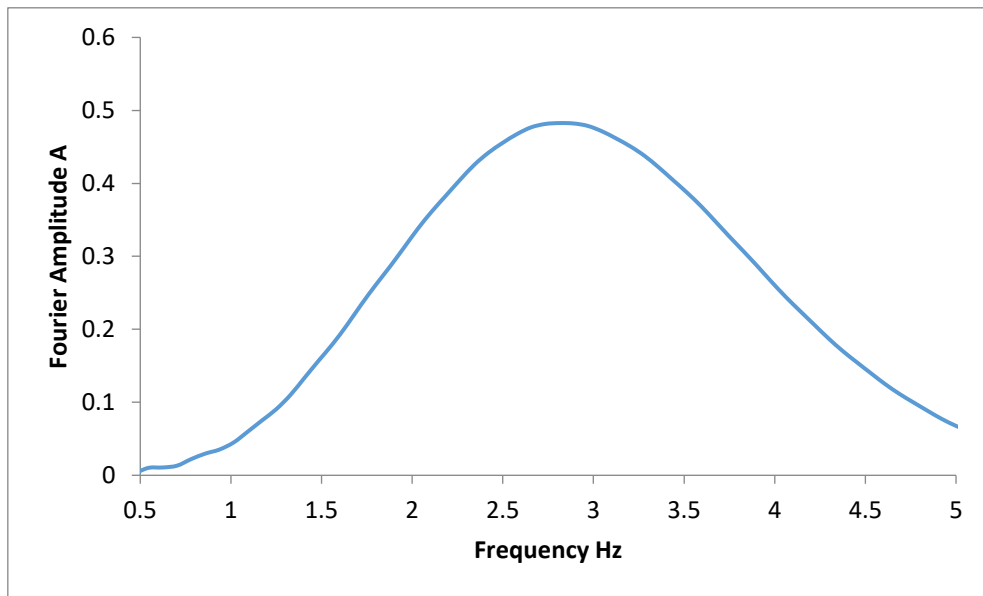


Διάγραμμα 3.2. Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση (Point A) και στην κορυφή (Point B) της εδαφικής στρώσης

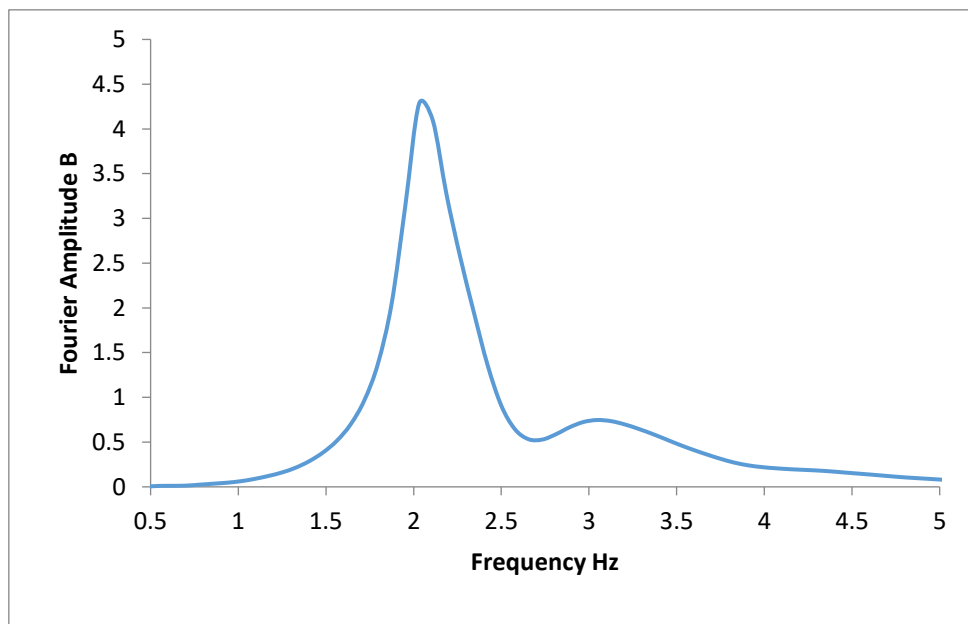
Στο διάγραμμα παρατηρείται η διάδοση του παλμού Ricker στην άκαμπτη εδαφική στρώση (σημείο A) και στην κορυφή της (σημείο B). Στην συνέχεια προκειμένου να εξεταστεί η παράμετρος της ενίσχυσης της διέγερσης, λόγω των συντονιστικών φαινομένων υπολογίζεται ο συντελεστής ενίσχυσης AF της εδαφικής στρώσης. Σημειώνεται πως ο συντελεστής ενίσχυσης AF ισούται με:

$$AF = \frac{\text{Fourier Amplitude } (f), \text{ Point B}}{\text{Fourier Amplitude } (f), \text{ point A}} \quad (3.4)$$

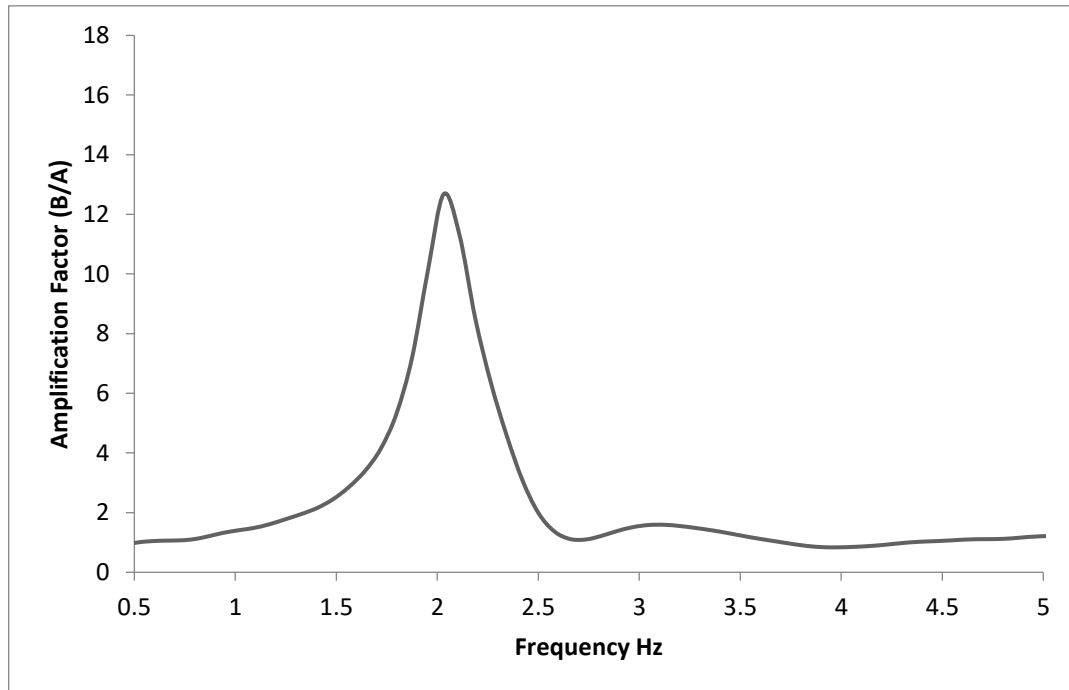
Ο συντελεστής ενίσχυσης AF προσδιορίζεται μέσω του μετασχηματισμού Fourier των χρονοϊστοριών της οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση και στην κορυφή (Σημεία A και B αντίστοιχα). Στο σημείο εκείνο για το οποίο προκύπτει η μέγιστη τιμή του συντελεστή AF, η συχνότητα του, αποτελεί την ιδιοσυχνότητα του μοντέλου. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό SeismoSignal, από τις χρονοιστοιοστορίες εξάχθηκαν τα φάσματα Fourier για κάθε σημείο αντίστοιχα και στην συνέχεια δημιουργήθηκε η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης συναρτήσει της συχνότητας. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα του φάσματος Fourier για κάθε σημείο αντίστοιχα και το διάγραμμα του συντελεστή ενίσχυσης συναρτήσει της συχνότητας. Συμπεραίνεται ότι η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης μεγιστοποιείται στην τιμή 12.7 για συχνότητα 2Hz, η οποία αποτελεί την ιδιοσυχνότητα f_c του μοντέλου.



Διάγραμμα 3.3. Μετασχηματισμός Fourier της χρονοϊστορίας της οριζόντιας επιτάχυνσης για το σημείο A (βάση εδαφικής στρώσης)



Διάγραμμα 3.4. Μετασχηματισμός Fourier της χρονοϊστορίας της οριζόντιας επιτάχυνσης για το σημείο B (κορυφή εδαφικής στρώσης)



Διάγραμμα 3.5. Συντελεστής ενίσχυσης AF συναρτήσει της συχνότητας f

Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότι η αναλυτική λύση $AF=12.7$ επαληθεύεται από την αριθμητική λύση, με την χρήση της αρμονικής διέγερσης συχνότητας $f=2$ Hz, αλλά και με τη χρήση του παλμού Ricker συχνότητας $f=2$ Hz.

3.3.2 Δεύτερο προκαταρκτικό προσομοίωμα

Σε επόμενο στάδιο, θεωρείται ένας μονοβάθμιος ταλαντωτής μάζας $m=10$ tn ($W=100$ kN) ο οποίος εδράζεται επί άκαμπτης εδαφικής στρώσης. Για την απλούστευση των αναλύσεων ο ταλαντωτής θεωρείται πως είναι θεμελιωμένος στην επιφάνεια της εδαφικής στρώσης. Αναφορικά με την οριζόντια εδαφική στρώση προκειμένου να χαρακτηριστεί ως άκαμπτη, η ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος στην εδαφική στρώση λαμβάνεται ίση με 2000 m/s². Τονίζεται πως και σε αυτή την περίπτωση θα πραγματοποιηθούν δύο περιπτώσεις διέγερσης. Μία περίπτωση με διέγερση στη βάση με μία αρμονική ταλάντωση-ημίτονο για $f=2$ Hz και μία δεύτερη περίπτωση με παλμό Ricker για $f=2$ Hz.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της εδαφικής στρώσης:

- 1) $\gamma=17$ kN/m³
- 2) $\nu=0.3$
- 3) $L=400$ m
- 4) $H=25$ m
- 5) $\xi=5\%$

Η προσομοίωση της συμπεριφοράς τμημάτων κατασκευών στο λογισμικό Plaxis γίνεται με τη χρήση ανάλογων στοιχείων πλακών (plate elements). Οι πλάκες είναι δομικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν λεπτές κατασκευές με δυσκαμψία και ορθή ακαμψία. Οι σημαντικότερες παράμετροι των ιδιοτήτων των υλικών των πλακών περιλαμβάνουν την δυσκαμψία EI και την δυστένεια EA. Από αυτές τις δύο παραμέτρους υπολογίζεται και το ισοδύναμο πάχος της πλάκας d_{equal} από την εξίσωση :

$$d_{equal} = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}} \quad (3.5)$$

Πρέπει να σημειωθεί, ότι στο Plaxis δεν μπορεί να προσομοιωθεί ο μονοβάθμιος ταλαντωτής με μια πακτωμένη δοκό με μάζα στην κορυφή, δηλαδή ένα ανεστραμμένο εκκρεμές, οπότε μπορεί να προσομοιωθεί μόνον ως ένα κλειστό ορθογώνιο πλαίσιο το οποίο έχει διαστάσεις με ύψος $h=5$ m και μήκος $l=10$ m, από το οποίο αφαιρείται το εσωτερικό «εδαφικό υλικό». Ο ταλαντωτής αποτελείται από δύο δοκούς και δύο υποστυλώματα. Η μάζα του ταλαντωτή δίνεται στη δοκό της κορυφής και η ακαμψία στους δύο στύλους. Συνεπώς, θα χρειαστεί να γίνει διάκριση στα οριζόντια και κατακόρυφα μέλη του μονοβάθμιου ταλαντωτή (column & beam elements), ενώ για την επίτευξη της προσομοίωσης πακτωμένου μονοβάθμιου ταλαντωτή τα οριζόντια μέλη, η δοκός, καθώς και η δοκός θεμελίωσης θεωρούνται δύσκαμπτα. Η απόσβεση του ταλαντωτή λαμβάνεται ίση με $\xi=5\%$ και ιδιοσυχνότητα $f_c=2$ Hz.

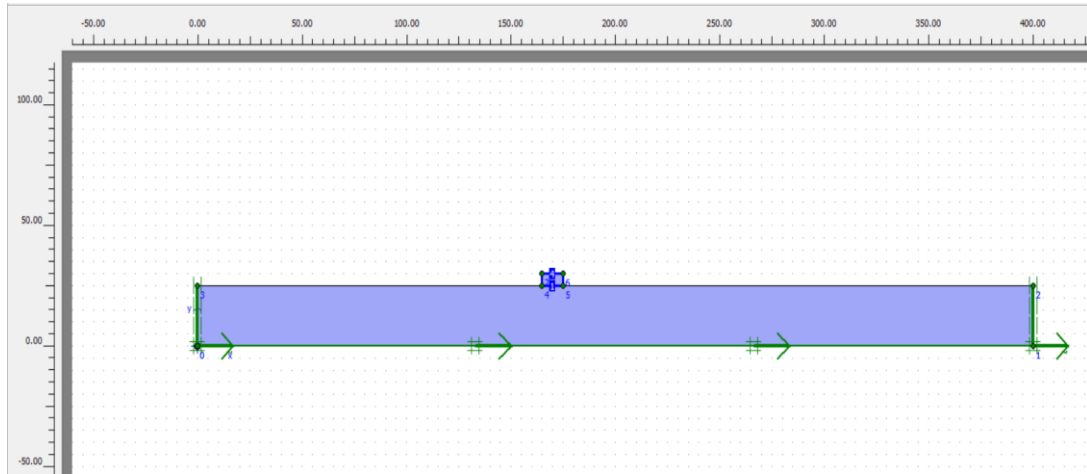
Ο συντελεστής ακαμψίας του ταλαντωτή υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$k = \frac{4 * \pi^2 * m}{T_c^2} \quad (3.6)$$

Η συνολική ακαμψία των δύο υποστυλωμάτων του ταλαντωτή μορφής πλαισίου δίνεται από την σχέση :

$$k = 2 \frac{12 * EI}{h^3} \quad (3.7)$$

Επομένως για $k=1579.2$ kN/m , $h=5$ m συνεπάγεται ότι δυσκαμψία για το κάθε υποστυλώμα ισούται με $EI=8224.69$ kNm²/m και η δυστένεια $EA=5*10^6$. Συνεπώς, σύμφωνα με την Εξίσωση 3.5 προκύπτει ότι το ισοδύναμο πάχος της πλάκας ισούται $d_{equal}=0.14$ m. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται η γεωμετρία του προσομοιώματος και οι ιδιότητες της δοκού κορυφής και βάσης, καθώς και των υποστυλωμάτων.



Εικόνα 3.3. Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες του προσομιώματος

Plate properties

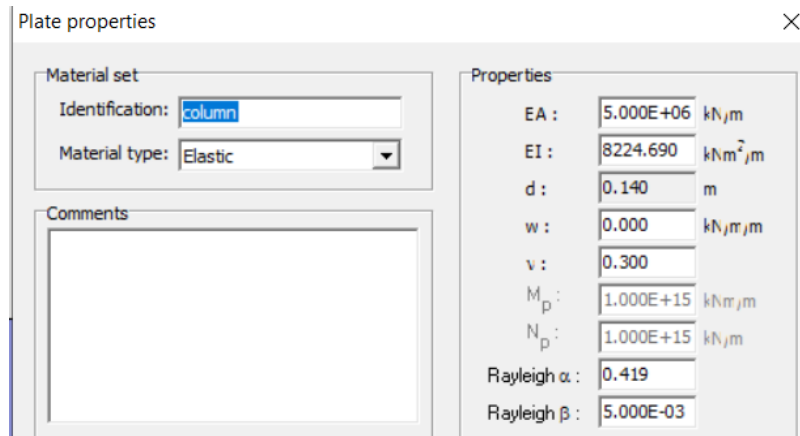
Material set	Properties
Identification: <input type="text" value="beam"/>	EA : <input type="text" value="1.000E+10"/> kN/m
Material type: <input type="text" value="Elastic"/>	EI : <input type="text" value="1.000E+10"/> kNm ² /m
Comments	d : <input type="text" value="3.464"/> m
	w : <input type="text" value="10.000"/> kN/m/m
	v : <input type="text" value="0.300"/>
	M _p : <input type="text" value="1.000E+15"/> kNm/m
	N _p : <input type="text" value="1.000E+15"/> kN/m
	Rayleigh α : <input type="text" value="0.419"/>
	Rayleigh β : <input type="text" value="5.000E-03"/>

Εικόνα 3.4. Ιδιότητες δοκού κορυφής

Plate properties

Material set	Properties
Identification: <input type="text" value="base beam"/>	EA : <input type="text" value="1.000E+10"/> kN/m
Material type: <input type="text" value="Elastic"/>	EI : <input type="text" value="1.000E+10"/> kNm ² /m
Comments	d : <input type="text" value="3.464"/> m
	w : <input type="text" value="0.000"/> kN/m/m
	v : <input type="text" value="0.300"/>
	M _p : <input type="text" value="1.000E+15"/> kNm/m
	N _p : <input type="text" value="1.000E+15"/> kN/m
	Rayleigh α : <input type="text" value="0.419"/>
	Rayleigh β : <input type="text" value="5.000E-03"/>

Εικόνα 3.5. Ιδιότητες δοκού βάσης



Εικόνα 3.6. Ιδιότητες υποστυλώματος

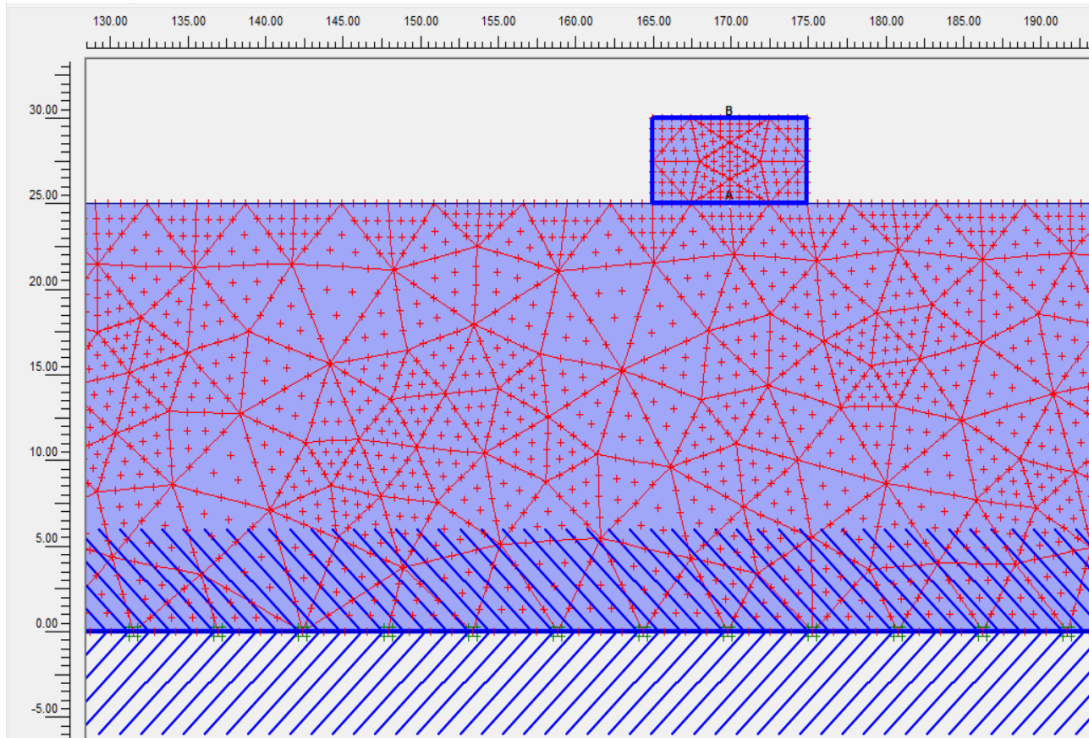
Σύμφωνα με την αναλυτική λύση, ο συντελεστής ενίσχυσης στον ταλαντωτή ισούται με:

$$AF = \frac{1}{2 * \xi} \quad (3.8)$$

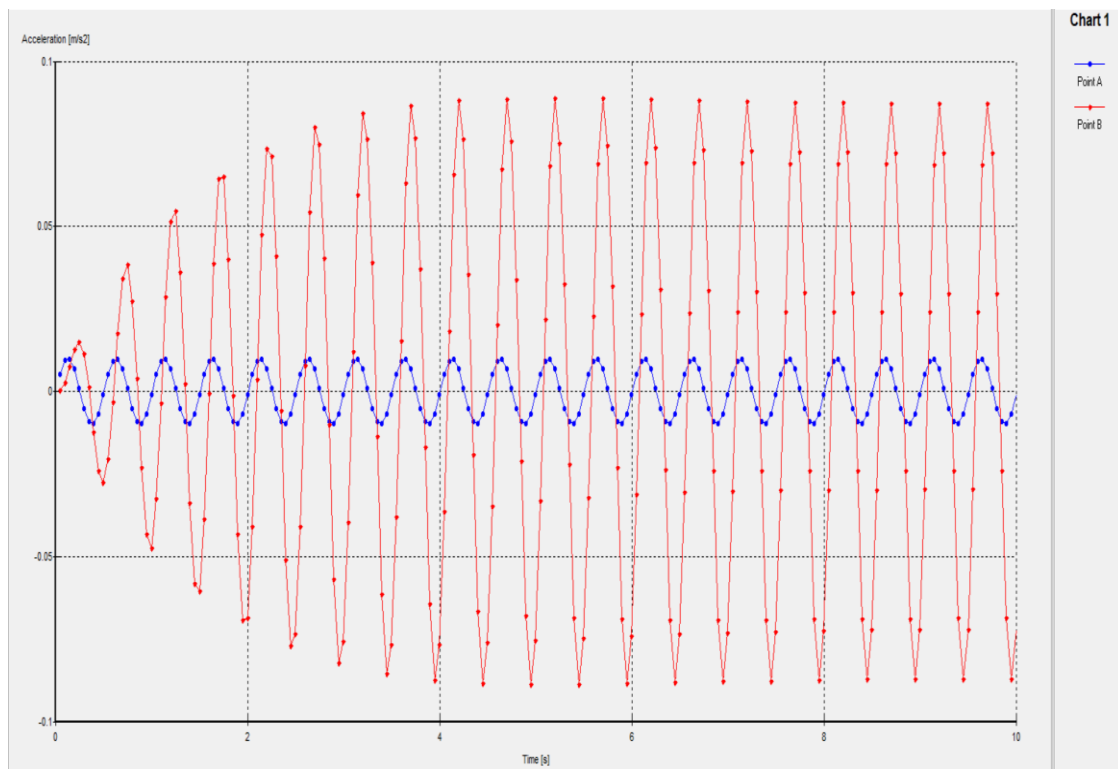
$$AF = \frac{1}{2 * 0.05} = 10$$

3.3.2.1 Αρμονική διέγερση

Προκύπτει ότι με τον συντελεστή ενίσχυσης να ισούται με $AF=10$, θα πρέπει η αρμονική διέγερση στη βάση του ταλαντωτή να έχει μοναδιαίο πλάτος και η απόκριση στην κορυφή του θα πρέπει να είναι περίπου 10-πλάσια για να επαληθευθεί η αριθμητική προσομοίωση μέσω του PLAXIS. Στο Διάγραμμα 3.6 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση του ταλαντωτή (Σημείο A) και στην κορυφή του (Σημείο B). Παρατηρείται ότι το πλάτος ταλάντωσης της οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση ισούται με 0.01 m/s^2 , ενώ στην κορυφή υπολογίστηκε ίση με 0.9 m/s^2 περίπου. Συνεπώς η αριθμητική λύση πλησιάζει ικανοποιητικά την αναλυτική, η οποία την επαληθεύει.



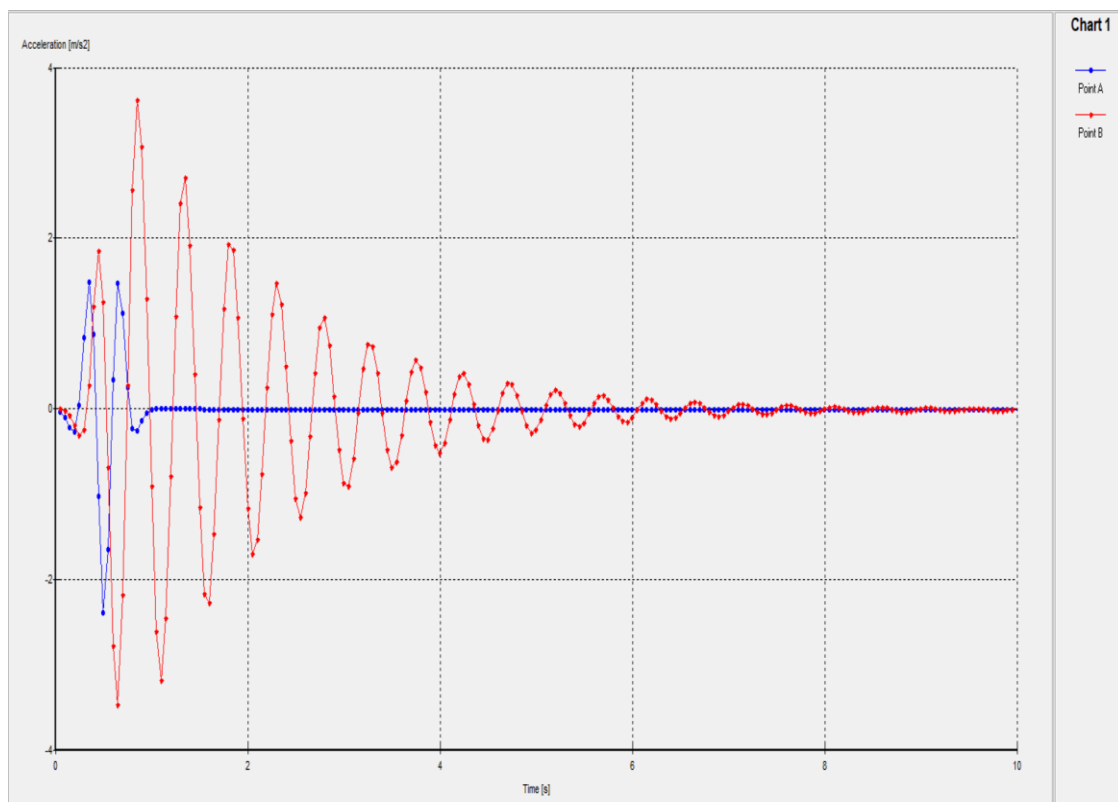
Εικόνα 3.7. Σημεία A και B στην βάση και κορυφή αντίστοιχα του ταλαντωτή



Διάγραμμα 3.6. Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση (Point A) και στην κορυφή (Point B) του ταλαντωτή

3.3.2.2 Παλμός Ricker

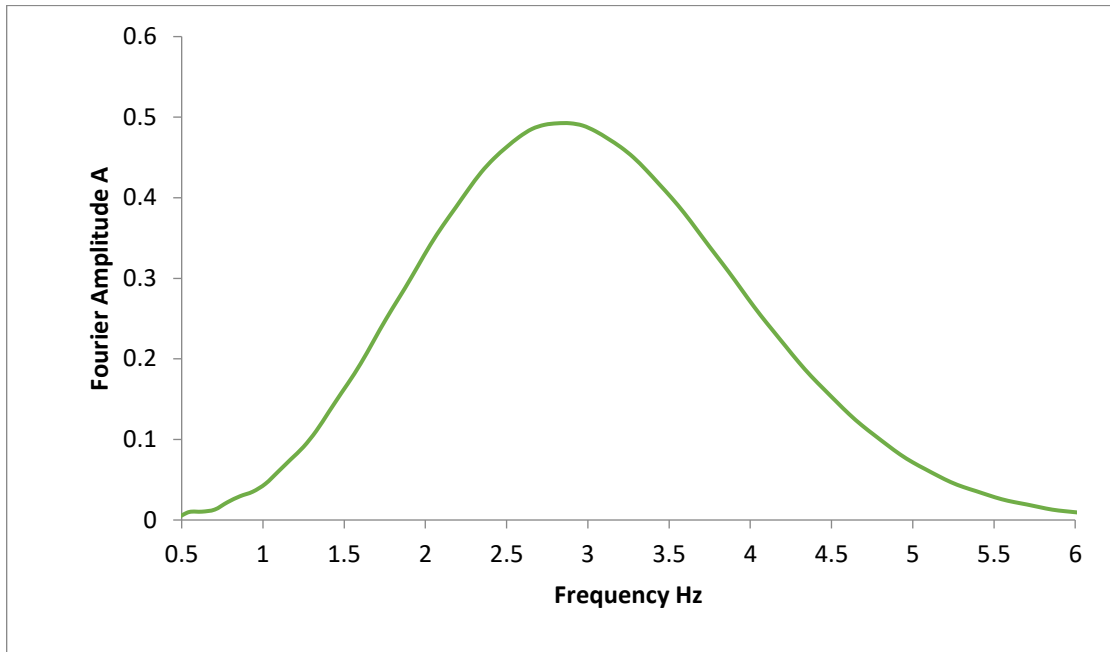
Στη συνέχεια, όπως πραγματοποιήθηκε και στο πρώτο προκαταρκτικό προσομοίωμα, υπολογίζεται η αριθμητική λύση χρησιμοποιώντας διέγερση με παλμό Ricker. Στο Διάγραμμα 3.7 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης του σημείου A που βρίσκεται στη βάση του ταλαντωτή και του σημείου B στην επιφάνεια του με την χρήση του παλμού Ricker για $f=2$ Hz. Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρείται η διάδοση του παλμού Ricker στην κορυφή του αποτελεί ταλάντωση με αποσβενούμενο πλάτος.



