

**Αναγνώριση ιδιομορφικών
χαρακτηριστικών μηχανικών
συστημάτων υπό σεισμική διέγερση**

Διπλωματική Εργασία

Γαβριηλίδης Ηλίας

7/14/2016

© 2016 Γαβρηλίδης Ηλίας

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ 2).

Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

Πρώτος Εξεταστής: Καθηγητής Παπαδημητρίου Κωνσταντίνος

(Επιβλέπων) Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Δεύτερος Εξεταστής: Καθηγητής Καραμάνος Σπύρος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Τρίτος Εξεταστής: Αναπληρωτής Καθηγητής Κερμανίδης Αλέξης

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την αναγνώριση των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών (ιδιοσυχνότητες, ιδιομορφές, συντελεστές απόσβεσης) μηχανικών συστημάτων στα οποία έχουν τοποθετηθεί επιταχυνσιόμετρα για την καταγραφή σεισμικών διεγέρσεων. Παρουσιάζεται η μεθοδολογία αναγνώρισης και γίνεται εφαρμογή της θεωρίας σε κτιριακή κατασκευή η οποία διεγείρεται από σεισμικά φορτία στη βάση της. Συγκεκριμένα, η καταγραφή των χρονοϊστοριών πραγματοποιήθηκε στο κτίριο Alcazar στην πόλη Viña del Mar της Χιλής το οποίο χτίστηκε το 2008 και έχει τρεις υπόγειους ορόφους και δεκαέξι υπέργειους. Η αναγνώριση των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών έγινε με την ανάλυση τριών σεισμικών διεγέρσεων, οι οποίες έγιναν 5 Απριλίου 2010 (Event 1), 1 Μαΐου 2010 (Event 2) και 17 Μαρτίου 2011 (Event 3). Η επεξεργασία των σημάτων (καταγραφθείσες επιταχύνσεις) έγινε με τη χρήση του software MITool βασισμένο στο πρόγραμμα MATLAB, με βάση το οποίο εξείχθησαν οι ιδιοσυχνότητες, οι ιδιομορφές οι οποίες είναι πέντε, τέσσερις καμπτικές και μία στρεπτική, καθώς και τους αντίστοιχους συντελεστές απόσβεσης, οι οποίοι κυμαίνονται από 1% έως 3%. Οι ιδιοσυχνότητες που υπολογίστηκαν στη συνέχεια συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες που εκτιμήθηκαν από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Μεταξύ άλλων, ο στόχος της εφαρμογής στο συγκεκριμένο κτίριο είναι ο προσδιορισμός μεταβολών στη δομική ακεραιότητα της κατασκευής μέσω της μεταβολής των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλεποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ.Παπαδημητρίου Κωνσταντίνο για την υποστήριξή του και τη συνεχή καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την πολύτιμη βοήθεια και στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	9
1.1 Περιγραφή ιδιομορφικών χαρακτηριστικών	9
1.2 Περιγραφή Εργασίας.....	10
2. Γραμμική θεωρία του προβλήματος στο πεδίο του χρόνου.....	12
2.1 Σύστημα εξισώσεων κίνησης	12
2.2 Μοντέλο Μη-Κλασικής Απόσβεσης (non-classically damped model)	13
2.3 Ιδιοπρόβλημα.....	13
2.4 Συνθήκες ορθογωνικότητας.....	15
2.5 Εξισώσεις απόκρισης με βάση το μετρούμενο μέγεθος.....	16
2.6 Ιδιομορφική ανάλυση	17
2.7 Η εξίσωση της απόκρισης στο πεδίο της συχνότητας	18
3. Στάδια λειτουργίας του software βασισμένο στο MATLAB	20
3.1 Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων στο πεδίο της συχνότητας.....	20
3.2 Αναγνώριση ιδιομορφών, εκτίμηση ιδιοσυχνοτήτων και συντελεστών απόσβεσης (Στάδιο 1).....	22
3.3 Εκτίμηση ιδιομορφών και συντελεστών συνεισφοράς (Στάδιο 2)	23
3.4 Εκτίμηση ιδιομορφικών χαρακτηριστικών μέσω μη γραμμικής βελτιστοποίησης (Στάδιο 3).....	25
4. Εφαρμογή στο κτίριο Alcazar και αποτελέσματα της ανάλυσης	26
4.1 Γενικά χαρακτηριστικά του κτιρίου.....	26
4.2 Ιδιομορφική ανάλυση πρώτης σεισμικής διέγερσης (Event 1)	28
4.3 Ιδιομορφική ανάλυση δεύτερης σεισμικής διέγερσης (Event 2)	36
4.4 Ιδιομορφική ανάλυση τρίτης σεισμικής διέγερσης (Event 3).....	45
4.5 Ανακεφαλαίωση και σύγκριση των τριών σεισμικών διεγέρσεων.....	52
5. Συμπεράσματα	58
Παράρτημα 1 (1 ^η σεισμική διέγερση).....	59
Παράρτημα 2 (2 ^η σεισμική διέγερση).....	64
Παράρτημα 3 (3 ^η σεισμική διέγερση).....	69
Βιβλιογραφία	74

Περιεγόμενα εικόνων

Εικόνα 1. Σχηματισμός των τριών πρώτων καμπτικών ιδιομορφών.....	10
Εικόνα 2. Διάγραμμα σταθεροποίησης, 3 ^{ος} σεισμός, αισθητήρας 9.....	23
Εικόνα 3. Διάγραμμα σταθεροποίησης, 3 ^{ος} σεισμός, αισθητήρας 16.....	23
Εικόνα 4. Κτίριο Alcazar	26
Εικόνα 5. Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων	27
Εικόνα 6. Διαστασιολόγηση ορόφων, θέσεις αισθητήρων και διευθύνσεις μετρήσεων	28
Εικόνα 7. Επιτάχυνση από την πρώτη σεισμική διέγερση, τρίτο υπόγειο, αισθητήρας 1 (NW corner EW direction).....	29
Εικόνα 8. Επιτάχυνση από την πρώτη σεισμική διέγερση, τρίτο υπόγειο, αισθητήρας 2 (NW corner NS direction).....	29
Εικόνα 9. Επιτάχυνση απόκρισης από την πρώτη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 10 (EW direction NW corner)	30
Εικόνα 10. Επιτάχυνση απόκρισης από την πρώτη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 11 (NS direction NW corner)	30
Εικόνα 11. Επιτάχυνση απόκρισης από την πρώτη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 12 (NS direction SE corner)	31
Εικόνα 12. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 8, 6 ^{ος} όροφος, πρώτος σεισμός	31
Εικόνα 13. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 11, τελευταίος όροφος, πρώτος σεισμός.....	32
Εικόνα 14. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 15, 3 ^{ος} όροφος, πρώτος σεισμός ..	32
Εικόνα 15. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 10, τελευταίος όροφος, πρώτος σεισμός.....	33
Εικόνα 16. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 11, τελευταίος όροφος, πρώτος σεισμός.....	33
Εικόνα 17. 1 ^η καμπτική ιδιομορφή στην Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction), πρώτη σεισμική διέγερση.	34
Εικόνα 18. 2 ^η καμπτική ιδιομορφή στην Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction), πρώτη σεισμική διέγερση.	35

Εικόνα 19. 2 ^η στρεπτική ιδιομορφή, πρώτη σεισμική διέγερση.....	35
Εικόνα 20. 3 ^η καμπτική ιδιομορφή στη Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction), πρώτη σεισμική διέγερση.	36
Εικόνα 21. Επιτάχυνση από τη δεύτερη σεισμική διέγερση, τρίτο υπόγειο, αισθητήρας 1 (NW corner EW direction).....	37
Εικόνα 22. Επιτάχυνση από τη δεύτερη σεισμική διέγερση, τρίτο υπόγειο, αισθητήρας 2 (NW corner NS direction).....	37
Εικόνα 23. Επιτάχυνση απόκρισης από τη δεύτερη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 10 (EW direction NW corner).....	38
Εικόνα 24 Επιτάχυνση απόκρισης από τη δεύτερη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 11 (NS direction NW corner).....	38
Εικόνα 25. Επιτάχυνση απόκρισης από τη δεύτερη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 12 (NS direction SE corner).....	39
Εικόνα 26. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 6, ισόγειο, δεύτερος σεισμός.....	39
Εικόνα 27. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 7, 6 ^{ος} όροφος, δεύτερος σεισμός...40	40
Εικόνα 28. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 10, τελευταίος όροφος, δεύτερος σεισμός.....	40
Εικόνα 29. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 12, τελευταίου ορόφου, δεύτερος σεισμός.....	41
Εικόνα 30. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 14, 3 ^{ος} όροφος, δεύτερος σεισμός.41	41
Εικόνα 31. 1 ^η καμπτική ιδιομορφή στην Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction), δεύτερη σεισμική διέγερση.....	42
Εικόνα 32. 1 ^η καμπτική ιδιομορφή στην Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction), δεύτερη σεισμική διέγερση.	43
Εικόνα 33. 2 ^η καμπτική ιδιομορφή στη Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction), δεύτερη σεισμική διέγερση.....	43
Εικόνα 34. 2 ^η στρεπτική ιδιομορφή, δεύτερη σεισμική διέγερση.....	44
Εικόνα 35. 3 ^η καμπτική ιδιομορφή στη Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction), δεύτερη σεισμική διέγερση.....	44
Εικόνα 36. Επιτάχυνση από την τρίτη σεισμική διέγερση, τρίτο υπόγειο, αισθητήρας 1 (NW corner EW direction).....	45

Εικόνα 37. Επιτάχυνση από την τρίτη σεισμική διέγερση, τρίτο υπόγειο, αισθητήρας 2 (NW corner NS direction).....	45
Εικόνα 38. Επιτάχυνση απόκρισης από την τρίτη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 10 (EW direction NW corner).....	46
Εικόνα 39. Επιτάχυνση απόκρισης από την τρίτη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 11 (NS direction NW corner).....	46
Εικόνα 40. Επιτάχυνση απόκρισης από την τρίτη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 12 (NS direction SE corner).....	47
Εικόνα 41. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 14, 3 ^{ος} όροφος, τρίτος σεισμός.....	47
Εικόνα 42. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 6, ισόγειο, τρίτος σεισμός.....	48
Εικόνα 43. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 5, ισόγειο, τρίτος σεισμός.....	48
Εικόνα 44. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 16, 3 ^{ος} όροφος, τρίτος σεισμός.....	49
Εικόνα 45. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 10, τελευταίος όροφος, τρίτος σεισμός.....	49
Εικόνα 46. 1 ^η καμπτική ιδομορφή στην Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction), τρίτη σεισμική διέγερση.	50
Εικόνα 47. 2 ^η καμπτική ιδιομορφή στη Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction), τρίτη σεισμική διέγερση.....	51
Εικόνα 48. 2 ^η στρεπτική ιδιομορφή, δεύτερη σεισμική διέγερση.....	51
Εικόνα 49. 3 ^η καμπτική ιδιομορφή στη Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction), τρίτη σεισμική διέγερση.....	52
Εικόνα 50. Οριζόντιες επιταχύνσεις από τις τρεις σεισμικές διεγέρσεις στον 3 ^ο υπόγειο όροφο από τον αισθητήρα 1, Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction)	53
Εικόνα 51. Οριζόντιες επιταχύνσεις από τις τρεις σεισμικές διεγέρσεις στον 3 ^ο υπόγειο όροφο από τον αισθητήρα 2, Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction).....	53
Εικόνα 52. Οριζόντιες επιταχύνσεις από τις τρεις σεισμικές διεγέρσεις στον τελευταίο όροφο από τον αισθητήρα 10, Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction).....	54
Εικόνα 53. Οριζόντιες επιταχύνσεις από τις τρεις σεισμικές διεγέρσεις στον τελευταίο όροφο από τον αισθητήρα 11, Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction).....	55
Εικόνα 54. Οριζόντιες επιταχύνσεις από τις τρεις σεισμικές διεγέρσεις στον τελευταίο όροφο από τον αισθητήρα 10, Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction).....	55

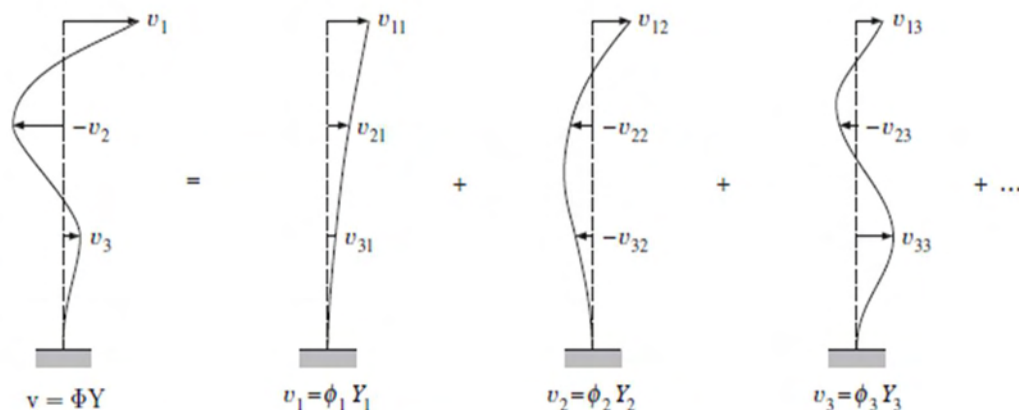
1. Εισαγωγή

Ο σκοπός της παρούσας διπλώματικής εργασίας είναι ο υπολογισμός των πραγματικών δυναμικών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής χρησιμοποιώντας τη δυναμική απόκριση της ίδιας της κατασκευής σε σεισμικές διεγέρσεις. Η μελέτη των μετρήσεων απόκρισης της κατασκευής μας δίνει τη δυνατότητα να μελετήσουμε ποσοτικά καθώς και ποιοτικά τη δυναμική συμπεριφορά των κατασκευών. Για τις κατασκευές, οι οποίες καταπονήθηκαν κάτω από σεισμικές διεγέρσεις, τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά υπολογίζονται με επεξεργασία των μετρούμενων επιταχύνσεων στη βάση της κατασκευής καθώς και των επιταχύνσεων σε διάφορα σημεία στο φορέα της κατασκευής. Επίσης η πληροφορία των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση στην ανάπτυξη και αναθεώρηση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, έτσι ώστε με τη χρήση τους να μπορεί να γίνει προσομοίωση της συμπεριφοράς των κατασκευών.

1.1 Περιγραφή ιδιομορφικών χαρακτηριστικών

Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα εργασία εστιάζει στην αναγνώριση ιδιομορφικών χαρακτηριστικών του κτιρίου Alcazar μέσω επεξεργασίας μετρήσεων επιτάχυνσης, οι οποίες καταγράφηκαν από τρεις διαφορετικές σεισμικές δονήσεις. Για αυτό το λόγο το πρόβλημα θεωρείται πολλαπλής εισόδου-πολλαπλής εξόδου (multi input-multi output). Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι οι ιδιομορφές (mode shapes), ιδιοσυχνότητες (modal frequencies), οι συντελεστές απόσβεσης (modal damping ratios) καθώς και οι συντελεστές συνεισφοράς (participation factors).

Η ιδιομορφή πρακτικά είναι ένας συγκεκριμένος σχηματισμός της κατασκευής, ο οποίος σχηματίζεται σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, η οποία ονομάζεται ιδιοσυχνότητα της ιδιομορφής. Οι ιδιομορφές μπορούν να είναι είτε καμπτικές (bending mode shape) στις δύο κατευθύνσεις του επιπέδου x και y , είτε στρεπτικές (torsional mode shape). Η σύνθεση των επιμέρους ιδιομορφών καταλήγει στον τελικό δυναμικό σχηματισμό της κατασκευής. Όμως, στον τελικό σχηματισμό της κατασκευής δε συμμετέχουν όλες οι ιδιομορφές με το ίδιο ποσοστό. Αυτή την πληροφορία μας τη δίνουν οι συντελεστές συνεισφοράς, οι οποίοι εμπεριέχουν την πληροφορία για το ποιές ιδιομορφές συμμετέχουν καθώς και το ποσοστό συμμετοχής τους. Στην Εικόνα 1 που ακολουθεί παρατηρούμε τη σύνθεση των τριών πρώτων καμπτικών ιδιομορφών για να δημιουργηθεί ο τελικός σχηματισμός της κατασκευής, ο οποίος όμως αποτελείται από τη συνεισφορά και περισσότερων ιδιομορφών. Επιπλέον ο συντελεστής απόσβεσης είναι μία αδιάστατη ποσότητα η οποία περιγράφει πώς ένα σύστημα, το οποίο ταλαντώνεται, φθίνει έπειτα από μία διαταραχή.



Εικόνα 1. Σχηματισμός των τριών πρώτων καμπτικών ιδιομορφών.

1.2 Περιγραφή Εργασίας

Στην εργασία παρουσιάζονται αναλυτικότερα η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος για την εκτίμηση των δυναμικών ιδιομορφικών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής η οποία καταπονήθηκε από σεισμική δόνηση. Επίσης η λειτουργία του software το οποίο προγραμματίστηκε στο πρόγραμμα MATLAB για την επεξεργασία των μετρούμενων επιταχύνσεων, καθώς και τα αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν από την ανάλυση.

Στο δεύτερο κεφάλαιο χρησιμοποιείται η γραμμική θεωρία έτσι ώστε να περιγραφεί η λύση του συστήματος αρχικά στο πεδίο του χρόνου και στο τέλος να εξαχθεί η απόκριση του συστήματος στο πεδίο των συχνοτήτων (απόκριση συναρτήσεων συχνοτήτων). Για να καταλήξει η ανάλυση στην απόκριση του συστήματος παρατίθενται οι εξισώσεις κίνησης του συστήματος και εφαρμόζονται σε ένα μοντέλο μη κλασικής απόσβεσης. Παρουσιάζεται το ιδιοπρόβλημα από το οποίο υπολογίζονται ιδιοτιμές και ιδιοσυναρτήσεις οι οποίες ικανοποιούν συνθήκες ορθογωνικότητας. Στη συνέχεια εισάγοντας συγκεκριμένο μετασχηματισμό καταλήγουμε στην ιδιομορφική εξίσωση και μέσω μετασχηματισμού Fourier καταλήγουμε στην απόκριση του συστήματος στο πεδίο της συχνότητας.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η λειτουργία του software βασισμένο στο MATLAB για την επεξεργασία των μετρούμενων επιταχύνσεων που καταγράφησαν. Η αναγνώριση των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών (ιδιοσυχνότητες, ιδιομορφές, συντελεστές απόσβεσης) πραγματοποιείται σε τρία στάδια. Αρχικά ορίζεται μία συνάρτηση σφάλματος η οποία περιέχει τη διαφορά των τετραγώνων των μετασχηματισμών Fourier που προβλέπονται από το ιδιομορφικό μοντέλο και των μετασχηματισμών Fourier από τις μετρούμενες επιταχύνσεις. Ελαχιστοποιώντας τη συνάρτηση σφάλματος εξάγονται οι ιδιομορφικοί παράμετροι Στο πρώτο στάδιο εκτιμούνται οι ιδιοσυχνότητες, οι συντελεστές απόσβεσης καθώς και ο αριθμός των ιδιομορφών μέσω διαγραμμάτων (stabilization diagram). Στο δεύτερο στάδιο οι

εκτιμήσεις του προηγούμενου σταδίου θεωρούνται γνωστές και εισέρχονται στη σχέση της απόκρισης έτσι ώστε να υπολογιστούν οι υπόλοιπες ιδιομορφικοί παράμετροι. Τέλος το τρίτο στάδιο λύνει το πλήρες μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης για μεγαλύτερη ακρίβεια του αποτελέσματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του κτιρίου, στο οποίο έγινε η ανάλυση των μετρήσεων. Αρχικά παρουσιάζεται η διαστασιολόγηση του κτιρίου, οι θέσεις στις οποίες έχουν εγκατασταθεί οι αισθητήρες καθώς και οι διευθύνσεις στις οποίες καταγράφουν. Έπειτα παρατίθενται τα αποτελέσματα από την ανάλυση κάθε σεισμού, όπως ιδιοσυχνότητες, συντελεστές απόσβεσης, καθώς και απεικόνιση των αντίστοιχων ιδιομορφών. Επιπλέον απεικονίζονται διαγράμματα σύγκλισης της μεθόδου η οποία παρουσιάστηκε στο τρίτο κεφάλαιο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την ανάλυση των δεδομένων καθώς και η συμπεριφορά του πραγματικού κτιρίου σε σχέση με το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.

2. Γραμμική θεωρία του προβλήματος στο πεδίο του χρόνου

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανάλυση του μαθηματικού μοντέλου το οποίο περιγράφει την κίνηση του συστήματος. Θεωρούμε την κατασκευή ένα γραμμικό σύστημα πολλών βαθμών ελευθερίας, όπου λύνοντας το σύστημα των εξισώσεων έχουμε ως αποτέλεσμα την απόκριση του συστήματος (μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση), το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η επιτάχυνση.

2.1 Σύστημα εξισώσεων κίνησης

Αρχικά θεωρούμε $\underline{y}_s(t) \in R^n$ την απόκριση των βαθμών ελευθερίας (DOFs) της κατασκευής η οποία ισούται με την ψευδοστατική απόκριση $\underline{z}(t) \in R^n$ και τη δυναμική απόκριση του συστήματος $\underline{q}(t) \in R^n$ να δίνεται από τη σχέση [1,16]

$$\underline{y}_s(t) = \underline{z}(t) + \underline{q}(t) \quad (2.1)$$

όπου $\underline{z}(t) = D \underline{z}(t)$, με $D = -K^{-1}K_{sb}$ να είναι το ψευδο-στατικό μητρώο και K_{sb} το μητρώο στιβαρότητας το οποίο ενώνει τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος με της βάσης.

Οι εξισώσεις κίνησης της γραμμικής κατασκευής συναρτήσει της δυναμικής απόκρισης δίνονται από το παρακάτω σύστημα n διαφορικών εξισώσεων δεύτερης τάξης

$$M \underline{\ddot{q}}(t) + C_0 \underline{\dot{q}}(t) + K \underline{q}(t) = L \underline{\ddot{z}}(t) \quad (2.2)$$

όπου αντίστοιχα $\underline{\dot{q}}(t)$ είναι το διάνυσμα της ταχύτητας και $\underline{\ddot{q}}(t)$ της επιτάχυνσης. Επίσης $M \in R^{n \times n}$, $C_0 \in R^{n \times n}$ και $K \in R^{n \times n}$ είναι αντίστοιχα τα μητρώα μάζας, απόσβεσης και στιβαρότητας. Στο δεξί μέλος του συστήματος έχουμε $\underline{\ddot{z}}(t) \in R^{N_m}$ το οποίο είναι το διάνυσμα των επιταχύνσεων στη βάση της κατασκευής (N_{in} είναι ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας που θεωρούμε ως διεγέρσεις), ενώ $L = -(M D + M_{sg})$ είναι το μητρώο το οποίο έχει την πληροφορία από τους βαθμούς ελευθερίας της διεγερσης (N_{in}) προς τους n βαθμούς ελευθερίας του συστήματος. Ακόμα M_{sg} είναι το μητρώο μάζας το οποίο ενώνει τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος με της βάσης.

2.2 Μοντέλο Μη-Κλασικής Απόσβεσης (non-classically damped model)

Στη γενική περίπτωση που τα μητρώα μάζας, απόσβεσης και στιβαρότητας (M, C_0, K) δεν είναι συμμετρικά τότε για να μετατρέψουμε την εξίσωση (2.2) σε ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων πρώτου βαθμού εισάγουμε την εξίσωση

$$M\dot{\underline{q}}(t) = M\dot{\underline{q}}(t) \quad (2.3)$$

καθώς και το διάνυσμα,

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} \underline{q} \\ \dot{\underline{q}} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Επομένως αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (2.3), (2.4) στην εξίσωση (2.2) καταλήγουμε στο εξής σύστημα διαφορικών εξισώσεων πρώτου βαθμού

$$P\dot{\underline{x}} + Q\underline{x} = \begin{bmatrix} L \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{\underline{z}}(t) \quad (2.5)$$

όπου τα μητρώα P, Q δίνονται από της εξής σχέσεις

$$P = \begin{bmatrix} C_0 & M \\ M & 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$Q = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.3 Ιδιοπρόβλημα

Η ιδιομορφική ανάλυση η οποία περιγράφει την απόκριση των βαθμών ελευθερίας της κατασκευής βασίζεται στις μιγαδικές ιδιοτιμές, ιδιοσυναρτήσεις και στη διέγερση. Ορίζοντας $\underline{\psi}_r \in C^{2n}$ τις μιγαδικές ιδιοσυναρτήσεις και λ_r τις μιγαδικές ιδιοτιμές οι οποίες ικανοποιούν το ιδιοπρόβλημα του συστήματος

$$(P\lambda + Q)\underline{\psi} = \underline{0} \quad (2.8)$$

Αν οι μιγαδικές ιδιοτιμές λ_r και ιδιοσυναρτήσεις ψ_r είναι λύσεις του ιδιοπροβλήματος τότε μπορεί ναδειχθεί ότι και οι αντίστοιχοι συζυγείς μιγαδικοί λ_r^* , ψ_r^* είναι λύσεις του ίδιου ιδιοπροβλήματος (το σύμβολο «*» δηλώνει το συζυγή μιγαδικό).

