

Ⓜ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ Ⓜ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ
ΜΟΡΦΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ
ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ***



Χατζοπούλου Αρετή

Επιβλέπων: Αναπλ. Καθηγητής Κ. Παπαδημητρίου

Βόλος, Σεπτέμβριος 2001



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 632/1

Ημερ. Εισ.: 26-10-2001

Δωρεά: Συγγραφέα

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜΒ
2001

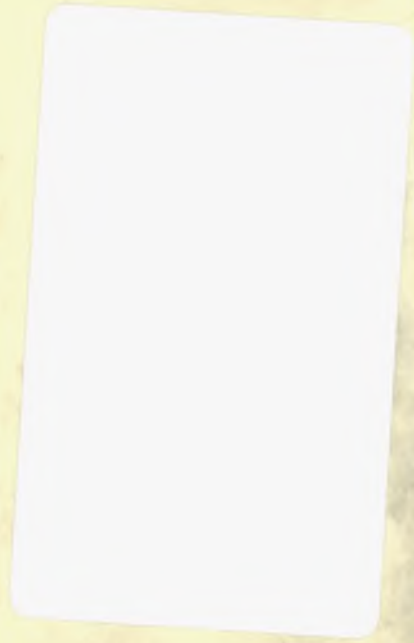
ΧΑΤ

αρ 302

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000062930



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΜΟΡΦΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	7
2.1 Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων.....	7
2.2 Μορφικό Μοντέλο.....	11
2.3 Εκτίμηση Βέλτιστων Τιμών των Παραμέτρων του Μορφικού Μοντέλου.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	16
3.1 Πρότυπη Κατασκευή (Benchmark Problem).....	16
Μοντέλο 1.....	19
Μοντέλο 2.....	25
3.2 Προσομοιωμένα Δεδομένα Γέφυρας.....	28
Περίπτωση 1 ^η : Δύο βαθμοί ελευθερίας (1, 4)	29
Περίπτωση 2 ^η : Τρεις βαθμοί ελευθερίας (1, 4, 20)	31
Περίπτωση 3 ^η : Τέσσερις βαθμοί ελευθερίας (1, 4, 6, 9)	33
Περίπτωση 4 ^η : Πέντε βαθμοί ελευθερίας (3, 4, 18, 20, 22).....	35
Περίπτωση 5 ^η : Πέντε βαθμοί ελευθερίας (5, 16, 13, 24, 25).....	36
3.3 Πραγματικές Μετρήσεις από τη Γέφυρα της Χαλκίδας.....	39
Περίπτωση 1 ^η	40
Περίπτωση 2 ^η	41
Περίπτωση πέντε ιδιομορφών.....	41
Περίπτωση έξι ιδιομορφών.....	43
Περίπτωση 3 ^η	44
Περίπτωση 4 ^η	46
Περίπτωση τεσσάρων ιδιομορφών.....	46
Περίπτωση οκτώ ιδιομορφών.....	47
Περίπτωση 5η.....	48
Περίπτωση 6 ^η	50
Περίπτωση 7 ^η	52
3.4 Πραγματικές Μετρήσεις από το Κτήριο του ΟΤΕ.....	54
3.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	58
Συμπεράσματα	58
Προτάσεις	58
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	60
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	61
Σχέσεις παραγώγων.....	61
Παράγωγος ως προς συνολικούς συντελεστές συνεισφοράς (effective participation factors).....	61
Παράγωγος ως προς ψευδοστατικό πίνακα (pseudostatic matrix).....	62
Παράγωγος ως προς αρχική μετατόπιση	62
Παράγωγος ως προς αρχική ταχύτητα.....	63
Παράγωγος ως προς $a_r = 2\zeta_r \omega_r$	63
Παράγωγος ως προς $b_r = \omega_r^2$	64

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μορφική αναγνώριση μοντέλων κατασκευών, με χρήση μετρήσεων δυναμικών δεδομένων. Για το σκοπό αυτό εξετάστηκε η υπάρχουσα θεωρία και μεθοδολογία και αναπτύχθηκε πηγαίος κώδικας σε Matlab για τον προσδιορισμό των μορφικών παραμέτρων των κατασκευών. Η εργασία εξελίχθηκε σε δύο κύρια στάδια: την ανάπτυξη του μορφικού μοντέλου και του κώδικα αναγνώρισης μορφικών παραμέτρων και δεύτερον τις εφαρμογές του κώδικα σε προσομοιωμένα και πραγματικά δυναμικά δεδομένα.

Αρχικά περιγράφεται το πρόβλημα και η σημασία της μορφικής αναγνώρισης κατασκευών. Στη συνέχεια αναπτύσσεται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και ακολούθως το μορφικό μοντέλο, με τα οποία προσεγγίζεται η κατασκευή. Ακολούθως περιγράφεται η μέθοδος που ακολουθείται για την εκτίμηση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων του μορφικού μοντέλου.

Έπεται η παρουσίαση ορισμένων εφαρμογών σε προσομοιωμένα δεδομένα επιταχύνσεων από μία πρότυπη κατασκευή και από την καλωδιωτή γέφυρα της Χαλκίδας, αλλά και πραγματικά δεδομένα επιταχύνσεων από το κτήριο του ΟΤΕ στους Θρακομακεδόνες και από την καλωδιωτή γέφυρα της Χαλκίδας. Ακολούθως τα αποτελέσματα των εφαρμογών αυτών παρουσιάζονται και σχολιάζονται αναλυτικά.

Τέλος αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, καθώς και ορισμένες προτάσεις για μελλοντική δουλειά στο συγκεκριμένο τομέα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές μου κ. Κ. Παπαδημητρίου, κ. Σ. Καραμάνο και κ. Γ. Πετρόπουλο. Ειδικά τον κ. Παπαδημητρίου ευχαριστώ θερμά τόσο για την καθοδήγηση, όσο και για τη διάθεση και τη συμπαράστασή του σε όλο το διάστημα εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον καθηγητή μου κ. Δ. Βαλουγεώργη για τη διάθεση του εξοπλισμού του εργαστηρίου ηλεκτρονικών υπολογιστών. Επίσης ευχαριστώ τους προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές του εργαστηρίου δυναμικής συστημάτων και του εργαστηρίου Η/Υ για την πολύτιμη βοήθειά τους. Ειδικά το συνάδελφο και φίλο Πουλάκη Ζαννή, ευχαριστώ για την υποστήριξη και τη βοήθειά του, κυρίως όμως για τις γνώσεις μου στη Matlab, τις οποίες οφείλω αποκλειστικά σε εκείνον. Ευχαριστώ θερμά τη Λεμπιδάκη Δήμητρα, για τη συμβολή και την εμπύχωση, αν και εξ αποστάσεως.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ απευθύνω στους γονείς μου, για τη διαρκή εμπύχωση, κατανόηση και συμπαράστασή τους.

Ευχαριστούμε το ΙΤΣΑΚ για την παροχή των δεδομένων μετρήσεων από τη γέφυρα της Χαλκίδας και από το κτήριο του ΟΤΕ στους Θρακομακεδόνες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη σύγχρονη εποχή οι κατασκευές έχουν φτάσει σε υψηλό επίπεδο πολυπλοκότητας αλλά και μεγέθους, με αποτέλεσμα η ασφάλειά τους να αποτελεί πρωταρχικό στόχο που η εξέλιξη της επιστήμης καθιστά δυνατό να επιτευχθεί. Σε κάθε κατασκευή ο χρόνος και τα φυσικά φαινόμενα προκαλούν φθορές που συχνά δεν είναι εμφανείς, εντούτοις είναι απαραίτητο να μπορούν να διαγνωσθούν, ειδικά τώρα που η κλίμακα των κατασκευών έχει κάνει την ασφάλειά τους να αφορά τις ζωές πολλών περισσότερων ανθρώπων. Μία σχετικά απλή στη σύλληψη της ιδέα αποτελεί η γνώση κάποιων χαρακτηριστικών της κατασκευής που θα έδινε τη δυνατότητα παρακολούθησης των αλλαγών τους και θα διαπίστωνε την ύπαρξη βλάβης. Η πολυπλοκότητα των κατασκευών καθιστά τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών τους σχετικά δύσκολο. Τα στοιχεία που παρέχουν οι μετρήσεις αποκρίσεων της κατασκευής σε γνωστές διεγέρσεις, αποτελούν χρήσιμο μέσο για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών της. Είναι όμως απαραίτητη η ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου που να συνδέει τη συμπεριφορά της κατασκευής με τα χαρακτηριστικά της, με χρήση φυσικά ορισμένων παραδοχών, απαραίτητων για τη ρεαλιστική χρήση του μοντέλου. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία επελέγη, έτσι ώστε να προσδιορίζονται τα μορφικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων συστημάτων.

Η αναγνώριση των παραμέτρων μορφικών μοντέλων, όπως οι ιδιοσυχνότητες, τα μέτρα απόσβεσης και οι ιδιομορφές, μιας ταλαντούμενης κατασκευής χρησιμοποιώντας δεδομένα διεγέρσεων και αποκρίσεων αποτελεί λοιπόν τομέα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για τη δυναμική των κατασκευών. Οι παράμετροι αυτές μπορούν να αξιοποιηθούν ως ένα πολύ σημαντικό εργαλείο σε διάφορες εφαρμογές, όπως για την αναλυτική αξιολόγηση ενός μοντέλου, για τον εντοπισμό μεταβολών σε κατασκευές καθώς και για τη μελέτη της συμπεριφοράς και την προσομοίωση της απόκρισης της κατασκευής σε συγκεκριμένες διεγέρσεις.

Οι μορφικές παράμετροι μπορούν να προσδιοριστούν είτε με μεθόδους στο πεδίο των συχνοτήτων (π.χ. Παυλίδου, 2000, McVerry, 1980)

χρησιμοποιώντας μετασχηματισμό Fourier, είτε με μεθόδους στο πεδίο του χρόνου. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. Αρχικά γίνεται αναφορά στο απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την παραμετρική αναγνώριση των παραμέτρων γραμμικών συστημάτων με σταθερούς συντελεστές, η οποία περιλαμβάνει τις ιδιοσυχνότητες, τους συντελεστές απόσβεσης και τους συνολικούς συντελεστές συνεισφοράς των ιδιομορφών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες εφαρμογές του προγράμματος που αναπτύχθηκε, όπου γίνεται μορφική αναγνώριση ορισμένων κατασκευών, βάσει προσομοιωμένων αλλά και πραγματικών δεδομένων επιταχύνσεων. Τέλος σχολιάζονται τα αποτελέσματα και εξάγονται συμπεράσματα της εργασίας καθώς και αναφέρονται οι δυνατότητες περαιτέρω εξέλιξης του προγράμματος και γενικά μελλοντικής δουλειάς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΜΟΡΦΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Θεωρήθηκε μία κατηγορία γραμμικών παραμετρικών μοντέλων για την περιγραφή της συμπεριφοράς των κατασκευών, με $\underline{\theta}$ τις παραμέτρους που σχετίζονται με τις ιδιότητες της εκάστοτε κατασκευής. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών είναι ενδεικτικές για την κατάσταση της κατασκευής. Για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με τις πιθανές τιμές των παραμέτρων $\underline{\theta}$ χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα δυναμικών μετρήσεων της διέγερσης και της απόκρισης της κατασκευής. Τα δεδομένα αυτά δόθηκαν με τη μορφή επιταχύνσεων σε συνάρτηση με το χρόνο. Στην παρούσα εργασία οι παράμετροι $\underline{\theta}$ που επελέγησαν να εξεταστούν και ως προς αυτές να γίνει η αναγνώριση του μοντέλου είναι οι μορφικές παράμετροι, δηλαδή οι ιδιομορφές με τις αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες και μέτρα απόσβεσης. Το μορφικό μοντέλο προήλθε από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων μίας κατασκευής, χρησιμοποιώντας τη συνήθη μορφική ανάλυση. Στη συνέχεια περιγράφεται η εξαγωγή του μορφικού μοντέλου, από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την περίπτωση πολλαπλών διεγέρσεων βάσης. Το μορφικό μοντέλο προέρχεται από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων μίας κατασκευής χρησιμοποιώντας τη συνήθη μορφική ανάλυση. Στη συνέχεια περιγράφεται η εξαγωγή του μορφικού μοντέλου από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την περίπτωση πολλαπλών διεγέρσεων βάσης.

2.1 Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων

Έστω γενικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων μίας κατασκευής και \underline{x}_0 το διάνυσμα των μετατοπίσεων των βαθμών ελευθερίας του. Η εξίσωση κίνησης που προκύπτει από την διακριτοποίηση της κατασκευής γράφεται:

$$M\ddot{\underline{x}}_0 + C\dot{\underline{x}}_0 + K\underline{x}_0 = \underline{f}(t) \quad (2.1)$$

όπου $M \equiv M(\underline{\theta})$, $C \equiv C(\underline{\theta})$, $K \equiv K(\underline{\theta})$ είναι τα μητρώα μάζας, απόσβεσης και ακαμψίας, αντίστοιχα και $\underline{f}(t)$ το διάνυσμα των δυνάμεων διέγερσης.

Θεωρούμε τον παρακάτω διαχωρισμό (partition) του διανύσματος \underline{x}_0 :

$$\underline{x}_0 = \begin{Bmatrix} \underline{y} \\ \underline{x}_g \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

όπου \underline{x}_g περιέχει τις μετατοπίσεις των βαθμών ελευθερίας «βάσης» της κατασκευής, τύπου g, για τους οποίους δίνεται η χρονική μεταβολή των επιταχύνσεων, και \underline{y} περιέχει τις μετατοπίσεις των υπόλοιπων βαθμών ελευθερίας, τύπου s, για τους οποίους απαιτείται ο προσδιορισμός των μετατοπίσεων. Εξωτερικές διεγείρουσες δυνάμεις δεν υπάρχουν, παρά μόνον οι μετατοπίσεις στη βάση της κατασκευής και αυτές δηλώνονται από το \underline{x}_g . Λαμβάνοντας υπόψη το διαχωρισμό των κινήσεων της βάσης και της υπόλοιπης κατασκευής, η εξίσωση (2.1) γράφεται:

$$\begin{bmatrix} m_{ss} & m_{sg} \\ m_{gs} & m_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \underline{\ddot{y}}(t) \\ \underline{\ddot{x}}_g(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{ss} & c_{sg} \\ c_{gs} & c_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \underline{\dot{y}}(t) \\ \underline{\dot{x}}_g(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{ss} & k_{sg} \\ k_{gs} & k_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \underline{y}(t) \\ \underline{x}_g(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \underline{0} \\ \underline{0} \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

όπου οι πίνακες των ιδιοτήτων της κατασκευής έχουν χωριστεί σε τμήματα (partitions) ανάλογα με τους βαθμούς ελευθερίας στους οποίους αναφέρεται το καθένα.

Κάνοντας χρήση μόνο των εξισώσεων που αντιστοιχούν στους βαθμούς ελευθερίας τύπου s, η εξίσωση (2.3) γράφεται:

$$\begin{bmatrix} m_{ss} & m_{sg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \underline{\ddot{y}}(t) \\ \underline{\ddot{x}}_g(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{ss} & c_{sg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \underline{\dot{y}}(t) \\ \underline{\dot{x}}_g(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{ss} & k_{sg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \underline{y}(t) \\ \underline{x}_g(t) \end{Bmatrix} = \underline{0} \quad (2.4)$$

όπου τα διανύσματα κίνησης έχουν διαχωριστεί, ώστε να διακρίνονται οι ποσότητες που αποτελούν τις αποκρίσεις από αυτές που αποτελούν τις διεγέρσεις του συστήματος. Αντίστοιχα έχουν χωριστεί και οι πίνακες των ιδιοτήτων της κατασκευής. Οι πίνακες που εκφράζουν δυνάμεις που οφείλονται στην απόκριση των βαθμών ελευθερίας λόγω της κίνησης των στηρίξεων, υποδηλώνονται εδώ με τον δείκτη g. Η εξίσωση (2.4) δηλώνει την ισορροπία δυνάμεων στους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας και επίσης

πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχουν εξωτερικά φορτία που να αντιστοιχούν σε αυτές τις μετατοπίσεις.

Μεταφέροντας, στην εξίσωση (2.4), τους όρους που αναφέρονται στην κίνηση των στηρίξεων στο δεξί μέρος, προκύπτει η ακόλουθη έκφραση

$$m_{ss} \ddot{\underline{y}}(t) + c_{ss} \dot{\underline{y}}(t) + k_{ss} \underline{y}(t) = -m_{sg} \ddot{\underline{x}}_g(t) - c_{sg} \dot{\underline{x}}_g(t) - k_{sg} \underline{x}_g(t) \quad (2.5)$$

Η απόκριση του συστήματος σε μία τέτοια διέγερση μπορεί να απλοποιηθεί, εκφράζοντας την ολική απόκριση σαν άθροισμα του διανύσματος των ψευδοστατικών αποκρίσεων $\underline{s}(t)$ και του διανύσματος των δυναμικών αποκρίσεων $\underline{x}(t)$:

$$\underline{y}(t) = \underline{s}(t) + \underline{x}(t) \quad (2.6)$$

Η ψευδοστατική απόκριση δίνεται από τη σχέση:

$$\underline{s}(t) = -k_{ss}^{-1} k_{sg} \underline{x}_g(t) \equiv R \underline{x}_g(t) \quad (2.7)$$

όπου το R_{ij} στοιχείο του πίνακα R ,

$$R = -k_{ss}^{-1} k_{sg} \quad (2.8)$$

εκφράζει τη στατική απόκριση σε όλους τους βαθμούς ελευθερίας j , ($j \neq i$) λόγω μοναδιαίας μετατόπισης του i βαθμού ελευθερίας των στηρίξεων.

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (2.7) στην (2.6), θέτοντας το αποτέλεσμα στην (2.5) και στη συνέχεια μεταφέροντας τους όρους που σχετίζονται με την κίνηση των στηρίξεων (είσοδος) στο δεξί μέρος, προκύπτει η σχέση:

$$m \ddot{\underline{x}}(t) + c \dot{\underline{x}}(t) + k \underline{x}(t) = -(mR + m_{sg}) \ddot{\underline{x}}_g(t) - (cR + c_g) \dot{\underline{x}}_g(t) \quad (2.9)$$

όπου ορίζεται:

$$m = m_{ss},$$

$$k = k_{ss},$$

$$c = c_{ss}$$

Στη σχέση (2.9) έχει απαλειφθεί ο όρος της ακαμψίας, λόγω του ορισμού της ψευδοστατικής μετατόπισης στη Σχέση (2.7). Επίσης, από αριθμητικά πειράματα, έχει αποδειχτεί ότι η συνεισφορά του όρου που εξαρτάται από την απόσβεση είναι αμελητέα σε σχέση με εκείνη της ακαμψίας (Clough and Penzien, 1993). Έτσι η (2.9) μπορεί να γραφεί:

$$m\ddot{\underline{x}}(t) + c\dot{\underline{x}}(t) + k\underline{x}(t) = -(mR + m_{sg})\ddot{\underline{x}}_g(t) \quad (2.10)$$

Έστω $\ddot{\underline{z}}(t)$ το διάνυσμα των ανεξαρτήτων επιταχύνσεων βάσης τέτοιο ώστε

$$\ddot{\underline{x}}_g(t) = R_0\ddot{\underline{z}}(t) \quad (2.11)$$

Η εξίσωση παίρνει την τελική μορφή:

$$m\ddot{\underline{x}}(t) + c\dot{\underline{x}}(t) + k\underline{x}(t) = -F\ddot{\underline{z}} \quad (2.12)$$

όπου

$$F = (mR + m_{sg})R_0 \quad (2.13)$$

Λύνοντας λοιπόν την παραπάνω διαφορική εξίσωση υπολογίζεται η απόκριση της κατασκευής όταν υπόκειται σε επιταχύνσεις βάσεως $\ddot{\underline{z}}(t)$.

Μία άλλη σημαντική παράμετρος που πρέπει να οριστεί για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης (2.12) είναι το μητρώο απόσβεσης C της κατασκευής.

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Caughey, το μητρώο της απόσβεσης προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$C = m\Phi Z\Phi^T m \quad (2.14)$$

όπου Φ είναι ο πίνακας των N_m ιδιομορφών και Z είναι ο διαγώνιος πίνακας της μορφής:

$$Z = \begin{bmatrix} 2\zeta_1\omega_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 2\zeta_m\omega_m \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

και $\zeta_i =$ ο συντελεστής απόσβεσης για την i ιδιομορφή του οποίου οι τιμές προσδιορίζονται από πειραματικά δεδομένα.

