



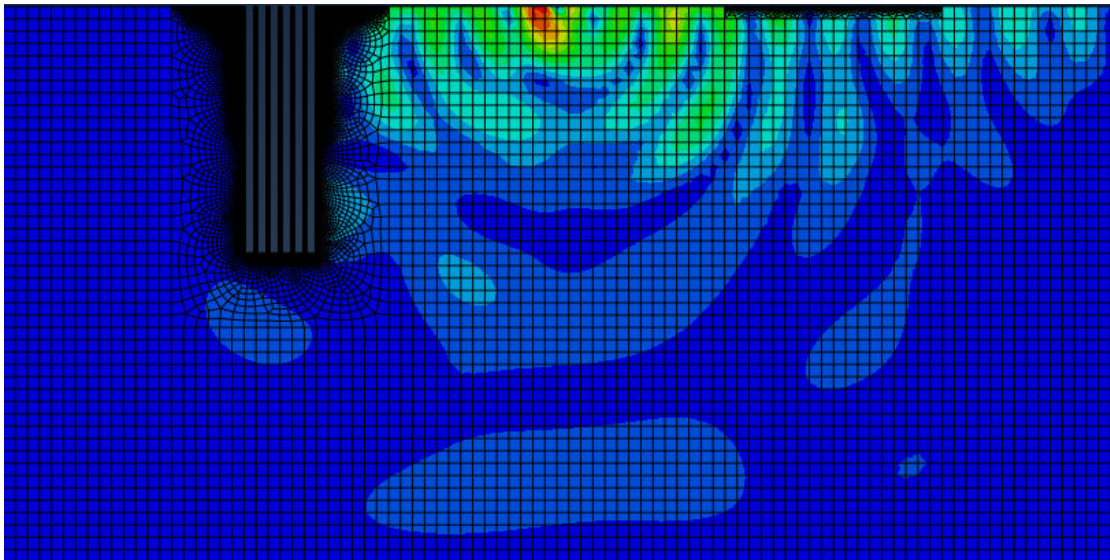
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία  
**ΕΥΘΥΜΙΟΥ ΦΟΥΝΤΑ**

---

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΑΡΧΗΣ ΤΩΝ ΦΩΝΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ  
ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ**

---



Επιβλέπων  
**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΠΥΡΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Συνεπιβλέπων  
**ΧΑΡΙΛΑΟΣ ΜΑΝΙΑΤΑΚΗΣ, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.**

*Αθήνα, Οκτώβριος 2019*



Ευθύμιος Φούντας (2019)  
Εφαρμογή της Αρχής των Φωνονικών Υλικών στην Αντισεισμική Μηχανική  
Διπλωματική Εργασία  
Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Efthymios Fountas (2019)  
Application of Phononics Principles in Earthquake Engineering  
Diploma Thesis  
Laboratory for Earthquake Engineering, National Technical University of Athens

*Ευχαριστώ τον επιβλέποντά μου, κ. Κωνσταντίνο Σπυράκο, Καθηγητή Ε.Μ.Π. και Διευθυντή του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας, για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος διπλωματικής εργασίας και την επιστημονική του καθοδήγηση σε όλα τα στάδια εκπόνησής της.*

*Ευχαριστώ επίσης τον συνεπιβλέποντά μου, κ. Χάρη Μανιατάκη, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό Ε.Μ.Π. και Συνεργάτη του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας, ο οποίος αφενός με συμβουλευέ στην επίλυση των σημαντικών προβλημάτων που αντιμετώπισα στην εργασία αυτή, αφετέρου με εμπύχωνε όποτε το χρειαζόμουν.*



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία  
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΑΡΧΗΣ ΤΩΝ ΦΩΝΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

Ευθύμιος Φούντας

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Σπυράκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Συνεπιβλέπων: Χαρίλαος Μανιατάκης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να συμβάλλει στην έρευνα γύρω από νέες τεχνικές αντισεισμικής προστασίας και συγκεκριμένα να διερευνήσει τη δυνατότητα απόσβεσης των σεισμικών κυμάτων πριν αυτά φθάσουν σε κρίσιμα εύρη, με την εφαρμογή της αρχής των μετα-υλικών. Η χρήση των μετα-υλικών ξεκίνησε στον ηλεκτρομαγνητισμό, επεκτάθηκε στην ακουστική και τα τελευταία χρόνια γίνεται έρευνα για τη πιθανή χρήση τους στην αντισεισμική μηχανική, ιδιαίτερα στην προστασία σημαντικών υποδομών. Τα μετα-υλικά αφορούν περιοδικές δομές που λόγω των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών τους έχουν τη δυνατότητα να επηρεάζουν τα εισερχόμενα σε αυτά κύματα. Εξετάζονται τρία διαφορετικά εδαφικά προφίλ: ένα χαλαρού εδάφους, ένα σκληρού εδάφους και ένα πραγματικό έδαφος με βάση τα αποτελέσματα γεωτεχνικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε. Γίνεται χρήση τριών διαφορετικών ειδών διεγέρσεων. Το πρώτο είδος αφορά τεχνητό επιταχυνσιογράφημα συμβατό με το ελαστικό φάσμα του Ευρωκώδικα 8. Το δεύτερο είδος αφορά τεχνητό κυματίδιο τύπου Hanning. Το τρίτο είδος αφορά ημισυνθετικά επιταχυνσιογραφήματα σεισμών κοντινού πεδίου. Εξετάζεται η περίπτωση ελαστικού εδάφους χωρίς απόσβεση και ελαστικού εδάφους με απόσβεση Rayleigh. Η σύγκριση των σημείων που προστατεύονται από την περιοδική δομή με αυτά που δεν προστατεύονται από την περιοδική δομή γίνεται σε όρους επιταχυνσιογραφημάτων, φασμάτων επιτάχυνσης και φασμάτων Fourier. Από τις αναλύσεις προκύπτει πως η εφαρμογή των μετα-υλικών οδηγεί σε μείωση της σεισμικής απόκρισης σε συγκεκριμένες θέσεις κοντά στις περιοδικές δομές.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF STRUCTURAL ENGINEERING  
LABORATORY FOR EARTHQUAKE ENGINEERING

Diploma Thesis  
APPLICATION OF PHONONICS PRINCIPLES IN EARTHQUAKE ENGINEERING

Efthymios Fountas

Supervisor: Constantine Spyrakos, Professor N.T.U.A.  
Co-supervisor: Charilaos Maniatakis, Civil Engineer N.T.U.A., Ph.D.

ABSTRACT

The purpose of this diploma thesis is to contribute to the research on new seismic protection techniques and in particular to investigate the possibility of seismic wave attenuation with the application of meta-materials. The use of meta-materials initially has been applied in the scientific field of electromagnetism, and then has been expanded also in acoustic engineering. Recently research is being conducted for their potential use in earthquake engineering, particularly in the protection of important infrastructure, with interesting outcome. The term “meta-material” refers to periodic structures that because of their specific characteristics are capable of transforming the critical characteristics of incoming waves. Three different soil models are examined: a loose soil model, a hard soil model and a soil model based on the results of a geotechnical research at an existing site. Three different types of seismic excitation are used. The first type is an artificial accelerograph compatible with the elastic spectrum of Eurocode 8. The second type is an artificial Hanning wavelet. The third type is a series of semi-synthetic accelerographs of near-fault earthquakes. The cases of an elastic soil with no damping and an elastic soil with Rayleigh damping are considered. The soil response is examined at critically selected points near the periodic structure in terms of acceleration time history, spectral acceleration and Fourier amplitude spectra. The results show that the application of meta-materials leads to a significant decrease of the seismic response at specific points behind the periodic structure.

# Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή .....	1
1.1 Παραδείγματα σεισμικών αστοχιών .....	1
1.2 Ανάγκη εφαρμογής νέων τεχνικών αντισεισμικής προστασίας .....	5
2. Θεωρητικό υπόβαθρο .....	8
2.1 Σεισμικά κύματα.....	8
2.2 Περιγραφή της εδαφικής κίνησης.....	11
2.3 Ρόλος του εδάφους .....	12
2.3.1 Επιρροή των εδαφικών χαρακτηριστικών στη σεισμική απόκριση .....	12
2.3.2 Ελαστική συμπεριφορά εδαφών .....	16
2.3.3 Ιξωδο-ελαστική συμπεριφορά εδαφών .....	18
2.3.4 Ελαστο-πλαστική συμπεριφορά εδαφών .....	20
2.4 Απόσβεση Rayleigh .....	20
2.5 Σεισμοί κοντινού πεδίου .....	21
2.6 Κατηγοριοποίηση εδαφών με βάση τον Ευρωκώδικα 8 .....	25
2.7 Μετα-υλικά.....	27
2.7.1 Ορισμός μετα-υλικών.....	27
2.7.2 Ιστορική ανασκόπηση χρήσης μετα-υλικών - Ηλεκτρομαγνητισμός.....	27
2.7.3 Ιστορική ανασκόπηση χρήσης μετα-υλικών - Ακουστική .....	29
2.7.4 Ιστορική ανασκόπηση χρήσης μετα-υλικών – Σεισμική μηχανική .....	30
2.7.5 Χάσμα συχνοτήτων .....	36
2.7.6 Επίδραση χαρακτηριστικών των μετα-υλικών.....	38
3. Αναλύσεις.....	39
3.1 Παράμετροι εδάφους και δομών.....	39
3.1.1 Παράμετροι χαλαρού εδάφους και δομών .....	39
3.1.2 Παράμετροι σκληρού εδάφους και δομών.....	40
3.1.3 Παράμετροι εδάφους από γεωτεχνική έρευνα και δομών .....	41
3.2 Υπολογισμός αποσβεστήρων .....	42
3.2.1 Σχέσεις υπολογισμού αποσβεστήρων .....	42
3.2.2 Αποσβεστήρες στο χαλαρό έδαφος.....	42
3.2.3 Αποσβεστήρες στο σκληρό έδαφος.....	43

3.2.4 Αποσβεστήρες στο έδαφος της γεωτεχνικής έρευνας .....	44
3.3 Μοντέλα αναλύσεων .....	46
3.3.1 Μοντέλο για χαλαρό έδαφος & για έδαφος της γεωτεχνικής έρευνας .....	46
3.3.2 Μοντέλο για σκληρό έδαφος.....	47
3.4 Χαρακτηριστικά διεγέρσεων.....	49
3.4.1 Χρονοϊστορίες συμβατές με το σεισμικό φάσμα κατά Ευρωκώδικα 8 .....	49
3.4.2 Απλοποιημένο κυματίδιο Hanning .....	49
3.4.3 Παλμοί σεισμικών καταγραφών κοντινού πεδίου.....	50
3.5 Αναλύσεις.....	52
3.5.1 Αναλύσεις χωρίς απόσβεση .....	52
3.5.2 Αναλύσεις με απόσβεση Rayleigh για χαλαρό και σκληρό έδαφος .....	53
3.5.3 Αναλύσεις με απόσβεση Rayleigh για το έδαφος της γεωτεχνικής έρευνας .....	54
4. Αποτελέσματα.....	56
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.1: Διέγερση TH-EC8 στο σημείο K για χαλαρό έδαφος .....	56
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.2: Διέγερση TH-EC8 στο σημείο K' για χαλαρό έδαφος.....	62
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.3: Διέγερση TH-EC8 σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος .....	68
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.4: Διέγερση TH-HF5 στο Σημείο K για χαλαρό έδαφος.....	74
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.5: Διέγερση TH-Parkfield σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος .....	80
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.6: Διέγερση TH-Kobe σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος .....	86
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.7: Διέγερση TH-Aegion σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος .....	92
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.8: Διέγερση TH-Erzincan σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος .....	98
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.9: Διέγερση TH-Northridge στην επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος .....	104
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.10: Διέγερση TH-EC8 στο σημείο K για σκληρό έδαφος.....	110
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.11: Διέγερση TH-EC8 στο σημείο K' για σκληρό έδαφος.....	116
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.12: Διέγερση TH-EC8 σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος .....	122
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.13: Διέγερση TH-HF5 στο σημείο K για σκληρό έδαφος .....	128
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.14: Διέγερση TH-Parkfield σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος.....	134



Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.15: Διέγερση TH-Kobe σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος .....	140
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.16: Διέγερση TH-Aegion σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος.....	146
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.17: Διέγερση TH-Erzincan σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος.....	152
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.18: Διέγερση TH-Northridge σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος.....	158
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.1: Διέγερση TH-EC8 σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος .....	164
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.2: Διέγερση HANNING-HF5 στο σημείο K για χαλαρό έδαφος .....	165
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.3: Διέγερση TH-Parkfield σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος .....	167
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.4: Διέγερση TH-Kobe σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος .....	168
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.5: Διέγερση TH-Aegion σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος .....	170
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.6: Διέγερση TH-Erzincan σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος .....	171
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.7: Διέγερση TH-Northridge σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος .....	173
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.8: Διέγερση TH-EC8 σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος .....	174
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.9: Διέγερση HANNING-H5 στο σημείο K για σκληρό έδαφος .....	176
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.10: Διέγερση TH-Parkfield σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος.....	177
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.11: Διέγερση TH-Kobe σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος .....	179
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.12: Διέγερση TH-Aegion σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος.....	180
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.13: Διέγερση TH-Erzincan σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος.....	182
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.14: Διέγερση TH-Northridge σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος.....	183
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 3.1: Διέγερση HANNING-HF5 στο σημείο K για το έδαφος της γεωτεχνικής έρευνας.....	185

Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 3.2: Διέγερση TH-Kobe σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για το έδαφος της γεωτεχνικής έρευνας .....	186
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 3.3: Διέγερση TH-Northridge σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για το έδαφος της γεωτεχνικής έρευνας.....	188
5. Συμπεράσματα .....	190
5.1 Χαλαρό έδαφος χωρίς απόσβεση .....	190
5.2 Σκληρό έδαφος χωρίς απόσβεση .....	191
5.3 Χαλαρό έδαφος με απόσβεση Rayleigh.....	191
5.4 Σκληρό έδαφος με απόσβεση Rayleigh.....	192
5.5 Έδαφος με βάση τα δεδομένα της γεωτεχνικής έρευνας και με απόσβεση Rayleigh ...	192
5.6 Γενικά σχόλια και συμπεράσματα .....	193
6. Βιβλιογραφία.....	195

# 1. Εισαγωγή

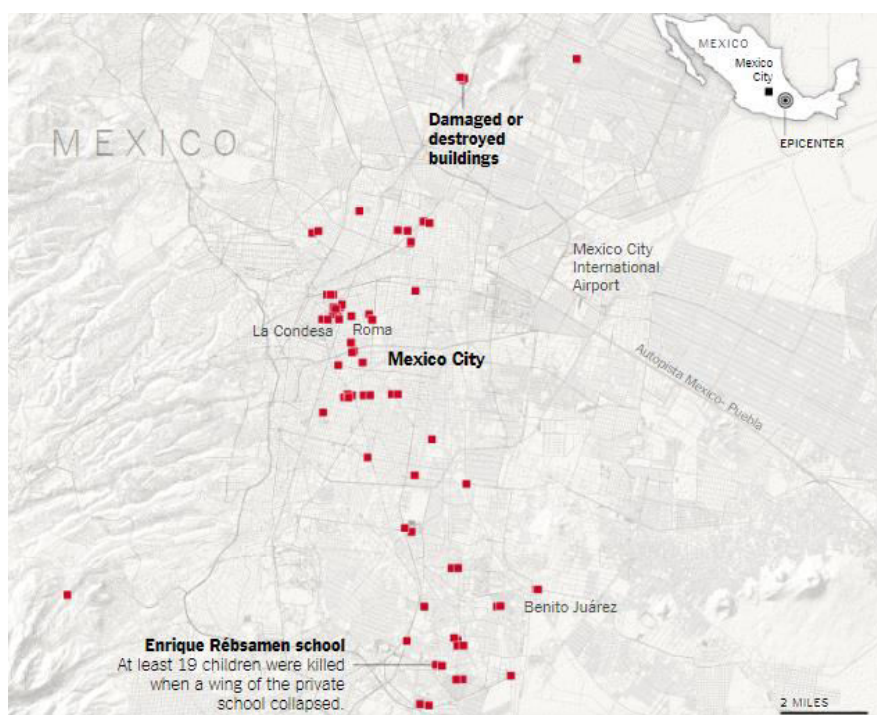
## 1.1 Παραδείγματα σεισμικών αστοχιών

Οι σεισμοί αποτελούν ένα φυσικό φαινόμενο που έχει αποτυπωθεί έντονα στη μνήμη όλων των λαών της Γης και ιδιαίτερα σε όσους κατοικούν σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα. Οι καταγραφές δομικών αστοχιών – άλλοτε μικρών και άλλοτε ιδιαίτερα σημαντικών – είναι εκτενείς στη διεθνή βιβλιογραφία, ενώ οι ανθρώπινες απώλειες δεν είναι ασυνήθιστες σε σημαντικά σεισμικά φαινόμενα. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα σεισμών και των αντίστοιχων επιπτώσεών τους, τόσο στο δομικό περιβάλλον όσο και στον ανθρώπινο πληθυσμό, σε διάφορες χώρες – Μεξικό, Ιαπωνία, Η.Π.Α. και Ελλάδα. Στόχος των παραδειγμάτων αυτών, είναι να αποτυπωθεί το μέγεθος της καταστροφής που μπορεί να προκληθεί από ένα σεισμό. Έμφαση δίνεται κυρίως στην αναφορά αστοχιών σε έργα υποδομής όπως γέφυρες, οδικούς άξονες και λιμενικά έργα, καθώς και σε φαινόμενα ρευστοποίησης του εδάφους και σε καταστροφές των Δικτύων Κοινής Ωφέλειας.

Ένας από τους πλέον καταστροφικότερους σεισμούς των τελευταίων δεκαετιών, μεγέθους  $M_s=8.1$ , συνέβη το 1985 στο Μεξικό. Ο σεισμός είχε επίκεντρο στα παράλια του Ειρηνικού Ωκεανού, στην επαρχία Michoacan. Στην επικεντρική περιοχή οι βλάβες σε κατασκευές ήταν περιορισμένες και στην υπόλοιπη χώρα αμελητέες. Ωστόσο, στην Πόλη του Μεξικού, σε απόσταση περίπου 400 χλμ. από το επίκεντρο, οι βλάβες ήταν εκτεταμένες. Η Πόλη του Μεξικού, αποτελείται από τρεις γεωλογικές ζώνες: (i) τη λοφώδη ζώνη, στην οποία υπάρχει επιφανειακή εκδήλωση βράχου ηφαιστειογενούς προέλευσης, (ii) τη λιμναία ζώνη, που αποτελείται από μαλακές αργιλικές αποθέσεις υπό τον υδροφόρο ορίζοντα και (iii) την ενδιάμεση – μεταβατική ζώνη. Οι μαλακές λιμναίες αποθέσεις αργίλου ηφαιστειακής προέλευσης, οι οποίες διακόπτονται κατά θέσεις από πυκνότερες στρώσεις άμμου-ύλος-αργίλου, έχουν πάχος που κυμαίνεται από 20-100m περίπου, με τον μητρικό βράχο να είναι αρκετά βαθύτερα. Η «άργιλος της Πόλης του Μεξικού», όπως χαρακτηριστικά έχει ονομαστεί, έχει ποσοστά φυσικής υγρασίας που κυμαίνονται μεταξύ των τιμών  $W=200\%-400\%$ , ενώ σε πολλά σημεία οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη πόρων ξεπερνούν ακόμα και την τιμή του  $e=10$ . Κατά τη σεισμική αυτή δόνηση, οι κορυφαίες επιταχύνσεις στη λοφώδη ζώνη δεν ξεπέρασαν την τιμή του 0.05g, ωστόσο στη λιμναία ζώνη έφθασαν ακόμα και την τιμή του 0.20g. Σε κάποια σημεία της Πόλης του Μεξικού εμφανίσθηκαν καταστάσεις διπλού συντονισμού. Ο πρώτος αφορούσε στο συντονισμό μεταξύ του διεγείροντος κραδασμού, που ήταν πλούσιος σε περιόδους περί τα  $T=2s$  στο βραχώδες υπόβαθρο με την εδαφική στήλη – η διεγείρουσα συχνότητα ταυτίστηκε με την ιδιοσυχνότητα του εδαφικού σχηματισμού. Ο δεύτερος αφορούσε στο συντονισμό μεταξύ του επιφανειακού κραδασμού και ορισμένων κατασκευών – η διεγείρουσα περίοδος στην επιφάνεια του εδάφους ταυτίστηκε με τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο ορισμένων κτιρίων περί τα  $T=2s$ . Τα κτίρια της Πόλης του Μεξικού, δεν ήταν κατάλληλα θωρακισμένα για να

αντιμετωπίσουν έναν τέτοιο συντονισμό και μάλιστα μεγάλης διάρκειας, αφού είχαν σχεδιασθεί για αρκετά μικρότερη τιμή φασματικής επιτάχυνσης, ενώ η διαθέσιμη πλαστιμότητα των κατασκευών εξαντλήθηκε. Ως αποτέλεσμα όλων των παραπάνω και σε συνδυασμό με τους έντονους μετασεισμούς που ακολούθησαν, εκατοντάδες κτίρια κατέρρευσαν, ενώ χιλιάδες υπέστησαν σοβαρές ζημιές, μεταξύ των οποίων νοσοκομεία και σχολικά κτίρια. Οι πρώτες πληροφορίες μιλούσαν για περίπου 10.000 νεκρούς, δεκάδες χιλιάδες τραυματίες, ενώ το κόστος αποκατάστασης των ζημιών ανήλθε σε πάνω από 3 δισ. δολλάρια.

Το 2017, ένας ακόμα ισχυρός σεισμός έπληξε την Πόλη του Μεξικού μεγέθους  $M_w=7.1$  με διάρκεια περίπου 20s και την επικεντρική περιοχή να βρίσκεται σε απόσταση 160km. Τουλάχιστον 44 κτίρια κατέρρευσαν, ενώ ο αριθμός των θυμάτων έφθασε τις εκατοντάδες. Παρακάτω παρουσιάζεται ένας χάρτης που δείχνει την έκταση των βλαβών στην Πόλη του Μεξικού.



**Σχήμα 1.1:** Χάρτης της Πόλης του Μεξικού με τα κτίρια που κατέρρευσαν ή έπαθαν σοβαρές βλάβες στο σεισμό της 19<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2017

Ο σεισμός του Kobe στην Ιαπωνία το 1995 είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός έντονου σεισμικού γεγονότος. Ο σεισμός είχε επίκεντρο 20km νοτιοδυτικά της πόλης και μέγεθος  $M_s=7.2$ . Το εδαφικό προφίλ περιλαμβάνει ένα στρώμα αλλουβιακών αποθέσεων κυμαινόμενου πάχους 10-60m, με εναλλαγές στρώσεων αργίλου και άμμου, ακολουθούμενο από μαλακό βράχο. Το βραχώδες γρανιτικό υπόστρωμα απαντάται σε βάθος από 700-1400m. Οι τιμές της μέγιστης οριζόντιας επιτάχυνσης που καταγράφηκαν σε όλο το μήκος της πόλης, ξεπέρασαν τα 0.50g, ενώ έφθασαν ακόμα και την τιμή του 0.85g σε ορισμένα σημεία. Το αποτέλεσμα της σεισμικής δόνησης αυτής ήταν περίπου 170.000 κτίρια να καταρρεύσουν ή να υποστούν ανεπανόρθωτες ζημιές και περίπου 300.000 άνθρωποι να μείνουν άστεγοι. Παράλληλα, υπήρξαν εκτεταμένες βλάβες σε

υποδομές, όπως στο υψηλής σπουδαιότητας λιμάνι της πόλης – όπου οι μετακινήσεις των φρεατο-κρηπιδότοιχων έφθασαν ακόμη και τα 5m – και σε εκατοντάδες οδικές και σιδηροδρομικές γέφυρες, με πιο χαρακτηριστική περίπτωση την κατάρρευση ενός τμήματος 600m της οδικής γέφυρας Hanshin Expressway. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τα αίτια αστοχίας της γέφυρας αυτής μπορούν να συνοψιστούν πως ήταν ο ανεπαρκής εγκάρσιος οπλισμός των βάθρων, η ανεπαρκής αγκύρωση του διαμήκου οπλισμού, οι ελαστικές μέθοδοι εκτίμησης του σεισμού σχεδιασμού και η αρνητική επιρροή της αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίου-κατασκευής (Mylonakis et al., 2006). Εντοπίστηκαν σοβαρές ζημιές και σε σήραγγες όπως και σε ένα σταθμό του μετρό, στον οποίο οι μεσαίες κολώνες του συνεθλίβησαν. Τα φαινόμενα ρευστοποίησης του εδάφους διαδραμάτισαν καθοριστικό ρόλο σε διάφορες αστοχίες όπως π.χ. στις καθιζήσεις βάθρων γεφύρων, ενώ υπήρχαν σημεία που υποχώρησαν ακόμα και 2m στα τεχνητά νησιά που βρίσκονταν λίγα χιλιόμετρα μακριά από την πόλη. Επιπρόσθετα, εμφανίστηκαν κατολισθήσεις, ενώ σχεδόν όλα τα δίκτυα (ύδρευσης, υγραερίου, ηλεκτρισμού) τέθηκαν για αρκετές ημέρες εκτός λειτουργίας. Τα θύματα ξεπέρασαν τον αριθμό των 5000, ενώ το κόστος αποκατάστασης των ζημιών ανήλθε σε δεκάδες δισεκατομμύρια δολάρια.



*Σχήμα 1.2: Αστοχία της οδικής γέφυρας Hanshin Expressway στο σεισμό του Kobe 1995*

Ο σεισμός του Northridge στο Λος Άντζελες συνέβη το 1994 και ήταν μεγέθους  $M_s=6.8$ . Το επίκεντρό του εντοπίστηκε σε πυκνοκατοικημένη περιοχή. Η μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους έφθασε την τιμή του 1.8g – η μεγαλύτερη τιμή που έχει καταγραφεί ποτέ σε κατοικημένη περιοχή στη Βόρεια Αμερική. Θεωρείται ένας από τους καταστροφικότερους σεισμούς στις ΗΠΑ, καθώς παρόλο που ο αριθμός των θυμάτων δεν ήταν ιδιαίτερα μεγάλος συγκριτικά με την ένταση του σεισμού, το κόστος αποκατάστασης των ζημιών έφθασε τα δεκάδες δισ. δολларία. Περίπου 180 κτίρια κατέρρευσαν ή έπαθαν ανεπανόρθωτες βλάβες, ενώ χιλιάδες άλλα υπέστησαν ελαφρότερες ζημιές. Μεταξύ άλλων οι αστοχίες αφορούσαν την κατάρρευση τμημάτων 18 γεφύρων με αποτέλεσμα την τεράστια παρακώληση των συγκοινωνιών για αρκετές ημέρες, σημαντικά προβλήματα στο

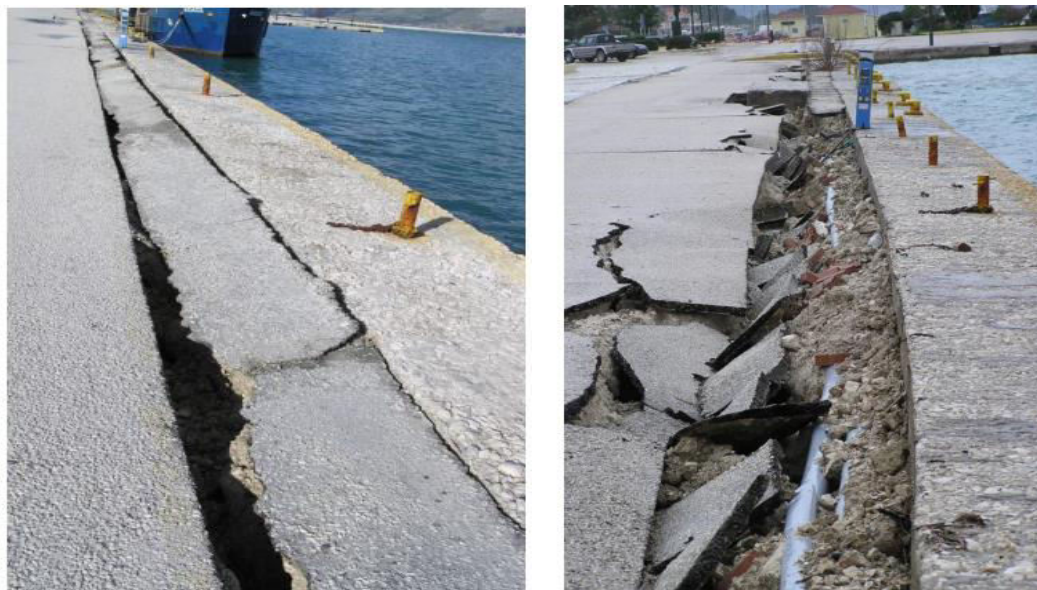
σιδηροδρομικό δίκτυο, σοβαρές ζημιές σε νοσοκομεία με αποτέλεσμα να σταματήσει η λειτουργία τους, ενώ εκτενείς ήταν και οι ζημιές στην τοπική πανεπιστημιούπολη. Τέλος, σημαντικές ήταν οι καταστροφές στο δίκτυο ύδρευσης, φυσικού αερίου και ηλεκτρισμού, με αποτέλεσμα να προκληθούν πλημμύρες και φωτιές σε αρκετά σημεία.



**Σχήμα 1.3:** Αστοχία της οδικής γέφυρας Interstate 5 στο σεισμό Northridge 1994

Από τον Ελλαδικό χώρο, αναφέρεται η σεισμική δραστηριότητα του 2014 στη Κεφαλονιά. Η επικεντρική περιοχή ήταν 9km από το Ληξούρι, ενώ το μέγεθος του σεισμού ήταν  $M_w=6.0$ , με ισχυρό μετασεισμό λίγες μέρες αργότερα μεγέθους  $M_w=5.9$ . Οι περισσότερες κατασκευές στην Κεφαλονιά έχουν σχεδιασθεί για ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z3, σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό, δηλαδή για εδαφική επιτάχυνση αναφοράς  $a_{gR}=0.36g$ . Η μέγιστη φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού προκύπτει πως είναι 0.9g (EAK2000) και 1.08g (EC8, για έδαφος κατηγορίας B). Στο σεισμό της Κεφαλονιάς καταγράφηκαν μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις έως και 0.40g (που αντιστοιχεί σε ψευδοφασματική επιτάχυνση  $PSA=1.44g$ ) στη θέση Αργοστόλι. Στο μετασεισμό, οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις έφθασαν ακόμα και την τιμή 0.75g (που αντιστοιχεί σε ψευδοφασματική επιτάχυνση  $PSA=2.89g$ ) στη θέση Χαβριάτα. Οι βλάβες στα κτίρια από Ω/Σ ήταν σχετικά περιορισμένες. Σε μερικά κτίρια από Ω/Σ εμφανίσθηκαν οι αναμενόμενες δισδιαγώνιες ρωγμές λόγω της σεισμικής δράσης, ωστόσο τα περισσότερα συμπεριφέρθηκαν πολύ καλά, παρά την ένταση του φαινομένου. Αυτό εξηγείται λόγω της διαθέσιμης υπεραντοχής τους. Σε αντίθεση, λιθόκτιστα κτίρια και κτίρια σχεδιασμένα με παλαιότερους κανονισμούς εμφάνισαν ζημιές. Άλλες επιπτώσεις στο δομικό περιβάλλον αφορούν σημαντικές ζημιές σε ναούς και αρχαιότητες, βλάβες στο οδικό δίκτυο καθώς ήταν αρκετές οι διαρρήξεις οδοστρώματος, σημαντικές κατολισθήσεις και καταστροφή του προβλήτα του λιμανιού λόγω ρευστοποίησης του υποκείμενου εδάφους. Παρόλο που υπάρχουν καταγραφές σεισμών με περισσότερες και σημαντικότερες επιπτώσεις στον Ελλαδικό χώρο, ο σεισμός της Κεφαλονιάς κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί καθώς αποτελεί χαρακτηριστική περίπτωση όπου η σεισμική δράση ήταν αρκετά μεγαλύτερη από το σεισμό σχεδιασμού, σύμφωνα με τον ισχύοντα αντισεισμικό

κανονισμό. Το γεγονός ότι στο νησί δεν εμφανίσθηκαν πολύ σοβαρές βλάβες οφείλεται στη μικρή διάρκεια του σεισμικού κραδασμού.



**Σχήμα 1.4:** Αριστερά: Καθίζηση της προβλήτας στο λιμάνι του Ληξουρίου (26.1.2014)  
Δεξιά: Καθίζηση της ίδιας προβλήτας όπως αυτή διευρύνθηκε κατά το δεύτερο σεισμό (3.2.2014)

Από τα παραπάνω παραδείγματα σεισμικών γεγονότων, είναι φανερό πως υπήρξαν, κατά περίπτωση ή συνδυαστικά, αστοχίες λόγω μέτριας κατασκευαστικής ποιότητας, πλημελλούς αντισεισμικού σχεδιασμού των κατασκευών, αρνητικής επίδρασης του εδάφους (αλληλεπίδρασης εδάφους – θεμελίου – κατασκευής), αλλά και μη επάρκειας των ισχύοντων αντισεισμικών κανονισμών. Αποτέλεσμα των εκτεταμένων δομικών αστοχιών ήταν σε αρκετές περιπτώσεις η ύπαρξη και ανθρώπινων θυμάτων. Στα παραπάνω επίσης αναφέρθηκε η ανάγκη καταβολής τεράστιων ποσών για την αποκατάσταση ζημιών. Σε ένα σημαντικό σεισμικό γεγονός όμως, πρέπει να υπολογίζονται και οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις, όπως είναι οι ψυχοκοινωνικές επιπτώσεις π.χ. όσων αναγκαστούν να μείνουν άστεγοι μέχρι την αποκατάσταση των βλαβών, αλλά και οι επιπτώσεις στην οικονομία από την καταστροφή αναγκαίων μέσων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση καταστροφής ενός λιμένα, πέρα από το κόστος αποκατάστασής του, θα πρέπει να υπολογίζονται και οι οικονομικές συνέπειες από την παύση διακίνησης εμπορευμάτων που εξάγονται ή εισάγονται. Γίνεται σαφές λοιπόν πως η έρευνα γύρω από την αντισεισμική προστασία είναι μείζονος σημασίας.

## 1.2 Ανάγκη εφαρμογής νέων τεχνικών αντισεισμικής προστασίας

Σήμερα, η αντισεισμική προστασία των κατασκευών περιλαμβάνει κυρίως δύο τεχνικές:

- Στην πρώτη τεχνική, η κατασκευή επιτρέπεται να παραμορφωθεί στην πλαστική περιοχή. Συγκεκριμένα, ο σεισμός σχεδιασμού για τον οποίο σχεδιάζονται τα τεχνικά έργα έχει μικρή πιθανότητα να συμβεί κατά τη

διάρκεια της ζωής τους. Συνεπώς, θα ήταν αντιοικονομικό να σχεδιασθεί μια κατασκευή έτσι ώστε να συμπεριφερθεί ελαστικά όταν συμβεί αυτός ο σεισμός, δηλαδή να μην υποστεί καμία ζημιά. Σύμφωνα λοιπόν με αυτήν την τεχνική, η κατασκευή σχεδιάζεται έτσι ώστε στους μεγάλους σεισμούς να επιτρέπεται να υποστεί μερικές μικρές ζημιές (να παραμορφωθεί στην πλαστική περιοχή) οι οποίες θα είναι επισκευάσιμες, ενώ στους μικρούς σεισμούς θα συμπεριφερθεί ελαστικά. Το πόσο μεγάλες βλάβες θα υποστεί η κατασκευή σε αυτήν την περίπτωση, εξαρτάται από το πόσο πολύ θα παραμορφωθεί στην πλαστική περιοχή, δηλαδή από το πόσο πολύ μεγαλύτερη είναι η μέγιστη ανελαστική μετακίνηση που θα αναπτυχθεί σε σχέση με την μετακίνηση διαρροής. Ποσοτικά αυτό εκφράζεται μέσω του δείκτη πλαστιμότητας της κατασκευής. Για να περιοριστούν οι βλάβες πρέπει να εξασφαλιστεί ότι εάν συμβεί ο σεισμός σχεδιασμού, η κατασκευή δε θα αναπτύξει δείκτη πλαστιμότητας μεγαλύτερο από κάποια μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή.

- Στην δεύτερη τεχνική, χρησιμοποιούνται διάφοροι τρόποι που αποσκοπούν στη μείωση των μετακινήσεων και των εσωτερικών δυνάμεων που αναπτύσσονται σε μια κατασκευή κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Αυτή η τεχνική αναφέρεται ως σεισμική μόνωση των κατασκευών. Η σεισμική μόνωση μπορεί να επιτευχθεί με συσκευές που οδηγούν (i) σε αύξηση της ιδιοπεριόδου της κατασκευής, (ii) σε αύξηση της απόσβεσής της, (iii) στο συνδυασμό των δύο παραπάνω παραγόντων. Στην περίπτωση (i) η αύξηση της ιδιοπεριόδου οδηγεί σε μείωση των σεισμικών φορτίων. Στην περίπτωση (ii) χρησιμοποιούνται ειδικοί μηχανισμοί οι οποίοι απορροφούν ενέργεια και οδηγούν σε μείωση τόσο των σεισμικών δυνάμεων, όσο και των μετακινήσεων. Οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται βασίζονται είτε σε ανελαστική συμπεριφορά κάποιου υλικού (συνήθως χάλυβα ή μολύβδου), είτε σε συστήματα τριβής, είτε σε προσθήκη ιξώδους απόσβεσης, είτε σε συνδυασμό των παραπάνω.

Η εφαρμογή της πρώτης τεχνικής, όπως ειπώθηκε, οδηγεί την κατασκευή σε σημαντικές παραμορφώσεις. Είναι πιθανό οι βλάβες που θα προκληθούν από αυτές τις παραμορφώσεις να είναι μη επιδιορθώσιμες και συνεπώς η κατασκευή να καταστεί μη λειτουργική.

Η εφαρμογή της δεύτερης τεχνικής, προϋποθέτει τη χρήση ειδικών συσκευών. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται συσκευές που αυξάνουν την ιδιοπερίοδο της κατασκευής, τα σεισμικά φορτία μειώνονται, ωστόσο ταυτόχρονα αυξάνονται οι μετακινήσεις. Εάν η τιμή της ιδιοπεριόδου χωρίς μόνωση είναι κοντά στο σημείο έναρξης του φθίνοντα κλάδου του φάσματος ( $T_c$  στο φάσμα σχεδιασμού του EC8) τότε ακόμη και μικρή αύξηση της περιόδου, οδηγεί σε σημαντική μείωση των σεισμικών δυνάμεων. Αντίθετα, αν η τιμή της ιδιοπεριόδου χωρίς μόνωση είναι ήδη μεγάλη, η μείωση του φορτίου που επιτυγχάνεται δεν είναι σημαντική, ενώ αντίθετα η αύξηση των μετακινήσεων είναι μεγάλη.



Στην άλλη περίπτωση χρησιμοποιούνται μηχανισμοί που αυξάνουν την απόσβεση της κατασκευής. Ως μειονεκτήματα τέτοιων μηχανισμών θεωρούνται η ανάγκη υψηλής πιστότητας και αξιοπιστίας των υλικών και του συστήματος, η συντήρηση που χρειάζεται σε ορισμένες περιπτώσεις και η πιθανή ανάγκη αντικατάστασής τους αμέσως μετά από κάποιο ισχυρό σεισμό.

Σε γενικές γραμμές, σε περιοχές που παρουσιάζεται έντονη σεισμικότητα είναι αναγκαία η λήψη σημαντικότερων μέτρων αντισεισμικής προστασίας, σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές. Επίσης, πολλές από αυτές τις τεχνικές που αναφέρθηκαν δεν λαμβάνουν υπόψη την αλληλεπίδραση εδάφους – θεμελίου – κατασκευής, η οποία μπορεί να είναι ιδιαίτερα αρνητική. Τέλος, σε αρκετές περιπτώσεις τεχνικών έργων κρίνεται απαγορευτική η ανάπτυξη σημαντικών μετακινήσεων, ενώ υπάρχουν περιπτώσεις που κρίνεται σκόπιμη η ανάπτυξη μόνον μικρών μετακινήσεων, ακόμα και σε ένα ισχυρό σεισμό.

Μια τεχνική αντισεισμικής προστασίας που θα πρέπει να εξεταστεί εις βάθος είναι η απόσβεση των σεισμικών κυμάτων πριν αυτά φθάσουν σε κρίσιμα σημεία. Με τη μέθοδο αυτή αφενός ξεπερνούνται πολλά από τα μειονεκτήματα των παραπάνω τεχνικών, αφετέρου γίνεται εφικτή η προστασία ευρύτερων περιοχών, σε αντίθεση με την προστασία μεμονωμένων κατασκευών. Αυτό μπορεί να εφαρμοστεί κάνοντας χρήση μηχανικών μετα-υλικών μεγάλης κλίμακας. Αυτές οι δομές επηρεάζουν τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων μέσω των ιδιοτήτων τους. Για παράδειγμα αναφέρεται η αρνητική διάθλαση και η εμφάνιση χασμάτων συχνοτήτων (frequency band gaps).

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η εφαρμογή τέτοιων δομών σε τρία είδη εδαφικού προφίλ (χαλαρού, σκληρού και εδαφικού προφίλ με βάση γεωτεχνική έρευνα) για διάφορες περιπτώσεις σεισμικών διεγέρσεων. Αξιολογείται η δυνατότητα απόσβεσης των σεισμικών κυμάτων πριν αυτά φθάσουν σε κρίσιμα σημεία και συγκεκριμένα συγκρίνονται σημεία που βρίσκονται πίσω από τις δομές αυτές και τα αντιδιαμετρικά τους, τα οποία βρίσκονται σε χώρο χωρίς την ύπαρξη αυτών των δομών.

## 2. Θεωρητικό υπόβαθρο

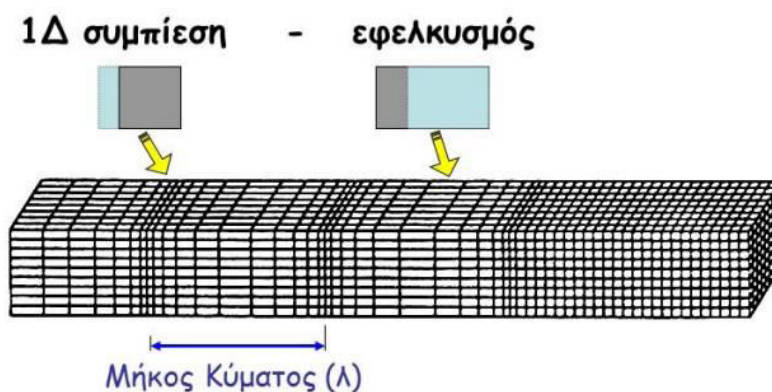
### 2.1 Σεισμικά κύματα

Η σεισμική ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη γένεση ενός σεισμού είναι κινηματικού χαρακτήρα και διαδίδεται με τη μορφή κυμάτων. Σε γενικές γραμμές τα κύματα μπορούν να θεωρηθούν ως ελαστικά κύματα. Με τη θεωρία των ελαστικών κυμάτων μπορεί να γίνει εις βάθος μελέτη όλων των θεμάτων που αφορούν τόσο τη γένεση ενός σεισμού, όσο και τη διάδοση της σεισμικής ενέργειας. Η υπόθεση διάδοσης της κινηματικής ενέργειας με τη μορφή ελαστικών κυμάτων είναι μια απλουστευτική προσέγγιση, καθώς το έδαφος στην πραγματικότητα είναι ένα σύνθετο υλικό, με ελαστο-πλαστική μη-γραμμική συμπεριφορά, ανομοιογενές και ανισότροπο, ενώ πρόσθετοι παράγοντες όπως ο βαθμός κορεσμού του, είναι καθοριστικοί στη συμπεριφορά του στη δυναμική δόνηση.

Τα κύματα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

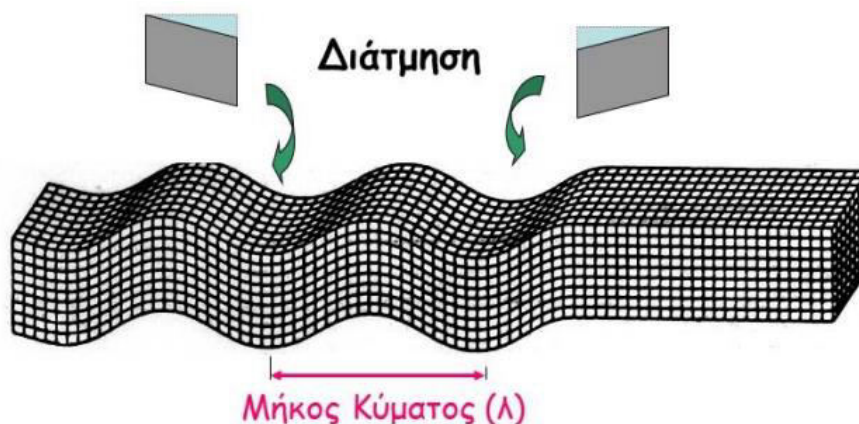
- Στα κύματα που διαδίδονται στο εσωτερικό της γης (body waves) και τα οποία διακρίνονται στα (i) πρωτεύοντα κύματα ή κύματα πίεσης P και στα (ii) δευτερεύοντα κύματα ή διατμητικά κύματα S. Τα πρωτεύοντα κύματα έχουν την υψηλότερη ταχύτητα και συνεπώς είναι τα πρώτα που καταγράφονται.
- Στα κύματα που διαδίδονται στην επιφάνεια της γης (surface waves) και τα οποία διακρίνονται στα (i) κύματα Rayleigh και στα (ii) κύματα Love, τα οποία δημιουργούνται από το συνδυασμό των P και S κυμάτων.

Στα κύματα P η κίνηση των εδαφικών σημείων είναι παράλληλη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και η παραμόρφωση του εδαφικού στοιχείου συνίσταται από εναλλαγές 1-Δ συμπίεσης και εφελκυσμού.



Σχήμα 2.1: Διάδοση κύματος πίεσης P

Στα κύματα S η κίνηση των εδαφικών σημείων είναι εγκάρσια προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και η παραμόρφωση του εδαφικού στοιχείου συνίσταται από κύκλους (φόρτιση-αποφόρτιση-επαναφόρτιση) απλής διάτμησης.



Εικόνα 2.2: Διάδοση διατμητικού κύματος S

Τα κύματα S αναλύονται συνήθως σε κύματα SH (ταλάντωση σε οριζόντιο επίπεδο) και σε κύματα SV (ταλάντωση σε κατακόρυφο επίπεδο).

Η ταχύτητα των κυμάτων P και S δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1.1)$$

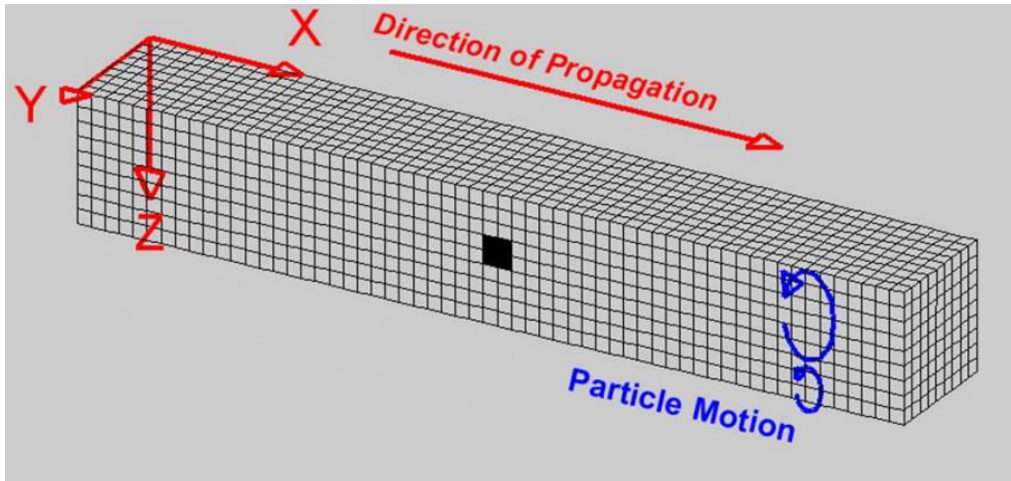
$$V_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (1.2)$$

Όπου:

- E το μέτρο ελαστικότητας Young του εδαφικού υλικού
- ρ η πυκνότητα μάζας του εδαφικού υλικού
- ν ο λόγος Poisson του εδαφικού υλικού

Τα επιφανειακά κύματα δημιουργούνται ως συνδυασμός των P και S κυμάτων, όταν υπάρχουν σύνορα όπως για παράδειγμα η ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους ή διεπιφάνειες γεωλογικών σχηματισμών οι οποίες επιβάλλουν κινηματικούς και δυναμικούς περιορισμούς, ασυμβίβαστους με τα κύματα χώρου P και S.

Συγκεκριμένα, τα κύματα Rayleigh δημιουργούνται από το συνδυασμό κυμάτων P και κυμάτων SV, στην ελεύθερη επιφάνεια του εδαφικού σχηματισμού. Η κίνηση του εδαφικού στοιχείου αποτελεί αριστερόστροφη έλλειψη σε κατακόρυφο επίπεδο, παράλληλο προς τη διεύθυνση του κύματος. Η παραμόρφωσή του συνίσταται από συνδυασμένη (εκτός φάσης) 1-Δ συμπίεση και απλή διάτμηση. Το εύρος της ταλάντωσης μειώνεται με το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους.

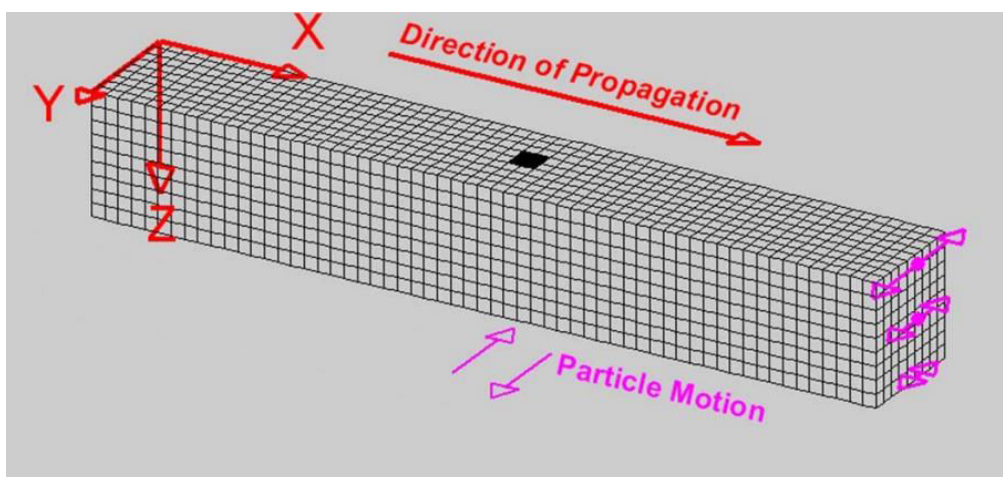


Εικόνα 2.3: Διάδοση κύματος Rayleigh

Η ταχύτητα των κυμάτων Rayleigh για συνήθεις τιμές του  $\nu$  σε εδαφικά υλικά ( $0.25 < \nu < 0.50$ ) εκτιμάται από τη σχέση:

$$V_R = 0.94V_S \quad (1.3)$$

Τα κύματα Love εμφανίζονται σε δίστρωτο εδαφικό σχηματισμό. Δημιουργούνται από κύματα SH που είναι «παγιδευμένα» στα ανώτερα στρώματα του εδαφικού σχηματισμού, λόγω πολλαπλών ανακλάσεων. Βασική συνθήκη ύπαρξης κυμάτων Love είναι η διατμητική δυσκαμψία των επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών να είναι μικρότερη από τη διατμητική δυσκαμψία του υποκείμενου ημιχώρου. Κατά συνέπεια τα κύματα Love δεν εμφανίζονται σε ομοιογενή ελαστικό ημίχωρο. Η κίνηση του εδαφικού σημείου είναι οριζόντια, εγκάρσια προς την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η παραμόρφωση του εδαφικού στοιχείου συνίσταται από εναλλασσόμενη απλή διάτμηση σε οριζόντιο επίπεδο. Το εύρος της ταλάντωσης μειώνεται με το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα 2.4: Διάδοση κύματος Love

Η ταχύτητα των κυμάτων Love εκτιμάται από την παρακάτω εξίσωση διασποράς:

$$\tan \left| \omega H \sqrt{\left(\frac{V_L}{V_{s1}}\right)^2 - 1} \right| = \frac{G_2 \sqrt{1 - \left(\frac{V_L}{V_{s2}}\right)^2}}{G_1 \sqrt{\left(\frac{V_L}{V_{s1}}\right)^2 - 1}} \quad (1.4)$$

Όπου:

- $\omega$  η κυκλική συχνότητα
- $H$  το πάχος του υπερκείμενου – ανώτερου στρώματος
- $V_L$  η ταχύτητα του κύματος Love
- $V_{s1}$  η ταχύτητα του κύματος S στο ανώτερο στρώμα
- $V_{s2}$  η ταχύτητα του κύματος S στο κατώτερο στρώμα
- $G_2$  το μέτρο διάτμησης του ανώτερου στρώματος
- $G_1$  το μέτρο διάτμησης του κατώτερου στρώματος

Στα κύματα Love ενδιαφέρουσα είναι η περίπτωση όπου υπάρχει ένα στρώμα χαλαρής αλλουβιακής απόθεσης που επικάθεται σε ένα βραχώδες υπόστρωμα, το οποίο έχει πολλαπλάσια ταχύτητα  $V_s$  από το επιφανειακό στρώμα και συνεπώς θεωρείται ως πρακτικά άκαμπτο όριο. Σε αυτήν την περίπτωση η ταχύτητα των κυμάτων Love δίνεται από τη σχέση:

$$V_L = \frac{\omega H}{\sqrt{\left(\frac{\omega H}{V_s}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2}} \quad (1.5)$$

Σημειώνεται εδώ πως τα κύματα Love δεν υφίστανται για συχνότητες μικρότερες από την ιδιοπερίοδο (διατμητικής) ταλάντωσης του μαλακού στρώματος.

Γενικά, τα σεισμικά κύματα έχουν συχνότητες που κυμαίνονται στο εύρος 0.1 – 50 Hz. Τα επιφανειακά κύματα ταξιδεύουν πιο αργά από τα κύματα P και S και συνεπώς μπορεί να είναι πολύ πιο καταστροφικά για τις κατασκευές στην επιφάνεια της εδαφικής στρώσης, λόγω του φαινομένου του συντονισμού (θα αναλυθεί στην επόμενη παράγραφο).

## 2.2 Περιγραφή της εδαφικής κίνησης

Το πλάτος της εδαφικής κίνησης μεταβάλλεται με το χρόνο, όπως φαίνεται σε μια χρονοϊστορία επιτάχυνσης, ταχύτητας ή μετακίνησης. Ωστόσο, το μέγιστο πλάτος της εδαφικής κίνησης δεν αρκεί για να περιγράψει τον τρόπο με τον οποίο μια κατασκευή ή μια εδαφική απόθεση, θα συμπεριφερθούν στον συγκεκριμένο σεισμό. Ένας σεισμός έχει ως αποτέλεσμα μια σύνθετη κίνηση η οποία καλύπτει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων και σε καθεμιά από τις συχνότητες αντιστοιχεί ένα πλάτος κίνησης. Το συχνοτικό περιεχόμενο της σεισμικής κίνησης περιγράφει ακριβώς τον τρόπο με τον οποίο διαφοροποιείται το πλάτος της κίνησης στις διαφορετικές συχνότητες.

Οι κυριότερες τεχνικές με τις οποίες εκτιμάται το συχνοτικό περιεχόμενο μιας σεισμικής κίνησης είναι τα:

- Φάσματα Fourier, τα οποία δημιουργούνται με τη γραφική παράσταση του πλάτους Fourier με τη συχνότητα. Σε ένα φάσμα Fourier το άρθροισμα των πλατών Fourier, δηλαδή η επιφάνεια του φάσματος, συνιστά ένα μέτρο της συνολικής σεισμικής ενέργειας που περιέχεται σε μια εδαφική κίνηση συγκεκριμένης διάρκειας. Οι αιχμές στο φάσμα Fourier προσδιορίζουν τις περιόδους ή συχνότητες στις οποίες η σεισμική ενέργεια μεγιστοποιείται.
- Φάσματα απόκρισης, τα οποία δημιουργούνται με τη γραφική παράσταση της μέγιστης απόκρισης (π.χ. επιτάχυνσης) ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή σε μια συγκεκριμένη διέγερση στη βάση, ως συνάρτηση της ιδιοσυχνότητας ή της ιδιοπεριόδου και του συντελεστή απόσβεσης του δεδομένου ταλαντωτή.

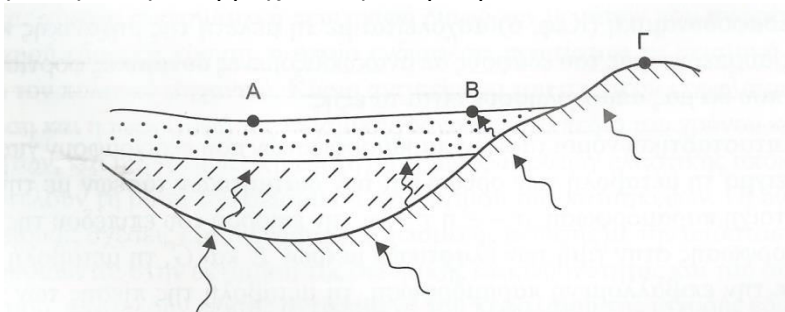
Η δεσπόζουσα περίοδος είναι μια παράμετρος που περιγράφει με συνοπτικό τρόπο το συχνοτικό περιεχόμενο της εδαφικής κίνησης, η οποία ορίζεται ως η περίοδος της ταλάντωσης που αναφέρεται στη μέγιστη τιμή του φάσματος πλάτους Fourier.

## 2.3 Ρόλος του εδάφους

### 2.3.1 Επιρροή των εδαφικών χαρακτηριστικών στη σεισμική απόκριση

Από όλα τα προηγούμενα παραδείγματα σεισμικών γεγονότων, αλλά και από όσα αναπτύχθηκαν για τα ελαστικά κύματα στην προηγούμενη παράγραφο έγινε σαφές πως το έδαφος διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στον τρόπο συμπεριφοράς των κατασκευών που βρίσκονται θεμελιωμένες σε αυτό – κάποιες φορές ο ρόλος του είναι θετικός, ενώ άλλοτε ο ρόλος του είναι έντονα αρνητικός.

Σε γενικές γραμμές η απόκριση στον ίδιο σεισμικό κραδασμό, αναμένεται να είναι διαφορετική για διαφορετικές εδαφικές συνθήκες. Για παράδειγμα, στο παρακάτω σχήμα η εδαφική ταλάντωση αναμένεται να είναι διαφορετική στα σημεία Α, Β και Γ. Το σημείο Α βρίσκεται σε μία εδαφική ζώνη, όπου το βραχώδες υπόβαθρο βρίσκεται σε αρκετά μεγάλο βάθος, το σημείο Β βρίσκεται σε μια μεταβατική – ενδιάμεση ζώνη, ενώ το σημείο Γ βρίσκεται σε μια ζώνη στην οποία υπάρχει επιφανειακή εκδήλωση του βραχώδους υποβάθρου.

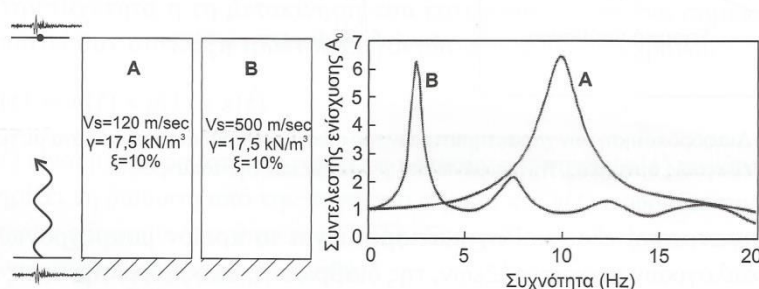


**Σχήμα 2.5:** Απεικόνιση διάδοσης σεισμικών κυμάτων σε μια περιοχή που αποτελείται από εδαφική ζώνη και παρακείμενη επιφανειακή εκδήλωση του βραχώδους υποβάθρου.

Γενικά, η τοπογραφία της επιφάνειας, η γεωμετρία των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών και του υποβάθρου, οι γεωλογικές ασυνέχειες, η αντίθεση των ταχυτήτων με τις οποίες διαδίδονται τα σεισμικά κύματα στα διάφορα εδαφικά στρώματα, η μη-γραμμική συμπεριφορά των εδαφών, επηρεάζουν την τελική ταλάντωση σε κάθε σημείο του χώρου.

Μία από τις θεαματικότερες περιπτώσεις, όπου οι τοπικές εδαφικές συνθήκες έπαιξαν καθοριστικό ρόλο, ήταν ο σεισμός στο Μεξικό το 1985. Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, οι καταρρεύσεις και εν γένει οι σοβαρές βλάβες στην Πόλη του Μεξικό, εντοπίστηκαν κυρίως σε όσες κατασκευές βρίσκονταν στη λιμναία ζώνη με τις μαλακές αργιλικές αποθέσεις και τον υψηλό δείκτη υγρασίας, ενώ αντίθετα σε όσες περιοχές ήταν στη βραχώδη ζώνη της πόλης, οι βλάβες ήταν αρκετά περιορισμένες ή ανύπαρκτες. Συνεπώς, παρατηρήθηκε έντονη μεγέθυνση του σεισμικού κραδασμού.

Γίνεται αντιληπτό λοιπόν πως οι επιφανειακοί εδαφικοί σχηματισμοί, αλλά και η επιφανειακή τοπογραφία μπορούν να τροποποιούν τα χαρακτηριστικά – πλάτος, συχνοτικό περιεχόμενο, διάρκεια – του εισερχόμενου σε αυτά σεισμικού κύματος, προκαλώντας την ενίσχυση ή ακομά και τη μείωση του πλάτους της εδαφικής κίνησης, του συχνοτικού περιεχομένου της και της διάρκειάς της. Ο συντελεστής εδαφικής ενίσχυσης είναι ένα μέγεθος που εκφράζει ποιοτικά και ποσοτικά τις διαφοροποιήσεις αυτές.



**Εικόνα 2.6:** Διαφοροποίηση του πλάτους και του συχνοτικού περιεχομένου του σεισμικού κραδασμού ανάλογα με τη δυστημσία του εδάφους

Ενα παράδειγμα παρουσιάζεται στην παραπάνω εικόνα, όπου η διαφορετική δυστημσία της επιφανειακής στρώσης έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική διαφοροποίηση του πλάτους και του συχνοτικού περιεχομένου στην επιφάνεια.

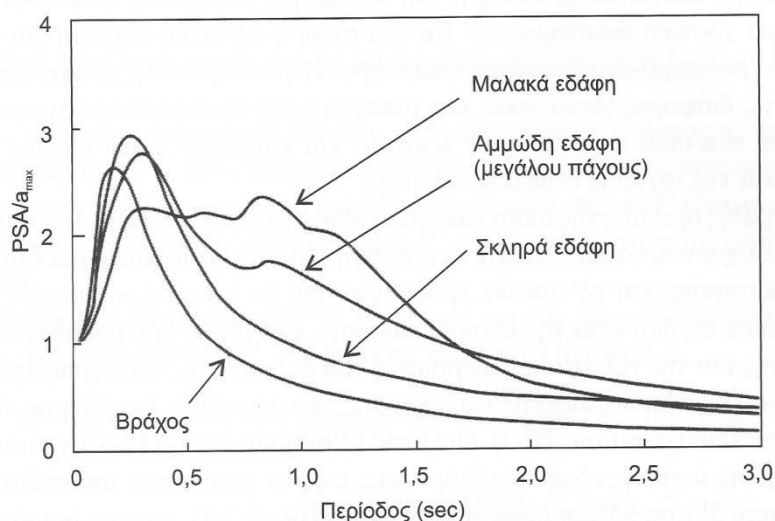
Οι παράγοντες που επηρεάζουν και διαμορφώνουν τα χαρακτηριστικά του σεισμικού κραδασμού στην επιφάνεια συνεπώς είναι τόσο οι ιδιότητες του εδάφους, όσο και τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης.

Μια συνοπτική εξήγηση της εμφάνισης της εδαφικής ενίσχυσης, αποτελεί το γεγονός ότι τα σεισμικά κύματα όταν εισέρχονται σε μαλακές εδαφικές στρώσεις υπόκεινται σε πολλαπλές ανακλάσεις και διαθλάσεις και εν τέλει «παγιδεύονται» στα επιφανειακά αυτά στρώματα μικρότερης δυστημσίας. Ως αποτέλεσμα λοιπόν του παραπάνω φαινομένου αυξάνεται το πλάτος της εδαφικής ταλάντωσης.

Όταν λοιπόν υπάρχουν έντονες εναλλαγές στους επιφανειακούς σχηματισμούς, παρατηρείται η αύξηση του πλάτους του ανερχόμενου σεισμικού κύματος λόγω του συντονισμού, επειδή όπως αναφέρθηκε κάποια από τα σεισμικά κύματα παγιδεύονται στα ανώτερα στρώματα και ανακλώνεται.

Το φαινόμενο του συντονισμού αφορά την τάση των κατασκευών ή των εδαφικών σχηματισμών, να αποκρίνονται με μεγαλύτερο πλάτος (επιτάχυνσης, μετακίνησης), όταν η συχνότητα της σεισμικής βάσης της κατασκευής ή στο βραχώδες υπόβαθρο αντίστοιχα, ταυτιστεί με την ιδιοσυχνότητα αυτής. Στην περίπτωση που συμβούν ταυτόχρονα και τα δύο παραπάνω φαινόμενα συντονισμού, τότε κάνουμε λόγο για διπλό συντονισμό. Η θεμελιώδης συχνότητα συντονισμού μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 0.2Hz (για αποθέσεις πολύ μεγάλου πάχους ή για υπερβολικά μαλακά εδαφικά υλικά) έως και 10Hz ή και παραπάνω (για αποθέσεις πολύ μικρού πάχους ή αποσαθρωμένους βράχους).

Μάλιστα, οι τοπικές εδαφικές συνθήκες επηρεάζουν τη μορφή και τις τιμές των φασμάτων απόκρισης. Σε σκληρά εδάφη όπως είναι οι περισσότερες μάργες, τα πυκνά αμμοχάλικα και οι στιφρές άργιλοι, η εδαφική κίνηση είναι περισσότερο πλούσια σε υψηλές συχνότητες. Αντίθετα, χαλαρά ή μαλακά εδάφη μετατοπίζουν το φάσμα σε χαμηλότερες συχνότητες και γενικά παρουσιάζουν μεγαλύτερο πλούτο συχνοτήτων. Αυτό μπορεί εύκολα να επιβεβαιωθεί υπολογίζοντας τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο της εδαφικής στρώσης η οποία είναι ανάλογη του πάχους της εδαφικής στρώσης και αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας διάδοσης του κύματος S. Όπως είναι γνωστό, στα σκληρά εδάφη η ταχύτητα διάδοσης είναι αρκετά μεγαλύτερη από ότι στα χαλαρά εδάφη και κατά συνέπεια η ιδιοπερίοδος των σκληρών εδαφών είναι μικρότερη από αυτήν στα χαλαρά εδάφη. Παρουσιάζονται τρία φάσματα για γραφική σύγκριση αυτής της θεώρησης.

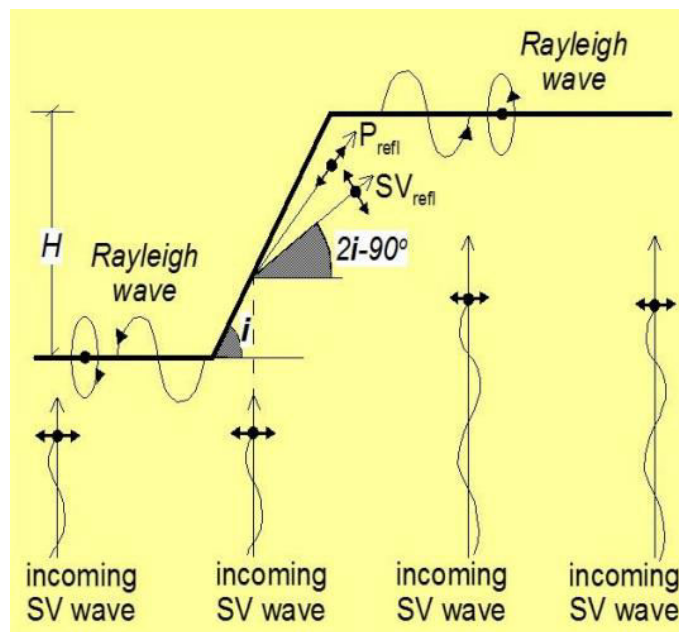


**Εικόνα 2.7:** Μέσα αντιπροσωπευτικά φάσματα ψευδοεπιτάχυνσης για τέσσερις τυπικές κατηγορίες εδαφών (Seed et al. 1976)

Η επίδραση της τοπογραφίας διαδραματίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην εδαφική απόκριση. Μετά από καταστροφικούς σεισμούς έχει παρατηρηθεί ότι κτίρια που



βρίσκονται κοντά σε κορυφές λόφων ή στο φρύδι πρανών συχνά υφίστανται πιο έντονες βλάβες, σε σχέση με αυτά που βρίσκονται στη βάση τους. Σε κάθε σημείο της ελεύθερης επιφάνειας συμβάλλουν τέσσερα κύματα: ένα κατακόρυφα μεταδιδόμενο SV, ένα ανακλώμενο SV, ένα ανακλώμενο P και τέλος ένα επιφανειακό κύμα Rayleigh.



Εικόνα 2.8: Απεικόνιση της συμβολής των σεισμικών κυμάτων σε πρανή

Η επίδραση της τοπογραφίας στη σεισμική εδαφική κίνηση σχετίζεται κυρίως με τρία φυσικά φαινόμενα:

- Την ευαισθησία της επιφανειακής εδαφικής στρώσεις στη γωνία πρόσπτωσης των σεισμικών κυμάτων, η οποία μεγιστοποιείται για κύματα SV περί την κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης και άρα με την κλίση του πρανούς.
- Την εστίαση ή την από-εστίαση των σεισμικών κυμάτων κατά μήκος του τοπογραφικού αναγλύφου
- Την περίθλαση των κυμάτων χώρου και επιφανείας που διαδίδονται προς τα κάτω και που συμβάλλουν με το προσπίπτον (ανερχόμενο) κυματικό πεδίο.

Αρκετές θεωρητικές μελέτες αποπειράθηκαν να παραμετροποιήσουν το πρόβλημα της τοπογραφικής ενίσχυσης: Συνοπτικά αναφέρονται:

- Η ενίσχυση των προσπίπτοντων κυμάτων SV είναι υψηλότερη επειδή η ανάκλαση και η περίθλαση των κυμάτων SH δεν παράγει άλλα είδη κυμάτων χώρου, παρά μόνον επιφανειακά κύματα Love, ενώ τα SV γενούν κύματα P αλλά και επιφανειακά κύματα Rayleigh
- Η μεγαλύτερη απόλυτη επιτάχυνση στην κορυφή παρατηρείται για την περίπτωση κατακόρυφα διαδιδόμενων κυμάτων και μάλιστα για κατακόρυφα διαδιδόμενα κύματα SV υπό κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης

- Η εδαφική ενίσχυση γενικά αυξάνεται όταν η κλίση του πρανούς γίνεται πιο απότομη
- Η εδαφική ενίσχυση γενικά αυξάνεται για μεγάλες συχνότητες και άρα μικρά μήκη κύματος

### 2.3.2 Ελαστική συμπεριφορά εδαφών

Στην περίπτωση θεώρησης ομοιόμορφου ελαστικού εδάφους εδραζόμενο σε άκαμπτο – βραχώδες υπόβαθρο, τότε η ιδιοσυχνότητα της εδαφικής απόθεσης εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$T_s = \frac{4H}{V_s} \frac{1}{2n-1} \quad (1.6)$$

Όπου:

- Η το βάθος της εδαφικής στρώσης
- $V_s$  η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων
- $n$  ο αριθμός της ιδιομορφής

Για τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο είναι  $n=1$  και από την παραπάνω σχέση προκύπτει:

$$T_s = \frac{4H}{V_s} \quad (1.7)$$

Συντονισμός μεταξύ του διεγείροντος κραδασμού στο βραχώδες υπόβαθρο και του εδαφικού σχηματισμού εμφανίζεται για τις παρακάτω τιμές:

$$T_s/T_{exc} = 2n - 1, n = 1, 2, \dots \quad (1.8)$$

Όπου  $T_s$  η ιδιοπερίοδος του εδάφους και  $T_{exc}$  η περίοδος της διέγερσης.

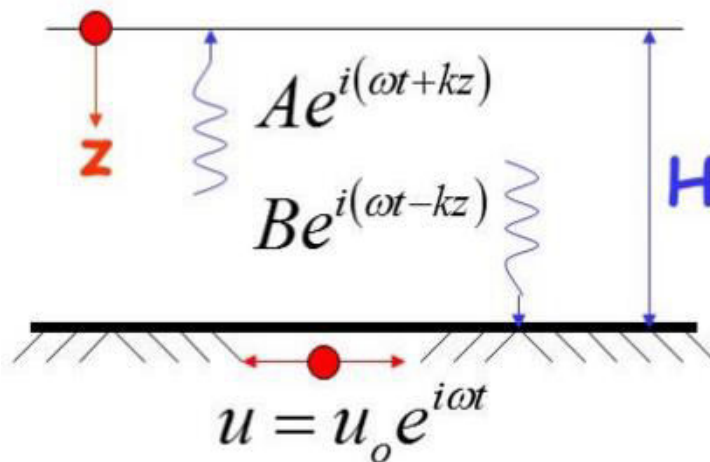
Αν συμβολίσουμε με  $F_1$  το συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης, τότε μπορούμε να γράψουμε:

$$F_1(\omega) = \frac{u_o(z=0)}{u_o(z=H)} \quad (1.9)$$

Όπου  $u_o(z = 0)$  η εξίσωση κίνησης ενός σημείου στην επιφάνεια του εδαφικού στρώματος και  $u_o(z = H)$  η εξίσωση κίνησης ενός σημείου στην επιφάνεια του άκαμπτου – βραχώδους υποβάθρου, σε βάθος  $H$ .

Αν η βάση εκτελεί κίνηση με  $u = u_o e^{i\omega t}$  και ο κυματαριθμός είναι  $k = \omega/V$  τότε στο σημείο της επιφάνειας συμβάλλουν δύο κύματα και η εξίσωση κίνησης αυτού του σημείου είναι:

$$u = A e^{i(\omega t + kz)} + B e^{i(\omega t - kz)} \quad (1.10)$$



**Εικόνα 2.9:** Ταλάντωση σημείων επιφάνειας κατά τη διάδοση κύματος σε ομοιόμορφο ελαστικό έδαφος υπό βραχώδες υπόβαθρο

Εφαρμόζοντας τις συνοριακές συνθήκες του προβλήματος:

1<sup>η</sup> Συνοριακή συνθήκη:  $\tau_{z=0} = 0$

$$G \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \rightarrow Gik[Ae^{i(\omega t + kz)} - Be^{i(\omega t - kz)}] = 0$$

$$\text{Για } z=0: Gik(A - B)e^{i\omega t} = 0 \rightarrow A = B$$

Συνεπώς:

$$u = 2Ae^{i\omega t} \frac{e^{ikz} + e^{-ikz}}{2} = 2Ae^{i\omega t} \cos kz$$

2<sup>η</sup> συνοριακή συνθήκη:  $u(z = H) = u_0 e^{i\omega t}$

$$\text{Και άρα: } u_0 = 2A \cos kH$$

$$\text{Συνεπώς: } A = \frac{u_0}{2 \cos kH}$$

Με βάση τα προηγούμενα:

$$u(z) = 2Ae^{i\omega t} \cos kz = 2 \frac{u_0(H)}{2 \cos kH} \cos kz = u_0(H) \frac{\cos kz}{\cos kH} e^{i\omega t}$$

Άρα το σημείο της επιφάνειας ταλαντώνεται με ένα κύμα εύρους:

$$u_0(z) = u_0(H) \frac{\cos kz}{\cos kH} \tag{1.11}$$

Για  $z=0$  (στο σημείο στην επιφάνεια του εδάφους) προκύπτει:

$$u_o(0) = u_o(H) \frac{1}{\cos kH} \quad (1.12)$$

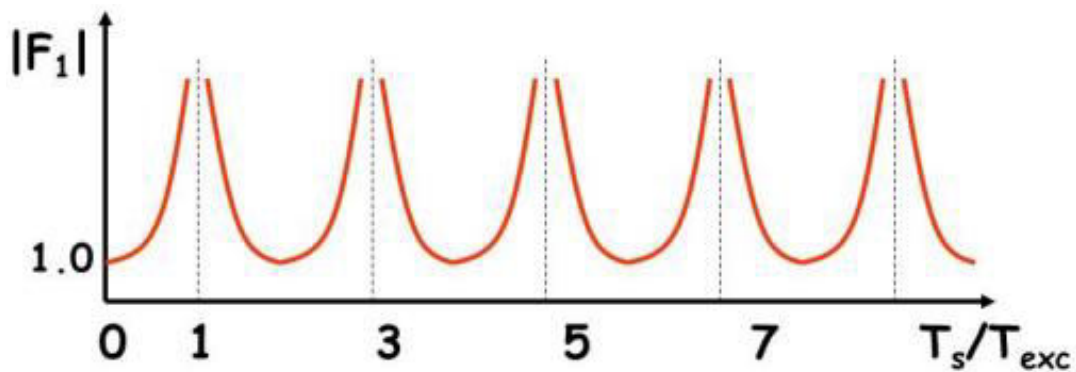
Και κατά συνέπεια ο συντελεστής εδαφικής ενίσχυσης μπορεί να γραφτεί:

$$F_1(\omega) = \frac{1}{\cos kH} \quad (1.13)$$

Αποδεικνύεται πως:

$$F_1(\omega) = \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi T_S}{2T_{exc}}\right)} \quad (1.14)$$

Για τις διάφορες τιμές του λόγου  $T_S/T_{exc}$  υπολογίζεται η απόλυτη τιμή της εδαφικής ενίσχυσης  $|F_1(\omega)|$ , δίνοντας την παρακάτω γραφική παράσταση.



**Εικόνα 2.10:** Σημεία συντονισμού εδαφικής ταλάντωσης για ομοιόμορφο ελαστικό έδαφος υπό βαρχώδες υπόβαθρο

Στα σημεία  $\frac{T_S}{T_{exc}} = 1, 2, 3, \dots$  η τιμή της  $|F_1|$  λαμβάνει άπειρη τιμή. Τα σημεία αυτά είναι τα σημεία συντονισμού.

### 2.3.3 Ιξωδο-ελαστική συμπεριφορά εδαφών

Η δυναμική φόρτιση είναι ανακυκλική και επαναλαμβανόμενη. Ο ανακυκλικός χαρακτήρας των σεισμικών διεγέρσεων, οδηγεί σε απομείωση της διατμητικής δυστησίας ( $G$ ) και σε απώλεια ενέργειας ( $\xi$ ). Η απομείωση αυτών των δύο παραμέτρων είναι συνάρτηση της διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$ . Ο επαναληπτικός χαρακτήρας της σεισμικής διέγερσης, οδηγεί σε συσσώρευση των ογκομετρικών παραμορφώσεων και καθιζήσεων για ξηρό έδαφος και σε ανάπτυξη υπερπιέσεων στους πόρους για κορεσμένο έδαφος.

Σε αυτήν την περίπτωση εισάγονται τα παρακάτω:

$$G' = G(1 + 2i\xi) \quad (1.15)$$

$$V' = V(1 + i\xi) \quad (1.16)$$

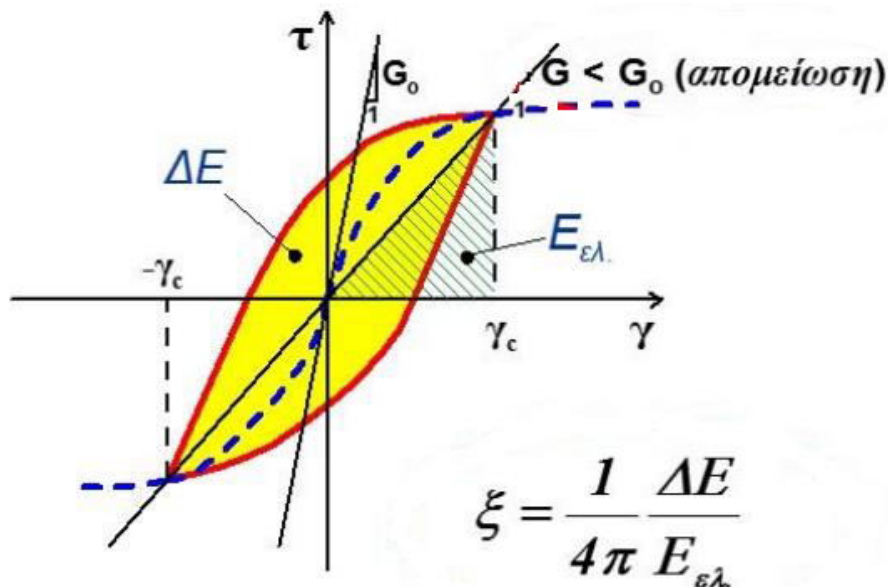
$$T' = T(1 - i\xi) \quad (1.17)$$

$$k' = k(1 - i\xi) \quad (1.18)$$

Όπου:

- $G'$  το μέτρο δυσστησίας στο ιξωδο-ελαστικό έδαφος
- $V'$  η ταχύτητα στο ιξωδο-ελαστικό έδαφος
- $T'$  η περίοδος στο ιξωδο-ελαστικό έδαφος
- $k'$  ο κυματικός αριθμός στο ιξωδο-ελαστικό έδαφος

Ο ανακυκλικός και επαναλαμβανόμενος χαρακτήρας που οδηγεί σε μείωση του μέτρου δυσστησίας ( $G$ ) και της απόσβεσης ( $\xi$ ) απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 2.11: Ανακυκλική φόρτιση σεισμικού γεγονότος

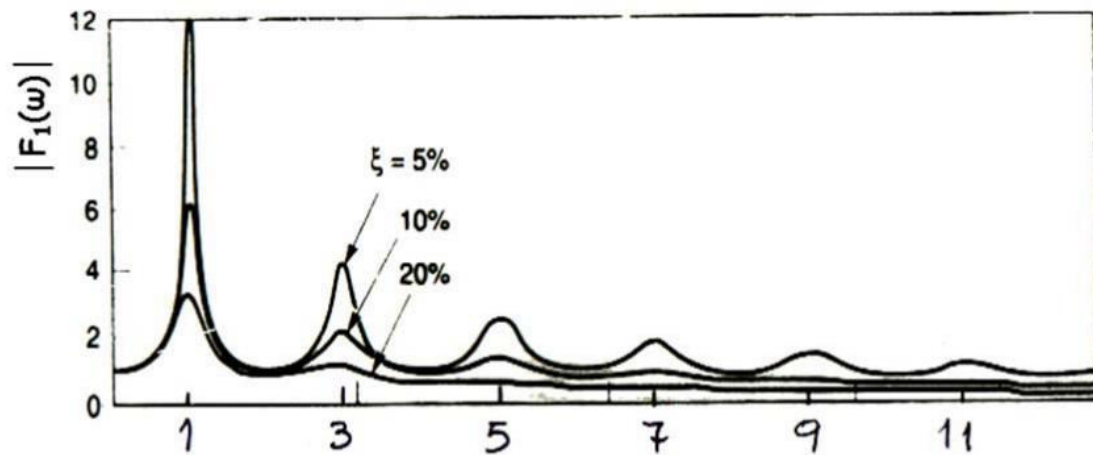
Σύμφωνα με την αρχή της αντιστοιχίας (correspondence principle), οι λύσεις για το ελαστικό έδαφος μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για ιξωδο-ελαστικό έδαφος, εάν οι πραγματικές μεταβλητές αντικατασταθούν με τις αντίστοιχες μιγαδικές. Συνεπώς ο συντελεστής εδαφικής ενίσχυσης εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$F_2(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 kH + (kH\xi)^2}} \quad (1.19)$$

Προκύπτει ότι το πλάτος του συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης είναι:

$$\max|F_2(\omega)| = \frac{2}{(2n-1)\pi \xi} \quad (1.20)$$

Η γραφική παράσταση του πλάτους του συντελεστή εδαφικής ενίσχυσης για ιξωδοελαστικό έδαφος παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 2.12: Σημεία συντονισμού στην περίπτωση ομοιόμορφου μη ελαστικού εδάφους υπό το βραχώδες υπόβαθρο για διάφορες τιμές του  $\xi$

### 2.3.4 Ελαστο-πλαστική συμπεριφορά εδαφών

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, στην περίπτωση έντονων σεισμικών δονήσεων είναι πιθανό μαζί με την απομείωση του μέτρου δυστημσίας ( $G$ ) και την απώλεια ενέργειας ( $\xi$ ), να εμφανιστεί και ογκομετρική παραμόρφωση και ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων. Αυτό σημαίνει ότι υπό σταθερή διατμητική τάση, υπάρχει ανάπτυξη έντονων παραμορφώσεων. Στην περίπτωση που αυτό συμβαίνει υπό αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης τότε εκδηλώνεται το φαινόμενο της ρεστοποίησης. Συγκεκριμένα, κατά την ανακυκλιζόμενη σεισμική φόρτιση, μια χαλαρή κορεσμένη άμμος έχει την τάση να συμπυκνωθεί όμως λόγω του αστράγγιστου χαρακτήρα της φόρτισης αυτό δεν είναι εύκολο. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μεταβίβαση των σεισμικών ορθών τάσεων από το στερεό σκελετό στο νερό των πόρων και συνεπώς η αύξηση της πίεσης των πόρων. Άμεση συνέπεια της αύξησης της πίεσης των πόρων είναι η μείωση της ενεργού τάσης με τελικό αποτέλεσμα τη μείωση της διατμητικής αντοχής και την εκδήλωση παραμορφώσεων στο έδαφος. Ο όρος ρεστοποίηση επικράτησε λόγω της συχνής εμφάνισης ρέουσας λεπτόκοκκης άμμου και αμμο-ιλύος, η οποία αναβλύζει δημιουργώντας στην επιφάνεια κρατήρες άμμου.

### 2.4 Απόσβεση Rayleigh

Η κλασική απόσβεση είναι μια κατάλληλη προσομοίωση αν παρόμοιοι μηχανισμοί απόσβεσης κατανέμονται σε όλη την κατασκευή. Μία τέτοια διαδικασία είναι ο υπολογισμός της απόσβεσης Rayleigh σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (1.21)$$

Οι  $\alpha$  και  $\beta$  είναι κατάλληλοι συντελεστές που συνήθως υπολογίζονται με βάση τους συντελεστές απόσβεσης των δύο περισσότερο σημαντικών ιδιομορφών. Εάν θεωρήσουμε ενιαίο συντελεστή απόσβεσης  $\zeta$ , ίδιο για όλες τις ιδιομορφές οι συντελεστές  $\alpha$  και  $\beta$  υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\alpha = \frac{2\zeta\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (1.22)$$

$$\beta = \frac{2\zeta}{\omega_i + \omega_j} \quad (1.23)$$

Όπου  $\omega_i$  και  $\omega_j$  οι κυκλικές συχνότητες των δύο περισσότερο σημαντικών ιδιομορφών

## 2.5 Σεισμοί κοντινού πεδίου

Είναι σημαντικό να αναφερθεί η περίπτωση των σεισμών κοντινού πεδίου, καθώς χρήση παλμών τέτοιων σεισμικών φαινομένων παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία. Οι σεισμοί κοντινού πεδίου είναι αυτοί που συμβαίνουν σε περιοχές πλησίον ρηγμάτων. Αυτές οι περιοχές βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από 20-60km από το ρήγμα και παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς προκαλούν σοβαρές συνέπειες στις παρακείμενες κατασκευές. Γενικά, οι εδαφικές κινήσεις σε περιοχές τέτοιες αναμένεται να διαφέρουν αρκετά από τις εδαφικές κινήσεις που προκαλούνται από την ίδια σεισμική διέγερση σε περιοχές μεγαλύτερης απόστασης. Τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης της περιοχής που βρίσκεται κοντά στο ρήγμα εξαρτώνται από το μηχανισμό διάρρηξης, την κατευθυντικότητα της διάδοσης της διάρρηξης σε σχέση με την περιοχή, αλλά και από πιθανές μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις που μπορεί να προκληθούν λόγω της ολίσθησης του ρήγματος.

Σύμφωνα με έρευνες που αφορούν την απόκριση των κατασκευών σε σεισμούς κοντινού πεδίου, η απεικόνιση των εδαφικών κινήσεων με τη μορφή χρονοϊστορίας είναι προτιμότερη από μια απεικόνιση με τη μορφή φάσματος απόκρισης (Somerville (1998), Alavi and Krawinkler (2000), Sasani and Bertero (2000), Rodriguez-Marek (2000)). Το προαναφερόμενο δικαιολογείται καθώς η μελέτη μιας εδαφικής κίνησης σε ένα χώρο συχνοτήτων, όπως είναι ένα φάσμα απόκρισης, ενέχει μια στοχαστική διαδικασία κατά την οποία υπάρχει σχετικά ομοιόμορφη κατανομή της ενέργειας σε όλη τη διάρκεια της κίνησης. Όμως, στις εδαφικές κινήσεις που επηρεάζονται από φαινόμενα κατευθυντικότητας η ενέργεια συγκεντρώνεται σε μερικούς παλμούς στη χρονοϊστορία των ταχυτήτων, με αποτέλεσμα ένα φάσμα απόκρισης να μην μπορεί να απεικονίσει το φαινόμενο αντιπροσωπευτικά. Οι Krawinkler and Alavi (1998) καθώς και οι Sasani and Bertero (2000), υποστήριξαν ότι η απόκριση των κατασκευών σε εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου μπορεί εύκολα να προσεγγισθεί με απλοποιημένες μορφές των παλμών που εντοπίζονται στη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας. Οι παράμετροι που

καθορίζουν τους παλμούς είναι ο αριθμός των ημίκυκλων (halfcycles), που ισοδυναμούν με τους παλμούς της εδαφικής κίνησης, η δεσπόζουσα περίοδος, που αντιστοιχεί στην διάρκεια κάθε ημίκυκλου και το αντίστοιχο εύρος. Επομένως, κατά με τους μελετητές, η περιγραφή της εδαφικής κίνησης ανάγεται στην εκτίμηση της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας PGV, της δεσπόζουσας περιόδου του παλμού  $T_p$  και του αριθμού των σημαντικών ημίκυκλων  $N$  της κίνησης του εδάφους.

Μία ιδιαίτερως ενδιαφέρουσα μέθοδος περιγραφής της εδαφικής κίνησης προτάθηκε από τους Manvgoeidis & Parageorgiou (2003), στην οποία ανέπτυξαν ένα απλό μαθηματικό μοντέλο στηριζόμενο στη διαμόρφωση ενός σύνθετου κυματιδίου. Το μοντέλο βασίστηκε σε ένα πλήθος σεισμικών καταγραφών κοντινού πεδίου και κατορθώνει να προσομοιώσει επιτυχώς ένα σύνολο χρονοϊστοριών ταχύτητας και μετατόπισης και σε πολλές περιπτώσεις και επιτάχυνσης, καθώς επίσης τα αντίστοιχα φάσματα μετακινήσεων, ταχυτήτων και επιταχύνσεων. Επιπρόσθετα, ορίζει την περίοδο αυτών των εδαφικών καταγραφών και εκτιμά τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν τη φασματική απόκριση των κατασκευών μέσω του μετασχηματισμού Fourier.

Οι ερευνητές θεώρησαν πως το αναλυτικό μοντέλο που επιλέγεται θα πρέπει να έχει τις εξής ιδιότητες:

- Το σύνθετο κυματίδιο θα έπρεπε να εκφράζεται μέσω μιας κατάλληλα παραμετροποιημένης έκφρασης, με τον ελάχιστο αριθμό παραμέτρων εισόδου, που έχουν φυσικό νόημα, για την όσο το δυνατόν ακριβέστερη αναπαράσταση των παλμών.
- Το σύνθετο κυματίδιο θα έπρεπε να μπορούσε να προσομοιάσει τις περισσότερες, ή ιδανικά όλες, τις παλμικές καταγραφές κοντινού πεδίου που περιλαμβάνονται στον πίνακα των σεισμικών καταγραφών κοντινού πεδίου
- Η μαθηματική έκφραση του κυματιδίου θα έπρεπε να επιτρέπει την ανάπτυξη κλειστών λύσεων για την εκτίμηση φασμάτων απόκρισης και τον προσδιορισμό των φασματικών χαρακτηριστικών σε μορφή Fourier. Τέτοιες κλειστές λύσεις διευκολύνουν την παραμετρική εκτίμηση της απόκρισης των κατασκευών σε παλμούς κοντινού πεδίου.

Τελικά οι ερευνητές επέλεξαν ανάμεσα από διάφορα κυματίδια, το κυματίδιο Gabor. Ωστόσο, λόγω της εκθετικής συνάρτησης (περιβάλλουσα Gauss) που περιέχει η μαθηματική του έκφραση, δεν παρέχει κλειστές λύσεις για την απόκριση ενός μονοβάθμιου συστήματος. Για το λόγο αυτό, οι ερευνητές πρότειναν ένα αναλυτικό μοντέλο που θα διατηρούσε τα πλεονεκτήματα του κυματιδίου Gabor (π.χ. αριθμός παραμέτρων, φυσική σημασία αυτών, απλή μαθηματική έκφραση, κλπ.), αλλά ταυτόχρονα θα έδινε κλειστές λύσεις για την απόκριση μονοβάθμιων συστημάτων. Συνεπώς, η περιβάλλουσα Gauss του κυματιδίου Gabor αντικαταστάθηκε από μια συμμετρική συνάρτηση μορφής κώδωνα, που προκύπτει από έναν μετατοπισμένο κύκλο συνημιτόνου, ενώ το ημιτονικό σήμα παραμένει ως έχει. Η μαθηματική σχέση έχει την ακόλουθη μορφή:



$$f(t) = A \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi f_P}{\gamma} t \right) \right] \cos(2\pi f_P t + \nu) \quad (1.24)$$

Οι παρατηρήσεις είναι οι εξής:

1) Η μετατοπισμένη συνάρτηση συνημιτόνου είναι μια περιοδική συνάρτηση. Επομένως δεν παράγει μια περιβάλλουσα με μία μόνο μία κορυφή, όπως η περιβάλλουσα Gauss του κυματιδίου Gabor. Αυτό το πρόβλημα επιλύεται εύκολα περιορίζοντας το χρονικό διάστημα του σήματος ως εξής:

$$-\frac{\gamma}{2f_P} \leq t \leq \frac{\gamma}{2f_{pP}} \quad (1.25.1)$$

2) Η περίοδος της αρμονικής ταλάντωσης θα πρέπει να είναι μικρότερη από την περίοδο της περιβάλλουσας μορφής κώδωνα, προκειμένου η εδαφική κίνηση που προκύπτει να είναι φυσικά αποδεκτή. Συνεπώς:

$$\frac{1}{f_P} < \frac{\gamma}{f_P} \rightarrow \gamma > 1 \quad (1.25.2)$$

3) Για τη διευκόλυνση της προσαρμογής του μοντέλου, εισάγεται μια χρονικής μετατόπισης  $t_0$  στην εξίσωση (1.17) με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό της περιοχής μεγίστου της περιβάλλουσας. Συνεπώς:

$$t = t - t_0 \quad (1.25.3)$$

Ο συνδυασμός των εξισώσεων (1.17.) και (1.18.), δίνει το προτεινόμενο αναλυτικό μοντέλο παλμών ταχύτητας των ταχυτήτων πλαμών κοντινού πεδίου:

$$v(t) = \begin{cases} A \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi f_P}{\gamma} (t - t_0) \right) \right] \cos[2\pi f_P (t - t_0) + \nu] \\ 0 \quad , \text{για κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (1.26)$$

Όπου η πρώτη σχέση ισχύει για:  $t_0 - \frac{\gamma}{2f_P} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_{pP}}$

Όπου:

- Α η παράμετρος που ελέγχει το εύρος του σήματος
- $f_P$  είναι η δεσπόζουσα συχνότητα του σήματος
- $\nu$  η διαφορά φάσης της ημιτονικής συνιστώσας ( $\nu=0$  και  $\nu=\pm\pi/2$ , για συμμετρικό και αντισυμμετρικό σήμα αντίστοιχα),
- $\gamma$  είναι μια παράμετρος που καθορίζει τον χαρακτήρα της ταλάντωσης του σήματος
- $t_0$  καθορίζει την περιοχή της κορυφής της περιβάλλουσας.