Εισάγοντας το μητρώο $\Psi = [\underline{\psi}_1 \quad \dots \quad \underline{\psi}_n \quad \underline{\psi}_1^* \quad \dots \quad \underline{\psi}_n^*] \in \mathcal{C}^{2n \times 2n}$, μπορεί να δειχθεί εύκολα ότι ισχύει

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Phi & \Phi^* \\ \Phi \Lambda & \Phi^* \Lambda^* \end{bmatrix} \in \mathcal{C}^{2n \times 2n} \quad (2.9)$$

όπου $\Phi \in \mathcal{C}^{n \times n}$ είναι το μητρώο το οποίο σχετίζεται με τη δυναμική απόκριση $\underline{q}(t)$ των βαθμών ελευθερίας (DOF) του διανύσματος $\underline{x}(t)$ και Φ, λ ικανοποιούν το ιδιοπρόβλημα δεύτερης τάξης

$$M\Phi\lambda^2 + C_0\Phi\lambda + K\Phi = 0 \quad (2.10)$$

Οι ιδιοτιμές λ_r δίνονται από τη σχέση

$$\lambda_r = -\zeta_r \omega_r \pm j \omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2} = -a_r \pm j b_r, \quad r = 1, \dots, m \quad (2.11)$$

όπου ω_r είναι η ιδιοσυχνότητα και ζ_r είναι ο αντίστοιχος συντελεστής απόσβεσης και ικανοποιούν τις σχέσεις

$$\omega_r = |\lambda_r| \quad \text{και} \quad \zeta_r = -\frac{\text{Re}\{\lambda_r\}}{\omega_r} \quad (2.12)$$

επίσης οι παράμετροι a_r και b_r δίνονται από τις σχέσεις

$$a_r = \zeta_r \omega_r \quad \text{και} \quad b_r = \omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2} \quad (2.13)$$

Αντιθέτως αν έχουμε τις παραμέτρους a_r, b_r τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την ιδιοσυχνότητα ω_r καθώς και τον αντίστοιχο συντελεστή απόσβεσης ζ_r από τις ακόλουθες σχέσεις

$$\omega_r = \sqrt{a_r^2 + b_r^2} \quad \text{και} \quad \zeta_r = \frac{a_r}{\sqrt{a_r^2 + b_r^2}} \quad (2.14)$$

Το μητρώο, το οποίο περιέχει τις ιδιοτιμές του γραμμικού συστήματος της εξίσωσης (2.5) δίνεται από τη σχέση

$$\Lambda_c = \begin{bmatrix} \Lambda & 0 \\ 0 & \Lambda^* \end{bmatrix} = \text{diagonal} \in \mathcal{C}^{2n \times 2n} \quad (2.15)$$

όπου Λ είναι το διαγώνιο μητρώο

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_n \end{bmatrix} \in \mathcal{C}^{n \times n} \quad (2.16)$$

2.4 Συνθήκες ορθογωνικότητας

Οι μιγαδικές ιδιοσυναρτήσεις ικανοποιούν τις εξής δύο σχέσεις

$$\underline{\psi}^T P \underline{\psi} = \text{diag}[a_r] \quad (2.17)$$

$$\underline{\psi}^T Q \underline{\psi} = \text{diag}[\beta_r] \quad (2.18)$$

Επίσης οι προηγούμενες σχέσεις ορθογωνικότητας μπορούν να εκφραστούν ως προς τα μητρώα P, Q

$$P = \Psi^{-T} \text{diag}[a_r] \Psi^{-1} \quad (2.19)$$

$$Q = \Psi^{-T} \text{diag}[\beta_r] \Psi^{-1} \quad (2.20)$$

Πολλαπλασιάζοντας από αριστερά τη σχέση (2.8) με $\underline{\psi}^T$ καταλήγουμε

$$\underline{\psi}^T P \underline{\psi} \lambda + \underline{\psi}^T Q \underline{\psi} = 0 \quad (2.21)$$

και λύνοντας ως προς λ έχουμε

$$\lambda = - \frac{\underline{\psi}^T Q \underline{\psi}}{\underline{\psi}^T P \underline{\psi}} \quad (2.22)$$

ενώ για την r -ιδιοτιμή και ιδιοσυνάρτηση η σχέση (2.22) γίνεται

$$\lambda_r = - \frac{\underline{\psi}_r^T Q \underline{\psi}_r}{\underline{\psi}_r^T P \underline{\psi}_r} \quad (2.23)$$

Τελικά η r -ιδιοτιμή μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$\lambda_r = - \frac{\beta_r}{\alpha_r} \quad (2.24)$$

$$\text{όπου } \beta_r = \underline{\psi}_r^T Q \underline{\psi}_r, \alpha_r = \underline{\psi}_r^T P \underline{\psi}_r \quad (2.25)$$

επομένως ο πίνακας ιδιοτιμών γίνεται

$$\Lambda_c = \text{diag} \left[\frac{1}{\alpha_r} \right] \text{diag}[\beta_r] \quad (2.26)$$

Πολλαπλασιάζοντας το σύστημα εξισώσεων της σχέσης (2.5) με το μητρώο P^{-1}

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & M^{-1} \\ M^{-1} & -M^{-1}C_0M^{-1} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

καταλήγουμε στο εξής σύστημα εξισώσεων

$$\dot{\underline{x}} = A_c \underline{x} + B_c \ddot{\underline{z}}(t) \text{ όπου,} \quad (2.28)$$

$$A_c = -P^{-1}Q = \begin{bmatrix} 0 & M^{-1} \\ M^{-1} & -M^{-1}C_0M^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C_0 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

και

$$B_c = -P^{-1} \begin{bmatrix} L \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & M^{-1} \\ M^{-1} & -M^{-1}C_0M^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}L \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Πολλαπλασιάζοντας ομοίως την εξίσωση (2.8) του ιδιοπροβλήματος με το μητρώο P^{-1} καταλήγουμε στη σχέση

$$(-P^{-1}Q - \lambda I)\underline{\psi} = \underline{0} \Rightarrow (A_c - \lambda I)\underline{\psi} = \underline{0} \quad (2.31)$$

Η έκφραση (2.31) για την r ιδιοτιμή και ιδιοσυνάρτηση μπορεί να γραφεί στην εξής μορφή

$$A_c \underline{\psi}_r = \lambda_r \underline{\psi}_r \text{ για } r = 1, \dots, 2n \quad (2.32)$$

η οποία έκφραση μπορεί να γραφεί και σε μητρική μορφή ($2n$ εξισώσεις)

$$A_c \Psi = \Psi \Lambda_c \quad (2.33)$$

Από την προηγούμενη σχέση (2.33) καταλήγουμε πως τα μητρώα Λ_c, Ψ περιέχουν τις ιδιοτιμές και τις ιδιοσυναρτήσεις του μητρώου A_c .

$$A_c = \Psi \Lambda_c \Psi^{-1} \quad (2.34)$$

2.5 Εξισώσεις απόκρισης με βάση το μετρούμενο μέγεθος

Ορίζοντας γενικά $\underline{y}(t) \in R^{N_{out}}$ την απόκριση του συστήματος τότε αυτή μπορεί να γραφεί ως γραμμικός συνδυασμός των επιταχύνσεων $\ddot{\underline{q}}(t)$, των ταχυτήτων $\dot{\underline{q}}(t)$ και των μετατοπίσεων. Πιο συγκεκριμένα στο πρόβλημα οι μετρήσεις που κατέγραψαν οι αισθητήρες ήταν οι επιταχύνσεις της απόκρισης των βαθμών ελευθερίας του συστήματος.

$$\underline{y}(t) = C_a \dot{\underline{z}}_s(t) = C_c \underline{x} + D_c \ddot{\underline{z}}(t) \quad (2.35)$$

όπου $C_a \in R^{N_{out} \times n}$ είναι το μητρώο, το οποίο δηλώνει ποιό βαθμοί ελευθερίας έχουν μετρήσεις. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (2.1), (2.2) καθώς και τη σχέση $L = -(M D + M_{sg})$ τότε τα μητρώα C_c, D_c δίνονται από της εξής σχέσεις

$$C_c = -C_a M^{-1} [K \quad C_0] \in R^{N_{out} \times 2n} \quad (2.36)$$

το οποίο εξαρτάται από το μητρώο C_a , λόγω του μετρούμενου μεγέθους της επιτάχυνσης και των μητρώων μάζας, στιβαρότητας και απόσβεσης του συστήματος (M, K, C_0)

και

$$D_c = C_a (M^{-1} L + D) = -C_a M^{-1} M_{sg} \in R^{N_{out} \times N_{in}} \quad (2.37)$$

το οποίο εξαρτάται ομοίως από το μητρώο C_a , από το μητρώο μάζας M και από το M_{sg} το οποίο ενώνει τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος με της βάσης.

2.6 Ιδιομορφική ανάλυση

Για την πραγματοποίηση του ιδιομορφικής ανάλυσης εισάγουμε τον παρακάτω μετασχηματισμό

$$\underline{x}(t) = \Psi \begin{Bmatrix} \underline{\xi}(t) \\ \underline{\xi}^*(t) \end{Bmatrix} \quad (2.38)$$

ο οποίος μετατρέπει το διάνυσμα με τις φυσικές συντεταγμένες του συστήματος $\underline{x}(t)$ στο διάνυσμα $\underline{\xi} = [\xi_1(t) \quad \dots \quad \xi_m(t)]^T \in C^m$ με της κύριες συντεταγμένες.

Επομένως, με βάση το μετασχηματισμό σε κύριες συντεταγμένες το διάνυσμα \underline{y} της σχέσης (2.35), το οποίο περιέχει τις μετρούμενες επιταχύνσεις των N_{out} βαθμών ελευθερίας (DOFs), βασισμένο σε μοντέλο μη κλασικής απόσβεσης (non-classically damped modal model) μπορεί να γραφει

$$\underline{\ddot{y}}(t) = U \underline{\ddot{\xi}}(t) + U^* \underline{\ddot{\xi}}^*(t) + D_c \underline{\ddot{z}}(t) = \sum_{r=1}^m [\underline{u}_r \xi_r(t) + \underline{u}_r^* \xi_r^*(t)] + D_c \underline{\ddot{z}}(t) \quad (2.39)$$

όπου D_c είναι ένα πραγματικό μητρώο το οποίο δίνεται από τη σχέση (2.37). Επίσης οι μιγαδικές κύριες συντεταγμένες $\xi_r(t), r = 1, \dots, m$ ικανοποιούν τις μιγαδικές κύριες ή ιδιομορφικές εξισώσεις

$$\dot{\xi}_r(t) = \lambda_r \xi_r(t) + \underline{l}_r^T \underline{\ddot{z}}(t) \quad (2.40)$$

Επιπλέον ορίζουμε, το μητρώο

$$U \equiv [\underline{u}_1 \quad \dots \quad \underline{u}_m] = C_c \begin{bmatrix} \underline{\Phi} \\ \underline{\Phi}_\Lambda \end{bmatrix} = C_a \Phi \Lambda^2 \in \mathcal{C}^{N_{out} \times m} \quad (2.41)$$

το οποίο περιέχει τις μιγαδικές ιδιοσυναρτήσεις των N_{out} βαθμών ελευθερίας (DOFs)

$$\underline{u}_r = \lambda_r^2 C_a \underline{\varphi}_r \in \mathcal{C}^{N_{out}}, r = 1, \dots, m \quad (2.42)$$

καθώς και το μιγαδικό διάνυσμα \underline{l}_r^T , το οποίο περιέχει τους συντελεστές συνεισφοράς που σχετίζουν τους N_{in} βαθμούς ελευθερίας ως εισαγόμενη ενέργεια με την r mode του συστήματος. Η ιδιομορφική απόκριση $\xi_r(t)$ μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (2.40) χρησιμοποιώντας τη μιγαδική τιμή $\xi_r(0)$ ως αρχική συνθήκη.

2.7 Η εξίσωση της απόκρισης στο πεδίο της συχνότητας

Εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Fourier (FT: Fourier Transform) στις εξισώσεις (2.39) και (2.40) καταλήγουμε σε μία σχέση του μετασχηματισμού Fourier $\hat{\underline{y}}(\omega)$ της απόκρισης $\underline{y}(t)$ του συστήματος και του FT $\hat{\underline{z}}(\omega)$ της διέγερσης $\underline{z}(t)$. Ορίζουμε $\underline{y}_k(\underline{\theta})$ να είναι ο μετασχηματισμός Fourier $\hat{\underline{y}}(k\Delta\omega)$ της απόκρισης των επιταχύνσεων $\underline{y}(t)$. Επίσης διακριτοποιούμε το πεδίο των συχνοτήτων ω σε k ακέραια πολλαπλάσια του στοιχειώδους εύρους συχνοτήτων $\Delta\omega$, επομένως $\omega = k\Delta\omega$.

Άρα ο μετασχηματισμός Fourier της απόκρισης του συστήματος δίνεται από τη εξής σχέση

$$\begin{aligned} \underline{y}_k(\underline{\theta}) = & \sum_{r=1}^m \left[\underline{u}_r \underline{l}_r^T \underline{\eta}_k(\lambda_r) + \underline{u}_r^* \underline{l}_r^{*T} \underline{\eta}_k(\lambda_r^*) \right] + D_c \hat{\underline{z}}_k + \sum_{r=1}^m \left[(\underline{a}_r + \underline{b}_r e^{-jk\Delta\omega}) A_k(\lambda_r) \right. \\ & \left. + (\underline{a}_r^* + \underline{b}_r^* e^{-jk\Delta\omega}) A_k(\lambda_r^*) \right] \end{aligned} \quad (2.43)$$

όπου τα διανύσματα \underline{a}_r και \underline{b}_r δίνονται από τις σχέσεις

$$\underline{a}_r = \underline{u}_r \xi_r(0) \in \mathcal{C}^{N_{out} \times 1} \quad (2.44)$$

$$\underline{b}_r = -\underline{u}_r \xi_r(T) \in \mathcal{C}^{N_{out} \times 1} \quad (2.45)$$

Επίσης ορίζουμε από τη σχέση της απόκρισης (2.43),

$$\underline{\eta}_k(\lambda_r) = \frac{\hat{\underline{z}}_k(k\Delta\omega)}{jk\Delta\omega - \lambda_r} \quad (2.46)$$

$$A_k(\lambda_r) = -\frac{1}{jk\Delta\omega - \lambda_r} \quad (2.47)$$

$$\underline{\ddot{z}}_k = \hat{\underline{z}}(k\Delta\omega) \quad (2.48)$$

Ακόμα από την συνάρτηση της απόκρισης της κατασκευής (2.43), η παράμετρος $\underline{\theta}$

$$\underline{\theta} = \{\lambda_r, \underline{u}_r, \underline{l}_r^T, \xi_r(0), \xi_r(T), r = 1, \dots, m, D_c\} \quad (2.49)$$

καθορίζει πλήρως την απόκριση επιτάχυνσης των μετρούμενων βαθμών ελευθερίας εμπεριέχοντας πληροφορίες, όπως μιγαδικές ιδιοτιμές λ_r , ιδιοσυναρτήσεις \underline{u}_r , συντελεστές συνεισφοράς \underline{l}_r^T και αρχικές συνθήκες κύριων συντεταγμένων $\xi_r(0), \xi_r(T)$.

Επίσης εισάγοντας τις παρακάτω συναρτήσεις στην εξίσωση (2.43)

$$g_k(\underline{\theta}_r^a) = \underline{l}_r^T \underline{\eta}_k(\lambda_r) + [\xi_r(0) - \xi_r(T)e^{-jk\Delta\omega T}]A_k(\lambda_r) \quad (2.50)$$

$$h_k(\underline{\theta}_r^a) = \underline{l}_r^{*T} \underline{\eta}_k(\lambda_r^*) + [\xi_r^*(0) - \xi_r^*(T)e^{-jk\Delta\omega T}]A_k(\lambda_r^*) \quad (2.51)$$

μπορεί να διατυπωθεί με την ισοδύναμη εναλλακτική μορφή

$$\underline{y}_k = \sum_{r=1}^m [\underline{u}_r g_k(\underline{\theta}_r^a) + \underline{u}_r^* h_k(\underline{\theta}_r^a)] + D_c \underline{\ddot{z}}_k \quad (2.52)$$

όπου η παράμετρος $\underline{\theta}_r^a$ ορίζεται από την παρακάτω σχέση

$$\underline{\theta}_r^a = \{\underline{l}_r, \lambda_r, \xi_r(0), \xi_r(T)\} \quad (2.53)$$

Η σημαντικότητα της εναλλακτικής σχέσης (2.52) της επιτάχυνσης της κατασκευής θα καθοριστεί στο επόμενο κεφάλαιο, στο οποίο αναφέρεται η λειτουργία του software μέσω του προγράμματος MATLAB, με βάση το οποίο γίνεται η αναγνώριση των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών της κατασκευής.

3. Στάδια λειτουργίας του software βασισμένο στο MATLAB

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία, η οποία ακολουθείται μέσω του προγράμματος MATLAB για την αναγνώριση των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών μηχανικών συστημάτων. Οι μετρήσεις που καταγράφονται από τα επιταχυνσιόμετρα εισέρχονται στο MATLAB. Επίσης μοντελοποιείται η κατασκευή εισάγοντας τις συντεταγμένες των κόμβων των βαθμών ελευθερίας (από τη γεωμετρία της κατασκευής) και την αντίστοιχη σύνδεση των κόμβων. Επιπλέον προγραμματίζονται οι θέσεις στις οποίες είναι εγκατεστημένοι οι αισθητήρες, καθώς και οι κατευθύνσεις στις οποίες πραγματοποιούνται οι μετρήσεις (η θετική φορά των μετρήσεων).

Η μεθοδολογία της ιδιομορφικής ανάλυσης χρησιμοποιεί τους μετασχηματισμούς Fourier των επιταχύνσεων που μετρήθηκαν στους βαθμούς ελευθερίας της κατασκευής και των μετασχηματισμών Fourier των επιταχύνσεων που προβλέφθηκαν στους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας της κατασκευής από το ιδιομορφικό μοντέλο.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια συνάρτηση σφάλματος, στην οποία επιλέγονται οι ιδιομορφικές παράμετροι μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων, για την ελαχιστοποίησή της μεταξύ των μετασχηματισμών Fourier των μετρούμενων επιταχύνσεων και των μετασχηματισμών Fourier των επιταχύνσεων που προβλέπονται από το ιδιομορφικό μοντέλο της κατασκευής, σε ένα εύρος συχνοτήτων. Η διαδικασία βελτιστοποίησης βασίζεται σε τρία στάδια και θα αναλυθεί εκτενέστερα στη συνέχεια.

3.1 Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων στο πεδίο της συχνότητας

Στο πεδίο της συχνότητας, οι βέλτιστες τιμές του $\underline{\theta}$ έχουν ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της διαφοράς μεταξύ των μετασχηματισμών Fourier των μετρούμενων επιταχύνσεων και των μετασχηματισμών Fourier που προβλέπονται από το ιδιομορφικό μοντέλο της κατασκευής.

Επομένως εισάγουμε την αντικειμενική συνάρτηση $J(\underline{\theta})$, η οποία περιέχει τα τετράγωνα της διαφοράς των προβλέψεων της απόκρισης του ιδιομορφικού μοντέλου $\underline{y}_k(\underline{\theta}), k = 1, \dots, N$ και της απόκρισης $\underline{\hat{y}}_k$ που εκτιμήθηκε από τα δεδομένα των μετρήσεων. Οπότε καταλήγουμε σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, στο οποίο ψάχνουμε τις τιμές της παραμέτρου $\underline{\theta}$ για τις οποίες ελαχιστοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση

$$\begin{aligned}
J(\underline{\theta}) &= \frac{1}{V} \sum_{k=0}^N \left[\underline{y}(k\Delta\omega, \underline{\theta}) - \underline{\hat{y}}(k\Delta\omega) \right]^{*T} \left[\underline{y}(k\Delta\omega, \underline{\theta}) - \underline{\hat{y}}(k\Delta\omega) \right] = \\
&= \frac{1}{V} \sum_{k=0}^N \left[\underline{y}_k - \underline{\hat{y}}_k \right]^{*T} \left[\underline{y}_k - \underline{\hat{y}}_k \right]
\end{aligned} \tag{3.1}$$

όπου N είναι ο αριθμός του δείγματος των δεδομένων στα οποία έγινε ανάλυση σε χρόνο περιόδου T (διάρκεια απόκρισης). Επιπλέον V είναι ο συντελεστής κανονικοποίησης στο πεδίο της συχνότητας.

Εναλλακτικά, η εξίσωση (3.1) της αντικειμενικής συνάρτησης μπορεί να εκφραστεί ως προς το σφάλμα μεταξύ των μετρούμενων επιταχύνσεων των βαθμών ελευθερίας και των επιταχύνσεων που προβλεπονται από το ιδιομορφικό μοντέλο της κατασκευής.

$$J(\underline{\theta}) = \frac{1}{V} \sum_{k=0}^N \left[\underline{\varepsilon}_k^{NL} \right]^T W \left[\underline{\varepsilon}_k^{NL} \right] = \frac{1}{V} \sum_{k=0}^N \left\| \underline{\varepsilon}_k^{NL} \right\|^2 \tag{3.2}$$

όπου $\underline{\varepsilon}_k^{NL}(\underline{\theta})$ είναι η μη γραμμική συνάρτηση του σφάλματος, η οποία εξαρτάται από την παράμετρο $\underline{\theta}$,

$$\underline{\varepsilon}_k^{NL}(\underline{\theta}) = \underline{y}_k(\underline{\theta}) - \underline{\hat{y}}_k \tag{3.3}$$

αντίστοιχα, ο συντελεστής κανονικοποίησης V γράφεται στην εξής μορφή

$$V = \sum_{k=0}^N \left\| \underline{\hat{y}}_k \right\|^2 \tag{3.4}$$

και ακόμα ισχύει $\left\| \underline{y} \right\|^2 = \underline{y}^T W \underline{y}$, με $W \in R^{N_{out} \times N_{out}}$ είναι ένα μητρώο βαρύτητας το οποίο επιλέγεται από το χρήστη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει οριστεί ο μοναδιαίος πίνακας ($W = I$).

Από την πλευρά του προγράμματος, για να περιγραφεί το διάνυσμα της απόκρισης $\underline{y}_k(\underline{\theta})$ είναι απαραίτητο οι μεταβλητές της παραμέτρου $\underline{\theta}$ να οριστούν ως πραγματικές τιμές. Για αυτό το λόγο, οι μιγαδικοί αριθμοί καθώς και τα μιγαδικά διανύσματα, όπως $\underline{u}_r, \underline{l}_r, \xi_r(T), \xi_r(0)$, τα οποία εμπεριέχονται στην ανάλυση του ιδιομορφικού μοντέλου εκφράζονται σε πραγματικό και σε φανταστικό μέρος.

Αναλυτικότερα, οι μιγαδικές σχέσεις γράφονται ως εξής

$$\underline{u}_r = \underline{\varphi}_r + j\underline{\psi}_r \quad (3.5)$$

$$\underline{L}_r^T = \underline{p}_{Re,r}^T + j\underline{p}_{Im,r}^T \quad (3.6)$$

$$\xi_r(0) = n_{Re,r}^0 + jn_{Im,r}^0 \quad (3.7)$$

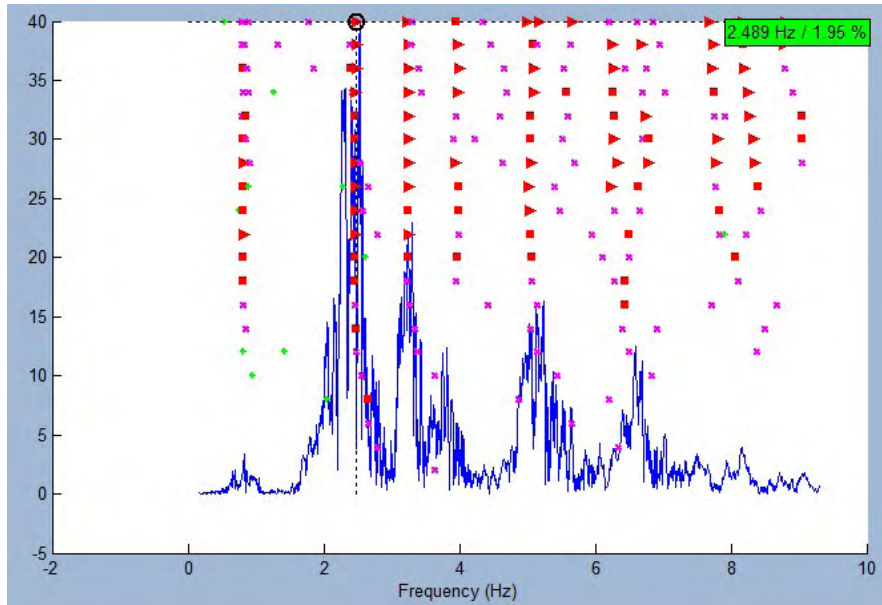
$$\xi_r(T) = n_{Re,r}^T + jn_{Im,r}^T \quad (3.8)$$

Ο συνολικός αριθμός των παραμέτρων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της απόκρισης των N_{out} βαθμών ελευθερίας που δίνουν m ιδιομορφές και N_{in} χρονοϊστορίες που εισέρχονται στο σύστημα είναι

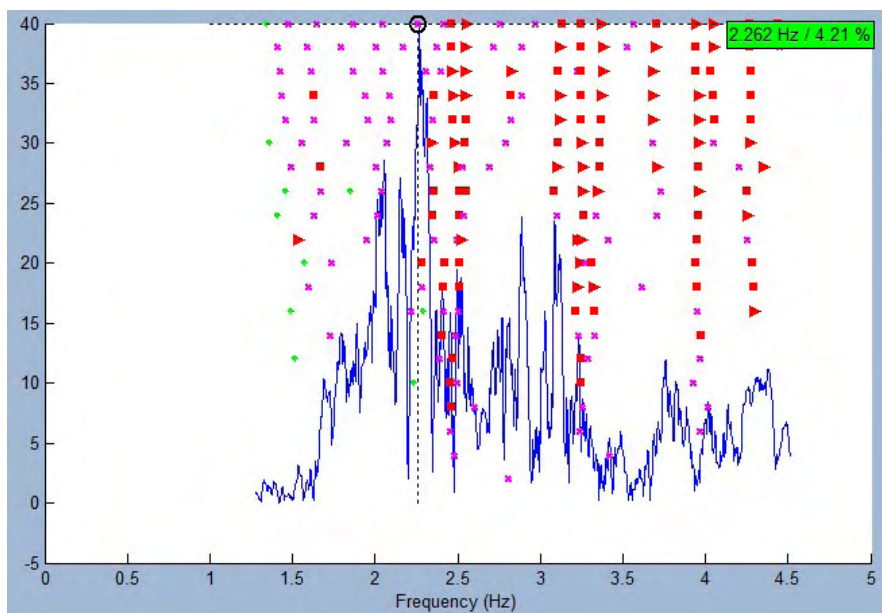
$$[4m + 2(m \times N_{in}) + 2(N_{out} \times m) + (N_{out} \times N_{in})] \quad (3.9)$$

3.2 Αναγνώριση ιδιομορφών, εκτίμηση ιδιοσυχνοτήτων και συντελεστών απόσβεσης (Στάδιο 1)

Στο πρώτο στάδιο της ανάλυσης παρέχονται εκτιμήσεις των ιδιοσυχνοτήτων και των αντίστοιχων συντελεστών απόσβεσης διατυπώνοντας την αντικειμενική συνάρτηση σφάλματος με ένα κατάλληλο τρόπο τέτοιο ώστε να λύνεται ένα γραμμικό σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων χρησιμοποιώντας το μοντέλο κοινού παρονομαστή (common denominator model) [17]. Διαγράμματα σταθεροποίησης (stabilization diagrams) χρησιμοποιούνται για να διακριθεί η διαφορά μεταξύ του φυσικού και του μαθηματικού μοντέλου, καθώς αυτόματα εκτιμάται και ο αριθμός των ιδιομορφών που συμμετέχουν όπως φαίνονται στις Εικόνες 2 και 3. Αυτό το πρώτο βήμα είναι μια επέκταση της μεθόδου PolyMAX στο πεδίο της συχνότητας (polyreference least-squares complex frequency domain method) [18], για να περιγραφεί ένα ιδιομορφικό μοντέλο μη κλασικής απόσβεσης (non-classically damped modal model) έτσι ώστε να εξαχθούν τα χαρακτηριστικά της απόκρισης με βάση δεδομένων σεισμικής διέγερσης. Λεπτομέρειες παρουσιάζονται στην εργασία του Νικολάου [16]. Επιπλέον το πρώτο στάδιο, δε δίνει μόνο εκτιμήσεις των ιδιοσυχνοτήτων και των αντίστοιχων συντελεστών απόσβεσης, αλλά παρέχει και την πληροφορία του αριθμού των ιδιομορφών που συμμετέχουν. Για παράδειγμα, με βάση τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων σταθεροποίησης που παρουσιάζονται στις Εικόνες 2 και 3 παρατηρείται ότι συμμετέχουν 6 ιδιομορφές.



Εικόνα 2. Διάγραμμα σταθεροποίησης, 3^{ος} σεισμός, αισθητήρας 9



Εικόνα 3. Διάγραμμα σταθεροποίησης, 3^{ος} σεισμός, αισθητήρας 16

3.3 Εκτίμηση ιδιομορφών και συντελεστών συνεισφοράς (Στάδιο 2)

Στο δεύτερο στάδιο, ο αριθμός των ιδιομορφών m που συμμετέχουν καθώς και οι εκτιμήσεις των πόλων λ_r θεωρούνται γνωστά και εισάγονται στη σχέση της απόκρισης (2.43) ή (2.52) έτσι ώστε λύνοντας ένα σύστημα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων μπορούν να εξαχθούν εκτιμήσεις για τις υπόλοιπες ιδιομορφικές παραμέτρους, οι οποίες είναι άγνωστες μεταβλητές στο πρόβλημα. Οι παράμετροι για

τις οποίες θα πάρουμε εκτιμήσεις είναι οι ιδιομορφές \underline{u}_r , οι συντελεστές συνεισφοράς \underline{L}_r , το πραγματικό μητρώο D_c και τα διανύσματα $\underline{a}_r, \underline{b}_r$ ή οι αρχικές συνθήκες $\xi_r(0), \xi_r(T)$. Για τον υπολογισμό αυτών των ποσοτήτων αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις.

