



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία:

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ  
ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΗΜΑΤΩΝ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΕ ΣΕΙΣΜΟ  
ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ**

Επιμέλεια: Καραγάλιου Μαρία – Μπαμπατζέλιου Δήμητρα

Επιβλέπων: Μ. Φραγκιαδάκης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων: Ιωάννης Ταφλαμπάς, Dr. Πολιτικός Μηχανικός

ΑΘΗΝΑ 2018



## Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τον κύκλο των μεταπτυχιακών μας σπουδών θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά όλους όσους συνέβαλαν στην περάτωση της παρούσας εργασίας. Κατ' αρχάς, θέλουμε να ευχαριστήσουμε τους επιβλέποντες της μεταπτυχιακής μας εργασίας τον Επίκουρο Καθηγητή του Ε.Μ.Π. Μ. Φραγκιαδάκη και τον επιστημονικό συνεργάτη Dr. Πολιτικό Μηχανικό Ιωάννη Ταφλαμπά, για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και την πολύτιμη και ουσιαστική βοήθεια και καθοδήγησή τους. Χάρης σε αυτούς, μας δόθηκε η δυνατότητα να ασχοληθούμε με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο, ακολουθώντας πάντα τις διδακτικές τους συμβουλές καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής εργασίας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ από καρδιάς στις οικογένειές μας για τη συμβολή τους με κάθε δυνατό τρόπο στην επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης, αλλά και για την υποστήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.

*Καραχάλιου Μαρία*

*Μπαμπατζέλιου Δήμητρα*

*Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*

*Αθήνα 2018*



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία έχει ως κύριο στόχο να εξετάσει και να αναλύσει σεισμούς κοντινού πεδίου, που συνδέονται άρρηκτα με το φαινόμενο της κατευθυντικότητας και να διερευνήσει την επιρροή αυτών στην απόκριση των κατασκευών. Κρίνεται, λοιπόν, σκόπιμη η παρακολούθηση της κατάστασης μιας κατασκευής με μη καταστροφικές μεθόδους, ώστε να καταγραφούν οι επιταχύνσεις και οι ταχύτητες του ανωτάτου ορόφου και επομένως να εντοπιστεί ο παλμός της ισχυρής εδαφικής κίνησης, αλλά και να καθοριστεί η μεταβολή της ιδιοπερίοδου της κατασκευής. Με αυτή τη διαδικασία καθίσταται εύκολος ο καθορισμός του βαθμού βλάβης και επιτυγχάνεται ένας επαρκής έλεγχος της δομικής ακεραιότητας της κατασκευής. Μέχρι πρότινος, καθώς η εκτίμηση των βλαβών μετά από ένα σεισμικό γεγονός διεξαγόταν μέσω επιθεωρήσεων, υπήρχε μεγάλη πιθανότητα ορισμένες σοβαρές ζημιές να μην μπορέσουν να εντοπιστούν. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η δυσκολία έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες που αφορούν τόσο τη μέτρηση των επιταχύνσεων ή μετατοπίσεων της κατασκευής σε πραγματικό ή κοντά σε πραγματικό χρόνο, που με τη σειρά τους σχετίζονται με την απόκριση της κατασκευής, όσο και τη μελέτη της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής.

Στα πλαίσια αυτού, εξετάστηκε μια οκταώροφη υφιστάμενη κατασκευή, η οποία προσομοιώθηκε μέσω του προγράμματος Seismostruct 2016 και διεξήχθησαν ιδιομορφική, στατική ανελαστική ανάλυση (Static Pushover Analysis) και προσαυξητική δυναμική ανάλυση (I.D.A.–Incremental Dynamic Analysis). Για τη τελευταία προαναφερθείσα ανάλυση, το κτίριο υποβλήθηκε σε 10 καταγραφές εδαφικής κίνησης της βάσης NGA, η καθεμία από τις οποίες κλιμακώνεται καταλλήλως έτσι ώστε η μη-γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας της κάθε κλιμάκωσης να καλύπτει πλήρως όλο το φάσμα της παραμορφωσιακής ικανότητας του φορέα. Σημαντικές πληροφορίες που αφορούν την ανελαστική συμπεριφορά της κατασκευής προσφέρονται μέσω των καμπύλων IDA, οι οποίες παράγονται από την κάθε κλιμακούμενη καταγραφή.

Για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας του υφιστάμενου δομήματος εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι της φασματικής ανάλυσης της επιτάχυνσης, της φασματικής ανάλυσης της ταχύτητας και της κυματικής ανάλυσης με χρήση του φάσματος συνέλιξης. Σκοπός των αναλύσεων ήταν η εκτίμηση της μεταβολής της ιδιοπερίοδου της κατασκευής σε κάθε στάθμη επιτελεστικότητας, η τιμή της οποίας

συνδέεται άμεσα με το επίπεδο των βλαβών Για το λόγο αυτό, για τις δύο πρώτες αναλύσεις από τις χρονοϊστορίες απόκρισης της επιτάχυνσης και ταχύτητας παρήχθησαν τα αντίστοιχα φάσματα Fourier μέσω του προγράμματος Seismosignal και η τιμή της ιδιοπερίοδου υπολογίστηκε από την κορυφή των δύο αυτών φασμάτων. Ενώ, για την κυματική ανάλυση αξιοποιήθηκε η μεθοδολογία των P. Mimoglou et al. [2014]. Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία, η χρονοϊστορία απόκρισης της ταχύτητας εκφράζεται με έξι κυματίδια, όπου η περίοδος του κάθε κυματιδίου προσδιορίζεται από την κορυφή του φάσματος συνέλιξης και ο εντοπισμός των παραμέτρων τους βασίζεται στις μαθηματικές σχέσεις των Mavroeidis and Papageorgiou [2003]. Από τα έξι αυτά κυματίδια, επιλέγονται αυτά που όχι μόνο προσομοιώνουν καλύτερα τον παλμό και την ελεύθερη ταλάντωση στην χρονοϊστορία απόκρισης της ταχύτητας αλλά διαθέτουν και τον μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης με την αρχική καταγραφή. Με τον τρόπο αυτό, υπολογίζονται η ιδιοπερίοδος της κατασκευής και ο συντελεστής συσχέτισης του παλμού ο οποίος αποτελεί και αυτός ένα δείκτη απομείωσης της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής. Διαπιστώνεται λοιπόν πως ο συνδυασμός των δυο τελευταίων μεθόδων αποδίδει ικανοποιητικά την επίδρασή του παλμού στην απόκριση των κατασκευών.



## **ABSTRACT**

The purpose of this present master thesis is to examine near fault ground motions and to investigate their influences on the performance of structures. Since the effects of ground motions with directivity effects on structures are tremendous, structural health monitoring has been developed over the last few years in order to evaluate the response of the structures in these ground motions. The current state-of-the-art monitoring systems are based on a highly efficient, since sensors are deployed throughout the building and send out data regarding measured accelerations or velocities from instrumented locations in the structure. These measures are used to detect the pulse of the ground motions and to determine the changes in the fundamental period of the structure. Therefore, the damage detection and performance evaluation is achieved with the real-time structural health monitoring of a structure.

Until recently, as the damage detection after a seismic event was carried out through inspections by engineers, there was a high possibility that some serious damage could not be detected. To address this problem, technologies have been developed that involve both the measurement of real-time or real-time accelerations or displacements, which in turn are related to the response of the structure and the study of the soil-construction interaction.

In this context, an eight-storey existing structure, which was simulated with the use of Seismostruct 2016 program, was examined and an eigenvalue, a static pushover analysis and an incremental dynamic analysis were performed. For the latter analysis, the building was subjected to 10 NGA data records of seismic motion; each one is appropriately calibrated so that the nonlinear time-history of each record fully covers the capacity deformation of the structure. Important information regarding the inelastic behavior of the structure is provided through the IDA curves.

In order to evaluate the bearing capacity of an existing structure, spectral analysis of acceleration, spectral analysis of velocity and wavelet analysis were carried out. The purpose of the analyzes was to estimate the changes in the period of the structure in every limit state, since its value is directly related to the level of damage. For this reason, as for the first two analyzes, the acceleration Fourier spectra and velocity Fourier spectra were calculated from the respective acceleration and velocity response time histories with the use of program Seismosignal. Then, the period of the structure was calculated from the peak of these two Fourier spectra.



While, regarding wavelet analysis, according to the methodology of P. Mimoglou et al. [2014] the time history response velocity is depicted with six wavelets, where the period of each wavelet is determined by the peak of the convolution spectrum  $S_d \times S_v$  and their parameters are calculated based on the mathematical relations of Mavroeidis and Papageorgiou [2003]. The remaining parameters of the M&P wavelet are derived from the targeted response spectrum of the ground motion applying a new relationship that is established between the cumulative absolute displacement (CAD) of a wavelet and its peak spectral amplitude. The method follows a well-defined procedure that can be easily implemented in a computer code for the automatic determination of the pulse parameters of a given ground motion.

From the above mentioned six wavelets, there are selected those which not only simulate best the pulse and free oscillation in the time-history response velocity, but also have the highest correlation coefficient with the initial records. According to this procedure, the period of the structure is determined and the correlation coefficient is estimated which is also an indicator of the bearing capacity of the structure. Overall, it can be seen that the combination of the latter two methodologies illustrates the effect of the pulse ground motions in the response of the structure.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b> .....	xi
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	xviii

### **1. ΕΝΟΡΓΑΝΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ**

<b>ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ</b> .....	1
1.1 Πλεονεκτήματα και χρησιμότητα της ενόργανης παρακολούθησης .....	1
1.2 Παραδείγματα εφαρμογών των οργάνων παρακολούθησης.....	2
1.3 Βασικές μεθοδολογίες της εκτίμησης βλαβών.....	7
1.3.1 Σύστημα ανίχνευσης βλαβών REFLEXX .....	9
1.3.2 Σύστημα ανίχνευσης βλαβών με συνδυασμό νευρωνικών δικτύων, κυματικών αναλύσεων και πιθανοτικών μεθόδων .....	10
1.4 Παραδείγματα σεισμικών διεγέρσεων κοντινού πεδίου και επιπτώσεις τους στις κατασκευές.....	12
1.4.1 Πόλη Christchurch της Νέας Ζηλανδίας .....	12
1.4.2 Κτίρια Torre Central και Construction Chamber της Χιλής .....	13
1.4.3 Κτίριο Vina Del Mar της Χιλής .....	16
1.4.4 Τοξωτή γέφυρα στο Πόρτο της Πορτογαλίας .....	18
1.4.5 Canton Tower στην πόλη Guangzhou της Κίνας .....	21
1.4.6 Ενόργανη παρακολούθηση συμπεριφοράς εφεδράνων με ελαστομερές υλικό .....	22

### **2. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ**

<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ</b> .....	25
2.1.Χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης σε σεισμική διέγερση κοντινού πεδίου .....	25
2.1.1 Χαρακτηριστικά και βασικοί τύπο ρηγμάτων.....	25
2.1.2 Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας.....	27
2.2 Μέθοδοι εκτίμησης συχνοτικού περιεχομένου παλμών κατευθυντικότητας.....	32
2.2.1 Εισαγωγή .....	32
2.2.2 Μέθοδος κυματιδίων κατά Baker .....	33

2.2.3 Μέθοδος των Manroeidis and Papageorgiou.....	35
2.2.4.Μεθοδος κυματικής ανάλυσης με χρήση του φάσματος συνέλιξης.....	37
<b>3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΟΡΕΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....</b>	<b>51</b>
3.1 Περιγραφή του κτιρίου.....	51
3.1.1 Γενικά .....	51
3.1.2 Αρχιτεκτονική μελέτη .....	51
3.1.3 Προσομοίωση Φορέα .....	53
3.1.4 Υλικά .....	55
3.1.5 Περιγραφή των διατομών .....	58
3.1.6 Φορτία .....	74
3.1.7 Παραδοχές σχεδιασμού .....	76
3.2 Αναλύσεις.....	78
3.2.1 Εισαγωγή .....	78
3.2.2 Ιδιομορφική ανάλυση .....	80
3.2.3 Στατική ανελαστική ανάλυση (Static Pushover Analysis) .....	81
3.2.4 Η μέθοδος της προσαυξητικής δυναμικής ανάλυσης (IDA).....	84
<b>4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΗΜΑΤΩΝ ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ.....</b>	<b>97</b>
4.1 Εισαγωγή.....	97
4.2 Αποτελέσματα αναλύσεων.....	98
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>139</b>
<b>6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....</b>	<b>153</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....</b>	<b>155</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 1.1:</b> Τυπικές διατάξεις οργάνων παρακολούθησης. ....	3
<b>Σχήμα 1.2:</b> Καμπύλες τρωτότητας που συνδέουν την πιθανότητα υπέρβασης των στάθμων επιτελεστικότητας με τη σχετική μετακίνηση των ορόφων. ....	9
<b>Σχήμα 2.1:</b> Χαρακτηριστικά ρήγματος. ....	26
<b>Σχήμα 2.2:</b> Βασικοί τύποι ρηγμάτων. ....	26
<b>Σχήμα 2.3:</b> Διευθύνσεις ανάπτυξης των διαφορετικών τύπων κατευθυντικότητας....	27
<b>Σχήμα 2.4:</b> Σχηματικό διάγραμμα επίδρασης της κατευθυντικότητας της διάρρηξης για οριζόντιο ρήγμα ολίσθησης. Η διάρρηξη αρχίζει στο υπόκεντρο και διαδίδεται με ταχύτητα περίπου ίση με το 80% της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Η εικόνα παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο του μετώπου της ρήξης σε μια δεδομένη στιγμή (Somerville et al 1997a). ....	29
<b>Σχήμα 2.5:</b> Καταγραφές κοντινού πεδίου σε περιπτώσεις οριζόντιου ρήγματος και ρήγματος βύθισης, κάθετα και παράλληλα στο ίχνος του ρήγματος (Stewart et al., 2001). ....	29
<b>Σχήμα 2.6:</b> Παράμετροι που σχετίζονται με την διάρρηξη και καθορίζουν το εύρος στο φαινόμενο της έμπροσθεν κατευθυντικότητας (Somerville et al., 1997). ....	30
<b>Σχήμα 2.7:</b> Επίπτωση των παραμέτρων της διάρρηξης στην φασματική μεγέθυνση σε σχέση με συνθήεις καταγραφές (Somerville et al, 1997). ....	31
<b>Σχήμα 2.8:</b> Κυματίδιο Daubechies. ....	33
<b>Σχήμα 2.9:</b> Διαφοροποίηση περιόδου παλμού και δεσπόζουσας περιόδου φάσματος ταχυτήτων (Baker, 2007) ....	35
<b>Σχήμα 2.10:</b> Προσομοίωση παλμού (Loma Prieta 1989 Station STG), (Mavroeidis and Papageorgiou 2003). ....	36
<b>Σχήμα 2.11:</b> Κυματομορφή (Mavroeidis and Papageorgiou, 2003). ....	39
<b>Σχήμα 2.12:</b> Σχέση μεταξύ της μέγιστης φασματικής μετακίνησης $S_d,max$ και της αθροιστικής απόλυτης μετακίνησης CAD για το κυματίδιο M&P για διάφορες τιμές του $\gamma$ και $\nu$ . ....	40
<b>Σχήμα 2.13:</b> (α) Φάσμα απόκρισης της ψεύδο-ταχύτητας για απόσβεση 5% και (β) Σύγκριση της χρονοϊστορίας του παλμού με βάση τη μεθοδολογία M&P με τη χρονοϊστορία της ταχύτητας της εδαφικής κίνησης. ....	42

<b>Σχήμα 2.14:</b> (α) Σύγκριση του φάσματος Fourier της εδαφικής ταχύτητας με το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης για μηδενική απόσβεση και (β) φάσμα απόκρισης μετατόπισης για 5% απόσβεση. ....	44
<b>Σχήμα 2.15:</b> (α) Φάσμα απόκρισης μετακίνησης για απόσβεση 5% και (β) Φάσμα απόκρισης ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5%. ....	45
<b>Σχήμα 2.16:</b> Πάνω σειρά: Προσδιορισμός της περιόδου των παλμών $T_p$ από την κορυφή του φάσματος συνέλιξης $S_{dxSv}$ για απόσβεση 5%. Κάτω σειρά: Σύγκριση των χρονοϊστορίων ταχύτητας του εξαγόμενου M&P κυματιδίου (διακεκομμένη γραμμή) με τις χρονοϊστορίες ταχύτητας των αρχικών καταγραφών. ....	47
<b>Σχήμα 3.1:</b> Ενδεικτική τομή κτιρίου. ....	52
<b>Σχήμα 3.2:</b> Ενδεικτική κάτοψη κτιρίου. ....	52
<b>Σχήμα 3.3:</b> Δισδιάστατη απεικόνιση τυπικού ορόφου του κτιρίου στο πρόγραμμα Seismostruct. ....	54
<b>Σχήμα 3.4:</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση του προσομοιώματος του κτιρίου στο πρόγραμμα Seismostruct. ....	54
<b>Σχήμα 3.5:</b> Ανελαστικό διγραμμικό μοντέλο σκυροδέματος <code>con_ma</code> . ....	56
<b>Σχήμα 3.6:</b> Ελαστικό μοντέλο υλικού σκυροδέματος <code>el_mat</code> . ....	56
<b>Σχήμα 3.7:</b> Ανελαστικό διγραμμικό μοντέλο υλικού χάλυβα <code>stl_bl</code> . ....	57
<b>Σχήμα 3.8:</b> Ελαστικό μοντέλο υλικού χάλυβα <code>el_mat</code> . ....	58
<b>Σχήμα 3.9:</b> Οπλισμός τοιχώματος W1 ισογείου. ....	59
<b>Σχήμα 3.10:</b> Οπλισμός τοιχώματος W1 ορόφων. ....	59
<b>Σχήμα 3.11:</b> Οπλισμός τοιχώματος W2 ισογείου. ....	59
<b>Σχήμα 3.12:</b> Οπλισμός τοιχώματος W2 ορόφων. ....	60
<b>Σχήμα 3.13:</b> Οπλισμός τοιχώματος W3 ισογείου. ....	60
<b>Σχήμα 3.14:</b> Οπλισμός τοιχώματος W3 ορόφων. ....	60
<b>Σχήμα 3.15:</b> Οπλισμός τοιχώματος W4 ισογείου. ....	60
<b>Σχήμα 3.16:</b> Οπλισμός τοιχώματος W4 ορόφων. ....	60
<b>Σχήμα 3.17:</b> Οπλισμός τοιχώματος W7. ....	60
<b>Σχήμα 3.18:</b> Οπλισμός τοιχώματος W8. ....	61
<b>Σχήμα 3.19:</b> Οπλισμός τοιχώματος W9. ....	61
<b>Σχήμα 3.20:</b> Οπλισμός τοιχώματος W10. ....	61
<b>Σχήμα 3.21:</b> Οπλισμός τοιχώματος W11 ισογείου. ....	61
<b>Σχήμα 3.22:</b> Οπλισμός τοιχώματος W11 ορόφων. ....	61
<b>Σχήμα 3.23:</b> Οπλισμός τοιχώματος W12 ισογείου. ....	61

Σχήμα 3.24: Οπλισμός τοιχώματος W12 ορόφων. ....	62
Σχήμα 3.25: Οπλισμός τοιχώματος W13 ισογείου. ....	62
Σχήμα 3.26: Οπλισμός τοιχώματος W13 ορόφων. ....	62
Σχήμα 3.27: Οπλισμός τοιχώματος W14 ισογείου. ....	62
Σχήμα 3.28: Οπλισμός τοιχώματος W14 ορόφων. ....	62
Σχήμα 3.29: Οπλισμός τοιχώματος W15 ισογείου. ....	62
Σχήμα 3.30: Οπλισμός τοιχώματος W15 ορόφων. ....	63
Σχήμα 3.31: Οπλισμός τοιχώματος W16 ισογείου. ....	63
Σχήμα 3.32: Οπλισμός τοιχώματος W16 ορόφων. ....	63
Σχήμα 3.33: Οπλισμός τοιχώματος W17 ισογείου. ....	63
Σχήμα 3.34: Οπλισμός τοιχώματος W17 ορόφων. ....	63
Σχήμα 3.35: Οπλισμός τοιχώματος W18 ισογείου. ....	63
Σχήμα 3.36: Οπλισμός τοιχώματος W18 ορόφων. ....	64
Σχήμα 3.37: Οπλισμός δοκού B1.....	65
Σχήμα 3.38: Οπλισμός δοκού B2.....	65
Σχήμα 3.39: Οπλισμός δοκού B3.....	66
Σχήμα 3.40: Οπλισμός δοκού B4.....	66
Σχήμα 3.41: Οπλισμός δοκού B5.....	67
Σχήμα 3.42: Οπλισμός δοκού B6.....	67
Σχήμα 3.43: Οπλισμός δοκού B7.....	68
Σχήμα 3.44: Οπλισμός δοκού B8.....	68
Σχήμα 3.45: Οπλισμός δοκού B9.....	69
Σχήμα 3.46: Οπλισμός δοκού B10.....	69
Σχήμα 3.47: Οπλισμός δοκού B11.....	70
Σχήμα 3.48: Οπλισμός δοκού B12.....	70
Σχήμα 3.49: Οπλισμός δοκού B13.....	71
Σχήμα 3.50: Οπλισμός δοκού B14.....	71
Σχήμα 3.51: Οπλισμός δοκού B15.....	72
Σχήμα 3.52: Οπλισμός δοκού B16.....	72
Σχήμα 3.53: Οπλισμός δοκού B17.....	73
Σχήμα 3.54: Οπλισμός δοκού B18.....	73
Σχήμα 3.55: Οπλισμός δοκού B19.....	74
Σχήμα 3.56: Συντελεστές Cg και Cq. ....	75
Σχήμα 3.57: Θεωρητικές καμπύλες εντατικού μεγέθους-παραμόρφωση.....	82

<b>Σχήμα 3.58:</b> Γωνία στροφής χορδής.....	83
<b>Σχήμα 3.59:</b> Κατασκευή καμπύλης αντίστασης κατασκευής.....	83
<b>Σχήμα 3.60:</b> Καμπύλη ικανότητας (Capacity Curve).....	84
<b>Σχήμα 3.61:</b> Δύο διαφορετικοί κανόνες που παράγουν πολλαπλά σημεία ικανότητας για ένα 3-ώροφο μεταλλικό καμπτικό πλαίσιο με ψαθυρές συνδέσεις ( $T_1=1.3\text{sec}$ ). Ο κανόνας DM, όπου DM είναι το $\theta_{max}$ , εφαρμόζεται για $CDM=0.08$ και ο κανόνας IM χρησιμοποιεί το κριτήριο της 20% κλίσης.....	90
<b>Σχήμα 3.62:</b> Καμπύλη IDA καταγραφής 1-2.....	92
<b>Σχήμα 3.63:</b> Καμπύλη IDA καταγραφής 1-4.....	92
<b>Σχήμα 3.64:</b> Καμπύλη IDA καταγραφής 1-5.....	93
<b>Σχήμα 3.65:</b> Καμπύλη IDA καταγραφής 1-7.....	93
<b>Σχήμα 3.66:</b> Καμπύλη IDA καταγραφής 1-8.....	94
<b>Σχήμα 3.67:</b> Καμπύλη IDA καταγραφής 1-11.....	94
<b>Σχήμα 3.68:</b> Καμπύλη IDA καταγραφής 1-21.....	95
<b>Σχήμα 3.96:</b> Καμπύλη IDA καταγραφής 1-22.....	95
<b>Σχήμα 3.70:</b> Καμπύλη IDA καταγραφής 1-23.....	96
<b>Σχήμα 3.71:</b> Καμπύλη IDA καταγραφής 1-27.....	96
<b>Σχήμα 4.1:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-5 slight damage state.....	99
<b>Σχήμα 4.2:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-5 slight damage state.....	99
<b>Σχήμα 4.3:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-5 slight damage state.....	100
<b>Σχήμα 4.4:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-5 light damage state.....	101
<b>Σχήμα 4.5:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-5 light damage state.....	101
<b>Σχήμα 4.6:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-5 light damage state.....	102
<b>Σχήμα 4.7:</b> Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πέμπτο κυματίδιο) για Data 1-5 light damage state.....	102
<b>Σχήμα 4.8:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-5 moderate damage state.....	103
<b>Σχήμα 4.9:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-5 moderate damage state.....	103
<b>Σχήμα 4.10:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-5 moderate damage state.....	104
<b>Σχήμα 4.11:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-5 extensive damage state.....	105
<b>Σχήμα 4.12:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-5 extensive damage state.....	105



<b>Σχήμα 4.13:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-5 extensive damage state.....	106
<b>Σχήμα 4.14:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-5 partial collapse damage state .....	107
<b>Σχήμα 4.15:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-5 partial collapse damage state... ..	107
<b>Σχήμα 4.16:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-5 partial collapse damage state.. ..	108
<b>Σχήμα 4.17:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-7 slight damage state.. ..	109
<b>Σχήμα 4.18:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-7 slight damage state.....	109
<b>Σχήμα 4.19:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-7 slight damage state.....	110
<b>Σχήμα 4.20:</b> Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-7 slight damage state.....	110
<b>Σχήμα 4.21:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-7 light damage state.....	111
<b>Σχήμα 4.22:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-7 light damage state. ....	111
<b>Σχήμα 4.23:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-7 light damage state.. ..	112
<b>Σχήμα 4.24:</b> Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-7 light damage state.....	112
<b>Σχήμα 4.25:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-7 moderate damage state.. ....	113
<b>Σχήμα 4.26:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-7 moderate damage state.....	113
<b>Σχήμα 4.27:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-7 moderate damage state.....	114
<b>Σχήμα 4.28:</b> Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (τρίτο κυματίδιο) για Data 1-7 moderate damage state.....	114
<b>Σχήμα 4.29:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-7 extensive damage state.. ....	115
<b>Σχήμα 4.30:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-7 extensive damage state.....	115
<b>Σχήμα 4.31:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-7 extensive damage state.....	116
<b>Σχήμα 4.32:</b> Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (τέταρτο κυματίδιο) για Data 1-7 extensive damage state.....	116
<b>Σχήμα 4.33:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-7 partial collapse damage state. ....	117

<b>Σχήμα 4.34:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-7 partial collapse damage state..	117
<b>Σχήμα 4.35:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-7 partial collapse damage state..	118
<b>Σχήμα 4.36:</b> Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πέμπτο κυματίδιο) για Data 1-7 partial collapse damage state..	118
<b>Σχήμα 4.37:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-8 slight damage state	119
<b>Σχήμα 4.38:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-8 slight damage state..	119
<b>Σχήμα 4.39:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-8 slight damage state..	120
<b>Σχήμα 4.40:</b> Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (τέταρτο κυματίδιο) για Data 1-8 slight damage state..	120
<b>Σχήμα 4.41:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-8 light damage state..	121
<b>Σχήμα 4.42:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-8 light damage state..	121
<b>Σχήμα 4.43:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-8 light damage state..	122
<b>Σχήμα 4.43:</b> Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πέμπτο κυματίδιο) για Data 1-8 light damage state..	122
<b>Σχήμα 4.45:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-8 moderate damage state..	123
<b>Σχήμα 4.46:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-8 moderate damage state..	123
<b>Σχήμα 4.47:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-8 moderate damage state..	124
<b>Σχήμα 4.48:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-8 extensive damage state..	125
<b>Σχήμα 4.49:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-8 extensive damage state..	125
<b>Σχήμα 4.50:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-8 extensive damage state..	126
<b>Σχήμα 4.51:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-8 partial collapse damage state..	127
<b>Σχήμα 4.52:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-8 partial collapse damage state..	127
<b>Σχήμα 4.53:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-8 partial collapse damage state..	128
<b>Σχήμα 4.54:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-11 slight damage state..	129
<b>Σχήμα 4.55:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-11 slight damage state..	129

<b>Σχήμα 4.56:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-11 slight damage state.....	130
<b>Σχήμα 4.57:</b> Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πέμπτο κυματίδιο) για Data 1-11 slight damage state.....	130
<b>Σχήμα 4.58:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-11 light damage state.....	131
<b>Σχήμα 4.59:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-11 light damage state. ....	131
<b>Σχήμα 4.60:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-11 light damage state. ....	132
<b>Σχήμα 4.61:</b> Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (τρίτο κυματίδιο) για Data 1-11 light damage state.....	132
<b>Σχήμα 4.62:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-11 moderate damage state.. ..	133
<b>Σχήμα 4.63:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-11 moderate damage state.....	133
<b>Σχήμα 4.64:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-11 moderate damage state.....	134
<b>Σχήμα 4.65:</b> Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (τρίτο κυματίδιο) για Data 1-11 moderate damage state.....	134
<b>Σχήμα 4.66:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-11 extensive damage state.. ..	135
<b>Σχήμα 4.67:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-11 extensive damage state.....	135
<b>Σχήμα 4.68:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-11 extensive damage state.....	136
<b>Σχήμα 4.69:</b> Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (τρίτο κυματίδιο) για Data 1-11 extensive damage state.....	136
<b>Σχήμα 4.70:</b> Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-11 partial collapse damage state .....	137
<b>Σχήμα 4.71:</b> Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-11 partial collapse damage state. ....	137
<b>Σχήμα 4.72:</b> Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-11 partial collapse damage state .....	138
<b>Σχήμα 4.73:</b> Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πέμπτο κυματίδιο) για Data 1-11 partial collapse damage state .....	138

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Διαστάσεις τοιχωμάτων.....	59
Πίνακας 3.2: Διαστάσεις δοκών.....	64
Πίνακας 3.3: Τιμές χαρακτηριστικών περιόδων και συντελεστή εδάφους για την οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης.....	76
Πίνακας 3.4: Κατηγορία σπουδαιότητας.....	77
Πίνακας 3.5: Τιμές ποσοστού απόσβεσης.....	78
Πίνακας 3.6: Τιμές ιδιοπεριόδου και ποσοστά συμμετοχής μάζας.....	81
Πίνακας 3.7: HRC (Homogenised Reinforced Concrete) scale damage limit states	.91
Πίνακας 4.1: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-5 slight damage state.....	100
Πίνακας 4.2: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-5 light damage state.....	102
Πίνακας 4.3: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-5 moderate damage state.....	104
Πίνακας 4.4: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-5 extensive damage state.....	106
Πίνακας 4.5: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-5 partial collapse damage state..	108
Πίνακας 4.6: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-7 slight damage state.....	110
Πίνακας 4.7: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-7 light damage state.....	112
Πίνακας 4.8: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-7 moderate damage state.....	114
Πίνακας 4.9: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-7 extensive damage state.....	116
Πίνακας 4.10: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-7 partial collapse damage state.	118
Πίνακας 4.11: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-8 slight damage state.....	120
Πίνακας 4.12: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-8 light damage state.....	122
Πίνακας 4.13: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-8 moderate damage state.....	124
Πίνακας 4.14: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-8 extensive damage state.....	126
Πίνακας 4.15: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-8 partial collapse damage state	128
Πίνακας 4.16: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-11 slight damage state.....	130
Πίνακας 4.17: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-11 light damage state.....	132
Πίνακας 4.18: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-11 moderate damage state. ....	134
Πίνακας 4.19: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-11 extensive damage state.....	136
Πίνακας 4.20: Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-11 partial collapse damage state.....	138

<b>Πίνακας 5.1:</b> Συγκεντωτικός πίνακας μεταβολής της περιόδου ελεύθερης ταλάντωσης και του συντελεστή συσχέτισης του παλμού για slight και extensive damage state.....	150
---	-----

# 1. ΕΝΟΡΓΑΝΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

## 1.1 Πλεονεκτήματα και χρησιμότητα της ενόργανης παρακολούθησης

Μέχρι πρόσφατα, η εκτίμηση των βλαβών μετά από ένα σεισμικό γεγονός διεξαγόταν μέσω επιθεωρήσεων από μηχανικούς. Εντούτοις, ένα από τα σοβαρά εμπόδια για την ακριβή εκτίμηση του επιπέδου των βλαβών των κατασκευών με οπτική επιθεώρηση είναι ότι ορισμένες σοβαρές ζημιές μπορεί να μην είναι ορατές. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες μέτρησης των μετατοπίσεων της κατασκευής σε πραγματικό ή κοντά σε πραγματικό χρόνο, προκειμένου να υπολογιστούν εύκολα οι σχετικές μετατοπίσεις των διαδοχικών ορόφων, που με τη σειρά τους σχετίζονται με την απόκριση της κατασκευής. Η ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών σχετίζεται ακόμα με την εξέλιξη των μεθόδων σχεδιασμού με βάση τις μετακινήσεις, αλλά και με τις ανάγκες των ιδιοκτητών των ακινήτων για την γρήγορη και άμεση αξιολόγηση της λειτουργικότητας των κτιρίων μετά από ένα σημαντικό σεισμικό γεγονός. Σημειώνεται πως ο όρος πραγματικός χρόνος αναφέρεται στο γεγονός πως χρειάζονται κάποια δευτερόλεπτα με κάποια λεπτά από τη στιγμή της διέγερσης μέχρι να επεξεργαστούν τα δεδομένα των διάφορων αισθητήρων, να εξαχθούν τα αποτελέσματα και να σταλθούν στους εκάστοτε ενδιαφερομένους.

Για τη σεισμική παρακολούθηση των κατασκευών χρησιμοποιούνται σύγχρονες εφαρμογές οι οποίες αξιολογούν τη λειτουργικότητα, το βαθμό βλάβης και τη συμπεριφορά του κτιρίου κατά τη διάρκεια ισχυρών και μη σεισμικών διεγέρσεων. Οι σύγχρονες αυτές προσεγγίσεις έχουν σκοπό την εύρεση τόσο των σχετικών μετατοπίσεων των ορόφων, σε πραγματικό ή κοντά στο πραγματικό χρόνο, όσο και τη μελέτη της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής.

Για κατασκευή στην οποία έχουν τοποθετηθεί όργανα παρακολούθησης θα πρέπει να παρέχονται πληροφορίες για (α) την απόκριση της με αρκετή λεπτομέρεια, ώστε να συγκριθεί με την απόκριση που προβλέπεται από τα μαθηματικά μοντέλα και από αυτά που παρατηρούνται στα εργαστήρια (στόχος είναι η βελτίωση των μοντέλων), (β) τη σωστή ερμηνεία των αιτιών της οποιασδήποτε βλάβης στη κατασκευή, και (γ) τη διευκόλυνση των αποφάσεων σε ότι αφορά τη αναβάθμιση και ενίσχυση των δομικών συστημάτων.

## 1.2 Παραδείγματα εφαρμογών των οργάνων παρακολούθησης

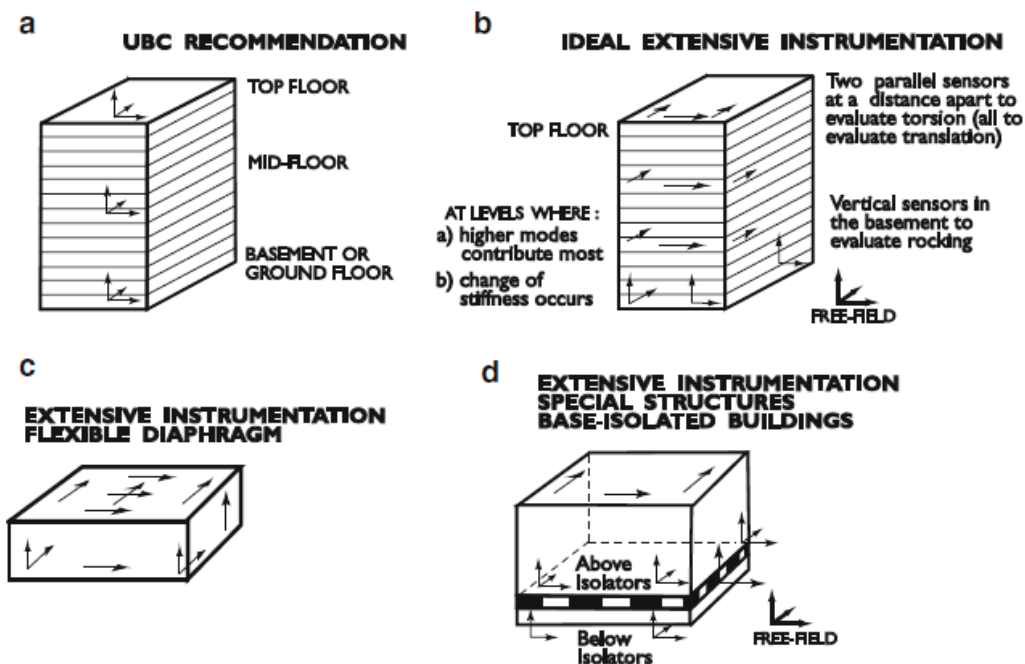
Γενικά, και μέχρι πρόσφατα, τα επιταχυνσιόμετρα έχουν χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί το χρονικό διάστημα και το εύρος της διεγέρσεως σε στρατηγικά επιλεγμένες θέσεις εντός της κατασκευής. Για παράδειγμα, μια διάταξη των οργάνων θα πρέπει να περιλαμβάνει, εάν είναι εφικτό, ένα τρι-αξονικό επιταχυνσιογράφημα ελεύθερου πεδίου, έτσι ώστε η αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής να μπορεί να ποσοτικοποιηθεί. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί όργανα παρακολούθησης λόγω της εμφάνισης συστημάτων συλλογής δεδομένων με ειδικό λογισμικό. Αυτά μπορούν να καταγράψουν, να ψηφιοποιήσουν και να επεξεργαστούν επιταχύνσεις, να υπολογίσουν τις μετατοπίσεις μέσω ολοκλήρωσης των επιταχύνσεων σε σχεδόν πραγματικό χρόνο και να μεταδώσουν επιταχύνσεις αλλά και μετατοπίσεις σε πραγματικό ή κοντά σε πραγματικό χρόνο. Το γεγονός αυτό δίνει τη δυνατότητα αυτοματοποίησης της διαδικασίας με την ύπαρξη αλγορίθμων για τον έλεγχο της δομικής κατάστασης μιας κατασκευής.

Ορισμένα παραδείγματα των εφαρμογών ή διατάξεων των οργάνων παρακολούθησης παρουσιάζονται παρακάτω.

- **Εκτεταμένη χρήση οργάνων:** Μέχρι το 2000, ο κώδικας στις Ηνωμένες Πολιτείες UBC συνέστηνε για τις σεισμικές ζώνες 3 και 4, να τοποθετούνται τουλάχιστον τρία τριαξονικά επιταχυνσιογραφήματα σε κάθε κτίριο με έξι ορόφους και πάνω και με συνολική επιφάνεια δαπέδου 60000 τετραγωνικά πόδια ή σε κάθε κτίριο με δέκα ορόφους και πάνω ανεξάρτητα από την επιφάνεια δαπέδου, Σχήμα 1.1(a). Ο σκοπός του ήταν να παρακολουθεί και όχι να αναλύει τα χαρακτηριστικά της απόκρισης της κατασκευής, όμως διαπιστώθηκε ότι οι διατάξεις αυτές δεν επαρκούσαν. Για το λόγο αυτό προτάθηκε η «εκτεταμένη χρήση οργάνων», η οποία συνιστά τη χρήση δύο παράλληλων αισθητήρων σε απόσταση μεταξύ τους για να αξιολογηθεί η στρέψη αλλά και τη χρήση κατακόρυφων αισθητήρων στο υπόγειο για να αξιολογηθεί ο λικνισμός, Σχήμα 1.2(b). Οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι στα επίπεδα όπου οι ανώτερες ιδιομορφές συνεισφέρουν περισσότερο και εμφανίζεται αλλαγή της δυσκαμψίας. Όμως, ειδικές διατάξεις οργάνων απαιτούνται για την κατανόηση και την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων απόκρισης. Για παράδειγμα, για την ακριβή μέτρηση της

απόκρισης του διαφράγματος απαιτούνται αισθητήρες στο κέντρο του καθώς και στα άκρα του, Σχήμα 1.1(c). Τέλος, η απόκριση των κατασκευών με συστήματα σεισμικής μόνωσης στη βάση και η αποτελεσματικότητα των συστημάτων αυτών επιτυγχάνεται καλύτερα μετρώντας τις τριαξονικές κινήσεις πάνω και κάτω από τα συστήματα μόνωσης καθώς και τις κινήσεις από την υπόλοιπη κατασκευή, Σχήμα 1.1(d).

- **Όργανα ελεύθερου πεδίου:** Για την ερμηνεία της κίνησης της θεμελίωσης σε σχέση με το έδαφος απαιτούνται όργανα ελεύθερου πεδίου για τη συλλογή περισσότερων πληροφοριών που σχετίζονται με τη κατασκευή, Σχήμα 1.2(b). Οι πληροφορίες αυτές αφορούν τα χαρακτηριστικά της κίνησης εδάφους στο βραχώδες υπόβαθρο σε μια καθορισμένη απόσταση από τη πηγή και την ενίσχυση των σεισμικών κυμάτων στα διάφορα στρώματα.



**Σχήμα 1.1:** Τυπικές διατάξεις οργάνων παρακολούθησης.

- **Όργανα με συγχρονισμό καταγραφών:** Εκτεταμένη καλωδίωση από κάθε αισθητήρα στην κεντρική μονάδα εγγραφής χρησιμοποιείται για το συγχρονισμό των καταγραφών υψηλής ακρίβειας σε μια κατασκευή. Ο συγχρονισμός αυτός είναι απαραίτητος εφόσον οι χρονοϊστορίες απόκρισης πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της



κατασκευής. Ωστόσο, οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις επιτρέπουν τη μείωση της χρήσης καλωδίων. Για παράδειγμα, το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS) χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως για τον συγχρονισμό των οργάνων της κατασκευής με ξεχωριστή μονάδα καταγραφής ελεύθερου πεδίου.

- **Σύγχρονα συστήματα καταγραφών:** Πριν από το 2005, τα συστήματα καταγραφών περιορίζονταν σε δώδεκα με δεκαοκτώ κανάλια. Πρόσφατα, πιο σύγχρονες εκδόσεις όπως το Granite4, το Dolomite4 και το 130-MC4 σχεδιάστηκαν ειδικά για να καταγράφουν και να μεταδίδουν μέσω διαφόρων μέσων, συμπεριλαμβανομένου και του διαδικτύου, συνδυασμούς δεδομένων δώδεκα, εικοσιτεσσέρων ή τριανταέξι καναλιών. Ακόμα, αναπτύχθηκαν συστήματα λήψης δεδομένων με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν πολλαπλούς μετατροπείς από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα και διαθέτουν πολλά κανάλια δεδομένων. Σε τέτοια συστήματα, οι μόνοι περιορισμοί είναι το κόστος των αισθητήρων και των μέσων μετάδοσης των δεδομένων που απαιτούνται. Οι περισσότερες συσκευές καταγραφής λειτουργούν με ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος, αλλά διαθέτουν και εσωτερικές μπαταρίες. Μέχρι πρόσφατα, η ανάπτυξη των εφαρμογών με ασύρματο αισθητήρα ήταν πολύ περιορισμένη, κυρίως λόγω της μικρής διάρκειας ζωής των μπαταριών που χρησιμοποιούνται ως εφεδρική τροφοδοσία.
- **Χρήση GPS για άμεσες μετρήσεις μετακινήσεων:** Για εύκαμπτες κατασκευές μεγάλης ιδιοπεριόδου, όπως ψηλά κτίρια και γέφυρες μεγάλων ανοιγμάτων, οι μετρήσεις των δυναμικών μετακινήσεων γίνονται με τη χρήση GPS. Ωστόσο, οι μετρήσεις αυτές καθίστανται δυνατές μόνο στην οροφή των κτιρίων.
- **Μετακινήσεις μέσω διπλής ολοκλήρωσης σε πραγματικό χρόνο:** Ο προηγούμενος περιορισμός, που αφορά τη χρήση του GPS, έχει εξαλειφθεί υπολογίζοντας τις μετακινήσεις από αποκρίσεις επιτάχυνσης σε πραγματικό ή κοντά σε πραγματικό χρόνο. Ένας διακομιστής ψηφιοποιεί συνεχόμενα αναλογικά δεδομένα επιτάχυνσης από τα επιταχυνσιόμετρα και τελικά τα

μεταδίδει σε χρήστες μέσω του διαδικτύου. Προκειμένου να υπολογιστούν οι σχετικές μετακινήσεις των οροφών γίνεται διπλή ολοκλήρωση των φιλτραρισμένων δεδομένων επιτάχυνσης σε πραγματικό χρόνο.

- **Διατάξεις για την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής:** Η μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών των κατασκευών λόγω της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής μπορεί να είναι επωφελής ή επιζήμια για την απόκρισή τους. Για παράδειγμα, είναι δυνατόν οι θεμελιώδεις ιδιοπερίοδοι να αυξηθούν λόγω αυτής της αλληλεπίδρασης. Για τον υπολογισμό των μεταβολών αυτών απαιτούνται (α) η διάταξη των αισθητήρων στους ορόφους του κτιρίου (β) η διάταξη των αισθητήρων στη θεμελίωση, αλλά και κάτω και επάνω από τα εξωτερικά τοιχώματα του θεμελίου για να συλλάβει τη μεταβολή των επιταχύνσεων, μετακινήσεων και πιέσεων σε οριζόντιες και κάθετες διευθύνσεις και (γ) μια κατακόρυφη διάταξη κάτω από την κατασκευή ή στο άμεσο περιβάλλον της και μια οριζόντια διάταξη σε άμεση γειτνίαση με αυτήν.

Ένας ακόμη τρόπος παρακολούθησης της κατάστασης μιας κατασκευής με μη καταστροφικές μεθόδους είναι η **χρήση αισθητήρων ασύρματης τεχνολογίας**. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για τους ασύρματους αισθητήρες αφορά την εγκατάσταση. Υψηλής ποιότητας καλώδια σήματος, που είναι απαραίτητα για τη μετάδοση αναλογικών σημάτων, μπορεί να κοστίζουν αρκετά ώστε να εξυπηρετήσουν το μεγάλο αριθμό μετατροπέων σε ένα κεντρικό σύστημα απόκτησης δεδομένων. Επιπλέον, για πολλές κατασκευές, τα ενσωματωμένα καλώδια ενδέχεται να έχουν ασυνέχειες, μειώνοντας τη συνολική ακεραιότητα τους. Άλλα μειονεκτήματα αφορούν το γεγονός ότι τα αναλογικά σήματα είναι πολύ ευαίσθητα στο θόρυβο και μόλις το καλώδιο υποστεί ζημιά, ο αισθητήρας που συνδέεται με αυτό υποβαθμίζεται μέχρι αυτό να επιδιορθωθεί.

Από την άλλη πλευρά, οι ασύρματοι αισθητήρες διαθέτουν συχνά πολλαπλές, περιττές διαδρομές μετάδοσης. Έτσι όταν μία διαδρομή χαθεί, κάποια άλλη μπορεί να είναι διαθέσιμη για την μετάδοση των δεδομένων στο χρήστη. Η χρήση αισθητήρων με καλώδια δεν είναι επιθυμητή σε περιπτώσεις απαίτησης μειωμένου ίδιου βάρους, περιστρεφόμενης κατασκευής ή έκθεσης τους στα καιρικά φαινόμενα. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της ασύρματης τεχνολογίας αισθητήρων βασίζεται στο γεγονός ότι τα

αναλογικά σήματα μετατρέπονται σε ψηφιακά, τα οποία μεταδίδονται μέσω ενός ψηφιακού ασύρματου μόντεμ και έτσι οι παρεχόμενες υπολογιστικές δυνατότητες μπορούν να αξιοποιηθούν για την επεξεργασία δεδομένων αμέσως μόλις συλλεχθούν. Με αυτόν τον τρόπο δεν υπάρχει πια ο κίνδυνος απώλειας δεδομένων.

Ειδικότερα, τα εξαρτήματα ενός ασύρματου αισθητήρα, τα οποία είναι απαραίτητα για τη συλλογή, ερμηνεία και μετάδοση των δεδομένων, αποτελούνται από α) μια διεπιφάνεια ανίχνευσης για την ψηφιοποίηση και δειγματοληψία αναλογικών σημάτων του μετατροπέα, β) έναν υπολογιστικό πυρήνα για τη διαχείριση των λειτουργιών του αισθητήρα και την εκτέλεση αναλύσεων, γ) μια πλατφόρμα επικοινωνίας, δ) μια διεπιφάνεια ενεργοποίησης (προαιρετική) ώστε ο αισθητήρας να διεγερθεί και ε) μια τροφοδοσία ρεύματος.

Η χρήση όμως των ασύρματων αισθητήρων περιλαμβάνει περιορισμούς που κατατάσσονται στις παρακάτω πέντε γενικές κατηγορίες:

- Θέματα που σχετίζονται με περιορισμένους ενεργειακούς πόρους
- Ζητήματα που σχετίζονται με τους συνδέσμους επικοινωνίας του ασύρματου δικτύου
- Περιορισμένη μνήμη και υπολογιστικά εργαλεία
- Προβλήματα διάδοσης δεδομένων και υπολογιστικής ισχύος
- Θέματα ασφάλειας και αξιοπιστίας

Παρουσιάζεται, ακόμα, μια νέα μέθοδος εκτίμησης βλαβών που βασίζεται στην χρήση **πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων**. Η μείωση της δομικής ακεραιότητας της κατασκευής διαπιστώνεται με τις αλλαγές του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της μηχανικής αντίστασης του αισθητήρα, η οποία σχετίζεται άμεσα με τις παραμέτρους της κατασκευής. Η μηχανική αντίσταση μπορεί να μετρηθεί πειραματικά εφαρμόζοντας μια ημιτονοειδή δύναμη σε ένα σημείο και το μέγεθος της προσδιορίζεται από την αναλογία της μετρούμενης δύναμης και του εύρους της ταχύτητας, ενώ η διαφορά φάσης από τη διαφορά φάσης μεταξύ των αντίστοιχων μετρημένων σημάτων τάσης. Η μηχανική αντίσταση εκτιμάται βάση της ηλεκτρομηχανικής αγωγιμότητας πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων, οι οποίοι τοποθετούνται στην κατασκευή. Μπορεί να μετρηθεί με αναλυτές αντίστασης/μετρητές LCR. Βέβαια σημειώνεται πως, δεν επιτρέπεται η χρήση των συμβατικών κεφαλών αντίστασης και των επιταχυνσιομέτρων για υψηλές

συχνότητες, γιατί ακόμα και τα επιταχυνσιόμετρα υψηλής τεχνολογίας παρουσιάζουν τα μειονεκτήματα του υψηλού κόστους και του μικρού λειτουργικού εύρους. Αυτή η δυσκολία όμως μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση «ευφών» πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων PZT μέσω της τεχνικής της σύνθετης ηλεκτρομηχανικής αντίστασης (EMI). Η τεχνική EMI χρησιμοποιεί τα δύο έξυπνα χαρακτηριστικά των πιεζοηλεκτρικών υλικών, όπου το ίδιο υλικό εκτελεί διπλό ρόλο ως διεγέρτη και ως αισθητήρα.

### 1.3 Βασικές μεθοδολογίες της εκτίμησης βλαβών

Για τη μείωση των λαθών αξιολογούνται οι βλάβες με διάφορες ανεξάρτητες τεχνικές και δίνονται τα αποτελέσματα ως πιθανότητα υπέρβασης των σταθμών επιτελεστικότητας. Ακόμα, όσες περισσότερες πληροφορίες είναι γνωστές για το στατικό σύστημα της κατασκευής, όπως οι καμπύλες τρωτότητας του κάθε υλικού, τόσο πιο ακριβή είναι η εκτίμηση του επιπέδου βλάβης. Τα αποτελέσματα μπορεί να αναφέρονται είτε στο κτίριο ως σύνολο είτε τοπικά σε κάθε όροφο και να έχουν ντετερμινιστικές ή πιθανοτικές τιμές. Οι μεθοδολογίες που εφαρμόζονται για την εκτίμηση βλαβών είναι οι ακόλουθοι:

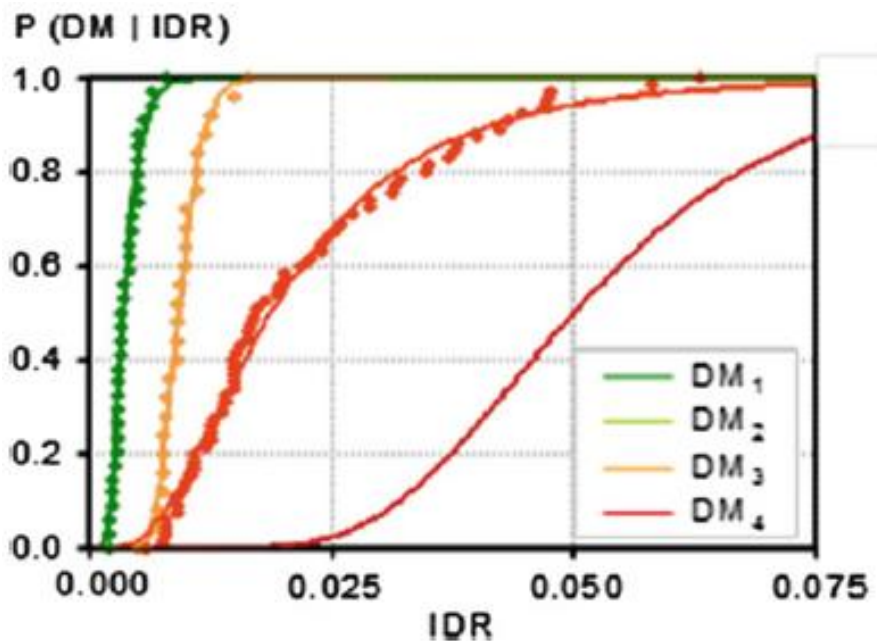
- Τεχνικές προσδιορισμού συστήματος
- Αναλύσεις κυματιδίου
- Προσεγγίσεις βάση του σχεδιασμού
- Πιθανοτικές μέθοδοι, όπως οι καμπύλες τρωτότητας που προτείνονται από τον HAZUS-MH ή λεπτομερείς τρωτότητες υλικών που έχουν αναπτυχθεί από το PEER/NSF ή αναπτύσσονται από το ATC-58 project.

Οι **τεχνικές προσδιορισμού τους συστήματος** υπολογίζουν και εντοπίζουν τις αλλαγές στα δυναμικά χαρακτηριστικά του κτιρίου (περίοδος, απόσβεση, ιδιομορφές) και τις συσχετίζουν με πιθανές βλάβες. Ο Naiem [1997] εντόπισε πως αν και η αύξηση της περιόδου ισοδυναμεί με την εμφάνιση βλαβών στα κτίρια, είναι δύσκολο να διαπιστωθεί ο βαθμός και το είδος της βλάβης χωρίς πρόσθετες πληροφορίες. Αυτό συμβαίνει κυρίως γιατί, η κατάσταση του εδάφους, η υγρασία, η θερμοκρασία και η συμμετοχή των μη φέροντων στοιχείων συνεισφέρουν στις αλλαγές των δυναμικών χαρακτηριστικών και είναι δύσκολο να συσχετιστούν οι αλλαγές αυτές με τις βλάβες.

Το **κυματίδιο** που χρησιμοποιείται κατά την ανάλυση είναι πρακτικώς οποιαδήποτε μορφής κύματος που έχει περιορισμένη διάρκεια και μηδενικό μέσο όρο. Όταν δημιουργείται μια βλάβη, το δοσμένο σήμα χωρίζεται σε δύο, στη προσέγγιση και στη λεπτομέρεια. Όσον αφορά τη λεπτομέρεια, απεικονίζει τις ξαφνικές αλλαγές στο περιεχόμενο της συχνότητας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση βλαβών. Ένα από τα προβλήματα αυτής της μεθόδου είναι η δυσκολία να συσχετιστεί το μέγεθος του εύρους με την εμφάνιση της βλάβης. Ακόμα, είναι πολύ πιο δύσκολο να συσχετιστούν τα διάφορα επίπεδα βλάβης με τα διαφορετικά μεγέθη του εύρους. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα μια κορυφή του σήματος να σχετίζεται με κάτι άλλο πέρα από τη δομική βλάβη. Πληροφορίες για την κατασκευή πριν τη εμφάνιση βλαβών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σημείο αναφοράς και γι' αυτό το λόγο αυτού του είδους η ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα άλλων μεθόδων.

Η χρήση της μεθοδολογίας των **προσεγγίσεων βάση του σχεδιασμού** για την ανίχνευση των βλαβών, πέρα από την εύρεση της μέγιστης σχετικής μετακίνησης μεταξύ των ορόφων, είναι πολύ περιορισμένη. Αυτό συμβαίνει, αρχικά, γιατί οι τιμές σχεδιασμού από τη φύση τους είναι συντηρητικές, άρα και η υπέρβαση τους δεν σημαίνει απαραίτητα και βλάβη. Ένα ακόμη λόγος είναι ότι οι τιμές σχεδιασμού με βάση την τέμνουσα βάσης βασίζονται σε εμπειρικούς και μερικές φορές αυθαίρετους παράγοντες και τέλος γιατί για να χρησιμοποιήσουμε τις προαναφερθείσες τιμές χρειαζόμαστε ακριβή γνώση των δυνάμεων σχεδιασμού, των τεχνικών λεπτομερειών και γενικά των θετικών και αρνητικών του συγκεκριμένου στατικού συστήματος και γεωμετρίας.

Η χρήση των **πιθανοτικών μεθόδων** είναι η πιο υποσχόμενη μέθοδος στην εκτίμηση βλαβών σε πραγματικό χρόνο, καθώς απεικονίζει την αβεβαιότητα στην απόκριση των κατασκευών. Βασίζεται σε καμπύλες τρωτότητας οι οποίες συνδέουν την πιθανότητα υπέρβασης μιας συγκεκριμένης στάθμης επιτελεστικότητας με παραμέτρους όπως η συνολική σχετική μετακίνηση, η σχετική μετακίνηση, η επιτάχυνση και η παραμόρφωση των ορόφων, Σχήμα 1.2. Οι καμπύλες τρωτότητας προκύπτουν είτε βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων, αναλυτικών προσομοιωμάτων ή γνώμες ειδικών. Αποτελούν τη βάση για την εκτίμηση των βλαβών βάση της μεθοδολογία HAZUS-MH.



**Σχήμα 1.2:** Καμπύλες τρωτότητας που συνδέουν την πιθανότητα υπέρβασης των στάθμων επιτελεστικότητας με τη σχετική μετακίνηση των ορόφων.

### 1.3.1 Σύστημα ανίχνευσης βλαβών REFLEXX

Παρουσιάζονται παρακάτω η διαδικασία και οι μέθοδοι που υπεισέρχονται στο REFLEXX σύστημα. Το σύστημα αυτό είναι ένα σύγχρονο σύστημα για την ανίχνευση των βλαβών σε πραγματικό χρόνο και την αξιολόγηση της απόδοσης (DDPE) που ανέπτυξαν οι John A. Martin & Associates σε συνεργασία με την Inc και DigitexxData Systems.

Γενικά, στην εκτίμηση βλαβών με μη καταστροφικές μεθόδους οι αισθητήρες λαμβάνουν και επεξεργάζονται δεδομένα σχετικά με τις κινήσεις του κτιρίου και τα δυναμικά τους χαρακτηριστικά. Ορίζεται ένα καθορισμένο όριο διέγερσης. Ο κάθε αισθητήρας λαμβάνει δεδομένα τόσο κατά τη διάρκεια της διέγερσης, μετά την υπέρβαση του προκαθορισμένου ορίου, όσο και στην κατάσταση ηρεμίας για ένα ορισμένο χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο παρέχονται ρεαλιστικές οριακές συνθήκες για να εξαχθούν ακριβή υπολογισμοί. Μετά από κάθε διέγερση το REFLEXX σύστημα εξάγει μια αναφορά σχετικά με τη διέγερση και τις επιπτώσεις της στην κατασκευή. Για να συμβεί αυτό πρέπει να είναι γνωστά η δομή της κατασκευής, οι θέσεις των αισθητήρων και τα ντετερμινιστικά ή πιθανοτικά όρια της διέγερσης. Για τη σωστή λειτουργία του συστήματος πρέπει να έχουμε αξιόπιστα μέσα μετάδοσης των

δεδομένων, όπως επίσης κάθε γεγονός να αρχειοθετείται με αναφορά στα χαρακτηριστικά του και στο μοντέλο της κατασκευής κατά τη διάρκεια της διέγερσης και αν αυτά αλλάζουν να γίνονται και οι κατάλληλες προσαρμογές. Για να χρησιμοποιείται ευρέως πρέπει η μορφή, το περιεχόμενο της αναφοράς αλλά και ο τρόπος ειδοποίησης να προσαρμόζεται εύκολα στον κάθε χρήστη. Ένα σύστημα αξιολόγησης της απόδοσης DDPE χρησιμοποιεί δεδομένα που εξάγονται από τους διαφόρους τύπους αισθητήρων όπως:

- Επιταχυνσιογραφήματα
- Μετρητές ταχύτητας, όπως μετρητές ταχύτητας ανέμου
- Αισθητήρες μετατόπισης όπως μετρητές παραμόρφωσης, μετρητές κλίσης LVDTs
- Ανιχνευτές διείσδυσης
- Περιβαλλοντικοί αισθητήρες (μέτρηση θερμοκρασίας, ταχύτητας ανέμου και κατεύθυνσης).

Με αυτόν τον τρόπο ενσωματώνονται στο DDPE σύστημα άλλου είδους συστήματα ανίχνευσης βλαβών που υπάρχουν ήδη στην κατασκευή. Η κατανομή των αισθητήρων στην κατασκευή απαιτεί προσεκτική εξέταση των ιδιοτήτων της, των ζωνών, όπου αναμένονται οι βλάβες, και το αν βρίσκεται ευαίσθητος εξοπλισμός στο κτίριο. Η κατανομή των επιταχυνσιομέτρων, όπου είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες, πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες που θέλουμε να λάβουμε και το διαθέσιμο προϋπολογισμό που διαθέτουμε.

### **1.3.2 Σύστημα ανίχνευσης βλαβών με συνδυασμό νευρωνικών δικτύων, κυματικών αναλύσεων και πιθανοτικών μεθόδων**

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες όπου γίνεται χρήση υπολογιστών για την επεξεργασία του σήματος και την ανίχνευση βλαβών, λαμβάνοντας υπόψη αβεβαιότητες όπως ο θόρυβος, η ατέλεια και η μεταβλητότητα στα δεδομένα ανίχνευσης και στο υπολογιστικό μοντέλο. Η μεθοδολογία που προτείνεται παρακάτω βασίζεται στο δυναμικό τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, στις κυματικές αναλύσεις και στη μέθοδο της Bayesian πιθανοτικής αξιολόγησης.

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο νευρωνικού δικτύου ασαφούς κυματομορφής για την πραγματοποίηση της μη παραμετρικής αναγνώρισης των πολλαπλών δεδομένων και αποτελεσμάτων της κατασκευής. Το δυναμικό νευρωνικό δίκτυο του μοντέλου διατηρεί τη χρονική ακολουθία των διανυσμάτων εισόδου και απομνημονεύει τα δεδομένα των χρονοϊστοριών, που προηγήθηκαν. Έχει αποδειχθεί ότι παρέχει ακριβέστερη μη γραμμική προσέγγιση από το συμβατικό νευρωνικό δίκτυο. Σε συνήθεις συνθήκες, η κατασκευή υποβάλλεται σε εξωτερική διέγερση χρησιμοποιώντας μη ολοκληρωμένα δεδομένα αισθητήρων. Το μοντέλο χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των δυναμικών αποκρίσεων του δομικού συστήματος υπό άγνωστες συνθήκες. Τόσο τα προβλεπόμενα όσο και τα δεδομένα των χρονοϊστοριών από τους αισθητήρες αποσυντίθενται σε πολλαπλές αναλύσεις χρόνου-συχνότητας χρησιμοποιώντας μια διακεκριμένη μέθοδο μετασχηματισμού του κυματιδίου.

Η ενέργεια του κυματιδίου υπολογίζεται με βάση τους συντελεστές του καθενός και χρησιμοποιείται ως χαρακτηριστικός δείκτης για την ανίχνευση βλάβης σε ένα δομικό σύστημα. Εκτενέστερα, τα κυματίδια χρησιμοποιούνται για την αντιπροσώπευση ενός σήματος μέσα σε περιορισμένο χρόνο και συχνότητα. Η μέθοδος μετασχηματισμού του κυματιδίου είναι ένα μαθηματικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για την αποσύνθεση ενός χρονικού σήματος σε ένα σύνολο συνιστωσών με ορισμένη χρονική διάρκεια και διάφορων συχνοτικών αναλύσεων. Οι Coifman and Wickerhauser [1992] πρότειναν το μετασχηματισμό ενός συνόλου διακριτών κυματιδίων για να επιτευχθεί μια καλύτερη και ρυθμιζόμενη ανάλυση στις υψηλές συχνότητες. Η ενέργεια των κυματιδίων αυτών αντιπροσωπεύει το ενεργειακό περιεχόμενο του σήματος που έχει συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Για να αξιολογηθεί αν τα κυματίδια αυτά αντιπροσωπεύουν αποτελεσματικά το αρχικό σήμα χρησιμοποιούνται δύο κριτήρια, η συσχέτιση και η συνοχή. Η συσχέτιση μεταξύ του σήματος που έχει συντεθεί και του αρχικού χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ομοιότητας των δύο σημάτων στο πεδίο του χρόνου. Η συνοχή χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ομοιότητας στην περιοχή των συχνοτήτων.

Η μέθοδος πιθανοτικής αξιολόγησης Bayesian ενσωματώνει πιθανές αβεβαιότητες στα δεδομένα των αισθητήρων μεγάλης μεταβλητότητας και παρέχει ένα ποσοτικό μέτρο εμπιστοσύνης ενός υπολογιστικού μοντέλου. Τα αποτελέσματα του μοντέλου συγκρίνονται με τις πειραματικές παρατηρήσεις προκειμένου να εκτιμηθεί ποσοτικά η εγκυρότητα ή οι προβλεπόμενες δυνατότητες των



υπολογιστικών μοντέλων. Όταν τα αποτελέσματα που προβλέπονται από το μοντέλο συγκρίνονται με τα μετρηθέντα αποτελέσματα (κάτω από την ίδια διέγερση), η διαφορά μεταξύ αυτών θα χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση των βλαβών. Με τον τρόπο αυτό, θα μπορούσε να γίνει μια ποσοτική Bayesian-προσέγγιση για την εκτίμηση πολλαπλών μοντέλων και την ανίχνευση βλαβών υπό αβεβαιότητα χρησιμοποιώντας την ενέργεια των χαρακτηριστικών κυματιδίων που εξάγονται από τις δεδομένες χρονοϊστορίες.

#### 1.4 Παραδείγματα σεισμικών διεγέρσεων κοντινού πεδίου και επιπτώσεις τους στις κατασκευές

##### 1.4.1 Πόλη Christchurch της Νέας Ζηλανδίας

Τα έτη 2010 και 2011, σημειώθηκε μια ασυνήθιστη αλληλουχία καταστροφικών σεισμών λόγω των επιπτώσεων του φαινομένου της κατευθυντικότητας, της λεκάνης απορροής και της μη γραμμικής απόκρισης των επιφανειακών εδαφικών εναποθέσεων στην πόλη Christchurch της Νέας Ζηλανδίας. Παρατηρήθηκε εδαφική κίνηση μεγάλης περιόδου λόγω της επιφανειακής διάδοσης των κυμάτων και η ταχύτητα του παλμού που σχετίζεται με το φαινόμενο της κατευθυντικότητας σχετίζεται ακόμα και με το φαινόμενο της ανάκλασης των κυμάτων μέσα στη λεκάνη απορροής. Επιπλέον, η μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους συνέβαλε στην αύξηση του εύρους της εδαφικής κίνησης.

Αρχικά, με βάση τις χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης διαπιστώθηκε ότι οι οριζόντιες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης, στη θέση του μαλακού εδάφους, έχουν σημαντικά μικρότερο εύρος αλλά μεγαλύτερη διάρκεια από εκείνες στο βραχώδες υπόβαθρο. Αντίθετα, οι κατακόρυφες συνιστώσες της επιτάχυνσης στις δύο θέσεις είναι παρόμοιες. Επιπλέον, εξετάζοντας τα φάσματα απόκρισης της ψευδο-επιτάχυνσης και στις δύο θέσεις παρατηρήθηκε ότι στη θέση του μαλακού εδάφους η οριζόντια κίνηση έχει σημαντικά μικρότερο εύρος σε μικρότερες περιόδους, αλλά μεγαλύτερο εύρος σε μεγαλύτερες περιόδους. Ενώ και στις δύο θέσεις, τα κατακόρυφα φάσματα απόκρισης είναι πολύ παρόμοια. Ακόμα, λόγω του ότι οι περισσότεροι καταγραφικοί σταθμοί βρίσκονται σε μαλακά εδάφη, παρατηρήθηκαν έντονες σεισμικές κινήσεις στην κατακόρυφη συνιστώσα. Κάτι τέτοιο εξηγείται από

το γεγονός ότι, για μαλακά εδάφη σε ιζηματογενείς λεκάνες, μεγάλες κατακόρυφες επιταχύνσεις σε θέσεις κοντά στην πηγή μπορεί να προκύψουν από τη μετατροπή κεκλιμένων κυμάτων SV σε P κύματα στη διεπιφάνεια των ιζηματογενών λεκανών. Τα κύματα αυτά ενισχύονται και διαθλώνται με την κάθετη πρόσκρουση λόγω της κλίσης των P κυμάτων της λεκάνης. Όσον αφορά το φαινόμενο της ρευστοποίησης, η άφθονη παροχή νερού μέσω των ανοιχτών καναλιών, ο υδροφόρος ορίζοντας και οι χαμηλού υψομέτρου περιοχές κοντά στην ακτογραμμή, το επίπεδο των υπόγειων υδάτων που είναι σχετικά υψηλό σε ολόκληρη την πόλη δικαιολογούν γιατί το έδαφος της περιοχής είναι ευάλωτο σε αυτό.

Τέλος, ακολουθεί η απόκριση των κατασκευών με έμφαση στα κτίρια χωρίς οπλισμό και στα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα. Αν και οι ξύλινες κατασκευές πλαισιακού χαρακτήρα γενικά λειτουργούσαν καλά, τα θεμέλια τους δεν μπορούσαν να φέρουν τις πλευρικές φορτίσεις και τις διαφορικές καθιζήσεις λόγω της ρευστοποίησης. Σημειώθηκαν ζημιές σε γέφυρες, όπως η περιστροφή των ακροβάθρων, εξαιτίας της πλευρικής μετατόπισης, που συνέβη στις όχθες των ποταμών, αλλά και στα υπόγεια δίκτυα σωληνώσεων τα οποία υπέστησαν εκτεταμένες βλάβες εξαιτίας της ρευστοποίησης. Σε γενικές γραμμές, τα κτίρια από άοπλη τοιχοποιία χωρίς σεισμικές επεμβάσεις είχαν πολύ κακή απόκριση, ενώ τα ενισχυμένα κτίρια από άοπλη τοιχοποιία παρουσίασαν γενικά καλές αποκρίσεις. Ακόμα, στη βιομηχανική περιοχή η οποία ήταν αυτή με τις περισσότερες βλάβες, τα κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος (είτε πλαισιακά είτε με τοιχία) ήταν ο πιο συνηθισμένος τύπος κατασκευής, τα μισά από τα οποία κατασκευάστηκαν χωρίς σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς. Αρά, όπως αναμενόταν, παρατηρήθηκε υψηλό ποσοστό βλάβης (κίτρινη/κόκκινη σήμανση), 54% για τα κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος κατασκευής πριν από το 1970. Ωστόσο, σχετικά υψηλά επίπεδα βλαβών παρατηρήθηκαν και στα κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος κατασκευής μετά το 1976.

#### **1.4.2 Κτίρια Torre Central και Construction Chamber της Χιλής**

Σε μια σεισμογενή χώρα, όπως η Χιλή, είχαν ενσωματωθεί όργανα παρακολούθησης μόνο σε 3 κτίρια και σε μια γέφυρα. Ένα από τα προαναφερθέντα τρία κτίρια ήταν το Torre Central Building του Πανεπιστημίου της Χιλής, το οποίο

διέθετε ένα συνεχές σύστημα παρακολούθησης για την εξέταση των αλλαγών στα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Το σύστημα παρακολούθησης διέθετε οκτώ επιταχυνσιόμετρα, με δύο παράλληλα συστήματα απόκτησης των σεισμικών δεδομένων με μια διάταξη ενεργοποίησης (το πρώτο) και με ενίσχυση του αναλογικού σήματος για συνεχή λήψη των δονήσεων του περιβάλλοντος (το δεύτερο). Τρεις αισθητήρες είχαν τοποθετηθεί οριζόντια στον τρίτο και στον όγδοο όροφο και δύο στο επίπεδο θεμελίωσης. Αυτή η διάταξη επιτρέπει την παρακολούθηση της κίνησης της κατασκευής, την εύρεση των ιδιοτήτων της και τη μερική καταγραφή των γραμμικών και μη γραμμικών χαρακτηριστικών απόκρισης. Επιπλέον, είχαν εγκατασταθεί τρεις αισθητήρες υγρασίας σε ένα φρεάτιο στη δυτική πλευρά του κτιρίου. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται για τη συσχέτιση των παραμέτρων απόκρισης με την υγρασία του εδάφους και αποκτά επίσης πληροφορίες και από το μετεωρολογικό σταθμό του Πανεπιστημίου. Τα δεδομένα αποθηκεύονται και επεξεργάζονται σε έναν υπολογιστή χρησιμοποιώντας δύο τεχνικές για την ταυτοποίηση των παραμέτρων των ιδιομορφών, τη μέθοδο ανίχνευσης αιχμής και τη μέθοδο της στοχαστικής υποδιαστολής (SSI).

Αρχικά λοιπόν για να προσδιορίσουμε τις παραμέτρους των ιδιομορφών λόγω των εξωτερικών δονήσεων και να τις χρησιμοποιήσουμε ως τιμές αναφοράς για τον προσδιορισμό των μεταβολών των χαρακτηριστικών τους γίνεται χρήση των δεδομένων δονήσεων των τελευταίων δυο χρόνων, αλλάζοντας παραμέτρους όπως συνθήκες θερμοκρασίας, υγρασίας, βροχής και ανέμου. Αυτή η ανάλυση χρησιμεύει ακόμα στην αναγνώριση της μη γραμμικής συμπεριφοράς, λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων, και στην ανάπτυξη παραμετρικών μοντέλων των ιδιοτήτων των ιδιομορφών. Όσον αφορά το σεισμικό γεγονός καταγράφηκε μέγιστη επιτάχυνση στο επίπεδο του εδάφους 0.16g και μέγιστη επιτάχυνση της κατασκευής 0.45g. Σύμφωνα με την ανάλυση της εξωτερικής δόνησης οι πρώτες ιδιοπερίοδοι αυξήθηκαν κατά μέσο όρο 14%, οι τιμές απόσβεσης παρουσίασαν μεγάλη διασπορά, ενώ τα σχήματα των ιδιομορφών ελάχιστες διασπορές.

Για τα άλλα δυο κτίρια, τα δεδομένα από το σεισμό ανακτήθηκαν και δόθηκε μια λεπτομερής οπτική και αναλυτική περιγραφή του βλαβών και των μεταβολών των ιδιοτήτων των ιδιομορφών, λόγω ενός αλγόριθμου ταυτοποίησης και χαρακτηρισμού των παραμέτρων. Ένα από αυτά ήταν το Chilean Construction Chamber Building όπου το σύστημα ενόργανης παρακολούθησης αποτελείται από δώδεκα μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα ισορροπημένης δύναμης συνδεδεμένα σε μια κεντρική μονάδα

εγγραφής. Τρεις αισθητήρες είχαν τοποθετηθεί οριζόντια στον δωδέκατο και δέκατο ένατο όροφο, δύο αισθητήρες στο επίπεδο του εδάφους και δύο οριζόντιοι και δύο κάθετοι αισθητήρες στο τέταρτο υπόγειο όροφο. Και σε αυτήν την περίπτωση η διάταξη των αισθητήρων επιτρέπει την παρακολούθηση της κίνησης της κατασκευής, την εύρεση των ιδιοτήτων της και την εύρεση των γραμμικών και μη γραμμικών χαρακτηριστικών απόκρισης.

Κατά το σεισμό του 2010, οι βλάβες παρουσιάστηκαν κυρίως στα περιμετρικά τοιχία οπλισμένου σκυροδέματος, στα πλαίσια και σε μερικά μη φέροντα χωρίσματα και στις οροφές. Όσον αφορά το σεισμικό γεγονός, καταγράφηκε μέγιστη επιτάχυνση στο επίπεδο του εδάφους 0.17g και 0.097g για την οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση αντίστοιχα και μέγιστη επιτάχυνση της κατασκευής 0.31g. Προσδιορίστηκαν και εδώ αρχικά οι ιδιότητες των ιδιομορφών από δονήσεις του περιβάλλοντος πριν και μετά τον σεισμό, τιμές αναφοράς, προκειμένου εκτιμηθούν οι πιθανές μόνιμες αλλαγές στις ιδιότητες αυτές. Συμπέρασμα ήταν ότι οι βλάβες της κατασκευής απεικονίζονται κυρίως στις περιόδους με αλλαγές κατά 22%, ενώ οι αλλαγές στην απόσβεση ήταν ελάχιστες. Όπως και στο προηγούμενο κτίριο χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα προσδιορισμού με ολισθαίνοντα αλληλοεπικαλυπτόμενα παράθυρα και από τη διακύμανση της συχνότητας, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η κύρια αλλαγή στη συχνότητα ξεκίνησε με εύρος επιτάχυνσης του εδάφους μεγαλύτερο από 0.08g και μετά από αυτό δεν προέκυψε καμία μόνιμη αλλαγή. Όταν μειώθηκε το εύρος της απόκρισης, η συχνότητα αυξήθηκε σε μια τιμή κοντά στο επίπεδο δόνησης του περιβάλλοντος μετά το σεισμό. Παρατηρώντας τις αρχικές, ελάχιστες και τελικές τιμές των πέντε πρώτων συχνοτήτων διαπιστώνεται η μεγάλη διακύμανση που αγγίζει το 40%. Σημειώνεται, ακόμα, πως στο κτίριο υπάρχουν ελαφρές βλάβες και ότι οι παραπάνω μεταβολές εξαρτώνται από το εύρος της απόκρισης και έτσι θα μπορούσαν να εξαφανιστούν αν δεν υπάρχει καμία βλάβη. Αυτά τα παραδείγματα δείχνουν τις σημαντικές δυνατότητες της εκτίμησης βλαβών με μη καταστρεπτικές μεθόδους για τη γρήγορη και άμεση εκτίμηση των βλαβών σε μια κατασκευή.

### 1.4.3 Κτίριο Vina Del Mar της Χιλής

Σεισμικοί σταθμοί είχαν εγκατασταθεί στο κτίριο της Vina Del Mar στη Χιλή για να καταγράφουν τα δεδομένα επιταχυνσιόμετρων της κατασκευής σε πραγματικό χρόνο. Σκοπός των M. Garevski et al. [2013] ήταν η ιδιομορφική ανάλυση του κτιρίου, η αναλυτική και πειραματική αξιολόγηση των ιδιομορφών και των ιδιοσυχνοτήτων του και η παρατήρηση πιθανών αλλαγών στα δυναμικά χαρακτηριστικά εξαιτίας της κίνησης του εδάφους. Κατά την περίοδο εμφάνισης συχνών μετασεισμών για την εξακρίβωση των βλαβών χρησιμοποιήθηκε μια προσεγγιστική παραμετρική ταυτοποίηση του συστήματος (ARX).

Αρχικά, η κατασκευή σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ως μικτό σύστημα πλαισίων και τοιχίων από οπλισμένο σκυρόδεμα με δεκαέξι ορόφους πάνω από το επίπεδο του εδάφους και τρία υπόγεια επίπεδα. Αναπτύχθηκε ένα φορητό πολυκαναλικό σύστημα από την ομάδα DIGITEXX και δεκαέξι επιταχυνσιόμετρα εγκαταστάθηκαν σε ολόκληρη την κατασκευή. Ένα αναλυτικό μοντέλο δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα SAP2000 προκειμένου να συγκριθούν τα αναλυτικά και πειραματικά αποτελέσματα.

Γενικά, σε μια κατασκευή, στην οποία έχουν τοποθετηθεί όργανα παρακολούθησης, απαιτείται η μαθηματική περιγραφή της συμπεριφοράς της για να μπορεί να περιγραφεί το δυναμικό σύστημα της σε βλαμμένη ή μη δομική κατάσταση. Υποθέτοντας ότι το δομικό σύστημα είναι γραμμικό και χρονικά αμετάβλητο, μπορούν να υπολογιστούν πολυάριθμα μοντέλα ταυτοποίησης συστήματος από ψηφιοποιημένα δεδομένα εισόδου-εξόδου. Από τα διαθέσιμα μοντέλα, επιλέγεται το μοντέλο χρονοϊστορίων εισόδων με αυτόματη αντιστροφή (ARX), ένα ισχυρό μαθηματικό εργαλείο, εύκολο στον υπολογισμό. Η μέθοδος βασίζεται στην καταγραφή του ιστορικού των διεγέρσεων και αποκρίσεων. Η διαδικασία αναγνώρισης βλαβών σχετίζεται με την παρατήρηση των αλλαγών στις παραμέτρους αυτές διαμέσου του καταγεγραμμένου ιστορικού της οποιασδήποτε κατασκευής.

Στο κτίριο Vina Del Mar, οι καταγραφές (διέγερση) του πρώτου ορόφου θεωρούνται ως τα δεδομένα εισόδου του μαθηματικού μοντέλου, επειδή οι υπόγειοι όροφοι είναι σημαντικά πιο άκαμπτοι σε σχέση με την υπεράνω κατασκευή εξαιτίας της κυρίαρχης παρουσίας των τοιχίων. Ως δεδομένα εξόδου θεωρήθηκαν οι καταγραφές στην κορυφή (απόκριση). Μια τέτοια παρατήρηση έχει υιοθετηθεί για να

εξασφαλιστεί η συμβολή όλων των ιδιομορφών στη διαδικασία αναγνώρισης του συστήματος. Μπορεί να θεωρηθεί ότι ένα τέτοιο μοντέλο παρέχει εποπτεία επί της συμπεριφοράς ολόκληρου του συστήματος με βάση τις εισόδους-εξόδους.

Με βάση τα αποτελέσματα, αρχικά από τα φασμάτα Fourier των παρατηρούμενων καταγραφών επιτάχυνσης, οι μειώσεις της συχνότητας είναι στιγμιαίες. Η μάζα του συστήματος δεν έχει αλλάξει κατά τη διάρκεια της παρατήρησης, οπότε η ενδεχόμενη μικρή μείωση της ιδιοσυχνότητας αντιστοιχεί σε μείωση της ακαμψίας του εδάφους και κατά συνέπεια του συνολικού συστήματος που αποτελείται από την κατασκευή και το έδαφος. Οι ιδιοσυχνότητες κατά τη διάρκεια σεισμών εξαρτώνται από το εύρος διέγερσης. Η πτώση της συχνότητας, η οποία αφορά τον σεισμό με το μεγαλύτερο μέγεθος, μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός της μεγαλύτερης εισροής σεισμικής ενέργειας και της μεγαλύτερης διάρκειας της. Επίσης, αρκετές κυρίαρχες αρμονικές συχνότητες της διέγερσης (είσοδος) ήταν κοντά στις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής και έτσι την οδήγησαν κοντά στην κατάσταση συντονισμού.

Κατά την εξέταση της δυναμικής απόκρισης των κατασκευών σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, κατά την οποία εμφανίζονται ασθενείς διεγέρσεις, διάφοροι άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες πρέπει να εξεταστούν. Για παράδειγμα, η έντονη βροχή έχει την τάση να αυξάνει τις συχνότητες λόγω του κορεσμού του νερού στο έδαφος, με συνέπεια την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής, οι ισχυροί άνεμοι σε περίπτωση απουσίας βροχοπτώσεων μπορούν να μειώσουν τις ιδιοσυχνότητες σε 3%, ενώ οι αυξανόμενες θερμοκρασίες μπορούν να αυξήσουν όλες τις ιδιοσυχνότητες κατά 1-2%.

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των πειραμάτων που διεξήχθησαν είναι ότι, τα αποτελέσματα επιτρέπουν τη βαθμονόμηση των παραμέτρων μάζας και ακαμψίας των αναλυτικών μοντέλων σύμφωνα με τα επί τόπου καταγεγραμμένα δεδομένα και την επίτευξη της βελτίωσης και της ακρίβειάς τους. Τελικά, η ανάλυση χρησιμοποιώντας την προσέγγιση ARX έδειξε ότι η κατασκευή δεν υπέστη βλάβες κατά τη διάρκεια της περιόδου εξέτασης. Η δυσκαμψία της υπάρχουσας κατασκευής δεν μειώθηκε. Συνεπώς, δεν σημειώθηκε καμία μείωση της ιδιοσυχνότητας της.

#### 1.4.4 Τοξωτή γέφυρα στο Πόρτο της Πορτογαλίας

Δίνεται στη συνέχεια ένα παράδειγμα ενός δυναμικού συστήματος παρακολούθησης σε συνεχή λειτουργία σε μία τοξωτή γέφυρα, Infante D. Henrique Bridge, στο Πόρτο της Πορτογαλίας. Παρουσιάζεται αναλυτικά μια στρατηγική για την επεξεργασία των δεδομένων που βασίζεται στη χρήση των πιο πρόσφατα αναπτυγμένων αλγόριθμων σε συνδυασμό με καλά προσαρμοσμένες ρουτίνες που είναι σε θέση να αναγνωρίσουν αυτόματα τις παραμέτρους των ιδιομορφών από τις χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης, ενώ η κατασκευή βρίσκεται σε κανονική λειτουργία. Από τη μεταβολή των ιδιοσυχνοτήτων, είναι δυνατόν να διαπιστωθούν μη φυσιολογικές αλλαγές που να σχετίζονται με την εμφάνιση βλαβών. Αυτό βέβαια προϋποθέτει την ύπαρξη στατιστικών εργαλείων για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των περιβαλλοντικών και λειτουργικών παραγόντων, όπως θερμοκρασία περιβάλλοντος, ένταση της κυκλοφορίας σε μια γέφυρα κλπ. Σημειώνεται πως η αποτελεσματικότητα του συστήματος παρακολούθησης εξαρτάται από την ποσότητα των δεδομένων που συλλέχθηκαν πριν από την εμφάνιση ενός ακραίου συμβάντος.

Η γέφυρα διαθέτει δώδεκα καταγραφείς επιτάχυνσης, οι οποίοι συνεχώς λαμβάνουν την απόκρισή της σε εξωτερικές διεγέρσεις. Τα επιταχυνσιόμετρα έχουν τοποθετηθεί σε τέσσερα τμήματα, κάθε τμήμα διαθέτει τρία, δυο για να μετρούν τις οριζόντιες επιταχύνσεις πλευρικά στις άκρες του καταστρώματος και ένα για τη μέτρηση πλευρικών επιταχύνσεων. Επιπλέον, υπάρχουν οκτώ αισθητήρες θερμοκρασίας κατανεμημένοι σε τέσσερα τμήματα. Πριν από την εγκατάσταση του συστήματος δυναμικής παρακολούθησης, πραγματοποιήθηκε μια δοκιμή δονήσεων περιβάλλοντος προκειμένου να αποκτηθούν πειραματικά οι παράμετροι των ιδιομορφών της γέφυρας.

Πρώτο βήμα ήταν ο αυτόματος προσδιορισμός των παραμέτρων των ιδιομορφών από τις χρονοϊστορίες της επιτάχυνσης με τις μεθόδους frequency domain και time domain. Οι πρώτες βασίζονταν στην τοποθέτηση ενός μοντέλου στο φάσμα εξόδου, από το οποίο εξάγονται οι παράμετροι σε μια δεύτερη φάση, ενώ οι δεύτερες μέθοδοι βασίζονταν ουσιαστικά σε δύο τύπους μοντέλων: στοχαστικά μοντέλα διακριτού χρόνου και ARMA (Auto-Regressive Moving Average). Η εφαρμογή των παραμετρικών μεθόδων επιβάλλει να γνωρίζουμε τη σειρά των μοντέλων που θα ταιριάζει καλύτερα στα πειραματικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα από τα διάφορα μοντέλα συνοψίζονταν σε ένα διάγραμμα σταθεροποίησης, το οποίο

ενισχύει τις εκτιμήσεις που είναι σύμφωνες με πολλά μοντέλα, οι οποίες σχετίζονται με τις ιδιομορφές. Η παραπάνω διαδικασία απαιτεί την ανάπτυξη αλγορίθμων για την αυτοματοποίηση της ανάλυσης και της ερμηνείας των πληροφοριών των διαγραμμάτων αυτών. Τα τελικά αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας ήταν οι μέσες τιμές των παραμέτρων των ιδιομορφών (ιδιοσυχνότητα, λόγος απόσβεσης και σχήμα ιδιομορφής). Ο παραπάνω αλγόριθμος εφαρμόστηκε στα δεδομένα που συλλέγονται από το σύστημα παρακολούθησης της γέφυρας. Η εφαρμογή αυτής της διαδικασίας σε διαδοχικά αποκτηθέντα σύνολα δεδομένων επιτρέπει την κατασκευή διαγραμμάτων με την χρονική εξέλιξη των παραμέτρων των ιδιομορφών.

Οι ιδιοσυχνότητες, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως δείκτες για την ανίχνευση βλαβών, επηρεάζονται συχνά από περιβαλλοντικούς και λειτουργικούς παράγοντες. Για τη μείωση αυτών των επιδράσεων δημιουργούνται μοντέλα ικανά να αντιπροσωπεύουν τα φυσικά φαινόμενα, που προκαλούν αυτές τις αλλαγές. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η ανάπτυξη ενός περίπλοκου μοντέλου για κάθε εφαρμογή και ότι ακόμη και κάποιες επιδράσεις δεν θα μοντελοποιηθούν σωστά. Μια άλλη μέθοδος βασίζεται σε μοντέλα μαύρου κουτιού, των οποίων οι παράμετροι προκύπτουν χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο αριθμό παρατηρήσεων, για να παραχθούν σχέσεις μεταξύ των συχνοτήτων και των παραγόντων που μπορεί να επηρεαστούν. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μια ανάλυση παλινδρόμησης και συγκεκριμένα με την πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση. Κύριος στόχος της ανάλυσης παλινδρόμησης είναι η εκτίμηση των παραμέτρων που παρέχουν μια καλή προσαρμογή μεταξύ των παρατηρήσεων και των τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών που δίνονται από το μοντέλο. Αυτά συνήθως λαμβάνονται μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων η οποία ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων. Ακολουθείται και μια τρίτη προσέγγιση, με βάση στατιστικά εργαλεία που επιτρέπουν τη διόρθωση των ιδιοσυχνοτήτων χωρίς την ανάγκη ποσοτικοποίησης των περιβαλλοντικών και λειτουργικών παραγόντων.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή των παραπάνω αναλύοντας τη χρονική μεταβολή των παραμέτρων των ιδιομορφών στη γέφυρα. Διαπιστώθηκε ότι οι συχνότητες μειώνονται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και αυξάνονται το χειμώνα πράγμα που σημαίνει ότι η θερμοκρασία τις επηρεάζει. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας στις διακυμάνσεις των συχνοτήτων ήταν το εύρος της δόνησης της γέφυρας, δηλαδή η ένταση της κυκλοφορίας. Μετά τον προσδιορισμό



των παραγόντων με τη μεγαλύτερη επίδραση, δημιουργούνται μοντέλα παλινδρόμησης για να ελαχιστοποιηθούν αυτές οι επιδράσεις και να μειωθούν ακόμη περισσότερο οι διαφορές μεταξύ των μοντέλων και των παρατηρήσεων.

Απαλλαγμένα τα δεδομένα από λειτουργικές και περιβαλλοντικές επιδράσεις χρησιμοποιούνται στατιστικά εργαλεία, όπως διαγράμματα ελέγχου, για τον προσδιορισμό της μεταβολής της δυσκαμψία, άρα για την ανίχνευση των βλαβών. Μια παρατήρηση εκτός της περιοχής ελέγχου μπορεί να σχετίζεται με την εμφάνιση βλάβης. Για να ελεγχθεί εάν η παραπάνω στρατηγική είναι επαρκής διατυπώνονται ορισμένα αριθμητικά σενάρια βλαβών. Οι τυχόν βλάβες λόγω ακραίων γεγονότων ή γήρανσης της κατασκευής μοντελοποιούνται με ένα απλοποιημένο τρόπο, με μειώσεις της καμπτικής ροπής αδρανείας στη κάθετη διεύθυνση των τμημάτων της γέφυρας.

Οι ιδιοσυχνότητες που σχετίζονται με σενάρια βλαβών συγκρίνονται με τις αριθμητικές τιμές αναφοράς και με τις πειραματικές τιμές που προσδιορίζονται από τις δοκιμές δονήσεων περιβάλλοντος και από το σύστημα παρακολούθησης. Επειδή οι διαφορές μεταξύ των συχνοτήτων αναφοράς και των μέσων τιμών που προσδιορίζονται από το σύστημα παρακολούθησης είναι πολύ μεγαλύτερες από τις διακυμάνσεις που εκτιμήθηκαν από τα μοντελοποιημένα σενάρια βλαβών, οι ιδιοσυχνότητες πολλαπλασιάστηκαν με έναν κατάλληλο συντελεστή. Όμως επειδή οι διορθωμένες ιδιοσυχνότητες από το μοντέλο παλινδρόμησης εξακολουθούν να παρουσιάζουν κάποια συσχέτιση μεταξύ τους, γεγονός που σημαίνει ότι εξακολουθούν να επηρεάζονται από κοινούς παράγοντες, όπως η υγρασία ή τα χαρακτηριστικά του ανέμου η ανάλυση παλινδρόμησης συμπληρώθηκε με μια Principal Components Analysis. Ακολούθησε, η κατασκευή του πίνακα ελέγχου και όσον αφορά τις παραμέτρους του πίνακα διαπιστώθηκε μετά από δοκιμές, ότι η επιτυχής αναγνώριση των βλαβών επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ομάδες διαδοχικών παρατηρήσεων με σαράντα οκτώ στοιχεία. Ο αριθμός των απαιτούμενων παρατηρήσεων είναι αντιστρόφως ανάλογος με το επίπεδο της βλάβης που πρέπει να εντοπιστεί. Σημειώνεται ακόμα πως θεωρήθηκε ότι κάθε νέα παρατήρηση είναι ανεξάρτητη της προηγούμενης, κάτι που δεν είναι απολύτως αληθές.

Κλείνοντας, σημειώνεται πως απαιτούνται εφαρμογές μεγάλης κλίμακας για να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα της δυναμικής παρακολούθησης και πως πρέπει να συνδυαστεί με περιοδικές οπτικές επιθεωρήσεις και άλλα στοιχεία παρακολούθησης, όπως αισθητήρες παραμορφώσεων, μετατοπίσεων και περιστροφών.

### 1.4.5 Canton Tower, πόλη της Guangzhou, Κίνα

Στον Canton tower, ύψους 454 μέτρων στην πόλη Guangzhou της Κίνας έχει εφαρμοστεί για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της λειτουργικότητας του κατά τη διάρκεια της κατασκευής και της λειτουργίας του ένα εξελιγμένο μακροχρόνιο σύστημα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο. Όσον αφορά τη κατασκευή του πύργου εξωτερικά έχει μορφή υπερβολής, η οποία δημιουργείται από τη περιστροφή δύο ελλείψεων. Αναφορικά με το σύστημα παρακολούθησης αποτελείται από περισσότερους από 700 αισθητήρες, δεκαέξι τύπων. Πιο συγκεκριμένα αποτελείται από το σύστημα αισθητήρων, το σύστημα συλλογής και μετάδοσης δεδομένων, το σύστημα επεξεργασίας και έλεγχου δεδομένων, σύστημα ανίχνευσης βλάβης και αξιολόγησης και το σύστημα επιθεώρησης και συντήρησης. Τέλος, για την παρακολούθηση της δυναμικής απόκρισης της κατασκευής έχουν εγκατασταθεί μόνιμα πάνω από είκοσι μονοαξονικά επιταχυνσιόμετρα.

Το εν λόγω σύστημα παρέχει τη δυνατότητα on-line παρακολούθησης των δυναμικών αποκρίσεων ψηλών κτιρίων κατά τη διάρκεια σεισμών. Σύμφωνα με τα δεδομένα από το σύστημα παρακολούθησης του Canton Tower, παρατηρήθηκε ότι η απόκριση της κατασκευής σε σεισμούς μεγάλης εμβέλειας χαρακτηριζόταν από χαμηλές συχνότητες (0.08-0.2Hz), ενώ σε σεισμούς μικρής εμβέλειας από υψηλότερες συχνότητες (1.0-2.3Hz). Ακόμα, στους σεισμούς μεγάλης εμβέλειας, οι μέγιστες τιμές της επιτάχυνσης γενικά αυξάνονταν σταδιακά, ενώ στους σεισμούς μικρής εμβέλειας η κατανομή των μέγιστων τιμών της επιτάχυνσης δεν ακολουθεί αυτόν κανόνα. Αντιθέτως, παρουσιάζει πολύπλοκα και ακανόνιστα χαρακτηριστικά απόκρισης, η μέγιστη απόκριση επιτάχυνσης δεν εμφανίζεται στο ανώτερο επίπεδο.