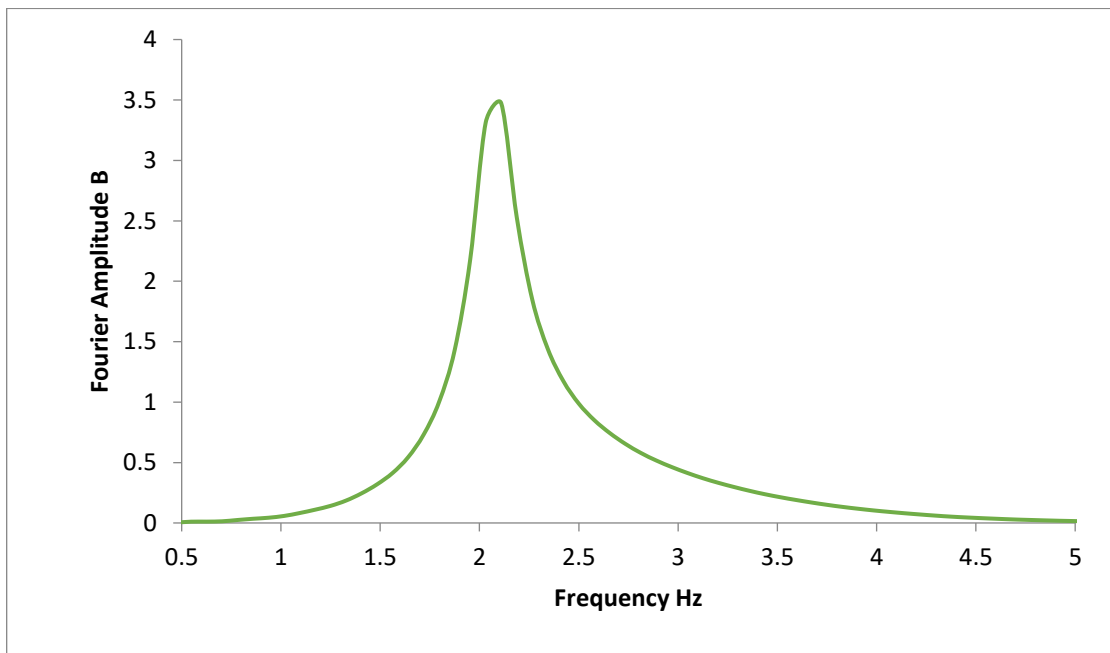
Διάγραμμα 3.7. Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης στη βάση (Point A) και στην κορυφή (Point B) του ταλαντωτή

Στη συνέχεια προκειμένου να εξεταστεί η παράμετρος της ενίσχυσης της διέγερσης, λόγω των συντονιστικών φαινομένων μεταξύ κατασκευής (ταλαντωτή) και της άκαμπτης εδαφικής στρώσης υπολογίστηκαν τα φάσματα Fourier για τα σημεία A και B. Σύμφωνα με την Εξίσωση 3.4 δημιουργήθηκε το διάγραμμα του συντελεστή ενίσχυσης συναρτήσει της συχνότητας. Η συχνότητα για την οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη τιμή του συντελεστή AF αποτελεί την ιδιοσυχνότητα του μοντέλου. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα του φάσματος Fourier για τα δύο σημεία και η παραγόμενη καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης. Συμπεραίνεται ότι η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης μεγιστοποιείται στην

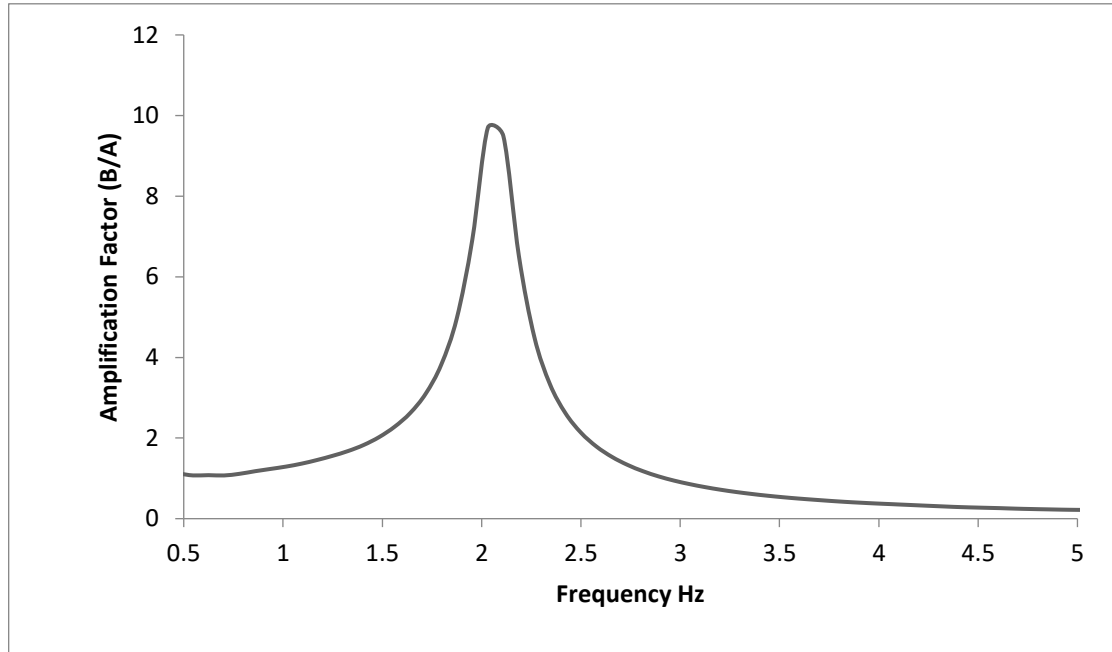
τιμή 9.7 για συχνότητα 2 Hz. Συνεπώς, η συχνότητα αυτή αποτελεί την ιδιοσυχνότητα f_c του προσομοιώματος.



Διάγραμμα 3.8. Μετασχηματισμός Fourier της χρονοϊστορίας της οριζόντιας επιτάχυνσης για το σημείο A(βάση ταλαντωτή)



Διάγραμμα 3.9. Μετασχηματισμός Fourier της χρονοϊστορίας της οριζόντιας επιτάχυνσης για το σημείο B(κορυφή ταλαντωτή)



Διάγραμμα 3.10. Συντελεστής ενίσχυσης AF συναρτήσει της συχνότητας f

Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότι η αναλυτική λύση $AF=10$ επαληθεύεται από την αριθμητική λύση με την χρήση του παλμού Ricker συχνότητας 2 Hz .

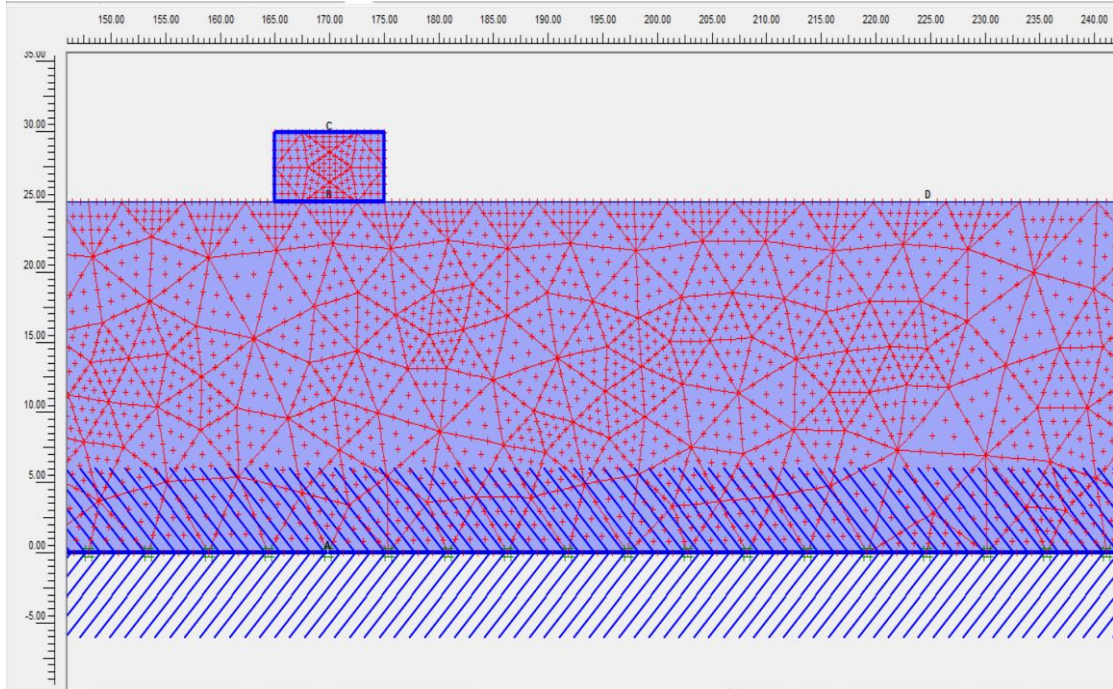
3.3.3 Τρίτο προκαταρκτικό προσομοίωμα

Το τρίτο προκαταρκτικό προσομοίωμα αποτελείται από ίδιο μονοβάθμιο ταλαντωτή, της προηγούμενης περίπτωσης ο οποίος εδράζεται επί εύκαμπτης εδαφικής στρώσης πάνω από βράχο, και όχι επί άκαμπτης εδαφικής στρώσης όπως στην προηγούμενη περίπτωση που εξετάστηκε. Το οριζόντιο εδαφικό στρώμα, έχει τα εξής χαρακτηριστικά: (α) $V_s= 200\text{m/s}$, (β) $\gamma= 17 \text{ kN/m}^3$, (γ) $\nu= 0.3$, (δ) $H= 25\text{m}$ και (ε) $\xi= 5\%$. Η ιδιοσυχνότητα του εδαφικού στρώματος δίνεται όπως αναφέρθηκε και παραπάνω από την Εξίσωση 3.1 όπου για $H=25$ μέτρα και $V_s=200 \text{ m/s}$ συνεπάγεται $f_s=2 \text{ Hz}$. Οι σταθερές α και β του Rayleigh παραμένουν 0.419 και 0.005 αντίστοιχα, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

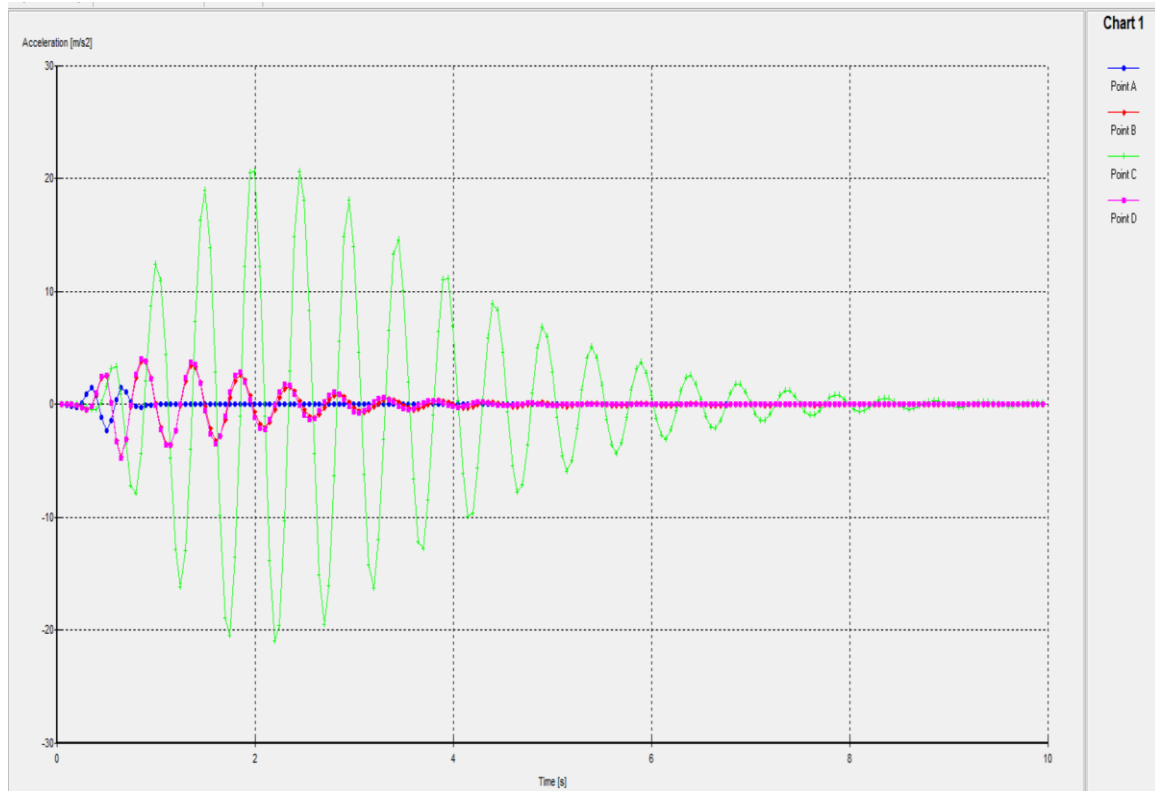
3.3.3.1 Παλμός Ricker

Στη βάση του προσομοιώματος επιβάλλεται διέγερση με τον ίδιο παλμό Ricker με συχνότητα $f=2\text{Hz}$. Στην Εικόνα 3.8 που ακολουθεί απεικονίζεται το προσομοίωμα του εδαφικού στρώματος και ο μονοβάθμιος ταλαντωτής. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση της άκαμπτης εδαφικής στρώσης, ο επιβαλλόμενος παλμός δεν μεταφέρεται αυτούσιος στη βάση του ταλαντωτή (ή αλλιώς στην επιφάνεια του εδάφους). Εκτός από τα

σημεία Β και C στη βάση και στην κορυφή του ταλαντωτή αντίστοιχα, ορίζεται και το σημείο Α στη βάση του εδαφικού στρώματος, καθώς και το σημείο D στην επιφάνεια του σε απόσταση 50m από τον ταλαντωτή. Στο Διάγραμμα 3.11 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης των σημείων .

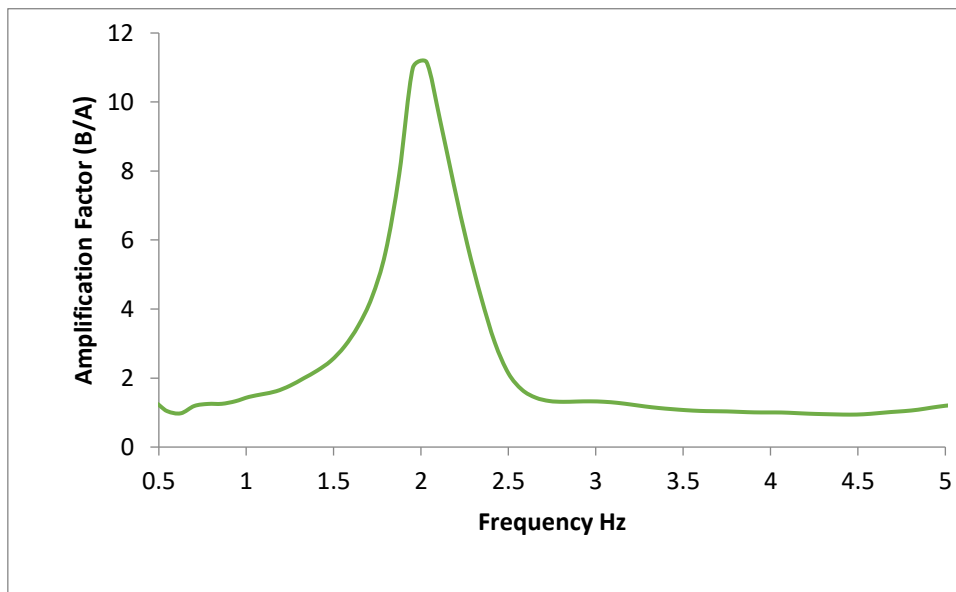


Εικόνα 3.8. Σημεία A,B,C,D του προσομοιώματος

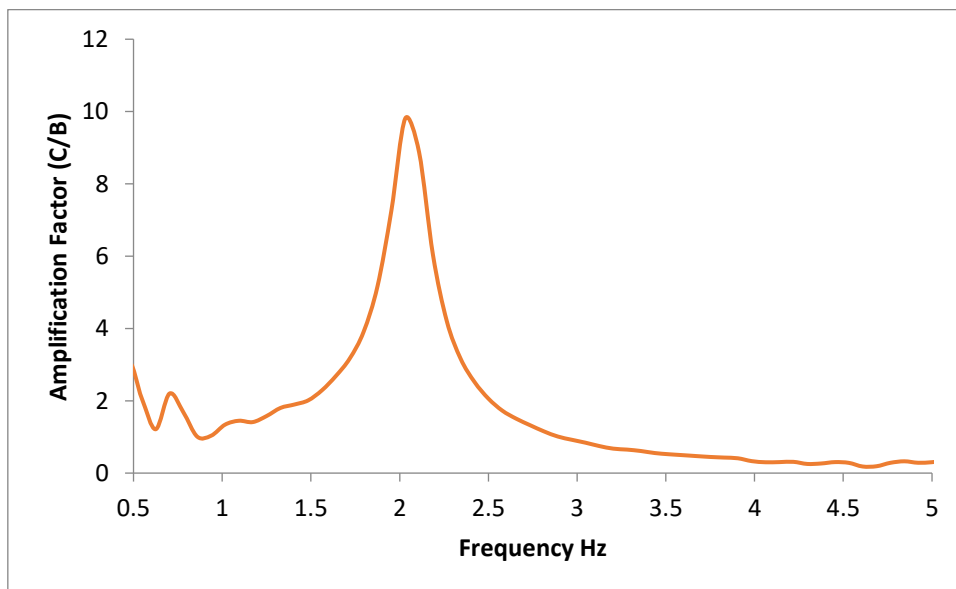


Διάγραμμα 3.11. Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης σημείων A,B,C,D εδαφικής στρώσης και ταλαντωτή

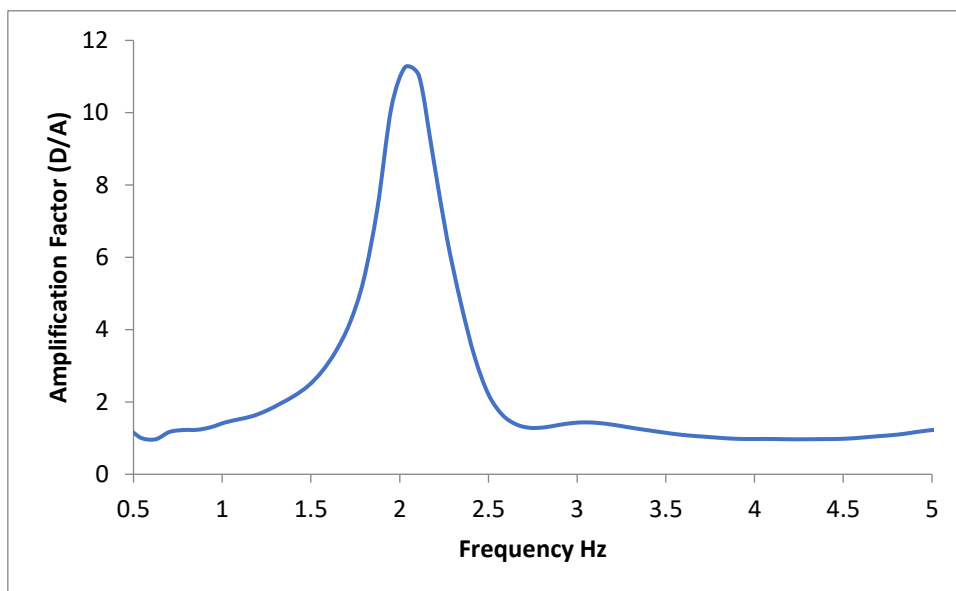
Στη συνέχεια λόγω της τροποποίησης της διέγερσης που πραγματοποιείται στο προσομοίωμα λόγω της μαλακής εδαφικής στρώσης κάτω από τον ταλαντωτή, αφού υπολογιστούν ο μετασχηματισμός του φάσματος Fourier της οριζόντιας επιτάχυνσης και για τα τέσσερα σημεία A, B, C και D δημιουργούνται τα διαγράμματα του συντελεστή ενίσχυσης για την εδαφική στρώση (B/A), τον ταλαντωτή (C/B), της εδαφικής στρώσης με τον βράχο(D/A) και για τον ταλαντωτή με την άκαμπτη εδαφική στρώση (C/A) συναρτήσει της συχνότητας.



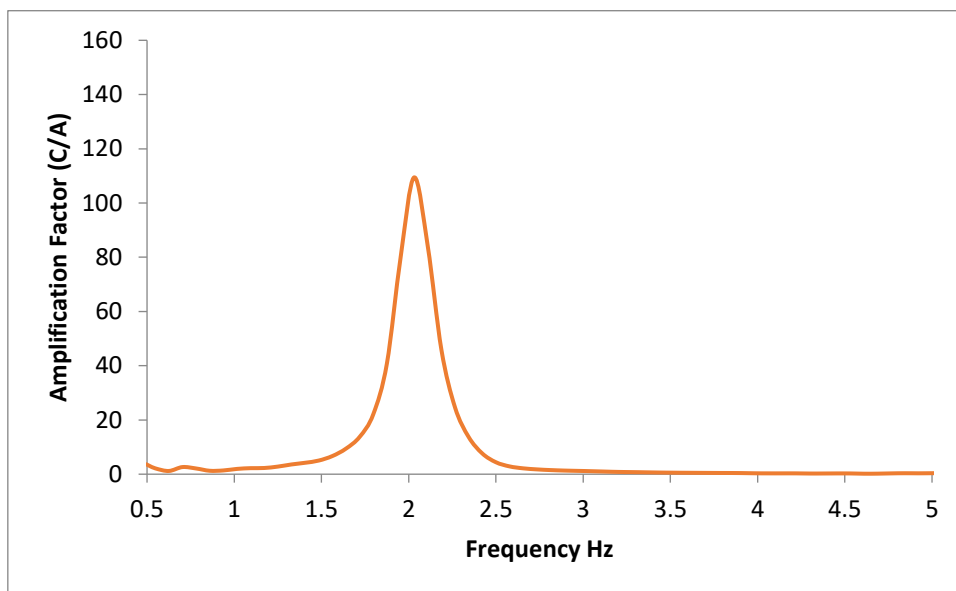
Διάγραμμα 3.12. Συντελεστής ενίσχυσης $AF(B/A)$ συναρτήσει της συχνότητας f



Διάγραμμα 3.13. Συντελεστής ενίσχυσης $AF(C/B)$ συναρτήσει της συχνότητας f



Διάγραμμα 3.14. Συντελεστής ενίσχυσης $AF(C/B)$ συναρτήσει της συχνότητας f



Διάγραμμα 3.15. Συντελεστής ενίσχυσης $AF(C/A)$ συναρτήσει της συχνότητας f

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι:

1. Η μέγιστη τιμή του συντελεστή ενίσχυσης για τον μονοβάθμιο ταλαντωτή ισούται με $AF(C/B)=9.8$ για συχνότητα 2 Hz η οποία ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα της εδαφικής στρώσης.
2. Η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για το εδαφικό στρώμα σε απόσταση 50 m από το μονοβάθμιο ταλαντωτή ισούται με $AF(D/A)=11.26$ για συχνότητα 2 Hz.
3. Η τιμή του συντελεστή ενίσχυσης του εδαφικού στρώματος ισούται με $AF(B/A)=11$ για συχνότητα 2 Hz
4. Η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης μεταξύ του σημείου στην κορυφή του ταλαντωτή και του σκληρού υπόβαθρου μεγιστοποιείται στην τιμή $AF(C/A)=109.5$

Από τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνεται πως η ενίσχυση στο μονοβάθμιο ταλαντωτή διαφέρει ανάλογα με τις τοπικές εδαφικές συνθήκες που επικρατούν. Στην περίπτωση που ο ταλαντωτής εδράζεται επί μαλακής εδαφικής στρώσης παρατηρείται ότι η ιδιοσυχνότητα της εδαφικής απόθεσης ($f_s=2$ Hz) συντονίστηκε με την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή ($f_c=2$ Hz) γεγονός που ενδείκνυται από την υψηλή τιμή του συντελεστή ενίσχυσης ($C/A=109.5$). Επίσης παρατηρείται πως η ενίσχυση του σημείου της εδαφικής στρώσης κάτω από τον ταλαντωτή με την ενίσχυση του σημείου 50 μέτρα μακριά του είναι περίπου ίδια. Αυτό συμβαίνει διότι κατά τη μονοδιαστάτη ανάλυση απλοποιείται η γεωμετρία και έχουμε ιδανικές περιπτώσεις όπου η οριζόντια εδαφική στρώση διατηρεί τις μηχανικές ιδιότητες σε όλο το μήκος της. Οι τοπικές εδαφικές συνθήκες διαφέρουν από σημείο σε σημείο στη πραγματικότητα, συνεπώς μέσα από το προκαταρκτικό προσομοίωμα διαπιστώνεται η θεώρηση των εσφαλμένων εκτιμήσεων μέσα από την μονοδιάστατη ανάλυση.

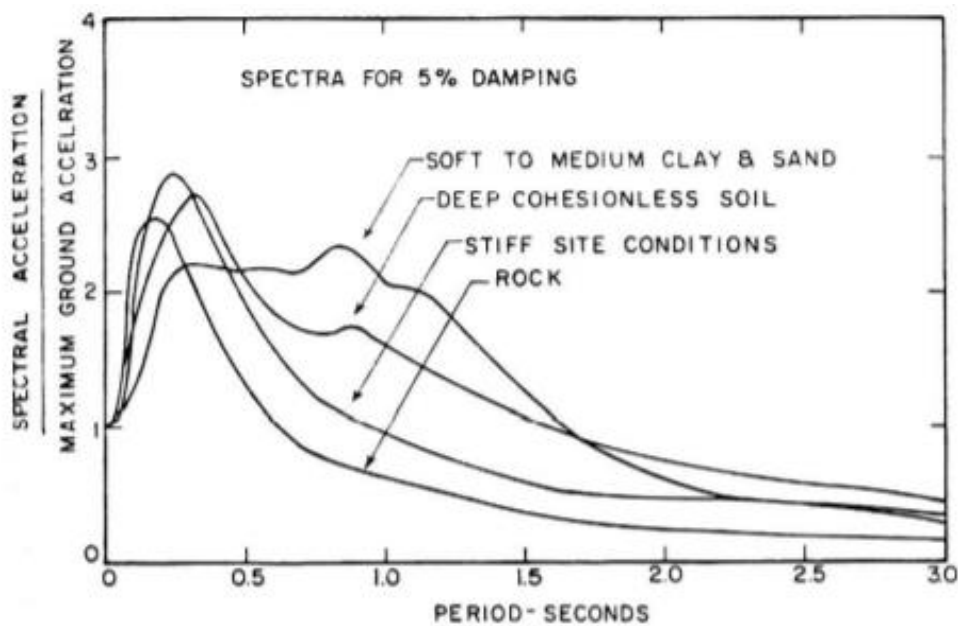
3.4 Τρόποι αποφυγής συντονιστικών φαινομένων

3.4.1 Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, το έδαφος, και επομένως και η βάση μιας κατασκευής που είναι θεμελιωμένη πάνω σ' αυτό, κινείται γρήγορα, με εναλλασσόμενο πρόσημο, γύρω από την αρχική θέση ηρεμίας. Η μάζα της κατασκευής, λόγω της αδράνειάς της, δεν ακολουθεί την κίνηση της βάσης αλλά κινείται με διαφορετικό τρόπο κάνοντας μία δική της ταλάντωση. Λόγω αυτής της διαφορετικής κίνησης μάζας και βάσης, προκαλείται παραμόρφωση και κατ' επέκταση ένταση στην κατασκευή. Η ποιότητα του εδάφους πάνω στο οποίο θα θεμελιωθεί η κατασκευή, επηρεάζει εκτός από την τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης σημαντικά και τη μορφή του φάσματος σχεδιασμού που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Η εξάρτηση του φάσματος σχεδιασμού από τις ιδιότητες του εδάφους είναι

αναμενόμενη, αφού η κατασκευή θα διεγερθεί με την κίνηση του εδάφους στη στάθμη θεμελίωσης, η οποία είναι αποτέλεσμα της απόκρισης του εδάφους στη σεισμική δόνηση.

Η μεγάλη επιρροή των χαρακτηριστικών του εδάφους στα φάσματα απόκρισης των σεισμών φαίνεται στην Εικόνα 3.9, όπου παρουσιάζεται ο μέσος όρος κανονικοποιημένων φασμάτων διαφόρων σεισμών από την Καλιφόρνια και την Ιαπωνία, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους πάνω στο οποίο είχε γίνει η καταγραφή. Σε σκληρά και βραχώδη εδάφη, τα φάσματα δείχνουν μεγάλες επιταχύνσεις σε μικρές περιόδους, οι οποίες μειώνονται γρήγορα όσο μεγαλώνει η περίοδος της κατασκευής. Αντίθετα, σε μαλακά εδάφη εμφανίζονται μεγάλες φασματικές επιταχύνσεις ακόμη και σε αρκετά μεγάλες περιόδους.



Εικόνα 3.9. Μέσα φάσματα απόκρισης απόλυτων επιταχύνσεων διάφορων σεισμών για $\xi=5\%$ ανάλογα το είδος του εδάφους (Πηγή: Seed et al, 1976)

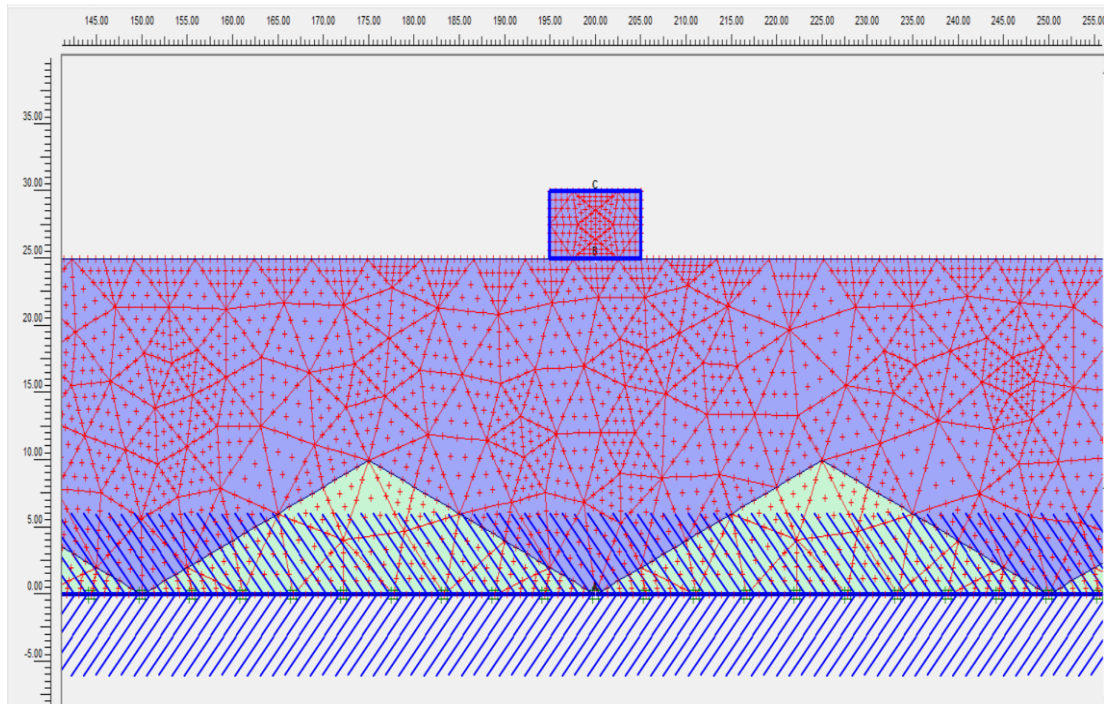
Οι σεισμοί διαδίδονται από το σκληρό υπόβαθρο στην επιφάνεια μέσω της υπερκείμενης απόθεσης εδάφους, η οποία δρα ως φίλτρο και τροποποιεί τα χαρακτηριστικά κίνησης του εδάφους. Λόγω της επίδρασης του εδάφους ως φίλτρο, η απόθεση του εδάφους τροποποιεί τα σεισμικά κύματα ανάλογα με τις τοπικές εδαφικές συνθήκες που επικρατούν, ενισχύοντας το κύμα σε ορισμένες συγκεκριμένες συχνότητες και αποσβένοντάς το σε κάποια άλλα. Εάν η συχνότητα με την οποία εμφανίζεται η μέγιστη ενίσχυση της κίνησης του εδάφους είναι κοντά στη φυσική συχνότητα της κατασκευής στην ανωδομή, το κτίριο και η κίνηση του εδάφους συντονίζονται μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα ταλαντεύεται με πολύ υψηλά πλάτη συχνότητων που μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες ζημιές στο κτίριο το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε ανθρώπινες απώλειες. Συνεπώς βασικός στόχος είναι η πρόληψη σοβαρών δομικών αστοχιών και η αποφυγή ανθρώπινων απωλειών.

