



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ
ΒΑΣΙΚΩΝ ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΟΥ ΚΑΤΑΠΟΝΟΥΝ
ΧΕΡΣΑΙΟΥΣ ΚΑΙ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ**



Δήμητρα Τσιγώνια

Επιβλέποντες:

Κατής Μαρίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ψαρρόπουλος Πρόδρομος Ε.Δι.Π. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία διεξάγεται στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών. Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ορισμένους από τους ανθρώπους που γνώρισα, συνεργάστηκα και, γενικά, στάθηκαν σημαντικοί αρωγοί στην πραγματοποίησή της.

Πρώτους από όλους, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές της διπλωματικής εργασίας, τον κ. Κατή Μαρίνο και κ. Ψαρρόπουλο Πρόδρομο για την πολύτιμη καθοδήγηση τους, την εμπιστοσύνη και την εκτίμηση τους στο πρόσωπο μου. Ιδιαίτερω, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ψαρρόπουλο Πρόδρομο, ο οποίος με την αδιαμφισβήτητη πνευματική του καλλιέργεια, την ανεξάντλητη υπομονή του, το ειλικρινές ενδιαφέρον του, την ακούραστη προθυμία του, την ανιδιοτέλεια και το ήθος του, συνέβαλε καθοριστικά στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Νίκο και Νικολέττα, καθώς και τους πολύτιμους φίλους μου, που υπήρξαν στυλοβάτες στην πορεία μου αυτή και μου πρόσφεραν την απαραίτητη ηθική συμπαράσταση για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας μου.

ACKNOWLEDGEMENTS

This thesis is conducted under the program of the School of Rural and Surveying Engineering. Prior to the presentation of the results, I feel obliged to thank some of the people I met, I worked together and, in general, they were important helpers in its realization.

First of all, I would like to thank the supervising professors of thesis, Mr. Katti Marinos and Mr. Psarropoulos Prodromos for their valuable guidance, trust and appreciation in my face. Particularly, I would like to thank Mr. Psarropoulos Prodromos, who with his undeniable spiritual cultivation, his inexhaustible patience, his sincere interest, his tireless willingness, his selflessness and his morality, contributed decisively to the completion of this work.

Finally, I would like to thank my parents, Nikos and Nicoletta, as well as my precious friends, who have been pillars in this process and offered me the necessary moral support for the completion of my thesis.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Θεμελιώδης Αρχή Σεισμών.....	14
1.2 Θεμελιώδης Αρχή Αγωγών.....	15
1.3 Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας.....	16
1.4 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας	16

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΣΕΙΣΜΙΚΟΙ ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΟΙ

2.1 Εισαγωγή	19
2.2 Τεκτονικές Πλάκες.....	19
2.3 Βασικές Αρχές Σεισμών.....	22
2.4 Κίνδυνος Μόνιμης Παραμόρφωσης Εδάφους.....	23
2.4.1 Ρήγματα	23
2.4.2 Κατολισθήσεις.....	25
2.4.3 Ρευστοποίηση.....	26
2.5 Κίνδυνος Διάδοσης Κύματος.....	27
2.5.1 Βασικές Αρχές της Διάδοσης Κύματος.....	27
2.5.2 Παράμετροι Κίνησης Εδάφους.....	30
2.5.3 Ταχύτητα Διάδοσης Κύματος.....	30
2.5.4 Καταπόνηση Εδάφους και Καμπυλότητας λόγω της Διάδοσης Κύματος.....	32
2.6 Εδαφικές Κινήσεις.....	33
2.7 Σεισμική συμπεριφορά Κοιλιάδας	33
2.8 Γεωκίνδυνοι στον Ελλαδικό Χώρο.....	37
2.8.1 Γεωμορφολογία Ελλάδας	37
2.8.2 Γεωτεκτονικά δεδομένα Ελλάδας.....	39
2.8.3 Σεισμικότητα στην Ελλάδα	40
2.8.5 Ισχυρότεροι Σεισμοί στην Ελλάδα.....	42
2.8.6 Χερσαία και Υποθαλάσσια Ρήγματα στην Ελλάδα.....	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΑΓΩΓΟΙ ΚΑΙ ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΟΙ

3.1 Εισαγωγή.....	46
3.2 Σεισμική Φόρτιση – Δυναμική Ανάλυση Εδάφους.....	46
3.2.1 Διέγερση με την Τεχνική των Ενεργών Σεισμικών Δυνάμεων.....	47
3.2.2 Απόσβεση υλικού.....	47
3.2.3 Συμπεριφορά Εδαφικών Στρωμάτων.....	48

3.2.4 Σφάλμα απόκρισης εδάφους.....	49
3.2.5 Γραμμική προσέγγιση.....	49
3.2.6 Αξιολόγηση των λειτουργιών μεταφοράς κύματος.....	50
3.2.7 Fourier.....	51
3.3 Μόνιμες Εδαφικές Παραμορφώσεις.....	52
3.3.1 Οριακές Συνθήκες Αγωγών και Κριτήρια Αστοχίας.....	52
3.4 Συνεχής Αγωγός με Συγκολλήσεις στα Άκρα.....	53
3.5 Συνεχής Αγωγός με Συγκολλημένες Ενώσεις Ολίσθησης.....	54
3.6 Σπονδυλωτός Αγωγός (Segmented Pipeline)	56
3.7 Αλληλεπίδραση Σωλήνων – Εδάφους	57
3.7.1 Χερσαίοι Αγωγοί σε Κατάλληλο Μη Ρευστοποιημένο Έδαφος.....	58
3.7.2 Χερσαίοι Αγωγοί σε Ρευστοποιημένο Έδαφος.....	62
3.8 Υποθαλάσσιοι Αγωγοί.....	62
3.9 Συμπεριφορά των υπόγειων Συνεχών Αγωγών στη Διαμήκη Μόνιμη Παραμόρφωση.....	63
3.10 Μοντέλο Ελαστικού Σωλήνα (Elastic Pipe Model)	64
3.11 Μοντέλο Ανελαστικού Σωλήνα (Inelastic Pipe Model)	52
3.12 Αναδίπλωση Σωλήνα (Wrinkling)	67
3.13 Επιρροή των Αρθρώσεων Διαστολής.....	68
3.14 Επίδραση Κάμψης ή Άρθρωσης μορφής Γ.....	68
3.15 Συμπεριφορά Μόνιμη Παραμόρφωση Εδάφους (Transverse PGD) των Υπόγειων Συνεχών Σωλήνων στην Εγκάρσια.....	69
3.16 Χερσαίοι Αγωγοί σε Ρευστοποιημένο Έδαφος.....	71
3.17 Συμπεριφορά των Υπόγειων Συνεχών Αγωγών στα Ρήγματα.....	72
3.18 Παρακολούθηση των Βλαβών των Σωλήνων.....	73
3.19 Ρήγματα Οριζόντιας Ολίσθησης (Strike-Slip Faults) - Ονομαστική Τάση.....	73
3.20 Ρήγματα Οριζόντιας Ολίσθησης (Strike-Slip Faults) –Ονομαστική Θλίψη.....	74
3.21 Κανονικά και Ανάστροφα Ρήγματα (Normal and Reverse Faults).....	75
3.22 Συμπεριφορά των Σπονδυλωτών Αγωγών στη Μόνιμη Παραμόρφωση Εδάφους (PGD)	76
3.23 Διαμήκης PGD	77
3.24 Εγκάρσια PGD.....	78
3.25 Μετατοπίσεις Ρήγματος	79
3.26 Συμπεριφορά Υπόγειων Συνεχών Αγωγών στη Διάδοση Κύματος.....	79
3.27 Ευθείς Συνεχείς Αγωγοί.....	80
3.28 Σχέσεις Σεισμικής Ευθραυστότητας στους Υπόγειους Αγωγούς.....	81
3.28.1. Σχέσεις Διάδοσης κύματος.....	81

3.28.2. Σχέσεις PGD.....	82
3.28.3. Σχέσεις Παραμόρφωσης Εδάφους.....	82
3.28.4. Επιρροή των Μεταβαλλόμενων Συντελεστών.....	83
3.29 Μέτρα για την Αντιμετώπιση των Βλαβών Σεισμού των Αγωγών λόγω.....	84
3.29.1. Δρομολόγηση και Μετατόπιση (Routing and Rerouting).....	84
3.29.2. Βέλτιστος Προσανατολισμός στο Οριζόντιο Επίπεδο.....	84
3.29.3. Βέλτιστη Θέση στην Κατακόρυφη Διεύθυνση.....	85
3.29.4 Αποκατάσταση Εδάφους.....	85
3.29.5. Ανθεκτικότερος Σωλήνας.....	86
3.29.6. Μείωση Φορτίου.....	86

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

4.1 Εισαγωγή.....	87
4.1 Αριθμητικές Αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία.....	87
4.2 Αριθμητική προσομοίωση.....	88
4.2.1 Στοιχεία εισαγωγής στον Κώδικα Πεπερασμένων Στοιχείων PLAXIS.....	88
4.2.2 Αποτελέσματα Αναλύσεων – Διαγράμματα Επιταχύνσεων Σεισμικής δόνησης κοιλιάδας.....	92
4.2.3 Συμπεράσματα για την Σεισμική Απόκριση της Κοιλιάδας.....	97
4.3 Ρήγμα.....	100
4.3.1 Ποσοτικοποίηση γεωκινδύνων - Ρήγμα.....	100
4.3.2 Αποτελέσματα Αναλύσεων – Διαγράμματα Μετατόπισης Κανονικού και Ανάστροφου ρήγματος.....	101
4.3.3 Συμπεράσματα Διαγραμμάτων Καθίζησης Κανονικού και Ανάστροφου ρήγματος.....	106

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Συμπεράσματα.....	107
5.2 Προτάσεις.....	108

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	109
--------------------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	184
--------------------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	187
--------------------------	-----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	193
---------------------------	-----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Κατανομή λιθοσφαιρικών στρωμάτων Γης

Εικόνα 2.2: Οι λιθοσφαιρικές πλάκες της Γης

Εικόνα 2.3: Τύποι ρηγμάτων

Εικόνα 2.5: Μορφή κανονικού και ανάστροφου ρήγματος

Εικόνα 2.6: Κατολίσθηση στο Ναυάγιο της Ζακύνθου

Εικόνα 2.7: Ρευστοποίηση εδάφους μετά από σεισμό στην Ιαπωνία το 1964

Εικόνα 2.8: Σχήμα για τα εγκάρσια και επιμήκη κύματα

Εικόνα 2.9: Η διαδρομή των διαφόρων σεισμικών κυμάτων δια μέσου της Γης.

Εικόνα 2.10: Τεκτονικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής της ανατολικής Μεσογείου όπου απεικονίζεται το γεωδυναμικό καθεστώς και τα αντίστοιχα διανύσματα κίνησης.

Εικόνα 2.11: Η διαδρομή των διαφόρων σεισμικών κυμάτων δια μέσου της Γης.

Εικόνα 2.12: Βυθομετρικός Χάρτης Ελλάδας.

Εικόνα 2.13: Χάρτης σύνθετων ρηγμάτων στο Αιγαίο και στο Ιόνιο Πέλαγος.

Εικόνα 2.14: Χάρτης απλών ρηγμάτων στο Αιγαίο και στο Ιόνιο Πέλαγος.

Εικόνα 3.1: Ρήξη τοιχώματος σωλήνα με αγωγό υγρού καυσίμου (Limon, Costa Rica, 1991)

Εικόνα 3.2: WSJ με εξωτερική επένδυση

Εικόνα 3.3: Μηχανισμοί βλάβης στους σπονδυλωτούς αγωγούς

Εικόνα 3.4: Απλοποιημένο μοντέλο για την εγκάρσια εδαφική ελαστικότητα σε μη συνεκτικό υλικό σε ρηχά βάθη ταφής

Εικόνα 3.5: Απλοποιημένο μοντέλο για το παράγοντα κατακόρυφης ανόδου για την άμμο

Εικόνα 3.6: Κάθετος εντοπισμός χωρητικότητας

Εικόνα 3.7: Μοντέλα Εξιδανίκευσης

Εικόνα 3.8: Κατανομή της αξονικής μετατόπισης του σωλήνα, δύναμη και τάση για την Case I

Εικόνα 3.9: Κατανομή της αξονικής μετατόπισης του σωλήνα, δύναμη και τάση για την Case II

Εικόνα 3.10: Είδη των εγκάρσιων PGD

Εικόνα 3.11: Σύστημα Εύκαμπτου Σύρματος

Εικόνα 3.12: Διατομή αγωγού που διασχίζει ρευστοποιημένη ζώνη

Εικόνα 3.13: Μετρημένες αξονικές και καμπτικές καταπονήσεις σε σωλήνα HDPE που υπόκεινται σε ονομαστική τάση σε μετατοπίσεις ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης

Εικόνα 3.14: Μετρημένες αξονικές και καμπτικές καταπονήσεις σε σωλήνα HDPE που υπόκεινται σε ονομαστική θλίψη και σε ονομαστική τάση σε μετατοπίσεις ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης

Εικόνα 3.15: Μετρημένες αξονικές και καμπτικές καταπονήσεις σε σωλήνα HDPE σε διάφορες αποστάσεις από το ρήγμα για ονομαστική τάση οριζόντιας ολίσθησης και κανονική/ανάστροφη ρηγμάτωση

Εικόνα 3.16: Συνιστώμενες γωνίες διασταύρωσης για ρήγματα κατεύθυνσης Βορρά-Νότου

Εικόνα 4.1.1: Αρχική συνθήκη για ημιτονική διέγερση $f=2\text{Hz}$

Εικόνα 4.1.2: Καθορισμός στοιχείων υλικού

Εικόνα 4.1.3: Πυκνό πλέγμα κοιλάδας

Εικόνα 4.1.4: Διαδικασία υπολογισμού δυναμικής ανάλυσης

Εικόνα 4.1.5: Επιλογή παραμέτρων των αναλύσεων

Εικόνα 4.1.6: Επιλογή σημείων της εδαφικής απόκρισης (A,B,C,D,E,F,G)

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Τάση απόδοσης και παράμετροι Ramberg-Osgood για ελαφρύ χάλυβα και Χ-χάλυβα, μαζί με την ελάχιστη επιμήκυνση που απαιτείται από το API 5L (δείγμα δοκιμής μικρής διατομής)

Πίνακας 3.2 Συνιστώμενη μέγιστη τάση εφελκυσμού για PGD – Χερσαίος αγωγός με συγκολλήσεις καλής ποιότητας στα άκρα

Πίνακας 3.3: Συντελεστής τριβής k για μέγιστη αντοχή στο έδαφος χωρίς αιχμή στην αξονική κατεύθυνση

Πίνακας 3.4: Κρίσιμο μήκος και μετατόπιση για την αποτυχία λόγω θλίψης χάλυβας Grad-B και Χ-70 και διάφορες παραμέτρους ταφής και λόγοι R/t

Πίνακας 3.5: Μέση μετατόπιση άρθρωσης και συντελεστής μεταβολής για σπονδυλωτό σωλήνα που υπόκειται σε κατανεμημένη παραμόρφωση εδάφους

Πίνακας 5.1: Πίνακας μέγιστης επιτάχυνσης των σημείων A,B,C,D,E,F & G για σεισμική ανάλυση χρόνου διέγερσης 225α

Πίνακας 5.2: Πίνακας ποσοστού επιτάχυνσης ως προς την βάση των σημείων A,B,C,D,E,F & G για σεισμική ανάλυση χρόνου διέγερσης 225α

Πίνακας 5.3: Πίνακας μέγιστης ταχύτητας των σημείων A,B,C,D,E,F & G για σεισμική ανάλυση χρόνου διέγερσης 225α

Πίνακας 5.4: Πίνακας ποσοστού ταχύτητας ως προς την βάση των σημείων A,B,C,D,E,F & G για σεισμική ανάλυση χρόνου διέγερσης 225α

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 4.1.1: Αρχική συνθήκη για ημιτονική διέγερση $f=2\text{Hz}$ σημείου B

Διάγραμμα 4.1.2: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου B, για άνοιγμα κοιλάδας $a=50\text{m}$, $a=100\text{m}$, $a=200\text{m}$ & $a=300\text{m}$, ταχύτητα διάτμησης κύματος $v=500\text{m/s}$ και διέγερση 225α

Διάγραμμα 4.1.3: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου B, για άνοιγμα κοιλάδας $a=50\text{m}$, $a=100\text{m}$, $a=200\text{m}$ & $a=300\text{m}$, ταχύτητα διάτμησης κύματος $v=1000\text{m/s}$ και διέγερση 225α

Διάγραμμα 4.1.4: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου B, για άνοιγμα κοιλάδας $a=50\text{m}$, $a=100\text{m}$, $a=200\text{m}$ & $a=300\text{m}$, ταχύτητα διάτμησης κύματος $v=2000\text{m/s}$ και διέγερση 225α

Διάγραμμα 4.1.5: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου B, για άνοιγμα κοιλάδας $a=50\text{m}$, $a=100\text{m}$, $a=200\text{m}$ & $a=300\text{m}$, ταχύτητα διάτμησης κύματος $v=500\text{m/s}$ και ημιτονική διέγερση $f=2\text{Hz}$

Διάγραμμα 4.1.6: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου B, για άνοιγμα κοιλάδας $a=50\text{m}$, $a=100\text{m}$, $a=200\text{m}$ & $a=300\text{m}$, ταχύτητα διάτμησης κύματος $v=1000\text{m/s}$ και ημιτονική διέγερση $f=2\text{Hz}$

Διάγραμμα 4.1.8: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου B, για άνοιγμα κοιλάδας $a=50\text{m}$, $a=100\text{m}$, $a=200\text{m}$ & $a=300\text{m}$, ταχύτητα διάτμησης κύματος $v=2000\text{m/s}$ και ημιτονική διέγερση $f=2\text{Hz}$

Διάγραμμα 4.2.1: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης δv (m) συναρτήσει της μετατόπισης x (m) κατά τον άξονα x , για γωνία τριβής $\varphi=15^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=50\text{m}$ & $h=100\text{m}$

Διάγραμμα 4.2.2: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης δv (m) συναρτήσει της μετατόπισης x (m) κατά τον άξονα x , για γωνία τριβής $\varphi=25^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=25\text{m}$, $h=50\text{m}$, $h=100\text{m}$ & $h=200\text{m}$

Διάγραμμα 4.2.3: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης δv (m) συναρτήσει της μετατόπισης x (m) κατά τον άξονα x , για γωνία τριβής $\varphi=30^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=25\text{m}$, $h=50\text{m}$, $h=100\text{m}$ & $h=200\text{m}$

Διάγραμμα 4.2.4: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης δv (m) συναρτήσει της μετατόπισης x (m) κατά τον άξονα x , για γωνία τριβής $\varphi=15^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=50\text{m}$ & $h=100\text{m}$

Διάγραμμα 4.2.5: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης δv (m) συναρτήσει της μετατόπισης x (m) κατά τον άξονα y , για γωνία τριβής $\varphi=25^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=25\text{m}$, $h=50\text{m}$, $h=100\text{m}$ & $h=200\text{m}$

Διάγραμμα 4.2.6: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα y , για γωνία τριβής $\varphi=30^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=25m, h=50m, h=100m$ & $h=200m$

Διάγραμμα 4.2.7: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα x , για γωνία τριβής $\varphi=15^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=50m, h=100m$ & $h=200m$

Διάγραμμα 4.2.8: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα x , για γωνία τριβής $\varphi=25^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=25m, h=50m, h=100m$ & $h=200m$

Διάγραμμα 4.2.9: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα x , για γωνία τριβής $\varphi=30^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=25, h=50m, h=100m$ & $h=200m$

Διάγραμμα 4.2.10: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα y , για γωνία τριβής $\varphi=15^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=50m, h=100m$ & $h=200m$

Διάγραμμα 4.2.11: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα y , για γωνία τριβής $\varphi=25^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=25, h=50m, h=100m$ & $h=200m$

Διάγραμμα 4.2.12: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα y , για γωνία τριβής $\varphi=30^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=25, h=50m, h=100m$ & $h=200m$

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην σημερινή εποχή, η ραγδαία εξέλιξη των τεχνικών έργων επιφέρει οικονομική, κοινωνική και πολιτική ανάπτυξη στις χώρες που δραστηριοποιούνται σε μεγάλα βιομηχανικά έργα. Η αυξημένη ζήτηση για την κατασκευή χερσαίων και υποθαλάσσιων αγωγών οδηγεί στην ανάγκη για εκτενή μελέτη μεγάλων τεχνικών έργων. Ωστόσο, προκειμένου να γίνει σωστή μελέτη είναι απαραίτητο να εξετασθούν όλες οι παράμετροι και να επιτευχθεί η κατασκευή τους.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την προμελέτη ενός έργου μεγάλου μήκους, εξετάζοντας και αναλύοντας τις πιο συνηθισμένες εδαφικές περιπτώσεις που είναι πιθανό να παρουσιαστούν στην χάραξη ενός αγωγού. Συγκεκριμένα, η εργασία στοχεύει στην κατανόηση και την επεξεργασία δύο βασικών σεισμικών γεωκινδύνων. Στην εργασία ερευνάται η απόκριση του εδάφους στην περίπτωση σεισμού, εξετάζοντας σε πρώτη φάση την συμπεριφορά της κοιλάδας, μεταβάλλοντας την γεωμετρία και το εδαφικό υλικό της. Στο δεύτερο σκέλος των αριθμητικών προσομοιώσεων, ερευνάται ο βασικός σεισμικός γεωκίνδυνος, δηλαδή τα ρήγματα, κανονικά και ανάστροφα, λαμβάνοντας υπόψιν το πάχος της εδαφικής στρώσης και την γωνία τριβής του υλικού. Στόχος των αναλύσεων είναι να αποδειχθεί ότι ο σεισμός επηρεάζει την τρωτότητα των χερσαίων και υποθαλάσσιων αγωγών.

Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται στο περιβάλλον PLAXIS 2D. Το στάδιο των αναλύσεων περιλαμβάνει α) αριθμητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, σχετικά με την εδαφική απόκριση της κοιλάδας και β) αριθμητική διερεύνηση της επίδρασης κανονικού και ανάστροφου ρήγματος στην επιφανειακή εδαφική παραμόρφωση.

ABSTRACT

Nowadays, the rapid development of industrial projects brings economic, social and political development to those countries that are active in large industrial projects. The increased demand for onshore and offshore pipelines leads to the need for extensive study of large projects. However, in order to study properly it is necessary to examine all the parameters and to achieve their construction.

This diploma thesis deals with the preliminary design of a long project, examining and analyzing the most common ground cases that are likely to occur in the design of a pipeline. In particular, the project aims at understanding and processing the basic seismic geohazards. This thesis investigates the soil response in case of an earthquake, examining the behavior of the valley in the first phase, altering its geometry and its terrestrial material. In the second part of the numerical simulations, the basic seismic geological hazards are investigated, that is faults, especially normal and inverse faults, taking into account the thickness of the soil layer and the friction angle of the material. The aim of the analyzes is to prove that strong soil vibration influences the seismic vulnerability of onshore and offshore pipelines.

Analyzes are performed in the program PLAXIS 2D. The analysis stage includes a) finite element numerical analyzes on the valley soil response and b) numerical investigation of the effect of normal and inverse faults on surface vibration.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Θεμελιώδης Αρχή Σεισμών

Ο σεισμός είναι ένα φυσικό φαινόμενο. Από την αρχαιότητα οι άνθρωποι προσπαθώντας να εξηγήσουν το φαινόμενο του σεισμού, ανέπτυξαν διάφορες θεωρίες για να εξηγήσουν τις μεγάλες εδαφικές κινήσεις. Για παράδειγμα, σύμφωνα με την μυθολογία, οι αρχαίοι Έλληνες πίστευαν ότι οι σεισμικές δονήσεις προέρχονται από την οργή του Εγκέλαδου, ο οποίος με την γιγαντιαία του δύναμη τράνταζε όλη την γη.

Η σύγχρονη εξήγηση για τη σεισμική δραστηριότητα είναι η θεωρία τεκτονικών πλακών. Η επιφάνεια της γης αποτελείται από επτά ή οκτώ μεγάλες πλάκες και μεγαλύτερο αριθμό μικρών πλακών. Ρήγματα ονομάζονται τα όρια μεταξύ των επιμέρους πλακών. Οι σεισμοί προκύπτουν από την συγγενή κίνηση μιας πλάκας σε σχέση με την γειτονική της. Η κίνηση στα όρια των πλακών είναι σποραδική. Συνήθως, απέχουν τουλάχιστον δεκαετίες μεταξύ σημαντικών κινήσεων. Οι δυνάμεις οικοδομούνται με την πάροδο του χρόνου, και πραγματοποιείται τελικά η θραύση της εύθραυστης λιθοσφαιρικής πλάκας. Η ξαφνική διάρρηξη και η σχετική κίνηση κατά μήκος της επιφάνειας θραύσης του σφάλματος απελευθερώνει την συσσωρευμένη ενέργεια και παράγει σεισμικά κύματα που διαδίδονται μακριά από τη ζώνη ρήξης ρήγματος. Το πέρασμα αυτών των σεισμικών κυμάτων προκαλεί την ανάδευση του εδάφους. Ωστόσο, η ανάδευση του εδάφους είναι παροδική. Η ανάδευση ξεκινά όταν φτάσουν τα σεισμικά κύματα στην περιοχή και τελειώνουν όταν περάσουν τα κύματα. Η ανάδευση του εδάφους μπορεί να προκαλέσει κατολισθήσεις οριακά σταθερών κλίσεων, υγροποίηση και πλευρική εξάπλωση κορεσμένου αμμώδους εδάφους καθώς και επίλυση της επιφάνειας του εδάφους. Ωστόσο, αντίθετα το τίναγμα του εδάφους που ενεργοποιεί αυτές τις κινήσεις εδάφους προκαλεί μόνιμες παραμορφώσεις, αφού παραμένει μετά τη διακοπή της σεισμικής ανάδευσης. Υπάρχουν διάφορα μέτρα μεγέθους σεισμού. Το πρώτο μέτρο με βάση το όργανο του μεγέθους του σεισμού ήταν η κλίμακα Richter. Το μέγεθος βασίζεται στην απόκριση ενός συγκεκριμένου οργάνου που βρίσκεται σε συγκεκριμένη απόσταση από το συμβάν. Αν και αναγνωρίζεται ευρέως από το κοινό, το μέγεθος έχει πρόβλημα αναγνώρισης σωστής μέτρησης μεγάλων γεγονότων. Συγκεκριμένα, η κλίμακα Richter έχει επίπεδο κορεσμού περίπου 6,8. Δηλαδή, ανεξάρτητα από το πραγματικό μέγεθος του σεισμού, η κλίμακα Richter δεν υπερβαίνει το 6,8.

Σε επιστημονικούς κύκλους, η ροπή είναι το σύνηθες μέτρο υπολογισμού. Είναι συνάρτηση της σεισμικής στιγμής M_0 , η οποία με τη σειρά της είναι το προϊόν της περιοχής κάτω βαθμού που έσπασε, η μέση μετατόπιση ρήξης και η δύναμη του βράχου

που θρυμματίζεται. Ως εκ τούτου, σχετίζεται άμεσα με το μέγεθος της κίνησης σφάλματος, το μήκος της ρήξης σφάλματος και την απελευθερωμένη ενέργεια. Η ποσότητα της μόνιμης μετακίνησης λόγω κατολισθήσεων και πλευρικών εξαπλώσεων ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του σεισμού, την απόσταση από την τοποθεσία προς την περιοχή, την κλίση του εδάφους και διάφορες λεπτομερείς ιδιότητες του εδάφους.

Όσον αφορά τις επιπτώσεις τους στους υπόγειους αγωγούς, οι δύο γενικές κατηγορίες σεισμικών κινδύνων είναι ο κίνδυνος διάδοσης κυμάτων και ο κίνδυνος μόνιμης παραμόρφωσης εδάφους (PGD). Ο κίνδυνος διάδοσης κύματος είναι παροδικός και αντιστοιχεί σε ανάδευση εδάφους. Αποφέρει μεταβατικά στελέχη σε υπόγειους αγωγούς, τα οποία εξαφανίζονται όταν σταματήσει η ανάδευση. Ο κίνδυνος διάδοσης κυμάτων εμφανίζεται σε κάθε περίπτωση και γενικά οδηγεί σε χαμηλές έως μέτριες βλάβες για τους υπόγειους σωλήνες (επισκευές ανά χιλιόμετρο σωλήνα) σε ευρείες περιοχές. Ο κίνδυνος μόνιμης παραμόρφωσης εδάφους PGD οδηγεί σε μόνιμες κατολισθήσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μόνιμη παραμόρφωση σε υπόγειο αγωγό ακόμη και μετά την ανατάραξη. Ο κίνδυνος PGD δεν συμβαίνει απαραίτητα σε κάθε περίπτωση, αλλά όταν συμβαίνει γενικά οδηγεί σε μέτρια έως υψηλά ποσοστά βλάβης για τους υπόγειους αγωγούς (και πάλι ανά χιλιόμετρο σωλήνα) στις περιορισμένες περιοχές όπου εντοπίζεται.

1.2 Θεμελιώδης Αρχή Αγωγών

Οι αγωγοί διαφέρουν ανάλογα με τα ρευστά που μεταφέρουν: αέριο, καύσιμα, πόσιμο νερό, λύματα κλπ. Διαφέρουν σε σχέση με το υλικό: χάλυβας, χυτοσίδηρο, σκυρόδεμα κλπ. Διαφέρουν επίσης στα φυσικά χαρακτηριστικά τους: διάμετρος, πάχος τοιχώματος, ταφή το βάθος, κλπ. Ωστόσο, όσον αφορά τη σεισμική συμπεριφορά και το σχεδιασμό, η πιο σημαντική διαφορά έγκειται στον τρόπο με τον οποίο είναι συνδεδεμένα. Εάν ο σύνδεσμος με αξονική και περιστροφική ακαμψία στον αγωγό είναι συγκρίσιμος με το απομακρυσμένο τμήμα του σωλήνα, τότε ο αγωγός θεωρείται συνεχής. Σωλήνας από χάλυβα με συγκολλημένες αρθρώσεις περιμέτρου, χαλύβδινος σωλήνας με αρμούς ολίσθησης και συγκόλληση με φιλέτα (WSJ) και σωλήνα HDPE με συγκολλημένους αρμούς, αποτελούν παραδείγματα συνεχούς αγωγού. Παρόλο που υπάρχουν διαφορές, η αντοχή του συγκολλημένου άκρου και σωλήνα WSJ παραμένει. Όλα αυτά γενικά έχουν καλύτερες επιδόσεις από τον κατακεραματισμένο αγωγό, όταν υποβάλλονται σε κινδύνους σεισμού. Συγκεκριμένα, είναι συνηθισμένο να υποστούν βλάβη από τον κίνδυνο PGD, αλλά είναι ασυνήθιστο να έχουν υποστεί βλάβη από τον κίνδυνο διάδοσης κύματος.

Η άλλη ομάδα είναι οι τμηματικοί αγωγοί. Για τα τμήματα γραμμικών σωλήνων, η ακαμψία των αρθρώσεων είναι σημαντικά χαμηλότερη από την ακαμψία του τμήματος μακριά από την άρθρωση. Όπως σημειώθηκε παραπάνω, η σεισμική απόδοση του διαχωρισμένου αγωγού δεν είναι τόσο καλή όσο για τους συνεχείς αγωγούς. Αυτό συμβαίνει διότι οι τμηματικοί αγωγοί έχουν υποστεί βλάβη από το κύμα διάδοσης καθώς και τους κινδύνους PGD.

1.1 Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην κατανόηση και την επεξεργασία των βασικών σεισμικών γεωκινδύνων. Στην εργασία ερευνάται η απόκριση του εδάφους στην περίπτωση σεισμού, εξετάζοντας σε πρώτη φάση την συμπεριφορά της κοιλάδας, μεταβάλλοντας την γεωμετρία και το εδαφικό υλικό. Στο δεύτερο σκέλος των αριθμητικών προσομοιώσεων, ερευνάται ένα άλλος βασικός σεισμικός γεωκίνδυνος, δηλαδή τα ρήγματα, κανονικά και ανάστροφα, λαμβάνοντας υπόψιν το πάχος της εδαφικής στρώσης και την γωνία τριβής του υλικού. Στόχος των αναλύσεων είναι να αποδειχθεί, σε ποιο βαθμό, η ισχυρή εδαφική δόνηση επηρεάζει την σεισμική τρωτότητα των χερσαίων και υποθαλάσσιων αγωγών.

Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται στο περιβάλλον PLAXIS 2D. Το στάδιο των αναλύσεων περιλαμβάνει α) αριθμητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, σχετικά με την εδαφική απόκριση της κοιλάδας και β) αριθμητική διερεύνηση της επίδρασης κανονικού και ανάστροφου ρήγματος στην επιφάνεια.

1.2 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία δομείται με βάση τους βασικούς γεωκινδύνους. Το ενδιαφέρον εστιάζεται κυρίως σε όσους προκαλούνται από τον σεισμό. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται εκτενώς τα στοιχεία για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των χερσαίων και υποθαλάσσιων αγωγών. Τέλος, πραγματοποιείται αριθμητική προσομοίωση για την απόκριση του εδάφους στους βασικούς σεισμικούς γεωκινδύνους, εξάγοντας και αναλύοντας τα αποτελέσματα του προγράμματος.

Πιο συγκεκριμένα, το κάθε κεφάλαιο περιλαμβάνει:

Κεφάλαιο 2^ο : Αρχικά, γίνεται αναφορά για την γένεση του σεισμού μέσω της θεωρίας των τεκτονικών πλακών και αναλύονται οι βασικές αρχές των σεισμών. Στην συνέχεια, περιγράφεται ο κίνδυνος Μόνιμης Παραμόρφωσης του εδάφους (Permanent Ground Deformation – PGD Hazard) και ο κίνδυνος Διάδοσης Κύματος (Wave Propagation

Hazard) στα πλαίσια βασικών σεισμικών γεωκινδύνων και τις επιπτώσεις αυτών όσον αφορά τις κατασκευές και το περιβάλλον. Στην συνέχεια, αναλύεται ο κίνδυνος διάδοσης κύματος. Ύστερα, αναλύονται οι εδαφικές κινήσεις και η σεισμική συμπεριφορά της κοιλάδας. Τέλος, γίνεται μια εκτενής αναφορά στα γεωμορφολογικά, γεωτεκτονικά και σεισμοτεκτονικά δεδομένα της Ελλάδας.

Κεφάλαιο 3^ο : Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται δύο θεματικοί άξονες. Πρώτον, εκτίθεται το δυναμικό πρόβλημα των γεωκινδύνων, δηλαδή η σεισμική φόρτιση και ουσιαστικά, η απόκριση των κοιλάδων σε αυτή. Δεύτερον, μελετώνται διεξοδικά οι μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις και η επίδραση τους στους χερσαίους και θαλάσσιους αγωγούς. Η επόμενη αναφορά σχετίζεται με τις οριακές συνθήκες των αγωγών και τα κριτήρια αστοχίας, καθώς και την αλληλεπίδραση αγωγού-εδάφους. Στην συνέχεια, γίνεται αναφορά στη συμπεριφορά των Υπόγειων Συνεχών Αγωγών στη Διαμήκη Μόνιμη Παραμόρφωση Εδάφους (Longitudinal PGD), στην Εγκάρσια Μόνιμη Παραμόρφωση Εδάφους (Transverse PGD), και στα Ρήγματα. Όσον αφορά τους Σπονδυλωτούς Αγωγούς, περιγράφεται η συμπεριφορά τους στη Μόνιμη Μετατόπιση Εδάφους (PGD). Τέλος, περιγράφονται οι σχέσεις σεισμικής ευθραυ-στότητας στους υπόγειους αγωγούς και προτείνονται τα μέτρα για την αντιμετώπιση των βλαβών των αγωγών εξαιτίας του σεισμού.

Κεφάλαιο 4^ο : Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η αριθμητική προσομοίωση της εκτίμησης των βασικών γεωκινδύνων που καταπονούν τους χερσαίους και υποθαλάσσιους αγωγούς. Στην διεκπεραίωση και ολοκλήρωση της διαδικασίας συνέβαλαν οι δυνατότητες που παρέχονται από το πρόγραμμα PLAXIS 2D. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου, εξετάζεται η εδαφική απόκριση στην επιφάνεια της κοιλάδας, αλλάζοντας την γεωμετρία της και την ταχύτητα του διατμητικού κύματος του υλικού της. Έπειτα, τα αποτελέσματα διαμορφώνουν τα διαγράμματα επιτάχυνσης-χρόνου και ταχύτητας-χρόνου. Το διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου συγκρίνεται με την μέθοδο του Fourier. Στο δεύτερο μέρος των αναλύσεων, εξετάζεται η περίπτωση εξαναγκασμένης εδαφική παραμόρφωση στην επιφάνεια της επίστρωσης, ώστε να δημιουργηθεί ρήγμα. Τα αποτελέσματα αφορούν τα δύο βασικά είδη ρηγμάτων, το κανονικό και το ανάστροφο ρήγμα. Τέλος, εξάγονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων, ώστε να καταστεί εφικτή η δημιουργία έγκυρων διαγραμμάτων σχετικά με τις εδαφικές καθιζήσεις των σημείων της επιφάνειας της εδαφικής στρώσης.

Κεφάλαιο 5^ο : Στο τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, παρατίθεται ο σχολιασμός των αναλύσεων του κεφαλαίου 4. Προκειμένου να είναι επεξεργάσιμα τα αποτελέσματα της εδαφικής απόκρισης της κοιλάδας, δημιουργούνται πίνακες επιταχύνσεων και ταχυτήτων, που αφορούν τα σημεία ελέγχου της επιφάνειας του εδάφους. Στην συνέχεια, ακολουθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων των καθιζήσεων για

τις περιπτώσεις που εξετάζονται και η παρουσίαση του «κατά πόσον» καταπονείται ο αγωγός σε κάθε περίπτωση. Τέλος, προτείνονται περαιτέρω ιδέες και επιλογές για έρευνα σχετικά με τον έλεγχο της σεισμικής απόκρισης του εδάφους και την καταπόνηση των χερσαίων και υποθαλάσσιων αγωγών.

2. ΣΕΙΣΜΙΚΟΙ ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΟΙ

2.1 Εισαγωγή

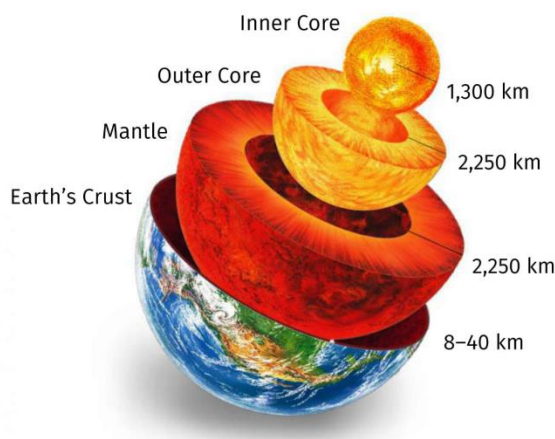
Οι γεωλογικοί κίνδυνοι, όπως οι σεισμοί, τα ηφαίστεια, το τσουνάμι, οι πλημμύρες και οι ανεμοστρόβιλοι, είναι φαινόμενα που προκαλούν πολλές φορές ανεπανόρθωτες συνέπειες στο περιβάλλον και στον άνθρωπο. Τα φυσικά φαινόμενα, με συχνότερο αυτό των σεισμικών δονήσεων, είναι ικανά να προκαλέσουν θάνατο, σοβαρούς τραυματισμούς και υλικές ζημιές. Η σεισμική μηχανική εξετάζεται στον εντοπισμό και στην μείωση επικινδυνότητας των σεισμικών κινδύνων. Στα επακόλουθα υποκεφάλαια παρατίθενται οι σημαντικότεροι κίνδυνοι.

2.2 Τεκτονικές πλάκες

Η σύνθεση της επιφάνειας της Γης αποτελείται από μια μεγάλη ποικιλία μορφών ανάγλυφου και πετρωμάτων. Η διαμόρφωση του στερεού φλοιού είναι αποτέλεσμα μακροχρόνιων διαδικασιών. Οι μεταβολές προέρχονται από ενδογενείς και εξωγενείς δυνάμεις που αλληλεπιδρούν στην Γη. Όλες οι μεταβολές που γίνονται στην ένταση, στο είδος και στην κατανομή των διεργασιών αποτυπώνονται στα πετρώματα, αποδίδοντας την τελική μορφή του ανάγλυφου.

Οι κινήσεις του φλοιού και οι παραμορφώσεις των πετρωμάτων είναι απόρροια ενδογενών δυνάμεων, δηλαδή των συνεχών μετατοπίσεων των τεκτονικών πλακών. Ο φλοιός της Γης και ο ανώτερος μανδύας είναι στερεοί και επικαλύπτονται από την ας θενόσφαιρα και την λιθόσφαιρα. Η λιθόσφαιρα δεν αποτελεί ενιαίο κομμάτι πλάκας αλλά απαρτίζεται από μικρότερες πλάκες οι οποίες ολισθαίνουν πάνω στο μανδουακό υλικό, δηλαδή την ασθενόσφαιρα πραγματοποιώντας σχετικές μετακινήσεις. Οι πλάκες αυτές ονομάζονται λιθοσφαιρικές πλάκες. Η λιθόσφαιρα βρίσκεται 50 χιλιόμετρα κάτω από τους ωκεανούς και περίπου 150 χιλιόμετρα κάτω από τις ηπείρους. Ενώ, η ασθενόσφαιρα αποτελεί το στρώμα κάτω από την λιθόσφαιρα και επεκτείνεται στον μανδύα περίπου σε βάθος 500 χιλιομέτρων και είναι η ζώνη με πλαστική συμπεριφορά που ερμηνεύει την κίνηση των πλακών. Η πιθανή αιτία κίνησης είναι οι οριζόντιες εφαπτομενικές κινήσεις που ασκούνται στον πυθμένα από τα θερμικά κύματα μεταφοράς διαμορφώνοντας με αυτόν τον τρόπο, τον ασθενοσφαιρικό μανδύα. Οι θερμοκρασίες που επικρατούν είναι υψηλές, δημιουργώντας μεγάλες πιέσεις στο εσωτερικό της Γης. Συνεπώς, η παρουσία

της ερμηνεύει την συμπεριφορά των σεισμικών κυμάτων και τον διαχωρισμό των ηπείρων.



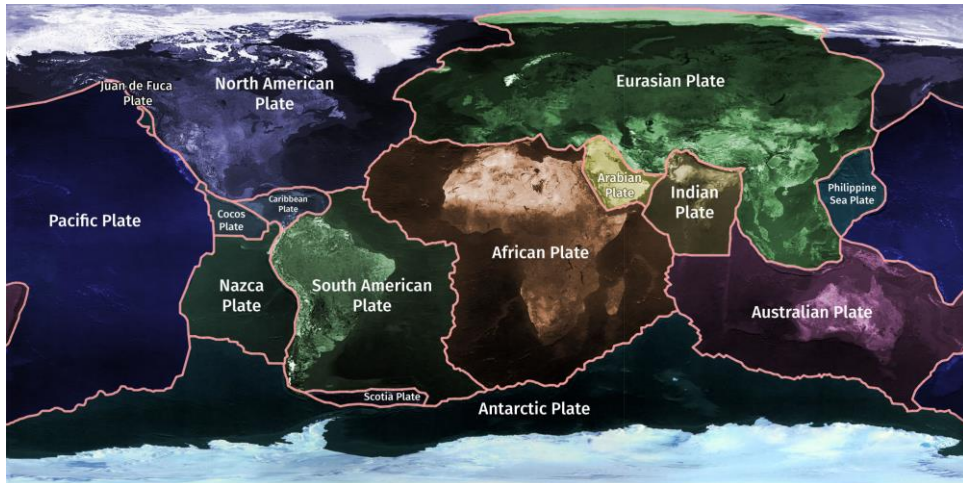
Εικόνα 2.3: Κατανομή λιθосφαιρικών στρωμάτων Γης

Πηγή: Wikipedia.org

Η επικρατέστερη θεωρία των τεκτονικών πλακών από τους McKenzie και Parketto 1967, διαχωρίζει την γήινη επιφάνεια σε έξι μεγάλες πλάκες, με τάφρους, ωκεάνιες ράχες, ρήγματα και πτυχωσιγενείς οροσειρές. Η κατανομή των πλακών γίνεται σύμφωνα με τα ακόλουθα όρια:

1. Την Ανταρκτική και τον ωκεάνιο πυθμένα που την περιβάλλει.
2. Τη βόρεια και νότιο Αμερική μαζί με τον πυθμένα του δυτικού Ατλαντικού ωκεανού.
3. Την Ινδία με την Αυστραλία και τη Νέα Ζηλανδία.
4. Την Ευρασία με τον περιβάλλοντα ωκεάνιο πυθμένα.
5. Τέλος, την Αφρική μαζί με τον πυθμένα του ανατολικού ωκεανού.

Επιπρόσθετα, έχουν εντοπιστεί ορισμένες μεταγενέστερες, μικρότερες πλάκες στις ειρηνικές ακτές της Αμερικής, στην Καραϊβική, στην περιοχή των Φιλιππίνων και στη Μεσογειακή ζώνη έως την Αραβία.

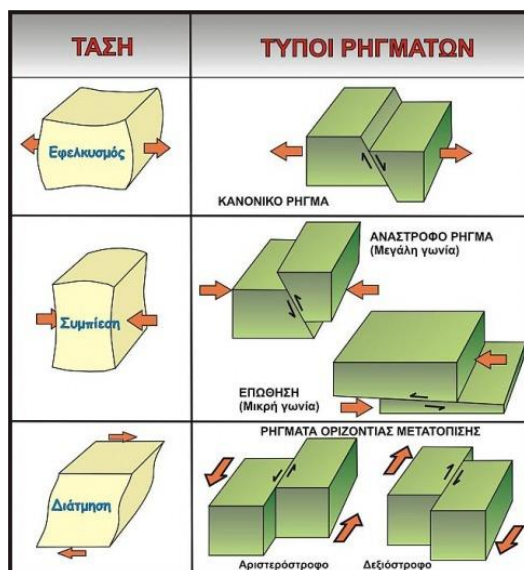


Εικόνα 4.2: Οι λιθοσφαιρικές πλάκες της Γης

Πηγή: the-dialogue.com

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ερμηνεία των γεωλογικών και γεωφυσικών παρατηρήσεων σχετίζεται με την ενεργή τεκτονική δράση και κατά συνέπεια με τη σεισμική δράση, η οποία περιγράφει την κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών και την δημιουργία ρηγμάτων. Διακρίνεται με κριτήριο τους διαφορετικούς τύπους ορίων των λιθοσφαιρικών πλακών, οι οποίοι είναι οι εξής:

1. Απόκλιση ή απομάκρυνση και προσαύξηση των λιθοσφαιρικών πλακών. Οι πλάκες απομακρύνονται η μία από την άλλη.
2. Σύγκλιση. Οι δύο πλάκες συγκρούονται μεταξύ τους και δημιουργούν ωκεάνια τάφρο.
3. Οι λιθοσφαιρικές πλάκες έχουν παράλληλη κίνηση μεταξύ τους με αντίθετη κατεύθυνση. Τα όρια τους αποκαλούνται συντηρητικά περιθώρια και αποτελούν τα όρια των ρηγμάτων μετασχηματισμού εξαιτίας της παράλληλης μετατόπισης.



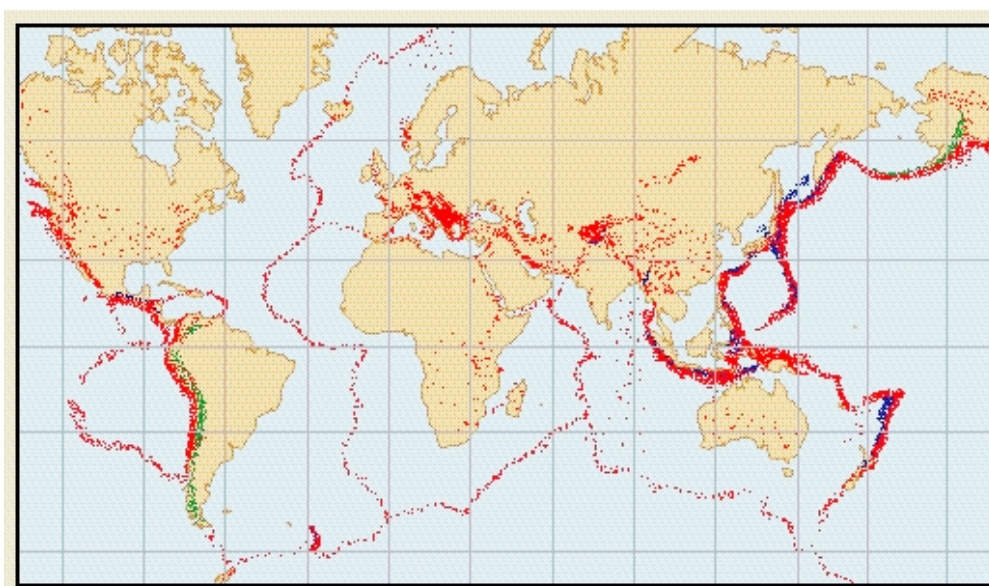
Εικόνα 2.3: Τύποι ρηγμάτων

Πηγή: geodifhs.com

2.3 Βασικές Αρχές Σεισμών

Η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών ευθύνεται για την δημιουργία σεισμού με φυσικά αίτια. Ο σεισμός δημιουργείται από δονήσεις του υπεδάφους κατά τη διάρκεια διαταράξεων της μηχανικής ισορροπίας των πετρωμάτων με διάρρηξη και μετακίνηση των πλακών. Οι δονήσεις αυτές χαρακτηρίζονται από μεταβαλλόμενη ένταση. Ανάλογα το μέγεθος τους, μπορούν να προκαλέσουν ζημιές ή καταστροφές σε κατασκευές, θανάσιμα ατυχήματα, οικολογικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές καταστροφές ή ακόμα να μην γίνουν αντιληπτοί παρά μόνο από όργανα υψηλής ακρίβειας, που ονομάζονται σειсмоγράφοι. Οι μεταβολές που προκαλούνται στο έδαφος και στις τεχνικές κατασκευές περιγράφονται ως μακροσεισμικά αποτελέσματα.

Η δράση των τεκτονικών δυνάμεων, όπως έχει ήδη αναφερθεί, προκαλούν σεισμικά κύματα που προέρχονται από το φλοιό της γης και την κίνηση των τεκτονικών πλακών. Οι συσσωρευμένες τάσεις που βρίσκεται στον φλοιό της Γης, καταπονούν τη λιθόσφαιρα με συνέπεια μόλις υπερβεί το όριο αντοχής των πετρωμάτων, αυτά θραύονται και απελευθερώνεται ελαστική ενέργεια στην επιφάνεια. Αυτό φέρει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ρηγμάτων. Οι περισσότεροι σεισμοί που προκαλούν τα πιο καταστρεπτικά αποτελέσματα προέρχονται συνήθως από μετατοπίσεις ή παραμορφώσεις γήινων τεμαχίων κατά μήκος των ρηγμάτων και καλούνται τεκτονικοί σεισμοί. Η διάρρηξη του ρήγματος διαδίδεται μέχρι να σταματήσει με μια ορισμένη ταχύτητα. Το σημείο διάρρηξης ονομάζεται σεισμική εστία. Η κατακόρυφη προβολή του σημείου αυτού στην επιφάνεια, λέγεται επίκεντρο του σεισμού και η απόσταση μεταξύ του αποκαλείται εστιακό βάθος.



Εικόνα 2.4: Η παγκόσμια κατανομή σεισμών (1/1977- 12/1986). Τα χρώματα στα επίκεντρα δείχνουν το βάθος των εστιών (κόκκινα 0-70 χλμ, πράσινο 70-300 χλμ και μπλε βαθύτερα από 300 χλμ.

Πηγή: Garrison (1996)

2.4 Κίνδυνος Μόνιμης Παραμόρφωσης Εδάφους

Η σεισμική διέγερση διαρκεί μερικά δευτερόλεπτα. Ωστόσο, στην συνολική διάρκεια του σεισμού μπορούν να προηγηθούν ασθενέστερες δονήσεις, δηλαδή να προκληθεί προσεισμός εν συνεχεία ο κύριος σεισμός και τέλος, να υπάρξουν μια σειρά από μετασεισμούς. Ο κύκλος του σεισμού διαμορφώνεται από μία ακολουθία σεισμικών δονήσεων. Οι πρώτοι σεισμοί δημιουργούν θρυμματισμούς μικρών εμποδίων, που βρίσκονται στο επίπεδο του ρήγματος ή της ρηξιγενούς ζώνης. Έπεται, ο κύριος σεισμός, μπορεί να διαταράξει συνδεδεμένους ρηξιγενείς όγκους χωρίς να αποκαθίσταται η σταθερότητα στην περιοχή, δημιουργώντας κατολισθήσεις. Τέλος, ακολουθούν οι μετασεισμοί, οι οποίοι επαναφέρουν την ευστάθεια. Το κατά μήκος σπάσιμο των πετρωμάτων συντελούν στην απελευθέρωση της ενέργειας στην επιφάνεια με την μορφή κυμάτων προς όλες τις κατευθύνσεις. Αυτό συμβαίνει λόγω της ελαστικότητας των πετρωμάτων.

2.4.1 Ρήγματα

Ρήγμα ονομάζεται η διάρρηξη των πετρωμάτων εκατέρωθεν της ρηξιγενής επιφάνειας, διαχωρίζοντας τα πετρώματα σε δύο τμήματα, τα τεκτονικά τεμάχια. Η μετατόπιση των τεμαχίων μπορεί να ξεκινάει από μερικά χιλιοστά ή έως εκατοντάδες χιλιόμετρα κάνοντας διάφορες κινήσεις. Είναι σύνηθες φαινόμενο η ύπαρξη ρηγμάτων κατά ομάδες σε περιοχές με έντονη τεκτονική δραστηριότητα, διαμορφώνοντας την ρηξιγενή ζώνη.

Η θέση των ρηγμάτων στο χώρο καθορίζεται από την κλίση και την τομή της κεκλιμένης επιφάνειας από το οριζόντιο επίπεδο της ρηξιγενής επιφάνειας. Η σχετική μετατόπιση δύο σημείων εκατέρωθεν της επιφάνειας του ρήγματος που συνέπιπταν πριν την θραύση, ονομάζεται ολίσθηση. Ενώ, στην περίπτωση της διάρρηξης επίπεδων ρηγμάτων, οι επιφάνειες που σχηματίζονται είναι κοίλες, δημιουργώντας ληστρικά ρήγματα.

Πιο συγκεκριμένα, οι διάφορες κατηγορίες ρηγμάτων αποσαφηνίζονται από την κατεύθυνση της κίνησης κατά μήκος του επιπέδου διάρρηξης. Οι κινήσεις πάνω στην επιφάνεια του ρήγματος είναι οι εξής :

- **Ρήγματα με ολίσθηση κατά την παράταξη** (strike-slip), δηλαδή η οριζόντια κίνηση. Τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης διακρίνονται σε δεξιόστροφα και αριστερόστροφα. Τα ρήγματα μετασχηματισμού ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

- **Ρήγματα με ολίσθηση κατά τη διεύθυνση κλίσης** της επιφάνειας του ρήγματος (dip-slip)
- **Ρήγματα πλάγιας ολίσθησης** (lateral-slip), δηλαδή οριζόντια και κατακόρυφη μετακίνηση των τεμαχιών

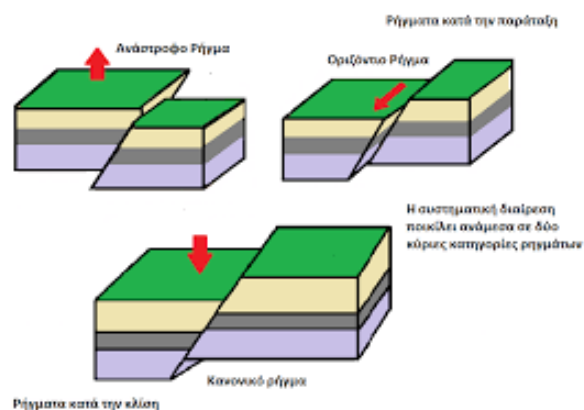
Ωστόσο, τα ρήγματα δημιουργούνται είτε από συμπιεστικές τάσεις είτε από εφελκυστικές. Ανάλογα το είδος των τάσεων που δέχονται διακρίνονται με βάση τη θέση της επιφάνειας του ρήγματος στον χώρο σε :

- Κανονικά ρήγματα (normal faults)
- Ανάστροφα ρήγματα (reverse faults)
- Εφιππεύσεις ρήγματα (thrust faults)
- Δεξιά πλάγια ρήγματα (right lateral faults)
- Αριστερά πλάγια ρήγματα (left lateral faults)

Τα **κανονικά ρήγματα** δημιουργούνται από εφελκυστικές τάσεις, στις οποίες υπερτερούν οι κατακόρυφες τάσεις λόγω βαρύτητας. Τα κανονικά ρήγματα είναι είτε κατακόρυφα είτε κεκλιμένα και τα πετρώματα καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο μετά την διάρρηξή τους.

Τα **ανάστροφα ρήγματα** δημιουργούνται από διατμητικές τάσεις, στα οποία υπερισχύουν οι οριζόντιες μετακινήσεις ενώ η διάρρηξη των πετρωμάτων καταλαμβάνει μικρό χώρο. Η κίνηση των ανώτερου τεμάχους γίνεται αντίστροφα προς την διεύθυνση κλίσης.

Τα ρήγματα είναι άμεσα συνδεδεμένα με τους σεισμούς, καθώς επηρεάζουν την ένταση των σεισμών. Γι' αυτό διακρίνονται σε ενεργά και ανενεργά ανάλογα με την σεισμική τους δραστηριότητα κατά την πάροδο του χρόνου. Στην παρούσα διπλωματική θα εξετάζονται περιπτώσεις των κανονικών και των ανάστροφων ρηγμάτων, τα αποτελέσματα των οποίων αναλύονται στο κεφάλαιο 5.



Εικόνα 2.5: Μορφή κανονικού και ανάστροφου ρήγματος

Πηγή: <https://docplayer.gr>

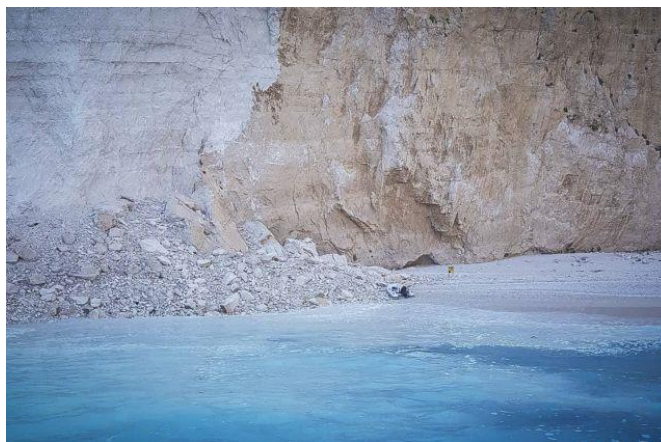
2.4.2 Κατολισθήσεις

Ο κύκλος του σεισμού διαμορφώνεται από μία ακολουθία σεισμικών δονήσεων. Ένας ισχυρός σεισμός μπορεί να διαταράξει συνδεδεμένους ρηξιγενούς όγκους χωρίς να αποκαθίσταται η σταθερότητα στην περιοχή, δημιουργώντας κατολισθήσεις. Πολλές κατολισθήσεις που προκαλούνται από σεισμό, προκύπτουν είτε από φαινόμενα ρευστοποίησης, είτε από αστοχία πλαγιών που βρίσκονταν σε οριακές στατικές συνθήκες. Στην περίπτωση των υποθαλάσσιων κατολισθήσεων, τα κύματα θολότητας είναι εκείνα που μπορούν εκτός των άλλων να τις προκαλέσουν.

Είναι σύνηθες οι χερσαίοι αγωγοί να επηρεάζονται από τις κατολισθήσεις. Σύμφωνα με την παρατήρηση των κατολισθήσεων, ο Meyersohn (1991) διαχώρισε τις επιπτώσεις των κατολισθήσεων στους χερσαίους αγωγούς σε τρεις τύπους. Ο πρώτος Τύπος I σχετίζεται με την πτώση και την ανατροπή του βράχου. Αποτέλεσμα αυτού, η πρόσκρουση των πεσόντων βράχων σε επιφανειακό αγωγό. Ωστόσο, στην περίπτωση που ο αγωγός είναι υπόγειος στο έδαφος, δεν διατρέχει μεγάλο κίνδυνο. Ο δεύτερος Τύπος II αφορά τα υλικά που συμπεριφέρονται σαν ρευστά. Το μέγεθος της κίνησης του υλικού είναι δύσκολο να προβλεφθεί καθώς αφορά μεγάλες μετακινήσεις. Τέλος, ο Τύπος III η μετακίνηση του βράχου γίνεται σαν μια ενιαία μάζα. Αποτελεί την πιο συνηθισμένη περίπτωση καθώς αναπτύσσεται γύρω από πλαγιές, ποτάμια και επιχώματα, όπου η πιθανότητα διασταύρωσης με αγωγό είναι σχεδόν βέβαιη.

Όσο αναφορά τις υποθαλάσσιες κατολισθήσεις προκαλούνται από σεισμική ανάκαμψη ή από τα κύματα θολότητας. Στα παράκτια, οι κατολισθήσεις είναι περιοχές επιρρεπείς στην σεισμική δραστηριότητα. Για κατολισθήσεις που προκαλούνται από κύματα θολότητας, οι κατολισθήσεις γίνονται κατάντη των ποταμών, έχοντας υψηλά φορτία ιζημάτων. Τέλος, η διαπερατότητα των θαλάσσιων εδαφών επηρεάζει την πιθανότητα κατολισθήσεων. Τόσο τα σεισμικά κύματα όσο και τα κύματα θολότητας προκαλούν

δυναμική ή κυκλική φόρτιση, η οποία για μαλακά εδάφη μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικές πιέσεις νερού και απώλεια δύναμης διάτμησης.



Εικόνα 2.6: Κατολίσθηση στο Ναυάγιο της Ζακύνθου

Πηγή: <https://www.in.gr>

2.4.3 Ρευστοποίηση

Ένας ακόμα γεωλογικός κίνδυνος είναι η ρευστοποίηση του εδάφους. Η ρευστοποίηση είναι από τα πιο επιβλαβή φαινόμενα. Το έδαφος φαίνεται να λειτουργεί όπως τα ρευστά. Με άλλα λόγια, το έδαφος χάνει την αντοχή του σε σημείο που δεν είναι πλέον σε θέση να στηρίξει τις δομές του και να παραμείνει σταθερό. Το συγκεκριμένο φαινόμενο παρατηρείται σε περιοχές που περικλείονται από το υδάτινο στοιχείο, όπως ποτάμια, κόλπους και άλλα υδατικά συστήματα.

Με τον όρο ρευστοποίηση προκύπτουν αρκετά συναφή φαινόμενα. Για παράδειγμα, οι βλάβες ροής συμβαίνουν όταν η ισχύς του εδάφους μειωθεί αρκετά ώστε η σταθερότητα υπό στατικές συνθήκες να μην μπορεί να διατηρηθεί. Επομένως, οι στατικές βαρυτικές δυνάμεις παράγουν, συνήθως, μεγάλες κινήσεις. Η πλευρική εξάπλωση είναι ένα αλληλένδετο φαινόμενο από τις αυξημένες μετατοπίσεις κατά την ανάδευση του σεισμού. Ανάλογα με τον αριθμό και τη δύναμη των τάσεων που υπερβαίνουν την αντοχή του εδάφους, η πλευρική εξάπλωση μπορεί να προκαλέσει έντονες παραμορφώσεις του εδάφους, παράγοντας μεγάλες μετακινήσεις και προκαλώντας ζημιές στα θεμέλια και στα στηρίγματα των κατασκευών.

Στην περίπτωση των αγωγών η πλευρική εξάπλωση είναι μία από τις παραμέτρους που επηρεάζουν την περίπτωση αστοχίας του αγωγού κατασκευής. Η απόκριση του αγωγού σε ένα οριζόντιο επίπεδο επηρεάζεται από τέσσερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα,

1. Η ποσότητα της κίνησης PGD δ

2. Το εγκάρσιο πλάτος της ζώνης PGD W
3. Το διάμηκες πλάτος της ζώνης PGD L
4. Το πρότυπο κατανομής της μετακίνησης εντός της ζώνης



Εικόνα 2.7: Ρευστοποίηση εδάφους μετά από σεισμό στην Ιαπωνία το 1964

Πηγή: http://users.ntua.gr/gbouck/downfiles/geot_earthquake_eng_Ch6-LIQ-10.pdf

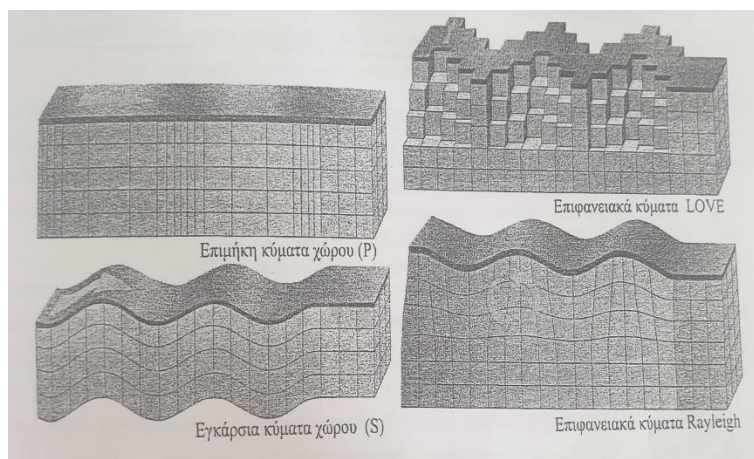
2.5 Κίνδυνος Διάδοσης Κύματος

Στη φύση των γεωλογικών υλικών είναι να προκαλούν τη δυναμική του εδάφους και τη γεωτεχνική μηχανική σεισμών ώστε να αποκλίνουν από τα δομικά τους στοιχεία. Ενώ οι περισσότερες δομές μπορούν εύκολα να εξιδανικευτούν ως συναθροίσεις διακεκριμένων μαζών με διακριτές πηγές ακαμψίας, τα γεωλογικά υλικά δεν μπορούν. Πρέπει να αντιμετωπίζονται ως συνεχή υλικά και η αντίδρασή τους σε δυναμικές διαταραχές πρέπει να περιγράφονται στο πλαίσιο της διάδοσης των κυμάτων. Η θεμελιώδης αντιμετώπιση των βασικών εννοιών παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο. Το σχετικά απλό πρόβλημα των κυμάτων σε απεριόριστα μέσα επικοινωνίας ακολουθείται από το πιο περίπλοκο πρόβλημα των κυμάτων σε οριοθετημένα και στρωματοποιημένα μέσα.

2.5.1 Βασικές Αρχές της Διάδοσης Κύματος

Τα πιο γρήγορα σεισμικά κύματα που διαδίδονται στην επιφάνεια ονομάζονται κύματα Primary (P) και η ταχύτητά τους είναι περίπου 4 με 8 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο. Τα κύματα P χαρακτηρίζονται ως επιμήκη κύματα και διαδίδονται μέσα στο πετρώματα και στα υγρά. Στην συνέχεια, ακολουθούν τα δευτερεύοντα κύματα που ονομάζονται κύματα

Secondary (S). Τα κύματα S είναι εγκάρσια κύματα και η κατεύθυνση της κίνησης του χωρίζονται σε κάθετα προς την διεύθυνση κίνησης (SV, vertical plane movement) και οριζόντια προς την διεύθυνση της κίνησης (SH, horizontal plane movement), αποκλειστικά στα στερεά στοιχεία, καθώς τα υγρά δεν έχουν διαμητική ακαμψία. Στην εικόνα 2.8 που βίσκεται παρακάτω απεικονίζεται η μορφή των κειμάτων που αναφέρονται.



Εικόνα 2.8: Σχήμα για τα εγκάρσια και επιμήκη κύματα

Πηγή: Αλίκη Αλεξοπούλου-Λειβαδίτη, 1994

Σύμφωνα με όσα προαναφέρονται, είναι αναγκαίο να αποσαφηνιστούν οι ιδιότητες των σεισμικών κυμάτων κατά την διάδοσή τους.

Τα επιμήκη κύματα (P) , ταξιδεύουν με ορισμένη ταχύτητα, α, μέσα σε ένα ισότροπο και ελαστικό μέσο. Η σχέση που δίνει το την ταχύτητα είναι :

$$\alpha = \sqrt{\lambda + \frac{\mu}{\rho}}$$

όπου, λ και μ είναι οι ελαστικές σταθερές του Lamé και ρ, η πυκνότητα του μέσου διάδοσης.

Αντίστοιχα, τα εγκάρσια κύματα (S), διαδίδονται με ορισμένη ταχύτητα, β, μέσα σε ένα ισότροπο και ελαστικό μέσο, σύμφωνα με τον τύπο :

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

στα υγρά στοιχεία, το μ ισούται με μηδέν, αφού τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται μόνο σε στερεά υλικά. Η ταχύτητα τους κυμαίνεται μεταξύ των 2,5 με 5,5 χιλιομέτρων ανά δευτερόλεπτο.

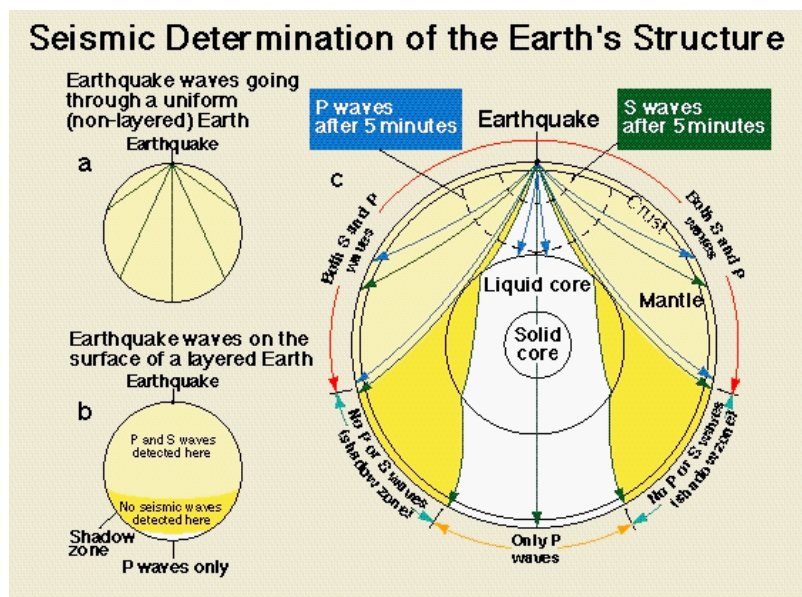
Τα κύματα Primary και Secondary χαρακτηρίζονται ως κύματα χώρου ή κύματα σώματος, καθώς διαδίδονται προς όλες τις διευθύνσεις ανεξάρτητα το βάθος. Οι σεισμολόγοι μπορούν να μελετήσουν το εσωτερικό της Γης και να υπολογίσουν σχετική ακρίβεια της απόστασης της θέση παρατήρησης από την πηγή του σεισμού.

Καθώς τα δύο κύματα φτάνουν στην επιφάνεια ανακλώνται και διαθλώνται με αποτέλεσμα να δημιουργούν άλλους δύο τύπους κυμάτων, που είναι σημαντικοί για την μηχανική. Τα κύματα αυτά ονομάζονται σεισμικά επιφανειακά κύματα και διακρίνονται στα κύματα Love και στα κύματα Rayleigh.

Τα επιφανειακά κύματα διαμορφώνονται με την αλληλεπίδραση μεταξύ των κυμάτων του σώματος και της επιφάνειας και των επιφανειακών στρωμάτων της γης. Ταξιδεύουν κατά μήκος της επιφάνειας της γης και τα μεγέθη τους μειώνονται εκθετικά. Σύμφωνα με τις απαιτούμενες αλληλεπιδράσεις για την παραγωγή τους, τα επιφανειακά κύματα είναι πιο εμφανή σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την εστία του σεισμού. Παρατηρείται ότι σε αποστάσεις μεγαλύτερες από το διπλάσιο του πάχους του φλοιού της γης, τα επιφανειακά κύματα, παρά τα κύματα του σώματος, θα παράγουν αιχμές εδάφους. Τα επιφανειακά κύματα χαρακτηρίζονται ως καταστρεπτικά εξαιτίας του τρόπου που εκλύουν ενέργεια στην επιφάνεια προκαλώντας έντονες δονήσεις. Η απώλεια ενέργειας είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης. Επομένως, γίνονται αντιληπτά εξαιτίας του μεγάλου πλάτους ταλάντωσή τους και το μέγεθος τους αποδίδεται με την κλίμακα Richter. Τα κύματα Rayleigh περιλαμβάνουν τόσο την κατακόρυφη όσο και την οριζόντια κίνηση σωματιδίων. Δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση των πρωταρχικών κυμάτων και των δευτερευόντων κάθετων κυμάτων. Για να γίνουν πιο αντιληπτά, η μορφή τους μπορεί να παρομοιαστεί με τα κύματα που παράγονται από την ρήξη βράχου σε μια λίμνη.

Ο δεύτερος τύπος κυμάτων, κύματα Love, προκύπτουν από την αλληλεπίδραση των οριζόντιων κυμάτων SH με ένα μαλακό επιφανειακό στρώμα και δεν έχουν καμία κατακόρυφη συνιστώσα της κίνησης των σωματιδίων. Η διάδοση του στα ανώτερα στρώματα της επιφάνειας χαρακτηρίζεται ως ένα βαθμό ανομοιογενή, συγκριτικά με τα κύματα χώρου.

Η διαφορά των κυμάτων Rayleigh και των κυμάτων Love είναι ότι τα πρώτα κινούνται σε ελλειπτικές τροχιές με το μεγάλο άξονα κατακόρυφο και το μικρό παράλληλο προς τη διεύθυνση διάδοσης, ενώ τα δεύτερα, σείονται παράλληλα στην επιφάνεια του εδάφους κατά τη διεύθυνση διάδοσης. Ωστόσο, εξίσου η ταχύτητα διάδοσης των δύο κυμάτων, εξαρτάται από την περίοδο (T). Όπως είναι γνωστό, η ταχύτητα αυξάνει όταν αυξάνεται η περίοδος.



Εικόνα 2.9: Η διαδρομή των διαφόρων σεισμικών κυμάτων δια μέσου της Γης.

Πηγή: SEPM,1996

2.5.2 Παράμετροι Κίνησης Εδάφους

Οι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν για την κίνηση του εδάφους είναι:

- Μέγιστη επιτάχυνση εδάφους (peak ground acceleration)
- Μέγιστη ταχύτητα εδάφους (peak ground velocity)
- Μέγιστη παραμόρφωση εδάφους (peak ground deformation)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξάγονται συμπεράσματα για την ανταπόκριση του εδάφους από την μέγιστη επιτάχυνση του εδάφους. Ωστόσο, για τους υπόγειους αγωγούς η βασικότερη παράμετρος που εξετάζεται είναι η μέγιστη ταχύτητα του εδάφους, καθώς η καταπόνηση τόσο του εδάφους όσο και των αγωγών σχετίζονται με την ταχύτητα.

2.5.3 Ταχύτητα Διάδοσης Κύματος

α) Κύματα χώρου

Τα εγκάρσια κύματα μεταφέρουν περισσότερη ενέργεια και τείνουν να παράγουν μεγαλύτερη κίνηση εδάφους από τα επιμήκη κύματα. Η οριζόντια ταχύτητα διάδοσης για τα κύματα S αποτελεί τη βασική παράμετρο για την ταχύτητα στην επιφάνεια του εδάφους. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα αδράνειας για τους αγωγούς δεν είναι

σημαντικά, αφού το βάρος του σωλήνα συν το περιεχόμενο είναι περίπου το ίδιο με το έδαφος που αντικαθιστά. Αντίθετα, η κίνηση εκτός φάσης της διάδοσης κύματος κατά μήκος του σωλήνα είναι σημαντική. Είναι αναγκαίο στους αγωγούς να λαμβάνεται υπόψη η μικρή γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της διάδοσης του κύματος του σώματος και της κατακόρυφης κατεύθυνσης, καθώς αυτό οδηγεί σε κίνηση εκτός φάσης κατά μήκος του σωλήνα. Ο M. O'Rourke και οι συνεργάτες του (1982) μελέτησαν την φαινόμενη οριζόντια ταχύτητα μετάδοσης, C , για κύματα σώματος. Αναπτύσσοντας μια αναλυτική τεχνική, οδηγήθηκαν στο εξής συμπέρασμα ότι για την αξιολόγηση της γωνίας επίπτωσης των κυμάτων S , αξιολογούνται τα τρία συστατικά της κίνησης στην επιφάνεια του εδάφους σε συνδυασμό με έναν τανυστή έντασης της κίνησης εδάφους. Η φαινομενική ταχύτητα μετάδοσης για τα κύματα S δίνεται από τον τύπο:

$$C_s = \frac{V_s}{\sin \gamma_s}$$

όπου γ_s είναι η γωνία πρόσπτωσης των κυμάτων S σε σχέση με την κατακόρυφο και V η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων των επιφανειακών εδαφών.

β) Κύματα επιφάνειας

Τα κύματα Love δεν λαμβάνονται υπόψη στους υπόγειους αγωγούς, καθώς προκαλούν μεγάλες καταπονήσεις. Αντιθέτως, τα κύματα Rayleigh προκαλούν μικρές καταπονήσεις, αφού η αξονική καταπόνηση του σωλήνα είναι παράλληλη προς την κατεύθυνση της διάδοσης κύματος στο οριζόντιο επίπεδο. Δεδομένου ότι τα κύματα R ταξιδεύουν παράλληλα με την επιφάνεια του εδάφους, η ταχύτητα φάσης των κυμάτων R , C_0 είναι η φαινομενική ταχύτητα διάδοσης. Σημειώνεται ότι η ταχύτητα διάδοσης ορίζεται ως η ταχύτητα με την οποία μια μεταβατική κατακόρυφη διαταραχή σε μια δεδομένη συχνότητα, που προέρχεται από την επιφάνεια του εδάφους, διαδίδεται κατά μήκος της επιφάνειας του μέσου. Η ταχύτητα διάδοσης R είναι μια συνάρτηση της μεταβολής της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων με το βάθος και, σε αντίθεση με τα κύματα του σώματος, είναι, επίσης, συνάρτηση της συχνότητας. Όπως όλα τα μετακινούμενα κύματα, το μήκος κύματος λ , η συχνότητα f και η ταχύτητα φάσης πολλαπλασιασμού C αλληλοσυνδέονται με την εξίσωση:

$$C = \lambda f$$

2.5.4 Καταπόνηση Εδάφους και Καμπυλότητας λόγω της Διάδοσης Κύματος

Οι επιπτώσεις της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων χαρακτηρίζονται από την καταπόνηση του εδάφους και την καμπυλότητα λόγω της διάδοσης κυμάτων. Για την ανάλυση και το σχεδιασμό των υπόγειων αγωγών, ο Newmark (1967) ανέπτυξε μια απλουστευμένη διαδικασία εκτίμησης της καταπόνησης του εδάφους. Θεωρεί και ένα απλό μετακινούμενο κύμα με σταθερό σχήμα κύματος. Δηλαδή, στην περίπτωση μιας απόλυτης χρονικής κλίμακας, η επιτάχυνση, η ταχύτητα και η μετατόπιση οι χρονικές στιγμές των δύο σημείων κατά μήκος της διάδοσης του κύματος διαφέρουν μόνο με μία χρονική καθυστέρηση, η οποία είναι συνάρτηση της απόστασης διαχωρισμού μεταξύ των δύο σημείων και της ταχύτητας του σεισμικού κύματος. Η τελική μορφή εξίσωσης για την διάδοση του κύματος προκύπτει από την σχέση:

$$\varepsilon_g = \frac{V_{max}}{C_R}$$

όπου V_{max} είναι η μέγιστη οριζόντια ταχύτητα εδάφους στη διεύθυνση της διάδοσης του κύματος και C_R είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος Rayleigh.

Αντίθετα, η διάδοση των κυμάτων παράλληλη με τον αγωγό προκαλεί σημαντική αξονική καταπόνηση κατά μήκος του σωλήνα. Από την άλλη πλευρά, τα εγκάρσια κύματα (S) προκαλούν κάμψη στο σωλήνα. Ωστόσο, τα ενεργητικά κύματα-S προ-καλούν αξονική καταπόνηση εφόσον κινούνται υπό γωνία σε σχέση με τον άξονα του σωλήνα. Ουσιαστικά, ένα κύμα-S που διαδίδεται σε ένα οριζόντιο επίπεδο από ένα επίπεδο με κάποια γωνία σε σχέση με έναν υπόγειο αγωγό, εξαιτίας της γωνίας, η κίνηση του κύματος S (κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης) θα έχει ένα διάνυσμα παράλληλο προς τον σωλήνα (προκαλώντας αξονική καταπόνηση) και ένα άλλο κάθετο διάνυσμα προς το σωλήνα (προκαλώντας κάμψη). Ο Yeh (1974) υπέδειξε τη γωνία που μεγιστοποιεί την αξονική καταπόνηση και είναι 45° . Η σχέση που προκύπτει για την αξονική καταπόνηση είναι:

$$\varepsilon_g = \frac{V_{max}}{2C_S}$$

όπου C_S θεωρητικά είναι η φαινομενική ταχύτητα διάδοσης του εγκάρδιου κύματος (S) σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους.

2.6 Εδαφικές κινήσεις

Η γη δονείται σχεδόν συνεχώς σε περιόδους που κυμαίνονται από χιλιοστά του δευτερολέπτου έως ημέρες και πλάτη που κυμαίνεται από νανόμετρα έως μέτρα. Η πλειοψηφία των δονήσεων δεν γίνεται άμεσα αντιληπτή και ανιχνεύονται με εξειδικευμένο εξοπλισμό μέτρησης. Οι μηχανικοί του σεισμού ενδιαφέρονται για την ισχυρή κίνηση εδάφους ώστε να αξιολογήσουν τον τρόπο με τον οποίο, οι συνεχείς μετατοπίσεις επιδρούν στους ανθρώπους και στο περιβάλλον. Η αξιολόγηση των επιπτώσεων των σεισμών με ισχυρή κίνηση εδάφους σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, απαιτεί αντικειμενικούς και ποσοτικούς τρόπους. Οι κινήσεις εδάφους που παράγονται από σεισμούς μπορεί να είναι αρκετά περίπλοκες.

Οι κινήσεις των μαζών κατά κύριο λόγο οφείλονται στην βαρύτητα και κινούνται κατά τη διεύθυνση κλίσεως των επιφανειών πάνω στις οποίες κινούνται. Κατά τον Sharp (1938) οι κινήσεις του εδάφους χωρίζονται ανάλογα με την ταχύτητα σε:

1. Ερπυσμό, όπου η αποσάθρωση των υλικών κινούνται πολύ αργά στις πλαγιές. Η μετατόπιση του εδάφους δεν είναι εμφανής γιατί το υλικό που απομακρύνεται ανανεώνεται από νέο που δημιουργείται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου. Η αναγνώριση του ερπυσμού μπορεί να γίνει από την εμφάνιση κλιμακωτών μορφών στην επιφάνεια ή την κύρτωση των κορμών των δένδρων.
2. Ταχεία κίνηση ή ροή, όπου το έδαφος συμπεριφέρεται με την μορφή ρευστού. Κινείται προς την διεύθυνση κλίσεως και στερεοποιείται μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα.
3. Κατολίσθηση
4. Καθίζηση, όπου το έδαφος έχει μια κατακόρυφη μετατόπιση με αποτέλεσμα η επιφάνεια του να βυθίζεται. Η αναγνώριση της καθίζησης είναι πολύ βασική, ειδικά όταν μελετάται η κατασκευή μεγάλου έργου.

2.7 Σεισμική συμπεριφορά Κοιλάδας

Το σχετικά σκληρό υπόβαθρο της κοιλάδας οφείλεται σε ιζηματογενείς αποθέσεις ημίσκληρου αργίλου και λεπτόκοκκης άμμου, και έχει σαφώς μεγαλύτερη διατμητική αντοχή, με ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος $V_s=400$ m/s και αριθμό κρούσεων της τυποποιημένης δοκιμής διεισδύσεως $N_{SPT} = 50$. Σημειώνεται ότι τα επιφανειακά αργιλικά στρώματα χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερως υψηλούς δείκτες

πλασιμότητας PI (Plasticity Index) που υπερβαίνουν κατά πολύ το 100% . Οι Vucetic & Dobry (1991), μετά από συστηματική μελέτη των αργιλικών αποθέσεων της πόλης του Μεξικού, απέδειξαν ότι τα αργιλικά υλικά με υψηλό δείκτη πλασιμότητας συμπεριφέρονται πρακτικώς ως γραμμικώς ελαστικά υλικά, για μεγάλο εύρος διατμητικών παραμορφώσεων. Το συμπέρασμα τους βοηθάει στην κατανόηση της μονοδιάστατης και δισδιάστατης σεισμικής απόκρισης της κοιλάδας.

Για την παρατήρηση της δυναμικής απόκρισης του εδάφους θεμελιωμένης κατασκευής αγνοείται η ύπαρξη της κατασκευής. Η εκτίμηση της σεισμικής δόνησης γίνεται στην κοιλάδα. Προκειμένου να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα, οι αναλύσεις σεισμικής απόκρισης πρέπει να επαληθεύονται με εγκεκριμένες καταγραφές, ώστε να είναι αποδεκτές οι παραδοχές ως προς τα γεωτεχνικά δεδομένα, ως προς την συμπεριφορά των διάφορων υλικών και ως προς τις βασικές υποθέσεις για το είδος των διεγερόντων σεισμικών κυμάτων.

Για την προσομοίωση της σεισμικής συμπεριφοράς της κοιλάδας ενδείκνυνται οι μέθοδοι ανάλυσης :

Μονοδιάστατη Προσομοίωση

Ως βασική αιτία της υποεκτίμησης της εδαφικής ενίσχυσης θεωρείται η έντονη ανελαστικότητα που αναπτύσσεται στις μονοδιάστατες αναλύσεις, με τις εξής συνέπειες:

- το μέτρο διατμήσεως G μειώνεται αρκετά, οδηγώντας σε αύξηση της ιδιοπεριόδου τού σχηματισμού πέρα από τις δεσπόζουσες περιόδους τής διέγερσης, και
- ο λόγος υστερητικής αποσβέσεως ξ αυξάνεται υπερβολικώς, φθάνοντας σε τιμές μεγαλύτερες τού 15%

Οι κοιλάδες που έχουν αργιλικά υλικά χαρακτηρίζονται από μεγάλο (έως τεράστιο) δείκτη πλασιμότητας PI, ο οποίος ξεπερνά κατά πολύ το 100%. Είναι γνωστό ότμι οι άργιλοι που παρουσιάζουν υψηλή πλασιμότητα παραμένουν γραμμικώς ελαστικές για μεγάλο εύρος παραμορφώσεων. Οι καμπύλες των Vucetic & Dobry (1991) αποδεικνύουν την οιονεί ελαστική συμπεριφορά τέτοιων αργίλων για διατμητικές παραμορφώσεις γ_c πρακτικώς μέχρι 0.002 (= 0.2%). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι, ακόμα και σε τόσο μεγάλες παραμορφώσεις, οι τιμές της απόσβεσης παραμένουν μικρότερες του

5%. Γενικά, η μονοδιάστατη θεωρία κρίνεται σχετικώς αδύναμη να προβλέψει την εδαφική ενίσχυση και συνεπώς, την σεισμική απόκριση.