Η πρώτη προσέγγιση στο δεύτερο βήμα, εκτιμά τα μητρώα R_r ,

$$R_r = \underline{u}_r \underline{L}_r^T \in \mathbb{C}^{N_{out} \times N_{in}} \quad (3.10)$$

το πραγματικό μητρώο D_c και τα διανύσματα $\underline{a}_r, \underline{b}_r$ υπολογίζονται ελαχιστοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση (3.2) με το σφάλμα $\underline{x}_k^{NL}(\underline{\theta})$, το οποίο δίνεται από τη σχέση (3.3) και η απόκριση $\underline{y}_k(\underline{\theta})$ η οποία δίνεται από τη σχέση (2.43) όπου ο όρος $\underline{u}_r \underline{L}_r^T$ αντικαθίσταται από R_r και η σχέση μπορεί να διατυπωθεί ως εξής

$$\begin{aligned} \underline{y}_k(\underline{\theta}) = & \sum_{r=1}^m \left[R_r \underline{\eta}_k(\lambda_r) + R_r^* \underline{\eta}_k(\lambda_r^*) \right] + D_c \ddot{\underline{z}}_k + \sum_{r=1}^m \left[(\underline{a}_r + \underline{b}_r e^{-jk\Delta}) A_k(\lambda_r) \right. \\ & \left. + (\underline{a}_r^* + \underline{b}_r^* e^{-jk\Delta}) A_k(\lambda_r^*) \right] \end{aligned} \quad (3.11)$$

Είναι εμφανές από την κατασκευή του προβλήματος ότι η αντικειμενική συνάρτηση του σφάλματος είναι τετραγωνική σε στοιχεία όπως το μητρώο R_r , το πραγματικό μητρώο D_c , και τα διανύσματα $\underline{a}_r, \underline{b}_r$. Οπότε μπορεί να γραφεί ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων για αυτά τα στοιχεία. Άρα δίνοντας το μητρώο R_r και θεωρώντας ότι ισχύει η σχέση (3.10) τότε μπορούν να εξαχθούν οι ιδιομορφές \underline{u}_r και οι συντελεστές συνεισφοράς \underline{L}_r από τη μέθοδο Singular Value Decomposition (SVD).

Η δεύτερη προσέγγιση του ίδιου βήματος βασίζεται στη έκφραση (2.52) των επιταχύνσεων $\underline{y}_k(\underline{\theta})$. Σε αυτή την περίπτωση οι παράμετροι που θέλουμε να υπολογίσουμε είναι οι ιδιομορφές \underline{u}_r , οι συντελεστές συνεισφοράς \underline{L}_r , οι αρχικές συνθήκες $\xi_r(0), \xi_r(T)$, ο αριθμός των ιδιομορφών $r = 1, \dots, m$, καθώς και το πραγματικό μητρώο D_c . Για το πρόβλημα, το οποίο είναι μοντέλο μη κλασικής απόσβεσης (non-classically damped modal model), ο αριθμός των άγνωστων παραμέτρων είναι $2m(1 + N_{out} + N_{in}) + N_{out}N_{in}$. Ομώς ο αριθμός των παραμέτρων μπορεί να μειωθεί σε $2m(1 + N_{in})$, εμπεριέχοντας τις παραμέτρους $\underline{L}_r, \xi_r(0)$ και $\xi_r(T)$ για κάθε ιδιομορφή αναγνωρίζοντας ότι η αντικειμενική συνάρτηση σφάλματος, η οποία δίνεται από τη σχέση (3.2) είναι τετραγωνική σε σχέση με τις μιγαδικές ιδιομορφές \underline{u}_r και το πραγματικό μητρώο D_c . Εφαρμόζοντας συνθήκες βελτιστότητας στη σχέση (3.2) της αντικειμενικής συνάρτησης του σφάλματος σε σχέση με τις παραμέτρους \underline{u}_r και D_c , καταλήγουμε σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων με αποτέλεσμα τις ιδιομορφές \underline{u}_r και το μητρώο D_c συναρτήσεων των παραμέτρων $\underline{L}_r, \xi_r(0)$ και $\xi_r(T)$. Το πρόβλημα αυτό αποτελεί πρόβλημα μη

γραμμικού προγραμματισμού και υπολογίστηκε στο MATLAB με τη χρήση αλγορίθμων οι οποίοι βασίζονται στις παραγώγους της αντικειμενικής συνάρτησης σφάλματος ως προς τις παραμέτρους του συστήματος. Η ανάλυση για τον προσδιορισμό των παραγώγων παρουσιάζεται στην εργασία του Νικολάου [16]

3.4 Εκτίμηση ιδιομορφικών χαρακτηριστικών μέσω μη γραμμικής βελτιστοποίησης (Στάδιο 3)

Τα αποτελέσματα, τα οποία προκύπτουν από τα προηγούμενα δύο στάδια αναγνώρισης των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών της κατασκευής, είναι πολύ κοντά στις βέλτιστες εκτιμήσεις. Όμως για ιδιομορφές οι οποίες βρίσκονται σε κοντινά εύρη συχνοτήτων καθώς και ιδιομορφές οι οποίες αλληλοκαλύπτονται τα αποτελέσματα των προηγούμενων δύο σταδίων μπορεί να μην είναι επαρκή. Σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται να λυθεί το πλήρες πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης για την αναγνώριση όλων των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών ταυτόχρονα. Πιο συγκεκριμένα οι ιδιομορφικές παράμετροι του προβλήματος υπολογίζονται μέσω του διανύσματος $\underline{\theta}$ ελαχιστοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση του σφάλματος η οποία δίνεται από τη σχέση (3.2) και το σφάλμα $\underline{x}_k^{NL}(\underline{\theta})$ δίνεται από τη (3.3). Οι παράμετροι που εμπεριέχονται στην ιδιομορφική παράμετρο $\underline{\theta}$ είναι η ιδιοσυχνότητα ω_r , ο συντελεστής απόσβεσης ζ_r , το διάνυσμα των συντελεστών συνεισφοράς \underline{l}_r , οι αρχικές συνθήκες $\xi_r(0), \xi_r(T)$, ο αριθμός των ιδιομορφών που συμμετέχουν $r = 1, \dots, m$ και το πραγματικό μητρώο D_c . Προσδιορίζοντας την παράμετρο $\underline{\theta}$, τότε προσδιορίζεται πλήρως το διάνυσμα της απόκρισης το οποίο δίνεται από τη σχέση (2.52). Ο συνολικός αριθμός των παραμέτρων για το πρόβλημα μη κλασικής απόσβεσης (non-classically damped modal model) είναι $2m(2 + N_{out} + N_{in}) + N_{out}N_{in}$.

Για την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία δίνεται από τη σχέση (3.2), μπορεί να παρατηρηθεί ότι η σχέση (3.2) είναι τετραγωνική σε σχέση με τις μιγαδικές ιδιομορφές \underline{u}_r και των στοιχείων του μητρώου D_c . Με βάση αυτή την παρατήρηση μπορούν να αναπτυχθούν εκφράσεις οι οποίες συνδέουν τις παραμέτρους \underline{u}_r, D_c με τους συντελεστές συνεισφοράς \underline{l}_r , τις ιδιοσυχνότητες ω_r , τους συντελεστές απόσβεσης ζ_r και τις αρχικές συνθήκες $\xi_r(0), \xi_r(T)$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί ο αριθμός των παραμέτρων που εμπλέκονται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης σε $2m(N_{in} + 2)$.

4. Εφαρμογή στο κτίριο Alcazar και αποτελέσματα της ανάλυσης

4.1 Γενικά χαρακτηριστικά του κτιρίου

Το κτίριο Alcazar όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4, στο οποίο έγινε η ανάλυση των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών είναι ένα κτίριο δέκα έξι ορόφων το οποίο στεγάζει γραφεία. Τοποθετείται στην πόλη Viña del Mar της Χιλής και χτίστηκε το 2008 σύμφωνα με το Χιλιανό Κώδικα Κτιρίων του 2004 (NCh 433). Διαθέτει τρεις υπόγειους ορόφους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως χώροι στάθμευσης και δέκα έξι υπέργειους, οι οποίοι στεγάζουν γραφεία. Το μήκος και πλάτος του κτιρίου είναι περίπου είκοσι δύο και είκοσι οχτώ μέτρα αντίστοιχα, ενώ το ύψος είναι περίπου πενήντα μέτρα. Το ύψος του τρίτου και δεύτερου ορόφου του υπογείου είναι 2.88 μέτρα, ενώ του πρώτου ορόφου του υπογείου είναι 3.6 μέτρα. Επίσης το ύψος του πρώτου ορόφου είναι 3.42 μέτρα ενώ των υπολοίπων ορόφων είναι 3.24 μέτρα.

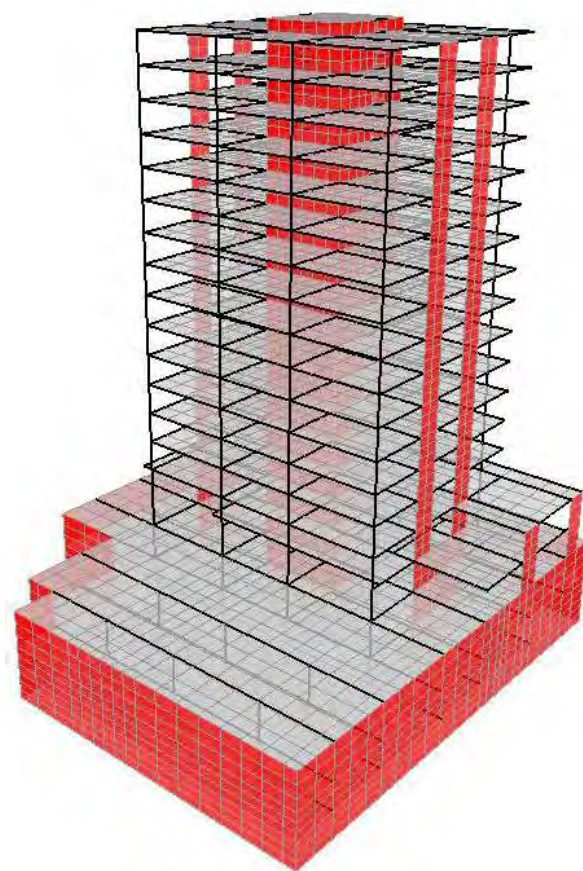


Εικόνα 4. Κτίριο Alcazar

Η αντοχή του κτιρίου σε πλευρικές δυνάμεις αποτελείται από ενισχυμένο σκυρόδεμα στην περίμετρο του κτιρίου και στις δύο διευθύνσεις (Βόρεια-Νότια, Ανατολικά-Δυτικά) και από τοιχεία στη Β-Ν διεύθυνση (NS direction). Επίσης για επιπλέον ενίσχυση κατασκευάστηκαν τοιχεία ενισχυμένου σκυροδέματος στη μέση

του κτιρίου. Άρα ανακεφαλαιώνοντας, η αντοχή του κτιρίου αποτελείται από μία πλάκα ενισχυμένου σκυροδέματος η οποία στηρίζεται από τοίχια, οχτώ ορθογώνιες κολώνες περιμετρικά και τέσσερα τοίχια περιμετρικά.

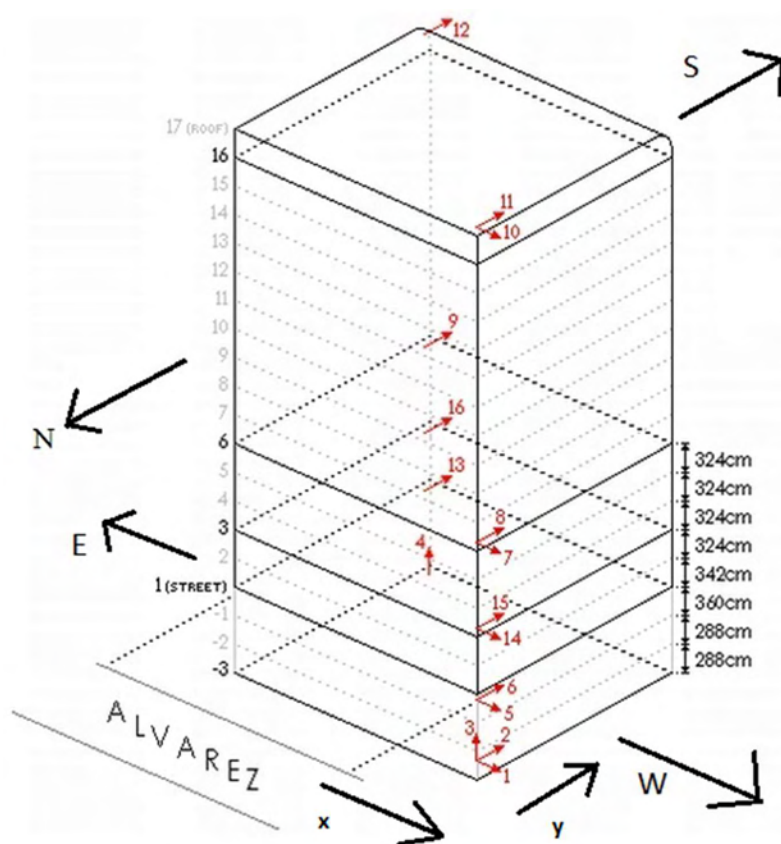
Στη συνέχεια αναπτύχθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FE model) υψηλής ακρίβειας του κτιρίου. Μοντελοποιήθηκαν οι όροφοι και οι τοίχοι σε πεπερασμένα στοιχεία διαφορετικού πάχους. Τα τοίχια σκυροδέματος μοντελοποιήθηκαν σε κελιά πάχους 0.4 μέτρα, ενώ τα τοίχια της περιμέτρου μοντελοποιήθηκαν με πάχος 0.5 μέτρα.. Επιπλέον οι δοκοί και οι κολώνες στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων διακριτοποιήθηκαν σε 60000 βαθμούς ελευθερίας (DOF) προσεγγιστικά. Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων απεικονίζεται στη Εικόνα 5.



Εικόνα 5. Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

Στο κτίριο Alcazar των δέκα έξι ορόφων έχουν τοποθετηθεί δέκα έξι επιταχυνσιόμετρα μίας διάστασης. Εγκαταστάθηκαν τέσσερις αισθητήρες στο τρίτο υπόγειο (level -3), τρεις στο ισόγειο (level 0), και από τρεις αισθητήρες ακόμα στον τρίτο, έκτο και τελευταίο όροφο. Οι αισθητήρες τρία και τέσσερα των οποίων η διεύθυνση μέτρησης δεν είναι παράλληλη με το επίπεδο των ορόφων αλλά κάθετη

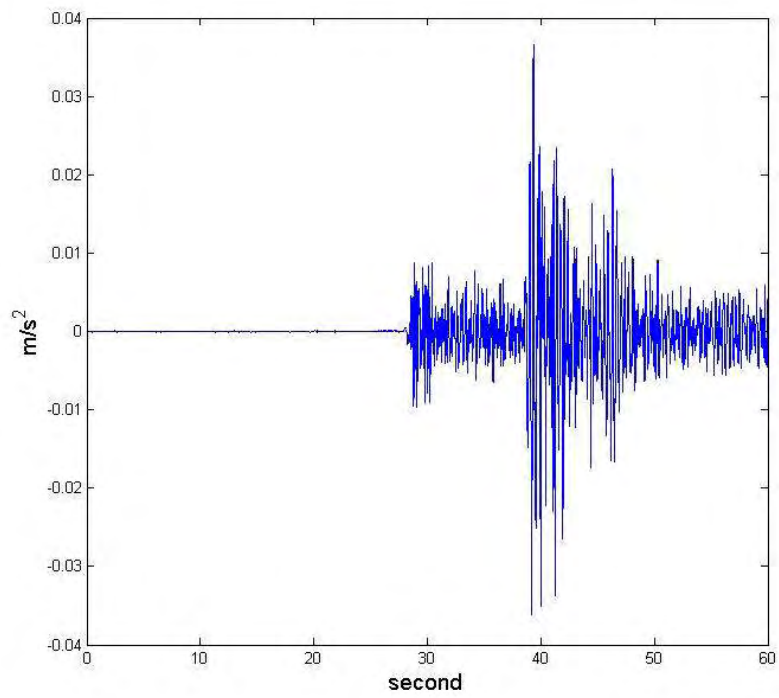
δεν είναι ενεργοί. Οι αισθητήρες καταγράφουν στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις του κτιρίου, ένας αισθητήρας στην Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction) και δύο στη Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction) έτσι ώστε να μπορούν να αναγνωριστούν οι στρεπτικές ιδιομορφές. Στους ενδιάμεσους ορόφους από επτά έως και δέκα έξι δεν έχουν τοποθετηθεί αισθητήρες, το οποίο κάνει την αναγνώριση των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών δυσκολότερη καθώς και τη σύγκρισή τους με το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Ο χρόνος διακριτοποίησης με βάση τον οποίο καταγράφηκαν οι μετρήσεις είναι 0.01 δευτερόλεπτα. Στην Εικόνα 6 που ακολουθεί φαίνονται αναλυτικότερα οι διαστάσεις των ορόφων, οι θέσεις στις οποίες έχουν εγκατασταθεί οι αισθητήρες καθώς και οι διευθύνσεις στις οποίες καταγράφουν. Οι πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του κτιρίου καθώς και το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με τα αποτελέσματα της ανάλυσης δόθηκαν από συνεργάτες στη Χιλή [17].



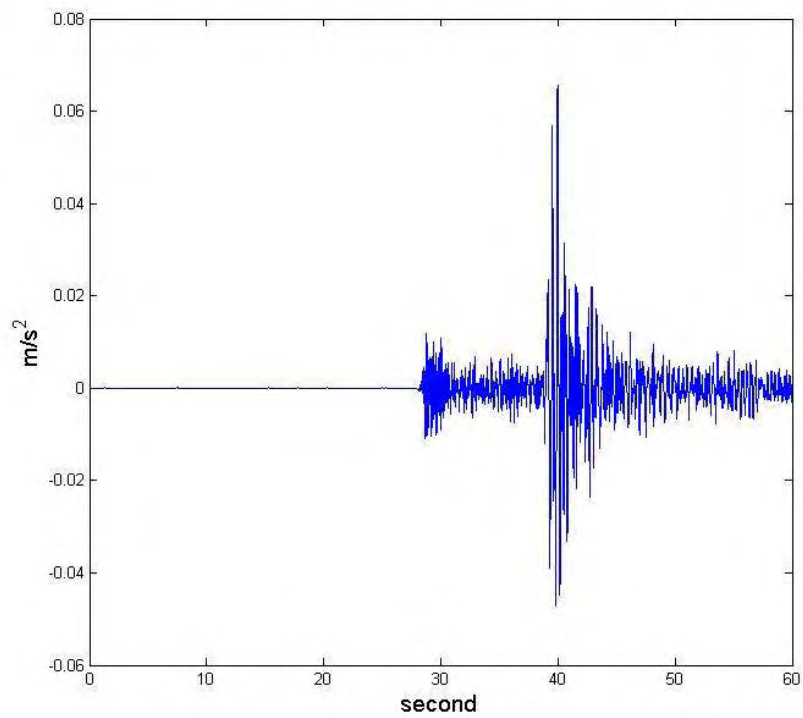
Εικόνα 6. Διαστασιολόγηση ορόφων, θέσεις αισθητήρων και διευθύνσεις μετρήσεων

4.2 Ιδιομορφική ανάλυση πρώτης σεισμικής διέγερσης (Event 1)

Η πρώτη σεισμική διέγερση, η οποία καταγράφηκε, πραγματοποιήθηκε 5 Απριλίου 2010 (Event 1). Οι χρονοϊστορίες της διέγερσης παρουσιάζονται στις Εικόνες 7 και 8 όπου φαίνονται οι ποσοστιαίες επιταχύνσεις λόγω του σεισμού (διαιρεμένες με την επιτάχυνση της βαρύτητας g) συναρτήσει του χρόνου από τους αισθητήρες 1 και 2 στον 3^ο υπόγειο όροφο.

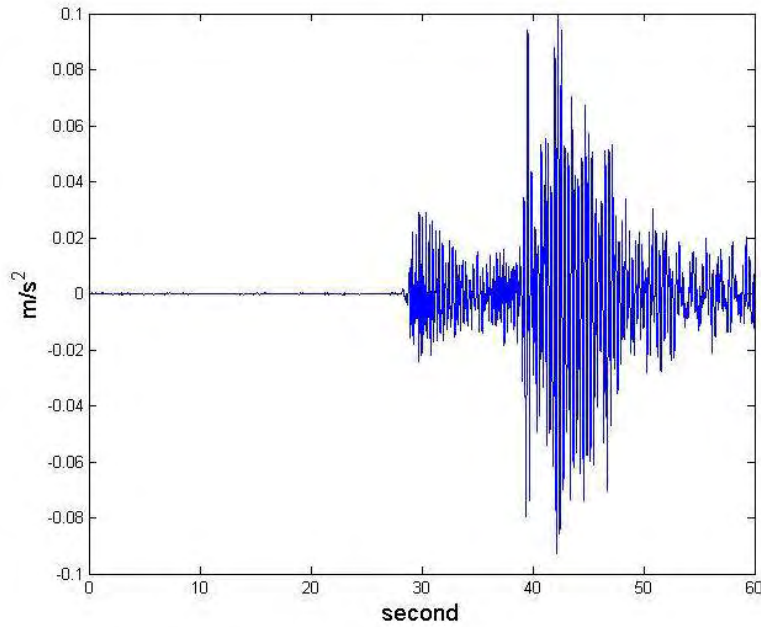


Εικόνα 7. Επιτάχυνση από την πρώτη σεισμική διέγερση, τρίτο υπόγειο, αισθητήρας 1 (NW corner EW direction)

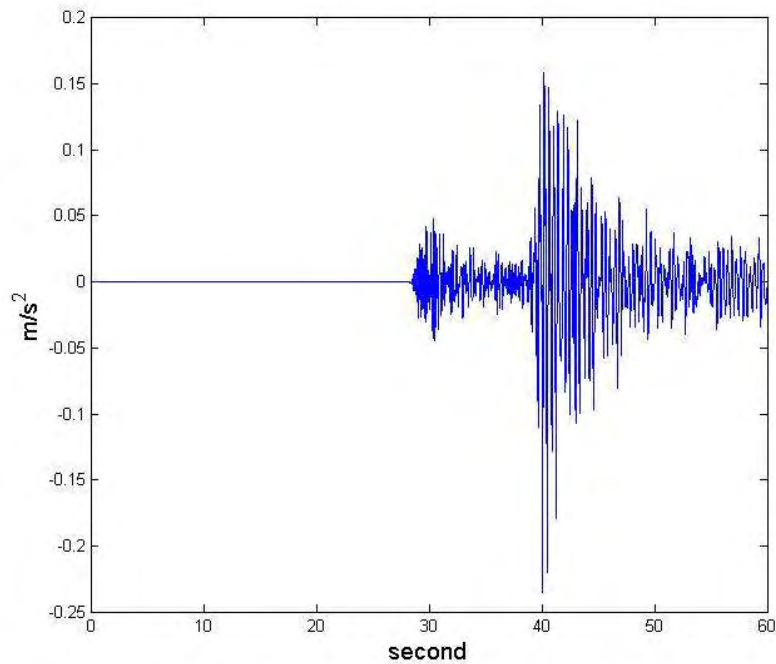


Εικόνα 8. Επιτάχυνση από την πρώτη σεισμική διέγερση, τρίτο υπόγειο, αισθητήρας 2 (NW corner NS direction)

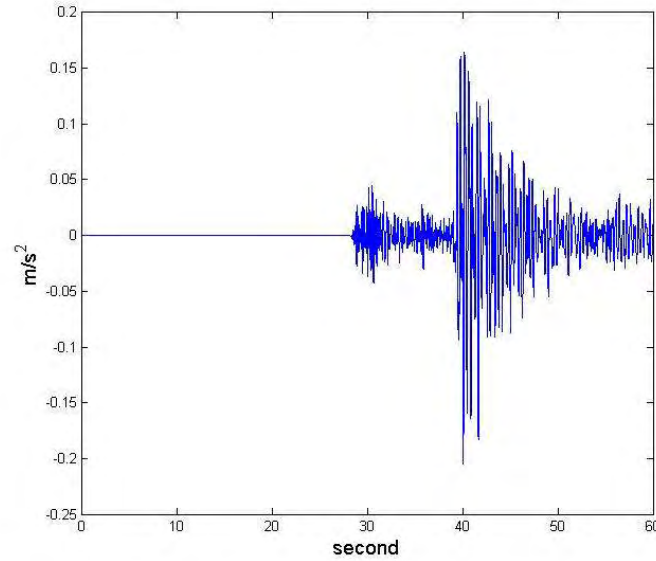
Στη συνέχεια παρουσιάζονται στις Εικόνες 9,10 και 11 οι χρονοϊστορίες της απόκρισης του κτιρίου, οι οποίες περιέχουν τις ποσοστιαίες επιταχύνσεις συναρτήσει του χρόνου, στον τελευταίο όροφο όπως καταγράφηκαν από τους αισθητήρες 10, 11 και 12.



Εικόνα 9. Επιτάχυνση απόκρισης από την πρώτη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 10 (EW direction NW corner)

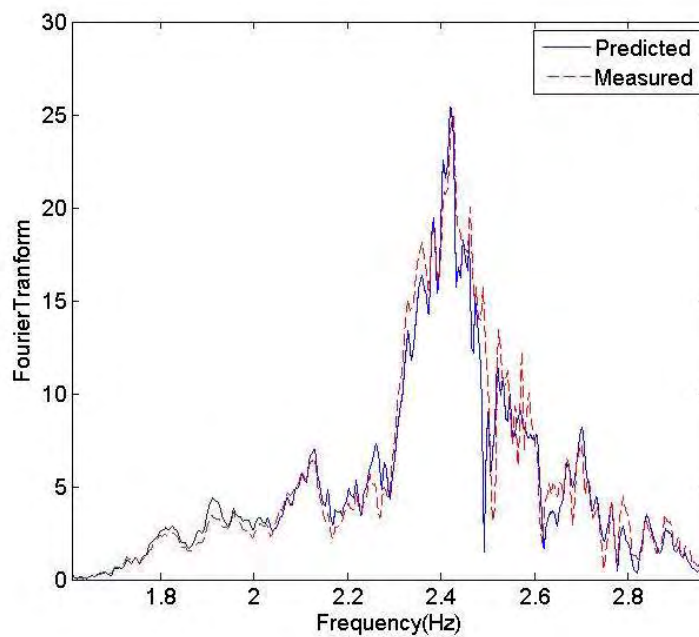


Εικόνα 10. Επιτάχυνση απόκρισης από την πρώτη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 11 (NS direction NW corner)

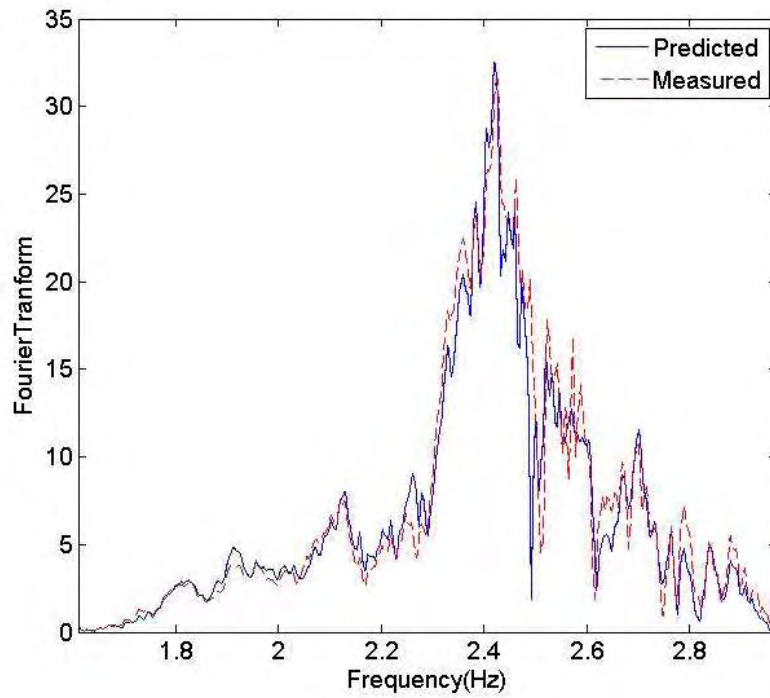


Εικόνα 11. Επιτάχυνση απόκρισης από την πρώτη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 12 (NS direction SE corner)

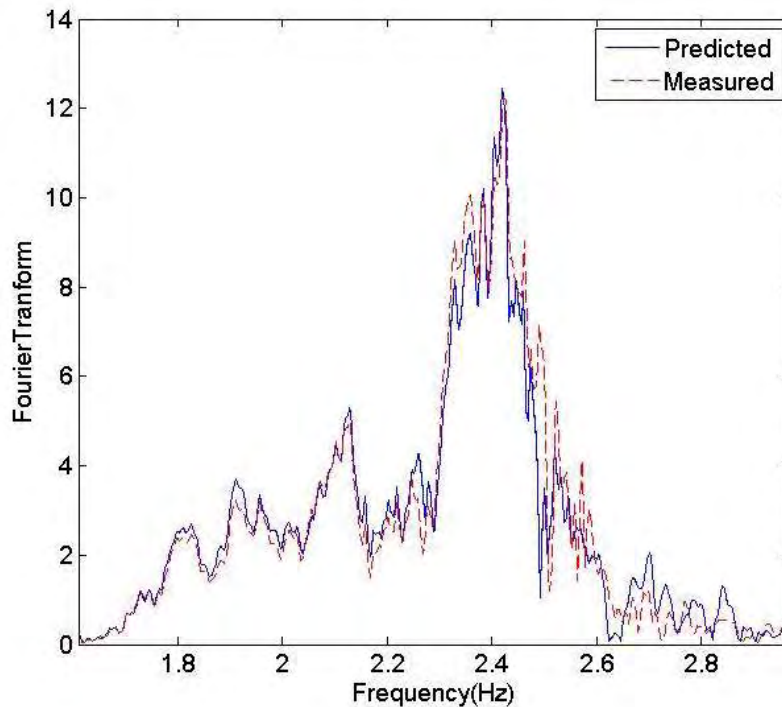
Επιπλέον παρατίθενται παρακάτω οι Εκόνες 12, 13, 14, 15 και 16 στις οποίες απεικονίζεται η σύγκριση των μετασχηματισμών Fourier των επιταχύνσεων που προβλέφθηκαν από το ιδιομορφικό μοντέλο και των μετασχηματισμών Fourier των μετρούμενων επιταχύνσεων. Από τις εικόνες αυτές διακρίνεται η πολύ ικανοποιητική λειτουργία της μεθόδου με την οποία πραγματοποιήθηκε η ιδιομορφική ανάλυση, λόγω της σύγκλισης η οποία παρατηρείται.