2.2 Μορφικό Μοντέλο

Έστω ότι s_i και x_i , $i=1,2,\dots,N_R$, είναι το ψευδοστατικό και το δυναμικό μέρος της απόκρισης y_i αντίστοιχα, στον i βαθμό ελευθερίας, όπου μετράται η απόκριση του συστήματος (Σχέση (2.6)). Το ψευδοστατικό μέρος υπολογίζεται από την εξίσωση (2.7). Το δυναμικό μέρος x_i μπορεί να εκφραστεί ως η επαλληλία της συνεισφοράς των N_m μορφών της ταλάντωσης του συστήματος που διεγείρονται σημαντικά από τις διεγέρσεις βάσεων (π.χ. σεισμό) ($N_m \ll N$). Αυτό εκφράζεται μαθηματικά από τη σχέση:

$$x_i(t) = \sum_{r=1}^{N_m} \phi_{ir} \xi_r(t) = \sum_{r=1}^{N_m} \eta_{ir}(t) \quad (2.16)$$

όπου $\phi_{ir} \xi_r(t) \equiv \eta_{ir}(t)$ είναι η συνεισφορά της r μορφής στην απόκριση στον i βαθμό ελευθερίας του συστήματος. Από τη μορφική ανάλυση της εξίσωσης (2.12) που περιλαμβάνει και την ορθογωνικότητα των μορφών, μπορεί να δειχτεί ότι η μορφική συνεισφορά της η_{ir} , $i=1,2,\dots,N_R$ ικανοποιεί την εξίσωση (Νατσιάβας, 2001):

$$\ddot{\eta}_{ir} + a_r \dot{\eta}_{ir} + b_r \eta_{ir} = -P_i^{(r)} \ddot{\underline{z}} \quad (2.17)$$

με $a_r = 2\zeta_r \omega_r$,

$$b_r = \omega_r^2$$

όπου ζ_r και ω_r είναι ο συντελεστής απόσβεσης και η συχνότητα της r μορφής, αντίστοιχα και $[P^{(r)}]$ είναι ο πίνακας με τους συνολικούς συντελεστές συνεισφοράς της r ιδιομορφής, και ο οποίος έχει τη μορφή:

$$P^{(r)} = [P_y^{(r)}] = \begin{bmatrix} P_1^{(r)} \\ P_2^{(r)} \\ \cdot \\ \cdot \\ P_{N_R}^{(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1r}\gamma_{r1} & \phi_{1r}\gamma_{r2} & \dots & \phi_{1r}\gamma_{r,N_S} \\ \phi_{2r}\gamma_{r1} & \phi_{2r}\gamma_{r2} & \dots & \phi_{2r}\gamma_{r,N_S} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \phi_{N_R,r}\gamma_{r1} & \phi_{N_R,r}\gamma_{r2} & \dots & \phi_{N_R,r}\gamma_{r,N_S} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Το ϕ_{ir} είναι το μέγεθος της r ιδιομορφής στον i βαθμό ελευθερίας και γ_{rj} είναι ο συντελεστής συνεισφοράς (participation factor) της r μορφής από τον j βαθμό ελευθερίας των στηρίξεων ($j=1,2,\dots,N_S$), όπου N_S είναι οι βαθμοί ελευθερίας των στηρίξεων για τους οποίους είναι γνωστή η χρονική ιστορία της επιτάχυνσης. Τέλος, τα γ_{rj} είναι τα στοιχεία του πίνακα:

$$\Gamma = [\gamma_{rj}] = \phi^T (mR + m_{sg}) \quad (2.19)$$

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι ο πίνακας των ψευδοστατικών αποκρίσεων R , ο πίνακας των συνολικών συντελεστών συνεισφοράς $P^{(r)}$ και οι μορφικές παράμετροι a_r και b_r είναι τα μόνα στοιχεία που πρέπει να είναι γνωστά για να χαρακτηριστεί πλήρως η απόκριση του συστήματος, όταν αυτό υπόκειται σε γνωστές διεγέρσεις. Επιπλέον κρίθηκε χρήσιμη η προσθήκη δύο ακόμη παραμέτρων, των αρχικών συνθηκών ταχύτητας και μετατόπισης σε περίπτωση που αυτές είναι μη μηδενικές. Τούτο ήταν απαραίτητο στην περίπτωση, παραδείγματος χάριν, που χρησιμοποιείτο, στην αναγνώριση του μορφικού μοντέλου, τμήμα της χρονικής ιστορίας των επιταχύνσεων, οπότε η αρχική ταχύτητα και μετατόπιση ήταν διάφορες του μηδενός. Οι παράμετροι αυτές εισήχθησαν στο σύστημα, ως αρχικές συνθήκες για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης (2.17). Η δυνατότητα χρήσης τμήματος μόνον της χρονικής ιστορίας κρίθηκε απαραίτητη τόσο για να χρησιμοποιείται το τμήμα στο οποίο παρατηρούνται μεγάλες τιμές επιταχύνσεων (strong motion) και το οποίο περιέχει περισσότερες πληροφορίες για το σύστημα, όσο και για τη διευκόλυνση της εκτέλεσης του προγράμματος που αναπτύχθηκε, με την επεξεργασία λιγότερων στοιχείων, δηλαδή διανυσμάτων επιτάχυνσης

μικρότερης διάστασης. Οι αρχικές συνθήκες για την εξίσωση (2.17) είναι οι εξής:

$$\eta_{ir}(0) = \gamma_{ir}$$

$$\dot{\eta}_{ir}(0) = \delta_{ir}$$

Επομένως οι παράμετροι $\underline{\theta}$ του μορφικού μοντέλου αποτελούνται από τα στοιχεία R_{ij} , ($i=1,2,\dots,N_R, j=1,2,\dots,N_S$) του πίνακα R των ψευδοστατικών αποκρίσεων, τα a_r , b_r , τα στοιχεία $P_{ij}^{(r)}$ του πίνακα $P^{(r)}$, ($r=1,2,\dots,N_m$) των συνολικών συντελεστών συνεισφοράς (effective participation factors) και των αρχικών συνθηκών γ_{ir} και δ_{ir} .

2.3 Εκτίμηση Βέλτιστων Τιμών των Παραμέτρων του Μορφικού Μοντέλου

Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων $\underline{\theta}$ προκύπτουν από την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης σφάλματος, δηλαδή της διαφοράς μεταξύ των μετρούμενων επιταχύνσεων και των επιταχύνσεων οι οποίες προκύπτουν από το μορφικό μοντέλο.

$$J(\underline{\theta}) = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{n=0}^{N_T} [\hat{y}_i(n\Delta t) - \ddot{y}_i(n\Delta t; \underline{\theta})]^2 \quad (2.20)$$

όπου:

\hat{y}_i = η μετρούμενη επιτάχυνση στον i μετρούμενο βαθμό ελευθερίας.

\ddot{y}_i = η επιτάχυνση στον i μετρούμενο βαθμό ελευθερίας η οποία προβλέπεται από το μορφικό μοντέλο

Δt = ο χρόνος δειγματοληψίας των ψηφιοποιημένων γραφημάτων επιτάχυνσης.

n = ο συνολικός αριθμός μετρήσεων (ανά χρονικό διάστημα Δt)

$\underline{\theta} = \{R_{ij}, a_r, b_r, P_{ij}^{(r)}, \gamma_{ir}, \delta_{ir} : r=1,2,\dots,N_m, i=1,2,\dots,N_R, j=1,2,\dots,N_S\}$

και V είναι ένας συντελεστής κανονικοποίησης που δίνεται από τη σχέση:

$$V = \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{n=0}^{N_T} \hat{y}_i^2(n\Delta t) \quad (2.21)$$

Επομένως το $J(\underline{\theta})$ μπορεί να ερμηνευτεί ως ο λόγος των μέσων τετραγώνων του σφάλματος των επιταχύνσεων του μοντέλου προς το μέσο τετράγωνο των μετρούμενων επιταχύνσεων.

Η ελαχιστοποίηση του $J(\underline{\theta})$ συναρτήσεως των παραμέτρων $\underline{\theta}$ του μοντέλου εφαρμόζεται στη μέθοδο χρησιμοποιώντας έναν επαναληπτικό αλγόριθμο, που είναι μία παραλλαγή του αλγόριθμου της μεθόδου που αναπτύχθηκε από τον Beck (Werner et al., 1987). Ο αλγόριθμος αυτός αποτελείται από μία σειρά σαρώσεων του μοντέλου, κατά τη διάρκεια των οποίων, η αρχική εκτίμηση και αναθεώρηση των στοιχείων του πίνακα R γίνεται ελαχιστοποιώντας το $J(\underline{\theta})$ συναρτήσεως μόνο αυτών των στοιχείων. Στη συνέχεια οι εκτιμήσεις για τις παραμέτρους κάθε μορφής $(a_r, b_r, P^{(r)}, \gamma_{ir}, \delta_{ir})$ αναθεωρούνται πραγματοποιώντας μία σειρά ελαχιστοποιήσεων του $J(\underline{\theta})$ για κάθε μία μορφή ξεχωριστά. Η ελαχιστοποίηση αυτή για κάθε μορφή ξεχωριστά ανταποκρίνεται στην προσαρμογή των ελαχίστων τετραγώνων των μετρούμενων αποκρίσεων στις οποίες η συμμετοχή της ψευδοστατικής απόκρισης και των άλλων μορφών παραμένουν σταθερές. Η συμμετοχή αυτή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις νέες εκτιμήσεις στις τιμές των παραμέτρων που υπολογίστηκαν από τις μορφές που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί για τη σάρωση, και από τις προηγούμενες εκτιμήσεις των παραμέτρων για τις μορφές που δεν έχουν ακόμη χρησιμοποιηθεί. Μία απλή σάρωση έχει ολοκληρωθεί όταν η ψευδοστατική απόκριση και όλες οι συγκεκριμένες μορφές έχουν χρησιμοποιηθεί κατ' αυτό τον τρόπο. Πετυχημένες σαρώσεις των μορφών γίνονται μέχρι το $J(\underline{\theta})$ να πάρει τιμή μικρότερη από κάποια επιθυμητή τιμή που έχει δηλωθεί από το χρήστη, ή όταν έχει πραγματοποιηθεί αριθμός σαρώσεων μεγαλύτερος από κάποιο επιθυμητό αριθμό που έχει δηλωθεί στην αρχή, ή το υπολογιστικό σφάλμα στην εκτίμηση των παραμέτρων $\underline{\theta}$ να είναι μικρότερο μιας επιθυμητής τιμής.

Συνήθως στη διαδικασία ελαχιστοποίησης χρησιμοποιούνται η πρώτη ή οι δύο πρώτες μορφές που διεγείρονται περισσότερο και που επιλέγονται από το φάσμα συχνοτήτων που προέρχεται από μετασχηματισμό Fourier των μετρήσεων. Στη συνέχεια προστίθενται και άλλες μορφές, μία κάθε φορά, επιλέγοντας κατάλληλες αρχικές εκτιμήσεις για τη συχνότητα και το

συντελεστή απόσβεσης. Επιτυχημένη βελτιστοποίηση γίνεται μέχρι να συμπεριληφθούν όλες οι μορφές που επηρεάζουν αισθητά την απόκριση. Έτσι οι μορφές προστίθενται με τέτοιο τρόπο που είναι ευκολότερο κάποιος να παρατηρήσει πότε μία μορφή έχει ή δεν έχει επίδραση στην προσαρμογή της μετρούμενης απόκρισης.

Κατά την ελαχιστοποίηση του $J(\underline{\theta})$ για κάθε μορφή, οι συνολικοί συντελεστές συνεισφοράς $p_{ij}^{(r)}$, $i=1,2,\dots,N_R, j=1,2,\dots,N_S, r=1,2,\dots,N_m$, χρησιμοποιούνται ως ανεξάρτητοι. Αυτό δεν είναι απολύτως ορθό, αφού, όπως παρατηρείται στη σχέση (2.18), υπάρχει προφανής εξάρτηση. Ομοίως, για την επιβολή των βοηθητικών συνθηκών θεωρείται πλήρης ο ψευδοστατικός πίνακας, από τον οποίο όμως μόνο οι υποπίνακες που ανταποκρίνονται στους μετρούμενους βαθμούς ελευθερίας μπορούν να εκτιμηθούν από τα δεδομένα των μετρήσεων. Έτσι λοιπόν, το μοντέλο που χρησιμοποιείται στην διαδικασία αναγνώρισης είναι γενικότερο από το κλασσικό μορφικό μοντέλο που περιγράφεται παραπάνω. Ωστόσο, αν οι υποθέσεις που εμπεριέχονται στο κλασσικό μορφικό μοντέλο είναι αρκετά ακριβείς, τότε οι βοηθητικές συνθήκες πρέπει να ικανοποιούνται αυτομάτως με την εκτίμηση των $p_{ij}^{(r)}$.

Το λογισμικό μορφικής αναγνώρισης αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab. Η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $J(\underline{\theta})$ επιτεύχθηκε με τη χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης της Matlab. Κατά τη διαδικασία ελαχιστοποίησης της συνάρτησης σφάλματος κρίθηκε απαραίτητος ο αναλυτικός υπολογισμός των μερικών παραγώγων της συνάρτησης $J(\underline{\theta})$ ως προς όλες τις παραμέτρους $\underline{\theta}$. Ο αναλυτικός υπολογισμός των παραγώγων της $J(\underline{\theta})$ συνεισέφερε στην αξιοπιστία και σύγκλιση του αλγορίθμου, σε σύγκριση με τον αριθμητικό υπολογισμό τους, που προσφερόταν από την υπορουτίνα της Matlab. Επίσης με τον αναλυτικό υπολογισμό των παραγώγων δόθηκε η δυνατότητα αποκοπής τμημάτων της χρονικής ιστορίας διέγερσης και απόκρισης, τόσο για να μειώνεται ο χρόνος που απαιτεί η εφαρμογή, όσο και για να είναι δυνατός ο προσδιορισμός αρχικών συνθηκών διάφορων του μηδενός, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Ο αναλυτικός υπολογισμός των παραγώγων της $J(\underline{\theta})$ παρουσιάζεται στο Παράρτημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η διαδικασία που περιγράφηκε προηγούμενα, εφαρμόστηκε αρχικά για την πιστοποίηση του μοντέλου με προσομοιωμένα δεδομένα:

1) από ένα πρότυπο (Benchmark) πρόβλημα μίας κτιριακής κατασκευής

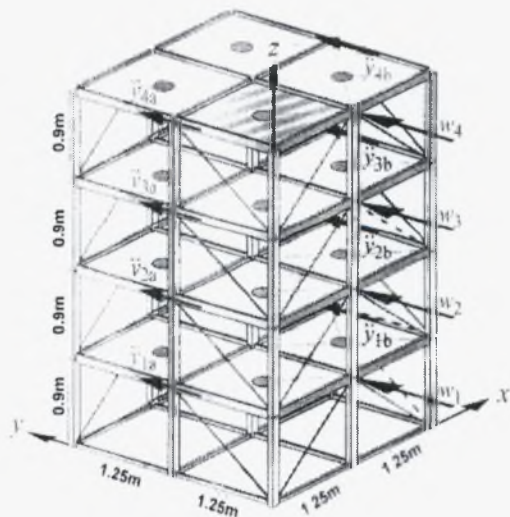
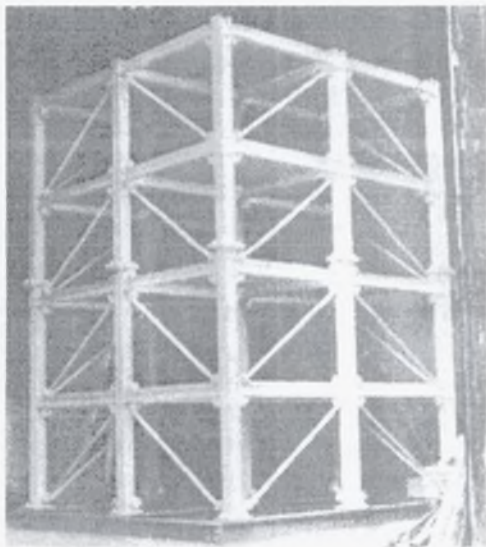
2) από την καλωδιωτή γέφυρα της Χαλκίδας

και στη συνέχεια με πραγματικές μετρήσεις

3) από τη γέφυρα της Χαλκίδας, που διεγείρεται από ασθενή σεισμική δόνηση

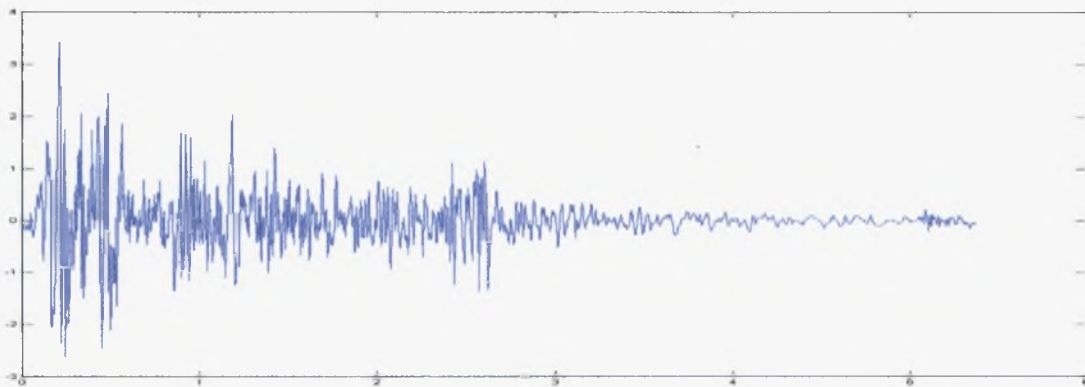
3.1 Πρότυπη Κατασκευή (Benchmark Problem)

Πρόκειται για μια τετραώροφη κατασκευή, η οποία θεωρείται ότι παραλαμβάνει διατμητικές τάσεις ως μοντέλο δώδεκα βαθμών ελευθερίας, με τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά όροφο (Johnson et al., 2000). Αποτελείται από σαράντα πέντε κόμβους από τους οποίους οι εννέα στις στηρίξεις, όπως εμφανίζεται και στο Σχήμα 3.1.

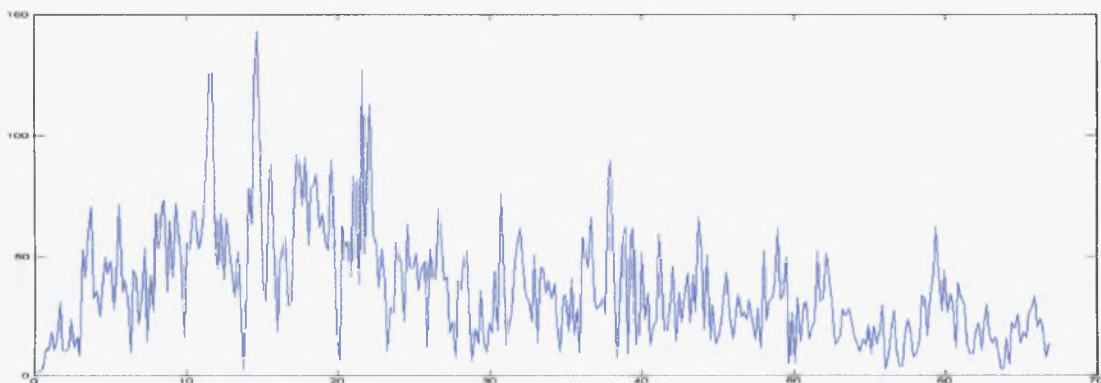


Σχήμα 3.1 Η υπό κλίμακα μεταλλική κατασκευή και το διάγραμμα του αναλυτικού μοντέλου

Τα προσομοιωμένα δεδομένα προέκυψαν χρησιμοποιώντας πρόγραμμα σε Matlab, επιβάλλοντας στις στηρίξεις της κατασκευής γνωστή επιτάχυνση El Centro, ίδια και στις δύο οριζόντιες κατευθύνσεις x και y και μηδενική διέγερση στην κατεύθυνση z (Χριστοδούλου, 2001), η χρονική ιστορία της οποίας καθώς και ο μετασχηματισμός Fourier εμφανίζονται στο Σχήμα 3.2 και Σχήμα 3.3 αντίστοιχα. Στον Πίνακα 3.1 εμφανίζονται οι φυσικές ιδιοσυχνότητες του μοντέλου.



Σχήμα 3.2 Χρονική ιστορία επιτάχυνσης El Centro



Σχήμα 3.3 Μετασχηματισμός Fourier επιτάχυνσης El Centro

Μοντέλο 1	Μοντέλο 2
9.41 γ	6.24 γ
11.79 χ	9.91 χ
16.53 θ	11.84 θ
25.60 γ	21.58 γ
32.07 χ	28.99 χ
38.85 γ	37.56 γ
45.17 θ	38.75 θ
48.37 γ	47.57 χ
48.68 χ	48.19 γ
60.60 χ	60.45 χ
68.64 θ	66.46 θ
85.51 θ	85.20 θ

Πίνακας 3.1 Ιδιοσυχνότητες [Hz] της κατασκευής

Το μοντέλο 1, αναφέρεται στο μοντέλο της κατασκευής, όπως αυτό περιγράφηκε παραπάνω, ενώ το μοντέλο 2 αντιστοιχεί στην παραπάνω κατασκευή με μοντελοποιημένη βλάβη στον πρώτο όροφο, όπου έχουν αφαιρεθεί όλοι οι διαγώνιοι σύνδεσμοί του (*braces*).

Μοντέλο 1

Το πρόγραμμα εφαρμόστηκε αρχικά θεωρώντας τη διέγερση στις κατευθύνσεις x και y και τις αντίστοιχες αποκρίσεις σε όλους τους ορόφους της κατασκευής. Η εκτίμηση των παραμέτρων έγινε ελαχιστοποιώντας τη συνάρτηση $J(\theta)$ (Σχέση (2.20)), αρχικά για την πρώτη ιδιομορφή, στη συνέχεια για την πρώτη και τη δεύτερη και ούτω καθεξής. Τα αποτελέσματα, όσο αφορά στις ιδιοσυχνότητες και τα μέτρα απόσβεσης, συνοψίζονται στον Πίνακα 3.2. Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται οι βέλτιστες και οι πραγματικές τιμές των συνολικών συντελεστών συνεισφοράς. Οι στήλες του πίνακα αντιστοιχούν σε διεγέρσεις (x και y) και οι γραμμές σε αποκρίσεις (x και y εναλλάξ). Έτσι στις ιδιομορφές που διεγείρονται κατά τη x διεύθυνση εμφανίζονται μηδενικά στις κατά y αποκρίσεις (γραμμές Πίνακα 3.3) καθώς και στην κατά y διέγερση στις πραγματικές τιμές (στήλη Πίνακα 3.3).