Αναλυτική Διδιάστατη Προσομοίωση

Τα πολλαπλά τοπικά μέγιστα των φασμάτων αποκρίσεως προέρχονται από την διδιάστατη (ή και τριδιάστατη) γεωμετρία τής κοιλάδας. Τα κύρια φαινόμενα που σχετίζονται με την κυματική διάδοση και οφείλονται στην διδιάστατη και τρισδιάστατη γεωμετρία είναι τα εξής:

- η εστίαση των κυμάτων που τείνει να ενισχύσει την δόνηση κυρίως κοντά στο κέντρο τής κοιλάδας,
- η γένεση επιφανειακών κυμάτων (Rayleigh ή/και Love) στα άκρα τής κοιλάδας, που διαδίδονται κατά μήκος τής κοιλάδας με αργούς ρυθμούς απόσβεσης, παρατείνοντας συνεπώς την δόνηση, και
- η παγίδευση προσπιπτόντων (υπό διάφορες γωνίες) κυμάτων, γεγονός που επιδεινώνει την δόνηση στην περιοχή των άκρων της κοιλάδας.

Χαρακτηριστική εκτίμηση των γεωμορφικών χαρακτηριστικών της κοιλάδας στην επιφανειακή σεισμική δόνηση προέκυψε μέσω μίας προσεγγιστικής διδιάστατης ανάλυσης (Fan 1992) που βασίστηκε σε απλές γεωμετρικές λύσεις των Sanchez-Sesma et al (1988). Μία ποσοτικώς ακριβής ανάλυση της τριδιάστατης (ή ακόμη και της διδιάστατης) σεισμικής απόκρισης της κοιλάδας αποτελεί χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία, όπως διαπιστώνεται παρακάτω. Πράγματι, οι Sanchez-Sesma et al (1988) έλυσαν αναλυτικώς δύο σχετιζόμενα μεταξύ τους προβλήματα:

- την εκτός επιπέδου απόκριση διδιάστατου εδαφικού στρώματος επί κεκλιμένου άκαμπτου υποβάθρου που επιβάλλει την σεισμική διέγερση.
- την εκτός επιπέδου απόκριση διδιάστατης συμμετρικής τριγωνικής κοιλάδας με ομοιογενές εδαφικό υλικό που υπέρκειται άκαμπτου σεισμικού υποβάθρου.

Η λύση είναι ακριβής, όταν η γωνία του κεκλιμένου άκαμπτου υποβάθρου με την οριζόντιο ισούται με $\psi = 90^\circ$ (όπου $N = 1, 3, 5, \dots$). Για αυτές τις δύο γεωμετρίες, οι Sanchez-Sesma et al έδειξαν ότι υπάρχει ένα πλήρες σύνολο κυμάτων SH, τα οποία είναι συμβατά με τις συνοριακές συνθήκες. Ειδικά στην περίπτωση τής τριγωνικής κοιλάδας, τα κύματα παραμένουν κάθετα στην άκαμπτη βάση, δεν παρουσιάζεται περίθλαση στα άκρα, και η δόνηση σε κάθε σημείο τού εδαφικού σχηματισμού μπορεί

να εξαχθεί ως υπέρθεση των επιμέρους δονήσεων που επιβάλλει κάθε οικογένεια κυμάτων.

Κρίνοντας από τα αποτελέσματα αυτής τής εφαρμογής, διαπιστώνεται ότι η διδιάστατη φασματική ενίσχυση περιέχει πολύ περισσότερα τοπικά μέγιστα απ' ότι η αντίστοιχη μονοδιάστατη, γεγονός που αποτελεί ένδειξη των ανακλάσεων κυμάτων υπό γωνία που ξεκινούν (λόγω μετάδοσης και ανάκλασης) από το υπόβαθρο.

Σημειώνεται ότι ούτε αυτά τα ακρότατα παρουσιάζονται κατά την μονοδιάστατη ανάλυση. Ποσοτικώς πάντως, τα αποτελέσματα υποεκτιμούν ακόμη την καταγεγραφέα ενίσχυση. Αρκετά επιπρόσθετα φαινόμενα κυματικής διαδόσεως μπορούν να θεωρηθούν ως αίτια αυτής τής ασυμφωνίας. Για παράδειγμα:

- κύματα προερχόμενα από το ένα άκρο τής κοιλάδας ανακλώνται στο υπόβαθρο
- επιφανειακά κύματα Rayleigh που δημιουργούνται στα άκρα και διαδίδονται με μικρή εξασθένιση κατά μήκος τής επιφάνειας, ή/και
- κύματα που προέρχονται από άλλες διευθύνσεις λόγω τής τριδιάστατης γεωμετρίας τής κοιλάδας

Και φυσικά, τα φαινόμενα αυτά είναι ακόμα πιο περίπλοκα στην περίπτωση διεγέρσεως στο επίπεδο, όπου παρουσιάζονται P και SV κύματα.

Προσομοίωση με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

Η γένεση ενός δικτύου πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιείται με τη χρήση τού προεπεξεργαστή αυτόματης γενέσεως δικτύων NEGE (1992), με την χρήση του οποίου αντιμετωπίζονται επιτυχώς υλικές και γεωμετρικές ανωμαλίες. Το δίκτυο αποτελείται από εξι-κομβικά τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία, το μέγεθος των οποίων έχει προσαρμοστεί στο μικρότερο μήκος κύματος των διαδιδόμενων διατμητικών κυμάτων S που λαμβάνονται υπόψη. Η προσομοίωση συνήθως γίνεται με την χρήση τού εμπορικού κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS και η εισαγωγή της διέγερσης βασίζεται στην Τεχνική των Ενεργών Δυνάμεων. Με την τεχνική αυτή, το πρόβλημα της σεισμικής απόκρισης διδιάστατης κοιλάδας μετατρέπεται σε ένα ισοδύναμο, κατά το οποίο τα προσπίπτοντα κύματα τοποθετούνται στο εσωτερικό του πεδίου που αναλύεται με την μορφή χρονοϊστοριών δυνάμεων. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι το τεχνητό σύνορο της βάσης του προσομοιώματος χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την απορρόφηση της διαχέουσας ενέργειας του συστήματος (απόσβεση ακτινοβολίας), ενώ η σεισμική διέγερση εισάγεται κατευθείαν μέσα στην υπό εξέταση περιοχή. Επιπλέον, το τεχνητό σύνορο μπορεί να τοποθετηθεί τόσο πλησιέστερα στην υπό εξέταση περιοχή όσο η ακρίβεια τού τεχνητού συνόρου επιτρέπει. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την

διακριτοποίηση περιορισμένης ζώνης του υποκειμένου σεισμικού υποβάθρου, ελαχιστοποιώντας κατ' αυτό τον τρόπο σημαντικά το υπολογιστικό κόστος.

Στο ABAQUS η απόσβεση υλικού είναι τύπου Rayleigh, που σημαίνει ότι η απόσβεση είναι εξαρτώμενη από την συχνότητα. Καθώς, η πραγματική κατάσταση στα εδάφη είναι πολύ πιο πολύπλοκη (βλ. Assimaki 1999), η συμπεριφορά της κοιλάδας είναι μάλλον προσεγγιστική.

Προσομοίωση με την μέθοδο φασματικών στοιχείων

Το μέγεθος των φασματικών στοιχείων, όπως και στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, προσαρμόζεται στα αποδεκτά μήκη κύματος των διαδιδόμενων διατμητικών κυμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η οικονομικότητα της μεθόδου των φασματικών στοιχείων επιτρέπει την προσομοίωση μεγαλύτερης ζώνης υποβάθρου. Η απόσβεση υλικού διατηρείται, όπως και στο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων, στο 3%. Η δόνηση εφαρμόζεται ως προσπίπτον επίπεδο διατμητικό κύμα SV μέσω επιβολής της ίδιας επιτάχυνσης σε όλους τους επιλεγμένους κόμβους που ανήκουν σε μία προεπιλεγμένη οριζόντια γραμμή, και, όπως και στο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων, τεχνητά σύνορα έχουν τοποθετούνται στην βάση και στα εκατέρωθεν άκρα της κοιλάδας που εξετάζεται.

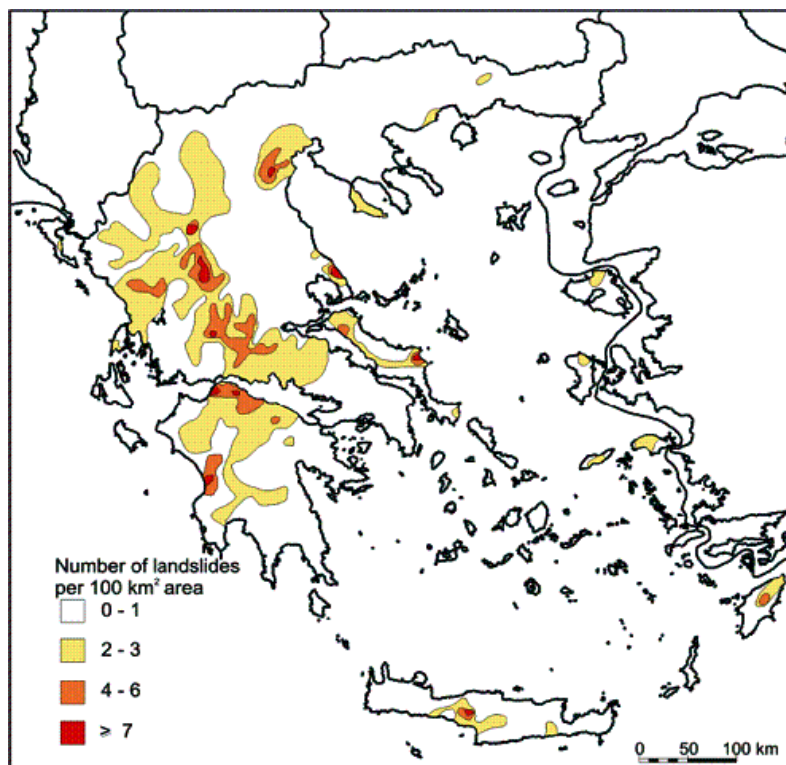
2.8 Γεωκίνδυνοι στον Ελλαδικό Χώρο

Στην διάρκεια της γεωλογικής ιστορίας, συνέβησαν πολλές και σημαντικές αλλαγές στον ελληνικό χώρο, οι οποίες οφείλονται σε συνεχείς και έντονες γεωτεκτονικές διεργασίες, γι' αυτό η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από την έντονη σεισμική της δραστηριότητα. Τα ιδιαίτερα γεωλογικά χαρακτηριστικά της, τα οποία έχουν διαμορφωθεί από τις κινήσεις των τεκτονικών πλακών στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου κατατάσσουν την χώρα στην έκτη θέση της παγκόσμιας κατάταξης και στην πρώτη της Ευρώπης.

2.8.1 Γεωμορφολογία Ελλάδας

Η Ελλάδα, ως χερσόνησος, περιβάλλεται από θάλασσα, ενώ στον ηπειρωτικό χώρο πλαισιώνεται από μεγάλο αριθμό νησιών. Τα νησιά της αποτελούν το πιο βασικό γνώρισμά της. Το μήκος των ακτών της Ελλάδας ανέρχεται στα 15.020 χιλιόμετρα. Η Ελλάδα βρέχεται από τη Μεσόγειο θάλασσα και γύρω της σχηματίζονται πελάγη. Το Ιόνιο πέλαγος βρίσκεται στα δυτικά της Ελλάδας, το Αιγαίο στην ανατολική λεκάνη της Μεσογείου, το Μυρτώο καταλαμβάνει το νοτιοδυτικό τμήμα του Αιγαίου ενώ το

Θρακικό το βορειοανατολικό τμήμα του Βορείου Αιγαίου και το Καρπάθιο το νοτιο-ανατολικό τμήμα του Νοτίου Αιγαίου, το Ικάριο βρίσκεται στα ανατολικά των Κυκλάδων, το Κρητικό στη Μεσόγειο γύρω από τη νήσο Κρήτη, και το Λιβυκό μεταξύ των νότιων ακτών της Κρήτης και των ακτών της βόρειας Αφρικής. Το έδαφος της χαρακτηρίζεται ορεινό και ημιορεινό σε ποσοστό μεγαλύτερο από 3/4. Τη χώρα διασχίζουν σε όλο το μήκος, ψηλά ή χαμηλά βουνά, που σταυρώνονται αναμεταξύ τους. Ανάμεσα στα βουνά σχηματίζονται αρκετές πεδιάδες, κοιλάδες και οροπέδια. Στη Δυτική Ελλάδα ξεχωρίζει η οροσειρά της Πίνδου, η οποία αποτελεί την συνέχεια των Δειναρικών Άλπεων. Το ψηλότερο βουνό της Ελλάδας είναι ο Όλυμπος, με ύψος 2.917 m. Η χώρα έχει ξηρό κλίμα εξαιτίας της έλλειψης βροχής, με αποτέλεσμα να μην σχηματίζονται μεγάλοι και, ταυτόχρονα, πλωτοί ποταμοί. Ο μεγαλύτερος πο-ταμός είναι ο Έβρος στα σύνορα Ελλάδας και Τουρκίας. Τέλος, το τοπίο της Ελλάδας συμπληρώνουν οι πολλές και εντυπωσιακές λίμνες, οι οποίες βρίσκονται κυρίως στις βόρειες περιοχές της χώρας με σχετικά μικρό βάθος.



Εικόνα 2.10: Κατανομή των κατολισθήσεων στην Ελλάδα

Πηγή: <http://ecodonet.uoi.gr>

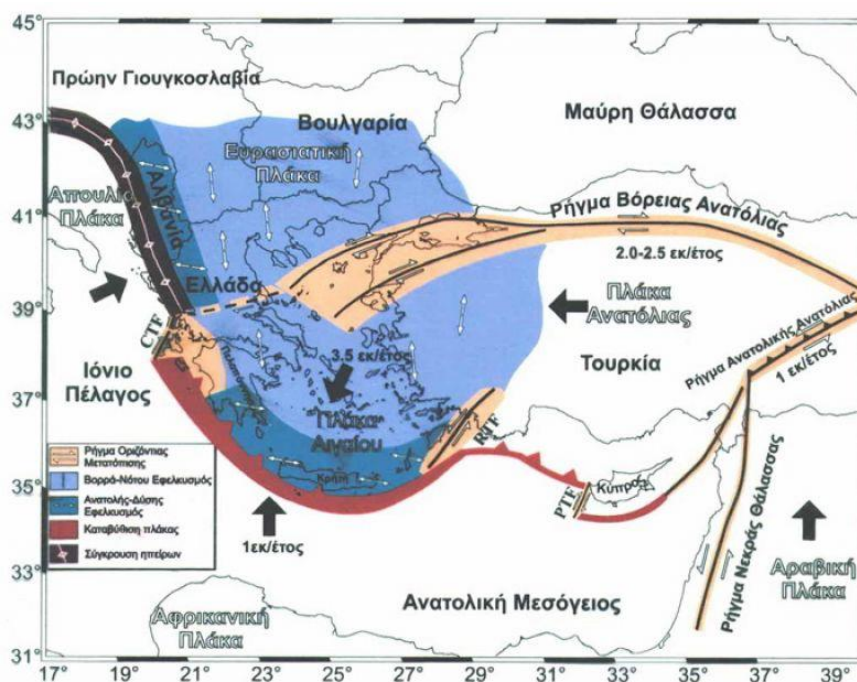
2.8.2 Γεωτεκτονικά δεδομένα της Ελλάδας

Οι γεωτεκτονικές ζώνες διακρίνονται από τα δυτικά προς τα ανατολικά σε εξωτερικές και εσωτερικές ζώνες ή ενότητες. Ο διαχωρισμός προκύπτει από την θέση των τόξων των ελληνικών οροσειρών και τις ορογενετικές φάσεις που έχουν υποστεί.

Στο γεωδυναμικό καθεστώς των λιθοσφαιρικών πλακών στο χώρο της ανατολικής Μεσογείου, κυριαρχεί η σύγκρουση της Αφρικανικής πλάκας με την Ευρασιατική κατά μήκος του ελληνικού και κυπριακού χώρου. Ο ελληνικός χώρος συμπεριλαμβάνεται στο τμήμα του νότιου ορογενετικού συστήματος της Τηθύος και του τμήματος που ορίζεται από τις Δειναρίδες οροσειρές για την εγκάρσια τεκτονική ζώνη Scutari-Pec (στην Αλβανία) στα βόρεια και στα ανατολικά από τις Ταυρίδες οροσειρές με την ακμή του ορογενετικού τόξου στην περιοχή Αντάλυα της Τουρκίας. Το ελληνικό τόξο αποτελεί τμήμα του αλπικού ορογενετικού συστήματος της Τηθύος, στο οποίο συνεχίζεται σήμερα η ορογένεση με συνέπεια την έντονη σεισμικότητα του ευρύτερου γεωγραφικού χώρου.

Η Τουρκία κινείται δυτικά προς το Αιγαίο με ταχύτητα 25 χιλιοστά τον χρόνο κατά μήκος του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας. Το Αιγαίο ακολουθεί την κίνηση αυτή και κινείται με την ίδια ταχύτητα σε σχέση με την Ευρώπη κατά μήκος της τάφρου του Βορείου Αιγαίου προς τα δυτικά. Ωστόσο, η κίνηση του επεκτείνεται προς τα νότια με μικρότερη ταχύτητα, περίπου 10 χιλιοστά τον χρόνο, λόγω της εσωτερικής παραμόρφωσης που υφίσταται. Ο ρυθμός ολίσθησης της πλάκας του Αιγαίου στο νότιο τμήμα φθάνει ως τα 35 χιλιοστά τον χρόνο με κατεύθυνση βορειοανατολικά και νοτιοδυτικά. Η Αφρική κινείται βόρεια προς το Αιγαίο με αντίστοιχη ταχύτητα 10 χιλιοστά ανά έτος. Η διαρκής επέκταση του Αιγαίου οφείλεται στον ρυθμό σύγκλισης της αφρικάνικης λιθοσφαιρικής πλάκας με την πλάκα του Αιγαίου στα 45 χιλιοστά ανά έτος.

Τέλος, στα δυτικά του ελληνικού χώρου, δηλαδή στην περιοχή βόρεια της Κεφαλονιάς, η Απουλία που είναι μικροπλάκα στο Βόρειο Ιόνιο και στην Αδριατική εκτελεί μια αριστερόστροφη κίνηση, με αποτέλεσμα το ανατολικό της όριο να συγκρούεται με την Πίνδο. Στην εικόνα 2.11 που ακολουθεί απεικονίζεται το γεωδυναμικό καθεστώς που επικρατεί στην Ανατολική Μεσόγειο.



Εικόνα 2.11: Τεκτονικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής της ανατολικής Μεσογείου όπου απεικονίζεται το γεωδυναμικό καθεστώς και τα αντίστοιχα διανύσματα κίνησης.

Πηγή: Πανεπιστήμιο Αιγαίου

2.8.3 Σεισμικότητα στην Ελλάδα

Όλες οι κινήσεις των τεκτονικών πλακών που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο αποτελούν την κύρια αιτία της σεισμικής δραστηριότητας που εκδηλώνεται στον ελληνικό χώρο, ιδιαίτερα στην περιοχή της Κεφαλονιάς. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάζεται η μεγαλύτερη σεισμικότητα στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου, ολόκληρης την Ελλάδα και κατ' επέκταση της Ευρώπης.

Το ελληνικό τόξο ξεκινώντας από την Κεφαλονιά, διασχίζει το νότιο Ιόνιο ανατολικά της Πελοποννήσου και περνώντας νότια της Κρήτης, καταλήγει στη Ρόδο. Το μέγεθος του σεισμού αγγίζει τα 7,5 βαθμούς Ρίχτερ. Το σημείο εκείνο αποτελεί το όριο επαφής και σύγκλισης της αφρικανικής με την ευρασιατική λιθοσφαιρική πλάκα, όπου η πρώτη βυθίζεται με ταχύτητα περίπου 4,5 εκατοστών τον χρόνο κάτω από τη δεύτερη. Η σύγκρουση των πλακών στο Νότιο Αιγαίο είναι η κύρια αιτία εκδήλωσης των περισσότερων σεισμών στην Ελλάδα.

Η μεγαλύτερη σεισμική δραστηριότητα παρουσιάζεται στο δυτικό τμήμα του ελληνικού τόξου, όπου σημειώνονται τακτικά ισχυρές δονήσεις στον θαλάσσιο χώρο νότια της Καλαμάτας και μεταξύ Λευκάδας - Πρέβεζας. Επίσης, στο δυτικότερο άκρο του ελληνικού τόξου, αποκαλείται το σεισμικό «τρίγωνο του διαβόλου». Στο σημείο αυτό εμφανίζονται

ιδιαίτερα τεκτονικά χαρακτηριστικά που τον κατατάσσουν στην πρώτη θέση της λίστας των περιοχών υψηλότερης σεισμικότητας στο Αιγαίο και στην Ευρώπη.

Επιπρόσθετα, η σεισμική δραστηριότητα διακρίνεται σε τρεις περιοχές κατά μήκος των ακτών της Δυτικής Ελλάδας από την Κέρκυρα ως τη Δυτική Κρήτη.

1. Η πρώτη περιοχή βρίσκεται βόρεια της Λευκάδας και η σεισμική δραστηριότητα εκεί οφείλεται σε συμπιεστικές δυνάμεις περίπου ανατολικής - δυτικής διεύθυνσης, δηλαδή κάθετες στη διεύθυνση των ακτών της Δυτικής Ελλάδας.
2. Η δεύτερη περιοχή βρίσκεται νότια της Κεφαλονιάς και αποτελεί το δυτικό τμήμα του ελληνικού τόξου. Η σεισμική δραστηριότητα οφείλεται στη σύγκλιση μεταξύ της αφρικανικής πλάκας και του Αιγαίου με αποτέλεσμα να καταδύεται η πρώτη κάτω από την δεύτερη. Αποτέλεσμα της κατάδυσης αυτής είναι η εκδήλωση σεισμικής δραστηριότητας σε εστιακά βάθη σεισμών μεγαλύτερα των 60 χιλιομέτρων κάτω από την Πελοπόννησο και ανατολικά αυτής περίπου ως τον χώρο των Κυκλάδων.
3. Η τρίτη περιοχή βρίσκεται μεταξύ των δύο προηγούμενων, στον ευρύτερο χώρο της Κεφαλονιάς, από τη Ζάκυνθο ως τη Λευκάδα. Η σεισμική δραστηριότητα εκδηλώνεται κατά μήκος ενός ρήγματος, το οποίο έχει διεύθυνση βορειοανατολική - νοτιοδυτική. Συγκεκριμένα, η οριζόντια κίνηση του χώρου νότια του ρήγματος, προς τα νοτιοδυτικά της Μεσογείου και του χώρου, βόρεια του ρήγματος, προς τα βορειοανατολικά της Πίνδου διαμορφώνουν την σεισμική δραστηριότητα στον χώρο. Η συνολική σχετική κίνηση κοντά στο ρήγμα αυτό είναι της τάξεως των 25 χιλιοστών ανά έτος.

Ο μεγάλος αριθμός μικρών και ενδιάμεσου μεγέθους σεισμών, καθώς και η μεγαλύτερη συχνότητα γένεσης ισχυρών, καταστρεπτικών σεισμών είναι χαρακτη-ριστικό της σεισμικής δραστηριότητας στη Δυτική Ελλάδα που οφείλεται στις τεκτονικές ιδιότητες της περιοχής. Παρά το γεγονός, ότι στον χώρο αυτό τα μεγέθη των μεγαλύτερων σεισμών είναι μικρότερα συγκριτικά με άλλες περιοχές του ελληνικού χώρου, ο σεισμικός κίνδυνος είναι σαφώς μεγαλύτερος εξαιτίας της συχνότητας γένεσης σεισμών που μπορούν να αποβούν καταστροφικοί. Επίσης, διαπιστώνεται ότι η γένεση του ισχυρού σεισμού στην Τουρκία επηρέασε σημαντικά τη σεισμικότητα όλου του ελληνικού χώρου. Σε διάφορες περιοχές μάλιστα, συμπερι-λαμβανομένης και της Δυτικής Ελλάδας, εκδηλώθηκε σεισμική δραστηριότητα αμέ-σως μετά την άφιξη των σεισμικών κυμάτων από την Τουρκία. Τέτοιες μεταβολές είναι γνωστές στο παρελθόν με βάση τόσο τις ενόργανες μετρήσεις όσο και τα ιστορικά δεδομένα. Τέλος, παρατηρείται ότι η σεισμική δραστηριότητα δεν εκδηλώνεται χρονικά πάντα με τον ίδιο τρόπο, αλλά διακρίνονται

περίοδοι ύφεσης και έξαρσής της. Οι παρατηρήσεις αυτές αλλά και τα συμπεράσματα μελετών που αφορούν στη μεσοπρόθεσμη πρόγνωση σεισμών με τη χρήση σύγχρονων μεθοδολογιών εξάγουν σημαντικά στοιχεία, συμβάλλοντας αποτελεσματικά στη μείωση του σεισμικού κινδύνου.

2.8.5 Ισχυρότεροι Σεισμοί στην Ελλάδα

Οι κυριότεροι σεισμοί που έχουν πλήξει την ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και του Λεκανοπεδίου από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα είναι οι εξής:

- **427 π.Χ.:** Ισχυρός σεισμός έγινε αισθητός στην Αθήνα, Εύβοια, Βοιωτία και μερικώς στον Ορχομενό. Κατά τις αναφορές του Θουκυδίδη, η πιθανή εστία ήταν η Αταλάντη.
- **426 π.Χ.:** Το καλοκαίρι του έτους αυτού, από ισχυρό σεισμό στην ευρεία περιοχή της Αταλάντης, μετατοπίστηκε η βορειο-ανατολική γωνία του Παρθε-νώνα.
- **420 π.Χ.:** Το καλοκαίρι του έτους αυτού, σεισμική δόνηση έγινε αισθητή στην Αθήνα.
- **3-9-1705:** Στην Αθήνα έγινε αισθητή σεισμική δόνηση που προερχόταν από την περιοχή ανάμεσα στον Ωρωπό και στις Πλαταιές, γύρω στα 30 χιλιόμετρα από την Αθήνα.
- **13-6-1785:** Σεισμική δόνηση με επίκεντρο τον Ωρωπό, 35 χιλιόμετρα βόρεια της Αθήνας.
- **17-9-1805 ή 17-11-1805:** Σεισμική δόνηση έγινε αισθητή τις νυχτερινές ώρες στην Αθήνα.
- **8-8-1853:** Στην Αθήνα έγινε αισθητός σεισμός, πιθανόν 6 Ρίχτερ.
- **17-1-1874:** Το πρωί έγινε σεισμική δόνηση που πιθανόν είχε επίκεντρο την Αθήνα.
- **24-2-1981:** Αισθητή ισχυρή σεισμική δόνηση 6,8 Ρίχτερ με επίκεντρο τις Αλκουνίδες, 77 χιλιόμετρα από την Αθήνα. Μετά 6 ώρες σημειώθηκε μετασεισμός 6,4 Ρίχτερ στα 60 χιλιόμετρα από την Αθήνα.
- **7-9-1999:** Αισθητή ισχυρή σεισμική δόνηση 5,9 Ρίχτερ με επίκεντρο την Πάρνηθα προκάλεσε τον θάνατο 140 περίπου ατόμων καθώς και πολλές καταρρεύσεις κτιρίων.

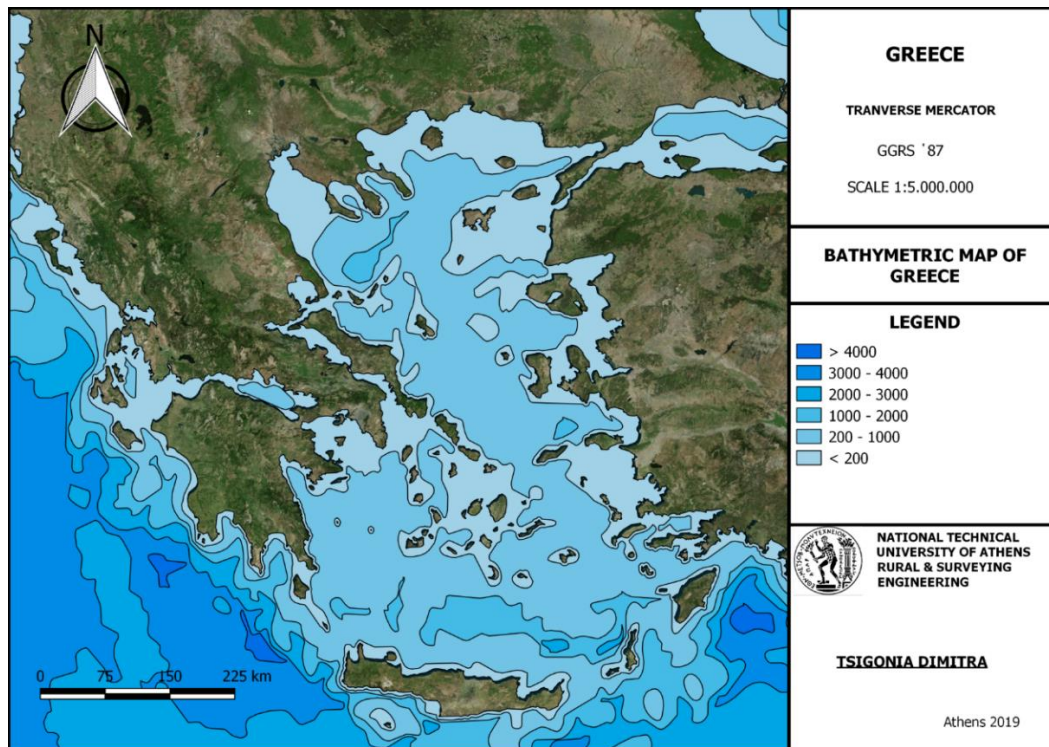
2.8.6 Χερσαία και Υποθαλάσσια Ρήγματα στην Ελλάδα

Η Αττική περικλείεται από τρία μεγάλα ρήγματα. Τα ενεργά ρήγματα στον χώρο της Αττικής έχουν:

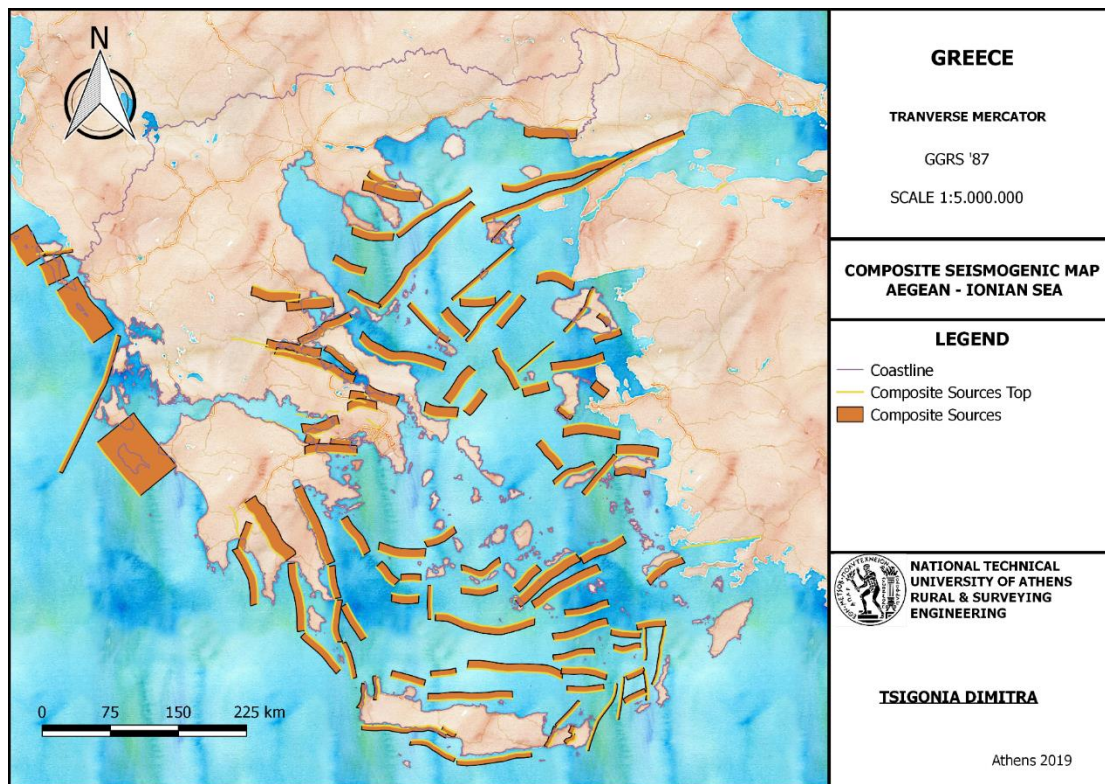
1. Γενική ανατολική – δυτική διεύθυνση
2. Επικρατούν μεγαλύτερα μεγέθη στην περιοχή του ανατολικού Κορινθιακού και δυτικού Σαρωνικού, με διεύθυνση περίπου ανατολική-δυτική
3. Επικρατούν μικρότερα μεγέθη στην περιοχή της βορειοανατολικής Αττικής προς τον Νότιο Ευβοϊκό κόλπο, με διεύθυνση περίπου βορειοδυτική - νοτιοανατολική.

Στο χώρο γύρω από το επίκεντρο του μεγάλου σεισμού του 1999, τα μεγαλύτερα ρήγματα είναι βόρεια του Θριάσιου Πεδίου, μήκους περίπου 15 χιλιομέτρων, το οποίο οροθετεί την Νοτιοδυτική Πάρνηθα, βόρεια της Πεντέλης στον Διόνυσο από την περιοχή της Δροσιάς έως την περιοχή της Ραφήνας μήκους περίπου 12 χιλιομέτρων και στα βόρεια της Πάρνηθας που διέρχεται από Αυλώνα - Μαλακάσα συνολικού μήκους περίπου 18 χιλιομέτρων.

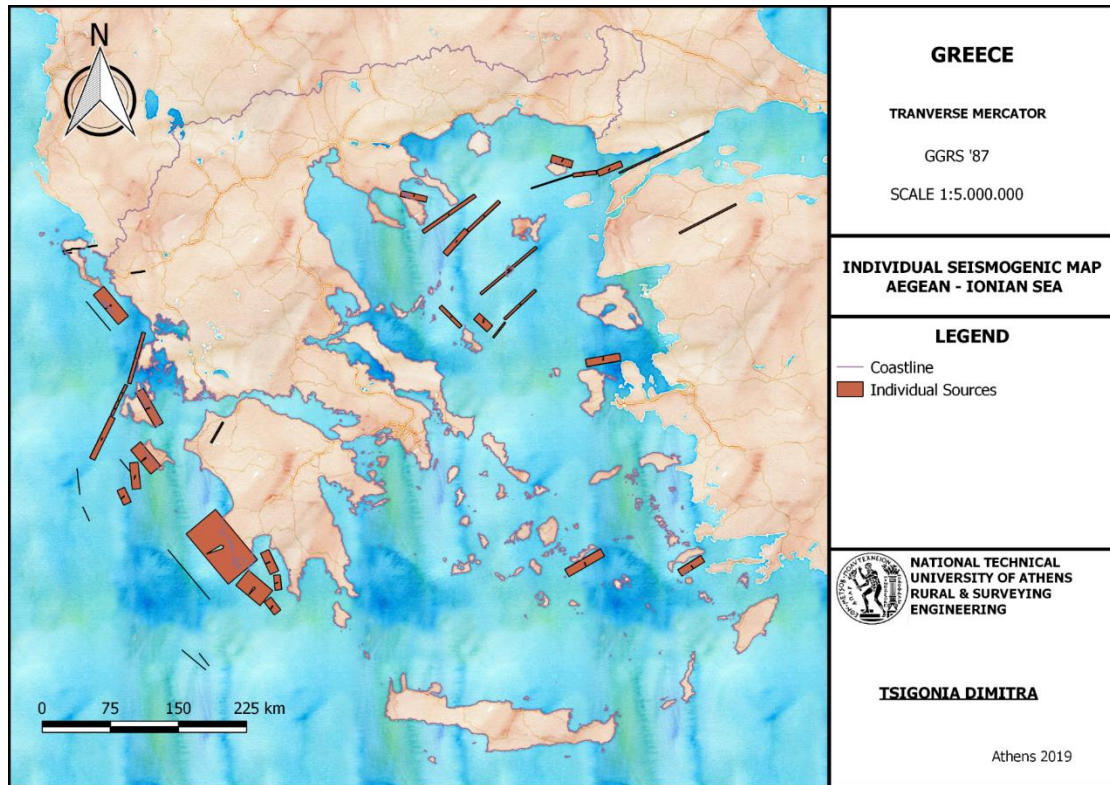
Η Ελλάδα χαρακτηρίζεται ως σεισμογενής χώρα. Οι περισσότεροι σεισμοί πραγματοποιούνται κάτω από το νερό. Οι γεωμορφολογία των ελληνικών υδάτων παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον λόγω των ρηγμάτων στον πυθμένα όσο και τα βαθυμετρικά χαρακτηριστικά των πελάγων. Προκειμένου να επεικονιστεί η γεωμορφολογία του πυθμένα δημιουργήσα χάρτες για σύνθετα και ανάστροφα ρήγματα και χάρτη βυθομετρίας στο Αιγαίο και Ιόνιο Πέλαγος. Η δημιουργία των χαρτών έγινε σε περιβάλλον G.I.S.. Η συλλογή των βάσεων δεδομένων για τα ρήγματα έγινε από τις μέχρι τώρα καταγραφές της ελληνικής βάσης σεισμικών δεδομένων. Η βάση δεδομένων για τα βυθομετρικά στοιχεία στηρίζεται στην παγκόσμια βάση δεδομένων της NASA για την βυθομετρία όλη της Γης. Τα αποτελέσματα του βυθομετρικού χάρτη συγκρίνονται με τον αντίστοιχο χάρτη του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών και θεωρούνται αποδεκτά.



Εικόνα 2.12: Βυθομετρικός Χάρτης Ελλάδας.



Εικόνα 2.13: Χάρτης σύνθετων ρηγμάτων στο Αιγαίο και στο Ιόνιο Πέλαγος



Εικόνα 2.14: Χάρτης απλών ρηγμάτων στο Αιγαίο και στο Ιόνιο Πέλαγος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Αγωγοί και Γεωκίνδυνοι

3.1 Εισαγωγή

Η επίδραση των τοπικών εδαφολογικών συνθηκών στη φύση από σεισμό έχει αναγνωριστεί εδώ και πολλά χρόνια. Από τη δεκαετία του 1920, η επιστήμη της γεωτεχνικής μηχανικής σεισμού ερευνά την ανάπτυξη ποσοτικών μεθόδων για την πρόβλεψη της επιρροής των τοπικών εδαφολογικών συνθηκών στην ισχυρή σεισμική δόνηση του εδάφους. Με την πάροδο των ετών, έχει αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός τεχνικών για την ανάλυση εδάφους.

3.2 Σεισμική Φόρτιση – Δυναμική Ανάλυση Εδάφους

Ένα από τα πιο συνηθισμένα και σημαντικότερα προβλήματα στη γεωτεχνική μηχανική σεισμών είναι η αξιολόγηση της απόκρισης εδάφους. Οι αναλύσεις απόκρισης εδάφους χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη κινήσεων της επιφάνειας του εδάφους, για την ανάπτυξη του φάσματος απόκρισης σχεδιασμού, για την αξιολόγηση δυναμικών καταπονήσεων και παραμορφώσεων, για την εκτίμηση των κινδύνων ρευστοποίησης και για τον προσδιορισμό των δυνάμεων που προκαλούνται από σεισμό και μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια των δομών των εδαφικών στρωμάτων.

Υπό ιδανικές συνθήκες, μια πλήρης ανάλυση απόκρισης εδάφους ενεργοποιεί τον μηχανισμό διάρρηξης στο σεισμικό επίκεντρο, με αποτέλεσμα τη διάδοση των κυμάτων σε μια συγκεκριμένη περιοχή, όπου καθορίζεται, κατά πόσο, επηρεάζεται η κίνηση της επιφάνειας του εδάφους. Στην πραγματικότητα, ο μηχανισμός της ρήξης σφάλματος είναι τόσο περίπλοκος και η φύση της μετάδοσης ενέργειας μεταξύ της πηγής και του τόπου είναι τόσο αβέβαιη ώστε αυτή η προσέγγιση δεν είναι πρακτική για κοινές εφαρμογές μηχανικής. Στην πράξη, οι εμπειρικές μέθοδοι που βασίζονται στα χαρακτηριστικά των καταγεγραμμένων σεισμών χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη σχέσεων πρόβλεψης. Αυτές οι σχέσεις πρόγνωσης χρησιμοποιούνται συχνά σε συνδυασμό με την ανάλυση σεισμικού κινδύνου για την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών κίνησης του πετρώματος στο χώρο.

Το πρόβλημα της ανάλυσης της επιφανειακής απόκρισης καθίσταται ένας προσδιορισμός της απόκρισης της απόθεσης του εδάφους στην κίνηση του υπόβαθρου. Παρά το γεγονός ότι τα σεισμικά κύματα μπορούν να περάσουν από δεκάδες χιλιόμετρα βράχου και συχνά, λιγότερο από 100 μέτρα εδάφους, το έδαφος παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της επιφάνειας του εδάφους. Συνήθως, οι τεχνικές ομαδοποιούνται ανάλογα με τη διαστασιολόγηση των προβλημάτων που

μπορούν να αντιμετωπίσουν, αν και πολλές από τις διδιάστατες και τρισδιάστατες τεχνικές είναι συνέχεια των αντίστοιχων μονοδιάστατων τεχνικών.

3.2.1 Διέγερση με την Τεχνική των Ενεργών Σεισμικών Δυνάμεων

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα ισχυρότατο εργαλείο προσομοίωσης, καθώς είναι ικανή να αντιμετωπίσει - με σχετική ευκολία - πολύπλοκες γεωμετρίες και την ανελαστική συμπεριφορά των εδαφικών υλικών. Παρόλα αυτά, κατά τις αναλύσεις σεισμικής απόκρισης τού εδάφους, προκύπτει ένα ιδιαίτερος σύνθετο πρόβλημα, το οποίο καθιστά την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων τουλάχιστον δύσχρηστη.

Αδύνατη θεωρείται η ταυτόχρονη επιβολή της σεισμικής διέγερσης ως προδιαγεγραμμένη χρονοϊστορία επιτάχυνσης, ταχύτητας ή μετατόπισης στην βάση του προσομοιώματος. Σύμφωνα με την πάγια πρακτική, απορροφητικά στοιχεία τοποθετούνται μόνο στα εκατέρωθεν κατακόρυφα τεχνητά σύνορα του προσομοιώματος και η σεισμική διέγερση επιβάλλεται στην πακτωμένη βάση του. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα πλασματικό «κιβώτιο» παγίδευσης των σεισμικών κυμάτων και της ενέργειας που αυτά ενέχουν.

Με στόχο την αντιμετώπιση του εν-λόγω προβλήματος, μία πρωτοποριακή τεχνική αναπτύχθηκε από τους Bielak & Christiano (1984) και εφαρμόσθηκε από τους Cremonini et al (1988) και Loukakis (1988). Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, που ουσιαστικά αποτελεί επίλυση προβλήματος αλληλεπίδρασης, το τεχνητό σύνορο της βάσης χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την απορρόφηση των σεισμικών κυμάτων.

Η σεισμική διέγερση περιγράφεται σε μία σχετικά μικρή περιοχή που περιβάλλει την ζώνη ενδιαφέροντος με την μορφή προδιαγεγραμμένων χρονοϊστοριών κομβικών δυνάμεων. Με αυτόν τον τρόπο, επιβάλλονται οι μετακινήσεις και οι παραμορφώσεις τού ομοιογενούς ημίχωρου σε μία διεπιφάνεια που διαχωρίζει την ζώνη ενδιαφέροντος από τον υπόλοιπο ημίχωρο. Όπως προαναφέρεται, το πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα αλληλεπίδρασης, όπου το ένα σώμα είναι ο υποκείμενος ημίχωρος και το δεύτερο είναι η περιοχή ενδιαφέροντος.

3.2.2 Απόσβεση υλικού

Δεδομένου ότι η απόσβεση υλικού απορροφά μέρος της ελαστικής ενέργειας ενός κύματος τάσης, η συγκεκριμένη ενέργεια (ελαστική ενέργεια ανά μονάδα όγκου) μειώνεται καθώς το κύμα μετακινείται μέσω ενός υλικού. Η μείωση της συγκεκριμένης ενέργειας αναγκάζει το εύρος του κύματος τάσης να μειωθεί με την απόσταση. Η συγκεκριμένη ενέργεια μπορεί επίσης να μειωθεί με έναν άλλο κοινό μηχανισμό, ο οποίος μπορεί να απεικονισθεί μέσω της διάδοσης των κυμάτων τάσης κατά μήκος μιας

αδιατάρακτης κωνικής ράβδου. Εάν η γωνία κορυφής είναι επαρκώς μικρή, η κανονική τάση θα είναι ομοιόμορφη σε κάθε μία από τις δύο σφαιρικές επιφάνειες που συνδέουν ένα στοιχείο πλάτους dr , και θα ενεργεί σε μία διεύθυνση σχεδόν παράλληλη με τον άξονα της ράβδου.

3.2.3 Συμπεριφορά Εδαφικών Στρωμάτων

Η απλούστερη δυνατή πραγματική κατάσταση, συγκεκριμένα, η μέγιστη δυνατή απλοποίηση της πραγματικότητας, είναι η παρουσία ενός ή περισσότερων οριζοντίων εδαφικών στρωμάτων τα οποία εκτείνονται θεωρητικώς στο άπειρο. Κατ' αυτήν την έννοια το πρόβλημα υποτίθεται ότι έχει μία μόνον διάσταση (αυτή του πάχους των εδαφικών στρωμάτων), και η ανάλυση καλείται μονοδιάστατη. Στην περίπτωση αυτή, η σεισμική συμπεριφορά των εδαφικών στρωμάτων οφείλεται αποκλειστικά στην κατακόρυφη διάδοση οριζοντίων διατρητικών κυμάτων από το υποκείμενο υπόβαθρο προς την επιφάνεια μέσω του εδάφους, και η φυσική ερμηνεία του φαινομένου της εδαφικής ενίσχυσης (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. Με άλλα λόγια, το κάθε εδαφικό στρώμα παίζει τον ρόλο ενός κυματικού φίλτρου, ενισχύοντας εκείνες τις αρμονικές συνιστώσες του προσπίπτοντος κυματισμού των οποίων η συχνότητα πλησιάζει τις δικές του ιδιοσυχνότητες. Στην ειδική περίπτωση όπου αυτές ταυτιστούν, παρατηρείται το φαινόμενο του συντονισμού με αποτέλεσμα η εδαφική ενίσχυση μεγιστοποιείται (Roesset & Whitman 1969, Seed & Idriss 1969).

Εξάγεται το συμπέρασμα ότι όταν η υπόθεση οριζόντιας στρωματογραφίας είναι αρκετά ρεαλιστική παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ μονοδιάστατων αναλύσεων και καταγραφών. Συχνά, με δεδομένες τις δυσχέρειες που παρουσιάζουν οι διδιάστατες και τριδιάστατες αναλύσεις σεισμικής απόκρισης, στις περιπτώσεις που οι εδαφικές και γεωμορφολογικές συνθήκες παρουσιάζουν χωρική ποικιλομορφία, εκτελούνται απλοποιώντας πολλαπλές μονοδιάστατες αναλύσεις (μία για κάθε θέση ενδιαφέροντος) χρησιμοποιώντας μία εδαφική στήλη που περιγράφει τις συνθήκες στην συγκεκριμένη θέση. Η υπόθεση αυτή, αν και χονδροειδής, αποτελεί πάγια τακτική που εφαρμόζεται ως η απλούστερη δυνατή λύση. Βέβαια σε περιπτώσεις κατά τις οποίες παρουσιάζονται έντονες γεωμορφικές ιδιαιτερότητες, αλλά και τοπογραφικές διακυμάνσεις, η μονοδιάσταση θεώρηση αδυνατεί να ερμηνεύσει τις καταγραφές και να προβλέψει την αναμενόμενη σεισμική συμπεριφορά. Τότε απαιτείται πολυδιάστατη υπόθεση ικανή να λάβει υπόψη τα ιδιαίτερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της υπό εξέταση περιοχής.

Καταγραφές και αναλύσεις έχουν δείξει ότι τα μαλακά εδάφη όταν υπόκεινται σε έντονη δυναμική φόρτιση παρουσιάζουν μη-γραμμική ανελαστική συμπεριφορά, η οποία εκδηλώνεται μέσω μείωσης του μέτρου διατμήσεως και ταυτόχρονης αύξησης της υστερητικής απόσβεσης αυξανόμενης της διατμητικής παραμόρφωσης. Η επίδραση της εδαφικής επιτάχυνσης είναι έμμεση, καθώς μεγάλες τιμές της επιτάχυνσης οδηγούν σε μη-γραμμική συμπεριφορά του υλικού (με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται και η ταχύτητα διαδόσεως των διατμητικών κυμάτων και η υστερητική απόσβεση). Παρατηρείται όμως, ότι η έντονη μη-γραμμική συμπεριφορά συνήθως τείνει να μετριάσει την δυσμενή επίδραση της αντίστοιχης γραμμικώς ελαστικής εδαφικής ενίσχυσης, και για τον λόγο αυτό τα φαινόμενα εδαφικής ενισχύσεως είναι σχετικά εντονότερα σε μακρινούς σεισμούς και ασθενείς δονήσεις.

3.2.4 Σφάλμα απόκρισης εδάφους

Όταν ένα σφάλμα καταρρέει κάτω από την επιφάνεια της γης, τα κύματα του σώματος απομακρύνονται από την πηγή προς όλες τις κατευθύνσεις. Καθώς φτάνουν στα όρια μεταξύ διαφορετικών γεωλογικών υλικών, αντανακλώνται και διαθλούνται. Οι μονοδιάστατες αναλύσεις απόκρισης εδάφους βασίζονται στην υπόθεση ότι όλα τα όρια είναι οριζόντια και ότι η απόκριση μιας εναπόθεσης εδάφους προκαλείται κυρίως από τα SH-κύματα που πολλαπλασιάζονται κάθετα από το υποκείμενο υπόστρωμα. Για την ανάλυση μονοδιάστατης απόκρισης εδάφους, θεωρείται ότι η επιφάνεια του εδάφους και του υποστρώματος εκτείνεται απεριόριστα στην οριζόντια κατεύθυνση.

Θεωρείται απαραίτητο να αποσαφηνιστούν κάποιες έννοιες σχετικά με τα μοντέλα απόκρισης εδάφους, που χρησιμοποιούνται συνήθως για να περιγράψουν τις κινήσεις εδάφους. Η κίνηση στην επιφάνεια μιας εναπόθεσης εδάφους είναι η κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας. Η κίνηση στη βάση της κατάθεσης του εδάφους (και η κορυφή του βράχου) ονομάζεται κίνηση πετρώματος. Η κίνηση σε μια θέση όπου το υπόστρωμα εκτίθεται στην επιφάνεια του εδάφους ονομάζεται κίνηση βράχου προς τα έξω. Αν η απόθεση του εδάφους δεν ήταν εμφανής, η κίνηση στην κορυφή του βράχου θα ήταν η κίνηση της εκσκαφής του βράχου.

3.2.5 Γραμμική προσέγγιση

Μια σημαντική κατηγορία τεχνικών για την ανάλυση απόκρισης εδάφους βασίζεται επίσης στη χρήση λειτουργιών μεταφοράς. Για το πρόβλημα της απόκρισης στο έδαφος, οι λειτουργίες μεταφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκφράσουν διάφορες

παραμέτρους απόκρισης, όπως μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση, διατμητική τάση και παραμόρφωση, σε μια παράμετρο κίνησης εισόδου, όπως η επιτάχυνση του πετρώματος. Αυτή η προσέγγιση περιορίζεται στην ανάλυση γραμμικών συστημάτων. Αν και ο υπολογισμός περιλαμβάνει χειρισμό σύνθετων αριθμών, η ίδια η προσέγγιση είναι αρκετά απλή. Ένα γνωστό χρονικό ιστορικό της κίνησης βάθους (input) παρουσιάζεται ως σειρά Fourier, συνήθως χρησιμοποιώντας το FFT. Κάθε όρος στη σειρά Fourier της κίνησης bedrock (input) στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με τη συνάρτηση μεταφοράς για την παραγωγή της σειράς Fourier της κίνησης της επιφάνειας εδάφους (εξόδου). Η κίνηση της επιφάνειας εδάφους (έξοδος) μπορεί τότε να εκφραστεί στο πεδίο χρόνου χρησιμοποιώντας την αντίστροφη FFT. Έτσι, η συνάρτηση μεταφοράς καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο κάθε συχνότητα στην κίνηση του πετρώματος (εισροής) ενισχύεται ή εξουδετερώνεται από την εναπόθεση χώματος.

3.2.6 Fourier

Ο μετασχηματισμός Fourier (FT) αναλύει μια συνάρτηση του χρόνου ενός σήματος, στις συνιστώσες της συχνότητας. Ο όρος μετασχηματισμός Fourier αναφέρεται τόσο στην αναπαράσταση περιοχών συχνότητας όσο και στη μαθηματική λειτουργία που συνδυάζει την αναπαράσταση περιοχών συχνοτήτων με μια συνάρτηση του χρόνου. Ο μετασχηματισμός Fourier μιας συνάρτησης του χρόνου είναι ο ίδιος μια πολύπλοκη συνάρτηση της συχνότητας, του οποίου το μέγεθος (συντελεστής) αντιπροσωπεύει την ποσότητα αυτής της συχνότητας που υπάρχει στην αρχική συνάρτηση και του οποίου το επιχείρημα είναι η μετατόπιση φάσης του βασικού ημιτονοειδούς σε αυτή τη συχνότητα. Ο μετασχηματισμός Fourier δεν περιορίζεται στις λειτουργίες του χρόνου, αντιθέτως ο τομέας της αρχικής λειτουργίας αναφέρεται συνήθως ως πεδίο χρόνου.

Οι γραμμικές λειτουργίες που εκτελούνται σε έναν τομέα (χρόνος ή συχνότητα) έχουν αντίστοιχες λειτουργίες στον άλλο τομέα, οι οποίες μερικές φορές είναι ευκολότερες στην εκτέλεση. Η λειτουργία της διαφοροποίησης στο πεδίο χρόνου αντιστοιχεί σε πολλαπλασιασμό με τη συχνότητα, ώστε μερικές διαφορικές εξισώσεις να είναι ευκολότερο να αναλυθούν στον τομέα συχνοτήτων. Επίσης, η συνέλιξη στον τομέα του χρόνου αντιστοιχεί σε κανονικό πολλαπλασιασμό στον τομέα συχνοτήτων.

Λειτουργίες που εντοπίζονται στον τομέα του χρόνου έχουν μετασχηματισμούς Fourier που απλώνονται σε όλο το πεδίο συχνοτήτων και αντίστροφα, ένα φαινόμενο που είναι γνωστό ως αρχή αβεβαιότητας.

3.2.7 Αξιολόγηση των λειτουργιών μεταφοράς κύματος

Το κλειδί της γραμμικής προσέγγισης είναι η αξιολόγηση των λειτουργιών μεταφοράς. Παρακάτω, οι λειτουργίες μεταφοράς εξάγονται για μια σειρά διαδοχικά πιο περίπλοκων γεωτεχνικών συνθηκών. Αν και το απλούστερο από αυτά μπορεί σπάνια να εφαρμοστεί σε πραγματικά προβλήματα, απεικονίζουν μερικές από τις σημαντικές επιδράσεις των εναποθέσεων του εδάφους στα χαρακτηριστικά εδάφους χωρίς αδικαιολόγητη μαθηματική πολυπλοκότητα. Τα πιο σύνθετα είναι σε θέση να περιγράψουν τις πιο σημαντικές πτυχές της απόκρισης εδάφους και χρησιμοποιούνται πολύ συχνά στην πρακτική γεωτεχνικής μηχανικής σεισμού.

Ομοιόμορφο εδαφικό υπόστρωμα σε άκαμπτο βράχο.

Αρχικά, θεωρείται ένα ομοιόμορφο στρώμα ιστροπικού, γραμμικού ελαστικού εδάφους που επικαλύπτει άκαμπτο υπόστρωμα. Η αρμονική οριζόντια κίνηση του πετρώματος παράγει κατακόρυφα πολλαπλασιαστικά κύματα διάτμησης στο έδαφος. Το σταθερό κύμα παράγεται από την εποικοδομητική παρεμβολή των κυμάτων προς τα πάνω και προς τα κάτω και έχει σταθερό σχήμα σε σχέση με το βάθος. Η εξίσωση του μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ορισμό μιας συνάρτησης μεταφοράς που περιγράφει το λόγο των πλάτους μετατόπισης σε οποιαδήποτε δύο σημεία του στρώματος εδάφους. Επιλέγοντας αυτά τα δύο σημεία για να είναι το πάνω και κάτω μέρος του εδάφους δίνει τη λειτουργία μεταφοράς.

Στρώμα από στρώσεις με ελαστικό βράχο.

Ενώ τα ομοιόμορφα μοντέλα ελαστικής στρώσης είναι χρήσιμα για την απεικόνιση της επίδρασης των συνθηκών εδάφους σε διάφορα χαρακτηριστικά εδάφους, είναι σπάνια κατάλληλα για ανάλυση των πρακτικών προβλημάτων γήινας απόκρισης. Τα πραγματικά προβλήματα απόκρισης εδάφους συνήθως περιλαμβάνουν εναποθέσεις εδάφους με στρώματα διαφορετικών χαρακτηριστικών δυσκαμψίας και απόσβεσης με όρια στα οποία η ελαστική ενέργεια κυμάτων θα ανακλαστεί ή θα μεταδοθεί. Τέτοιες συνθήκες απαιτούν την ανάπτυξη λειτουργιών μεταφοράς για εναποθέσεις στρωμάτων εδάφους. Η λύση στην εξίσωση κύματος μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή

Ομοιόμορφο, εξασθενημένο έδαφος σε άκαμπτο βράχο.

Ο τύπος της απεριόριστης ενίσχυσης που προβλέπεται από την προηγούμενη ανάλυση δεν μπορεί φυσικά να συμβεί. Στην προηγούμενη περίπτωση δεν υπολογίζεται καμία διάχυση ενέργειας ή απόσβεση στο έδαφος. Δεδομένου ότι η απόσβεση υπάρχει σε όλα τα υλικά, μπορούν να επιτευχθούν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα επαναλαμβάνοντας την ανάλυση με απόσβεση.

3.3 Μόνιμες Εδαφικές Παραμορφώσεις

3.3.1 Οριακές Συνθήκες Αγωγών και Κριτήρια Αστοχίας

Οι κύριες οριακές συνθήκες και τα κριτήρια αστοχίας, σε συνεχείς αγωγούς, που είναι τοποθετημένοι από 1 έως 3 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και δεν έχουν υποστεί διάβρωση, είναι ο εφελκυσμός και η κάμψη του αγωγού. Εξαιτίας της επικινδυνότητας της μονότονης φόρτισης, δηλαδή του κίνδυνου Μόνιμης Παραμόρφωσης Εδάφους (Permanent Ground Deformation), καθορίζονται διαφορετικά κριτήρια οριακών συνθήκων από εκείνα του κυκλικού φορτίου, δηλαδή του κινδύνου Διάδοσης Κύματος (Wave Propagation). Ομοίως, συνιστώνται διαφορετικά κριτήρια οριακής κατάστασης για το σωλήνα με συγκολλήσεις στα άκρα (υψηλότερη χωρητικότητα) από ότι για το σωλήνα τμηματικής συγκόλλησης (χαμηλότερη χωρητικότητα). Επιπλέον, οι οριακές καταστάσεις για τους υπόγειους χαλύβδινους σωλήνες συχνά, λαμβάνουν υπόψιν την συμπεριφορά του αγωγού μετά την απόδοση. Συνεπώς, απαιτείται πλήρης περιγραφή της συμπεριφοράς της καταπόνησης του αγωγού. Το μοντέλο Ramberg-Osgood (1943) είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^r \right]$$

όπου ε είναι η μηχανική παραμόρφωση, σ είναι η μονοαξονική τάση εφελκυσμού, το E είναι το αρχικό μέτρο ελαστικότητας του Young, σ_y είναι η εμφανή τάση απόδοσης, n και r είναι οι παράμετροι Ramberg-Osgood.

Σύμφωνα με το API 5L για τους σωλήνες, η ελάχιστη επιμήκυνση του χαλύβδινου σωλήνα κυμαίνεται από 12% έως 18%. Σημειώνεται ότι, όσο υψηλότερης ποιότητας χάλυβας χρησιμοποιείται, τόσο χαμηλότερη είναι η απαιτούμενη ελάχιστη επιμήκυνση. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται όσο προαναφέρονται.

Πίνακας 3.1: Τάση απόδοσης και παράμετροι Ramberg-Osgood για ελαφρύ χάλυβα και Χ-χάλυβα, μαζί με την ελάχιστη επιμήκυνση που απαιτείται από το API 5L (δείγμα δοκιμής μικρής διατομής)

Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

	Grade-B	X-42	X-52	X-60	X-70	X-80
Yield Stress (MPa)	241	290	359	414	483	552
Minimum Elongation	18%	18%	16%	15%	13%	12%
<i>n</i>	10	15	9	10	5.5	16
<i>r</i>	100	32	10	12	16.6	16

3.4 Συνεχής Αγωγή με Συγκολλήσεις στα Άκρα

Οι κύριοι λόγοι αστοχίας για συνεχείς υπόγειους αγωγούς, χωρίς να έχουν υποστεί διάβρωση, είναι η εφελκυστική τάση και η τοπική κάμψη. Οι αστοχίες εξετάζονται σε αγωγούς τοποθετημένους κάτω από το έδαφος περίπου 1 μέτρο ή περισσότερο. Οι χερσαίοι και οι υποθαλάσσιοι αγωγοί με βάθος ταφής μικρότερο από περίπου 1 μέτρο, δηλαδή, ρηχές εγκαταστάσεις τάφρων, καθώς και αγωγοί που τοποθετούνται απευθείας στον πυθμένα της θάλασσας, μπορεί να παρουσιάσουν μεγάλη κάμψη.

Κατάρρευση των σωλήνων έχει επίσης συμβεί κατά τη διάρκεια μετασεισμικής εκσκαφής προκειμένου να ελεγχθεί η θλιπτική τάση του σωλήνα.

Εφελκυστική Ρήξη – Κίνδυνος Παραμόρφωσης Εδάφους

Στην περίπτωση εφελκυσμού, ο σωλήνας από χάλυβα με συγκολλήσεις στις αρθρώσεις, χωρίς να έχει υποστεί διάβρωση, είναι πολύ εύπλαστος και ανεκτικός σε αντοχή πριν την ρήξη. Από την άλλη πλευρά, οι παλαιότεροι χαλυβδοσωλήνες με αρμούς συγκολλημένους με αέριο, συχνά, διαρρηγνύονται με πολύ χαμηλότερα επίπεδα καταπόνησης. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί ότι οι σωλήνες με αρμούς ολίσθησης, που έχουν συγκολληθεί με αέριο, έχουν υποστεί ρήξη με εφελκυσμό όταν υποβάλλονται στον ίδιο Κίνδυνο Παραμόρφωσης Εδάφους (PGD). Όταν οι σωλήνες συγκολλούνται στο πεδίο, το υλικό συγκόλλησης είναι τυπικά ισχυρότερο, αλλά λιγότερο όλκιμο από το αρχικό υλικό και πολύ μακριά από τη συγκόλληση.

Οι Newmark και Hall (1975) πρότειναν το 4% ως τη τελική τάση παραμόρφωσης για σχεδιαστικούς σκοπούς. Οι κατευθυντήριες γραμμές της ASCE για τον σεισμικό σχεδιασμό των συστημάτων αγωγών πετρελαίου και αερίου (1984) επιτρέπουν διαμήκεις παραμορφώσεις στην περιοχή 3 - 5%. Σε σχέση με ένα σχέδιο εκτίμησης κινδύνου αγωγού φυσικού αερίου, οι Wijewickreme et al. (2005) χρησιμοποιούν 3% και 10%,

αντίστοιχα, με τα στελέχη του σωλήνα να αντιστοιχούν σε 10% και 90% πιθανότητα ρήξης σε εφελκυσμό. Σημειώστε ότι αυτά τα προτεινόμενα όρια εφελκυσμού δίδονται από την άποψη της τάσης των σωλήνων. Δεδομένου ότι τα όρια αυτά είναι πολύ υψηλότερα από την απόδοση, οι μικρές μεταβολές της τάσης συνδέονται με μεγάλες μεταβολές της τάσης, ιδιαίτερα για τον χάλυβα με μεγάλη παράμετρο Ramberg-Osgood r .

Για αγωγούς στους οποίους ο στόχος επιδόσεων είναι η διατήρηση της ακεραιότητας πίεσης (οραματίζεται ένας σωλήνας που δεν διαρρέει αλλά μπορεί να πρέπει να αντικατασταθεί μετά το συμβάν σχεδιασμού), το όριο εφελκυστικής τάσης είναι 4% στην κατευθυντήρια γραμμή ALA και 2 έως 4% PRCI κατευθυντήρια γραμμή. Αν ο στόχος επιδόσεων είναι κανονική λειτουργικότητα (αναμένεται λειτουργικότητα του σωλήνα μετά την εκδήλωση), το όριο ALA είναι 2% ενώ το όριο PRCI είναι 1 έως 2%. Για συνθήκες ελεγχόμενου φορτίου (κίνδυνοι εκτός από παροδική τάση εδάφους και PGD), το προτεινόμενο όριο έντασης τάσης στην κατευθυντήρια γραμμή PRCI είναι 0,5%. Τα προτεινόμενα όρια εφελκυστικής παραμόρφωσης για τον σύγχρονο χαλυβδοσωλήνα που έχει συγκολληθεί στην ξηρά, συνοψίζονται στον Πίνακα 3.2.

Για τους υπεράκτιους αγωγούς, το καναδικό πρότυπο (CSA 2003) προτείνει ένα όριο εφελκυστικής τάσης 2,5%. Στο νορβηγικό πρότυπο (DNV, 2000) το συνηθισμένο όριο είναι 2%. Εντούτοις, επιτρέπεται μια τάση έως και 4% εάν πιστοποιηθεί με δοκιμές εφελκυσμού και με τη δοκιμή Charpy V-notch. Επιπλέον, στο νορβηγικό πρότυπο, το όριο στέλεχος 2% προτείνεται για τον κανονικό στόχο επιδόσεων λειτουργικότητας. Αυτό το όριο βασίζεται, εν μέρει, στο διαβρωτικό υπεράκτιο περιβάλλον και στις δυσκολίες απλώς στην πρόσβαση στον αγωγό. Είναι ενδιαφέρον ότι, αν και η τελική τάση (μέγιστη επιμήκυνση) για τους τύπους χάλυβα που παρατίθενται στον πίνακα 4.1 είναι διαφορετική, οι συνιστώμενες επιτρεπτές εφελκυστικές παραμορφώσεις τόσο για χερσαίες όσο και για υπεράκτιους αγωγούς δεν είναι λειτουργίες χάλυβα ούτε αντοχή συγκόλλησης.

Πίνακας 3.2: Συνιστώμενη μέγιστη τάση εφελκυσμού για PGD – Χερσαίος αγωγός με συγκολλήσεις καλής ποιότητας στα άκρα

Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

Newmark & Hall (1975)	1984 ASCE Guideline	2001 ALA Steel Pipe Guideline	2004 PRCI Guideline	Wijewickreme et al. (2005)
4%	3 to 5%	4% – (pressure integrity goal) 2% – (normal operability goal)	2 – 4% (pressure integrity goal) 1 – 2 % (normal operability goal)	3% (10% probability of tensile rupture) 10% (90 % probability of tensile rupture)

Τοπική κάμψη– Κίνδυνος Παραμόρφωσης Εδάφους

Ο όρος κάμψη σχετίζεται με μια κατάσταση δομικής αστάθειας, στην οποία ένα στοιχείο θλιπτικά φορτισμένο βιώνει ξαφνική αλλαγή από σταθερή σε ασταθή κατάσταση. Η τοπική κάμψη τυπικά περιλαμβάνει εμπρόσθια παραμόρφωση του τοιχώματος του σωλήνα δίπλα στην προς τα έξω διόγκωση για χαμηλές έως μέτριες εσωτερικές πιέσεις. Στην περίπτωση υψηλής εσωτερικής πίεσης, η εξωτερική διόγκωση είναι πιο συνηθισμένη. Η τοπική κάμψη του σωλήνα συνήθως δεν οδηγεί σε διαρροή ή απώλεια του ορίου πίεσης. Ωστόσο, όλες οι περαιτέρω γεωμετρικές παραμορφώσεις που προκαλούνται από παραμόρφωση εδάφους ή τη διάδοση του κύματος τείνουν να συγκεντρωθούν στο σημείο παραμόρφωσης. Ωστόσο, όταν προκύπτουν μεγάλες καμπύλες στο τοίχωμα του σωλήνα υπάρχει πιθανότητα να δημιουργηθεί διαρροή. Αναμφισβήτητα, το γεγονός αυτό είναι η πιθανότερη περίπτωση αστοχίας για σωλήνες από χάλυβα από ρήξη εφελκυσμού. Κατασκευαστικά, αυτό σημαίνει ότι, ο σωλήνας μπορεί να έχει κολλήσει πρώτα κάτω από την αξονική συμπίεση αλλά στη συνέχεια να σπάσει από κάτω λόγω της αξονικής τάσης.

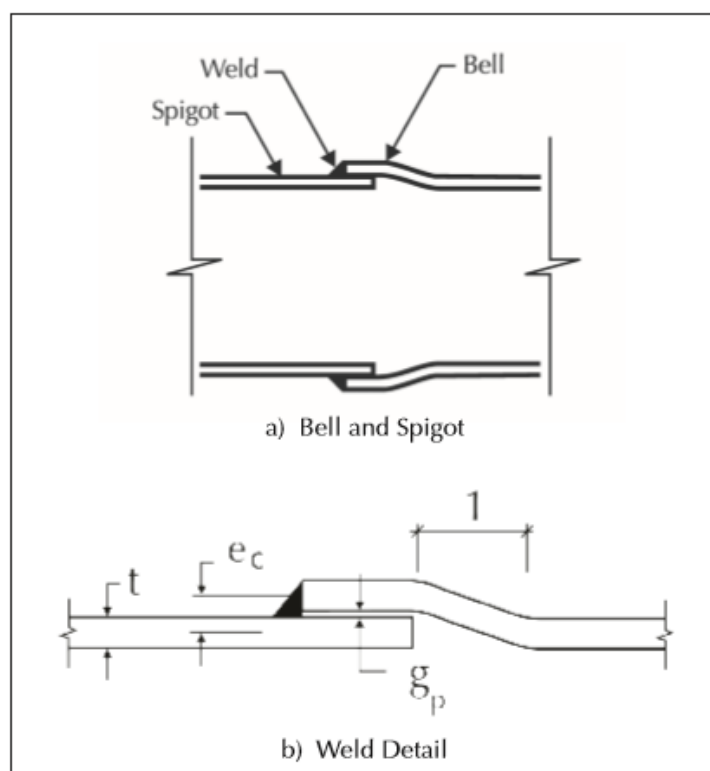


Εικόνα 3.1: Ρήξη τοιχώματος σωλήνα με αγωγό υγρού καυσίμου (Limon, Costa Rica, 1991)

Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

3.5 Συνεχής Αγωγός με Συγκολλημένες Ενώσεις Ολίσθησης

Το κριτήριο αστοχίας για αγωγούς από χάλυβα με αρθρώσεις συγκόλλησης βασίζεται στην αντοχή του υλικού των σωληνώσεων, εφόσον οι αρθρώσεις είναι ισχυρότερες από το βασικό υλικό μακριά από την άρθρωση. Αντίθετα, οι σωλήνες από χάλυβα με συγκολλημένες ενώσεις ολίσθησης (WSJ) εξετάζονται με διαφορετικά κριτήρια αστοχίας. Συγκεκριμένα, λόγω της εκκεντρότητας και της τμηματικής συγκόλλησης, η χωρητικότητα φορτίου των WSJ είναι μικρότερη από εκείνη του βασικού υλικού μακριά από τον σύνδεσμο, ιδιαίτερα για ένα WSJ που υπόκειται σε διαμήκη συμπίεση. Συνεπώς, οι αγωγοί με WSJs είναι επιρρεπείς σε αστοχία κατά τη διάρκεια σεισμών.



Εικόνα 3.2: WSJ με εξωτερική επένδυση

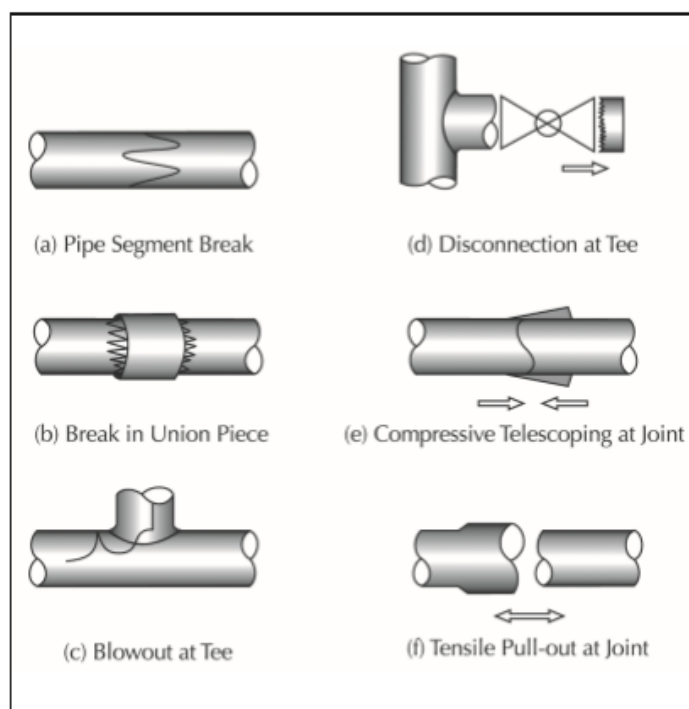
Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

3.6 Σπονδυλωτός Αγωγός (Segmented Pipeline)

Για τους σπονδυλωτούς αγωγούς, ιδιαίτερα εκείνους με μεγάλες διαμέτρους και μεγάλο τοίχωμα, παρατηρείται σεισμική αστοχία συνήθως λόγω πίεσης στις αρθρώσεις του σωλήνα. Μερικές φορές, η αξονική ανύψωση σε συνδυασμό με τη σχετική γωνιακή περιστροφή στις αρθρώσεις προκαλεί αστοχία σε περιοχές με έντονη παραμόρφωση του εδάφους. Η περιστροφή των αρθρώσεων είναι μια επιπλέον συνθήκη αστοχίας σε

περιοχές ελαστικής παραμόρφωσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αντοχή διατμήσεως των υλικών συνδέσεως ή η δύναμη τριβής λόγω συμπίεσης του ελαστικού υλικού είναι πολύ μικρότερη από την αντοχή εφελκυσμού του σωλήνα. Με λίγα λόγια, η κατακερματισμένη άρθρωση είναι ο αδύναμος κρίκος.

Οι Μ.Ο'Rourke και Ballantyne (1992) παρατήρησαν τις παραπάνω μορφές βλάβης στους σπονδυλωτούς αγωγούς κατά τη διάρκεια του σεισμού στην Κόστα Ρίκα (1991).



Εικόνα 3.3: Μηχανισμοί βλάβης στους σπονδυλωτούς αγωγούς

Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

3.7 Αλληλεπίδραση Σωλήνων - Εδάφους

Οι αξονικές δυνάμεις, οι οποίες προκαλούνται από σεισμό, οι ροπές κάμψης στους υπόγειους αγωγούς καθώς, και η συνεχής καταπόνηση του σωλήνα οφείλονται σε δυνάμεις που αναπτύσσονται στο σημείο επαφής εδάφους-σωλήνα. Με άλλα λόγια, ενώ το έδαφος κινείται λόγω διάδοσης κύματος ή PGD, οι συνήθεις δυνάμεις και οι δυνάμεις τριβής στο σημείο επαφής εδάφους-σωλήνα επιβαρύνουν τον αγωγό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η συνολική σεισμική συμπεριφορά του υπόγειου αγωγού να σχετίζεται άμεσα με τη σχέση δύναμης-παραμόρφωσης στο σημείο σύνδεσης εδάφους-σωλήνα. Για λόγους ανάλυσης, η παραμόρφωση του εδάφους μπορεί να διαχωριστεί σε διαμήκη συνιστώσα (κίνηση εδάφους παράλληλη με τον άξονα του σωλήνα) και εγκάρσια συνιστώσα κάθετα προς τον άξονα του σωλήνα.

Επιπρόσθετα, το εγκάρσιο συστατικό τυπικά αποσυντίθεται σε δυο ξεχωριστές συνιστώσες:

- α) εγκάρσια-οριζόντια και
- β) εγκάρσια-κατακόρυφη.

Σε σχέση με την εγκάρσια-κατακόρυφη συνιστώσα, πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ της ανοδικής και της καθοδικής κίνησης του σωλήνα, καθώς οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης είναι τελείως διαφορετικές για αυτές τις δύο περιπτώσεις. Τέλος, στην περίπτωση χερσαίων αγωγών, πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ του σωλήνα που περιβάλλεται από κατάλληλο, μη ρευστοποιημένο έδαφος και αγωγούς που βρίσκονται σε ρευστοποιημένο στρώμα. Οι υποθαλάσσιοι αγωγοί συνήθως τοποθετούνται κατευθείαν πάνω στον πυθμένα.

3.7.1 Χερσαίοι Αγωγοί σε Κατάλληλο Μη Ρευστοποιημένο Έδαφος

Διαμήκη Κίνηση – Longitudinal Movement

Η σχετική κίνηση, παράλληλη με τον άξονα του σωλήνα, φέρει ως αποτέλεσμα διάμηκες αξονικές δυνάμεις στο σημείο επαφής εδάφους-σωλήνα. Για την άμμο και άλλα μη συνεκτικά υλικά, η διαμήκης αντίσταση οφείλεται στην τριβή στο σημείο επαφής. Η πίεση που ασκείται από την τριβή οδηγεί στην υπέρβαση του φορτίου και τις πλάγιες πιέσεις του εδάφους. Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες ASCE (1984), η συνήθης πίεση λαμβάνεται ως μέσος όρος των κατακόρυφων και των υπόλοιπων πλευρικών πιέσεων του εδάφους που επιδρούν στον αγωγό.

$$t_u = \pi D \bar{\gamma} H \left(\frac{1+k_o}{2} \right) \tan k\phi$$

όπου D, η διάμετρος του σωλήνα, $\bar{\gamma}$ είναι η πραγματική μονάδα βάρους του εδάφους, H είναι το βάθος προς τη γραμμή συμμετρίας του αγωγού, ϕ είναι η γωνία αντοχής σε διάτμηση της άμμου, k_o είναι ο συντελεστής πλευρικής πίεσης του εδάφους σε κατάσταση ηρεμίας, και k είναι ο συντελεστής τριβής.

Pipe Material/ Coating	<i>k</i>
Concrete Cement Coated Steel Cement Coated Cast Iron	1.0
Coal Tar Coating	0.9
Rough Steel Cast Iron	0.8
Smooth Steel	0.7
Epoxy Coated Polyethylene	0.6

Πίνακας 3.3: Συντελεστής τριβής *k* για μέγιστη αντοχή στο έδαφος χωρίς αιχμή στην αξονική κατεύθυνση
Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

Για τον άργιλο και τα άλλα υλικά χωρίς γωνία τριβής ($\varphi=0$), η διαμήκη αντίσταση (δύναμη ανά μονάδα μήκους) είναι ανάλογη με τη διάμετρο του σωλήνα *D*, την αντοχή διάτμησης του εδάφους, *S_u* και τον παράγοντα συνάφειας α , το οποίο από μόνο του είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του *S_u*:

$$t_u = \pi * D * \alpha * S_u$$

Εγκάρσια – Οριζόντια Κίνηση

Η σχετική μετατόπιση κάθετα στον άξονα του σωλήνα στο οριζόντιο επίπεδο οδηγεί σε εγκάρσιες οριζόντιες δυνάμεις στο σημείο επαφής σωλήνα-εδάφους. Εφαρμόζοντας ισορροπία στην κατακόρυφη διεύθυνση λύνεται η συνήθης πίεση του εδάφους σ_n . Χρησιμοποιώντας $\mu=\tan\varphi$ και επιλύοντας την ισορροπία στην οριζόντια διεύθυνση προσδιορίζεται η μέγιστη πλευρική δύναμη σε ένα σωλήνα με ρηχή ταφή σε ένα μη συνεκτικό υλικό

$$F_{\max} = p_u = \frac{\bar{\gamma} * \left(H + \frac{D}{2}\right)^2 \tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)}{\cos\beta - \mu \sin\beta} [\sin\beta + \mu \cos\beta]$$

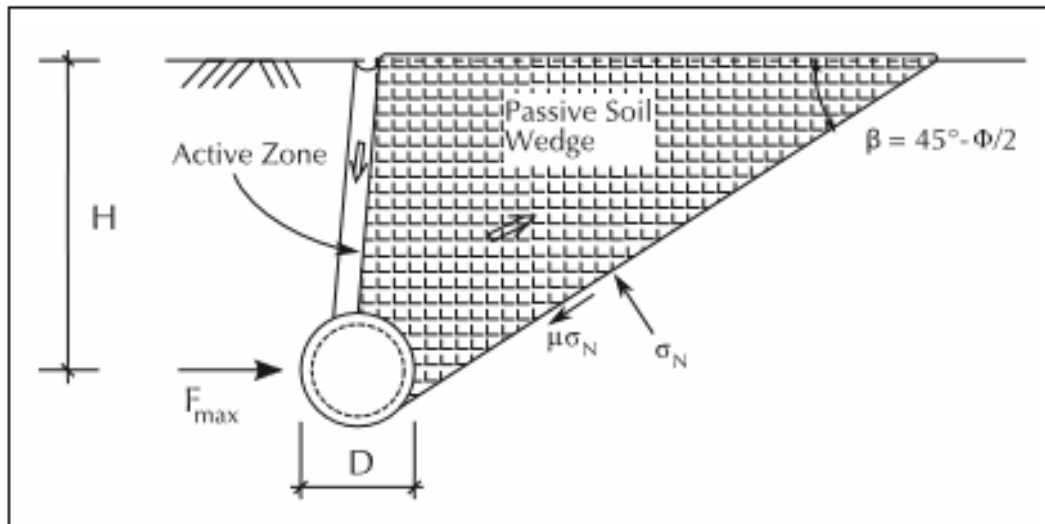
όπου β , η γωνία σφήνας ($45^\circ - \varphi/2$)

Στην πράξη, οι οδηγίες της ASCE (1984) χρησιμοποιεί την ακόλουθη σχέση για μη συνεκτικά υλικά ($S_u=0$):

$$p_u = \gamma * H * N_{qh} * D$$

$$y_u = \begin{cases} (0.07 \sim 0.10)(H + D/2) \text{ για χαλαρή άμμο} \\ (0.03 \sim 0.05)(H + D/2) \text{ για μεσαία άμμο} \\ (0.02 \sim 0.03)(H + D/2) \text{ για πυκνή άμμο} \end{cases}$$

όπου N_{qh} είναι ο οριζόντιος συντελεστής φέρουσας ικανότητας για την άμμο που δίνεται από τις γραφικές παραστάσεις των Trautmant και T.O'Rourke.



Εικόνα 3.4: Απλοποιημένο μοντέλο για την εγκάρσια εδαφική ελαστικότητα σε μη συνεκτικό υλικό σε ρηχά βάθη ταφής

Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

Εγκάρσια Κάθετη Κίνηση, κατεύθυνσης προς τα πάνω (Transverse Vertical Movement, Upward Direction)

Η σχετική ανοδική κίνηση, κάθετη στον άξονα του σωλήνα, έχει ως αποτέλεσμα κατακόρυφες δυνάμεις στο σημείο επαφής σωλήνα-εδάφους. Σύμφωνα με την ASCE 1984, οι σχέσεις για άργιλο και άμμο είναι οι εξής :

Για την άμμο :

$$q_u = \bar{\gamma} * H * N_{qv} * D$$

$$z_u = (0.01 \sim 0.015)H$$

όπου N_{qv} είναι ο κατακόρυφος συντελεστής ανόδου της άμμου.

Οι οδηγίες της ALA (2001) και της PRCI (2004) καταγράφουν ότι η μέγιστη αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

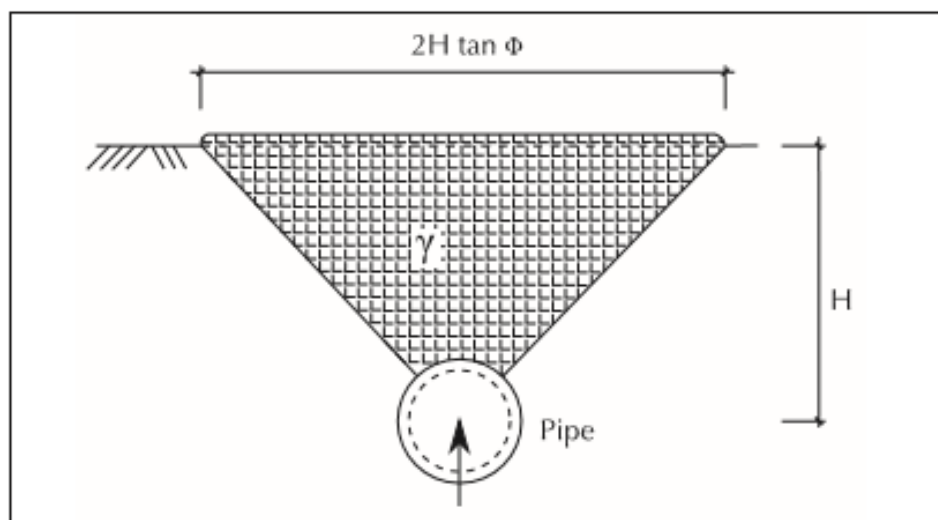
$$q_u = \bar{\gamma} * H^2 * \tan \varphi$$

Για τον άργιλο και τα υπόλοιπα υλικά χωρίς γωνία τριβής, οι οδηγίες της ASCE (1984) παρέχουν την ακόλουθη σχέση:

$$q_u = S_u * N_{cv} * D$$

$$z_u = (0.1 \sim 0.2)H$$

όπου N_{cv} είναι ο κατακόρυφος συντελεστής ανόδου για τον άργιλο.