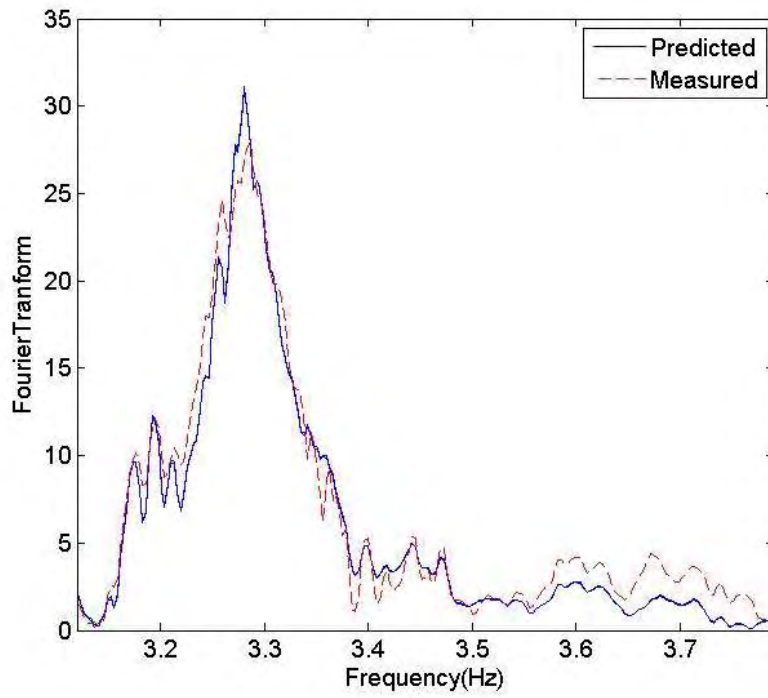
Εικόνα 12. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 8, 6^{ος} όροφος, πρώτος σεισμός



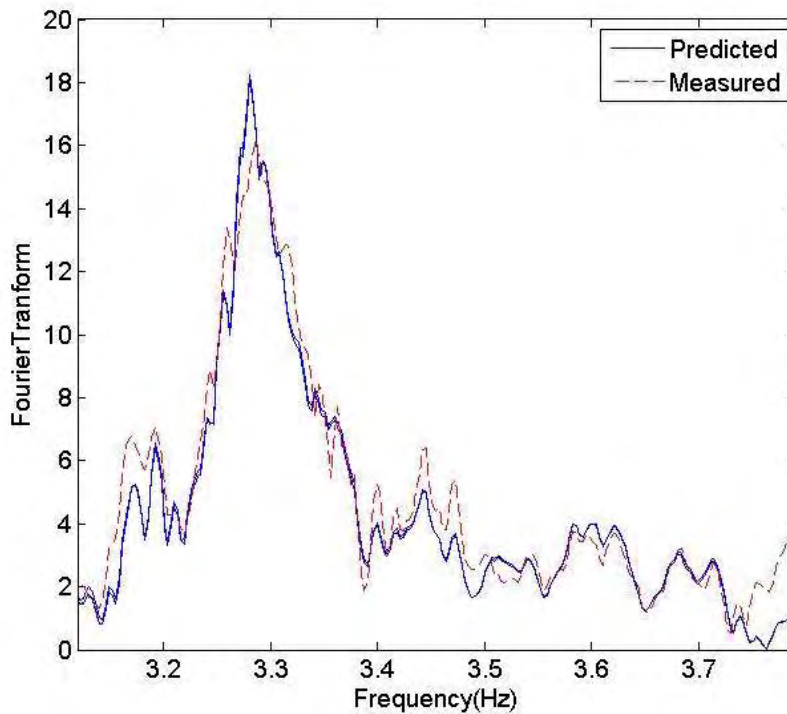
Εικόνα 13. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 11, τελευταίος όροφος, πρώτος σεισμός



Εικόνα 14. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 15, 3^{ος} όροφος, πρώτος σεισμός



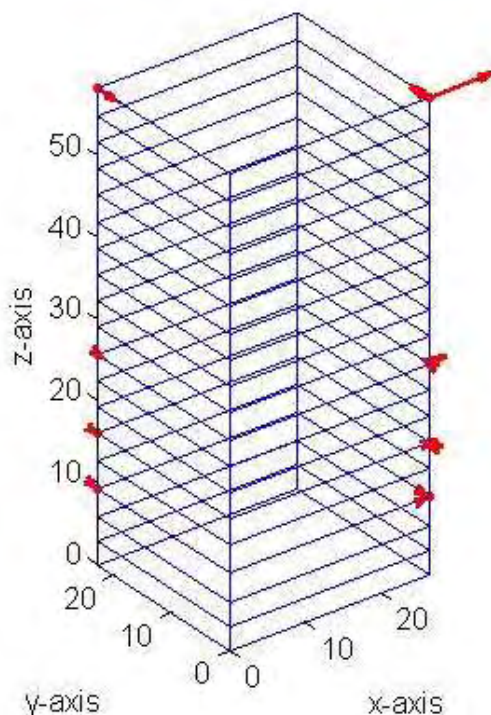
Εικόνα 15. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 10, τελευταίος όροφος, πρώτος σεισμός



Εικόνα 16. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 11, τελευταίος όροφος, πρώτος σεισμός

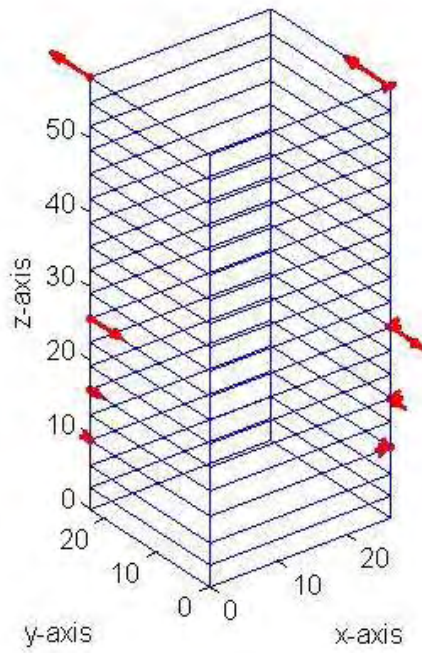
Οι ιδιομορφές, οι οποίες αναγνωρίστηκαν από την πρώτη σεισμική διέγερση, είναι τέσσερις. Τρεις καμπτικές ιδιομορφές και μία στρεπτική, πύο συγκεκριμένα μία καμπτική ιδιομορφή στη Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction) και αντίστοιχα δύο στη Βόρεια-Νότια (NS direction). Ο σχηματισμός των ιδιομορφών, η ιδιοσυχνότητα καθώς και οι συντελεστές απόσβεσης παραθέτονται στη συνέχεια. Επιπλέον στις εικόνες, στις οποίες απεικονίζονται ο σχηματισμός των ιδιομορφών, η διεύθυνση x αντιστοιχεί στην Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction) της Εικόνας 6 και η y στην Βόρεια-Νότια (NS direction) αντίστοιχα.

Στην Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction) εμφανίζεται η 1^η καμπτική ιδιομορφή (1st bending mode shape) με ιδιοσυχνότητα 0.832 Hz, συντελεστή απόσβεσης 0.93% και απεικονίζεται στην Εικόνα 17.



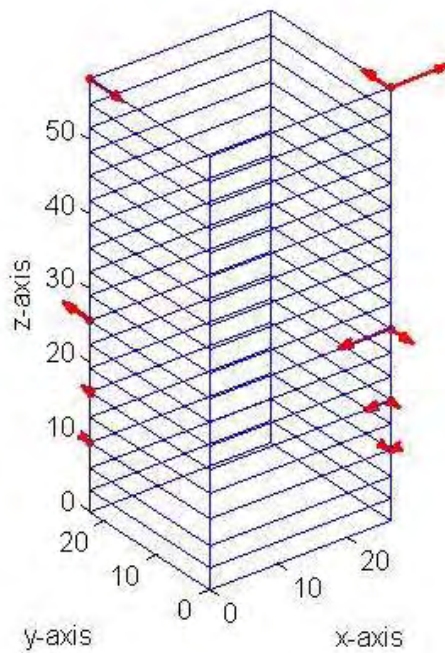
Εικόνα 17. 1^η καμπτική ιδιομορφή στην Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction), πρώτη σεισμική διέγερση.

Στην Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction) εμφανίζεται η 2^η καμπτική ιδιομορφή (2nd bending mode shape) με ιδιοσυχνότητα 2.45 Hz, συντελεστή απόσβεσης 2.51% και απεικονίζεται στην Εικόνα 18.



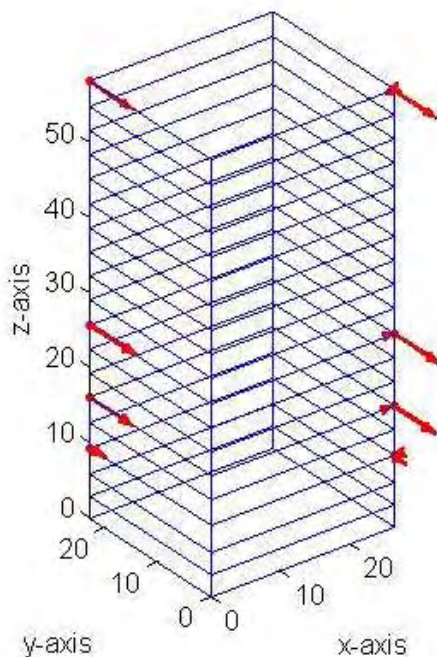
Εικόνα 18. 2^η καμπτική ιδιομορφή στην Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction), πρώτη σεισμική διέγερση.

Η δεύτερη στρεπτική ιδιομορφή (2nd torsional) εμφανίζεται με ιδιοσυχνότητα 3.29 Hz, συντελεστή απόσβεσης 1.065 και απεικονίζεται στην Εικόνα 19.



Εικόνα 19. 2^η στρεπτική ιδιομορφή, πρώτη σεισμική διέγερση.

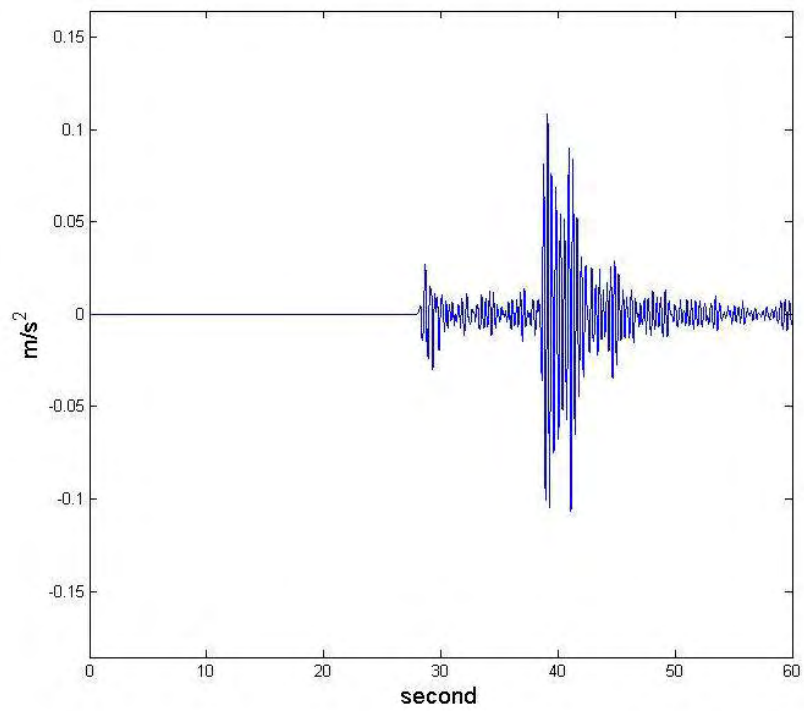
Στη Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction) εμφανίζεται η 3^η καμπτική ιδιομορφή (3rd bending) με ιδιοσυχνότητα 5.11 Hz, συντελεστή απόσβεσης 1.98% και απεικονίζεται ο σχηματισμός της στην Εικόνα 20. Όμως δεν είναι εύκολα διακριτή λόγω της απουσίας επιταχυνσιόμετρων από τον έβδομο μέχρι και τον δέκατο έκτο όροφο.



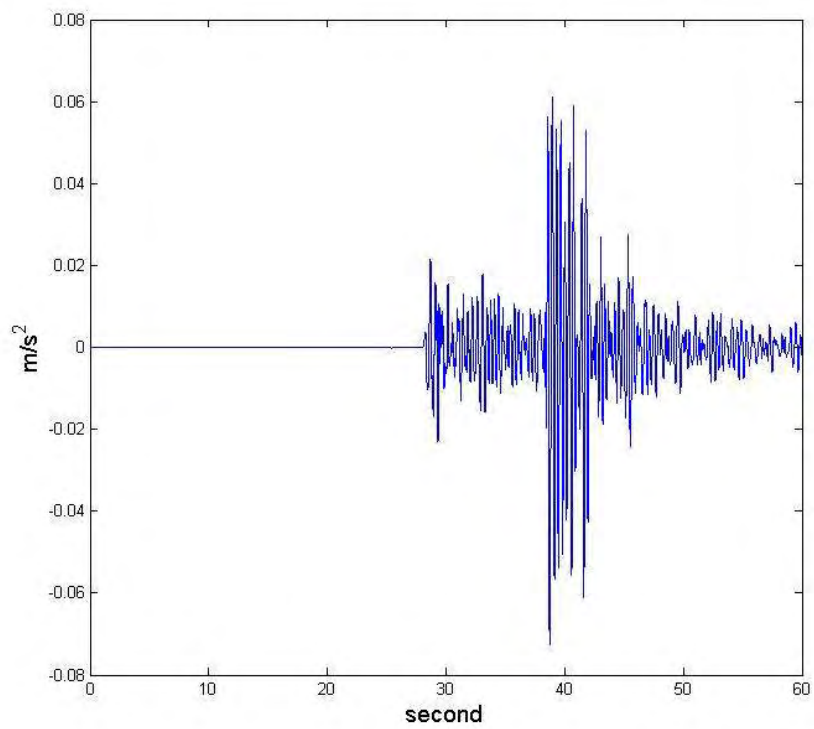
Εικόνα 20. 3^η καμπτική ιδιομορφή στη Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction), πρώτη σεισμική διέγερση.

4.3 Ιδιομορφική ανάλυση δεύτερης σεισμικής διέγερσης (Event 2)

Η δεύτερη σεισμική διέγερση, η οποία καταγράφηκε, πραγματοποιήθηκε 1 Μαΐου 2010 (Event 2). Οι χρονοϊστορίες της διέγερσης παρουσιάζονται στις Εικόνες 21 και 22, στις οποίες φαίνονται οι ποσοστιαίες επιταχύνσεις λόγω του σεισμού (διαιρεμένες με την επιτάχυνση της βαρύτητας g) συναρτήσει του χρόνου από τους αισθητήρες 1 και 2 στον 3^ο υπόγειο όροφο.

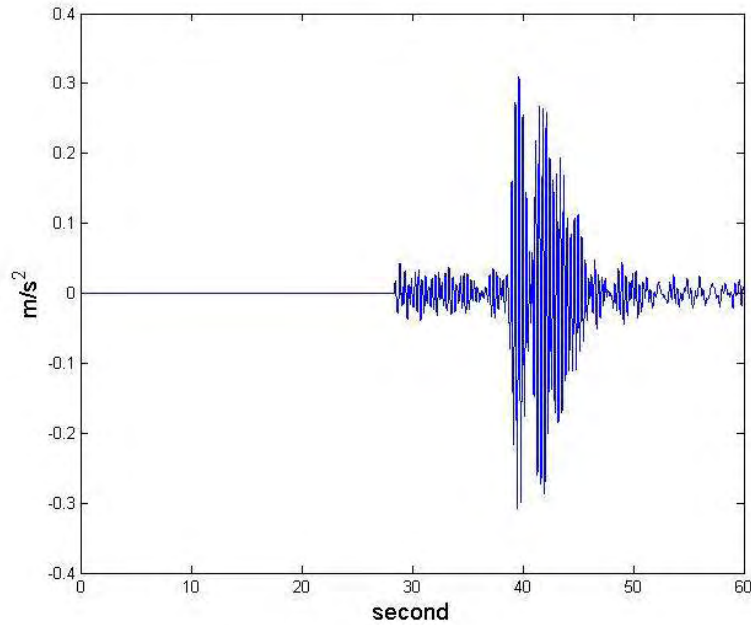


Εικόνα 21. Επιτάχυνση από τη δεύτερη σεισμική διέγερση, τρίτο υπόγειο, αισθητήρας 1 (NW corner EW direction).

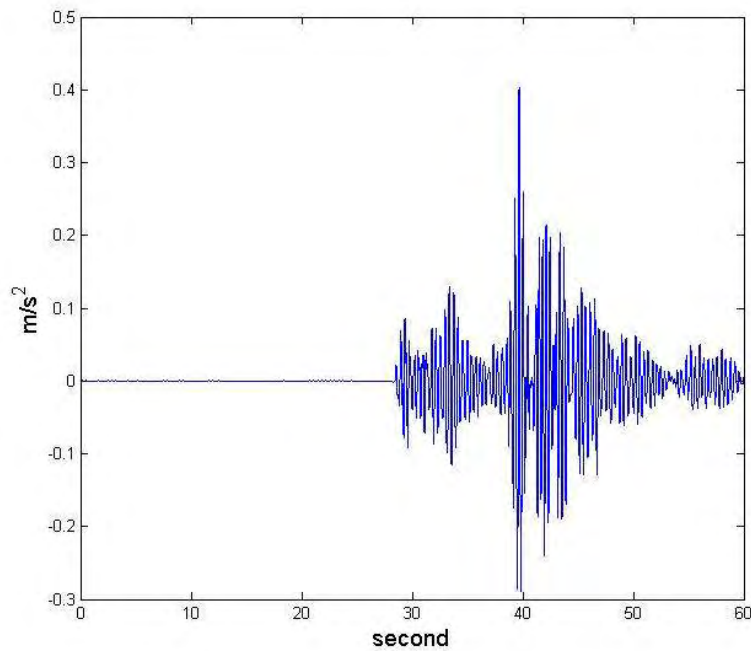


Εικόνα 22. Επιτάχυνση από τη δεύτερη σεισμική διέγερση, τρίτο υπόγειο, αισθητήρας 2 (NW corner NS direction).

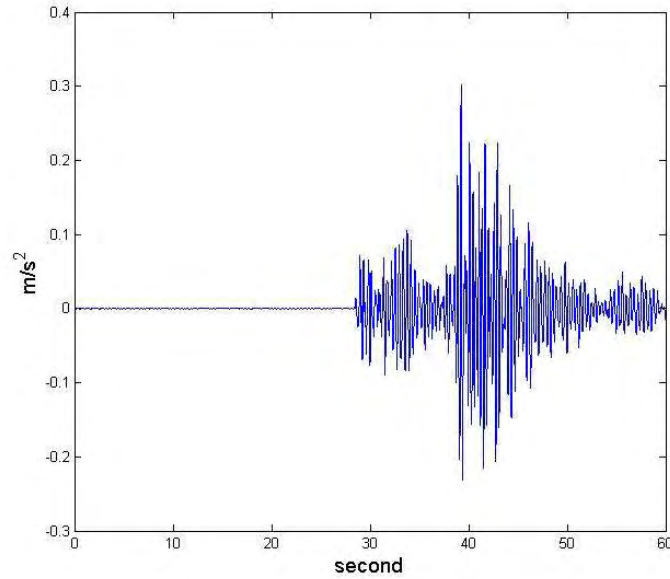
Στη συνέχεια παρουσιάζονται στις Εικόνες 23, 24 και 25 οι χρονοϊστορίες της απόκρισης του κτιρίου, οι οποίες περιέχουν τις ποσοστιαίες επιταχύνσεις συναρτήσει του χρόνου, στον τελευταίο όροφο όπως καταγράφηκαν από τους αισθητήρες 10, 11 και 12.



Εικόνα 23. Επιτάχυνση απόκρισης από τη δεύτερη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 10 (EW direction NW corner)

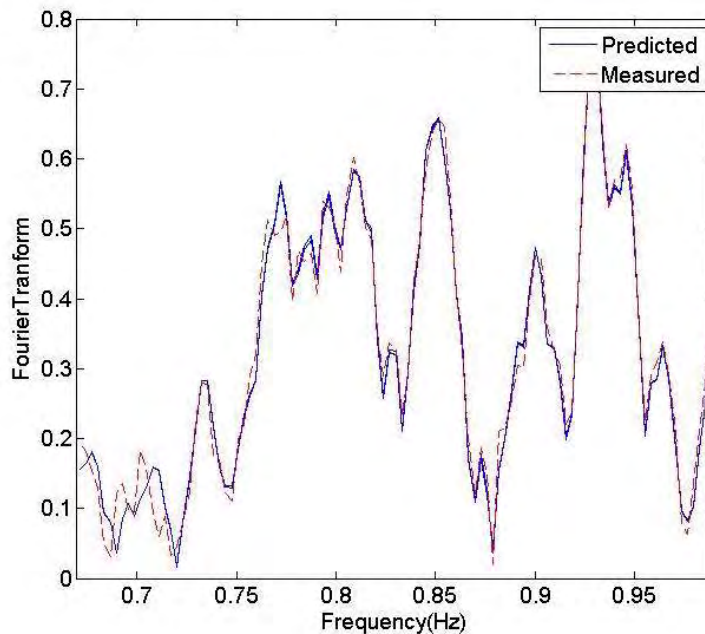


Εικόνα 24 Επιτάχυνση απόκρισης από τη δεύτερη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 11 (NS direction NW corner)

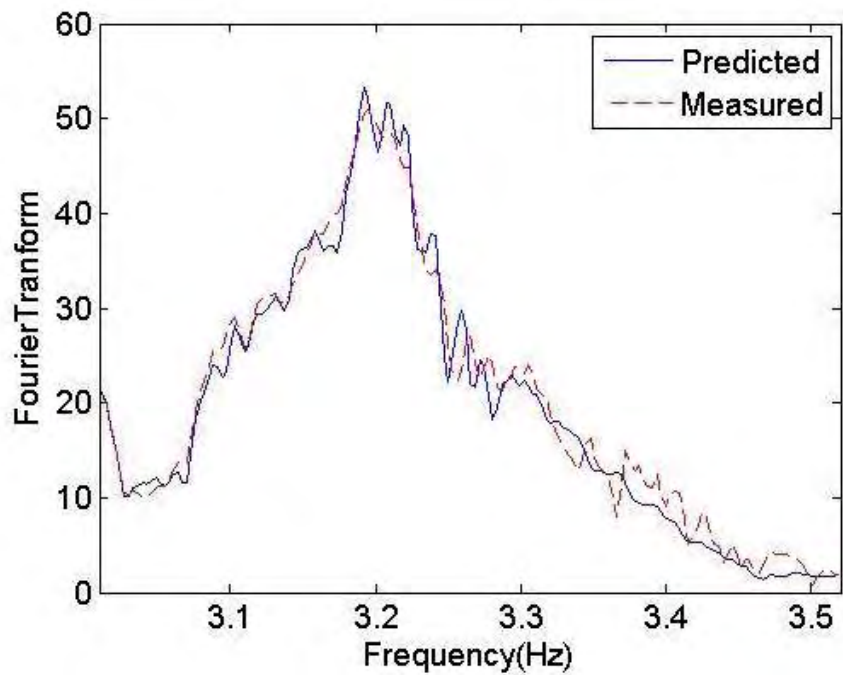


Εικόνα 25. Επιτάχυνση απόκρισης από τη δεύτερη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 12 (NS direction SE corner)

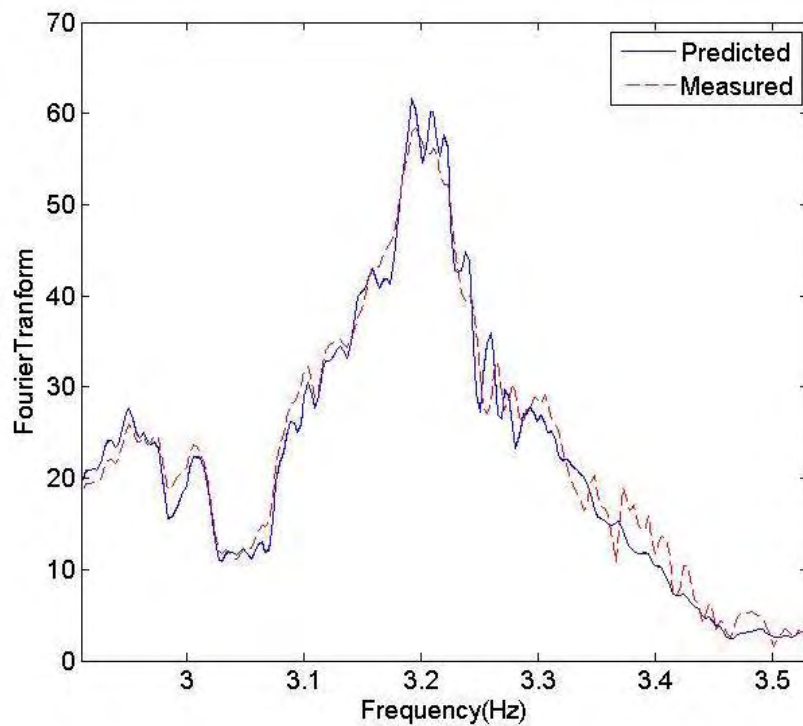
Επιπλέον παρατίθενται παρακάτω οι Εκόνες 26, 27, 28, 29 και 30 στις οποίες απεικονίζεται η σύγκριση των μετασχηματισμών Fourier των επιταχύνσεων που προβλέφθηκαν από το ιδιομορφικό μοντέλο και των μετασχηματισμών Fourier των μετρούμενων επιταχύνσεων. Από τις εικόνες αυτές διακρίνεται η πολύ καλή λειτουργία της μεθόδου με την οποία πραγματοποιήθηκε η ιδιομορφική ανάλυση, λόγω της σύγκλισης η οποία παρατηρείται.