3.4.2 Μέθοδος τοπικής ενίσχυσης εδάφους

Προκειμένου να αποφευχθεί το φαινόμενο του διπλού συντονισμού θα πρέπει η ιδιοσυχνότητα της εδαφικής στρώσης να αλλάξει σε τιμές μεγαλύτερες ή μικρότερες με την συχνότητα της κατασκευής προκειμένου το έδαφος να παρεμβάλλεται και να λειτουργεί αποσυντονιστικά. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί αλλάζοντας τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά πολλών εδαφικών αποθέσεων μπορούν να βελτιωθούν με έγχυση (grouting) ή ανάμιξη τσιμεντοειδών υλικών στο έδαφος. Αυτά τα υλικά ενισχύουν και τις δύο επαφές μεταξύ των κόκκων του εδάφους και γεμίζουν τον κενό χώρο μεταξύ των κόκκων. Οι τεχνικές ανάπτυξης περιλαμβάνουν την έγχυση τέτοιων υλικών στα κενά του εδάφους, έτσι ώστε η δομή των σωματιδίων της πλειονότητας του εδάφους να παραμείνει ανέπαφη. Το grouting είναι μία ευέλικτη μέθοδος με την οποία πραγματοποιείται η έγχυση αντλούμενων υλικών στο έδαφος για τη δημιουργία επιτόπου μηχανικών γεωμετρικών εδάφους-τσιμέντου γενικά με περιορισμένη απαιτούμενη πρόσβαση με σκοπό την αλλαγή των φυσικών χαρακτηριστικών του. Η τεχνική τείνει να είναι ακριβή, αλλά συχνά μπορεί να επιτευχθεί με ελάχιστη καθίζηση ή δόνηση. Ως αποτέλεσμα, μπορεί συχνά να χρησιμοποιηθεί σε καταστάσεις όπου άλλες τεχνικές βελτίωσης του εδάφους δεν μπορούν.

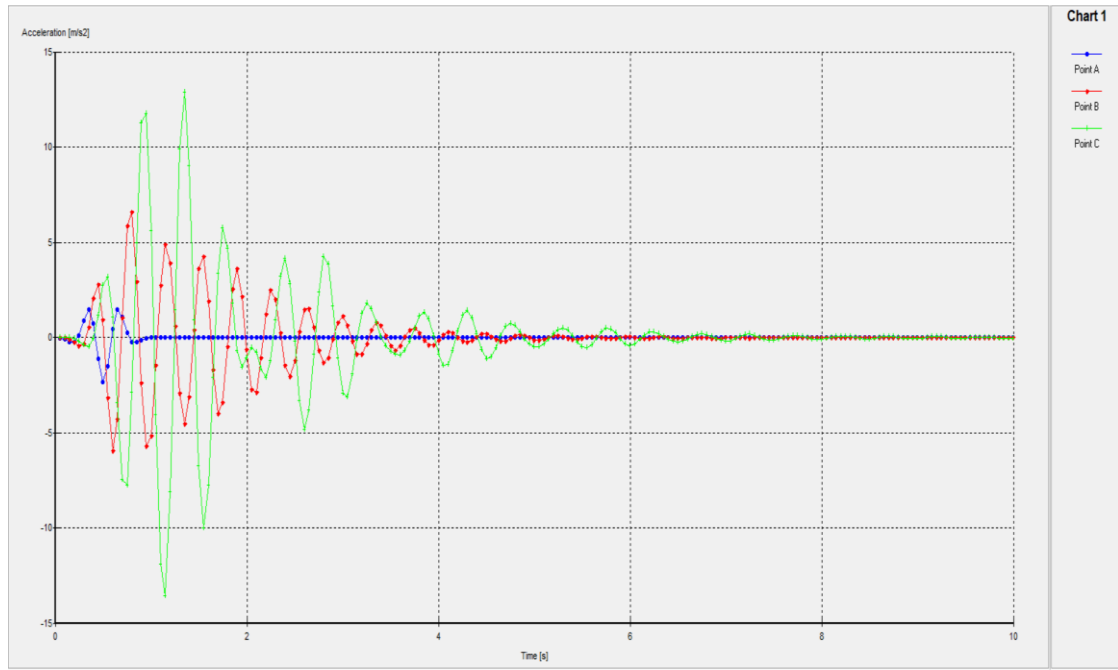
Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στην συνέχεια στο τρίτο προκαταρκτικό προσομοίωμα της προηγούμενης υποενοότητας, του μονοβάθμιου ταλαντωτή ο οποίος εδράζεται επί εδαφικού στρώματος πάνω από βράχο, η οποία εδαφική στρώση έχει τα εξής χαρακτηριστικά: (α) $V_s = 200 \text{ m/s}$, (β) $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$, (γ) $\nu = 0.3$, (δ) $H = 25 \text{ m}$, (ε) $\xi = 5\%$ (ζ) $f_s = 2 \text{ Hz}$. Οι σταθερές α και β του Rayleigh παραμένουν 0.419 και 0.005 αντίστοιχα, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Προκειμένου να προσομοιώθει η παραπάνω μέθοδος δημιουργούνται κατά μήκος της βάσης της κοιλάδας, μηχανικές γεωμετρίες τσιμέντου σε σχήμα ισοσκελούς τριγώνου ανά πενήντα μέτρα σε βάθος h_1 15, 10, 5, 0 m αντίστοιχα (το βάθος 15, 10, 5, 0 m αναφέρεται στη απόσταση της γεωμετρίας από την επιφάνεια). Οι τέσσερις αυτές περιπτώσεις συγκρίνονται με το αρχικό προσομοίωμα προκειμένου να ελεγχθεί κατά πόσο η μέθοδος grouting είναι αξιόπιστη και τείνει το έδαφος να λειτουργεί αποσυντονιστικά.

Στην Εικόνα 3.9 που ακολουθεί παρουσιάζεται η πρώτη περίπτωση όπου στο προσομοίωμα έχουν εφαρμοστεί οι γεωμετρίες τσιμέντου σε βάθος 15 m από την επιφάνεια που εδράζεται ο ταλαντωτής. Τα σημεία A, B και C ορίζονται έτσι ώστε να ταυτίζονται με την ίδια σειρά με αυτή του προσομοιώματος της Ενότητας 3.3.3.



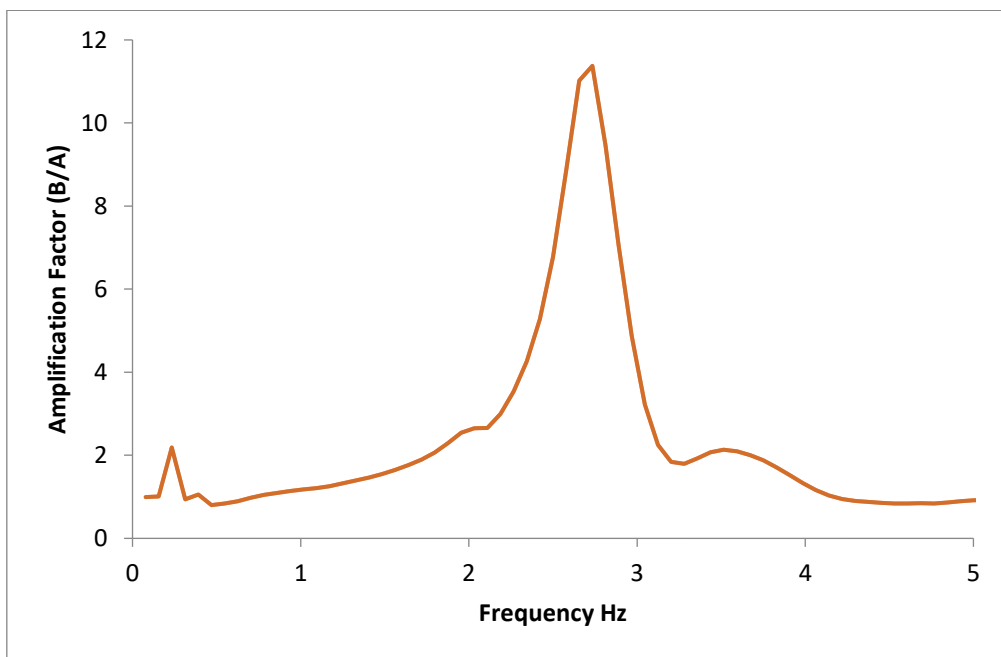
Εικόνα 3.10. Σημεία A,B,C, του προσομιώματος (grouting-15m βάθος)

Οι τριγωνικές τσιμεντώσεις έχουν τα εξής χαρακτηριστικά: (α) ταχύτητα διάδοσης του διατμητικού κύματος 2000m/s , (β) $\gamma=25\text{ kN/m}^3$, (γ) $\nu= 0.3$ και (δ) $\xi= 5\%$. Οι σταθερές α και β του Rayleigh παραμένουν 0.419 και 0.005 . Στη βάση του εδαφικού στρώματος επιβάλλεται ο ίδιος παλμός Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f=2\text{ Hz}$. Πλέον σε αυτή την περίπτωση λόγω του grouting, η διεπιφάνεια εδάφους-κατασκευής δεν είναι πια οριζόντια. Έτσι δημιουργείται ένα ανάγλυφο με αποτέλεσμα το έδαφος πλέον να μην επιδρά συντονιστικά. Στο Διάγραμμα 3.16 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης στα σημεία αυτά, λόγω του επιβαλλόμενου παλμού Ricker στη βάση του εδαφικού στρώματος.

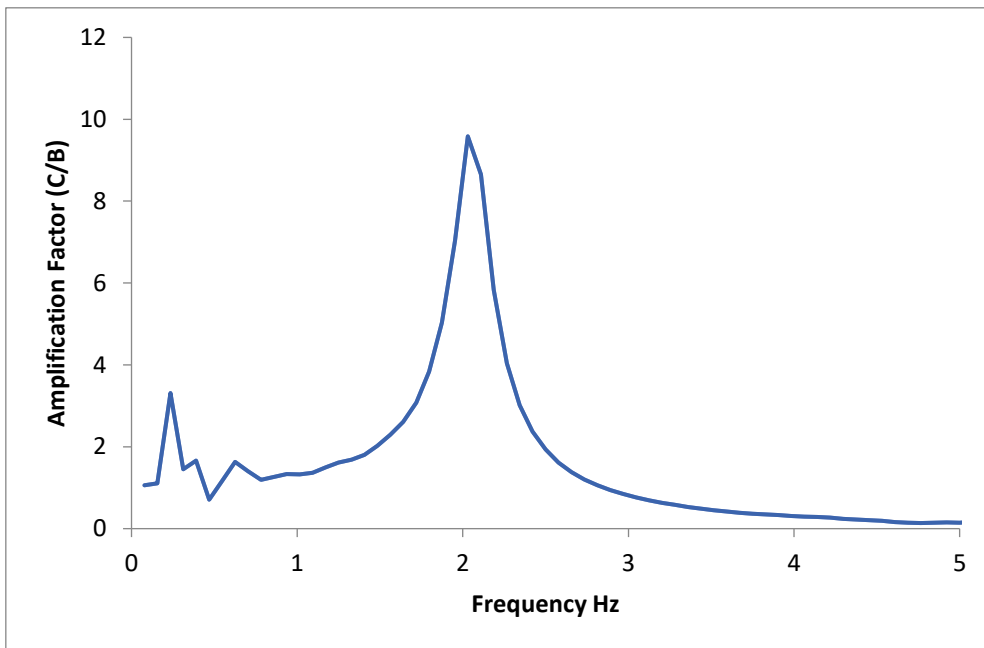


Διάγραμμα 3.16. Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης σημείων A,B,C εδαφικής στρώσης και ταλαντωτή (grouting)

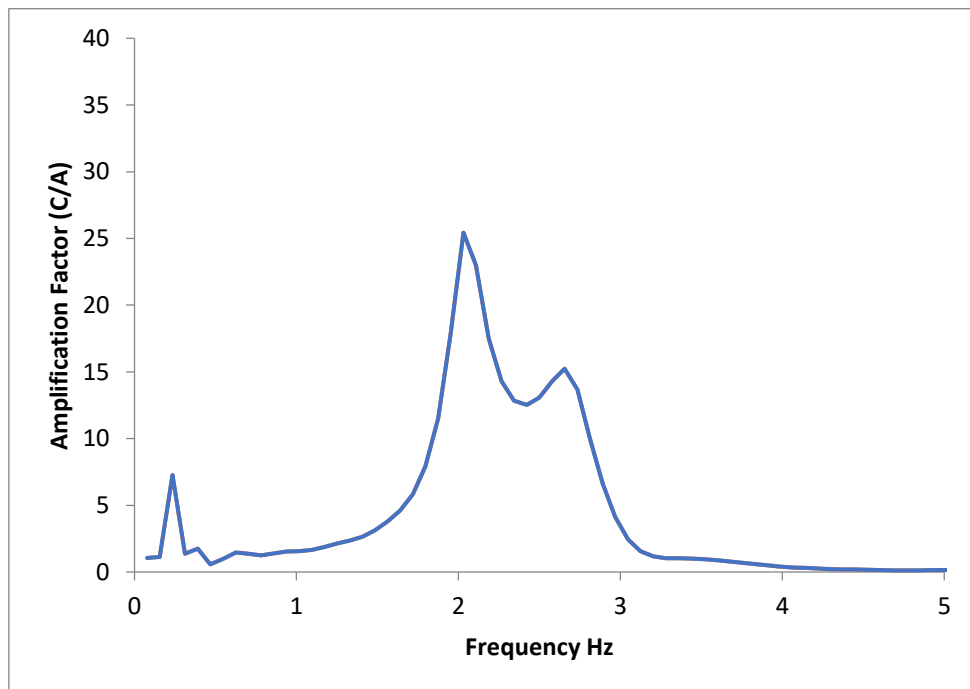
Στη συνέχεια λόγω της τροποποίησης της διέγερσης να έχει αλλάξει κάτω από τον ταλαντωτή εξαιτίας της γεωμετρίας στο μαλακό έδαφος, αφού υπολογιστούν τα φάσματα Fourier της οριζόντιας επιτάχυνσης και για τα τρία σημεία A, B, C δημιουργούνται τα διαγράμματα 3.17, 3.18, 3.19 του συντελεστή ενίσχυσης για την εδαφική στρώση (B/A), τον ταλαντωτή (C/B), και για τον ταλαντωτή με την άκαμπτη εδαφική στρώση (C/A) συναρτήσει της συχνότητας αντίστοιχα.



Διάγραμμα 3.17. Συντελεστής ενίσχυσης $AF(B/A)$ συναρτήσει της συχνότητας f



Διάγραμμα 3.18. Συντελεστής ενίσχυσης $AF(C/B)$ συναρτήσει της συχνότητας f

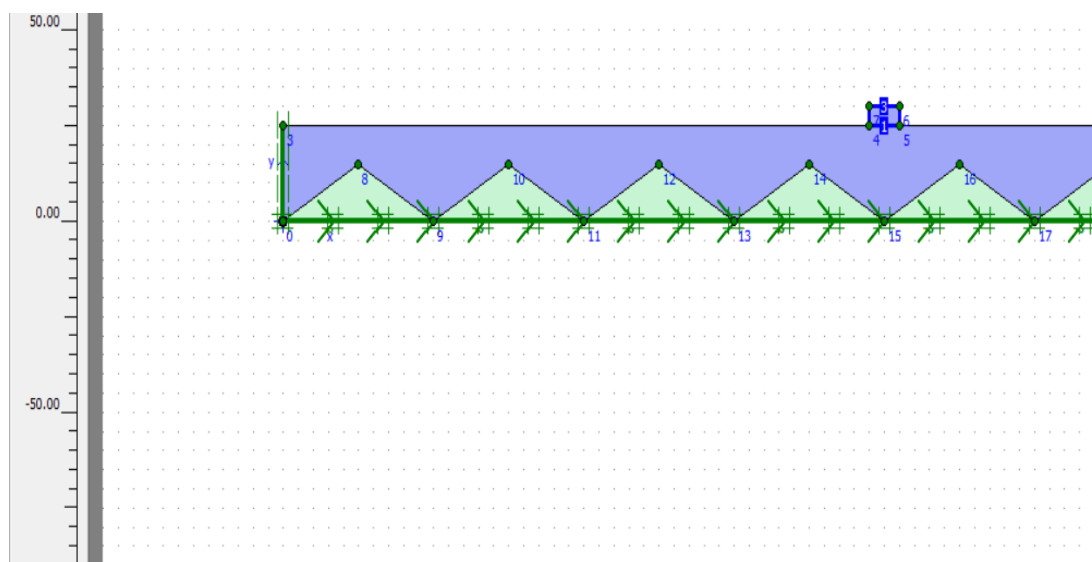


Διάγραμμα 3.19. Συντελεστής ενίσχυσης $AF(C/A)$ συναρτήσει της συχνότητας f

Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για το μονοβάθμιο ταλαντωτή AF(C/B) μεγιστοποιείται στην τιμή 9.6 για συχνότητα 2 Hz. Η αντίστοιχη καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για τη στρώση του εδάφους ανάμεσα στον ταλαντωτή και το σκληρό υπόβαθρο AF(B/A) μεγιστοποιείται στη τιμή 11.4 για συχνότητα 2.7 Hz. Παρατηρείται πως η ιδιοσυχνότητα του συντελεστή ενίσχυσης του ταλαντωτή με την ιδιοσυχνότητα του συντελεστή ενίσχυσης του εδάφους δεν ταυτίζονται. Συνεπώς το φαινόμενο του διπλού συντονισμού παρατηρείται ελαφρώς εξασθενημένο. Πρέπει να τονιστεί ότι η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης για το έδαφος και την κατασκευή AF=(C/A) μας δείχνει τη μέγιστη δυνατή απόκριση για το μοντέλο. Συνεπώς, πολύ μεγάλες τιμές ενίσχυσης υποδεικνύουν πως δημιουργείται το φαινόμενο του διπλού συντονισμού. Σε αυτή την περίπτωση ο συντελεστής ενίσχυσης AF=(C/A) έχει μέγιστη τιμή για 25.4 για συχνότητα 2 Hz.

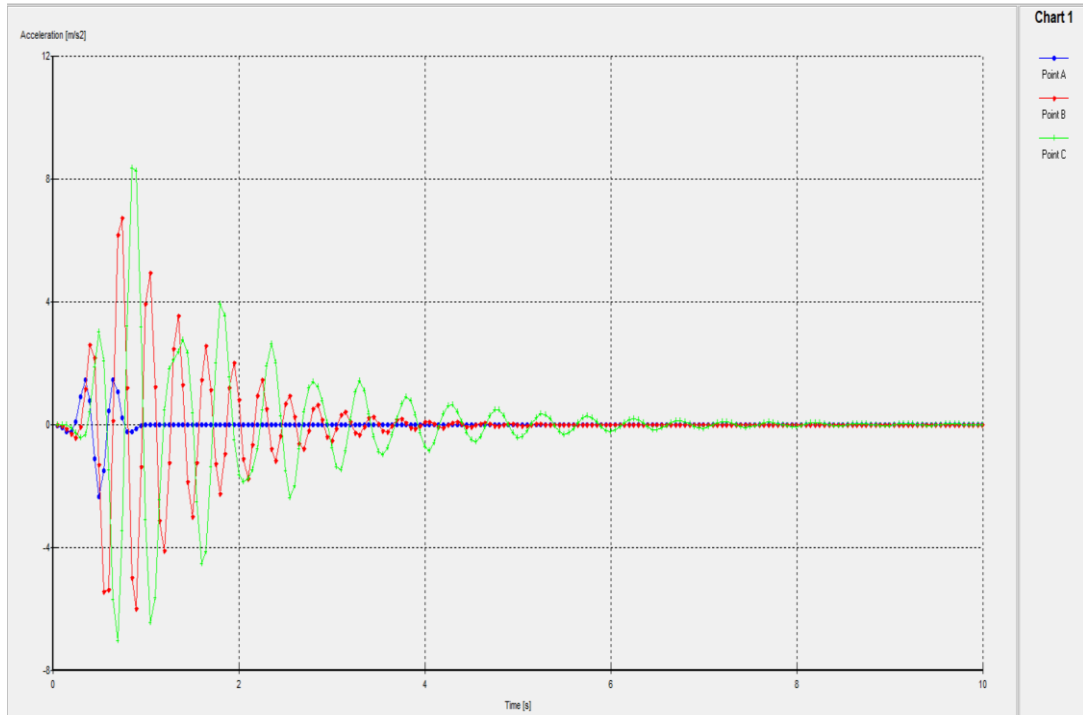
Με βάση τα αποτελέσματα της καμπύλης του συντελεστή ενίσχυσης μεταξύ εδάφους κατασκευής AF=(C/A) για το μοντέλο πριν και μετά την χρήση του grouting παρατηρείται ότι: $AF=(C/A)=109.5$ για συχνότητα 2.5 Hz πριν τη χρήση της μεθόδου grouting και για τα ίδια σημεία $AF=(C/A)=25.4$ για συχνότητα 2.03 Hz μετά την εφαρμογή της μεθόδου. Συνεπώς η μέθοδος Jet Grouting είναι αποτελεσματική διότι το έδαφος λειτούργησε αποσυντονιστικά με μεγάλη μείωση του AF(C/A) από 109.5 σε 25.4, γεγονός την καθιστά μία μέθοδο μείωσης του φαινομένου του διπλού συντονισμού.

Ακολούθως, παρουσιάζονται οι εικόνες με τα μοντέλα για τις υπόλοιπες περιπτώσεις της προσομοίωσης βάθος 10, 5 και 0 μέτρα από την επιφάνεια που εδράζεται ο ταλαντωτής, χρησιμοποιώντας την μέθοδο grouting και οι αντίστοιχες χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης για τα σημεία A, B, C αντίστοιχα.

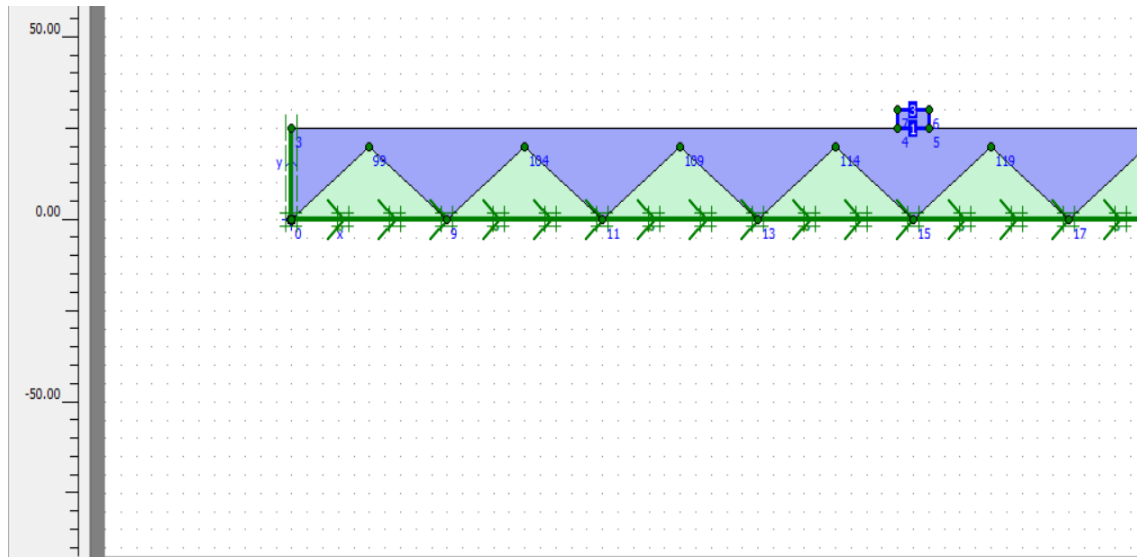


Εικόνα 3.11. Γεωμετρία του προσομοιώματος με τη χρήση της μεθόδου grouting σε βάθος 10 m

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΚΟΙΛΑΔΩΝ ΚΑΙ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

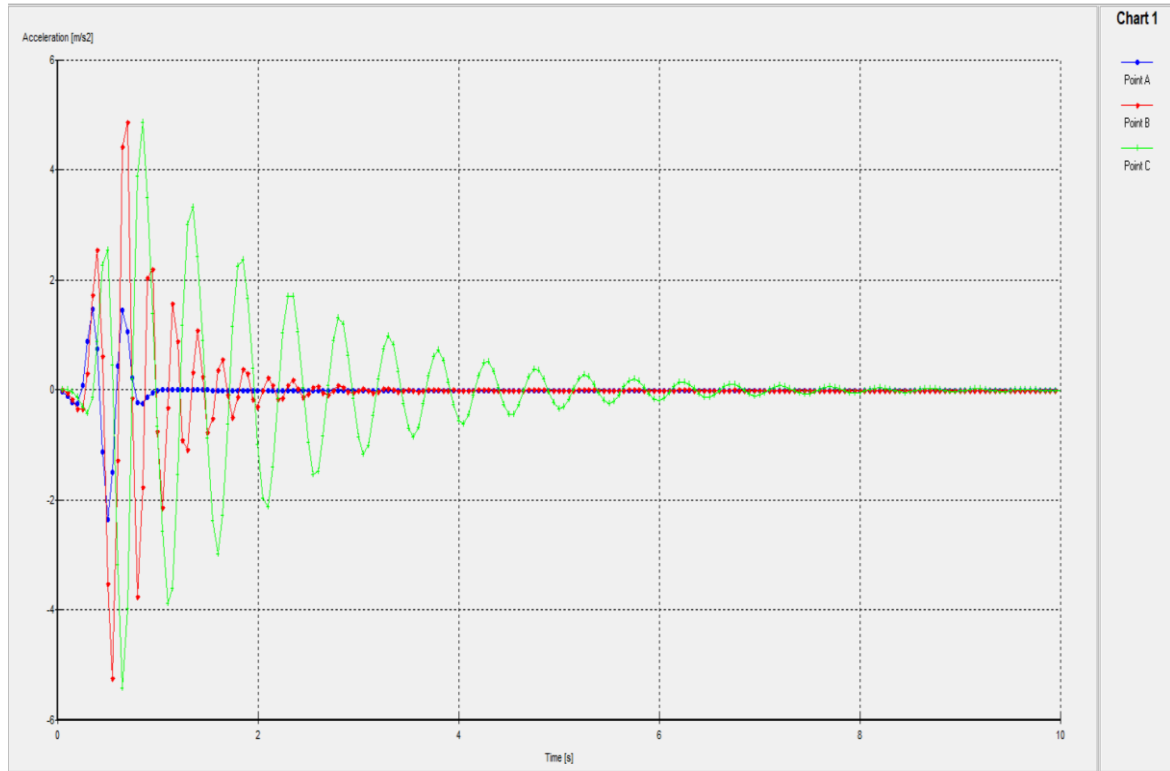


Διάγραμμα 3.20. Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης σημείων A,B,C εδαφικής στρώσης και ταλαντωτή (grouting-βάθος 10 m)

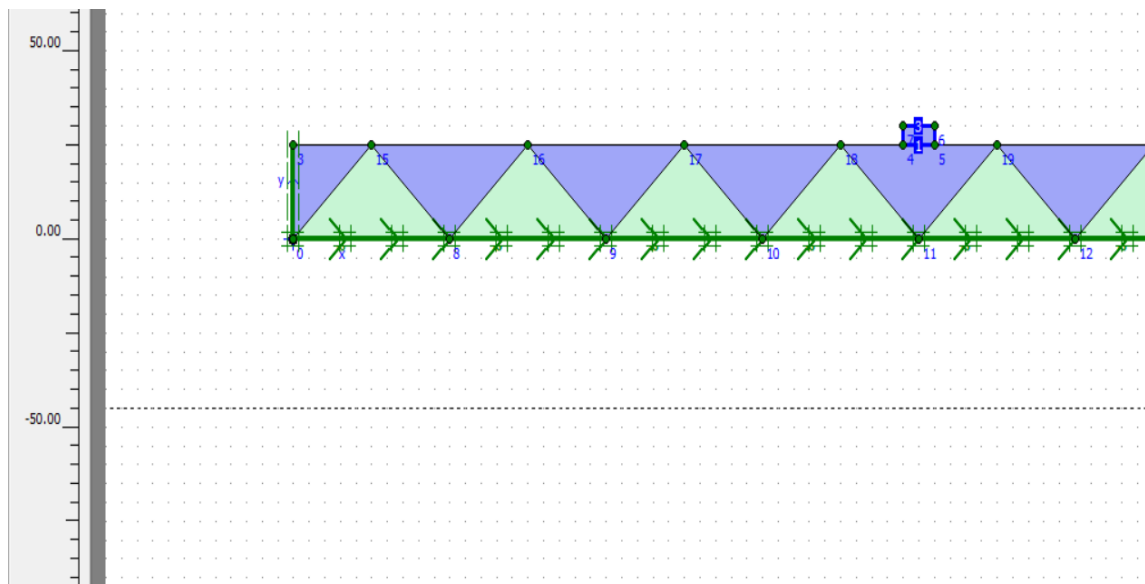


Εικόνα 3.12. Γεωμετρία του προσομιώματος με τη χρήση της μεθόδου grouting σε βάθος 5 m

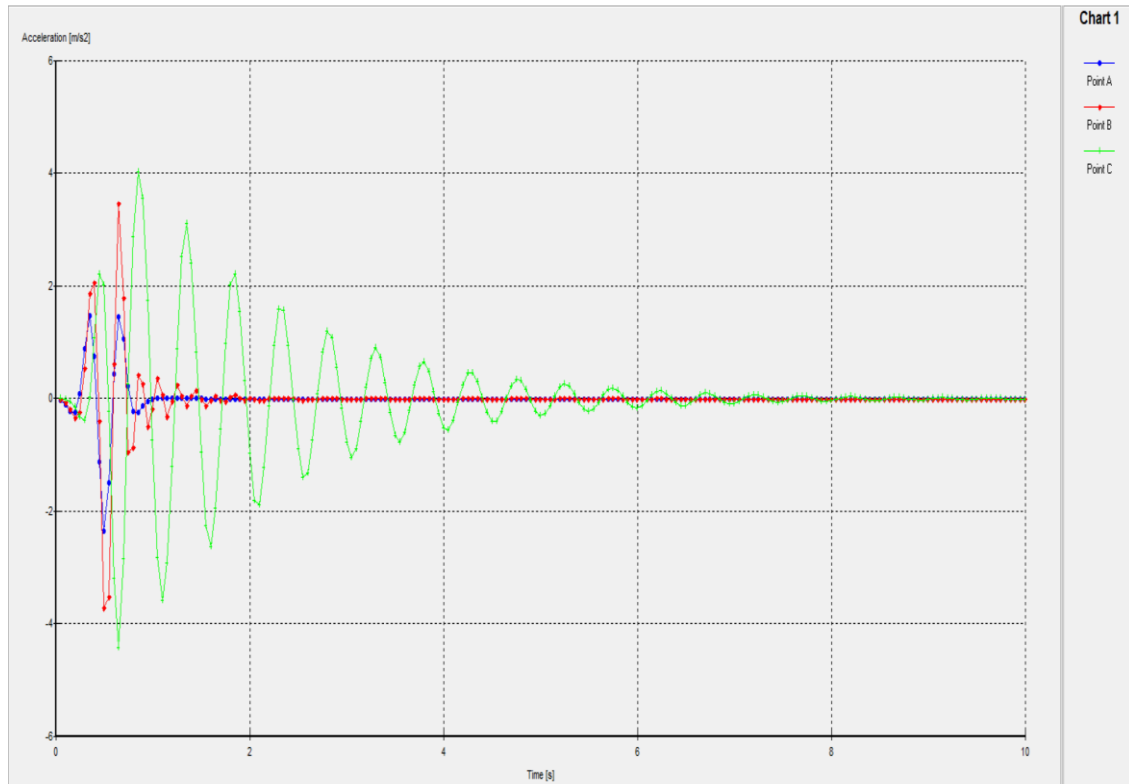
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΚΟΙΛΑΔΩΝ ΚΑΙ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



Διάγραμμα 3.21. Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης σημείων A,B,C εδαφικής στρώσης και ταλαντωτή (grouting-βάθος 5 m)



Εικόνα 3.13. Γεωμετρία του προσομιώματος με τη χρήση της μεθόδου grouting σε βάθος 0 m



Διάγραμμα 3.21. Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης σημείων A,B,C εδαφικής στρώσης και ταλαντωτή (grouting-βάθος 0 m)

Συνοψίζοντας, στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων. Ο πίνακας περιέχει τις τιμές του συντελεστή ενίσχυσης του μονοβάθμιου ταλαντωτή $AF=(C/B)$, της στρώσης του εδάφους $AF=(B/A)$ και της κατασκευής με το έδαφος $AF=(C/A)$, για την περίπτωση χωρίς την χρήση της μεθόδου grouting και με την χρήση της για τα διάφορα βάθη και τις αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες. Παρατηρείται, ότι όσο μειώνεται το βάθος χρήσης της μεθόδου grouting (γεγονός το οποίο συνεπάγεται ότι χρησιμοποιείται περισσότερο υλικό για τις γεωμετρικές τσιμεντώσεις), ο συντελεστής ενίσχυσης της οριζόντιας στρώσης του εδάφους $AF=B/A$ μειώνεται συναρτήσει του βάθους, ενώ η συχνότητα του αυξάνεται. Αυτό προκύπτει διότι η διεπιφάνεια του εδάφους με το βράχο μετατρέπεται σε ένα ανάγλυφο, το οποίο δεν είναι ομοιογενές, με αποτέλεσμα να παράγονται μεγαλύτερες διαθλάσεις, ανακλάσεις και κυματικές μετατροπές που αυξάνουν τον χρόνο διάδοσης του κύματος. Έτσι η ιδιοσυχνότητα της εδαφικής στρώσης μεταβάλλεται και δεν ταυτίζεται με αυτή του μονοβάθμιου ταλαντωτή με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται αποφυγή συντονισμού. Στη μη οικονομική περίπτωση όπου η γεωμετρία των τσιμεντώσεων ξεκινάει από μηδενικό βάθος η ιδιοσυχνότητα της εδαφικής στρώσης παρατηρείται 2.5 φορές σχεδόν μεγαλύτερη από αυτή του ταλαντωτή.