Εικόνα 3.5: Απλοποιημένο μοντέλο για το παράγοντα κατακόρυφης ανόδου για την άμμο

Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

Εγκάρσια Κάθετη Κίνηση, κατεύθυνσης προς τα πάνω

Η σχετική προς τα κάτω κίνηση κάθετη προς τον άξονα του σωλήνα έχει ως αποτέλεσμα κατακόρυφες δυνάμεις στο σημείο επαφής εδάφους – σωλήνα. Οι αντίστοιχες σχέσεις για την άμμο και τα μη συνεκτικά υλικά είναι:

$$q_u = \bar{\gamma} * H * N_q * D + 1/2 * \bar{\gamma} * D^2 * N_y$$

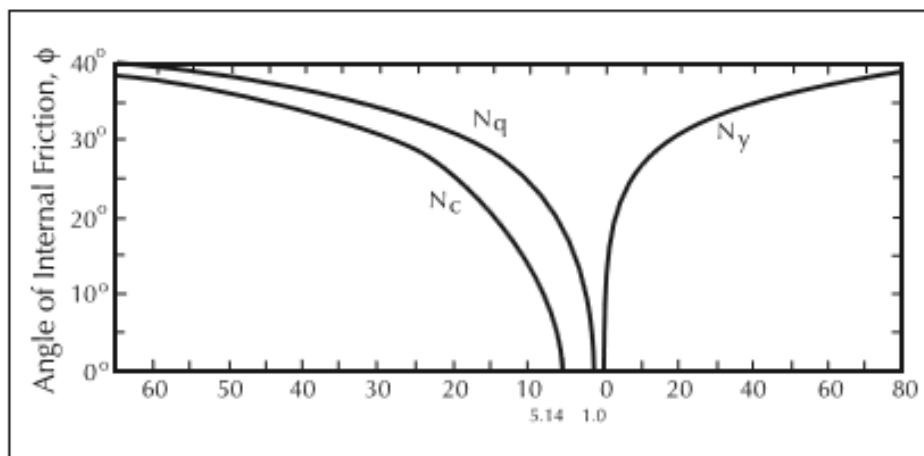
$$z_u = (0.10 \sim 0.15)D$$

Για άργιλο και υλικά χωρίς τριβή:

$$q_u = S_u * N_c * D$$

$$z_u = (0.10 \sim 0.15)D$$

όπου είναι η συνολική μονάδα βάρους της άμμου, N_q και N_y είναι οι συντελεστές φέρουσας ικανότητας για οριζόντιες λωρίδες επίστρωσης με άμμο φορτισμένες στην κατακόρυφη προς τα κάτω διεύθυνση, ενώ N_c είναι ο συντελεστής φέρουσα ικανότητας για οριζόντιες λωρίδες ερείσματος αργίλου.



Εικόνα 3.6: Κάθετος εντοπισμός χωρητικότητας

Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

3.7.2 Χερσαίοι Αγωγοί σε Ρευστοποιημένο Έδαφος

Οι Suzuki (1988), Miyajima και Kitaura (1989) απέδειξαν ότι η αντίδραση του αγωγού είναι πολύ ευαίσθητη στην ακαμψία της αντίστοιχης εδαφικής ελαστικότητας για έναν αγωγό που βρίσκεται σε ένα ρευστοποιημένο έδαφος. Σύμφωνα με τους Sato (1994), η εγκάρσια δύναμη που επιβάλλεται στον αγωγό ανά μονάδα μήκους είναι :

$$F = \frac{4 \pi \eta V}{(2.0 - \log R_e)}$$

όπου η είναι ο συντελεστής ιξώδους για το ρευστοποιημένο έδαφος, V είναι η ταχύτητα του σωλήνα σε σχέση με το ρευστοποιημένο έδαφος, $R_e = \gamma V D$ είναι ο αριθμός Reynolds και γ , η πυκνότητα του ρευστοποιημένου εδάφους.

3.8 Υποθαλάσσιοι Αγωγοί

Η πιο συνηθισμένη περίπτωση υποθαλάσσιων αγωγών είναι ο αγωγός τοποθετημένος στον πυθμένα της θάλασσας. Στην περίπτωση αυτή παρουσιάζει ενδιαφέρον το έδαφος στο πάνω μέρος του πυθμένα. Λόγω της διάβρωσης από τα κύματα θολότητας στην θάλασσα, τα ιζήματα που δημιουργούνται σχηματίζουν μαλακά εδάφη στο πάνω μέρους

του πυθμένα και χαρακτηρίζονται συνήθως ως άμμος, λάσπη ή άργιλος. Η άμμος τείνει να εμφανίζεται κοντά στις ακτές όπου τα κύματα είναι ισχυρά. Υπάρχει ένα πολύπλοκο σύστημα δυναμικής, αλλά για λόγους απλοποίησης πρέπει να διασφαλιστεί ότι η τοπική κάμψη του σωλήνα δεν θα συμβεί πριν το ξέσπασμα.

Διαμήκης Κίνηση

Για τους αγωγούς που τοποθετούνται σε αμμώδες έδαφος ή σε σκληρό πυθμένα (άκαμπος άργιλος, τσιμεντοκονίαμα, κοράλλι, βράχια) όπου η ενσωμάτωση του σωλήνα είναι αμελητέα, η αξονική αντίσταση εδάφους είναι :

$$t_u = w_s * \tan k\phi$$

$$x_u = \begin{cases} 0.002 \text{ m για σκληρό πυθμένα} \\ 0.005 \text{ m για μαλακό πυθμένα} \end{cases}$$

όπου w_s είναι το βυθισμένο βάρος του σωλήνα ανά μονάδα μήκους, με το περιεχόμενο του, $\tan k\phi$ είναι ο συντελεστής τριβής μεταξύ του πυθμένα και του σωλήνα, και k είναι ο συντελεστής ελαχιστοποίησης της τριβής

Δεδομένου ότι η διαμήκης κίνηση του σωλήνα είναι παράλληλη με την τάφρο που δημιουργείται, η μέγιστη αντίσταση του εδάφους παραμένει σχετικά σταθερή για σχετική μετατόπιση μεγαλύτερη από x_u . Για αμμώδες έδαφος, η ενσωμάτωση του σωλήνα οδηγεί στο ότι η επιφάνεια του σωλήνα που έρχεται σε επαφή με το έδαφος θα είναι μεγαλύτερη. Οι πλευρικές πιέσεις που δημιουργούνται, προκαλούν μεγαλύτερη αντίσταση. Ωστόσο, για τα συνήθη βάθη ενσωμάτωσης του αγωγού, περίπου 0.3D, η αύξηση της διαμήκους αντίστασης θεωρείται αμελητέα.

3.9 Συμπεριφορά των υπόγειων Συνεχών Αγωγών στη Διαμήκη Μόνιμη Παραμόρφωση

Στη περίπτωση αυτή, ένας αγωγός, χωρίς να έχει υποστεί διάβρωση, μπορεί να αποτύχει στις συγκολλημένες αρθρώσεις. Έτσι, υπάρχει πιθανότητα να λυγίσει τοπικά σε μια θλιπτική ζώνη, με συνέπεια να υποστεί ρήξη στη ζώνη εφελκυσμού. Όταν ο αγωγός τοποθετείται σε σχετικά μικρό βάθος, τότε ο αγωγός σε μια ζώνη θλίψης εδάφους μπορεί να λυγίσει και να εξέλθει εκτός εδάφους.

Μοντέλα για διαμήκη Μόνιμη Παραμόρφωση Εδάφους (Permanent Ground Deformation -PGD) είναι:

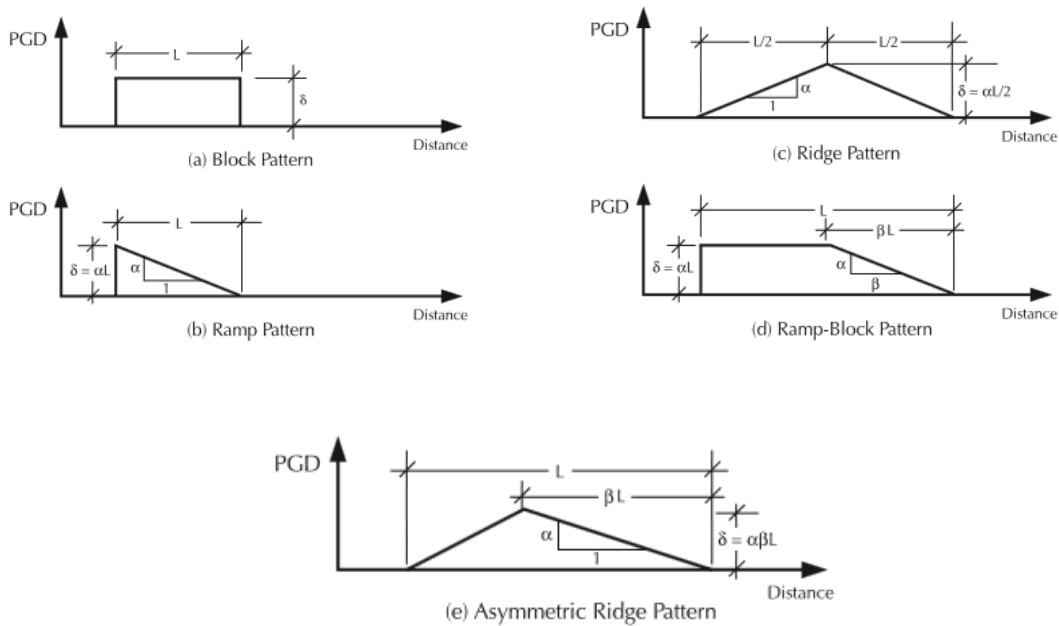
α) Το ελαστικό μοντέλο, το οποίο είναι κατάλληλο για υπόγειο σωλήνα με αρθρώσεις ολίσθησης, δεδομένου ότι οι αρθρώσεις ολίσθησης συνήθως αποτυγχάνουν για επίπεδα φορτίων, για τα οποία το υπόλοιπο μέρος του σωλήνα είναι γραμμικά ελαστικό.

β) Το μοντέλο τάσης-καταπόνησης Ramberg-Osgood θεωρείται καταλληλότερο για σωλήνες με συγκολλημένες αρθρώσεις, καθώς οι τρόποι αστοχίας της τοπικής κάμψης ή εφελκυστικής ρήξης για αυτούς τους πιο ανθεκτικούς σωλήνες, συνήθως προκύπτουν όταν ο σωλήνας είναι πέρα από το εύρος του γραμμικά ελαστικός.

3.10 Μοντέλο Ελαστικού Σωλήνα (Elastic Pipe Model)

Το πρότυπο μπλοκ (block pattern) της παραμόρφωσης εδάφους έχει ήπια επίδραση στην αντίδραση των αγωγών στην περίπτωση PGD. Έχουν αναπτυχθεί διάφορα πρότυπα μπλοκ, όπως φαίνονται στην εικόνα.

Για ένα μοντέλο άκαμπτου πλαστικού εδάφους, η αξονική δύναμη ανά μονάδα μήκος στο σημείο επαφής εδάφους-σωλήνα θεωρείται σταθερή, ανεξάρτητα από την ποσότητα της σχετικής μετατόπισης μεταξύ του σωλήνα και του εδάφους που το περιβάλλει. Αυτό θεωρείται λογικό, δεδομένου ότι η ποσότητα της κίνησης PGD, είναι τυπικά περίπου ένα μέτρο, ενώ η ποσότητα σχετικής μετατόπισης στο σημείο επαφής εδάφους-σωλήνα που απαιτείται για την πλαστική συμπεριφορά της ελαστικότητας του εδάφους είναι μερικά χιλιοστά.



Εικόνα 3.7: Μοντέλα Εξιδανίκευσης

Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

Το μήκος της ζώνης PGD ομαλοποιείται από το ως το μήκος εμπλοκής, L_{em} , το οποίο ορίζεται ως το μήκος κατά το οποίο η σταθερή δύναμη ολίσθησης t_u , πρέπει να δράσει για να επιφέρει παραμόρφωση του σωλήνα ίση με την αντίστοιχη παραμόρφωση του εδάφους. Επιπλέον, σημειώνεται ότι το πρότυπο μπλοκ έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη τάση σε έναν ελαστικό σωλήνα. Για το πρότυπο μπλοκ της PGD, η παραμόρφωση σε έναν ελαστικό σωλήνα δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\alpha L}{2 L_{em}} = \frac{t_u L}{2 AE} & L < 4L_{em} \\ \frac{\alpha L}{\sqrt{L L_{em}}} = \sqrt{\frac{t_u}{AE}} & L > 4L_{em} \end{cases}$$

$$\text{όπου } L_{em} = \frac{\alpha EA}{t_u}$$

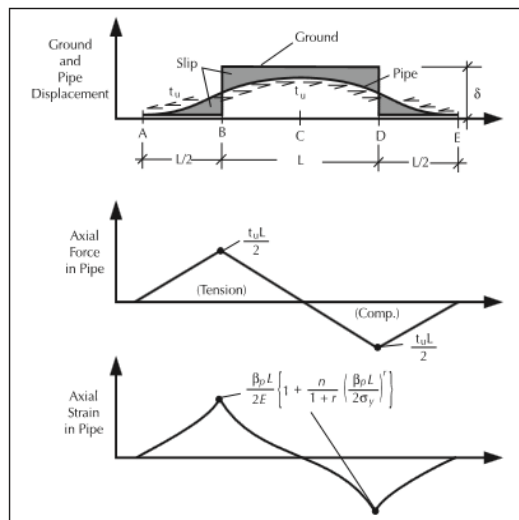
Για $L < 4L_{em}$ η παραμόρφωση του σωλήνα ελέγχεται από το μήκος της ζώνης PGD, L , ενώ για $L > 4L_{em}$ η παραμόρφωση του σωλήνα ελέγχεται από το μέγεθος της μετακίνησης του εδάφους, δ .

3.11 Μοντέλο Ανελαστικού Σωλήνα (Inelastic Pipe Model)

Η αποτυχία αγωγών με συγκόλληση τόξου με τυπικά βάθη ταφής και αναλογίες διαμέτρου προς πάχος τοιχώματος απαιτεί ένα μοντέλο στο οποίο το υλικό του σωλήνα να είναι ανελαστικό. Ο M. O' Rourke (1995) υπέθεσε ένα πρότυπο μπλοκ για τον προσδιορισμό των συνθηκών που οδηγούν σε μια διαμήκη αστοχία λόγω PGD σε ένα σωλήνα με ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο υλικών Ramberg-Osgood. Το εξιδανικευμένο πρότυπο μπλοκ αντιστοιχεί σε μάζα εδάφους που έχει μήκος L , κινούμενο προς τα κάτω σε μικρή κλίση. Η μετατόπιση του εδάφους σε κάθε πλευρά της ζώνης PGD είναι μηδέν, ενώ η μετατόπιση του εδάφους, εντός της ζώνης, είναι μια σταθερή τιμή δ . Οι δυνάμεις του εδάφους που δρουν στον αγωγό εντός της ζώνης PGD βρίσκονται δεξιά. Ωστόσο, το έδαφος μεταξύ των σημείων A και B κοντά στην επιφάνεια και μεταξύ των σημείων D και E, κοντά στην άκρη, αντιστέκεται στην κίνηση του σωλήνα και αυτές οι δυνάμεις συγκράτησης του εδάφους κατευθύνονται προς τα αριστερά. Οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης εδάφους-σωλήνα, που συνδυάζονται, οδηγούν σε μια περιοχή αξονικής καταπόνησης του σωλήνα κοντά στην επιφάνεια και σε μια περιοχή αξονικής θλίψης κοντά στην άκρη. Δεδομένου ότι η διαμήκης δύναμη ανά μονάδα μήκους στο σημείο επαφής εδάφους-σωλήνα θεωρείται σταθερή, η αξονική δύναμη του σωλήνα μεταβάλλεται γραμμικά με μέγιστη τάση στην επιφάνεια (σημείο B) και μέγιστη θλίψη στην

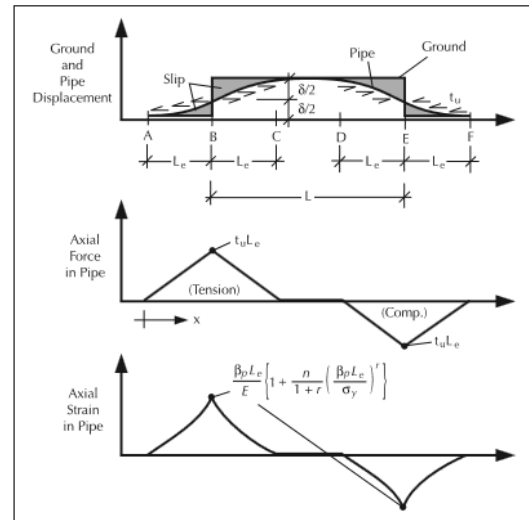
άκρη (σημείο D). Οι παραμορφώσεις του σωλήνα που προκύπτουν σχετίζονται με την πίεση του σωλήνα μέσω της προαναφερθείσας σχέσης Ramberg-Osgood.

Υπάρχουν δύο περιπτώσεις κατανομής της αξονικής μετατόπισης του σωλήνα. Στην πρώτη περίπτωση, η μετατόπιση εδάφους, δ , είναι συγκριτικά μεγάλη και το μήκος της ζώνης PGD, L , είναι συγκριτικά μικρό. Στην περίπτωση αυτή, η μέγιστη μετατόπιση του σωλήνα είναι μικρότερη από τη μετατόπιση εδάφους και η παραμόρφωση του σωλήνα εξαρτάται από το L . Στην δεύτερη περίπτωση, το μήκος της ζώνης PGD είναι συγκριτικά μεγάλο, ενώ η ποσότητα της μετατόπισης εδάφους είναι συγκριτικά μικρή. Υπάρχει ακόμη αξονική τάση στο σωλήνα, στην επιφάνεια και θλίψη στην άκρη. Ωστόσο, η ζώνη είναι αρκετά μεγάλη ώστε η μετατόπιση του σωλήνα να ταιριάζει με εκείνη του εδάφους μεταξύ των σημείων C και D, όπου η αξονική δύναμη και παραμόρφωση στον σωλήνα είναι μηδέν



Εικόνα 3.8: Κατανομή της αξονικής μετατόπισης του σωλήνα, δύναμη και τάση για την Case I

Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)



Εικόνα 3.9: Κατανομή της αξονικής μετατόπισης του σωλήνα, δύναμη και τάση για την Case II

Χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο Ramberg-Osgood, η παραμόρφωση και η μετατόπιση του σωλήνα μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$\varepsilon(x) = \frac{\varepsilon_p}{E} \left\{ 1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{\beta \rho \chi}{\sigma_y} \right)^r \right\}$$

$$\delta(x) = \frac{\varepsilon_p \chi^2}{E} \left\{ 1 + \frac{2}{2+\rho} \cdot \frac{n}{1+r} \cdot \left(\frac{\beta \rho \chi}{\sigma_y} \right)^r \right\}$$

όπου n και r είναι οι παράμετροι Ramberg-Osgood, E το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα, σ , η αποτελεσματική τάση απόδοσης και β_p η παράμετρος ταφής του σωλήνα.

Για αμμώδες έδαφος ($S_u=0$) η παράμετρος ταφής του σωλήνα β_p ορίζεται ως εξής:

$$\beta_p = \frac{\mu \gamma H}{t}$$

όπου ο συντελεστής τριβής μ δίνεται από τη σχέση $\mu = \tan k\phi$

Για τον άργιλο, η παράμετρος ταφής του σωλήνα, β_p , εκφράζεται από την σχέση:

$$\beta_p = \frac{\alpha S_u}{t}$$

όπου α είναι ο συντελεστής πρόσφυσης του αργίλου.

3.12 Αναδίπλωση σωλήνα (wrinkling)

Αντικαθιστώντας μία κρίσιμη καμπτική τάση στη σχέση $\epsilon(x) = \frac{\epsilon_p x}{E} \left\{ 1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{\beta_p x}{\sigma_y} \right)^r \right\}$,

μπορεί να προκύψει το κρίσιμο μήκος, L_{cr} , της ζώνης PGD. Αυτό μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της κρίσιμης μετακίνησης εδάφους δ_{cr} . Χρησιμοποιώντας το μοντέλο υλικών των σωλήνων Ramberg-Osgood, ο M. O'Rourke (1995) αναπτύσσει τις κρίσιμες τιμές για τα δ και L , οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την καταπόνηση του τοιχώματος του σωλήνα κατά τη θλίψη (κρίσιμη παραμόρφωση σε θλίψη που θεωρείται ότι είναι $0.175 t/R$). Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει αυτές τις κρίσιμες τιμές για το χάλυβα Grade-B ($n=10$, $r=100$) και X-70 ($n=5.5$, $r=16.6$) και διάφορες παραμέτρους ταφής και λόγοι R/t .

	R/t	$\beta_p = 1.0 \text{ pci}$		$\beta_p = 2.5 \text{ pci}$		$\beta_p = 5 \text{ pci}$		$\beta_p = 15 \text{ pci}$		$\beta_p = 25 \text{ pci}$	
		L(m)	δ (m)	L(m)	δ (m)	L(m)	δ (m)	L(m)	δ (m)	L(m)	δ (m)
GR-B	10	1762	1.32	704	0.53	352	0.26	117	0.09	70	0.05
	25	1744	1.12	698	0.45	349	0.23	116	0.08	70	0.045
	50	1728	1.05	691	0.42	346	0.21	115	0.07	69	0.042
	100	1704	1.00	682	0.4	341	0.20	114	0.066	68	0.04
	150	1660	0.94	664	0.38	332	0.19	111	0.063	66	0.037
X-70	10	4488	10.3	1795	4.1	898	2.10	299	0.69	180	0.41
	25	4182	6.87	1673	2.75	836	1.37	279	0.46	167	0.28
	50	3833	5.18	1533	2.1	768	1.04	256	0.35	153	0.21
	100	2577	2.25	1031	0.90	515	0.45	172	0.15	103	0.09
	150	1718	1.0	687	0.4	344	0.2	115	0.067	69	0.04

Πίνακας 3.4: Κρίσιμο μήκος και μετατόπιση για την αποτυχία λόγω θλίψης χάλυβας Grad-B και X-70 και διάφορες παραμέτρους ταφής και λόγοι R/t

Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

Αστοχία λόγω Εφελκυσμού

Για τις τυπικές αναλογίες διαμέτρου του σωλήνα προς το πάχος του τοιχώματος του σωλήνα, D/t , η αξονική καταπόνηση για να προκληθεί τοπική κάμψη του τοιχώματος του σωλήνα, δηλαδή τσαλάκωμα, είναι μικρότερη από εκείνη για να προκληθεί ρήξη λόγω εφελκυσμού. Επειδή οι μέγιστες τάσεις εφελκυσμού και θλίψης για διαμήκη PGD είναι ίσες, περιμένει κανείς πρώτα να εμφανιστεί τσαλάκωμα. Ωστόσο, ανάλογα με τους στόχους επίδοσης για το σύστημα σωλήνων, μπορεί να είναι αποδεκτό το τσαλάκωμα του τοιχώματος του σωλήνα χωρίς επακόλουθη ρήξη του ορίου πίεσης. Για τέτοιες συνθήκες, η ρήξη λόγω εφελκυσμού μπορεί να είναι η οριακή κατάσταση ενδιαφέροντος.

3.13 Επιρροή των Αρθρώσεων Διαστολής

Μία άρθρωση διαστολής επιτρέπει τη διαφορική αξονική κίνηση κατά μήκος της άρθρωσης, αλλά δε μεταδίδει αξονική δύναμη κατά μήκος της άρθρωσης. Ανάλογα με τη θέση των αρθρώσεων διαστολής, μπορεί να μην έχουν αποτέλεσμα, να έχουν πλεονεκτικό αποτέλεσμα ή να έχουν καταστρεπτικό αποτέλεσμα. Η χρήση των αρθρώσεων διαστολής προϋποθέτει ότι είναι σε θέση να εξυπηρετήσουν την επιβαλλόμενη σχετική διαστολή και συστολή. Συνοπτικά, η χρήση αρθρώσεων διαστολής για την άμβλυνση των επιπτώσεων της διαμήκου PGD σε συνεχείς αγωγούς πρέπει να γίνεται με προσοχή. Γενικά, για να είναι αποτελεσματικές, απαιτούνται τουλάχιστον δύο αρθρώσεις διαστολής, η μία κοντά στην επιφάνεια της ζώνης PGD και η άλλη κοντά στο άκρο. Επιπλέον, η ικανότητα διαστολής και συστολής των αρθρώσεων πρέπει να είναι συγκρίσιμη με την ποσότητα παραμόρφωσης του εδάφους δ. Τέλος, χρειάζεται μια εύλογη ακριβής εκτίμηση τόσο της θέσης όσο και της έκτασης της ζώνης PGD.

3.14 Επίδραση Κάμψης ή άρθρωσης μορφής Γ

Αρθρώσεις σχήματος Γ ή κάμψης που βρίσκονται κοντά, αλλά πέρα από τα όρια μιας διαμήκου ζώνης PGD, θα επηρεάσουν τη συμπεριφορά του σωλήνα. Εκτός από τις αξονικές καταπονήσεις που προκαλούνται από τη PGD στο ευθύγραμμο τμήμα του σωλήνα, δημιουργούνται καμπτικές τάσεις στο σχήμα Γ. Επιπλέον, λόγω της παρουσίας του σχήματος Γ, η δύναμη αντίδρασης του εδάφους δεν κατανέμεται πλέον ισοδύναμα μεταξύ της τάσης στην επιφάνεια και της θλίψης στο άκρο. Η παρουσία ενός σχήματος Γ κοντά στο άκρο έχει ως αποτέλεσμα η εφελκυστική τάση στην επιφάνεια να

είναι μεγαλύτερη από τη θλιπτική τάση στο άκρο. Επίσης, καθώς αυξάνεται η απόσταση από το όριο θλίψης στο σχήμα Γ, L_0 , η εφελκυστική τάση του σωλήνα στην επιφάνεια μειώνεται, ενώ η θλιπτική τάση στο άκρο αυξάνεται.

3.15 Συμπεριφορά Μόνιμη Παραμόρφωση Εδάφους (Transverse PGD) των Υπόγειων Συνεχών Σωλήνων στην Εγκάρσια

Η εγκάρσια PGD αναφέρεται στη μόνιμη κίνηση εδάφους κάθετα στον άξονα του σωλήνα. Όταν υπόκειται σε εγκάρσια PGD, ένας συνεχής αγωγός θα τεντώσει και θα λυγίσει καθώς προσπαθεί να ικανοποιήσει την εγκάρσια κίνηση του εδάφους. Ο τρόπος αστοχίας του σωλήνα εξαρτάται από τη σχετική ποσότητα αξονικής τάσης (εφελκυσμός λόγω των επιδράσεων μήκους τόξου) και από την καμπτική τάση. Έτσι, αν η καταπόνηση αξονικής τάσης είναι μικρή, το τοίχωμα του σωλήνα μπορεί να λυγίσει σε θλίψη λόγω υπερβολικής κάμψης. Από την άλλη πλευρά, εάν η αξονική τάση είναι μεγάλη, ο σωλήνας μπορεί να υποστεί θραύση λόγω της συνδυασμένης επίδρασης της αξονικής τάσης και κάμψης. Σύμφωνα με τους Oourke και Tawifik, (1983), η εγκάρσια PGD χωρίς απότομες εγκάρσιες μετατοπίσεις στο όριο συνήθως δεν οδηγεί σε αστοχία του σωλήνα.

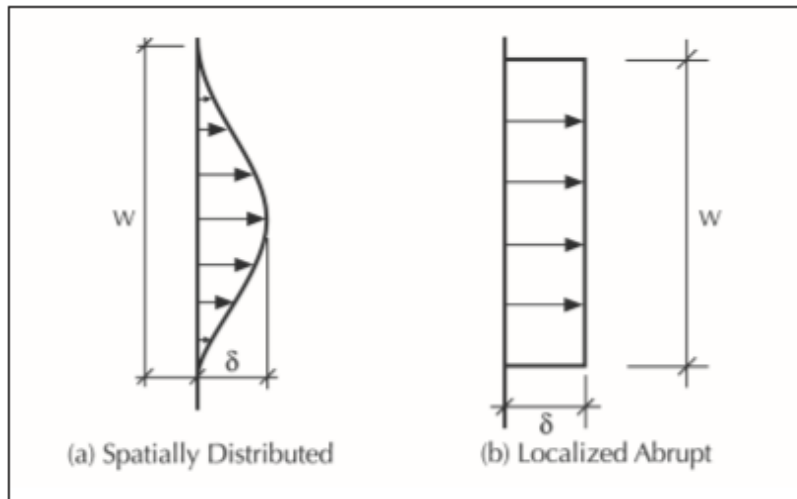
Παρόμοια με τη διαμήκη PGD, η συμπεριφορά του αγωγού στην εγκάρσια PGD είναι γενικά συνάρτηση της ποσότητας PGD δ , της έκτασης της ζώνης PGD, καθώς και του τρόπου παραμόρφωσης του εδάφους.

Τα είδη των εγκάρσιων PGD περιλαμβάνουν (Εικόνα 3.9):

α) Χωρικά κατανομημένη εγκάρσια PGD (spatially distributed) : η παραμόρφωση του σωλήνα είναι συνάρτηση τόσο της ποσότητας όσο και του πλάτους της ζώνης PGD

β) Απότομη εγκάρσια PGD (abrupt) : Η παραμόρφωση του σωλήνα είναι συνάρτηση της ποσότητας δ και σε ορισμένες περιπτώσεις του πλάτους της ζώνης VW.

γ) Η PGD που προκύπτει λόγω της πλευστότητας: Όταν ένας σωλήνας περιβάλλεται από ρευστοποιημένο έδαφος, υφίσταται πιθανή παραμόρφωση στην οριζόντια διεύθυνση λόγω πλευρικής εξάπλωσης του ρευστοποιημένου εδάφους, αλλά μπορεί επίσης να ανυψωθεί λόγω της πλευστότητας.



Εικόνα 3.9: Είδη των εγκάρσιων PGD

Πηγή: Michael J. O'Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

Για δεδομένες τιμές των W και δ , οι εφελκυστικές και οι θλιπτικές τάσεις είναι περίπου ίσες. Αυτό υποδηλώνει ότι η αξονική καταπόνηση του σωλήνα είναι μικρή, Ένα συγκεκριμένο πλάτος της ζώνης PGD περίπου 30 m έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη καταπόνηση του σωλήνα.

Σύμφωνα με προσεγγίσεις αναλυτικών και πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση της συμπεριφοράς του αγωγού σε εγκάρσιες PGD, οι σχέσεις που αναπτύχθηκαν από τους O'Rourke, (1988), Miyajima και Kitaura (1989) και οι Liu και O'Rourke (1997b) καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι καμπτικές τάσεις μπορούν να συγκριθούν αφού η αναλυτική σχέση για την καμπτική τάση που δίνεται στην παρακάτω εξίσωση (δεύτερος όρος στο δεξί μέλος και στις δύο εξισώσεις) υποδηλώνει ότι είναι μόνο συνάρτηση των δ , D και W .

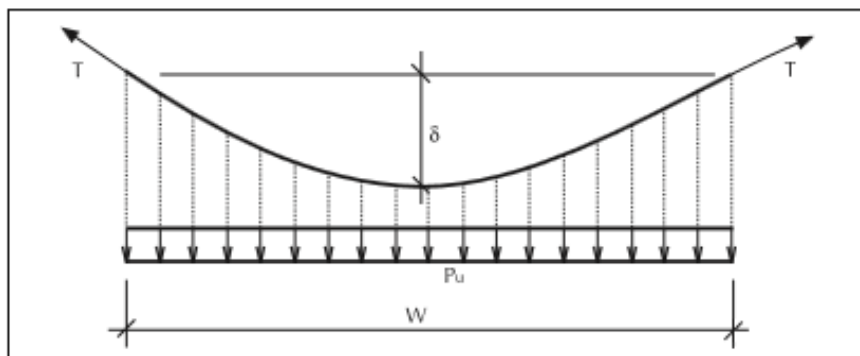
$$\epsilon_{\text{elastic}} = \begin{cases} \frac{\pi\delta}{2} \sqrt{\frac{t_u}{AEW}} \pm \frac{\pi^2\delta D}{W^2} & \delta \leq \delta_{cr} \\ \frac{\pi\delta_{cr}}{2} \sqrt{\frac{t_u}{AEW}} \pm \frac{\pi^2\delta_{cr} D}{W^2} & \delta > \delta_{cr} \end{cases}$$

όπου A είναι η περιοχή διατομής του σωλήνα, t_u , η διαμήκης δύναμη τριβής,

$$\delta_{cr} = \frac{1}{\frac{1}{\delta_{cr-bending}} + \frac{1}{\delta_{cr-axial}}} \text{ η κρίσιμη καμπτική παραμόρφωση και } \delta_{cr-bending} = \frac{p_u W^4}{384 EI} \text{ η μέση}$$

διάρκεια εκτροπής για μια ενσωματωμένη δέσμη μήκους W που υπόκεινται σε ομοιόμορφο φορτίο p_u .

Οι βλάβες αγωγού λόγω διαμήκους PGD είναι αρκετά συνηθισμένη . Αυτό οφείλεται, εν μέρει, στο γεγονός ότι ο σωλήνας είναι σχετικά εύκολο να λυγίσει (ευλύγιστος) και, εν μέρει, είναι δύσκολο να τεντωθεί ή να συμπιεστεί αξονικά.



Εικόνα 3.10: Σύστημα Εύκαμπτου Σύρματος

Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

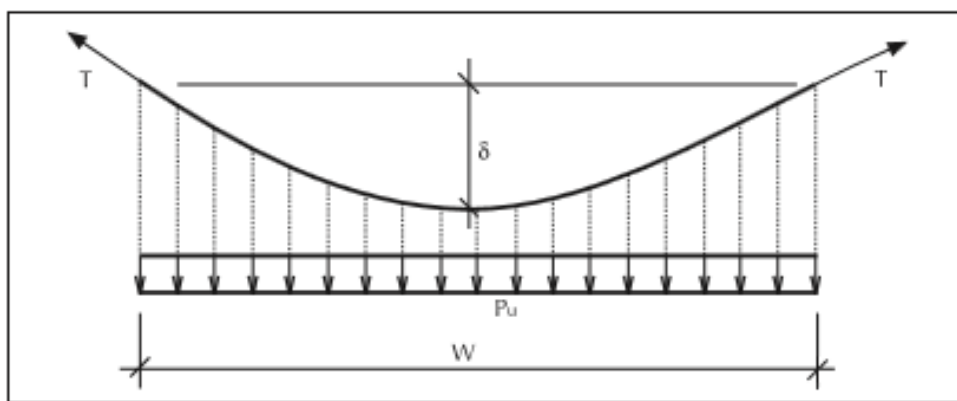
3.16 Χερσαίοι Αγωγοί σε Ρευστοποιημένο Έδαφος

Το υψηλότερο στρώμα του ρευστοποιημένου εδάφους βρίσκεται συνήθως κάτω από τον πυθμένα των χερσαίων αγωγών. Ωστόσο, όταν ο σωλήνας είναι υπόγειος σε εμποτισμένη άμμο , όπως σε μια κοίτη του ποταμού , το έδαφος που περιβάλλει τον αγωγό μπορεί να ρευστοποιηθεί κατά τη διάρκεια ισχυρής σεισμικής ανάδευσης. Σε αυτήν την περίπτωση, η ροή του ρευστοποιημένου εδάφους κάτω από μια ήπια κλίση μπορεί να κινηθεί προς τα πάνω λόγω της πλευστότητας , ειδικά όταν υπάρχει φρεάτιο ή όταν ένα θλιπτικό φορτίο επενεργεί στον αγωγό. Ο σωλήνας μπορεί να παραμορφωθεί πλευρικά ακολουθώντας οριζόντια κίνηση. Όταν ένας χερσαίος αγωγός περιβάλλεται από ρευστοποιημένο έδαφος, ο σωλήνας μπορεί να κινηθεί πλευρικά λόγω της ροής του ρευστοποιημένου εδάφους. Κάθετη κίνηση ακολουθεί εάν το έδαφος που περιβάλλει άμεσα ένα χερσαίο υπόγειο σωλήνα ρευστοποιηθεί. Έτσι, ο σωλήνας μπορεί να ανασηκωθεί λόγω της πλευστότητας. Ο Hou (1990) ανέλυσε την καταπόνηση του χερσαίου σωλήνα λόγω επιδράσεων πλευστότητας με προσέγγιση πεπερασμένων στοιχείων. Στην ανάλυση, λαμβάνεται υπόψη η μη γραμμικότητα τόσο του χάλυβα όσο και της δύναμης αλληλεπίδρασης στο σημείο επαφής σωλήνα - εδάφους εκτός ρευστοποιημένης ζώνης. Η ανυψωτική δύναμη ανά μονάδα μήκους, P_{uplift} , που ενεργεί στον αγωγό μέσα στην ρευστοποιημένη ζώνη , μπορεί να εκφραστεί ως:

$$P_{uplift} = \frac{\pi D^2}{4} (\gamma_{soil} - \gamma_{contents}) - \pi D t \gamma_{pipe}$$

όπου γ_{soil} , γ_{pipe} και γ_{contents} είναι τα βάρη ανά μονάδα όγκου ρευστοποιημένου εδάφους, σωλήνα και περιεχομένου σωλήνα (δηλαδή νερό, αέριο κλπ.), αντίστοιχα. Συνήθως οι αγωγοί υγρών στοιχείων έχουν μικρή δυνατότητα ανύψωσης λόγω της υψηλής μονάδας βάρους των περιεχομένων.

Η συμπεριφορά ανύψωσης παρατηρήθηκε μόνο για αγωγούς μεγάλης διαμέτρου (π.χ. διάμετρο μεγαλύτερη από 1 m) και αγωγούς πετρελαίου με αρχικά θλιπτικά φορτία (λόγω περιορισμένης θερμικής διαστολής και αύξησης της δυνατότητας ανύψωσης). Η απόδοση του αγωγού κατά τη διάρκεια των σεισμών του παρελθόντος δείχνει, επίσης, ότι οι αγωγοί χάλυβα είναι απίθανο να υποστούν βλάβη από την πλευστότητα, αλλά ενδέχεται να εκτεθούν σε κάποιο τέτοιο κίνδυνο.



Εικόνα 3.11: Διατομή αγωγού που διασχίζει ρευστοποιημένη ζώνη

Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

3.17 Συμπεριφορά των Υπόγειων Συνεχών Αγωγών στα Ρήγματα

Σε ένα κανονικό ρήγμα (normal fault), σωλήνες με παχύ τοίχωμα, όπου οι τάσεις αστοχίας εφελκυσμού και θλίψης έχουν εγγείς τιμές, θα ήταν πιθανόν η ρήξη εφελκυσμού, δεδομένου ότι οι μεγαλύτερες τάσεις του σωλήνα είναι εφελκυστικές στην περίπτωση αυτή. Σε ένα αντίστροφο ρήγμα (ονομαστική θλίψη) οι σωλήνες διαταράσσονται λόγω της κάμψης και της αξονικής θλιπτικής δύναμης, δεδομένου ότι οι μεγαλύτερες τάσεις του σωλήνα είναι θλιπτικές. Ο μηχανισμός αστοχίας σωλήνων θα κατέρρευε καθώς το ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης θα μπορούσε να θέσει ένα σωλήνα είτε σε ονομαστική τάση είτε σε ονομαστική θλίψη ανάλογα με τη γωνία τομής μεταξύ του ίχνους του ρήγματος και του άξονα του σωλήνα και τη σχετική κίνηση του ρήγματος.

3.18 Παρακολούθηση των Βλαβών των Σωλήνων

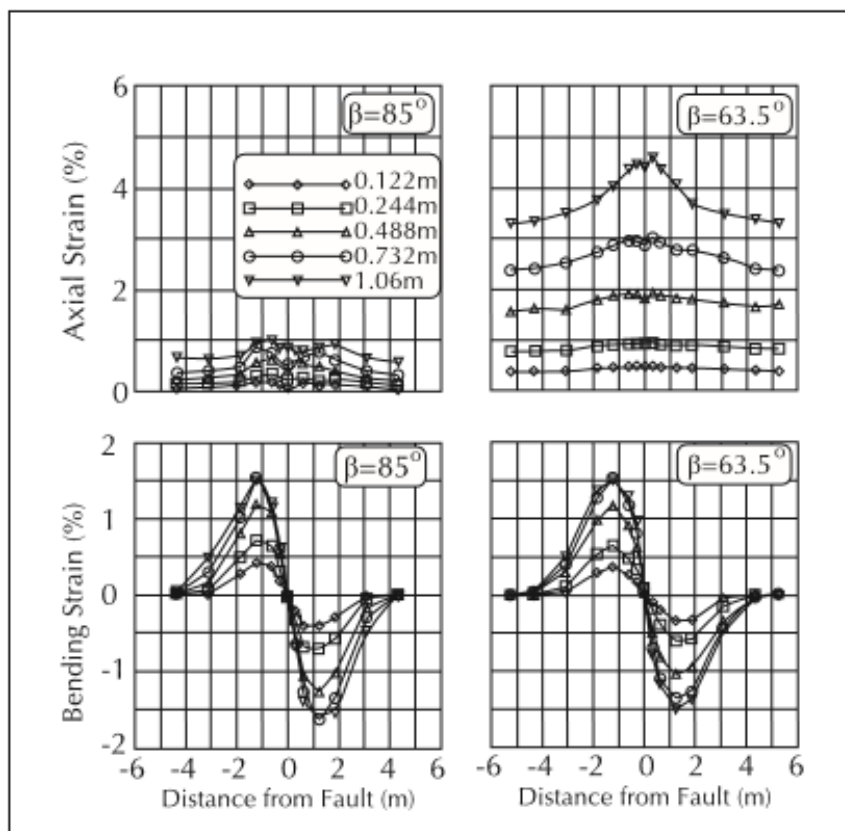
Γενικά υπάρχουν τρεις πιθανοί τρόποι αστοχίας για ένα συνεχή αγωγό που διασταυρώνεται με ρήγμα. Αυτοί είναι:

- ρήξη εφελκυσμού (tensile rupture)
- τοπική κάμψη (local buckling) κατά τη θλίψη
- κάμψη δοκών (beam buckling) κατά τη θλίψη

Ο τρόπος κάμψης των δοκών είναι ένας ρεαλιστικός τρόπος αστοχίας για τους υποθαλάσσιους αγωγούς που τοποθετούνται στον πυθμένα, οι χερσαίοι αγωγοί είναι συνήθως θαμμένοι 1.0 m ή περισσότερο κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Δεδομένου ότι αυτό το βάθος ταφής είναι μεγαλύτερο από το κρίσιμο βάθος ταφής, ο χερσαίος σωλήνας "τσαλακώνεται" και δεν κάμπτεται όπως μια δοκός που υπόκειται σε θλιπτική PGD.

3.19 Ρήγματα Οριζόντιας Ολίσθησης (Strike-Slip Faults) - Ονομαστική Τάση

Δοκιμές του Ha (2008) για τις αξονικές και καμπτικές τάσεις που μετρήθηκαν σε σωλήνες HDPE, οι οποίοι υποβλήθηκαν σε διάφορες ποσότητες μετατόπισεων του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης σε γωνία β , μεταξύ του ρήγματος και των σωλήνων 85° και 63.5° , έδειξε ότι η αξονική καταπόνηση του σωλήνα είναι μια αύξουσα συνάρτηση της μετατόπισης και ότι οι αξονικές καταπονήσεις που προκαλούνται στη σχεδόν κατακόρυφη μετατόπιση ($\beta 85^\circ$) είναι πολύ μικρότερες, περίπου το ένα πέμπτο για $\beta=63.5^\circ$. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.12 οι αξονικές καταπονήσεις του σωλήνα είναι μεγαλύτερες κοντά στο ρήγμα και μειώνονται κατά κάποιο τρόπο γραμμικά σε σχέση με την απόσταση από το ρήγμα. Οι καμπτικές τάσεις που μετρώνται, συνάδουν με τη διπλή καμπυλότητα κάμψης. Από τη μία πλευρά του ρήγματος είναι κυρτό και από την άλλη πλευρά είναι κοίλο, με ένα σημείο καμπής στο ίδιο το ρήγμα. Άλλες δοκιμές που αναφέρονται από τον Abdoun (2009) δείχνουν ότι ούτε ο ρυθμός μετατόπισης του ρήγματος, ούτε η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους επηρέασαν σημαντικά τα μεγέθη ή τη θέση των μέγιστων καταπονήσεων των σωλήνων. Από την άλλη πλευρά, το βάθος ταφής είχε σημαντική επίδραση στην παραμόρφωση των σωλήνων, ιδιαίτερα στις καμπτικές καταπονήσεις. Τέλος, μεγαλύτερα βάθη ταφής έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλες καμπτικές καταπονήσεις σωλήνων.



Εικόνα 3.12: Μετρημένες αξονικές και καμπτικές καταπονήσεις σε σωλήνα HDPE που υπόκεινται σε ονομαστική τάση σε μετατοπίσεις ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης

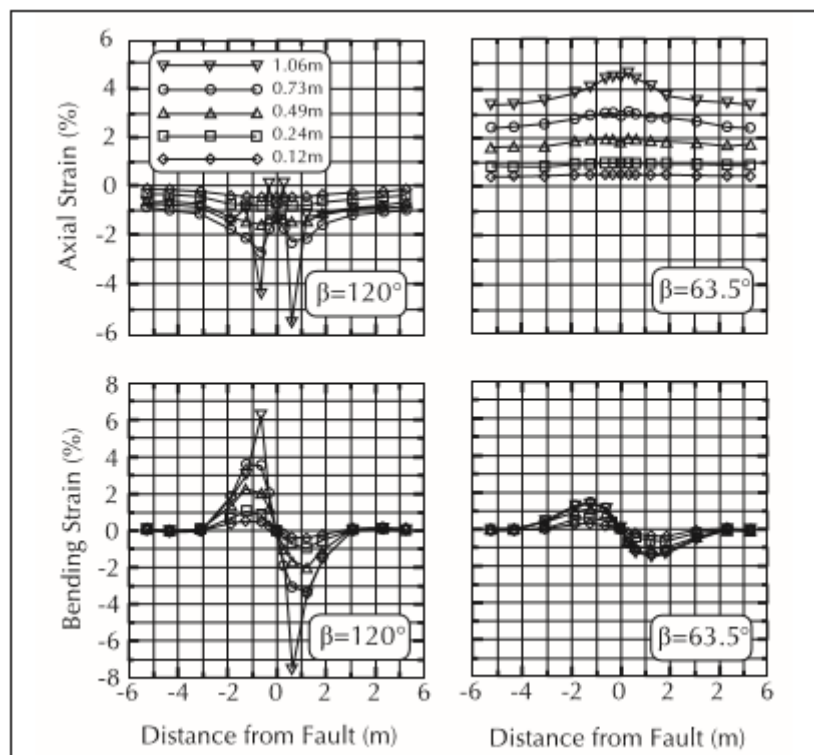
Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

3.20 Ρήγματα Οριζόντιας Ολίσθησης (Strike-Slip Faults) –Ονομαστική Θλίψη

Ομοίως με πριν, γίνονται δοκιμές από τον Ha (2010) σε σωλήνες HDPE που υπόκεινται είτε σε ονομαστική θλίψη (γωνία διασταύρωσης-intersection $\beta=120^\circ$) είτε σε μετατοπίσεις ονομαστικής τάσης ($\beta 63.50$) Η διάμετρος του σωλήνα 0.41m (16 ίντσες), ο λόγος H/D 2.75 και η αναλογία D/t 17 δείχνουν ότι η ονομαστική τάση και η συμπεριφορά στη θλίψη διαφέρουν σημαντικά για μετατοπίσεις 0.49m κατά την ονομαστική θλίψη. Τόσο οι αξονικές όσο και οι καμπτικές καταπονήσεις παραμένουν αρκετά μεγάλες σε δύο θέσεις κοντά στο ρήγμα.

Στην Εικόνα 2.15 φαίνεται ότι οι κάμψεις αρχίζουν να σχηματίζονται για μετατοπίσεις μεταξύ 0.24m και 0.49m Η αντίστοιχη συνολική παραμόρφωση (αξονική θλίψη και καμπτική θλίψη) είναι μεταξύ 1.8% (για μετατόπιση 0.24m) και 3.5% (για μετατόπιση 0.49 m). Το υλικό των σωλήνων HDPE έχει μια καμπύλη πίεσης-καταπόνησης τύπου στρογγυλού και, επομένως, μια ελαφρώς κακώς καθορισμένη παραμόρφωση διαρροής. Ωστόσο, για το ρυθμό μετατόπισης που χρησιμοποιείται στις δοκιμές, η

ονομαστική παραμόρφωση διαρροής (έναρξη σημαντικής ανελαστικής συμπεριφοράς) που είναι περίπου 2%.



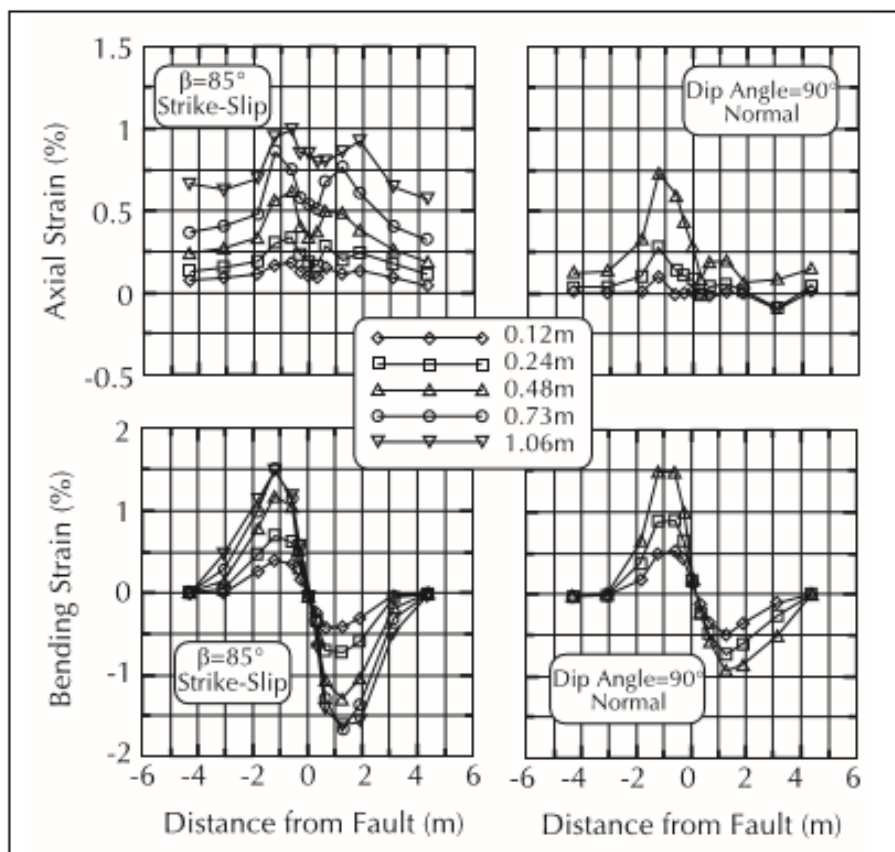
Εικόνα 3.13: Μετρημένες αξονικές και καμπτικές καταπονήσεις σε σωλήνα HDPE που υπόκεινται σε ονομαστική θλίψη και σε ονομαστική τάση σε μετατοπίσεις ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης

Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

3.21 Κανονικά και Ανάστροφα Ρήγματα (Normal and Reverse Faults)

Μελέτες από τον Abdoun (2008) έχουν μετρήσει αξονικές και καμπτικές καταπονήσεις για δύο διαφορετικές μετατοπίσεις ρηγμάτων . Η πρώτη είναι η οριζόντια ολίσθηση - ονομαστική τάση με γωνία τομής σωλήνα και ρήγματος $\beta=85^\circ$, ενώ η δεύτερη είναι κανονική ρηγμάτωση κατά μήκος ενός κατακόρυφου επιπέδου ρήγματος. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.14, οι γραφικές παραστάσεις για το $\beta=85^\circ$ είναι πανομοιότυπες, με την εξαίρεση ότι η αξονική καταπόνηση έχει παρασταθεί σε διαφορετική κλίμακα. Η συμπεριφορά για κανονικό/ανάστροφο ρήγμα είναι διαφορετική από εκείνη για ρηγμάτωση οριζόντιας ολίσθησης-ονομαστικής τάσης. Στην πρώτη περίπτωση, η κατανομή των καταπονήσεων δεν είναι πλέον συμμετρική σε σχέση με το ρήγμα, και οι διαφορές στην αξονική καταπόνηση είναι πιο αισθητές. Στη δεύτερη περίπτωση, οι καμπτικές καταπονήσεις για ρηγμάτωση οριζόντιας ολίσθησης φτάνουν σε ένα σταθερό επίπεδο με μετατόπιση 0.73m. Δεν υπάρχει εμφανές όριο σε καμπτικές καταπονήσεις για το κανονικό/ανάστροφο ρήγμα. Τέλος, παρόλο που η συμπεριφορά είναι διαφορετική, με την περίπτωση της κανονικής/ανάστροφης ρηγμάτωσης να είναι πιο

περίπλοκη οι μετρηθέντες καταπονήσεις της εικόνας 3.16 υποδηλώνουν ότι οι παραμορφώσεις οριζόντιας ολίσθησης για σχεδόν κάθετες οριζόντιες μετατοπίσεις παρέχουν μια λογική αλλά κάπως συντηρητική εκτίμηση για τις αξονικές και καμπτικές καταπονήσεις που προκαλούνται από κάθετες σχεδόν κατακόρυφες μετατοπίσεις.



Εικόνα 3.14: Μετρημένες αξονικές και καμπτικές καταπονήσεις σε σωλήνα HDPE σε διάφορες αποστάσεις από το ρήγμα για ονομαστική τάση οριζόντιας ολίσθησης και κανονική/ανάστροφη ρηγμάτωση

Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

3.22 Συμπεριφορά των Σπονδυλωτών Αγωγών στη Μόνιμη Παραμόρφωση Εδάφους (PGD)

Οι σπονδυλωτοί σωλήνες έχουν συνήθως αρθρώσεις bell and spigot και το υλικό τους μπορεί να είναι χυτοσίδηρος, όλκιμος σίδηρος, χάλυβας, σκυρόδεμα ή αμίαντο τσιμέντο. Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι αστοχίας για τους σπονδυλωτούς αγωγούς: 1) αξονική αποκόλληση στις αρθρώσεις, 2) σύνθλιψη των αρθρώσεων bell and spigot και 3) κυκλικές ρήξεις κάμψης στο τμήμα των σωλήνων μακριά από τις αρθρώσεις. Η συμπεριφορά ενός δεδομένου υπόγειου σπονδυλωτού αγωγού είναι συνάρτηση του είδους της PGD (π.χ. διαμήκης ή εγκάρσια), της ποσότητας της μετακίνησης εδάφους δ , της έκτασης του χώρου της ζώνης PGD και του προτύπου της κίνησης του εδάφους μέσα στη ζώνη.

3.23 Διαμήκης PGD

Όπως συμβαίνει με το συνεχή αγωγό, η διαμήκης PGD προκαλεί αξονικές επιδράσεις στο σπονδυλωτό αγωγό. Πιο συγκεκριμένα προκαλεί αξονική καταπόνηση στα τμήματα σωλήνων και σχετική αξονική μετατόπιση στις αρθρώσεις. Ωστόσο, σε αντίθεση με τη συμπεριφορά των συνεχών αγωγών, η βλάβη στους σπονδυλωτούς αγωγούς, που υπόκεινται σε διαμήκη PGD, προκύπτει συνήθως στις αρθρώσεις των σωλήνων, δεδομένου ότι η αντοχή των αρθρώσεων είναι γενικά μικρότερη από την αντοχή του Τμήματος του σωλήνα μεταξύ των αρθρώσεων. Η αστοχία των αρθρώσεων εξαρτάται από τη δύναμη και την ικανότητα παραμόρφωσης των αρθρώσεων καθώς και από τα χαρακτηριστικά της PGD. Ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι το πρότυπο της διαμήκους PGD. Για την περίπτωση κατανεμημένης παραμόρφωσης, υπάρχει καταπόνηση εδάφους σε σημαντικό τμήμα της ζώνης PGD. Στην περίπτωση της απότομης παραμόρφωσης, σχετική κίνηση υπάρχει μόνο στα όρια της ζώνης PGD και η καταπόνηση εδάφους μεταξύ των ορίων είναι μηδενική.

Κατανεμημένη Παραμόρφωση

Η αντίδραση των σπονδυλωτών αγωγών που υπόκεινται σε κατανεμημένο πρότυπο παραμόρφωσης διαμήκους PGD είναι παρόμοια με εκείνη των σπονδυλωτών αγωγών που υπόκεινται σε διάδοση κύματος, καθώς η χωρικά κατανεμημένη PGD έχει ως αποτέλεσμα μια περιοχή καταπόνησεων εδάφους.

Χρησιμοποιώντας ρεαλιστικές μεταβολές της δυσκαμψίας των αρθρώσεων, οι El Hmadi και M. O'Rourke (1989) προσδιόρισαν, τη μέση μετατόπιση της άρθρωσης, $\Delta\bar{x}$, σε εκατοστά, και συντελεστές μεταβολής, μ , σε ποσοστά, ως συνάρτηση της καταπόνησης του εδάφους για διάφορες διαμέτρους σωλήνα από χυτοσίδηρο με σωληνωτές αρθρώσεις (CI) και σωλήνα από όλκιμο σίδηρο με ελαστικές αρθρώσεις (DI). Οι τιμές στον πίνακα 3.5 υποθέτουν ότι το μήκος τμήματος του σωλήνα L_0 για όλους τους τύπους ήταν 6.0m (20 ft) και ότι δε συνέβη ούτε αποκόλληση (pull-out) και ούτε απασφάλιση (lock-up) της άρθρωσης.

Ground Strain	CI D = 40 cm (16 in)		CI D = 76 cm (30 in)		CI D = 122 cm (48 in)		DI D = 40-122 cm (16-48 in)	
	Δx (cm)	μ (%)	Δx (cm)	μ (%)	Δx (cm)	μ (%)	Δx (cm)	μ (%)
0.001 (1/1,000)	.54	64	.56	54	.58	52	.59	2
0.002 (1/500)	1.14	56	1.17	49	1.17	43	1.19	2
0.005 (1/200)	2.92	39	2.95	24	2.97	14	3.00	1
0.007 (1/150)	4.12	26	4.16	19	4.16	16	4.19	1

Πίνακας 3.5: Μέση μετατόπιση άρθρωσης και συντελεστής μεταβολής για σπονδυλωτό σωλήνα που υπόκειται σε κατανεμημένη παραμόρφωση εδάφους

Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

Απότομη Παραμόρφωση

Η απότομη διαμήκης PGD αναφέρεται στις μετακινήσεις εδάφους με μεγάλες σχετικές μετατοπίσεις σε τοπικά σημεία. Για παράδειγμα, στο πρότυπο μπλοκ (block pattern) της Εικόνας 2.8 (α), η καταπόνηση του εδάφους είναι μηδέν μακριά από τα όρια της ζώνης PGD και υπάρχει ένα άνοιγμα εφελκυσμού ή μία ρωγμή στην επιφάνεια της ζώνης καθώς και ένα ανάχωμα που προκαλεί θλίψη στο άκρο. Τα πρότυπα ramp και rampblock στην Εικόνα 2.8(b) και (d) έχουν επίσης μια απότομη μετατόπιση, αλλά για αυτά τα πρότυπα η απότομη μετατόπιση εντοπίζεται μόνο στο ένα άκρο της ζώνης PGD.

3.24 Εγκάρσια PGD

Κατά την εξέταση της αντίδρασης των σπονδυλωτών αγωγών που υπόκεινται σε εγκάρσια PGD, πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ των χωρικά κατανεμημένων εγκάρσιων PGD και εντοπισμένων απότομων εγκάρσιων PGD. Για σπονδυλωτούς αγωγούς που υπόκεινται σε χωρικά κατανεμημένη εγκάρσια PGD, οι τρόποι αστοχίας περιλαμβάνουν στρογγυλές ρωγμές στα τμήματα των σωλήνων, θραύση των bell and spigot αρθρώσεων λόγω της κάμψης και αποκόλληση στην άρθρωση λόγω αξονικής επιμήκυνσης.

Για μια θεωρούμενη ημιτονοειδή διακύμανση της μετακίνησης εδάφους σε όλο το πλάτος της ζώνης PGD, οι M. O'Rourke και Nordberg (1991) μελέτησαν το μέγιστο άνοιγμα της άρθρωσης λόγω τόσο της περιστροφής της άρθρωσης όσο και της αξονικής επέκτασης των σπονδυλωτών αγωγών. Ένας αγωγό που υπόκειται σε εγκάρσια PGD, όπου Δx_t και $\Delta \theta$ είναι η επέκταση της άρθρωσης και η σχετική περιστροφή άρθρωσης μεταξύ των γειτονικών τμημάτων

Το συνολικό μέγιστο άνοιγμα στη μία πλευρά μιας άρθρωσης, Δx λόγω της εγκάρσιας PGD, είναι απλώς το άθροισμα της αξονικής επέκτασης και των επιδράσεων της περιστροφής. Ωστόσο, οι αξονικές και περιστροφικές συνιστώσες είναι μεγαλύτερες σε διαφορετικά σημεία. Συνδυάζοντας αυτές τις επιδράσεις, το μέγιστο άνοιγμα της άρθρωσης που προκύπτει είναι:

$$\Delta x = \begin{cases} \frac{\pi^2 L_o \delta^2}{W^2} \left[\frac{2D}{\delta} \right] & 0.268 \leq D/\delta < 3.73 \\ \frac{\pi^2 L_o \delta^2}{2W^2} [(D/\delta)^2] & \text{Άλλα} \end{cases}$$

Ως εκ τούτου, από την Εικόνα 2.18 , το αντίστοιχο μέγιστο άνοιγμα άρθρωσης (χρησιμοποιώντας ανώτατες οριακές τιμές $\delta/W=0.01$ και $\delta=2.0m$) θα ήταν 2.5cm για σωλήνα με διάμετρο 4.0m (157in) (δηλαδή θα ισχύει $D/\delta=2$) ή λιγότερο . Επομένως, ένα άνω άνοιγμα σύνδεσης της άρθρωσης για εγκάρσια κατανεμημένη PGD (25 cm) είναι περίπου το ήμισυ του κατώτατου ανοίγματος σύνδεσης της άρθρωσης για ένα κατάνεμημένο πρότυπο διαμήκους PGD (5.0cm), το οποίο με τη σειρά του είναι μικρότερο από το κάτω όριο για ένα πρότυπο απότομης παραμόρφωσης διαμήκους PGD.

3.25 Μετατοπίσεις Ρήγματος

Ο Takada (1984) πραγματοποίησε εργαστηριακό έλεγχο για να αναλύσει την αντίδραση των σπονδυλωτών αγωγών που υπόκεινται σε εγκάρσια PGD. Δύο περιπτώσεις μελετήθηκαν από τον Takada. Στην υπόθεση A, ο αγωγός αποτελείται από τρία μεγαλύτερα τμήματα, ενώ στην περίπτωση B αποτελείται από πέντε μικρότερα τμήματα. Οι τάσεις στον αγωγό με τμήματα μικρότερου μήκους (περίπτωση B) είναι πολύ λιγότερες από εκείνες στον αγωγό με τμήματα μεγαλύτερου μήκους (περίπτωση), ιδιαίτερα για μεγάλες τιμές μετατόπισης. Αν γίνει η υπόθεση ότι οι αρθρώσεις είναι περιστροφικά εύκαμπτες , τότε η μέγιστη ροπή κάμψεως στο τμήμα σωλήνα, το οποίο διασχίζει το ρήγμα , είναι ανάλογη του τετραγώνου του μήκους Τμήματος του σωλήνα. Η μικρότερη τάση πίεσης στην περίπτωση B οφείλεται, εν μέρει , στο μικρότερο μήκος του Τμήματος των σωλήνων. Η μικρότερη τάση του σωλήνα στην περίπτωση B οφείλεται, εν μέρει, στο μικρότερο μήκος των τμημάτων των σωλήνων.

3.26 Συμπεριφορά Υπόγειων Συνεχών Αγωγών στη Διάδοση Κύματος

Όταν ένα σεισμικό κύμα ταξιδεύει κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους, οποιαδήποτε δύο σημεία που βρίσκονται κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης θα υποβάλλονται σε κινήσεις εκτός φάσης. Αυτές οι κινήσεις προκαλούν τόσο αξονικές όσο και καμπτικές καταπονήσεις σε έναν υπόγειο αγωγό λόγω αλληλεπίδρασης στο σημείο επαφής σωλήνα-εδάφους. Για σπονδυλωτούς αγωγούς, η βλάβη συνήθως προκύπτει στις αρθρώσεις των σωλήνων. Παρόλο που οι βλάβες από τη διάδοση σεισμικών κυμάτων σε συνεχείς αγωγούς είναι λιγότερο συχνές, οι παρατηρούμενοι μηχανισμοί αστοχίας είναι η τοπική κάμψη ή αστοχία λόγω εφελκυσμού στις αδύναμες περιμετρικές συγκολλήσεις.

Η ανάλυση της συμπεριφοράς των υπόγειων συνεχών αγωγών σε ισχυρές κινήσεις εδάφους είναι διαφορετική από εκείνη των σπονδυλωτών αγωγών κυρίως λόγω του τύπου και της αντοχής των αρθρώσεων.

3.27 Ευθείς Συνεχείς Αγωγοί

Η αξονική καταπόνηση που προκαλείται σε ένα ευθύ συνεχή αγωγό εξαρτάται από την παραμόρφωση του εδάφους, το μήκος των κυμάτων που ταξιδεύουν και τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης στο σημείο επαφής σωλήνα-εδάφους. Για μικρές έως μέτριες κινήσεις εδάφους, θεωρείται ότι η παραμόρφωση του σωλήνα ισούται με την παραμόρφωση του εδάφους, αλλά για μεγάλες κινήσεις εδάφους, η ολίσθηση συμβαίνει συνήθως στο σημείο επαφής σωλήνα-εδάφους, με αποτέλεσμα η παραμόρφωση του σωλήνα να είναι ελαφρώς μικρότερη από την παραμόρφωση του εδάφους.

Η παραμόρφωση του εδάφους λόγω των S-waves κατά μήκος του άξονα ενός αγωγού εξαρτάται από :

- α) τη μέγιστη ταχύτητα εδάφους V_{max}
- β) την ταχύτητα διάτμησης V_s ,
- γ) τη γωνία πρόσπτωσης των κυμάτων διάτμησης, γ_s

Η παραμόρφωση του εδάφους δίνεται από τη σχέση:

$$\epsilon_g = \frac{V_{max}}{V_s} * \sin\gamma_s * \cos\gamma_s$$

Η παραμόρφωση του εδάφους λόγω των L-waves κατά μήκος ενός άξονα του αγωγού δίνεται από τη σχέση:

$$\epsilon_g = \frac{V_{max}}{C_R}$$

όπου C_R είναι η ταχύτητα διάδοσης κύματος των R-waves

Ωστόσο, οι παραπάνω εξισώσεις υπερεκτιμούν την παραμόρφωση του σωλήνα, ειδικά όταν η παραμόρφωση του εδάφους είναι μεγάλη, καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις, η ολίσθηση συμβαίνει στο σημείο επαφής σωλήνα-εδάφους και η παραμόρφωση του σωλήνα είναι μικρότερη από την παραμόρφωση του εδάφους.

Οι Μ. Ο'Rourke και ΕΙ Ηmadi (1988) εκτίμησαν τη μέγιστη αξονική παραμόρφωση που προκλήθηκε στο σημείο επαφής σωλήνα-εδάφους ενός συνεχούς σωλήνα, λόγω της διάδοσης κύματος χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$\epsilon_p = \frac{t_u L_s}{AE}$$

όπου $L_s = \lambda/4$ (λ το μήκος κύματος του σεισμικού κύματος), t_u , η δύναμη τριβής ανά μονάδα μήκους, A η επιφάνεια διατομής του σωλήνα και E ο συντελεστής ελαστικότητας του σωλήνα. Τέλος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μέγιστη αξονική παραμόρφωση σε ένα σωλήνα λόγω της κίνησης του εδάφους θεωρείται ότι είναι η μικρότερη από τα ϵ_g και ϵ_p .

Σε περίπτωση κάμψης ή σε σημείο μορφής Γ κατά μήκος του συνεχούς σωλήνα που υπόκειται σε διάδοση κύματος, η μέγιστη παραμόρφωση του σωλήνα μακριά από ένα σημείο μορφής Γ είναι μικρότερη σε σχέση με την παραμόρφωση του εδάφους και τη τάση τριβής. Σε ένα σημείο μορφής Γ , η παραμόρφωση που προκαλείται είναι μικρότερη από $1.25\epsilon_g$.

3.28 Σχέσεις Σεισμικής Ευθραυστότητας στους Υπόγειους Αγωγούς

Στην υποενότητα αυτή γίνεται εκτίμηση των πιθανών ποσών βλάβης στο σύστημα των αγωγών λόγω των πιθανών σεισμών. Για τους υπόγειους αγωγούς έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κανόνα εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ των παρατηρούμενων σεισμικών βλαβών και κάποιων μετρήσεων των κινήσεων του εδάφους.

3.28.1 Σχέσεις Διάδοσης κύματος

Ο Eguchi (1991) έλαβε διγραμμικές καμπύλες ρυθμών επισκευής, οι οποίες τροποποιήθηκαν από τον Τ. Ο' Rourke και Jeon (1999) και έλαβαν μια διγραμμική καμπύλη.

$$RR = \left(\frac{V_{max}}{266} \right)^{1.22}$$

όπου RR είναι ο ρυθμός επισκευής σε επισκευές ανά χιλιόμετρο και V_{max} είναι η μέγιστη οριζόντια ταχύτητα σε cm/sec.

Με βάση την παραπάνω εξίσωση, αναμένονται περίπου 0.13 επισκευές ανά χιλιόμετρο για $V_{max}=50\text{cm/sec}$ και ρυθμό επισκευής περίπου 0.018 για $V_{max}=10\text{cm/sec}$.

Επίσης, σύμφωνα με μελέτη της American Lifeline Alliance (2002), ALA, αναπτύχθηκε η ακόλουθη σχέση βλαβών λόγω διάδοσης κύματος:

$$RR = 0.0024V_{max}$$

Αυτή η σχέση αποδίδει περίπου 0.12 επισκευές ανά χιλιόμετρο για $V_{max}=50\text{cm/sec}$ και ρυθμό επισκευής περίπου 0.02 για $V_{max}=10\text{cm/sec}$.

3.28.2 Σχέσεις PGD

Σύμφωνα με την ALA (2002) ο μέσος ρυθμός επισκευής, σε επισκευές ανά χιλιόμετρο, δίνεται από τη σχέση $RR=2.58(D_{max})^{0.19}$ όπου D_a είναι η ποσότητα μόνιμης μετατόπισης εδάφους (permanent ground displacement-PG D) σε cm.

3.28.3 Σχέσεις Παραμόρφωσης Εδάφους

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες υποενότητες, για κύματα S (S-waves), η παραμόρφωση του εδάφους είναι γραμμικά ανάλογη της μέγιστης ταχύτητας των σωματιδίων V_{max} , αλλά, επίσης, αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας διάδοσης. Δεδομένου ότι η ταχύτητα διάδοσης C_s , των κυμάτων S είναι συνήθως μεγαλύτερη από τη C_R (R-wave), η παραμόρφωση του και κυρίως σε περιπτώσεις βλαβών σε σπονδυλωτούς σωλήνες επηρεάζεται έντονα από το είδος του κύματος.

Ο M. O'Rourke (2009) ανέπτυξε μια σχέση ευθραυστότητας βασισμένη στην παραμόρφωση εδάφους, ε_g, μετά τον υπολογισμό των συσχετισμένων εξισώσεων της μέγιστης ταχύτητας και της εξάπλωσης:

$$RR=1905\varepsilon_g^{1.12}$$

Στην περίπτωση των κυμάτων R (R-waves):

$$RRR = 0.0104V_{max}^{1.12}$$

Στην περίπτωση των κυμάτων S (S-waves):

$$RRs = 0.0022V_{\max}^{1.12}$$

Δηλαδή, για δεδομένη τιμή V_{\max} υπάρχει ένας παράγοντας που διαφέρει πέντε φορές από τις αναμενόμενες ταχύτητες επισκευής, που εξαρτώνται από τον εξεταζόμενο τύπο κύματος.

3.28.4 Επιρροή των Μεταβαλλόμενων Συντελεστών

Η αξιοσημείωτη συνοχή των βλαβών των σπονδυλωτών σωλήνων τόσο από τη διάδοση κύματος όσο και από την μόνιμη παραμόρφωση εδάφους (Permanent Ground Deformation-PGD) οδηγεί στις ακόλουθες σημαντικές παρατηρήσεις:

α) Η σεισμική συμπεριφορά ενός σωλήνα ελέγχεται από τις επιδράσεις του άξονα του σωλήνα. Δηλαδή, η κάμψη των τμημάτων του σωλήνα και η γωνιακή περιστροφή των αρθρώσεων των αγωγών φαίνεται να είναι δευτερεύουσας σημασίας. Ενώ η αξονική τάση και η θλίψη των τμημάτων των σωλήνων και η αξονική διαστολή και συστολή των σωλήνων φαίνεται ότι έχουν πρωτεύουσα σημασία.

β) Οι παραμορφώσεις του εδάφους, εξαιτίας της μόνιμης παραμόρφωσης εδάφους, (PGD) είναι περίπου 50 φορές μεγαλύτερες από τις παραμορφώσεις εδάφους λόγω διάδοσης κύματος (wave propagation). Όταν και αν εμφανίζονται μόνιμες παραμορφώσεις εδάφους (PGD), είναι περίπου 50 φορές πιο καταστροφικές για τους σπονδυλωτούς σωλήνες απ' ό τι η διάδοση κύματος. Η PGD εμφανίζεται συνήθως πάνω από ένα μικρό κομμάτι ενός δικτύου αγωγών, ενώ η διάδοση του κύματος μπορεί να επηρεάσει ολόκληρο το δίκτυο.

γ) Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν το έδαφος και την παραμόρφωση του σωλήνα, και κατά συνέπεια τις παραμορφώσεις λόγω PGD και λόγω σεισμού, χρησιμοποιούνται ως παράγοντες τροποποίησης στην ανάλυση ευθραυστότητας, όπως:

- Το υλικό των σωλήνων
- Διαβρωτικά ή μη διαβρωτικά εδάφη
- Η διάμετρος του σωλήνα

3.29 Μέτρα για την Αντιμετώπιση των Βλαβών Σεισμού των Αγωγών λόγω

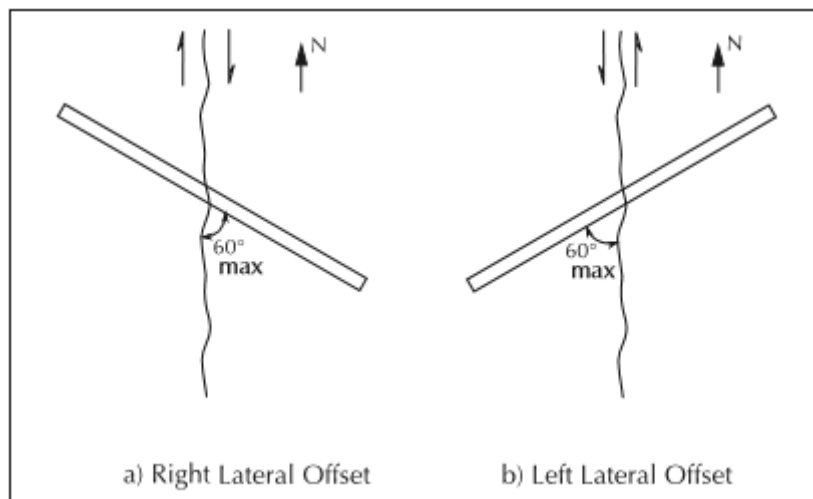
Έχουν εισαχθεί διάφορες μέθοδοι για την αντιμετώπιση των βλαβών που προκαλούνται στους αγωγούς από κάποιον σεισμό . Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν τη χρήση υλικών υψηλής αντοχής ή μεγάλης πλαστιμότητας για τους αγωγούς, τη χρήση αρθρώσεων με ενισχυμένη ικανότητα διαστολής/συστολής ή περιστροφής, διάφορες μεθόδους για την απομόνωση του αγωγού από τις εδαφικές κινήσεις, διάφορες μεθόδους για τη μείωση της εδαφικής κίνησης, αλλά και τη δρομολόγηση (routing) νέων αγωγών ή τη μετατόπιση (rerouting) κάποιων υφιστάμενων αγωγών εκτός περιοχών που είναι επιρρεπείς σε βλάβες που μπορεί να προκαλέσει κάποιος σεισμός.

3.29.1 Δρομολόγηση και Μετατόπιση (Routing and Rerouting)

Στην περίπτωση αυτή γίνεται προσπάθεια να αποφεύγονται περιοχές που είναι ευαίσθητες σε μεγάλες μετακινήσεις εδάφους. Είναι σχετικά εύκολο να εφαρμοστεί κατά τη διάρκεια του αρχικού σχεδιασμού. Αυτή η μέθοδος είναι συνήθως η πιο αποτελεσματική παραμόρφωση εδάφους PGD, όπως σε περιοχές με κατολισθήσεις ή περιοχές ευαίσθητες στην ρευστοποίηση εδάφους. Θα μπορούσε, επίσης, να χρησιμοποιηθεί για κίνδυνο μόνιμης από απειλούνται τον περιοχές που για τον κίνδυνο διασταύρωσης ρηγμάτων εάν το πέρας των γραμμών χάραξης των αγωγών βρίσκονται στην ίδια πλευρά του ενεργού ρήγματος.

3.29.2 Βέλτιστος Προσανατολισμός στο Οριζόντιο Επίπεδο

Αυτός χρησιμοποιείται συχνά για συνεχή σωλήνα που υπόκειται σε κίνδυνο PGD και περιλαμβάνει επιλογή της βέλτιστης γωνίας διασταύρωσης σωλήνων. Εφόσον οι επιτρεπόμενες παραμορφώσεις αξονικής τάσης είναι μεγαλύτερες από αυτές της αξονικής θλίψης , οποιαδήποτε γωνία που οδηγεί σε καθαρή αξονική θλίψη θα πρέπει να αποφεύγεται αν είναι δυνατόν. Με άλλα λόγια, για ρήγμα με κατεύθυνση βορρά-νότου με δεξιά πλευρική μετατόπιση, προτείνεται ο αγωγός να τοποθετηθεί με κατεύθυνση Βορειοδυτικά-Νοτοανατολικά. Σύμφωνα με τον Kennedy (1977) προτείνεται γωνία διασταύρωσης όχι μεγαλύτερη από 60° για τους υπόγειους χερσαίους αγωγούς, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.15. Επιπλέον, στην περίπτωση εγκάρσιας και διαμήκους PGD λαμβάνονται υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ζώνης PGD.



Εικόνα 3.15: Συνιστώμενες γωνίες διασταύρωσης για ρήγματα κατεύθυνσης Βορρά-Νότου

Πηγή: Michael J. O' Rourke & (Jack) X. Liu (2012)

3.29.3 Βέλτιστη Θέση στην Κατακόρυφη Διεύθυνση

Βάσει αυτής της μεθόδου, ο αγωγός διασχίζει την επικίνδυνη περιοχή αλλά απομονώνεται από τις επιδράσεις των μεγάλων εδαφικών κινήσεων μέσω επανευθυγράμμισης στην κατακόρυφη διεύθυνση. Για παράδειγμα, τοποθέτηση του αγωγού σε στηρίξεις, που βρίσκονται πάνω από το έδαφος, τύπου "goal post", σε θέσεις διασταύρωσης ρηγμάτων ή μέσα στους οχετούς σε περιπτώσεις υπόγειων αγωγών. Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τους περισσότερους τύπους κινδύνων PGD, ωστόσο, η σωστή εφαρμογή συχνά απαιτεί μία επιφάνεια ολίσθησης χαμηλή σε τριβή μεταξύ του σωλήνα και του οριζόντιου μέλους στηρίξεως.

3.29.4 Αποκατάσταση Εδάφους

Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει διάφορα είδη επεξεργασιών πεδίου για τη μείωση της πιθανότητας πλευρικής εξάπλωσης. Αυτά τα είδη επεξεργασίας είναι:

- Η αύξηση της πυκνότητας της άμμου, μειώνοντας τη στάθμη των υπογείων υδάτων και αυξάνοντας την απορρόφηση της πίεσης των πόρων νερού.
- Η συμπίκνωση της άμμου ως τεχνική για την αύξηση της πυκνότητας του εδάφους, μειώνοντας έτσι κάποια πιθανή ρευστοποίηση
- Η αντικατάσταση των ρευστοποιημένων εδαφών στη γύρω περιοχή του σωλήνα με μη ρευστοποιημένα υλικά, όπως χαλίκια.

Ωστόσο, αυτές οι μέθοδοι είναι πρακτικές μόνο όταν η χωρική έκταση των αποθέσεων ρευστοποιημένου εδάφους είναι περιορισμένη και το ρευστοποιημένο στρώμα εδάφους είναι σχετικά κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

3.29.5 Ανθεκτικότερος Σωλήνας

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση ανθεκτικότερου σωλήνα (δηλαδή υψηλότερης ονομαστικής τάσης απόδοσης) και μεγαλύτερου πάχους τοιχώματος σωλήνα και τη χρήση ισχυρά δεμένων αρθρώσεων στους σπονδυλωτούς σωλήνες. Ωστόσο, η δυσκολία επίτευξης αντοχής συγκόλλησης μεγαλύτερης από την πραγματική αντοχή του σωλήνα σε σωλήνες υψηλής αντοχής τους, καθιστά ιδιαίτερα ακατάλληλους για σεισμικούς κινδύνους, όπου προβλέπεται σημαντική εκτροπή πέρα από την παραμόρφωση της απόδοσης.

3.29.6 Μείωση Φορτίου

Η μέθοδος αυτή συνεπάγεται τη μείωση του φορτίου στον σωλήνα αντί της αύξησης της αντοχής του σωλήνα. Αυτό βασίζεται στην παράμετρο ταφής του σωλήνα β , όπως ορίζεται στην εξίσωση:

$$\beta_p = \frac{\mu \gamma H}{t}$$

χρησιμοποιώντας το μικρότερο δυνατό βάθος ταφής (H), χρησιμοποιώντας χαμηλής πυκνότητας backfill (γ) και/ή χρησιμοποιώντας λείες επιστρώσεις, οι οποίες μειώνουν το συντελεστή τριβής στο σημείο επαφής εδάφους-σωλήνα (μ).

Κεφάλαιο 4 : ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο πρόκειται να αναλυθούν οι βασικοί σεισμικοί γεωκίνδυνοι, οι οποίοι καταπονούν τους χερσαίους και υποθαλάσσιους αγωγούς. Οι αναλύσεις διεξήχθησαν με την βοήθεια του προγράμματος PLAXIS 2D, το οποίο συμβάλλει στην ερμηνεία και αξιολόγηση πεπερασμένων στοιχείων. Η έρευνα χωρίζεται στα εξής δύο στάδια: Το πρώτο στάδιο διερευνά την συμπεριφορά της κοιλάδας τροποποιώντας την γεωμετρία της και το υλικό που περιέχει. Στη συνέχεια, το δεύτερο στάδιο εξετάζει την περίπτωση των ρηγμάτων, δηλαδή αν συγκαταλέγονται στα κανονικά ή στα ανάστροφα ρήγματα.

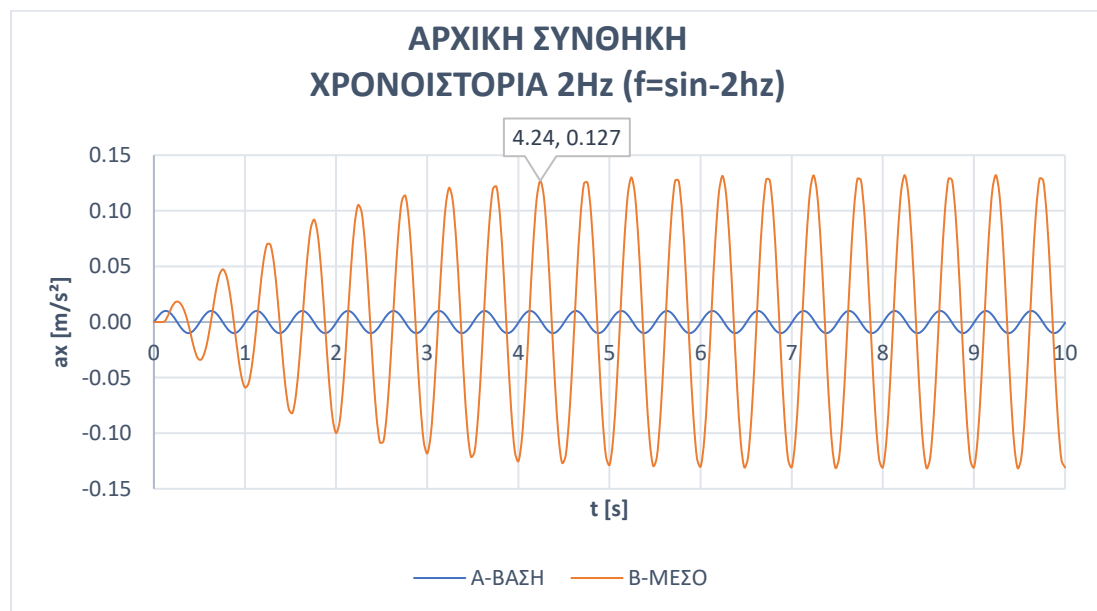
4.1 Αριθμητικές Αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία

Η αρχική συνθήκη που εξετάζεται είναι η μονοδιάστατη κοιλάδα, αφορά μια οριζόντια εδαφική στρώση, μήκους 475m και ύψους $h=25m$. Η ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος $V_s=200 m/s$ και η απόσβεση του υλικού είναι της τάξεως $\xi=5\%$. Προκειμένου να επιτευχθεί η προσομοίωση, χρησιμοποιούνται συνοριακά στοιχεία ώστε να προσομοιώνεται ικανοποιητικά η επέκταση της στρώσης σε άπειρο μήκος. Η στρώση διεγείρεται από μια αρμονική ταλάντωση με συχνότητα $f_1=2Hz$.

Η στρώση πρόκειται να συντονισθεί ενισχύοντας την αρμονική ταλάντωση κατά $2/\pi\xi$ φορές. Η απόσβεση του υλικού είναι 5%, άρα σύμφωνα με τον τύπο ο συντελεστής ενίσχυσης είναι: $AF=2/\pi * \xi = 12.7$. Οπότε, αν η διέγερση έχει μοναδιαίο πλάτος, η απόκριση στην επιφάνεια αναμένεται να είναι 12.7. Τα αποτελέσματα επαληθεύονται από την αναλυτική λύση του προγράμματος Plaxis 2D, καθώς η χρονοϊστορία στην επιφάνεια, για το σημείο B, το οποίο είναι το μέσο του προσομοιωμένου μήκους, δίνει το επιθυμητό αποτέλεσμα.



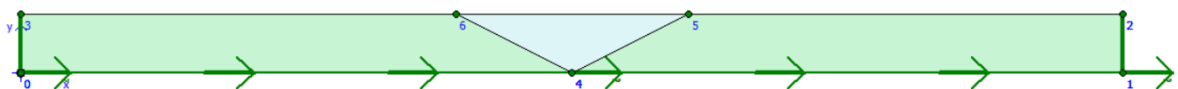
Εικόνα 4.1.1: Μονοδιάστατη κοιλάδα



Διάγραμμα 4.1.1: Αρχική συνθήκη για ημιτονική διέγερση $f=2\text{Hz}$ σημείου B

4.2 Αριθμητική προσομοίωση

Για την πιθανότητα απόκρισης της κοιλάδας σε περίπτωση σεισμού, είναι απαραίτητο να εξετασθεί η συμπεριφορά των κρίσιμων σημείων. Η επίτευξη των σκοπών της ανάλυσης πραγματοποιείται μέσω της επιλογής 7 σημείων, εκ των οποίων τα 6 βρίσκονται στην επιφάνεια, ενώ το 7^ο στο μέσο της βάσης.