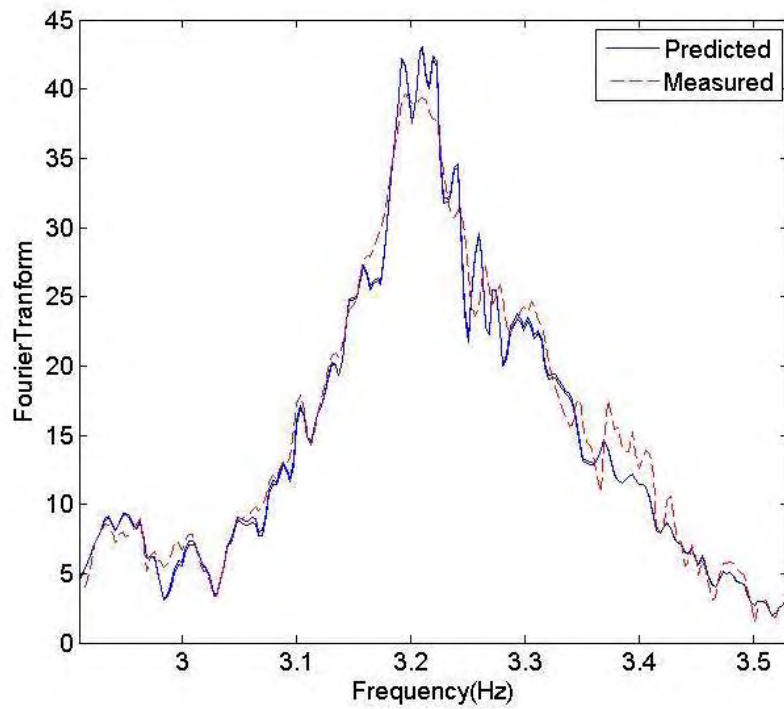
Εικόνα 26. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 6, ισόγειο, δεύτερος σεισμός



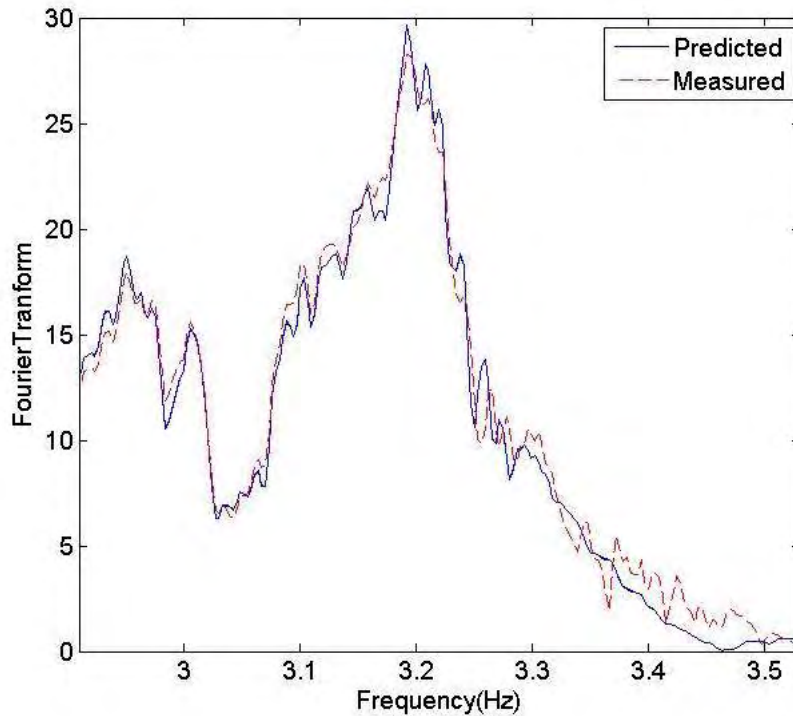
Εικόνα 27. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 7, 6^{ος} όροφος, δεύτερος σεισμός



Εικόνα 28. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 10, τελευταίος όροφος, δεύτερος σεισμός



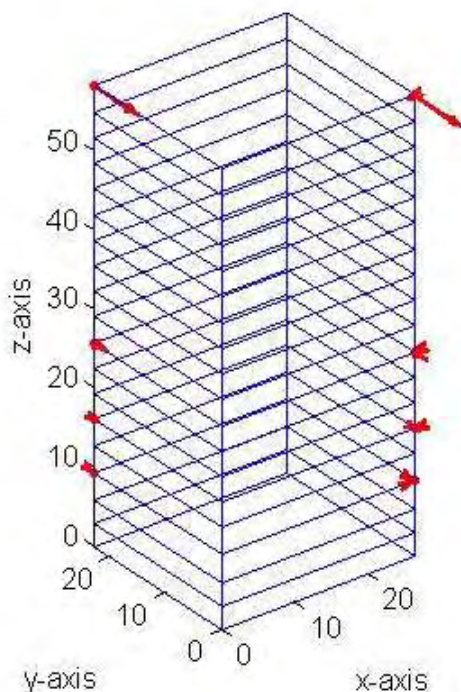
Εικόνα 29. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 12, τελευταίου ορόφου, δεύτερος σεισμός



Εικόνα 30. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 14, 3^{ος} όροφος, δεύτερος σεισμός

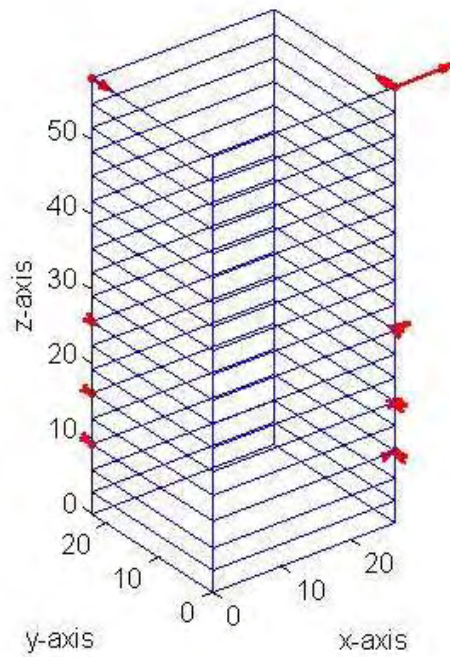
Οι ιδιομορφές, οι οποίες αναγνωρίστηκαν από τη δεύτερη σεισμική διέγερση, είναι πέντε. Τέσσερις καμπτικές ιδιομορφές και μία στρεπτική, πιο συγκεκριμένα μία καμπτική ιδιομορφή στη Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction) και τρεις στη Βόρεια-Νότια (NS direction) αντίστοιχα. Ο σχηματισμός των ιδιομορφών, η ιδιοσυχνότητα καθώς και οι συντελεστές απόσβεσης παραθέτονται στη συνέχεια. Επιπλέον στις εικόνες, στις οποίες απεικονίζονται ο σχηματισμός των ιδιομορφών, η διεύθυνση x αντιστοιχεί στην Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction) της Εικόνας 6 και η y στην Βόρεια-Νότια (NS direction) αντίστοιχα.

Στη Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction) εμφανίζεται η 1^η καμπτική ιδιομορφή (1st bending mode shape) με ιδιοσυχνότητα 0.677 Hz, συντελεστή απόσβεσης 2.92% και απεικονίζεται στην Εικόνα 31.



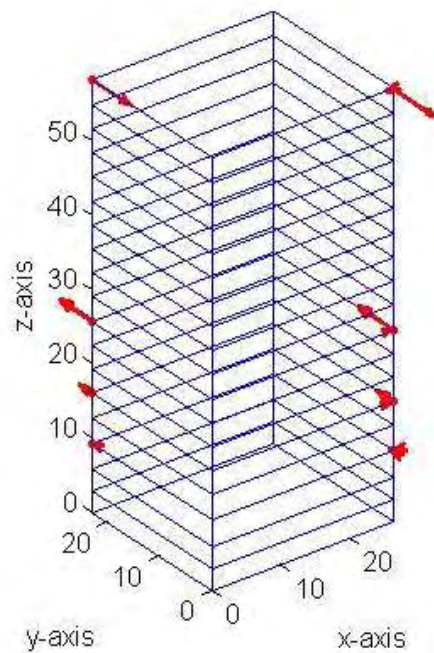
Εικόνα 31. 1^η καμπτική ιδιομορφή στην Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction), δεύτερη σεισμική διέγερση.

Στην Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction) εμφανίζεται η 1^η καμπτική ιδιομορφή (1st bending mode shape) με ιδιοσυχνότητα 0.831 Hz, συντελεστή απόσβεσης 1.46% και ο σχηματισμός της απεικονίζεται στην Εικόνα 32.



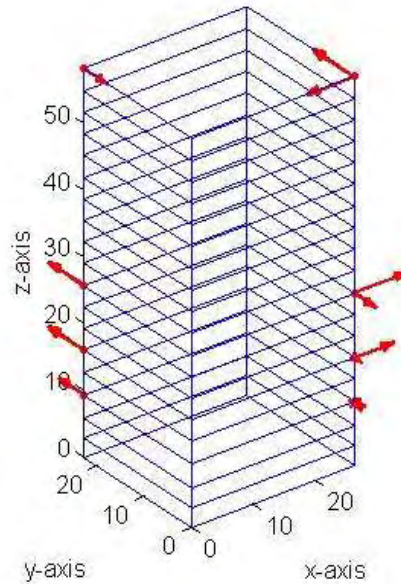
Εικόνα 32. 1^η καμπτική ιδιομορφή στην Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction), δεύτερη σεισμική διέγερση.

Στη Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction) εμφανίζεται η 2^η καμπτική ιδιομορφή (2nd bending mode shape) με ιδιοσυχνότητα 2.75 Hz, συντελεστή απόσβεσης 0.48% και ο σχηματισμός της ιδιομορφής απεικονίζεται στην Εικόνα 33.



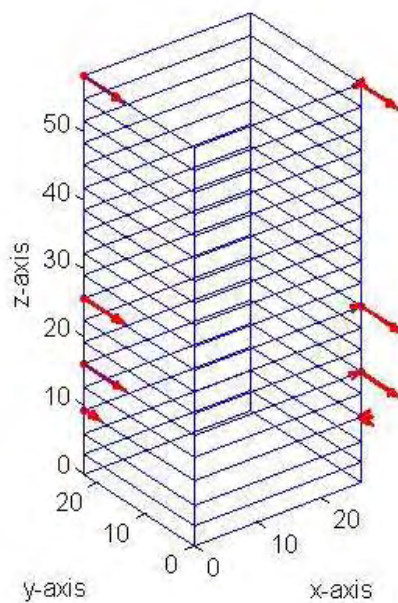
Εικόνα 33. 2^η καμπτική ιδιομορφή στη Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction), δεύτερη σεισμική διέγερση.

Η δεύτερη στρεπτική ιδιομορφή (2nd torsional mode shape) εμφανίζεται με ιδιοσυχνότητα 3.24 Hz, συντελεστή απόσβεσης 1.34% και απεικονίζεται στην Εικόνα 34.



Εικόνα 34. 2^η στρεπτική ιδιομορφή, δεύτερη σεισμική διέγερση

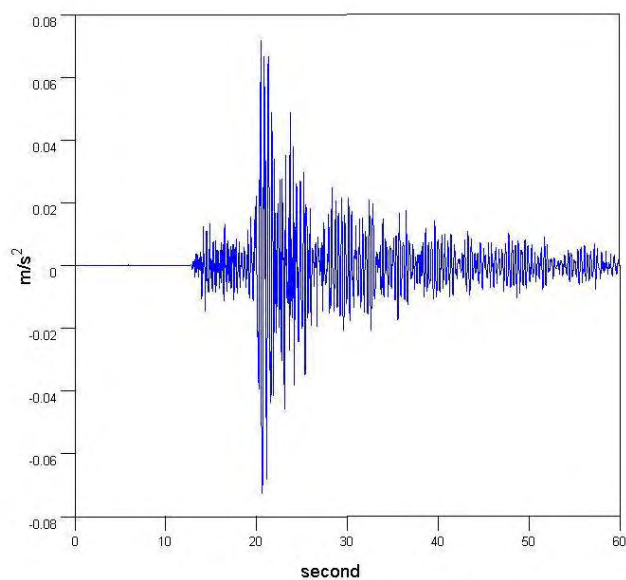
Στη Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction) εμφανίζεται η 3^η καμπτική ιδιομορφή (3rd bending mode shape) με ιδιοσυχνότητα 5.01 Hz, συντελεστή απόσβεσης 2.32% και απεικονίζεται στην Εικόνα 35.



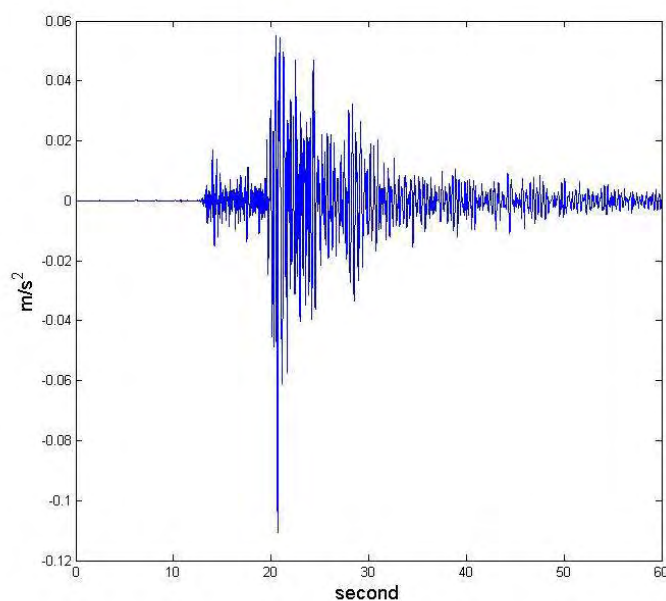
Εικόνα 35. 3^η καμπτική ιδιομορφή στη Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction), δεύτερη σεισμική διέγερση.

4.4 Ιδιομορφική ανάλυση τρίτης σεισμικής διέγερσης (Event 3)

Η τρίτη σεισμική διέγερση, η οποία καταγράφηκε, πραγματοποιήθηκε 17 Μαρτίου 2011 (Event 3). Οι χρονοϊστορίες της διέγερσης παρουσιάζονται στις Εικόνες 36 και 37, στις οποίες φαίνονται οι ποσοστιαίες επιταχύνσεις λόγω του σεισμού (διαιρεμένες με την επιτάχυνση της βαρύτητας g) συναρτήσει του χρόνου από τους αισθητήρες 1 και 2 στον 3^ο υπόγειο όροφο.

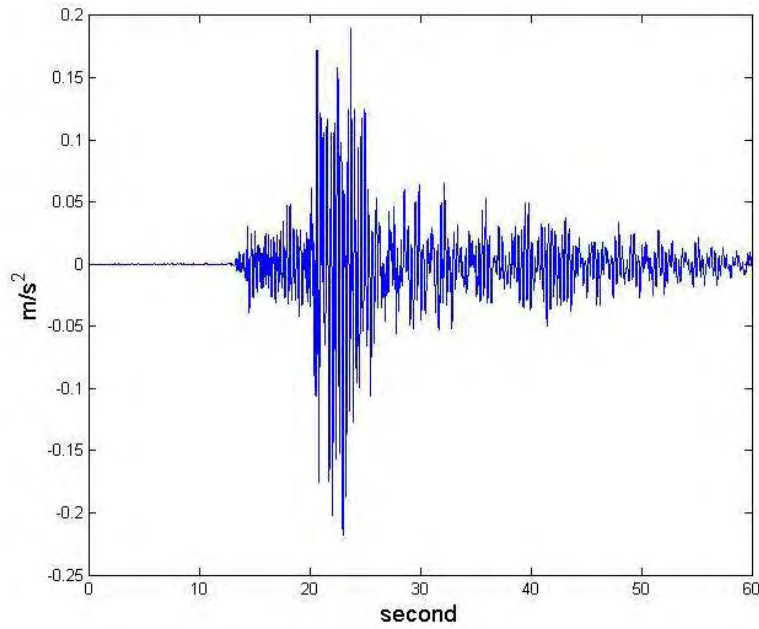


Εικόνα 36. Επιτάχυνση από την τρίτη σεισμική διέγερση, τρίτο υπόγειο, αισθητήρας 1 (NW corner EW direction).

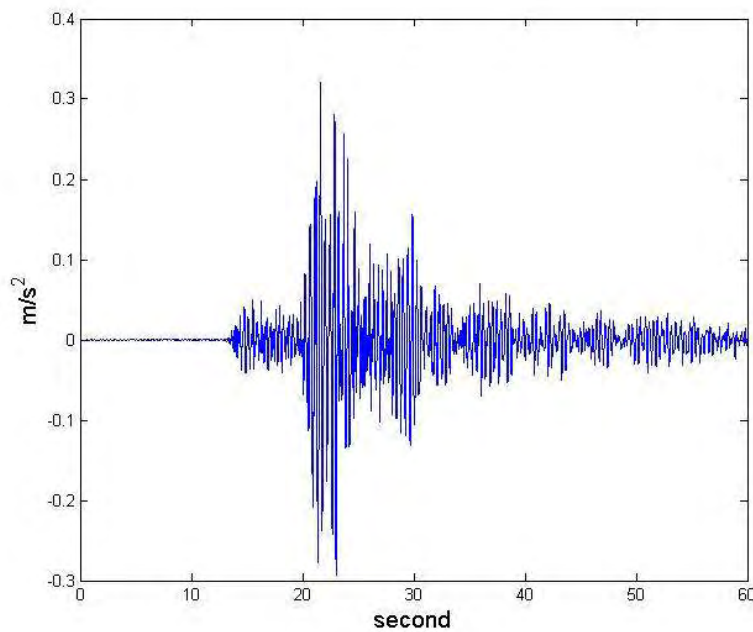


Εικόνα 37. Επιτάχυνση από την τρίτη σεισμική διέγερση, τρίτο υπόγειο, αισθητήρας 2 (NW corner NS direction).

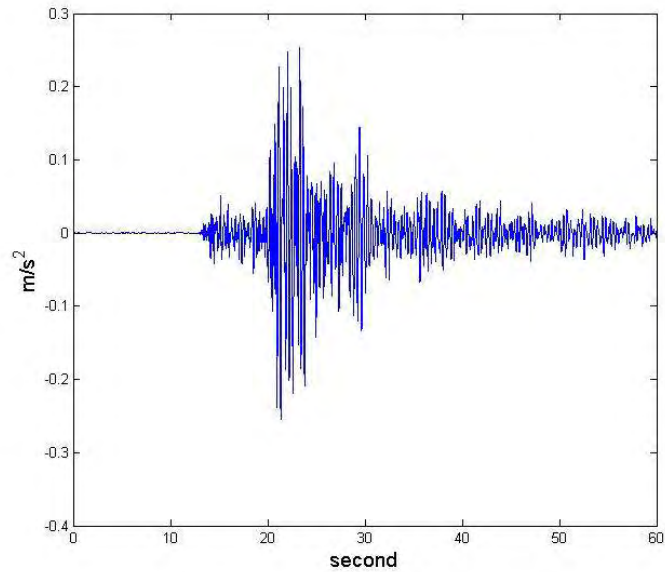
Στη συνέχεια παρουσιάζονται στις Εικόνες 38, 39 και 40 οι χρονοϊστορίες της απόκρισης του κτιρίου, οι οποίες περιέχουν τις ποσοστιαίες επιταχύνσεις συναρτήσει του χρόνου, στον τελευταίο όροφο όπως καταγράφηκαν από τους αισθητήρες 10, 11 και 12



Εικόνα 38. Επιτάχυνση απόκρισης από την τρίτη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 10 (EW direction NW corner)

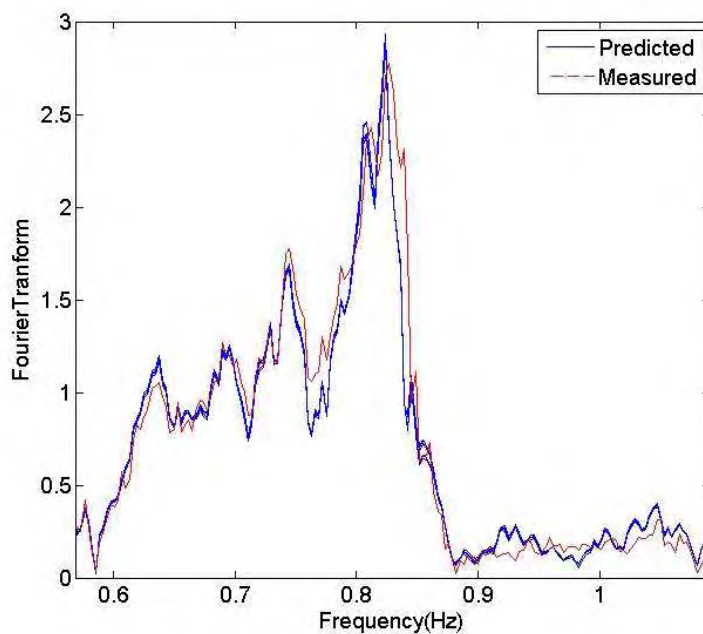


Εικόνα 39. Επιτάχυνση απόκρισης από την τρίτη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 11 (NS direction NW corner)

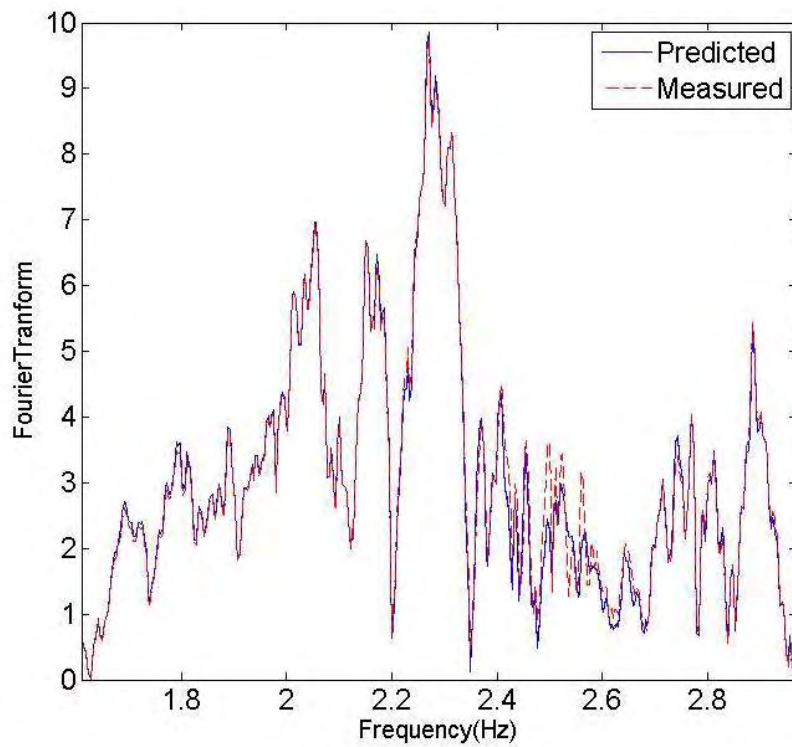


Εικόνα 40. Επιτάχυνση απόκρισης από την τρίτη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 12 (NS direction SE corner)

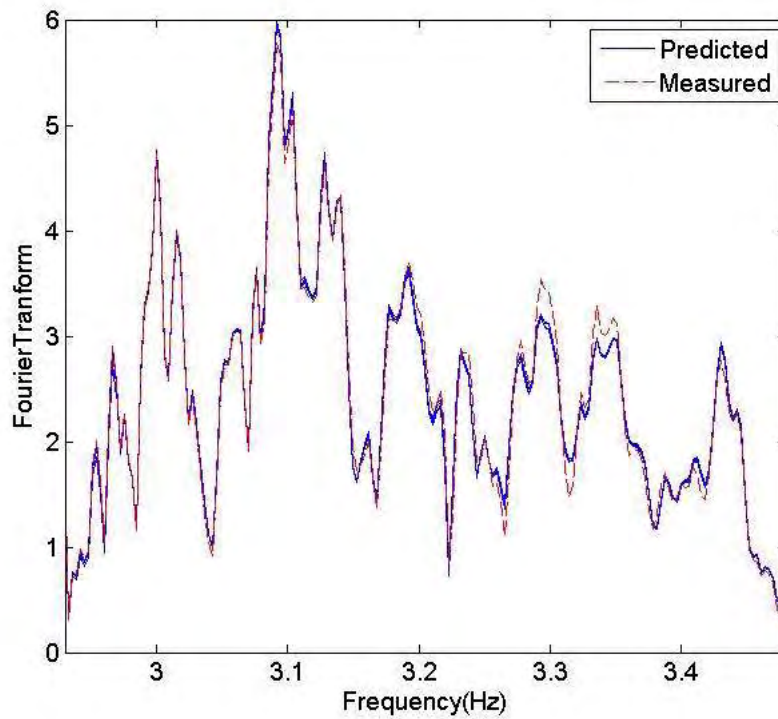
Επιπλέον παρατίθενται παρακάτω οι Εκόνες 41, 42, 43, 44 και 45 στις οποίες απεικονίζεται η σύγκριση των μετασχηματισμών Fourier των επιταχύνσεων που προβλέφθηκαν από το ιδιομορφικό μοντέλο και των μετασχηματισμών Fourier των μετρούμενων επιταχύνσεων. Από τις εικόνες αυτές διακρίνεται η πολύ ικανοποιητική λειτουργία της μεθόδου με την οποία πραγματοποιήθηκε η ιδιομορφική ανάλυση, λόγω της σύγκλισης η οποία παρατηρείται.