Με βάση τα παραπάνω κατέληξαν στην αναλυτική σχέση που εκφράζει την επιτάχυνση:

$$a(t) = \begin{cases} -\frac{A\pi f_P}{\gamma} \left[ \begin{array}{l} \sin\left(\frac{2\pi f_P}{\gamma}(t-t_0)\right) \cos[2\pi f_P(t-t_0) + \nu] \\ +\gamma \sin[2\pi f_P(t-t_0) + \nu] \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi f_P}{\gamma}(t-t_0)\right)\right] \end{array} \right] \\ 0, \quad \text{για κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (1.27)$$

Η πρώτη σχέση ισχύει για:  $t_0 - \frac{\gamma}{2f_P} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_P}, \gamma > 1$

Στη συνέχεια οι ερευνητές προχώρησαν στην προσαρμογή του μοντέλου με βάση τα δεδομένα των καταγραφών σεισμών κοντινού πεδίου. Οι παράμετροι  $A$ ,  $f_P$ ,  $\nu$  και  $\gamma$  προσδιορίζονται μέσω μιας διαδικασίας βήμα-προς-βήμα και όχι με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Η τιμή της  $f_P$  ή της  $T_P$  καθορίζεται έτσι ώστε το φάσμα απόκρισης της ψευδοταχύτητας της συνθετικής και της καταγεγραμμένης εδαφικής κίνησης να παρουσιάζουν τις μέγιστες τιμές τους σχεδόν στην ίδια φυσική περίοδο. Η παράμετρος  $A$  καθορίζεται έτσι ώστε το εύρος του συνθετικού παλμού ταχύτητας και η μέγιστη ψευδοφασματική ταχύτητά του να συμφωνούν με όλες τις αντίστοιχες καταγεγραμμένες ποσότητες. Τέλος, οι παράμετροι  $\nu$  και  $\gamma$  προσαρμόζονται έτσι ώστε να βελτιστοποιήσουν τη σύμπτωση της συνθετικής ταχύτητας και των καταγραφών μετακίνησης. Με βάση αυτή τη διαδικασία προσδιόρισαν τις παραμέτρους αυτές για όλες τις καταγραφές σεισμών κοντινού πεδίου που είχαν στη διάθεσή τους και σχημάτισαν τον πίνακα που παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα.

No.	Location	Station	Component*	A	$\gamma$	$\nu$ (°)	$f_p$ (Hz)	$t_0$ (sec)
1	Parkfield, CA, USA	C02	SN	60.0	1.700	100.0	0.500	4.100
2	San Fernando, CA, USA	PCD	SN	115.0	1.600	180.0	0.680	3.000
3	Gazli, USSR	KAR	Rad	45.0	2.900	70.0	0.238	8.400
4	Bucharest, Romania	BRI	SN	62.0	2.400	200.0	0.470	3.830
5	Tabas, Iran	TAB	SP	104.0	2.200	180.0	0.190	12.400
6	Coyote Lake, CA, USA	GA6	SN	48.0	1.550	315.0	1.000	2.600
7	Imperial Valley, CA, USA	E04	SN	71.0	1.900	305.0	0.225	6.100
		E05	SN	84.0	1.900	300.0	0.255	6.600
		E06	SN	96.0	2.100	265.0	0.260	6.350
		E07	SN	79.0	2.100	25.0	0.275	6.100
		EMO	SN	78.0	2.300	0.0	0.340	4.950
8	Mexicali Valley, Mexico	VCT	SN	80.0	1.500	270.0	0.270	11.550
9	Morgan Hill, CA, USA	HAL	SN	38.0	1.750	130.0	1.150	10.450
10	Palm Springs, CA, USA	NPS	SN	60.0	1.700	170.0	0.800	2.890
		DSP	SN	21.0	2.000	80.0	0.600	2.520
11	Whittier Narrows, CA, USA	DOW	SN	29.0	2.200	220.0	1.200	5.350
		NWK	SN	20.0	2.100	200.0	1.350	4.300
12	Superstition Hills, CA, USA	PTS	SN	112.0	1.800	237.0	0.445	12.295
		ELC	SN	46.0	1.650	210.0	0.430	13.180
13	Loma Prieta, CA, USA	LGP	SN	60.0	3.000	280.0	0.310	7.600
		STG	SN	47.0	1.900	150.0	0.270	6.500
14	Sierra Madre, CA, USA	COG	Rad (filt)	9.2	2.300	260.0	1.100	2.190
15	Erzincan, Turkey	ERZ	SN	67.0	2.500	210.0	0.410	3.700
16	Landers, CA, USA	LUC	SN	100.0	1.210	55.0	0.170	10.500
17	Northridge, CA, USA	JFA	SN	87.0	2.300	100.0	0.330	4.120
		RRS	SN	142.0	1.700	20.0	0.800	2.430
		SCG	SN	93.0	2.500	0.0	0.340	3.650
		SCH	SN	80.0	2.300	0.0	0.330	3.770
		NWS	SN	94.0	1.700	200.0	0.370	4.770
18	Aigion, Greece	AEG	Long	44.5	1.450	75.0	1.400	3.840
		AEG	Tran	61.0	1.200	205.0	1.480	4.340
19	Izmit, Turkey	ARC	SN	41.0	1.380	225.0	0.140	14.700
		SKR	SP	67.0	1.023	5.0	0.105	9.000
		YPT	SP (first pulse)	35.0	1.550	90.0	0.190	9.150
			SP (second pulse)	91.5	1.050	10.0	0.137	12.050
		GBZ	SN	34.5	2.200	220.0	0.210	6.600
		GBZ	SP	28.0	1.800	85.0	0.165	4.900
20	Chi-Chi, Taiwan	TCU052	SN	225.0	1.048	190.0	0.079	35.400
		TCU068	SN	332.0	1.055	190.0	0.082	36.300
		TCU075	SN	105.0	1.200	220.0	0.170	28.500
		TCU076	SN	70.0	1.088	200.0	0.175	27.280
		TCU129	SN	52.0	1.090	200.0	0.130	27.100
21	Kobe, Japan†	KOB	SN (first pulse)	85.0	1.550	270.0	1.000	7.600
			SN (second pulse)	75.0	1.700	270.0	1.100	8.400
			SN (third pulse)	45.0	2.000	70.0	0.500	9.300

\*Component abbreviations are as in Table 1.

†Not characterized by a distinct near-fault ground velocity pulse (i.e., thus, not included in Table 1).

**Πίνακας 2.1:** Παράμετροι  $A$ ,  $\nu$ ,  $\gamma$ ,  $f_p$ ,  $t_0$  για τη μεθοδολογία Μανροειδής & Παράγεοργίου (2003)

## 2.6 Κατηγοριοποίηση εδαφών με βάση τον Ευρωκώδικα 8

Ο χαρακτηρισμός των εδαφών δίνεται στο Ευρωκώδικα 8. Στην τελευταία του έκδοση, το έδαφος κατηγοριοποιείται σε πέντε μεγάλες κατηγορίες και δύο ειδικές υποκατηγορίες που αντιστοιχούν σε χαλαρά ή ρευστοποιήσιμα εδάφη. Το πλεονέκτημα της ταξινόμησης είναι ότι οι τρεις παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των εδαφών (ταχύτητα διατμητικών κυμάτων, τιμές  $N_{SP}$  και αστράγγιστη αντοχή) μπορούν να μετρηθούν σχετικά εύκολα. Η δυσστησία του εδάφους καθορίζεται από τις τιμές της ταχύτητας  $V_S$  μόνο των 30 πρώτων επιφανειακών μέτρων. Η μέση ταχύτητα διατμητικών κυμάτων  $V_{S,30}$  υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}} \quad (1.28)$$

Όπου  $h_i$  και  $V_i$  είναι το πάχος και η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων των  $N$  εδαφικών σχηματισμών των πρώτων 30m.

### Κατάταξη εδαφών

Κατηγορία εδάφους	Περιγραφή στρωματογραφίας	Παράμετροι		
		$v_{s,30}$	$N_{SPT}$	$c_u$ (kPa)
A	Βράχος ή άλλος βραχώδης γεωλογικός σχηματισμός που περιλαμβάνει το πολύ 5 m ασθενέστερου επιφανειακού υλικού	> 800	–	–
B	Αποθέσεις πολύ πυκνής άμμου, χαλίκων, ή πολύ σκληρής αργίλου, πάχους τουλάχιστον αρκετών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος	360 - 800	> 50	> 250
C	Βαθιές αποθέσεις πυκνής ή μετρίως πυκνής άμμου, χαλίκων ή σκληρής αργίλου πάχους από δεκάδες έως πολλές εκατοντάδες μέτρων	180 - 360	15 - 50	70 - 250
D	Αποθέσεις χαλαρών έως μετρίως χαλαρών μη συνεκτικών υλικών (με ή χωρίς κάποια μαλακά στρώματα συνεκτικών υλικών), ή κυρίως μαλακά έως μετρίως σκληρά συνεκτικά υλικά	< 180	< 15	< 70
E	Εδαφική τομή που αποτελείται από ένα επιφανειακό στρώμα ιλύος με τιμές $v_s$ κατηγορίας C ή D και πάχος που ποικίλλει μεταξύ περίπου 5 m και 20 m, με υπόστρωμα από πιο σκληρό υλικό με $v_s > 800$ m/s			
S <sub>1</sub>	Αποθέσεις που αποτελούνται ή που περιέχουν ένα στρώμα πάχους τουλάχιστον 10 m μαλακών αργίλων/ιλών με υψηλό δείκτη πλαστικότητας (PI > 40) και υψηλή περιεκτικότητα σε νερό	< 100 (ενδεικτικό)	–	10 - 20
S <sub>2</sub>	Στρώματα ρευστοποιήσιμων εδαφών, ευαίσθητων αργίλων, ή οποιαδήποτε άλλη εδαφική τομή που δεν περιλαμβάνεται στους τύπους A – E ή S <sub>1</sub>			

**Πίνακας 2.2:** Κατηγορίες εδαφών σύμφωνα με τον EC8

## 2.7 Μετα-υλικά

### 2.7.1 Ορισμός μετα-υλικών

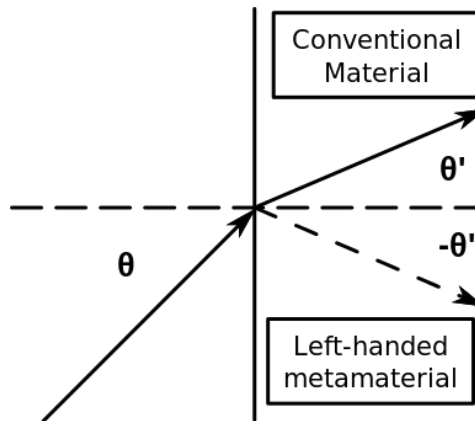
Τα μετα-υλικά είναι υλικά που σχεδιάζονται έτσι ώστε να έχουν ιδιότητες που δεν εμφανίζονται στα φυσικά υλικά. Οι ιδιότητές τους προκύπτουν από μια περιοδική τεχνητή δομή. Συγκεκριμένα, τα μετα-υλικά κατασκευάζονται από υλικά τα οποία συνήθως είναι διατεταγμένα σε επαναλαμβανόμενα μοτίβα, σε κλίμακες μικρότερες από τα μήκη κύματος των φαινομένων που επηρεάζουν. Το ακριβές σχήμα, η γεωμετρία, το μέγεθος, ο προσανατολισμός και η διάταξη προσδίδουν τις ιδιότητές τους. Η έρευνα γύρω από τα μετα-υλικά ξεκίνησε από τη πιθανή χρήση τους στον ηλεκτρομαγνητισμό, όπου επιβεβαιώθηκε πως μπορούν να αποσβέσουν, να απορροφήσουν, να ενισχύσουν ή και να κάμψουν τα κύματα, παρουσιάζοντας οφέλη που δεν εμφανίζονται στα συμβατικά υλικά.

### 2.7.2 Ιστορική ανασκόπηση χρήσης μετα-υλικών - Ηλεκτρομαγνητισμός

Η έρευνα γύρω από τα μετα-υλικά ξεκίνησε με την κατασκευή αυτών για χρήση τους στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Γενικά ένα ηλεκτρομαγνητικό μετα-υλικό επηρεάζει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που προσκρούουν ή αλληλεπιδρούν με τα χαρακτηριστικά της δομής του.

Ο V. Veselago (1986) ήταν ο πρώτος που περιέγραψε θεωρητικά την ύπαρξη υλικών με αρνητικό δείκτη διάθλασης, δια μέσου των οποίων μπορεί να διαδοθεί φως. Συγκεκριμένα, το φως ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα χαρακτηρίζεται από τη διηλεκτρική σταθερά ( $\epsilon$ ) και τη μαγνητική διαπερατότητα ( $\mu$ ). Τα περισσότερα διηλεκτρικά σταθερά έχουν θετικές τιμές του  $\epsilon$ , ενώ η μαγνητική διαπερατότητα είναι πάντοτε θετικός αριθμός. Ο δείκτης διάθλασης  $n$  ορίζεται από τη σχέση  $n = \sqrt{\epsilon \mu}$ .

Διερεύνησε θεωρητικά την ύπαρξη αρνητικής διηλεκτρικής  $\epsilon$  και αρνητικού  $\mu$ , δηλαδή υλικών με αρνητικό δείκτη διάθλασης  $n$ . Αυτά τα υλικά, που αποκαλούνται και «αριστερόστροφα», τείνουν να αποβάλλουν το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο από το εσωτερικό τους. Αυτό σημαίνει πως οι ακτίνες του φωτός που εισέρχονται σε αυτό το υλικό, κάμπτονται κατά την αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν που θα κάμπτονταν σε ένα υλικό με το συνηθισμένο θετικό δείκτη διάθλασης. Κατά συνέπεια, στα θεωρητικά αυτά υλικά, οι ακτίνες διαθλώνται στην ίδια πλευρά με αυτήν που προσκρούν στο μέσο, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.

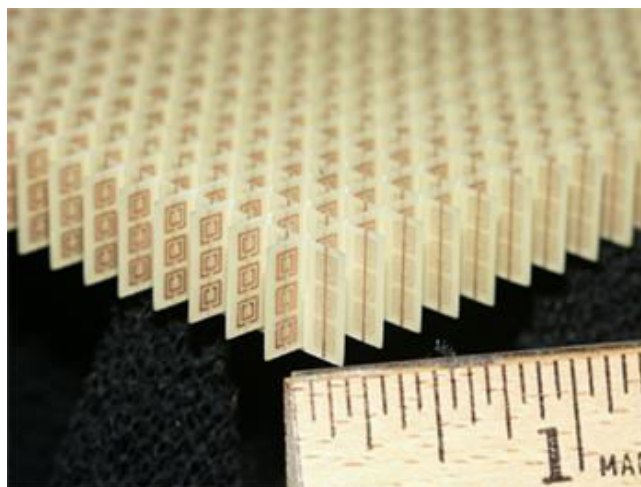


Σχήμα 2.13: Σχηματική απεικόνιση αρνητικού δείκτη διάθλασης

Εστίασε κυρίως στην περίπτωση όπου μια ακτίνα περνά από ένα μέσο με  $\epsilon_1 > 0$ ,  $\mu_1 > 0$  σε ένα άλλο μέσο με  $\epsilon_2 = -\epsilon_1$  και  $\mu_2 = -\mu_1$ , δηλαδή ένα υλικό με δείκτη διάθλασης  $n = -1$ .

Ο J. Pendry (1999) ήταν ο πρώτος που, βασιζόμενος στα στοιχεία του Veselago, εξέτασε έναν πρακτικό τρόπο κατασκευής ενός τέτοιου υλικού. Ανέπτυξε έτσι την ιδέα ενός «τέλειου φακού» - ενός φακού που θα μπορούσε να εστιάσει πέραν του ορίου περίθλασης, αποτελούμενος από μια επίπεδο πλάκα με «αριστερόστροφο» υλικό δείκτη διάθλασης  $n = -1$ . Μια τέτοια κατασκευή θα μπορούσε να επιτύχει τέλεια ανάλυση της εικόνας, σε κατάλληλη θέση από την άλλη πλευρά του φακού. Η ιδέα του ήταν πως μια συστοιχία λεπτών μεταλλικών συρμάτων σε απόσταση μερικών χιλιοστών μπορεί να εμφανίσει αρνητική διηλεκτρική σταθερά ( $\epsilon < 0$ ). Παράλληλα, πρότεινε μια δομή για εμφάνιση αρνητικού δείκτη μαγνητικής διαπερατότητας αποτελούμενη από μια συστοιχία διαχωρισμένων δακτυλίων.

Τελικά, οι Smith et al. (2002) επιβεβαίωσαν πειραματικά την ύπαρξη ενός μεταυλικού με ταυτόχρονη ύπαρξη αρνητικής διηλεκτρικής σταθεράς και αρνητικής μαγνητικής διαπερατότητας. Αποτελούνταν από μια περιοδική συστοιχία δύο διαστάσεων, της οποίας η δομική μονάδα περιείχε τη διάταξη χάλκινων διαχωρισμένων δακτυλίων και λεπτών συρμάτων. Με αυτόν τον τρόπο, υπήρξε αρνητική τιμή του  $\epsilon$  και του  $\mu$  για ένα εύρος συχνοτήτων στην κλίμακα των GHz.



Σχήμα 2.14: Σχηματική απεικόνιση φωτονικού κρυστάλλου

Παράλληλα, οι Yablonoitch et al. (1987) διερεύνησαν την κατασκευή κρυσταλλικών δομών, δομών δηλαδή που αποτελούνται από περιοδικές διατάξεις, οι οποίες επαναλαμβανόμενες στο χώρο δημιουργούν το κρυσταλλικό πλέγμα, ως αναλογία με τους ημιαγωγούς στην περίπτωση των ηλεκτρονίων. Σε ορισμένες περιπτώσεις το πλέγμα αυτό μπορεί να δημιουργήσει φωτονικά χάσματα συχνοτήτων (photonic band gaps) αποτρέποντας τη διάδοση του κύματος στο εσωτερικό του. Το φαινόμενο των χασμάτων παρουσιάζεται συχνά σε ημιαγωγούς, όπως π.χ. το πυρίτιο, όπου τα ηλεκτρόνια τους μπορούν να καταλάβουν μόνο συγκεκριμένες ενεργειακές στάθμες. Κατασκεύασαν τον πρώτο φωτονικό κρύσταλλο, ανοίγοντας μηχανικά οπές ενός χλιοστού σε ένα διηλεκτρικό υλικό με δείκτη διάθλασης  $n=3.6$ , που απέτρεπε στα μικροκύματα να διαδίνονται προς οποιαδήποτε κατεύθυνση.

### 2.7.3 Ιστορική ανασκόπηση χρήσης μετα-υλικών - Ακουστική

Η ανάπτυξη των ηλεκτρομαγνητικών μετα-υλικών ή αλλιώς φωτονικών κρυστάλλων επεκτάθηκε και στην κατασκευή φωνονικών κρυστάλλων, περιοδικών σύνθετων υλικών που χαρακτηρίζονται από την χωρική διαμόρφωση της ελαστικότητας, της πυκνότητας της μάζας και την διαμήκη και εγκάρσια ταχύτητα του ήχου. Με την κατάλληλη επιλογή των διάφορων χαρακτηριστικών τους, μπορούν να εμφανίσουν φωνονικά χάσματα συχνοτήτων (phononic band gaps), εμποδίζοντας φωνόνια ορισμένων συχνοτήτων να διέλθουν δια μέσου του υλικού αυτού. Η χρησιμότητα τους έγκειται στο γεγονός ακουστικής απομόνωσης και συνεπώς της βελτίωσης της απόδοσης, της ποιότητας και της προστασίας από πηγές θορύβου του περιβάλλοντος. Παράλληλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν φίλτρα ή οδηγοί.

Οι Meseguer et al. (1995) μελέτησαν ένα γλυπτό στη Μαδρίτη, αποτελούμενο από περιοδικά κατανεμημένους κοίλους μεταλλικούς κυλίνδρους διαμέτρου 2.9cm σε ένα δομικό πλέγμα των 10cm. Η πηγή των ακουστικών κυμάτων ήταν ο έντονος θόρυβος από τις παρακείμενες δραστηριότητες. Η ομάδα των ερευνητών παρατήρησε χάσμα συχνοτήτων για συχνότητα  $f=1,670\text{kHz}$ . Η δι-διάσταση αυτή φωνονική περιοδική δομή, παρουσίαζε δηλαδή δυνατότητες φίλτρου.

Παράλληλα, το 1999 ομάδα ερευνητών εξέτασε πειραματικά την ύπαρξη φαινομένων σκέδασης επιφανειακών – ελαστικών κυμάτων, μέσω μιας περιοδικής διάταξης κυλινδρικών οπών, κατασκευασμένων σε επίπεδη επιφάνεια από μάρμαρο. Εξέτασαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις της διάταξης – ένα πλέγμα μορφής κηρήθρας και ένα τριγωνικό πλέγμα κυλινδρικών οπών. Οι δομές αυτές ήταν διαμέτρου 6cm και βάθους 160cm. Τα επιφανειακά – ελαστικά κύματα παρήχθησαν από την κρούση μιας χαλύβδινης σφαίρας διαμέτρου 1.27cm. Παρατήρησαν την εμφάνιση πλήρων χασμάτων συχνοτήτων για τα ελαστικά κύματα σε διάφορες συχνότητες της τάξης των kHz.

Οι Liu et al. (2000) εξέτασαν πειραματικά περιοδικές δομές τοπικού συντονισμού που εμφανίζουν χάσματα συχνοτήτων αποτελούμενες από ένα πλέγμα δύο τάξεων μεγέθους μικρότερου από το μήκος του σχετικού ακουστικού κύματος. Η

τριδιάσταση δομή τους αποτελούνταν από ένα στερεό υλικό υψηλής πυκνότητας και συγκεκριμένα σφαίρες μολύβδου επικαλυμμένες με ένα στρώμα καουτσούκ

Οι Fang et al. (2006) διερεύνησαν μετα-υλικά που αποτελούμενα από περιοδική διάταξη συντονιστών Helmholtz που γεμίζονται με νερό. Τα μετα-υλικά αυτά αφορούσαν συχνότητες υπερήχων.

Οι Sukhovitch et al. (2009) εξέτασαν φαινόμενα εστίασης με χρήση φωνονικών κρυστάλλων κατ' αντιστοιχία των υπερφακών, με στόχο τη πιθανή χρήση αυτών σε ανάγκες υψηλής ανάλυσης.

Οι Achaoui (2011) διερεύνησαν πειραματικά τη διάδοση επιφανειακών κυμάτων σε μια περιοδική διάταξη μικρών στύλων από νικέλο σε ένα πιεζομετρικό υπόστρωμα, παράγοντας επιφανειακά ελαστικά κύματα. Οι ερευνητές παρατήρησαν ένα πλήρες band gap σε συχνότητες της τάξης των MHz. Συμπεράναν πως το χάσμα συχνοτήτων χαμηλής συχνότητας συμβαίνει λόγω τοπικού συντονισμού των στύλων.

#### 2.7.4 Ιστορική ανασκόπηση χρήσης μετα-υλικών – Σεισμική μηχανική

Όλα τα προηγούμενα, στάθηκαν η αφορμή ώστε να ξεκινήσει η έρευνα για την πιθανή χρήση των μετα-υλικών ή αλλιώς περιοδικών δομών στην αντισεισμική μηχανική. Ομοίως, αφορμή για την παρούσα διπλωματική εργασία στάθηκαν διάφορες δημοσιεύσεις, μερικές από τις οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Οι Adam & von Estorff (2004) διερεύνησαν με 2D αριθμητικές αναλύσεις τη μείωση των δονήσεων που υφίστανται κτίρια από τη παρακείμενη διέλευση τρένων με τη χρήση ανοικτών και γεμισμένων τάφρων.

Συγκεκριμένα, ανέλυσαν πως επηρεάζονται οι δονήσεις (επιτάχυνση στην κορυφή του κτιρίου) και οι εσωτερικές δυνάμεις του κτιρίου (υποστυλώματα και δοκοί) από τη χρήση τάφρων ανοικτών ή μη που βρίσκονται μεταξύ της σιδηροδρομικής γραμμής και του κτιρίου. Πραγματοποίησαν διάφορες αναλύσεις με βάση την επίδραση κάθε φορά μιας διαφορετικής γεωμετρικής παραμέτρου της τάφρου: αύξηση του πλάτους, αύξηση του βάθους και αύξηση της απόστασης της τάφρου από κτίριο υπό προστασία. Παράλληλα, εξέτασαν την επίδραση της χρήσης ανοικτής τάφρου ή τάφρου με υλικό πλήρωσης.

Η απόσταση του άξονα της σιδηροδρομικής γραμμής από την παρειά του κτιρίου ήταν 20.0m. Εφαρμόστηκαν ταυτόχρονα δύο συγκεντρωμένα φορτία στις σιδηροδρομικές γραμμές, με σκοπό την προσομοίωση του φορτίου του τρένου. Η χρονοϊστορία κάθε φορτίου περιελάμβανε 4 διαδοχικούς παλμούς. Ο κάθε παλμός ήταν διάρκειας 0.02s και μεγέθους 1000 kN. Το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών διάρκειας ήταν 0.02s. Συνεπώς η χρονοϊστορία ήταν συνολικής διάρκειας διάρκειας 0.14s. Αυτός ο συνδυασμός φόρτισης αφορά ευρύ συχνοτικό περιεχόμενο με επικρατέστερο το εύρος μεταξύ των τιμών 20Hz – 35Hz και κεντρική



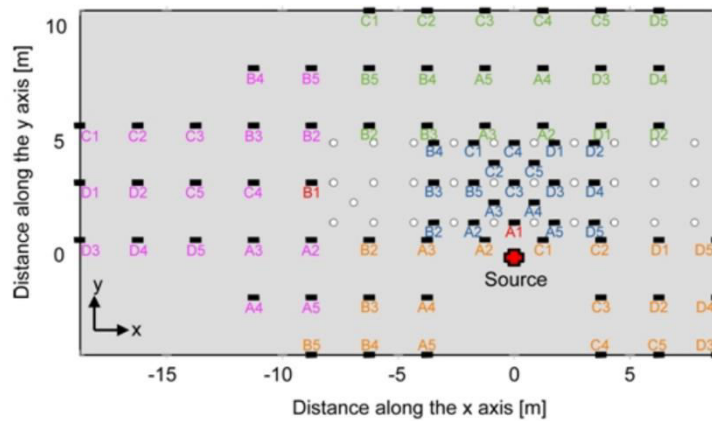
συχνότητα περίπου 27Hz. Αυτή η φόρτιση καλύπτει το εύρος συχνοτήτων που αναμένεται να παραχθεί από τη διέλευση μιας βαριάς αμαξοστοιχίας. Η συνολική χρονική περίοδος στις αναλύσεις τέθηκε 0.75s.

Αρχικά, εξέτασαν την επίδραση της παραπάνω φόρτισης στο κτίριο, χωρίς την χρήση τάφρου. Στη συνέχεια, εξέτασαν την περίπτωση κατασκευής ανοιχτής τάφρου και διερεύνησαν την μείωση των δονήσεων για (i) απόσταση τάφρου-κτιρίου ίση με 2.0m, 3.0m, 5.0m, 8.0m, (ii) βάθος της τάφρου ίσο με 3.0m, 4.5m, 6.0m, 8.0m και (iii) πλάτος της τάφρου ίσο με 0.50m, 1.0m, 1.5m, 2.0m. Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν ήταν:

- (i) Η κατασκευή τάφρου μεταξύ κτιρίου και σιδηροδρομικής γραμμής, οδηγεί στη μείωση των εσωτερικών δυνάμεων του κτιρίου σε ποσοστό έως και 80%, ενώ η κατακόρυφη επιτάχυνση στην κορυφή του κτιρίου μειώθηκε σε ποσοστό έως και 75%.
- (ii) Η μείωση των αξονικών δυνάμεων των υποστυλωμάτων είναι γενικά μεγαλύτερη από τη μείωση των διατμητικών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών.
- (iii) Η χρήση μιας ανοιχτής τάφρου είναι πολύ πιο αποτελεσματική από τη χρήση μιας τάφρου με υλικό πλήρωσης π.χ. με μείγμα μπετονιτη-εδάφους. Συγκεκριμένα, τα ποσοστά μείωσης με χρήση τάφρου με υλικό πλήρωσης είναι μόνο 70-80% των αντίστοιχων ποσοστών μείωσης στην περίπτωση χρήσης ανοιχτής τάφρου.
- (iv) Η αύξηση του βάθους και του πλάτους της τάφρου συνέβαλε καθοριστικά στη μείωση των εντατικών μεγεθών και δονήσεων. Ωστόσο, η αύξηση του βάθους της τάφρου (με τις άλλες δύο γεωμετρικές παραμέτρους σταθερές) οδηγεί σε ακόμα μεγαλύτερη μείωση.
- (v) Η τάφρος θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο κτίριο υπό προστασία. Στην περίπτωση που η απόσταση είναι αρκετά μεγάλη δεν συμβάλλει στην μείωση των εντατικών μεγεθών και των δονήσεων στο κτίριο λόγω της αύξησης της σκέδασης.
- (vi) Η αλλαγή της πυκνότητας μάζας και του λόγου Poisson του υλικού πλήρωσης, στην περίπτωση της μη ανοιχτής τάφρου, έχει μικρή επίδραση στις μονωτικές της ικανότητες

Οι Brule et al. (2014) εξέτασαν τη χρήση των μετα-υλικών στην αντισεισμική προστασία. Το καλοκαίρι του 2012 πραγματοποίησαν δοκιμές πεδίου σε μια περιοχή της Γαλλίας, με πυκνό ομοιογενές έδαφος αποτελούμενο από λασπώδη άργιλο βάθους περίπου 200m. Οι μελετητές σημειώνουν πως επέλεξαν αυτή τη χρονική περίοδο για την διεξαγωγή του πειράματος καθώς το ξηρό έδαφος είναι λιγότερο ιξωδο-ελαστικό. Αρχικά, εκτίμησαν την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων Rayleigh, παράγοντας επιφανειακά κύματα συχνότητας 50Hz. Η ταχύτητα εκτιμήθηκε 78m/s. Η πυκνότητα του εδάφους ήταν  $\rho=1500\text{kg/m}^3$ , το μέτρο ελαστικότητας  $E=100\text{MPa}$  και ο λόγος Poisson  $\nu=0.3$ . Στη συνέχεια, δημιούργησαν το μετα-υλικό. Διάνοιξαν στο έδαφος συνολικά 30 οπές – 3 σειρές αποτελούμενες από 10 κενές οπές η καθεμία. Οι οπές ήταν διαμέτρου 0.32m και βάθους 5.0m, με ενδιάμεση απόσταση 1.73m. Η απόσταση αυτή επιλέχθηκε καθώς το μήκος των επιφανειακών κυμάτων στο πείραμα ήταν 1.56m. Τοποθέτησαν 20 ταχύμετρα τριών

συνιστωσών ( $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ ). Τοποθέτησαν τα ταχύμετρα σε τέσσερις διαφορετικές θέσεις: (i) στην περιοχή ακριβώς πίσω από τις τρεις σειρές των οπών, (ii) ενδιάμεσα στη διάταξη των οπών, (iii) στην περιοχή ακριβώς δίπλα από τις οπές και (iv) περιμετρικά της συσκευής παραγωγής των επιφανειακών κυμάτων. Πραγματοποίησαν λοιπόν τέσσερις φορές το πείραμα με τη δομή των οπών και τέσσερις φορές χωρίς τη δομή, αλλάζοντας τις θέσεις των συσκευών με στόχο την πλήρη χαρτογράφηση του ενεργειακού πεδίου.



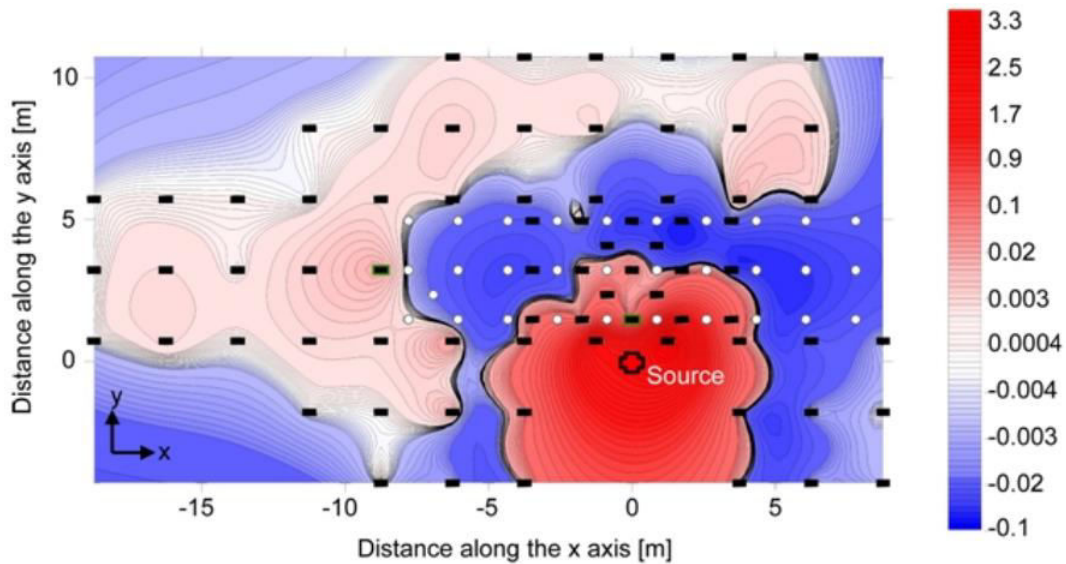
**Σχήμα 2.15:** Διάταξη των συσκευών καταγραφής κατά το πείραμα των Brule et al. (2014)

Οι δονήσεις παρήχθησαν από ένα μηχάνημα δονητικής συμπύκνωσης που λειτουργούσε στη συχνότητα των 50Hz, σε απόσταση 1.50m από την πρώτη σειρά των οπών. Κρίθηκε αναγκαίο το μηχάνημα να ήταν κοντά στις οπές λόγω της ισχυρής εδαφικής απόσβεσης.

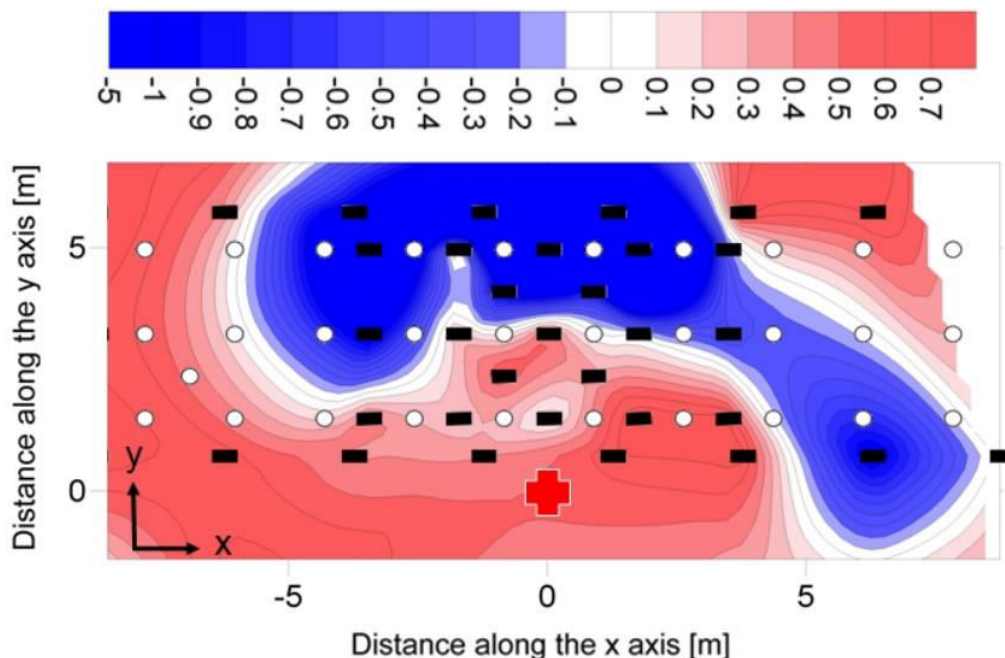


**Σχήμα 2.16:** Απεικόνιση του χώρου διενέργειας του πειράματος των Brule et. al (2014). Στην κόκκινη περιοχή βρίσκεται το μηχάνημα παραγωγής των δονήσεων, στην καφέ περιοχή οι οπές και στην πράσινη περιοχή οι συσκευές καταγραφής

Τα αποτελέσματα έδειξαν πως τα σεισμικά επιφανειακά κύματα σχεδόν δεν υπήρχαν ύστερα από την πρώτη σειρά της δομής, ενώ η μέτρησή τους ήταν σχεδόν αδύνατη ύστερα από τη δεύτερη σειρά της δομής. Επίσης, παρατηρήθηκε μια ζώνη συγκέντρωσης της ελαστικής ενέργειας ακτίνας 5.0m γύρω από το σημείο δόνησης. Αυτό συνέβη επειδή τα κύματα αντανακλούνται από τις οπές προς τα πίσω.



**Σχήμα 2.17:** Χάρτης πειραματικών αποτελεσμάτων: Διαφορά του ενεργειακού πεδίου μετά και πριν την κατασκευή των οπών. Το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στις περιοχές που η ελαστική ενέργεια είναι μικρότερη αφότου διανοίχθηκαν οι οπές, ενώ το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στις περιοχές που η ελαστική ενέργεια είναι μεγαλύτερη αφότου διανοίχθηκαν οι οπές.



**Σχήμα 2.18:** Χάρτης πειραματικών αποτελεσμάτων: Διαφορά του ενεργειακού πεδίου μετά και πριν την κατασκευή των οπών, κανονικοποιημένη με το ενεργειακό πεδίο αφότου διανοίχθηκαν οι οπές. Το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στις περιοχές που η ελαστική ενέργεια είναι μικρότερη αφότου διανοίχθηκαν οι οπές, ενώ το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στις περιοχές που η ελαστική ενέργεια είναι μεγαλύτερη αφότου διανοίχθηκαν οι οπές.

Στον παραπάνω χάρτη παρατηρείται πως η συσκευή μέτρησης στο σημείο (0,5) καταγράφει 6 φορές μικρότερη ελαστική ενέργεια αφότου διανοίχθηκαν οι οπές.

Οι Achaoui et al. (2016) διερεύνησαν με αριθμητικές αναλύσεις την απόσβεση σεισμικών κυμάτων κάνοντας χρήση μιας κυβικής διάταξης αδρανειακών συντονιστών γύρω από ένα κτίριο. Συγκεκριμένα, διερεύνησαν τις ιδιότητες χάσματος συχνοτήτων μιας θεωρητικής διάταξης σιδερένιων σφαιρών συνδεδεμένων σε όγκο από σκυρόδεμα διαμέσου σιδερένιων συνδέσμων ή συνδέσμων από καουτσούκ. Η κάθε σφαίρα μπορεί να κινείται ελεύθερα μέσα στον περιβάλλοντα χώρο, ωστόσο οι σύνδεσμοι τις ενώνουν με το σκυρόδεμα και διευκολύνουν καμπτικές και περιστροφικές κινήσεις. Έλεγξαν διάφορες περιπτώσεις διαμέτρου των σφαιρών και διαμέτρου των συνδέσμων. Πλήρη χάσματα συχνοτήτων εντοπίστηκαν στο εύρος συχνοτήτων 16-21Hz για διάμετρο σφαίρας 7.4m και στο εύρος 6-11Hz για διάμετρο σφαίρας 0.74m, σε αξονική απόσταση 10m μεταξύ τους. Τελικά παρατήρησαν απόσβεση των ελαστοδυναμικών κυμάτων στο εύρος 8-49Hz για σιδερένιες σφαίρες διαμέτρου 0.74m συνδεδεμένες στο έδαφος με έξι συνδέσμους από καουτσούκ.

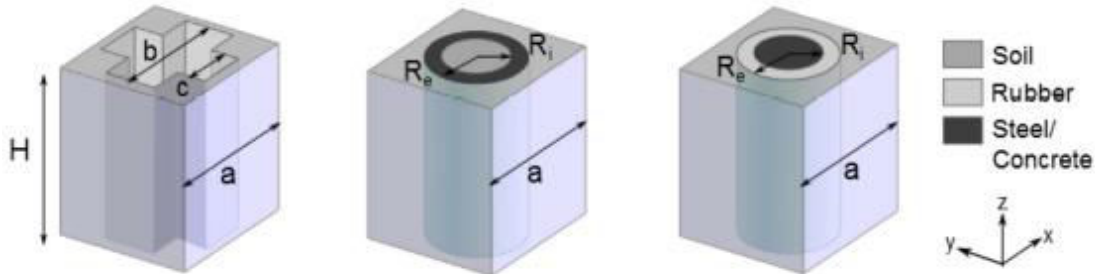
Ο Tsinidis (2018) εξέτασε με αριθμητικές αναλύσεις την επίδραση των κτιρίων που βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους στη συμπεριφορά αστικής μονής και διπλής κυκλικής σήραγγας που υπόκειται σε ισχυρή σεισμική δόνηση, στην εγκάρσια διεύθυνση. Σημαντικοί παράγοντες που είναι δυνατόν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά των σήραγγων εξετάστηκαν και συγκεκριμένα το βάθος της σήραγγας, ο αριθμός των κτιρίων και η θέση τους σε σχέση με τον άξονα της σήραγγας και τέλος οι ιδιότητες του εδάφους. Γενικά, τα αποτελέσματα έδειξαν πως η θεώρηση των βαθμών ελευθερίας των κτιρίων στην επιφάνεια, οδηγεί σε αύξηση της απόκρισης της σήραγγας, τόσο σε όρους παραμορφώσεων της σήραγγας, δυναμικών εδαφικών πιέσεων και δυναμικών διατμητικών τάσεων γύρω από αυτήν, αλλά επίσης και σε όρους των δυναμικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας. Τα φαινόμενα αυτά αυξάνονταν όσο η σήραγγα ήταν πιο κοντά στην επιφάνεια.

Οι Miniaci et al. (2016) εξέτασαν με αριθμητικές αναλύσεις την εφαρμογή φωνονικών κρυστάλλων ως αντισεισμικές ασπίδες. Συγκεκριμένα, εξέτασαν την απόσβεση των τυπικών συχνοτήτων των σεισμικών κυμάτων με τη χρήση μηχανικών μετα-υλικών μεγάλης κλίμακας (Large-Scale Mechanical Metamaterials).

Θεώρησαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις περιοδικών δομικών μονάδων της αντισεισμικής ασπίδας:

- Κοιλότητες τύπου σταυρού, τις οποίες και θεώρησαν τις πιο αποτελεσματικές καθώς παρατήρησαν τα μεγαλύτερα χάσματα συχνοτήτων σε σύγκριση με τις υπόλοιπες γεωμετρίες του ίδιου όγκου
- Κοίλους κυλίνδρους, αποτελούμενων από ένα σκληρότερο υλικό συγκριτικά με το περιβάλλον υλικό, οι οποίες γεμίζονται με έδαφος

- Εγκλείσεις τοπικού συντονισμού, κατασκευασμένων από ένα στρώμα μαλακού καουτσούκ γύρω από ένα κυλινδρικό πυρήνα, όπου παρατήρησαν χάσματα συχνοτήτων για υποκύματα



**Σχήμα 2.19:** Περιπτώσεις περιοδικών δομών σύμφωνα με τους *Miniaci et. al (2016)*.

Δεξιά: κοιλοότητα τύπου σταυρού, Μέση:Κοίλος κύλινδρος, Δεξιά: Εγκλειση τοπικού συντονισμού

Τα χαρακτηριστικά του εδάφους που εξετάστηκαν ήταν  $E=20\text{MPa}$ ,  $\nu=0.3$  και  $\rho=1800\text{kg m}^{-3}$  που αντιστοιχούν σε αμμώδες έδαφος. Το σκυρόδεμα είχε  $E=30\text{GPa}$ ,  $\nu=0.25$  και  $\rho=2500\text{kg m}^{-3}$ , ενώ στην περίπτωση των εγκλείσεων τοπικού συντονισμού το καουτσούκ είχε  $E=120\text{kPa}$ ,  $\nu=0.47$  και  $\rho=1300\text{kg m}^{-3}$ . Αρχικά, εξέτασαν το έδαφος ως γραμμικό – ελαστικό, ενώ στη συνέχεια εξέτασαν και την ιζωδο-ελαστική συμπεριφορά του. Οι μελετητές εξέτασαν διάφορες παραμέτρους της αξονικής απόστασης  $a$  των δομών και των διαστάσεών τους  $c$ ,  $b$ ,  $R_e$ ,  $R_i$ , όπως και του βάθους  $H$ .

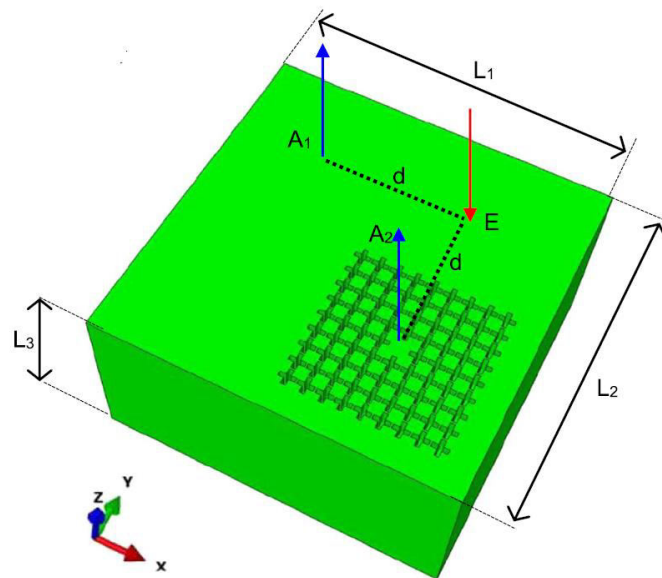
Διερεύνησαν αρχικά την ύπαρξη χασμάτων συχνοτήτων μεμονωμένα για κάθε μία από τις παραπάνω δομές για διαφορετικές τιμές του λόγου  $H/a$ , με βάση τις ιδιότητες των υλικών. Κατέληξαν πως κυρίως οι κοιλοότητες τύπου σταυρού είναι εκείνες που μπορούν να αποσβέσουν αποτελεσματικά τα επιφανειακά κύματα. Στη συνέχεια πραγματοποίησαν αναλύσεις σε 3D προσομοιώματα, εφαρμόζοντας μια περιοδική διάταξη των κοιλοτήτων τύπου σταυρού. Το βάθος των κοιλοτήτων ήταν  $H=10\text{m}$  και η αξονική απόστασή τους  $a=10\text{m}$ .

Case study	Parameter						Shielding potential ( $\beta; N_C$ )			
	$a$ (m)	$b/a$	$c/a$	$R_e/a$	$R_i/a$	$H/a$	3.75 Hz	5 Hz	6 Hz	8 Hz
Cross-like cavity	10	0.90	0.25	—	—	$1 \div 3$	(0.66; 1.39)	(0.68; 1.07)	—	—
Hollow cylinder	10	—	—	0.40	0.30	$1 \div 3$	—	—	(0.77; 1.09)	(0.90; 0.86)
Coated cylinder	2	—	—	0.48	0.40	$1 \div 5$	—	—	—	—

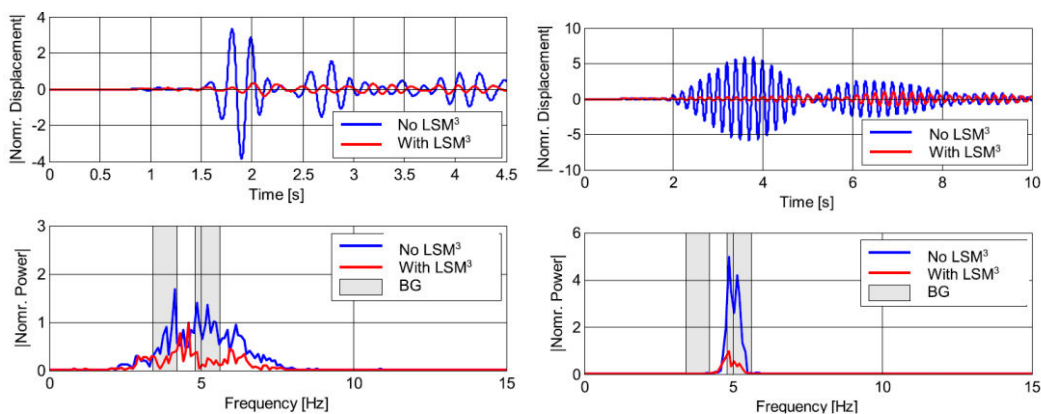
**Πίνακας 2.3:** Περιπτώσεις διερεύνησης των *Miniaci et. al (2016)*

Το μοντέλο ανάλυσης αποτελούνταν από τον εδαφικό ημιχώρο διαστάσεων  $200\text{m} \times 200\text{m} \times 100\text{m}$  και την περιοδική δομή από κοιλοότητες τύπου σταυρού. Το φορτίο που εφαρμόστηκε ήταν: (i) 3 ημιτονικοί κύκλοι Hanning και (ii) 19 ημιτονικοί κύκλοι Hanning συχνότητας 5.0Hz. Το φορτίο εφαρμόστηκε στη θέση E του επόμενου σχήματος και μετρήθηκαν οι κατακόρυφες μετακινήσεις στα σημεία A1

και A2. Η απόσταση του σημείου E από τα σημεία καταγραφής A1 και A2 ήταν  $d=90\text{m}$ .



**Σχήμα 2.20:** 3-D μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη των *Miniaci et. al* (2016)



**Σχήμα 2.21:** Πάνω αριστερά: Χρονοϊστορία μετακίνησης για φόρτιση Hanning 3 κύκλων  
 Κάτω αριστερά: Φάσμα Fourier για φόρτιση Hanning 3 κύκλων  
 Πάνω δεξιά: Χρονοϊστορία μετακίνησης για φόρτιση Hanning 19 κύκλων  
 Κάτω δεξιά: Φάσμα Fourier για φόρτιση Hanning 19 κύκλων

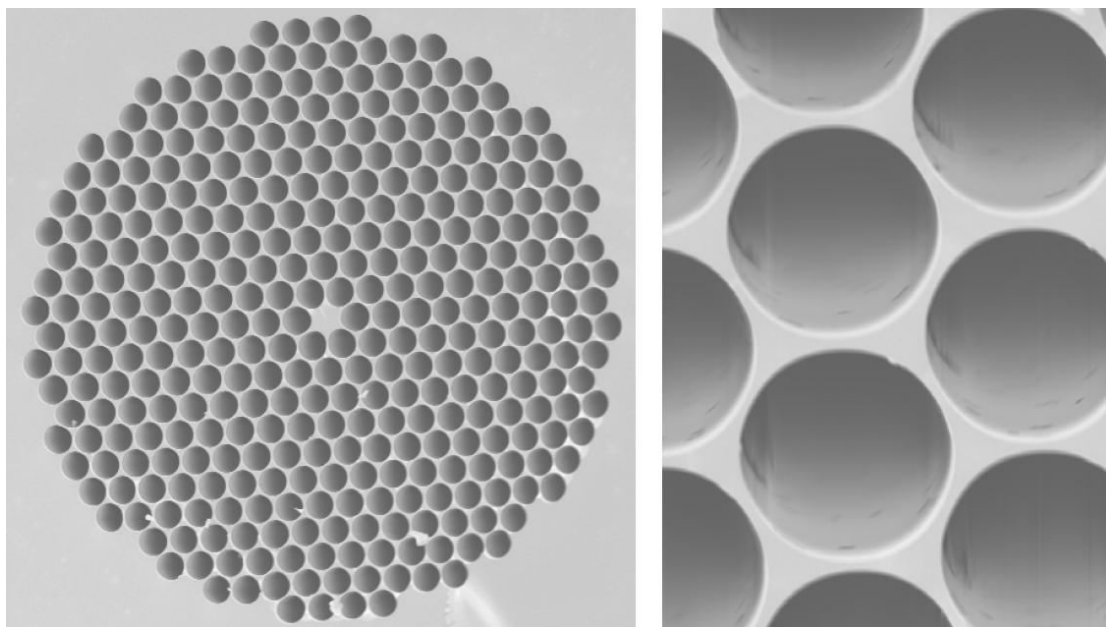
### 2.7.5 Χάσμα συχνοτήτων

Η ύπαρξη χασμάτων συχνοτήτων (band gaps) σχετίζεται με τις ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων. Με τον όρο στερεό σώμα εννοείται ένας μεγάλος αριθμός ατόμων ή μορίων που συγκρατούνται μεταξύ τους. Τα άτομα αυτά μπορεί να είναι περιοδικά διατεταγμένα, οπότε έχουμε κρυσταλλικό στερεό ή μη περιοδικά (τυχαία), οπότε έχουμε άμορφο στερεό.

Σε ένα μεμονωμένο άτομο, τα ηλεκτρόνια βρίσκονται γύρω από τον πυρήνα και οι ενέργειές τους είναι κβαντισμένες, μπορεί δηλαδή να έχουν μόνο μια συγκεκριμένη διακριτή τιμή  $E_n$  ( $n=1,2,3,\dots$ ). Όταν περισσότερα από δύο άτομα έρχονται κοντά

(συνδέονται) για το σχηματισμό ενός κρυσταλλικού στερεού, οι τροχιές των ηλεκτρονίων σθένους υπερκαλύπτονται. Οι ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων μετατρέπονται σε ενεργειακές ζώνες, δηλαδή ζώνες επιτρεπτών ενεργειακών καταστάσεων. Οι ενεργειακές ζώνες διαχωρίζονται μεταξύ τους από ενεργειακά χάσματα, δηλαδή περιοχές όπου είναι απαγορευμένες για τα ηλεκτρόνια.

Στην περίπτωση των φωτονικών κρυστάλλων, το φωτονικό χάσμα συχνοτήτων (photonic band gap) εμφανίζεται επειδή οι περιοδικές δομές αυτές έχουν επαναλαμβανόμενες δομές υψηλής και χαμηλής διηλεκτρικής σταθεράς. Απλοποιητικά, το φωτονικό χάσμα συχνοτήτων μπορεί να γίνει κατανοητό πως προκύπτει λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων που υφίσταται το διαδιδόμενο κύμα μέσα στον κρύσταλλο, στις διεπαφές υψηλού και χαμηλού διηλεκτρικού. Για να γίνει κατανοητό το φωτονικό χάσμα συχνοτήτων θεωρούμε τον φωτονικό κρύσταλλο που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα, αποτελούμενος από ένα διηλεκτρικό υλικό το οποίο περιέχει έναν αριθμό μικροσκοπικών κενών αέρα. Τα φωτόνια θα κινούνται μέσα στις περιοχές υψηλού δείκτη διάθλασης που είναι το διηλεκτρικό, οι οποίες διακόπτονται από περιοχές με χαμηλό δείκτη διάθλασης που είναι οι οπές με τον αέρα. Για το φωτόνιο, η αντίθεση αυτή στο δείκτη διάθλασης αντιστοιχεί με το περιοδικό δυναμικό ενός ηλεκτρονίου όταν κινείται μέσα σε ένα κρυσταλλικό στερεό. Πράγματι, αν υπάρχει μεγάλη διαφορά στο δείκτη διάθλασης μεταξύ των δύο περιοχών, τότε το φως θα περιοριστεί κυρίως είτε στο διηλεκτρικό είτε στις τρύπες αέρα. Ο περιορισμός αυτός έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό επιτρεπόμενων ενεργειακών περιοχών, διαχωρισμένων από τις απαγορευμένες περιοχές (band gaps).



*Εικόνα 2.22: Απεικόνιση φωτονικού κρυστάλλου*

Παρόμοια εξήγηση δίνεται και για την εμφάνιση των φωνονικών χασμάτων συχνοτήτων (phononic band gaps) στην περίπτωση των φωνονικών κρυστάλλων καθώς και των περιοδικών δομών που εξετάζονται στην αντισεισμική μηχανική. Γενικά, χάσματα συχνοτήτων είναι ζώνες στις οποίες η διάδοση του κύματος καθίσταται απαγορευτική.

## 2.7.6 Επίδραση χαρακτηριστικών των μετα-υλικών

Από όσα περιγράφηκαν παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως τα χαρακτηριστικά των περιοδικών δομών διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά τους, είτε χρησιμοποιούνται στην φωτονική, την φωνονική ή την αντισεισμική μηχανική. Εν προκειμένω, για την επιτυχή απόσβεση των σεισμικών κυμάτων απαιτείται ενδεδειγμένη διερεύνηση της του καταλληλότερου μετα-υλικού, της περιοδικής δομής δηλαδή που επιτυγχάνει μείωση της σεισμικής απόκρισης.

Γενικά, σύμφωνα με τα βιβλιογραφικά στοιχεία που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, ως κρίσιμοι παράγοντες των περιοδικών δομών για την επιτυχή απόσβεση των προσπίπτοντων σεισμικών κυμάτων, αναφέρονται οι παρακάτω:

1. Το σχήμα των επαναλαμβανόμενων στοιχείων (κυκλικά, τετραγωνικά, ορθογωνικά κλπ)
2. Η αξονική απόσταση τοποθέτησης των επαναλαμβανόμενων στοιχείων
3. Ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων στοιχείων
4. Οι γεωμετρικές διαστάσεις τους (διάμετρος αν πρόκειται για κυκλικά ή μήκος πλευράς αν πρόκειται για ορθογωνικά ή τετραγωνικά, βάθος)
5. Η ύπαρξη ή μη υλικού πλήρωσης



## 3. Αναλύσεις

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν σε τρία είδη εδαφικού προφίλ: σε χαλαρό έδαφος, σε σκληρό έδαφος και σε έδαφος τριών στρώσεων με βάση δεδομένα γεωτεχνικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε. Στις αναλύσεις αυτές εξετάζεται η δυνατότητα απόσβεσης των κυμάτων μέσω εφαρμογής των μετα-υλικών ή αλλιώς μέσω των περιοδικών δομών. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του κώδικα ABAQUS. Τα αποτελέσματα που εξάγονται και παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο είναι τα επιταχυνσιογραφήματα, τα φάσματα επιτάχυνσης και τα φάσματα Fourier των σημείων ενδιαφέροντος, κατά περίπτωση.

### 3.1 Παράμετροι εδάφους και δομών

#### 3.1.1 Παράμετροι χαλαρού εδάφους και δομών

Στις αναλύσεις που αφορούν χαλαρό έδαφος έχει γίνει η θεώρηση ομοιόμορφου ελαστικού εδάφους, με και χωρίς απόσβεση Rayleigh, που εδράζεται σε άκαμπτο – βραχώδες υπόβαθρο. Γίνεται χρήση των εδαφικών παραμέτρων του πειράματος πεδίου Brule et al. (2014). Το έδαφος αυτό αντιστοιχεί σε έδαφος κατηγορίας D κατά EC8. Έχει επιλεγεί η κατασκευή κυλινδρικών δομών με κενό αέρα, διαμέτρου  $r$  και αξονικής απόστασης  $a$ . Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται παρακάτω:

#### **Εδαφικές παράμετροι Brule**

$$\rho=1500 \text{ kgr/m}^3$$

$$E=0.1 \text{ GPa} = 0.1 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$\nu=0.3$$

#### **Στοιχεία δομών για εδαφικές παραμέτρους εδάφους Brule**

$$r=0.35 \text{ m}$$

$$a=1.00 \text{ m}$$

### 3.1.2 Παράμετροι σκληρού εδάφους και δομών

Στις αναλύσεις που αφορούν σκληρό έδαφος έχει γίνει η θεώρηση ομοιόμορφου ελαστικού εδάφους, χωρίς απόσβεση και με απόσβεση Rayleigh, που εδράζεται σε άκαμπτο – βραχώδες υπόβαθρο. Γίνεται χρήση εδαφικών παραμέτρων που αντιστοιχούν σε έδαφος τύπου A κατά τον EC8. Έχει επιλεγεί η κατασκευή κυλινδρικών δομών με κενό αέρα, διαμέτρου  $r$  και αξονικής απόστασης  $a$ . Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται παρακάτω:

#### **Στοιχεία δομών για εδαφικές παραμέτρους εδάφους τύπου A**

$$r=3.5 \text{ m}$$

$$a=10.0 \text{ m}$$

#### **Εδαφικές παράμετροι τύπου A**

$$\rho=2038.7 \text{ kgr/m}^3$$

$$E=5.096839960 \text{ GPa}$$

$$\nu=0.25$$

### 3.1.3 Παράμετροι εδάφους από γεωτεχνική έρευνα και δομών

Πραγματοποιήθηκε γεωτεχνική έρευνα. Το έδαφος αποτελείται από τρεις στρώσεις. Τα δεδομένα της γεωτεχνικής έρευνας παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα. Γίνεται η παραδοχή πως το έδαφος μετά τα 15m δεν αλλάζει και συνεπώς και μετά τα 20m, όπου σταματά η γεωτεχνική έρευνα, το έδαφος είναι ερυθρο-καστανή έως καστανή, μέτρια πυκνή έως πυκνή ιλυώδης άμμος με κατά θέσεις χαλίκια και κροκάλες, με τις παραμέτρους  $\gamma_b$ ,  $\phi$ ,  $c$ ,  $E_s$  και  $V_s$  σταθερές.

$\gamma_b = 19,5 \text{ kN/m}^3$	<b>ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ I</b>  Ερυθροκαστανή έως καστανή μέτρια πυκνή έως πυκνή ιλυώδης <b>ΑΜΜΟΣ</b> με κατά θέσεις χαλίκια και κροκάλες  Έδαφος : Γαιώδες
$\phi = 30^\circ$	
$c = 25 \text{ kPa}$	
$E = 20 \text{ MPa}$	
$180 < V_s < 355 \text{ m/sec}$	
<b>0,00- 12,00m</b>	<b>ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ II</b>  Κάστανη, μέτριας συνεκτικότητας <b>ΑΡΓΙΛΟΣ</b> με άμμο  Έδαφος : Γαιώδες
$\gamma_b = 19,0 \text{ kN/m}^3$	
$\phi = 10^\circ$ , $c = 20 \text{ kPa}$	
$E_s = 25 \text{ MPa}$	
$V_s = 180 \text{ m/sec}$	
<b>12,00- 15,00m</b>	<b>ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ I</b>  Ερυθροκαστανή έως καστανή μέτρια πυκνή έως πυκνή ιλυώδης <b>ΑΜΜΟΣ</b> με κατά θέσεις χαλίκια και κροκάλες  Έδαφος : Γαιώδες
$\gamma_b = 19,0 \text{ kN/m}^3$	
$\phi = 35^\circ$ , $c = 25 \text{ kPa}$	
$E_s = 50 \text{ MPa}$	
$180 < V_s < 355 \text{ m/sec}$	
<b>15,00 -20,00m</b>	

*Πίνακας 3.1: Εδαφικές παράμετροι γεωτεχνικής έρευνας*

#### Στοιχεία δομών για εδαφικές παραμέτρους εδάφους Brule

$r = 0.35 \text{ m}$

$a = 1.00 \text{ m}$

## 3.2 Υπολογισμός αποσβεστήρων

### 3.2.1 Σχέσεις υπολογισμού αποσβεστήρων

Τα πρότυπα ιξώδη σύνορα του μοντέλου, διαμορφώνονται με δύο σειρές απειροστών αποσβεστήρων, που εφαρμόζονται στους κόμβους των συνόρων του μοντέλου. Οι εφαπτομενικοί αποσβεστήρες ( $\tau$ ) αναφέρονται στους αποσβεστήρες που εφαρμόζονται στην διεύθυνση  $y$  του μοντέλου, ενώ οι κατακόρυφοι αποσβεστήρες ( $\sigma$ ) αναφέρονται στους αποσβεστήρες που εφαρμόζονται στην διεύθυνση  $x$  του μοντέλου. Οι υπολογισμοί έγιναν σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\tau = \rho V_S A \quad (3.1)$$

$$\sigma = \rho V_P A \quad (3.2)$$

Όπου:

- $\rho$  η πυκνότητα μάζας του εδαφικού υλικού
- $V_P$  η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων P
- $V_S$  η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων S
- $A$  το εμβαδόν επιρροής του αποσβεστήρα

Οι ταχύτητες των κυμάτων P και S υπολογίζονται από τις σχέσεις (1.1) και (1.2):

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

### 3.2.2 Αποσβεστήρες στο χαλαρό έδαφος

Σημειώνεται, πως επιλέχθηκαν τετραγωνικά πεπερασμένα στοιχεία διάστασης 1.0m στα σύνορα του μοντέλου (βλ. 3.3.1), και συνεπώς υπολογίστηκαν δύο εμβαδά επιρροής του κάθε αποσβεστήρα που τοποθετήθηκε. Συγκεκριμένα το  $A_{\text{ενδιαμ}}$  αφορά στους κατακόρυφους και εφαπτομενικούς αποσβεστήρες που τοποθετήθηκαν με εμβαδό επιρροής  $1\text{m}^2$ , ενώ το  $A_{\text{γωνιακ}}$  αφορά στους κατακόρυφους και εφαπτομενικούς αποσβεστήρες που τοποθετήθηκαν με εμβαδό επιρροής  $0.50\text{m}^2$  καθώς βρίσκονταν στις άνω και κάτω γωνιακές παρειές του καννάβου. Οι υπολογισμοί που έγιναν παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πυκνότητα μάζας	$\gamma=$	1500	kg/m <sup>3</sup>
	$\rho=\gamma/g$	1500	Mgr/m <sup>3</sup>
Μέτρο ελαστικότητας	$E=$	100000000	Pa
Λόγος Poission	$\nu=$	0.3	-
Ταχύτητα κυμάτων S	$V_s=$	160.13	m/sec
Ταχύτητα κυμάτων P	$V_p=$	299.57	m/sec
Εμβαδά επιρροής	$A_{ενδιαμ}=$	1.00	m <sup>2</sup>
	$A_{γωνιακ}=$	0.50	m <sup>2</sup>
Αποσβεστήρες $\tau$	$\tau_{ενδιαμ}=$	240192.23	Nsec/m
	$\tau_{γωνιακ}=$	120096.12	Nsec/m
Αποσβεστήρες $\sigma$	$\sigma_{ενδιαμ}=$	449358.52	Nsec/m
	$\sigma_{γωνιακ}=$	224679.26	Nsec/m

**Πίνακας 3.2:** Υπολογισμός αποσβεστήρων για το χαλαρό έδαφος και για το έδαφος με βάση τα δεδομένα της γεωτεχνικής έρευνας

### 3.2.3 Αποσβεστήρες στο σκληρό έδαφος

Σημειώνεται, πως επιλέχθηκαν τετραγωνικά πεπερασμένα στοιχεία διάστασης 10.0m στα σύνορα του μοντέλου (βλ. 3.3.2), και συνεπώς υπολογίστηκαν δύο εμβαδά επιρροής του κάθε αποσβεστήρα που τοποθετήθηκε. Συγκεκριμένα το  $A_{ενδιαμ}$  αφορά στους κατακόρυφους και εφαπτομενικούς αποσβεστήρες που τοποθετήθηκαν με εμβαδό επιρροής 10m<sup>2</sup>, ενώ το  $A_{γωνιακ}$  αφορά στους κατακόρυφους και εφαπτομενικούς αποσβεστήρες που τοποθετήθηκαν με εμβαδό επιρροής 5.0m<sup>2</sup> καθώς βρίσκονταν στις άνω και κάτω γωνιακές παρειές του καννάβου. Οι υπολογισμοί που έγιναν παρουσιάζονται στην επόμενη σελίδα.

Πυκνότητα μάζας	$\gamma=$	2038.7	$\text{kg}/\text{m}^3$
	$\rho=\gamma/g$	2038.7	$\text{Mg}/\text{m}^3$
Μέτρο ελαστικότητας	$E=$	5096839960	Pa
Λόγος Poisson	$\nu=$	0.25	-
Ταχύτητα κυμάτων S	$V_s=$	1000.01	m/sec
Ταχύτητα κυμάτων P	$V_p=$	1732.07	m/sec
Εμβαδά επιρροής	Αενδιαμ=	10.00	$\text{m}^2$
	Αγωνιακ=	5.00	$\text{m}^2$
Αποσβεστήρες $\tau$	$\tau_{\text{ενδιαμ}}=$	<b>20387179.92</b>	<b>Nsec/m</b>
	$\tau_{\text{γωνιακ}}=$	<b>10193589.96</b>	<b>Nsec/m</b>
Αποσβεστήρες $\sigma$	$\sigma_{\text{ενδιαμ}}=$	<b>35311631.44</b>	<b>Nsec/m</b>
	$\sigma_{\text{γωνιακ}}=$	<b>17655815.72</b>	<b>Nsec/m</b>

Πίνακας 3.3: Υπολογισμός αποσβεστήρων για το σκληρό έδαφος

### 3.2.4 Αποσβεστήρες στο έδαφος της γεωτεχνικής έρευνας

Σημειώνεται, πως επιλέχθηκαν τετραγωνικά πεπερασμένα στοιχεία διάστασης 1.0m στα σύνορα του μοντέλου (βλ. 3.3.1), και συνεπώς υπολογίστηκαν δύο εμβαδά επιρροής του κάθε αποσβεστήρα που τοποθετήθηκε.

Πυκνότητα μάζας	$\gamma=$	1988.45	$\text{kg}/\text{m}^3$
	$\rho=\gamma/g$	1988.45	$\text{Mg}/\text{m}^3$
Μέτρο ελαστικότητας	$E=$	20000000	Pa
Λόγος Poisson	$\nu=$	0.3	-
Ταχύτητα κυμάτων S	$V_s=$	267.50	m/sec
Ταχύτητα κυμάτων P	$V_p=$	116.36	m/sec
Εμβαδά επιρροής	Αενδιαμ=	1.00	$\text{m}^2$
	Αγωνιακ=	0.50	$\text{m}^2$
Αποσβεστήρες $\tau$	$\tau_{\text{ενδιαμ}}=$	<b>531910.38</b>	<b>Nsec/m</b>
	$\tau_{\text{γωνιακ}}=$	<b>265955.19</b>	<b>Nsec/m</b>
Αποσβεστήρες $\sigma$	$\sigma_{\text{ενδιαμ}}=$	<b>231376.73</b>	<b>Nsec/m</b>
	$\sigma_{\text{γωνιακ}}=$	<b>115688.37</b>	<b>Nsec/m</b>

Πίνακας 3.4: Υπολογισμός αποσβεστήρων για την άνω στρώση

Πυκνότητα μάζας	$\gamma=$	1937.46	$\text{kg}/\text{m}^3$
	$\rho=\gamma/g$	1937.46	$\text{Mg}/\text{m}^3$
Μέτρο ελαστικότητας	$E=$	25000000	Pa
Λόγος Poisson	$\nu=$	0.3	-
Ταχύτητα κυμάτων S	$V_s=$	180.00	m/sec
Ταχύτητα κυμάτων P	$V_p=$	131.80	m/sec
Εμβαδά επιρροής	Αενδιαμ=	1.00	$\text{m}^2$
	Αγωνιακ=	0.50	$\text{m}^2$
Αποσβεστήρες $\tau$	$\tau_{\text{ενδιαμ}}=$	<b>348742.80</b>	Nsec/m
	$\tau_{\text{γωνιακ}}=$	<b>174371.40</b>	Nsec/m
Αποσβεστήρες $\sigma$	$\sigma_{\text{ενδιαμ}}=$	<b>255348.74</b>	Nsec/m
	$\sigma_{\text{γωνιακ}}=$	<b>127674.37</b>	Nsec/m

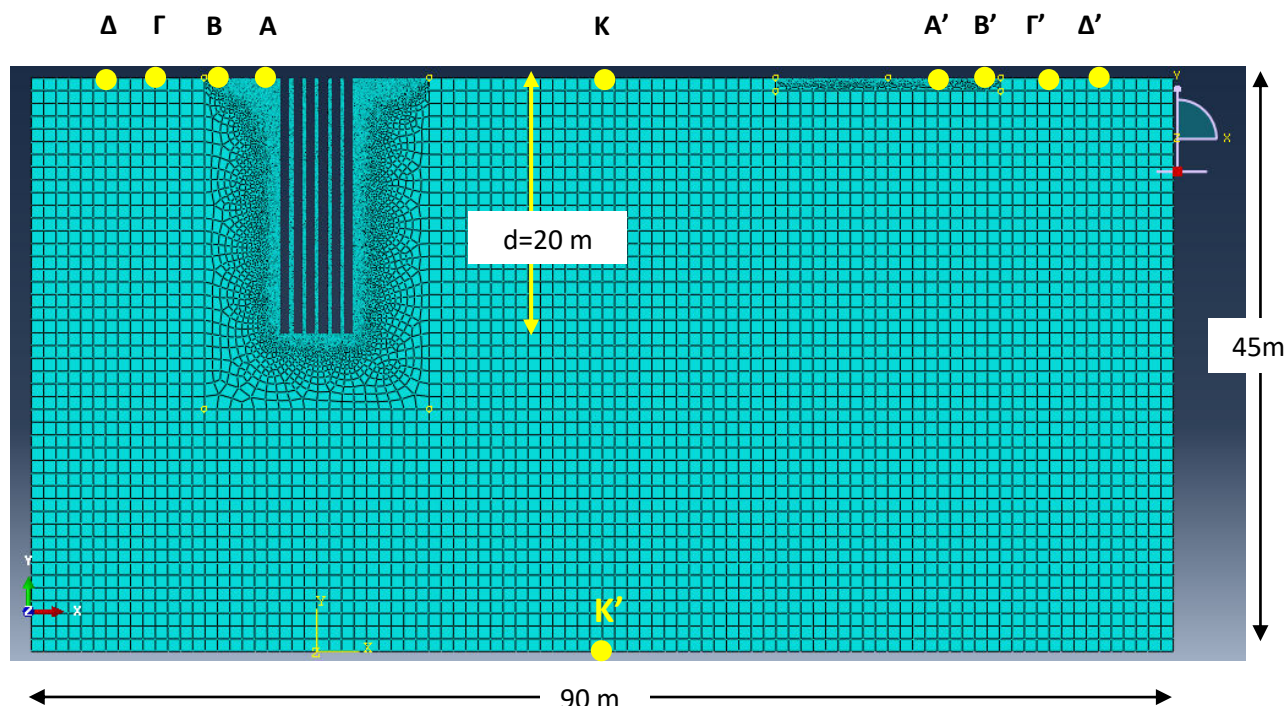
Πίνακας 3.5: Υπολογισμός αποσβεστήρων για τη μεσαία στρώση

Πυκνότητα μάζας	$\gamma=$	1937.46	$\text{kg}/\text{m}^3$
	$\rho=\gamma/g$	1937.46	$\text{Mg}/\text{m}^3$
Μέτρο ελαστικότητας	$E=$	50000000	Pa
Λόγος Poisson	$\nu=$	0.3	-
Ταχύτητα κυμάτων S	$V_s=$	267.50	m/sec
Ταχύτητα κυμάτων P	$V_p=$	186.39	m/sec
Εμβαδά επιρροής	Αενδιαμ=	1.00	$\text{m}^2$
	Αγωνιακ=	0.50	$\text{m}^2$
Αποσβεστήρες $\tau$	$\tau_{\text{ενδιαμ}}=$	<b>518270.55</b>	Nsec/m
	$\tau_{\text{γωνιακ}}=$	<b>259135.28</b>	Nsec/m
Αποσβεστήρες $\sigma$	$\sigma_{\text{ενδιαμ}}=$	<b>361117.66</b>	Nsec/m
	$\sigma_{\text{γωνιακ}}=$	<b>180558.83</b>	Nsec/m

Πίνακας 3.6: Υπολογισμός αποσβεστήρων για την κατώτερη στρώση

### 3.3 Μοντέλα αναλύσεων

#### 3.3.1 Μοντέλο για χαλαρό έδαφος & για έδαφος της γεωτεχνικής έρευνας



**Σχήμα 3.1:** Μοντέλο για χαλαρό έδαφος & για έδαφος της γεωτεχνικής έρευνας

Επιλέχθηκε η κατασκευή έξι (6) κυλινδρικών δομών με κενό αέρα, διαμέτρου  $b=0.7$  m, αξονικής απόστασης  $a=1.0$  m και βάθους  $d=20$  m.

Για τον κάνναβο, επιλέχθηκε η χρήση 4-κομβικών τετράπλευρων πεπερασμένων στοιχείων “plain strain” διάστασης 1.0m, τύπου CPE4. Ωστόσο, για τη βελτίωση της ανάλυσης στα σημεία που μας ενδιαφέρουν οι καταγραφές, έγινε πύκνωση του καννάβου με πεπερασμένα στοιχεία διάστασης 0.05m. Η πύκνωση του καννάβου έγινε:

- Περιμετρικά των κυλινδρικών δομών
- Στο ενδιάμεσο εδαφικό τμήμα των κυλινδρικών δομών
- Στην επιφάνεια του εδάφους και σε απόσταση ως 6.0m από την παρειά των ακραίων πασσάλων
- Στην επιφάνεια του εδάφους για συνολικό μήκος 17.7m (6.0m + 5.70m + 6.0m, όπου 5.70m η απόσταση της παρειάς από τον πρώτο ως τον τελευταίο πάσσαλο), στην περιοχή των αντιδιαμετρικών σημείων

Οι διαστάσεις του ημιχώρου επιλέχθηκαν έτσι ώστε η αξονική απόσταση  $L$  του συνόρου του μοντέλου από την παρειά του πασσάλου να είναι  $L \geq 20 b$ , ενώ το βάθος  $D$  του ημιχώρου επιλέχθηκε έτσι ώστε  $D \geq 45b$ , δηλαδή:



$$L \geq 14.0 \text{ m}$$

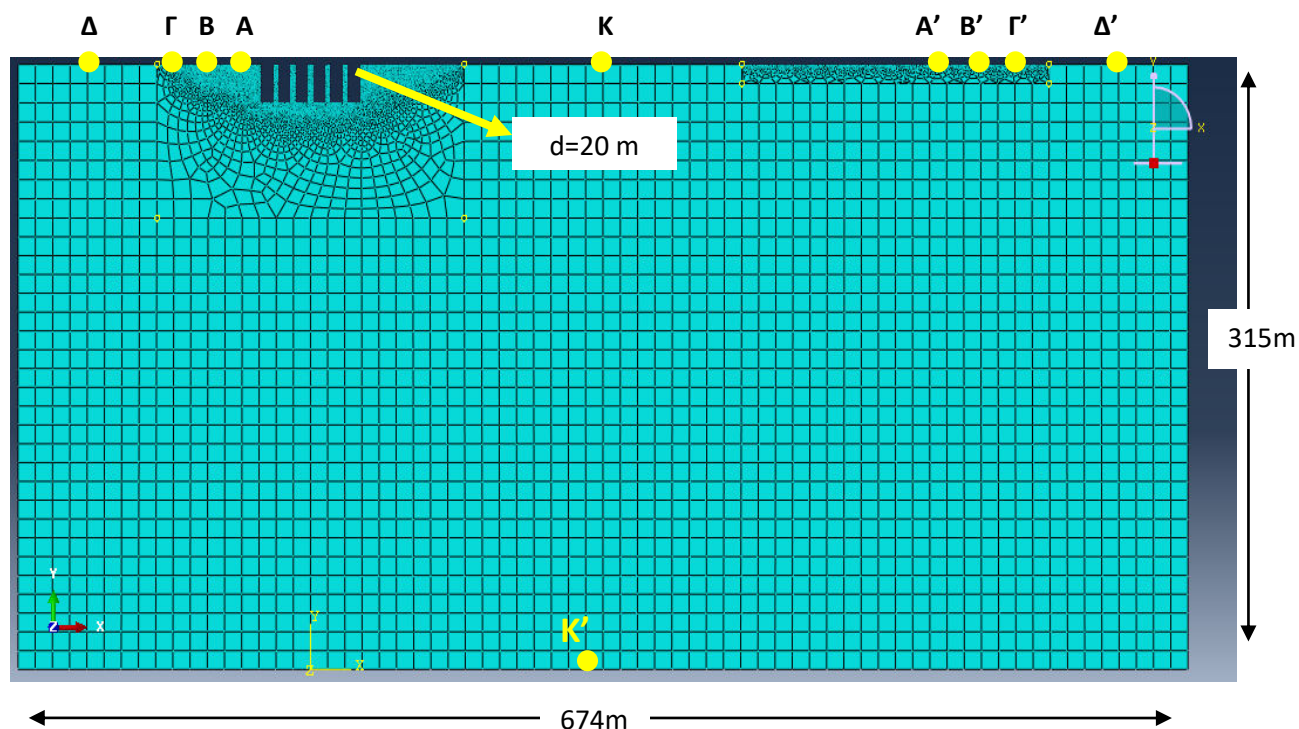
$$D \geq 31.5 \text{ m}$$

Τελικά επιλέχθηκε απόσταση  $L = 20 \text{ m}$  και βάθος  $D = 45 \text{ m}$ . Συνεπώς το συνολικό μήκος του μοντέλου είναι  $90\text{m}$  με βάθος  $45 \text{ m}$ .

Ορίζονται σημεία στο μοντέλο, στα οποία θα πραγματοποιήσουμε τις αναλύσεις και θα εξάγουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Αυτά είναι κάτωθι:

- Σημείο A, σε απόσταση  $1.0\text{m}$  πίσω από την παρειά του ακραίου πασσάλου
- Σημείο A', αντιδιαμετρικό σημείο του Σημείου A
- Σημείο B, σε απόσταση  $5.0\text{m}$  πίσω από την παρειά του ακραίου πασσάλου
- Σημείο B', αντιδιαμετρικό σημείο του Σημείου A
- Σημείο Γ, σε απόσταση  $10.0\text{m}$  πίσω από την παρειά του ακραίου πασσάλου
- Σημείο Γ', αντιδιαμετρικό σημείο του Σημείου A
- Σημείο Δ, σε απόσταση  $15.0\text{m}$  πίσω από την παρειά του ακραίου πασσάλου
- Σημείο Δ', αντιδιαμετρικό σημείο του Σημείου A
- Σημείο K, στο μέσον της επιφάνειας του καννάβου
- Σημείο K', στο μέσον της επιφάνειας του βραχώδους υποβάθρου

### 3.3.2 Μοντέλο για σκληρό έδαφος



Σχήμα 3.2: Μοντέλο για σκληρό έδαφος

Επιλέχθηκε η κατασκευή έξι (6) κυλινδρικών δομών με κενό αέρα, διαμέτρου  $b=7.0\text{m}$ , αξονικής απόστασης  $a=10.0\text{ m}$  και βάθους  $d=20\text{ m}$ .

Για τον κάνναβο, επιλέχθηκε η χρήση 4-κομβικών τετράπλευρων πεπερασμένων στοιχείων “plain strain” διάστασης  $10.0\text{m}$ , τύπου CPE4. Ωστόσο, για τη βελτίωση της ανάλυσης στα σημεία που μας ενδιαφέρουν οι καταγραφές, έγινε πύκνωση του καννάβου με πεπερασμένα στοιχεία διάστασης  $0.5\text{m}$ . Η πύκνωση του καννάβου έγινε:

- Περιμετρικά των κυλινδρικών δομών
- Στο ενδιάμεσο εδαφικό τμήμα των κυλινδρικών δομών
- Στην επιφάνεια του εδάφους και σε απόσταση ως  $60.0\text{m}$  από την παρειά των ακραίων πασσάλων
- Στην επιφάνεια του εδάφους για συνολικό μήκος  $177\text{m}$  ( $60.0\text{m} + 57.0\text{m} + 60.0\text{m}$ , όπου  $57.0\text{m}$  η απόσταση της παρειάς από τον πρώτο ως τον τελευταίο πάσσαλο), στην περιοχή των αντιδιαμετρικών σημείων

Οι διαστάσεις του ημιχώρου επιλέχθηκαν έτσι ώστε η αξονική απόσταση  $L$  του συνόρου του μοντέλου από την παρειά του πασσάλου να είναι  $L \geq 20 b$ , ενώ το βάθος  $D$  του ημιχώρου επιλέχθηκε έτσι ώστε  $D \geq 45b$ , δηλαδή:

$$L \geq 140.0\text{ m}$$

$$D \geq 315.0\text{ m}$$

Τελικά επιλέχθηκε απόσταση  $L = 140\text{ m}$  και βάθος  $D = 315\text{ m}$ . Συνεπώς το συνολικό μήκος του μοντέλου είναι  $674\text{ m}$  με βάθος  $315\text{ m}$ .

Ορίζονται σημεία στο μοντέλο, στα οποία θα πραγματοποιήσουμε τις αναλύσεις και θα εξάγουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Αυτά είναι κάτωθι:

- Σημείο A, σε απόσταση  $10.0\text{m}$  πίσω από την παρειά του ακραίου πασσάλου
- Σημείο A', αντιδιαμετρικό σημείο του Σημείου A
- Σημείο B, σε απόσταση  $25.0\text{m}$  πίσω από την παρειά του ακραίου πασσάλου
- Σημείο B', αντιδιαμετρικό σημείο του Σημείου A
- Σημείο Γ, σε απόσταση  $50.0\text{m}$  πίσω από την παρειά του ακραίου πασσάλου
- Σημείο Γ', αντιδιαμετρικό σημείο του Σημείου A
- Σημείο Δ, σε απόσταση  $100.0\text{m}$  πίσω από την παρειά του ακραίου πασσάλου
- Σημείο Δ', αντιδιαμετρικό σημείο του Σημείου A
- Σημείο K, στο μέσον της επιφάνειας του καννάβου
- Σημείο K', στο μέσον της επιφάνειας του βραχώδους υποβάθρου

## 3.4 Χαρακτηριστικά διεγέρσεων

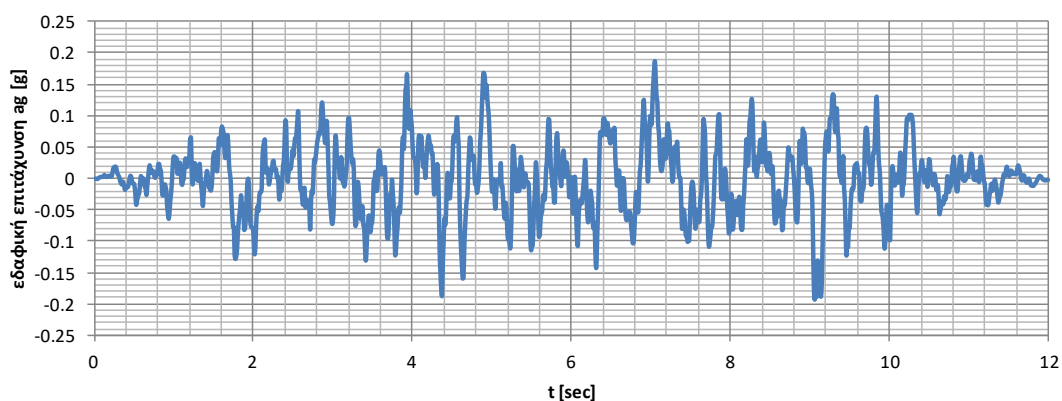
### 3.4.1 Χρονοϊστορίες συμβατές με το σεισμικό φάσμα κατά Ευρωκώδικα 8

Ως διεγερση χρησιμοποιείται τεχνητό επιταχυνσιογράφημα συμβατό με το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού του Ευρωκώδικα 8, με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Επιτάχυνση αναφοράς σε βραχώδες έδαφος  $a_{gR}=0.16\text{ g}$
- Σπουδαιότητα  $\gamma_I=1.00$  (Σ2)

Η εν λόγω διεγερση αναφέρεται στο εξής ως «ΤΗ-EC8». Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται το τεχνητό επιταχυνσιογράφημα που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις.

Εφαρμόζονται ως οριζόντια επιτάχυνση στο σημείο K, στο σημείο K' και σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου, κατά περίπτωση. Στα σημεία ενδιαφέροντος καταγράφεται η οριζόντια επιτάχυνση.



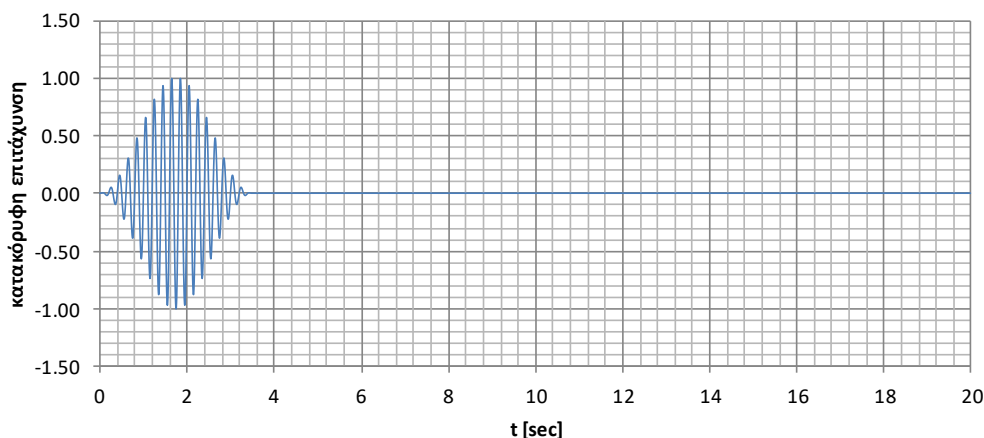
**Σχήμα 3.3:** Χρονοϊστορία επιτάχυνσης συμβατή με φάσμα Ευρωκώδικα 8.

### 3.4.2 Απλοποιημένο κυματίδιο Hanning

Εκτός από την τεχνητή χρονοϊστορία διερευνάται η αποδοτικότητα της περιοδικής δομής όταν η διεγερση είναι ένα τεχνητό κυματίδιο Hanning. Χρησιμοποιείται κυματίδιο Hanning σύμφωνα με τα παρακάτω στοιχεία:

- συχνότητα  $f=5\text{ Hz}$
- 19 ημιτονικοί κύκλοι
- εύρος  $a=1\text{ m/sec}^2$

Η εν λόγω διέγερση αναφέρεται στο εξής ως «HANNING-HF5». Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν εφαρμόστηκε ως κατακόρυφη επιτάχυνση στο σημείο Κ. Στα σημεία ενδιαφέροντος καταγράφεται η κατακόρυφη επιτάχυνση.

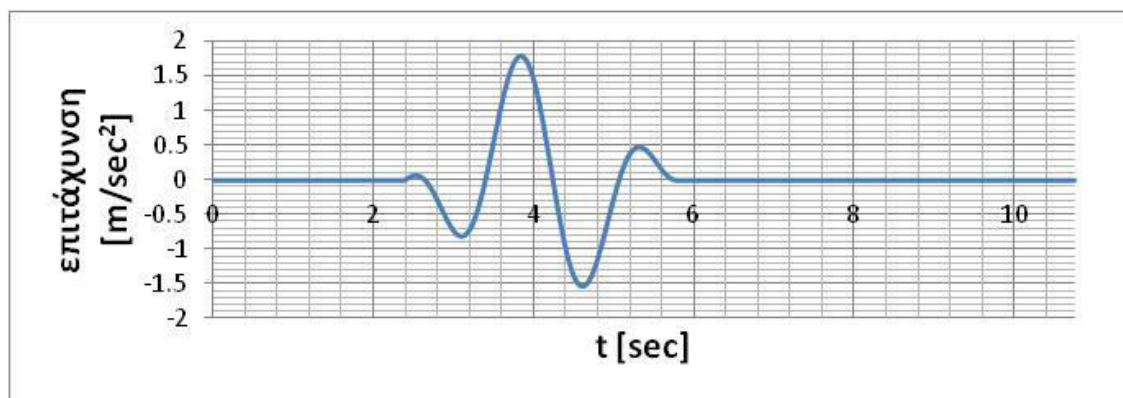


Σχήμα 3.4: Απλοποιημένο κυματίδιο Hanning, συχνότητα  $f=5$  Hz.

### 3.4.3 Παλμοί σεισμικών καταγραφών κοντινού πεδίου

Χρησιμοποιείται η μέθοδος Manroeidis & Parageorgiou (2003), όπου καταγραφές πραγματικών σεισμών μετατρέπονται σε επιταχυνσιογραφήματα παλμικής μορφής, όπως αναπτύχθηκε αναλυτικά Κεφάλαιο 2. Οι διεγέρσεις αναφέρονται ως «ΤΗ-περιοχή σεισμού».

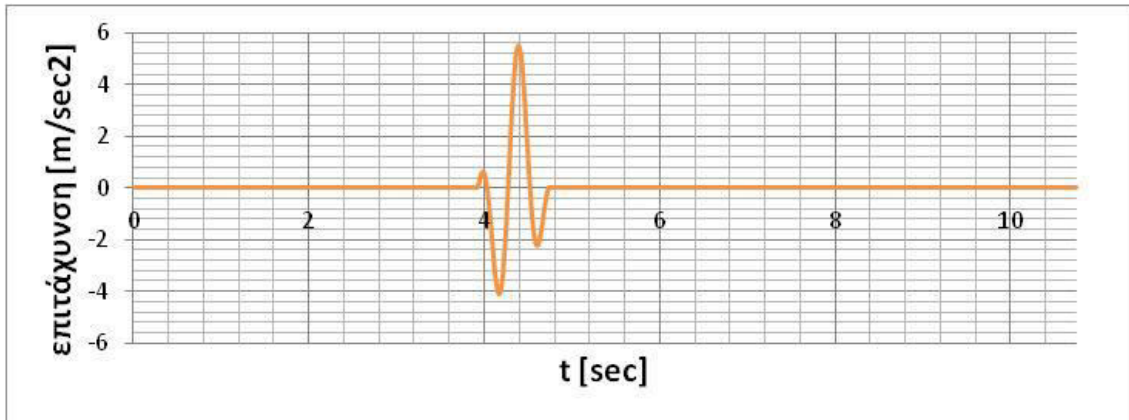
Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, οι διεγέρσεις αυτές εφαρμόστηκαν ως οριζόντια επιτάχυνση σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου. Στα σημεία ενδιαφέροντος καταγράφηκαν οι οριζόντιες επιταχύνσεις.



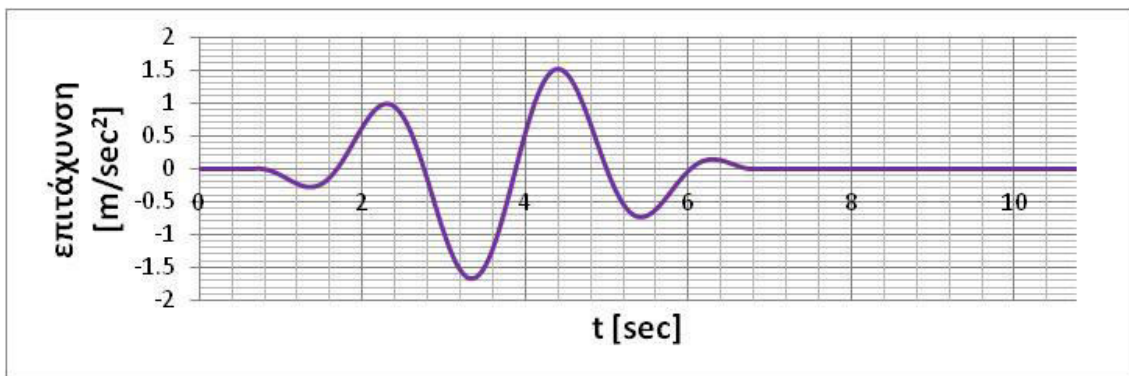
Σχήμα 3.5: Επιταχυνσιογράφημα Parkfield



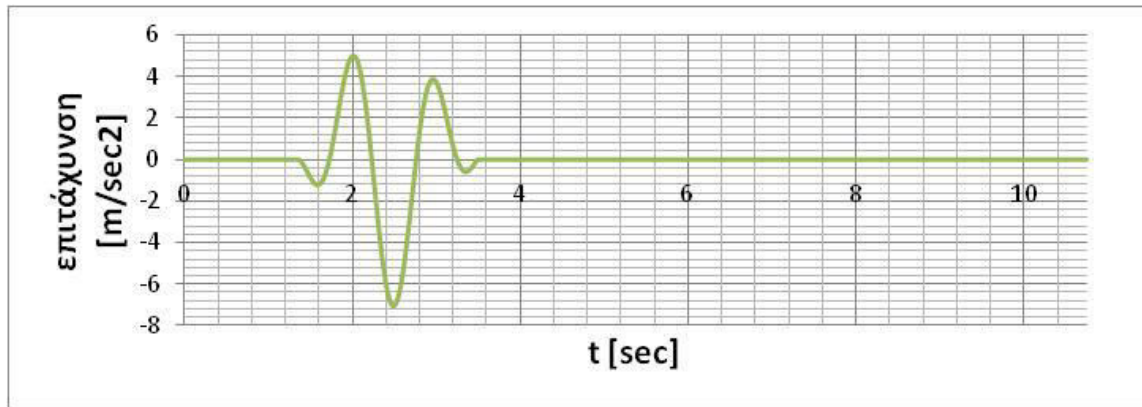
Σχήμα 3.6: Επιταχυνσιογράφημα Kobe



Σχήμα 3.7: Επιταχυνσιογράφημα Aegeion



Σχήμα 3.8: Επιταχυνσιογράφημα Erzincan



Σχήμα 3.9: Επιταχυνσιογράφημα Northridge

## 3.5 Αναλύσεις

### 3.5.1 Αναλύσεις χωρίς απόσβεση

Το έδαφος θεωρείται ελαστικό και ομοιόμορφο. Δεν εφαρμόζεται απόσβεση. Εξετάζονται τα σημεία Α, Β, Γ, Δ και τα αντιδιαμετρικά τους Α', Β', Γ', Δ'. Τα σενάρια των αναλύσεων είναι τα παρακάτω:

- ΣΕΝΑΡΙΟ 1.1: Διέγερση TH-EC8 στο σημείο Κ για χαλαρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 1.2: Διέγερση TH-EC8 στο σημείο Κ' για χαλαρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 1.3: Διέγερση TH-EC8 σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 1.4: Διέγερση HANNING-HF5 στο σημείο Κ για χαλαρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 1.5: Διέγερση TH-Parkfield σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 1.6: Διέγερση TH-Kobe σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 1.7: Διέγερση TH-Aegion σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 1.8: Διέγερση TH-Erzincan σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 1.9: Διέγερση TH-Northridge σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 1.10: Διέγερση TH-EC8 στο σημείο Κ για σκληρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 1.11: Διέγερση TH-EC8 στο σημείο Κ' για σκληρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 1.12: Διέγερση TH-EC8 σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 1.13: Διέγερση HANNING-HF5 στο σημείο Κ για σκληρό έδαφος

- ΣΕΝΑΡΙΟ 1.14: Διέγερση TH-Parkfield σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 1.15: Διέγερση TH-Kobe σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 1.16: Διέγερση TH-Aegion σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 1.17: Διέγερση TH-Erzincan σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 1.18: Διέγερση TH-Northridge σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος

### 3.5.2 Αναλύσεις με απόσβεση Rayleigh για χαλαρό και σκληρό έδαφος

Το έδαφος θεωρείται ελαστικό και ομοιόμορφο. Εφαρμόζεται απόσβεση Rayleigh. Εξετάζεται ενδεικτικά μόνον η περίπτωση του σημείου B και του αντιδιαμετρικού B'.