Η επιλογή των αρχικών τιμών των παραμέτρων του συστήματος που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό της επιτάχυνσης του μοντέλου είναι πολύ σημαντική, δεδομένου ότι λανθασμένη επιλογή είναι δυνατόν να οδηγήσει στον εντοπισμό τοπικών ελαχίστων κατά την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $J(\theta)$ και άρα σε μη σύγκλιση στις πραγματικές τιμές. Καλή αρχική εκτίμηση των τιμών των ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος είναι δυνατόν να προκύψει από τη συνάρτηση μετάδοσης, ειδικά όταν πρόκειται για σύστημα λίγων βαθμών ελευθερίας, οπότε είναι εφικτός ο συσχετισμός του μετασχηματισμού Fourier της διέγερσης και των αποκρίσεων για τον εντοπισμό των τοπικών μεγίστων της συνάρτησης μεταφοράς.

Αρχικές Εκτιμήσεις		Βέλτιστες Τιμές		Πραγματικές Τιμές		$J(\theta)$
ν (Hz)	ζ (απόσβ.)	ν (Hz)	ζ (απόσβ.)	ν (Hz)	ζ (απόσβ.)	
9	4%	9.41	5.002%	9.41	5%	78.144%
15	4%	11.79	4.953%	11.79	5%	5.413%
20	4%	25.60	5.074%	25.60	5%	1.361%
30	4%	32.07	4.990%	32.07	5%	1.188%
40	4%	38.87	6.758%	38.85	5%	0.550%
50	4%	48.54	7.421%	48.68	5%	0.058%

Πίνακας 3.2 Σύγκριση βέλτιστων και πραγματικών τιμών των παραμέτρων

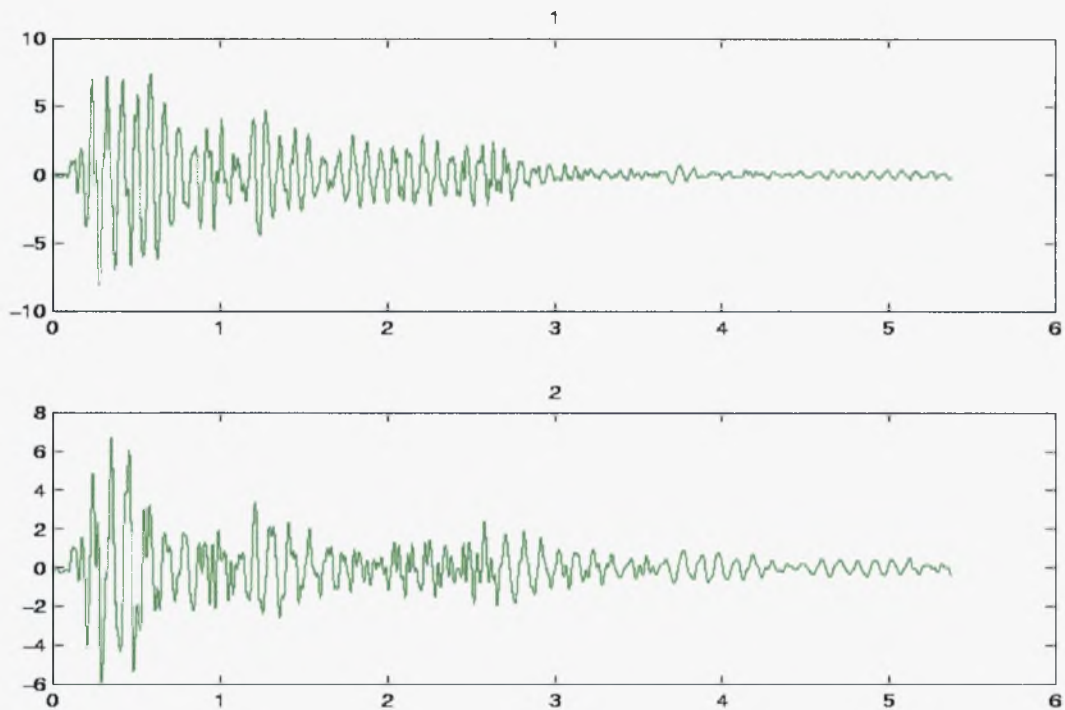
Παρατηρείται άριστη σύγκλιση ειδικά στις πρώτες ιδιομορφές, γεγονός που εμφανίζεται και στο Σχήμα 3.4 και Σχήμα 3.5, όπου παρουσιάζεται άριστη σύμπτωση των επιταχύνσεων που προβλέφθηκαν από το βέλτιστο μορφικό μοντέλο με τις “μετρούμενες” (προσομοιωμένες) επιταχύνσεις. Επίσης παρακολουθώντας την τιμή της συνάρτησης $J(\theta)$, προκύπτει ότι κατά τον εντοπισμό κάθε επόμενης ιδιομορφής που διεγείρεται, η τιμή της $J(\theta)$ μειώνεται κατά ποσοστό ενδεικτικό της συνεισφοράς της στους μετρούμενους βαθμούς ελευθερίας. Παρατηρείται, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι η συνεισφορά των χαμηλών ιδιοσυχνοτήτων είναι μεγαλύτερη, αφού το σφάλμα μειώνεται περισσότερο σε σύγκριση με τις υψηλές ιδιοσυχνότητες. Πράγματι από 78% μειώνεται σε 5.4% με τη δεύτερη ιδιομορφή και στη συνέχεια σε 1.3% με την τρίτη, ενώ ακολούθως η μείωση δεν είναι τόσο μεγάλη. Το τελικό σφάλμα, η τελική τιμή δηλαδή της συνάρτησης $J(\theta)$ στην εφαρμογή αυτή ήταν 0.058%, συμπεριλαμβάνοντας όλες τις παραμέτρους, δηλαδή, εκτός από τις συχνότητες και τα μέτρα απόσβεσης, τους συνολικούς συντελεστές συνεισφοράς (effective participation factors) και τον ψευδοστατικό πίνακα R .

1 ^η ιδιομορφή (9.41 Hz)			
Βέλτιστες Τιμές		Πραγματικές Τιμές	
0.001	0.001	0.0000	0.0000
0.245	0.245	0.0000	0.4844
0.002	0.002	0.0000	0.0000
0.445	0.445	0.0000	0.8827
0.003	0.003	0.0000	0.0000
0.583	0.583	0.0000	1.1605
0.004	0.004	0.0000	0.0000
0.642	0.642	0.0000	1.2798
2 ^η ιδιομορφή (11.79 Hz)			
Βέλτιστες Τιμές		Πραγματικές Τιμές	
0.243	0.243	0.4844	0.0000
-0.001	-0.001	0.0000	0.0000
0.44	0.44	0.8827	0.0000
-0.002	-0.002	0.0000	0.0000
0.577	0.577	1.1605	0.0000
-0.001	-0.001	0.0000	0.0000
0.636	0.636	1.2798	0.0000
0	0	0.0000	0.0000
4 ^η ιδιομορφή (25.60 Hz)			
Βέλτιστες Τιμές		Πραγματικές Τιμές	
0.061	0.061	0.0000	0.0000
0.218	0.218	0.0000	0.3894
0.036	0.036	0.0000	0.0000
0.138	0.138	0.0000	0.2688
-0.019	-0.019	0.0000	0.0000
-0.07	-0.07	0.0000	-0.1223
-0.054	-0.054	0.0000	0.0000
-0.204	-0.204	0.0000	-0.3904

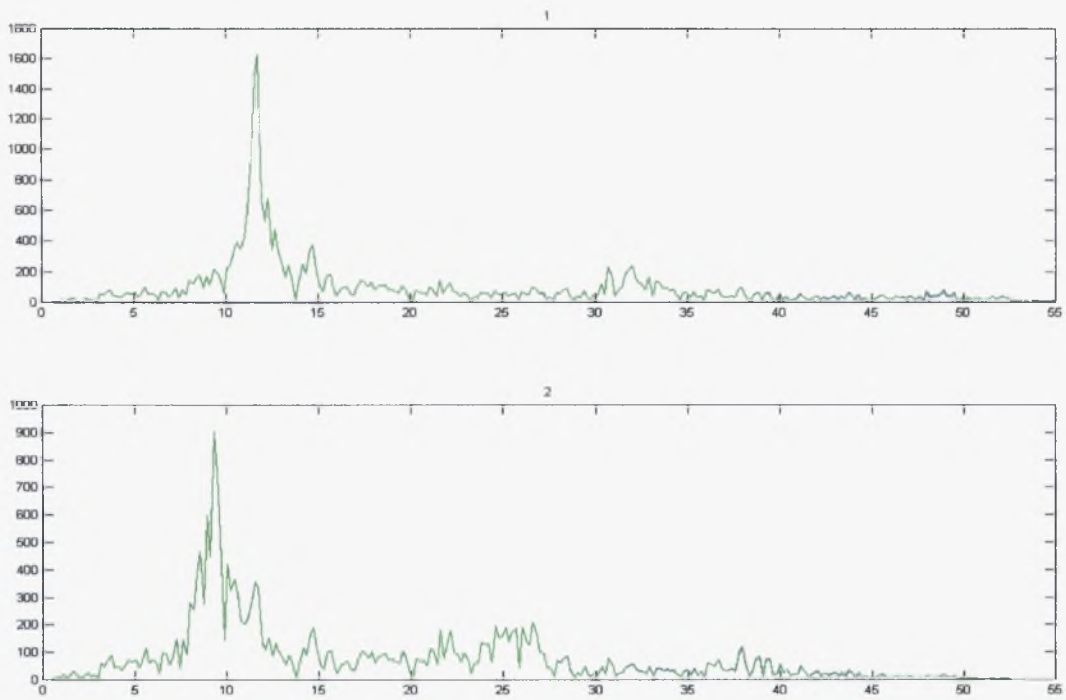
5 ^η ιδιομορφή (32.07 Hz)			
Βέλτιστες Τιμές		Πραγματικές Τιμές	
0.189	0.189	0.3894	0.0000
0.01	0.01	0.0000	0.0000
0.147	0.147	0.2688	0.0000
0.008	0.008	0.0000	0.0000
-0.06	-0.06	-0.1223	0.0000
-0.007	-0.007	0.0000	0.0000
-0.207	-0.207	-0.3904	0.0000
-0.007	-0.007	0.0000	0.0000
6 ^η ιδιομορφή (38.87 Hz)			
Βέλτιστες Τιμές		Πραγματικές Τιμές	
0.007	0.007	0.0000	0.0000
0.197	0.197	0.0000	0.3895
0.002	0.002	0.0000	0.0000
0.1345	0.1345	0.0000	0.2690
0.004	0.004	0.0000	0.0000
-0.0614	-0.0614	0.0000	-0.1229
-0.0012	-0.0012	0.0000	0.0000
-0.1954	-0.1954	0.0000	-0.3908
9 ^η ιδιομορφή (48.54 Hz)			
Βέλτιστες Τιμές		Πραγματικές Τιμές	
0.056	0.056	0.1156	0.0000
0.007	0.007	0.0000	0.0000
-0.058	-0.058	-0.1156	0.0000
-0.009	-0.009	0.0000	0.0000
-0.040	-0.040	-0.0803	0.0000
-0.0009	-0.0009	0.0000	0.0000
0.069	0.069	0.1402	0.0000
0.0004	0.0004	0.0000	0.0000

Πίνακας 3.3 Σύγκριση βέλτιστων και πραγματικών τιμών των συνολικών συντελεστών συνεισφοράς

Παρατηρείται ότι οι βέλτιστες τιμές των συνολικών συντελεστών συνεισφοράς που προέκυψαν από το μοντέλο κυμαίνονται περίπου στο ήμισυ των πραγματικών τιμών, με πολύ καλή σύγκλιση στην τιμή αυτή. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ύπαρξη δύο διεγέρσεων, μίας στη x και μίας στην y διεύθυνση, ίσων μεταξύ τους. Εφόσον, δηλαδή, οι συντελεστές αυτοί εκφράζουν τη συνεισφορά κάθε διέγερσης σε κάθε απόκριση και εφόσον το πρόγραμμα δεν αναγνωρίζει την κατεύθυνση κάθε διέγερσης, είναι αναμενόμενο στην απόκριση κάθε βαθμού ελευθερίας στη x διεύθυνση να συνεισφέρει κατά το ήμισυ η διέγερση στη x διεύθυνση και κατά το ήμισυ η διέγερση στην y διεύθυνση. Αντιστοίχως και για την y διεύθυνση.



Σχήμα 3.4 Χρονική ιστορία απόλυτων επιταχύνσεων προσομοιωμένων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).



Σχήμα 3.5 Μετασχηματισμός Fourier απόλυτων επιταχύνσεων προσομοιωμένων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

Μοντέλο 2

Εφαρμόστηκε η διέγερση του El Centro μόνο στην κατεύθυνση x , οπότε προέκυψαν οι αποκρίσεις στους τέσσερις βαθμούς ελευθερίας, έναν ανά όροφο, βάσει των οποίων, ελαχιστοποιώντας τη συνάρτηση $J(\theta)$, προέκυψαν οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4. Οι επιταχύνσεις που χρησιμοποιήθηκαν, προέκυψαν από πρόγραμμα σε Matlab, όπου θεωρήθηκε απουσία στηρίξεων στον πρώτο όροφο, που αποτελεί το σχέδιο βλάβης που εξετάστηκε. Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα της εφαρμογής. Στο Σχήμα 3.6 εμφανίζεται η σύγκλιση που επιτεύχθηκε μεταξύ της χρονικής ιστορίας της απόλυτης επιτάχυνσης που προβλέφθηκε από το μοντέλο και αυτής που προέκυψε από την προσομοίωση. Στο Σχήμα 3.7 εμφανίζεται αντιστοίχως η σύγκλιση μεταξύ των μετασχηματισμών Fourier των απόλυτων επιταχύνσεων.

Αρχικές Εκτιμήσεις		Βέλτιστες Τιμές		Πραγματικές Τιμές		$J(\theta)$
ν (Hz)	ζ (απόσβ.)	ν (Hz)	ζ (απόσβ.)	ν (Hz)	ζ (απόσβ.)	
10	5%	9.91	6.082%	9.91	5%	7.014%
30	5%	29.04	5.406%	28.99	5%	0.565%
50	5%	47.70	5.264%	47.57	5%	0.039%

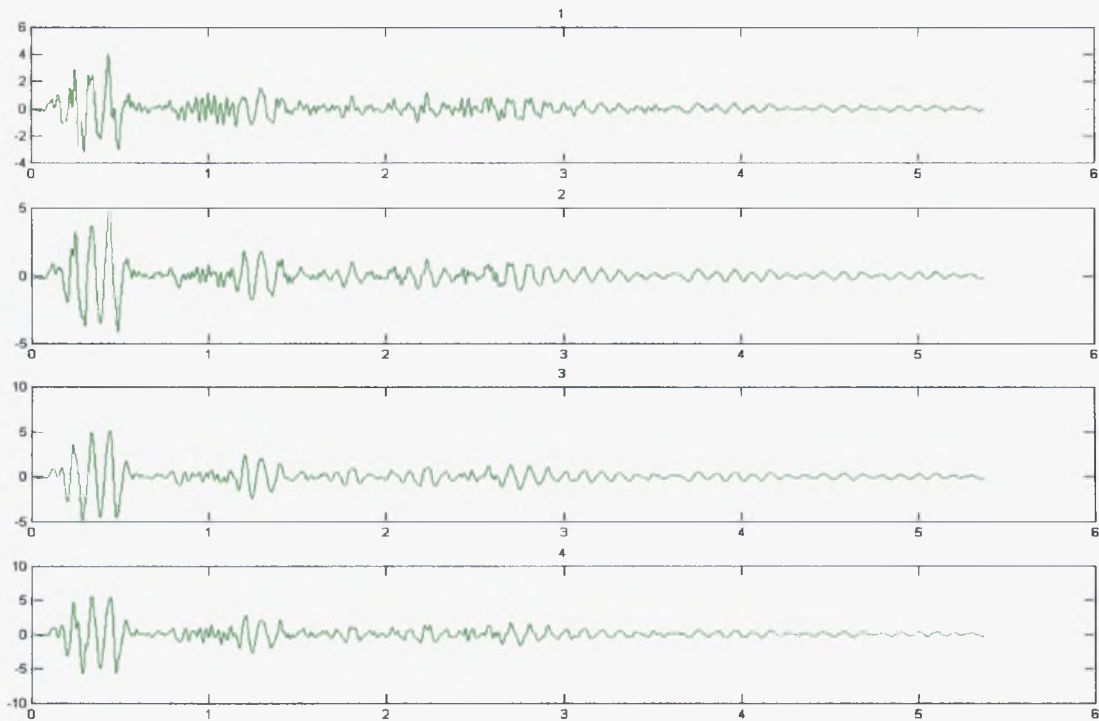
Πίνακας 3.4 Σύγκριση βέλτιστων και πραγματικών τιμών των παραμέτρων

Είναι εμφανές ότι επιτεύχθη και πάλι πολύ καλή σύγκλιση για την πρώτη ιδιομορφή και ικανοποιητική για τις επόμενες δύο, ενώ η τέταρτη ιδιομορφή δεν κατέστη δυνατόν να προσεγγιστεί, λόγω της πολύ ασθενούς συνεισφοράς της, όπως υποδεικνύουν και ο μετασχηματισμός Fourier της διέγερσης και των αποκρίσεων. Το τελικό σφάλμα που προέκυψε από τη διαδικασία ήταν 0.039%, στον υπολογισμό του οποίου συμπεριλήφθηκαν όλες οι παράμετροι του συστήματος και όχι μόνο οι συχνότητες και οι αποσβέσεις.

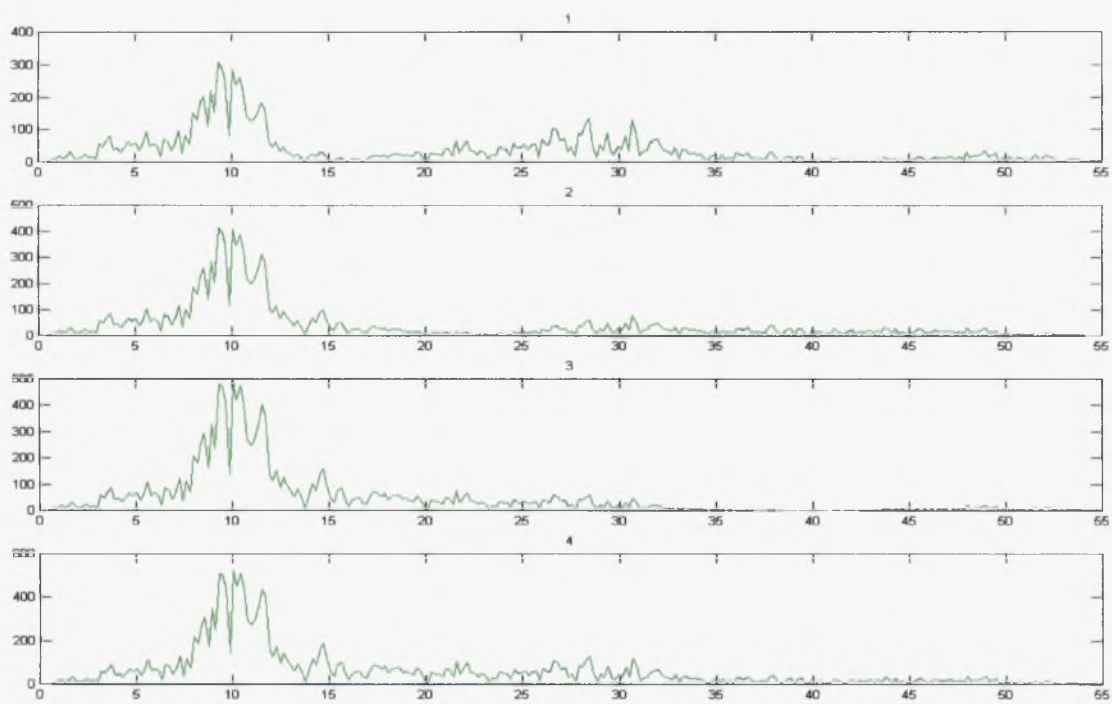
3 ^η ιδιομορφή (9.91 Hz)		5 ^η ιδιομορφή (29.04 Hz)	
Βέλτιστες Τιμές	Πραγματικές Τιμές	Βέλτιστες Τιμές	Πραγματικές Τιμές
0.66560	0.66679	0.27740	0.28005
0.94710	0.94840	0.13290	0.13437
1.13800	1.13850	-0.12130	-0.12186
1.22100	1.21874	-0.27560	-0.27783

8 ^η ιδιομορφή (47.70 Hz)	
Βέλτιστες Τιμές	Πραγματικές Τιμές
0.05039	0.05032
-0.06612	-0.06597
-0.03684	-0.03695
0.07308	0.07346

Πίνακας 3.5 Σύγκριση βέλτιστων και πραγματικών τιμών των συνολικών συντελεστών συνεισφοράς



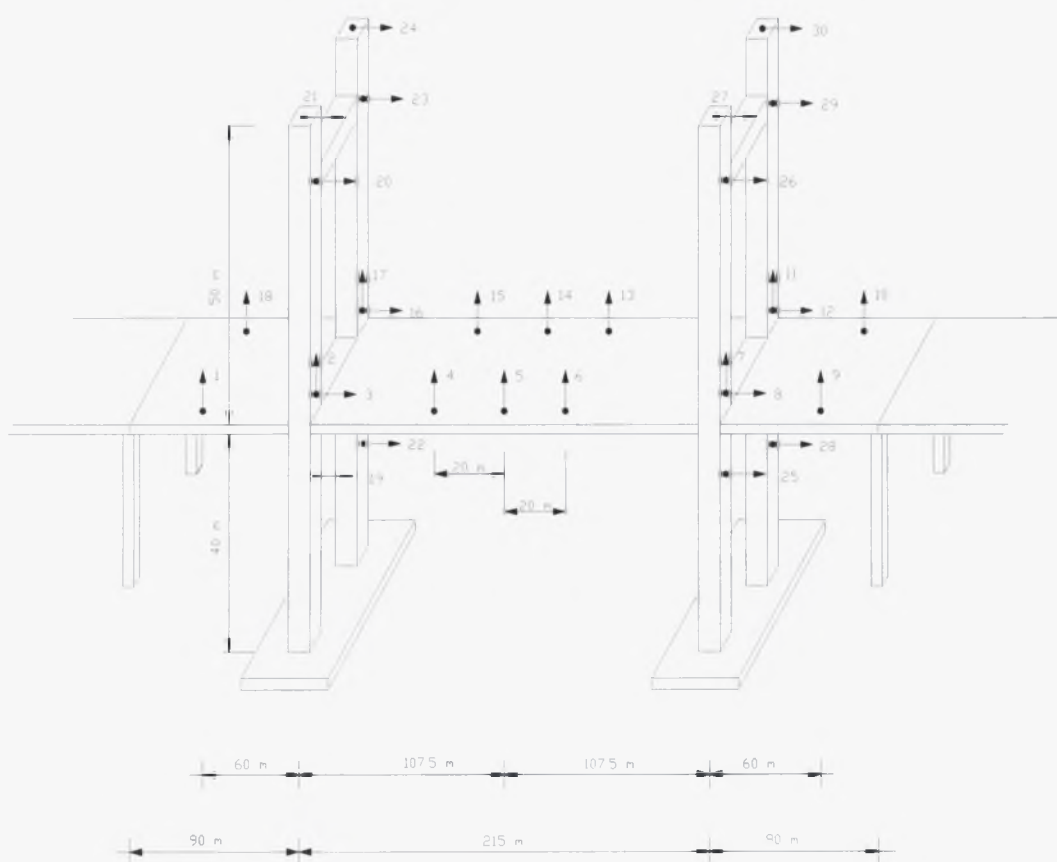
Σχήμα 3.6 Χρονική ιστορία απόλυτων επιταχύνσεων προσομοιωμένων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).