Εικόνα 4.1.2: Διδιάστατη κοιλάδα

4.2.1 Στοιχεία εισαγωγής στον Κώδικα Πεπερασμένων Στοιχείων PLAXIS

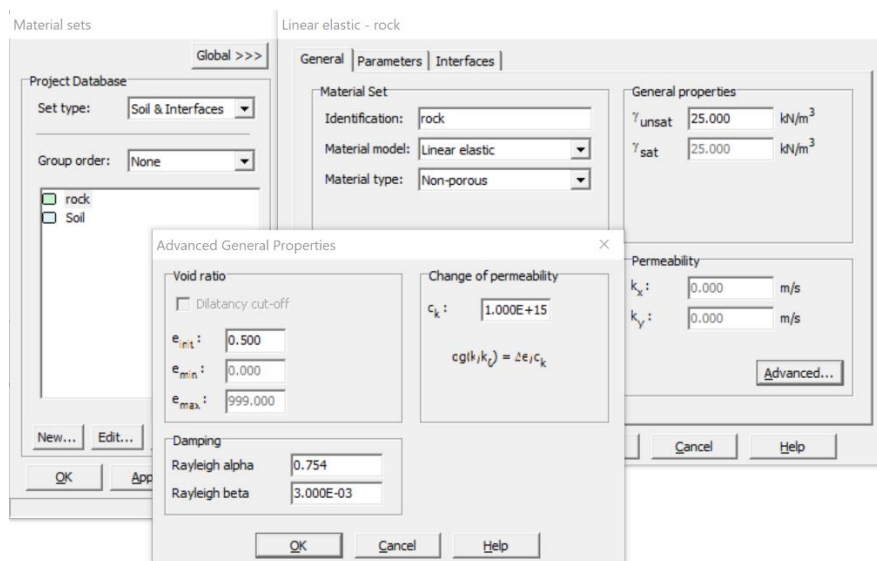
Το PLAXIS 2D χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ώστε να αναλυθούν δισδιάστατα οι παραμορφώσεις και να διεξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την σταθερότητα των γεωτεχνικών έργων. Τα γεωτεχνικά προβλήματα απαιτούν

εξελιγμένα μοντέλα για την προσομοίωση της μη-γραμμικής, κατά χρόνο ανεξάρτητη και ανισότροπη συμπεριφορά των εδαφών και των βράχων. Επιπροσθέτως, τα εδάφη απαιτούν ειδικές τεχνικές στην προσομοίωση της υδροστατικής και μη-υδροστατικής συμπεριφοράς των πιέσεων των πόρων. Παράλληλα, εκτός από τα γεωτεχνικά προβλήματα, στο παρών πρόγραμμα δίνεται η δυνατότητα διερεύνησης της αλληλεπίδρασης μεταξύ των κατασκευών και των εδαφών. Το λογισμικό είναι ιδιαίτερα φιλικό προς τον χρήστη λόγω των γραφικών που διαθέτει καθώς και της ενσωμάτωσης λειτουργιών, που προσφέρουν ταχύτητα στην ανάλυση οποιουδήποτε προβλήματος. Οι βασικές λειτουργίες διακρίνονται σε τέσσερα στάδια:

- Πρόγραμμα εισαγωγής: Πραγματοποιείται η εισαγωγή της γεωμετρίας, των ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών και δομείται με αυτόματο αλγόριθμο ο κάρναβος των πεπερασμένων στοιχείων.
- Πρόγραμμα υπολογισμού: Δίνεται η δυνατότητα επιλογής της ανάλυσης ή αναλύσεων που θα πραγματοποιηθούν. Στην συγκεκριμένη μελέτη, το πρώτο στάδιο έγινε με δυναμική ανάλυση.
- Πρόγραμμα εξόδου: Σε αυτό το σημείο εξάγονται οι αναλύσεις που έχουν προηγηθεί.
- Πρόγραμμα καμπυλών: Παράγονται τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων των σημείων που έχουν δηλωθεί στην ανάλυση. Τα σημεία αυτά μπορεί να εκφράζουν ένα δυναμικό φαινόμενο, όπως είναι η επιτάχυνση συναρτήσει του χρόνου ή η δύναμη συναρτήσει της μετατόπισης.

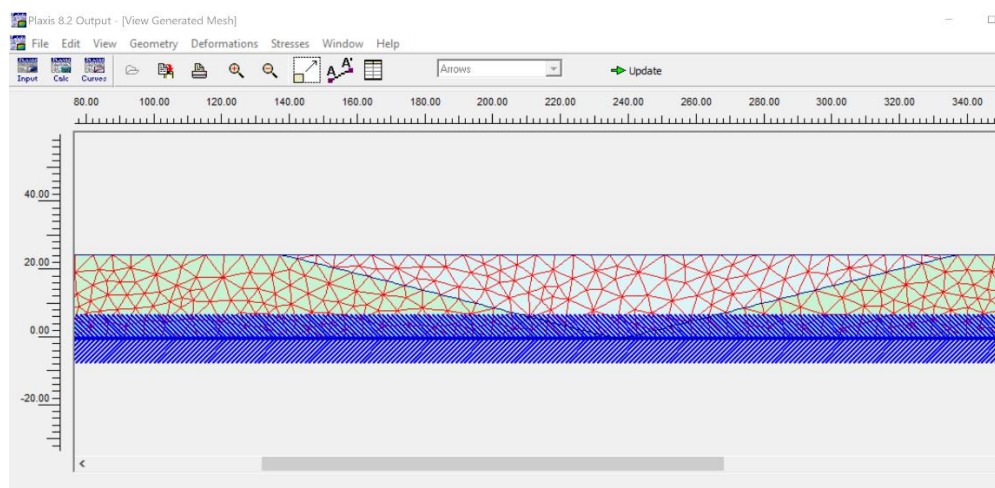
Η μελέτη της κοιλάδας εξετάστηκε με τέσσερες διαφορετικές γεωμετρίες συνδυαστικά με τρεις διαφορετικές ταχύτητες διατμητικού κύματος. Αρχικά, εισάγεται στο Plaxis το δισδιάστατο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων της κοιλάδας. Στην συνέχεια, εισάγονται οι εδαφικές παράμετροι, επιλέγοντας το υλικό του εδάφους. Τα χαρακτηριστικά του υλικού είναι: α) είδος υλικού : linear elastic
β) τύπος υλικού: non-porous γ) ειδικό βάρος : $\gamma_{unsat} = \gamma_{sat} = 25 \text{ KN} / \text{m}^3$. Το μέγεθος των Rayleigh alpha και Rayleigh beta εξάγονται από την απόσβεση. Στην προκειμένη μελέτη, η απόσβεση έχει καθοριστεί στο 5%, μέσω υπολογισμών από το MS Excel προκύπτουν οι τιμές των Rayleigh alpha=0.754 και Rayleigh beta=0.003.

Στο επόμενο βήμα καθορίζονται οι παράμετροι: μέτρο ελαστικότητας E_{ref} και η ταχύτητα της διάδοσης κύματος Vs, η τιμή της οποίας μεταβάλλεται ανάλογα με το υλικό, όπως βράχος, άργιλος, ασβεστόλιθος κ.α.



Εικόνα 4.1.3: Καθορισμός στοιχείων υλικού

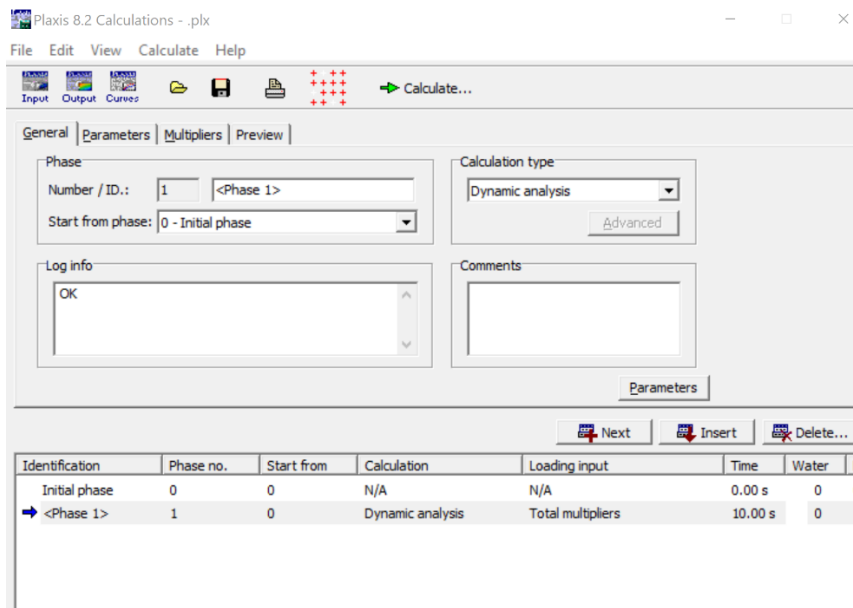
Αφού οριστεί το υλικό, δημιουργείται το πλέγμα του μοντέλου, επιλέγοντας την επιλογή Global coarseness και καθορίζεται το πλέγμα να είναι πυκνό, από την επιλογή Element distribution (very fine). Τέλος, καθορίζονται από το πρόγραμμα οι αρχικές συνθήκες (Initial Condition) ώστε να προσφέρεται η δυνατότητα να περάσει το πρόγραμμα στο επόμενο στάδιο, δηλαδή στον υπολογισμό των στοιχείων.



Εικόνα 4.1.4: Πυκνό πλέγμα κοιλάδας

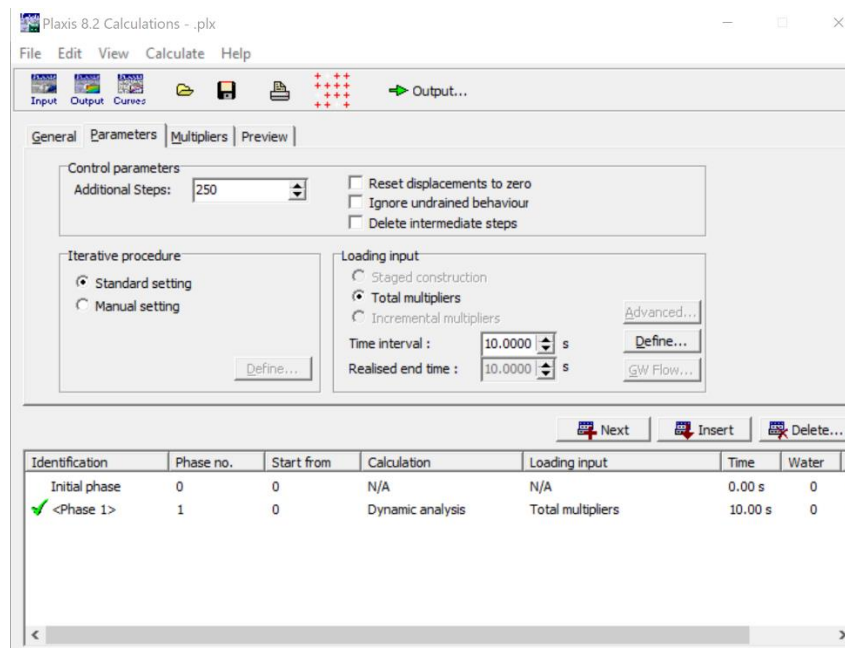
Η επιλογή Calculate ανοίγει το πρόγραμμα υπολογισμού. Αρχικά, καθορίζεται ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η ανάλυση. Στην συγκεκριμένη εργασία, το πρόβλημα που εξετάζεται είναι δυναμικό.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΓΕΩΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΟΥ ΚΑΤΑΠΟΝΟΥΝ ΧΕΡΣΑΙΟΥΣ ΚΑΙ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥΣ



Εικόνα 4.1.5: Διαδικασία υπολογισμού δυναμικής ανάλυσης

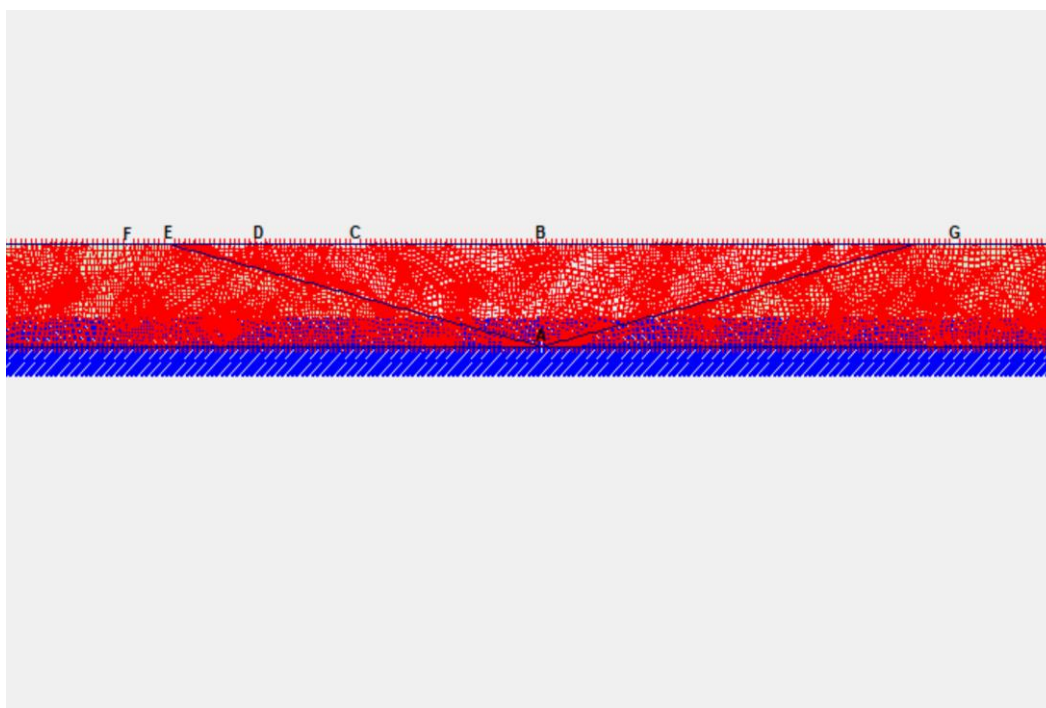
Έπειτα, επιλέγονται οι παράμετροι που θα ήταν καλό να ληφθούν υπόψη, δηλαδή σε πόσα βήματα πρόκειται να τρέξει το πρόγραμμα, ορίζοντας τα additional steps 250 και τον χρόνο, time interval=10 sec.



Εικόνα 4.1.6: Επιλογή παραμέτρων των αναλύσεων

Στη συνέχεια, εισάγεται η διέγερση και τότε ξεκινάει η διαδικασία υπολογισμού. Για τις ανάγκες της ανάλυσης επιλέχθηκαν δυο διεγέρσεις: η πραγματική ιστορία επιτάχυνσης (UPLANDEARTHQUAKE,1990) (225a.smc) και η ημιτονική διέγερση με

συχνότητα $f=2$ Hz (SIN-2hz.smc). Τέλος, γίνεται οι επιλογή των σημείων που πρόκειται να μελετηθούν. Η κοιλάδα έχει συμμετρική μορφή, οπότε τα σημεία που επιλέγονται είναι 7 (A,B,C,D,E,F,G), τα 6 εκ των οποίων βρίσκονται στην επιφάνεια. Λόγω της συμμετρίας εξετάζεται η αριστερή μεριά της κοιλάδας χωρίζοντας της σε 4 τμήματα. Συγκεκριμένα, το σημείο A βρίσκεται στο μέσο της βάσης, το σημείο B βρίσκεται στο μέσο της επιφάνειας της κοιλάδας, το σημείο C βρίσκεται στο μέσο του μισού ανοίγματος της επιφάνειας, το σημείο D είναι στα $3/4$ και το σημείο E είναι στην άκρη. Τα σημεία F και G επιλέγονται εκατέρωθεν του ανοίγματος.



Εικόνα 4.1.7: Επιλογή σημείων της εδαφικής απόκρισης (A,B,C,D,E,F,G)

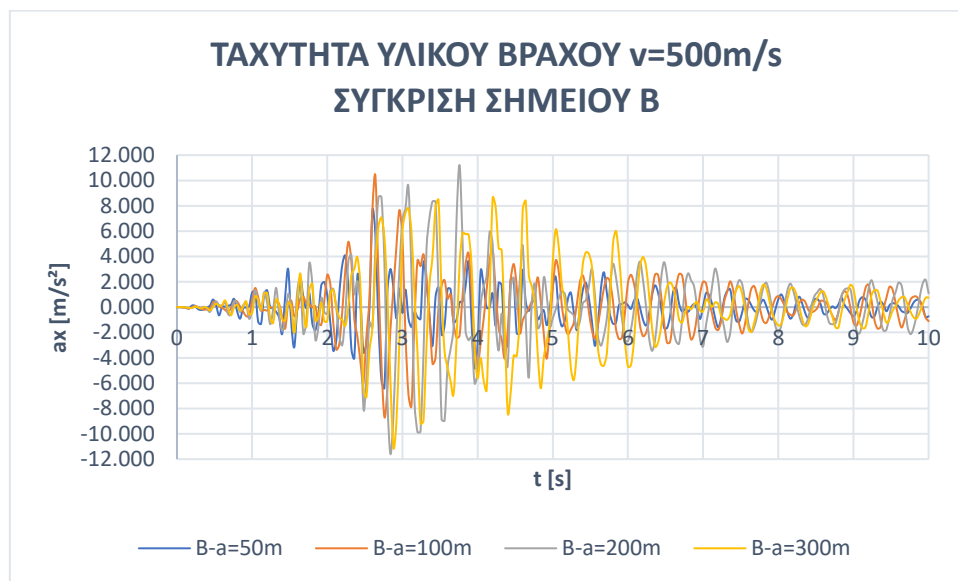
4.2.2 Αποτελέσματα Αναλύσεων – Διαγράμματα Επιταχύνσεων

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων διεξάγονται με το πρόγραμμα καμπυλών, κατά το οποίο απεικονίζονται τα διαγράμματα των επιταχύνσεων και των ταχυτήτων. Η σχεδίαση των διαγραμμάτων γίνεται με το Plaxis. Ωστόσο, για την καλύτερη ανάλυση της πληροφορίας, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με το MS Excel. Για την σχεδίαση των διαγραμμάτων επιταχύνσεων λαμβάνονται υπόψιν η ταχύτητα διάδοσης του κύματος, η οποία εξαρτάται από την επιλογή υλικού, το άνοιγμα της κοιλάδας και η διέγερση. Οι τιμές των ταχυτήτων διάδοσης που επιλέγονται είναι $v=500$ m/s, $v=1000$ m/s και $v=2000$ m/s, η γεωμετρία της κοιλάδας αφορά τα ανοίγματα

$\alpha=50\text{m}$, $\alpha=100\text{m}$, $\alpha=200\text{m}$ και $\alpha=300\text{m}$ και τέλος, οι διεγέρσεις είναι η διεγερση 225α και ημιτονική διεγερση SIN-2hz.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων επιτάχυνσης-χρόνου και ταχύτητας χρόνου για το σημείο B, το οποίο βρίσκεται στην μέση της επιφάνειας της κοιλάδας για τις περιπτώσεις που προαναφέρθηκαν. Λόγω του όγκου αποτελεσμάτων, η παρουσία των υπόλοιπων σημείων βρίσκεται στο Παράρτημα Α και στο Παράρτημα Β.

Διέγερση 225α: Πραγματική Χρονοϊστορία Επιτάχυνσης (UPLANDEARTHQUAKE)



Διάγραμμα 4.1.2: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου B, για άνοιγμα κοιλάδας $\alpha=50\text{m}$, $\alpha=100\text{m}$, $\alpha=200\text{m}$ & $\alpha=300\text{m}$, ταχύτητα διάτμησης κύματος $v=500\text{m/s}$ και διεγερση 225α

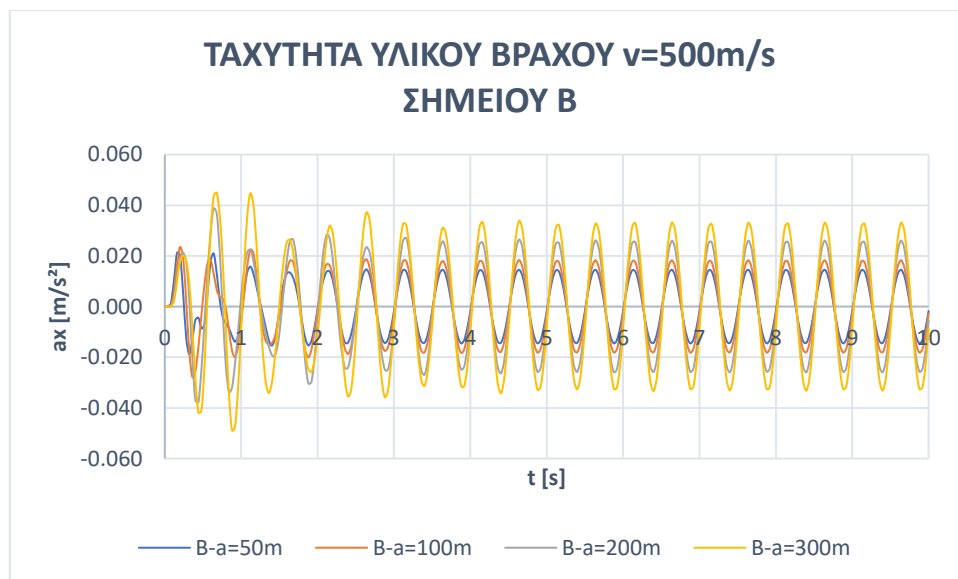


Διάγραμμα 4.1.3: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου B, για άνοιγμα κοιλάδας $\alpha=50\text{m}$, $\alpha=100\text{m}$, $\alpha=200\text{m}$ & $\alpha=300\text{m}$, ταχύτητα διάτμησης κύματος $v=1000\text{m/s}$ και διεγερση 225α

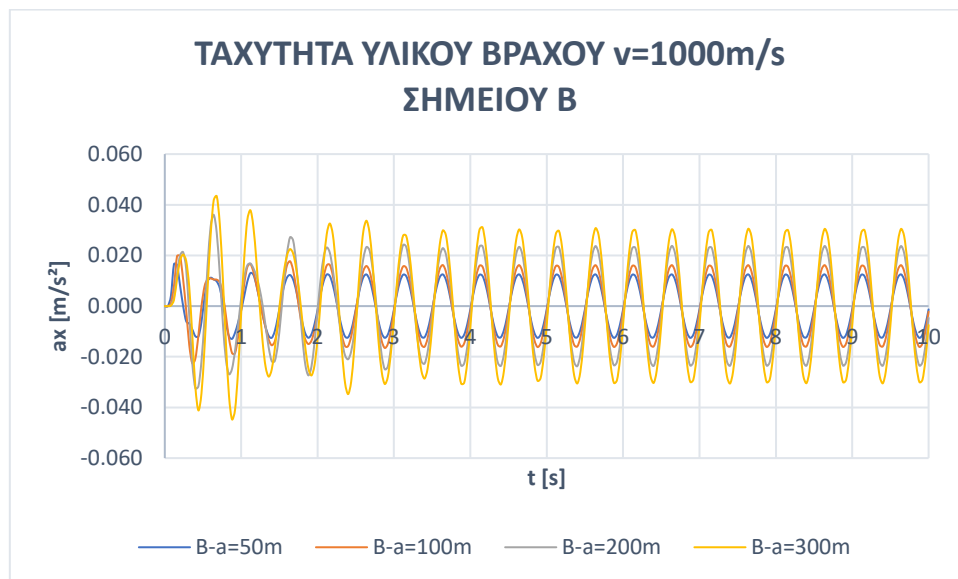


Διάγραμμα 4.1.4: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου Β, για άνοιγμα κοιλάδας $a=50\text{m}$, $a=100\text{m}$, $a=200\text{m}$ & $a=300\text{m}$, ταχύτητα διάτμησης κύματος $v=2000\text{m/s}$ και διέγερση 225α

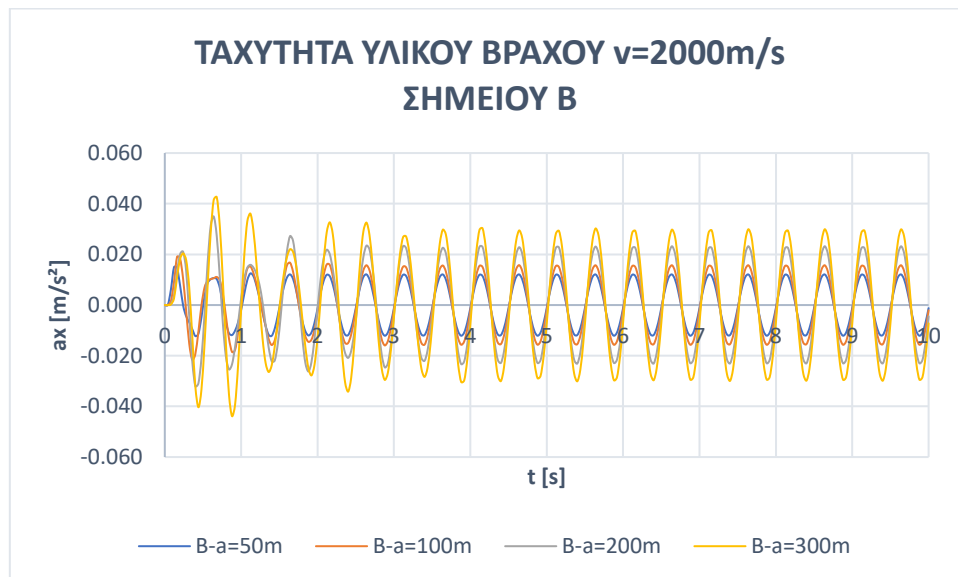
Ημιτονική διέγερση $f=2\text{Hz}$ (SIN-2hz)



Διάγραμμα 4.1.5: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου Β, για άνοιγμα κοιλάδας $a=50\text{m}$, $a=100\text{m}$, $a=200\text{m}$ & $a=300\text{m}$, ταχύτητα διάτμησης κύματος $v=500\text{m/s}$ και ημιτονική διέγερση $f=2\text{Hz}$



Διάγραμμα 4.1.6: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου B, για άνοιγμα κοιλάδας $a=50\text{m}$, $a=100\text{m}$, $a=200\text{m}$ & $a=300\text{m}$, ταχύτητα διάτμησης κύματος $v=1000\text{m/s}$ και ημιτονική διέγερση $f=2\text{Hz}$

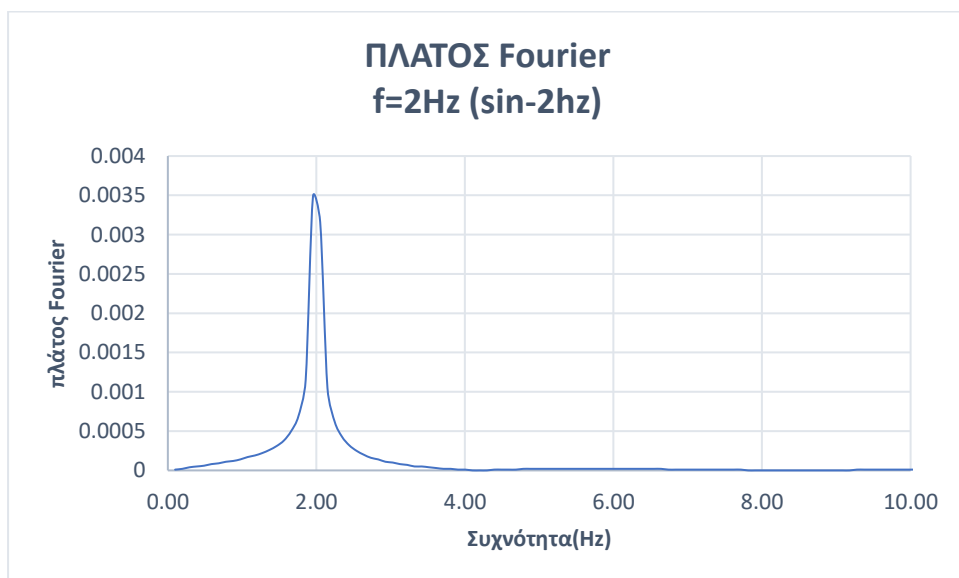


Διάγραμμα 4.1.7: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου B, για άνοιγμα κοιλάδας $a=50\text{m}$, $a=100\text{m}$, $a=200\text{m}$ & $a=300\text{m}$, ταχύτητα διάτμησης κύματος $v=2000\text{m/s}$ και ημιτονική διέγερση $f=2\text{Hz}$

Διαγράμματα Fourier



Διάγραμμα 4.1.8: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου B, για άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$, $a=100m$, $a=200m$ & $a=300m$, ταχύτητα διάτμησης κύματος $v=2000m/s$ και ημιτονική διέγερση $f=2Hz$



Διάγραμμα 4.1.9: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου B, για άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$, $a=100m$, $a=200m$ & $a=300m$, ταχύτητα διάτμησης κύματος $v=2000m/s$ και ημιτονική διέγερση $f=2Hz$

4.2.3 Συμπεράσματα για την Σεισμική Απόκριση της Κοιλιάδας

Ο πρώτος γεωκίνδυνος που εξετάζεται είναι ο τρόπος με τον οποίο αποκρίνεται μια κοιλάδα, σε περίπτωση που αλλάξει η γεωμετρία της και το υλικό της. Σύμφωνα με τις περιπτώσεις που εξετάζονται, διαμορφώνονται οι εξής πίνακες:

Πίνακες επιτάχυνσης

Διέγερση 225α: Πραγματική Χρονοϊστορία Επιτάχυνσης (UPLANDEARTHQUAKE)

Πίνακας 5.1: Πίνακας μέγιστης επιτάχυνσης των σημείων Α,Β,С,Д,Е,Ғ & G για σεισμική ανάλυση χρόνου διέγερσης 225α

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΑ f=225α, ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ												
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΚΥΜΑΤΟΣ (m/s)	500m/s				1000m/s				2000m/s			
ΣΗΜΕΙΑ/ΑΝΟΙΓΜΑ ΚΟΙΛΑΔΑΣ	50m	100m	200m	300m	50m	100m	200m	300m	50m	100m	200m	300m
A	1.761	1.761	1.761	1.761	1.761	1.761	1.761	1.761	1.761	1.761	1.761	1.761
B	7.636	10.360	11.586	11.120	8.949	8.443	9.631	9.726	5.182	6.035	9.268	9.610
C	6.933	6.800	5.826	7.084	4.833	6.598	6.392	4.338	3.866	3.994	4.885	3.813
D	6.160	6.098	6.157	6.358	5.991	6.804	7.964	8.083	2.595	3.764	5.386	6.153
E	4.138	4.908	5.084	4.772	4.459	4.293	4.139	3.949	2.349	2.369	2.385	2.370
F	3.871	4.936	4.987	4.800	4.444	4.334	4.248	3.959	2.361	2.411	2.413	2.334
G	3.901	4.969	5.002	4.816	4.447	4.351	4.205	3.953	2.362	2.404	2.453	2.342

Πίνακας 5.2: Πίνακας ποσοστού επιτάχυνσης ως προς την βάση των σημείων Α,Β,С,Д,Е,Ғ & G για σεισμική ανάλυση χρόνου διέγερσης 225α

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΑ f=225α, ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΒΑΣΗ												
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΚΥΜΑΤΟΣ (m/s)	500m/s				1000m/s				2000m/s			
ΣΗΜΕΙΑ/ΑΝΟΙΓΜΑ ΚΟΙΛΑΔΑΣ	50m	100m	200m	300m	50m	100m	200m	300m	50m	100m	200m	300m
A	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76
B	4.34	5.88	6.58	6.32	5.08	4.80	5.47	5.52	2.94	3.43	5.26	5.46
C	3.94	3.86	3.31	4.02	2.75	3.75	3.63	2.46	2.20	2.27	2.77	2.17
D	3.50	3.46	3.50	3.61	3.40	3.86	4.52	4.59	1.47	2.14	3.06	3.49
E	2.35	2.79	2.89	2.71	2.53	2.44	2.35	2.24	1.33	1.35	1.35	1.35
F	2.20	2.80	2.83	2.73	2.52	2.46	2.41	2.25	1.34	1.37	1.37	1.33
G	2.22	2.82	2.84	2.74	2.53	2.47	2.39	2.25	1.34	1.37	1.39	1.33

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πινάκων, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα διάδοσης κύματος σε συνδυασμό με την γεωμετρία, το ποσοστό επιτάχυνσης ως προς την βάση τείνει να φθίνει. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το σημείο Β, το οποίο βρίσκεται στο κέντρο της επιφάνειας. Το ποσοστό της επιτάχυνσης στην περίπτωση

$V_s=2000\text{m/s}$ είναι $\alpha\%=5.46$ για άνοιγμα κοιλάδας 300m, ενώ το αποτέλεσμα αυξάνεται περισσότερο από μια μονάδα για την περίπτωση $V_s=500\text{m/s}$ με $\alpha\%=6.32$. Ενώ, όσο αυξάνει η ταχύτητα διάδοσης κύματος και αυξάνεται και η γεωμετρία παρατηρείται ότι οι τιμές αντιστοιχούν σε μικρότερη ταχύτητα διάδοσης και μικρότερο άνοιγμα επιφάνειας. Επιπλέον, είναι εμφανής ότι η γεωμετρία επηρεάζει την απόκριση του εδάφους. Σε μικρότερο άνοιγμα κοιλάδας το έδαφος αποκρύνεται λιγότερο σε σχέση με τα ανοίγματα $\alpha=200\text{m}$ και $\alpha=300\text{m}$. Τέλος, διεξάγεται το συμπέρασμα ότι κάθε σημείο στην επιφάνεια στο εσωτερικό της κοιλάδας διαφοροποιείται έντονα από το προηγούμενο του.

Πίνακες ταχύτητας

Πίνακας 5.3: Πίνακας μέγιστης ταχύτητας των σημείων A,B,C,D,E,F & G για σεισμική ανάλυση χρόνου διέγερσης 225α

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΑ $f=225\alpha$, ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ												
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΚΥΜΑΤΟΣ (m/s)	500m/s				1000m/s				2000m/s			
ΣΗΜΕΙΑ/ΑΝΟΙΓΜΑ ΚΟΙΛΑΔΑΣ	50m	100m	200m	300m	50m	100m	200m	300m	50m	100m	200m	300m
A	0.088	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089
B	0.320	0.477	0.638	0.586	0.201	0.340	0.585	0.556	0.148	0.279	0.571	0.548
C	0.281	0.309	0.266	0.214	0.178	0.239	0.229	0.182	0.146	0.219	0.231	0.173
D	0.212	0.229	0.170	0.196	0.181	0.210	0.173	0.165	0.109	0.151	0.150	0.157
E	0.149	0.175	0.166	0.151	0.149	0.152	0.149	0.144	0.102	0.102	0.102	0.102
F	0.144	0.174	0.167	0.147	0.149	0.153	0.150	0.144	0.102	0.102	0.103	0.102
G	0.144	0.174	0.167	0.148	0.149	0.153	0.150	0.144	0.102	0.103	0.102	0.102

Πίνακας 5.4: Πίνακας ποσοστού ταχύτητας ως προς την βάση των σημείων A,B,C,D,E,F & G για σεισμική ανάλυση χρόνου διέγερσης 225α

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΑ $f=225\alpha$, ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΒΑΣΗ												
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΚΥΜΑΤΟΣ (m/s)	500m/s				1000m/s				2000m/s			
ΣΗΜΕΙΑ/ΑΝΟΙΓΜΑ ΚΟΙΛΑΔΑΣ	50m	100m	200m	300m	50m	100m	200m	300m	50m	100m	200m	300m
A	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
B	3.611	5.384	7.190	6.614	2.265	3.834	6.605	6.274	1.669	3.145	6.441	6.185
C	3.177	3.491	3.005	2.413	2.005	2.693	2.583	2.050	1.647	2.475	2.610	1.953
D	2.395	2.585	1.922	2.208	2.042	2.371	1.946	1.861	1.231	1.702	1.691	1.772
E	1.685	1.981	1.869	1.699	1.681	1.715	1.686	1.627	1.156	1.155	1.156	1.155
F	1.625	1.971	1.884	1.660	1.686	1.724	1.697	1.619	1.155	1.155	1.159	1.155
G	1.627	1.970	1.885	1.668	1.687	1.725	1.695	1.620	1.155	1.158	1.153	1.155

Ημιτονική διέγερση $f=2\text{Hz}$ (SIN-2hz)

Πίνακες επιτάχυνσης

Πίνακας 5.5: Πίνακας μέγιστης επιτάχυνσης των σημείων A,B,C,D,E,F & G για σεισμική ανάλυση χρόνου διέγερσης $f=2\text{Hz}$

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΑ $f=2\text{Hz}$ (sin-2hz), ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ												
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΚΥΜΑΤΟΣ (m/s)	500m/s				1000m/s				2000m/s			
ΣΗΜΕΙΑ/ΑΝΟΙΓΜΑ ΚΟΙΛΑΔΑΣ	50m	100m	200m	300m	50m	100m	200m	300m	50m	100m	200m	300m
A	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
B	0.021	0.028	0.039	0.049	0.017	0.023	0.036	0.045	0.015	0.022	0.035	0.044
C	0.020	0.023	0.026	0.024	0.016	0.019	0.020	0.018	0.014	0.017	0.019	0.018
D	0.018	0.017	0.017	0.018	0.013	0.013	0.012	0.013	0.012	0.012	0.011	0.011
E	0.016	0.015	0.015	0.015	0.011	0.011	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
F	0.016	0.015	0.015	0.015	0.011	0.011	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
G	0.016	0.015	0.015	0.015	0.011	0.011	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010

Πίνακας 5.6: Πίνακας ποσοστού επιτάχυνσης ως προς την βάση των σημείων A,B,C,D,E,F & G για σεισμική ανάλυση χρόνου διέγερσης $f=2\text{Hz}$

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΑ $f=2\text{Hz}$ (sin-2hz), ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΒΑΣΗ												
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΚΥΜΑΤΟΣ (m/s)	500m/s				1000m/s				2000m/s			
ΣΗΜΕΙΑ/ΑΝΟΙΓΜΑ ΚΟΙΛΑΔΑΣ	50m	100m	200m	300m	50m	100m	200m	300m	50m	100m	200m	300m
A	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
B	2.12	2.78	3.87	4.89	1.66	2.26	3.61	4.47	1.49	2.16	3.50	4.39
C	1.96	2.28	2.62	2.44	1.57	1.87	1.96	1.83	1.41	1.70	1.86	1.76
D	1.81	1.72	1.71	1.77	1.27	1.33	1.23	1.34	1.19	1.19	1.14	1.13
E	1.60	1.51	1.51	1.47	1.06	1.06	1.05	1.05	1.01	1.01	1.01	1.01
F	1.58	1.51	1.53	1.46	1.06	1.06	1.05	1.04	1.01	1.01	1.01	1.01
G	1.58	1.52	1.53	1.46	1.06	1.06	1.05	1.04	1.01	1.01	1.01	1.01

Στην περίπτωση της ημιτονικής διέγερσης τα αποτελέσματα είναι πιο ήπια. Εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα στην διαφοροποίηση της γεωμετρίας του εδάφους είναι σταθερά για κάθε σημείο. Με άλλα λόγια, παρατηρείται το σημείο B έχει σχεδόν μία μονάδα αύξηση για $\alpha=100\text{m}$, $\alpha=200\text{m}$ και $\alpha=300\text{m}$ για την ίδια ταχύτητα διάδοσης. Το οποίο αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο για μια σταθερή χρονοϊστορία. Ακόμα, η απόκριση του σημείου B, το οποίο βρίσκεται στην μέση της κοιλάδας, επηρεάζεται έντονα από την σεισμική διέγερση, συγκεντρώνοντας το μεγαλύτερο ποσοστό επηρεασμού από το κέντρο. Όσο τα σημεία πλησιάζουν στα άκρα τείνουν να πλησιάζουν την σταθερή κατάσταση που έχει ο βράχος στο υπόστρωμα. Όπως είναι αναμενόμενο τα σημεία E,F & G εξάγουν το ίδιο αποτέλεσμα καθώς το σημείο E

βρίσκεται στο αριστερό άκρο της κοιλάδας, ενώ τα σημεία F & G βρίσκονται εκατέρωθεν.

Πίνακες ταχύτητας

Πίνακας 5.8: Πίνακας ταχύτητας ως προς την βάση των σημείων A,B,C,D,E,F & G για σεισμική ανάλυση χρόνου διέγερσης $f=2\text{Hz}$

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΑ $f=2\text{Hz}$ ($\sin-2\text{hz}$), ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ												
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (m/s)	500m/s				1000m/s				2000m/s			
ΣΗΜΕΙΑ/ ΑΝΟΙΓΜΑ ΚΟΙΛΑΔΑΣ	50m	100m	200m	300m	50m	100m	200m	300m	50m	100m	200m	300m
A	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
B	0.002	0.003	0.004	0.004	0.002	0.002	0.003	0.004	0.002	0.002	0.003	0.004
C	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
D	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
E	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
F	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
G	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002

Πίνακας 5.8: Πίνακας ποσοστού ταχύτητας ως προς την βάση των σημείων A,B,C,D,E,F & G για σεισμική ανάλυση χρόνου διέγερσης $f=2\text{Hz}$

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι αναλύσεις υποδεικνύουν ότι οι τοπικές συνθήκες επηρεάζουν σημαντικά την ισχυρή τοπική δόνηση στην επιφάνεια του εδάφους, η οποία καταπονεί τους αγωγούς με την δυναμική φόρτιση της περιοχής.

4.3 Ρήγμα

4.3.1 Στοιχεία Εισαγωγής στον Κώδικα Πεπερασμένων Στοιχείων Plaxis 2D

Για την εισαγωγή δεδομένων ακολουθείται η ίδια διαδικασία που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ωστόσο, τα όρια που καθορίζονται στο προσομοιωμένο έδαφος είναι διαφορετικά και το μέγεθος τους τροποποιείται. Από την μια πλευρά, το έδαφος είναι πακτωμένο, χρησιμοποιώντας την εντολή total fixities, ενώ από την αριστερή πλευρά γίνεται εξαναγκασμένη μετατόπιση με την εντολή prescribed displacement. Η επιλογή του υλικού είναι συμπαγής βράχος και τα χαρακτηριστικά του είναι: α) είδος υλικού : Mohr-Coulomb β) τύπος υλικού : Drained γ) ειδικό βάρος : $\gamma_{\text{unsat}} = \gamma_{\text{sat}} = 25 \text{ KN} / \text{m}^3$. Στο επόμενο βήμα καθορίζονται οι παράμετροι: μέτρο ελαστικότητας E_{ref} και η ταχύτητα της διάδοσης κύματος, η οποία είναι $V_s=200 \text{ m/s}$, η αντοχή του βράχου είναι $c_{\text{ref}}=15\text{KN/m}^2$ και η γωνία τριβής. Στην μελέτη εξετάζονται

τρεις γωνίες τριβής. Η $\varphi=15^\circ$, είναι μια πολύ μικρή γωνία, η οποία εξετάζει την περίπτωση των υποθαλάσσιων κατασκευών. Οι γωνίες $\varphi=25^\circ$ και $\varphi=30^\circ$ εξετάζουν την περίπτωση των χερσαίων κατασκευών. Έπειτα, σχηματίζεται ένα πυκνό πλέγμα για το υλικό. Ας σημειωθεί ότι μπορεί να συνεχιστεί η διαδικασία για την επεξεργασία των δεδομένων.

Στο πρόγραμμα υπολογισμού, για το είδος υπολογισμού, επιλέγεται πλαστική ανάλυση (Plastic). Οι παράμετροι που καθορίζονται είναι α) additional steps=1000, β) reset displacements to zero, ξεκινώντας την μετατόπιση από το μηδέν, γ) staged construction και τέλος, δ) από την εντολή define, καθορίζεται η μετατόπιση στο 1 μέτρο. Στην συνέχεια, επιλέγονται τα σημεία από τα οποία θα εξαχθούν τα αποτελέσματα για την τελική μορφοποίηση της επιφάνειας του εδάφους, στην περίπτωση δημιουργίας ρήγματος. Επιλέγονται 10 σημεία στην επιφάνεια ομοιόμορφα κατανομημένα (A,B,C,D,E,F,G,H,I,J) με γνωστές θέσεις. Εφόσον έχει γίνει η παραπάνω διαδικασία ξεκινάει ο υπολογισμός των δεδομένων (calculate).

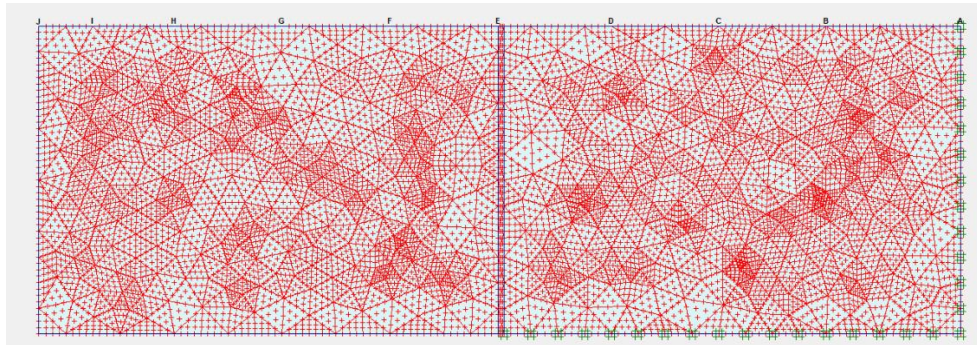
4.3.2 Αποτελέσματα Αναλύσεων – Διαγράμματα Μετατόπισης

Τα αποτελέσματα εξάγονται από το πρόγραμμα καμπυλών, κατά το οποίο προκύπτουν τα δεδομένα για κάθε σημείο που είχε τοποθετηθεί στην επιφάνεια της επίστρωσης. Τα διαγράμματα, τα οποία παράγονται, αποτελούν διαγράμματα μετατόπισης συναρτήσει των βημάτων που έχουν καθοριστεί. Ωστόσο, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων έγινε στο MS Excel προκειμένου να δημιουργηθεί η τελική επιφάνεια του εδάφους μετά το ρήγμα. Στην εργασία εξετάζονται οι βασικές περιπτώσεις ρηγμάτων, το κανονικό και το ανάστροφο ρήγμα. Τα τελικά διαγράμματα αποδίδουν τη κατανομή των καθιζήσεων της επιφάνειας προς το μήκος της επίστρωσης, κατά τους άξονες x και y.

Οι περιπτώσεις που υπολογίστηκαν αφορούν το ύψος της επίστρωσης $h=25\text{m}$, $h=50\text{m}$, $h=100\text{m}$ και $h=200\text{m}$ και παρουσιάζουν τις γωνίες τριβής που αναφέρονται προηγουμένως.

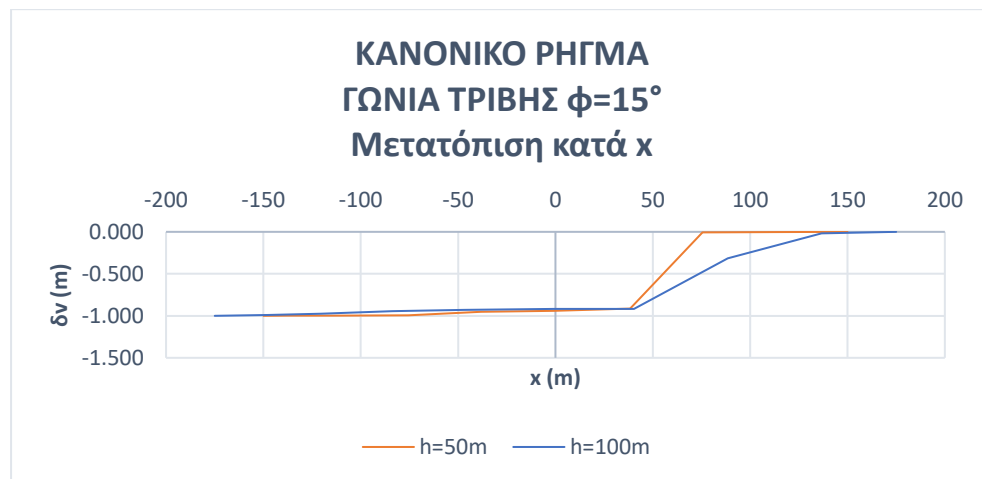
Παρακάτω παρουσιάζονται τα συνολικά διαγράμματα για όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται. Στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται τα υπόλοιπα διαγράμματα για κάθε περίπτωση ξεχωριστά.

Προκειμένου να διαμορφωθεί η επιφάνεια της καθίζησης επιλέγονται 10 σημεία στην επιφάνεια της επίστρωσης. Τα σημεία A,B,C,D,E,F,G,H,I,J είναι ομοιόμορφα κατανομημένα στο άνοιγμα της εδαφικής στρώσης με σκοπό να εξάγουν όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικό αποτέλεσμα, δηλαδή την καθίζηση των σημείων στην επιφάνεια

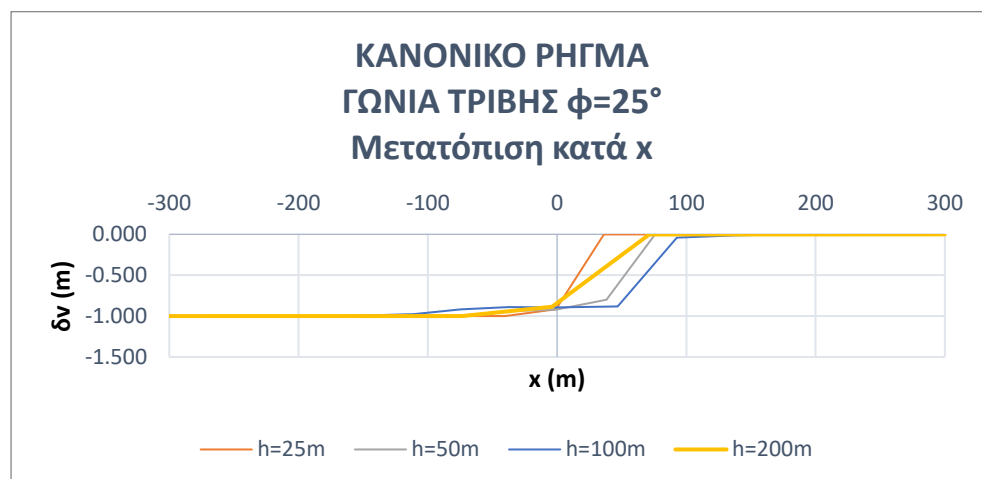


Εικόνα 4.2.1: Κατανομή σημείων (A,B,C,D,E,F,G,H,I,J) καθίζησης της επιφάνειας για κανονικό και ανάστροφο ρήγμα

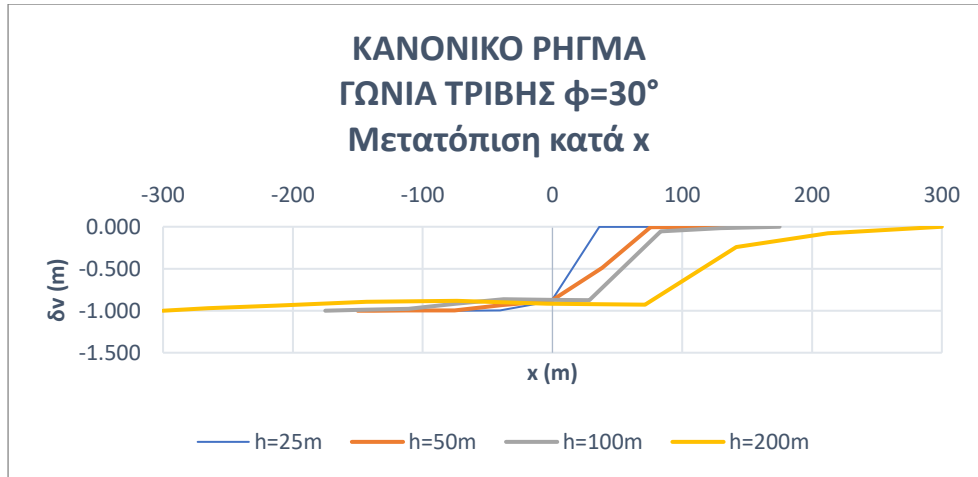
Κανονικό Ρήγμα



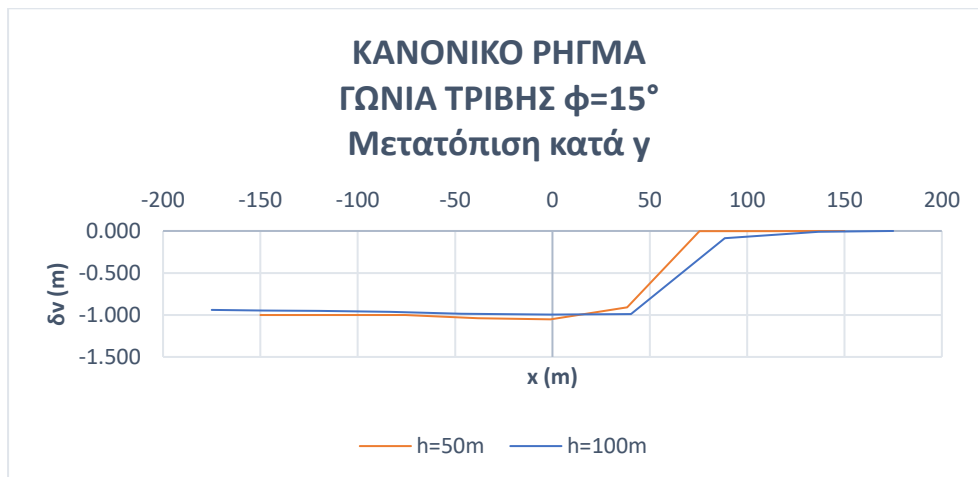
Διάγραμμα 4.2.1: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα x , για γωνία τριβής $\phi=15^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=50m$ & $h=100m$



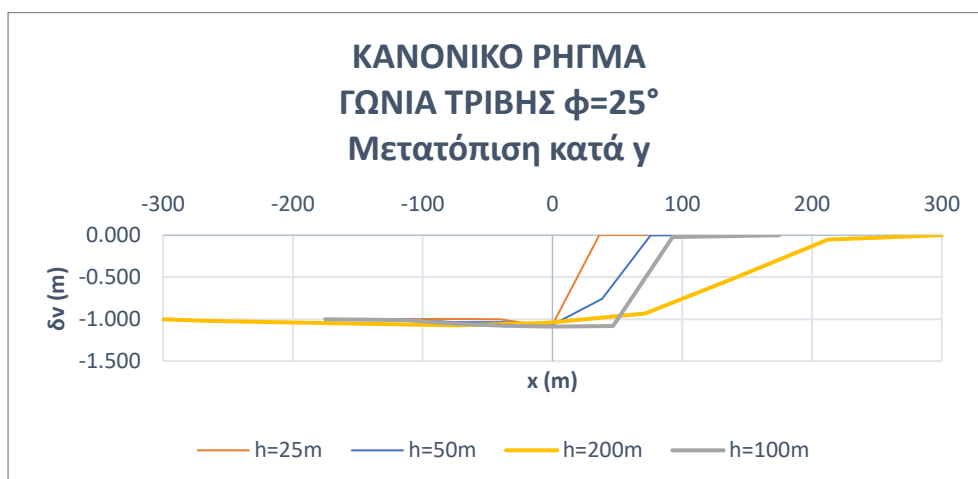
Διάγραμμα 4.2.2: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα x , για γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=25m$, $h=50m$, $h=100m$ & $h=200m$



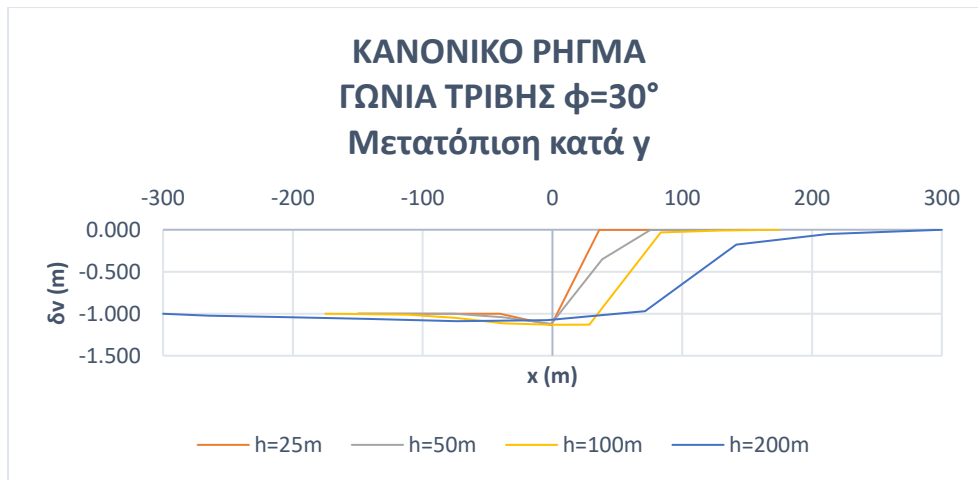
Διάγραμμα 4.2.3: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα x, για γωνία τριβής $\phi=30^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=25m$, $h=50m$, $h=100m$ & $h=200m$



Διάγραμμα 4.2.4: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα x, για γωνία τριβής $\phi=15^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=50m$ & $h=100m$

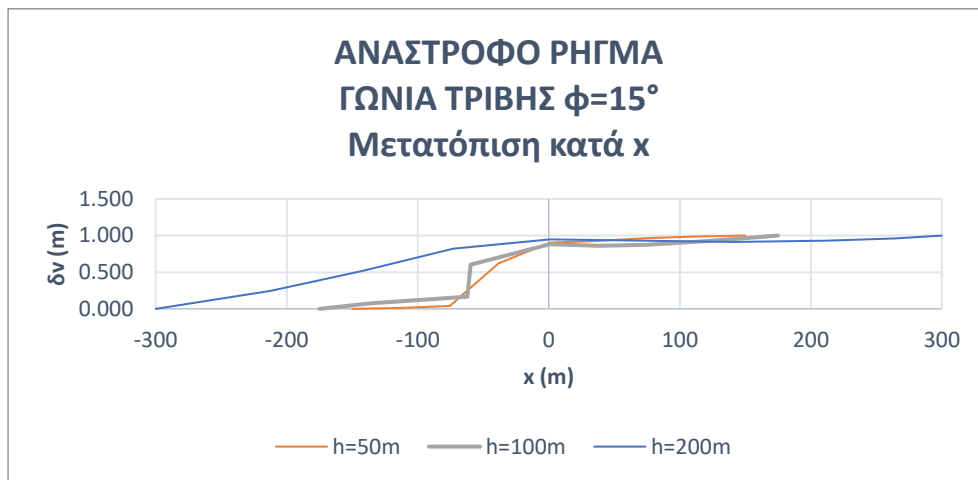


Διάγραμμα 4.2.5: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα y, για γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=25m$, $h=50m$, $h=100m$ & $h=200m$

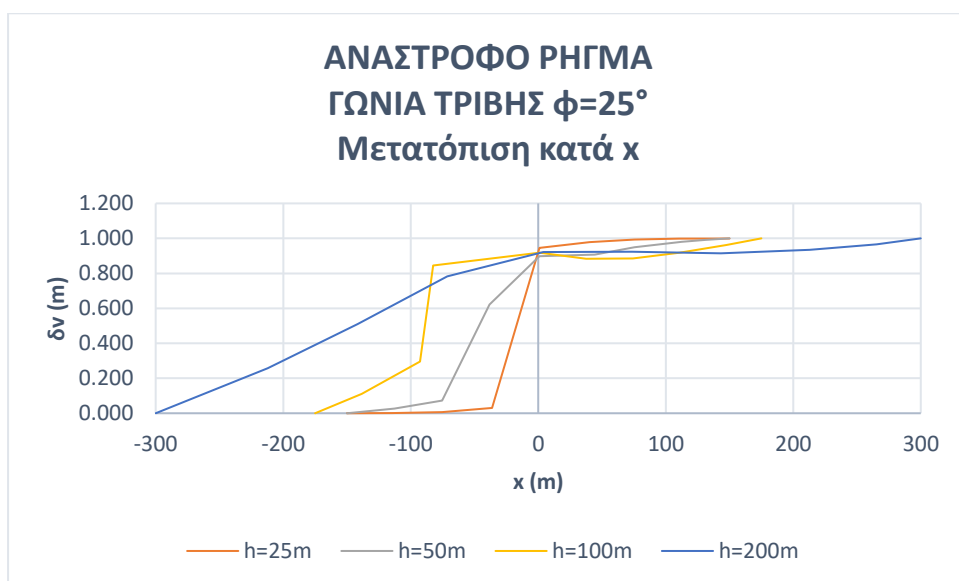


Διάγραμμα 4.2.6: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης δv (m) συναρτήσει της μετατόπισης x (m) κατά τον άξονα y , για γωνία τριβής $\phi=30^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=25m$, $h=50m$, $h=100m$ & $h=200m$

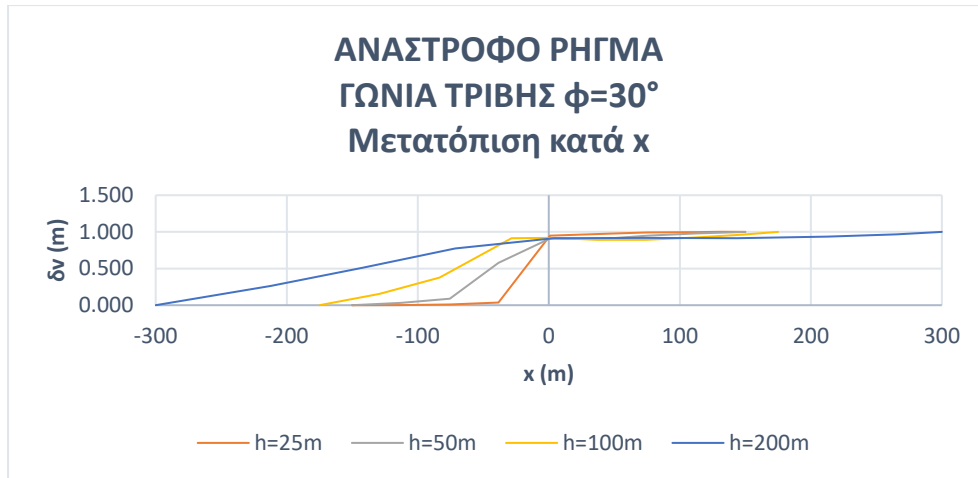
Ανάστροφο Ρήγμα



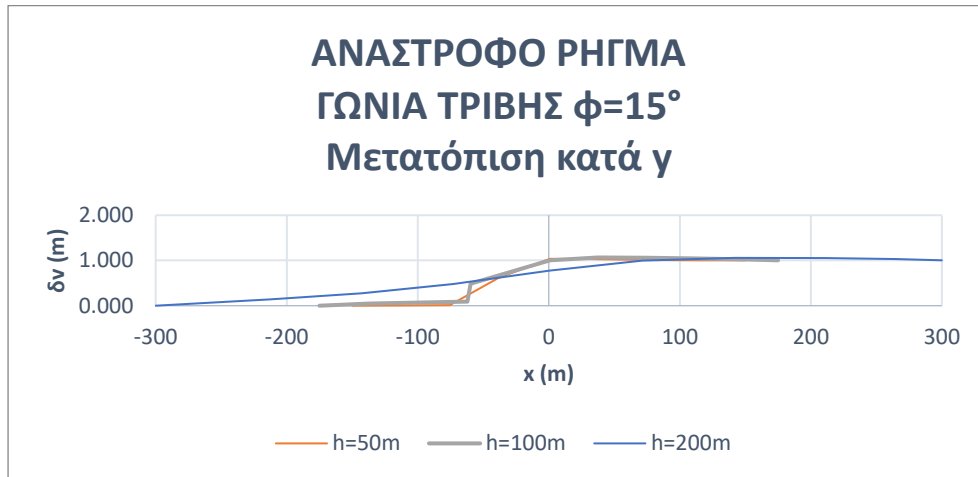
Διάγραμμα 4.2.7: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης δv (m) συναρτήσει της μετατόπισης x (m) κατά τον άξονα x , για γωνία τριβής $\phi=15^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=50m$, $h=100m$ & $h=200m$



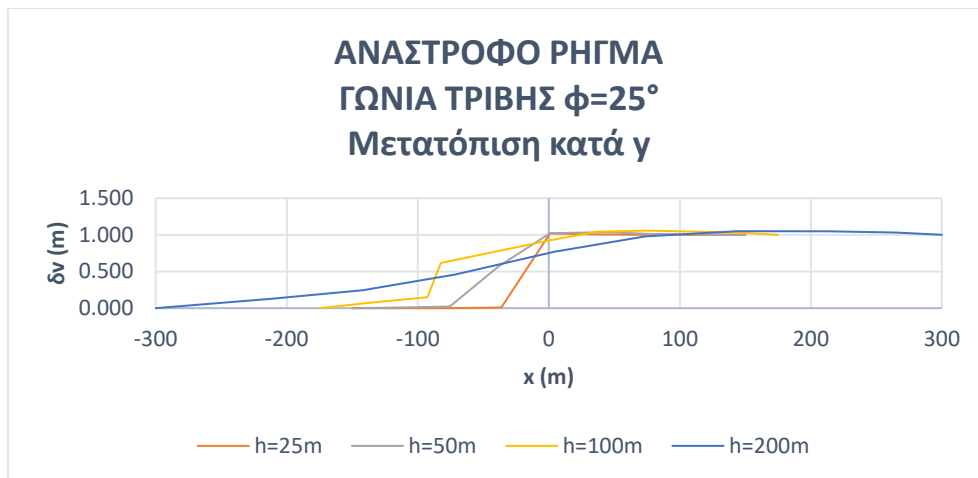
Διάγραμμα 4.2.8: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα x , για γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=25m$, $h=50m$, $h=100m$ & $h=200m$



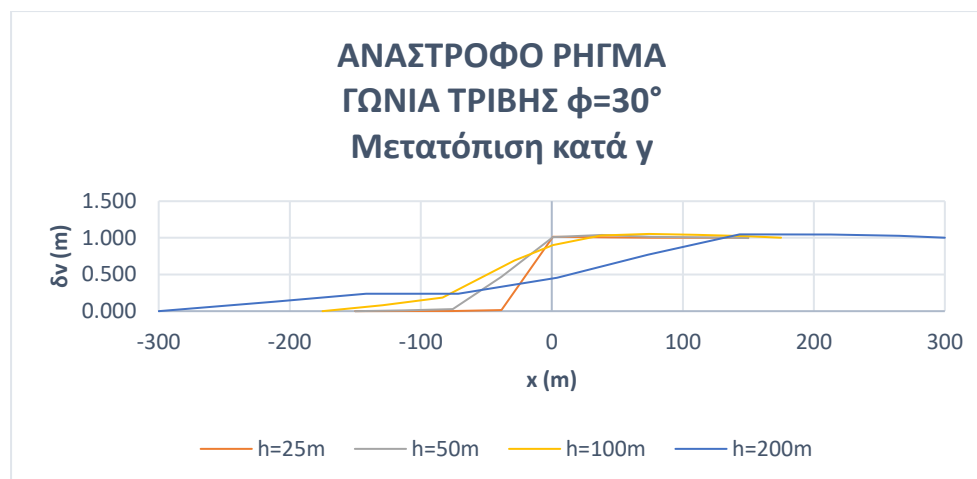
Διάγραμμα 4.2.9: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα x , για γωνία τριβής $\phi=30^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=25$, $h=50m$, $h=100m$ & $h=200m$



Διάγραμμα 4.2.10: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα y , για γωνία τριβής $\phi=15^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=50m$, $h=100m$ & $h=200m$



Διάγραμμα 4.2.11: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα y , για γωνία τριβής $\phi=25^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=25$, $h=50m$, $h=100m$ & $h=200m$



Διάγραμμα 4.2.12: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα y , για γωνία τριβής $\phi=30^\circ$ στις επιστρώσεις ύψους $h=25$, $h=50m$, $h=100m$ & $h=200m$

4.3.3 Συμπεράσματα Διαγραμμάτων Καθίζησης Κανονικού και Ανάστροφου ρήγματος

Η μόνιμη εδαφική παραμόρφωση του εδάφους μπορεί να προκαλέσει ρήξη στον αγωγό. Επομένως, η χάραξη ενός εκτενούς έργου πρέπει πρώτα να εξετάζει το εδαφικό υλικό από το οποίο θα περάσει και τις συνθήκες της περιοχής, γνωρίζοντας ότι ο αγωγός είναι μια τρωτή κατασκευή. Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται δίνουν την μορφή του σχηματισμού της οριζόντιας επιφάνειας. Η γωνία $\phi=15^\circ$ χρησιμοποιείται στην περίπτωση του υποθαλάσσιου αγωγού. Ενώ, η γωνία $\phi=25^\circ$ και $\phi=30^\circ$ απευθύνεται στους χερσαίους αγωγούς.

Σύμφωνα με τις αναλύσεις που παρουσιάζονται στο προηγούμενο κεφάλαιο 4.3 διαπιστώνεται ότι τα μήκος του ανοίγματος της επίστρωσης έχει καθοριστικό ρόλο στο αν τελικά θα καταπονηθεί ή όχι ο αγωγός. Με άλλα λόγια στην περίπτωση ρήγματος, κανονικού ή ανάστροφου, για μήκος $a=300m$ η εδαφική καθίζηση γίνεται ομαλά, οπότε ο αγωγός μπορεί να απορροφήσει την παραμόρφωση χωρίς να σπάσει. Αντίθετα σε πολύ μικρό μήκος η γωνία κλίσης είναι πολύ έντονη, οπότε ο αγωγός στο σημείο του ρήγματος θα αναδιπλωθεί. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να ελέγχεται η γωνία τριβής σε συνδυασμό με το μήκος και το πλάτος της επίστρωσης.

Κεφάλαιο 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας την βιβλιογραφική ανασκόπηση και την μελέτη της αριθμητικής προσομοίωσης για τους δύο βασικούς γεωκινδύνους των χερσαίων και υποθαλάσσιων αγωγών με την βοήθεια του προγράμματος PLAXIS 2D, εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Οι σεισμικοί γεωκίνδυνοι διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην αστοχία του αγωγού. Γι' αυτό κρίνεται απαραίτητο, πριν την χάραξη ενός αγωγού, να γίνεται προμελέτη και να εξετάζεται η γεωμορφολογία της περιοχής.
2. Στην περίπτωση που οι συνθήκες των οριακών καταστάσεων για την καταπόνηση των αγωγών δεν τηρούνται, μπορεί να είναι καταταστροφικές.
3. Η μορφολογία της κοιλάδας επηρεάζει σημαντικά την ισχυρή εδαφική δόνηση στην επιφάνεια της εδάφους, η οποία καταπονεί τους αγωγούς άμεσα, λόγω της δυναμικής φόρτισης.
4. Τα ρήγματα, οι κατολισθήσεις και η ρευστοποίηση τους εδάφους ευθύνονται για τις μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις (PGDs), καθώς κρίνονται υπαίτια για ρήξη στους αγωγούς. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του ρήγματος, όταν διαμορφώνεται απότομη κλίση στο έδαφος, ο αγωγός ενδεχομένως να μην απορροφήσει την παραμόρφωση του εδάφους, με αποτέλεσμα να προκληθεί ρήξη του αγωγού.

5.2 Προτάσεις

Η παρούσα διερεύνηση του ζητήματος σχετικά με την καταπόνηση των χερσαίων και υποθαλάσσιων αγωγών από δύο βασικούς σεισμικούς γεωκίνδυνους θέτει τα θεμέλια για την διεξαγωγή περαιτέρου έρευνας. Αρχικά, προτείνεται να μελετηθεί η περίπτωση της τρισδιάστατης κοιλάδας, καθώς η μορφολογία της φαίνεται πιο αντιπροσωπευτική με την πραγματικότητα. Έπειτα, η μεταβολή της γεωμετρίας της κοιλάδας σε ακανόνιστο σχήμα θα δώσει, αναμφίβολα, διαφορετικά αποτελέσματα. Σχετικά με τα ρήγματα, συνίσταται να εξετασθεί η παράλληλη κίνηση του ρήγματος, δηλαδή η οριζόντια μετατόπιση. Σε αυτή την περίπτωση, πρόκειται να εξετασθεί η πιθανότητα ολίσθησης του αγωγού στην επιφάνεια.

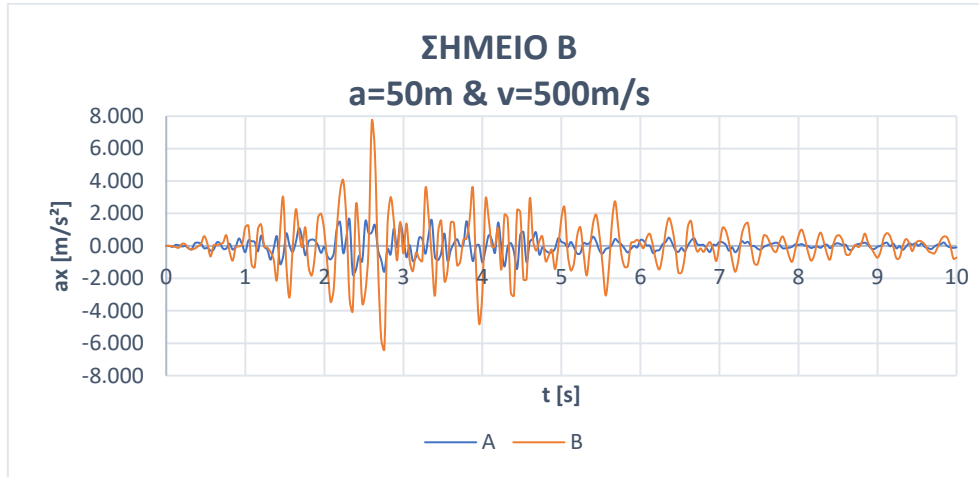
Παράλληλα, μια εκτενέστερη παραμετρική ανάλυση συμβάλλει στην ολοκλήρωση μιας πιο εμπειριστατωμένης έρευνας, αποτελούμενη από επιπρόσθετους παραμέτρους σχετικά με το υλικό του εδάφους. Επίσης, η αναλυτική και η πειραματική διερεύνηση με τη χρήση αποδεκτών μαθηματικών εξισώσεων, συμβάλλουν στην σφαιρική κατανόηση του προβλήματος. Η πειραματική προσέγγιση άλλωστε παρουσιάζει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Τέλος, προτείνεται στις ήδη υπάρχουσες προσομοιώσεις και αναλύσεις να προστεθεί ο αγωγός, ώστε να εξαχθούν αποτελέσματα σεισμικής απόκρουσης εδάφους και αγωγού ως ενιαίο σώμα.

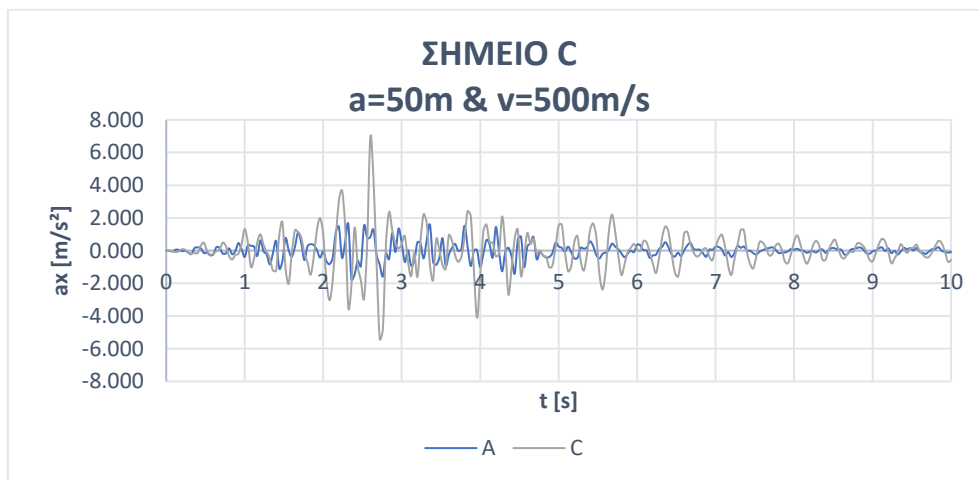
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Διαγράμματα Επιτάχυνσης- Χρόνου

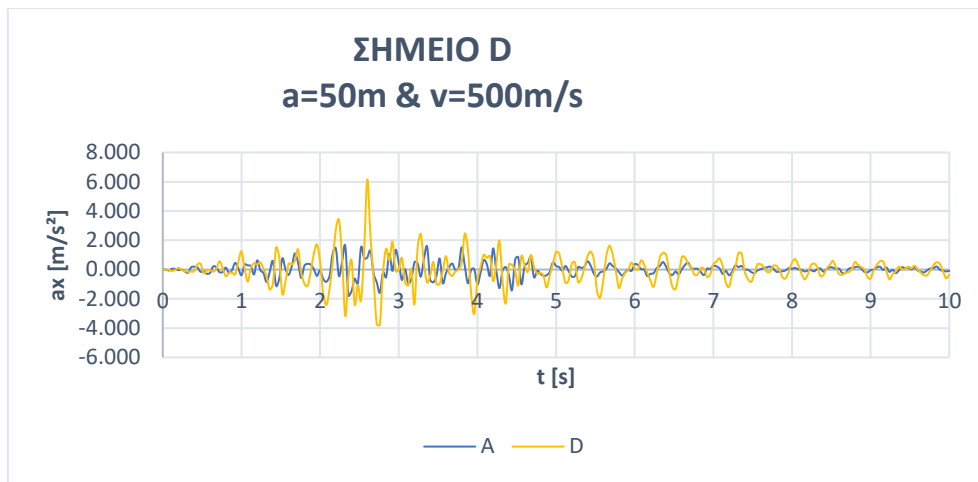
Διέγερση 225α: Πραγματική Χρονοϊστορία Επιτάχυνσης (UPLANDEARTHQUAKE)



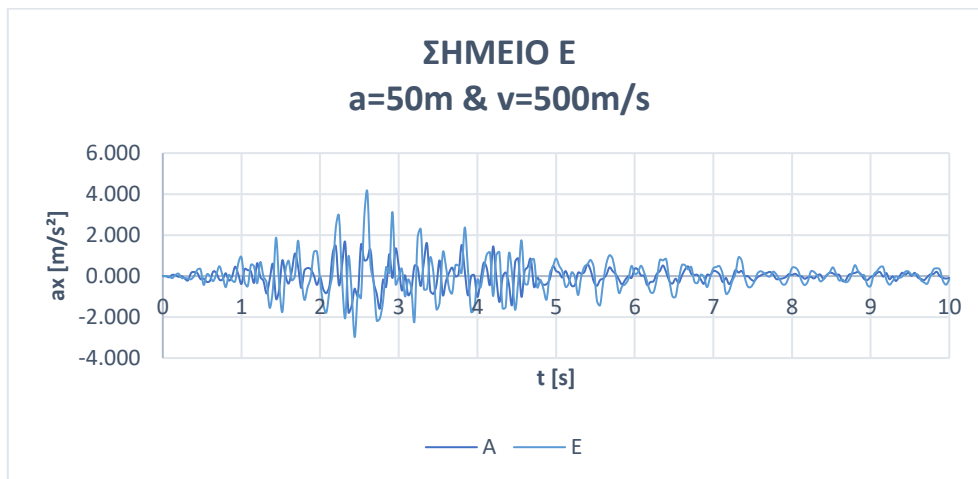
Διάγραμμα 4.1.1: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση 225 α



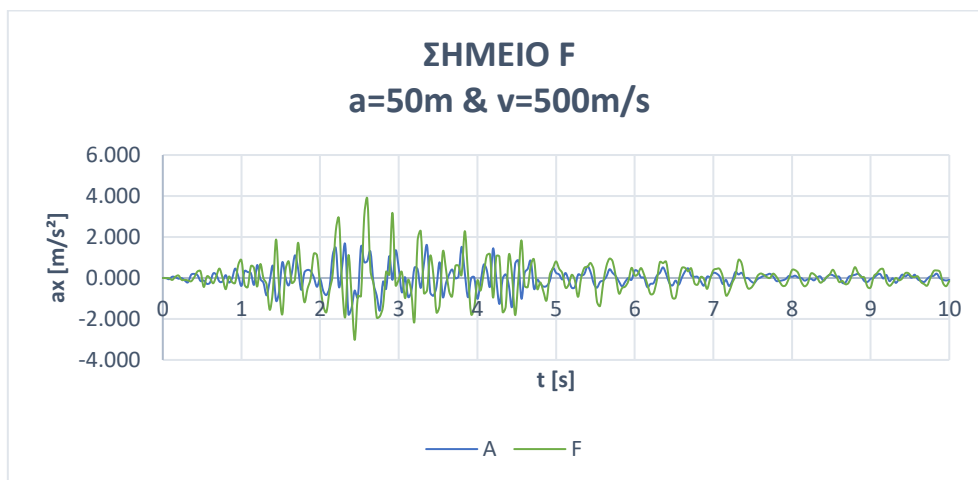
Διάγραμμα 4.1.2: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση 225 α



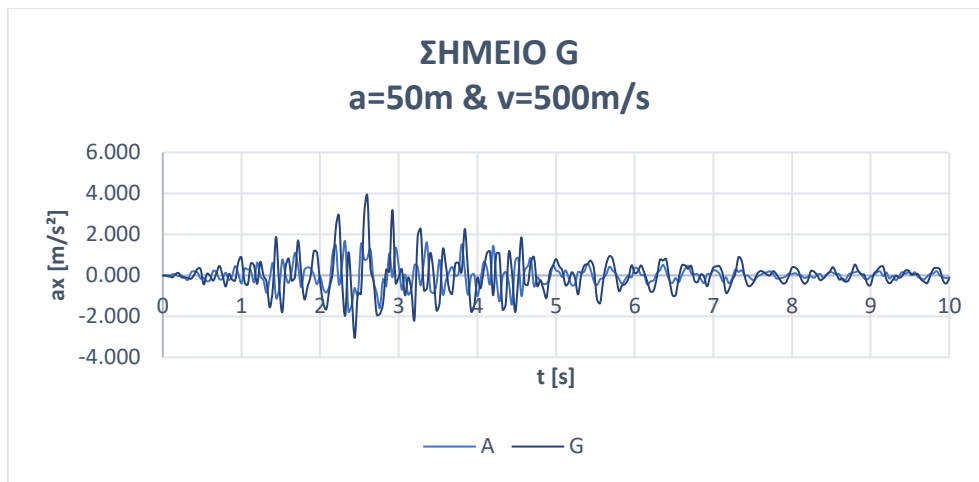
Διάγραμμα 4.1.3: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση 225α



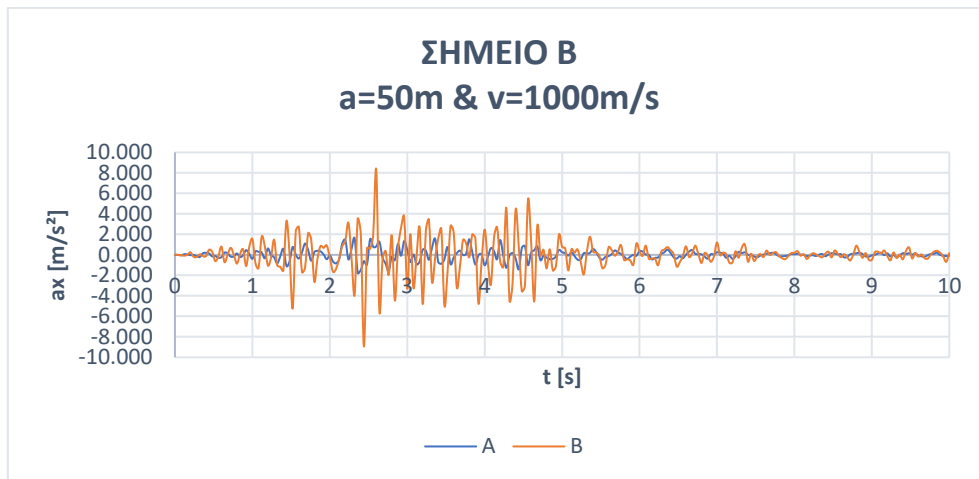
Διάγραμμα 4.1.4: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση 225α



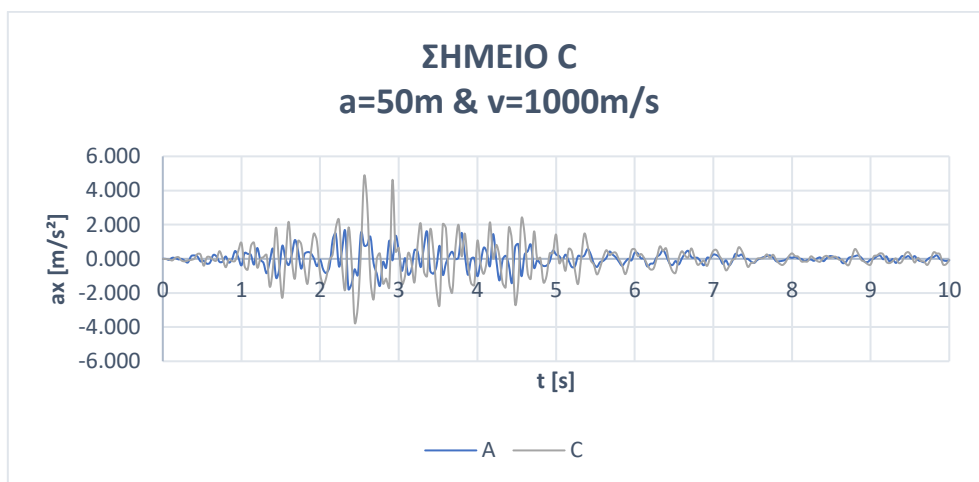
Διάγραμμα 4.1.5: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση 225α



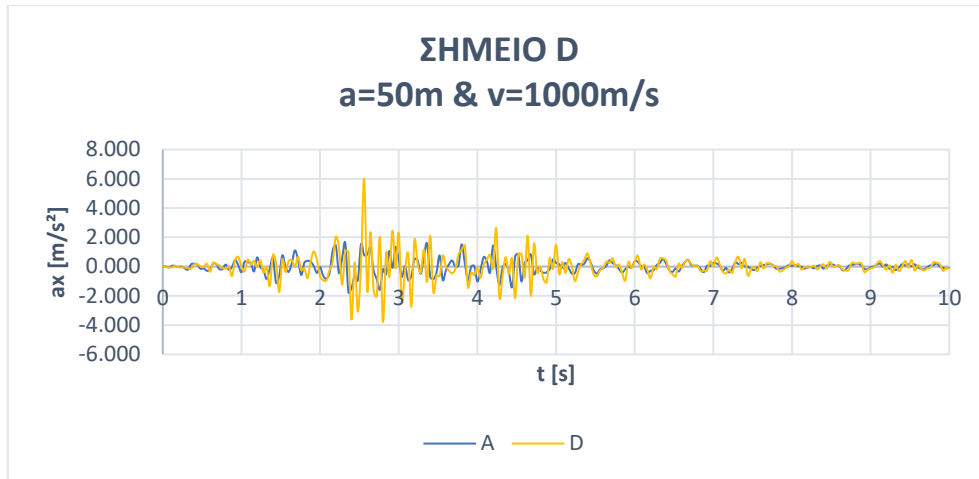
Διάγραμμα 4.1.6: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση 225^α



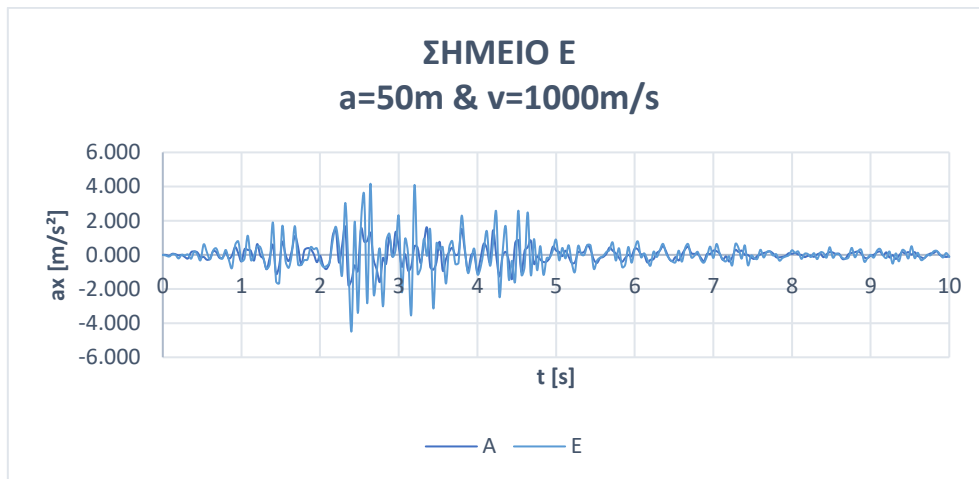
Διάγραμμα 4.1.7: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου B για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση 225^α