Για την περίπτωση του χαλαρού εδάφους οι σημαντικές ιδιοπερίοδοι σύμφωνα με τη σχέση (1.6) είναι:

$$T_1 = \frac{4H}{V_S} = 1.124s$$

$$T_N = T_3 = \frac{4H}{V_S} \frac{1}{5} = 0.225s$$

Θεωρώντας  $\zeta=10\%$  από τις σχέσεις (1.22) και (1.23) προκύπτει:

$$\alpha = 0.9316$$

$$\beta = 0.00596$$

Οι συντελεστές αυτοί εισάγονται στον κώδικα ABAQUS και υπολογίζεται η απόσβεση Rayleigh.

Στην περίπτωση του σκληρού εδάφους οι σημαντικές ιδιοπερίοδοι σύμφωνα με τη σχέση (1.6) είναι:

$$T_1 = \frac{4H}{V_S} = 1.26s$$

$$T_N = T_3 = \frac{4H}{V_S} \frac{1}{5} = 0.252s$$

Θεωρώντας  $\zeta=5\%$  από τις σχέσεις (1.22) και (1.23) προκύπτει:

$$\alpha = 0.4156$$

$$\beta = 0.00334$$

Οι συντελεστές αυτοί εισάγονται στον κώδικα ABAQUS και υπολογίζεται η απόσβεση Rayleigh.

- ΣΕΝΑΡΙΟ 2.1: Διέγερση TH-EC8 σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 2.2: Διέγερση HANNING-HF5 στο σημείο K για χαλαρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 2.3: Διέγερση TH-Parkfield σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 2.4: Διέγερση TH-Kobe σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 2.5: Διέγερση TH-Aegion σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 2.6: Διέγερση TH-Erzincan σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 2.7: Διέγερση TH-Northridge σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 2.8: Διέγερση TH-EC8 σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 2.9: Διέγερση HANNING-HF5 στο σημείο K για σκληρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 2.10: Διέγερση TH-Parkfield σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 2.11: Διέγερση TH-Kobe σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 2.12: Διέγερση TH-Aegion σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 2.13: Διέγερση TH-Erzincan σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος
- ΣΕΝΑΡΙΟ 2.14: Διέγερση TH-Northridge σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος

### 3.5.3 Αναλύσεις με απόσβεση Rayleigh για το έδαφος της γεωτεχνικής έρευνας

Το έδαφος θεωρείται ελαστικό και γίνεται χρήση των δεδομένων της γεωτεχνικής έρευνας (όπως παρουσιάζονται στην παρ. 3.1.3). Γίνεται η παραδοχή πως το



έδαφος παραμένει το ίδιο και μετά τα 20m, όπου σταματά η γεωτεχνική έρευνα. Εφαρμόζεται απόσβεση Rayleigh. Εξετάζεται ενδεικτικά μόνον η περίπτωση του σημείου Β και του αντιδιαμετρικού Β'.

Υπολογίζεται η ταχύτητα  $V_{S,30}$  η οποία δίνεται από τη σχέση (1.28):

$$V_{S,30} = \frac{30}{\frac{12}{267.5} + \frac{3}{180} + \frac{15}{267.5}} = 254,76m/s$$

Σημειώνεται πως για τις στρώσεις 0m-12m και 15-20m χρησιμοποιήθηκε η μέση ταχύτητα των τιμών  $V_S$  που δίνονται στη γεωτεχνικά έρευνα. Επίσης, σημειώνεται πως το έδαφος αυτό αντιστοιχεί σε έδαφος κατηγορίας C κατά EC8.

Οι σημαντικές ιδιοπερίοδοι σύμφωνα με τη σχέση (1.6) είναι:

$$T_1 = \frac{4H}{V_S} = 0.701s$$

$$T_N = T_3 = \frac{4H}{V_S} \frac{1}{5} = 0.14s$$

Θεωρώντας  $\zeta=5\%$  από τις σχέσεις (1.22) και (1.23) προκύπτει:

$$\alpha = 0.747$$

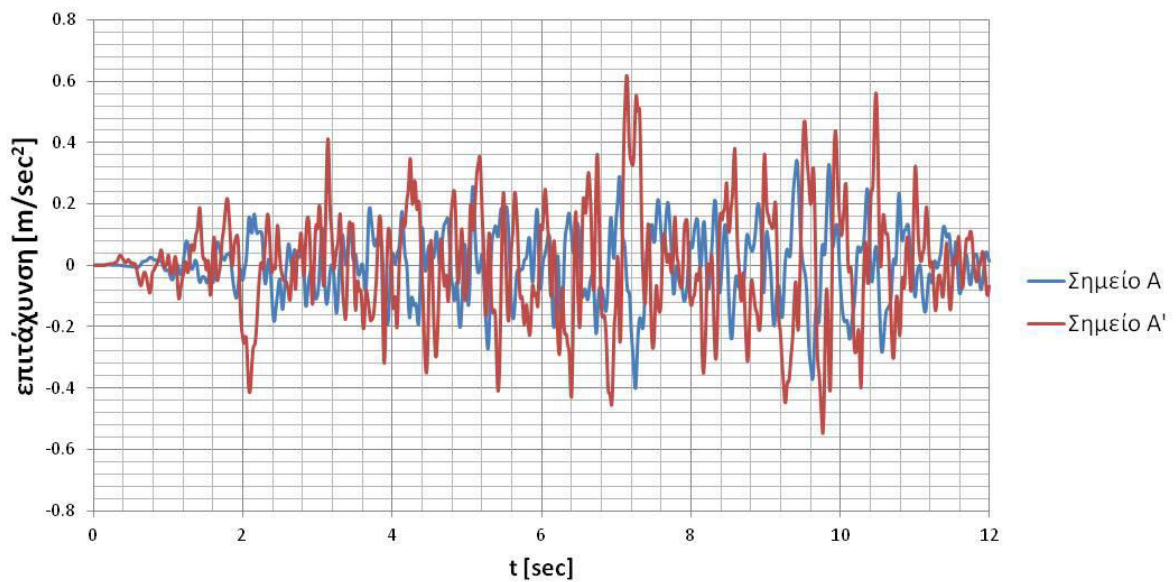
$$\beta = 0.00186$$

Τα σενάρια αυτά είναι τα παρακάτω:

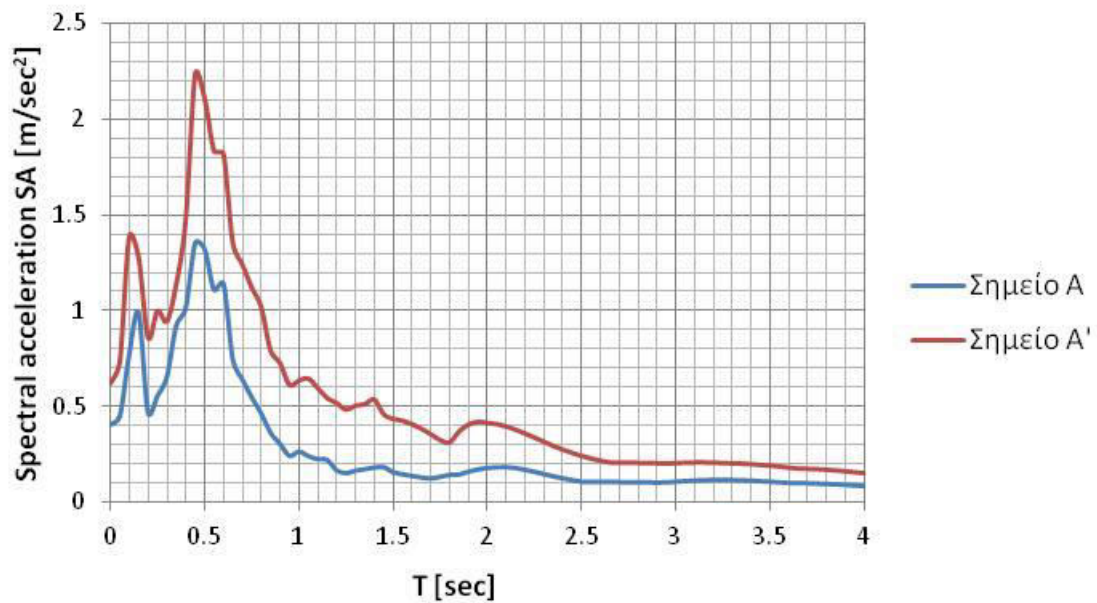
- ΣΕΝΑΡΙΟ 3.1: Διέγερση HANNING-HF5 στο σημείο Κ για το έδαφος της γεωτεχνικής έρευνας
- ΣΕΝΑΡΙΟ 3.2: Διέγερση TH-Kobe σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για το έδαφος της γεωτεχνικής έρευνας
- ΣΕΝΑΡΙΟ 3.3: Διέγερση TH-Northridge σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για το έδαφος της γεωτεχνικής έρευνας

## 4. Αποτελέσματα

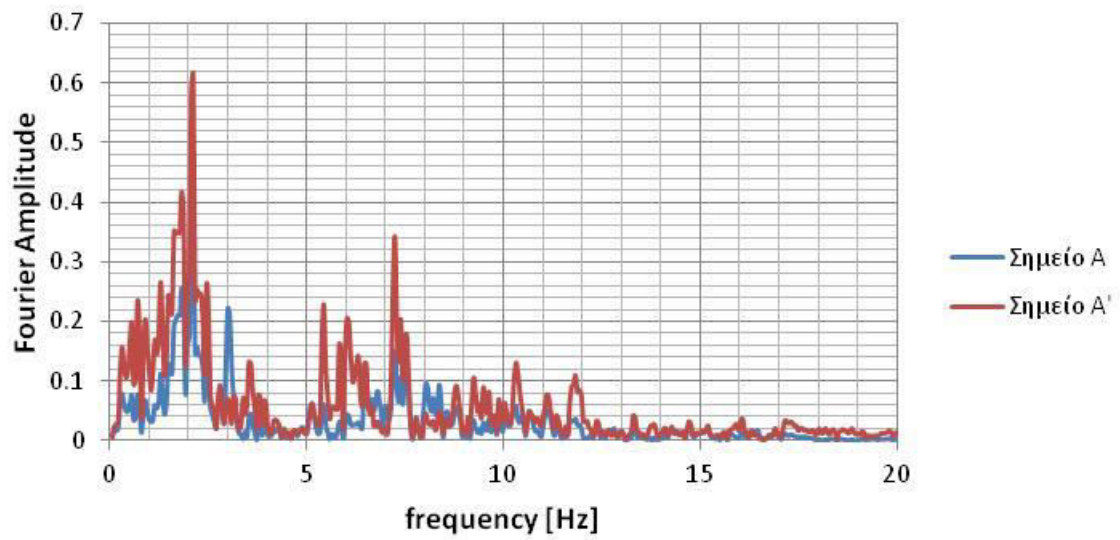
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.1: Διέγερση TH-EC8 στο σημείο Κ για χαλαρό έδαφος



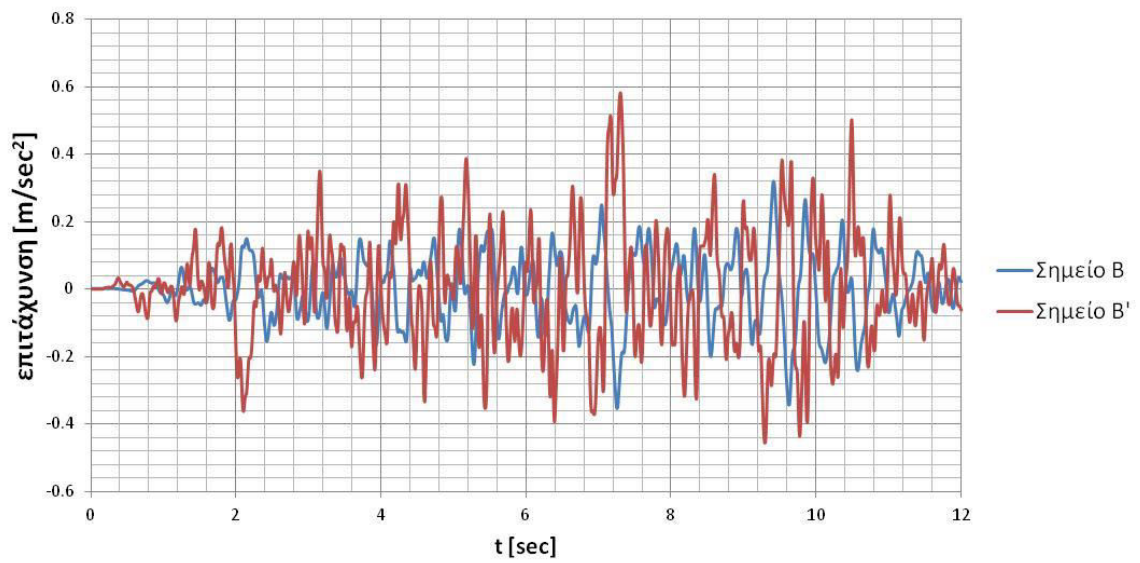
Σχήμα 4.1: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων A και A' για για Σενάριο Νο 1.1.



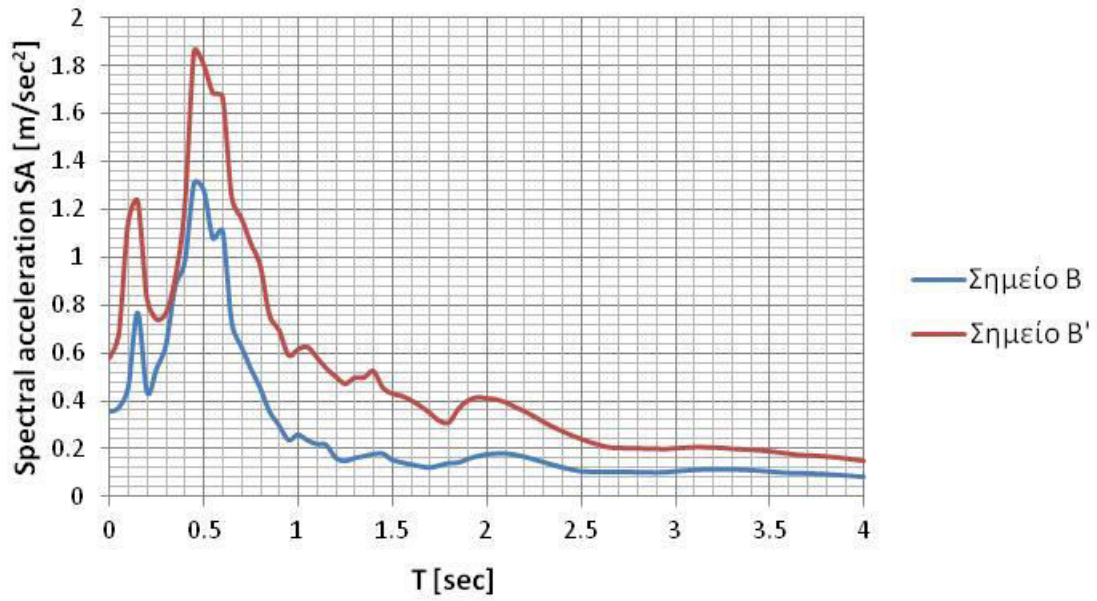
Σχήμα 4.2: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.1.



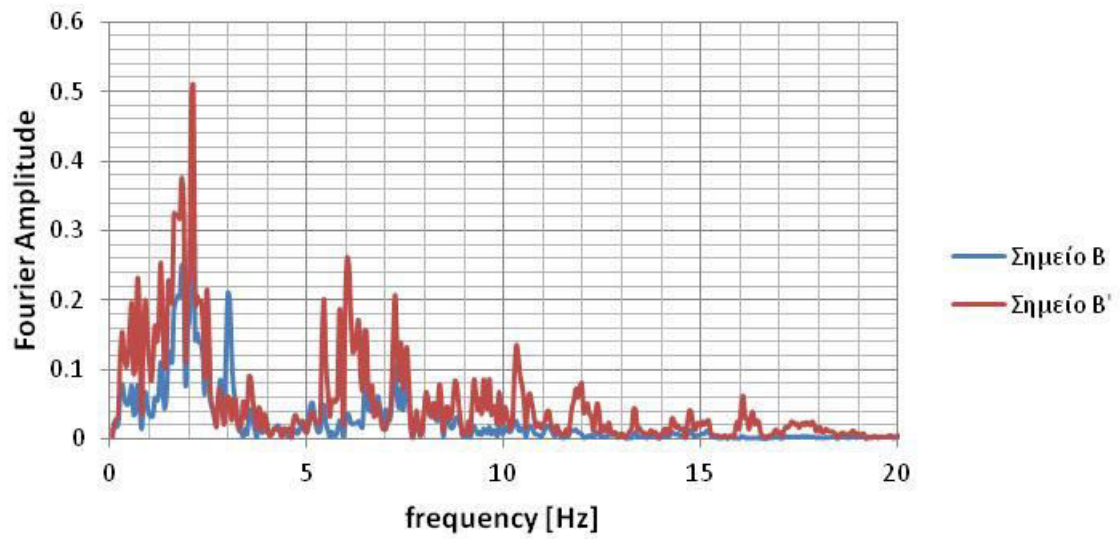
Σχήμα 4.3: Φάσματα Fourier σημείων Α και Α' για Σενάριο Νο 1.1.



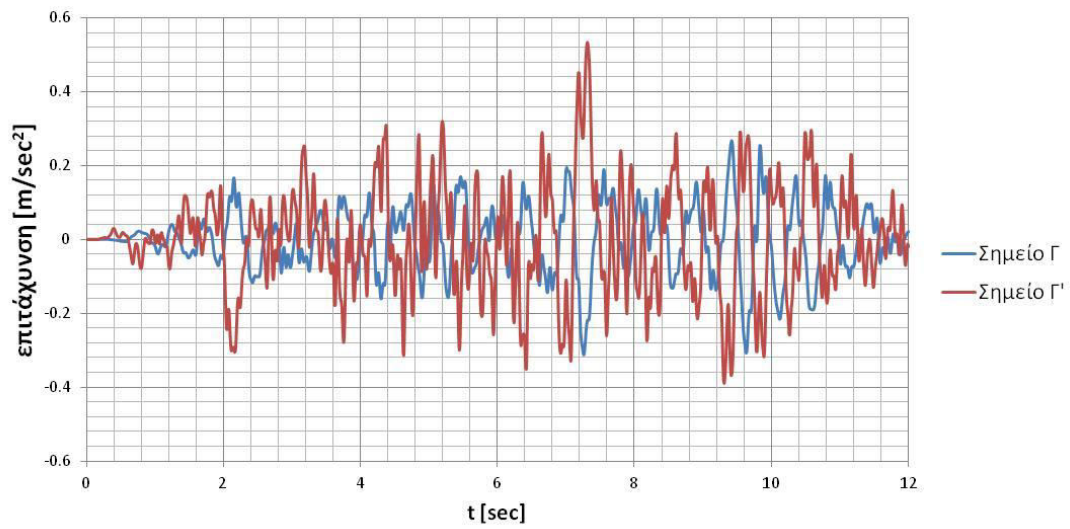
Σχήμα 4.4: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.1.



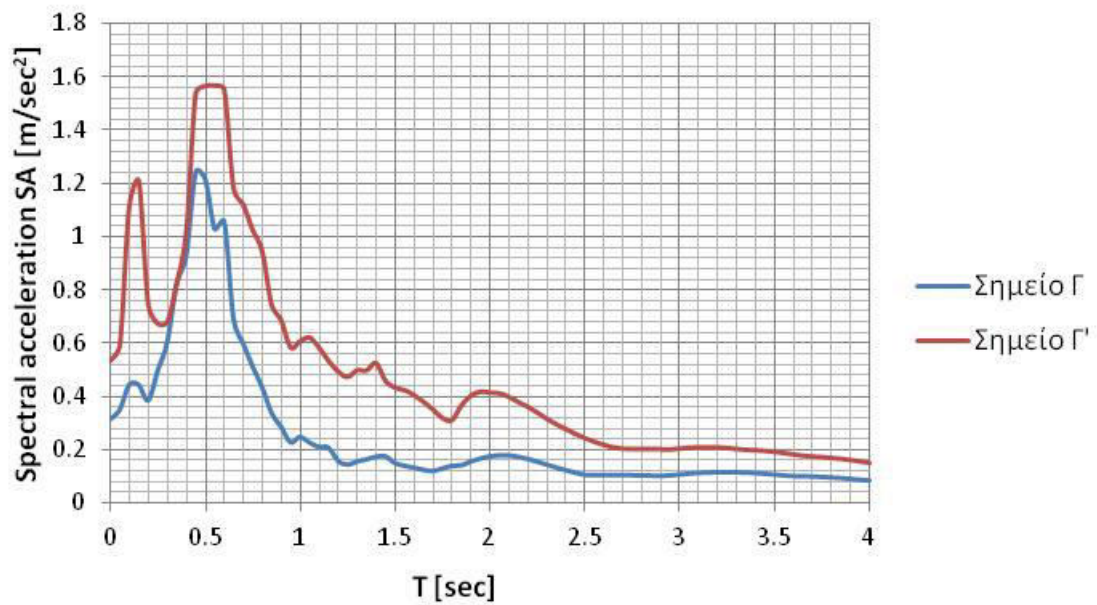
Σχήμα 4.5: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.1.



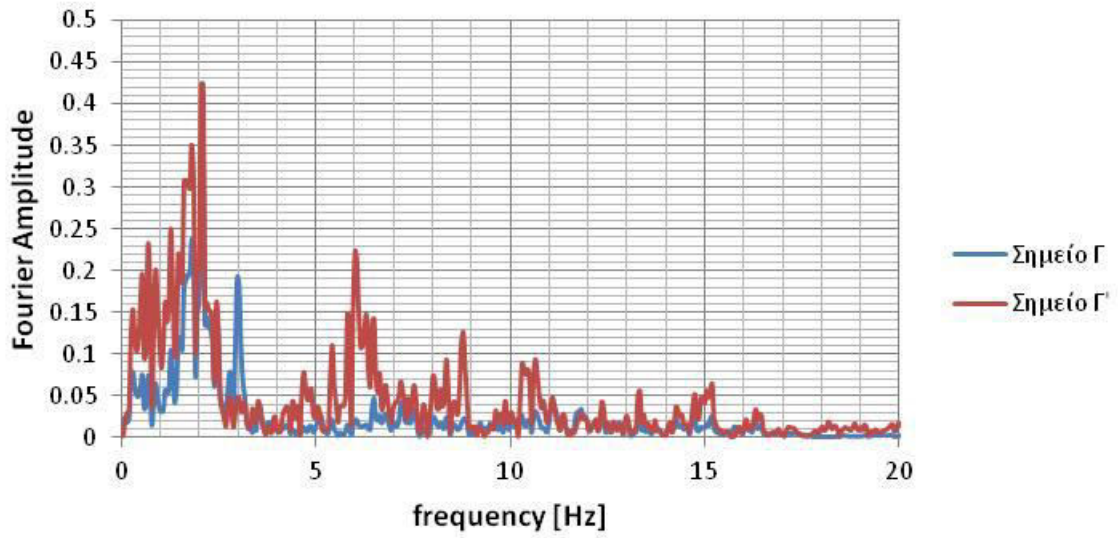
Σχήμα 4.6: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.1.



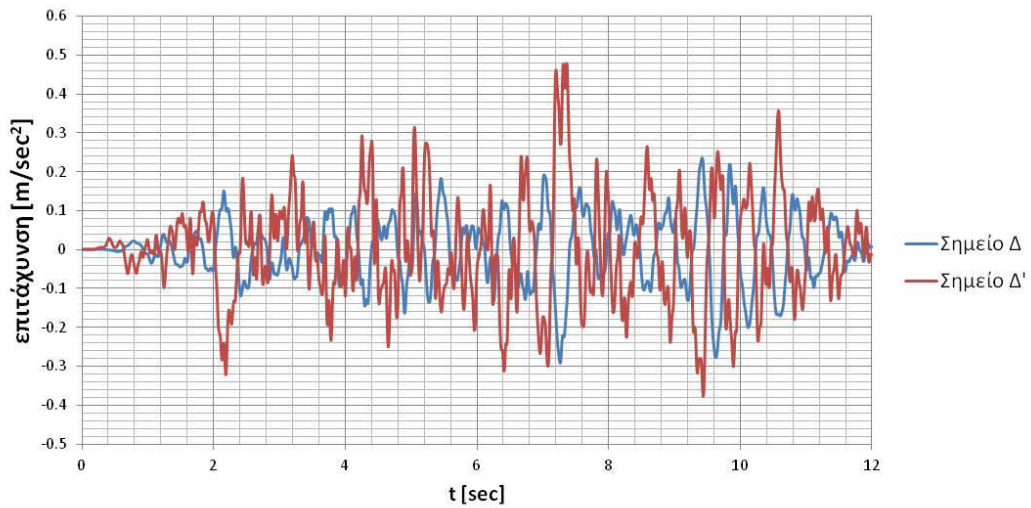
Σχήμα 4.7: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.1.



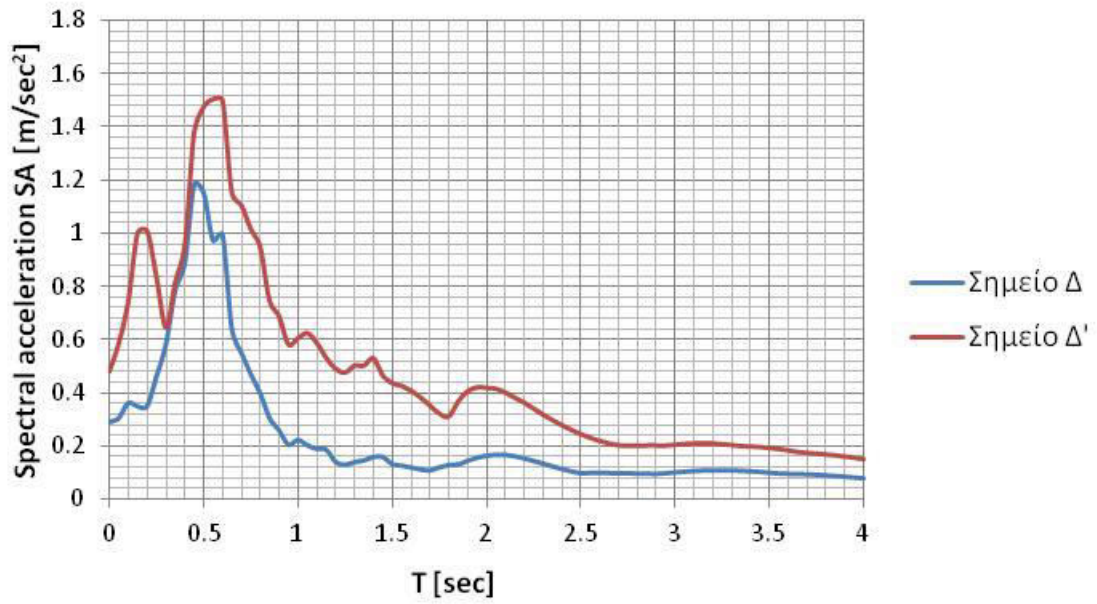
Σχήμα 4.8: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.1.



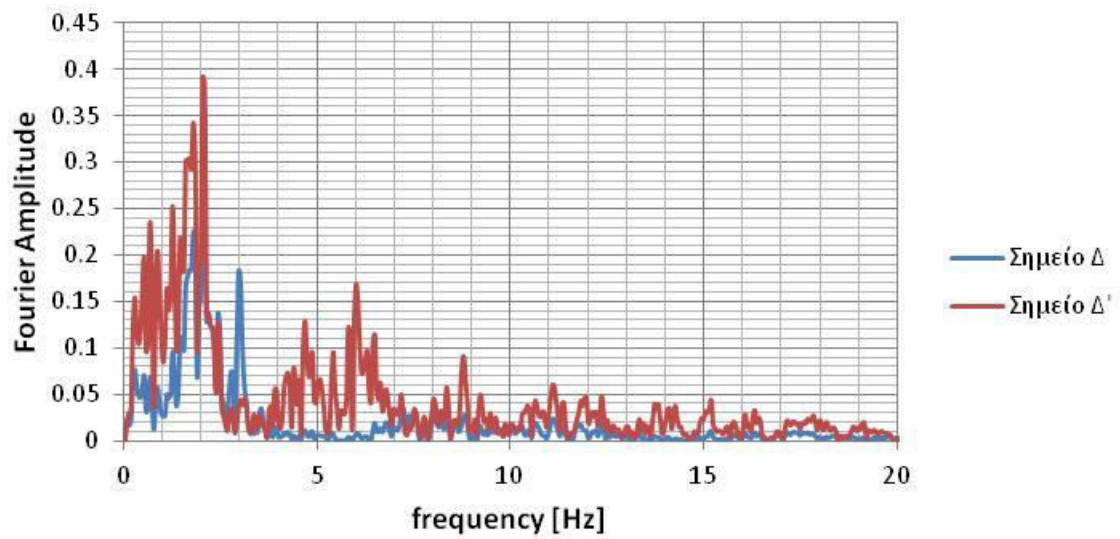
**Σχήμα 4.9:** Φάσματα Fourier σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.1.



**Σχήμα 4.10:** Επιταχυνσιογραφήματα σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.1.

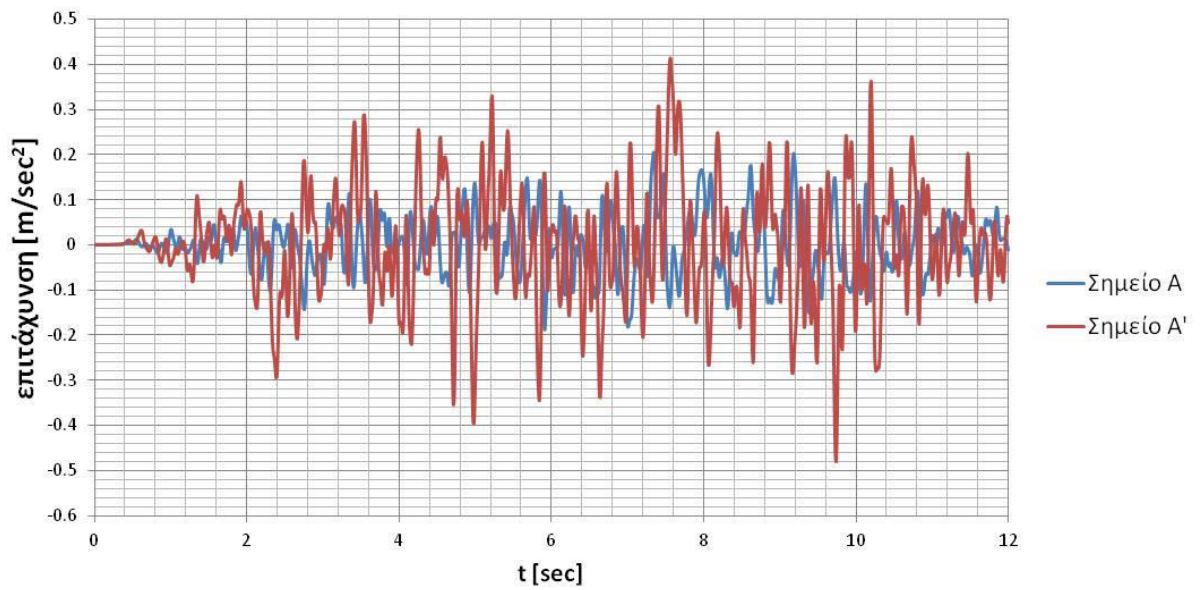


Σχήμα 4.11: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.1.

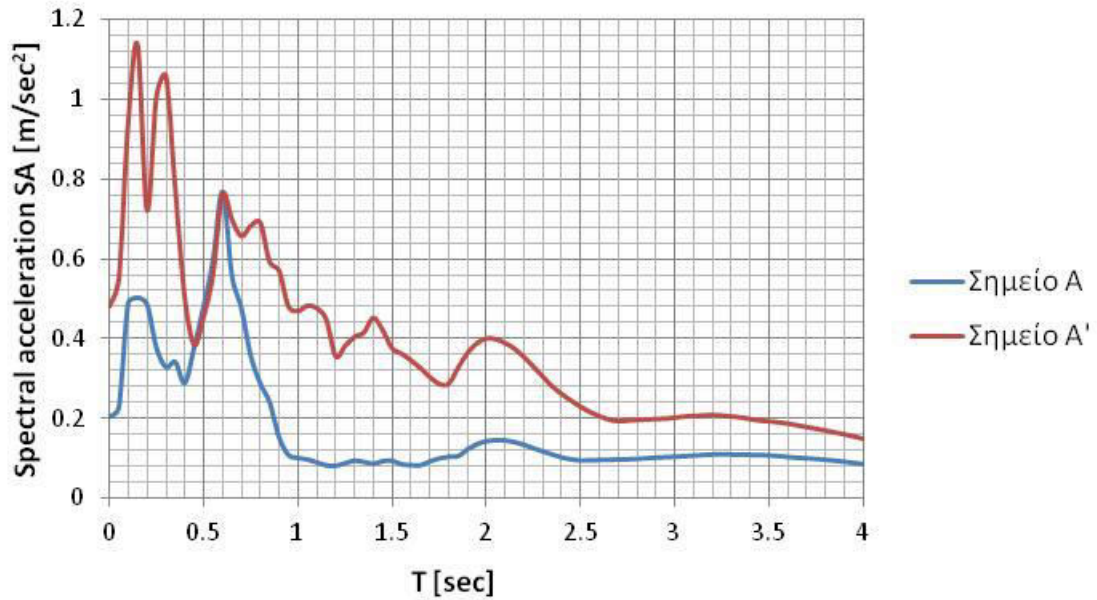


Σχήμα 4.12: Φάσματα Fourier σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.1.

Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.2: Διέγερση TH-EC8 στο σημείο Κ' για χαλαρό έδαφος

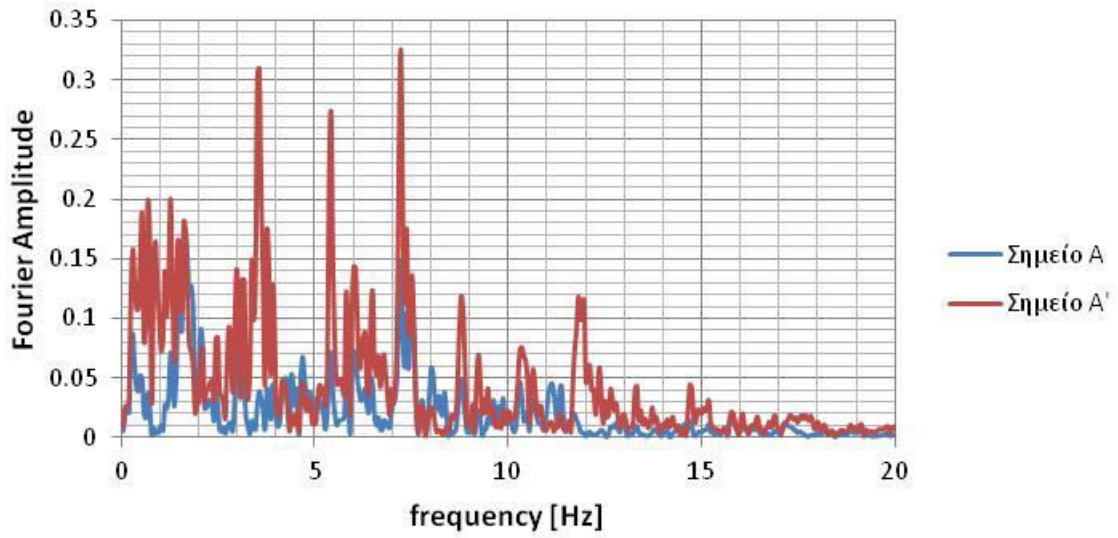


Σχήμα 4.13: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.2.

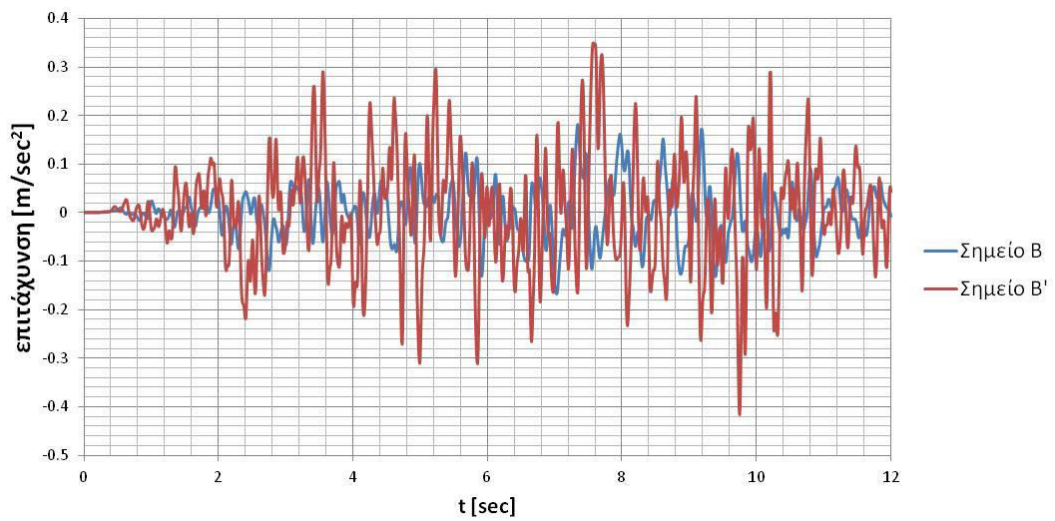


Σχήμα 4.14: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.2.

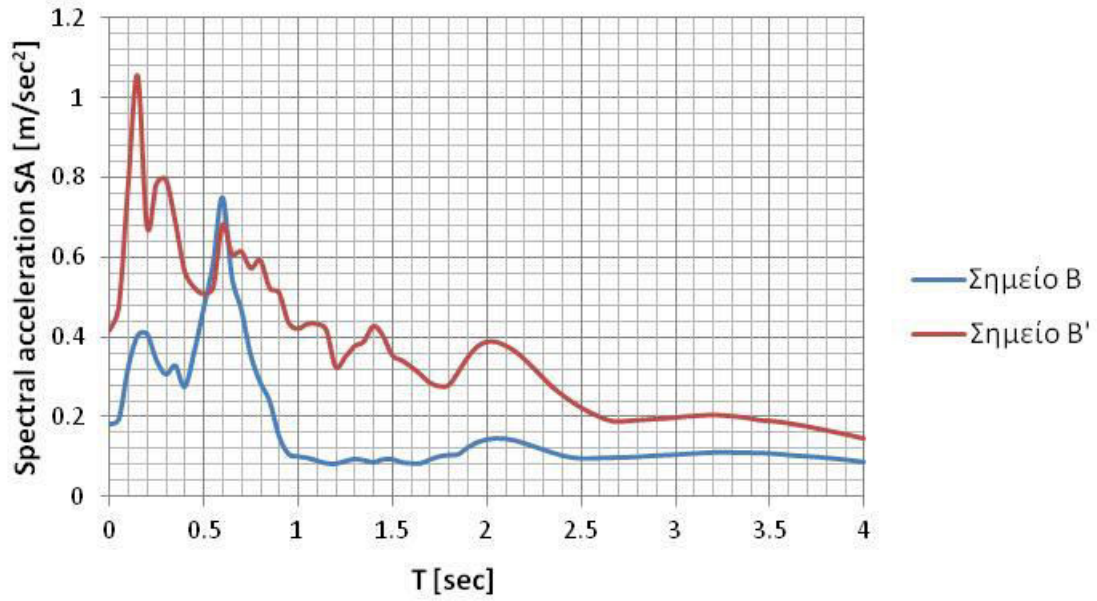




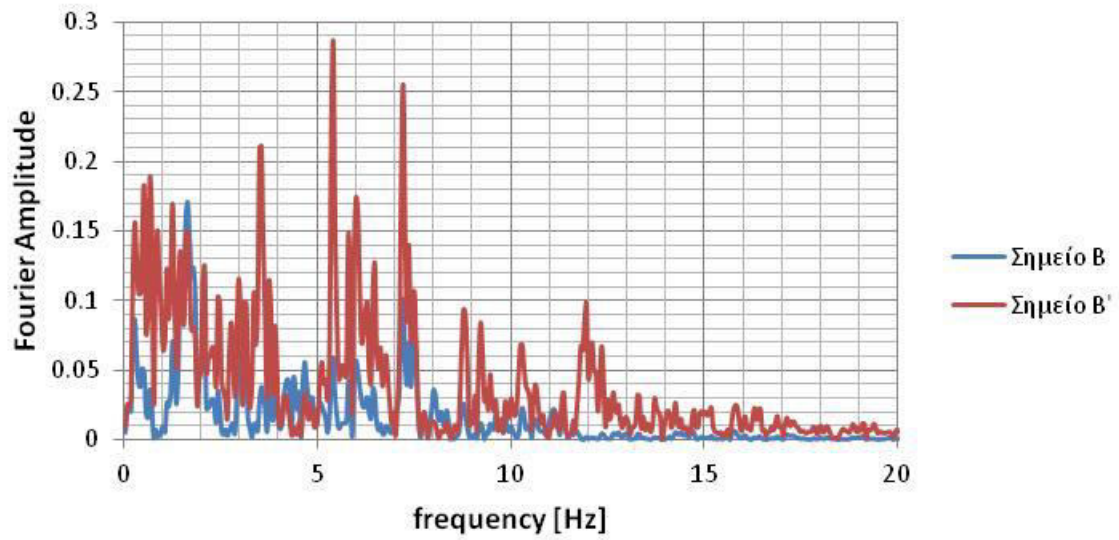
**Σχήμα 4.15:** Φάσματα Fourier σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.2.



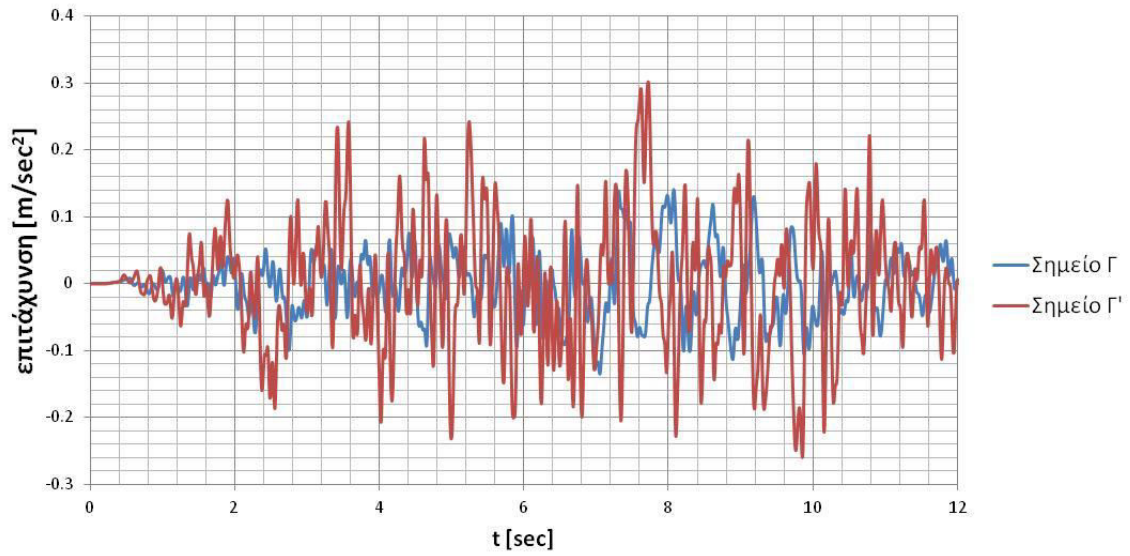
**Σχήμα 4.16:** Επιταχυνσιογραφήματα σημείων B και B' για Σενάριο Νο 1.2.



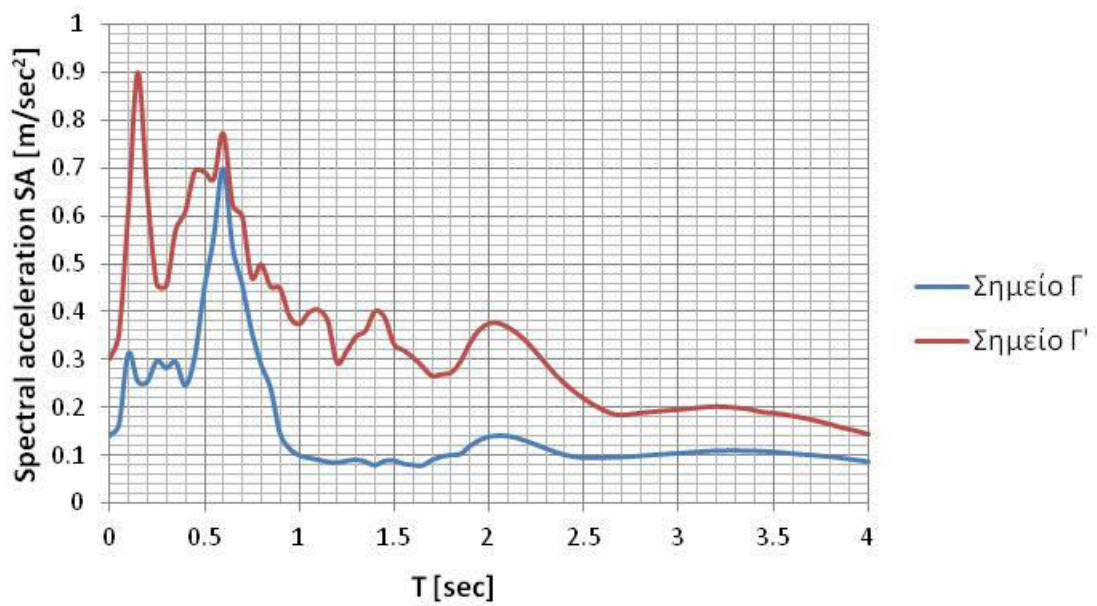
Σχήμα 4.17: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.2.



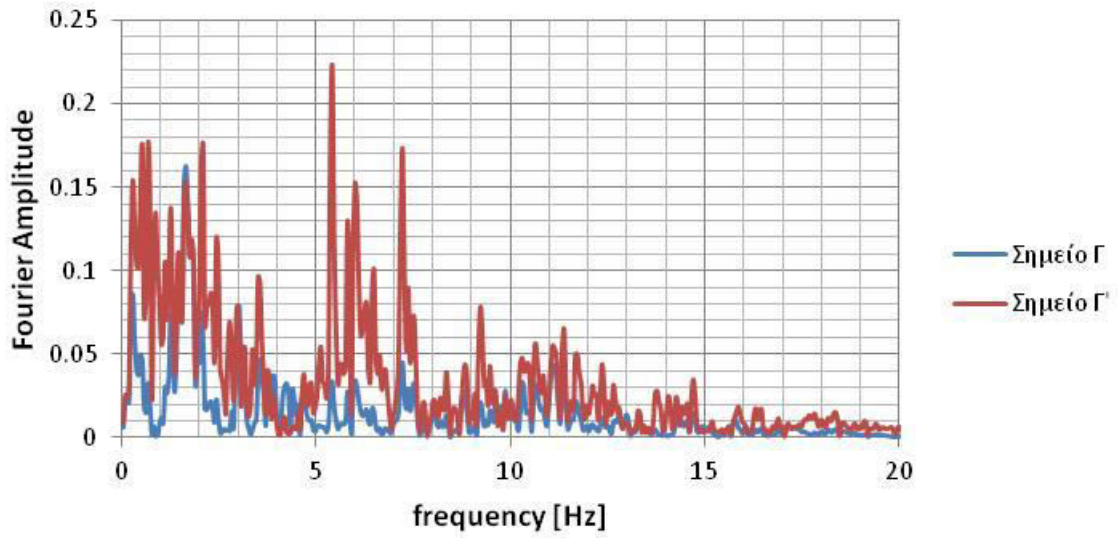
Σχήμα 4.18: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.2.



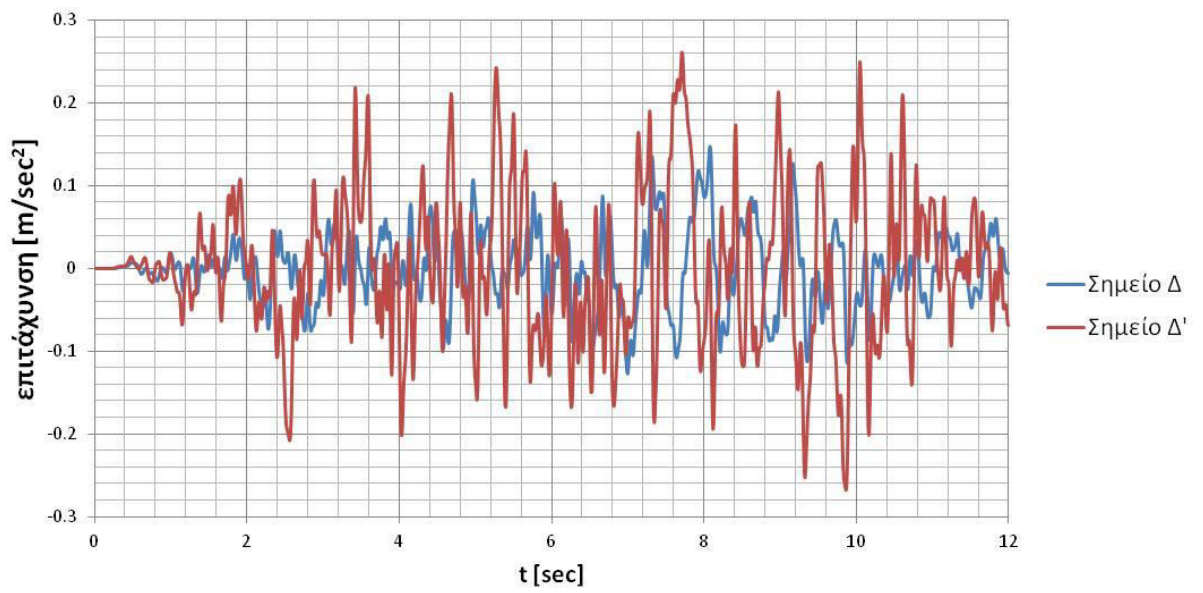
Σχήμα 4.19: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.2.



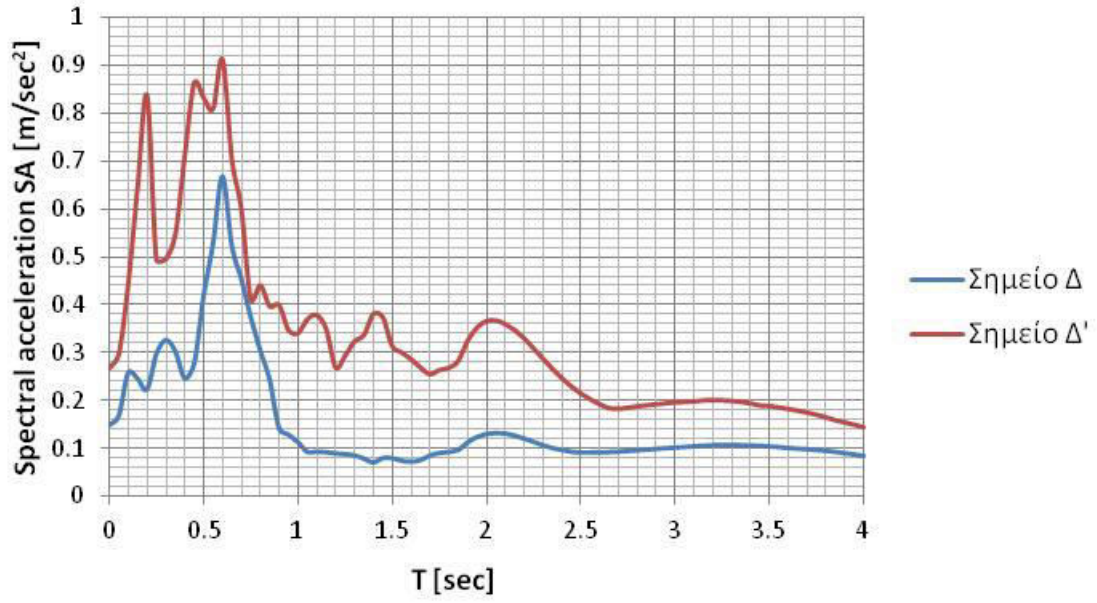
Σχήμα 4.20: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.2.



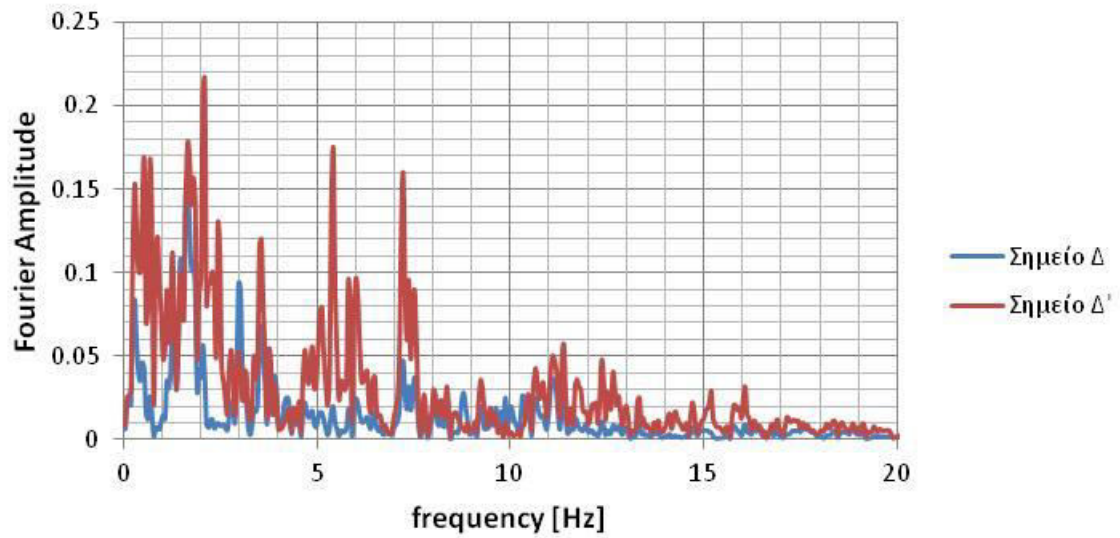
Σχήμα 4.21: Φάσματα Fourier σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.2.



Σχήμα 4.22: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.2.

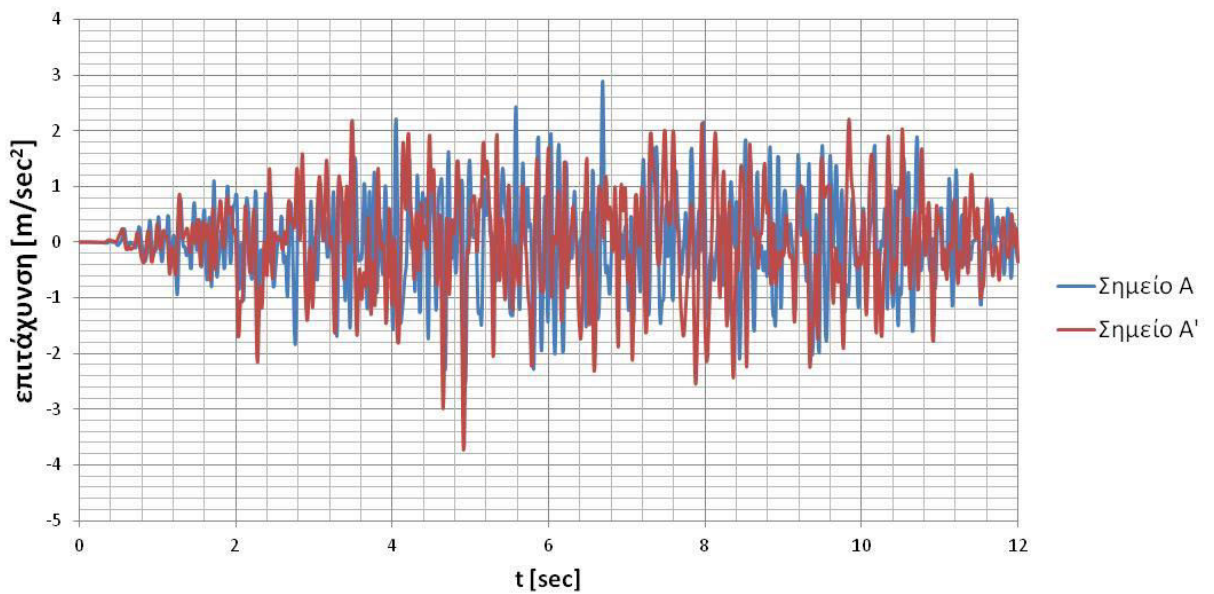


Σχήμα 4.23: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.2.

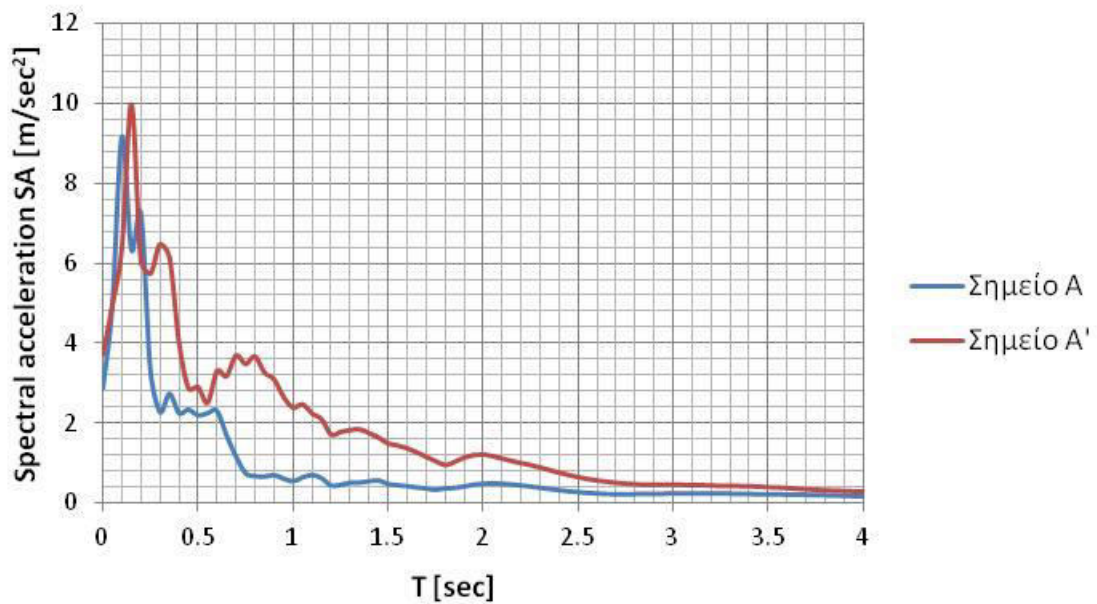


Σχήμα 4.24: Φάσματα Fourier σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.2.

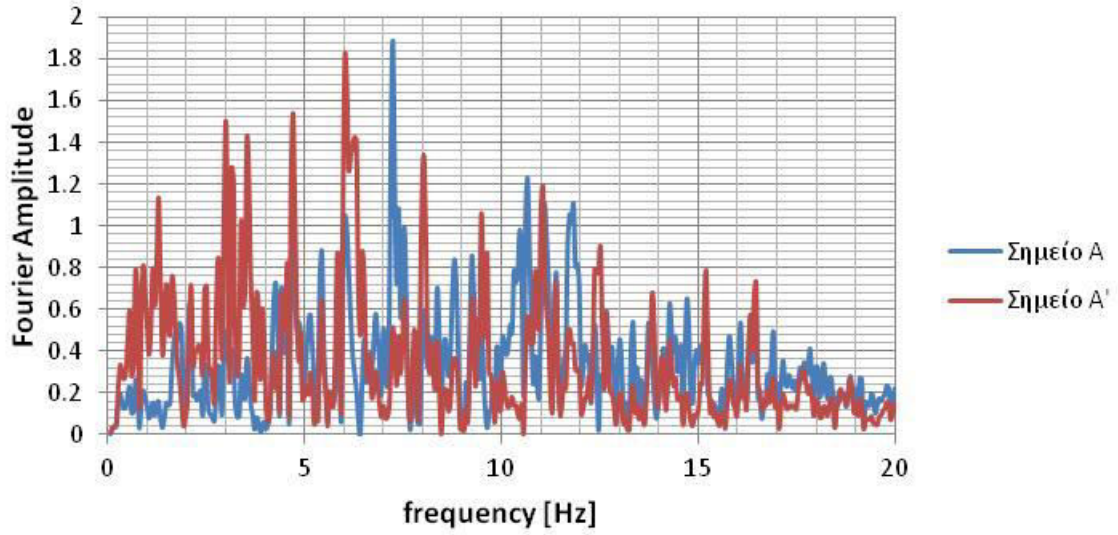
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.3: Διέγερση TH-EC8 σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος



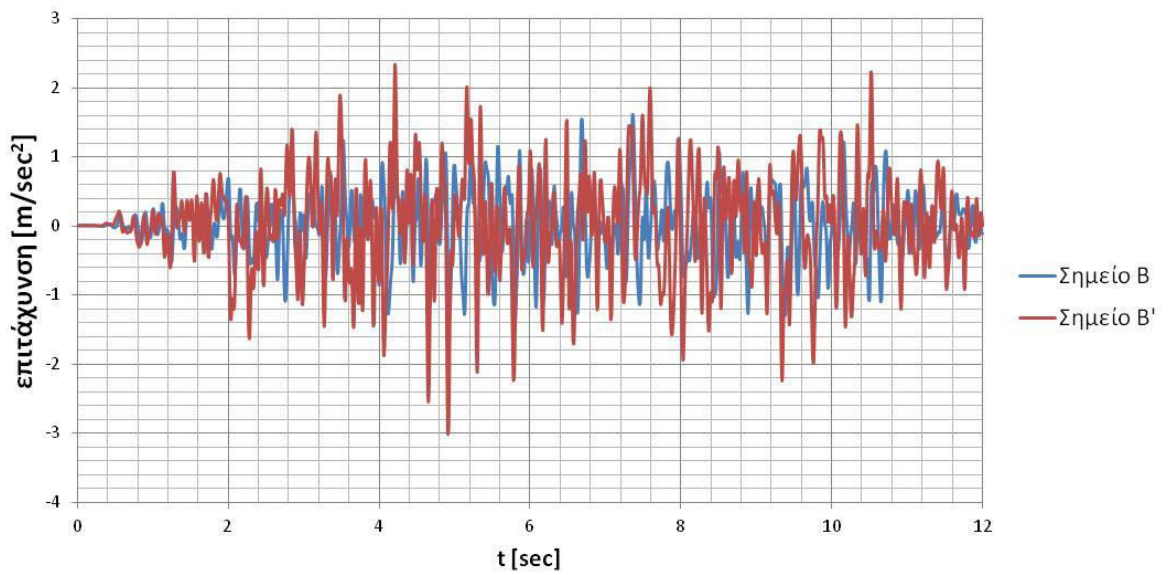
Σχήμα 4.25: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων A και A' για Σενάριο No 1.3.



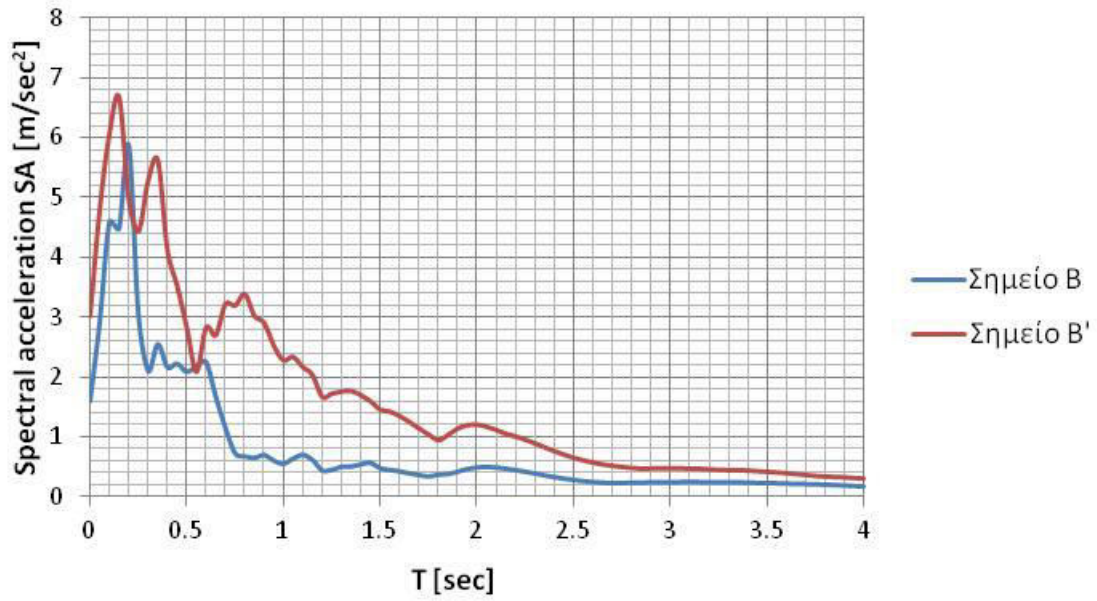
Σχήμα 4.26: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων A και A' για Σενάριο No 1.3.



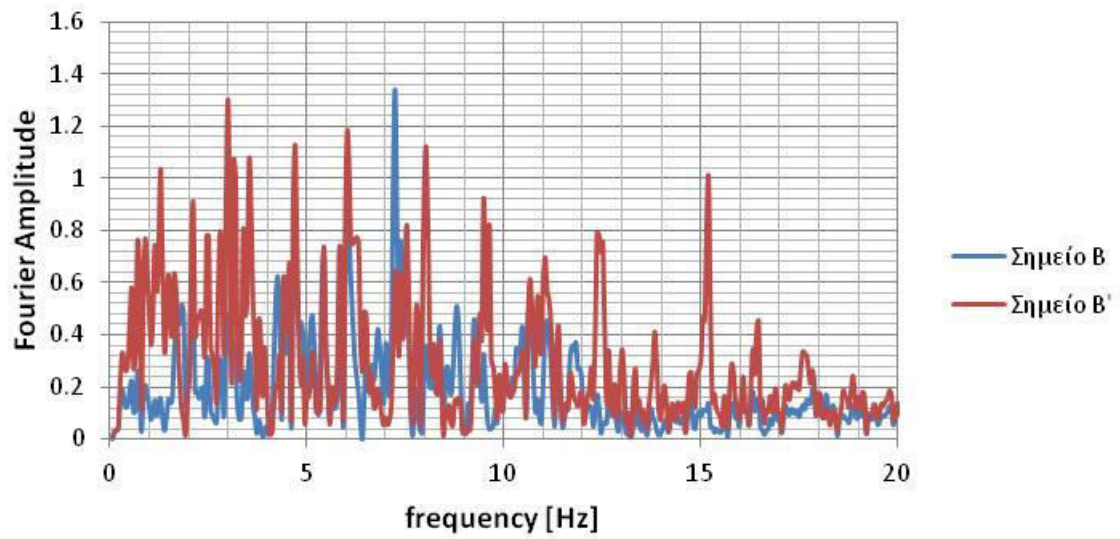
Σχήμα 4.27: Φάσματα Fourier σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.3.



Σχήμα 4.28: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων B και B' για Σενάριο Νο 1.3.

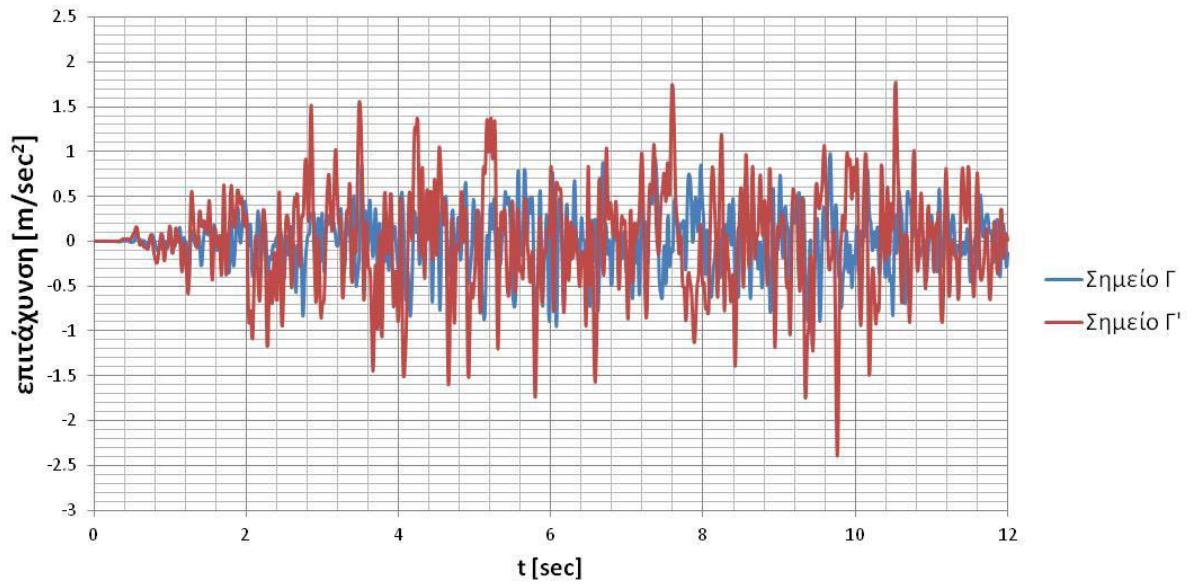


Σχήμα 4.29: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.3.

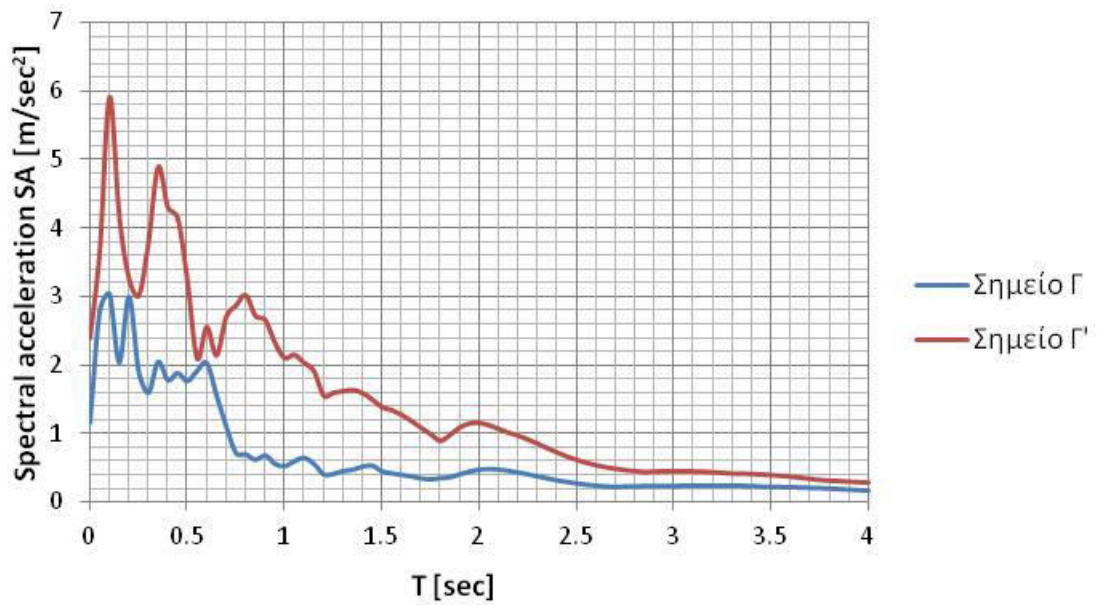


Σχήμα 4.30: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.3.

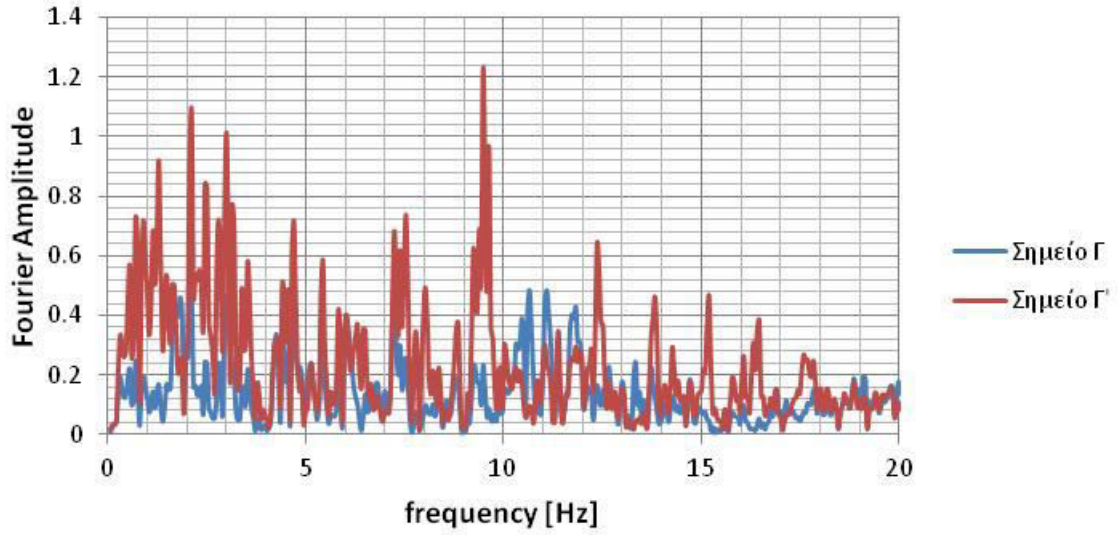




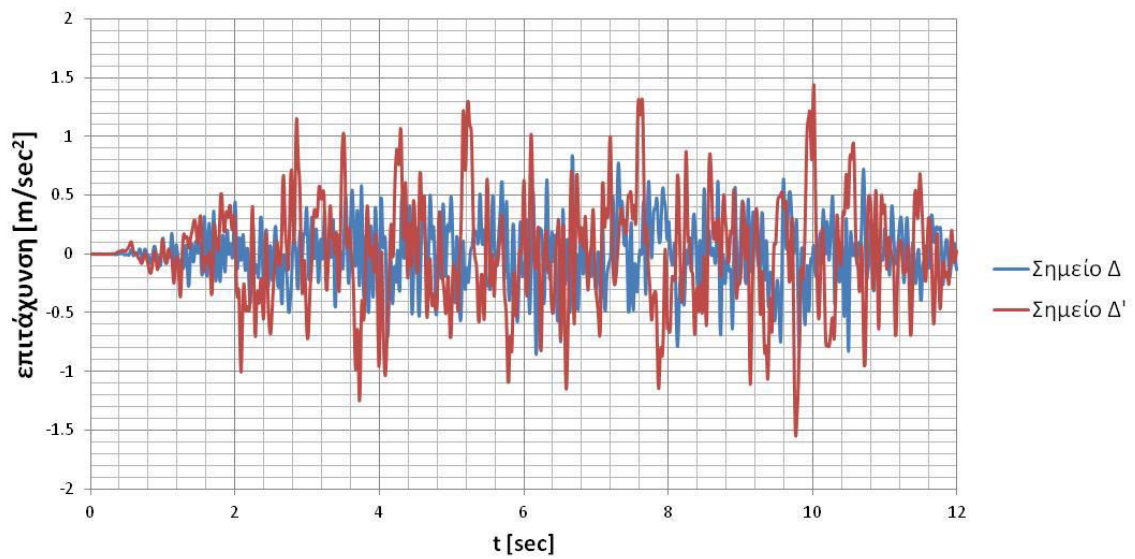
Σχήμα 4.31: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.3.



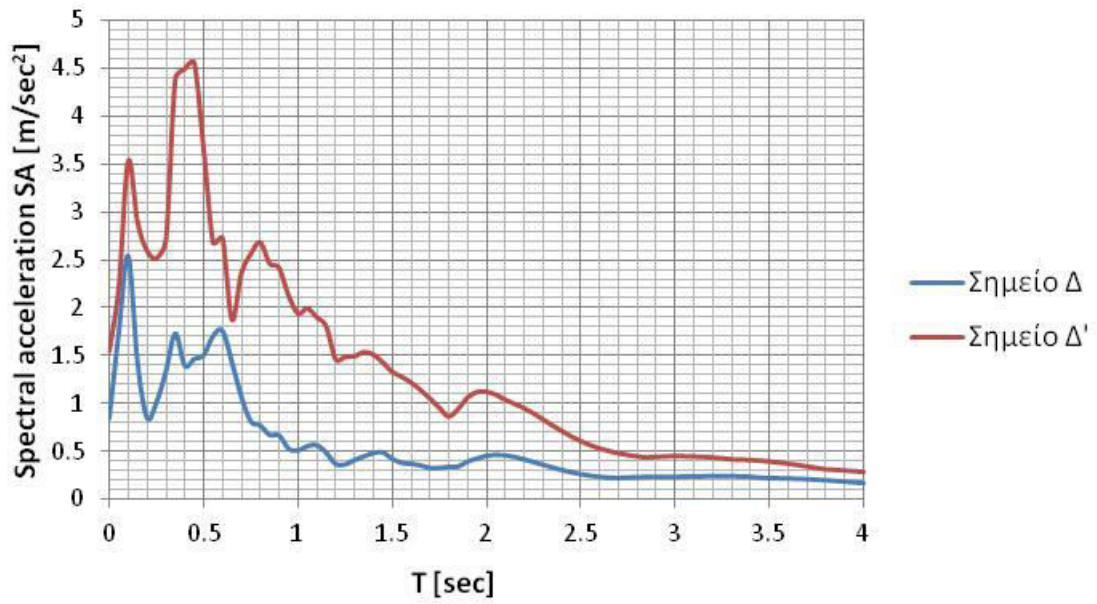
Σχήμα 4.32: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.3.



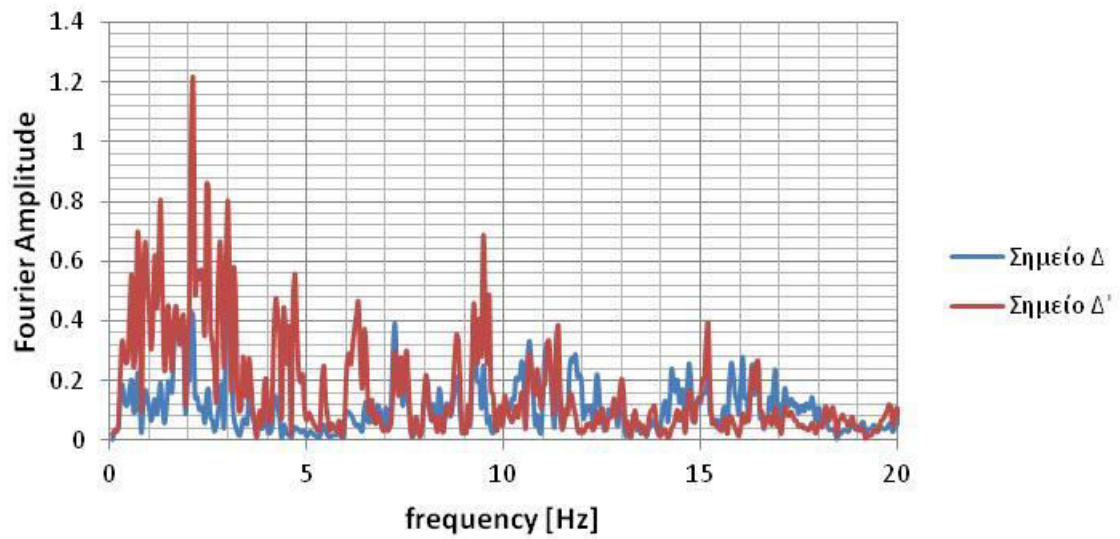
Σχήμα 4.33: Φάσματα Fourier σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.3.



Σχήμα 4.34: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.3.

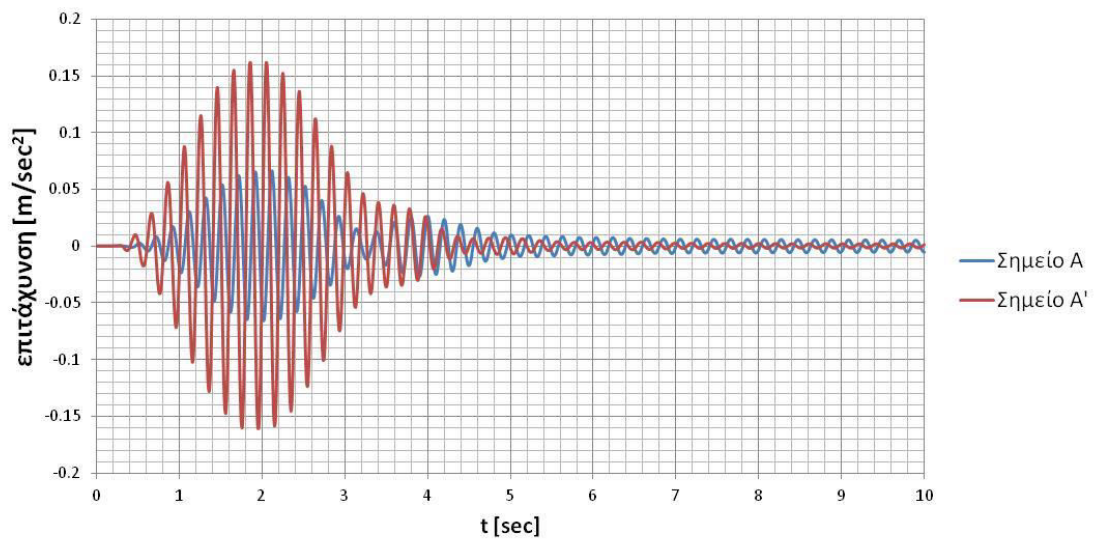


Σχήμα 4.35: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.3.

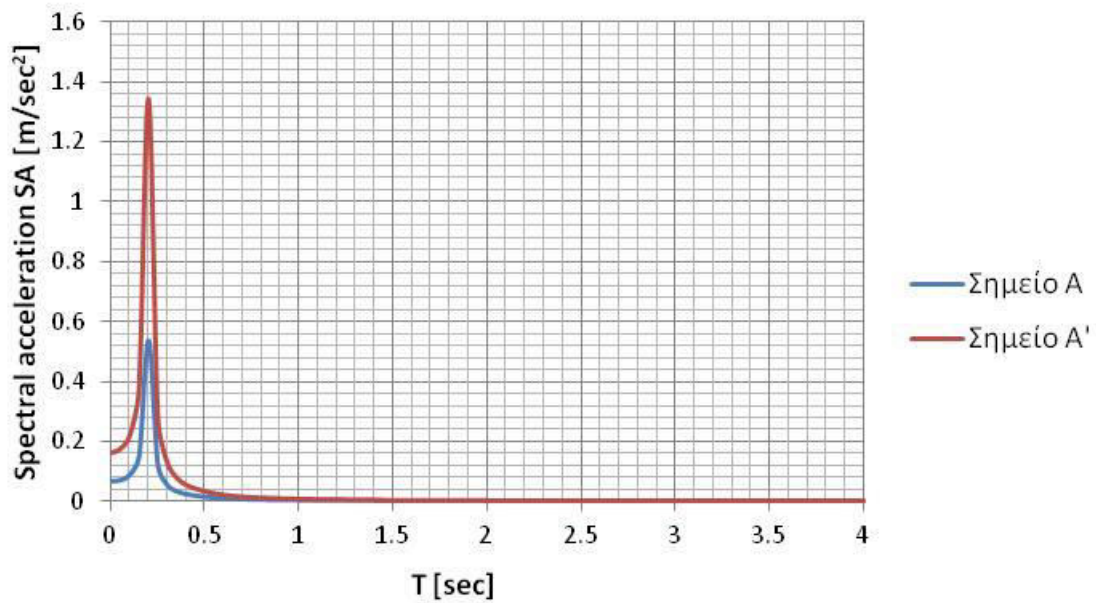


Σχήμα 4.36: Φάσματα Fourier σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.3.

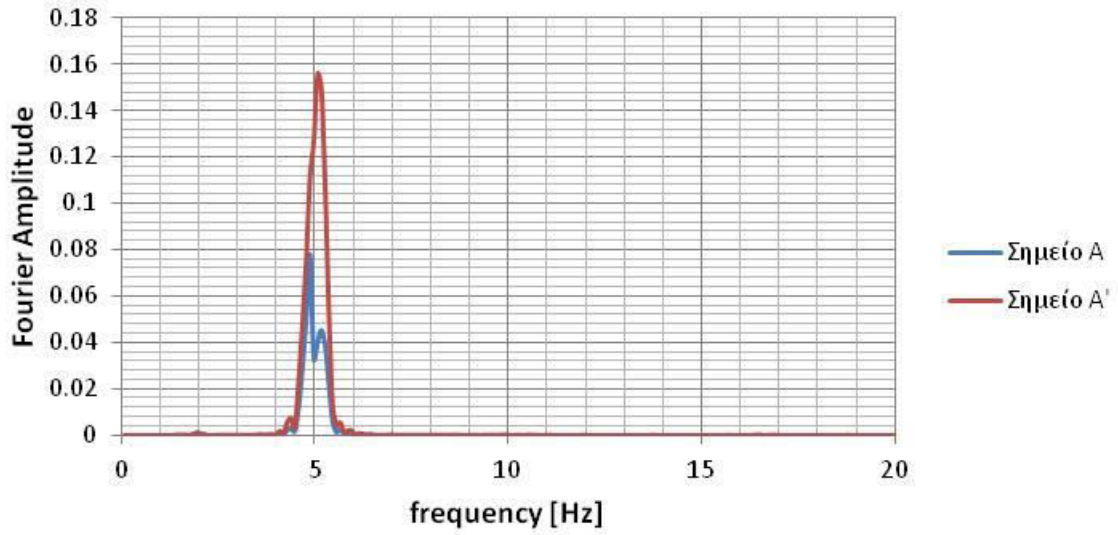
## Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.4: Διέγερση TH-HF5 στο Σημείο Κ για χαλαρό έδαφος



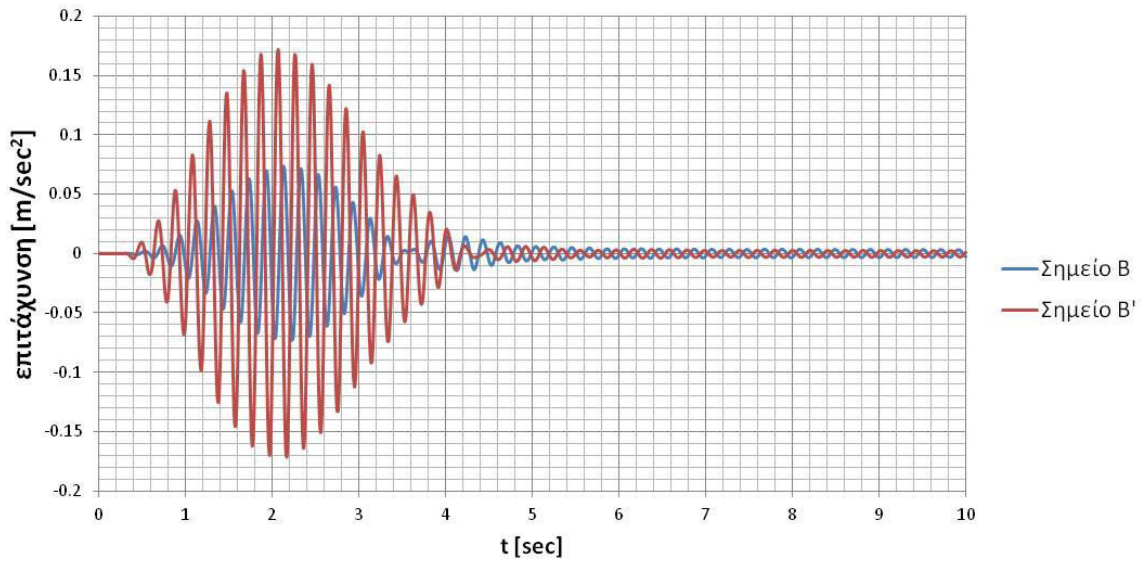
Σχήμα 4.37: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων A και A' για Σενάριο No 1.4.



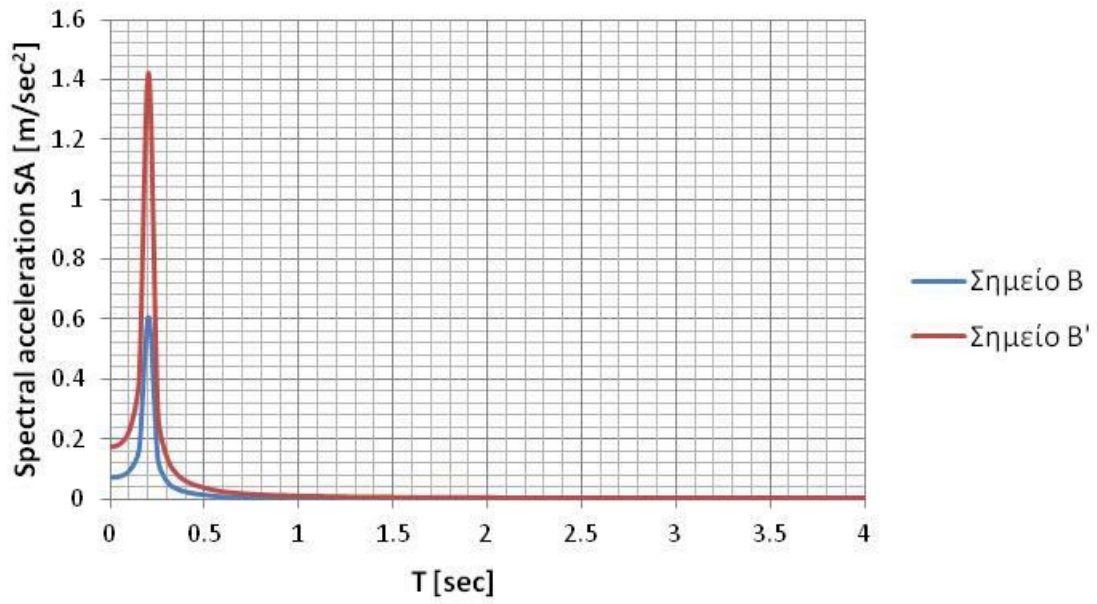
Σχήμα 4.38: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων A και A' για Σενάριο No 1.4.



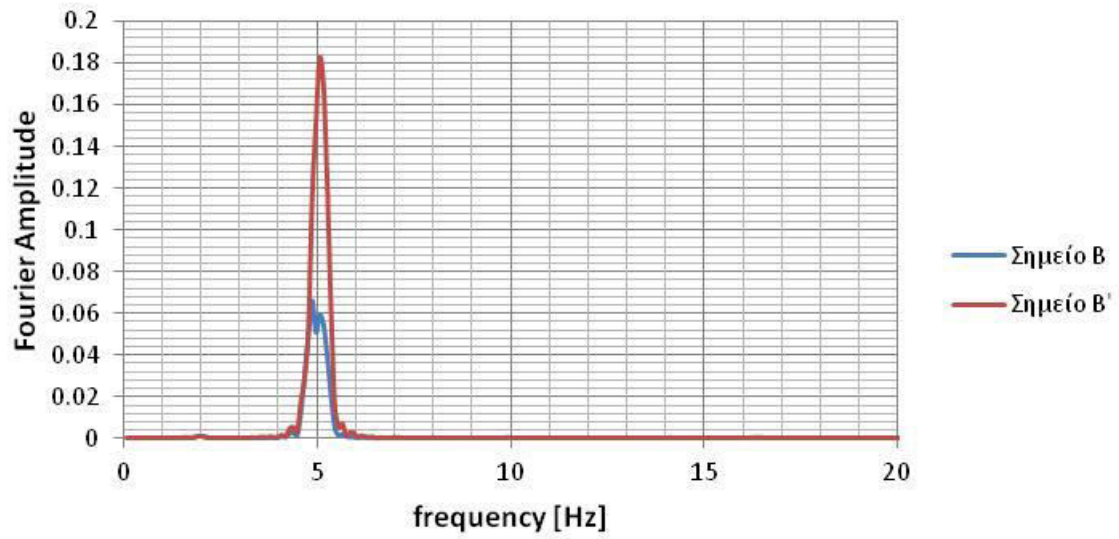
Σχήμα 4.39: Φάσματα Fourier σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.4.



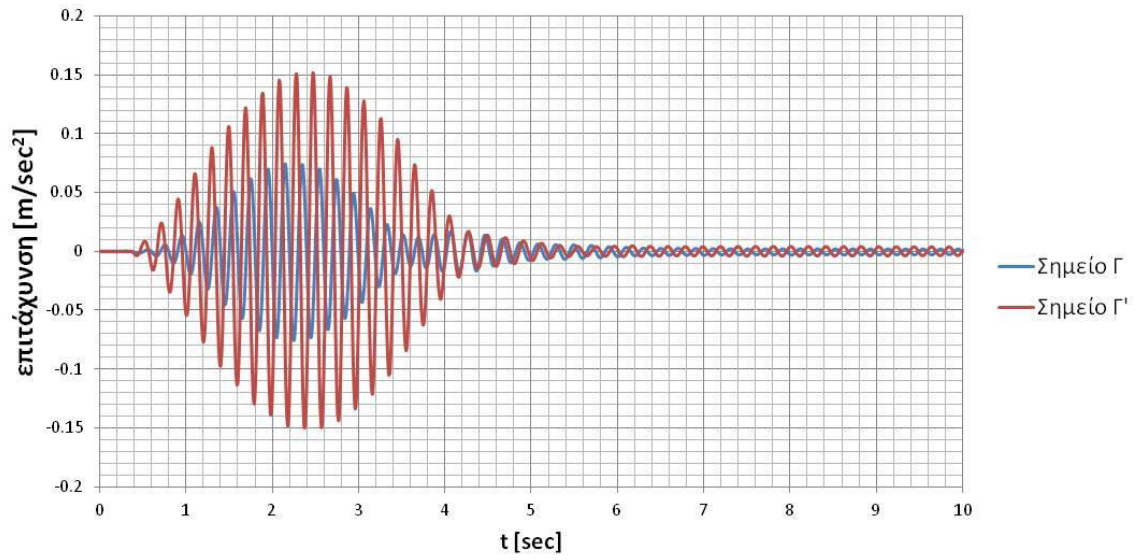
Σχήμα 4.40: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων B και B' για Σενάριο Νο 1.4.



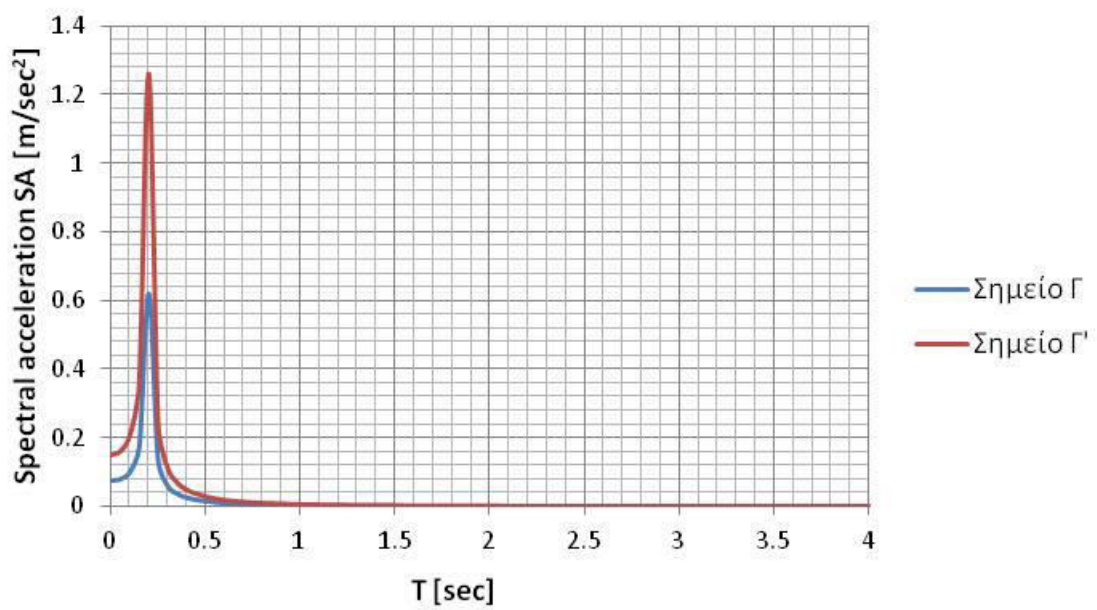
Σχήμα 4.41: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.4.