Τέλος, ένας ακόμη τρόπος αξιολόγησης της δομικής κατάστασης της κατασκευής μετά από ένα σεισμικό γεγονός, χρησιμοποιώντας δεδομένα που αποκτήθηκαν πριν, κατά τη διάρκεια και μετά από αυτόν είναι η χρήση ενός δείκτη βάσει της εμπειρικής μεθόδου αποσύνθεσης (EMD). Αυτός ο δείκτης ορίζεται σε όρους ονομαστικής ενέργειας, η οποία προκύπτει από το μετασχηματισμό Hilbert-Huang (HHT) και την εμπειρική μέθοδο αποσύνθεσης (EMD) των μετρούμενων επιταχύνσεων μετά και πριν από ένα ακραίο συμβάν. Χρησιμοποιώντας αυτούς τους δείκτες που λαμβάνονται μετά και πριν από έναν σεισμό, προκύπτουν οι τιμές του δείκτη με βάση την EMD σε διαφορετικές θέσεις αισθητήρων, δηλαδή οι τιμές του Modal Assurance Criterion (MAC) για τις πρώτους έξι ιδιομορφές. Όλες οι τιμές

είναι πολύ κοντά στην μονάδα γεγονός που υποδηλώνει ότι η κατανομή της αποθηκευμένης ενέργειας μεταξύ των σημείων μέτρησης είναι απόλυτα συνεπής μετά και πριν από τον σεισμό και ότι η δομική κατάσταση δεν έχει μεταβληθεί αισθητά μετά από αυτόν.

#### **1.4.6 Ενόργανη παρακολούθηση συμπεριφοράς εφεδράνων με ελαστομερές υλικό**

Τα εφέδρανα με ελαστομερές υψηλής απόσβεσης εφαρμόζονται για να επιτευχθεί σεισμική μόνωση. Σε κτίρια, αυτά τοποθετούνται πάνω από τη θεμελίωση, ενώ στις γέφυρες, τοποθετούνται πάνω από τα βάθρα. Η εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης επιτρέπει: (α) μείωση των δυνάμεων σχεδιασμού ως αποτέλεσμα της αύξησης της θεμελιώδους περιόδου του δομικού συστήματος-εφεδράνων, (β) συγκέντρωση των μεγαλύτερων παραμορφώσεων στους μονωτές, όπου το υπόλοιπο τμήμα της κατασκευής συμπεριφέρεται ελαστικά, (γ) απορρόφηση σημαντικής ποσότητας σεισμικής ενέργειας στο σύστημα μόνωσης μέσω υστερητικής απόσβεσης ή μέσω πρόσθετων στοιχείων, που αναφέρονται ως αποσβεστήρες.

Αρχικά, παρουσιάζονται αποτελέσματα πειραμάτων, που αφορούν κυκλικά εφέδρανα από μαλακό και σκληρό ελαστομερές. Μια βάση δεδομένων για τη συμπεριφορά των μονωτών σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης δημιουργήθηκε και χρησιμοποιήθηκε αργότερα για την ανάπτυξη ενός νέου αναλυτικού μοντέλου για μονωτές από ελαστομερές. Σε πρώτη πράξη, διεξήχθησαν ορισμένες δοκιμές πάνω στους μονωτές από ελαστομερές. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αξονικής φόρτισης παρουσιάζονται με καμπύλες δύναμης-μετατόπισης. Η κατακόρυφη δυσκαμψία σε διαφορετικά επίπεδα φορτίου οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η δυσκαμψία αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου. Επιπροσθέτως, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η διατμητική συμπεριφορά εξαρτάται κυρίως από τη σύνθεση του ελαστομερούς. Η υστερητική απόσβεση των μονωτών καθορίστηκε από τις δοκιμές διάτμησης. Η μη γραμμική συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης του φυσικού ελαστομερούς έχει ως αποτέλεσμα υψηλή οριζόντια δυσκαμψία σε χαμηλές παραμορφώσεις, χαμηλή δυσκαμψία σε μέτριες παραμορφώσεις και συνεχή αύξηση δυσκαμψίας ξεκινώντας από υψηλότερες παραμορφώσεις. Λόγω αυτής της συμπεριφοράς του ελαστομερούς, χρησιμοποιήθηκε ένα πολυωνυμικό αναλυτικό μοντέλο για τη μαθηματική μοντελοποίηση των εφεδράνων.

Σε δεύτερη πράξη, διεξήχθησαν δοκιμές σε σεισμική τράπεζα για την παρακολούθηση και τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των μονωτών με ελαστομερές υλικό και της δεξαμενής, η οποία είναι μονωμένη στη βάση της. Τα μοντέλα εκτέθηκαν σε τυχαίες και σε μια σειρά από αρμονικές και σεισμικές διεγέρσεις. Η μεταλλική δεξαμενή μονώθηκε με τέσσερα κυκλικά εφέδρανα κατασκευασμένα από σκληρό ελαστομερές υλικό στη πρώτη περίπτωση και, στη δεύτερη, από μαλακό ελαστομερές υλικό. Η θεμελίωση αποτελείται από μια κυκλική σκάφη από οπλισμένο σκυρόδεμα που συνδέεται με τη σεισμική τράπεζα με έξι αγκύρια, ενώ οι μονωτές συνδέονται με τη θεμελίωση μέσω τεσσάρων αγκυρίων. Πάνω από τους μονωτές, υπάρχει μια πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος, η οποία στηρίζει τη μεταλλική δεξαμενή. Ο σκοπός αυτής της πλάκας ήταν να προσομοιωθεί ένα άκαμπτο στοιχείο, το οποίο θα μεταφέρει ομοιόμορφα τις διατμητικές δυνάμεις από την άνω στην κάτω κατασκευή. Η συμπεριφορά των μοντέλων παρακολουθήθηκε μέσω των ενσωματωμένων μετατροπέων μετατόπισης, των επιταχυνσιόμετρων και των εξαρτημάτων μέτρησης των παραμορφώσεων.

Μετά τη διέγερση των δοκιμών, καταλήγουμε στα παρακάτω αποτελέσματα. Η συχνότητα συντονισμού του συστήματος λήφθηκε με δοκιμές υπό τυχαία διέγερση στην περιοχή συχνοτήτων 0.1-25Hz. Η θεμελιώδης συχνότητα του μοντέλου με τους μονωτές από μαλακό ελαστομερές υλικό ανήλθε σε 1.95Hz, ενώ η συχνότητα του μοντέλου με σκληρό ελαστομερές σε 6.8Hz. Η θεμελιώδης συχνότητα του μοντέλου καθορίστηκε από τις δοκιμές υπό σεισμικές διεγέρσεις. Αυτές οι δοκιμές είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση της ιδιοσυχνότητας του μοντέλου. Μια τέτοια αλλαγή συχνότητας είναι το αποτέλεσμα της μη γραμμικής συμπεριφοράς των μονωτών από ελαστομερές υλικό. Ο ισοδύναμος συντελεστής ιξώδους απόσβεσης του συστήματος καθορίστηκε σε συνθήκες ελεύθερων κραδασμών ύψους 0.09 (μαλακό ελαστομερές) και 0.15 (σκληρό ελαστομερές). Έτσι, επιβεβαιώθηκε η χαμηλότερη απόσβεση των μονωτών με μαλακό ελαστομερές υλικό σε σύγκριση με αυτήν των μονωτών με σκληρό ελαστομερές υλικό. Τέλος, εξετάζοντας τη σχέση δύναμης-μετατόπισης των μονωτών ανακαλύπτουμε, σε ότι αφορά τη συμπεριφορά των μονωτών, ότι στην περίπτωση των σεισμών μικρής έντασης, του ανέμου και άλλων μικρών οριζόντιων φορτίων, το σύστημα μόνωσης διαθέτει μεγαλύτερη δυσκαμψία με αποτέλεσμα να μην ενεργοποιούνται σε αυτές τις φορτίσεις.

Τέλος, η συμπεριφορά της μονωμένης στη βάση κατασκευής προσομοιώνεται αναλυτικά με επαρκή ακρίβεια μέσω των πραγματοποιημένων μη γραμμικών

δυναμικών αναλύσεων ενός τρισδιάστατου μοντέλου. Για να συμπεριληφθεί η μη γραμμική συμπεριφορά των εφεδράνων σε συνθήκες μεγάλων παραμορφώσεων, το πρότυπο διγραμμικό μοντέλο αντικαταστάθηκε με ένα προηγμένο πολυωνυμικό. Οι παράμετροι αυτού του μοντέλου καθορίστηκαν με βάση τις καμπύλες δύναμης-μετατόπισης που λαμβάνονται από τις δοκιμές των εφεδράνων. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν επέτρεψαν τη μαθηματική επαλήθευση της συμπεριφοράς των εφεδράνων με ελαστομερές υλικό. Τέλος, το πολυωνυμικό μοντέλο επαληθεύτηκε μέσω της σύγκρισης των χρονοϊστοριών επιτάχυνσης στο επίπεδο μόνωσης και εκείνων στην κορυφή της δεξαμενής που προέκυψαν από τις δυναμικές αναλύσεις και τις δοκιμές στη σεισμική τράπεζα.

## 2. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΕΛΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

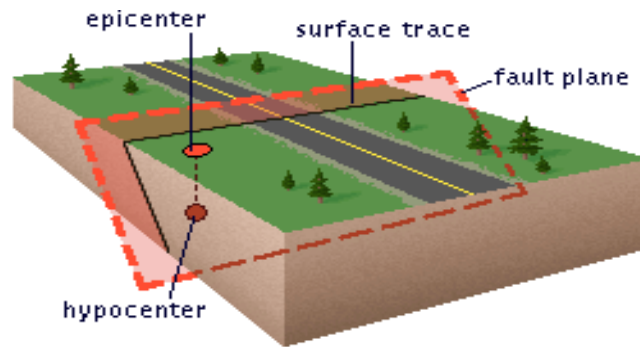
2.1. Χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης σε σεισμική διέγερση κοντινού πεδίου

### 2.1.1 Χαρακτηριστικά και βασικοί τύποι ρηγμάτων.

Με τον όρο ρήγματα αναφερόμαστε σε εκείνες τις περιοχές του φλοιού της γης, που έχουν ρηγματωθεί στο παρελθόν κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων και στις οποίες αναμένεται στο μέλλον να εμφανισθούν και πάλι σεισμοί. Τα ρήγματα, επομένως, αποτελούν ασυνέχειες του φλοιού της γης συνυφασμένες με την εμφάνιση σεισμικών γεγονότων. Σύμφωνα με τη θεωρία ελαστικής ανάπλασης αντιλαμβανόμαστε το μηχανισμό δημιουργίας των σεισμών. Κατά τη μετακίνηση των τεκτονικών πλακών συσσωρεύεται ελαστική ενέργεια, με την αύξηση των διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων στην επιφάνεια ανάμεσα στα δύο τμήματα του ρήματος. Όταν οι διατμητικές τάσεις υπερβούν την αντοχή του πετρώματος θα προκληθεί διάρρηξη και σχετική ολίσθηση σε ένα τμήμα του ρήματος.

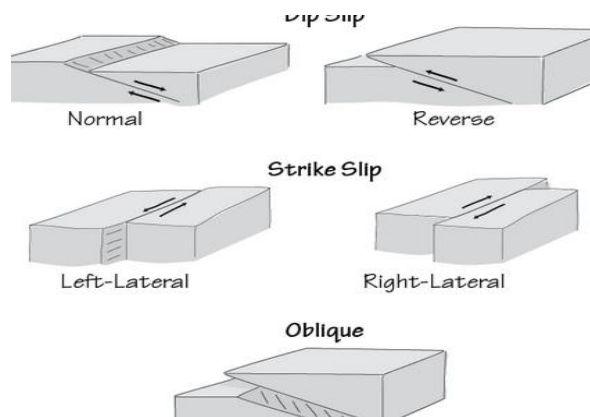
Το επίπεδο του ρήματος (fault plane) χωρίζει το φλοιό της περιοχής στο υπερκείμενο του άνω τμήμα που ονομάζεται hanging wall και στο κάτω τμήμα το λεγόμενο footwall. Η τομή του επιπέδου του ρήματος με το οριζόντιο λέγεται ίχνος του ρήματος (fault trace/line) και η θετική του φορά είναι προς τα δεξιά μας, όταν βρισκόμαστε στο άνω μέρος του ρήματος. Χαρακτηριστικά σημεία στην περιοχή του ρήματος είναι η εστία ή υπόκεντρο (focus), το σημείο μέσα στον φλοιό από το οποίο αρχίζει η διάρρηξη στην περιοχή του ρήματος, και το επίκεντρο (epicenter), που αποτελεί την προβολή της εστίας στο οριζόντιο επίπεδο, Σχήμα 2.1. Η κατακόρυφη απόσταση της εστίας από το επίκεντρο ονομάζεται εστιακό βάθος. Η δεξιόστροφη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στον γεωγραφικό βορρά και στη θετική φορά του ίχνους του ρήματος, δηλαδή το αζιμούθιο του ίχνους του ρήματος, ονομάζεται γωνία διεύθυνσης  $\varphi$  (trace angle). Η γωνία  $\theta$  ανάμεσα στο οριζόντιο επίπεδο και το επίπεδο του ρήματος είναι η γωνία βύθισης ή κλίση (dip angle), πάντα μικρότερη από  $90^\circ$ . Η ολίσθηση του ρήματος χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα πάνω στο επίπεδο του ρήματος, που δείχνει τη σχετική μετακίνηση του άνω σε σχέση με το κάτω τμήμα του ρήματος. Η αριστερόστροφη γωνία  $\lambda$  ανάμεσα

στη θετική φορά του ίχνους του ρήγματος και στο διάνυσμα ολίσθησης λέγεται γωνία ολίσθησης (rake angle).



**Σχήμα 2.1:** Χαρακτηριστικά ρήγματος.

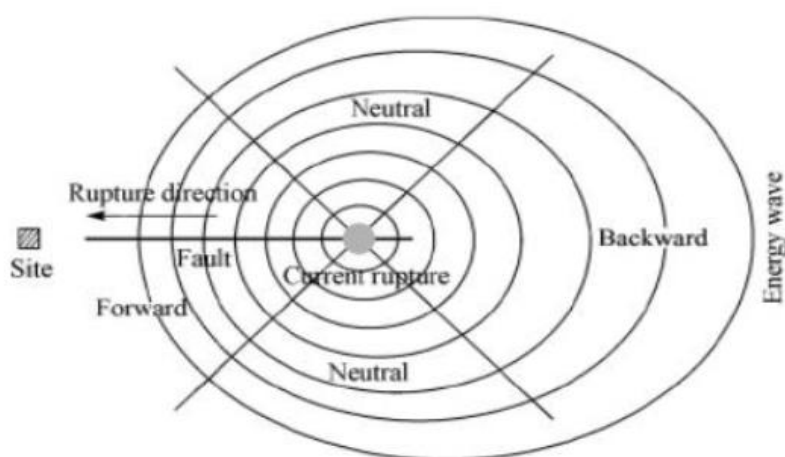
Η γωνία ολίσθησης καθορίζει και τον τύπο του ρήγματος. Αν η ολίσθηση είναι κυρίως οριζόντια και παράλληλη με το ίχνος του ρήγματος, τότε το ρήγμα λέγεται οριζόντιο (strike slip). Αν η έναντι πλευρά του ρήγματος κινήθηκε προς τα δεξιά, το ρήγμα λέγεται οριζόντιο δεξιόστροφο. Σε αντίθετη περίπτωση, οριζόντιο αριστερόστροφο. Αν το ρήγμα κινείται κάθετα στο ίχνος του ρήγματος, ονομάζεται ρήγμα βύθισης ή dip slip. Αν το άνω μέρος του ρήγματος κινείται προς τα κάτω το ρήγμα λέγεται κανονικό ή βαρύτητας (normal fault) και αντίθετα ανάστροφο (reverse). Στην πρώτη κατηγορία υπάγονται τα ρήγματα φαινομένου εφελκυσμού και στην δεύτερη τα ρήγματα θλίψεως. Στις περισσότερες περιπτώσεις η ολίσθηση του ρήγματος είναι λοξή (oblique) και έχει συνιστώσες και ως προς το ίχνος και ως προς τη βύθιση. Όταν το ρήγμα είναι λοξό και ανάστροφο, λέγεται στην αγγλική βιβλιογραφία obverse, Σχήμα 2.2.



**Σχήμα 2.2:** Βασικοί τύποι ρηγμάτων.

### 2.1.2 Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας

Η περιοχή στην οποία επικεντρώνονται οι βλάβες κατά την διάρκεια ενός σεισμού είναι συνήθως συγκεντρωμένη γύρω από το ρήγμα και έχει διαστάσεις ανάλογες με την επιφάνεια ρηγμάτωσης. Θεωρητικά η ζώνη αυτή βρίσκεται μέσα σε μια απόσταση 20-60km από ένα ρήγμα. Η περιοχή αυτή ονομάζεται κοντινό πεδίο και κοντά της η εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται από το φαινόμενο της κατευθυντικότητας. Μέσα σε αυτήν την ζώνη κοντινού πεδίου, οι εδαφικές κινήσεις επηρεάζονται σημαντικά από το μηχανισμό διάρρηξης, την κατεύθυνση της διάδοσης της διάρρηξης σε σχέση με την εξεταζόμενη θέση, και τις πιθανές μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις ως αποτέλεσμα της ολίσθησης του ρήματος. Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε έμπροσθεν (forward), όπισθεν (backward) και ουδέτερη (neutral) κατευθυντικότητα ανάλογα με την σχετική θέση της διεύθυνσης διάδοσης της διάρρηξης και της θέσης καταγραφής, Σχήμα 2.3.



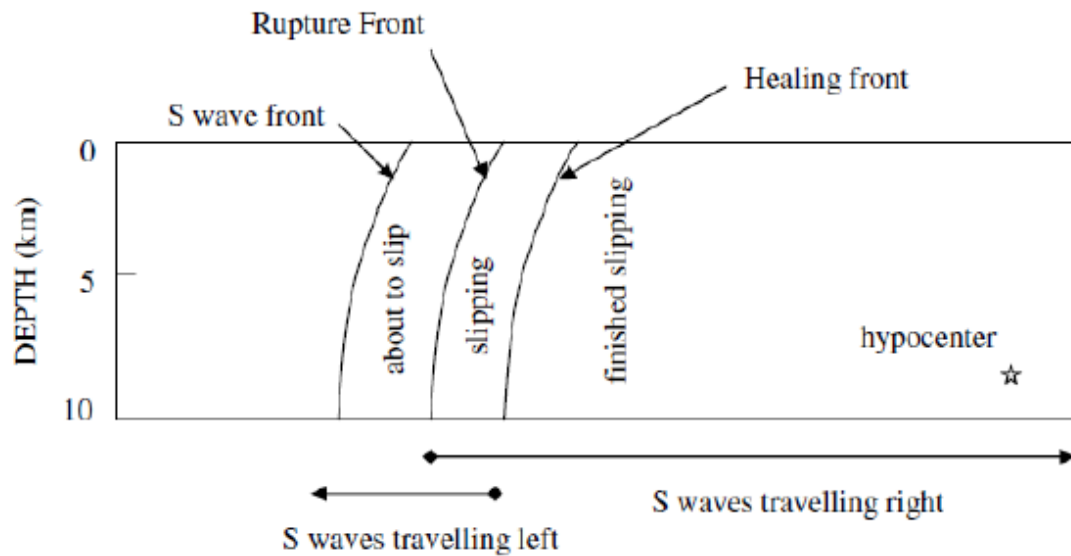
**Σχήμα 2.3:** Διευθύνσεις ανάπτυξης των διαφορετικών τύπων κατευθυντικότητας.

Η έμπροσθεν κατευθυντικότητα (forward directivity) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η διάδοση της διάρρηξης και η κατεύθυνση της ολίσθησης στο ρήγμα γίνονται προς την ίδια περιοχή. Αυτό συμβαίνει επειδή η ταχύτητα της διάρρηξης στο ρήγμα είναι σχεδόν ίδια με την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων του βράχου κοντά στην πηγή. Για έναν μηχανισμό οριζόντιας ολίσθησης, Σχήμα 2.4, όπου το μέτωπο διάρρηξης διαδίδεται μακριά από το υπόκεντρο και προς μια περιοχή, η ενέργεια συσσωρεύεται κοντά στο μέτωπο διάρρηξης από κάθε διαδοχική ζώνη της ολίσθησης κατά μήκος του ρήματος. Το μέτωπο των κυμάτων φθάνει ως ένας

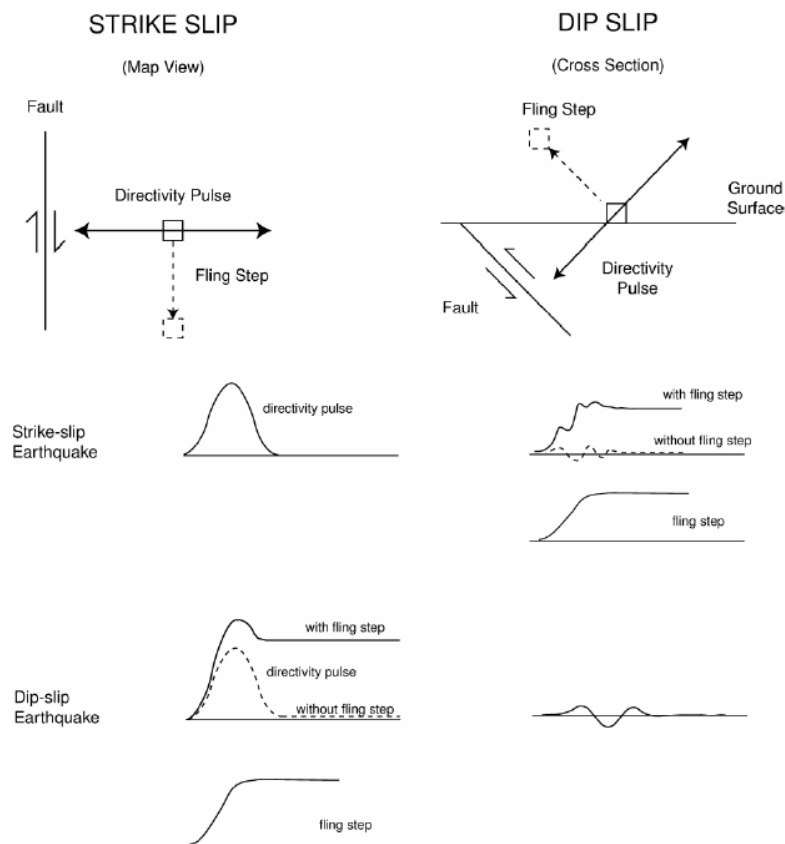


μεγάλος παλμός της κίνησης. Ο παλμός της κίνησης χαρακτηρίζεται από το μεγάλο εύρος ενδιάμεσα στις μεγάλες περιόδους και τη μικρή διάρκεια. Εάν αντίθετα μια περιοχή βρίσκεται κοντά στο επίκεντρο, δηλαδή, η διάρρηξη διαδίδεται μακριά από την περιοχή, η άφιξη κάθε παλμού επιμέρους σεισμικής διάρρηξης γίνεται στο τέλος του προηγούμενου του. Αυτός ο όρος, καλούμενος ως «όπισθεν κατευθυντικότητα» (backward directivity), χαρακτηρίζεται από κινήσεις με σχετικά μεγάλη διάρκεια και μικρό εύρος. Η «ουδέτερη κατευθυντικότητα» (neutral directivity) εμφανίζεται όταν η ρήξη δεν είναι ούτε προς ούτε μακριά από την περιοχή. Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας απαντάται στις οριζόντιες καταγραφές που είναι κάθετες προς τη ρηξιγενή ζώνη. Οι παλμοί κατευθυντικότητας είναι εμφανείς στη χρονοϊστορία της ταχύτητας.

Στις σύγχρονες ψηφιακές καταγραφές των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου παρατηρούνται μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις. Οι εν λόγω στατικές μετατοπίσεις καλούνται παραμένουσες μετακινήσεις (fling step) και είναι αποτέλεσμα της συνολικής ολίσθησης του ρήγματος. Οι μετακινήσεις αυτές εμφανίζονται παράλληλα στη διεύθυνση ολίσθησης και δε συνδέονται άμεσα με τις προαναφερθείσες δυναμικές μετακινήσεις που καλούνται παλμός κατευθυντικότητας της διάρρηξης. Φαινόμενα κατευθυντικότητας παρατηρούνται σε ρήγματα κάθε είδους, είτε είναι οριζόντια είτε κανονικά ή ανάστροφα. Στην περίπτωση των οριζοντίων ρηγμάτων, η εδαφική κίνηση κάθετα στο ίχνος του ρήγματος, λόγω πόλωσης, εμφανίζει ισχυρούς παλμούς κατευθυντικότητας, ενώ στην παράλληλη προς το ρήγμα διεύθυνση υπάρχει μία παραμένουσα μετακίνηση που οφείλεται στην ολίσθηση του ρήγματος. Στην περίπτωση των κανονικών ή αναστρόφων ρηγμάτων, κάθετα στην διεύθυνση του ρήγματος, καταγράφεται μία εδαφική κίνηση που αποτελεί σύνθεση του παλμού κατευθυντικότητας και της ολίσθησης του ρήγματος, Σχήμα 2.5

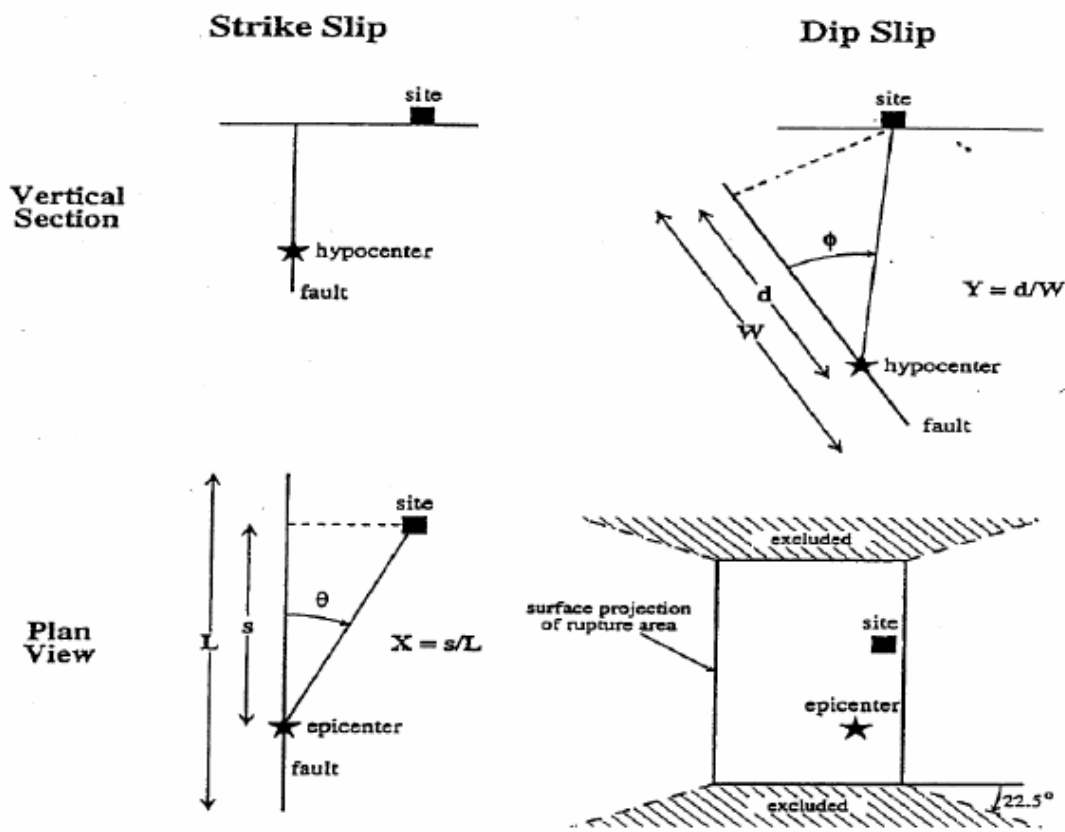


**Σχήμα 2.4:** Σχηματικό διάγραμμα επίδρασης της κατευθυντικότητας της διάρρηξης για οριζόντιο ρήγμα ολίσθησης. Η διάρρηξη αρχίζει στο υπόκεντρο και διαδίδεται με ταχύτητα περίπου ίση με το 80% της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Η εικόνα παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο του μετώπου της ρήξης σε μια δεδομένη στιγμή (Somerville et al 1997a).



**Σχήμα 2.5:** Καταγραφές κοντινού πεδίου σε περιπτώσεις οριζόντιου ρήγματος και ρήγματος βύθισης, κάθετα και παράλληλα στο ίχνος του ρήγματος (Stewart et al., 2001).

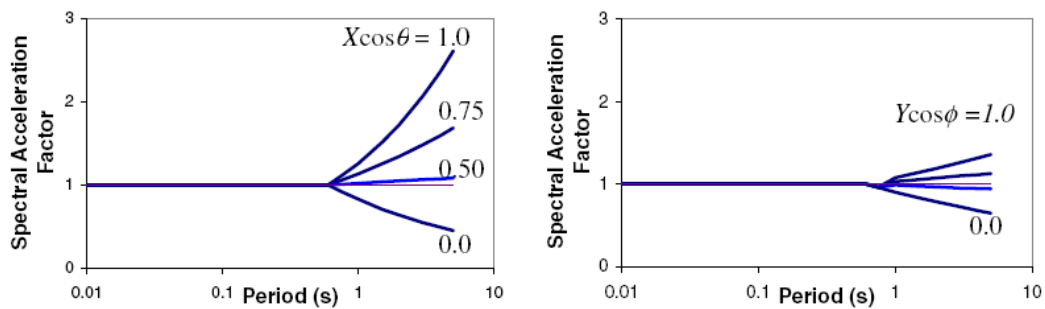
Οι Somerville et al. [1997] μελετώντας το φαινόμενο της κατευθυντικότητας πρότειναν τροποποίηση των εμπειρικών σχέσεων χρησιμοποιώντας κατάλληλες παραμέτρους εδαφικής κίνησης, με σκοπό να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα της κατευθυντικότητας στο εύρος και στη διάρκεια. Η διαφοροποίηση που αφορά την επίδραση του φαινομένου της κατευθυντικότητας εξαρτάται από δύο παράγοντες. Ο πρώτος αναφέρεται στη γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της διάδοσης της διάρρηξης και της κατεύθυνσης των κυμάτων που ταξιδεύουν από το ρήγμα στην περιοχή ( $\theta$  για τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και  $\phi$  για τα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.6. Ο δεύτερος παράγοντας από την άλλη συναρτάται από το λόγο του τμήματος της ρηγμάτωσης που βρίσκεται μεταξύ του υποκέντρου και της εξεταζόμενης περιοχής προς το συνολικό μήκος ρηγμάτωσης,  $X$  για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και  $Y$  για κατακόρυφης βύθισης.



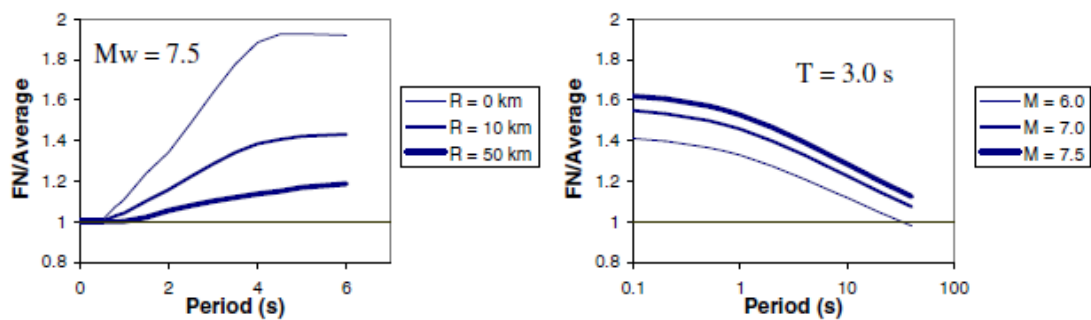
**Σχήμα 2.6:** Παράμετροι που σχετίζονται με την διάρρηξη και καθορίζουν το εύρος στο φαινόμενο της έμπροσθεν κατευθυντικότητας (Somerville et al., 1997).

Σημειώνεται ότι για μικρές γωνίες μεταξύ της εξεταζόμενης περιοχής και του ρήγματος, και για μεγαλύτερους λόγους του διερρηγμένου ρήγματος μεταξύ της θέσης και υπόκεντρου, τα φαινόμενα της έμπροσθεν κατευθυντικότητας έχουν μεγαλύτερη επίδραση. Ωστόσο, ακόμα κι όταν οι γεωμετρικές προϋποθέσεις ικανοποιούνται, ώστε να υπάρξει το φαινόμενο της έμπροσθεν κατευθυντικότητας, οι επιπτώσεις της μπορεί να μην εμφανιστούν. Για παράδειγμα, εάν ένας καταγραφικός σταθμός βρίσκεται στο άκρο ενός ρήγματος και η διάρρηξη κατευθύνεται προς το σταθμό, αλλά η ολίσθηση συγκεντρωθεί κοντά στο άκρο του ρήγματος όπου και βρίσκεται ο σταθμός.

Τέλος, οι Somerville et al. [1997] προχώρησαν σε συσχέτιση των φασματικών τιμών (με απόσβεση 5%) με τις γεωμετρικές παραμέτρους του Σχήματος 2.6 και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 2.7.



α) Μέση αναλογία φασματικής απόκρισης με εξάρτηση στις παραμέτρους της περιόδου και της διεύθυνσης



β) Αναλογία οριζόντιας φασματικής απόκρισης κάθετης στη ρήξη προς τη μέση οριζόντια για συνθήκες εμπρόσθιας κατευθυντικότητας ( $X\cos\theta=1$ ).

**Σχήμα 2.7:** Επίπτωση των παραμέτρων της διάρρηξης στην φασματική μεγέθυνση σε σχέση με συνθήκες καταγραφές (Somerville et al, 1997).

Οι καταγραφές που έχουν επηρεαστεί από το φαινόμενο της έμπροσθεν κατευθυντικότητας παρουσιάζουν ενίσχυση των φασματικών τιμών στην περιοχή των μεσαίων και μεγάλων περιόδων, με την αύξηση αυτή να είναι εντονότερη όσο μεγαλύτερο είναι το τμήμα της ρηγμάτωσης που μεσολαβεί μεταξύ του υπόκεντρου και της θέσης καταγραφής, Σχήμα 2.7α. Αντίθετα, όσο μεγαλύτερη είναι η προαναφερθείσα γωνία τόσο μειώνεται η φασματική επαύξηση λόγω κατευθυντικότητας. Επιπροσθέτως, η επιρροή των φαινομένων κατευθυντικότητας αυξάνει σημαντικά με τη μείωση της απόστασης ( $R$ ) ενώ μειώνεται με τη μείωση του μεγέθους του σεισμού ( $M$ ), Σχήμα 2.7β. Ωστόσο, το φαινόμενο της κατευθυντικότητας δεν εμφανίζεται μόνο στους μεγάλους και μεσαίους σεισμούς. Αυτοί οι σεισμοί, οι οποίοι παράγουν μικρότερες περιόδους παλμού, μπορεί να δημιουργούν εδαφικές κινήσεις μεγαλύτερων απαιτήσεων για άκαμπτες κατασκευές, όπως αναφέρουν και οι Bray & Rodriguez-Marek [2004], Li & Zhu [2004] και Shuang [2007].

## 2.2 Μέθοδοι εκτίμησης συχνοτικού περιεχομένου παλμών κατευθυντικότητας

### 2.2.1 Εισαγωγή

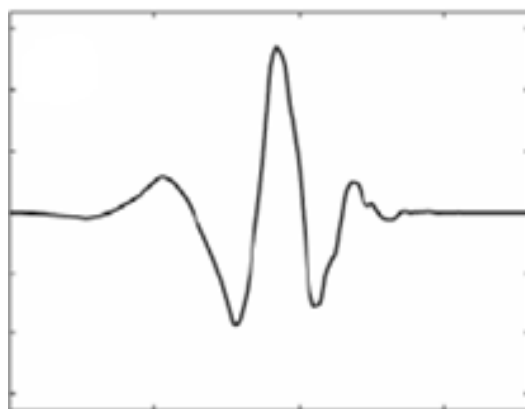
Οι σεισμοί κοντινού πεδίου συχνά χαρακτηρίζονται από έντονους παλμούς ταχυτήτων και μετακινήσεων σχετικά μεγάλων περιόδων πράγμα το οποίο τους ξεχωρίζει από τις τυπικές σεισμικές διεγέρσεις. Αν και οι καταστροφικές τους επιδράσεις στις εύκαμπτες κατασκευές ήταν εμφανείς κατά το σεισμό στο San Fernando της California το 1971, μόνο μετά τους σεισμούς το 1994 στο Northridge της California και το 1995 στο Kobe της Japan οι μελετητές αναγνώρισαν τις σοβαρές συνέπειες και τις καταστροφικές επιδράσεις τους στις κατασκευές, όταν το ρήγμα δηλαδή βρίσκεται σε άμεση γειτνίαση με μεγάλες αστικές περιοχές. Για το λόγο αυτό αντικείμενο πολλών ερευνητών έχει αποτελέσει η μελέτη των επιδράσεων των φαινομένων κατευθυντικότητας στην απόκριση των κατασκευών και πιο συγκεκριμένα στην εύρεση των κυριότερων χαρακτηριστικών του παλμού που εμπεριέχεται στη χρονοϊστορία της ταχύτητας μιας σεισμικής καταγραφής κοντινού πεδίου.

## 2.2.2 Μέθοδος κυματιδίων κατά Baker

Ένας τρόπος εύρεσης της περιόδου του παλμού είναι η ταύτιση της με τη δεσπόζουσα περίοδο ενός κυματιδίου (wavelet) το οποίο προσαρμόζεται χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο σήμα στην χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας. Η διαδικασία που έχει προτείνει ο Baker [2007] καταλήγει σε μία σειρά κυματιδίων, που το καθένα είναι εντοπισμένο χρονικά και χαρακτηρίζεται από μια στενή περιοχή συχνοτήτων.

Για χρονικά πεπερασμένα σήματα, όπως θεωρούνται οι σεισμικές διεγέρσεις, η απόδοση του σήματος μέσω χρονικά εντοπισμένων κυματιδίων είναι πιο αντιπροσωπευτική από την χρήση μη πεπερασμένων χρονικά ημιτονικών αρμονικών. Για να εξεταστεί αν ο παλμός σχετίζεται με φαινόμενα κατευθυντικότητας εξετάζονται δυο παράγοντες. Ο πρώτος αναφέρεται στην χρονική στιγμή άφιξης του παλμού ο οποίος θα πρέπει να έγκειται στην αρχή του σήματος, ενώ ο δεύτερος αφορά την τιμή της εδαφικής ταχύτητας όπου σαν ελάχιστο όριο του έχει τεθεί η τιμή των 30 cm/sec.

Ο Baker [2007] κατά την ανάλυση του έχει χρησιμοποιήσει το κυματίδιο Daubechies, Mallat [1999] τέταρτης τάξης, Σχήμα 2.8, το οποίο προσεγγίζει ικανοποιητικά αρκετές μορφές παλμών ταχύτητας. Για τον προσδιορισμό της περιόδου και της θέσης του παλμού αναλύεται η χρονοϊστορία της ταχύτητας με τη μέθοδο του ολοκληρώματος συνέλιξης και το κυματίδιο που προσδιορίζεται είναι αυτό με τον μεγαλύτερο συντελεστή. Η διαδικασία της συνέλιξης επαναλαμβάνεται για τον προσδιορισμό όλων των απαιτούμενων παλμών, από το εναπομένον σήμα, που συνθέτουν τον παλμό κατευθυντικότητας της εδαφικής κίνησης.



**Σχήμα 2.8:** Κυματίδιο Daubechies.

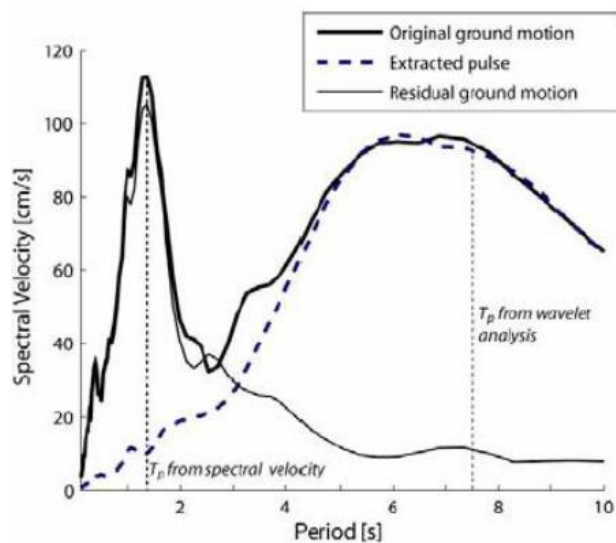
Χρησιμοποιείται ένας δείκτης βάση του οποίου η καταγραφή κατατάσσεται σε παλμική ή μη, οι τιμές του οποίου κυμαίνονται μεταξύ του 0 και του 1. Σύμφωνα με τον Baker [2007] δείκτες με τιμές μεγαλύτερες από 0.85 περιέχουν σημαντικό παλμό κατευθυντικότητας ενώ με τιμές κάτω από 0.15 δεν περιέχουν τέτοιο παλμό. Ο δείκτης σχετίζεται με το λόγο της μέγιστης ταχύτητας του εναπομένοντος σήματος προς την μέγιστη εδαφική ταχύτητα της αρχικής καταγραφής αλλά και με τον λόγο της ενέργειας του εναπομένοντος σήματος προς την ενέργεια της χρονοϊστορίας της εδαφικής ταχύτητας. Η ενέργεια αυτή θεωρείται ανάλογη του αθροίσματος των συντελεστών των αντιστοιχών κυματιδίων. Ο δείκτης ορίζεται ως:

$$\text{Pulse\_indicator} = \frac{1}{1 + e^{-23.3+14.6(\text{PGV\_ratio})+20.5(\text{Energy\_ratio})}} \quad [2.1]$$

Σημειώνεται πως για τον προσδιορισμό των παλμών κατευθυντικότητας χρησιμοποιείται ως κριτήριο η σχέση της αθροιστικής τετραγωνικής ταχύτητας (cumulative squared velocity) που υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{CSV}(t) = \int_0^t \mathbf{v}^2(\tau) \times d\tau \quad [2.2]$$

Αυτό το κριτήριο αποτελεί μία προσεγγιστική ένδειξη ότι ο παλμός εισάγεται στην χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας πριν ακόμη το ολοκλήρωμα που αντιστοιχεί σε αυτήν λάβει σημαντικές τιμές. Σκοπός του Baker ήταν να συσχετίσει τις περιόδους που προσδιορίζονται με βάση τη μέθοδο που πρότεινε με τις εκείνες που προκύπτουν από την κορυφή του φάσματος ταχύτητας. Διαπιστώθηκε ότι, αν και πολλές φορές υπήρχε μεγάλη σύγκλιση ανάμεσα στις δύο τιμές των περιόδων, υπήρχαν περιπτώσεις όπου εμφανίζονταν σημαντικές αποκλίσεις, με τη περίοδο που προκύπτει από τη μέθοδο των κυματιδίων να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν που προκύπτει από το φάσμα ταχυτήτων, Σχήμα 2.9.



**Σχήμα 2.9:** Διαφοροποίηση περιόδου παλμού και δεσπόζουσας περιόδου φάσματος ταχυτήτων (Baker, 2007)

### 2.2.3 Μέθοδος των Mavroeidis and Papageorgiou

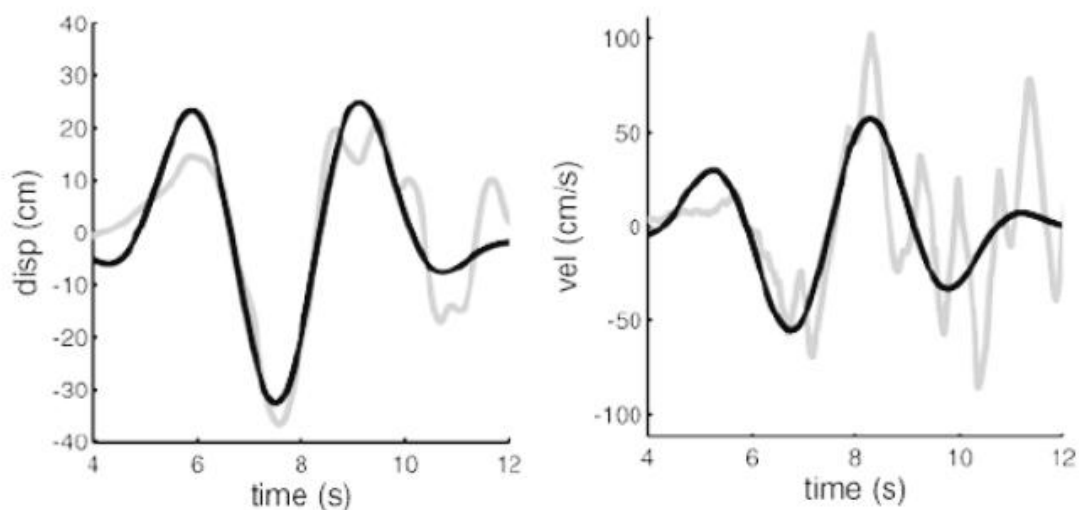
Οι Mavroeidis and Papageorgiou [2003], πρότειναν μια μέθοδο προσδιορισμού του παλμού αλλά και των παραμέτρων του. Η μέθοδος αυτή βασίστηκε στην χρήση ενός σύνθετου κυματιδίου και εκφράζεται με μία απλή μαθηματική μορφή. Επιτρέπει την ανάπτυξη κλειστών λύσεων για την εκτίμηση των φασμάτων αποκρίσεως και Fourier και, επομένως, την παραμετρική εκτίμηση της απόκρισης των κατασκευών σε σεισμικές διεγέρσεις με παλμούς κατευθυντικότητας.

Το κυματίδιο προκύπτει από την σύνθεση μιας περιοδικής αρμονικής, με συχνότητα  $f_p$  και διαφορά φάσης  $\nu$  και μιας κωδωνόσχημης περιβάλλουσας, με εύρος  $A$  και διάρκεια  $\gamma/f_p$  που έχει προκύψει από την μετάθεση πάνω από τον οριζόντιο άξονα μιας συνάρτησης συνημίτονου. Αρχικά, καθορίζεται η περίοδος του σήματος  $T_p$  έτσι ώστε να συγκλίνουν η δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος ταχυτήτων της αρχικής καταγραφής με αυτή του φάσματος που προκύπτει από την απλοποιημένη μαθηματική προσομοίωσή του παλμού της εδαφικής κίνησης. Στη συνέχεια, οι παράμετροι  $A$ ,  $\nu$  και  $\gamma$  προσδιορίζονται μέσω δοκιμών ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική σύγκλιση του προσομοιώματος με την πραγματική χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας και της μετακίνησης, πέραν της σύμπτωσης των φασματικών τιμών.



Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα, ενώ σε πολλές περιπτώσεις ο παλμός της μέγιστης ταχύτητας ταυτίζεται με τον παλμό κατευθυντικότητας, υπάρχουν περιπτώσεις που ο παλμός μέγιστης ταχύτητας εμφανίζεται σχετικά υψίσυχνος και τελικά επιλέγεται σαν παλμός κατευθυντικότητας παλμός με μικρότερο εύρος και μεγαλύτερη περίοδο. Ο παλμός αυτός αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο εμβαδόν από τον παλμό μέγιστης εδαφικής ταχύτητας.

Σύμφωνα με την στατιστική διερεύνηση των Mavroeidis et al. [2004], εκτιμήθηκε ότι η περίοδος του παλμού είναι πολύ κοντά στην φασματική περίοδο  $T_d$ , που ορίζει την μετάβαση από την περιοχή σταθερών φασματικών ταχυτήτων στην περιοχή σταθερών φασματικών μετακινήσεων, και εκτιμάται συναρτήσει της PGD και PGV. Η εδαφική μετακίνηση οφείλει να σχετίζεται με τον παλμό της εδαφικής ταχύτητας που περικλείει το μεγαλύτερο εμβαδόν, διότι προκύπτει από την ολοκλήρωση της εδαφικής ταχύτητας. Στην περίπτωση, λοιπόν, δύο διακριτών παλμών που αντιστοιχούν ο ένας στην μέγιστη εδαφική ταχύτητα PGV και ο άλλος στο μέγιστο περικλειόμενο εμβαδόν, δηλαδή στην μέγιστη διαφορική μετακίνηση ID, επιλέγεται ο παλμός με την μεγαλύτερη διάρκεια δηλαδή την μέγιστη ID, για την εκτίμηση της περιόδου του παλμού κατευθυντικότητας, Σχήμα 2.10.



**Σχήμα 2.10** Προσομοίωση παλμού (Loma Prieta 1989 Station STG), (Mavroeidis and Papageorgiou 2003).

## 2.2.4.Μεθοδος κυματικής ανάλυσης με χρήση του φάσματος συνέλιξης

### 2.2.4.1 Εισαγωγή

Παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω μια μέθοδος, μια κλειστή μαθηματική διαδικασία, εντοπισμού των παραμέτρων των παλμών, η οποία εισήχθη από τους P. Mimoglou et al. [2014]. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, για τον εντοπισμό των παλμών ταχύτητας πραγματοποιείται κυματική ανάλυση και για τη μαθηματική τους περιγραφή γίνεται χρήση του κυματιδίου με βάση τις μελέτες των Mavroeidis and Papageorgiou [2003]. Πιο συγκεκριμένα, οι Mavroeidis and Papageorgiou [2003, 2004], παρουσίασαν ένα αποτελεσματικό προσομοίωμα το οποίο εισήγαγε περαιτέρω παραμέτρους, που αφορούσαν τη συνολική διάρκεια και την αλλαγή φάσης των προσομοιούμενων παλμών. Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία των P. Mimoglou et al. [2014] η περίοδος του παλμού προσδιορίζεται από την κορυφή του φάσματος συνέλιξης  $S_d \times S_v$ . Οι υπόλοιπες παράμετροι του κυματιδίου προέρχονται από το στοχευόμενο φάσμα απόκρισης της εδαφικής μετακίνησης εφαρμόζοντας μια νεοεισαχθείσα σχέση μεταξύ της Αθροιστικής Απόλυτης Μετατόπισης (CAD) και του μέγιστου φασματικού του εύρους του κυματιδίου.

### 2.2.4.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Διάφορες μαθηματικές εκφράσεις έχουν χρησιμοποιηθεί για να απεικονίσουν τους παλμούς της ταχύτητας που υπάρχουν στις εδαφικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου. Στη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία υιοθετείται το κυματίδιο του παλμού της ταχύτητας που πρότειναν οι Mavroeidis and Papageorgiou [2003], το οποίο θα αναφέρεται ως κυματίδιο M&P. Το κυματίδιο M&P προέρχεται από τη σύζευξη ενός σήματος αρμονικής ταλάντωσης και μια κωδωνόσχημης περιβάλλουσας, Σχήμα 2.11. Χρησιμοποιούνται τέσσερις παράμετροι για τον προσδιορισμό του παλμού:

- η περίοδος  $T_p$  της αρμονικής ταλάντωσης του κυματιδίου,
- το εύρος  $A$  της περιβάλλουσας, το οποίο σχετίζεται με το πλάτος της χρονοϊστορίας ταχύτητας

- η διάρκεια  $\gamma$  του κύματος, η οποία μετρά τον αριθμό των ταλαντώσεων και ορίζεται ως  $\gamma = t_p / T_p$  με  $\gamma > 1$  και  $t_p$  είναι η χρονική διάρκεια του κυματιδίου και
- $\nu$  η διαφορά φάσης.

Επομένως, οι κλειστές μαθηματικές σχέσεις που υπολογίζουν την επιτάχυνση  $\alpha_p(t)$  και την ταχύτητα  $v_p(t)$  είναι οι ακόλουθες σύμφωνα με τους Mavroeidis and Parageorgiou [2003].

$$\alpha_p(t) = -\frac{A\pi f_p}{\gamma} \left[ \begin{array}{l} \sin\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_0)\right) \cos[2\pi f_p(t-t_0) + \nu] \\ + \gamma \cdot \sin[2\pi f_p(t-t_0) + \nu] \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_0)\right) \right] \end{array} \right] \quad [2.3]$$

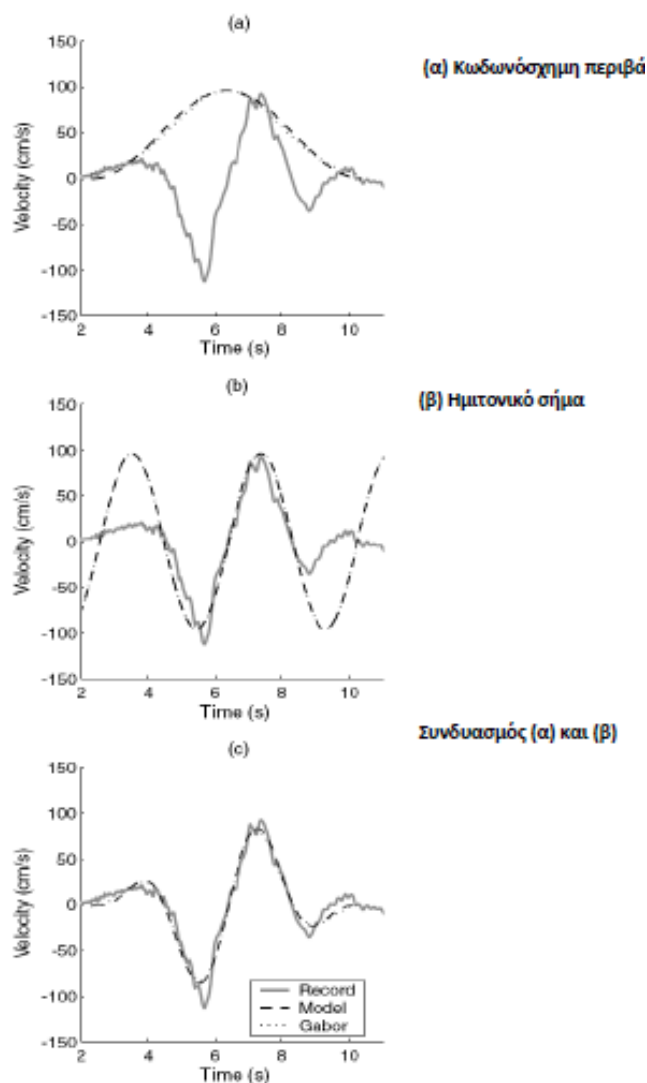
$$v_p(t) = A \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_0)\right) \right] \cos[2\pi f_p(t-t_0) + \nu] \quad [2.4]$$

για  $t_0 - \frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_p}$  με  $\gamma > 1$

διαφορετικά  $a(t)=0, v(t)=0$

Χρησιμοποιώντας αυτές τις παραμέτρους, επιτυγχάνεται μια καλή προσαρμογή του παλμού που περιέχεται στις σεισμικές διεγέρσεις, ικανή για να αποτυπώσει τις επιπτώσεις τους στην απόκριση των κατασκευών. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζοντας κάθε παράμετρο ξεχωριστά διαπιστώνεται πως η διάρκεια είναι σημαντική για να επιτευχθεί η σωστή επαύξηση του φάσματος απόκρισης, η γωνία φάσης ελέγχει το σχήμα του κυματιδίου για την καλύτερη προσαρμογή του στη χρονοϊστορία της ταχύτητας, ο αριθμός των κύκλων και η διαφορά φάσης επηρεάζουν την ικανότητα του κυματιδίου προσεγγίσει σε ικανοποιητικό βαθμό τις σεισμικές διεγέρσεις που εμπεριέχουν παλμό, όπως αναφέρουν οι Vassiliou and Makris [2011]. Λόγω αυτών των πλεονεκτημάτων το κυματίδιο M&P επιλέχθηκε μεταξύ άλλων ευρέως

χρησιμοποιούμενων κυματιδίων, οι παράμετροι των οποίων δεν σχετίζονται άμεσα με την απόκριση των κατασκευών, όπως για παράδειγμα το κυματίδιο Daubechies του Baker.



**Σχήμα 2.11** Κυματομορφή (Mavroeidis and Papageorgiou, 2003).

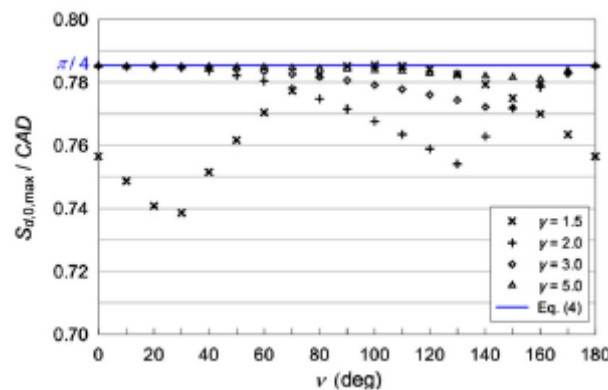
Το εύρος  $A$  του κυματιδίου υπολογίζεται έτσι ώστε το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης του παλμού να προσεγγίζει όσο καλύτερα γίνεται με φάσμα των αρχικών καταγραφών. Σε αυτή τη διαδικασία, χρησιμοποιείται η έννοια της αθροιστικής απόλυτης μετακίνησης (CAD), η οποία σχετίζεται με την φασματική μετακίνηση. Το CAD εισήχθη από τους Taflampas et al. [2009] και ορίζεται ως το χρονικό ολοκλήρωμα της απόλυτης εδαφικής ταχύτητας όπως ορίζεται παρακάτω, δηλαδή,

$$CAD = \int_0^{t_{tot}} |v_g| dt \quad [2.5]$$

Για ένα κυματίδιο M&P, παρά το γεγονός ότι έχει εφαρμοστεί η κωδωνόσχημη περιβάλλουσα στο εύρος της διέγερσης, υπάρχει μια σταθερή σχέση με ικανοποιητική ακρίβεια μεταξύ της φασματικής μετατόπισης για μηδενική απόσβεση σε συντονισμό και του CAD, η οποία μπορεί να εκφραστεί ως

$$\frac{S_{d,0}(T_{res})}{CAD} = \frac{\pi}{4} \quad [2.6]$$

Η σχέση αυτή φαίνεται στο Σχήμα 2.12 όπου σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα είναι ανεξάρτητα της περιόδου  $T_p$ .



**Σχήμα 2.12** Σχέση μεταξύ της μέγιστης φασματικής μετακίνησης  $S_{d,max}$  και της αθροιστικής απόλυτης μετακίνησης CAD για το κυματίδιο M&P για διάφορες τιμές του  $\gamma$  και  $\nu$ .

Μια παρόμοια σχέση μεταξύ της κορυφαίας φασματικής μετακίνησης και του CAD μπορεί να οριστεί και για άλλες τιμές της απόσβεσης, πέρα από τη μηδενική. Για έναν μονοβάθμιο ταλαντωτή με λόγο ιξώδους απόσβεσης ίσο με  $\xi$  και για μια καθαρά αρμονική διέγερση, η μετακίνηση σε συντονισμό σύμφωνα με τους Clough RW and Penzien J. [1993] ορίζεται ως

$$S_{d,\xi}(T_{res}) = \frac{1 - e^{-2\pi\xi}}{2\xi} \cdot d_{g,max} \quad [2.7]$$

Αν η διέγερση δεν είναι καθαρά αρμονική, αλλά ένα κυματίδιο M&P, η παραπάνω εξίσωση παρουσιάζει σφάλματα για μεγάλες τιμές του  $\gamma$  για το λόγο αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας διορθωτικός συντελεστής ίσος με  $1+(\gamma-1)\xi$ . Συνεπώς, για κυματίδια M&P, μπορεί να γραφεί με ακρίβεια:

$$\frac{S_{d,\xi,\max}}{CAD} = \frac{1 - e^{-2\pi\gamma\xi}}{8\gamma\xi} [1 + (\gamma - 1)\xi] \quad [2.8]$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις [2.6] και [2.8] και τη γνωστή σχέση μεταξύ της φασματικής μετακίνησης και της ψευδο-ταχύτητας:  $PSv=(2\pi/T)-S_d$ , καταλήγουμε στις ακόλουθες σχέσεις μεταξύ CAD και PSv οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του εύρους του κυματιδίου M&P

$$\frac{PS_{v,0,\max}}{CAD} = \frac{\pi^2}{2T_p} \quad \text{for zero damping} \quad [2.9]$$

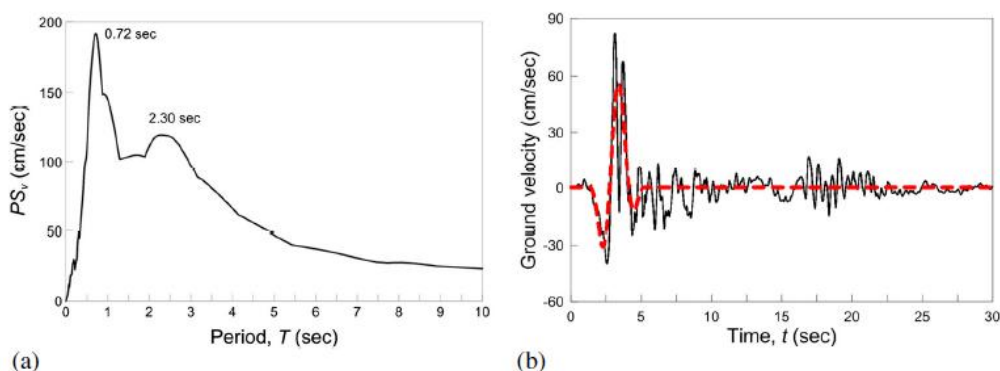
$$\frac{PS_{v,\xi,\max}}{CAD} = \frac{\pi (1 - e^{-2\pi\gamma\xi}) [1 + (\gamma - 1)\xi]}{4\gamma\xi T_p} \quad \text{for damping } \xi \neq 0 \quad [2.10]$$

#### 2.2.4.3 Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού

Για την εκτίμηση της περιόδου  $T_p$  του παλμού κατευθυντικότητας ορίζεται η τιμή της περιόδου που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη τιμή του ελαστικού φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5%. Για παράδειγμα, η κλιμάκωση του μεγέθους της περιόδου του δεσπόζοντος παλμού που εμφανίζεται στη χρονοϊστορία της ταχύτητας στις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου δίνεται από σχέσεις παλινδρόμησης που συχνά βασίζονται σε αυτό τον ορισμό, Somerville [1998], Alavi and Krawinkler [2000], Rupakhety et al. [2011]. Ωστόσο, η ακρίβεια της διαδικασίας αυτής έχει αμφισβητηθεί από πολλούς ερευνητές όπως οι Rodriguez-Marek [2000] και Baker [2007].

Ένα τέτοιο παράδειγμα, όπου ο ορισμός της περιόδου του παλμού οδηγεί σε εσφαλμένα αποτελέσματα δίνεται στο Σχήμα 2.13, καταγραφή Petrolia, Cape Mendocino 1992, κανονικό ρήγμα. Στην περίπτωση αυτή, η περίοδος του παλμού που

αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη τιμή του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5% είναι ίση με 0.72 sec, Σχήμα 2.13(α). Όμως η τιμή της περιόδου που υπολογίζεται σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Baker [2007] ισούται με 3.0 sec ενώ σύμφωνα με τη μεθοδολογία των P. Mimoglou et al. [2014] είναι ίση με 2.30 sec. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.13(α), οι τιμές αυτές είναι κοντά στην περίοδο της δεύτερης κορυφής του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας, 2.30sec. Στο Σχήμα 2.13(β) συγκρίνεται η χρονοϊστορία του παλμού που ορίζεται με βάση τη μεθοδολογία M&P με τη χρονοϊστορία της ταχύτητας της εδαφικής κίνησης. Είναι προφανές ότι το κυματίδιο M&P με περίοδο 2.74 sec αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά τον παλμό που βρίσκεται στην εδαφική κίνηση, ενώ ένα κυματίδιο με περίοδο 0.72 sec, όπως προτείνεται από την κορυφή του φάσματος της ψευδο-ταχύτητας, θα αντιστοιχούσε στο υψίσυχο περιεχόμενο της εδαφικής κίνησης και όχι στον κύριο παλμό της σεισμικής διέγερσης.



**Σχήμα 2.13** (α) Φάσμα απόκρισης της ψεύδο-ταχύτητας για απόσβεση 5% και (β) Σύγκριση της χρονοϊστορίας του παλμού με βάση τη μεθοδολογία M&P με τη χρονοϊστορία της ταχύτητας της εδαφικής κίνησης.

Μία εναλλακτική προσέγγιση για τον υπολογισμό του  $T_p$  είναι η χρήση του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης. Η λύση αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι η φασματική μετακίνηση ταυτίζεται με την περιβάλλουσα του φάσματος Fourier και το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας για μηδενική απόσβεση θεωρείται ότι είναι μια επαρκής περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης σύμφωνα με τον Hudson DE [1979], δηλαδή

$$\tilde{a}_g(\omega) \leq S_{v,0}(\omega) \quad [2.11]$$

όπου  $S_{v,0}(\omega)$  είναι το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας για μηδενική απόσβεση και  $\tilde{a}_g(\omega)$  είναι τα πλάτη του φάσματος Fourier της εδαφικής επιτάχυνσης  $a_g(t)$  που ορίζεται ως

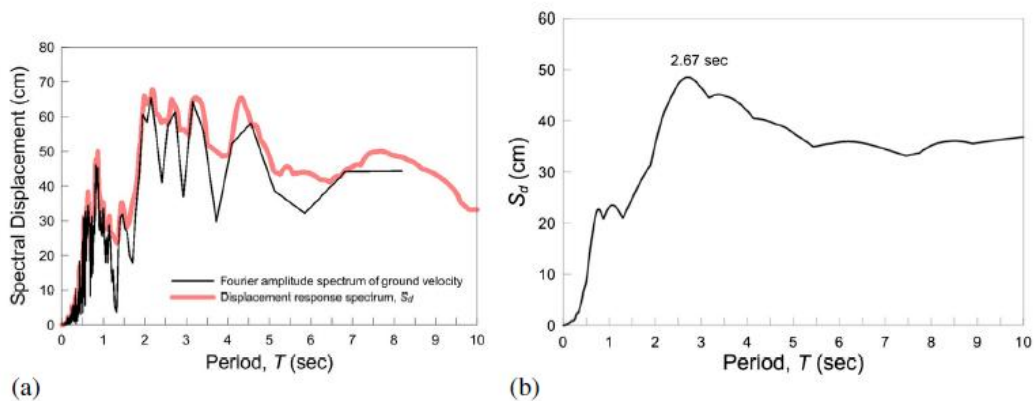
$$\tilde{a}_g(\omega) = \sqrt{\left[ \int_0^{\tau} a_g(t) \cdot \cos(\omega t) dt \right]^2 + \left[ \int_0^{\tau} a_g(t) \cdot \sin(\omega t) dt \right]^2} \quad [2.12]$$

Όμοια, μπορεί να αποδειχτεί ότι για ταλαντωτές με μηδενική απόσβεση ( $\xi=0$ ) και εκτός από περιοχές μεγάλων περιόδων το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας  $S_{v,0}(\omega)$  συμπίπτει με το φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας  $PS_{v,0}(\omega)$ . Όντως, για ταλαντωτές με μηδενική απόσβεση ( $\xi=0$ ) μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας  $S_{v,0}(\omega)$  συμπίπτει με το φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας  $PS_{v,0}(\omega)$ , εκτός από τις περιοχές μεγάλων περιόδων. Έτσι, σε ένα μεγάλο εύρος περιόδων, μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι  $S_{v,0}(\omega) = \omega \cdot S_{d,0}(\omega)$ , όπου  $S_{d,0}(\omega)$  είναι το φάσμα απόκρισης της μετατόπισης για μηδενική απόσβεση. Τότε, διαιρώντας και τα δύο μέλη της σχέσης με  $\omega$  και λαμβάνοντας υπόψη ότι  $\tilde{a}_g(\omega)/\omega = \tilde{v}_g(\omega)$ , όπου  $\tilde{v}_g(\omega) = F(\tilde{v}_g)$  το φάσμα Fourier της εδαφικής ταχύτητας  $v_g(t)$ , προκύπτει:

$$\tilde{v}_g(\omega) \leq S_{d,0}(\omega) \quad [2.13]$$

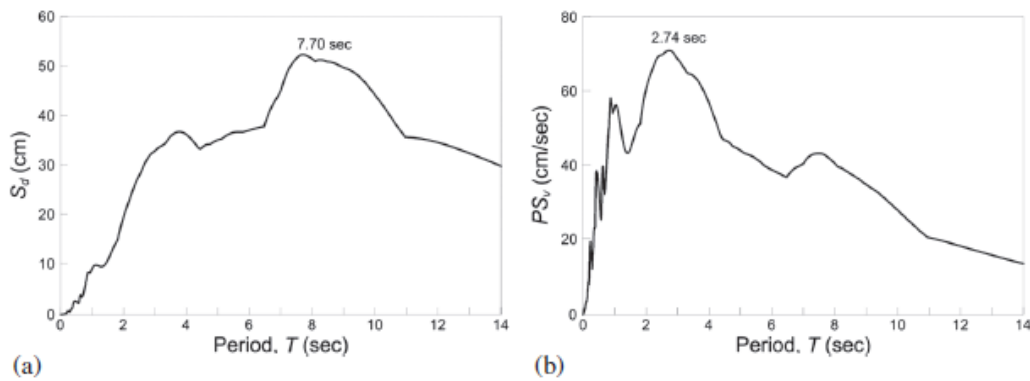
,το οποίο δείχνει ότι το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης αποτελεί μια επαρκής περιβάλλουσα καμπύλη του φάσματος Fourier της εδαφικής ταχύτητας. Ακολουθεί ένα παράδειγμα στο Σχήμα 14(α) από το σεισμό του Cape Mendocino του 1992. Με βάση τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη ότι ο παλμός είναι εμφανής στη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας, θα ήταν λογικό να καθοριστεί η περίοδος του παλμού  $T_p$  από τη δεσπόζουσα περίοδο στο φάσμα απόκρισης της μετακίνησης για απόσβεση 5% αντί του φάσματος της ψευδο-ταχύτητας. Παραδείγματος χάρη για το σεισμό στη Cape Mendocino το 1992 από το Σχήμα 14(β) του φάσματος απόκρισης της μετατόπισης για 5% απόσβεση η τιμή της περιόδου ορίζεται  $T_p=2.67\text{sec}$  τιμή η οποία είναι κοντά στη περίοδο του παλμού που προσδιορίστηκε με βάση τη μεθοδολογία του Baker [2007] 3.0sec και με βάση την μεθοδολογία του P. Mimoglou et al. [2014] 2.74sec.





**Σχήμα 2.14** (α) Σύγκριση του φάσματος Fourier της εδαφικής ταχύτητας με το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης για μηδενική απόσβεση και (β) φάσμα απόκρισης μετατόπισης για 5% απόσβεση.

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου η χρήση του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης για τον υπολογισμό της περιόδου  $T_p$  μπορεί να είναι προβληματική. Μια τέτοια περίπτωση αποτελεί το γεγονός ότι η κορυφή του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης μπορεί να επηρεαστεί από την ύπαρξη σφαλμάτων μεγάλης διάρκειας στις καταγραφές της εδαφικής επιτάχυνσης αλλά και ότι μπορεί να αντιστοιχεί σε έναν παλμό ταχύτητας με μεγάλη χρονική διάρκεια αλλά μικρό εύρος, ο οποίος μπορεί να μην είναι ο δεσπόζων παλμός. Επιπλέον, αυτός ο εναλλακτικός ορισμός της  $T_p$  μέσω της δεσπόζουσας περιόδου του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης δε μπορεί να γενικευτεί, αφού υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες δεν επαληθεύεται. Ένα τέτοιο παράδειγμα δίνεται στο Σχήμα 2.15 για τη καταγραφή Parachute Test Site από το σεισμό του Westmorland το 1981, που αντιστοιχεί σε κανονικό ρήγμα. Σύμφωνα με το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης η δεσπόζουσα περίοδος του παλμού ισούται με 7.7sec, αρκετά μεγαλύτερη από αυτή που καθορίστηκε σύμφωνα με τον Baker [2007], 3.6sec και σύμφωνα με τον P. Mimoglou et al. [2014], 3.0sec. Σημειώνεται όμως πως οι τιμές είναι κοντά στη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5%, ίση με 2.74sec.



**Σχήμα 2.15 (α)** Φάσμα απόκρισης μετακίνησης για απόσβεση 5% και **(β)** Φάσμα απόκρισης ψευδο-ταχύτητας για απόσβεση 5%.

Σύμφωνα λοιπόν με όσα έχουν αναφερθεί προηγουμένως, ο προσδιορισμός της δεσπόζουσας περιόδου του παλμού τόσο από την κορυφή του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας όσο και της μετακίνησης, οδηγεί πολλές φορές σε αποτελέσματα που απέχουν σημαντικά από τα πραγματικά. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι διότι πολλές εδαφικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου επηρεάζονται από περισσότερους από έναν παλμό διαφορετικών περιόδων.

Προτείνεται, λοιπόν, μια νέα μεθοδολογία βάση της οποίας ο προσδιορισμός του δεσπόζοντος παλμού μιας εδαφικής κίνησης προκύπτει μέσω του συνδυασμού των φασμάτων της ταχύτητας και της μετακίνησης. Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι οι παλμικές συνιστώσες των εδαφικών κινήσεων των φαινομένων κατευθυντικότητας επηρεάζουν και την εδαφική επιτάχυνση και την εδαφική ταχύτητα, σε διαφορετικό βέβαια βαθμό, γι' αυτό και η περίοδος του παλμού  $T_p$  πρέπει να επικρατεί στο ολοκλήρωμα συνέλιξης (convolution integral) των δύο αυτών χρονοϊστοριών. Επιπλέον, με τη χρήση του ολοκληρώματος συνέλιξης μειώνεται η επιρροή ακραίων συνιστωσών υψηλής ή χαμηλής συχνότητας που μπορεί να υπάρχουν στην εδαφική επιτάχυνση και την ταχύτητα της εδαφικής κίνησης. Κατά συνέπεια, η κορυφή του φάσματος Fourier της συνέλιξης επιτάχυνσης και ταχύτητας πρέπει να αντιστοιχεί στην περίοδο του σημαντικού παλμού που εμπεριέχεται στην εδαφική κίνηση.

Είναι γνωστό ότι το φάσμα Fourier του ολοκληρώματος συνέλιξης είναι ίσο με το φάσμα Fourier των σημάτων για τα οποία γίνεται η συνέλιξη. Από την άλλη πλευρά, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, το φάσμα απόκρισης της ταχύτητας,  $S_{v,0}$ , για μηδενική απόσβεση είναι μια επαρκής περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της

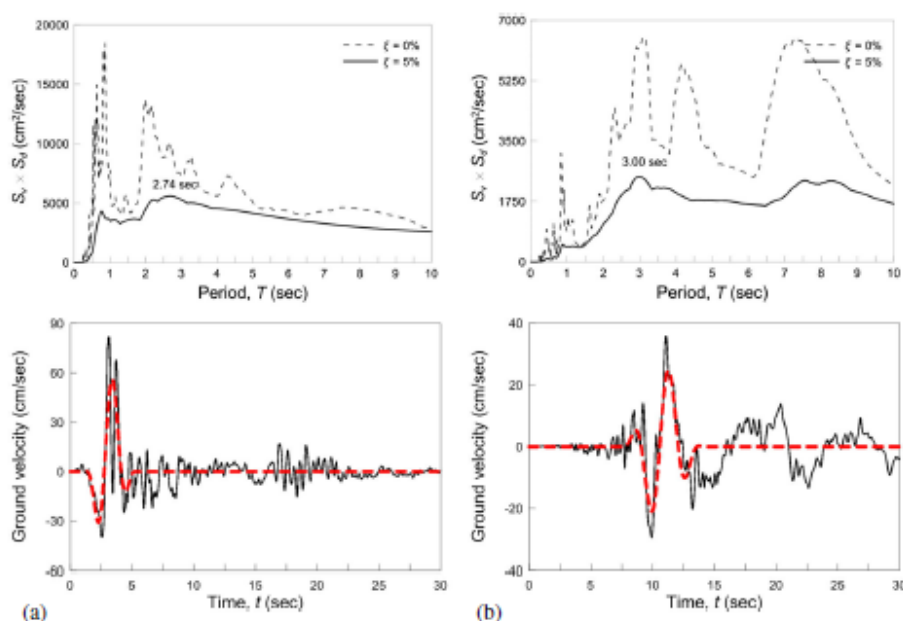
εδαφικής επιτάχυνσης και το φάσμα απόκρισης της μετακίνησης  $S_{d,0}$  για μηδενική απόσβεση είναι μια επαρκής περιβάλλουσα του φάσματος Fourier της εδαφικής ταχύτητας. Χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες αυτές, το φάσμα εύρους Fourier του ολοκληρώματος συνέλιξης μπορεί να προσεγγιστεί από το γινόμενο  $S_{v,0} \times S_{d,0}$ , το οποίο στη συνέχεια θα αναφέρεται ως «φάσμα συνέλιξης» (convolution spectrum)  $S_d \times S_v$  για μηδενική απόσβεση. Συνεπώς, οι περίοδοι των σημαντικών παλμών της ταχύτητας μπορούν να καθοριστούν από τις κορυφές του φάσματος συνέλιξης  $S_d \times S_v$ .

Αν και οι περίοδοι που αντιστοιχούν στην κορυφή του φάσματος απόκρισης για μηδενική απόσβεση δεν συμπίπτουν κατ' ανάγκη με εκείνες για 5% απόσβεση, έχει προταθεί η περίοδος του παλμού να προσδιορίζεται από το φάσμα συνέλιξης για απόσβεση 5%,  $S_{d,5} \times S_{v,5}$ . Αυτό συμβαίνει γιατί οι τιμές αυτές ταιριάζουν καλύτερα με εκείνες που προκύπτουν με βάση τον Baker [2007] αλλά και γιατί τα φάσματα απόκρισης για 5% απόσβεση της εδαφικής κίνησης ταιριάζουν καλύτερα με το αντίστοιχο φάσμα του εξαγόμενου παλμού της ταχύτητας..

Ένα παράδειγμα που φανερώνει την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου δίνεται στο Σχήμα 2.16 για τη καταγραφή Petrolia του σεισμικού γεγονότος στο Cape Mendocino το 1992 και τη καταγραφή Parachute Test Site στο Westmorland το 1981. Στην πρώτη περίπτωση, η περίοδος του παλμού ορίζεται σε 3.00sec σύμφωνα με τον Baker [2007] και συνδέεται με την δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος απόκρισης της μετακίνησης και χρησιμοποιώντας την κορυφή του φάσματος συνέλιξης  $S_d \times S_v$ , προσδιορίζεται σε  $T_p=2.74$  sec. Στην δεύτερη περίπτωση, σύμφωνα με τον Baker [2007] η περίοδος του παλμού είναι 3.60 sec, σχετίζεται με το φάσμα απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας και χρησιμοποιώντας την κορυφή του φάσματος συνέλιξης  $S_d \times S_v$  ορίζεται σε  $T_p=3.00$ sec. Άρα, η χρήση του φάσματος συνέλιξης επιτρέπει το σωστό υπολογισμό της περιόδου του παλμού και στις δύο περιπτώσεις.

Συγκρίνοντας τις χρονοϊστορίες των παλμών που προσδιορίστηκαν μέσω της μεθοδολογία των Mimoglou et al. [2014] με τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες των εδαφικών ταχυτήτων, που περιέχουν τους παλμούς, διαπιστώνεται ότι βρίσκονται σε μεγάλη συμφωνία, Σχήμα 2.16 κάτω. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16(b) η καταγραφή φαίνεται να περιέχει δύο σημαντικούς παλμούς, που αντιστοιχούν στις δύο μεγαλύτερες κορυφές του φάσματος συνέλιξης σε πολύ διαφορετικές περιόδους. Επιλέχθηκε η τιμή που αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο εύρος του φάσματος συνέλιξης  $S_d \times S_v$  για απόσβεση 5% για τον προσδιορισμό του  $T_p$ .

Σημειώνεται όμως ότι όπως έχει αναφερθεί σε πολλές μελέτες σε μια καταγραφή μπορεί να υπάρχουν πολλοί και όχι ένας και μοναδικός παλμός.



**Σχήμα 2.16** Πάνω σειρά: Προσδιορισμός της περιόδου των παλμών  $T_p$  από την κορυφή του φάσματος συνέλιξης  $S_d \times S_v$  για απόσβεση 5%. Κάτω σειρά: Σύγκριση των χρονοϊστοριών ταχύτητας του εξαγόμενου M&P κυματιδίου (διακεκομμένη γραμμή) με τις χρονοϊστορίες ταχύτητας των αρχικών καταγραφών.

Η χρήση του φάσματος συνέλιξης επιτρέπει τον εντοπισμό πρόσθετων σημαντικών παλμών που ενδέχεται να εμπεριέχονται μέσα στην εδαφική κίνηση και εμφανίζονται στο πεδίο των μεσαίων και χαμηλών συχνοτήτων. Το γεγονός ότι ίσως απαιτούνται περισσότεροι από ένα παλμοί για την αξιόπιστη απεικόνιση της εδαφικής κίνησης και την ικανοποιητική προσέγγιση των φασμάτων απόκρισης των καταγραφών, έχει τονιστεί και από τους Mavroudis and Papageorgiou [2003]. Στις περιπτώσεις αυτές, είναι απαραίτητος ο συνδυασμός περισσότερων από ένα κυματίδια για την επαρκή αναπαράσταση της αρχικής καταγραφής. Αυτοί οι επιπλέον παλμοί εμφανίζονται ως δευτερεύουσες κορυφές στο φάσμα συνέλιξης και μπορεί να αντιστοιχούν σε μικρότερες ή μεγαλύτερες περιόδους σε σύγκριση με τον πρώτο παλμό που προκύπτει από τη μεγαλύτερη αιχμή του φάσματος συνέλιξης. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις αυτό δεν είναι ξεκάθαρο. Για το λόγο αυτό προτείνεται η εύρεση κάθε επιπρόσθετου παλμού επαναλαμβάνοντας την προαναφερθείσα διαδικασία στην εναπομένουσα εδαφική κίνηση, μετά την αφαίρεση όλων των προηγούμενων παλμών

από την αρχική καταγραφή. Αυτή η διαδικασία θα πρέπει να επαναλαμβάνεται όσες φορές είναι απαραίτητο, μέχρι να εξαχθούν διαδοχικά όλοι οι σημαντικοί παλμοί. Παρατηρείται ότι όλοι οι παλμοί που εξάγονται από τη διαδικασία αυτή δεν είναι εξίσου σημαντικοί. Είναι έτσι απαραίτητος ο καθορισμός κριτηρίων, ώστε να ελέγχεται εάν ένας παλμός είναι αποδεκτός ή θα πρέπει να απορρίπτεται.

#### 2.2.4.4 Προσδιορισμός των υπολοίπων παραμέτρων των κυματιδίων

Ο προσδιορισμός των τριών παραμέτρων του κύματος, εύρος  $A$ , διάρκεια  $\gamma$  και αριθμός κύκλων  $\nu$ , επιτυγχάνεται με τη χρήση του CAD, το οποίο όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα σχετίζεται με το μέγιστο φασματικό εύρος του παλμού. Για τα κυματίδια M&P, η τιμή του CAD συνδέεται άμεσα με το πλάτος  $A$  και τη διάρκεια  $\gamma$ , με την ακόλουθη σχέση:

$$CAD = \gamma \cdot A \cdot T_p / \pi \quad [2.14]$$

Με βάση την παραπάνω σχέση αλλά και τη σχέση [2.10] και αντικαθιστώντας το  $PS_{\nu, \xi, \max}$  με  $PS_{\nu, \xi}(T_p)$ , η οποία είναι η τιμή του φάσματος απόκρισης της ψευδο-ταχύτητας της εδαφικής κίνησης για περίοδο  $T_p$  και απόσβεση  $\xi$  (όπου τυπικά λαμβάνεται η τιμή 5%), παίρνουμε

$$A = \frac{4 \xi PS_{\nu, \xi}(T_p)}{(1 - e^{-2\pi\xi}) \cdot [1 + (\gamma - 1)\xi]} \quad [2.15]$$

Για τον προσδιορισμό του εύρους  $A$  πρέπει να είναι γνωστή η τιμή της διάρκειας  $\gamma$ . Επειδή όμως είναι μια άγνωστη παράμετρος, εξετάζονται όλες οι πιθανές τιμές μέσα σε ένα επιλεγμένο εύρος. Από τα ζεύγη των τιμών ( $A$ ,  $\gamma$ ), απορρίπτονται οι τιμές που αντιστοιχούν σε εύρη επιτάχυνσης, ταχύτητας ή μετακίνησης του κυματιδίου μεγαλύτερα από τη μέγιστη επιτάχυνση εδάφους  $rg_a$ , η μέγιστη ταχύτητα εδάφους  $rg_v$  και μέγιστη μετατόπιση εδάφους  $rg_d$  αντίστοιχα. Για τα υπόλοιπα αποδεκτά ζεύγη τιμών ( $A$ ,  $\gamma$ ) και για όλες τις τιμές της διαφοράς φάσης  $\nu$  μεταξύ  $0^\circ$  και  $360^\circ$ , υπολογίζονται τα αντίστοιχα κυματίδια. Για κάθε ένα κυματίδιο, εξετάζονται διάφορες τιμές της χρονικής καθυστέρησης έναρξης του παλμού  $t_d$ . Έτσι,

καθορίζεται ένα σύνολο πιθανών κυματιδίων, το καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε διαφορετικό σύνολο παραμέτρων  $A$ ,  $\gamma$ ,  $\nu$ , και  $t_d$ . Επιλέγεται από τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες των παλμών  $v_p(A, \gamma, \nu, t_d, t)$ , το κυματίδιο που ταιριάζει καλύτερα με τη χρονοϊστορία της εδαφικής ταχύτητας αλλά και με το χρόνο έναρξης της εδαφικής κίνησης  $t_d$ , αυτό δηλαδή με το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης,  $r$ .

#### 2.2.4.5 Προτεινόμενη μεθοδολογία σε βήματα

Με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο, τόσο για την εκτίμηση της περιόδου των σημαντικών παλμών αλλά και για τον υπολογισμό των υπολοίπων παραμέτρων των κυματιδίων M&P που ήδη διατυπώθηκε, θα παρουσιαστεί παρακάτω η προτεινόμενη μεθοδολογία αναλυτικά σε βήματα.

Αρχικά, για την καταγραφή που εξετάζουμε παράγουμε το φάσμα συνέλιξης  $S_d \times S_v$  από τον πολλαπλασιασμό του φάσματος της ταχύτητας και της μετακίνησης για απόσβεση 5%.

Στη συνέχεια, προσδιορίζεται η περίοδος ( $T_1$ ) που αντιστοιχεί στην κορυφή του φάσματος συνέλιξης και από το φάσμα της ψευδο-ταχύτητας η τιμή που αντιστοιχεί στην παραπάνω περίοδο,  $PS_{v,5\%,max}(T_1)$ . Σημειώνεται πως, γενικότερα, η τιμή αυτή δεν αντιστοιχεί στη κορυφή του φάσματος ψευδο-ταχύτητας, ωστόσο, είναι κοντά σε μια τοπική κορυφή, αν όχι στη μεγαλύτερη.

Επόμενο βήμα είναι ο ορισμός μιας μέγιστης τιμής,  $\gamma_{max}$ , για τη διάρκεια του κυματιδίου M&P. Καθώς η διάρκεια του κυματιδίου δεν είναι γνωστή, εκ των προτέρων, απαιτούνται όλες οι πιθανές τιμές μεταξύ 1 και  $\gamma_{max}$  για τον προσδιορισμό του καταλληλότερου κυματιδίου για τη συγκεκριμένη εδαφική κίνηση. Για τις περισσότερες σεισμικές διεγέρσεις κοντινού πεδίου η τιμή  $\gamma_{max}=5$  είναι συνήθως επαρκής. Αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να απαιτηθεί μεγαλύτερη τιμή  $\gamma_{max}=10$ .

Κατόπιν για κάθε τιμή του  $\gamma$ ,  $1 \leq \gamma \leq 5$ , με βήμα  $\Delta\gamma=0.1$  υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή του εύρους  $A$  από την σχέση [2.15]. Με αυτό τον τρόπο, καθορίζονται οι τιμές για όλα τα αποδεκτά ζεύγη ( $A_j, \gamma_j$ ). Για κάθε ζεύγος τιμών και για διαφορά φάσης  $\nu$  που κυμαίνεται από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$  με βήμα  $\Delta\nu=5^\circ$ , προσδιορίζεται το αντίστοιχο κυματίδιο M&P για  $T_1$  και αφήνοντας το  $t_0$  ως παράμετρο από τις

σχέσεις [2.3], [2.4]. Απορρίπτουμε όλα τα κυματίδια που η μέγιστη επιτάχυνση, ταχύτητα ή μετακίνηση είναι μεγαλύτερη από την PGA, PGV ή PGD αντίστοιχα.

Έπειτα, για τα κυματίδια που αντιστοιχούν σε μια αποδεκτή τιμή  $\gamma$  και για όλες τις τιμές  $t_0$  που κυμαίνονται από  $t_0 = \gamma_j T_1/2$  έως  $t_0 = t_{tot} - \gamma_j T_1/2$ , με  $t_{tot}$  τη συνολική διάρκεια της εδαφική κίνησης διεξάγεται μια διεργασία συσχέτισης μεταξύ της χρονοϊστορίας ταχύτητας του κυματιδίου από την σχέση [2.4] και της χρονοϊστορίας ταχύτητας της καταγραφής και υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης,  $r$ .

Επιλέγεται εκείνο το κυματίδιο με το μεγαλύτερο συντελεστής συσχέτισης  $r$ , το οποίο αντιπροσωπεύει τον παλμό ταχύτητας της εδαφικής κίνησης και καθορίζονται οι παράμετροι του,  $A_1, \gamma_1, v_1, t_{0,1}$  όπως και η χρονική διάρκεια του  $t_{p,1} = t_{0,1} - \gamma_j T_1/2$ . Ωστόσο επισημαίνεται ότι αν οι συντελεστές συσχέτισης είναι μικροί, αμφισβητείται το γεγονός ότι η εδαφική κίνηση επηρεάζεται από παλμούς κατευθυντικότητας.

Τελικά, αφαιρείται το κυματίδιο αυτό από την αρχική καταγραφή και εναπομένουσα εδαφική κίνηση παίρνει πλέον τη θέση της αρχικής καταγραφής και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τον προσδιορισμό των επόμενων παλμών.

### **3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΟΡΕΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ**

#### 3.1 Περιγραφή του κτιρίου

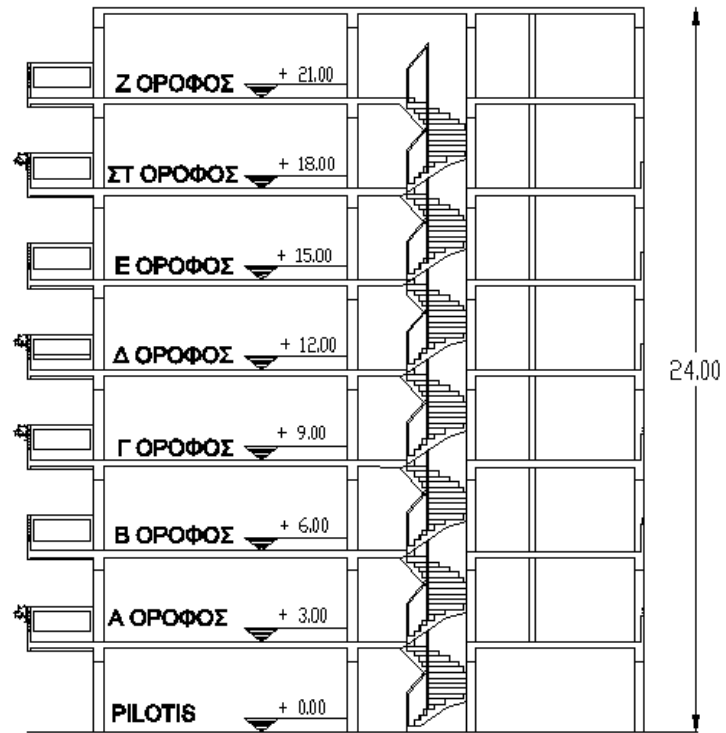
##### **3.1.1 Γενικά**

Πρόκειται για μια επταώροφη οικοδομή επί P.I.L.O.T.I.S, η οποία ανεγέρθηκε στην περιοχή της Νέας Σμύρνης κατά το έτος 2007. Ο σχεδιασμός του κτιρίου είναι σύμφωνος με τις διατάξεις του αντισεισμικού κανονισμού ΦΕΚ 2184 Β/2000, του κανονισμού σκυροδέματος ΦΕΚ 1329 Β/2000 και της τεχνολογίας σκυροδέματος ΦΕΚ 226 Β/1995. Το κατακόρυφο σύστημα ανάληψης δράσεων αποτελείται μόνο από τοιχώματα, το οποίο πλεονεκτεί έναντι πλαισιωτών φορέων καθώς μειώνονται οι οριζόντιες μετακινήσεις του κτιρίου λόγω των σεισμικών δράσεων με αποτέλεσμα τόσο τον περιορισμό των φαινομένων δευτέρας τάξεως όσο και των βλαβών στα φέροντα και μη φέροντα στοιχεία.

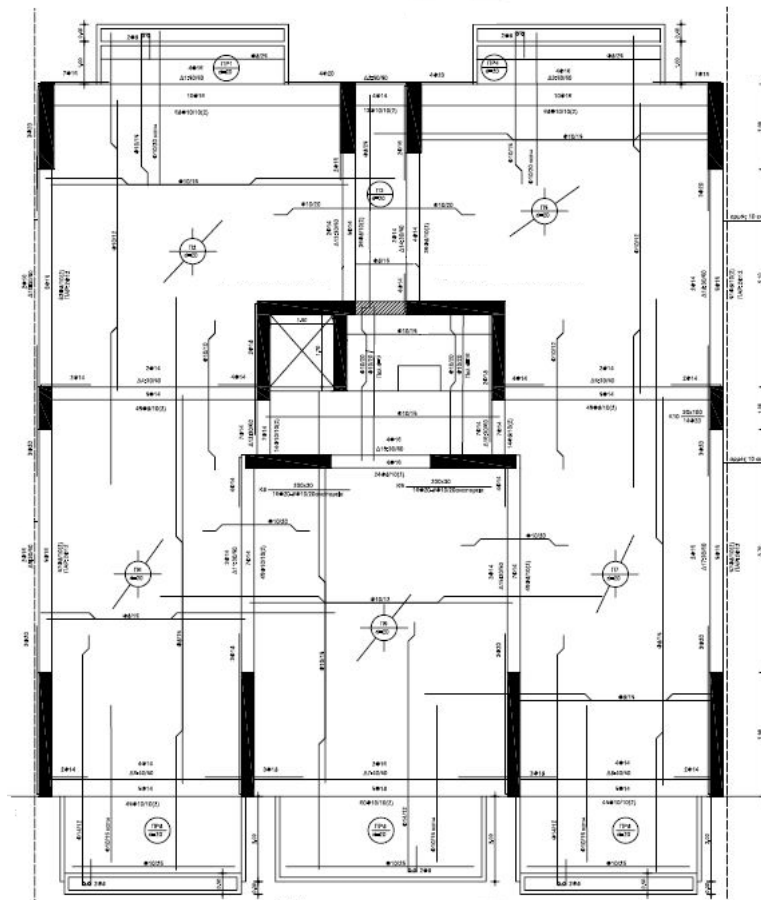
##### **3.1.2 Αρχιτεκτονική μελέτη**

Το υπό μελέτη οκταώροφο κτίριο έχει συνολικό ύψος 24m, με ύψος κάθε ορόφου και πιλοτής 3m. Η κάτοψη του κτιρίου έχει διαστάσεις 16.02x16.70 m<sup>2</sup> και δε διαφέρει από όροφο σε όροφο. Πιο συγκεκριμένα, το δομικό σύστημα αποτελείται από δώδεκα τοιχώματα, τα τοιχώματα που πλαισιώνουν το κλιμακοστάσιο και τον ανελκυστήρα, τις δοκούς και τις πλάκες με πάχος 20cm. Τέλος σε κάθε όροφο υπάρχουν πέντε εξώστες, τρεις στην μπροστινή και δυο στην πίσω όψη. Παρουσιάζεται παρακάτω μία ενδεικτική τομή και κάτοψη του εξεταζόμενου κτιρίου.





Σχήμα 3.1: Ενδεικτική τομή κτιρίου.



