

## **ΤΕΛΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ**

Ερευνητικό Πρόγραμμα Ο.Α.Σ.Π.

«Ανάπτυξη Συστήματος Παρακολούθησης Δυναμικής Συμπεριφοράς και Αποτίμηση Επάρκειας Γεφυρών»

Ενότητα 3: «Ανάλυση Σεισμικής Απόκρισης»

### **ΣΥΝΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΙ ΦΟΡΕΙΣ:**

- **ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών  
και  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας
- **ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ & ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

### **Επιστημονικός Υπεύθυνος**

**Φίλιππος Κ. Περδικάρης, Καθηγητής**

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών  
Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας  
38334 Βόλος

**Οκτώβριος 2003**

## Τίτλος Έργου:

# «Ανάπτυξη Συστήματος Παρακολούθησης Δυναμικής Συμπεριφοράς και Αποτίμηση Επάρκειας Γεφυρών»

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το παρόν ερευνητικό πρόγραμμα-μελέτη «Ανάπτυξη Συστήματος Παρακολούθησης Δυναμικής Συμπεριφοράς και Αποτίμηση Επάρκειας Γεφυρών» ανατέθηκε από τον Ο.Α.Σ.Π. στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας (Τμήματα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας) και το Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών.

Οι κύριοι στόχοι του προτεινόμενου ερευνητικού προγράμματος ήταν:

1. Ο καθορισμός των γενικών απαιτήσεων ενός ευφυούς συστήματος δικτύου αισθητήρων το οποίο αξιοποιεί κατά το μέγιστο δυνατό τις πληροφορίες που θα προέρχονται από τις μετρήσεις των δυναμικών χαρακτηριστικών γεφυρών
2. Η δυνατότητα αναθεώρησης του μοντέλου μιας γέφυρας με βάση τα μετρητικά δεδομένα
3. Η ανάπτυξη λογισμικού διάγνωσης της κατάστασης μιας γέφυρας με βάση τα μετρητικά στοιχεία

Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται στο ερευνητικό αυτό πρόγραμμα περιλαμβάνει ένα αξιόπιστο μοντέλο για την αποτίμηση της επάρκειας μιας συγκεκριμένης γέφυρας, παρακολούθηση της αλλοίωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών της και με βάση αυτή τη πληροφορία λήψη απόφασης πιθανής συντήρησης και επισκευής της.

Το παρόν κείμενο αποτελεί την Τελική Έκθεση του έργου. Το πειραματικό τμήμα περιλαμβάνει δύο περιόδους μετρήσεων (1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> φάση) στη 2η χαραδρογέφυρα της παράκαμψης Καβάλας στην Εγνατία Οδό με ένα κινητό δίκτυο αισθητήρων (επιταχυνσιόμετρων). Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 10 αισθητήρες, κατανομημένους σε ομάδες των τριών ή τεσσάρων. Κάθε ομάδα καλύπτει μία συγκεκριμένη διατομή της γέφυρας και διαθέτει επιταχυνσιόμετρα οριζόντιας (εγκάρσια και κατά μήκος) και κατακόρυφης κατεύθυνσης. Η μεθοδολογία των μετρήσεων βασίζεται σε ορισμένες σταθερές θέσεις μετρήσεων από ορισμένους αισθητήρες (θέσεις αναφοράς), ενώ οι υπόλοιποι σαρώνουν το υπόψη άνοιγμα της γέφυρας για τον καλύτερο προσδιορισμό των πειραματικών ιδιομορφών. Οι διέγερση της χαραδρογέφυρας της Καβάλας προήλθε είτε από λειτουργικά φορτία της που οφείλονται σε τυχαίες διεγέρσεις λόγω της κίνησης οχημάτων είτε από ελεύθερη ταλάντωση της κατασκευής μετά την έξοδο του οχήματος από τη γέφυρα.

Στην παρούσα Έκθεση περιέχονται επίσης οι βασικές τεχνικές αναγνώρισης και αναθεώρησης-διάγνωσης κατασκευών, τα αποτελέσματα αναγνώρισης και αναθεώρησης της γέφυρας με βάση πραγματικές μετρήσεις και τα αποτελέσματα διάγνωσης βλαβών με βάση προσομοιωμένες μετρήσεις. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά της χαραδρογέφυρας της Καβάλας (ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές) με βάση τις μετρήσεις συγκρίθηκαν με τα αναλυτικά προσδιορισμένα από τη δυναμική ανάλυσή της και μέσω μίας διαδικασίας βελτιστοποίησης ακολούθησε αναθεώρηση του δυναμικού μοντέλου της οριστικής μελέτης της.

Στα πλαίσια του παρόντος προγράμματος αναπτύχθηκε ένα εύχρηστο λογισμικό Η/Υ σε περιβάλλον Matlab προκειμένου να υπολογίζονται και να αποτιμώνται: 1) οι ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές μιας γέφυρας με βάση την επεξεργασία των δυναμικών μετρήσεων των αισθητήρων (επιταχυνσιόμετρων) τοποθετημένων στη συγκεκριμένη

γέφυρα, 2) τα εκάστοτε δυναμικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις εκάστοτε μετρήσεις με δεδομένο ότι έχει αναπτυχθεί το αναθεωρημένο μοντέλο της γέφυρας και 3) η ύπαρξη και πιθανή θέση αστοχιών, βλαβών ή φθορών στη γέφυρα συγκρίνοντας τις μετρούμενες ιδιομορφές με τις προβλεπόμενες ιδιομορφές από το αναθεωρημένο μοντέλο της γέφυρας.

Ο χρήστης του λογισμικού έχει πλήρεις οδηγίες χρήσεως για την επεξεργασία των μετρητικών δεδομένων και την αναγνώριση των μορφικών μοντέλων της κατασκευής (FEMUpdating) και τη δημιουργία του μοντέλου προς αναθεώρηση και τη διάγνωση της κατάστασης της γέφυρας ακολουθώντας μια διαδικασία βελτιστοποίησης (IDEMO). Ο χρήστης δεν επεμβαίνει στον προγραμματισμό της διαδικασίας αναθεώρησης, αλλά θα πρέπει να δώσει ως «input» το αντίστοιχο μοντέλο της γέφυρας προς εξέταση και να επιλέξει τις παραμέτρους που θέλει να αναθεωρήσει.

Το σύστημα παρακολούθησης είναι πολύ χρήσιμο στην περίπτωση σεισμικής καταπόνησης της γέφυρας ή καταπόνησης σε δυναμικά φορτία όπως ισχυρή ανεμοθύελλα ή κόπωση λόγω λειτουργικών φορτίων. Το πλεονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος είναι η άμεση παροχή πληροφορίας για τη λειτουργικότητα και ασφάλεια μίας γέφυρας. Στην περίπτωση που η διάγνωση διαπιστώνει την ύπαρξη πιθανής βλάβης, το σύστημα λαμβάνοντας υπόψη το αναλυτικό προσομοίωμα της κατασκευής (είτε αυτό στο οποίο βασίστηκε η μελέτη είτε κάποιο αναθεωρημένο μοντέλο) θα παρέχει την δυνατότητα ταχείας εκτίμησης της λειτουργικότητας γεφυρών και επιπλέον πληροφορίες για το μέγεθος της βλάβης και τη δυνατότητα εντοπισμού της που θα βοηθήσουν στη αποτελεσματική συντήρησή των. Οι πληροφορίες που θα παρέχονται είναι απαραίτητες στη ταχεία λήψη κρίσιμων αποφάσεων όπως ανάπτυξη διαδικασιών έκτακτης ανάγκης, εφαρμογή σχεδίου διακοπής λειτουργίας μίας γέφυρας και προγραμματισμό άμεσων επιδιορθώσεων που αποσκοπούν στην κάλυψη των βασικών αναγκών του οδικού δικτύου. Η τεχνική αυτή θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε συνδυασμό με άλλες μη-καταστροφικές τεχνικές αποτίμησης της επάρκειας γεφυρών, οι οποίες συνήθως απαιτούν επί τόπου μετάβαση, επιτυγχάνοντας έτσι το βέλτιστο αποτέλεσμα στη διάγνωση. Τα τεράστια οικονομικά και κοινωνικά προβλήματα λόγω διακοπής της λειτουργίας του δικτύου γεφυρών στις ΗΠΑ, στο Μεξικό και την Ιαπωνία αμέσως μετά από ισχυρούς σεισμούς καθιστούν την άμεση πληροφόρηση για την κατάσταση κατασκευών όπως οι γέφυρες επιτακτική.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	6
2	ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΕΡΓΟΥ .....	7
2.1	Εργασίες Πεδίου.....	7
2.2	Εργασίες Γραφείου.....	7
3	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΕΔΙΟΥ .....	7
3.1	- 1η Περίοδος των Μετρήσεων .....	8
3.1.1	Γενική Μεθοδολογία Μετρήσεων .....	8
3.1.2	- 1η Φάση .....	8
3.1.3	- 2η Φάση .....	9
3.2	- 2η Περίοδος των Μετρήσεων .....	10
4	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ .....	10
4.1	Συνοπτική Παρουσίαση Αναγνώρισης Ιδιοσυχνοτήτων - Ιδιομορφών (Modal Identification) .....	10
5	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ .....	11
5.1	Συνοπτική Παρουσίαση Μεθοδολογίας Αναθεώρησης .....	12
6	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ 2 <sup>η</sup> ΧΑΡΑΔΡΟΓΕΦΥΡΑ ΤΗΣ ΚΑΒΑΛΑΣ .....	12
6.1	Προσομοίωση της Γέφυρας .....	12
6.2	Περιγραφή Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων της Γέφυρας.....	13
6.3	Αριθμητικά Αποτελέσματα για την Γέφυρα της Καβάλας – Αναγνώριση Ιδιοσυχνοτήτων και Ιδιομορφών.....	19
6.3.1	Αναγνώριση με Χρήση Δεδομένων Ελεύθερης Ταλάντωσης από την Χαραδρογέφυρα Καβάλας .....	19
6.3.1.1	Περιγραφή της Διαδικασίας Μετρήσεων .....	19
6.3.1.2	Διαδικασία Διέγερσης .....	20
6.3.1.3	Διαδικασία Καταγραφής Δεδομένων .....	20
6.3.1.4	Περιγραφή Σημείων Μέτρησης .....	21
6.3.1.5	Αποτελέσματα Αναγνώρισης .....	22
6.3.1.5.1	Μοντέλο Κλασσικής Απόσβεσης.....	23
6.3.1.5.2	Μοντέλο Μη Κλασσικής Απόσβεσης .....	26
6.4	Αριθμητικά Αποτελέσματα για τη Γέφυρα της Καβάλας – Αναθεώρηση Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων .....	28
6.5	Πιστοποίηση Σωστής Λειτουργίας Λογισμικού Αναθεώρησης Μοντέλων και Διάγνωσης Βλαβών.....	30
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	.....	33
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΜΟΡΦΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΩΝ .....		33
A.1	Ελεύθερη Ταλάντωση .....	33
A.2	Λειτουργικά φορτία.....	34
A.3	Σεισμικά φορτία / Εξαναγκασμένη Ταλάντωση .....	35
A.3.1	Πεδίο Χρόνου.....	35
A.3.2	Πεδίο Συχνοτήτων.....	36
A.4	Συμπεράσματα από την Εφαρμογή των Μεθοδολογιών στη Γέφυρα της Καβάλας.....	37
A.5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	37

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β .....	39
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ	
ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ.....	39
Β.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	39
Β.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	39
Β.2.1 Αναγνώριση Βασισμένη σε Δεδομένα Διεγέρσεων και Αποκρίσεων.....	40
Β.2.2 Αναγνώριση Βασισμένη σε Μορφικά Δεδομένα .....	41
Β.2.3 Αναγνώριση Βασισμένη στις Αναπτυγμένες Ιδιομορφές .....	42
Β.2.4 Παραμετροποίηση Μοντέλων Πεπερασμένων Στοιχείων.....	44
Β.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΠΑΝΩ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ	
.....	45
Β.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	46
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	48
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ	
ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ.....	48
Γ.1 Η Μέθοδος Ελαχιστοποίησης Quasi-Newton.....	48
Γ.1.1 Εισαγωγή στην Μέθοδο Newton .....	48
Γ.1.2 Η Μέθοδος Quasi Newton .....	49
Γ.1.3 Μειονεκτήματα Μεθόδου Quasi-Newton.....	50
Γ.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι .....	50
Γ.3 Η Υβριδική Μέθοδος Ελαχιστοποίησης Γενετικών Αλγορίθμων - Quasi-Newton .....	52
Γ.4 Συμπεράσματα από την Εφαρμογή των Μεθοδολογιών .....	52
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ .....	53
ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΑΠΟ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΕΔΙΟΥ .....	53
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε.....	57
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΚΑΤΑΡΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ .....	57
Ε.1 Άνοιγμα C.....	57
Ε.2 Άνοιγμα D.....	59
Ε.3 Μετρήσεις 1 <sup>ης</sup> και 2 <sup>ης</sup> Περιόδου.....	62
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΑΡΙΣΤΕΡΟΥ ΚΛΑΔΟΥ 2 <sup>ης</sup>	
ΧΑΡΑΔΡΟΓΕΦΥΡΑΣ.....	94
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗΣ.....	105
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Η: ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΜΟΡΦΙΚΩΝ	
ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ.....	108
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Θ: ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ «FEMUpdating».....	157

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν έργο έχει ανατεθεί από τον Ο.Α.Σ.Π. στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας και το Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών. Η έρευνα στο παρόν έργο αφορά στην ανάπτυξη ενός συστήματος συνεχούς παρακολούθησης και διάγνωσης της στατικής επάρκειας για μία συγκεκριμένη γέφυρα της Ε.Ο.Α.Ε. (2η χαραδρογέφυρα της Καβάλας).

Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται στο παρόν έργο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλες σημαντικές γέφυρες της Ε.Ο.Α.Ε. Η ερευνητική ομάδα έχει εγκαταστήσει ένα κινητό δίκτυο αισθητήρων (επιταχυνσιόμετρων) στην 2η χαραδρογέφυρα παράκαμψης Καβάλας. Η εγκατάσταση του δικτύου αισθητήρων έδωσε τη δυνατότητα να προσδιορισθεί η δυναμική απόκριση της γέφυρας με βάση τις μετρήσεις των επιταχύνσεων που αναπτύσσονται στη γέφυρα λόγω τυχαίων διεγέρσεων (ambient vibrations). Αυτές οι μετρήσεις της δυναμικής απόκρισης επεξεργάστηκαν προκειμένου να προσδιορισθούν τα πραγματικά δυναμικά χαρακτηριστικά της γέφυρας. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά της γέφυρας (ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές) με βάση τις μετρήσεις συγκρίθηκαν με τα αναλυτικά προσδιορισμένα από την οριστική στατική μελέτη της ίδιας γέφυρας και ακολούθησε βαθμονόμηση/αναθεώρηση του δυναμικού μοντέλου της συγκεκριμένης οριστικής μελέτης της γέφυρας.

Στα πλαίσια του παρόντος προγράμματος αναπτύχθηκαν προγράμματα Η/Υ (software) προκειμένου να υπολογίζονται και να αποτιμώνται: 1) ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές της γέφυρας με την επεξεργασία των μετρήσεων 2) τα εκάστοτε δυναμικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις εκάστοτε μετρήσεις 3) η ύπαρξη και θέση πιθανών αστοχιών, βλαβών ή φθορών στη γέφυρα.

## **2 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΕΡΓΟΥ**

Η εκτέλεση του έργου έγινε σε συνεργασία δύο φορέων, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και του ΙΤΣΑΚ. Το έργο περιλαμβάνει εργασίες πεδίου (εκτέλεση μετρήσεων σε γέφυρα της Εγνατίας οδού), καθώς και εργασίες γραφείου όπου οι μετρήσεις επεξεργάστηκαν με κατάλληλο λογισμικό.

### **2.1 Εργασίες Πεδίου**

Οι εργασίες πεδίου ξεκίνησαν με την τοποθέτηση των αισθητήρων του κινητού συστήματος στη 2η Χαραδρογέφυρα της Καβάλας. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 10 αισθητήρες-επιταχυνσιογράφοι σε κατάλληλα σημεία ώστε να αποκομιστούν τα απαραίτητα μετρητικά δεδομένα. Τα όργανα αυτά μετρούν επιταχύνσεις στην γέφυρα σε κατάλληλα επιλεγμένα σημεία με σκοπό τη μορφική ανάλυση, την αναθεώρηση του μοντέλου και την ανάπτυξη μεθοδολογίας διάγνωσης βλαβών. Οι διεγέρσεις αυτές και στις δύο περιόδους μετρήσεων προέρχονται αποκλειστικά από λειτουργικά φορτία της γέφυρας που οφείλονται στην κίνηση των οχημάτων. Τα φορτία αυτά ενεργοποίησαν συγκεκριμένες ιδιομορφές οι οποίες αναγνωρίστηκαν και παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6.

Οι μετρήσεις στη γέφυρα ακολουθούν μία συστηματική διαδικασία σάρωσης της γέφυρας σε διάφορα σημεία. Οι μετρήσεις είναι επίσης σταδιακές με στόχο την σωστή βαθμονόμηση των οργάνων και τη σωστή αρχική τους επεξεργασία. Η μεθοδολογία εγκατάστασης και διεξαγωγής των μετρήσεων περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3 και στο Παράρτημα.

Οι μετρήσεις διεξήχθησαν και ολοκληρώθηκαν επιτυχώς σε δύο περιόδους. Οι μετρήσεις της κάθε περιόδου πραγματοποιήθηκαν σε δύο φάσεις. Κάθε φάση των μετρήσεων εστιάστηκε σε ένα από τα τέσσερα ανοίγματα της γέφυρας.

### **2.2 Εργασίες Γραφείου**

Οι εργασίες γραφείου περιλαμβάνουν αφενός την ανάπτυξη των υπολογιστικών τεχνικών αναγνώρισης, αναθεώρησης μοντέλου και διάγνωσης, και αφετέρου την βαθμονόμησή τους για τις ανάγκες του συγκεκριμένου ερευνητικού προγράμματος (δηλ. της συγκεκριμένης γέφυρας) με βάση τις μετρήσεις επιταχύνσεων από τις εργασίες πεδίου.

Μία σύντομη περιγραφή των υπολογιστικών τεχνικών και του λογισμικού που αναπτύχθηκε γίνεται στο Κεφάλαιο 4, ενώ οι τεχνικές αναγνώρισης και αναθεώρησης-διάγνωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στα Παραρτήματα Α, Β και Γ. Η μεθοδολογία στην οποία βασίστηκε η πρόταση ενοργάνωσης παρουσιάζεται στο Παράρτημα Ζ.

## **3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΕΔΙΟΥ**

Οι εργασίες περιλαμβάνουν τη διεξαγωγή επιτόπου μετρήσεων στη 2η χαραδρογέφυρα της Καβάλας. Στόχος των μετρήσεων είναι η παρακολούθηση και η μέτρηση της απόκρισης της γέφυρας για φορτία ανέμου, κυκλοφορίας και άλλα τυχηματικά αίτια.

Γενικά αποφασίστηκε να γίνουν μετρήσεις σε 2 περιόδους. Η λήψη των μετρήσεων και για τις δύο περιόδους έχουν ολοκληρωθεί επιτυχώς. Η πρώτη περίοδος περιλαμβάνει μετρήσεις στο «κεντρικό» άνοιγμα C και το «ακραίο» άνοιγμα D (βλ.

Κεφάλαιο 6). Η δεύτερη περίοδος περιλαμβάνει μετρήσεις και στα υπόλοιπα ανοίγματα της γέφυρας, δηλαδή στο «κεντρικό» άνοιγμα Β και το «ακραίο» άνοιγμα Α.

### **3.1 - 1η Περίοδος των Μετρήσεων**

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αναγνώρισης κατασκευών που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο, η 1η φάση των μετρήσεων εστιάστηκε σε ένα από τα δύο κεντρικά ανοίγματα. Στόχος της 1ης φάσης ήταν η μέτρηση της απόκρισης του ανοίγματος (κυρίως σε κατακόρυφες ταλαντώσεις) και η βαθμονόμηση της μεθοδολογίας λήψης των μετρήσεων, κυρίως σε ότι αφορά τη στάθμη μέτρησης επιταχύνσεων (threshold acceleration value) και την εξάλειψη του θορύβου.

Η δεύτερη (2η) φάση περιελάμβανε μετρήσεις στο ακραίο άνοιγμα της γέφυρας, και συγκεκριμένα, εκείνο που βρίσκεται δίπλα σε αυτό που διενεργήθηκαν οι μετρήσεις της 1ης φάσης. Οι λεπτομέρειες των μετρήσεων περιγράφονται στο Παράρτημα της έκθεσης.

Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 10 αισθητήρες, κατανομημένους σε ομάδες των τριών ή τεσσάρων. Κάθε ομάδα καλύπτει μία συγκεκριμένη διατομή της γέφυρας και διαθέτει οριζόντια και κατακόρυφα επιταχυνσιόμετρα. Η μεθοδολογία των μετρήσεων βασίζεται σε ορισμένες σταθερές θέσεις μετρήσεων από ορισμένα αισθητήρια (θέσεις αναφοράς), ενώ τα υπόλοιπα σαρώνουν το υπόψη άνοιγμα της γέφυρας για τον καλύτερο προσδιορισμό των πειραματικών ιδιομορφών.

Για την 1η αυτή περίοδο μετρήσεων, οι θέσεις των αισθητήρων παρουσιάζονται στο σχεδιάγραμμα του σχήμα Δ.8 του Παραρτήματος Δ, για τα ανοίγματα C και D της γέφυρας. Η επεξεργασία των αρχικών αυτών μετρήσεων κρίθηκε απαραίτητη προτού προχωρήσουν οι υπόλοιπες μετρήσεις. Στην επόμενη περίοδο οι μετρήσεις καλύπτουν όλο τον άξονα της γέφυρας, ακολουθώντας σε γενικές γραμμές την φιλοσοφία που υιοθετήθηκε στην 1η περίοδο.

#### **3.1.1 Γενική Μεθοδολογία Μετρήσεων**

Μετά από συνεχείς και εκτενείς συζητήσεις των ερευνητών αποφασίστηκε να γίνουν μετρήσεις στη γέφυρα με έναν «έξυπνο τρόπο» ώστε να μεγιστοποιηθεί ο όγκος των πληροφοριών που θα συλλεχθεί προς επεξεργασία. Οι μετρήσεις και η διαδικασία εκτέλεσής τους κατά την 1η περίοδο παρουσιάζονται στις κάτωθι 2 φάσεις:

#### **3.1.2 - 1η Φάση**

Η πρώτη φάση θεωρείται πολύ σημαντική υπό την έννοια ότι θα δώσει τα βασικά αρχικά αποτελέσματα της παρούσας ερευνητικής εργασίας. Η πρώτη αυτή φάση αποσκοπεί στη μέτρηση των δυναμικών χαρακτηριστικών ενός μεμονωμένου ανοίγματος της γέφυρας. Η προσπάθεια αυτή βασίζεται στο ότι το κάθε ένα από τα ανοίγματα της γέφυρας αποτελούν θεωρητικά τουλάχιστον αμφιέριστα τμήματα. Ο στόχος είναι η αξιόπιστη επεξεργασία των μετρήσεων στο άνοιγμα αυτό. Για το λόγο αυτό, ορισμένοι αισθητήρες κρατήθηκαν σταθεροί (ως προς θέση και διεύθυνση) και οι υπόλοιποι ήταν κινητοί για τη λήψη μετρήσεων σ' όλο το άνοιγμα. Η «σάρωση» του ανοίγματος έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη λήψη σημάτων και επεξεργασία τους για τον πιο αξιόπιστο υπολογισμό ιδιοπεριόδων και κυρίως ιδιομορφών ταλάντωσης.



Βασικές μετρήσεις στη φάση αυτή είναι αυτές των επιταχύνσεων στην κατακόρυφη διεύθυνση, για τον υπολογισμό των βασικών ιδιομορφών στην υπόψη διεύθυνση. Επιπλέον, οι μετρήσεις επιταχύνσεων στην εγκάρσια διεύθυνση δίνουν μία πρώτη εικόνα για την εγκάρσια ταλάντωση της γέφυρας.

Στην φάση αυτή χρησιμοποιήθηκαν και οι 10 διαθέσιμοι αισθητήρες του φορητού συστήματος. Η διάταξη των αισθητήρων στην 1η αυτή φάση παρουσιάζεται στο σχήμα Δ.8 του Παραρτήματος Δ, για το άνοιγμα C της γέφυρας. Η επεξεργασία των αρχικών αυτών μετρήσεων κρίθηκε απαραίτητη προτού πραγματοποιηθούν οι υπόλοιπες μετρήσεις.

Για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιείται το υψηλής διακριτότητας (19 bits) κινητό σύστημα ενοργάνωσης κατασκευών του ΙΤΣΑΚ. Οι καταγραφές που λαμβάνονται από το σύστημα υφίστανται κατάλληλη επεξεργασία έτσι ώστε να απαλειφθούν τα λάθη που υπεισέρχονται από την όλη διαδικασία καταγραφής (π. χ. διορθώσεις baseline – offset, θόρυβος οργάνου κλπ).

Επιγραμματικά, τα εφαρμοζόμενα στάδια επεξεργασίας συνοψίζονται στα εξής :

- Διόρθωση Offset (επιλογή μεταξύ διαφόρων τύπων διόρθωσης)
- Διόρθωση οργάνου (χρήση χαμηλοπερατού φίλτρου Ormsby χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Triffunac)
- Διόρθωση baseline (εφαρμογή μεθοδολογιών least-square fitting και χρήση κατάλληλων χαμηλοπερατών και υπηπερατών φίλτρων Ormsby)
- Υψηλεπερατό φιλτράρισμα για υπολογισμό χρονοϊστοριών ταχυτήτων και μετατοπίσεων
- Υπολογισμός μεγίστων τιμών επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης

Ιδιαίτερα όσον αφορά την απομάκρυνση τυχόν περιβαλλοντικού θορύβου, εφαρμόζεται στις καταγραφές ειδικό φίλτρο παραθύρου τύπου ράμπας (Ormsby taper-type window filter), του οποίου τα όρια (Corner frequency, Terminal frequency, High- and Low-pass roll-off widths), καθορίζονται με βάση την εμπειρία που έχει αποκομίσει η ερευνητική ομάδα του ΙΤΣΑΚ από σειρά σχετικών μετρήσεων, λαμβάνοντας υπόψη και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του καταγραφικού συστήματος (π. χ. έλεγχος στο πεδίο Fourier της ανεπεξέργαστης καταγραφής και σύγκριση με την τελική, έλεγχος των μετατοπίσεων που προκύπτουν από τις καταγραφές έτσι ώστε να έχουν αποδεκτή μορφή από φυσική άποψη, εμπειρία από εφαρμογές μεθοδολογιών signal-to-noise ratios σε καταγραφές από μικρότερης διακριτότητας συσκευές κλπ).

### 3.1.3 - 2η Φάση

Η δεύτερη φάση ακολούθησε σε γενικές γραμμές τα όσα πραγματοποιήθηκαν στην 1<sup>η</sup> φάση, αλλά αφορούσε το γειτονικό ακραίο άνοιγμα της γέφυρας προς την πλευρά του ακρόβαθρου.

Οι μετρήσεις έγιναν με τους ίδιους 10 αισθητήρες του παραπάνω κινητού συστήματος. Για τις θέσεις και διευθύνσεις των αισθητήρων ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογία με αυτή της 1<sup>ης</sup> φάσης. Η ακριβής διάταξη των αισθητήρων για τη φάση αυτή των μετρήσεων παρουσιάζεται στο σχήμα Δ.8 του Παραρτήματος Δ, για το άνοιγμα D της γέφυρας. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε θέσεις αντίστοιχες των θέσεων που υιοθετήθηκαν στην 1<sup>η</sup> πρώτη φάση.

### 3.2 - 2η Περίοδος Μετρήσεων

Οι μετρήσεις της δεύτερης περιόδου πραγματοποιήθηκαν επίσης σε δύο φάσεις. Η 1<sup>η</sup> φάση των μετρήσεων εστιάστηκε στο 2<sup>ο</sup> κεντρικό άνοιγμα Β της γέφυρας. Οι μετρήσεις έγιναν με τους ίδιους 10 αισθητήρες του ως άνω κινητού συστήματος. Για τις θέσεις και διευθύνσεις των αισθητήρων ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογία με αυτή της 1<sup>ης</sup> φάσης της 1<sup>ης</sup> πρώτης περιόδου μετρήσεων. Η ακριβής διάταξη των αισθητήρων για την φάση αυτή των μετρήσεων παρουσιάζεται στο αντίστοιχο Παράρτημα. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε θέσεις αντίστοιχες των θέσεων που υιοθετήθηκαν στην 1<sup>η</sup> φάση της 1<sup>ης</sup> περιόδου μετρήσεων. Οι λεπτομέρειες των μετρήσεων περιγράφονται στο Παράρτημα Ε της έκθεσης.

Η 2<sup>η</sup> και τελική φάση των μετρήσεων της 2<sup>ης</sup> περιόδου ολοκληρώθηκε την 29 Νοεμβρίου 2002 και περιελάμβανε μετρήσεις στο ακραίο άνοιγμα Α της γέφυρας. Η 2<sup>η</sup> φάση ακολούθησε σε γενικές γραμμές τα όσα πραγματοποιήθηκαν στην 1<sup>η</sup> φάση, αλλά αφορούσε το γειτονικό ακραίο άνοιγμα Α της γέφυρας, προς την πλευρά του ακρόβαθρου. Από την επεξεργασία των στοιχείων της ενοργάνωσης της χαραδρογέφυρας που συλλέχθηκαν στην 1<sup>η</sup> περίοδο μετρήσεων του προγράμματος, κρίθηκε απαραίτητο κατά τη 2<sup>η</sup> φάση της 2<sup>ης</sup> περιόδου ενοργάνωσης να επιδιωχθεί η λήψη μετρήσεων σημαντικά μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας από αυτής των προηγούμενων φάσεων. Κατά το στάδιο της επεξεργασίας τους, οι μετρήσεις αυτές θεωρήθηκαν μετρήσεις σε λειτουργικά φορτία και επομένως αναλύθηκαν με το αντίστοιχο λογισμικό αναγνώρισης μορφών σε λειτουργικά φορτία και επομένως αναμένεται να δώσουν πιο αξιόπιστη πληροφορία για τις ιδιοσυχνότητες της γέφυρας. Οι καταγραφές της 2<sup>ης</sup> φάσης παρουσιάζονται στο Παράρτημα Ε.

## 4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Οι υπολογιστικές τεχνικές αναγνώρισης, με το αντίστοιχο λογισμικό που αναπτύσσεται στα πλαίσια του παρόντος προγράμματος έχει τους κάτωθι γενικούς στόχους.

### 4.1 Συνοπτική Παρουσίαση Αναγνώρισης Ιδιοσυχνοτήτων - Ιδιομορφών (Modal Identification)

Η διαδικασία αυτή αποσκοπεί στον υπολογισμό των ιδιοτιμών και των ιδιομορφών ενός συστήματος ή μιας κατασκευής με βάση μετρητικά δεδομένα. Η μεθοδολογία αυτή λέγεται μορφική αναγνώριση (modal identification) της κατασκευής, δεν απαιτεί την ύπαρξη μοντέλου και δέχεται ως input τα μετρητικά δεδομένα από τα επιταχυνσιόμετρα. Το αντίστοιχο πρόγραμμα έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον Matlab.

Η γενική μεθοδολογία της αναγνώρισης βασίζεται στο γεγονός ότι η συνολική απόκριση της κατασκευής μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο αποκρίσεων ασύζευκτων ιδιομορφών ως ακολούθως

$$\ddot{x}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{x}_i + \omega_i^2 x_i = p_i f(t)$$

Η μετατόπιση στο κάθε σημείο μπορεί να υπολογιστεί από τις γενικευμένες συντεταγμένες  $x_i$

$$y_k = \sum_{j=1}^N \phi_{jk} x_j$$

Αν οι μετρήσεις των επιταχύνσεων στα επιλεγμένα σημεία είναι  $\hat{y}$ , τότε το κάτωθι πρόβλημα ελαχιστοποίησης

$$\|\ddot{y}_k - \hat{y}_k\| \rightarrow \min$$

καταλήγει στον υπολογισμό των ιδιοσυχνοτήτων, συντελεστών απόσβεσης και των τιμών των ιδιομορφών στις θέσεις των μετρήσεων.

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζεται αναλυτικά η πλήρης μεθοδολογία αναγνώρισης ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών για τις περιπτώσεις ελεύθερης ταλάντωσης, ταλάντωσης σε λειτουργικά φορτία (ambient vibration) και εξαναγκασμένης ταλάντωσης. Στην κατασκευή της γέφυρας της Καβάλας ήταν διαθέσιμα δεδομένα ελεύθερης ταλάντωσης που αποκτήθηκαν από διέγερση προερχόμενη από οδική κυκλοφορία αμέσως μετά την έξοδο ενός μεγάλου οχήματος από το κατάστρωμα της γέφυρας. Επομένως, η εφαρμογή της μεθοδολογίας αναγνώρισης μορφικού προσομοιώματος έγινε βάσει της περίπτωσης ελεύθερων ταλαντώσεων όπως περιγράφεται στο Παράρτημα Α, παράγραφο Α.1.

## 5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Οι υπολογιστικές τεχνικές αναθεώρησης μοντέλου και διάγνωσης, με το αντίστοιχο λογισμικό που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του παρόντος προγράμματος έχει τους κάτωθι γενικούς στόχους.

Η διαδικασία αναθεώρησης μοντέλου χρησιμοποιεί ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της κατασκευής στο οποίο αρχικά προσδιορίζονται από το χρήστη οι βασικοί παράμετροι δυσκαμψίας που ενδέχεται να αναθεωρηθούν για την ταύτιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τα μετρητικά στοιχεία. Στη συνέχεια το πρόγραμμα μέσω μίας διαδικασίας βελτιστοποίησης εκτελεί τη διαδικασία της αναθεώρησης. Η διαδικασία λέγεται διεθνώς «αναθεώρηση του μοντέλου» (model updating) και χρησιμοποιεί ως input τα αποτελέσματα του προηγούμενου σταδίου, της μορφικής αναγνώρισης. Το λογισμικό λειτουργεί επίσης σε περιβάλλον Matlab ενώ ο χρήστης του προγράμματος θα έχει πλήρεις οδηγίες χρήσεως για την επεξεργασία των μετρητικών δεδομένων και τη δημιουργία του μοντέλου προς αναθεώρηση. Το πρόγραμμα είναι γενικό με την έννοια ότι η μεθοδολογία αναφέρεται σε οποιαδήποτε κατασκευή. Ο χρήστης δεν επεμβαίνει στον προγραμματισμό της διαδικασίας αναθεώρησης, αλλά θα πρέπει να δώσει ως «input» το αντίστοιχο μοντέλο της γέφυρας προς εξέταση και να επιλέξει τις παραμέτρους που θέλει να αναθεωρήσει. Για την καλύτερη χρήση του προγράμματος θα χρησιμοποιηθεί η εμπειρία από την επεξεργασία των μετρητικών δεδομένων της γέφυρας της Καβάλας.

Η διάγνωση των κατασκευών είναι η διαδικασία όπου με κατάλληλη επεξεργασία μετρητικών δεδομένων είναι δυνατός ο εντοπισμός πιθανών βλαβών ή φθορών στις κατασκευές. Η διαδικασία αυτή λέγεται διεθνώς «structural diagnosis/damage diagnosis», και το αντίστοιχο λογισμικό είναι επίσης σε περιβάλλον Matlab. Η διαδικασία αυτή είναι ουσιαστικά ισοδύναμη με την διαδικασία αναθεώρησης και επίσης ακολουθεί μία διαδικασία βελτιστοποίησης. Για τον προσδιορισμό των πιθανών βλαβών, χρησιμοποιούνται ως input οι πειραματικές ιδιοτιμές και ιδιομορφές του σταδίου 1, καθώς και οι μετρήσεις που σε τακτά χρονικά διαστήματα λαμβάνονται από την υπόψη κατασκευή. Ο χρήστης του προγράμματος έχει πλήρεις οδηγίες

χρήσεως για την επεξεργασία των μετρητικών δεδομένων και τη δημιουργία του μοντέλου προς περαιτέρω επεξεργασία.

### 5.1 Συνοπτική Παρουσίαση Μεθοδολογίας Αναθεώρησης

Η μεθοδολογία αναθεώρησης βασίζεται στην επιλογή κάποιων παραμέτρων  $\theta_i$ , οι οποίες επηρεάζουν τη δυσκαμψία του συστήματος, και συγκεκριμένα το μητρώο δυσκαμψίας  $K = K(\theta_i)$ . Αν οι υπολογιστικές τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και των αντίστοιχων ιδιομορφών είναι  $\{\omega_i\}$  και  $\{\phi_{jk}\}$  και οι αντίστοιχες τιμές από τις μετρήσεις είναι  $\{\hat{\omega}_i\}$  και  $\{\hat{\phi}_{jk}\}$ , τότε η κάτωθι διαδικασία βελτιστοποίησης

$$\|\omega_i - \hat{\omega}_i\| + \|\phi_{jk} - \hat{\phi}_{jk}\| \rightarrow \min$$

καταλήγει στον υπολογισμό των τιμών των παραμέτρων  $\theta_i$ .

Η λογική πίσω από την χρήση των συντελεστών  $\theta_i$  είναι πως οι διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τη δυσκαμψία του συστήματος μπορούν σε μία πρώτη προσέγγιση να εκφραστούν μέσω των παραμέτρων αυτών. Οι συντελεστές  $\theta_i$  πολλαπλασιάζουν τη δυσκαμψία του υπόψη δομικού στοιχείου. Για παράδειγμα, αν η δυσκαμψία ενός στοιχείου δοκού σε καμπτική ένταση στο ένα του άκρο, ενώ το άλλο παραμένει πακτωμένο, είναι (από την γνωστή σχέση της Στατικής):

$$K_b = \frac{4EI}{L}$$

τότε αυτή θεωρείται στην συγκεκριμένη μεθοδολογία αναθεώρησης ως

$$K_b = \theta_i \frac{4EI}{L} = \frac{4(E\theta_i)I}{L}$$

και το  $\theta_i$  είναι η παράμετρος που προσδιορίζεται μέσω της κατάλληλης μεθοδολογίας ελαχιστοποίησης ώστε να έχουμε, κατά το δυνατόν, ταύτιση των μετρούμενων ιδιοτιμών- ιδιομορφών με τα αποτελέσματα του μοντέλου.

Περισσότερες λεπτομέρειες στην υπολογιστική τεχνική αναθεώρησης του μοντέλου αναφέρονται στο Παράρτημα Β.

## 6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ 2<sup>η</sup> ΧΑΡΑΔΡΟΓΕΦΥΡΑ ΤΗΣ ΚΑΒΑΛΑΣ

### 6.1 Προσομοίωση της Γέφυρας

Η συνδεσμολογία-κομβολογία του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζεται στο Παράρτημα ΣΤ. Γενικά αναφέρεται πως χρησιμοποιήθηκαν πεπερασμένα στοιχεία δοκού.

1. Για την προσομοίωση των βάθρων χρησιμοποιήθηκαν κατακόρυφα στοιχεία δοκού, ενώ τα βάθρα θεωρήθηκαν πακτωμένα στην θεμελίωση, με βάση τα δεδομένα της εδαφοτεχνικής μελέτης που χρησιμοποιεί ο μελετητής (θεμελίωση με φρέατα).

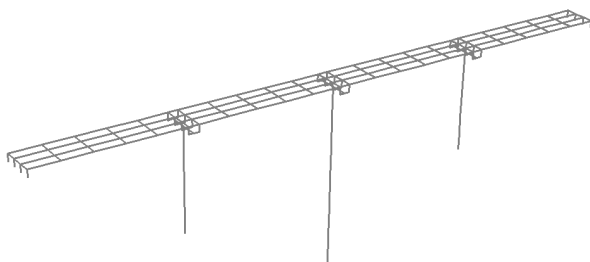
2. Η ανωδομή προσομοιώθηκε με στοιχεία δοκού σε διάταξη εσχάρας (ισοδύναμη εσχάρα). Με τον τρόπο αυτό προσομοιώθηκαν οι τέσσερις κύριες δοκοί καθώς και οι διαδοκίδες στα άκρα των ανοιγμάτων.
3. Τέλος, τα εφέδρανα προσομοιώθηκαν με ισοδύναμα στοιχεία δοκού μικρού μήκους, των οποίων η δυσκαμψία είναι ίση με τη δυσκαμψία των εφεδράνων.

Κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων. Το ένα μοντέλο ενεργοποιεί πλήρως τα εφέδρανα χωρίς τη χρήση διατμητικών συνδέσμων (μοντέλο Α), ενώ το δεύτερο ενεργοποιεί τους διατμητικούς συνδέσμους με τον τρόπο που ορίζει ο μελετητής και χρησιμοποιεί τα 2/3 της δυσκαμψίας των βάρων, όπως και ο μελετητής (μοντέλο Β). Προφανώς το 2<sup>ο</sup> μοντέλο (Β) χρησιμεύει μόνον για ανάλυση σε σεισμό, και στην παρούσα εργασία για σύγκριση με το μοντέλο του μελετητή. Για την αναθεώρηση της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε το πρώτο μοντέλο (Α).

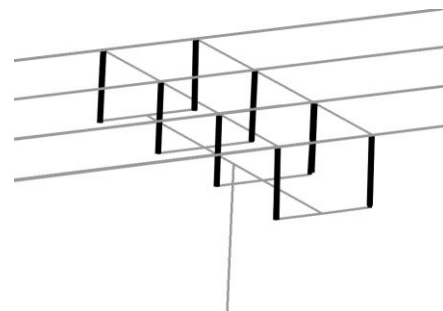
Η δημιουργία του μοντέλου μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε λογισμικό παραγωγής αυτόματου πλέγματος ή να δοθεί μια δεδομένη συνδεσμολογία-κομβολογία. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το ABAQUS λόγω των πολύ καλών δυνατοτήτων του για τη γραφική παραγωγή της γεωμετρίας του μοντέλου, και στη συνέχεια έγινε μεταφορά στο MATLAB. Γενικά, δεν υπάρχει περιορισμός του λογισμικού που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του μοντέλου, αλλά θα πρέπει το τελικό μοντέλο να λειτουργεί σε περιβάλλον MATLAB.

## 6.2 Περιγραφή Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων της Γέφυρας

Για την μοντελοποίηση του αριστερού κλάδου της 2ης χαραδρογέφυρας στο τμήμα 2 της Παράκαμψης Καβάλας, χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά, τρισδιάστατα ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία. Η μοντελοποίηση έγινε με τη χρήση του λογισμικού Abaqus.



Σχήμα 6.2.1



Σχήμα 6.2.2

Η ανωδομή μοντελοποιήθηκε ως ισοδύναμη εσχάρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2.1. Η εσχάρα αποτελείται από τις τέσσερις κυρίως πλακοδοκούς, τις εγκάρσιες διαδοκίδες στην αρχή και στο τέλος των ανοιγμάτων, τα πλακίδια σύνδεσης μεταξύ των ανοιγμάτων και τις εγκάρσιες συνεργασίες λόγω της πλάκας καταστρώματος. Η ανωδομή εδράζεται επί των 3 βάρων και των 2 ακρόβαθρων μέσω ελαστομεταλλικών εφεδράνων.

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα προσομοιώνονται ως ισοδύναμες ράβδοι με γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά τέτοια ώστε να παρέχουν την ίδια διατμητική ακαμψία με τα εφέδρανα, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2.2 (τα

σκουρόχρωμα ραβδωτά στοιχεία μοντελοποιούν τα εφέδρανα). Η στροφική ακαμψία των εφεδράνων είναι πολύ μικρή και μπορεί να αγνοηθεί στο μοντέλο. Οι ράβδοι των εφεδράνων συνδέουν το κέντρο βάρους της ανωδομής με τη δοκό έδρασης στην κεφαλή των βάθρων. Η δοκός έδρασης θεωρείται άκαμπτη και συνδέεται με το κέντρο βάρους των μεσόβαθρων.

Σε ότι αφορά τις συνοριακές συνθήκες του μοντέλου, τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα είναι πακτωμένα στα δύο ακρόβαθρα, ενώ τα τρία μεσόβαθρα είναι πακτωμένα στο έδαφος.

Στην περίπτωση όπου γίνεται μελέτη της συμπεριφοράς της γέφυρας σε σεισμικά φορτία (μεγάλες μετακινήσεις), στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων παγιώνονται οι ακόλουθες σειρές εφεδράνων:

- Αριστερή σειρά εφεδράνων Μεσόβαθρου M1
- Δεξιά σειρά εφεδράνων Μεσόβαθρου M2
- Δεξιά σειρά εφεδράνων Μεσόβαθρου M3

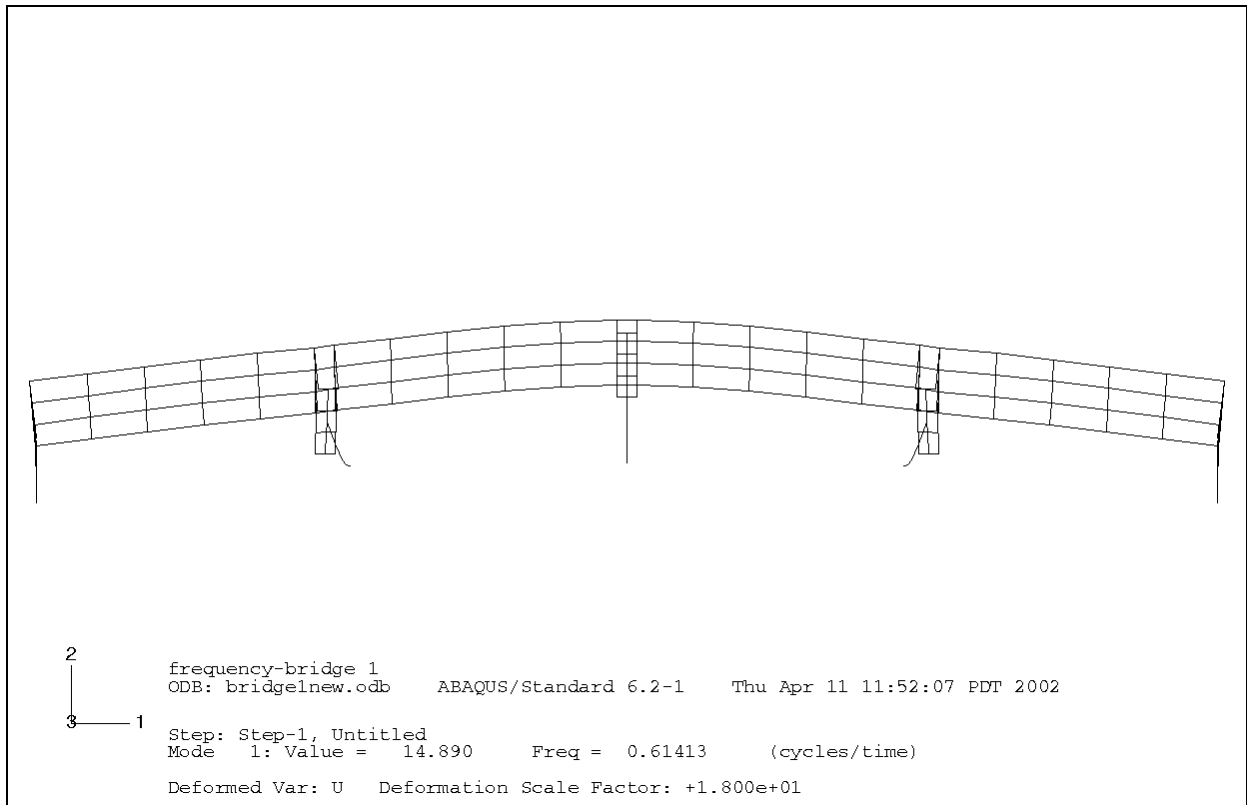
Στη συνέχεια δίνονται σχηματικά οι 8 πρώτες ιδιομορφές του μοντέλου της γέφυρας, όπως αυτές προκύπτουν από την ανάλυση του λογισμικού Abaqus.

Από τις 8 πρώτες ιδιομορφές οι 1, 3, 4, 7 είναι εγκάρσιες, η 2η είναι κατά μήκος ενώ οι 5, 6, 8 είναι καμπτικές.

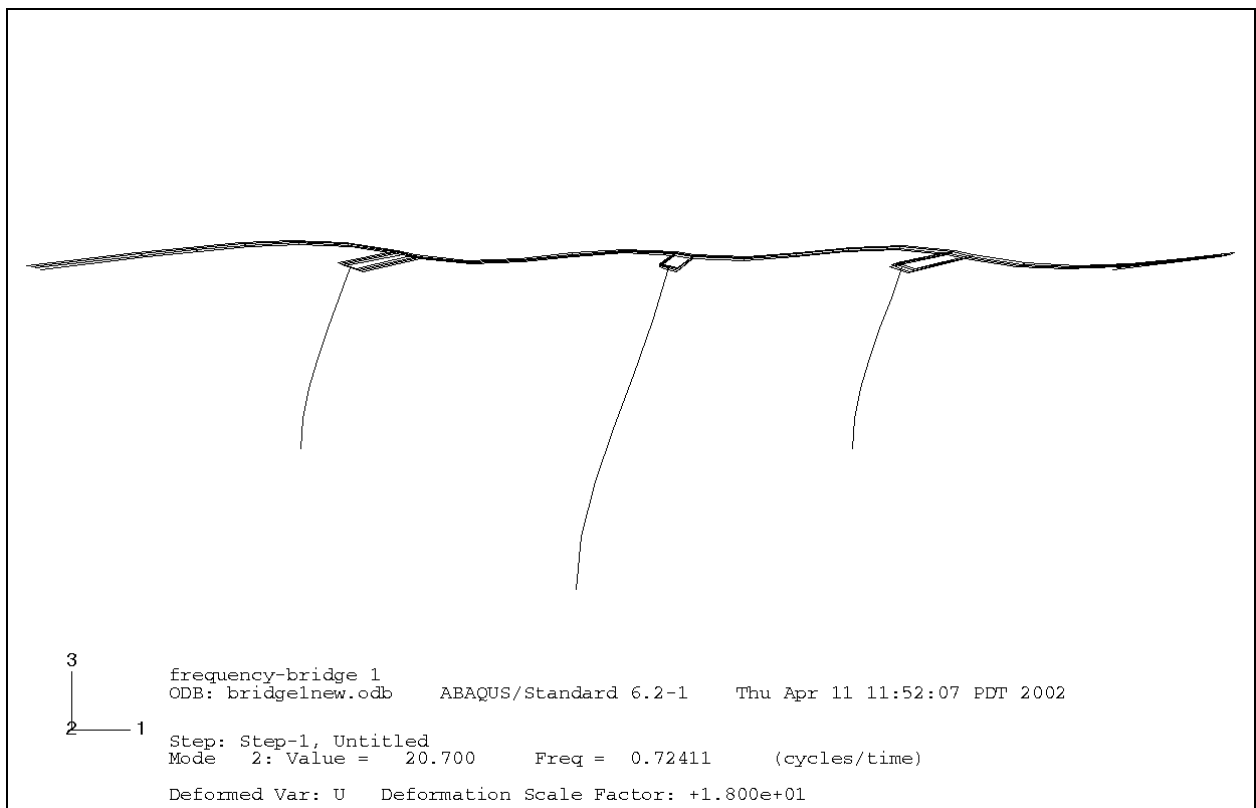
Το ίδιο μοντέλο, μοντελοποιήθηκε και σε περιβάλλον Matlab, για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα από το λογισμικό αναθεώρησης μοντέλων.

Να σημειωθεί ότι το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε στην τεχνική αναθεώρησης είναι πιο σύνθετο από αυτό που χρησιμοποιήθηκε από το μελετητή στην αντίστοιχη στατική μελέτη. Οι λόγοι που χρησιμοποιήθηκε αυτό το μοντέλο είναι ότι:

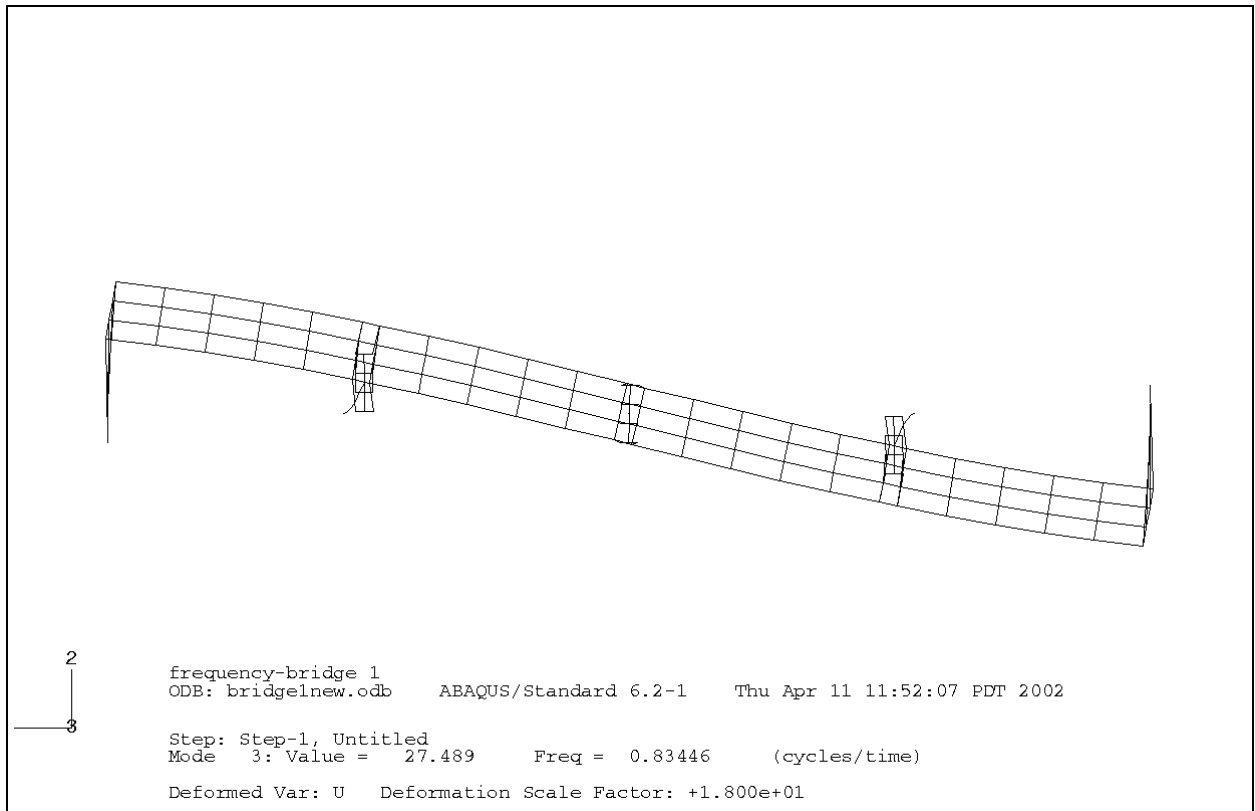
1. Στην γέφυρα τοποθετήθηκαν αισθητήρες και στις δύο πλευρές (δηλ. αριστερά και δεξιά του καταστρώματος), και απαιτείται ο καθορισμός των θέσεων αυτών. Με το παρόν μοντέλο αυτό είναι δυνατό, ενώ το μοντέλο του μελετητή είναι πολύ «απλοϊκό» για την περιγραφή της γεωμετρίας της γέφυρας με επιθυμητή ακρίβεια, δεδομένου ότι χρησιμοποιεί ένα στοιχείο δοκού για να περιγράψει την συμπεριφορά της διατομής του καταστρώματος.
2. Η αναθεώρηση της γέφυρας είναι σημαντικά διαφορετική διαδικασία (και μάλιστα πολύ πιο ευαίσθητη) από τη διαδικασία του σχεδιασμού, στον οποίον θεωρούνται μόνον οι μέγιστες τιμές των φορτίσεων σε οριακή κατάσταση, ενώ υπάρχουν οι απαιτούμενοι συντελεστές ασφαλείας για την εξάλειψη των αβεβαιοτήτων.
3. Η χρήση ενός λεπτομερούς μοντέλου δεν επιβαρύνει σημαντικά το χρόνο επίλυσης του προβλήματος της αναθεώρησης. Η βασική επιβάρυνση είναι η επιλογή μεγάλου αριθμού παραμέτρων  $\theta_i$ . Δεδομένου ότι σε πρακτικές εφαρμογές επιλέγονται σχετικά λίγες παράμετροι (3 – 5), και ότι αυτές «βαθμονομούνται» με τις «αναγνωρισμένες» ιδιομορφές, οι υπόλοιπες ιδιομορφές θα προκύψουν από το μοντέλο με τη γνωστή διαδικασία εύρεσης ιδιοτιμών–ιδιομορφών που χρησιμοποιείται από όλα τα προγράμματα. Επομένως, όσο πιο ακριβές είναι το μοντέλο τόσο πιο αντιπροσωπευτικές ιδιομορφές θα δώσει.