Σχήμα 3.7 Μετασχηματισμός Fourier απόλυτων επιταχύνσεων προσομοιωμένων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

3.2 Προσομοιωμένα Δεδομένα Γέφυρας

Εφόσον πιστοποιήθηκε σε πρώτο στάδιο η καλή λειτουργία του προγράμματος σε Matlab, με τις εφαρμογές στην πρότυπη κατασκευή, παρήχθησαν, με τη χρήση του προγράμματος SAP2000, προσομοιωμένα δεδομένα για το μοντέλο της γέφυρας της Χαλκίδας (Χριστοδούλου, 2001), ούτως ώστε να εφαρμοστεί και σε αυτά το πρόγραμμα αναγνώρισης μορφικού μοντέλου. Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται σχέδιο της γέφυρας και τα σημεία στα οποία υπολογίστηκαν οι αποκρίσεις. Για την εξαγωγή κατά το δυνατόν καλύτερων αποτελεσμάτων, έγιναν αρκετές εφαρμογές, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικό συνδυασμό μετρούμενων βαθμών ελευθερίας κάθε φορά. Τα δεδομένα των απόλυτων επιταχύνσεων της κατασκευής, προέκυψαν εφαρμόζοντας στη βάση του μοντέλου γνωστή επιτάχυνση E1Centro, ίδια με εκείνη που επιβλήθηκε στην πρότυπη κατασκευή. Στο μοντέλο θεωρήθηκε ότι τα μέτρα απόσβεσης για κάθε ιδιομορφή είναι 5%, ενώ οι ιδιοσυχνότητές σε Hz παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6.



Σχήμα 3.8 Γέφυρα Χαλκίδας και θέσεις στις οποίες υπολογίστηκαν αποκρίσεις.

Ιδιομορφή	Συχνότητα (Hz)	Ιδιομορφή	Συχνότητα (Hz)
1	0.387732	16	1.348501
2	0.408910	17	1.381858
3	0.469349	18	1.483542
4	0.584829	19	1.559999
5	0.688893	20	1.567585
6	0.753239	21	1.597896
7	0.830110	22	1.645705
8	0.863437	23	1.698857
9	0.951109	24	1.806954
10	0.999578	25	1.836876
11	1.006366	26	1.961933
12	1.090765	27	1.969572
13	1.205709	28	1.981394
14	1.286148	29	2.038588
15	1.293331	30	2.143530

Πίνακας 3.6 Ιδιοσυχνότητες μοντέλου γέφυρας.

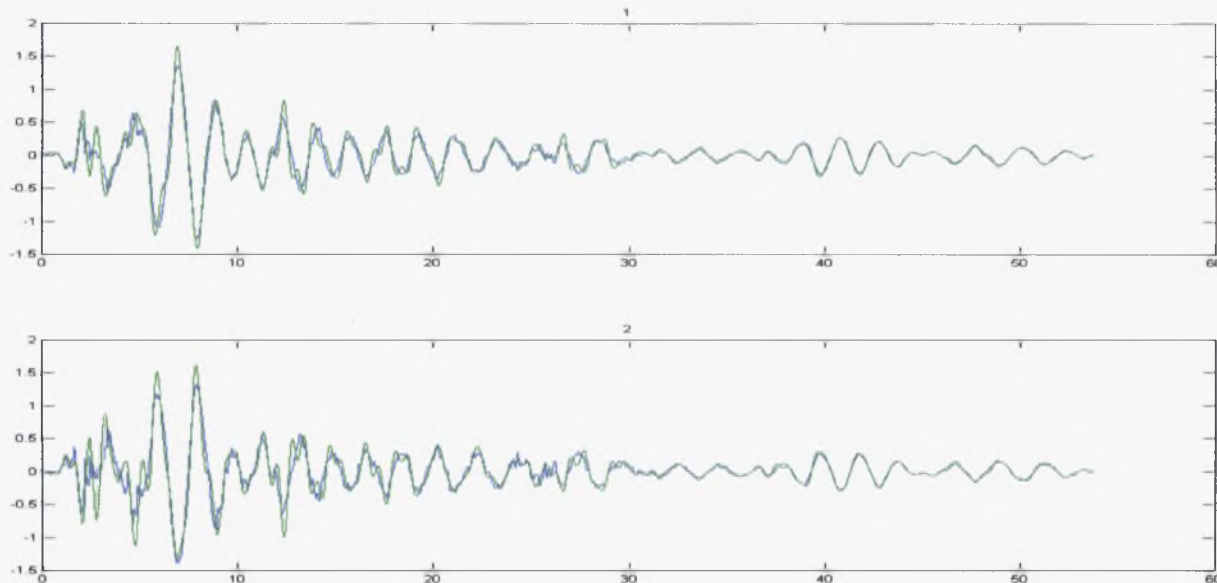
Περίπτωση 1^η: Δύο βαθμοί ελευθερίας (1, 4)

Η μέθοδος αναγνώρισης μορφικού μοντέλου εφαρμόστηκε για δύο αποκρίσεις, στους βαθμούς ελευθερίας 1 και 4. Στον Πίνακα 3.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, δηλαδή οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος. Στα Σχήματα 3.9 και 3.10 εμφανίζεται η σύγκλιση που επιτεύχθηκε μεταξύ της χρονικής ιστορίας της απόλυτης επιτάχυνσης του μοντέλου και της μετρούμενης (προσομοίωσης) και η σύγκλιση μεταξύ των μετασχηματισμών Fourier των απόλυτων επιταχύνσεων, αντιστοίχως.

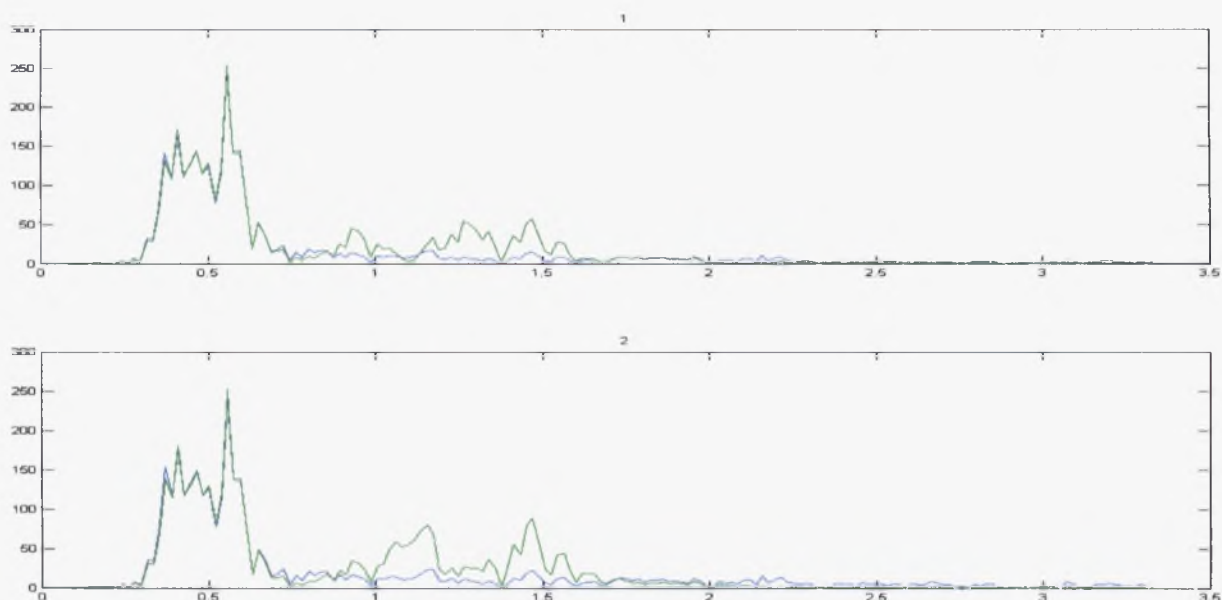
Αρχικές Τιμές		Τελικές Τιμές		Πραγματικές Τιμές	
Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης
0.3	4%	0.4094	5.789%	0.408910	5%
0.3	4%	0.5856	4.383%	0.584829	5%

Πίνακας 3.7 Σύγκριση βέλτιστων και πραγματικών τιμών των παραμέτρων.

Στην εφαρμογή αυτή, το συνολικό σφάλμα έφτασε στο 13.5%, γεγονός αναμενόμενο, εφόσον λαμβάνοντας υπόψη δύο μόνο βαθμούς ελευθερίας δεν θα ήταν δυνατόν να προσεγγιστούν περισσότερες ιδιομορφές. Αυτό εμφανίζεται και στο Σχήμα 3.10, όπου η σύγκλιση του μετασχηματισμού Fourier των αποκρίσεων παρουσιάζεται πολύ καλή για τις δύο χαμηλές συχνότητες, ενώ επιδέχεται βελτίωση στις μεγαλύτερες συχνότητες.



Σχήμα 3.9 Χρονική ιστορία απόλυτων επιταχύνσεων προσομοιωμένων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).



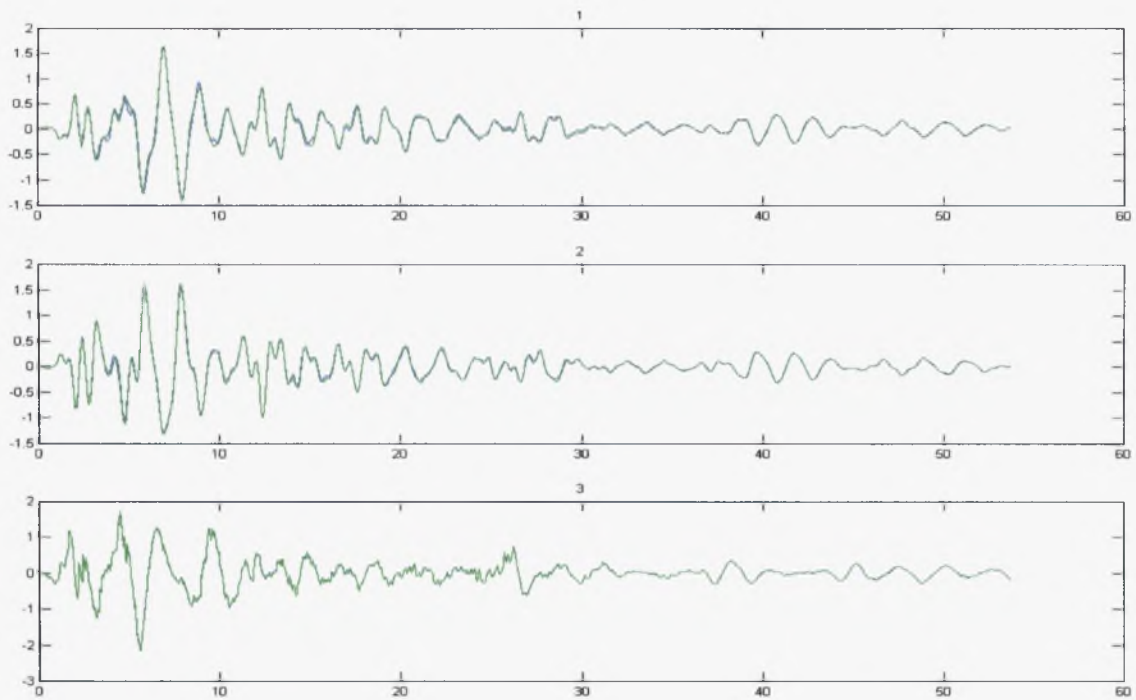
Σχήμα 3.10 Μετασχηματισμός Fourier απόλυτων επιταχύνσεων προσομοιωμένων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

Περίπτωση 2^η: Τρεις βαθμοί ελευθερίας (1, 4, 20)

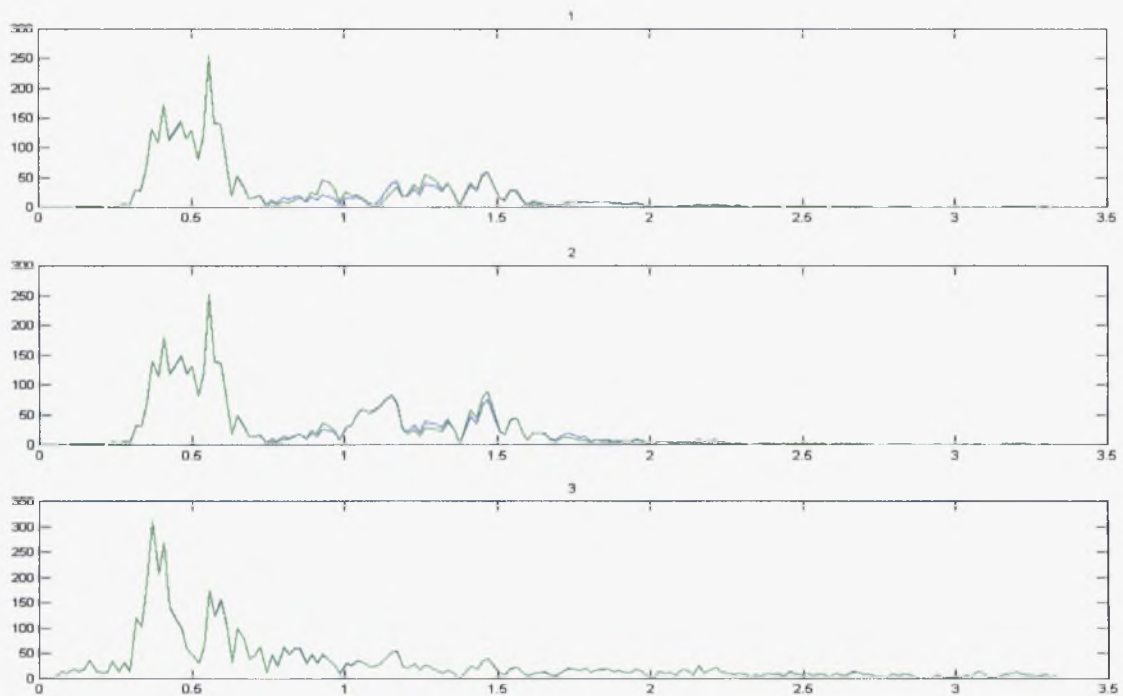
Κατά τα αναμενόμενα, στην εφαρμογή αυτή επετεύχθη ακόμη καλύτερη σύγκλιση και το σφάλμα έφτασε στο 0.734%, εντοπίζοντας τέσσερις ιδιομορφές, ενδεχομένως τις μόνες που διεγείρονται στη συγκεκριμένη εφαρμογή, κρίνοντας και από την ιδιαίτερως χαμηλή τιμή του σφάλματος.

Αρχικές Τιμές		Τελικές Τιμές		Πραγματικές Τιμές	
Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης
0.3	4%	0.4095	5.052%	0.408910	5%
0.5	4%	0.5857	4.841%	0.584829	5%
1.1	4%	1.094	4.326%	1.090765	5%
1.3	4%	1.309	4.971%	1.293331	5%

Πίνακας 3.8 Σύγκριση βέλτιστων και πραγματικών τιμών των παραμέτρων.



Σχήμα 3.11 Χρονική ιστορία απόλυτων επιταχύνσεων προσομοιωμένων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).



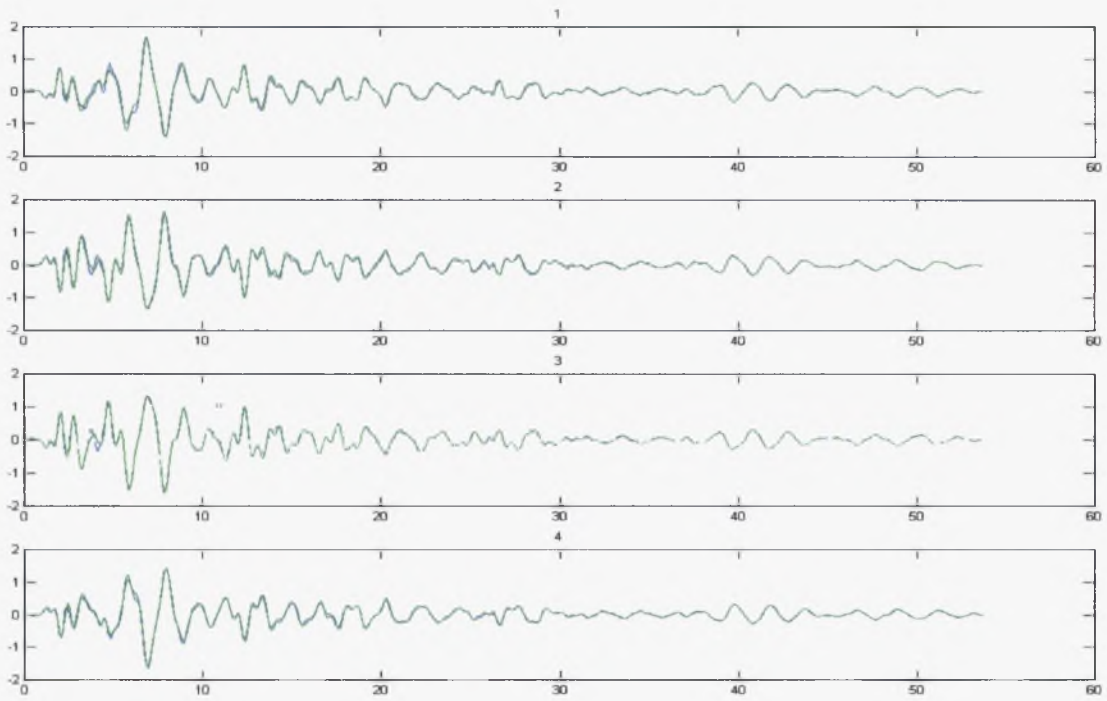
Σχήμα 3.12 Μετασχηματισμός Fourier απόλυτων επιταχύνσεων προσομοιωμένων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

Περίπτωση 3^η: Τέσσερις βαθμοί ελευθερίας (1, 4, 6, 9)

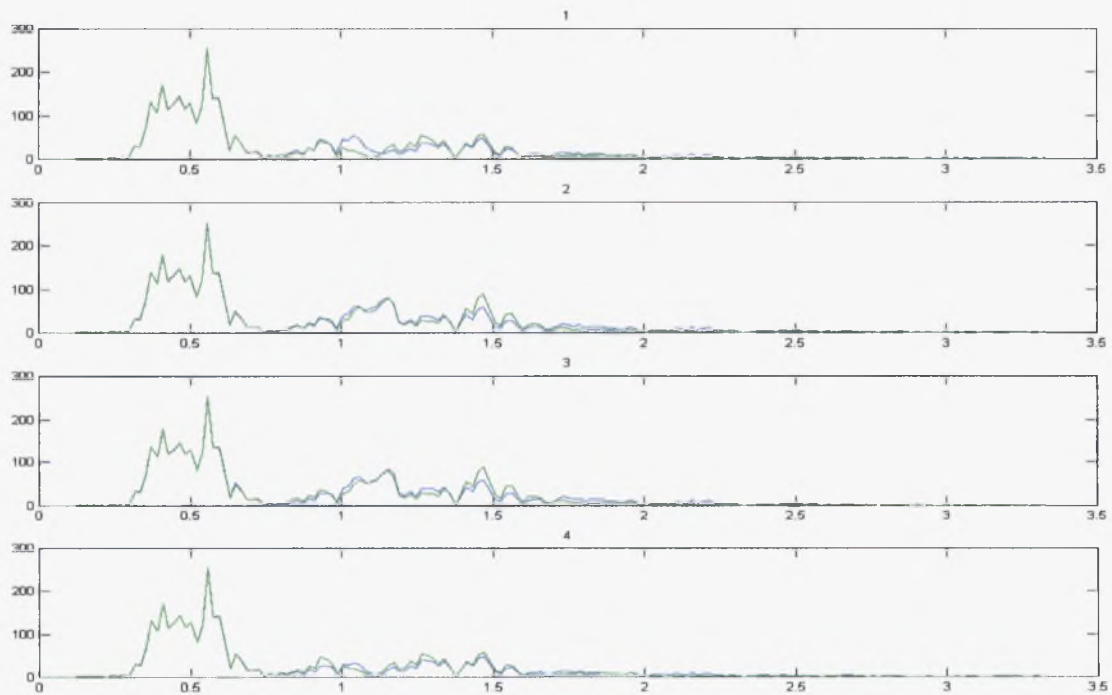
Λαμβάνοντας υπόψη έναν ακόμη βαθμό ελευθερίας, αντίθετα από τα αναμενόμενα, δεν εντοπίζεται επιπλέον ιδιομορφή. Μάλιστα δεν κατέστη δυνατόν να εντοπιστεί ούτε η τέταρτη ιδιομορφή, όπως στην προηγούμενη περίπτωση. Πιθανότατα αυτό οφείλεται στην επιλογή των σημείων 1, 4, 6 και 9, τα οποία βρίσκονται όλα στο κατάστρωμα της γέφυρας και δεν δίνουν αρκετή πληροφορία, όπως το σημείο 20 που βρίσκεται στον πυλώνα. Έτσι το σφάλμα αυξήθηκε στο 2.3%. Παρόλα αυτά, η σύγκλιση που επιτεύχθηκε μεταξύ της χρονικής ιστορίας της απόλυτης επιτάχυνσης που προέβλεψε το βέλτιστο μοντέλο και της μετρούμενης επιτάχυνσης, είναι πολύ καλή (Σχήμα 3.13).