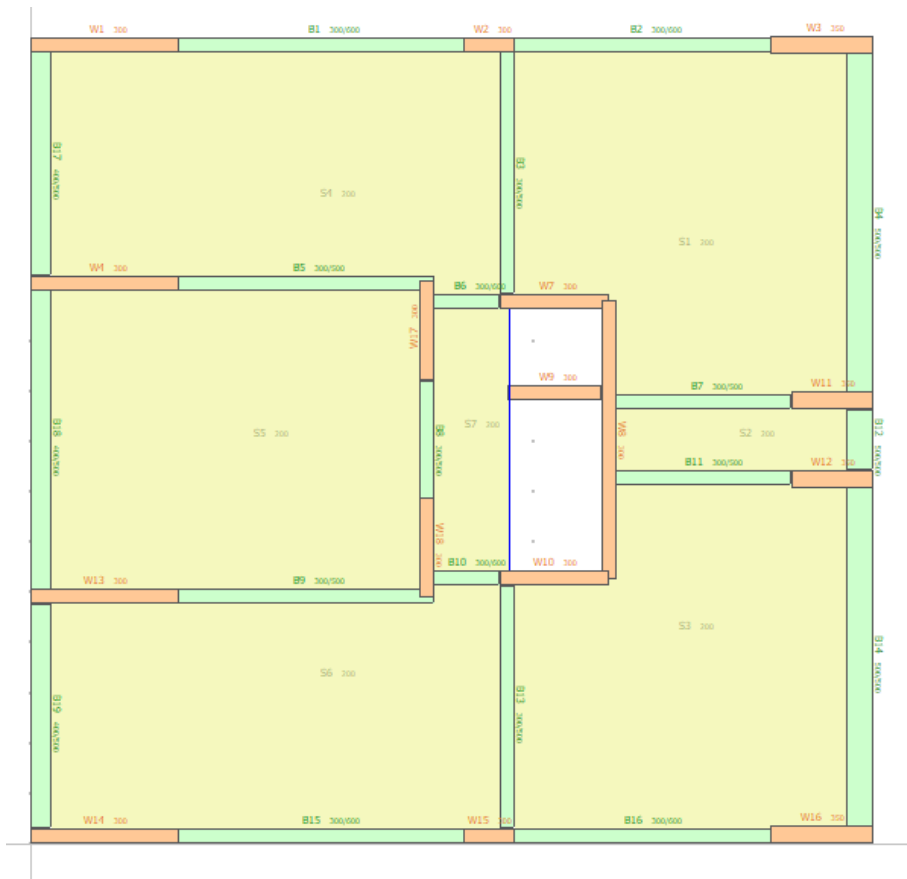
Σχήμα 3.2: Ενδεικτική κάτοψη κτιρίου.

### 3.1.3 Προσομοίωση Φορέα

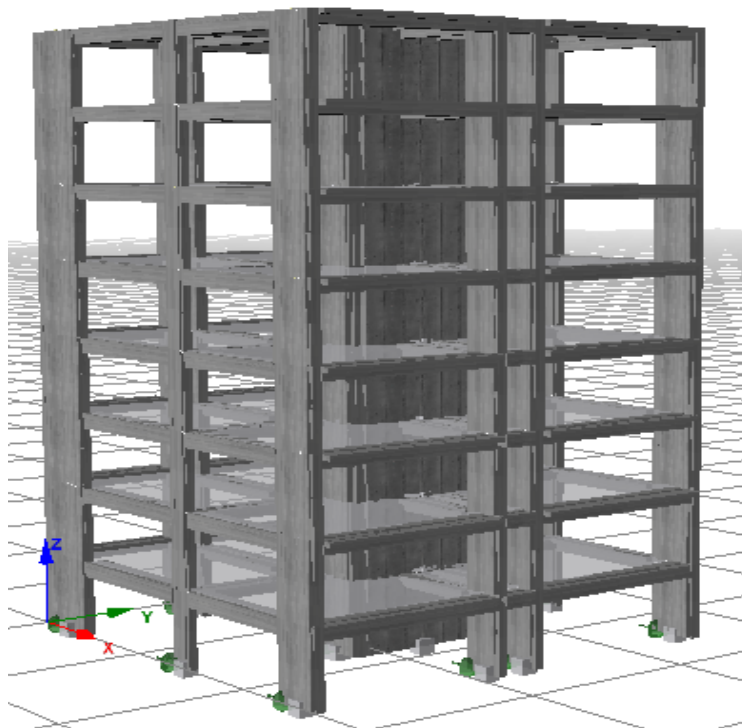
Η προσομοίωση του φορέα πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Seismostruct 2016. Το Seismostruct είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που παρέχει τη δυνατότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς κτιριακών πλαισιακών μοντέλων υπό στατική ή δυναμική φόρτιση. Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματά του είναι η δυνατότητα εισαγωγής της μη γραμμικότητας στη γεωμετρία και της ανελαστικότητας των υλικών στην ανάλυση του προσομοιώματος. Η κατανομή της μη γραμμικότητας κατά μήκος του στοιχείου και καθ' ύψος της διατομής προσομοιώνεται με ακρίβεια, επιτρέποντας τον ακριβή υπολογισμό της κατανομής της βλάβης.

Μέσω του υποπρογράμματος Building Modeler και με βάση τους ξυλοτύπους των αρχιτεκτονικών σχεδίων εισήχθησαν όλα τα δομικά στοιχεία, τοιχώματα, δοκοί, πλάκες, με τις αντίστοιχες διαστάσεις και τους αντίστοιχους οπλισμούς. Σημειώνεται ότι ορίστηκε διαφραγματική λειτουργία στους κόμβους κάθε ορόφου. Ακόμα, το υπόγειο δεν προσομοιώθηκε στο μοντέλο και ο φορέας θεωρήθηκε πακτωμένος στη στάθμη του ισογείου, χωρίς να υπάρχει αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής.

Όσον αφορά τις δοκούς και τα τοιχώματα ορίστηκαν ως inelastic force-based plastic hinge frame element type (infrmFBPH). Η ανελαστική τους συμπεριφορά θεωρείται κατανεμημένη σε ένα συγκεκριμένο μήκος στα δυο τους άκρα (μήκος πλαστικής άρθρωσης). Πλεονεκτήματα αυτού του τύπου στοιχείων είναι όχι μόνο ο μειωμένος χρόνος ανάλυσης, δεδομένου ότι η διακριτοποίηση γίνεται μόνο στο μήκος της πλαστικής άρθρωσης, αλλά και ένας πιο εποπτικός έλεγχος των θέσεων που εμφανίζεται. Για να επιτευχθεί, ακόμα, μια επαρκής διακριτοποίηση, ορίστηκαν ογδόντα sections fibres τόσο στις διατομές των δοκών όσο και των τοιχωμάτων, αριθμός ικανός για να εξασφαλιστεί η σωστή κατανομή των τάσεων-παραμορφώσεων στις διατομές των στοιχείων. Γενικότερα μια τέτοια διακριτοποίηση ποικίλει ανάλογα με το σχήμα και το υλικό της διατομής αλλά και με το βαθμό της ανελαστικής συμπεριφοράς που ορίζεται στο υλικό μας.



**Σχήμα 3.3:** Δισδιάστατη απεικόνιση τυπικού ορόφου του κτιρίου στο πρόγραμμα Seismostruct.



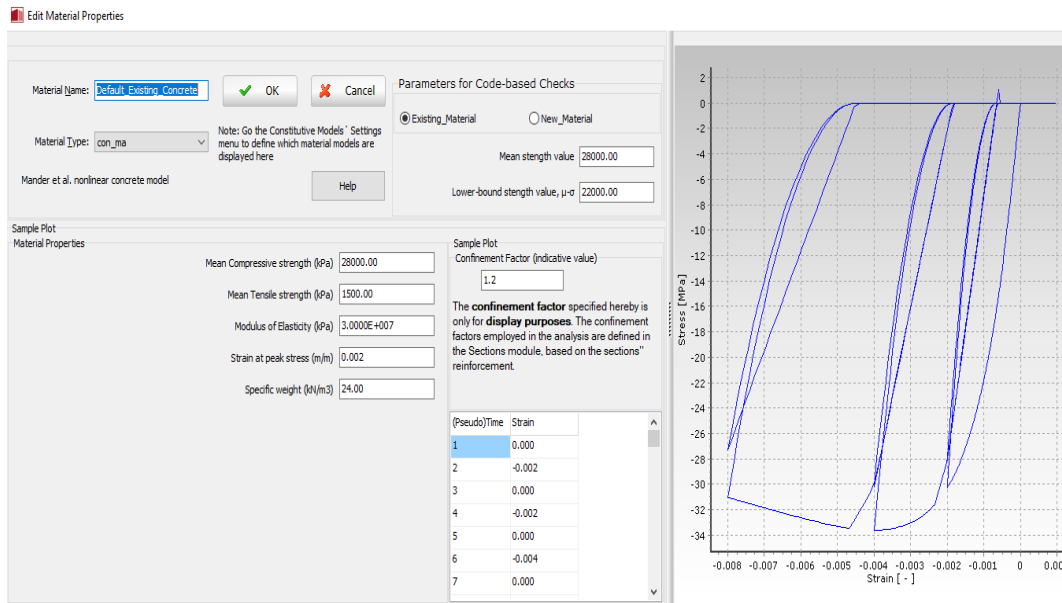
**Σχήμα 3.4:** Τρισδιάστατη απεικόνιση του προσομοιώματος του κτιρίου στο πρόγραμμα Seismostruct.

### 3.1.4 Υλικά

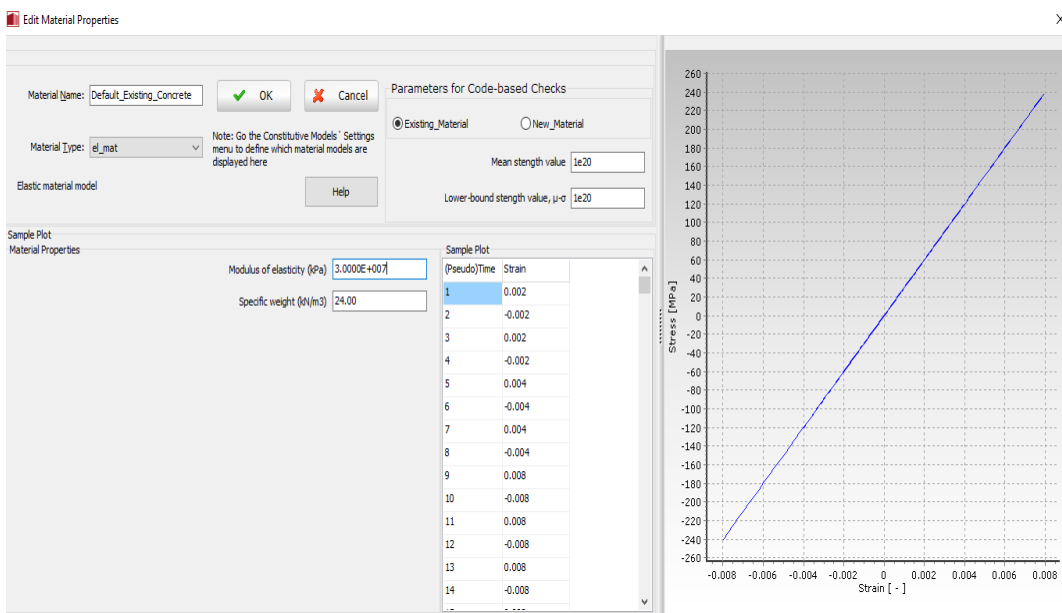
#### 3.1.4.1 Σκυρόδεμα

Ο φέρων οργανισμός του κτιρίου έχει κατασκευαστεί από οπλισμένο σκυρόδεμα. Σύμφωνα με τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα ποιότητας C20/25 με χαρακτηριστική τιμή θλιπτικής αντοχής 20000kPa. Όμως, κατά τη σεισμική αποτίμηση χρησιμοποιούνται οι πραγματικές/αναμενόμενες τιμές που είναι κάπως μεγαλύτερες. Λόγω αυτού, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.1 του EC2, στην περίπτωση μας ορίστηκε σκυροδέματα μέσης τιμή θλιπτικής αντοχής 28000kPa, μέσης εφελκυστικής αντοχής 1500kPa, μέτρου ελαστικότητας  $3 \cdot 10^7$  kPa. Ακόμα η παραμόρφωση του σκυροδέματος για τη μέγιστη τιμή της τάσης λήφθηκε 0.002 m/m και το ειδικό βάρος σκυροδέματος 24kN/m<sup>3</sup>. Τέλος χρησιμοποιήθηκε το ανελαστικό διγραμμικό μοντέλο υλικού con\_ma του Mander et al. [1988] για το περισφιγμένο σκυρόδεμα που ορίζεται από το μη γραμμικό νόμο τάσεων – παραμορφώσεων που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

Σημειώνεται, όμως, ότι προκειμένου να διεξαχθεί η ιδιομορφική ανάλυση και να υπολογιστούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του κτιρίου (ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές), χρησιμοποιήθηκε το ελαστικό μοντέλο του υλικού στο οποίο απαιτούνται δύο παράμετροι για να περιγραφούν πλήρως τα μηχανικά του χαρακτηριστικά, το μέτρο ελαστικότητας και το ειδικό βάρος του υλικού, με τιμές αυτές που αναφέρθηκαν προηγουμένως.



Σχήμα 3.5: Ανελαστικό διγραμμικό μοντέλο σκυροδέματος con\_ma.



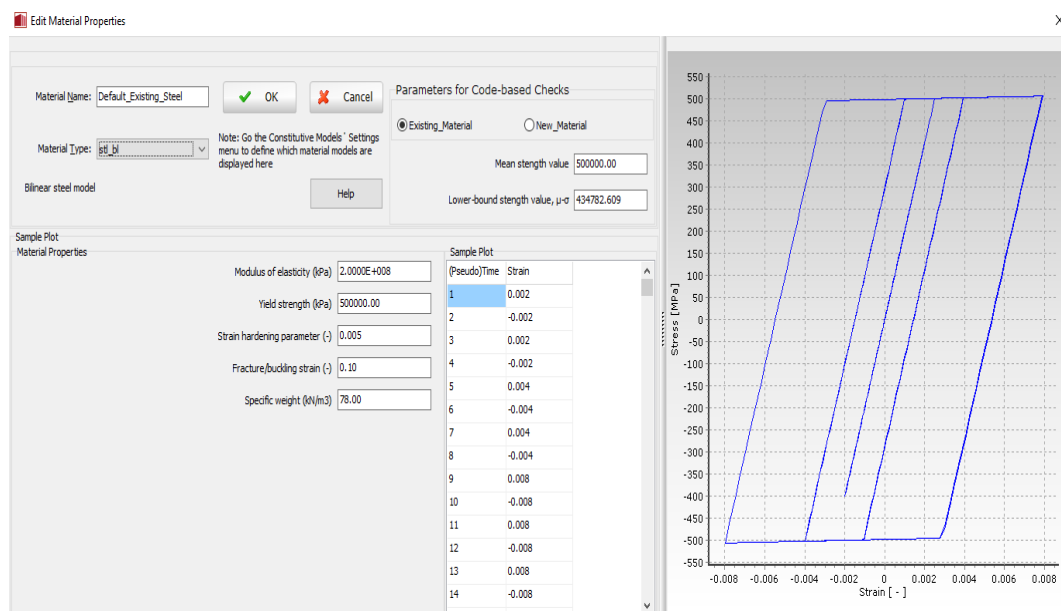
Σχήμα 3.6: Ελαστικό μοντέλο υλικού σκυροδέματος el\_mat.

### 3.1.4.2. Χάλυβας οπλισμού

Ο χάλυβας οπλισμού των δομικών στοιχείων σύμφωνα με τις παραδοχές της μελέτης ήταν ποιότητας S500 τόσο για το διαμήκη οπλισμό όσο και για τους συνδετήρες Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας που ορίζεται για τον υφιστάμενο χάλυβα είναι 1.05. Άρα, η μέση εφελκυστική αντοχή του χάλυβα-όριο διαρροής του

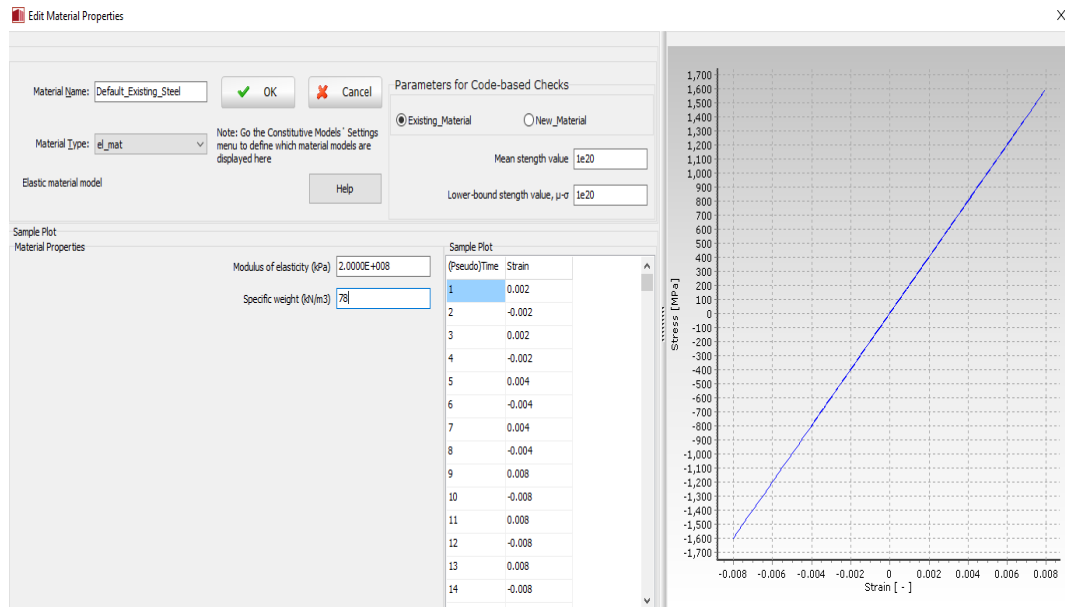
λήφθηκε ίση με 476190.476kPa. Ακόμα, το μέτρο ελαστικότητας λήφθηκε ίσο με 200GPa και ο λόγος παραμόρφωσης-σκλήρυνσης δηλαδή ο λόγος μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας του υλικού μετά τη διαρροή και του αρχικού μέτρου ελαστικότητας είχε την τιμή 0.005. Τέλος, η μέγιστη ή οριακή παραμόρφωση η οποία είναι η τιμή της παραμόρφωσης για την οποία συμβαίνει η θραύση ή ο λυγισμός λήφθηκε ίση με 0.1 και το ειδικό βάρος χάλυβα ίσο με 78 kN/m<sup>3</sup>.

Για να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του χάλυβα χρησιμοποιήθηκε ένα διγραμμικό μοντέλο υλικού stl\_bl, η οποία στην επιφάνεια διαρροής είναι γραμμική συνάρτηση της αύξησης της πλαστικής παραμόρφωσης με το νόμο τάσεων-παραμορφώσεων όπως ορίζεται στο σχήμα 3.7.



**Σχήμα 3.7:** Ανελαστικό διγραμμικό μοντέλο υλικού χάλυβα stl\_bl.

Τέλος ορίστηκε και για το χάλυβα οπλισμού κατά την ιδιομορφική ανάλυση ένα ελαστικό μοντέλο υλικού με μέτρο ελαστικότητας 200GPa και ειδικό βάρος 78 kN/m<sup>3</sup>.



Σχήμα 3.8: Ελαστικό μοντέλο υλικού χάλυβα el\_mat.

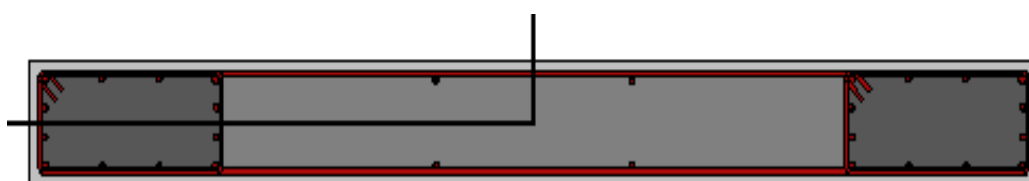
### 3.1.5 Περιγραφή των διατομών

#### 3.1.5.1 Τοιχώματα

Παρουσιάζονται, στη συνέχεια, οι διαστάσεις των διατομών των τοιχωμάτων. Τα τοιχώματα του κλιμακοστασίου και του ανεγκυστήρα έχουν διατομή μορφής Π, ενώ τα υπόλοιπα έχουν ορθογωνική διατομή με λόγο πλευρών να κυμαίνεται από τρία έως εννέα. Δίνονται στον παρακάτω πίνακα η ονοματολογία, το μήκος και το πάχος της κάθε διατομής, όπου σημειώνεται ότι τα τοιχώματα W7, W8, W9 και W10 αναφέρονται σε αυτά του κλιμακοστασίου. Ακόμα, παρουσιάζονται σχηματικά οι οπλισμοί κάθε τοιχώματος, σημειώνοντας πως οι οπλισμοί των ορθογωνικών τοιχωμάτων του ισογείου διαφέρουν από αυτούς των ορόφων.

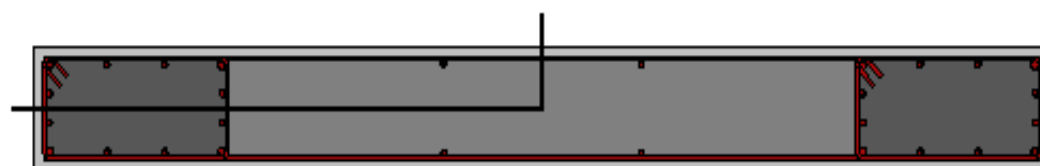
**Πίνακας 3.1:** Διαστάσεις τοιχωμάτων.

Τοιχώματα	Μήκος (mm)	Πάχος (mm)
W1	2908	300
W2	1002	300
W3	2006	350
W4	2910	300
W7	2172	300
W8	5550	300
W9	1822	300
W10	2172	300
W11	1604	350
W12	1604	350
W13	2908	300
W14	2908	300
W15	1002	300
W16	2006	350
W17	1992	300
W18	1970	300



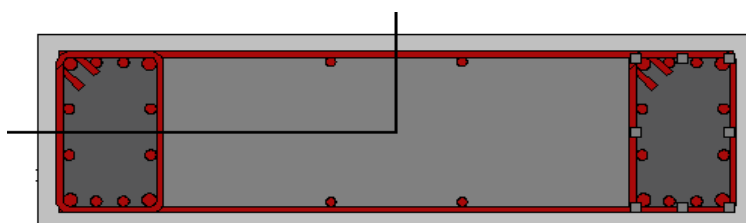
**16Φ20-Φ10/10ανά παρειά και συνδετήρες Φ12/10**

**Σχήμα 3.9:** Οπλισμός τοιχώματος W1 ισόγειου.



**12Φ20+8Φ16-Φ10/17ανά παρειά και συνδετήρες Φ10/10**

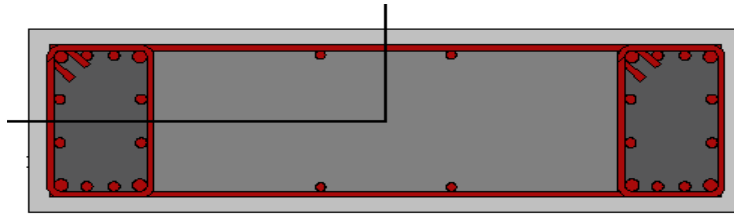
**Σχήμα 3.10:** Οπλισμός τοιχώματος W1 ορόφων.



**14Φ20 και συνδετήρες Φ12/10**

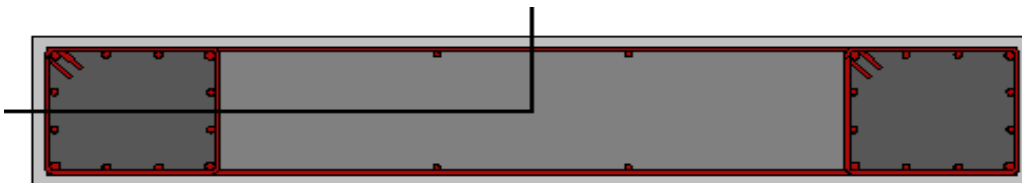
**Σχήμα 3.11:** Οπλισμός τοιχώματος W2 ισόγειου.





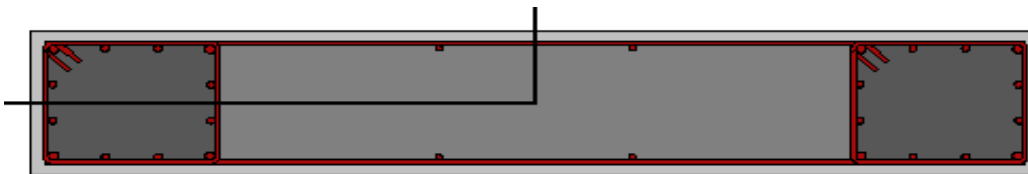
**14Φ20 και συνδετήρες Φ10/10**

**Σχήμα 3.12:** Οπλισμός τοιχώματος W2 ορόφων.



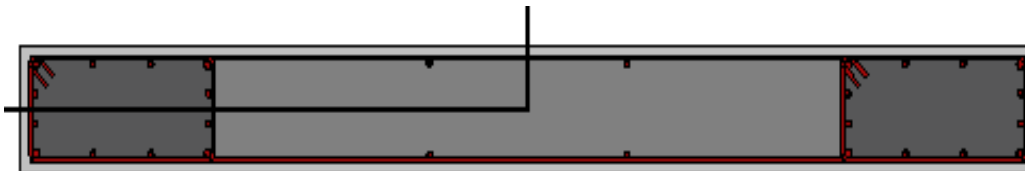
**20Φ20-Φ10/10ανά παρειά και συνδετήρες Φ10/10**

**Σχήμα 3.13:** Οπλισμός τοιχώματος W3 ισογείου.



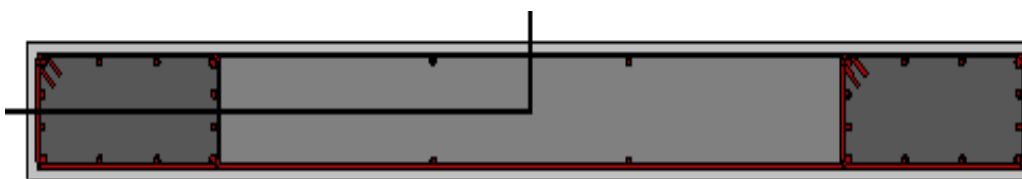
**10Φ20+10Φ16-ΚαθΦ10/18-ΟριζΦ10/10 και συνδετήρες Φ10/10**

**Σχήμα 3.14:** Οπλισμός τοιχώματος W3 ορόφων.



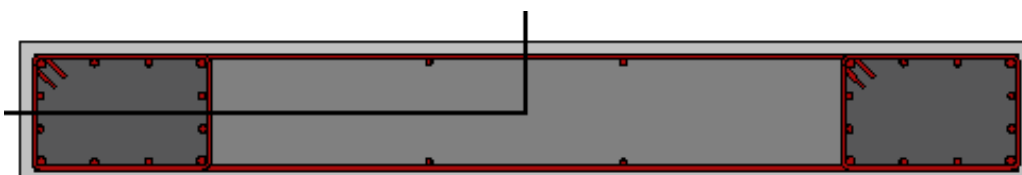
**16Φ20-Φ10/10ανά παρειά και συνδετήρες Φ12/10**

**Σχήμα 3.15:** Οπλισμός τοιχώματος W4 ισογείου.



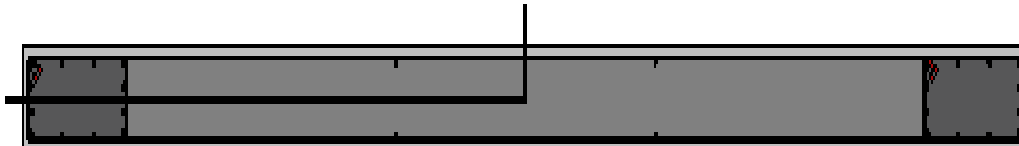
**8Φ20+8Φ16-Φ10/20 ανά παρειά και συνδετήρες Φ10/10**

**Σχήμα 3.16:** Οπλισμός τοιχώματος W4 ορόφων.

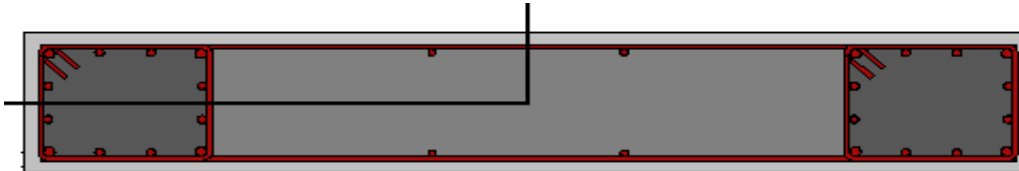


**12Φ20-ΚαθΦ10/20ανά παρειά-ΟριζΦ10/10ανά παρειά και συνδετήρες Φ10/10**

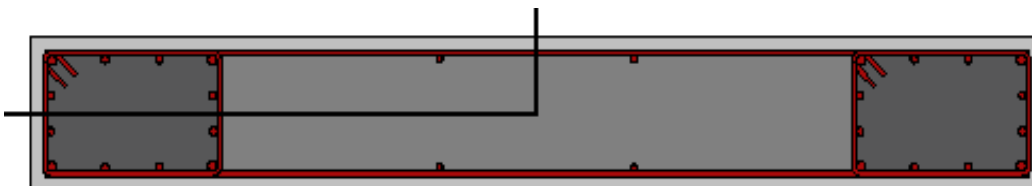
**Σχήμα 3.17:** Οπλισμός τοιχώματος W7.



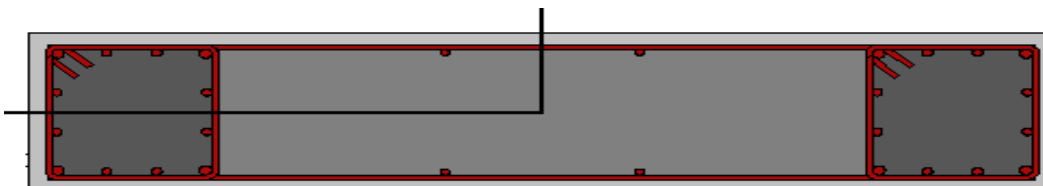
12Φ20-ΚαθΦ10/20ανά παρειά-ΟριζΦ10/10ανά παρειά και συνδετήρες Φ10/10  
Σχήμα 3.18: Οπλισμός τοιχώματος W8.



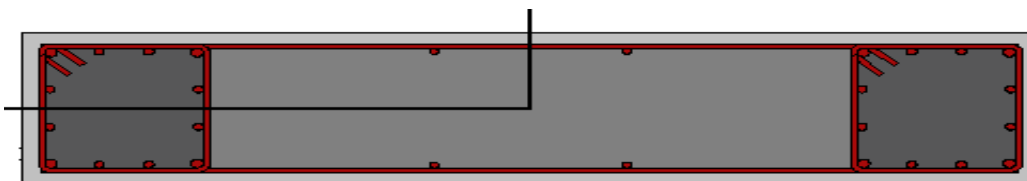
12Φ20-ΚαθΦ10/20ανά παρειά-ΟριζΦ10/10ανά παρειά και συνδετήρες Φ10/10  
Σχήμα 3.19: Οπλισμός τοιχώματος W9.



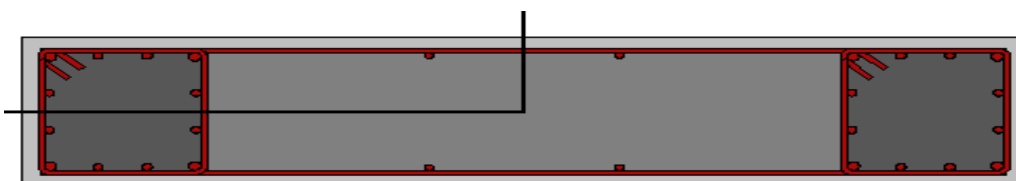
12Φ20-ΚαθΦ10/20ανά παρειά-ΟριζΦ10/10ανά παρειά και συνδετήρες Φ10/10  
Σχήμα 3.20: Οπλισμός τοιχώματος W10.



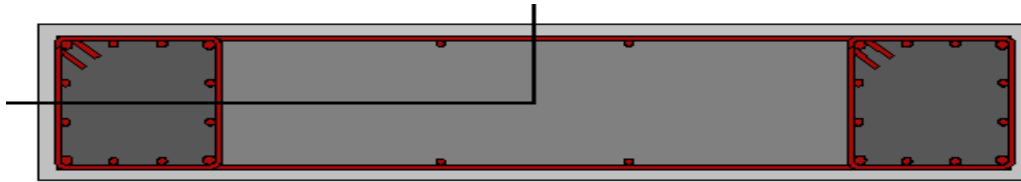
20Φ20-ΚαθΦ10/18-ΟριζΦ10/10 και συνδετήρες Φ10/10  
Σχήμα 3.21: Οπλισμός τοιχώματος W11 ισογείου.



10Φ20+10Φ16-ΚαθΦ10/18-ΟριζΦ10/10 και συνδετήρες Φ10/10  
Σχήμα 3.22: Οπλισμός τοιχώματος W11 ορόφων.

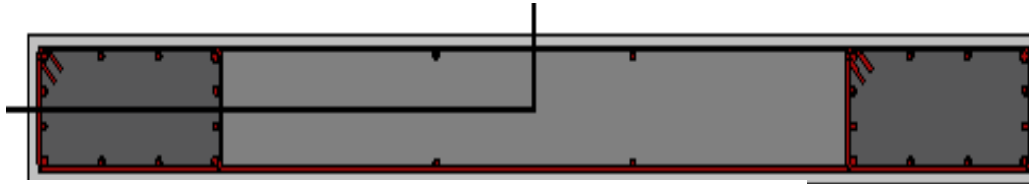


20Φ20-ΚαθΦ10/18-ΟριζΦ10/10 και συνδετήρες Φ10/10  
Σχήμα 3.23: Οπλισμός τοιχώματος W12 ισογείου.



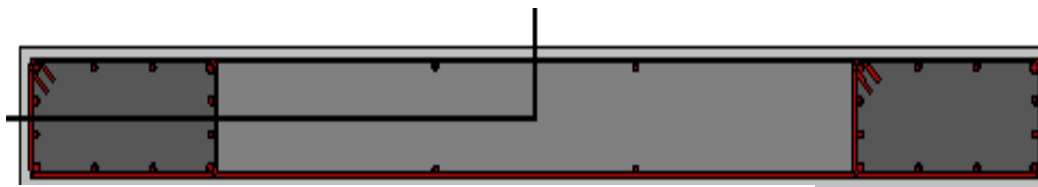
**10Φ20+10Φ16-ΚαθΦ10/18-ΟριζΦ10/10 και συνδετήρες Φ10/10**

**Σχήμα 3.24:** Οπλισμός τοιχώματος W12 ορόφων.



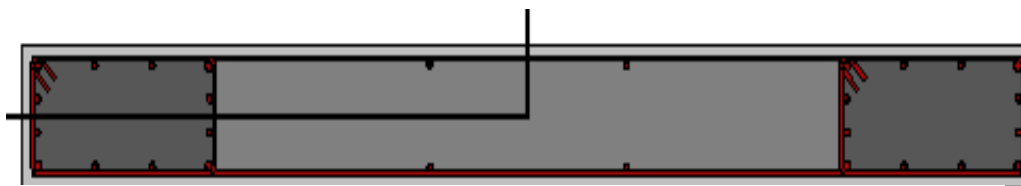
**16Φ20-Φ10/10 ανά παρειά και συνδετήρες Φ10/10**

**Σχήμα 3.25:** Οπλισμός τοιχώματος W13 ισογείου.



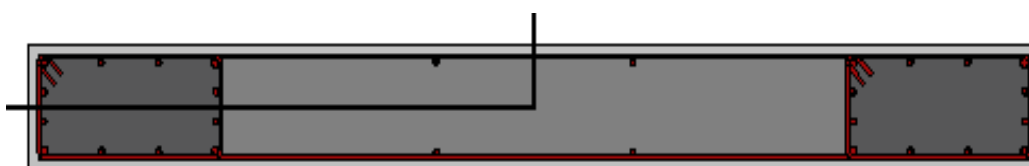
**8Φ20+8Φ16-Φ10/20 ανά παρειά και συνδετήρες Φ10/10**

**Σχήμα 3.26:** Οπλισμός τοιχώματος W13 ορόφων.



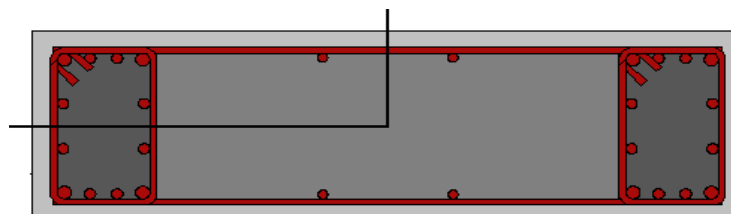
**20Φ20-ΚαθΦ10/15-ΟριζΦ10/10 και συνδετήρες Φ10/10**

**Σχήμα 3.27:** Οπλισμός τοιχώματος W14 ισογείου.



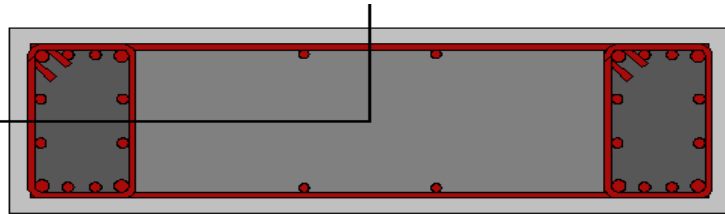
**12Φ20+8Φ16-Φ10/17 ανά παρειά και συνδετήρες Φ10/10**

**Σχήμα 3.28:** Οπλισμός τοιχώματος W14 ορόφων.



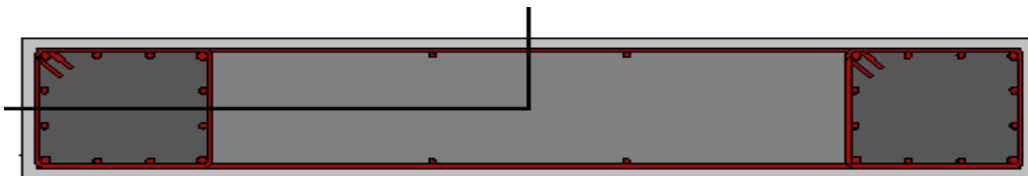
**14Φ20 και συνδετήρες Φ12/10**

**Σχήμα 3.29:** Οπλισμός τοιχώματος W15 ισογείου.



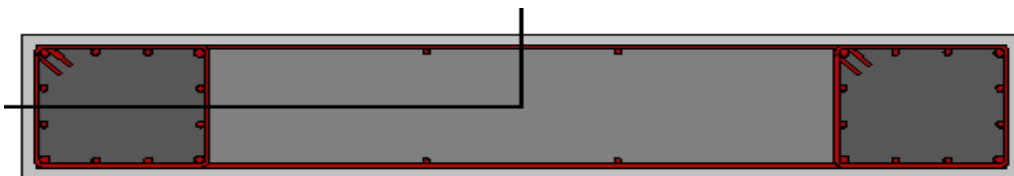
**14Φ20 και συνδετήρες Φ10/10**

**Σχήμα 3.30:** Οπλισμός τοιχώματος W15 ορόφων.



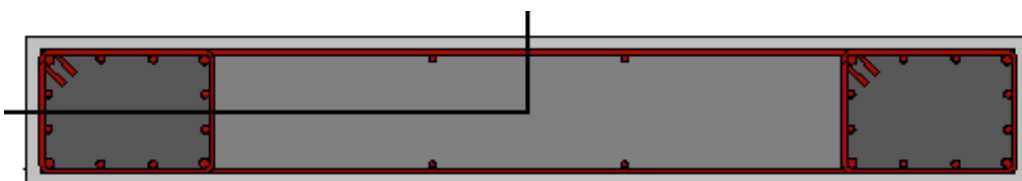
**24Φ20-Φ10/10 ανά παρειά και συνδετήρες Φ10/10**

**Σχήμα 3.31:** Οπλισμός τοιχώματος W16 ισογείου.



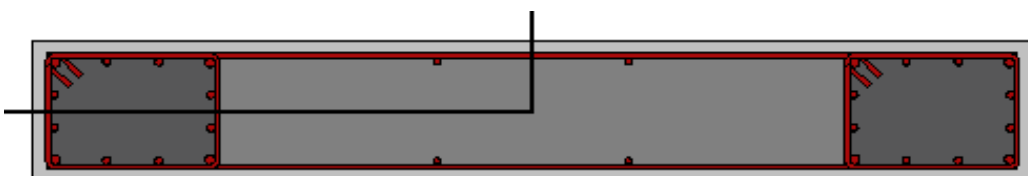
**14Φ20+10Φ16-ΚαθΦ10/18-ΟριζΦ10/10 και συνδετήρες Φ10/10**

**Σχήμα 3.32:** Οπλισμός τοιχώματος W16 ορόφων.



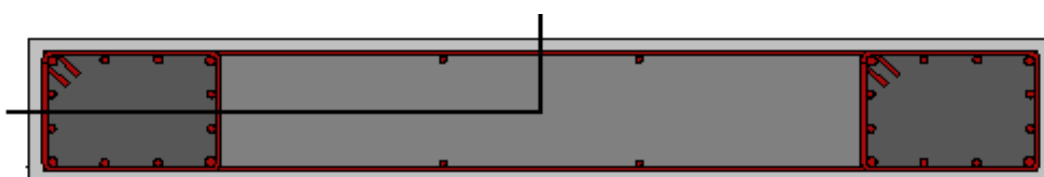
**16Φ20-Φ10/20 ανά παρειά και συνδετήρες Φ10/10**

**Σχήμα 3.33:** Οπλισμός τοιχώματος W17 ισογείου.



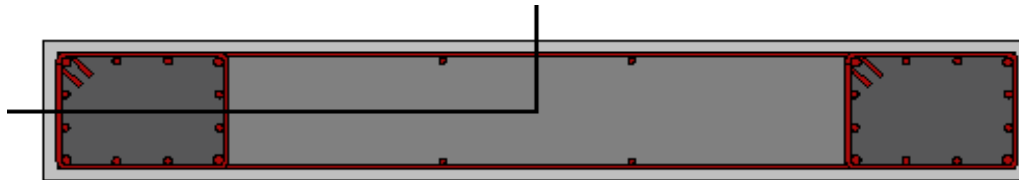
**8Φ20+8Φ16-Φ10/20 ανά παρειά και συνδετήρες Φ10/10**

**Σχήμα 3.34:** Οπλισμός τοιχώματος W17 ορόφων.



**16Φ20-Φ10/20 ανά παρειά και συνδετήρες Φ12/10**

**Σχήμα 3.35:** Οπλισμός τοιχώματος W18 ισογείου.



**8Φ20+8Φ16-Φ10/20 ανά παρειά και συνδετήρες Φ10/10**

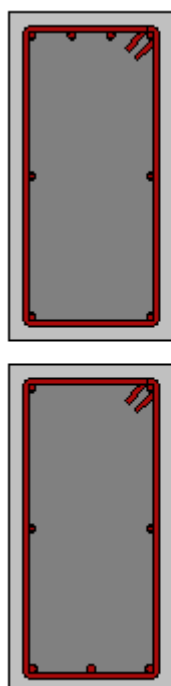
**Σχήμα 3.36:** Οπλισμός τοιχώματος W18 ορόφων.

### 3.1.5.2 Δοκοί

Ο υπό εξεταζόμενος φορέας απαρτίζεται από δέκα περιμετρικές δοκούς και εννέα εσωτερικές. Η ονοματολογία και οι διαστάσεις της κάθε δοκού δίνονται στον παρακάτω πίνακα και οι οπλισμοί στα σχήματα που ακολουθούν

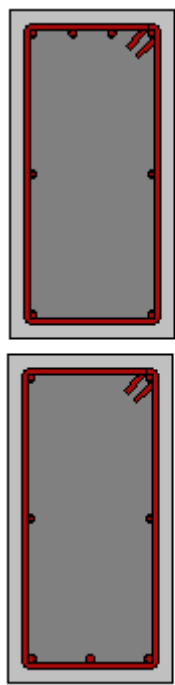
**Πίνακας 3.2:** Διαστάσεις δοκών.

Δοκοί	Ύψος (mm)	Πλάτος (mm)
<b>B1</b>	600	300
<b>B2</b>	600	300
<b>B3</b>	500	300
<b>B4</b>	500	500
<b>B5</b>	500	300
<b>B6</b>	600	300
<b>B7</b>	500	300
<b>B8</b>	500	300
<b>B9</b>	500	300
<b>B10</b>	600	300
<b>B11</b>	500	300
<b>B12</b>	500	500
<b>B13</b>	500	300
<b>B14</b>	500	500
<b>B15</b>	600	300
<b>B16</b>	600	300
<b>B17</b>	500	400
<b>B18</b>	500	400
<b>B19</b>	500	400



Start/lower:	2	14mm
Start/upper:	4	14mm
Start/sides:	2	12mm
Middle/lower:	3	16mm
Middle/upper:	2	14mm
Middle/sides:	2	12mm
End/lower:	2	14mm
End/upper:	4	14mm
End/sides:	2	12mm
Start/Add. Rebars :	None	
Middle/Add. Rebars :	None	
End/Add. Rebars :	None	
Transverse start:	10mm	/ 15 cm
Transverse middle:	10mm	/ 15 cm
Transverse end:	10mm	/ 15 cm

Σχήμα 3.37: Οπλισμός δοκού B1.



Start/lower:	2	14mm
Start/upper:	4	14mm
Start/sides:	2	12mm
Middle/lower:	3	16mm
Middle/upper:	2	14mm
Middle/sides:	2	12mm
End/lower:	2	14mm
End/upper:	4	14mm
End/sides:	2	12mm
Start/Add. Rebars :	None	
Middle/Add. Rebars :	None	
End/Add. Rebars :	None	
Transverse start:	10mm	/ 15 cm
Transverse middle:	10mm	/ 15 cm
Transverse end:	10mm	/ 15 cm

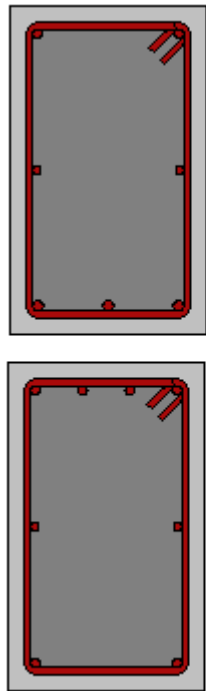
Σχήμα 3.38: Οπλισμός δοκού B2.

Start/lower:	2	14mm
Start/upper:	4	14mm
Start/sides:	2	12mm
Middle/lower:	3	16mm
Middle/upper:	2	14mm
Middle/sides:	2	12mm
End/lower:	2	14mm
End/upper:	4	14mm
End/sides:	2	12mm
Start/Add. Rebars:	None	
Middle/Add. Rebars:	None	
End/Add. Rebars:	None	
Transverse start:	10mm	/ 15 cm
Transverse middle:	10mm	/ 15 cm
Transverse end:	10mm	/ 15 cm

Σχήμα 3.39: Οπλισμός δοκού B3.

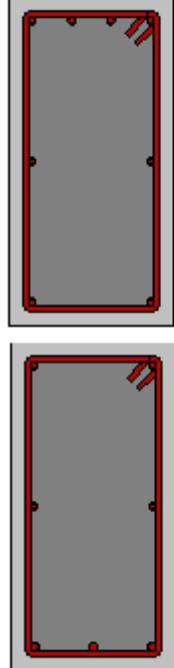
Start/lower:	2	14mm
Start/upper:	4	14mm
Start/sides:	2	12mm
Middle/lower:	3	16mm
Middle/upper:	2	14mm
Middle/sides:	2	12mm
End/lower:	2	14mm
End/upper:	4	14mm
End/sides:	2	12mm
Start/Add. Rebars:	None	
Middle/Add. Rebars:	None	
End/Add. Rebars:	None	
Transverse start:	10mm	/ 15 cm
Transverse middle:	10mm	/ 15 cm
Transverse end:	10mm	/ 15 cm

Σχήμα 3.40: Οπλισμός δοκού B4.



Start/lower:	2	14mm
Start/upper:	4	14mm
Start/sides:	2	12mm
Middle/lower:	3	16mm
Middle/upper:	2	14mm
Middle/sides:	2	12mm
End/lower:	2	14mm
End/upper:	4	14mm
End/sides:	2	12mm
Start/Add. Rebars :	None	
Middle/Add. Rebars :	None	
End/Add. Rebars :	None	
Transverse start:	10mm	/ 15 cm
Transverse middle:	10mm	/ 15 cm
Transverse end:	10mm	/ 15 cm

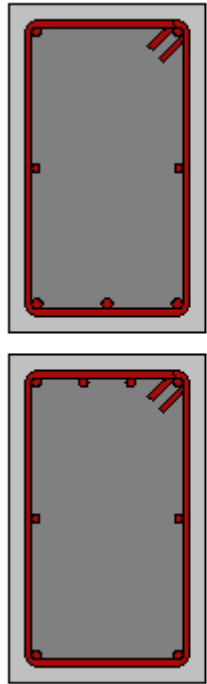
Σχήμα 3.41: Οπλισμός δοκού B5.



Start/lower:	2	14mm
Start/upper:	4	14mm
Start/sides:	2	12mm
Middle/lower:	3	16mm
Middle/upper:	2	14mm
Middle/sides:	2	12mm
End/lower:	2	14mm
End/upper:	4	14mm
End/sides:	2	12mm
Start/Add. Rebars :	None	
Middle/Add. Rebars :	None	
End/Add. Rebars :	None	
Transverse start:	10mm	/ 15 cm
Transverse middle:	10mm	/ 15 cm
Transverse end:	10mm	/ 15 cm

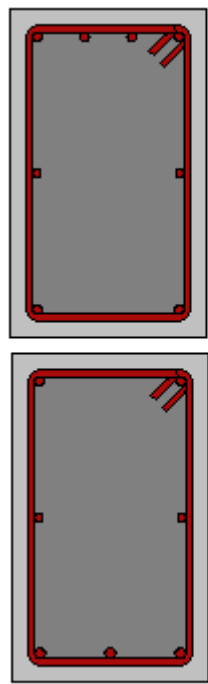
Σχήμα 3.42: Οπλισμός δοκού B6.





Start/lower:	2	14mm
Start/upper:	4	14mm
Start/sides:	2	12mm
Middle/lower:	3	16mm
Middle/upper:	2	14mm
Middle/sides:	2	12mm
End/lower:	2	14mm
End/upper:	4	14mm
End/sides:	2	12mm
Start/Add. Rebars :	None	
Middle/Add. Rebars :	None	
End/Add. Rebars :	None	
Transverse start:	10mm	15 cm
Transverse middle:	10mm	15 cm
Transverse end:	10mm	15 cm

Σχήμα 3.43: Οπλισμός δοκού B7.



Start/lower:	2	14mm
Start/upper:	4	14mm
Start/sides:	2	12mm
Middle/lower:	3	16mm
Middle/upper:	2	14mm
Middle/sides:	2	12mm
End/lower:	2	14mm
End/upper:	4	14mm
End/sides:	2	12mm
Start/Add. Rebars :	None	
Middle/Add. Rebars :	None	
End/Add. Rebars :	None	
Transverse start:	10mm	15 cm
Transverse middle:	10mm	15 cm
Transverse end:	10mm	15 cm

Σχήμα 3.44: Οπλισμός δοκού B8.

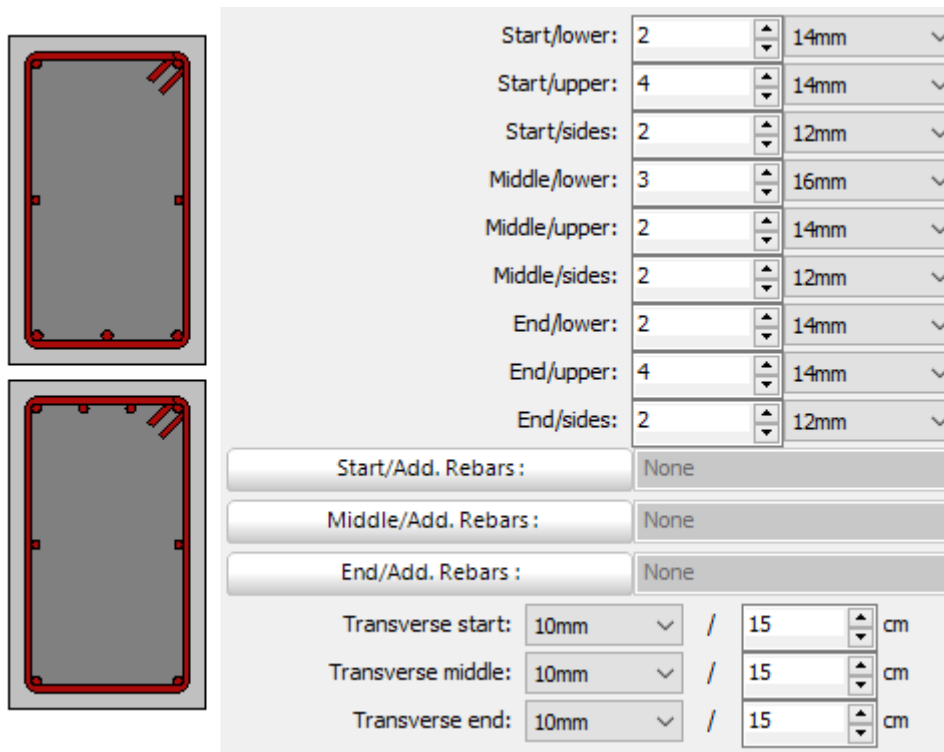


Diagram showing the reinforcement layout for beam B9, including top and bottom views. The top view shows a rectangular cross-section with red rebar outlines and a diagonal cut-off bar at the top right corner. The bottom view shows a similar layout with red rebar outlines.

Start/lower:	2	14mm
Start/upper:	4	14mm
Start/sides:	2	12mm
Middle/lower:	3	16mm
Middle/upper:	2	14mm
Middle/sides:	2	12mm
End/lower:	2	14mm
End/upper:	4	14mm
End/sides:	2	12mm

Start/Add. Rebars : None

Middle/Add. Rebars : None

End/Add. Rebars : None

Transverse start: 10mm / 15 cm

Transverse middle: 10mm / 15 cm

Transverse end: 10mm / 15 cm

Σχήμα 3.45: Οπλισμός δοκού B9.

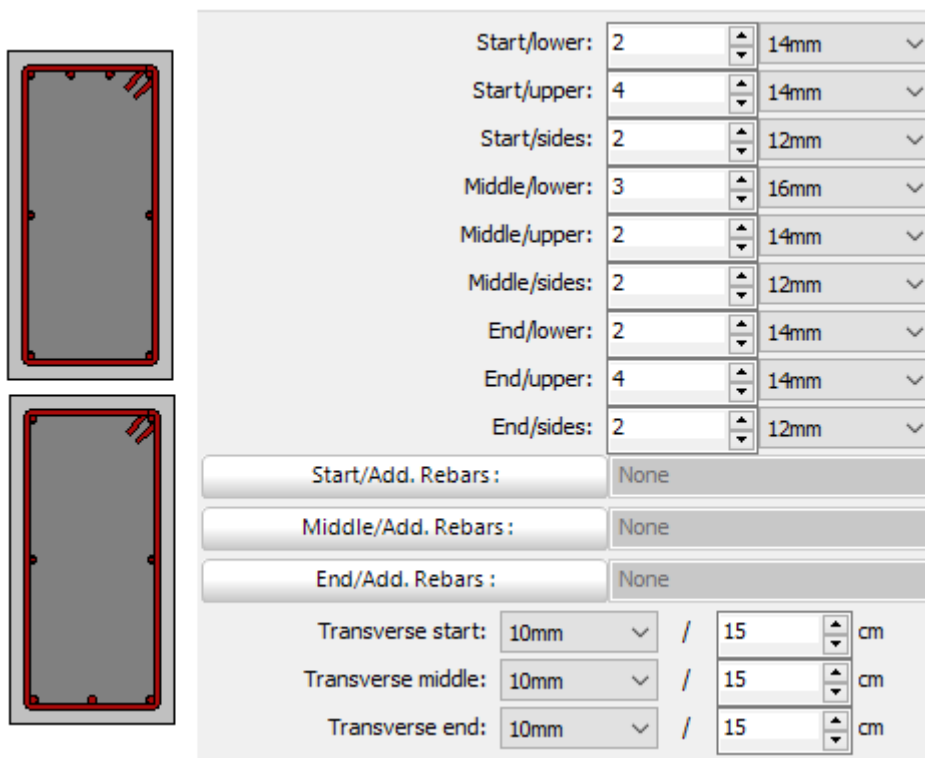


Diagram showing the reinforcement layout for beam B10, including top and bottom views. The top view shows a rectangular cross-section with red rebar outlines and a diagonal cut-off bar at the top right corner. The bottom view shows a similar layout with red rebar outlines.

Start/lower:	2	14mm
Start/upper:	4	14mm
Start/sides:	2	12mm
Middle/lower:	3	16mm
Middle/upper:	2	14mm
Middle/sides:	2	12mm
End/lower:	2	14mm
End/upper:	4	14mm
End/sides:	2	12mm

Start/Add. Rebars : None

Middle/Add. Rebars : None

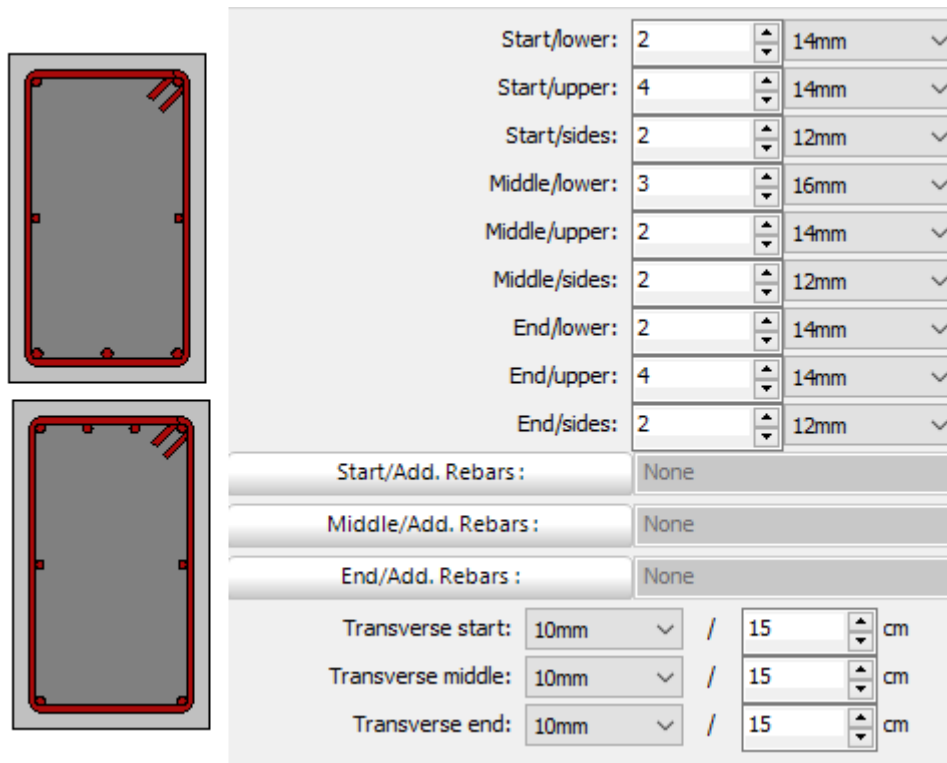
End/Add. Rebars : None

Transverse start: 10mm / 15 cm

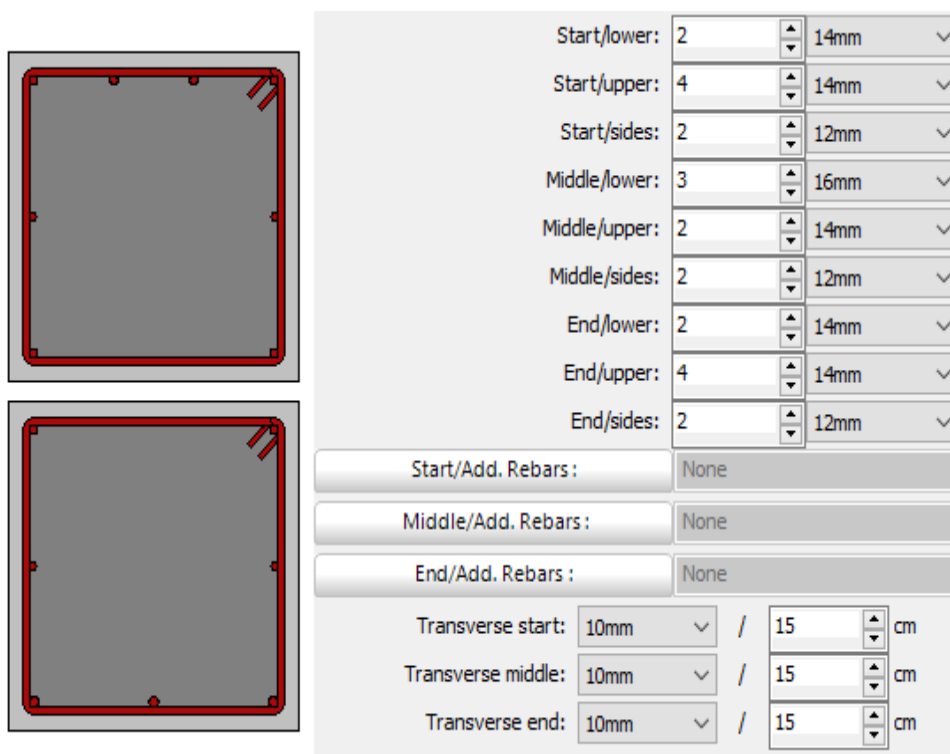
Transverse middle: 10mm / 15 cm

Transverse end: 10mm / 15 cm

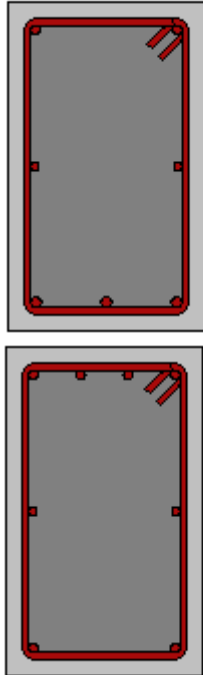
Σχήμα 3.46: Οπλισμός δοκού B10.



Σχήμα 3.47: Οπλισμός δοκού B11.



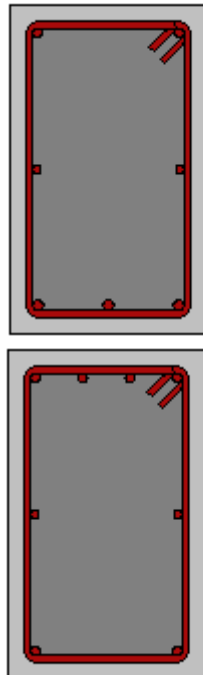
Σχήμα 3.48: Οπλισμός δοκού B12.



Two diagrams showing the reinforcement layout for beam B13. The top diagram shows the reinforcement with 2 bars at the bottom and 4 bars at the top. The bottom diagram shows the same reinforcement layout with a different bar arrangement.

Start/lower:	2	14mm
Start/upper:	4	14mm
Start/sides:	2	12mm
Middle/lower:	3	16mm
Middle/upper:	2	14mm
Middle/sides:	2	12mm
End/lower:	2	14mm
End/upper:	4	14mm
End/sides:	2	12mm
Start/Add. Rebars :	None	
Middle/Add. Rebars :	None	
End/Add. Rebars :	None	
Transverse start:	10mm	15 cm
Transverse middle:	10mm	15 cm
Transverse end:	10mm	15 cm

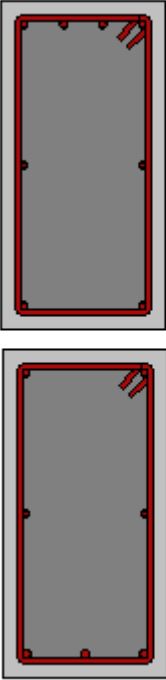
Σχήμα 3.49: Οπλισμός δοκού B13.



Two diagrams showing the reinforcement layout for beam B14. The top diagram shows the reinforcement with 2 bars at the bottom and 4 bars at the top. The bottom diagram shows the same reinforcement layout with a different bar arrangement.

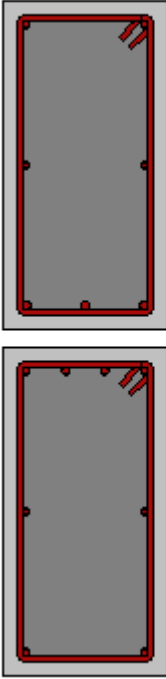
Start/lower:	2	14mm
Start/upper:	4	14mm
Start/sides:	2	12mm
Middle/lower:	3	16mm
Middle/upper:	2	14mm
Middle/sides:	2	12mm
End/lower:	2	14mm
End/upper:	4	14mm
End/sides:	2	12mm
Start/Add. Rebars :	None	
Middle/Add. Rebars :	None	
End/Add. Rebars :	None	
Transverse start:	10mm	15 cm
Transverse middle:	10mm	15 cm
Transverse end:	10mm	15 cm

Σχήμα 3.50: Οπλισμός δοκού B14.



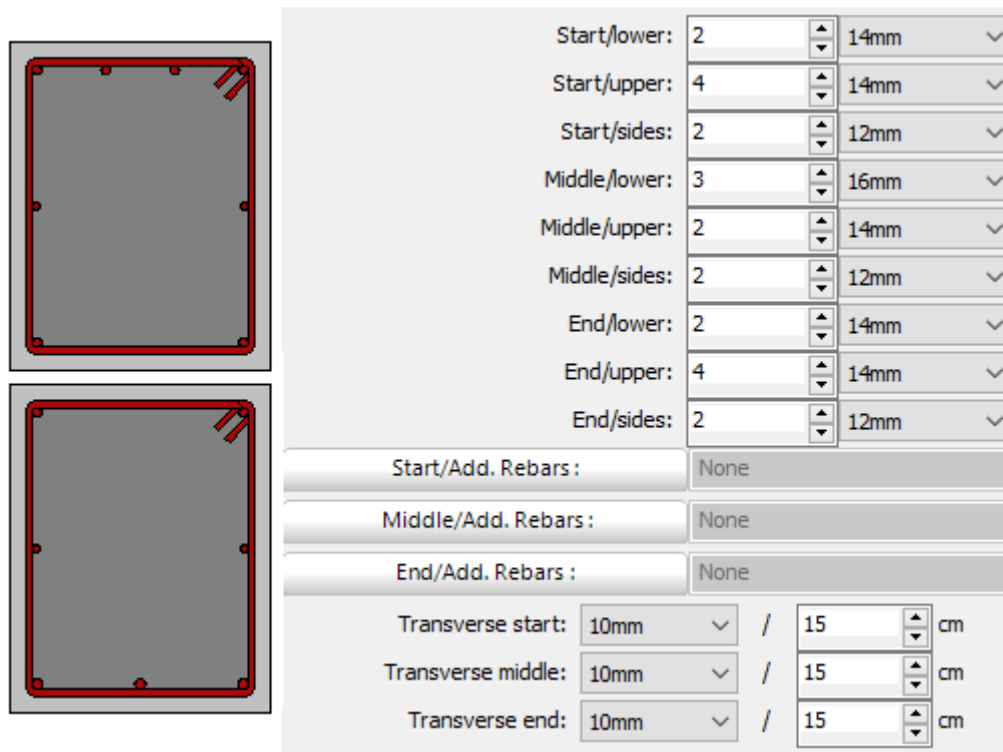
Start/lower:	2	14mm
Start/upper:	4	14mm
Start/sides:	2	12mm
Middle/lower:	3	16mm
Middle/upper:	2	14mm
Middle/sides:	2	12mm
End/lower:	2	14mm
End/upper:	4	14mm
End/sides:	2	12mm
Start/Add. Rebars :	None	
Middle/Add. Rebars :	None	
End/Add. Rebars :	None	
Transverse start:	10mm	/ 15 cm
Transverse middle:	10mm	/ 15 cm
Transverse end:	10mm	/ 15 cm

Σχήμα 3.51: Οπλισμός δοκού B15.

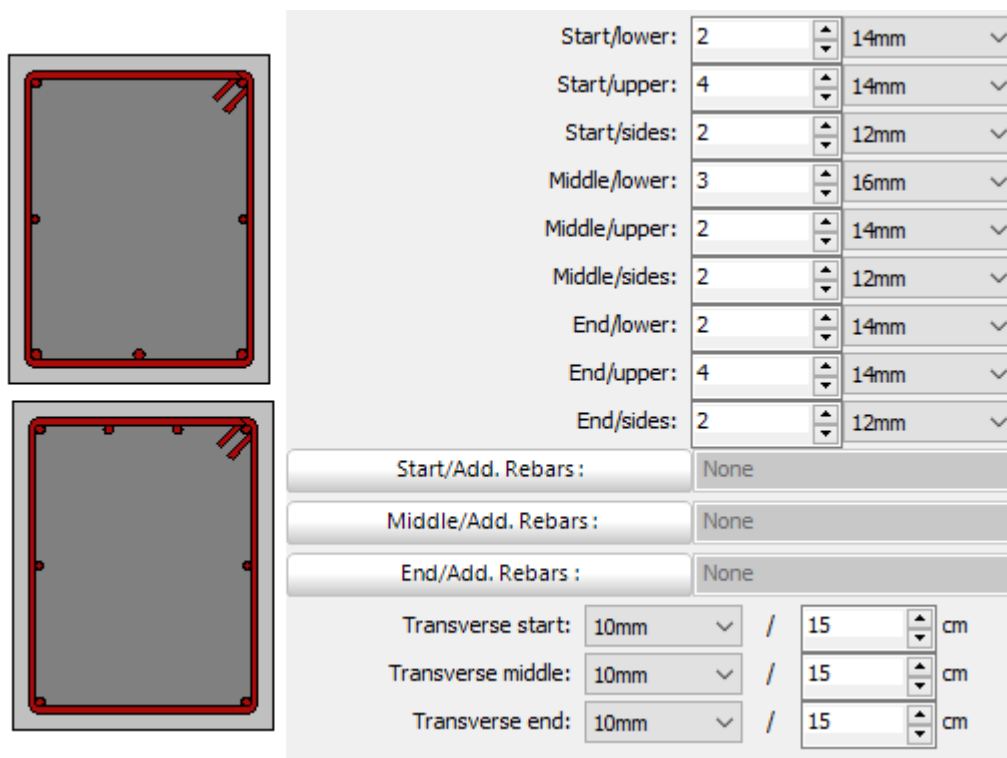


Start/lower:	2	14mm
Start/upper:	4	14mm
Start/sides:	2	12mm
Middle/lower:	3	16mm
Middle/upper:	2	14mm
Middle/sides:	2	12mm
End/lower:	2	14mm
End/upper:	4	14mm
End/sides:	2	12mm
Start/Add. Rebars :	None	
Middle/Add. Rebars :	None	
End/Add. Rebars :	None	
Transverse start:	10mm	/ 15 cm
Transverse middle:	10mm	/ 15 cm
Transverse end:	10mm	/ 15 cm

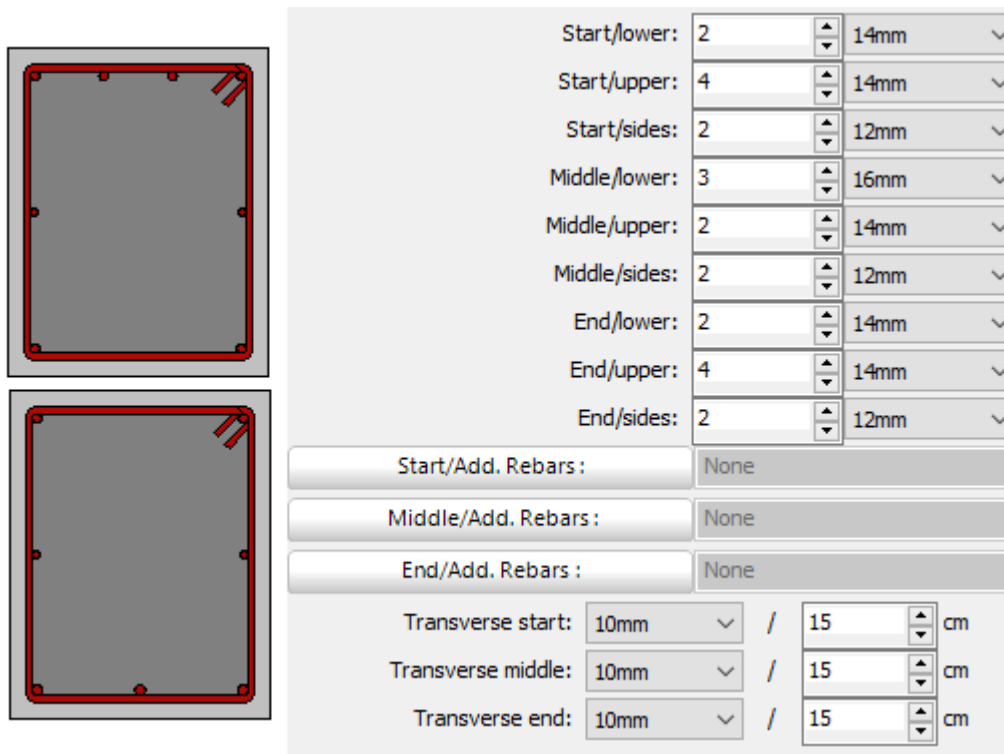
Σχήμα 3.52: Οπλισμός δοκού B16.



Σχήμα 3.53: Οπλισμός δοκού B17.



Σχήμα 3.54: Οπλισμός δοκού B18.



**Σχήμα 3.55:** Οπλισμός δοκού B19.

### 3.1.5.3 Πλάκες

Οι πλάκες από τις οποίες αποτελείται το κτίριο σε όλους τους ορόφους είναι σταθερού πάχους ίσου με 20 cm. Συνολικά, ο αριθμός τους είναι δώδεκα, πέντε εκ των οποίων είναι πρόβολοι. Οι πλάκες αυτές, καθώς και η κανονικότητα της κάτοψης, εξασφαλίζουν τη διαφραγματική λειτουργία του κτιρίου. Ο οπλισμός τους είναι Φ10/10 και στις δύο διευθύνσεις.

### 3.1.6 Φορτία

Το πρόγραμμα ανάλυσης Seismostruct υπολογίζει τα ίδια βάρη των στοιχείων, που απαρτίζουν την κατασκευή μας, έχοντας ορίσει τις διαστάσεις αυτών αλλά και το ίδιο βάρος οπλισμένου σκυροδέματος ( $25\text{kN/m}^3$ ). Επιπροσθέτως τα φορτία που επιβάλλονται στην κατασκευή είναι τα εξής:

#### ΜΟΝΙΜΑ:

- Δρομική Οπτοπλινθοδομή: 5.0 kN/m
- Μπατική Οπτοπλινθοδομή: 9.0 kN/m
- Επιστρώσεις γενικώς: 2.0 kN/m<sup>2</sup>

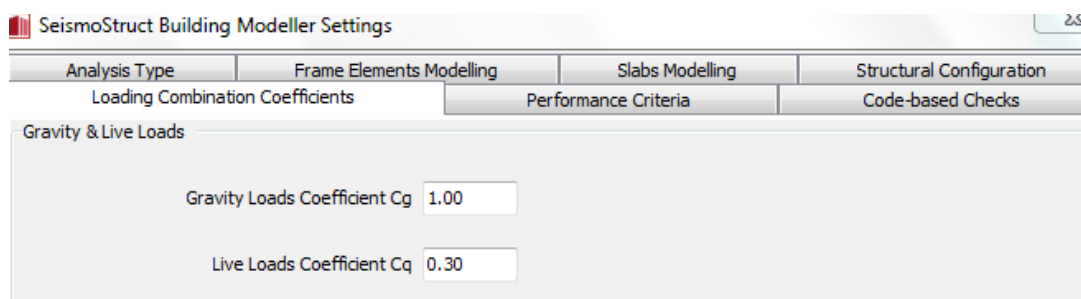
Με τον όρο αυτό νοούνται όλες οι δράσεις, οι οποίες αναμένεται να επενεργήσουν κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης περιόδου αναφοράς και για την οποία η διαφοροποίηση του μεγέθους τους στο χρόνο είναι αμελητέα.

#### ΚΙΝΗΤΑ:

- Κινητά φορτία πλακών: 2.0 kN/m<sup>2</sup>
- Κινητά φορτία εξωστών: 5.0 kN/m<sup>2</sup>
- Κινητά φορτία ισογείου: 5.0 kN/m<sup>2</sup>

Τα κινητά ή μεταβλητά φορτία είναι φορτία βαρύτητας ή πλευρικά φορτία που δρουν όταν η κατασκευή βρίσκεται πλέον σε λειτουργία και μεταβάλλονται ως προς τη θέση και το μέγεθός τους. Αυτά μπορεί να έχουν μόνιμο ή και παροδικό χαρακτήρα και λαμβάνονται ως ομοιόμορφα καταναμημένα.

Για να υπολογισθεί αυτόματα η ταλαντούμενη μάζα της κατασκευής απ' το Seismostruct, ορίζονται οι παρακάτω παράμετροι ( $C_g=1.0$  και  $C_q=0.3$ ) στο υποπρόγραμμα Building Modeler ώστε να προκύψει από το συνδυασμό των φορτίων  $G+0.3Q$ .



**Σχήμα 3.56:** Συντελεστές  $C_g$  και  $C_q$ .



### 3.1.7 Παραδοχές σχεδιασμού

#### Ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας

Η Ελλάδα υποδιαιρείται σε σεισμικές ζώνες ανάλογα με την τοπική επικινδυνότητα. Σε κάθε ζώνη αντιστοιχεί μια τιμή σεισμικής επιτάχυνσης του εδάφους  $A=\alpha \cdot g$ , η οποία έχει μια πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 χρόνια (περίοδος επαναφοράς 475 χρόνια). Το κτίριο που μελετήθηκε ανήκει στη ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας II, με τιμή εδαφικών επιταχύνσεων σχεδιασμού  $0.24 \cdot g$  (ποσοστό της επιτάχυνσης της βαρύτητας  $g$ ).

#### Τιμές χαρακτηριστικών περιόδων

Ανάλογα με την κατηγορία εδάφους προκύπτουν οι τιμές των χαρακτηριστικών περιόδων  $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_D$  και ο συντελεστής εδάφους  $S$ . Από τον παρακάτω Πίνακα 3.3 για κατηγορία εδάφους A λαμβάνονται οι τιμές  $S=1.00$ ,  $T_B=0.15$ ,  $T_C=0.40\text{sec}$  και  $T_D=2.50\text{sec}$ .

**Πίνακας 3.3:** Τιμές χαρακτηριστικών περιόδων και συντελεστή εδάφους για την οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης

Κατηγορία εδάφους	S	$T_B$ (sec)	$T_C$ (sec)	$T_D$ (sec)
A	1.0	0.15	0.4	2.5
B	1.2	0.15	0.5	2.5
C	1.15	0.2	0.6	2.5
D	1.35	0.2	0.8	2.5
E	1.4	0.15	0.5	2.5

#### Κατηγορία σπουδαιότητας

Τα κτίρια κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες σπουδαιότητας, ανάλογα με τον κίνδυνο που συνεπάγεται για τον άνθρωπο και τις κοινωνικοοικονομικές συνέπειες που μπορεί να έχει ενδεχόμενη καταστροφή τους ή διακοπή της λειτουργίας τους. Σε κάθε κατηγορία σπουδαιότητας αντιστοιχεί μία τιμή του συντελεστή σπουδαιότητας  $\gamma_1$  σύμφωνα με τον Πίνακα 3.4.

**Πίνακας 3.4:** Κατηγορία σπουδαιότητας

<b>Κατηγορία Σπουδαιότητας</b>		<b>γ<sub>1</sub></b>
Σ1	<b>Κτίρια μικρής σπουδαιότητας ως προς την ασφάλεια του κοινού</b> , όπως αγροτικά οικήματα και αγροτικές αποθήκες, υπόστεγα, στάβλοι, βουστάσια, χοιροστάσια, ορνιθοτροφεία, κλπ.	0.85
Σ2	<b>Συνήθη κτίρια</b> , όπως κατοικίες και γραφεία, βιομηχανικά - βιοτεχνικά κτίρια, ξενοδοχεία (τα οποία δεν περιλαμβάνουν χώρους συνεδρίων), ξενώνες, οικοτροφεία, χώροι εκθέσεων, χώροι εστίασεως και ψυχαγωγίας (ζαχαροπλαστεία, καφενεία, μπόουλινγκ, μπιλιάρδου, ηλεκτρονικών παιχνιδιών, εστιατόρια, μπαρ, κλπ), τράπεζες, ιατρεία, αγορές, υπεραγορές, εμπορικά κέντρα, καταστήματα, φαρμακεία, κουρεία, κομμωτήρια, ινστιτούτα γυμναστικής, βιβλιοθήκες, εργοστάσια, συνεργεία συντήρησης και επισκευής αυτοκινήτων, βαφεία, ξυλουργεία, εργαστήρια ερευνών, παρασκευαστήρια τροφίμων, καθαριστήρια, κέντρα μηχανογράφησης, αποθήκες, κτίρια στάθμευσης αυτοκινήτων, πρατήρια υγρών καυσίμων, ανεμογεννήτριες, γραφεία δημοσίων υπηρεσιών και τοπικής αυτοδιοίκησης που δεν εμπίπτουν στην κατηγορία Σ4, κλπ	1.00
Σ3	<b>Κτίρια τα οποία στεγάζουν εγκαταστάσεις πολύ μεγάλης οικονομικής σημασίας, καθώς και κτίρια δημοσίων συναθροίσεων και γενικώς κτίρια στα οποία ευρίσκονται πολλοί άνθρωποι κατά μεγάλο μέρος του 24ώρου</b> , όπως αίθουσες αεροδρομίων, χώροι συνεδρίων, κτίρια που στεγάζουν υπολογιστικά κέντρα, ειδικές βιομηχανίες, εκπαιδευτικά κτίρια, αίθουσες διδασκαλίας, φροντιστήρια, νηπιαγωγεία, χώροι συναυλιών, αίθουσες δικαστηρίων, ναοί, χώροι αθλητικών συγκεντρώσεων, θέατρα, κινηματογράφοι, κέντρα διασκέδασης, αίθουσες αναμονής επιβατών, ψυχιατρεία, ιδρύματα ατόμων με ειδικές ανάγκες, ιδρύματα χρονίως πασχόντων, οίκοι ευγηρίας, βρεφοκομεία, βρεφικοί σταθμοί, παιδικοί σταθμοί, παιδότοποι, αναμορφωτήρια, φυλακές, εγκαταστάσεις καθαρισμού νερού και αποβλήτων, κλπ.	1.15
Σ4	<b>Κτίρια των οποίων η λειτουργία, τόσο κατά την διάρκεια του σεισμού, όσο και μετά τους σεισμούς, είναι ζωτικής σημασίας</b> , όπως κτίρια τηλεπικοινωνίας, παραγωγής ενέργειας, νοσοκομεία, κλινικές, αγροτικά ιατρεία, υγειονομικοί σταθμοί, κέντρα υγείας, διυλιστήρια, σταθμοί παραγωγής ενέργειας, πυροσβεστικοί και αστυνομικοί σταθμοί, κτίρια δημοσίων επιτελικών υπηρεσιών για την αντιμετώπιση έκτακτων αναγκών από σεισμό. <b>Κτίρια που στεγάζουν έργα μοναδικής καλλιτεχνικής αξίας</b> , όπως μουσεία, αποθήκες μουσείων, κλπ.	1.30

Το υπό μελέτη κτίριο ανήκει στην κατηγορία σπουδαιότητας II (συνήθη κτίρια) με συντελεστή γ<sub>1</sub>=1.00.

### Διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης $\eta$

Ο διορθωτικός συντελεστής απόσβεσης εκφράζει την αυξομείωση της επιρροής της ιξώδους απόσβεσης στην ελαστική περιοχή της συμπεριφοράς, όταν το ποσοστό της κρίσιμης απόσβεσης  $\zeta$  είναι διάφορο του 5% και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2 + \zeta}} \geq 0.7$$

Οι τιμές του ποσοστού απόσβεσης  $\zeta$  εξαρτώνται από το είδος της κατασκευής και δίνονται στον Πίνακα 3.5.

**Πίνακας 3.5:** Τιμές ποσοστού απόσβεσης

Είδος κατασκευής		$\zeta\%$
Μεταλλική:	με συγκολλήσεις	2
	με κοχλιώσεις	4
Σκυρόδεμα:	άοπλο	3
	οπλισμένο	5
	προεντεταμένο	4
Τοιχοποιία:	οπλισμένη	6
	διαζωματική	5
Ξύλινη:	κολλητή	4
	κοχλιωτή	4
	ηλωτή	5

Η απόσβεση της κατασκευής για κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι  $\zeta=5\%$ , άρα  $\eta=1$ .

## 3.2 Αναλύσεις

### 3.2.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα με το πρόγραμμα Seismostruct έγινε η ανάλυση του προσομοιώματος του κτιρίου. Η βιβλιοθήκη του διαθέτει ακριβή μοντέλα προσομοίωσης υλικών, όπως του σκυροδέματος και του χάλυβα, καθώς και ένα σημαντικό εύρος δομικών μελών τριών διαστάσεων, συνθέτοντας μαζί με τα υλικά ένα μεγάλο φάσμα δυνατών διατομών οπλισμένου σκυροδέματος, χαλύβδινων ή ακόμη και σύμμεικτων. Μαζί με

την αριθμητική σταθερότητα και την ακρίβεια σε υψηλά επίπεδα παραμόρφωσης, το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα ακριβούς καθορισμού της ανελαστικής απόκρισης και του φορτίου κατάρρευσης κάθε είδους δομικού πλαισίου. Στο πρόγραμμα μπορούν να εισαχθούν στατικές δράσεις (δυνάμεις, μετακινήσεις), όπως, επίσης, και δυναμικές δράσεις (επιταχυνσιογραφήματα), και να διεξαχθούν διάφορα είδη αναλύσεων.

Η ελαστική στατική ανάλυση, η ελαστική δυναμική ανάλυση, η ανελαστική στατική ανάλυση (pushover) και η ανελαστική δυναμική ανάλυση (χρονοϊστορίας) αποτελούν μεθόδους ανάλυσης, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτίμηση υφισταμένων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό σεισμικά φορτία.

Οι **ελαστικές** μέθοδοι χρησιμοποιούν την κλασσική γραμμική σχέση έντασης-παραμόρφωσης για τα δομικά στοιχεία της κατασκευής, όπου με προσεγγιστικούς τρόπους, λαμβάνουν έμμεσα υπόψη την ανελαστική συμπεριφορά του φορέα. Οι ελαστικές στατικές και δυναμικές αναλύσεις είναι εύλογο να εφαρμόζονται σε κτίρια υψηλής επιτελεστικότητας, δηλαδή σε κατασκευές που αναμένεται να αποκριθούν ελαστικά ή σχεδόν ελαστικά, με μηδενικές έως πολύ περιορισμένες βλάβες κατά το σεισμό σχεδιασμού. Αντίθετα, για τις χαμηλές στάθμες επιτελεστικότητας, οι γραμμικές μέθοδοι αδυνατούν να προσδιορίσουν με ακρίβεια τη σεισμική τους απόκριση.

Οι **ανελαστικές** μέθοδοι ανάλυσης είναι ικανές να υποδείξουν τόσο τους μηχανισμούς αστοχίας όσο και το ενδεχόμενο προοδευτικής κατάρρευσης και επομένως οδηγούν σε καλύτερη εποπτεία και κατανόηση της πραγματικής απόκρισης των κατασκευών. Η ανελαστική δυναμική ανάλυση αποτελεί την πιο πλήρη και ρεαλιστική μεθοδολογία ανάλυσης των κατασκευών. Στην ανάλυση αυτή η σεισμική δράση εισάγεται υπό μορφή χρονοϊστοριών επιταχύνσεων βάσεως, είτε από πραγματικές καταγραφές, είτε από σύνθετα επιταχυνσιογραφήματα. Μειονέκτημα της ωστόσο αποτελεί η αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα, αλλά και ο αυξημένος χρόνος ανάλυσης κυρίως σε χωρικές αναλύσεις πολυωρόφων κτιρίων. Οι δυσχέρειες της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης οδήγησαν κατά τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη στατικών μη γραμμικών μεθόδων ανάλυσης, με στόχο το ρεαλιστικότερο και πιο εύκολο προσδιορισμό της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών χαμηλών επιπέδων επιτελεστικότητας. Η κυριότερη μη γραμμική στατική μέθοδος είναι η

στατική υπερωθητική ανάλυση (static pushover analysis), στην οποία η εξωτερικά επιβαλλόμενη φόρτιση είναι οριζόντια σεισμικά φορτία.

### 3.2.2 Ιδιομορφική ανάλυση

Η ιδιομορφική ανάλυση (Eigenvalue Analysis) του κτιρίου πραγματοποιήθηκε ώστε να υπολογιστούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του κτιρίου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά την ανάλυση αυτή χρησιμοποιήθηκε το ελαστικό προσομοίωμα του κτιρίου. Η ανάλυση γίνεται κατά τη διεύθυνση συμμετρίας, ενώ οι μάζες υπολογίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα από τα κατακόρυφα φορτία (μόνιμα και κινητά) για το σεισμικό συνδυασμό φόρτισης G+0.3Q. Η επίδραση των ιδιομορφών στην απόκριση της κατασκευής εξαρτάται από τα ποσοστά συμμετοχής μάζας της κάθε ιδιομορφής και κατά συνέπεια ένα μεγάλο ποσοστό συμμετοχής μάζας μαρτυρά τη θεμελιώδη ιδιομορφή. Η κατασκευή αποκρίνεται με βάση το σχήμα της θεμελιώδους ιδιομορφής και για αυτό το λόγο η κατανομή της οριζόντιας φόρτισης χρησιμοποιείται σύμφωνα με αυτήν κατά τις στατικές ανελαστικές αναλύσεις. Για το κτίριο κατά την διεύθυνση συμμετρίας x, η τιμή της ιδιοπεριόδου, όπως φαίνεται και στον παρακάτω Πίνακα 3.6 προέκυψε ίση με  $T=0.45\text{sec}$  με δρώσα μάζα 71.45% της συνολικής μάζας του κτιρίου. Επομένως, γίνεται στη συνέχεια η ιδιομορφική κατανομή των οριζόντιων φορτίων της μη-γραμμικής ανάλυσης βάσει της δεύτερης ιδιομορφής.

**Πίνακας 3.6:** Τιμές ιδιοπεριόδου και ποσοστά συμμετοχής μάζας.

EFFECTIVE MODAL MASS PERCENTAGES							
[ Individual Mode ]							
Mode	Period	[Ux]	[Uy]	[Uz]	[Rx]	[Ry]	[Rz]
1	0.533	0.23%	37.47%	0.00%	10.39%	0.05%	37.76%
2	<b>0.451</b>	<b>71.45%</b>	0.33%	0.01%	0.12%	19.39%	0.00%
3	0.374	0.15%	29.51%	0.00%	12.85%	0.05%	40.06%
4	0.147	0.05%	5.56%	0.00%	6.24%	0.09%	5.65%
5	0.118	15.25%	0.03%	0.04%	0.02%	26.28%	0.03%
6	0.089	0.00%	11.12%	0.01%	17.33%	0.01%	5.40%
7	0.082	0.00%	0.01%	19.30%	0.09%	0.38%	0.01%
8	0.082	0.00%	0.32%	0.25%	8.39%	0.01%	0.20%
9	0.072	0.01%	2.64%	0.00%	3.14%	0.00%	2.42%
10	0.067	0.00014%	6.1E-07%	0.2366%	0.0002%	0.0982%	6.1E-06%
[ Cumulative Mass ]							
Mode	Period	[Ux]	[Uy]	[Uz]	[Rx]	[Ry]	[Rz]
1	0.53274	0.23%	37.47%	0.00%	10.39%	0.05%	37.76%
2	0.4506	71.68%	37.80%	0.01%	10.52%	19.43%	37.76%
3	0.37392	71.84%	67.31%	0.01%	23.36%	19.48%	77.81%
4	0.14698	71.88%	72.87%	0.01%	29.60%	19.58%	83.46%
5	0.11796	87.13%	72.91%	0.05%	29.62%	45.85%	83.49%
6	0.08902	87.13%	84.03%	0.05%	46.95%	45.86%	88.88%
7	0.08189	87.13%	84.04%	19.35%	47.04%	46.24%	88.89%
8	0.0815	87.13%	84.36%	19.61%	55.42%	46.25%	89.10%
9	0.07175	87.14%	87.00%	19.61%	58.56%	46.25%	91.52%
10	0.0673	0.8715	0.8700	0.4326	0.5858	0.5607	0.9152

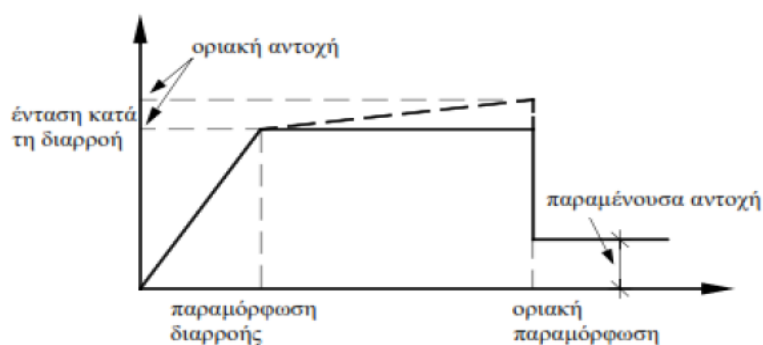
### 3.2.3 Στατική ανελαστική ανάλυση (Static Pushover Analysis)

Κύριος στόχος της ανελαστικής στατικής ανάλυσης είναι η εκτίμηση του μεγέθους των ανελαστικών παραμορφώσεων που θα αναπτυχθούν στα δομικά στοιχεία όταν το κτίριο υπόκειται στη σεισμική δράση για την οποία γίνεται η αποτίμηση και η σύγκρισή τους με τις επιτρεπόμενες τιμές που προσδιορίζονται με βάση τη στοχευόμενη στάθμη επιτελεστικότητας και τις ικανότητες των μελών που προκύπτουν από τα προσομοιώματα για τη συμπεριφορά τους.

Η κεντρική, απλουστευτικού χαρακτήρα ιδέα επί της οποίας στηρίζεται η ανάλυση αυτή είναι ο συσχετισμός της ανελαστικής απόκρισης του πραγματικού, πολυβάθμιου κτιρίου με την απόκριση ενός ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή.

Αυτό, όμως, σημαίνει ότι η απόκριση της κατασκευής εξαρτάται από μία μόνο ιδιομορφή ταλάντωσης, της οποίας, μάλιστα, η μορφή παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της σεισμικής καταπόνησης.

Στη στατική ανελαστική ανάλυση το προσομοίωμα του κτιρίου συνεκτιμά με άμεσο τρόπο τα μη-γραμμικά χαρακτηριστικά του νόμου έντασης - παραμόρφωσης των δομικών στοιχείων. Σε κάθε περιοχή που αναμένεται να εμφανισθεί ανελαστική συμπεριφορά λαμβάνεται υπόψη η σχέση έντασης - παραμόρφωσης μέσω πλήρων καμπυλών μονότονης φόρτισης μέχρι την αστοχία, οι οποίες περιλαμβάνουν τη φάση εξασθένησης της αντίστασης του στοιχείου, καθώς και την παραμένουσα αντίστασή του. Οι καμπύλες αυτές έχουν τη μορφή του σχήματος που ακολουθεί.



**Σχήμα 3.57:** Θεωρητικές καμπύλες εντατικού μεγέθους-παραμόρφωση.

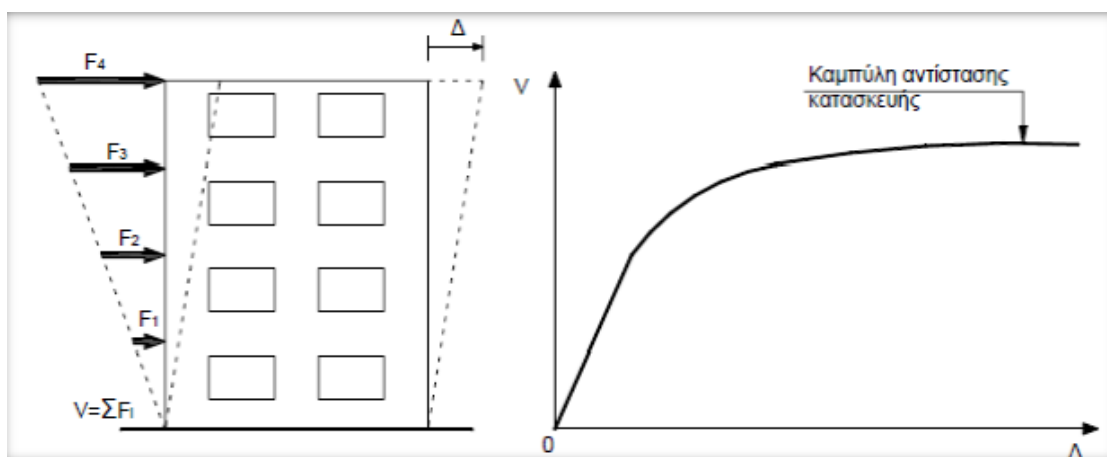
Σημειώνεται πως οι περιοχές όπου αναμένεται να εμφανισθεί η ανελαστική συμπεριφορά, σε κτίρια πλαισιακού τύπου, είναι οι κρίσιμες περιοχές των υποστυλωμάτων και των δοκών, όπου και ορίζονται οι «πλαστικές αρθρώσεις». Η συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης ορίζεται με τον καταστατικό νόμο ροπής-γωνίας στροφής χορδής του μέλους (υποστυλώματος ή δοκού) με τις γωνίες στροφής χορδής να υπολογίζονται βάση των καμπυλοτήτων στη διαρροή και στην αστοχία της διατομής του μέλους. Θεωρούμε ότι η ελαστική γραμμή κάμψης του μέλους είναι τέτοια ώστε στα δύο άκρα να αναπτύσσονται δύο ίσες και αντίθετες γωνίες στροφής χορδής.