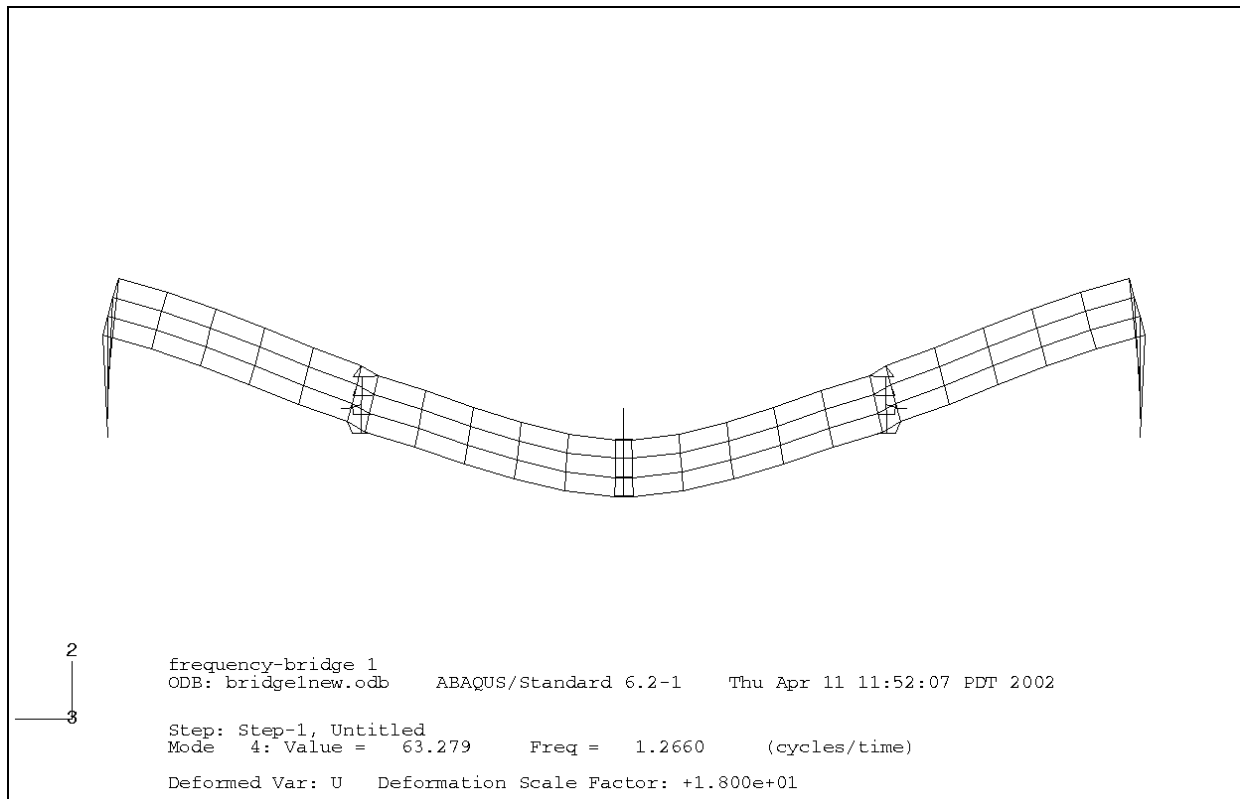
$$\omega_1 = 0,6141 \text{ Hz}$$



$$\omega_2 = 0,7241 \text{ Hz}$$

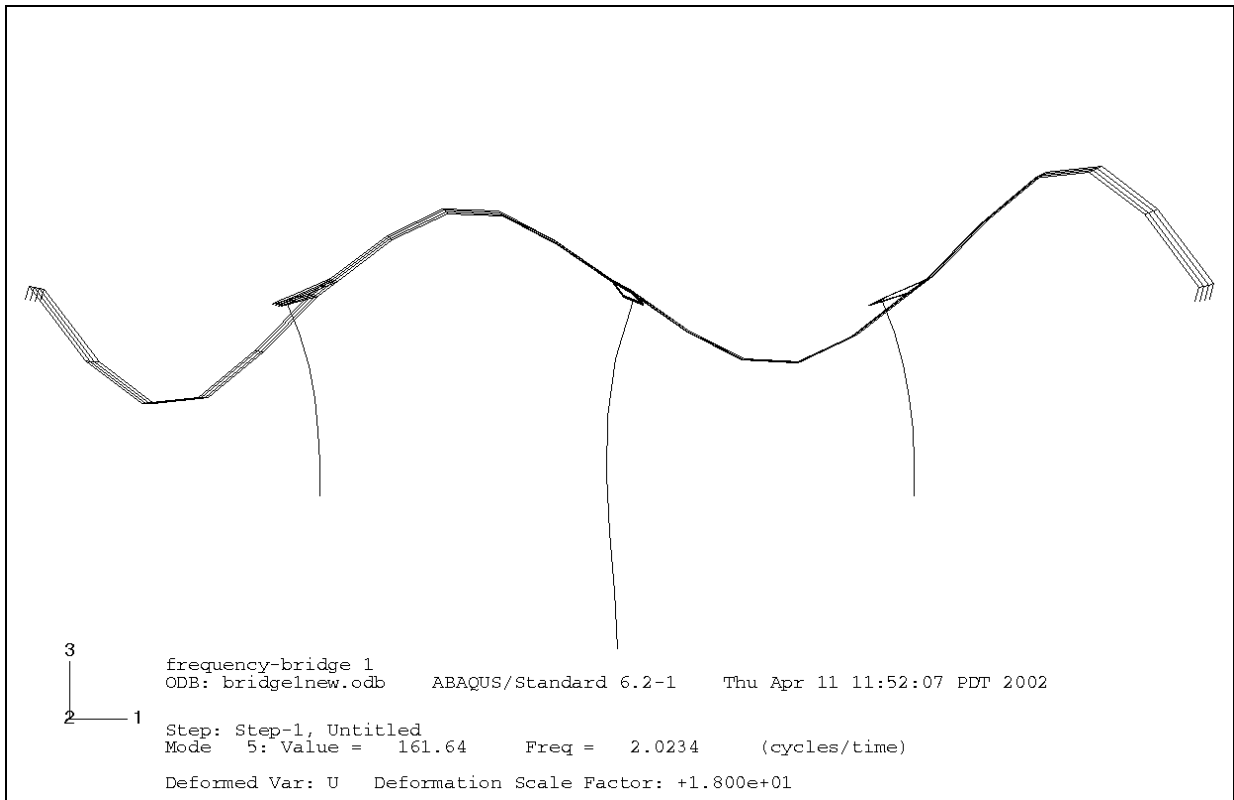


$$\omega_3 = 0,8344 \text{ Hz}$$

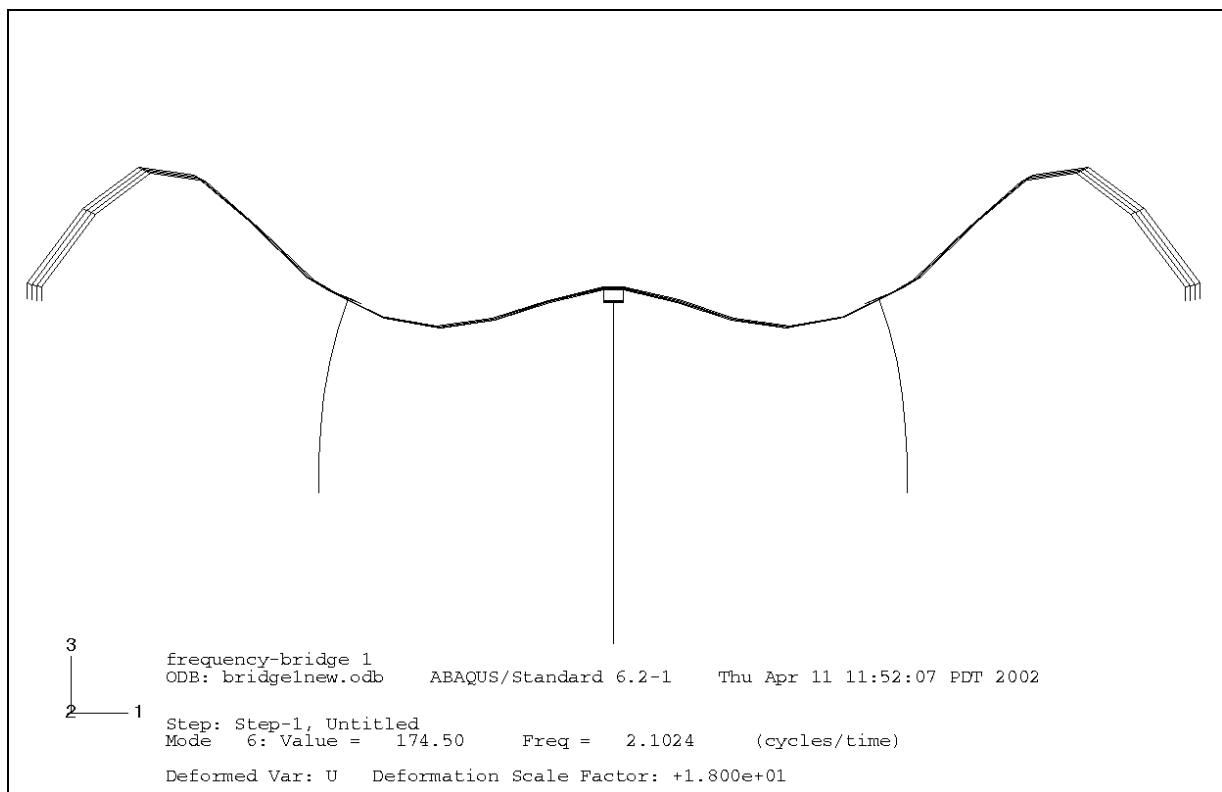


$$\omega_4 = 1,2620 \text{ Hz}$$

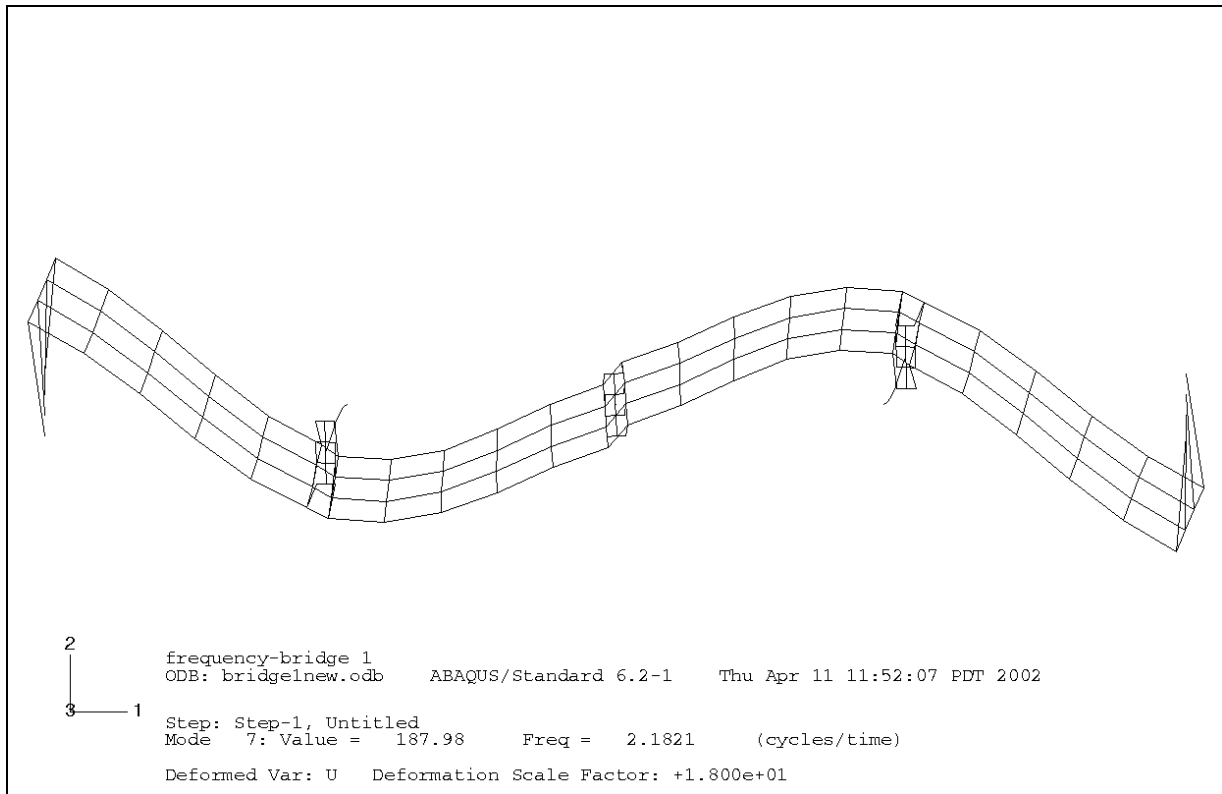




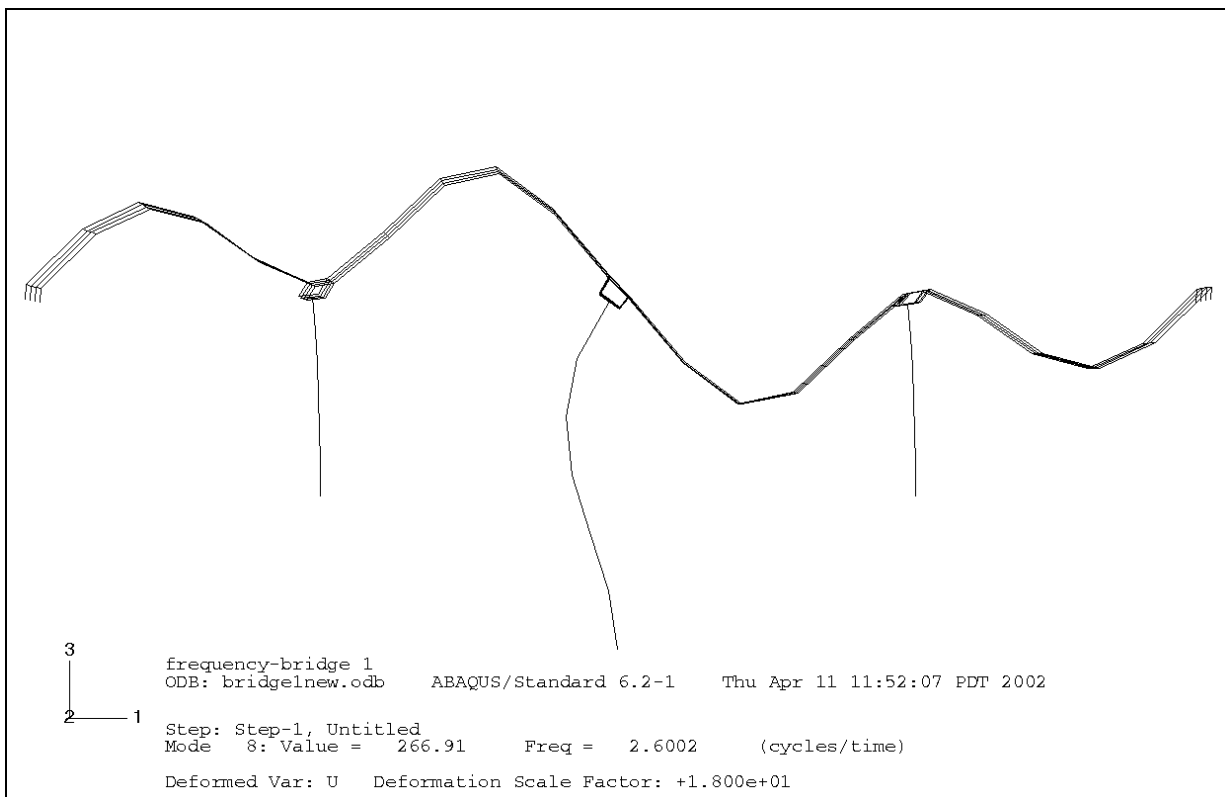
$\omega_5 = 2,0234 \text{ Hz}$



$\omega_6 = 2,1024 \text{ Hz}$



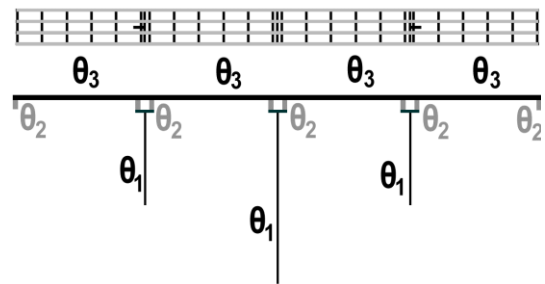
$\omega_7 = 2,1821 \text{ Hz}$



$\omega_8 = 2,6002 \text{ Hz}$

### 6.3 Αριθμητικά Αποτελέσματα για την Γέφυρα της Καβάλας – Αναγνώριση Ιδιοσυχνοτήτων και Ιδιομορφών

Η 2η χαραδρογέφυρα της παράκαμψης Καβάλας της Εγνατίας Οδού έχει μήκος 180 μέτρα και 4 ανοίγματα, με πλάτος 13 μέτρα για το κατάστρωμα του κάθε κλάδου της διπλής οδού. Το κατάστρωμα δε διαθέτει ενδιάμεσο σύνδεσμο διαστολής και «επιπλέει» πάνω σε ελαστομερή μεταλλικά εφέδρανα. Τα κοίλα βάρθα από σκυρόδεμα είναι τετράγωνης διατομής με πάχος 40 εκατ. ενώ το μέγιστο ύψος των βάρθων φτάνει τα 53 μ. Η κατασκευή και το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.3.1.



**Σχήμα 6.3.1** Γέφυρα της Καβάλας και μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

Οι μέθοδοι αναγνώρισης που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια εφαρμόστηκαν σε δεδομένα που προέρχονταν τόσο από πειραματικές μετρήσεις κατασκευών όσο και από προσομοιωμένα δεδομένα μετρήσεων.

Συγκεκριμένα, το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στην εφαρμογή της μεθόδου μορφικής αναγνώρισης με τη χρήση δεδομένων ελεύθερης ταλάντωσης όπως και εξαναγκασμένη συνεχή ταλάντωση προερχόμενη από τη διέλευση οχημάτων πάνω στη γέφυρα. Περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο έγιναν οι πειραματικές μετρήσεις, ο τρόπος διέγερσης και το μέρος από τη χρονική ιστορία των μετρήσεων που επεξεργάστηκε και χρησιμοποιήθηκε για την αναγνώριση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου.

#### 6.3.1 Αναγνώριση με Χρήση Δεδομένων Ελεύθερης Ταλάντωσης από την χαραδρογέφυρα της Καβάλας

Η γέφυρα στην οποία εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι αναγνώρισης ελεύθερης ταλάντωσης με κλασσική και μη κλασσική απόσβεση όπως αναφέρθηκε, είναι η 2<sup>η</sup> χαραδρογέφυρα της παράκαμψης Καβάλας στην Εγνατία οδό.

##### 6.3.1.1 Περιγραφή της Διαδικασίας Μετρήσεων

Η αναγνώριση των δυναμικών χαρακτηριστικών της γέφυρας έγινε με τη χρήση δεδομένων ταλάντωσης προερχόμενη από τη διέλευση οχημάτων πάνω στο κατάστρωμα της γέφυρας, και συγκεκριμένα με την επεξεργασία της χρονικής ιστορίας της επιτάχυνσης των σημείων μέτρησης, όπως αυτή προέκυψε ύστερα από κατάλληλη διέγερση.

### 6.3.1.2 Διαδικασία Διέγερσης

Για τη διέγερση της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε στις δύο φάσεις της 1<sup>ης</sup> περιόδου μετρήσεων και στη 1<sup>η</sup> φάση της 2<sup>ης</sup> περιόδου μετρήσεων ένας αριθμός φορτηγών, τα οποία διέσχιζαν κατά μήκος την γέφυρα με αυθαίρετη (μη προκαθορισμένη, μη σταθερή) ταχύτητα. Με τον τρόπο αυτό διεγέρθηκε η κατασκευή από μια άγνωστη μη μοντελοποιημένη διέγερση. Με την απομάκρυνση του φορτηγού από τη γέφυρα, η κατασκευή συνέχιζε να ταλαντώνεται χωρίς την επίδραση της αρχικής διέγερσης. Έτσι τα δεδομένα που καταγράφονταν από το χρονικό σημείο αυτό και μετά θεωρούνται ως απόκριση της γέφυρας σε ελεύθερη ταλάντωση. Στη 2<sup>η</sup> φάση της 2<sup>ης</sup> περιόδου μετρήσεων η κατασκευή διεγέρθηκε από περισσότερα από ένα οχήματα (επιβατικά αυτοκίνητα και φορτηγά) τα οποία διέσχιζαν ταυτόχρονα τη γέφυρα. Η διάρκεια των μετρήσεων ήταν μεγαλύτερη των 5 λεπτών ανά γεγονός.

### 6.3.1.3 Διαδικασία Καταγραφής Δεδομένων

Από τα τέσσερα ανοίγματα της γέφυρας, στα τρία (B, C, D) έγιναν μετρήσεις που αντιστοιχούσαν σε διεγέρσεις από τη διέλευση φορτηγών στη γέφυρα (εξαναγκασμένη ταλάντωση), ενώ για το άνοιγμα A οι μετρήσεις βασίστηκαν σε διεγέρσεις από συνεχή οδική κυκλοφορία (ταλάντωση λόγω λειτουργικών φορτίων). Ελήφθησαν υπόψη και διεγέρσεις λόγω ανέμου, που αντιμετωπίζονται όπως αυτές της οδικής κυκλοφορίας, αλλά αυτές ήταν πολύ μικρού μεγέθους και οδήγησαν στον εντοπισμό μόνο της βασικής ιδιοσυχνότητας της κατασκευής.

Στη περίπτωση των μετρήσεων βασισμένων σε ταλαντώσεις λόγω διέλευσης φορτηγού, σε κάθε διέλευση του φορτηγού καταγράφονταν η απόκριση σε ένα μόνο άνοιγμα. Προκειμένου να εξεταστούν οι μετρήσεις του ενός ανοίγματος σε σχέση με τις αντίστοιχες του άλλου, χρησιμοποιήθηκε μία διάταξη δέκα (10) μετρητικών οργάνων ώστε σε όλες τις μετρήσεις ανεξαρτήτως ανοίγματος να υπάρχουν κοινά σημεία μέτρησης. Για το λόγο αυτό υιοθετήθηκε η χρήση σταθερών και μεταβλητών σημείων μέτρησης.

Οι μετρήσεις των δεδομένων έγιναν με τέτοιο τρόπο ώστε να περιλαμβάνεται όλο το κομμάτι της χρονικής εξέλιξης της επιτάχυνσης του κάθε σημείου μέτρησης, τόσο πριν όσο και μετά τη διέλευση του φορτηγού. Το γεγονός αυτό είχε σαν αποτέλεσμα, η κάθε καταγραφή να αποτελείται από τρία χρονικά διαστήματα.

Το πρώτο αφορά την ταλάντωση της γέφυρας πριν τη διέλευση του φορτηγού-διεγέρτη. Το σήμα αυτό οφείλεται κατά ένα μέρος στη διέγερση της γέφυρας από τον άνεμο και γενικότερα το περιβάλλον αλλά και από την αλληλεπίδραση του μέρους της γέφυρας που έχει ήδη διεγερθεί, αλλά δεν μελετάται, με το μέρος της γέφυρας που εξετάζεται.

Το δεύτερο χρονικό μέρος του καταγεγραμμένου σήματος είναι η μέτρηση της απόκρισης της κατασκευής κατά τη διάρκεια της διέλευσης του φορτηγού. Το μέρος αυτό του σήματος είναι η απόκριση της κατασκευής σε εξαναγκασμένη ταλάντωση, και οφείλεται στη διέγερση του φορτηγού.

Τέλος το διάστημα που απομένει, από την έξοδο του φορτηγού από το μετρούμενο άνοιγμα της γέφυρας μέχρι την παύση της μέτρησης, αποτελεί την απόκριση της γέφυρας χωρίς την παρουσία του διεγέρτη. Στο χρονικό αυτό διάστημα η γέφυρα εκτελεί ελεύθερη ταλάντωση, με αρχικές συνθήκες, την μετατόπισή της και την ταχύτητά της την χρονική στιγμή της εξόδου του φορτηγού από το μετρούμενο άνοιγμα.

Για να είναι δυνατός ο διαχωρισμός των διαφορετικών αυτών χρονικών διαστημάτων, χρησιμοποιήθηκε ένα από τα επιταχυνσιόμετρα προκειμένου να μεταδοθεί στις μετρήσεις, η πληροφορία της εισόδου και εξόδου του κάθε φορτηγού-διεγέρτη, από το μετρούμενο άνοιγμα. Για το σκοπό αυτό, σε κάθε μέτρηση χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας μέτρησης της οριζόντιας ταλάντωσης. Κατά την είσοδο και έξοδο του φορτηγού από το κατάστρωμα της γέφυρας, ο παραπάνω αισθητήρας διεγείροταν στιγμιαία με ένα χτύπημα. Έτσι ήταν δυνατόν να εντοπιστεί οι χρονική στιγμή εισόδου και εξόδου των φορτηγών από τη γέφυρα και ο προσδιορισμός του μέρους της απόκρισης της γέφυρας που αντιστοιχεί στην ελεύθερη ταλάντωση. Το αποτέλεσμα του χτυπήματος στη μέτρηση της επιτάχυνσης στην οριζόντια κατεύθυνση και ο χαρακτηρισμός τις ταλάντωσης φαίνονται στο Σχ. 6.3.2.

Στην περίπτωση των μετρήσεων βασισμένων σε ταλαντώσεις λόγω λειτουργικών φορτίων (συνεχή και ταυτόχρονη διέλευση επιβατικών οχημάτων και φορτηγών), λαμβάνεται υπόψη το σύνολο της χρονικής ιστορίας, η οποία ήταν αρκετά μεγάλης διάρκειας (> 5 min). Οι χρονικές ιστορίες των καταγραφών παρουσιάζονται στο Παράρτημα Ε για το άνοιγμα Α.

#### **6.3.1.4 Περιγραφή Σημείων Μέτρησης**

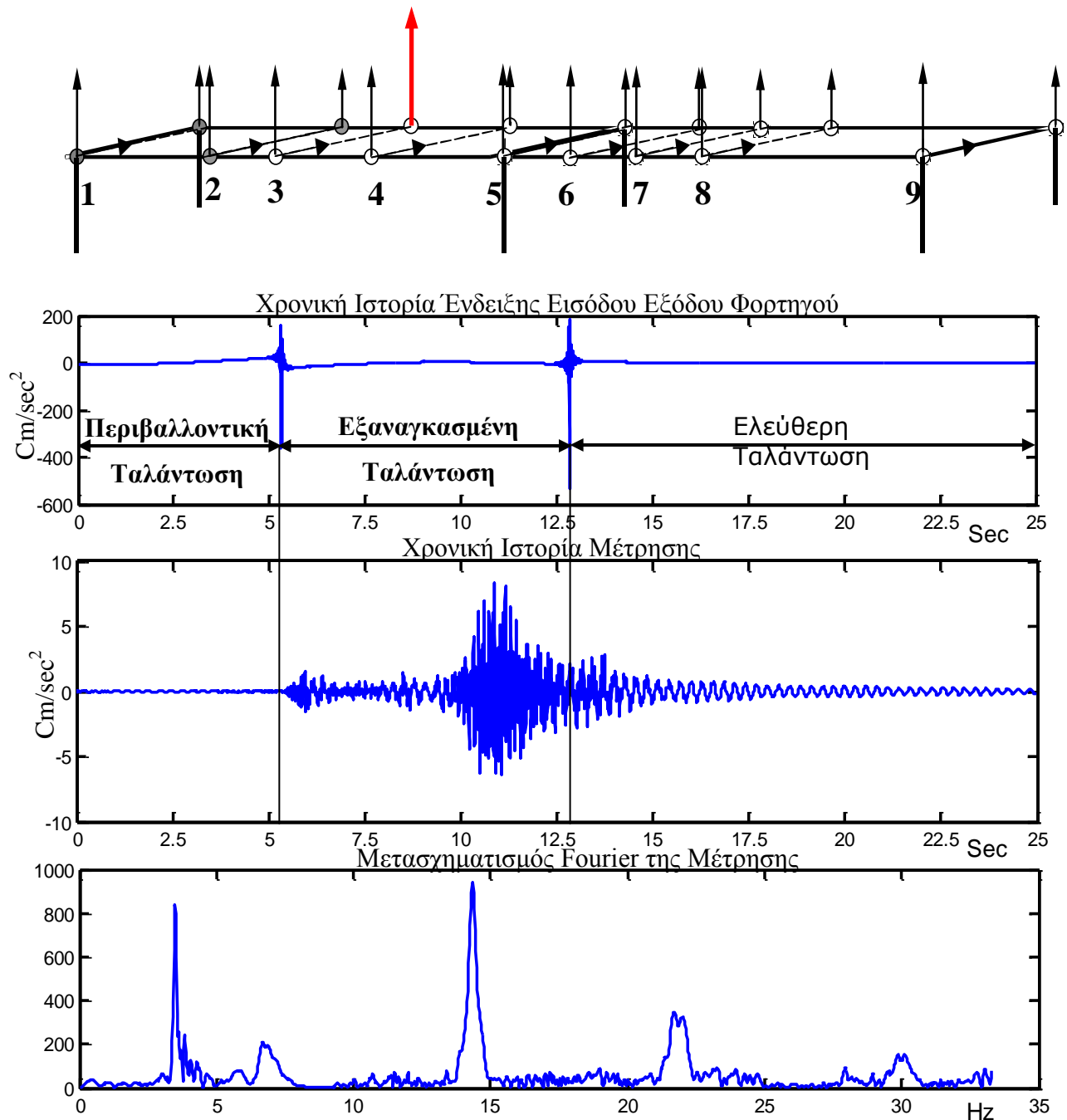
Οι θέσεις των μετρητικών οργάνων έχουν ένα σημαντικό ρόλο για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων. Προκειμένου να αξιοποιηθεί όσο το δυνατόν περισσότερη πληροφορία από την κίνηση της κατασκευής τοποθετήθηκε ένα κατάλληλα διαμορφωμένο δίκτυο αισθητήρων. Για τον λόγο αυτό σε κάθε μέτρηση που λάμβανε χώρα υπήρχε μια συστηματική τοποθέτηση των δέκα συνολικά αισθητήρων, η οποία φαίνεται στο σχήμα Δ8 του Παραρτήματος Δ για κάθε άνοιγμα της γέφυρας.

Οι μετρήσεις έγιναν σε δύο στάδια κάθε ένα από το οποίο περιελάμβανε και ένα από τα ανοίγματα της γέφυρας στα οποία έγιναν μετρήσεις. Έτσι για κάθε άνοιγμα και για κάθε μέτρηση υπήρχαν έξι αισθητήρες που κατέγραφαν την κατακόρυφη κίνηση της γέφυρας (τρεις αριστερά και τρεις δεξιά), τρεις αισθητήρες που κατέγραφαν την εγκάρσια κίνηση, και ένας αισθητήρας που κατέγραφε την οριζόντια διαμήκη κίνηση της κατασκευής.

Για να ληφθούν μετρήσεις από όλο το μήκος του κάθε ανοίγματος, όλοι οι αισθητήρες που βρίσκονταν στις διατομές 1 και 2 (συνολικά 7 αισθητήρες: τέσσερις κατακόρυφοι, δύο εγκάρσιοι και ένας οριζόντιος), παρέμεναν σταθεροί στο σύνολο των μετρήσεων (σχήμα 6.3.2). Τα υπόλοιπα τρία μετρητικά όργανα (δύο κατακόρυφα αριστερά και δεξιά και ένα εγκάρσιο δεξιά) βρίσκονταν στην ίδια διατομή μεταξύ τους, η οποία για κάθε μέτρηση ήταν διαφορετική. Έτσι έγινε μια «σάρωση» του ανοίγματος C της γέφυρας από διαδοχικές μετρήσεις των κινητών αισθητήρων στις διατομές 3 και 4.

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για την καταγραφή των μετρήσεων στο άνοιγμα D της γέφυρας. Οι σταθεροί αισθητήρες στις διατομές 1 και 2 παρέμειναν στη θέση τους και οι κινητοί τοποθετήθηκαν διαδοχικά στις διατομές 5, 6, 7, 8 και 9. Ομοίως, έγινε η «σάρωση» και των ανοιγμάτων Α και Β της γέφυρας.

Με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω, ήταν δυνατή η εξαγωγή δεδομένων στην κατακόρυφη και στην εγκάρσια κατεύθυνση από περισσότερα σημεία μέτρησης απ' ότι επέτρεπε ο αριθμός των μετρητικών οργάνων. Επίσης διενεργήθηκαν μετρήσεις και στη διαμήκη κατεύθυνση με σκοπό τον υπολογισμό ιδιομορφών στην κατεύθυνση αυτή. Στο σχήμα Δ.8 του παραρτήματος Δ, παρουσιάζονται όλες οι θέσεις στις οποίες έγιναν μετρήσεις και οι κατευθύνσεις των μετρητικών οργάνων.



**Σχήμα 6.3.2**

### 6.3.1.5 Αποτελέσματα Αναγνώρισης

Η αναγνώριση των μορφικών χαρακτηριστικών έγινε με τη χρήση τόσο του μοντέλου κλασσικής απόσβεσης όσο και με το μοντέλο μη κλασσικής απόσβεσης. Για την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης σφάλματος εφαρμόστηκε η μέθοδος Quasi-Newton, αλλά στη συνέχεια επαναλήφθηκε η διαδικασία αναγνώρισης με την υβριδική μέθοδο ελαχιστοποίησης, η οποία έδωσε καλύτερα αποτελέσματα (Παράρτημα Γ).

Κάθε διέλευση φορτηγού που συνοδεύονταν από πειραματικές μετρήσεις στα σημεία των σταθερών αισθητήρων και σε κάποια σημεία από το σύνολο των θέσεων των κινητών αισθητήρων, χαρακτηρίζεται στη συνέχεια ως γεγονός. Κάθε γεγονός αντιστοιχεί σε διαφορετική διέγερση, αφού περνούσαν διαφορετικά φορτηγά με

διαφορετικές ταχύτητες. Αποτέλεσμα της διαφορετικής διέγερσης της κατασκευής σε κάθε γεγονός ήταν η διέγερση κάθε φορά ενός συνόλου ιδιομορφών το οποίο, πέρα από δύο κοινές, περιείχε διαφορετικές ιδιομορφές.

Η παραπάνω ιδιαιτερότητα των μετρήσεων σε συνδυασμό με το ότι κάθε γεγονός περιελάμβανε μετρήσεις των κινητών αισθητήρων από διαφορετικά σημεία μέτρησης, είχαν σαν αποτέλεσμα τον πλήρη προσδιορισμό μόνο τριών ιδιομορφών. Στο μοντέλο κλασικής απόσβεσης με τη μέθοδο ελαχιστοποίησης γενετικών αλγορίθμων ήταν δυνατόν να εντοπιστούν και άλλες ιδιομορφές οι οποίες δεν εμφανίζονταν σε κάθε γεγονός με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο πλήρης προσδιορισμός των σε όλα τα σημεία μέτρησης των κινητών αισθητήρων στο 3<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> άνοιγμα της γέφυρας.

#### **6.3.1.5.1 Μοντέλο Κλασικής Απόσβεσης**

Η μέθοδος αναγνώρισης με τη χρήση του μοντέλου κλασικής απόσβεσης και με την ελαχιστοποίηση Quasi-Newton αποδείχθηκε αρκετά ευαίσθητη ως προς τις αρχικές συνθήκες σε σχέση με την αντίστοιχη του μοντέλου μη κλασικής απόσβεσης. Για τον λόγο αυτό, στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιήθηκε η ελαχιστοποίηση γενετικών αλγορίθμων προκειμένου να λυθούν προβλήματα σύγκλισης σε τοπικά ελάχιστα ή μη σύγκλισης. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση χρήσης του υβριδικού γενετικού αλγορίθμου, ο χρήστης δηλώνει το χρονικό διάστημα των δεδομένων στο οποίο θέλει να γίνει η προσαρμογή του μοντέλου στις μετρήσεις καθώς επίσης και τον αριθμό των ιδιομορφών που θεωρεί ότι υπάρχουν. Στην περίπτωση που ο αριθμός τους είναι μεγαλύτερος από αυτόν που υποδήλωσε ο χρήστης τότε το πρόγραμμα υπολογίζει μόνο όσες δήλωσε ο χρήστης ενώ στην περίπτωση που ο χρήστης υποδηλώσει τον εντοπισμό περισσότερων ιδιομορφών από όσες πραγματικά υπάρχουν τότε παρατηρήθηκε ότι το πρόγραμμα υπολογίζει μερικές από αυτές με πολλαπλότητα, ώστε ο συνολικός αριθμός τους να είναι ίσος με αυτόν που δήλωσε ο χρήστης.

Οι τιμές των αναγνωρισμένων ιδιοσυχνοτήτων και συντελεστών απόσβεσης της εγκάρσιας ιδιομορφής και των καμπτικών ιδιομορφών παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3.1. Στον Πίνακα 6.3.1 παρουσιάζονται επίσης η μέση τιμή και οι συντελεστές απόκλισης, δηλαδή ο λόγος της τυπικής απόκλισης του μέσου όρου των αποτελεσμάτων προς το μέσο όρο των αποτελεσμάτων, για την ανάλυση με το μοντέλο της κλασικής απόσβεσης διάφορων συμβάντων διέγερσης. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν την πολύ καλή εκτίμηση των ιδιοσυχνοτήτων με διασπορά της τάξης του 1% γύρω από τη μέση τιμή ενώ οι εκτιμήσεις για τους συντελεστές απόσβεσης παρουσιάζουν μεγαλύτερη διασπορά. Στον Πίνακα 6.3.2 παρουσιάζονται επιπλέον 9 αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες (5 καμπτικές, 2 εγκάρσιες και 2 διαμήκεις) και οι αντίστοιχοι συντελεστές απόσβεσης, με τη διαφορά ότι οι ιδιομορφές αυτές δε διεγείρονται σε αρκετά γεγονότα μετρήσεων ώστε να εκτιμηθούν οι μέσες τιμές, η διασπορά τους και οι πλήρεις ιδιομορφές.

Για την εγκάρσια κατεύθυνση, τα αποτελέσματα προέκυψαν με τη χρήση του μοντέλου κλασικής απόσβεσης, με επεξεργασία όλων των μετρήσεων εγκάρσιας κατεύθυνσης από όλα τα σημεία μέτρησης του 1<sup>ου</sup>, 2<sup>ου</sup>, 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> ανοίγματος. Από τη σύνθεση των αποτελεσμάτων των εγκάρσιων μετρήσεων (Σχήμα 6.3.3) προκύπτει η πλήρης ιδιομορφή του διαγράμματος 6.3.1.

Αντίστοιχα, για τις καμπτικές ιδιομορφές, τα αποτελέσματα προέκυψαν με τη χρήση του μοντέλου κλασικής απόσβεσης, με επεξεργασία όλων των μετρήσεων κατακόρυφης κατεύθυνσης από όλα τα σημεία μέτρησης του 1<sup>ου</sup>, 2<sup>ου</sup>, 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup>

ανοίγματος (σχήμα 6.3.4) και συντέθηκαν 2 πλήρεις ιδιομορφές που αντιστοιχούν στα 3.55 Hz, όπως παρουσιάζεται στα διαγράμματα 6.3.2, 6.3.3.

<b>Μοντέλο Κλασικής Απόσβεσης</b>				
	<b>Εγκάρσια Ιδιομορφή</b>		<b>Καμπτική Ιδιομορφή (Διπλή)</b>	
	Συχνότητα	Συντελεστής Απόσβεσης	Συχνότητα	Συντελεστής Απόσβεσης
Μέση Τιμή	<b>0,827Hz</b>	<b>1,3%</b>	<b>3,55Hz</b>	<b>0,46%</b>
Συντελεστής Απόκλισης	0,017	0,36	0,0068	0,61
	<b>Καμπτική Ιδιομορφή</b>		<b>Καμπτική Ιδιομορφή</b>	
	Συχνότητα	Συντελεστής Απόσβεσης	Συχνότητα	Συντελεστής Απόσβεσης
Μέση Τιμή	<b>11,57Hz</b>	<b>1,445%</b>	<b>14,29Hz</b>	<b>0,95%</b>
Συντελεστής Απόκλισης	0,0441	0,36	0,0710	0,38
	<b>Καμπτική Ιδιομορφή</b>			
	Συχνότητα	Συντελεστής Απόσβεσης		
Μέση Τιμή	<b>19,24Hz</b>	<b>1,2%</b>		
Συντελεστής Απόκλισης	0,0155	0,38		

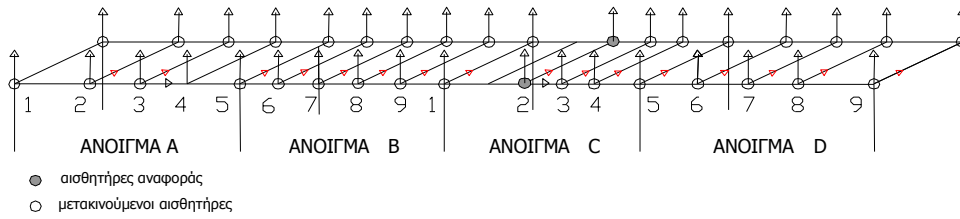
**Πίνακας 6.3.1** Βέλτιστες εκτιμήσεις ιδιοσυχνοτήτων και συντελεστών απόσβεσης με βάση το μοντέλο κλασικής απόσβεσης

<b>Μοντέλο Κλασικής Απόσβεσης</b>			
<b>Εγκάρσια Ιδιομορφή</b>		<b>Καμπτική Ιδιομορφή</b>	
Συχνότητα	Συντελεστής Απόσβεσης	Συχνότητα	Συντελεστής Απόσβεσης
<b>3,93 Hz</b>	<b>1, 53%</b>	<b>4,26 Hz</b>	<b>1,23 %</b>
<b>Καμπτική Ιδιομορφή</b>		<b>Καμπτική Ιδιομορφή</b>	
Συχνότητα	Συντελεστής Απόσβεσης	Συχνότητα	Συντελεστής Απόσβεσης
<b>6,20 Hz</b>	<b>1,76%</b>	<b>6,62 Hz</b>	<b>0,95 %</b>
<b>Διαμήκης Ιδιομορφή</b>		<b>Καμπτική Ιδιομορφή</b>	
Συχνότητα	Συντελεστής Απόσβεσης	Συχνότητα	Συντελεστής Απόσβεσης
<b>9,39 Hz</b>	<b>1,42 %</b>	<b>9,53 Hz</b>	<b>0,64 %</b>
<b>Διαμήκης Ιδιομορφή</b>		<b>Καμπτική Ιδιομορφή</b>	
Συχνότητα	Συντελεστής Απόσβεσης	Συχνότητα	Συντελεστής Απόσβεσης
<b>9,80 Hz</b>	<b>0,97 %</b>	<b>12,28 Hz</b>	<b>0,92 %</b>
<b>Εγκάρσια Ιδιομορφή</b>			
Συχνότητα	Συντελεστής Απόσβεσης		

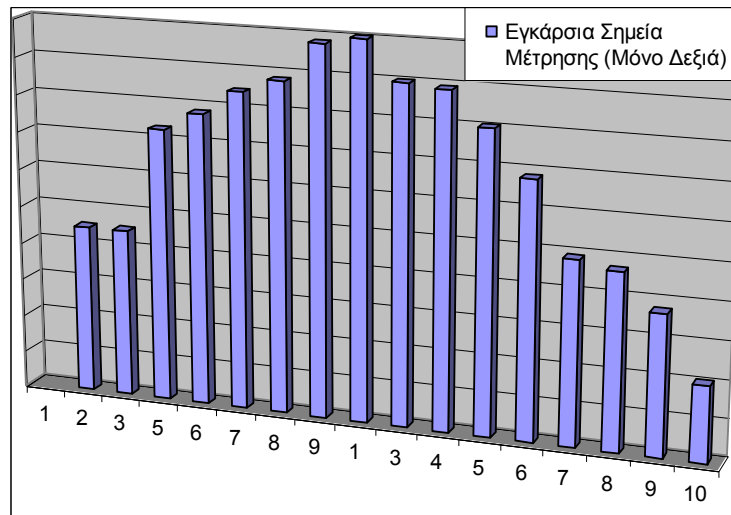


<b>13,08 Hz</b>	<b>1,09 %</b>
-----------------	---------------

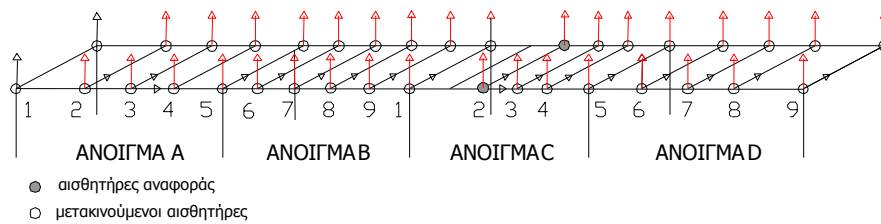
**Πίνακας 6.3.2** Επιπλέον αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες της γέφυρας.



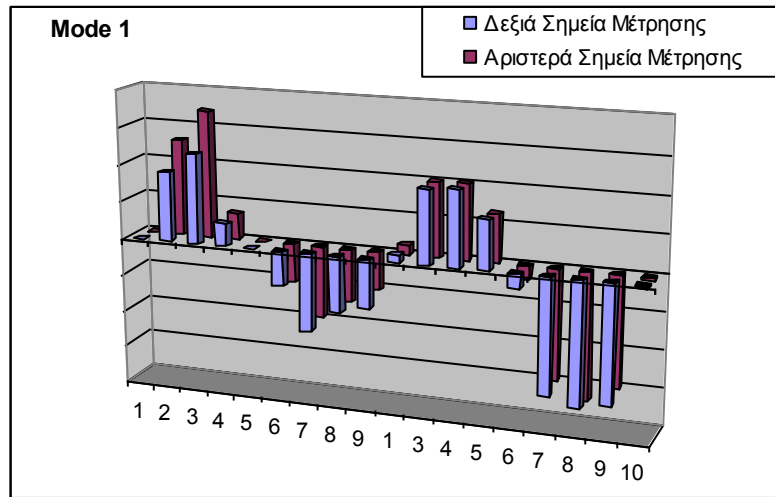
**Σχήμα 6.3.3** Εγκάρσια σημεία μέτρησης σε όλα τα ανοίγματα της γέφυρας.



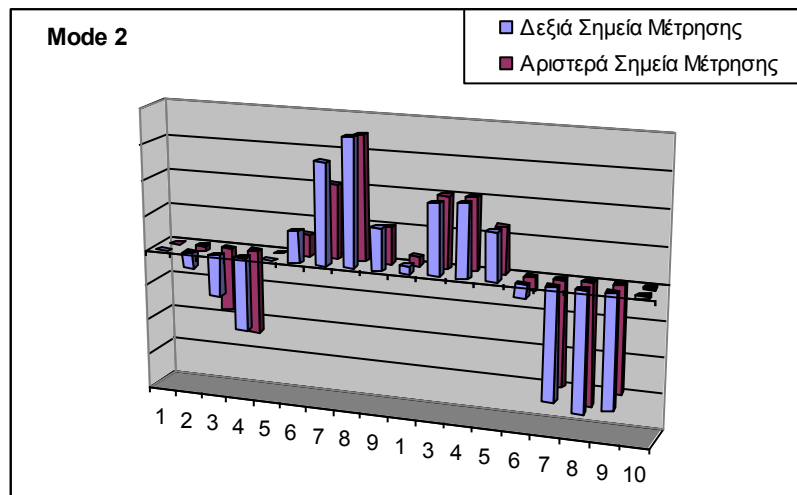
**Διάγραμμα 6.3.1** Αναγνωρισμένη εγκάρσια ιδιομορφή συχνότητας 0.83 Hz.



**Σχήμα 6.3.4** Κατακόρυφα σημεία μέτρησης σε όλα τα ανοίγματα της γέφυρας.



**Διάγραμμα 6.3.2** Αναγνωρισμένη ιδιομορφή στα 3.55 Hz.



**Διάγραμμα 6.3.3** Δεύτερη αναγνωρισμένη ιδιομορφή στα 3.55 Hz.

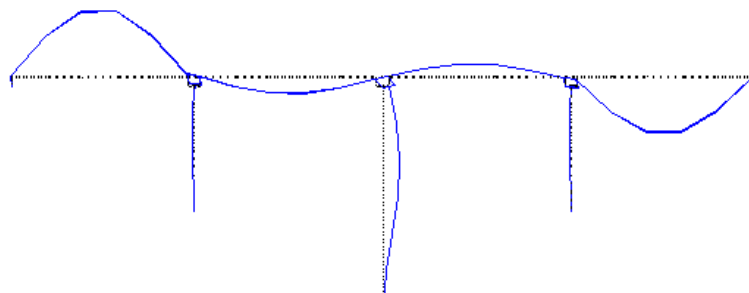
#### 6.3.1.5.2 Μοντέλο Μη Κλασικής Απόσβεσης

Έγινε επίσης προσπάθεια εκτίμησης ιδιομορφών με το μορφικό μοντέλο μη-κλασικής απόσβεσης. Το μοντέλο αυτό έχει τη δυνατότητα να δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για ζευγάρια ιδιομορφών που αντιστοιχούν σε πολύ κοντινές ιδιομορφές. Παρακάτω στον Πίνακα 6.3.2 παρουσιάζονται οι ιδιομορφές που εντοπίστηκαν με το μοντέλο μη κλασικής απόσβεσης. Οι καλύτερες εκτιμήσεις με τη χρήση αυτού του μοντέλου οφείλονται στην ύπαρξη μιας ιδιομορφής με συχνότητα 3.67 Hz, πολύ κοντά στην ιδιοσυχνότητα των 3.55 Hz της καμπτικής ιδιομορφής. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο μη κλασικής απόσβεσης η μέθοδος μορφικής αναγνώρισης κατόρθωσε να διακρίνει αυτή την ιδιομορφή, καταλήγοντας σε βελτιωμένη προσαρμογή των προβλεπόμενων χρονικών ιστοριών επιτάχυνσης στα μετρητικά δεδομένα. Η επιπλέον ιδιομορφή εμφανίζεται σε μερικά από τα καταγραφικά γεγονότα με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο πλήρης προσδιορισμός της σε όλα τα σημεία μέτρησης των κινητών αισθητήρων. Οι εκτιμήσεις για την πρώτη καμπτική ιδιομορφή που αναγνωρίστηκε από το μοντέλο της μη κλασικής απόσβεσης ήταν σε κάθε περίπτωση καλύτερες από τις αντίστοιχες που αποκτήθηκαν από το μοντέλο κλασικής απόσβεσης.

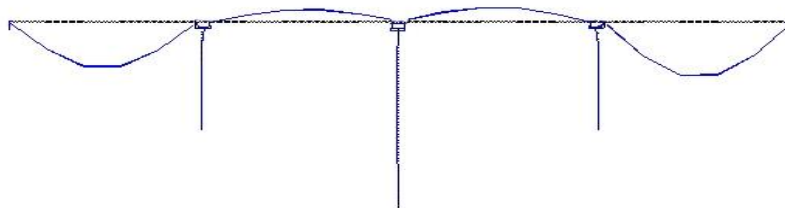
Σημειώνεται ότι το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων κατέληξε σε τρεις διαφορετικές ιδιομορφές που αντιστοιχούν στις δύο καμπτικές ιδιομορφές που προσδιορίστηκαν από το μορφικό μοντέλο κλασικής απόσβεσης και στην ιδιομορφή που αντιστοιχεί στην ιδιοσυχνότητα 3.67 Hz από το μοντέλο μη κλασικής απόσβεσης. Οι ιδιομορφές αυτές παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.3.5α, 6.3.5β και 6.3.6. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι καμπτικές ιδιομορφές που παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.3.5α, 6.3.5β αντιστοιχούν πολύ καλά στις καμπτικές ιδιομορφές των διαγραμμάτων στα Σχήματα 6.3.2 και 6.3.3 που αναγνωρίστηκαν με βάση τις μετρήσεις.