Πίνακας 3.1 Σύνοψη αναλύσεων του συντελεστή ενίσχυσης AF για κάθε περίπτωση

	AF=B/A	f(Hz)	AF=C/B	f(Hz)	AF=C/A	f(Hz)
ΧΩΡΙΣ GROUTING	11.4	2.0	9.8	2.0	111.7	2.0
GROUTING (15m)	11.3	2.7	9.6	2.0	25.4	2.0
GROUTING (10m)	9.5	3.4	9.5	2.0	16.4	2.0
GROUTING (5m)	7.7	4.2	9.5	2.0	13.1	2.0
GROUTING (0m)	6.5	5.2	9.6	2.0	11.9	2.0

Αναφορικά με το συντελεστή ενίσχυσης εδάφους-κατασκευής $AF=(C/A)$, χωρίς τη χρήση της μεθόδου grouting έχουμε τη μέγιστη δυνατή απόκριση με τιμή του AF μεγαλύτερη από το 100 λόγω συντονισμού. Με τη χρήση της μεθόδου σε βάθος 15 μέτρα παρατηρείται περίπου υποπενταπλασιασμός της τιμής του συντελεστή ενίσχυσης. Όσο μεγαλύτερες στη συνέχεια προκύπτουν οι τριγωνικές τσιμεντώσεις η τιμή του AF μειώνεται περισσότερο, αλλά με μικρότερο ρυθμό μεταβολής. Συνεπώς, με αυτή την τεχνική αλλάζουν τα χαρακτηριστικά του εδάφους το οποίο πια δρα αποσυντονιστικά με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η τιμή της ενίσχυσης στην ανωδομή και η περίπτωση εμφάνισης φαινομένων συντονισμού.

3.5 Συμπεράσματα

Διαπιστώνεται ότι πέραν των σεισμολογικών παραμέτρων που έχουν ήδη εξετασθεί, κυρίαρχο ρόλο στη διαμόρφωση της εδαφικής κίνησης διαδραματίζουν οι τοπικές εδαφικές συνθήκες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι εδαφικές στρώσεις παίζουν το ρόλο ενός φυσικού δυναμικού φίλτρου, το οποίο αποκόπτει κάποιες συχνότητες ταλάντωσης και ενισχύει κάποιες άλλες. Στιφροί σχηματισμοί ενισχύουν περισσότερο τις υψηλές συχνότητες (μικρές περιόδους) και μειώνουν τις χαμηλές συχνότητες (μεγάλες περιόδους). Αντίθετα, χαλαροί εδαφικοί σχηματισμοί ενισχύουν τις υψηλότερες συχνότητες (μεγάλες ιδιοπερίοδοι). Όπως διαπιστώνεται από τα αποτελέσματα, ο ταλαντωτής συμπεριφέρεται διαφορετικά όταν εδράζεται πάνω σε άκαμπτη ή εύκαμπτη εδαφική στρώση. Σε εύκαμπτη εδαφική στρώση ειδικά σε πολύ μαλακά εδάφη, η συχνότητα με την οποία εμφανίζεται η μέγιστη ενίσχυση της κίνησης του εδάφους είναι κοντά στη φυσική συχνότητα του υπερκείμενου η δομή, το κτίριο και το έδαφος συντονίζονται μεταξύ τους. Με τη χρήση μονοβάθμιων δυναμικών συστημάτων επιτυγχάνεται, η κατανόηση των κύριων συνιστωσών του προβλήματος, με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία της ανάλυσης που παρέχει τη βάση για μελέτη πιο σύνθετων και ρεαλιστικών συστημάτων.

Φαινόμενα συντονισμού οδηγούν το σύστημα να ταλαντώνεται με πολύ υψηλά πλάτη που μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες ζημιές στις κατασκευές, γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε ανθρώπινες απώλειες. Λύση στην εξασθένηση του φαινομένου αυτού θα μπορούσε να αποτελέσει η τεχνική τοπικής ενίσχυσης του εδάφους grouting. Εγχύσεις τσιμέντου δημιουργούν διάφορες γεωμετρίες με αποτέλεσμα να αλλάζει η σύσταση του εδάφους και να δημιουργείται ένα ανάγλυφο το οποίο δρα αποσυντονιστικά. Όπως προκύπτει από τα παραπάνω και με σχετικά οικονομικές επεμβάσεις στη διεπιφάνεια, μπορούμε να επιτύχουμε ιδιοπερίοδο της εδαφικής στρώσης που δεν μπορεί να συντονιστεί με την ιδιοπερίοδο της ανωδομής.

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΟΙΛΑΔΑΣ ΟΗΒΑ-ΟΗΑΣΗ

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται η σεισμική απόκριση της κοιλάδας πάνω στην οποία είναι θεμελιωμένη η γέφυρα Ohba-Ohashi στην πόλη Fujisawa της Ιαπωνίας. Η προσομοίωση που παρουσιάζεται στη συνέχεια, αποτελεί ένα *πείραμα φυσικής κλίμακας*, καθώς έχουν πραγματοποιηθεί καταγραφές της εδαφικής κίνησης στην επιφάνεια και στη βάση της κοιλάδας από τέσσερα σεισμικά γεγονότα. Η συγκεκριμένη κοιλάδα, χαρακτηρίζεται από μαλακές εδαφικές αποθέσεις και έντονες γεωμορφικές συνθήκες. Για το λόγο αυτό κρίνεται αναγκαίο, να πραγματοποιηθεί διεξοδική ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς η μονοδιάστατη ανάλυση (όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2) αδυνατεί να επιφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα αριθμητικών λύσεων στην προσομοίωση όταν επικρατούν έντονες γεωμορφικές συνθήκες.

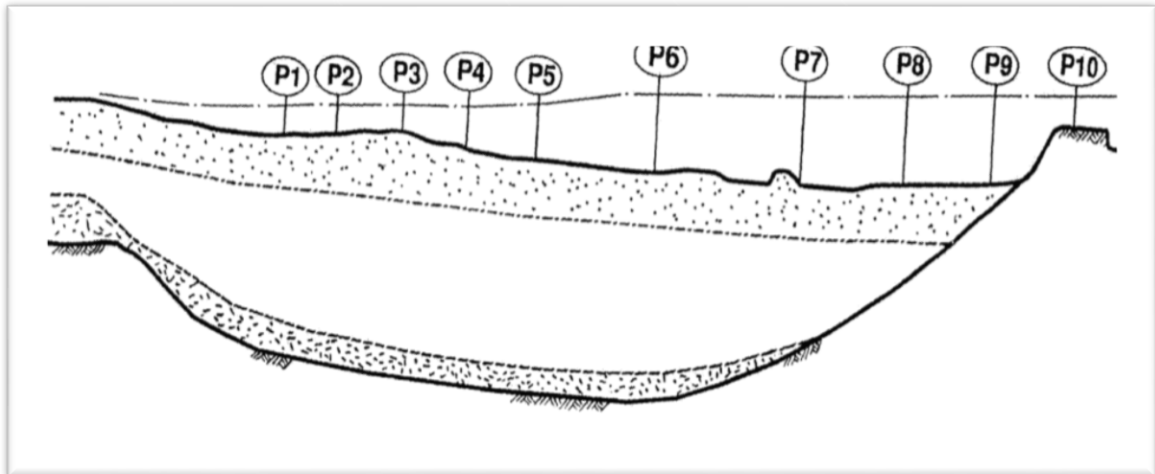
Χρησιμοποιώντας τη χρονοϊστορία της καταγραφής στη βάση της κοιλάδας, από τα τέσσερα σεισμικά γεγονότα, τα αποτελέσματα της επιφανειακής σεισμικής απόκρισης του προσομοιώματος συγκρίνονται με αυτά των επιφανειακών καταγραφών. Οι επιφανειακές σεισμικές αποκρίσεις που προκύπτουν, υποδεικνύουν τη διαφοροποίησή τους από θέση σε θέση, η οποία καθίσταται σημαντική κατά τη μελέτη και τον αντισεισμικό σχεδιασμό μιας γέφυρας. Στη συνέχεια, τοποθετούνται τρεις μονοβάθμιοι ταλαντωτές σε σημεία στα οποία, από την ανάλυση που έχει προηγηθεί, παρατηρείται διαφοροποίηση της επιφανειακής απόκρισης και εξετάζεται η ενίσχυση που επιφέρει η σεισμική διέγερση στους ταλαντωτές. Τέλος, χρησιμοποιείται η μέθοδος grouting στο διεξοδικό προσομοίωμα προκειμένου να υποδειχθούν οι διαφοροποιήσεις που επιφέρει η μέθοδος στην ενίσχυση του εδαφικού σχηματισμού και του ταλαντωτή και στη μεταξύ τους αλληλεπίδραση, γεγονός που αποδεικνύει ότι τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζει μία κοιλάδα επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο αυτή και η κατασκευή στην ανωδομή της συμπεριφέρεται σε ένα σεισμικό φαινόμενο.

4.2 Περιγραφή της κοιλάδας

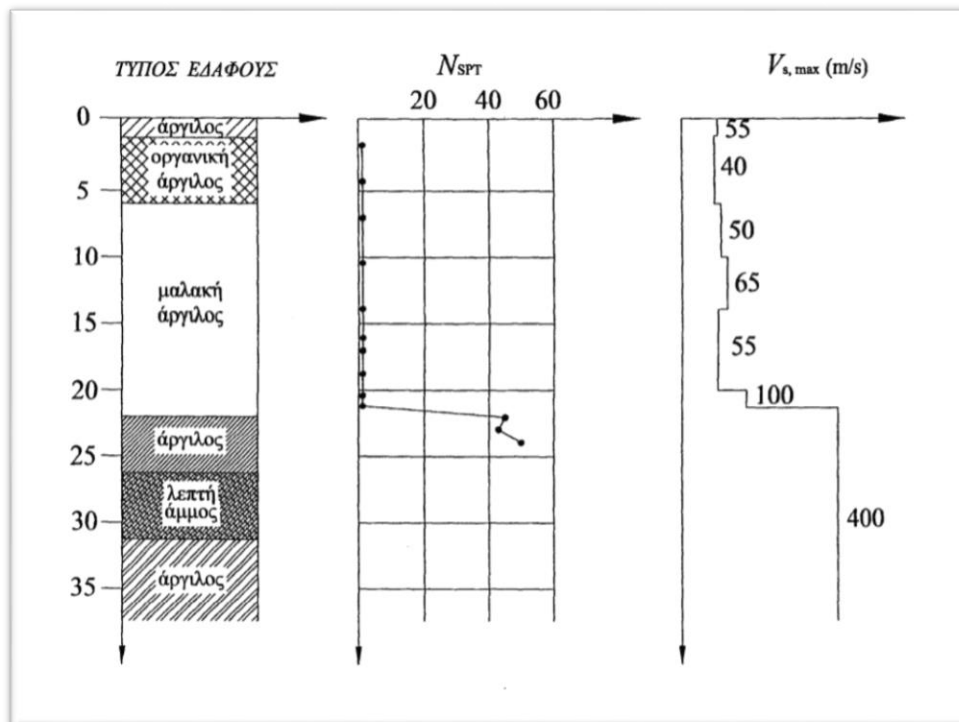
Η κοιλάδα Ohba αποτελεί μία λεκάνη μαλακών αλλουβιακών αποθέσεων. Η γεωμετρία και η σύσταση του εδάφους παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.1 και 4.2 αντίστοιχα. Τα εδαφικά στρώματα συνολικού πάχους 25 m που την απαρτίζουν, αποτελούνται από εξαιρετικά μαλακές αποθέσεις αργιλικών υλικών, οργανικών και μη. Οι τιμές N_{SPT} της τυπικής δοκιμής διείσδυσης της εδαφικής προφόρτισης, που πραγματοποιήθηκε πριν από την κατασκευή της γέφυρας με σκοπό τη βελτίωση του εδάφους της, πλησιάζουν το μηδέν, ενώ η ταχύτητα διατμητικού κύματος, μετράται μέσω δοκιμών down-hole και κυμαίνεται περίπου στα 60 m/s. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται περίπου ένα μέτρο κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ το ποσοστό υγρασίας των επιφανειακών στρωμάτων ξεπερνάει το 100% με τιμές έως και 250%. Οι επιφανειακές στρώσεις χαρακτηρίζονται από

υψηλούς δείκτες πλασιμότητας P_I με τιμές μεγαλύτερες από το 100%. Σύμφωνα με τους Vucetic & Dobry (1991) τα αργιλικά υλικά με υψηλό δείκτη πλασιμότητας συμπεριφέρονται ως γραμμικά ελαστικά υλικά για μεγάλο εύρος διατμητικών παραμορφώσεων.

Το σκληρό υπόβαθρο αποτελείται από εδαφικές αποθέσεις ημίσκληρης αργίλου και λεπτόκοκκης άμμου, με τιμές της τυπικής δοκιμής διείδυσης N_{SPT} περίπου στο 50 και ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος στα 400 m/s.



Εικόνα 4.1 Μηκοτομή της κοιλάδας και των βάθρων της γέφυρας Ohba-Hashi (Πηγή: Ψαρρόπουλος, 2001)



Εικόνα 4.2 Ιδιότητες της εδαφικής στρώσης (Πηγή: Ψαρρόπουλος, 2001)

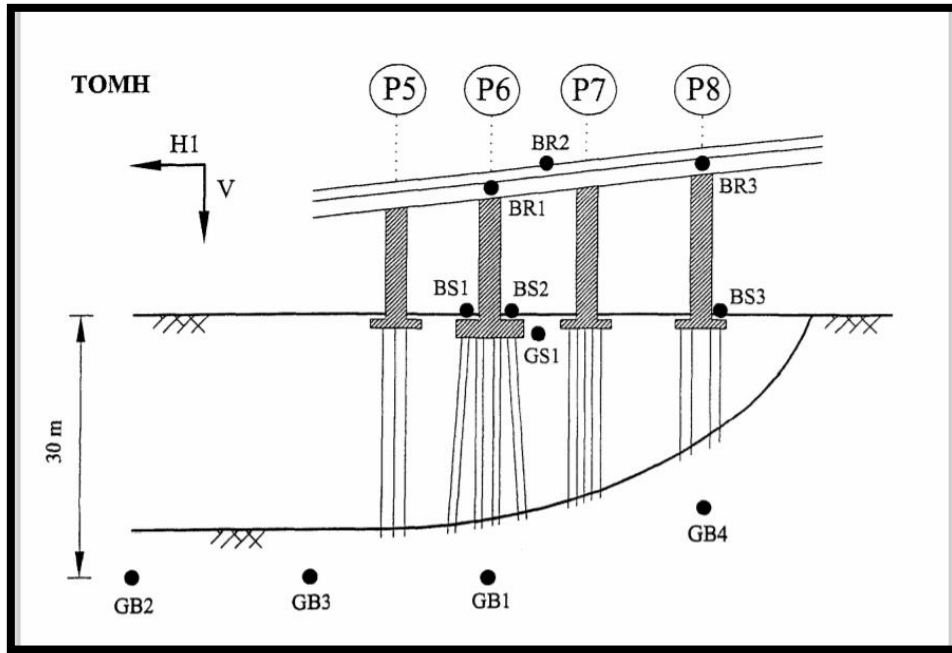
4.3 Ενόργανες καταγραφές

Το διάστημα που μεσολάβησε από τον Απρίλιο του 1981 έως τον Απρίλιο του 1985, πραγματοποιήθηκαν από το τεχνολογικό ινστιτούτο της εταιρείας Shimizu Corporation στην Ιαπωνία ενόργανες καταγραφές χρησιμοποιώντας 11 επιταχυνσιογράφους και 8 μηκυσιόμετρα εγκατεστημένους στην κοιλάδα, στα βάρθρα και στη γέφυρα αντίστοιχα (βλ. Εικόνα 4.3), από 14 διαφορετικά σεισμικά γεγονότα. Από αυτά τα σεισμικά γεγονότα, χρησιμοποιούνται για τις παρακάτω αναλύσεις οι καταγραφές από τους σεισμούς με κωδικό αριθμό 7, 11, 12 και 13. Τα χαρακτηριστικά των σεισμών, αλλά και οι μέγιστες επιταχύνσεις τους, στην οριζόντια διεύθυνση H1 στην επιφάνεια και στο σκληρό υπόβαθρο που καταγράφηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1

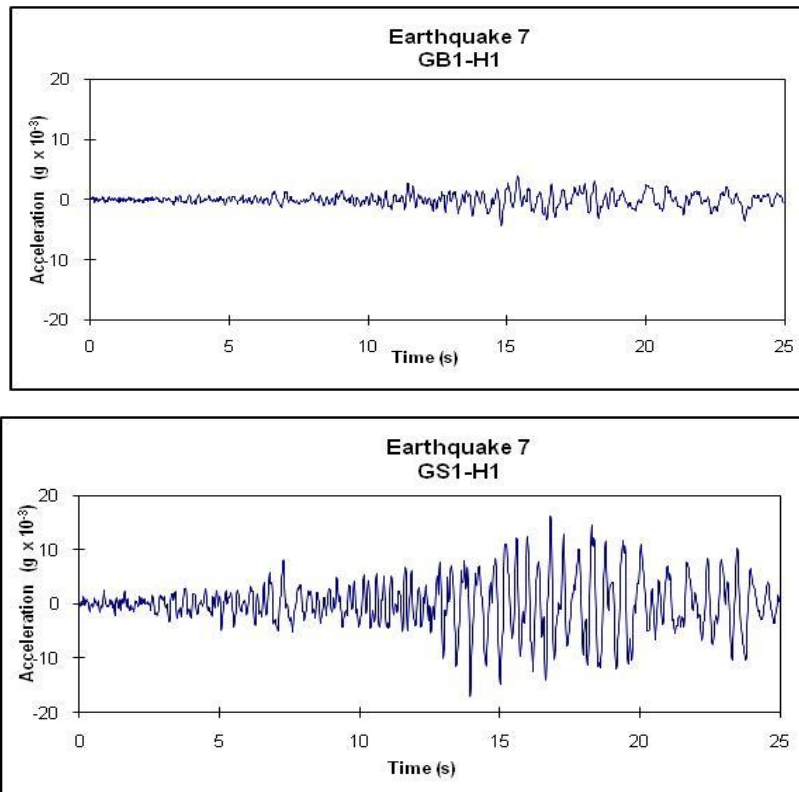
Πίνακας 4.1 Στοιχεία των εξεταζόμενων σεισμών (M,R,D) και GSA,GBA στη διεύθυνση H1

Earthquake Number	M (-)	R (km)	D (km)	GSA-H1 (%g)	GBA-H1 (%g)
7	7	238	10	1.7	0.44
11	6	81	70	2.93	0.62
12	6	42	20	11.36	3.31
13	5.4	38	20	1.9	0.48

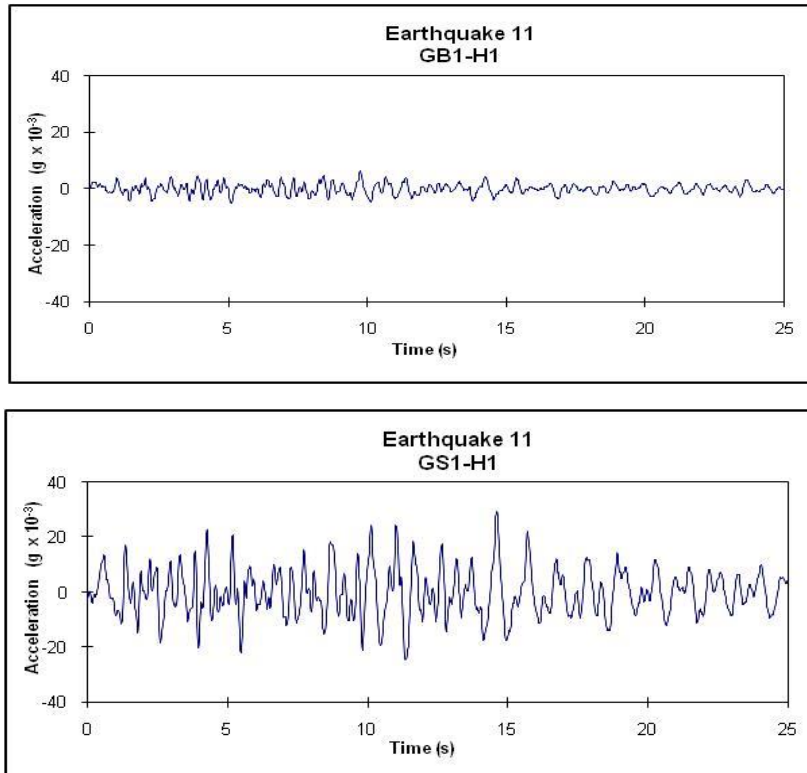
Η σεισμική απόκριση της κοιλάδας θα μελετηθεί με βάση τις καταγραφές του επιταχυνσιογράφου GS1 που είναι εγκατεστημένος σε βάθος 1 m από την επιφάνεια και του επιταχυνσιογράφου GB1 που έχει εγκατασταθεί αντίστοιχα σε βάθος περίπου 30 m πλησίον του σκληρού υπόβαθρου. Ο επιταχυνσιογράφος GB1 βρίσκεται τοποθετημένος σε σημείο στο σκληρό υπόβαθρο, στο οποίο το ανάγλυφό του ξεκινάει να παρουσιάζει απότομη κλίση καταγράφοντας τη σεισμική απόκριση του ελεύθερου πεδίου και ο επιταχυνσιογράφος GS1 βρίσκεται αντιδιαμετρικά του GB1 στην επιφάνεια. Σημειώνεται πως από τις διευθύνσεις H1, H2 και V των καταγραφών χρησιμοποιήθηκε η H1. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα διαγράμματα των χρονοϊστοριών της επιτάχυνσης για τα σημεία GB1, GS1 κατά την οριζόντια διεύθυνση H1 που έχουν καταγραφεί από τους προ μελέτη σεισμούς 7, 11, 12 και 13. Είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι τα αρχεία των καταγραφών μετατράπηκαν από αρχεία DAT σε αρχεία smc με την χρήση κώδικα, στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab προκειμένου να μπορέσουν να πραγματοποιηθούν οι αναλύσεις στο λογισμικό Plaxis.



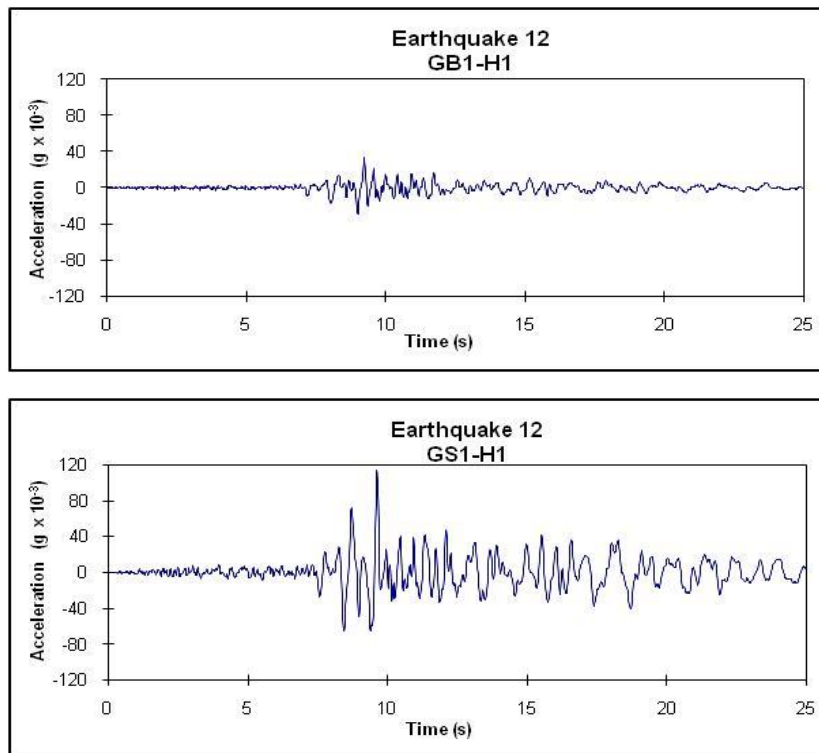
Εικόνα 4.3 Διάταξη των επιταχυνσιογράφων σε σκαρίφημα της κοιλάδας και της γέφυρας (Πηγή: Ψαρρόπουλος, 2001)



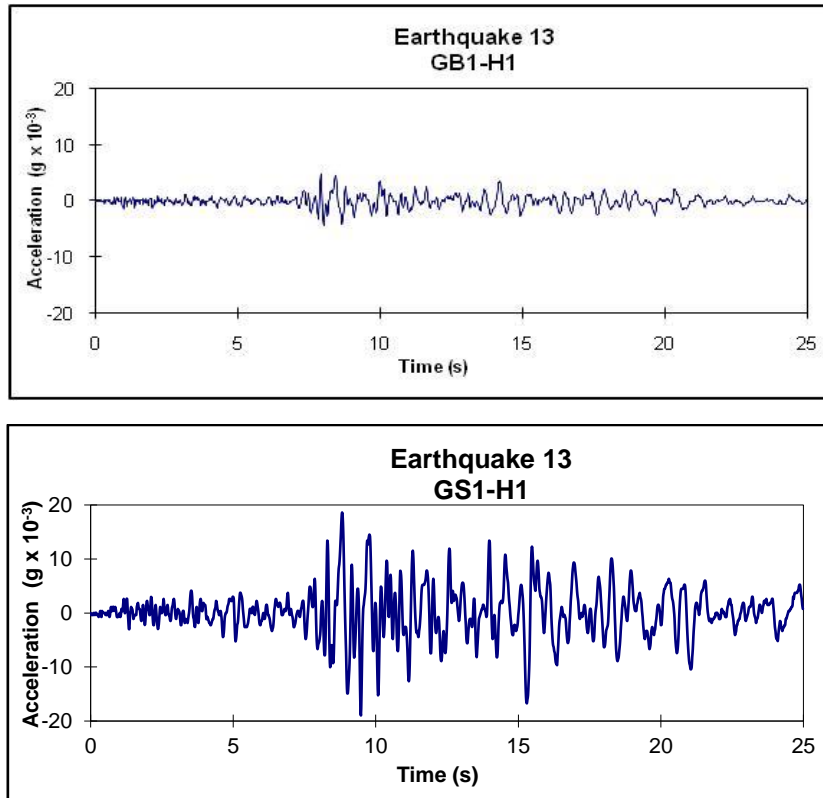
Εικόνα 4.4 Διαγράμματα χρονοϊστοριών των επιταχυνσιογράφων GB1(υπόβαθρο), GS1 (1 m κάτω από την επιφάνεια της κοιλάδας) (Σεισμός 7)



Εικόνα 4.5 Διαγράμματα χρονοϊστοριών των επιταχυνσιογράφων GB1(υπόβαθρο), GS1 (1 m κάτω από την επιφάνεια της κοιλάδας) (Σεισμός 11)



Εικόνα 4.4 Διαγράμματα χρονοϊστοριών των επιταχυνσιογράφων GB1(υπόβαθρο), GS1 (1 m κάτω από την επιφάνεια της κοιλάδας) (Σεισμός 12)



Εικόνα 4.6 Διαγράμματα χρονοϊστοριών των επιταχυνσιογράφων GB1, GS1 (Σεισμός 13)

4.4 Σεισμική απόκριση κοιλάδας

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, η υποεκτίμηση των τοπικών εδαφικών συνθηκών και η αγνόηση της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής μπορεί να προκαλέσει σοβαρές αστοχίες. Η δυναμική απόκριση του εδάφους θεμελίωσης μπορεί να θεωρηθεί ως απαραίτητη προκαταρκτική μελέτη για τη δυναμική ανάλυση μιας κατασκευής, καθώς η σεισμική απόκρισή της επηρεάζεται από τις γεωλογικές και γεωτεχνικές ιδιότητες του. Συνεπώς, σε αρχικό στάδιο, αναλύεται η δυναμική απόκριση του υποκείμενου εδαφικού σχηματισμού και προσδιορίζεται η σεισμική απόκριση σε διάφορες χαρακτηριστικές θέσεις. Σε οποιαδήποτε μελέτη, η ύπαρξη ενόργανων καταγραφών και η σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα των αναλύσεων, επιφέρουν αξιοπιστία, όσο αφορά τις παραδοχές για τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρονται τα διάφορα εδαφικά υλικά, το είδος των κυμάτων της σεισμικής διέγερσης και τις γεωτεχνικές παραμέτρους.