**Σχήμα 3.58:** Γωνία στροφής χορδής

Κατά τη στατική ανελαστική ανάλυση, επιβάλλεται στο πολυβάθμιο προσομοίωμα της κατασκευής μια επαυξητική οριζόντια φόρτιση, με προκαθορισμένη καθ' ύψος κατανομή και υπολογίζονται για κάθε βήμα φόρτισης τα μεγέθη απόκρισης. Η κατανομή καθ' ύψος των φορτίων μπορεί να είναι ομοιόμορφη, τριγωνική ή ιδιομορφική.

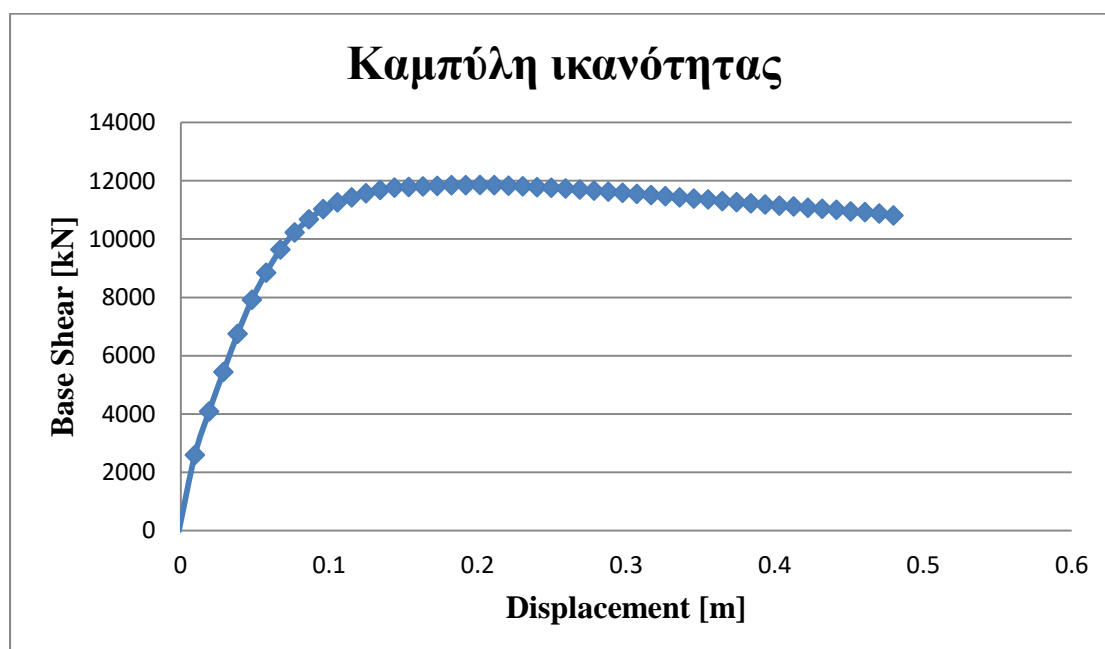
Από την ανάλυση του προσομοιώματος προκύπτει η καμπύλη αντίστασης του κτιρίου (καμπύλη ικανότητας), η οποία παρουσιάζεται σε όρους τέμνουσας βάσης  $V_b$  και μετακίνησης  $\Delta$  του χαρακτηριστικού του σημείου (κόμβος ελέγχου), το οποίο λαμβάνεται στο κέντρο μάζας της οροφής του κτιρίου, Σχήμα 3.59. Η καμπύλη αυτή αποτελεί τη βάση για όλους τους απαιτούμενους ελέγχους ικανοποίησης των κριτηρίων επιτελεσματικότητας. Η σχέση τέμνουσας βάσης-μετακίνησης κόμβου ελέγχου αντικαθίσταται από μια εξιδανικευμένη διγραμμική καμπύλη. Τα εντατικά μεγέθη και οι παραμορφώσεις που υπολογίζονται από την ανάλυση ελέγχονται σύμφωνα με τα κριτήρια επιτελεσματικότητας, ώστε να διαπιστωθεί η επάρκεια ή μη του φορέα, με βάσει τις απαιτήσεις που τέθηκαν αρχικά.



**Σχήμα 3.59:** Κατασκευή καμπύλης αντίστασης κατασκευής.



Η καμπύλη αντίστασης (ή καμπύλη ικανότητας) του εξεταζόμενου φορέα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, Σχήμα 3.60.



**Σχήμα 3.60:** Καμπύλη ικανότητας (Capacity Curve).

### 3.2.4 Η μέθοδος της προσαυξητικής δυναμικής ανάλυσης (IDA)

#### 3.2.4.1 Εισαγωγή

Η Προσαυξητική Δυναμική Ανάλυση (I.D.A. – Incremental Dynamic Analysis), Vamvatsikos and Cornell [2002] είναι μία μέθοδος η οποία αναδείχθηκε σε διάφορες μορφές με στόχο τη διαρκώς καλύτερη αποτίμηση της συμπεριφοράς των δομικών έργων υπό την επίδραση σεισμικών φορτίων και εντάσεων. Η διαδικασία της μεθόδου περιλαμβάνει αρχικά την κατασκευή ενός προσομοιώματος και στη συνέχεια την υποβολή αυτού του σε μία (ή περισσότερες) καταγραφές εδαφικής κίνησης, η καθεμία από τις οποίες κλιμακώνεται σε διάφορα επίπεδα έντασης, παράγοντας έτσι μία (ή περισσότερες) καμπύλες απόκρισης ως προς κάποιο επίπεδο έντασης.

Έχουν αναπτυχθεί, λοιπόν διάφορες μέθοδοι όπου μέσα από τη κατάλληλη κλιμάκωση της στατικής εντατικής εικόνας της κατασκευής δημιουργούσαν μια «συνεχή» εικόνα μέσα στην οποία μελετάται ολόκληρο το εύρος της συμπεριφοράς

της υπό εξέτασης κατασκευής, από την διαρροή μέχρι την τελική κατάρρευση, επηρεάζοντας σημαντικά την κατανόηση της συμπεριφορά της.

Με την πάροδο των χρόνων η Δυναμική Προσαυξητική Ανάλυση καθιερώθηκε ως μία τελευταία τεχνολογίας μέθοδος για τον καθορισμό της φέρουσας ικανότητας μιας κατασκευής και η χρήση της είναι ευρεία σε παγκόσμιο επίπεδο. Σημαντικά πλεονεκτήματα της μεθόδου της Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης είναι μεταξύ άλλων η καλύτερη κατανόηση α) του εύρους της απόκρισης και των απαιτήσεων μιας κατασκευής σε κάθε πιθανό εύρος εδαφικής σεισμικής καταπόνησης, β) των δομικών επιπλοκών σε σπανιότερα επίπεδα σεισμικής έντασης αλλά και γ) των αλλαγών στη φύση της απόκρισης της κατασκευής καθώς η ένταση της σεισμικής καταπόνησης αυξάνεται.

### 3.2.4.2 Βασικές έννοιες της μεθόδου IDA για μια καταγραφή χρονοϊστορίας

Αρχικά, πρέπει να ορίσουμε με σαφήνεια όλους τους χρησιμοποιούμενους όρους και να ξεκινήσουμε τη δόμηση της μεθοδολογίας που θα ακολουθήσουμε, χρησιμοποιώντας ως βασικό στοιχείο την ιδέα της κλιμάκωσης ενός επιταχυνσιογραφήματος. Δίνεται έστω ένα μη βαθμονομημένο επιταχυνσιογράφημα  $a_1$ . Προκειμένου να εξηγηθούν ισχυρότερες ή ηπιότερες εδαφικές κινήσεις, εισάγουμε έναν απλό μετασχηματισμό, βάσει του οποίου πολλαπλασιάζουμε το πλάτος επιταχυνσιογραφήματος με έναν κοινό προσαυξητικό ή μειωτικό συντελεστή  $\lambda \in (0, +\infty)$  :  $a_\lambda = \lambda \cdot a_1$ . Η παραπάνω διαδικασία ισοδυναμεί με τον πολλαπλασιασμό του φάσματος ελαστικής επιτάχυνσης με  $\lambda$  ή ισοδύναμα με τον πολλαπλασιασμό με  $\lambda$  των πλατών όλων των συχνοτήτων των συναρτήσεων του μετασχηματισμού Fourier, χωρίς να μεταβάλλουμε το φασικό περιεχόμενο.

**Ορισμός 1.** *Ο Συντελεστής Κλιμάκωσης (Scale Factor – SF) ενός κλιμακούμενου επιταχυνσιογραφήματος, είναι ένας μη αρνητικός βαθμωτός συντελεστής  $\lambda [0, +\infty)$  το γινόμενο του οποίου με μία ακλιμάκωτη χρονοϊστορία επιταχύνσεων είναι  $a_\lambda$ .*

Για τιμή SF ( $\lambda=1$ ) έχουμε το αρχικό, ουδέτερο, επιταχυνσιογράφημα, για τιμές SF ( $\lambda < 1$ ) έχουμε ένα κλιμακωμένο προς τα κάτω επιταχυνσιογράφημα ενώ, για τιμές

( $\lambda > 1$ ) έχουμε ένα μεγενθυμένο επιταχυνσιογράφημα. Παρά το γεγονός ότι ο συντελεστής κλιμάκωσης είναι ο πιο σαφής τρόπος να χαρακτηριστούν οι κλιμακούμενες εικόνες ενός επιταχυνσιογραφήματος, παρόλα αυτά δεν προσφέρεται σε καμία περίπτωση για τους σκοπούς του μηχανικού. Δεν παρέχει καμία πληροφορία για την πραγματική ένταση της κλιμακωμένης χρονοϊστορίας και των επιδράσεων της στην εκάστοτε κατασκευή. Πρακτικότερο θα ήταν, ίσως, κάποιο μέγεθος το οποίο θα αποτελούσε μία προς μία απεικόνιση του  $SF$ , που όμως θα έδινε πληροφορίες για την ενδεχόμενη καταστροφική δύναμη του τελευταίου.

**Ορισμός 2.** Το Μέτρο της Έντασης (*Intensity Measure – IM*) ενός βαθμονομημένου επιταχυνσιογραφήματος  $a_\lambda$ , είναι ένας θετικός αριθμητικός συντελεστής  $IM [0, +\infty)$  που αποτελεί μια συνάρτηση  $IM = f a_1(\lambda)$ , που εξαρτάται από το μη-βαθμονομημένο επιταχυνσιογράφημα  $a_1$ , και αυξάνεται μονοτονικά με τον Συντελεστή Κλιμάκωσης  $\lambda$ .

Πολλά μεγέθη θεωρείται ότι αποδεικνύουν την ένταση μιας χρονοϊστορίας εδαφικής σεισμικής κίνησης, εντούτοις δεν είναι πάντα προφανές πως αυτά θα κλιμακωθούν. Συνήθη παραδείγματα αποδεκτών μεγεθών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως IM είναι η Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (Peak Ground Acceleration P.G.A.) και η Μέγιστη Εδαφική ταχύτητα (Peak Ground Velocity P.G.V.). Τα παραπάνω μέτρα έντασης έχουν την ιδιότητα του να είναι αναλογικά ως προς τον συντελεστή κλιμάκωσης μιας και ικανοποιούν την ιδιότητα  $IM = \lambda \cdot f a_1$ . Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί και μερικά μη μονοτονικά IM, όπως η ανελαστική κατατόπιση ενός μη γραμμικού ταλαντωτή (Luco και Cornell).

**Ορισμός 3.** Μέτρο βλάβης (*DAMAGE MEASURE – DM*) ή μέτρο κατάστασης της κατασκευής είναι ο θετικός αριθμητικός συντελεστής  $DM (0, +\infty)$  που χαρακτηρίζει την επιπλέον απόκριση του δομικού μοντέλου  $\sigma'$  ένα προκαθορισμένο σεισμικό φορτίο.

Με άλλα λόγια ένα μέτρο βλάβης είναι ένα εύκολα προσδιορίσιμο μέγεθος που είναι άμεσο αποτέλεσμα της απόκρισης της κατασκευής σε μία μη γραμμική δυναμική ανάλυση. Πιθανές επιλογές θα μπορούσε να είναι η μέγιστη τέμνουσα βάση, οι στροφές των κόμβων, η μέγιστη πλαστιμότητα των ορόφων, αλλά και διάφοροι άλλοι δείκτες βλάβης. Η επιλογή του κατάλληλου μέτρου βλάβης (DM) εξαρτάται και από την χρήση της ίδιας της κατασκευής. Επομένως μπορεί να κριθεί

σκόπιμη η χρήση δύο ή περισσότερων μέτρων βλάβης (DMs) (που προέρχονται από τις ίδιες μη-γραμμικές αναλύσεις) για την αποτίμηση διαφορετικών χαρακτηριστικών απόκρισης, οριακών καταστάσεων αστοχίας ή ακόμη και ιδιομορφών που οδηγούν σε αστοχία της κατασκευής.

**Ορισμός 4.** *Μελέτη Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης μονής χρονοϊστορίας εδαφικής επιτάχυνσης είναι μια μελέτη δυναμικής ανάλυσης ενός δεδομένου προσομοιώματος μιας κατασκευής που παραμετροποιείται από τον Συντελεστή Κλιμάκωσης της δεδομένης χρονοϊστορίας εδαφικής επιτάχυνσης.*

Γνωστή, επίσης, απλά και ως IDA ή δυναμική υπερωθητική ανάλυση (dynamic pushover–DPO), περιλαμβάνει μια σειρά δυναμικών ανελαστικών αναλύσεων εκτελουμένων επί τη βάση κλιμακωμένων εικόνων ενός επιταχυνσιογραφήματος, των οποίων τα IMs επιλέγονται, έτσι ώστε να καλύπτουν στην ιδανική περίπτωση ολόκληρο το εύρος απόκρισης της κατασκευής, από την ελαστική έως την ανελαστική απόκριση και τελικά την κατάρρευσή της. Σκοπός είναι να καταγραφούν τα μέτρα βλάβης (DM) του προσομοιώματος της κατασκευής σε κάθε επίπεδο μέτρου έντασης (IM) της κλιμακωμένης εδαφικής σεισμικής κίνησης. Οι τιμές απόκρισης που θα προκύψουν συνήθως αποτυπώνονται σε διάγραμμα μαζί με το επίπεδο της έντασης και προκύπτουν συνεχείς καμπύλες. Αυτές οι καμπύλες ονομάζονται καμπύλες Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης (IDA curves).

**Ορισμός 5.** *Μία καμπύλη Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης είναι μια γραφική παράσταση της μεταβλητής που χαρακτηρίζει την κατάσταση της κατασκευής (Μέτρο Βλάβης –Damage Measure, DM) μετά από μια δυναμική προσαυξητική ανάλυση σε σχέση με τις τιμές ενός ή περισσότερων Μέτρων Έντασης που χαρακτηρίζουν το εκάστοτε κλιμακωμένο επιταχυνσιογράφημα.*

Μια καμπύλη Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης μπορεί να απεικονισθεί σε 2 ή περισσότερες διαστάσεις, ανάλογα με τον αριθμό των μέτρων έντασης (Intensity Measure, IM). Προφανώς, ένας εξ αυτών θα πρέπει να κλιμακώνεται. Συνηθίζεται αυτές οι καμπύλες να φαίνονται «αναποδογυρισμένες» μιας και ως ανεξάρτητη μεταβλητή χρησιμοποιείται το μέτρο έντασης (IM), το οποίο θεωρείται κατ’ αναλογία ως «δύναμη», και αποτυπώνεται στον κατακόρυφο άξονα κατ’ αντιστοιχία της

δύναμης στο διάγραμμα τάσεων–παραμορφώσεων. Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι τα αποτελέσματα μιας Δυναμικής Προσαυξητικής Ανάλυσης μπορούν να παρουσιαστούν σε καμπύλες IDA διαφόρων μορφών ανάλογα με την επιλογή των μέτρων βλάβης (DMs) και των μέτρων έντασης (IMs).

### 3.2.4.3 Ικανότητα και οριακές καταστάσεις σε καμπύλες IDA

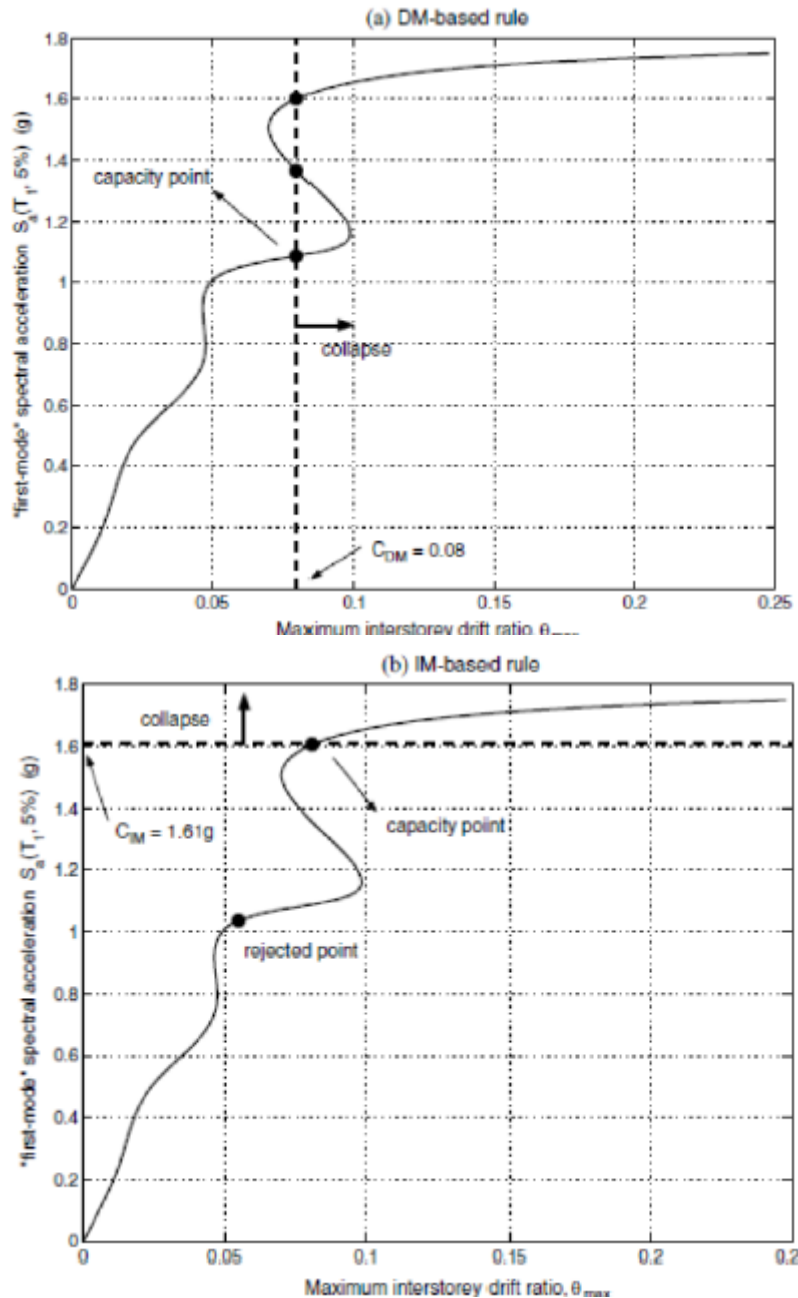
Σημαντική πτυχή του αντισεισμικού σχεδιασμού των κατασκευών αποτελούν οι στάθμες επιτελεστικότητας και η καμπύλη IDA περιέχει τις κατάλληλες πληροφορίες για την εκτίμησή τους. Κρίνεται σκόπιμο ωστόσο να οριστούν, σε μια καμπύλη IDA, με τέτοιο τρόπο ώστε οι ενδείξεις να οδηγούν σε μια οριακή κατάσταση. Για παράδειγμα, η στάθμη επιτελεστικότητας «Άμεση Χρήση» είναι εκείνη που έχει συνδεθεί με μία συγκεκριμένη τιμή του μέτρου βλάβης (DM), συνήθως σε όρους της στροφής ορόφου  $\theta_{max}$ , ενώ η συνολική κατάρρευση συνδέεται με την τιμή του μέτρου έντασης (IM) ή μέτρου βλάβης (DM), όπου και παρατηρείται δυναμική αστάθεια. Η κράτυνση και η ακραία της μορφή, η «επαναφορά της κατασκευής» (structural resurrection) αποτελεί την αιτία εμφάνισης πολλών διαφορετικών σημείων, ικανών να ικανοποιήσουν έναν κανόνα οριακής κατάστασης. Λύση του προβλήματος δίνει το γεγονός ότι στη συνολική καμπύλη IDA θεωρούμε απλά και μόνο τα σημεία μέχρι την πρώτη ένδειξη δυναμικής αστάθειας.

Στη συνέχεια, προχωράμε στους βασικούς κανόνες για τον καθορισμό μιας οριακής κατάστασης. Ο πρώτος εξ αυτών αφορά το μέτρο βλάβης (DM) και ισχυρίζεται πως «αν  $DM \geq CDM$ , τότε η οριακή κατάσταση υπερβαίνεται», Σχήμα 3.61(a). Καθώς το DM είναι ένας δείκτης βλάβης, εάν αυτός αυξάνει πέραν από μία συγκεκριμένη τιμή, η οποία μπορεί να εκτιμηθεί μέσω πειραμάτων παραδείγματος χάριν ακολουθώντας πιθανοτικές κατανομές, τότε υποτίθεται ότι το μοντέλο της κατασκευής είναι εντός της οριακής κατάστασης.

Εναλλακτικά, και εφόσον κρίνεται απαραίτητη η όσον το δυνατόν καλύτερη εκτίμηση της ικανότητας κατάρρευσης χρησιμοποιείται ο κανόνας που βασίζεται στο μέτρο έντασης (IM). Αυτό που αναζητείται είναι εκείνο το σημείο στην καμπύλη IDA που θα τη διαχωρίζει σε δύο περιοχές, αυτή της μη-κατάρρευσης (μικρότερο IM) και αυτήν της κατάρρευσης (μεγαλύτερο IM). Στη συγκεκριμένη κατηγορία, και εφόσον

μιλάμε για μονοτονικά μέτρα έντασης, ο κανόνας που δημιουργείται ισχυρίζεται πως «αν  $IM \geq CIM$ , τότε η οριακή κατάσταση υπερβαίνεται», Σχήμα 3.61(b). Σημειώνεται ότι, καθίσταται δύσκολο να καθοριστεί μία τιμή του CIM, που θα δηλώνει την κατάρρευση για όλες τις καμπύλες IDA. Για αυτό το λόγο η διαδικασία θα πρέπει να γίνει ξεχωριστά για κάθε καμπύλη. Πλεονεκτεί στο γεγονός ότι δημιουργεί ξεκάθαρα μια μονή περιοχή κατάρρευσης, ενώ μειονεκτεί καθώς υπάρχει δυσκολία στον καθορισμό ενός τέτοιου σημείου για κάθε καμπύλη με έναν ομοιόμορφο τρόπο. Γενικώς, ένας τέτοιος κανόνας καταλήγει σε περιγραφές της ικανότητας για το μέτρο έντασης (IM) και το μέτρο βλάβης (DM).

Το τελευταίο σημείο της καμπύλης με μια εφαπτόμενη κλίση ίση με το 20% της ελαστικής κλίσης ορίζεται ως το σημείο ικανότητας (αντίστασης), σύμφωνα με τον κανονισμό FEMA. Αυτό εξηγείται καθώς η οριζοντίωση της καμπύλης θεωρείται ως ένα δείγμα δυναμικής αστάθειας, όπου το μέτρο βλάβης (DM) παίρνει πολύ μεγάλες τιμές και επιταχύνεται προς το άπειρο. Εμείς αρκούμαστε σε έναν ρυθμό αύξησης του  $\theta_{max}$  ίσο με πέντε φορές τον αρχικό/ελαστικό ρυθμό, ως την περιοχή όπου καταγράφουμε το σημείο ικανότητας, καθώς το «άπειρο» δεν δίνει αριθμητικό αποτέλεσμα. Η δυνατή «κυματοειδής» συμπεριφορά μιας καμπύλης IDA μπορεί ωστόσο να δώσει αρκετά τέτοια σημεία, όπου η κατασκευή φαίνεται να κατευθύνεται προς κατάρρευση, μόνο για να επανέλθει κάπως σ' ένα υψηλότερο επίπεδο του μέτρου έντασης (IM), Σχήμα 3.61(b). Εφόσον δοθεί η απαραίτητη σημασία στο παραπάνω πρόβλημα σημειώνεται, επίσης, ότι αυτά τα χαμηλότερα σημεία πρέπει να απορριφτούν ως υποψήφια κατάρρευσης.



**Σχήμα 3.61:** Δύο διαφορετικοί κανόνες που παράγουν πολλαπλά σημεία ικανότητας για ένα 3-ώροφο μεταλλικό καμπτικό πλαίσιο με ψαθυρές συνδέσεις ( $T_1=1.3\text{sec}$ ). Ο κανόνας DM, όπου DM είναι το  $\theta_{max}$ , εφαρμόζεται για  $C_{DM}=0.08$  και ο κανόνας IM χρησιμοποιεί το κριτήριο της 20% κλίσης.

#### 3.2.4.4 Αποτελέσματα της προσαυξητικής δυναμικής ανάλυσης (IDA)

Ο φορέας υποβλήθηκε σε 10 καταγραφές εδαφικής κίνησης της βάσης NGA, η καθεμία από τις οποίες κλιμακώνεται καταλλήλως, έτσι ώστε η μη-γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας της κάθε κλιμάκωσης να καλύπτει πλήρως όλο το φάσμα της

παραμορφωσιακής ικανότητας του φορέα. Πιο συγκεκριμένα, η κάθε παλμική καταγραφή υποδιαιρέθηκε ή πολλαπλασιάστηκε με έναν κατάλληλο συντελεστή, ώστε η σχετική μετακίνηση του κτιρίου να ανταποκρίνεται στις στάθμες επιτελεστικότητας, οι οποίες ορίστηκαν σύμφωνα με τα HRC-scale damage limits των Rossetto and Elnashai [2003] και φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί για τοιχωματικά κτίρια.

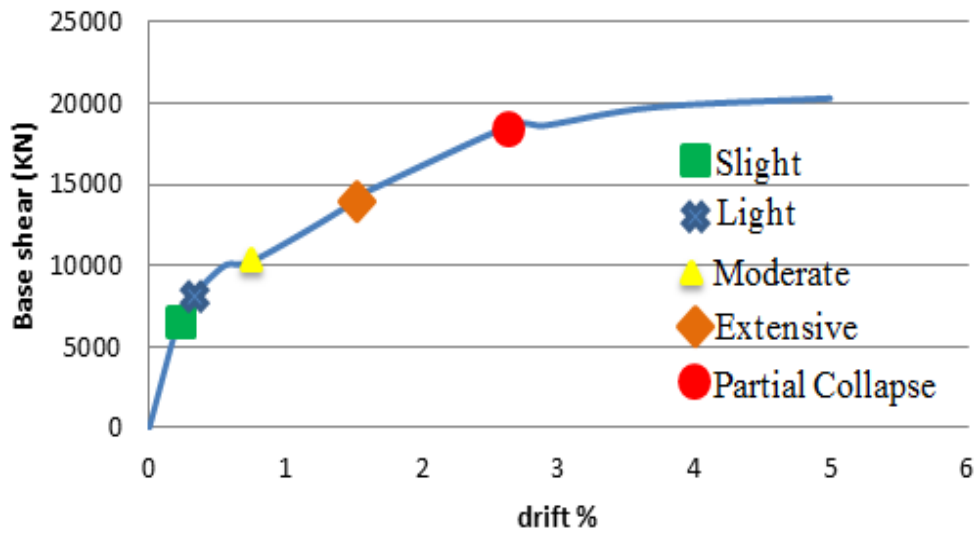
**Πίνακας 3.7:** HRC (Homogenised Reinforced Concrete) scale damage limit states.

ISD <sub>max</sub> (%) limits for HRC-scale				
HRC damage state	All	N-D MRF	Infilled MRF	Shear-walls
None	0	0	0	0
Slight	0.13	0.32	0.05	0.26
Light	0.19	0.43	0.08	0.34
Moderate	0.56	1.02	0.3	0.72
Extensive	1.63	2.41	1.15	1.54
Part. Coll.	3.34	4.27	2.8	2.56
Collapse	>4.78	>5.68	>4.36	>3.31

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι καμπύλες της ανάλυσης αυτής για κάθε μία από τις 10 καταγραφές εδαφικής κίνησης.

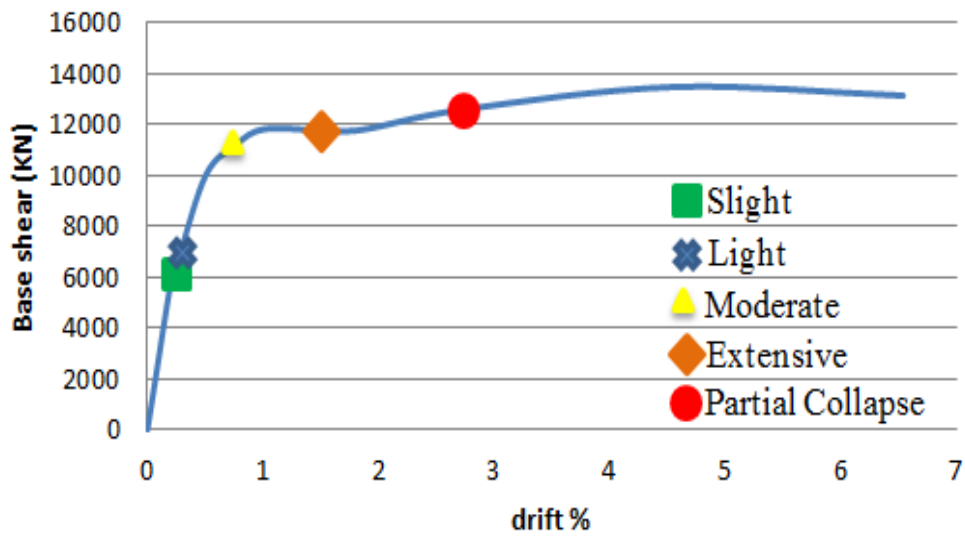


### IDA 1-2



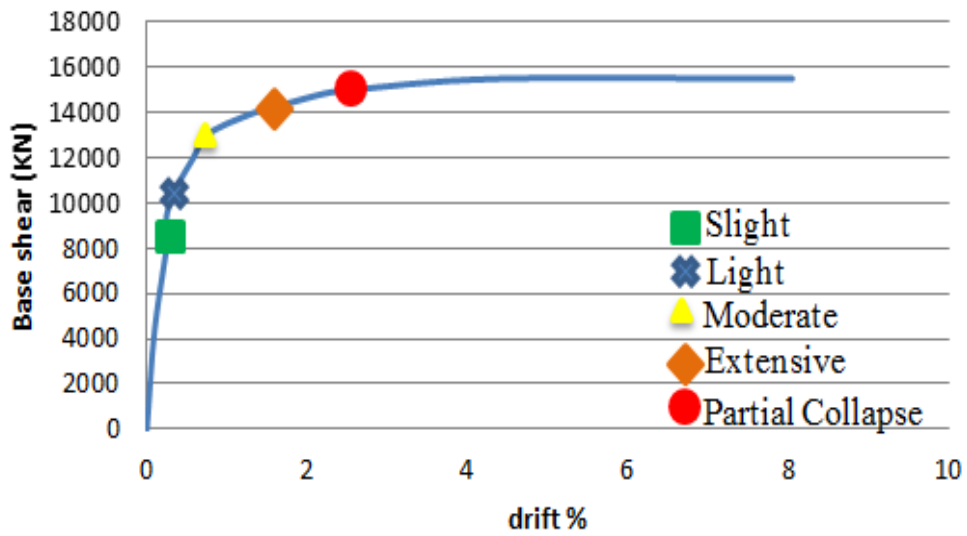
Σχήμα 3.62: Καμπύλη IDA καταγραφής 1-2.

### IDA 1-4



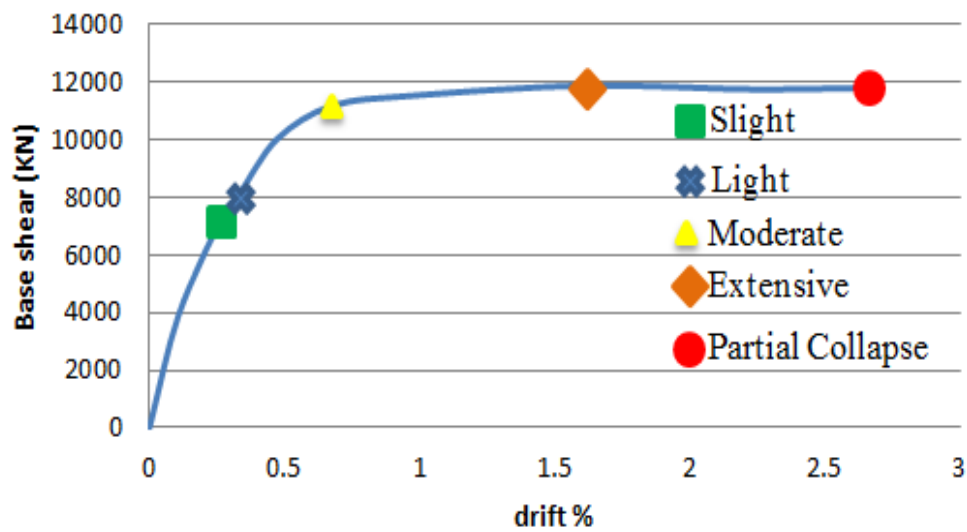
Σχήμα 3.63: Καμπύλη IDA καταγραφής 1-4.

### IDA 1-5



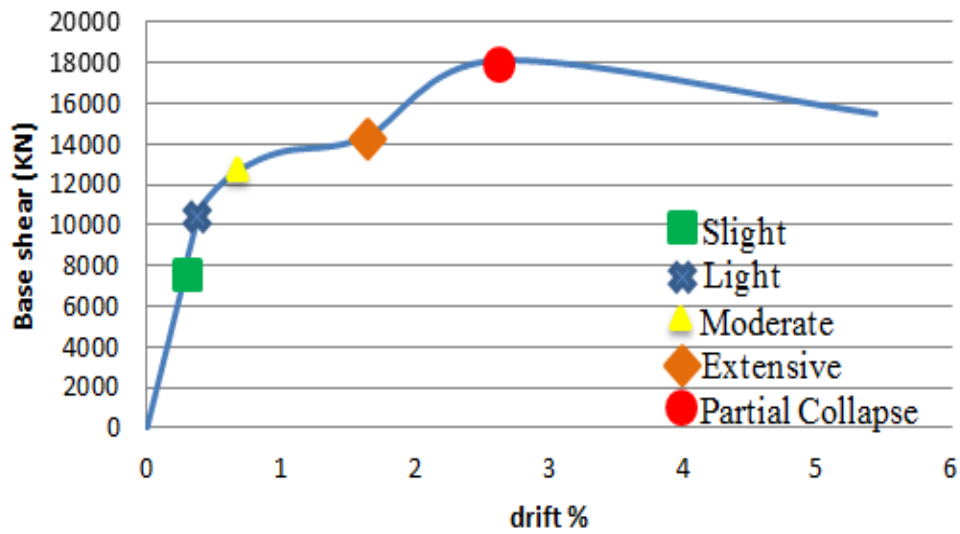
Σχήμα 3.64: Καμπύλη IDA καταγραφής 1-5.

### IDA 1-7



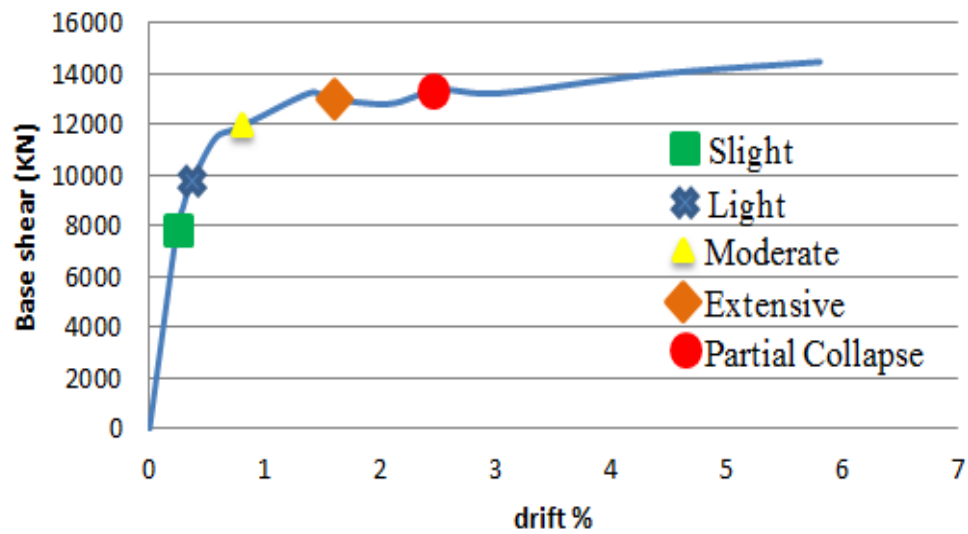
Σχήμα 3.65: Καμπύλη IDA καταγραφής 1-7.

### IDA 1-8



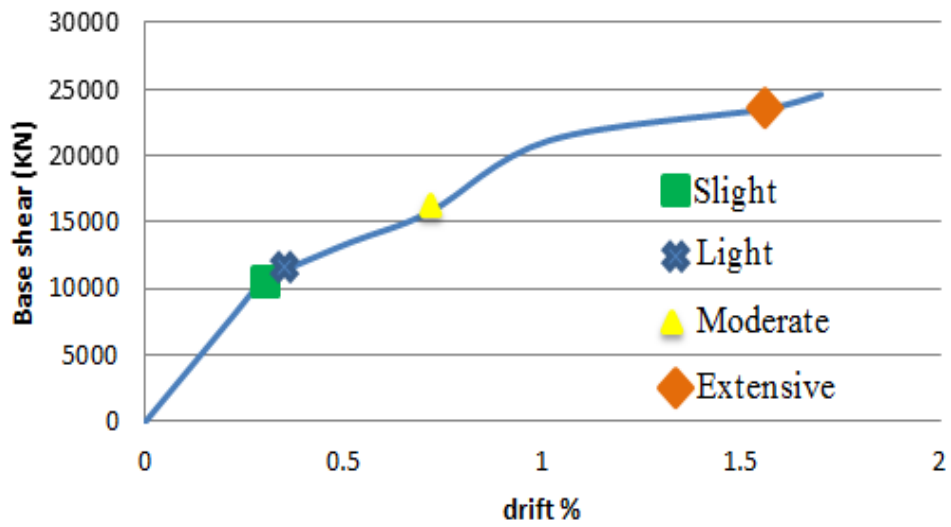
Σχήμα 3.66: Καμπύλη IDA καταγραφής 1-8.

### IDA 1-11



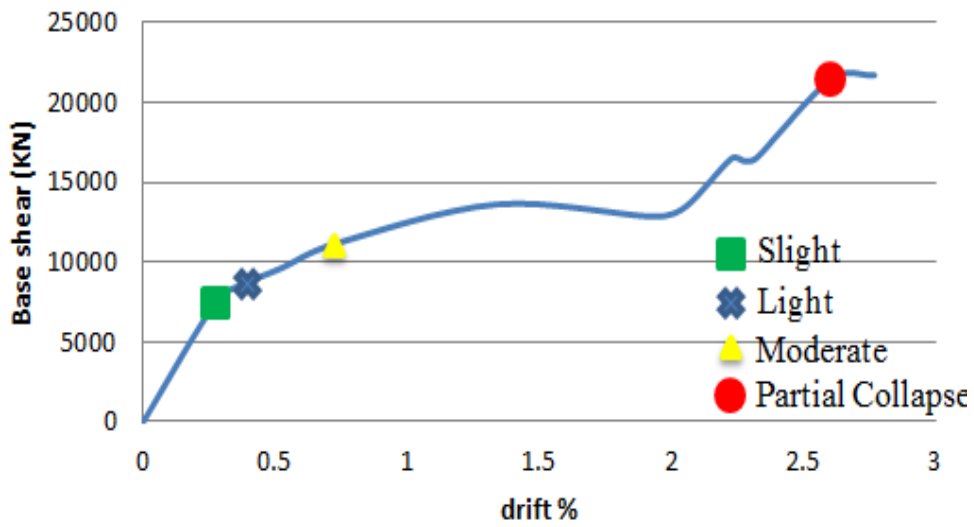
Σχήμα 3.67: Καμπύλη IDA καταγραφής 1-11.

### IDA 1-21



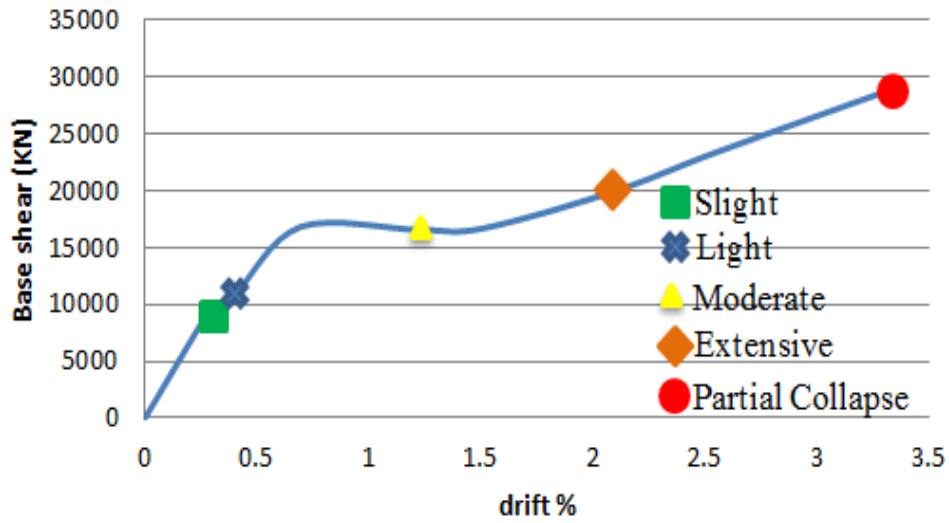
Σχήμα 3.68: Καμπύλη IDA καταγραφής 1-21.

### IDA 1-22



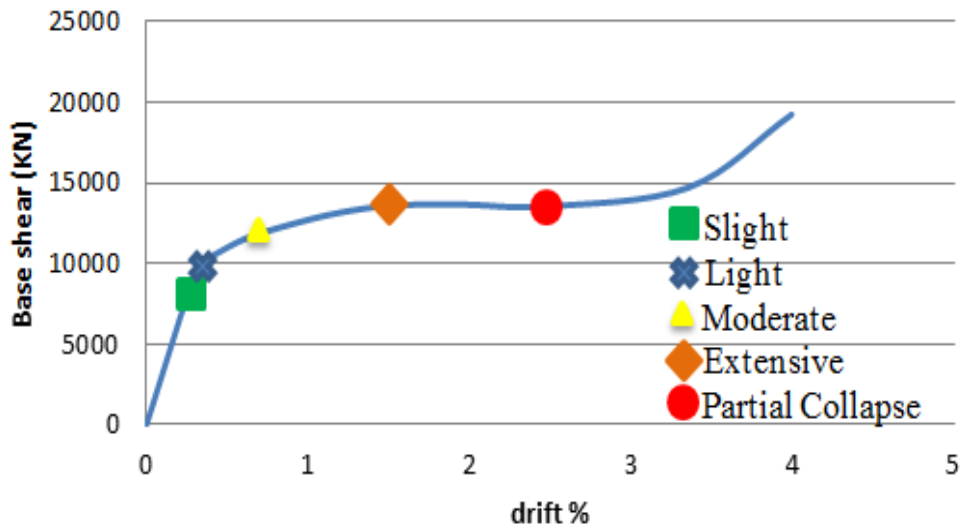
Σχήμα 3.96: Καμπύλη IDA καταγραφής 1-22.

### IDA 1-23



Σχήμα 3.70: Καμπύλη IDA καταγραφής 1-23.

### IDA 1-27



Σχήμα 3.71: Καμπύλη IDA καταγραφής 1-27.

## 4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΗΜΑΤΩΝ ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

### 4.1 Εισαγωγή

Στη παρούσα μεταπτυχιακή εργασία για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας του υφιστάμενου δομήματος εφαρμόστηκαν τρεις μέθοδοι:

- Φασματική ανάλυση επιτάχυνσης
- Φασματική ανάλυση ταχύτητας
- Κυματική ανάλυση με χρήση του φάσματος συνέλιξης.

Σκοπός των αναλύσεων ήταν η εκτίμηση της ιδιοπερίοδου της κατασκευής για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας. Κατά τις δύο πρώτες αναλύσεις για τον προσδιορισμό της ιδιοπερίοδου του κτιρίου έγινε χρήση του φάσματος Fourier της επιτάχυνσης και ταχύτητας αντίστοιχα.

Οι απλούστερες αναλύσεις δείχνουν ότι η απόκριση ενός συστήματος είναι άμεσα συνυφασμένη με το περιεχόμενο συχνοτήτων της διέγερσης στην οποία υποβάλλεται. Η σεισμική διέγερση είναι σύνθετη φόρτιση με συνιστώσες που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Το συχνοτικό περιεχόμενο της εδαφικής κίνησης περιγράφει το σχετικό εύρος των επιμέρους συνιστωσών της και σχετίζεται άμεσα με την εκτίμηση των αναμενομένων επιπτώσεων. Η απεικόνιση του συχνοτικού περιεχομένου γίνεται μέσω της χρήσης φασμάτων Fourier, με τη θεώρηση της καταγραφής της εδαφικής επιτάχυνσης ή ταχύτητας, που είναι μία μη περιοδική και χρονικά πεπερασμένη συνάρτηση, ως περιοδικού σήματος που επαναλαμβάνεται μετά από ένα χρονικό διάστημα. Συγκεκριμένα, το φάσμα Fourier υπολογίζεται με τη βοήθεια του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT) της χρονοϊστορίας απόκρισης της επιτάχυνσης και ταχύτητας και δείχνει πως το εύρος της εδαφικής κίνησης μεταβάλλεται σε σχέση με τη συχνότητα ή την περίοδο. Το εύρος Fourier υπολογίζεται ως η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων του πραγματικού και φανταστικού μέρους του μετασχηματισμού Fourier και η αντίστοιχη περίοδος θεωρείται η αντιστοιχούσα στη μεγαλύτερη φασματική τιμή.

Κατά την κυματική ανάλυση παράγουμε το φάσμα συνέλιξης  $S_d \times S_v$  από τον πολλαπλασιασμό του φάσματος της ταχύτητας και της μετακίνησης για απόσβεση 5% και προσδιορίζεται η περίοδος  $T$  που αντιστοιχεί στην κορυφή του φάσματος συνέλιξης. Κατόπιν, για ένα εύρος τιμών της διάρκειας του κύματος  $\gamma$  υπολογίζεται

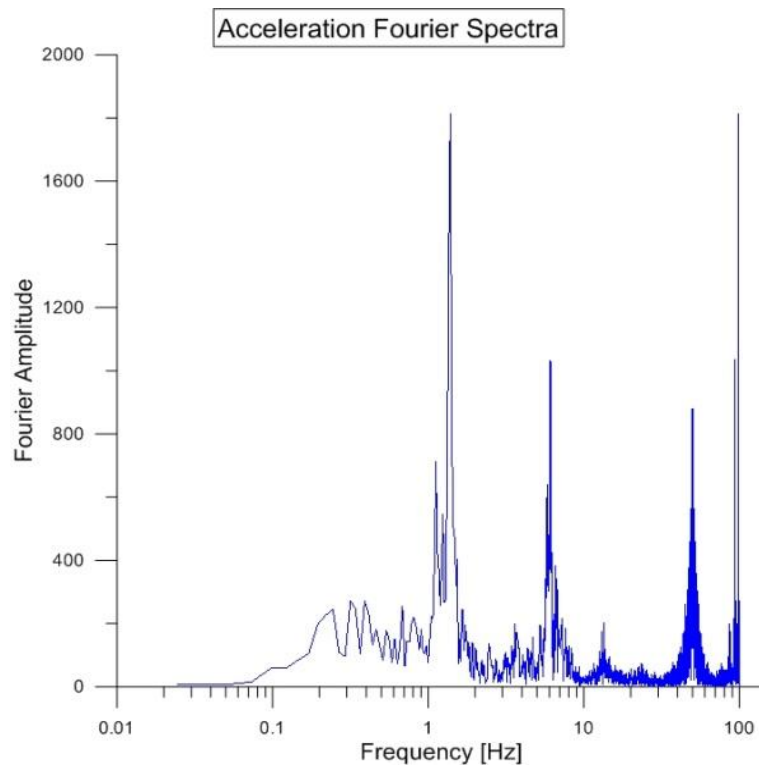
η αντίστοιχη τιμή του εύρους  $A$  και για κάθε ζεύγος τιμών  $(A,\gamma)$  και για διαφορά φάσης  $\nu$  προσδιορίζεται το αντίστοιχο κυματίδιο M&P για περίοδο  $T$ . Για τα αποδεκτά κυματίδια διεξάγεται μια διεργασία συσχέτισης μεταξύ της χρονοϊστορίας ταχύτητας του κυματιδίου και της χρονοϊστορίας ταχύτητας της καταγραφής και υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης,  $r$ . Κάθε κυματίδιο αφαιρείται από την αρχική καταγραφή και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τον προσδιορισμό των επόμενων παλμών με την εναπομένουσα εδαφική κίνηση να παίρνει πλέον τη θέση της αρχικής καταγραφής. Επιλέγεται εκείνο το κυματίδιο με το μεγαλύτερο συντελεστής συσχέτισης  $r$ , το οποίο αντιπροσωπεύει τον παλμό ταχύτητας της εδαφικής κίνησης.

Κατά τη φασματική ανάλυση επιτάχυνσης ταχύτητας για την παραγωγή του φάσματος Fourier γίνεται χρήση του προγράμματος Seismosignal ενώ κατά τη κυματική ανάλυση για τον προσδιορισμό των κυματιδίων με τις αντίστοιχες παραμέτρους τους χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Cross5new.

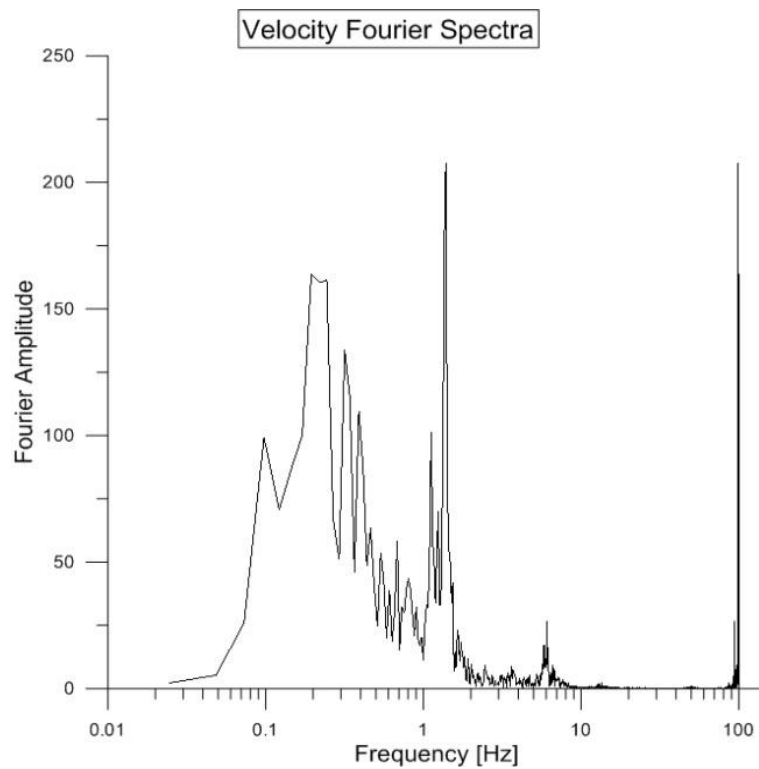
#### 4.2 Αποτελέσματα αναλύσεων

Τα αποτελέσματα των τριών αναλύσεων δίνονται στα σχήματα που ακολουθούν για τις τέσσερις περιπτώσεις σεισμικών διεγέρσεων μεγάλων περιόδων και για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας, slight, light, moderate, extensive και partial collapse damage state. Για τις υπόλοιπες έξι καταγραφές τα αποτελέσματα παρατίθενται στο παράρτημα Α.

## DATA 1-5: SLIGHT DAMAGE STATE

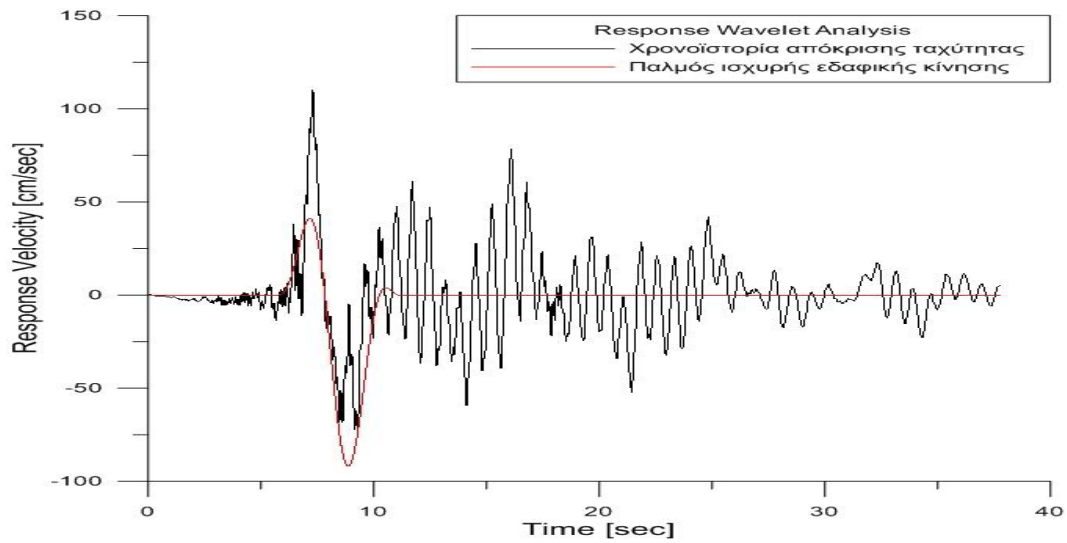


Σχήμα 4.1: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-5 slight damage state.



Σχήμα 4.2: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-5 slight damage state.





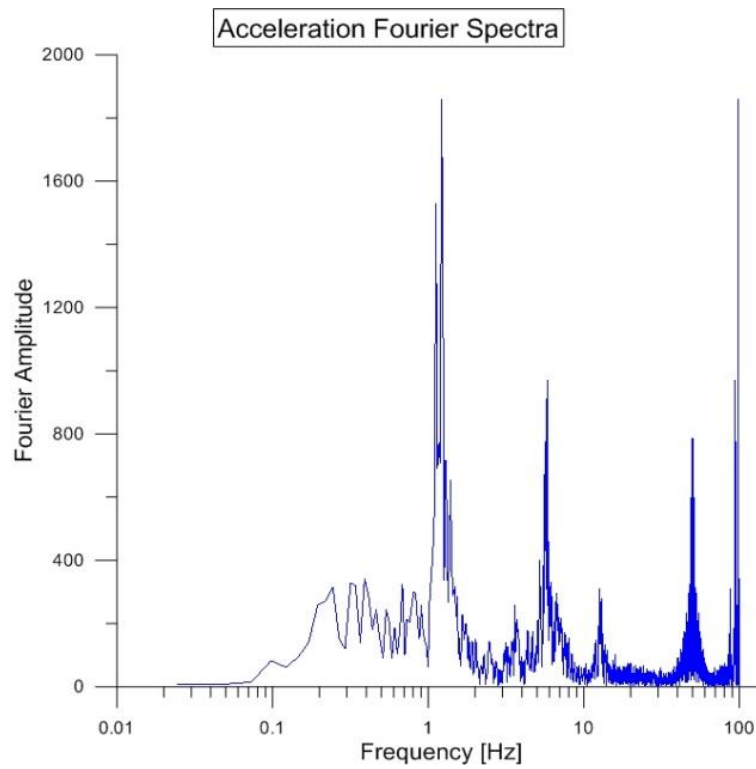
**Σχήμα 4.3:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-5 slight damage state.

**Πίνακας 4.1:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-5 slight damage state.

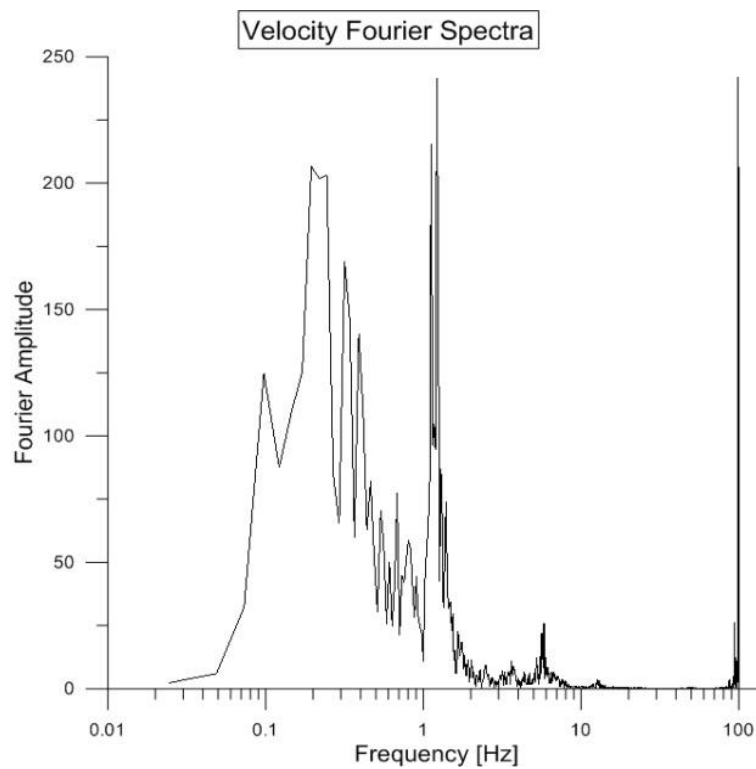
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
100.783	4.84	1.1	135	0.511
28.827	8.46	2.3	60	0.229
14.888	20	1.1	110	0.07
19.602	3.75	5	270	0.18
9.058	6.65	4.8	25	0.151
7.428	16.55	1.5	105	0.042

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 4.78 sec**

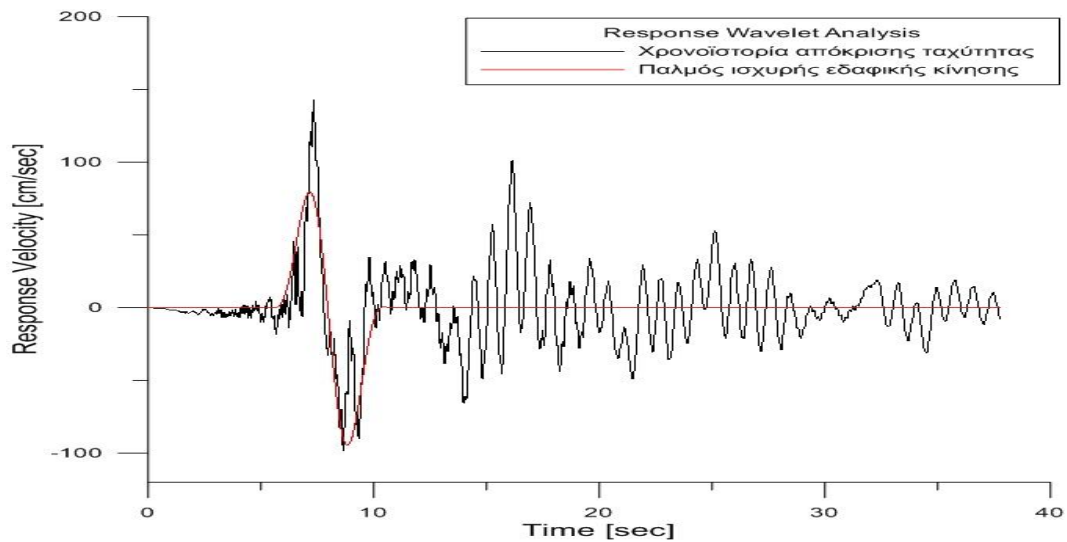
## DATA 1-5: LIGHT DAMAGE STATE



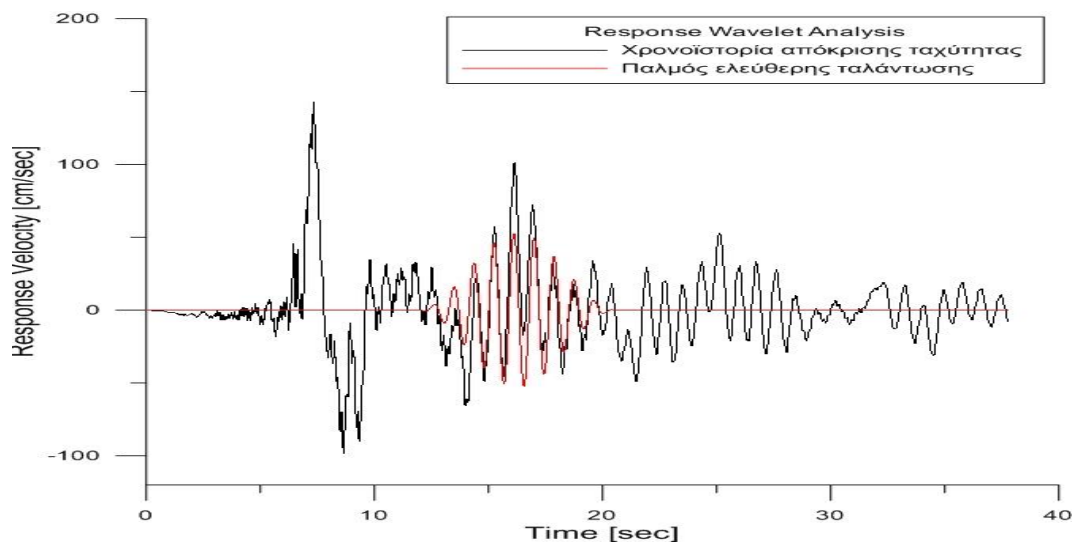
Σχήμα 4.4: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-5 light damage state.



Σχήμα 4.5: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-5 light damage state.



**Σχήμα 4.6:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-5 light damage state.



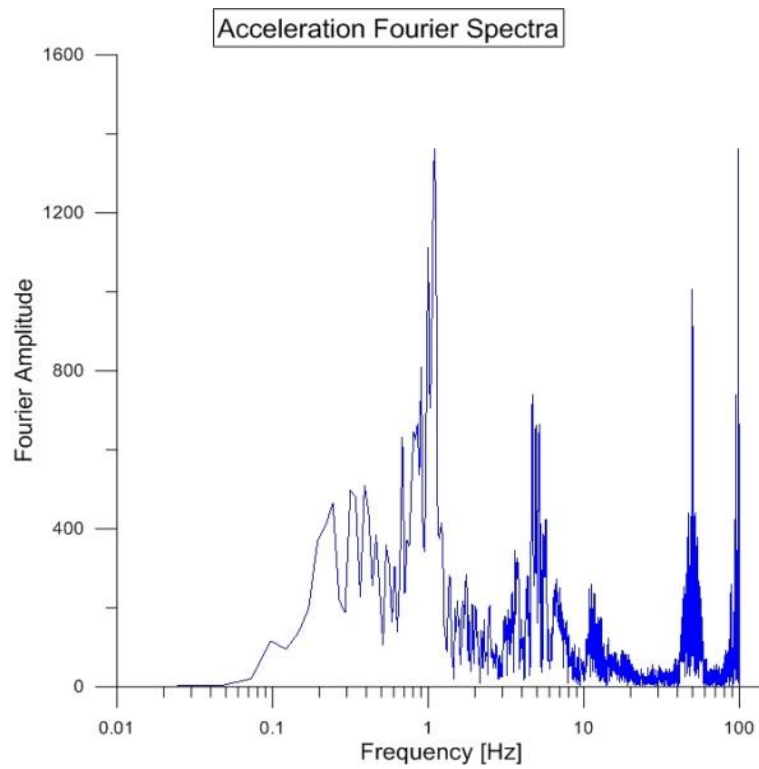
**Σχήμα 4.7:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πέμπτο κυματίδιο) για Data 1-5 light damage state.

**Πίνακας 4.2:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-5 light damage state.

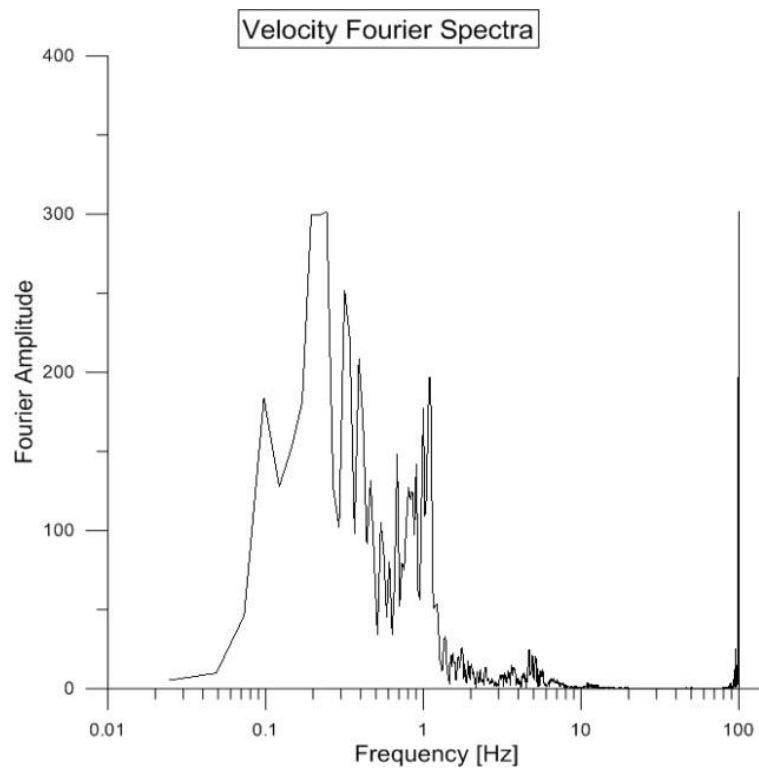
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
127.074	4.73	1.1	100	0.572
21.661	7.99	4.2	335	0.212
20.789	15.97	1.1	335	0.103
36.05	3.79	2.9	100	0.228
52.809	0.88	10	55	0.412
9.757	3.43	10	235	0.071

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 4.78 sec**

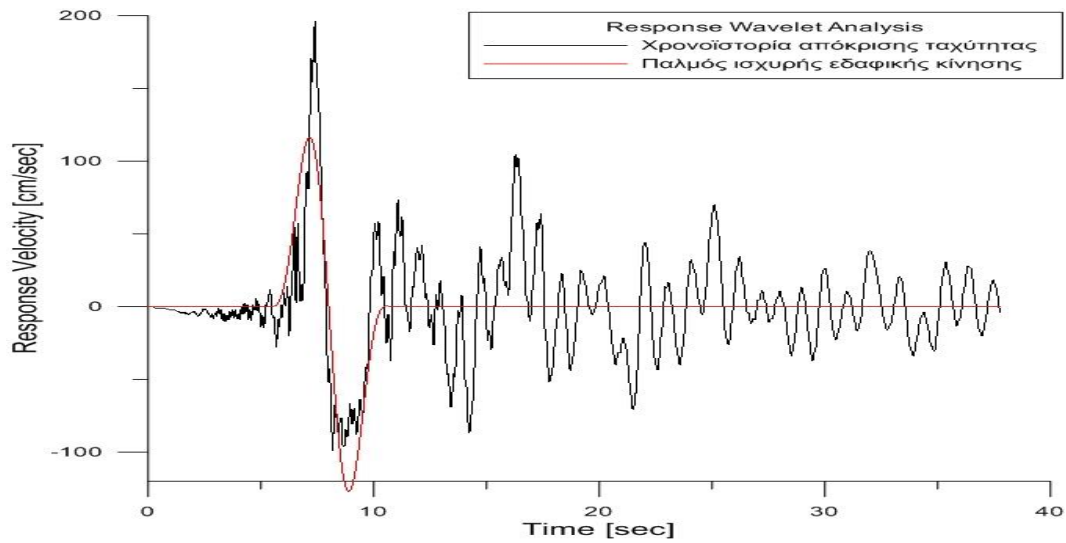
## DATA 1-5: MODERATE DAMAGE STATE



Σχήμα 4.8: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-5 moderate damage state.



Σχήμα 4.9: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-5 moderate damage state.



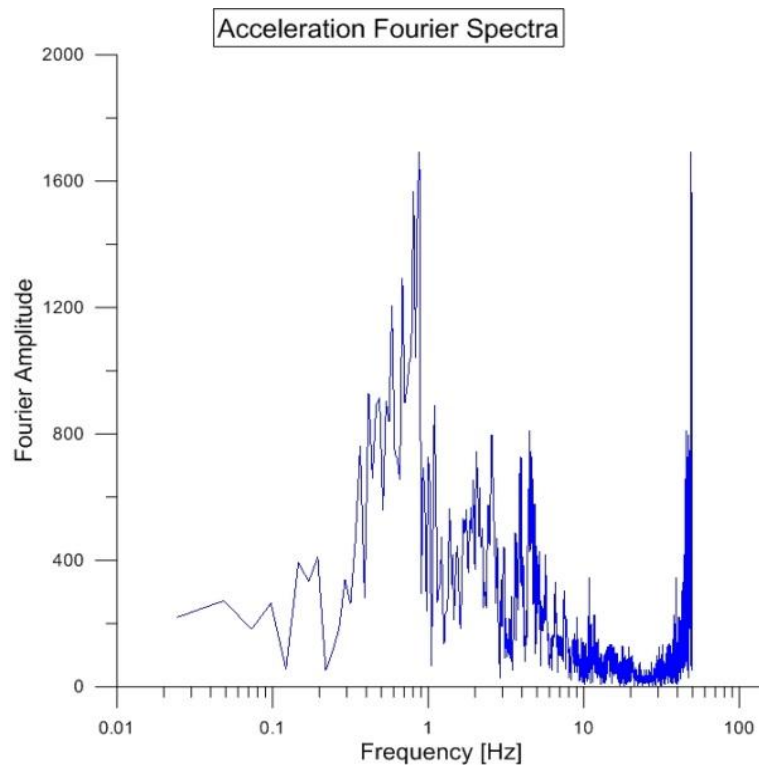
**Σχήμα 4.10:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-5 moderate damage state.

**Πίνακας 4.3:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-5 moderate damage state.

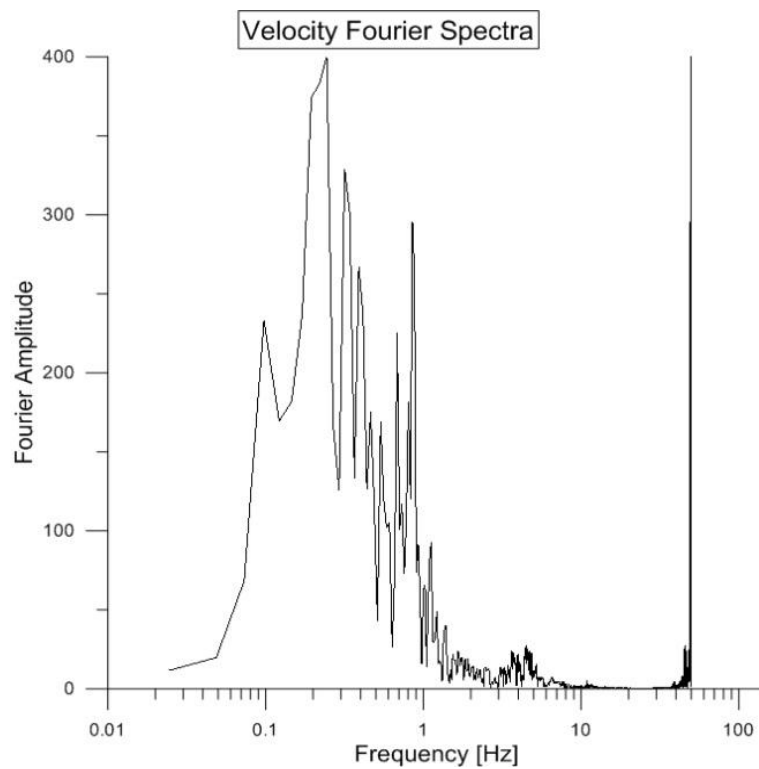
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
177.494	4.91	1.1	95	0.623
30.943	7.95	4.2	330	0.224
25.552	14.82	1.4	345	0.129
50.624	3.81	3	85	0.257
88.146	1.29	2.6	10	0.361
63.752	3.45	1.1	185	0.1

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 4.78 sec**

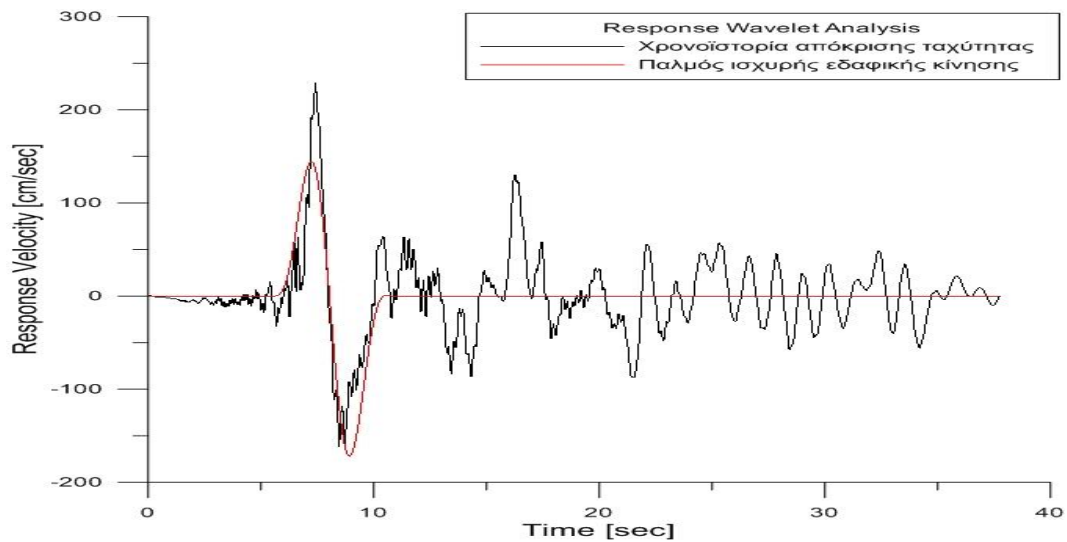
## DATA 1-5: EXTENSIVE DAMAGE STATE



Σχήμα 4.11: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-5 extensive damage state.



Σχήμα 4.12: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-5 extensive damage state.



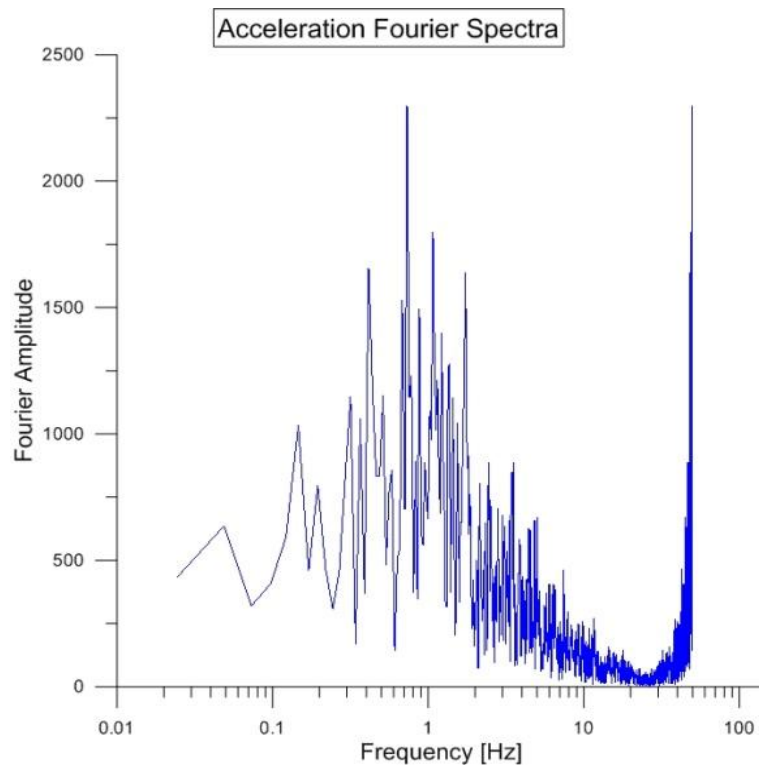
**Σχήμα 4.13:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-5 extensive damage state.

**Πίνακας 4.4:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-5 extensive damage state.

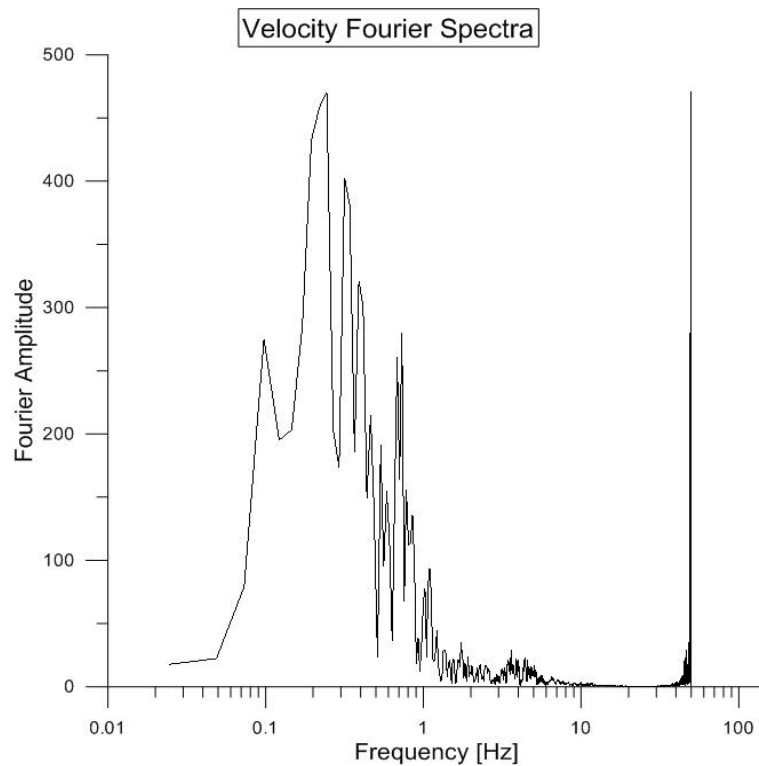
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
230.892	4.8	1.1	100	0.669
109.103	8.12	1.1	160	0.212
65.253	20	1.1	355	0.084
57.271	8.87	1.1	75	0.212
41.616	7.13	1.9	320	0.182
37.625	3.65	4.4	280	0.216

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 4.78 sec**

## DATA 1-5: PARTIAL COLLAPSE DAMAGE STATE

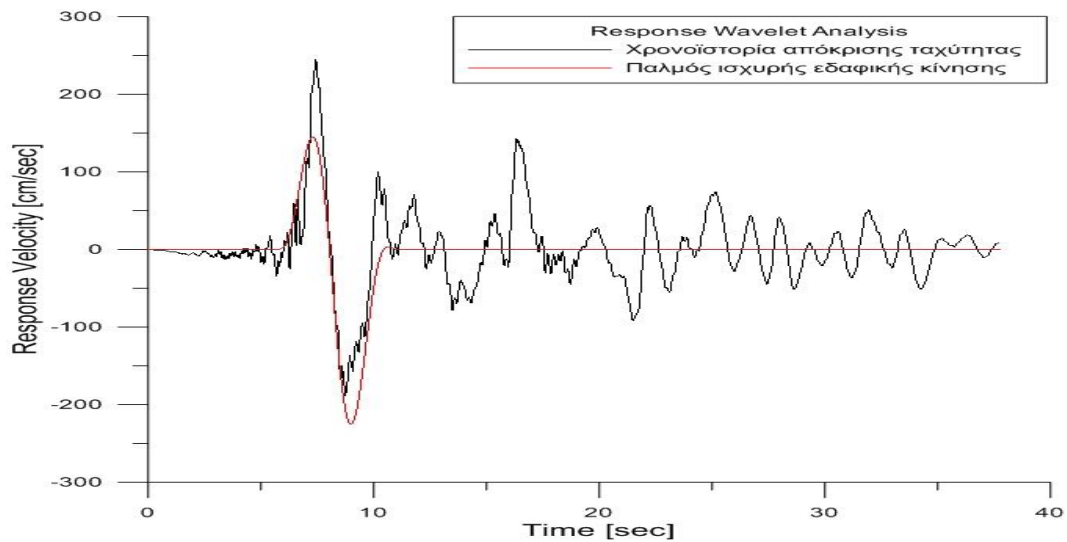


Σχήμα 4.14: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-5 partial collapse damage state.



Σχήμα 4.15: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-5 partial collapse damage state.





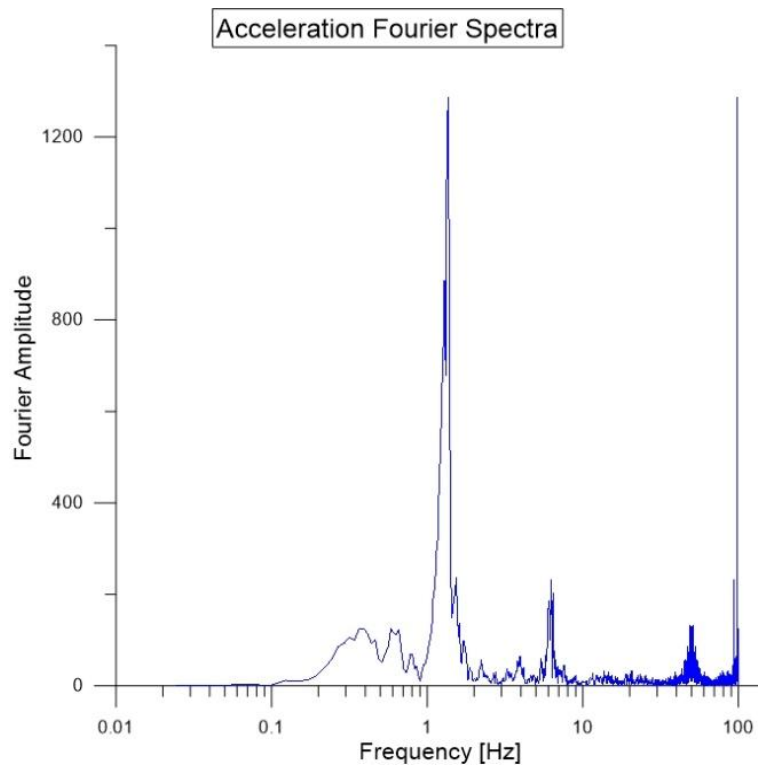
**Σχήμα 4.16:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-5 partial collapse damage state.

**Πίνακας 4.5:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-5 extensive damage state.

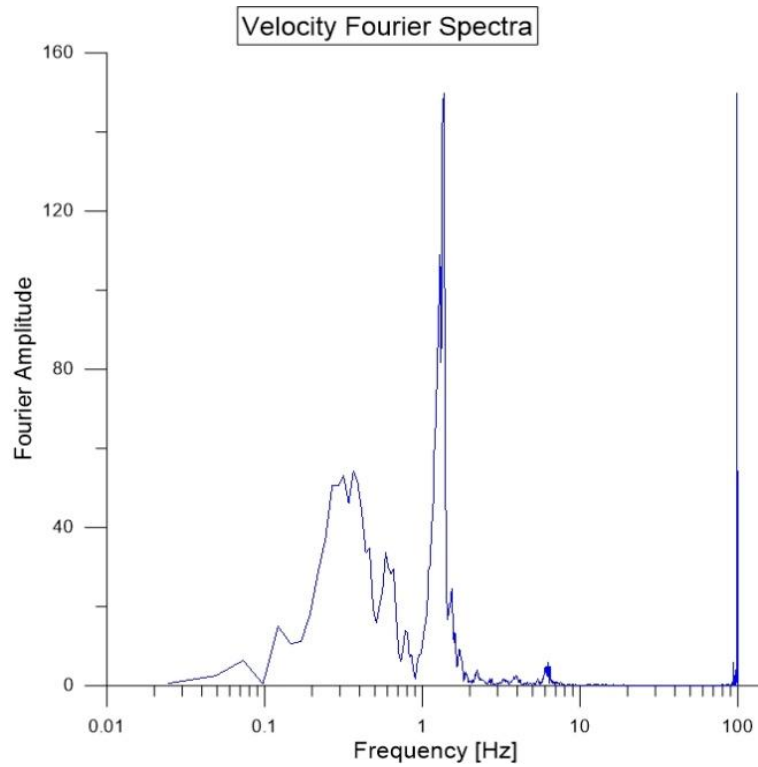
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
273.009	4.81	1.1	115	0.7
49.62	8.22	3.7	265	0.241
39.216	17.96	1.3	35	0.095
70.519	3.84	3.2	85	0.282
144.5	2.53	1.1	90	0.153
66.01	6.71	1.1	215	0.15

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 4.78 sec**

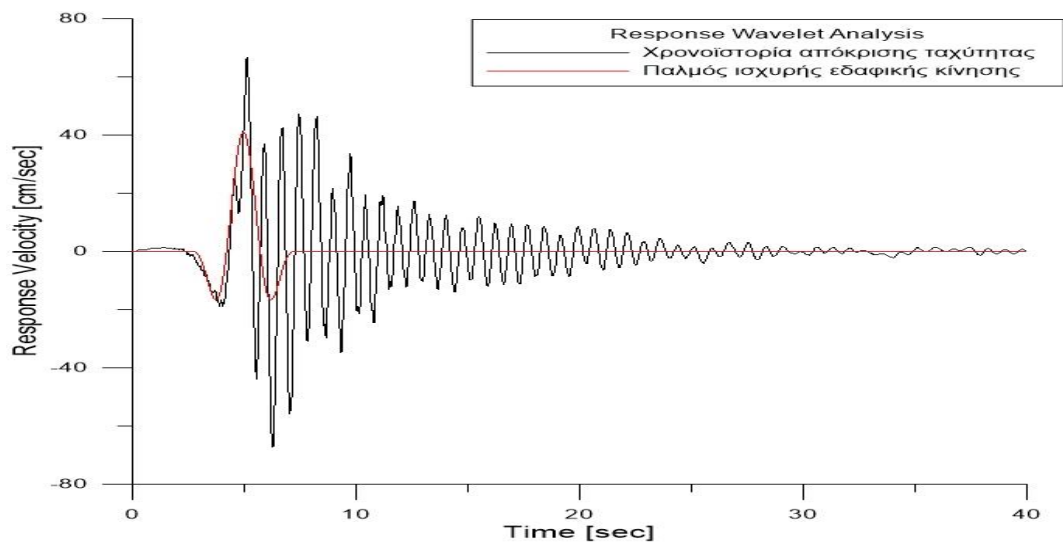
## DATA 1-7: SLIGHT DAMAGE STATE



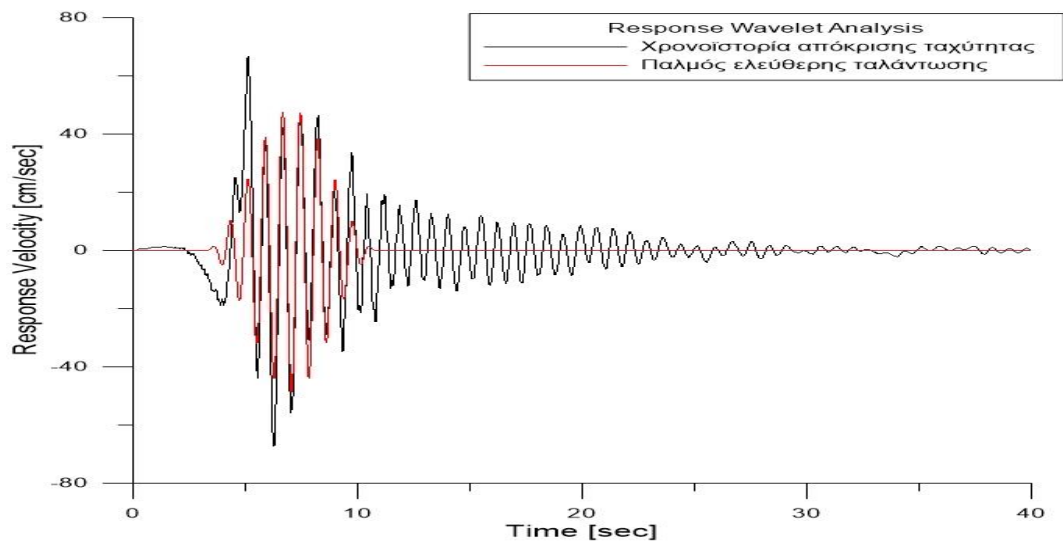
Σχήμα 4.17: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-7 slight damage state.



Σχήμα 4.18: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-7 slight damage state.



**Σχήμα 4.19:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-7 slight damage state.



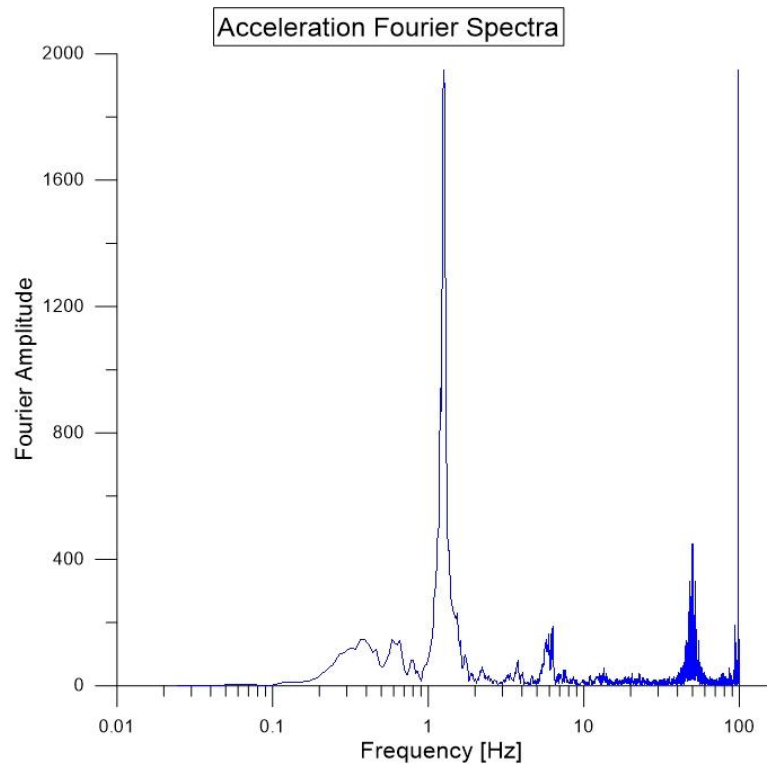
**Σχήμα 4.20:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-7 slight damage state.

**Πίνακας 4.6:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-7 slight damage state

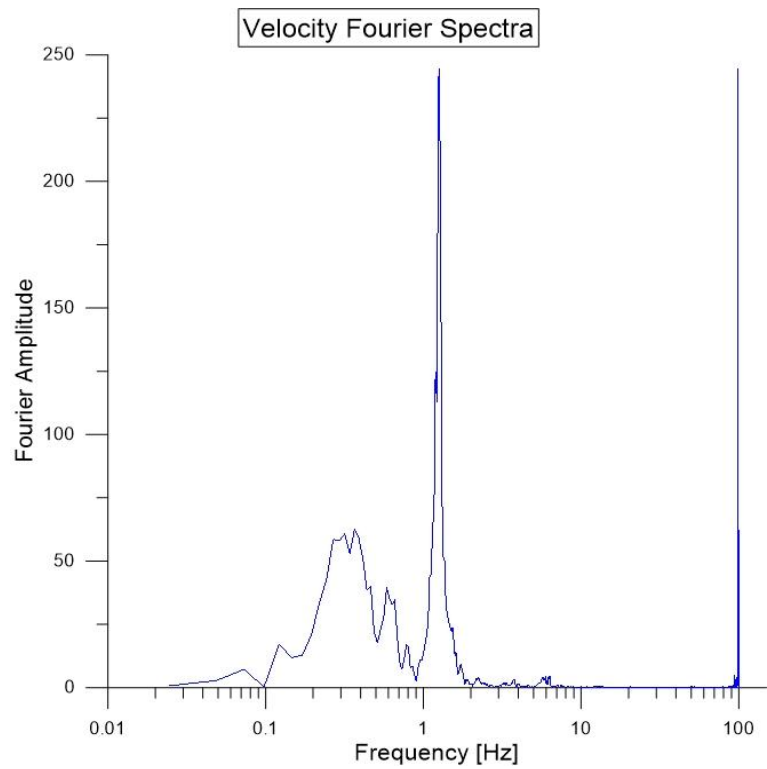
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
48.644	0.78	10	175	0.784
40.908	3.01	1.6	360	0.415
10.325	7.98	1.1	210	0.052
17.692	0.74	10	95	0.323
8.274	1.67	6.2	60	0.126
12.585	0.74	10	320	0.2

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 3.01 sec**

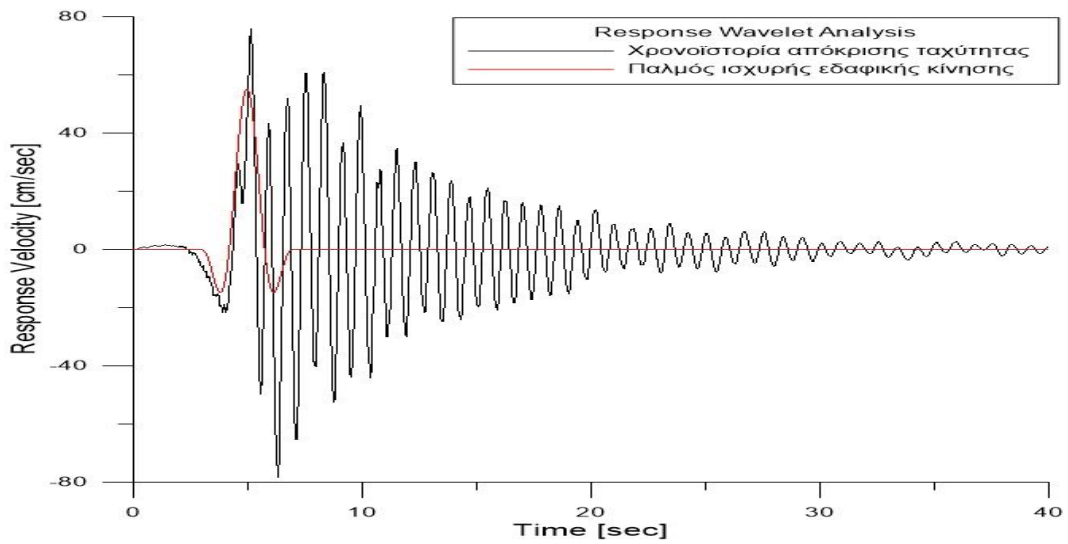
## DATA 1-7: LIGHT DAMAGE STATE



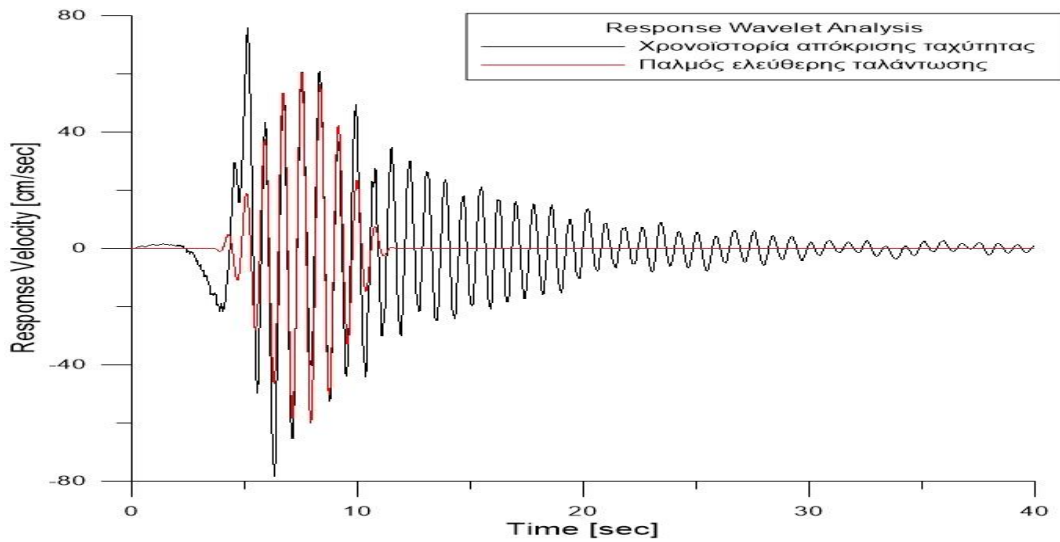
Σχήμα 4.21: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-7 light damage state.