Μοντέλο Μη Κλασικής Απόσβεσης						
	Εγκάρσια Ιδιομορφή		Καμπτική Ιδιομορφή		Καμπτική Ιδιομορφή	
	Συχνότητα	Συντελεστής Απόσβεσης	Συχνότητα	Συντελεστής Απόσβεσης	Συχνότητα	Συντελεστής Απόσβεσης
Μέση Τιμή	<b>0,825 Hz</b>	<b>0,92%</b>	<b>3,54 Hz</b>	<b>0,51%</b>	<b>3,67 Hz</b>	<b>2,68%</b>
Συντελεστής Απόκλισης	0,021	0,37	$5,8 \times 10^{-3}$	0,49	0,0341	0,367

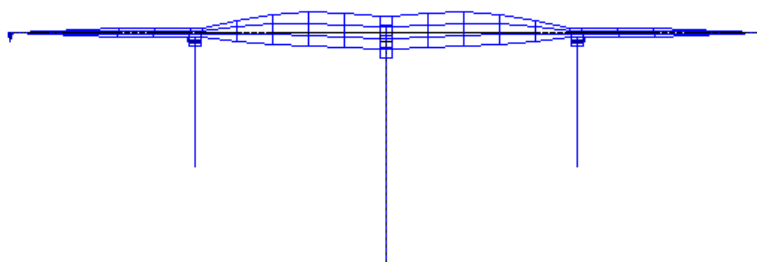
**Πίνακας 6.3.3** Βέλτιστες εκτιμήσεις ιδιοσυχνοτήτων και συντελεστών απόσβεσης με βάση το μοντέλο κλασικής απόσβεσης



**Σχήμα 6.3.5α** Ιδιομορφή που αντιστοιχεί στα 3,55 Hz.



**Σχήμα 6.3.5β** Ιδιομορφή που αντιστοιχεί στα 3,55 Hz.



**Σχήμα 6.3.6** Ιδιομορφή που αντιστοιχεί στα 3,67 Hz.

#### 6.4 Αριθμητικά Αποτελέσματα για τη Γέφυρα της Καβάλας – Αναθεώρηση Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων

Ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας, 900 βαθμών ελευθερίας (σχήμα 6.3.1 και Παράρτημα ΣΤ), αποτελείται από στοιχεία δοκών, αναπτύχθηκε σε κώδικα Matlab. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στο μοντέλο ABAQUS που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι των στοιχείων επιλέχθηκαν ώστε το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων να αντιστοιχεί στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε κατά τις φάσεις σχεδίασης της γέφυρας. Το μοντέλο αναθεωρήθηκε βάσει μετρούμενων μορφικών δεδομένων. Για το σκοπό αυτό, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων παραμετροποιήθηκε εισάγοντας τρεις παραμέτρους  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  και  $\theta_3$ . Η πρώτη παράμετρος αντιστοιχεί στη δυσκαμψία των τριών υποστυλωμάτων, η δεύτερη στη δυσκαμψία των εφεδράνων και η τρίτη στη δυσκαμψία του καταστρώματος. Η παραμετροποίηση δίνεται στο σχήμα 6.3.1.

Η παραμετροποίηση ήταν τέτοια ώστε το αρχικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων να αντιστοιχεί στις τιμές των  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 1$ . Οι τιμές αυτών των παραμέτρων αναθεωρήθηκαν ελαχιστοποιώντας τη συνάρτηση κόστους του προβλήματος βάσει της εγκάρσιας και της καμπτικής ιδιομορφής που αναγνωρίστηκαν στις δοκιμές πεδίου. Αναλύσεις ευαισθησίας έδειξαν ότι η εγκάρσια ιδιομορφή δεν είναι ευαίσθητη σε αλλαγές στις τιμές της δυσκαμψίας του καταστρώματος, ενώ η κατακόρυφη ιδιομορφή δεν είναι ευαίσθητη στις τιμές της δυσκαμψίας των υποστυλωμάτων και των εφεδράνων. Γι' αυτό προέκυψε η ανάγκη ύπαρξης αισθητήρα μέτρησης στο άνω μέρος του βάρθρου κάτω από το επίπεδο του εφεδράνου. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώθηκε από αναλύσεις βέλτιστης διάταξης αισθητήρων. Δυστυχώς, λόγω τεχνικής δυσκολίας, η τοποθέτηση τέτοιου αισθητήρα ήταν αδύνατη στα πλαίσια του παρόντος έργου. Επομένως έγινε μια παραμετρική ανάλυση όπου βελτιστοποιήθηκε η τιμή των  $\theta_2$  και  $\theta_3$ , δηλαδή προσδιορίστηκαν με βάση τα πραγματικά μετρητικά δεδομένα, οι δυσκαμψίες των εφεδράνων και του καταστρώματος, συναρτήσει ενδεικτικών τιμών της δυσκαμψίας των βάρθρων (δηλ. συναρτήσει της τιμής του  $\theta_1$ ). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών φαίνονται στον Πίνακα 6.4.1 για τιμές του  $\theta_1$  από 1 ως 2.

$\theta_1$	1	1.2	1.4	1.6	2
$\theta_2$	6.8036	4.7794	3.7663	3.1740	2.5135
$\theta_3$	1.5614	1.5580	1.5575	1.5568	1.5533

**Πίνακας 6.4.1** Βέλτιστες εκτιμήσεις των παραμέτρων του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων βάσει δύο ιδιομορφών

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές της δυσκαμψίας στα υποστυλώματα και στα εφέδρανα, εμφανίζονται υψηλότερες από τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της μελέτης.

Βασικό συμπέρασμα είναι ότι η ορθή και βέλτιστη τοποθέτηση αισθητήρων σε γέφυρες με εύκαμπτα βάρθρα και εφέδρανα οφείλει να περιλαμβάνει αισθητήρες στο άνω μέρος του βάρθρου (ή καλύτερα καθ' ύψος του βάρθρου) σε κάθε περίπτωση όμως σε στάθμη κατώτερη των εφεδράνων. Συγκεκριμένα, μία μέτρηση σε ένα υποστυλώμα της γέφυρας θα οδηγούσε σε πιο ορθολογική εκτίμηση των

παραμέτρων, ακόμα και με τις δύο μόνο μορφές. Ωστόσο, τέτοιου είδους μέτρηση κατά μήκος ή στην κορυφή του υποστυλώματος απαιτεί ειδικό βοηθητικό εξοπλισμό, δεδομένου ότι οι θέσεις αυτές δεν ήταν εύκολα προσβάσιμες.

Να σημειωθεί ότι δεν θα πρέπει να γίνονται συγκρίσεις του μοντέλου Α που χρησιμοποιήθηκε στην αναθεώρηση με το μοντέλο της οριστικής μελέτης. Το μοντέλο της μελέτης είναι σημαντικά διαφορετικό, διότι

1. Δεν περιγράφει την εγκάρσια διάσταση του καταστρώματος, επομένως δεν έχει ουσιαστικά την δυνατότητα να εκφράσει (παρά μόνον με πολύ μικρή ακρίβεια) στρεπτικές κινήσεις.
2. Θεωρεί την ενεργοποίηση των διατμητικών συνδέσμων σε ορισμένα σημεία, πράγμα που δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα διότι οι μετρήσεις αναφέρονται σε μικρές ταλαντώσεις.
3. Θεωρεί μειωμένη δυσκαμψία στα βάρθρα, λόγω ρηγμάτωσης σε κατάσταση οριακής αντοχής.
4. Οι ταλαντώσεις μικρού εύρους που χρησιμοποιήθηκαν στην αναγνώριση των ιδιομορφών και την αναθεώρηση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων δεν ήταν αρκετά ισχυρές ώστε να διεγείρουν τους μηχανισμούς πάνω στους οποίους βασίστηκε το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της σχεδίασης.

Επομένως, δεν μπορεί να θεωρηθεί ως αξιόπιστο μοντέλο και ως βάση σύγκρισης. Το μοντέλο της αναθεώρησης του MATLAB δίνει μία αρχικά εγκάρσια ιδιοσυχνότητα ίση με 0.61 Hz, που είναι πιο κοντά στην μετρούμενη ιδιοσυχνότητα από ότι το μοντέλο του μελετητή.

Οι ιδιομορφές που εμφανίζονται στο προς αναθεώρηση μοντέλο Α των πεπερασμένων στοιχείων είναι ίδιες με αυτές που προβλέπει το μοντέλο του μελετητή. Το γεγονός όμως ότι οι τιμές ιδιοσυχνοτήτων του μοντέλου Α των πεπερασμένων στοιχείων είναι σημαντικά διαφορετικές από αυτές των μετρήσεων είναι σε σημαντικό βαθμό εξηγητέο,

- Λόγω της «εμπειρικής» τιμής του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς
- Λόγω της ύπαρξης σημαντικών περιορισμών της κίνησης της γέφυρας λόγω δευτερευόντων κατασκευών, που δεν λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο (π.χ. εσχάρα σύνδεσης δύο κλάδων, χώματα που καλύπτουν μέρος του ακροβάθρου κ.τ.λ.).
- Το σφάλμα του μοντέλου σε σχέση με την πραγματική ιδιοσυχνότητα (που παρέχεται από τις μετρήσεις) δεν οφείλεται μόνον στη δυσκαμψία των βάρθρων αλλά και της πολύ πιο «εμπειρικής» εκτίμησης της δυσκαμψίας των εφεδράνων. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως σημαντικό μέρος της κίνησης της γέφυρας σχετίζεται άμεσα με την κίνηση των εφεδράνων.

Επιπλέον οφείλει να σημειωθεί πως οι μετρήσεις δείχνουν την πραγματική συμπεριφορά, η οποία κατά την άποψη των ερευνητών του παρόντος έργου είναι αδιαμφισβήτητη, με βάση το γεγονός ότι οι μετρήσεις είναι αξιόπιστες. Η διαφορά μεταξύ μετρούμενων ιδιοσυχνοτήτων και υπολογισμένων ιδιοσυχνοτήτων δείχνει πως η αναθεώρηση των υπάρχοντων μοντέλων των γεφυρών είναι αναγκαία για την σωστή προσομοίωση της συμπεριφοράς τους σε επίπεδο λειτουργίας.

Τέλος, θα πρέπει και πάλι να τονιστεί πως η ανάλυση των γεφυρών σε κατάσταση λειτουργίας με βάση τα μοντέλα των αντίστοιχων μελετών είναι όχι ενδεδειγμένη, διότι τα μοντέλα αυτά βασίζονται σε παραδοχές στην οριακή κατάσταση αστοχίας, και

δεν περιγράφουν σωστά και αξιόπιστα την κατάσταση λειτουργίας των γεφυρών. Επομένως σύγκριση της πραγματικής απόκρισης με αυτή που προβλέπουν τα μοντέλα της μελέτης είναι μάλλον ιδιαίτερα παρακινδυνευμένη και δεν συνιστάται.

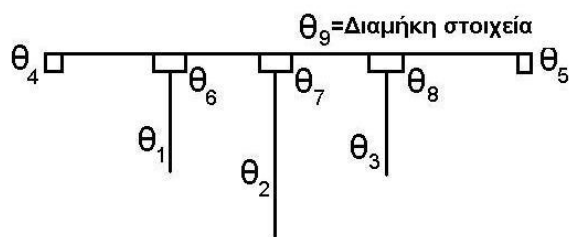
### 6.5 Πιστοποίηση Σωστής Λειτουργίας Λογισμικού Αναθεώρησης Μοντέλων και Διάγνωσης Βλαβών

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία του λογισμικού αναθεώρησης μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων και διάγνωσης βλαβών, κρίθηκε απαραίτητη η χρησιμοποίησή του έχοντας σαν δεδομένα εισόδου, προσομοιωμένα δεδομένα. Σωστή λειτουργία του λογισμικού, νοείται η σωστή αναγνώριση της θέσης αλλά και του μεγέθους τις βλάβης, εφόσον τα δεδομένα εισόδου είναι σωστά.

Με τον όρο «προσομοιωμένα» δεδομένα θεωρούνται οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών, που προέρχονται από την επίλυση του ιδιοπροβλήματος για την κατασκευή που περιγράφεται. Φυσικά, δε γίνεται χρήση όλων αυτών των ιδιοσυχνοτήτων αφού κατά την επεξεργασία πραγματικών μετρήσεων αναγνωρίζονται μόνο μερικές από τις πρώτες ιδιοσυχνότητες της κατασκευής. Επίσης, δε γίνεται χρήση όλων των μορφών που αντιστοιχούν σε κάποια από της ιδιοσυχνότητες, γιατί αυτό θα προϋποθέτει την ύπαρξη μετρητικών οργάνων σε όλα τα σημεία που αντιστοιχούν σε κόμβους του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και τα οποία να μετρούν προς όλες τις κατευθύνσεις (x, y, z). Έτσι χρησιμοποιούνται μόνο οι μορφές που αντιστοιχούν στα υποτιθέμενα σημεία μέτρησης.

Στις περιπτώσεις που εξετάζονται, υποτίθεται ότι έχουν τοποθετηθεί 30 αισθητήρες (σχήμα 6.5.2) και ότι με την επεξεργασία των μετρητικών δεδομένων αναγνωρίστηκαν 4 ιδιομορφές.

Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας παραμετροποιήθηκε με 9 παραμέτρους (σχήμα 6.5.1). Μια παράμετρος για τα στοιχεία του κάθε εφεδράνου, μια παράμετρος για τα στοιχεία του κάθε πυλώνα και μια παράμετρος για τα διαμήκη στοιχεία του καταστρώματος της γέφυρας. Υπενθυμίζεται ότι η παραμετροποίηση των στοιχείων γίνεται ως προς το μέτρο ελαστικότητάς τους, δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας των στοιχείων πολλαπλασιάζεται με την αντίστοιχη παράμετρο  $\theta_i$ ,  $i=1,2,\dots,9$  ( $E_i = E_0 \theta_i$ ).



**Σχήμα 6.5.1.** Παραμετροποίηση μοντέλου.

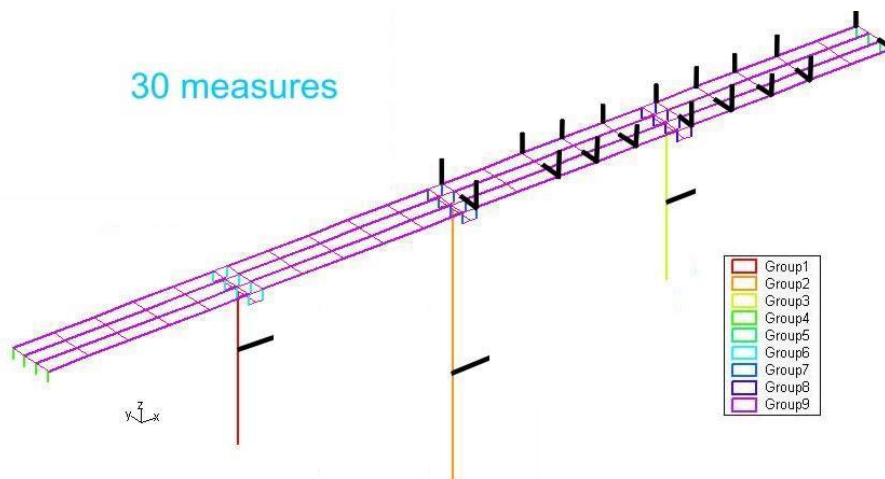
Δημιουργήθηκαν υπολογιστικά, τρία σετ μετρήσεων, ένα για κάθε μια από τις παρακάτω περιπτώσεις βλάβης της γέφυρας της Καβάλας:

1. Βλάβη στον πυλώνα M1 που προσομοιώνεται μειώνοντας τη δυσκαμψία του πυλώνα M1 (παράμετρος  $\theta_1$ ) κατά 25%

2. Βλάβες στον πυλώνα M1 που προσομοιώνεται μειώνοντας τη δυσκαμψία του εφεδράνου του πυλώνα M3 (παράμετρος  $\theta_8$ ) κατά 25%
3. Βλάβη στον πυλώνα M1 και στο εφέδρανο του ακροβάθρου A2 που προσομοιώνονται μειώνοντας τη δυσκαμψία τόσο του πυλώνα M1 (παράμετρος  $\theta_1$ ) κατά 25%, όσο και του εφεδράνου στο ακρόβαθρο A2 (παράμετρος  $\theta_5$ ) κατά 25%

Τα δεδομένα και στις τρεις περιπτώσεις δημιουργήθηκαν από το ίδιο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων το οποίο χρησιμοποιείται και για την αναθεώρηση, μειώνοντας κατάλληλα το μέτρο ελαστικότητας των στοιχείων που αντιστοιχούν στην τοποθεσία της βλάβης. Έτσι για παράδειγμα, τα δεδομένα της πρώτης περίπτωσης προήλθαν από το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την αναθεώρηση, μειώνοντας τη δυσκαμψία των στοιχείων του πυλώνα M1 κατά 25%, δίνοντας δηλαδή στην παράμετρο  $\theta_1=0.75$ . Αυτή είναι και η τιμή που θα πρέπει να έχει η παράμετρος  $\theta_1$  μετά το τέλος των υπολογισμών του προγράμματος. Υποτίθεται ότι αυτή η τιμή είναι άγνωστη πριν τρέξει το πρόγραμμα και λαμβάνεται μία αρχική τιμή γύρω στη μονάδα.

Στο σχήμα 6.5.2 φαίνονται τα σημεία μέτρησης καθώς και οι 9 ομάδες των στοιχείων που παραμετροποιούνται με τις αντίστοιχες παράμετρος  $\theta_i$ .



**Σχήμα 6.5.2.** Σημεία μέτρησης και ομάδες παραμετροποίησης.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν τα προσομοιωμένα δεδομένα, με τη βοήθεια του λογισμικού γίνεται προσπάθεια αναγνώρισης της κατάστασης της κατασκευής από την οποία προήλθαν αυτά τα δεδομένα. Η κατάσταση της κατασκευής δηλώνεται από τις τιμές των παραμέτρων, όπως αυτές υπολογίζονται από το λογισμικό. Στον Πίνακα 6.5.1 φαίνονται οι αρχικές εκτιμήσεις των τιμών των παραμέτρων που δηλώνονται από το χρήστη στην αρχή του προγράμματος, καθώς και οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων που υπολογίζονται από το λογισμικό, για κάθε μια από τις περιπτώσεις βλάβης που εξετάζονται. Προφανώς, αν το λογισμικό δουλεύει σωστά, θα πρέπει οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων να αντιστοιχούν σε αυτές από τις οποίες προήλθαν τα προσομοιωμένα δεδομένα.

Από τον παραπάνω πίνακα, για την πρώτη περίπτωση, φαίνεται ότι το λογισμικό προσδιόρισε σωστά την κατάσταση της κατασκευής από την οποία προήλθαν τα προσομοιωμένα δεδομένα. Η διάγνωση τόσο της θέσης αλλά και του μεγέθους της βλάβης στον πυλώνα M1 ήταν επιτυχής. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι όλες οι

τιμές των παραμέτρων είναι σχεδόν μονάδα ενώ η παράμετρος που αντιστοιχεί στα στοιχεία του πυλώνα M1 είναι 0.75.

Το ίδιο καλά είναι τα αποτελέσματα και για τις άλλες 2 περιπτώσεις. Για τη δεύτερη περίπτωση το λογισμικό προσδιόρισε, από τα δεδομένα που επεξεργάστηκε, τη θέση και το μέγεθος της βλάβης στο εφεδράνο πάνω από τον πυλώνα M3. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι όλες οι παράμετροι έχουν την τιμή περίπου 1, εκτός από την παράμετρο που αντιστοιχεί στα στοιχεία του εφεδράνου πάνω από τον πυλώνα M3, η οποία έχει τιμή 0.75. Έχουν δηλαδή αυτά τα στοιχεία μειωμένη δυσκαμψία κατά 25%.

Αντίστοιχα, στην 3<sup>η</sup> περίπτωση επίσης προσδιορίστηκαν επιτυχώς οι θέσεις και τα μεγέθη των βλαβών αφού τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των δεδομένων αντιστοιχούν σε κατασκευή όπου η δυσκαμψία τόσο του πυλώνα M1 όσο και του εφεδράνου στο ακρόβαθρο A2 είναι μειωμένη κατά 25%. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι οι  $\theta_1 = \theta_5 = 0.75$ , ενώ οι υπόλοιπες παράμετρος έχουν τιμή ίση σχεδόν με τη μονάδα.

$\theta_i$	Case 1		Case 2		Case 3	
	Αρχικές Εκτιμήσεις	Βέλτιστες Τιμές	Αρχικές Εκτιμήσεις	Βέλτιστες Τιμές	Αρχικές Εκτιμήσεις	Βέλτιστες Τιμές
$\theta_1$	1.0000	<b>0.7500</b>	1.2000	0.9988	0.8000	<b>0.7526</b>
$\theta_2$	0.8000	1.0000	1.2000	1.0000	0.8000	1.0000
$\theta_3$	1.2000	0.9998	1.2000	1.0000	1.2000	1.0000
$\theta_4$	1.2000	1.0000	1.2000	1.0000	1.2000	0.9989
$\theta_5$	0.9000	1.0000	1.2000	1.0000	0.9000	<b>0.7507</b>
$\theta_6$	1.1500	0.9999	1.2000	0.9993	1.1500	1.0000
$\theta_7$	1.1000	1.0000	1.2000	1.0000	1.1000	0.9902
$\theta_8$	1.1000	0.9997	1.2000	<b>0.7502</b>	1.1000	0.9987
$\theta_9$	1.1000	0.9998	1.2000	1.0000	1.1000	0.9994

**Πίνακας 6.5.1.** Αρχικές εκτιμήσεις και αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα λοιπόν, των παραπάνω περιπτώσεων επιβεβαιώνουν τη σωστή και αποτελεσματική λειτουργία του λογισμικού αναθεώρησης και διάγνωσης βλαβών. Η αποτελεσματικότητα του με τη χρήση πραγματικών δεδομένων μετρήσεων εξαρτάται από την ποιότητα των μετρήσεων καθώς και από την ύπαρξη ενός αξιόπιστου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων της κατασκευής.

Στο Παράρτημα που περιλαμβάνεται το Εγχειρίδιο Χρήσης Λογισμικού FEMUpdating παρουσιάζεται ενδεικτικά το αρχείο αποτελεσμάτων για τη δεύτερη περίπτωση βλάβης που μελετήθηκε. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαμόρφωσή του γίνεται αυτόματα από το λογισμικό. Το περιεχόμενο του αρχείου αποτελεσμάτων αναλύεται λεπτομερώς στο εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΜΟΡΦΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΩΝ

Η αναθεώρηση ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων είναι δυνατό να βασιστεί σε δεδομένα προερχόμενα, είτε από μετρήσεις ελεύθερης ταλάντωσης (free vibrations), είτε από ταλάντωση λόγω λειτουργικών φορτίων (ambient loading), αλλά και από σεισμικές διεγέρσεις εδάφους (seismic input). Για το σκοπό αυτό θεωρείται ένα μορφικό προσομοίωμα της υπό εξέταση κατασκευής (γέφυρα), όπου και εφαρμόζεται η μεθοδολογία αναγνώρισης και εκτιμούνται οι μορφικές παράμετροι. Στις μορφικές παραμέτρους περιλαμβάνονται οι ιδιοσυχνότητες του συστήματος, οι συντελεστές απόσβεσης και οι συντελεστές συνεισφοράς των ιδιομορφών στα σημεία μέτρησης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι μεθοδολογίες αναγνώρισης ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών για τις περιπτώσεις ελεύθερης ταλάντωσης, ταλάντωσης σε λειτουργικά φορτία (ambient vibration) και εξαναγκασμένης ταλάντωσης.

#### A.1 Ελεύθερη Ταλάντωση

Κατ' αρχήν παρουσιάζεται η περίπτωση των ελεύθερων ταλαντώσεων. Τα δεδομένα ελεύθερης ταλάντωσης αποκτήθηκαν από διέγερση προερχόμενη από οδική κυκλοφορία αμέσως μετά την έξοδο ενός μεγάλου οχήματος από το κατάστρωμα της γέφυρας. Χρησιμοποιώντας μορφική ανάλυση, η ελεύθερη απόκριση της κατασκευής σε μία θέση μέτρησης  $j$  μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$X_j(k\Delta t; \underline{\psi}) = \sum_{r=1}^m 2\text{Re}\{\phi_{jr} e^{\lambda_r k\Delta t}\} \quad (\text{A.1})$$

όπου  $\lambda_r = -\zeta_r \omega_r + i\omega_r \sqrt{1-\zeta_r^2}$ ,  $\omega_r$  και  $\zeta_r$  είναι αντίστοιχα η ιδιοσυχνότητα, ο συντελεστής απόσβεσης της μορφής  $r$ ,  $\phi_{jr}$  είναι η  $j$  συνιστώσα της  $r$  μιγαδικής ιδιομορφής, και  $m$  είναι ο αριθμός των ιδιομορφών που συνεισφέρουν. Επομένως, η απόκριση εξαρτάται από το διάνυσμα των μορφικών παραμέτρων  $\underline{\psi} = (\underline{\theta}, \underline{\phi})$  με το διάνυσμα  $\underline{\theta}$  να περιλαμβάνει τις ιδιοσυχνότητες και τους συντελεστές απόσβεσης ενώ το διάνυσμα  $\underline{\phi}$  περιλαμβάνει τις συνιστώσες της ιδιομορφής σε όλες τις θέσεις μέτρησης. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση κλασσικής απόσβεσης, μπορεί εύκολα να επαληθευτεί ότι  $\phi_{jr} = \varphi_{jr}(1 + ia_r)$ , όπου  $\varphi_{jr}$  είναι η  $j$  συνιστώσα της  $r$  πραγματικής ιδιομορφής.

Οι βέλτιστες εκτιμήσεις των παραμέτρων είναι αυτές που ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση κόστους (Pavlidou et al, 2002, Pavlidou, M., 2002, Γκαράς, 2002):

$$J(\underline{\psi}) = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{N_{out}} [X_j(k\Delta t; \underline{\psi}) - \hat{X}_j(k\Delta t)]^2 \quad (\text{A.2})$$

που εκφράζει τη διαφορά μεταξύ της μετρούμενης απόκρισης και της απόκρισης που προβλέπεται από το μοντέλο. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η συνάρτηση κόστους είναι τετραγωνική στο  $\underline{\phi}$ , οι συνιστώσες της ιδιομορφής στο διάνυσμα των παραμέτρων  $\underline{\phi}$  μπορούν να εκφραστούν με όρους του διανύσματος παραμέτρων  $\underline{\theta}$ , δηλαδή,  $\underline{\phi}(\underline{\theta})$ ,

λύνοντας ένα γραμμικό αλγεβρικό σύστημα που προκύπτει από τη συνθήκη στασιμότητας  $\partial J(\underline{\psi})/\partial \underline{\phi} = 0$ . Επομένως, οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων λαμβάνονται τελικώς ελαχιστοποιώντας την τροποποιημένη συνάρτηση  $J^*(\underline{\theta}) = J(\underline{\theta}, \underline{\phi}(\underline{\theta}))$  ως συνάρτηση των μορφικών παραμέτρων  $\underline{\theta}$ , ενώ οι συνιστώσες της ιδιομορφής λαμβάνονται από τη σχέση  $\underline{\phi}(\hat{\underline{\theta}})$ , όπου  $\hat{\underline{\theta}}$  είναι οι βέλτιστες μορφικές παράμετροι προερχόμενες από την ελαχιστοποίηση της  $J^*(\underline{\theta})$ .

Η παραπάνω μέθοδος αναγνώρισης βάσει μετρήσεων ελεύθερης ταλάντωσης οδήγησε στην ανάπτυξη κώδικα σε περιβάλλον Matlab με ονομασία *FreeVibr\_TimeDomain*.

## A.2 Λειτουργικά φορτία

Η θεωρία αναγνώρισης χρησιμοποιεί συμβατικές μεθόδους επίλυσης του προβλήματος που αναφέρεται στην περίπτωση όπου η διέγερση είναι διαθέσιμη. Σε μερικές περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα όταν μια γέφυρα υπόκειται σε κυκλοφοριακή διέγερση ή φορτία ανέμων, το μέγεθος αυτό είναι δύσκολο, αν όχι ακατόρθωτο, να μετρηθεί. Απαιτείται επομένως εφαρμογή μίας διαφορετικής μεθόδου αντιμετώπισης του προβλήματος που χρησιμοποιεί δεδομένα απόκρισης μικρού εύρους, ελλείψει μετρούμενης εισόδου. Παρόλο που δεδομένα απόκρισης κατασκευών λαμβάνονται πιο εύκολα και πιο συχνά από διεγέρσεις τέτοιου είδους, το πρόβλημα δεν έχει μελετηθεί σε εκτενή βαθμό σε σχέση με την περίπτωση της μετρούμενης μεγάλου εύρους εισόδου.

Μία λύση που μπορεί να οδηγήσει στην εκτίμηση των βέλτιστων μορφικών παραμέτρων στη περίπτωση των λειτουργικών φορτίων, αποτελεί η ελαχιστοποίηση ενός μέτρου της πυκνότητας φάσματος (PSD),  $S_{\hat{y}_i}(\omega_l)$ , της μετρούμενης απόκρισης της κατασκευής και της συνάρτησης PSD  $S_{\hat{y}_i}(\omega_l; \underline{\theta})$  της προβλεπόμενης από το μορφικό προσομοίωμα απόκρισης θεωρώντας διέγερση λευκού θορύβου ευρέου φάσματος. Συγκεκριμένα, η συνάρτηση κόστους δίνεται από (Pavlidou et al, 2002, Pavlidou, M., 2002, Γκαράς, Β. , 2002):

$$J(\underline{\theta}) = \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{l=1}^N [S_{\hat{y}_i}(\omega_l) - S_{\hat{y}_i}(\omega_l; \underline{\theta})]^2 \quad (\text{A.3})$$

όπου η πυκνότητα φάσματος της απόκρισης του μορφικού μοντέλου της κατασκευής που υπόκειται σε διέγερση λευκού θορύβου είναι

$$S_{\hat{y}_i}(\omega_k; \underline{\theta}) = \Phi H(\omega) S_f [\Phi \bar{H}(\omega)]^T \quad (\text{A.4})$$

όπου  $S_f = \text{σταθερό}$ , είναι η πυκνότητα φάσματος (PSD) της διέγερσης λευκού θορύβου.

Η παραπάνω μέθοδος αναγνώρισης βάσει μετρήσεων ταλάντωσης λόγω λειτουργικών φορτίων οδήγησε στην ανάπτυξη κώδικα σε περιβάλλον Matlab με ονομασία *AmbientVibr\_CSD*.

Η ελαχιστοποίηση του  $J(\underline{\theta})$  συναρτήσει των παραμέτρων  $\underline{\theta}$  του μοντέλου εφαρμόζεται στις παραπάνω μεθόδους χρησιμοποιώντας έναν επαναληπτικό αλγόριθμο, ο οποίος αποτελείται από μια σειρά σαρώσεων του προσομοιώματος, κατά τη διάρκεια των οποίων, οι αρχικές εκτιμήσεις των παραμέτρων αναθεωρούνται πραγματοποιώντας μια σειρά ελαχιστοποιήσεων του  $J(\underline{\theta})$  για κάθε μορφή ξεχωριστά. Ο αλγόριθμος συγκλίνει είτε όταν το  $J(\underline{\theta})$  αποκτήσει τιμή με την επιθυμητή ακρίβεια, είτε όταν έχει πραγματοποιηθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός επαναλήψεων, είτε όταν το υπολογιστικό σφάλμα στην εκτίμηση των παραμέτρων  $\underline{\theta}$  είναι μικρότερο μιας ορισμένης τιμής. Η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης  $J(\underline{\theta})$  επιτεύχθηκε είτε με τη χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης που αναφέρονται στο Optimization Toolbox του Matlab, ή με τη χρήση της υβριδικής μεθόδου βελτιστοποίησης που περιγράφεται στο Παράρτημα Γ (Γκαράς, 2002).

### **A.3 Σεισμικά φορτία / Εξαναγκασμένη Ταλάντωση**

Παράλληλα με της ανωτέρω μεθόδους, αναπτύχθηκε στατιστική μέθοδος αναγνώρισης μορφικού προσομοιώματος, η οποία αποτελεί επέκταση της μεθόδου Werner et al. (1987) στο πεδίο χρόνου ή στο πεδίο συχνοτήτων. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία, η δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής περιγράφεται από μία κατηγορία παραμετρικών μορφικών μοντέλων με  $\underline{\theta}$  τις παραμέτρους που σχετίζονται με τις μορφικές ιδιότητες της κατασκευής και είναι ενδεικτικές για την κατάσταση της κατασκευής. Για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με τις πιθανές τιμές των παραμέτρων  $\underline{\theta}$  χρησιμοποιούνται δεδομένα δυναμικών μετρήσεων της διέγερσης και της απόκρισης της κατασκευής. Συγκεκριμένα, εφαρμόζονται μέθοδοι αναγνώρισης μορφικού γραμμικού μοντέλου, που βασίζονται στην ανάλυση μετρήσεων μιας κατασκευής σε σεισμική διέγερση (McVerry, 1980; Werner et al., 1987)). Οι προς αναγνώριση παράμετροι  $\underline{\theta}$  είναι οι ιδιοσυχνότητες, μέτρα απόσβεσης και οι τιμές των ιδιομορφών στα σημεία μέτρησης. Οι μέθοδοι αναγνώρισης περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω.

#### **A.3.1 Πεδίο Χρόνου**

Χρησιμοποιώντας μορφική ανάλυση, η απόκριση  $x_i(t)$  ενός γραμμικού συστήματος σ' ένα μετρούμενο βαθμό ελευθερίας της κατασκευής αποδίδεται ως άθροισμα των συνεισφορών των ιδιομορφών:

$$y_i(t) = \sum_{r=1}^{N_m} y_{ir}(t) \quad (\text{A.5})$$

όπου  $y_{ir}(t)$  είναι η συνεισφορά της  $r$  μορφής στην απόκριση στον  $i$  βαθμό ελευθερίας του συστήματος και  $N_m$  ο αριθμός των ιδιομορφών του προσομοιώματος. Η εξίσωση κίνησης ανά μορφή που περιέχει τις προς αναγνώριση μορφικές παραμέτρους προκύπτει ως εξής:

$$\ddot{y}_{ir} + a_r \dot{y}_{ir} + b_r y_{ir} = -[p_{i1}^r \dots p_{iN_m}^r] \ddot{Z} \quad (\text{A.6})$$

όπου οι παράμετροι  $a_r = 2\zeta_r \omega_r$  και  $b_r = \omega_r^2$  εκφράζονται σε σχέση με τη συχνότητα  $\omega_r$  και το συντελεστή απόσβεσης  $\zeta_r$  της  $r$  μορφής, ενώ  $p_{ij}^r = \phi_{ir} \gamma_{rj}$  είναι οι συντελεστές συνεισφοράς της  $r$  ιδιομορφής, όπου  $\phi_{ir}$  είναι το μέγεθος της  $r$  ιδιομορφής στον  $i$  βαθμό ελευθερίας και  $\gamma_{rj} = \phi^T M R$  είναι ο συντελεστής συνεισφοράς 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. Τις προς αναγνώριση μορφικές παραμέτρους που συνιστούν το διάνυσμα  $\underline{\theta}$  αποτελούν τα στοιχεία του μητρώου  $R$ , τα  $a_r$ ,  $b_r$  και τα στοιχεία  $p_{ij}^r$ .

Στο πεδίο χρόνου, οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων  $\underline{\theta}$  προκύπτουν από την ελαχιστοποίηση ενός μέτρου της διαφοράς μεταξύ των μετρούμενων επιταχύνσεων και των επιταχύνσεων οι οποίες προκύπτουν από το μορφικό προσομοίωμα. Συγκεκριμένα, η συνάρτηση κόστους επιλέγεται στη μορφή (Παυλίδου 2001, Χατζοπούλου 2001, Καρακώστας 2001, Karakostas et al. 2001):

$$J(\underline{\theta}) = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{n=0}^{N_T} [\hat{y}_i(n\Delta t) - \ddot{y}_i(n\Delta t; \underline{\theta})]^2 \quad (\text{A.7})$$

όπου,

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

$\ddot{y}_i$  = η επιτάχυνση στον  $i$  μετρούμενο βαθμό ελευθερίας που προβλέπεται από το μορφικό προσομοίωμα,

$\Delta t$  = ο χρόνος δειγματοληψίας των ψηφιοποιημένων γραφημάτων επιτάχυνσης,

$n$  = ο συνολικός αριθμός μετρήσεων (ανά χρονικό διάστημα  $\Delta t$ ),

$\underline{\theta} = \{R_{ij}, a_r, b_r, P_{ij}^{(r)}, \gamma_{ir}, \delta_{ir} : r=1,2,\dots,N_m, i=1,2,\dots,N_R, j=1,2,\dots,N_S\}$ , οι παράμετρος του προβλήματος, και  $V$  είναι ένας συντελεστής κανονικοποίησης που δίνεται από τη σχέση:

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

Η παραπάνω μέθοδος οδήγησε στην ανάπτυξη κώδικα σε περιβάλλον Matlab με ονομασία *ForcedVibr\_TimeDomain*, ο οποίος αποτελεί τμήμα ενός ευρύτερου λογισμικού (*ID/MODES*), όπου εφαρμόζονται μέθοδοι για την αναγνώριση των δυναμικών χαρακτηριστικών κατασκευών.

### Α.3.2 Πεδίο Συχνότητων

Οι εξισώσεις του μορφικού προσομοιώματος μετασχηματίζονται στο πεδίο των συχνοτήτων μέσω μετασχηματισμού Fourier και η αναλυτική έκφραση της επιτάχυνσης που προβλέπεται από το προσομοίωμα δίνεται από τη σχέση:

$$\ddot{Y}_i(\omega; \underline{\theta}) = [R + \sum_{r=1}^{N_m} \frac{\omega^2 (b_r - \omega^2) - i\omega^3 a_r}{(b_r - \omega^2)^2 + \omega^2 a_r^2} p_{ij}^r] \ddot{Z}(\omega) + \sum_{r=1}^{N_m} \frac{b_r (b_r - \omega^2) + \omega^2 a_r^2 - i\omega^3 a_r}{(b_r - \omega^2)^2 + \omega^2 a_r^2} v_{ir} + \sum_{r=1}^{N_m} \frac{a_r b_r \omega^2 + i\omega b_r (b_r - \omega^2)}{(b_r - \omega^2)^2 + \omega^2 a_r^2} d_{ir} \quad (\text{A.8})$$

όπου  $v_{ir} = \dot{x}_{ir}(T) - \dot{x}_{ir}(0)$  και  $d_{ir} = x_{ir}(T) - x_{ir}(0)$  για την περίπτωση αρχικών συνθηκών  $\dot{x}_{ir}(0) = x_{ir}(0) = 0$ . Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων  $\underline{\theta}$  προκύπτουν από την ελαχιστοποίηση του μέτρου της διαφοράς του μετασχηματισμού Fourier της επιτάχυνσης που προβλέπεται από το προσομοίωμα  $\ddot{Y}_i(\omega; \underline{\theta})$  και του μετασχηματισμού Fourier της μετρούμενης επιτάχυνσης  $\hat{Y}_i(\omega)$  σ' ένα καθορισμένο εύρος συχνοτήτων. Συγκεκριμένα, η συνάρτηση κόστους επιλέγεται στη μορφή (Παυλίδου 2001, Χατζοπούλου 2001, Καρακώστας et al 2001, Karakostas et al 2001):

$$J(\underline{\theta}) = \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{l=1}^N [\hat{Y}_i(\omega) - \ddot{Y}_i(\omega; \underline{\theta})]^2 \quad (\text{A.9})$$

Το  $J(\underline{\theta})$  μπορεί να ερμηνευτεί σαν τον λόγο των μέσων τετραγώνων του σφάλματος των επιταχύνσεων του προσομοιώματος προς το μέσο τετράγωνο των μετρούμενων επιταχύνσεων. Η παραπάνω μέθοδος αναγνώρισης στο πεδίο των συχνοτήτων οδήγησε στην ανάπτυξη κώδικα σε περιβάλλον Matlab με ονομασία *ForcedVibr\_FrequencyDomain*.

#### A.4 Συμπεράσματα από την Εφαρμογή των Μεθοδολογιών στη Γέφυρα της Καβάλας

Στη πρώτη περίοδο των μετρήσεων στη γέφυρα της Καβάλας ήταν διαθέσιμα δεδομένα ελεύθερης ταλάντωσης που αποκτήθηκαν από διέγερση της γέφυρας από διερχόμενο όχημα και μέτρηση της απόκρισής της αμέσως μετά την έξοδο του οχήματος από το κατάστρωμα της γέφυρας. Επομένως, η εφαρμογή της μεθοδολογίας αναγνώρισης μορφικού προσομοιώματος έγινε βάσει την ελεύθερη ταλάντωση όπως περιγράφεται στην παράγραφο A.1. Στην πρόσφατη και τελευταία φάση των μετρήσεων καταγράφηκε από το άνοιγμα A της γέφυρας περιορισμένος αριθμός δεδομένων ταλάντωσης σε λειτουργικά φορτία. Στην περίπτωση αυτή η εφαρμογή της μεθοδολογίας αναγνώρισης μορφικού προσομοιώματος θα γίνει βάσει της περίπτωσης ταλαντώσεων σε λειτουργικά φορτία όπως περιγράφεται στην παράγραφο A.2. Το λογισμικό και οι οδηγίες χρήσης που έχουν ήδη ολοκληρωθεί αναφέρονται στις περιπτώσεις ελεύθερης ταλάντωσης και ταλάντωσης σε λειτουργικά φορτία.

#### A.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Beck, J.L., 1978, "Determining models of structures from earthquake records", Report No. EELRL 78-01, Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA.
- [2] Καρακώστας, Χ.Ζ., Λεκίδης, Β.Α., Παυλίδου, Μ.Ι., Παπαδημητρίου, Κ., 2001, "Σεισμική Συμπεριφορά Κατασκευών Ο/Σ κατά τη Μετασεισμική Ακολουθία του Σεισμού της Αθήνας (7-9-99)-Αναλυτική και Πειραματική Διερεύνηση", 2<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Θεσσαλονίκη, 27-30 Νοεμβρίου, 2001.
- [3] Pavlidou, M., Christodoulou, K., Gkaras, V., Karamanos, S.A., Papadimitriou, C., Perdikaris, P.C., Lekidis, V.A. and Karakostas, C.Z. (2002). "Model Updating of Bridges Using Vibration Measurements." 1<sup>st</sup> European Workshop on Structural Health Monitoring, Paris, France, in print.

- [4] Karakostas, C.Z., Lekidis, V.A., Pavlidou, M., Papadimitriou, C., 2002, "Analytical and Experimental Investigation of the Dynamic Behaviour of R/C buildings during the Athens (7-9-99) aftershock sequence", 12th European Conference on Earthquake Engineering, England.
- [5] McVerry, G.H., 1980, "Structural Identification in the Frequency Domain from Earthquake Records", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 8, pp. 161-180.
- [6] Optimization Toolbox for use with MATLAB, The Mathworks Inc.
- [7] Παυλίδου, Μ. 2000, "Αναγνώριση Παραμέτρων Ταλαντωτικού Συστήματος στο Πεδίο Συχνότητων", Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
- [8] Pavlidou, M., 2002, "Modal Model Identification Techniques", Thesis, *Department of Mechanical & Industrial Engineering, School of Engineering, University of Thessaly, Volos, Greece* (in preparation).
- [9] Werner, S.D., Beck, J.L. and Levine, M.B., 1987, "Seismic Response Evaluations of Meloland Road Overpass Using 1979 Imperial Valley Earthquake Records", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 15, pp. 249-274.
- [10] Χατζοπούλου, Α., 'Ανάλυση Μετρήσεων για τον Προσδιορισμό Μορφικών Μοντέλων Στο Πεδίο του Χρόνου', Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2001.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

#### B.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Περιγράφεται μία κατηγορία μεθοδολογιών αναθεώρησης μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, με βάση μετρήσεις δυναμικής απόκρισης. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται συμπεράσματα σχετικά με την αξιοπιστία των μεθοδολογιών, το υπολογιστικό κόστος και τους παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοπιστία διάγνωσης βλάβης.

#### B.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Έστω μία κατηγορία παραμετρικών μοντέλων (συνήθως μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων), η οποία επιλέγεται για την περιγραφή της συμπεριφοράς μιας κατασκευής. Έστω  $\theta$  οι παράμετροι που σχετίζονται με τις ιδιότητες της κατασκευής, όπως στιβαρότητα, μάζα και απόσβεση. Μία συγκεκριμένη τιμή των παραμέτρων  $\theta$  προσδιορίζει ένα συγκεκριμένο μοντέλο της γενικής κατηγορίας μοντέλων. Έτσι, οι τιμές των παραμέτρων αυτών είναι ενδεικτικές για την κατάσταση της κατασκευής. Κατά την αρχική προσομοίωση οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου είναι συνήθως άγνωστες λόγω ελλιπών πληροφοριών από τις οποίες θα ήταν εφικτός ο υπολογισμός τους. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας της κατασκευής, οι τιμές των παραμέτρων ενδέχεται να αλλάξουν λόγω βλαβών που προκαλούνται είτε από τη μακροχρόνια επίδραση φυσικών φαινομένων π.χ. διάβρωση, κόπωση, είτε από την επίδραση ακραίων φορτίσεων, ή από κακή χρήση. Δεδομένα δυναμικών μετρήσεων που αφορούν τόσο τη διέγερση και την απόκριση της κατασκευής όσο και τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής, των συντελεστών απόσβεσης και των ιδιομορφών, χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με τις πιθανές τιμές των παραμέτρων  $\theta$ . Μέθοδοι αναγνώρισης συστημάτων που λαμβάνουν υπόψη τις πληροφορίες που εξάγονται από τη μέτρηση των αποκρίσεων της ταλάντωσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τη συνεχή αναθεώρηση των τιμών των παραμέτρων των μοντέλων. Ειδικότερα, σημαντικές αλλαγές στις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου μπορεί να είναι ενδεικτικές για την ύπαρξη βλάβης στην κατασκευή και μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τον προσδιορισμό της θέσης και του μεγέθους της.

Η επισήμανση της μηχανικής κατάστασης των κατασκευών καθώς επίσης και ο προσδιορισμός της πιθανής τοπικής αστοχίας είναι ένα "αντίστροφο πρόβλημα" δυναμικής μηχανικής των κατασκευών, το οποίο συχνά δεν έχει μοναδική λύση λόγω σφαλμάτων μοντελοποίησης, ύπαρξης θορύβου στις μετρήσεις, μέτρηση λιγότερων βαθμών ελευθερίας λόγω περιορισμένου αριθμού αισθητήρων και του περιορισμού που επιβάλλει το εύρος συχνοτήτων στο οποίο διεγείρεται η κατασκευή. Μία στατιστική μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από τους Beck και Katafygiotis (1998) και είναι δομημένη κατάλληλα για το χειρισμό των αβεβαιοτήτων λόγω σφαλμάτων μοντελοποίησης και θορύβου, μπορεί να προσαρμοστεί έτσι ώστε να προβλέψει την επίδραση των παραμέτρων στην απόκριση του μοντέλου. Η μέθοδος αυτή,

συγκρινόμενη με άλλες καθοριστικές μεθόδους, παρέχει μια πιο συστηματική αντιμετώπιση των προβλημάτων της αναθεώρησης μοντέλου και της διάγνωσης-αναγνώρισης βλάβης σε κατασκευές διότι εκμεταλλεύεται πλήρως όλες τις πληροφορίες που περιέχονται στα δεδομένα, λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες που παρουσιάζονται, καθώς επίσης και σχετικές γνώσεις από προηγούμενες εμπειρίες με παρόμοια συστήματα. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, το πρόβλημα αναγνώρισης και εύρεσης του πιθανότερου μοντέλου λύνεται ελαχιστοποιώντας μία συνάρτηση που εκφράζει το μέτρο του σφάλματος των δυναμικών μετρήσεων απόκρισης και της απόκρισης που προβλέπεται από το κάθε μοντέλο της κατασκευής που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη τιμή των παραμέτρων  $\underline{\theta}$ .

Στη συνέχεια δίνονται τρεις ενδεικτικές μεθοδολογίες αναθεώρησης μοντέλων (Χριστοδούλου Κ. 2001). Τα συμπεράσματα εφαρμογής αυτών των μεθοδολογιών αναφέρονται σε επόμενη παράγραφο.

### ***B.2.1 Αναγνώριση Βασισμένη σε Δεδομένα Διεγέρσεων και Αποκρίσεων***

Θεωρούμε πρώτα την περίπτωση στην οποία τα δεδομένα των μετρήσεων αποτελούνται από καταγραφές των διεγέρσεων και των αποκρίσεων ενός συστήματος, που δίνονται με τη μορφή επιταχύνσεων σε συνάρτηση με το χρόνο. Συγκεκριμένα θεωρούμε ότι  $\underline{z}(n\Delta t)$ , με  $n=1, \dots, N$ , είναι η μετρούμενη διέγερση σε συνάρτηση με το χρόνο στους  $N_e$  βαθμούς ελευθερίας και  $\ddot{\underline{x}}(n\Delta t)$  είναι η μετρούμενη απόκριση σε συνάρτηση με το χρόνο στους  $R$  βαθμούς ελευθερίας του μοντέλου της κατασκευής, όπου  $n$  είναι ο συνολικός αριθμός των μετρήσεων που καταγράφονται ανά χρονικό διάστημα  $\Delta t$ .

Παρόμοια, θεωρούμε ότι  $\ddot{\underline{x}}(n\Delta t, \underline{\theta})$  είναι η προβλεπόμενη μετρούμενη απόκριση του μοντέλου της κατασκευής, που αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη τιμή των  $\underline{\theta}$  και η οποία προκαλείται από μία διέγερση  $\underline{z}(n\Delta t)$ . Λόγω σφαλμάτων προσομοίωσης και της παρουσίας θορύβου στις μετρήσεις, οι προβλεπόμενες τιμές απόκρισης του μοντέλου θα διαφέρουν από αυτές που πραγματικά καταγράφουν οι αισθητήρες. Η διαφορά  $\underline{e}(n)$  ανάμεσα στις μετρούμενες αποκρίσεις  $\ddot{\underline{x}}(n\Delta t)$  και στις αντίστοιχες προβλεπόμενες τιμές  $L_0 \ddot{\underline{x}}(n\Delta t, \underline{\theta})$  από ένα συγκεκριμένο μοντέλο, στους μετρούμενους βαθμούς ελευθερίας ικανοποιεί την εξίσωση σφάλματος

$$\underline{e}(n) = \ddot{\underline{x}}(n\Delta t) - L_0 \ddot{\underline{x}}(n\Delta t; \underline{\theta}) \quad (\text{B.1})$$

όπου  $L_0$  είναι ένας πίνακας διαστάσεων  $R \times N_d$  ο οποίος αποτελείται από μηδενικά και μονάδες έτσι ώστε από τους συνολικούς βαθμούς ελευθερίας  $N_d$  του μοντέλου να επιλέγονται οι  $R$  βαθμοί ελευθερίας που μετρώνται.

Σύμφωνα με τη στατιστική μέθοδο αναγνώρισης που αναπτύχθηκε από τους Beck και Katafygiotis (1998) η αβεβαιότητα στις δομικές παραμέτρους  $\underline{\theta}$  του μοντέλου για δεδομένα μετρήσεων  $D = \{\ddot{\underline{x}}(n\Delta t), \underline{z}(n\Delta t), n=1, \dots, N\}$  ποσοτικοποιείται από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των παραμέτρων  $\underline{\theta}$  σύμφωνα με την εξίσωση (Katafygiotis et al., 1998, 2000):

$$p(\underline{\theta} | D) = d J(\underline{\theta}, D)^{-(RN-1)/2} \quad (\text{B.2})$$



όπου  $J(\underline{\theta}, D)$  είναι ένα μέτρο του σφάλματος ανάμεσα στα δεδομένα των μετρήσεων και του βέλτιστου μοντέλου της κατασκευής, που αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη τιμή των  $\underline{\theta}$ , και δίνεται από τη σχέση:

$$J(\underline{\theta}, D) = \frac{1}{N \cdot R} \sum_{n=1}^N \left\| \ddot{\hat{x}}(n\Delta t) - L_0 \ddot{x}(n\Delta t; \underline{\theta}) \right\|^2, \quad (\text{B.3})$$

το  $\|\cdot\|$  παριστά το γνωστό Ευκλείδειο μέτρο και  $d$  είναι μία σταθερά η οποία διασφαλίζει ότι το ολοκλήρωμα της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας είναι ίσο με μονάδα. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας  $p(\underline{\theta}|D)$  της εξίσωσης (B.2) δίνει μία πλήρη περιγραφή της αβεβαιότητας στην εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου.

Για δεδομένες μετρήσεις  $D$ , οι βέλτιστες τιμές  $\hat{\underline{\theta}}$  των παραμέτρων  $\underline{\theta}$  προσδιορίζουν το πλέον πιθανό μοντέλο και προκύπτουν μεγιστοποιώντας την  $p(\underline{\theta}|D)$  ή ισοδύναμα ελαχιστοποιώντας τη συνάρτηση  $J(\underline{\theta}, D)$  ως προς τις παράμετρους  $\theta_i$ .

### **B.2.2 Αναγνώριση Βασισμένη σε Μορφικά Δεδομένα**

Θεωρείται η περίπτωση στην οποία οι πειραματικές μετρήσεις αποτελούνται από ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές. Συγκεκριμένα, έστω  $\hat{\omega}_i, i=1, \dots, m$  οι τιμές των  $m$  μετρούμενων ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής και  $\hat{\phi}_i, i=1, \dots, m$  οι αντίστοιχες τιμές των ιδιομορφών στα  $R$  σημεία μέτρησης. Παρόμοια, έστω  $\omega_i(\underline{\theta}), i=1, \dots, m$  και  $\phi_i(\underline{\theta})$  οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών αντίστοιχα που προκύπτουν από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της κατασκευής και αντιστοιχούν σε μια συγκεκριμένη τιμή των παραμέτρων  $\underline{\theta}$ . Συγκεκριμένα, οι ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές ικανοποιούν το ιδιοπρόβλημα:

$$\left( K(\underline{\theta}) - \omega_i^2 M(\underline{\theta}) \right) \underline{\phi}_i = \underline{0} \quad \text{για } i=1, \dots, m \quad (\text{B.4})$$

όπου  $K(\underline{\theta})$  και  $M(\underline{\theta})$  είναι τα μητρώα δυσκαμψίας και μάζας του μοντέλου της κατασκευής, τα οποία γενικά θα εξαρτώνται από τις παραμέτρους  $\underline{\theta}$ . Οι τιμές των ιδιομορφών που προβλέπονται από το μοντέλο στους μετρούμενους βαθμούς ελευθερίας υπολογίζονται μέσω του  $L_0$  από τη σχέση  $\underline{\varphi}_i(\underline{\theta}) = L_0 \underline{\phi}_i(\underline{\theta})$ .