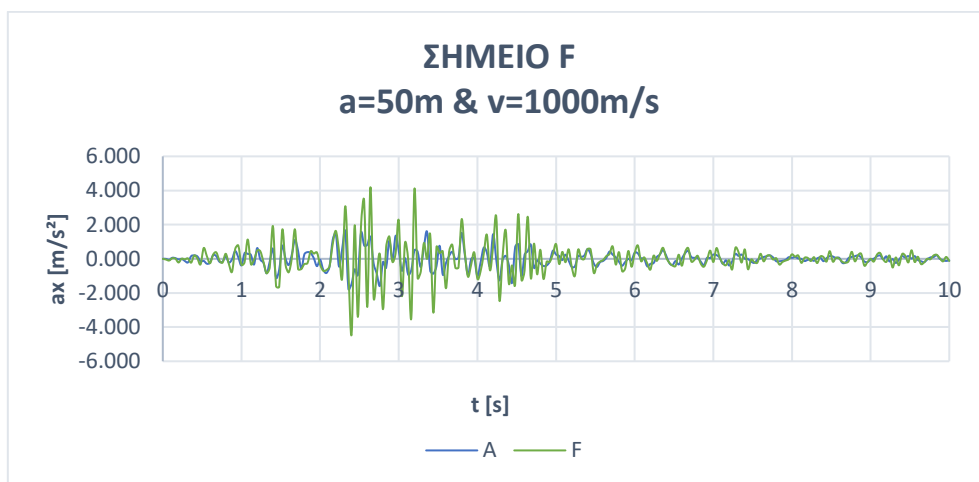
Διάγραμμα 4.1.8: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση 225^α



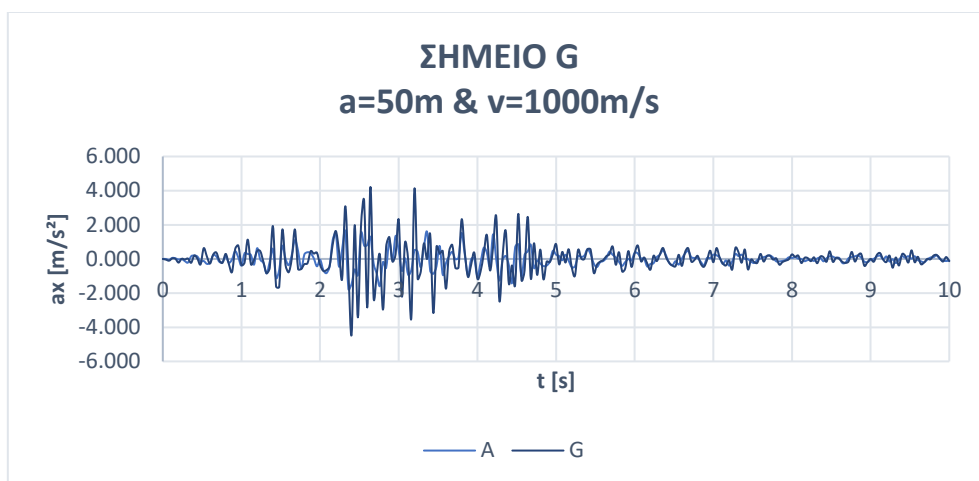
Διάγραμμα 4.1.9: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση 225α



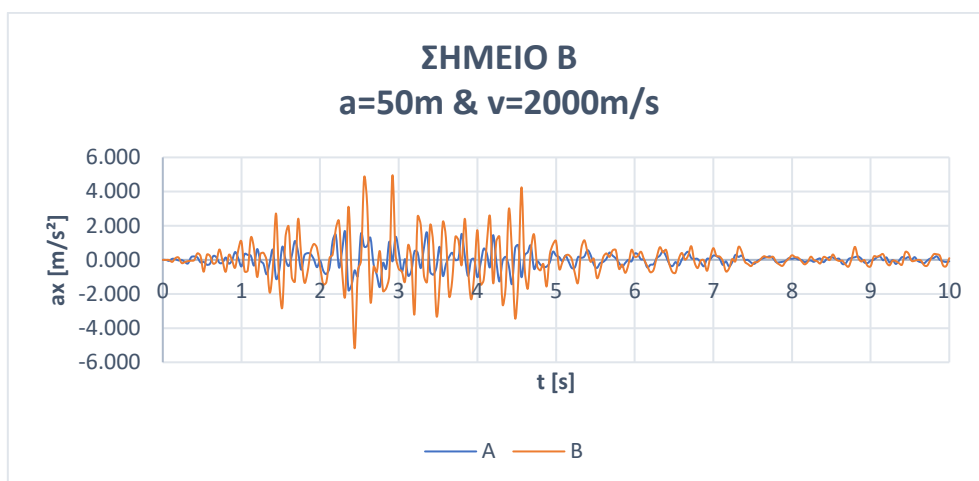
Διάγραμμα 4.1.10: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση 225α



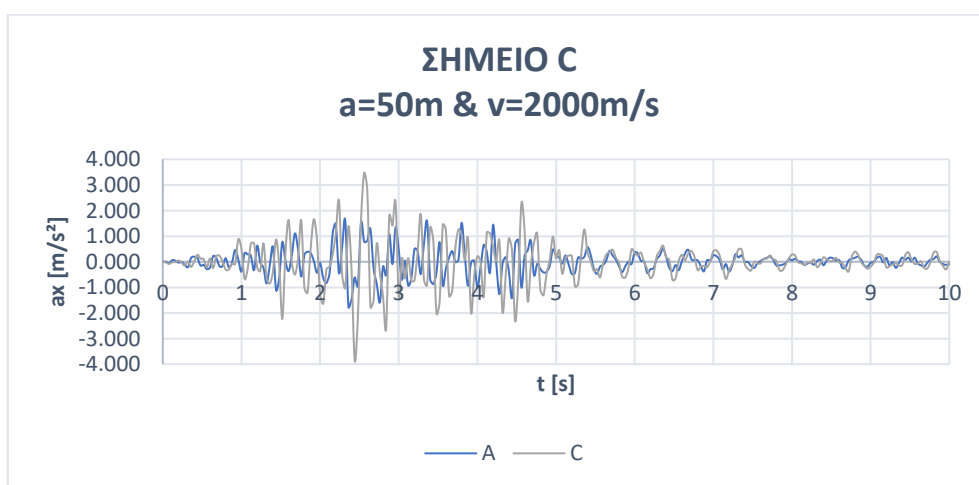
Διάγραμμα 4.1.11: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση 225α



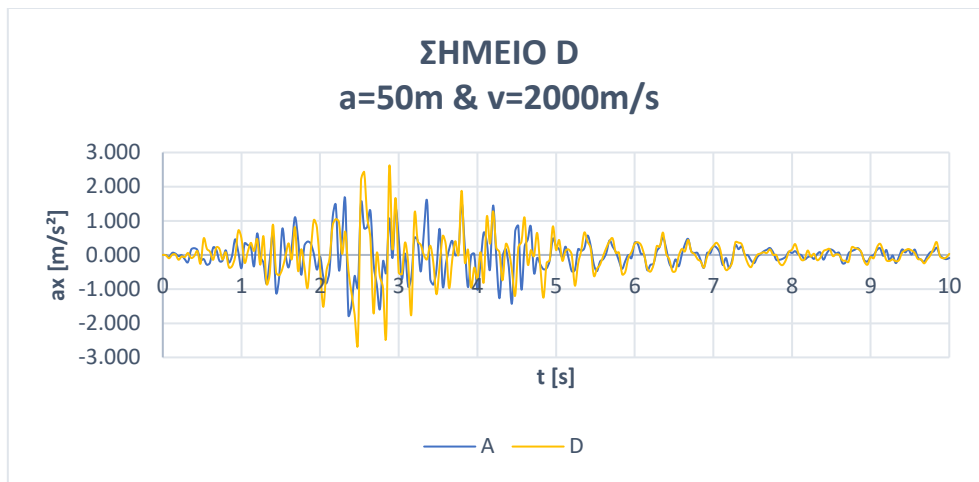
Διάγραμμα 4.1.12: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση 225α



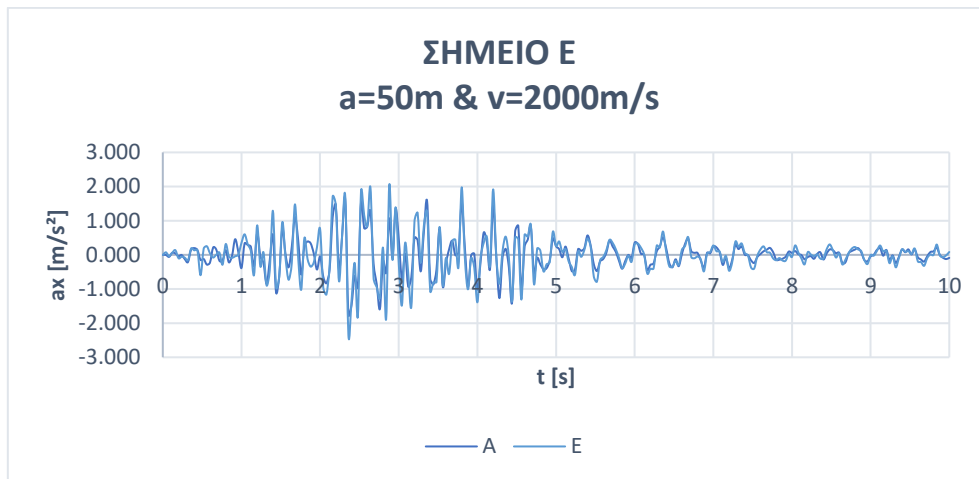
Διάγραμμα 4.1.13: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση 225α



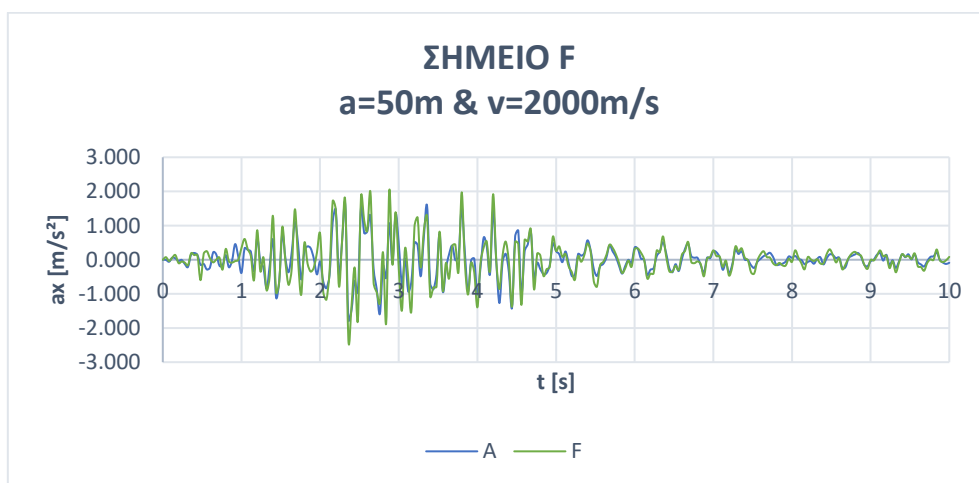
Διάγραμμα 4.1.14: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση 225α



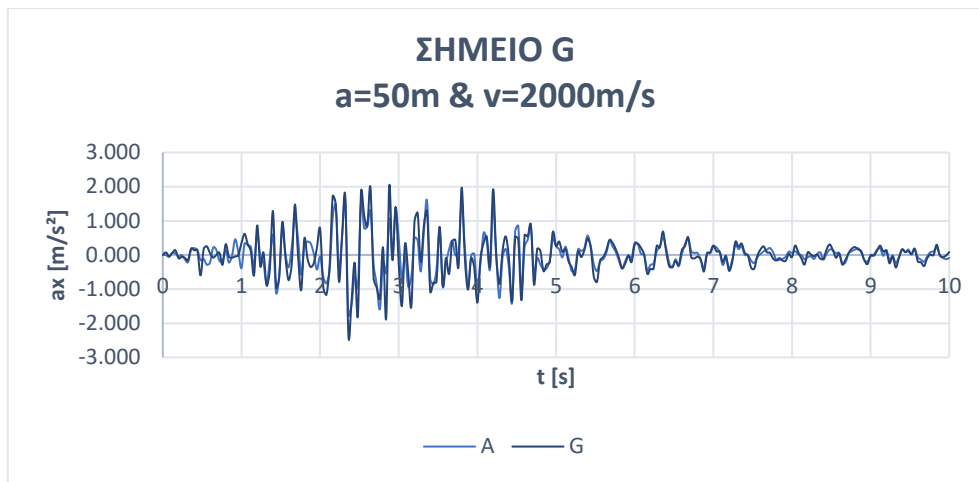
Διάγραμμα 4.1.15: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση 225α



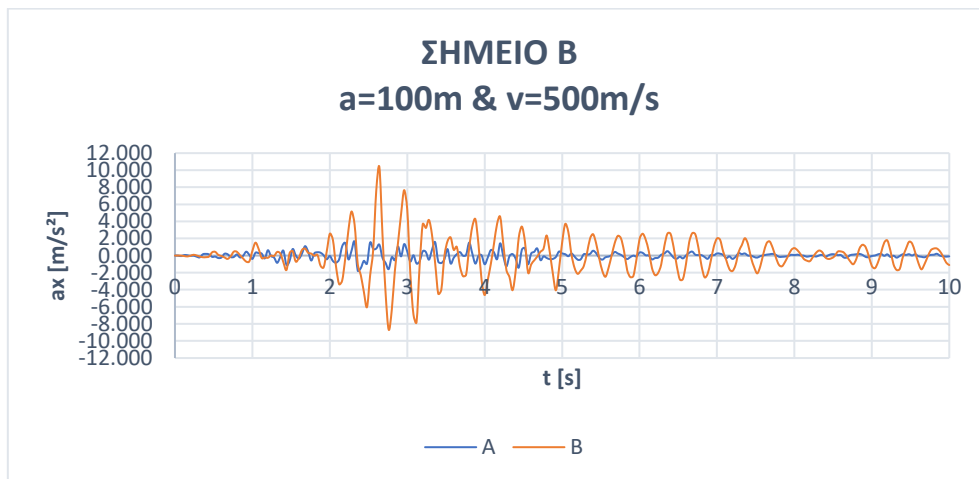
Διάγραμμα 4.1.16: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση 225α



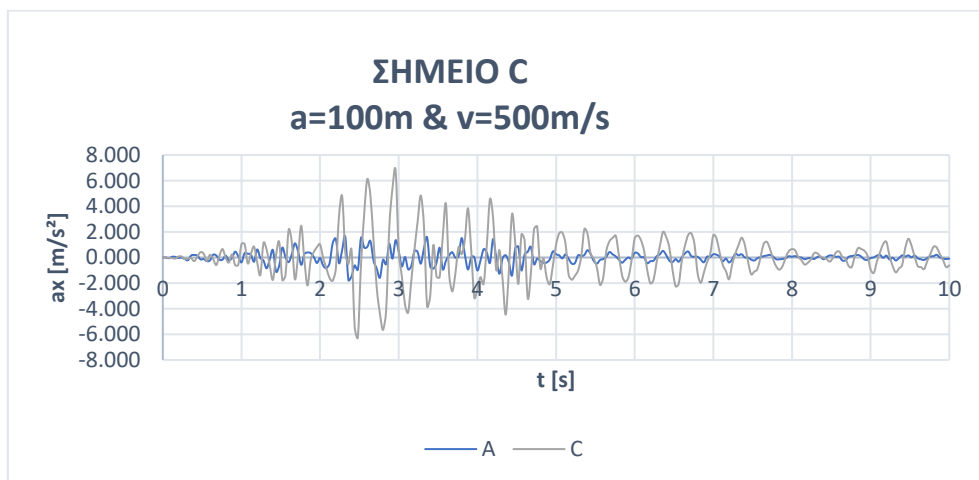
Διάγραμμα 4.1.17: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση 225α



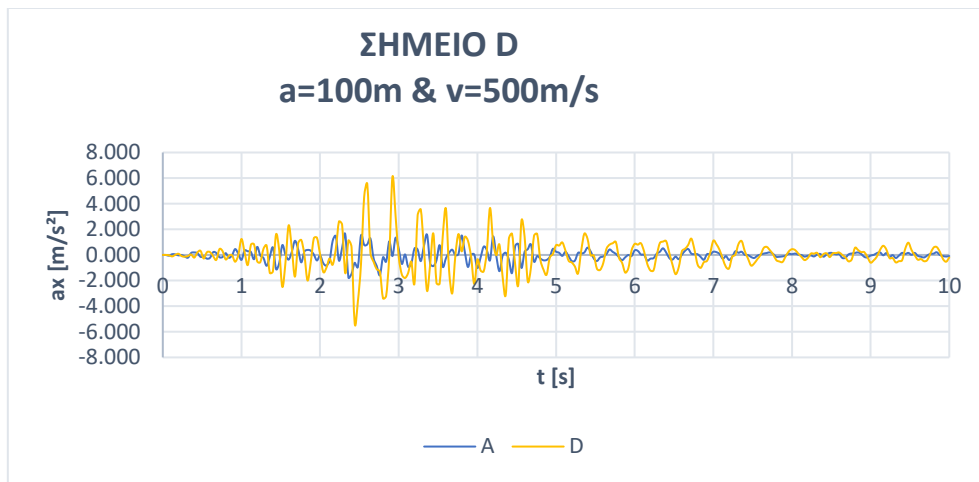
Διάγραμμα 4.1.18: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50\text{m}$ και διέγερση 225α



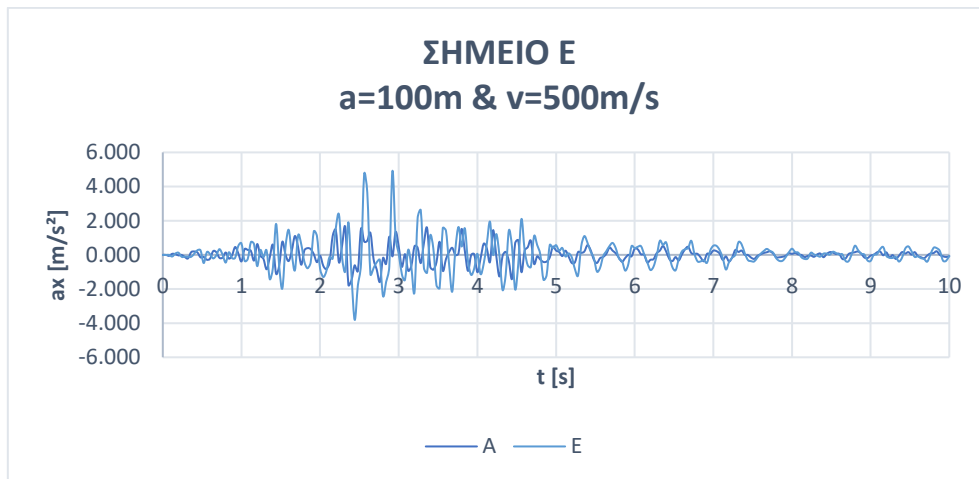
Διάγραμμα 4.1.19: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100\text{m}$ και διέγερση 225α



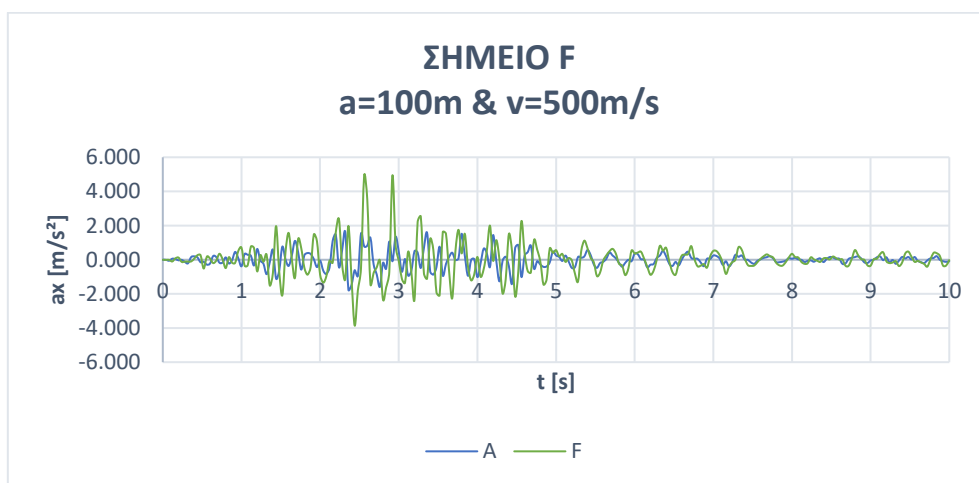
Διάγραμμα 4.1.20: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100\text{m}$ και διέγερση 225α



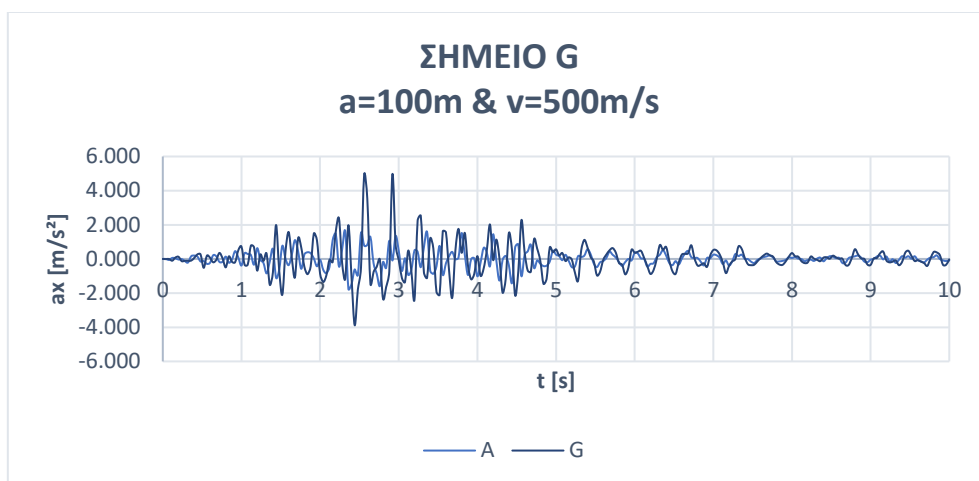
Διάγραμμα 4.1.21: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση 225α



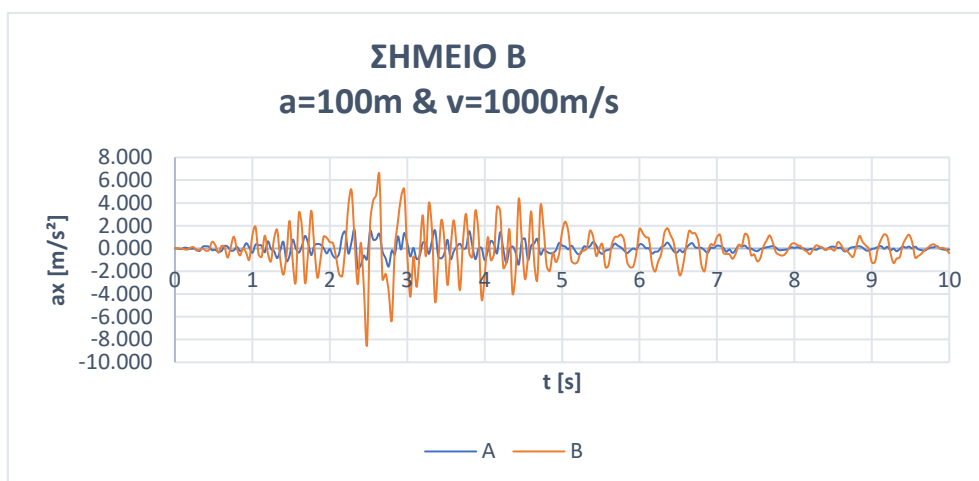
Διάγραμμα 4.1.22: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση 225α



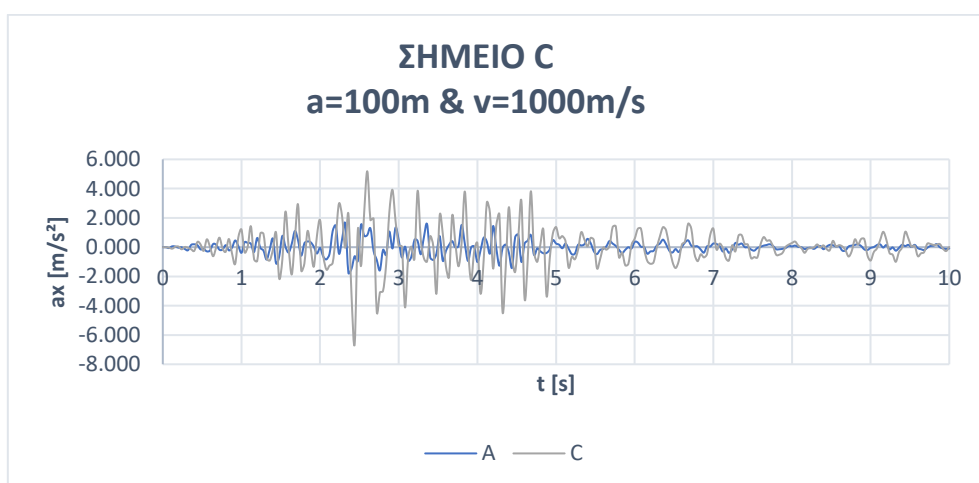
Διάγραμμα 4.1.23: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση 225α



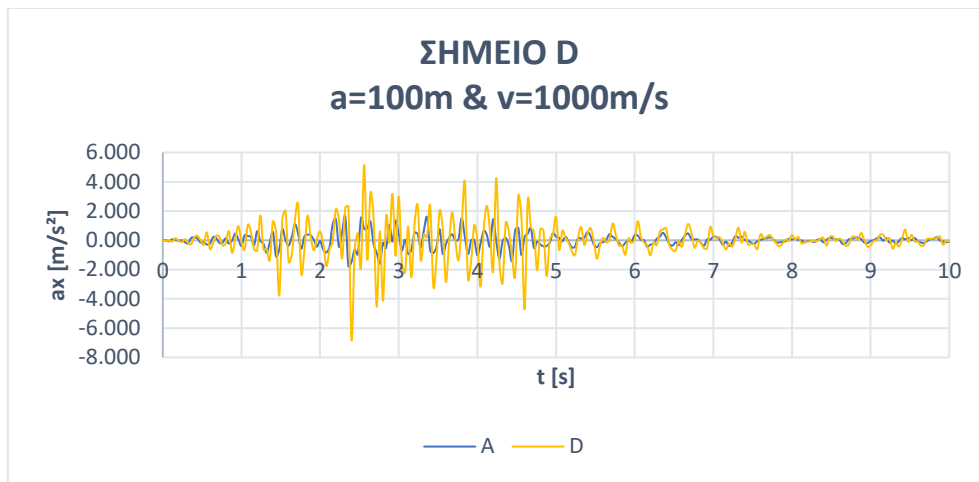
Διάγραμμα 4.1.24: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση 225α



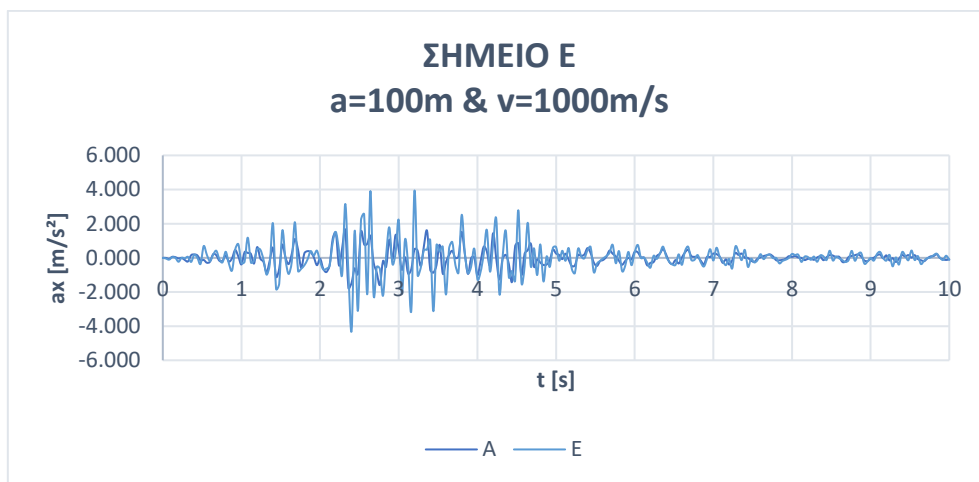
Διάγραμμα 4.1.25: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση 225α



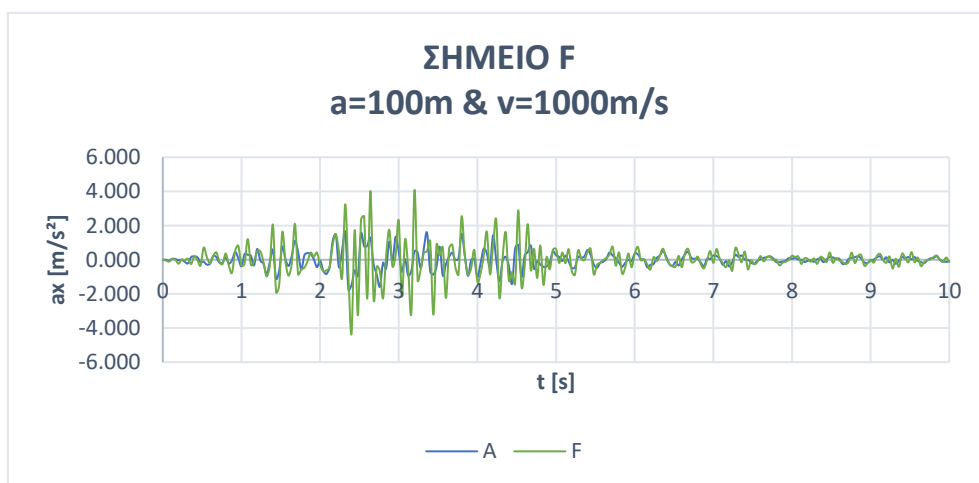
Διάγραμμα 4.1.26: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση 225α



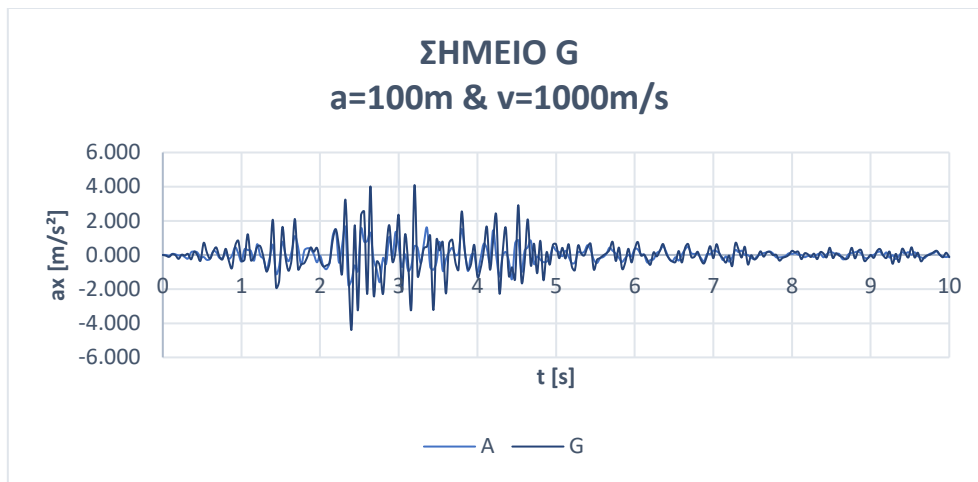
Διάγραμμα 4.1.27: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση 225α



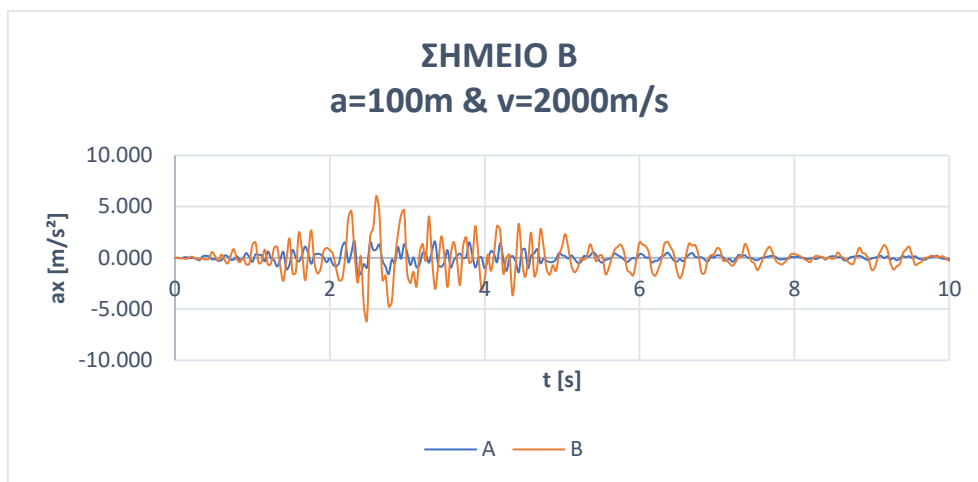
Διάγραμμα 4.1.28: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση 225α



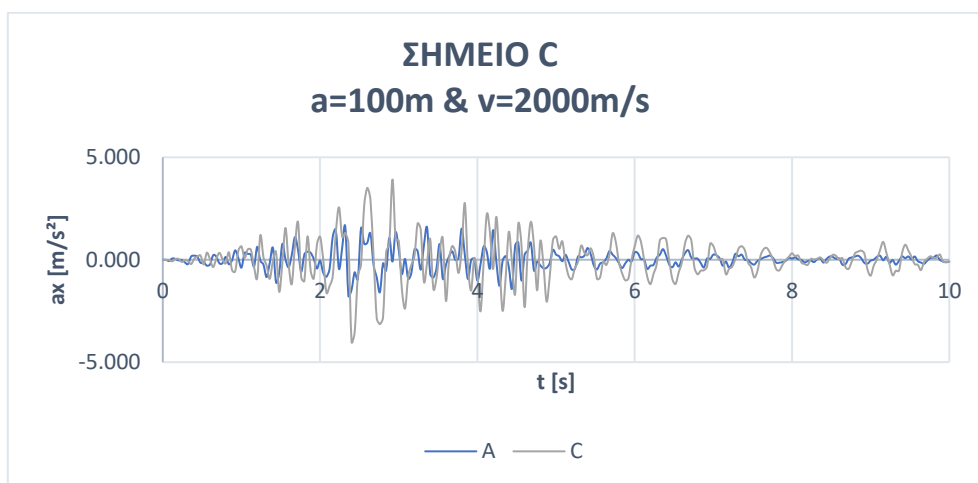
Διάγραμμα 4.1.29: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση 225α



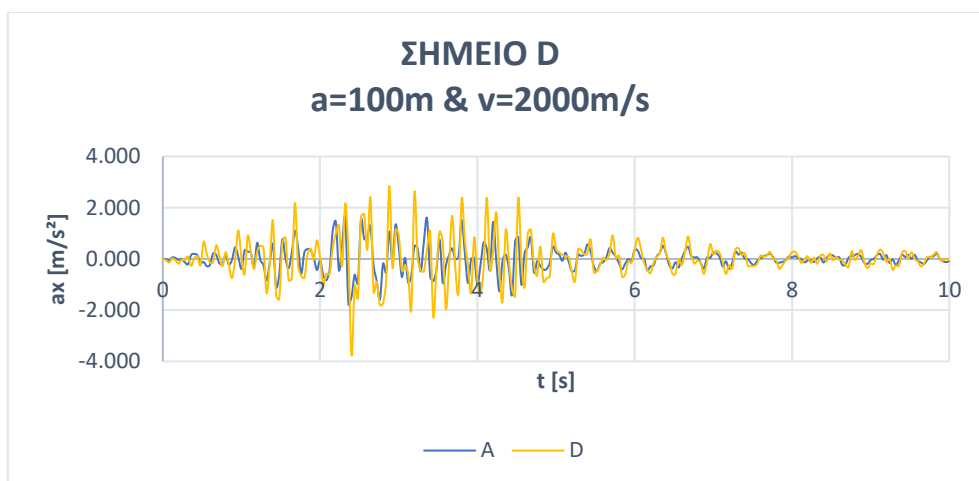
Διάγραμμα 4.1.30: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση 225α



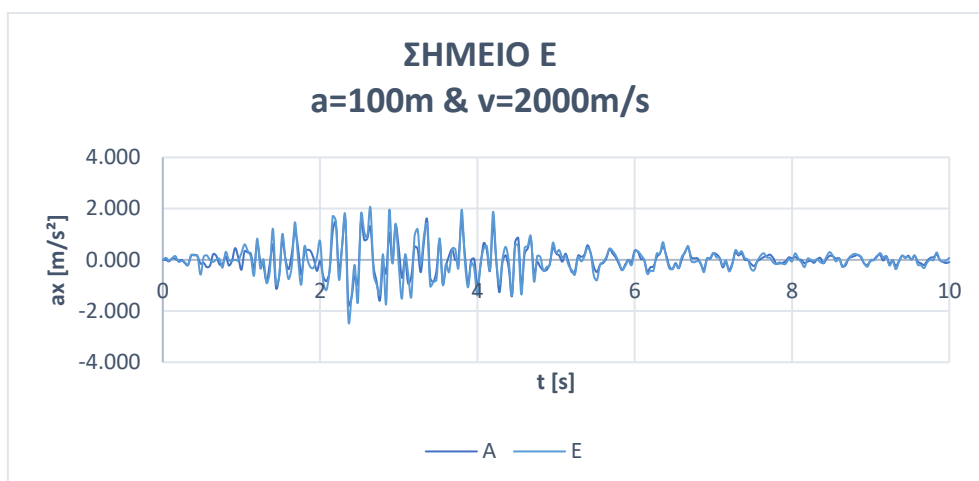
Διάγραμμα 4.1.31: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση 225α



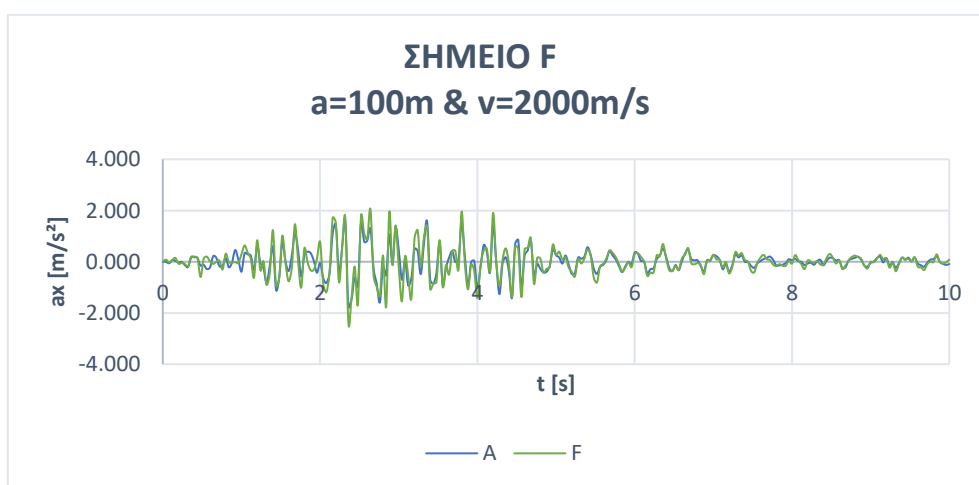
Διάγραμμα 4.1.32: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση 225α



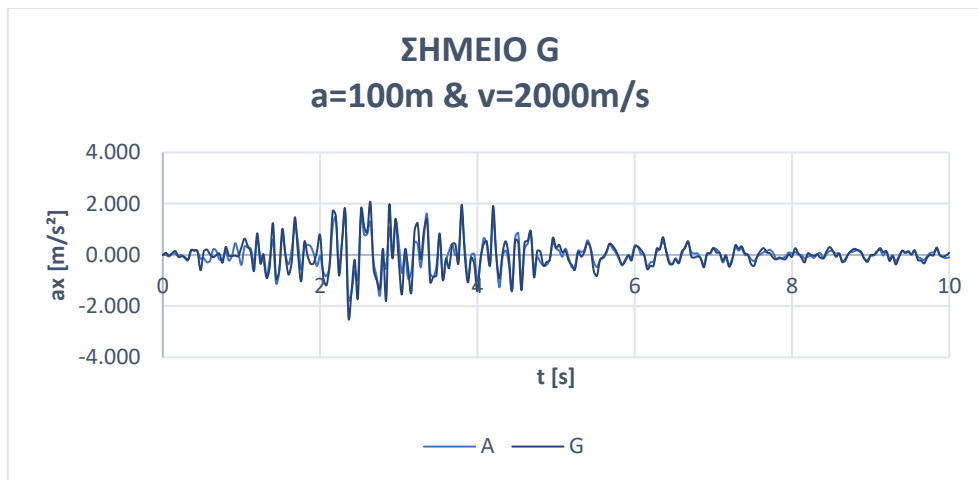
Διάγραμμα 4.1.33: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση 225α



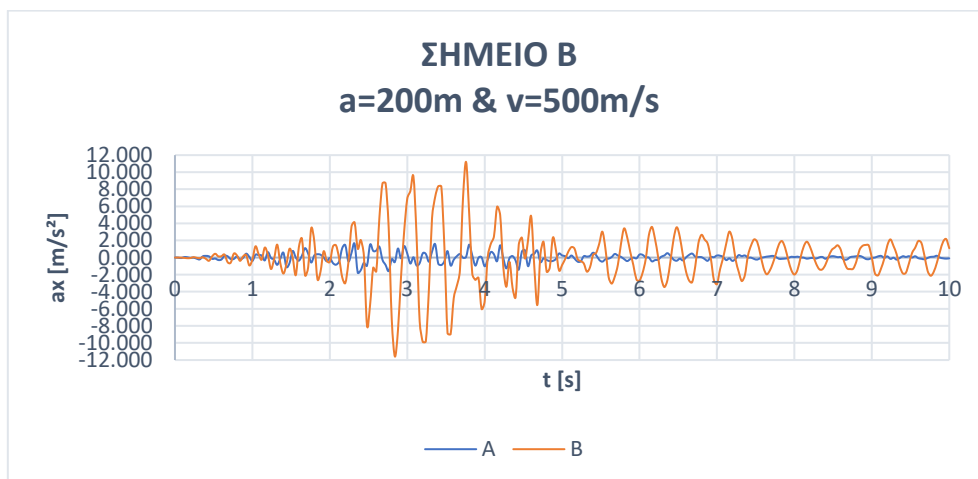
Διάγραμμα 4.1.34: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση 225α



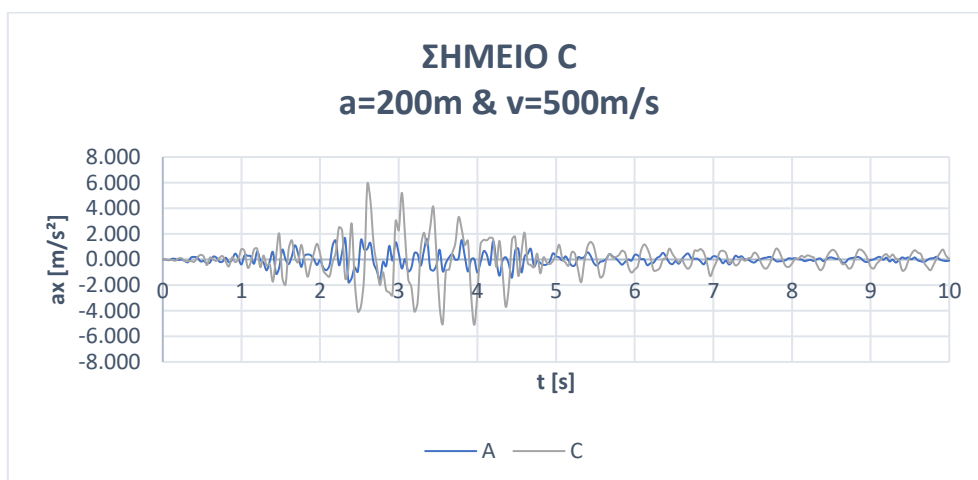
Διάγραμμα 4.1.35: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση 225α



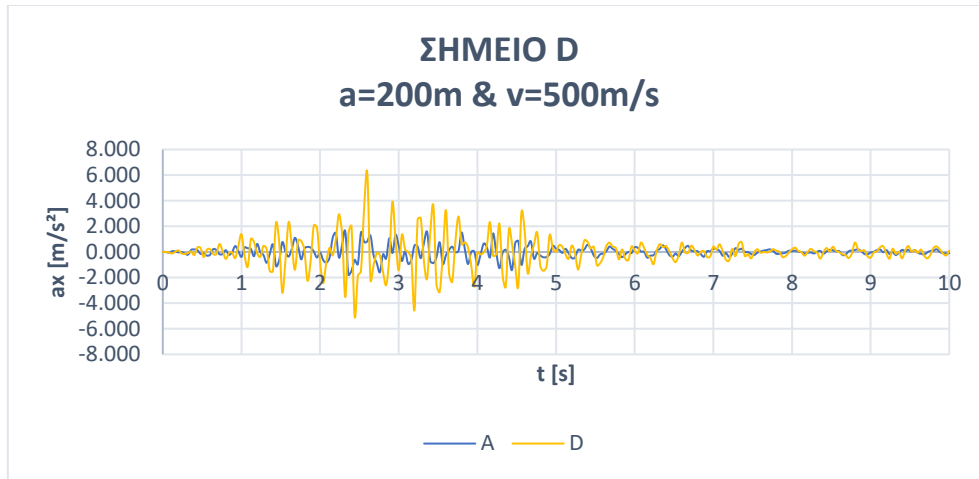
Διάγραμμα 4.1.36: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση 225α



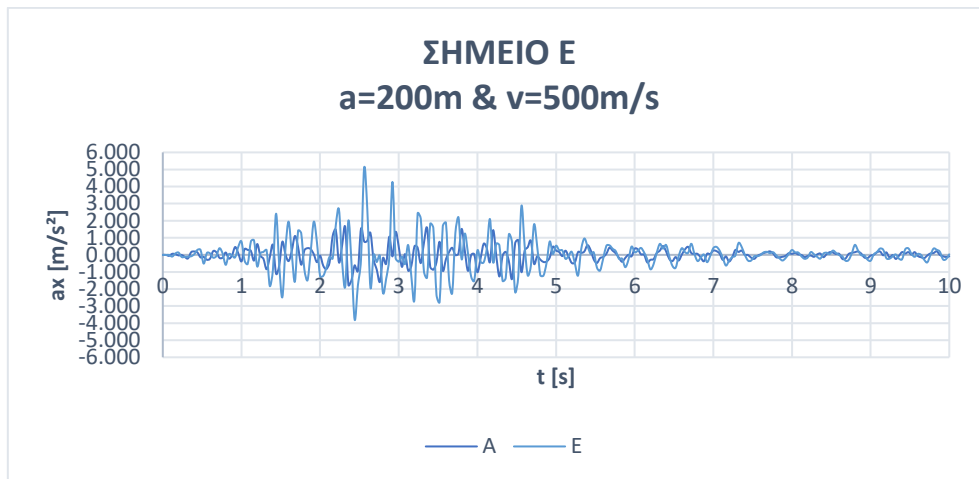
Διάγραμμα 4.1.37: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση 225α



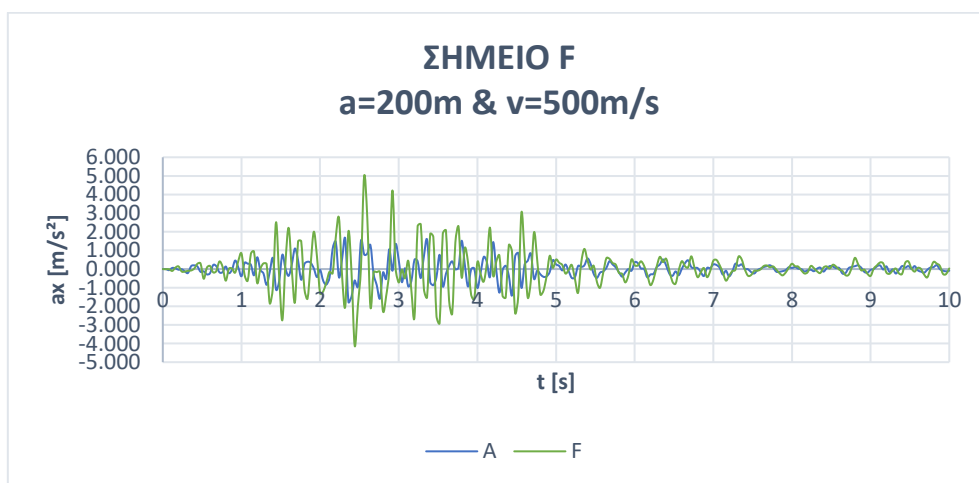
Διάγραμμα 4.1.38: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση 225α



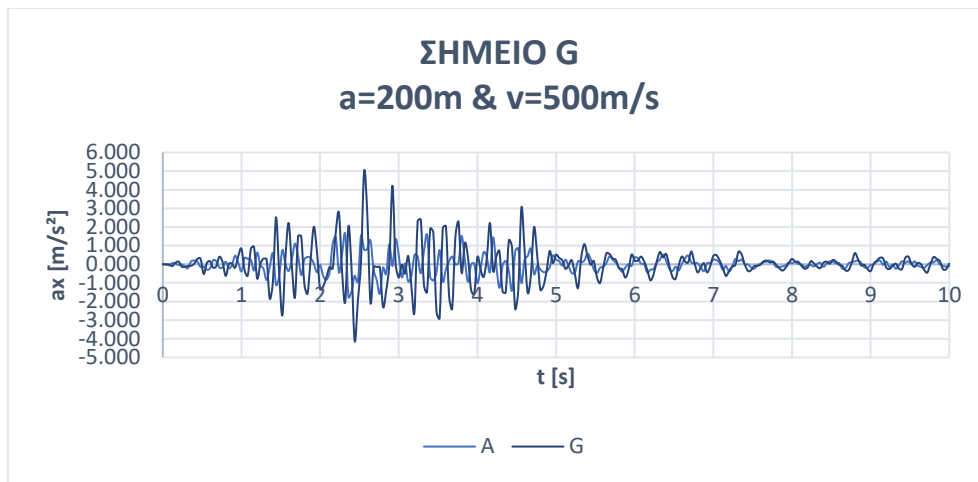
Διάγραμμα 4.1.39: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση 225α



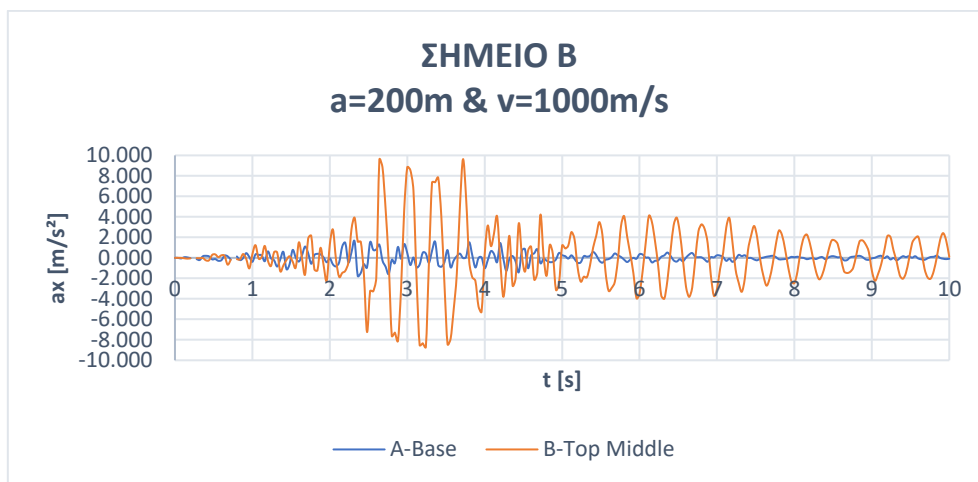
Διάγραμμα 4.1.40: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση 225α



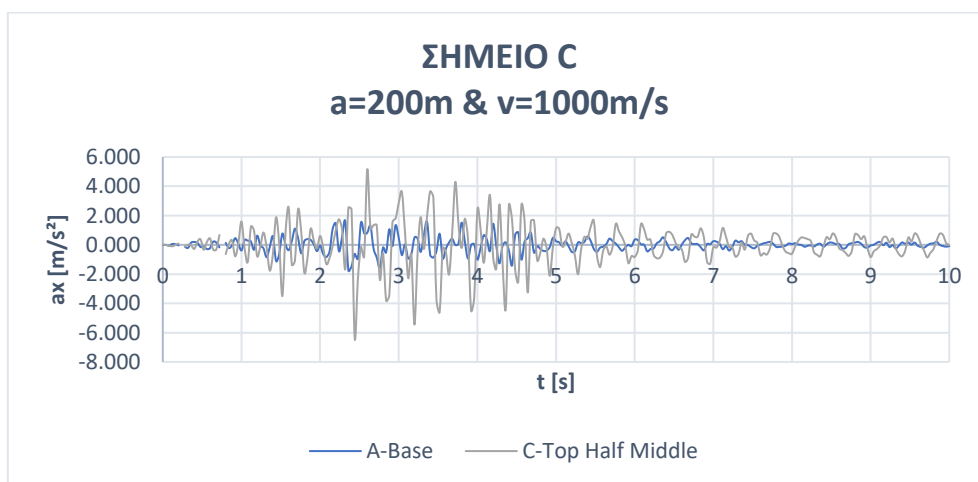
Διάγραμμα 4.1.41: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση 225α



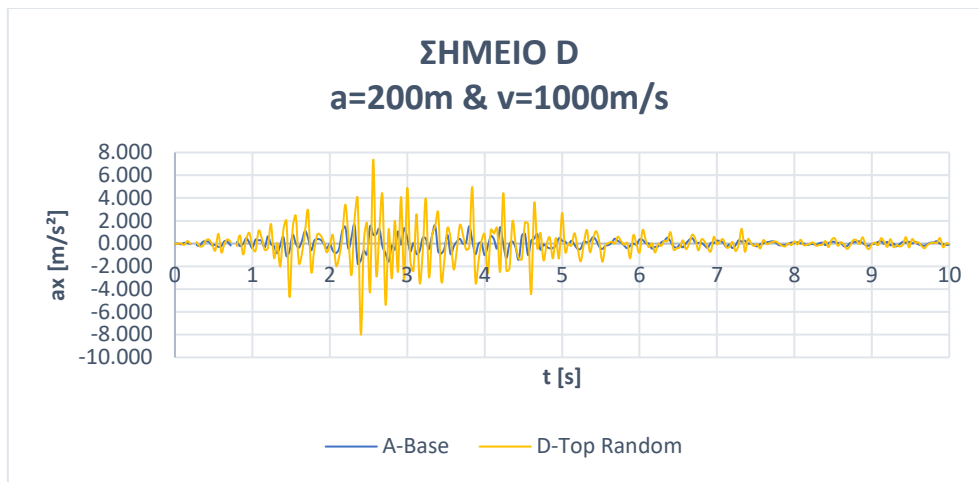
Διάγραμμα 4.1.42: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση 225α



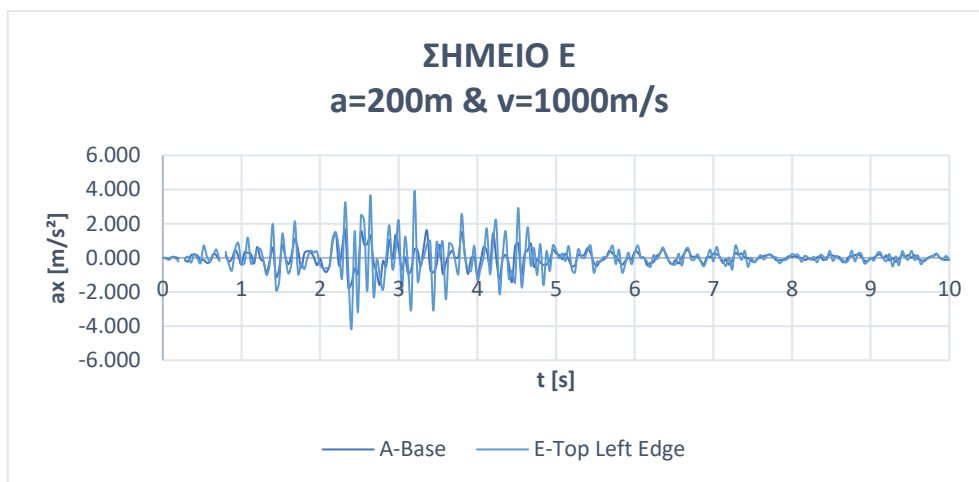
Διάγραμμα 4.1.43: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση 225α



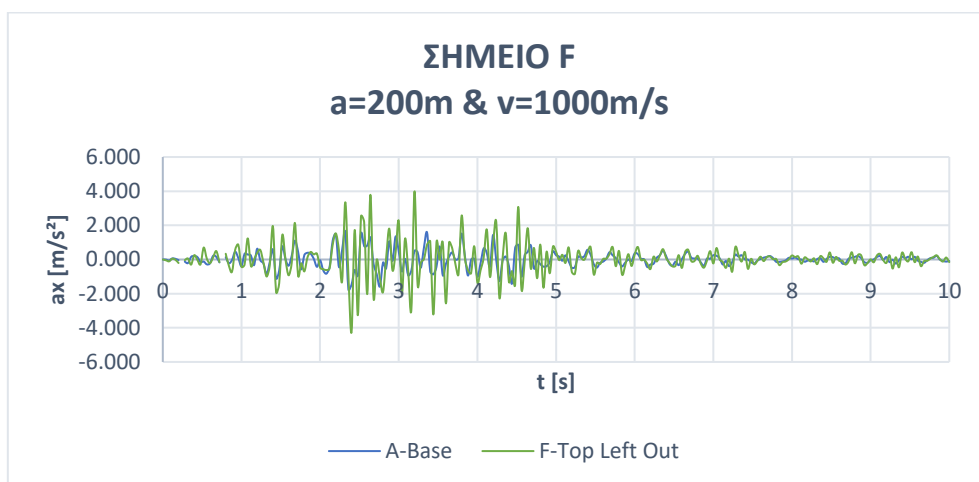
Διάγραμμα 4.1.44: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση 225α



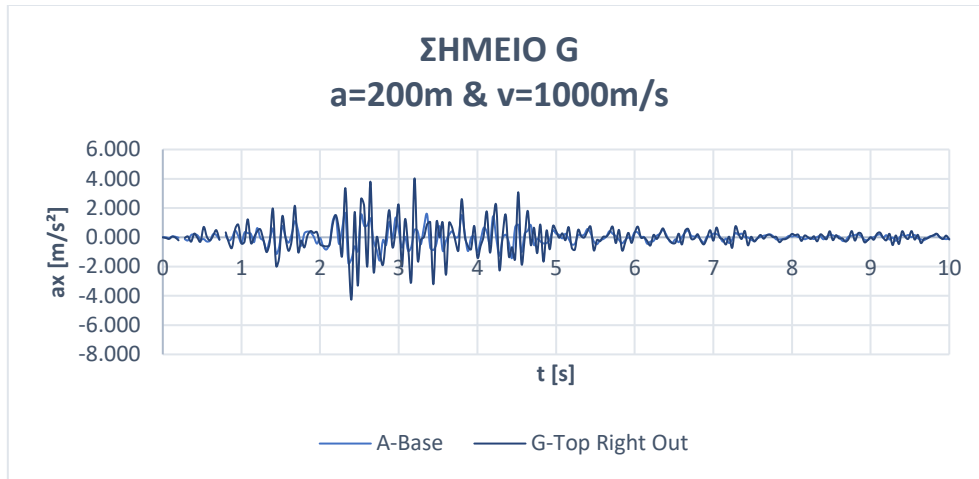
Διάγραμμα 4.1.45: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση 225α



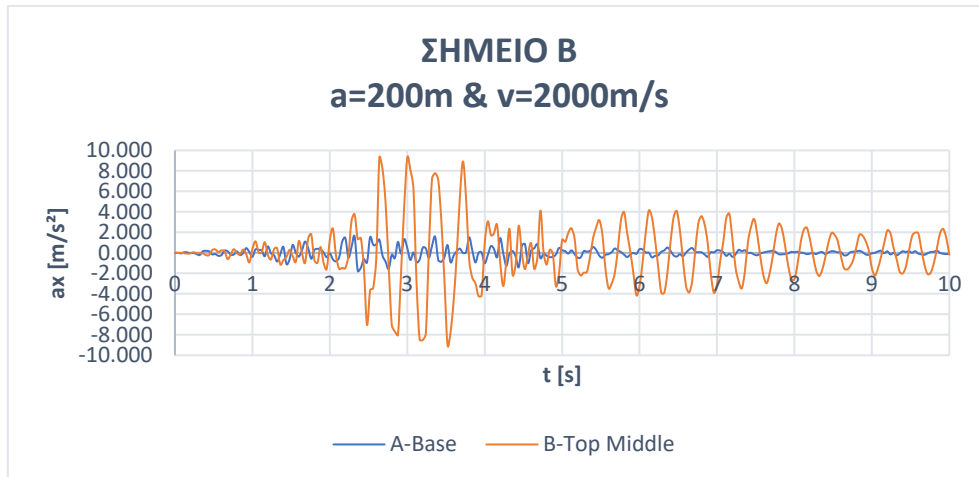
Διάγραμμα 4.1.46: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση 225α



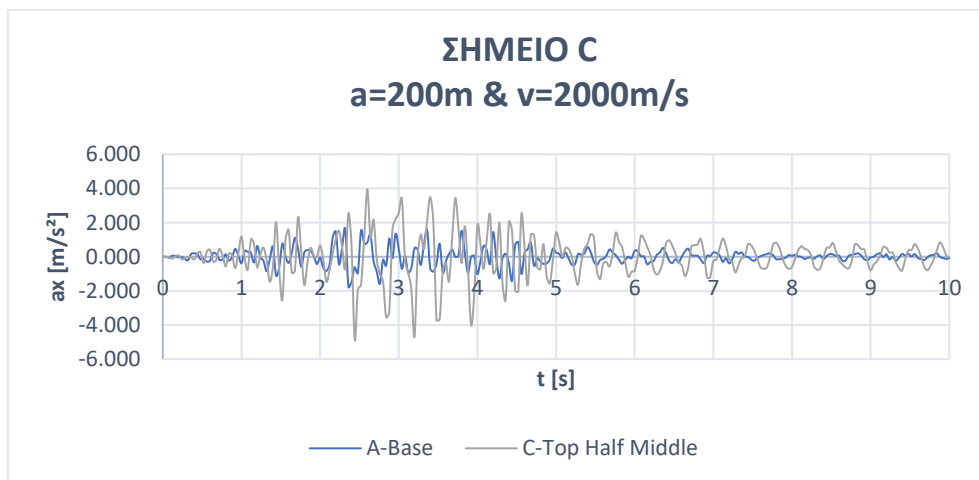
Διάγραμμα 4.1.47: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση 225α



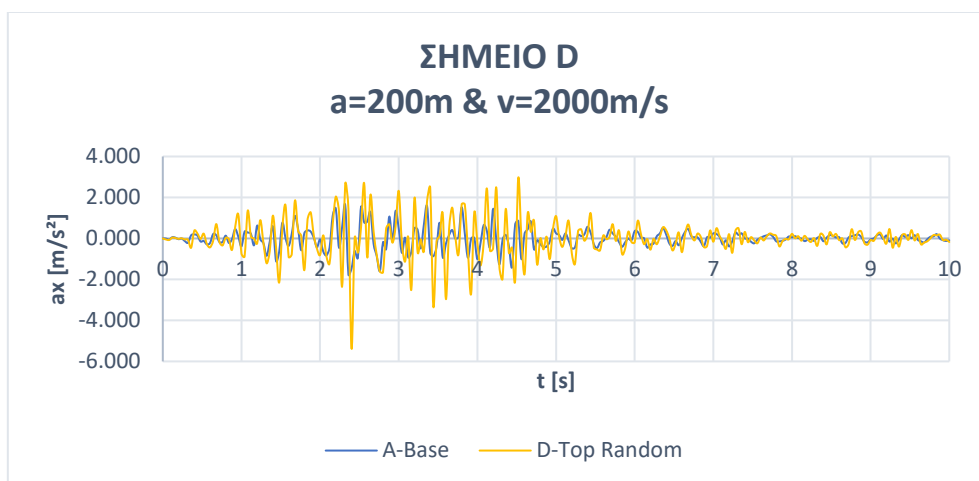
Διάγραμμα 4.1.48: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση 225α



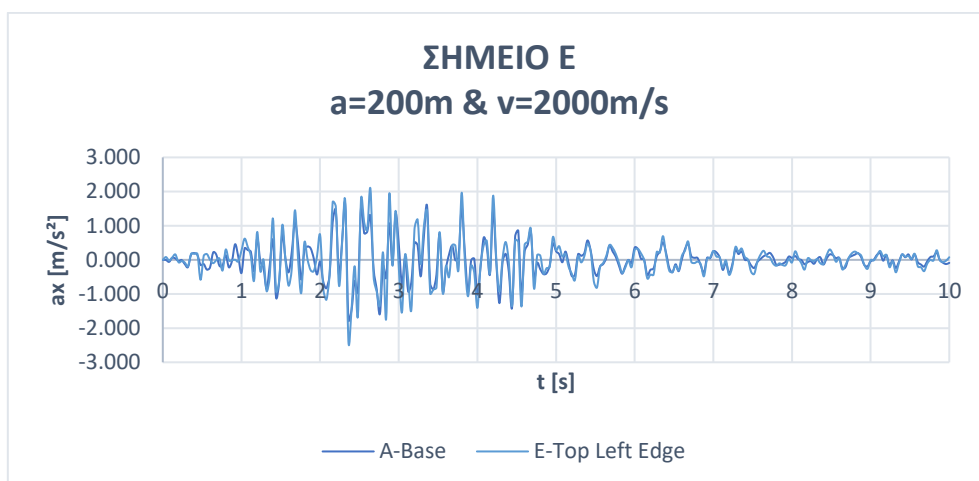
Διάγραμμα 4.1.49: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση 225α



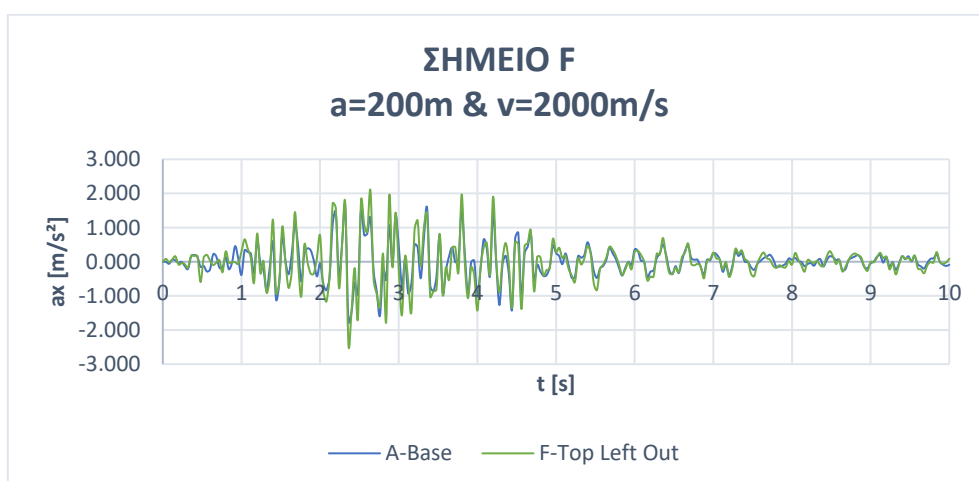
Διάγραμμα 4.1.50: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση 225α



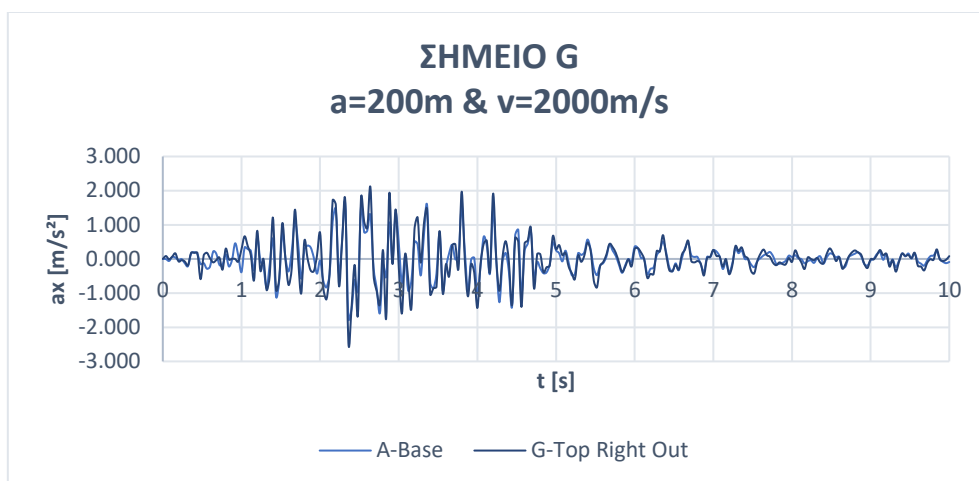
Διάγραμμα 4.1.51: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση 225α



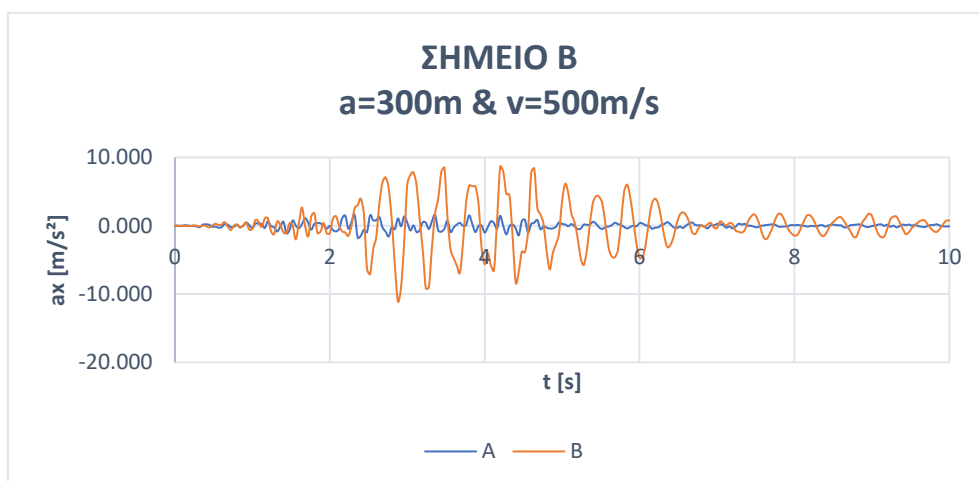
Διάγραμμα 4.1.52: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση 225α



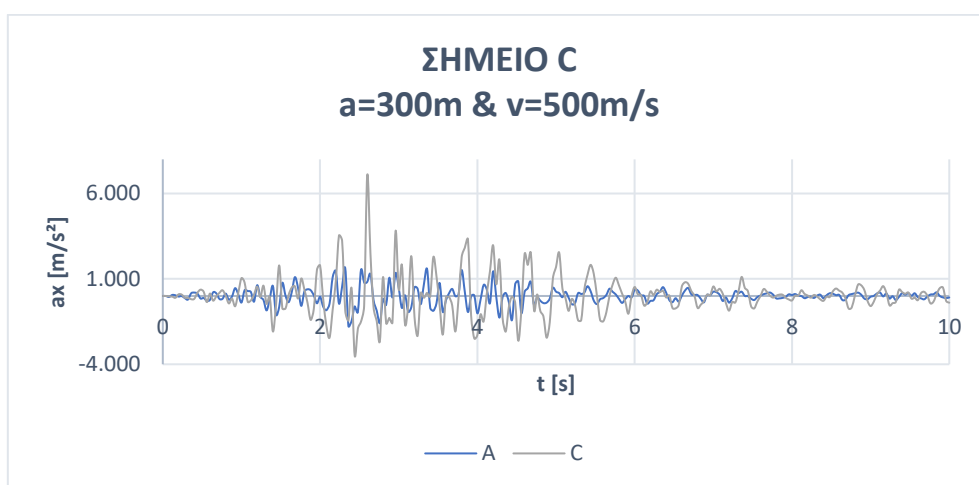
Διάγραμμα 4.1.53: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση 225α



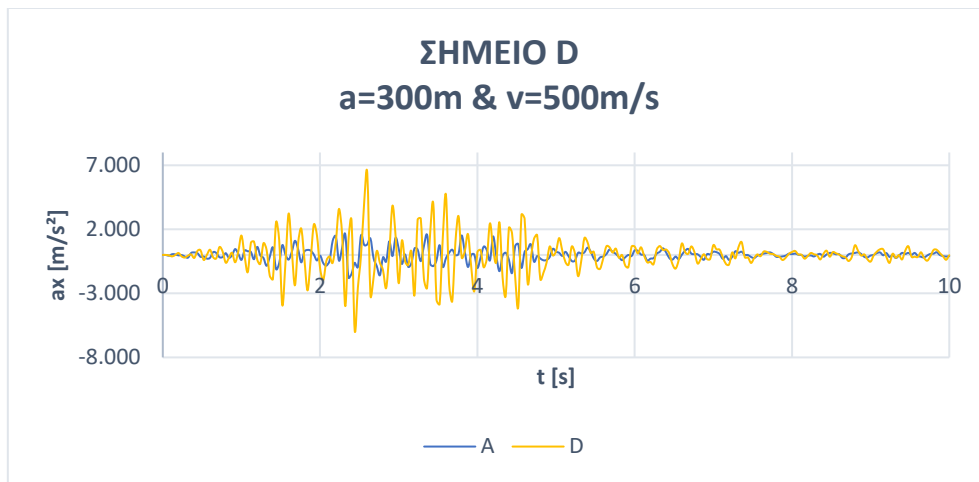
Διάγραμμα 4.1.54: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση 225^α



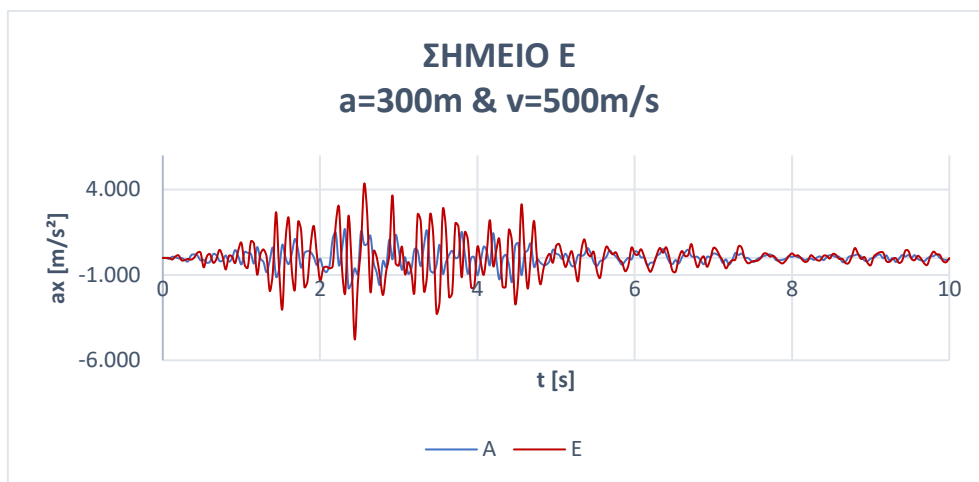
Διάγραμμα 4.1.55: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=300$ m και διέγερση 225^α



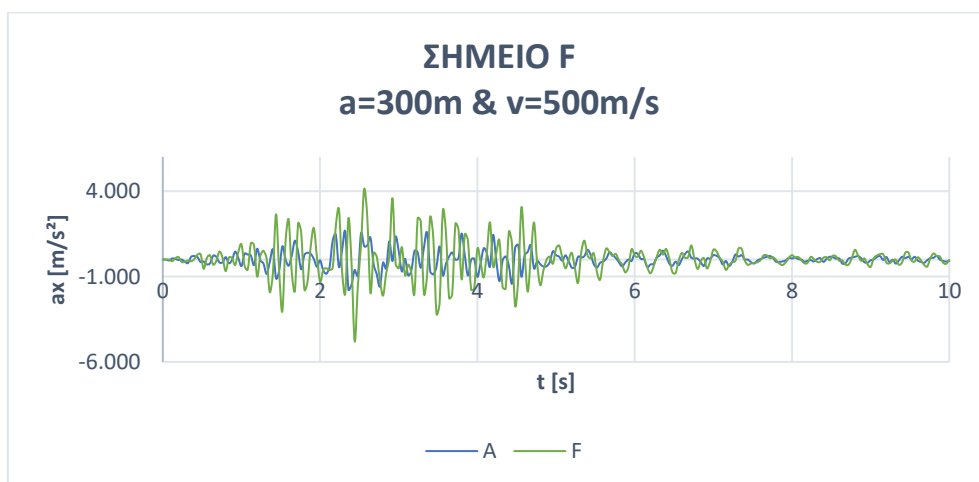
Διάγραμμα 4.1.56: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=300$ m και διέγερση 225^α



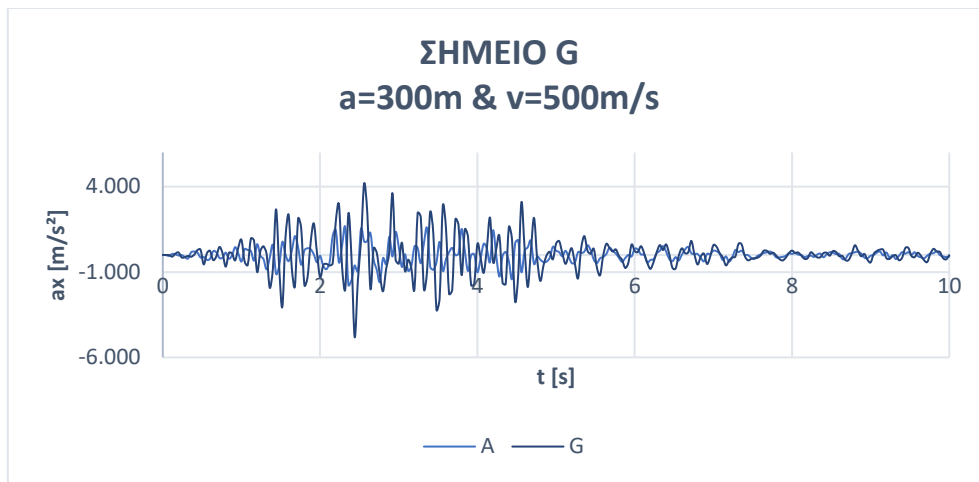
Διάγραμμα 4.1.57: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσεως του χρόνου t (s) σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=300$ m και διέγερση 225α



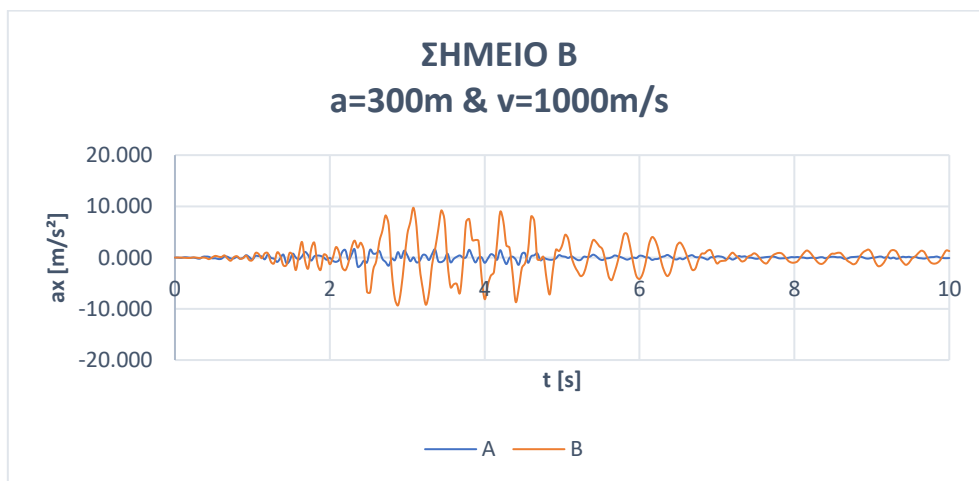
Διάγραμμα 4.1.58: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσεως του χρόνου t (s) σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=300$ m και διέγερση 225α



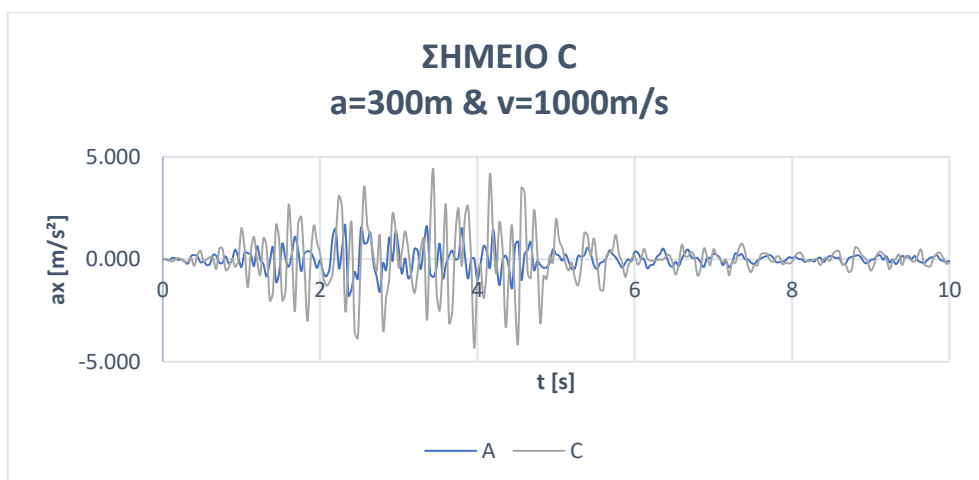
Διάγραμμα 4.1.59: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσεως του χρόνου t (s) σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=300$ m και διέγερση 225α



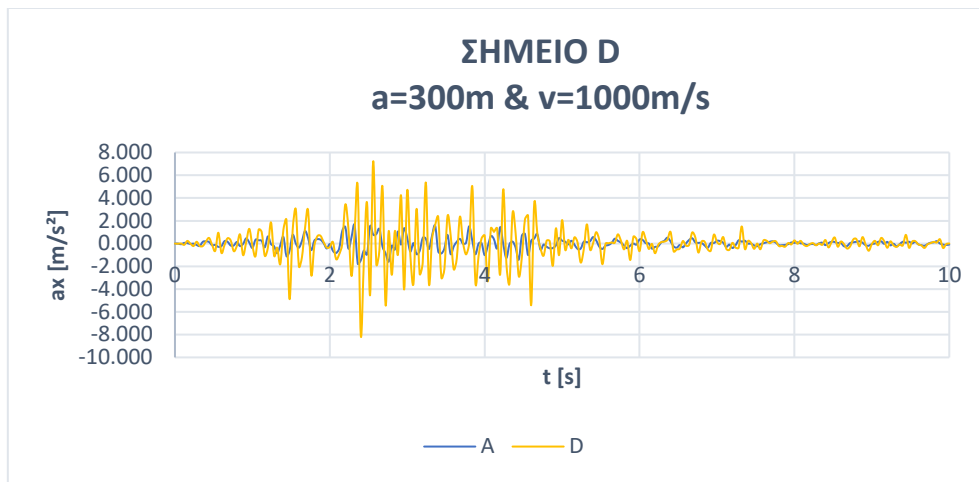
Διάγραμμα 4.1.60: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300\text{m}$ και διέγερση 225α



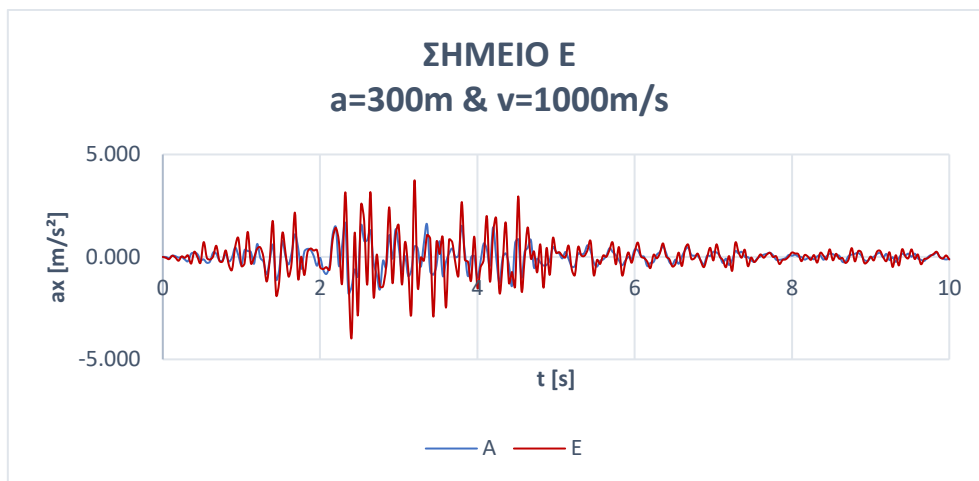
Διάγραμμα 4.1.61: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300\text{m}$ και διέγερση 225α



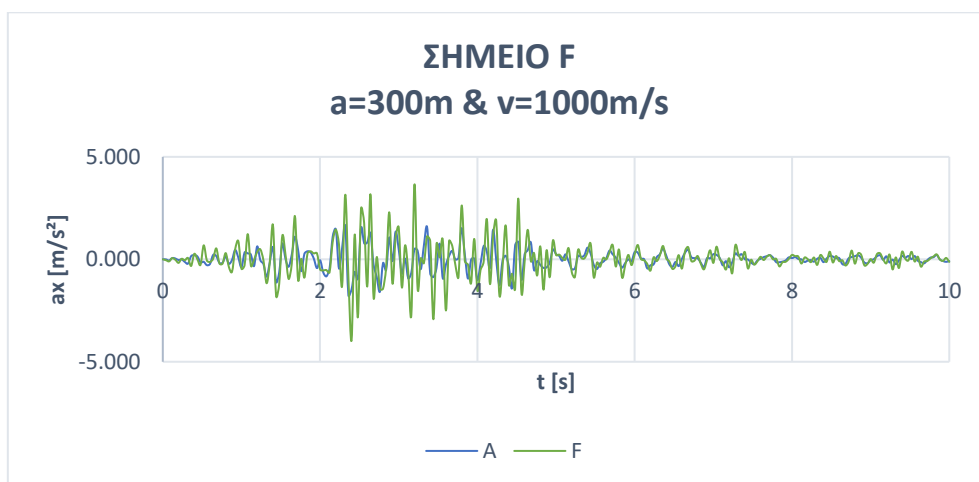
Διάγραμμα 4.1.62: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300\text{m}$ και διέγερση 225α