Σχήμα 4.22: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-7 light damage state.



**Σχήμα 4.23:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-7 light damage state.



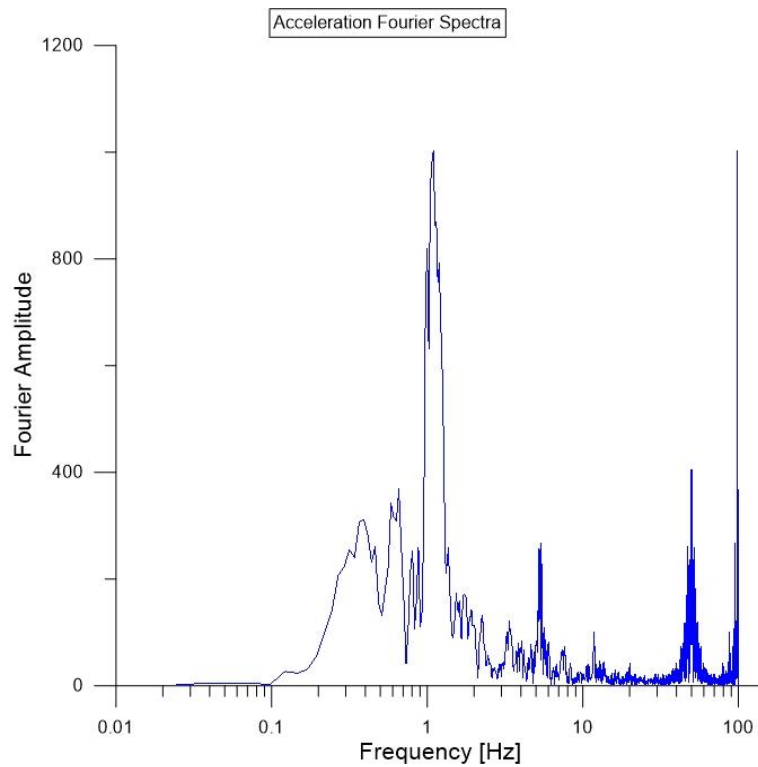
**Σχήμα 4.24:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-7 light damage state.

**Πίνακας 4.7:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-7 light damage state

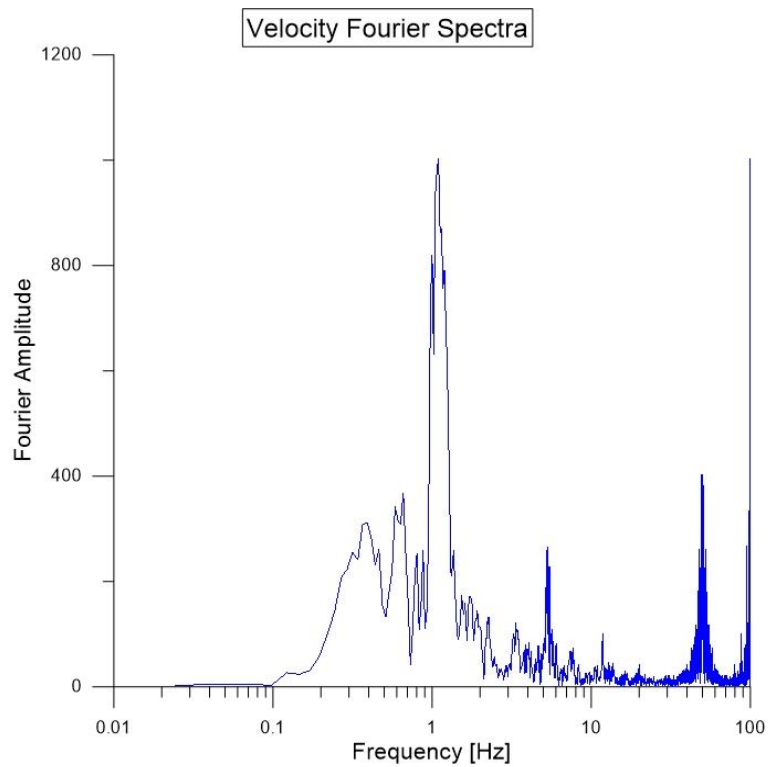
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
60.816	0.82	10	45	0.754
55.146	3.1	1.3	360	0.344
8.17	17.46	1.1	305	0.018
18.882	6.77	1.1	350	0.055
9.517	20	1.1	225	0.017
31.785	0.8	10	60	0.419

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 3.01 sec**

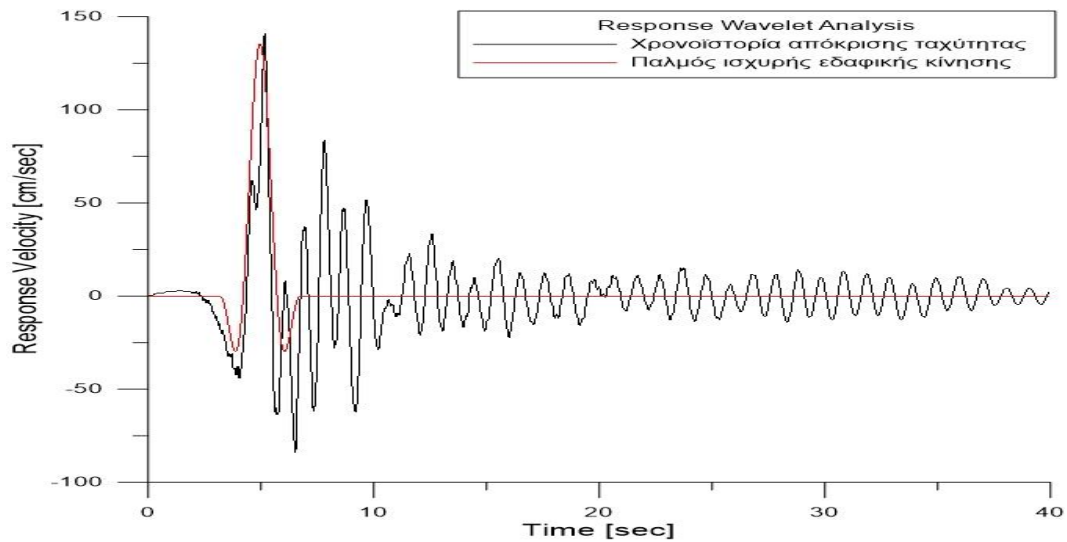
## DATA 1-7: MODERATE DAMAGE STATE



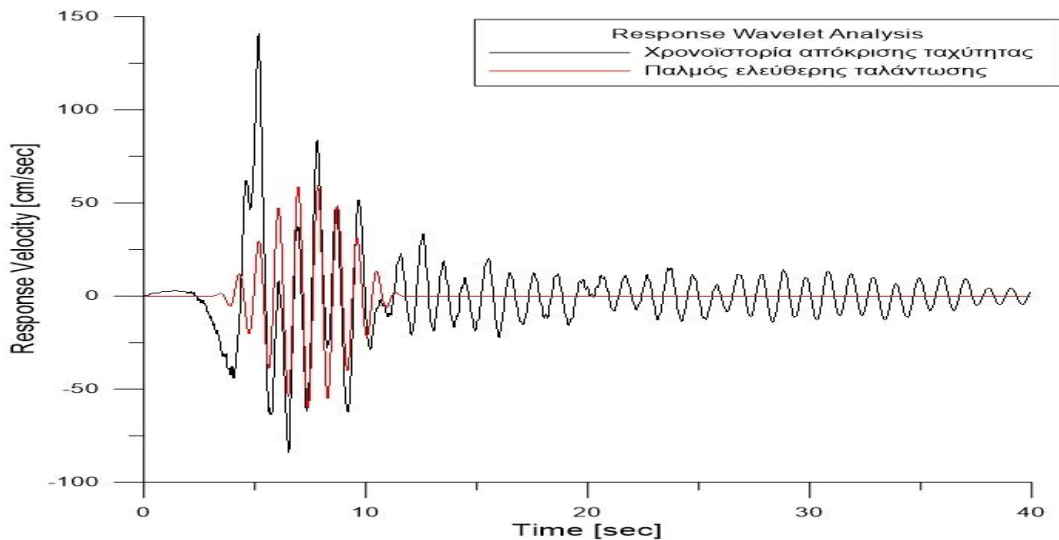
Σχήμα 4.25: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-7 moderate damage state.



Σχήμα 4.26: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-7 moderate damage state.



**Σχήμα 4.27:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-7 moderate damage state.



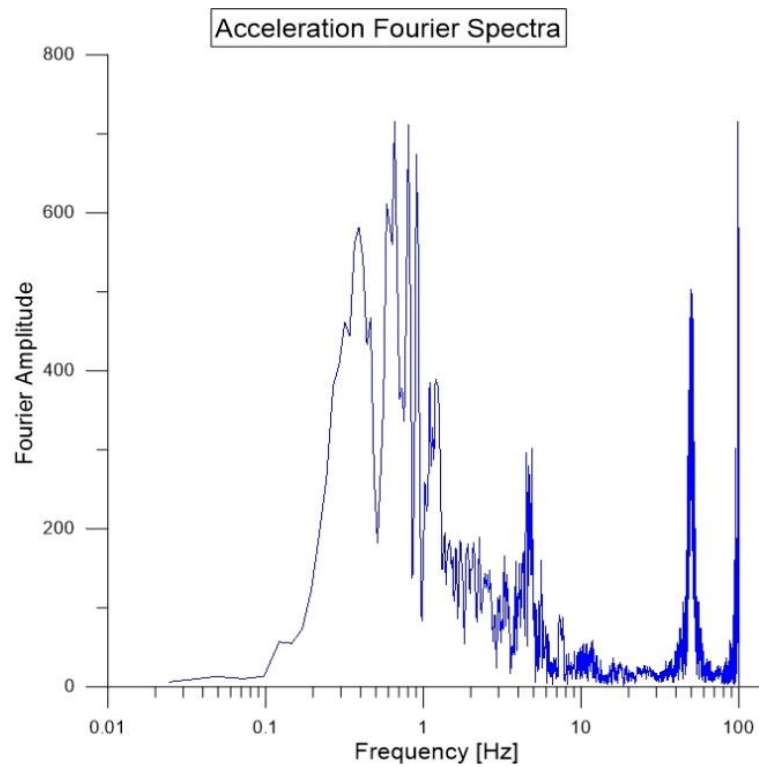
**Σχήμα 4.28:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (τρίτο κυματίδιο) για Data 1-7 moderate damage state.

**Πίνακας 4.8:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-7 moderate damage state.

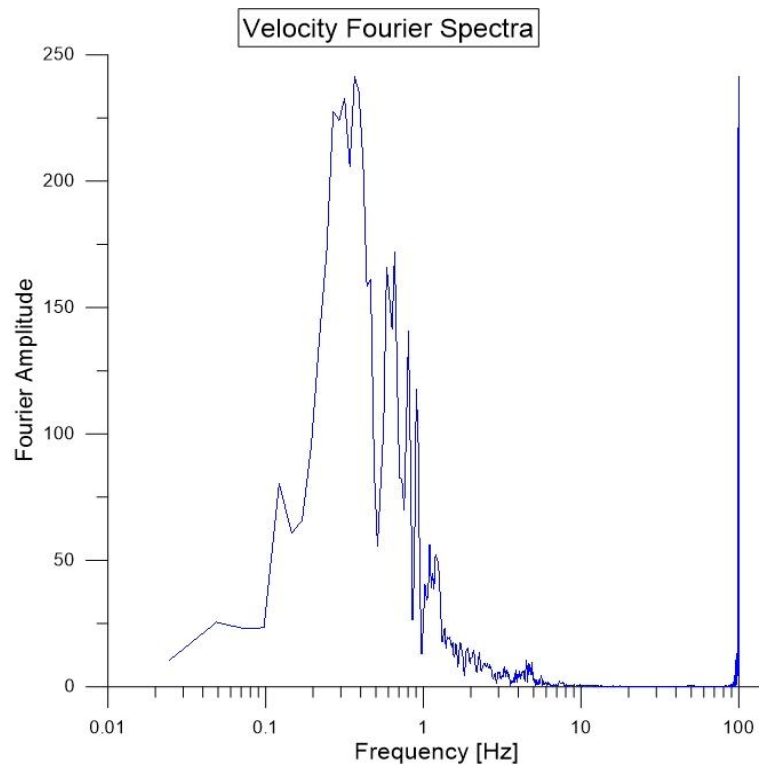
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
135.424	3.00	1.2	0	0.587
42.066	8.55	1.1	195	0.058
60.403	0.89	10	195	0.586
31.414	2.04	3.2	45	0.183
6.971	7.37	2.5	185	0.052
21.398	0.98	10	145	0.226

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 3.01 sec**

## DATA 1-7: EXTENSIVE DAMAGE STATE

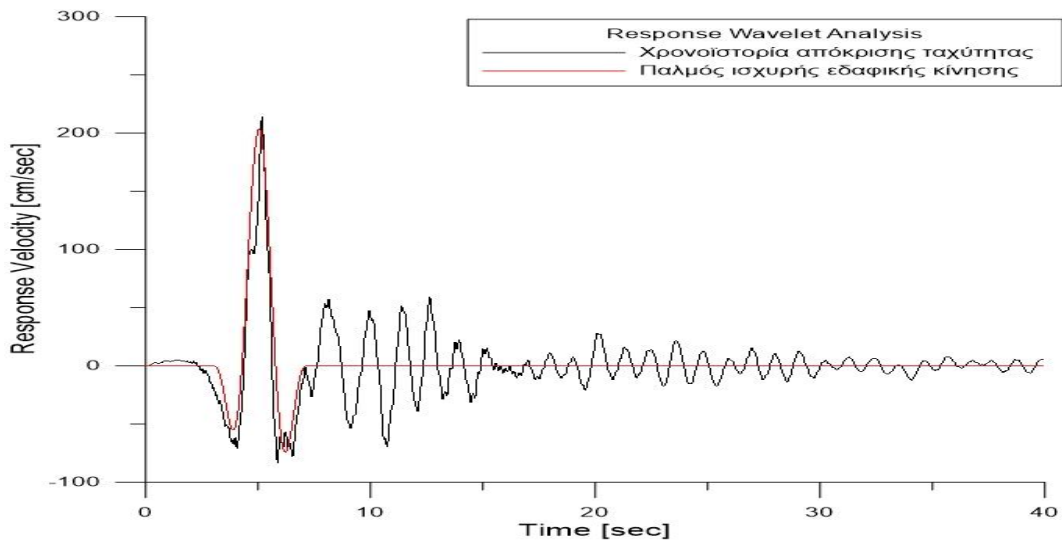


Σχήμα 4.29: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-7 extensive damage state.

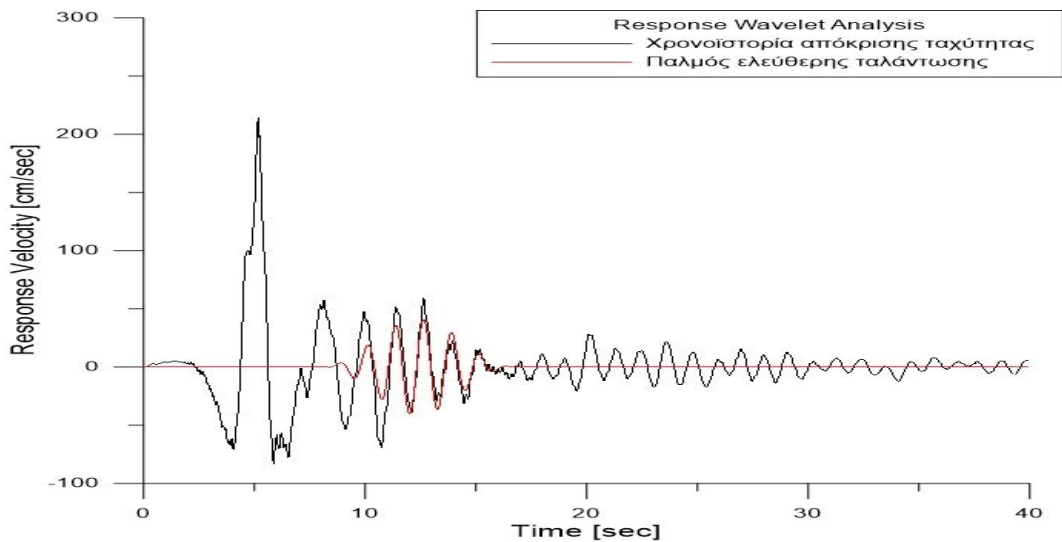


Σχήμα 4.30: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-7 extensive damage state.





**Σχήμα 4.31:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-7 extensive damage state.



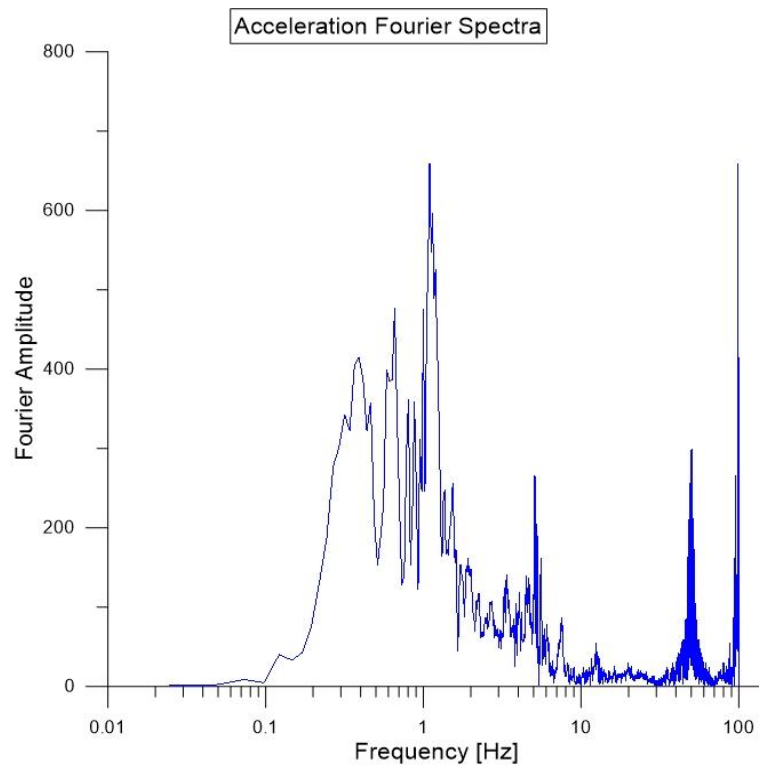
**Σχήμα 4.32:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (τέταρτο κυματίδιο) για Data 1-7 extensive damage state.

**Πίνακας 4.9:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-7 extensive damage state.

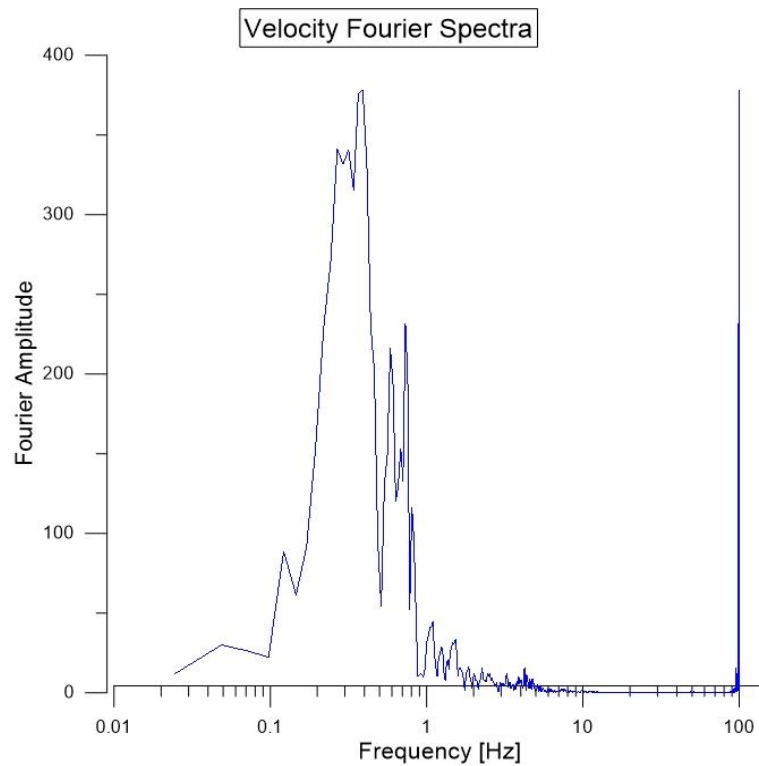
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
203.988	2.99	1.4	10	0.8
45	8.37	1.2	200	0.086
63.24	1.81	4	230	0.333
40.958	1.27	6.8	285	0.325
10.638	8.25	2.1	155	0.105
33.654	3.92	1.1	125	0.062

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 3.01 sec**

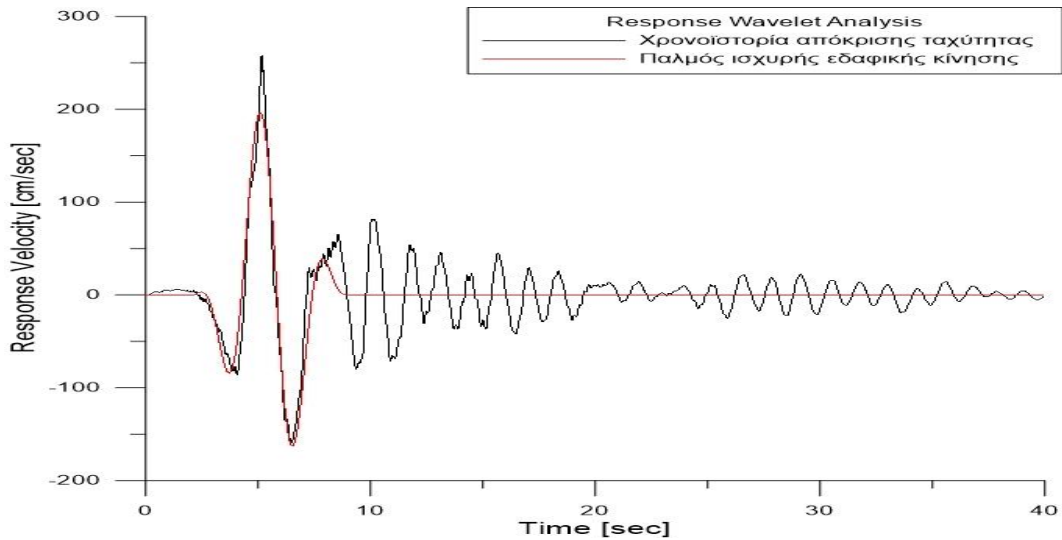
## DATA 1-7: PARTIAL COLLAPSE DAMAGE STATE



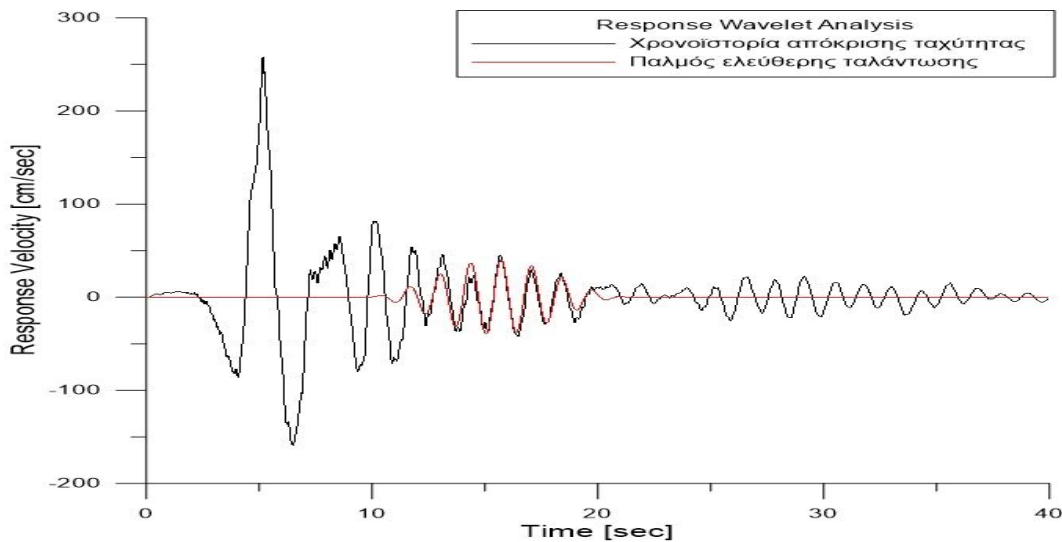
Σχήμα 4.33: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-7 partial collapse damage state.



Σχήμα 4.34: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-7 partial collapse damage state.



**Σχήμα 4.35:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-7 partial collapse damage state.



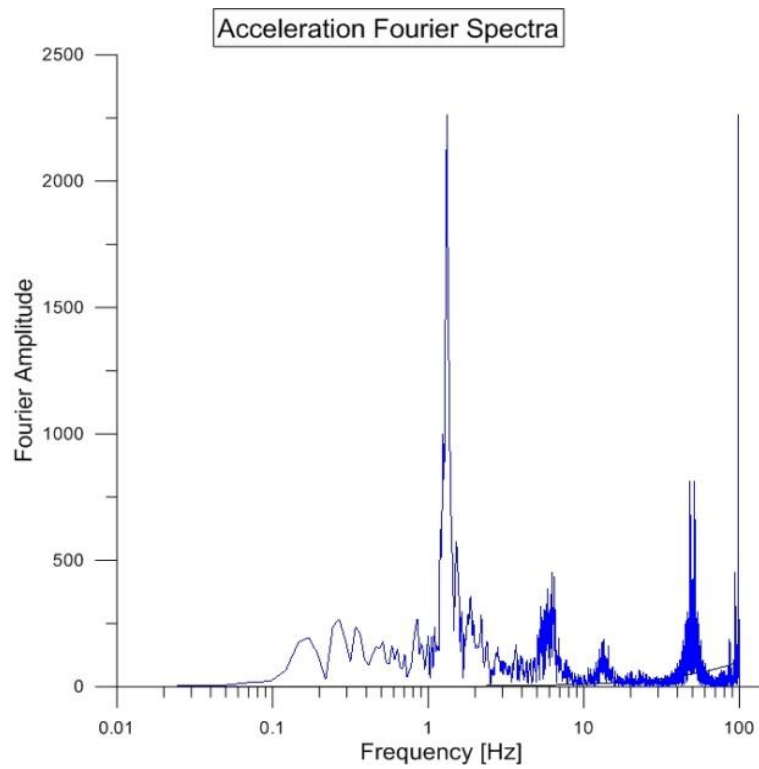
**Σχήμα 4.36:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πέμπτο κυματίδιο) για Data 1-7 partial collapse damage state.

**Πίνακας 4.10:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-7 partial collapse damage state.

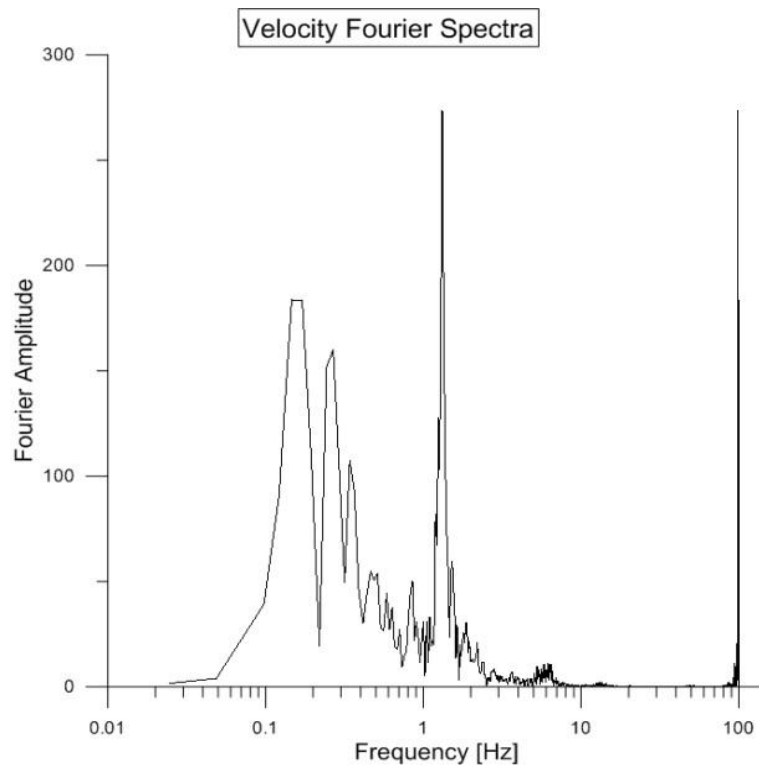
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
205.057	3.15	2.2	55	0.853
83.357	1.69	5.4	280	0.303
49.052	6.06	1.1	355	0.168
18.392	13.2	1.2	200	0.035
40.156	1.35	8.8	305	0.235
57.983	2.04	1.8	245	0.421

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 3.01 sec**

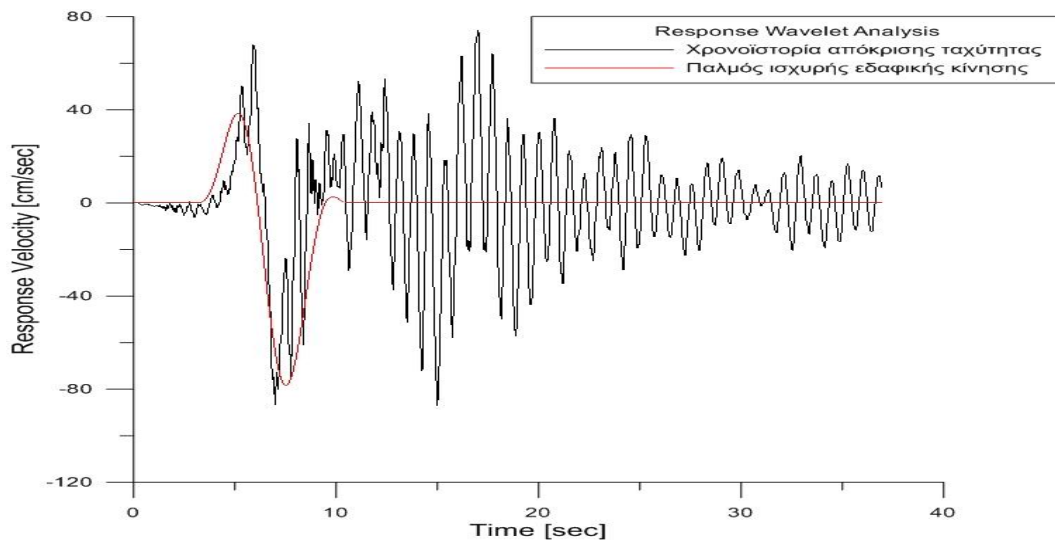
## DATA 1-8: SLIGHT DAMAGE STATE



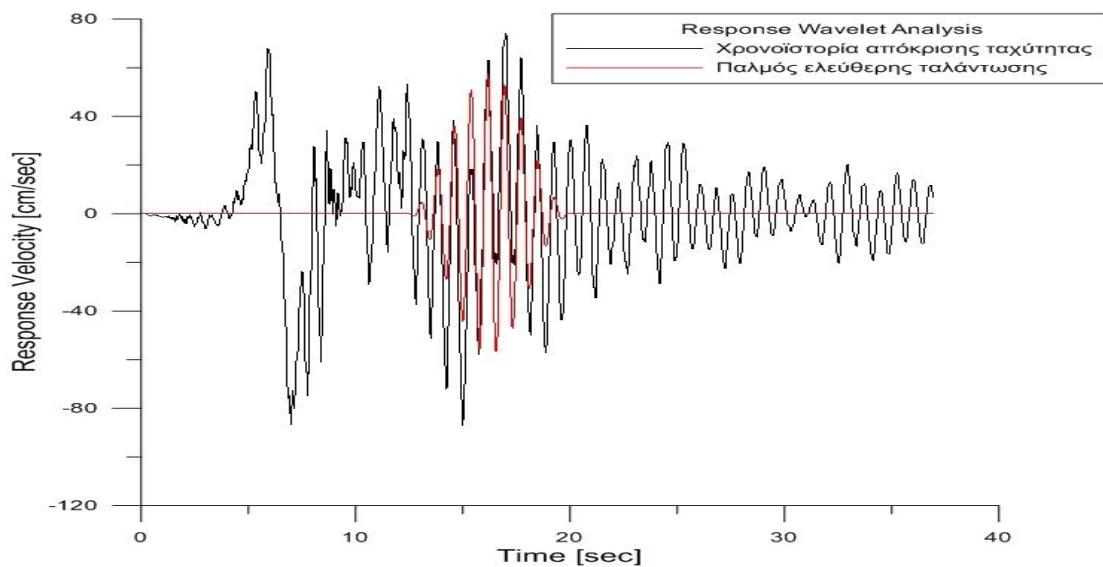
Σχήμα 4.37: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-8 slight damage state.



Σχήμα 4.38: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-8 slight damage state.



**Σχήμα 4.39:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-8 slight damage state.



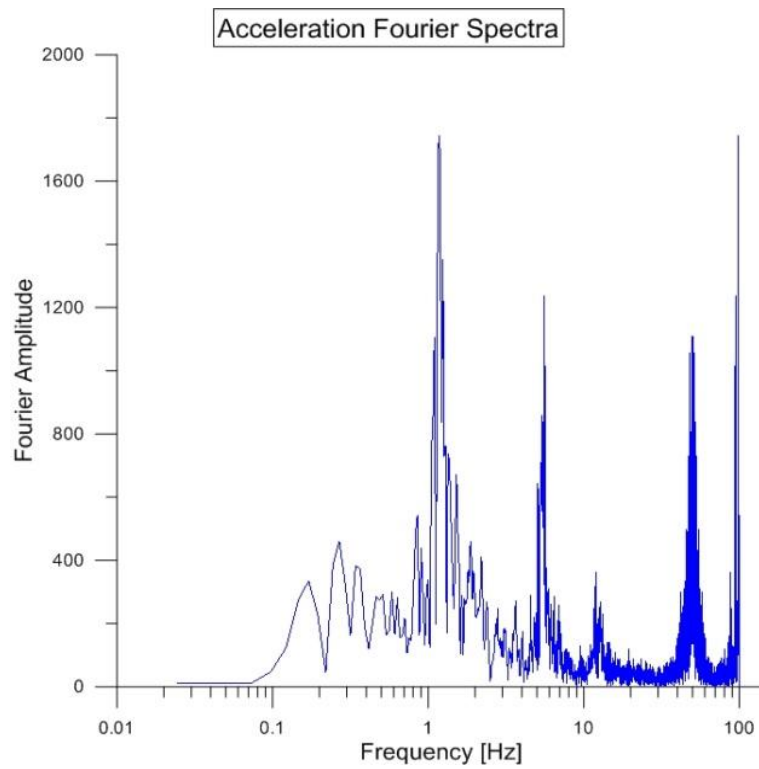
**Σχήμα 4.40:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (τέταρτο κυματίδιο) για Data 1-8 slight damage state.

**Πίνακας 4.11:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-8 slight damage state.

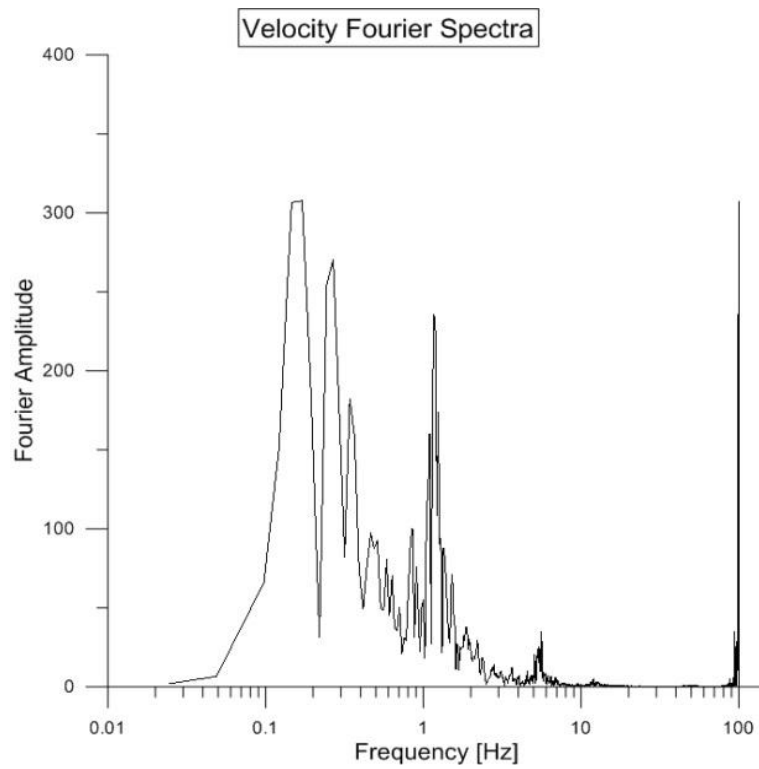
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
87.761	6.71	1.1	130	0.432
39.269	14.61	1.1	340	0.132
31.438	5.13	3.3	165	0.291
57.546	0.78	10	35	0.496
11.719	16.33	1.1	165	0.033
31.849	2.36	3	55	0.335

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 6.08 sec**

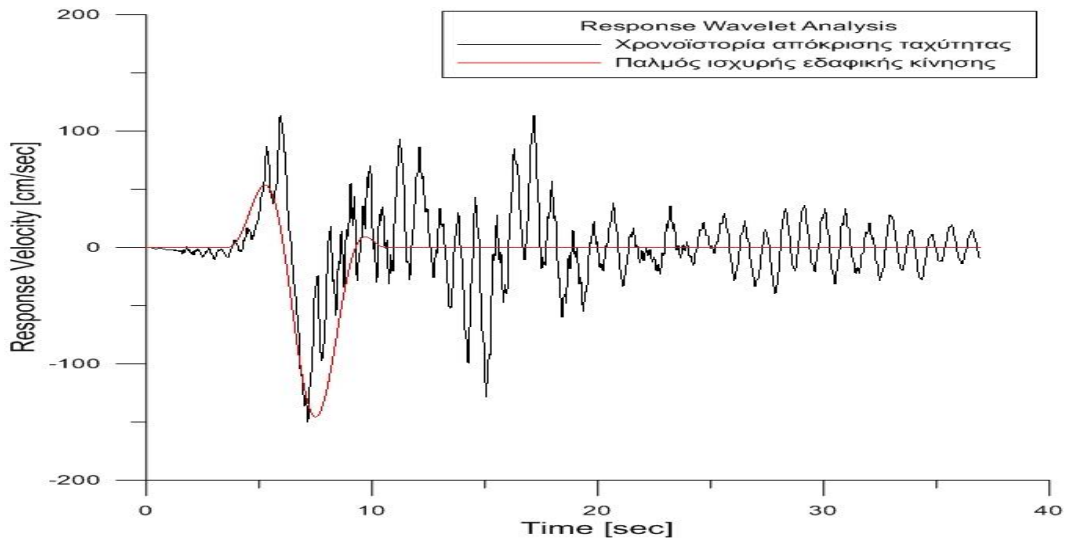
## DATA 1-8: LIGHT DAMAGE STATE



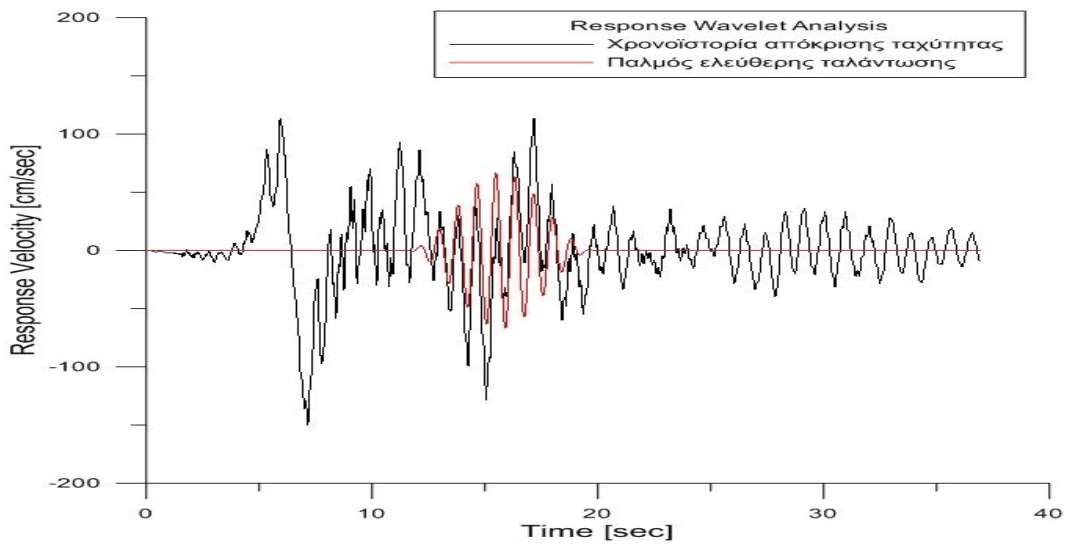
Σχήμα 4.41: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-8 light damage state.



Σχήμα 4.42: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-8 light damage state.



**Σχήμα 4.43:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-8 light damage state.



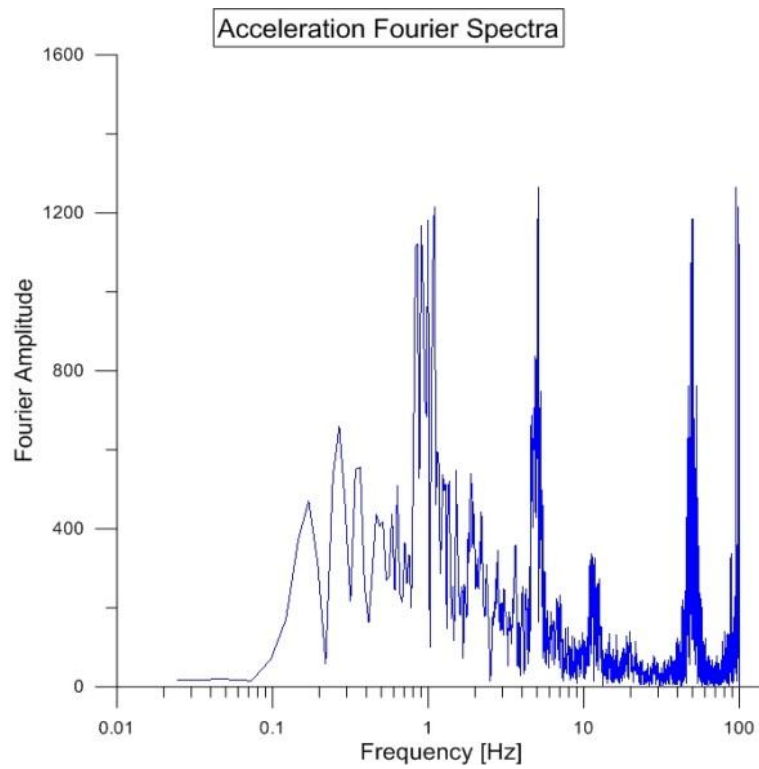
**Σχήμα 4.44:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πέμπτο κυματίδιο) για Data 1-8 light damage state.

**Πίνακας 4.12:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-8 light damage state.

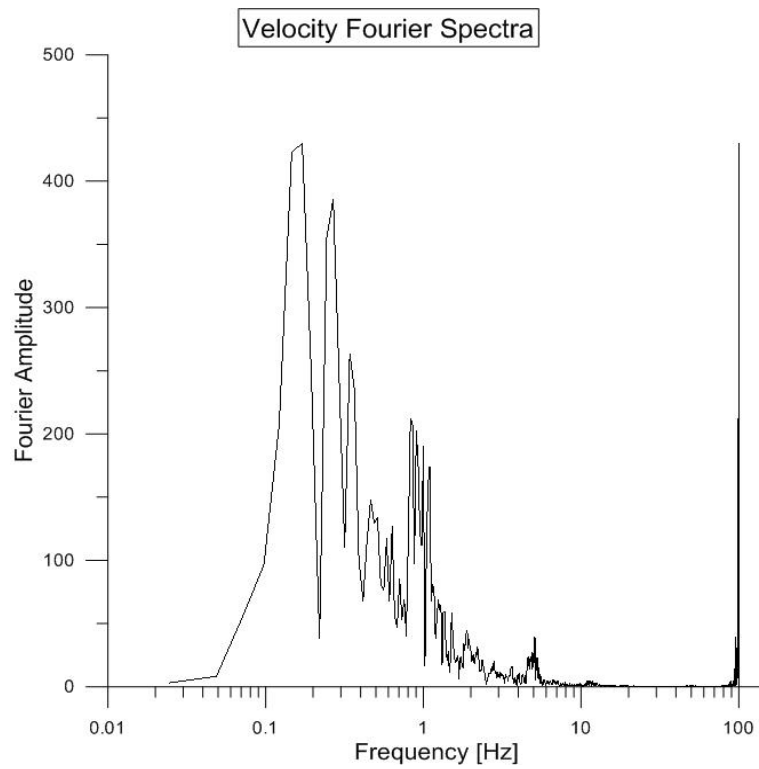
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
153.82	6.38	1.1	145	0.512
56.932	15.9	1.2	30	0.084
46.271	4.98	4.1	140	0.268
14.929	20	1.1	325	0.028
67.278	0.84	10	90	0.393
46.471	2.35	3	100	0.405

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 6.08 sec**

## DATA 1-8: MODERATE STATE DAMAGE

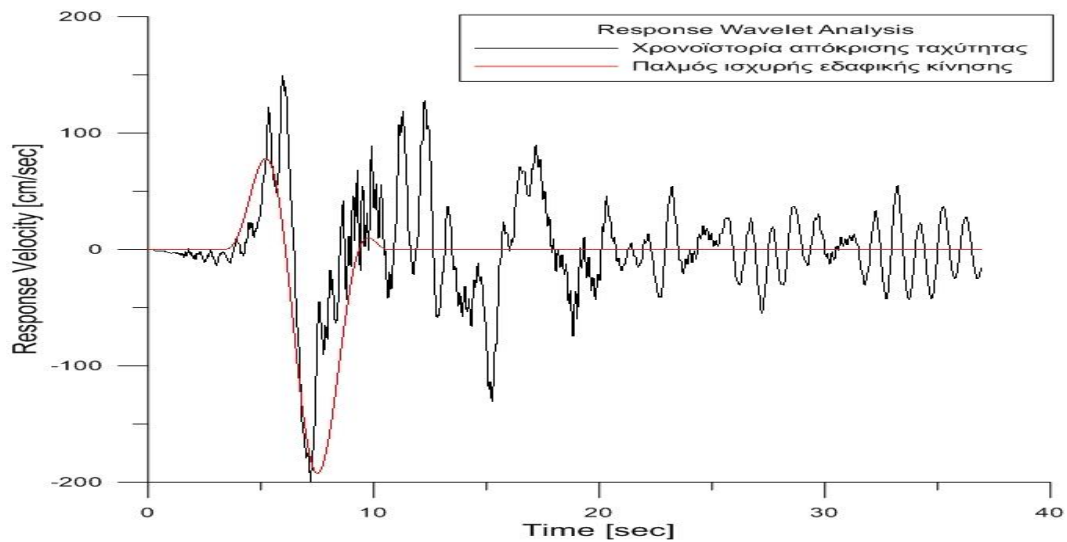


Σχήμα 4.45: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-8 moderate damage state.



Σχήμα 4.46: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-8 moderate damage state.





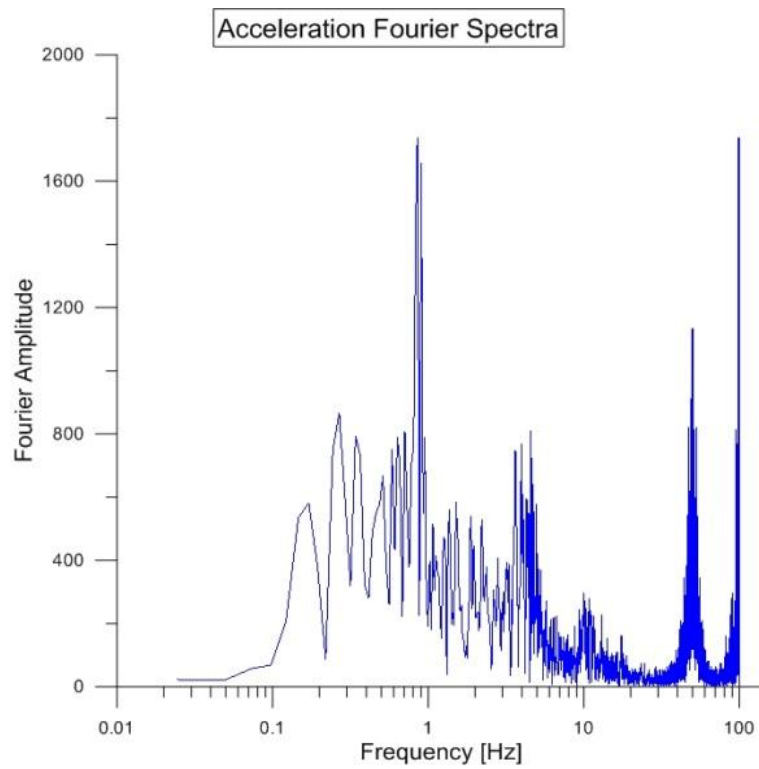
**Σχήμα 4.47:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-8 moderate damage state.

**Πίνακας 4.13:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-8 moderate damage state.

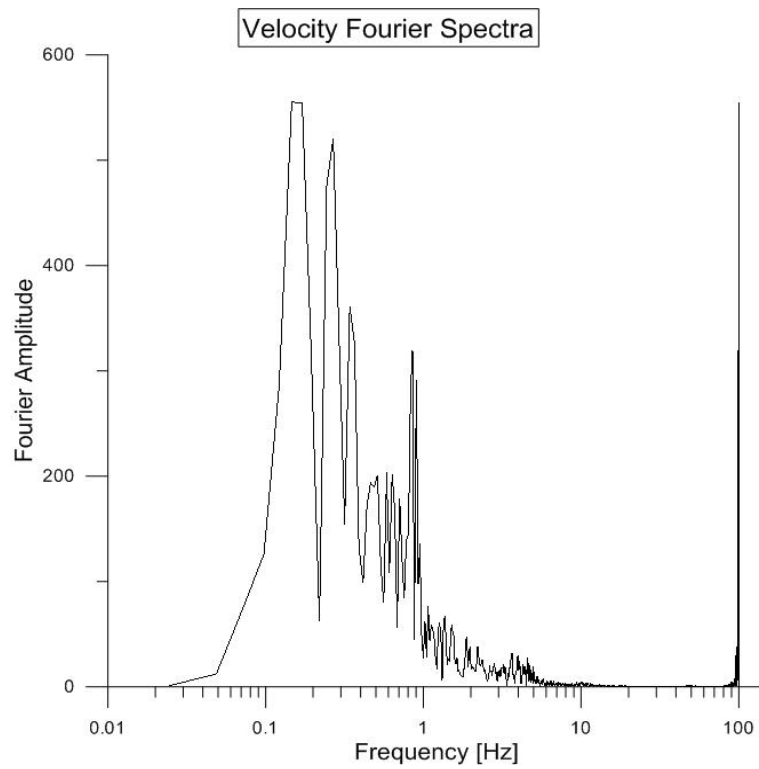
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
206.875	6.53	1.1	140	0.548
89.28	14.8	1.1	350	0.157
71.335	4.94	3.5	165	0.357
128.961	2.28	1.4	90	0.59
51.908	6.65	1.1	165	0.521
28.693	9.9	1.8	125	0.24

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 6.08 sec**

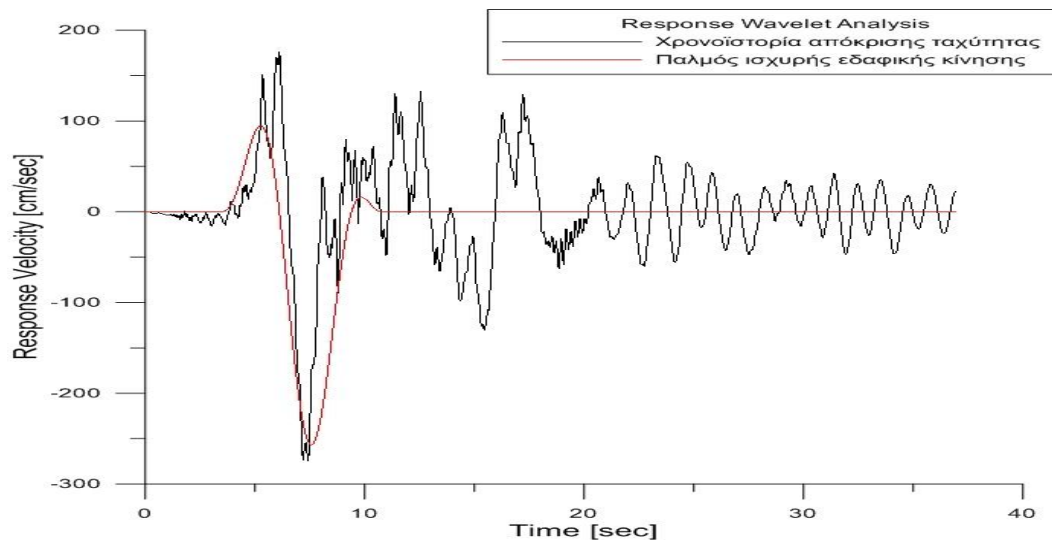
## DATA 1-8: EXTENSIVE DAMAGE STATE



Σχήμα 4.48: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-8 extensive damage state.



Σχήμα 4.49: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-8 extensive damage state.



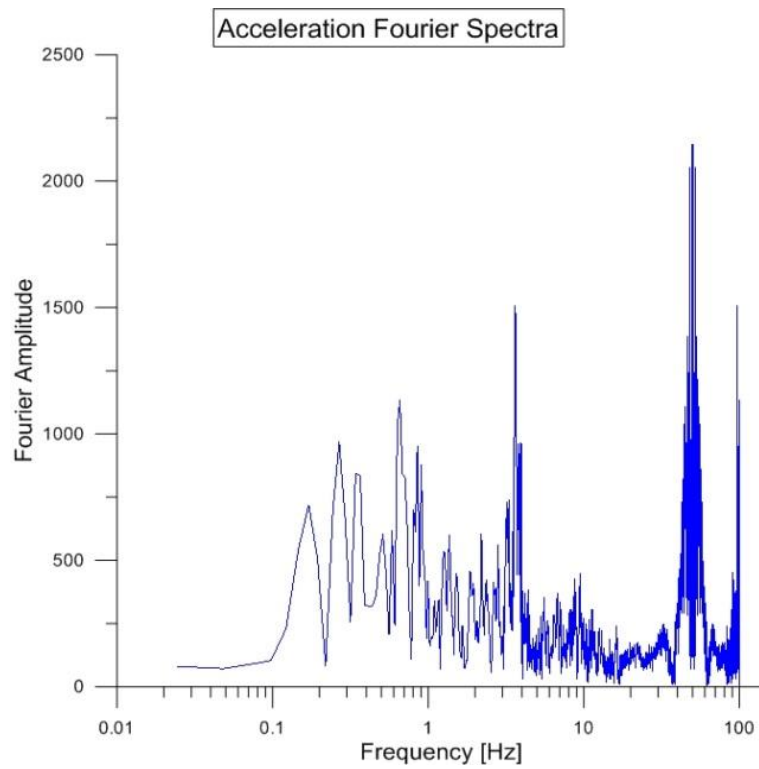
**Σχήμα 4.50:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-8 extensive damage state.

**Πίνακας 4.14:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-8 extensive damage state.

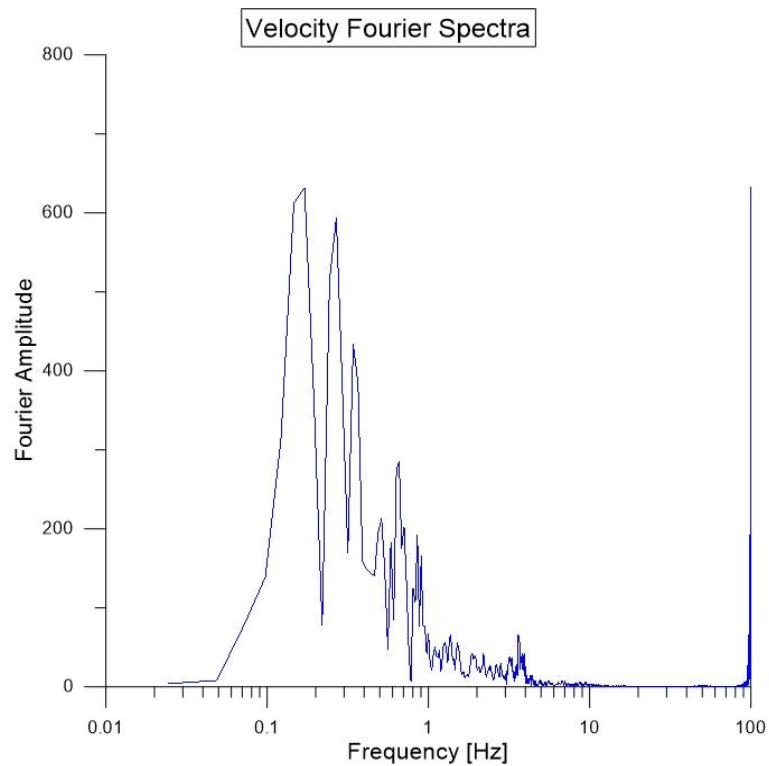
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
271.419	6.59	1.1	145	0.561
117.935	15.51	1.1	360	0.134
92.935	4.92	3.5	160	0.359
131.118	2.28	2.3	125	0.558
29.003	18	1.1	220	0.02
94.35	3.27	1.5	15	0.308

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 6.08 sec**

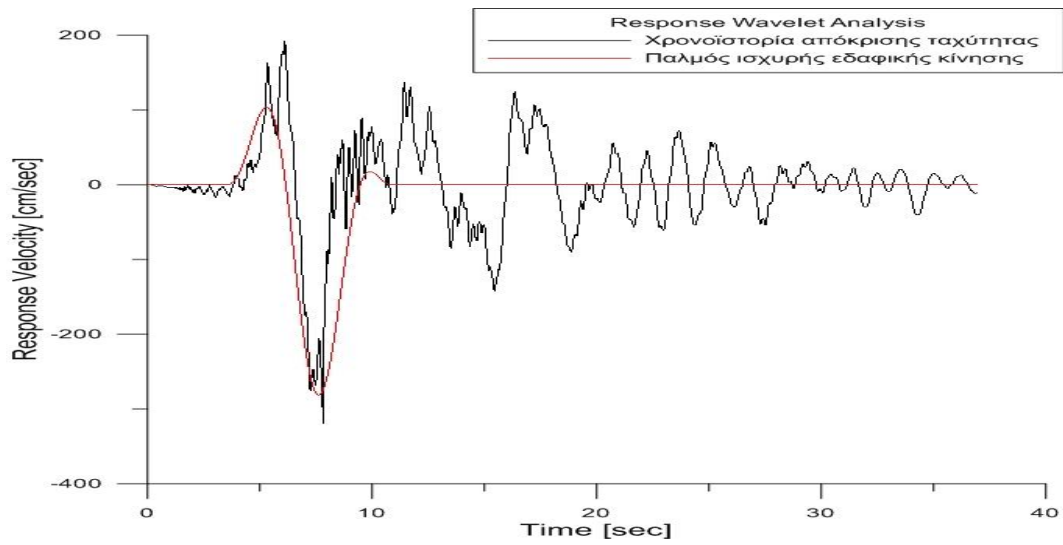
## DATA 1-8: PARTIAL COLLAPSE DAMAGE STATE



Σχήμα 4.51: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-8 partial collapse damage state.



Σχήμα 4.52: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-8 partial collapse damage state.



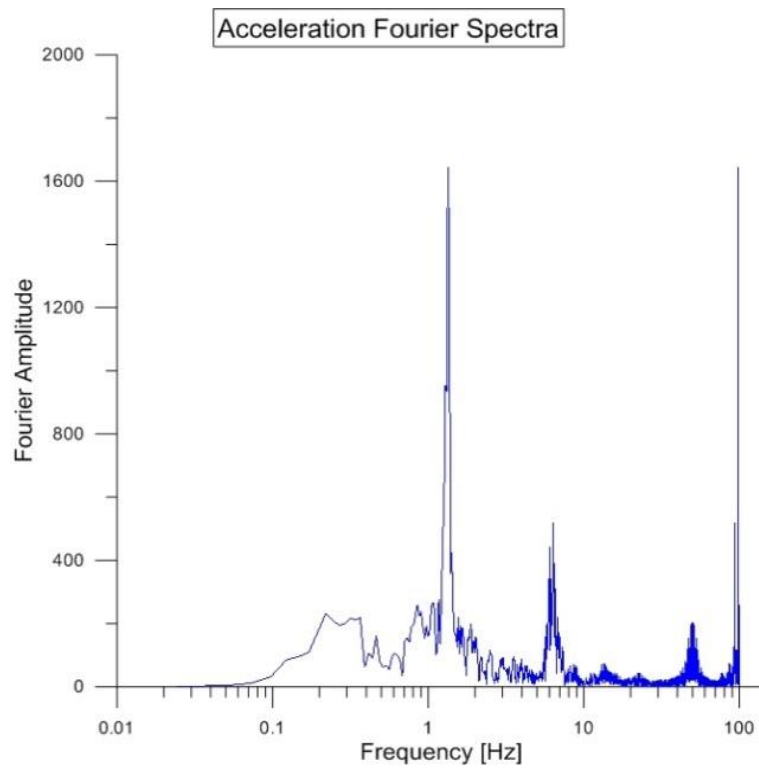
**Σχήμα 4.53:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-8 partial collapse damage state.

**Πίνακας 4.15:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-8 partial collapse damage state.

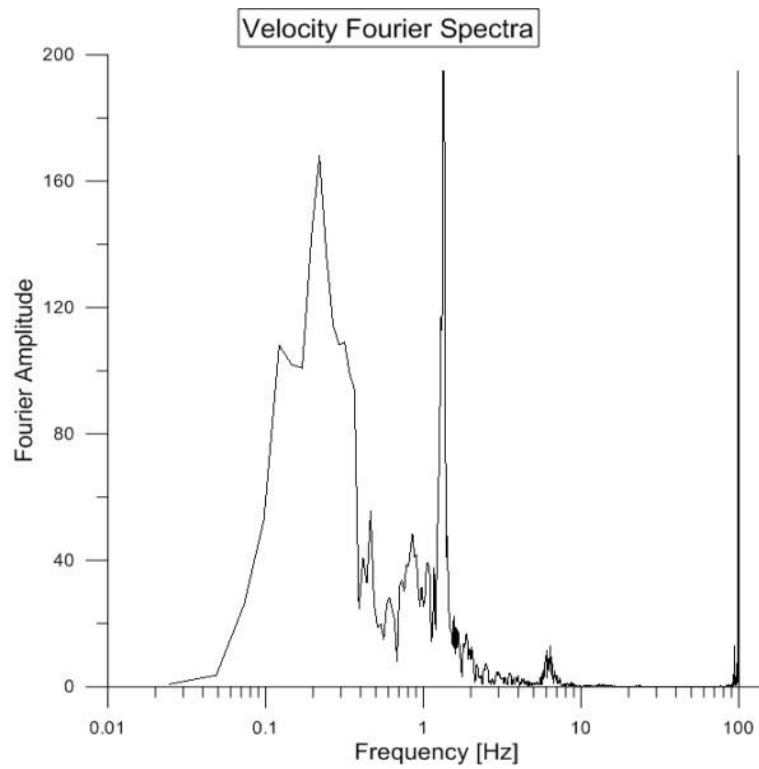
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
297.408	6.63	1.1	145	0.591
128.774	15.56	1.1	360	0.127
101.413	4.87	3.6	175	0.371
185.627	2.82	1.3	135	0.672
91.913	7.14	1.1	355	0.286
40.372	20	1.1	240	0.033

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 6.08 sec**

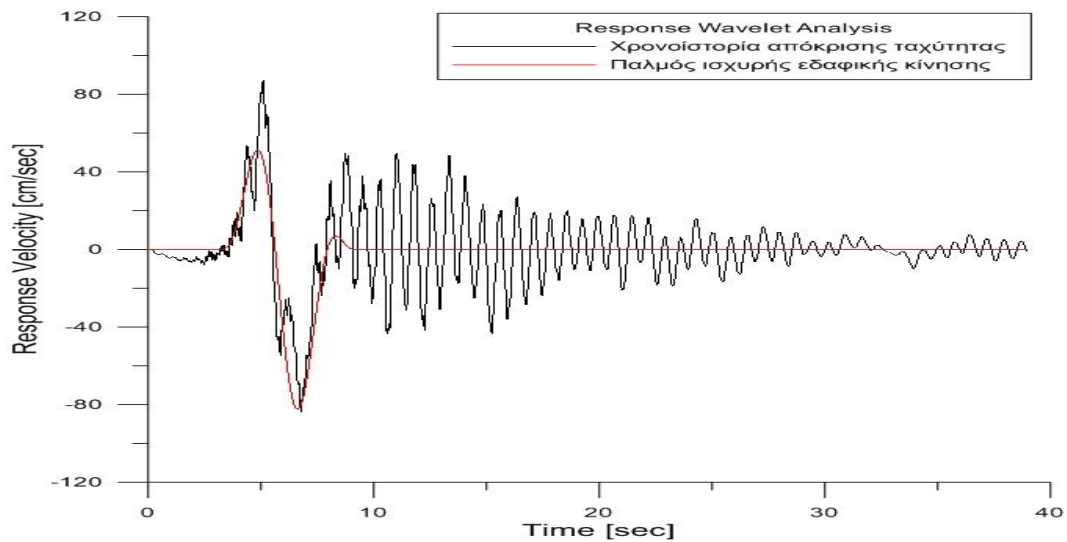
## DATA 1-11: SLIGHT DAMAGE STATE



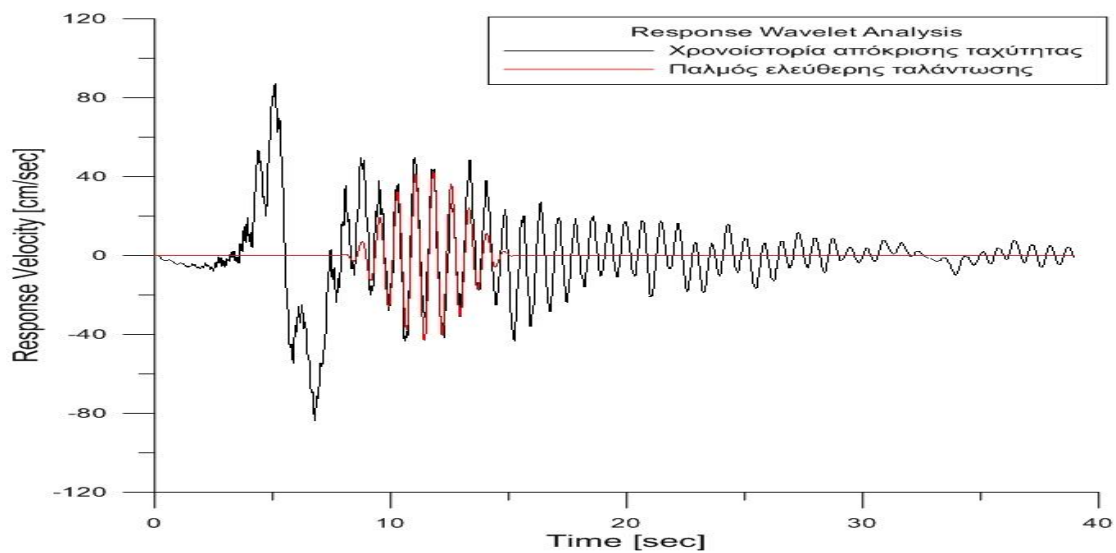
Σχήμα 4.54: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-11 slight damage state.



Σχήμα 4.55: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-11 slight damage state.



**Σχήμα 4.56:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-11 slight damage state.



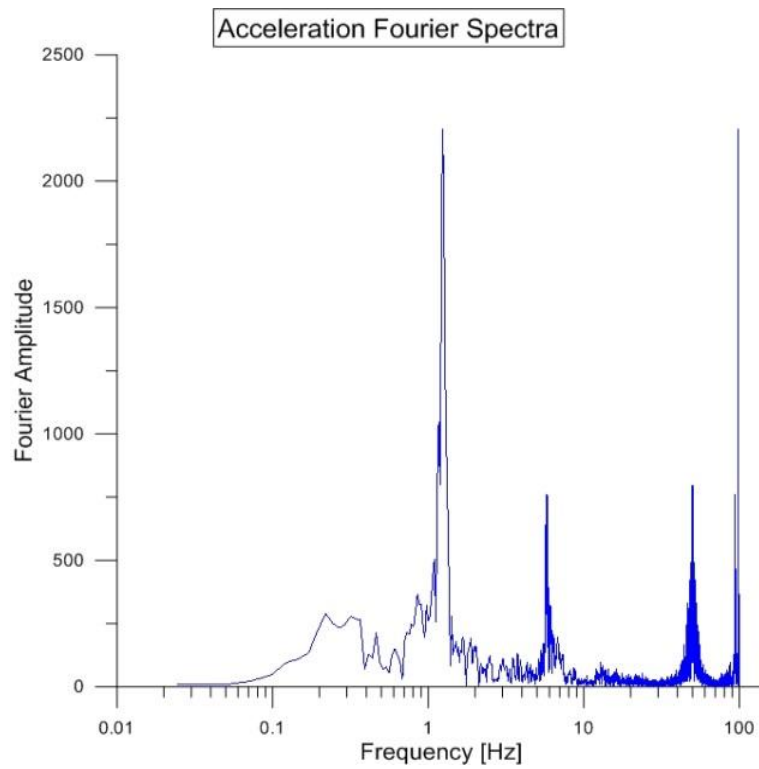
**Σχήμα 4.57:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πέμπτο κυματίδιο) για Data 1-11 slight damage state.

**Πίνακας 4.16:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-11 slight damage state.

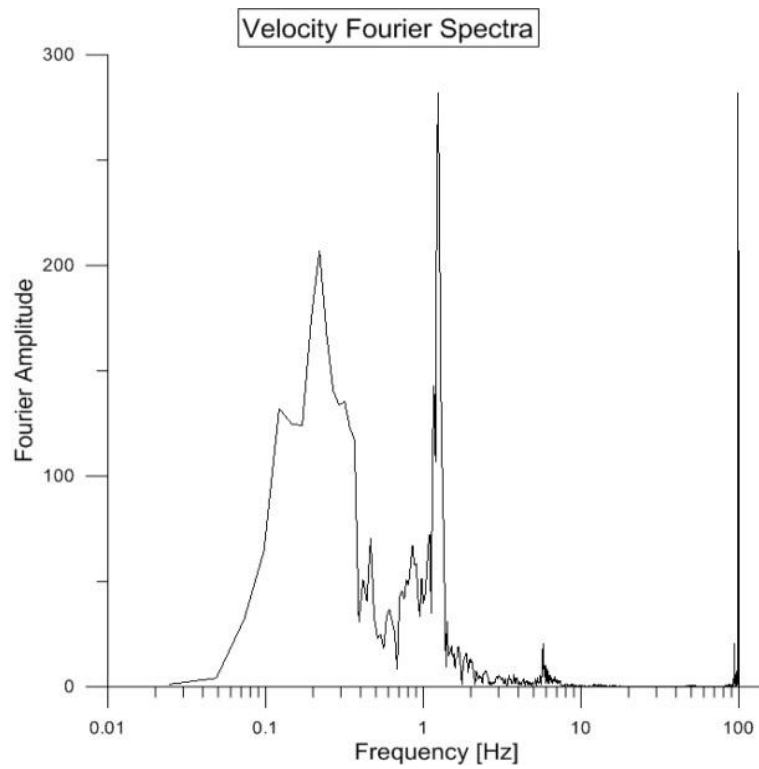
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
91.645	4.63	1.3	125	0.68
13.639	18.79	1.1	45	0.058
19.663	8.24	1.1	190	0.073
9.187	20	1.1	5	0.051
43.214	0.76	10	245	0.442
9.134	11.44	1.3	5	0.052

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 4.32 sec**

## DATA 1-11: LIGHT DAMAGE STATE

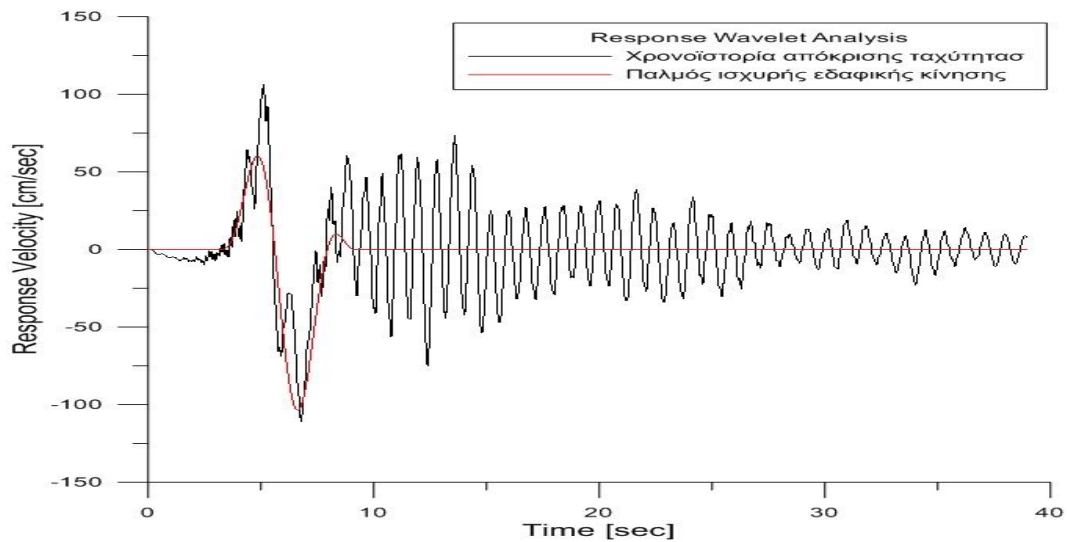


Σχήμα 4.58: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-11 light damage state.

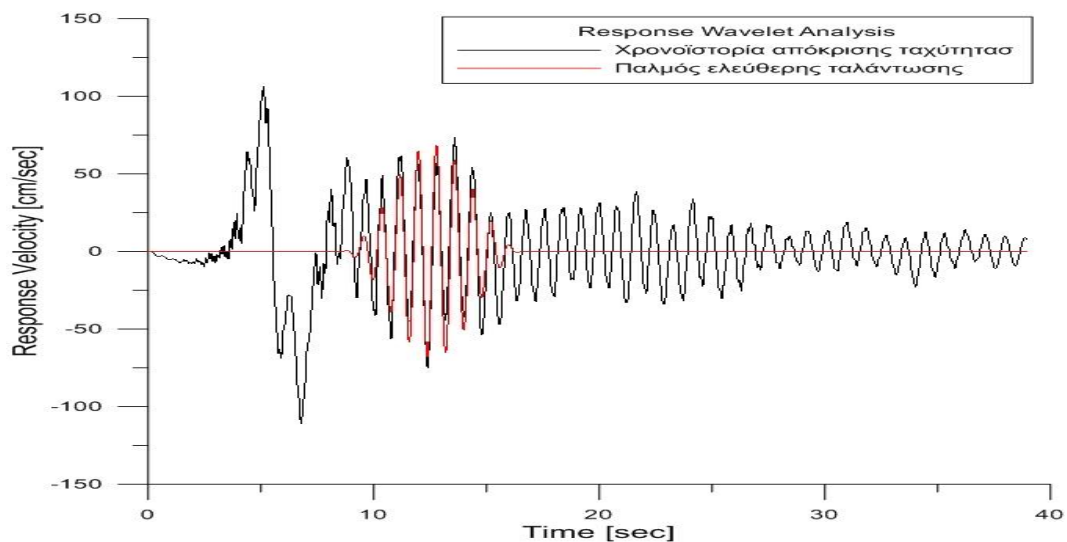


Σχήμα 4.59: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-11 light damage state.





**Σχήμα 4.60:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-11 light damage state



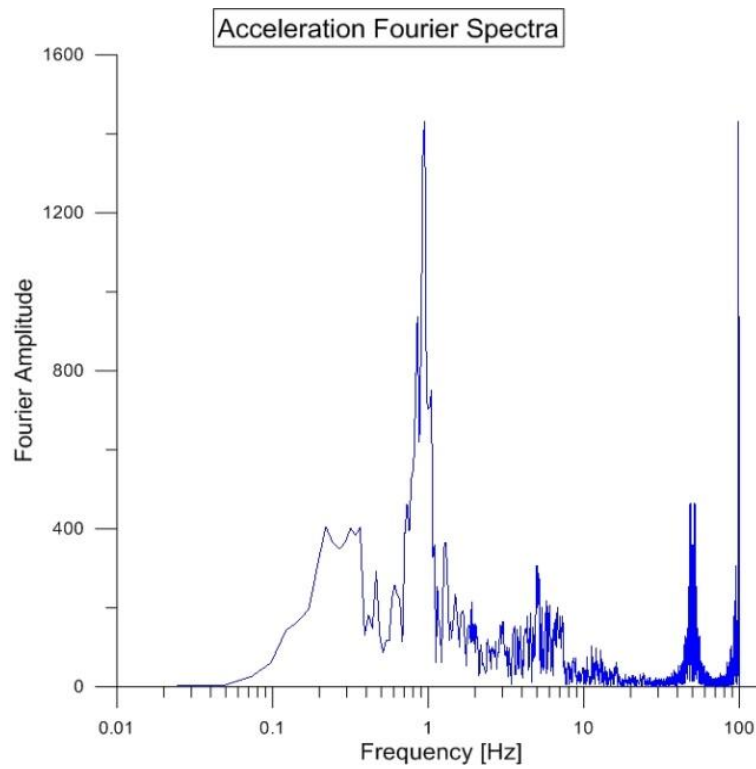
**Σχήμα 4.61:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (τρίτο κυματίδιο) για Data 1-11 light damage state.

**Πίνακας 4.17:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-11 light damage state.

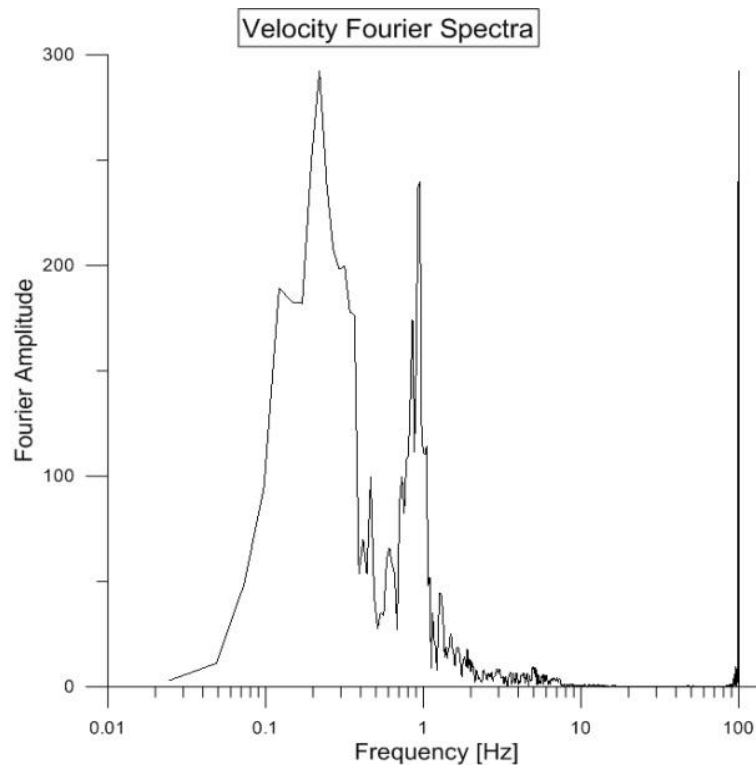
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
113.179	4.66	1.3	130	0.606
16.54	20	1.1	65	0.038
68.651	0.81	10	280	0.509
24.525	8.47	1.1	195	0.063
11.71	20	1.1	5	0.045
13.824	11.35	1.3	15	0.045

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 4.32 sec**

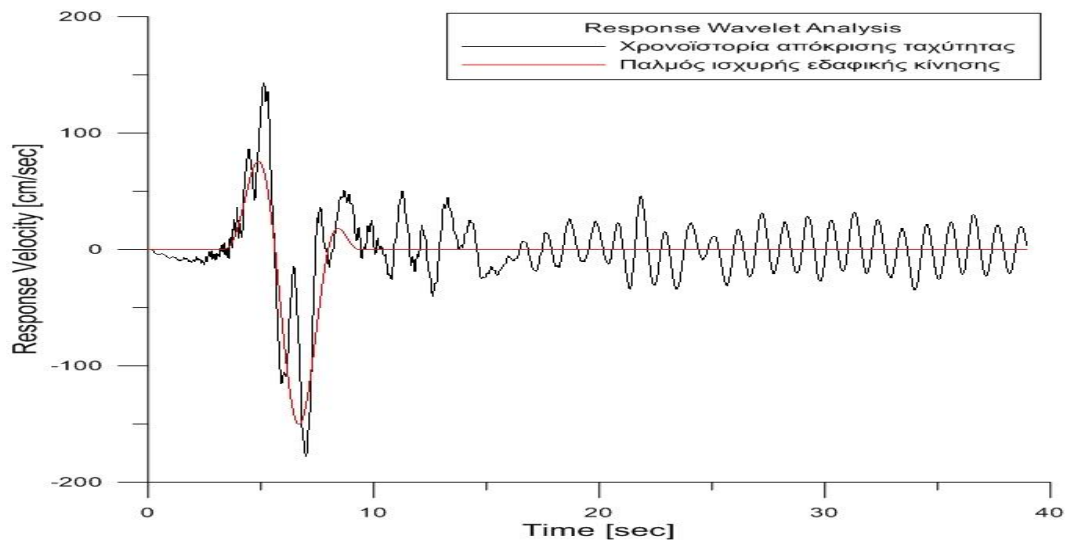
## DATA 1-11: MODERATE DAMAGE STATE



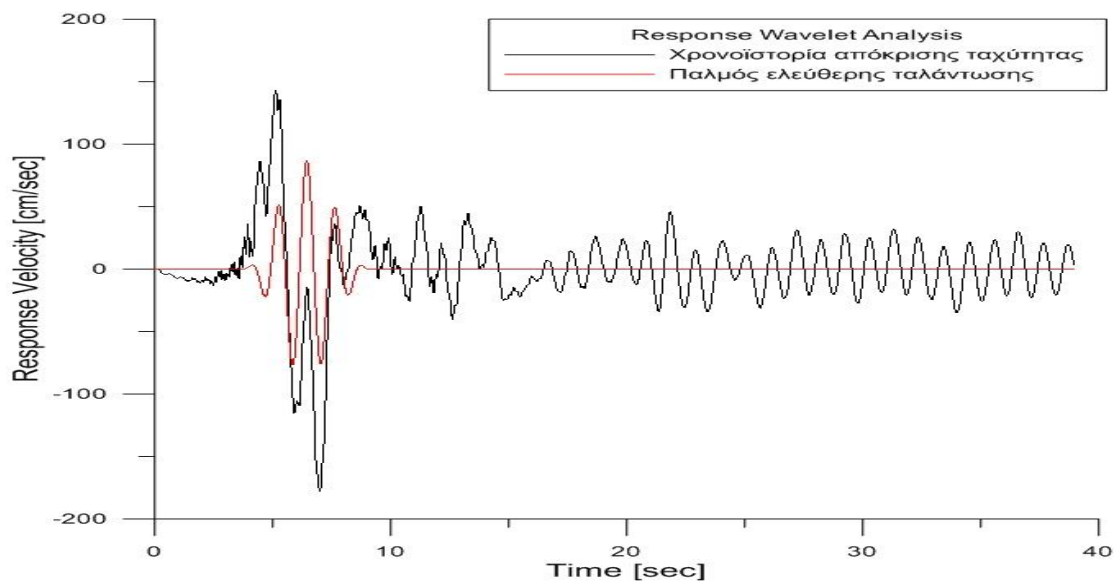
Σχήμα 4.62: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-11 moderate damage state.



Σχήμα 4.63: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-11 moderate damage state.



**Σχήμα 4.64:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-11 moderate damage state.



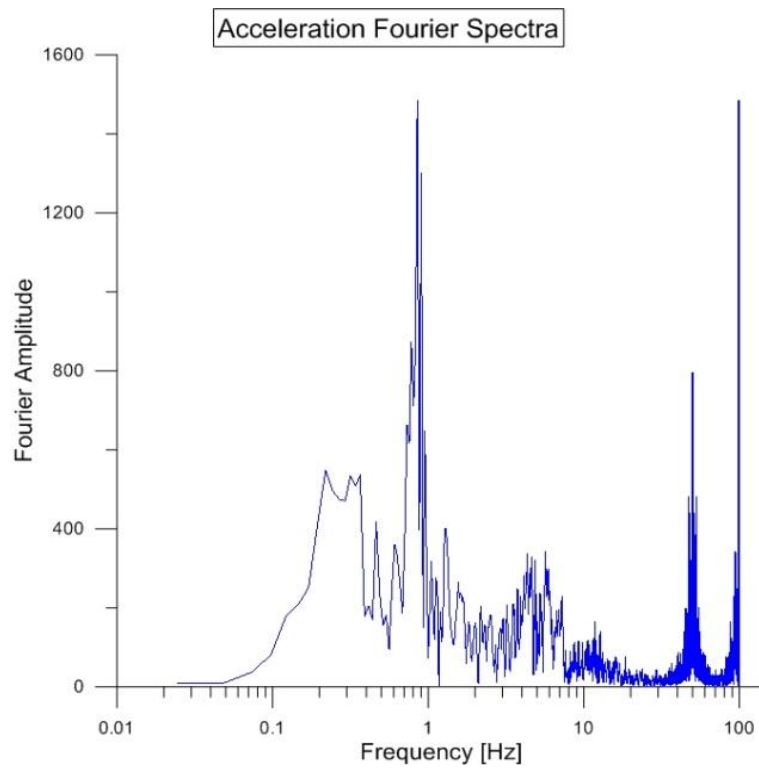
**Σχήμα 4.65:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (τρίτο κυματίδιο) για Data 1-11 moderate damage state.

**Πίνακας 4.18:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-11 moderate damage state.

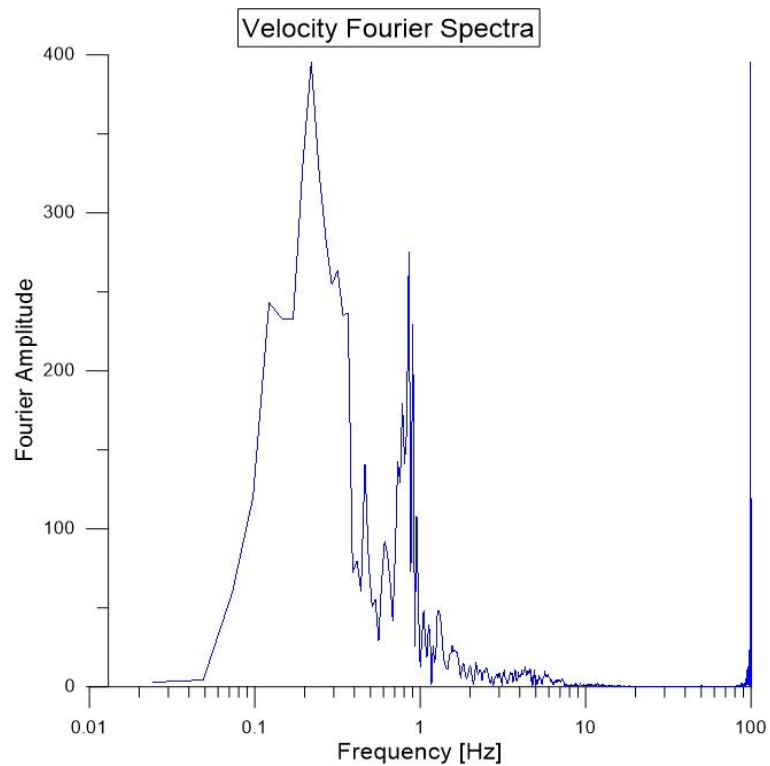
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
159.098	4.72	1.3	140	0.715
24.533	19.73	1.1	65	0.049
86.775	1.22	4.4	355	0.435
19.819	8.72	2.2	160	0.096
11.413	20	1.1	355	0.057
18.252	11.2	1.3	0	0.054

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 4.32 sec**

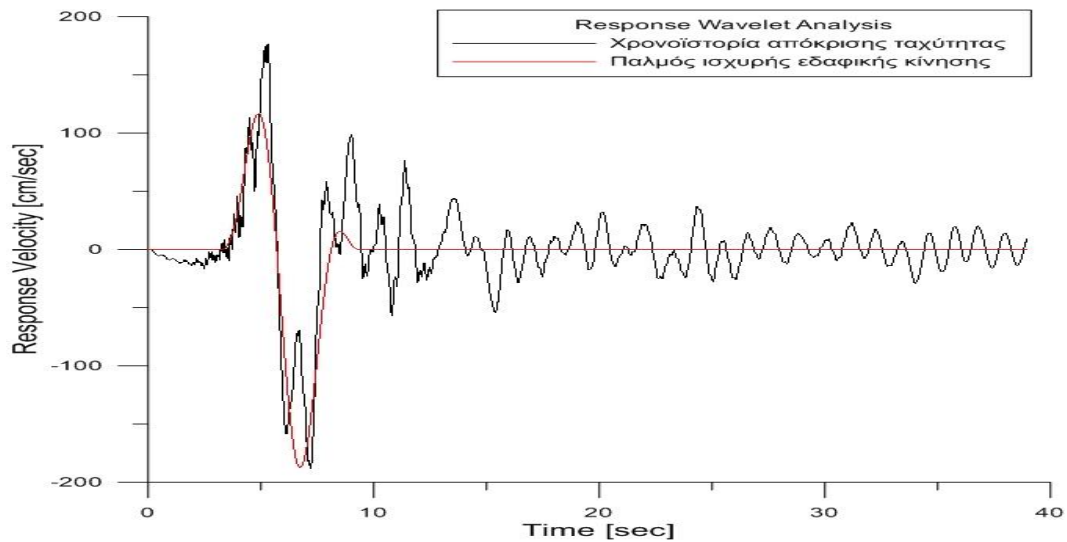
## DATA 1-11: EXTENSIVE DAMAGE STATE



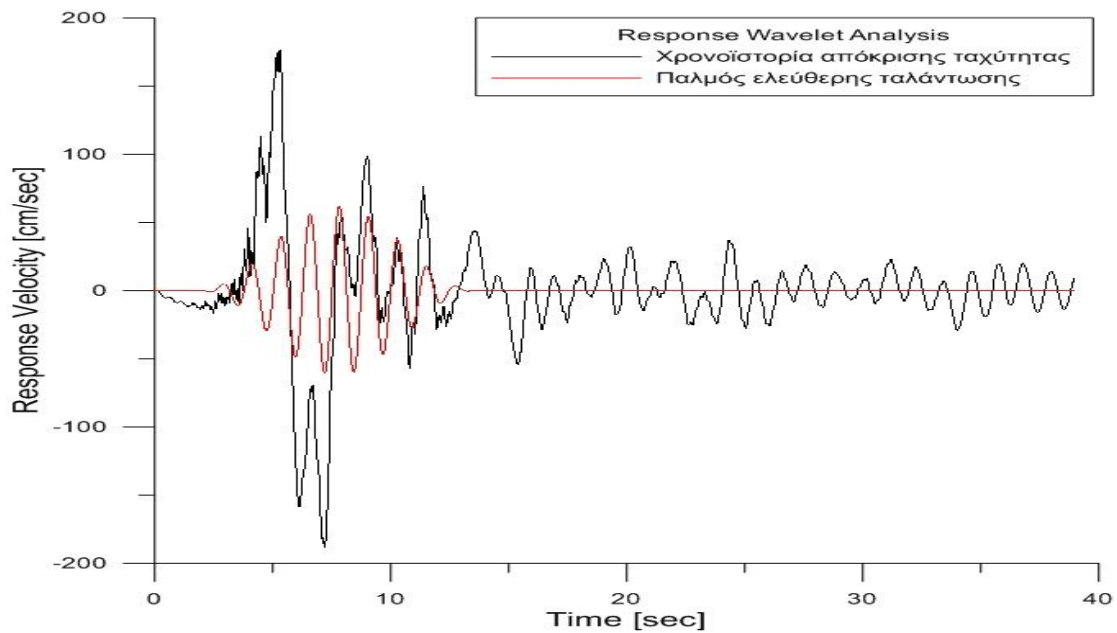
Σχήμα 4.66: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-11 extensive damage state.



Σχήμα 4.67: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-11 extensive damage state.



**Σχήμα 4.68:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-11 extensive damage state.



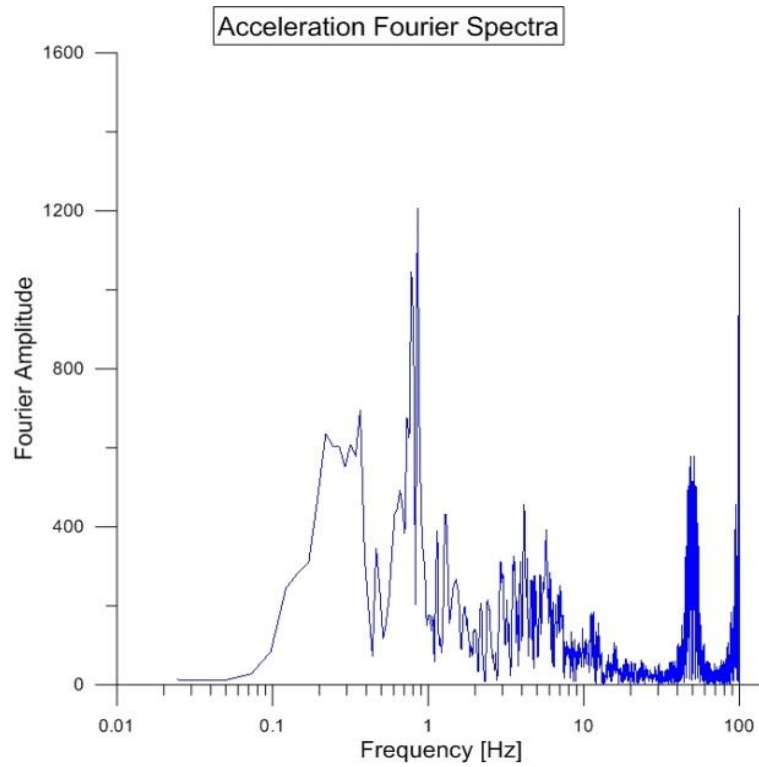
**Σχήμα 4.69:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (τρίτο κυματίδιο) για Data 1-11 extensive damage state.