Αρχικές Τιμές		Τελικές Τιμές		Πραγματικές Τιμές	
Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης
0.4	4%	0.4095	5.031%	0.408910	5%
0.5	4%	0.5861	5.100%	0.584829	5%
0.6	4%	1.303	4.085%	1.293331	5%

Πίνακας 3.9 Σύγκριση βέλτιστων και πραγματικών τιμών των παραμέτρων.



Σχήμα 3.13 Χρονική ιστορία απόλυτων επιταχύνσεων προσομοιωμένων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).



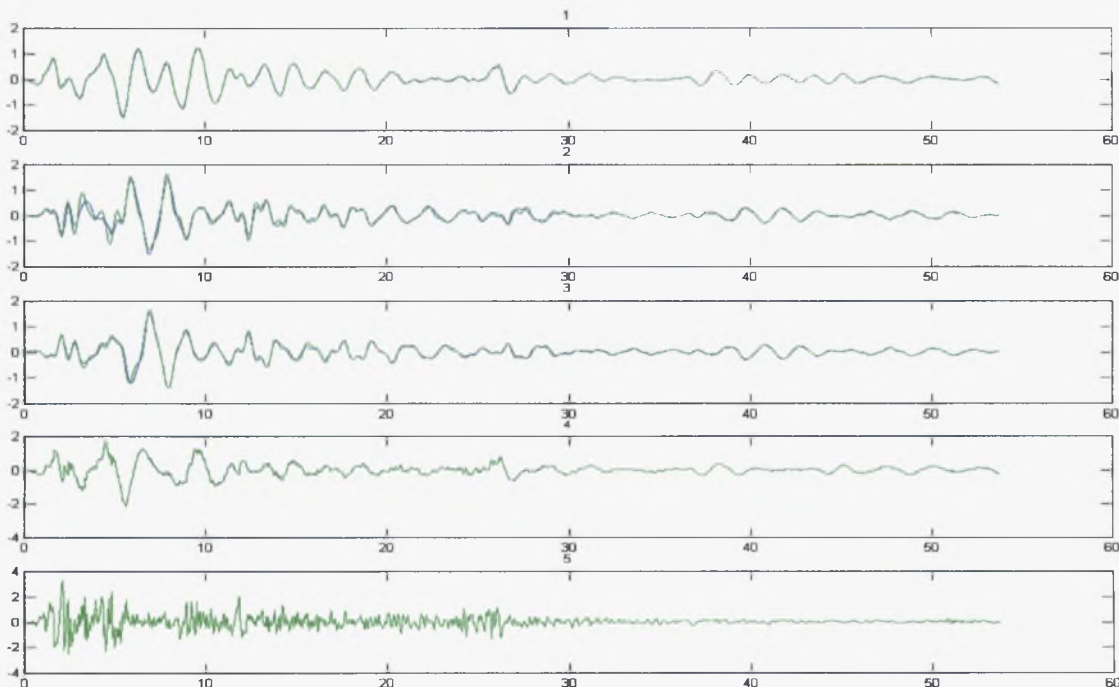
Σχήμα 3.14 Μετασχηματισμός Fourier απόλυτων επιταχύνσεων προσομοιωμένων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

Περίπτωση 4^η: Πέντε βαθμοί ελευθερίας (3, 4, 18, 20, 22)

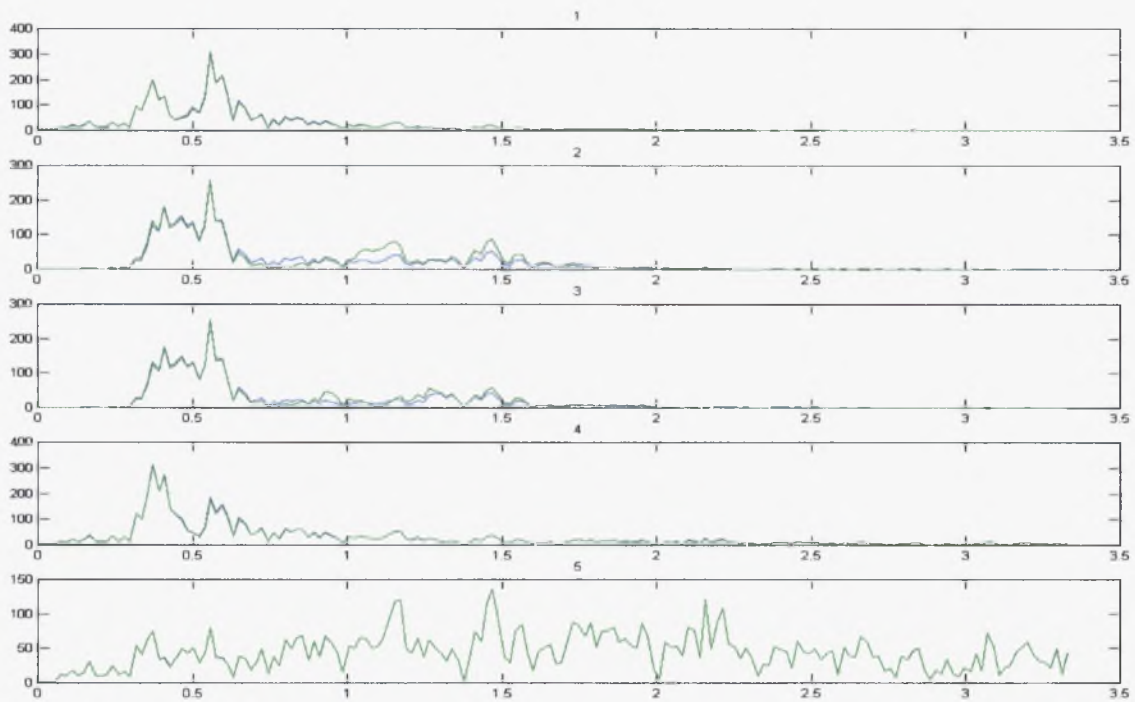
Με περισσότερο τυχαία και ασύμμετρη επιλογή βαθμών ελευθερίας, τόσο από το κατάστρωμα όσο και από τους πυλώνες, εντοπίστηκε και πάλι η τέταρτη ιδιομορφή και το σφάλμα περιορίστηκε σε 0.34%. Παρατηρείται επίσης εξαιρετική σύγκλιση στο Σχήμα 3.15 και 3.16, πέμπτο διάγραμμα, στο σημείο 22, που βρίσκεται χαμηλά στον πυλώνα.

Αρχικές Τιμές		Τελικές Τιμές		Πραγματικές Τιμές	
Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης
0.5	4%	0.4095	4.996%	0.408910	5%
0.3	4%	0.5858	4.914%	0.584829	5%
1.1	4%	1.087	4.816%	1.090765	5%
1.3	4%	1.301	6.122%	1.293331	5%

Πίνακας 3.10 Σύγκριση βέλτιστων και πραγματικών τιμών των παραμέτρων.



Σχήμα 3.15 Χρονική ιστορία απόλυτων επιταχύνσεων προσομοιωμένων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).



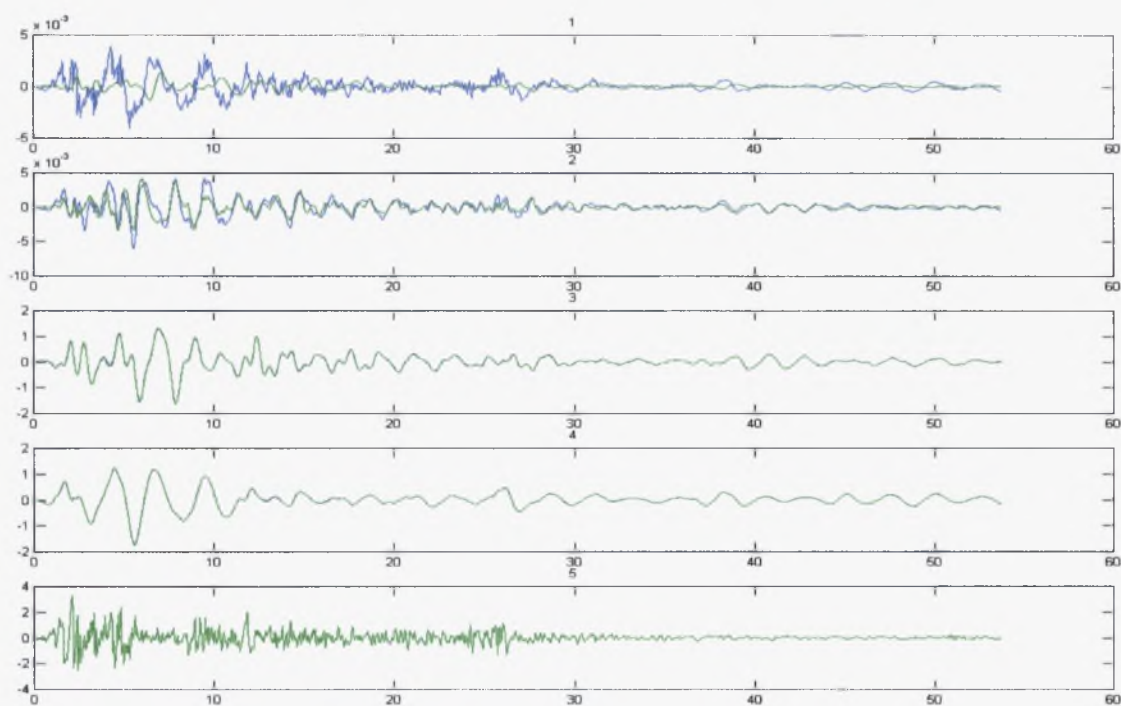
Σχήμα 3.16 Μετασχηματισμός Fourier απόλυτων επιταχύνσεων προσομοιωμένων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

Περίπτωση 5^η: Πέντε βαθμοί ελευθερίας (5, 16, 13, 24, 25)

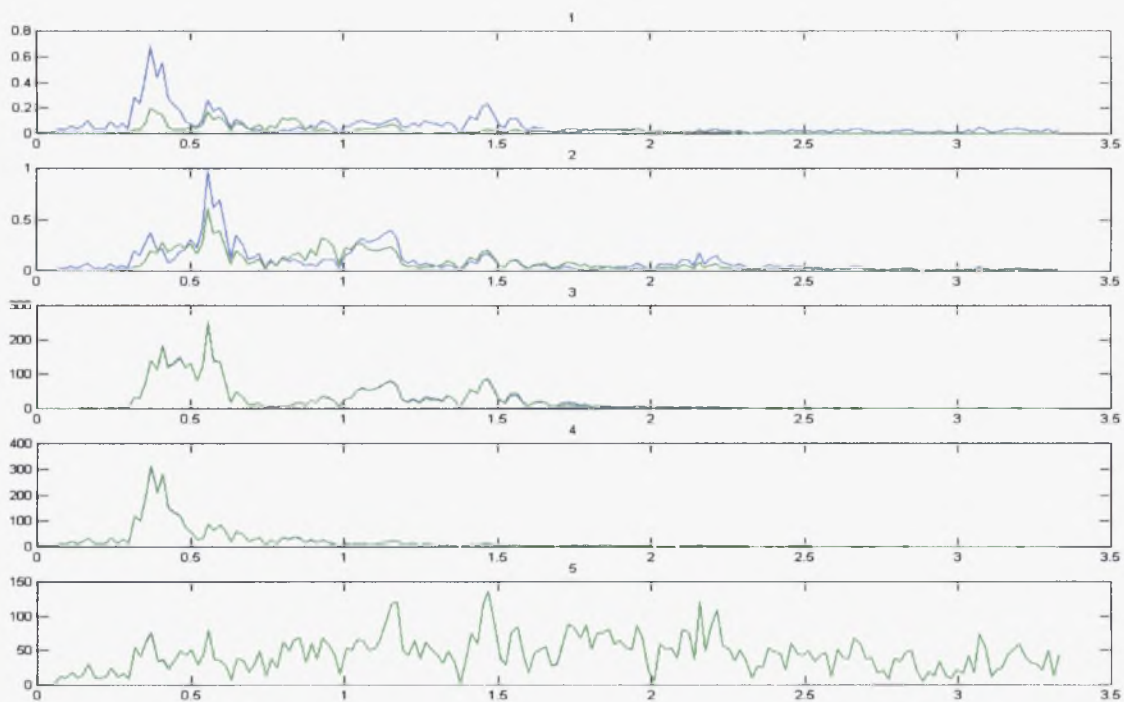
Στην περίπτωση αυτή, με την επιλογή βαθμών ελευθερίας τόσο από το κατάστρωμα, κοντά αλλά και μακρύτερα από τους πυλώνες και επί των πυλώνων, ψηλά αλλά και χαμηλά, επετεύχθη ακόμη καλύτερο αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα το σφάλμα περιορίστηκε ακόμη περισσότερο, στο 0.068% και εκτός από τις τέσσερις ιδιομορφές, που είχαν εντοπιστεί και σε προηγούμενες εφαρμογές, προέκυψε και μία πέμπτη και μάλιστα όλες οι ιδιοσυχνότητες εντοπίστηκαν πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές. Η φαινομενική απόκλιση στο Σχήμα 3.17 και 3.18, στο σημείο 5 και λιγότερο έντονη στο σημείο 16, οφείλεται στις εξαιρετικά χαμηλές τιμές της επιτάχυνσης σε σχέση με τις υψηλές τιμές στα σημεία μέτρησης 13, 24 και 25.

Αρχικές Τιμές		Τελικές Τιμές		Πραγματικές Τιμές	
Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης
0.3	4%	0.4095	5.020%	0.408910	5%
0.5	4%	0.5859	4.928%	0.584829	5%
0.9	4%	0.9524	3.524%	0.951109	5%
1.1	4%	1.092	4.734%	1.090765	5%
1.3	4%	1.336	8.089%	1.348501	5%

Πίνακας 3.11 Σύγκριση βέλτιστων και πραγματικών τιμών των παραμέτρων.



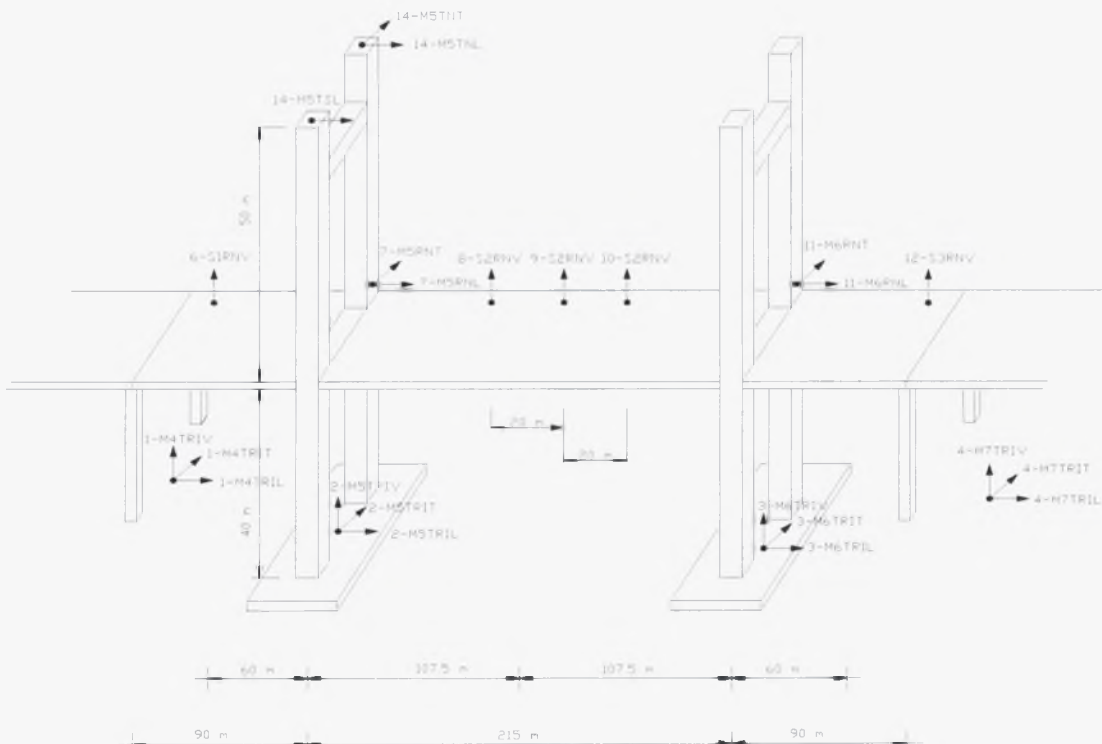
Σχήμα 3.17 Χρονική ιστορία απόλυτων επιταχύνσεων προσομοιωμένων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).



Σχήμα 3.18 Μετασχηματισμός Fourier απόλυτων επιταχύνσεων προσομοιωμένων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

3.3 Πραγματικές Μετρήσεις από τη Γέφυρα της Χαλκίδας

Εν συνεχεία, εφόσον η ικανοποιητική λειτουργία του αλγορίθμου πιστοποιήθηκε με τις προηγούμενες εφαρμογές, εφαρμόστηκε το πρόγραμμα αναγνώρισης μορφικού μοντέλου σε πραγματικές μετρήσεις από τη γέφυρα. Παρασχέθηκαν από το ΙΤΣΑΚ αρχεία με μετρήσεις επιταχύνσεων στα σημεία που εμφανίζονται στο Σχήμα 3.19. Πρόκειται για μετρήσεις από το δίκτυο επιταχυνσιογράφων που έχουν εγκατασταθεί στο κατάστρωμα, τους πυλώνες και τη βάση της γέφυρας (Lekidis et al., 1998, 1999). Παρακάτω παρατίθενται επτά χαρακτηριστικές εφαρμογές σε διάφορους συνδυασμούς βαθμών ελευθερίας διέγερσης και απόκρισης. Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι συνδυασμοί, αλλά με διαφορετικές αρχικές εκτιμήσεις, ή με τρόπο που να προέκυψαν επιπλέον ιδιομορφές. Παρατηρείται σύμπτωση των ιδιοσυχνοτήτων που προκύπτουν με τα τοπικά μέγιστα (peaks) στα οποία υπάρχει σύγκλιση μοντέλου και μετρήσεων στα γραφήματα του μετασχηματισμού Fourier. Για την αναγνώριση του μορφικού μοντέλου επιλέχθηκε τμήμα της χρονικής ιστορίας των διεγέρσεων και των αποκρίσεων στο οποίο παρατηρούνται μεγάλες τιμές επιταχύνσεων (strong motion). Το τμήμα αυτό επιλέχθηκε να είναι από 2.235 έως 12sec.



Σχήμα 3.19 Σκαρίφημα γέφυρας με σημειωμένες τις θέσεις των επιταχυνσιογράφων

Περίπτωση 1^η

Τέσσερις διεγέρσεις: 1-M4TRIL, 2-M5TRIL, 3-M6TRIL, 4-M7TRIL

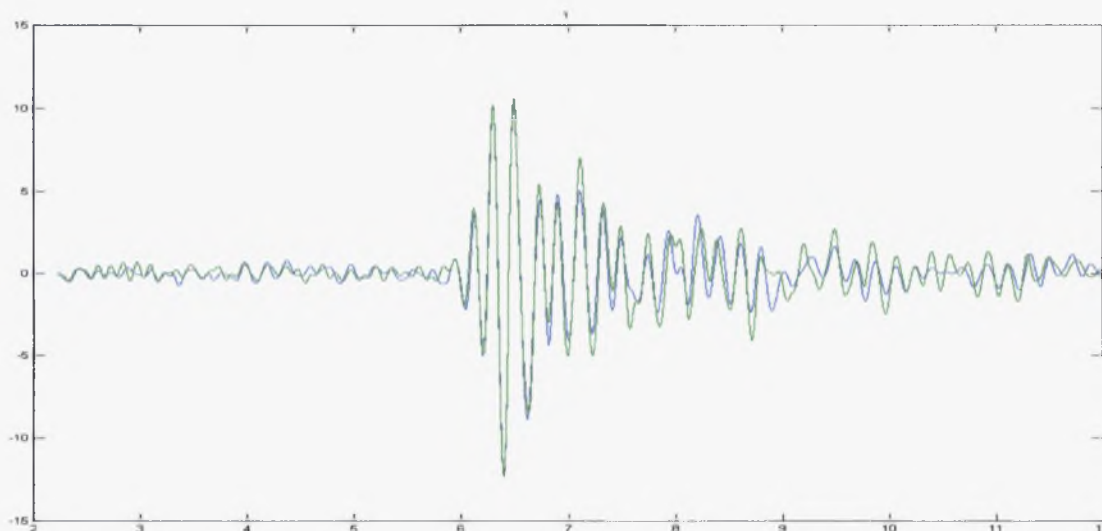
Αντιστοιχούν στην επιτάχυνση κάθε βάσης στην κατά μήκος διεύθυνση της γέφυρας.