4.4.1 Μονοδιάστατη προσομοίωση

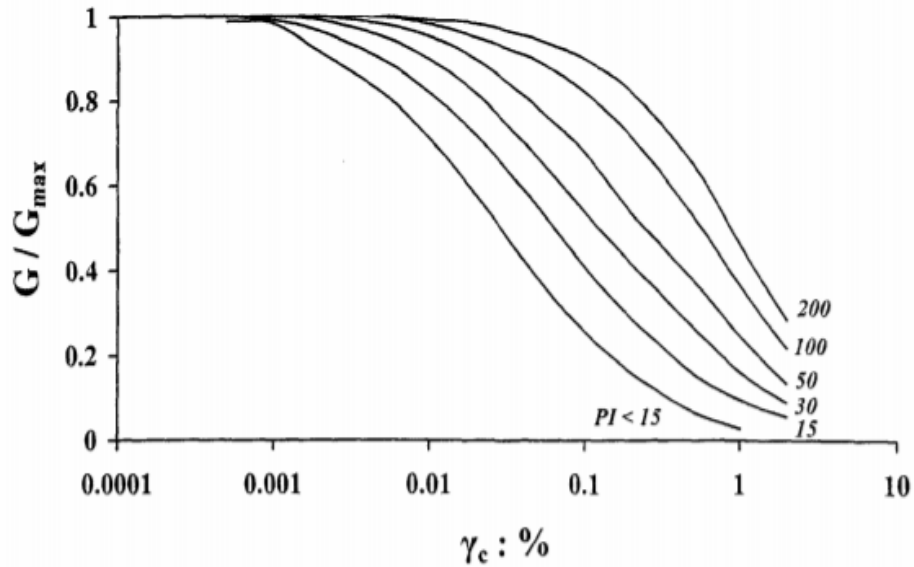
Σύμφωνα με προσπάθειες που πραγματοποιήθηκαν από τους Gazetas et, al. (1993), για την αναπαραγωγή της καταγραφής του επιταχυνσιογράφου GS1 στην επιφάνεια της κοιλάδας, με θεώρηση μονοδιάστατης κατακόρυφης κυματικής διαδόσεως χρησιμοποιώντας την καταγραφή GB1 στη βάση, τα αποτελέσματα δεν ήταν επιτυχείς. Εκτελέστηκαν δύο διαφορετικά σετ μονοδιάστατων αναλύσεων, δίνοντας έμφαση στις δυναμικές παραμέτρους του εδάφους που σχετίζονται με τη μεταβολή της εδαφικής δυστημής (G/G_{max}) συναρτήσεως της διατμητικής παραμόρφωσης (γ_c) και στο λόγο της υστερητικής απόσβεσης (ξ) συναρτήσεως της διατμητικής παραμόρφωσης (γ_c).

Στο πρώτο σετ των μονοδιάστατων αναλύσεων, ειπώθηκε πως ισχύουν οι σχέσεις που εφαρμόζονται σε αργιλικά εδάφη, G/G_{max}- γ_c και ξ - γ_c . Το αποτέλεσμα της ανάλυσης που προέκυψε για την μέγιστη επιφανειακή επιτάχυνση στην οριζόντια διεύθυνση H1 ήταν 3.8 φορές μικρότερο από αυτό της καταγραφής. Αυτή η υποεκτίμηση της εδαφικής ενίσχυσης, οφείλεται στην έντονη ανελαστικότητα που αναπτύσσεται σε τέτοιες αναλύσεις. Το φαινόμενο αυτό της έντονης ανελαστικότητας έχει ως αποτέλεσμα:

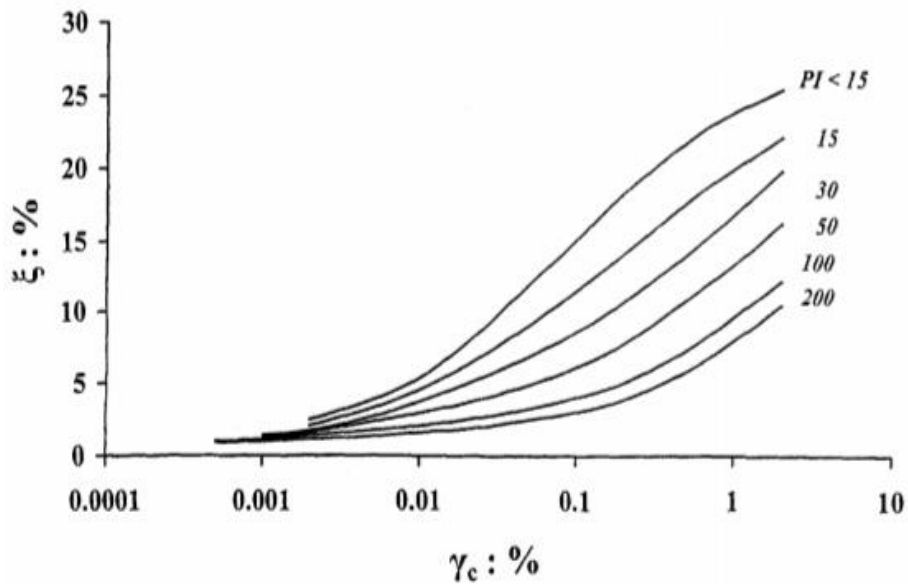
1. Τη μείωση του μέτρου διατμήσεως G σε τέτοιο βαθμό, η οποία οδηγεί σε αύξηση της ιδιοπεριόδου του εδαφικού σχηματισμού με τιμές υψηλότερες από τις περιόδους της σεισμικής διέγερσης
2. Την αύξηση της υστερητικής απόσβεσης ξ , με τιμές μεγαλύτερες του 15% το οποίο συνεπάγεται πολύ μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις

Ο επαναπροσδιορισμός και η καλύτερη μελέτη του συνόλου των εδαφικών δεδομένων, οδήγησε στο αποτέλεσμα, ότι οι σχέσεις που εφαρμόζονται σε αργιλικά εδάφη, G/G_{max}- γ_c και ξ - γ_c , κρίνονται ακατάλληλες, καθώς τα αργιλικά υλικά από τα οποία αποτελούνται οι εδαφικές αποθέσεις της κοιλάδας, χαρακτηρίζονται από μεγάλο δείκτη πλασιμότητας PI, όπως αναφέρθηκε παραπάνω κατά την περιγραφή της κοιλάδας με τιμές μεγαλύτερες από το 100%. Όπως συνέβη και κατά τον σεισμό Michoacan στο Μεξικό (1985), έτσι και στην περίπτωση της Ohba, *άργιλοι που παρουσιάζουν υψηλή πλασιμότητα παραμένουν γραμμικώς ελαστικές για μεγάλο εύρος παραμορφώσεων.*

Στις Εικόνες 4.7 και 4.8 παρουσιάζονται οι καμπύλες των Vucetic και Dobry (1991) οι οποίες αποδεικνύουν την ελαστική συμπεριφορά αργίλων με υψηλό δείκτη πλασιμότητας για διατμητικές παραμορφώσεις έως και 0.2%. Αξιοσημείωτο είναι ότι ακόμα και για τις συγκεκριμένες παραμορφώσεις, οι τιμές της απόσβεσης ξ βρίσκονται κάτω από το 5%. Έτσι, πραγματοποιήθηκε ένα νέο σύνολο 1-Δ αναλύσεων, χρησιμοποιώντας τις καμπύλες απομειώσεως του μέτρου διατμήσεως G και τις καμπύλες επαυξήσεως της απόσβεσης του Vucetic-Dobry, επιφέροντας κάποια παραμετρική παραλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που προέκυψαν ήταν βελτιωμένα, αλλά όχι στον επιθυμητό βαθμό.



Εικόνα 4.7 Η πειραματική καμπύλη G/G_{max} - γ_c των Vucetic & Dorby (1991) (Πηγή: Ψαρρόπουλος, 2001)



Εικόνα 4.7 Η πειραματική καμπύλη ξ - γ_c των Vucetic & Dorby (1991) (Πηγή: Ψαρρόπουλος, 2001)

Στην παρούσα μελέτη, με την χρήση του λογισμικού Plaxis, έγινε προσπάθεια για την πραγματοποίηση της μονοδιάστατης ανάλυσης της εδαφικής απόκρισης, για τη διερεύνηση της τοπικής ενίσχυσης που συμβαίνει μέσα στη στρώση των μαλακών αποθέσεων των αργιλικών υλικών της κοιλάδας. Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, η μελέτη της συμπεριφοράς δυναμικών συστημάτων των στρωματογραφικών συνθηκών (1-D αναλύσεις), βοηθούν στο να γίνουν καλύτερα κατανοητές οι κύριες συνιστώσες του

προβλήματος και αποτελεί προκαταρκτικό βήμα για τη μελέτη πιο πολύπλοκων συστημάτων.

Αναφορικά με την γεωμετρία του προσομοιώματος είναι ορθογωνικού σχήματος, μήκους $L=400$ m και πάχους $H=24$ m. Η εδαφική απόθεση παρουσιάζεται με τα εξής χαρακτηριστικά:

- 1) $V_s=60$ m/s
- 2) $\gamma=15$ kN/m³
- 3) $\nu=0.3$
- 4) $\xi=3\%$

Η ιδιοσυχνότητα της εδαφικής στρώσης σε μονοδιάστατη ανάλυση δίνεται όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3 από την σχέση 3.1 όπου για $H=24$ m και $V_s=60$ m/s συνεπάγεται:

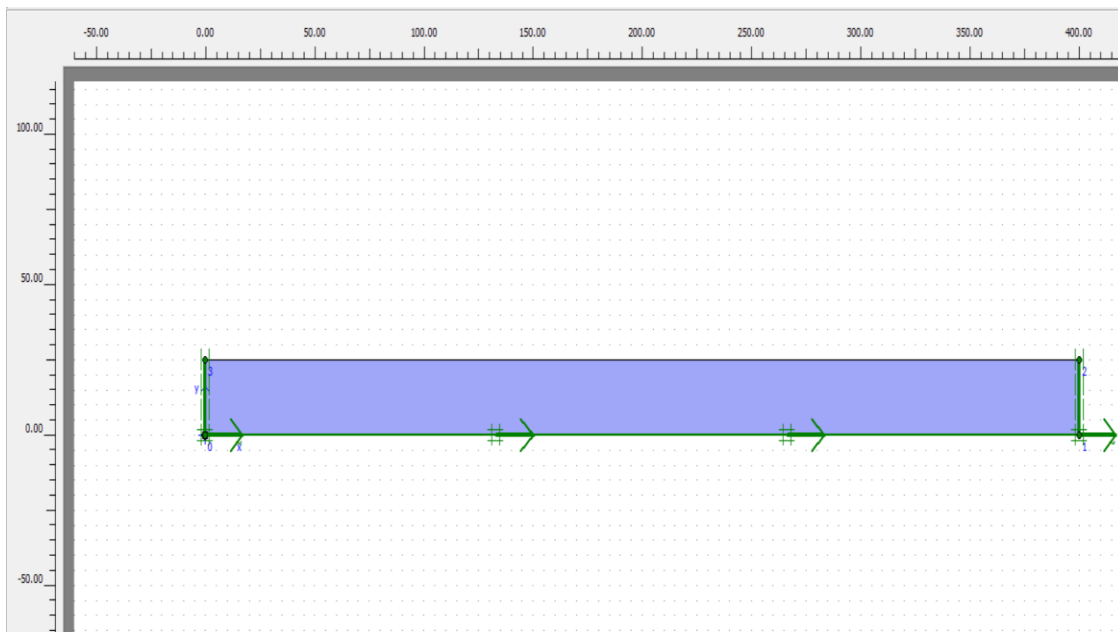
$$f_s = \frac{60}{4 * 24} = 0.625 \text{ Hz}$$

Συνεπώς για ιδιοσυχνότητα $f_s=0.625$ Hz ή ιδιοπερίοδο $T=1.6$ sec και για $\xi=3\%$ προκύπτουν οι συντελεστές Rayleigh a και b ίσοι με 0.126 και 0.007 αντίστοιχα.

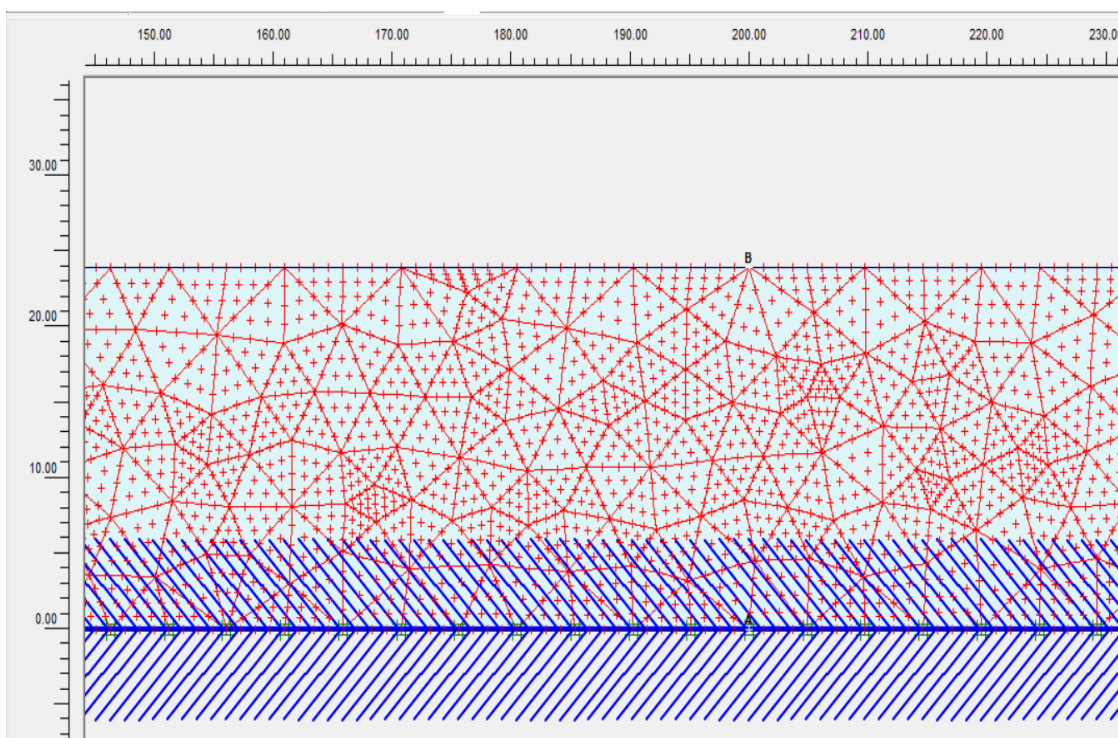
Από την αναλυτική λύση, σύμφωνα με την σχέση 3.2, προκύπτει ότι, η στρώση πρόκειται να συντονισθεί με τη διέγερση, ενισχύοντας την αρμονική ταλάντωση κατά $2/(\pi*\xi)$ φορές. Για απόσβεση $\xi=3\%$ προκύπτει ότι:

$$AF = \frac{2}{\pi * \xi} = \frac{2}{\pi * 0.03} = 21.2$$

Η προσομοίωση της σεισμικής διέγερσης πραγματοποιείται παρομοίως, όπως και στο Κεφάλαιο 3, χρησιμοποιώντας στη βάση του προσομοιώματος προδιαγεγραμμένη μετατόπιση (prescribed displacement), ορίζοντας την τιμή $u_x=0.01$ m για την οριζόντια μετατόπιση και $u_y=0.00$ m για την κάθετη, με υπόθεση, ότι το έδαφος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν απορροφητικά σύνορα εκατέρωθεν και το πολύ πυκνό πλέγμα (τριγωνικό δίκτυο). Το δίκτυο αποτελείται από δεκαπέντα-κομβικά τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία. Στην Εικόνα 4.8 παρουσιάζεται η γεωμετρία του προσομοιώματος καθώς και στην Εικόνα 4.9 παρουσιάζεται επίσης το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων καθώς και τα σημεία A, B που επιλέχθηκαν στη μέση του προσομοιώματος, για τη βάση και την κορυφή του εδαφικού στρώματος αντίστοιχα, με βάση τα οποία θα μελετηθεί η εδαφική ενίσχυση.

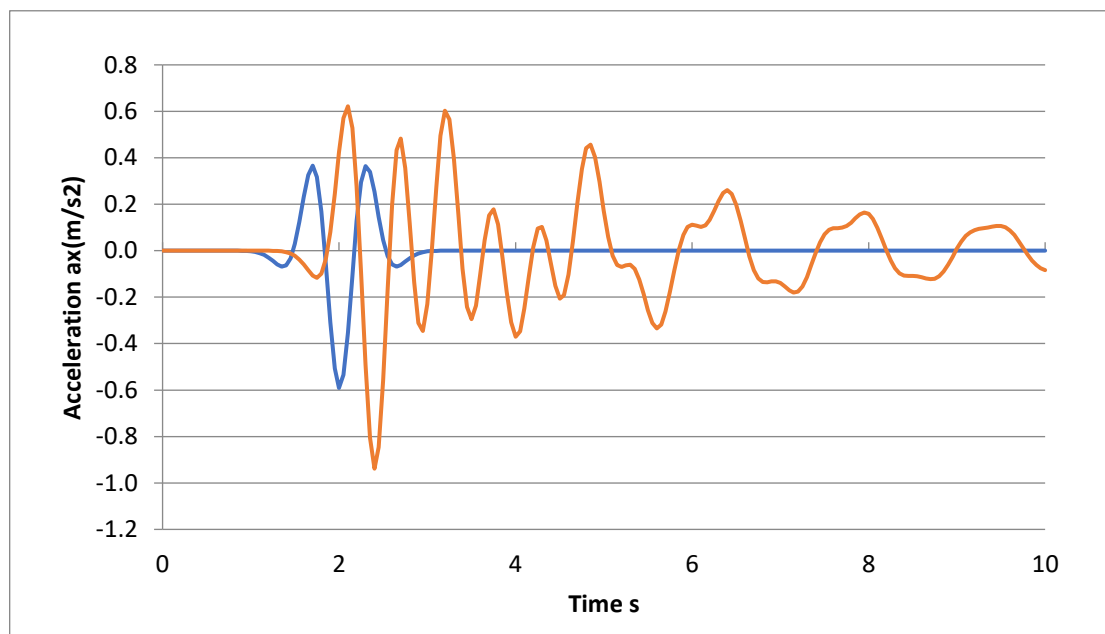


Εικόνα 4.8 Γεωμετρία του προσομιώματος



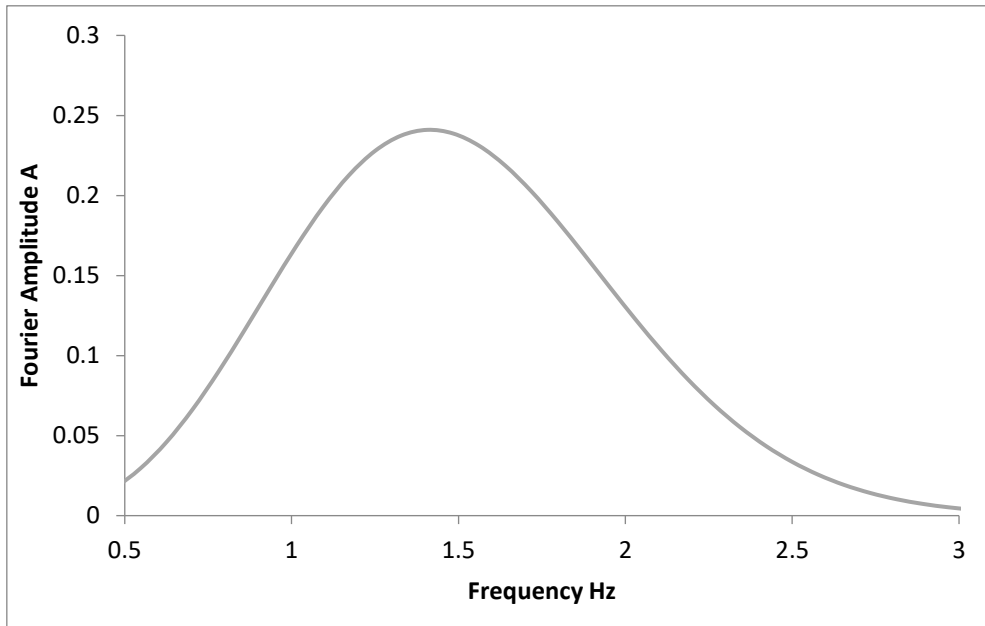
Εικόνα 4.9 Τριγωνικό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων και τα σημεία A,B στη βάση και την κορυφή της εδαφικής στρώσης αντίστοιχα

Είναι αξιοσημείωτο ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση, επειδή η ιδιοσυχνότητα του εδάφους είναι στα 0.625 Hz, επιλέχθηκε διέγερση στη βάση με παλμό Ricker με $f=1$ Hz. Ο συνολικός χρόνος της περιόδου στη παρούσα φάση υπολογισμού είναι 10 sec. Στο Διάγραμμα 4.1 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης για τα σημεία A και B.

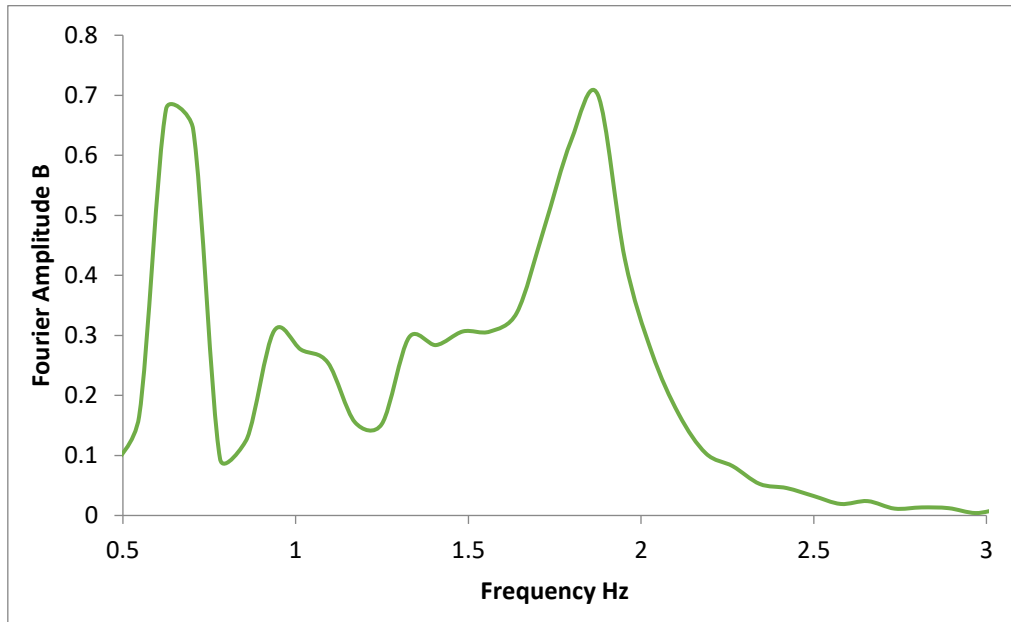


Διάγραμμα 4.1. Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης σημείων A,B της εδαφικής στρώσης

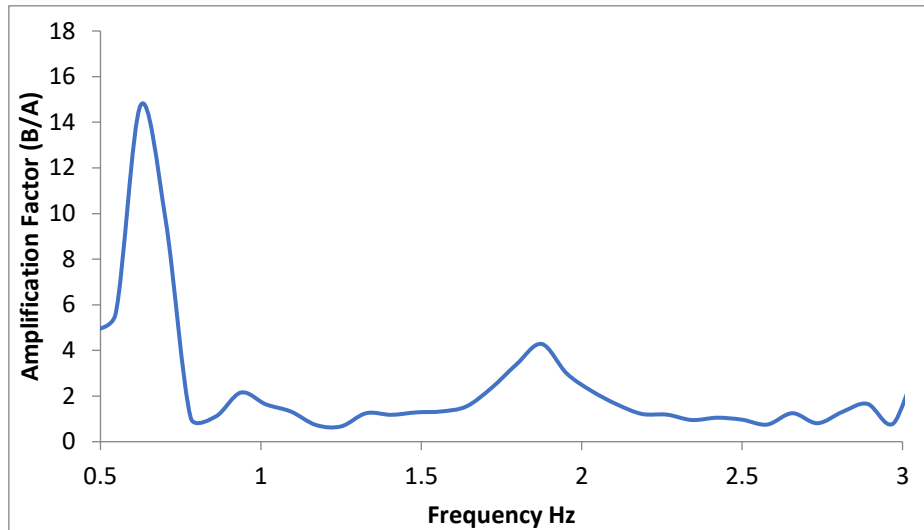
Στη συνέχεια, προκειμένου να εξεταστεί η παράμετρος της ενίσχυσης της διέγερσης, λόγω των συντονιστικών φαινομένων υπολογίζεται ο συντελεστής ενίσχυσης AF της εδαφικής στρώσης. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό SeismoSignal, από τις χρονοιστοϊστορίες, εξήχθησαν τα φάσματα Fourier για κάθε σημείο αντίστοιχα και στη συνέχεια δημιουργήθηκε η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης συναρτήσει της συχνότητας σύμφωνα με την Εξίσωση 3.4. Στο σημείο εκείνο για το οποίο προκύπτει η μέγιστη τιμή του συντελεστή AF, η συχνότητα του, αποτελεί την ιδιοσυχνότητα του προσομοιώματος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα του φάσματος Fourier για κάθε σημείο αντίστοιχα και το διάγραμμα του συντελεστή ενίσχυσης συναρτήσει της συχνότητας. Συμπεραίνεται ότι η καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης μεγιστοποιείται στην τιμή 14.7 για συχνότητα 0.625 Hz, η οποία αποτελεί την ιδιοσυχνότητα f_c του μοντέλου. Η αριθμητική λύση για τον συντελεστή $AF=14.7$ είναι αρκετά διαφορετική της αναλυτικής λύσης $AF=21.2$. Προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα ακολούθησαν αρκετές δοκιμές χρησιμοποιώντας τιμές απόσβεσης ξ για 5, 6 μέχρι και 7 %, χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τιμές στις ιδιότητες της εδαφικής απόθεσης αναφορικά με το λόγο του Poisson και το ειδικό βάρος, εφαρμόστηκε στη βάση και υψίσυχο Ricker $f=2$ Hz. Ακόμη εξετάστηκε η περίπτωση, το παραπάνω πρόβλημα να οφείλεται στα απορροφητικά σύνορα που χρησιμοποιούνται στο λογισμικό, αλλάζοντας το μήκος του προσομοιώματος για διάφορες τιμές. Η προσπάθεια ήταν ανεπιτυχής καθώς δεν μπόρεσαν να προσδιοριστούν τα επιθυμητά αποτελέσματα.



Διάγραμμα 4.2. Μετασχηματισμός Fourier της χρονοϊστορίας της οριζόντιας επιτάχυνσης για το σημείο A



Διάγραμμα 4.3. Μετασχηματισμός Fourier της χρονοϊστορίας της οριζόντιας επιτάχυνσης για το σημείο B



Διάγραμμα 4.3. Συντελεστής ενίσχυσης $AF(B/A)$ συναρτήσει της συχνότητας f

Τα παραπάνω αποτελέσματα, παρουσιάζουν την αδυναμία της μονοδιάστατης ανάλυσης, να προβλέψει στην παρούσα περίπτωση, μαλακού εδαφικού σχηματισμού την εδαφική ενίσχυση και συνεπώς τη σεισμική απόκριση του προσομοιώματος.

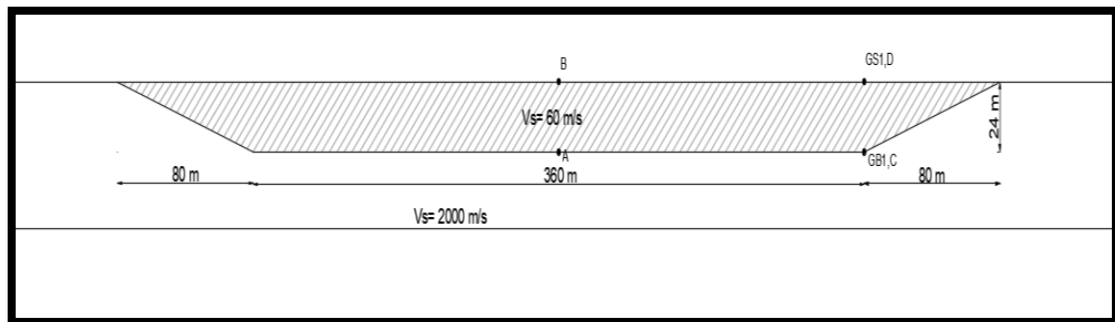
4.4.2 Διδιάστατη προσομοίωση

Γίνεται αντιληπτό ότι οι μονοδιάστατες αναλύσεις δεν παρουσιάζουν αξιοπιστία σε πολύπλοκες γεωμετρίες και σε μεγάλες διακυμάνσεις που εμφανίζονται στις καταγραφές των επιταχύνσεων με αποτέλεσμα να υποεκτιμάται ο συντελεστής της εδαφικής ενίσχυσης. Ποιοτικά αποτελέσματα σχετικά με την εδαφική ενίσχυση υπό την επίδραση των γεωμορφικών συνθηκών, εξάγονται με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων σε συνδυασμό με πραγματικές καταγραφές. Στη συνέχεια πραγματοποιείται αριθμητική διδιάστατη ανάλυση της σεισμικής αποκρίσεως της κοιλάδας, λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της.

Με βάση την Εικόνα 4.3, είναι σαφές ότι το υπόβαθρο των μαλακών εδαφικών στρώσεων δεν είναι οριζόντιο, ούτε εκτείνεται στο άπειρο, αλλά παρουσιάζεται μία απότομη κλίση στη θέση που είναι εγκατεστημένος ο επιταχυνσιογράφος GB1. Η κοιλάδα Ohba χαρακτηρίζεται συνεπώς ως μια στενή ιζηματογενή κοιλάδα με απότομη κλίση στα άκρα της. Οι καταγραφές στην επιφάνεια τέτοιων εδαφικών σχηματισμών, αναδεικνύουν ισχυρότερες σεισμικές δονήσεις και μεγαλύτερες σε χρονική διάρκεια από τα αποτελέσματα που επιφέρουν οι μονοδιάστατες αναλύσεις.

Για την κατάστρωση του αριθμητικού προσομοιώματος, παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.10 η γεωμετρία της κοιλάδας η οποία θεωρείται πως ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες. Το προσομοίωμα αποτελείται από δύο εδαφικές στρώσεις, όπου το ένα

χαρακτηρίζεται από μαλακές εδαφικές αποθέσεις με ταχύτητα διαδόσεως διατμητικού κύματος $V_s=60$ m/s και το άλλο από το σχετικά σκληρό υπόβαθρο με ταχύτητα διαδόσεως διατμητικού κύματος $V_s=2000$ m/s με τη μεταξύ τους διεπιφάνεια να παρουσιάζει κλίση περίπου 15 μοιρών. Σημειώνεται ότι στην πραγματικότητα το υπόβαθρο έχει $V_s=400$ m/s, αλλά στο προσομοίωμα χρησιμοποιήθηκε $V_s=2000$ m/s ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα εδαφικής ενίσχυσης στο υπόβαθρο. Τα σημεία που παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.10 αποτελούν τα σημεία στα οποία θα υπολογιστούν οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης, με τα A και B στο κέντρο του προσομοιώματος (κοιλάδα) και τα C και D να ταυτίζονται με τα σημεία όπου είναι εγκατεστημένοι οι επιταχυνσιογράφοι GB1 και GS1 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.10 Απλοποιημένη γεωμετρία διδιάστατης ανάλυσης

Το προσομοίωμα έχει στο σύνολο του μήκος $L=700$ m και πάχους $H=50$ m. Η στρώση του μαλακού εδάφους έχει μήκος $L_2=520$ m και πάχος $H_2=24$ m. Η προσομοίωση και σε αυτή την περίπτωση πραγματοποιείται με το λογισμικό Plaxis Εικόνα 4.11. Το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από δεκαπεντά-κομβικά τριγωνικά στοιχεία και χαρακτηρίζεται από πολύ πυκνό πλέγμα (τριγωνικό δίκτυο). Η μοντελοποίηση της σεισμικής διέγερσης πραγματοποιείται όπως και στις αναλύσεις του Κεφαλαίου 3 χρησιμοποιώντας στη βάση του προσομοιώματος προδιαγεγραμμένη μετατόπιση (prescribed displacement), ορίζοντας την τιμή $u_x=0.01$ m για την οριζόντια μετατόπιση και $u_y=0.00$ m για την κάθετη. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν απορροφητικά σύνορα εκατέρωθεν και πραγματοποιείται η υπόθεση πως το έδαφος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά με υστερητική απόσβεση υλικού, υπόθεση αποδεκτή για αργιλικά υλικά με υψηλό δείκτη πλασιμότητας όπως στην προκειμένη περίπτωση καθώς τα εδάφη αυτά αναπτύσσουν ανελαστική συμπεριφορά μόνο σε πάρα πολύ μεγάλες παραμορφώσεις ($\gamma_c > 0.001 = 0.1\%$). Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται για στραγγισμένες συνθήκες. Ο συνολικός χρόνος της περιόδου, για να συμπίπτουν οι αναλύσεις με αυτές των καταγραφών στη παρούσα φάση υπολογισμού είναι 25 sec.