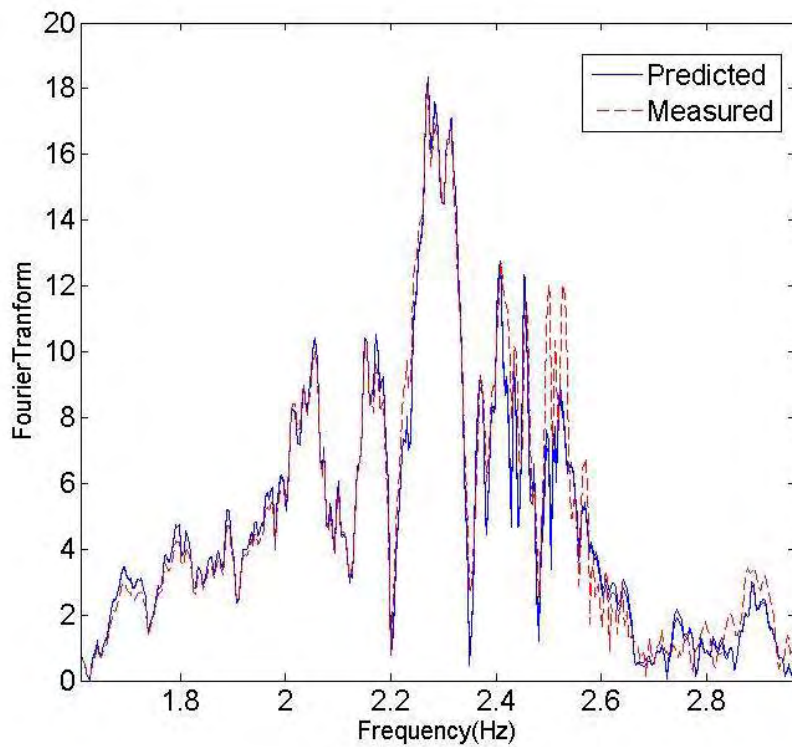
Εικόνα 41. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 14, 3^{ος} όροφος, τρίτος σεισμός



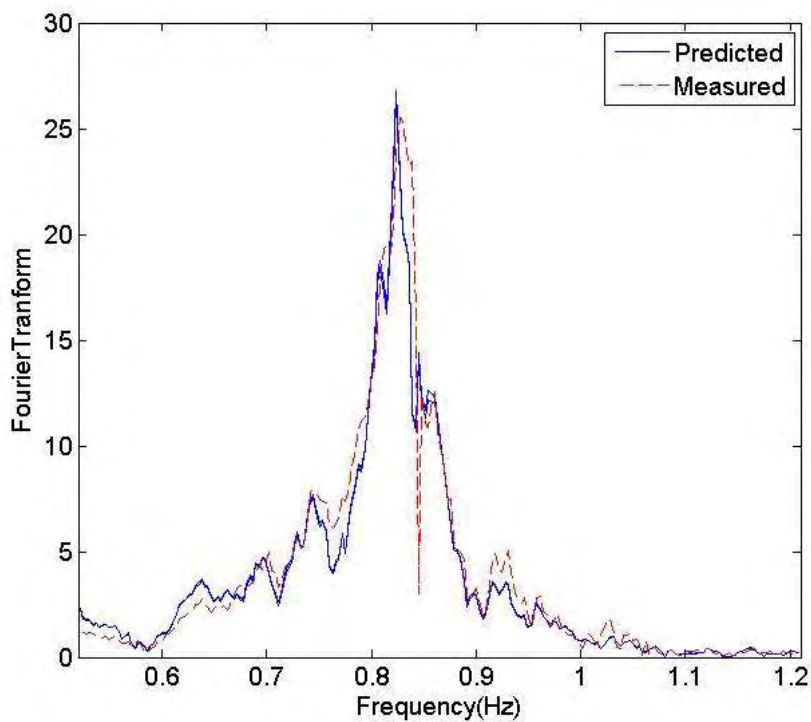
Εικόνα 42. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 6, ισόγειο, τρίτος σεισμός



Εικόνα 43. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 5, ισόγειο, τρίτος σεισμός



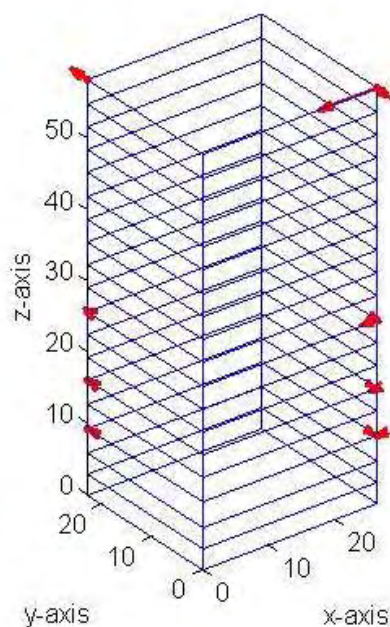
Εικόνα 44. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 16, 3^{ος} όροφος, τρίτος σεισμός



Εικόνα 45. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 10, τελευταίος όροφος, τρίτος σεισμός

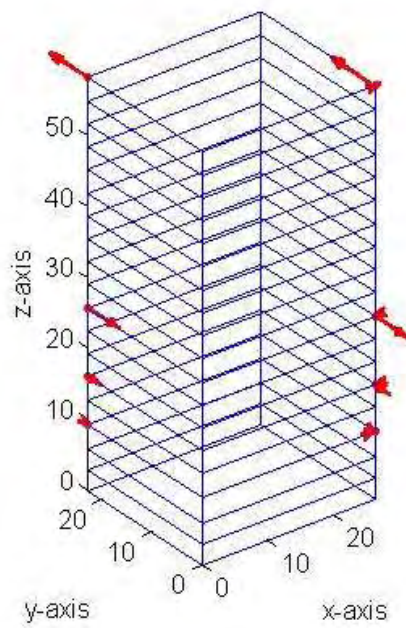
Οι ιδιομορφές, οι οποίες αναγνωρίστηκαν από την τρίτη σεισμική διέγερση, είναι τέσσερις. Τρεις καμπτικές ιδιομορφές και μία στρεπτική, πύο συγκεκριμένα μία καμπτική ιδιομορφή στη Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction) και δύο στη Βόρεια-Νότια (NS direction) αντιστοιχα. Ο σχηματισμός των ιδιομορφών, η ιδιοσυχνότητα καθώς και οι συντελεστές απόσβεσης παραθέτονται στη συνέχεια. Επιπλέον στις εικόνες, στις οποίες απεικονίζονται ο σχηματισμός των ιδιομορφών, η διεύθυνση x αντιστοιχεί στην Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction) της Εικόνας 6 και η y στην Βόρεια-Νότια (NS direction) αντιστοιχα.

Στην Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction) εμφανίζεται η 1^η καμπτική ιδιομορφή (1st bending mode shape) με ιδιοσυχνότητα 0.826 Hz, συντελεστή απόσβεσης 1.96% και ο σχηματισμός της απεικονίζεται στην Εικόνα 46.



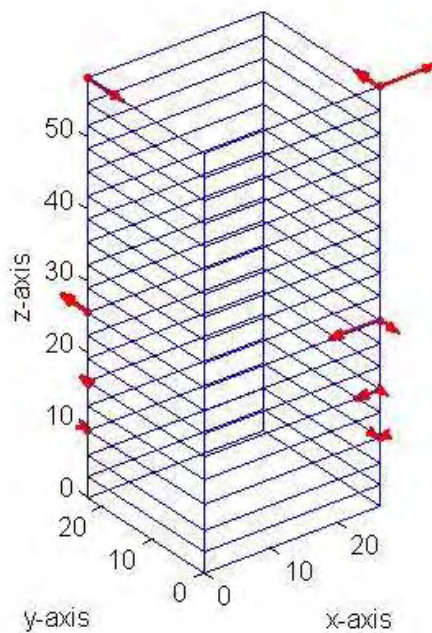
Εικόνα 46. 1^η καμπτική ιδιομορφή στην Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction), τρίτη σεισμική διέγερση.

Στην Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction) εμφανίζεται η 1^η καμπτική ιδιομορφή (1st bending mode shape) με ιδιοσυχνότητα 2.46 Hz, συντελεστή απόσβεσης 2.47% και ο σχηματισμός της απεικονίζεται στην Εικόνα 47.



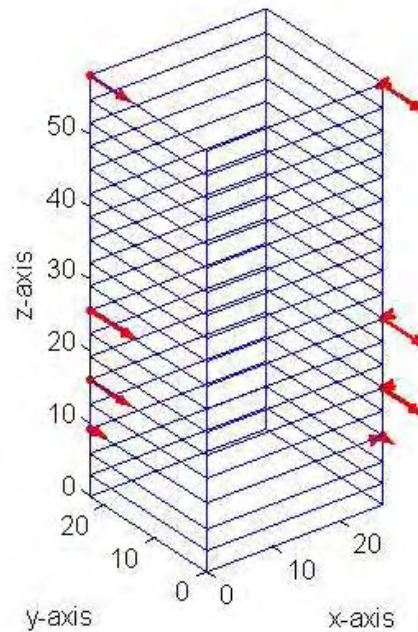
Εικόνα 47. 2^η καμπτική ιδιομορφή στη Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction), τρίτη σεισμική διέγερση.

Η δεύτερη στρεπτική ιδιομορφή (2nd torsional mode shape) εμφανίζεται με ιδιοσυχνότητα 3.24 Hz, συντελεστή απόσβεσης 2.66% και απεικονίζεται στην Εικόνα 48.



Εικόνα 48. 2^η στρεπτική ιδιομορφή, δεύτερη σεισμική διέγερση

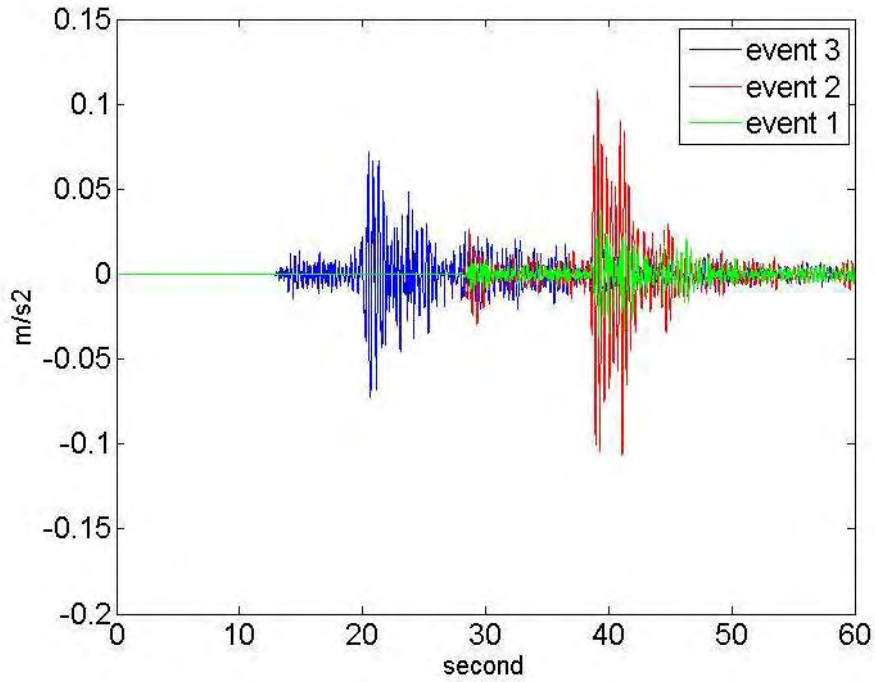
Στη Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction) εμφανίζεται η 3^η καμπτική ιδιομορφή (3rd bending mode shape) με ιδιοσυχνότητα 5.10 Hz, συντελεστή απόσβεσης 2.43% και απεικονίζεται στην Εικόνα 49.



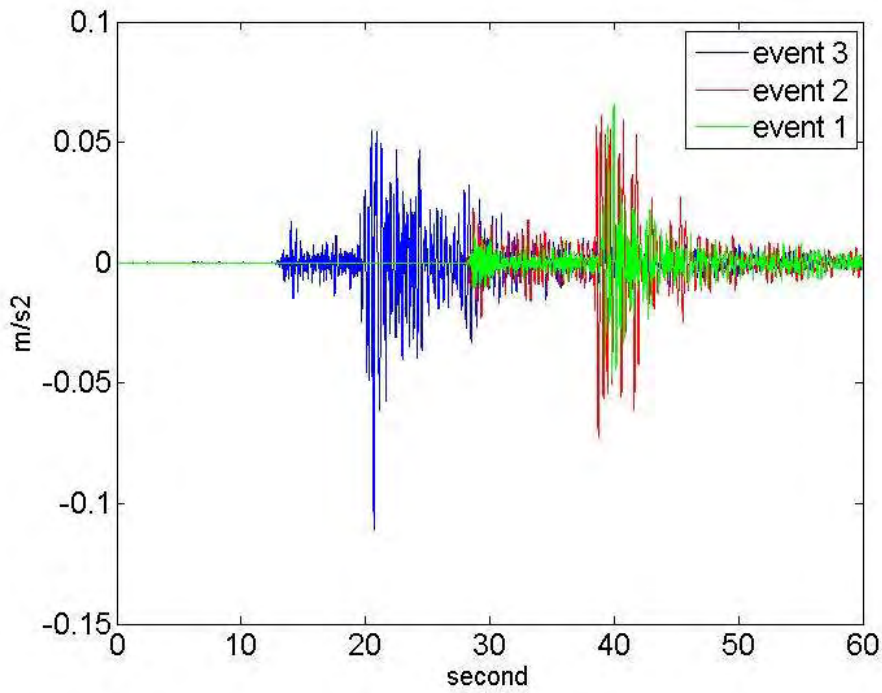
Εικόνα 49. 3^η καμπτική ιδιομορφή στη Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction), τρίτη σεισμική διέγερση.

4.5 Ανακεφαλαίωση και σύγκριση των τριών σεισμικών διεγέρσεων

Καταλήγοντας, μπορούμε από τις χρονοϊστορίες και των τριών διαφορετικών σεισμικών διεγέρσεων να συγκρίνουμε τις οριζόντιες επιταχύνσεις που καταγράφηκαν, οι οποίες αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους για κάθε σεισμική διέγερση χωριστά, έτσι ώστε να παρατηρήσουμε ποιά σεισμική διέγερση ήταν η πιό δυνατή καθώς και κατά πόσο δυνατότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες δύο. Στις παρακάτω Εικόνες 50 και 51 απεικονίζονται οι οριζόντιες επιταχύνσεις στον 3^ο υπόγειο όροφο όπως καταγράφηκαν από τους αισθητήρες 1, ο οποίος είναι τοποθετημένος στη Βορειοδυτική γωνία (NW corner) και καταγράφει στην Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction), και από τον αισθητήρα 2, ο οποίος είναι τοποθετημένος στη Βορειοδυτική γωνία (NW corner) και καταγράφει στην Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction)



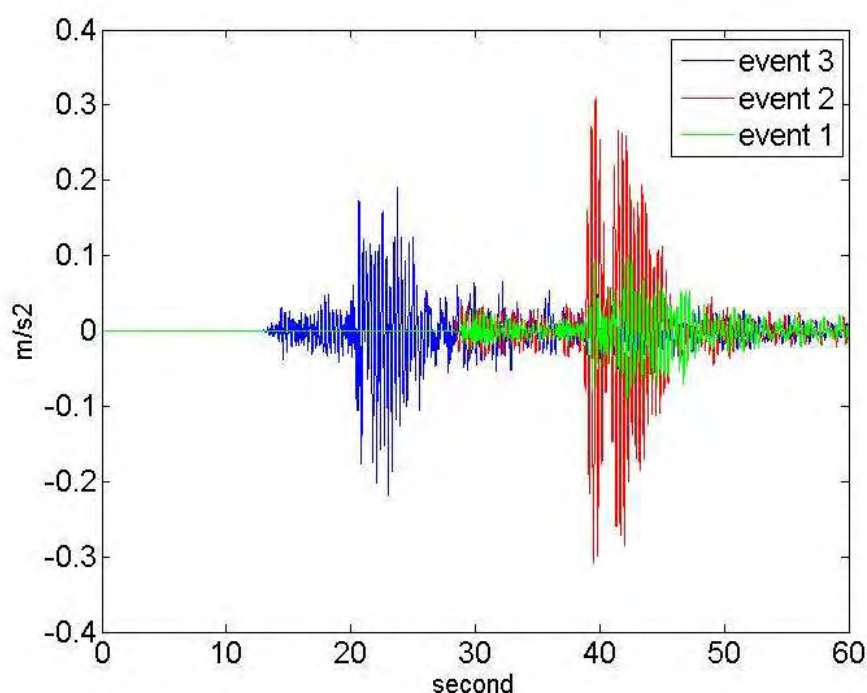
Εικόνα 50. Οριζόντιες επιταχύνσεις από τις τρεις σεισμικές διεγέρσεις στον 3^ο υπόγειο όροφο από τον αισθητήρα 1, Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction)



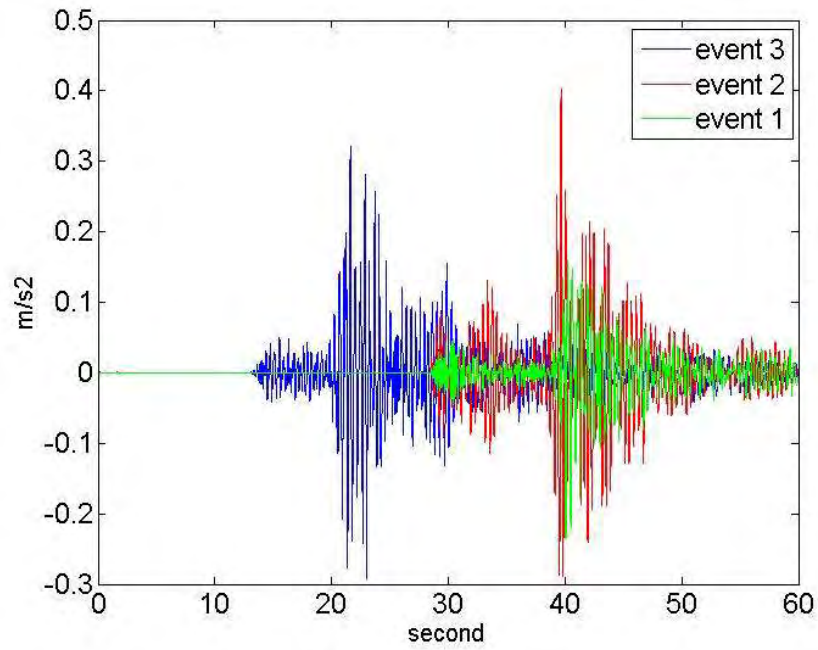
Εικόνα 51. Οριζόντιες επιταχύνσεις από τις τρεις σεισμικές διεγέρσεις στον 3^ο υπόγειο όροφο από τον αισθητήρα 2, Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction)

Από τα συγκριτικά διαγράμματα, τα οποία παρατέθηκαν ανωτέρω, μπορεί να παρατηρηθεί πως η δεύτερη σεισμική διέγερση είναι ελαφρώς δυνατότερη από την τρίτη καθώς από τις χρονοϊστορίες μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα επίπεδα διέγερσης είναι πιά υψηλά. Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί ότι τα επίπεδα διέγερσης του πρώτου σεισμού είναι περίπου 30% με 40% χαμηλότερα σε σχέση με τα επίπεδα διέγερσης του τρίτου σεισμού. Αυτό γίνεται ευκολότερα διακριτό στην Εικόνα 50, από τις χρονοϊστορίες που καταγράφηκαν από τον αισθητήρα 1.

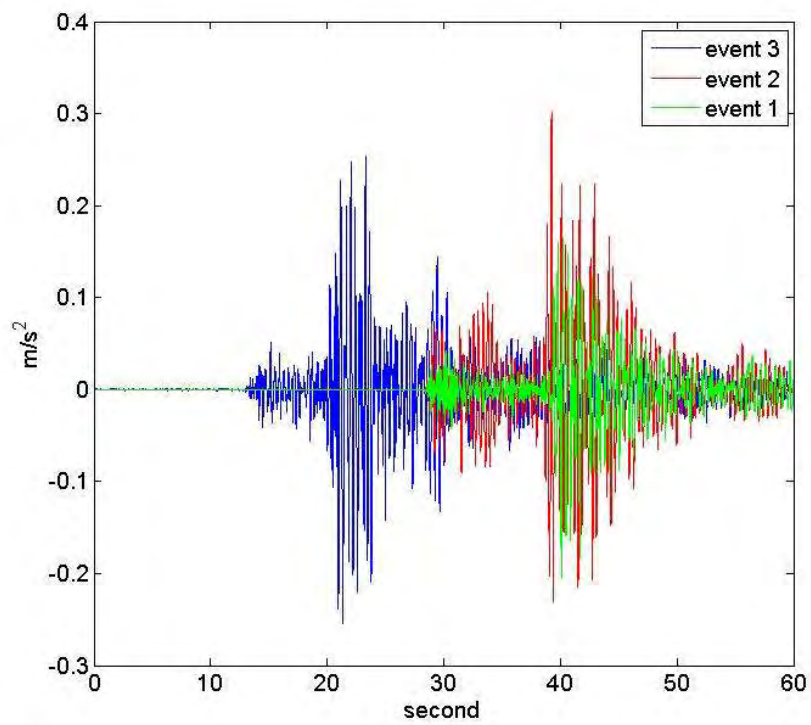
Επιπλέον παρατίθενται συγκριτικά διαγράμματα στις Εικόνες 52, 53 και 54, τα οποία απεικονίζουν τις οριζόντιες επιταχύνσεις που καταγράφησαν από τους αισθητήρες 10, 11 και 12. Ο αισθητήρας 10 έχει τοποθετηθεί στη Βορειοδυτική γωνία (NW corner) και καταγράφει στην Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction), ο αισθητήρας 11 είναι τοποθετημένος στη Βορειοδυτική γωνία (NW corner) και καταγράφει στη Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction), ενώ ο αισθητήρας 12 είναι τοποθετημένος στην Νοτιοανατολική γωνία (SE corner) του κτιρίου και καταγράφει στην Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction). Και οι τρεις αισθητήρες βρίσκονται στον τελευταίο όροφο.



Εικόνα 52. Οριζόντιες επιταχύνσεις από τις τρεις σεισμικές διεγέρσεις στον τελευταίο όροφο από τον αισθητήρα 10, Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction)



Εικόνα 53. Οριζόντιες επιταχύνσεις από τις τρεις σεισμικές διεγέρσεις στον τελευταίο όροφο από τον αισθητήρα 11, Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction)



Εικόνα 54. Οριζόντιες επιταχύνσεις από τις τρεις σεισμικές διεγέρσεις στον τελευταίο όροφο από τον αισθητήρα 10, Βόρεια-Νότια διεύθυνση (NS direction)

Από ανωτέρω τα διαγράμματα, τα οποία απεικονίζουν την οριζόντια επιτάχυνση του τελευταίου ορόφου, μπορεί να παρατηρηθεί επίσης ότι τα επίπεδα επιταχύνσεων του δεύτερου σεισμού είναι ελαφρώς μεγαλύτερα σε σχέση με τον τρίτο σεισμό, καθώς και του πρώτου είναι μικρότερα σε σχέση με του τρίτου. Η διαφορά αυτή γίνεται πίο αισθητή κυρίως από τις μετρήσεις του αισθητήρα 10.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας, ο οποίος εμπεριέχει τις μετρήσεις (ιδιοσυχνότητες, συντελεστές απόσβεσης στις αντίστοιχες ιδιομορφές που αναγνωρίστηκαν) για τους τρεις χαμηλής έντασης σεισμούς καθώς και τις μετρήσεις οι οποίες εκτιμήθηκαν από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FE model) του κτιρίου. Πίο συγκεκριμένα συγκρίνονται πέντε ιδιομορφές με τα χαρακτηριστικά τους, οι οποίες αναγνωρίστηκαν πλήρως. Τρεις καμπτικές ιδιομορφές στη Βόρεια-Νότια διεύθυνση, μία καμπτική ιδιομορφή στην Ανατολική-Δυτική διεύθυνση και η δεύτερη στρεπτική ιδιομορφή.

Πίνακας 1. Συγκριτικός πίνακας ιδιοσυχνοτήτων και συντελεστών απόσβεσης που αναγνωρίστηκαν από τους σεισμούς σε σχέση με το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.

Τύπος ιδιομορφής	Σεισμός 1ος		Σεισμός 2ος		Σεισμός 3ος		FE model
	ω (Hz)	ζ (%)	ω (Hz)	ζ (%)	ω (Hz)	ζ (%)	ω (Hz)
1 ^η καμπτική (B-N διευθ.)	-	-	0.677	2.92	-	-	0.74
1 ^η καμπτική (A-Δ διευθ.)	0.832	0.93	0.831	1.46	0.826	1.96	0.81
1 ^η στρεπτική	-	-	-	-	-	-	1.00
2 ^η καμπτική (B-N διευθ.)	2.45	2.51	2.75	0.48	2.46	2.47	2.75
2 ^η στρεπτική	3.29	1.06	3.24	1.34	3.24	2.66	3.34
2 ^η καμπτική (A-Δ διευθ.)	-	-	-	-	-	-	3.70
3 ^η καμπτική (B-N διευθ.)	5.11	1.98	5.01	2.32	5.10	2.43	5.56

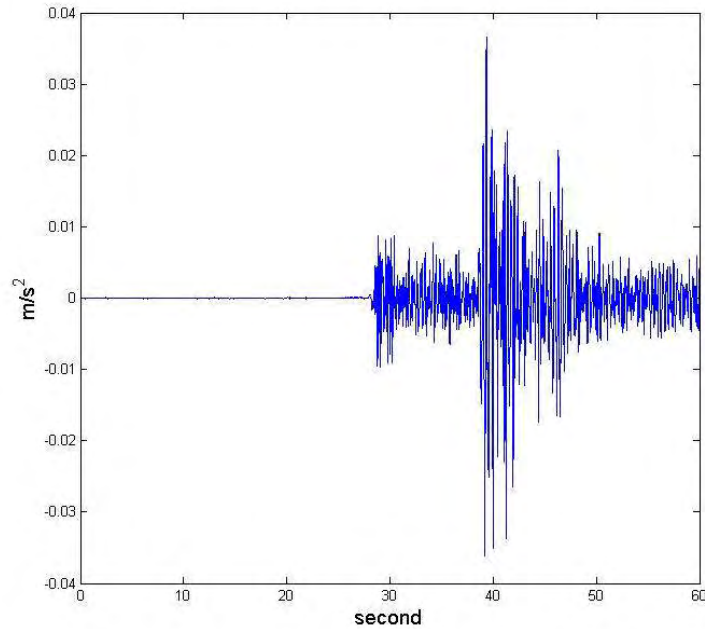
Από τη σύγκριση των μετρήσεων παρατηρείται ότι οι ιδιοσυχνότητες των αντίστοιχων ιδιομορφών έχουν μικρή μεταβλητότητα, παρόλο που η δεύτερη σεισμική διέγερση ήταν περίπου 30% με 40% ισχυρότερη από τις άλλες δύο. Οπότε

μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το κτίριο συμπεριφέρθηκε γραμμικά και στους τρεις σεισμούς και δεν ενεργοποιήθηκε μη γραμμικός μηχανισμός από αυτούς τους τρεις σεισμούς. Επίσης μπορούμε να συγκρίνουμε τις ιδιοσυχνότητες, οι οποίες αναγνωρίστηκαν από την ανάλυση, με τις αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες που προβλέφθηκαν από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Από αυτή τη σύγκριση παρατηρούμε ότι οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων είναι μεγαλύτερες από τις ιδιοσυχνότητες που αναγνωρίστηκαν από την πραγματική συμπεριφορά του κτιρίου υπό τις σεισμικές διεγέρσεις στις αντίστοιχες ιδιομορφές. Το αποτέλεσμα αυτό εμφανίζει το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων πίο στιβαρό σε σχέση με το πραγματικό κτίριο λόγω των αυξημένων ιδιοσυχνοτήτων. Επίσης οι συντελεστές απόσβεσης της 1^{ης} καμπτικής ιδιομορφής στην Ανατολική-Δυτική διεύθυνση (EW direction) κυμαίνονται από περίπου 1% έως 2%, των υπολοίπων τριών καμπτικών ιδιομορφών στη Βόρεια_Νότια διεύθυνση (NS direction) κυμαίνονται από 0.5% έως 3%, ομοίως και της δεύτερης στρεπτικής ιδιομορφής. Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι το κτίριο συμπεριφέρθηκε γραμμικά κατά τις σεισμικές διεγέρσεις. Επίσης οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές που αναγνωρίστηκαν θα μπορούσαν σε επόμενη φάση να χρησιμοποιηθούν για την αναθεώρηση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων έτσι ώστε οι προσδιορισθείσες ιδιοσυχνότητες με βάση τις μετρήσεις να συμπίπτουν με αυτές του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό το πρόβλημα αποτελεί μελλοντικό στόχο.

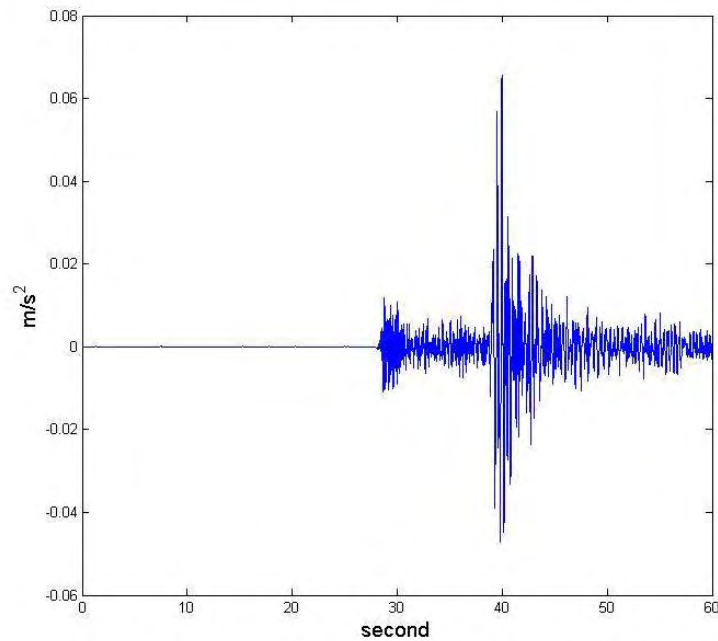
5. Συμπεράσματα

Στην εργασία παρουσιάζεται η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων στο πεδίο της συχνότητας για την αναγνώριση ιδιομορφικών χαρακτηριστικών κατασκευών που συμπεριφέρονται γραμμικά υπό την επίδραση σεισμικών διεγέρσεων. Η ανάλυση βασίστηκε στο μοντέλο μη κλασικής απόσβεσης και είναι μια επέκταση αλγορίθμων που υπάρχουν και έχουν αναπτυχθεί για μοντέλα κλασικής απόσβεσης. Η αναγνώριση των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών εμπεριέχει εκτιμήσεις του αριθμού των ιδιομορφών, των ιδιοσυχνοτήτων, των συντελεστών απόσβεσης, των μιγαδικών ιδιομορφών, των συντελεστών συνεισφοράς, του μητρώου ψευδο απόκρισης καθώς και των αρχικών συνθηκών των ιδιομορφών που συμμετέχουν. Για την ανάλυση αυτή χρησιμοποιήθηκε ένας υπολογιστικός αλγόριθμος βασισμένος στο πρόγραμμα MATLAB ο οποίος βασίζεται σε τρία στάδια και εξάγει τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά του μοντέλου με ακρίβεια, ακόμα και σε ιδιομορφές οι οποίες αλληλοκαλύπτονται ή βρίσκονται σε μικρά εύρη συχνοτήτων. Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε στο κτίριο Alcazar, το οποίο είναι δέκα έξι ορόφων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά υπολογίστηκαν με πολύ καλή ακρίβεια αφού τα φάσματα απόκρισης που προκύπτουν από το βέλτιστο ιδιομορφικό μοντέλο είναι πολύ κοντά στα φάσματα απόκρισης που υπολογίζεται από τις μετρούμενες επιταχύνσεις. Στη συνέχεια τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά, τα οποία υπολογίστηκαν από τρεις διαφορετικούς σεισμούς χαμηλής έντασης, συγκρίθηκαν με αντίστοιχα χαρακτηριστικά τα οποία προβλεφθηκαν από μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και εξήχθησαν συμπεράσματα ως προς την καταλληλότητα του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων αλλά και τη συμπεριφορά της κατασκευής. Συγκεκριμένα, η κατασκευή συμπεριφέρθηκε γραμμικά σε όλες τις σεισμικές διεγέρσεις. Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων βρέθηκε να είναι πιο στιβαρό από την πραγματική συμπεριφορά της κατασκευής οπότε και απαιτείται σε επόμενη φάση η αναθεώρηση του μοντέλου έτσι ώστε οι ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές που προσδιορίστηκαν με τη μέθοδό μας από τις μετρήσεις να συμπίπτουν με τις ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές που προβλέπει το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.