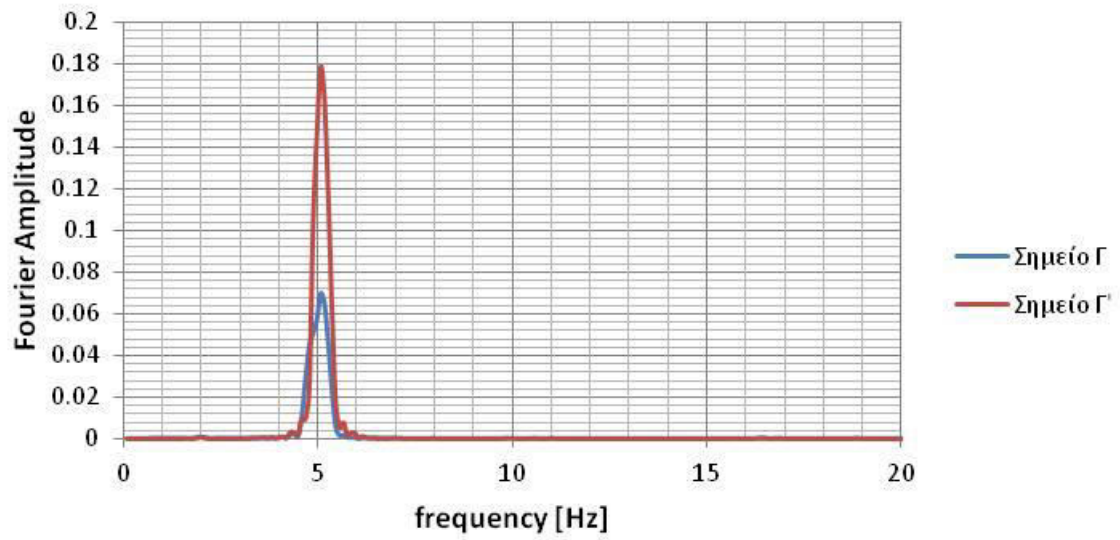
Σχήμα 4.42: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.4.



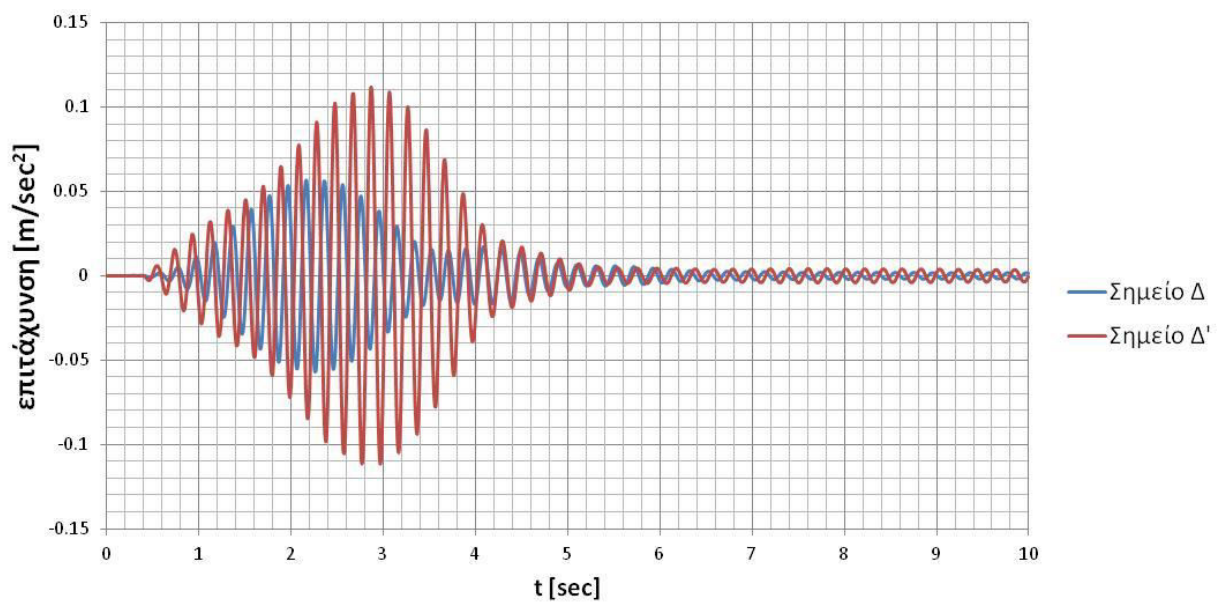
Σχήμα 4.43: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.4.



Σχήμα 4.44: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.4.

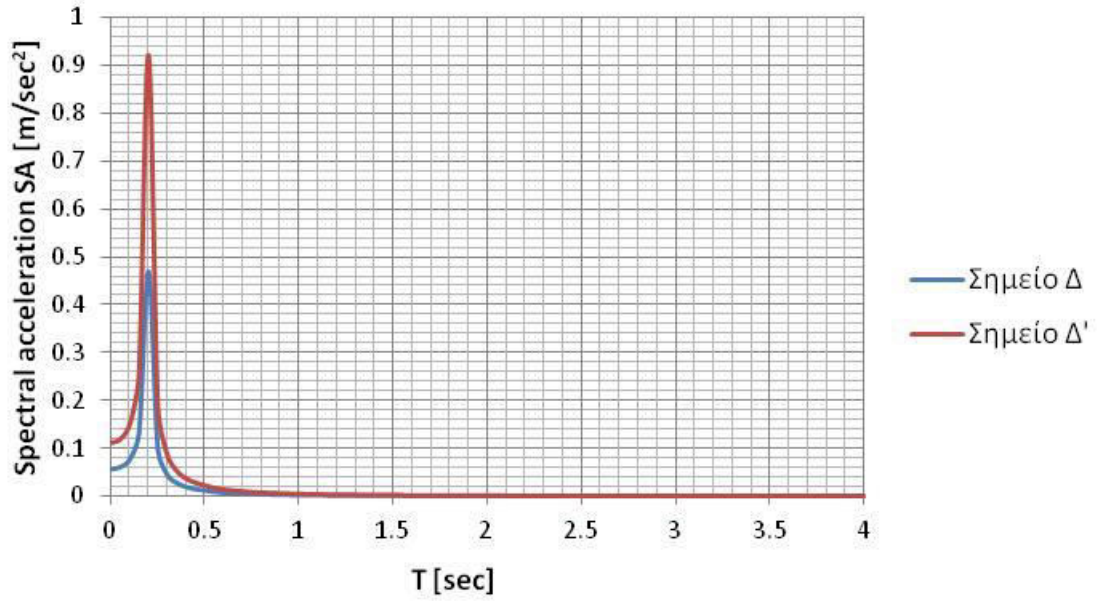


Σχήμα 4.45: Φάσματα Fourier σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.4.

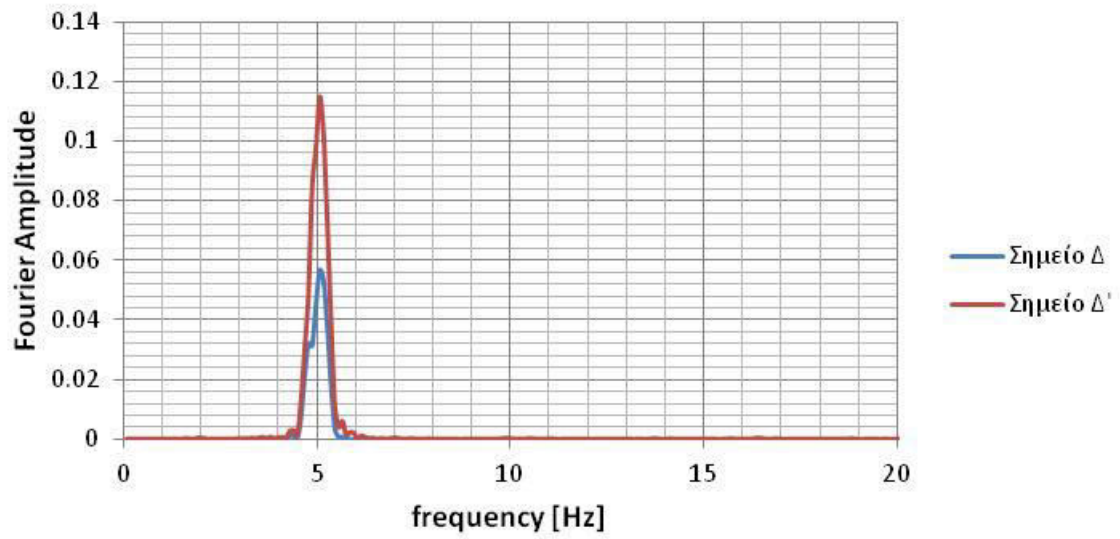


Σχήμα 4.46: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.4.



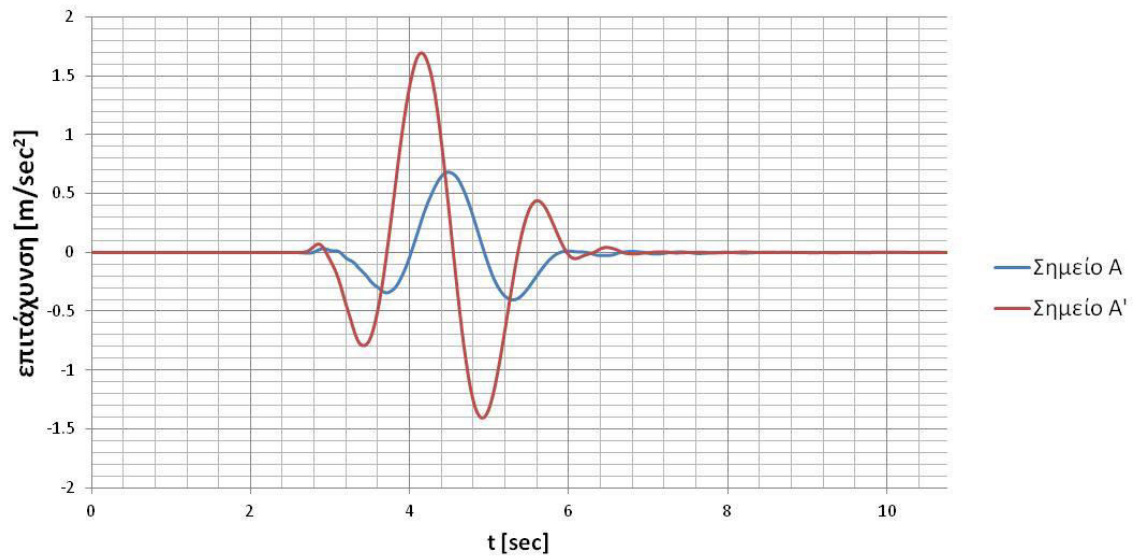


Σχήμα 4.47: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.4.

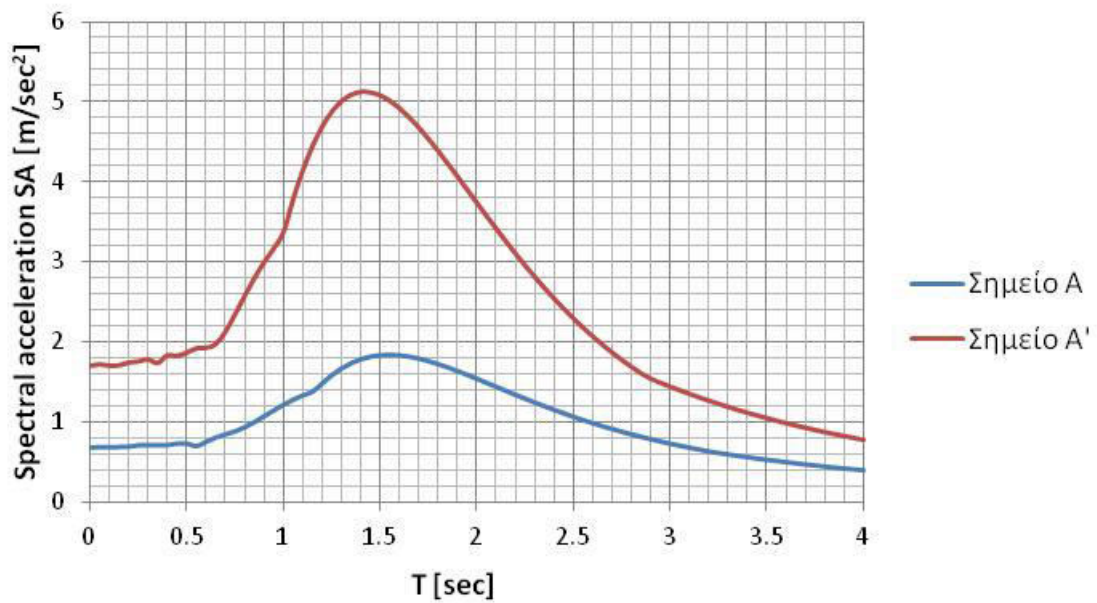


Σχήμα 4.48: Φάσματα Fourier σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.4.

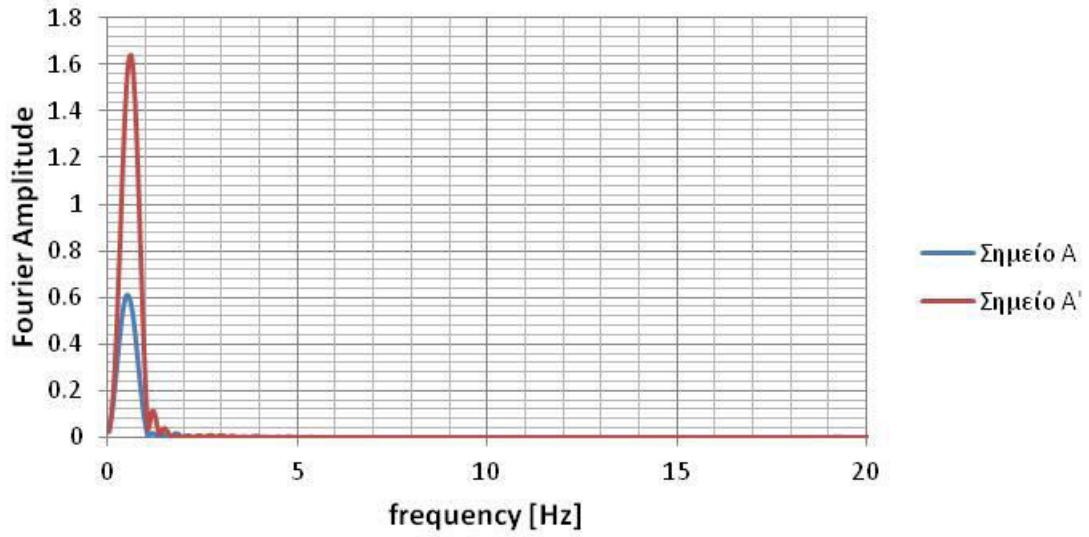
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.5: Διέγερση TH-Parkfield σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος



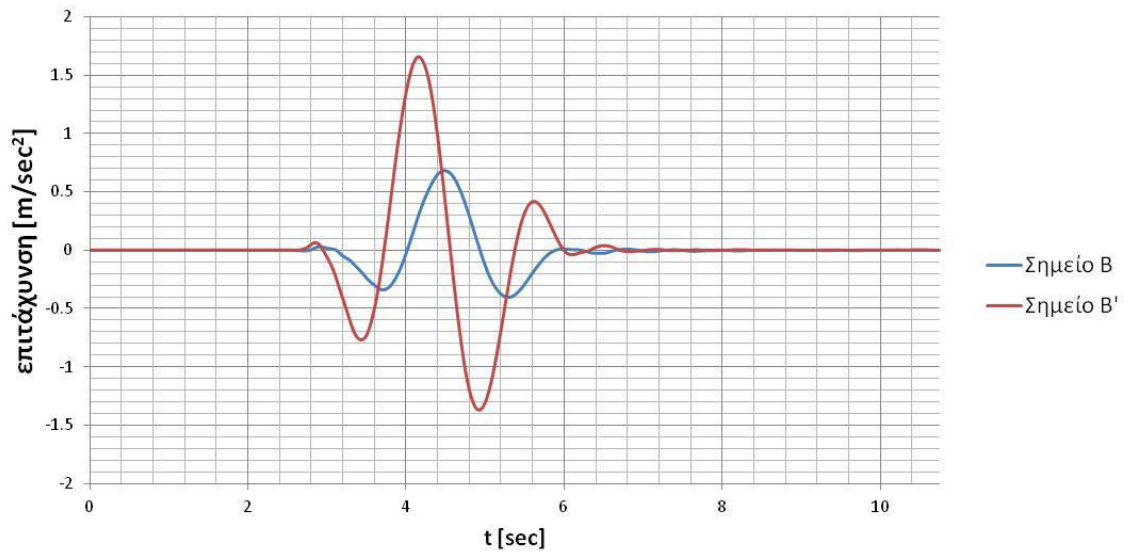
Σχήμα 4.49: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων A και A' για για Σενάριο Νο 1.5.



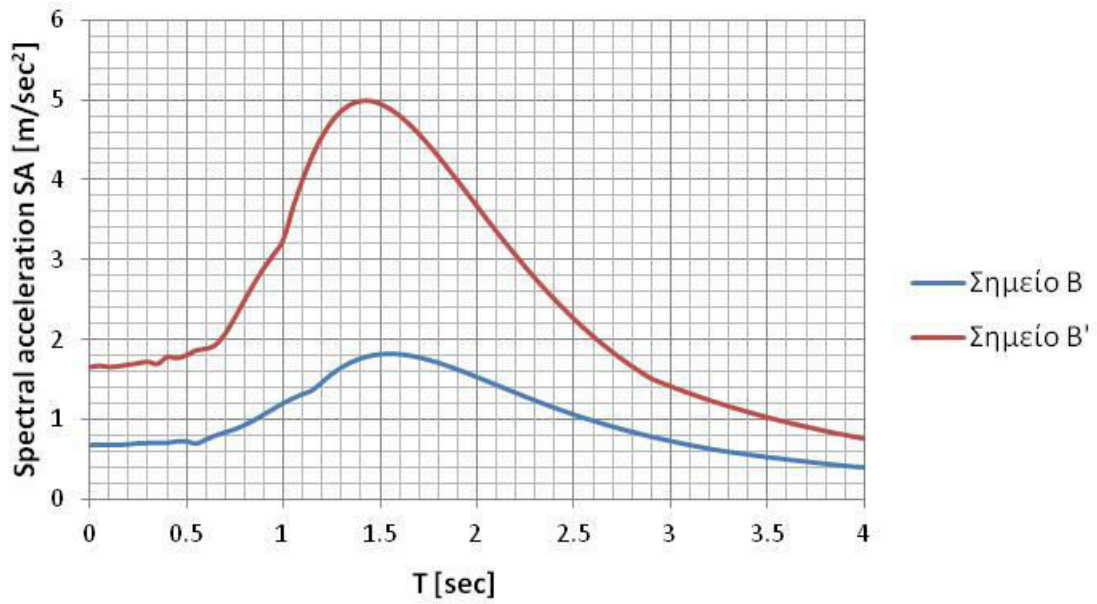
Σχήμα 4.50: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.5.



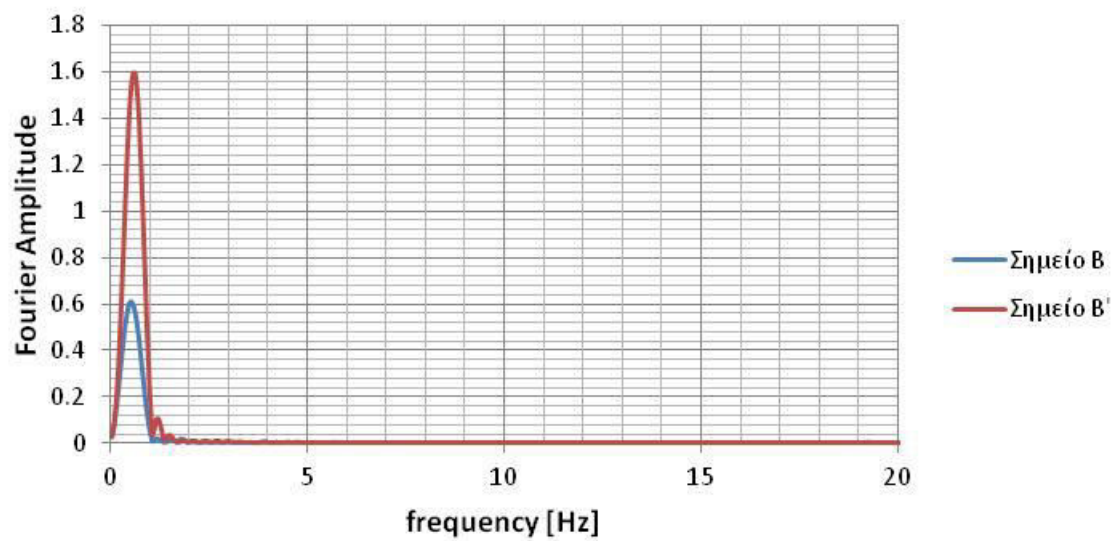
Σχήμα 4.51: Φάσματα Fourier σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.5.



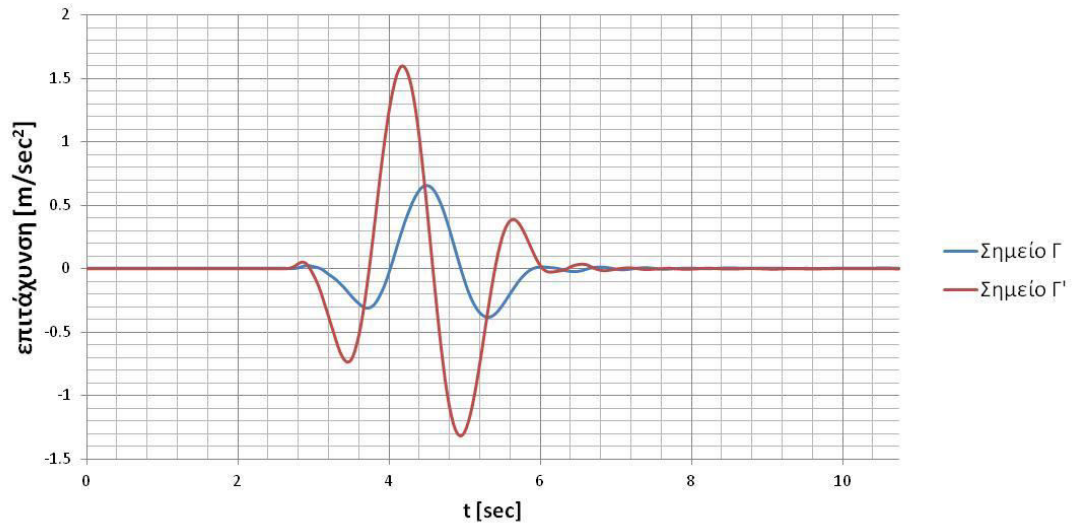
Σχήμα 4.52: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων B και B' για για Σενάριο Νο 1.5.



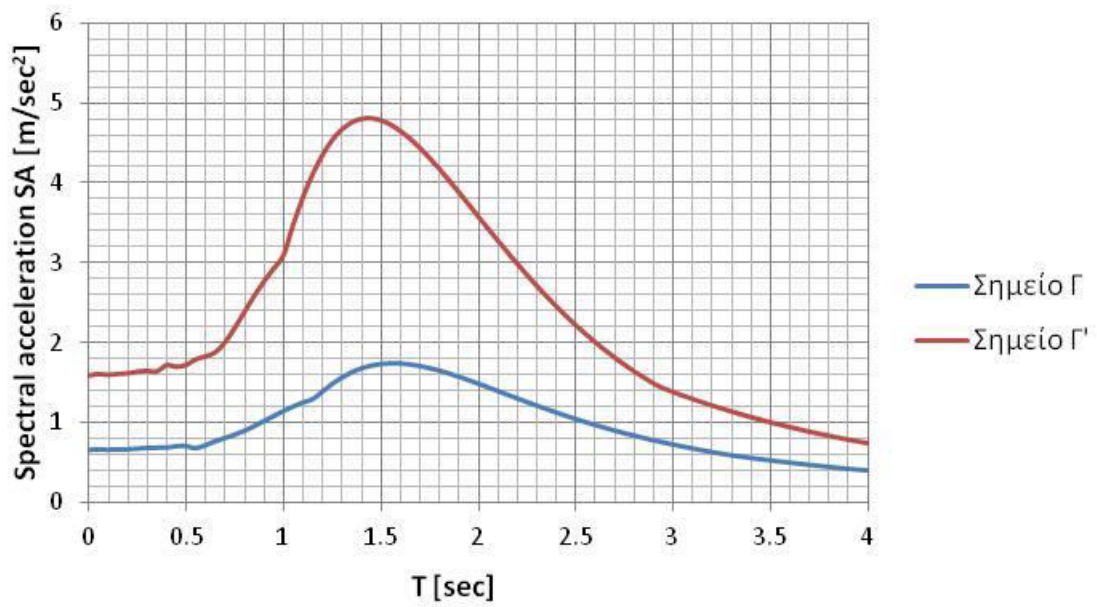
Σχήμα 4.53: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.5.



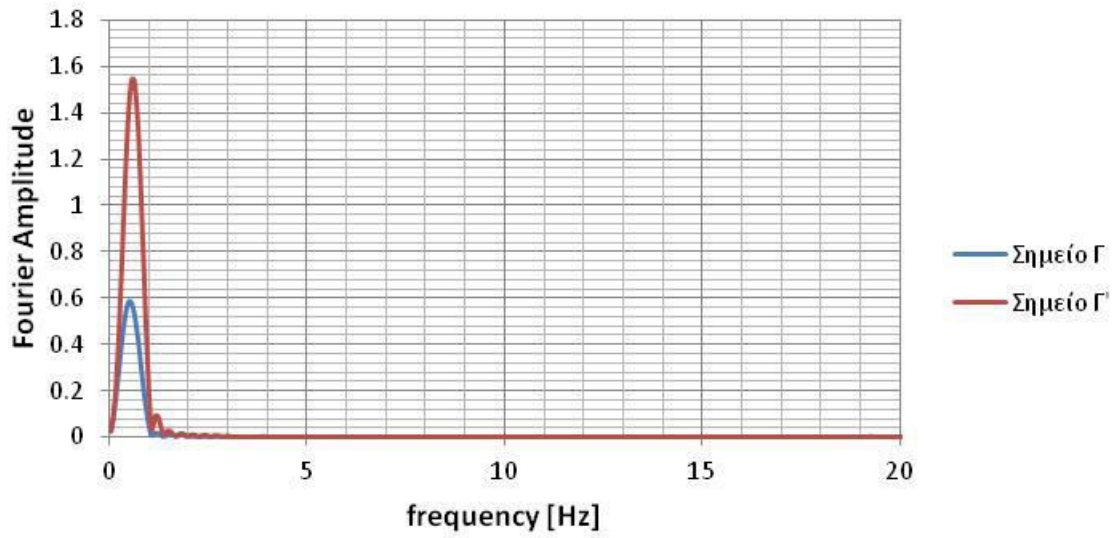
Σχήμα 4.54: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.5.



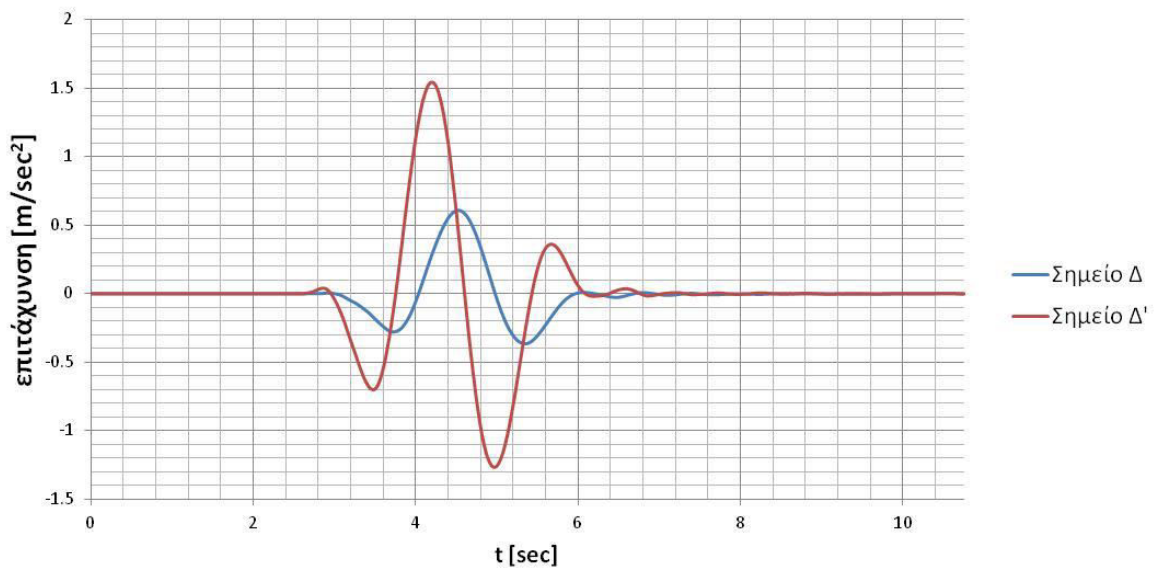
Σχήμα 4.55: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων Γ και Γ' για για Σενάριο Νο 1.5.



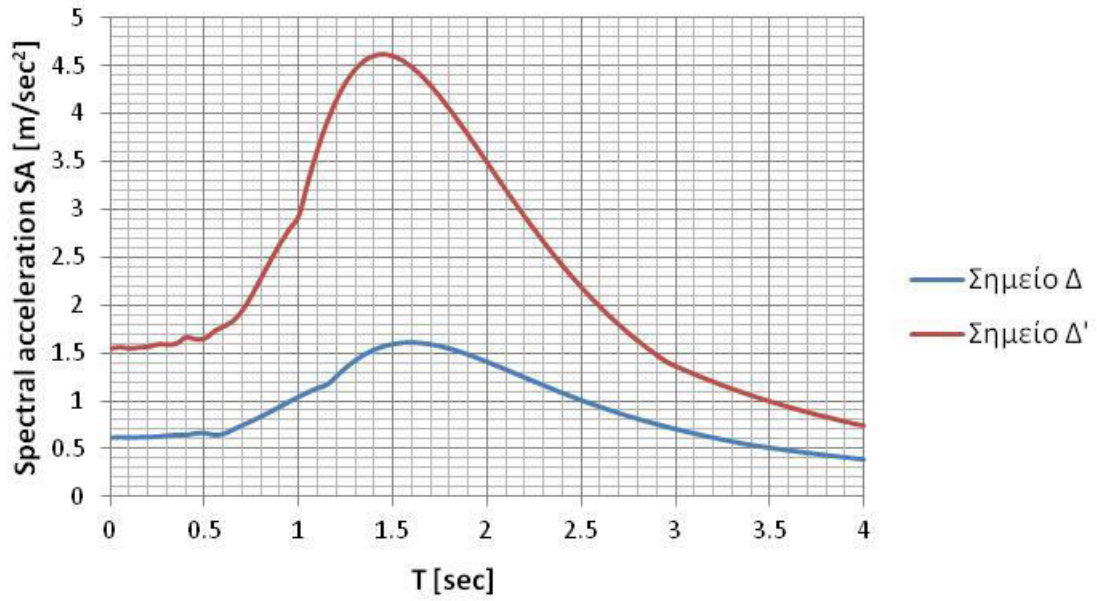
Σχήμα 4.56: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.5.



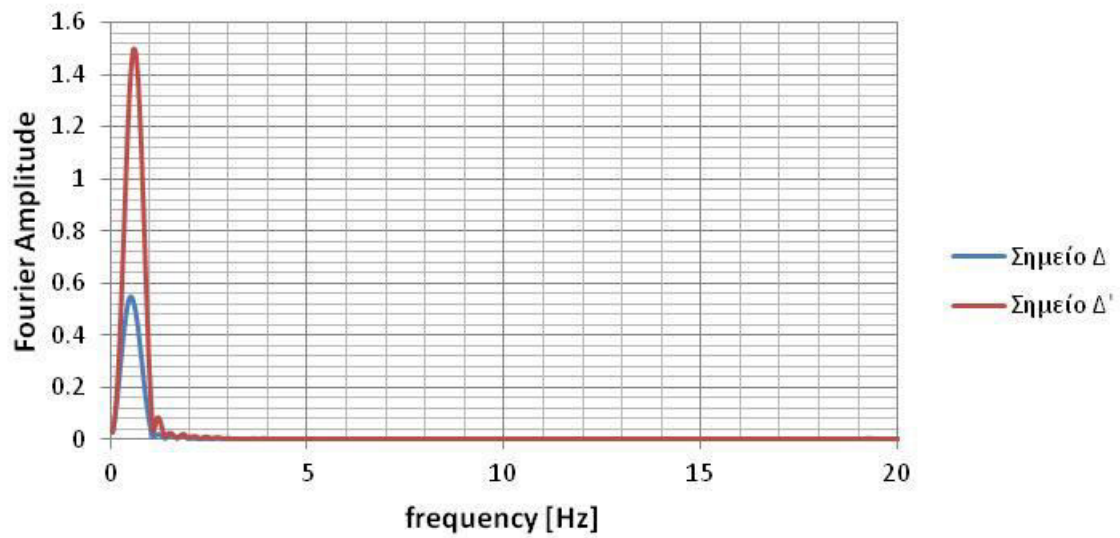
Σχήμα 4.57: Φάσματα Fourier σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.5.



Σχήμα 4.58: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων Δ και Δ' για για Σενάριο Νο 1.5.

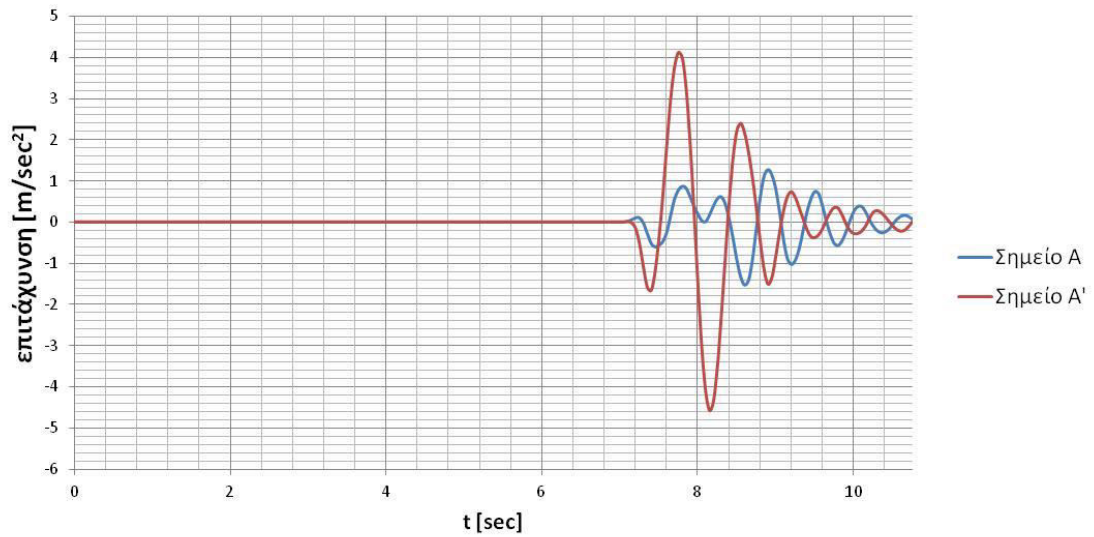


Σχήμα 4.59: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.5.

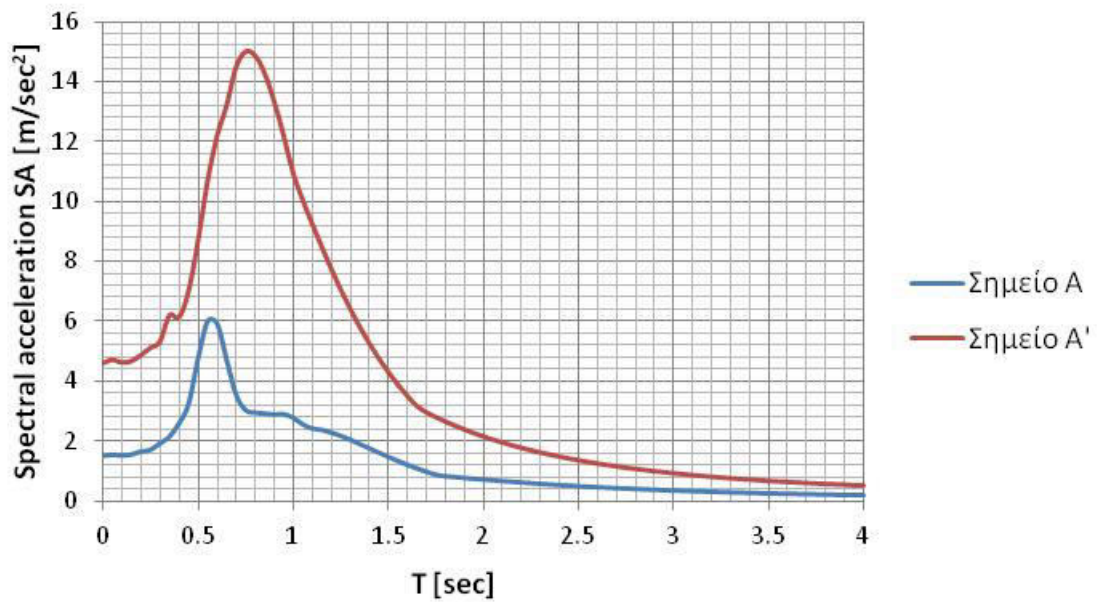


Σχήμα 4.60: Φάσματα Fourier σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.5.

Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.6: Διέγερση TH-Kobe σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος

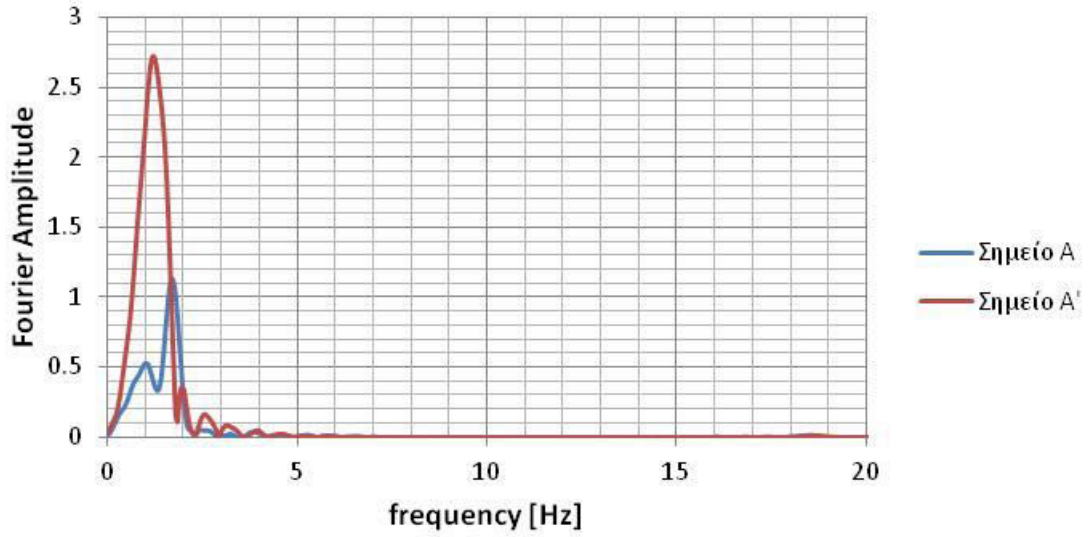


Σχήμα 4.61: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων A και A' για για Σενάριο Νο 1.6.

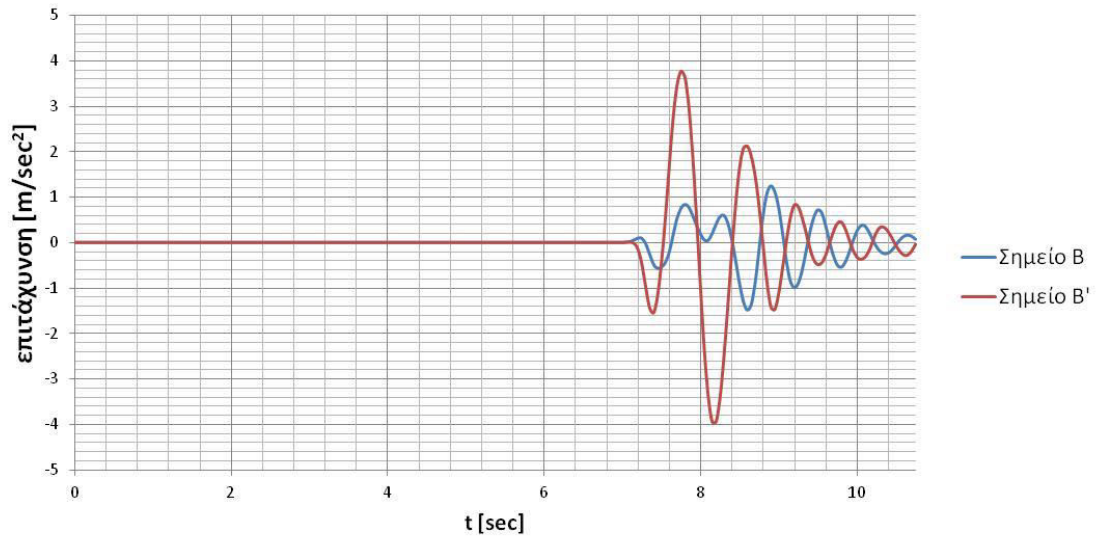


Σχήμα 4.62: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.6.

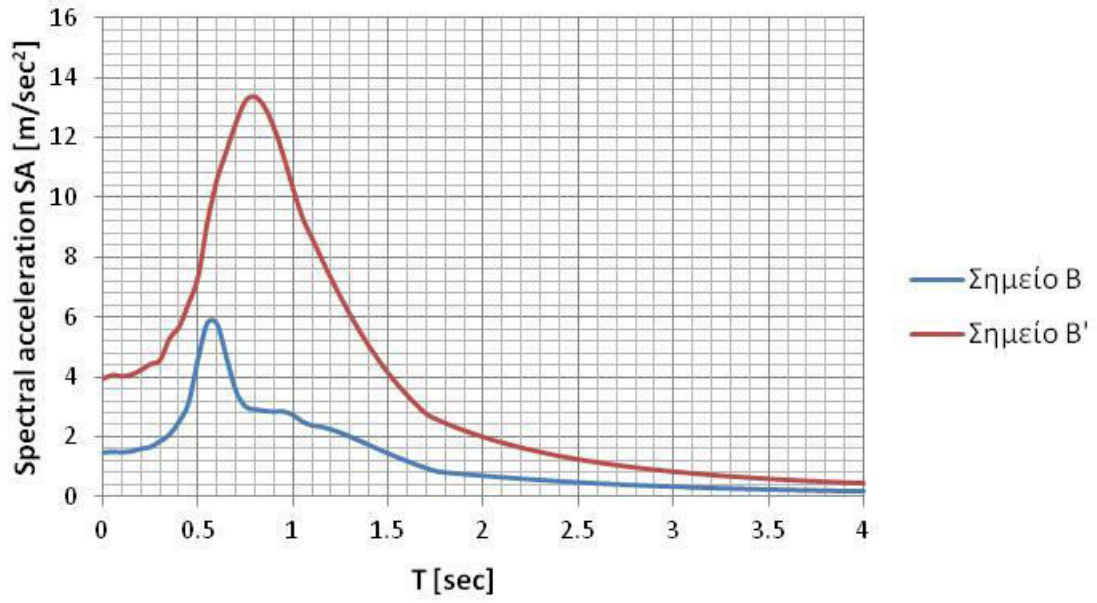




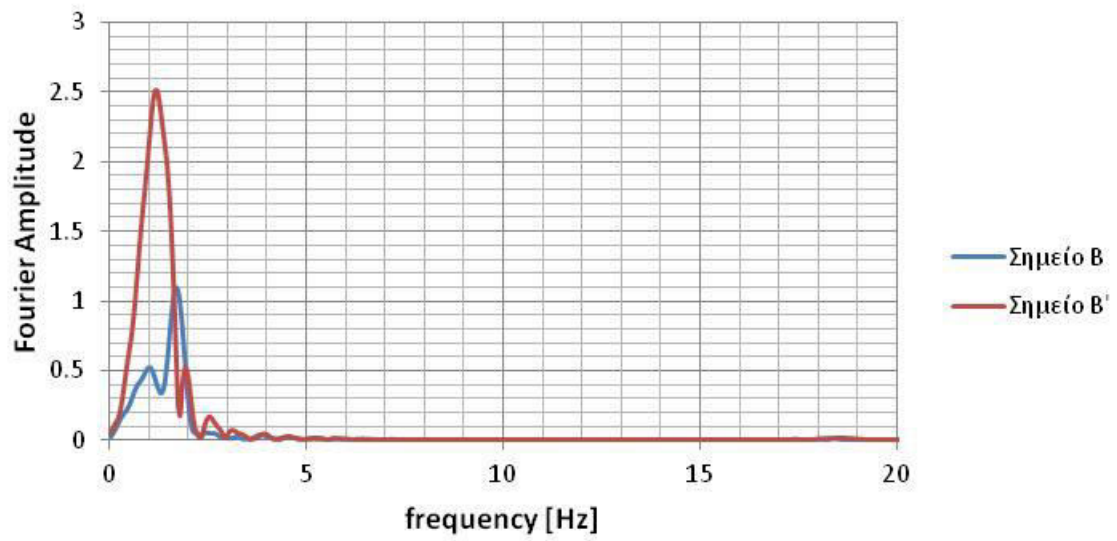
Σχήμα 4.63: Φάσματα Fourier σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.6.



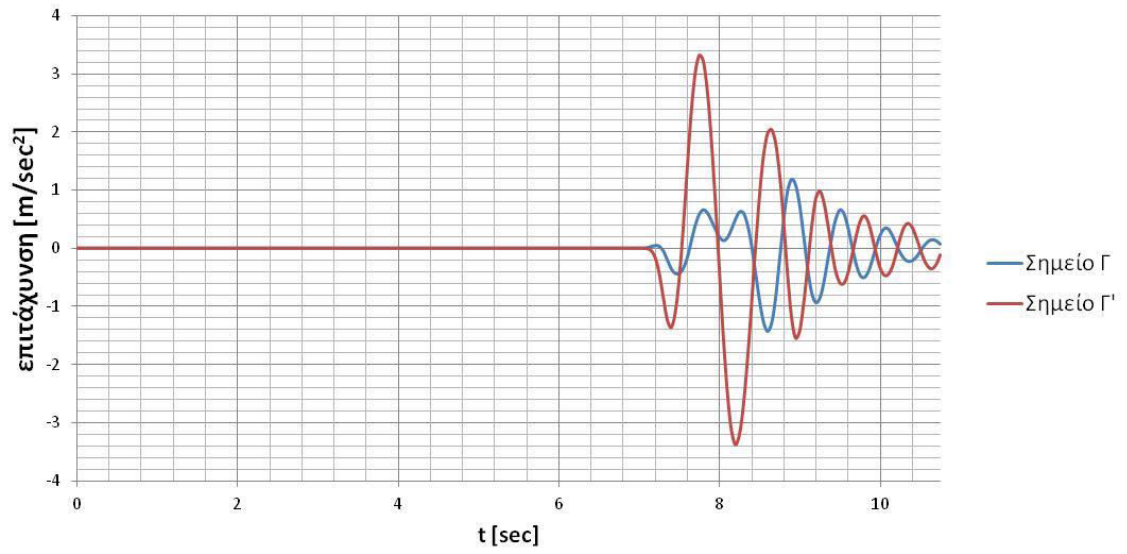
Σχήμα 4.64: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων B και B' για για Σενάριο Νο 1.6.



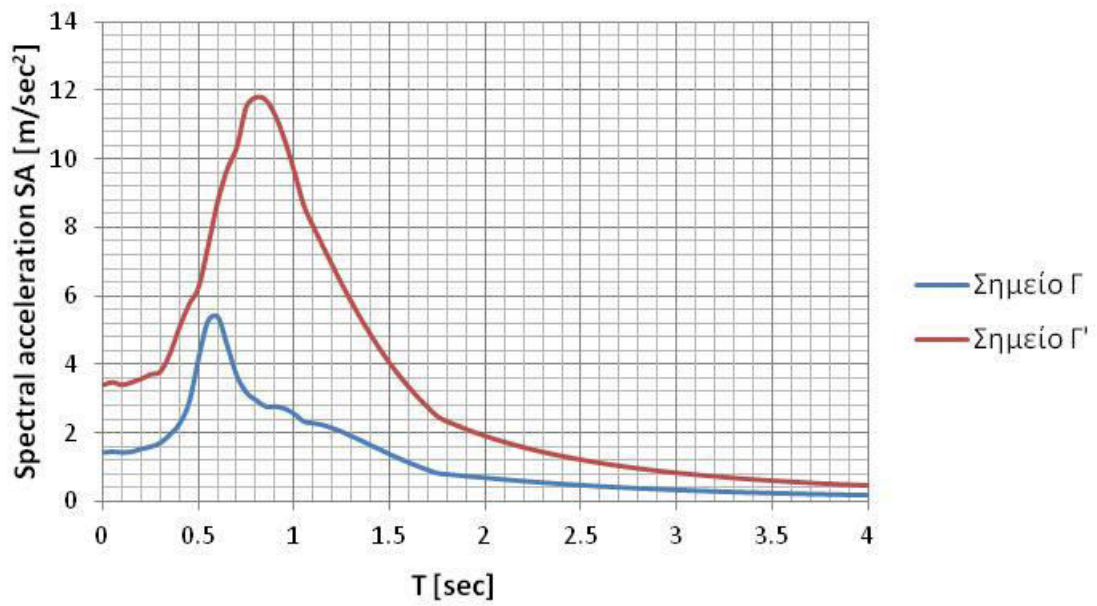
Σχήμα 4.65: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.6.



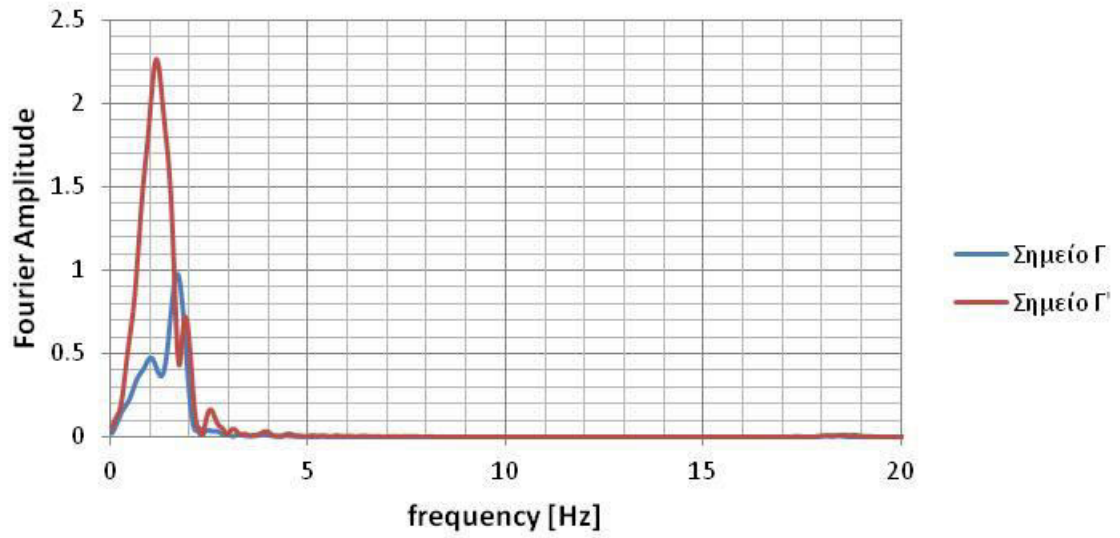
Σχήμα 4.66: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.6.



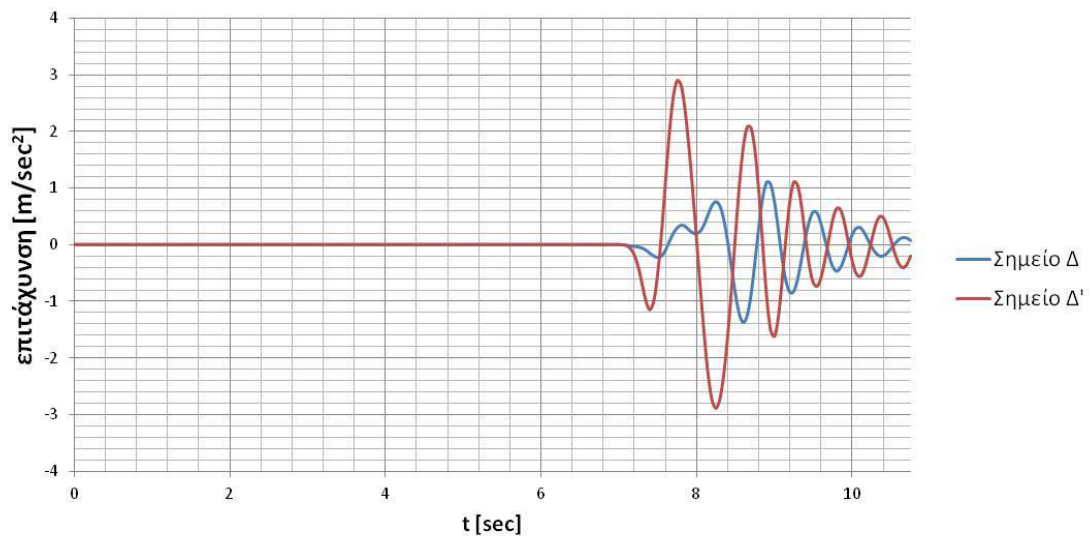
Σχήμα 4.67: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων Γ και Γ' για για Σενάριο Νο 1.6.



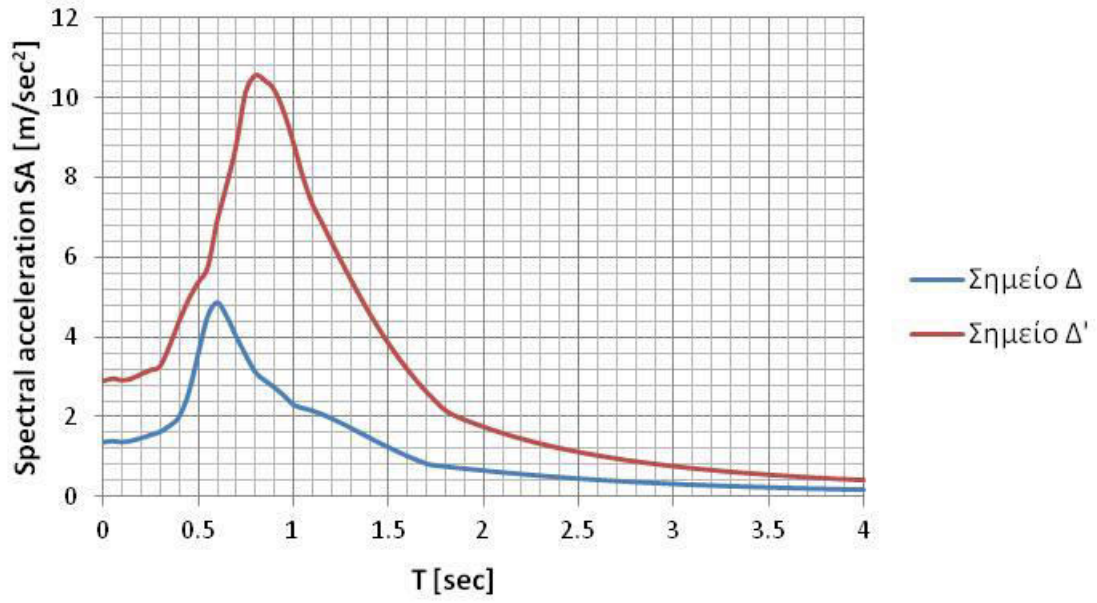
Σχήμα 4.68: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.6.



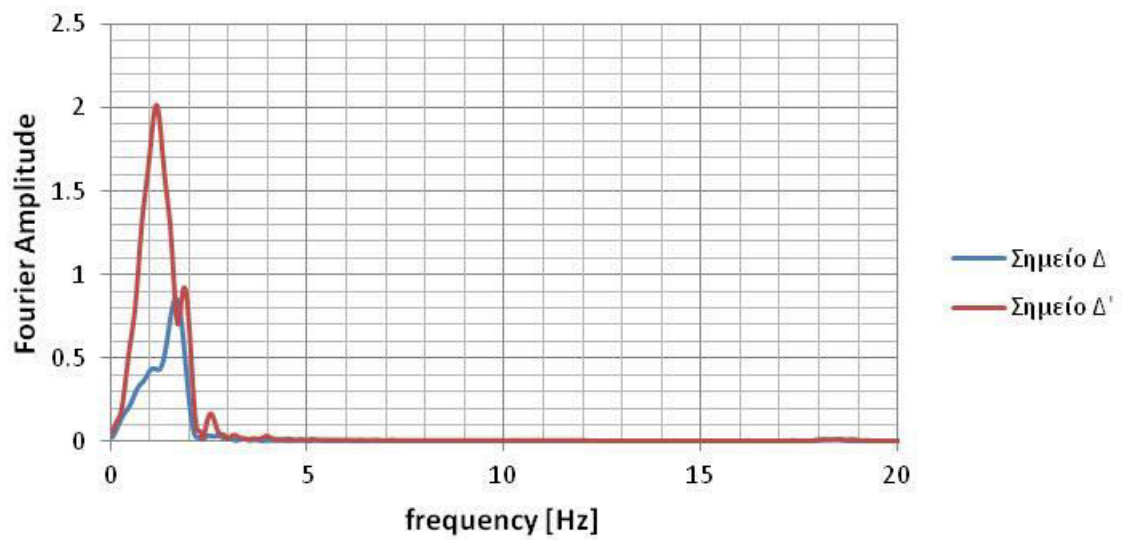
Σχήμα 4.69: Φάσματα Fourier σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.6.



Σχήμα 4.70: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων Δ και Δ' για για Σενάριο Νο 1.6.

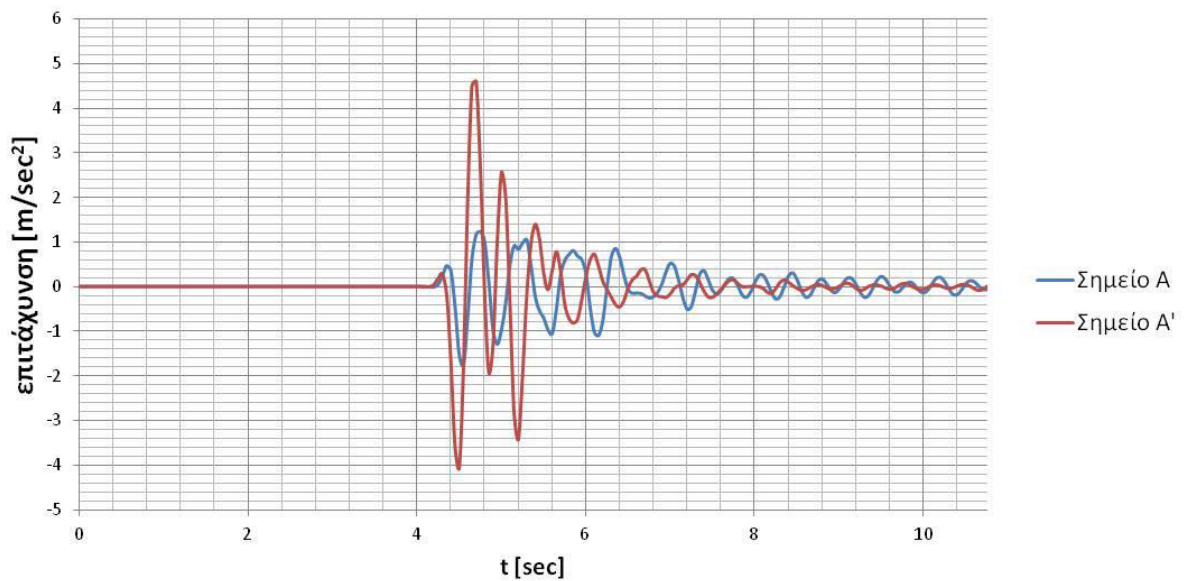


Σχήμα 4.71: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.6.

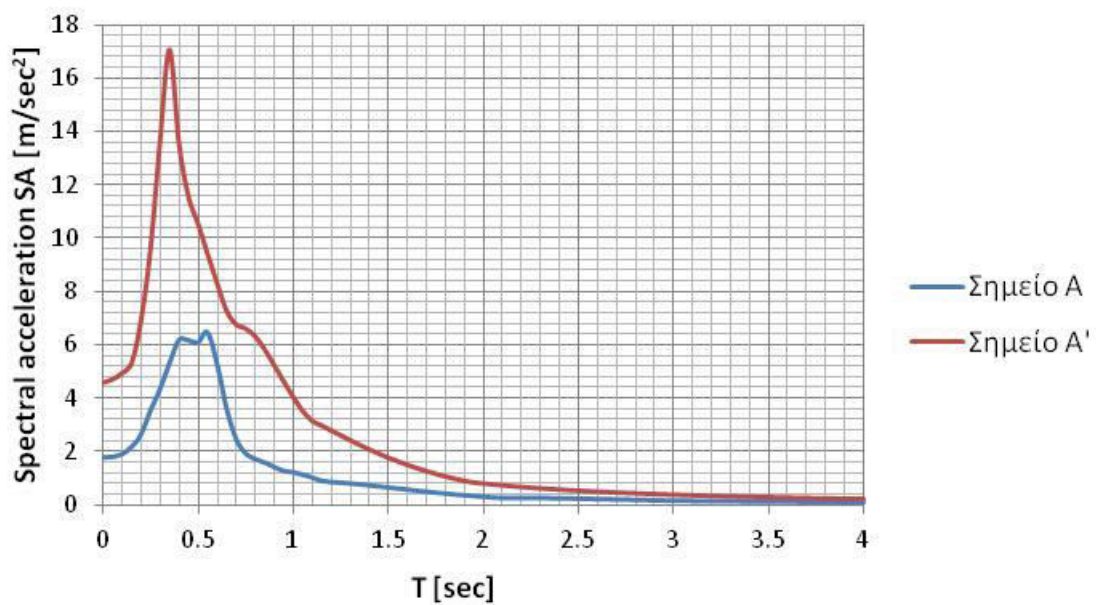


Σχήμα 4.72: Φάσματα Fourier σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.6.

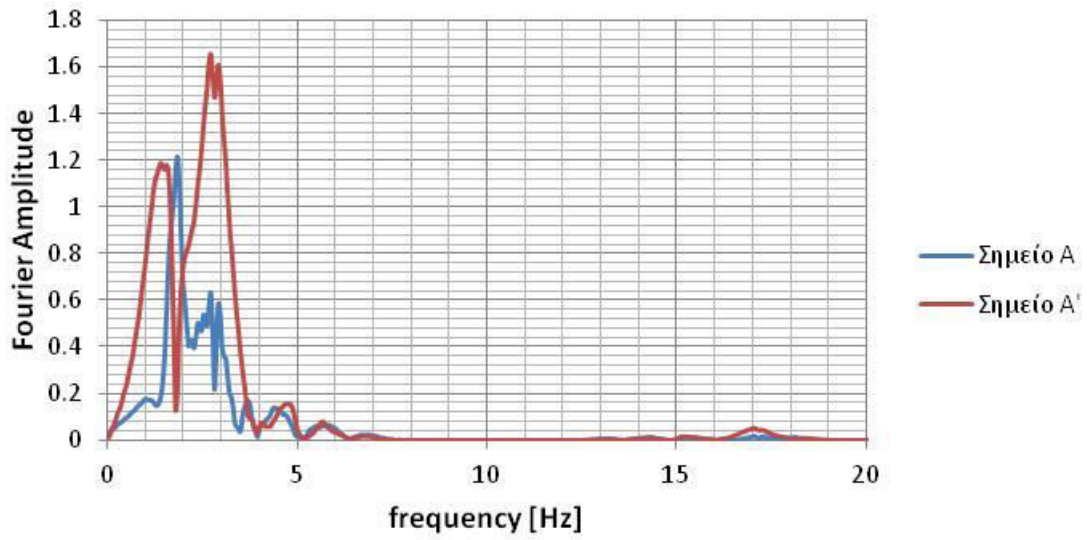
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.7: Διέγερση TH-Aegion σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος



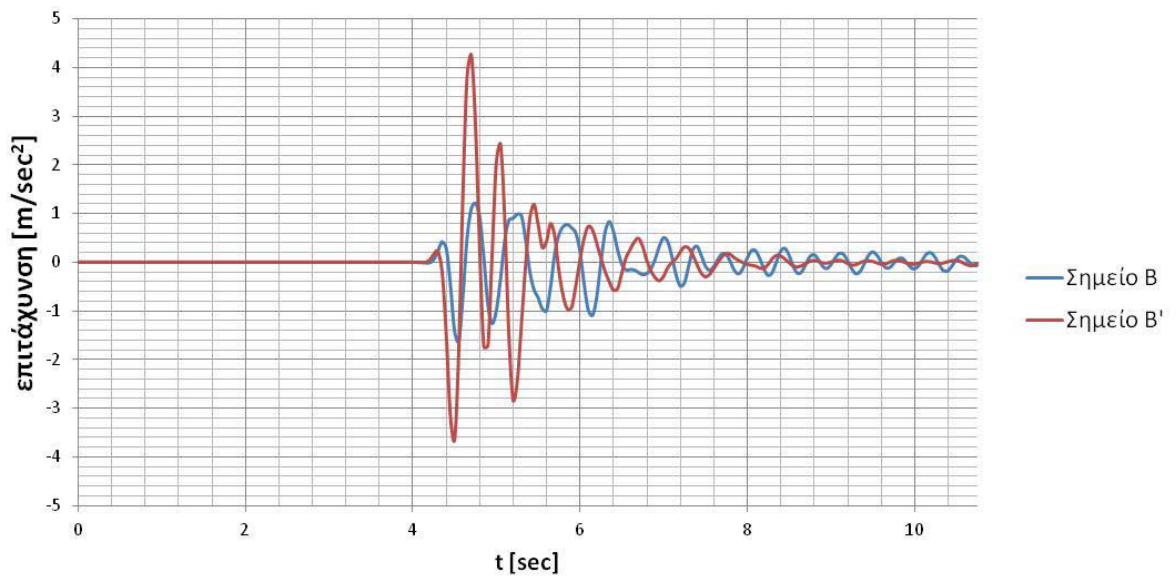
Σχήμα 4.73: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων A και A' για για Σενάριο No 1.7.



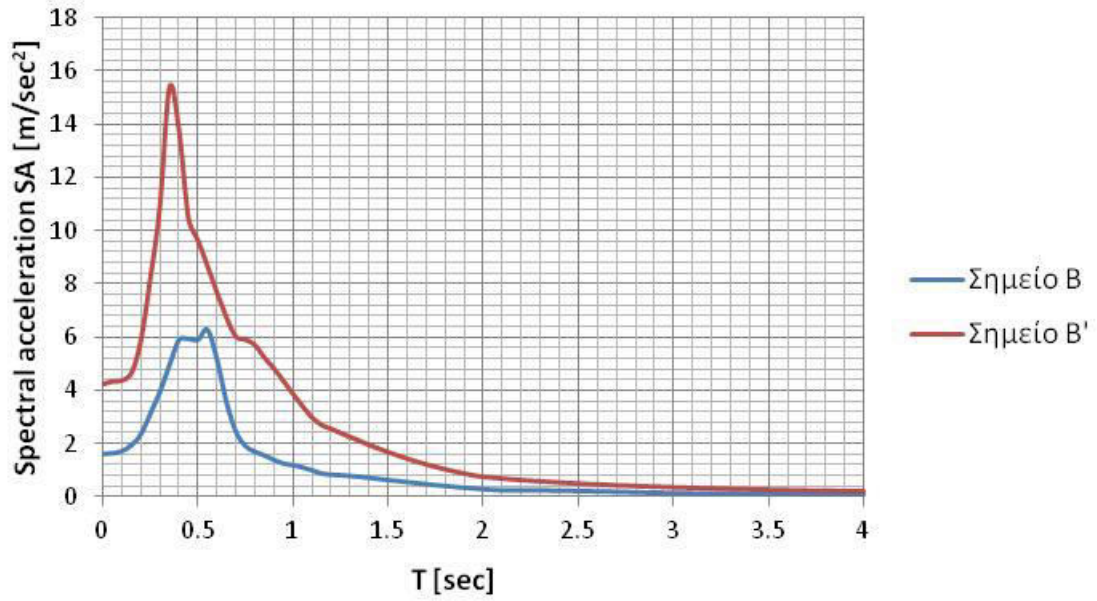
Σχήμα 4.74: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων A και A' για Σενάριο No 1.7.



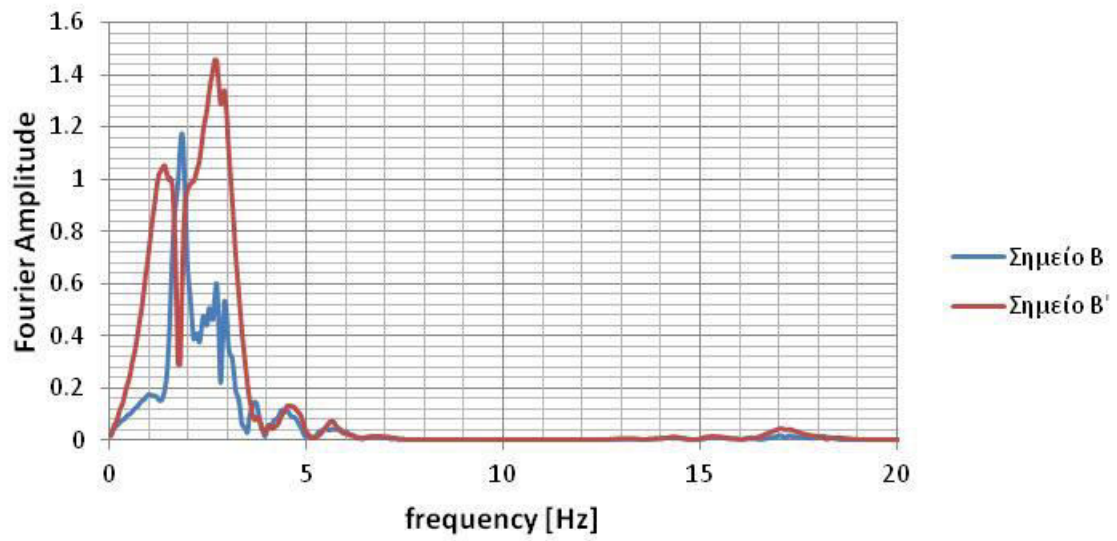
Σχήμα 4.75: Φάσματα Fourier σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.7.



Σχήμα 4.76: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων B και B' για για Σενάριο Νο 1.7.

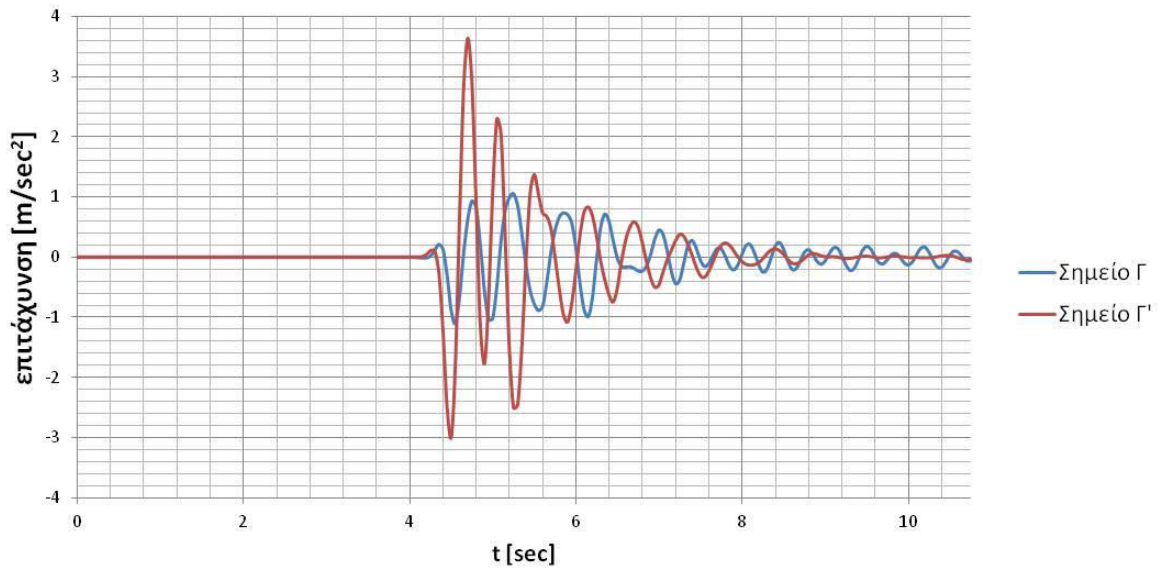


Σχήμα 4.77: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.7.

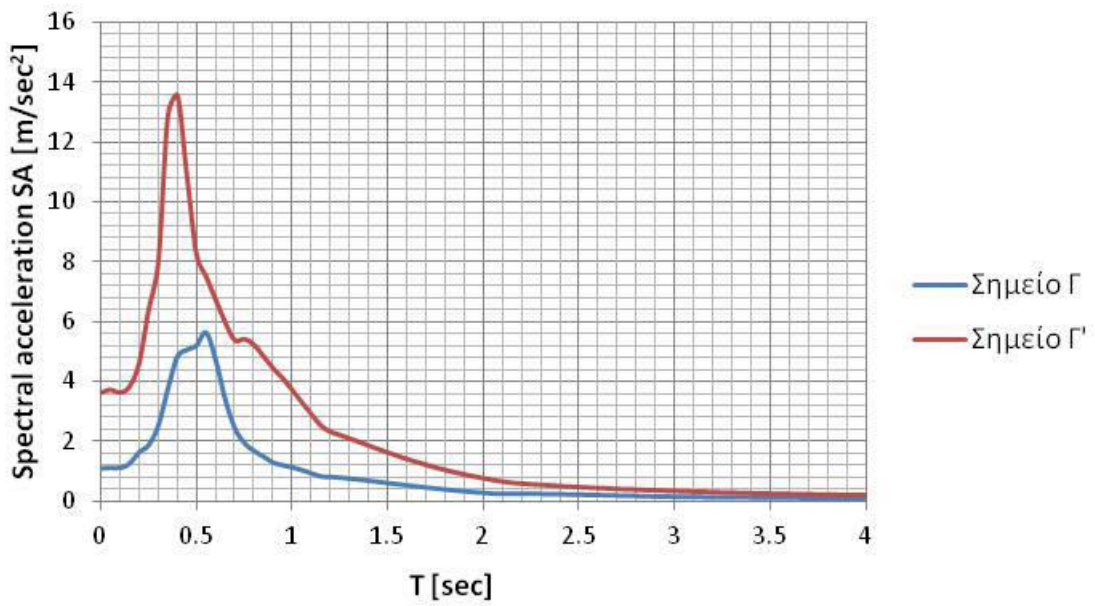


Σχήμα 4.78: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.7.

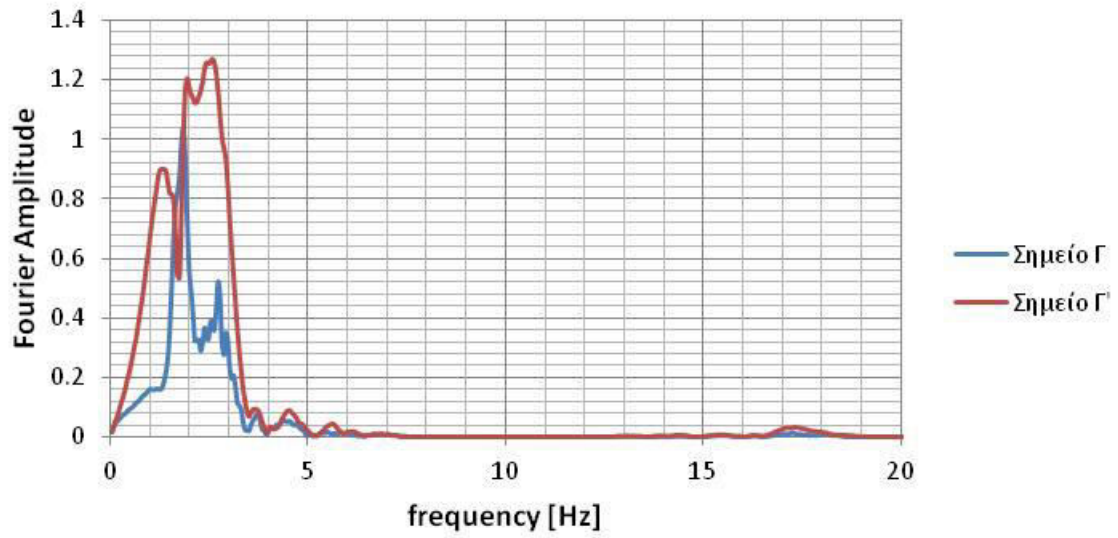




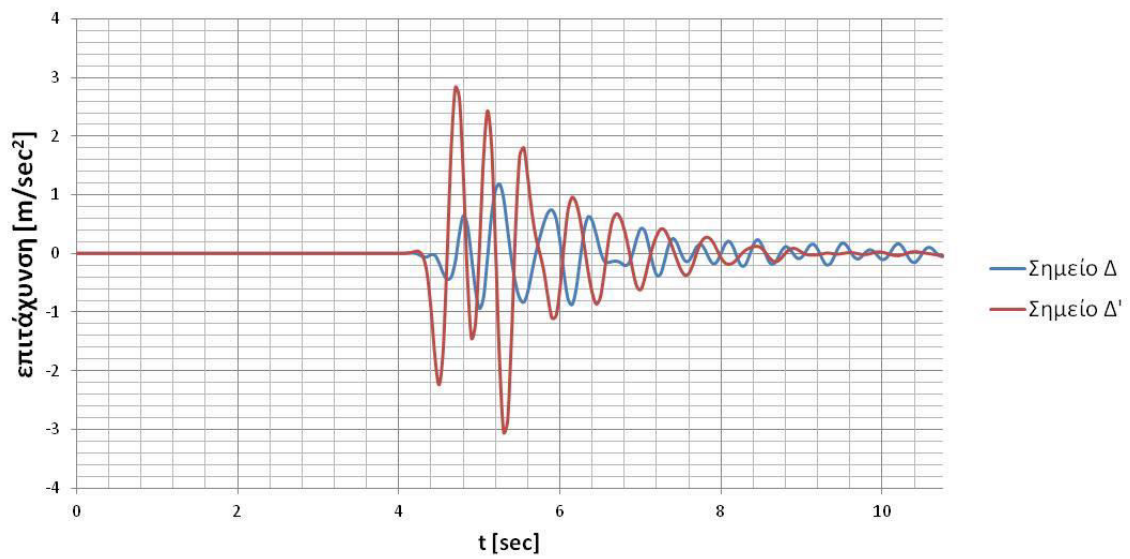
**Σχήμα 4.79:** Επιταχυνσιογραφήματα σημείων Γ και Γ' για για Σενάριο Νο 1.7.



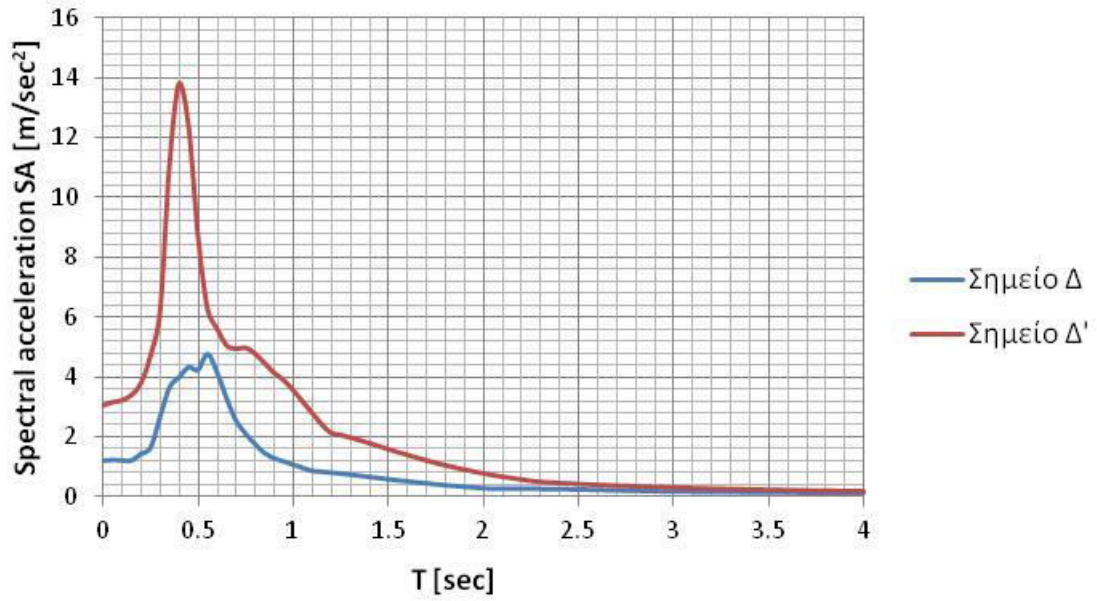
**Σχήμα 4.80:** Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.7.



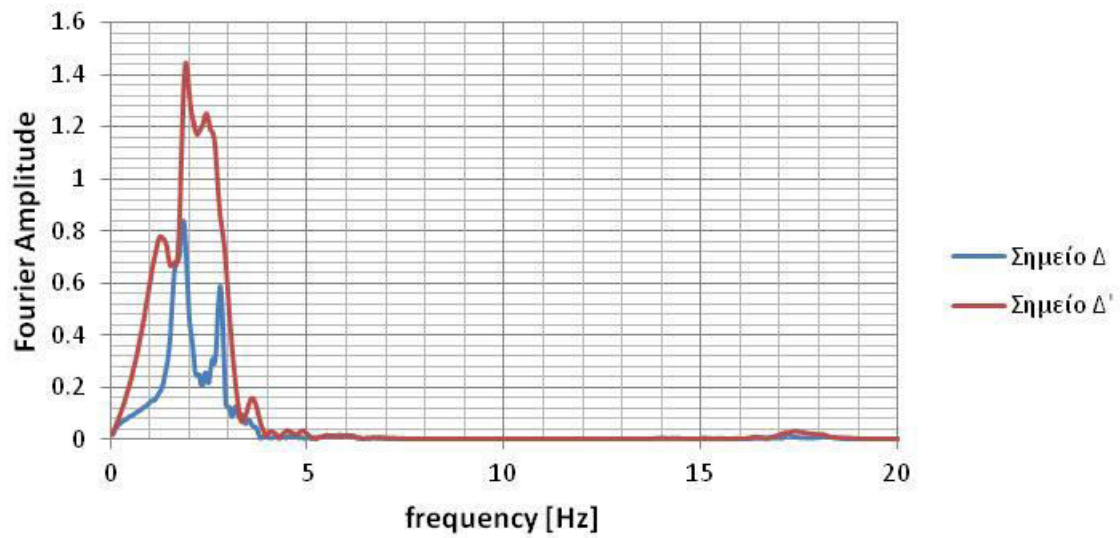
Σχήμα 4.81: Φάσματα Fourier σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.7.



Σχήμα 4.82: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων Δ και Δ' για για Σενάριο Νο 1.7.

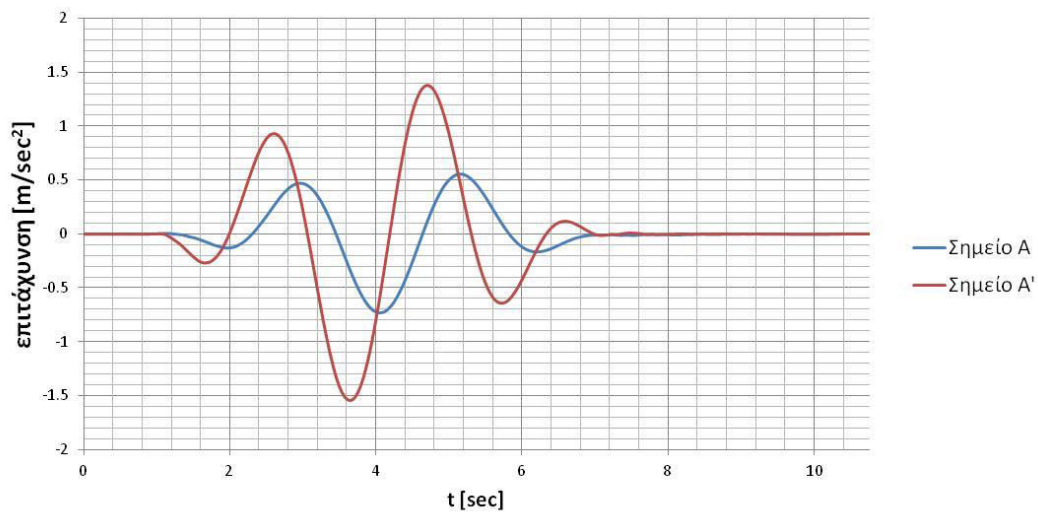


Σχήμα 4.83: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.7.

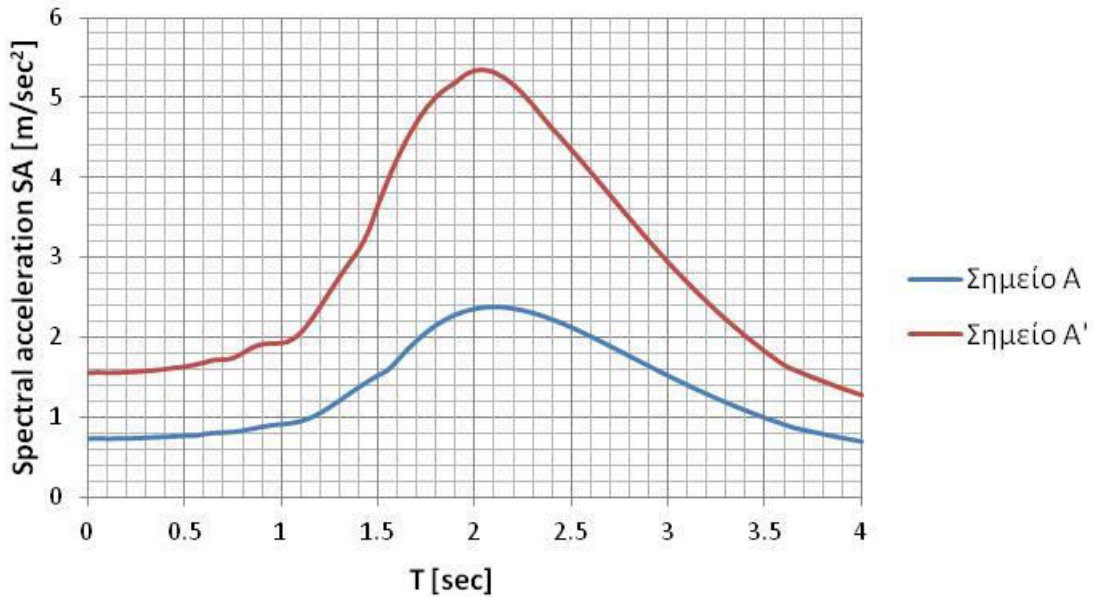


Σχήμα 4.84: Φάσματα Fourier σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.7.

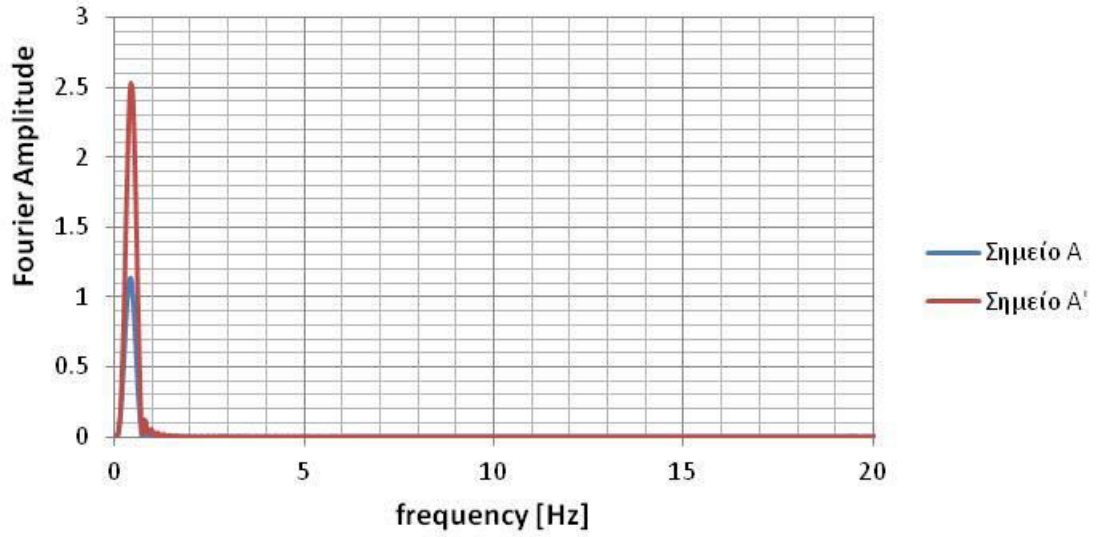
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.8: Διέγερση TH-Erzincan σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος



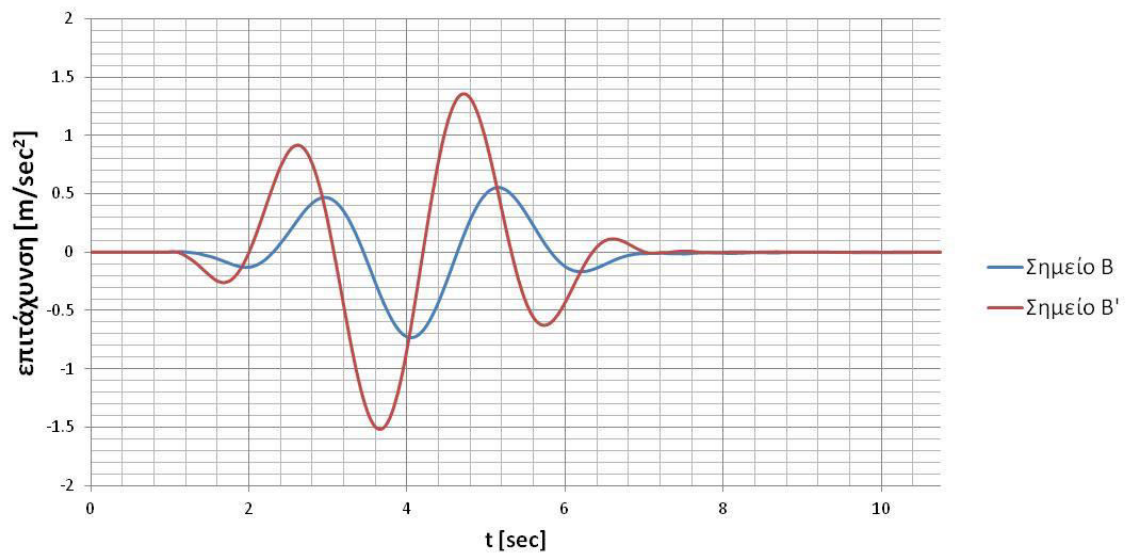
Σχήμα 4.85: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.8.



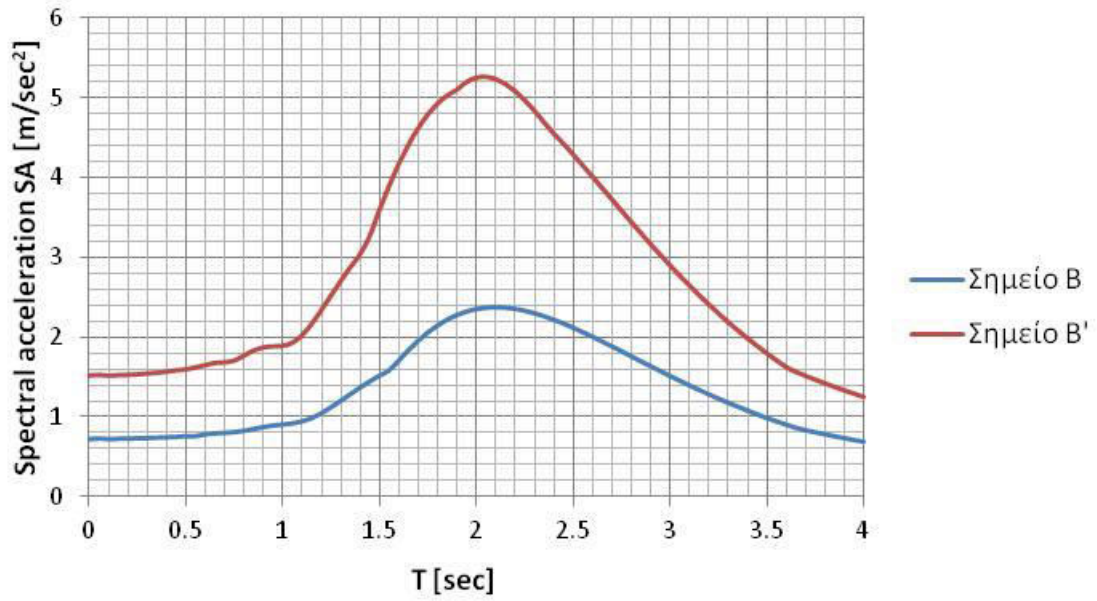
Σχήμα 4.86: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.8.



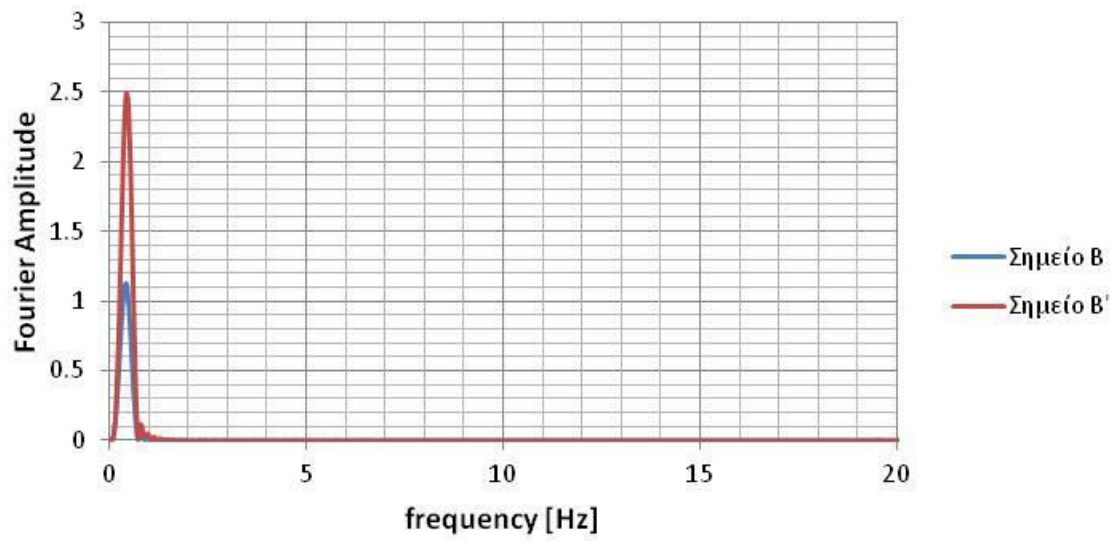
Σχήμα 4.87: Φάσματα Fourier σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.8.



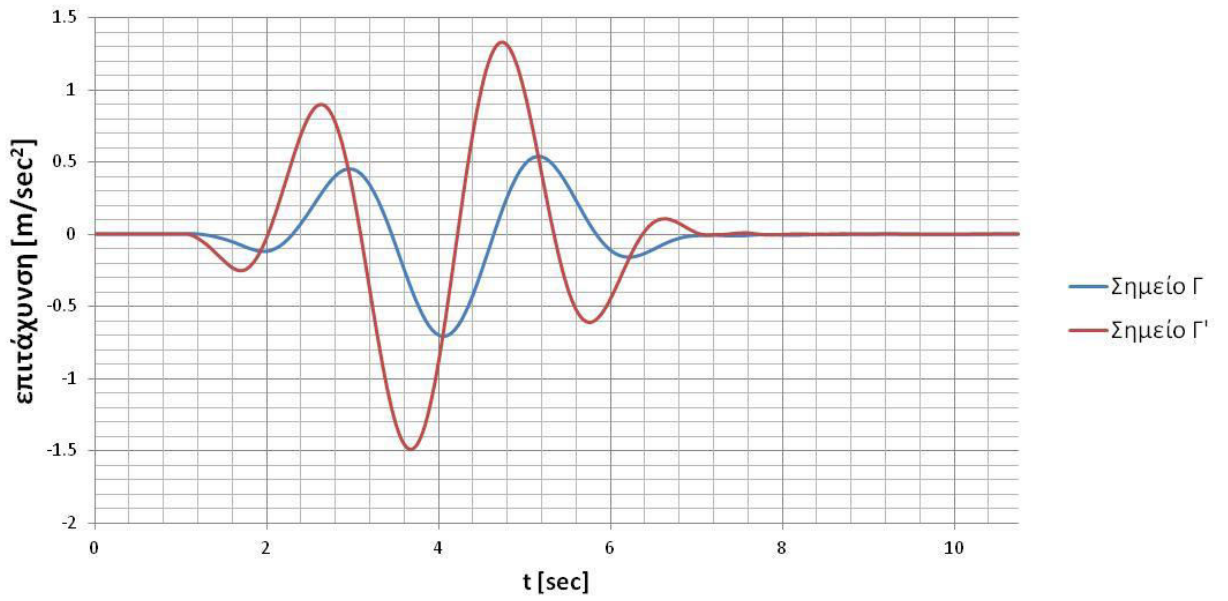
Σχήμα 4.88: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων B και B' για Σενάριο Νο 1.8.