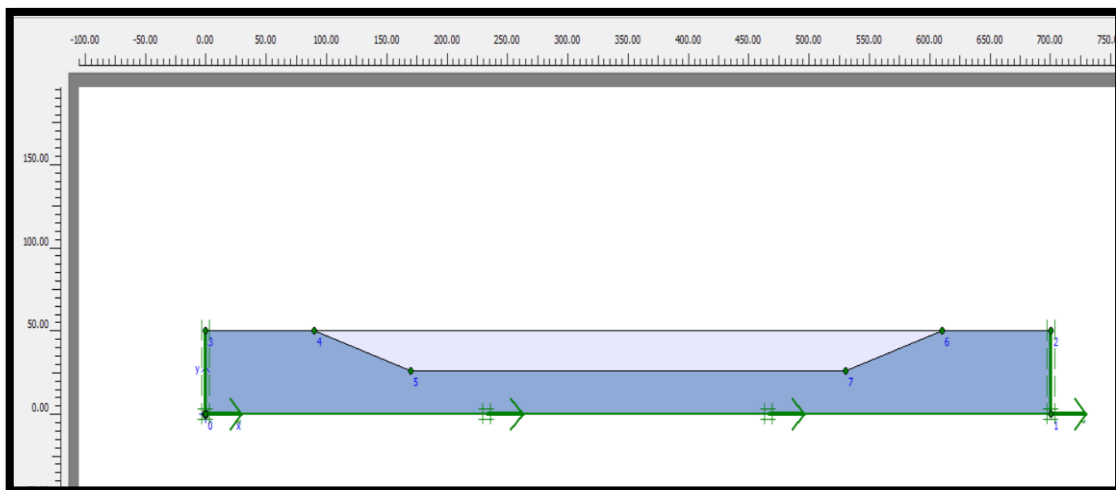
Η εδαφική στρώση που χαρακτηρίζεται ως σκληρό υπόβαθρο έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- 1) $V_s=2000$ m/s
- 2) $\gamma=24$ kN/m³
- 3) $\nu=0.3$
- 4) $\xi=5\%$
- 5) Για απόσβεση υλικού ίση με 0.5% οι συντελεστές α και β του Rayleigh προκύπτουν ίσες με 0.040 και 0.0005 αντίστοιχα

Η μαλακή εδαφική στρώση χαρακτηρίζεται από τις εξής ιδιότητες:

- 1) $V_s=60$ m/s
- 2) $\gamma=13$ kN/m³
- 3) $\nu=0.3$

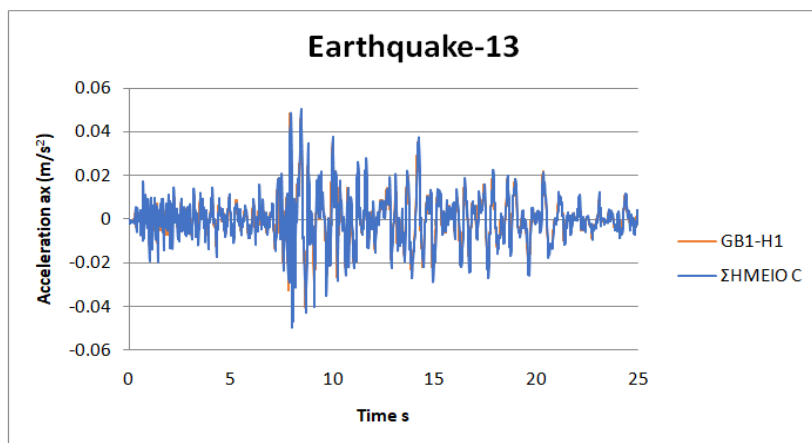
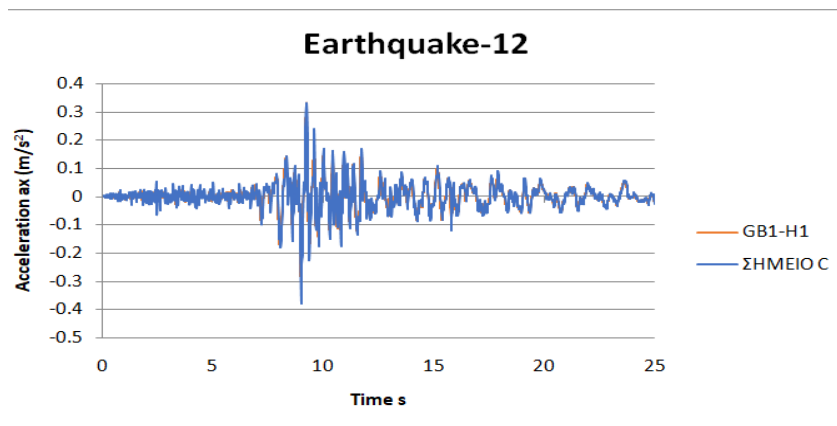
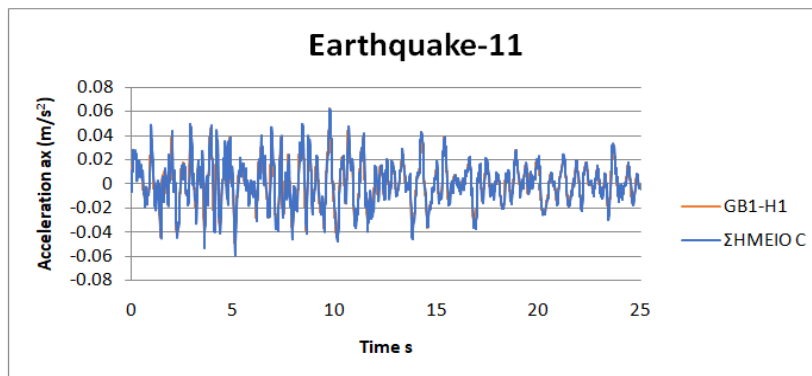
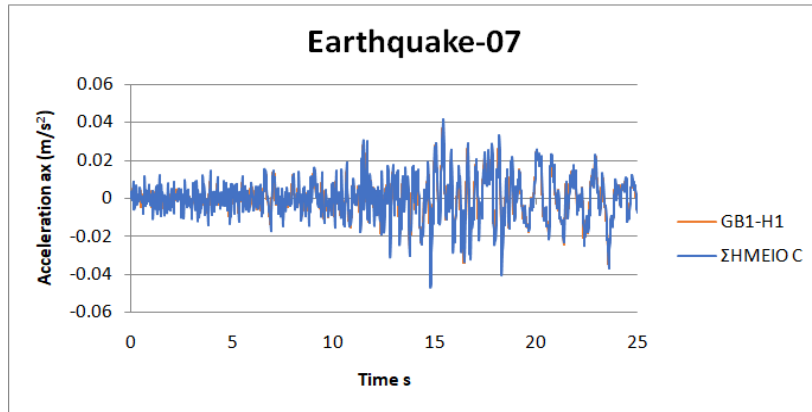
Μετά από αρκετές δοκιμές και για τα τέσσερα σεισμικά γεγονότα, προκειμένου τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων να συμπίπτουν με αυτά των καταγραφών της επιφάνειας για $\xi=0.5$ %, δημιουργήθηκαν δύο διαγράμματα απόσβεσης συναρτήσει της συχνότητας. Η απόσβεση υλικού είναι τύπου Rayleigh, που σημαίνει ότι εξαρτάται από την συχνότητα. Έτσι δημιουργήθηκαν δύο καμπύλες απόσβεσης-συχνότητας όπου το πρώτο διάγραμμα κρίνεται αξιόπιστο για τις χαμηλές συχνότητες (0-5 Hz) με συντελεστές Rayleigh $\alpha=0.040$ και $\beta=0.0005$ και το δεύτερο διάγραμμα κρίνεται αξιόπιστο για τις υψηλές συχνότητες (0-5 Hz) με συντελεστές Rayleigh $\alpha=0.45$ και $\beta=0.00001$. Συνεπώς πραγματοποιούνται δύο αριθμητικές αναλύσεις για κάθε σεισμό (από 0-5 Hz και από 5-10 Hz) και προκύπτει ένα συνολικό διάγραμμα από 0-10 Hz τόσο για τις παραγόμενες επιφανειακές χρονοϊστορίες, όσο και για τους αντίστοιχους μετασχηματισμούς Fourier.



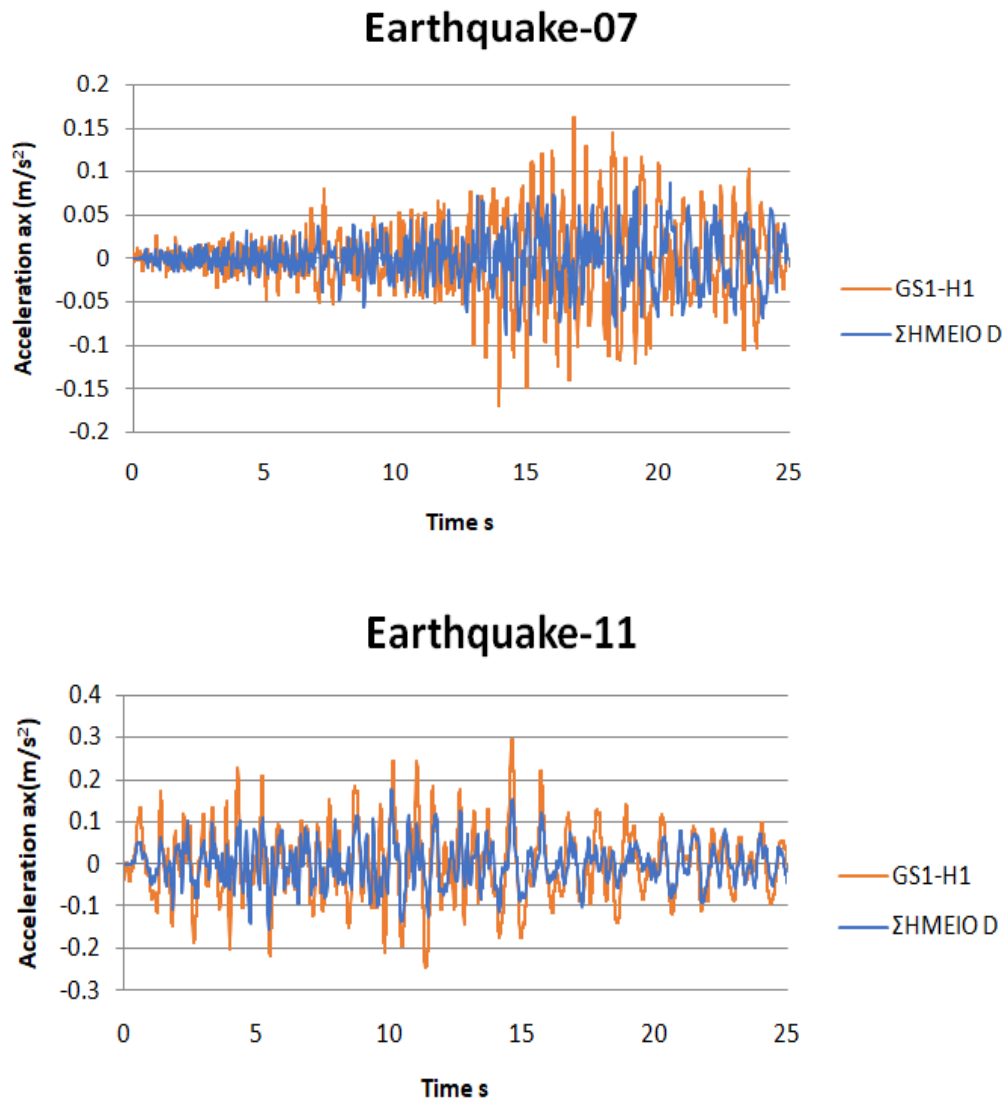
Εικόνα 4.11 Γεωμετρία και συνοριακές συνθήκες του διδιάστατου προσομοιώματος

4.4.2.1 Έλεγχος αξιοπιστίας των καταγραφών

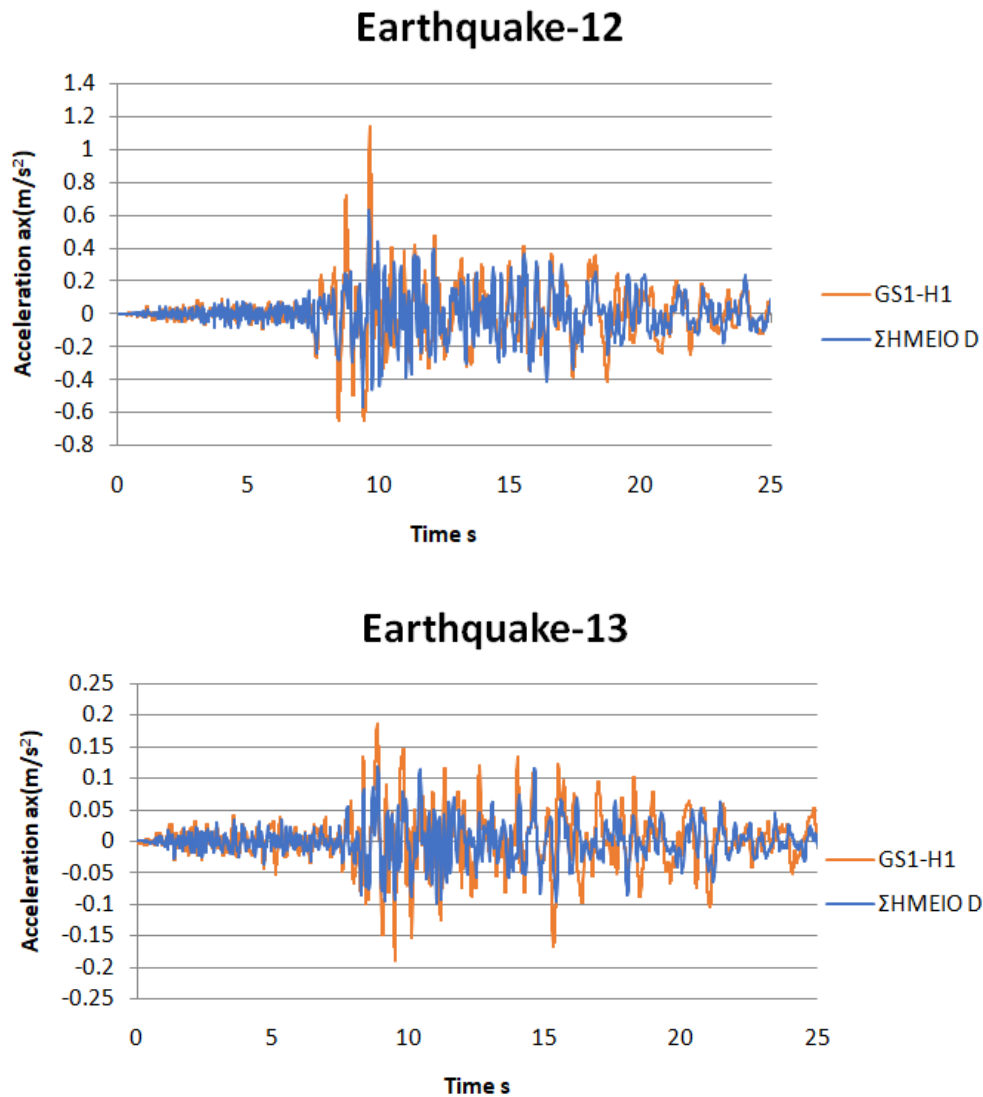
Εφαρμόζοντας τις καταγραφές του επιταχυνσιογράφου GB1 και για τους τέσσερις σεισμούς (7, 11, 12, 13) ως διέγερση στη βάση του προσομοιώματος, προέκυψαν οι επιφανειακές καταγραφές του σημείου D, οι οποίες στη συνέχεια συγκρίνονται με τις καταγραφές του επιταχυνσιογράφου GS1. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα με βάση τα οποία πραγματοποιείται η παραπάνω σύγκριση. Επίσης, πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των καταγραφών στη βάση GB1 με αυτή στο σημείο C προκειμένου να ελεγχθεί, η σωστή μετατροπή των καταγραφών από αρχείο Dat σε αρχείο Smc. Τα διαγράμματα παρατηρείται ότι ταυτίζονται ακριβώς, γεγονός που επιβεβαιώνει την σωστή μετατροπή του αρχείου των καταγραφών.



Εικόνα 4.12 Σύγκριση των αποτελεσμάτων στο σημείο B με τις καταγραφές του GB1



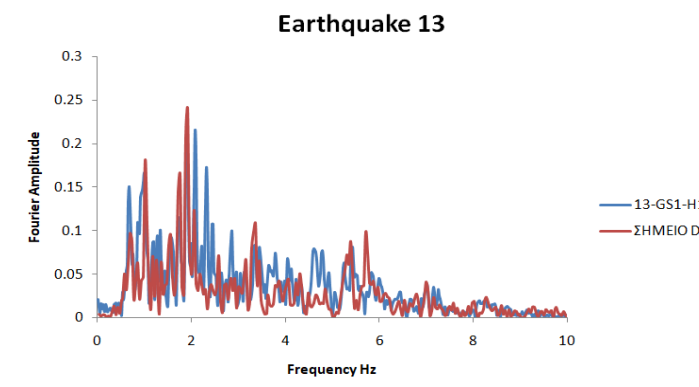
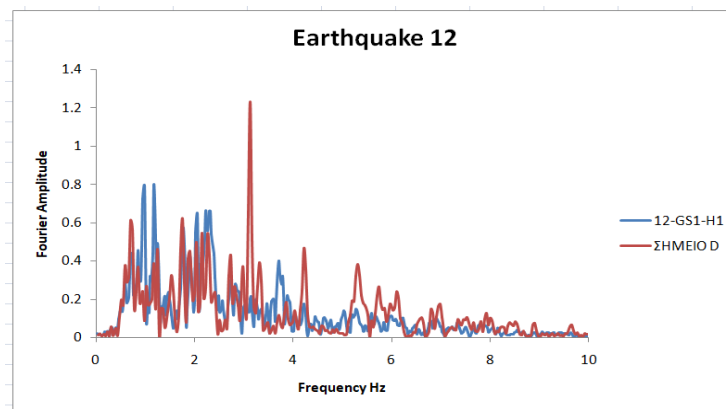
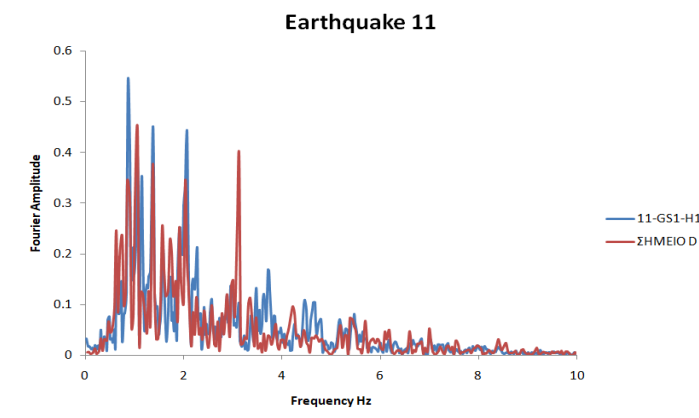
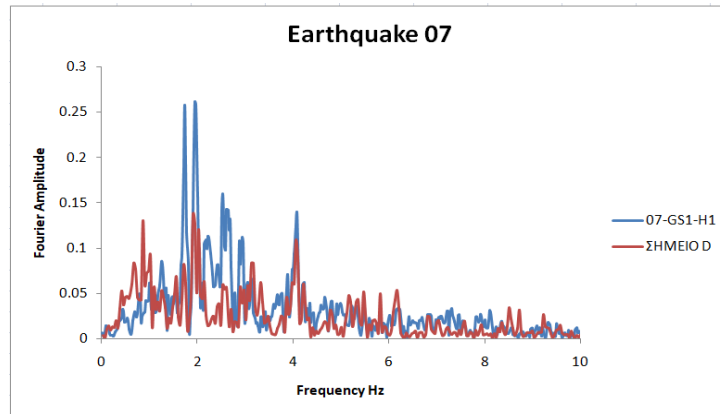
Εικόνα 4.13 Διαγράμματα αριθμητικών αποτελεσμάτων στο σημείο D και επιφανειακών καταγραφών (επιταχυνσιογράφος GS1) για τους σεισμούς 7 και 11



Εικόνα 4.14 Διαγράμματα αριθμητικών αποτελεσμάτων στο σημείο D και επιφανειακών καταγραφών (επιταχυνσιογράφος GS1) για τους σεισμούς 12 και 13

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, διαπιστώνεται μία ικανοποιητική σύγκριση μεταξύ των καταγραφών του επιταχυνσιογράφου GS1 και των παραγόμενων αριθμητικών αποτελεσμάτων σημείο D, ως προς το συχνολογικό περιεχόμενο και το μέγεθος της επιτάχυνσης, η οποία καθίσταται ως απόδειξη της αξιοπιστίας του αριθμητικού προσομοιώματος και της μεθόδου ανάλυσης. Επιπροσθέτως στις παρακάτω εικόνες, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των συγκρίσεων μεταξύ του μετασχηματισμού Fourier των σημείων GS1 και D. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων ενισχύουν ακόμα περισσότερο την αξιοπιστία της μεθόδου. Οι μικρές διαφορές που εντοπίζονται οφείλονται στην απλοποίηση των παραδοχών καθώς και στις γεωμετρικές και μηχανικές αβεβαιότητες.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΚΟΙΛΑΔΩΝ ΚΑΙ
ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



Εικόνα 4.15 Διάγραμμα του φάσματος Fourier για το σημείο D και για τον επιταχυνσιογράφο GS1

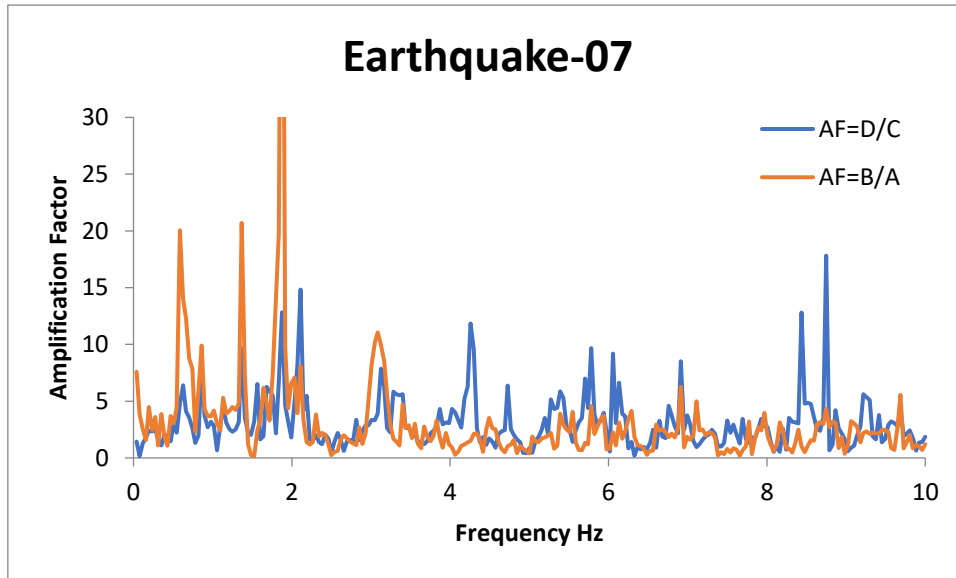
4.4.2.1 Διαφοροποίηση της ενίσχυσης από θέση σε θέση

Όπως έχει αναφερθεί στο εισαγωγικό κεφάλαιο, η διαφοροποίηση της εδαφικής ενίσχυσης ανάλογα τη θέση κατά το σχεδιασμό μίας γέφυρας είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η μη χρήση μεθόδων, οι οποίες εντοπίζουν τη διαφοροποίηση αυτή της ενίσχυσης μπορεί να επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στην κατασκευή κατά την εμφάνιση ενός σεισμικού φαινομένου αφού η απόκριση της κατασκευής εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν η ίδια η κατασκευή με το έδαφος. Αφού προηγουμένως, έχει αποδειχθεί η αξιοπιστία των προσομοιωμάτων με τη σύγκριση των παραγόμενων αποτελεσμάτων με αυτά των καταγραφών, υπολογίστηκαν και για τα τέσσερα σεισμικά γεγονότα (7, 11, 12, 13), ο μετασχηματισμός Fourier για τα σημεία A, B, C, D τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.10. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν τα διαγράμματα του συντελεστή ενίσχυσης της εδαφικής στρώσης μεταξύ των σημείων B προς A και D προς C προκειμένου να προσδιοριστεί η επιφανειακή ενίσχυση που προκύπτει στα σημεία B και D. Η ιδιουσυχνότητα του εδαφικού στρώματος όπως προσδιορίστηκε στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου κατά την προσπάθεια της μονοδιάστατης ανάλυσης ισούται με $f_s=0.625$ Hz.

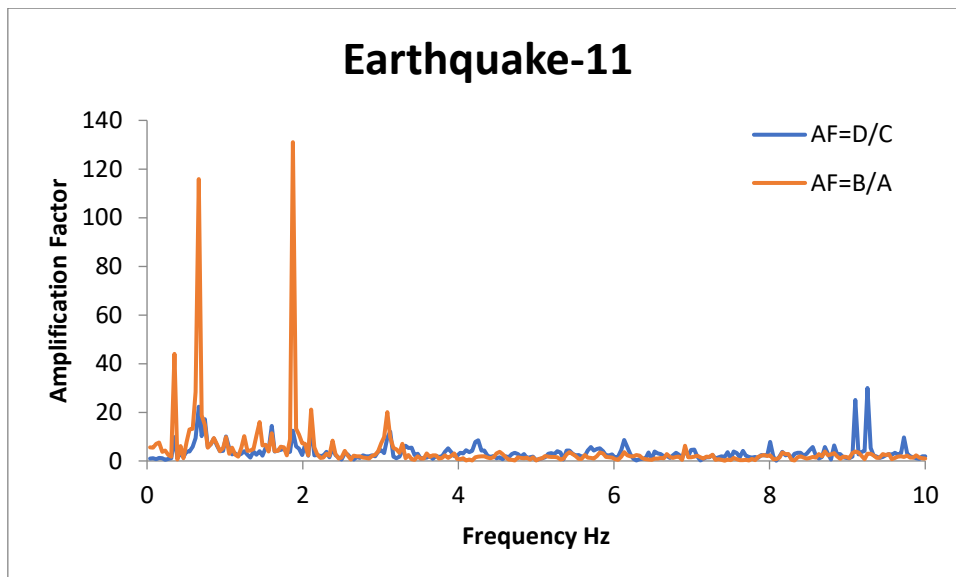
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της εδαφικής ενίσχυσης για κάθε σεισμικό φαινόμενο. Παρατηρείται ότι η ενίσχυση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της σεισμική διέγερσης. Σεισμοί μικρού εστιακού βάθους, μικρής επίκεντρης απόστασης και μέτριας έντασης (σεισμοί 12 και 13) επιφέρουν μεγαλύτερες τιμές ενίσχυσης στην επιφάνεια του εδάφους σε σχέση με τον σεισμό 7 (μεγάλη επίκεντρη απόσταση και μεγαλύτερη ένταση). Με βάση τα παρακάτω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η εδαφική ενίσχυση διαφέρει πράγματι ανάλογα την θέση. Επίσης, παρατηρείται, η ενίσχυση στο μέσον της κοιλάδας να είναι μεγαλύτερη έως και 6 φορές από αυτή στο σημείο όπου παρατηρείται η έναρξη της κλίσης στο σκληρό υπόβαθρο. Αυτό το φαινόμενο σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες, αποδεικνύεται, πως οφείλεται στο γεγονός ότι τα επιφανειακά κύματα, που παράγονται στις (απότομες) άκρες, διαδίδονται εκατέρωθεν κατά μήκος της κοιλάδας, εξασθενούν αργά και παρατείνουν έτσι την κίνηση. Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί σε αρκετά πρόσφατα σεισμικά γεγονότα. Για παράδειγμα, όπως αναφέρθηκε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο, στην Πόλη του Μεξικού, οι μεγάλες φασματικές ενισχύσεις Fourier και οι εξαιρετικά μεγάλες χρονικές διάρκειες της εδαφικής κίνησης παρατηρήθηκαν σε καταγραφές επιταχυνσιογράφων στην "κοίτη της λίμνης" κατά τη διάρκεια του σεισμού του Michoacan του 1985, αποδόθηκαν σε διακυμάνσεις στο πάχος του στρώματος μαλακού ηλίου.

Στη σεισμική διέγερση 7 η επιφανειακή ενίσχυση του εδάφους στο μέσον της κοιλάδας έχει τιμή $AF=20$ για συχνότητα $f=0.6$ Hz και ενώ στο σημείο όπου αλλάζουν τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της υπολογίζεται στα $AF=6$ Hz για συχνότητα $f=0.6$ Hz. Αναφορικά με το σεισμό 11, η ενίσχυση για το σημείο B έχει τιμή $AF=115$ για συχνότητα περίπου 0.7 Hz και για το σημείο D ενδείκνυται η τιμή $AF=18$ για συχνότητα 0.7 Hz. Στο σεισμικό φαινόμενο 12, η ενίσχυση που παρουσιάζεται στο σημείο B έχει τιμή $AF=31$ για συχνότητα 0.625 Hz και για το σημείο D ενδείκνυται η τιμή $AF=8.5$ για συχνότητα 0.78 Hz. Τέλος για το σεισμό 13 η επιφανειακή ενίσχυση του εδάφους στο μέσον της κοιλάδας έχει τιμή $AF=32.6$ για συχνότητα $f=0.625$ Hz και ενώ στο σημείο D, $AF=6$ Hz για συχνότητα $f=0.78$ Hz. Αναφορικά με όσα ειπώθηκαν παραπάνω, τα αποτελέσματα της ενίσχυσης των σημείων διακρίνονται αξιόπιστα για τους σεισμούς 7, 12, 13. Γίνεται αντιληπτό ότι με βάση τα χαρακτηριστικά των σεισμικών γεγονότων η ενίσχυση πρέπει να διατηρεί μεγαλύτερες τιμές για τους σεισμούς

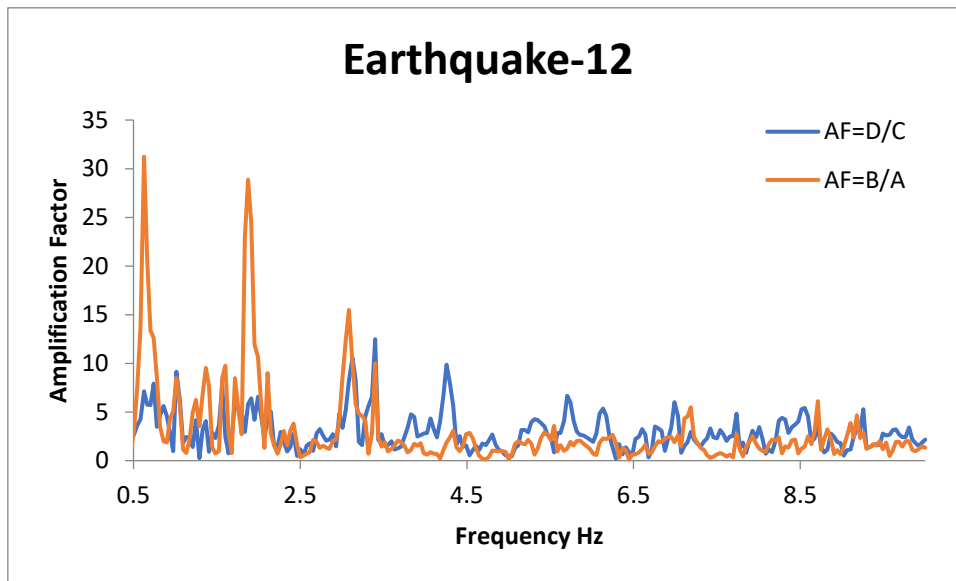
12 και 13 από ότι για τον σεισμό 7 όπως και συμβαίνει. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του σεισμού 11, η ενίσχυση στο μέσον της κοιλάδας με $AF=115$, θεωρείται ως αποτέλεσμα μη ρεαλιστικό και συνεπώς το διάγραμμα της μπορεί να χαρακτηριστεί ως μη αξιόπιστο.