Λόγω σφαλμάτων μοντελοποίησης και αβεβαιότητες στη διαδικασία πειραματικού υπολογισμού των μορφών, οι πειραματικά υπολογισμένες ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές θα διαφέρουν από τις αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές που υπολογίζονται από το μοντέλο. Ακολουθώντας μια παρόμοια μεθοδολογία με αυτή που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, το βέλτιστο μοντέλο στη περίπτωση που είναι διαθέσιμα τα μορφικά δεδομένα προκύπτει από την ελαχιστοποίηση μίας συνάρτησης που περιγράφει το σφάλμα μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων από το μοντέλο μορφικών ιδιοτήτων. Μία τέτοια συνάρτηση σφάλματος που προκύπτει από τη στατιστική μεθοδολογία του Bayes δίνεται στην εργασία του Vanik (1997) από τη σχέση:

$$J(\underline{\theta}) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\omega_i^2(\underline{\theta}) - \hat{\omega}_i^2}{\hat{\omega}_i^2} \right]^2 + \sum_{i=1}^N \left[ \frac{(\varphi_i(\underline{\theta}) - \alpha_i(\underline{\theta}) \hat{\varphi}_i)^T \cdot (\varphi_i(\underline{\theta}) - \alpha_i(\underline{\theta}) \hat{\varphi}_i)}{\|\alpha_i(\underline{\theta}) \hat{\varphi}_i\|^2} \right] \quad (\text{B.5})$$

όπου  $\alpha_i$  είναι ένας συντελεστής κανονικοποίησης των μετρούμενων και των υπολογιστικά προσδιοριζόμενων ιδιομορφών. Προκύπτει από την ελαχιστοποίηση του μέτρου της διαφοράς  $\|\varphi_i(\underline{\theta}) - \alpha_i(\underline{\theta}) \hat{\varphi}_i(\underline{\theta})\|$ . Αυτό ισοδυναμεί με την επιλογή

$$\alpha_i(\underline{\theta}) = \frac{\hat{\varphi}_i^T(\underline{\theta}) \varphi_i(\underline{\theta})}{\hat{\varphi}_i^T(\underline{\theta}) \hat{\varphi}_i(\underline{\theta})}$$

Ο πρώτος όρος της (B.5) αντιπροσωπεύει το σφάλμα ανάμεσα στις ιδιοσυχνότητες ενώ ο δεύτερος αντιπροσωπεύει το σφάλμα ανάμεσα στις ιδιομορφές. Η μέτρηση του  $J(\underline{\theta})$  στην παρούσα περίπτωση απαιτεί την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών της κατασκευής. Επιπλέον, η χρήση της (B.5) προϋποθέτει ότι η αντιστοιχία ανάμεσα στις ιδιομορφές του μοντέλου και των ιδιομορφών που προκύπτουν από τις μετρήσεις είναι γνωστές. Σε αρκετές περιπτώσεις όμως αυτή η αντιστοιχία δεν είναι γνωστή, με αποτέλεσμα να μην είναι εύκολη η εφαρμογή της (B.5).

### B.2.3 Αναγνώριση Βασισμένη στις Αναπτυγμένες Ιδιομορφές

Οι μέθοδοι αυτοί βασίζονται στην εισαγωγή των αγνώστων συνιστωσών των ιδιομορφών στη συνάρτηση σφάλματος και συχνά αναφέρονται σαν μέθοδοι ανεπτυγμένων ιδιομορφών (Levine et al, 1996, Papadimitriou et al, 1997). Στη περίπτωση αυτή η συνάρτηση σφάλματος παίρνει τη μορφή:

$$J(\underline{\theta}, \tilde{\varphi}_i) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{1}{\hat{\omega}_i^4} \left\| (K(\underline{\theta}) - \hat{\omega}_i^2 M(\underline{\theta})) \tilde{\varphi}_i \right\|_E^2 + \frac{\|L_0 \tilde{\varphi}_i - \hat{\varphi}_i\|^2}{\|\hat{\varphi}_i\|^2} \right] \quad (\text{B.6})$$

όπου το μέτρο  $\|x\|_E$  ορίζεται από τη σχέση  $\|x\|_E = x^T E x$ ,  $\|x\|$  είναι το συνήθως Ευκλείδειο μέτρο και  $\frac{1}{\hat{\omega}_i^4}$  είναι ένας συντελεστής που χρησιμοποιείται για την κανονικοποίηση των όρων στην εξίσωση B.6 (Papadimitriou et al. 1997, Farhat και Hemez 1993, Hemez 1995, Hemez και Farhat 1995).

Στην παραπάνω σχέση, ανάμεσα στις άγνωστες παραμέτρους συμπεριλαμβάνονται εκτός από τις παράμετρους  $\underline{\theta}$  και οι συνιστώσες  $\tilde{\varphi}_i$  της κάθε ιδιομορφής. Ο πρώτος όρος εκφράζει το μορφικό σφάλμα που προκύπτει από την μη ικανοποίηση του ιδιοπροβλήματος B.4, ενώ ο δεύτερος όρος είναι ένα μέτρο του σφάλματος μεταξύ των μετρούμενων ιδιομορφών  $\hat{\varphi}_i$  και των προβλεπόμενων ιδιομορφών  $\tilde{\varphi}_i$ , που αντιστοιχούν στο μοντέλο  $\underline{\theta}$ . Το πρόβλημα εύρεσης του βέλτιστου μοντέλου ανάγεται στο πρόβλημα ελαχιστοποίησης της συνάρτησης σφάλματος ως προς τις παράμετρους  $\underline{\theta}$  και τις ιδιομορφές  $\tilde{\varphi}_i$ . Επομένως, εκτός από το βέλτιστο μοντέλο

προκύπτουν και οι εκτιμήσεις των βέλτιστων “ανεπτυγμένων ιδιομορφών” σε όλους του βαθμούς ελευθερίας του μοντέλου.

Επίσης, στην παραπάνω σχέση αποφεύγεται το πρόβλημα της προηγούμενης μεθόδου που είχε να κάνει με την αντιστοιχία των μετρούμενων και των υπολογιστικά προσδιοριζόμενων ιδιοσυχνοτήτων. Όπως φαίνεται από τη σχέση, δεν απαιτείται πλέον η γνώση των υπολογιστικά υπολογιζόμενων ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών παρά μόνο η γνώση των ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών που προσδιορίζονται από τις μετρήσεις.

Να σημειωθεί ότι στην εργασία Paradimitriou et al (1997) αποδεικνύεται ότι, κάτω από ορισμένες συνθήκες, το μορφικό σφάλμα στον πρώτο όρο της (B.6) είναι ισοδύναμο με το σφάλμα  $J$ , που αντιστοιχεί στον πρώτο όρο της εξίσωσης (B.5).

Η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης (B.6) ως προς  $\underline{\theta}$  και  $\tilde{\phi}_i$  είναι ισοδύναμη με την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης:

$$J^*(\underline{\theta}) = J(\underline{\theta}, \tilde{\phi}_i(\underline{\theta})) \quad (B.7)$$

ως προς  $\underline{\theta}$ , όπου οι ανεπτυγμένες ιδιομορφές  $\tilde{\phi}_i(\underline{\theta})$  που αντιστοιχούν στην τιμή  $\underline{\theta}$  προκύπτουν από τη σχέση:

$$\left[ \frac{1}{\hat{\omega}_i^4} (K(\underline{\theta}) - \hat{\omega}_i^2 M(\underline{\theta})) E (K(\underline{\theta}) - \hat{\omega}_i^2 M(\underline{\theta})) + \frac{L_0^T L_0}{\hat{\phi}_i^T \hat{\phi}_i} \right] \tilde{\phi}_i = \frac{L_0^T \hat{\phi}_i}{\hat{\phi}_i^T \hat{\phi}_i} \quad (B.8)$$

Η τελευταία σχέση προκύπτει από το γεγονός ότι για να ελαχιστοποιείται η συνάρτηση  $J(\underline{\theta}, \tilde{\phi}_i)$  ως προς όλες τις παραμέτρους, πρέπει :

$$\frac{\partial J(\underline{\theta}, \tilde{\phi}_i)}{\partial \tilde{\phi}_{ji}} = 0 \quad (B.9)$$

όπου  $\tilde{\phi}_{ji}$  είναι η  $j$  συνιστώσα της  $\tilde{\phi}_i$  μορφής, προκύπτει άμεσα η εξίσωση (B.8).

Είναι αξιοσημείωτο ότι στον προσδιορισμό του βέλτιστου μοντέλου με την παρούσα μέθοδο αποφεύγεται η επίλυση ιδιοπροβλημάτων τα οποία είναι υπολογιστικά χρονοβόρα. Το μόνο που απαιτείται είναι η επίλυση του γραμμικού αλγεβρικού συστήματος της εξίσωσης (B.8). Αντίθετα, ο προσδιορισμός του βέλτιστου μοντέλου ελαχιστοποιώντας τη συνάρτηση (B.5) απαιτεί την επίλυση των ιδιοπροβλημάτων για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών.

Η επιλογή της παραμέτρου  $E$  της συνάρτησης (B.6) εξαρτάται από το πρόβλημα το οποίο μελετάται. Συνήθως επιλέγεται να είναι ο αντίστροφος πίνακας του μητρώου μάζας, δηλαδή  $E = M^{-1}$  (Paradimitriou et al, 1997). Στην περίπτωση όμως, που το δυναμικό σύστημα που μελετάται έχει πολλούς βαθμούς ελευθερίας, το μητρώο μάζας  $M$  που προκύπτει είναι πολύ μεγάλο. Κατά την αναστροφή του, το μητρώο  $M$  από ζωνικό (banded) που είναι αρχικά, μετατρέπεται σε ένα πλήρη πίνακα, γεγονός που αυξάνει σημαντικά τις υπολογιστικές απαιτήσεις. Έτσι, για να είναι η παραπάνω

μέθοδος υπολογιστικά αποδοτική για μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων με πολλούς βαθμούς ελευθερίας, γίνεται η επιλογή του  $E=I$ , όπου  $I$  ο μοναδιαίος πίνακας διάστασης  $N_d \times N_d$ .

#### ***B.2.4 Παραμετροποίηση Μοντέλων Πεπερασμένων Στοιχείων***

Παρακάτω περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο επιτεύχθηκε και υλοποιήθηκε σε λογισμικό η παραμετροποίηση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων. Για την περιγραφή της κατασκευής χρησιμοποιούνται γραμμικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων. Από την διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία προκύπτουν τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας των στοιχείων από τα οποία αποτελείται η κύρια κατασκευή, τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας των υποκατασκευών που σχηματίζονται από τα παραπάνω στοιχεία, καθώς και τα καθολικά μητρώα μάζας και δυσκαμψίας όλης της κατασκευής. Τα μητρώα εξαρτώνται από τις ιδιότητες της κατασκευής, όπως το μέτρο ελαστικότητας, πυκνότητα και γεωμετρικά χαρακτηριστικά (διατομή, πάχος, μήκος, ροπές αδρανείας, συγκεντρωμένες μάζες, κλπ). Συνήθως επιλέγεται για αναθεώρηση ένα υποσύνολο αυτών των ιδιοτήτων. Το υποσύνολο αυτό αποτελεί την ομάδα των παραμέτρων  $\underline{\theta}$ . Θεωρώντας ότι  $K^e$  και  $M^e$  είναι αντίστοιχα οι πίνακες δυσκαμψίας και μάζας του ενός στοιχείου, μπορούμε να εκφράσουμε την εξάρτηση αυτών των πινάκων του στοιχείου από τις παραμέτρους  $\underline{\theta}$ , που αντιστοιχεί σε αυτό το στοιχείο, με την παρακάτω γενική μορφή:

$$K^e = K^e(\underline{\theta}) \quad (B.10)$$

$$M^e = M^e(\underline{\theta}) \quad (B.11)$$

Στη μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία, οι καθολικοί πίνακες μάζας και δυσκαμψίας της κατασκευής παίρνουν τη μορφή:

$$K(\underline{\theta}) = \overset{e}{\mathbf{A}} K^e(\underline{\theta}) \quad (B.12)$$

$$M(\underline{\theta}) = \overset{e}{\mathbf{A}} M^e(\underline{\theta}) \quad (B.13)$$

όπου το  $\overset{e}{\mathbf{A}}$  δηλώνει τη συνήθη στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων σύνθεση (assembly) των μητρώων που αντιστοιχούν στο κάθε στοιχείο. Οι εξισώσεις (B.12) και (B.13) είναι η μαθηματική έκφραση του γεγονότος ότι οι καθολικοί πίνακες μάζας και δυσκαμψίας αποτελούνται από τους πίνακες μάζας και δυσκαμψίας των επιμέρους στοιχείων.

Θεωρώντας ότι έχουμε μια γραμμική σχέση ανάμεσα στις παραμέτρους  $\underline{\theta}$  και τους πίνακες μάζας και δυσκαμψίας ενός στοιχείου που περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$K^e = K_0^e + \sum_{i=1}^p K_i^e \theta_i \quad (B.14)$$

$$M^e = M_0^e + \sum_{i=1}^p M_i^e \theta_i \quad (B.15)$$

τότε οι καθολικοί πίνακες του συστήματος  $K(\underline{\theta})$  και  $M(\underline{\theta})$  μπορούν να γραφούν στη μορφή:

$$K(\underline{\theta}) = K_0 + \sum_{i=1}^p K_i \theta_i \quad (B.16)$$

$$M(\underline{\theta}) = M_0 + \sum_{i=1}^p M_i \theta_i \quad (\text{B.17})$$

όπου

$$K_i = \sum_{e=1}^e K_i^e, \quad i = 0, 1, \dots, p \quad (\text{B.18})$$

$$M_i = \sum_{e=1}^e M_i^e, \quad i = 0, 1, \dots, p \quad (\text{B.19})$$

Οι πίνακες  $K_0$ ,  $K_i$ ,  $M_0$  και  $M_i$  είναι σταθεροί πίνακες που δεν εξαρτώνται από τις μεταβλητές  $\underline{\theta}$  και συντίθενται από τους αντίστοιχους πίνακες των πεπερασμένων στοιχείων  $K_0^e, K_i^e, M_0^e$ , and  $M_i^e$  χρησιμοποιώντας τη συνήθη διαδικασία σύνθεσης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Οι εξισώσεις (B.18) και (B.19), δείχνουν ότι η παραμετροποίηση γίνεται σε επίπεδο στοιχείου και χρησιμοποιείται για την δημιουργία των καθολικών μητρώων του συστήματος,  $K_0, K_i, M_0$ , and  $M_i$ . Αφού έχει γίνει η παραμετροποίηση και έχουν υπολογιστεί και αποθηκευτεί στη μνήμη τα καθολικά μητρώα  $K_0, K_i, M_0$  και  $M_i$ , οι πίνακες μάζας και δυσκαμψίας του μοντέλου μπορούν να υπολογιστούν για κάθε τιμή των παραμέτρων  $\underline{\theta}$  χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (B.16) και (B.17). Έτσι ο υπολογισμός των πινάκων μάζας και δυσκαμψίας των στοιχείων και η σύνθεσή τους δεν χρειάζεται να επαναληφθεί όταν υπολογίζονται οι πίνακες για διαφορετική τιμή του  $\underline{\theta}$ . Καθώς η διαδικασία αναθεώρησης μοντέλων απαιτεί υπολογισμό των πινάκων μάζας και δυσκαμψίας για ποικίλες τιμές του  $\underline{\theta}$ , μία τέτοια παραμετροποίηση είναι υπολογιστικά πολύ αποδοτική.

### B.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΠΑΝΩ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη χρήση των προαναφερθέντων μεθοδολογιών αναθεώρησης, αναφέρονται αναλυτικά στην εργασία του Χριστοδούλου, Κ., 2001. Ωστόσο, τα βασικά συμπεράσματα μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

Η πρώτη μέθοδος, η οποία βασίζεται στην απευθείας ανάλυση των μετρήσεων της χρονικής μεταβολής της δυναμικής απόκρισης, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, αλλά απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό χρόνο και προϋποθέτει την ύπαρξη αξιόπιστου δυναμικού μοντέλου της κατασκευής. Ο μεγάλος υπολογιστικός χρόνος οφείλεται στην επίλυση των διαφορικών εξισώσεων κίνησης σε κάθε στάδιο της βελτιστοποίησης, απ' όπου προσδιορίζονται οι αποκρίσεις του μοντέλου. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την αναθεώρηση κατασκευών με μη-γραμμική συμπεριφορά.

Η δεύτερη μέθοδος, η οποία βασίζεται στη σύγκριση των μορφικών δεδομένων (ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες) που προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρούμενων επιταχύνσεων με αυτές που υπολογίζονται για το δυναμικό μοντέλο της κατασκευής, δίνει και αυτή ικανοποιητικά αποτελέσματα. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ο μεγάλος υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για σύνθετες κατασκευές, ο οποίος οφείλεται στην επίλυση του ιδιοπροβλήματος σε κάθε στάδιο της βελτιστοποίησης. Επίσης, η μέθοδος προϋποθέτει ότι είναι γνωστή η αντιστοιχία ανάμεσα στις ιδιομορφές του μοντέλου και αυτών που προκύπτουν από τις

μετρήσεις. Για σύνθετες κατασκευές η αντιστοιχία αυτή δεν είναι γνωστή, με αποτέλεσμα να μην είναι εύκολη η εφαρμογή της μεθόδου.

Η τρίτη μέθοδος, που βασίζεται στις μεθόδους ανεπτυγμένων ιδιομορφών, ξεπερνάει το παραπάνω πρόβλημα της αντιστοιχίας των ιδιομορφών, φαίνεται να είναι υπολογιστικά η πλέον αποτελεσματική και δίνει ικανοποιητικά και αξιόπιστα αποτελέσματα. Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής σε σχέση με άλλες προϋπάρχουσες τεχνικές, οι οποίες βασίζονται στη ανάλυση ιδιομορφών, είναι ότι δεν απαιτείται η προεπιλογή των υπό αναγνώριση ιδιομορφών από τον χρήστη και αποφεύγεται η επίλυση ιδιοπροβλημάτων. Με τη μέθοδο αυτή, είναι επίσης δυνατή η εκτίμηση της πλήρους ιδιομορφής, δηλαδή των συνιστωσών της ιδιομορφής στους βαθμούς ελευθερίας στους οποίους δεν έχουν τοποθετηθεί αισθητήρες.

Ως γενικό σχόλιο, αναφέρεται πως οι έως τώρα αναλύσεις δείχνουν ότι η διάγνωση βλάβης στις κατασκευές εξαρτάται:

- από τη θέση, μέγεθος και είδος της βλάβης,
- τον αριθμό και τύπο των διεγερόμενων ιδιομορφών, και
- το μέγεθος των σφαλμάτων μοντέλου και μετρήσεων
- τη διάταξη (θέση και αριθμό) αισθητήρων

Λόγω του σχετικά μικρού αριθμού βαθμών ελευθερίας του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων της υπό μελέτη κατασκευής (χαραδρογέφυρα Καβάλας), εφαρμόστηκε και υλοποιήθηκε η δεύτερη μέθοδος αναθεώρησης.

#### **B.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Beck, J.L. and Katafygiotis, L.S., 1998, "Updating Models and their Uncertainties - Bayesian System Identification", *J. Engineering Mechanics (ASCE)*, 123(4), pp. 455-461.
- [2] Katafygiotis, L.S., Papadimitriou, C. and Lam H.F., 1998, "A Probabilistic Approach to Structural Model Updating", *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 17(7-8), pp. 495-507.
- [3] Katafygiotis, L.S., Lam, H.F. and Papadimitriou C., 2000, "Treatment of Unidentifiability in Structural Model Updating", *Advances in Structural Engineering - An International Journal*, Vol. 3(1), 19-39.
- [4] Vanik, M. W., (1997), "A Bayesian Probabilistic Approach to Structural Health Monitoring", PhD Thesis, *Report EERL 97-07*, California Institute of Technology, Pasadena.
- [5] Levine-West, M.B., Milman, M. and Kissil, A., 1996, "Modeshape Expansion Techniques for Prediction - Experimental Evaluation", *AIAA Journal*, Vol. 34(4), pp. 821-829.
- [6] Papadimitriou, C., Levine-West, M. and Milman, M. (1997). "A Methodology for Finite Element Model Updating Using Modal Data." *Proc. of 11th VPI&SU Symposium on Structural Dynamics and Control*, Blacksburg, Virginia.
- [7] Farhat, C. and Hemez, F.M., 1993, "Updating Finite Element Dynamics Models Using an Element-by-Element Sensitivity Methodology", *AIAA Journal*, Vol. 31(9), pp. 1702-1711.
- [8] Hemez, F.M., 1995, "Practical Guide to High Accuracy Identification of Structural Damage in Complex Structures", *Proceedings of the International Modal Analysis Conference*, Nashville, TN, USA, 1995, pp. 1297-1304.

- [9] Hemez, F.M. and Farhat, C., 1995, "Structural Damage Detection via a Finite Element Model Updating Methodology", *The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, Vol. 10(3), pp. 152-166.
- [10] Χριστοδούλου,Φ.Κ., 2001, "Αναθεώρηση Μοντέλων Πεπερασμένων Στοιχείων με εφαρμογές στη Διάγνωση Βλαβών σε Κατασκευές", Μεταπτυχιακή εργασία, ΤΜΜΒ ΠΘ, Βόλος
- [11]

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

### ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

#### Εισαγωγή

Με την βοήθεια της συνάρτησης σφάλματος όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο προσδιορίστηκε ποσοτικά η «απόκλιση» του μοντέλου απόκρισης από τις πειραματικές μετρήσεις σε σχέση με τις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου. Επίσης ορίστηκε η σχετική συνάρτηση σφάλματος, η ελαχιστοποίηση της οποίας δίνει τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται δύο αριθμητικές μέθοδοι ελαχιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν για τον σκοπό αυτό, η μέθοδος Quasi-Newton και η μέθοδος Γενετικών Αλγορίθμων. Επίσης, παρουσιάζεται μια υβριδική μέθοδος ελαχιστοποίησης η οποία αφορά τη χρήση Γενετικών Αλγορίθμων σε πρώτο στάδιο, για τον αξιόπιστο προσδιορισμό της περιοχής του ολικού ελαχίστου και την εφαρμογή σε δεύτερο στάδιο της μεθόδου Quasi-Newton (καθοδηγούμενη από παραγώγους) για την επιτάχυνση της σύγκλισης του αλγορίθμου.

#### Γ.1 Μέθοδος Ελαχιστοποίησης Quasi-Newton

##### Γ.1.1 Εισαγωγή στη Μέθοδο Newton

Η οικογένεια μεθόδων βελτιστοποίησης Newton περιλαμβάνει διάφορες μεθόδους, όπως την discrete Newton μέθοδο, την quasi Newton και άλλες. Ιστορικά, οι δεύτερης τάξης,  $\mathcal{O}(n^2)$ , απαιτήσεις σε μνήμη, και τρίτης τάξης,  $\mathcal{O}(n^3)$ , υπολογισμοί επίλυσης γραμμικών συστημάτων, όπου  $n$  ο αριθμός των μεταβλητών ελαχιστοποίησης, είχαν περιορίσει τις μεθόδους αυτές σε επίλυση μικρών προβλημάτων, στην επίλυση σε πεδία κοντά στη λύση, ή την επίλυση «αραιών» συστημάτων. Ωστόσο, η εξέλιξη των υπολογιστών καθιστά δυνατή την επίλυση και μεγάλων προβλημάτων.

Όλες οι μέθοδοι Newton βασίζονται στην προσέγγιση τοπικά της συνάρτησης βελτιστοποίησης με μία δευτεροβάθμια συνάρτηση, την οποία και ελαχιστοποιούν. Το δευτεροβάθμιο μοντέλο της συνάρτησης βελτιστοποίησης  $f$  στη θέση  $x_k$  κατά μήκος του  $p$ , δίδεται από τη σχέση:

$$f(x_k + p) \approx f(x_k) + g_k^T p + \frac{1}{2} p^T \mathbf{H}_k p \quad (\Gamma.1)$$

όπου  $\mathbf{H}$  ο πίνακας Εσσιανής και  $g_k$  το διάνυσμα των πρώτων παραγώγων. Το ελάχιστο του δεξιού μέλους επιτυγχάνεται όταν το  $p_k$  είναι το ελάχιστο της δευτεροβάθμιας εξίσωσης

$$q_{\mathbf{H}_k}(p) = g_k^T p + \frac{1}{2} p^T \mathbf{H}_k p \quad (\Gamma.2)$$

Εναλλακτικά, η Newton κατεύθυνση  $p_k$ , ικανοποιεί το γραμμικό σύστημα  $n$  εξισώσεων (όπου  $n$ , ο αριθμός των παραμέτρων βελτιστοποίησης), γνωστό και ως σύστημα Newton



$$\mathbf{H}_k p = -g_k \quad (\Gamma.3)$$

Η κλασσική μέθοδος Newton, χρησιμοποιεί την κατεύθυνση  $p$ , επαναληπτικά χρησιμοποιώντας την εξίσωση

$$x_{k+1} = x_k + p_k \quad (\Gamma.4)$$

μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση. Η επαναληπτική διαδικασία για την ελαχιστοποίηση της μονοδιάστατης συνάρτησης  $f(x)$ , είναι:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f'(x_k)}{f''(x_k)} \quad (\Gamma.5)$$

Στην περίπτωση πολλών βαθμών ελευθερίας, η επιλογή του μονοδιάστατου διανύσματος κατεύθυνσης  $-f'(x_k)/f''(x_k)$  αντικαθίσταται από το διάνυσμα κατεύθυνσης  $-\mathbf{H}_k^{-1}g_k$ . Η κατεύθυνση αυτή ορίζεται για μη ιδιόμορφους πίνακες  $\mathbf{H}_k$ .

Στην πράξη είναι αναγκαία η τροποποίηση της μεθόδου προκειμένου να εγγυηθεί η σύγκλιση του αλγορίθμου, με τετραγωνικό ρυθμό σύγκλισης κοντά στην λύση. Όταν ο πίνακας  $\mathbf{H}$  δεν είναι θετικά ορισμένος, η κατεύθυνση της μεθόδου μπορεί να μην ορίζεται ή να είναι λανθασμένη. Έτσι αναπτύσσονται διάφορες μέθοδοι για την παραγωγή ενός θετικά ορισμένου πίνακα  $\bar{\mathbf{H}}$ . Επίσης τροποποιείται ο υπολογισμός του βήματος αλλά και της κατεύθυνσης για γρηγορότερη σύγκλιση.

### Γ.1.2 Η Μέθοδος Quasi Newton

Η μέθοδος αυτή προσθέτει στο επαναληπτικό σχήμα επιπλέον πληροφορία της καμπυλότητας της συνάρτησης που προσπαθεί να βελτιστοποιήσει, προκειμένου να συγκλίνει γρηγορότερα. Η πληροφορία για την καμπυλότητα προστίθεται σταδιακά. Σε κάθε βήμα του αλγόριθμου, η προσέγγιση του πίνακα της Εσσιανής (Hessian Matrix) ανανεώνεται με την χρήση νέας πληροφορίας της πρώτης παραγώγου. Χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα της πρώτης παραγώγου, προκύπτει:

$$g_{k+1} = g_k + \mathbf{H}_k (x_{k+1} - x_k) + \dots \quad (\Gamma.6)$$

Υποθέτοντας ότι η συνάρτηση που ελαχιστοποιούμε είναι τετραγωνική, τότε ο πίνακας Εσσιανής περιέχει σταθερές τιμές ανεξάρτητες του  $x_k$ , και είναι ίση με  $\mathbf{H}$ . Από τα παραπάνω προκύπτει:

$$\mathbf{H}s_k = y_k \quad (\Gamma.7)$$

όπου,  $s_k = x_{k+1} - x_k$  και  $y_k = g_{k+1} - g_k$

Εφόσον η κάθε διαφορά των παραγώγων  $y_k$  παρέχει πληροφορία για μία στήλη της  $\mathbf{H}$ , κατασκευάζεται μια οικογένεια από προσεγγιστικούς πίνακες,  $\{B_k\}$ . Έτσι δημιουργείται η βάση της συνθήκης της Quasi-Newton μεθόδου,

$$\mathbf{B}_{k+1}s_k = y_k \quad (\Gamma.8)$$

Ωστόσο για τον προσδιορισμό του  $\mathbf{B}_{k+1}$  μοναδικά, απαιτούνται επιπλέον συνθήκες. Για παράδειγμα υποθέτεται ότι ο  $\mathbf{B}_{k+1}$  διαφέρει από τον  $\mathbf{B}_k$ , από ένα πίνακα μικρότερης τάξης, ο οποίος εξαρτάται από τα  $s_k$  και  $y_k$ . Έτσι:

$$\mathbf{B}_{k+1} = \mathbf{B}_k + \mathbf{U}_k(s_k, y_k, B_k) \quad (\Gamma.9)$$

Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόζεται από την υπορουτίνα της Matlab *fminunc* για την ελαχιστοποίηση της σχετικής συνάρτησης σφάλματος και των προσδιορισμό των βέλτιστων μορφικών χαρακτηριστικών των κατασκευών.

### Γ.1.3 Μειονεκτήματα Μεθόδου Quasi-Newton

Τόσο η μέθοδος Quasi – Newton όσο και όλες οι άλλες μέθοδοι ελαχιστοποίησης που στηρίζονται στην τιμή των παραγώγων της συνάρτησης ελαχιστοποίησης, είναι ευαίσθητες ως προς την αρχική εκτίμηση των μεταβλητών. Επίσης παρουσιάζουν δυσκολίες στον υπολογισμό του ολικού ελαχίστου ιδιαίτερα σε μη γραμμικές, μη κυρτές συναρτήσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανάγκη αρχικών εκτιμήσεων κοντά στην λύση, το οποίο δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί για το σύνολο των μεταβλητών ελαχιστοποίησης, ειδικά στην μέθοδο αναγνώρισης από ταλάντωση λειτουργικών φορτίων, η οποία έχει τον μεγαλύτερο αριθμό αγνώστων παραμέτρων και μεταβλητών ελαχιστοποίησης.

## Γ.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί σημαντικό ενδιαφέρον γύρω από την επίλυση προβλημάτων με τη χρήση βασικών αρχών από τη γενετική και την εξελικτική θεωρία. Οι αλγόριθμοι αυτοί βασίζονται στη χρήση ενός πληθυσμού από δυνατές λύσεις, τον οποίο ανανεώνουν με μία διαδικασία επιλογής βασισμένη στο αποτέλεσμα της κάθε λύσης αλλά και σε μια γενετική διαδικασία λύσεων. Παραδείγματα τέτοιων μεθόδων είναι οι Εξελικτικές Στρατηγικές (Evolution Strategies) οι οποίες μιμούνται τις αρχές της φυσικής εξέλιξης για προβλήματα βελτιστοποίησης παραμέτρων. Άλλο παράδειγμα είναι η τεχνική Εξελικτικού Προγραμματισμού (Evolutionary Programming) εύρεσης λύσεων σε ένα πεδίο πεπερασμένων συστημάτων.

Για όλες τις περιπτώσεις χρήσης αλγορίθμων με αρχές γενετικής και εξελικτικής θεωρίας χρησιμοποιούμε τον όρο Εξελικτικά Προγράμματα (Evolution Programs). Ένα Εξελικτικό Πρόγραμμα είναι ένας αλγόριθμος ο οποίος διατηρεί ένα πληθυσμό από δυνατές λύσεις, σε κάθε επανάληψη. Στην επόμενη επανάληψη, ο αλγόριθμος συγκροτεί και πάλι τον ίδιο αριθμό δυνατών λύσεων, ένα μέρος των οποίων είναι οι καλύτερες της προηγούμενης επανάληψης και ένα άλλο μέρος είναι τροποποιημένες προηγούμενες λύσεις με την χρήση γενετικών τελεστών.

Οι γενετικοί τελεστές μπορεί να κατασκευάζουν νέες πιθανές λύσεις με μικρές αλλαγές σε ένα κομμάτι των παραμέτρων μιας λύσης (mutation type), ή μπορεί να κάνουν μεγαλύτερης τάξης αλλαγές, φτιάχνοντας πιθανές λύσεις από τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων προηγούμενων πιθανών λύσεων (crossover type). Μετά από ένα αριθμό επαναλήψεων, το πρόγραμμα συγκλίνει, σε μία καλή προσέγγιση της λύσης.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι δανείζονται λεξιλόγιο από την φυσική γενετική. Έτσι ορίζονται τα χρωμοσώματα ως μία σειρά από δυαδικά δεδομένα. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από ξεχωριστές μονάδες, τα γονίδια, τα οποία είναι τοποθετημένα

γραμμικά το ένα δίπλα στο άλλο. Τα γονίδια είναι τα στοιχεία που καθορίζουν ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά. Τα γονίδια με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τοποθετούνται σε ορισμένες θέσεις του χρωματοσώματος οι οποίες ονομάζονται loci. Επίσης κάθε χαρακτηριστικό μπορεί να οριστεί διαφορετικά. Το γονίδιο τότε έχει διάφορες καταστάσεις, οι οποίες ονομάζονται alleles.

Κάθε γενότυπος (δηλαδή κάθε χρωμόσωμα στην περίπτωση αυτή), περιγράφει μια πιθανή λύση του προβλήματος βελτιστοποίησής. Μια εξελικτική διαδικασία που χρησιμοποιεί ένα πληθυσμό χρωματοσωμάτων, αντιστοιχεί σε μία εύρεση βέλτιστης λύσης μέσα από ένα πλήθος δυνατών λύσεων.

Η διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης λύσης ισορροπεί μεταξύ δύο αντικρουόμενων συνθηκών, την εξερεύνηση όλου του πεδίου λύσεων και την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Μια τυχαία επιλογή λύσεων στο πεδίο ορισμού της συνάρτησης βελτιστοποίησης μπορεί να εξερευνά όλο το πεδίο λύσεων αλλά δεν «εκμεταλλεύεται» τις καλές λύσεις που εντοπίζει. Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν την δυνατότητα να επιλέγουν τις λύσεις του πληθυσμού που εξετάζουν σε κάθε επανάληψη, και έτσι να «επιβιώνουν» λύσεις κοντά στην βέλτιστη και να «πεθαίνουν» λύσεις μακριά από αυτήν.

Η δομή ενός απλού γενετικού αλγορίθμου είναι η ίδια με αυτή κάθε εξελικτικού αλγορίθμου. Κατά την διάρκεια της επανάληψης  $i$ , δημιουργείται ένας πληθυσμός λύσεων (χρωματοσωμάτων),

$$P(t) = \{x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i\} \quad (\Gamma.10)$$

Για κάθε λύση υπολογίζεται η συνάρτηση κόστους ώστε να εκτιμηθεί η προσέγγιση ή όχι της βέλτιστης λύσης. Μετά, στην επανάληψη  $i+1$ , σχηματίζεται ένας νέος πληθυσμός λύσεων, ο οποίος περιέχει τις καλύτερες λύσεις του προηγούμενου πληθυσμού. Μερικά από τα μέλη του νέου πληθυσμού προέρχονται από ανταλλαγή γονιδίων μεταξύ χρωματοσωμάτων και άλλα από μετάλλαξη.

Για παράδειγμα αν δύο χρωμοσώματα μπορούν να περιγραφούν με πενταδιάστατα διανύσματα,  $(a_1, \beta_1, \gamma_1, \delta_1, \epsilon_1)$  και  $(a_2, \beta_2, \gamma_2, \delta_2, \epsilon_2)$  η ανταλλαγή γονιδίων από το δεύτερο γονίδιο και μετά θα δημιουργούσε δύο νέα χρωματοσώματα, τα  $(a_1, \beta_1, \gamma_2, \delta_2, \epsilon_2)$  και  $(a_2, \beta_2, \gamma_1, \delta_1, \epsilon_1)$ . Σκοπός της ανταλλαγής αυτής είναι η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των πιθανών λύσεων. Η αυθαίρετη μετάλλαξη των χρωματοσωμάτων προκαλεί την αλλαγή ενός ή περισσότερων γονιδίων των χρωματοσωμάτων τυχαία με πιθανότητα ίση με τον ρυθμό μετάλλαξης. Σκοπός της μετάλλαξης είναι η εισαγωγή κάποιας επιπλέον μεταβλητότητας στον πληθυσμό.

Η μέθοδος των Γενετικών Αλγορίθμων δε χρησιμοποιεί πληροφορίες από τις τιμές των μερικών παραγώγων της συνάρτησης ελαχιστοποίησης ως προς την κάθε μεταβλητή. Αυτό δίνει το πλεονέκτημα στη μέθοδο να είναι αρκετά ευέλικτη ώστε ύστερα από ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων να βρίσκει το ολικό ελάχιστο της συνάρτησης ελαχιστοποίησης και όχι κάποιο τοπικό. Η μέθοδος επίσης είναι αρκετά εύρωστη (robust) ώστε να μην παρουσιάζονται προβλήματα σύγκλισης ανεξάρτητα από τις αρχικές συνθήκες. Μάλιστα οι αρχικές συνθήκες στη μέθοδο των Γενετικών Αλγορίθμων επιλέγονται τυχαία στο πεδίο ελαχιστοποίησης από το πρόγραμμα, χωρίς να είναι αναγκαία η εκτίμηση από τον χρήστη.

Ωστόσο έχει το μειονέκτημα της αργής σύγκλισης και της απαίτησης για μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων για την επίτευξη της ελαχιστοποίησης με ικανοποιητικά αποτελέσματα, σε σχέση με τις μεθόδους που βασίζονται στην τιμή των μερικών παραγώγων, ακόμα και στην περίπτωση που έχει φτάσει αρκετά κοντά στο ολικό ελάχιστο. Το τελικό επίσης αποτέλεσμα δεν είναι το απόλυτο ελάχιστο, και ενδεχομένως ένας μεγαλύτερος αριθμός επαναλήψεων να κατέληγε σε καλύτερο αποτέλεσμα.

### **Γ.3 Η Υβριδική Μέθοδος Ελαχιστοποίησης Γενετικών Αλγορίθμων - Quasi-Newton**

Η υβριδική αυτή μέθοδος ελαχιστοποίησης χρησιμοποιεί τόσο τον αλγόριθμο των Γενετικών Αλγορίθμων, όσο και τον αλγόριθμο της Quasi-Newton για την ελαχιστοποίηση της σχετικής συνάρτησης σφάλματος. Αρχικά χρησιμοποιείται η μέθοδος των Γενετικών Αλγορίθμων προκειμένου να εντοπιστεί η περιοχή του ολικού ελάχιστου. Τα αποτελέσματα της ελαχιστοποίησης των Γενετικών Αλγορίθμων βοηθούν και στην ταχύτερη σύγκλιση της μεθόδου Quasi-Newton.

Στο επόμενο στάδιο, τα αποτελέσματα της αρχικής ελαχιστοποίησης των Γενετικών Αλγορίθμων, χρησιμοποιούνται ως αρχικές εκτιμήσεις στη μέθοδο Quasi - Newton. Οι καλές αρχικές εκτιμήσεις που προκύπτουν από τους Γενετικούς αλγορίθμους βοηθούν σημαντικά την Quasi-Newton μέθοδο όχι μόνο να συγκλίνει αλλά και με μικρό αριθμό επαναλήψεων.

Η υβριδική αυτή μέθοδος εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα και των δύο μεθόδων ελαχιστοποίησης που χρησιμοποιεί. Δεν απαιτεί αρχικές εκτιμήσεις, συγκλίνει με ευκολία και καταλήγει σε απόλυτο ελάχιστο σε σχέση με τους γενετικούς αλγορίθμους. Ωστόσο η χρήση των γενετικών αλγορίθμων, αυξάνει τον αριθμό των πράξεων και επομένως τον υπολογιστικό χρόνο. Παρά τον μεγάλο υπολογιστικό χρόνο, η μέθοδος υπολογίζει με ακρίβεια το ολικό ελάχιστο με ελάχιστες απαιτήσεις παρέμβασης από τον χρήστη.

### **Γ.4 Συμπεράσματα από την Εφαρμογή των Μεθοδολογιών**

Σχετικά με την αριθμητική μέθοδο ελαχιστοποίησης της σχετικής συνάρτησης σφάλματος που εμφανίζεται κατά τη διαδικασία αναγνώρισης του μορφικού προσομοιώματος της γέφυρας, χρησιμοποιήθηκε η *υβριδική μέθοδος ελαχιστοποίησης Γενετικών Αλγορίθμων & Quasi-Newton*, η οποία εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα και των δύο μεθόδων ελαχιστοποίησης που χρησιμοποιεί, ξεπερνώντας προβλήματα που εμφανίζονται όπως αναφέρεται με λεπτομέρεια στο Παράρτημα Γ (Παράγραφοι Γ.1, Γ.2, Γ.3). Σαφές πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής, που οδήγησε και στην προτίμησή της έναντι των άλλων δύο, είναι το ότι δεν απαιτεί αρχικές εκτιμήσεις, συγκλίνει με ευκολία και καταλήγει σε απόλυτο ελάχιστο σε σχέση με τους γενετικούς αλγορίθμους. Παρά τον μεγάλο υπολογιστικό χρόνο που προκύπτει από τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων, η μέθοδος υπολογίζει με ακρίβεια το ολικό ελάχιστο με ελάχιστες απαιτήσεις παρέμβασης από τον χρήστη.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

### ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΑΠΟ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΕΔΙΟΥ



**Φωτογραφία Δ.1** Γενική άποψη της 2<sup>ης</sup> χαραδρογέφυρας Καβάλας.



**Φωτογραφία Δ.2** Κεντρικό άνοιγμα της 2<sup>ης</sup> χαραδρογέφυρας Καβάλας.



**Φωτογραφία Δ.3** Κεντρικό βάθρο της 2<sup>ης</sup> χαραδρογέφυρας Καβάλας.



**Φωτογραφία Δ.4** Το ενδιάμεσο κενό των δύο κλάδων της 2<sup>ης</sup> χαραδρογέφυρας Καβάλας.



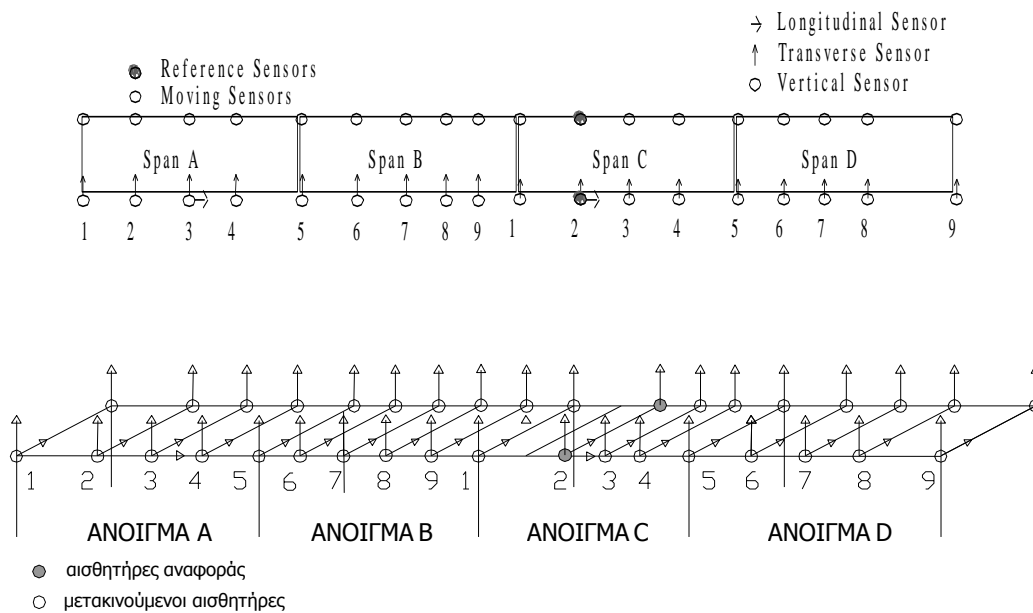
**Φωτογραφία Δ.5** Τοποθέτηση αισθητήρων στο κεντρικό στηθαίο New Jersey στο κεντρικό άνοιγμα της 2<sup>ης</sup> χαραδρογέφυρας Καβάλας.



**Φωτογραφία Δ.6** Κεντρική μονάδα κινητού συστήματος επιταχυνσιόμετρων στο κεντρικό άνοιγμα της 2<sup>ης</sup> χαραδρογέφυρας Καβάλας.



**Φωτογραφία Δ.7** Κεντρική μονάδα κινητού συστήματος επιταχυνσιόμετρων και τρία επιταχυνσιόμετρα στο κεντρικό άνοιγμα της 2<sup>ης</sup> χαραδρογέφυρας Καβάλας.



**Σχήμα Δ.8:** Διάταξη αισθητήρων στη γέφυρα.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

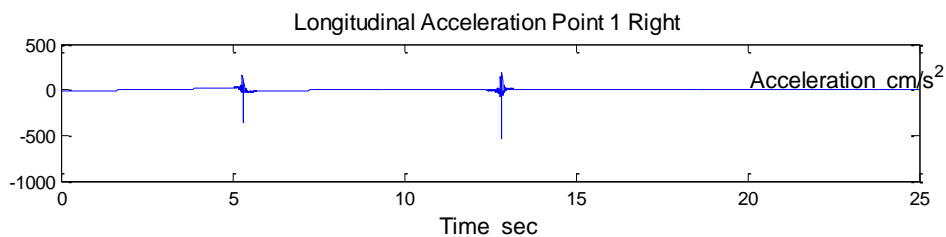
### ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΚΑΤΑΡΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Οι πειραματικές μετρήσεις που έλαβαν χώρα στην γέφυρα, περιλαμβάνουν μετρήσεις και από τα τέσσερα ανοίγματά της, τα Α, Β, C και D. Το αποτέλεσμα των μετρήσεων παρουσιάζονται παρακάτω. Για την καλύτερη κατανόηση των μετρήσεων δίνονται πρώτα ενδεικτικές μετρήσεις στα ανοίγματα C και D με επεξηγήσεις και μετά παρουσιάζονται όλες οι μετρήσεις και για τις δύο περιόδους μετρήσεων.

#### Ε.1 Άνοιγμα C

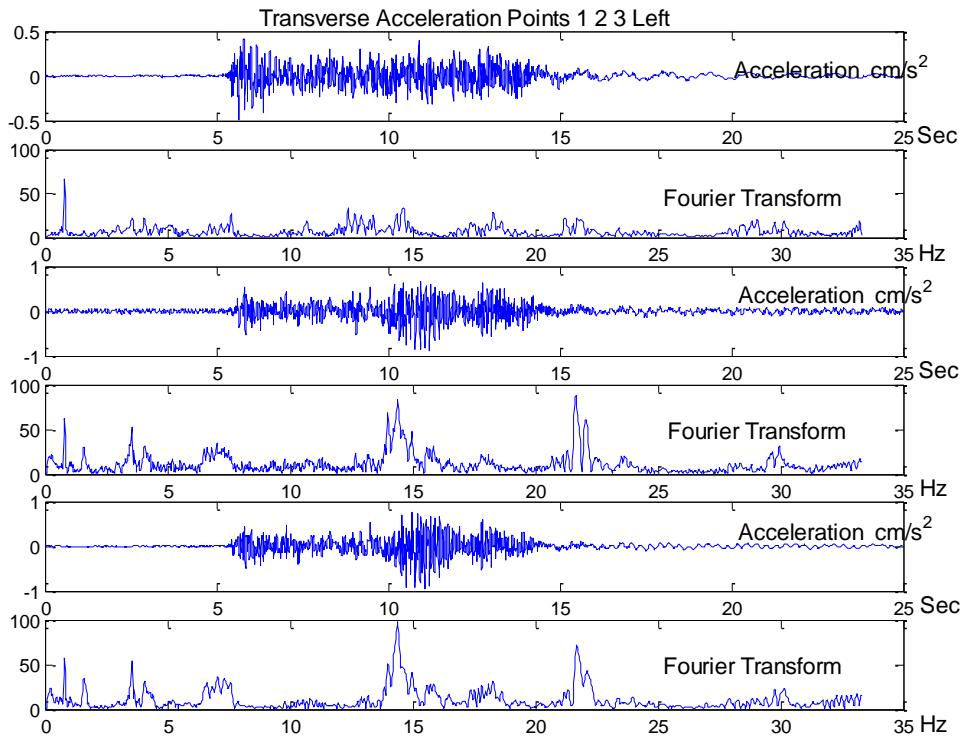
Οι μετρήσεις στο άνοιγμα C αποτελούνται από δέκα επιταχυνσιογραφήματα για κάθε μέτρηση, ένα στην κατά μήκος διεύθυνση, τρία εγκάρσια και έξι κατακόρυφα, όλα τοποθετημένα στο άνοιγμα αυτό.

Το κατά μήκος επιταχυνσιόμετρο χρησιμοποιήθηκε για αποθήκευση της πληροφορίας εισόδου και εξόδου του οχήματος που διέγειρε τη γέφυρα. Συγκεκριμένα την στιγμή εισόδου του φορτηγού στο άνοιγμα C το επιταχυνσιόμετρο κρουόταν στιγμιαία με ένα σφυρί προκειμένου να επισημανθεί η χρονική στιγμή εισόδου του οχήματος. Το ίδιο συνέβαινε και κατά την έξοδο του οχήματος. Το χτύπημα αυτό δεν ήταν δυνατόν να εξασφαλίσει μεγάλη χρονική ακρίβεια και για τον λόγο αυτό, τα δεδομένα ελεύθερης ταλάντωσης λαμβάνονταν δύο δευτερόλεπτα περίπου μετά την φαινομενική έξοδο του οχήματος. Οι επιταχύνσεις πριν το πρώτο χτύπημα θεωρούνται στοχαστικές. Τα δεδομένα μετά το δεύτερο χτύπημα είναι επιταχύνσεις των σημείων μέτρησης σε ελεύθερη ταλάντωση και επεξεργάζονται από το αντίστοιχο πρόγραμμα. Παρακάτω φαίνεται η μέτρηση του κατά μήκους επιταχυνσιόμετρου σε μία μέτρηση.

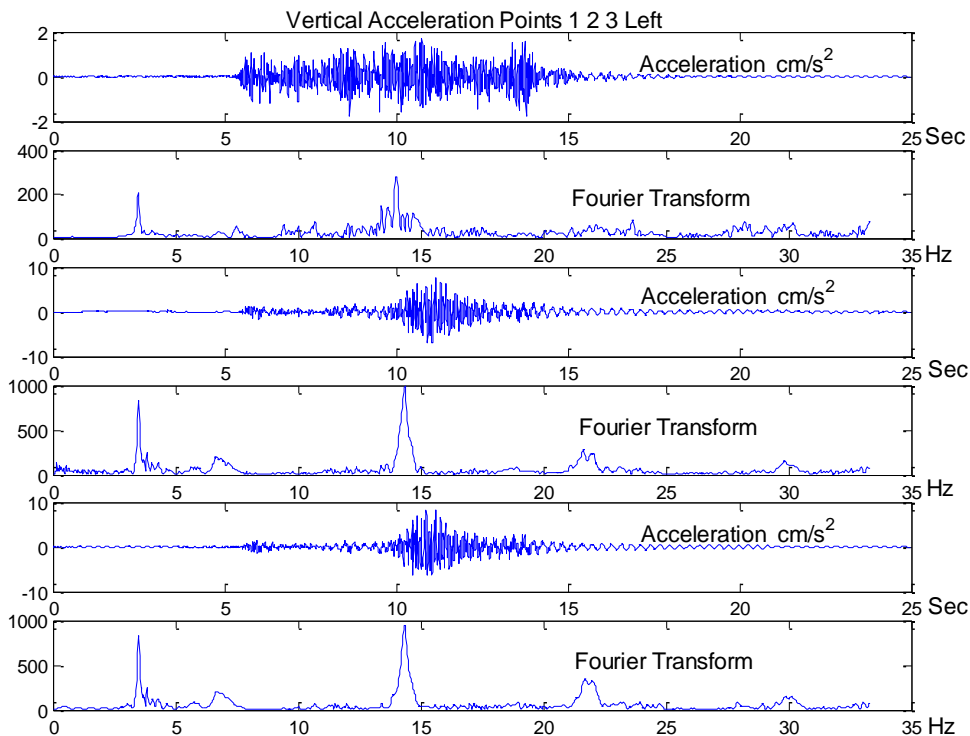


Με τα παρακάτω γραφήματα μπορεί κανείς να εντοπίσει, από τα πρώτα τοπικά μέγιστα του μέτρου του μετασχηματισμού Fourier, τις πρώτες ιδιοσυχνότητες της γέφυρας. Προκειμένου να υπολογιστούν όμως το μέτρο απόσβεσης και οι ιδιομορφές, είναι απαραίτητη η χρήση του λογισμικού που αναπτύχθηκε.