**Πίνακας 4.19:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-11 extensive damage state.

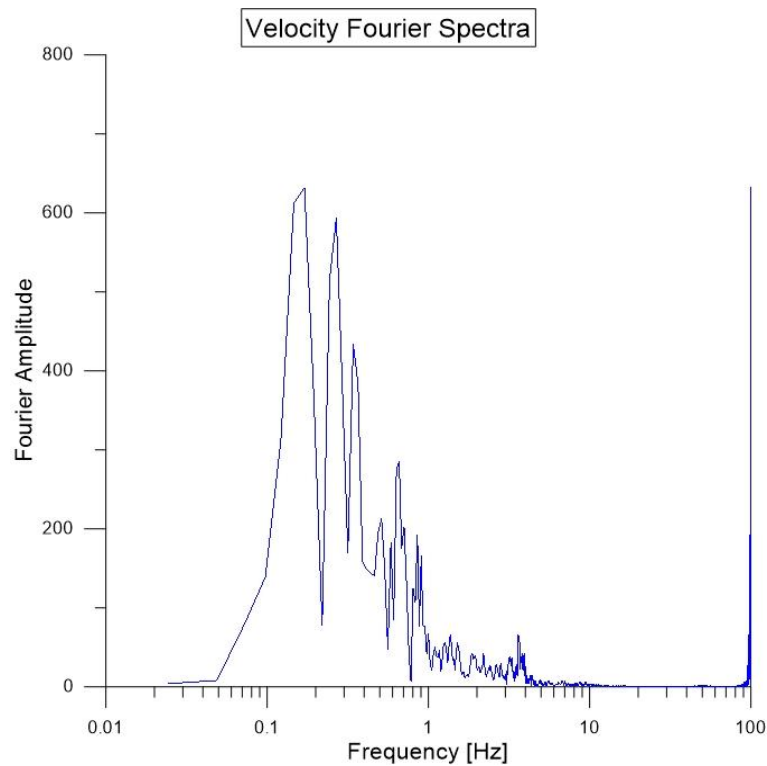
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
208.419	4.83	1.3	125	0.79
31.732	18.89	1.1	50	0.058
61.841	1.24	9.5	340	0.395
37.539	8.24	1.2	220	0.082
17.966	20	1.1	10	0.051
21.928	11.28	1.3	5	0.055

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 4.32 sec**

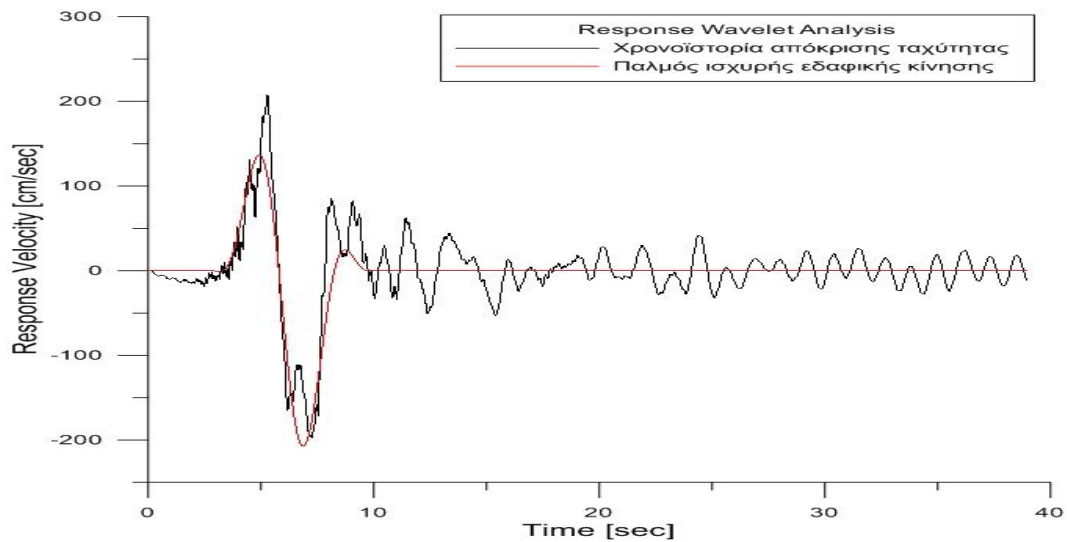
### DATA 1-11: PARTIAL COLLAPSE DAMAGE STATE



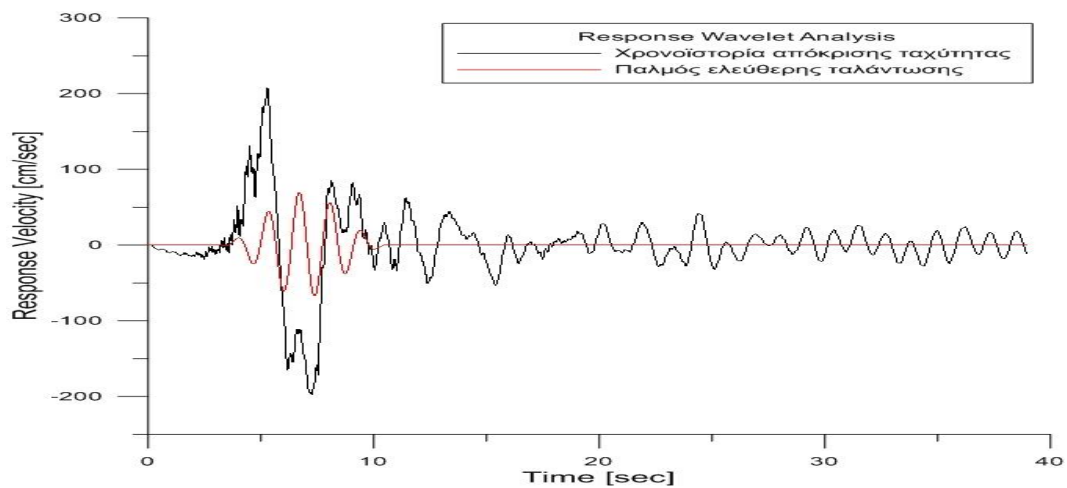
Σχήμα 4.70: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-11 partial collapse damage state.



Σχήμα 4.71: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-11 partial collapse damage state.



**Σχήμα 4.72:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-11 partial collapse damage state.



**Σχήμα 4.73:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πέμπτο κυματίδιο) για Data 1-11 partial collapse damage state.

**Πίνακας 4.20:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-11 partial collapse damage state.

AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
228.206	4.93	1.4	125	0.843
33.385	18.41	1.1	40	0.06
42.967	8.15	1.1	195	0.077
21.499	20	1.1	360	0.05
69.884	1.38	5.6	60	0.299
26.482	10.81	1.1	330	0.06

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 4.32 sec**

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε χώρες με έντονη σεισμική επικινδυνότητα, όπως η Ελλάδα, η δυνατότητα ελέγχου της δομικής ακεραιότητας των υφιστάμενων κατασκευών και η έγκαιρη προειδοποίηση από τυχόν βλάβες αποτελεί αντικείμενο έρευνας με μεγάλη σημασία. Η εκτίμηση της δομικής ασφάλειας των κατασκευών μετά από έντονα σεισμικά γεγονότα διεξαγόταν μέσω επιθεωρήσεων από μηχανικούς. Οι επιθεωρήσεις αυτές αφορούσαν την ανίχνευση, το γεωμετρικό εντοπισμό και χαρακτηρισμό της βλάβης για την κατάλληλη επισκευή ή ενίσχυση της κατασκευής. Παρόλα αυτά ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα για την εκτίμηση του επιπέδου των βλαβών είναι η δυσκολία άμεσης και γρήγορης αυτοψίας των πληγέντων κατασκευών. Επιπροσθέτως, μέχρι τώρα, οι τρόποι διάγνωσης των βλαβών σε δομικά υλικά και κατασκευές ήταν οπτικοί ή τοπικά πειραματικοί, όπως μέθοδοι υπερηχητικής εκπομπής, υπέρυθροι θερμογράφοι, οι μέθοδοι μικροκυμάτων μαγνητικών πεδίων κλπ. Όμως, οι παραπάνω τεχνικές προαπαιτούν τη γνώση κάποιων παραμέτρων της κατασκευής και μπορούν να διαγνώσουν τοπικές βλάβες, μόνο επάνω ή κοντά στην επιφάνεια που τοποθετούνται, η οποία ακόμα πρέπει να είναι και εύκολα προσβάσιμη.

Δεδομένου ότι οι κατασκευές γίνονται μεγαλύτερες αλλά και πιο σύνθετες, οι τεχνικές αυτές γίνονται ανέφικτες και νέοι και αποδοτικότεροι μέθοδοι ελέγχου πρέπει να αναπτυχθούν. Στα πλαίσια αυτού, τα τελευταία χρόνια υιοθετείται η λογική της ενόργανης παρακολούθησης των κατασκευών με σκοπό τη μέτρηση των επιταχύνσεων, ταχυτήτων ή μετατοπίσεων της κατασκευής σε πραγματικό ή κοντά σε πραγματικό χρόνο. Τέτοιες διαδικασίες ελέγχου της δομικής ακεραιότητας στοχεύουν στη δυναμική και συνεχή παρακολούθηση των κατασκευών, στην εύρεση αστοχιών στο χρόνο, στην εξάλειψη τυχόν αβεβαιοτήτων, στην άμεση ενεργοποίηση των διαδικασιών αποκατάστασης, στην άμεση ειδοποίηση των εμπλεκόμενων φορέων και τέλος την επαλήθευση του σχεδιασμού.

Η διαδικασία ελέγχου ενόργανης παρακολούθησης που παρουσιάζεται στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία βασίζεται στη λογική της χρήσης καταγραφών από επιταχυνσιόμετρα στην κορυφή και στη βάση του κτιρίου. Τα επιταχυνσιόμετρα στη βάση του κτιρίου μας δίνουν πληροφορίες που αφορούν τη σεισμική διέγερση και την

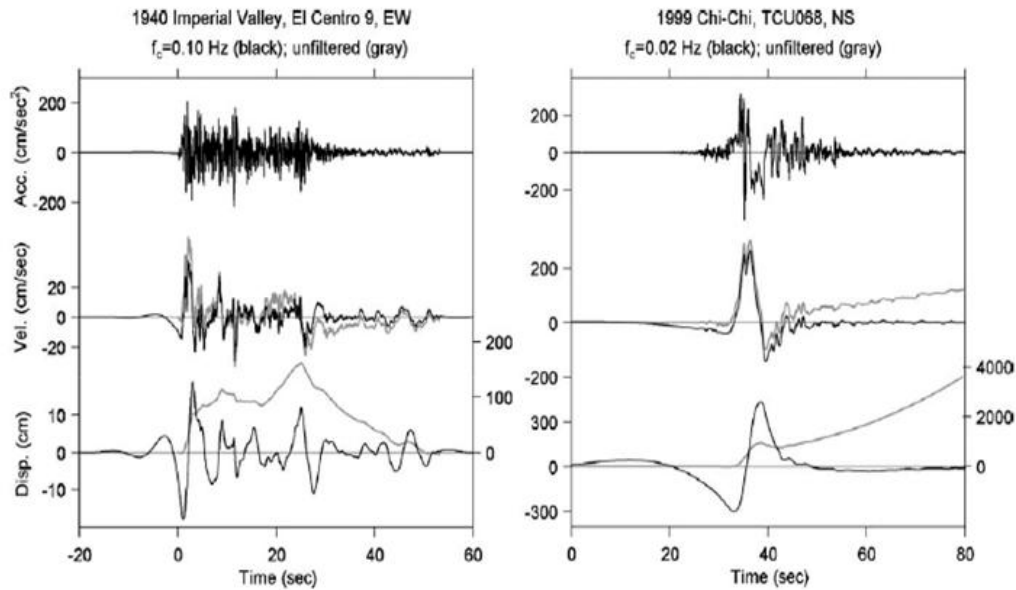


περίοδο του παλμού και αυτά της οροφής τις χρονοϊστορίες απόκρισης επιταχύνσεων της κατασκευής.

Μέχρι στιγμής, ο σεισμικός έλεγχος των κατασκευών επικεντρωνόταν στη χρήση των επιταχυνσιογραφημάτων και των φασμάτων επιταχύνσεων Fourier ώστε να εκτιμηθεί η μεταβολή της ιδιοπεριόδου της κατασκευής. Διαπιστώνεται ότι με την αύξηση της ιδιοπεριόδου, η κατασκευή πλαστικοποιείται, γίνεται πιο εύκαμπτη γεγονός που σημαίνει ότι έχει υποστεί μεγαλύτερες βλάβες. Όμως, το φάσμα επιταχύνσεων έχει πυκνή μορφή και είναι αρκετά υψίσυχνο με αποτέλεσμα τη δυσκολία εξαγωγής συμπερασμάτων. Παραδείγματος χάρη, η κορυφή του φάσματος επιταχύνσεων μπορεί να οφείλεται όχι στο σεισμικό γεγονός αλλά σε διάφορους περιβαλλοντικούς θορύβους, κραδασμούς κλπ. Ακόμα στις καταγραφές επιταχύνσεων λόγω του υψίσυχνου περιεχομένου ο παλμός κατευθυντικότητας δεν μπορεί να είναι ευδιάκριτος. Το πρόβλημα αυτό μεγεθύνεται στις περιπτώσεις εδαφικών κινήσεων μικρών περιόδων όπου εξετάζοντας το φάσμα επιταχύνσεων Fourier, η περίοδος του παλμού μπορεί να συμπίπτει με την περίοδο της ελεύθερης ταλάντωσης.

Τις δυσκολίες αυτές επιβεβαιώνουν και οι Misko Cubrinovski et al. [2013], κατά το σεισμό στην πόλη Christchurch της Νέας Ζηλανδίας. Το σεισμικό αυτό γεγονός χαρακτηριζόταν από παλμό κατευθυντικότητας μεγάλης περιόδου, το οποίο συνέβαλε στο φαινόμενο της ρευστοποίησης. Επισήμαναν ακόμη, ότι μεταξύ τεσσάρων καταγραφικών σταθμών, στις περιπτώσεις σεισμών με παλμό μεγάλης περιόδου εντοπίζεται μικρή διακύμανση μεταξύ των τιμών, το σήμα είναι πιο σταθμισμένο, πράγμα που δικαιολογείται αφού τέτοια σεισμικά γεγονότα σχετίζονται με το μηχανισμό γένεσης και την ποιότητα εδάφους της ευρύτερης περιοχής. Ενώ στους σεισμούς με παλμό μικρής περιόδου εμφανίζονται αποκλίσεις μεταξύ των καταγραφικών τιμών των σταθμών και το σήμα είναι πιο αστάθμητο.

Παράλληλα, ένας ακόμη τρόπος εκτίμησης των βλαβών ήταν η σύγκριση των σχετικών μετακινήσεων των ορόφων με όρια τα όποια έχουν τεθεί από αναλυτικά μοντέλα (στάθμες επιτελεστικότητας). Οι μετακινήσεις προκύπτουν από τη διπλή ολοκλήρωση των φασματικών επιταχύνσεων. Όμως, η διαδικασία αυτή εγκυμονεί κινδύνους. Γενικά, μια καταγραφή περιέχει σφάλματα, όπου στην διπλή ολοκλήρωση είναι αβέβαιο αν κατά την εξάλειψη των σφαλμάτων εξάγουμε και ένα μέρος της καταγραφής.



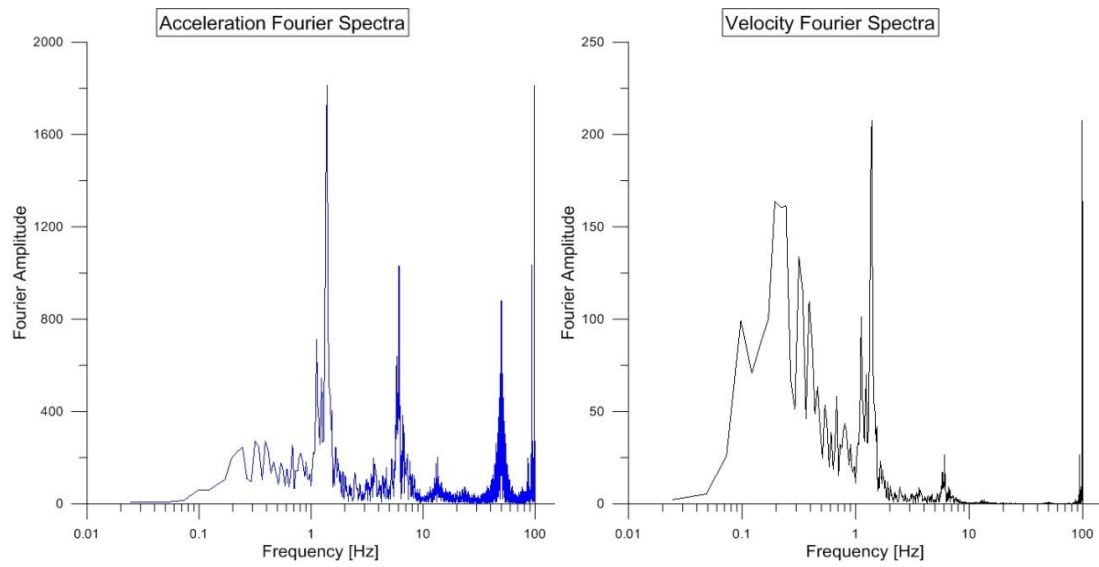
**Σχήμα 5.1** Καταγραφές με σφάλματα (γκρι χρώμα) και χωρίς σφάλματα (μαύρο χρώμα).

Για να ξεπεραστούν, λοιπόν, οι παραπάνω δυσκολίες χρησιμοποιείται η πρώτη ολοκλήρωση της επιτάχυνσης, δηλαδή οι χρονοϊστορίες ταχύτητας, όπου ο παλμός είναι πιο ευδιάκριτος και εξάγονται πιο ευκρινή αποτελέσματα. Ταυτόχρονα, στα φάσματα Fourier ταχύτητας διακρίνονται ξεκάθαρα οι κορυφές του παλμού διέγερσης και της ελεύθερης ταλάντωσης του κτιρίου.

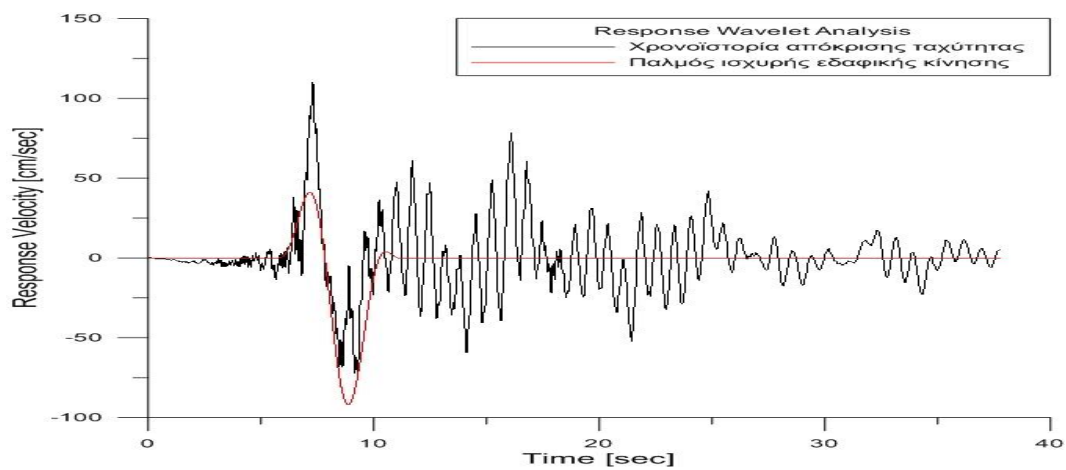
Ωστόσο, κρίνεται αναγκαίος ο συνδυασμός των πληροφοριών, που λαμβάνονται από τα φάσματα Fourier ταχυτήτων, με τη μεθοδολογία που προτάθηκε από τους Mimoglou et al. [2014]. Σύμφωνα με αυτήν πραγματοποιείται κυματική ανάλυση αξιοποιώντας το φάσμα συνέλιξης για τον προσδιορισμό της περιόδου των κυματιδίων και των παραμέτρων του μέσω των μαθηματικών σχέσεων των Mavroudis and Papageorgiou [2003]. Παράγονται έξι κυματίδια και για την προσομοίωση του παλμού και της ελεύθερης ταλάντωσης επιλέγονται αυτά με τον μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης. Ακόμη, τα κυματίδια αυτά απεικονίζονται στη χρονοϊστορία απόκρισης της ταχύτητας και μας δίνουν μια σαφή εικόνα της χρονικής στιγμής που εμφανίζεται η ισχυρή εδαφική κίνηση και η ελεύθερη ταλάντωση.

Παρουσιάζονται λοιπόν τα αποτελέσματα των φασμάτων Fourier επιταχύνσεων, ταχυτήτων και της χρονοϊστορίας απόκρισης της ταχύτητας με την απεικόνιση των παλμών της ισχυρής εδαφικής κίνησης και της ελεύθερης ταλάντωσης. Δίνονται για καταγραφές σεισμών κοντινού πεδίου μεγάλων περιόδων και για τις πέντε στάθμες επιτελεστικότητας.

## DATA 1-5: SLIGHT DAMAGE STATE

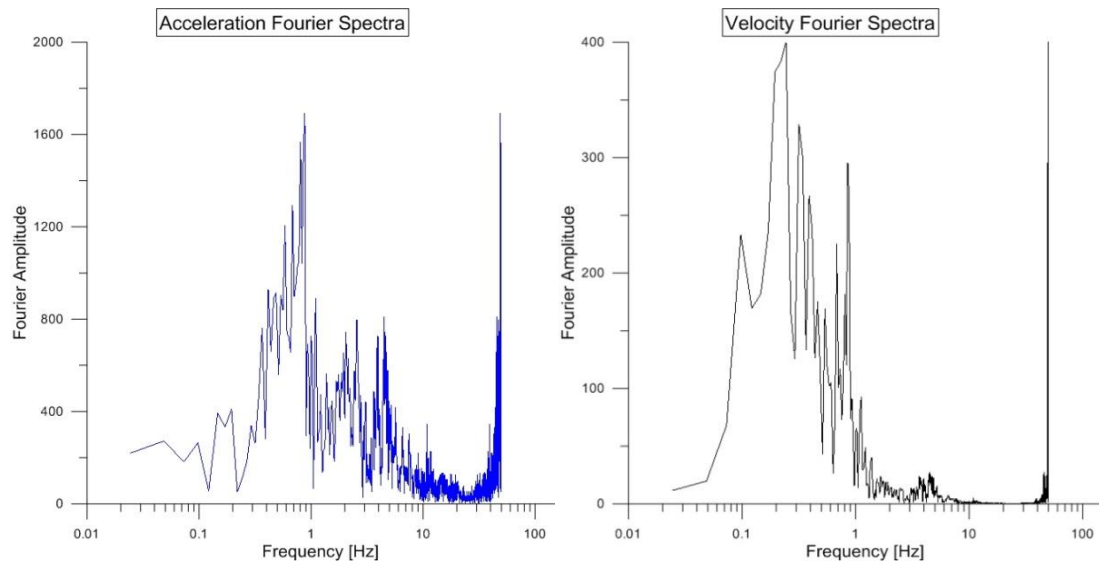


**Σχήμα 5.2:** Φάσματα Fourier επιτάχυνσης και ταχύτητας για Data 1-5 slight damage state.

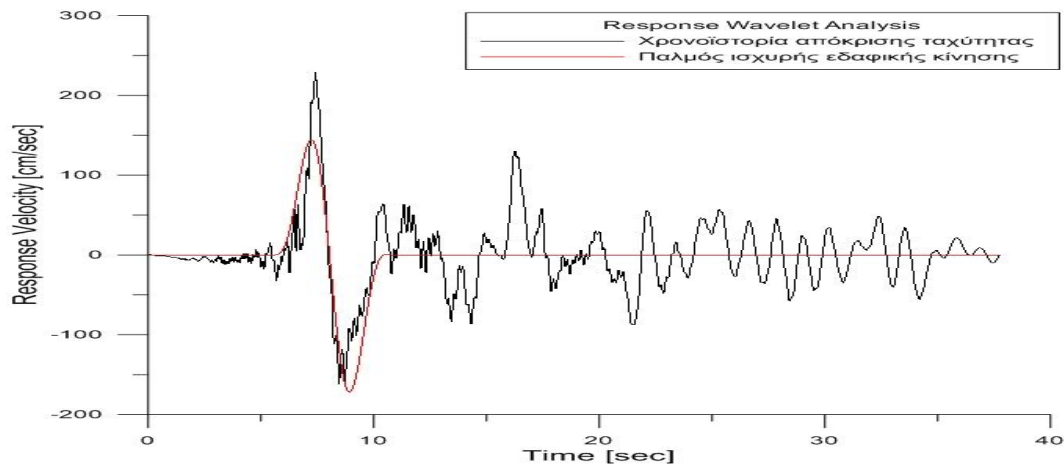


**Σχήμα 5.3:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης για Data 1-5 slight damage state.

## DATA 1-5: EXTENSIVE DAMAGE STATE

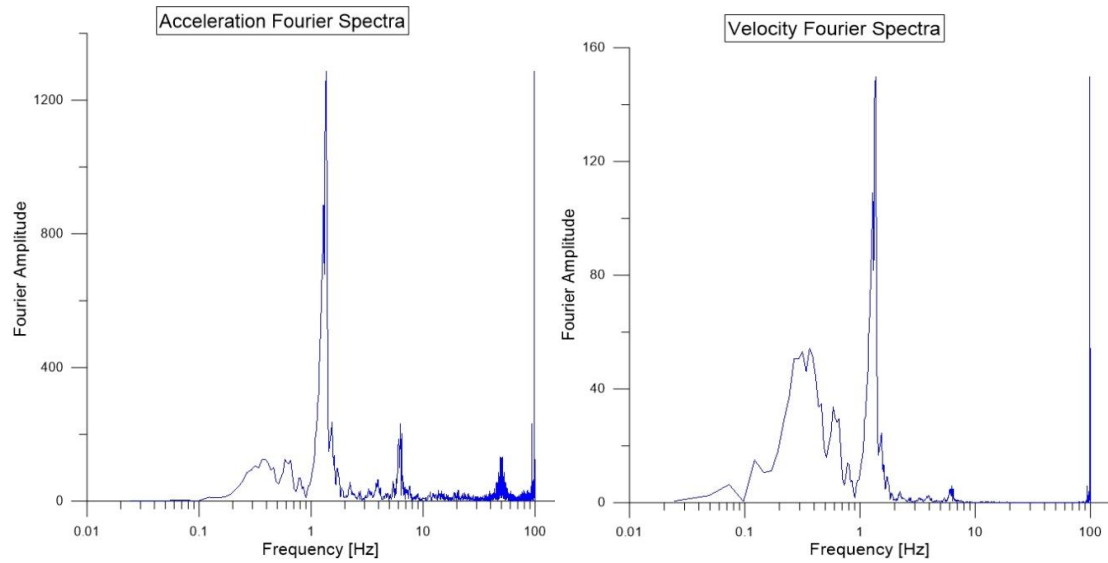


Σχήμα 5.4: Φάσματα Fourier επιτάχυνσης και ταχύτητας για Data 1-5 extensive damage state.

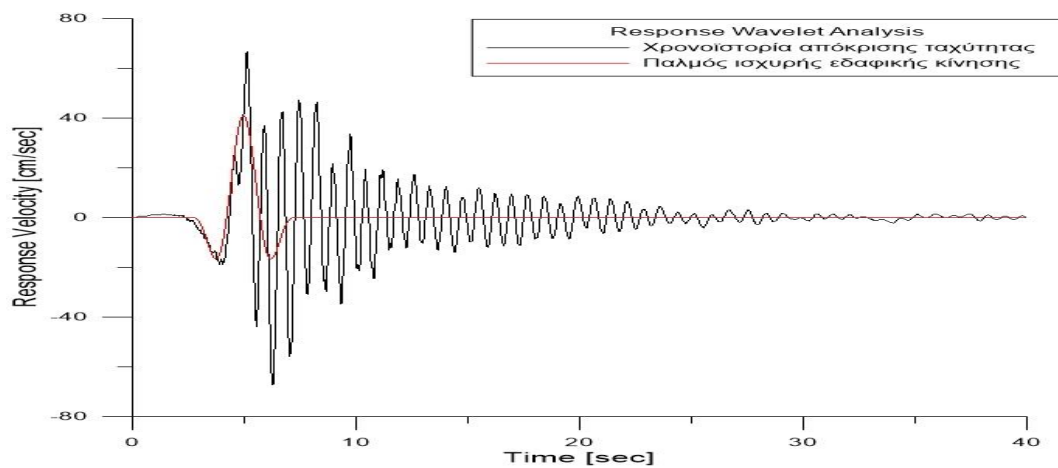


Σχήμα 5.5: Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης για Data 1-5 extensive damage state.

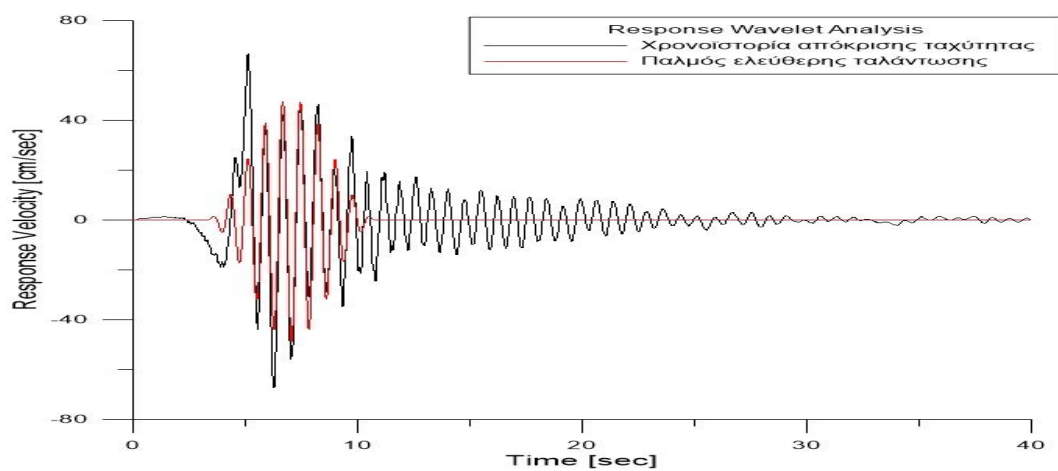
## DATA 1-7: SLIGHT DAMAGE STATE



**Σχήμα 5.6:** Φάσματα Fourier επιτάχυνσης και ταχύτητας για Data 1-7 slight damage state .

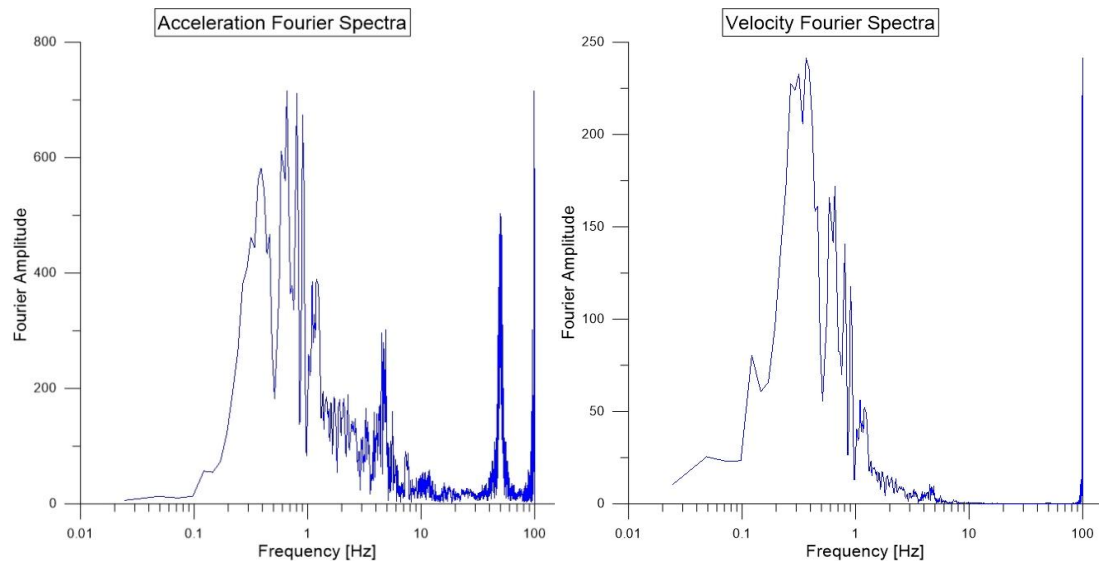


**Σχήμα 5.7:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης για Data 1-7 slight damage state.

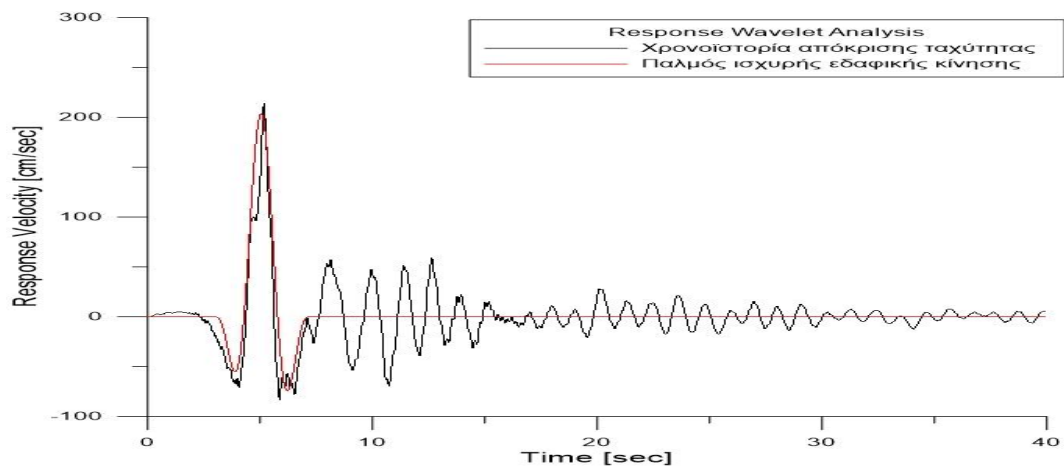


**Σχήμα 5.8:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης για Data 1-7 slight damage state.

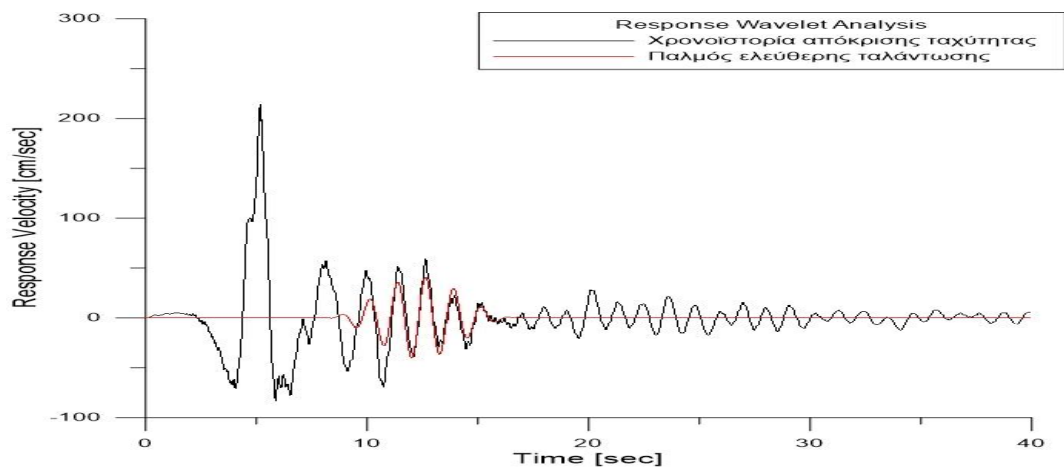
## DATA 1-7: EXTENSIVE DAMAGE STATE



Σχήμα 5.9: Φάσματα Fourier επιτάχυνσης και ταχύτητας για Data 1-7 extensive damage state.

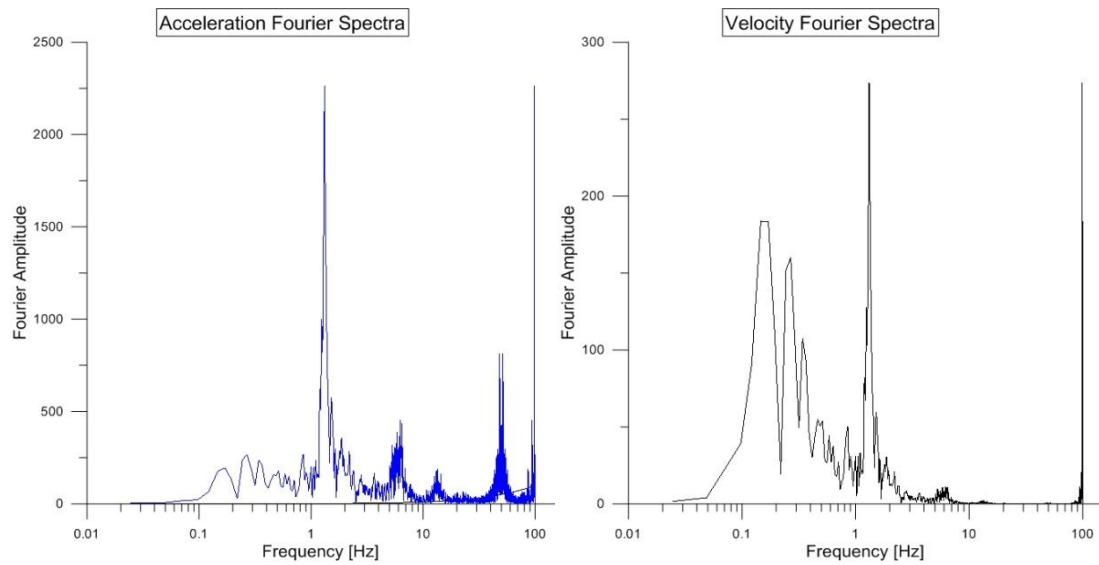


Σχήμα 5.10: Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης για Data 1-7 extensive damage state.

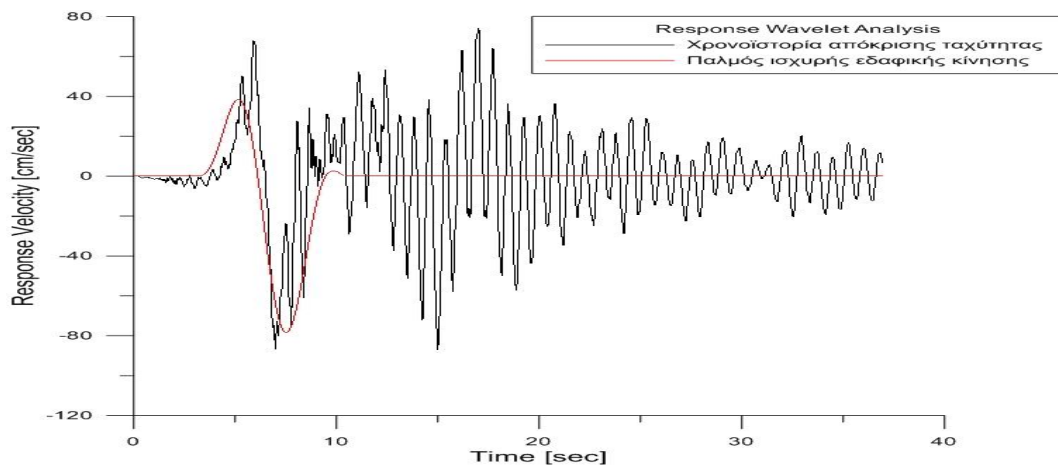


Σχήμα 5.11: Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης για Data 1-7 extensive damage state.

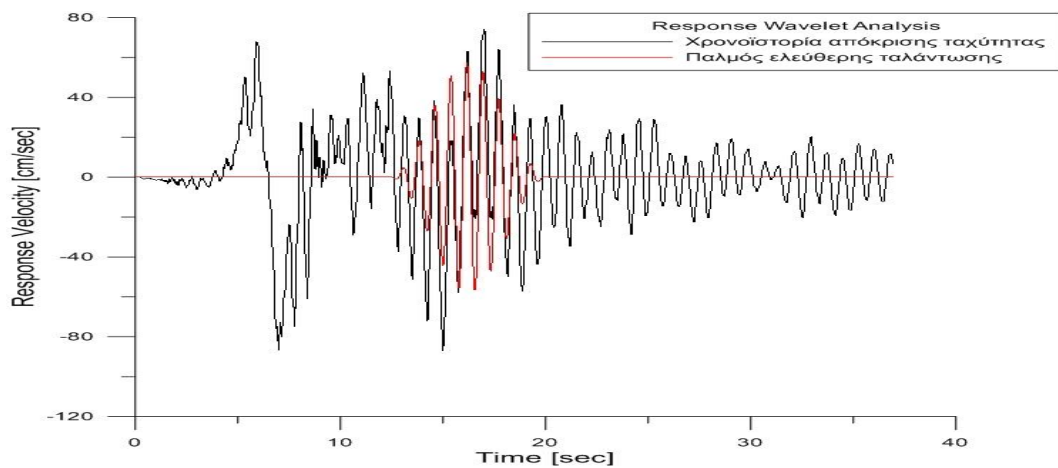
## DATA 1-8: SLIGHT DAMAGE STATE



**Σχήμα 5.12:** Φάσματα Fourier επιτάχυνσης και ταχύτητας για Data 1-8 slight damage state.

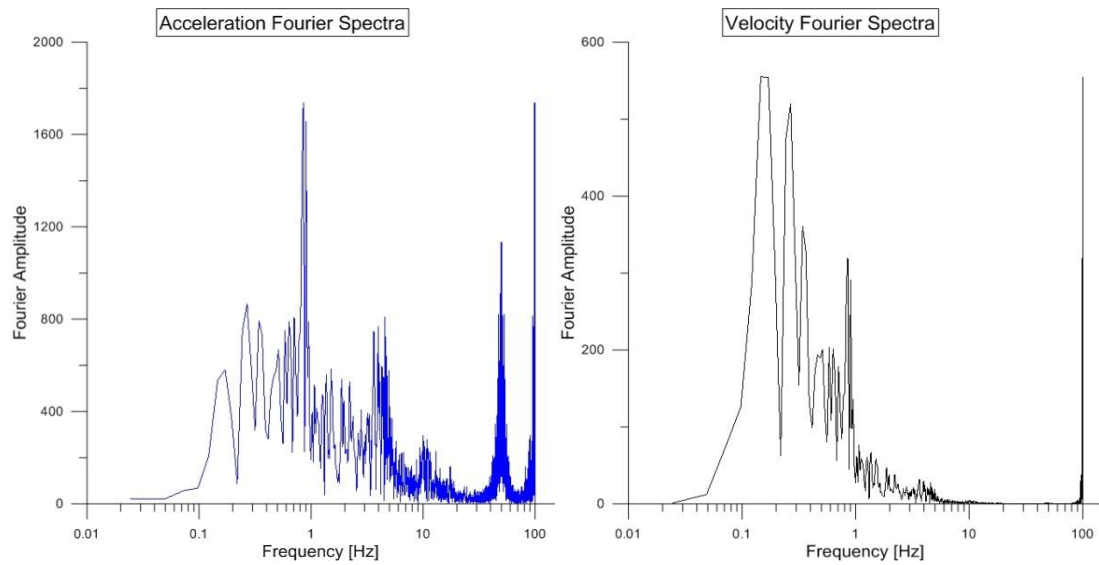


**Σχήμα 5.13:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης για Data 1-8 slight damage state.

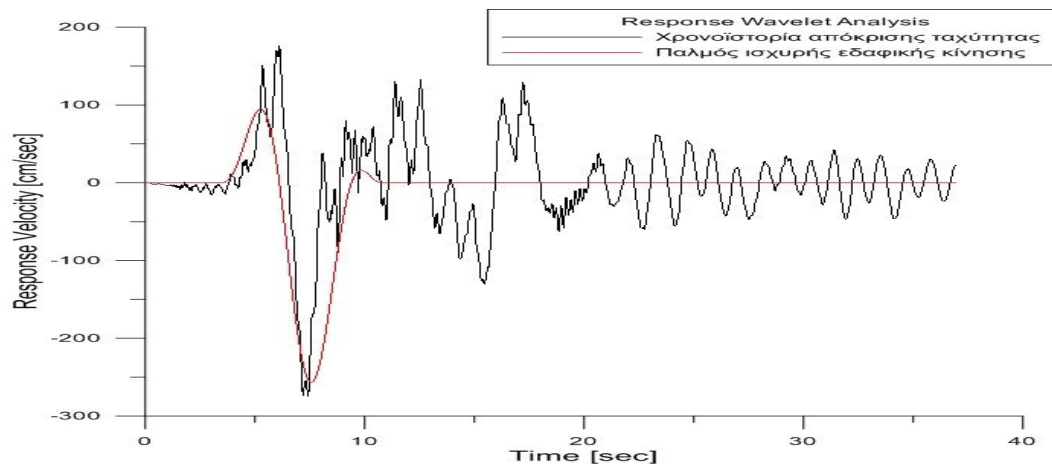


**Σχήμα 5.14:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης για Data 1-8 slight damage state.

## DATA 1-8: EXTENSIVE DAMAGE STATE



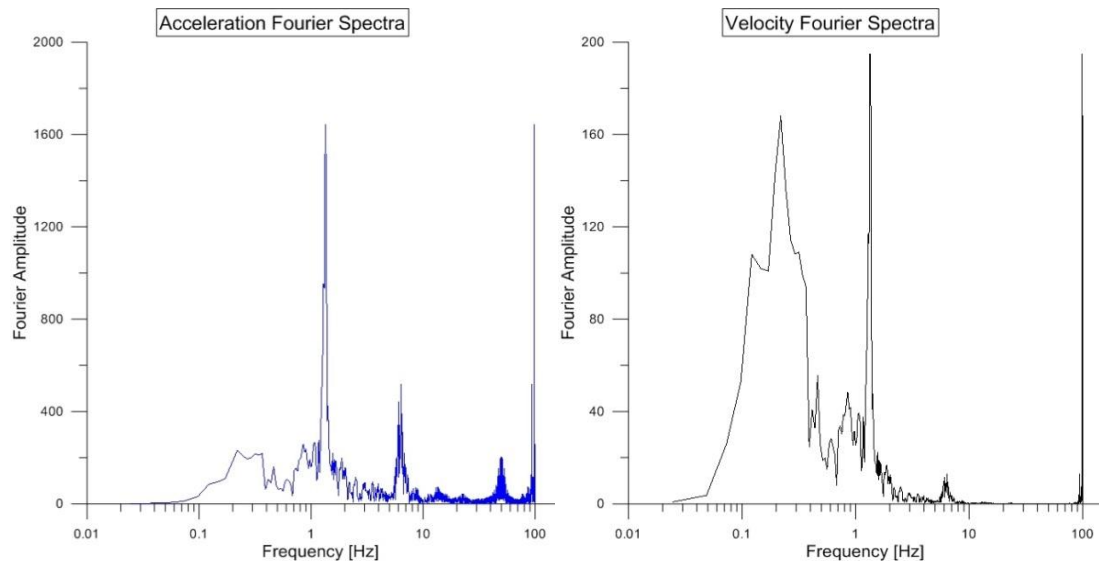
Σχήμα 5.15: Φάσματα Fourier επιτάχυνσης και ταχύτητας για Data 1-8 extensive damage state.



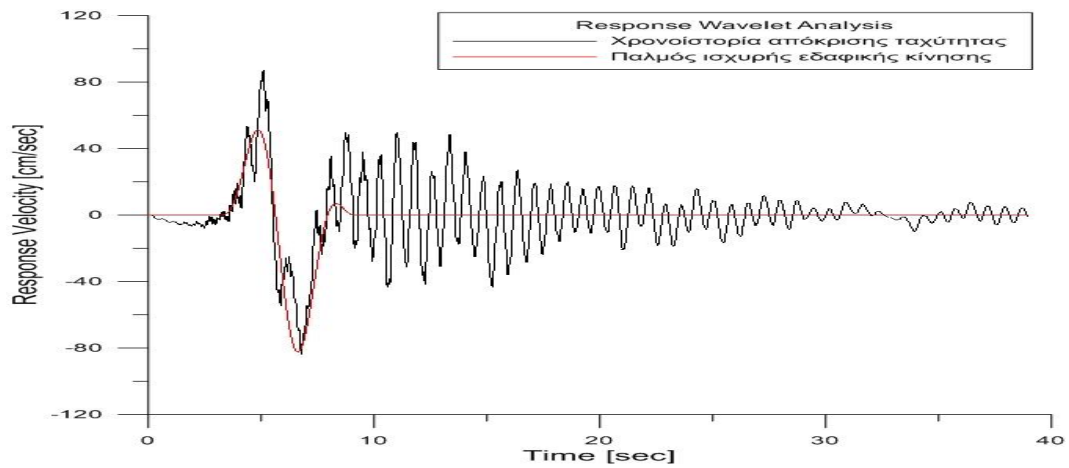
Σχήμα 5.16: Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης για Data 1-8 extensive damage state.



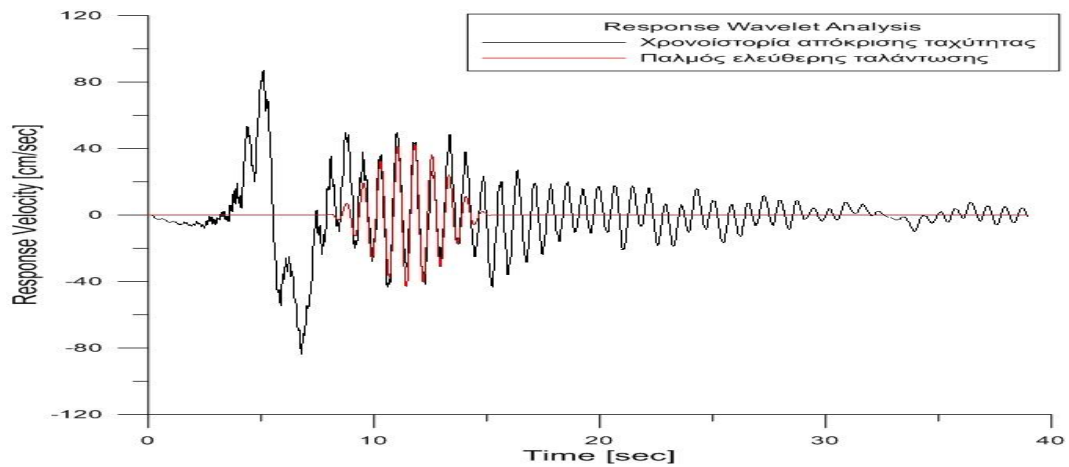
## DATA 1-11: SLIGHT DAMAGE STATE



Σχήμα 5.17: Φάσματα Fourier επιτάχυνσης και ταχύτητας για Data 1-11 slight damage state.

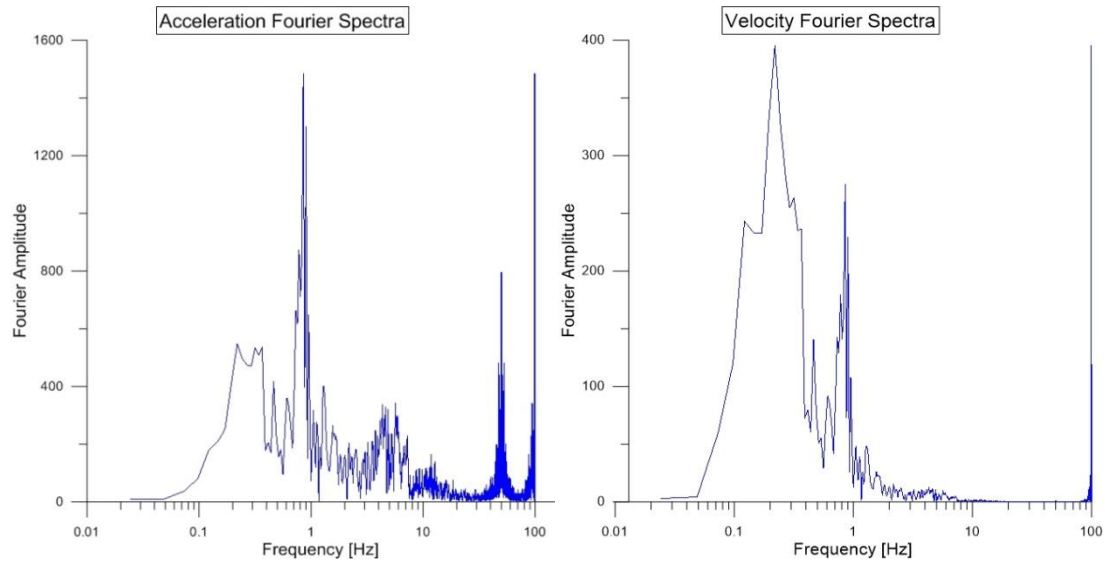


Σχήμα 5.18: Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης για Data 1-11 slight damage state.

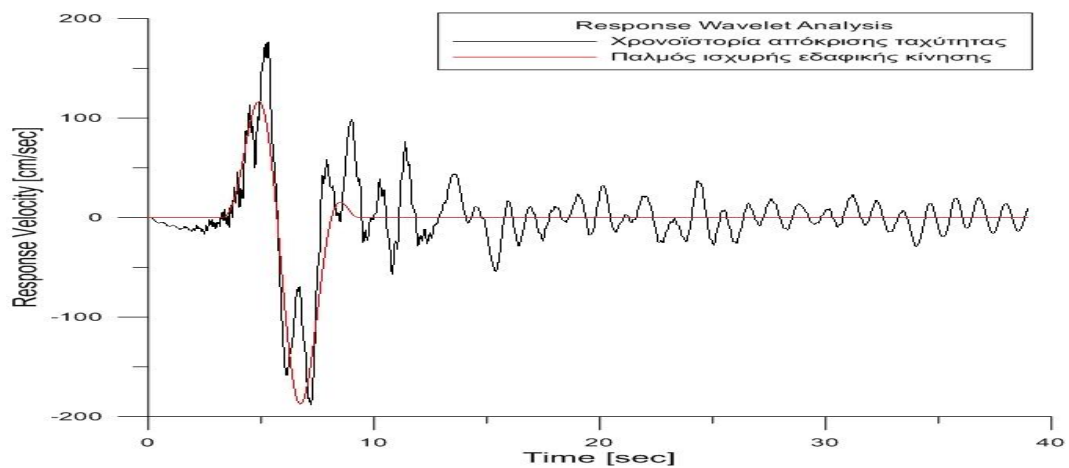


Σχήμα 5.19: Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης για Data 1-11 slight damage state.

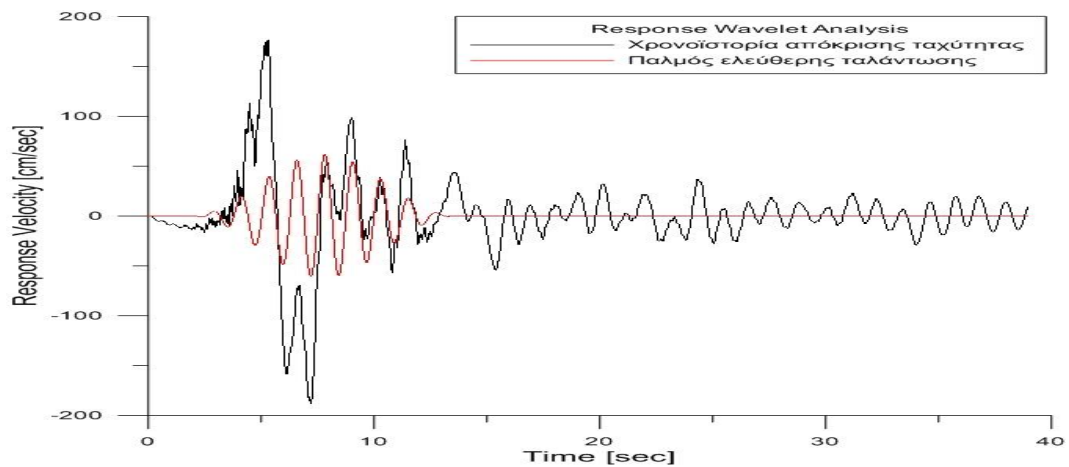
### DATA 1-11: EXTENSIVE DAMAGE STATE



Σχήμα 5.20: Φάσματα Fourier επιτάχυνσης και ταχύτητας για Data 1-11 extensive damage state.



Σχήμα 5.21: Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης για Data 1-11 extensive damage state.



Σχήμα 5.22: Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης για Data 1-11 extensive damage state.

**Πίνακας 5.1:** Συγκεντρωτικός πίνακας μεταβολής της περιόδου ελεύθερης ταλάντωσης και του συντελεστή συσχέτισης του παλμού για slight και extensive damage state.

Καταγραφές	Damage states	Περίοδος παλμού διεγέρσης [sec]	Περίοδος ελεύθερης ταλάντωσης [sec]	Συντελεστής συσχέτισης παλμού
<b>Data 1-5</b>	Slight	4.78	0.719	0.511
	Extensive		1.170	0.669
<b>Data 1-7</b>	Slight	3.01	0.82	0.344
	Extensive		1.27	0.8
<b>Data 1-8</b>	Slight	6.08	0.78	0.432
	Extensive		1.170	0.561
<b>Data 1-11</b>	Slight	4.32	0.76	0.68
	Extensive		1.24	0.79

Από τα παραπάνω καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

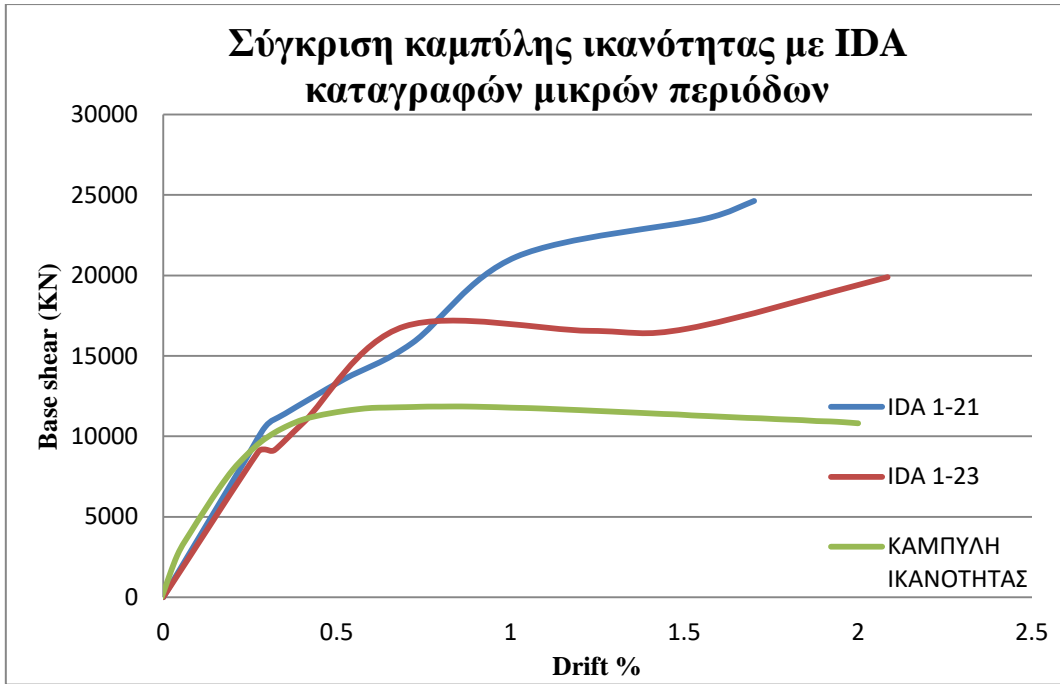
- Αρχικά, τα φάσματα Fourier της ταχύτητας δίνουν πιο ευκρινή αποτελέσματα, καθώς διαχωρίζονται οι κορυφές του παλμού και της ελεύθερης ταλάντωσης, σε σύγκριση με τα φάσματα Fourier της επιτάχυνσης, που όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι υψίσυχνες καταγραφές.
- Για μεγαλύτερες στάθμες επιτελεστικότητας παρατηρούμε ότι η τιμή της περιόδου της κατασκευής αυξάνεται και κοιτάζοντας τα φάσματα Fourier ταχυτήτων, η κορυφή της ελεύθερης ταλάντωσης μετακινείται προς τα αριστερά. Όπως είναι προφανές, η αύξηση αυτή ισοδυναμεί με πλαστικοποίηση της κατασκευής, μείωση της δυσκαμψίας της και δημιουργία σημαντικών και μεγάλων βλαβών.
- Διαπιστώνουμε, επίσης, ότι όσο προχωράμε σε μεγαλύτερες στάθμες επιτελεστικότητας τόσο αυξάνεται η τιμή του εύρους Fourier για τον παλμό. Στις μεγαλύτερες στάθμες επιτελεστικότητας, η κορυφή που αντιστοιχεί στο παλμό ενδεχομένως ξεπερνά αυτή της ελευθέρωσης ταλάντωσης.
- Τέλος, εξετάζοντας τα αποτελέσματα της κυματικής ανάλυσης διαπιστώθηκε ότι στις μεγαλύτερες καταπονήσεις, extensive damage και partial collapse state, ο παλμός της ισχυρής εδαφικής κίνησης έχει μεγαλύτερο συντελεστή

συσχέτισης (correlation) με την καταγραφή. Αυτό επιβεβαιώνει την ύπαρξη σημαντικών βλαβών, που διαπιστώθηκαν και με την αύξηση της περιόδου της κατασκευής. Εξάλλου, στην κατάρρευση δεσπόζει ο παλμός γιατί έχει αποσβεστεί στο σήμα η ελεύθερη ταλάντωση, λόγω της πλαστικοποίησης και έτσι κυριαρχεί η κρουστική διέγερση του παλμού.

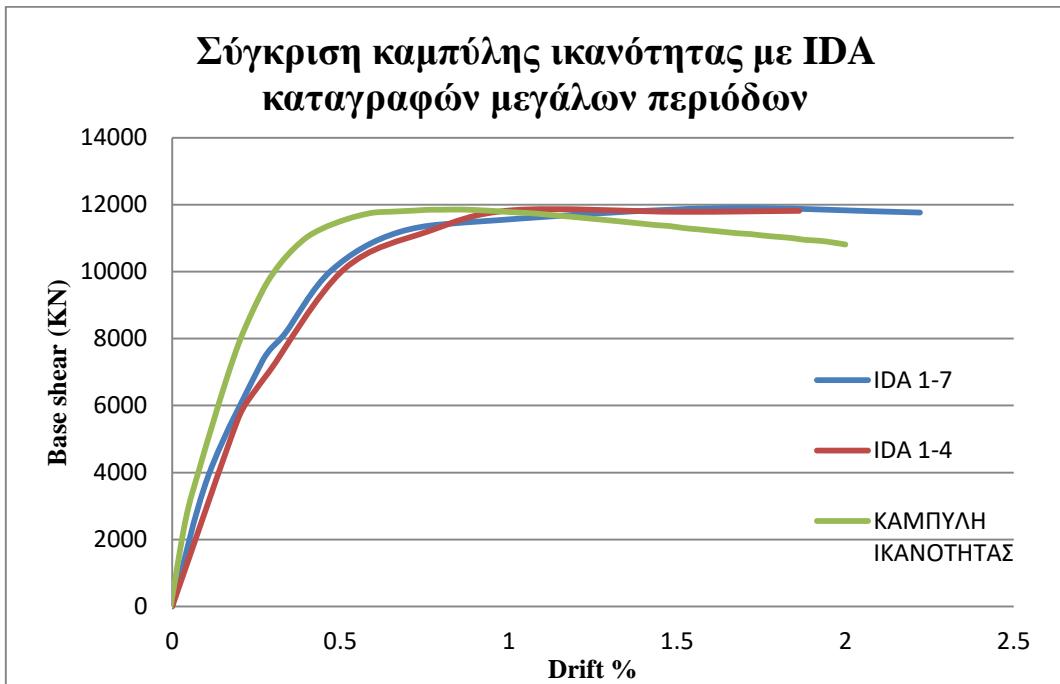
Τέλος, γίνεται σύγκριση των καμπυλών της προσαυξητικής δυναμικής ανάλυσης (IDA), για καταγραφές μικρών αλλά και μεγάλων περιόδων, με την καμπύλη ικανότητας της στατικής ανελαστικής ανάλυσης (pushover).

Όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα, στην περίπτωση μικρών περιόδων οι καμπύλες IDA βρίσκονται πιο πάνω από την ικανοτική καμπύλη, έχουν, όπως αναμενόταν, μεγαλύτερη κλίση γεγονός που σημαίνει ότι η κατασκευή διαθέτει μεγαλύτερη δυσκαμψία.

Αντίθετα, στις καταγραφές μεγάλων περιόδων οι καμπύλες IDA απεικονίζονται κάτω της ικανοτικής καμπύλης, έχουν μικρότερη κλίση και συνεπώς η κατασκευή χαρακτηρίζεται ως πιο εύκαμπτη.



Σχήμα 5.23: Σύγκριση καμπύλης ικανότητας καταγραφών μικρών περιόδων.



Σχήμα 5.24: Σύγκριση καμπύλης ικανότητας καταγραφών μεγάλων περιόδων

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

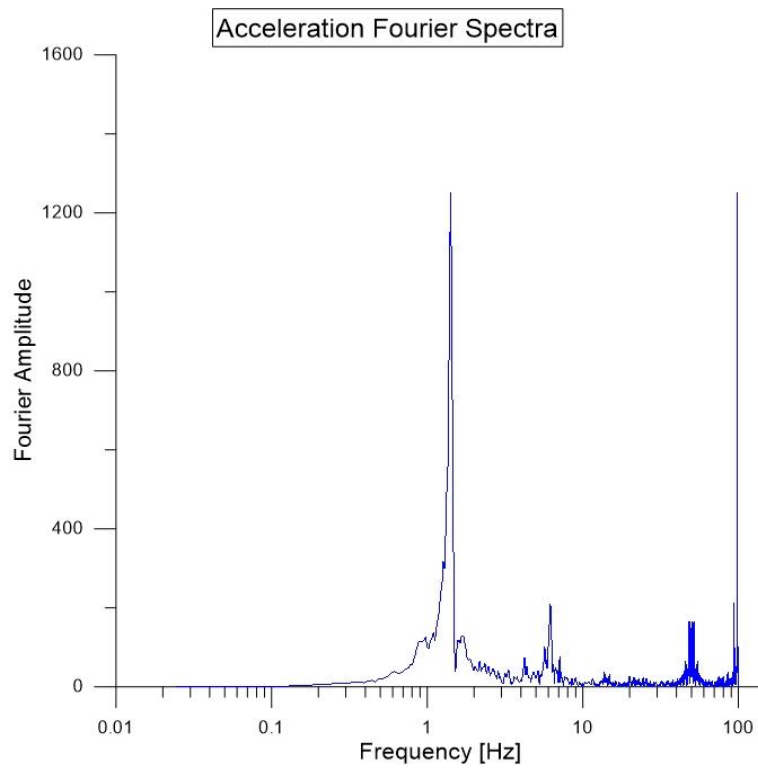
1. Ελευθεριάδου Α.Κ., Καραμπίνης Α.Ι, Αναλυτική Αποτίμηση της Σεισμικής Τρωτότητας Κατασκευών από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα, 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου, 2006.
2. Ταφλαμπάς Ιωάννης, σημειώσεις από το μάθημα Ειδικά Θέματα Τεχνικής Σεισμολογίας.
3. Baker J.W., (2007), Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis.
4. Coifman RR, Wickerhauser MV (1992) Entropy-based algorithms for best basis selection, IEEE Trans Inform Theory 38(2):713–718.
5. Hudson D.E., (1979), Reading and interpreting strong motion accelerograms, EERI Monograph, Berkeley, Ca, USA.
6. Mimoglou P, Psycharis I., Taflampas I.,(2014), Design-oriented simulation of near fault ground motions by a limited number of velocity pulses.
7. Mavroeidis George P. and Papageorgiou Apostolos S., (2003), Mathematical Representantation of Near- Fault Ground Motions.
8. Mavroeidis G. P. et al. , (2004), Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems.
9. Mihail Garevski, (2013), Earthquakes and Health Monitoring Of Civil Structures, Springer Environmental Science and Engineering.
10. Naeim F, (1997), Instrumented buildings information system for January 17, 1994, Northridge,California earthquake. John A. Martin & Associates, Inc., Los Angeles, Version 1.0.
11. Rodriguez-Marek A., (2000), Near-Fault Seismic Site Response.
12. Rossetto, T. and Elnashai, A, (2003) Derivation of Vulnerability Functions for European-Type RC Structures Based on Observational Data, Engineering Structures, 25, 1241-1263.
13. Rune Brincker, Carlos E. Ventura, (2015), Introduction to operational modal analysis, Wiley.
14. Seismostruct user manual for version 7.0.
15. Somerville P. G. et al., (1997), Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity, Seismological Research Letters, 68(1), 199–222.

16. Taflampas I. M., Spyrakos C. C., & Koutromanos I. A. (2009), A new definition of strong motion duration and related parameters affecting the response of medium-long period structures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 29, Issue 4, April 2009, Pages 752-763.
17. Vamvatsikos D., Cornell CA. (2002), Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, v.31, n.3.
18. Vassiliou Michalis F., Makris Nicos, (2011), Analysis of the rocking response of rigid blocks standing free on a seismically isolated base.

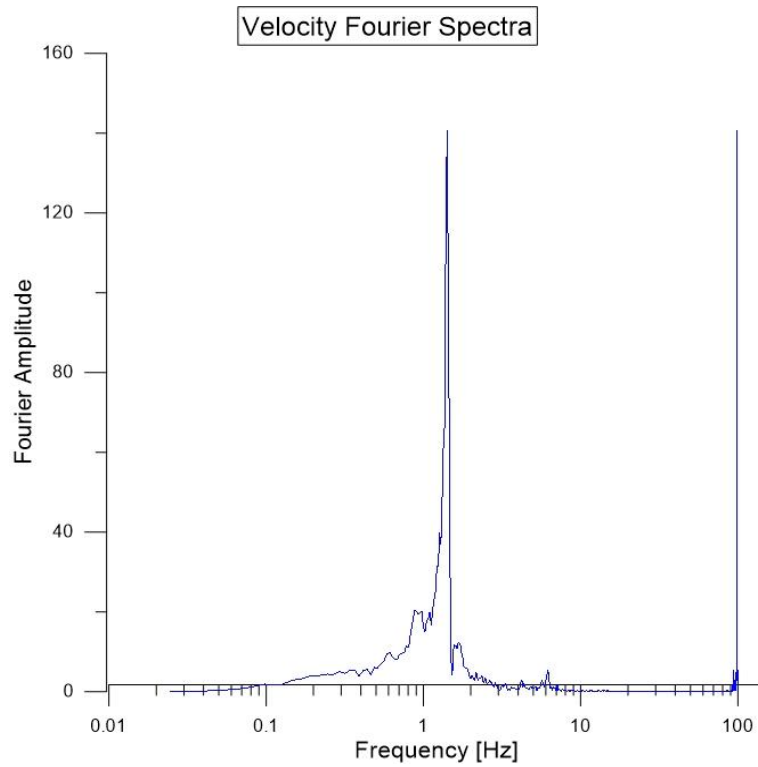
**Ιστοσελίδες διαδικτύου**

<http://www.seismosoft.com>

## DATA 1-2: SLIGHT DAMAGE STATE

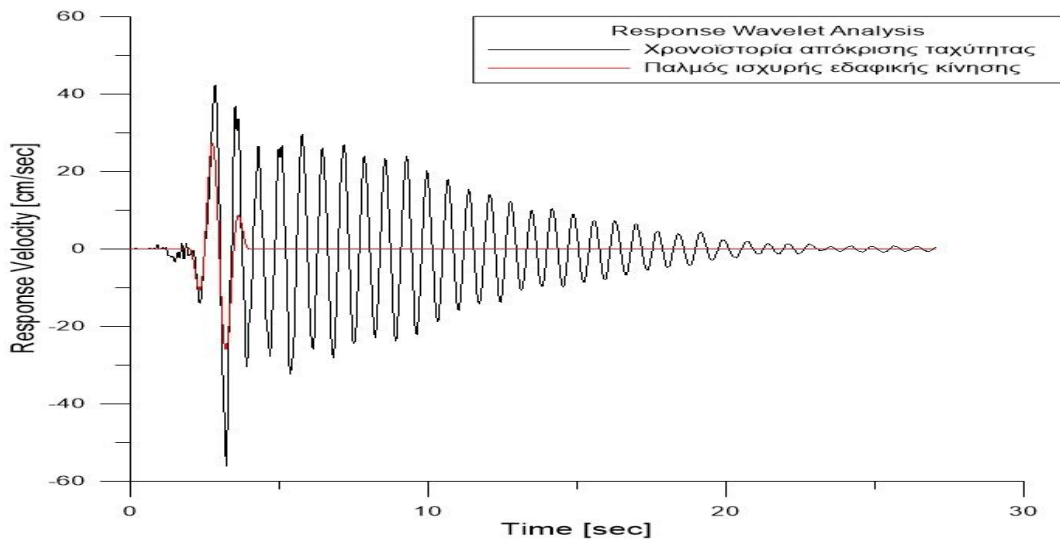


Σχήμα Α1: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-2 slight damage state.

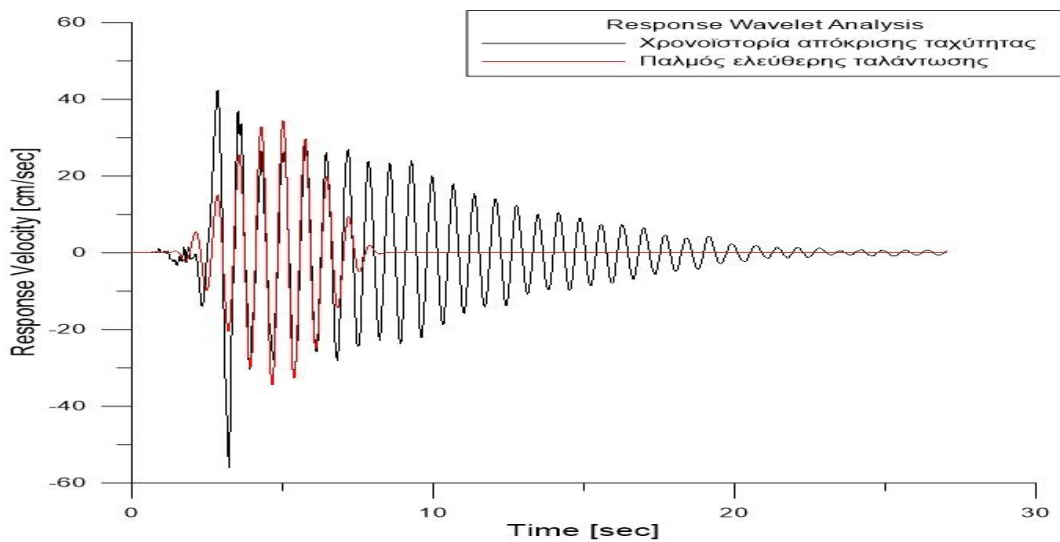


Σχήμα Α2: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-2 slight damage state.





**Σχήμα A3:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (τρίτο κυματίδιο) για Data 1-2 slight damage state.



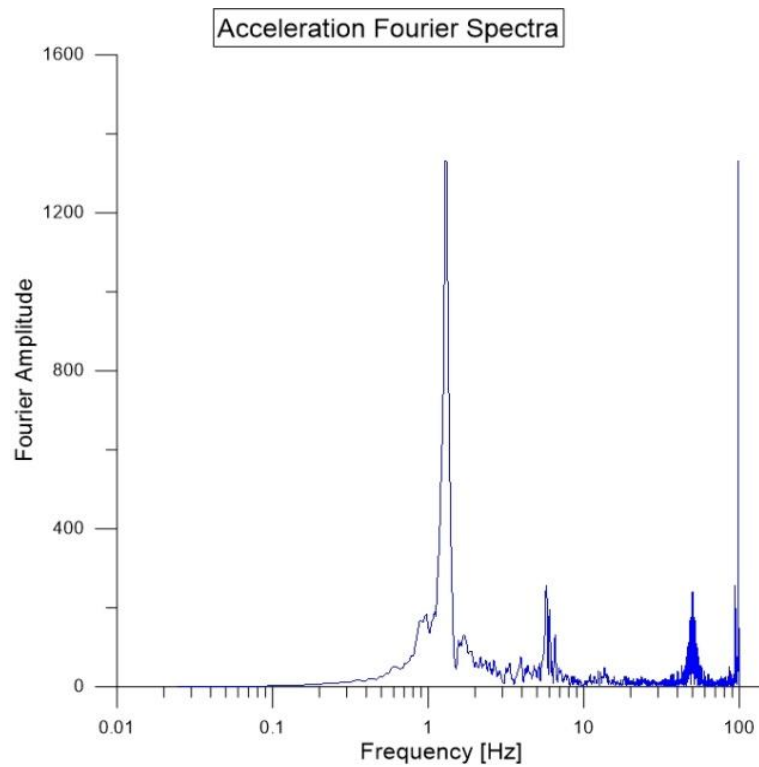
**Σχήμα A4:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-2 slight damages.

**Πίνακας A1:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-2 slight damage state.

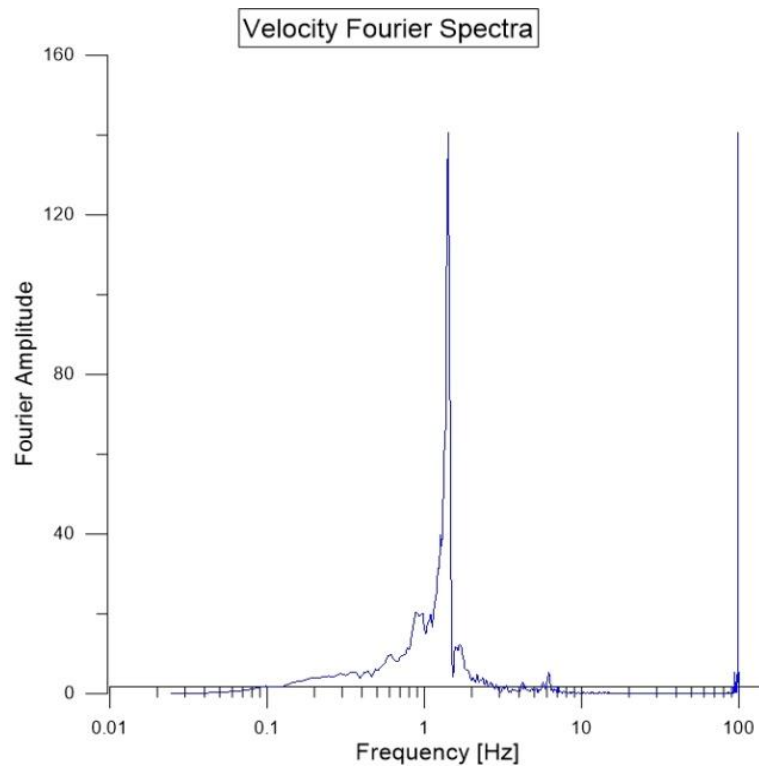
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
34.682	0.73	10	260	0.722
24.201	0.71	10	300	0.539
29.76	0.98	2.3	80	0.478
12.278	0.71	10	310	0.284
7.1	2.86	1.1	50	0.011
5.932	0.72	10	115	0.15

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 0.94 sec**

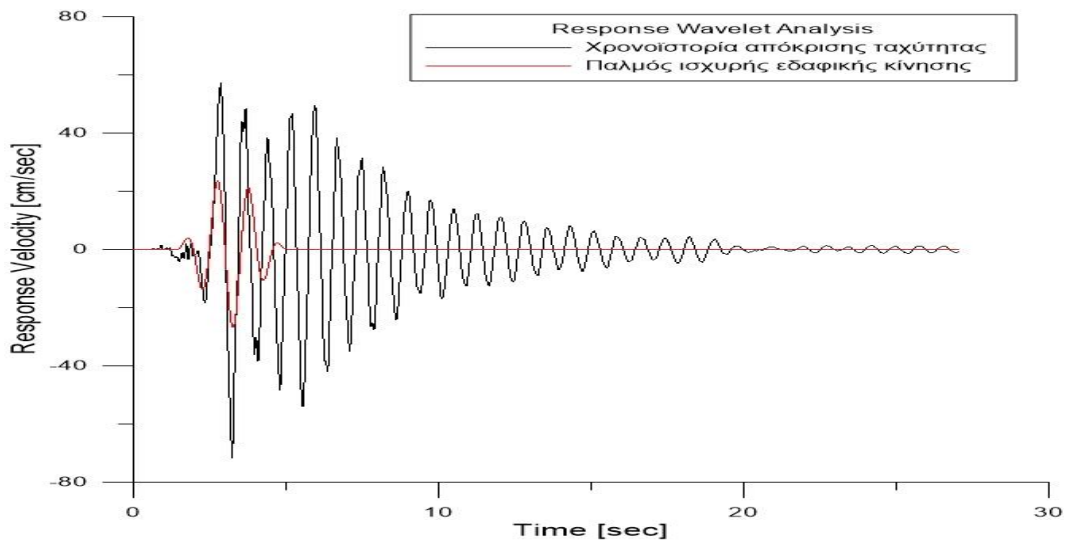
## DATA 1-2: LIGHT DAMAGE STATE



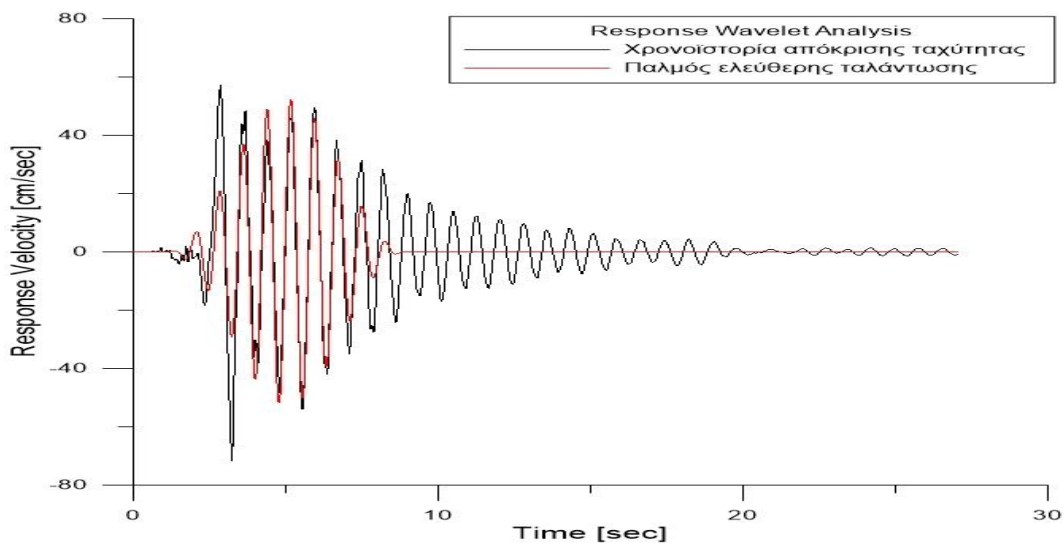
Σχήμα Α5: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-2 light damage state.



Σχήμα Α6: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-2 light damage state.



**Σχήμα A7:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-2 light damage state.



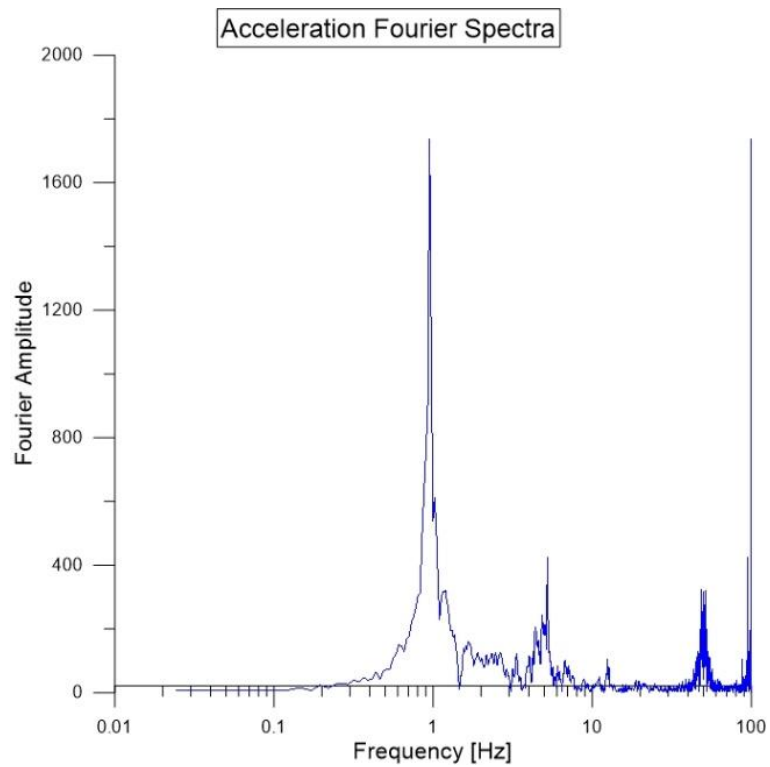
**Σχήμα A8:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-2 light damages.

**Πίνακας A2:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-2 light damage state.

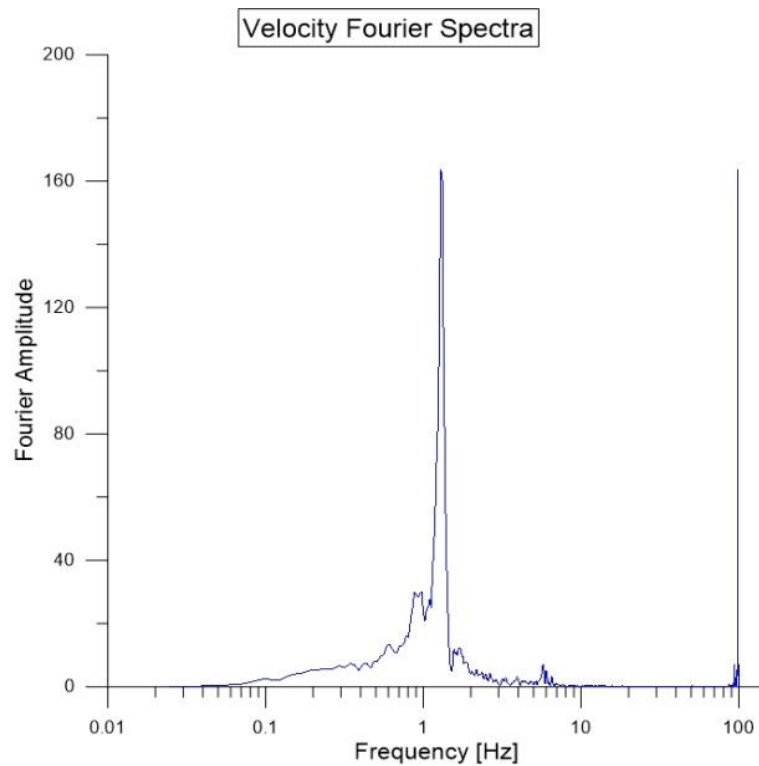
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
52.436	0.78	10	300	0.854
26.819	1.04	3.7	155	0.419
19.548	0.8	10	290	0.402
12.837	0.88	5.6	285	0.13
7.487	2.24	2.2	10	0.098
6.979	0.77	10	330	0.13

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 0.94 sec**

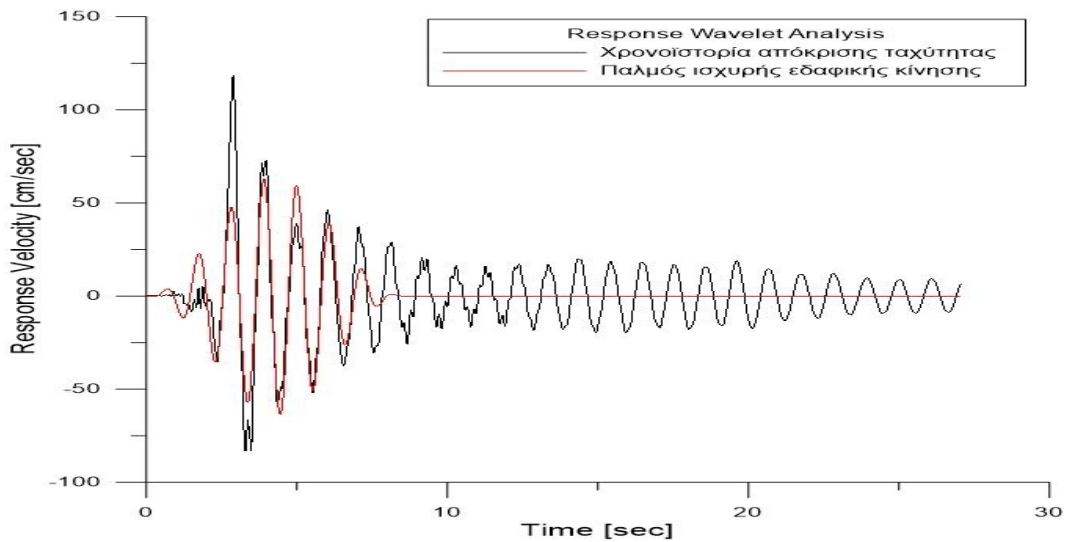
## DATA 1-2: MODERATE DAMAGE STATE



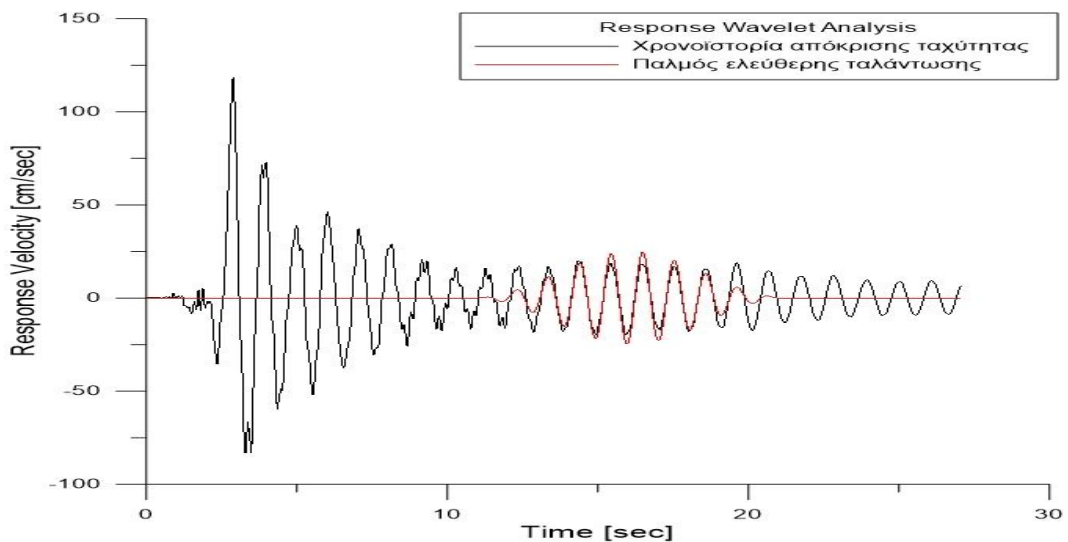
Σχήμα Α9: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-2 moderate damage state.



Σχήμα Α10: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-2 moderate damage state.



**Σχήμα A11:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-2 moderate damage state.



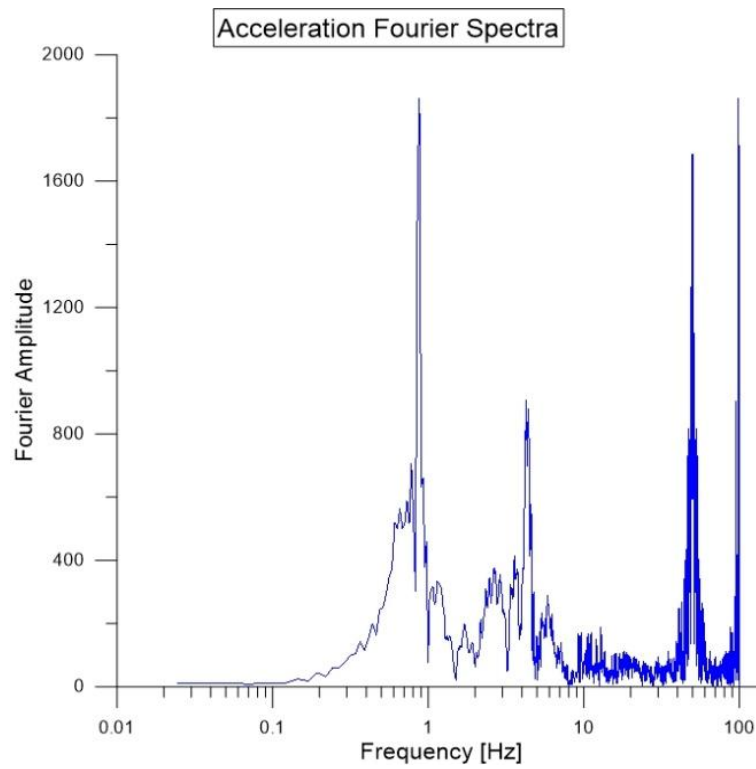
**Σχήμα A12:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-2 moderate damage state.

**Πίνακας A3:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-2 moderate damage state.

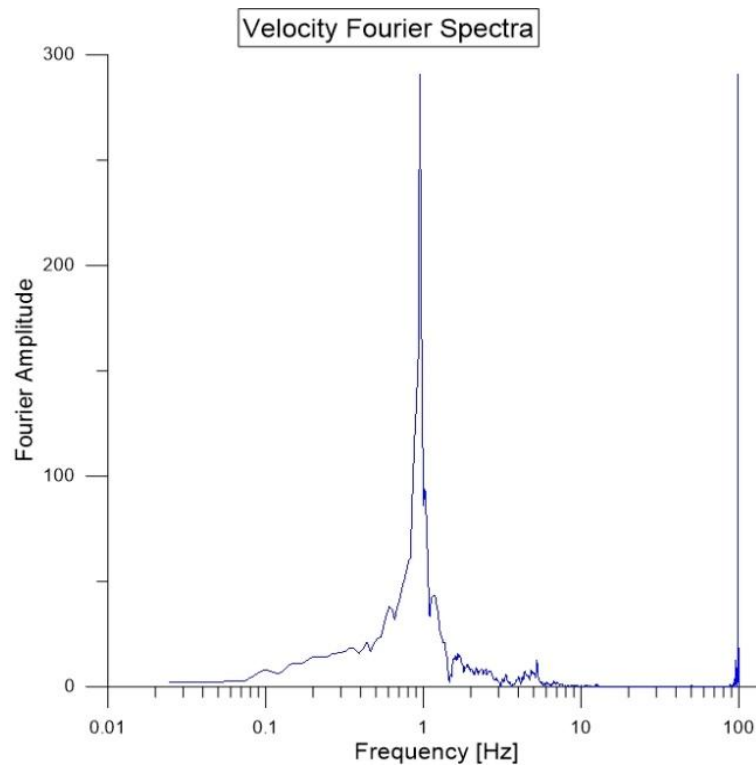
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
63.944	1.09	7.8	115	0.797
24.696	1.05	10	220	0.302
75.73	1.44	1.1	65	0.604
25.12	1.17	7.3	270	0.283
13.512	1.15	8.8	25	0.17
19.686	1.28	3.2	300	0.615

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 0.94 sec**

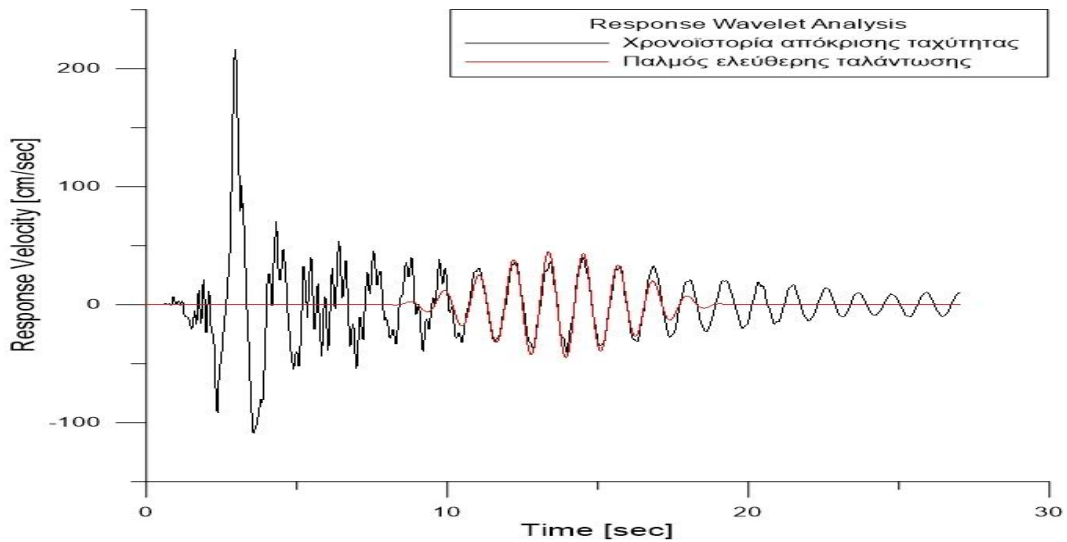
## DATA 1-2: EXTENSIVE DAMAGE STATE



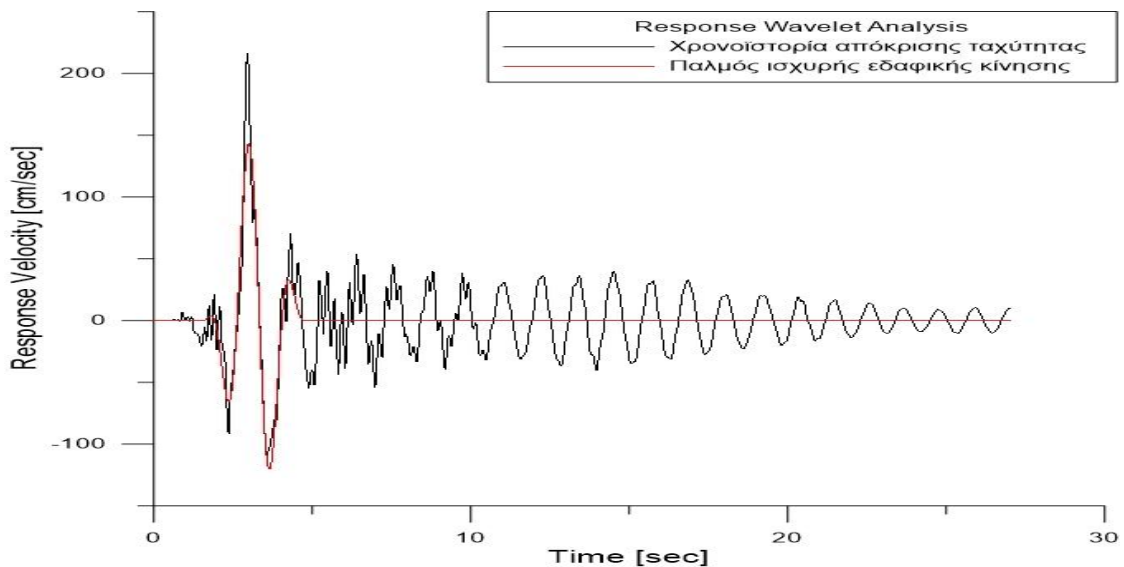
Σχήμα Α13: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-2 extensive damage state.



Σχήμα Α14: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-2 extensive damage state.