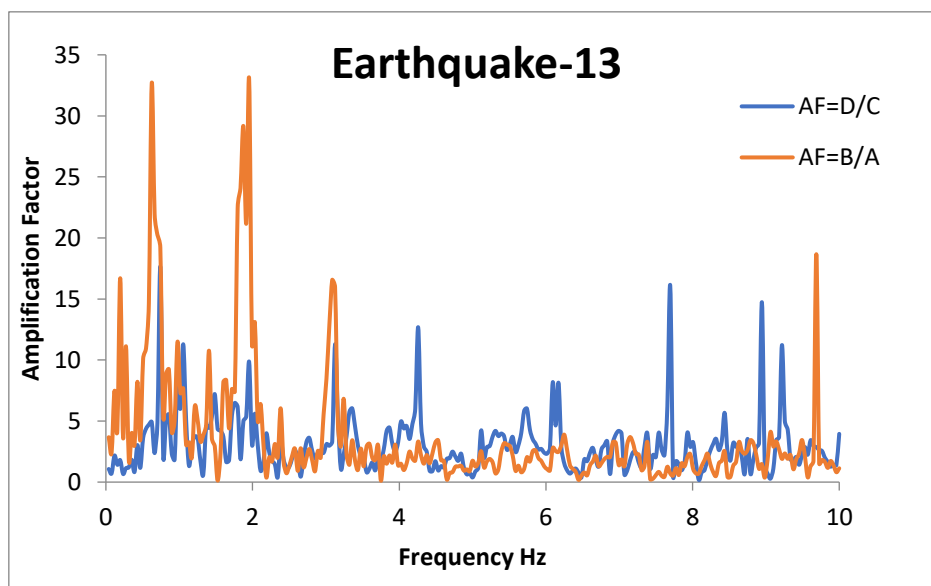
Διάγραμμα 4.4 Εδαφική ενίσχυση στα σημεία B (μέσον κοιλάδας) και D (σημείο επιταχυνσιογράφου GS1) στη σεισμική διέγερση 7



Διάγραμμα 4.5 Εδαφική ενίσχυση στα σημεία B (μέσον κοιλάδας) και D (σημείο επιταχυνσιογράφου GS1) στη σεισμική διέγερση 11



Διάγραμμα 4.5 Εδαφική ενίσχυση στα σημεία B (μέσον κοιλάδας) και D (σημείο επιταχυνσιογράφου GS1) στη σεισμική διέγερση 12

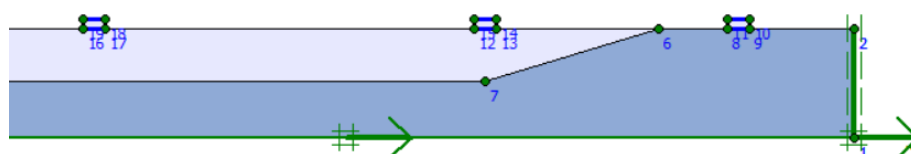
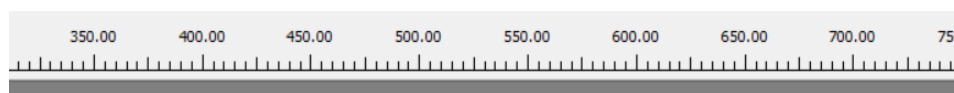


Διάγραμμα 4.6 Εδαφική ενίσχυση στα σημεία B (μέσον κοιλάδας) και D (σημείο επιταχυνσιογράφου GS1) στη σεισμική διέγερση 13

4.5 Ανάλυση συστήματος εδάφους-κατασκευής

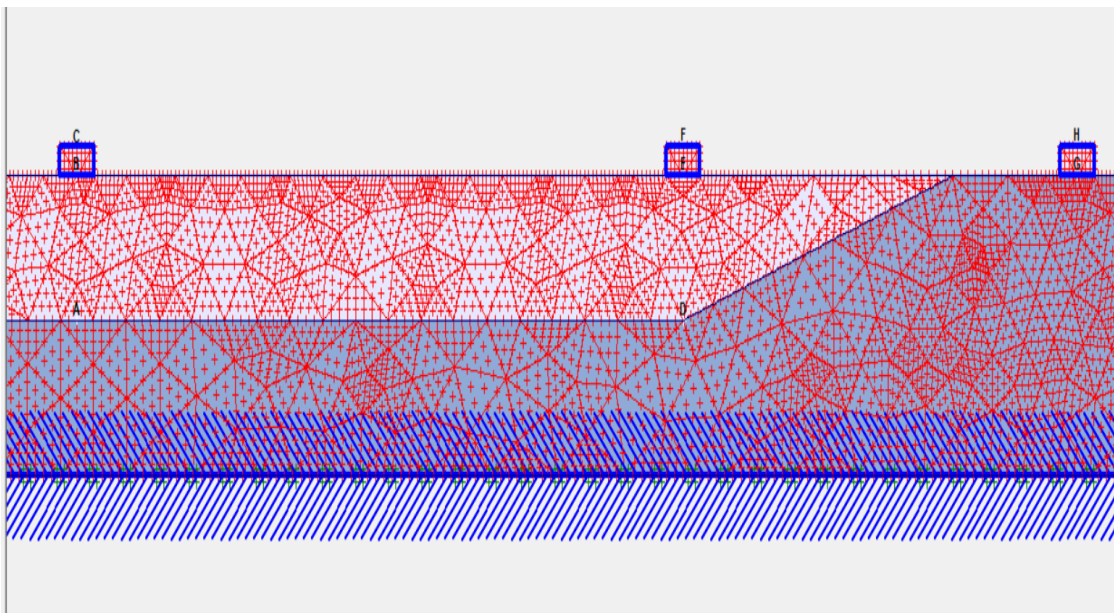
Η ενδοσιμότητα του εδάφους καθορίζει πως κατανέμονται τα φορτία στην ανωδομή κι επομένως πια θα είναι η ένταση στην οποία υπόκειται η κατασκευή (Γκαζέτας). Αφού ελέγχθηκε ο τρόπος με τον οποίο συμπεριφέρεται το έδαφος της κοιλάδας και εντοπίστηκε η διαφοροποίηση που αναπτύσσεται στην ενίσχυση της επιφάνειας του εδάφους εξαιτίας των γεωμορφικών διαφορών, στη συνέχεια, εξετάζεται η διαφοροποίηση της ενίσχυσης που επιφέρουν οι τοπικές συνθήκες στην κατασκευή της ανωδομής. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, τοποθετήθηκαν τρεις μονοβάθμιοι ταλαντωτές (όμοιοι με τον ταλαντωτή του Κεφαλαίου 3), στην επιφάνεια του διδιάστατου μοντέλου της προηγούμενης υποενότητας 4.4.2 και στη συνέχεια το προσομοίωμα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.16 υποβάλλεται σε σεισμική διέγερση με παλμό Ricker συχνότητας $f=1$ Hz. Στην προκειμένη περίπτωση αναλύσεων, η διαφοροποίηση της ιδιοσυχνότητας και ο διαφοροποιημένος συντελεστής ενίσχυσης σε κάθε ταλαντωτή λόγω της ύπαρξης γεωμορφολογικής ανωμαλίας και της διδιάστατης διάδοσης των διατμητικών κυματισμών αποτελούν το ζητούμενο.

Αναφορικά με τις μηχανικές ιδιότητες και τα γεωμορφικά χαρακτηριστικά του εδάφους, παραμένουν οι ίδιες τιμές και η ίδια γεωμετρία (βλέπε Ενότητα 4.4.2) χωρίς να υπάρξει κάποια παρέμβαση. Η απόσβεση του εδάφους λαμβάνεται ίση με $\xi=0.5\%$ και ιδιοσυχνότητα $f_s=0.625$ Hz. Οι μονοβάθμιοι ταλαντωτές του προσομοιώματος θεωρούνται ως κλειστά ορθογώνια, ύψους $H=5$ m και μήκους $L=10$ m (για περισσότερες λεπτομέρειες βλέπε υποενότητα 3.3.2). Υπενθυμίζεται ότι η απόσβεση του ταλαντωτή λαμβάνεται ίση με $\xi=5\%$ και ιδιοσυχνότητα $f_c=2$ Hz. Σύμφωνα με την αναλυτική λύση, από τη σχέση 3.8 προκύπτει για τον ταλαντωτή $AF=10$. Οι δύο ταλαντωτές, εδράζονται πάνω στα κομβικά σημεία που προηγήθηκε η δυναμική απόκριση της κοιλάδας (σημεία B και E=GS1) με απόσταση μεταξύ τους στα 200 μέτρα περίπου, ενώ τοποθετείται και ένας τρίτος στην άκρη της κοιλάδας, 100 μέτρα μακριά από τον ταλαντωτή 2, που εδράζεται πάνω στο θεωρούμενο άκαμπτο εδαφικό στρώμα.

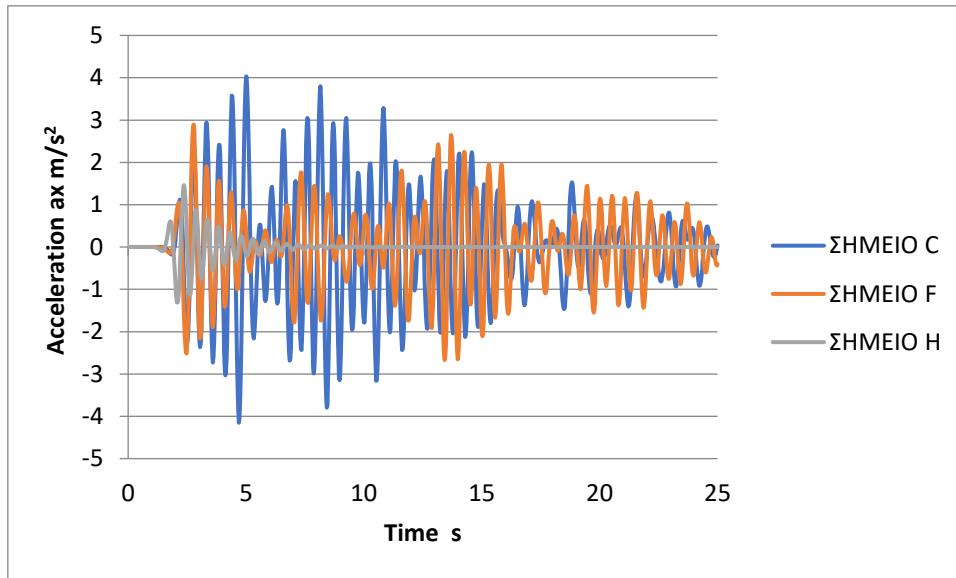


Εικόνα 4.16 Γεωμετρία του διδιάστατου προσομιώματος

Στην Εικόνα 4.17 παρουσιάζονται τα σημεία του μοντέλου στα οποία θα πραγματοποιηθούν οι αριθμητικές αναλύσεις. Ο τρόπος με τον οποίο αποκρίνονται τα σημεία C, F και H στην επιβαλλόμενη σεισμική διέγερση, επιδεικνύει την επίδραση που επιφέρουν οι γεωμετρικοί σχηματισμοί που αναπτύσσονται στο υπέδαφος. Όπως έχει αναφερθεί, επειδή ο σεισμός αποτελεί μία σύνθετη κίνηση, συναρτήσεως της επιτάχυνσης (Διάγραμμα 4.8) και της συχνότητας, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Seismosignal, δημιουργήθηκαν οι μετασχηματισμοί Fourier με βάση τις παραγόμενες χρονοϊστορίες και στη συνέχεια παράχθηκαν τα διαγράμματα της σεισμικής ενίσχυσης στη βάση και στην κορυφή για κάθε ταλαντωτή, προκειμένου να προσδιοριστεί η μέγιστη απόκριση του. Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής ενίσχυσης AF συναρτήσεως της συχνότητας f προκύπτει με διαίρεση των τιμών του μετασχηματισμού Fourier στην κορυφή προς τις αντίστοιχες τιμές του μετασχηματισμού Fourier στη βάση.



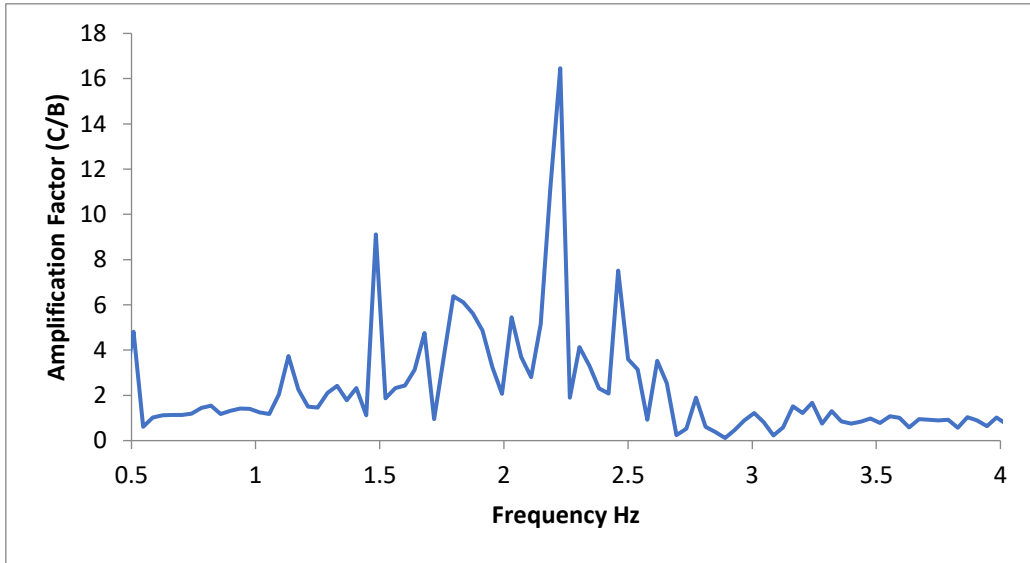
Εικόνα 4.17 Σημεία του προσομιώματος, με βάση τα οποία μελετάται η ενίσχυση (σημεία C,F,H=σημεία στην κορυφή του ταλαντωτή)



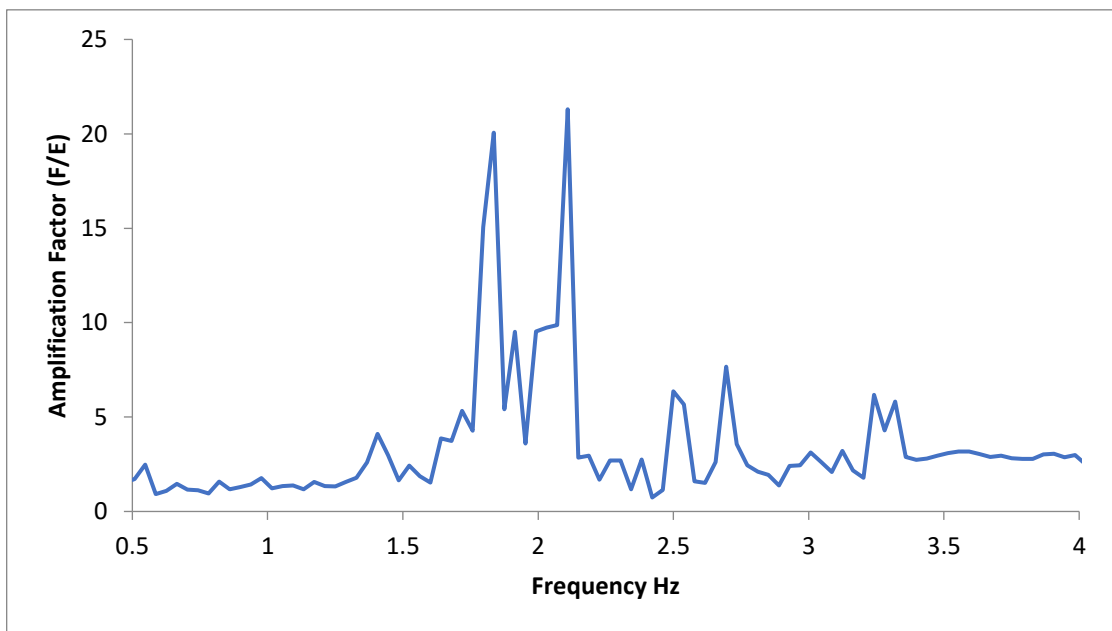
Διάγραμμα 4.7 Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης των σημείων στις κορυφές των ταλαντωτών

Σύμφωνα με τα παρακάτω διαγράμματα, διαπιστώνεται πως η μέγιστη τιμή του συντελεστή ενίσχυσης για κάθε ταλαντωτή, επιτυγχάνεται για συχνότητα περίπου 2 Hz, η οποία ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή. Πιο συγκεκριμένα ο συντελεστής ενίσχυσης του πρώτου ταλαντωτή που εδράζεται επί της εύκαμπτης εδαφικής στρώσης στο μέσον της κοιλάδας, ισούται με $AF(C/B)=16.5$ για συχνότητα $f=2.2$ Hz. Η αντίστοιχη τιμή AF για την βάση του ισούται με $AF=50$ για συχνότητα $f=0.625$ Hz. Πρέπει να τονιστεί ότι στην προκειμένη περίπτωση, η τιμή του συντελεστή AF για τον δεύτερο ταλαντωτή που εδράζεται στο κομβικό σημείο όπου αρχίζει να παρουσιάζει μια απότομη κλίση η διεπιφάνεια μεταξύ της εύκαμπτης και άκαμπτης εδαφικής στρώσης, έχει μεγαλύτερη τιμή με $AF(F/E)=21.3$ για συχνότητα $f=2.1$ Hz και τιμή της μέγιστης τιμής στη βάση του προκύπτει $AF=15.5$ για συχνότητα $f=0.625$ Hz. Τέλος προκύπτει για τρίτο ταλαντωτή που εδράζεται πάνω στην άκαμπτη εδαφική στρώση $AF(H/G)=10.3$ για συχνότητα 2.1 Hz, αποτέλεσμα το οποίο επαληθεύει την αναλυτική λύση.

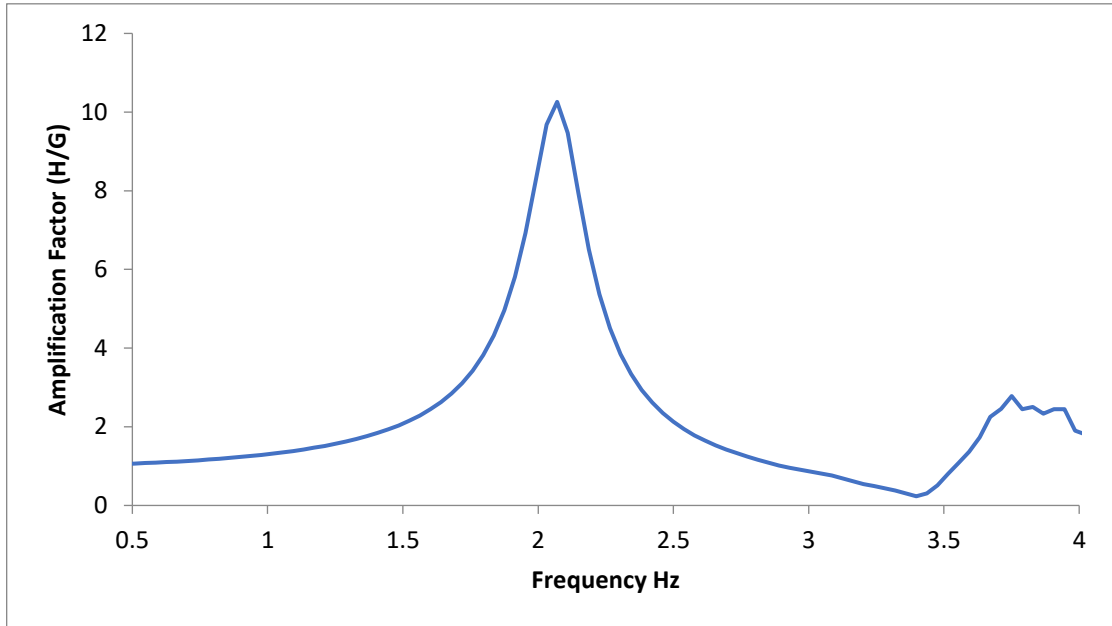
Η επαλήθευση της αναλυτικής λύσης σχετικά με τον τρίτο ταλαντωτή, εκτός από την αξιοπιστία που επιφέρει το αποτέλεσμα στις αναλύσεις που εφαρμόστηκαν, ερμηνεύει τη μονοδιάστατη θεώρηση, σύμφωνα με την οποία η σεισμική απόκριση της επιφάνειας της εδαφικής στρώσης ισούται αποκλειστικά με την κατακόρυφη διάδοση των οριζοντίων διατμητικών κυμάτων με ταχύτητα V_s , από το υποκείμενο υπόβαθρο προς την επιφάνεια. Από την άλλη πλευρά η διαφοροποίηση της ενίσχυσης των ταλαντωτών και αύξηση της ή μείωση, αναφορικά με τους άλλους δύο μονοβάθμιους ταλαντωτές, οφείλεται στην διδιάστατη θεώρηση σύμφωνα με την οποία τα σεισμικά κύματα που εισχωρούν στη κοιλάδα από το βραχύδες υπόβαθρο, εξαιτίας της γεωμορφολογίας αναπτύσσονται υπερκρίσιμες γωνίες πρόσπτωσης με αποτέλεσμα τα κύματα αυτά να μετατρέπονται σε επιφανειακά κύματα, τα οποία κινούνται εκατέρωθεν στην κοιλάδα. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι οι γεωμορφολογικές συνθήκες σε συνδυασμό με τη στρωματογραφία της περιοχής διαδραματίζουν καθοριστικό παράγοντα για το τρόπο με τον οποίο αποκρίνεται το έδαφος και συνεπώς οι κατασκευές που εδράζονται πάνω σε αυτό.



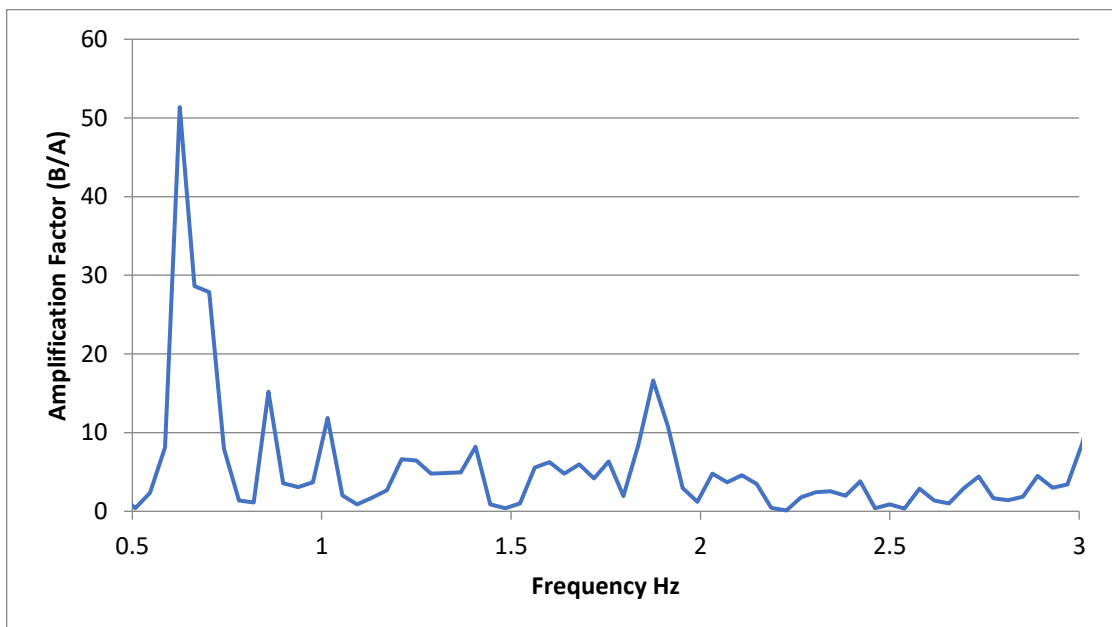
Διάγραμμα 4.8 Καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης συναρτήσει της συχνότητας για τον πρώτο ταλαντωτή



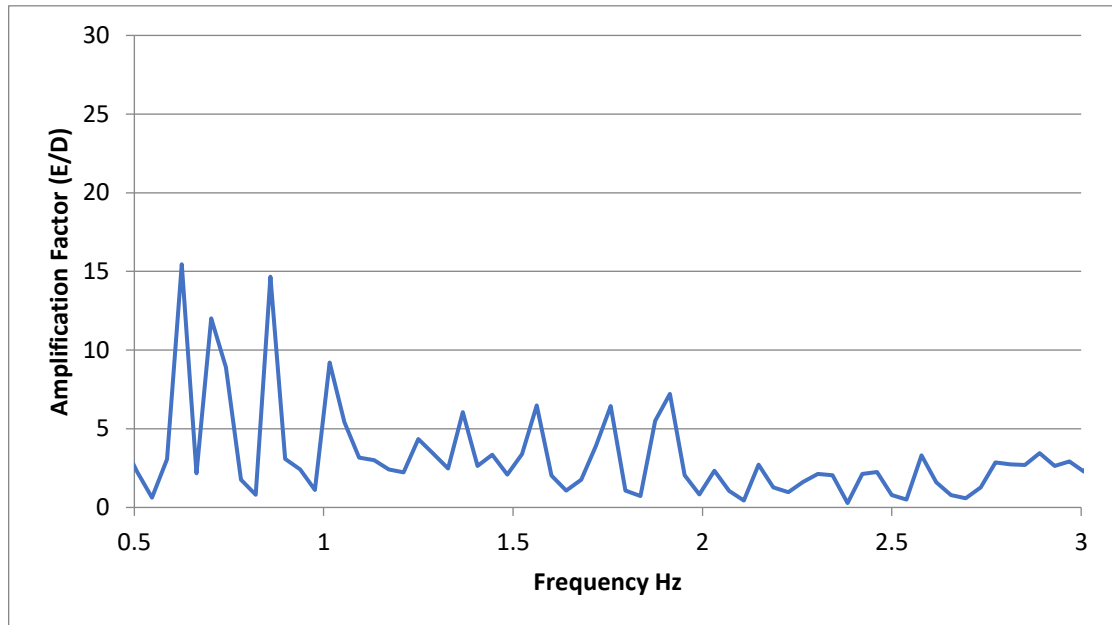
Διάγραμμα 4.9 Καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης συναρτήσει της συχνότητας για τον δεύτερο ταλαντωτή



Διάγραμμα 4.10 Καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης συναρτήσει της συχνότητας για τον τρίτο ταλαντωτή



Διάγραμμα 4.11 Καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του εδάφους-βάση του ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας

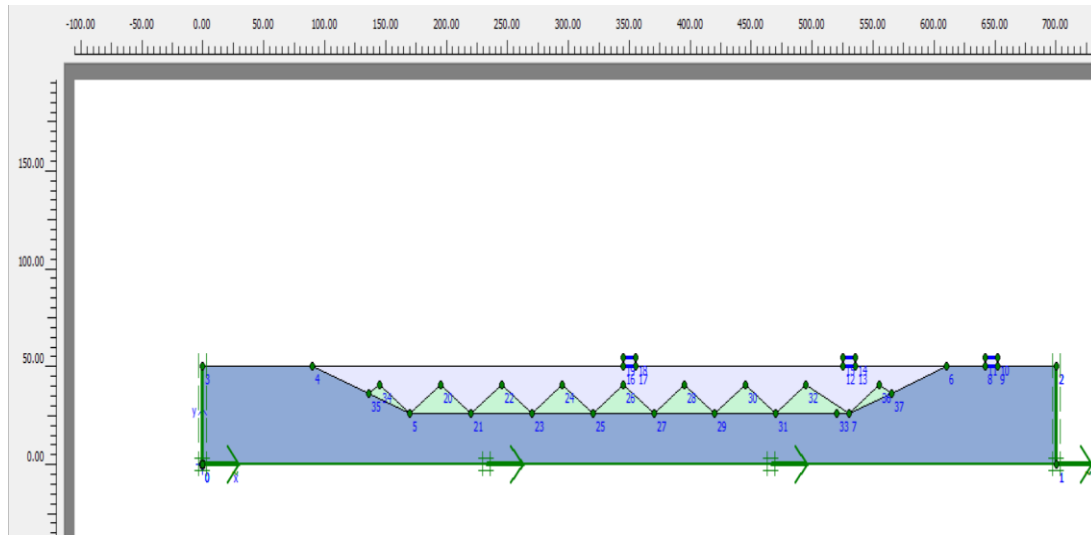


Διάγραμμα 4.12 Καμπύλη του συντελεστή ενίσχυσης που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του εδάφους-βάση του ταλαντωτή συναρτήσει της συχνότητας

4.6 Μέθοδος Grouting

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η μέθοδος grouting είναι μία ευέλικτη μέθοδος, με την οποία πραγματοποιείται η έγχυση αντλούμενων υλικών στο έδαφος για τη δημιουργία επιτόπου μηχανικών γεωμετριών εδάφους-τσιμέντου γενικά με περιορισμένη απαιτούμενη πρόσβαση με σκοπό την αλλαγή των φυσικών χαρακτηριστικών του με αποτέλεσμα να διαφοροποιείται η ιδιοσυχνότητά του. Η χρήση της μεθόδου έχει ως αποτέλεσμα το έδαφος να δρα αποσυντονιστικά και να επιφέρει μείωση στην ενίσχυση της επιφάνειας του και συνεπώς και στην ενίσχυση της κατασκευής αφού το έδαφος θεμελίωσης και η κατασκευή αποτελούν ένα σύστημα αλληλοεξαρτώμενο. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται η προσπάθεια εφαρμογής της μεθόδου grouting, στο διδιάστατο προσομοίωμα της προηγούμενης υποενότητας, προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση που θα επιφέρει η μέθοδος στην ενίσχυση των μονοβάθμιων ταλαντωτών.