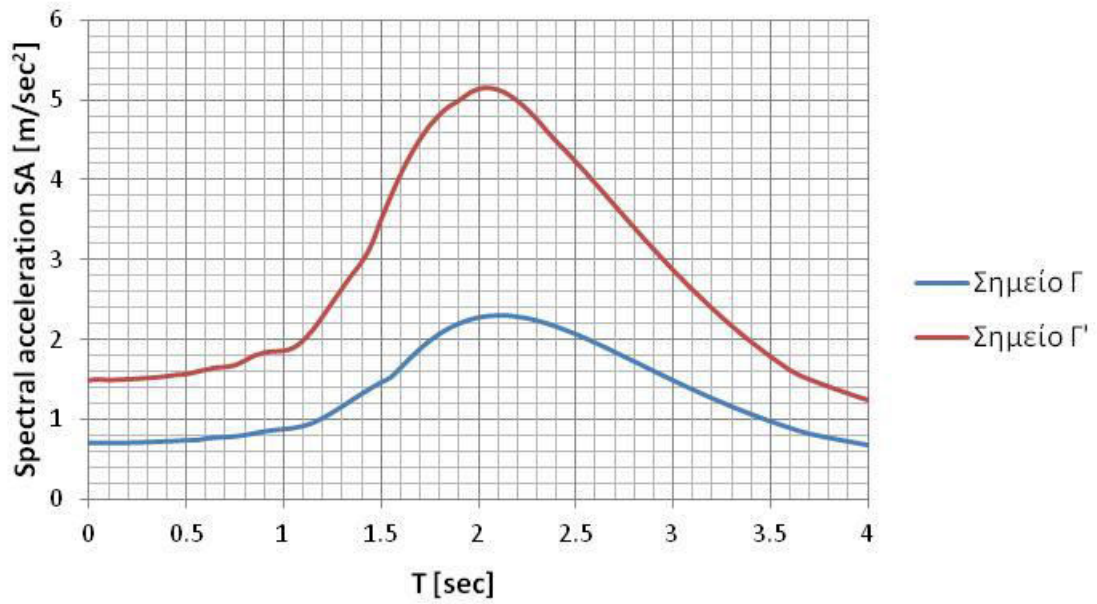
Σχήμα 4.89: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.8.



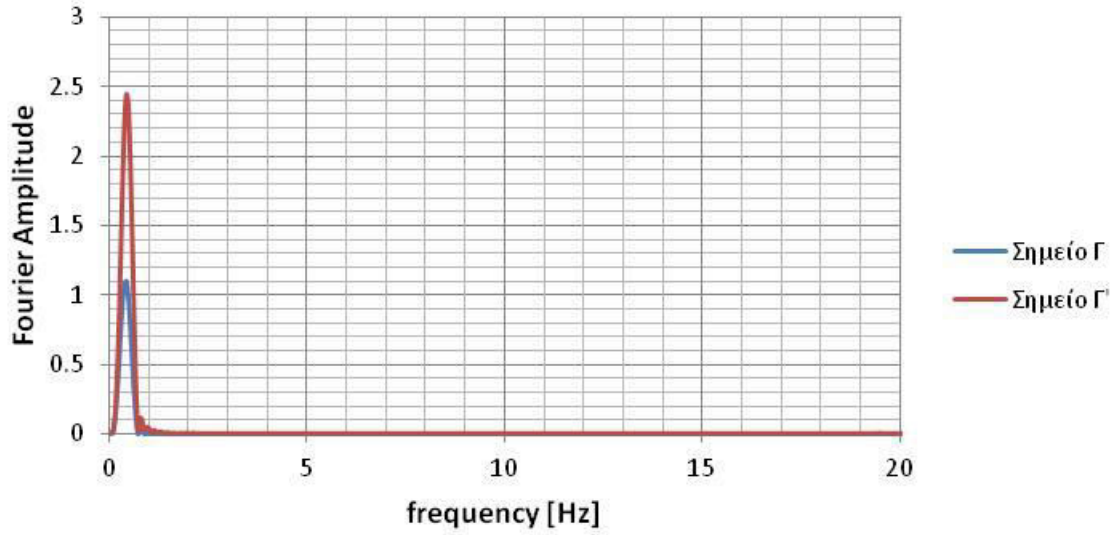
Σχήμα 4.90: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.8.



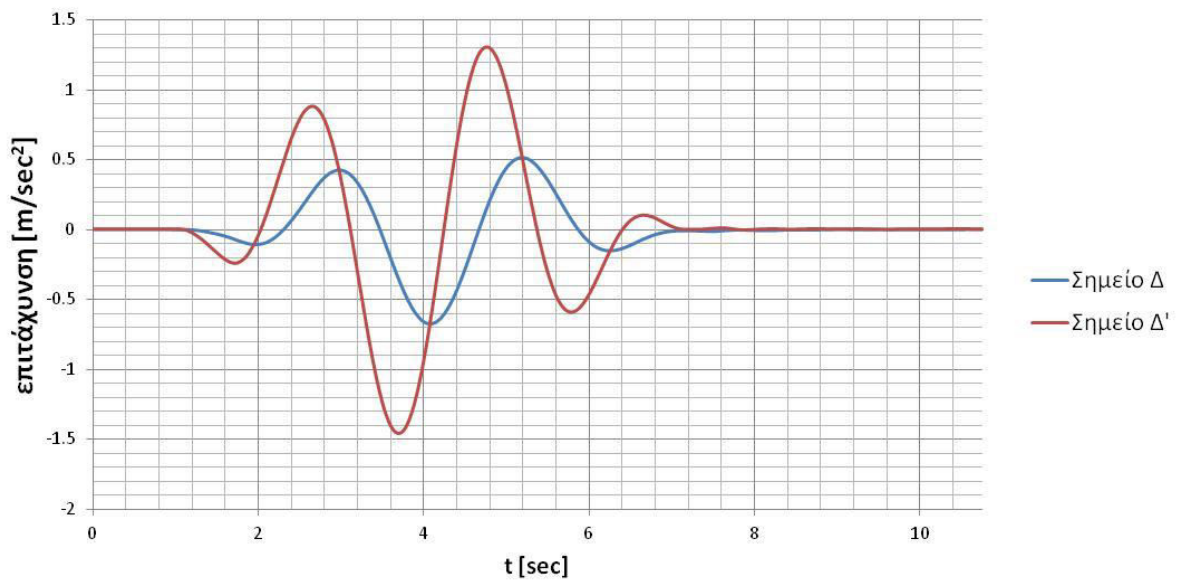
Σχήμα 4.91: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων Γ και Γ' για για Σενάριο Νο 1.8.



Σχήμα 4.92: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.8.

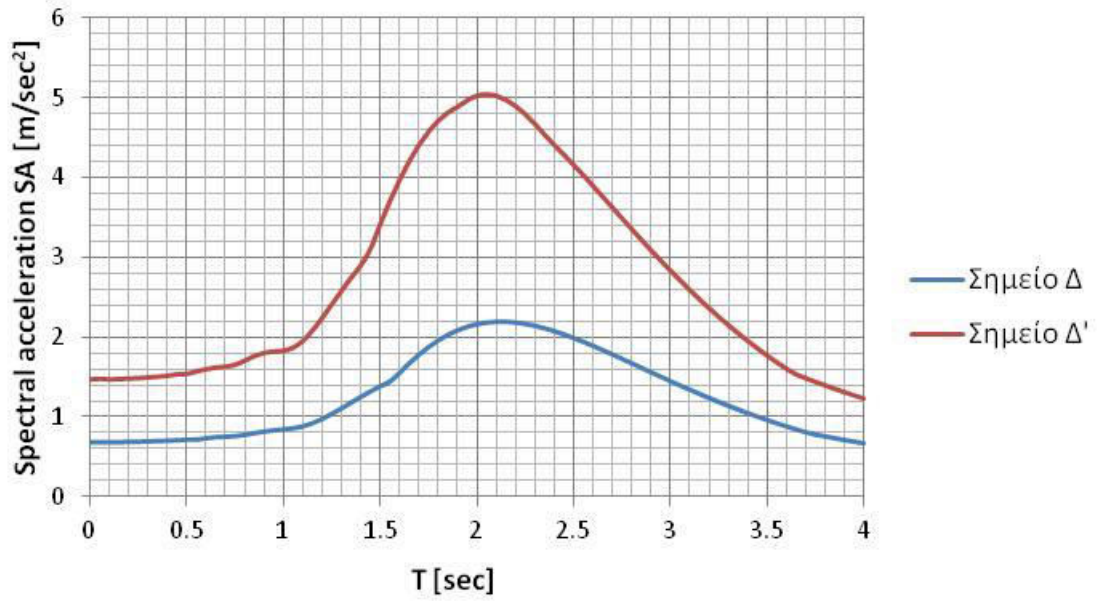


Σχήμα 4.93: Φάσματα Fourier σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.8.

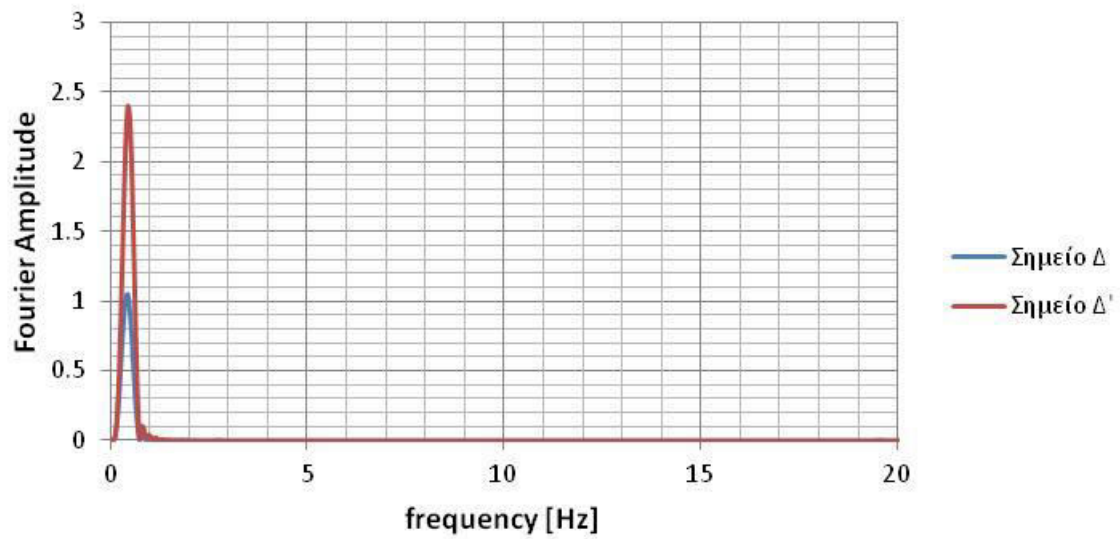


Σχήμα 4.94: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων Δ και Δ' για για Σενάριο Νο 1.8.



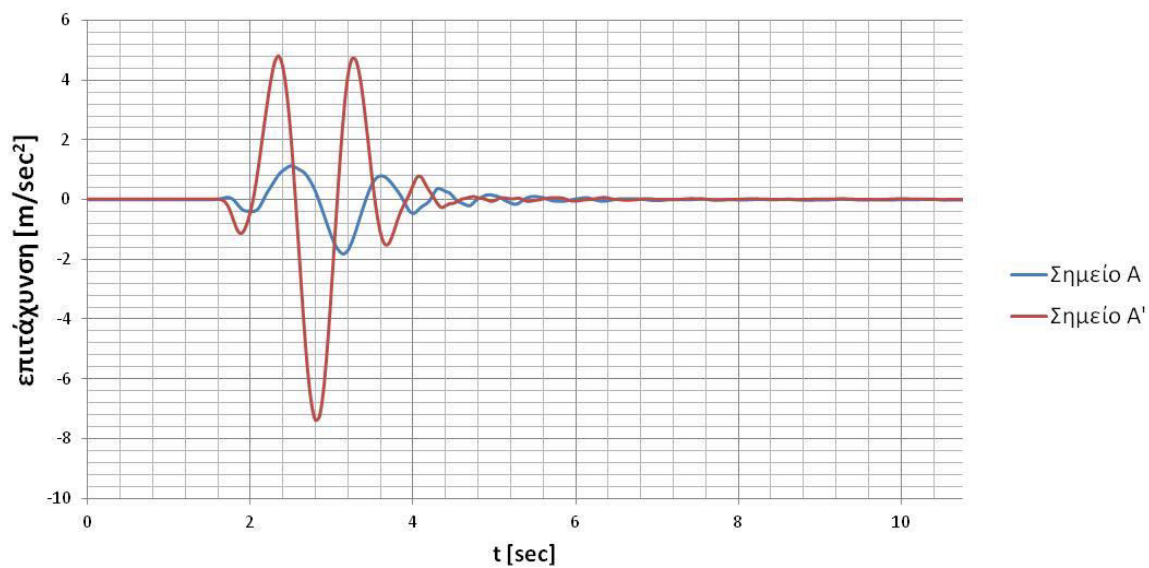


Σχήμα 4.95: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.8.

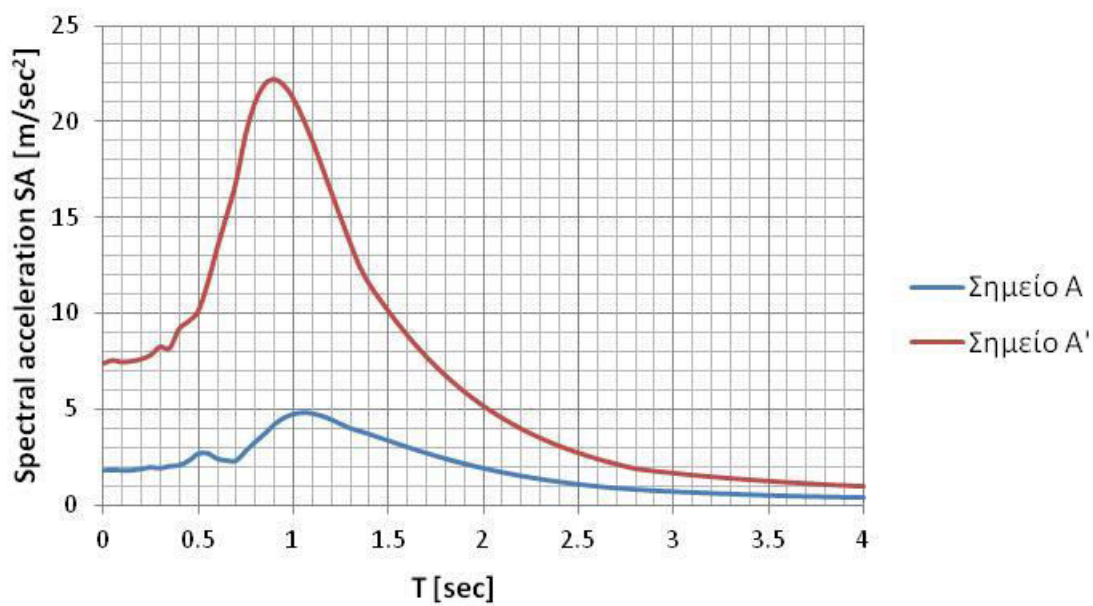


Σχήμα 4.96: Φάσματα Fourier σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.8.

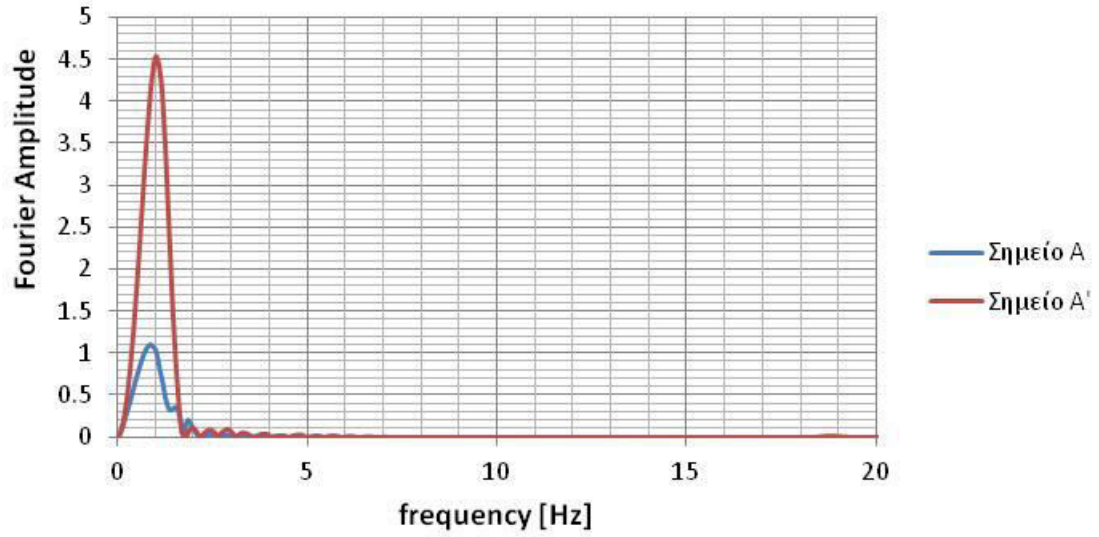
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.9: Διέγερση TH-Northridge στην επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος



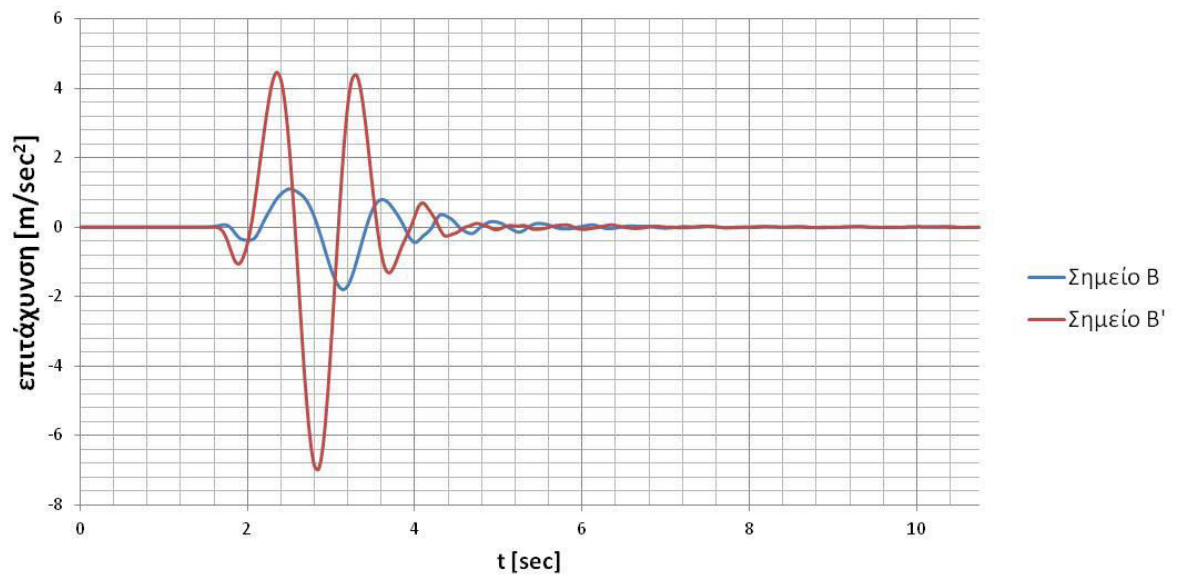
Σχήμα 4.97: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.9.



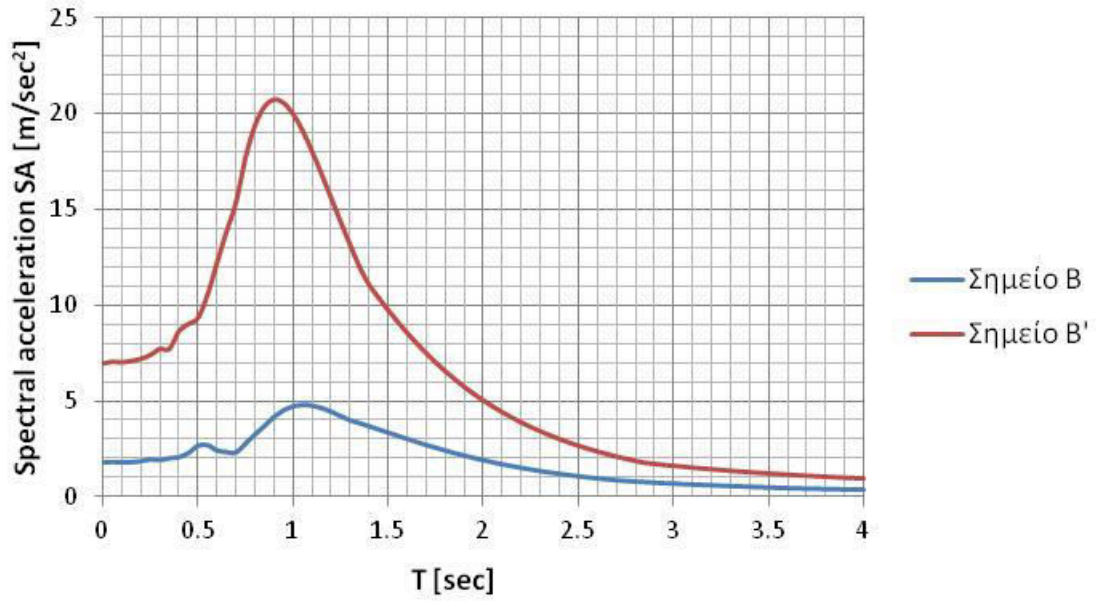
Σχήμα 4.98: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.9.



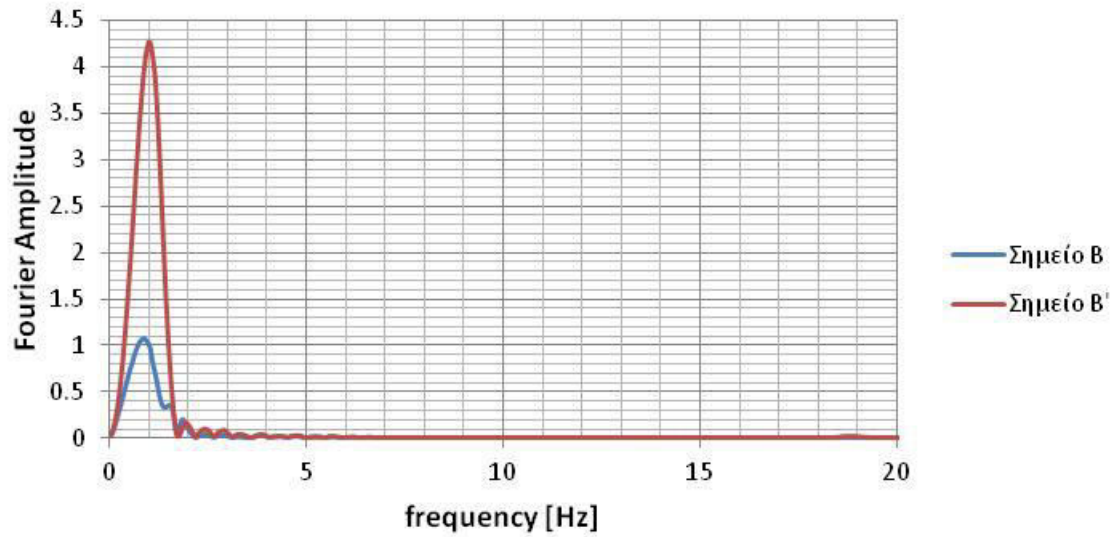
Σχήμα 4.99: Φάσματα Fourier σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.9.



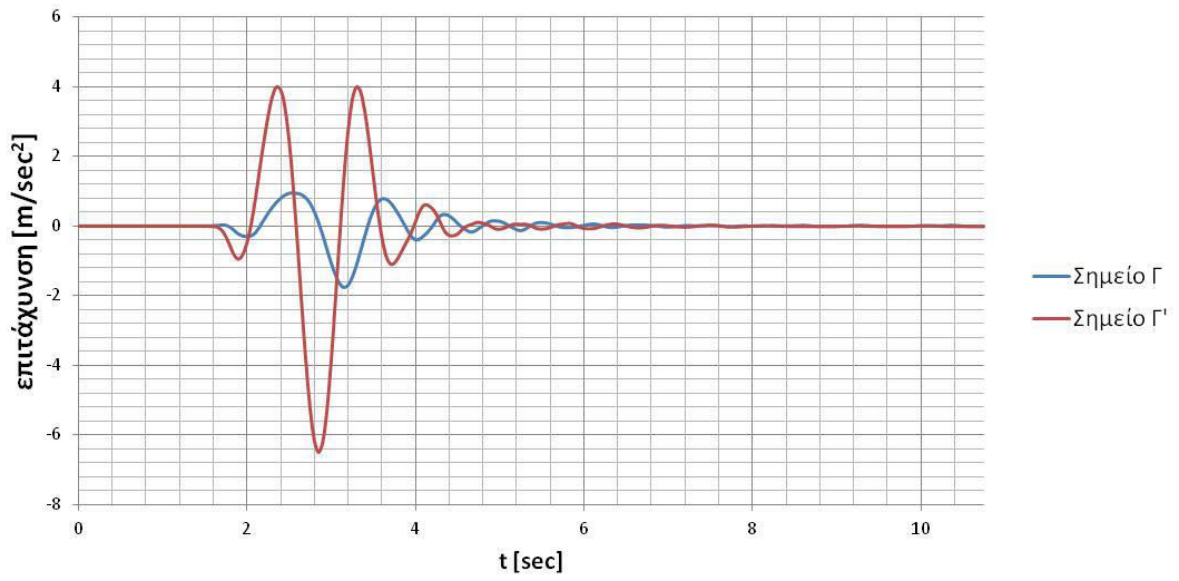
Σχήμα 4.100: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 1.9.



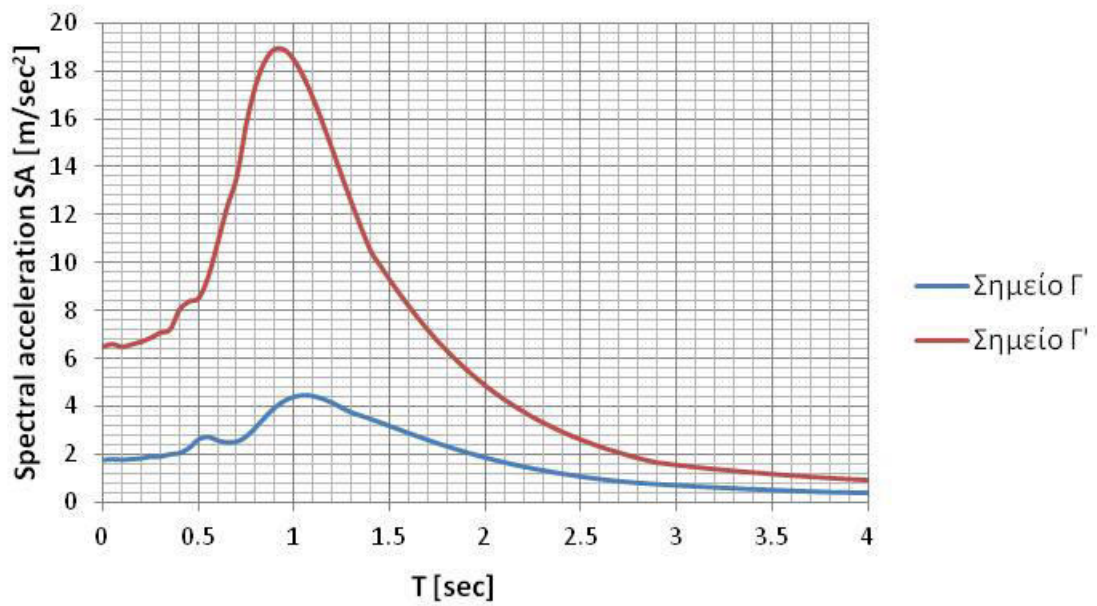
Σχήμα 4.101: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.9.



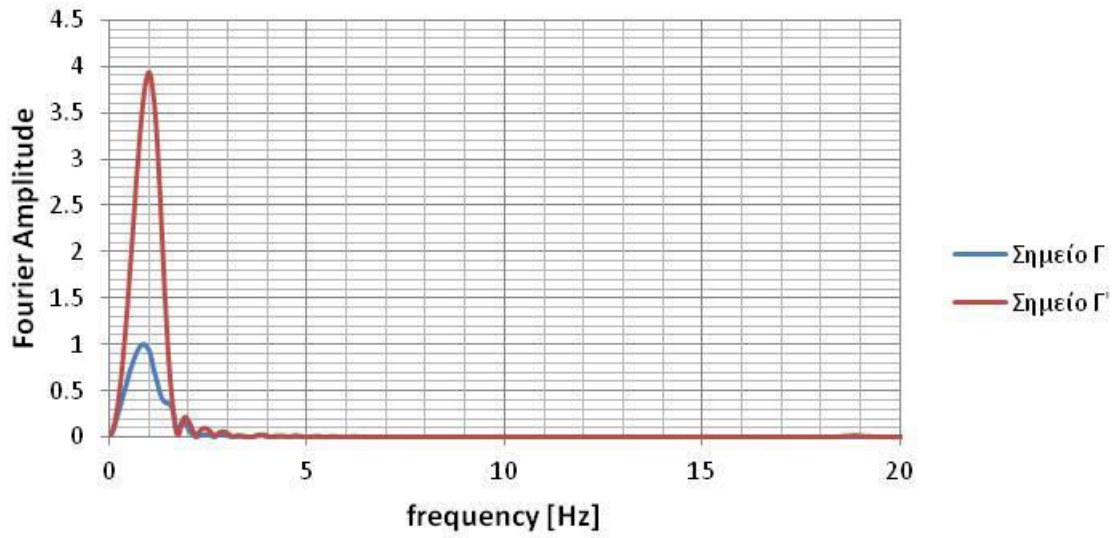
Σχήμα 4.102: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.9.



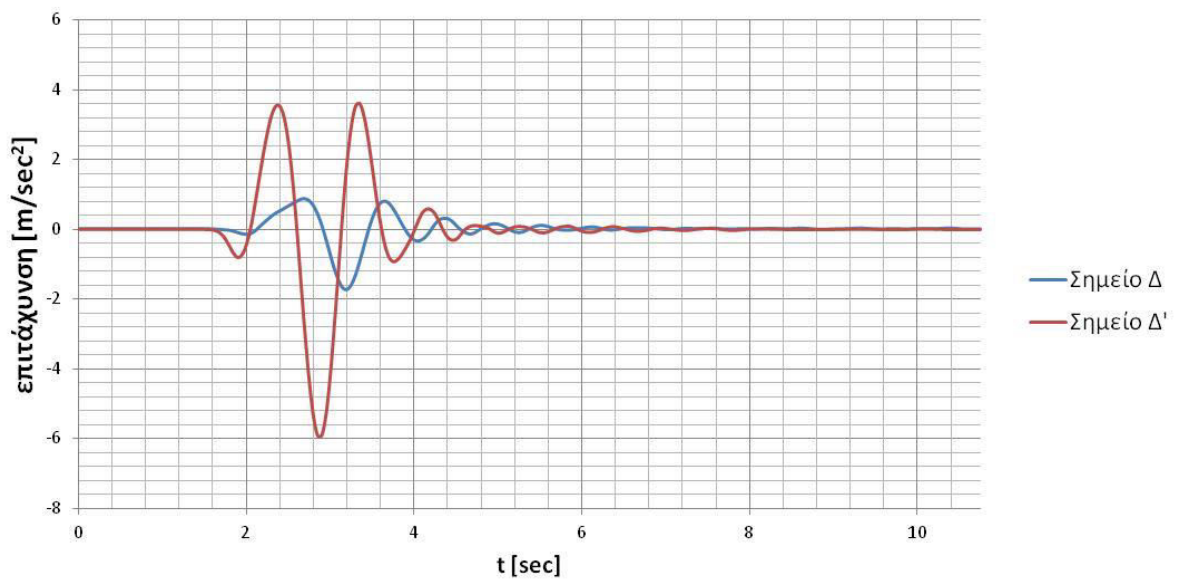
**Σχήμα 4.103** Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.9.



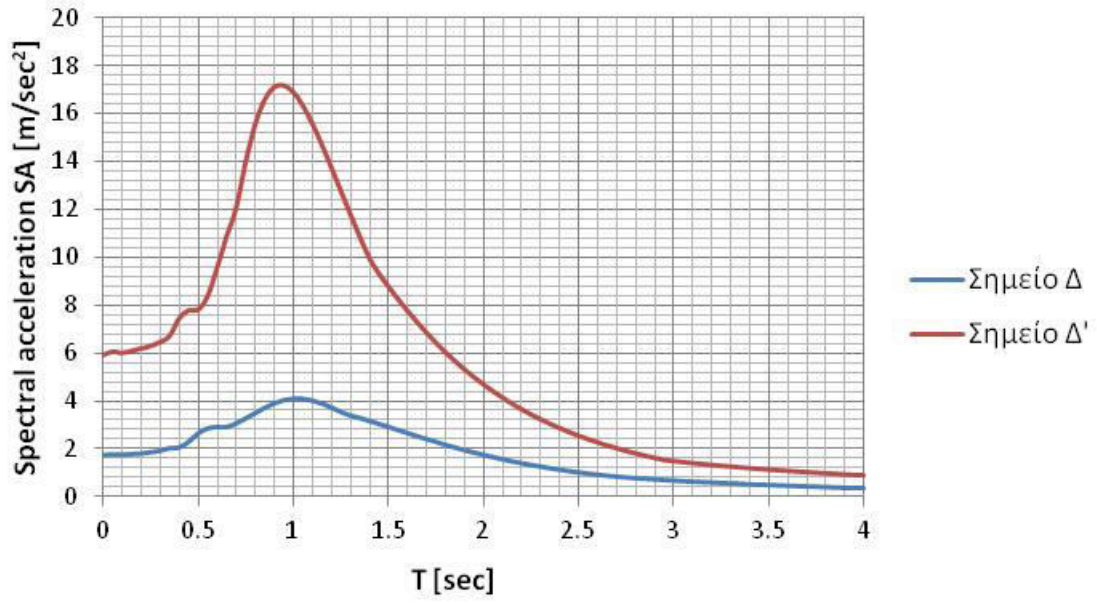
**Σχήμα 4.104:** Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.9.



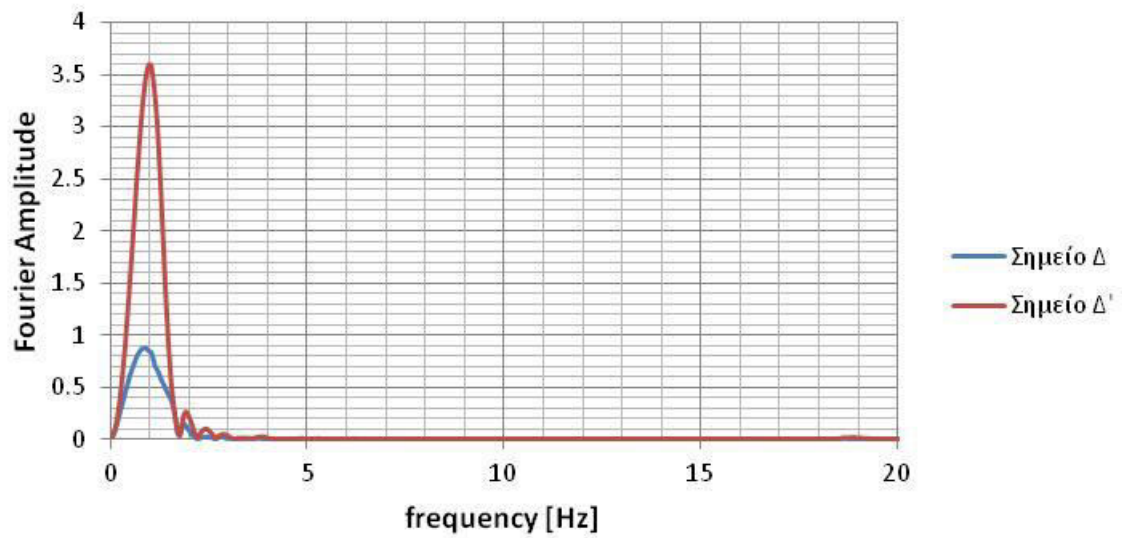
Σχήμα 4.105: Φάσματα Fourier σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.9.



Σχήμα 4.106: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.9.

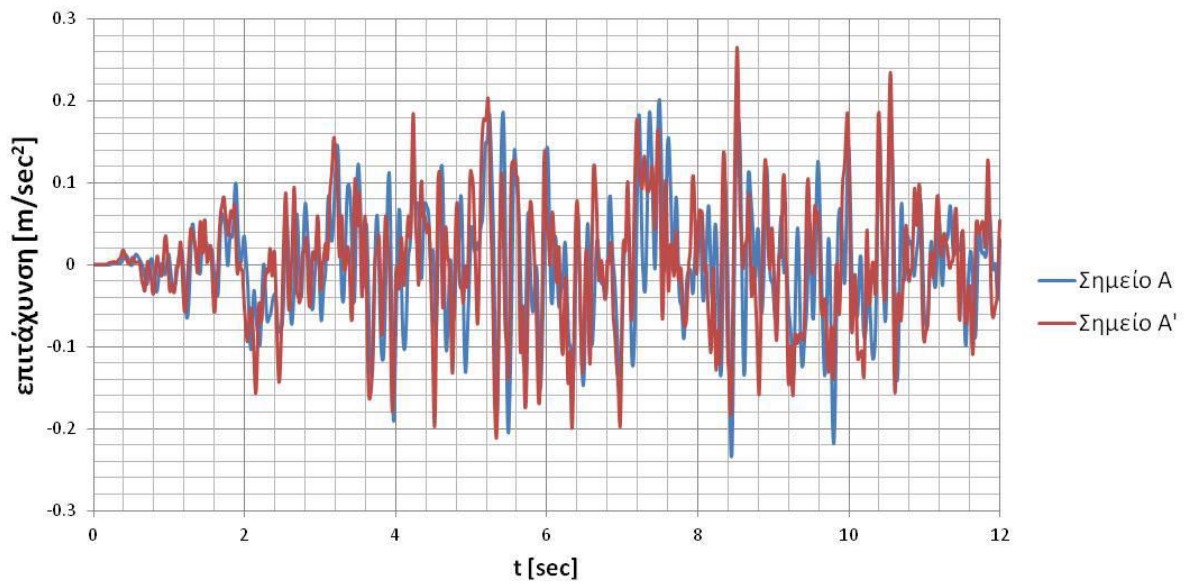


**Σχήμα 4.107:** Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.9.

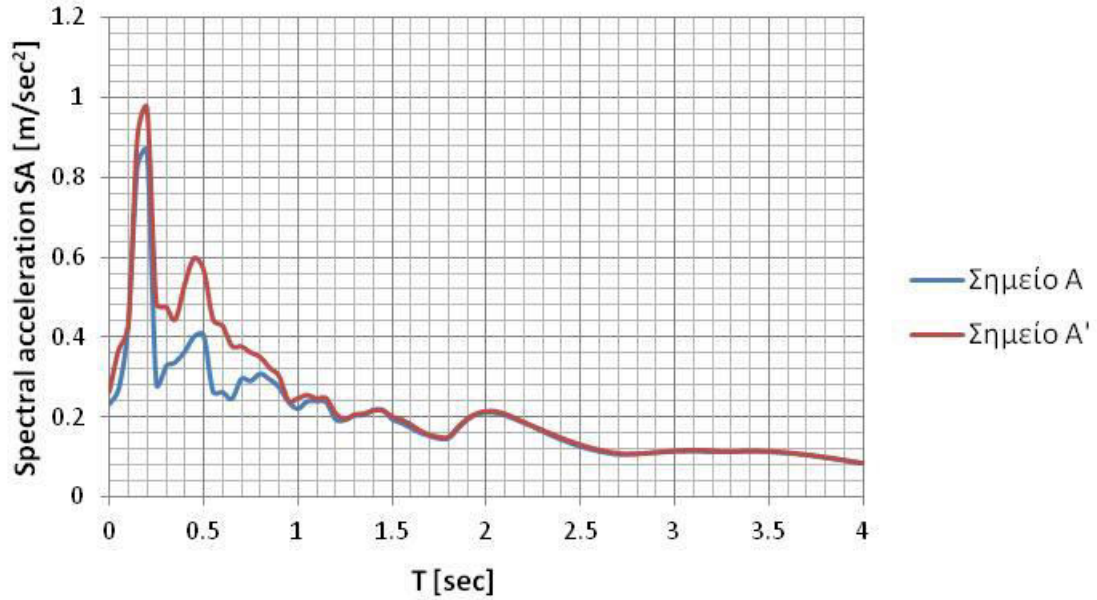


**Σχήμα 4.108:** Φάσματα Fourier σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.9.

Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.10: Διέγερση TH-EC8 στο σημείο Κ για σκληρό έδαφος

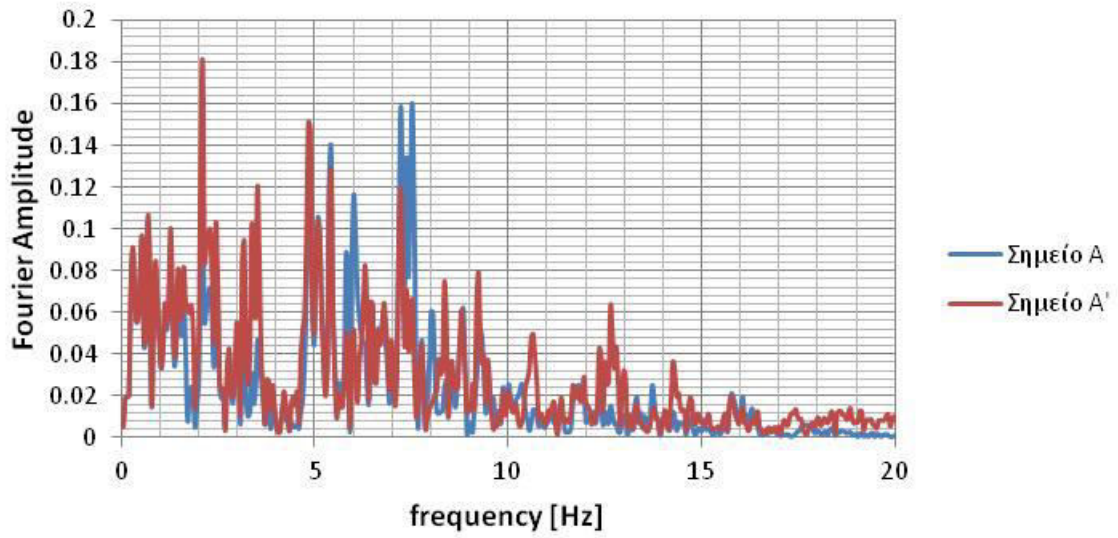


Σχήμα 4.109 Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.10.

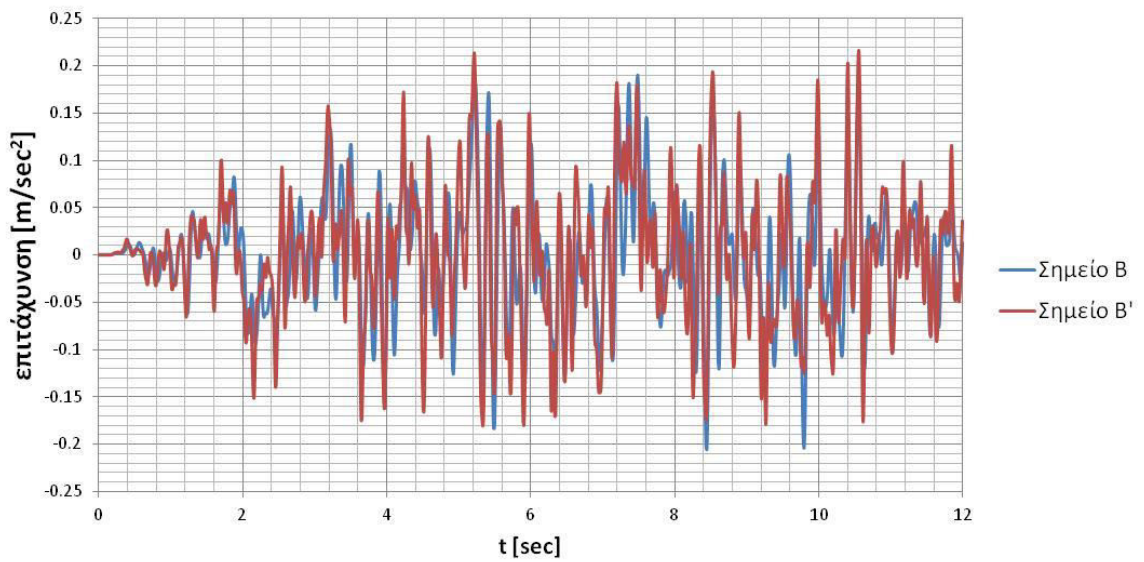


Σχήμα 4.110: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.10.

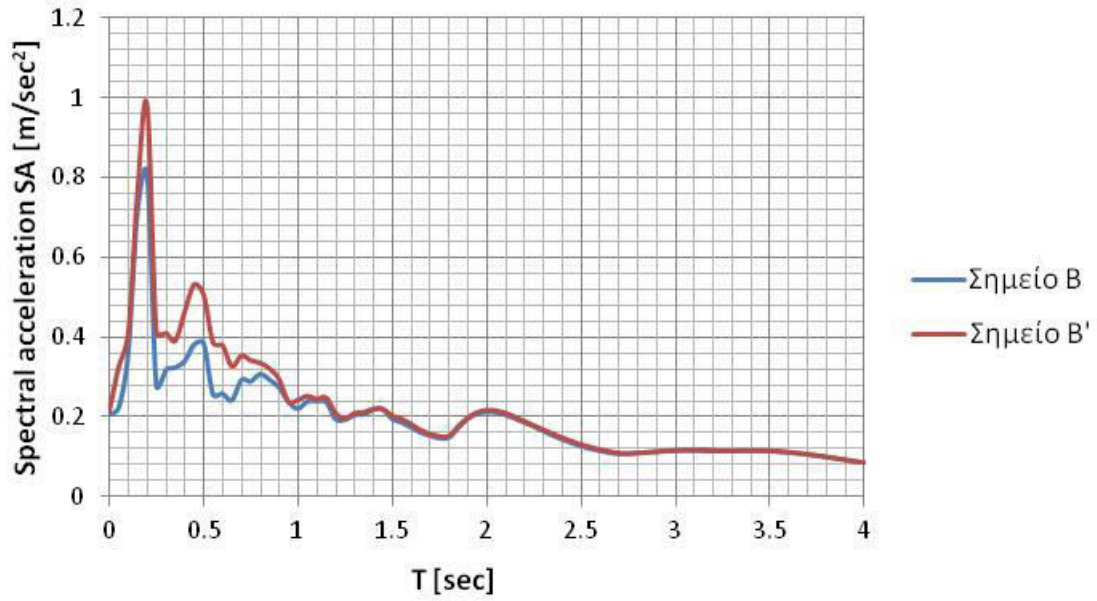




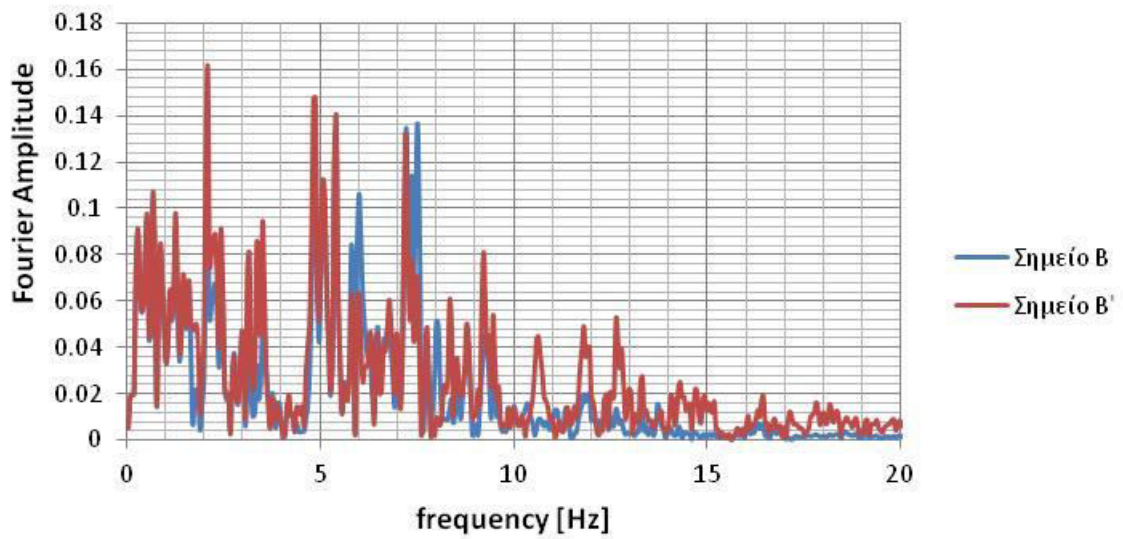
**Σχήμα 4.111:** Φάσματα Fourier σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.10.



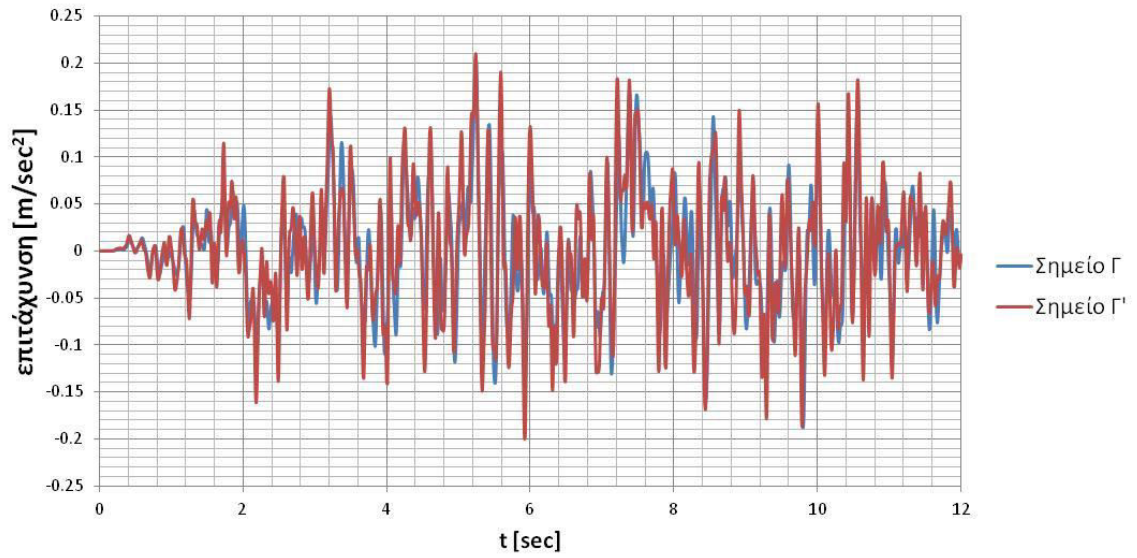
**Σχήμα 4.112:** Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 1.10.



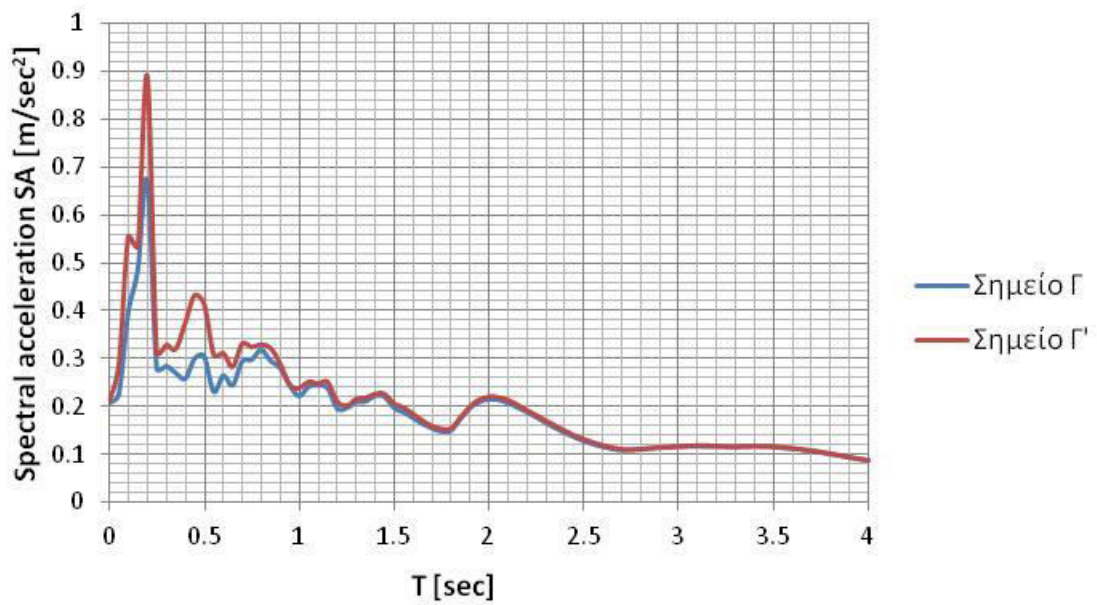
Σχήμα 4.113: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.10.



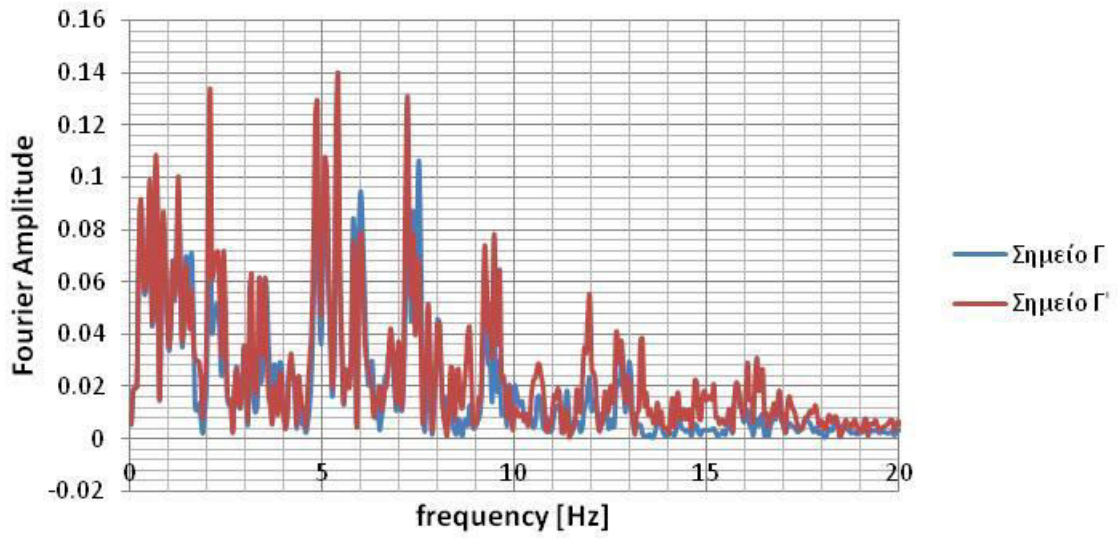
Σχήμα 4.114: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.10.



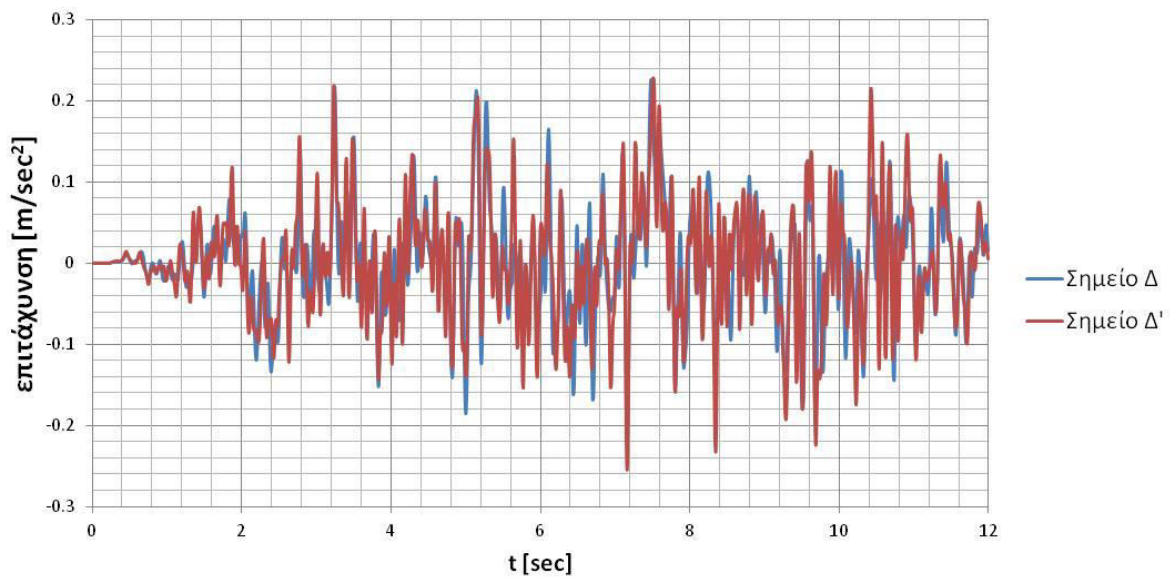
**Σχήμα 4.115:** Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.10.



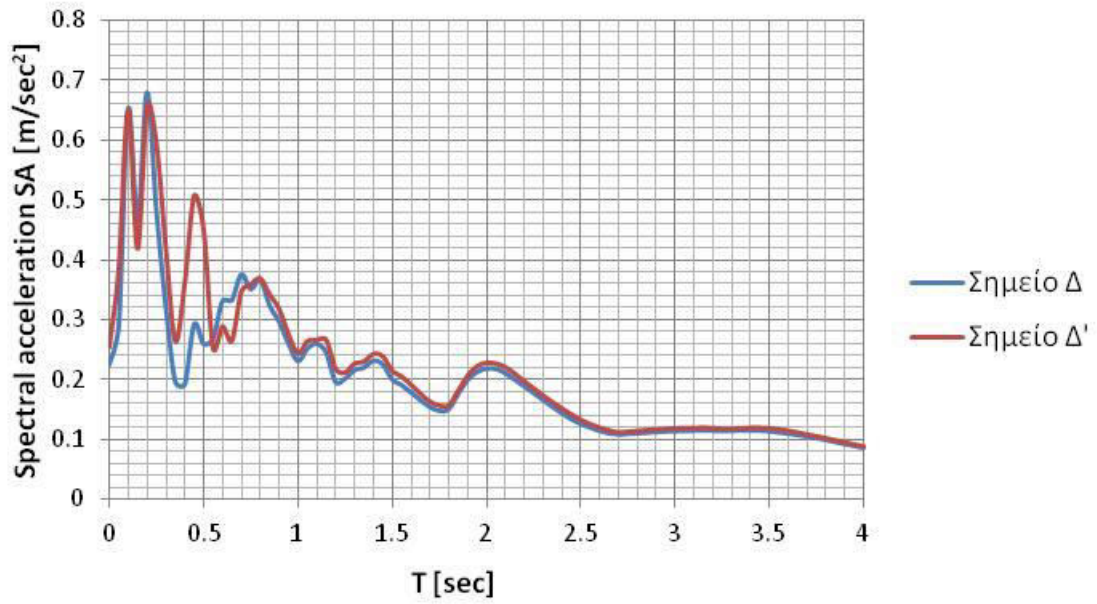
**Σχήμα 4.116:** Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.10.



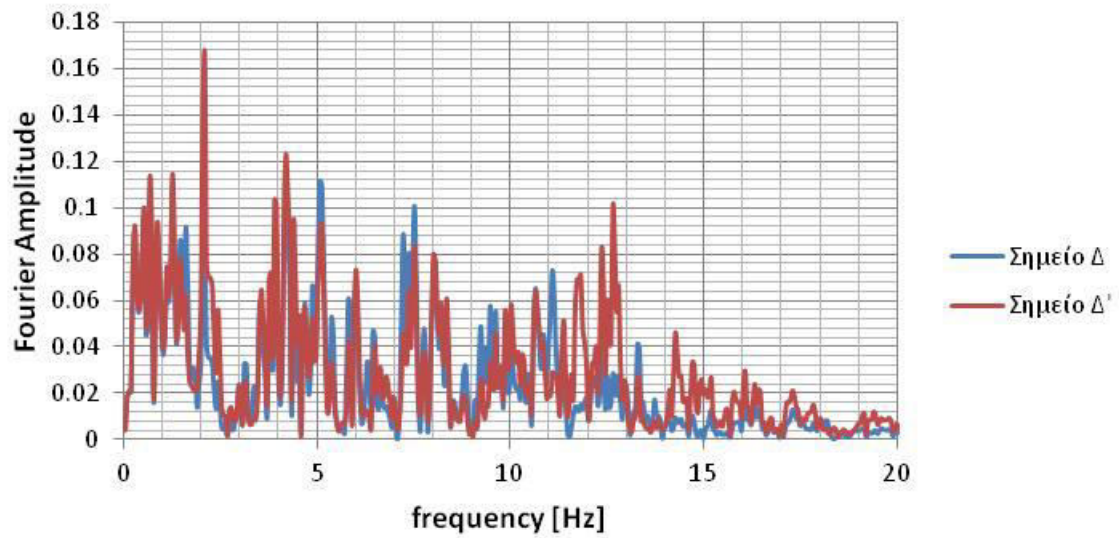
Σχήμα 4.117: Φάσματα Fourier σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.10.



Σχήμα 4.118: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.10.

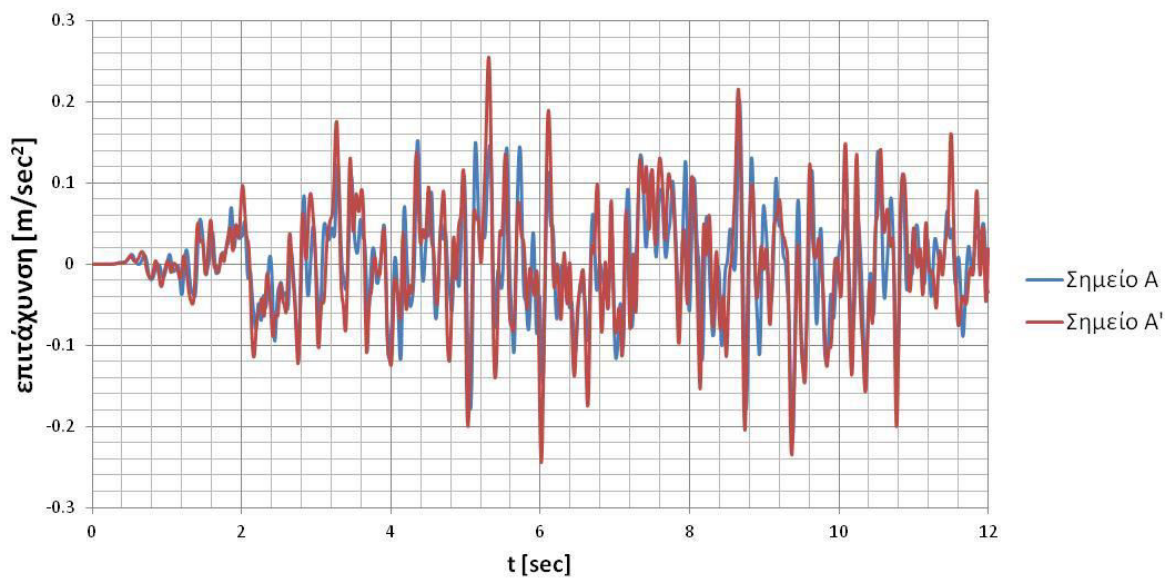


Σχήμα 4.119: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.10.

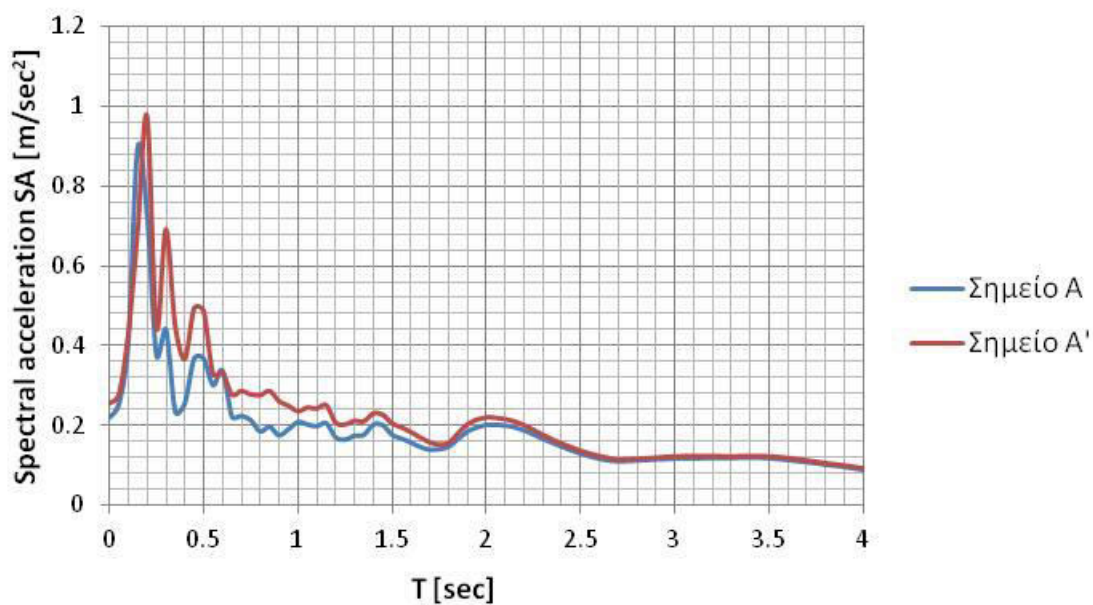


Σχήμα 4.120: Φάσματα Fourier σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.10.

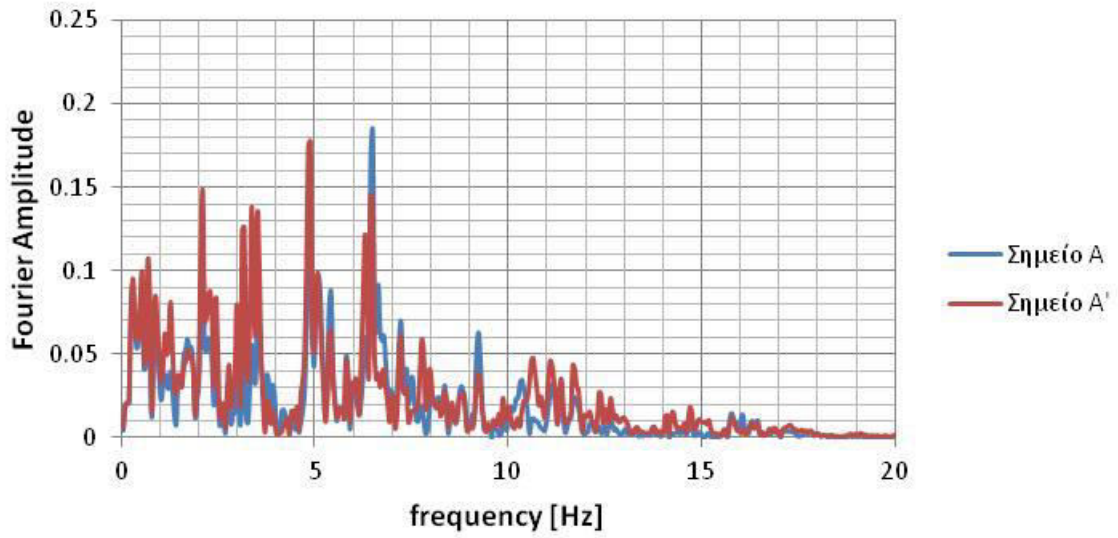
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.11: Διέγερση TH-EC8 στο σημείο Κ' για σκληρό έδαφος



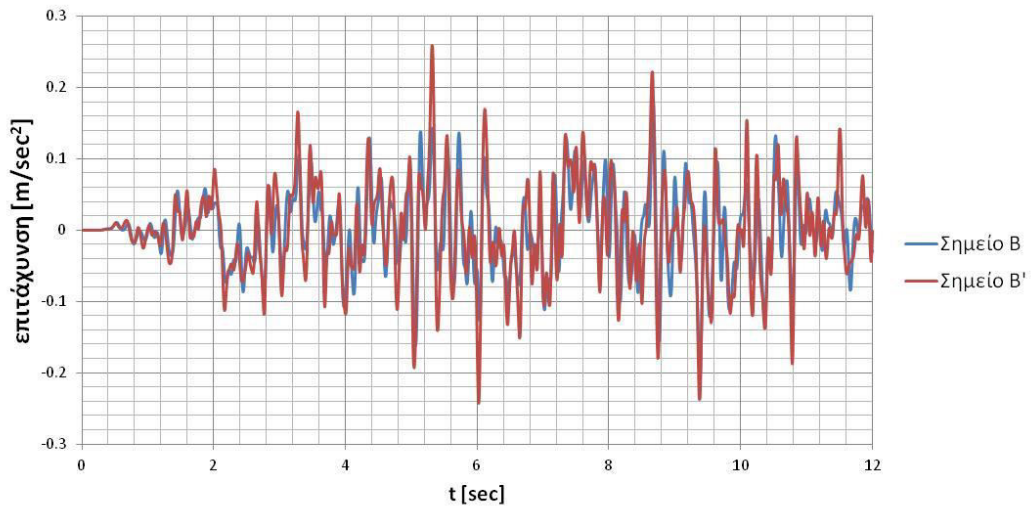
Σχήμα 4.121: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.11.



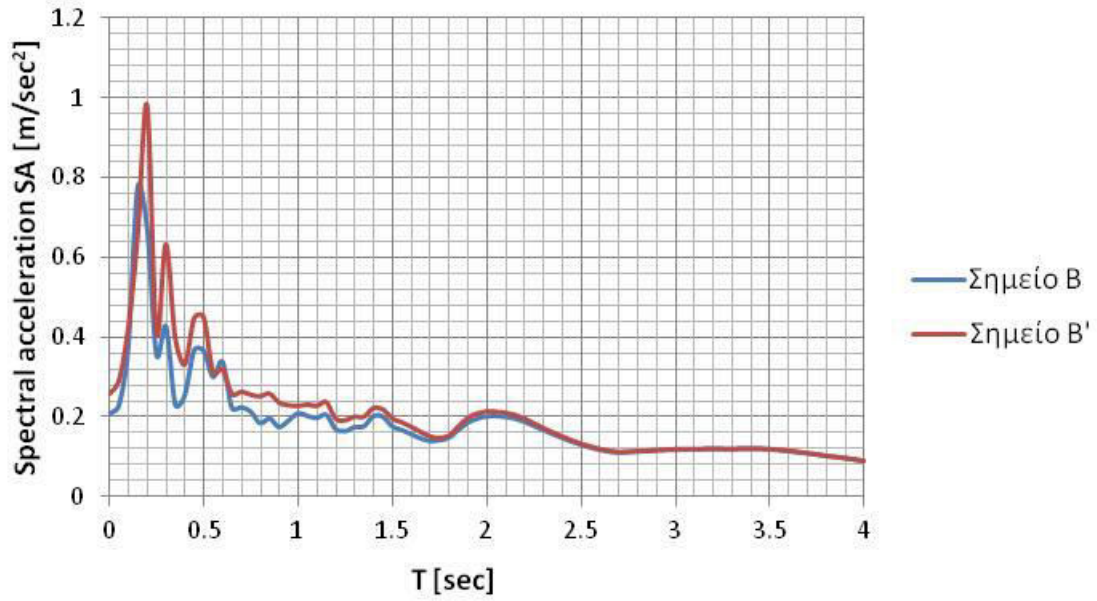
Σχήμα 4.122: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.11.



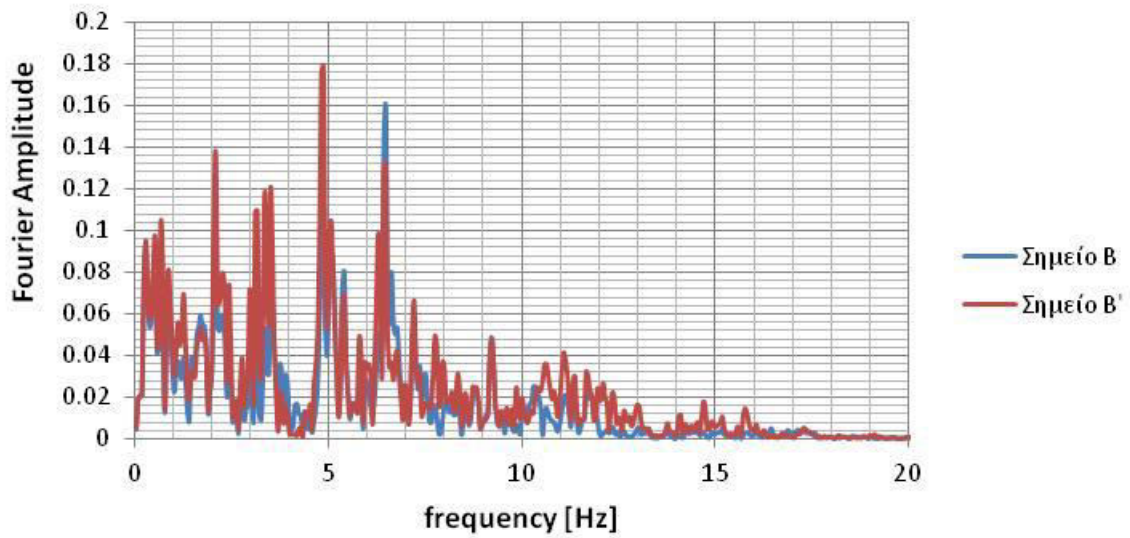
**Σχήμα 4.123:** Φάσματα Fourier σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.11.



**Σχήμα 4.124:** Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 1.11.

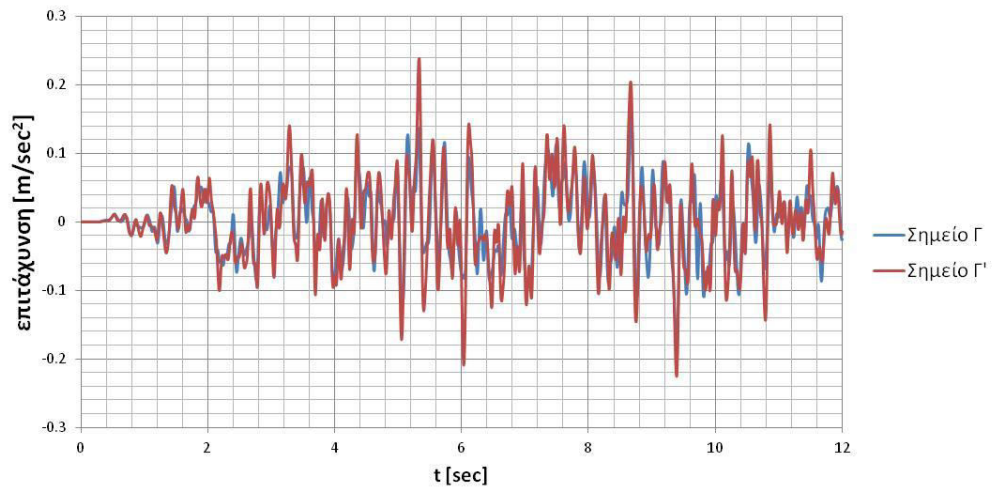


Σχήμα 4.125: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.11.

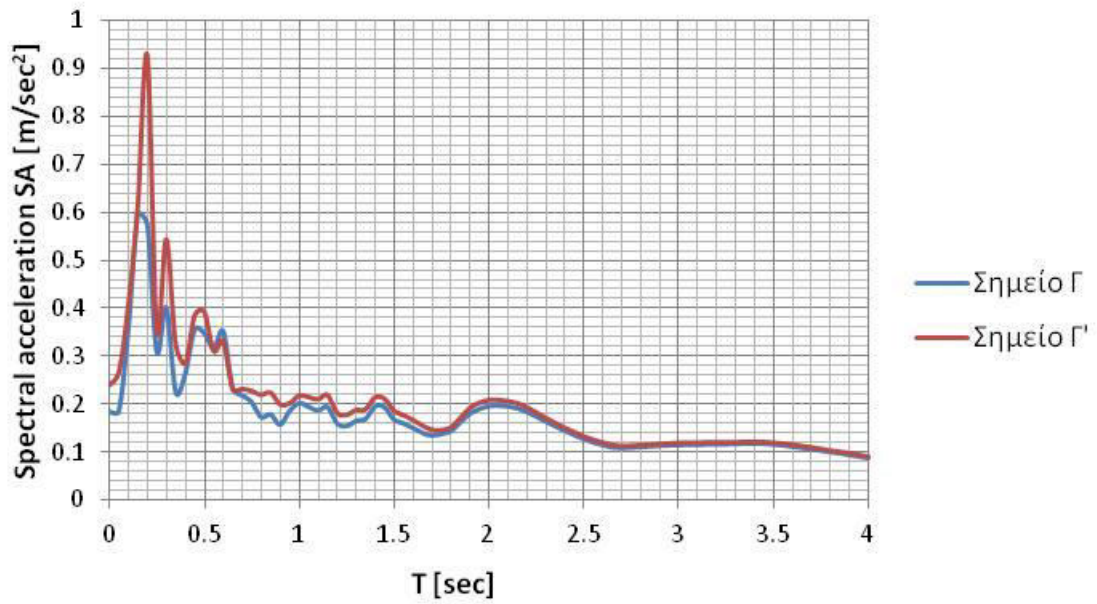


Σχήμα 4.126: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.11.

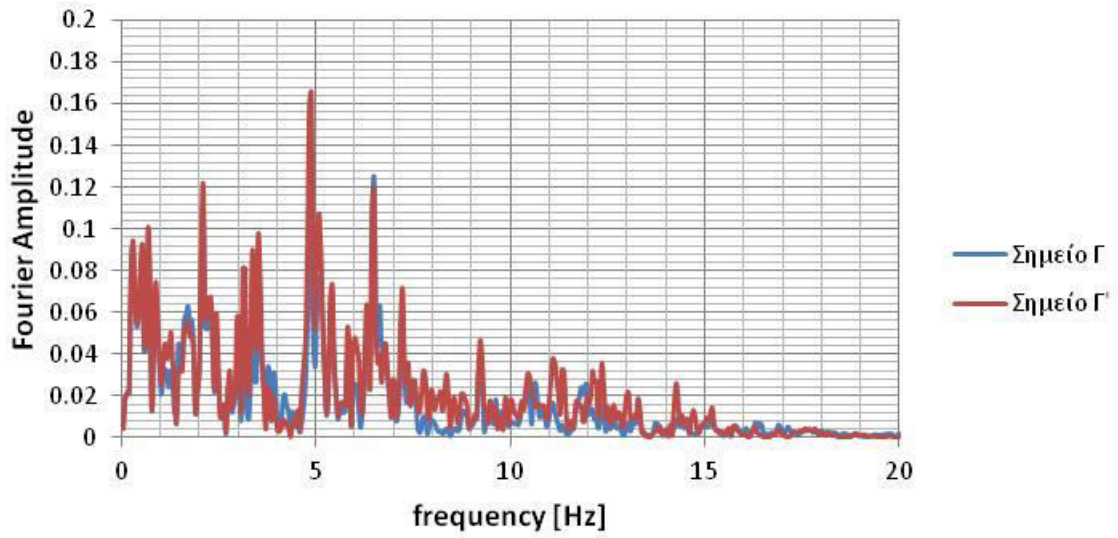




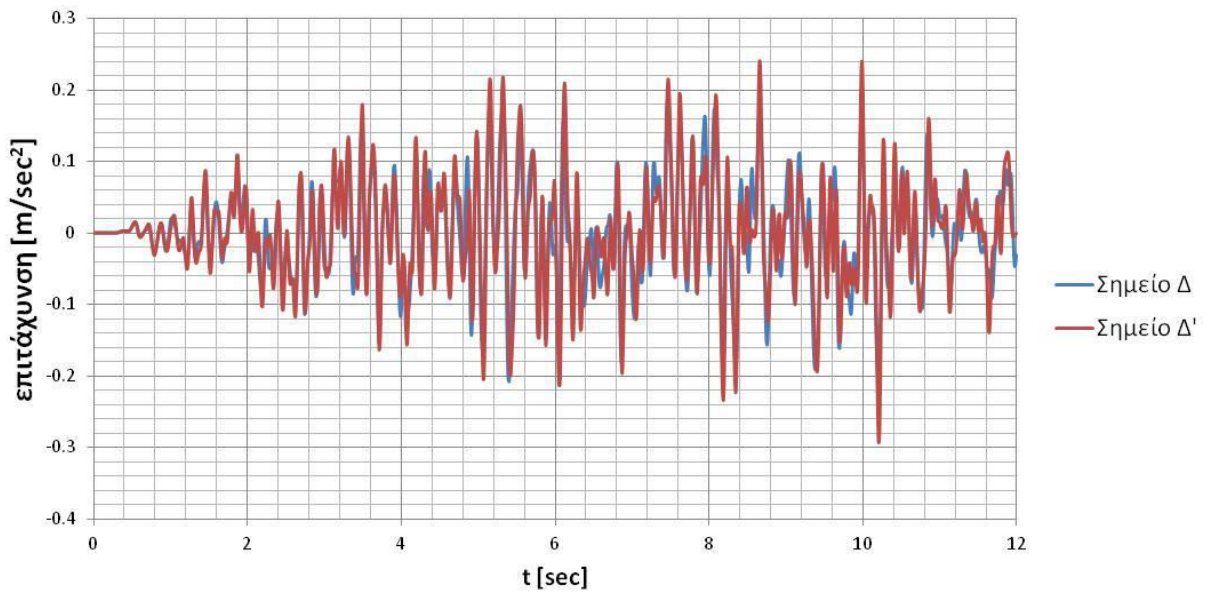
**Σχήμα 4.127:** Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.11.



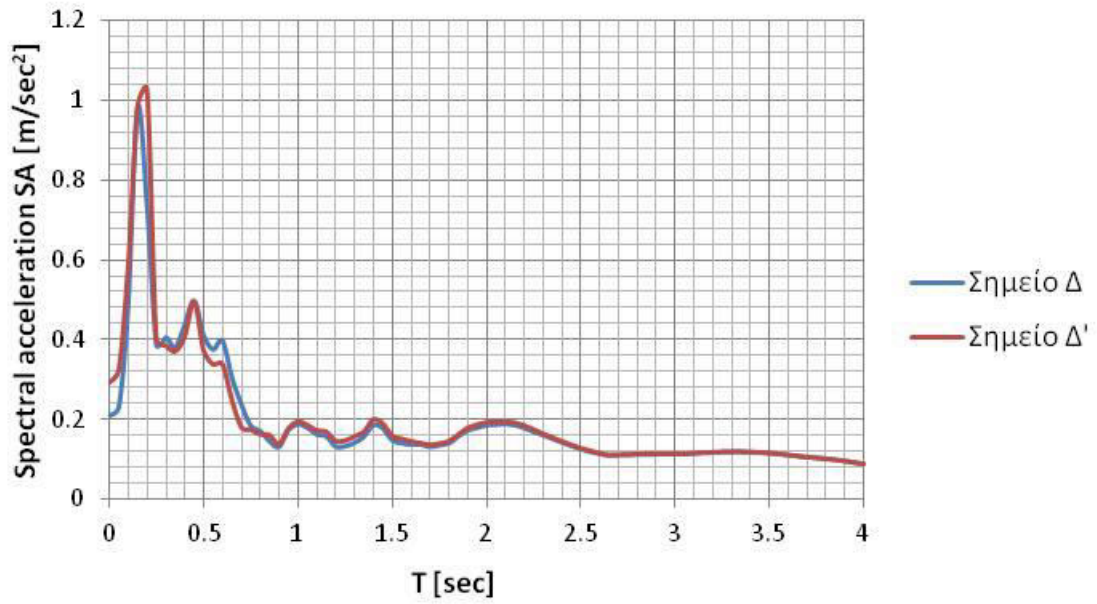
**Σχήμα 4.128:** Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.11.



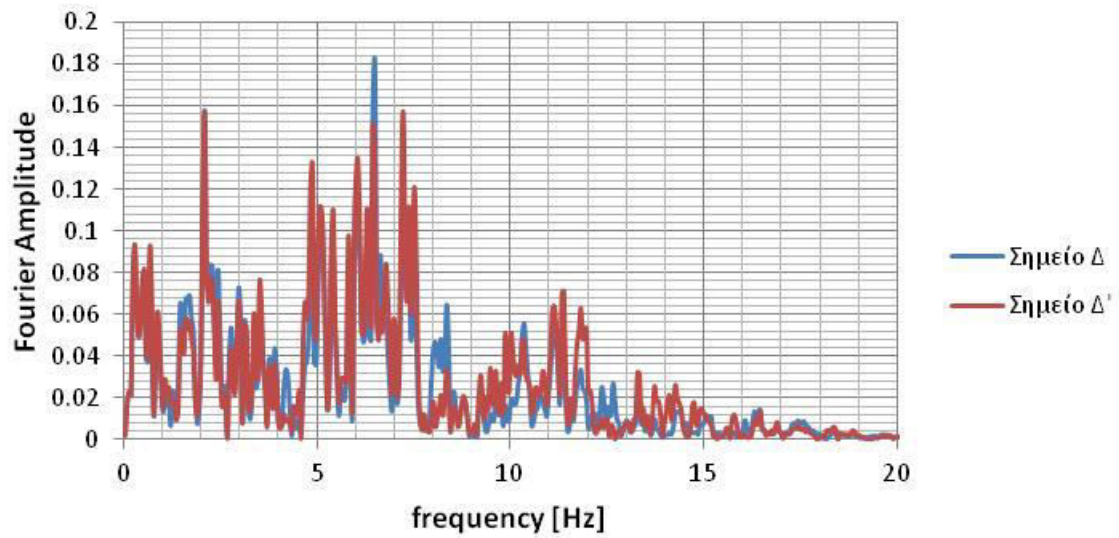
Σχήμα 4.129: Φάσματα Fourier σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.11.



Σχήμα 4.130: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.11.

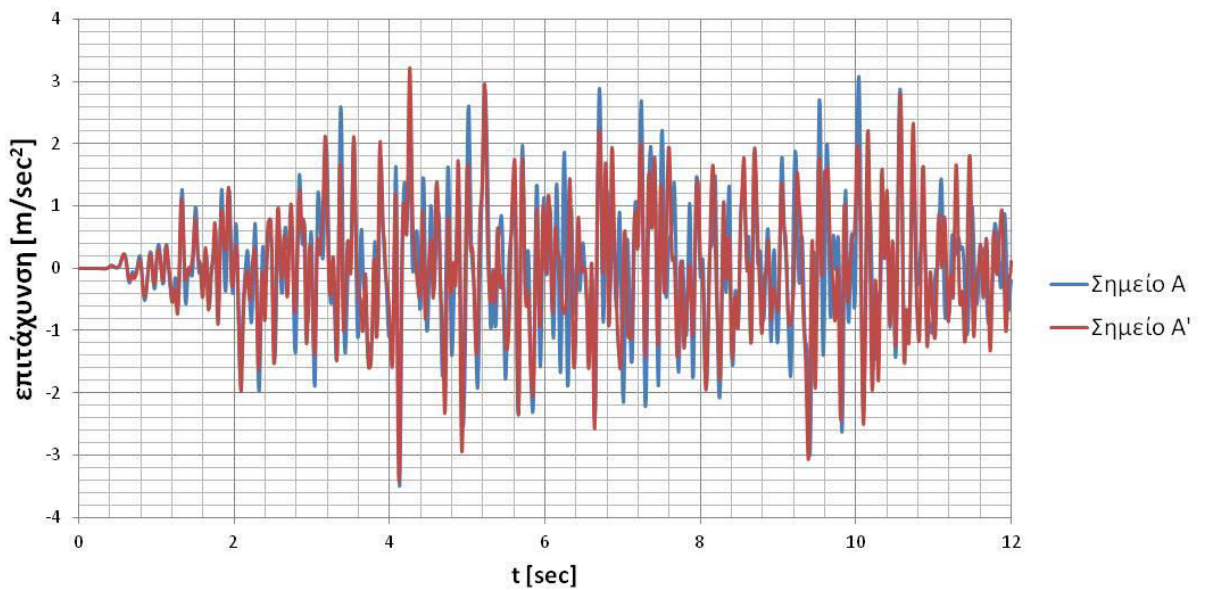


Σχήμα 4.131: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.11.

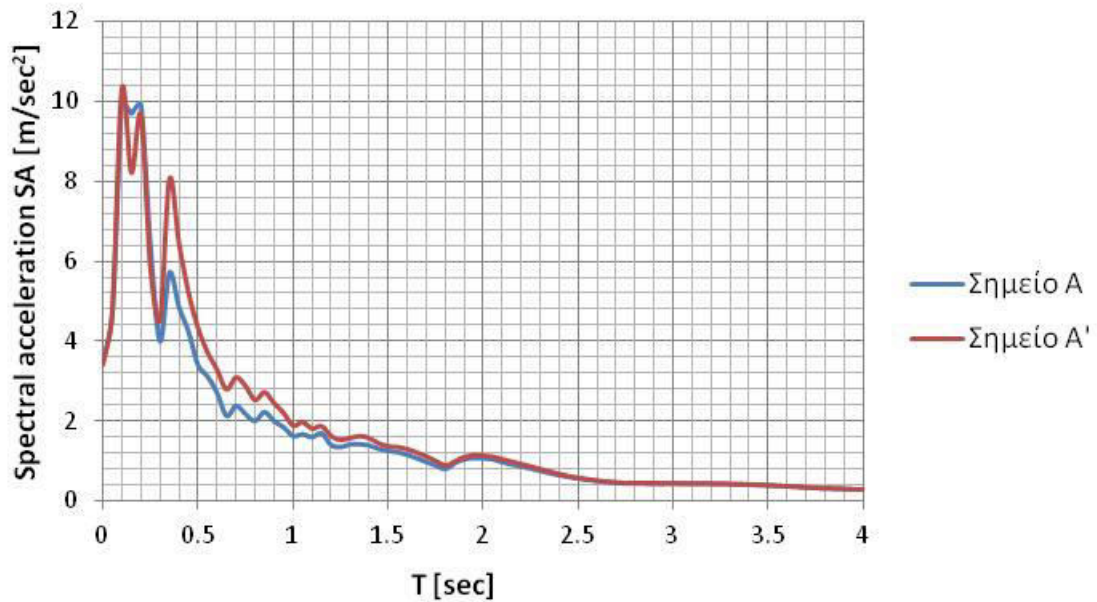


Σχήμα 4.132: Φάσματα Fourier σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.11.

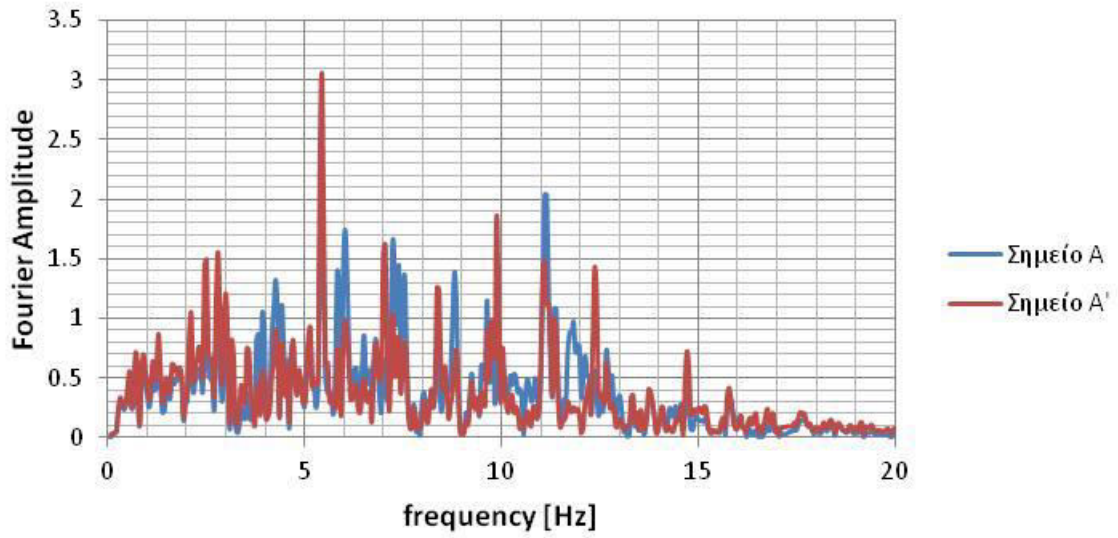
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.12: Διέγερση TH-EC8 σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος



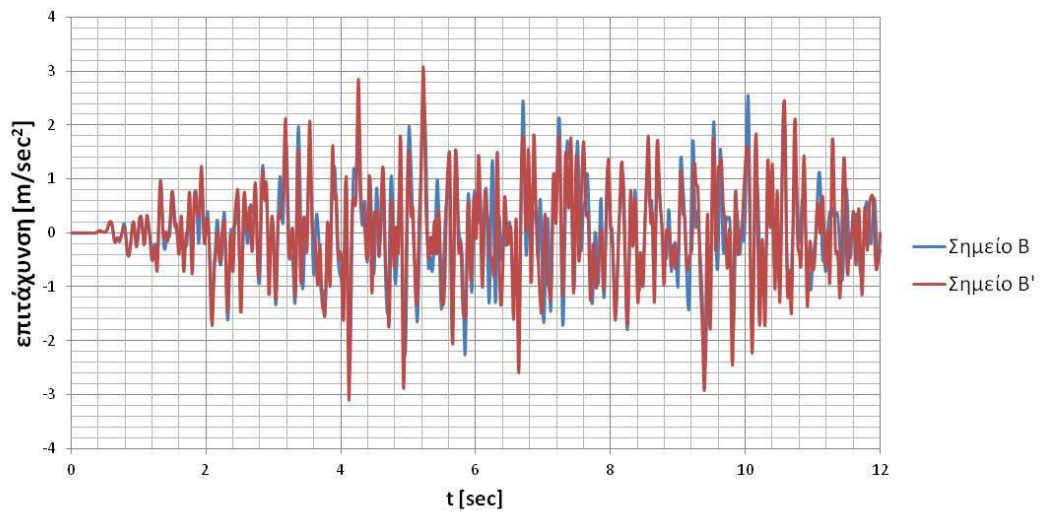
Σχήμα 4.133: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.12.



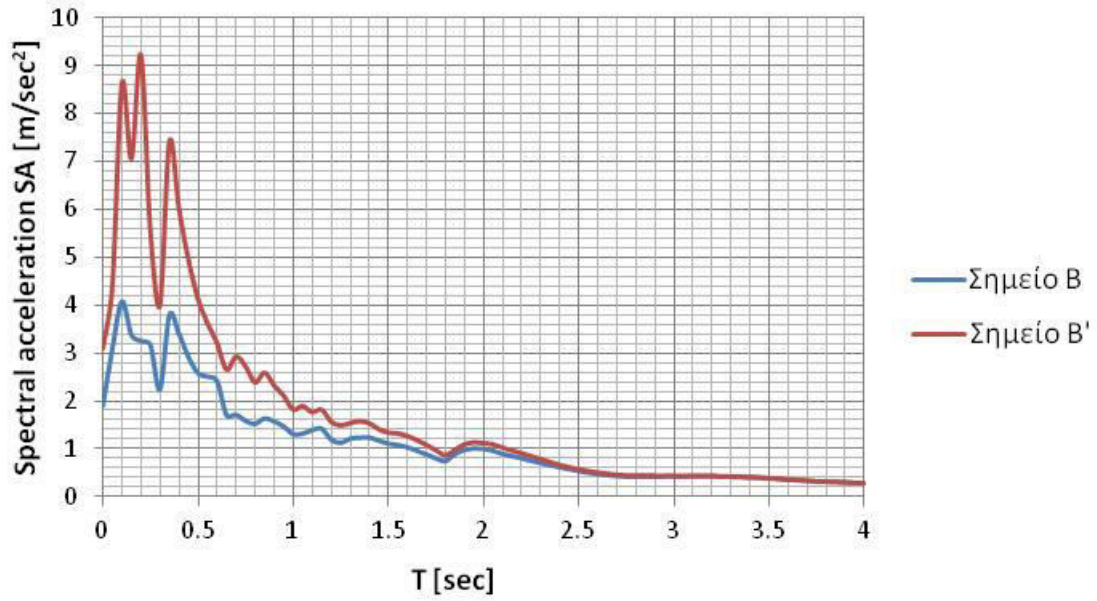
Σχήμα 4.134: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.12.



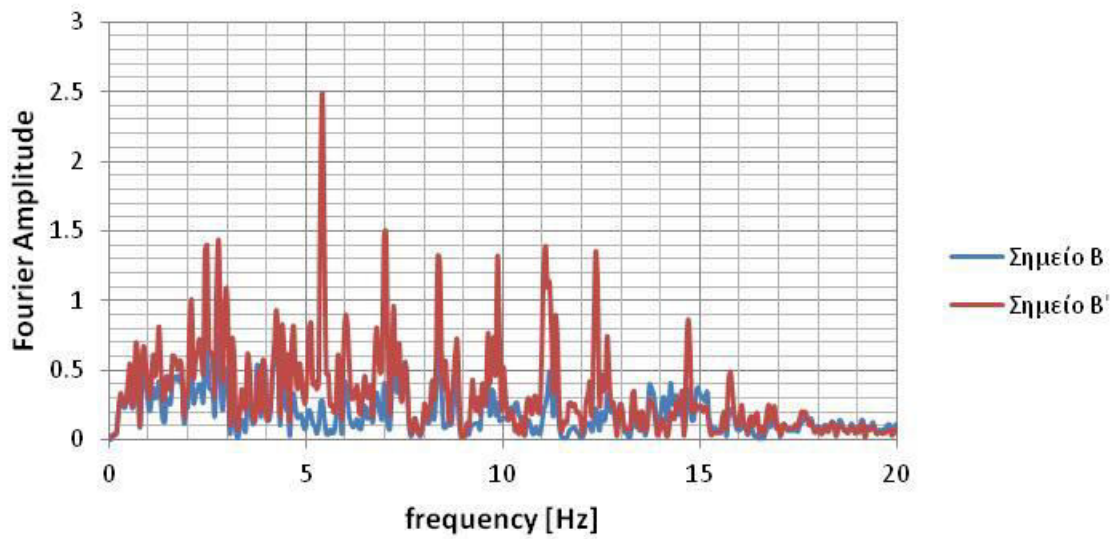
**Σχήμα 4.135:** Φάσματα Fourier σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.12.