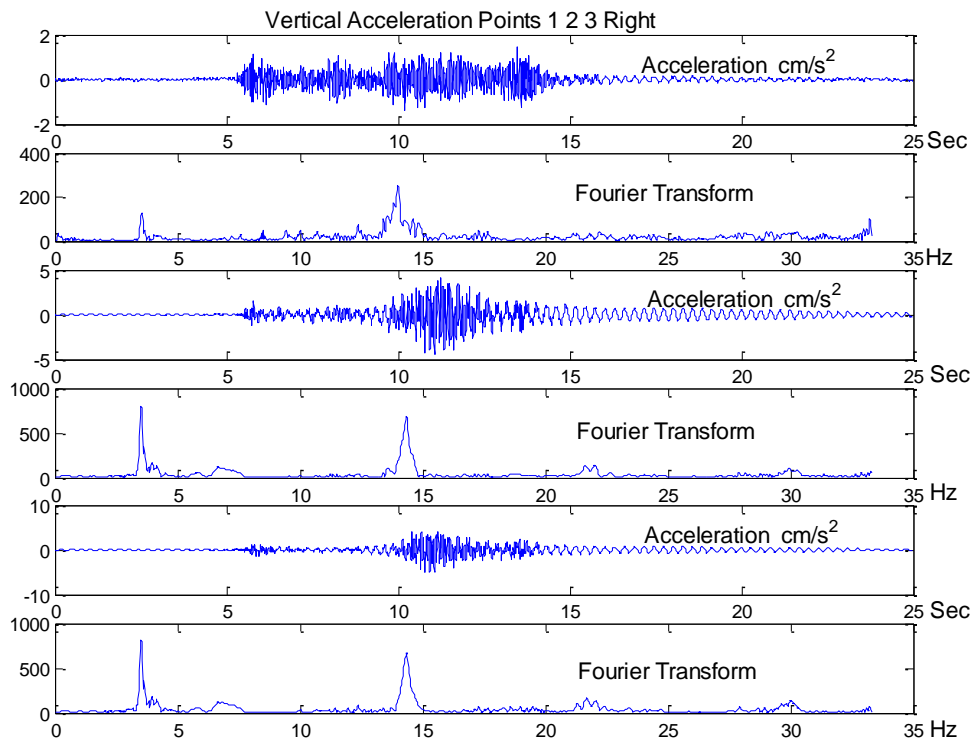
Τα επιταχυνσιογραφήματα στο πεδίο του χρόνου κατά την εγκάρσια κατεύθυνση στα σημεία μέτρησης και οι αντίστοιχοι μετασχηματισμοί Fourier φαίνονται παρακάτω:



Τα επιταχυνσιογραφήματα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση από την αριστερή μεριά και οι αντίστοιχοι μετασχηματισμοί Fourier, ακολουθούν:



Τέλος τα επιταχυνσιογραφήματα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση από τη δεξιά μεριά με τους αντίστοιχους μετασχηματισμούς Fourier, είναι:

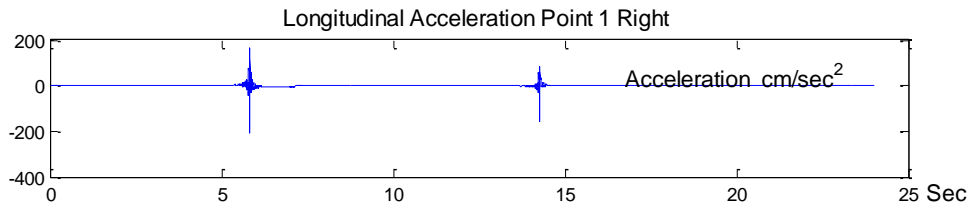


## E.2 Άνοιγμα D

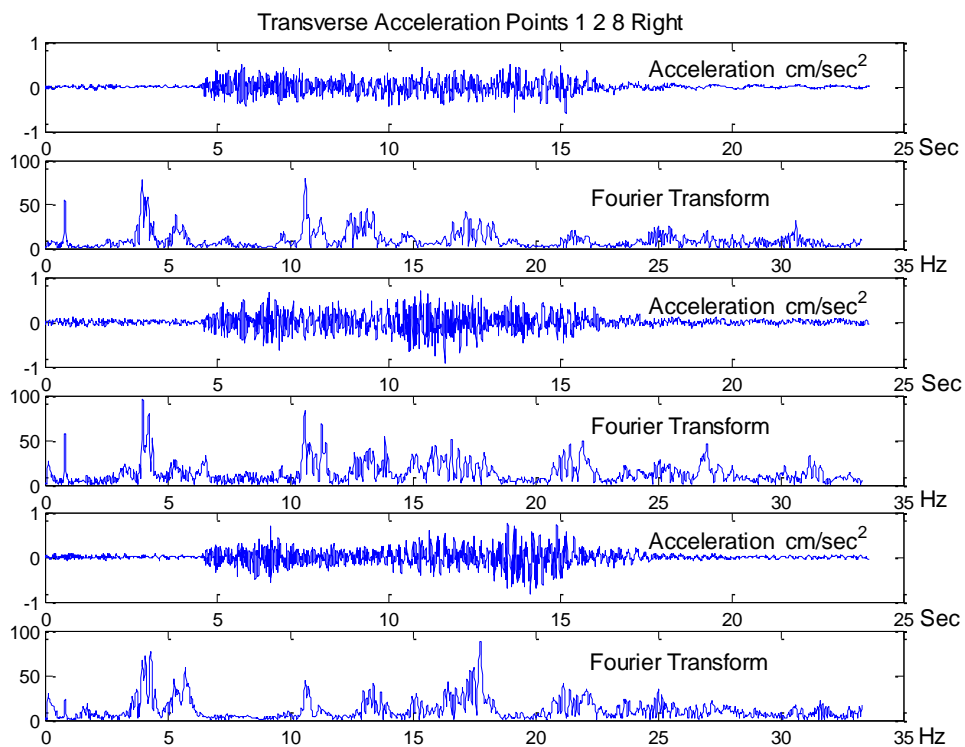
Οι μετρήσεις στο άνοιγμα D έγιναν μετακινώντας τρία επιταχυνσιόμετρα, το τελευταίο τοποθετημένο εγκάρσια, αλλά και τα δύο (αριστερά και δεξιά στο κατάστρωμα της γέφυρας) κάθετα, σε πέντε διαφορετικές διατομές (θέσεις 5 6 7 8 και 9). Με τον τρόπο αυτό σαρώνεται όλο το άνοιγμα D σε πέντε διατομές. Έτσι για κάθε πέρασμα του φορτηγού από το νέο άνοιγμα, λαμβάνονταν δεδομένα από τα έξι επιταχυνσιόμετρα των διατομών 1 και 2 (δύο κάθετα αριστερά και δεξιά στο κατάστρωμα, και ένα εγκάρσιο, για κάθε διατομή) του ανοίγματος C και δεδομένα από τα τρία όργανα στο άνοιγμα D. Η διαδικασία αυτή έγινε για να είναι δυνατόν να συνδεθούν τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων του C ανοίγματος με αυτά από το D άνοιγμα.

Τα δεδομένα που προκύπτουν από ένα πέρασμα του φορτηγού από το άνοιγμα D παρουσιάζονται παρακάτω.

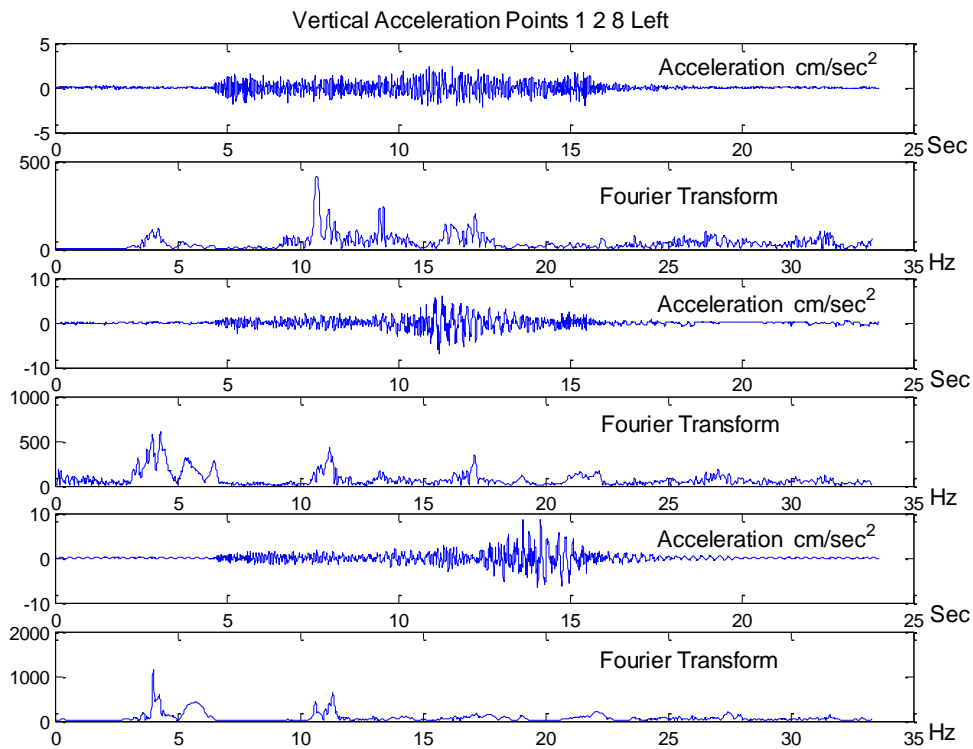
Κατά μήκος επιταχυνσιογράφημα στη θέση 1:



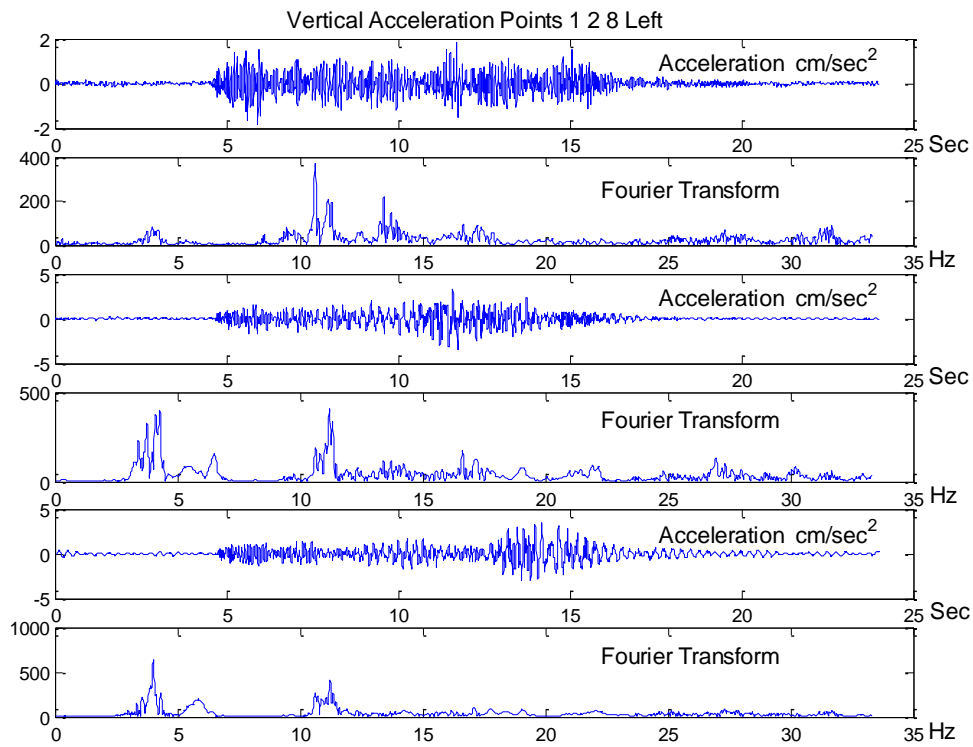
Εγκάρσια επιταχυνσιογραφήματα και μετασχηματισμοί Fourier, στα σημεία 1, 2 και 8:



Επιταχυνσιογραφήματα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και μετασχηματισμοί Fourier στα σημεία 1, 2 και 8, στην αριστερή πλευρά του καταστρώματος:



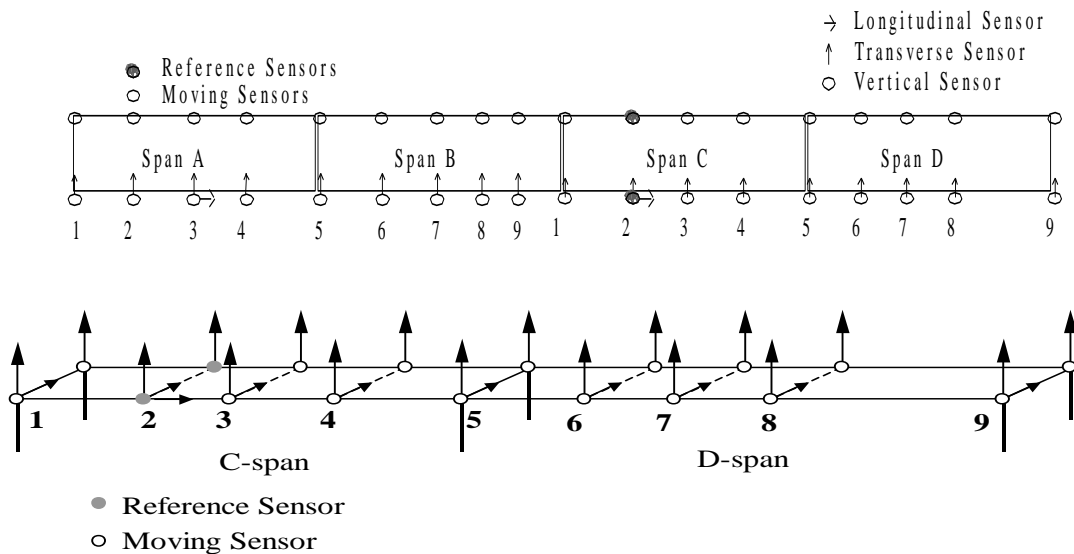
Επιταχυνσιογραφήματα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και μετασχηματισμοί Fourier στα σημεία 1, 2 και 8 στη δεξιά πλευρά του καταστρώματος:



Στις επόμενες σελίδες παρατίθενται όλα τα γεγονότα που μετρήθηκαν στις δύο περιόδους των μετρήσεων (φάσεις 1 και 2) και επεξεργάστηκαν με τις ανωτέρω τεχνικές αναγνώρισης και αναθεώρησης.

## Ε.3 Μετρήσεις 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> Περιόδου

### 1<sup>η</sup> ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ



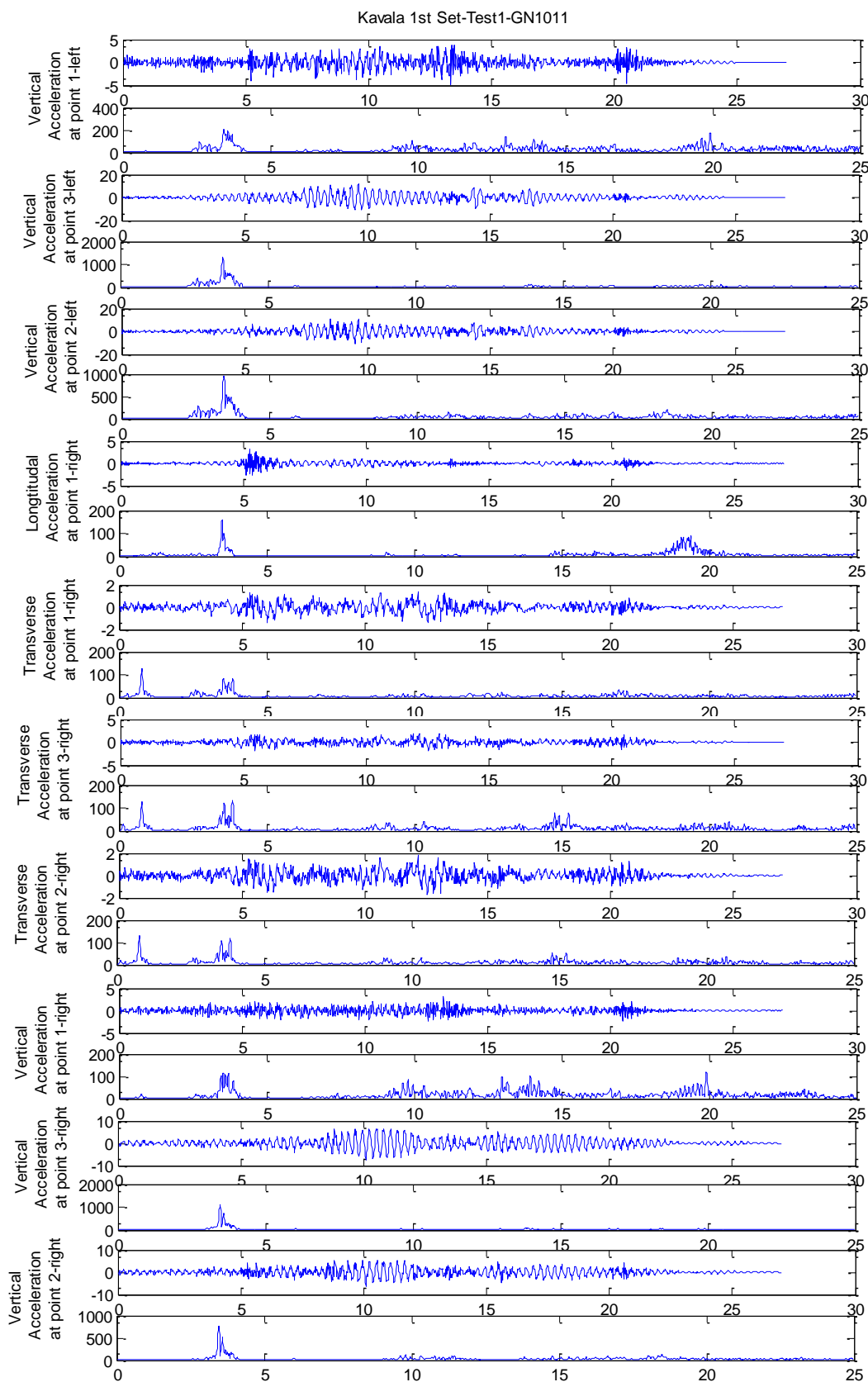
Οι μετρήσεις στη γέφυρα προέρχονται από τα ανοίγματα C (1<sup>η</sup> φάση μετρήσεων), D (2<sup>η</sup> φάση μετρήσεων), 3<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> άνοιγμα αντίστοιχα, και στις θέσεις 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, δεξιά και αριστερά των ανοιγμάτων που υπάρχουν αισθητήρες (παραπάνω σχήμα)

Σε κάθε γεγονός μετρήσεων αποκρίσεων της γέφυρας της Καβάλας υπάρχει ένα επιταχυνσιόμετρο που μετρά την κατά μήκος απόκριση και δίνει τη χρονική στιγμή εισόδου καθώς και τη χρονική στιγμή εξόδου του οχήματος διέγερσης. Στα παραπάνω γραφήματα αναφέρεται ως longitudinal acceleration. Συγκεκριμένα τη στιγμή εισόδου του φορτηγού στο άνοιγμα της γέφυρας υπό εξέταση, το παραπάνω επιταχυνσιόμετρο κρουόταν στιγμιαία με ένα σφυρί προκειμένου να επισημανθεί η χρονική στιγμή εισόδου του οχήματος. Το ίδιο συνέβαινε και κατά την έξοδο του οχήματος. Τα δεδομένα μετά το δεύτερο χτύπημα είναι επιταχύνσεις των σημείων μέτρησης σε ελεύθερη ταλάντωση και επεξεργάζονται από το αντίστοιχο πρόγραμμα για την αναγνώριση των μορφικών χαρακτηριστικών του προσομοιώματος της γέφυρας.

Τα επιταχυνσιογραφήματα στο πεδίο του χρόνου στα σημεία μέτρησης και οι αντίστοιχοι μετασχηματισμοί Fourier δίνονται παρακάτω για όλα τα γεγονότα της 1<sup>ης</sup> περιόδου μετρήσεων.

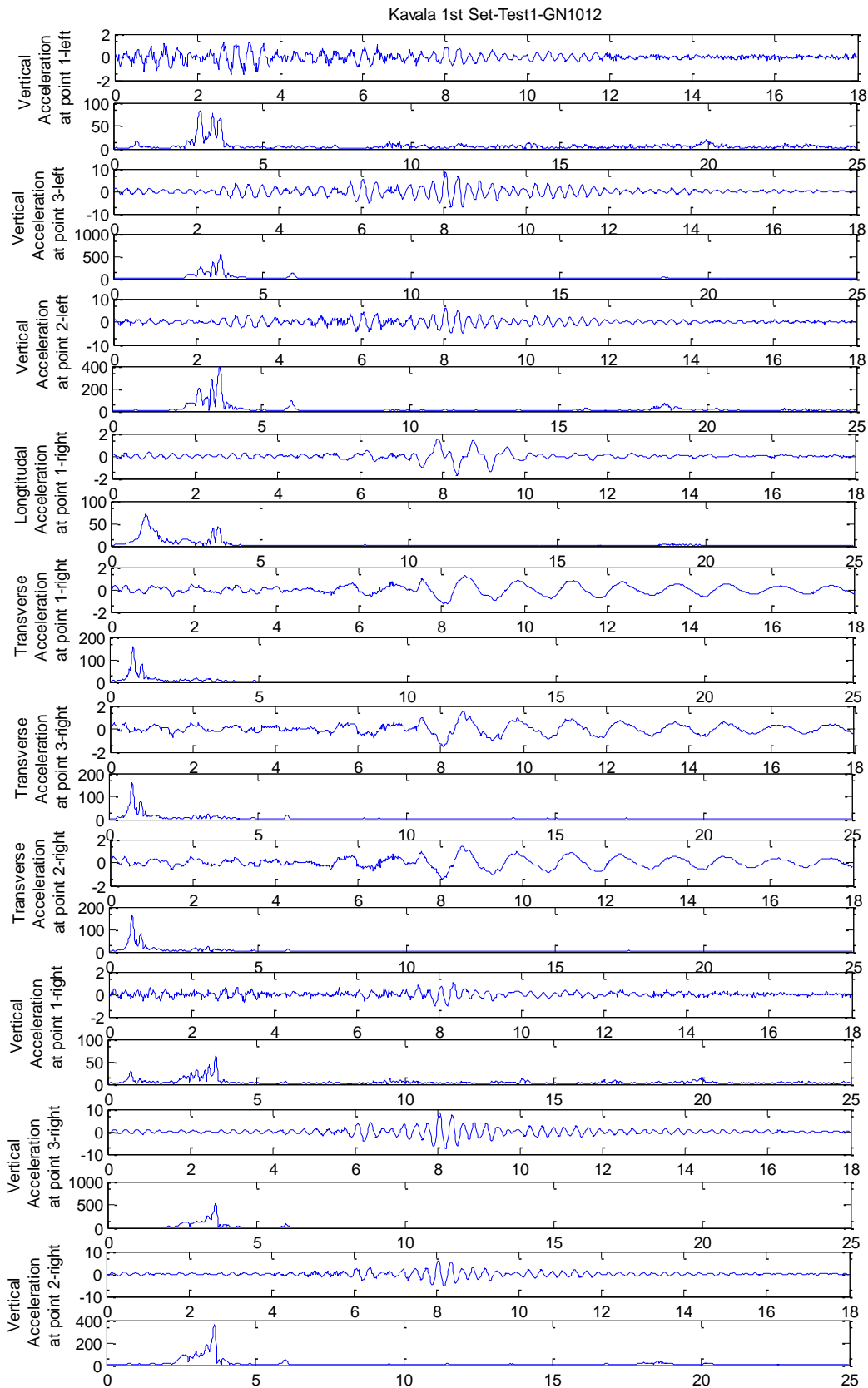
**1<sup>η</sup> φάση μετρήσεων**

***Kavala 1<sup>st</sup> Set –Test1–GN1011 (deck C)***

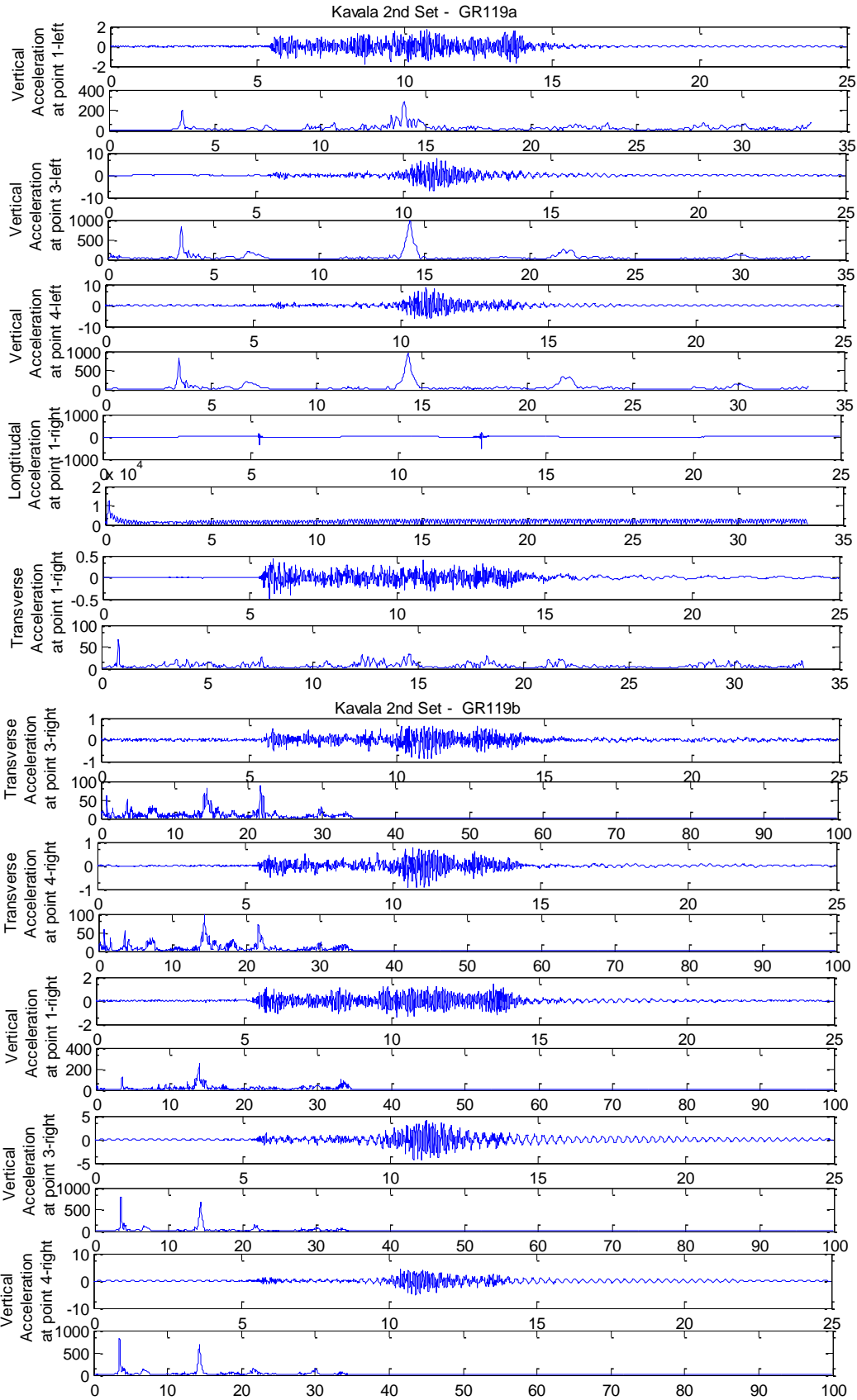




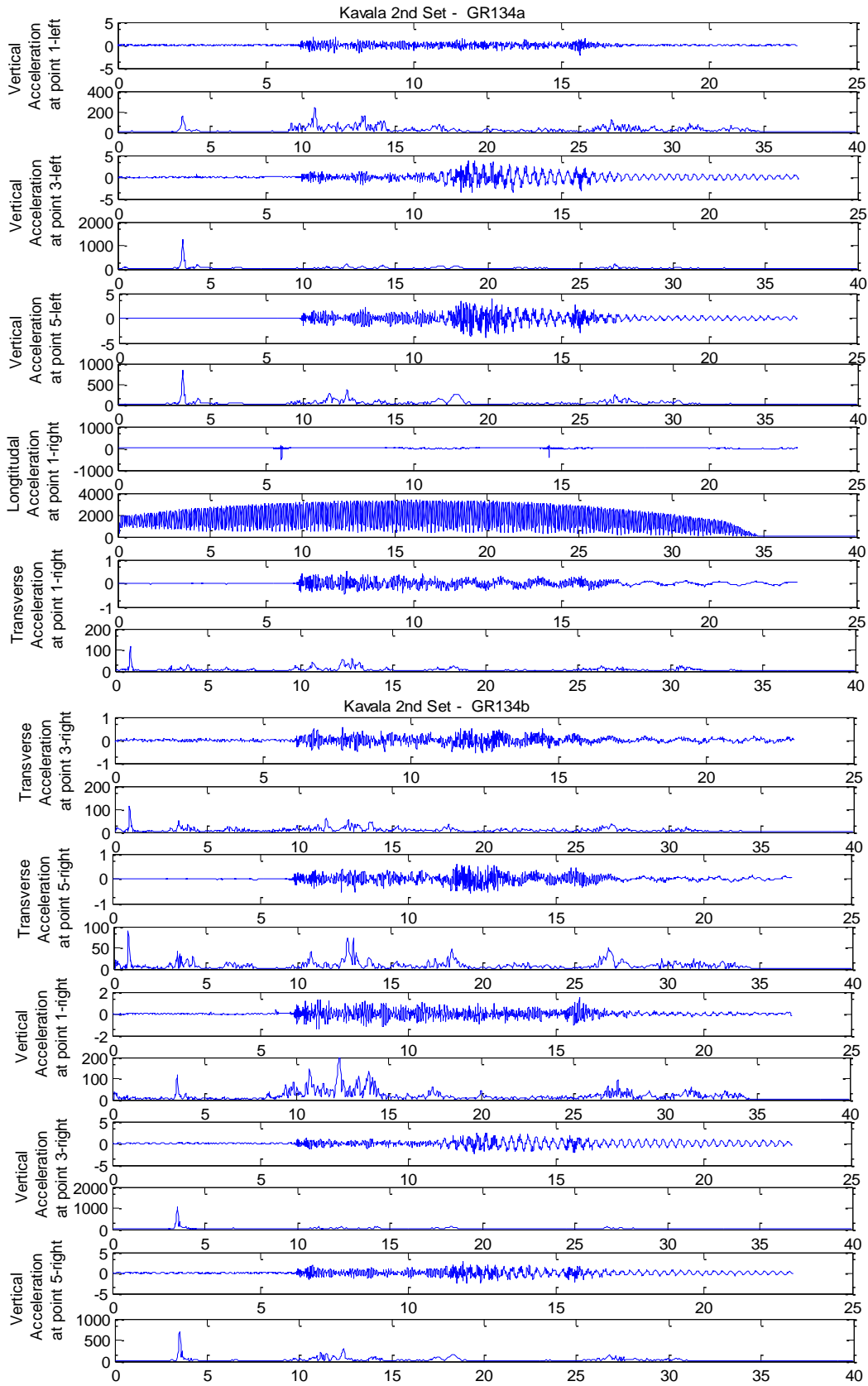
**Kavala 1<sup>st</sup> Set –Test1–GN1012 (deck C)**



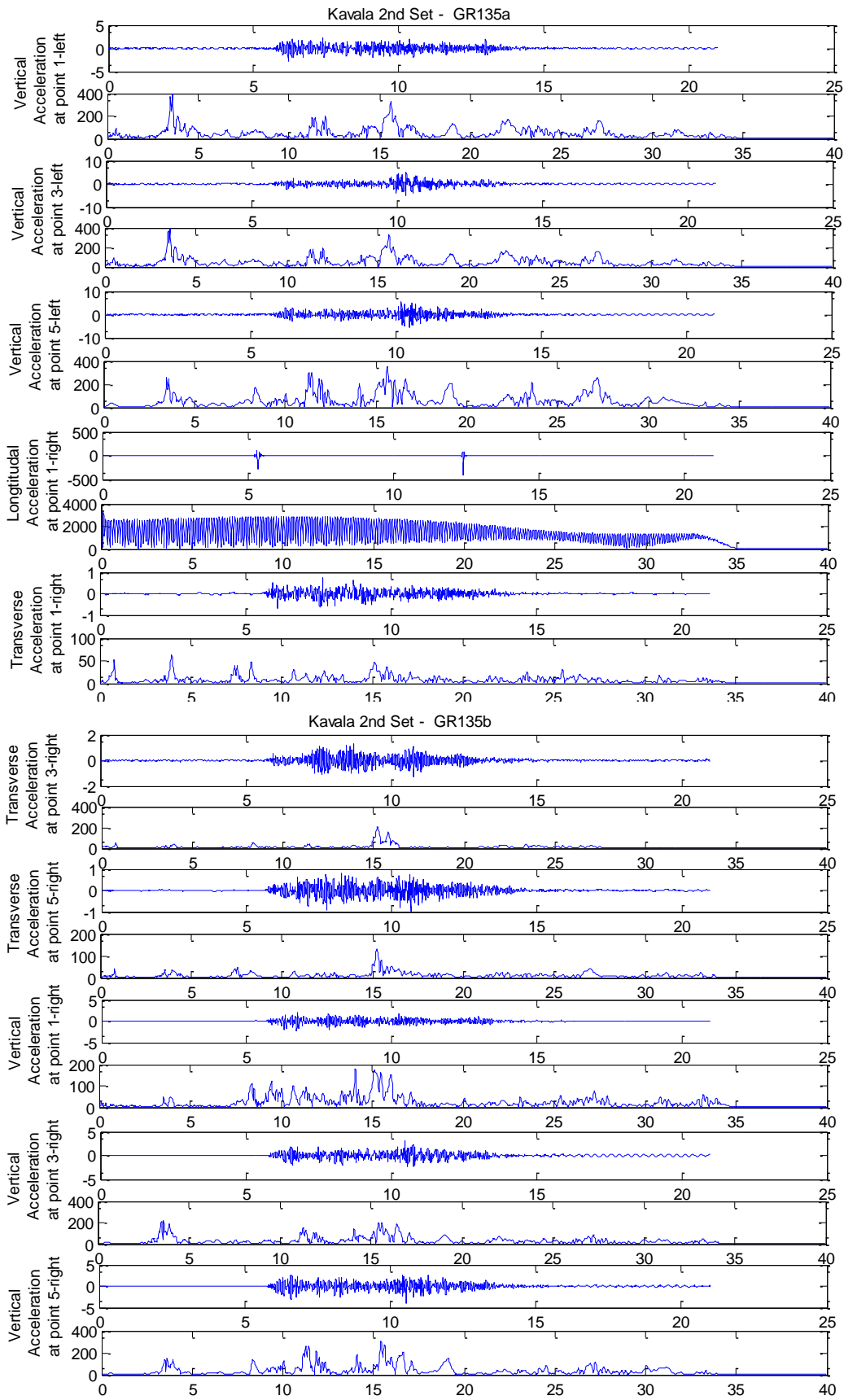
**Kavala 2<sup>nd</sup> Set –GR119a, b (deck C)**



**Kavala 2<sup>nd</sup> Set –GR134a, b (deck C)**

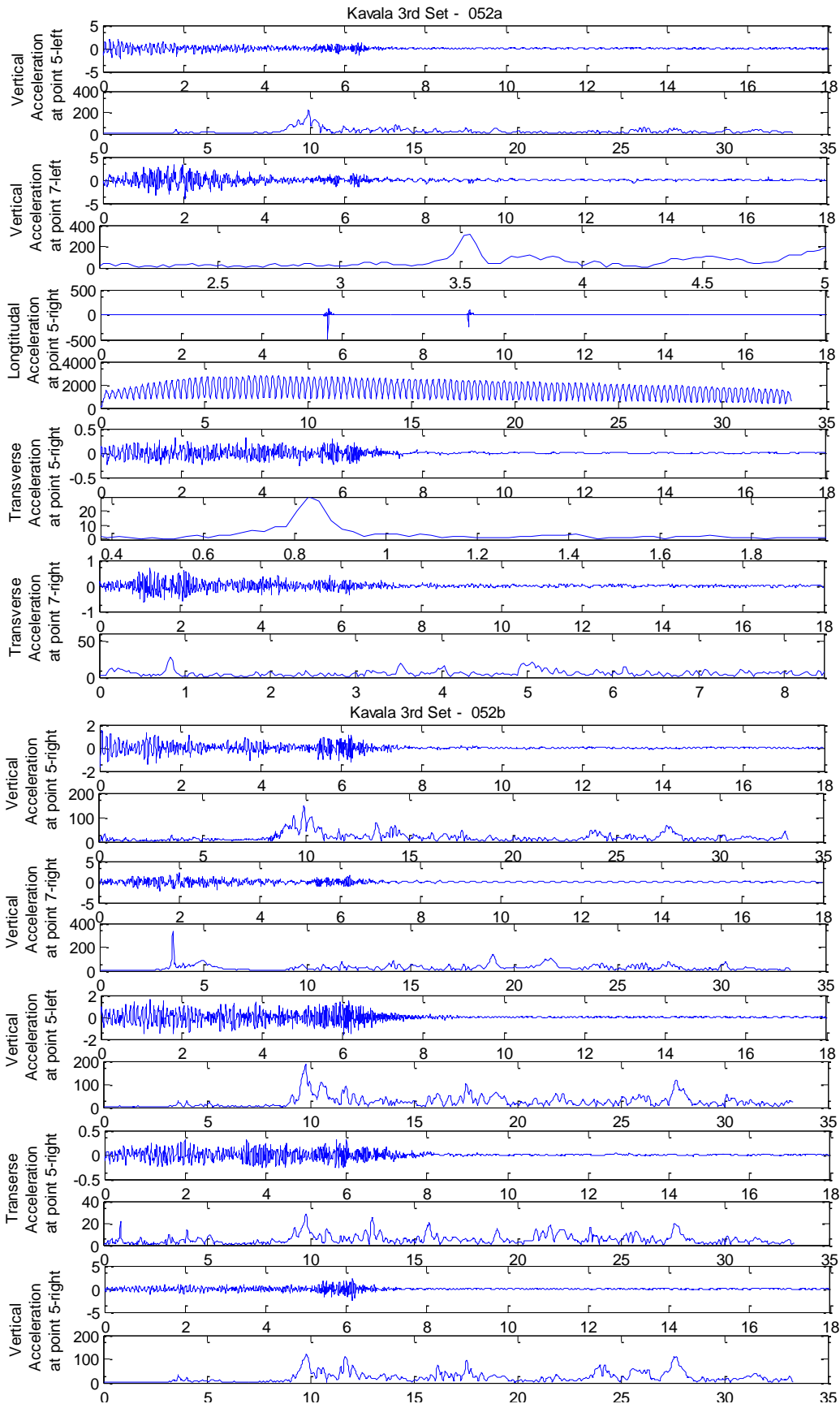


**Kavala 2<sup>nd</sup> Set –GR135a, b (deck C)**

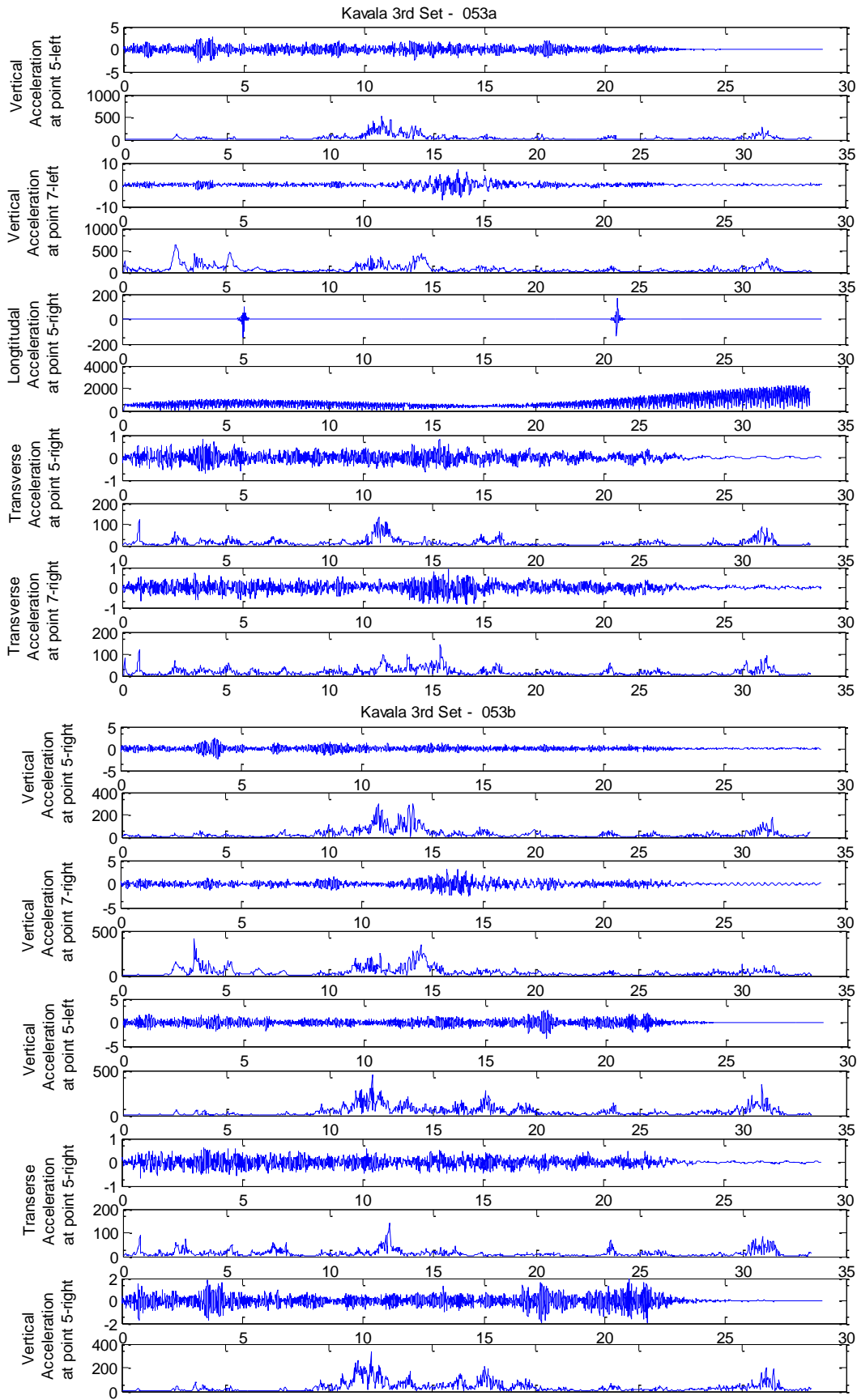


**2<sup>η</sup> φάση μετρήσεων**

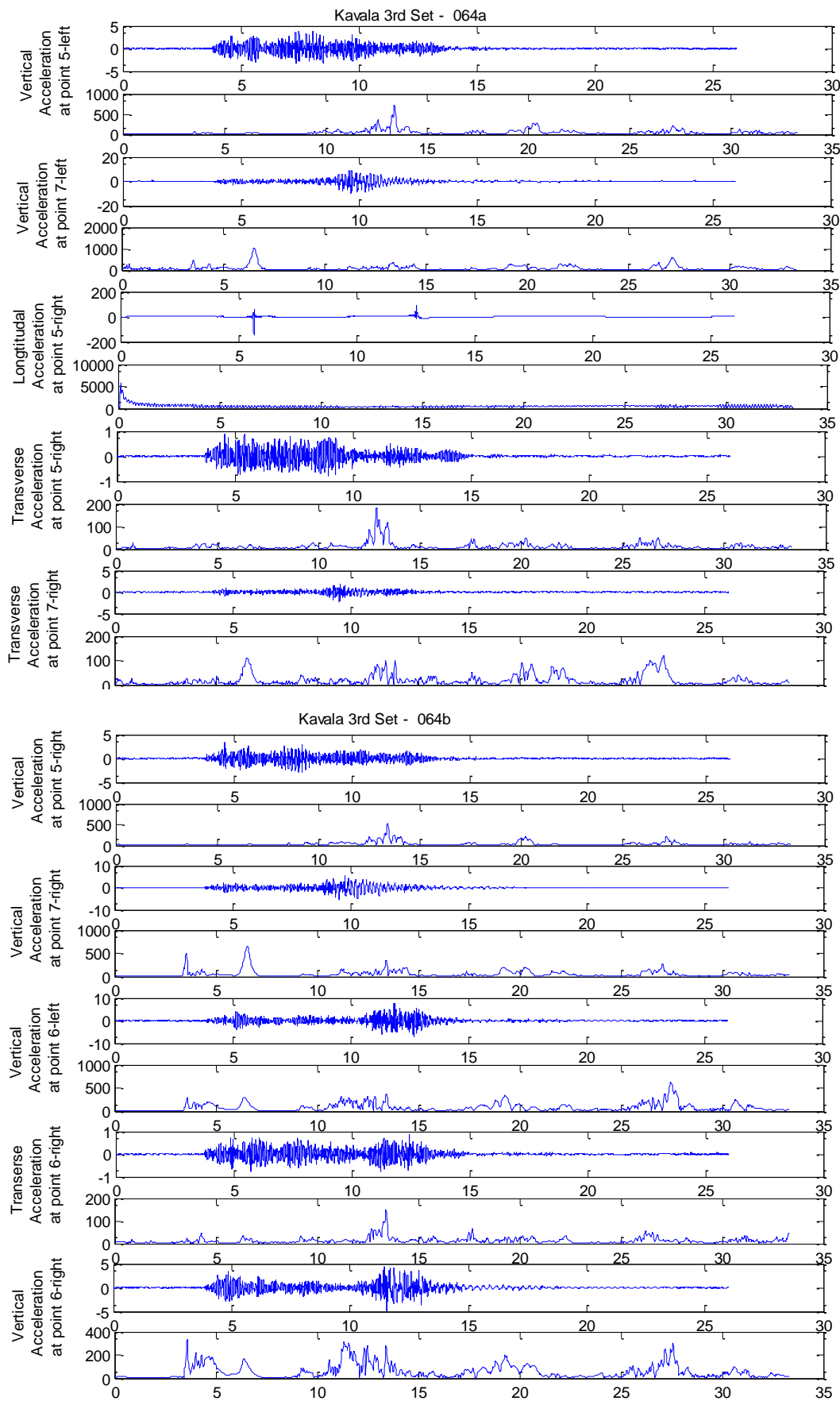
**Kavala 3<sup>rd</sup> Set – GR052 a, b (deck D)**



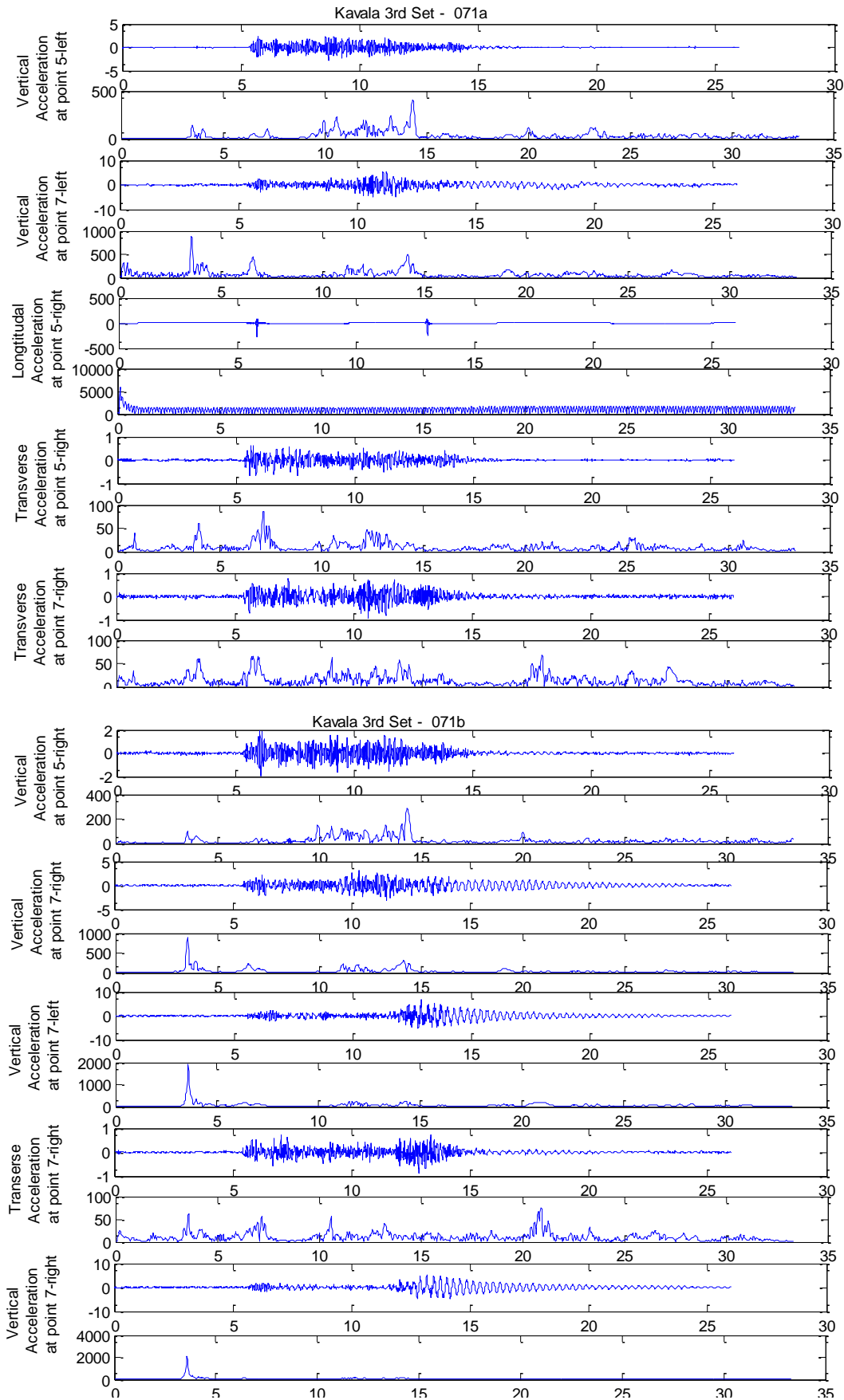
**Kavala 3<sup>rd</sup> Set – GR053 a, b (deck D)**