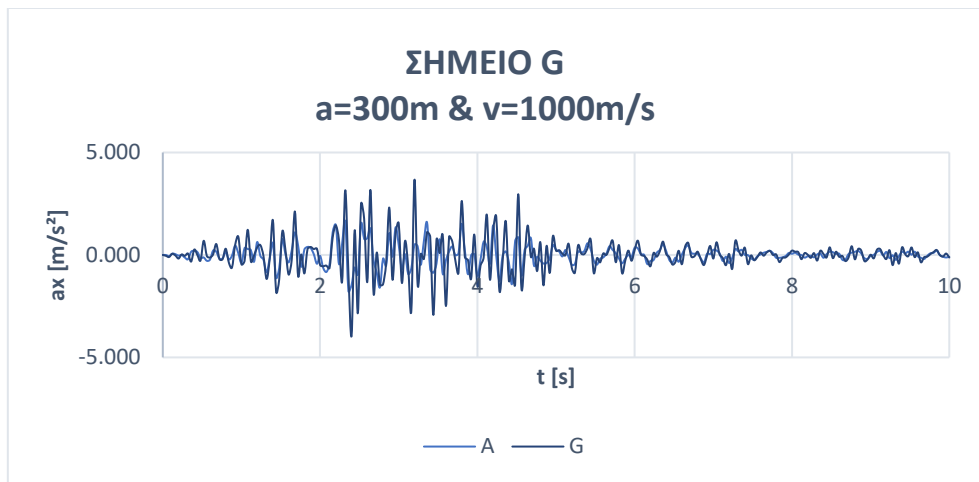
Διάγραμμα 4.1.63: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=300$ m και διέγερση 225^α



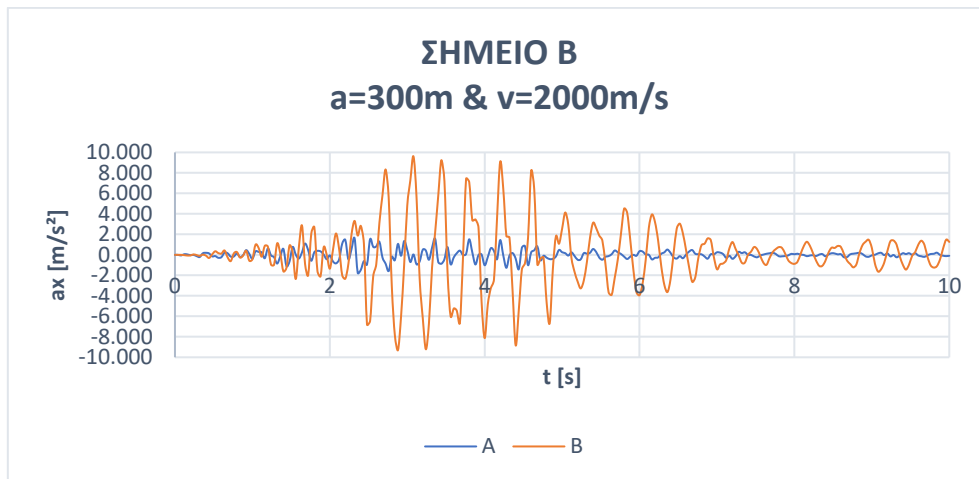
Διάγραμμα 4.1.64: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=300$ m και διέγερση 225^α



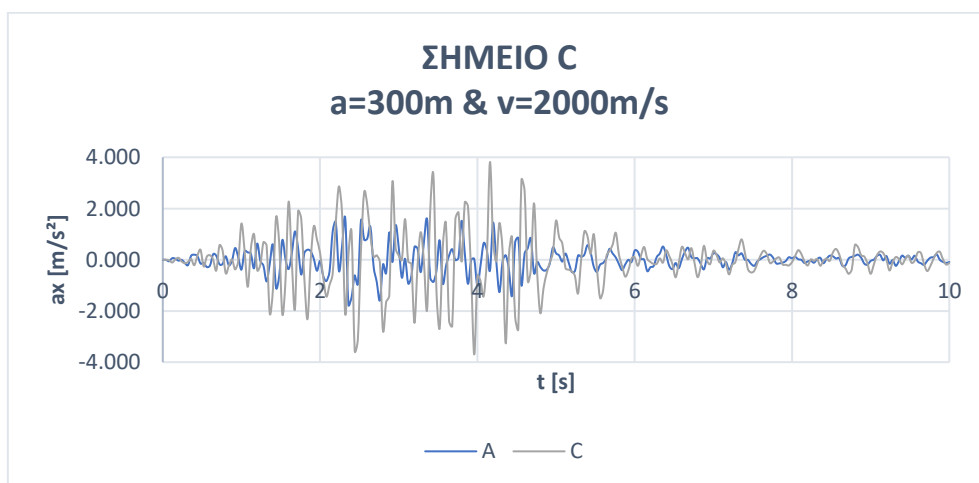
Διάγραμμα 4.1.65: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=300$ m και διέγερση 225^α



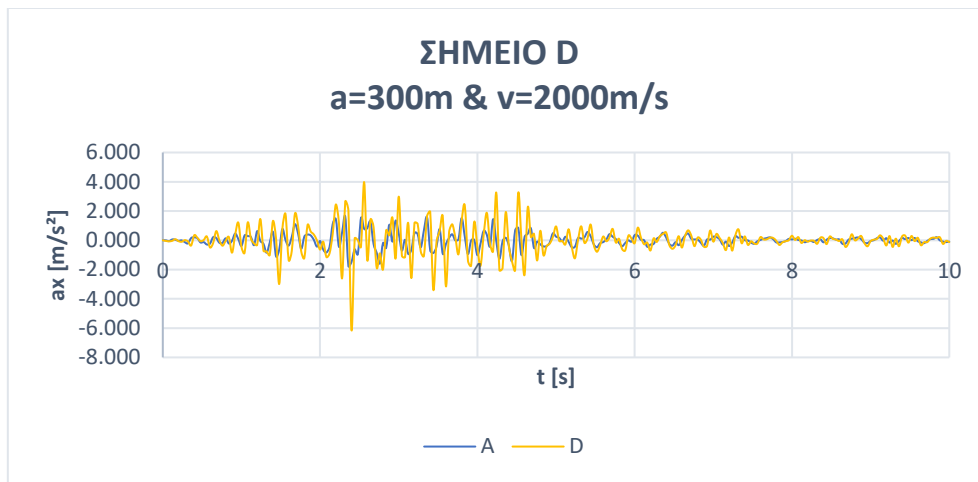
Διάγραμμα 4.1.66: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση 225α



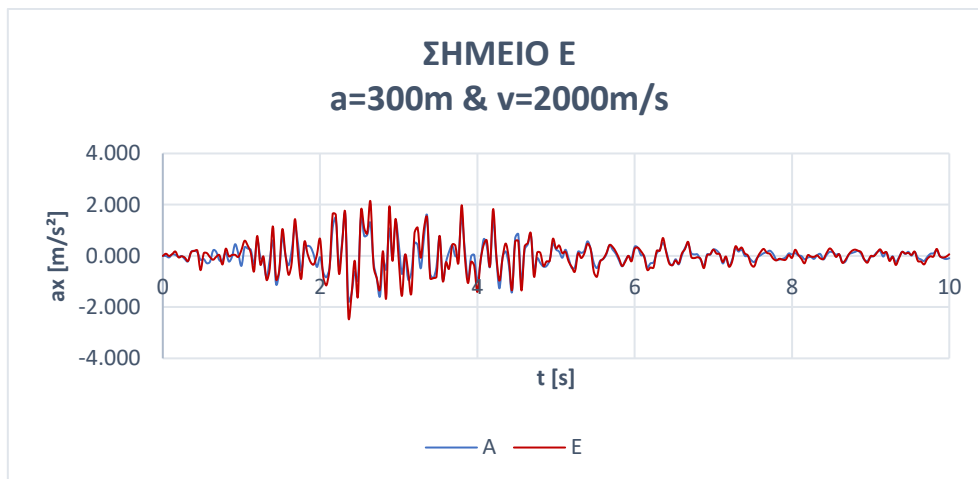
Διάγραμμα 4.1.67: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση 225α



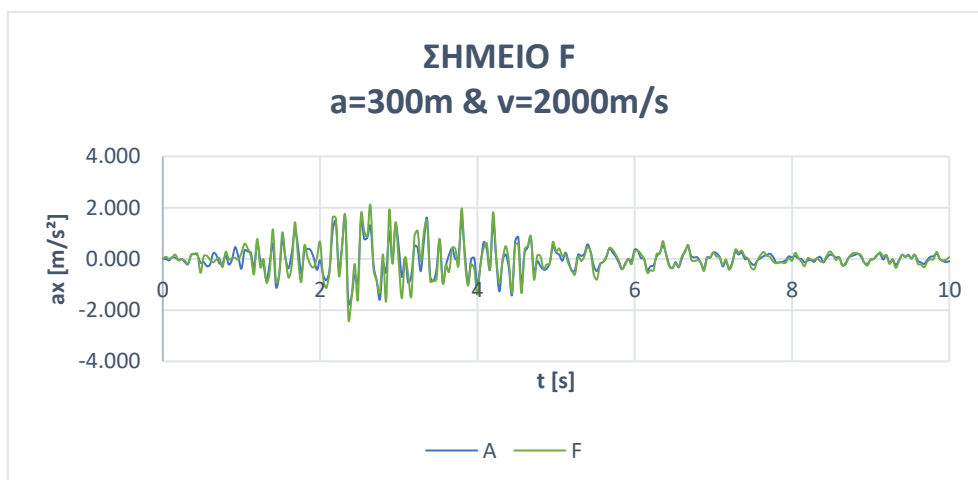
Διάγραμμα 4.1.68: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση 225α



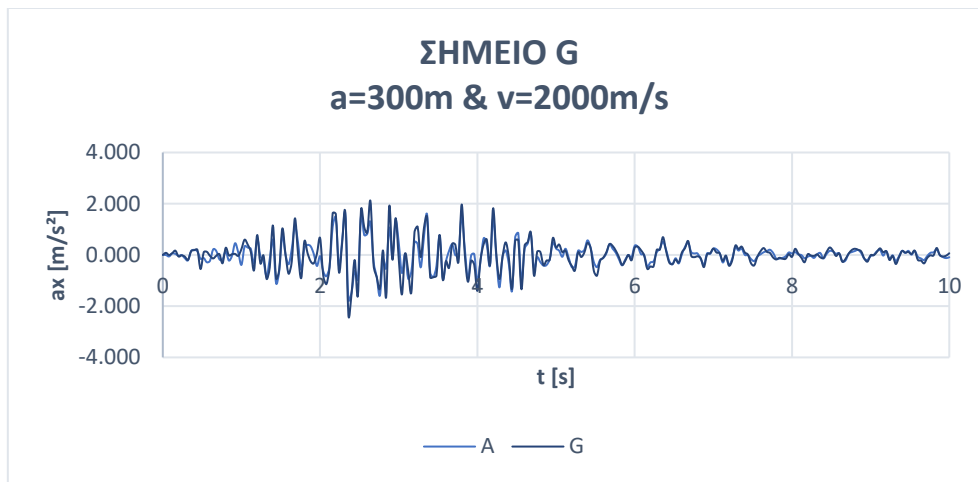
Διάγραμμα 4.1.69: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=300$ m και διέγερση 225α



Διάγραμμα 4.1.70: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=300$ m και διέγερση 225α

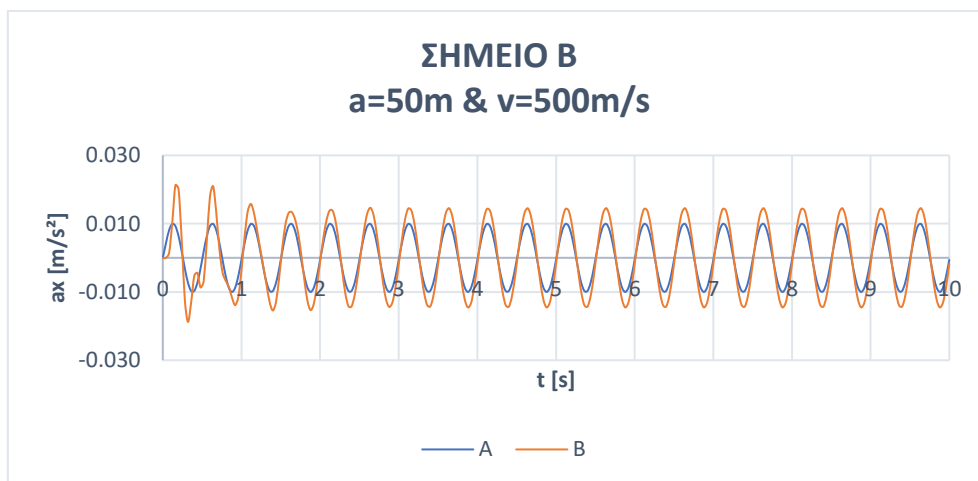


Διάγραμμα 4.1.71: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=300$ m και διέγερση 225α

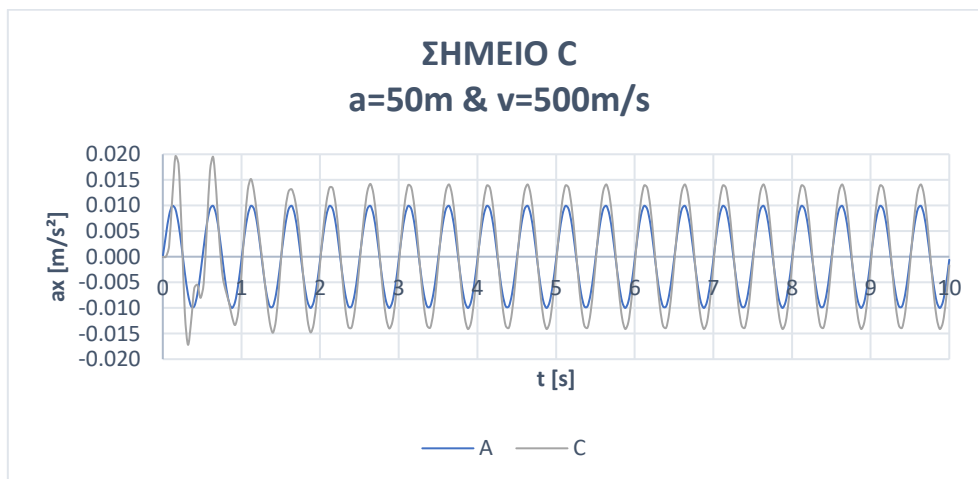


Διάγραμμα 4.1.72: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300\text{m}$ και διέγερση $225a$

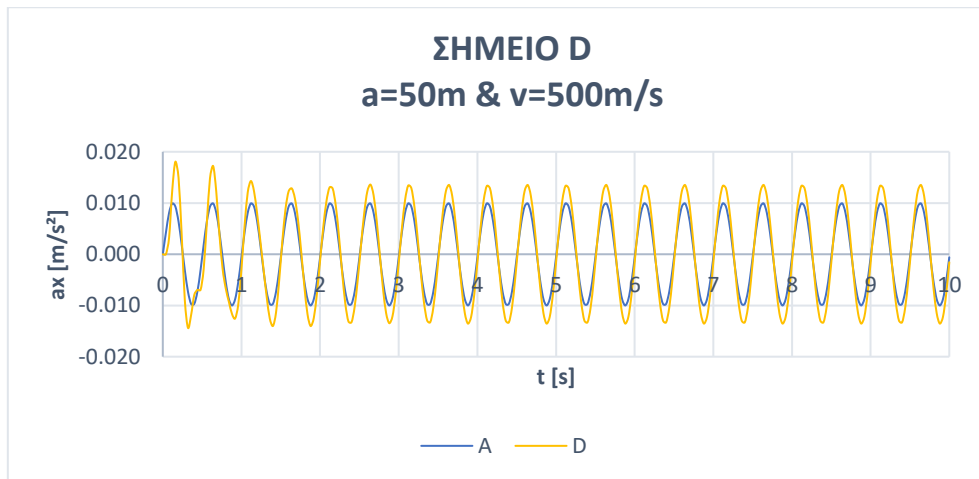
Ημιτονική διέγερση $f=2\text{Hz}$ (SIN-2hz)



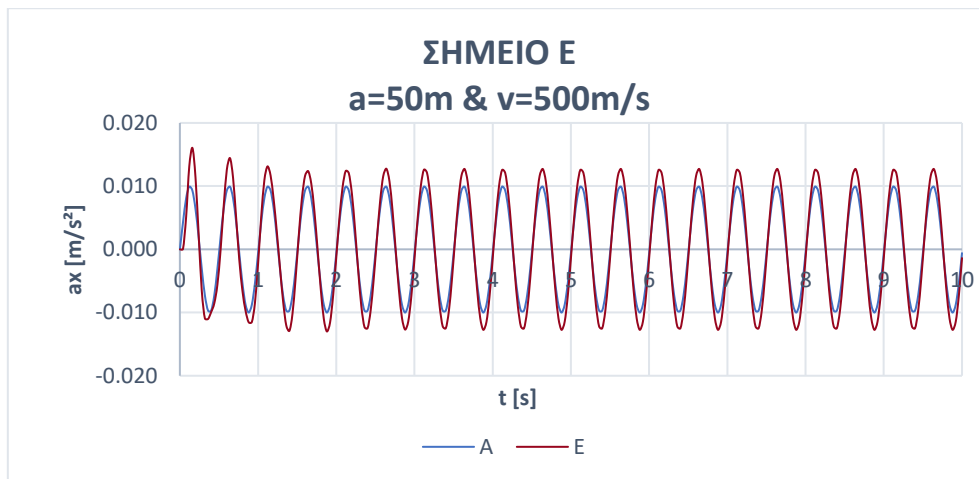
Διάγραμμα 4.1.73: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50\text{m}$ και διέγερση $f=2\text{Hz}$ (SIN-2hz)



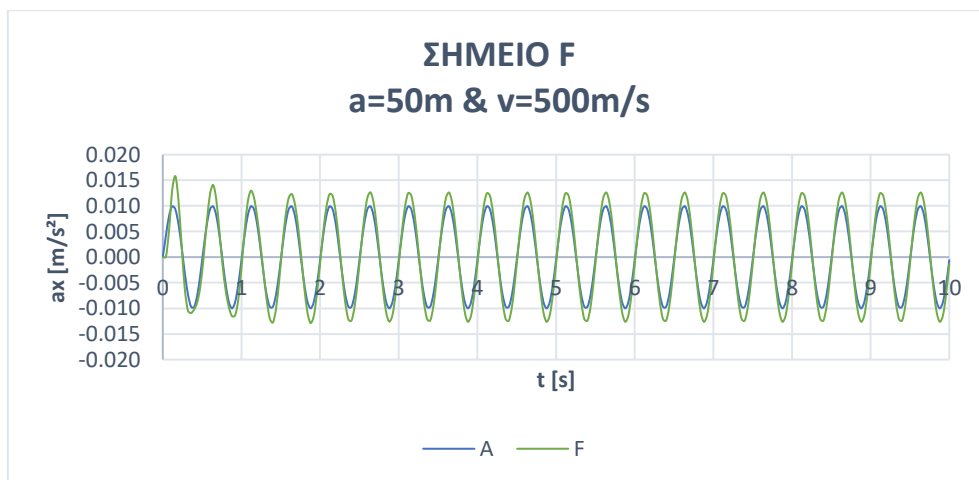
Διάγραμμα 4.1.74: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



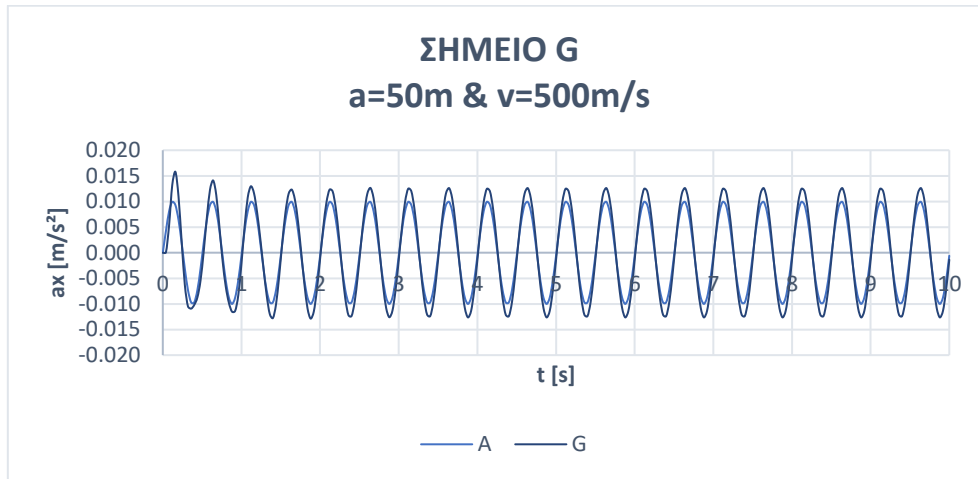
Διάγραμμα 4.1.75: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



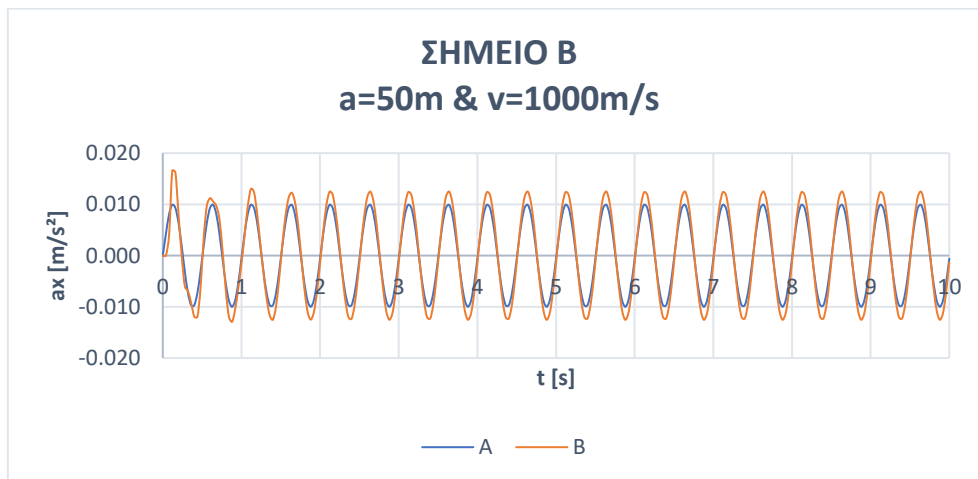
Διάγραμμα 4.1.76: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



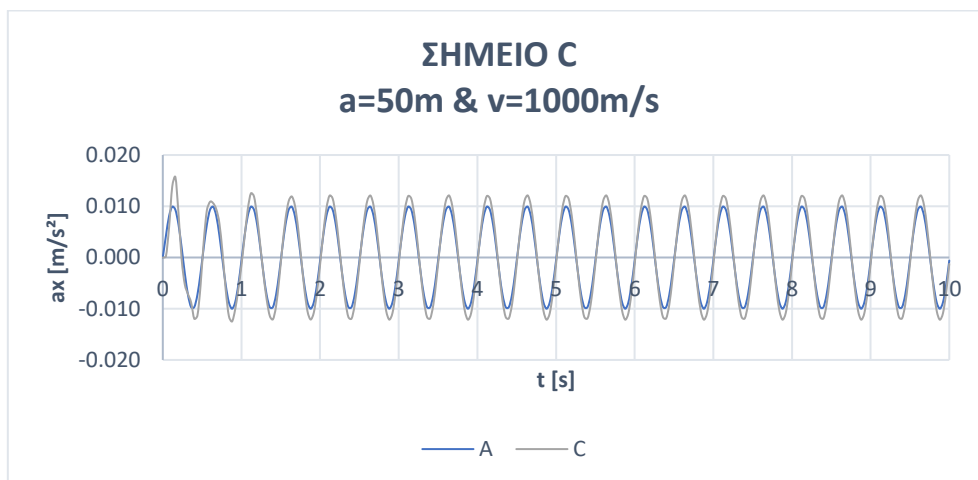
Διάγραμμα 4.1.77: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



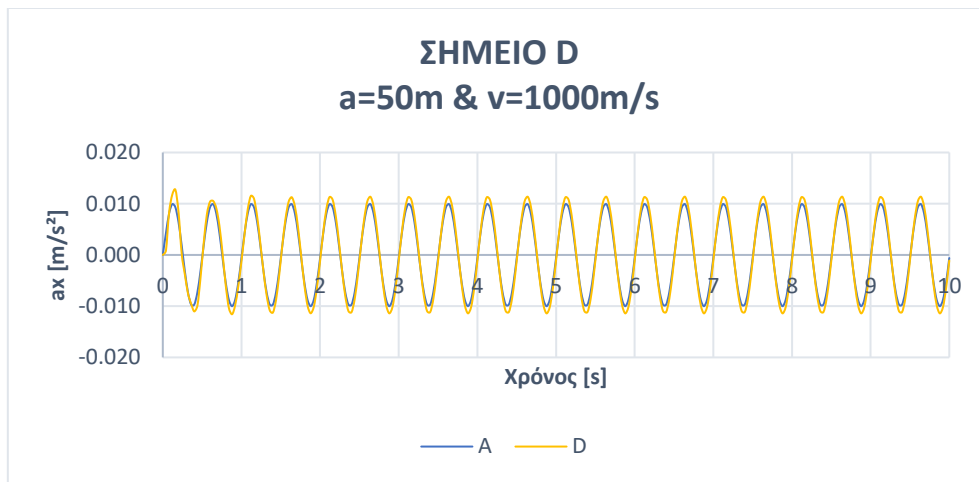
Διάγραμμα 4.1.78: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



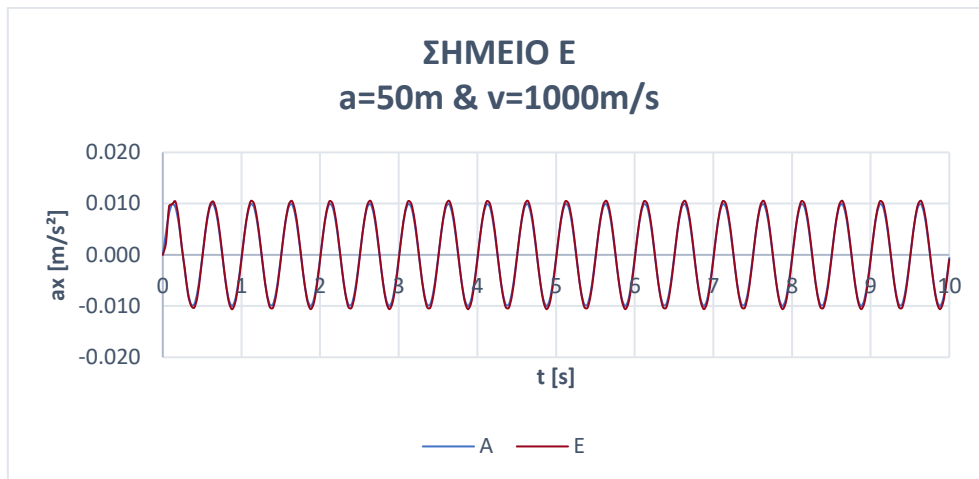
Διάγραμμα 4.1.79: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



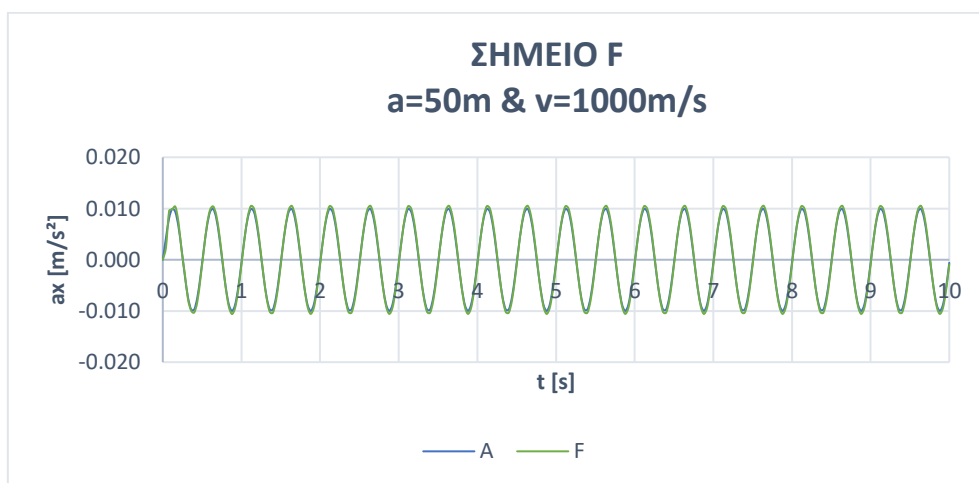
Διάγραμμα 4.1.80: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



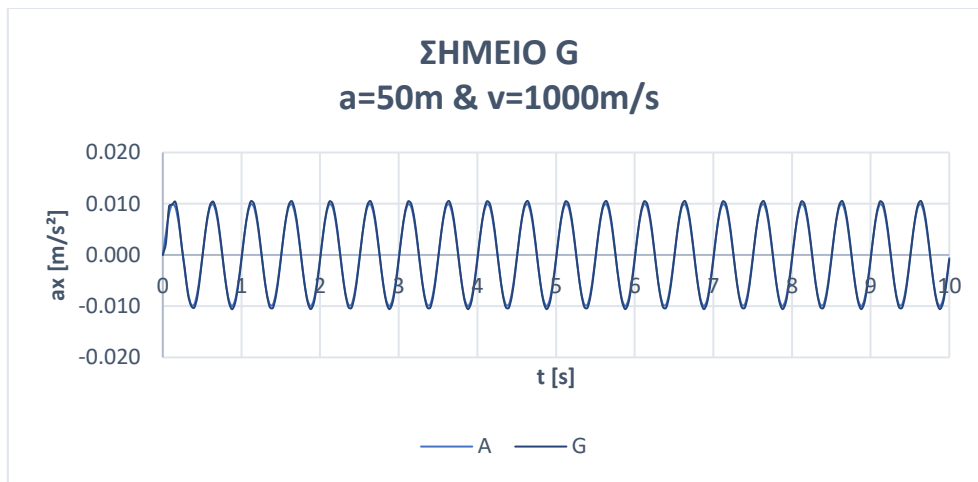
Διάγραμμα 4.1.81: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



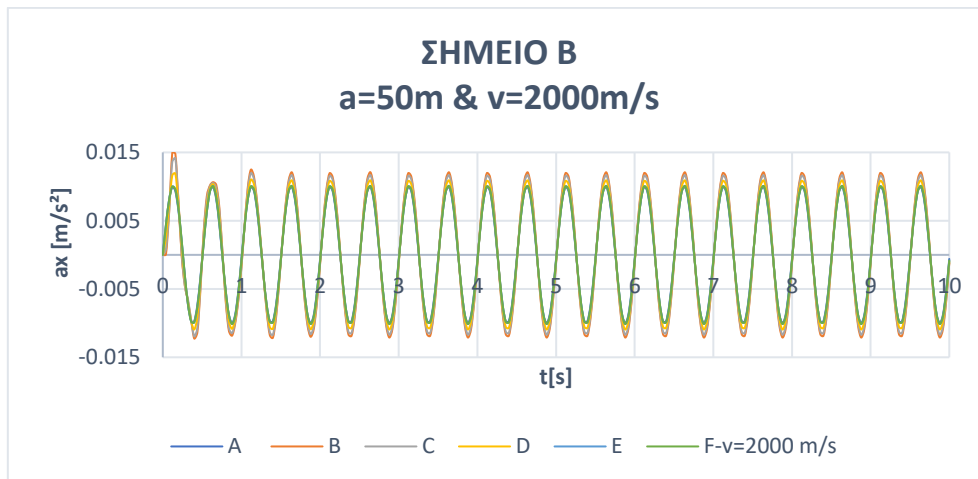
Διάγραμμα 4.1.82: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



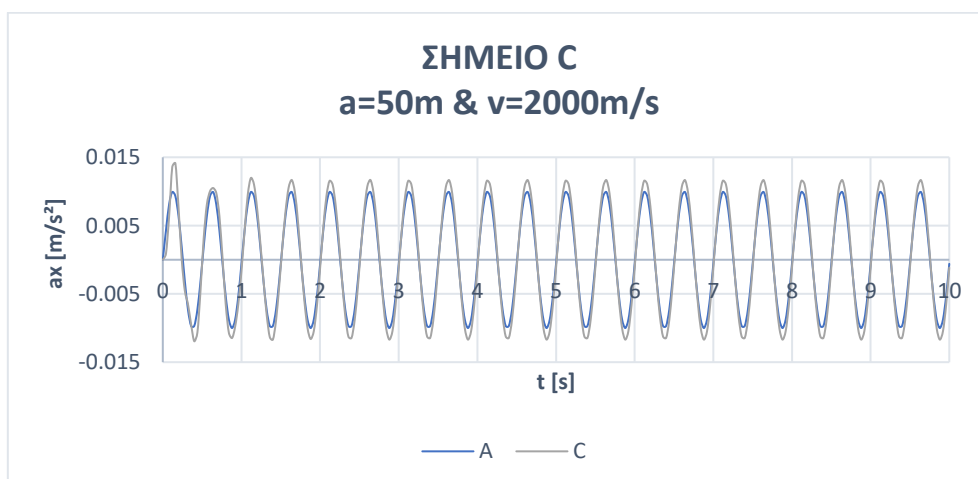
Διάγραμμα 4.1.83: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



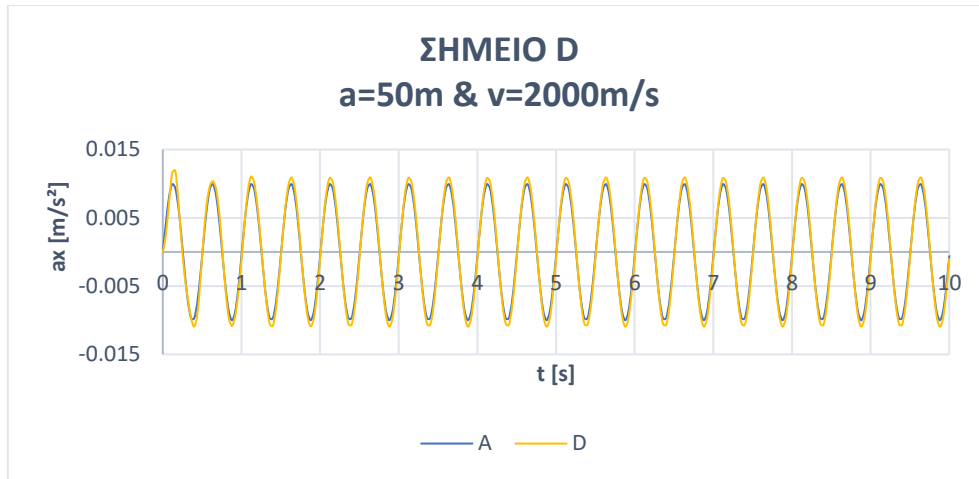
Διάγραμμα 4.1.84: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση $f=2Hz$ ($SIN-2hz$)



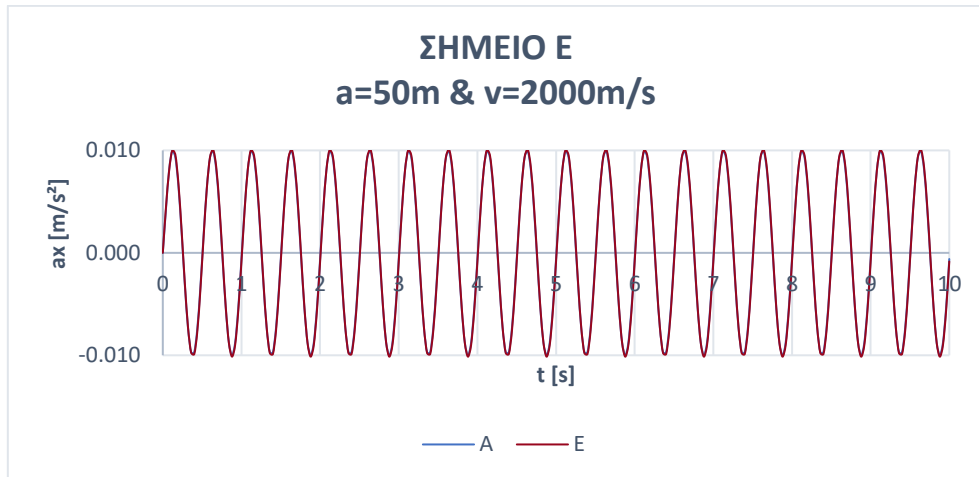
Διάγραμμα 4.1.85: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση $f=2Hz$ ($SIN-2hz$)



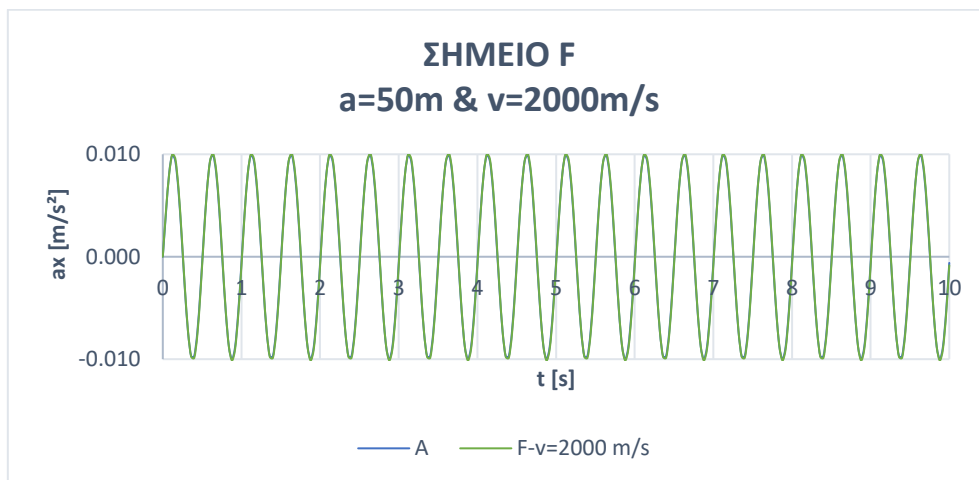
Διάγραμμα 4.1.86: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση $f=2Hz$ ($SIN-2hz$)



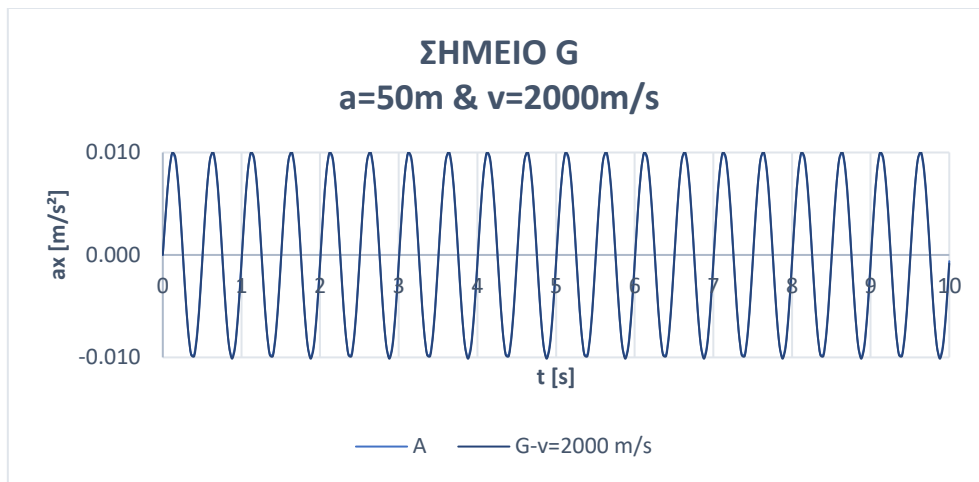
Διάγραμμα 4.1.87: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση $f=2Hz$ ($SIN-2hz$)



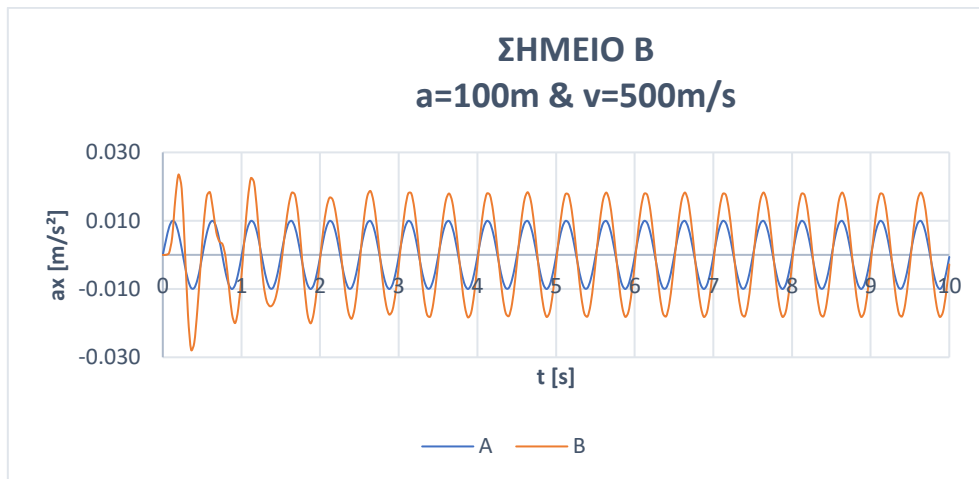
Διάγραμμα 4.1.88: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση $f=2Hz$ ($SIN-2hz$)



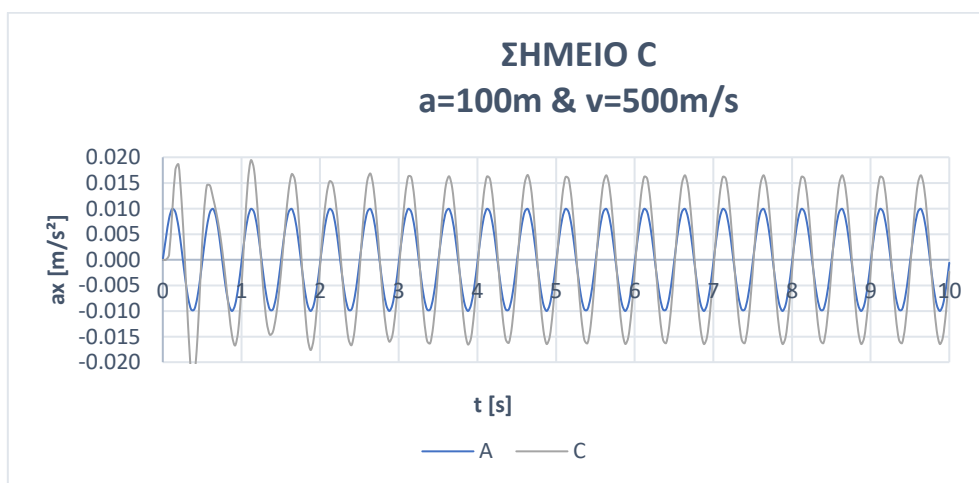
Διάγραμμα 4.1.89: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση $f=2Hz$ ($SIN-2hz$)



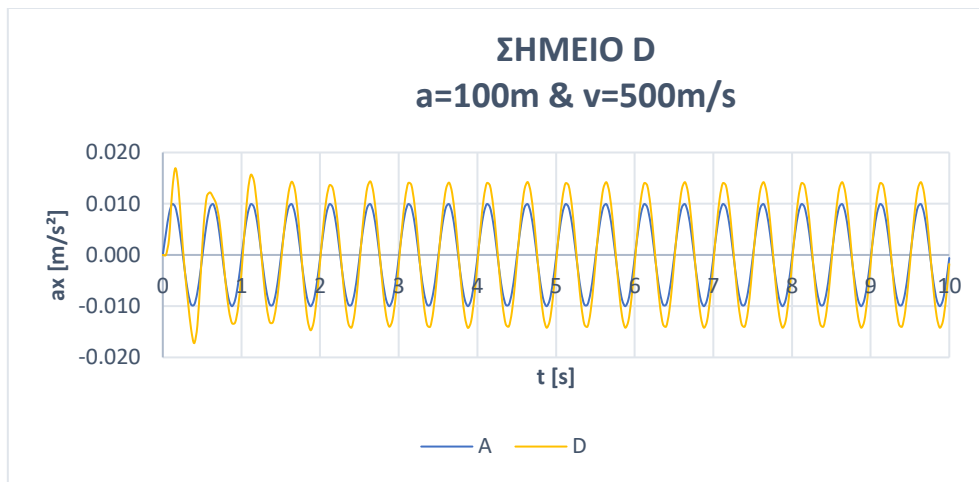
Διάγραμμα 4.1.90: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



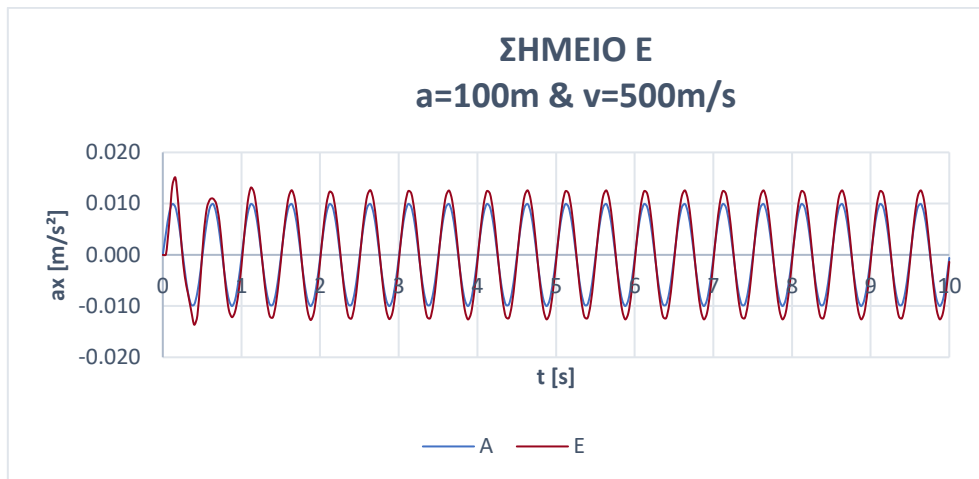
Διάγραμμα 4.1.91: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



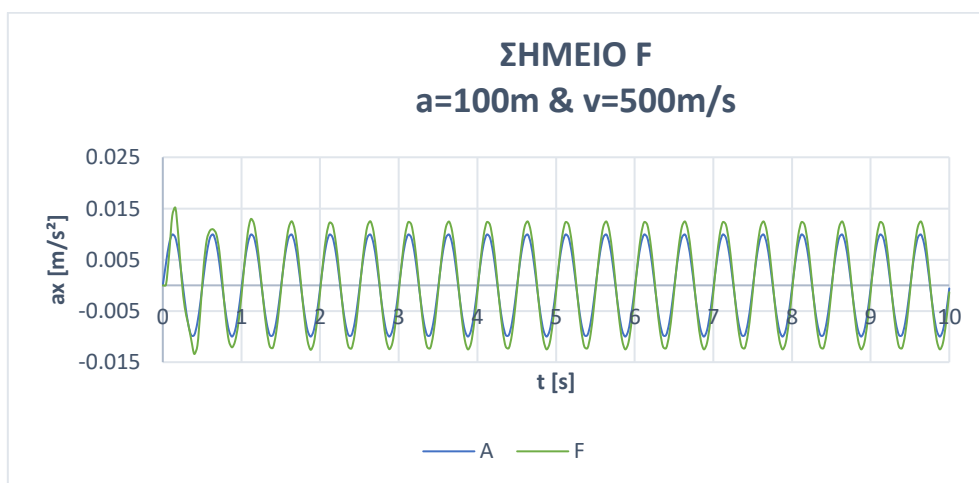
Διάγραμμα 4.1.92: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



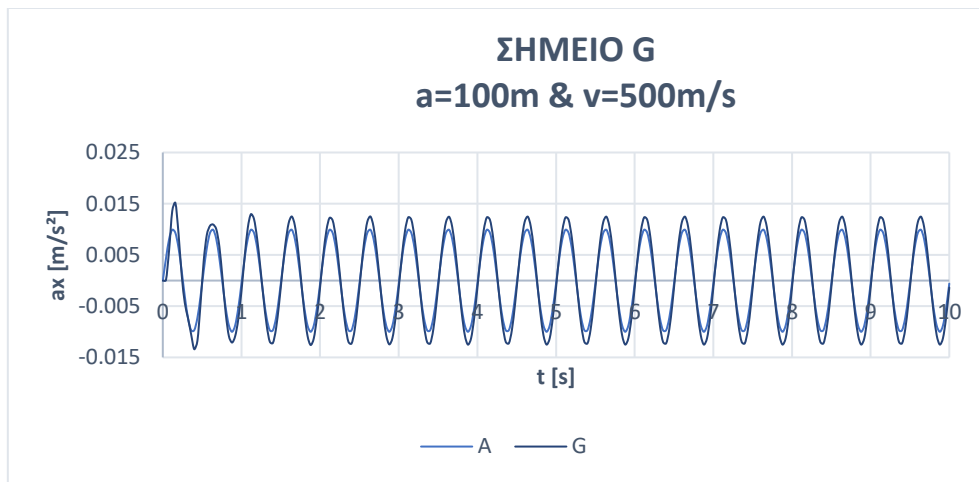
Διάγραμμα 4.1.93: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100\text{m}$ και διέγερση $f=2\text{Hz}$ (SIN-2hz)



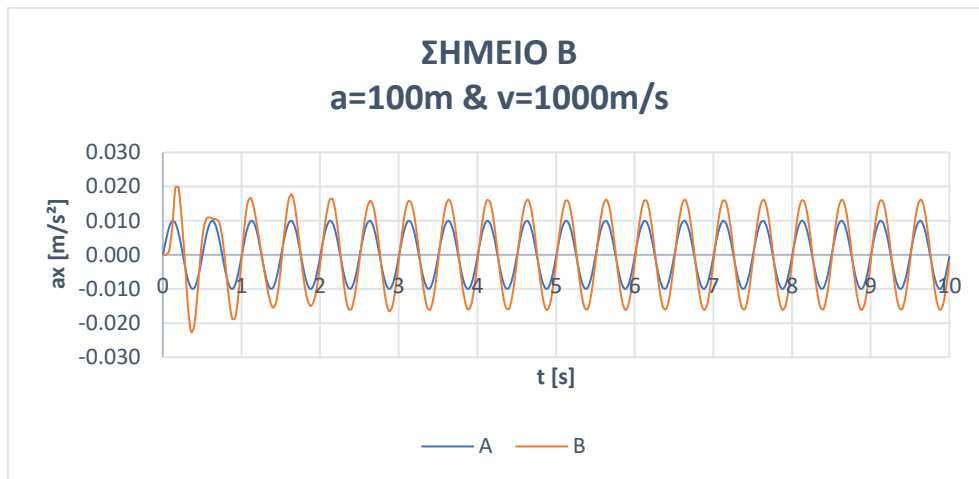
Διάγραμμα 4.1.94: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100\text{m}$ και διέγερση $f=2\text{Hz}$ (SIN-2hz)



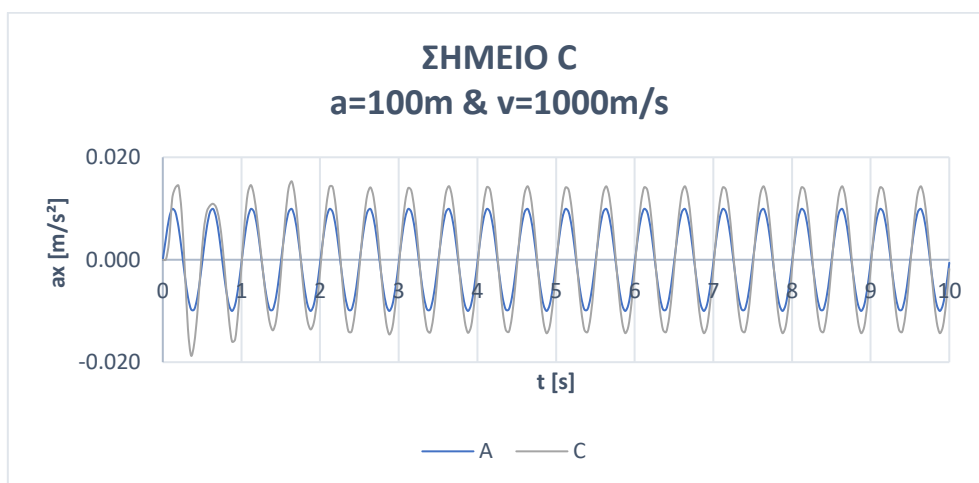
Διάγραμμα 4.1.95: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100\text{m}$ και διέγερση $f=2\text{Hz}$ (SIN-2hz)



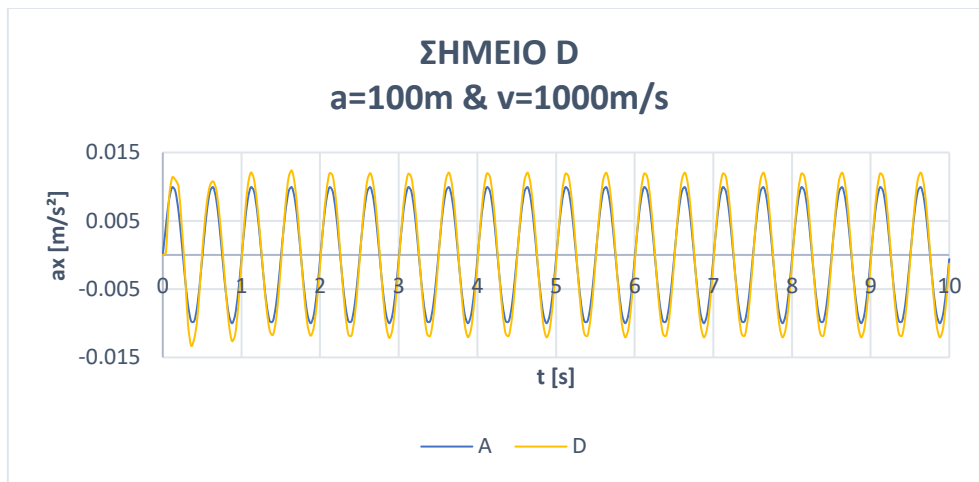
Διάγραμμα 4.1.96: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



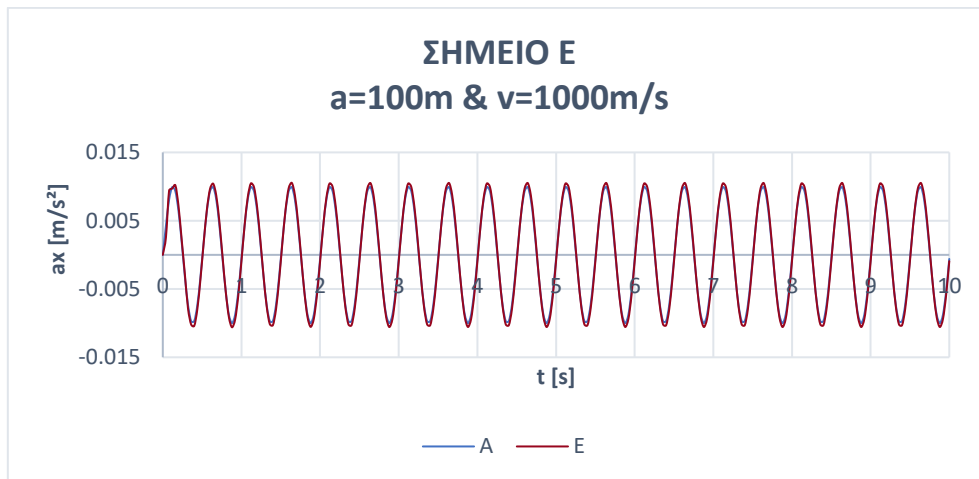
Διάγραμμα 4.1.97: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



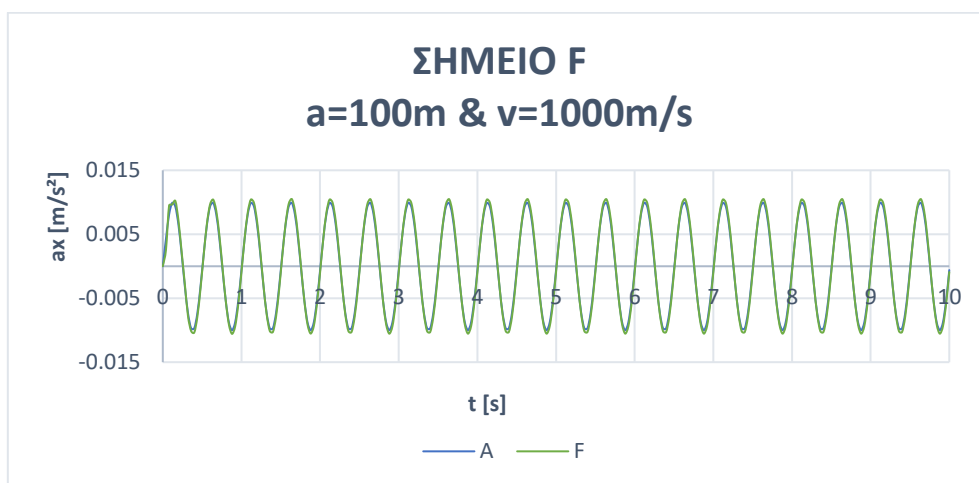
Διάγραμμα 4.1.98: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



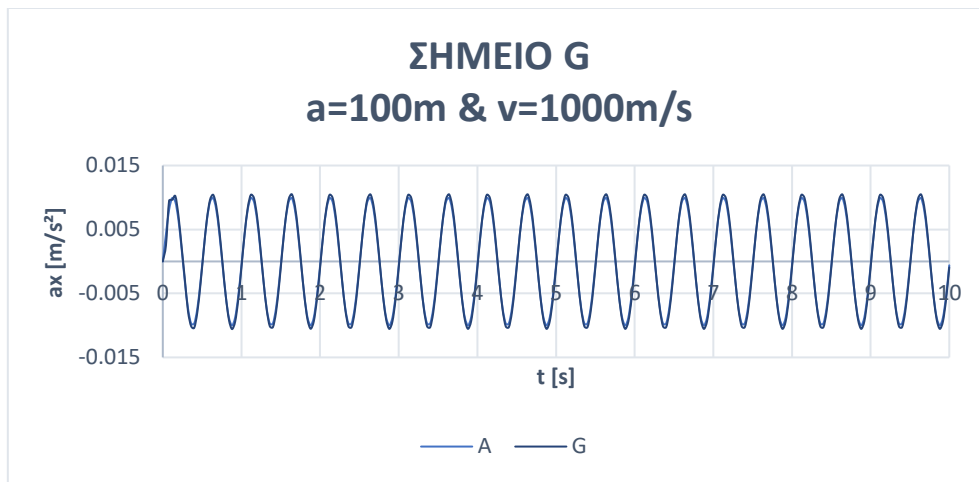
Διάγραμμα 4.1.99: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



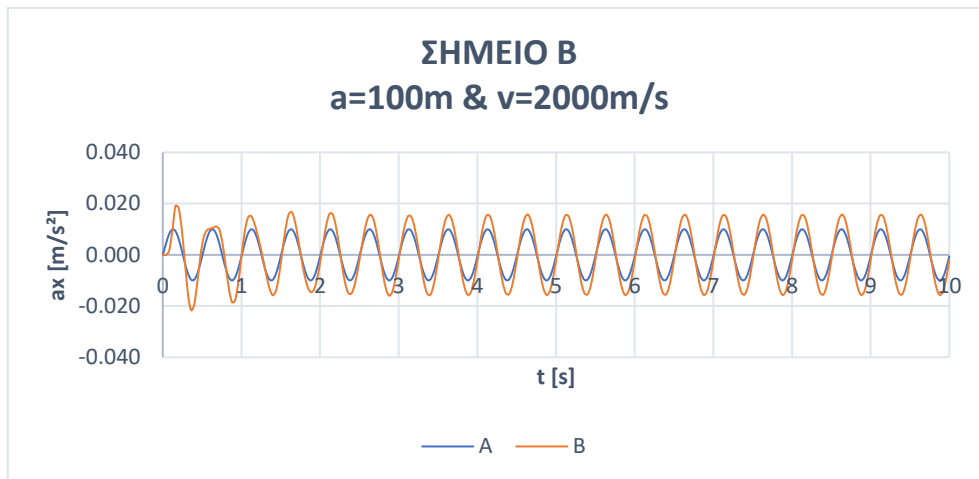
Διάγραμμα 4.1.100: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



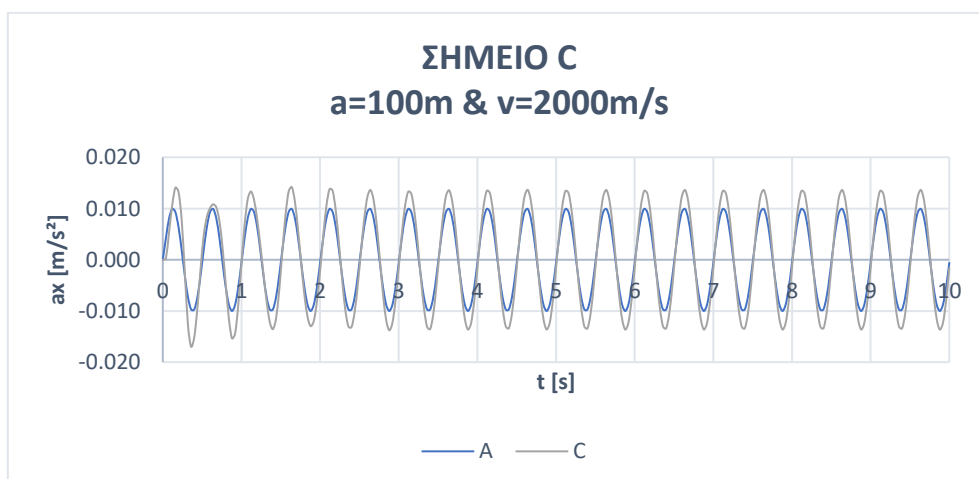
Διάγραμμα 4.1.101: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



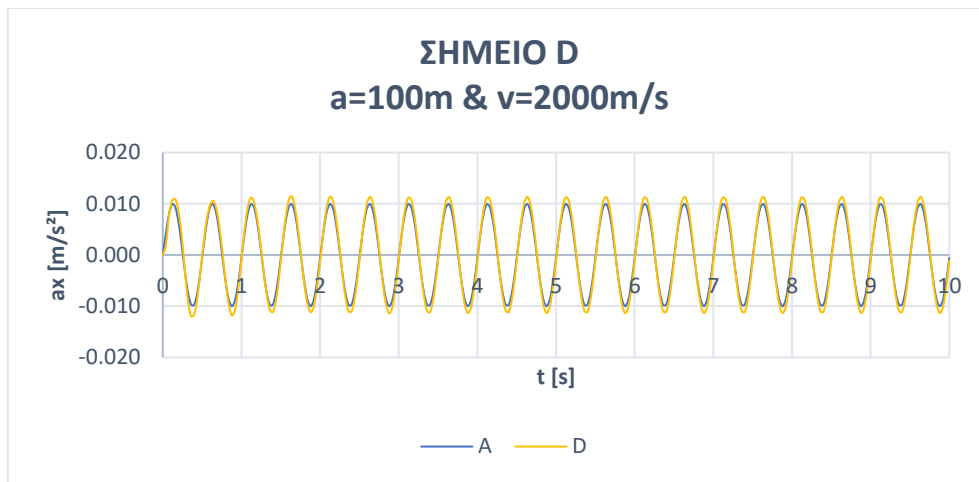
Διάγραμμα 4.1.102: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



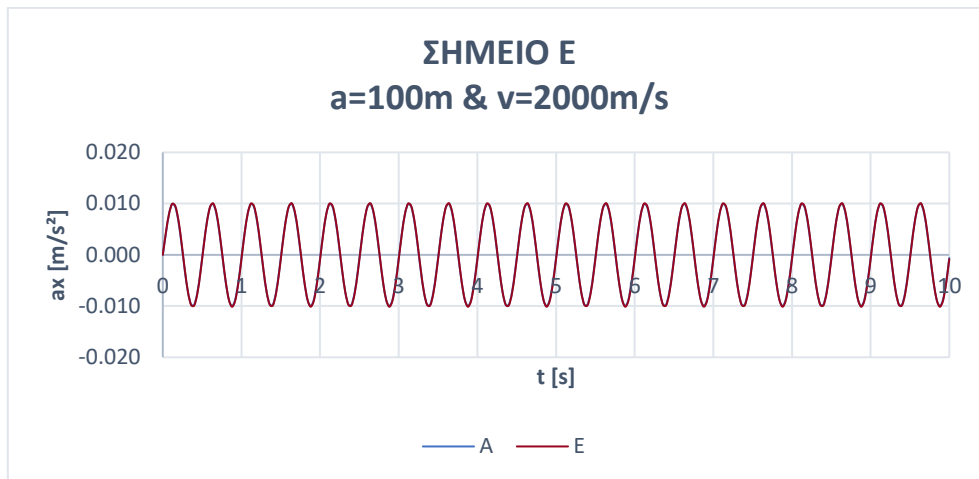
Διάγραμμα 4.1.103: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



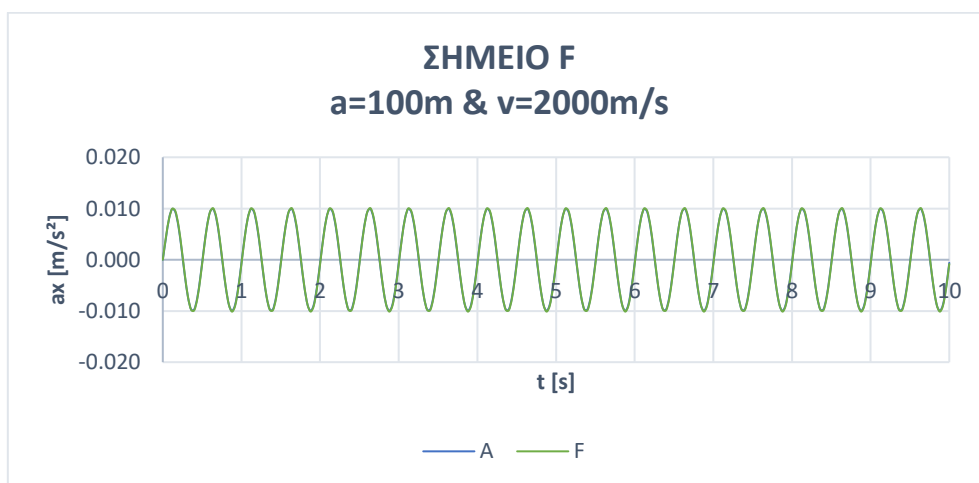
Διάγραμμα 4.1.104: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



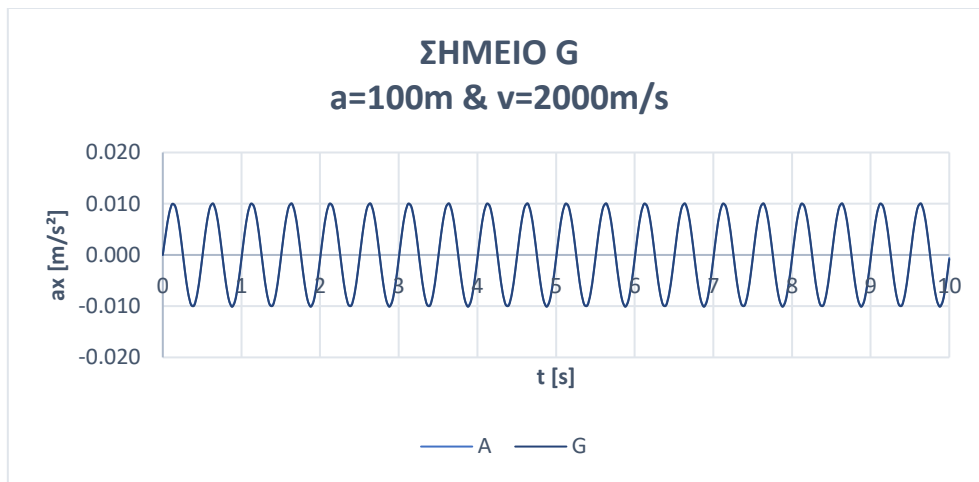
Διάγραμμα 4.1.105: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



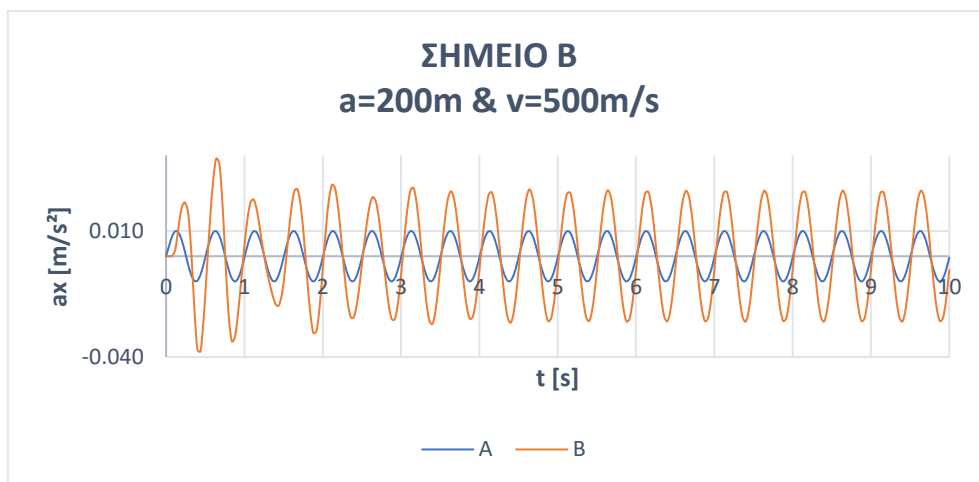
Διάγραμμα 4.1.106: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



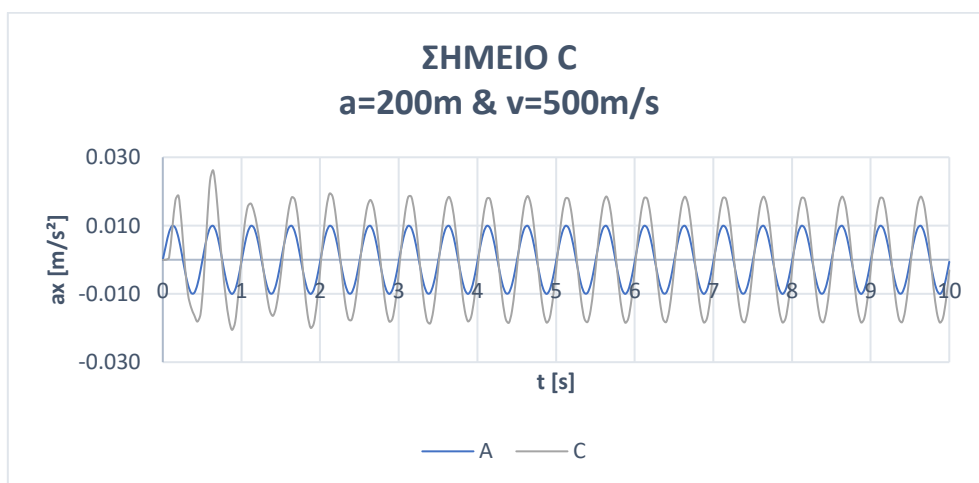
Διάγραμμα 4.1.107: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



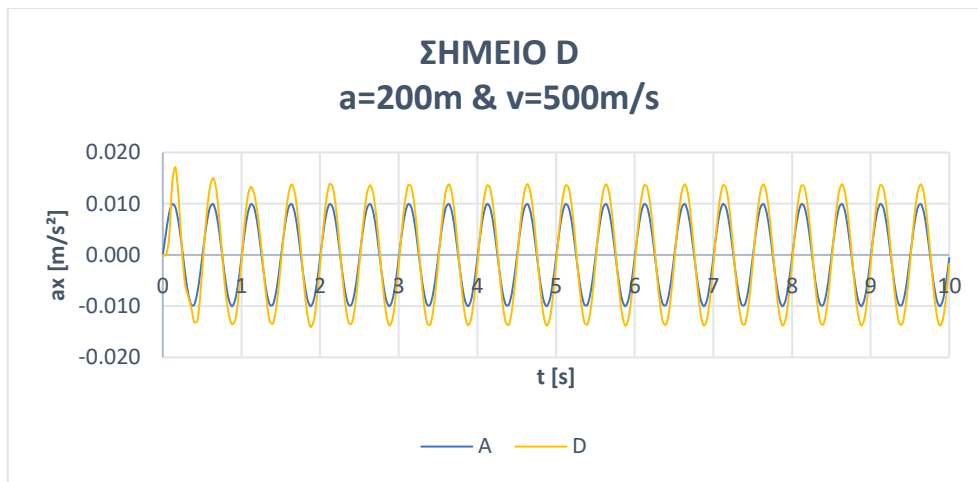
Διάγραμμα 4.1.108: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



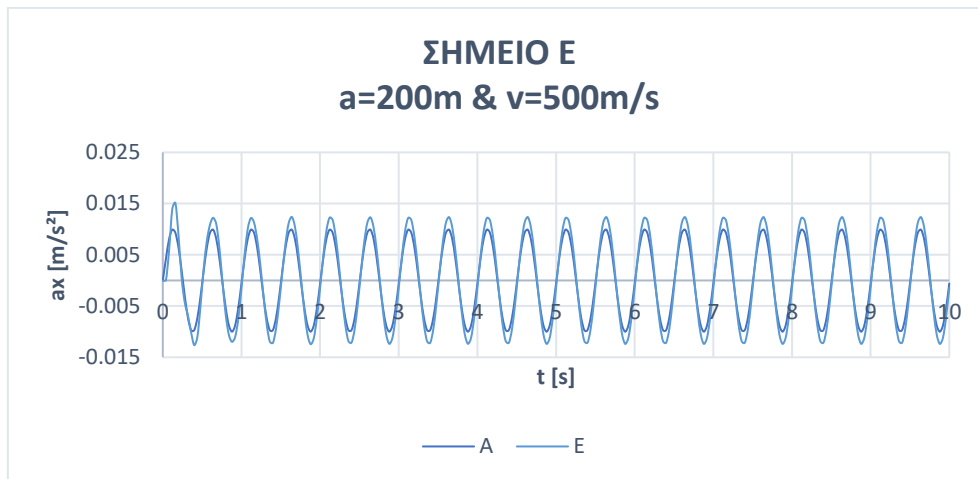
Διάγραμμα 4.1.109: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



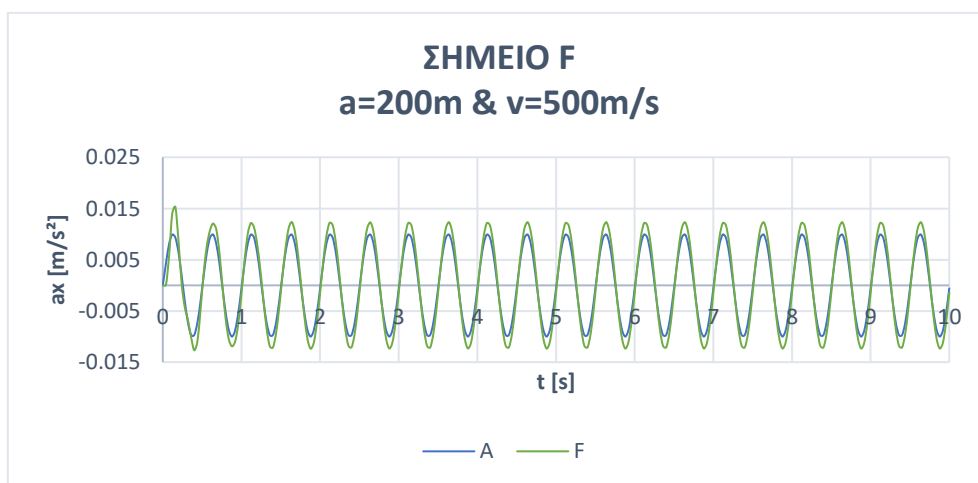
Διάγραμμα 4.1.110: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



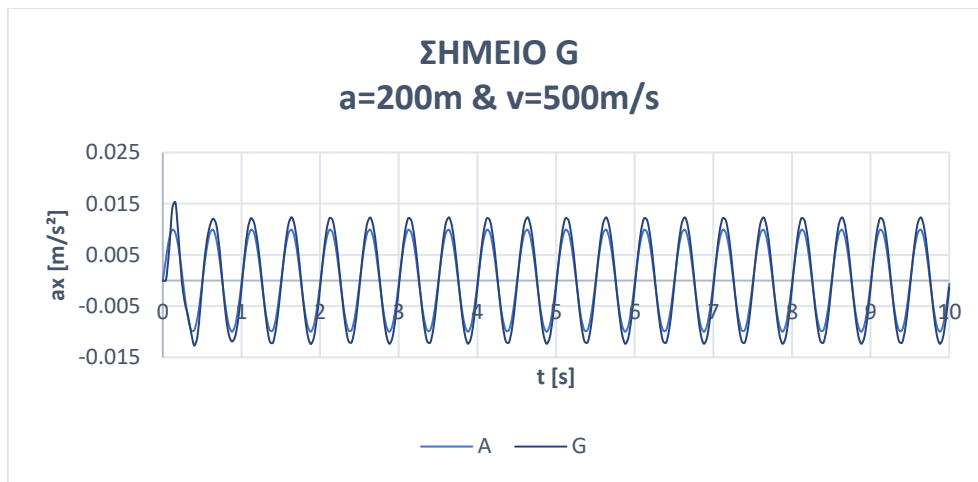
Διάγραμμα 4.1.111: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



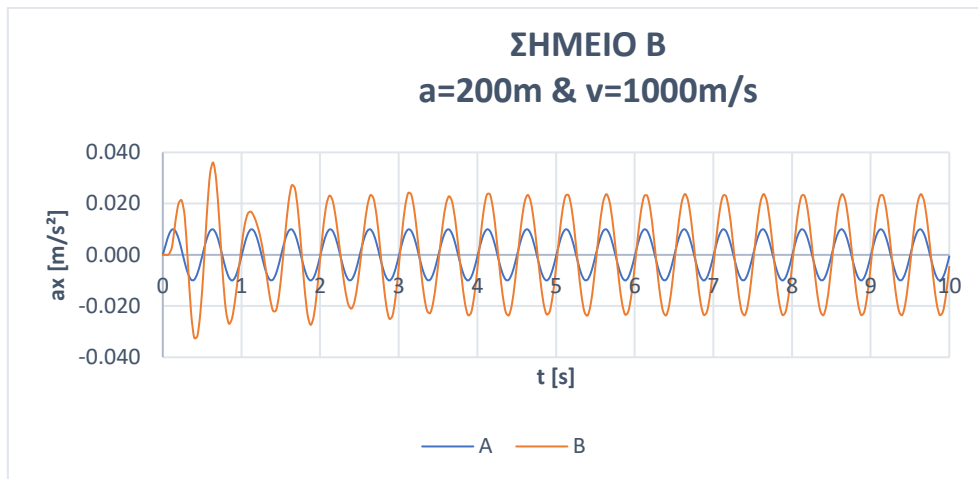
Διάγραμμα 4.1.112: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



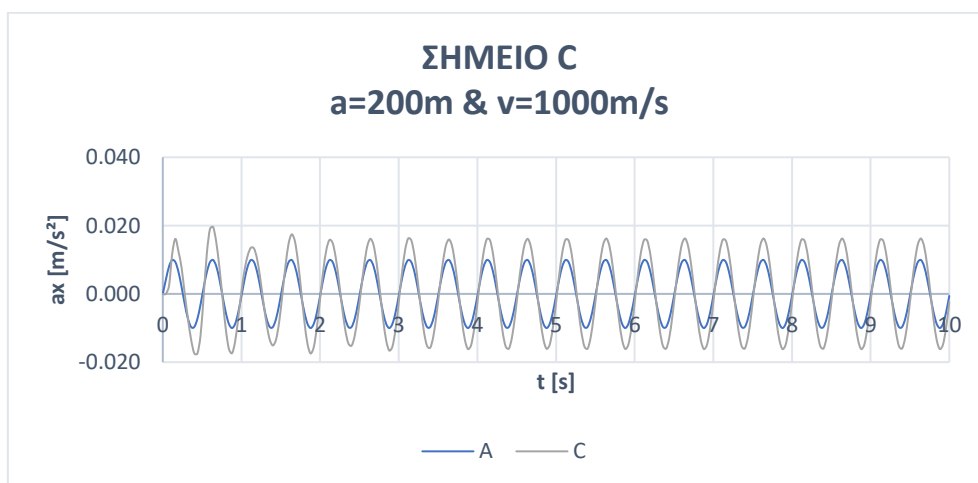
Διάγραμμα 4.1.113: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



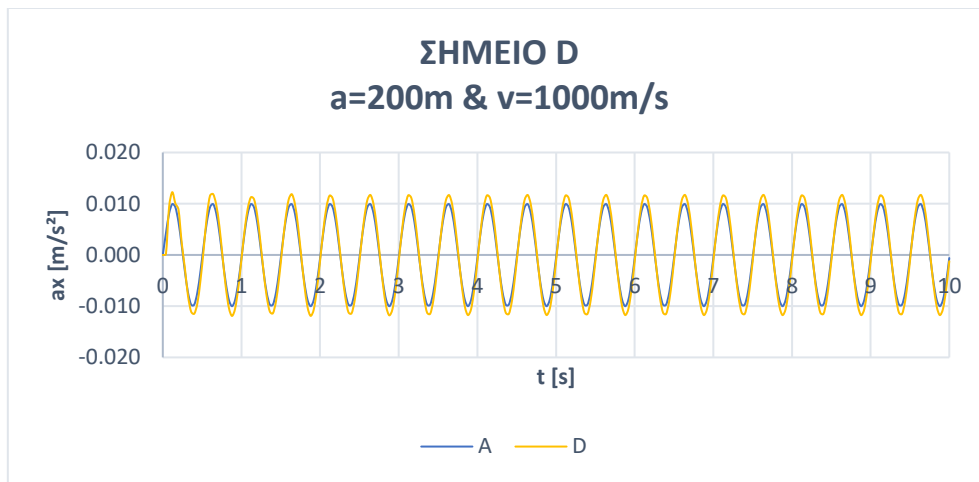
Διάγραμμα 4.1.114: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



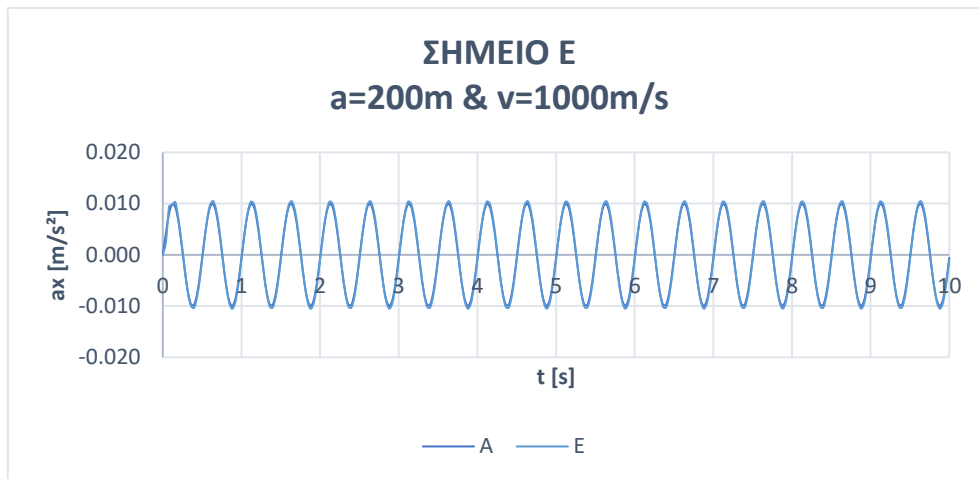
Διάγραμμα 4.1.115: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



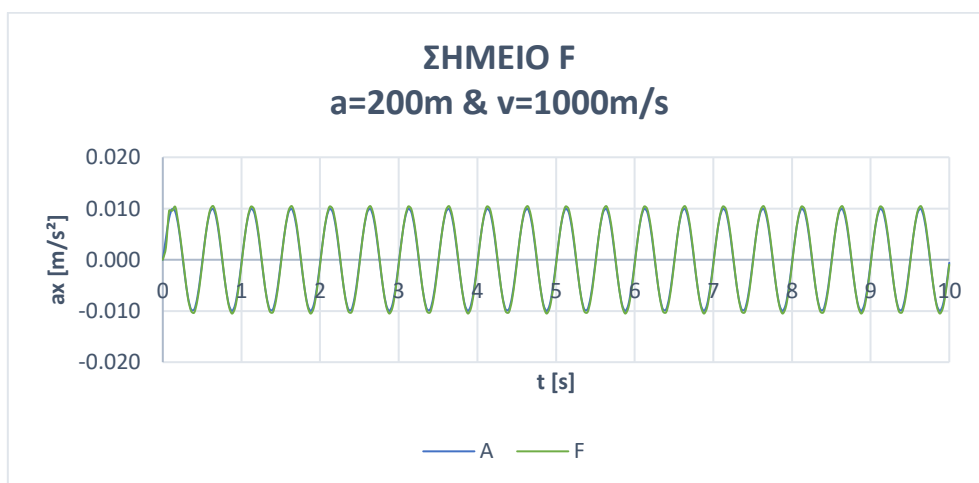
Διάγραμμα 4.1.116: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



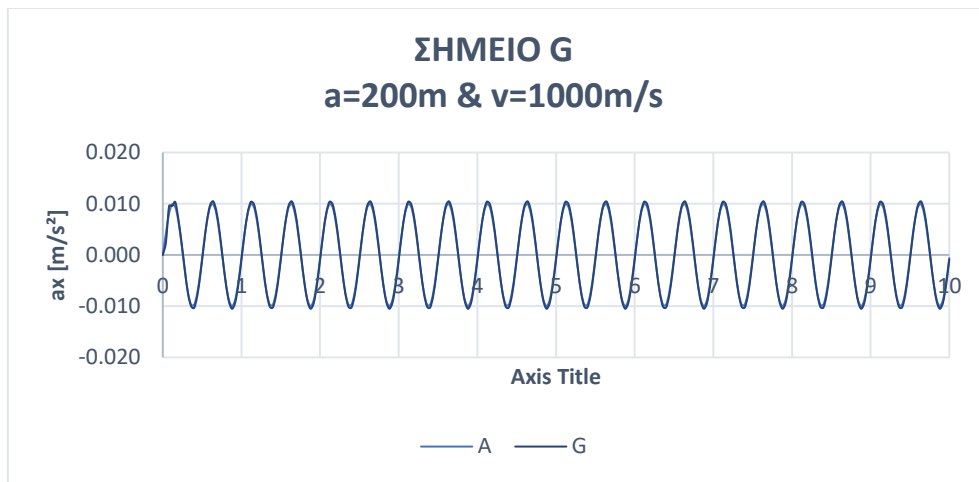
Διάγραμμα 4.1.117: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