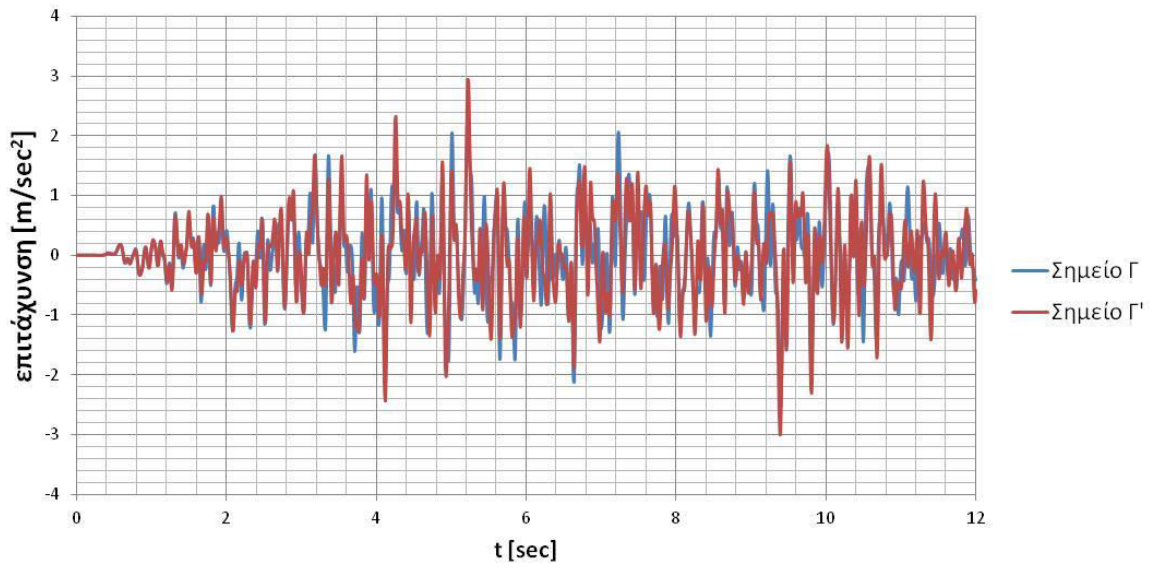
**Σχήμα 4.136:** Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 1.12.



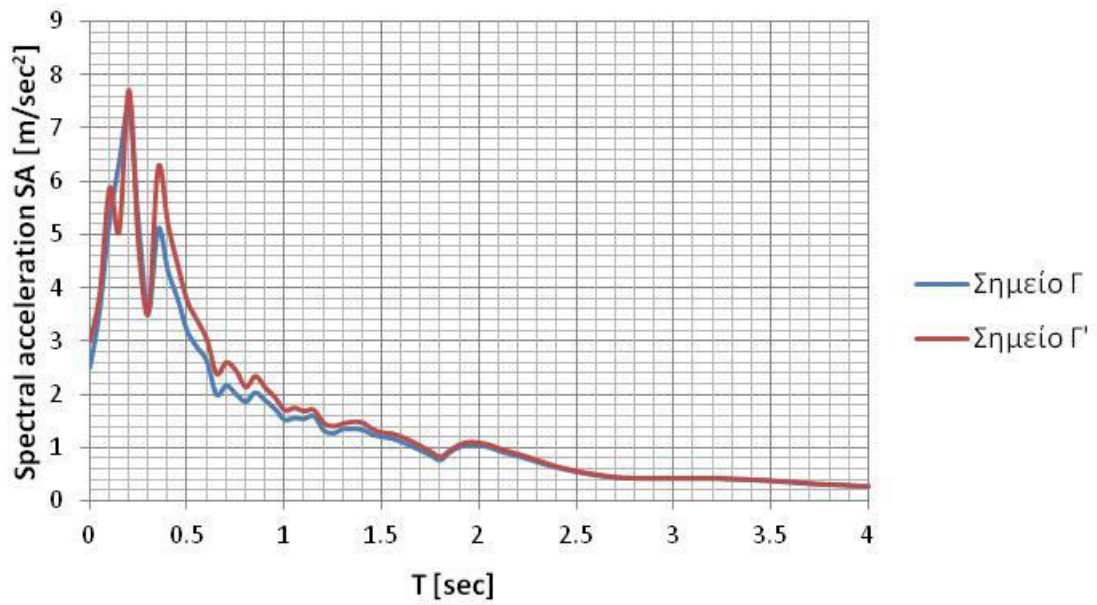
Σχήμα 4.137: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.12.



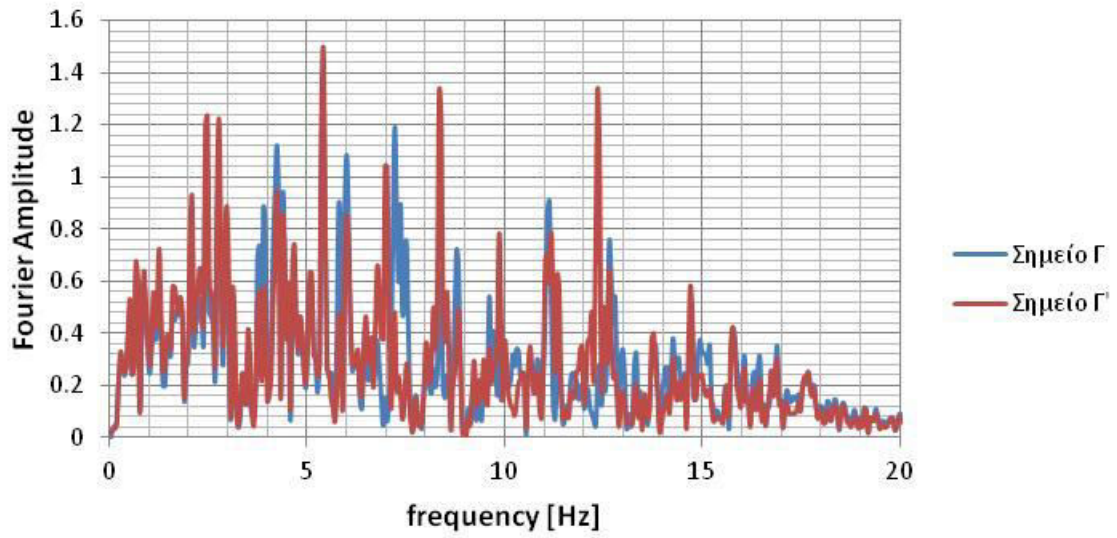
Σχήμα 4.138: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.12.



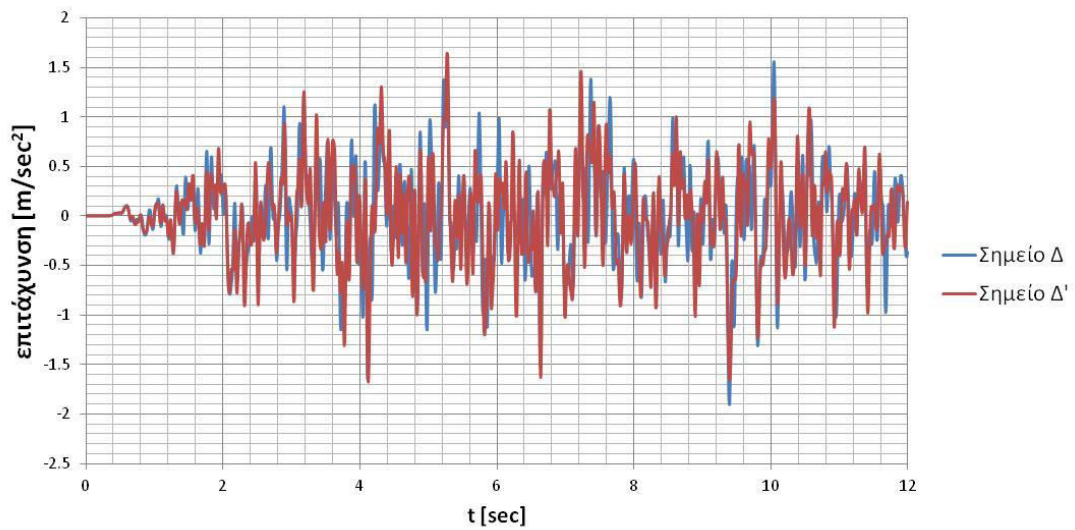
**Σχήμα 4.139:** Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.12.



**Σχήμα 4.140:** Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.12.

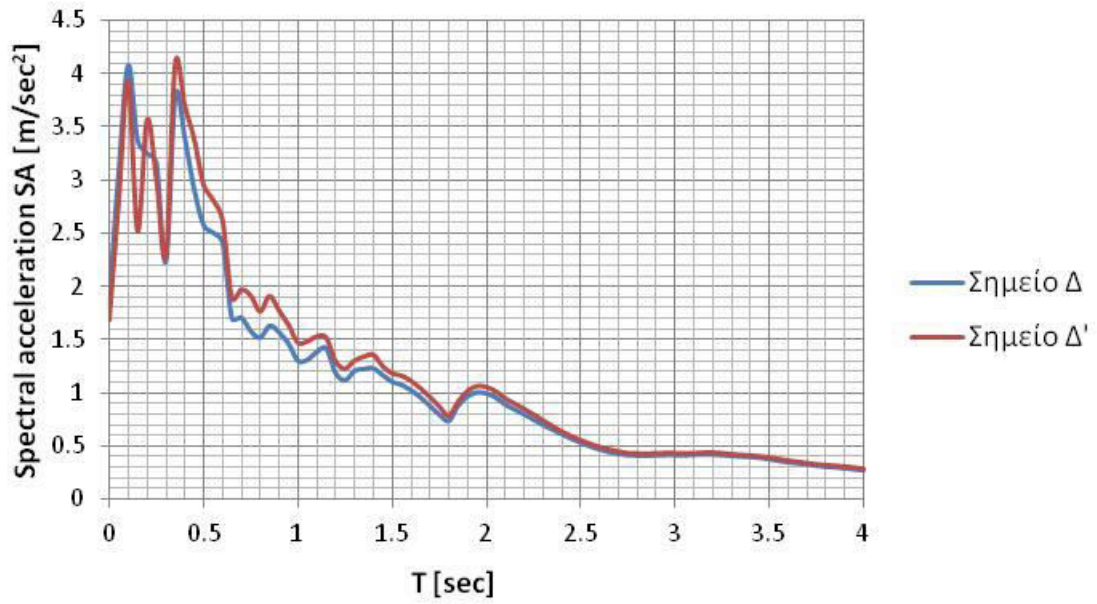


Σχήμα 4.141: Φάσματα Fourier σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.12.

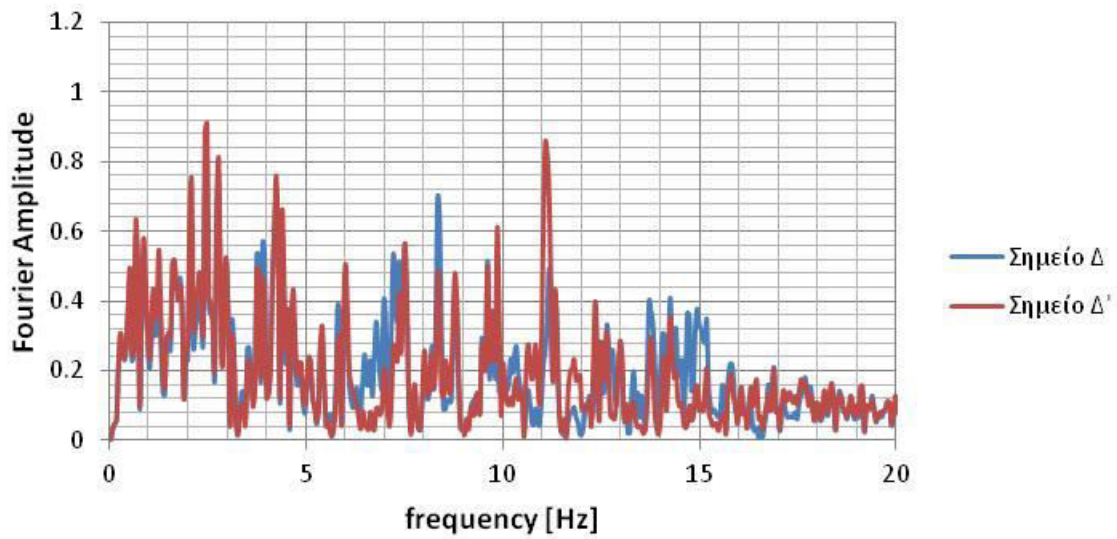


Σχήμα 4.142: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.12.



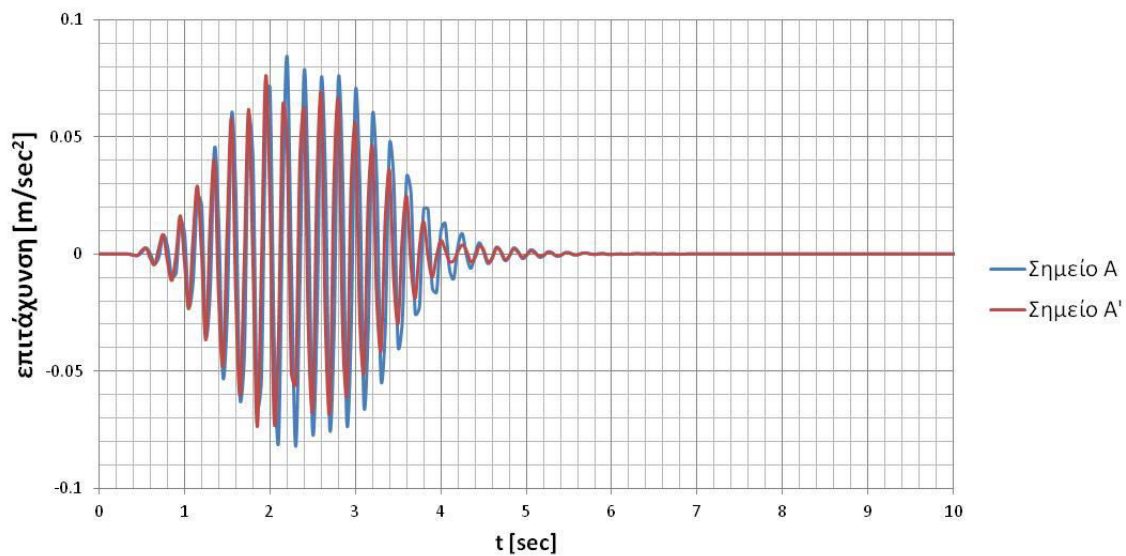


Σχήμα 4.143: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.12.

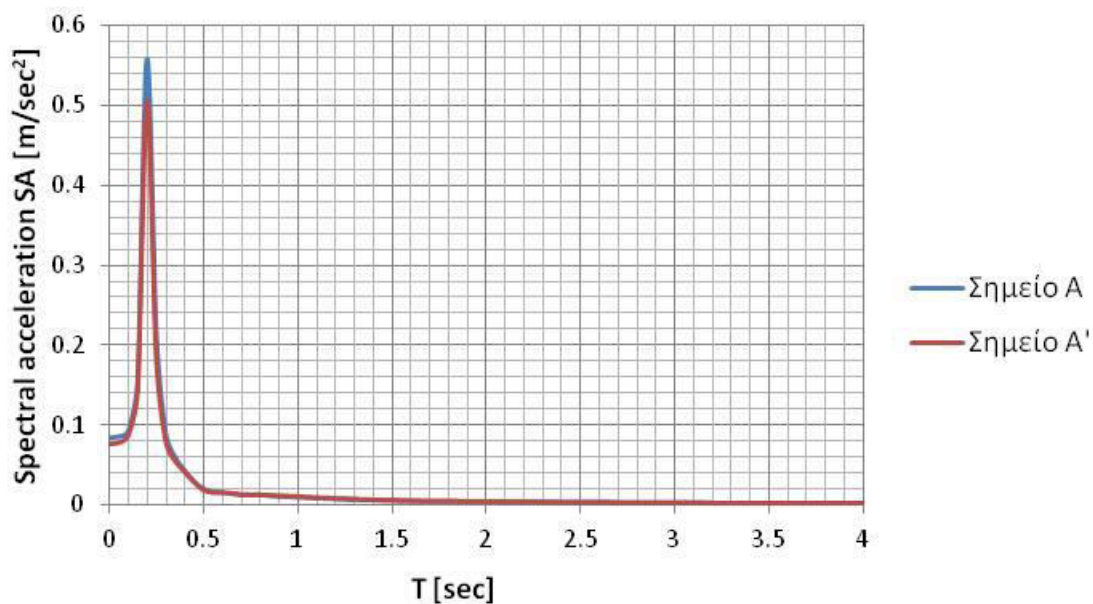


Σχήμα 4.144: Φάσματα Fourier σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.12.

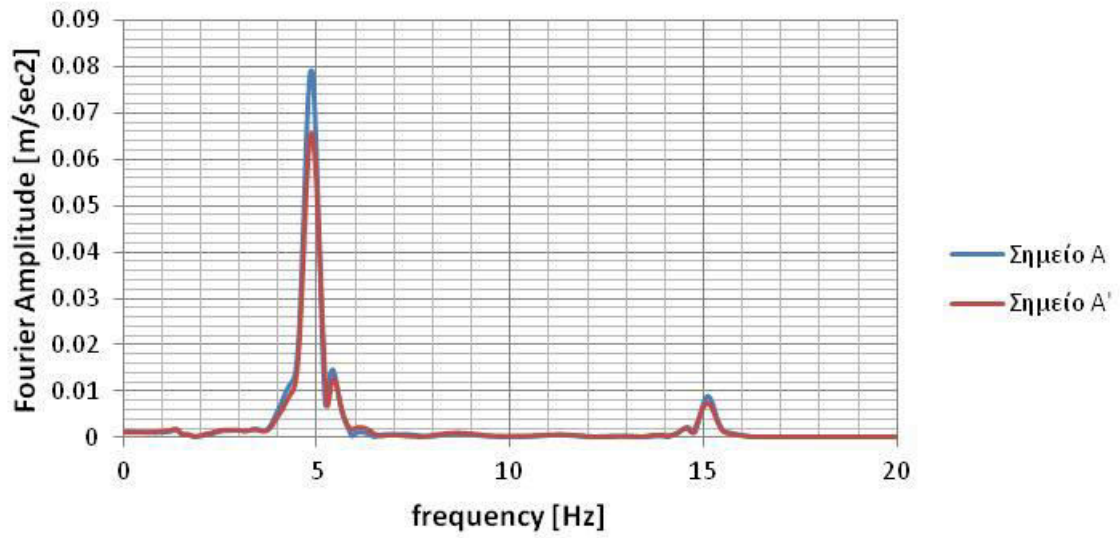
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.13: Διέγερση TH-HF5 στο σημείο Κ για σκληρό έδαφος



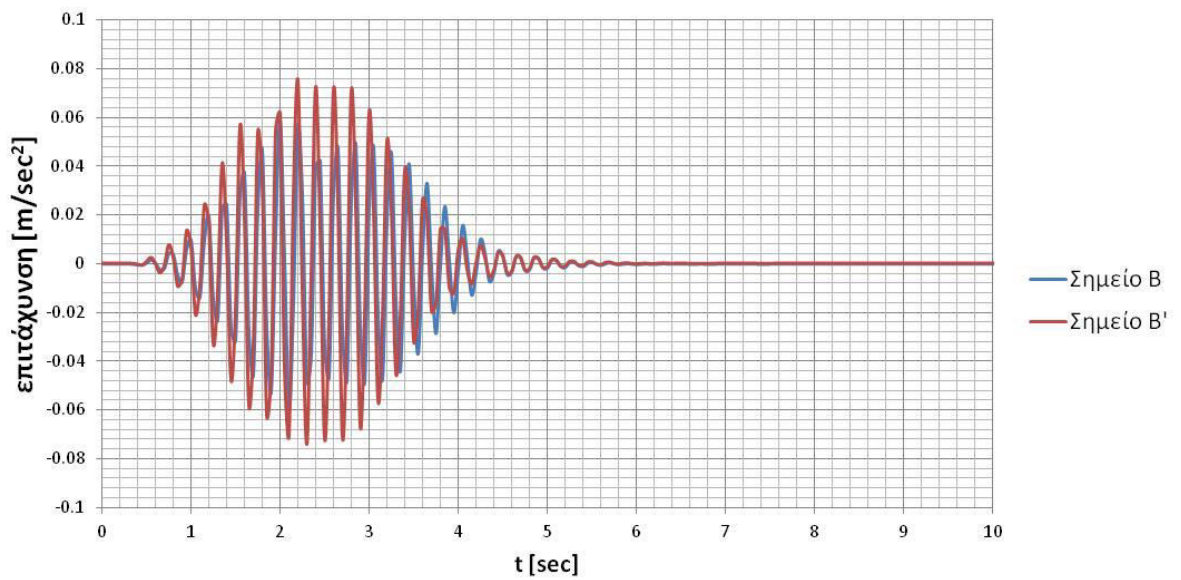
Σχήμα 4.145: Επιταχυνσιογραφήματα σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.13.



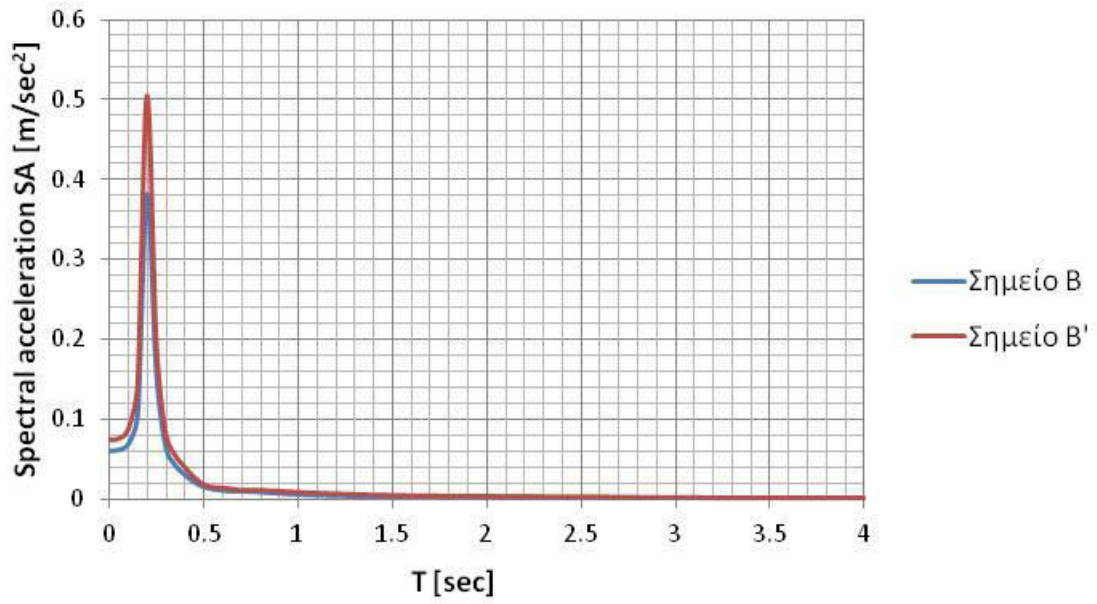
Σχήμα 4.146: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.13.



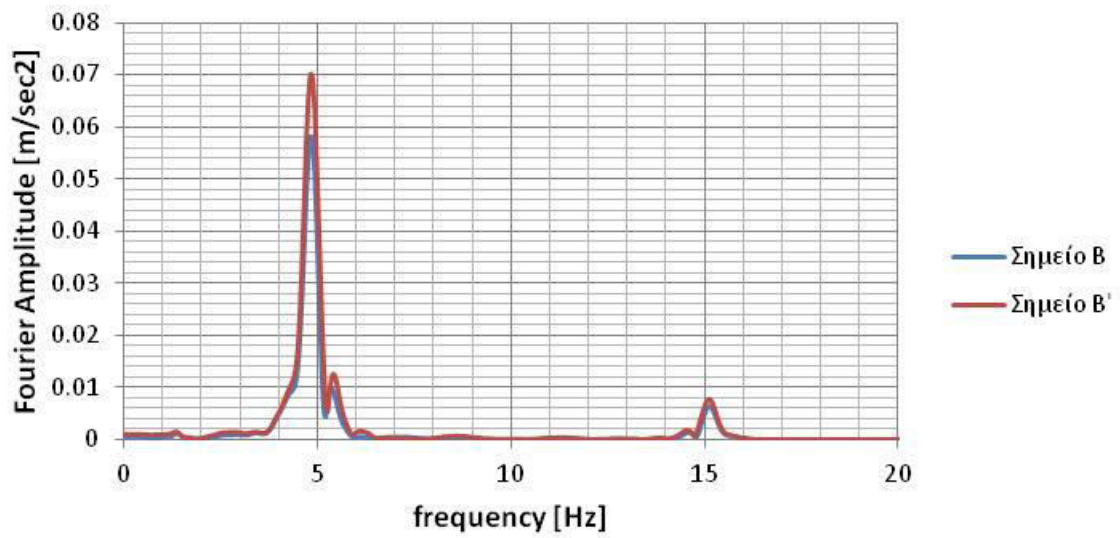
Σχήμα 4.147: Φάσματα Fourier σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.13.



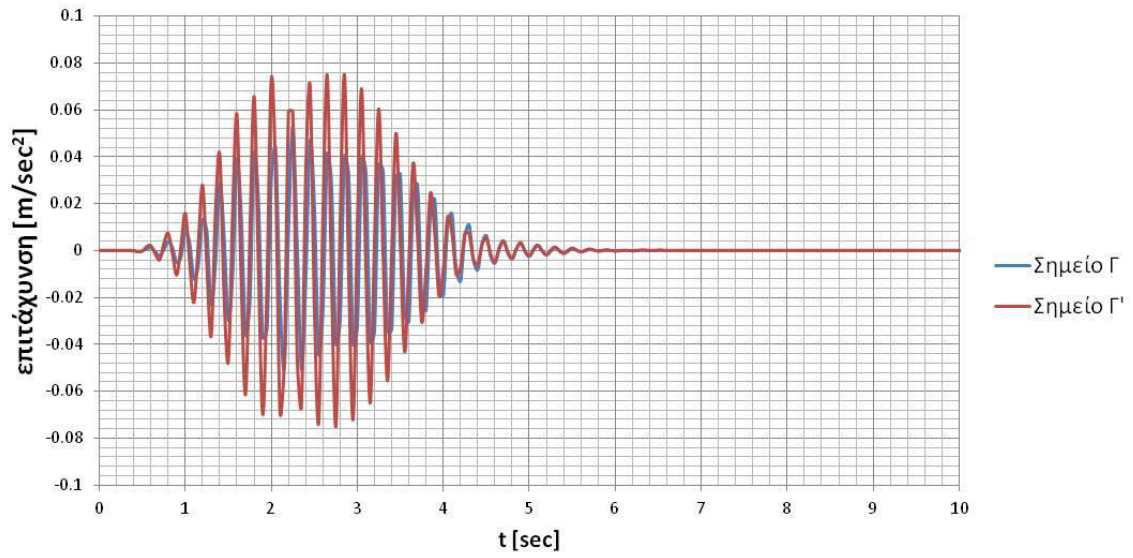
Σχήμα 4.148: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 1.13.



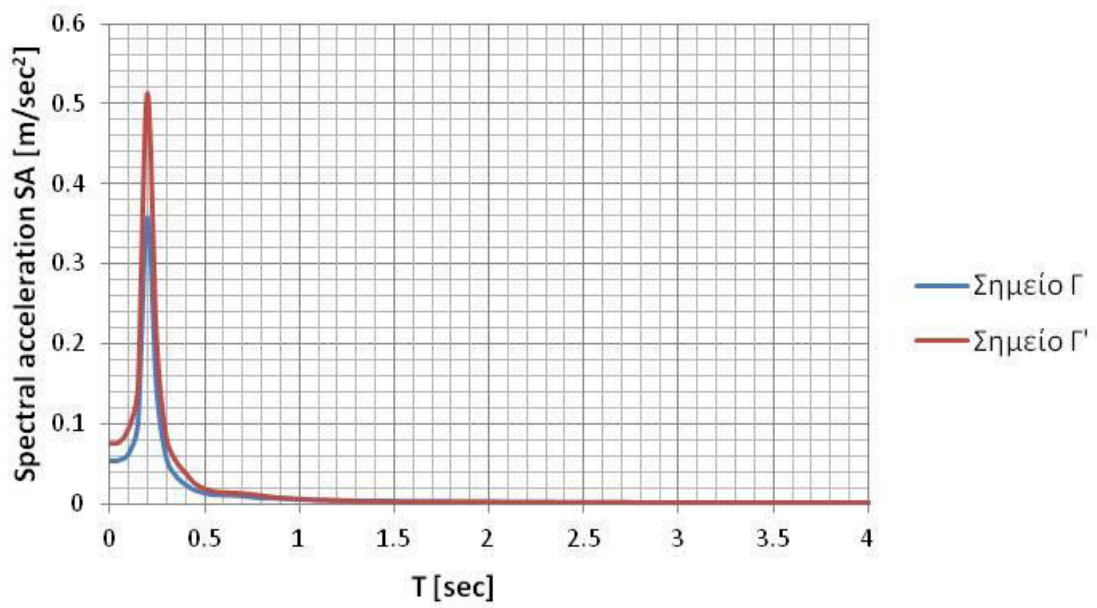
Σχήμα 4.149: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.13.



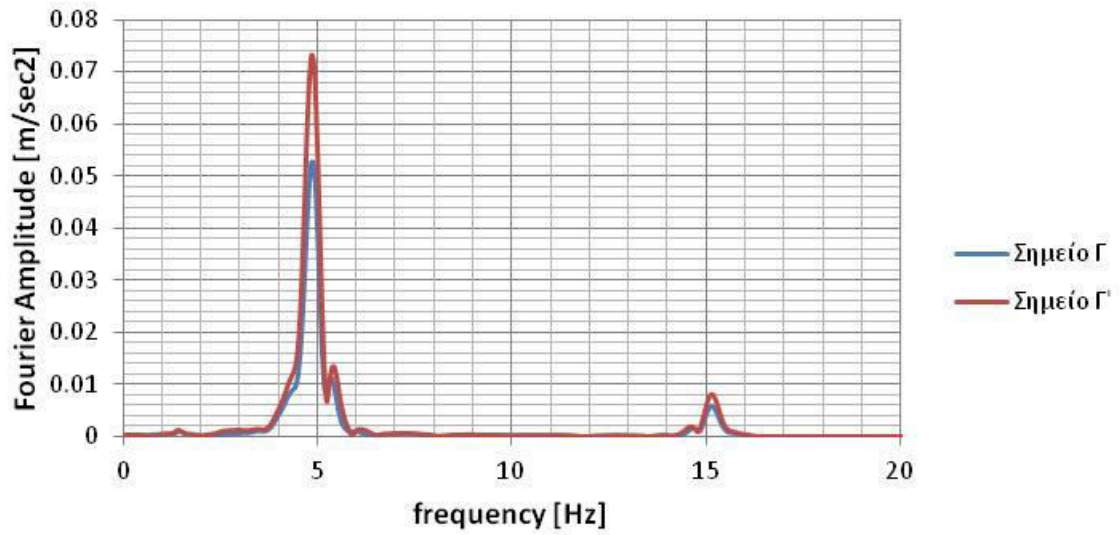
Σχήμα 4.150: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.13.



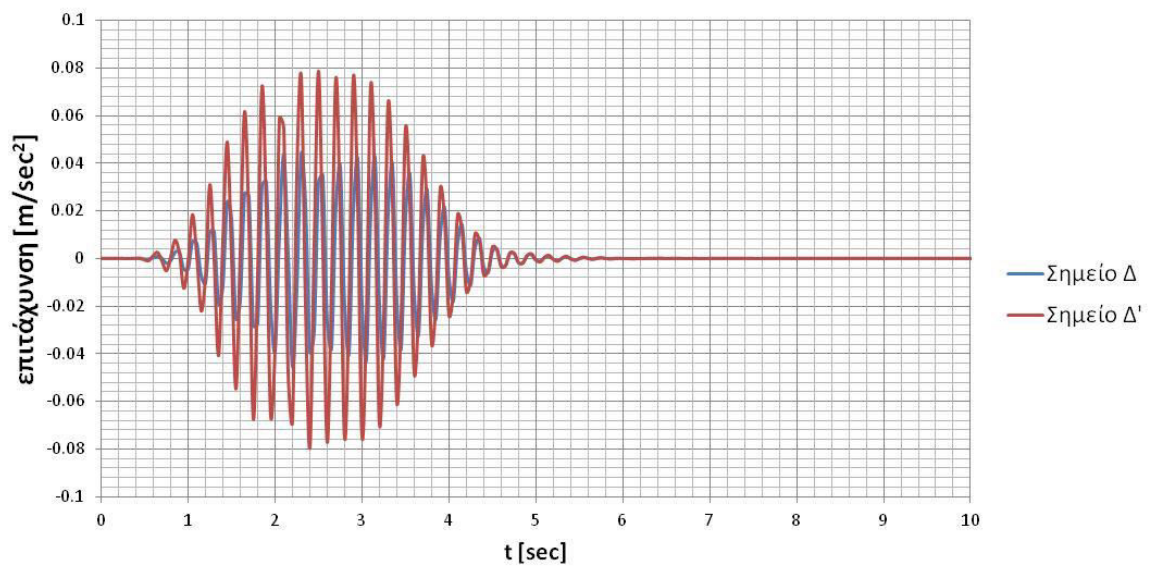
**Σχήμα 4.151:** Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.13.



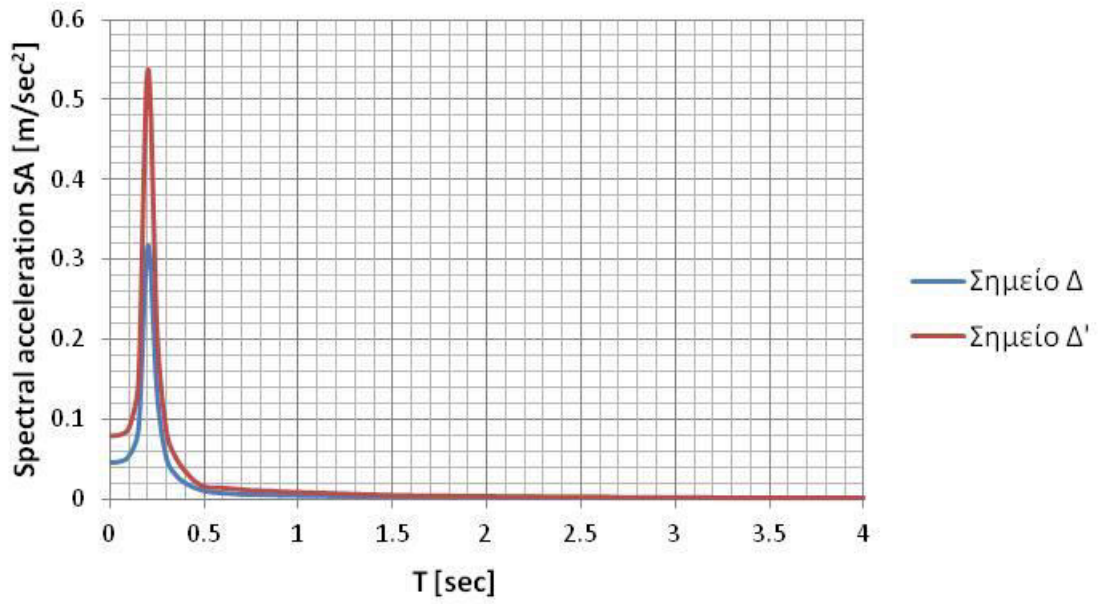
**Σχήμα 4.152:** Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.13.



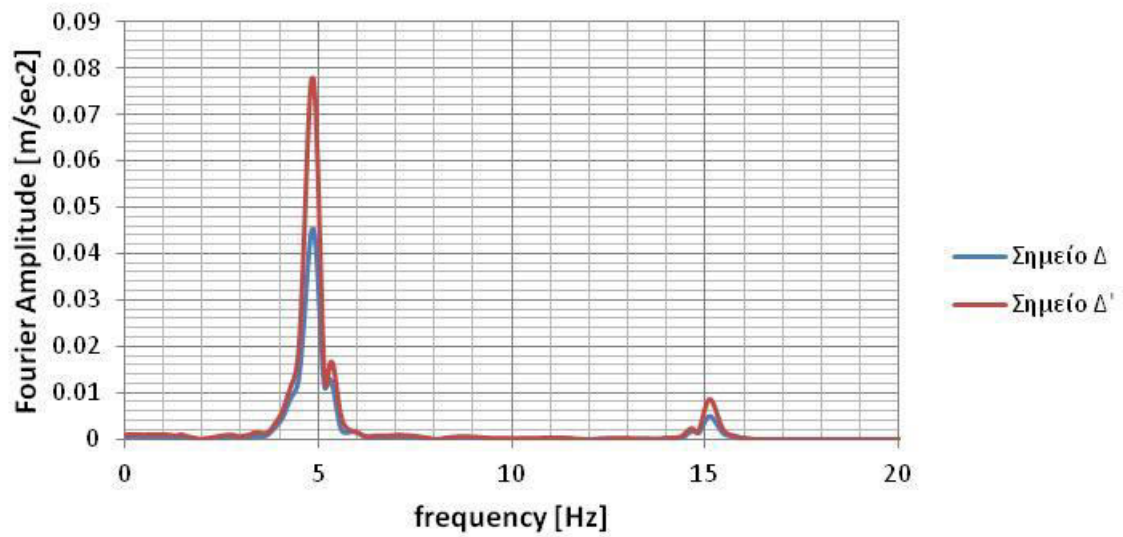
Σχήμα 4.153: Φάσματα Fourier σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.13.



Σχήμα 4.154: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.13.

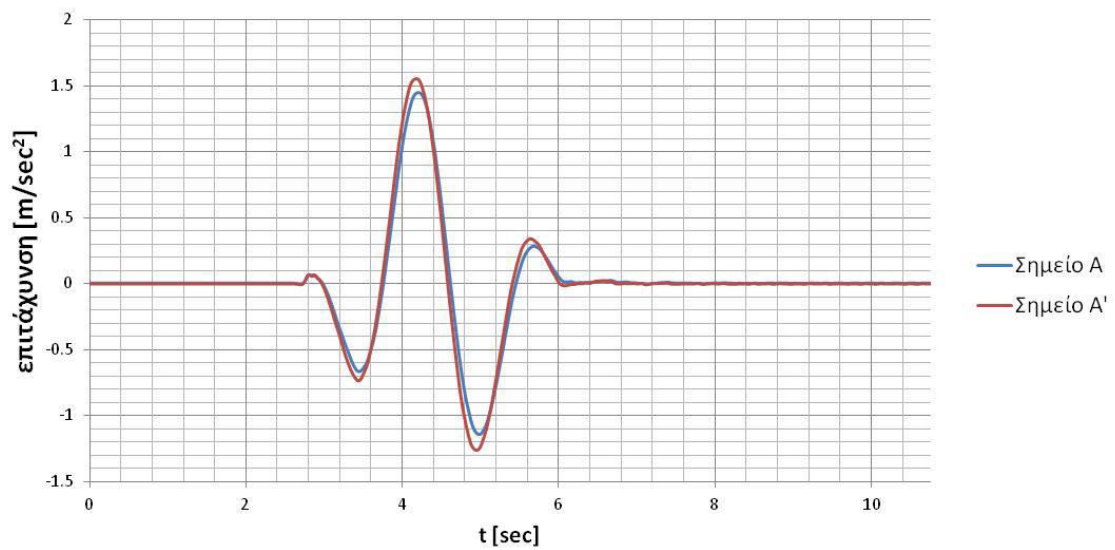


Σχήμα 4.155: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.13.

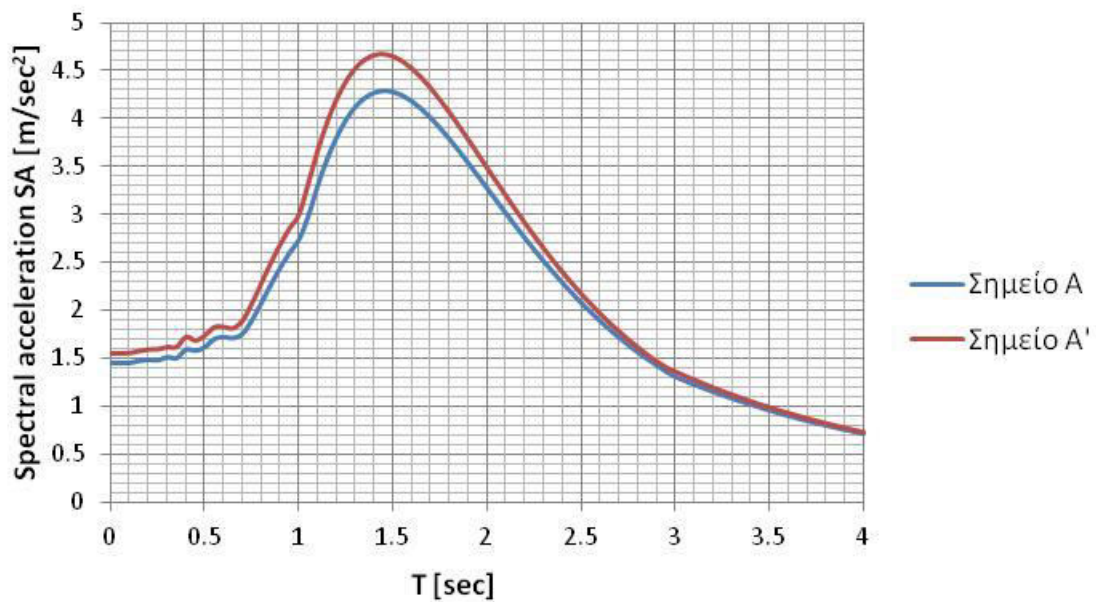


Σχήμα 4.156: Φάσματα Fourier σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.13

Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.14: Διέγερση TH-Parkfield σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος

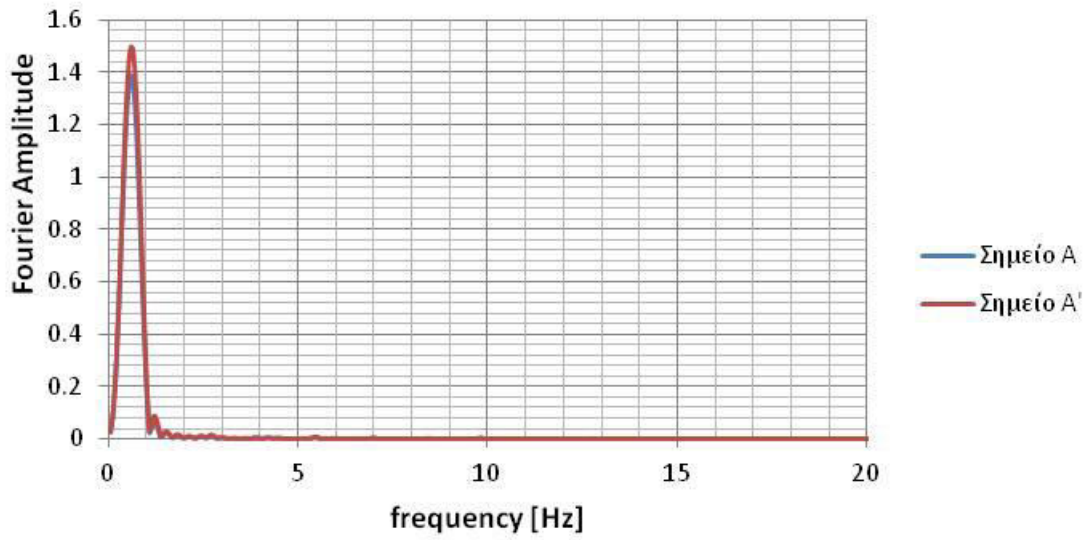


Σχήμα 4.157: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.14.

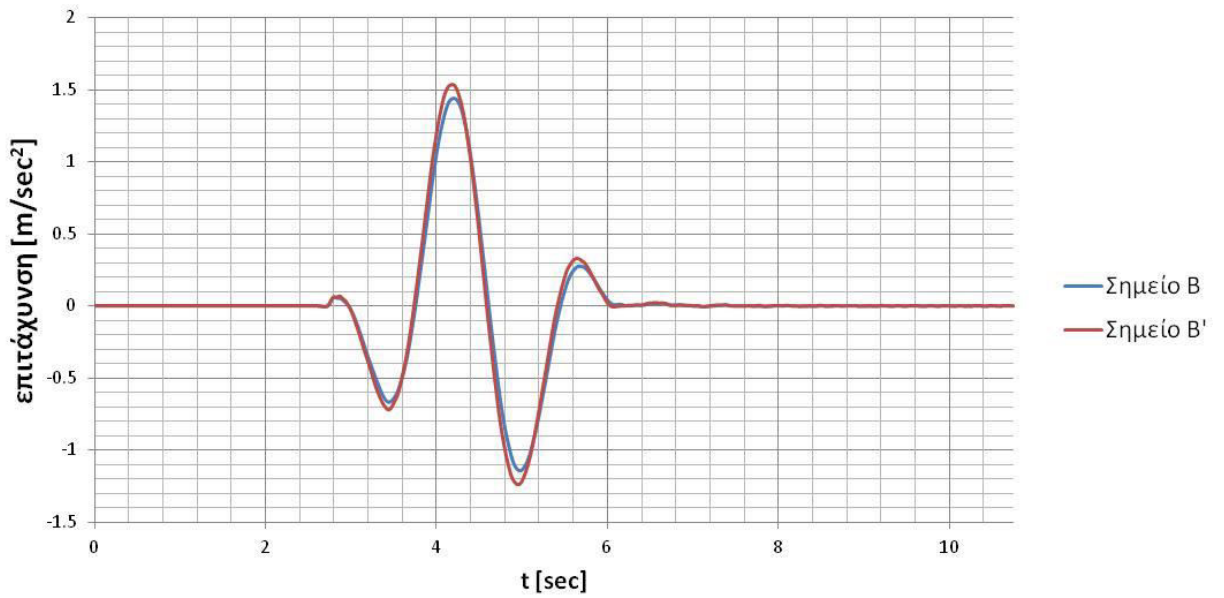


Σχήμα 4.158: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων A και A' για Σενάριο Νο 14.

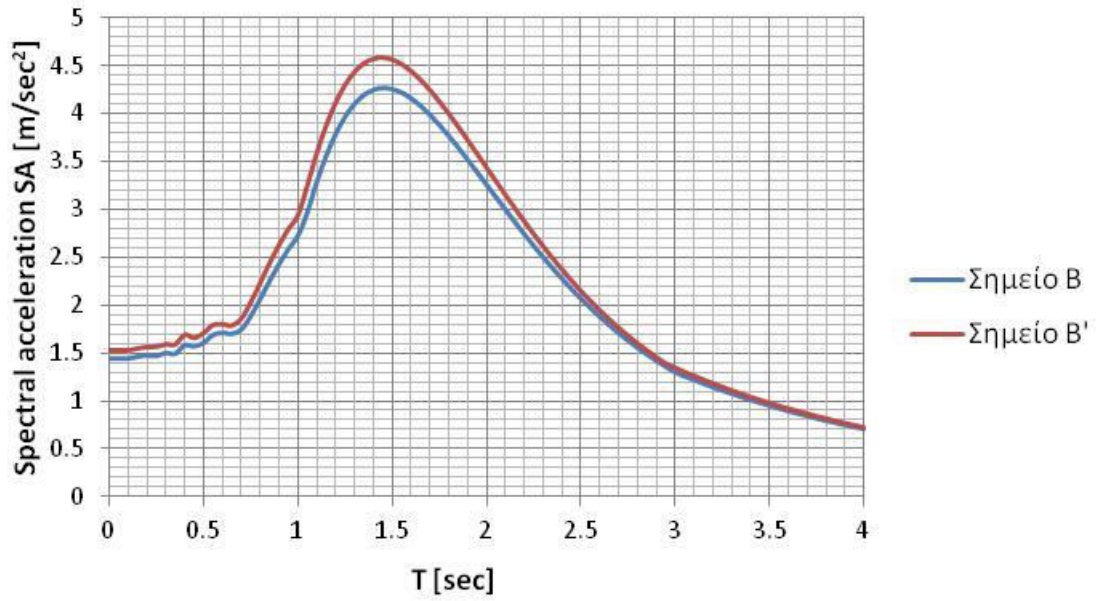




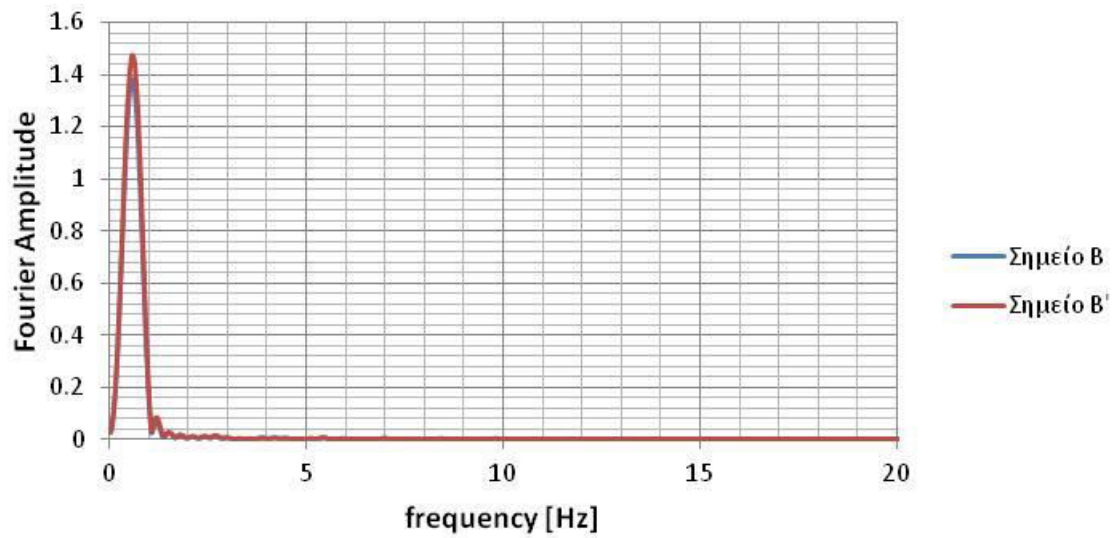
Σχήμα 4.159 Φάσματα Fourier σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.14.



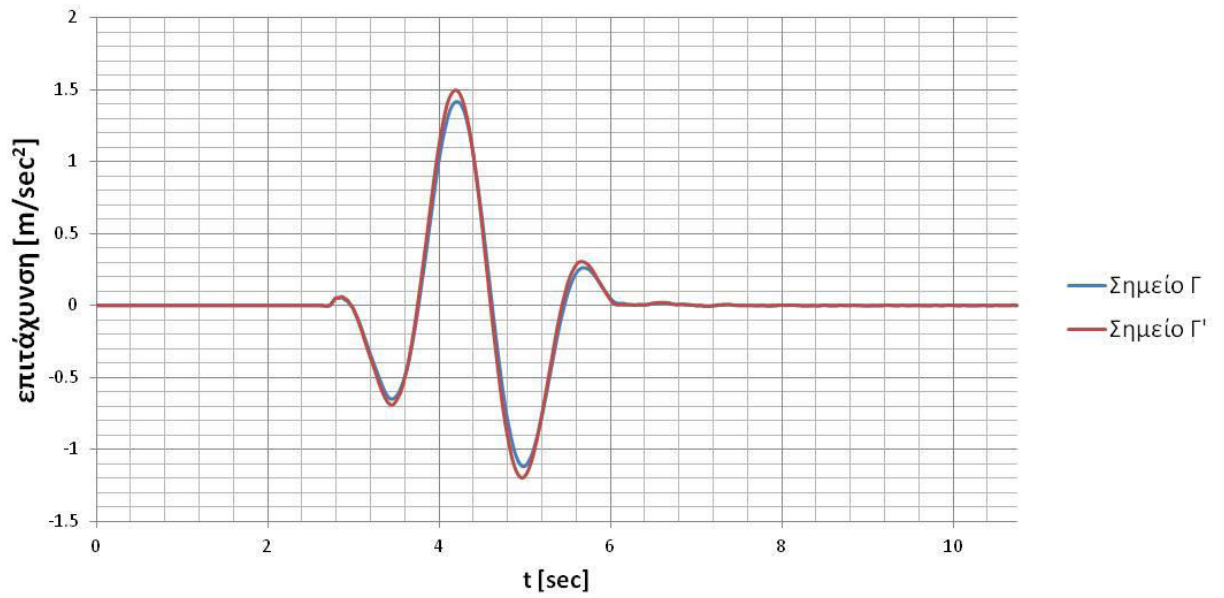
Σχήμα 4.160: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 1.14.



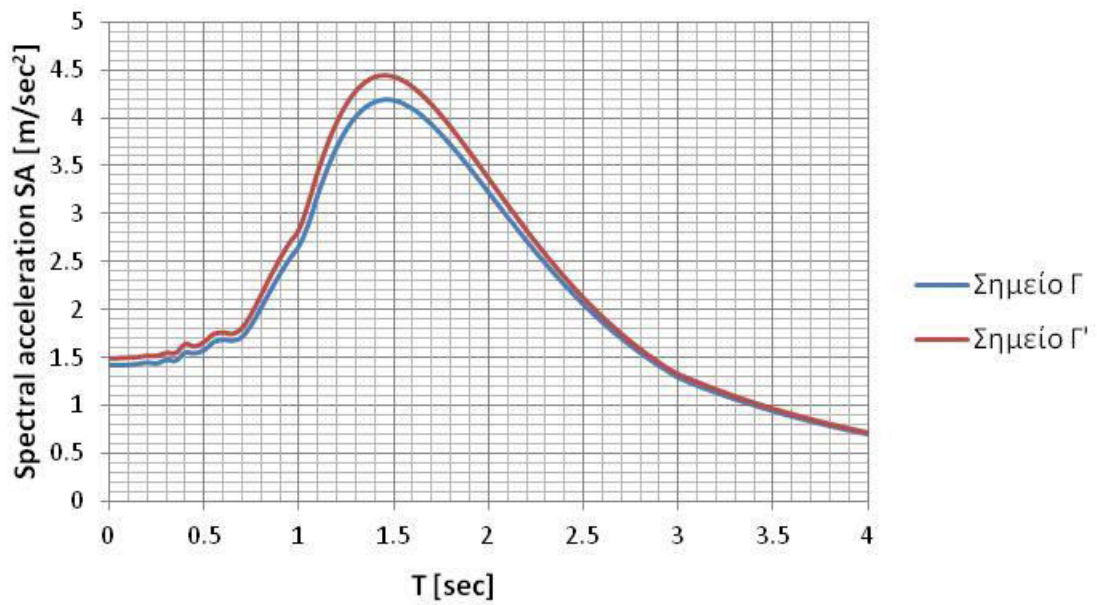
Σχήμα 4.161: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.14.



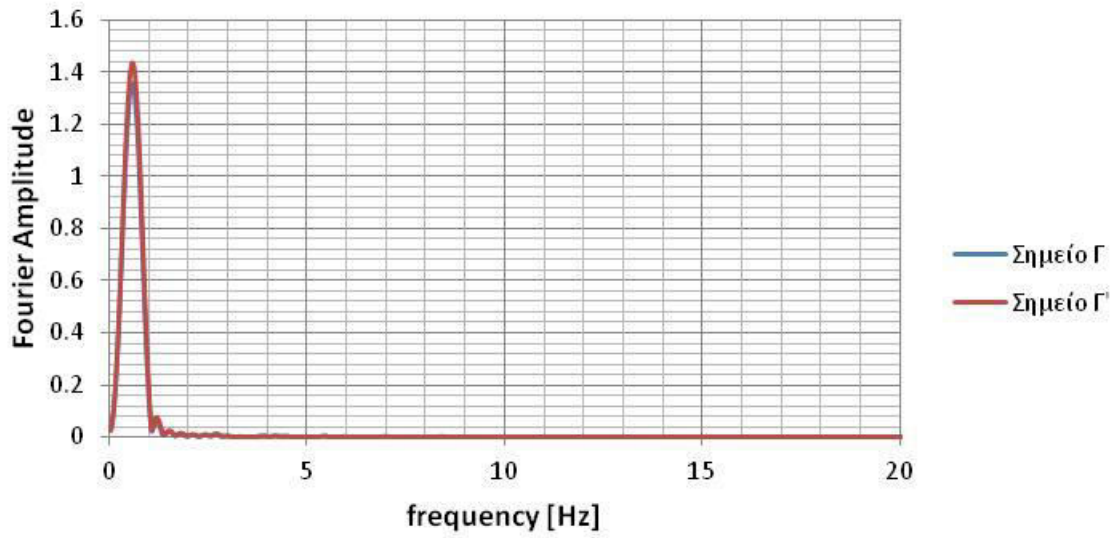
Σχήμα 4.162: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.14.



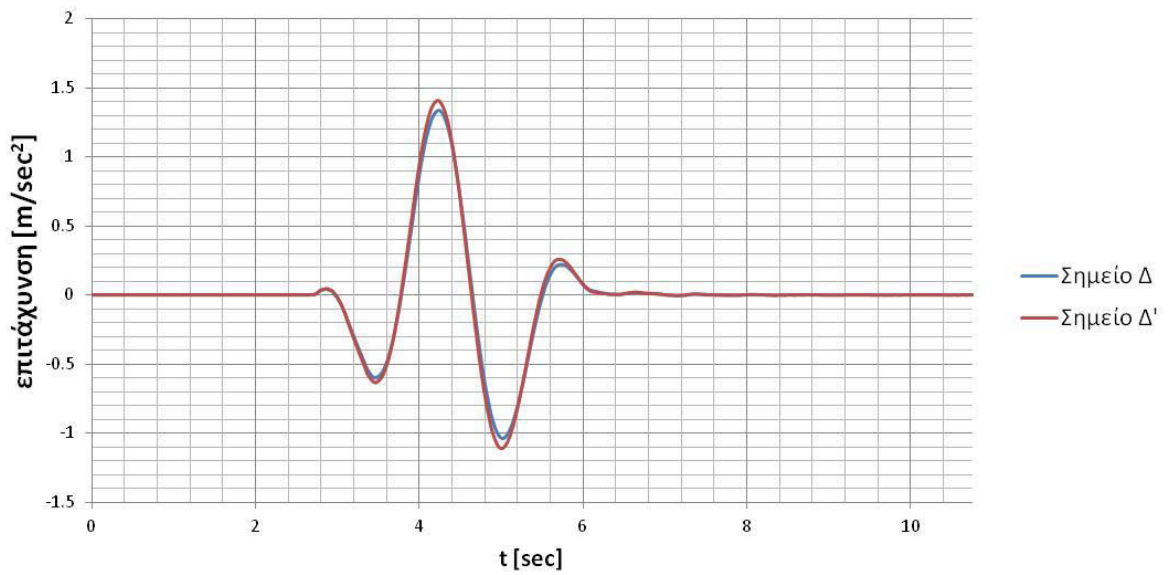
Σχήμα 4.163: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.14.



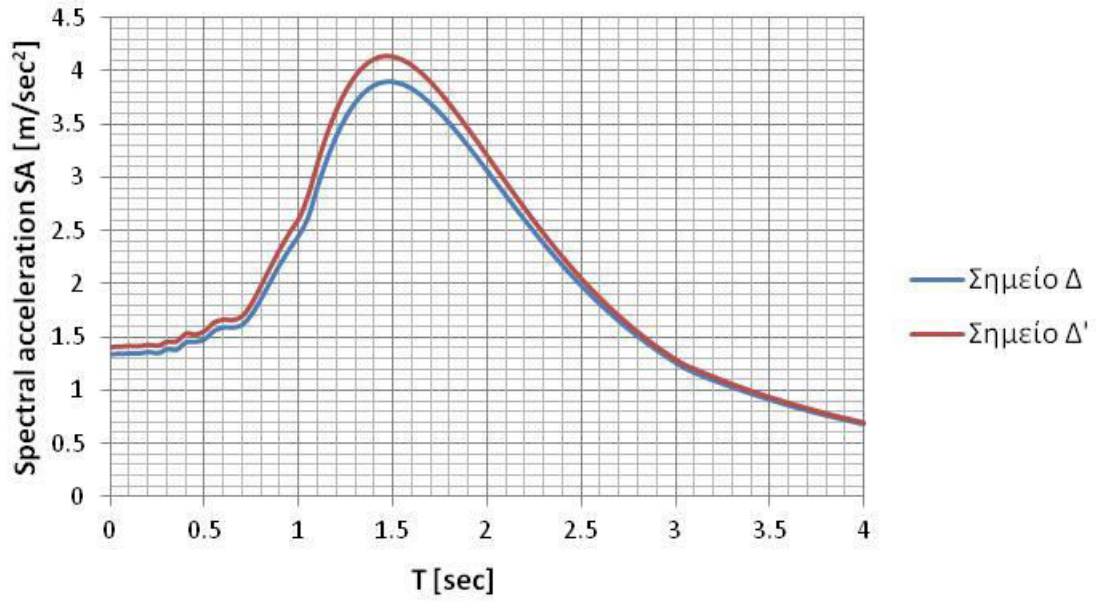
Σχήμα 4.164: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.14.



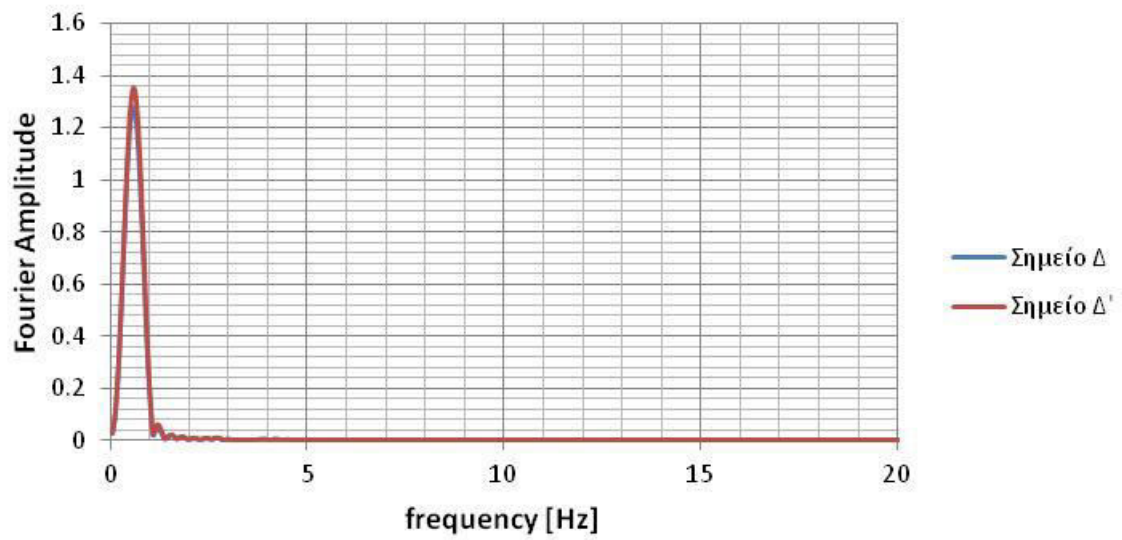
Σχήμα 4.165: Φάσματα Fourier σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.14.



Σχήμα 4.166: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.14.

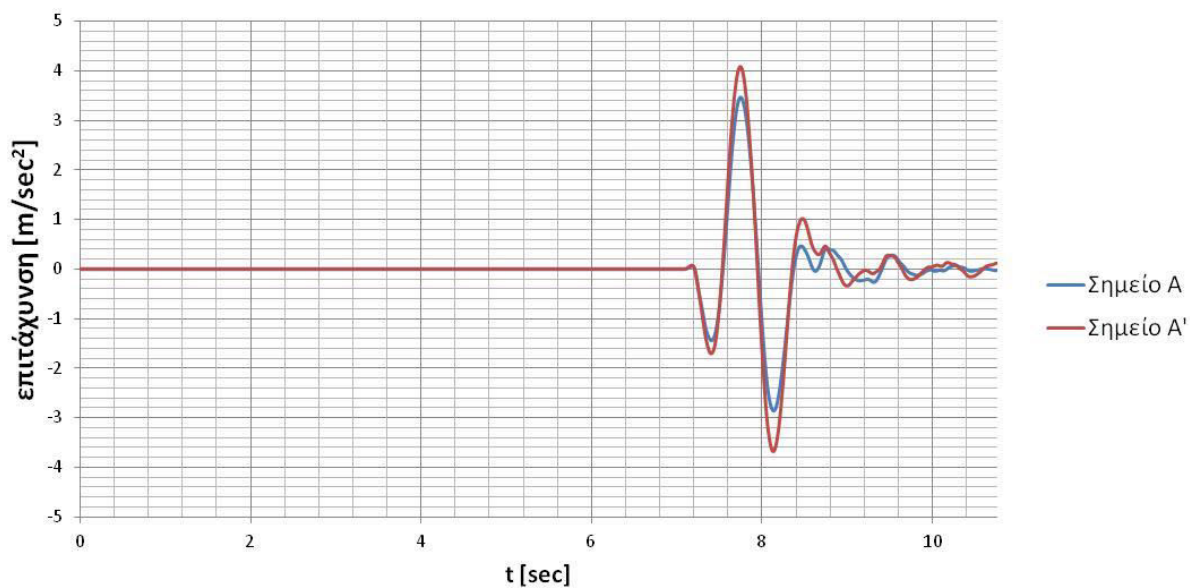


Σχήμα 4.167: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.14.

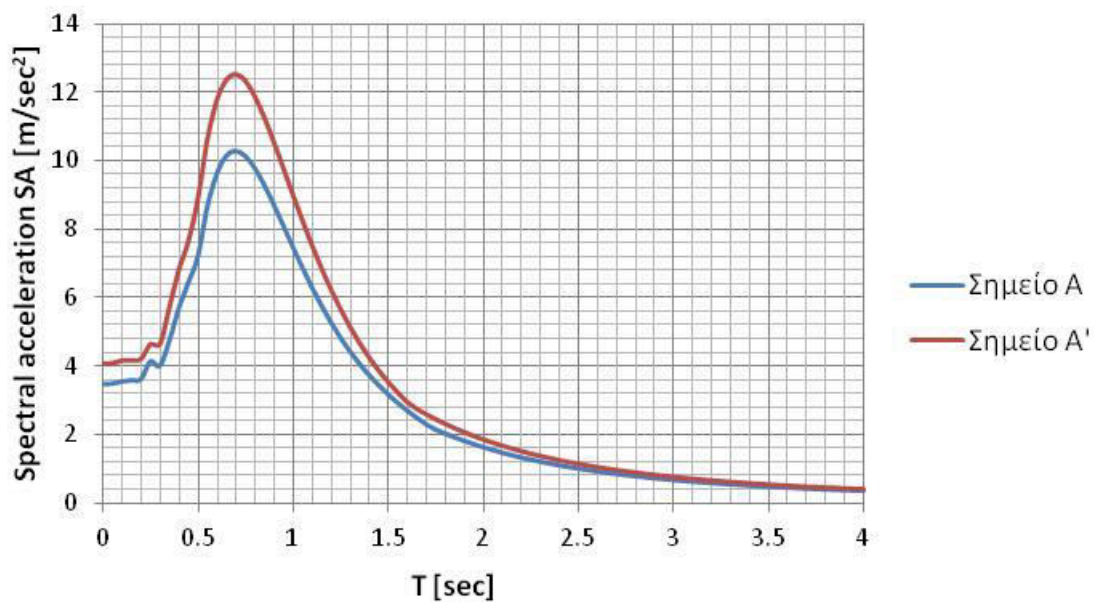


Σχήμα 4.168: Φάσματα Fourier σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.14.

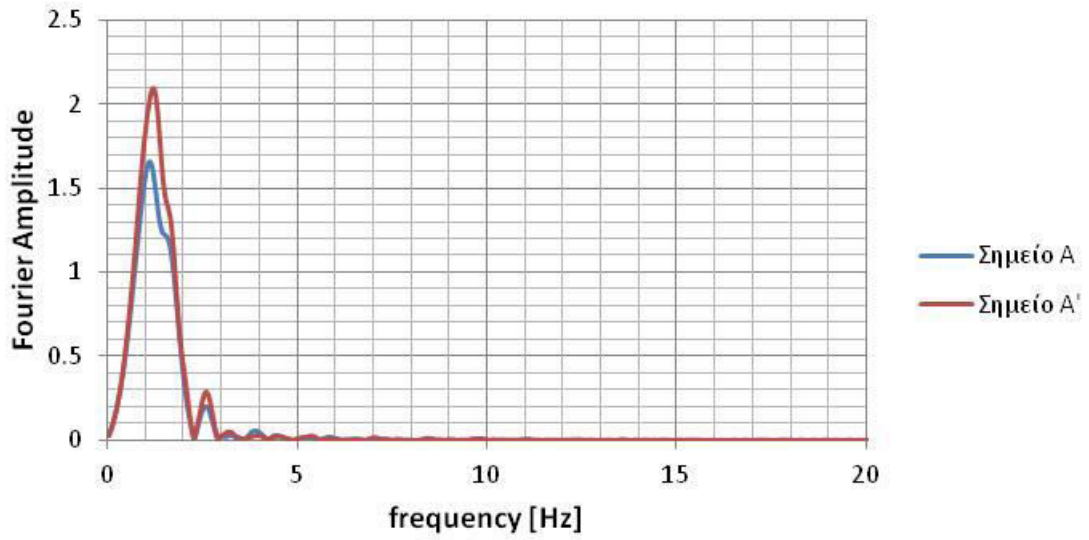
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.15: Διέγερση TH-Kobe σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος



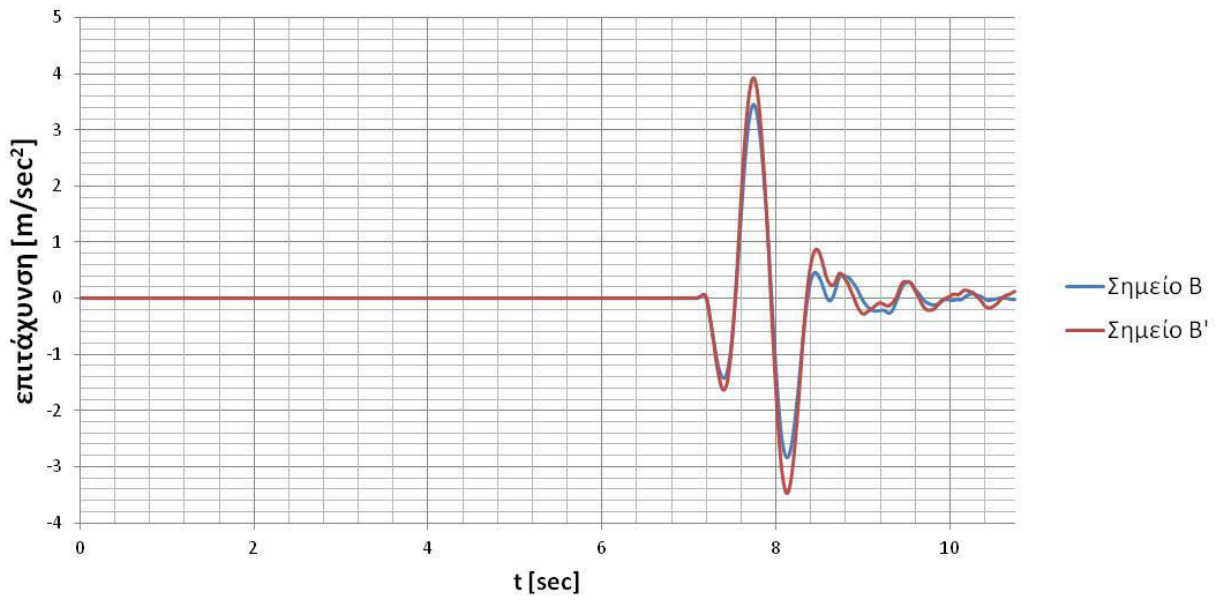
Σχήμα 4.169: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.15.



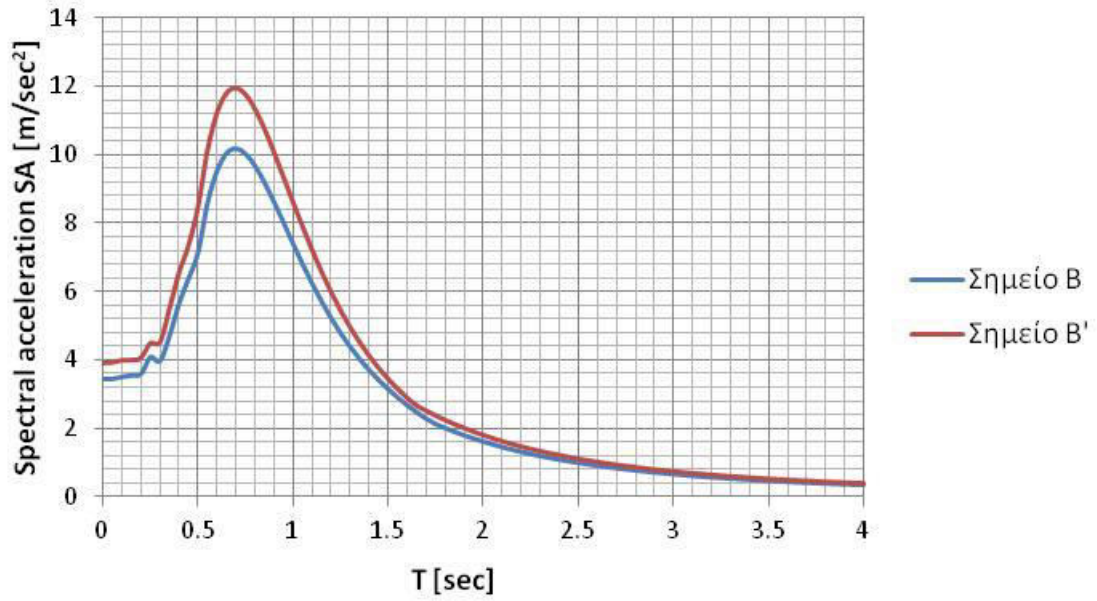
Σχήμα 4.170: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.15.



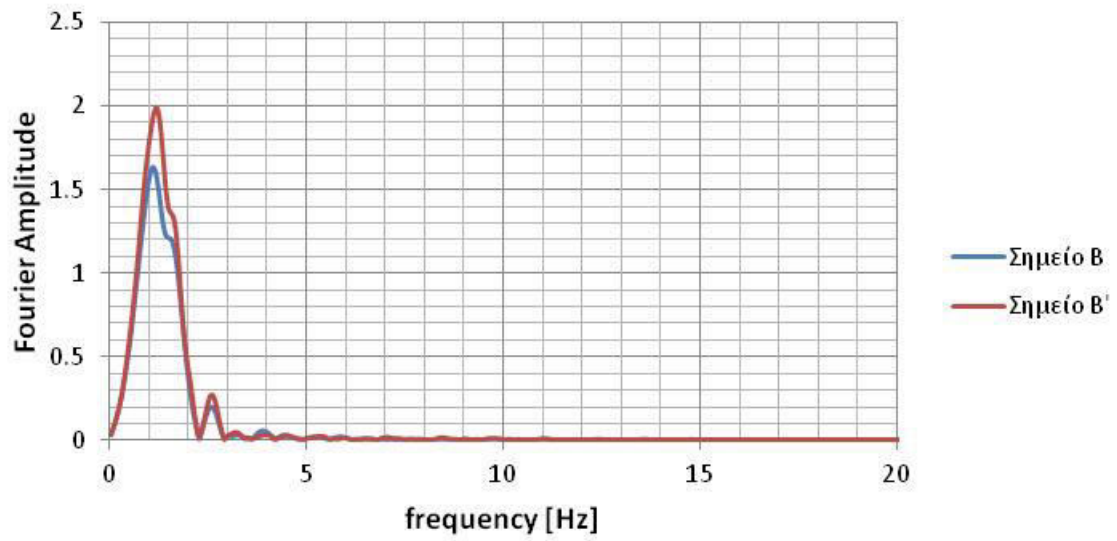
Σχήμα 4.171: Φάσματα Fourier σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.15.



Σχήμα 4.172: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 1.15.

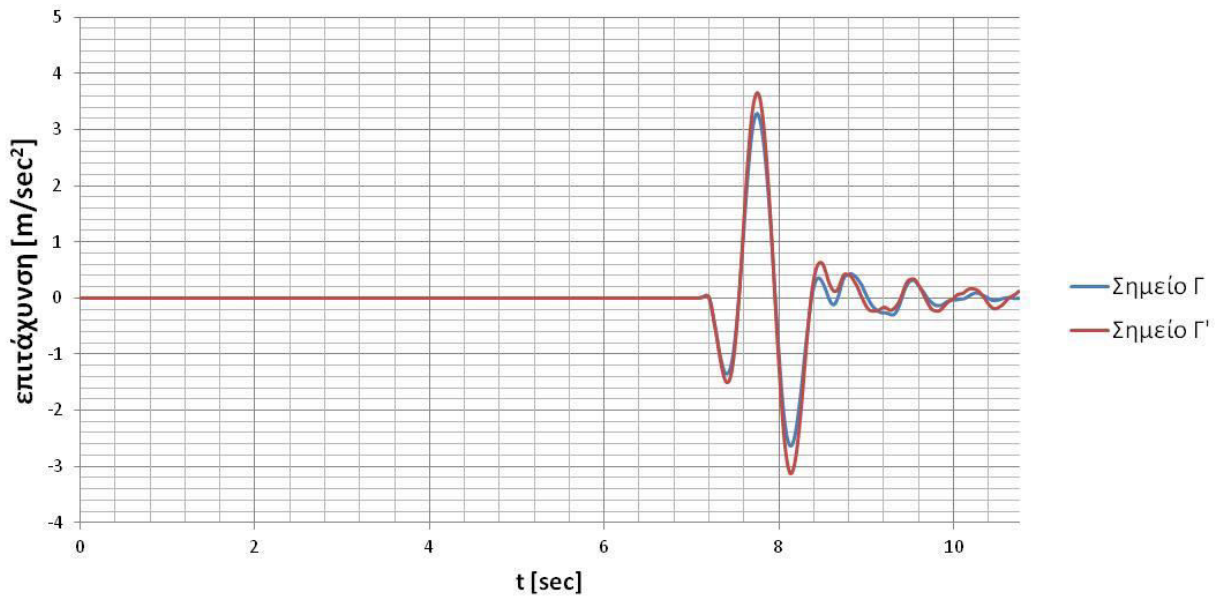


Σχήμα 4.173: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.15.

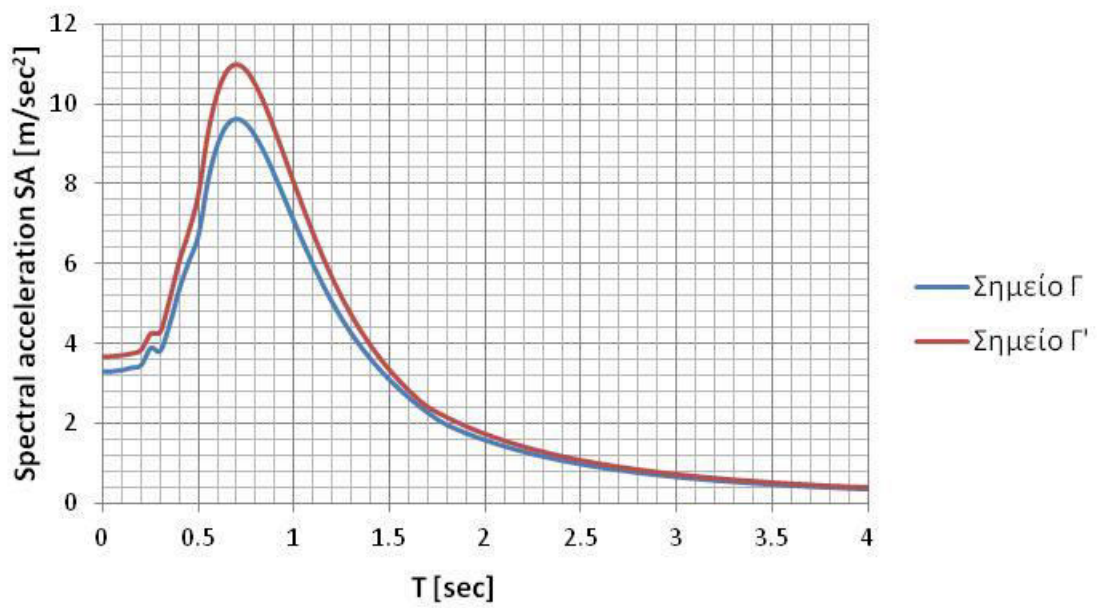


Σχήμα 4.174: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.15.

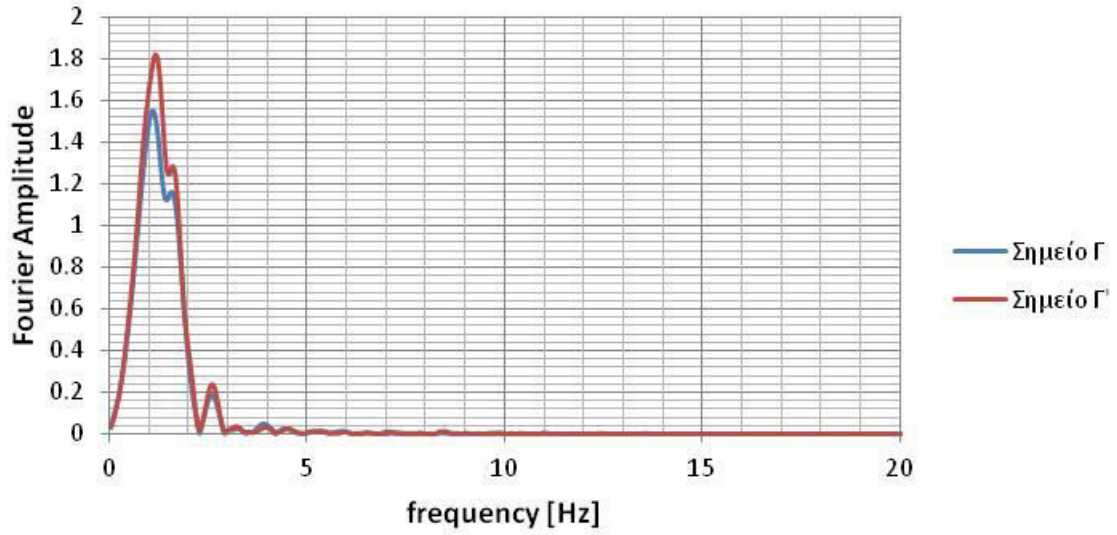




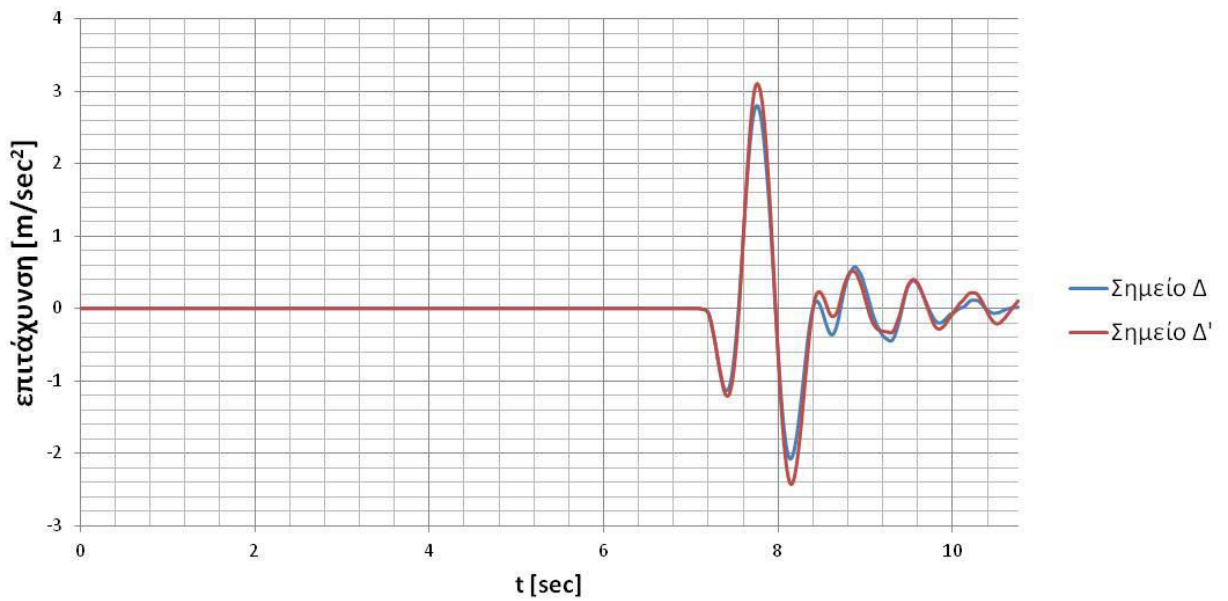
**Σχήμα 4.175:** Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.15.



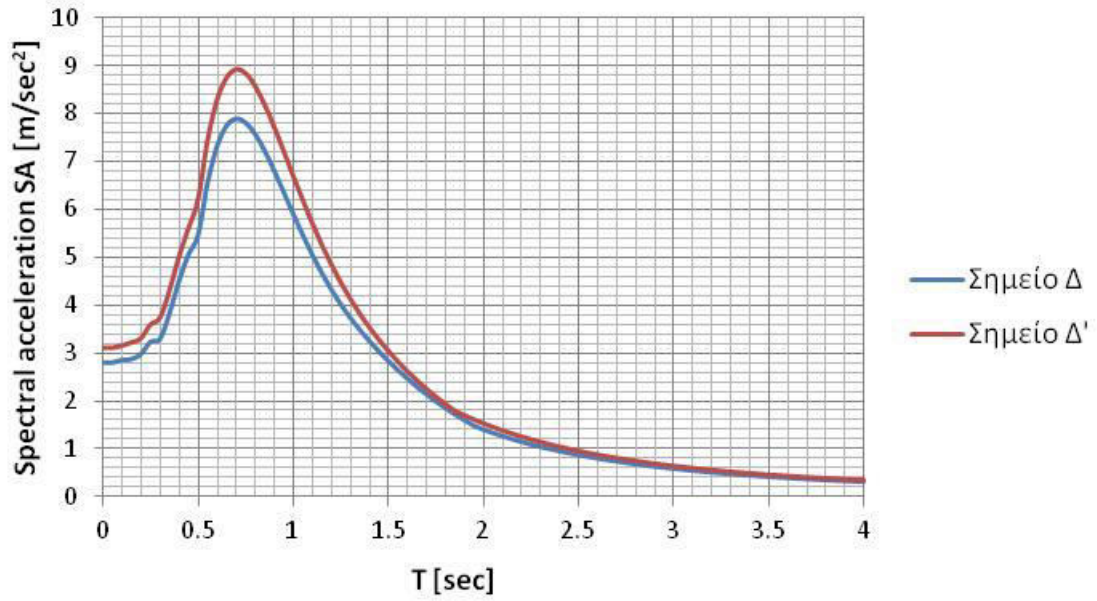
**Σχήμα 4.176:** Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.15.



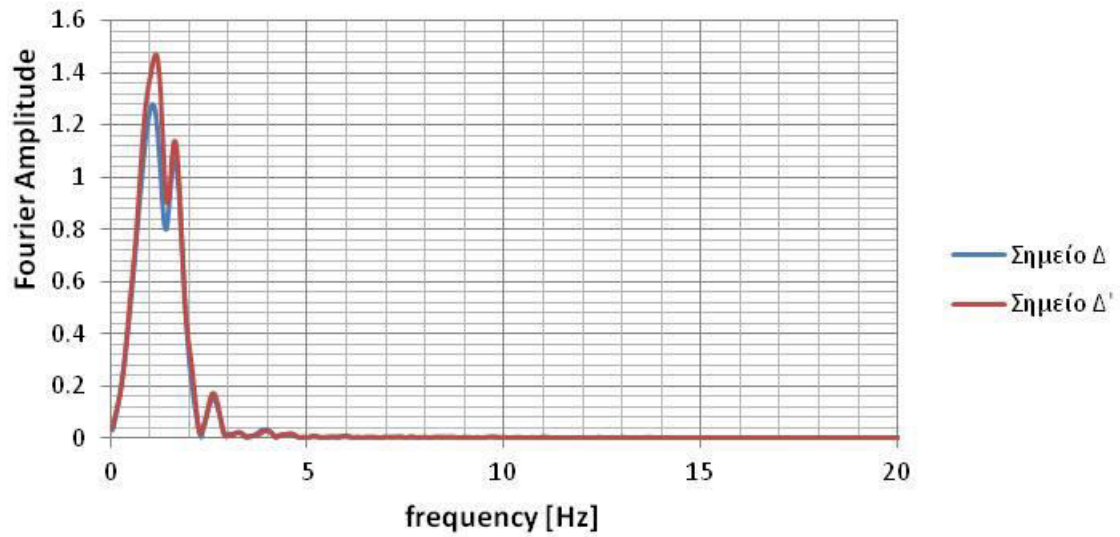
Σχήμα 4.177: Φάσματα Fourier σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.15.



Σχήμα 4.178: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.15.

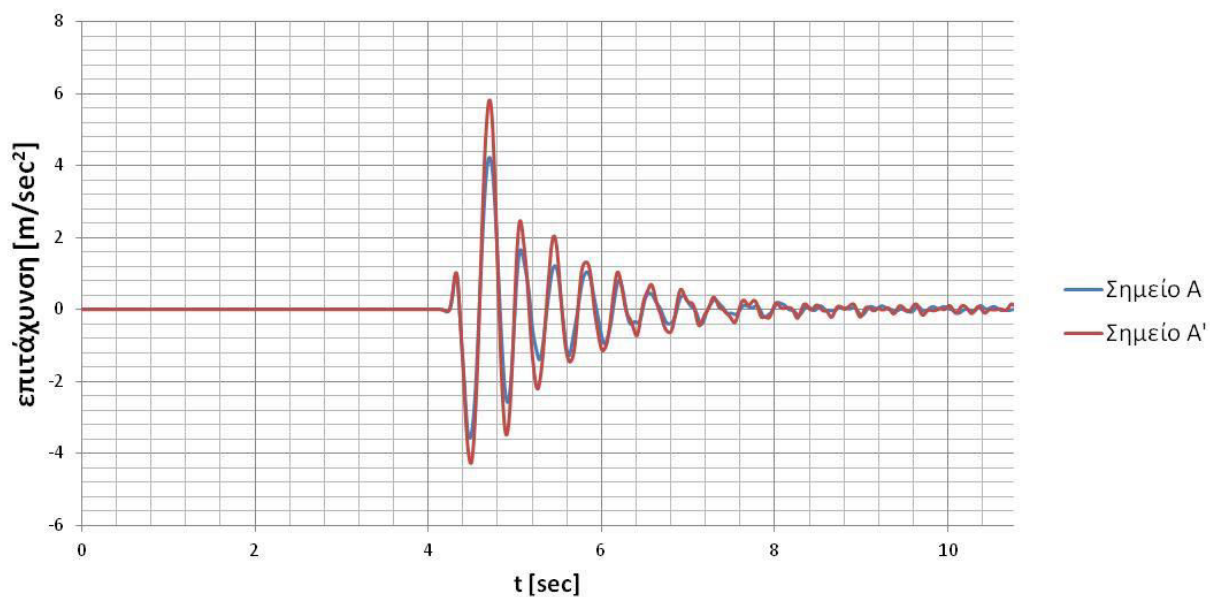


Σχήμα 4.179: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.15.

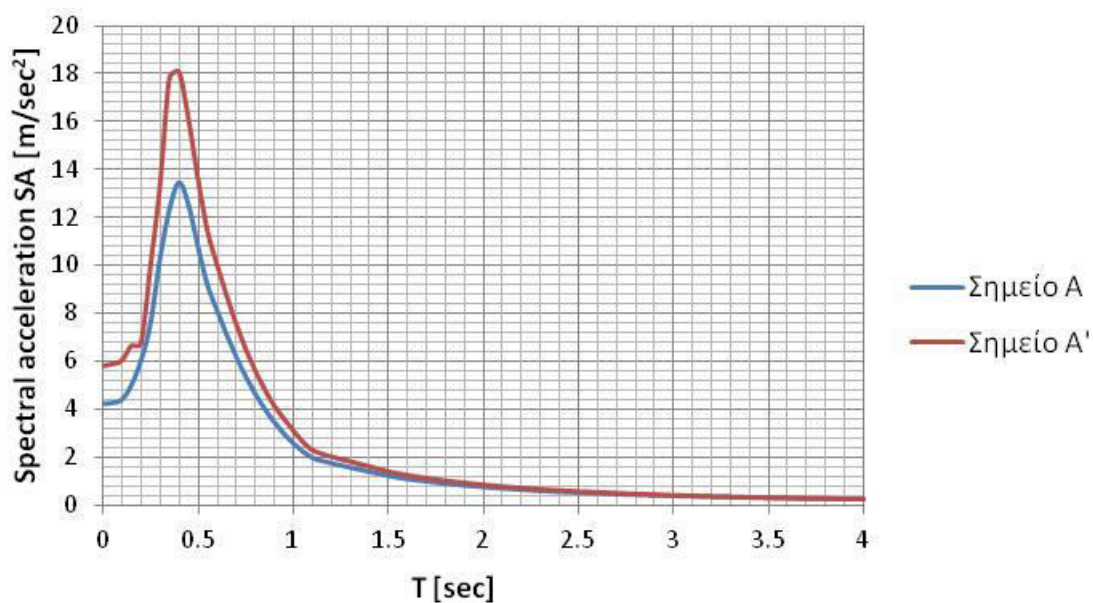


Σχήμα 4.180: Φάσματα Fourier σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.15.

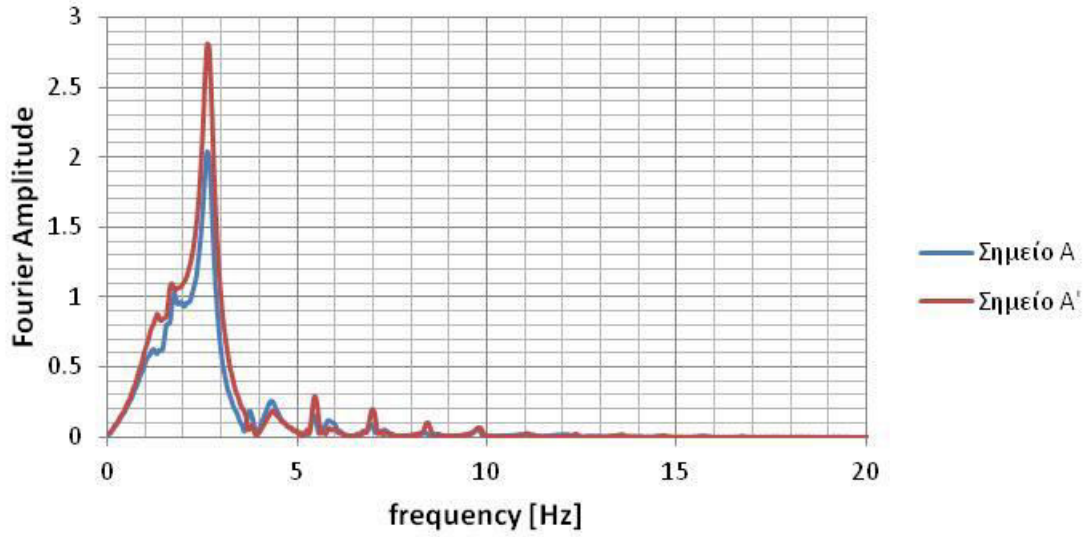
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.16: Διέγερση TH-Aegion σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος



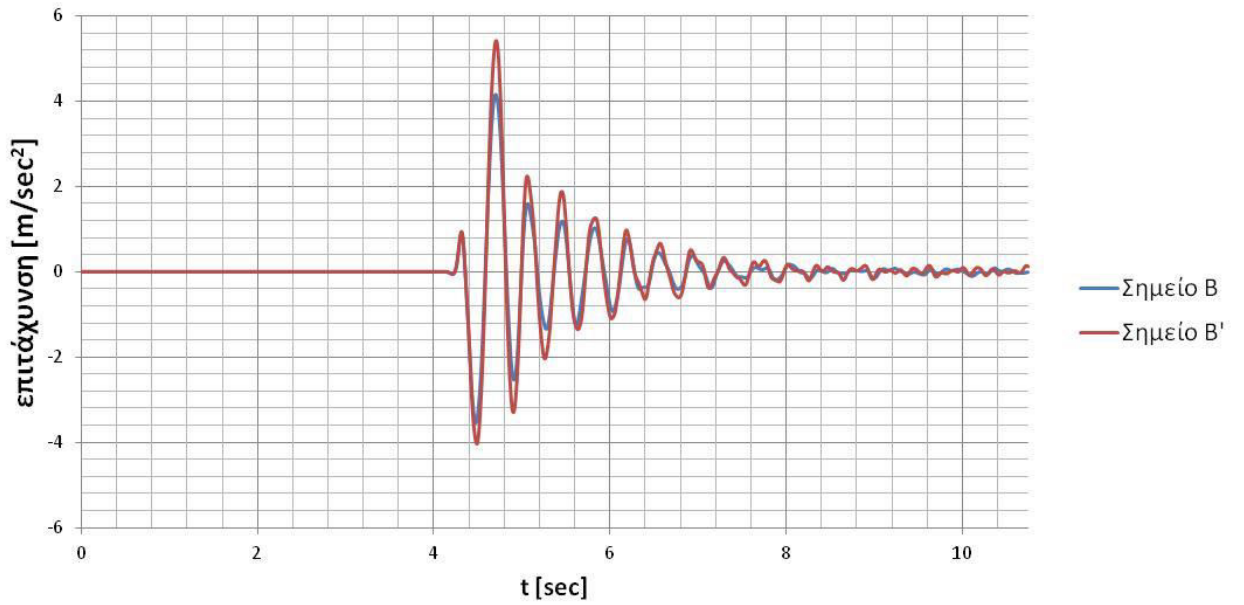
Σχήμα 4.181: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.16.