**Kavala 3<sup>rd</sup> Set – GR064 a, b (deck D)**

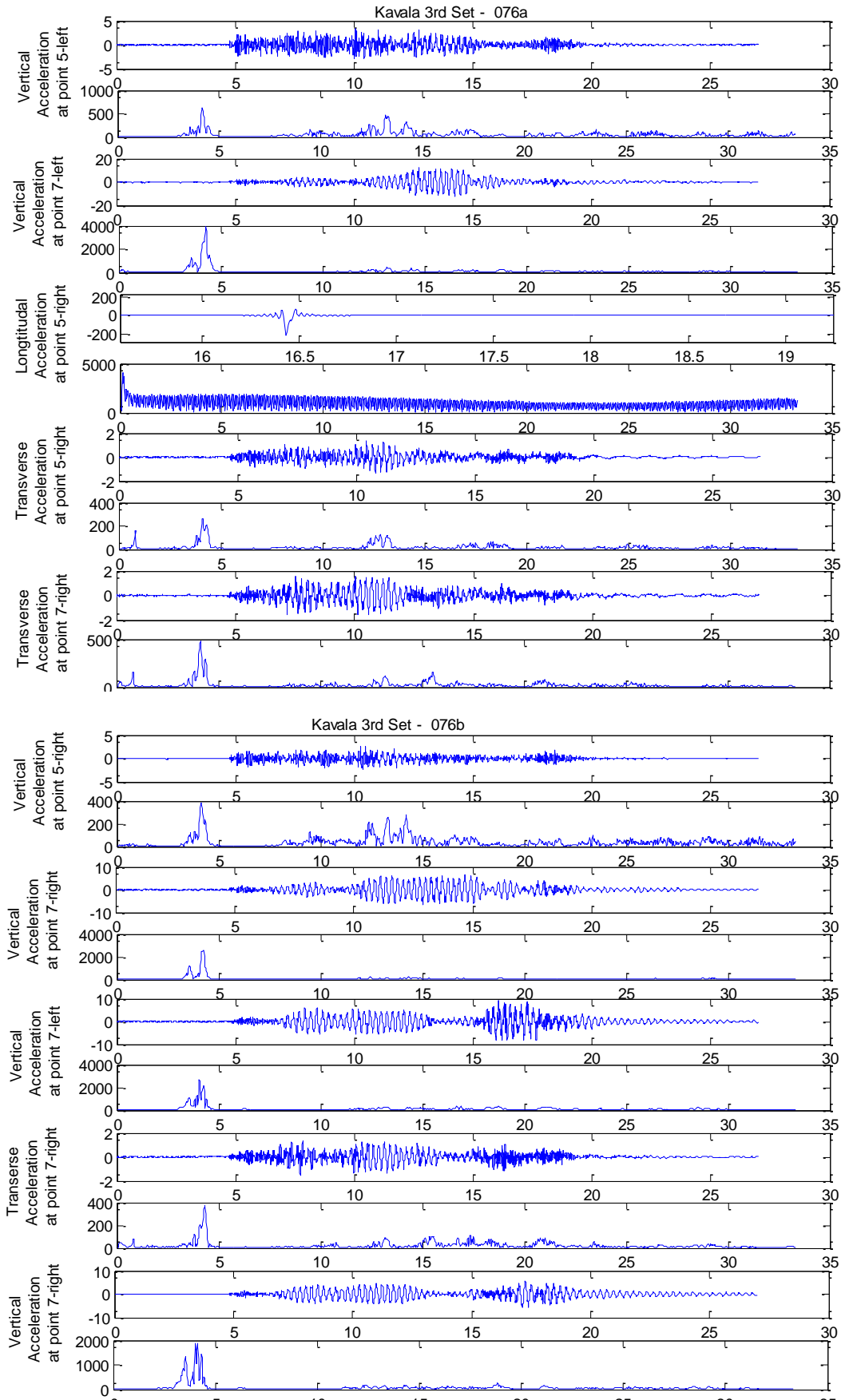


**Kavala 3<sup>rd</sup> Set – GR071 a, b (deck D)**

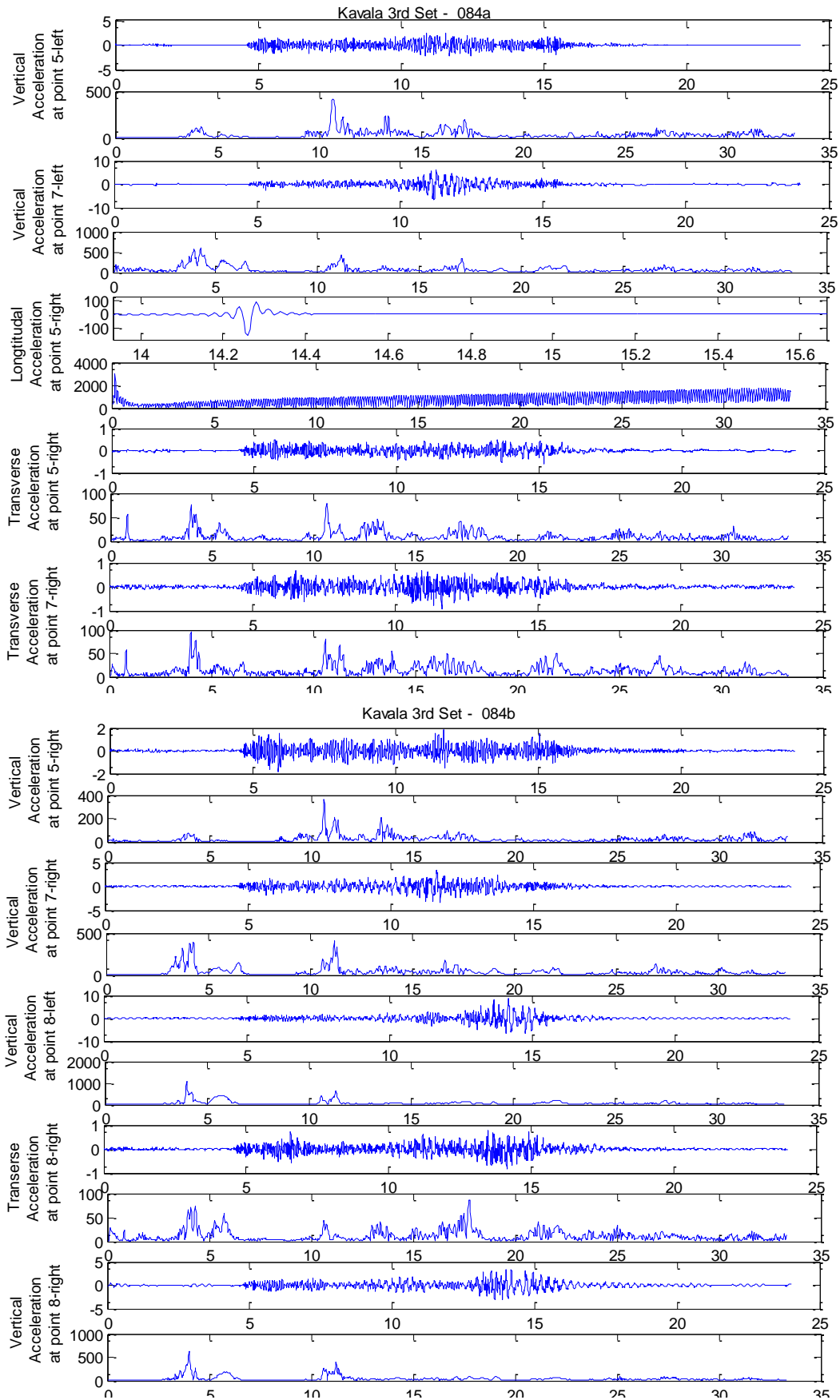




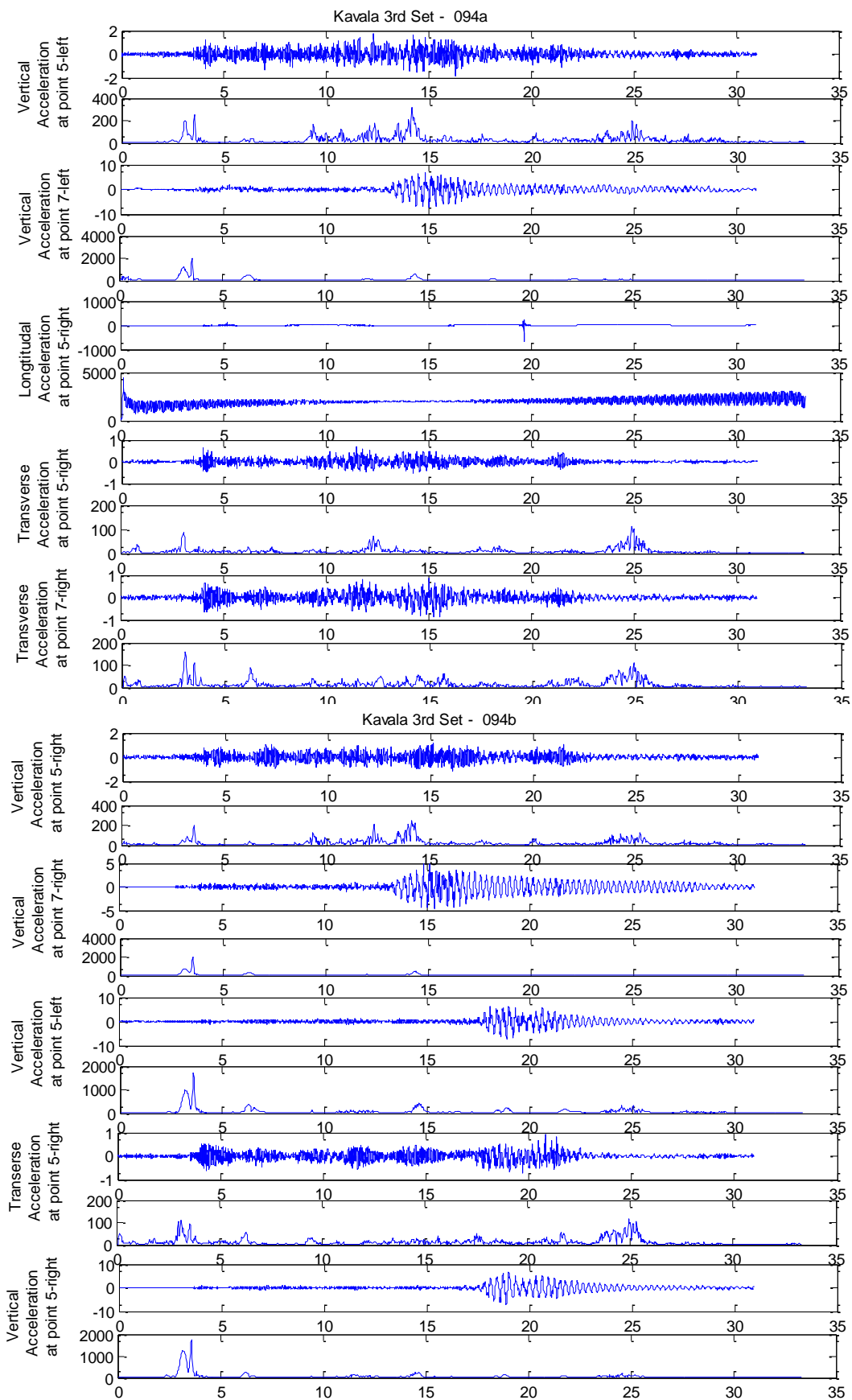
**Kavala 3<sup>rd</sup> Set – GR076 a, b (deck D)**



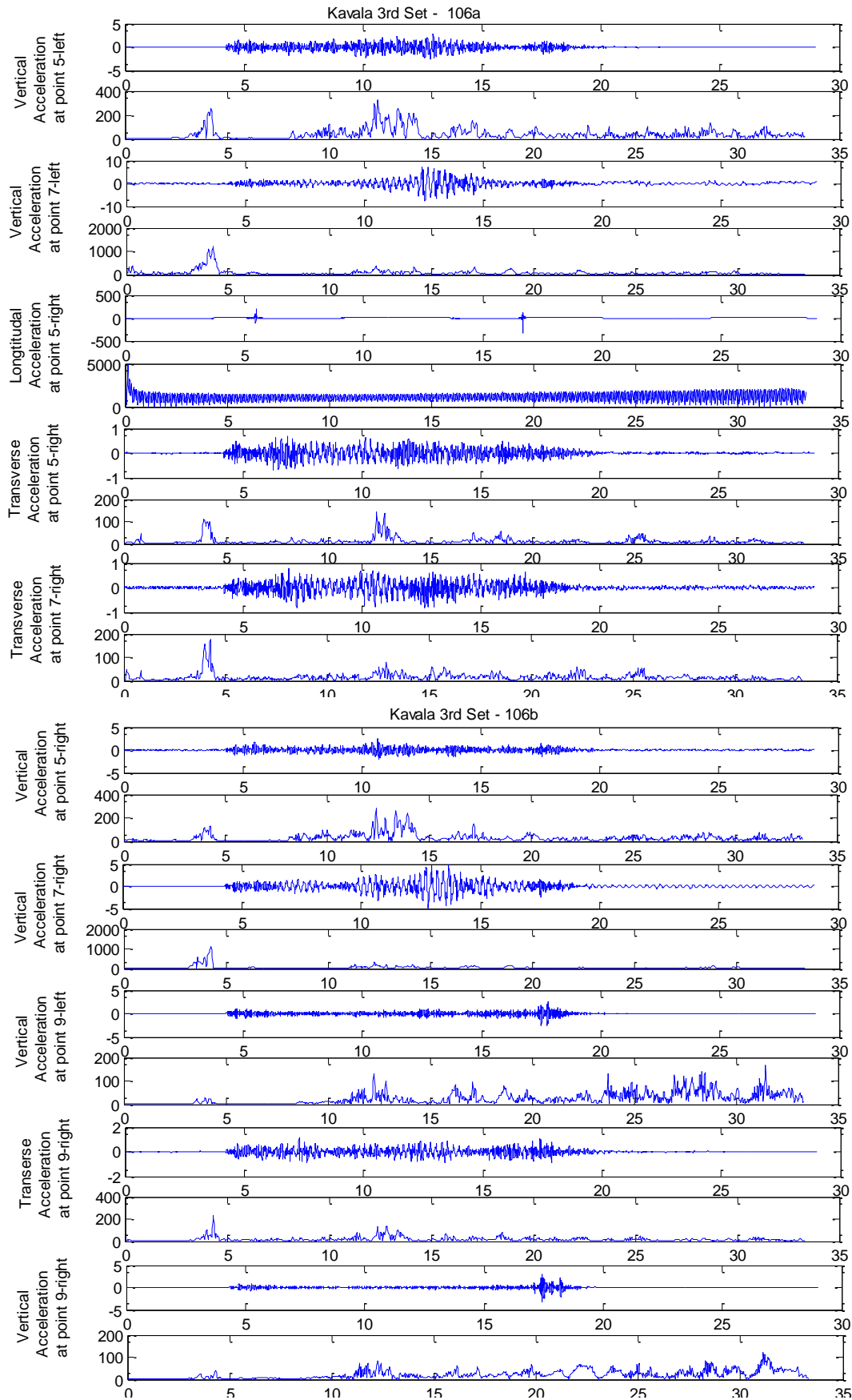
**Kavala 3<sup>rd</sup> Set – GR084 a, b (deck D)**



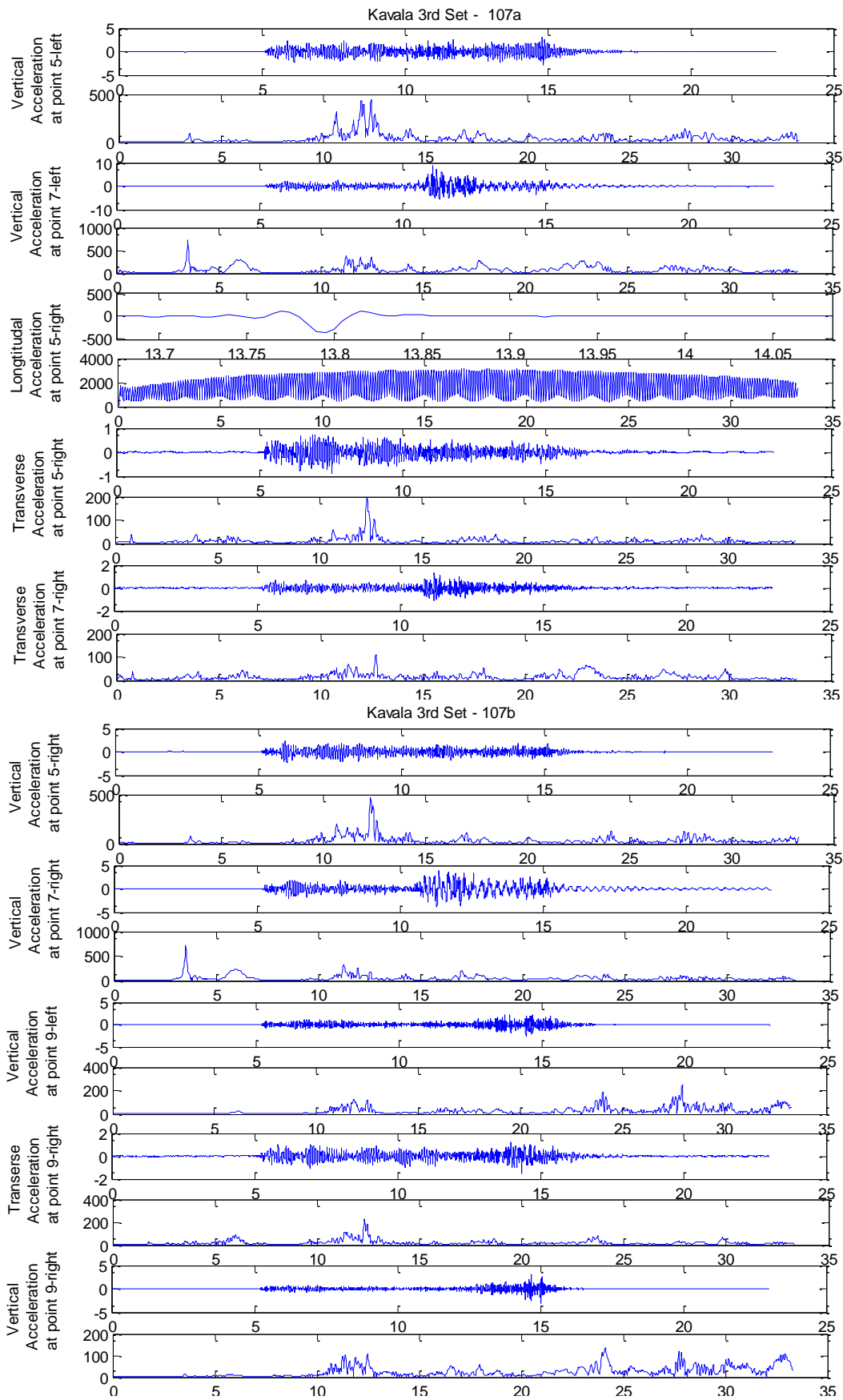
**Kavala 3<sup>rd</sup> Set – GR094 a, b (deck D)**



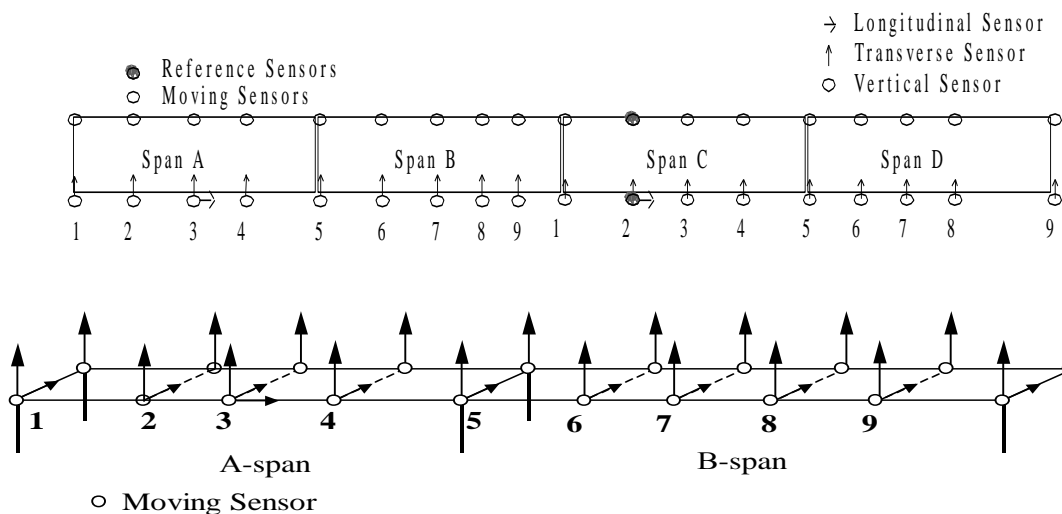
**Kavala 3<sup>rd</sup> Set – GR106 a, b (deck D)**



**Kavala 3<sup>rd</sup> Set – GR107 a, b(deck D)**



## 2<sup>η</sup> ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ



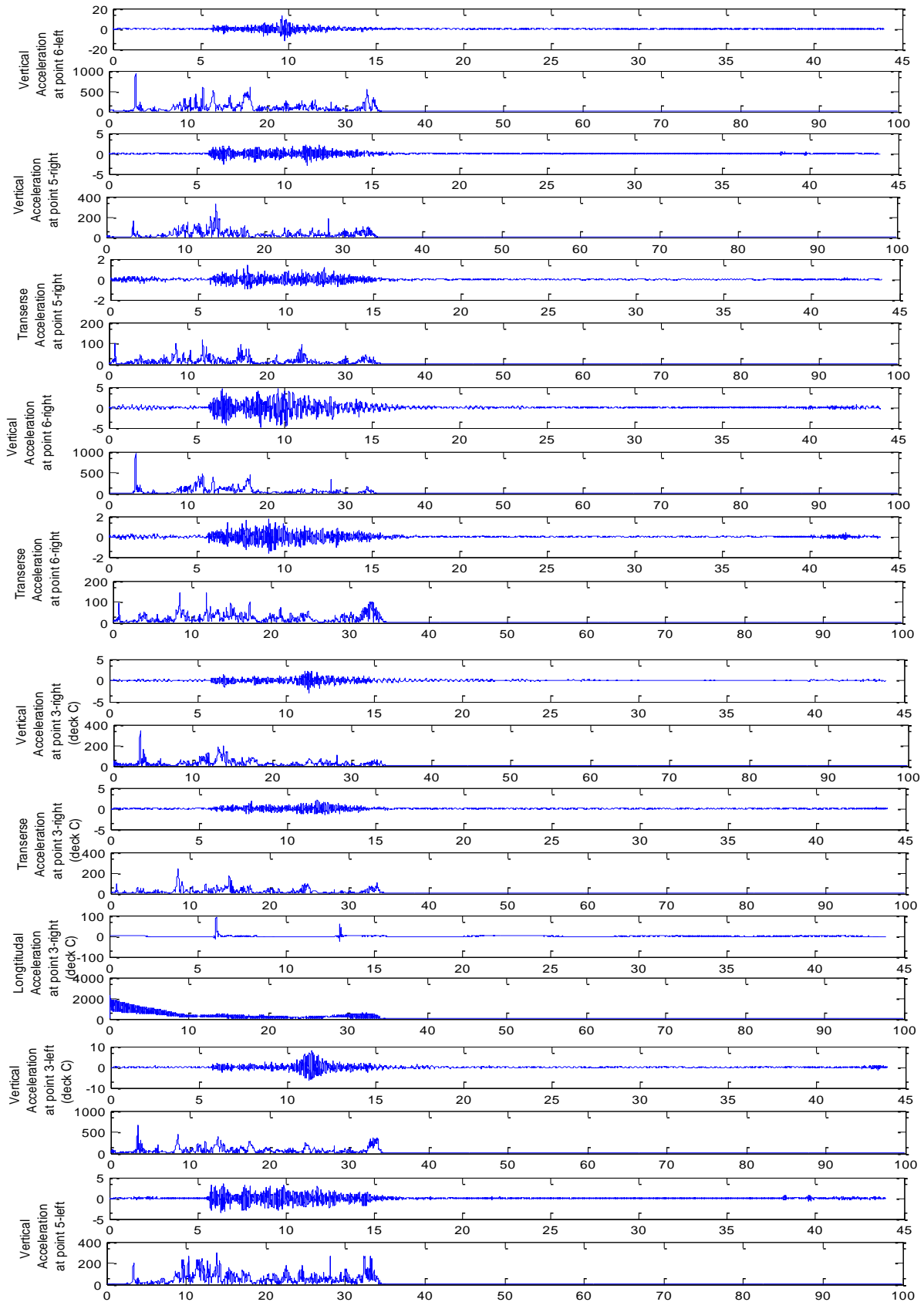
Οι μετρήσεις στη γέφυρα προέρχονται από τα ανοίγματα Β (1<sup>η</sup> φάση μετρήσεων), Α (2<sup>η</sup> φάση μετρήσεων), 2<sup>ο</sup> και 1<sup>ο</sup> άνοιγμα αντίστοιχα, και στις θέσεις 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, δεξιά και αριστερά των ανοιγμάτων που υπάρχουν αισθητήρες (παραπάνω σχήμα).

Σε κάθε γεγονός μετρήσεων αποκρίσεων της γέφυρας της Καβάλας υπάρχει ένα επιταχυνσιόμετρο που μετρά την κατά μήκος απόκριση και δίνει τη χρονική στιγμή εισόδου καθώς και τη χρονική στιγμή εξόδου του οχήματος διέγερσης. Στα παραπάνω γραφήματα αναφέρεται ως longitudinal Acceleration. Συγκεκριμένα την στιγμή εισόδου του φορτηγού στο άνοιγμα της γέφυρας υπό εξέταση, το παραπάνω επιταχυνσιόμετρο κρουόταν στιγμιαία με ένα σφυρί προκειμένου να επισημανθεί η χρονική στιγμή εισόδου του οχήματος. Το ίδιο συνέβαινε και κατά την έξοδο του οχήματος. Τα δεδομένα μετά το δεύτερο χτύπημα είναι επιταχύνσεις των σημείων μέτρησης σε ελεύθερη ταλάντωση και επεξεργάζονται από το αντίστοιχο πρόγραμμα για την αναγνώριση των μορφικών χαρακτηριστικών του προσομοιώματος της γέφυρας.

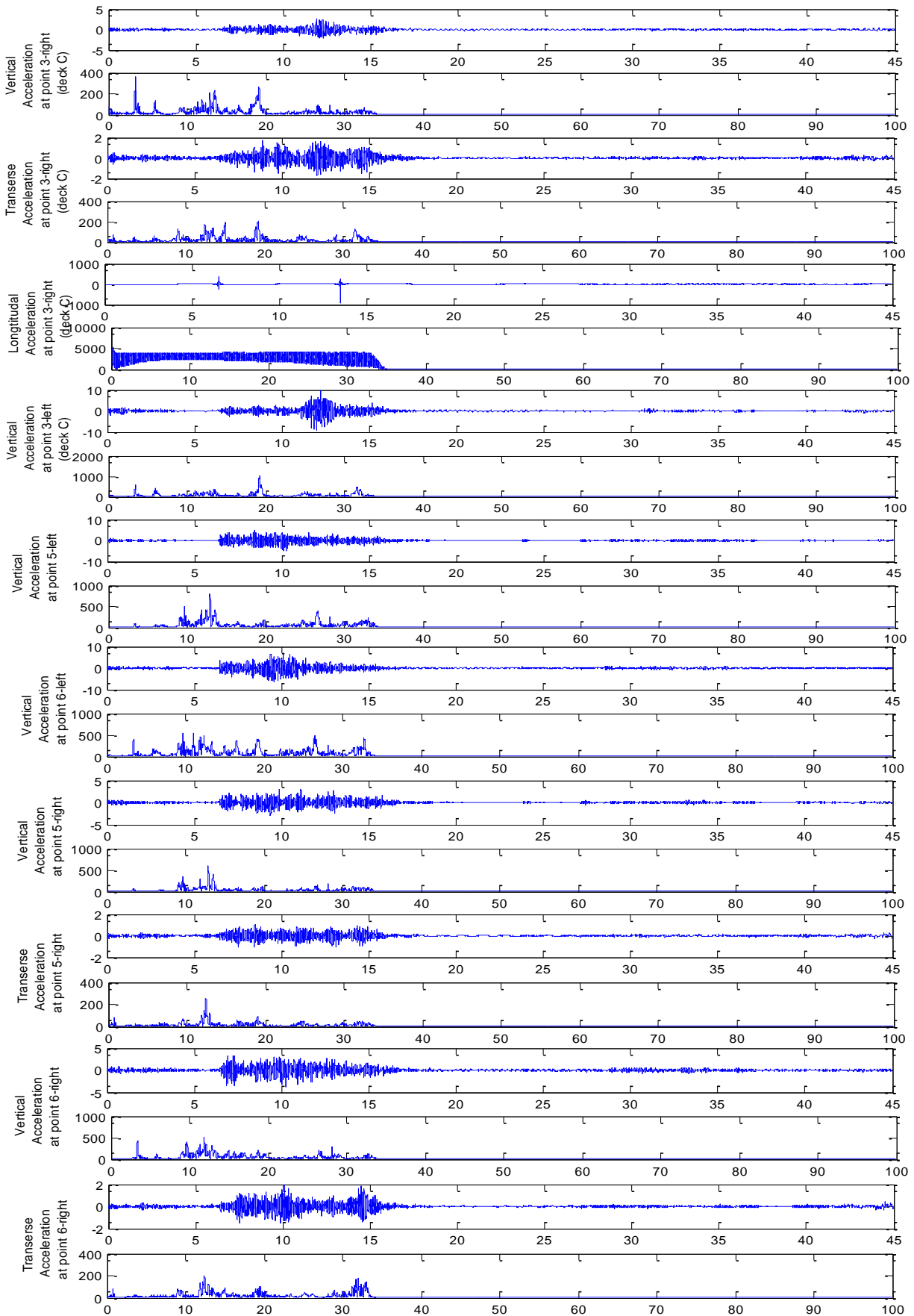
Τα επιταχυνσιογραφήματα στο πεδίο του χρόνου στα σημεία μέτρησης και οι αντίστοιχοι μετασχηματισμοί Fourier αυτών δίνονται παρακάτω για όλα τα γεγονότα της 2<sup>ης</sup> περιόδου. Να σημειωθεί ότι τα επιταχυνσιογραφήματα στο άνοιγμα Α είναι πολύ μεγαλύτερης διάρκειας (>5 λεπτών) από τα αντίστοιχα επιταχυνσιογραφήματα στα ανοίγματα Β, C και D. Επίσης οι μετασχηματισμοί Fourier των επιταχυνσιογραφημάτων έχουν αντικατασταθεί στο άνοιγμα Α με τους μέσους μετασχηματισμούς Fourier που προέκυψαν από το λογισμικό μορφικής ανάλυσης σε λειτουργικά φορτία. Το πλεονέκτημα των επιταχυνσιογραφημάτων μεγάλης διάρκειας είναι ότι οι αντίστοιχοι μέσοι μετασχηματισμοί Fourier αυτών παρέχουν πιο αξιόπιστες πληροφορίες για τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής. Αυτό είναι προφανές συγκρίνοντας τους μέσους μετασχηματισμούς Fourier στο άνοιγμα Α με τους μετασχηματισμούς Fourier στο άνοιγμα Β.

***1<sup>η</sup> φάση μετρήσεων***

***Kavala 4<sup>th</sup> Set – KN018 (deck B)***

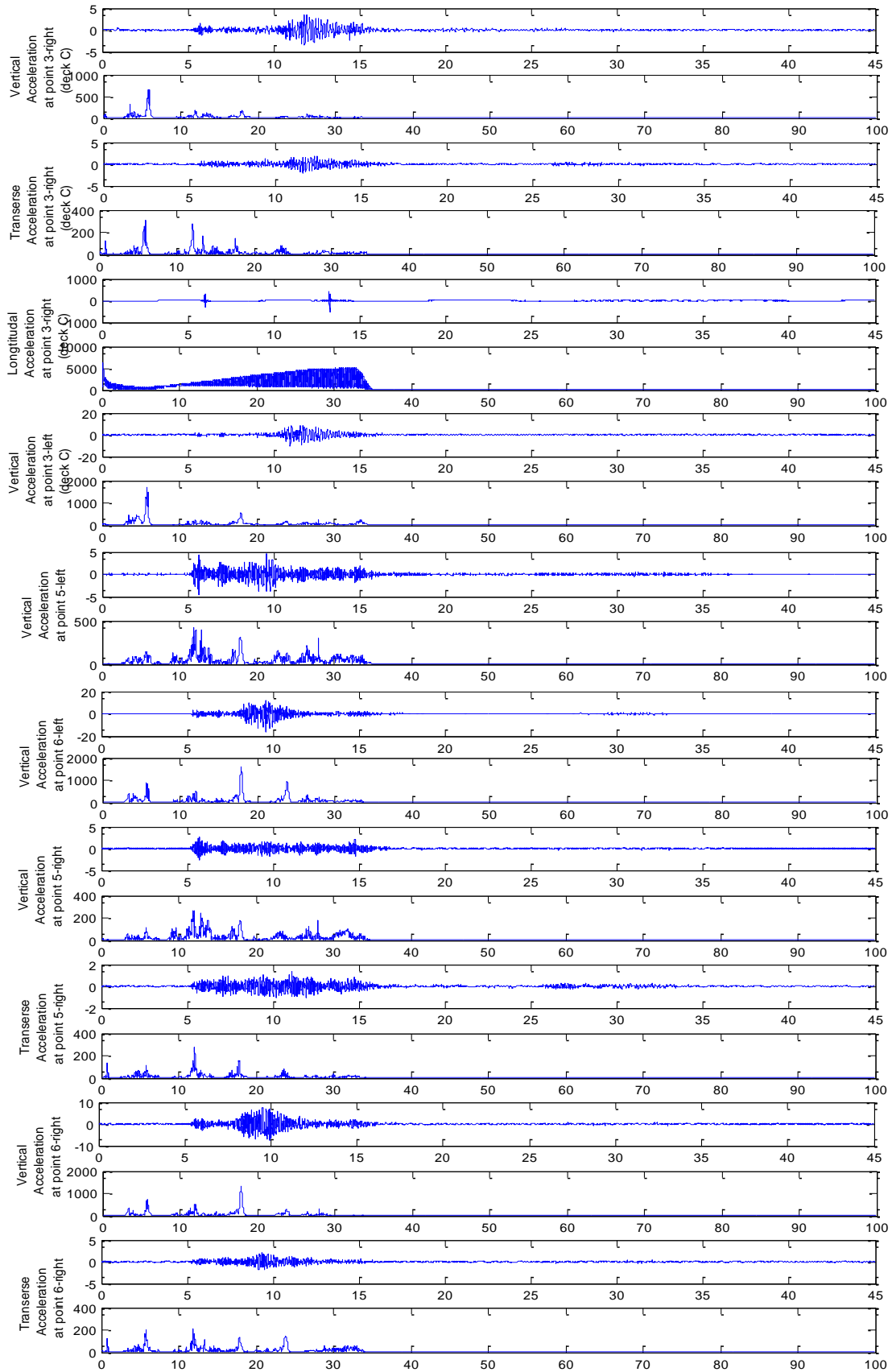


**Kavala 4<sup>th</sup> Set – KN020 (deck B)**

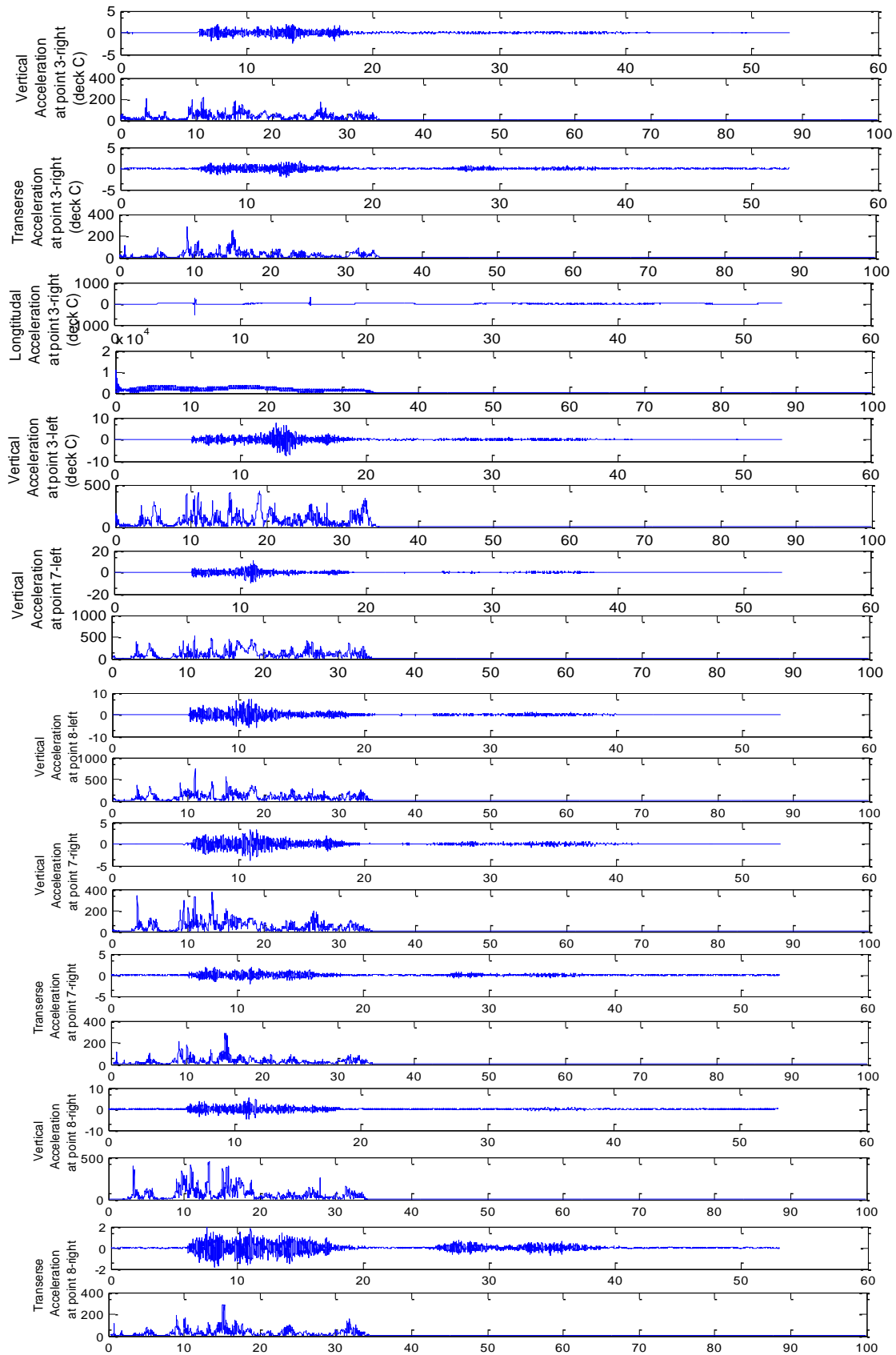




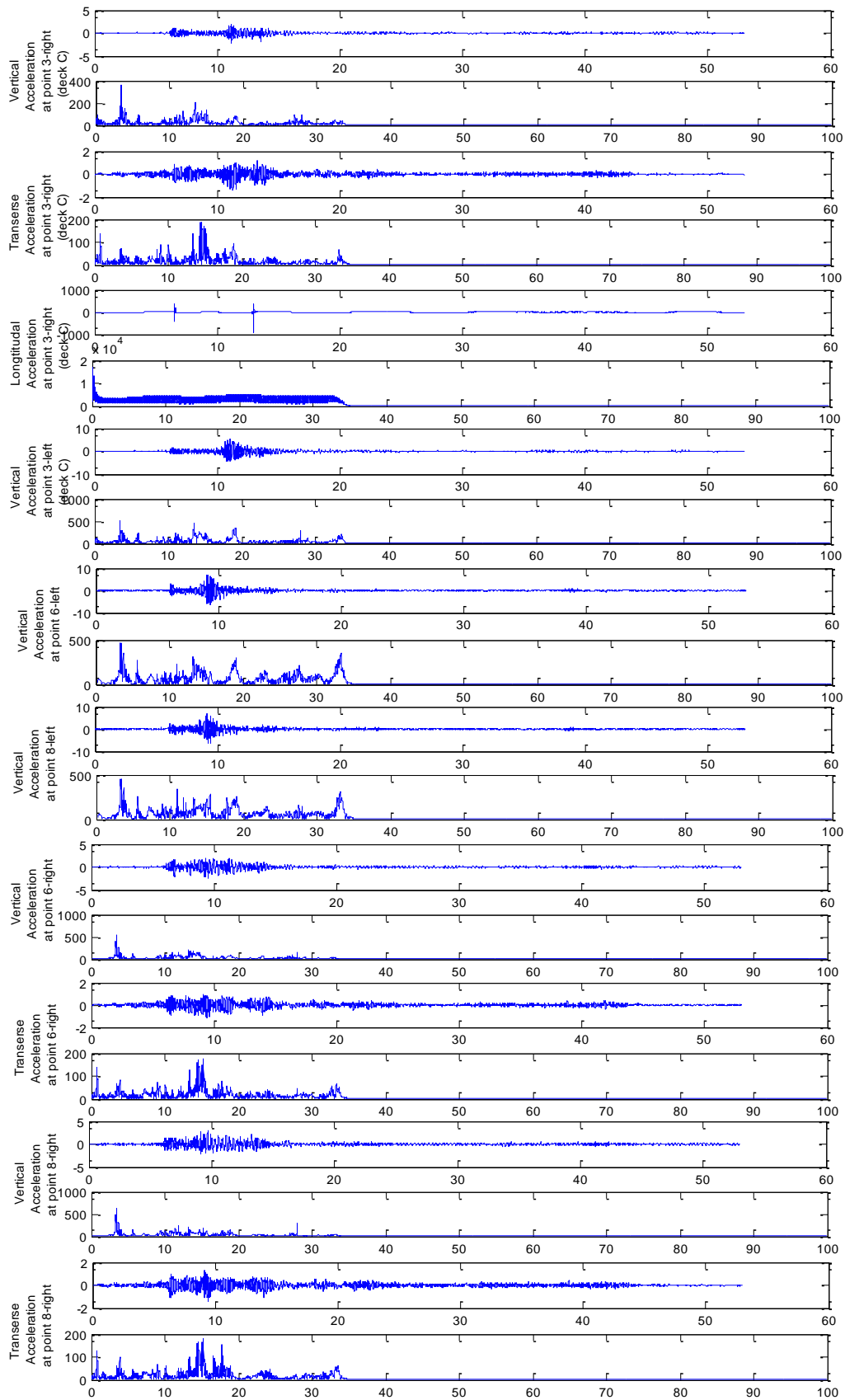
**Kavala 4<sup>th</sup> set – KN021 (deck B)**



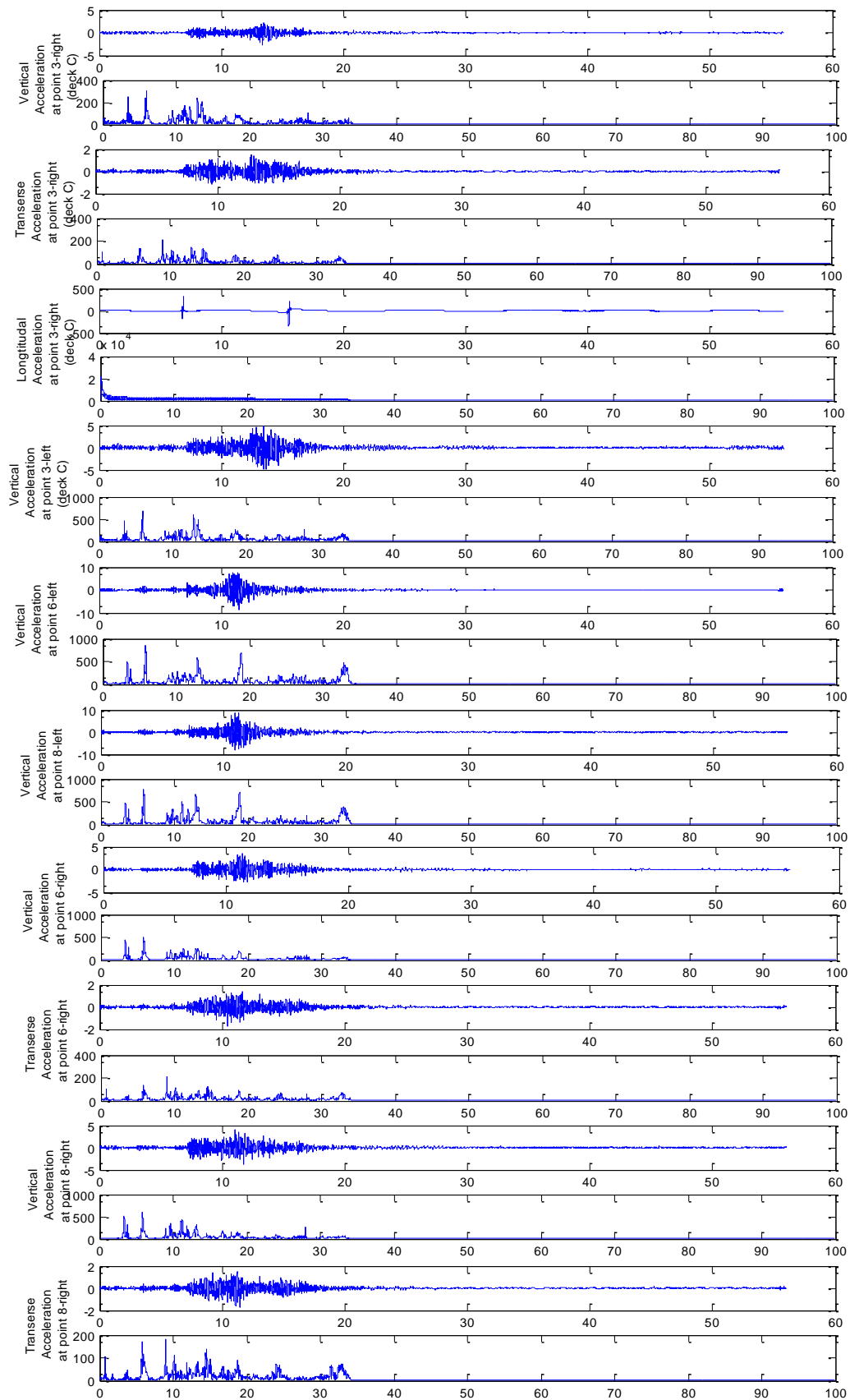
**Kavala 4<sup>th</sup> set – KP012 (deck B)**



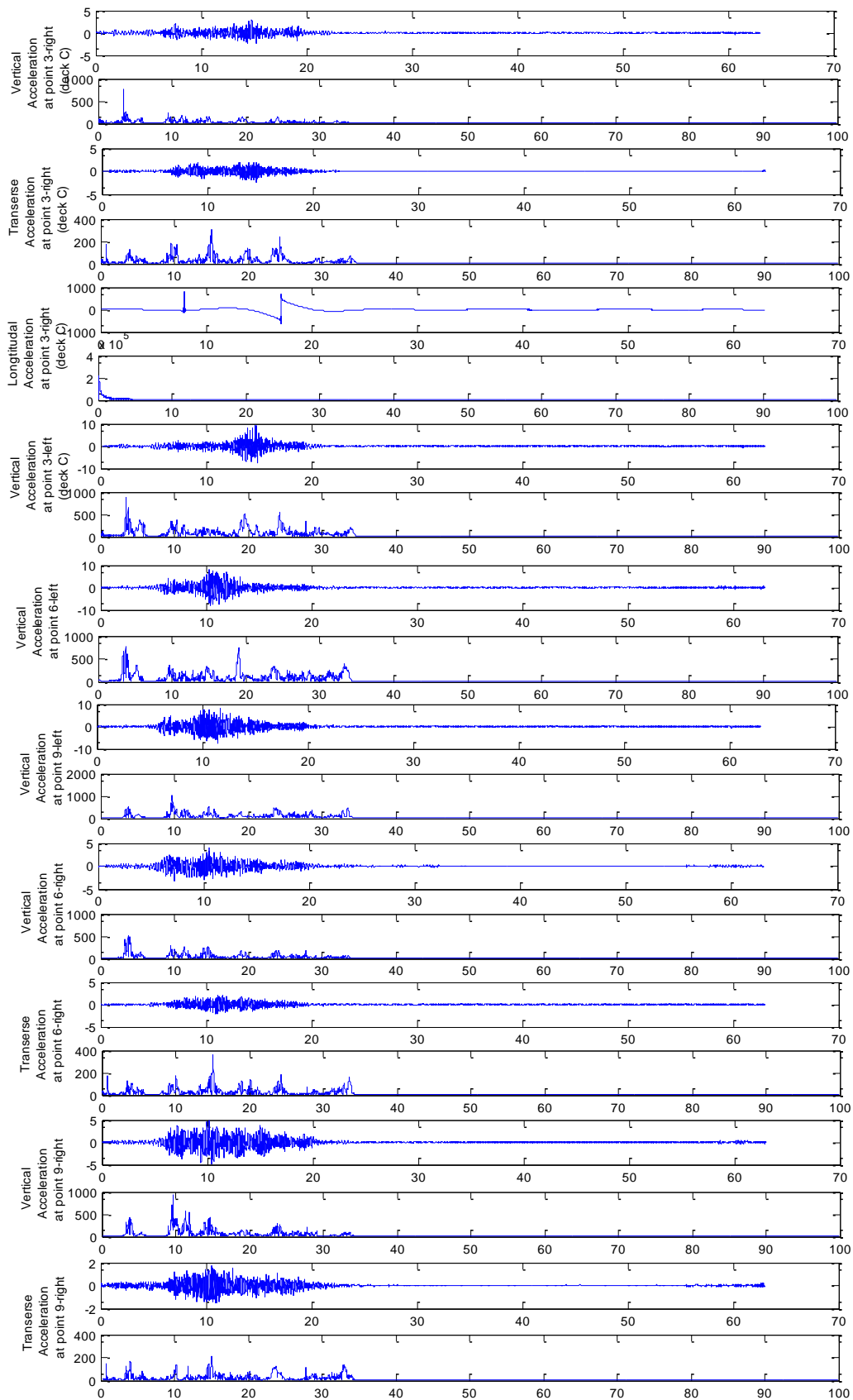
**Kavala 4<sup>th</sup> set – KP014 (deck B)**



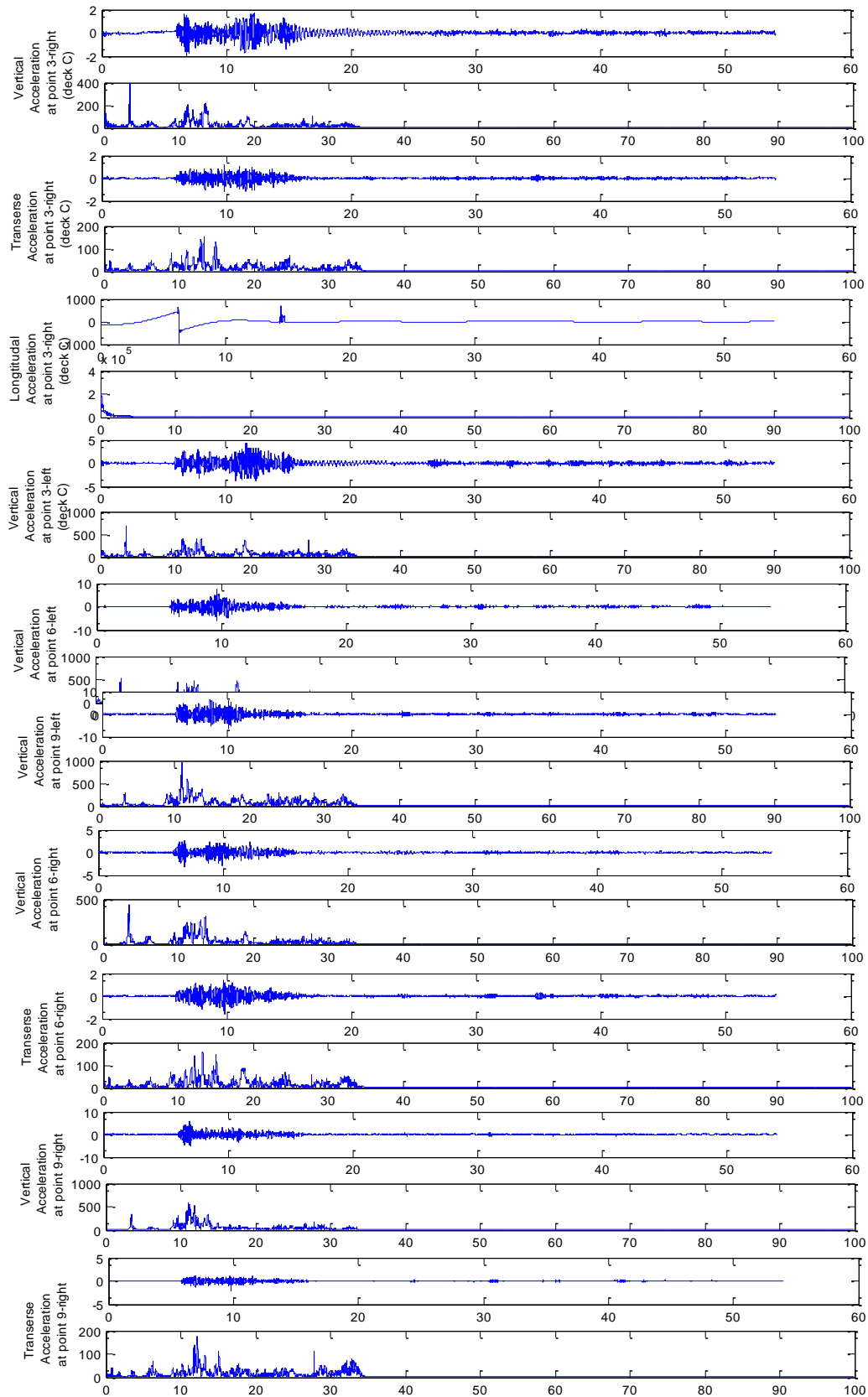
*Kavala 4<sup>th</sup> set – KP015 (deck B)*



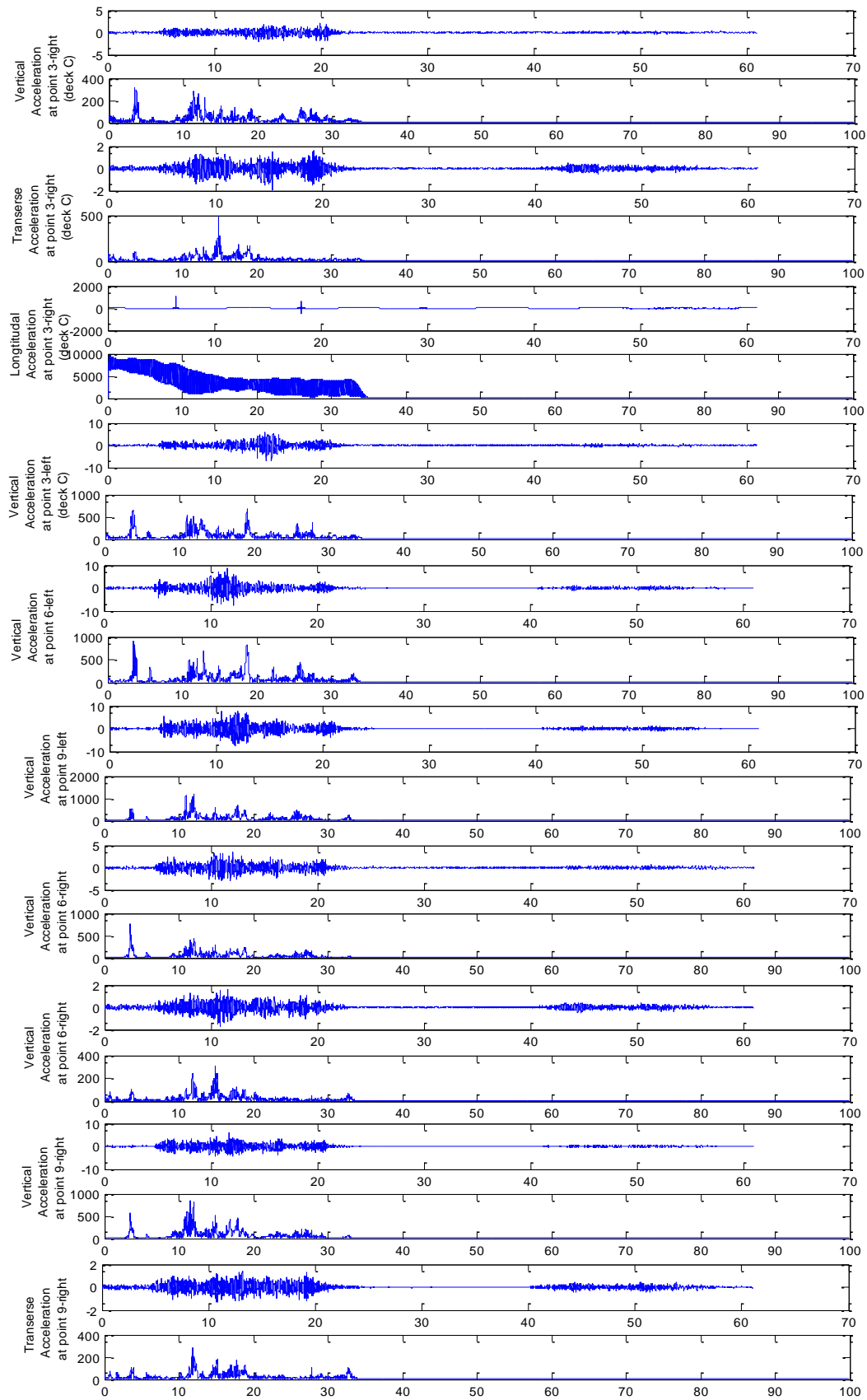
*Kavala 4<sup>th</sup> set – KQ007 (deck B)*