**Σχήμα A15:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-2 extensive damage state.



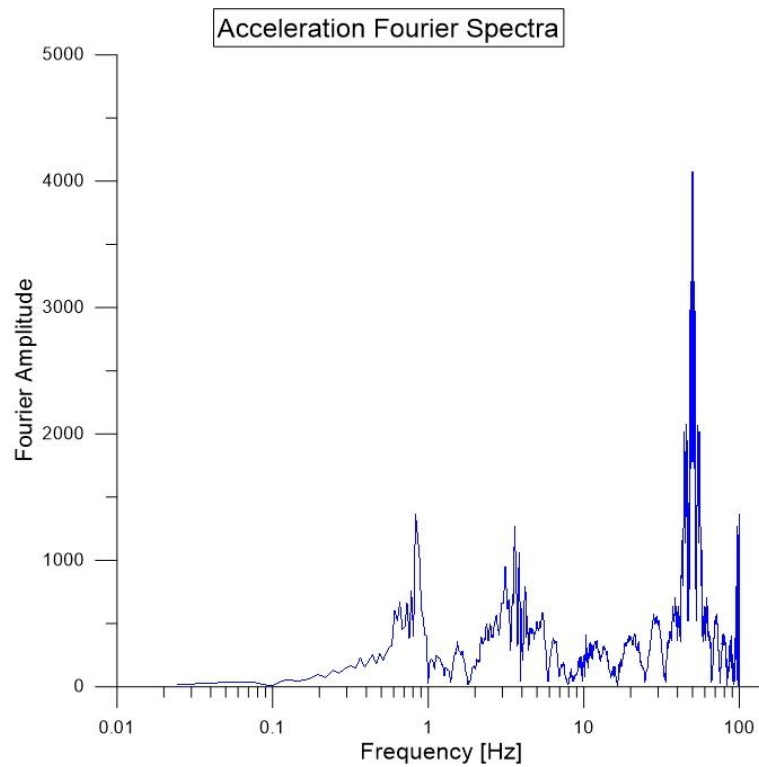
**Σχήμα A16:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-2 extensive damage state.

**Πίνακας A4:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-2 extensive damage state.

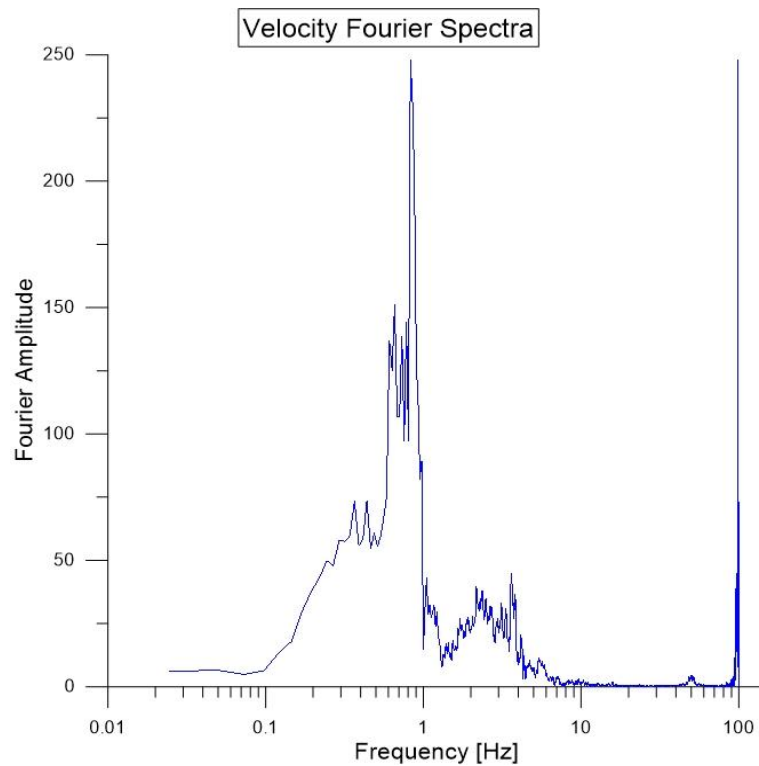
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
148.804	1.42	2.3	55	0.763
45.202	1.16	10	110	0.414
34.369	1.11	9	300	0.362
18.486	1.13	10	340	0.219
19.356	4.23	1.1	105	0.015
21.751	0.81	8.2	55	0.161

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 0.94 sec**

## DATA 1-2: PARTIAL COLLAPSE DAMAGE STATE

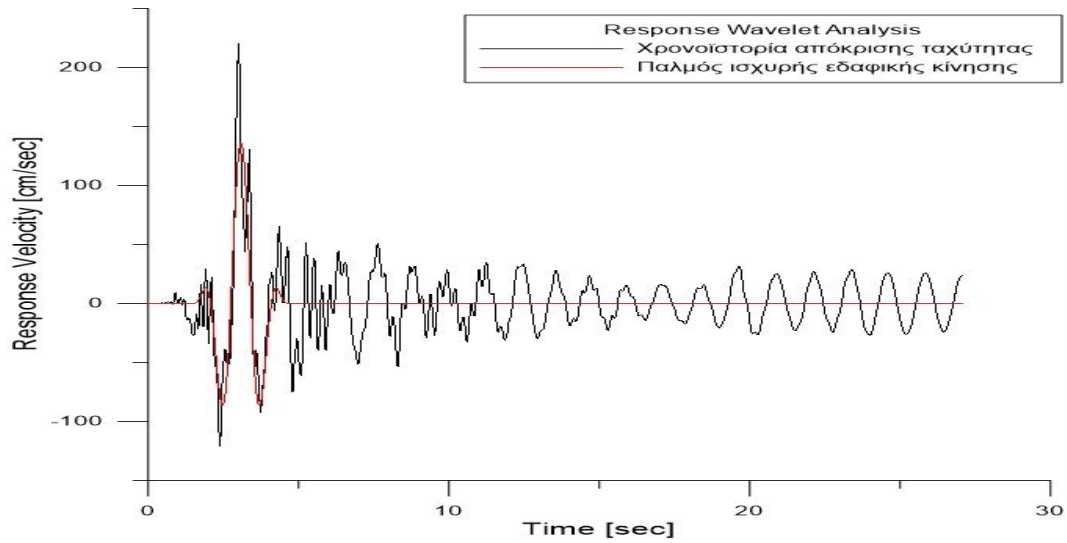


Σχήμα A17: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-2 partial collapse damage state.

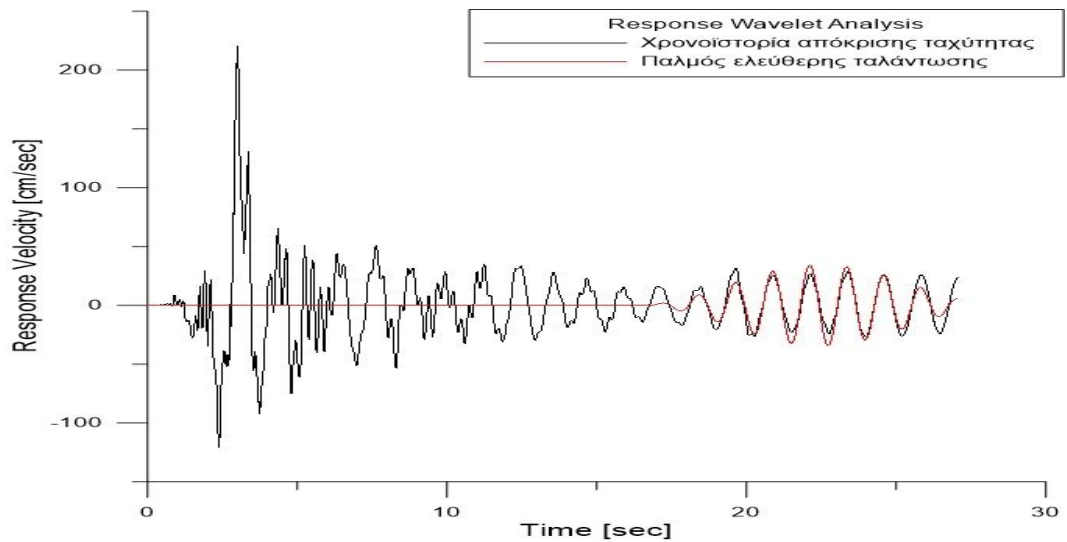


Σχήμα A18: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-2 partial collapse damage state.





**Σχήμα A19:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-2 partial collapse damage state.



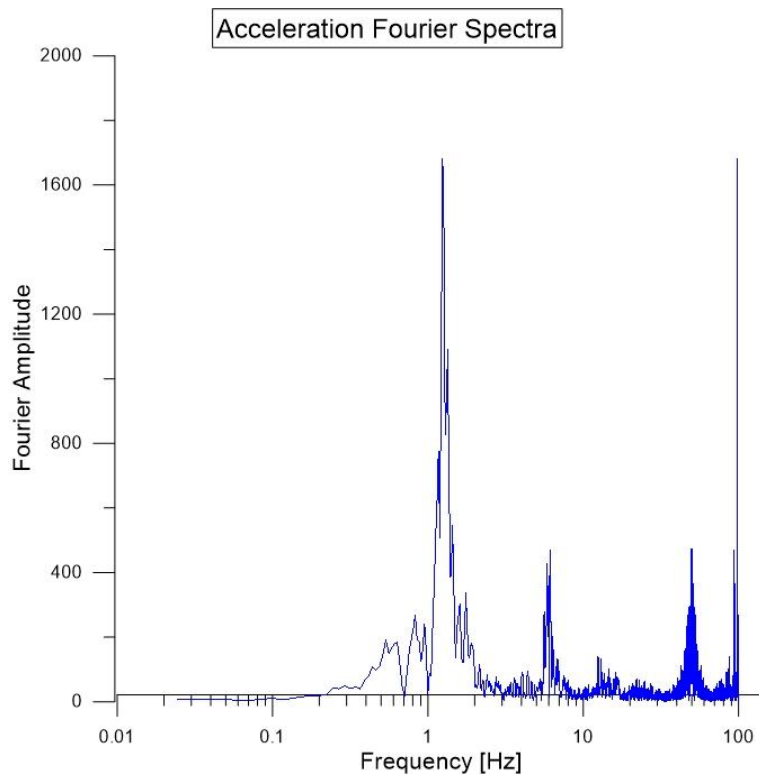
**Σχήμα A20:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-2 partial collapse damage state.

**Πίνακας A5:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-2 partial collapse damage state.

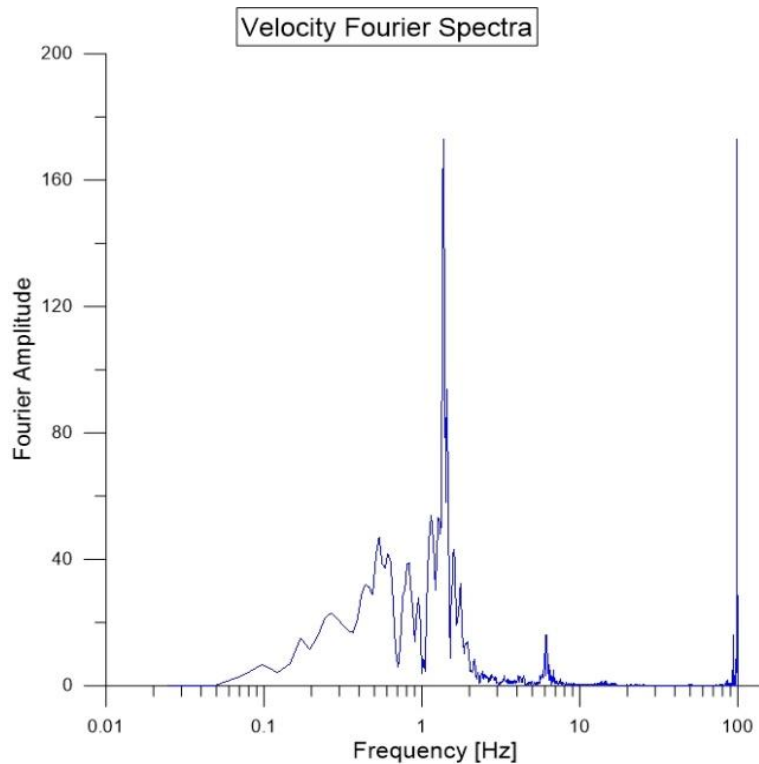
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
136.09	1.35	2.3	0	0.684
34.312	1.24	10	105	0.324
34.69	1.2	10	270	0.345
45.731	3.49	1.1	140	0.067
7.738	20	1.1	115	0.017
18.639	8	1.1	355	0.033

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 0.94 sec**

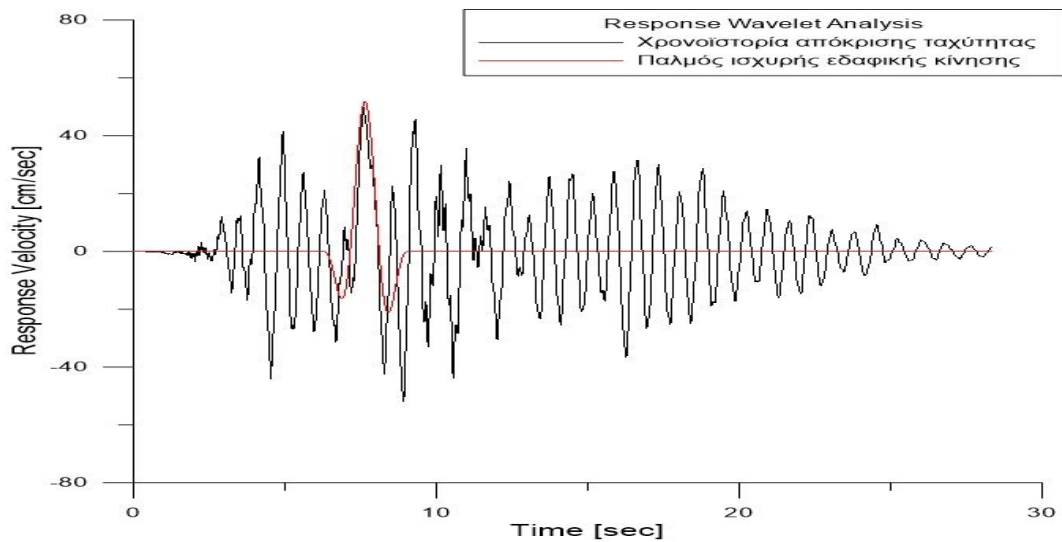
#### DATA 1-4: SLIGHT DAMAGE STATE



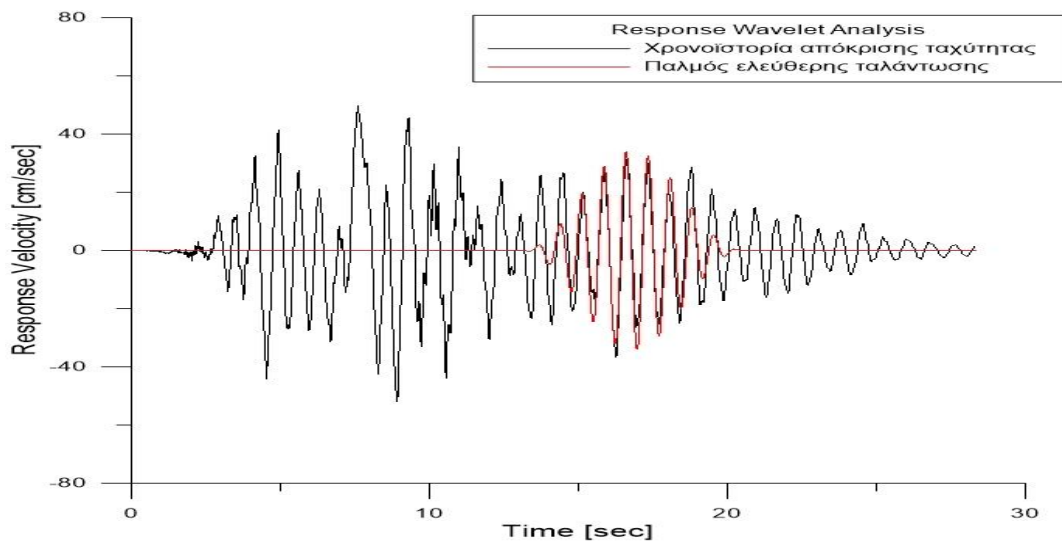
Σχήμα A21: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-4 slight damage state.



Σχήμα A22: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-4 slight damage state.



**Σχήμα A23:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-4 slight damage state.



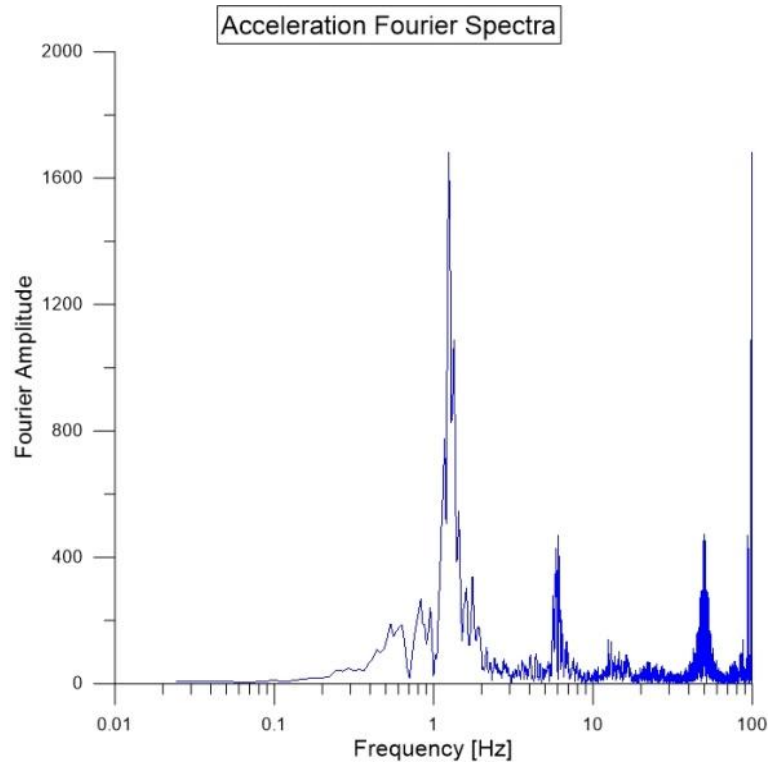
**Σχήμα A24:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-4 slight damage state.

**Πίνακας A6:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-4 slight damage state

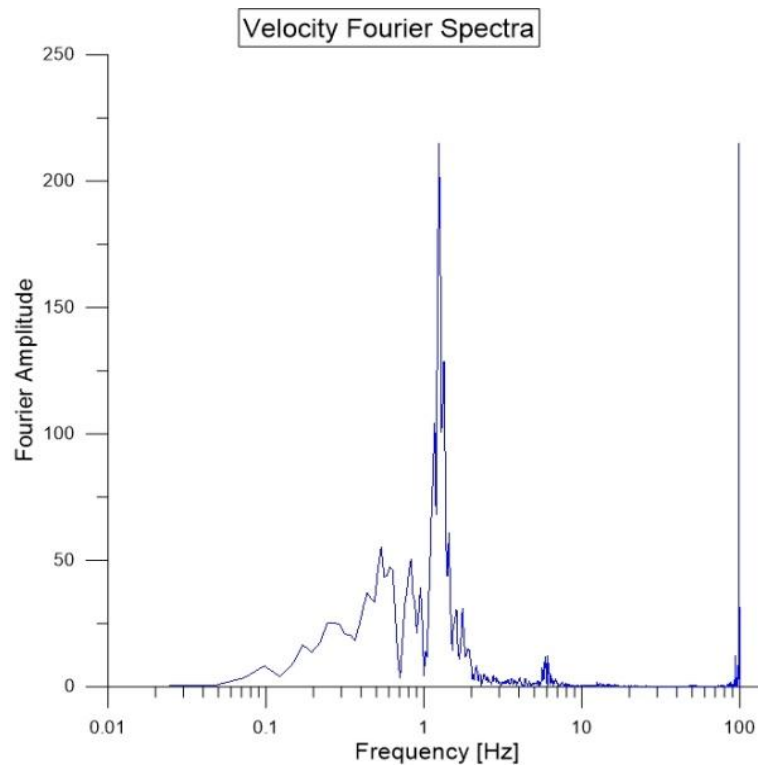
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
51.909	1.92	1.5	10	0.358
34.119	0.74	10	100	0.461
51.776	0.74	4.7	270	0.418
29.556	0.7	9.1	200	0.432
23.146	0.7	10	180	0.444
17.192	1.46	3.6	70	0.173

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 1.90 sec**

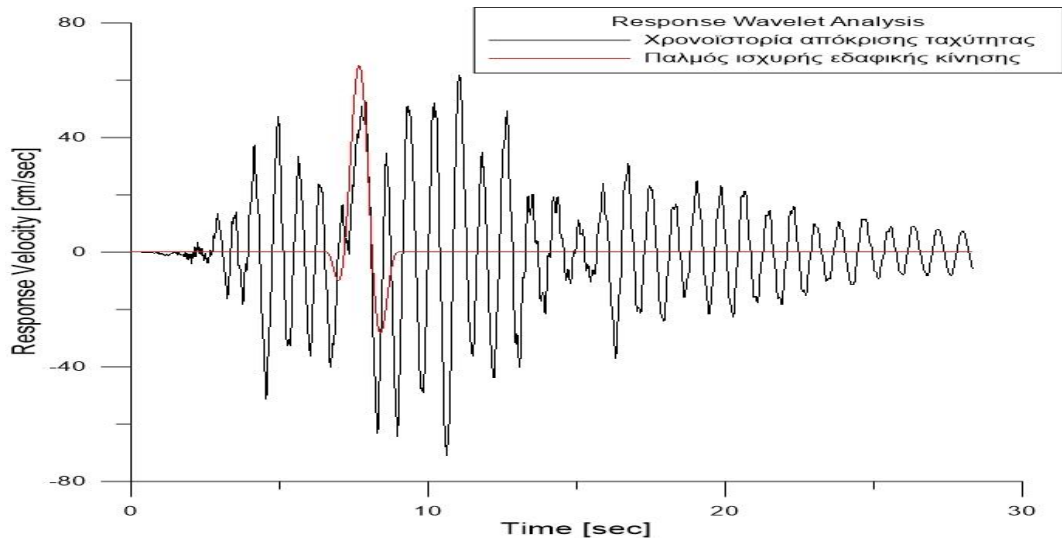
## DATA 1-4: LIGHT DAMAGE STATE



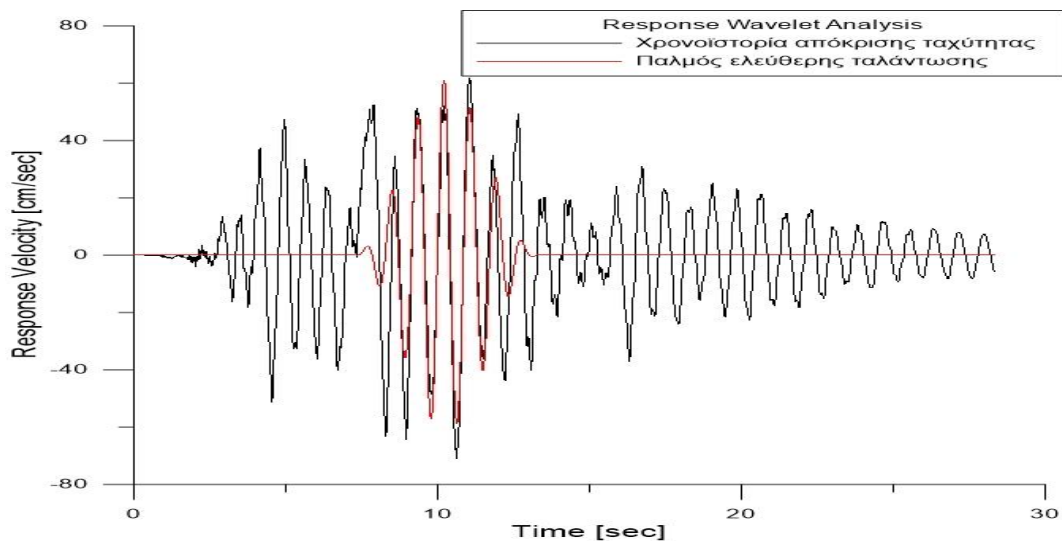
Σχήμα A25: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-4 light damage state.



Σχήμα A26: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-4 light damage state.



**Σχήμα A27:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-4 light damage state.



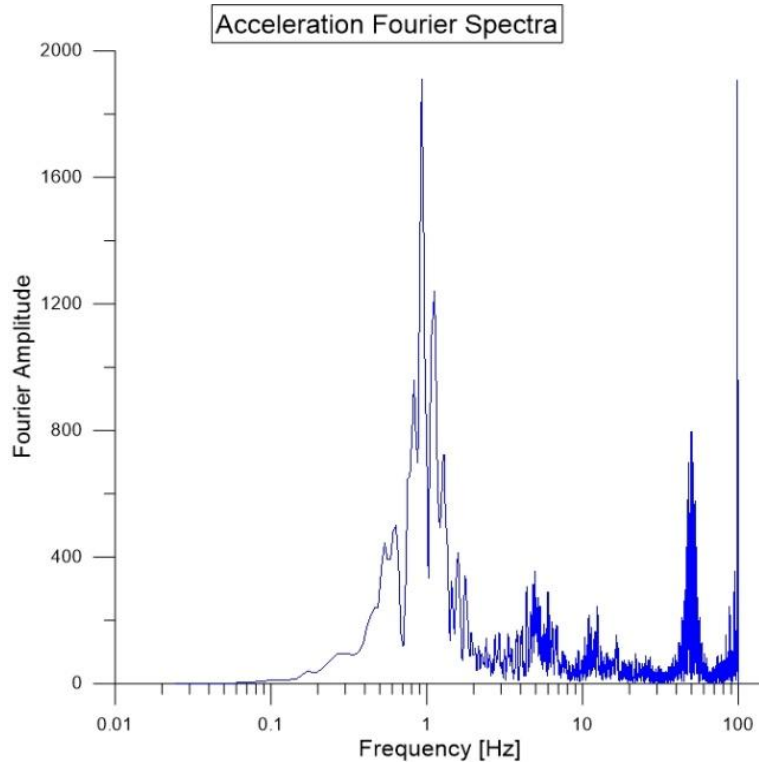
**Σχήμα A28:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-4 light damage state.

**Πίνακας A7:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-4 light damage state

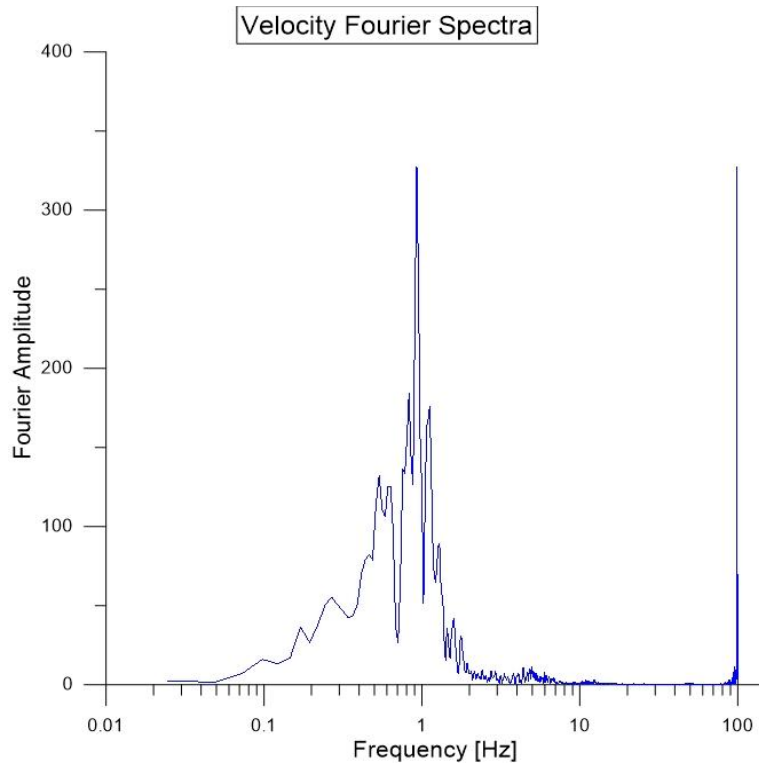
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
61.013	0.86	7.1	30	0.603
67.199	1.88	1.3	30	0.311
34.393	0.75	10	155	0.509
28.962	0.82	10	235	0.363
23.771	0.79	10	30	0.304
5.602	15.28	1.1	210	0.015

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 1.90 sec**

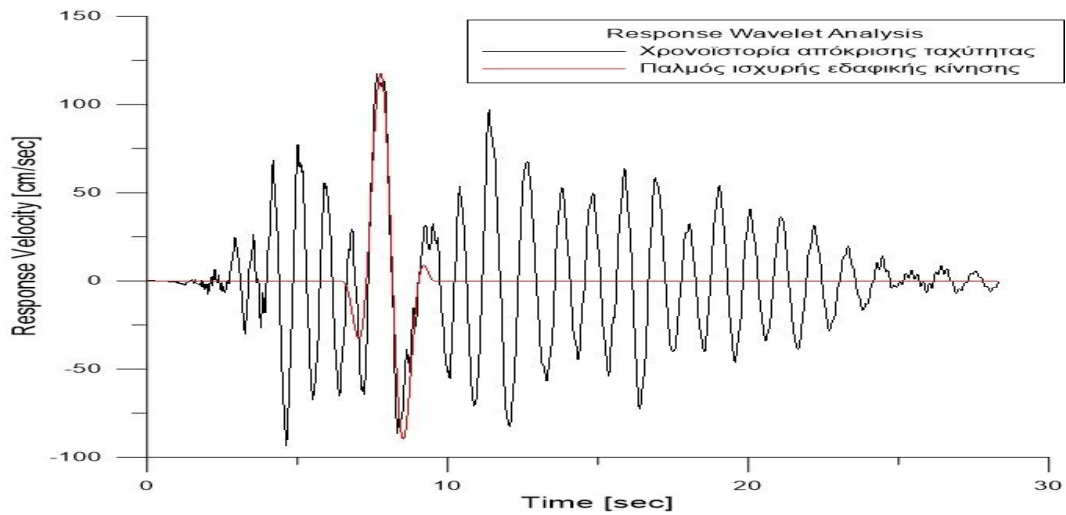
## DATA 1-4: MODERATE DAMAGE STATE



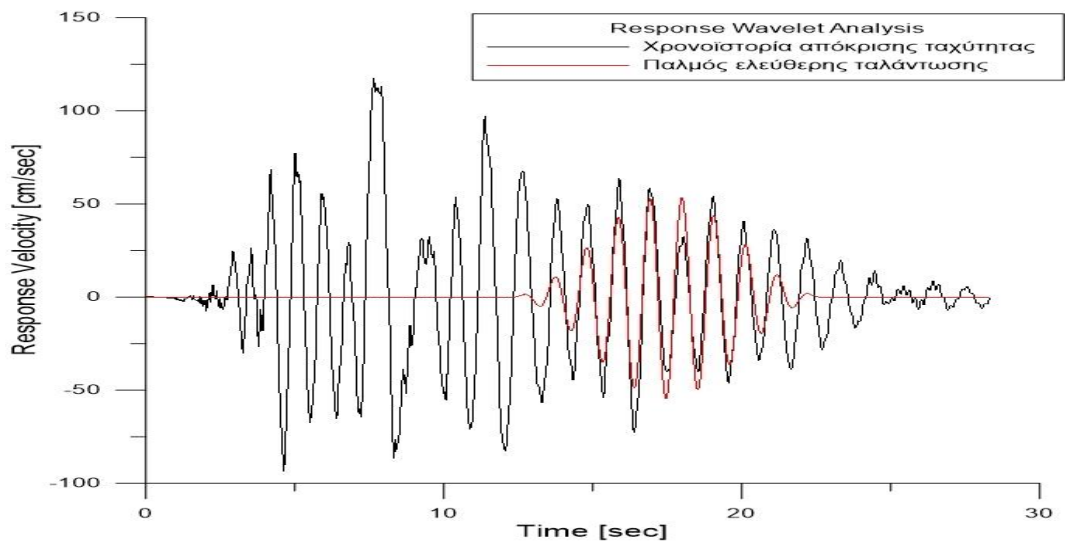
Σχήμα Α29: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-4 moderate damage state.



Σχήμα Α30: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-4 moderate damage state.



**Σχήμα A31:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-4 moderate damage state.



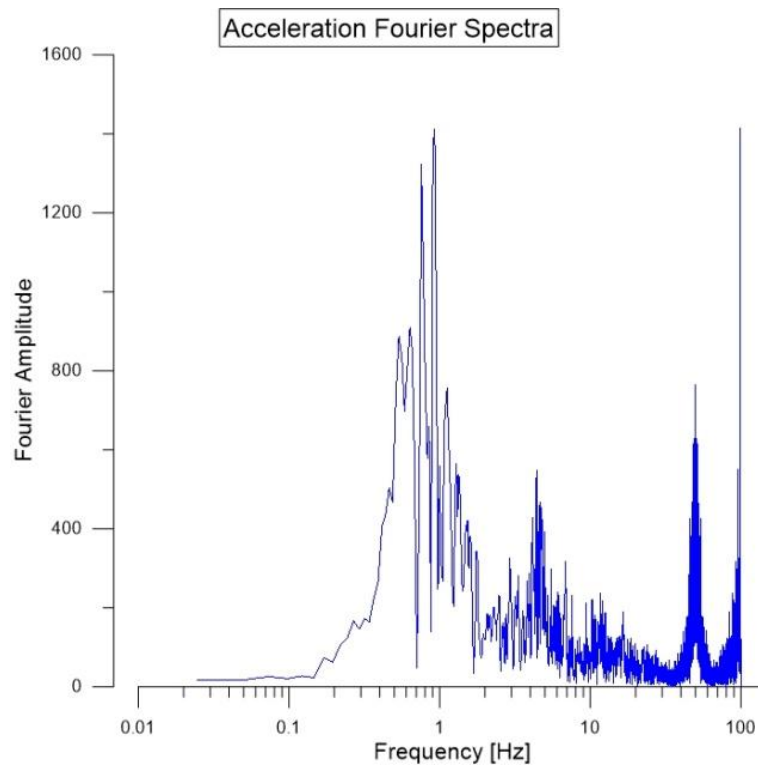
**Σχήμα A32:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (τρίτο κυματίδιο) για Data 1-4 moderate damage state.

**Πίνακας A8:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-4 moderate damage state.

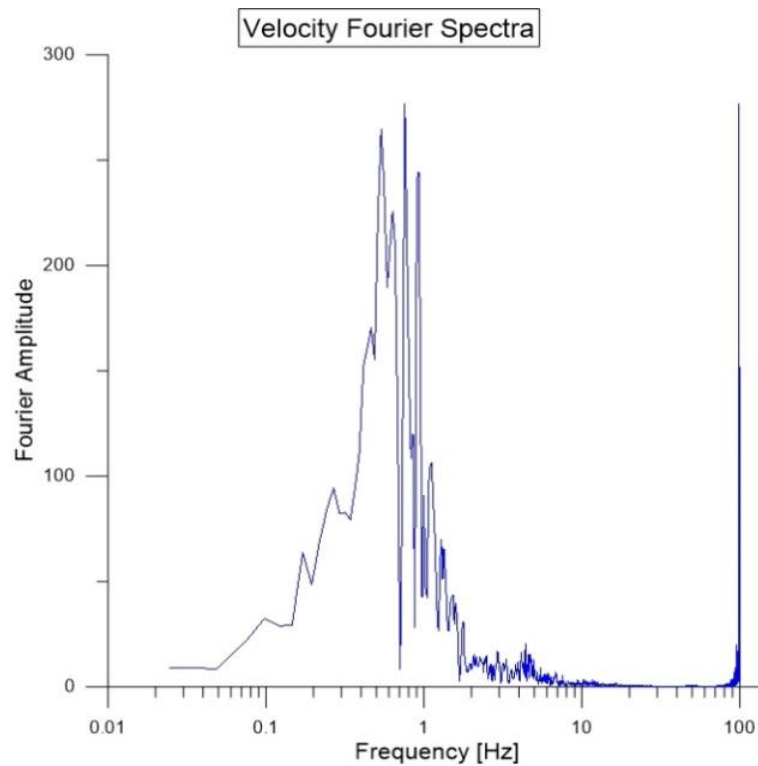
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
102.591	1.22	4.7	220	0.488
124.994	1.74	1.8	55	0.488
54.472	1.07	10	195	0.455
73.983	0.89	6.2	170	0.42
67.718	1.26	2	155	0.396
39.001	1.24	4.4	275	0.172

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 1.90 sec**

## DATA 1-4: EXTENSIVE DAMAGE STATE

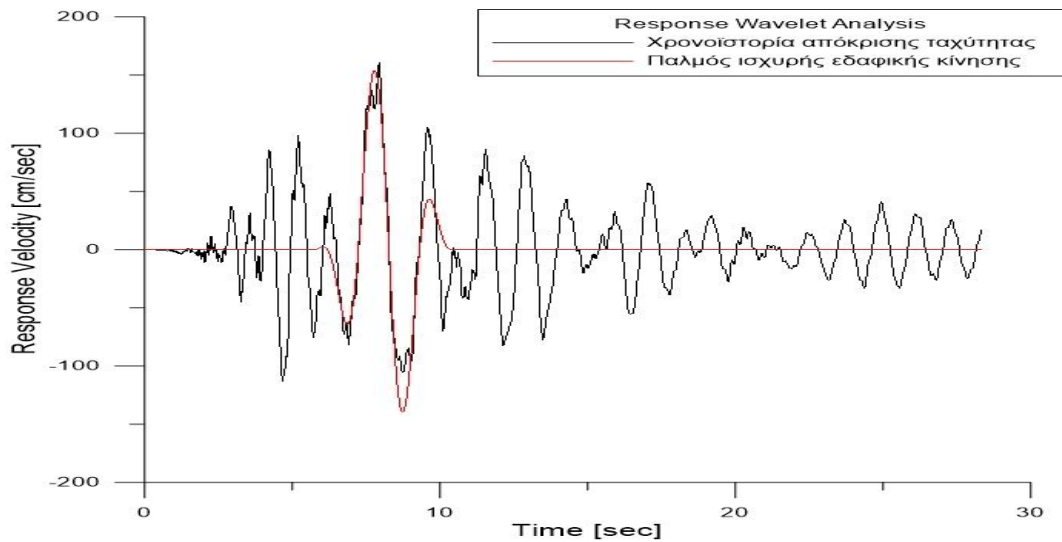


Σχήμα Α33: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-4 extensive damage state.

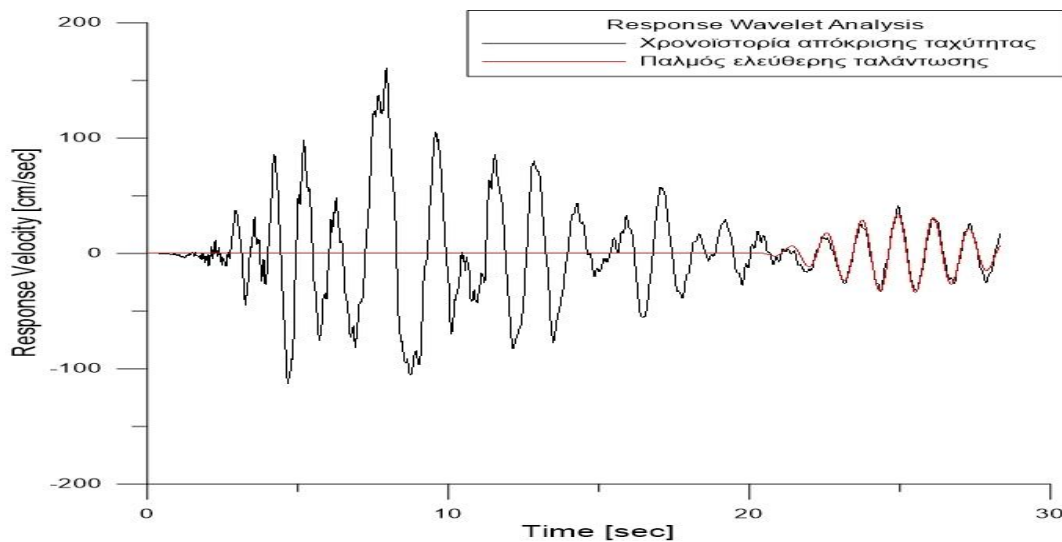


Σχήμα Α34: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-4 extensive damage state.





**Σχήμα A35:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-4 extensive damage state.



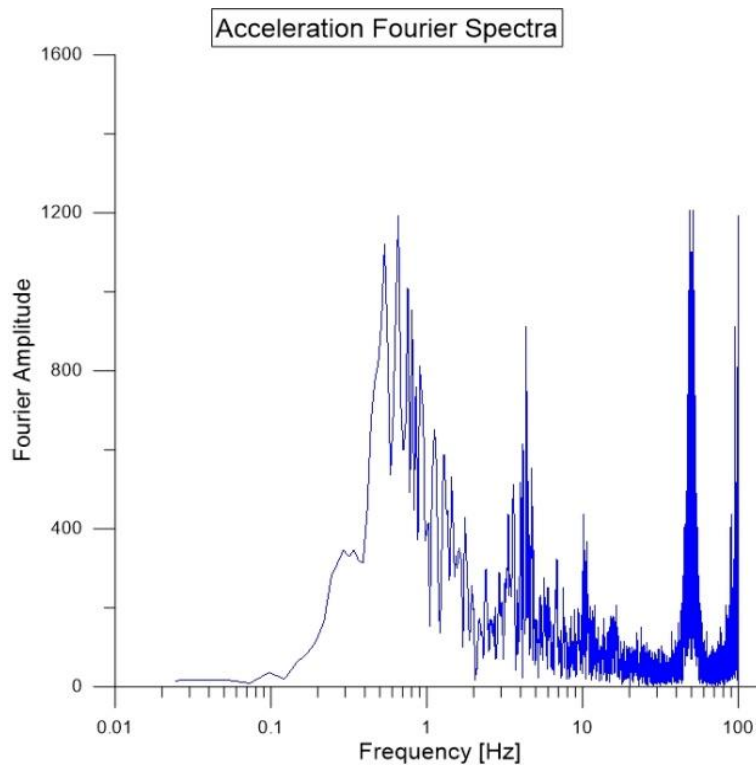
**Σχήμα A36:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (έκτο κυματίδιο) για Data 1-4 extensive damage state.

**Πίνακας A9:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-4 extensive damage state.

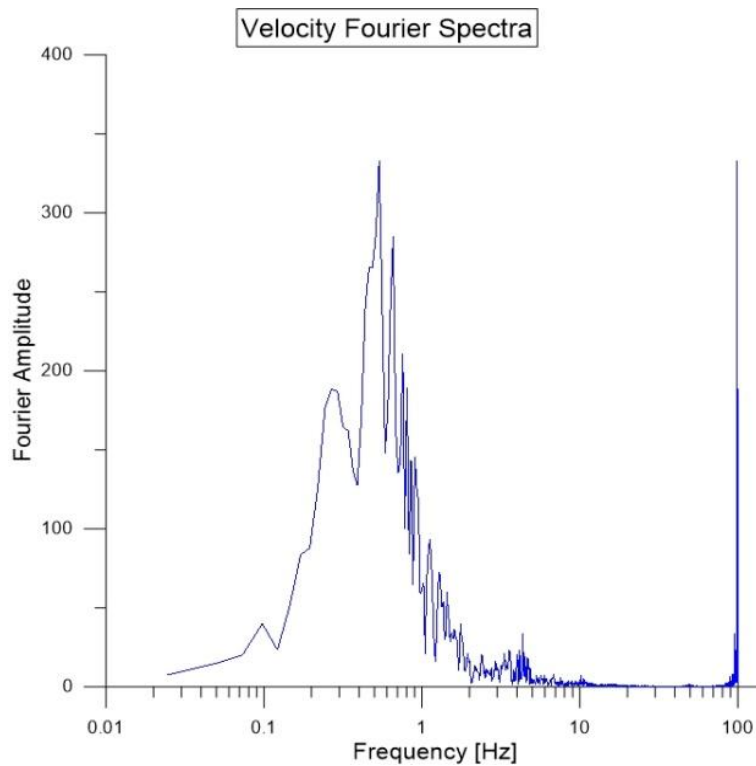
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
164.356	2.08	2.3	70	0.665
91.983	1.52	3.5	265	0.399
101.024	1.13	3.3	320	0.382
32.961	2.73	3.9	225	0.073
64.403	1.57	2.8	270	0.205
34.306	1.19	8.7	50	0.214

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 1.90 sec**

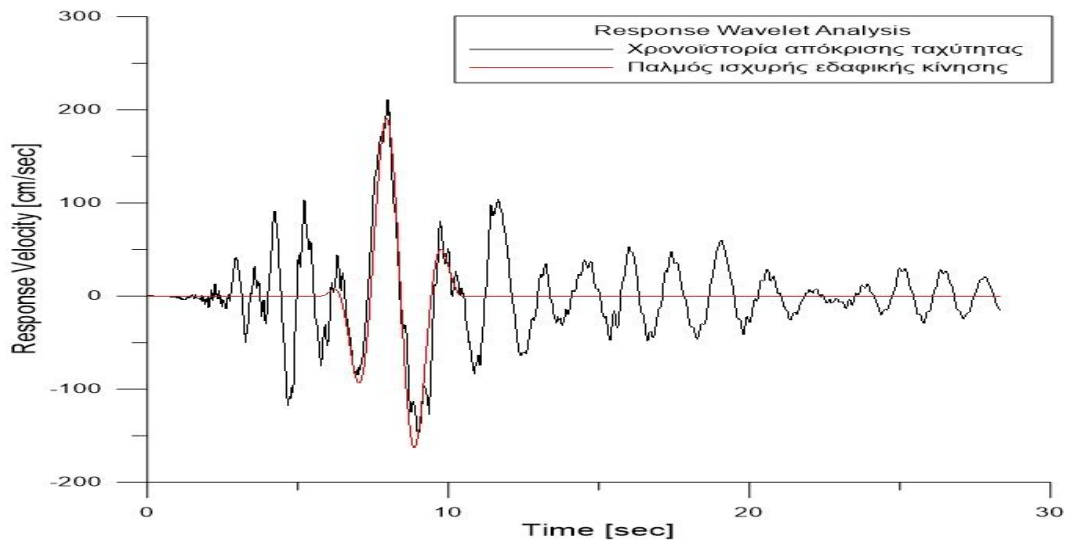
## DATA 1-4: PARTIAL COLLAPSE DAMAGE STATE



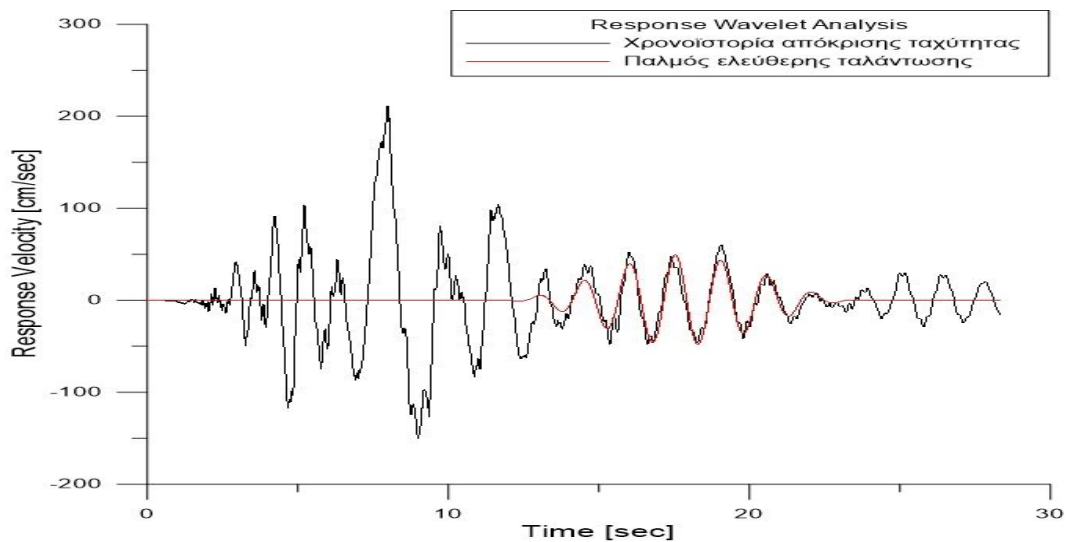
Σχήμα A37: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-4 partial collapse damage state.



Σχήμα A38: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-4 partial collapse damage state.



**Σχήμα Α39:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-4 partial collapse damage state.



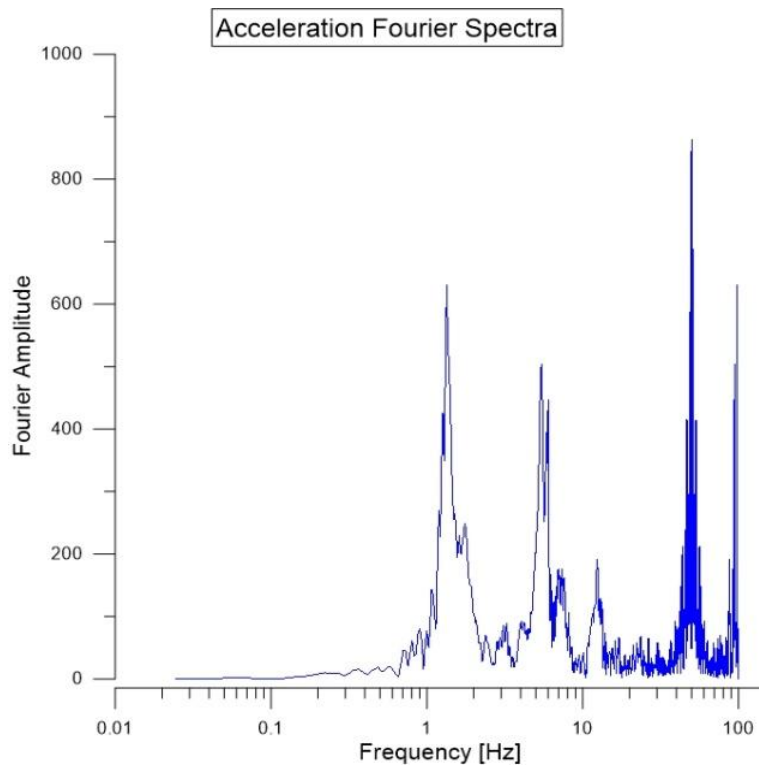
**Σχήμα Α40:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (τρίτο κυματίδιο) για Data 1-4 partial collapse damage state.

**Πίνακας Α10:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-4 partial collapse damage state.

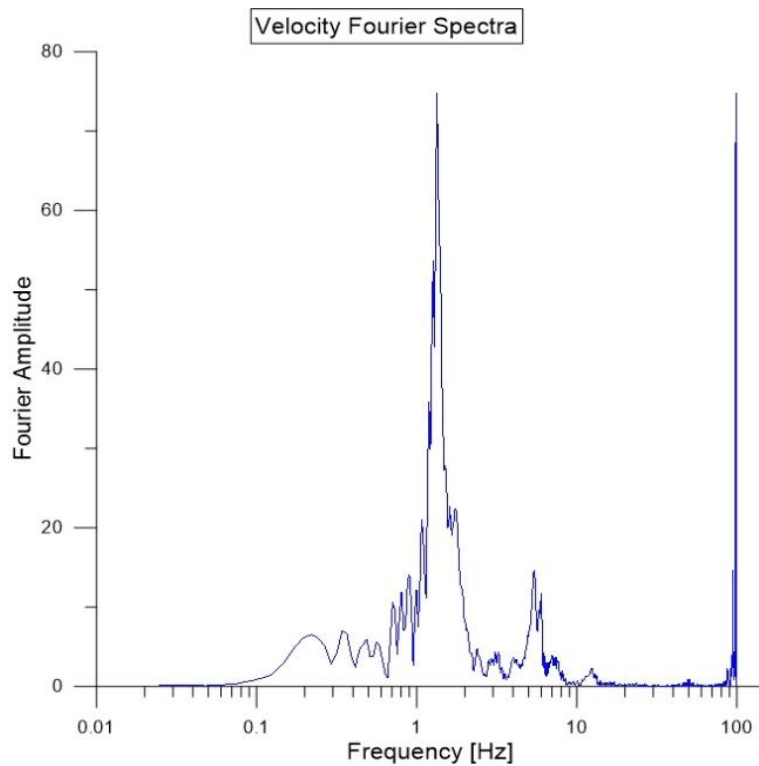
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
197.956	2.02	2.4	55	0.718
116.046	1.57	3	360	0.376
49.114	1.52	7.9	50	0.305
105.944	1.15	3	280	0.347
23.732	4.31	3.3	120	0.336
61.871	1.42	2.5	285	0.342

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 1.90 sec**

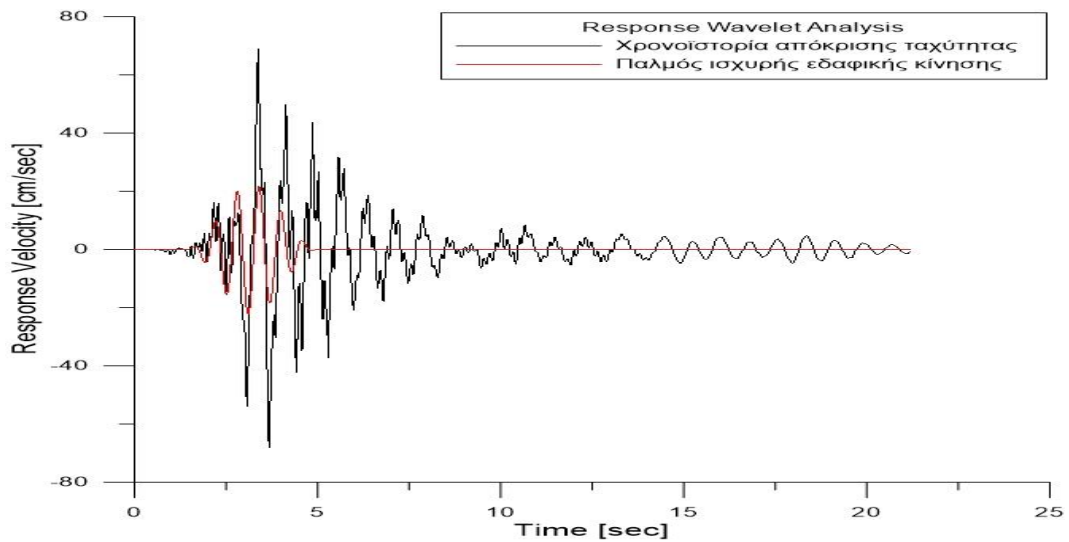
## DATA 1-21: SLIGHT DAMAGE STATE



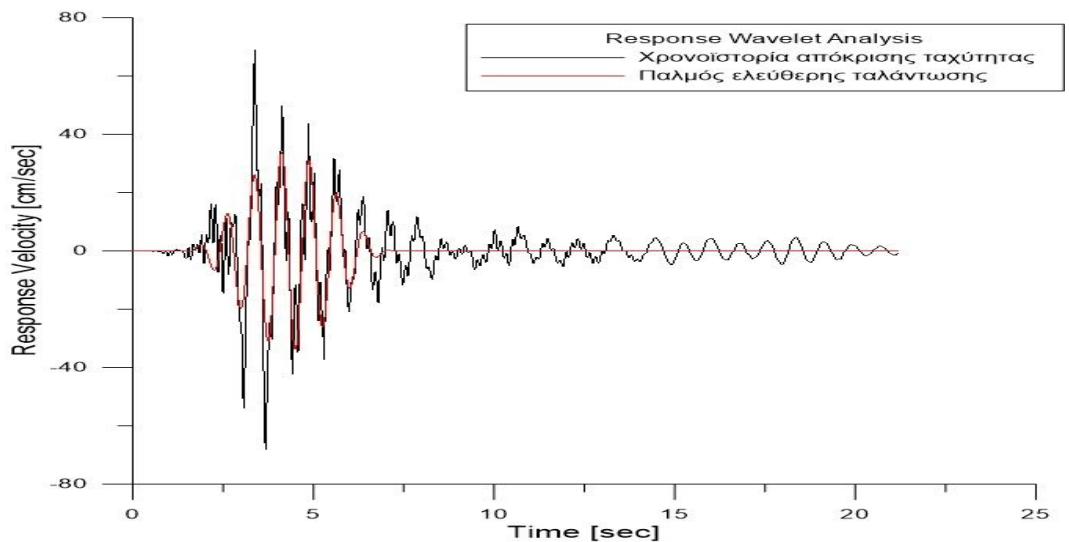
Σχήμα A41: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-21 slight damage state.



Σχήμα A42: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-21 slight damage state.



**Σχήμα A43:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-21 slight damage state.



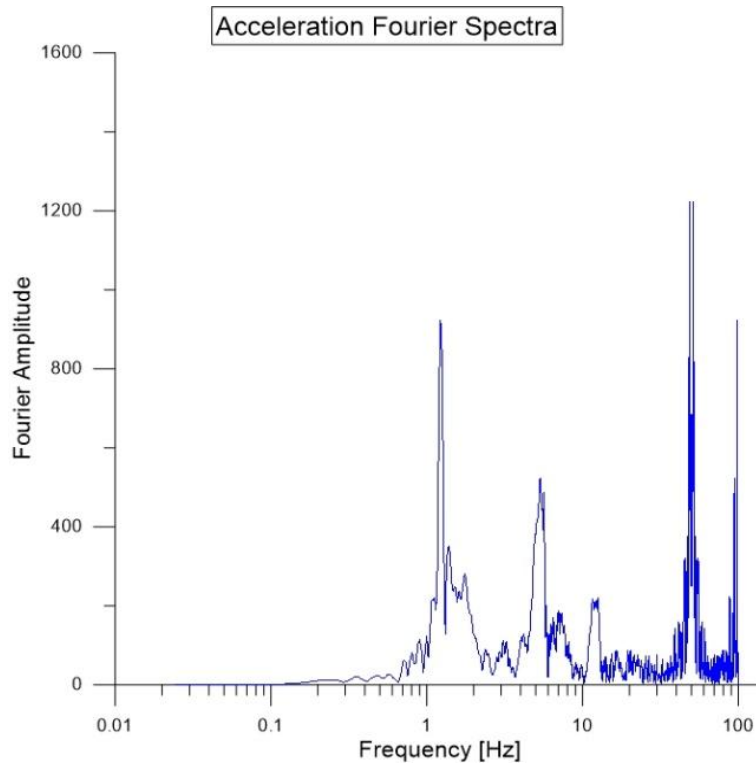
**Σχήμα A44:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-21 slight damage state.

**Πίνακας A11:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-21 slight damage state.

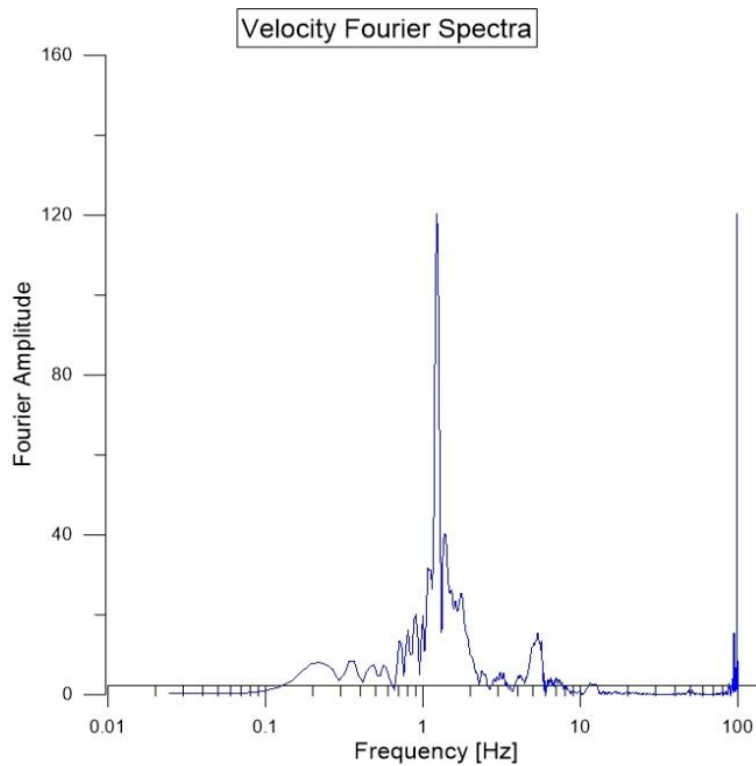
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
34.141	0.76	7.7	90	0.796
22.349	0.6	6.1	235	0.56
11.358	0.82	5.1	45	0.223
6.911	1.11	6	45	0.15
4.865	4.89	1.1	210	0.05
2.128	13.22	1.1	130	0.011

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 0.56 sec**

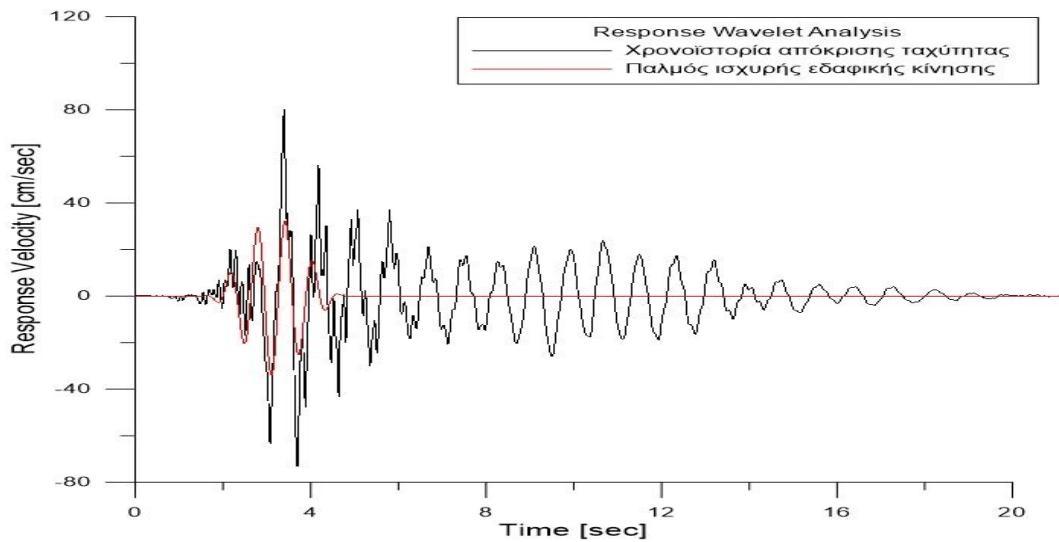
## DATA 1-21: LIGHT DAMAGE STATE



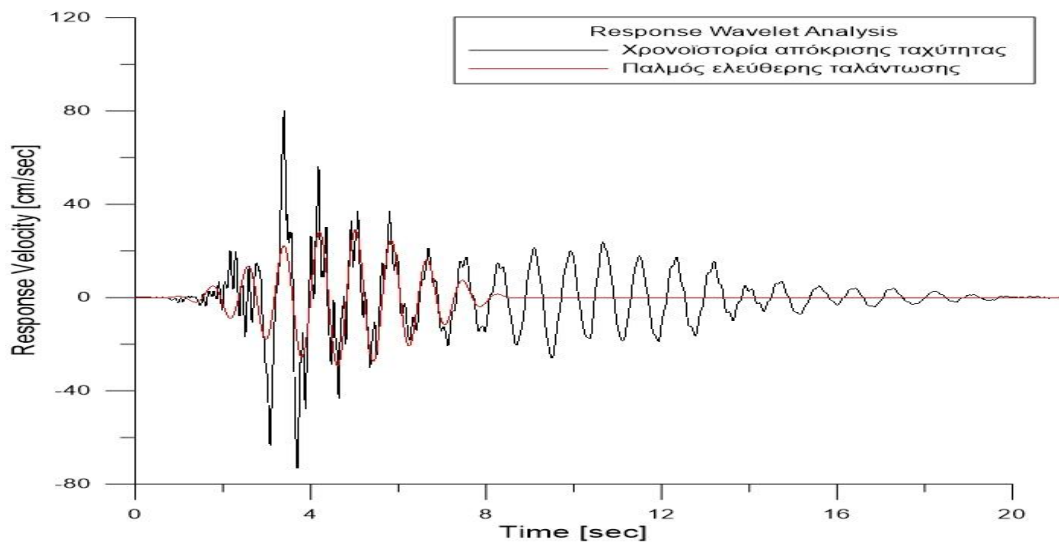
Σχήμα A45: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-21 light damage state.



Σχήμα A46: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-21 light damage state.



**Σχήμα A47:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (τρίτο κυματίδιο) για Data 1-21 light damage state.



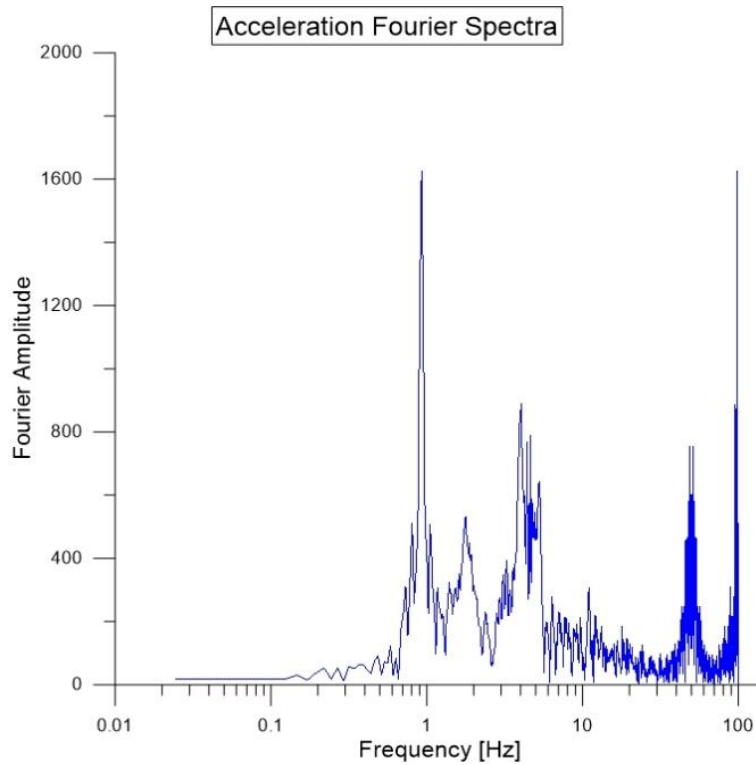
**Σχήμα A48:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-21 light damage state.

**Πίνακας A12:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-21 light damage state.

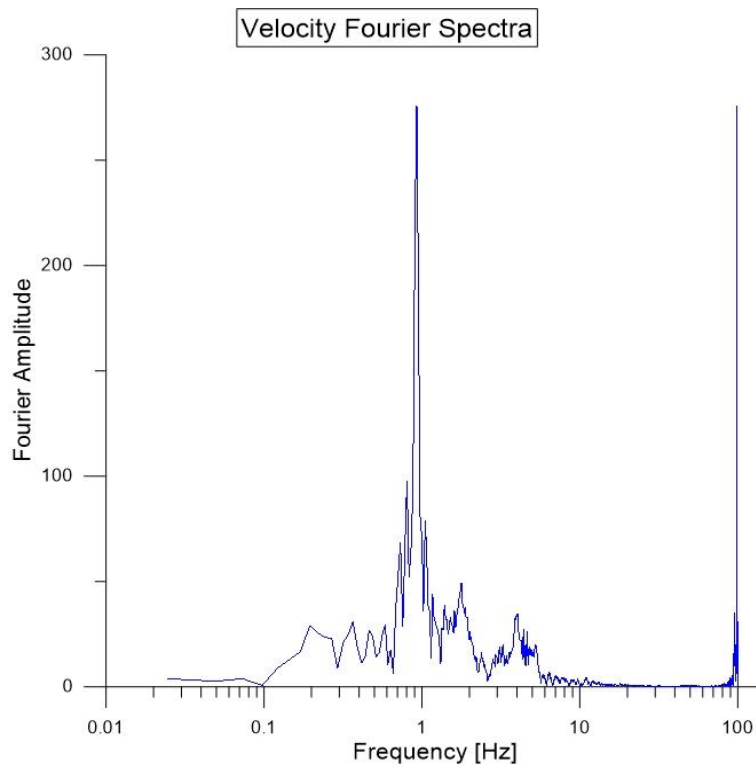
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
29.462	0.82	10	240	0.651
22.413	0.81	10	240	0.487
34.14	0.63	5.1	225	0.52
17.975	1.15	2.1	110	0.355
10.181	0.97	3.9	205	0.211
5.234	4.34	1.2	355	0.05

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 0.56 sec**

## DATA 1-21: MODERATE DAMAGE STATE

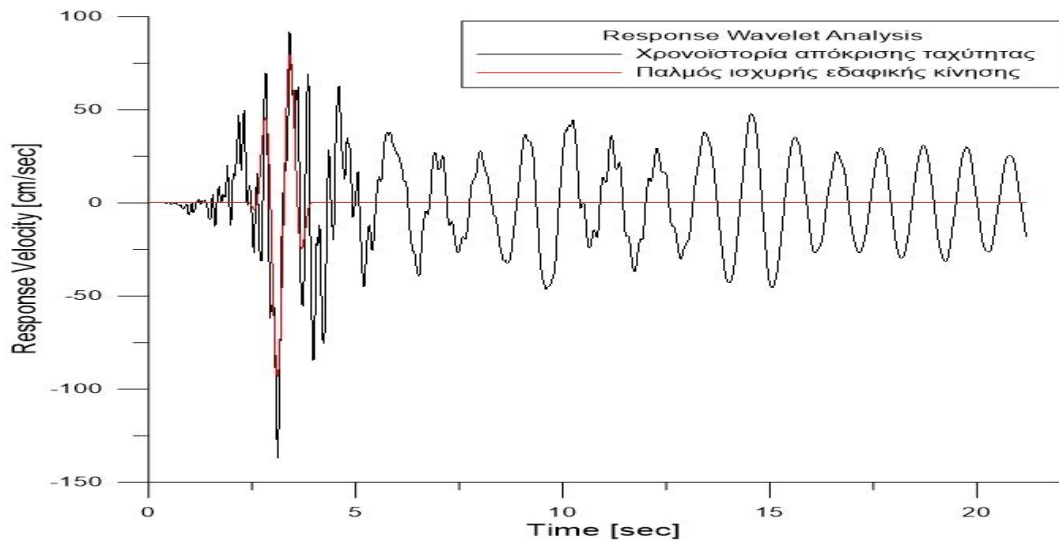


Σχήμα A49: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-21 moderate damage state.

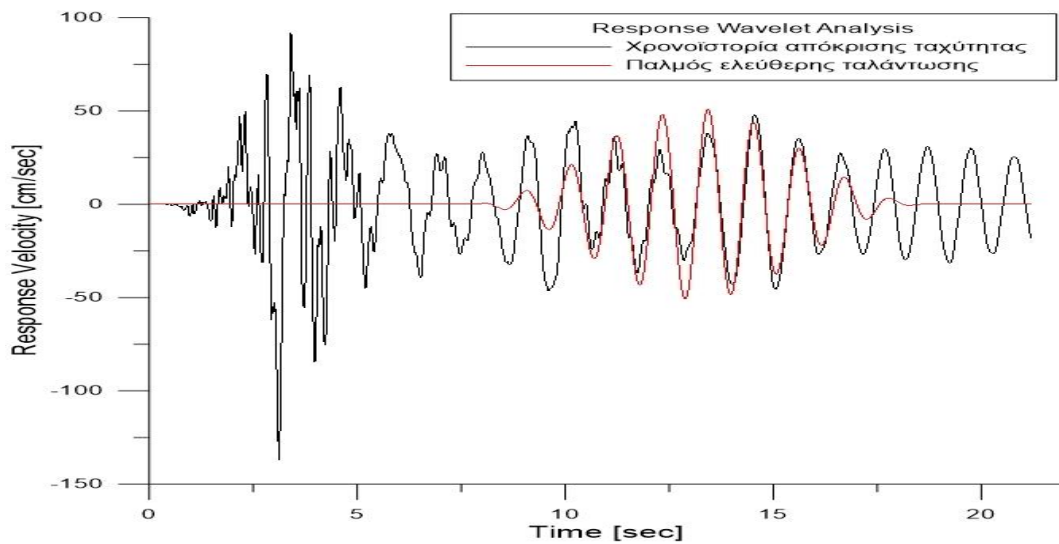


Σχήμα A50: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-21 moderate damage state.

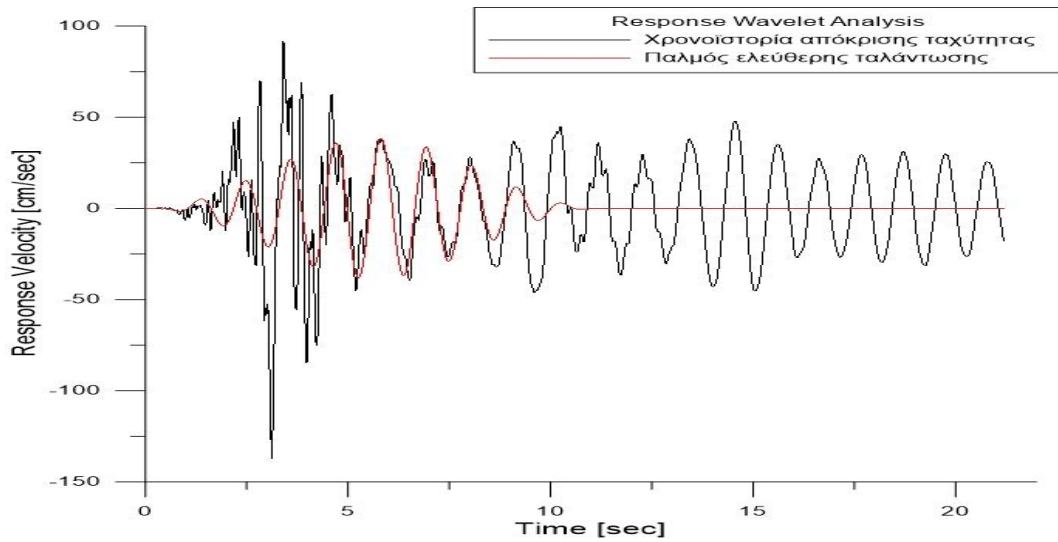




**Σχήμα A51:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (τέταρτο κυματίδιο) για Data 1-21 moderate damage state.



**Σχήμα A52:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-21 moderate damage state.



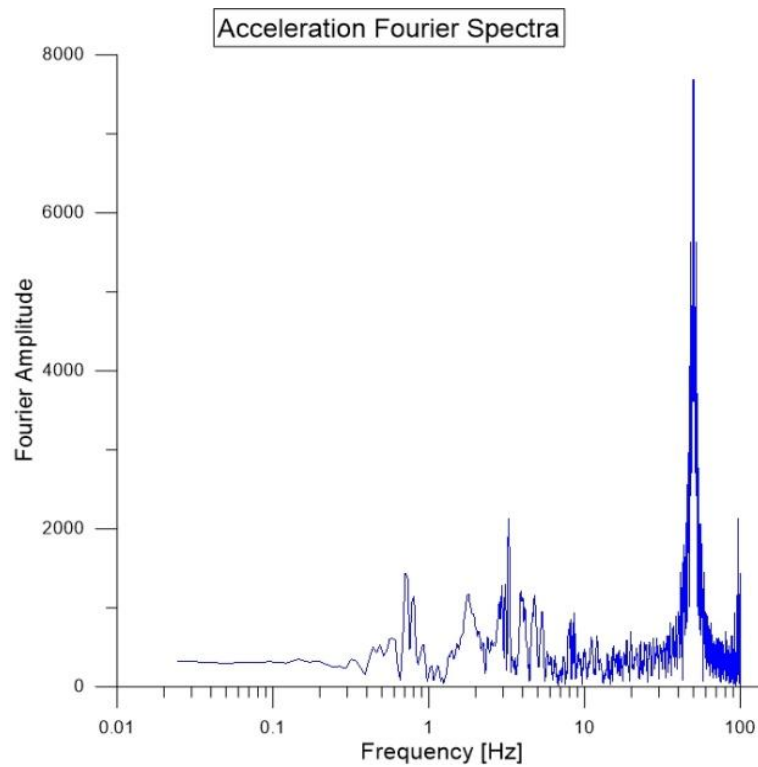
**Σχήμα A53:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-21 moderate damage state.

**Πίνακας A13:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-21 moderate damage state.

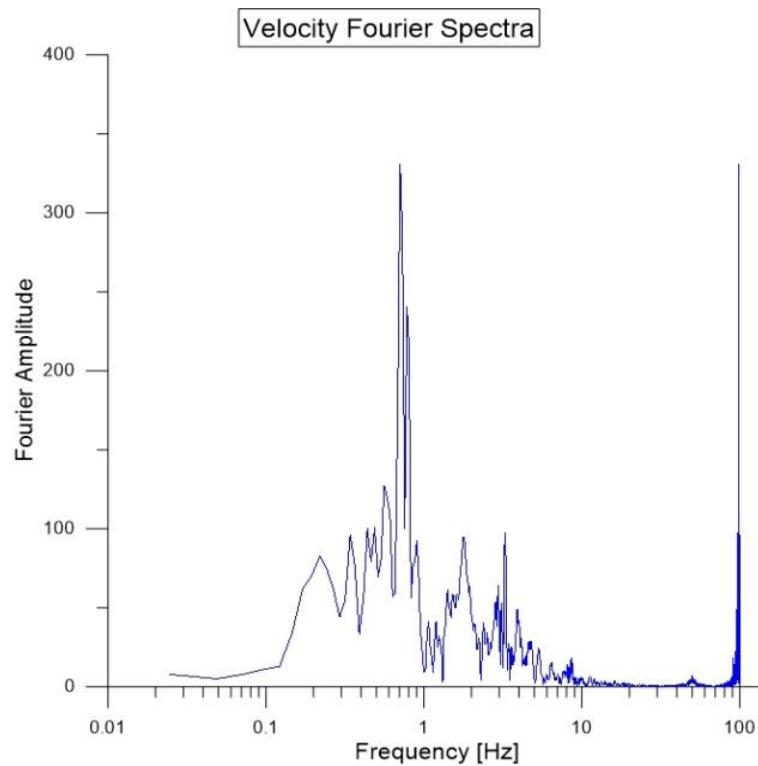
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
51.076	1.1	10	280	0.525
38.551	1.12	10	305	0.508
33.216	1.09	7.1	45	0.337
96.868	0.65	2.4	235	0.423
70.056	1.37	1.2	205	0.267
33.933	3.98	1.1	340	0.064

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 0.56 sec**

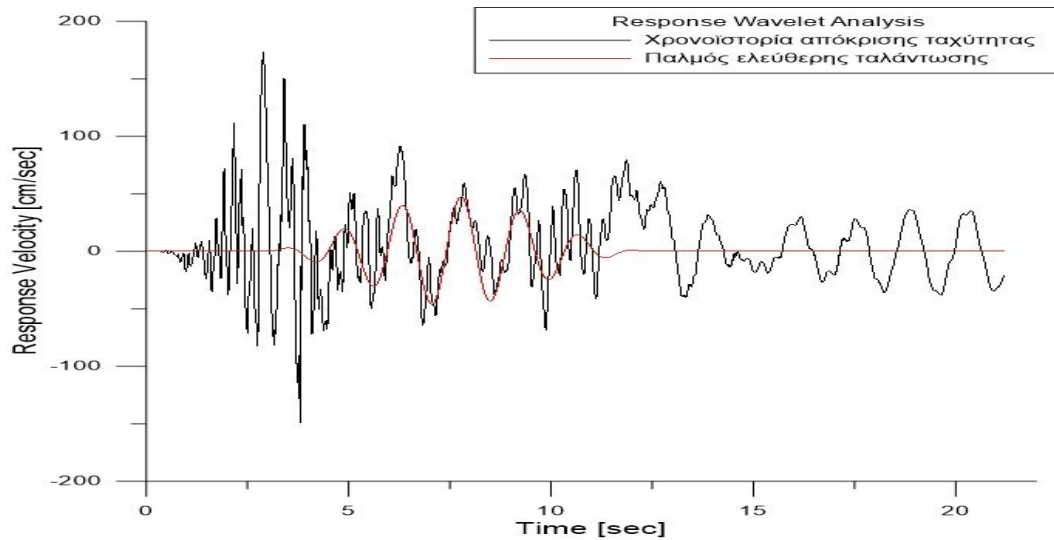
## DATA 1-21: EXTENSIVE DAMAGE STATE



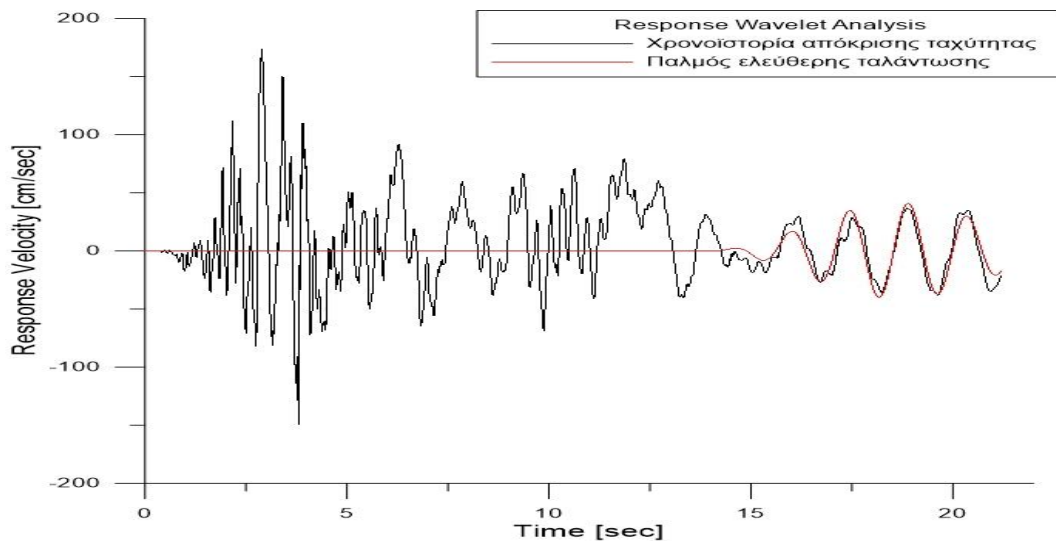
Σχήμα A54: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-21 extensive damage state.



Σχήμα A55: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-21 extensive damage state.



**Σχήμα A56:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (τρίτο κυματίδιο) για Data 1-21 extensive damage state.



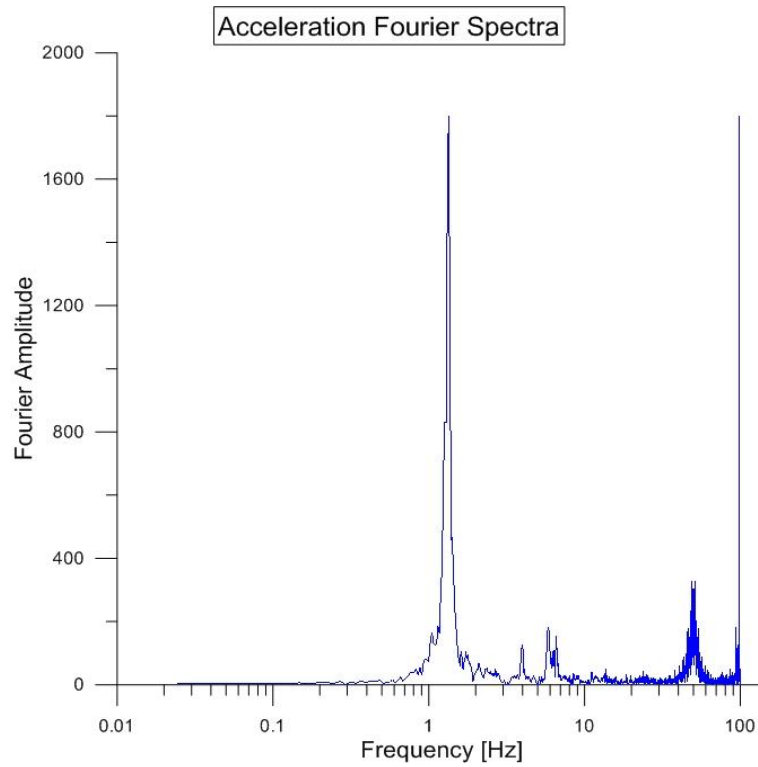
**Σχήμα A57:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (έκτο κυματίδιο) για Data 1-21 extensive damage state.

**Πίνακας A14:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-21 extensive damage state.

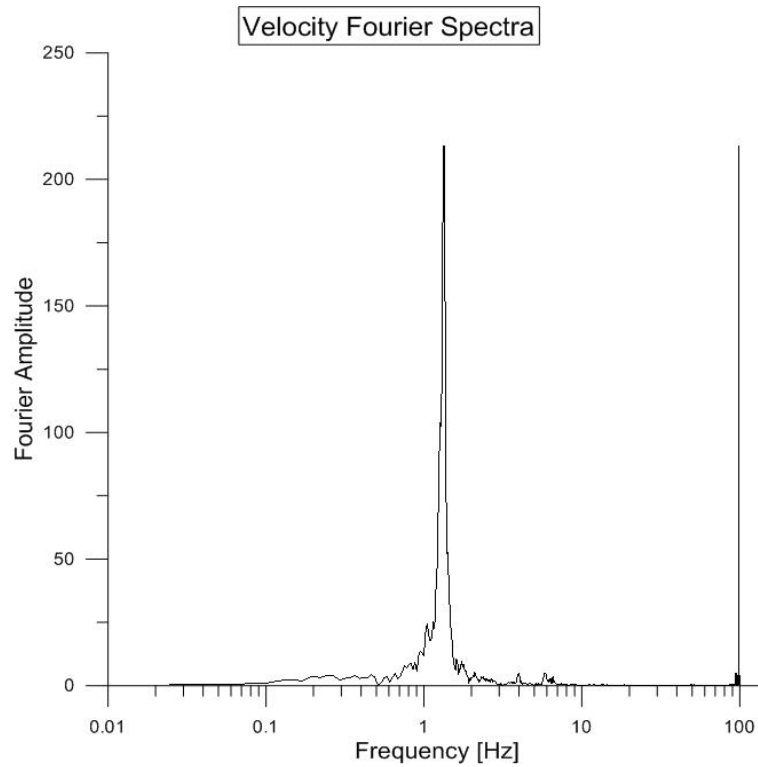
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
16.314	20	1.1	65	0.196
67.679	3.11	1.6	25	0.275
47.455	1.46	6.7	315	0.355
82.326	2.67	1.3	180	0.208
19.1	16.58	1.1	125	0.168
41.075	1.46	6.6	305	0.311

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 0.56 sec**

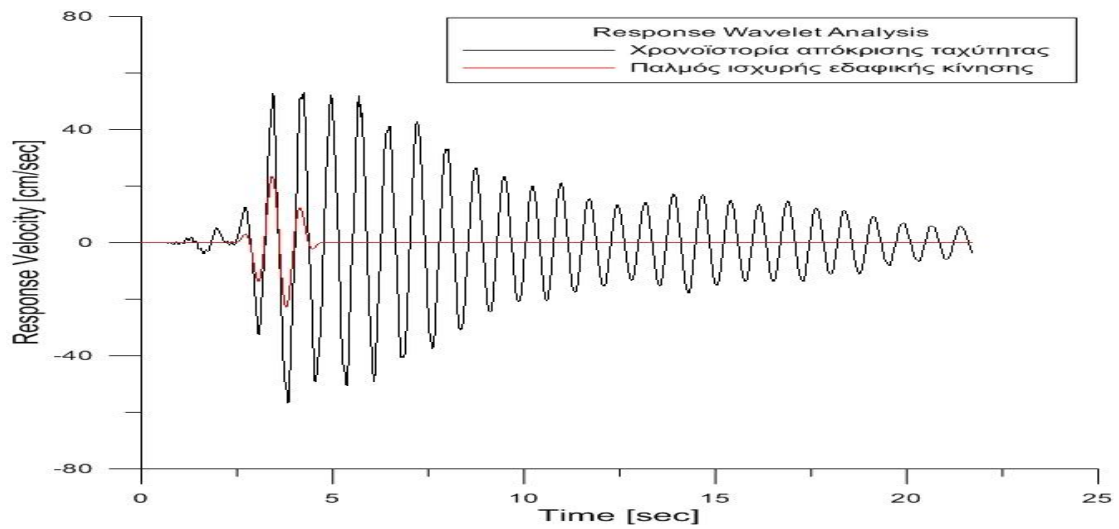
## DATA 1-22: SLIGHT DAMAGE STATE



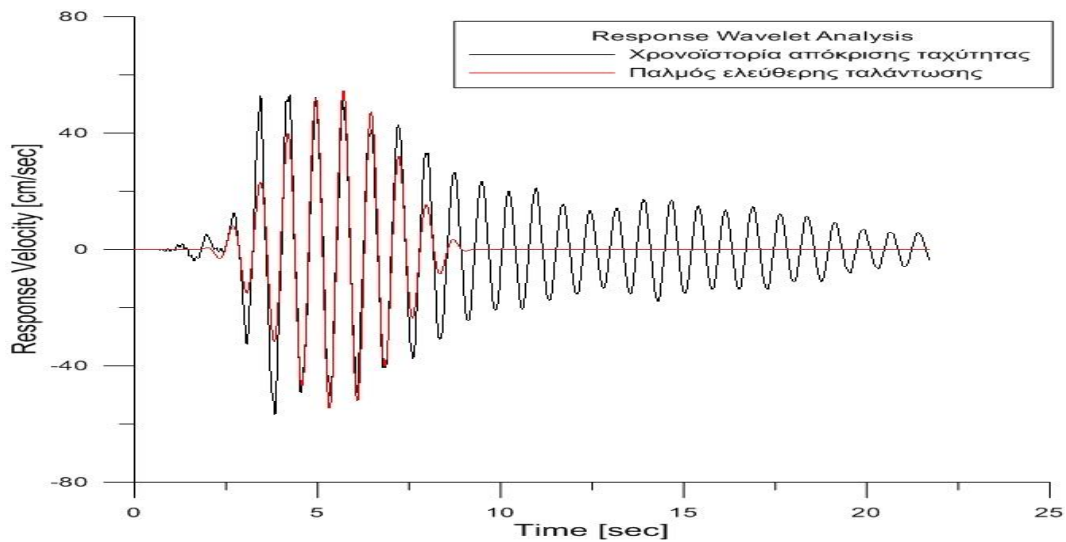
Σχήμα A58: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-22 slight damage state.



Σχήμα A59: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-22 slight damage state.



**Σχήμα Α60:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (τέταρτο κυματίδιο) για Data 1-22 slight damage state.



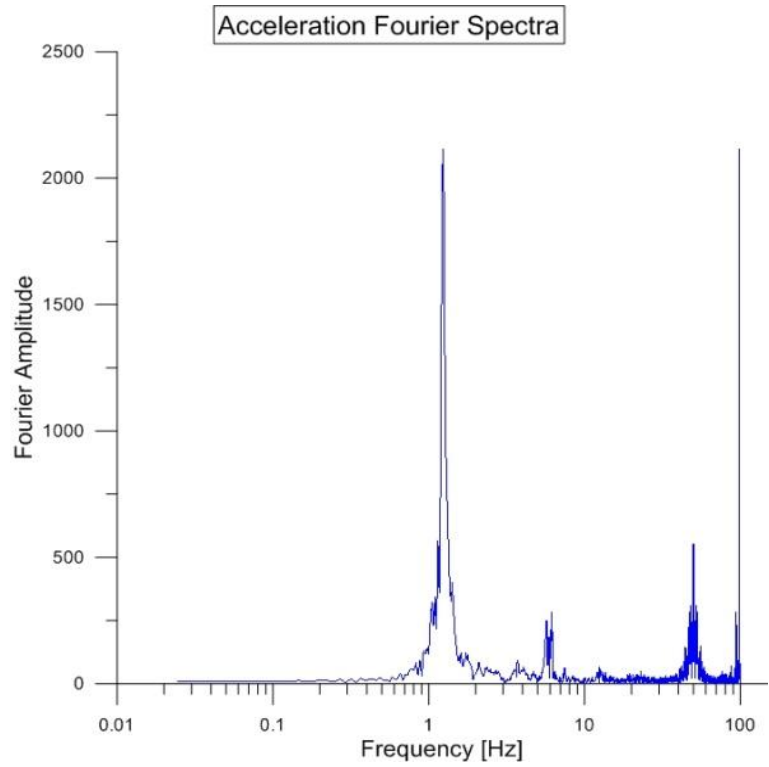
**Σχήμα Α61:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-22 slight damage state.

**Πίνακας Α15:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-22 slight damage state.

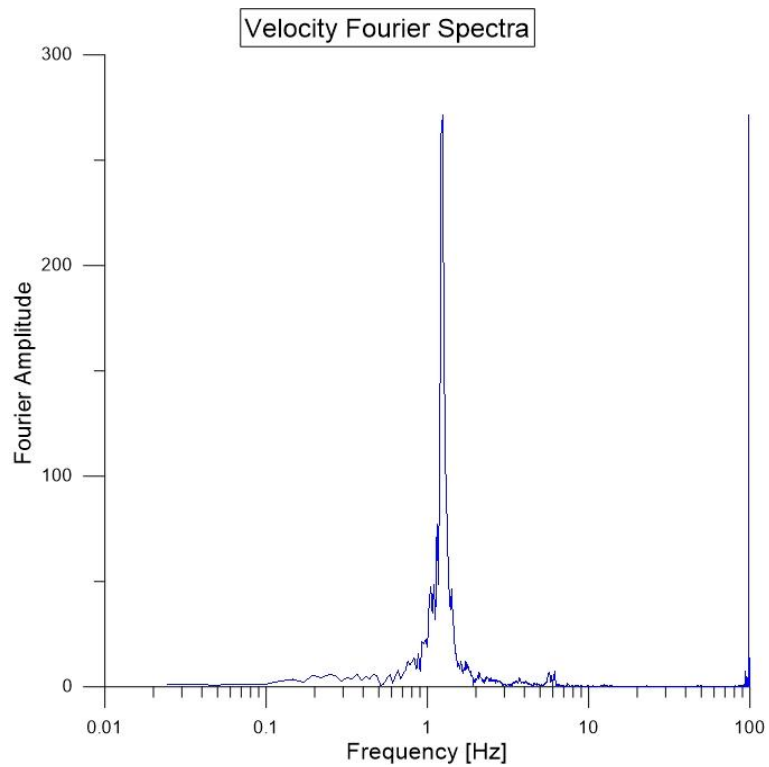
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
54.992	0.76	10	275	0.841
24.234	0.76	10	170	0.433
18.58	0.75	10	190	0.278
24.692	0.77	3	80	0.527
9.264	0.76	9.7	285	0.176
6.621	0.91	10	360	0.071

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 0.75 sec**

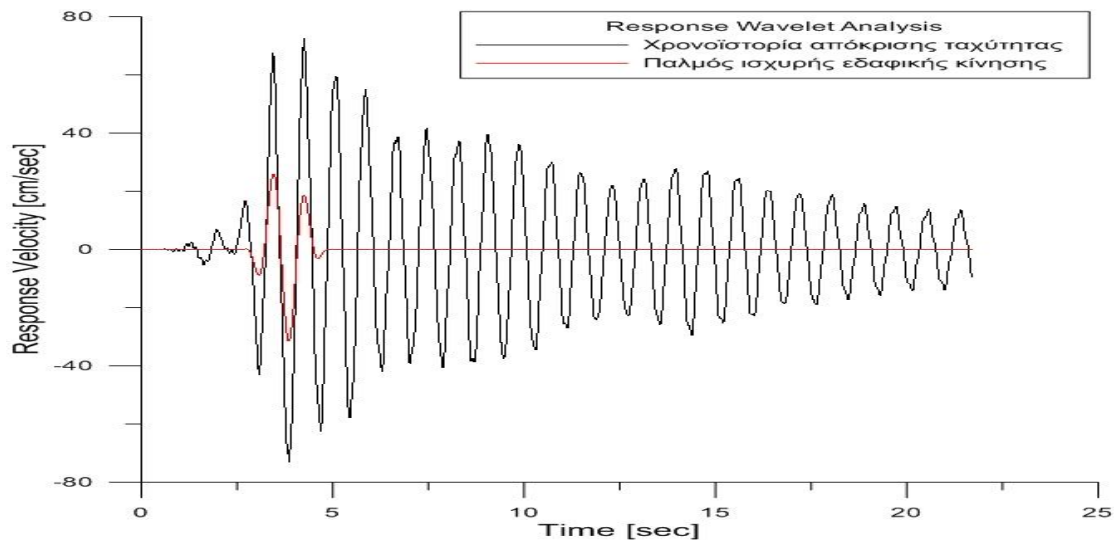
## DATA 1-22: LIGHT DAMAGE STATE



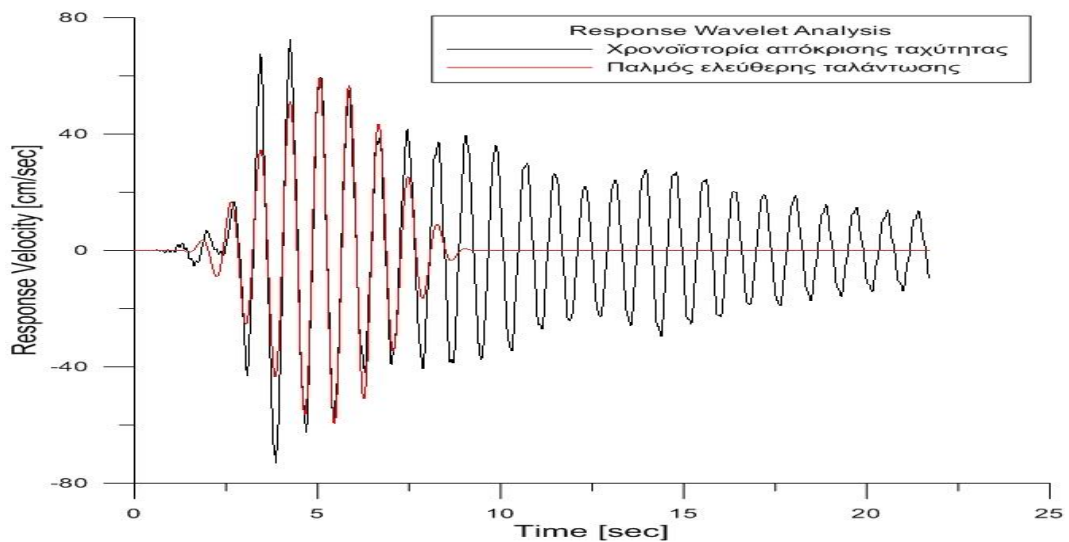
Σχήμα Α62: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-22 light damage state.