Στην Εικόνα 4.18 παρουσιάζεται η γεωμετρία του προσομοιώματος με τη χρήση της μεθόδου. Υπενθυμίζεται ότι οι τριγωνικές τσιμεντώσεις που δημιουργούνται έχουν τα εξής χαρακτηριστικά: (α) $V_s = 2000 \text{ m/s}$, (β) $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$, (γ) $\nu = 0,3$, και (ε) απόσβεση υλικού $\xi = 5\%$. Οι σταθερές α και β του Rayleigh παραμένουν 0.419 και 0.005. Στη βάση του εδαφικού στρώματος επιβάλλεται ο ίδιος παλμός Ricker με δεσπόζουσα συχνότητα $f = 1 \text{ Hz}$.

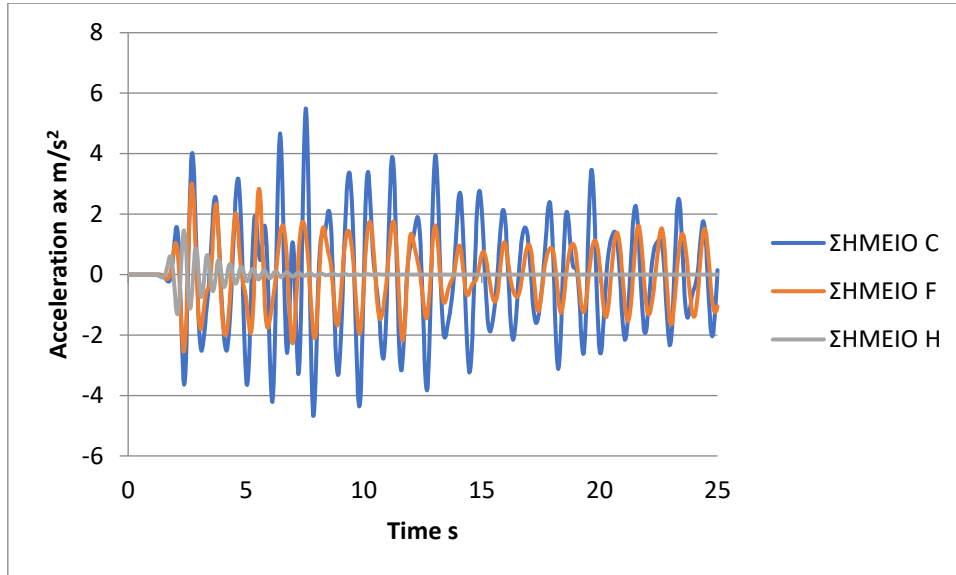


Εικόνα 4.18 Γεωμετρία του σύνθετου προσομοιώματος με την εφαρμογή του grouting

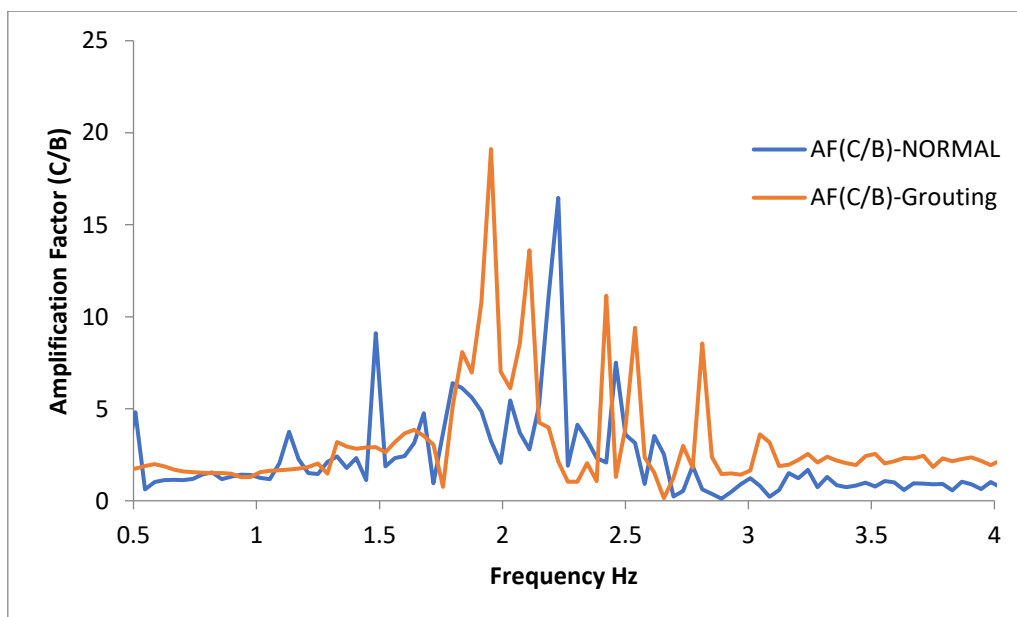
Στην συνέχεια, αφού προσδιοριστούν οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης για τα σημεία ενδιαφέροντος, προσδιορίζονται ο μετασχηματισμός του φάσματος Fourier και επαναλαμβάνεται η διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή ενίσχυσης AF. Στο Διάγραμμα 4.11 παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες της οριζόντιας επιτάχυνσης, που αναπτύσσονται στη κορυφή των ταλαντωτών με τη χρήση του grouting. Είναι αξιοσημείωτο ότι, στα διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζεται η σύγκριση για την ενίσχυση που αναπτύσσεται στην κορυφή των μονοβάθμιων ταλαντωτών, μεταξύ των κανονικών συνθηκών και της μεθόδου grouting.

Στο Διάγραμμα 4.14 που αναφέρεται στο μονοβάθμιο ταλαντωτή ο οποίος εδράζεται στο μέσον της κοιλάδας, η μέγιστη τιμή του συντελεστή ενίσχυσης επιτυγχάνεται για συχνότητα 1.95 Hz και τιμή $AF(C/B)=19.1$. Παρατηρείται μία μικρή μείωση στην τιμή της συχνότητας με την χρήση της μεθόδου Grouting $f=1.95$ Hz σε σχέση με αυτή των κανονικών συνθηκών ($f=2.2$ Hz) και $AF(C/B)=16.4$. Η μικρή αύξηση αυτή οφείλεται πιθανόν, στη γεωμετρία του υπεδάφους, η οποία θα επηρεάζει τις γωνίες διάθλασης και ανάκλασης των σεισμικών κυμάτων που προσπίπτουν στις τσιμεντώσεις. Με βάση το Διάγραμμα 4.15, διαπιστώνεται η μείωση που επιφέρει η μέθοδος Grouting στην ενίσχυση του δεύτερου ταλαντωτή (σημείο F), με τιμή $AF=13.3$ για συχνότητα $f=2.2$ σε σχέση με την τιμή $AF=21.3$ για συχνότητα $f=2.1$ Hz που αναπτύσσεται υπό κανονικές συνθήκες. Πρέπει να τονιστεί ότι, το Διάγραμμα 4.16 για τον ταλαντωτή που εδράζεται πάνω στην άκαμπτη εδαφική στρώση σε συνδυασμό με τα παραπάνω αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, διαπιστώνεται ότι πέρα από το είδος της σεισμικής διέγερσης που θα αναπτυχθεί, οι τοπικές εδαφικές συνθήκες διαδραματίζουν σημαντικό παράγοντα για τον τρόπο που αποκρίνεται το έδαφος και συνεπώς και η κατασκευή. Παρατηρείται ότι οι καμπύλες του συντελεστή ενίσχυσης με και χωρίς την χρήση της μεθόδου Grouting ταυτίζονται, γεγονός που αποδεικνύει, πρώτον την σημαντική επιρροή που επιφέρουν οι τοπικές εδαφικές συνθήκες που επικρατούν στην ενίσχυση τόσο του εδάφους όσο και της κατασκευής στην προς μελέτη περιοχή και

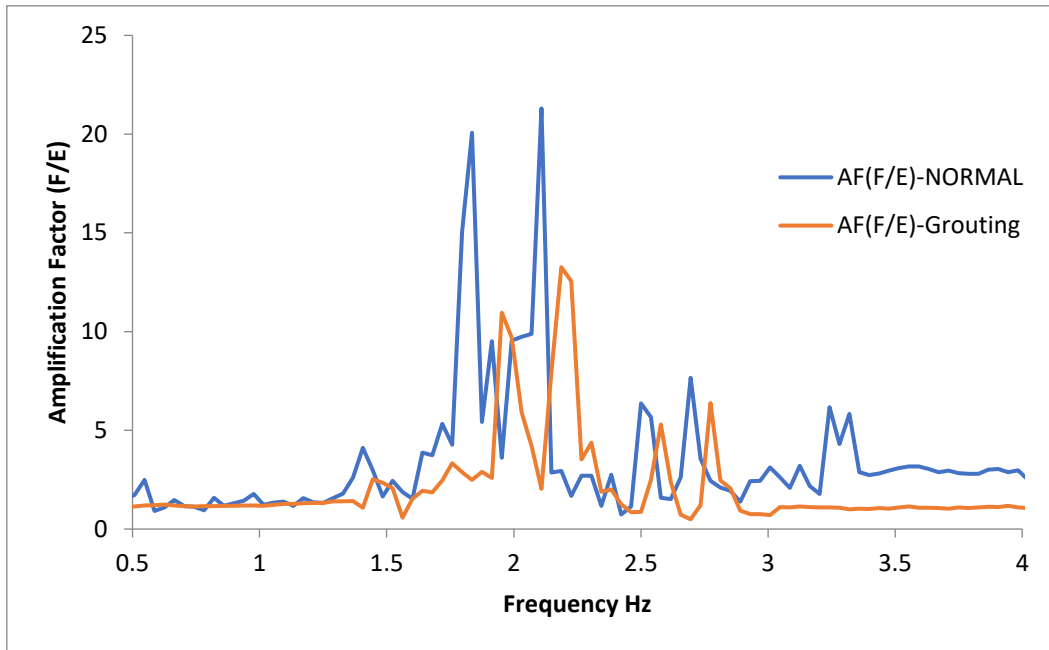
δεύτερον την αξιοπιστία της μεθόδου Grouting με βάση την οποία μπορούν να διαφοροποιηθούν οι τοπικές εδαφικές συνθήκες και συνεπώς οι τιμές της ενίσχυσης που εξαρτώνται από αυτές.



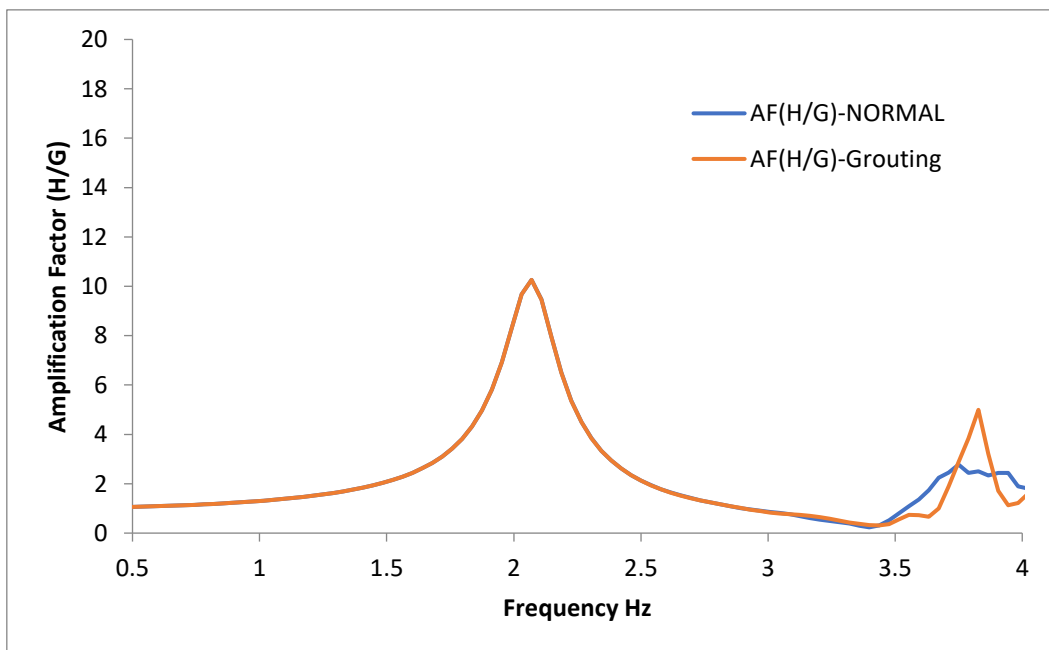
Διάγραμμα 4.13 Χρονοϊστορίες οριζόντιας επιτάχυνσης των σημείων στις κορυφές των ταλαντωτών με τη χρήση της μεθόδου grouting



Διάγραμμα 4.14 Σύγκριση των καμπύλων του συντελεστή ενίσχυσης υπό κανονικές συνθήκες και με την χρήση της μεθόδου grouting για τον ταλαντωτή 1



Διάγραμμα 4.15 Σύγκριση των καμπύλων του συντελεστή ενίσχυσης υπό κανονικές συνθήκες και με την χρήση της μεθόδου grouting για τον ταλαντωτή 2



Διάγραμμα 4.16 Σύγκριση των καμπύλων του συντελεστή ενίσχυσης υπό κανονικές συνθήκες και με την χρήση της μεθόδου grouting για τον ταλαντωτή 3

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Συμπεράσματα

Κατά τη σεισμική ανάλυση γεφυρών, μεγαλύτερη προσοχή δίνεται στη μελέτη και την κατασκευή της ανωδομής παρά σε θέματα που αφορούν την εδαφοδυναμική του εδάφους θεμελίωσης. Σημαντικές αστοχίες γεφυρών που συνέβησαν σε σεισμικά γεγονότα ευρέως στον κόσμο, αποδεικνύουν το καθοριστικό ρόλο της σεισμικής απόκρισης του εδάφους θεμελίωσης, η οποία αναλύεται προσεγγιστικά και μη έγκυρα, γεγονός που επεξηγεί την σημαντικότητα του συστήματος έδαφος-θεμελίωση-κατασκευή και την δυναμική αλληλεπίδραση για τη βιωσιμότητα του έργου.

Οι συνθήκες που ασκούν σημαντική επιρροή στην ένταση και στο φασματικό περιεχόμενο της σεισμικής απόκρισης αναφέρονται στις στρωματογραφικές συνθήκες, που περιγράφονται με αναλύσεις μονοδιάστατων προσομοιώματων, στις γεωμορφικές και τοπογραφικές συνθήκες οι οποίες περιγράφονται με αναλύσεις διδιάστατων και τρισδιάστατων προσομοιωμάτων. Καταγραφές από σεισμικά γεγονότα αποδεικνύουν τη διαφοροποίηση της επιτάχυνσης και της φασματικής απόκρισης από θέση σε θέση ανάλογα με το είδος των γεωμορφικών και τοπογραφικών συνθηκών σε συνδυασμό με τις συνθήκες της στρωματογραφίας που επικρατούν.

Με την μονοδιάστατη ανάλυση που πραγματοποιείται σε τρία προκαταρκτικά προσομοιώματα, υπολογίζονται οι συντελεστές ενίσχυσης AF για διάφορα κομβικά σημεία στο έδαφος αλλά και στον ταλαντωτή, καθώς και η τιμή της ιδιοσυχνότητας τους και διαπιστώνεται ότι ο τρόπος με τον οποίο συμπεριφέρεται ο ταλαντωτής διαφέρει ανάλογα το έδαφος στο οποίο εδράζεται. Στην περίπτωση άκαμπτης εδαφικής στρώσης με ταχύτητα $V_s=2000$ m/s η σεισμική διέγερση στην οποία υποβάλλεται το προσομοίωμα μεταφέρεται αυτούσια στον ταλαντωτή. Στην περίπτωση εύκαμπτης εδαφικής στρώσης με $V_s=200$ m/s, ο παλμός δεν μεταφέρεται αυτούσιος, το έδαφος λειτουργεί σαν φίλτρο με αποτέλεσμα η συχνότητα με την οποία εμφανίζεται η μέγιστη ενίσχυση της κίνησης του εδάφους είναι κοντά στη φυσική συχνότητα της κατασκευής στην ανωδομή γεγονός που οδηγεί την κατασκευή και το έδαφος να συντονίζονται μεταξύ τους.

Φαινόμενα συντονισμού όπως στην περίπτωση του σεισμού του Μεξικού (1985), επιφέρουν μεγάλες καταστροφές. Η αποφυγή του φαινομένου αυτού μπορεί να επιτευχθεί, τροποποιώντας τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους (η απόσβεση, η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, ο συντελεστής *poisson*) που επηρεάζουν τη σεισμική απόκριση του και συνεπώς την ιδιοσυχνότητά του, μέθοδος η οποία καθίσταται αδύνατη. Λύση αυτού του προβλήματος θα μπορούσε να αποτελέσει η μέθοδος τοπικής εδαφικής ενίσχυσης (*grouting*). Η εφαρμογή της μεθόδου στο μονοδιάστατο προσομοίωμα το καθιστά ως διδιάστατο, δημιουργώντας ένα ανάγλυφο στο υπέδαφος με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η ιδιοσυχνότητα του και να μην ταυτίζεται με αυτή του ταλαντωτή. Παρατηρείται ότι όσο περισσότερο υλικό χρησιμοποιείται για τις τσιμεντώσεις και άρα το βάθος εφαρμογής μειώνεται, η ιδιοσυχνότητα της εδαφικής στρώσης αυξάνεται με αποτέλεσμα να αποτρέπονται φαινόμενα συντονισμού.

Η χρήση μονοδιάστατων δυναμικών αναλύσεων αποδεικνύεται πως βοηθάει στο να κατανοηθούν καλύτερα οι κύριες συνιστώσες ενός δυναμικού προβλήματος, όμως η υπεραπλούστευση των γεωμετρικών χαρακτηρισμών του εδάφους θεμελίωσης, δεν λαμβάνει υπόψη τη γεωμορφολογία και την τοπογραφία που επικρατεί στην πραγματικότητα, με αποτέλεσμα, σε ένα αναμενόμενο σεισμό οι εκτιμήσεις να καθίστανται εσφαλμένες.

Οι τοπικές εδαφικές συνθήκες στην περίπτωση των γεφυρών οι οποίες εδράζονται πάνω σε κοιλάδες μεγάλου μήκους, πιθανολογείται να διαφέρουν από θέση σε θέση και συνεπώς διαφοροποιείται και η ενίσχυση αντίστοιχα. Σε μαλακές εδαφικές αποθέσεις θεμελίωσης, ο έγκυρος προσδιορισμός της διαφοροποίησης αυτής, μπορεί να αποτρέψει σημαντικές απώλειες (οικονομικές και ανθρώπινες), διότι, όπως αποδεικνύεται από τις μονοδιάστατες αναλύσεις που προέκυψαν σε εύκαμπτες εδαφικές στρώσεις, παρουσιάζονται συντονιστικά φαινόμενα τα οποία οδηγούν την κατασκευή και γενικά το σύστημα εδάφους-κατασκευής να ταλαντώνεται με μεγαλύτερα πλάτη.

Η κοιλάδα στην οποία εδράζεται η γέφυρα Ohba-Hashi αποτελεί ένα πείραμα φυσικής κλίμακας. Για αυτό πραγματοποιείται διδιάστατη ανάλυση χρησιμοποιώντας τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της κοιλάδας που υπάρχουν διαθέσιμα από προηγούμενες μελέτες. Οι διαθέσιμες καταγραφές από επιταχυνσιογράφους από διάφορα σεισμικά γεγονότα επαληθεύουν τα αριθμητικά αποτελέσματα, γεγονός που υποδεικνύει ότι η σεισμική ανάλυση καθίσταται πιο ρεαλιστική όταν λαμβάνονται υπόψη τα γεωμορφικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του εδάφους θεμελίωσης.

Όπως αποδεικνύεται με τη χρήση των διδιάστατων αναλύσεων, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των χρονοϊστοριών της οριζόντιας επιτάχυνσης και των διαγραμμάτων του συντελεστή ενίσχυσης συναρτήσει της συχνότητας κομβικών σημείων που μελετήθηκαν στην κοιλάδα, ο τρόπος με τον οποίο συμπεριφέρεται αυτή σε υποβαλλόμενη σεισμική διέγερση παλμού Ricker, διαφοροποιείται από θέση σε θέση. Η διαφοροποίηση αυτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό, όπως είναι γνωστό, εκτός από το είδος της διέγερσης (ένταση, επίκεντρη απόσταση, εστιακό βάθος) και από τα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά που την απαρτίζουν. Επίσης παρατηρείται μεγαλύτερη τιμή της ενίσχυσης στο κέντρο της κοιλάδας γεγονός που οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο μεταφέρονται από το σκληρό στο μαλακό υπόβαθρο τα σεισμικά κύματα, παγιδεύονται και διαδίδονται μέσα σε αυτό, λόγω της γεωμετρίας της.

Τέλος, πραγματοποιείται η προσπάθεια εφαρμογής της μεθόδου grouting στο διδιάστατο προσομοίωμα της κοιλάδας, προκειμένου να παρατηρηθούν οι αλλαγές που επιφέρει η μέθοδος στην διαφοροποίηση της ενίσχυσης πιο σύνθετων γεωμετρικών προσομοιωμάτων. Παρατηρείται μείωση της ενίσχυσης στα κομβικά σημεία τα οποία εδράζονται πάνω στη μαλακή στρώση του εδάφους, γεγονός που αποδεικνύει την επιρροή που επιφέρουν οι τοπικές εδαφικές συνθήκες στην ενίσχυση τόσο του εδάφους όσο και της κατασκευής στην προς μελέτη περιοχή και την αξιοπιστία της μεθόδου grouting με βάση την οποία μπορούν να διαφοροποιηθούν οι τοπικές εδαφικές συνθήκες και συνεπώς οι τιμές της ενίσχυσης που εξαρτώνται από αυτές.

5.2 Μελλοντικές προτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με τη μονοδιάστατη και διδιάστατη δυναμική ανάλυση εδαφικών σχηματισμών και παρουσιάζει την σημαντικότητα της επιρροής στη σεισμική απόκριση τους που επιφέρουν οι τοπικές εδαφικές συνθήκες. Προκειμένου να εξεταστεί η διαφοροποίηση της ενίσχυσης από θέση σε θέση που επιφέρουν στις γέφυρες οι γεωμορφικές συνθήκες, χρησιμοποιήθηκαν απλοϊκά μοντέλα μονοβάθμιων ταλαντωτών κατά μήκος του εδαφικού στρώματος και εφαρμόστηκε η μέθοδος grouting με σκοπό να μειωθεί η ενίσχυση της κατασκευής και γενικά του συστήματος έδαφος-θεμελίωση-κατασκευή.

Μελλοντικά, προτείνεται περαιτέρω διερεύνηση του παραπάνω προβλήματος χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων τριών διαστάσεων, προκειμένου να εξαχθούν αποτελέσματα μεγαλύτερης ακριβείας, χρησιμοποιώντας λιγότερες παραδοχές και το προσομοίωμα να καθίσταται πιο ρεαλιστικό και όχι τόσο απλοϊκό σε σχέση με το περιορισμένο των δύο διαστάσεων πρόγραμμα Plaxis.

Ακόμη, προτείνεται περαιτέρω επέκταση των αναλύσεων, σε μία πιο ολοκληρωμένη δυναμική ανάλυση του συστήματος έδαφος-θεμελίωση-κατασκευή με έμφαση στη θεμελίωση διότι στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η θεώρηση επιφανειακής θεμελίωσης για τους ταλαντωτές κάτι που καθίσταται μη ρεαλιστικό να εξεταστούν και οι περιπτώσεις εγκιβωτισμένης και βαθιάς θεμελίωσης με τη χρήση πασσάλων.

Όσον αφορά, τη μέθοδο grouting, σκόπιμη κρίνεται η περαιτέρω ανάλυση της, διαφοροποιώντας το σχήμα των τσιμεντώσεων που εκχύνονται στο υπέδαφος και η διαφοροποίηση που θα αναπτυχθεί στην ενίσχυση τόσο στην επιφάνεια της εδαφικής στρώσης όσο και στην κατασκευή που εδράζεται πάνω σε αυτή, ανάλογα το είδος της γεωμετρίας που θα έχουν οι τσιμεντώσεις. Ο τρόπος που θα αποκρίνεται η κατασκευή πιθανόν να διαφοροποιείται ανάλογα το είδος της γεωμετρίας του grouting καθώς θα επηρεάζεται η γωνία διάθλασης και ανάκλασης των σεισμικών κυμάτων και συνεπώς το η συχνότητα του φασματικού περιεχομένου της σεισμικής διέγερσης.

Τέλος, άλλη μία μελλοντική πρόταση αναφέρεται στην μελέτη της δυναμικής ανάλυσης του συστήματος εδάφους-κατασκευής, προσομοιώνοντας με εξειδικευμένα προγράμματα τη γέφυρα Ohba-Ohashi και εξετάζοντας την ενίσχυση που θα αναπτυχθεί σε συνδυασμό με τη μέθοδο grouting προκειμένου να ενισχυθεί περισσότερο η αντίσταση της κατασκευής και γενικότερα των γεφυρών και των έργων μεγάλου μήκους στις επιπτώσεις που επιφέρουν τα σεισμικά φαινόμενα.

Ολοκληρώνοντας, έργα μεγάλου μήκους, όπως οι γέφυρες, έχουν σκοπό τη σύνδεση γεωλογικών ασυνεχειών επιφέροντας θετικά κοινωνικά και οικονομικά αποτελέσματα. Είναι σαφές ότι η κατάρρευση μιας γέφυρας θέτει σε κίνδυνο πολλές ανθρώπινες ζωές. Εκτός από τις υλικές ζημιές, η ανακατασκευή της και ακόμα και η διακοπή της λειτουργίας της για κάποιο χρονικό διάστημα συνεπάγεται τεράστιες οικονομικές επιπτώσεις. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαίο κατά την ανάλυση μιας γέφυρας να δίνεται εξίσου ο ίδιος βαθμός

προσοχής στη μελέτη της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής στην ανωδομή και στην απόκριση του εδάφους θεμελίωσης αφού αποτελούν και τα δύο μαζί ένα σύστημα αλληλοεξαρτώμενο.

6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ψαρρόπουλος Π. (2001), *Αριθμητική Εδαφοδυναμική Προσομοίωση στη Σεισμική Ανάλυση Βάθρων και Ακρόβαθρων Γεφυρών*, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ.
2. Κυριαζής Δ.Πιτιλάκης. (2010), *Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ, Εκδόσεις Ζήτη
3. Γκαζέτας Γ., Γαρίνη Ε., Αναστασόπουλος Ι., Γερόλυμος Ν., *Αλληλεπίδραση Εδάφους-Θεμελίωσης-Κατασκευής*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
4. Γκαζέτας Γ. (2007), *Σημειώσεις Εδαφομηχανικής*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
5. Σακελλαρίου Γ.Μιχαήλ (2017), *Γεωτεχνική Μηχανική*, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών,ΕΜΠ
6. Ψυχάρης Ν.Γιάννης (2016), *Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ,ΕΜΠ
7. Γκαζέτας Γ., Μπουκουβάλας Γ., Καββαδάς Μ., Γερόλυμος Ν. (2009), *Υπολογιστική Γεωτεχνική* , Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
8. Μανώλης Δ. Γεώργιος, Κολιόπουλος Κ.Παναγιώτης, Παναγιωτόπουλος Γ. Χρήστος (2015), *Δυναμική των Κατασκευών*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ-Τ.Ε.Ι.Κ.Μ, Εκδόσεις Κάλλιπος.
9. Κούκης Γ., Σαμπατάκης Ν. (2002), *Τεχνική Γεωλογία*, Τμήμα Τεχνικής Γεωλογίας, Π.Π, Εκδόσεις Παπασωτηρίου
10. Βγενοπούλου Ε., Μυλωνάκης Γ., Κλουκίνας Π., Λυραντζάκη Φ., (2015), *Πρόταση Τροποποίησης Διατάξεων ΕΑΚ για Ανάλυση και Σχεδιασμό Κατασκευών Αντιστήριξης*, Τεχνική Έκθεση Παραδοτέων Π.Ε.4, ΤΕΙ Πάτρας
11. Graham Barnes (2014), *Εδαφομηχανική-Αρχές και Εφαρμογές*, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
12. Κωμοδρόμος Π. (2019), *Εισαγωγή στη Σεισμική Μόνωση*, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου.
13. Αγγελόυσης Τ. (2016), *Εκτίμηση Δυναμικών Χαρακτηριστικών Συστήματος Εδάφους-Επιχώματος-Μονολιθικής Γέφυρας για Τυπικά Εδαφικά Χαρακτηριστικά*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ
14. Τσιπιανίτης Δ.Αλέξανδρος (2013), *Μελέτη του Ρόλου του Υπέδαφους στη Δυναμική Απόκριση Πυλώνων Ανεμογεννητριών*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιοβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης
15. Τσέβας Α.Μιχαήλ (2018), *Θεμελίωση Ανεμογεννητριών και Δυναμική Αλληλεπίδραση των Πυλώνων τους με το Έδαφος*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ

16. Γλαμπεδάκης Χρ.Εμμανουήλ (2005), *Ο Ρόλος των Εδαφικών Συνθηκών στον Αντισεισμικό Σχεδιασμό Χωρών Υγειονομικής Ταφής Απορριμάτων*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης
17. Steven L.Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*, University of Washington (Prentice-Hall civil engineering and engineering mechanics series)
18. Gazetas G., Tazoh K., Shimizu K., Fan K. (1993), *Seismic Response of the Pile Foundation of Ohba-Ohashi Bridge*, Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering
19. F. Gelagoti, R. Kourkoulis, I. Anastasopoulos, T. Tazoh, G. Gazetas (2010), *Seismic Wave Propagation in a Very Soft Alluvial Valley: Sensitivity to Ground-Motion Details and Soil Nonlinearity, and Generation of a Parasitic Vertical Component*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 100, No. 6, pp. 3035–3054,
20. Franciso J. Sanchez-Sesma (1987), *Site Effects on Strong Ground Motion*, Journal, Instituto de Ingenieria, Universidad Nacional Autbnoma de Mbxico
21. Z.F. Wang , S.L. Shen , C.E. Ho and Y.H. Kim, *Jet Grouting Practice: an Overview*, Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University and State Key Laboratory of Ocean Engineering China, Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA Vol. 44 No.4 December 2013
22. Dr. William, Cofer F., Dr. David I. McLean and Jeffrey W. McGuire, *Analytical Modeling of Foundations for Seismic Analysis of Bridges*, Research Project, Department of Civil & Environmental Engineering, Washington State Transportation Center
23. Romain Meite, Liam Wotherspoon, James Kaklamanos, Christopher R. McGann, Connor Hayden, *Sensitivity of 1-D Ground motion Predictions to Analysis Codes and Material Models using KiK-net vertical arrays*, Journal.
24. Jack P. Moehle, Marc O. Eberhard (2000), *Earthquake Damage to Bridges*, Bridge Engineering Handbook
25. Philip Esper, Eizaburo Tachibana (1995), *KOBE EARTHQUAKE – Lessons Learnt*, Keynote Paper in BGS Int’l Conference, British Geological / Geotechnical Society, BGS Special Publications
26. Laera A., Brinkgreve R.B.J (2015), *Ground Response Analysis in Plaxis*
27. PLAXIS Version 8 Dynamics Manual
28. PLAXIS Version 8 Reference Manual
29. www.seissoft.com/seisomsignal, Earthquake Engineering Software Solutions