*Kavala 4<sup>th</sup> set – KQ008 (deck B)*

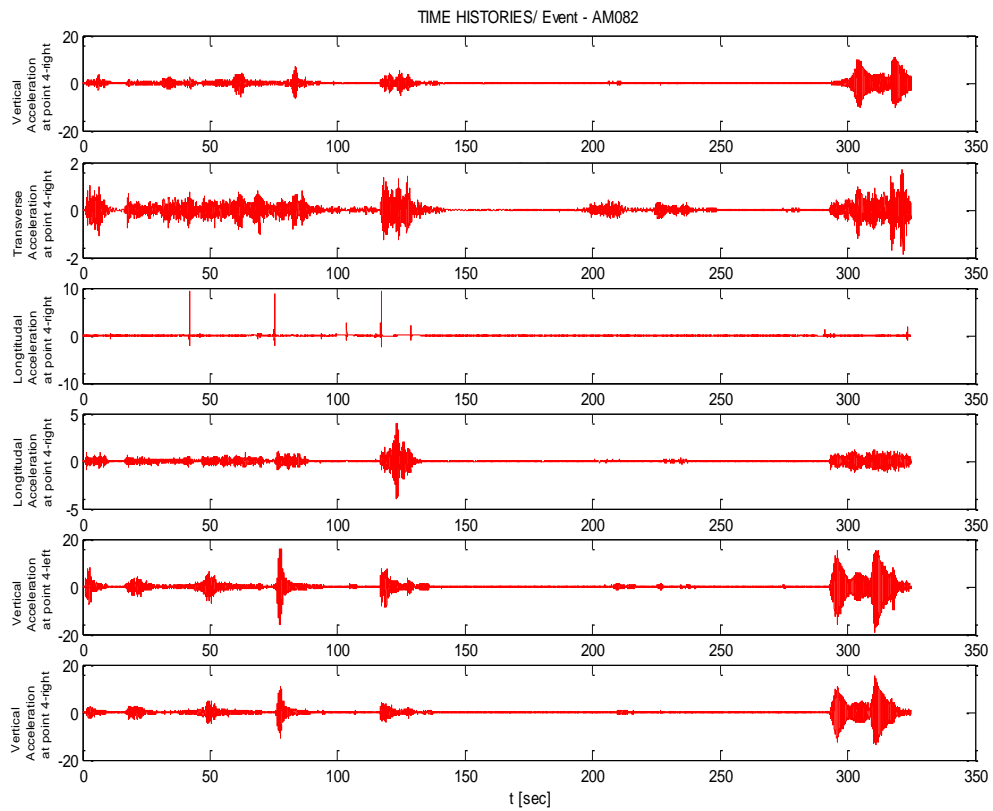


**Kavala 4<sup>th</sup> set – KQ010 (deck B)**



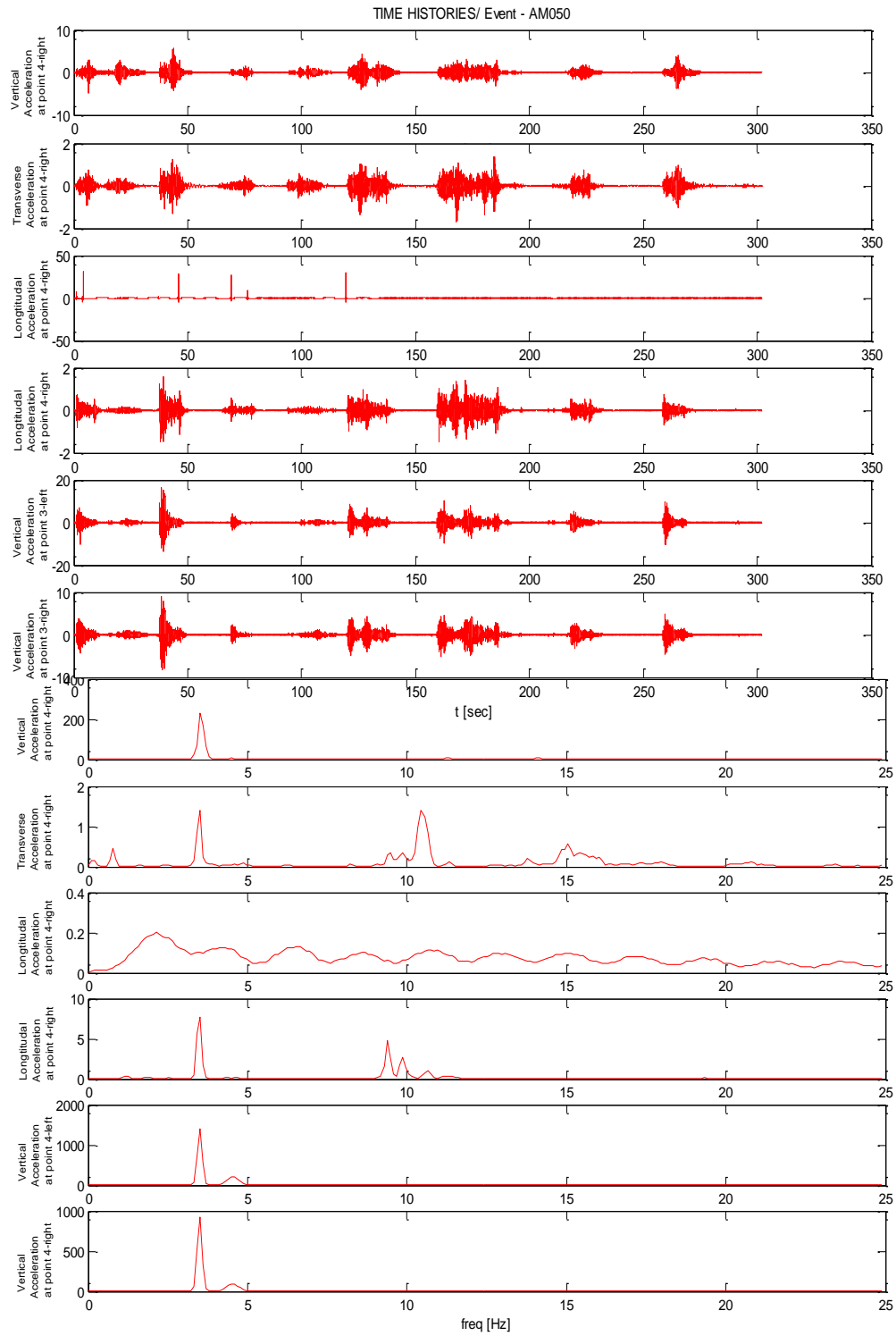
**2<sup>η</sup> φάση μετρήσεων**

***Kavala 5<sup>th</sup> set – AM082 (deck A)***

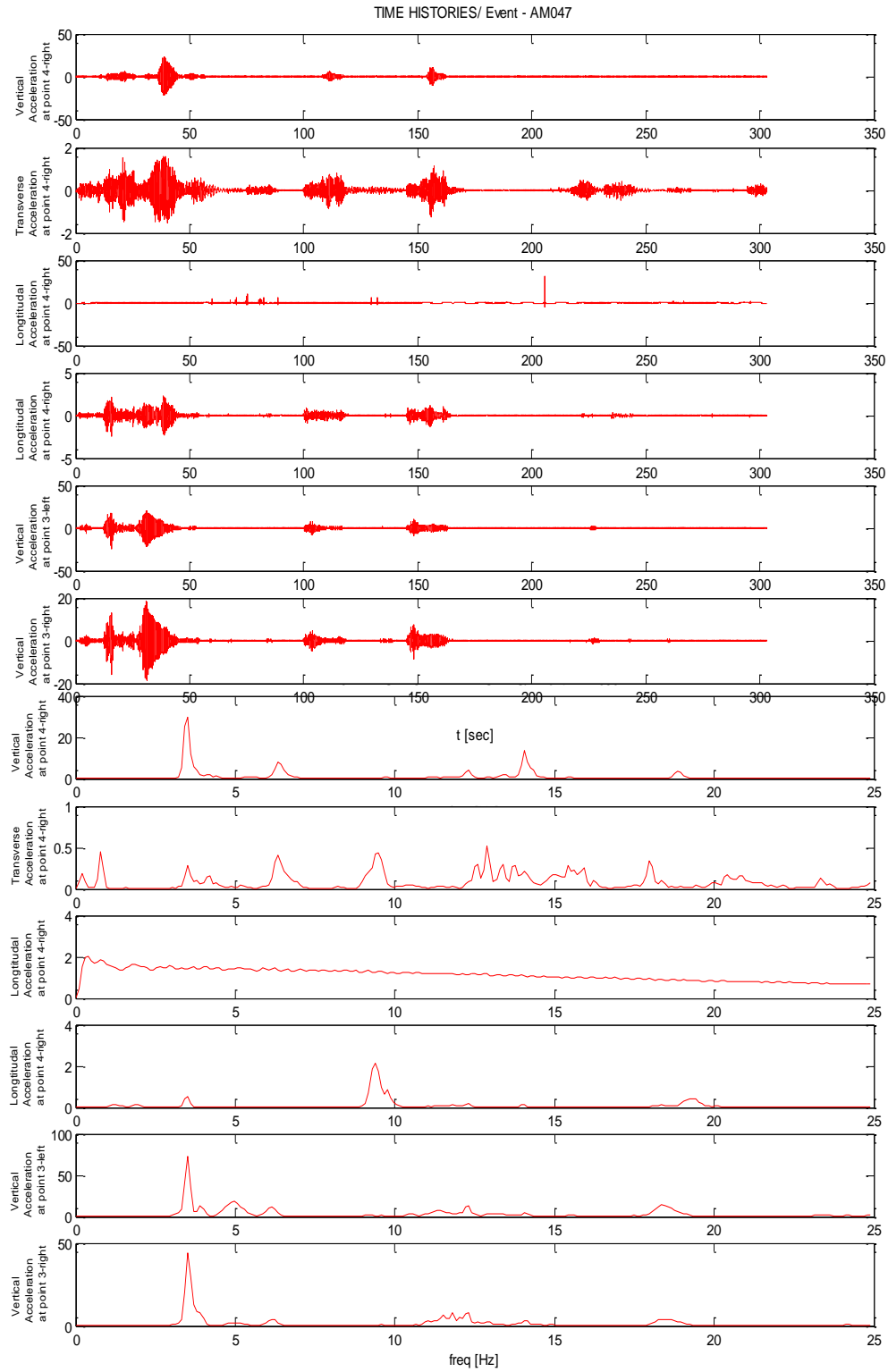




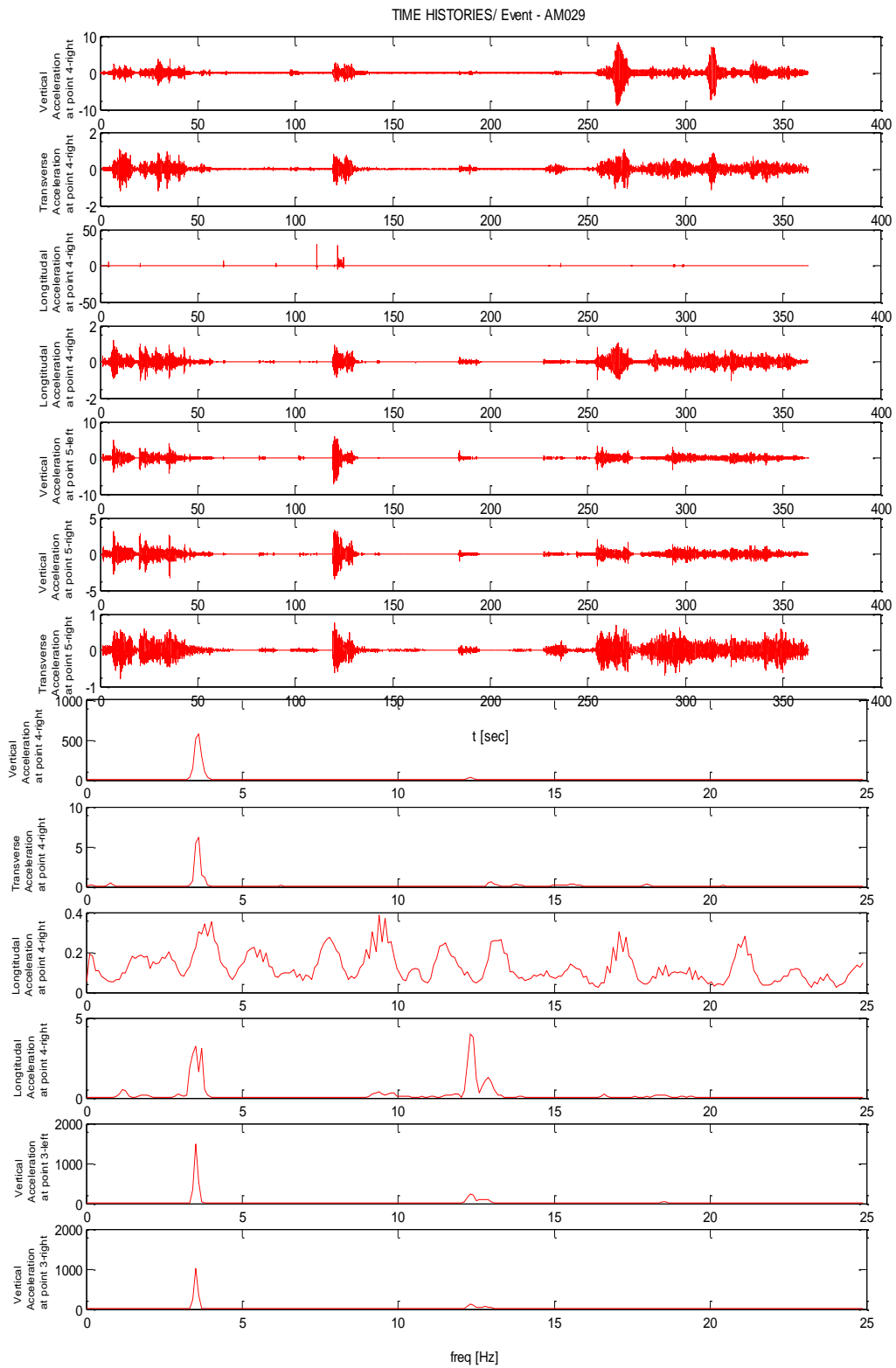
*Kavala 5<sup>th</sup> set – AM050 (deck A)*



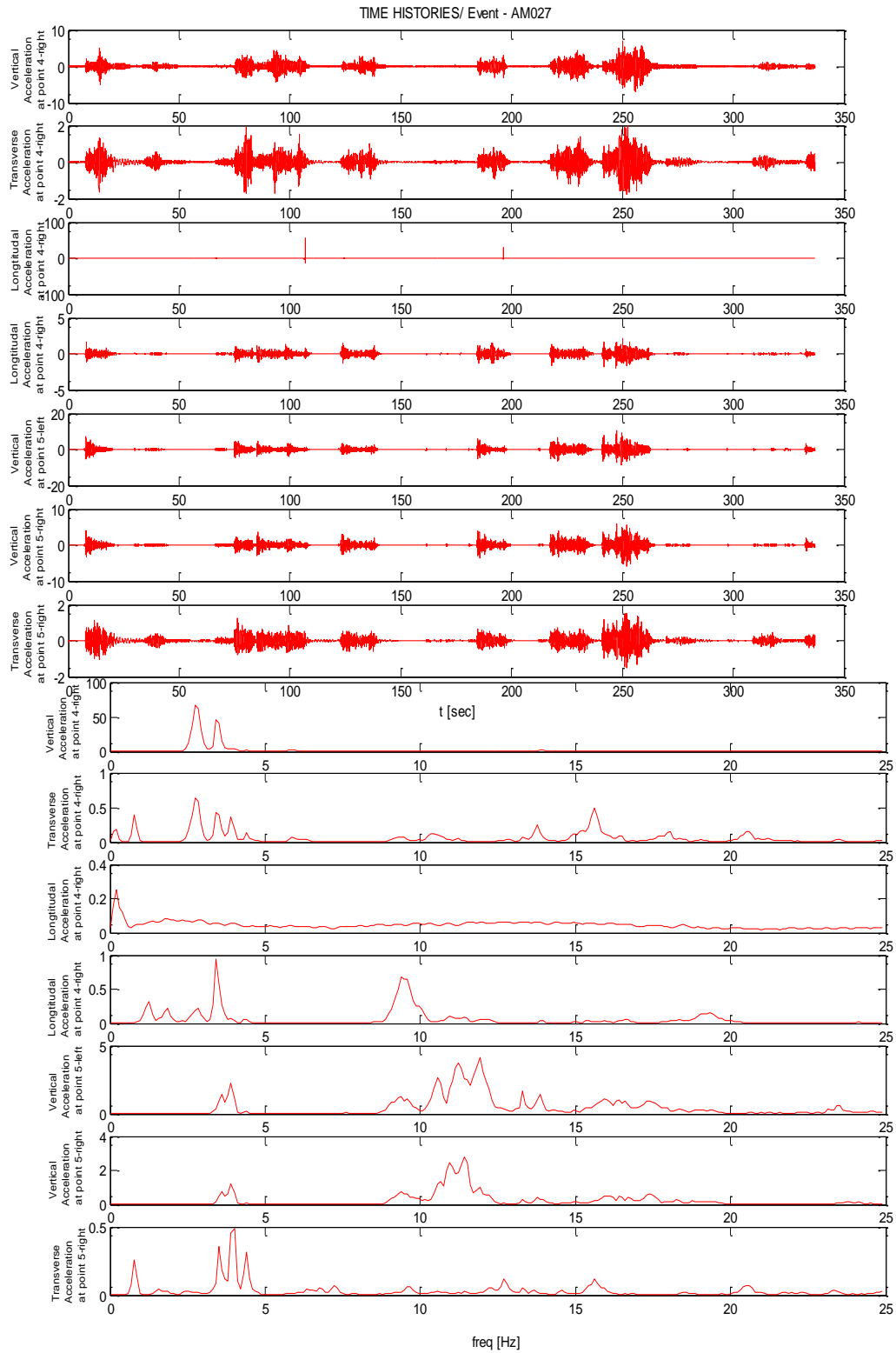
*Kavala 5<sup>th</sup> set – AM047 (deck A)*



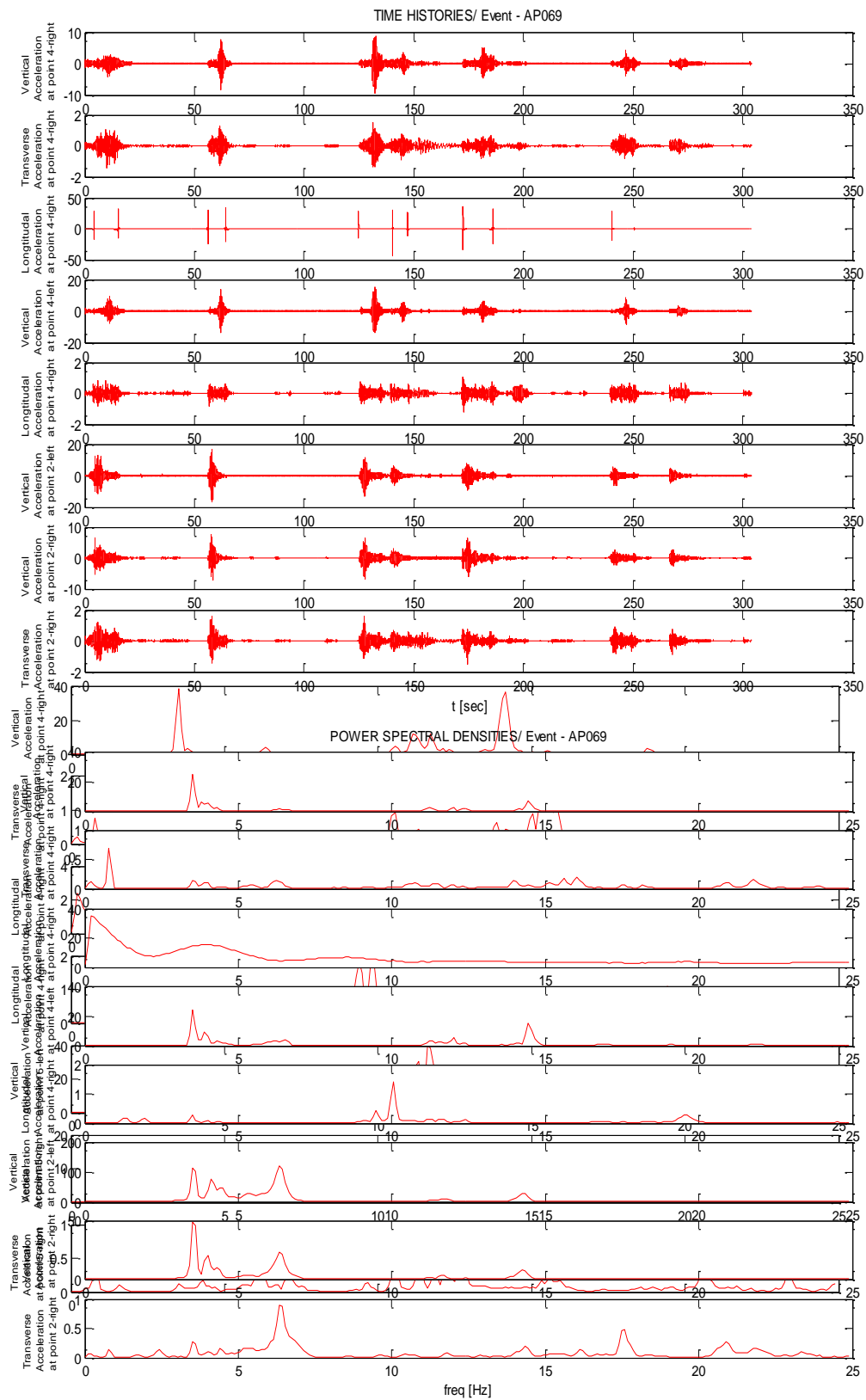
*Kavala 5<sup>th</sup> set – AM029 (deck A)*



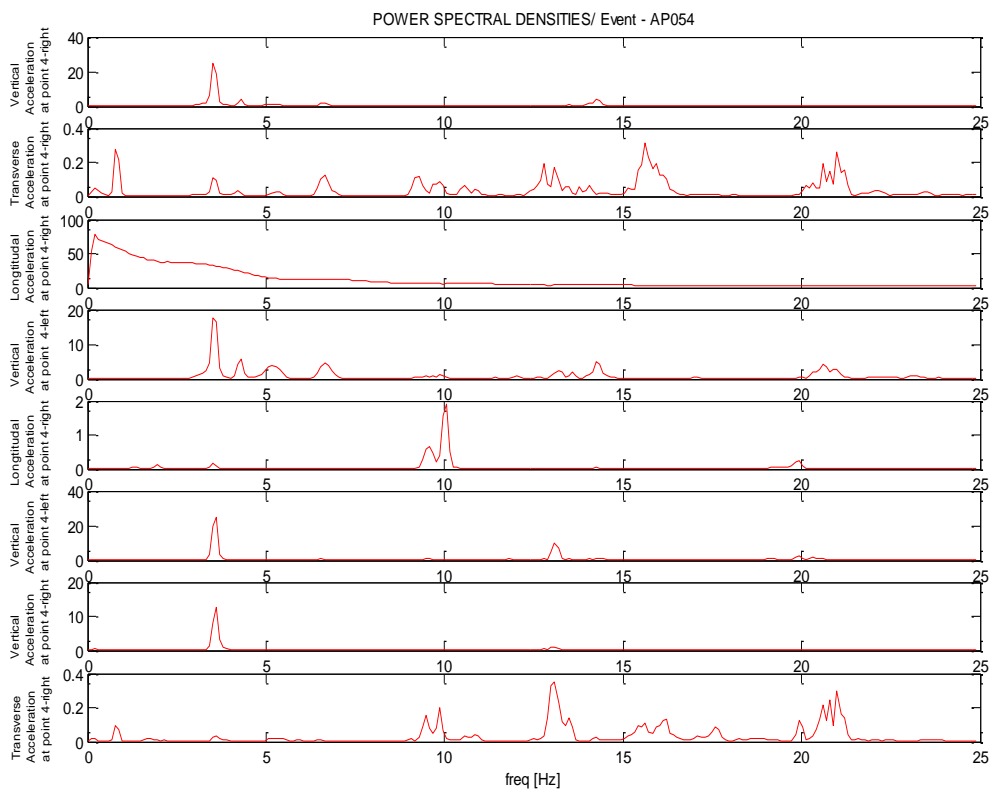
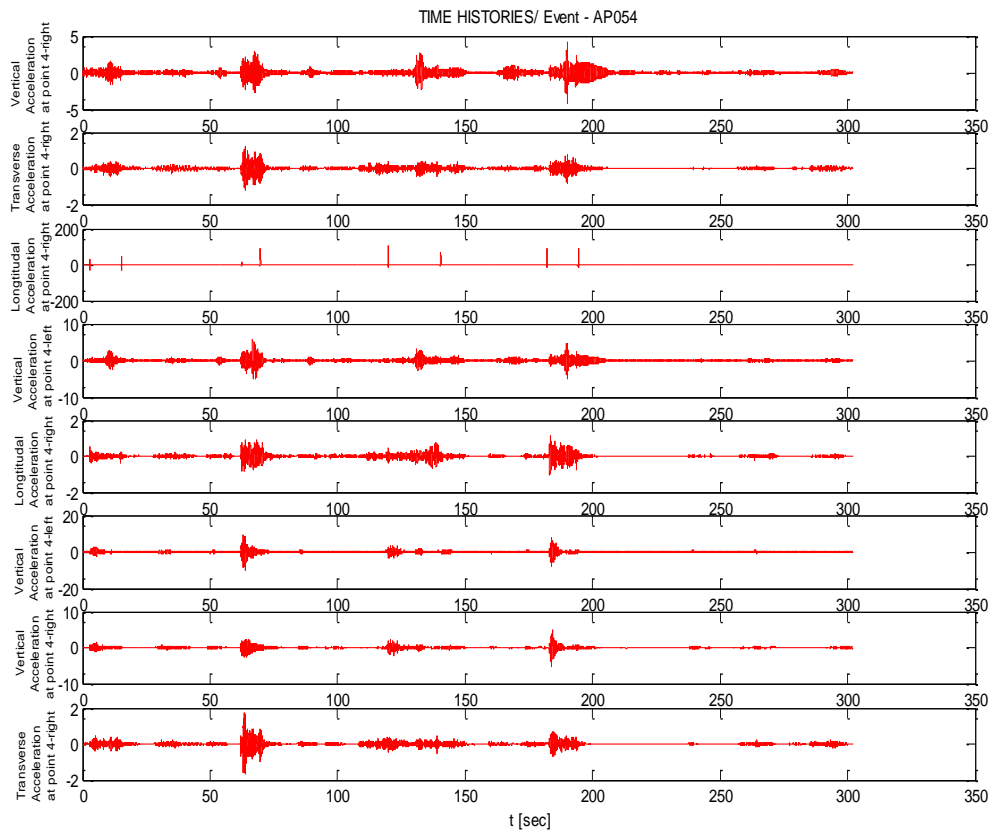
**Kavala 5<sup>th</sup> set – AM027 (deck A)**



**Kavala 5<sup>th</sup> set – AP069 (deck A)**



**Kavala 5<sup>th</sup> set – AP054 (deck A)**



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ

### ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΡΙΣΤΕΡΟΥ ΚΛΑΔΟΥ 2<sup>ης</sup> ΧΑΡΑΔΡΟΓΕΦΥΡΑΣ

Για την μοντελοποίηση του αριστερού κλάδου της 2<sup>ης</sup> Χαραδρογέφυρας στο τμήμα 2 της Παράκαμψης Καβάλας, χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία. Η μοντελοποίηση έγινε αρχικά με τη χρήση του λογισμικού Abaqus, λόγω των πολύ καλών δυνατοτήτων για γραφική εισαγωγή των δεδομένων.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα. Το ένα, μοντέλο Α, είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην αναθεώρηση του μοντέλου, ενώ το δεύτερο, μοντέλο Β, χρησιμοποιήθηκε μόνον για μία ενδεικτική σύγκριση με το μοντέλο του μελετητή. Το μοντέλο Α, μόλις κατασκευάστηκε στο ABAQUS, εισήχθη στο περιβάλλον MATLAB, όπου έγινε η διαδικασία της αναθεώρησης.

#### Γενική περιγραφή του μοντέλου

Η ανωδομή μοντελοποιήθηκε ως ισοδύναμη εσχάρα, όπως φαίνεται στα επισυναπτόμενα σχήματα. Η εσχάρα αποτελείται από τις τέσσερις κυρίως πλακοδοκούς, τις εγκάρσιες διαδοκίδες στην αρχή και στο τέλος των ανοιγμάτων, τα πλακίδια σύνδεσης μεταξύ των ανοιγμάτων και τις εγκάρσιες συνεργασίες λόγω της πλάκας καταστρώματος. Η ανωδομή εδράζεται επί των 3 βάθρων και των 2 ακρόβαθρων μέσω ελαστομεταλλικών εφεδράνων.

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα μοντελοποιούνται ως ισοδύναμες ράβδοι με τέτοια γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά ώστε να έχουν την ίδια διατμητική ακαμψία. Η δυστρεψία των εφεδράνων είναι ούτως ή άλλως πολύ μικρή και μπορεί να αγνοηθεί. Οι ράβδοι των εφεδράνων συνδέουν το κέντρο βάρους της ανωδομής με τη δοκό έδρασης στην κεφαλή των βάθρων. Η δοκός έδρασης θεωρείται άκαμπτη και συνδέεται με το κέντρο βάρους των μεσοβάθρων.

Το μοντέλο Α, το οποίο και χρησιμοποιήθηκε στην αναθεώρηση του μοντέλου θεωρεί την ανωδομή επί των εφεδράνων και την μη ενεργοποίηση των διατμητικών συνδέσμων.

#### Σύγκριση μοντέλου Β με το μοντέλο του μελετητή

Στην περίπτωση όπου γίνεται μελέτη της συμπεριφοράς της γέφυρας υπό σεισμικά φορτία (μεγάλες μετακινήσεις), στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων παγιώνονται οι ακόλουθες σειρές εφεδράνων:

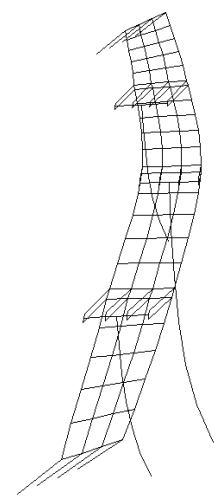
Αριστερή σειρά εφεδράνων	Μεσοβάθρου Μ1
Δεξιά σειρά εφεδράνων	Μεσοβάθρου Μ2
Δεξιά σειρά εφεδράνων	Μεσοβάθρου Μ3

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιοπερίοδοι τόσο για το μοντέλο της κατασκευής που χρησιμοποιήθηκε κατά τη μελέτη, όσο και για το μοντέλο Β πεπερασμένων στοιχείων που κατασκευάστηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος. Σημειώνεται πως το μοντέλο Β δεν έχει στόχο να αναθεωρηθεί, και η σύγκριση γίνεται καθαρά για λόγους πληρότητας. Το μοντέλο του μελετητή σχεδιάστηκε και επιλύθηκε με τη χρήση του λογισμικού STATIK ενώ το μοντέλο Β με το λογισμικό Abaqus.

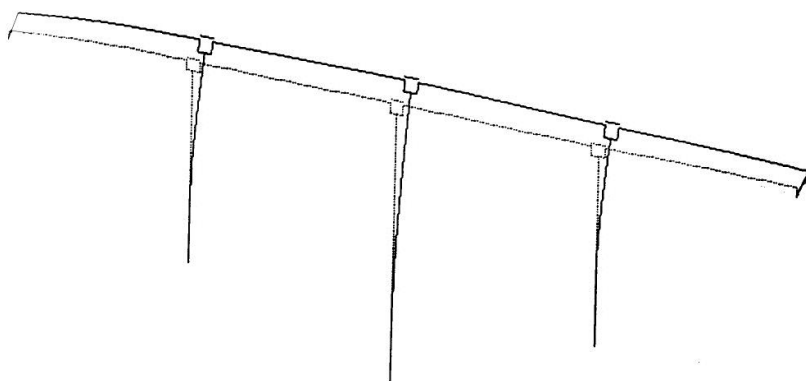
mode	Abaqus		Μελέτη (STATIK2)	
	$\omega$ (Hz)	T (sec)	$\omega$ (Hz)	T (sec)
1	0,6338	1,5777	0,5270	1,8975
2	0,7663	1,3051	0,5810	1,7212
3	0,8888	1,1251	0,6760	1,4793
4	1,2882	0,7763	1,4330	0,6978
5	1,8790	0,5322	2,9360	0,3406
6	2,2008	0,4544	3,0240	0,3307
7	2,2100	0,4525	3,0660	0,3262
8	2,3479	0,4259	3,1370	0,3188
9	2,3681	0,4223	3,1500	0,3175
10	2,6738	0,3740	3,5030	0,2855
11	3,4929	0,2863	3,5710	0,2800
12	4,0206	0,2487	6,0260	0,1659
13	5,0335	0,1987	7,5340	0,1327
14	5,4327	0,1841	7,6360	0,1310
15	5,6736	0,1763	7,9350	0,1260
16	6,3398	0,1577	8,6970	0,1150
17	6,5562	0,1525	8,7960	0,1137
18	6,6560	0,1502	8,9790	0,1114
19	7,0663	0,1415	9,5880	0,1043
20	7,1216	0,1404	9,7200	0,1029

Οι διαφορές ανάμεσα στις ιδιοσυχνότητες δύο μοντέλων οφείλεται στο διαφορετικό είδος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για το κάθε μοντέλο. Επίσης, το μοντέλο της μελέτης έχει μόνο μία ισοδύναμη ράβδο για να περιγράψει το κατάστρωμα της γέφυρας ενώ στο μοντέλο του Abaqus το κατάστρωμα έχει μοντελοποιηθεί με περισσότερα στοιχεία δοκού.

Παρ' όλα αυτά, η γραφική σύγκριση των τεσσάρων πρώτων ιδιομορφών και των δύο μοντέλων είναι η ίδια. Αυτό γίνεται αντιληπτό από το παρακάτω σχήμα, όπου έχουν σχεδιαστεί για το κάθε μοντέλο οι ιδιομορφές που αντιστοιχούν στις τέσσερις πρώτες ιδιοσυχνότητες.



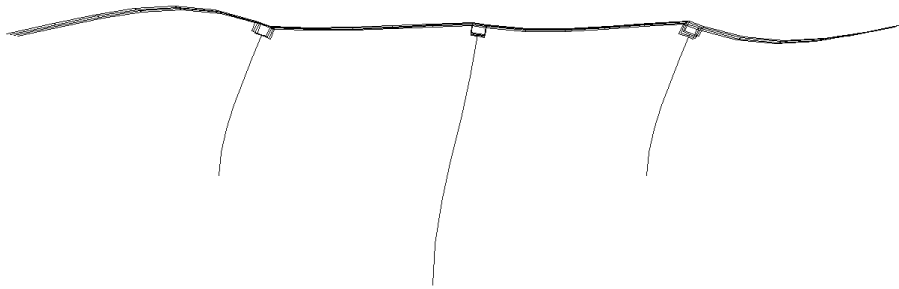
(a)  $\omega_1 = 0,6338$  Hz



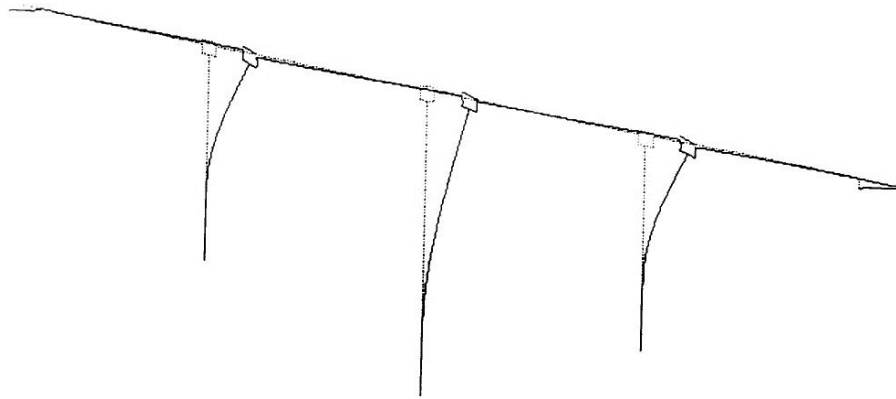
(b)  $\omega_1 = 0,5270$  Hz

1<sup>η</sup> ιδιομορφή (a) ABAQUS, (b) STATIK2



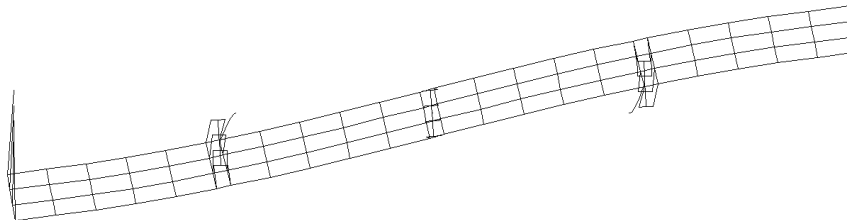


(a)  $\omega_2 = 0,7663 \text{ Hz}$

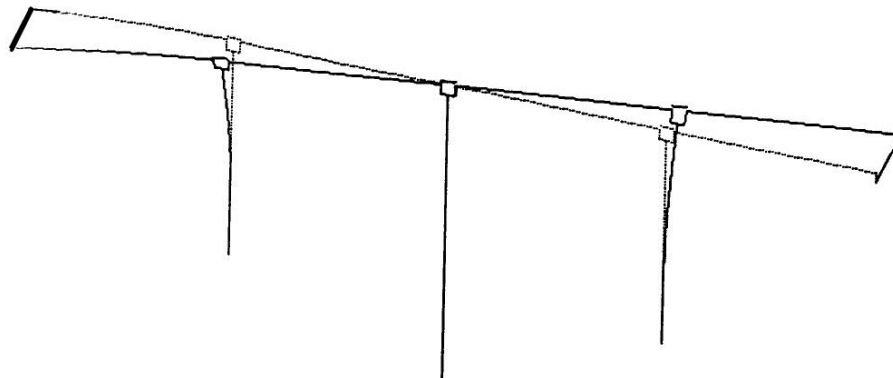


(b)  $\omega_2 = 0,5810 \text{ Hz}$

**2<sup>η</sup> ιδιομορφή (a) ABAQUS, (b) STATIK2**

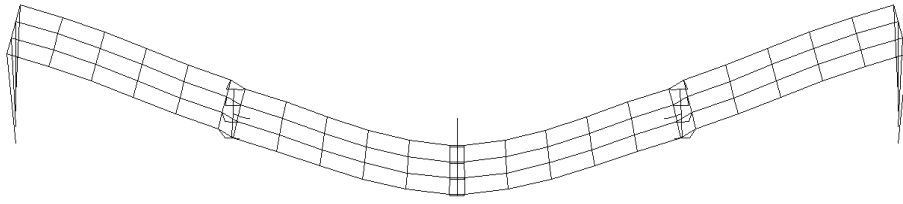


(a)  $\omega_3 = 0,8888 \text{ Hz}$

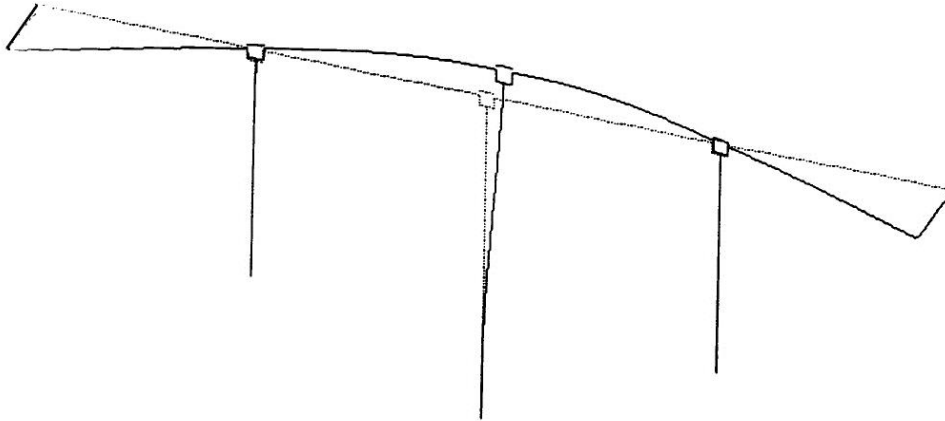


(b)  $\omega_3 = 0,6760 \text{ Hz}$

**3<sup>η</sup> ιδιομορφή (a) ABAQUS (b) STATIK2**



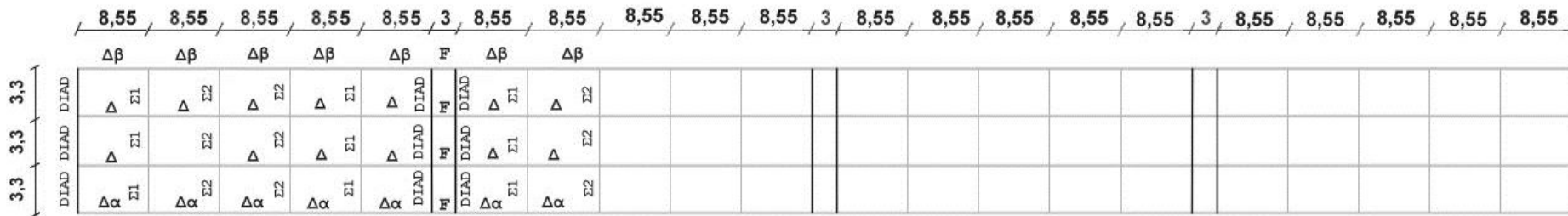
(a)  $\omega_4 = 1,2882$  Hz



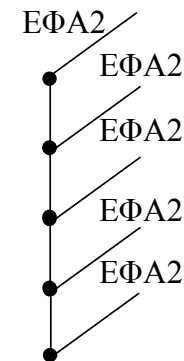
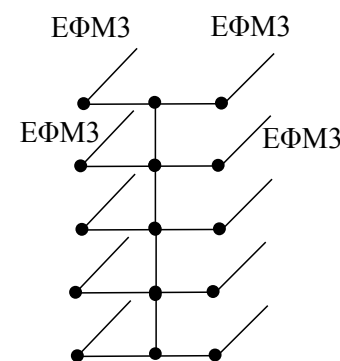
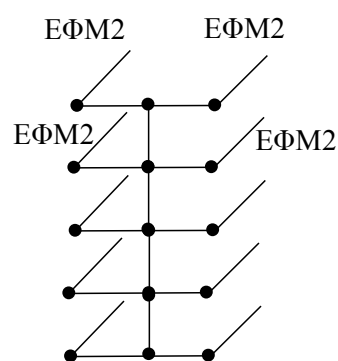
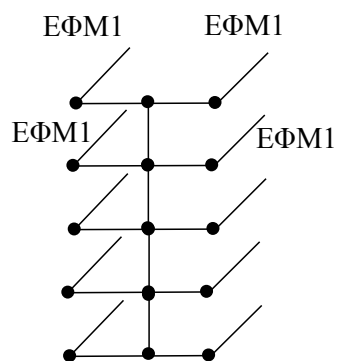
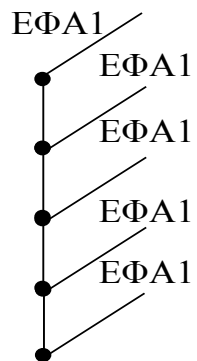
(c)  $\omega_4 = 1,4330$  Hz

**4<sup>η</sup> ιδιομορφή (a) ABAQUS, (b) STATIK2**

### ΚΑΤΟΨΗ

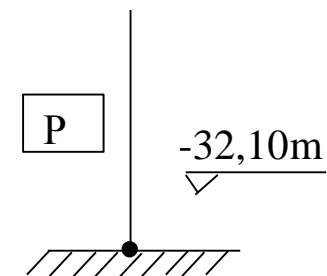
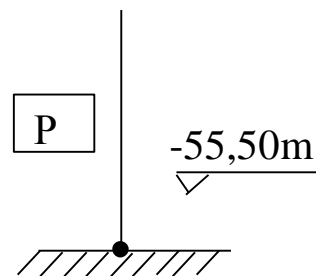
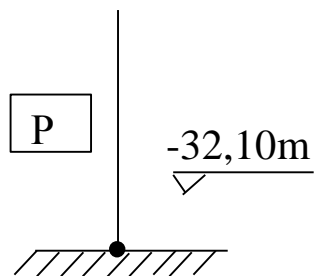


1<sup>ο</sup> Επίπεδο Κόμβων (στάθμη ± 0)



2<sup>ο</sup> Επίπεδο Κόμβων (στάθμη -2,10)

ΠΑΚΤΩΣΕΙΣ ΒΑΘΡΩΝ

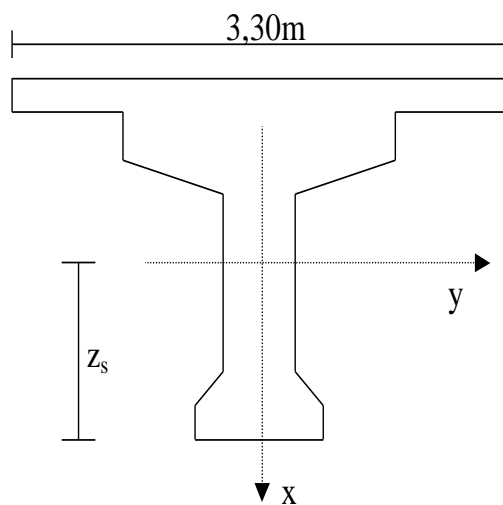


Κάθε πυλώνας χωρίζεται σε έξι πεπερασμένα στοιχεία.

## ΔΙΑΤΟΜΕΣ

### Κεντρικές Δοκοί

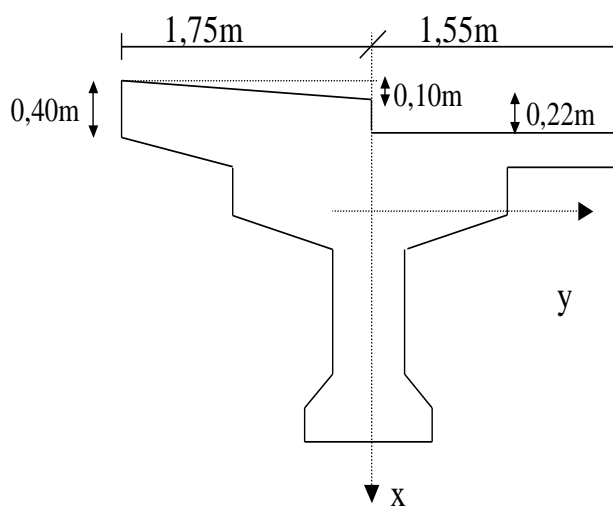
**Δ**



$$\begin{aligned} A &= 1,912 \text{ m}^2 \\ I_y &= 2,254 \text{ m}^4 \\ I_z &= 0,6855 \text{ m}^4 \\ I_p &= 3,12 \text{ m}^4 \\ z_s &= 2,10 \end{aligned}$$

### Ακραίες Δοκοί

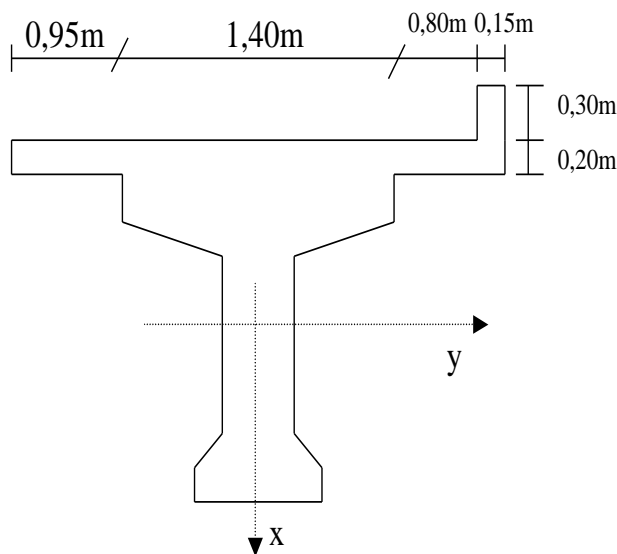
**Δα**



$$\begin{aligned} A &= 2,294 \text{ m}^2 \\ I_y &= 2,739 \text{ m}^4 \\ I_z &= 1,061 \text{ m}^4 \\ I_p &= 3,80 \text{ m}^4 \\ z_s &= 2,30 \end{aligned}$$

**Δβ**

$$\begin{aligned} A &= 1,924 \text{ m}^2 \\ I_y &= 2,294 \text{ m}^4 \\ I_z &= 0,9145 \text{ m}^4 \\ I_p &= 3,208 \text{ m}^4 \\ z_s &= 212,03 \end{aligned}$$



### ΕΦΕΔΡΑΝΑ

- Ακρόβαθρα

4φ650/195 ( $H_{ελαστικού} = 155$ )

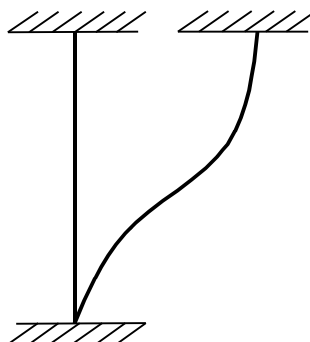
Δυσκαμψίες:  $K_v = 132.732,3 \text{ t/m}$  (κατακόρυφη)

$K_x = K_y = 256,9 \text{ t/m}$  (διατμητική)

$K_\phi = 132.732,3 \text{ tm/rad}$  (στροφική)

Ισοδύναμη Ράβδος:

$L=2,10\text{m}$



$$\left. \begin{aligned} 12 \frac{EI}{L^3} &= 2569 \text{ KN/m} \\ \frac{EA}{L} &= 1.327.323 \text{ KN/m} \end{aligned} \right\}$$

$$E = 1000 \text{ KN/m}^2,$$

$$I = 1,982 \text{ m}^4$$

$$A = 2787 \text{ m}^2$$

Διατομές ΕΦΑ1, ΕΦΑ2

- Μεσόβαθρα  $M_1, M_3$

4φ 600 x 400 / 99(71)

Δυσκαμψίες:  $K_v = 218.181,8 \text{ t/m}$  (κατακόρυφη)

$K_x = K_y = 405,63 \text{ t/m}$  (διατμητική)

$K_\phi = 1846 \text{ tm/rad}$  (στροφική)

Ισοδύναμη Ράβδος:  $E = 1000 \text{ KN/m}^2, I = 3,13 \text{ m}^4, A = 4581 \text{ m}^2$

Διατομές ΕΦΜ1, ΕΦΜ3

▪ Μεσόβαθρο  $M_2$

4φ 600 x 300 / 52(37)

Δυσκαμψίες:  $K_v = 337.500 \text{ t/m}$  (κατακόρυφη)

$K_x = K_y = 583,78 \text{ t/m}$  (διατμητική)

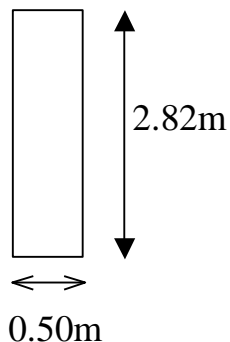
$K_\phi = 1708,59 \text{ tm/rad}$  (στροφική)

Ισοδύναμη Ράβδος:  $E = 1000 \text{ KN/m}^2$ ,  $I = 4,504 \text{ m}^4$ ,  $A = 7087,5 \text{ m}^2$

Διατομή ΕΦΜ2

ΔΙΑΔΟΚΙΔΑ

**DIAD**



$$A_x = 1,41 \text{ m}^2$$

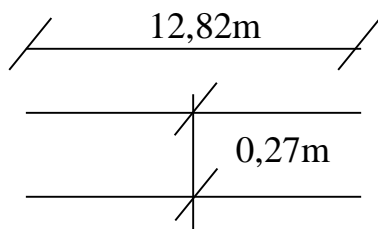
$$I_y = 0,9344 \text{ m}^4$$

$$I_z = 0,0294 \text{ m}^4$$

$$I_p = 1,0 \text{ m}^4$$

ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ

**Σ<sub>1</sub>**



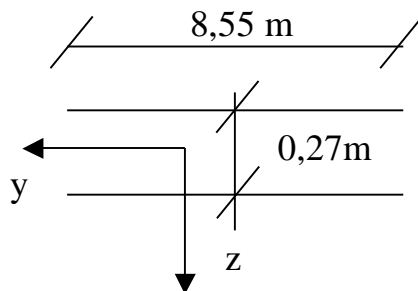
$$A_x = 3,46 \text{ m}^2$$

$$I_y = 0,021 \text{ m}^4$$

$$I_z = 47,40 \text{ m}^4$$

$$I_p = 1,0 \text{ m}^4$$

**Σ<sub>2</sub>**



$$A_x = 2,308 \text{ m}^2$$

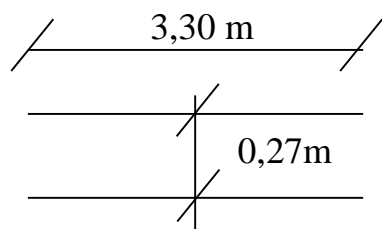
$$I_y = 0,014 \text{ m}^4$$

$$I_z = 14 \text{ m}^4$$

$$I_p = 1,0 \text{ m}^4$$

### Feder Plate

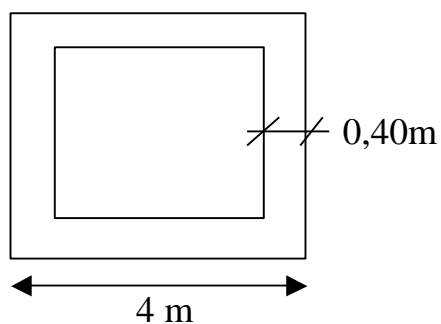
**F**



$$\begin{aligned}A_x &= 0,891 \text{ m}^2 \\I_y &= 0,0055 \text{ m}^4 \\I_z &= 0,808 \text{ m}^4 \\I_p &= 1,0 \text{ m}^4\end{aligned}$$

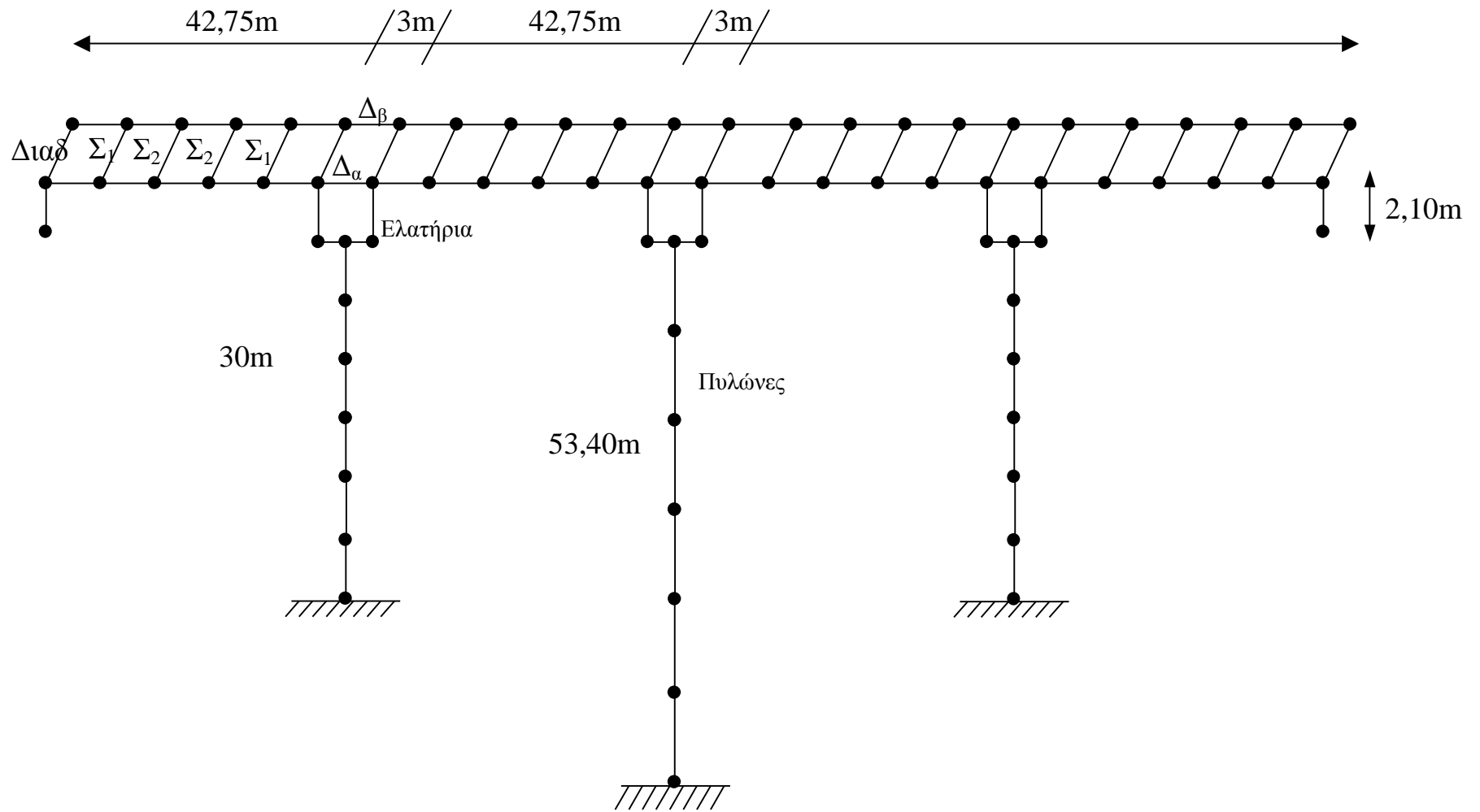
### Πυλώνες

**P**



$$\begin{aligned}A_x &= 5,77 \text{ m}^2 \\I_y = I_z &= 12,50 \text{ m}^4 \\I_p &= 25,3 \text{ m}^4\end{aligned}$$





ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΜΗ

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ

### ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗΣ

Το πρόβλημα εύρεσης της βέλτιστης διάταξης αισθητήρων σε γέφυρες για ένα δεδομένο αριθμό αισθητήρων διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με διακριτές παραμέτρους. Η αντικειμενική συνάρτηση που ελαχιστοποιείται είναι η εντροπία της πληροφορίας η οποία δίνεται από τη σχέση

$$H(\delta) = \frac{1}{2} N_{\theta} [\ln(2\pi) + \ln\sigma^2] - \frac{1}{2} \ln[\det Q(\delta, \theta)] \quad (Z.1)$$

όπου  $\theta$  είναι οι παράμετρος του μορφικού μοντέλου ή του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων,  $N_{\theta}$  είναι ο αριθμός των παραμέτρων, και  $\sigma^2$  σχετίζεται με την ακρίβεια του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων η οποία δεν επηρεάζει την επιλογή της βέλτιστης διάταξης.