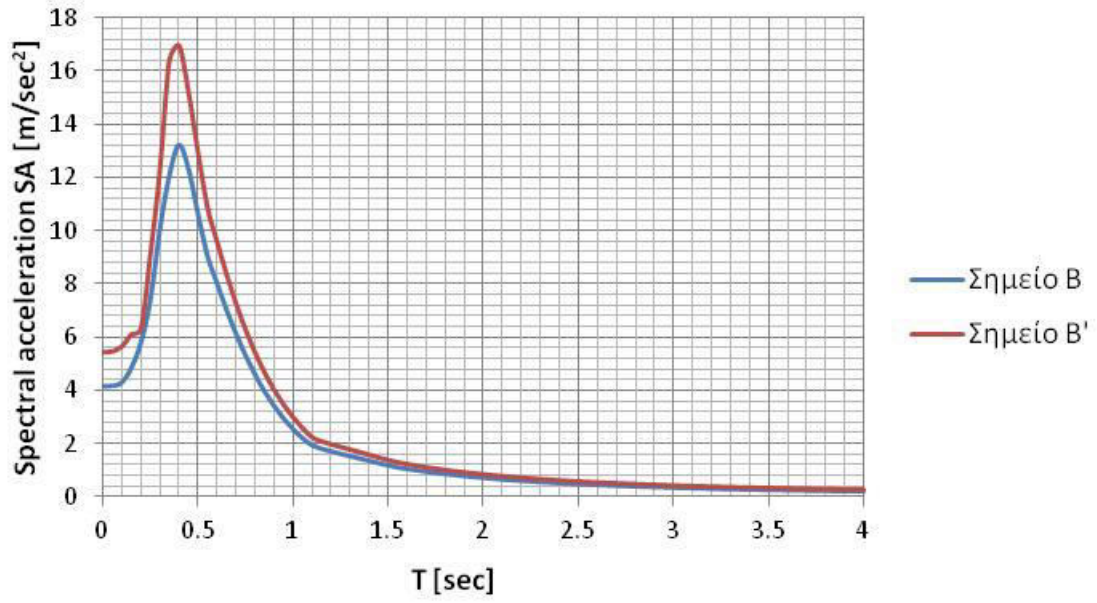
Σχήμα 4.182: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.16.



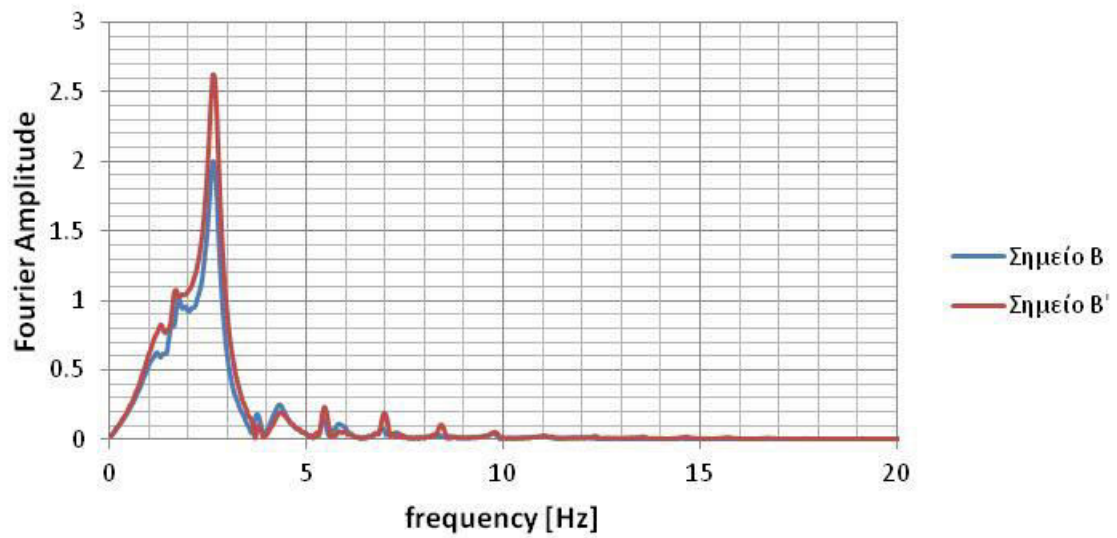
Σχήμα 4.183: Φάσματα Fourier σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.16.



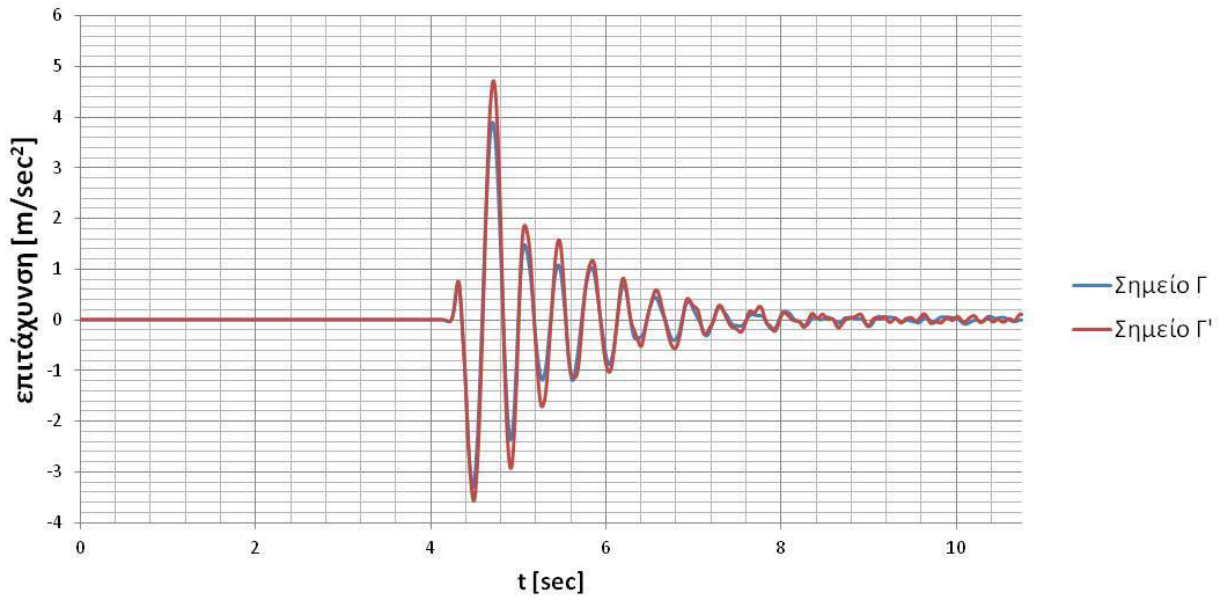
Σχήμα 4.184: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 1.16.



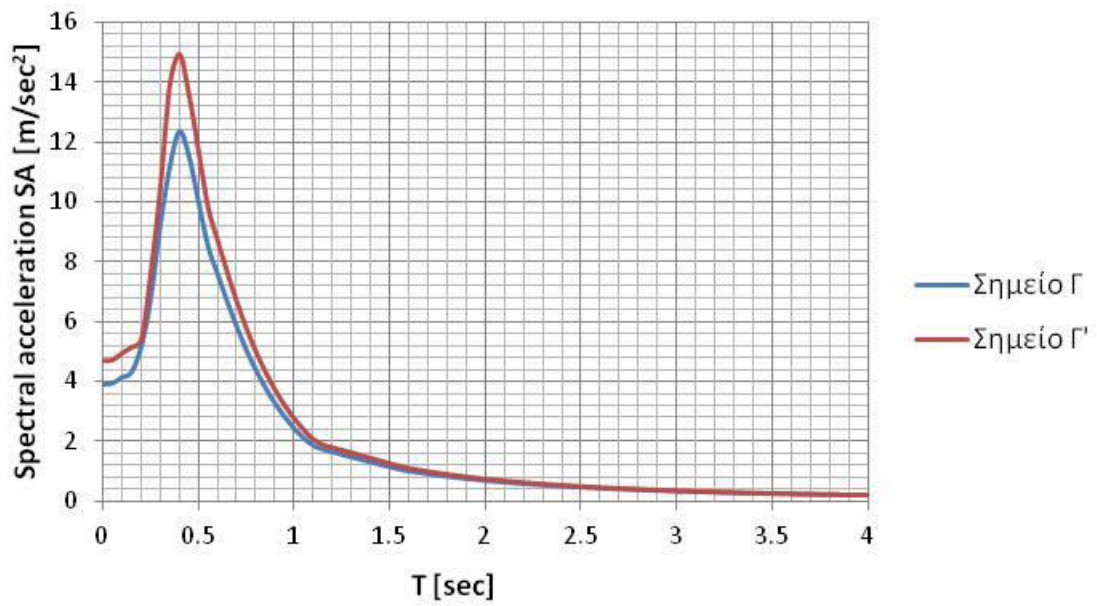
Σχήμα 4.185: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.16.



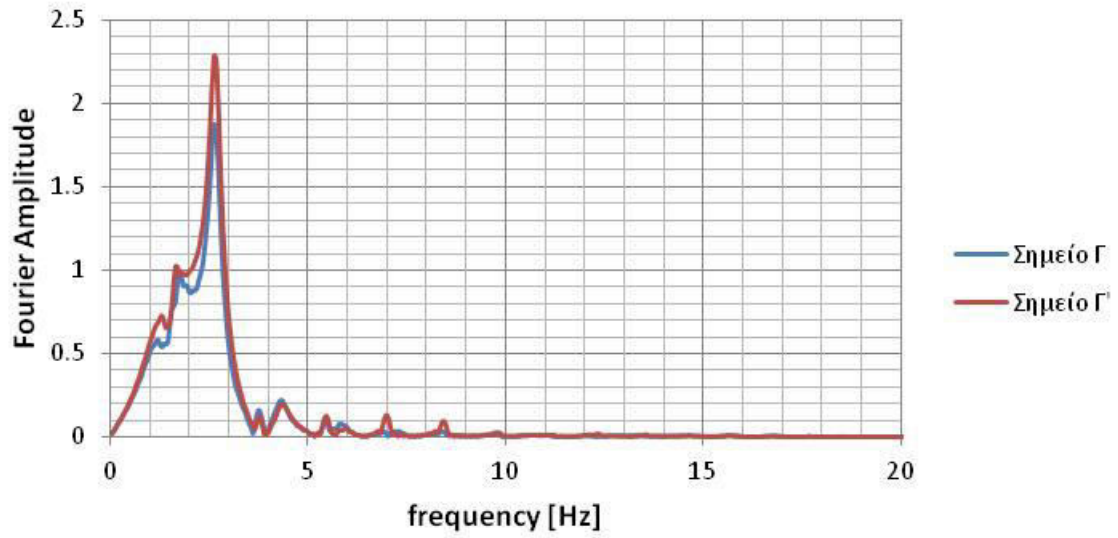
Σχήμα 4.186: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.16.



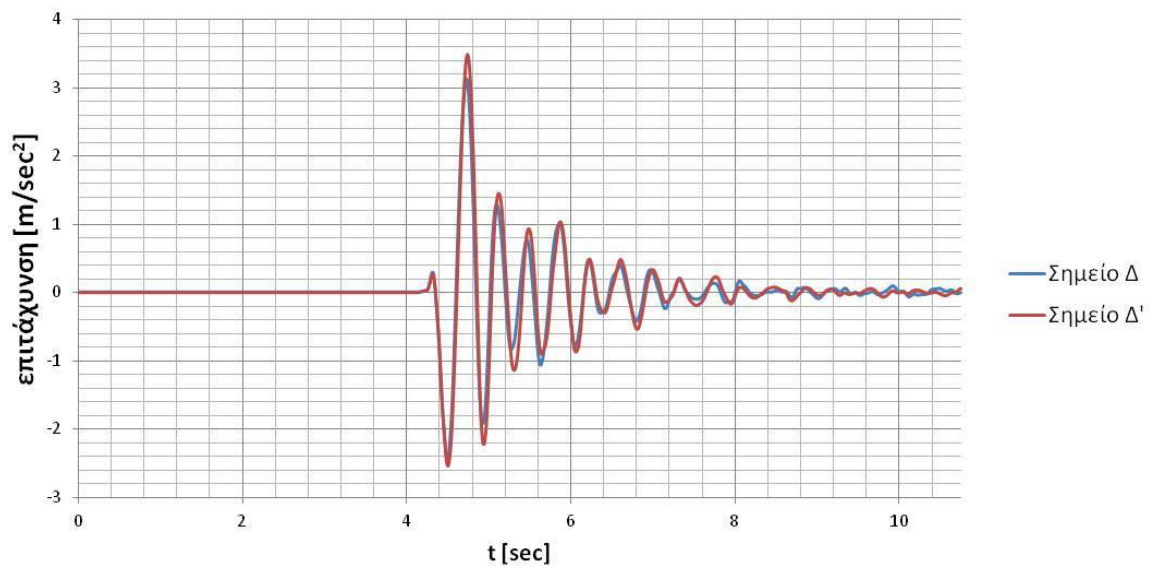
Σχήμα 4.187: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.16.



Σχήμα 4.188: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.16.

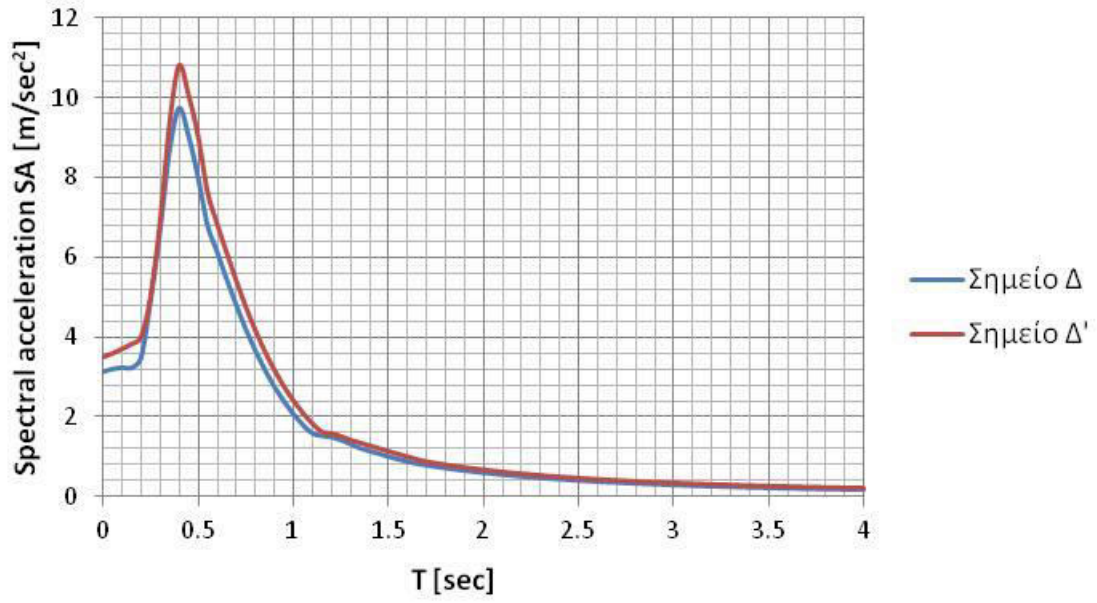


Σχήμα 4.189: Φάσματα Fourier σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.16.

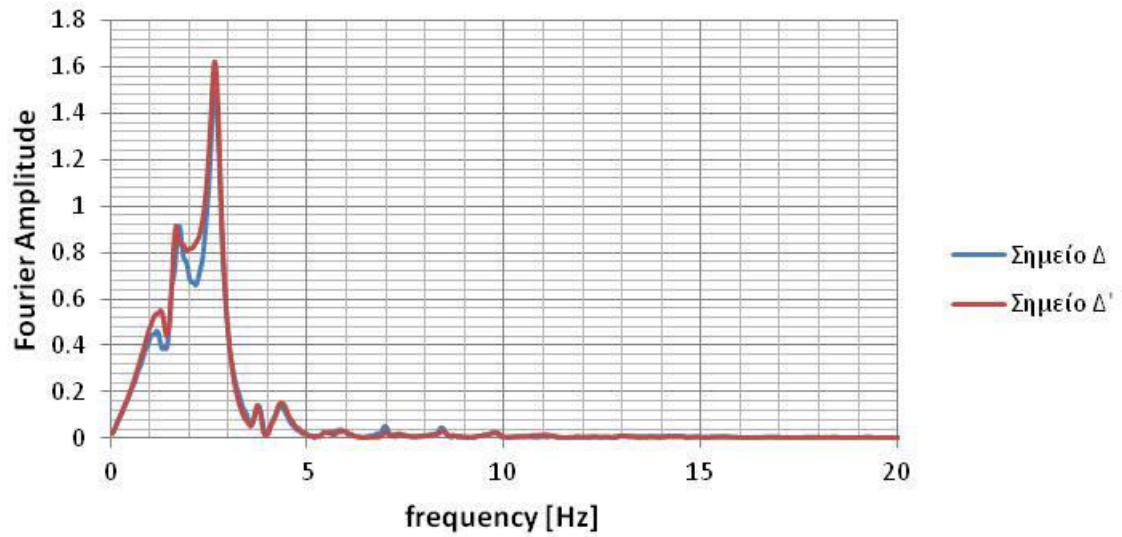


Σχήμα 4.190: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.16.



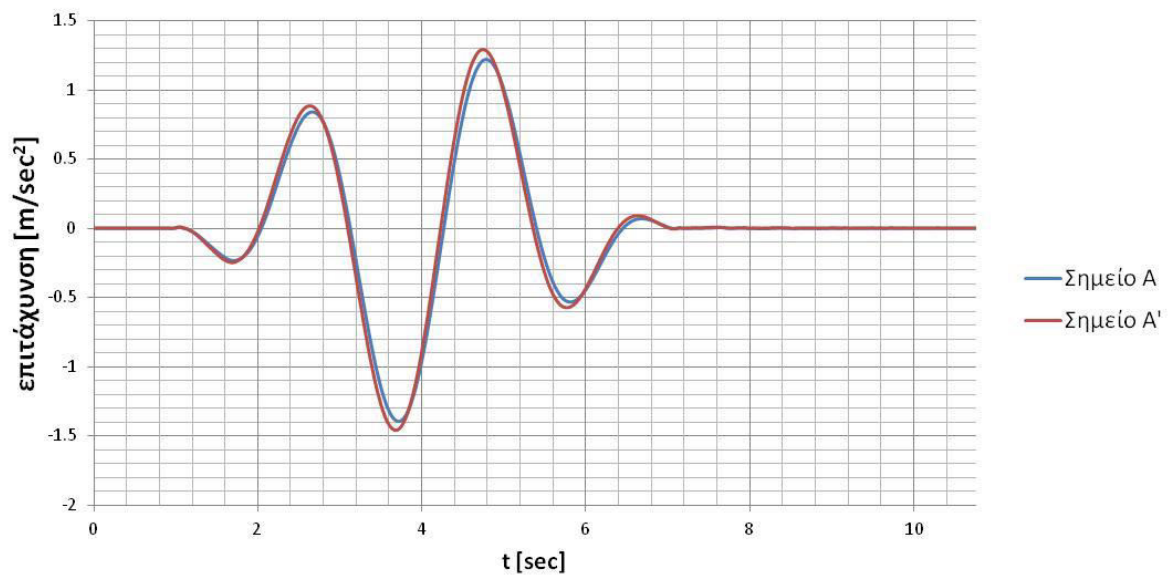


Σχήμα 4.191: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.16.

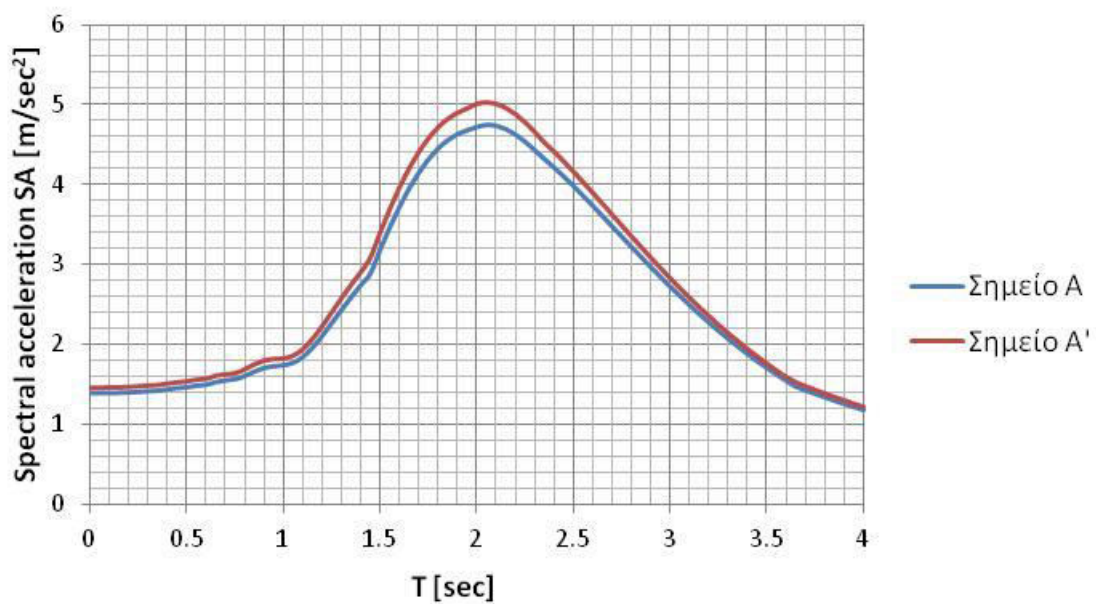


Σχήμα 4.192: Φάσματα Fourier σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.16.

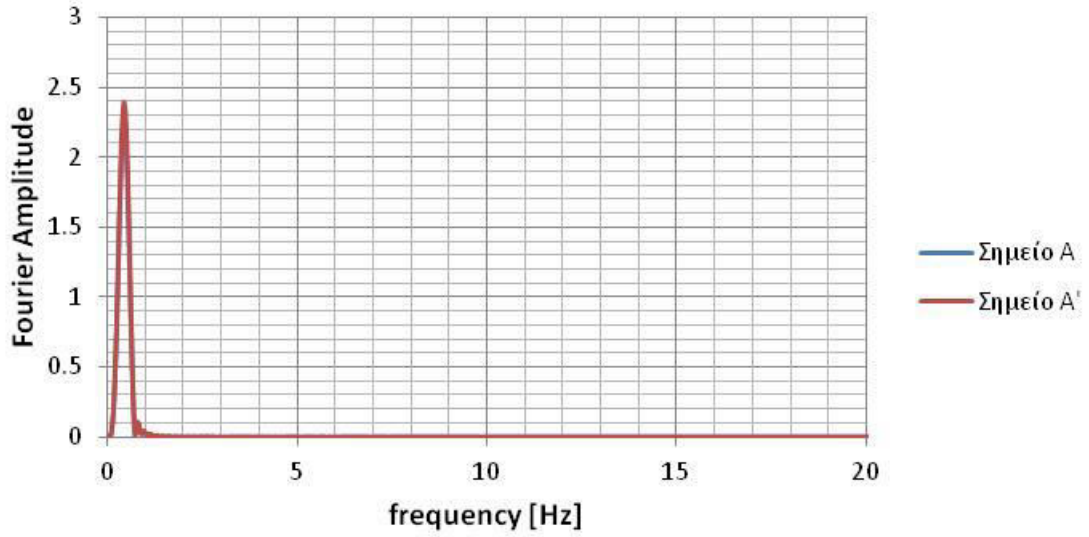
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.17: Διέγερση TH-Erzincan σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος



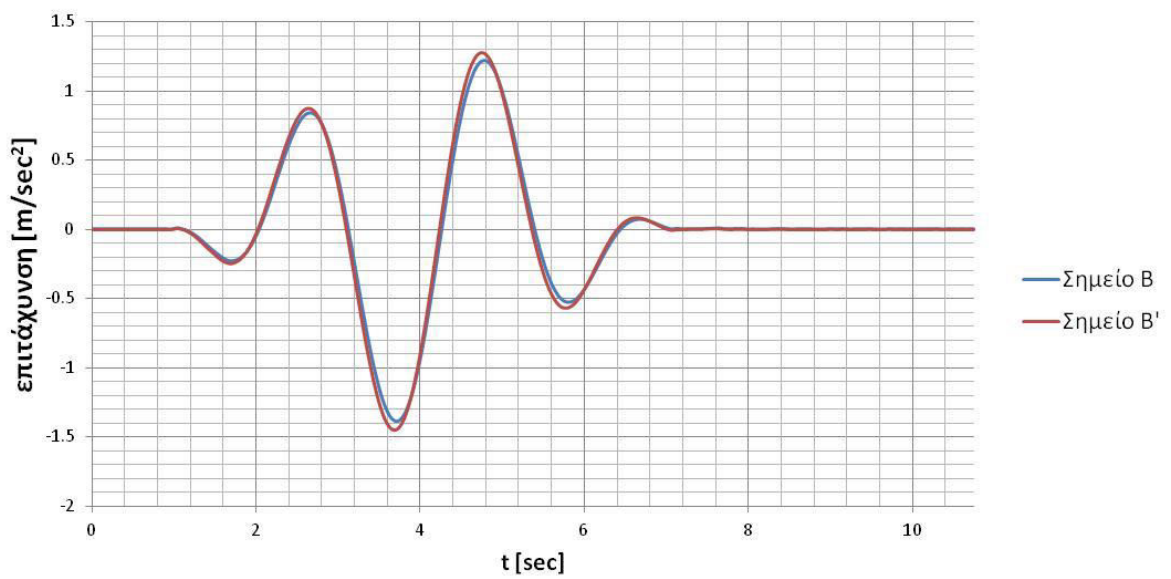
Σχήμα 4.193: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.17.



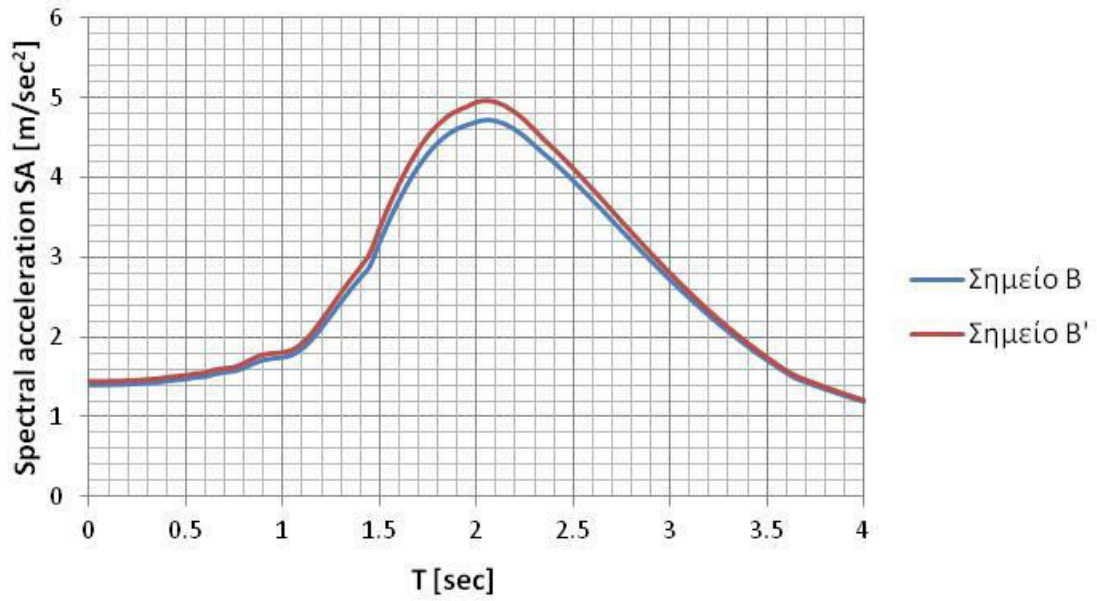
Σχήμα 4.194: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.17.



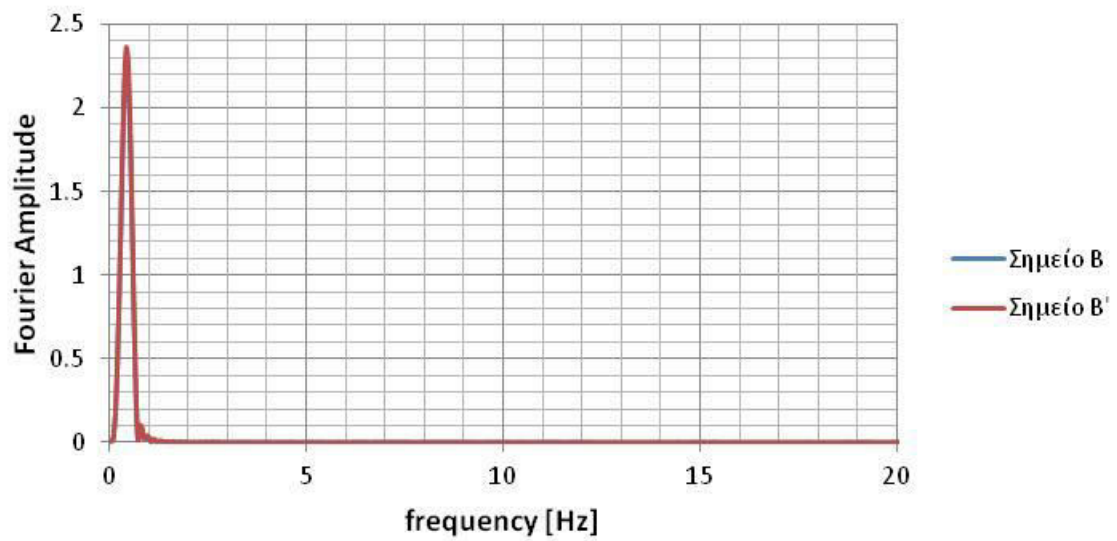
Σχήμα 4.195: Φάσματα Fourier σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.17.



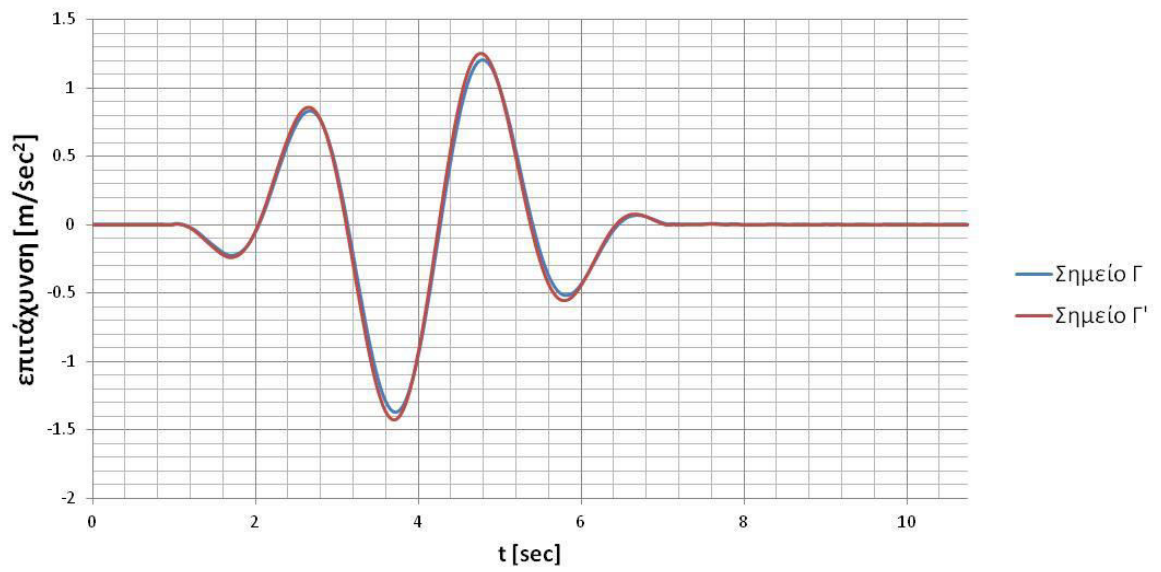
Σχήμα 4.196: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 1.17.



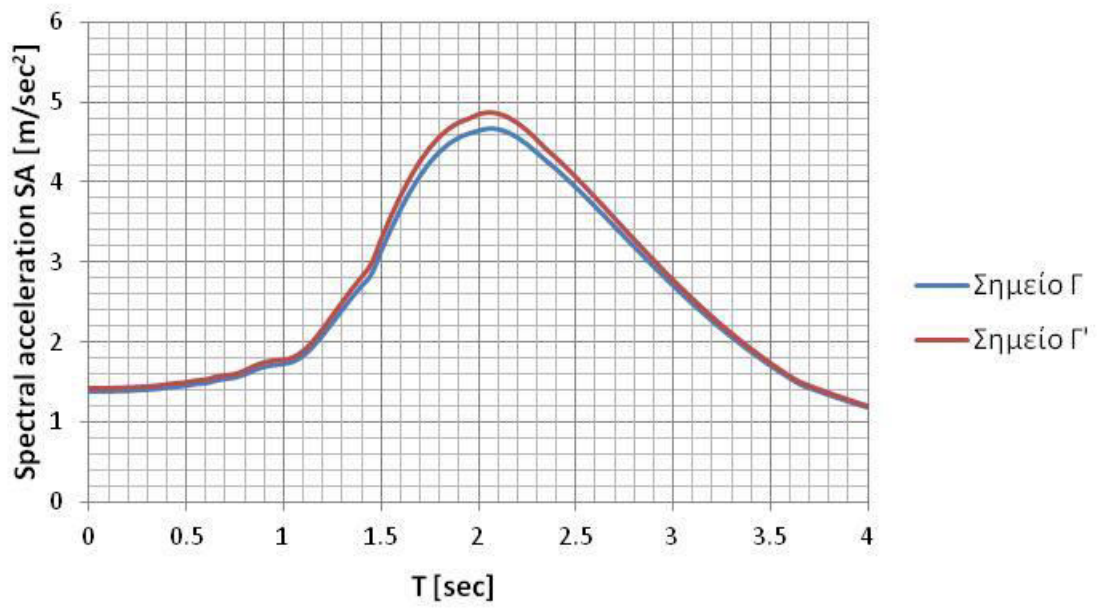
Σχήμα 4.197: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.17.



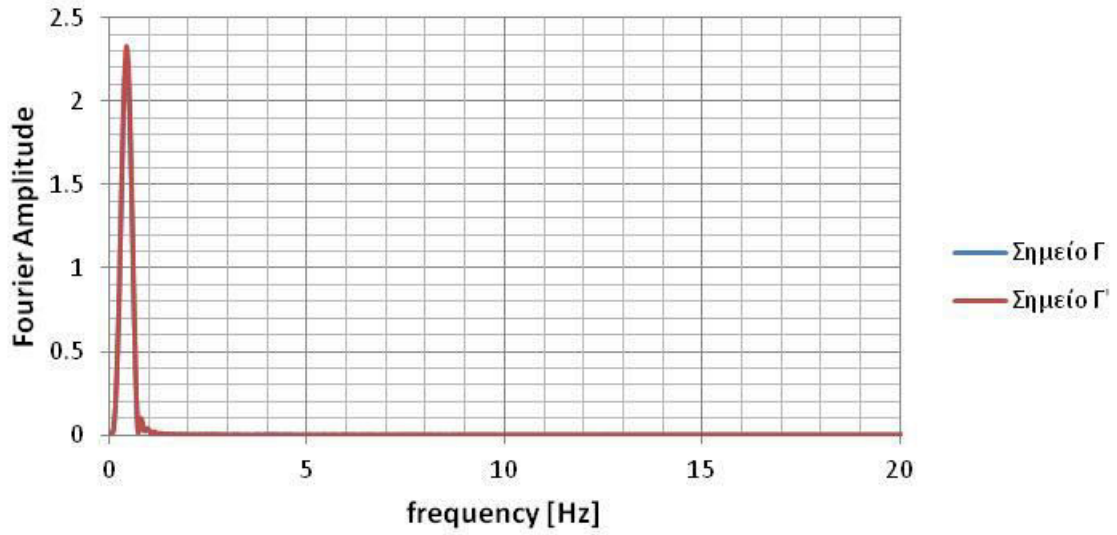
Σχήμα 4.198: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.17.



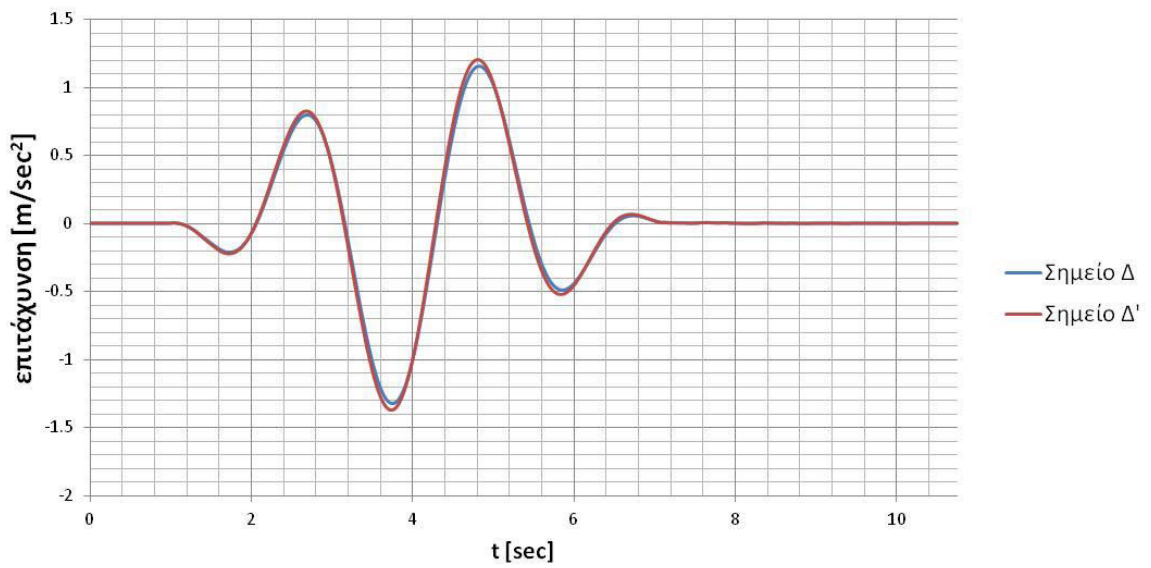
**Σχήμα 4.199:** Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.17.



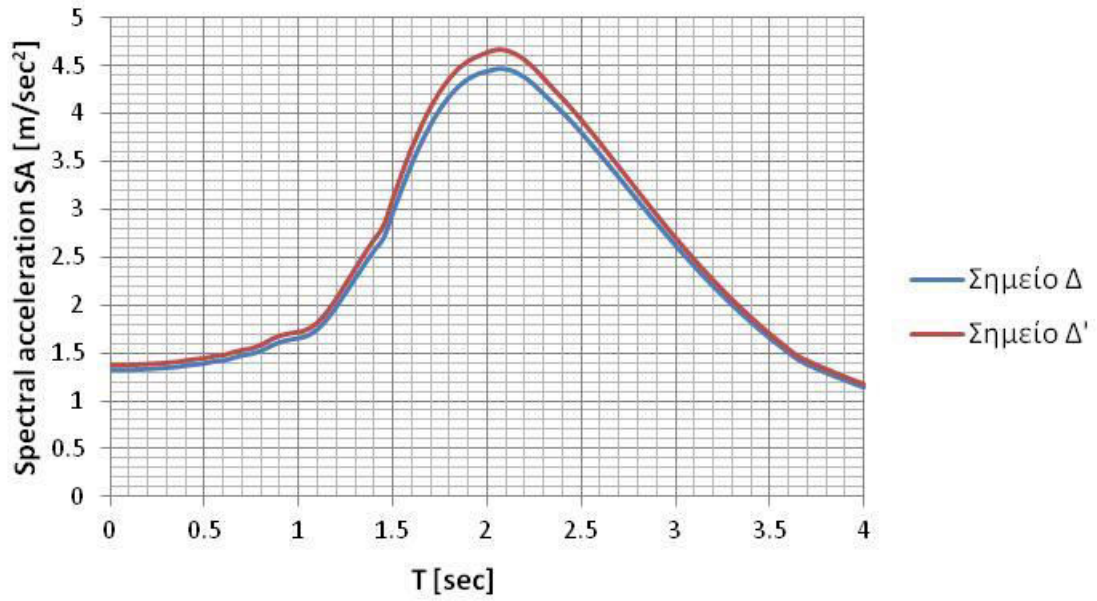
**Σχήμα 4.200:** Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.17.



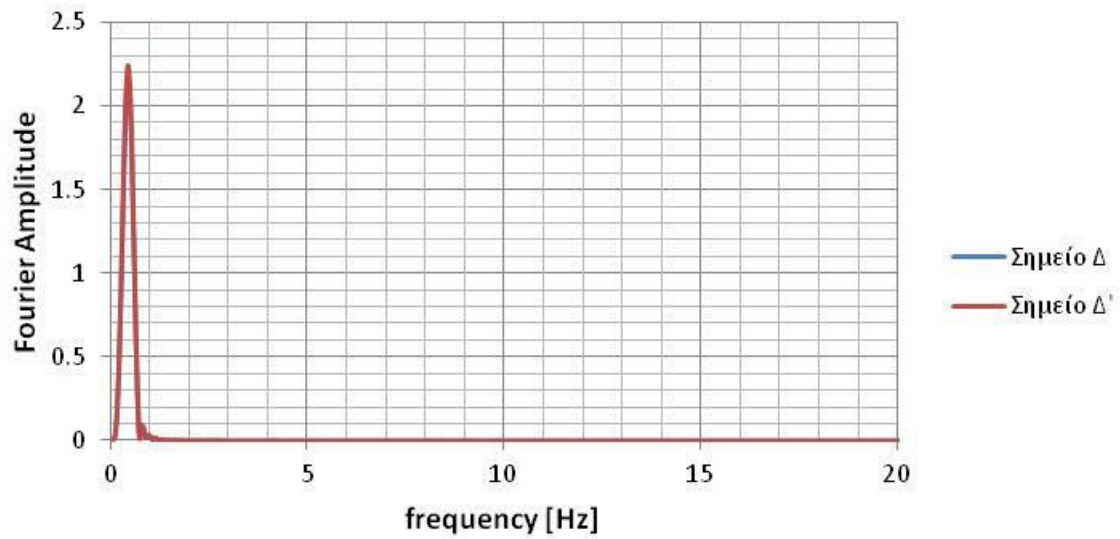
Σχήμα 4.201: Φάσματα Fourier σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.17.



Σχήμα 4.202: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.17.

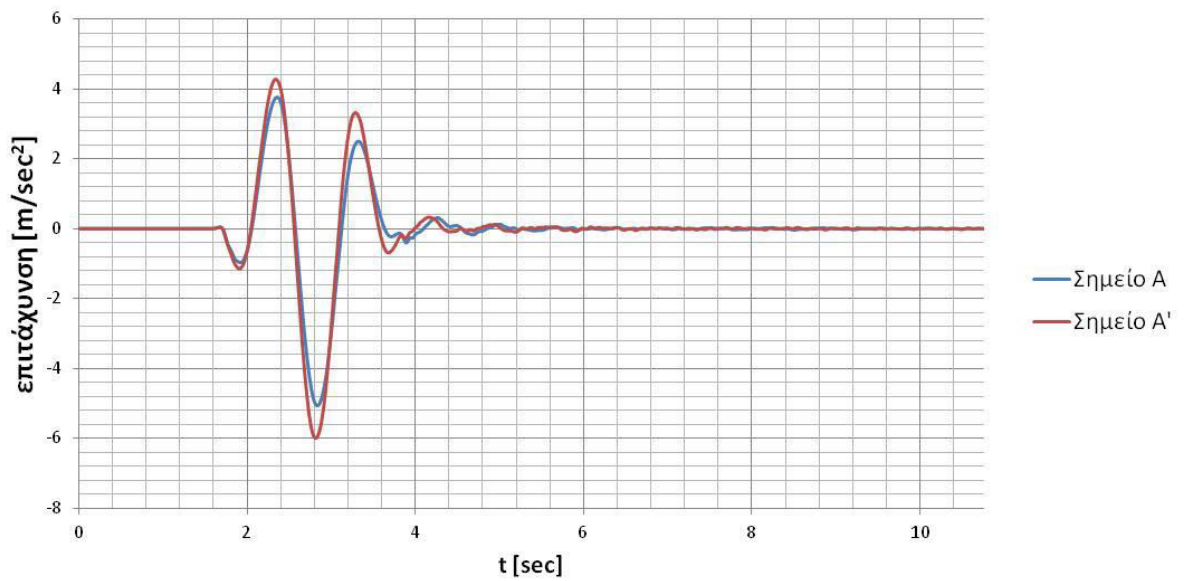


Σχήμα 4.203: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.17.

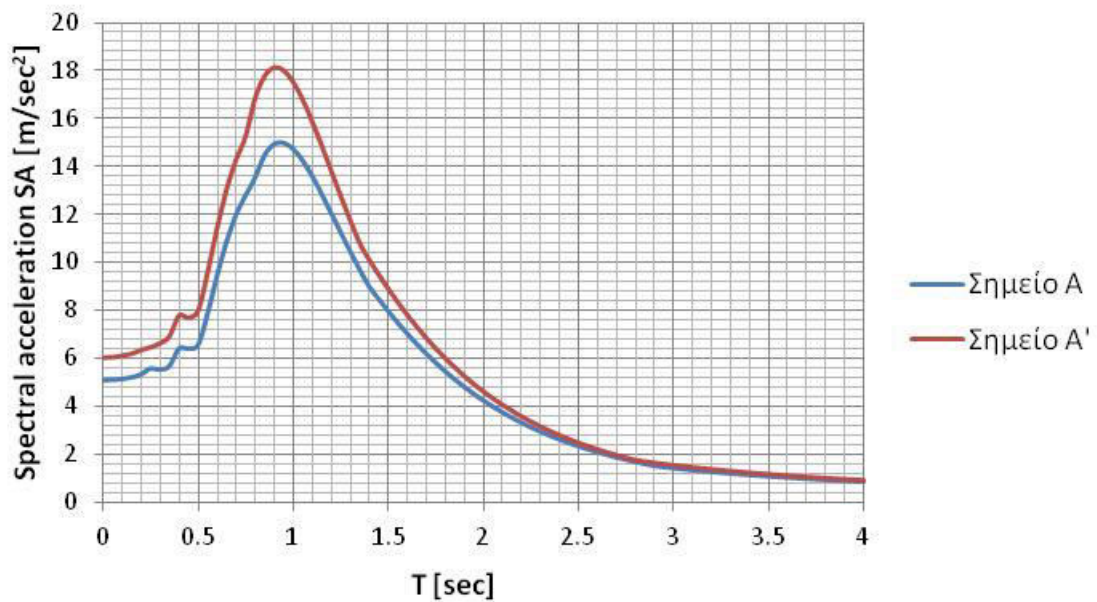


Σχήμα 4.204: Φάσματα Fourier σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.17.

Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 1.18: Διέγερση TH-Northridge σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος

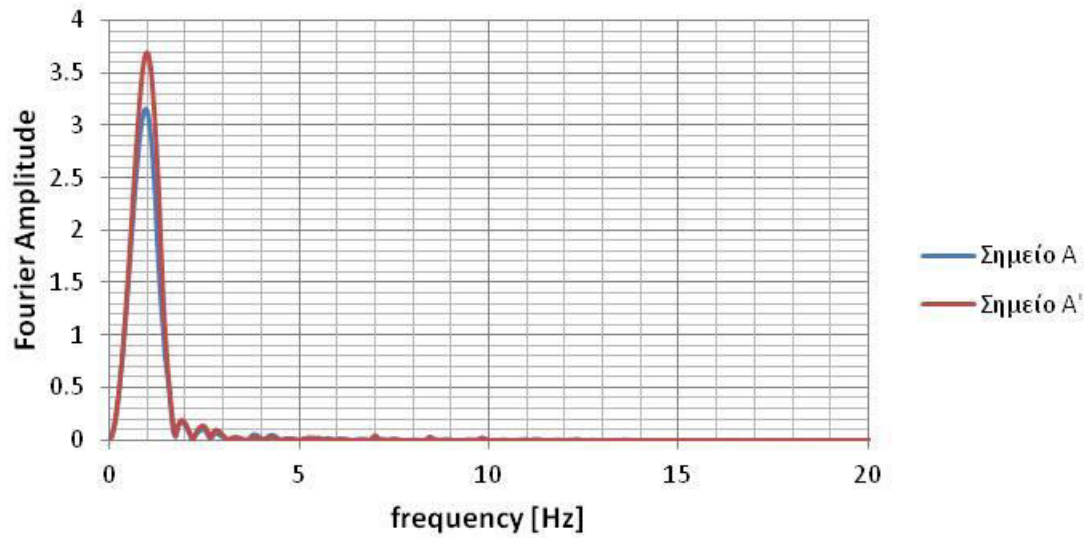


Σχήμα 4.205: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.18.

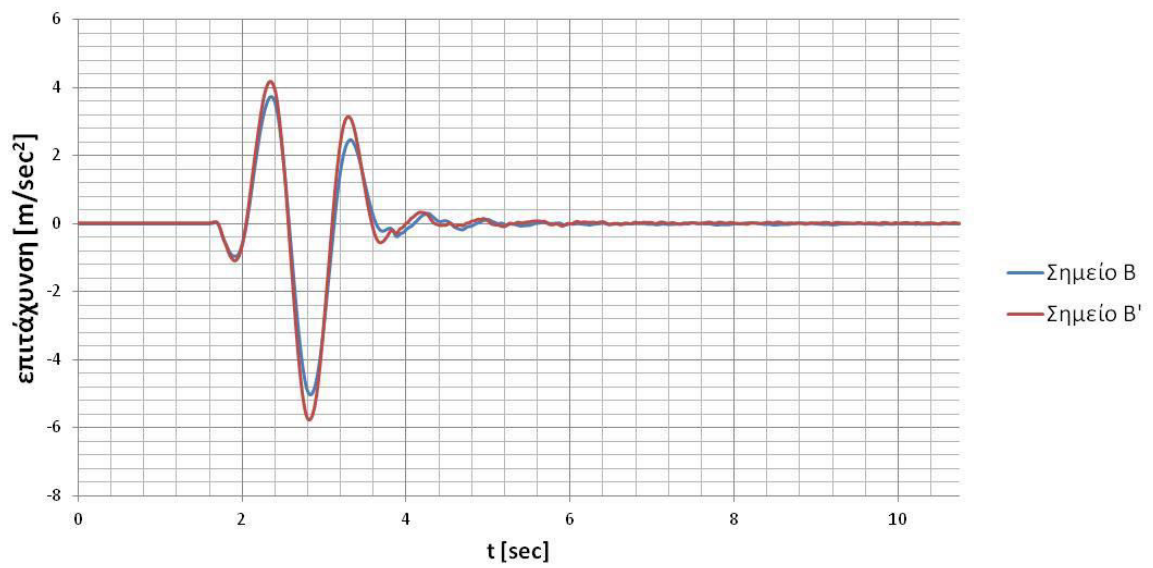


Σχήμα 4.206: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.18.

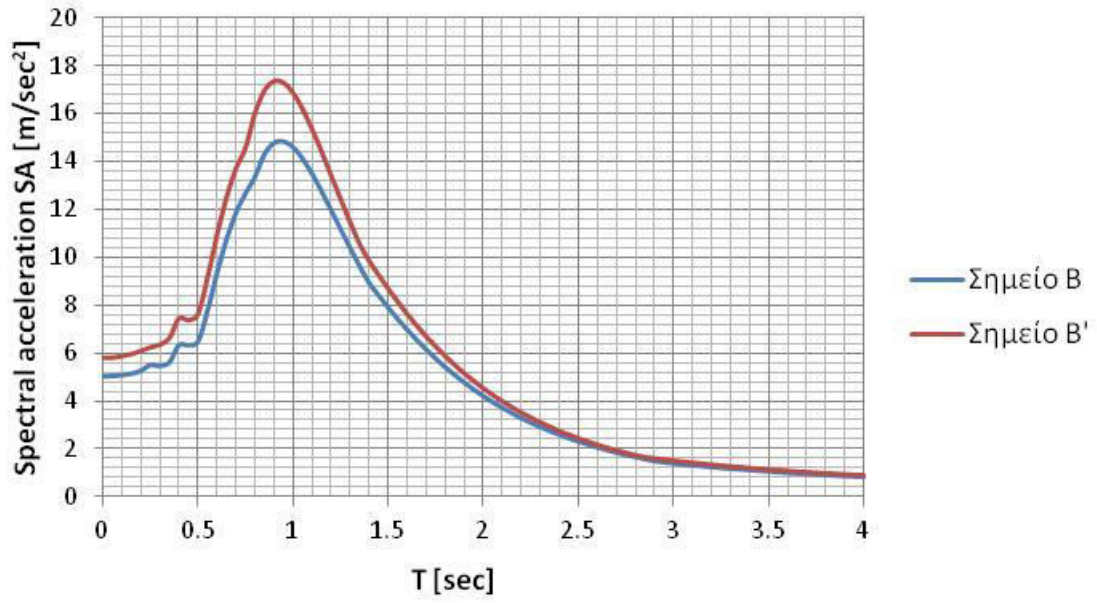




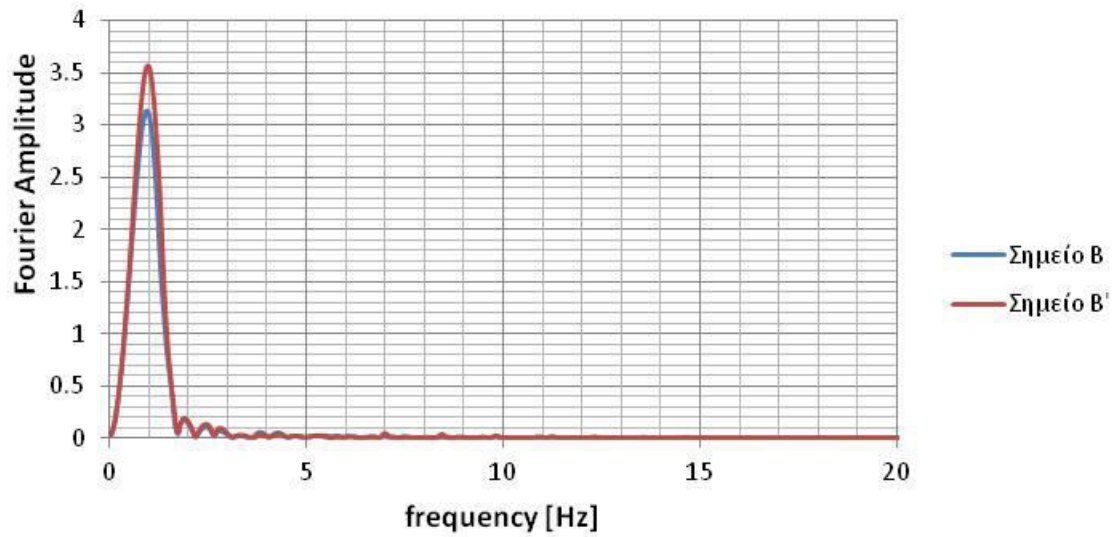
Σχήμα 4.207: Φάσματα Fourier σημείων A και A' για Σενάριο Νο 1.18.



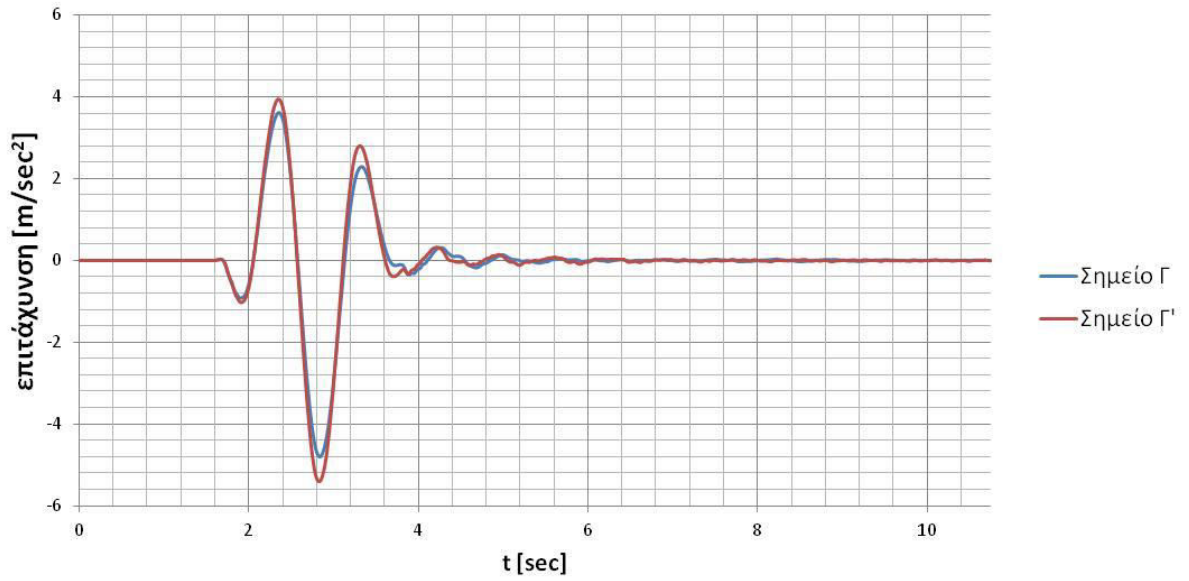
Σχήμα 4.208: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 1.18.



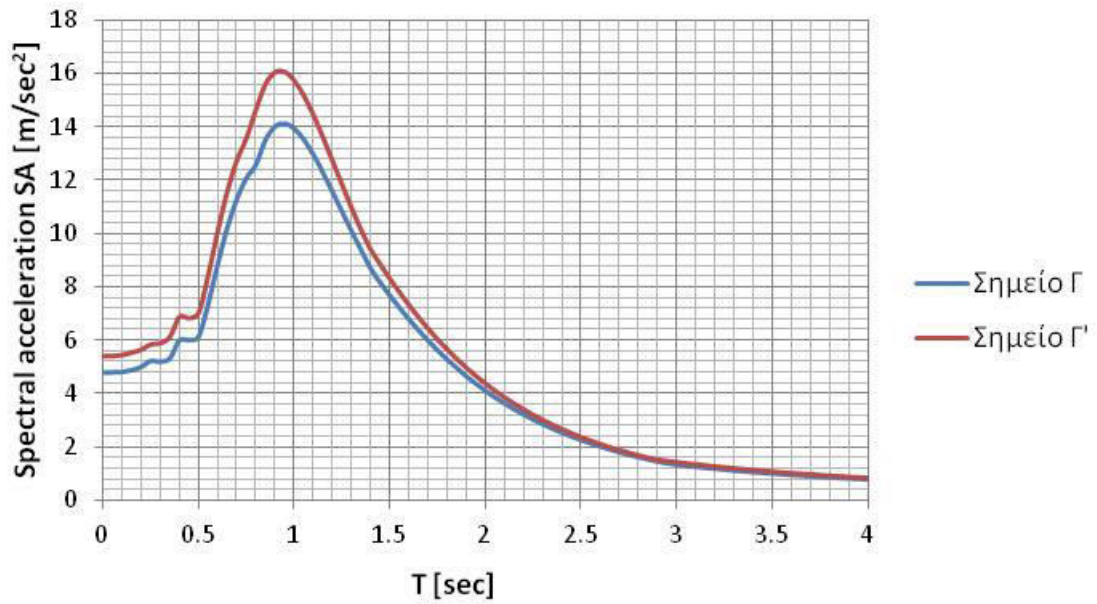
Σχήμα 4.209: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.18.



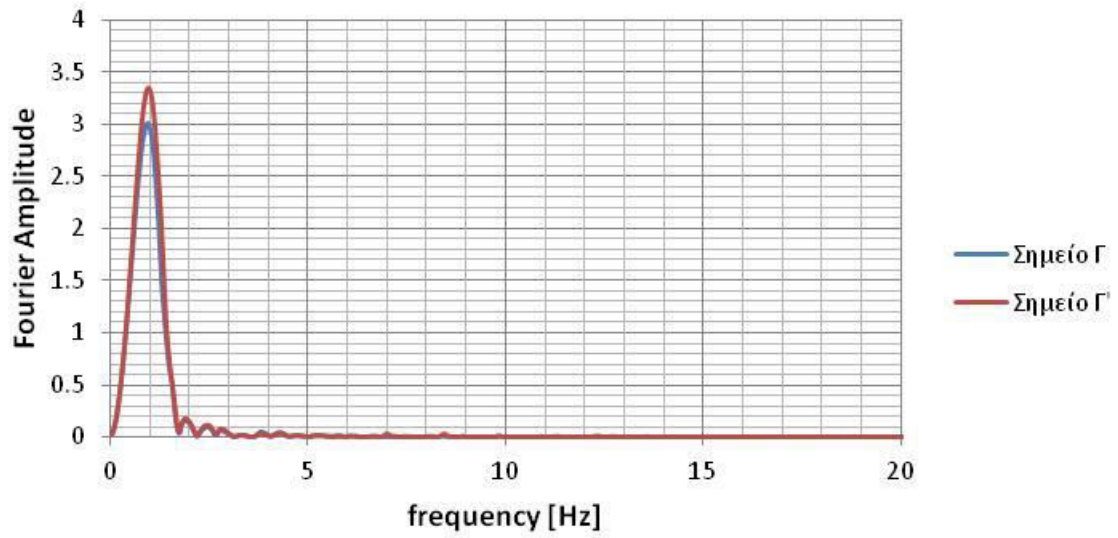
Σχήμα 4.210: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 1.18.



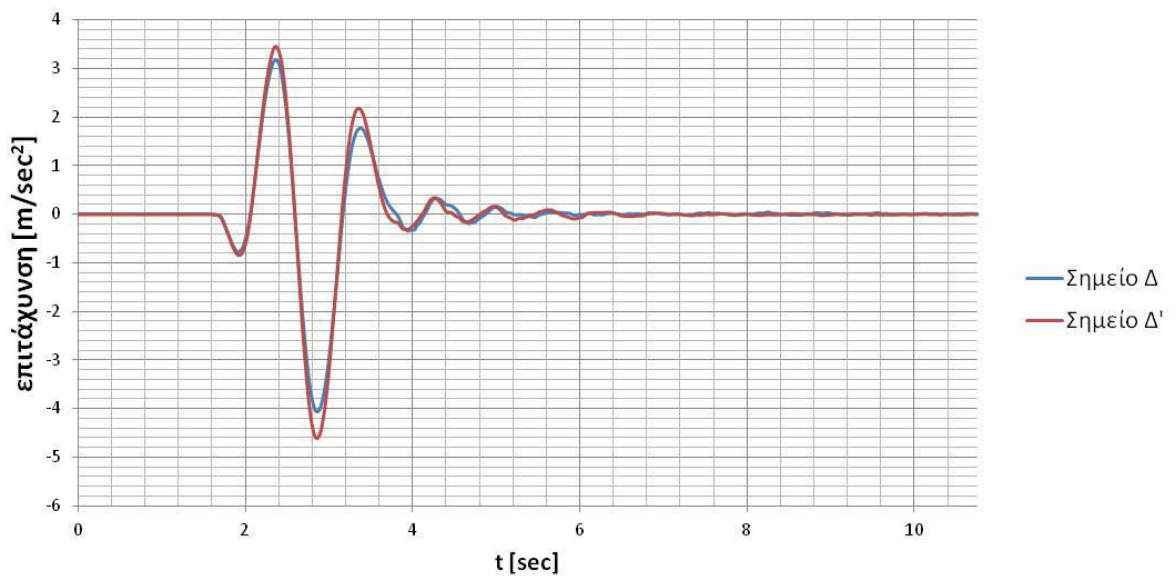
**Σχήμα 4.211:** Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.18.



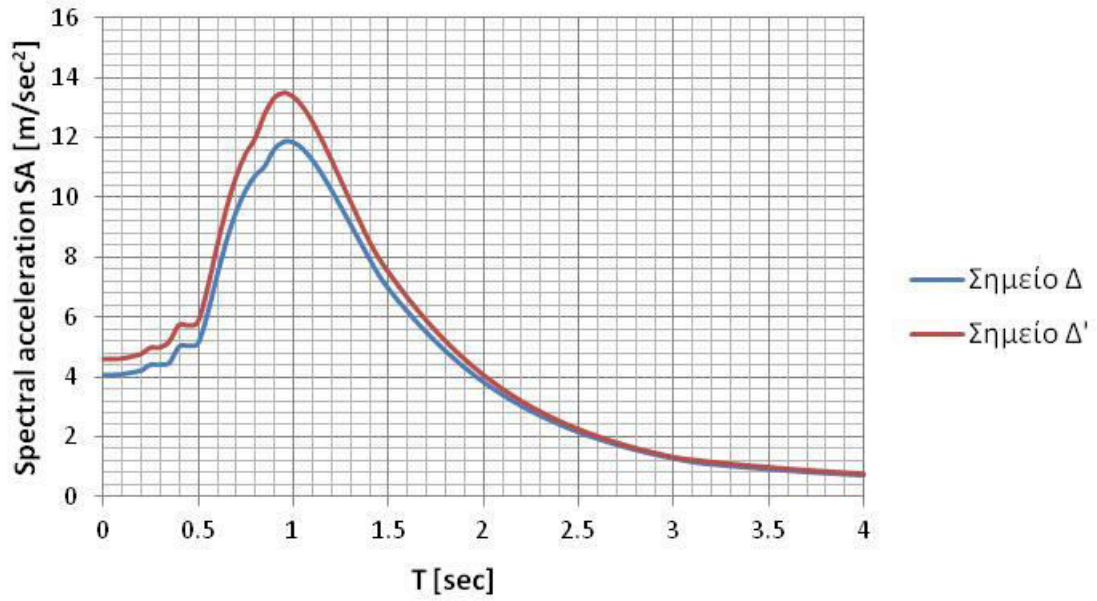
**Σχήμα 4.212:** Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.18.



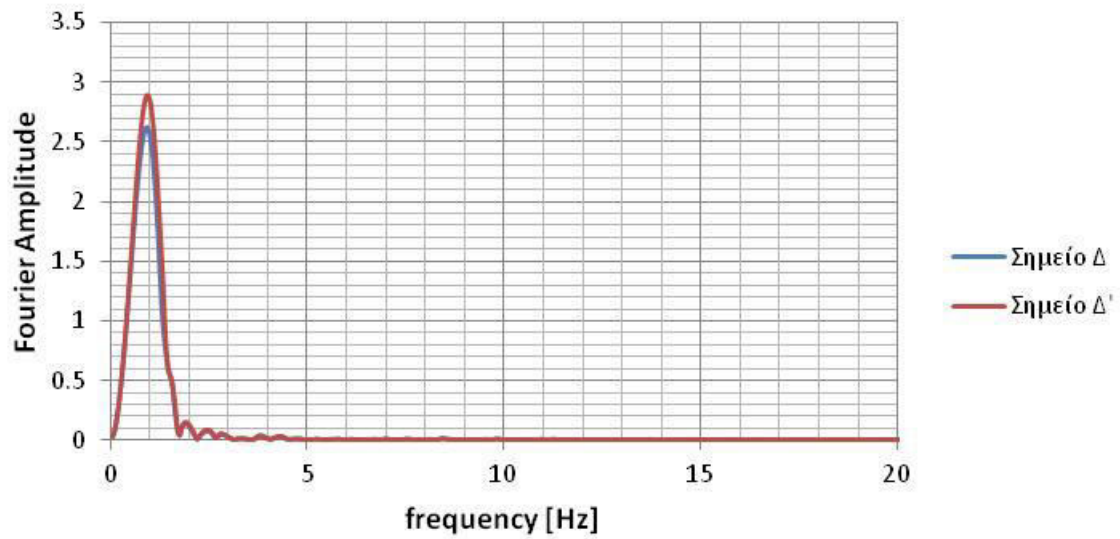
Σχήμα 4.213: Φάσματα Fourier σημείων Γ και Γ' για Σενάριο Νο 1.18.



Σχήμα 4.214: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.18.

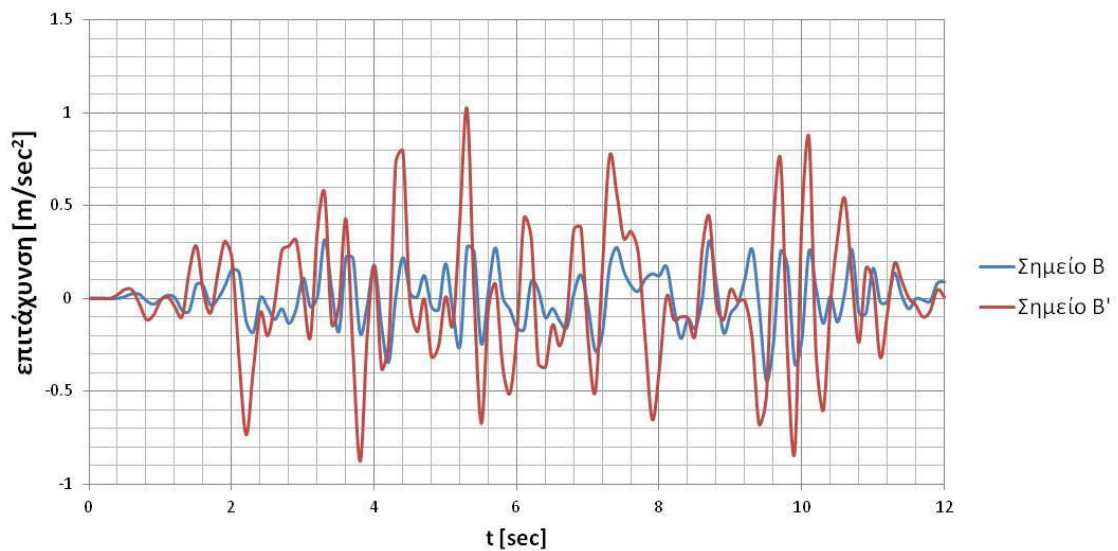


Σχήμα 4.215: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.18.

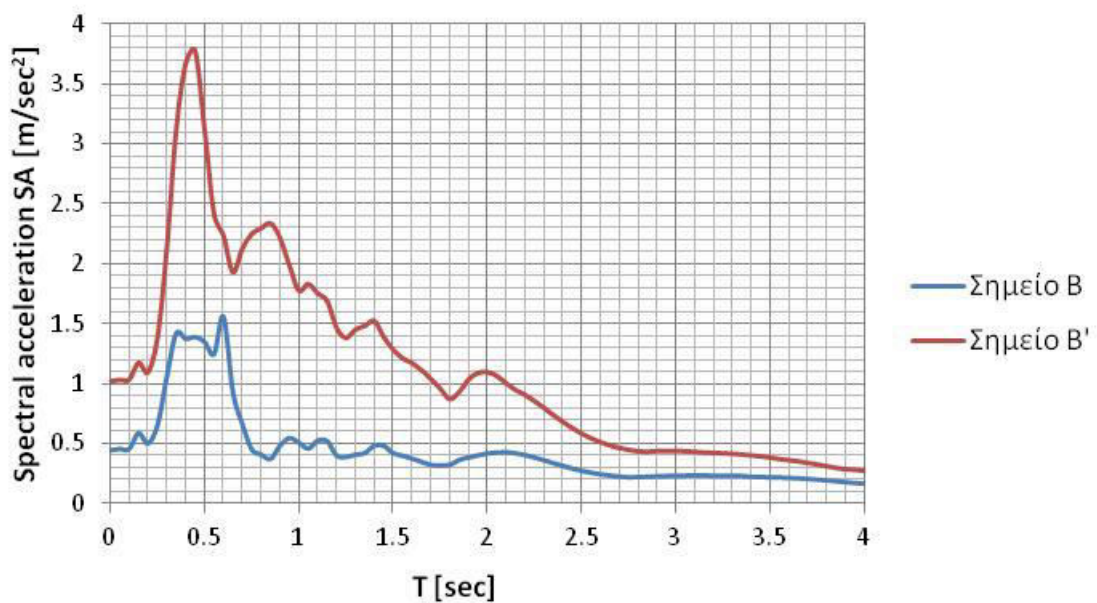


Σχήμα 4.216: Φάσματα Fourier σημείων Δ και Δ' για Σενάριο Νο 1.18.

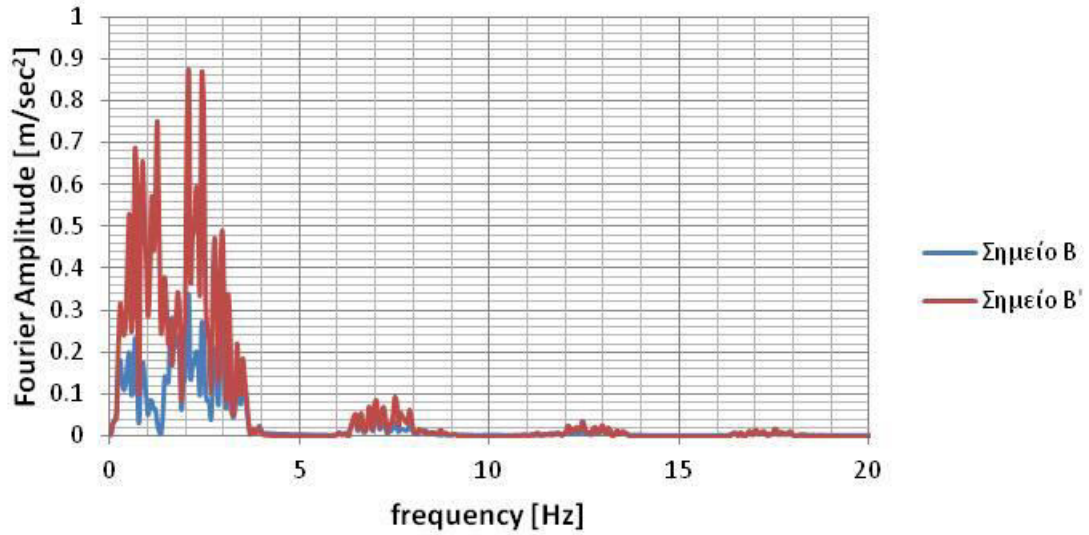
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.1: Διέγερση TH-EC8 σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος



Σχήμα 4.217: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 2.1.

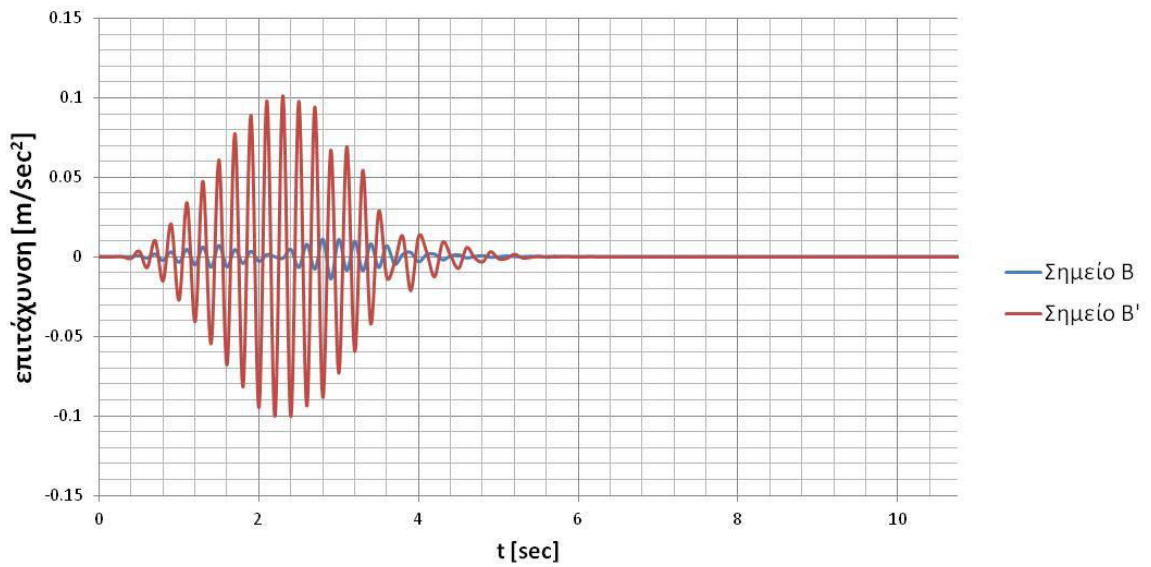


Σχήμα 4.218: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων B και B' για Σενάριο Νο 2.1.

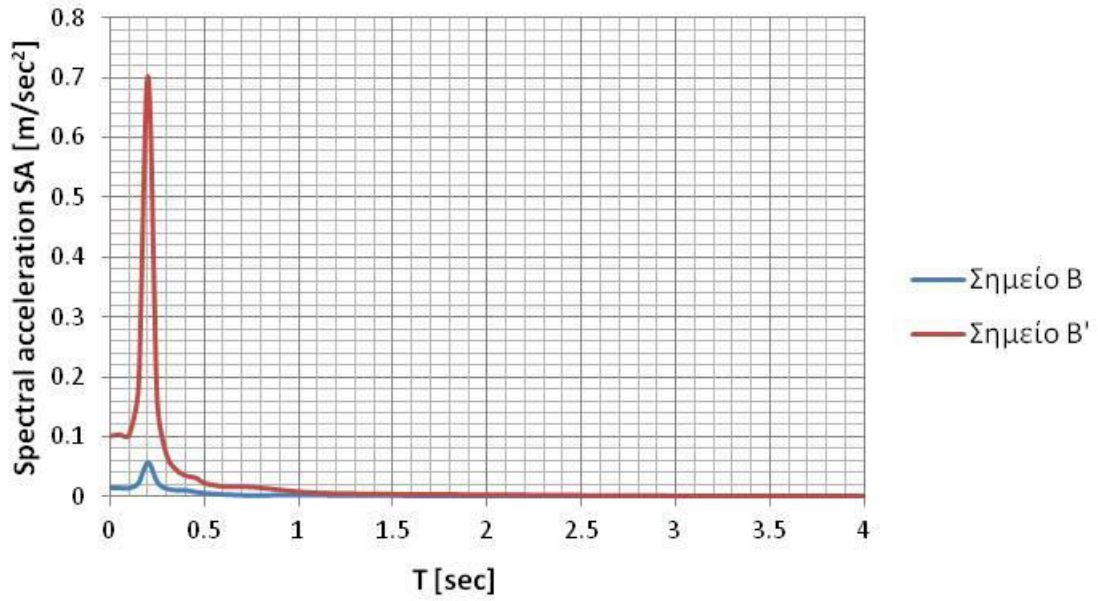


Σχήμα 4.219: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.1.

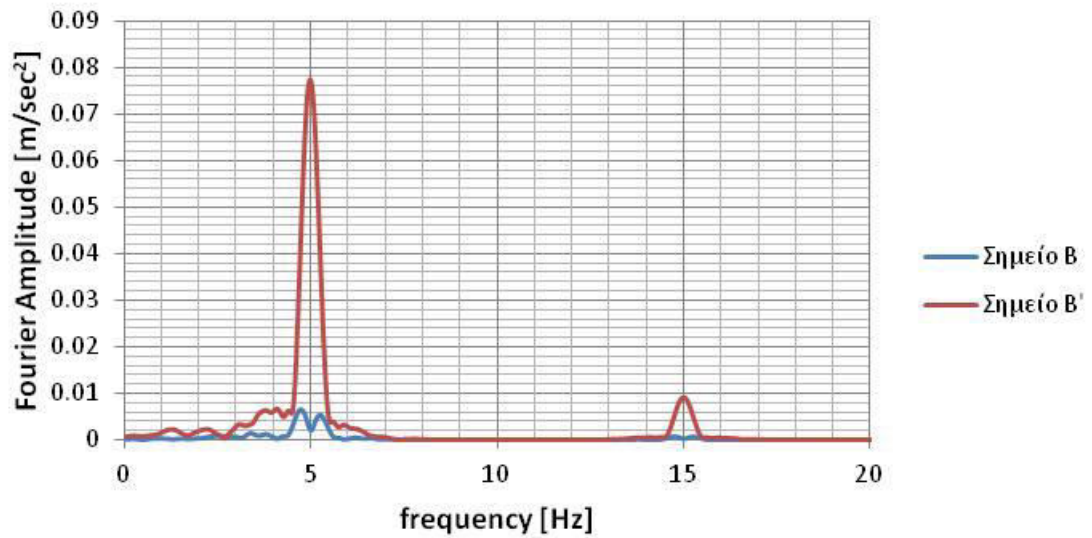
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.2: Διέγερση HANNING-HF5 στο σημείο Κ για χαλαρό έδαφος



Σχήμα 4.220: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.2.



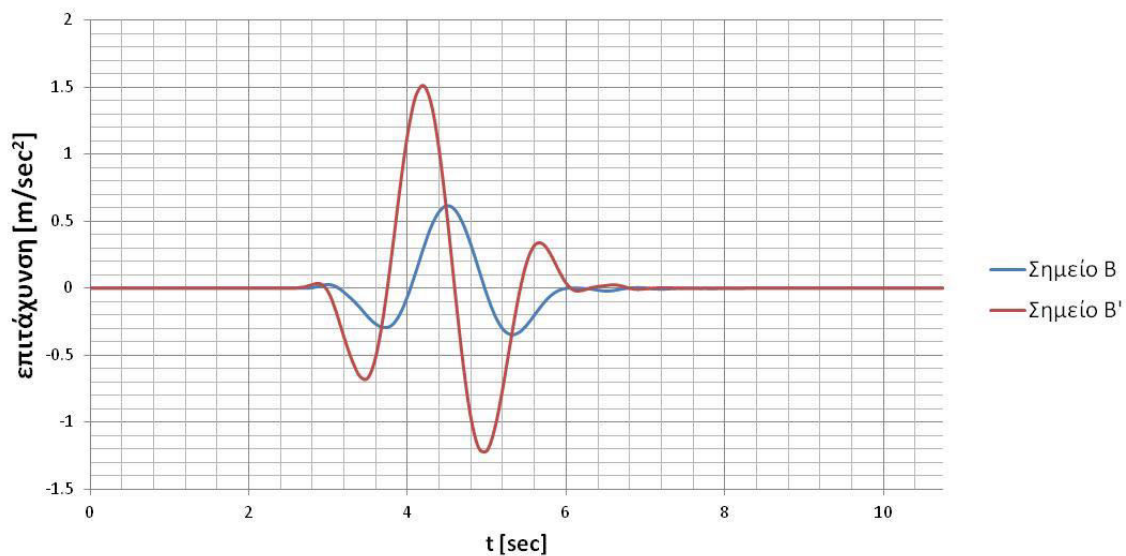
Σχήμα 4.221: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.2.



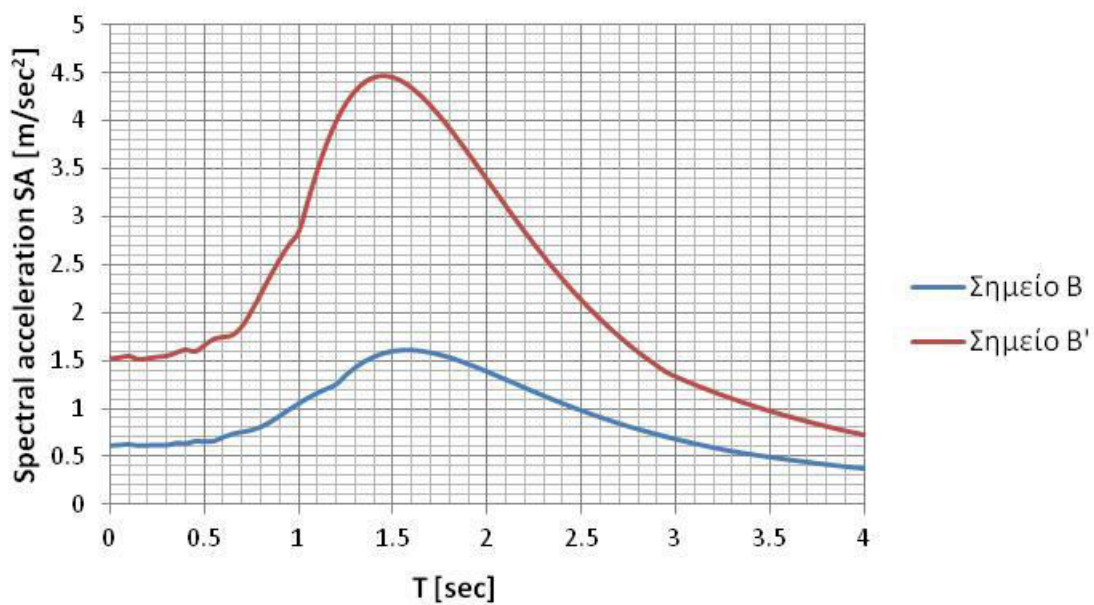
Σχήμα 4.222: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.2.



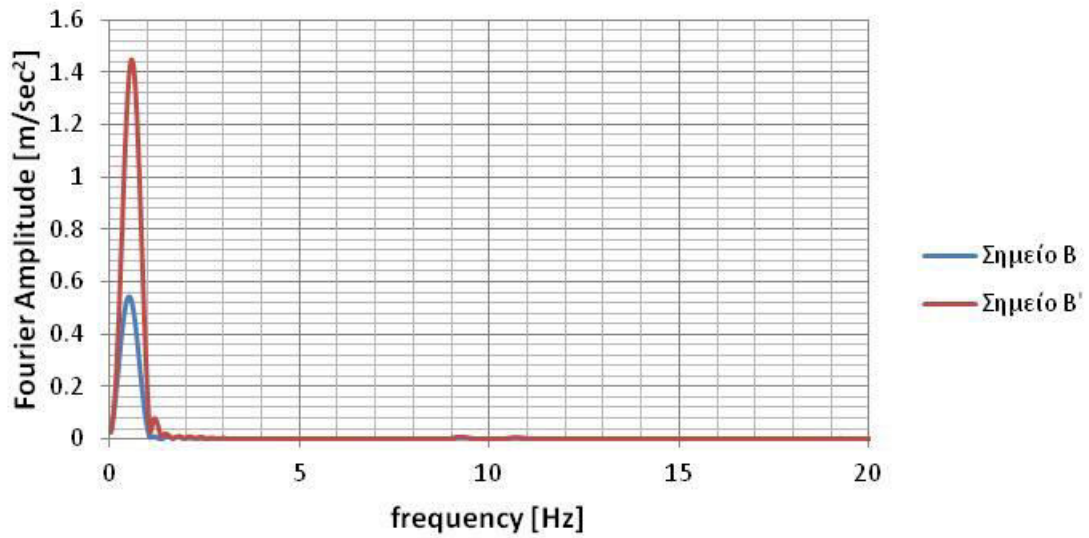
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.3: Διέγερση TH-Parkfield σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος



Σχήμα 4.223: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 2.3.

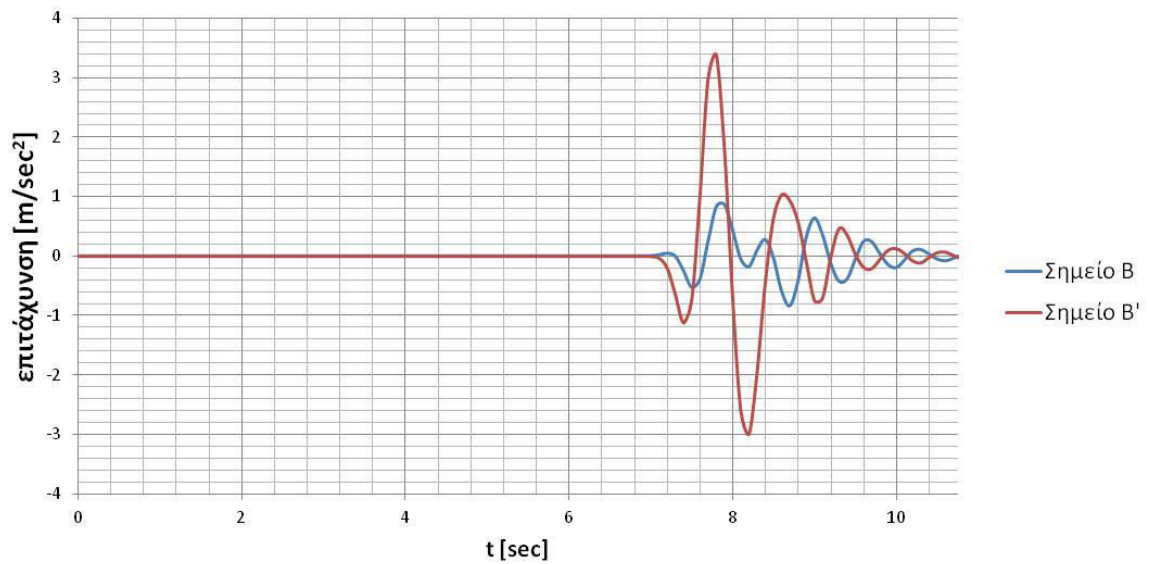


Σχήμα 4.224: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων B και B' για Σενάριο Νο 2.3.

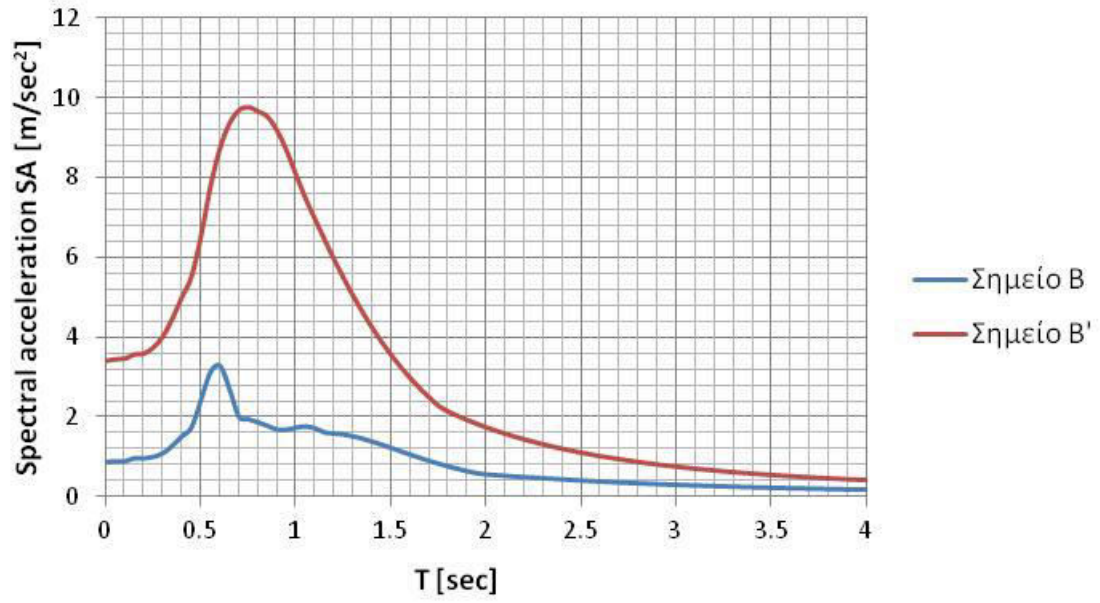


Σχήμα 4.225: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.3.

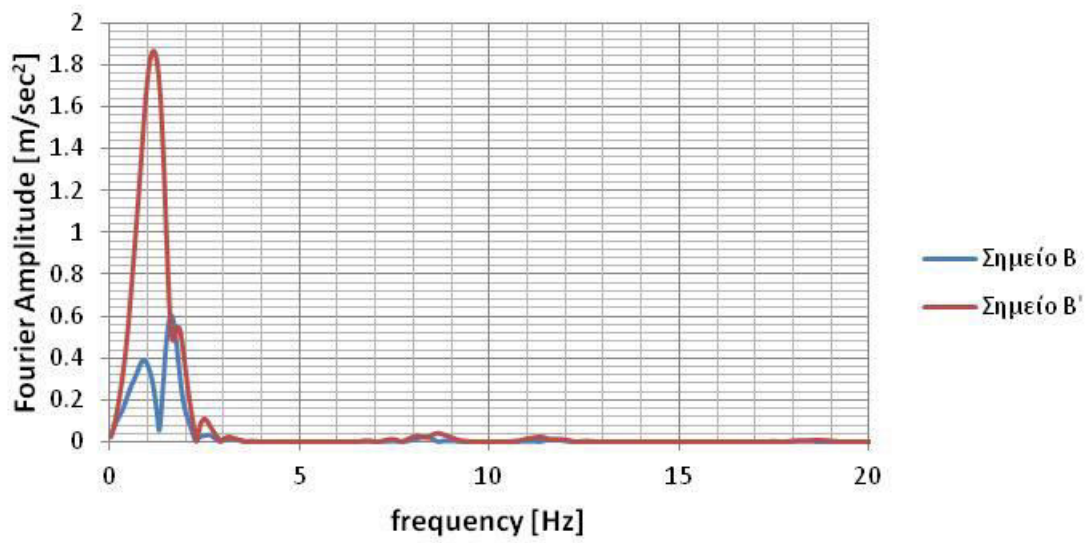
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.4: Διέγερση TH-Kobe σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος



Σχήμα 4.226: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.4.

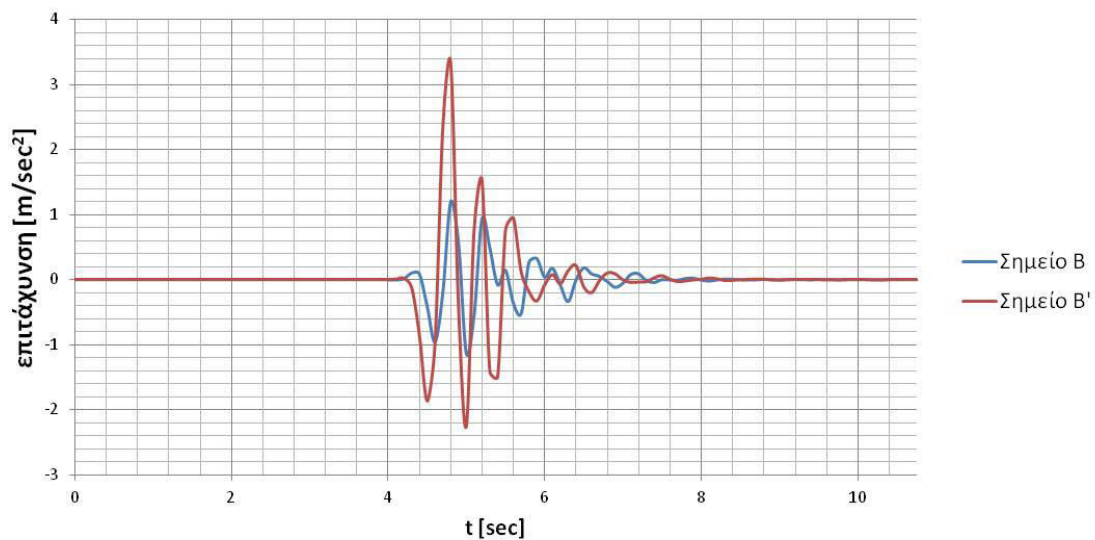


Σχήμα 4.227: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.4.

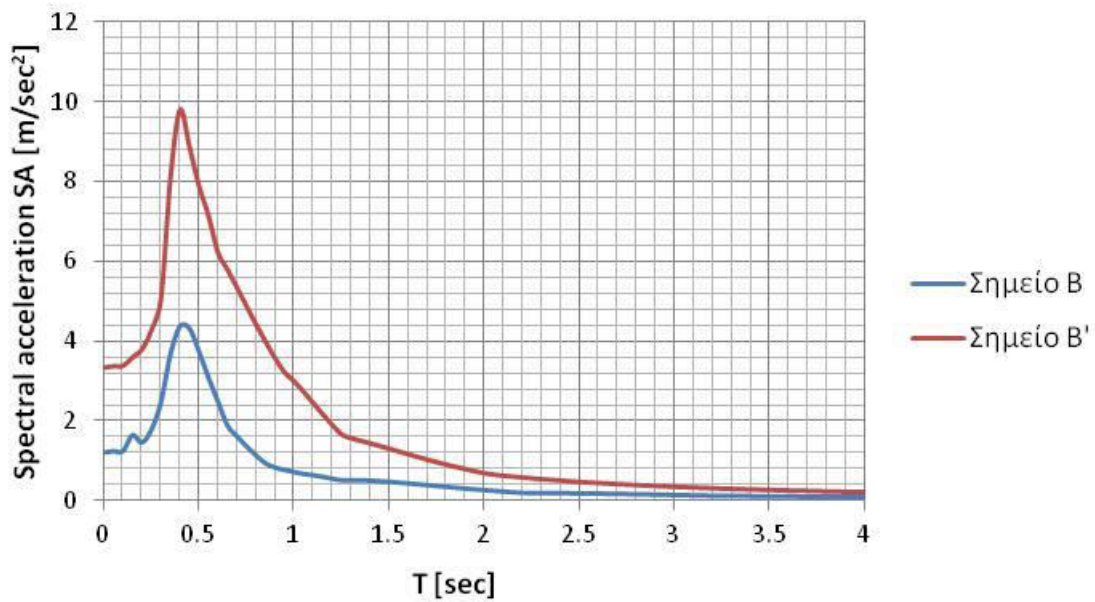


Σχήμα 4.228: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.4.