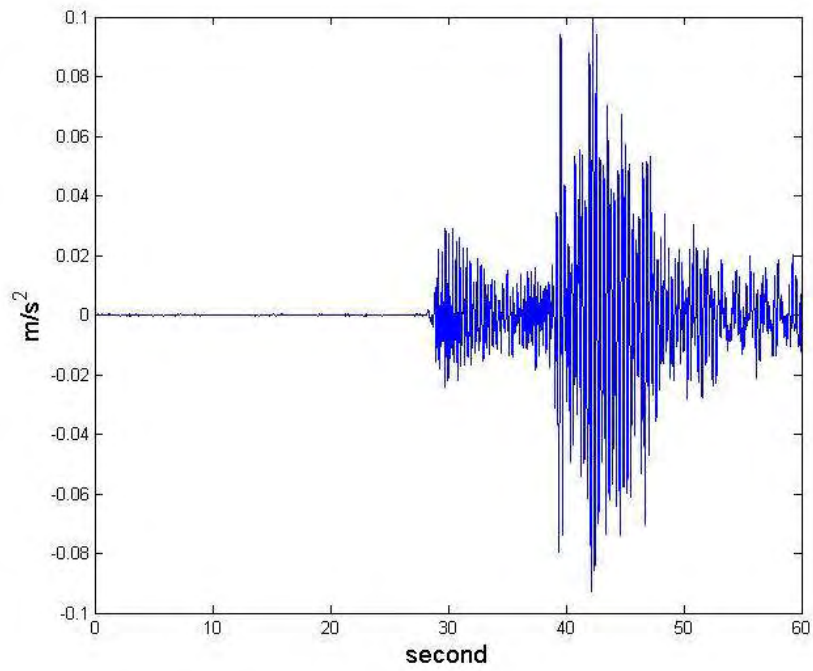
Παράρτημα 1 (1^η σεισμική διέγερση)



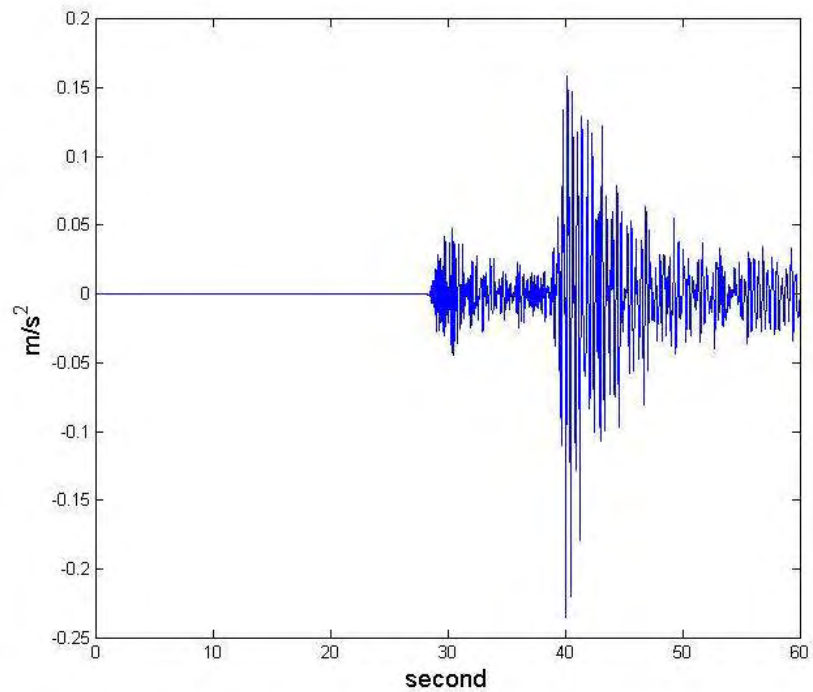
Εικόνα 7. Επιτάχυνση από την πρώτη σεισμική διέγερση, τρίτο υπόγειο, αισθητήρας 1 (NW corner EW direction)



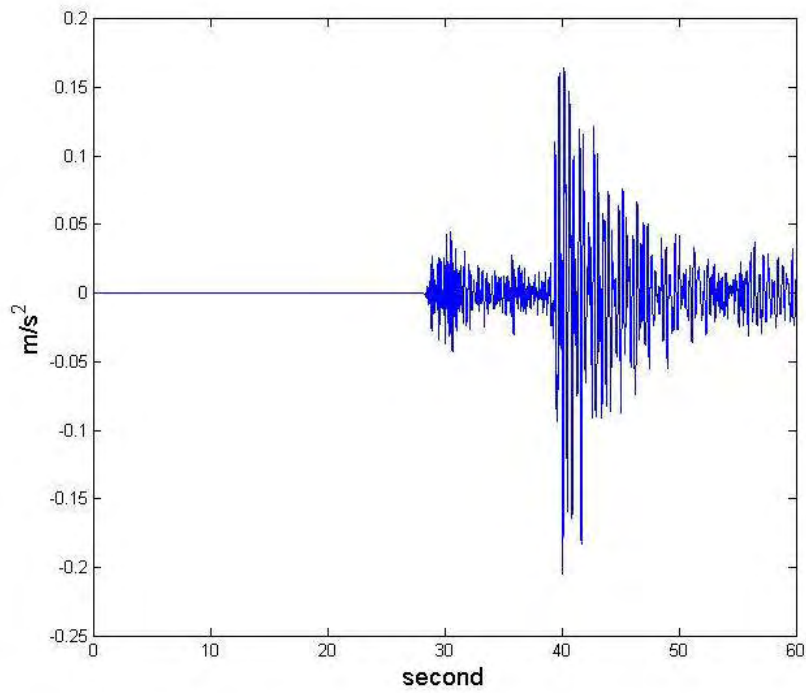
Εικόνα 8. Επιτάχυνση από την πρώτη σεισμική διέγερση, τρίτο υπόγειο, αισθητήρας 2 (NW corner NS direction)



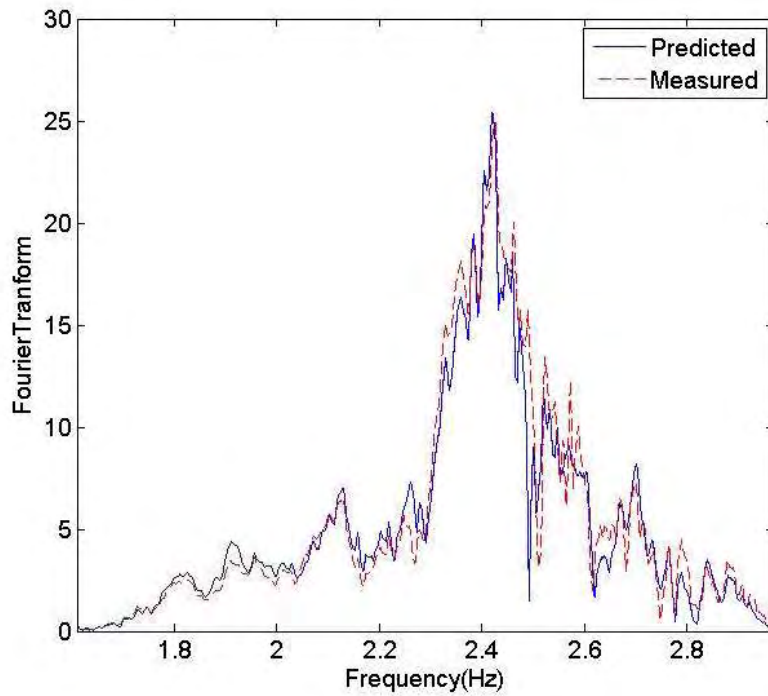
Εικόνα 9. Επιτάχυνση απόκρισης από την πρώτη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 10 (EW direction NW corner)



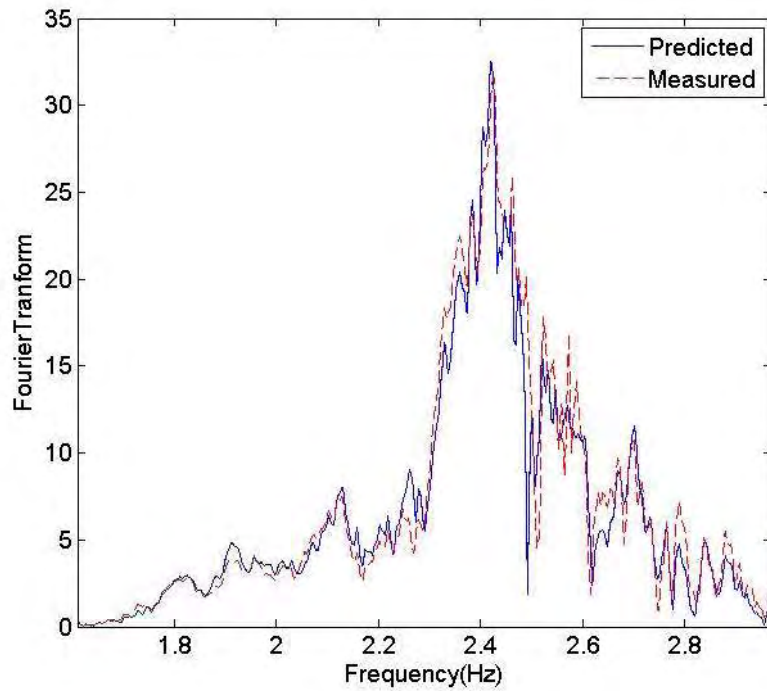
Εικόνα 10. Επιτάχυνση απόκρισης από την πρώτη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 11 (NS direction NW corner)



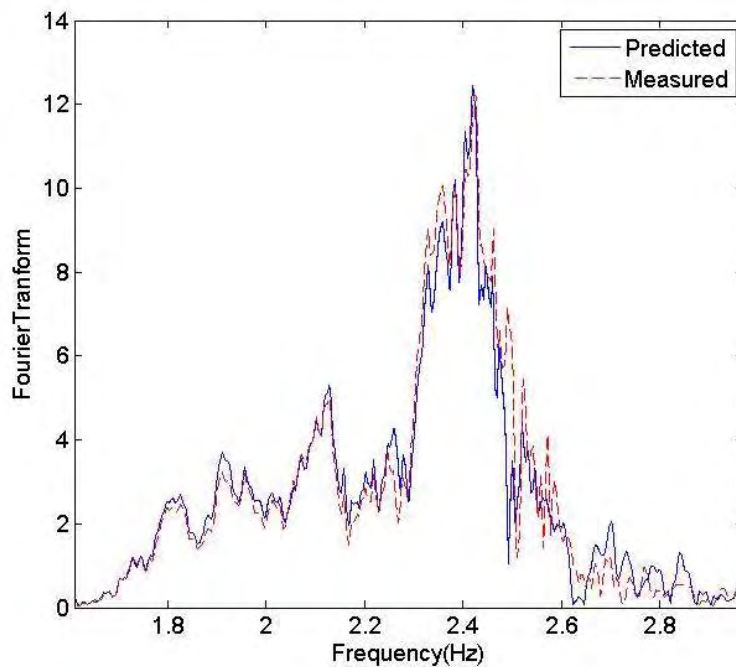
Εικόνα11. Επιτάχυνση απόκριση από την πρώτη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 12 (NS direction SE corner)



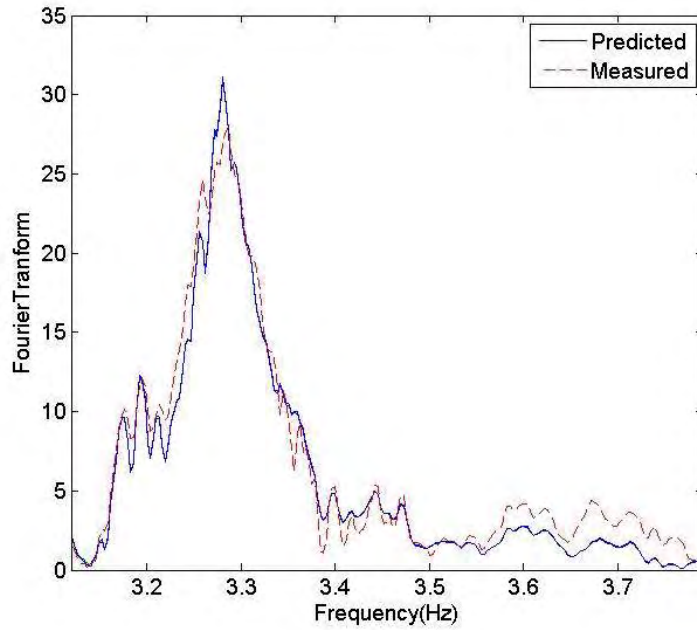
Εικόνα 12. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 8, 6^{ος} όροφος, πρώτος σεισμός



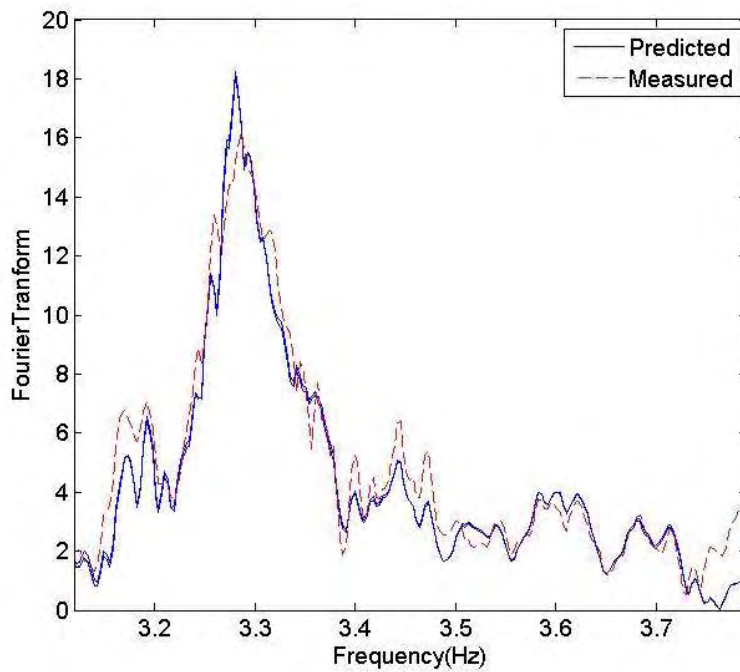
Εικόνα 13. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 11, τελευταίος όροφος, πρώτος σεισμός



Εικόνα 14. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 15, τελευταίος όροφος, πρώτος σεισμός

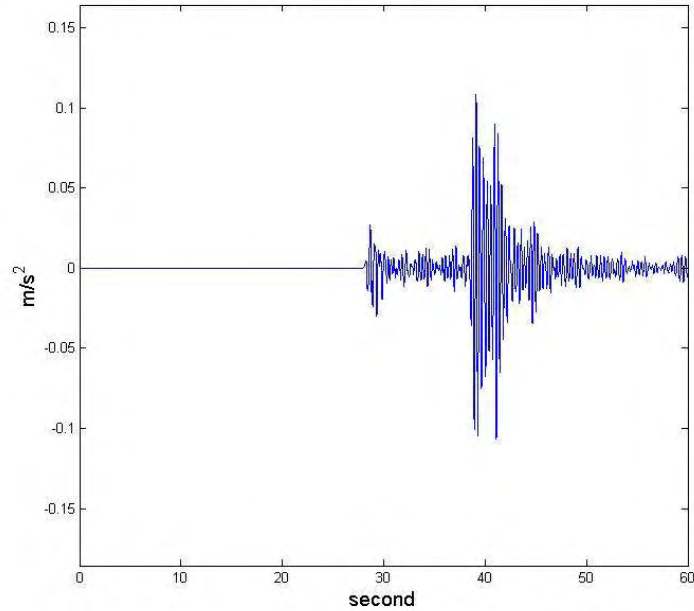


Εικόνα 15. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 10, τελευταίος όροφος, πρώτος σεισμός

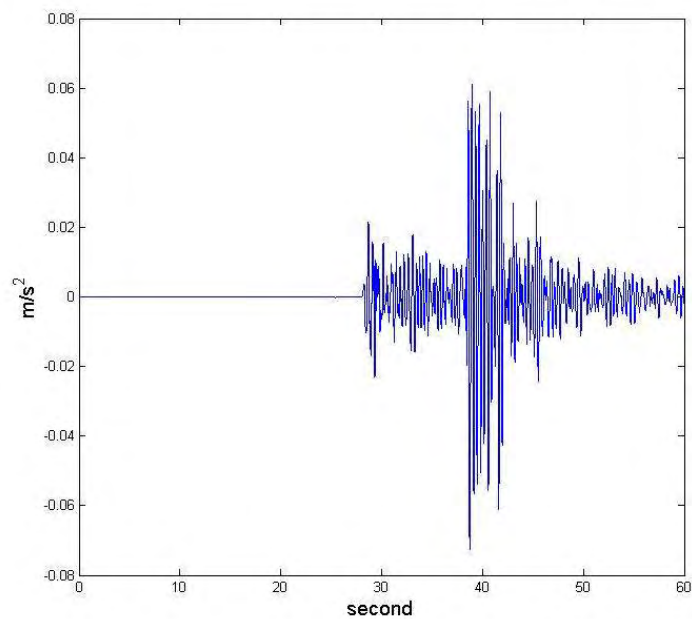


Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 11, τελευταίος όροφος, πρώτος σεισμός

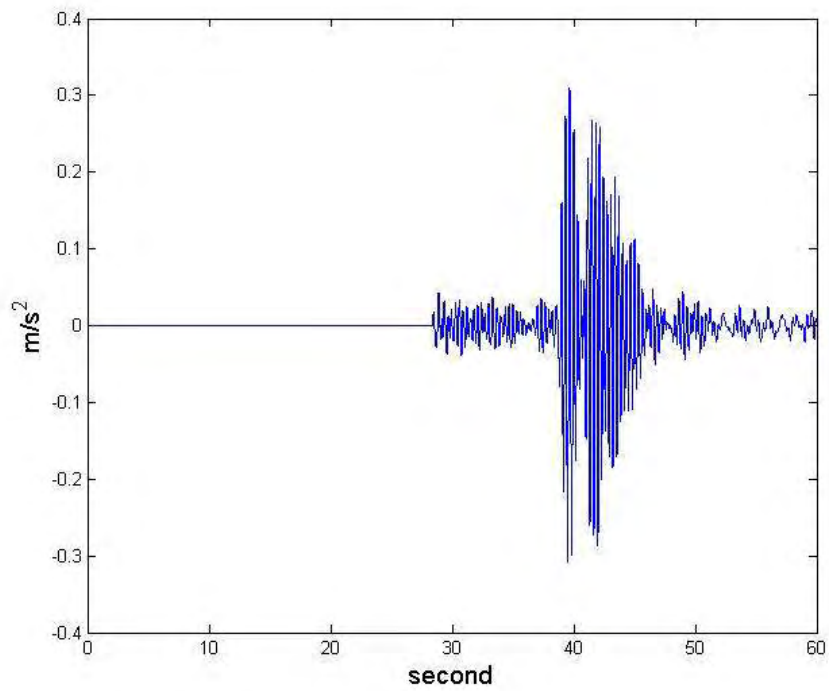
Παράρτημα 2 (2^η σεισμική διέγερση)



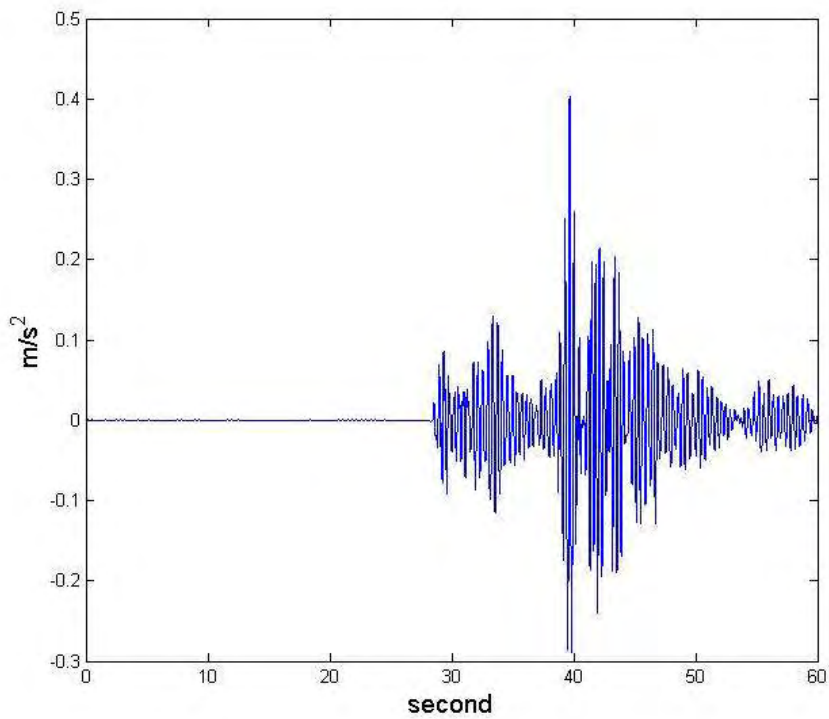
Εικόνα 21. Επιτάχυνση από τη δεύτερη σεισμική διέγερση, τρίτο υπόγειο, αισθητήρας 1 (NW corner EW direction)



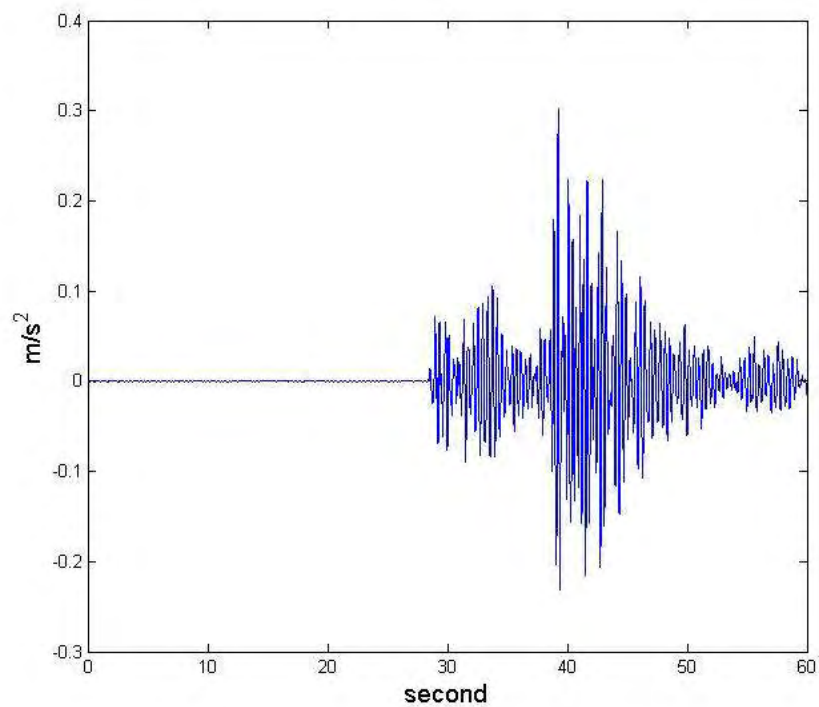
Εικόνα 22. Επιτάχυνση από τη δεύτερη σεισμική διέγερση, τρίτο υπόγειο, αισθητήρας 2 (NW corner NS direction).