Μία απόκριση: 7-M5RNL

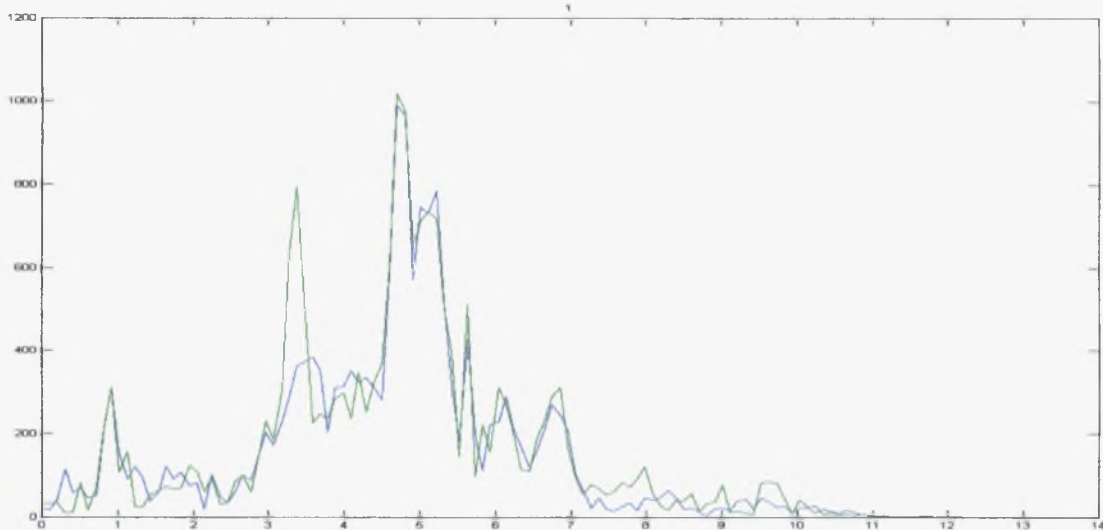
Αντιστοιχεί στην απόκριση της κολώνας 2 στην κατά μήκος διεύθυνση της γέφυρας.

Αρχικές Τιμές		Τελικές Τιμές		Τιμή Συνάρτησης
Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	$J(\theta)$
0.5	3%	5.1090	6.332%	643.67%
0.9	3%	0.8497	0.621%	231.30%
1.1	3%	5.6850	12.821%	78.80%
1.3	3%	2.0480	18.843%	12.787%

Πίνακας 3.12 Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.



Σχήμα 3.20 Χρονική ιστορία απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).



Σχήμα 3.21 Μετασχηματισμός Fourier απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

Περίπτωση 2^η

Δύο διεγέρσεις: 2-M5TRIL, 3-M6TRIL

Αντιστοιχούν στην επιτάχυνση των δύο κεντρικών βάσεων στην κατά μήκος διεύθυνση της γέφυρας.

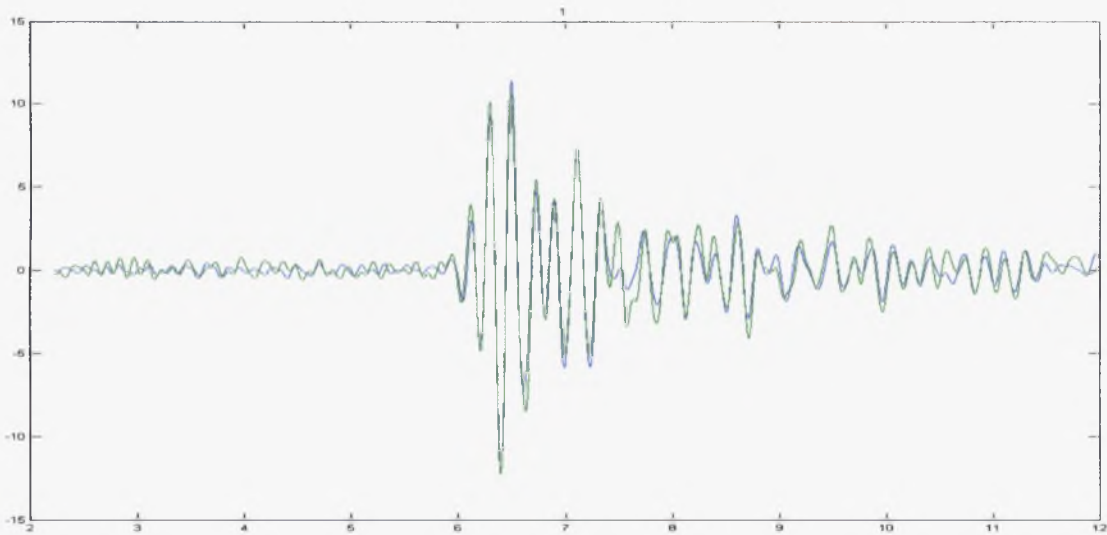
Μία απόκριση: 7-M5RNL

Αντιστοιχεί στην απόκριση της κολώνας 2 στην κατά μήκος διεύθυνση της γέφυρας.

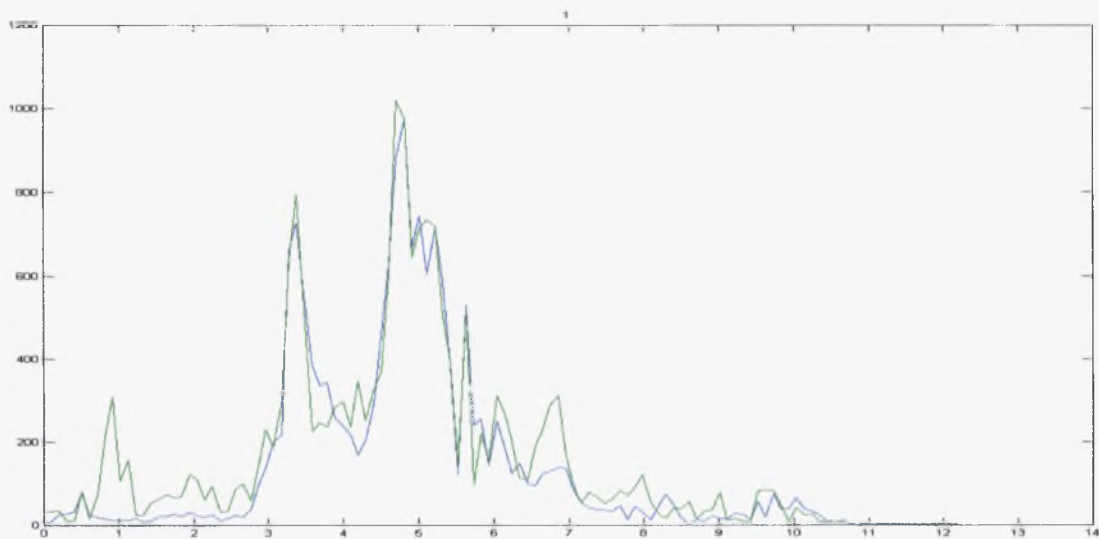
Περίπτωση πέντε ιδιομορφών

Αρχικές Τιμές		Τελικές Τιμές		Τιμή συνάρτησης $J(\theta)$
Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	
4.5	3%	4.8060	2.1250%	67.46%
3.5	3%	3.3350	2.8200%	28.50%
5.5	3%	9.7040	4.5060%	29.49%
0.5	3%	0.5193	4.6510%	16.42%
6.0	3%	5.6390	0.6010%	9.880%

Πίνακας 3.13 Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.



Σχήμα 3.22 Χρονική ιστορία απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

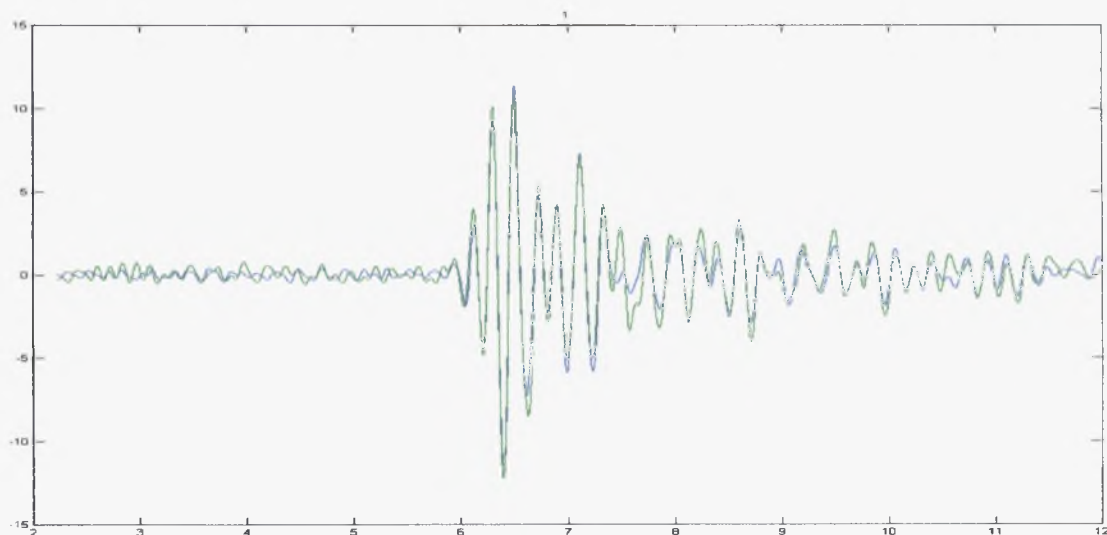


Σχήμα 3.23 Μετασχηματισμός Fourier απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

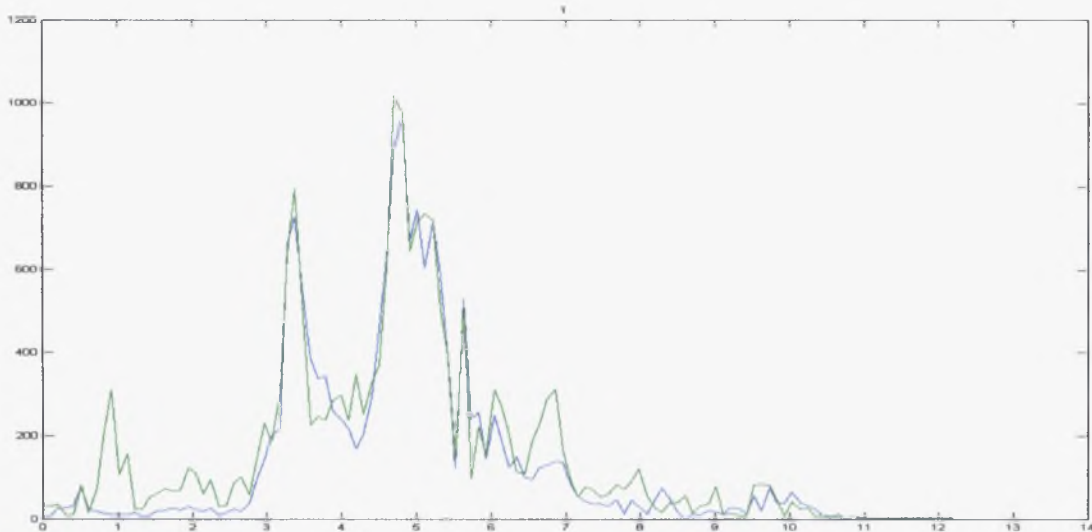
Περίπτωση έξι ιδιομορφών

Αρχικές Τιμές		Τελικές Τιμές		Τιμή συνάρτησης
Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	$J(\theta)$
0.5	3%	0.5504	4.3610%	118.48%
4.5	3%	4.8060	2.1270%	98.54%
6.0	3%	5.6420	0.6500%	93.37%
5.5	3%	9.6940	4.4180%	55.08%
3.5	3%	3.3360	2.8010%	54.87%
1.0	3%	0.8442	2.9830%	8.588%

Πίνακας 3.14 Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.



Σχήμα 3.24 Χρονική ιστορία απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).



Σχήμα 3.25 Μετασχηματισμός Fourier απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

Περίπτωση 3^η

Δύο διεγέρσεις: 2-M5TRIL, 3-M6TRIL

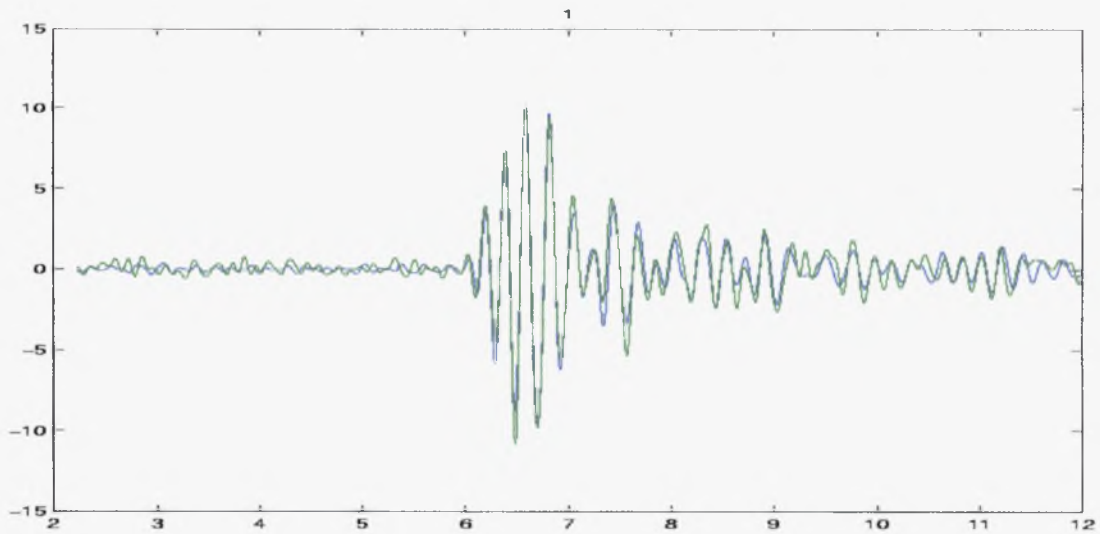
Αντιστοιχούν στην επιτάχυνση των δύο κεντρικών βάσεων στην κατά μήκος διεύθυνση της γέφυρας.

Μία απόκριση: 11-M6RNL

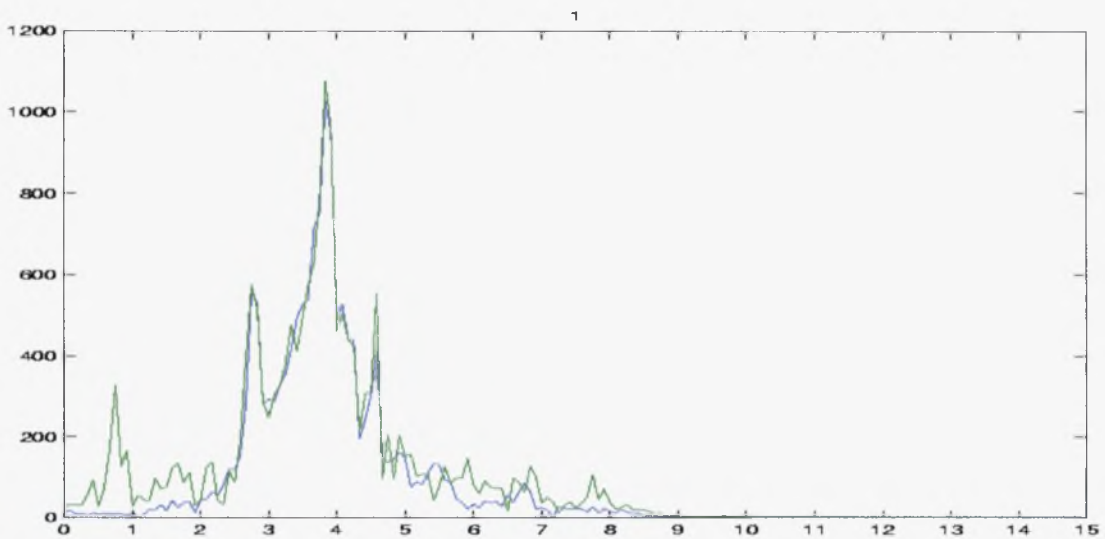
Αντιστοιχεί στην απόκριση της κολώνας 1 στην κατά μήκος διεύθυνση της γέφυρας.

Αρχικές Τιμές		Τελικές Τιμές		Τιμή συνάρτησης
Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	$J(\theta)$
4.0	3%	3.5270	3.0930%	68.99%
5.5	3%	5.2770	5.0690%	30.72%
4.5	3%	4.7780	1.1060%	9.763%

Πίνακας 3.15 Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.



Σχήμα 3.26 Χρονική ιστορία απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).



Σχήμα 3.27 Μετασχηματισμός Fourier απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

Περίπτωση 4^η

Τέσσερις διεγέρσεις: 1-M4TRIV, 2-M5TRIV, 3-M6TRIV, 4-M7TRIV

Αντιστοιχούν στην επιτάχυνση της κάθε βάσης στην κατακόρυφη διεύθυνση.

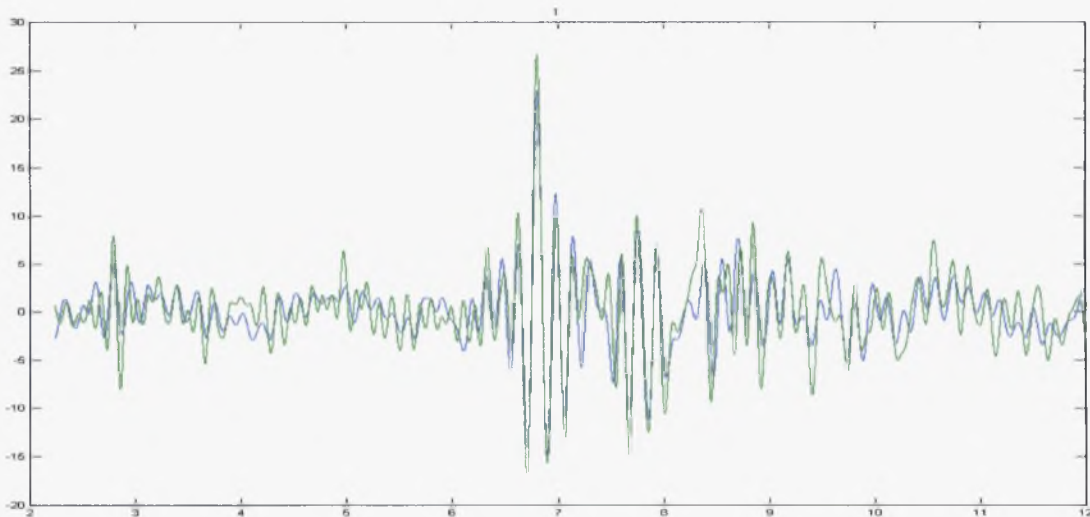
Μία απόκριση: 8-S2RNV

Αντιστοιχεί στην απόκριση του καταστρώματος μεταξύ του μέσου και της κολώνας 2, στην κατακόρυφη διεύθυνση.

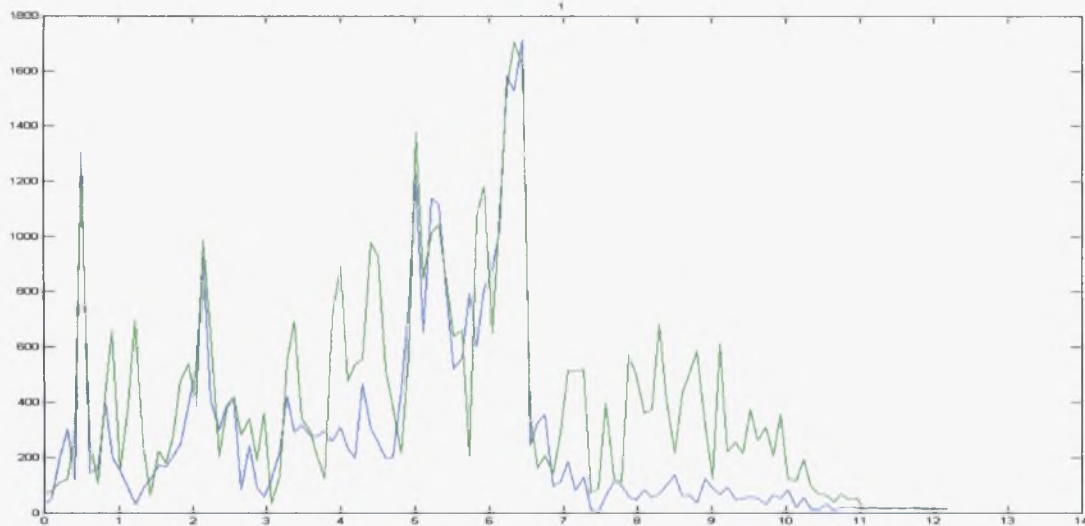
Περίπτωση τεσσάρων ιδιομορφών

Αρχικές Τιμές		Τελικές Τιμές		Τιμή συνάρτησης
Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	$J(\theta)$
0.3	3%	0.5660	2.1900%	194.55%
2.8	3%	2.3590	5.3550%	90.06%
3.9	3%	5.1270	2.8590%	63.08%
6.0	3%	6.4540	1.3740%	32.562%

Πίνακας 3.16 Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.