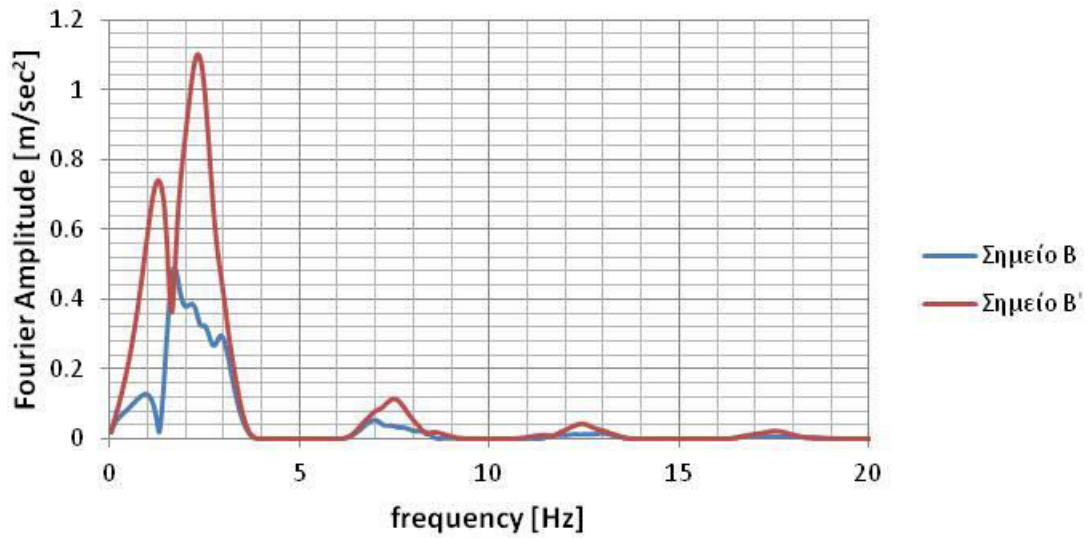
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.5: Διέγερση TH-Aegion σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος



Σχήμα 4.229: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο No 2.5.

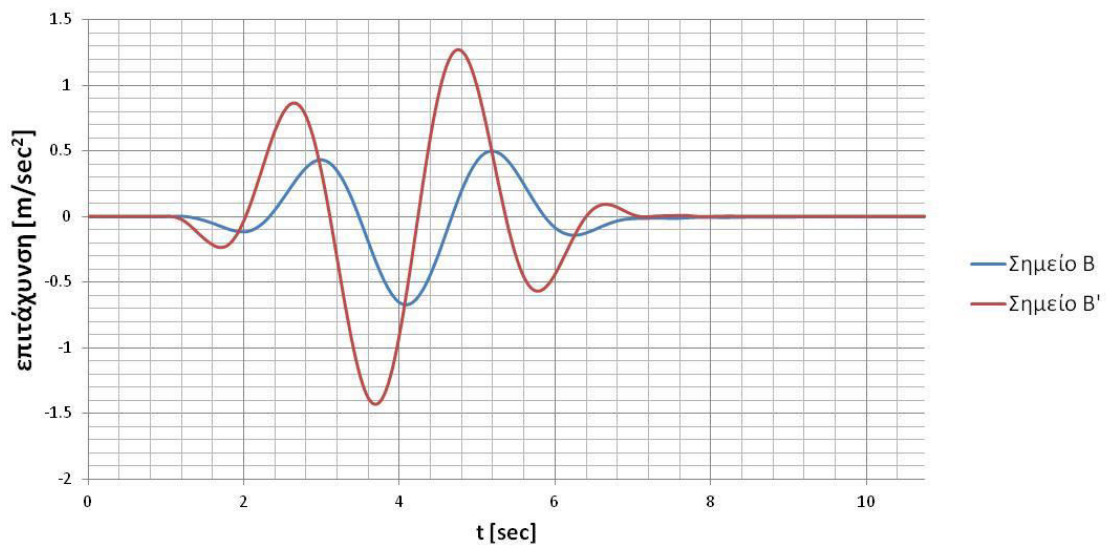


Σχήμα 4.230: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων B και B' για Σενάριο No 2.5.

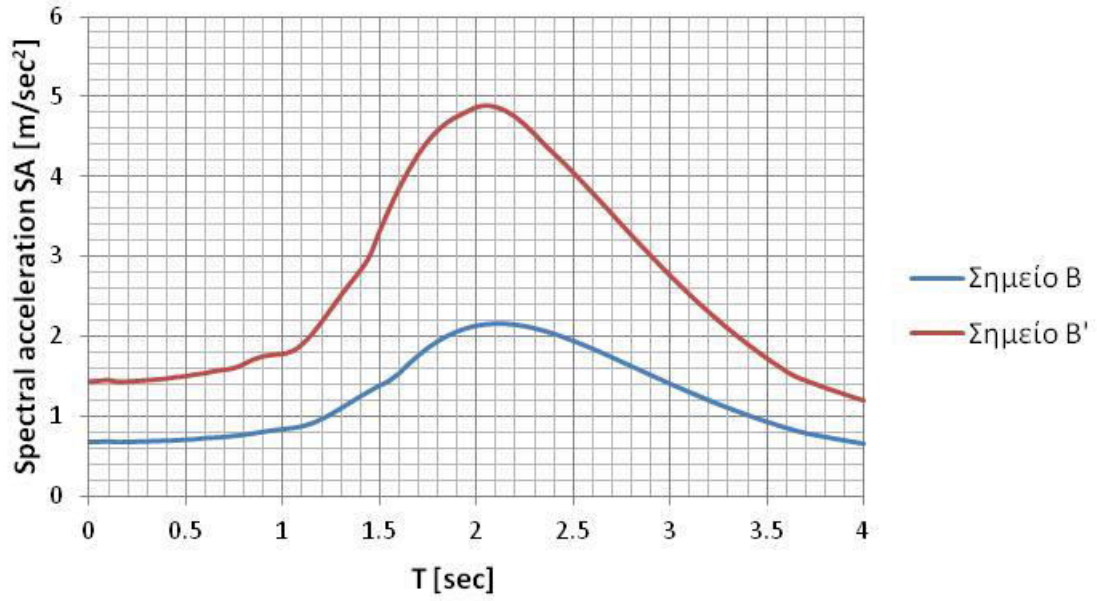


Σχήμα 4.231: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο No 2.5.

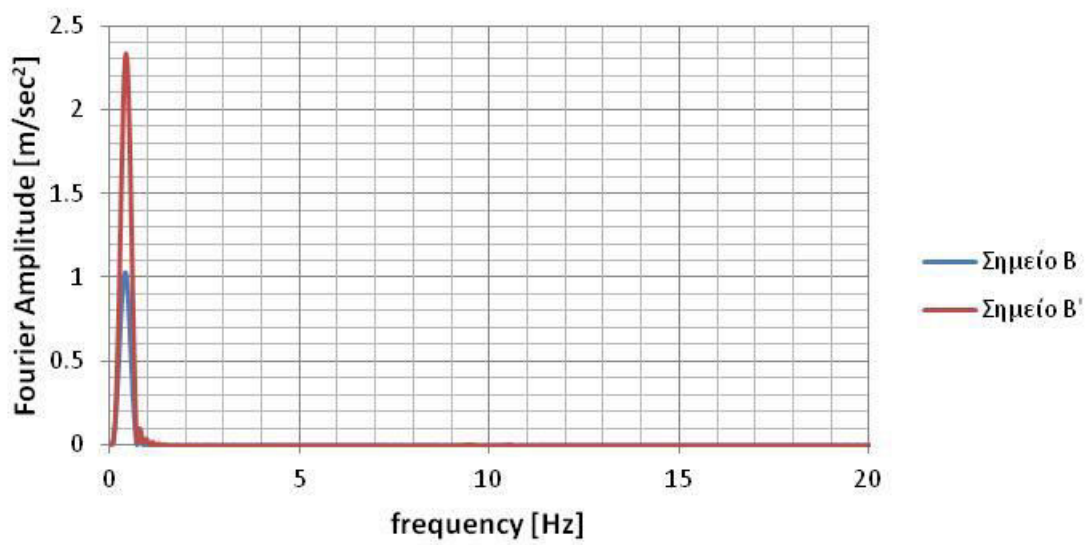
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.6: Διέγερση TH-Erzincan σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος



Σχήμα 4.232: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Β και Β' για Σενάριο No 2.6.

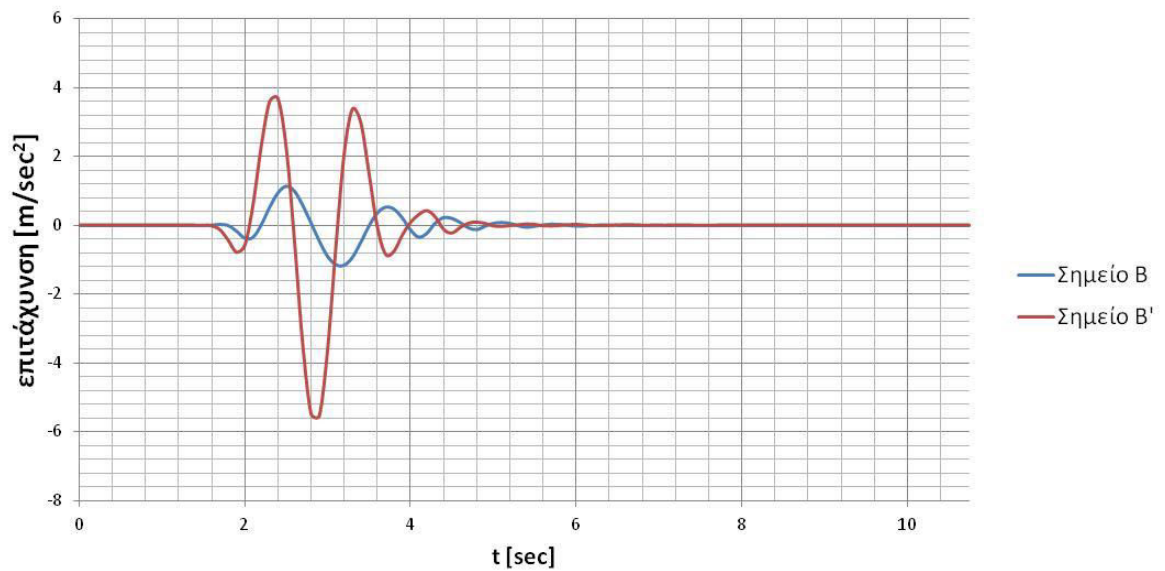


Σχήμα 4.233: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.6.

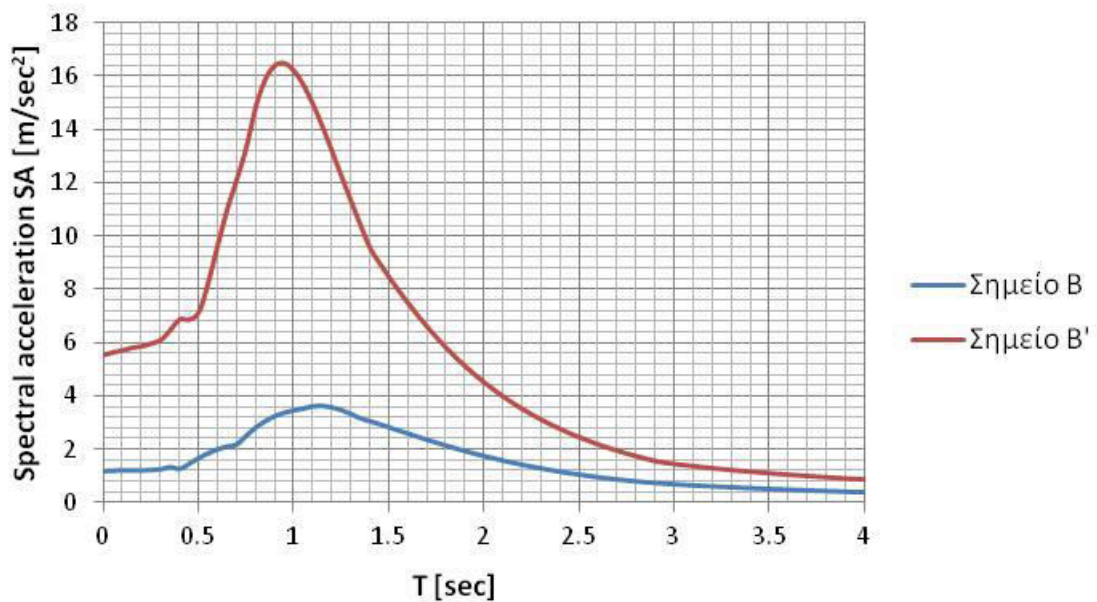


Σχήμα 4.234: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.6.

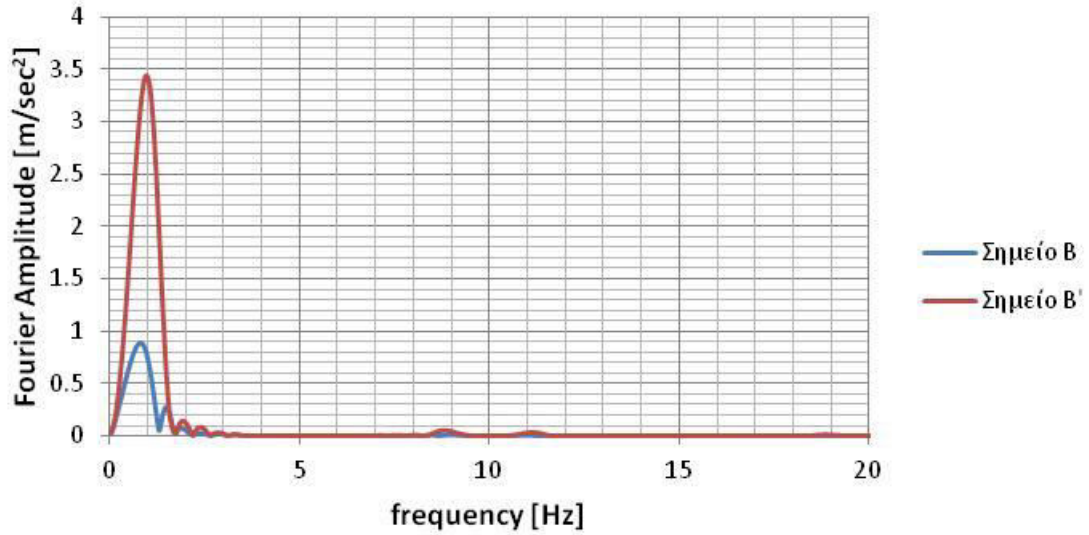
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.7: Διέγερση TH-Northridge σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για χαλαρό έδαφος



Σχήμα 4.235: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο No 2.7.

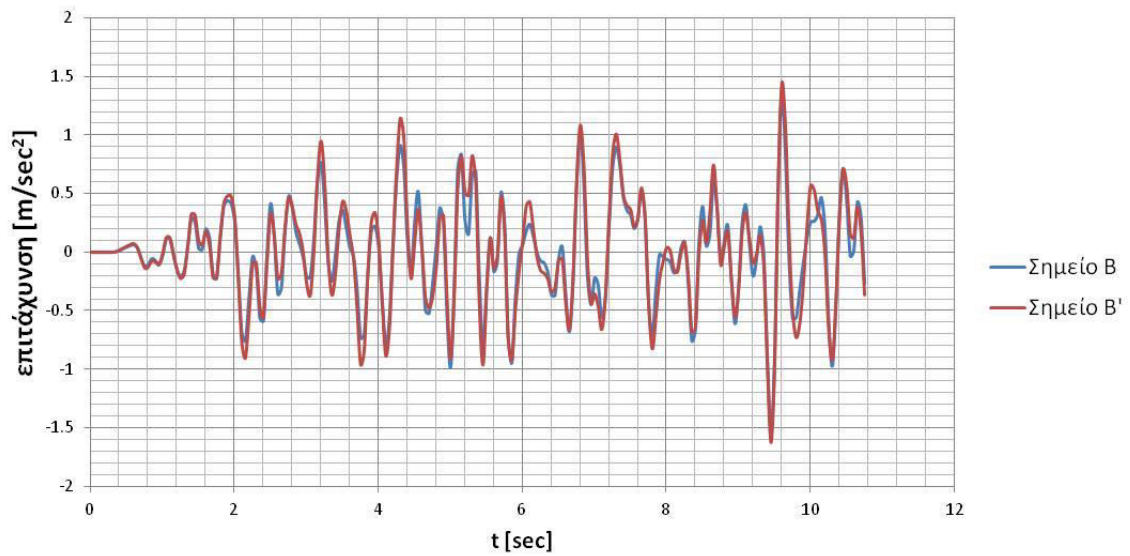


Σχήμα 4.236: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων B και B' για Σενάριο No 2.7.



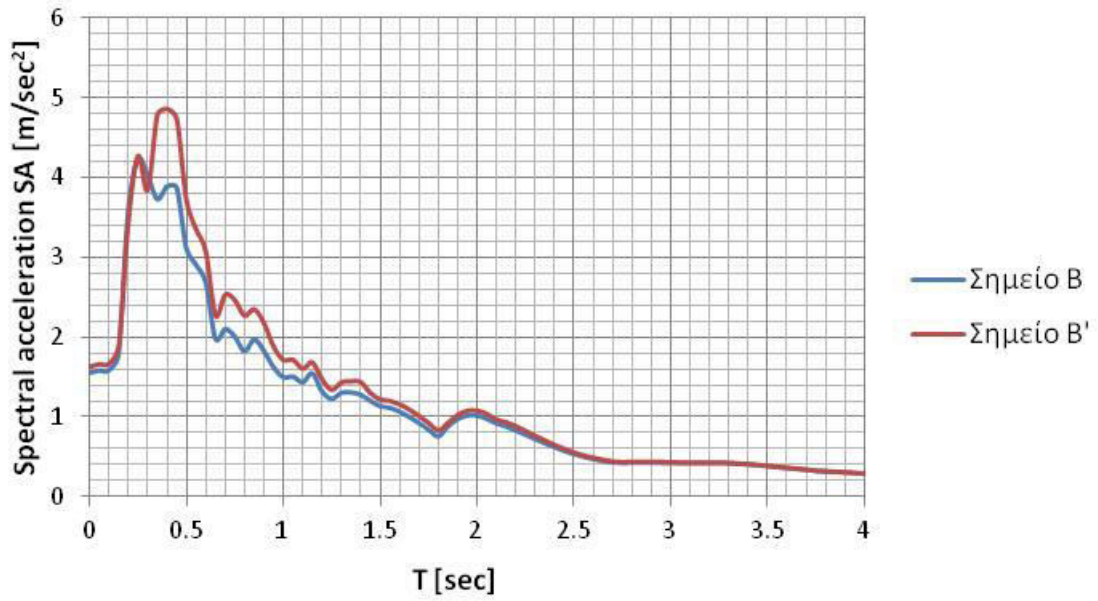
Σχήμα 4.237: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.7.

Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.8: Διέγερση ΤΗ-ΕC8 σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος

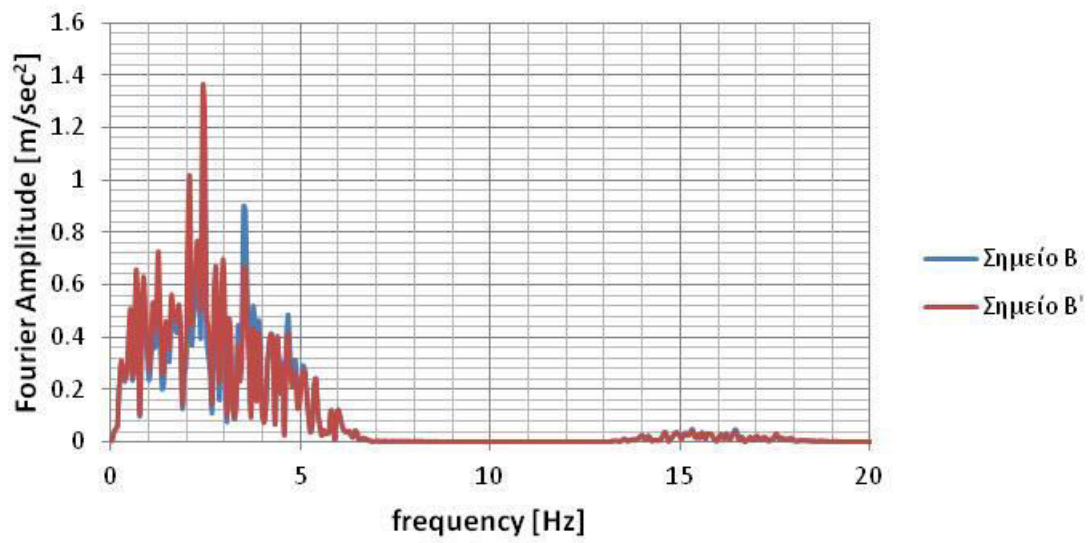


Σχήμα 4.238: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.8.



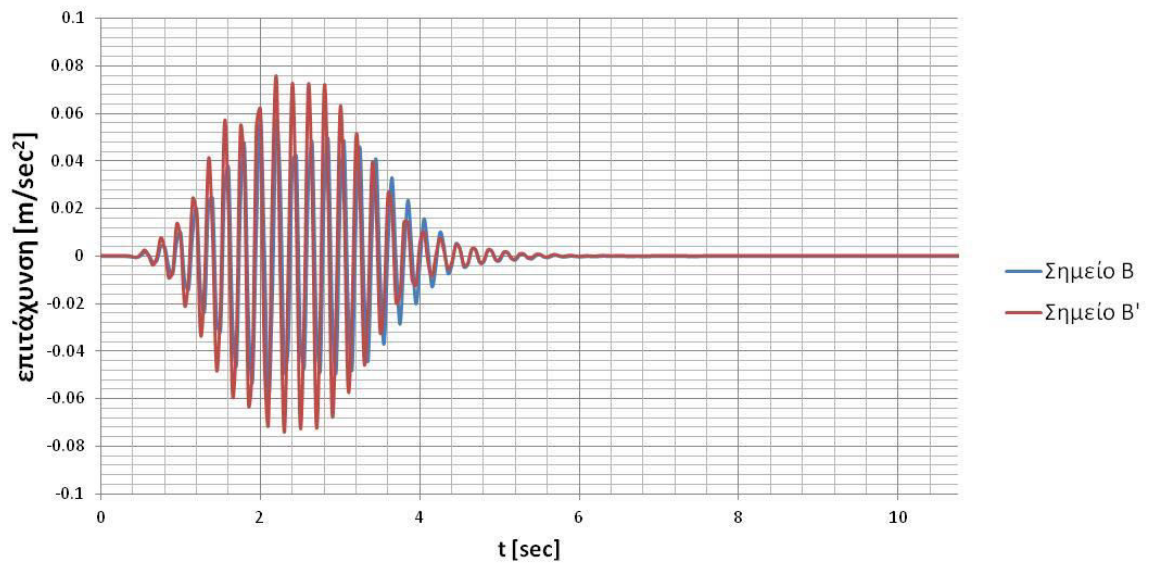


Σχήμα 4.239: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.8.

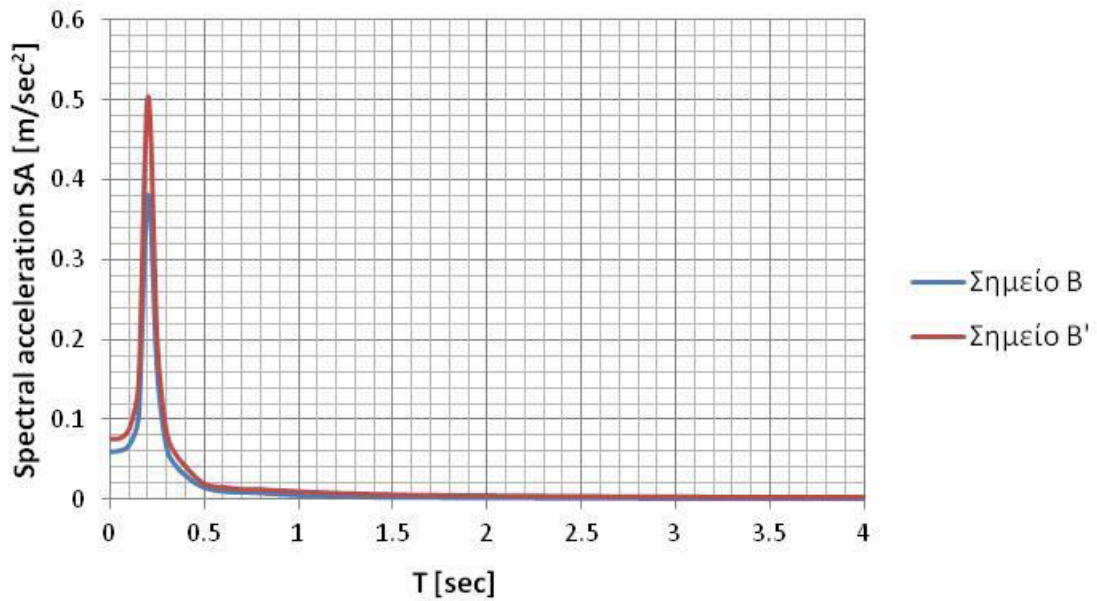


Σχήμα 4.240: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.8.

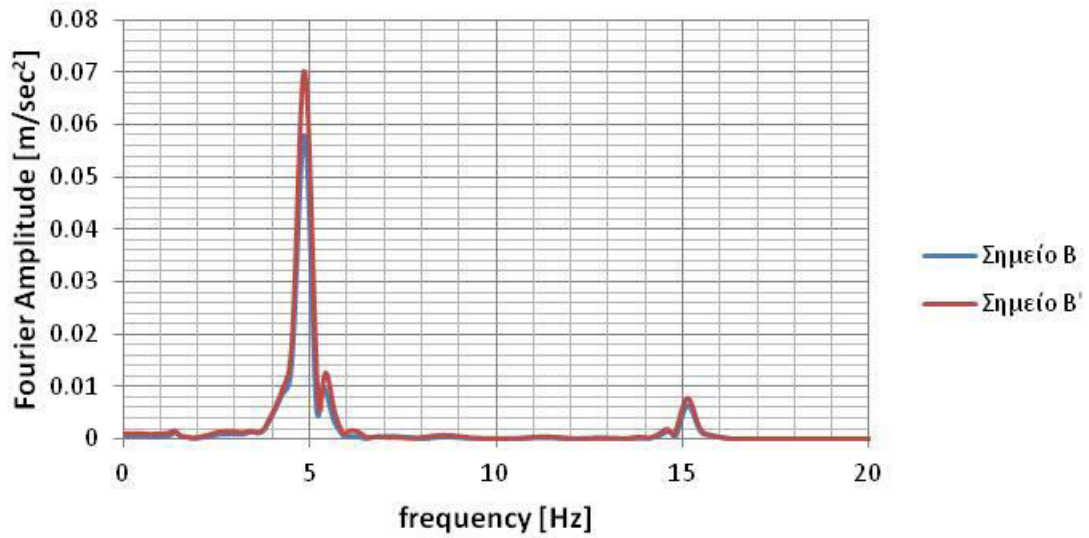
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.9: Διέγερση HANNING-H5 στο σημείο Κ για σκληρό έδαφος



Σχήμα 4.241: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 2.9.

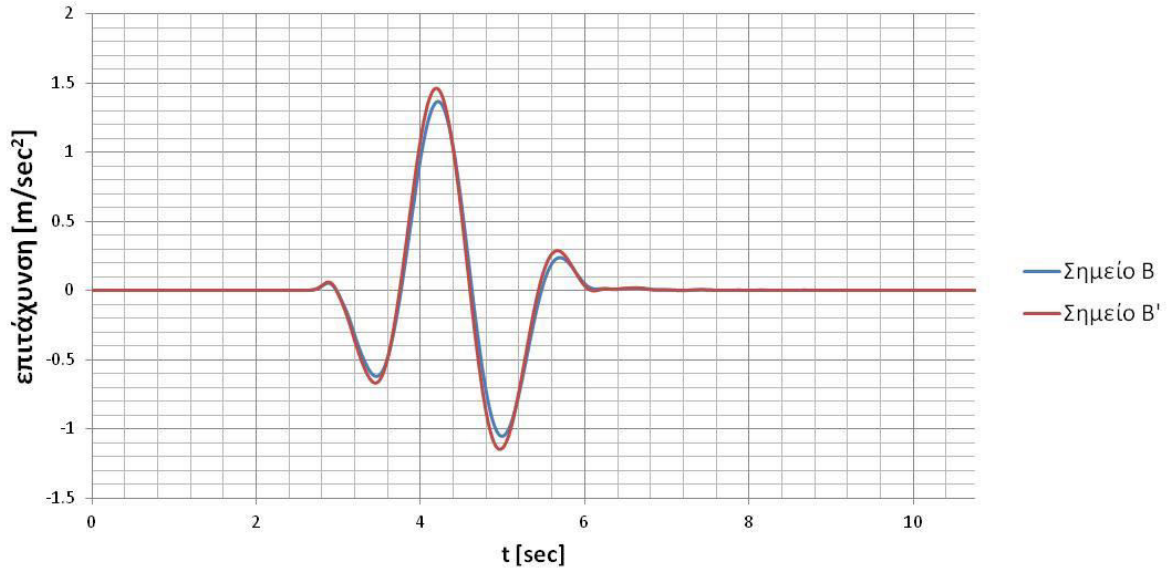


Σχήμα 4.242: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων B και B' για Σενάριο Νο 2.9.

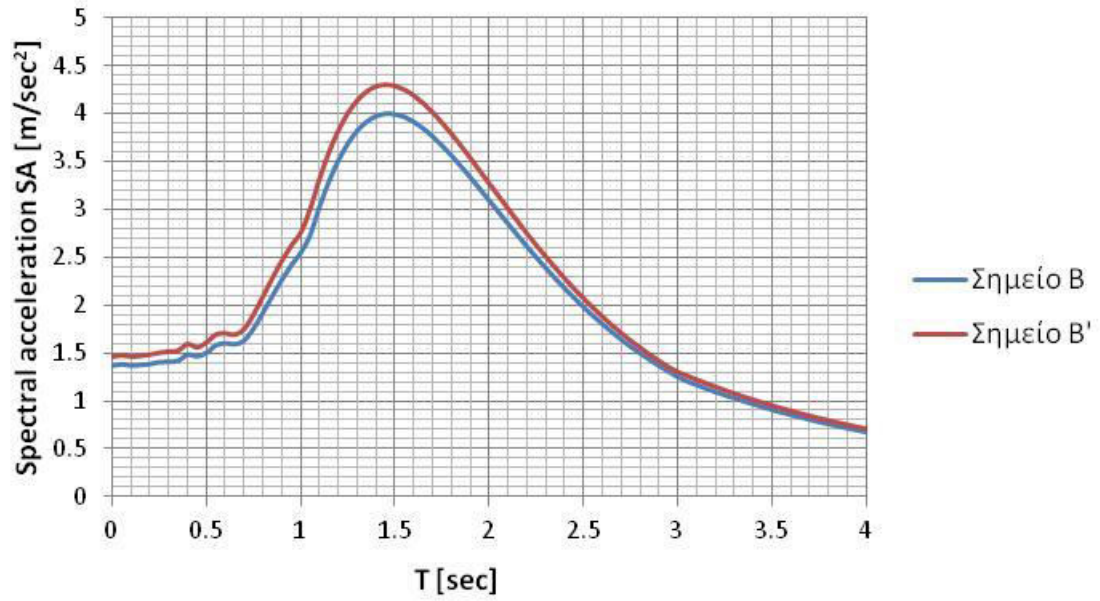


**Σχήμα 4.243:** Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.9.

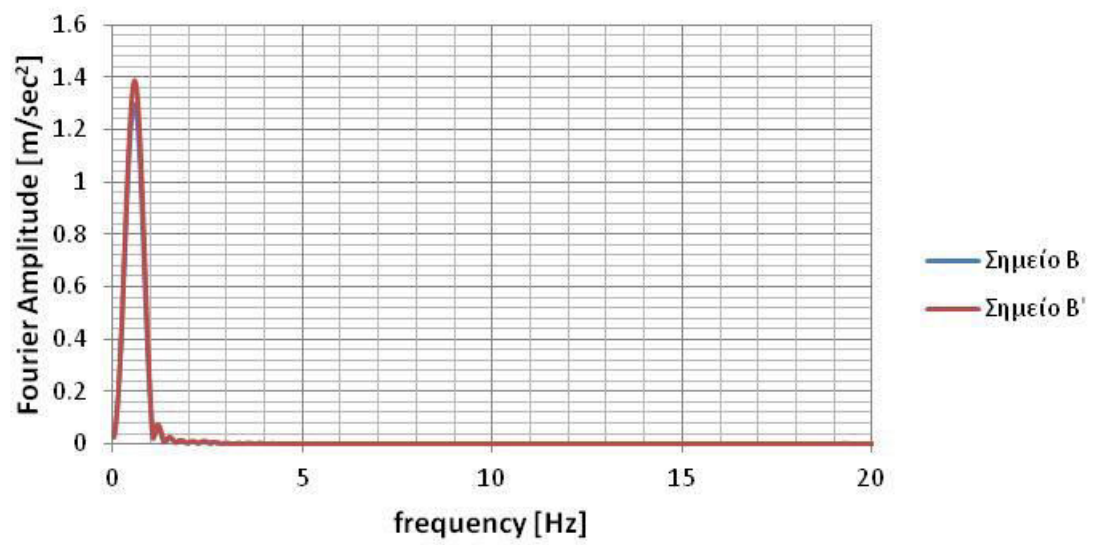
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.10: Διέγερση TH-Parkfield σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος



**Σχήμα 4.244:** Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.10.

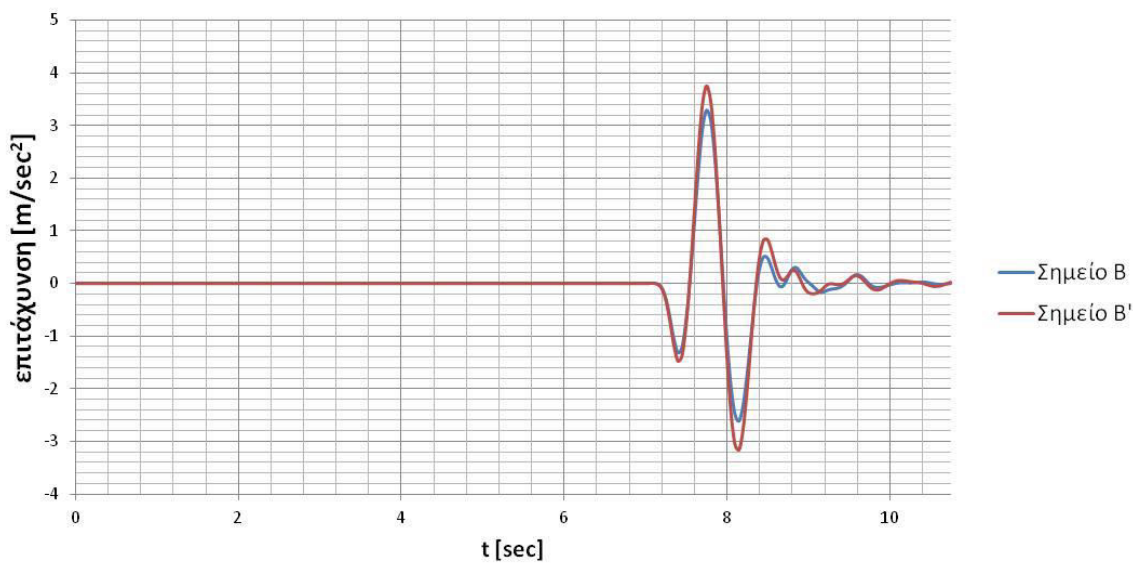


Σχήμα 4.245: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.10.

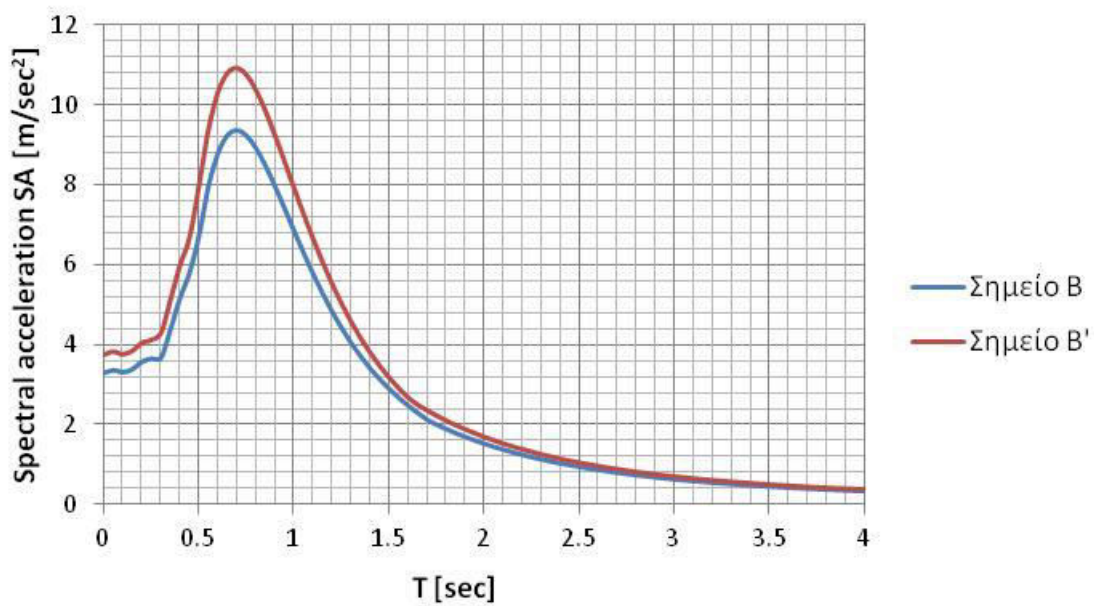


Σχήμα 4.246: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.10.

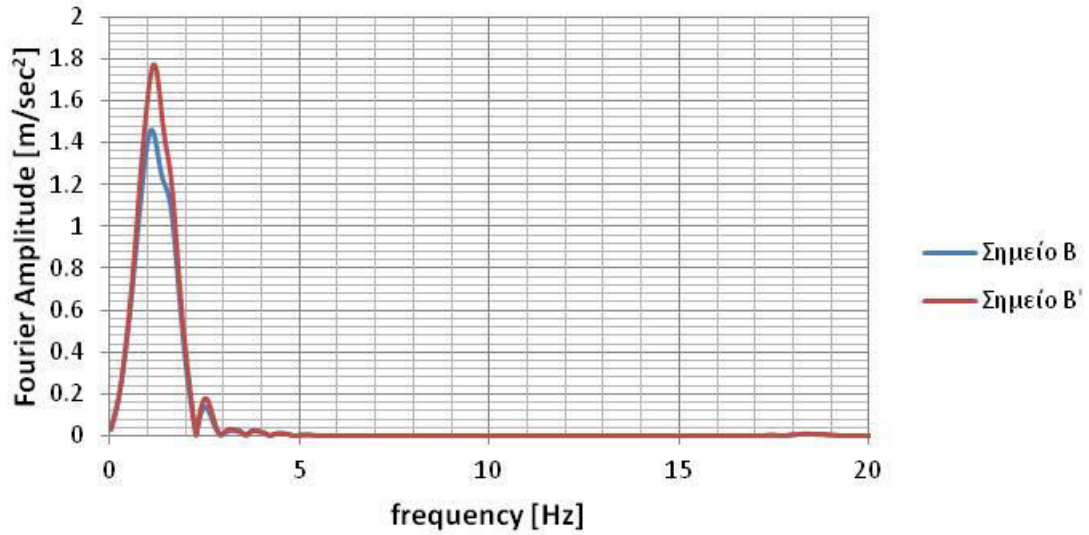
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.11: Διέγερση TH-Kobe σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος



Σχήμα 4.247: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 2.11.

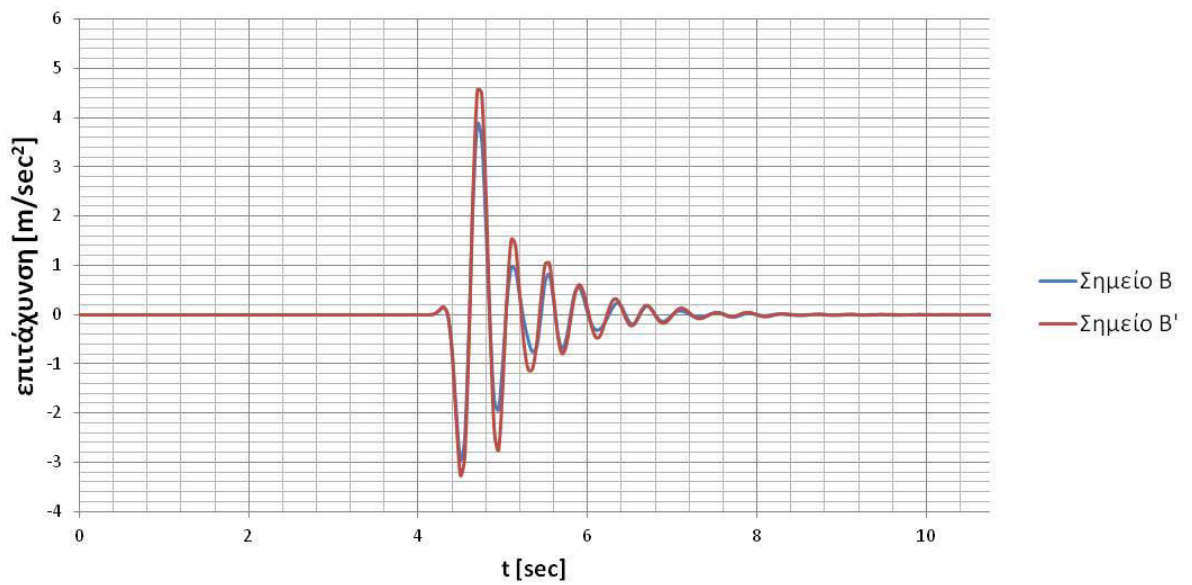


Σχήμα 4.248: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων B και B' για Σενάριο Νο 2.11.

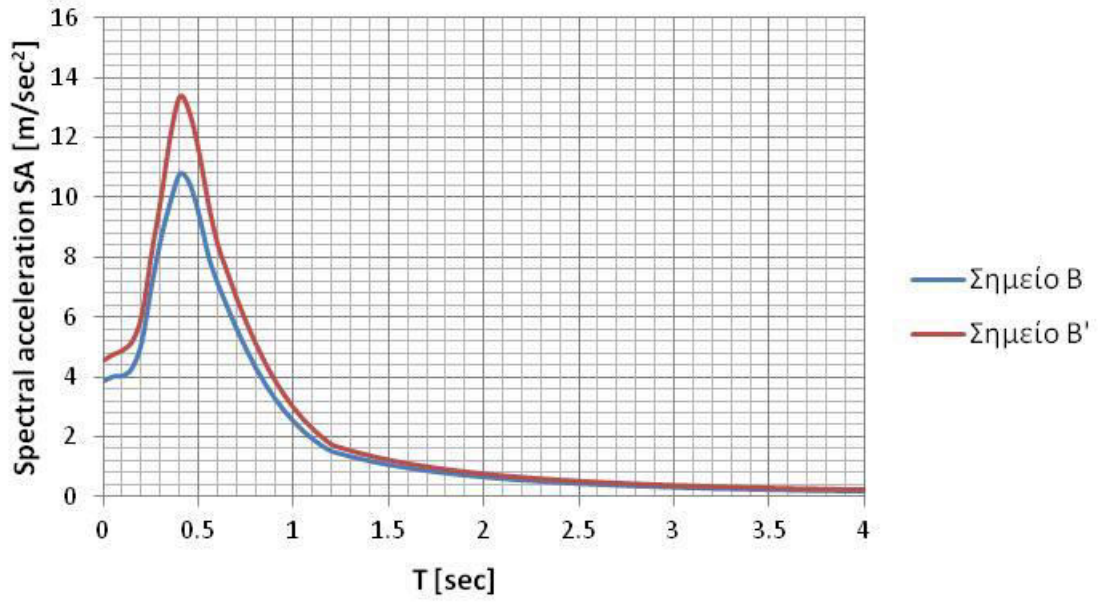


Σχήμα 4.249: Φάσματα Fourier σημείων B και B' για Σενάριο Νο 2.11.

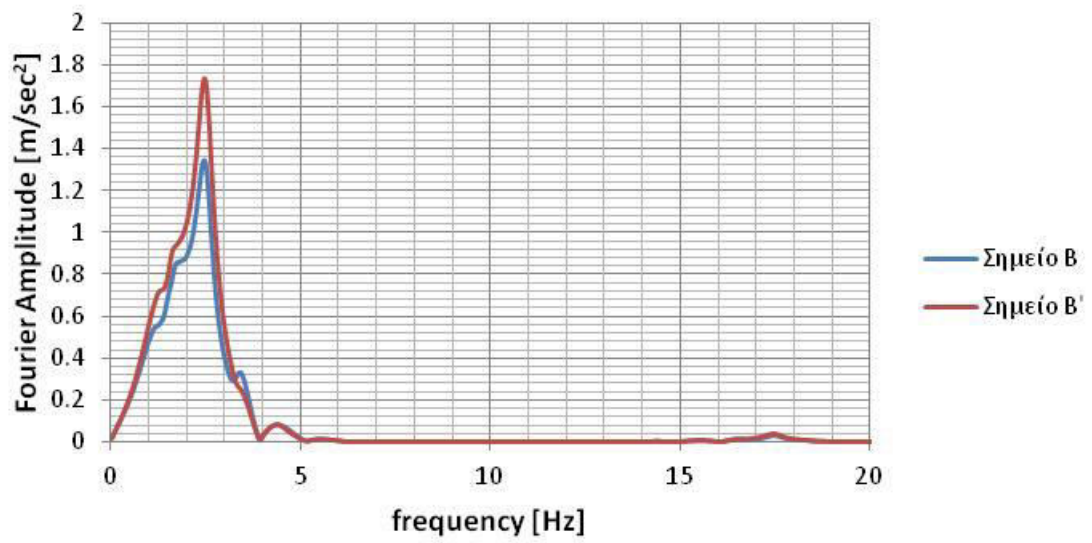
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.12: Διέγερση TH-Aegion σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος



Σχήμα 4.250: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 2.12.

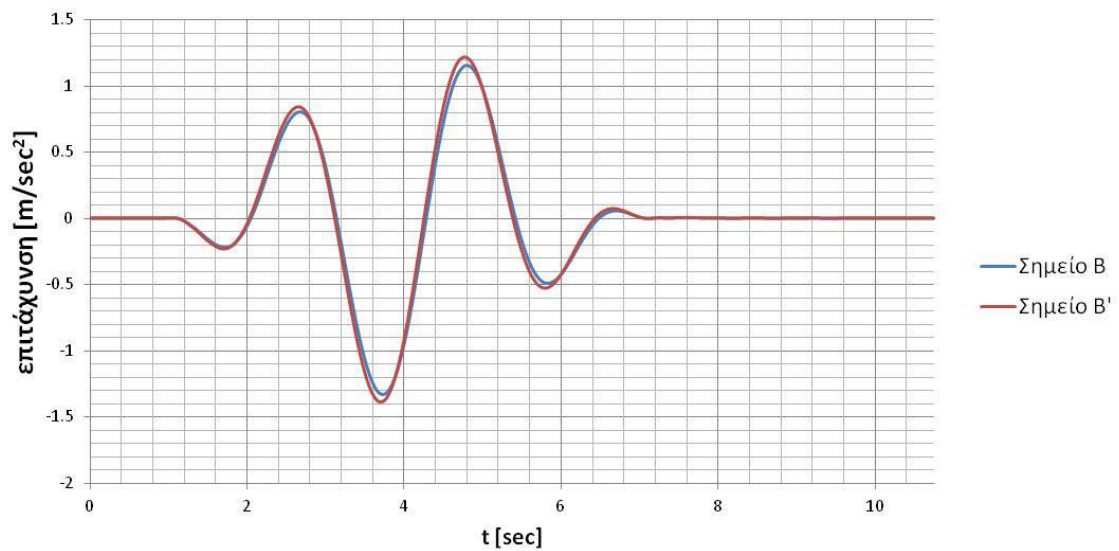


Σχήμα 4.251: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.12.

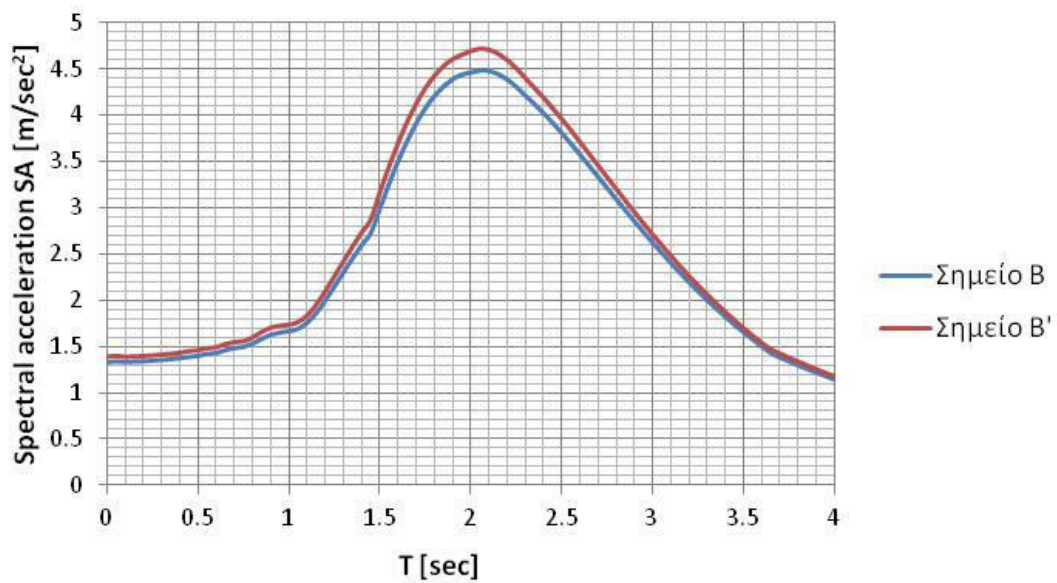


Σχήμα 4.252: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.12.

Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.13: Διέγερση TH-Erzincan σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος

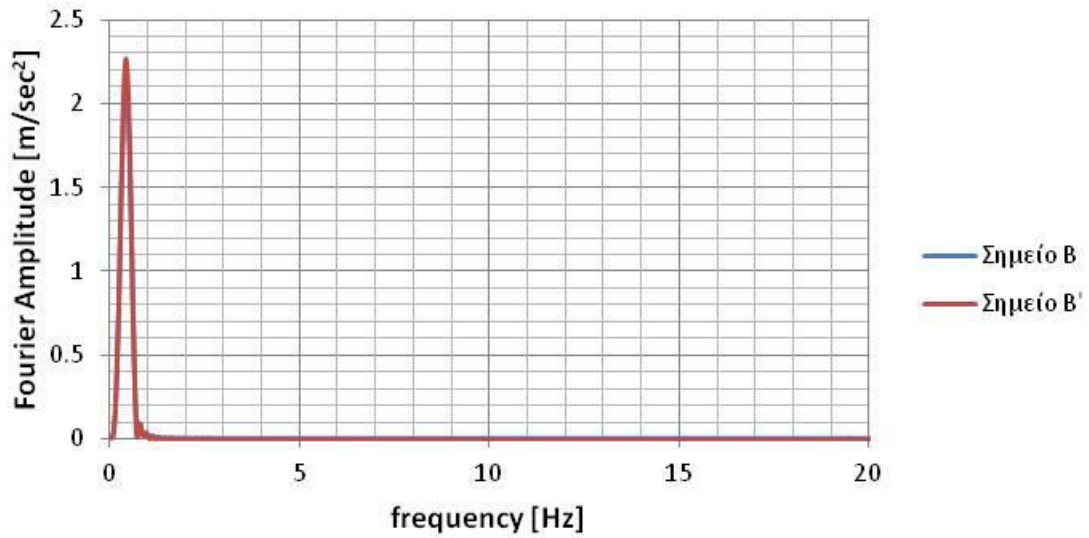


Σχήμα 4.253: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 2.13.



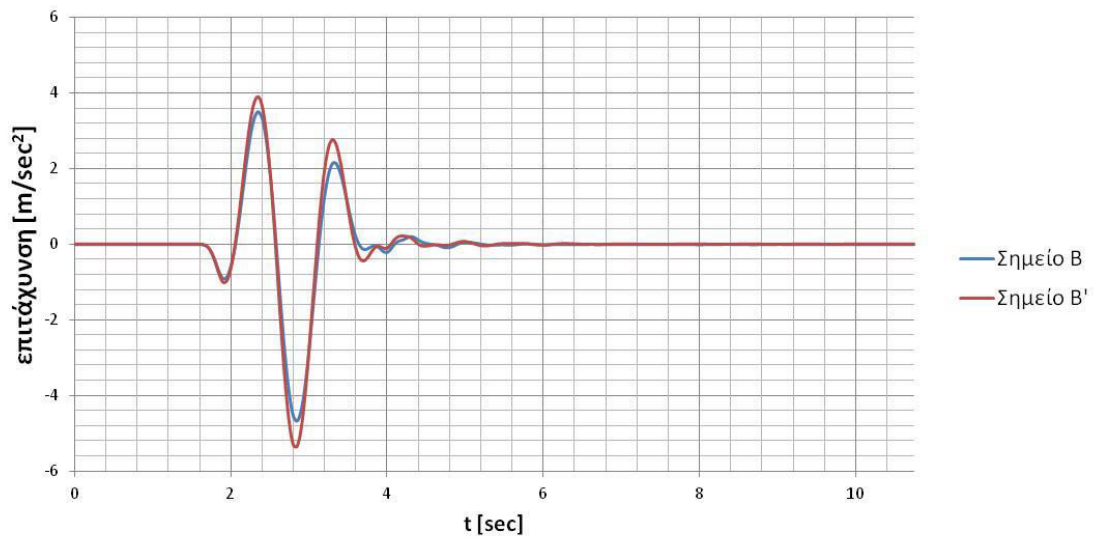
Σχήμα 4.254: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων B και B' για Σενάριο Νο 2.13.



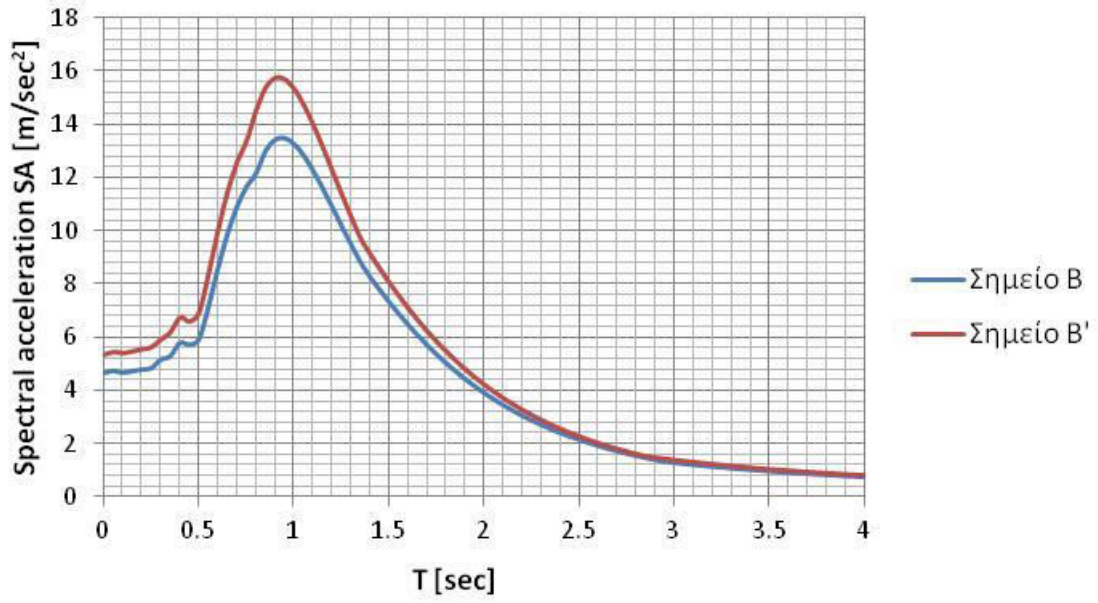


Σχήμα 4.255: Φάσματα Fourier σημείων B και B' για Σενάριο Νο 2.13.

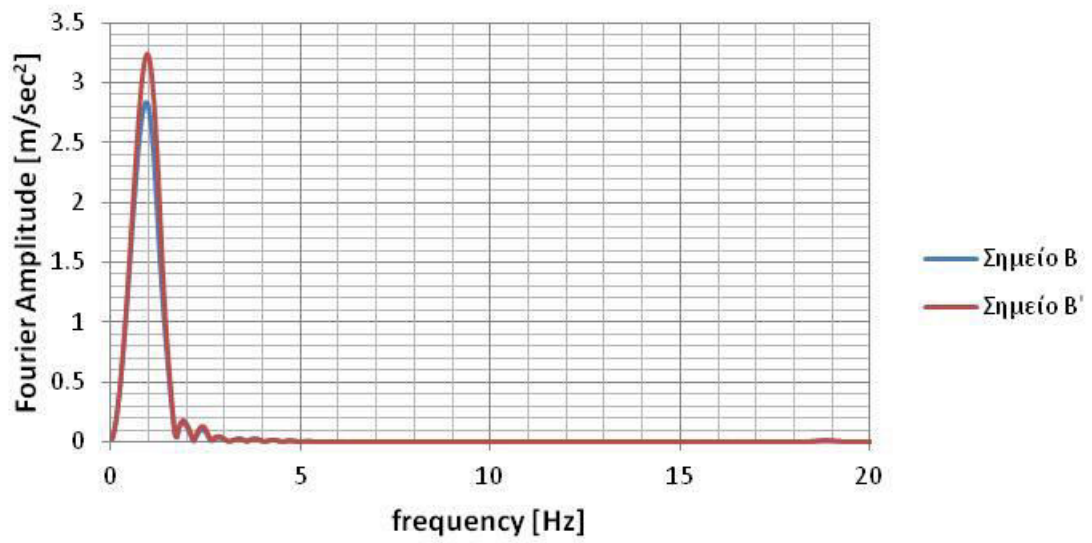
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 2.14: Διέγερση TH-Northridge σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για σκληρό έδαφος



Σχήμα 4.256: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 2.14.

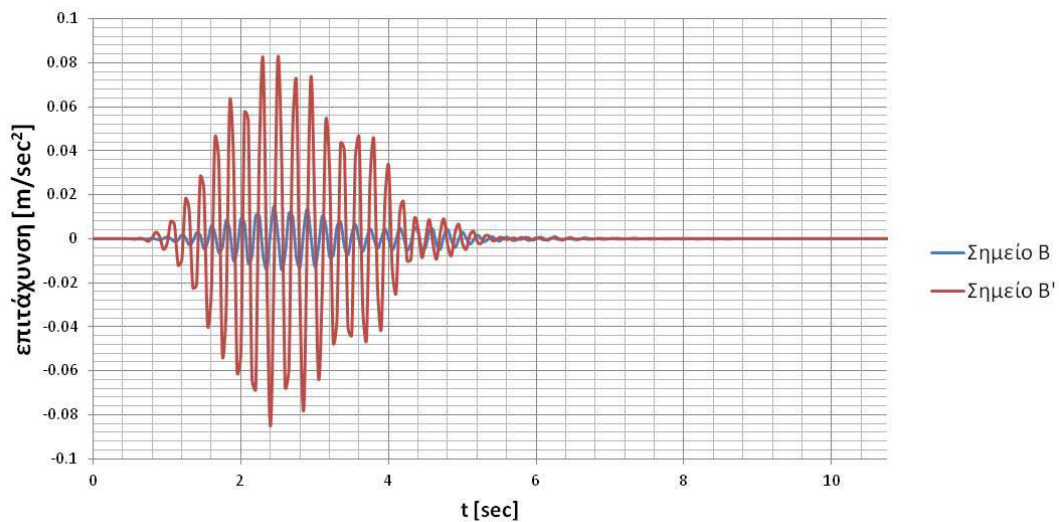


Σχήμα 4.257: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.14.

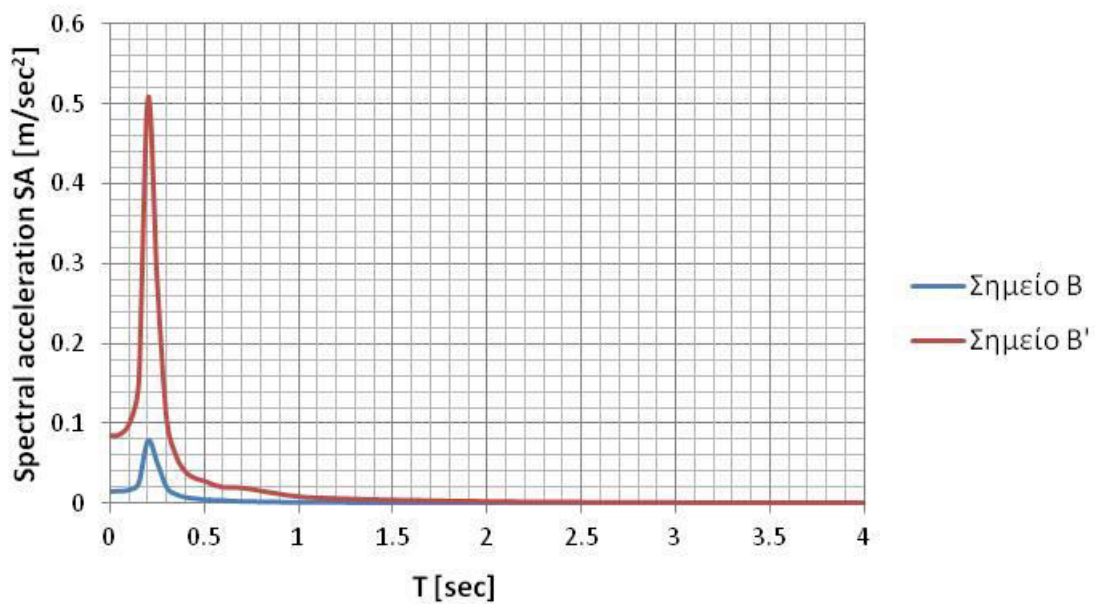


Σχήμα 4.258: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 2.14.

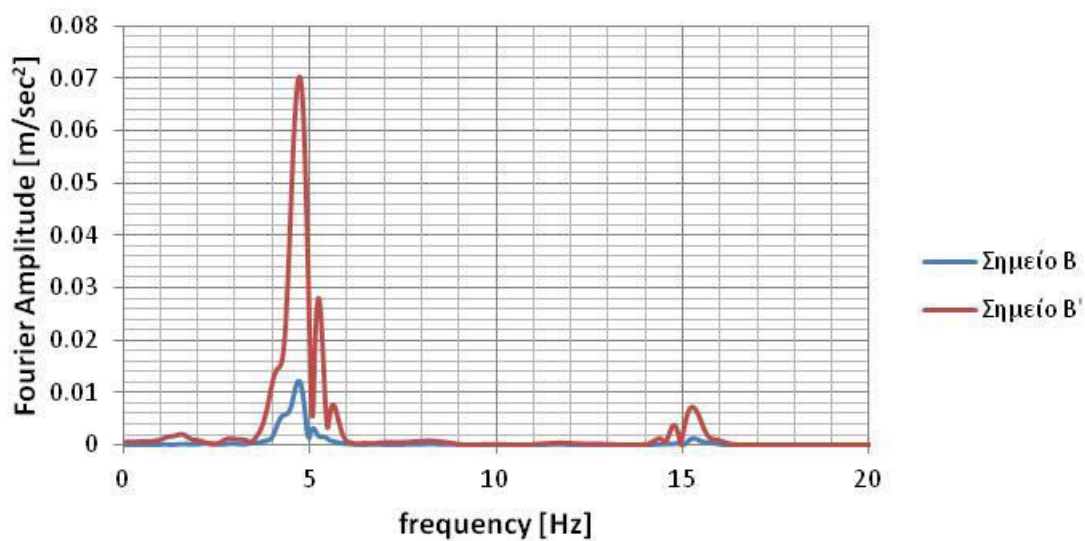
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 3.1: Διέγερση HANNING-HF5 στο σημείο Κ για το έδαφος της γεωτεχνικής έρευνας



Σχήμα 4.259: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 3.1

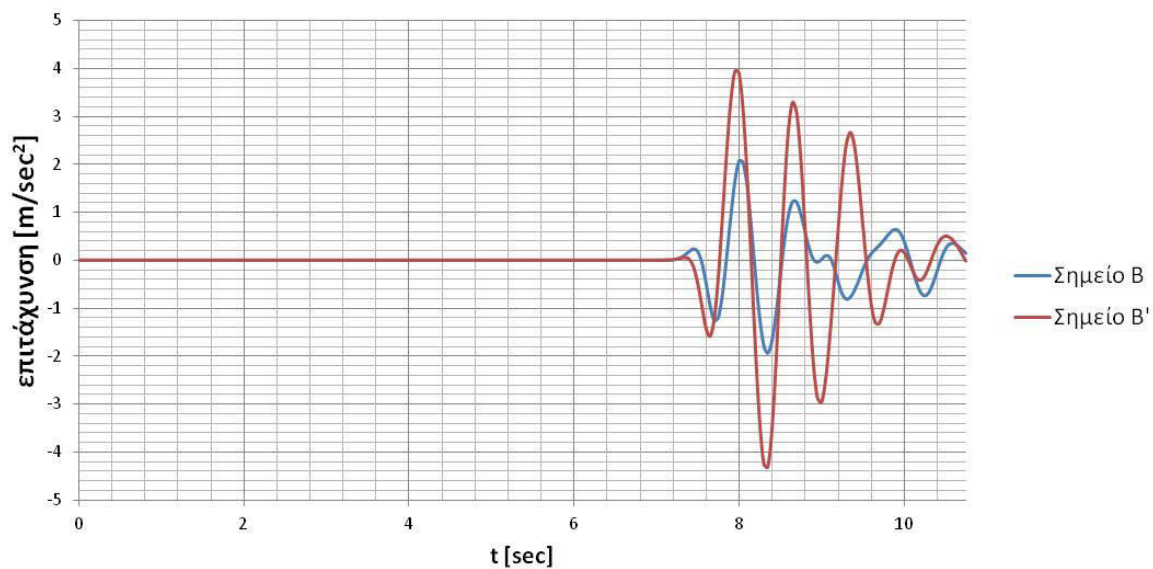


Σχήμα 4.260: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων B και B' για Σενάριο Νο 3.1

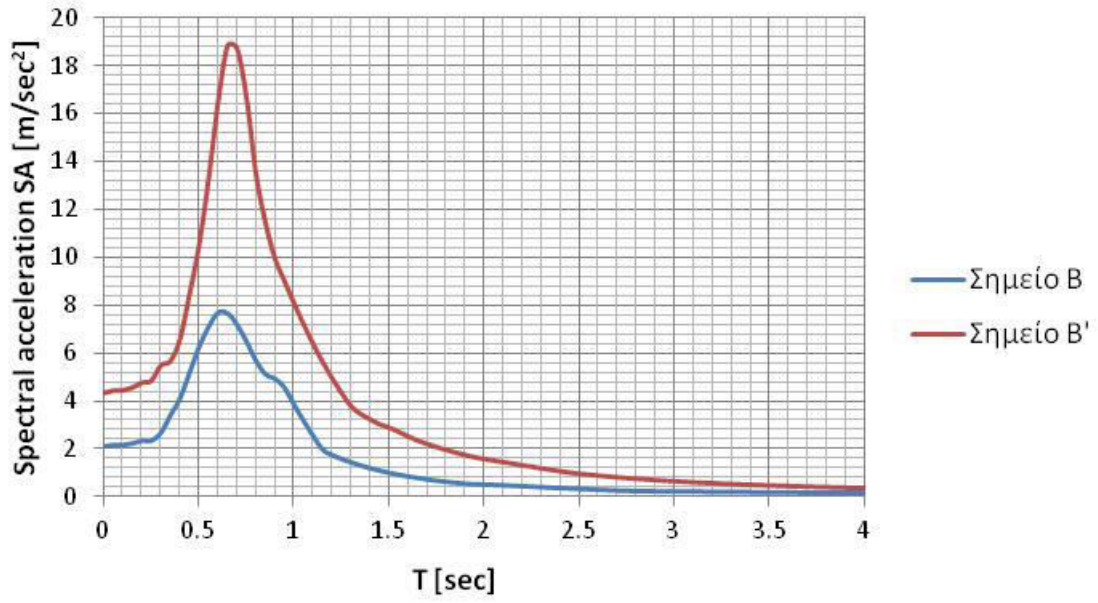


Σχήμα 4.261: Φάσματα Fourier σημείων B και B' για Σενάριο Νο 3.1

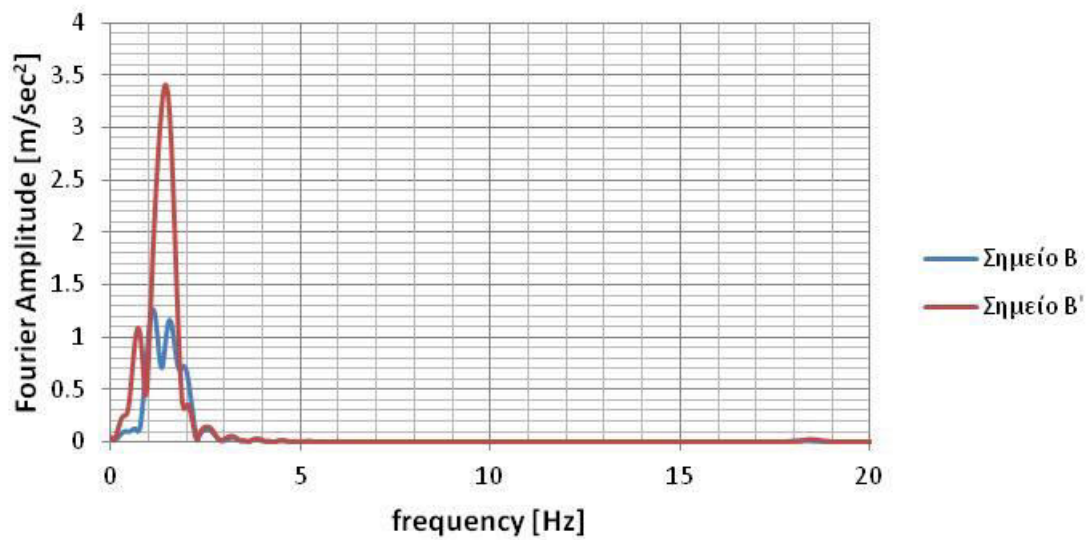
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 3.2: Διέγερση TH-Kobe σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για το έδαφος της γεωτεχνικής έρευνας



Σχήμα 4.262: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 3.2

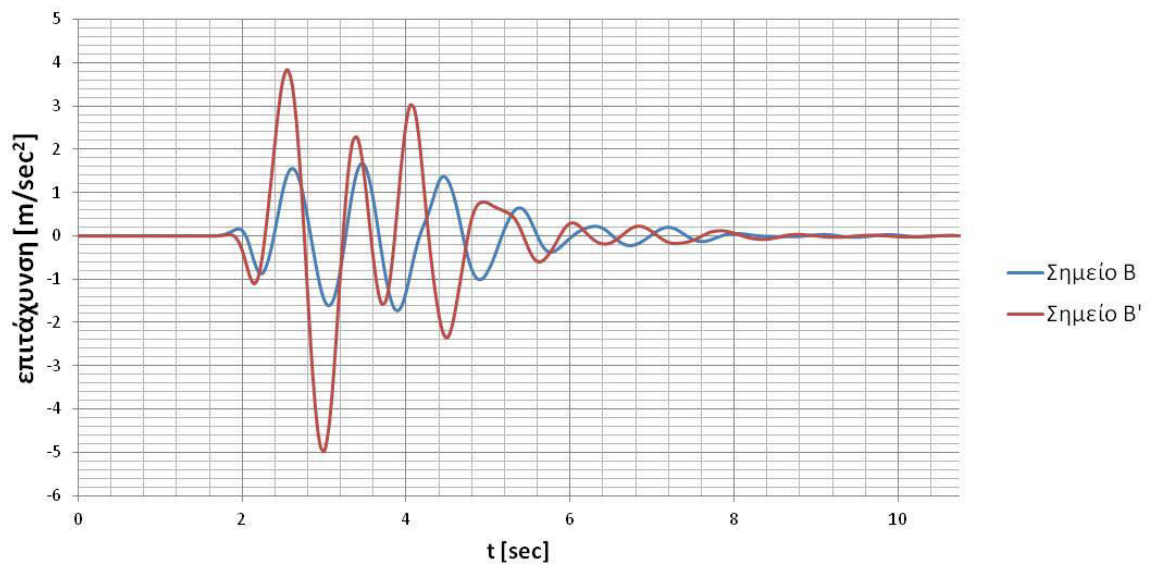


Σχήμα 4.263: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων B και B' για Σενάριο Νο 3.2

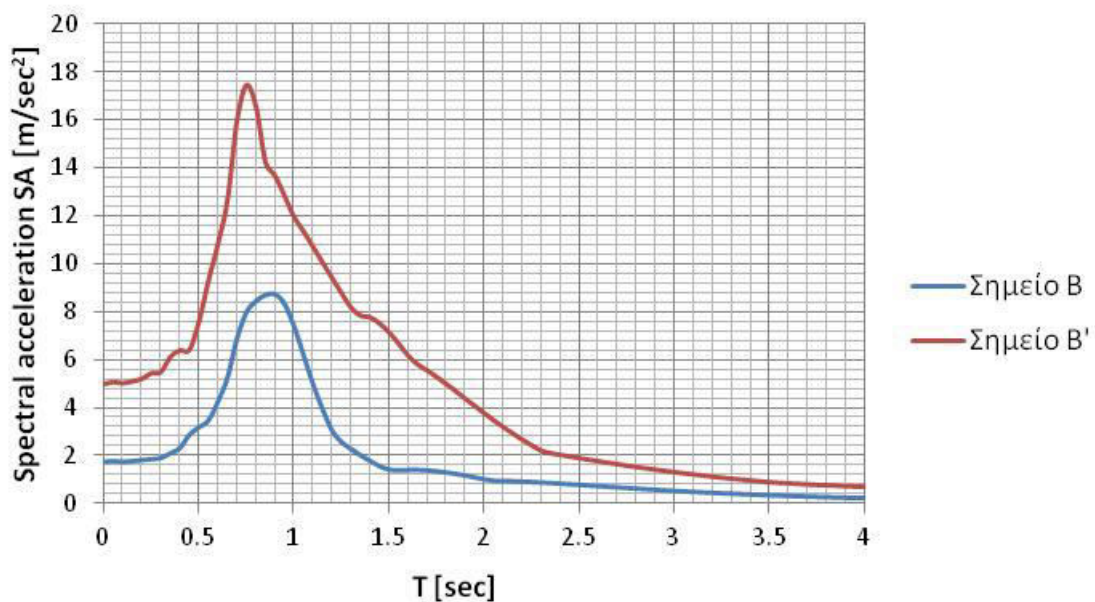


Σχήμα 4.264: Φάσματα Fourier σημείων B και B' για Σενάριο Νο 3.2

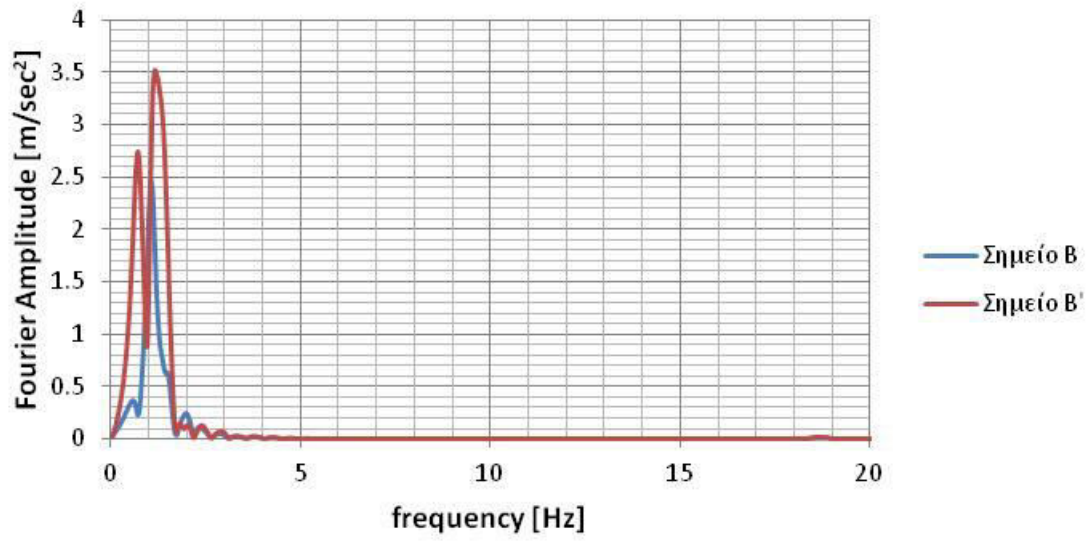
Αποτελέσματα για ΣΕΝΑΡΙΟ 3.3: Διέγερση TH-Northridge σε όλη την επιφάνεια του βραχώδους υποβάθρου για το έδαφος της γεωτεχνικής έρευνας



Σχήμα 4.265: Επιταχυνσιογραφήματα των σημείων B και B' για Σενάριο Νο 3.3



Σχήμα 4.266: Φάσματα επιτάχυνσης σημείων B και B' για Σενάριο Νο 3.3



Σχήμα 4.267: Φάσματα Fourier σημείων Β και Β' για Σενάριο Νο 3.3

## 5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε τρία διαφορετικά είδη εδαφικού προφίλ: (i) σε χαλαρό έδαφος, με βάση τις παραμέτρους του πειράματος πεδίου Brule et. al (2014), (ii) σε σκληρό έδαφος που αντιστοιχεί σε έδαφος κατηγορίας A κατά τον EC8 και (iii) σε έδαφος τριών στρώσεων με βάση τα δεδομένα γεωτεχνικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε. Εξετάστηκε η περίπτωση ελαστικού εδάφους χωρίς απόσβεση και ελαστικού εδάφους με απόσβεση Rayleigh. Στην περίπτωση του ελαστικού εδάφους χωρίς απόσβεση εξετάστηκε η σεισμική απόκριση σε τέσσερα σημεία πίσω από την περιοδική δομή (σημεία A, B, Γ, Δ) και η σεισμική απόκριση στα αντιδιαμετρικά τους, χωρίς την περιοδική δομή (σημεία A', B', Γ', Δ'). Στην περίπτωση του ελαστικού εδάφους με απόσβεση Rayleigh εξετάστηκε, ενδεικτικά, η σεισμική απόκριση σε ένα σημείο πίσω από την περιοδική δομή (σημείο B) και η σεισμική απόκριση στο αντιδιαμετρικό του, χωρίς την περιοδική δομή (σημείο B'). Τέλος, στην περίπτωση του ελαστικού εδάφους με βάση τα δεδομένα της γεωτεχνικής έρευνας και με απόσβεση Rayleigh εξετάστηκε, ενδεικτικά, η σεισμική απόκριση σε ένα σημείο πίσω από την περιοδική δομή (σημείο B) και η σεισμική απόκριση στο αντιδιαμετρικό του, χωρίς την περιοδική δομή (σημείο B'). Παρακάτω συνοψίζονται οι βασικές παρατηρήσεις – συμπεράσματα των αναλύσεων του Κεφαλαίου 4.

### 5.1 Χαλαρό έδαφος χωρίς απόσβεση

Η εφαρμογή της περιοδικής δομής που εξετάστηκε στο χαλαρό έδαφος χωρίς απόσβεση, είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του εύρους της απόκρισης. Συγκεκριμένα, για τη διέγερση με το τεχνητό επιταχυνσιογράφημα συμβατό με τον EC8 που εφαρμόστηκε σε όλη την βάση του βραχώδους υποβάθρου, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της απόκρισης στα σημεία Γ και Δ. Η μεγαλύτερη μείωση παρατηρήθηκε στο σημείο Γ (απόσταση 10.0m πίσω από την περιοδική δομή), όπου η μέγιστη φασματική επιτάχυνση μειώθηκε κατά περίπου 49%, ενώ στο σημείο Δ (απόσταση 15.0m πίσω από την περιοδική δομή) μειώθηκε κατά περίπου 46%. Για τη διέγερση με το κυματίδιο Hanning, η χρήση της περιοδικής δομής οδηγεί σε μείωση του εύρους της απόκρισης και στα τέσσερα σημεία πίσω από αυτήν. Η μεγαλύτερη μείωση παρατηρείται στο σημείο A (1.0m πίσω από την περιοδική δομή) όπου η μέγιστη φασματική επιτάχυνση μειώθηκε κατά περίπου 61%. Για τις διεγέρσεις με τα ημισυνθετικά επιταχυνσιογραφήματα των σεισμών κοντινού πεδίου επίσης η χρήση της περιοδικής δομής οδηγεί σε σημαντική μείωση του



εύρους της απόκρισης και στα τέσσερα σημεία πίσω από αυτήν. Γενικά, παρατηρείται μείωση της μέγιστης φασματικής επιτάχυνσης της τάξης του 54%-77% στα σημεία πίσω από τη δομή. Η μεγαλύτερη μείωση παρατηρείται στα σημείο A (1.0m πίσω από την περιοδική δομή) για την περίπτωση της διέγερσης Northridge. Στην περίπτωση αυτή η μείωση της μέγιστης φασματικής επιτάχυνσης είναι περίπου 77%. Επίσης παρατηρείται ότι η μείωση της απόκρισης εξακολουθεί να εμφανίζεται ακόμα και στο σημείο Δ (15.0m πίσω από την περιοδική δομή). Ειδικά, για την περίπτωση της διέγερσης Northridge εμφανίζονται τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα με την μείωση της μέγιστης φασματικής επιτάχυνσης να είναι 76%-77% σε όλα τα σημεία που εξετάστηκαν.

## 5.2 Σκληρό έδαφος χωρίς απόσβεση

Για τη διέγερση με το τεχνητό επιταχυνσιογράφημα συμβατό με τον EC8 που εφαρμόστηκε σε όλη την βάση του βραχώδους υποβάθρου, παρατηρήθηκε μείωση της απόκρισης μόνον στο σημείο B (25.0m πίσω από τη περιοδική δομή). Η μείωση της μέγιστης φασματικής επιτάχυνσης στο σημείο B ήταν περίπου 57%. Στα σημεία A, Γ και Δ η περιοδική δομή δεν είχε σχεδόν καμία επίδραση στη μείωση της απόκρισης. Για τη διέγερση με το κυματίδιο Hanning, η χρήση της περιοδικής δομής οδήγησε σε μείωση του εύρους της απόκρισης στα σημεία πίσω από αυτήν, με εξαίρεση το σημείο A. Η μεγαλύτερη μείωση παρατηρείται στο σημείο Δ (100.0m πίσω από την περιοδική δομή) όπου η μέγιστη φασματική επιτάχυνση μειώθηκε κατά περίπου 41%. Στο σημείο A (σε απόσταση 10.0m πίσω από την περιοδική δομή) για τη διέγερση Hanning, παρατηρήθηκε αύξηση της απόκρισής του. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στην τοπογραφική ενίσχυση, λόγω της συμβολής των κυμάτων στο κατακόρυφο πρσανές, όπως αναπτύχθηκε και στο Κεφάλαιο 2. Για τις διεγέρσεις με τα ημισυνθετικά επιταχυνσιογραφήματα των σεισμών κοντινού πεδίου η χρήση της περιοδικής δομής οδηγεί σε μείωση του εύρους της απόκρισης και στα τέσσερα σημεία πίσω από αυτήν. Γενικά, παρατηρείται μείωση που φθάνει ως το 25%. Αυτή η μείωση παρατηρείται στο σημείο A (10.0m πίσω από την περιοδική δομή) για την περίπτωση της διέγερσης Aegion. Στις υπόλοιπες διεγέρσεις, η μείωση της μέγιστης φασματικής επιτάχυνσης δεν ξεπερνά το 18%.

## 5.3 Χαλαρό έδαφος με απόσβεση Rayleigh

Η εφαρμογή της περιοδικής δομής που εξετάστηκε στο χαλαρό έδαφος με απόσβεση Rayleigh, είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του εύρους της απόκρισης στο σημείο B, σε όλες τις περιπτώσεις διεγέρσεων. Συγκεκριμένα, για τη διέγερση με το τεχνητό επιταχυνσιογράφημα συμβατό με τον EC8 που εφαρμόστηκε σε όλη την

βάση του βραχώδους υποβάθρου, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της απόκρισης στο σημείο B. Η μέγιστη φασματική επιτάχυνση μειώθηκε κατά περίπου 58%. Για τη διέγερση με το κυματίδιο Hanning, η χρήση της περιοδικής δομής επίσης οδηγεί σε μείωση του εύρους της απόκρισης στο σημείο B. Στην περίπτωση αυτή η μείωση της μέγιστης φασματικής επιτάχυνσης είναι περίπου 91%. Για τις διεγέρσεις με τα ημισυνθετικά επιταχυνσιογραφήματα των σεισμών κοντινού πεδίου επίσης η χρήση της περιοδικής δομής οδηγεί σε σημαντική μείωση του εύρους της απόκρισης στο σημείο B. Στην διέγερση Parkfield, η μέγιστη φασματική επιτάχυνση μειώθηκε κατά περίπου 64%, στην διέγερση Kobe μειώθηκε κατά περίπου 67%, στην διέγερση Aegion μειώθηκε κατά περίπου 55%, στη διέγερση Erzincan μειώθηκε κατά περίπου 55% και στην διέγερση Northridge μειώθηκε κατά περίπου 78%.

#### 5.4 Σκληρό έδαφος με απόσβεση Rayleigh

Η εφαρμογή της περιοδικής δομής που εξετάστηκε στο σκληρό έδαφος με απόσβεση Rayleigh, είχε ως αποτέλεσμα τη μερική μείωση του εύρους της απόκρισης στο σημείο B, σε όλες τις περιπτώσεις διεγέρσεων. Συγκεκριμένα, για τη διέγερση με το τεχνητό επιταχυνσιογράφημα συμβατό με τον EC8 που εφαρμόστηκε σε όλη την βάση του βραχώδους υποβάθρου, παρατηρήθηκε μείωση της απόκρισης στο σημείο B. Η μέγιστη φασματική επιτάχυνση μειώθηκε κατά περίπου 11%. Για τη διέγερση με το κυματίδιο Hanning, η χρήση της περιοδικής δομής επίσης οδηγεί σε μείωση του εύρους της απόκρισης στο σημείο B. Στην περίπτωση αυτή η μείωση της μέγιστης φασματικής επιτάχυνσης είναι περίπου 24%. Για τις διεγέρσεις με τα ημισυνθετικά επιταχυνσιογραφήματα των σεισμών κοντινού πεδίου επίσης η χρήση της περιοδικής δομής οδηγεί σε μερική μείωση του εύρους της απόκρισης στο σημείο B. Στην διέγερση Parkfield, η μέγιστη φασματική επιτάχυνση μειώθηκε κατά περίπου 7%, στην διέγερση Kobe μειώθηκε κατά περίπου 14%, στην διέγερση Aegion μειώθηκε κατά περίπου 19%, στη διέγερση Erzincan μειώθηκε κατά περίπου 4.3% και στην διέγερση Northridge μειώθηκε κατά περίπου 14%.

#### 5.5 Έδαφος με βάση τα δεδομένα της γεωτεχνικής έρευνας και με απόσβεση Rayleigh

Η εφαρμογή της περιοδικής δομής που εξετάστηκε στο έδαφος με βάση τα δεδομένα της γεωτεχνικής έρευνας και με απόσβεση Rayleigh, είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του εύρους της απόκρισης στο σημείο B, σε όλες τις περιπτώσεις των διεγέρσεων που εφαρμόστηκαν. Για τη διέγερση με το κυματίδιο Hanning, η χρήση της περιοδικής δομής οδήγησε σε μείωση του εύρους της

απόκρισης στο σημείο Β. Στην περίπτωση αυτή η μείωση της μέγιστης φασματικής επιτάχυνσης είναι περίπου 84%. Για τις διεγέρσεις με τα ημισυνθετικά επιταχυνσιογραφήματα των σεισμών κοντινού πεδίου (Kobe και Northridge) επίσης η χρήση της περιοδικής δομής οδηγεί σε σημαντική μείωση του εύρους της απόκρισης στο σημείο Β. Στη διεγερση Kobe η μέγιστη φασματική επιτάχυνση μειώθηκε κατά περίπου 59% και στην διεγερση Northridge μειώθηκε κατά περίπου 50%.

## 5.6 Γενικά σχόλια και συμπεράσματα

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, η έρευνα γύρω από την αντισεισμική προστασία των κατασκευών πρέπει να κατευθυνθεί σε νέες πρωτοπόρες τεχνικές, με τις οποίες θα λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση εδάφους – θεμελίου – κατασκευής και με τις οποίες θα επιτρέπεται η προστασία υψηλής σπουδαιότητας έργων που δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη μεγάλων μετακινήσεων, όπως ενεργειακοί σταθμοί και αρχαιότητες. Μια τέτοια προσέγγιση αποτελεί η χρήση των περιοδικών δομών, με τα οποία παρατηρήθηκε πως είναι ικανά να αποσβέσουν τα σεισμικά κύματα πριν αυτά φθάσουν σε κρίσιμα σημεία. Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο ελαστικό έδαφος, είτε χωρίς απόσβεση είτε με απόσβεση Rayleigh, παρατηρήθηκε πως η εφαρμογή της περιοδικής δομής με βάση την αρχή των φωνονικών υλικών είναι ελπιδοφόρα για την αντισεισμική μηχανική.

Η εφαρμογή της περιοδικής δομής παρατηρήθηκε να έχει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση χαλαρού εδάφους, με τη μείωση της μέγιστης φασματικής επιτάχυνσης να φθάνει στο ποσοστό του 91% για την περίπτωση της διεγερσης τύπου Hanning, σε χαλαρό ομοιόμορφο έδαφος με απόσβεση Rayleigh. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις διεγέρσεων το ποσοστό μείωσης της μέγιστης φασματικής επιτάχυνσης ήταν ίσο ή μεγαλύτερο του 50% στην περίπτωση ομοιόμορφου χαλαρού εδάφους ή χαλαρού εδάφους με διαφορετικές στρώσεις, με απόσβεση Rayleigh. Στην περίπτωση του σκληρού εδάφους με απόσβεση Rayleigh δεν παρατηρήθηκαν τόσο ικανοποιητικά αποτελέσματα, αφού η μείωση της μέγιστης φασματικής επιτάχυνσης έφθασε σε ποσοστό 24% για διεγερση Hanning, ενώ στις άλλες περιπτώσεις διεγέρσεων ήταν αρκετά μικρότερη.

Τέλος, στην περίπτωση της διεγερσης με ημισυνθετικά επιταχυνσιογραφήματα σεισμών κοντινού πεδίου σε χαλαρό έδαφος, η εφαρμογή της περιοδικής δομής οδήγησε σε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η μείωση της μέγιστης φασματικής επιτάχυνσης ήταν τουλάχιστον 50% για την περίπτωση του εδάφους τριών στρώσεων, ενώ στην περίπτωση του χαλαρού εδάφους με απόσβεση Rayleigh έφθασε στο ποσοστό του 78%. Αυτό κρίνεται σημαντικό δεδομένου του

καταστροφικού χαρακτήρα των σεισμών κοντινού πεδίου, σύμφωνα με τα στοιχεία της βιβλιογραφίας.

## 6. Βιβλιογραφία

1. A. Sukhovich, B. Merheb, K. Muralidharan, J. O. Vasseur, Y. Pennec, P. A. Deymier, 3. J. H. Page, *Experimental and theoretical evidence for subwavelength imaging in phononic crystals*, 2009
2. ABAQUS Documentation v 6.14
3. Anil K. Chopra, *Δυναμική των κατασκευών*, 3<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας, 2007
4. D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, S. Schultz, *Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity*, 2000
5. E. Yablonovitch, *Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics*, 1987
6. F. Meseguer, M. Holgado, D. Caballero, N. Benaches, J. Sanchez-Dehesa, C. Lopez, J. Llinares, *Rayleigh-wave attenuation by a semi-infinite two-dimensional elastic-band-gap crystal*
7. G. P. Mavroeidis, A. S. Papageorgiou, *A mathematical representation of near-fault ground motions*, 2003
8. G. Tsinidis, *Response of urban single and twin circular tunnels subjected to transversal ground seismic shaking*, 2018
9. J. B. Pendry, *Negative refraction makes a perfect lens*, 2000
10. M. Adam, O. von Estorff, *Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches*, 2004
11. M. Miniaci, A. Krushynska, F. Bosia, N. M. Pungo, *Large scale mechanical metamaterials as seismic shields*, 2016
12. N. Fang, D. Xi, J. Xu, M. Ambati, W. Srituravanich, C. Sun, X. Zhang, *Ultrasonic Metamaterials with negative modulus*, 2006
13. R. Martinez-Sala, J. Sancho, J. V. Sanchez, V. Gomez, J. Llinares, F. Meseguer, *Sound attenuation by sculpture*, 2002
14. S. Brule, E. H. Javelaud, S. Enoch, S. Guenneau, *Experiments on seismic metamaterials: molding surface waves*, 2014
15. S. Brule, E. H. Javelaud, S. Enoch, S. Guenneau, *Supplemental material for experiments on seismic metamaterials: molding surface waves*, 2014
16. S. John, *Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices*, 1987
17. S. Kontoe, L. Zdravkovic, D. M. Potts, *An assessment of the domain reduction method as an advanced boundary condition and some pitfalls in the use of conventional absorbing boundaries*, 2008
18. V. G. Veselago, *The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$* , 1968
19. Y. Achaoui, A. Khelif, S. Benchabane, L. Robert, V. Laude, *Experimental observation of locally-resonant and Bragg band gaps for surface guided waves in a phononic crystal of pillars*, 2011
20. Y. Achaoui, B. Ungureanu, S. Enoch, S. Brule, S. Guenneau, *Seismic waves attenuation with arrays of inertial resonators*, 2016
21. Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, Y. Y. Zhu, Z. Yang, C. T. Chan, P. Sheng, *Locally resonant sonic materials*, 2000

22. Β. Λεκίδης, *Ο σεισμός της Κεφαλονιάς (M=6.1), 26 Ιανουαρίου 2014. Προκαταρκτικά στοιχεία από ΙΤΣΑΚ-ΟΑΣΠ*, 2014
23. Γ. Α. Παπαδόπουλος, Μ. Σαχπάζη, Β. Καραστάθης, Α. Γκανάς, Γ. Μιναδάκης, Ι. Μπασκούτας, Α. Μόσχου, Α. Μουζακιώτης, Κ. Ορφανογιαννάκη, Ε. Δασκαλάκη, Σ. Λιακόπουλος, Α. Παπαγεωργίου, Ι. Τριανταφύλλου, *Οι σεισμοί του Ιανουαρίου-Φεβρουαρίου του 2014 στην Κεφαλονιά: Μια πρώτη έκθεση*, Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, 2014
24. Γ. Γκαζέτας, *Ο ρόλος του εδάφους στους σεισμούς του Μεξικού (1985) και της Καλαμάτας (1986)*
25. Γ. Καραμέρος, *Κατασκευή ημι-συνθετικών επιταχυνσιογραφημάτων κοντινού πεδίου βάσει μεγέθους και απόστασης*, Διπλωματική Εργασία, 2018
26. Γ. Μπουκοβάλας, *Σημειώσεις Εδαφομηχανικής – Θεωρία & Εφαρμογές*, Οκτώβριος 2018
27. Γ. Ψυχάρης, *Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας Τεύχος 1*, 2016
28. Γ. Ψυχάρης, *Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας Τεύχος 2*, 2015
29. Δ. Παπαναστασίου, Κ. Γάκη-Παπαναστασίου, *Ο σεισμός του Αιγίου (15-6-1995), σεισμοτεκτονικές παρατηρήσεις και γεωμορφικές επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον*
30. Κ. Κανελλόπουλος, *Στατικοί και δυναμικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης μεταξύ πασσάλων: Ελαστικό και μη ελαστικό έδαφος*, Διπλωματική Εργασία, 2017
31. Κυριαζής Δ. Πιτιλάκης, *Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική*, Εκδόσεις Ζήτη, 2010
32. Ο. Μιχαηλίδης, Γ. Γκαζέτας, Κ. Λουκάκης, *Ο σεισμός του Κόμπε 17-1-1995: Ο ρόλος του εδάφους, οι ζημιές σε γέφυρες και λιμάνια. Επισκόπηση – αναλύσεις - συμπεράσματα*, 1995
33. Π. Γ. Καρύδης, Ε. Α. Βουγιούκας, *Σύντομη αναφορά στο σεισμό της 17<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 1994 (Νόρθριτζ, Λος Άντζελες)*, 1994
34. Π. Θεοδωρόπουλος, *Επιστημονική μελέτη: Οι σεισμοί του Ιανουαρίου και του Φεβρουαρίου 2014 στην Κεφαλονιά για τις κατασκευές μας (<https://www.kefalonitis.com/news/item/25637-epistimoniki-meleti-oi-seismoi-tou-ianouariou-kai-fevrouariou-2014-stin-kefalonია-gia-tis-kataskeves-mas.html>), 2014*