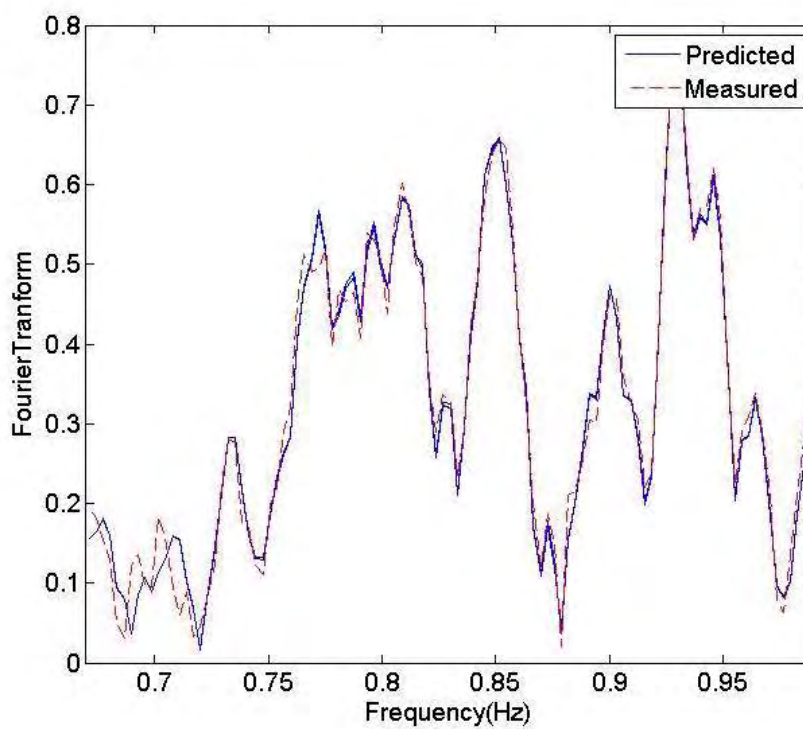
Εικόνα 23 Επιτάχυνση απόκρισης από τη δεύτερη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 10 (EW direction NW corner)



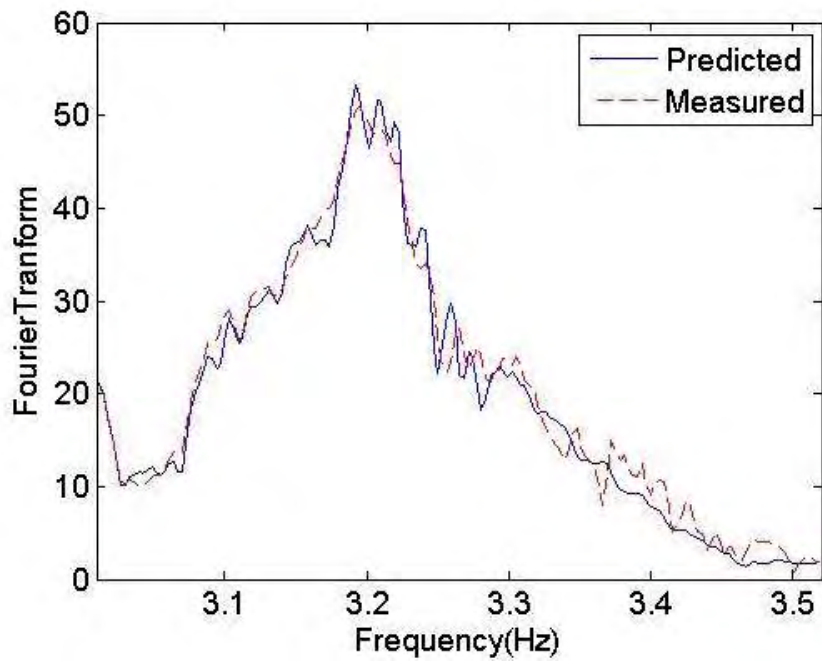
Εικόνα 24 Επιτάχυνση απόκρισης από τη δεύτερη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 11 (NS direction NW corner)



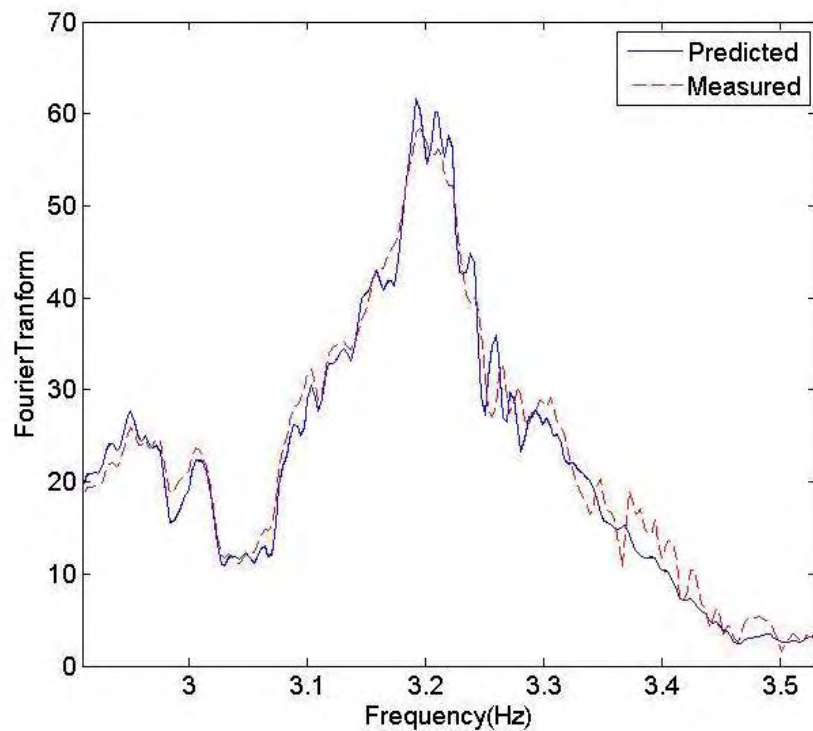
Εικόνα 25. Επιτάχυνση απόκρισης από τη δεύτερη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 12 (NS direction SE corner)



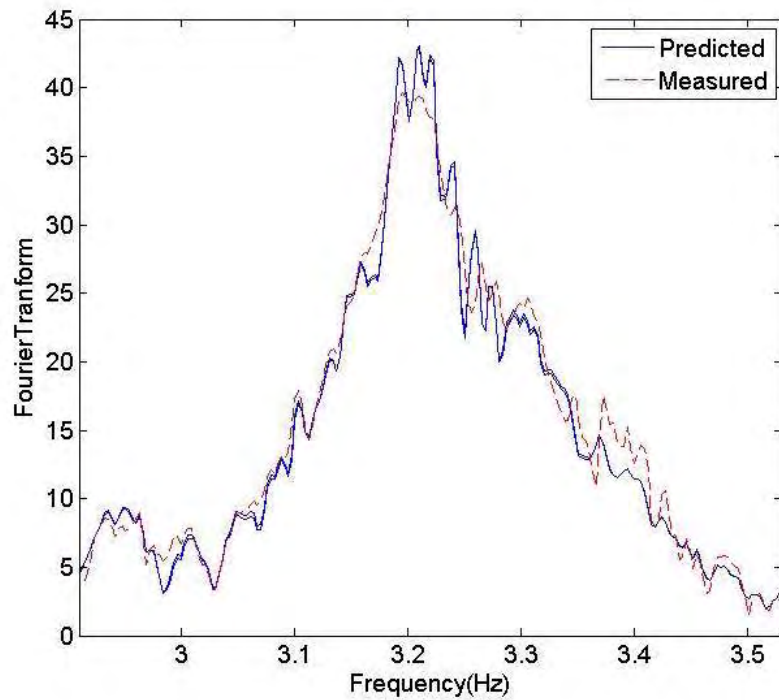
Εικόνα 26. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 6, ισόγειο, δεύτερος σεισμός



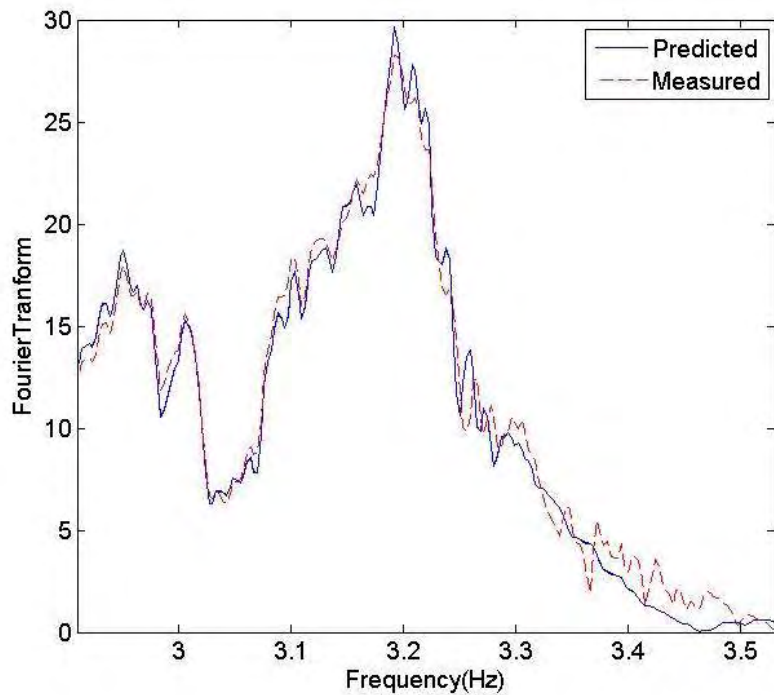
Εικόνα 27. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 7, 6^{ος} όροφος, δεύτερος σεισμός



Εικόνα 28. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 10, τελευταίος όροφος, δεύτερος σεισμός

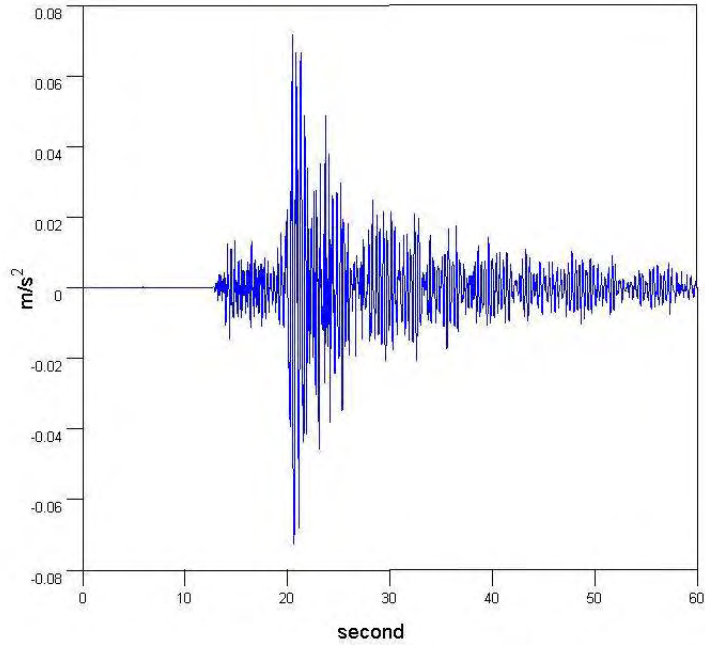


Εικόνα 29. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 12, τελευταίος όροφος, δεύτερος σεισμός

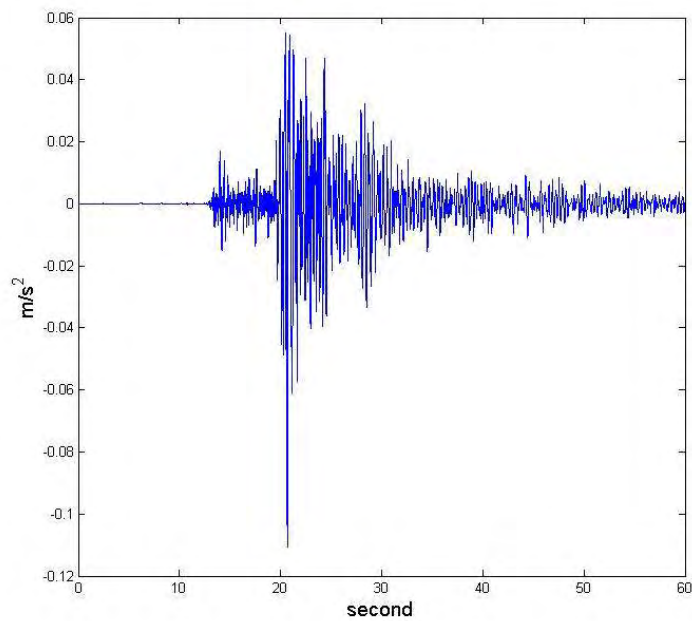


Εικόνα 30. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 14, 3^{ος} όροφος, δεύτερος σεισμός

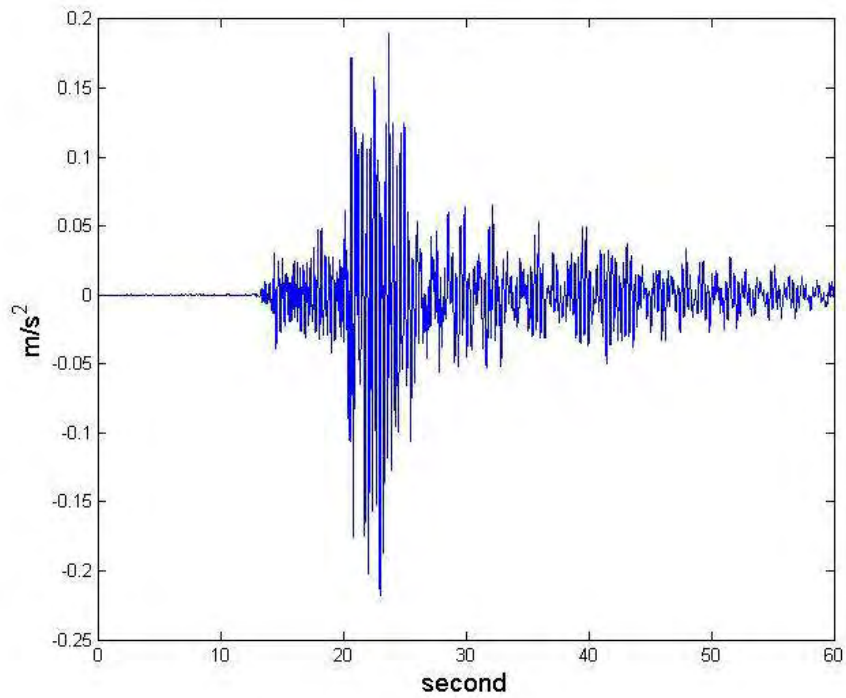
Παράρτημα 3 (3^η σεισμική διέγερση)



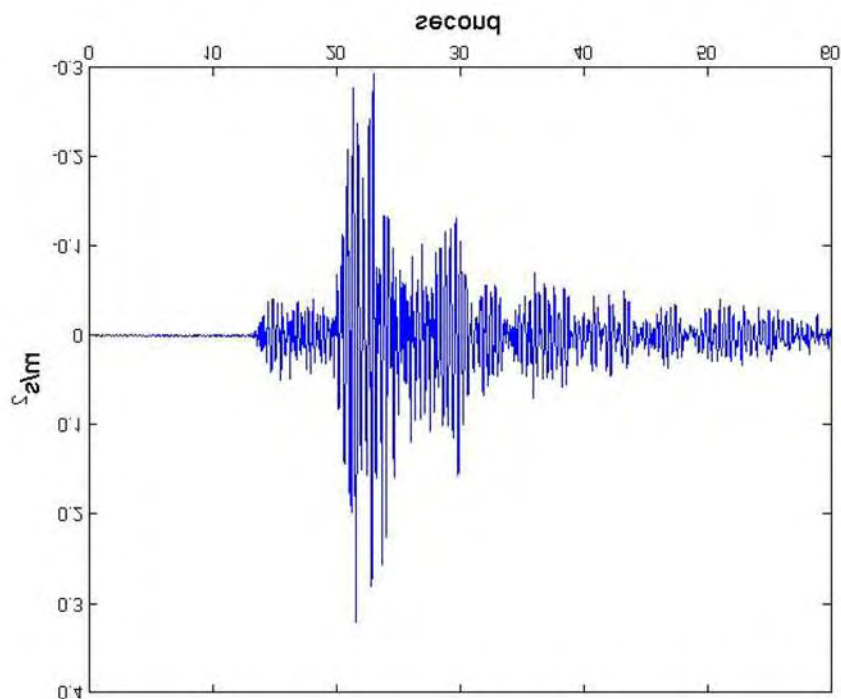
Εικόνα 36. Επιτάχυνση από την τρίτη σεισμική διέγερση, τρίτο υπόγειο, αισθητήρας 1 (NW corner EW direction)



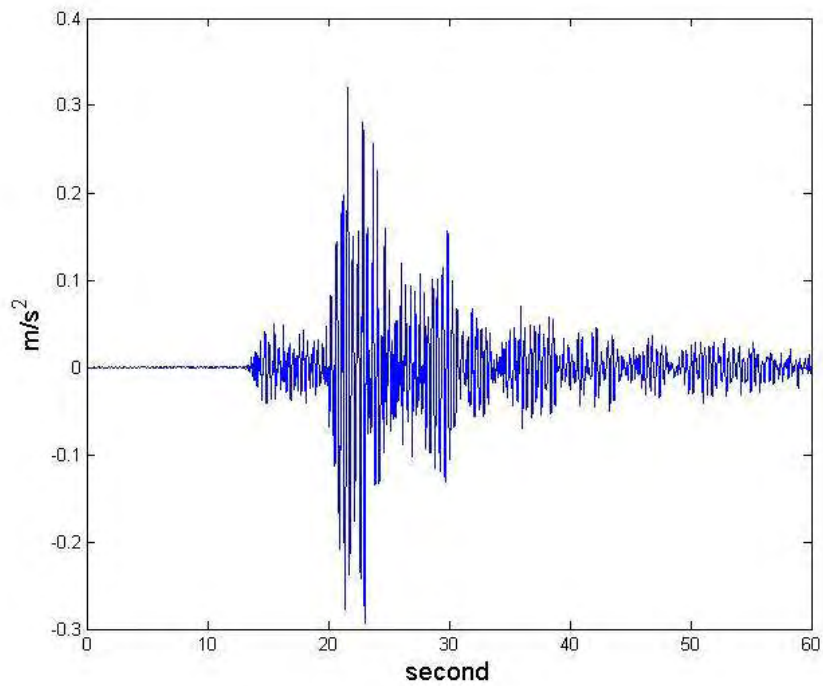
Εικόνα 37. Επιτάχυνση από την τρίτη σεισμική διέγερση, τρίτο υπόγειο, αισθητήρας 2 (NW corner NS direction).



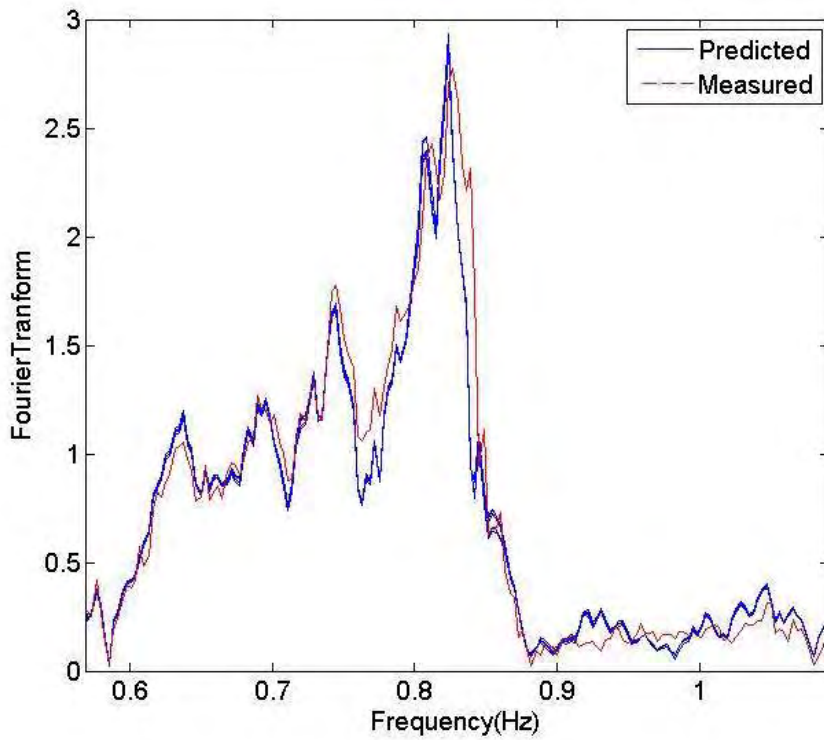
Εικόνα 38. Επιτάχυνση απόκρισης από την τρίτη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 10 (EW direction NW corner)



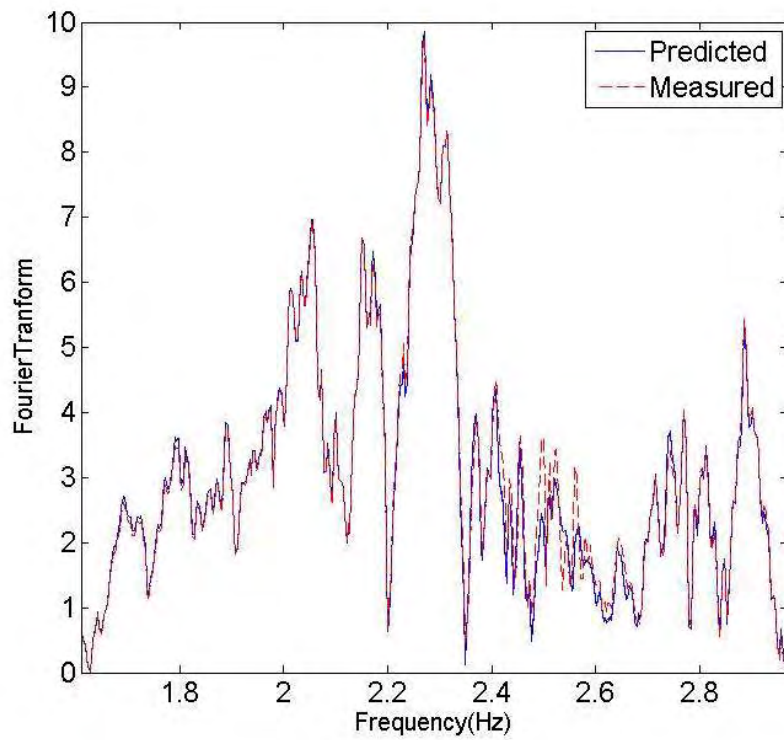
Εικόνα 39. Επιτάχυνση απόκρισης από την τρίτη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 11 (NS direction NW corner)



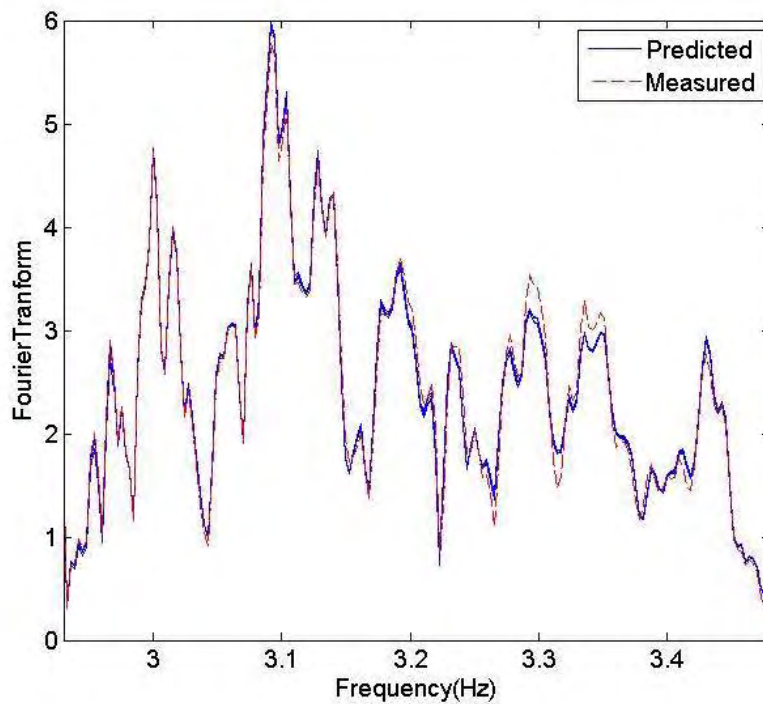
Εικόνα 40. Επιτάχυνση απόκρισης από την τρίτη σεισμική διέγερση, τελευταίος όροφος, αισθητήρας 12 (NS direction SE corner)



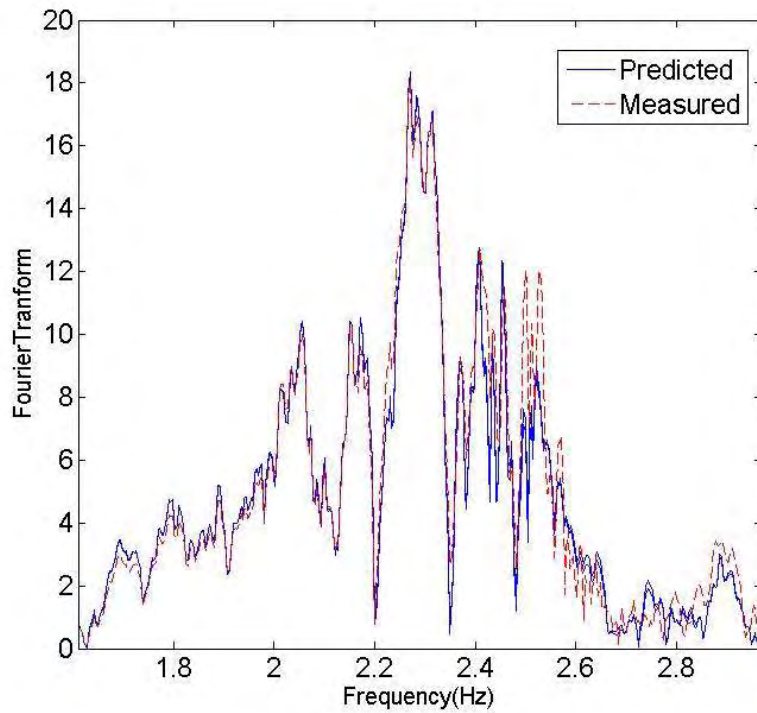
Εικόνα 41. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 14, 3^{ος} όροφος, τρίτος σεισμός



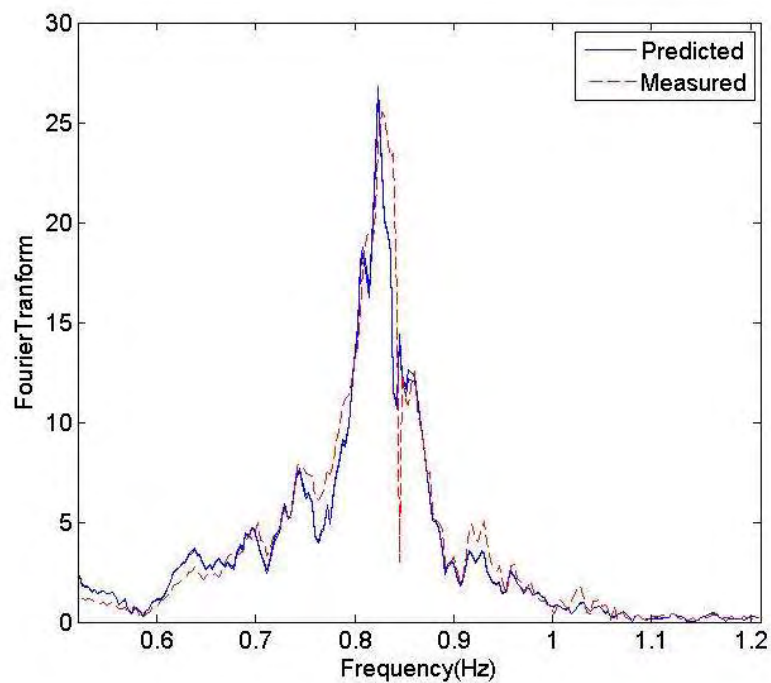
Εικόνα 42. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 6, ισόγειο, τρίτος σεισμός



Εικόνα 43. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 5, ισόγειο, τρίτος σεισμός



Εικόνα 44. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 16, 3^{ος} όροφος, τρίτος σεισμός



Εικόνα 45. Σύγκριση μετασχηματισμών Fourier μεταξύ επιταχύνσεων που μετρήθηκαν και που προβλέφθηκαν, αισθητήρας 10, τελευταίος όροφος, τρίτος σεισμός

Βιβλιογραφία

- [1] Werner S.D., Beck J.L., Levine M.B. (1987): Seismic response evaluations of Meloland road overpass using 1979 Imperial Valley earthquake records. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **15**, 249-274.
- [2] Vamvatsikos D, Cornell CA (2002): Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **31** (3), 491-514.
- [3] Safak E. (1995): Detection and identification of soil-structure interaction in buildings from vibration recordings. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, **121** (5), 899-906.
- [4] Lus H., Betti R., Longman R.W. (1999): Identification of linear structural systems using earthquake-induced vibration data. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **28**, 1449–1467.
- [5] Liu H., Yanga Z., Gaulke M.S. (2005): Structural identification and finite element modeling of a 14-story office building using recorded data. *Engineering Structures*, **27**, 463–473.
- [6] Chaudhary M.T.A., Abe M., Fujino Y. (2000): System identification of two base-isolated buildings using seismic records. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, **126** (10), 1187-1195.
- [7] Chaudhary M.T.A., Abe M., Fujino Y. (2002): Investigation of atypical seismic response of a base-isolated bridge. *Engineering Structures*, **24**, 945–953.
- [8] Arici Y., Mosalam K.M. (2003): System identification of instrumented bridge systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **32**, 999–1020.
- [9] Lin C.C., Hong L.L., Ueng J.M., Wu K.C., Wang C.E. (2005): Parametric identification of asymmetric buildings from earthquake response records. *Smart Materials and Structures*, **14**, 850-861.
- [10] Beck J.L., Jennings P.C. (1980): Structural identification using linear models and earthquake records. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **8**, 145-160.
- [11] McVerry G.H. (1980): Structural identification in the frequency domain from earthquake records. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **8**, 161-180.
- [12] Papageorgiou A.S., Lin B.C. (1989): Influence of lateral-load-resisting system on the earthquake response of structures – A system identification study. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **18**, 799-814.
- [13] Tan R.Y., Cheng W.M. (1993): System identification of a non-classically damped linear system. *Computers and Structures*, **46**, 67–75.

- [14] Mahmoudabadi M., Ghafory-Ashtiany M., Hosseini M. (2007): Identification of modal parameters of non-classically damped linear structures under multi-component earthquake loading. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **36**, 765-782.
- [15] Clough R.W., Penzien J. (1993): *Dynamics of Structures*. McGraw-Hill.
- [16] Nikolaou I., (2008): Structural modal identification methods based on earthquake-induced vibrations. *MS Thesis Report No. SDL-08-2*, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Thessaly, Volos, Greece.
- [17] C. Papadimitriou, I. Gavriilidis, C. Argyris, H. Jensen, C. Esse, V. Araya (2016): Identification and finite element modeling of Alcazar building in Chile using earthquake vibration data
- [18] Peeters B, Van der Auweraer H, Guillaume P, Leuridan J (2004): The PolyMAX frequency-domain method: A new standard for modal parameter estimation. *Shock and Vibration*, **11** (2-4), 395-409.
- [19] Heylen, W., Lammens, S., Sas, P. (1997): *Modal Analysis Theory and Testing*. Katholieke Universiteit Leuven, Department of Mechanical Engineering.