Σχήμα 3.28 Χρονική ιστορία απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

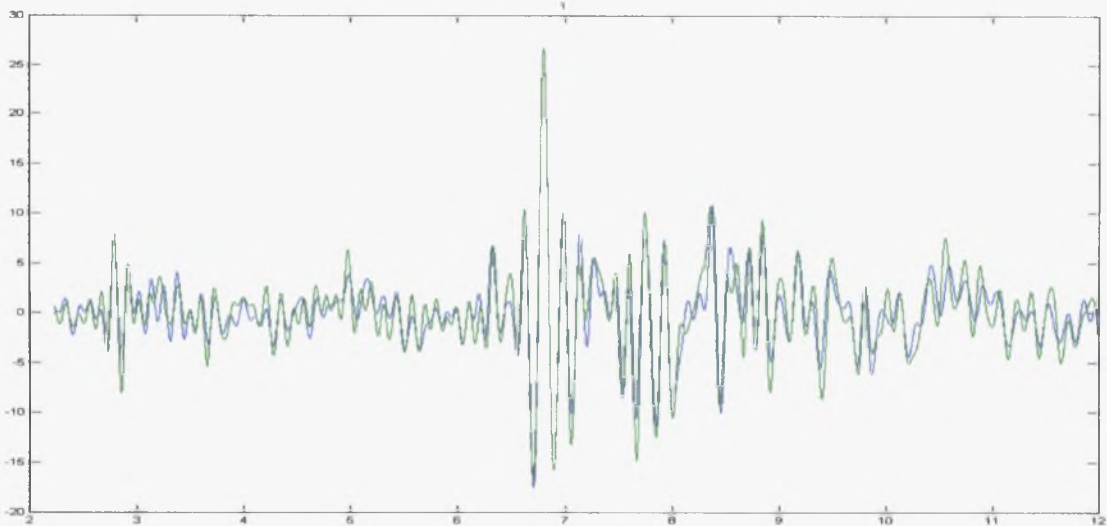


Σχήμα 3.29 Μετασχηματισμός Fourier απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

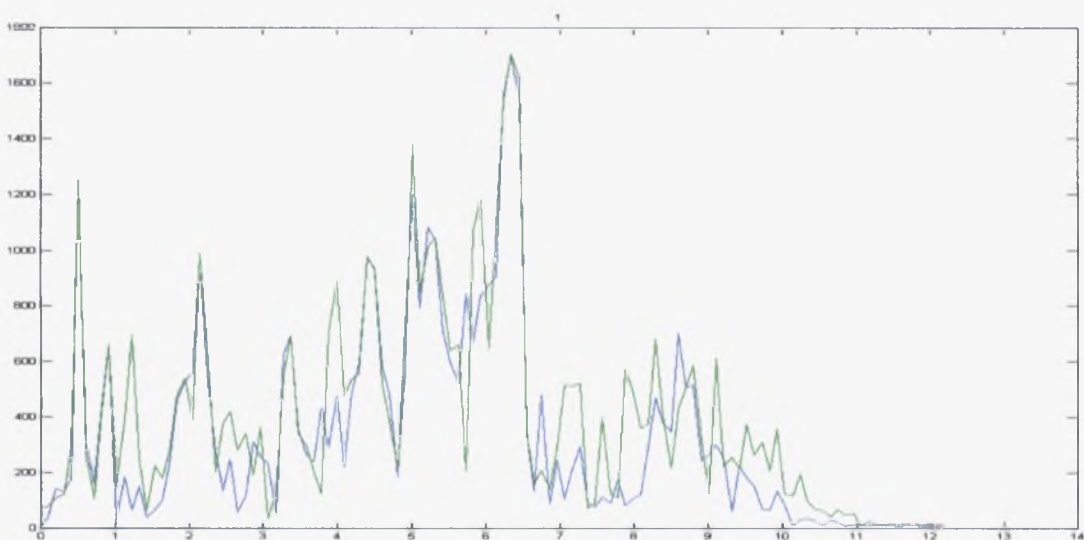
Περίπτωση οκτώ ιδιομορφών

Αρχικές Τιμές		Τελικές Τιμές		Τιμή συνάρτησης
Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	$J(\theta)$
0.3	3%	0.5386	1.4210%	152.11%
2.8	3%	2.2830	3.8650%	113.20%
5.5	3%	6.3780	2.3040%	60.12%
4.5	3%	5.1130	2.3970%	61.54%
4.0	3%	4.4620	0.7740%	49.07%
3.5	3%	3.4030	0.0260%	29.83%
1.5	3%	1.8310	4.5790%	30.04%
1.0	3%	0.9180	1.7670%	16.035%

Πίνακας 3.17 Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.



Σχήμα 3.30 Χρονική ιστορία απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).



Σχήμα 3.31 Μετασχηματισμός Fourier απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

Περίπτωση 5η

Οκτώ διεγέρσεις: 1-M4TRIV, 2-M5TRIL, 2-M5TRIV, 2-M5TRIT, 3-M6TRIL, 3-M6TRIV, 3-M6TRIT, 4-M7TRIV

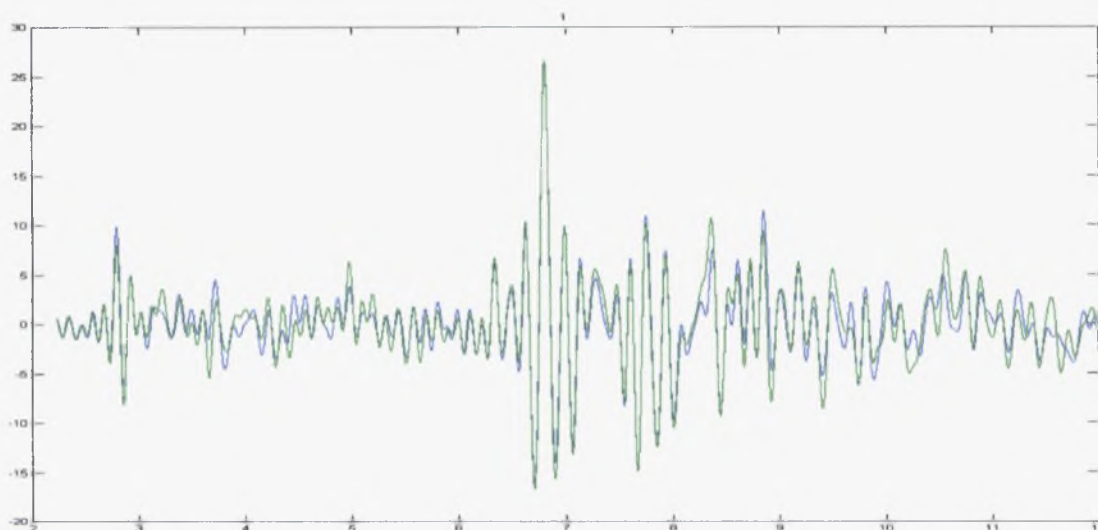
Αντιστοιχούν στην επιτάχυνση των κεντρικών βάσεων σε όλες τις διευθύνσεις και στις επιταχύνσεις των ακραίων βάσεων στην κατακόρυφη διεύθυνση.

Μία απόκριση: 8-S2RNV

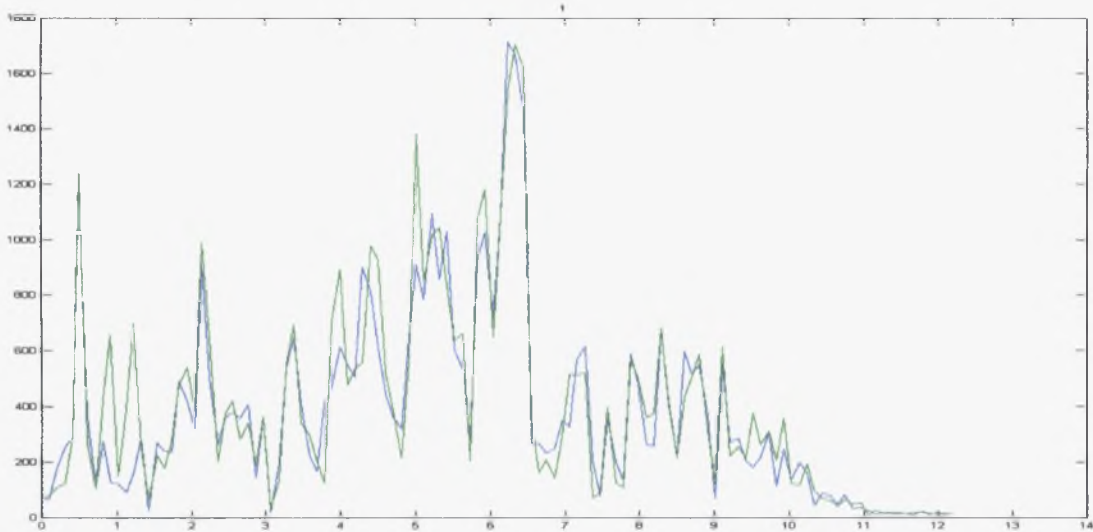
Αντιστοιχεί στην απόκριση του καταστρώματος μεταξύ του μέσου και της κολώνας 2, στην κατακόρυφη διεύθυνση.

Αρχικές Τιμές		Τελικές Τιμές		Τιμή συνάρτησης $J(\theta)$
Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	
1.0	3%	0.5687	5.6730%	65503.40%
7.0	3%	6.5190	7.3570%	3737.70%
2.0	3%	2.1790	32.4380%	193.35%
3.0	3%	3.3830	4.4910%	34.31%
8.0	3%	8.4550	1.5110%	31.97%
9.0	3%	9.0070	10.9950%	11.532%

Πίνακας 3.18 Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.



Σχήμα 3.32 Χρονική ιστορία απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).



Σχήμα 3.33 Μετασχηματισμός Fourier απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

Περίπτωση 6^η

Δώδεκα διεγέρσεις: 1-M4TRIL, 1-M4TRIV, 1-M4TRIT,, 2-M5TRIL, 2-M5TRIV, 2-M5TRIT, 3-M6TRIL, 3-M6TRIV, 3-M6TRIT, 4-M7TRIL, 4-M7TRIV, 4-M7TRIT

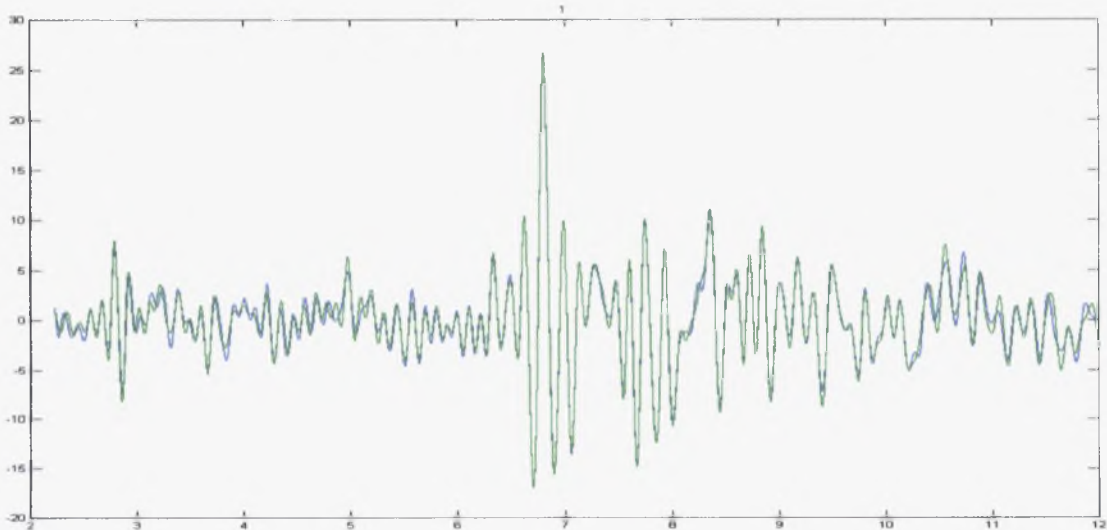
Αντιστοιχούν στην επιτάχυνση κάθε μίας από τις τέσσερις βάσεις σε όλες τις διευθύνσεις.

Μία απόκριση: 8-S2RNV

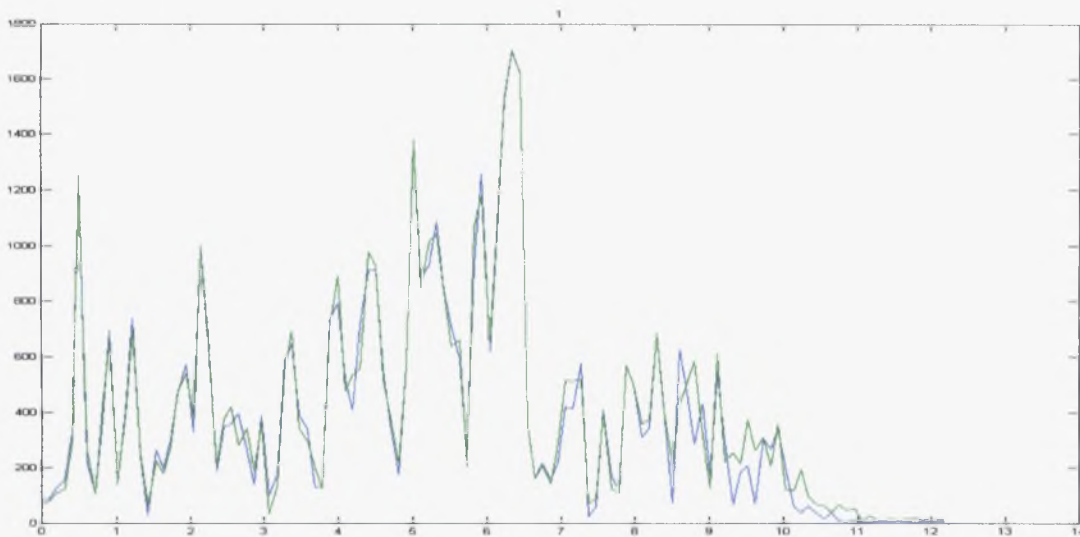
Αντιστοιχεί στην απόκριση του καταστρώματος μεταξύ του μέσου και της κολώνας 2, στην κατακόρυφη διεύθυνση.

Αρχικές Τιμές		Τελικές Τιμές		Τιμή συνάρτησης
Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	$J(\theta)$
2.8	3%	1.6160	41.9590%	238,689%
1.5	3%	0.8136	13.4421%	92,830%
4.5	3%	5.0430	9.4660%	21,896%
5.5	3%	6.6070	0.1700%	19,641%
3.9	3%	0.3943	37.0350%	19,426%
4.0	3%	4.8710	4.4990%	19,377%
3.5	3%	3.4730	4.5800%	18,380%
1.5	3%	1.7550	12.18%	8,814%
1.0	3%	1.0240	0.3560%	10.84%
8.5	3%	8.4110	1.9780%	2.78%

Πίνακας 3.19 Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.



Σχήμα 3.34 Χρονική ιστορία απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).



Σχήμα 3.35 Μετασχηματισμός Fourier απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

Περίπτωση 7^η

Οκτώ διεγέρσεις: 1-M4TRIV, 2-M5TRIL, 2-M5TRIV, 2-M5TRIT, 3-M6TRIL, 3-M6TRIV, 3-M6TRIT, 4-M7TRIV

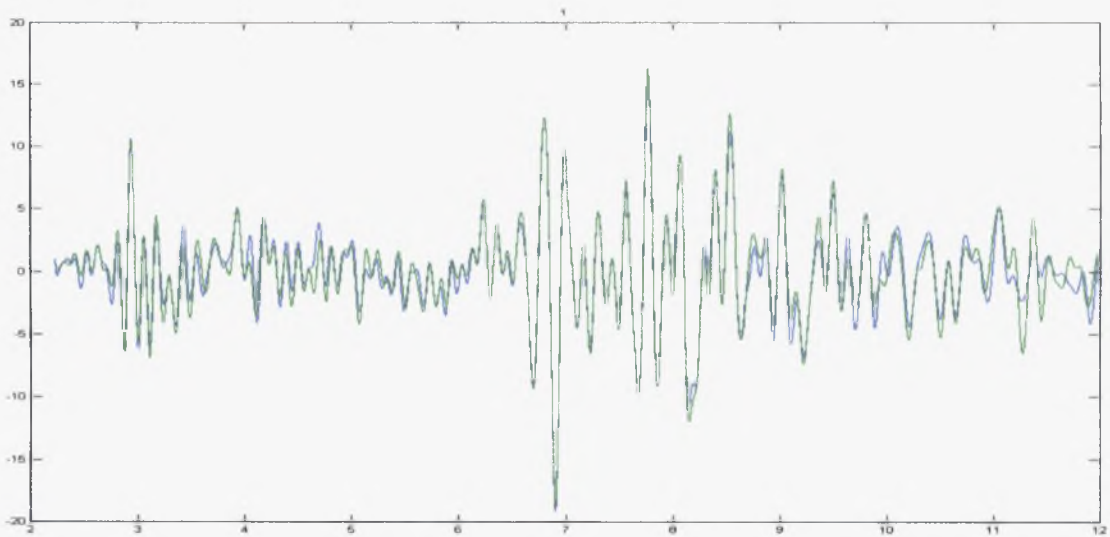
Αντιστοιχούν στην επιτάχυνση των κεντρικών βάσεων σε όλες τις διευθύνσεις και στις επιταχύνσεις των ακραίων βάσεων στην κατακόρυφη διεύθυνση.

Μία απόκριση: 9-S2RNV

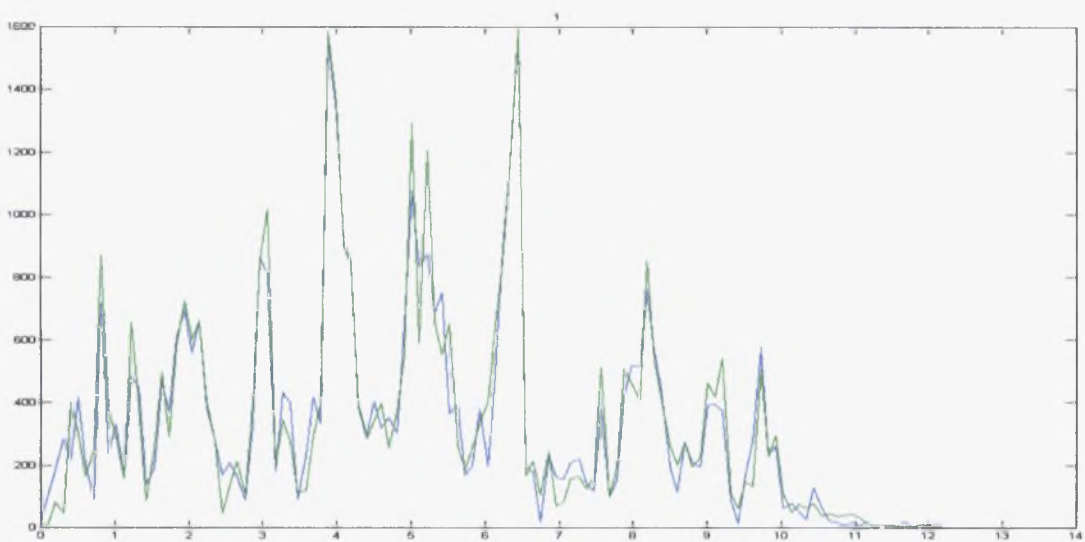
Αντιστοιχεί στην απόκριση στο μέσο του καταστρώματος.

Αρχικές Τιμές		Τελικές Τιμές		Τιμές Συνάρτησης $J(\theta)$
Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	
2.0	3%	1.9640	16.3070%	703.17%
3.0	3%	4.1700	3.3110%	549.67%
4.0	3%	3.0370	10.7130%	185.89%
6.0	3%	6.4020	0.7360%	85.19%
8.0	3%	7.9160	3.3730%	45.18%
9.0	3%	11.4700	13.1900%	6.925%

Πίνακας 3.20 Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.



Σχήμα 3.36 Χρονική ιστορία απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).