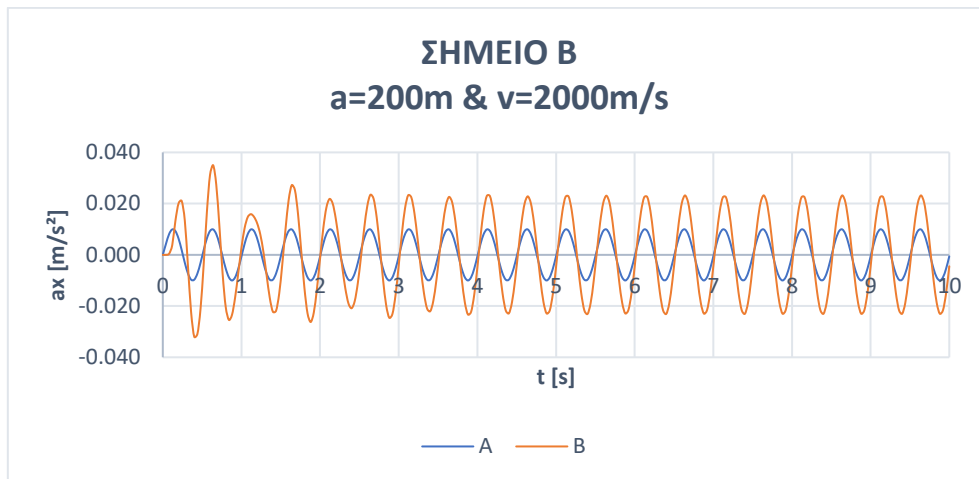
Διάγραμμα 4.1.118: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



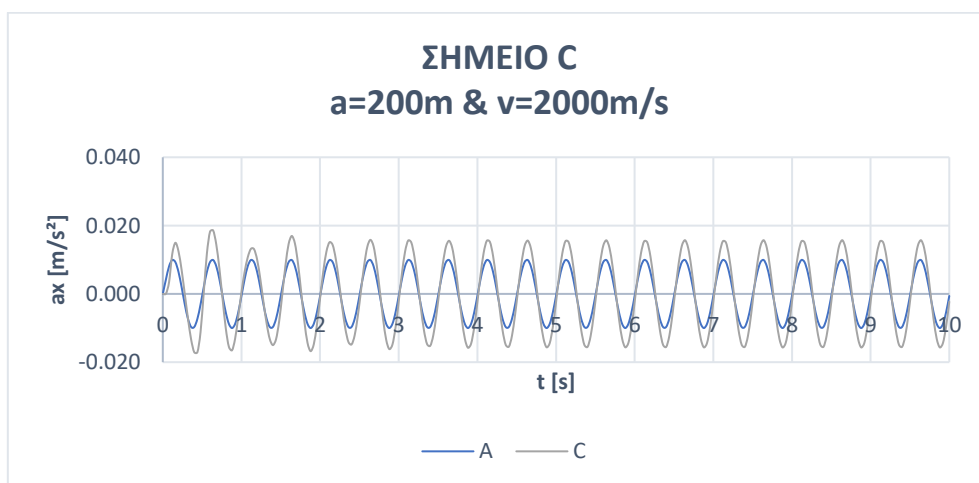
Διάγραμμα 4.1.119: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



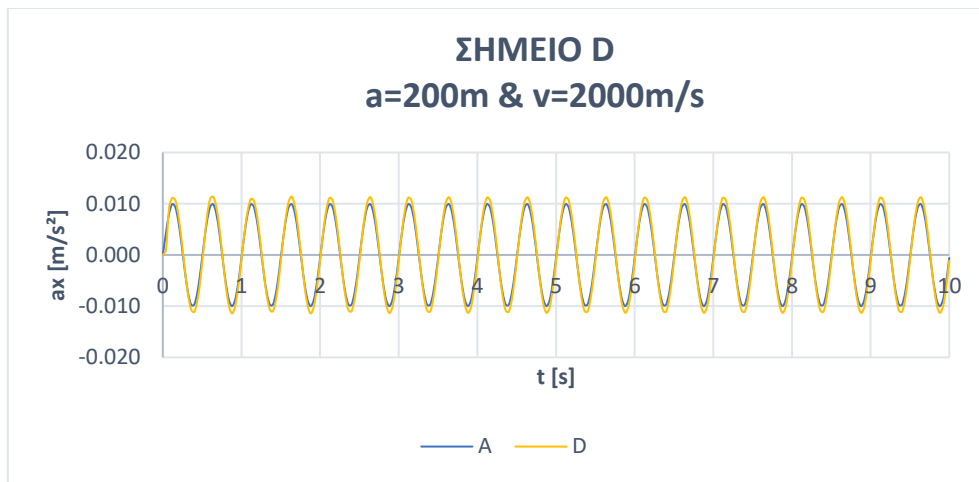
Διάγραμμα 4.1.120: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



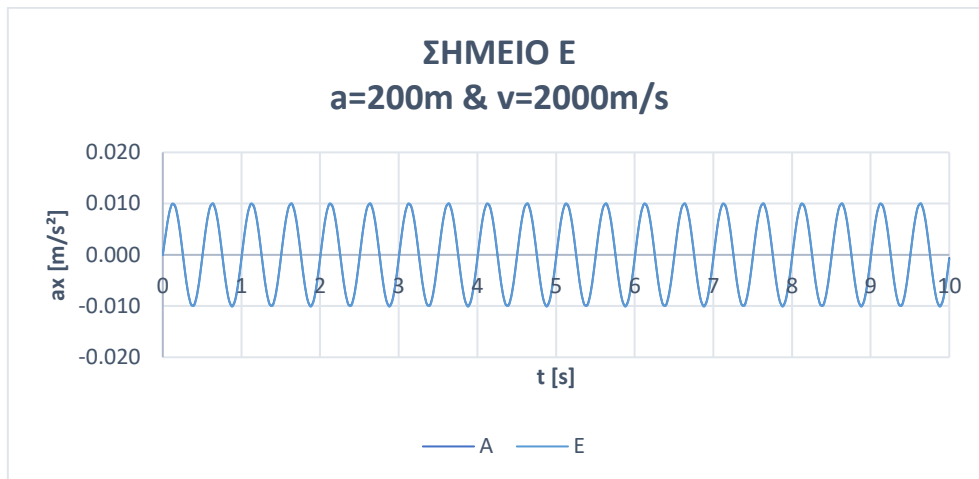
Διάγραμμα 4.1.121: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



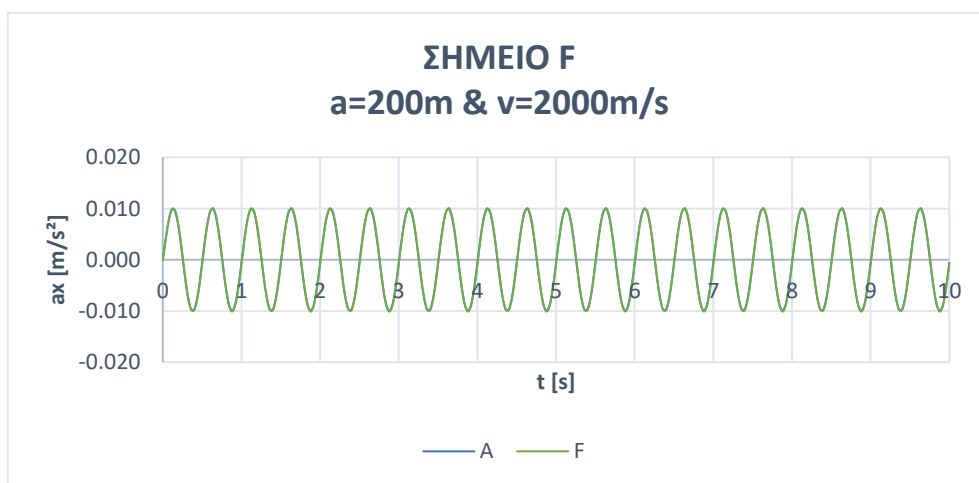
Διάγραμμα 4.1.122: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



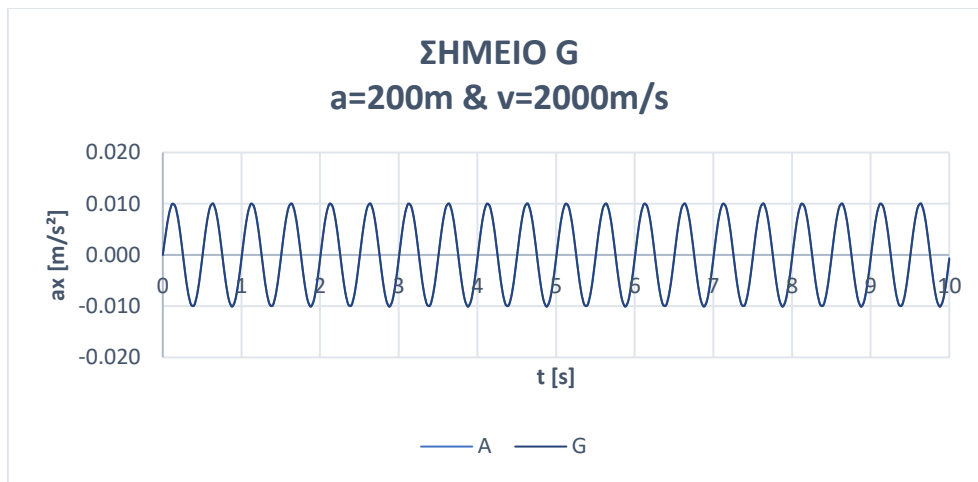
Διάγραμμα 4.1.123: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



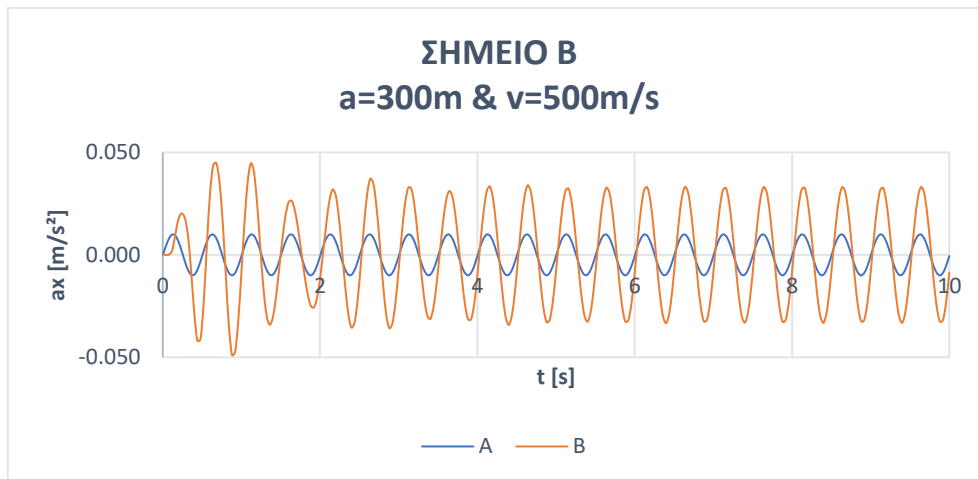
Διάγραμμα 4.1.124: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



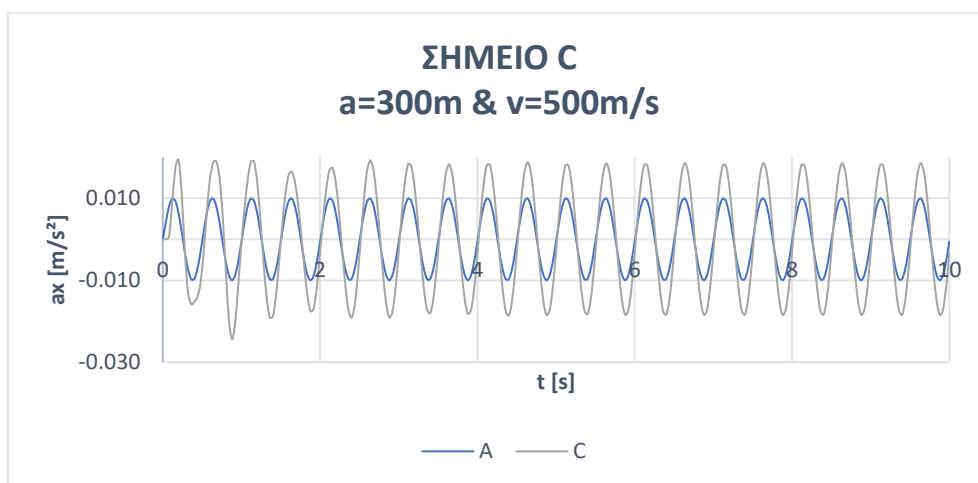
Διάγραμμα 4.1.125: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



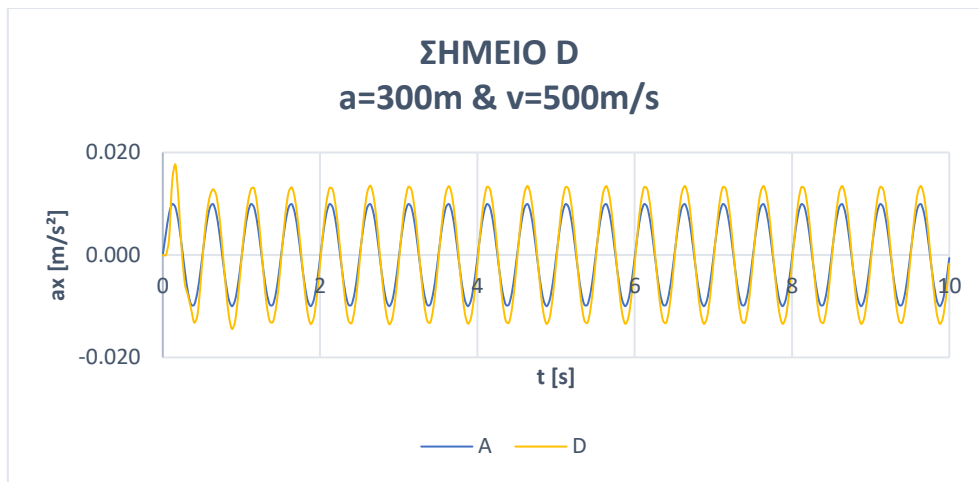
Διάγραμμα 4.1.126: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



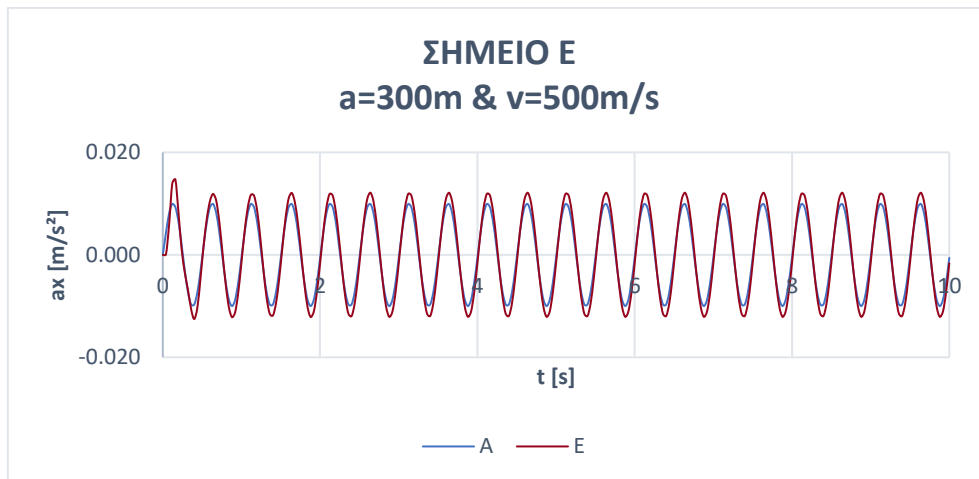
Διάγραμμα 4.1.127: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



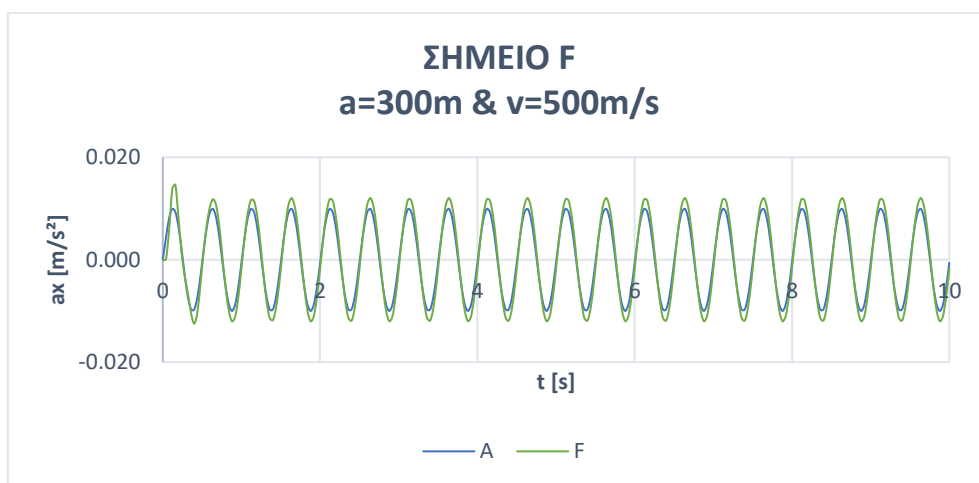
Διάγραμμα 4.1.128: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



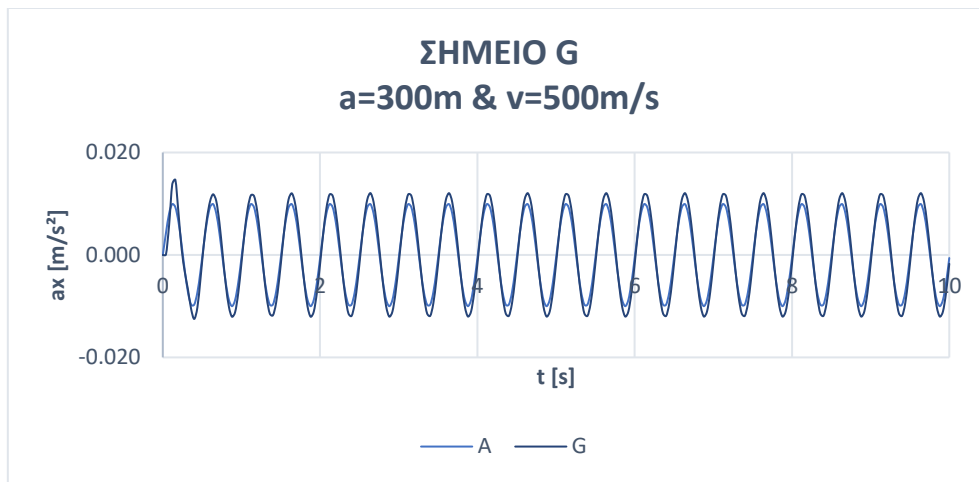
Διάγραμμα 4.1.129: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



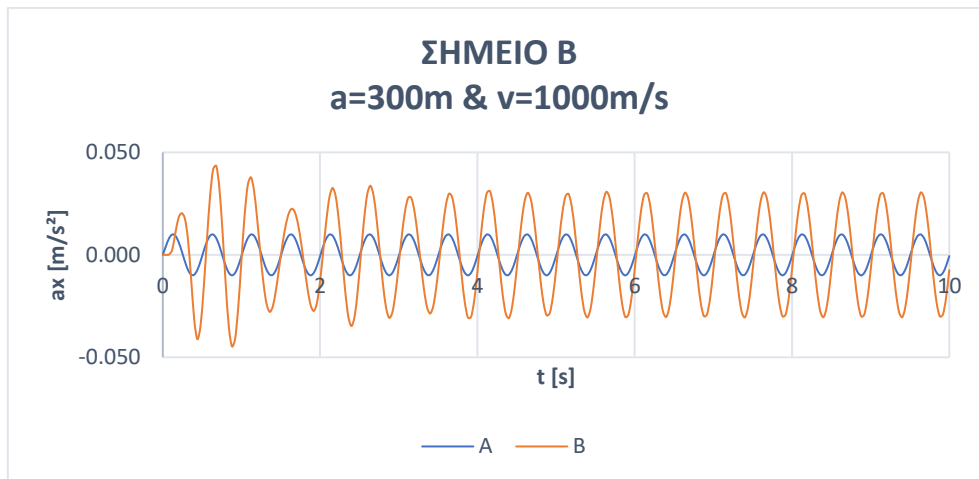
Διάγραμμα 4.1.130: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



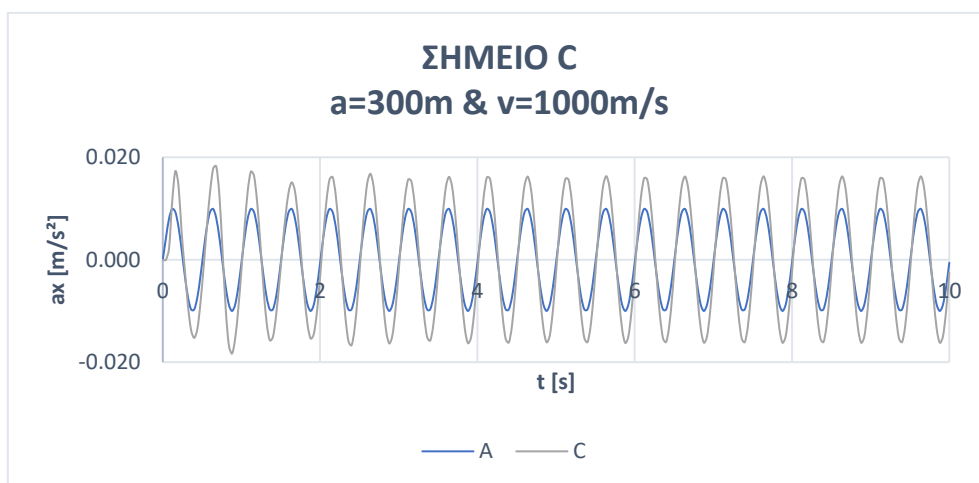
Διάγραμμα 4.1.131: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



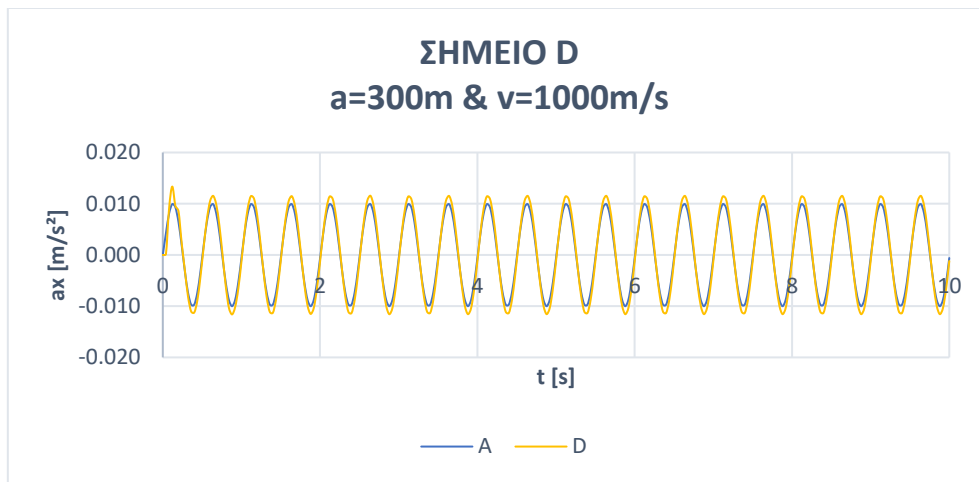
Διάγραμμα 4.1.132: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ ($SIN-2hz$)



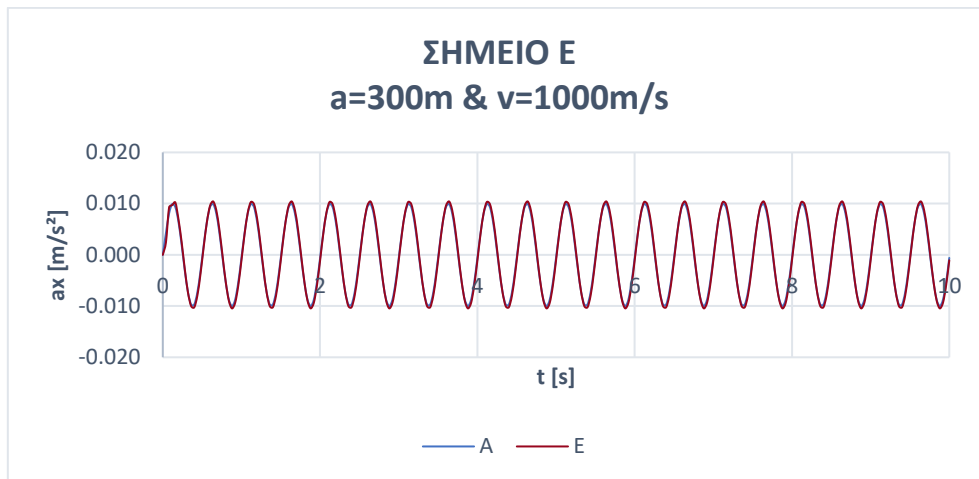
Διάγραμμα 4.1.133: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ ($SIN-2hz$)



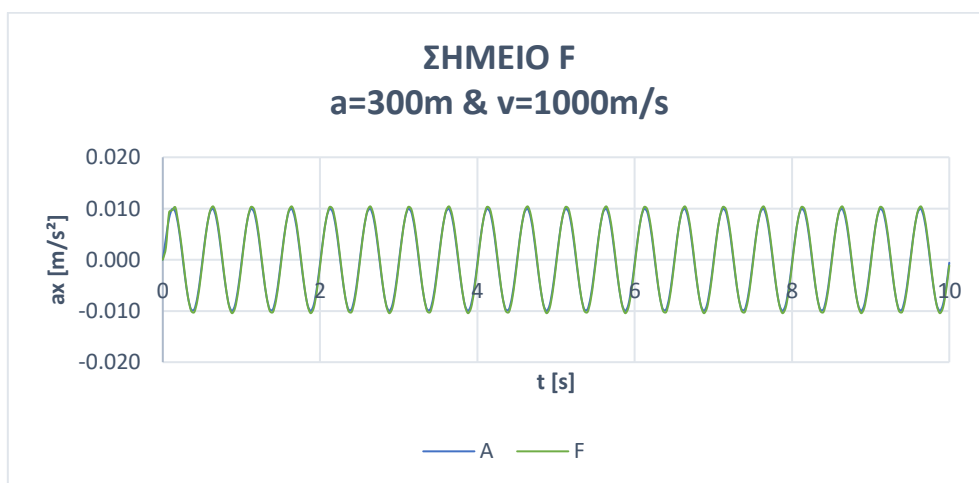
Διάγραμμα 4.1.134: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ ($SIN-2hz$)



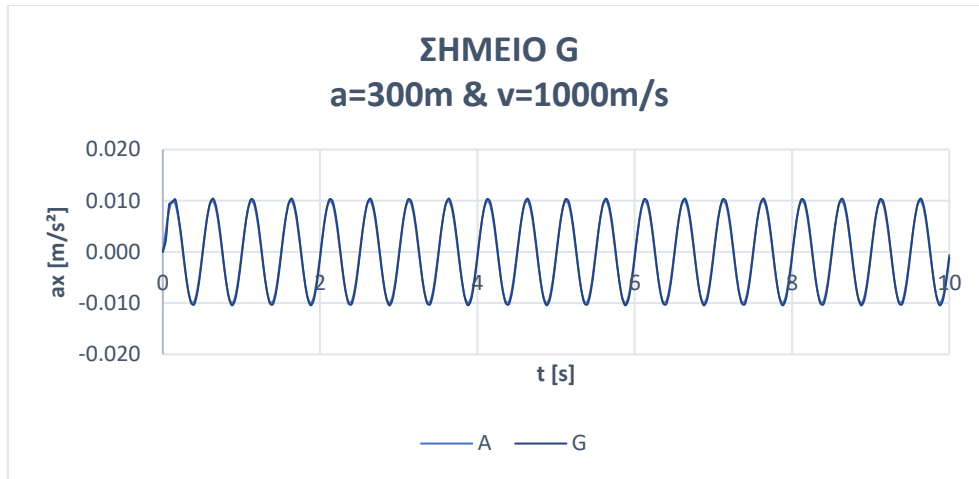
Διάγραμμα 4.1.135: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=300$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



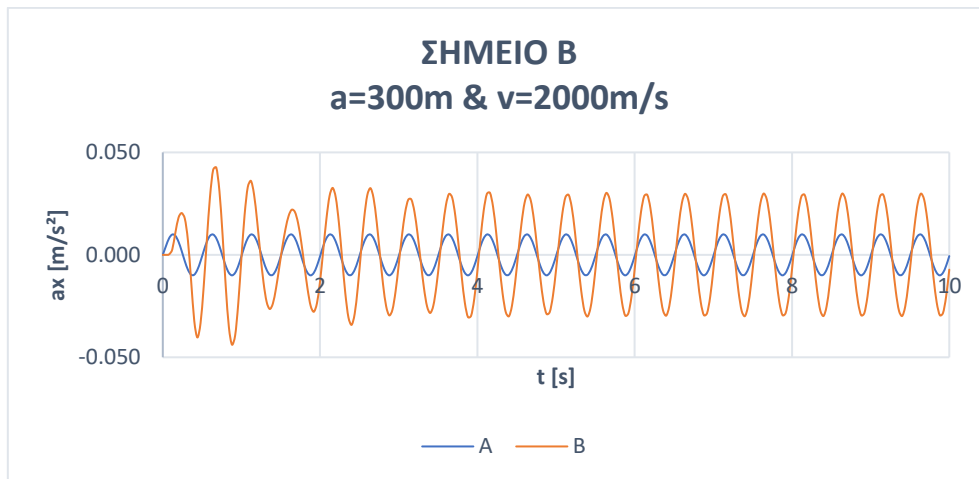
Διάγραμμα 4.1.136: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=300$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



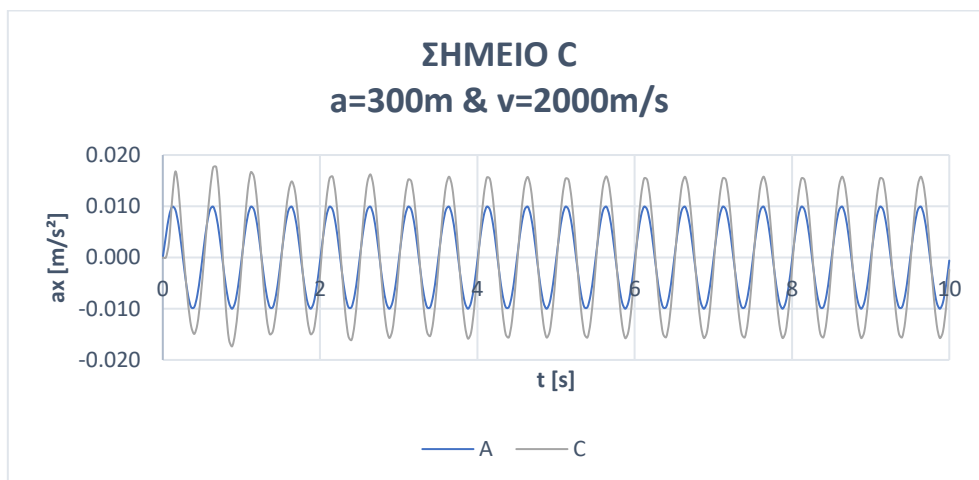
Διάγραμμα 4.1.137: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=300$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



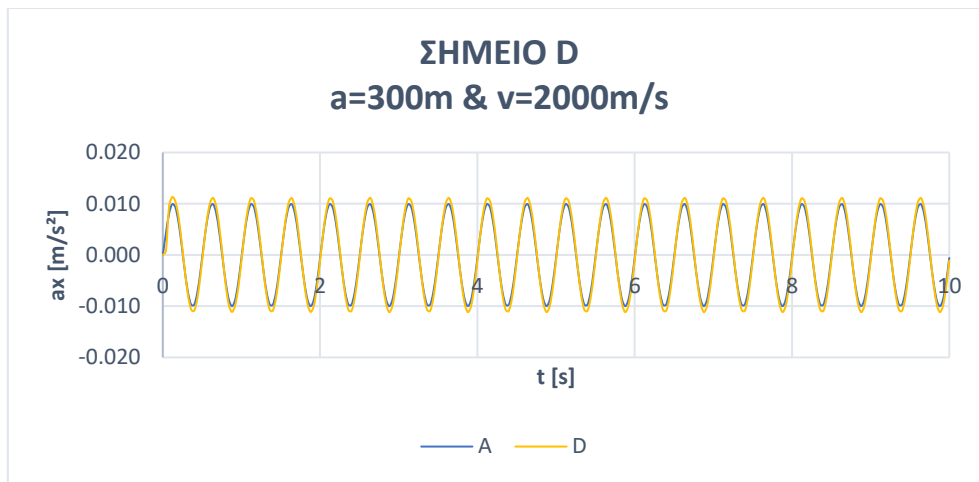
Διάγραμμα 4.1.138: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



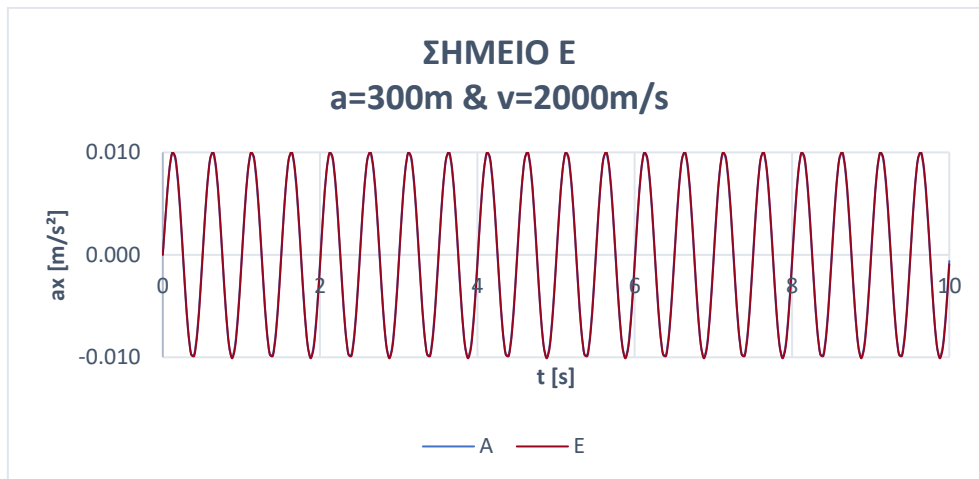
Διάγραμμα 4.1.139: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



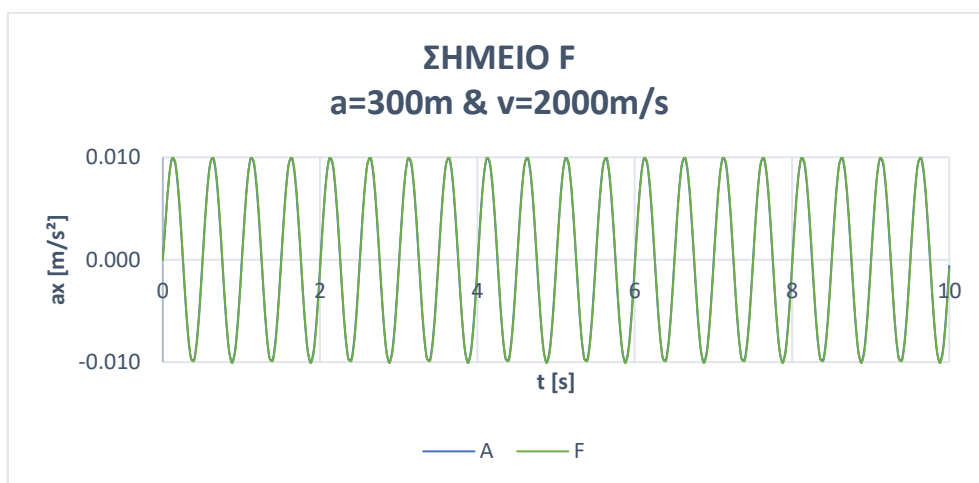
Διάγραμμα 4.1.140: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



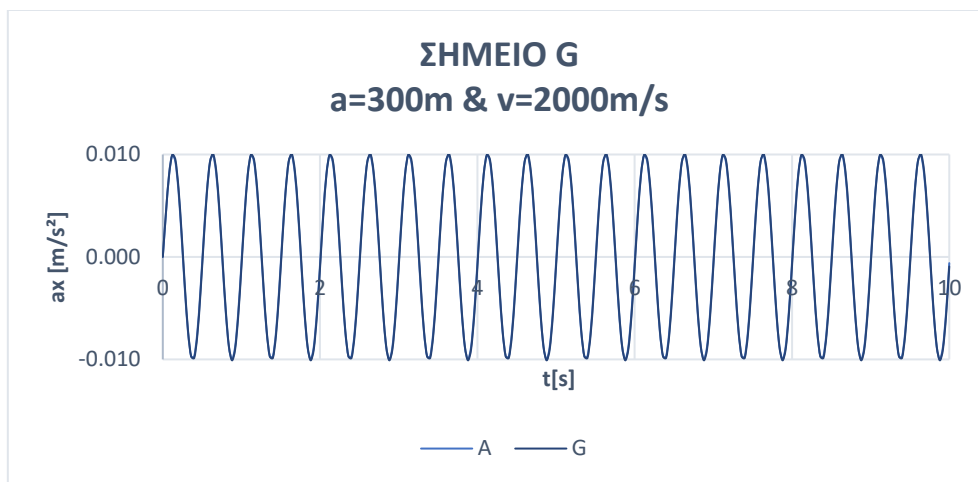
Διάγραμμα 4.1.141: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



Διάγραμμα 4.1.142: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



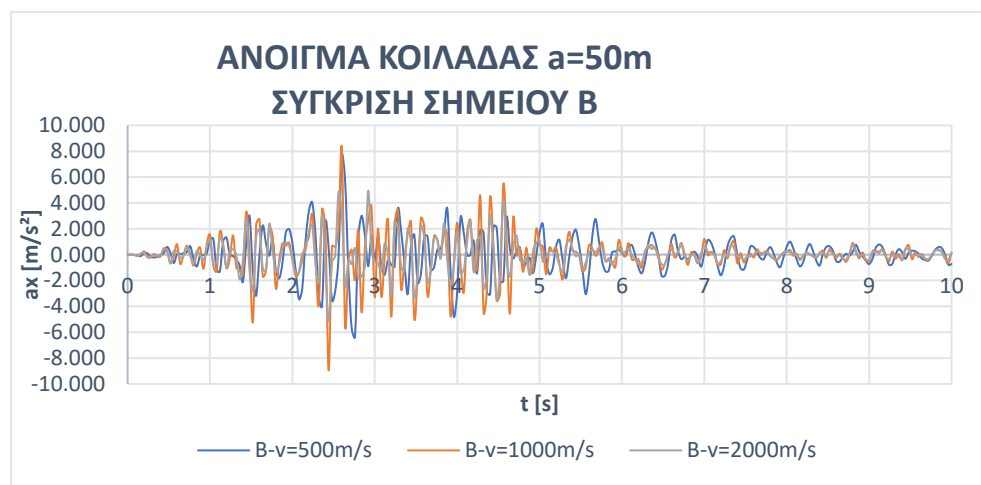
Διάγραμμα 4.1.143: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



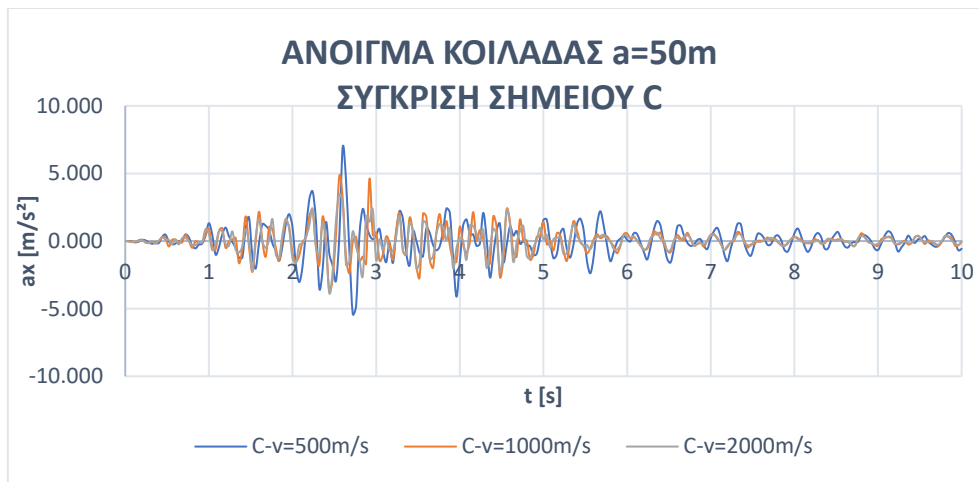
Διάγραμμα 4.1.144: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=300$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΗΜΕΙΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ-ΧΡΟΝΟΥ

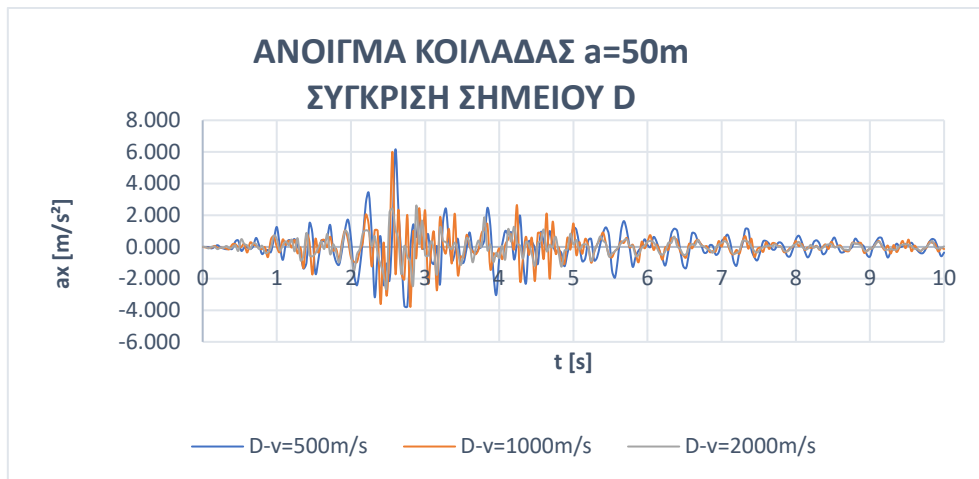
Διέγερση 225a: Πραγματική Χρονοϊστορία Επιτάχυνσης (UPLANDEARTHQUAKE)



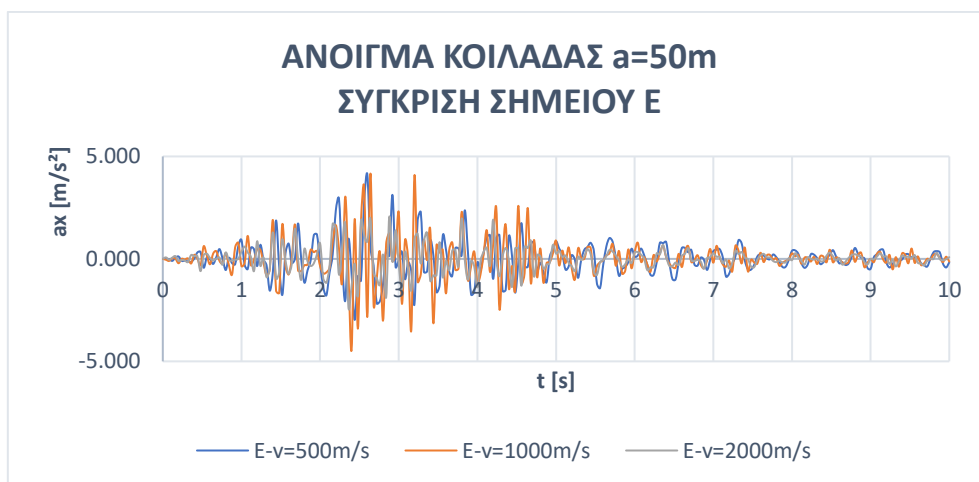
Διάγραμμα 4.1.145: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, $V_s=1000$ m/s & $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση 225^a



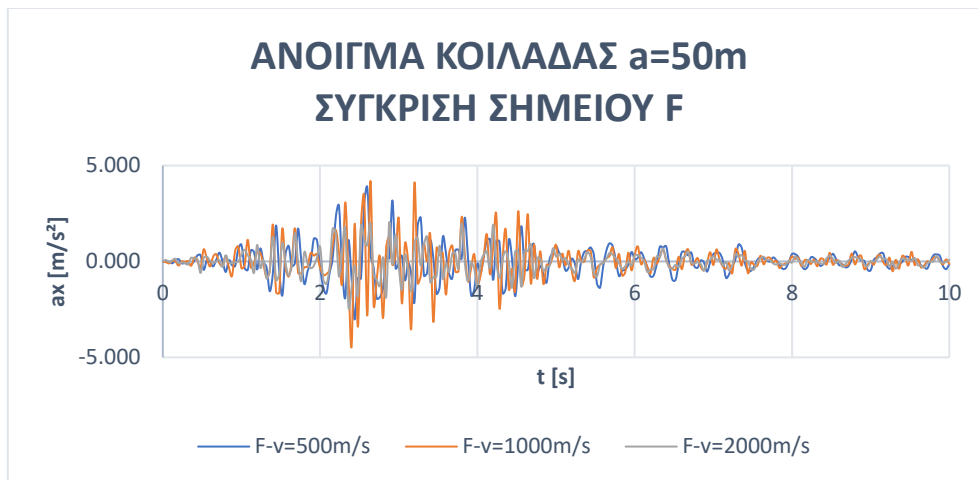
Διάγραμμα 4.1.146: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, $V_s=1000$ m/s & $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση 225^α



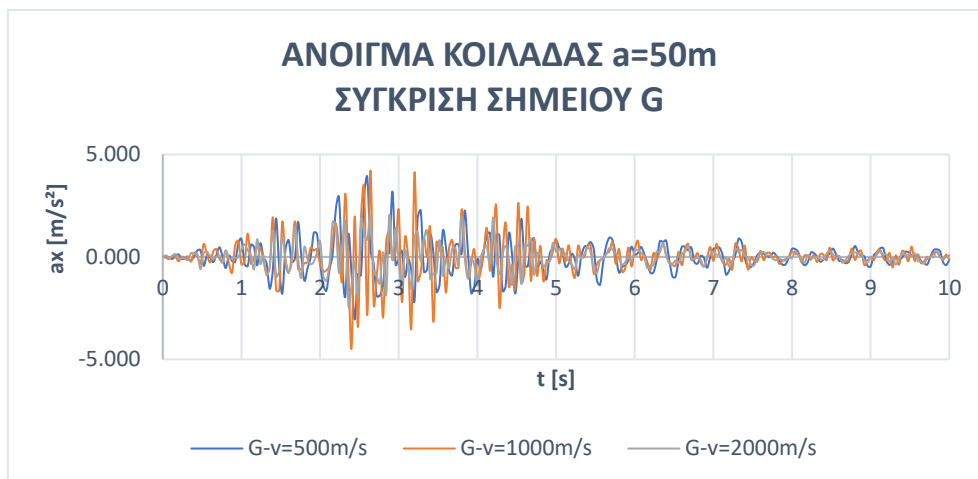
Διάγραμμα 4.1.147: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, $V_s=1000$ m/s & $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση 225^α



Διάγραμμα 4.1.148: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, $V_s=1000$ m/s & $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση 225^α



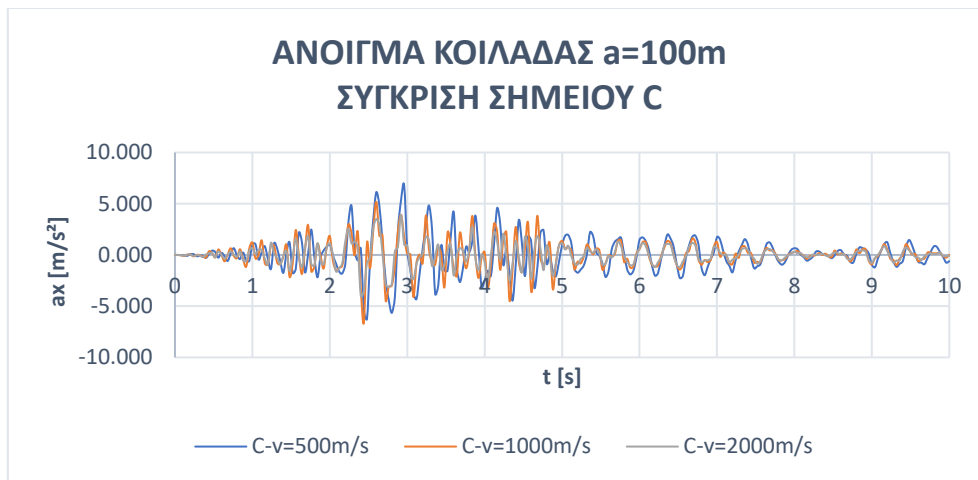
Διάγραμμα 4.1.149: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση 225^α



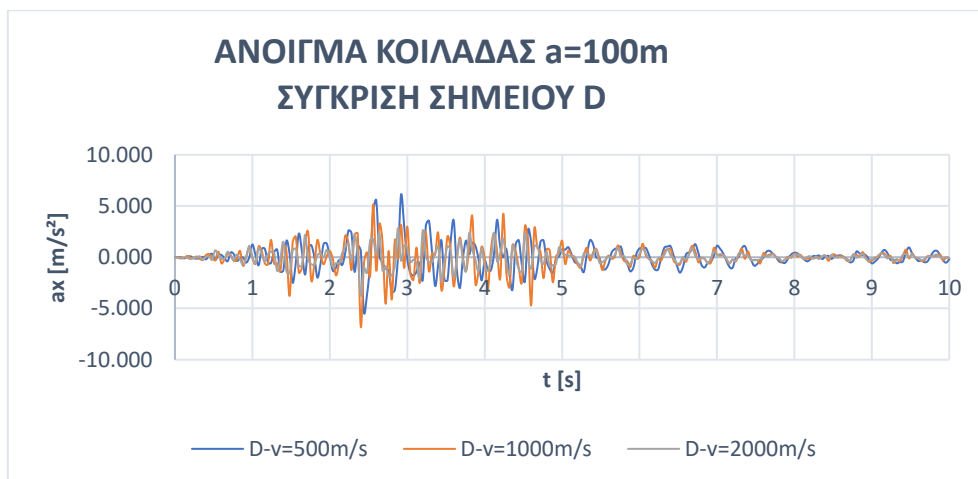
Διάγραμμα 4.1.150: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση 225^α



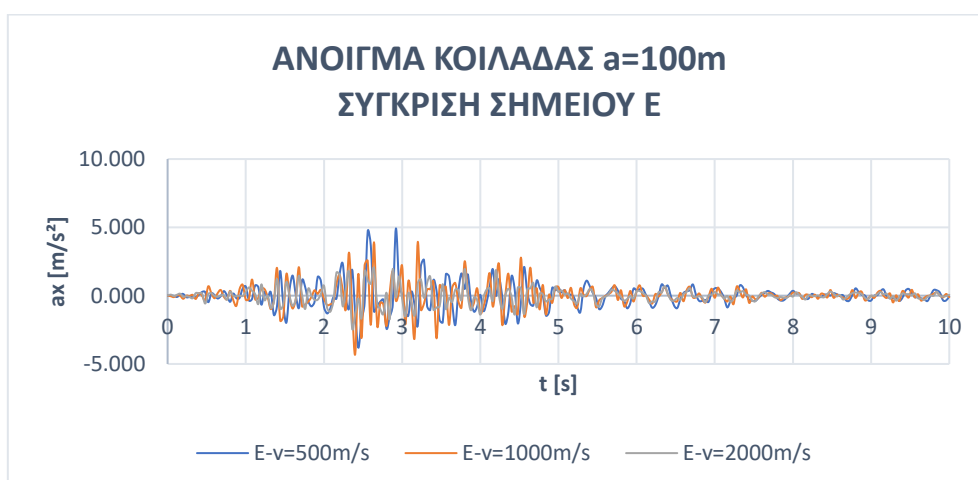
Διάγραμμα 4.1.151: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση 225^α



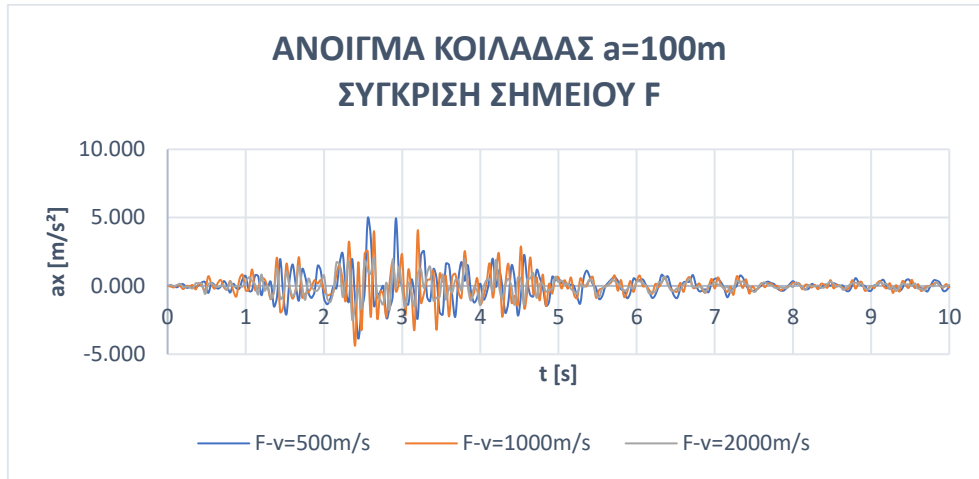
Διάγραμμα 4.1.152: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση 225^α



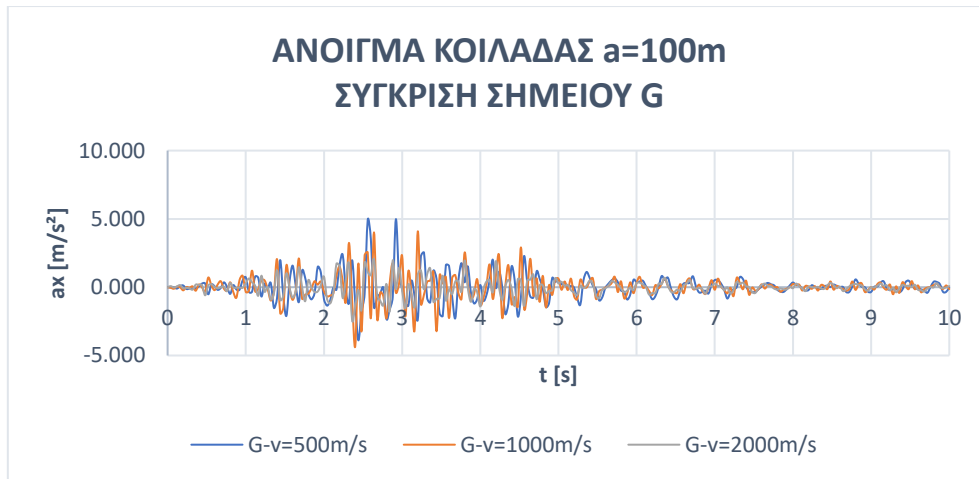
Διάγραμμα 4.1.153: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση 225^α



Διάγραμμα 4.1.154: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση 225^α



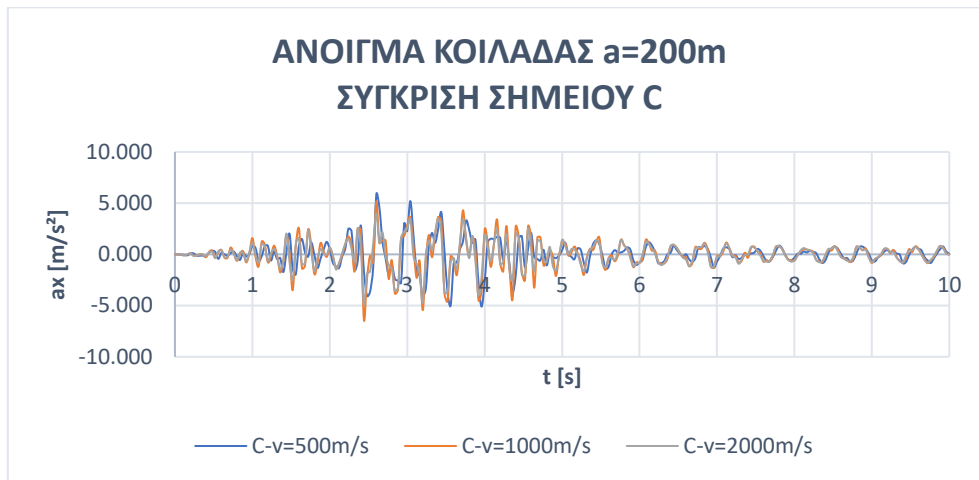
Διάγραμμα 4.1.155: Διάγραμμα επιτάχυνσης ax [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, $V_s=1000$ m/s & $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση 225^a



Διάγραμμα 4.1.156: Διάγραμμα επιτάχυνσης ax [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, $V_s=1000$ m/s & $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση 225^a



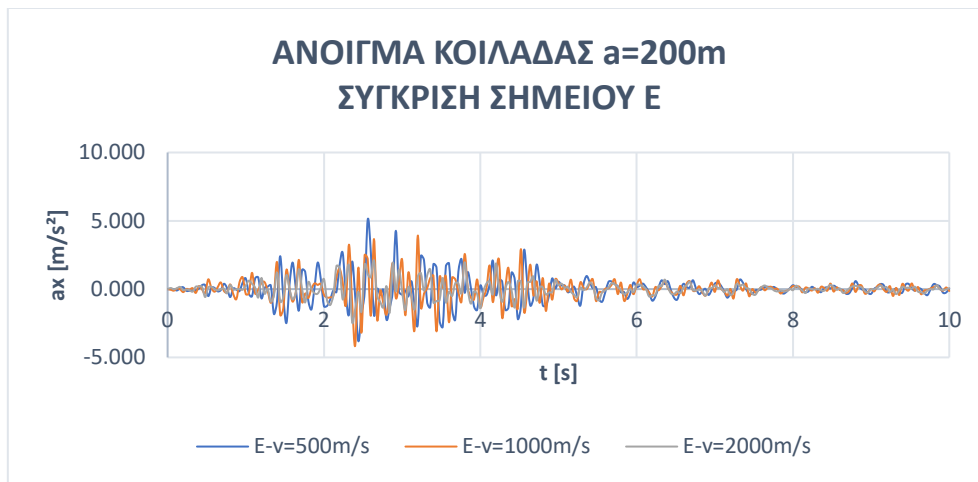
Διάγραμμα 4.1.157: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση 225^α



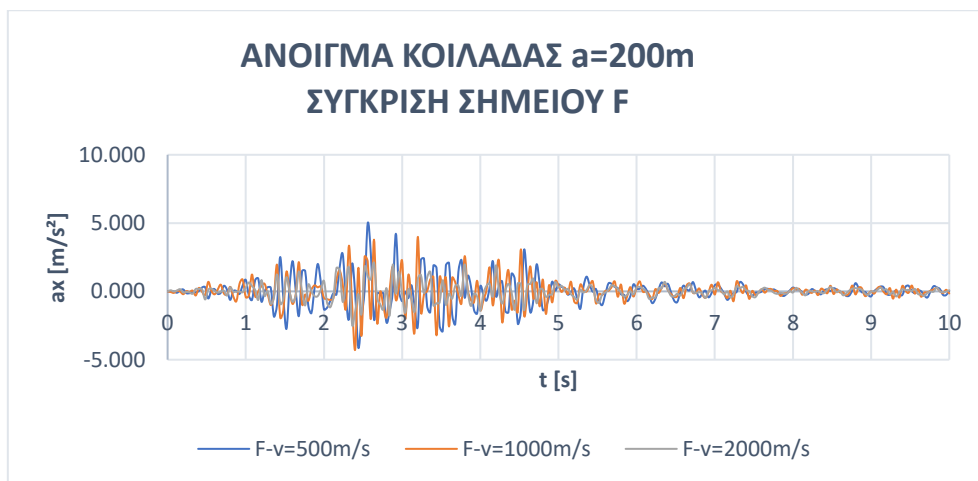
Διάγραμμα 4.1.158: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση 225^α



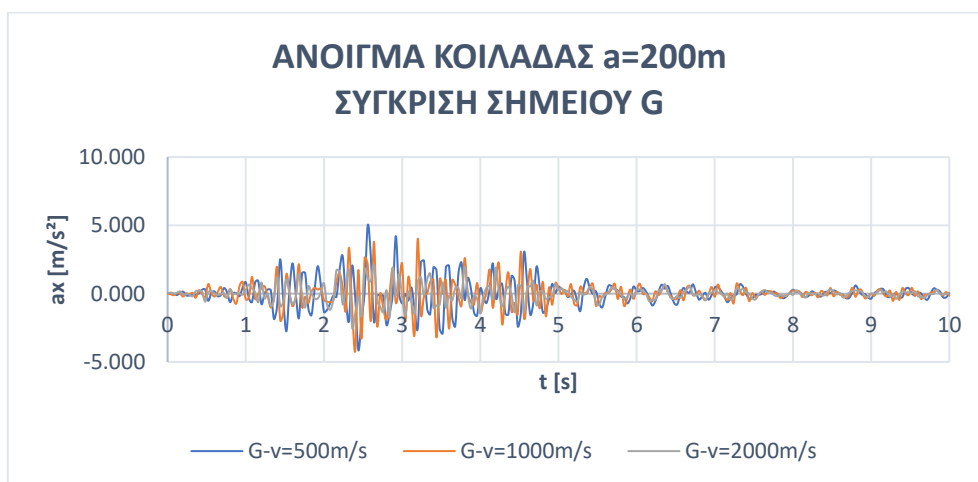
Διάγραμμα 4.1.159: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση 225^α



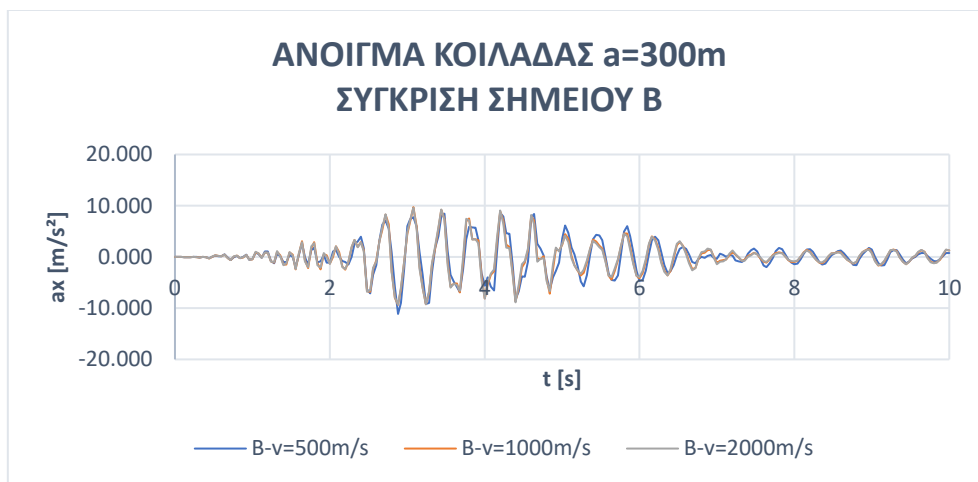
Διάγραμμα 4.1.160: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση 225^α



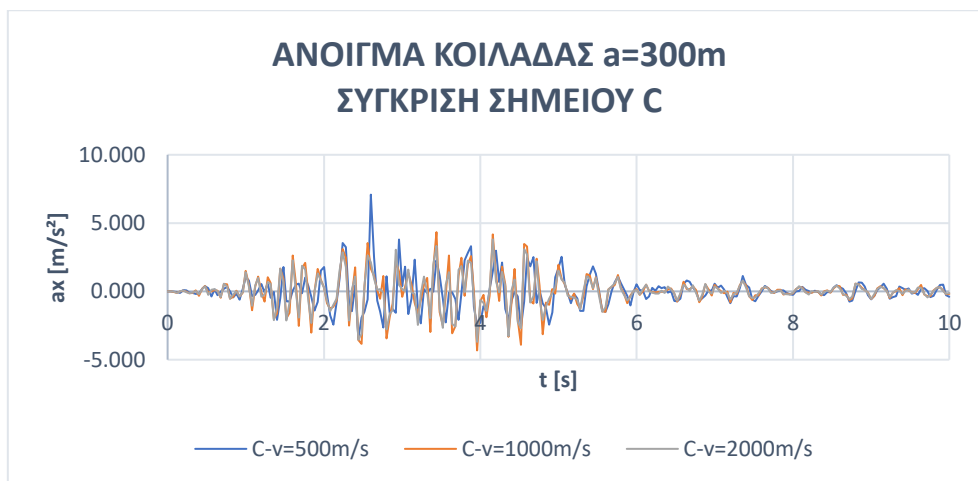
Διάγραμμα 4.1.161: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση 225^α



Διάγραμμα 4.1.162: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση 225^α



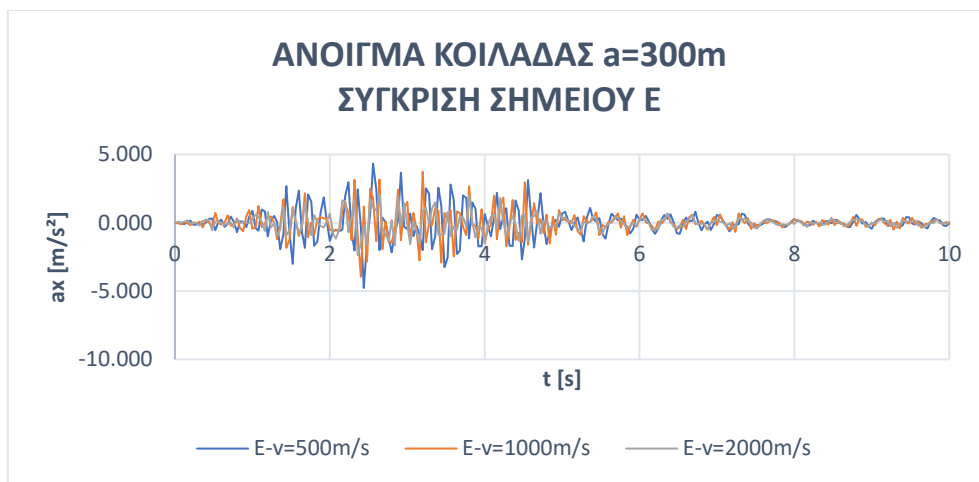
Διάγραμμα 4.1.163: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση 225^α



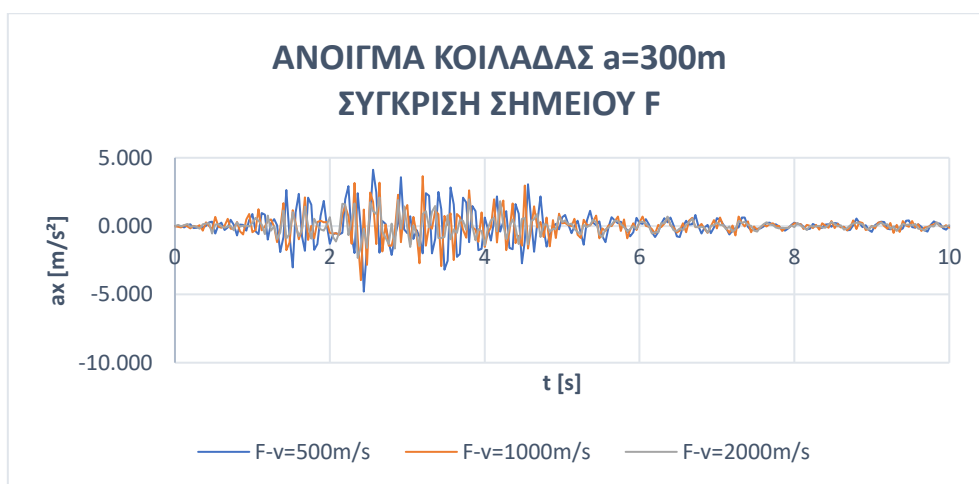
Διάγραμμα 4.1.164: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση 225^α



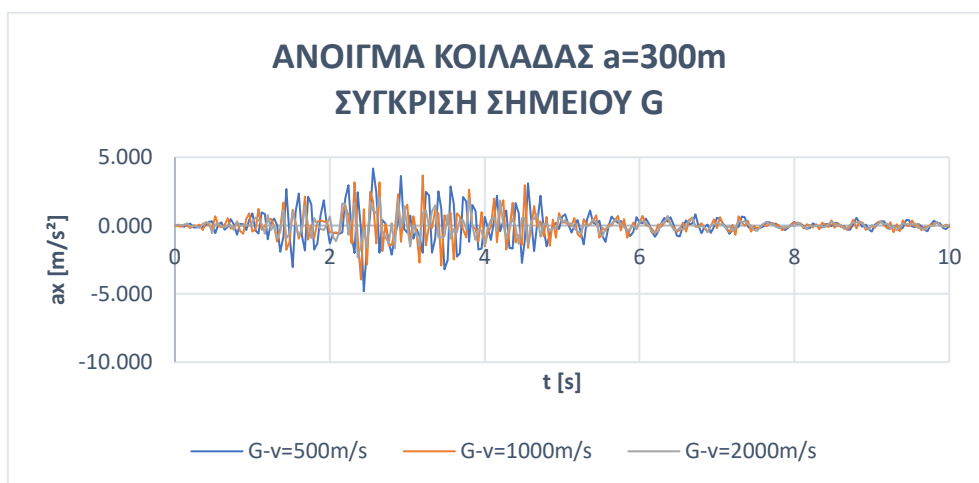
Διάγραμμα 4.1.165: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση 225^α



Διάγραμμα 4.1.166: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση 225^α

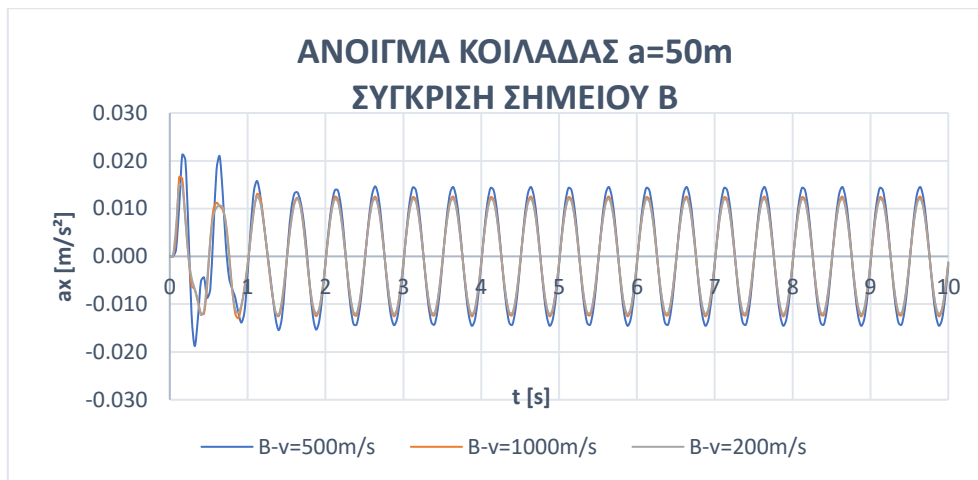


Διάγραμμα 4.1.167: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση 225^α



Διάγραμμα 4.1.168: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση 225^α

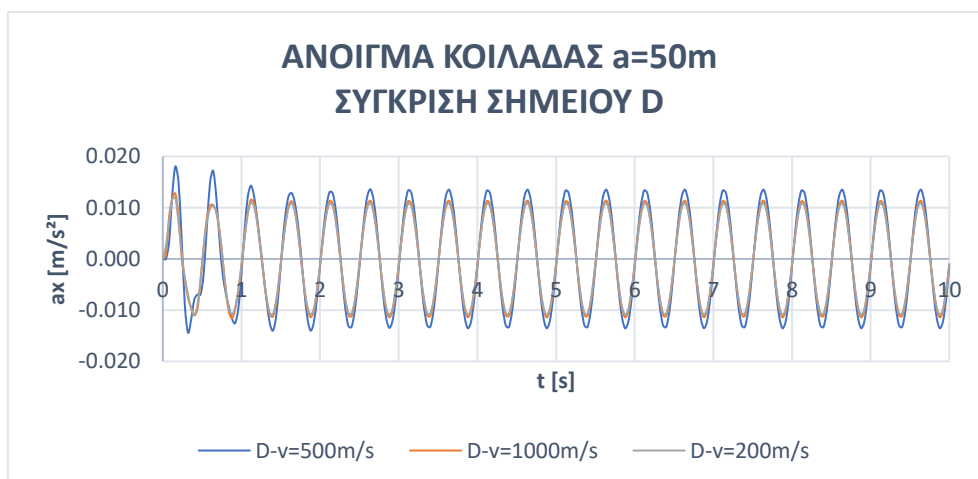
Ημιτονική διέγερση $f=2\text{Hz}$ (SIN-2hz)



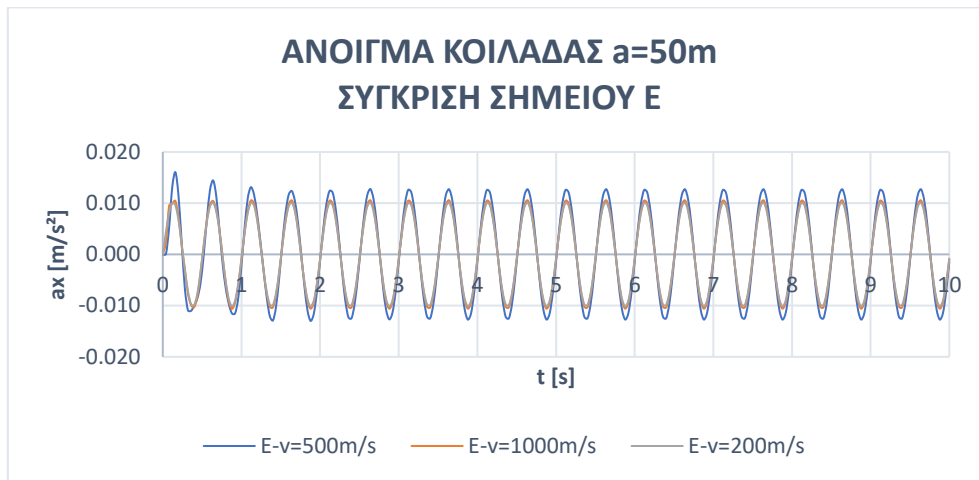
Διάγραμμα 4.1.169: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500\text{m/s}$, $V_s=1000\text{m/s}$ & $V_s=2000\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50\text{m}$ και διέγερση $f=2\text{Hz}$ (SIN-2hz)



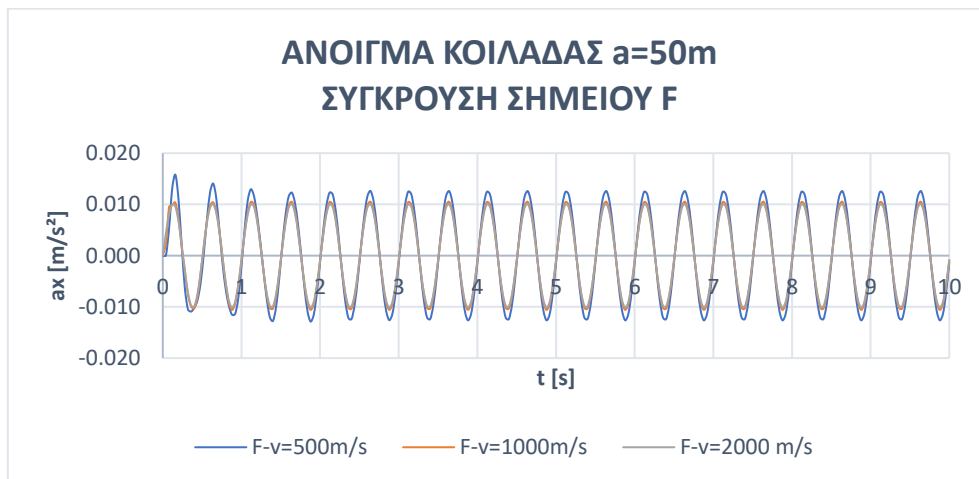
Διάγραμμα 4.1.170: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500\text{m/s}$, $V_s=1000\text{m/s}$ & $V_s=2000\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50\text{m}$ και διέγερση $f=2\text{Hz}$ (SIN-2hz)



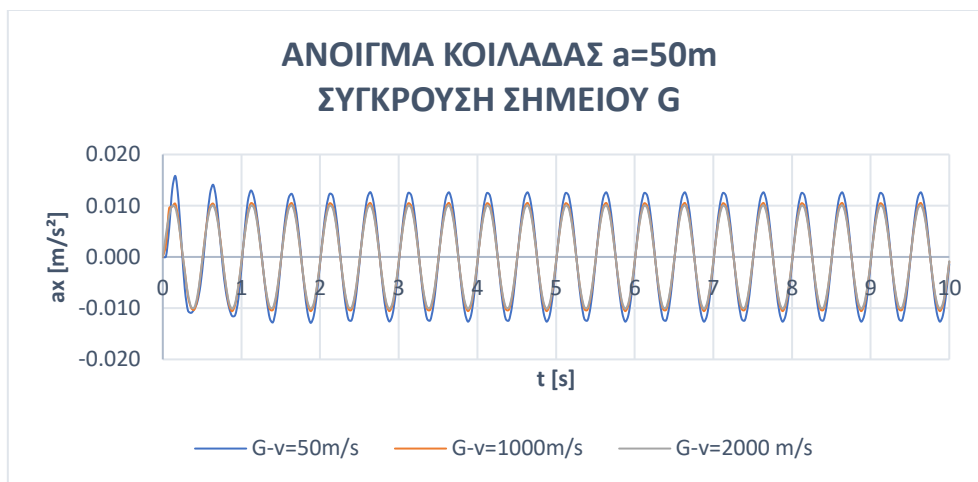
Διάγραμμα 4.1.171: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



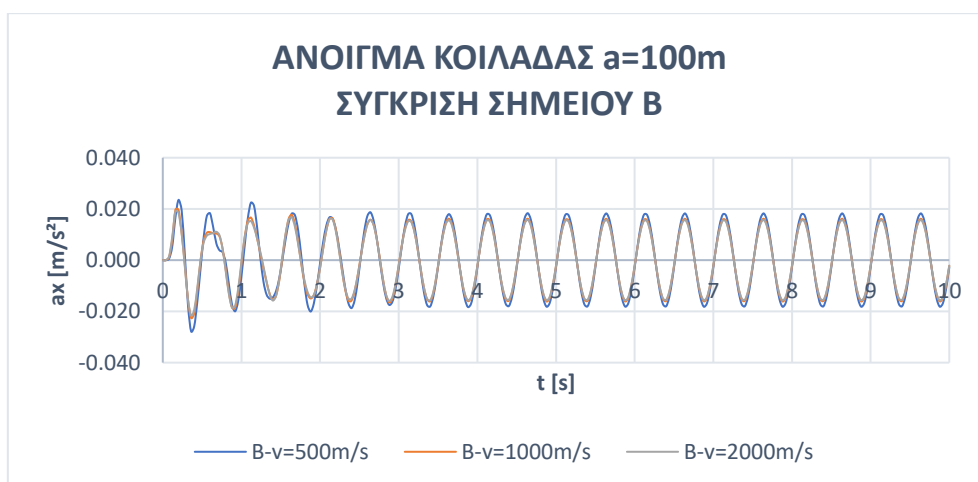
Διάγραμμα 4.1.172: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



Διάγραμμα 4.1.173: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



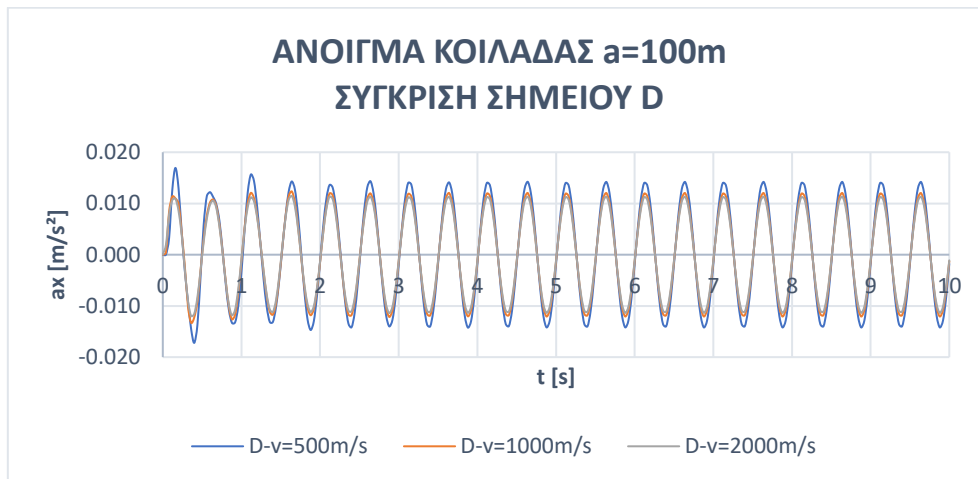
Διάγραμμα 4.1.174: Διάγραμμα επιτάχυνσης ax [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $Vs=500m/s$, $Vs=1000m/s$ & $Vs=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



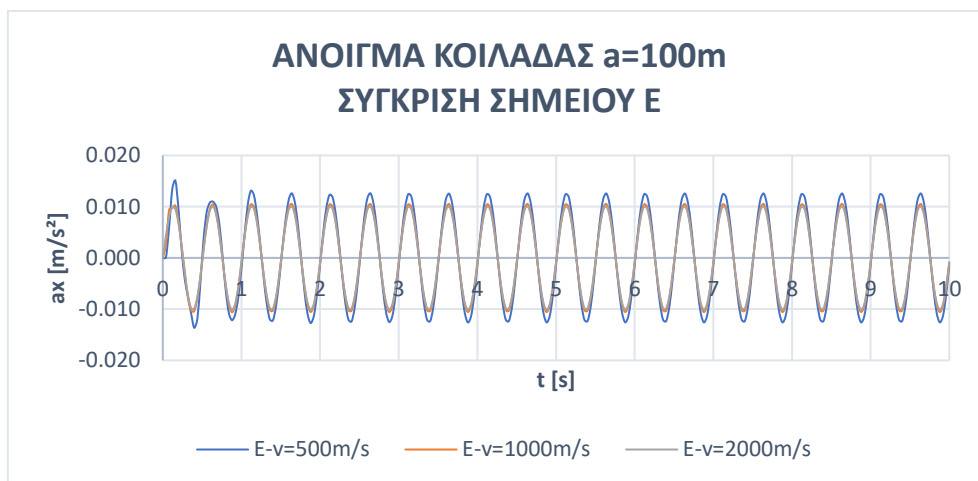
Διάγραμμα 4.1.175: Διάγραμμα επιτάχυνσης ax [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $Vs=500m/s$, $Vs=1000m/s$ & $Vs=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



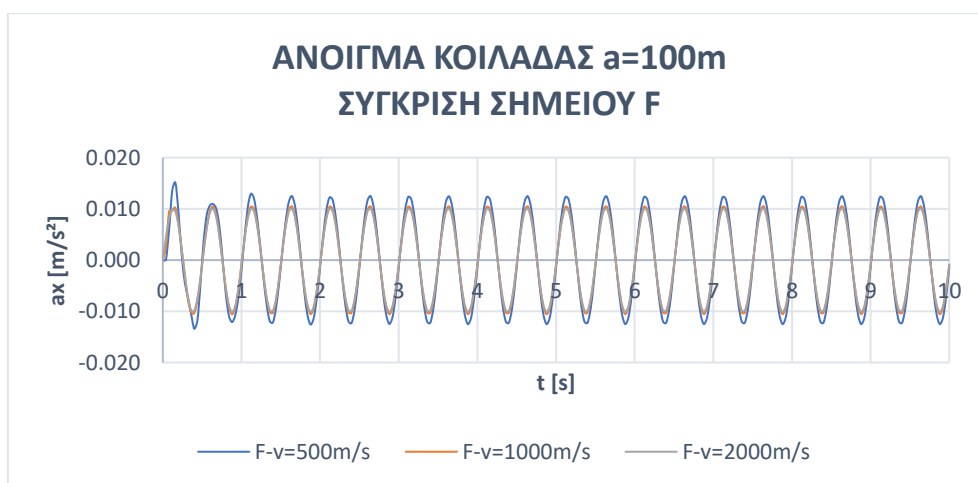
Διάγραμμα 4.1.176: Διάγραμμα επιτάχυνσης ax [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $Vs=500m/s$, $Vs=1000m/s$ & $Vs=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



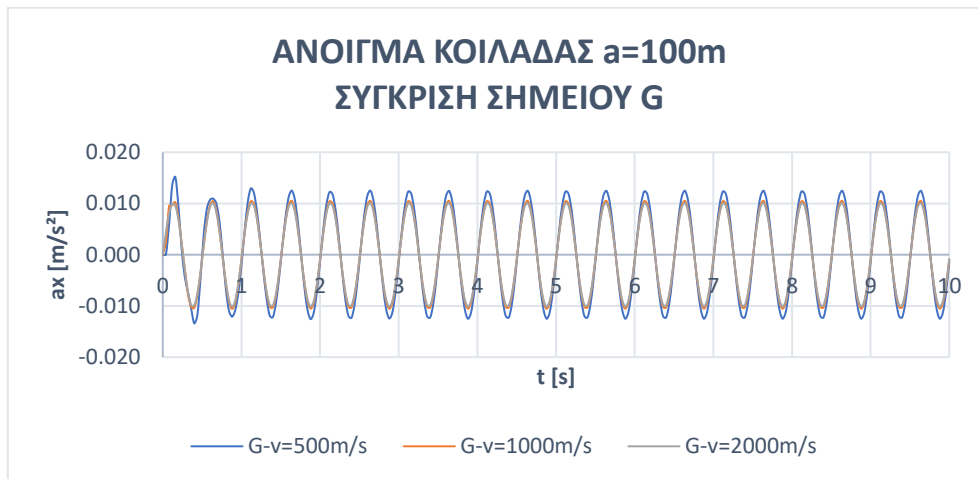
Διάγραμμα 4.1.177: Διάγραμμα επιτάχυνσης ax [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $Vs=500m/s$, $Vs=1000m/s$ & $Vs=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



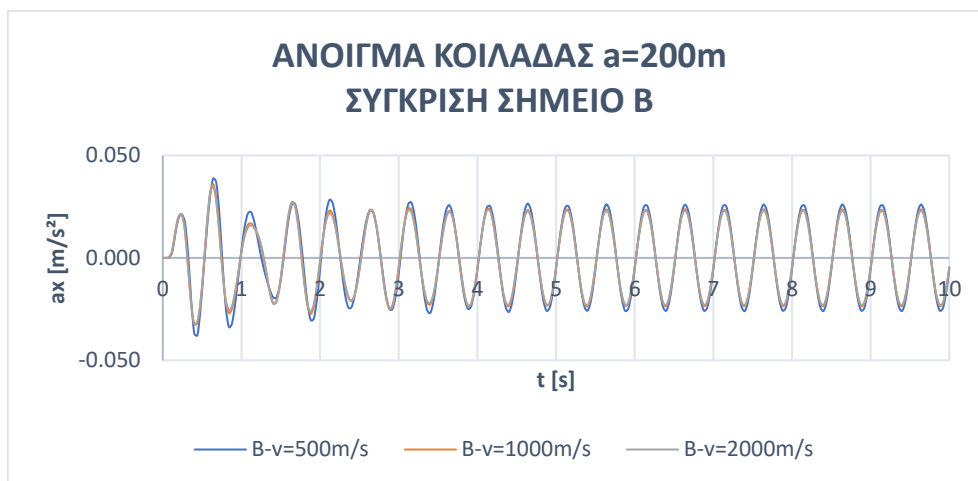
Διάγραμμα 4.1.178: Διάγραμμα επιτάχυνσης ax [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $Vs=500m/s$, $Vs=1000m/s$ & $Vs=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



Διάγραμμα 4.1.179: Διάγραμμα επιτάχυνσης ax [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $Vs=500m/s$, $Vs=1000m/s$ & $Vs=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