Σχήμα Α63: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-22 light damage state.



**Σχήμα A64:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (τέταρτο κυματίδιο) για Data 1-22 light damage state.



**Σχήμα A65:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-22 light damage state.

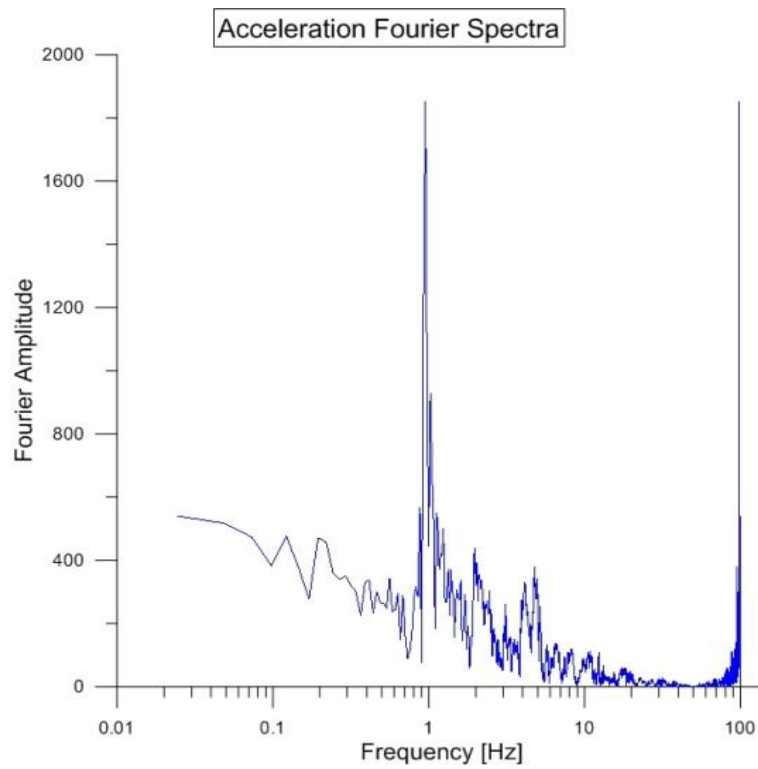
**Πίνακας A16:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-22 light damage state.

AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
59.787	0.81	10	90	0.764
36.926	0.82	10	180	0.49
26.93	0.83	10	325	0.362
32.123	0.86	2.6	140	0.501
15.105	0.86	8.5	315	0.199
8.558	0.99	9.5	230	0.058

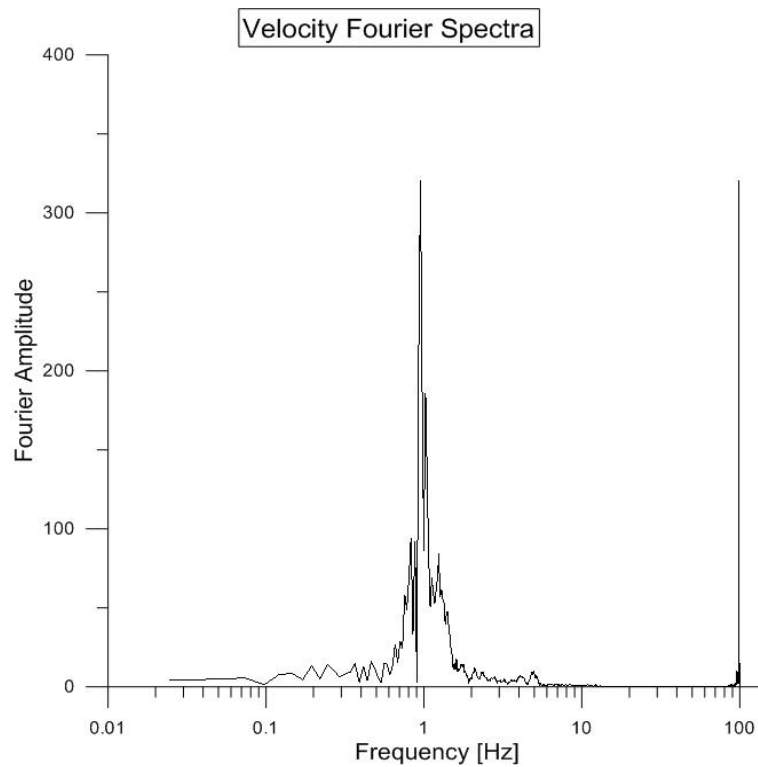
**Περίοδος παλμού διέγερσης: 0.75 sec**



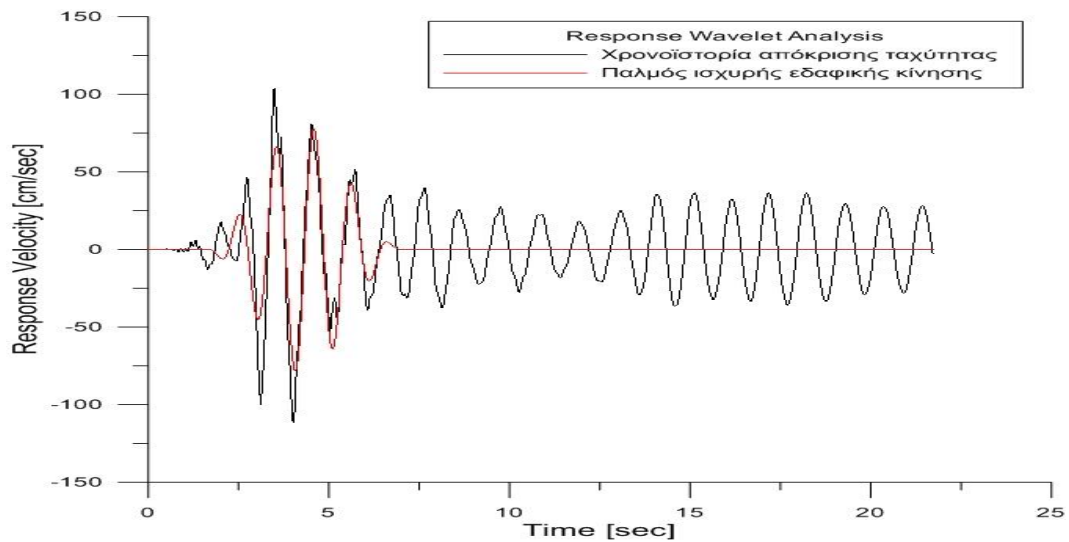
## DATA 1-22: MODERATE DAMAGE STATE



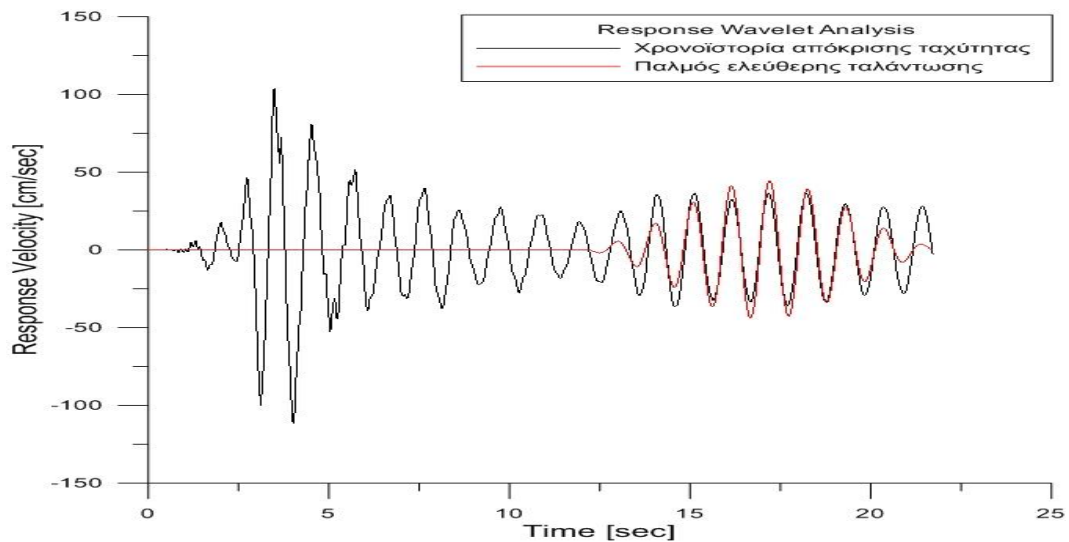
Σχήμα Α66: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-22 moderate damage state.



Σχήμα Α67: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-22 moderate damage state.



**Σχήμα A68:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-22 moderate damage state.



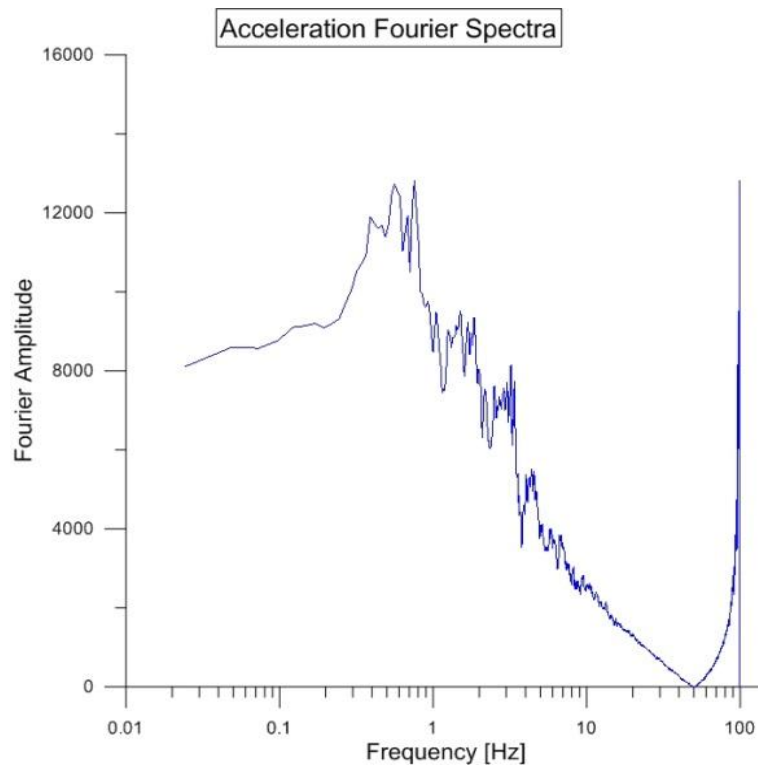
**Σχήμα A69:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-22 moderate damage state.

**Πίνακας A17:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-22 moderate damage state.

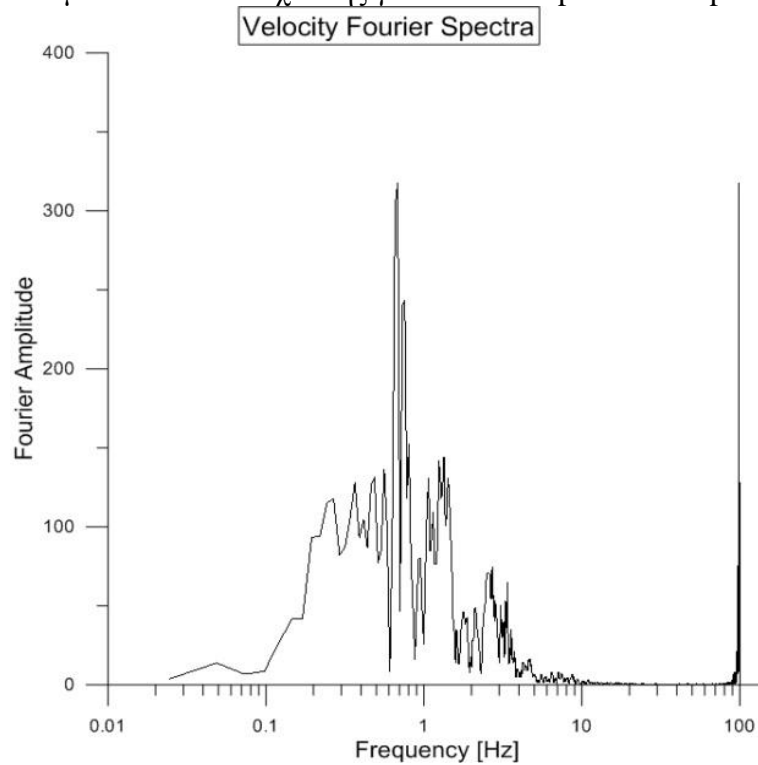
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
79.576	1.05	5.3	260	0.684
44.455	1.06	10	315	0.475
27.336	1.11	10	40	0.392
36.853	0.78	6.9	210	0.442
16.184	1.23	10	295	0.157
26.317	0.95	4.7	135	0.321

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 0.75 sec**

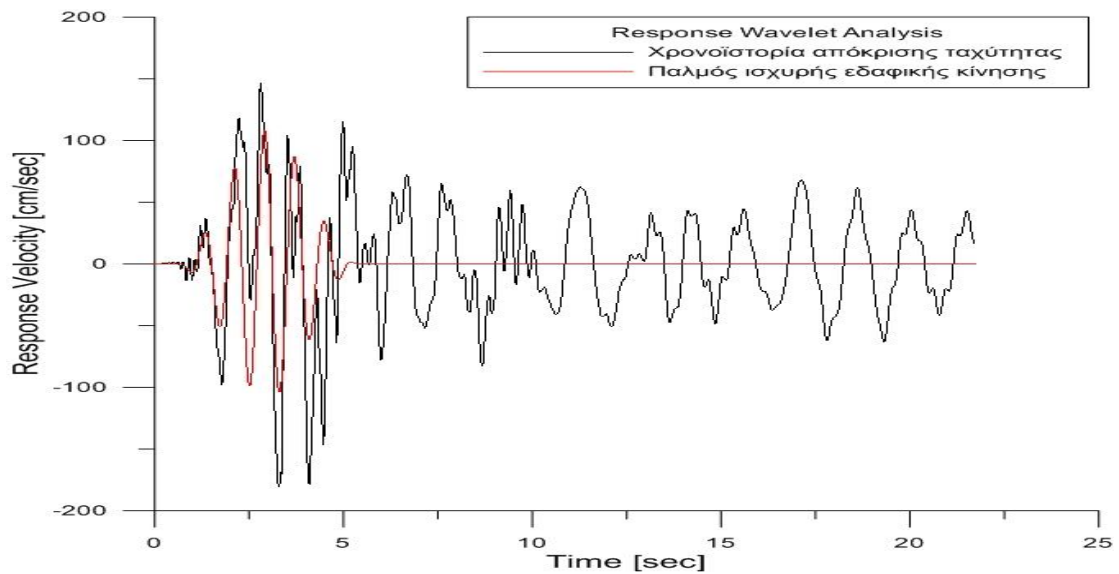
## DATA 1-22: PARTIAL COLLAPSE DAMAGE STATE



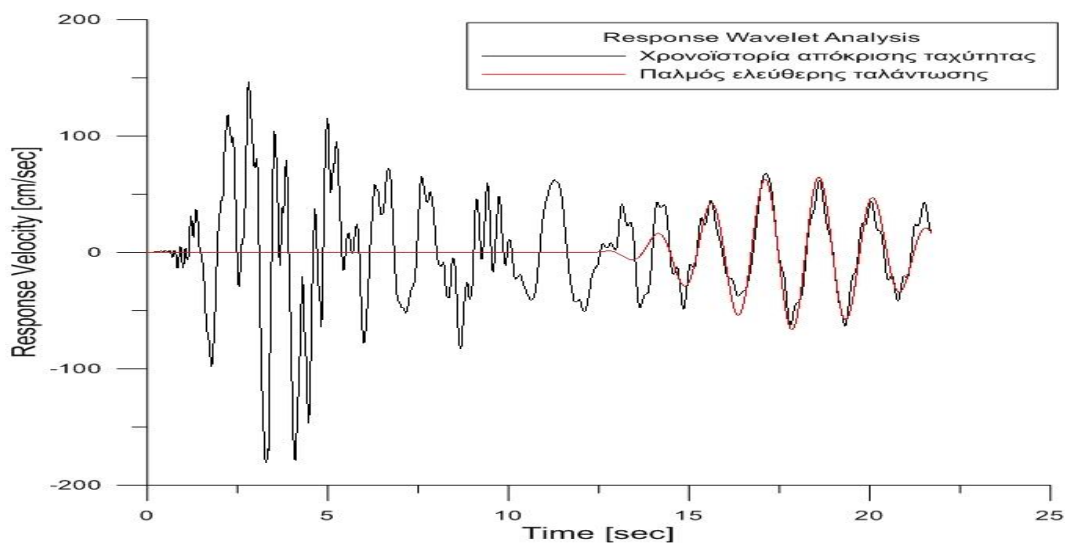
Σχήμα Α70: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-22 partial collapse damage state.



Σχήμα Α71: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-22 partial collapse damage state.



**Σχήμα A72:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πέμπτο κυματίδιο) για Data 1-22 partial collapse damage state.



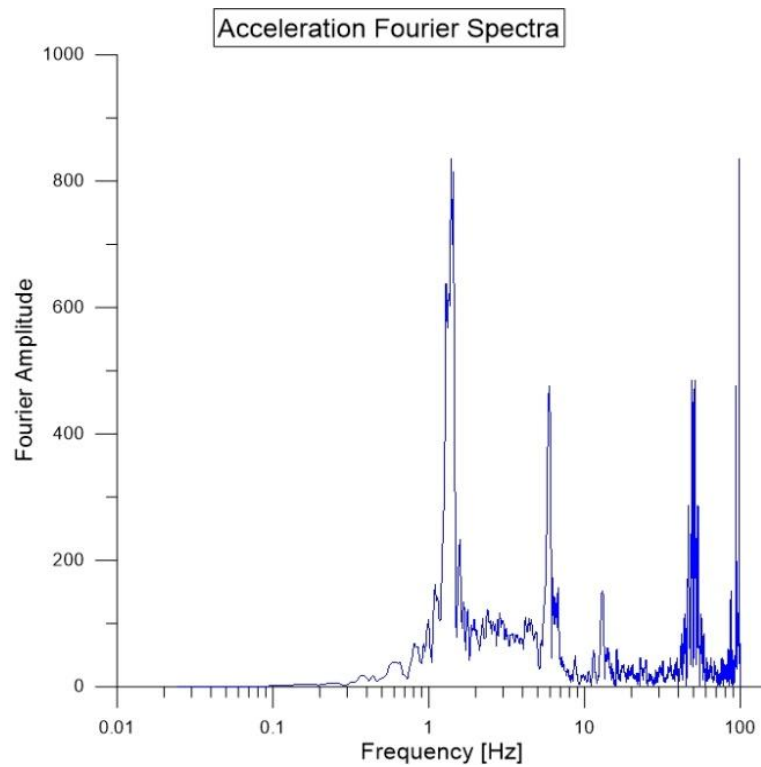
**Σχήμα A73:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-22 partial collapse damage state.

**Πίνακας A18:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-22 partial collapse damage state.

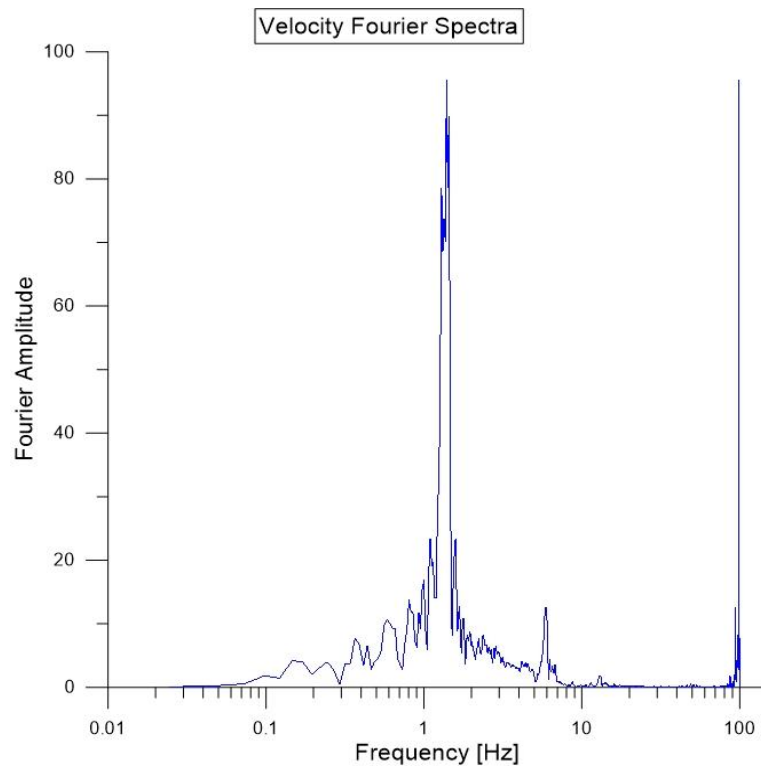
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
79.995	2.81	2.3	130	0.359
66.569	1.5	7.7	215	0.394
66.18	1.36	7.9	70	0.429
55.516	1.79	5.1	315	0.3
108.724	0.8	6.1	35	0.455
85.85	0.39	7.8	55	0.277

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 0.75 sec**

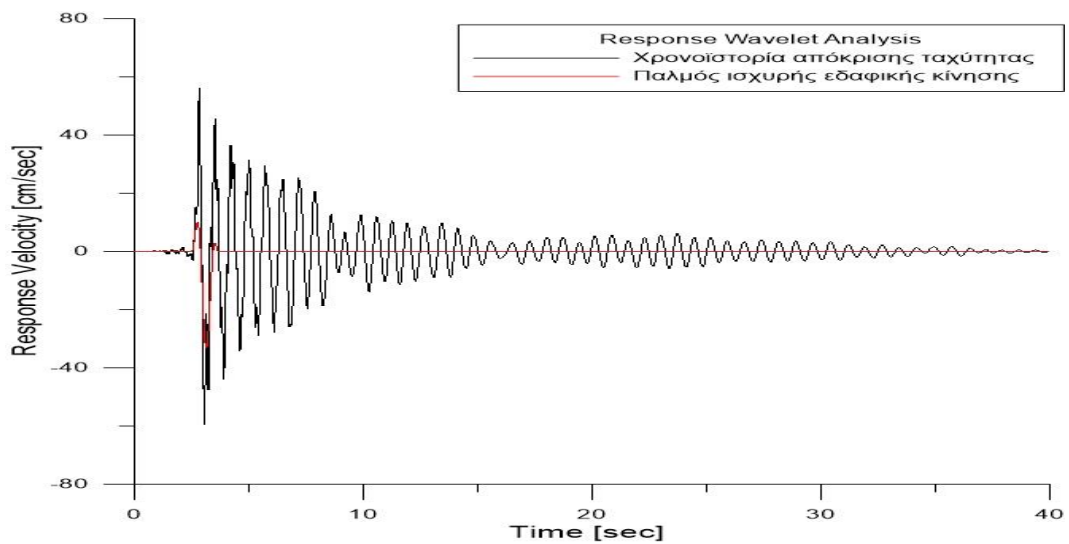
## DATA 1-23: SLIGHT DAMAGE STATE



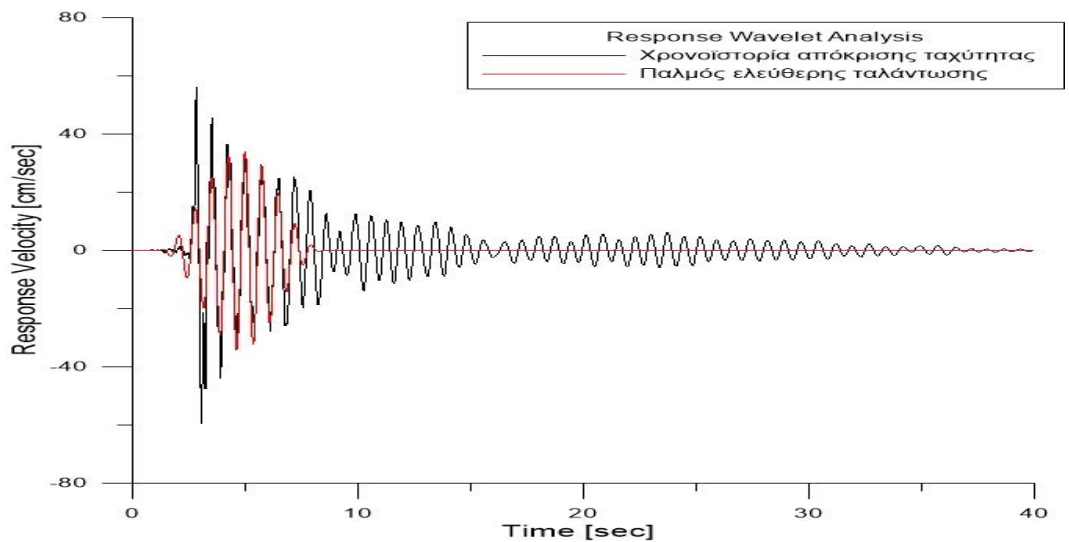
Σχήμα Α74: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-23 slight damage state.



Σχήμα Α75: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-23 slight damage state.



**Σχήμα A76:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (τρίτο κυματίδιο) για Data 1-23 slight damage state.



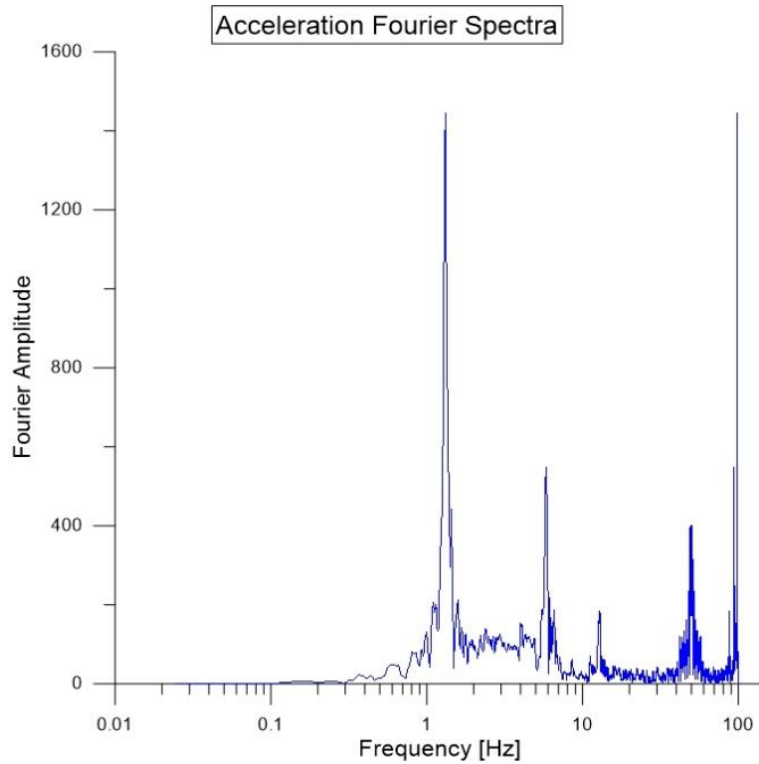
**Σχήμα A77:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-23 slight damage state.

**Πίνακας A19:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-23 slight damage state.

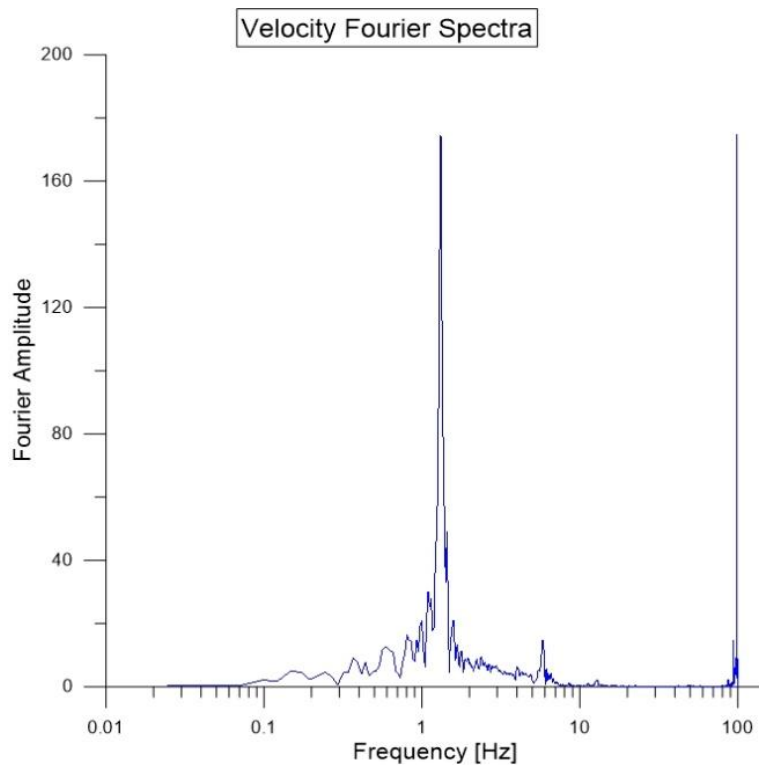
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
34.171	0.74	10	265	0.79
14.392	0.68	10	160	0.363
34.155	1.09	1.1	155	0.414
1.895	18.95	1.1	155	0.005
11.066	0.76	7.9	105	0.202
3.097	10.4	1.1	150	0.014

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 0.38 sec**

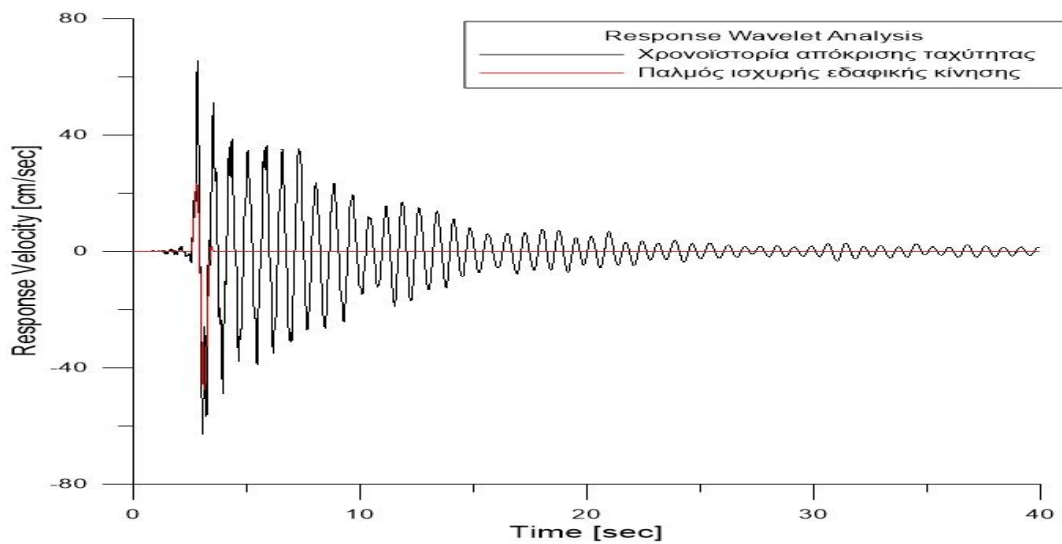
## DATA 1-23: LIGHT DAMAGE STATE



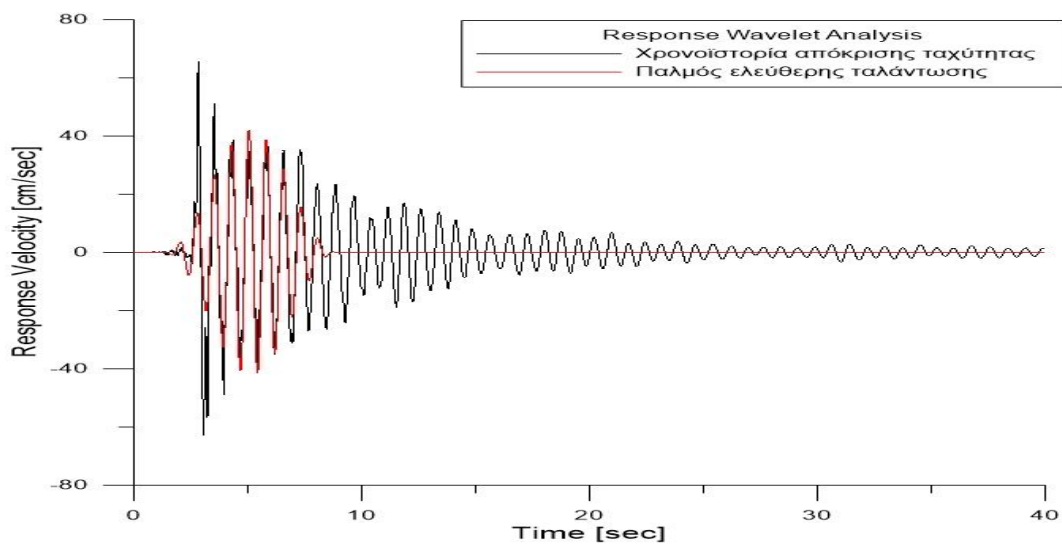
Σχήμα A78: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-23 light damage state.



Σχήμα A79: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-23 light damage state.



**Σχήμα A80:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (τέταρτο κυματίδιο) για Data 1-23 light damage state.



**Σχήμα A81:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-23 light damage state.

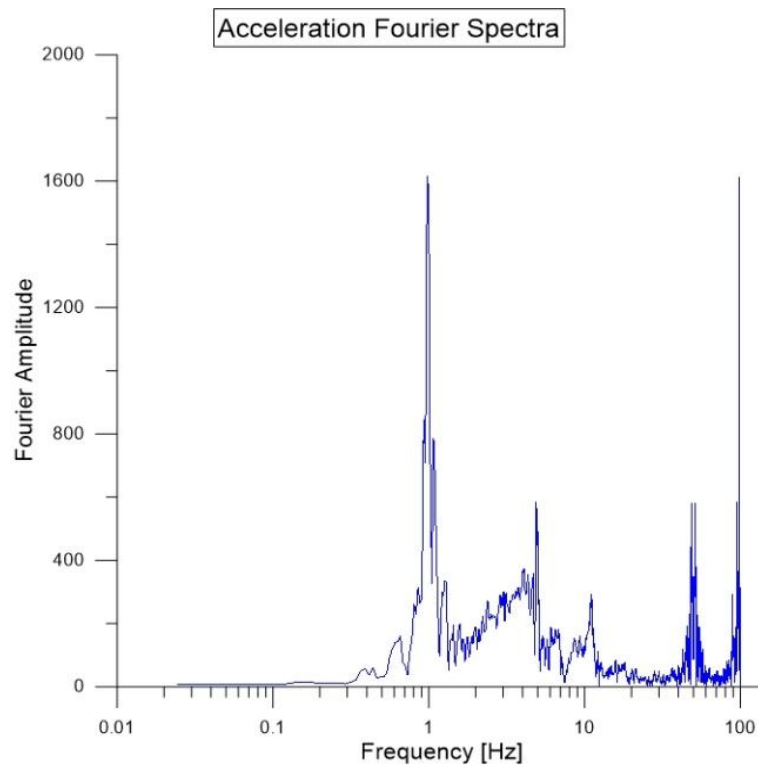
**Πίνακας A20:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-23 light damage state.

AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
42.116	0.76	10	30	0.767
26.596	0.86	5.5	355	0.341
16.775	0.76	10	235	0.315
53.207	0.94	1.1	130	0.414
21.98	0.98	2.3	355	0.291
1.638	20	1.1	150	0.004

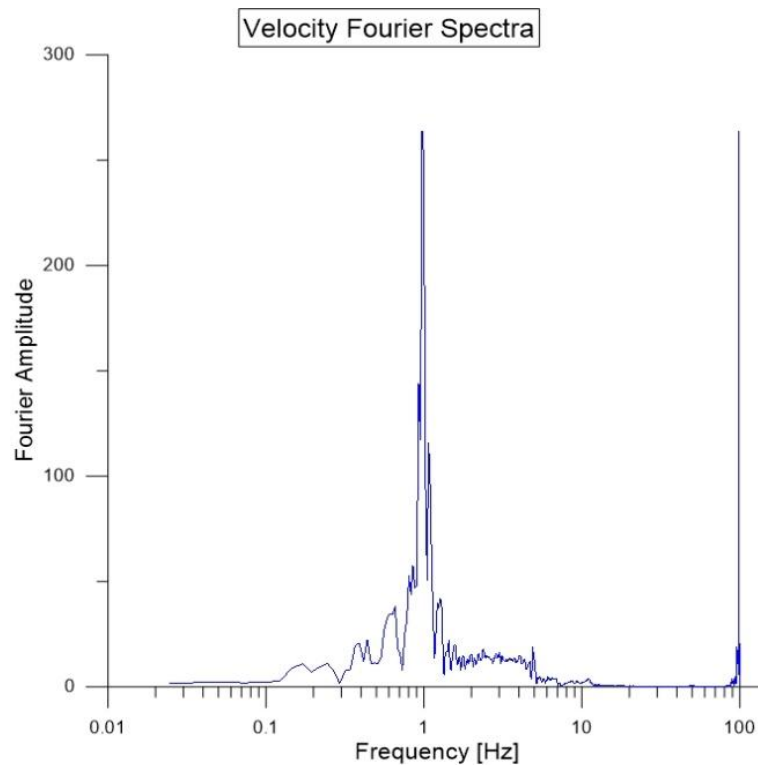
**Περίοδος παλμού διέγερσης: 0.38 sec**



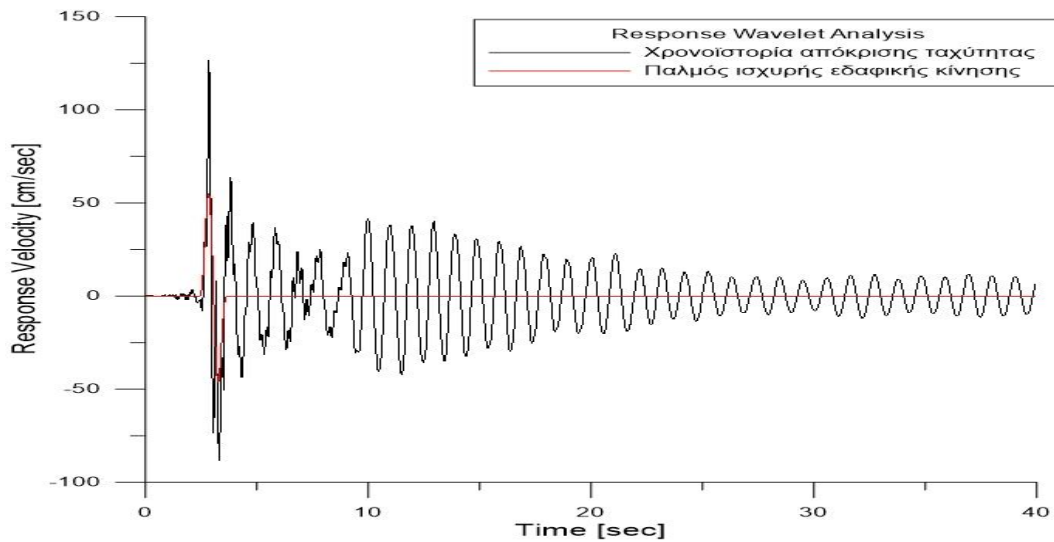
## DATA 1-23: MODERATE DAMAGE STATE



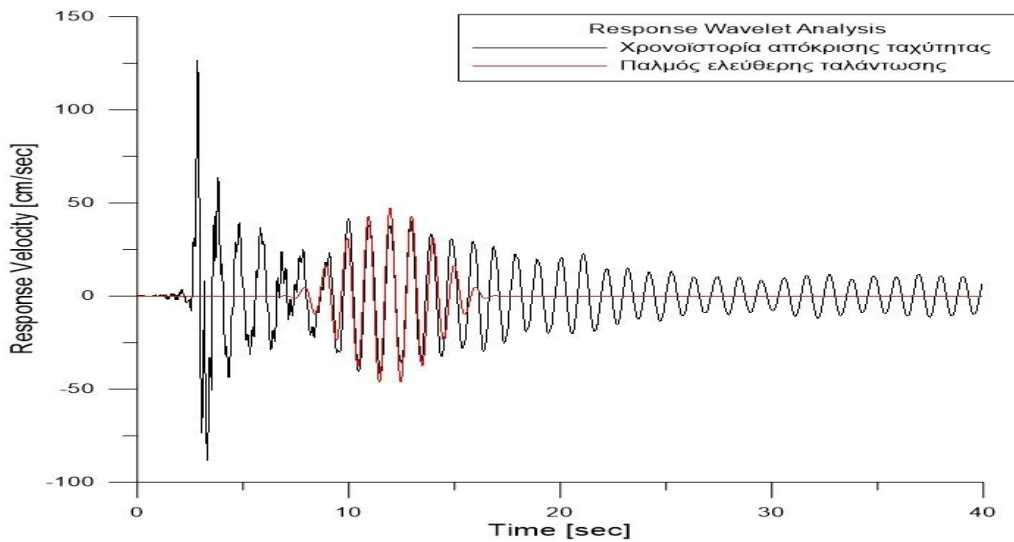
Σχήμα A82: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-23 moderate damage state.



Σχήμα A83: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-23 moderate damage state.



**Σχήμα A84:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (τέταρτο κυματίδιο) για Data 1-23 moderate damage state.



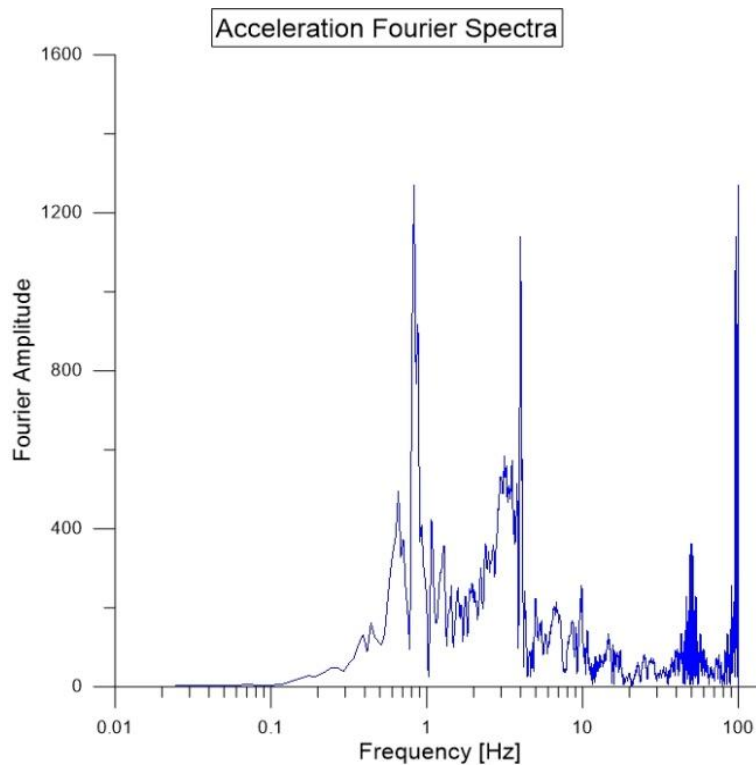
**Σχήμα A85:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-23 moderate damage state.

**Πίνακας A21:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-23 moderate damage state.

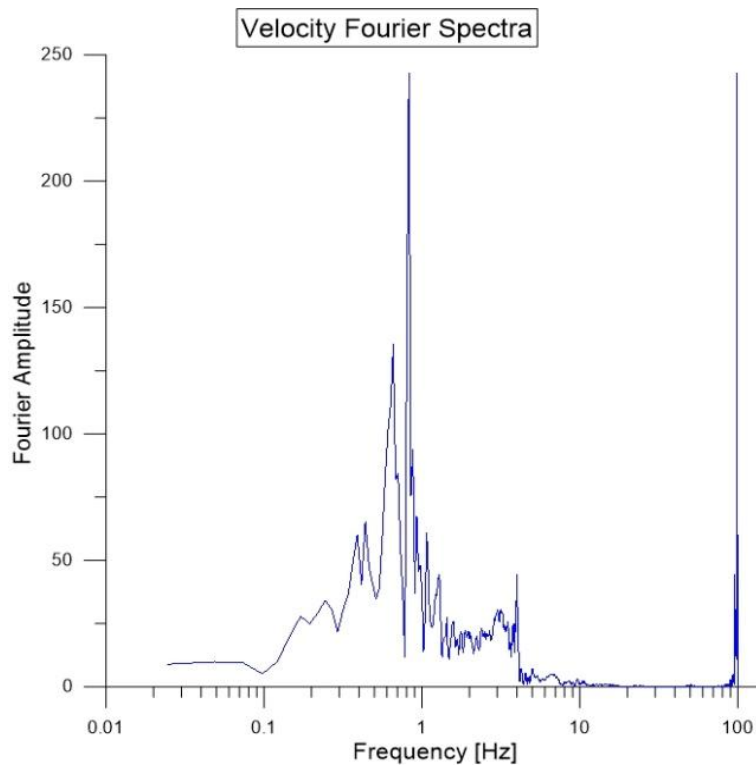
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
47.293	1.02	10	360	0.536
46.455	1.04	6.9	125	0.511
27.955	1.07	10	115	0.351
74.095	1.21	1.1	80	0.408
15.812	1.21	10	45	0.1
17.162	1.17	7.2	360	0.207

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 0.38 sec**

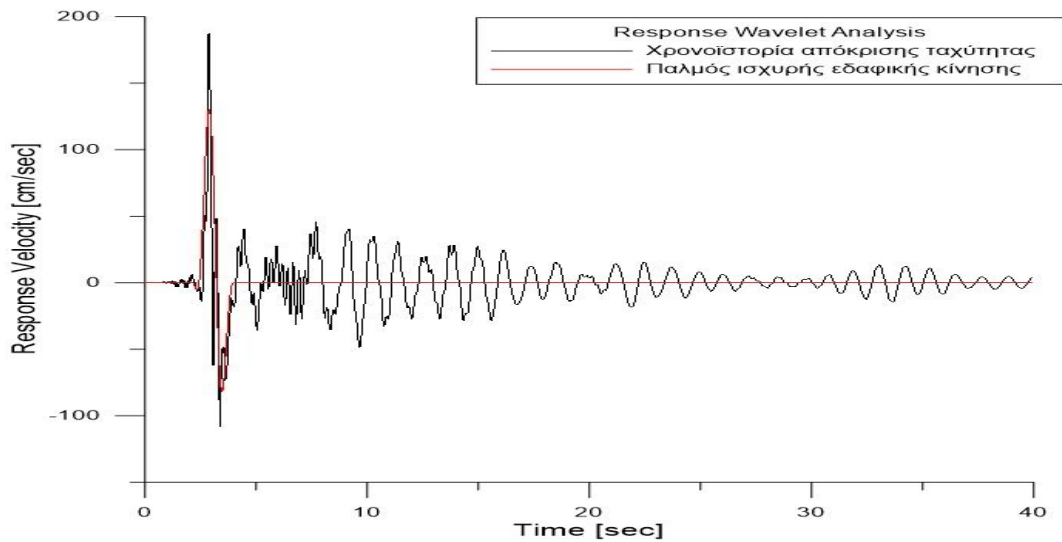
## DATA 1-23: EXTENSIVE DAMAGE STATE



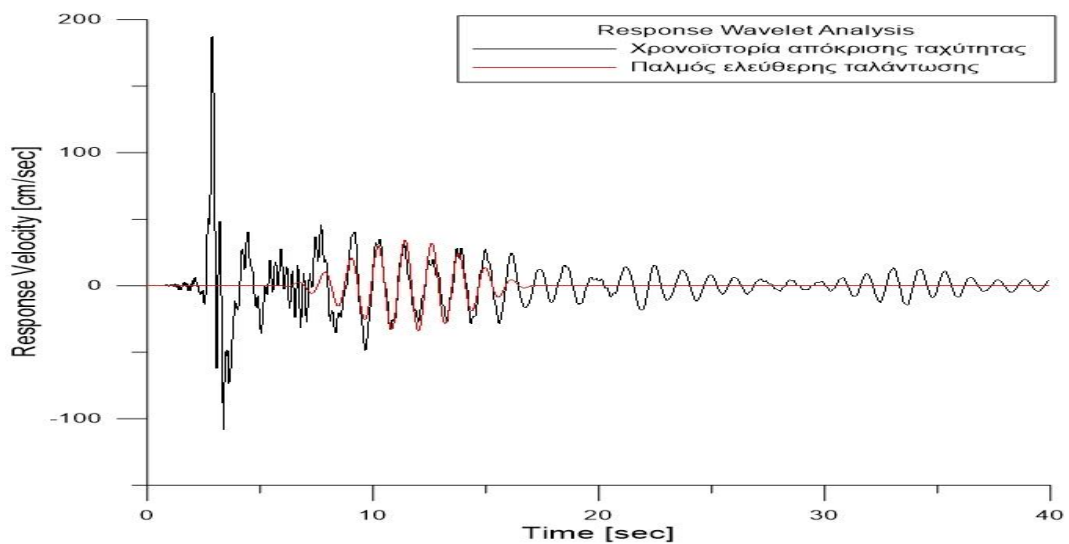
Σχήμα A86: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-23 extensive damage state.



Σχήμα A87: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-23 extensive damage state.



**Σχήμα A88:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-23 extensive damage state.



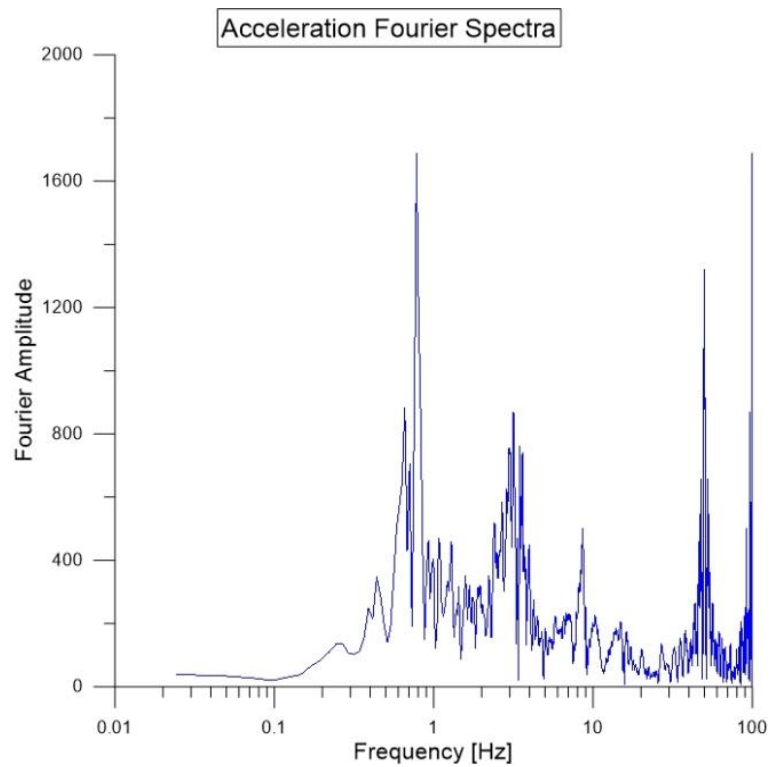
**Σχήμα A89:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-23 extensive damage state.

**Πίνακας A22:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-23 extensive damage state.

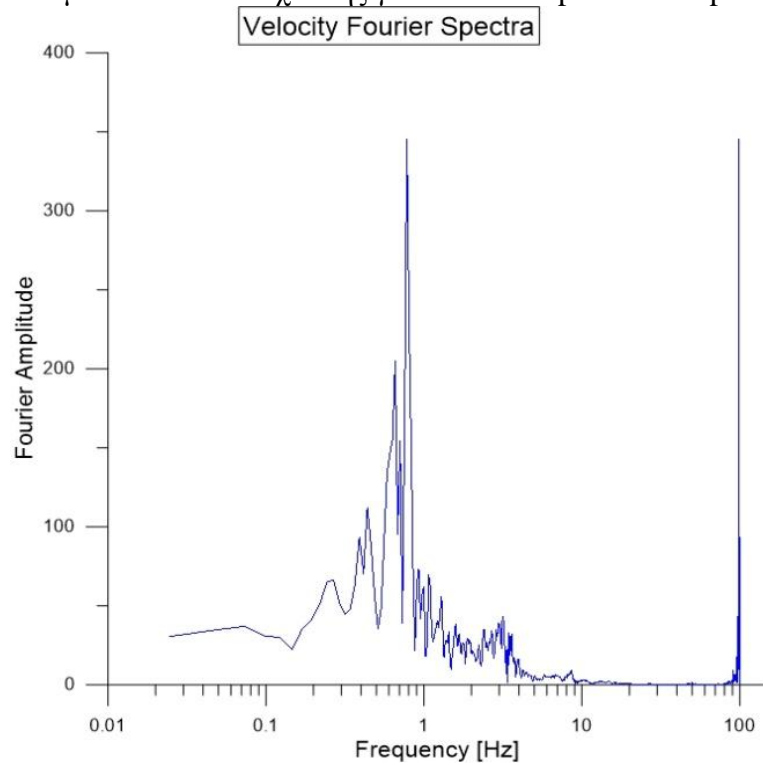
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
150.117	1.57	1.2	60	0.584
34.315	1.19	10	60	0.464
27.223	1.78	4	285	0.247
27.01	3.88	1.2	215	0.174
15.78	1.28	10	55	0.214
114.975	0.42	2	170	0.301

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 0.38 sec**

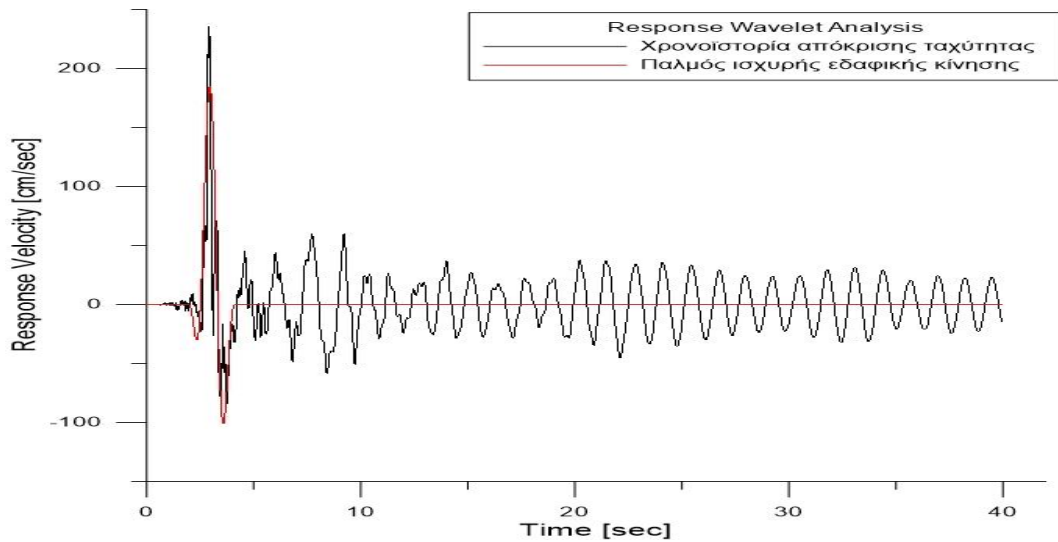
## DATA 1-23: PARTIAL COLLAPSE DAMAGE STATE



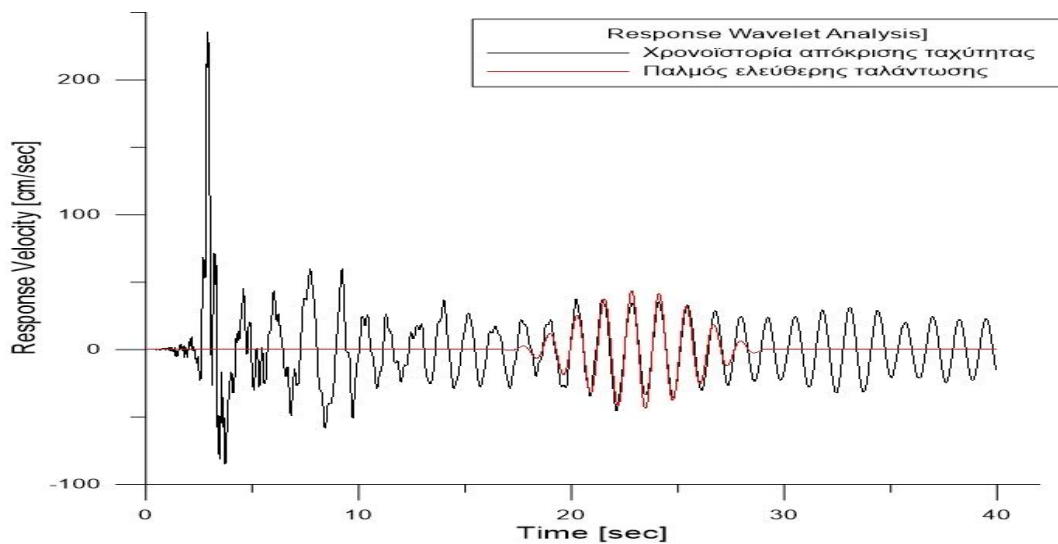
Σχήμα Α90: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-23 partial collapse damage state.



Σχήμα Α91: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-23 partial collapse damage state.



**Σχήμα A92:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-23 partial collapse damage state.



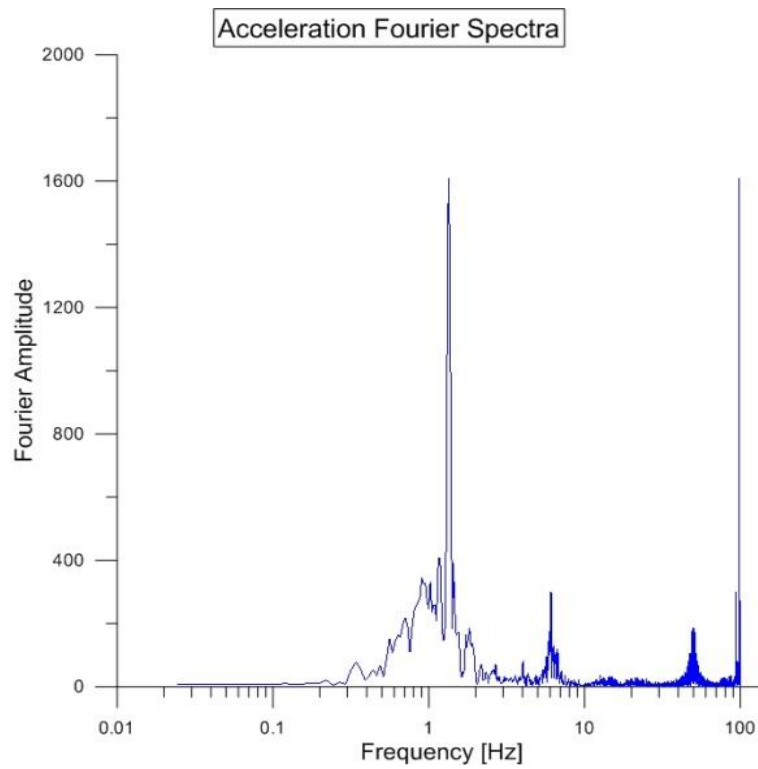
**Σχήμα A93:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (τρίτο κυματίδιο) για Data 1-23 partial collapse damage state.

**Πίνακας A23:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-23 partial collapse damage state.

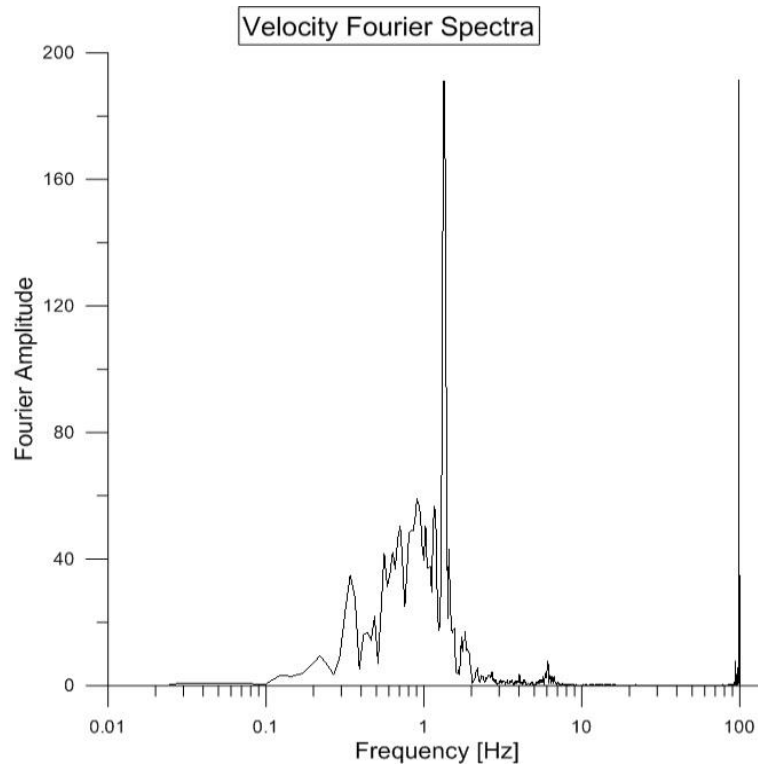
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
194.428	1.6	1.4	40	0.54
56.657	1.45	5.2	55	0.356
43.99	1.29	10	90	0.406
33.735	1.29	10	360	0.331
26.867	1.29	10	210	0.404
112.966	1.18	1.1	280	0.202

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 0.38 sec**

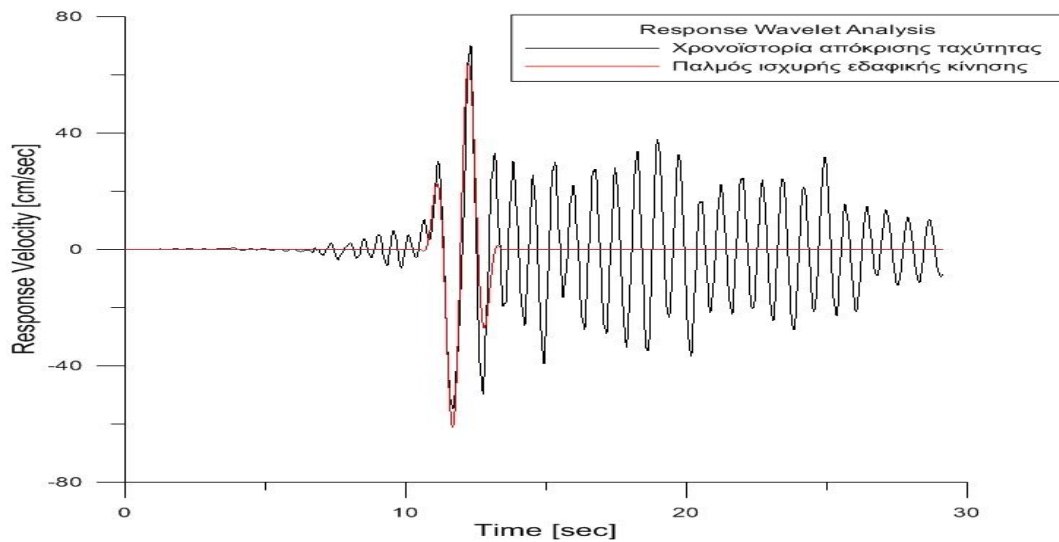
## DATA 1-27: SLIGHT DAMAGE STATE



Σχήμα Α94: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-27 slight damage state.



Σχήμα Α95: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-27 slight damage state.



**Σχήμα Α96:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-27 slight damage state.

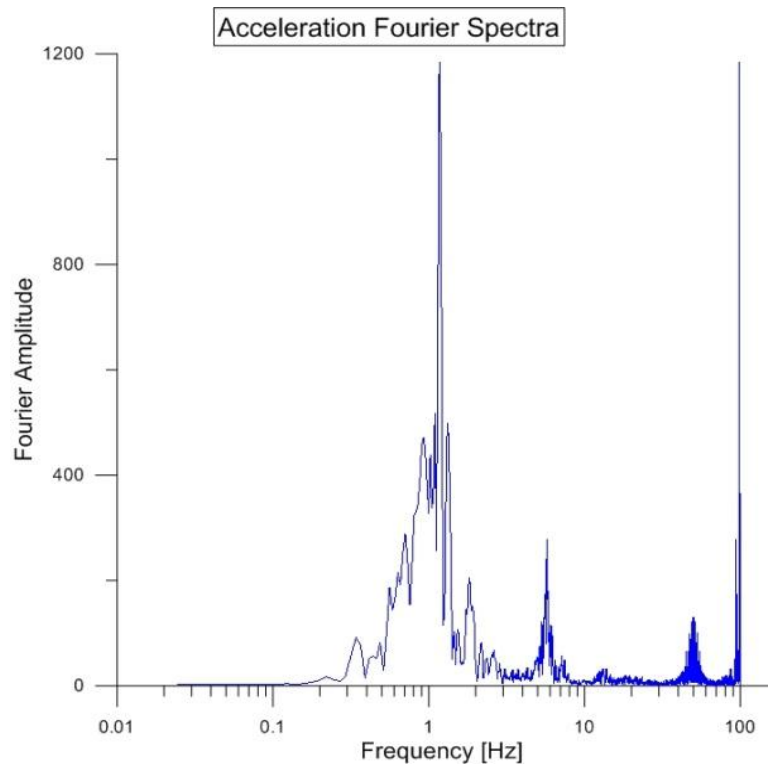
**Πίνακας Α24:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-27 slight damage state.

AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
69.105	1.24	2.4	280	0.559

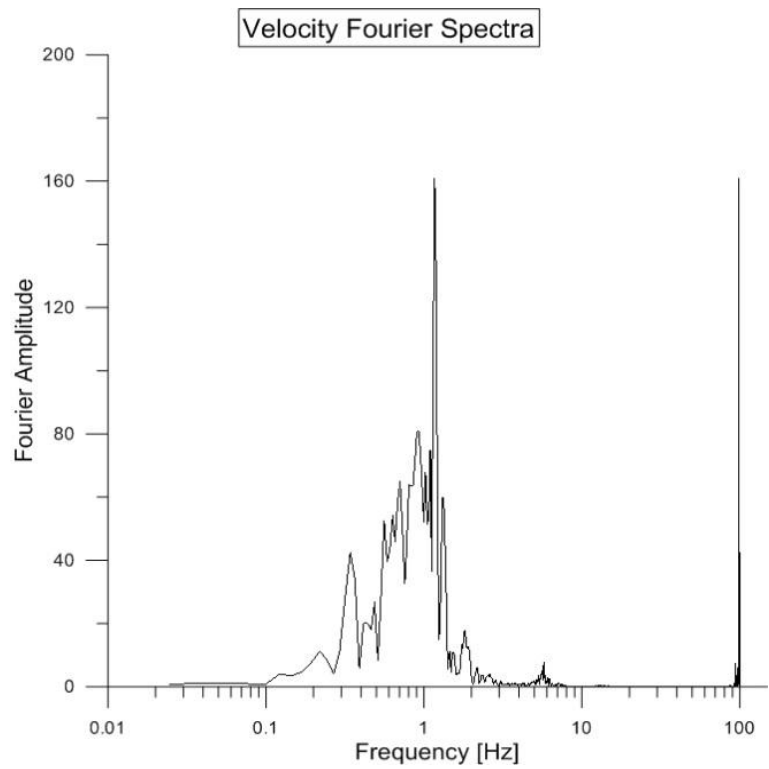
**Περίοδος παλμού διέγερσης: 1.39 sec**



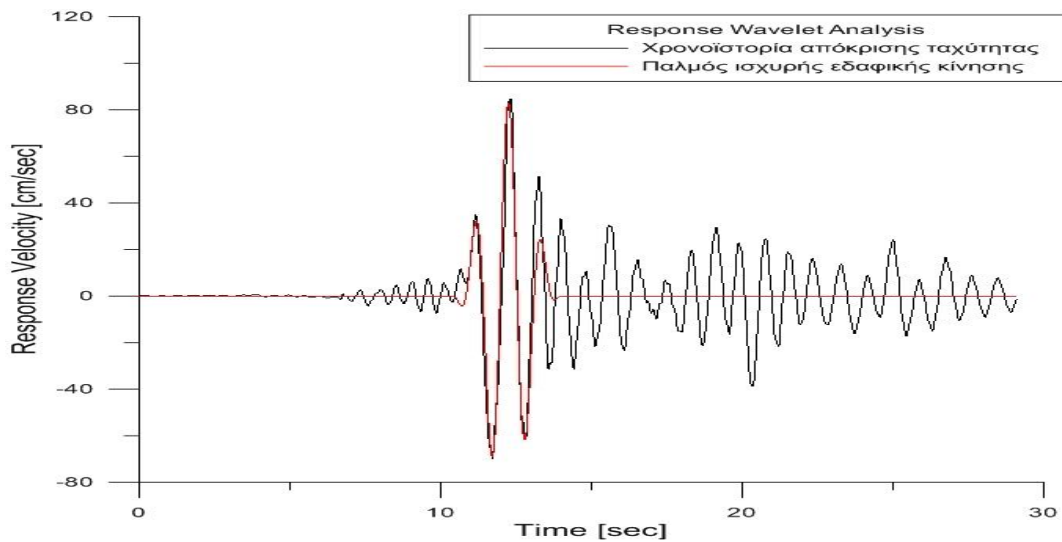
## DATA 1-27: LIGHT DAMAGE STATE



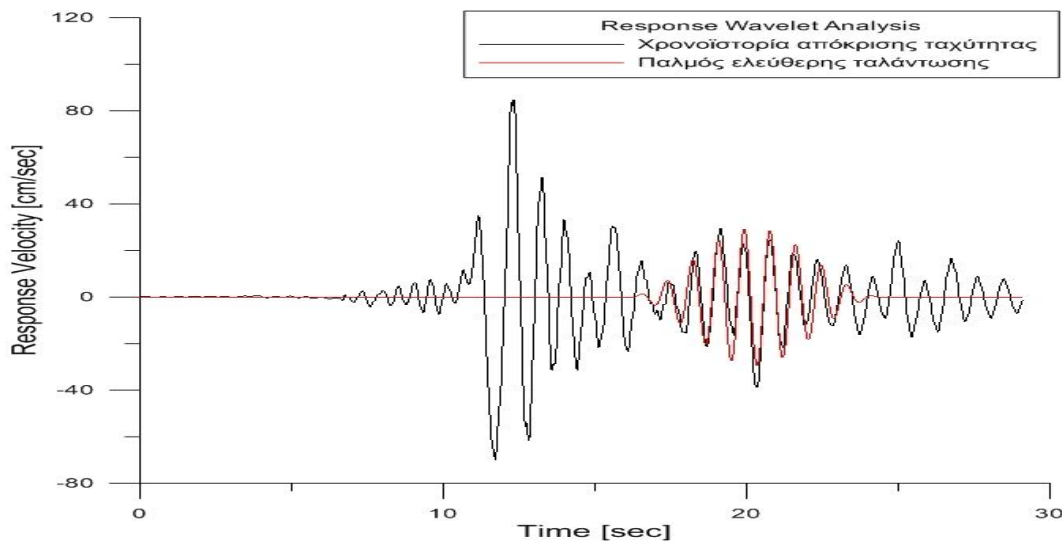
Σχήμα Α97: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-27 light damage state.



Σχήμα Α98: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-27 light damage state.



**Σχήμα A99:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-27 light damage state.



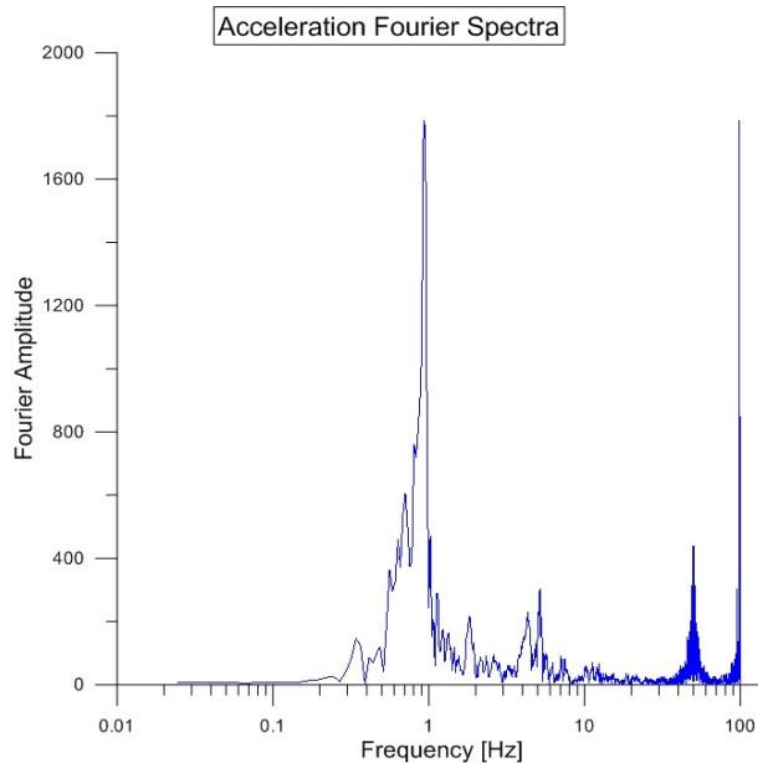
**Σχήμα A100:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-27 light damage state.

**Πίνακας A25:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-27 light damage state.

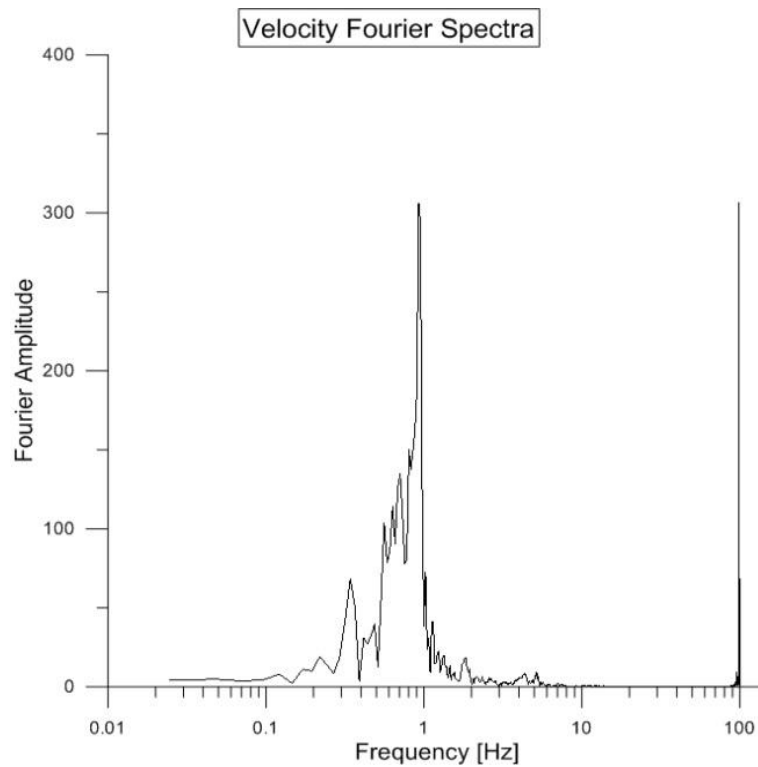
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
83.265	1.13	3.2	340	0.749
29.564	0.85	10	135	0.361
28.244	0.82	8.2	165	0.49
6.948	3.04	8.1	45	0.145
15.499	0.92	10	325	0.206
13.954	1.28	6	110	0.119

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 1.39 sec**

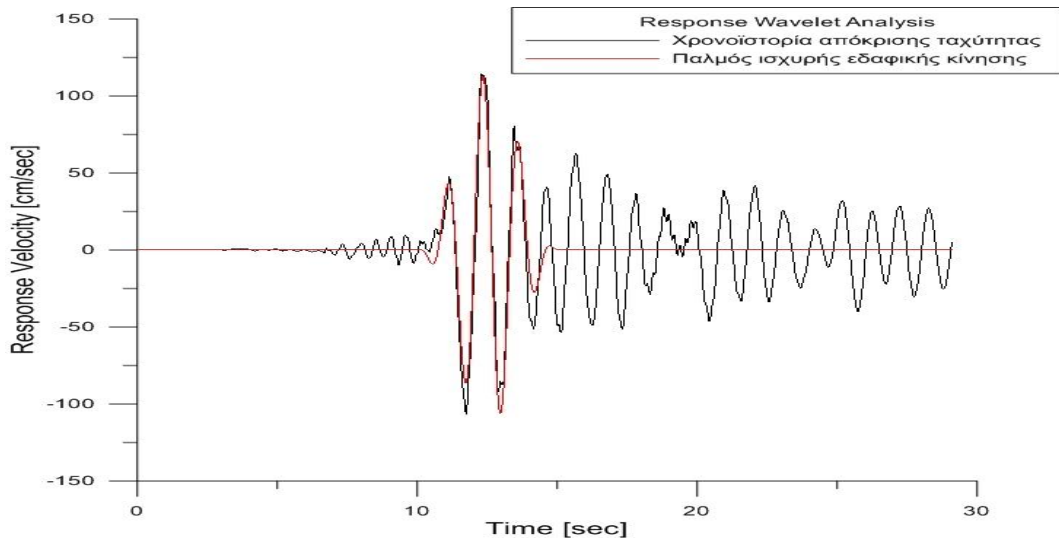
## DATA 1-27: MODERATE DAMAGE STATE



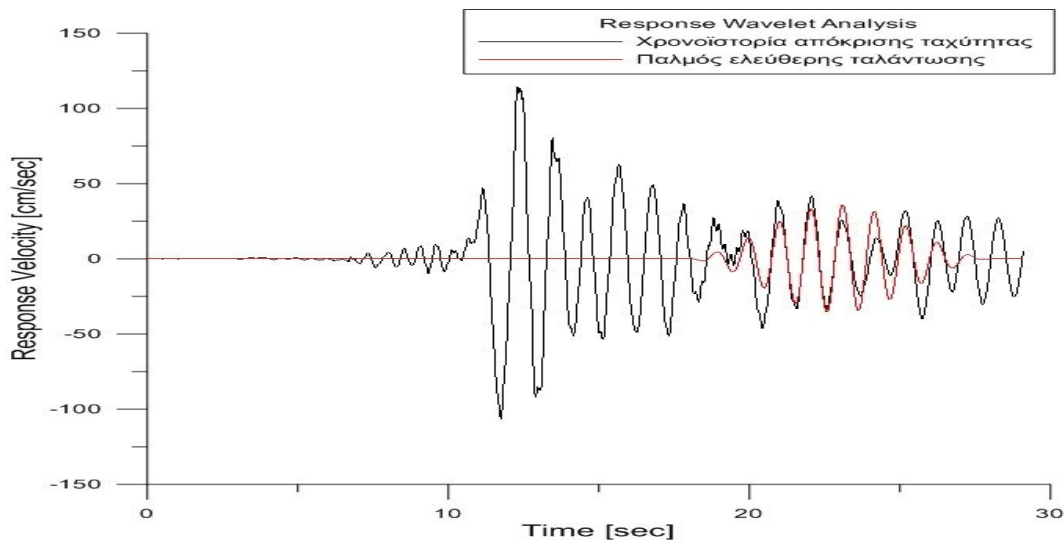
Σχήμα A101: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-27 moderate damage state.



Σχήμα A102: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-27 moderate damage state.



**Σχήμα A103:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-27 moderate damage state.



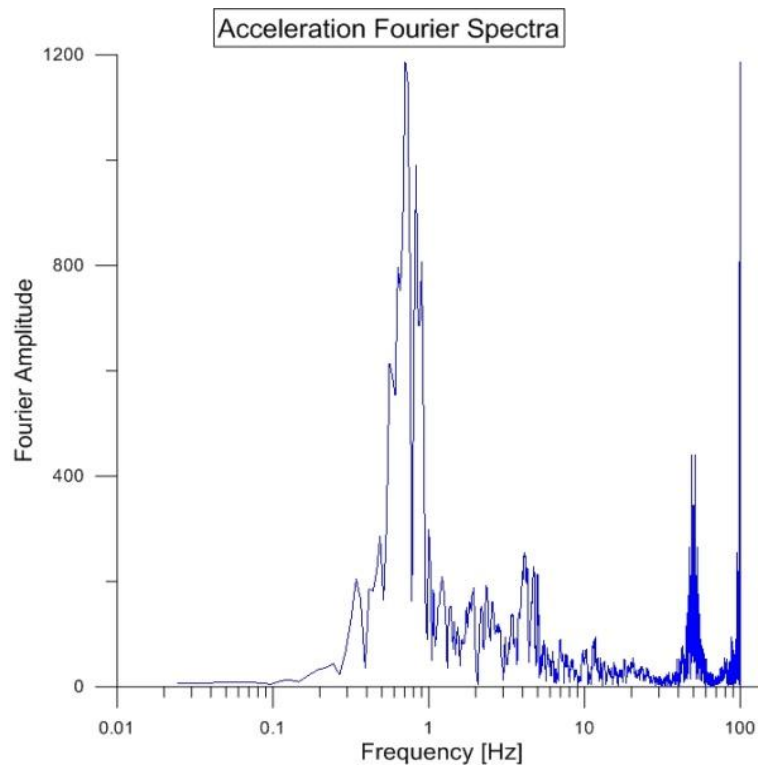
**Σχήμα A104:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (τρίτο κυματίδιο) για Data 1-27 moderate damage state.

**Πίνακας A26:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-27 moderate damage state.

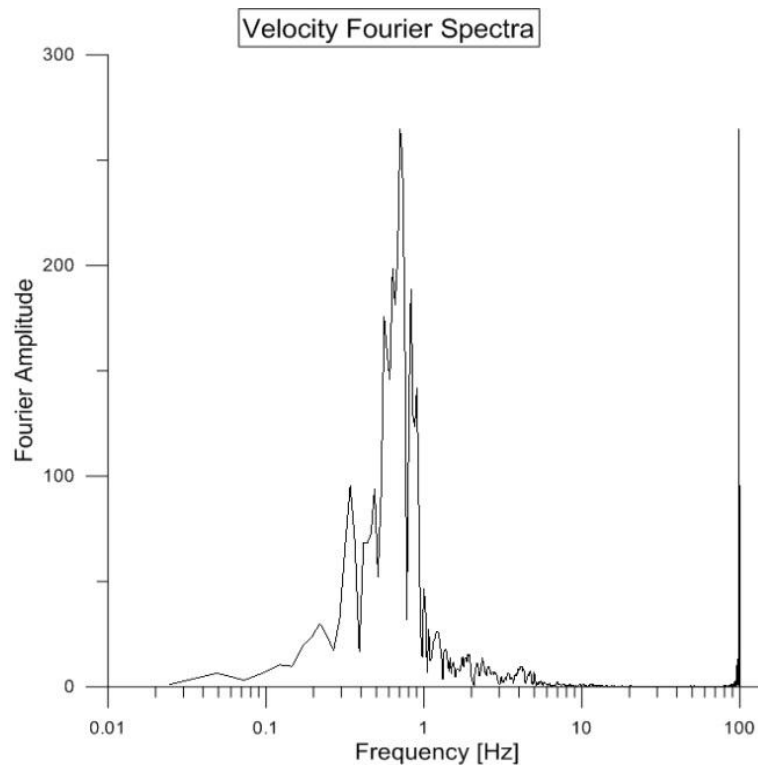
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
114.428	1.28	3.9	55	0.743
57.26	1.11	6.9	150	0.49
35.803	1.05	10	310	0.339
10.128	3.04	8.5	65	0.133
30.899	1.21	4	265	0.171
26.944	1.78	2.4	70	0.106

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 1.39 sec**

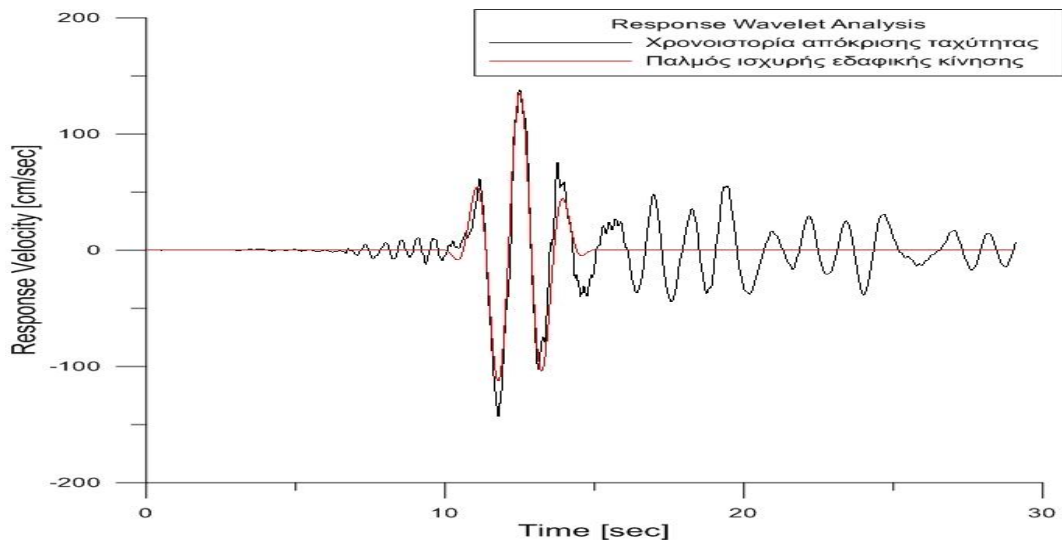
## DATA 1-27: EXTENSIVE DAMAGE STATE



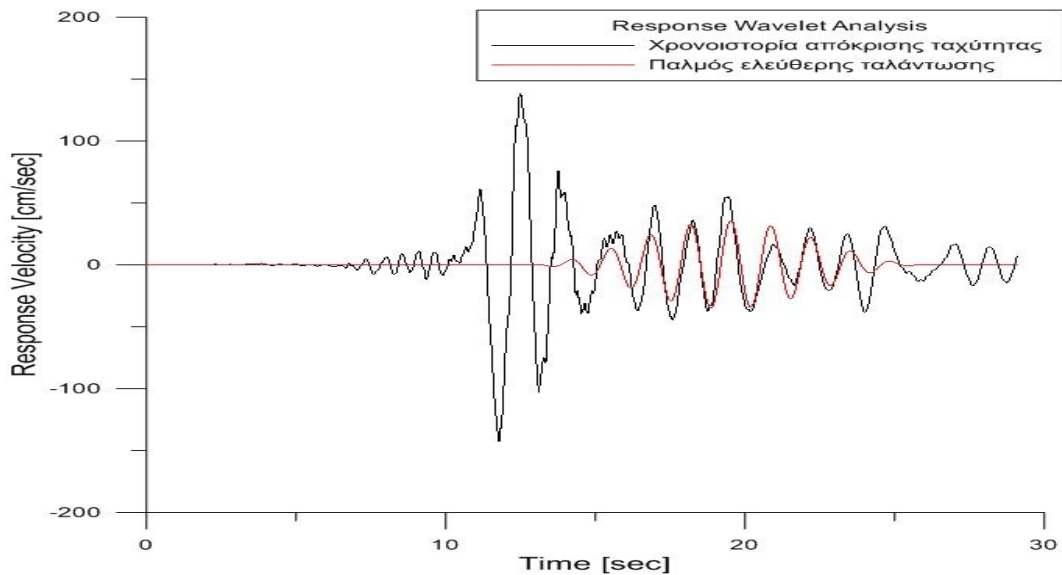
Σχήμα A105: Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-27 extensive damage state.



Σχήμα A106: Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-27 extensive damage state.



**Σχήμα A107:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-27 extensive damage state.



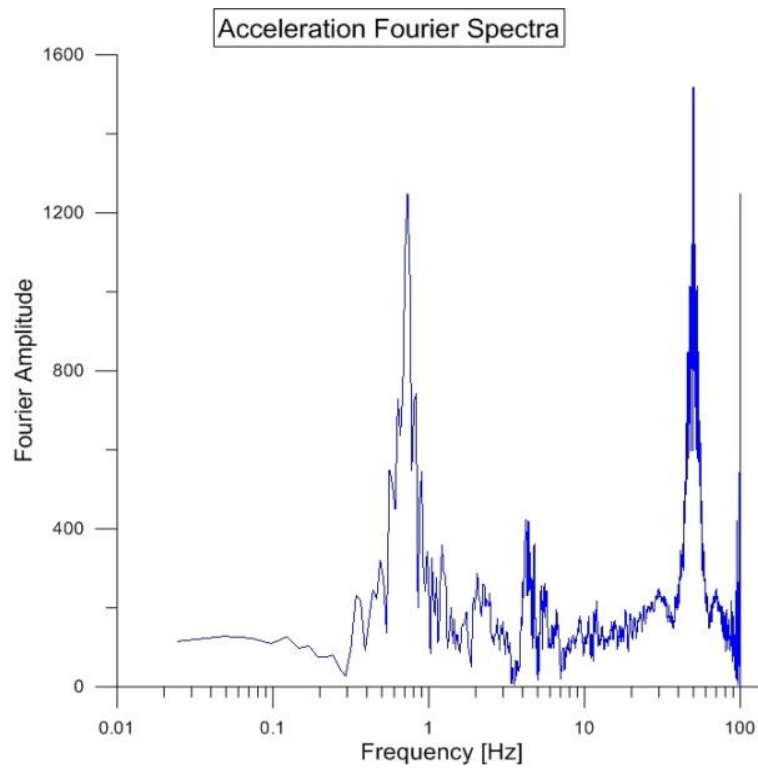
**Σχήμα A108:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-27 extensive damage state.

**Πίνακας A27:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-27 extensive damage state.

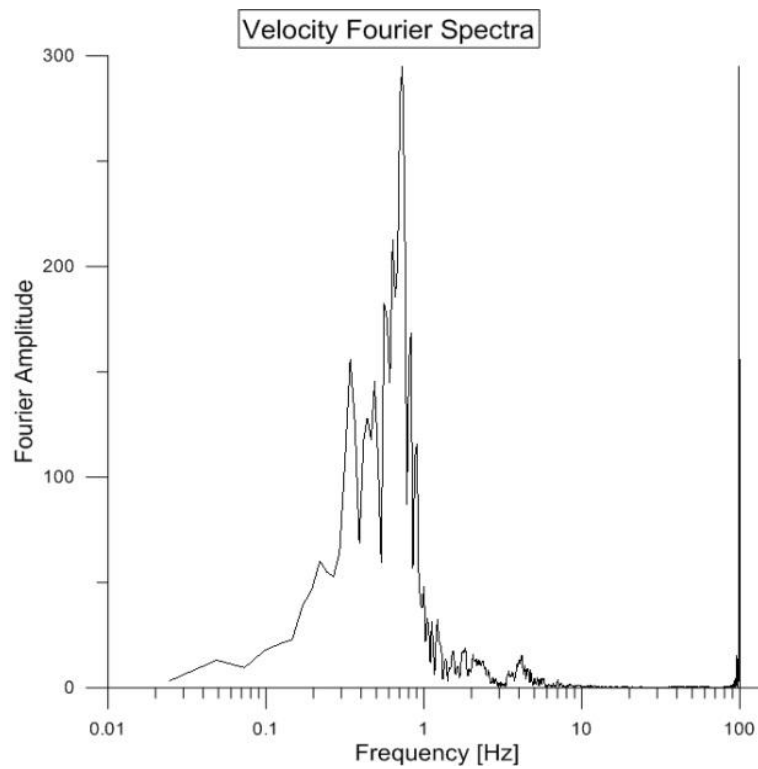
AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
135.516	1.52	3.3	345	0.831
35.646	1.34	10	325	0.375
60.59	2.96	1.1	105	0.174
18.778	4.94	2.5	330	0.03
43.347	1.91	1.9	290	0.162
15.697	2.26	5.9	200	0.088

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 1.39 sec**

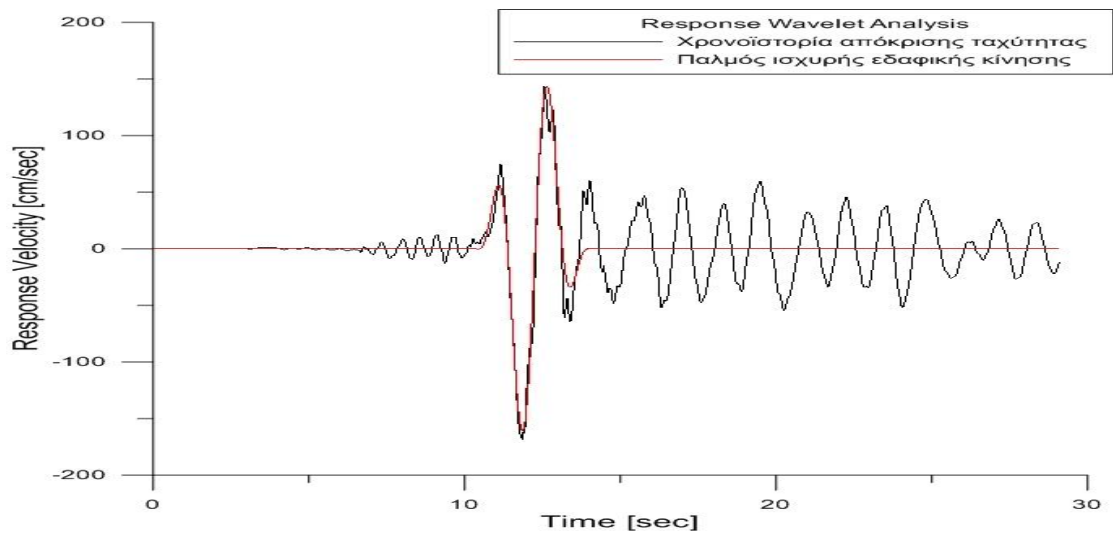
## DATA 1-27: PARTIAL COLLAPSE DAMAGE STATE



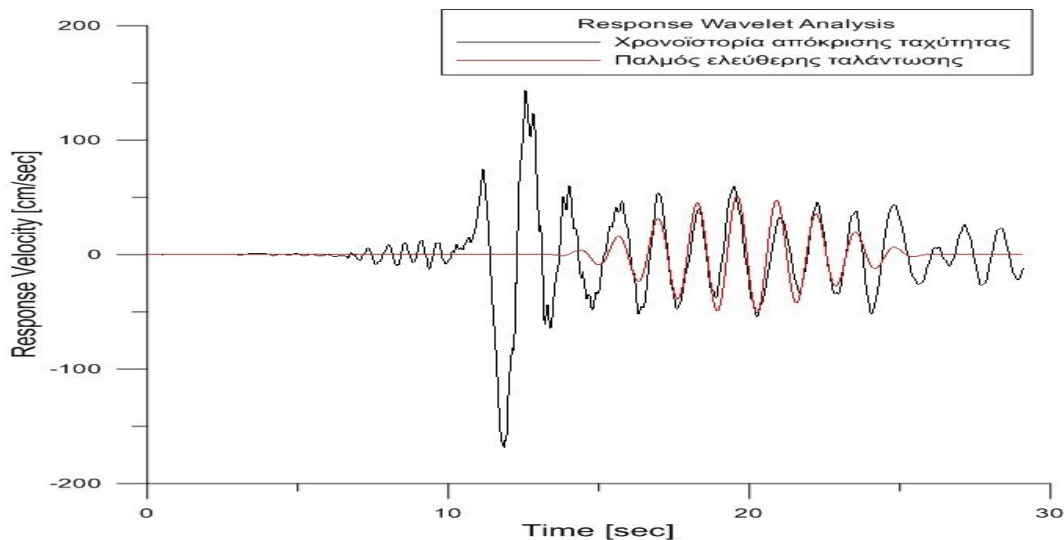
**Σχήμα A109:** Φάσμα Fourier επιτάχυνσης για Data 1-27 partial collapse damage state.



**Σχήμα A110:** Φάσμα Fourier ταχύτητας για Data 1-27 partial collapse damage state.



**Σχήμα A111:** Παλμός ισχυρής εδαφικής κίνησης (πρώτο κυματίδιο) για Data 1-27 partial collapse damage state.



**Σχήμα A112:** Παλμός ελεύθερης ταλάντωσης (δεύτερο κυματίδιο) για Data 1-27 partial collapse damage state.

**Πίνακας A28:** Παράμετροι κυματιδίων για Data 1-27 partial collapse damage state.

AMPLITUDE	PERIOD	GAMMA	N	CORRELATION
173.816	1.76	2.1	250	0.776
51.2	1.32	10	45	0.445
45.146	1.85	3.2	160	0.226
42.005	1.95	2.5	330	0.188
17.455	2.28	7.2	75	0.067
34.519	1.18	4.6	155	0.138

**Περίοδος παλμού διέγερσης: 1.39 sec**