Σχήμα 3.37 Μετασχηματισμός Fourier απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

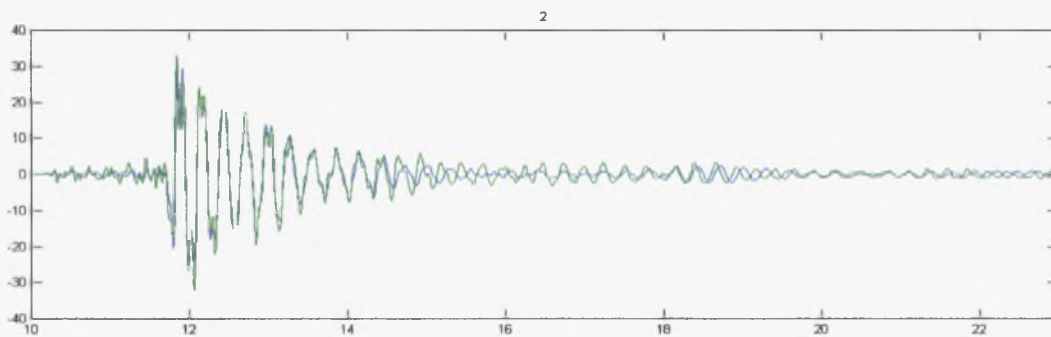
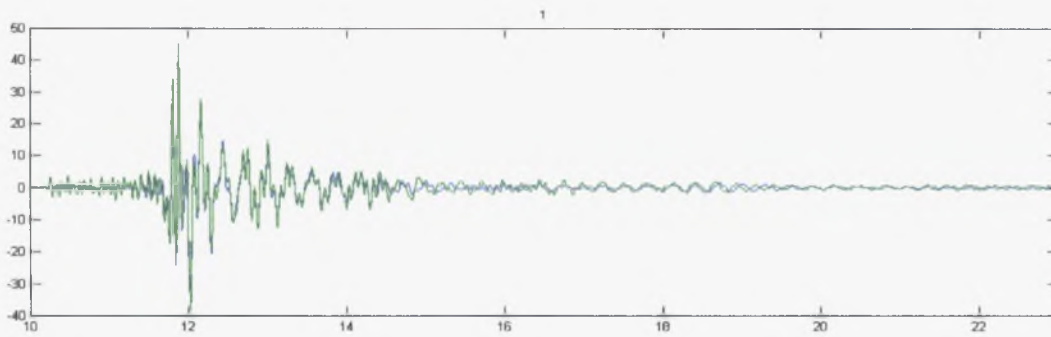
3.4 Πραγματικές Μετρήσεις από το Κτήριο του ΟΤΕ

Το πρόγραμμα εφαρμόστηκε ακολούθως σε πραγματικές μετρήσεις, που παραχωρήθηκαν από το ΙΤΣΑΚ, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε κτήριο του ΟΤΕ στους Θρακομακεδόνες (Karakostas et al., 2001). Η εν λόγω κατασκευή τέθηκε υπό παρακολούθηση μετά το σεισμό στην Πάρνηθα της ενάτης Σεπτεμβρίου 1999, με σκοπό να καταγραφεί η συμπεριφορά της κατά τη μετασεισμική ακολουθία. Το κτήριο αποτελείται από υπόγειο, ισόγειο και πρώτο όροφο όπου τοποθετήθηκαν εννέα αισθητήρες, τρεις σε κάθε όροφο. Οι αισθητήρες στο υπόγειο δίνουν τη διέγερση της κατασκευής και οι υπόλοιποι έξι τις αποκρίσεις

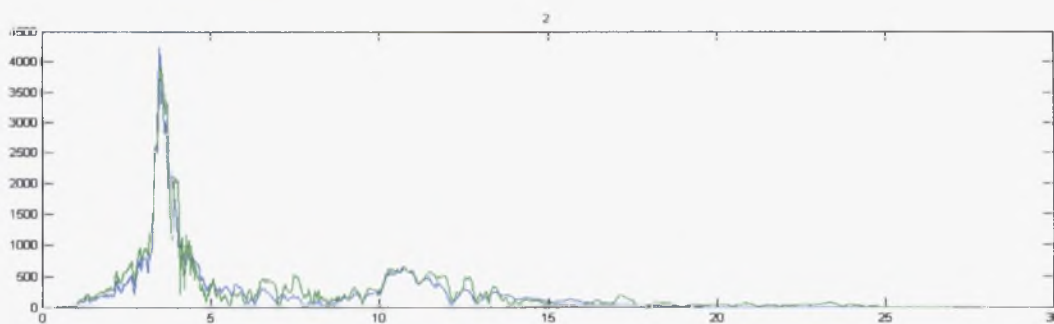
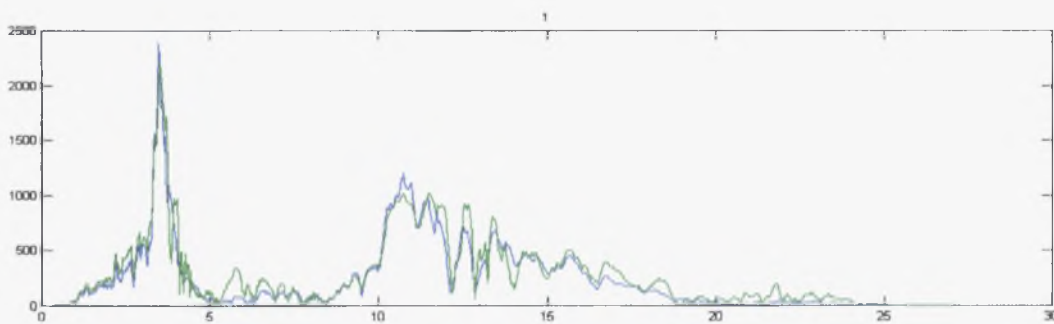
Παρουσιάζεται ενδεικτικά μία εφαρμογή, κατά την οποία εξετάστηκαν τα δυναμικά δεδομένα στη διεύθυνση x , ελήφθησαν λοιπόν υπόψη μία διέγερση και οι αποκρίσεις του ισογείου και του πρώτου ορόφου. Στον πίνακα 3.21 παρουσιάζονται οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων των δύο ιδιομορφών που εντοπίστηκαν. Όπως προκύπτει και από τα παρακάτω γραφήματα, επιτεύχθηκε αρκετά καλή σύγκλιση μετρήσεων και μοντέλου, γεγονός που διαπιστώνεται και από την τελική τιμή της συνάρτησης $J(\theta)$, 12.304%.

Αρχικές Τιμές		Τελικές Τιμές		Τιμές Συνάρτησης
Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	Συχνότητα (Hz)	Μέτρο Απόσβεσης	$J(\theta)$
5.0	3%	3.516	5.074%	39.768%
12.0	3%	11.527	7.082%	12.304%

Πίνακας 3.21 Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.



Σχήμα 3.38 Χρονική ιστορία απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).



Σχήμα 3.39 Μετασχηματισμός Fourier απόλυτων επιταχύνσεων μετρήσεων (πράσινο χρώμα) και προβλέψεων του βέλτιστου μορφικού μοντέλου (μπλε χρώμα).

3.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Εξετάζοντας τις παραπάνω εφαρμογές προκύπτει ως συμπέρασμα ότι το πρόγραμμα λειτουργεί αρκετά καλά. Κατά τον εντοπισμό κάθε ιδιομορφής, παρατηρείται ότι η τιμή της συνάρτησης σφάλματος $J(\theta)$ μειώνεται, κατά ποσοστό που υποδηλώνει τη συνεισφορά της συγκεκριμένης ιδιομορφής στους μετρούμενους βαθμούς ελευθερίας. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των διαφορετικών περιπτώσεων, παρατηρείται εντοπισμός κοινών ιδιομορφών, γεγονός που συντείνει προς την καλή λειτουργία του προγράμματος. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί η επίδραση ορισμένων παραγόντων τόσο στη λειτουργία του προγράμματος, όσο και στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Κατά τα συνήθη στις πειραματικές διαδικασίες, πιθανότατα υπάρχουν σφάλματα κατά τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων, αλλά και κατά τις μετρήσεις καθαυτές. Επίσης οι βαθμοί ελευθερίας στους οποίους παρέχονται μετρήσεις είναι πάντοτε πεπερασμένοι και τούτο περιορίζει την προσέγγιση μοντέλου και κατασκευής, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη δυσχέρεια συλλογής αρκετών πληροφοριών και κατά συνέπεια τον ελλιπή προσδιορισμό των παραμέτρων του συστήματος. Επιπλέον είναι βέβαιο ότι υπάρχουν παραδοχές που έγιναν και απέχουν αρκετά της πραγματικότητας. Μία από αυτές και η σημαντικότερη είναι το ότι θεωρήθηκε πως οι μετρήσεις που λάβαμε υπόψη μας ως διεγέρσεις στις ακραίες βάσεις της γέφυρας δεν αποτελούν την πραγματική διέγερση στα σημεία αυτά. Πιο συγκεκριμένα, στις θέσεις 1 και 4 ελήφθησαν μετρήσεις στο έδαφος (free field) και θεωρήθηκαν ως οι διεγέρσεις στα δύο άκρα του καταστρώματος. Ο κυριότερος λόγος που αυτή η θεώρηση πιθανότατα οδήγησε σε σφάλματα των αποτελεσμάτων είναι ότι στα σημεία αυτά η γέφυρα βασίζεται σε ελαστικά, τα οποία ασφαλώς δεν μεταδίδουν αυτούσια την υπό αυτών κίνηση στη γέφυρα. Το γεγονός αυτό επηρεάζει έντονα τις οριζόντιες συνιστώσες και λιγότερο την κατακόρυφη. Τέλος, όσον αφορά στην καλή λειτουργία του αλγορίθμου, αξίζει να επισημανθεί ότι κατά την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $J(\theta)$ οι συνολικοί συντελεστές συνεισφοράς (effective participation factors) θεωρούνται ανεξάρτητοι μεταξύ τους, ενώ σύμφωνα με τη Σχέση (2.18) είναι προφανές ότι κάτι τέτοιο δεν ισχύει και ότι

υπάρχει αναλογία μεταξύ των στηλών του πίνακα. Το γεγονός αυτό δεν επηρεάζει ενδεχομένως την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, είναι βέβαιο όμως ότι επιδρά στην εύρεση του ελάχιστου της συνάρτησης $J(\theta)$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε μία τεχνική αναγνώρισης μορφικών μοντέλων, η οποία κρίνεται χρήσιμη για την ερμηνεία της δυναμικής συμπεριφοράς ταλαντωτικών διατάξεων στα πλαίσια ισοδύναμων γραμμικών μοντέλων. Με βάση τη συγκεκριμένη μέθοδο, έγινε προσπάθεια προσδιορισμού των μορφικών χαρακτηριστικών του συστήματος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα διεγέρσεων και αποκρίσεων απόλυτων επιταχύνσεων. Τα παραπάνω επετεύχθησαν υπολογιστικά με τη δημιουργία πηγαίου κώδικα και τη χρήση έτοιμων συναρτήσεων της Matlab. Τα αποτελέσματα κρίθηκαν ικανοποιητικά, στο βαθμό που τούτο ήταν δυνατό. Άλλωστε ο βαθμός σύγκλισης είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με την ποιότητα των δεδομένων η οποία επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους, όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα.

Προτάσεις

Ο πηγαίος κώδικας που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab μπορεί να αποτελέσει τη βάση για περαιτέρω έρευνα στον τομέα της μορφικής αναγνώρισης κατασκευών καθώς και σημαντικό εργαλείο για τη διάγνωση βλαβών. Οι δυνατότητες που παρέχει, μπορούν να εξελιχθούν, έτσι ώστε να καλυφθούν ορισμένες επιπλέον ανάγκες στο συγκεκριμένο πεδίο της έρευνας. Σε πρώτη φάση θα ήταν χρήσιμο να γίνουν ορισμένες μικρές αλλαγές στον κώδικα, με σκοπό να λαμβάνεται υπόψη, κατά την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, η αλληλεξάρτηση που υφίσταται μεταξύ των συνολικών συντελεστών συνεισφοράς, η οποία αγνοήθηκε στο συγκεκριμένο κώδικα και οι συντελεστές αυτοί θεωρήθηκαν ανεξάρτητοι μεταξύ τους. Έναν επίσης σημαντικό στόχο αποτελεί η τροποποίηση της θεωρίας και η υλοποίηση στον κώδικα για τον υπολογισμό και τη διάκριση ιδιομορφών που αντιστοιχούν σε πολύ κοντινές τιμές ιδιοσυχνοτήτων. Στη συνέχεια, έχει θεωρηθεί αρκετά σημαντική η εξέλιξη του κώδικα, έτσι ώστε να έχει τη

δυνατότητα να δέχεται ως είσοδο άγνωστα (ambient) δεδομένα διέγερσης, όπως για παράδειγμα, διέγερση λόγω ανέμου. Γενικά θα ήταν επίσης χρήσιμη η εξέλιξη του κώδικα, όσο αφορά την αξιοπιστία του και πιο συγκεκριμένα τη σταθερή του συμπεριφορά (robustness). Χρειάζεται ενδεχομένως βαθύτερη γνώση της Matlab και των δυνατοτήτων των έτοιμων συναρτήσεών της. Στις συγκεκριμένες εφαρμογές της παρούσας εργασίας παρατηρήθηκε αρκετά μεγάλη ευαισθησία του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης σε εξάρτηση από τις αρχικές υποθέσεις για τις τιμές των παραμέτρων. Για την εξαγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων χρειάστηκαν, στις περισσότερες περιπτώσεις, αρκετές δοκιμές, με μικρές διαφοροποιήσεις των αρχικών εκτιμήσεων, ούτως ώστε να βρεθεί σε κάθε περίπτωση το ολικό και όχι τοπικό ελάχιστο. Όταν επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι και ο πηγαίος κώδικας φτάσει στην υψηλή ποιότητα που επιθυμείται, θα είναι χρήσιμη η σύνδεση του αρχείου με τα δεδομένα εισόδου του με γραφικό περιβάλλον, με στόχο τον φιλικό προς το χρήστη χαρακτήρα του κώδικα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Clough, R.W. and Penzien, J. "Dynamics of Structures" Mc Graw-Hill, 1993
- Johnson, E.A., Lam, H.F., Katafygiotis, L.S., Beck, J.L., 2000, "A Benchmark Problem for Structural Health Monitoring and Damage Detection."
- Karakostas, C.Z., Lekidis, V.A., Pavlidou, M. and Papadimitriou, K., 2001, "Analytical and Experimental Investigation of the Dynamic Behaviour of R/C Buildings during the Athens (7-9-99) Aftershock Sequence", *Proc. 12th European Conference on Earthquake Engineering*, Barbican Centre, London, UK.
- Lekidis, V.A., Karakostas, C.Z. and Talaslidis, D.G., 1998, "Dynamic Characteristics of the Cable-Stayed Bridge in Evripos Channel, Greece", *Proc. 11th European Conference on Earthquake Engineering*, CNIT, Paris, France.
- Lekidis, V.A., Karakostas, C.Z. and Talaslidis, D.G., 1999, "Instrumentation, Measurements and Numerical Analysis of Bridges: An Example of the Cable-Stayed Bridge on Evripos Channel, Greece", *Nato Advanced Research Workshop on Instrumentation for Civil Engineering Structures*, Istanbul.
- MATLAB Reference Guide, 1999, TheMathWorks, Inc
- McVerry, G.H., 1980, "Structural Identification in the Frequency Domain from Earthquake Records", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 8, pp. 161-180.
- Werner, S.D., Beck, J.L. and Levine, M.B., 1987, "Seismic Response Evaluation of Meloland Road Overpass Using 1979 Imperial Valley Earthquake Records", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 15, pp. 249-274.
- Νατσιάβας, Σ., 2001, "Ταλαντώσεις Μηχανικών Συστημάτων"
- Παυλίδου, Μ., 2000, "Αναγνώριση Παραμέτρων Ταλαντωτικού Συστήματος στο Πεδίο των Συχνοτήτων", διπλωματική εργασία.
- Χριστοδούλου, Κ., 2001, "Αναθεώρηση Μοντέλων Πεπερασμένων Στοιχείων και Εφαρμογές στη Διάγνωση Βλαβών σε Κατασκευές", διπλωματική εργασία.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Σχέσεις παραγώγων

Παρακάτω παρουσιάζονται οι σχέσεις βάσει των οποίων προέκυψαν αναλυτικά οι παράγωγοι της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς όλες τις παραμέτρους του προβλήματος. Η παράγωγος της

$$J(\underline{\theta}) = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{n=0}^{N_T} [\hat{y}_i(n\Delta t) - \ddot{y}_i(n\Delta t; \theta)]^2$$

ως προς τις παραμέτρους θ_l , δίνεται από τη σχέση

$$\frac{\partial J}{\partial \theta_l} = \frac{2}{V} \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{n=0}^{N_T} [\hat{y}_i(n\Delta t) - \ddot{y}_i(n\Delta t; \theta)] \frac{\partial \ddot{y}_i}{\partial \theta_l}$$

όπου η μορφή της $\frac{\partial \ddot{y}_i}{\partial \theta_l}$ εξαρτάται από το είδος της παραμέτρου θ_l

Παράγωγος ως προς συνολικούς συντελεστές συνεισφοράς (effective participation factors)

$$\theta_l = P_{jk}^{(r)}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial P_{jk}^{(r)}} &= \frac{2}{V} \sum_{i=1}^{N_R} [\hat{y}_i(n\Delta t) - \ddot{y}_i(n\Delta t; \theta)] \frac{\partial \ddot{y}_i}{\partial P_{jk}^{(r)}} = \frac{2}{V} \sum_{i=1}^{N_R} [\hat{y}_i(n\Delta t) - \ddot{y}_i(n\Delta t; \theta)] \frac{\partial \ddot{\eta}_{ir}}{\partial P_{ik}^{(r)}} = \\ &= \frac{2}{V} \sum_{i=1}^{N_R} [\hat{y}_i(n\Delta t) - \ddot{y}_i(n\Delta t; \theta)] \xi_{ik}^{(r)} \end{aligned}$$

όπου η $\xi_{ik}^{(r)} = \frac{\partial \ddot{\eta}_{ir}}{\partial P_{ik}^{(r)}}$ προκύπτει από την παραγωγή της (2.17) ως προς $P_{ij}^{(r)}$.

Τελικά, εύκολα προκύπτει ότι η $\xi_{ik}^{(r)}$ δίνεται από την επίλυση της:

$$\ddot{\xi}_{ik}^{(r)} + a_r \dot{\xi}_{ik}^{(r)} + b_r \xi_{ik}^{(r)} = -\ddot{z}_k$$

με αρχικές συνθήκες:

$$\xi_{ik}^{(r)}(0) = 0$$

$$\dot{\xi}_{ik}^{(r)}(0) = 0$$

Παράγωγος ως προς ψευδοστατικό πίνακα (pseudostatic matrix)

$$\theta_l = R_{lj}$$

$$\frac{\partial J}{\partial R_{lj}} = \frac{2}{V} \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{n=0}^{N_T} [\hat{y}_i(n\Delta t) - \dot{y}_i(n\Delta t; \theta)] \frac{\partial \ddot{s}_i}{\partial R_{lj}} = \frac{2}{V} \sum_{i=1}^{N_R} [\hat{y}_i(n\Delta t) - \dot{y}_i(n\Delta t; \theta)] \ddot{z}_k$$

όπου \ddot{z}_k , η κ συνιστώσα του $\ddot{\underline{z}}$.

Παράγωγος ως προς αρχική μετατόπιση

$$\theta_l = \gamma_{lr}$$

$$\frac{\partial J}{\partial \gamma_{lr}} = \frac{2}{V} \sum_{i=1}^{N_R} [\hat{y}_i(n\Delta t) - \dot{y}_i(n\Delta t; \theta)] \frac{\partial \ddot{\eta}_{lr}}{\partial \gamma_{lr}} = \frac{2}{V} \sum_{i=1}^{N_R} [\hat{y}_i(n\Delta t) - \dot{y}_i(n\Delta t; \theta)] \ddot{\xi}_{lr}$$

όπου η $\ddot{\xi}_{lr} = \frac{\partial \ddot{\eta}_{lr}}{\partial \gamma_{lr}}$, προκύπτει από την παραγωγή της (2.17) ως προς γ_{lr} και

δίνεται από την επίλυση της:

$$\ddot{\xi}_{lr} + a_r \dot{\xi}_{lr} + b_r \xi_{lr} = 0$$

με αρχικές συνθήκες:

$$\xi_{lr}(0) = 1$$

$$\dot{\xi}_{lr}(0) = 0$$

Παράγωγος ως προς αρχική ταχύτητα

$$\theta_l = \delta_{ir}$$

$$\frac{\partial J}{\partial \delta_{ir}} = \frac{2}{V} \sum_{i=1}^{N_R} [\hat{y}_i(n\Delta t) - \ddot{y}_i(n\Delta t; \theta)] \frac{\partial \ddot{\eta}_{ir}}{\partial \delta_{ir}} = \frac{2}{V} \sum_{i=1}^{N_R} [\hat{y}_i(n\Delta t) - \ddot{y}_i(n\Delta t; \theta)] \ddot{\xi}_{ir}$$

όπου η $\ddot{\xi}_{ir} = \frac{\partial \ddot{\eta}_{ir}}{\partial \delta_{ir}}$, προκύπτει από την παραγωγή της (2.17) ως προς δ_{ir} και

δίνεται από την επίλυση της:

$$\ddot{\xi}_{ir} + a_r \dot{\xi}_{ir} + b_r \xi_{ir} = 0$$

με αρχικές συνθήκες:

$$\xi_{ir}(0) = 0$$

$$\dot{\xi}_{ir}(0) = 1$$

Παράγωγος ως προς $a_r = 2\zeta_r \omega_r$

$$\theta_l = a_r$$

$$\frac{\partial J}{\partial a_r} = \frac{2}{V} \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{n=0}^{N_T} [\hat{y}_i(n\Delta t) - \ddot{y}_i(n\Delta t; \theta)] \frac{\partial \ddot{\eta}_{ir}}{\partial a_r} = \frac{2}{V} \sum_{n=0}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_R} [\hat{y}_i(n\Delta t) - \ddot{y}_i(n\Delta t; \theta)] \ddot{\xi}_{ir}$$

όπου η $\ddot{\xi}_{ir} = \frac{\partial \ddot{\eta}_{ir}}{\partial a_r}$, προκύπτει από την παραγωγή της (2.17) ως προς a_r και

δίνεται από την επίλυση της:

$$\ddot{\xi}_{ir} + a_r \dot{\xi}_{ir} + b_r \xi_{ir} = -\dot{\eta}_{ir}$$

με αρχικές συνθήκες:

$$\xi_{ir}(0) = 0$$

$$\dot{\xi}_{ir}(0) = 0$$

Παράγωγος ως προς $b_r = \omega_r^2$

$$\theta_l = b_r$$

$$\frac{\partial J}{\partial b_r} = \frac{2}{V} \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{n=0}^{N_T} [\hat{y}_i(n\Delta t) - \ddot{y}_i(n\Delta t; \theta)] \frac{\partial \ddot{\eta}_{ir}}{\partial b_r} = \frac{2}{V} \sum_{n=0}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_R} [\hat{y}_i(n\Delta t) - \ddot{y}_i(n\Delta t; \theta)] \ddot{\xi}_{ir}$$

όπου η $\ddot{\xi}_{ir} = \frac{\partial \ddot{\eta}_{ir}}{\partial b_r}$, προκύπτει από την παραγωγή της (2.17) ως προς b_r και

δίνεται από την επίλυση της:

$$\ddot{\xi}_{ir} + a_r \dot{\xi}_{ir} + b_r \xi_{ir} = -\eta_{ir}$$

με αρχικές συνθήκες:

$$\xi_{ir}(0) = 0$$

$$\dot{\xi}_{ir}(0) = 0$$