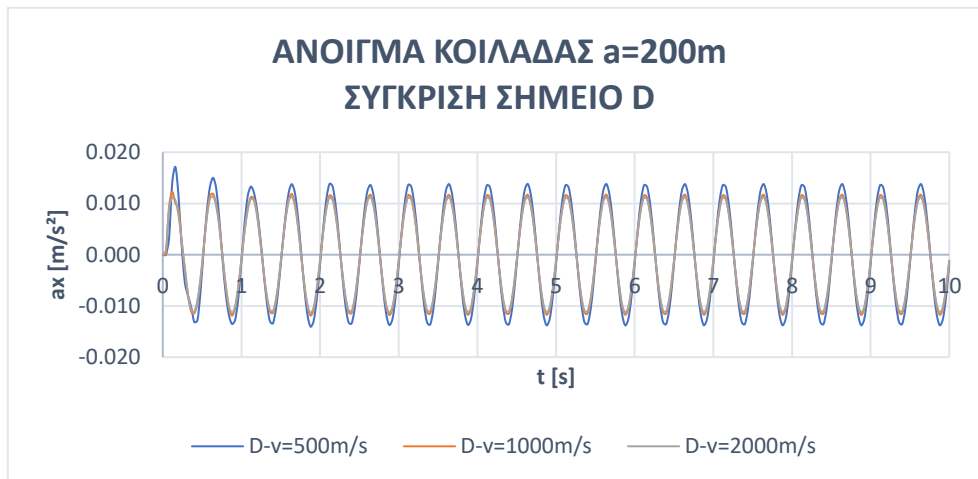
Διάγραμμα 4.1.180: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



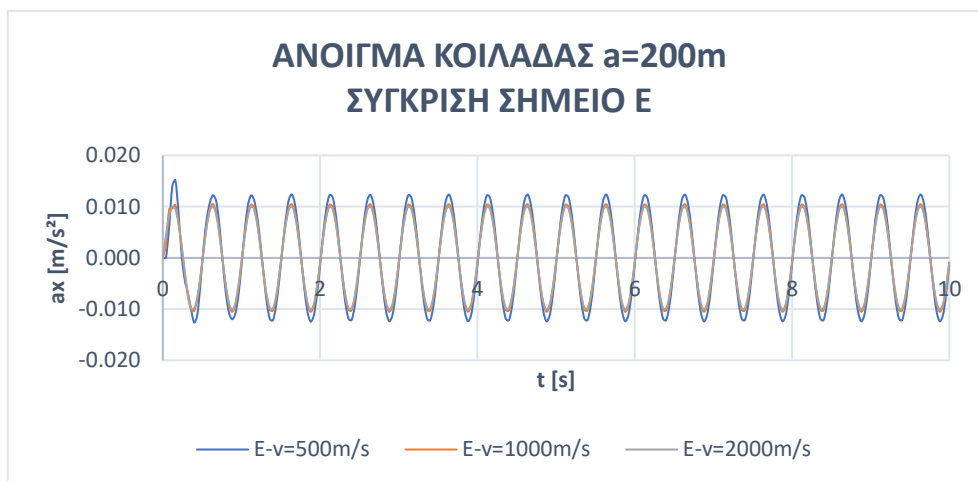
Διάγραμμα 4.1.181: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



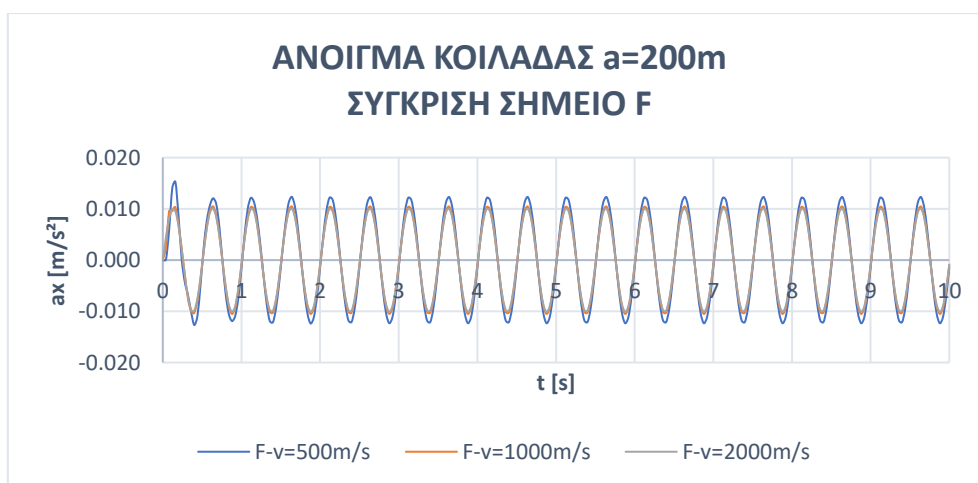
Διάγραμμα 4.1.182: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



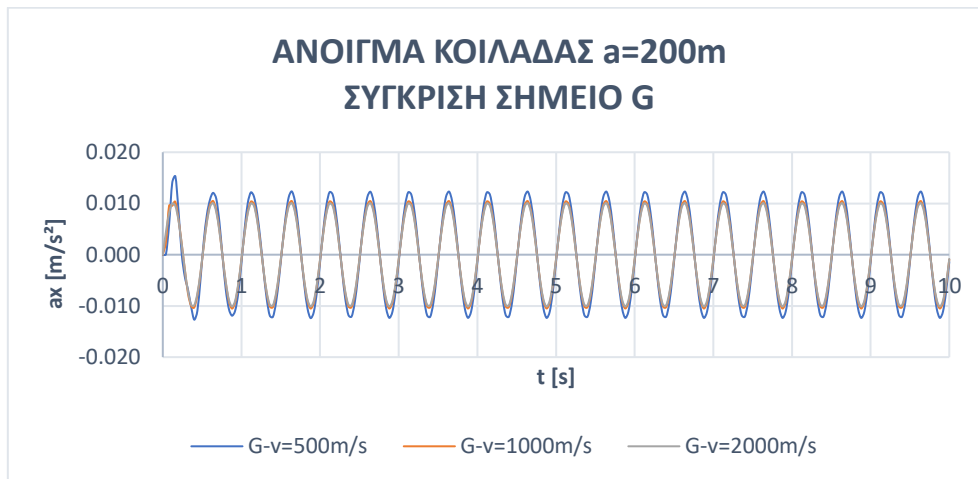
Διάγραμμα 4.1.183: Διάγραμμα επιτάχυνσης ax [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $Vs=500m/s$, $Vs=1000m/s$ & $Vs=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



Διάγραμμα 4.1.184: Διάγραμμα επιτάχυνσης ax [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $Vs=500m/s$, $Vs=1000m/s$ & $Vs=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



Διάγραμμα 4.1.185: Διάγραμμα επιτάχυνσης ax [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $Vs=500m/s$, $Vs=1000m/s$ & $Vs=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



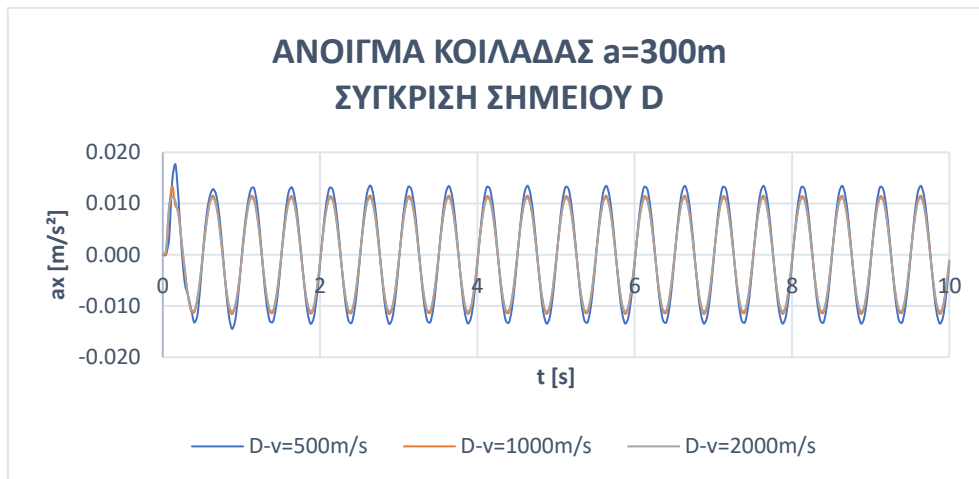
Διάγραμμα 4.1.186: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



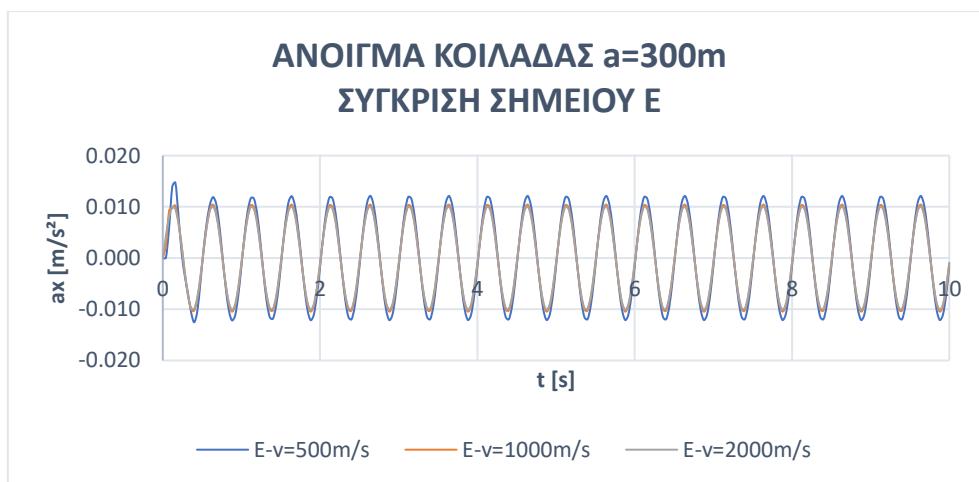
Διάγραμμα 4.1.187: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου B, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



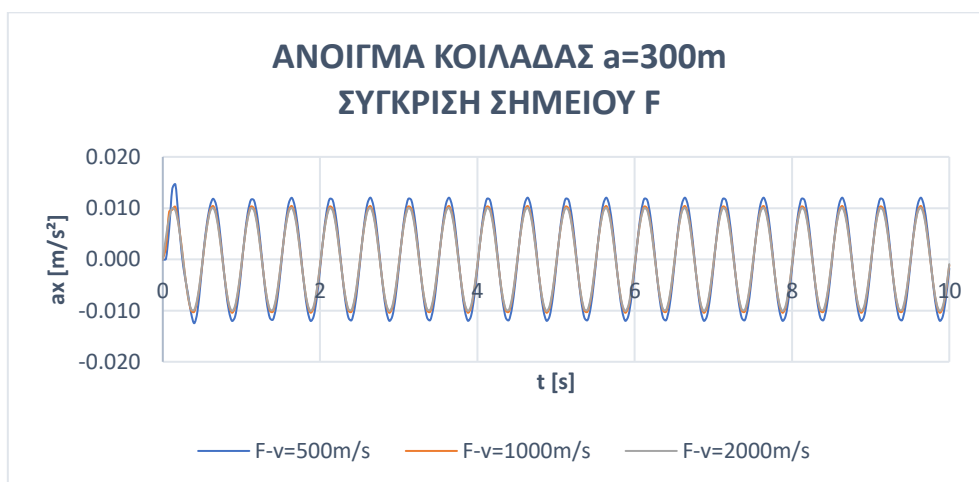
Διάγραμμα 4.1.188: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου C, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



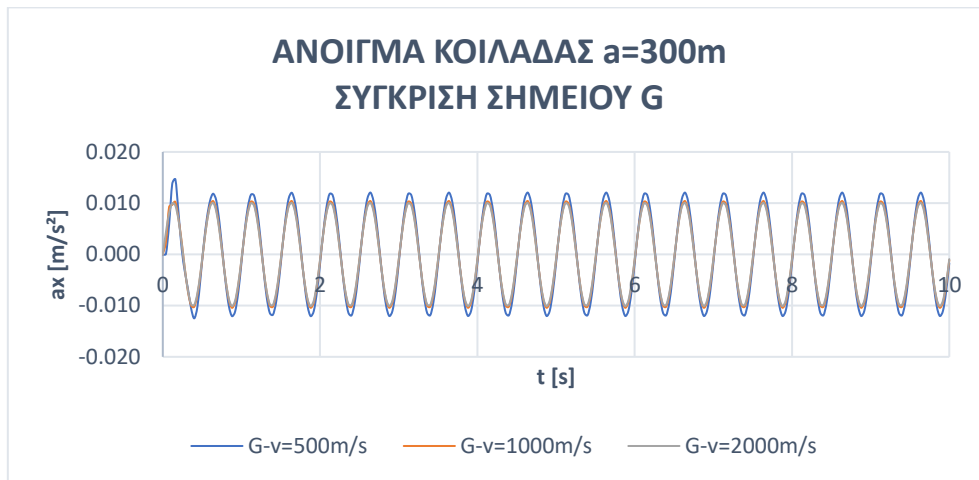
Διάγραμμα 4.1.189: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου D, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500\text{m/s}$, $V_s=1000\text{m/s}$ & $V_s=2000\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300\text{m}$ και διέγερση $f=2\text{Hz}$ (SIN-2hz)



Διάγραμμα 4.1.190: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου t (s) σύγκριση σημείου E, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500\text{m/s}$, $V_s=1000\text{m/s}$ & $V_s=2000\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300\text{m}$ και διέγερση $f=2\text{Hz}$ (SIN-2hz)



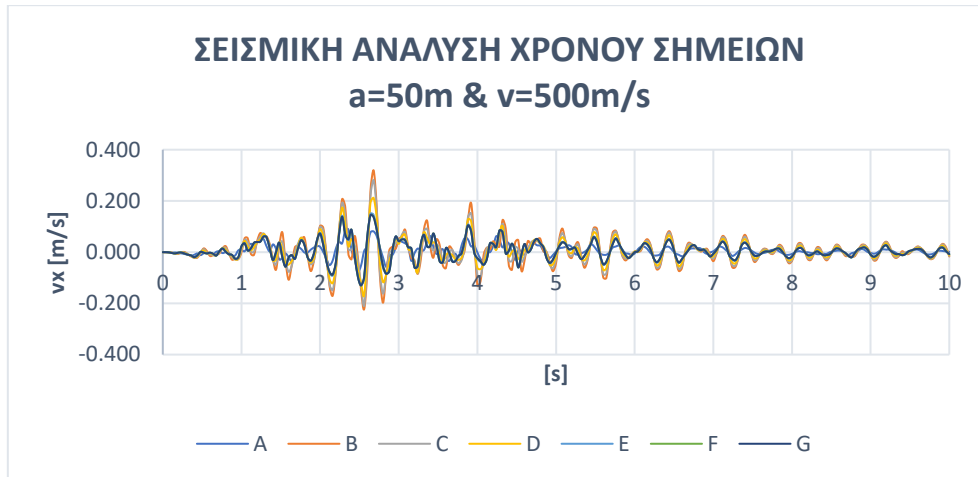
Διάγραμμα 4.1.191: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου F, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)



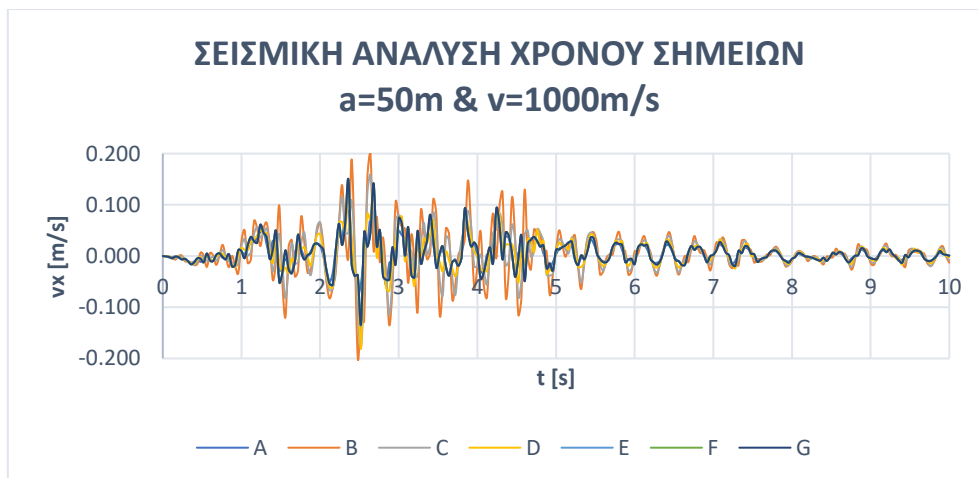
Διάγραμμα 4.1.192: Διάγραμμα επιτάχυνσης a_x [m/s^2] συναρτήσει του χρόνου $t(s)$ σύγκριση σημείου G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, $V_s=1000m/s$ & $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)

Διαγράμματα Ταχύτητας-Χρόνου

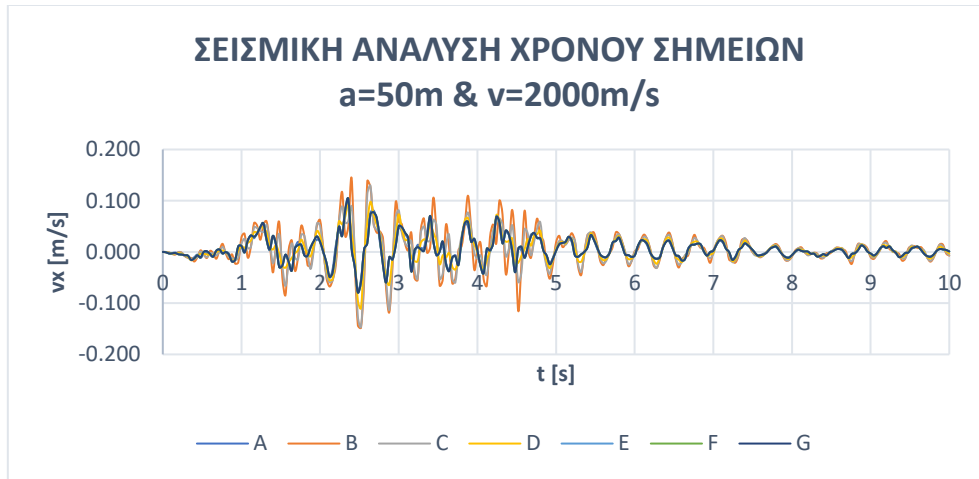
Διέγερση 225α: Πραγματική Χρονοϊστορία Επιτάχυνσης (UPLANDEARTHQUAKE)



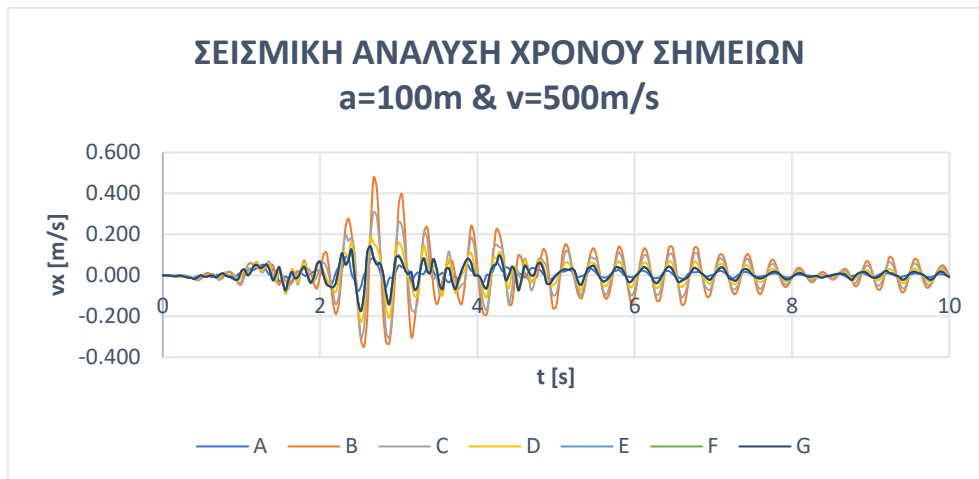
Διάγραμμα 4.1.193: Διάγραμμα ταχύτητα vx [m/s] συναρτήσει του χρόνου t(s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50\text{m}$ και διέγερση 225α



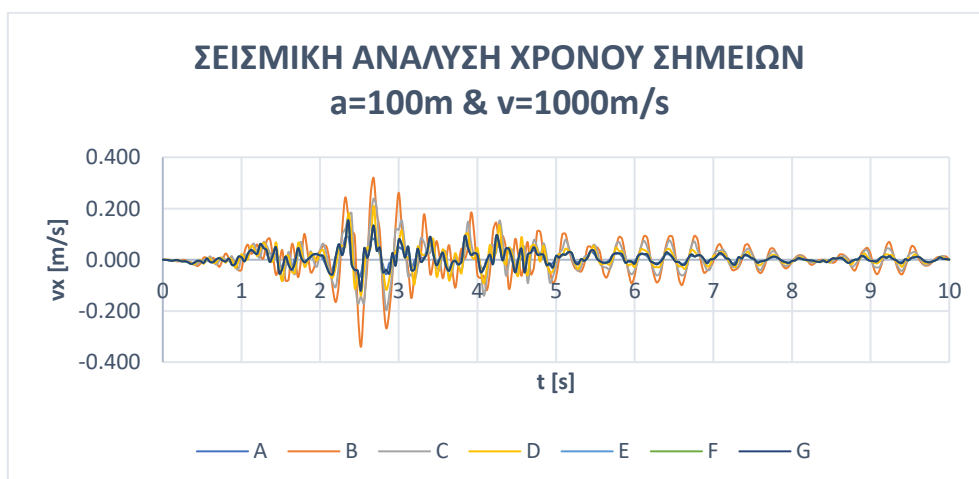
Διάγραμμα 4.1.194: Διάγραμμα ταχύτητα vx [m/s] συναρτήσει του χρόνου t(s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50\text{m}$ και διέγερση 225α



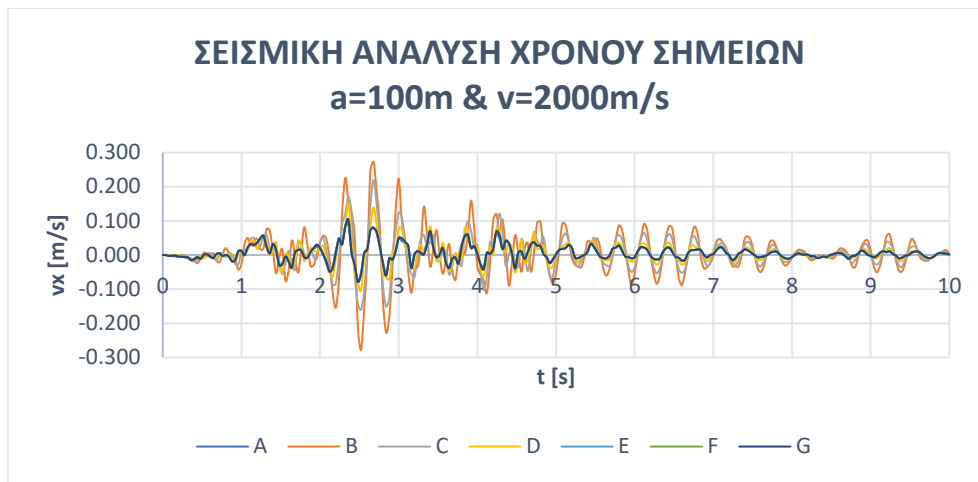
Διάγραμμα 4.1.195: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=50m$ και διέγερση 225α



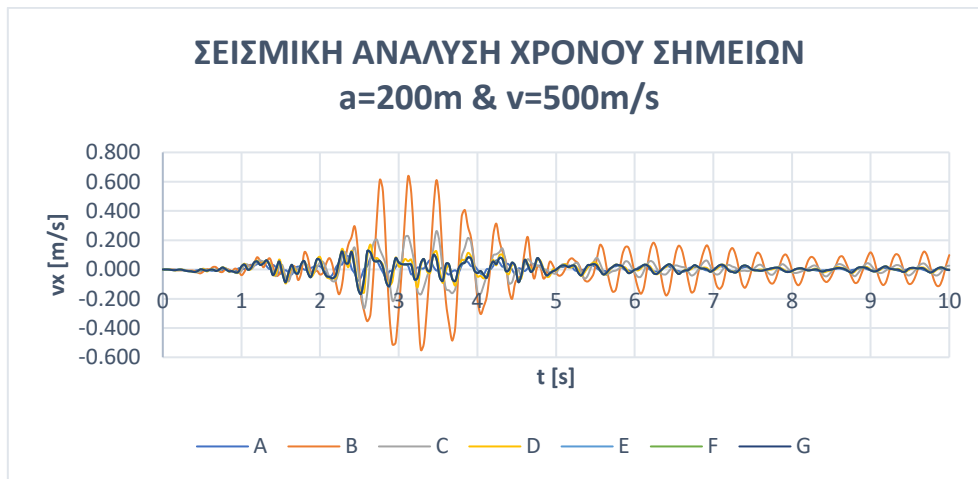
Διάγραμμα 4.1.196: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση 225α



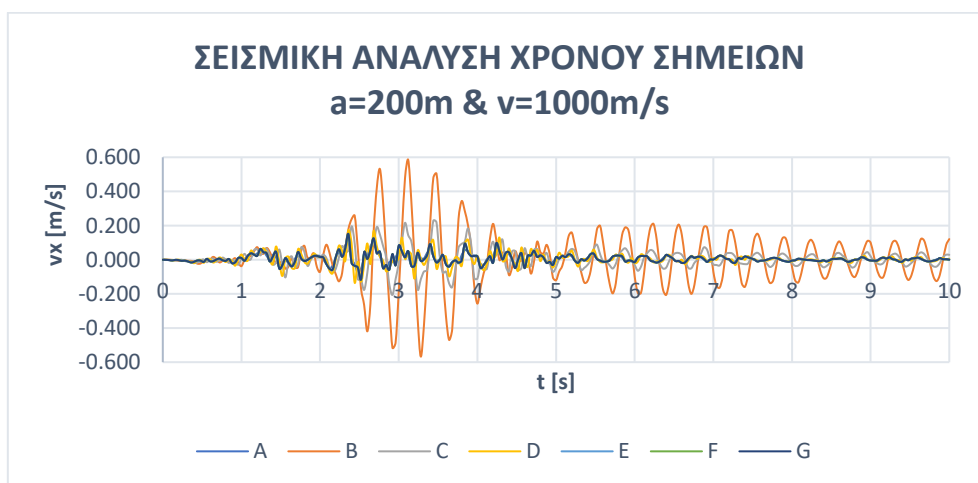
Διάγραμμα 4.1.197: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=100m$ και διέγερση 225α



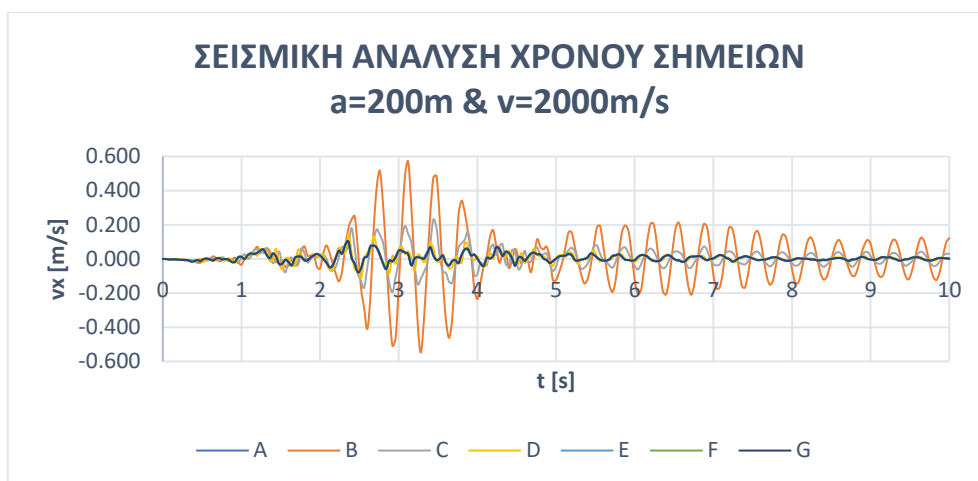
Διάγραμμα 4.1.198: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση 225α



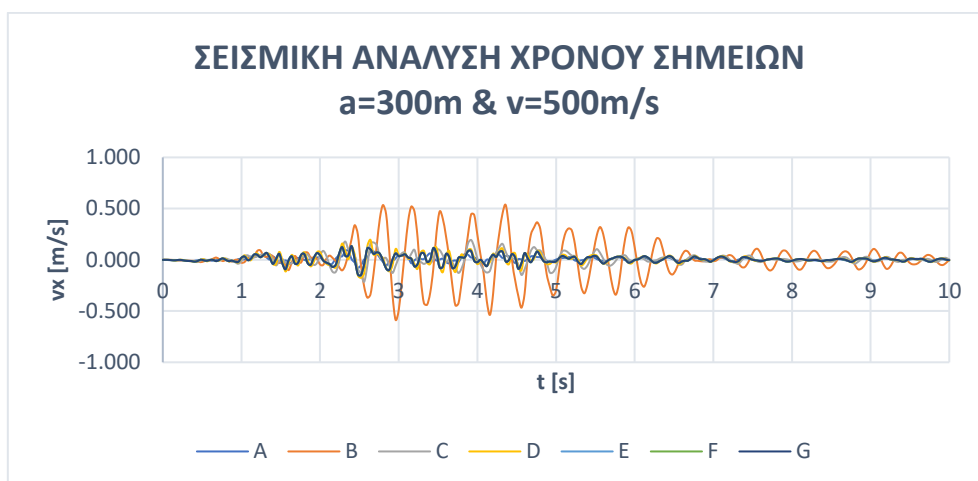
Διάγραμμα 4.1.199: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση 225α



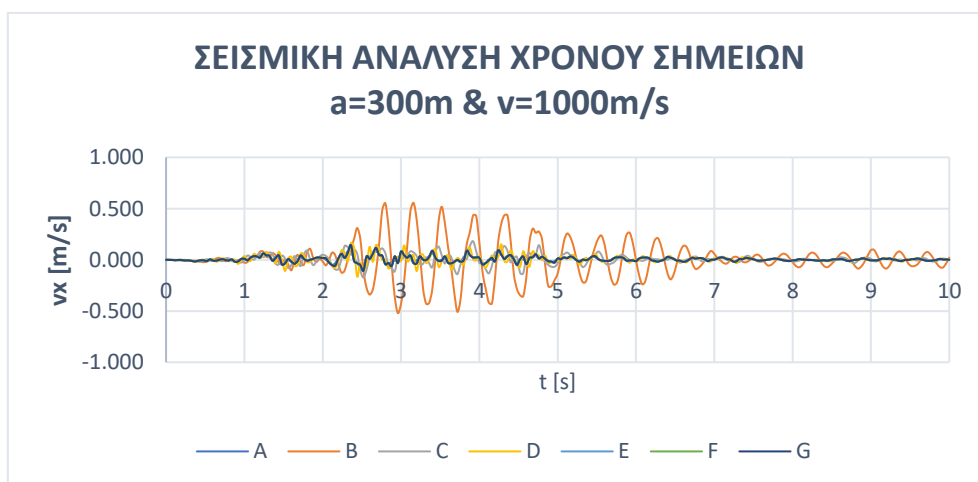
Διάγραμμα 4.1.200: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση 225α



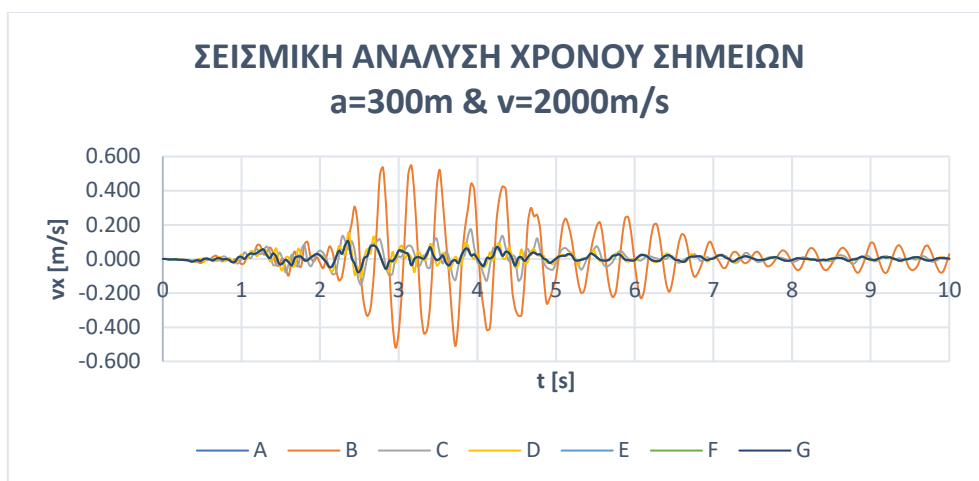
Διάγραμμα 4.1.201: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200m$ και διέγερση 225α



Διάγραμμα 4.1.202: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση 225α

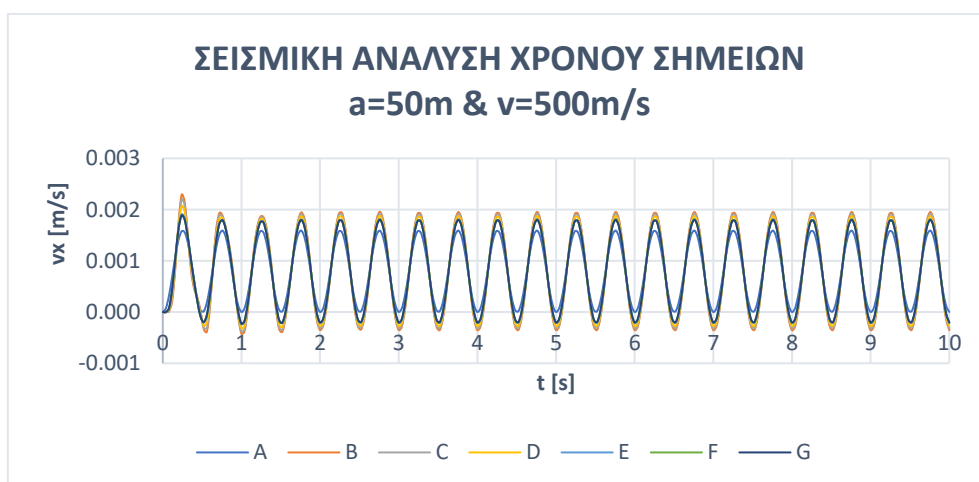


Διάγραμμα 4.1.203: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση 225α

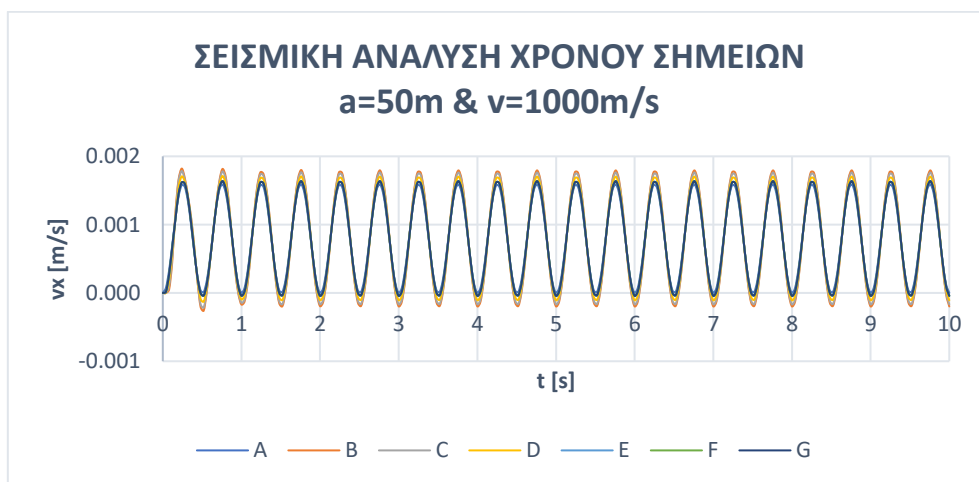


Διάγραμμα 4.1.204: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=300$ m και διέγερση 225α

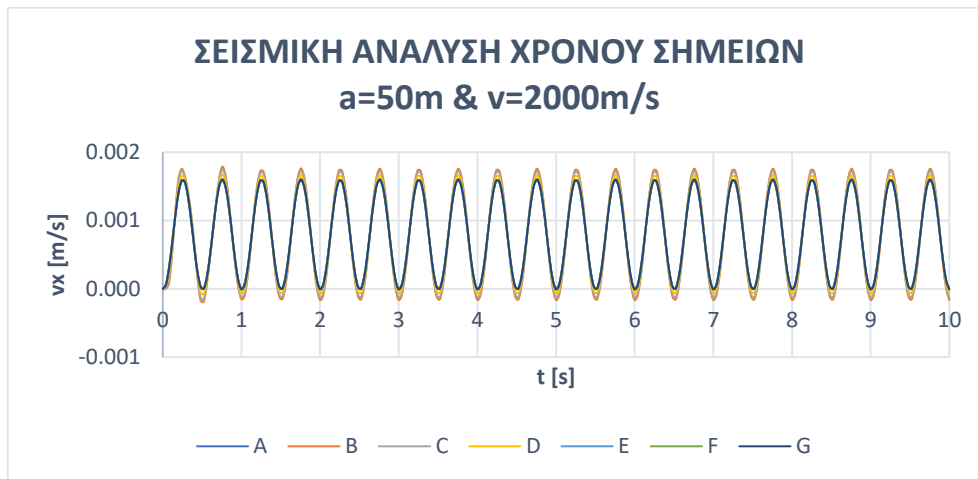
Ημιτονική διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



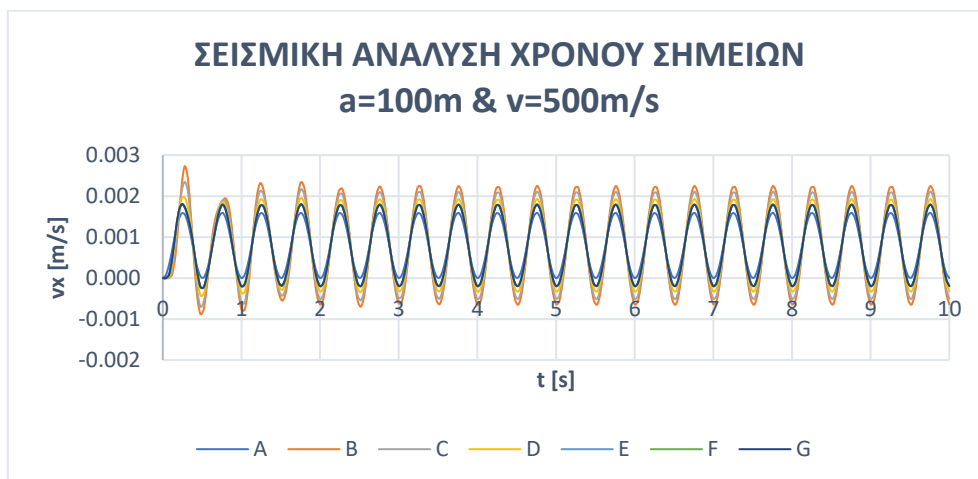
Διάγραμμα 4.1.205: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



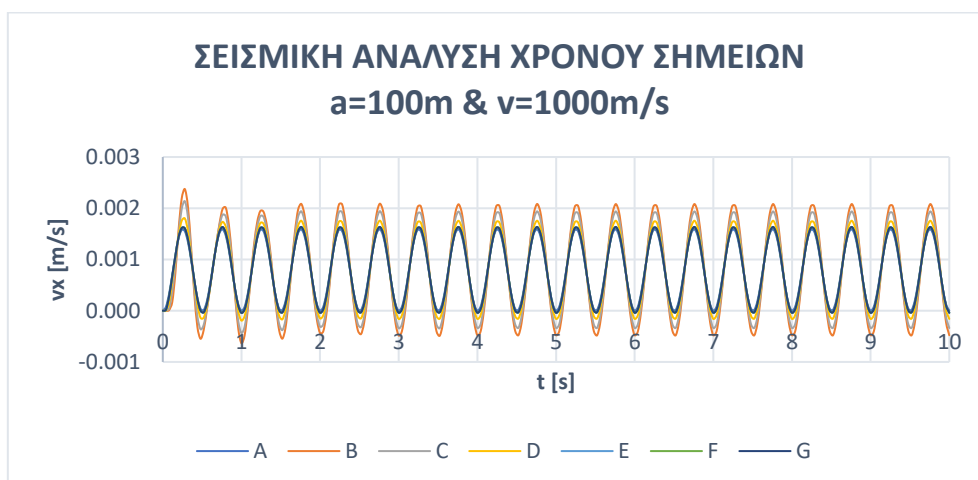
Διάγραμμα 4.1.206: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



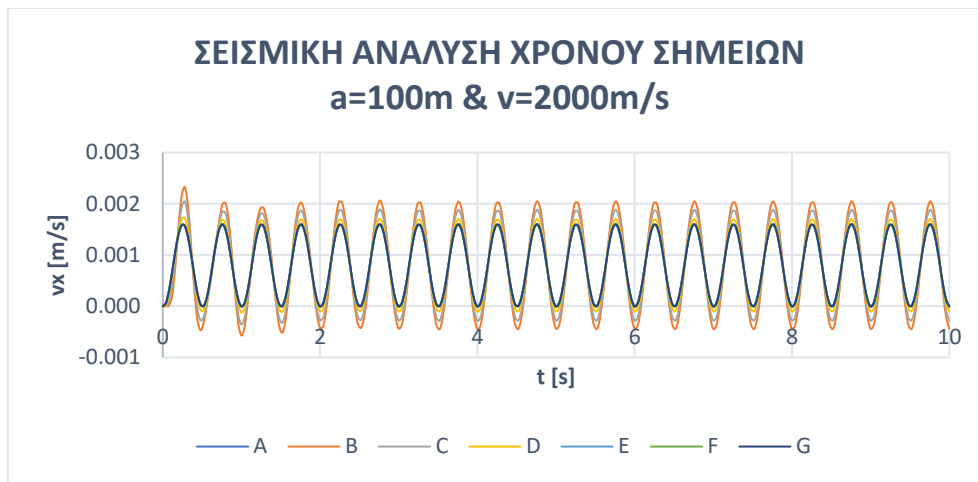
Διάγραμμα 4.1.207: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=50$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



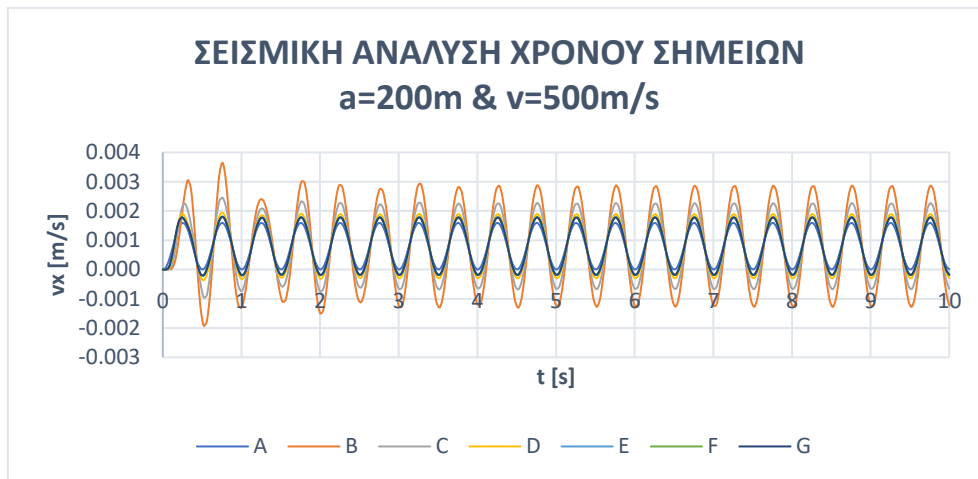
Διάγραμμα 4.1.208: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



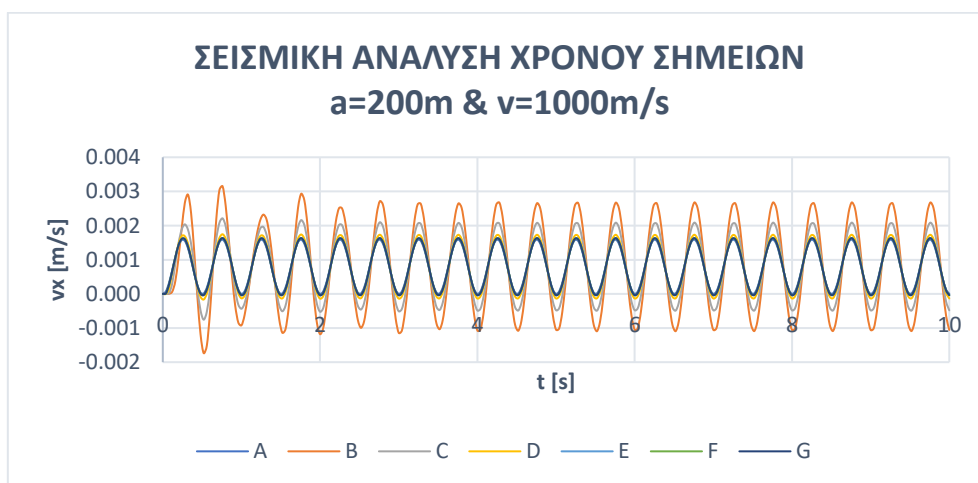
Διάγραμμα 4.1.209: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



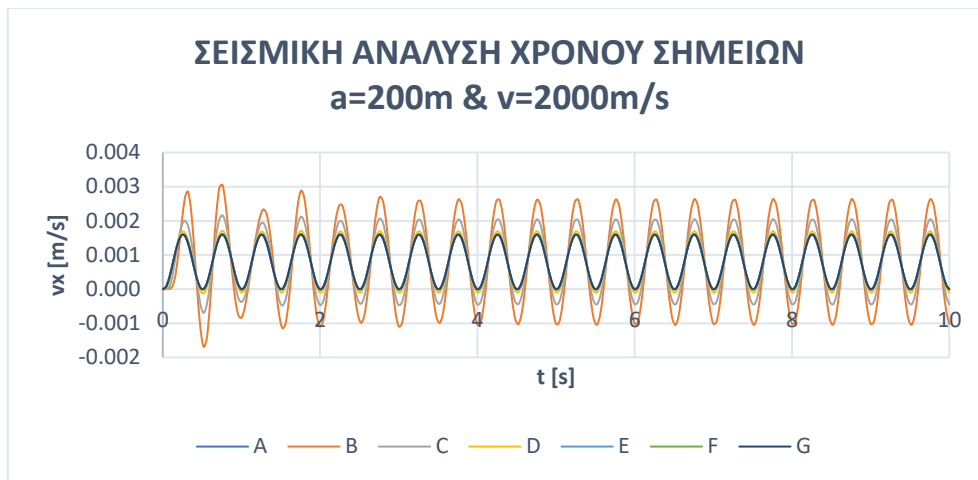
Διάγραμμα 4.1.210: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=100$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



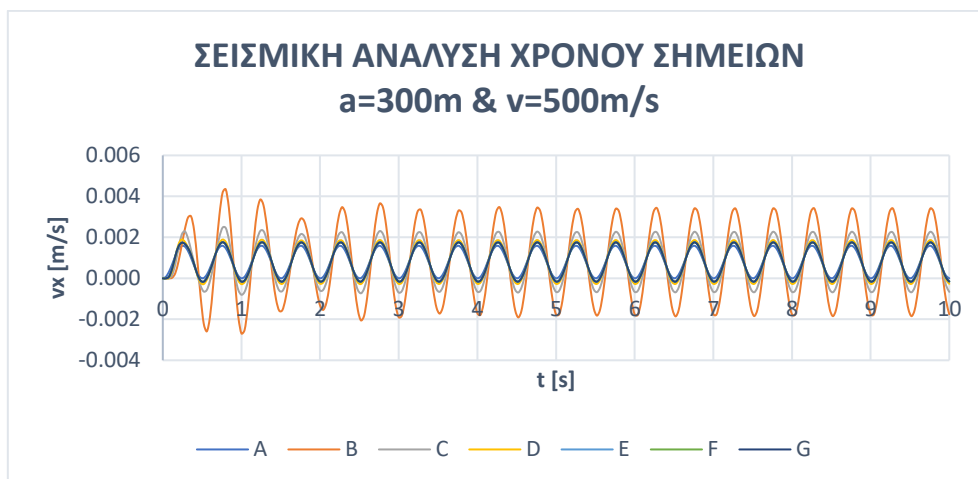
Διάγραμμα 4.1.211: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



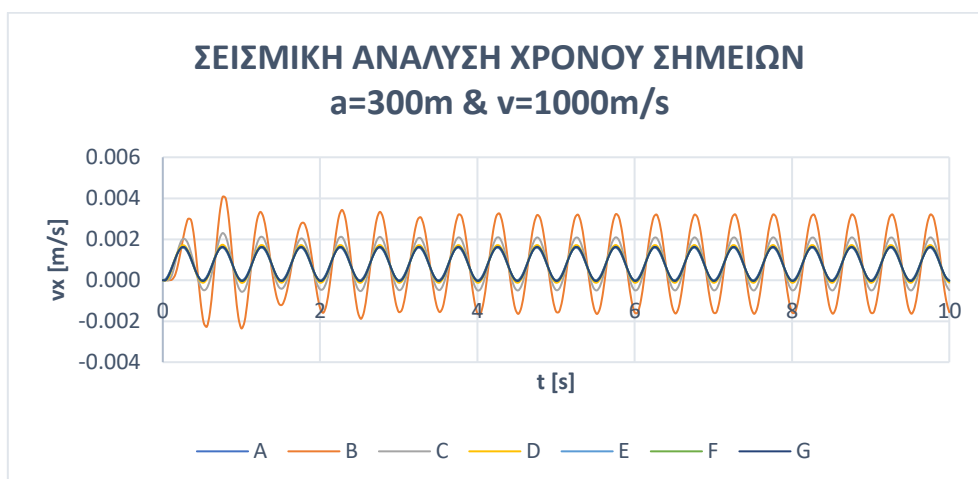
Διάγραμμα 4.1.212: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000$ m/s, άνοιγμα κοιλάδας $a=200$ m και διέγερση $f=2$ Hz (SIN-2hz)



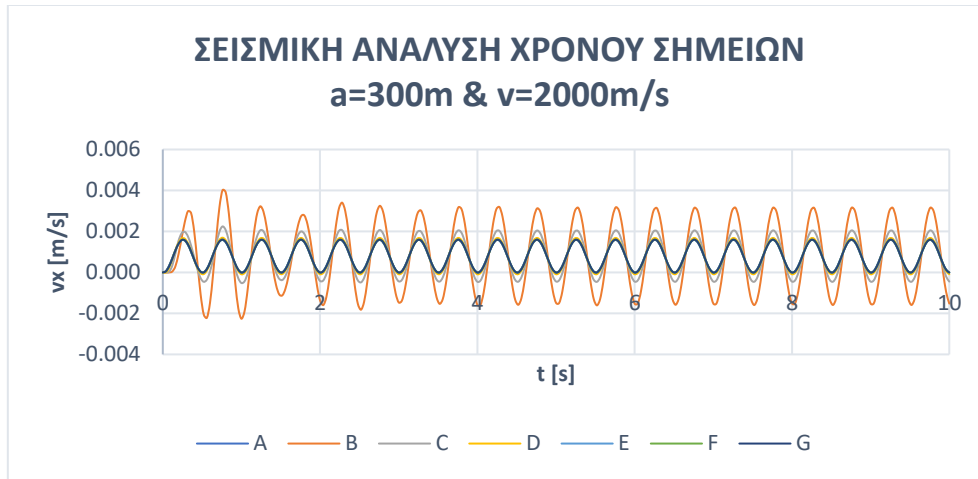
Διάγραμμα 4.1.213: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=200\text{m}$ και διέγερση $f=2\text{Hz}$ (SIN-2hz)



Διάγραμμα 4.1.214: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=500\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300\text{m}$ και διέγερση $f=2\text{Hz}$ (SIN-2hz)



Διάγραμμα 4.1.215: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=1000\text{m/s}$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300\text{m}$ και διέγερση $f=2\text{Hz}$ (SIN-2hz)



Διάγραμμα 4.1.216: Διάγραμμα ταχύτητα v_x [m/s] συναρτήσει του χρόνου t (s) των σημείων A, B, C, D, E, F, G, για ταχύτητα διάδοσης κύματος $V_s=2000m/s$, άνοιγμα κοιλάδας $a=300m$ και διέγερση $f=2Hz$ (SIN-2hz)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Διαγράμματα Fourier

Διέγερση 225α: Πραγματική Χρονοϊστορία Επιτάχυνσης (UPLANDEARTHQUAKE)



Διάγραμμα 4.1.217: Διάγραμμα Fourier μετατόπιση [m] συναρτήσει του χρόνου t(s) για διέγερση 225α

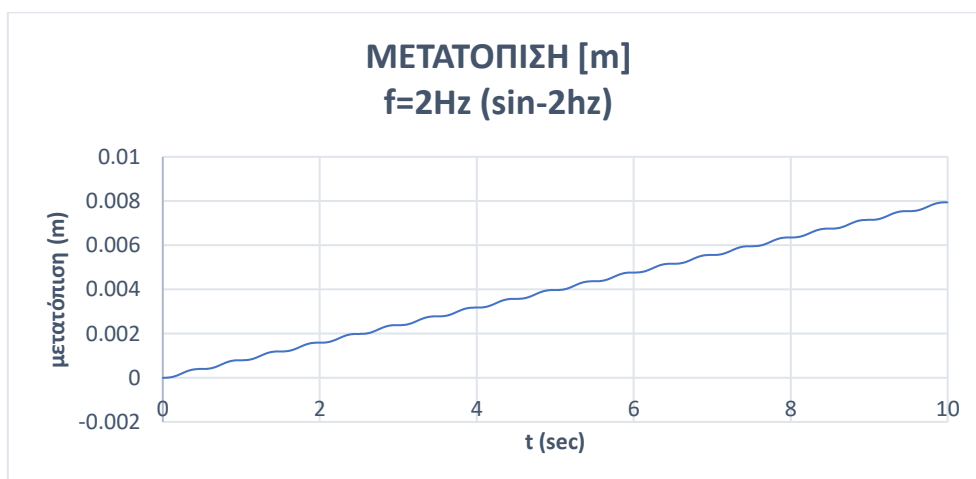


Διάγραμμα 4.1.218: Διάγραμμα Fourier επιτάχυνση [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t(s) για διέγερση 225α

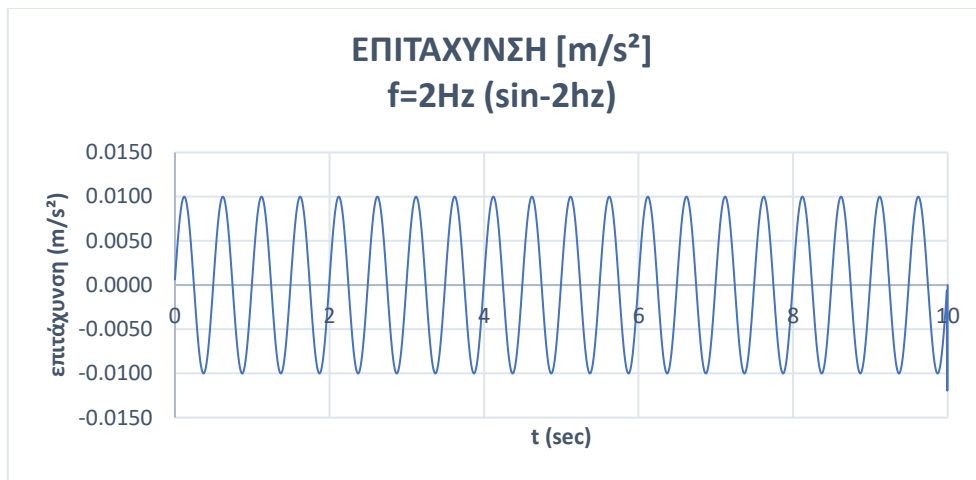


Διάγραμμα 4.1.218: Διάγραμμα Fourier ταχύτητα [m/s] συναρτήσει του χρόνου t(s) για διέγερση 225α

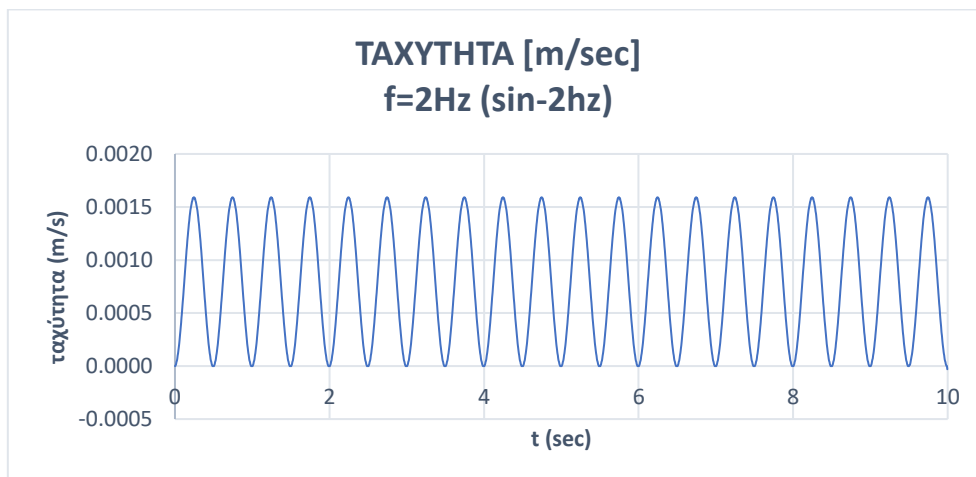
Ημιτονική διέγερση $f=2\text{Hz}$ (SIN-2hz)



Διάγραμμα 4.1.217: Διάγραμμα Fourier μετατόπιση [m] συναρτήσει του χρόνου t(s) για διέγερση $f=2\text{Hz}$ (SIN-2hz)



Διάγραμμα 4.1.218: Διάγραμμα Fourier επιτάχυνση [m/s²] συναρτήσει του χρόνου t(s) για διέγερση f=2Hz (SIN-2hz)



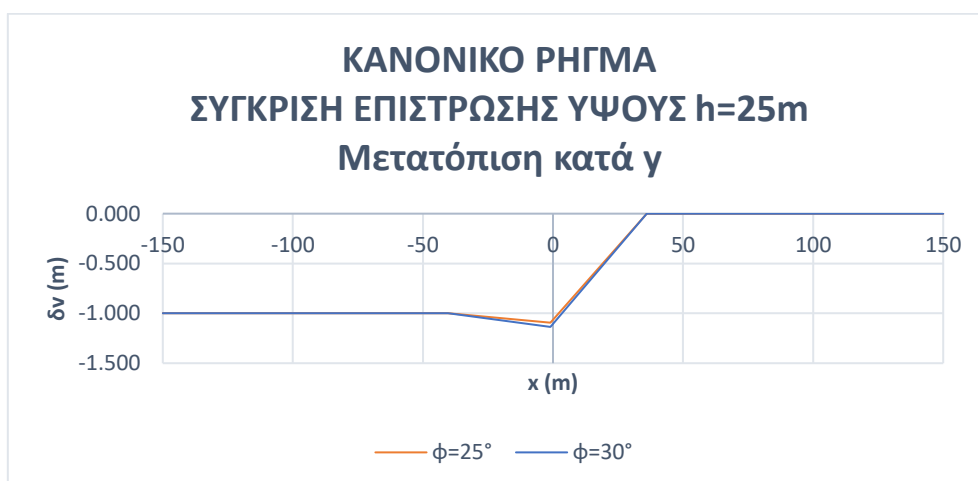
Διάγραμμα 4.1.218: Διάγραμμα Fourier ταχύτητα [m/s] συναρτήσει του χρόνου t(s) για διέγερση f=2Hz (SIN-2hz)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

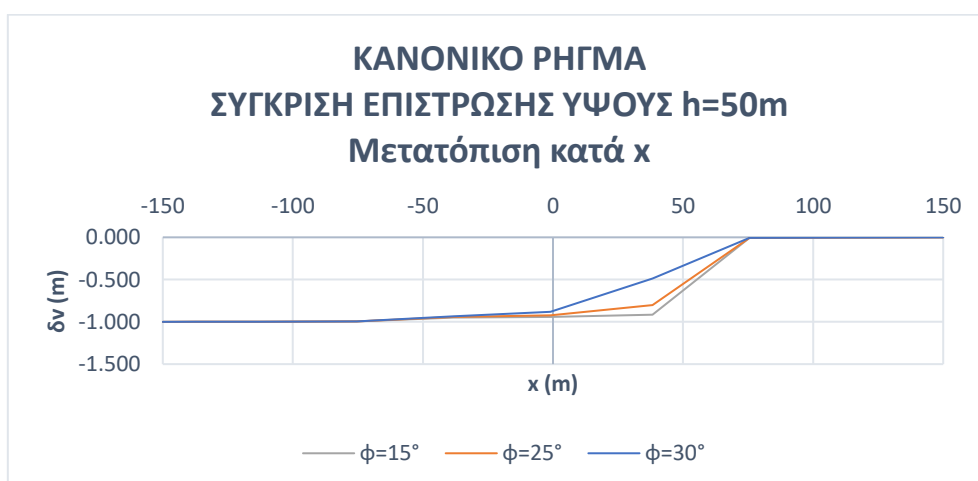
Κανονικό ρήγμα



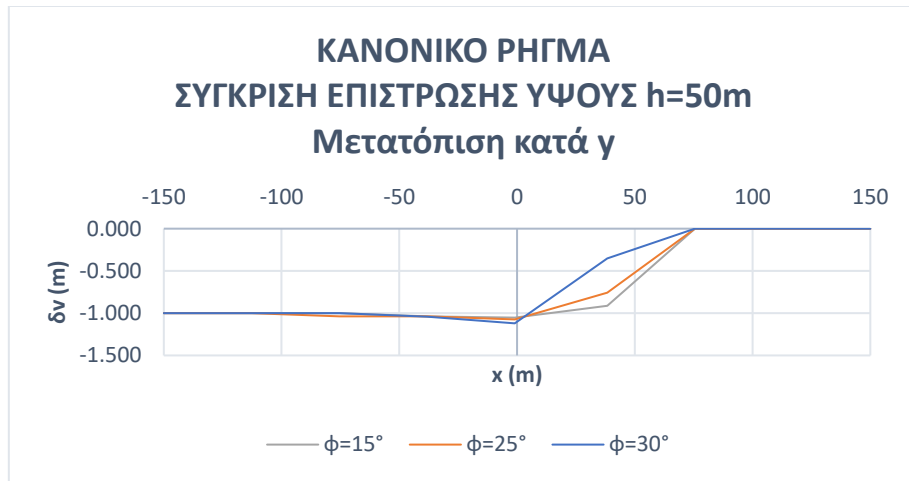
Διάγραμμα 4.2.1: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα x , για σύγκριση επίστρωσης ύψους $h=25m$ και για γωνίες τριβής $\phi=25^\circ$ & $\phi=30^\circ$



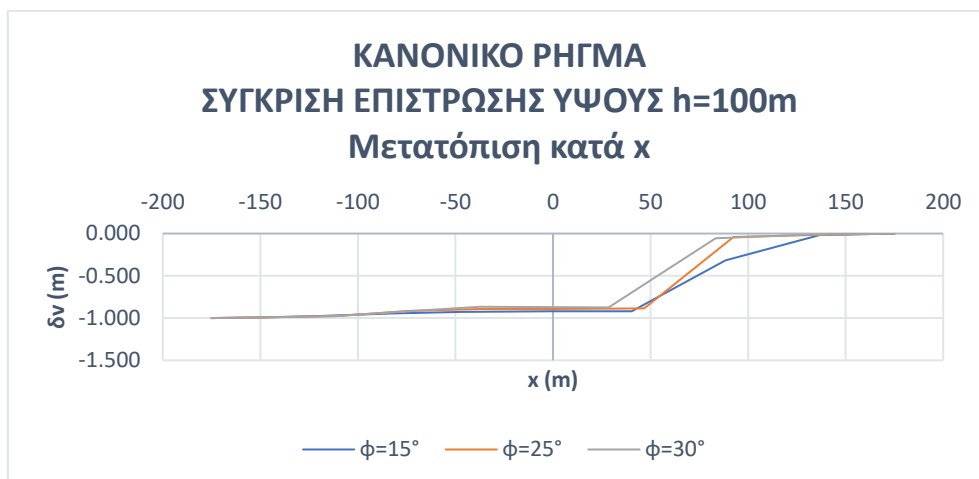
Διάγραμμα 4.2.2: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα y , για σύγκριση επίστρωσης ύψους $h=25m$ και για γωνίες τριβής $\phi=25^\circ$ & $\phi=30^\circ$



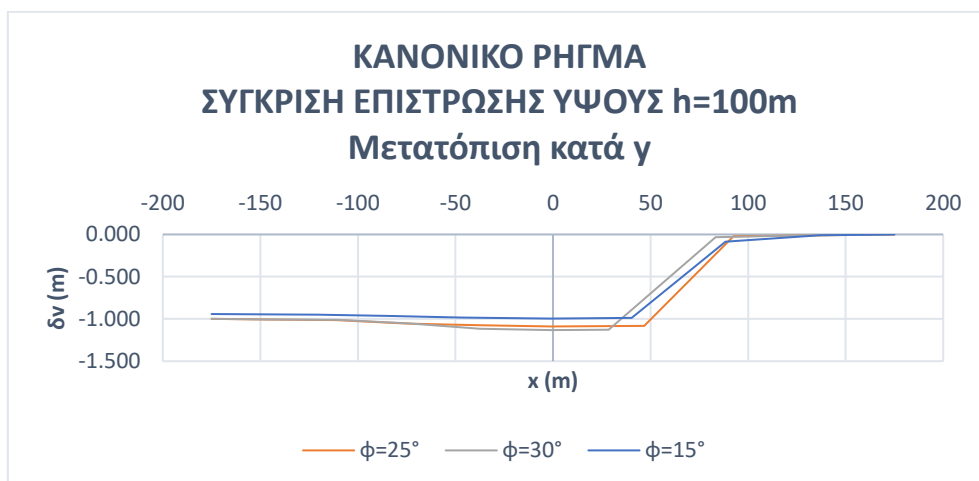
Διάγραμμα 4.2.3: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα x , για σύγκριση επίστρωσης ύψους $h=50m$ και για γωνίες τριβής $\phi=15^\circ$, $\phi=25^\circ$ & $\phi=30^\circ$



Διάγραμμα 4.2.4: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα y , για σύγκριση επίστρωσης ύψους $h=50m$ και για γωνίες τριβής $\phi=15^\circ$, $\phi=25^\circ$ & $\phi=30^\circ$



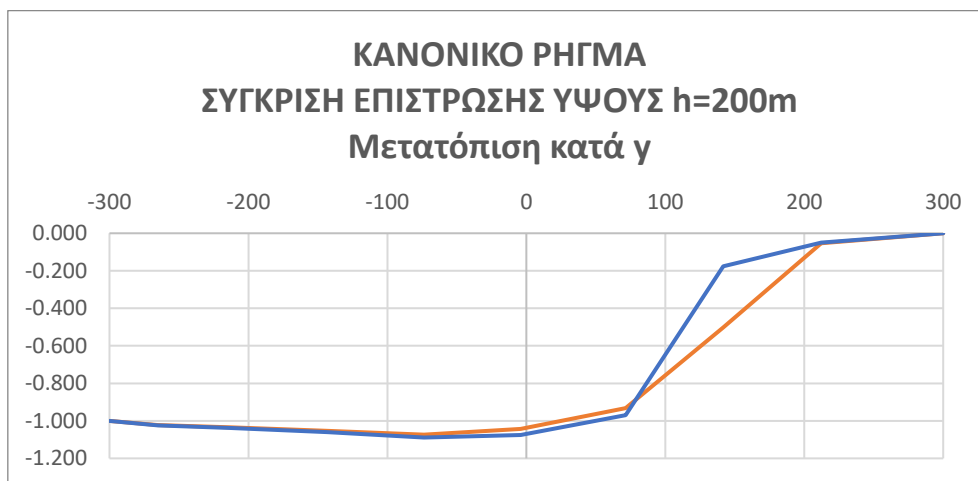
Διάγραμμα 4.2.5: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα x , για σύγκριση επίστρωσης ύψους $h=100m$ και για γωνίες τριβής $\phi=15^\circ$, $\phi=25^\circ$ & $\phi=30^\circ$



Διάγραμμα 4.2.6: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα y , για σύγκριση επίστρωσης ύψους $h=100m$ και για γωνίες τριβής $\phi=15^\circ$, $\phi=25^\circ$ & $\phi=30^\circ$

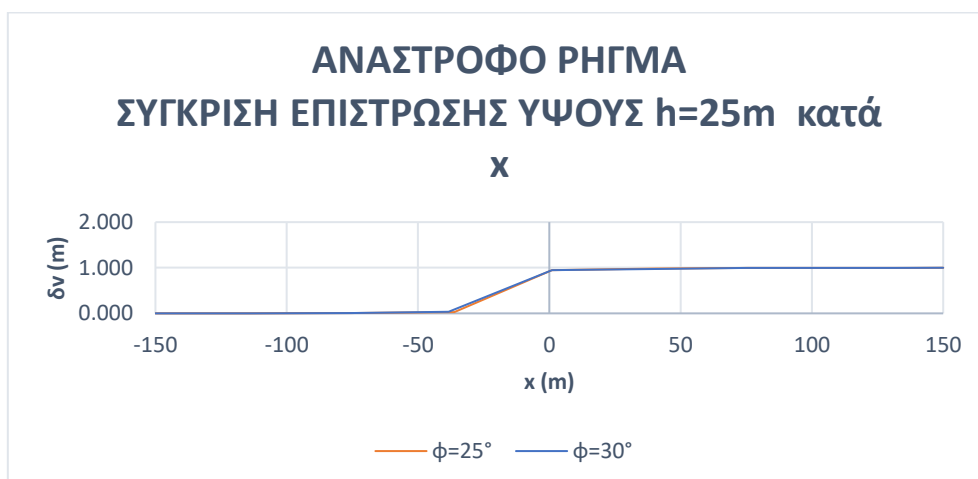


Διάγραμμα 4.2.7: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα x , για σύγκριση επίστρωσης ύψους $h=200m$ και για γωνίες τριβής $\varphi=25^\circ$ & $\varphi=30^\circ$

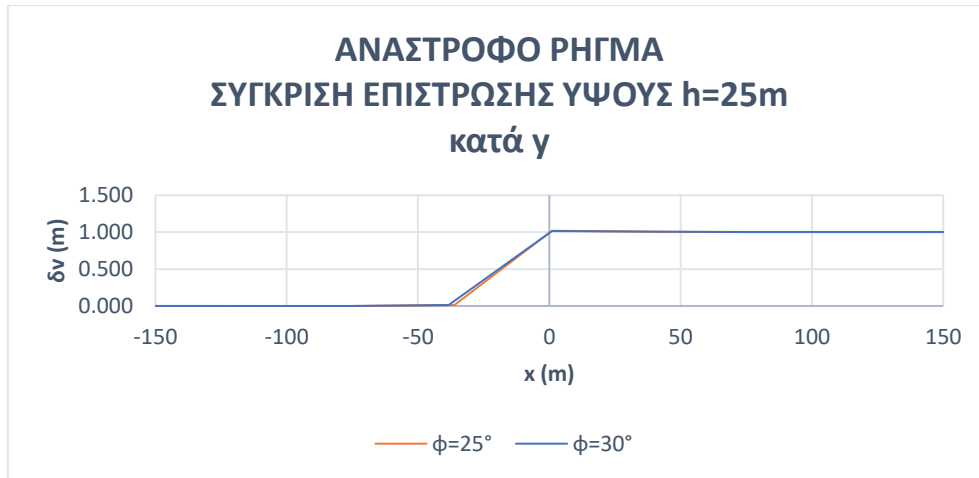


Διάγραμμα 4.2.8: Διάγραμμα κανονικού ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα y , για σύγκριση επίστρωσης ύψους $h=200m$ και για γωνίες τριβής $\varphi=25^\circ$ & $\varphi=30^\circ$

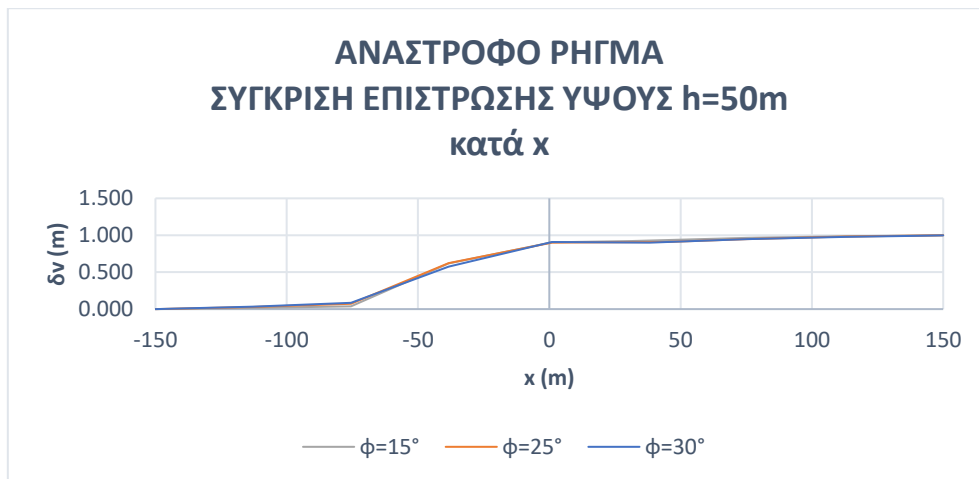
Ανάστροφο ρήγμα



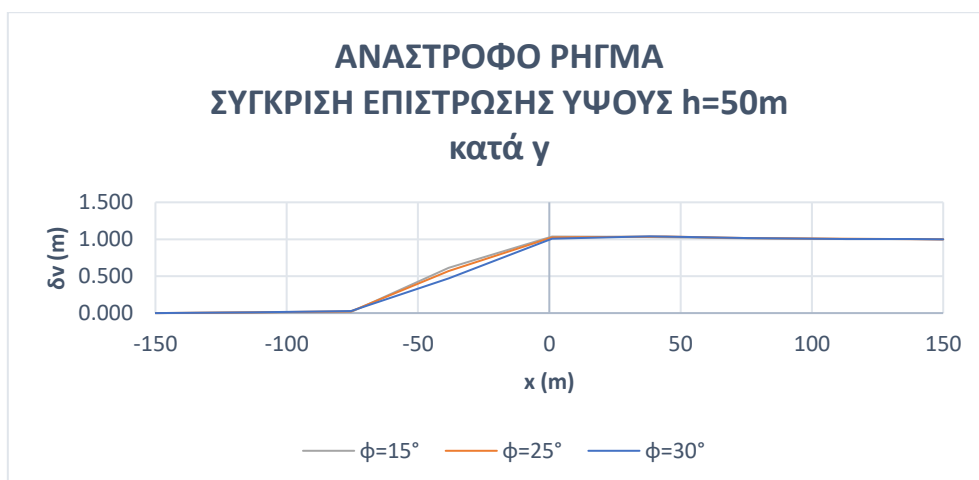
Διάγραμμα 4.2.9: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα x , για για σύγκριση επίστρωσης ύψους $h=25m$ και για γωνίες τριβής $\phi=25^\circ$ & $\phi=30^\circ$



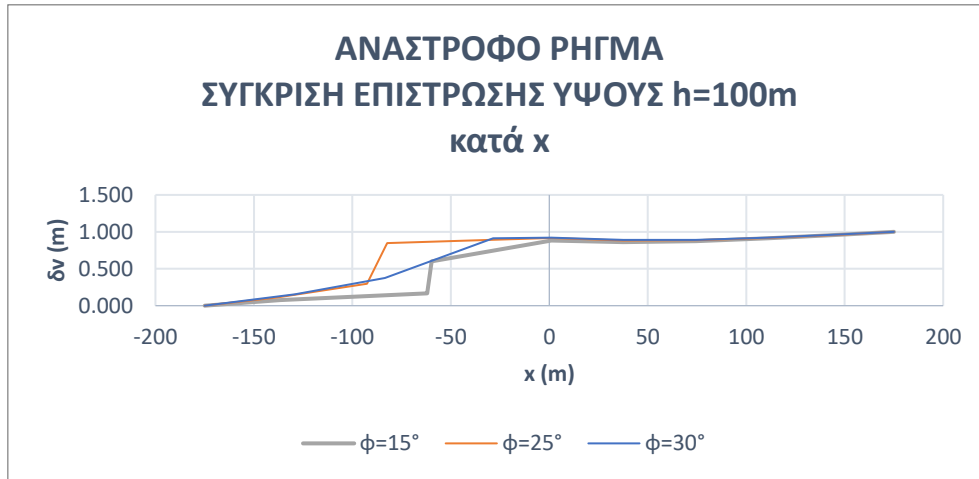
Διάγραμμα 4.2.10: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα γ , για για σύγκριση επίστρωσης ύψους $h=25m$ και για γωνίες τριβής $\phi=25^\circ$ & $\phi=30^\circ$



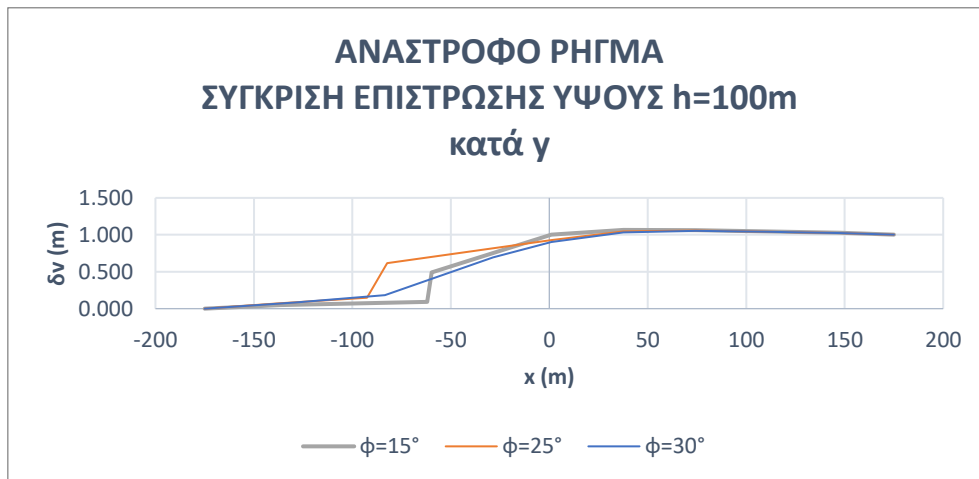
Διάγραμμα 4.2.11: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα x , για για σύγκριση επίστρωσης ύψους $h=50m$ και για γωνίες τριβής $\phi=15^\circ$, $\phi=25^\circ$ & $\phi=30^\circ$



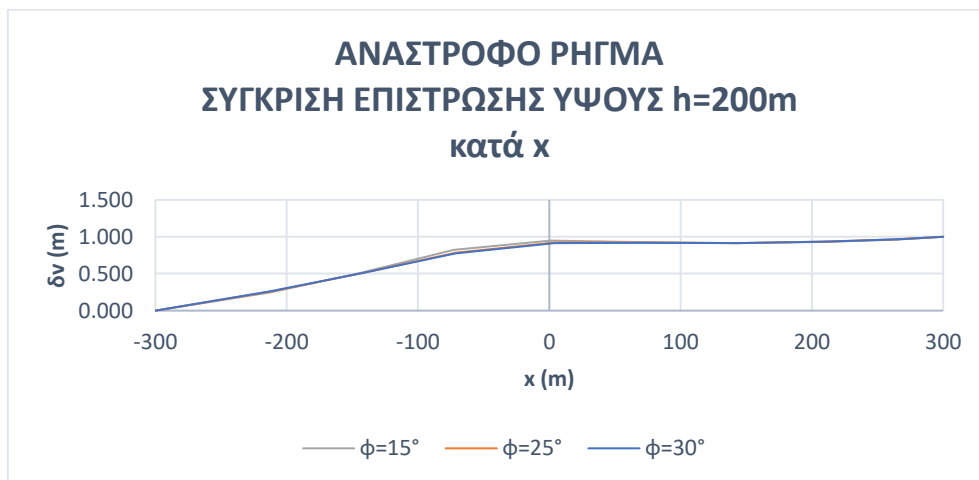
Διάγραμμα 4.2.12: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα γ , για για σύγκριση επίστρωσης ύψους $h=50m$ και για γωνίες τριβής $\phi=15^\circ$, $\phi=25^\circ$ & $\phi=30^\circ$



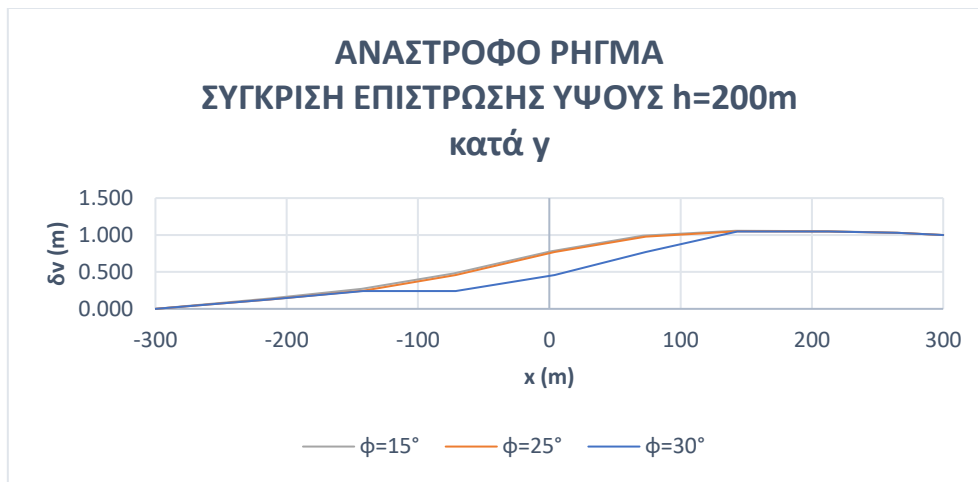
Διάγραμμα 4.2.13: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα x , για για σύγκριση επίστρωσης ύψους $h=100m$ και για γωνίες τριβής $\phi=15^\circ$, $\phi=25^\circ$ & $\phi=30^\circ$



Διάγραμμα 4.2.14: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα y , για για σύγκριση επίστρωσης ύψους $h=100m$ και για γωνίες τριβής $\phi=15^\circ$, $\phi=25^\circ$ & $\phi=30^\circ$



Διάγραμμα 4.2.15: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα x , για για σύγκριση επίστρωσης ύψους $h=200m$ και για γωνίες τριβής $\phi=15^\circ$, $\phi=25^\circ$ & $\phi=30^\circ$



Διάγραμμα 4.2.16: Διάγραμμα ανάστροφου ρήγματος, καθίζησης $\delta v(m)$ συναρτήσει της μετατόπισης $x(m)$ κατά τον άξονα γ , για για σύγκριση επίστρωσης ύψους $h=200m$ και για γωνίες τριθής $\phi=15^\circ$, $\phi=25^\circ$ & $\phi=30^\circ$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία, Περιοδικά και Άρθρα

1. STEVEN I. KRAMER, (1996), **Geotechnical Earthquake Engineering**, Prentice Hall, New Jersey.
2. Michael J. o'Rourke & (Jack) X. Liu, (2012), **Seismic Design of Buried and Offshore Pipelines**, MCEER, New York.
3. Β.Κ. Παπαζάχος, Γ.Φ. Καρακαϊσης, Π.Μ. Χατζηδημητρίου, (2005), **Εισαγωγή στη Σεισμολογία**, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
4. Διδακτορική Διατριβή, Πρόδρομος Ψαρρόπουλος (1999), **ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΔΑΦΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΗΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΘΡΩΝ ΚΑΙ ΑΚΡΟΒΑΘΡΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ**, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
5. Caputo R., Chatzipetros A., Pavlides S. and Sboras S. (accepted). **The Greek Database of Seismogenic Sources (GreDaSS): state-of-the-art for northern Greece**, Annals of Geophysics, In Press.
6. Pavlides S., Caputo R., Sboras S., Chatzipetros A., Papathanasiou G. and Valkaniotis S. (2010). **The Greek catalogue of active faults and database of seismogenic sources**, Bulletin of the Geological Society of Greece, XLIII (1), 486-494.
7. Sboras S. Pavlides S., Caputo R., Chatzipetros A., Michailidou A., Valkaniotis S. and Papathanasiou G. (2011): **Improving the resolution of seismic hazard estimates for critical facilities: the Database of Greek crustal seismogenic sources in the frame of the SHARE project**. Proceedings of the 30° Convegno Nazionale GNGTS, 14-17 November, 2011, Trieste, Extended Abstracts, 232-235.
8. Basili R., Garcia Moreno D., Kastelic V., Nemser E., Petricca P., Sboras S. and Valensise G. (2010): **Developing seismogenic source models based on geologic fault data in the Euro-Mediterranean area: SHARE mission accomplished? 32nd Assembly of the European Seismological Commission**, September 6-10, 2010, Montpellier, France, *Abstracts*, 86 pp.
9. Sboras S., Caputo R., Pavlides S., Chatzipetros A., Papathanasiou G. and Valkaniotis S. (2009): **The Greek Database of Seismogenic sources (GreDaSS): state-of-the-art**. Proceedings of the 28° Convegno Nazionale GNGTS, 16-19 November, 2009, Trieste, *Extended Abstracts*, 126-128.

10. Sboras S., Caputo R., Pavlides S., Chatzipetros A., Papathanasiou G. and Valkaniotis S. (2009). **The Greek Database of Seismogenic Sources: state-of-the-art on the northern Greece pilot area**, European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 19-24 April 2009, *Geophysical Research Abstracts*, 11, EGU2009-485-3.pdf
11. AMBRASEYS, N.N. (1960). "On the shear response of a two-dimensional truncated wedge subjected to arbitrary disturbance," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 50, No. 1, pp. 45-56.
12. AMBRASEYS, N.N. (1971). *Value of historical records of earthquakes," Nature, Vol. 232, pp. 375-379.
13. AMBRASEYS, N.N. (1988). "Engineering seismology," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 17, pp. 1-105.
14. Eguchi, R.T., (1983), "Seismic Vulnerability Models for Underground Pipes," Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment, PVP-77, ASME, New York, New York, June, pp. 368-373.
15. Eguchi, R.T., (1991), "Early Post-Earthquake Damage Detection for Underground Lifelines," Final Report to the National Science Foundation, Dames and Moore P.C., Los Angeles, California.
16. Meyersohn, W.D., (1991), "Analytical and Design Considerations for the Seismic Response of Buried Pipelines," Thesis, Graduate School of Cornell University, January.

Ιστοσελίδες

1. Wikipedia.org
2. the-dialogue.com
3. geodifhs.com
4. <https://docplayer.gr/44362534-Tektoniki-geologia-enotita-2-rigmata-stylianoszios-sholi-thetikon-epistimon-tmima-geologias-kai-geoperivallontos.html>
5. <https://www.in.gr/2018/09/13/greece/zakynthos-epta-oi-traymaties-apo-tin-katolisthisi-sto-nayagio/>
6. http://users.ntua.gr/gbouck/downfiles/geot_earthquake_eng_Ch6-LIQ-10.pdf
7. http://ecodonet.uoi.gr/geo_environmental_greek_1.html
8. <https://www.seismoi.gr/toellhnikotoxo.htm>
9. www.gredass.gr