Οι καλύτερες θέσεις αισθητήρα ελαχιστοποιούν την εντροπία της πληροφορίας. Οι διακριτές μεταβλητές της βελτιστοποίησης είναι τα στοιχεία του διανύσματος  $\delta$  τα οποία σχετίζονται με τις θέσεις των αισθητήρων. Συγκεκριμένα το  $j$  στοιχείο του διανύσματος διάταξης αισθητήρων  $\delta$  έχει τιμές  $\delta_j = 1$  εάν ο  $j$  βαθμός ελευθερίας του μοντέλου της κατασκευής περιέχει αισθητήρα, και  $\delta_j = 0$  εάν δεν περιέχει αισθητήρα.

Ο πίνακας  $Q(\delta, \theta)$  που εμφανίζεται στην (Z.1) είναι ένας θετικά ημιορισμένος πίνακας της μορφής

$$Q(\delta, \theta) = \sum_{j=1}^{N_d} \delta_j P^{(j)}(\theta) \quad (Z.2)$$

ο οποίος είναι γνωστός ως πίνακας πληροφορίας Fisher (Udwadia 1994, Papadimitriou et al. 2001, 2002, Metalidis et al 2003) και περιλαμβάνει τις πληροφορίες απ' όλα τα σημεία μέτρησης. Ο πίνακας  $P^{(j)}(\theta)$  είναι ένας θετικά ημιορισμένος πίνακας που ορίζεται ως

$$P^{(j)}(\theta) = \sum_{m=1}^N \nabla_{\theta} q_j(m; \theta) \nabla_{\theta}^T q_j(m; \theta) \quad (Z.3)$$

και περιλαμβάνει τις πληροφορίες που προέρχονται από ένα αισθητήρα τοποθετημένο στον  $j$  βαθμό ελευθερίας. Για δοσμένα χαρακτηριστικά διέγερσης, ο πίνακας  $P^{(j)}(\theta)$  εξαρτάται μόνο από την απόκριση του μοντέλου στο συγκεκριμένο βαθμό ελευθερίας  $j$ , ενώ είναι ανεξάρτητος από το διάνυσμα διάταξης των αισθητήρων  $\delta$ . Η μεταβλητή  $q_j(m; \theta)$  είναι η απόκριση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων ή του μορφικού μοντέλου στον  $j$  βαθμό ελευθερίας, ενώ  $\nabla_{\theta}$  παριστά την παράγωγο της απόκρισης ως προς τις παράμετρος του μοντέλου (μορφικές παράμετρος η παράμετρος δυσκαμψίας).

Για συγκεκριμένες τιμές του διανύσματος διάταξης  $\delta$ , τα μητρώα  $P^{(j)}(\theta)$  και  $Q(\delta, \theta)$  υπολογίζονται εύκολα κάνοντας χρήση του μορφικού μοντέλου ή του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας.

## Ζ.1 Υπολογιστικά Ζητήματα για την Εύρεση της Βέλτιστης Διάταξης Αισθητήρων

Για ένα κατασκευαστικό μοντέλο με  $N_d$  βαθμούς ελευθερίας, ο αριθμός όλων των διαφορετικών διατάξεων αισθητήρων που περιλαμβάνουν  $N_o$  αισθητήρες είναι

$$N_s = \frac{N_d!}{N_o!(N_d - N_o)!} \quad (\text{Z.4})$$

ο οποίος για τις περισσότερες περιπτώσεις πρακτικού ενδιαφέροντος είναι ένας εξαιρετικά μεγάλος αριθμός. Είναι φανερό ότι μια διεξοδική αναζήτηση όλων των διαφορετικών διατάξεων αισθητήρων για τον υπολογισμό της βέλτιστης διάταξης αισθητήρων είναι εξαιρετικά χρονοβόρα και στις περισσότερες περιπτώσεις απαγορευτική ακόμα και για μοντέλα με σχετικά μικρό αριθμό βαθμών ελευθερίας. Επομένως, πρέπει να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικές τεχνικές προσέγγισης για να λύσουν το πρόβλημα της διακριτής βελτιστοποίησης και να επιτύχουν καλές εκτιμήσεις των διατάξεων αισθητήρων που θα ανταποκρίνονται σε τιμές της εντροπίας της πληροφορίας κοντά στο ελάχιστο της εντροπίας.

Συγκεκριμένα, οι γενετικοί αλγόριθμοι (Goldberg 1989, Michalewicz 1999) είναι οι καταλληλότεροι για την επίλυση του τελικού προβλήματος της διακριτής βελτιστοποίησης και παρέχουν σχεδόν βέλτιστες λύσεις. Ο αριθμός των μεταβλητών που βελτιστοποιείται είναι ίσος με τον αριθμό των αισθητήρων,  $N_o$ . Λεπτομέρειες σχετικά με τα διάφορα ζητήματα που αφορούν τη χρήση των γενετικών αλγόριθμων για τον υπολογισμό των βέλτιστων διατάξεων των αισθητήρων, συμπεριλαμβανομένου και του προβλήματος σύγκλισης, είναι διαθέσιμες στην εργασία Paradimitriou (2002).

Μια πιο συστηματική και υπολογιστικά πιο αποτελεσματική προσέγγιση για την απόκτηση μιας καλής διάταξης αισθητήρων για ένα σταθερό αριθμό  $N_o$  αισθητήρων είναι η χρήση ενός αλγορίθμου Διαδοχικής Τοποθέτησης Αισθητήρων (ΔΤΑ). Οι θέσεις των  $N_o$  αισθητήρων υπολογίζονται διαδοχικά τοποθετώντας έναν αισθητήρα κάθε φορά στην κατασκευή σε τέτοια θέση που να οδηγεί στην μεγαλύτερη μείωση της εντροπίας της πληροφορίας. Ο αλγόριθμος ΔΤΑ μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί και με αντίστροφη σειρά, ξεκινώντας με  $N_d$  αισθητήρες τοποθετημένους σε όλους τους βαθμούς ελευθερίας της κατασκευής και αφαιρώντας διαδοχικά έναν αισθητήρα κάθε φορά από τη θέση που οδηγεί στη μικρότερη αύξηση της εντροπίας της πληροφορίας.

Η διαδοχική τοποθέτηση του κάθε αισθητήρα στην γέφυρα απαιτεί την βελτιστοποίηση της εντροπίας σε σχέση με μια μόνο θέση αισθητήρα. Η λύση βρίσκεται εύκολα χρησιμοποιώντας μια διεξοδική αναζήτηση στο χώρο των παραμέτρων. Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο ΔΤΑ, ο συνολικός αριθμός υπολογισμού της συνάρτησης για τη βέλτιστη τοποθέτηση του  $i$  αισθητήρα δεδομένου ότι  $(i-1)$

αισθητήρες έχουν ήδη τοποθετηθεί στην κατασκευή είναι ίσος με  $(N_d - i - 1)$ , όπου  $N_d$  είναι ο συνολικός αριθμός των βαθμών ελευθερίας. Έτσι, ο συνολικός αριθμός υπολογισμού της συνάρτησης που απαιτείται για το σχεδιασμό της βέλτιστης διάταξης αισθητήρων για  $N_o$  αισθητήρες χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο ΔΤΑ είναι

$$\sum_{i=1}^{N_o} (N_d - i - 1) \leq N_o N_d$$
. Επιπλέον, ο σχεδιασμός των διατάξεων αισθητήρων από έναν ως  $N_d$  αισθητήρες απαιτεί συνολικά το πολύ  $N_d^2 / 2$  υπολογισμούς της συνάρτησης που είναι ένας εξαιρετικά μικρός αριθμός σε σχέση με τον αριθμό  $N_s$  που δίνεται στην (Z.4).

Ο αλγόριθμος διαδοχικής τοποθέτησης αισθητήρα δίνει τη βέλτιστη διάταξη αισθητήρων μόνο στην περίπτωση για την οποία οι βέλτιστες θέσεις αισθητήρων για  $i$  αισθητήρες είναι ένα υποσύνολο των βέλτιστων θέσεων αισθητήρων για  $(i+1)$  αισθητήρες για όλα τα  $i$  από το 1 ως το  $N_o$ . Ωστόσο, η τελευταία διατύπωση δεν ισχύει γενικά και η διάταξη αισθητήρων που υπολογίζεται από τον αλγόριθμο ΔΤΑ δεν εγγυάται ότι είναι η βέλτιστη. Οι διάταξη αισθητήρων που υπολογίζονται από τον αλγόριθμο ΔΤΑ αντιστοιχεί σε τιμή της εντροπίας της πληροφορίας που αποτελεί άνω όριο της ελάχιστης εντροπίας. Αριθμητικές εφαρμογές δείχνουν ότι αυτά τα όρια στις περισσότερες περιπτώσεις που εξετάστηκαν συμφωνούν, η είναι πολύ κοντά με την ακριβή τιμή της ελάχιστης εντροπίας της πληροφορίας. Επομένως, ο αλγόριθμος ΔΤΑ προτιμάται έναντι των γενετικών αλγορίθμων επειδή επιτυγχάνονται υψηλά επίπεδα ακρίβειας με μικρό υπολογιστικό κόστος. Επιπλέον, η λύση που παρέχει ο αλγόριθμος ΔΤΑ μπορεί να συμπεριληφθεί στον αρχικό πληθυσμό ενός γενετικού κώδικα ώστε να επιταχύνει τη σύγκλιση των γενετικών αλγορίθμων και να βελτιώσει την εκτίμηση της βέλτιστης διάταξης αισθητήρων.

## Z2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Reading, Addison Wesley, MA.
- [2] Michalewicz, Z. (1999). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer, New York.
- [3] Papadimitriou, C. (2002a). "Optimal Instrumentation Strategies for Structural Identification." *Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. On Computational Stochastic Mechanics*, Corfu, Greece, in press.
- [4] Papadimitriou, C. (2002b). "Applications of Genetic Algorithms in Structural Health Monitoring." *Proc. 5<sup>th</sup> World Congress on Computational Mechanics*, Vienna, Austria, <http://wccm.tuwien.ac.at>.
- [5] Papadimitriou, C., Beck, J.L. and Au, S.K. (2000). "Entropy-Based Optimal Sensor Location for Structural Model Updating." *Journal of Vibration and Control*, 6(5), 781-800.
- [6] Papadimitriou, C., Christodoulou, K., Pavlidou, M. and Karamanos, S.A. (2001). "Optimal Sensor and Actuator Configuration for Structural Identification." *Proc. of the 18th Biennial ASME Conference on Mechanical Vibration and Noise*, Pittsburgh, Pennsylvania, September 9-13, Paper No. DETC2001/VIB21399.
- [7] Papadimitriou, C., Pavlidou, M., Christodoulou, K. and Karamanos, S.A. (2002). "Optimal Sensor Optimal Sensor Configuration Methodology

- for Structural Identification." 1st European Workshop on Structural Health Monitoring, Paris, France, in press.
- [8] Metallidis, P., Verros, G., Natsiavas, S. and Papadimitriou, C. (2003). "Fault Detection and Optimal Sensor Location in Vehicle Suspensions." *Journal of Vibration and Control*, 9 in press.
- [9] Udwadia, F.E. (1994). "Methodology for Optimal Sensor Locations for Parameter Identification in Dynamic Systems." *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 120(2), 368-390.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Η

### ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ «ΙΔΕΜΟ» ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΜΟΡΦΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

#### Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ-FREE VIBRATION.....</b>	<b>2</b>
1.1	ΑΡΧΕΙΟ ΕΙΣΟΔΟΥ - INPUT FILE .....	2
1.1.1	ΒΑΣΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - BASIC INPUT DATA .....	2
1.1.2	ΕΥΡΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ - DATA RANGE FOR COMPUTATION.....	4
1.1.3	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ - GA PARAMETERS .....	4
1.1.4	ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΦΑΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ QUASI-NEWTON.....	6
1.2	ΑΡΧΕΙΟ ΕΞΟΔΟΥ - OUTPUT FILE .....	7
<b>2</b>	<b>ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΑΠΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ - AMBIENT VIBRATION ....</b>	<b>8</b>
2.1	ΑΡΧΕΙΟ ΕΙΣΟΔΟΥ - INPUT FILE .....	9
2.1.1	ΒΑΣΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ -BASIC INPUT DATA .....	9
2.1.2	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ .....	11
2.1.3	ΕΥΡΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ - DATA RANGE FOR COMPUTATION.....	12
2.1.4	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ - GA PARAMETERS .....	12
2.1.5	ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΦΑΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ QUASI-NEWTON.....	14
2.2	ΑΡΧΕΙΟ ΕΞΟΔΟΥ - OUTPUT FILE .....	15
<b>3</b>	<b>ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....</b>	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ.....</b>	<b>18</b>
4.1	ΠΡΟΤΥΠΟ ΑΡΧΕΙΟ ΕΙΣΟΔΟΥ .....	21
4.2	ΠΡΟΤΥΠΟ ΑΡΧΕΙΟ ΕΞΟΔΟΥ .....	22
<b>5</b>	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>24</b>
α.	Κώδικας για ταλάντωση από λειτουργικά φορτία - AMBIENT VIBRATION ....	24
β.	Κώδικας για ελεύθερη ταλάντωση - FREE VIBRATION .....	35
γ.	ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ.....	45

## **1. ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ-FREE VIBRATION**

Ο κώδικας βάσει του οποίου γίνεται η μορφική αναγνώριση για την περίπτωση της ελεύθερης ταλάντωσης έχει την ονομασία *FREE\_VIBR*. Ο χρήστης δεν επεμβαίνει στις υπορουτίνες του κώδικα παρά μόνο στην υπορουτίνα των δεδομένων εισόδου που ονομάζεται *FrVibr\_data\_file*. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται στο αρχείο εξόδου σε ευανάγνωστη μορφή με ονομασία επιλεγμένη από το χρήστη, και αποθηκεύονται επίσης σε αρχείο του Matlab (.mat) ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω χρήση τους.

### **1.1 ΑΡΧΕΙΟ ΕΙΣΟΔΟΥ - INPUT FILE**

Το αρχείο εισόδου είναι το μόνο στο οποίο επεμβαίνει ο χρήστης, δίνοντας τα μετρητικά δεδομένα και κάποιες βασικές, απαραίτητες πληροφορίες για τη διαδικασία αναγνώρισης των ιδιομορφών της κατασκευής.

#### **1.1.1 ΒΑΣΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ - BASIC INPUT DATA**

**MeasDataFile** = το όνομα του αρχείου, όπου αποθηκεύονται τα μετρούμενα δεδομένα, δηλαδή οι χρονικές ιστορίες των επιταχύνσεων και το χρονικό διάστημα λήψης δείγματος. Το αρχείο αυτό έχει κατάληξη **.mat** και πρέπει να περιλαμβάνει τη μεταβλητή **dt**, δηλαδή ένα βαθμωτό μέγεθος που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα λήψης δείγματος και τη μεταβλητή **Accel**, δηλαδή ένα πίνακα με στήλες τις χρονικές ιστορίες των επιταχύνσεων και σειρές τις τιμές επιτάχυνσης σε κάθε **dt**. Για να καλέσουμε το αρχείο αυτό των μετρήσεων είναι δυνατό να δηλωθεί και το path (directory) όπου βρίσκεται, και από όπου θα το διαβάσει ο κώδικας (π.χ., 'C:\maria\_p\_122\FREE\_VIBR\Freevibr119.mat').

Η μετατροπή των διαθέσιμων μετρήσεων σε αρχείο με κατάληξη **.mat**, αναγνώσιμο από Matlab, απαιτεί μία απλή προεργασία που περιγράφεται αμέσως παρακάτω:

Τα δεδομένα των μετρήσεων μεταφέρονται απλά σε περιβάλλον Matlab μέσα από την επιλογή **Import data** που υπάρχει στην έκδοση 6 (και άνω) του κώδικα, αρκεί να βρίσκονται σε επιτρεπτή μορφή αρχείου, όπως **.txt** αρχεία. Κατόπιν, στο χρονικό διάστημα λήψης δείγματος δίνεται το όνομα **dt** και οι χρονικές ιστορίες των επιταχύνσεων τοποθετούνται σε ένα μητρώο με όνομα **Accel**. Συνήθως, οι μετρήσεις από διαφορετικά σημεία μιας κατασκευής τοποθετούνται σε διαφορετικά **.txt** αρχεία. Η διαδικασία είναι η ίδια ακόμη κι αν οι μετρήσεις είναι όλες μαζί στο ίδιο αρχείο, αρκεί ο χρήστης να γνωρίζει ποιες στήλες του αρχείου αντιστοιχούν σε δεδομένα επιταχύνσεων συγκεκριμένων θέσεων. Έτσι, εάν, π.χ., έχουμε διαθέσιμες μετρήσεις από δύο θέσεις (κανάλια), δημιουργούμε τη μεταβλητή **Accel** ως εξής: στο Command Window του Matlab δηλώνουμε **Accel(:,1)=data(:,1)** και **Accel(:,2)=data(:,2)**, εφόσον στη μεταβλητή **data** περιλαμβάνονται σε στήλες οι μετρήσεις στο ίδιο **.txt** αρχείο. Τέλος, οι 2 πλέον μεταβλητές αποθηκεύονται με την εντολή **save** σε ένα αρχείο με κατάληξη **.mat**, π.χ. 'Freevibr119.mat'.

*Προσοχή:* αν τα δεδομένα των επιταχύνσεων δεν έχουν το ίδιο μέγεθος δεν μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα μητρώο. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να υπάρχουν περισσότερες των μία μεταβλητές **Accel** που θα αντιστοιχούν σε μετρήσεις με το ίδιο μέγεθος. Οι μεταβλητές πρέπει να αποθηκεύονται σε διαφορετικά **.mat** αρχεία και λαμβάνονται υπόψη ξεχωριστά κατά τη διαδικασία αναγνώρισης. Συνήθως πάντως τα δεδομένα των επιταχύνσεων για ένα γεγονός μέτρησης έχουν το ίδιο μέγεθος, αφού οι μετρήσεις γίνονται κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

**PathName** = ο κατάλογος στον οποίο βρίσκεται ο φάκελος όπου θα γράφονται τα αποτελέσματα της αναγνώρισης (π.χ. 'C:\maria\_p\_122\FREE\_VIBR\Output\')

**OutputName** = το όνομα του αρχείου των αποτελεσμάτων, π.χ. 'kavala1'

**ActiveMeasData** = διάνυσμα γραμμή με στήλες τους αριθμούς των στηλών του μητρώου **Accel** που αντιστοιχούν στις χρονικές ιστορίες επιταχύνσεων που λαμβάνονται υπόψη στην αναγνώριση. Π. χ. [2 3 5 6], σημαίνει ότι από το μητρώο των επιταχύνσεων επιλέγονται η 2<sup>η</sup>, 3<sup>η</sup>, 5<sup>η</sup> και 6<sup>η</sup> στήλη, που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα σημεία μέτρησης στην κατασκευή.

**EventName** = το όνομα του γεγονότος μετρήσεων που χρησιμοποιείται για την αναγνώριση, π.χ., ['AM027']. Η μεταβλητή αυτή έχει βοηθητικό χαρακτήρα, ώστε στα figures με τα αποτελέσματα να υπάρχει η ονομασία του τρέχοντος γεγονότος μετρήσεων.

**AMDLabels** = τα ονόματα των μετρήσεων που επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση, π.χ., ['CRVB(Ch1)';'CRTB(Ch2)';'CRLB(Ch3)';'ARLB(Ch5)'];. Κάθε όνομα αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη στήλη από το μητρώο επιταχύνσεων που έχει δηλωθεί στη μεταβλητή **ActiveMeasData**. Τα ονόματα αυτά τα γνωρίζει εκ των προτέρων ο χρήστης. Η μεταβλητή αυτή έχει βοηθητικό χαρακτήρα, ώστε στα αποτελέσματα να υπάρχει η ονομασία της κάθε μέτρησης που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί.

*Προσοχή:* το σύνολο των γραμμάτων των ονομάτων πρέπει να είναι το ίδιο! Σε περίπτωση που διαφέρει για κάποια μέτρηση, συμπληρώνουμε με τα απαραίτητα κενά ώστε το σύνολο των γραμμάτων κάθε ονόματος να ισούται με αυτό του μεγαλύτερου ονόματος, π.χ., ['CRVB(Ch10)';'CRTB(Ch2) '];

**Dt = dt**, βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει το χρονικό διάστημα λήψης δείγματος σε sec, που καθορίζει τη διακριτοποίηση των χρονικών ιστοριών των επιταχύνσεων.

**Tmin** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει τον αρχικό χρόνο των χρονικών ιστοριών των επιταχύνσεων σε sec.



**Imode** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει τον αριθμό της ιδιομορφής από την οποία θα ξεκινήσει η διαδικασία μορφικής αναγνώρισης (ακέραιος θετικός αριθμός). Προεπιλεγμένη τιμή το 0, για την περίπτωση όπου δεν υπάρχουν δεδομένα αναγνώρισης για προηγούμενες ιδιομορφές. Η τιμή μπορεί να είναι διαφορετική του μηδενός, αρκεί να δοθεί το όνομα ενός αρχείου στο οποίο θα υπάρχουν αποθηκευμένα τα αποτελέσματα της αναγνώρισης των ιδιομορφών που επιθυμεί να λάβει υπόψη του ο χρήστης. Έτσι, αν ο αριθμός αυτός είναι π.χ. 2, τότε η αναγνώριση θα γίνει για τις ιδιομορφές από την 3<sup>η</sup> και έπειτα, έχοντας δώσει στον κώδικα αρχείο με παλιότερα αποτελέσματα από τις προηγούμενες δύο ιδιομορφές.

*Προσοχή:* Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται παραπάνω ιδιομορφές, πρέπει να συμφωνεί το διάστημα υπολογισμού με αυτό που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των προηγούμενων ιδιομορφών που καλούνται να χρησιμοποιηθούν.

**NumMode** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει το συνολικό αριθμό των ιδιομορφών που ορίζονται για αναγνώριση (ακέραιος θετικός αριθμός). Παρατηρείται εδώ ότι ο αριθμός των τελικώς αναγνωρισμένων ιδιομορφών είναι ίσος ή μικρότερος από αυτό τον αριθμό που δίνεται στην αρχή. Αυτό συμβαίνει γιατί στα αποτελέσματα της αναγνώρισης μπορεί να προκύψουν και “μορφές” που δεν αποτελούν ιδιομορφές του συστήματος. Αυτές μπορούν να διαχωριστούν από το χρήστη πρακτικά λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή απόσβεσης, ο οποίος πρέπει να αντιστοιχεί στην κατασκευή υπό εξέταση, και στη μείωση της συνάρτησης σφάλματος, η οποία αν δεν είναι σημαντική αποτελεί απόδειξη ότι δεν πρόκειται για ιδιομορφή του συστήματος. Περισσότερες λεπτομέρειες βρίσκονται στις οδηγίες για το αρχείο εξόδου παρακάτω.

### **1.1.2 ΕΥΡΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ - DATA RANGE FOR COMPUTATION**

**Lowert** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει την αρχή του διαστήματος της/των χρονικής/ών ιστορίας/ιών επιτάχυνσης/εων σε sec που λαμβάνεται υπόψη στη διαδικασία βελτιστοποίησης.

**Highert** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει το τέλος του διαστήματος της/των χρονικής/ών ιστορίας/ιών επιτάχυνσης/εων σε sec που λαμβάνεται υπόψη στη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που το χρονικό αυτό διάστημα είναι μεγάλο σε σχέση με το συνολικό, τότε επιδιώκεται η αναγνώριση πολλών ιδιομορφών του συστήματος. Αν είναι μικρό περιορίζεται η αναγνώριση στις υψηλές ή στις χαμηλές ιδιομορφές.

### **1.1.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ - GA PARAMETERS**

**RangeOmega** = πίνακας με γραμμές ίσες με το συνολικό αριθμό των ιδιομορφών που επιδιώκεται να αναγνωρισθεί (βλέπε **NumMode**), και στήλες που δηλώνουν το εύρος των συχνοτήτων που θα λάβει υπόψη του ο Γενετικός Αλγόριθμος για τη βελτιστοποίηση. Στην 1<sup>η</sup> στήλη, δηλώνεται το κάτω όριο του εύρους σε Hz και στη 2<sup>η</sup> δηλώνεται το άνω όριο του εύρους αντίστοιχα. Για την εκτίμηση του εύρους των

συχνοτήτων, απαραίτητο είναι ο χρήστης να δει τους μετασχηματισμούς Fourier των χρονικών ιστοριών των μετρούμενων επιταχύνσεων, ώστε να εκτιμήσει ποιες περιοχές συχνοτήτων διεγείρονται και ανάλογα να αναζητήσει σε αυτές τις ιδιομορφές της κατασκευής. Έτσι, καθώς εκτελείται ο κώδικας εμφανίζεται στην οθόνη η ερώτηση:

'>>>>> Plot Time Histories & FFT plots? [yes=1]/[no=0]=>>'

Με απάντηση π.χ. '1', εμφανίζονται στην οθόνη οι χρονικές ιστορίες και οι μετασχηματισμοί Fourier των επιταχύνσεων που έχουν επιλεγεί να χρησιμοποιηθούν.

Κατόπιν, εμφανίζεται η ερώτηση:

'>>>>> Continue execution of the program? [yes=1]/[no=0]=>>'

η οποία δίνει την ευκαιρία στο χρήστη να σταματήσει την εκτέλεση του κώδικα και να προσδιορίσει τα εύρη των συχνοτήτων που επιθυμεί να αναγνωρίσει.

**RangeDamping** = διάνυσμα σειράς με 1<sup>η</sup> στήλη να δηλώνει το κάτω όριο του εύρους για το συντελεστή απόσβεσης και τη 2<sup>η</sup> στήλη το άνω όριο του εύρους.

Προεπιλεγμένη τιμή: [0.01 1]

**Rangee** = διάνυσμα σειράς με 1<sup>η</sup> στήλη να δηλώνει το κάτω όριο του εύρους για την παράμετρο  $e$  και τη 2<sup>η</sup> στήλη το άνω όριο του εύρους.

Προεπιλεγμένη τιμή: [-5 5]

**DiscOmega** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει τη διακριτοποίηση του χώρου του πληθυσμού των ιδιοσυχνοτήτων (ακέραιος θετικός αριθμός). Η διακριτοποίηση πρέπει να είναι τέτοια ώστε να πετυχαίνεται η επιθυμητή ακρίβεια της αναγνώρισης των ιδιοσυχνοτήτων (προεπιλεγμένη τιμή: 8).

**DiscDamping** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει τη διακριτοποίηση του χώρου του πληθυσμού των συντελεστών απόσβεσης (ακέραιος θετικός αριθμός). Η διακριτοποίηση πρέπει να είναι τέτοια ώστε να πετυχαίνεται η επιθυμητή ακρίβεια της αναγνώρισης των συντελεστών απόσβεσης (προεπιλεγμένη τιμή: 8).

**Disce** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει τη διακριτοποίηση του χώρου του πληθυσμού των παραμέτρων  $e$  (ακέραιος θετικός αριθμός). Η διακριτοποίηση πρέπει να είναι τέτοια ώστε να πετυχαίνεται η επιθυμητή ακρίβεια της αναγνώρισης των παραμέτρων  $e$  (προεπιλεγμένη τιμή: 10).

**Maxgenerations** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει το μέγιστο αριθμό των γενεών που παράγει ο Γενετικός Αλγόριθμος. Μεγάλος αριθμός γενεών δίνει τη δυνατότητα

στον Γενετικό Αλγόριθμο να πλησιάσει περισσότερο στην περιοχή του βέλτιστου, εις βάρος όμως του υπολογιστικού χρόνου (προεπιλεγμένη τιμή: 200).

**PopulationSize** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει το μέγεθος του πληθυσμού για κάθε παράμετρο, δηλαδή τον αριθμό των δειγμάτων που λαμβάνει ο Γενετικός Αλγόριθμος από το χώρο που αντιστοιχεί σε κάθε παράμετρο. Μεγάλος μέγεθος πληθυσμού δίνει τη δυνατότητα στον Γενετικό Αλγόριθμο παίρνει περισσότερα δείγματα στο χώρο ορισμού των παραμέτρων, εις βάρος όμως του υπολογιστικού χρόνου (προεπιλεγμένη τιμή: 50).

**CrossoverProbability** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει την πιθανότητα που αφορά στην ανταλλαγή “γονιδίων” μεταξύ “χρωμοσωμάτων” (προεπιλεγμένη τιμή: 0.9).

**MutationProbability** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει την πιθανότητα που αφορά στη μετάλλαξη των “γονιδίων” (προεπιλεγμένη τιμή: 0.1).

#### 1.1.4 ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΦΑΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ QUASI-NEWTON

**FminuncOptions** = (δες Matlab για περισσότερες λεπτομέρειες – εντολή *optimset*)

**GradObj** - 'on' | {'off'}- όταν είναι ενεργοποιημένο σημαίνει ότι ο χρήστης έχει συμπεριλάβει την αναλυτική μορφή των παραγώγων της αντικειμενικής συνάρτησης.

Προεπιλεγμένη τιμή: 'off'.

**Display** -'off' | 'iter' | 'final' | 'notify' - 'off' δε δείχνει output; 'iter' δείχνει το output σε κάθε επανάληψη; 'final' δείχνει το τελικό output; 'notify' δείχνει το output μόνο σε περίπτωση μη σύγκλισης.

Προεπιλεγμένη τιμή: 'iter'.

**DerivativeCheck** -'on' | {'off'}- όταν δίνονται οι παράγωγοι αναλυτικά και είναι ενεργοποιημένη αυτή η εντολή, τότε γίνεται σύγκριση μεταξύ των τιμών των παραγώγων που υπολογίζονται αναλυτικά και αριθμητικά

Προεπιλεγμένη τιμή: 'off'.

**MaxFunEvals** - θετικός, ακέραιος αριθμός που δηλώνει πόσοι υπολογισμοί της συνάρτησης σφάλματος επιτρέπονται.

Προεπιλεγμένη τιμή: 3000.

**LargeScale** - {'on'} | 'off' – όταν είναι ενεργοποιημένη κάνει χρήση αλγορίθμου μεγάλης κλίμακας.

Προεπιλεγμένη τιμή: 'off'.

**ToIFun** – θετικός ακέραιος αριθμός που δηλώνει το κριτήριο σύγκλισης της συνάρτησης σφάλματος.

Προεπιλεγμένη τιμή: 1.e-7.

**ToIX** – θετικός ακέραιος αριθμός που δηλώνει το κριτήριο σύγκλισης των παραμέτρων.

Προεπιλεγμένη τιμή: 1.e-7.

**MaxIter** - θετικός, ακέραιος αριθμός που δηλώνει το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων που επιτρέπονται.

Προεπιλεγμένη τιμή: 200.

**Diagnostics** - 'on' | {'off'}- όταν είναι ενεργοποιημένη τυπώνει διαγνωστικές πληροφορίες σε σχέση με τη συνάρτηση που ελαχιστοποιείται.

Προεπιλεγμένη τιμή: 'on'

**SweepAccur** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει την ακρίβεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Προεπιλεγμένη τιμή: 1.e-03.

**MaxNumSweeps** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει το μέγιστο αριθμό των σαρώσεων βελτιστοποίησης.

Προεπιλεγμένη τιμή: 15.

## **1.2 ΑΡΧΕΙΟ ΕΞΟΔΟΥ - OUTPUT FILE**

Το αρχείο αυτό προκύπτει μετά την ολοκλήρωση της εκτέλεσης της διαδικασίας μορφικής αναγνώρισης και περιέχει συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα αυτής σε ευανάγνωστη μορφή. Στο αρχείο αυτό δεν επεμβαίνει ο χρήστης, παρά μόνο παρακολουθεί την κατάληξη της διαδικασίας αναγνώρισης.

Έτσι, αρχικά τυπώνονται οι βασικές παράμετρος εισόδου (**Input Parameters**), όπως το αρχείο από το οποίο ελήφθησαν οι μετρήσεις (**Loaded File Name with Measurements**), ο αριθμός των ιδιομορφών που επιλέχθηκε να αναγνωριστούν πειραματικά (**Number of Modes to be Experimentally Identified**) και ο αριθμός των μετρούμενων χρονικών ιστοριών των αποκρίσεων (**Number of Measured Output Time Histories**).

Κατόπιν, εμφανίζονται οι παράμετροι βάσει των οποίων έχει γίνει βελτιστοποίηση με Γενετικούς Αλγόριθμους (**Genetic Algorithm Parameters**), δηλαδή ο μέγιστος αριθμός παραγόμενων γενεών (**Max generations**), το μέγεθος του πληθυσμού για κάθε παράμετρο (**PopulationSize**), η διακριτοποίηση του χώρου για τις συχνότητες, τους συντελεστές απόσβεσης, ο συντελεστής  $e$  (**DiscOmega, DiscDamping, Disce**),

και οι πιθανότητες για ανταλλαγή γονιδίων και μετάλλαξη (**CrossoverProbability, MutationProbability**).

Στη συνέχεια, τυπώνονται οι αρχικές προβλέψεις (**Initial Guesses**), δηλαδή τα εύρη των παραμέτρων (**Range of Frequencies, Range of Damping ratios, Range of e**) για τις ιδιομορφές που αναγνωρίζονται (**Modes**) και ακολουθούνται από τα ενδιάμεσα αποτελέσματα της αναγνώρισης (**Intermediate Results**). Δηλαδή μετά τη πρώτη σάρωση των ιδιομορφών με Γενετικό Αλγόριθμο και αλγόριθμο Quasi-Newton δίνονται τα αποτελέσματα για τις ιδιοσυχνότητες (**frequencies**), συντελεστές απόσβεσης (**Damping ratios**) και συνιστώσες ιδιομορφών (**Modeshape Components**) που θα αποτελέσουν τις αρχικές εκτιμήσεις για τη δεύτερη σάρωση. Οι συνιστώσες ιδιομορφών δίνονται με τη μορφή πίνακα με σειρές τους μετρούμενους βαθμούς ελευθερίας (**Measured DOF**- θέσεις μετρούμενης απόκρισης) και στήλες το νούμερο της ιδιομορφής (**Mode #**). Δίνεται πρόσθετα, η συνάρτηση σφάλματος (**Error**) της οποίας η μείωση από ιδιομορφή σε ιδιομορφή αποτελεί σημαντικό κριτήριο για την αποδοχή μιας αναγνωρισμένης λύσης ως ιδιομορφή του συστήματος. Αναφέρονται επίσης ο αριθμός των υπολογισμών για την αντικειμενική συνάρτηση (**Function Evaluations**) καθώς και ο αριθμός των επαναλήψεων (**Iterations**) για κάθε ιδιομορφή. Επίσης, δίνεται ο χρόνος σε min μέσα στον οποίο εκτελείται αυτό το τμήμα του κώδικα (**Elapsed Time**).

Τέλος, τυπώνονται τα τελικά αποτελέσματα της μορφικής αναγνώρισης (**Final Results**). Δίνονται ο αρχικός χρόνος του διαστήματος των χρονικών ιστοριών των επιταχύνσεων που χρησιμοποιήθηκε στην αναγνώριση σε sec (**Initial Time**), ο τελικός χρόνος του ίδιου διαστήματος (**Final Time**), καθώς και η διάρκεια του σε sec (**Time Duration**). Επίσης, τυπώνεται το χρονικό διάστημα λήψης δείγματος σε sec (**Dt = Sampling Time**). Τα τελικά αποτελέσματα για τις παραμέτρους δίνονται σε παρόμοια μορφή με τα ενδιάμεσα αποτελέσματα με πρόσθετη πληροφορία τον αριθμό των σαρώσεων που απαιτήθηκαν για την αναγνώριση των ιδιομορφών (**Sweep**). Επίσης, δίνεται ο χρόνος σε min μέσα στον οποίο ολοκληρώνεται η διαδικασία μορφικής αναγνώρισης (**Elapsed Time**).

## **2. ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΑΠΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ - AMBIENT VIBRATION**

Ο κώδικας βάσει του οποίου γίνεται η μορφική αναγνώριση για την περίπτωση της ελεύθερης ταλάντωσης έχει την ονομασία *AMBIENT\_VIBR*. Ο χρήστης δεν επεμβαίνει στις υπορουτίνες του κώδικα παρά μόνο στην υπορουτίνα των δεδομένων εισόδου που ονομάζεται *AmbientVibr\_data\_file*. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται στο αρχείο εξόδου σε ευανάγνωστη μορφή με ονομασία επιλεγμένη από το χρήστη, και αποθηκεύονται επίσης σε αρχείο του Matlab (.mat) ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω χρήση τους.

## **2.1 ΑΡΧΕΙΟ ΕΙΣΟΔΟΥ - INPUT FILE**

### **2.1.1 ΒΑΣΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ -BASIC INPUT DATA**

**MeasDataFile** = το όνομα του αρχείου που αποθηκεύονται τα μετρούμενα δεδομένα, δηλαδή οι χρονικές ιστορίες των επιταχύνσεων και το χρονικό διάστημα λήψης δείγματος. Το αρχείο αυτό έχει κατάληξη **.mat** και πρέπει να περιλαμβάνει τη μεταβλητή **dt**, δηλαδή ένα βαθμωτό μέγεθος που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα λήψης δείγματος και τη μεταβλητή **Accel**, δηλαδή ένα πίνακα με στήλες τις χρονικές ιστορίες των επιταχύνσεων και σειρές τις τιμές επιτάχυνσης σε κάθε **dt**. Για να καλέσουμε το αρχείο αυτό των μετρήσεων είναι δυνατό να δηλωθεί και το path (directory) όπου βρίσκεται, και από όπου θα το διαβάσει ο κώδικας. Π.χ., *'C:\maria\_p\_122\FREE\_VIBR\Freevibr119.mat'*

Η μετατροπή των διαθέσιμων μετρήσεων σε αρχείο με κατάληξη **.mat**, αναγνώσιμο από Matlab, απαιτεί μία απλή προεργασία που περιγράφεται αμέσως παρακάτω:

Τα δεδομένα των μετρήσεων μεταφέρονται απλά σε περιβάλλον Matlab μέσα από την επιλογή **Import data** που υπάρχει στην έκδοση 6 (και άνω) του κώδικα, αρκεί να βρίσκονται σε επιτρεπτή μορφή αρχείου, όπως **.txt** αρχεία. Κατόπιν, στο χρονικό διάστημα λήψης δείγματος δίνεται το όνομα **dt** και οι χρονικές ιστορίες των επιταχύνσεων τοποθετούνται σε ένα μητρώο με όνομα **Accel**. Συνήθως, οι μετρήσεις από διαφορετικά σημεία μιας κατασκευής τοποθετούνται σε διαφορετικά **.txt** αρχεία. Η διαδικασία είναι η ίδια ακόμη κι αν οι μετρήσεις είναι όλες στο ίδιο αρχείο, αρκεί ο χρήστης να γνωρίζει ποιες στήλες του αρχείου αντιστοιχούν σε δεδομένα επιταχύνσεων συγκεκριμένων θέσεων. Έτσι, εάν, π.χ., έχουμε διαθέσιμες μετρήσεις από δύο θέσεις (κανάλια), δημιουργούμε τη μεταβλητή **Accel** ως εξής: στο Command Window του Matlab δηλώνουμε **Accel(:,1)=data(:,1)** και **Accel(:,2)=data(:,2)**, εφόσον στη μεταβλητή **data** περιλαμβάνονται σε στήλες οι μετρήσεις στο ίδιο **.txt** αρχείο. Τέλος, οι 2 πλέον μεταβλητές σώνονται με την εντολή **save** σε ένα αρχείο με κατάληξη **.mat**, π.χ. *'Freevibr119.mat'*.

*Προσοχή:* αν τα δεδομένα των επιταχύνσεων δεν έχουν το ίδιο μέγεθος δε μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα μόνο μητρώο. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να υπάρχουν περισσότερες των μία μεταβλητές **Accel** που θα αντιστοιχούν σε μετρήσεις με το ίδιο μέγεθος. Οι μεταβλητές πρέπει να αποθηκεύονται σε διαφορετικά **.mat** αρχεία και λαμβάνονται υπόψη ξεχωριστά κατά τη διαδικασία αναγνώρισης. Συνήθως πάντως τα δεδομένα των επιταχύνσεων για ένα γεγονός μέτρησης έχουν το ίδιο μέγεθος, αφού οι μετρήσεις γίνονται κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

**PathName** = ο κατάλογος στον οποίο βρίσκεται ο φάκελος όπου θα γράφονται τα αποτελέσματα της αναγνώρισης, π.χ.

*'C:\maria\_p\_122\AMBIENT\_VIBR\Output'*

**OutputName** = το όνομα που θα έχει το αρχείο των αποτελεσμάτων, π.χ. 'Benchmark1'

**ActiveMeasData** = διάνυσμα γραμμή με στήλες τους αριθμούς των στηλών του μητρώου **Accel** που αντιστοιχούν στις χρονικές ιστορίες επιταχύνσεων που λαμβάνονται υπόψη στην αναγνώριση. Π. χ. [2 3 5 6], σημαίνει ότι από το μητρώο των επιταχύνσεων επιλέγονται η 2<sup>η</sup>, 3<sup>η</sup>, 5<sup>η</sup> και 6<sup>η</sup> στήλη, που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα σημεία μέτρησης στην κατασκευή.

**EventName** = το όνομα του γεγονότος μετρήσεων που χρησιμοποιείται για την αναγνώριση, π.χ., [AM027]. Η μεταβλητή αυτή έχει βοηθητικό χαρακτήρα, ώστε στα figures με τα αποτελέσματα να υπάρχει η ονομασία του τρέχοντος γεγονότος μετρήσεων.

**AMDLabels** = τα ονόματα των μετρήσεων που επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση, π.χ., [CRVB(Ch1);CRTB(Ch2);CRLB(Ch3);ARLB(Ch5);]. Κάθε όνομα αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη στήλη από το μητρώο επιταχύνσεων που έχει δηλωθεί στη μεταβλητή **ActiveMeasData**. Τα ονόματα αυτά τα γνωρίζει εκ των προτέρων ο χρήστης. Η μεταβλητή αυτή έχει βοηθητικό χαρακτήρα, ώστε στα αποτελέσματα να υπάρχει η ονομασία της κάθε μέτρησης που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί.

*Προσοχή:* το σύνολο των γραμμάτων των ονομάτων πρέπει να είναι το ίδιο! Σε περίπτωση που διαφέρει για κάποια μέτρηση, συμπληρώνουμε με τα απαραίτητα κενά ώστε το σύνολο των γραμμάτων κάθε ονόματος να ισούται με αυτό του μεγαλύτερου ονόματος, π.χ., [CRVB(Ch10);CRTB(Ch2) '];

**Dt = dt**, βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει το χρονικό διάστημα λήψης δείγματος σε sec, που καθορίζει τη διακριτοποίηση των χρονικών ιστοριών των επιταχύνσεων.

**Tmin** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει τον αρχικό χρόνο των χρονικών ιστοριών των επιταχύνσεων σε sec.

**Imode** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει τον αριθμό της ιδιομορφής από την οποία θα ξεκινήσει η διαδικασία μορφικής αναγνώρισης (ακέραιος θετικός αριθμός). Προεπιλεγμένη τιμή το 0, για την περίπτωση όπου δεν υπάρχουν δεδομένα αναγνώρισης για προηγούμενες ιδιομορφές. Η τιμή μπορεί να είναι διαφορετική του μηδενός, αρκεί να δοθεί το όνομα ενός αρχείου στο οποίο θα υπάρχουν αποθηκευμένα τα αποτελέσματα της αναγνώρισης των ιδιομορφών που επιθυμεί να λάβει υπόψη του ο χρήστης. Έτσι, αν ο αριθμός αυτός είναι π.χ. 2, τότε η αναγνώριση θα γίνει για τις ιδιομορφές από την 3<sup>η</sup> και έπειτα, έχοντας δώσει στον κώδικα αρχείο με παλιότερα αποτελέσματα από τις προηγούμενες δύο ιδιομορφές.

**Προσοχή:** Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται παραπάνω ιδιομορφές, πρέπει να συμφωνεί το διάστημα υπολογισμού με αυτό που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των προηγούμενων ιδιομορφών που καλούνται να χρησιμοποιηθούν.

**NumMode** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει το συνολικό αριθμό των ιδιομορφών που ορίζονται για αναγνώριση (ακέραιος θετικός αριθμός). Παρατηρείται εδώ ότι ο αριθμός των τελικώς αναγνωρισμένων ιδιομορφών είναι ίσος ή μικρότερος από αυτό τον αριθμό που δίνεται στην αρχή. Αυτό συμβαίνει γιατί στα αποτελέσματα της αναγνώρισης μπορεί να προκύψουν και “μορφές” που δεν αποτελούν ιδιομορφές του συστήματος. Αυτές μπορούν να διαχωριστούν από το χρήστη πρακτικά λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή απόσβεσης, ο οποίος πρέπει να αντιστοιχεί στην κατασκευή υπό εξέταση, και στη μείωση της συνάρτησης σφάλματος, η οποία αν δεν είναι σημαντική αποτελεί απόδειξη ότι δεν πρόκειται για ιδιομορφή του συστήματος. Περισσότερες λεπτομέρειες βρίσκονται στις οδηγίες για το αρχείο εξόδου παρακάτω.

### **2.1.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΤΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ**

**OmegaMin** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει τη χαμηλότερη συχνότητα που διεγείρεται στο σύστημα σε Hz. Αποτελεί συνήθως μία εμπειρική τιμή και εξαρτάται άμεσα από την κατασκευή που εξετάζεται, π.χ. για γέφυρες κυμαίνεται γύρω στο 1 Hz. Η ενδεικτική αυτή τιμή αλλάζει πιθανόν, εφόσον απεικονιστούν οι μετασχηματισμοί Fourier των χρονικών ιστοριών των επιταχύνσεων και παρατηρηθεί από το χρήστη η θέση της κορυφής της χαμηλότερης ιδιοσυχνότητας του συστήματος.

**NumberOfPeriods** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει τον αριθμό των περιόδων που θα περιλαμβάνουν τα τμήματα στα οποία θα χωριστούν οι χρονικές ιστορίες των επιταχύνσεων για να προκύψουν οι συναρτήσεις φασματικής πυκνότητας. Προεπιλεγμένη τιμή οι 5 περίοδοι.

**window** = καθορίζει τη συνάρτηση φίλτρου (παράθυρο) και τον αριθμό των δειγμάτων που λαμβάνονται από την υπορουτίνα *csd* για διαίρεση του διανύσματος της επιτάχυνσης (λεπτομέρειες αναφέρονται στο *help csd* στο Matlab). Το προεπιλεγμένο φίλτρο είναι Hann window και η προεπιλογή αυτή δηλώνεται με κενό μητρώο [].

**numoverlap** = δηλώνει τον αριθμό των επικαλυπτόμενων δειγμάτων ανάμεσα στα κομμάτια. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι [0].



### 2.1.3 ΕΥΡΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ - DATA RANGE FOR COMPUTATION

**Lowerf** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει την αρχή του διαστήματος του/των μετασχηματισμού/ών Fourier της/των χρονικής/ών ιστορίας/ιών επιτάχυνσης/εων σε Hz που λαμβάνεται υπόψη στη διαδικασία βελτιστοποίησης.

**Higherf** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει το τέλος του διαστήματος του/των μετασχηματισμού/ών Fourier της/των χρονικής/ών ιστορίας/ιών επιτάχυνσης/εων σε sec που λαμβάνεται υπόψη στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Σημειώνεται ότι συνήθως επικεντρώνεται η προσοχή σε μικρές περιοχές συχνοτήτων, ώστε οι παράμετροι για βελτιστοποίηση να είναι περιορισμένες και ο υπολογιστικός χρόνος ολοκλήρωσης της διαδικασίας αναγνώρισης να μην είναι απαγορευτικός. Έτσι, στην πληθώρα των περιπτώσεων οι ιδιομορφές αναγνωρίζονται ανά δύο, λαμβάνοντας υπόψη τις μετρούμενες επιταχύνσεις των οποίων οι μετασχηματισμοί Fourier φανερώνουν ότι διεγείρονται οι συγκεκριμένες ιδιομορφές.

### 2.1.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ - GA PARAMETERS

**RangeOmega** = πίνακας με γραμμές ίσες με το συνολικό αριθμό των ιδιομορφών που επιδιώκεται να αναγνωρισθεί (δες **NumMode**), και στήλες που δηλώνουν το εύρος των συχνοτήτων που θα λάβει υπόψη του ο Γενετικός Αλγόριθμος για τη βελτιστοποίηση. Στην 1<sup>η</sup> στήλη, δηλώνεται το κάτω όριο του εύρους σε Hz και στη 2<sup>η</sup> δηλώνεται το άνω όριο του εύρους αντίστοιχα.

Σημειώνεται ότι για την εκτίμηση του εύρους των ιδιοσυχνοτήτων απαραίτητο είναι ο χρήστης με βάση τις συναρτήσεις φασματικής πυκνότητας μεταξύ των χρονικών ιστοριών των μετρούμενων επιταχύνσεων να εκτιμήσει ποιες περιοχές συχνοτήτων διεγείρονται και ανάλογα να αναζητήσει σε αυτές τις ιδιομορφές της κατασκευής. Έτσι, καθώς εκτελείται ο κώδικας εμφανίζεται στην οθόνη αρχικά η ερώτηση:

```
'>>>>> Plot Time Histories? [yes=1]/[no=0]=>>'
```

Με απάντηση π.χ. '1', βγαίνουν στην οθόνη οι χρονικές ιστορίες των επιταχύνσεων που έχουν επιλεγεί να χρησιμοποιηθούν. Κατόπιν, εμφανίζεται η ερώτηση:

```
'>>>>> Plot Cross Spectral Densities? [yes=1]/[no=0]=>>'
```

Με απάντηση π.χ. '1', βγαίνουν στην οθόνη οι συναρτήσεις φασματικής πυκνότητας των επιταχύνσεων που έχουν επιλεγεί να χρησιμοποιηθούν. Εμφανίζεται στη συνέχεια η ερώτηση:

'>>>>> Continue execution of the program? [yes=1]/[no=0]=>>',

η οποία δίνει την ευκαιρία στο χρήστη να σταματήσει την εκτέλεση του κώδικα και να προσδιορίσει τα εύρη των συχνοτήτων που επιθυμεί να αναγνωρίσει.

**RangeDamping** = διάνυσμα σειράς με 1<sup>η</sup> στήλη να δηλώνει το κάτω όριο του εύρους για το συντελεστή απόσβεσης και τη 2<sup>η</sup> στήλη το άνω όριο του εύρους.

Προεπιλεγμένη τιμή: [0.01 1]

**Rangephi** = διάνυσμα σειράς με 1<sup>η</sup> στήλη να δηλώνει το κάτω όριο του εύρους για τις συνιστώσες ιδιομορφής phi και τη 2<sup>η</sup> στήλη το άνω όριο του εύρους.

Προεπιλεγμένη τιμή: [-5 5]

**DiscOmega** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει τη διακριτοποίηση του χώρου του πληθυσμού των ιδιοσυχνοτήτων (ακέραιος θετικός αριθμός). Η διακριτοποίηση πρέπει να είναι τέτοια ώστε να πετυχαίνεται η επιθυμητή ακρίβεια της αναγνώρισης των ιδιοσυχνοτήτων.

Προεπιλεγμένη τιμή: 8.

**DiscDamping** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει τη διακριτοποίηση του χώρου του πληθυσμού των συντελεστών απόσβεσης (ακέραιος θετικός αριθμός). Η διακριτοποίηση πρέπει να είναι τέτοια ώστε να πετυχαίνεται η επιθυμητή ακρίβεια της αναγνώρισης των συντελεστών απόσβεσης.

Προεπιλεγμένη τιμή: 8.

**Discphi** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει τη διακριτοποίηση του χώρου του πληθυσμού συνιστωσών ιδιομορφής phi (ακέραιος θετικός αριθμός). Η διακριτοποίηση πρέπει να είναι τέτοια ώστε να πετυχαίνεται η επιθυμητή ακρίβεια της αναγνώρισης των συνιστωσών ιδιομορφής phi.

Προεπιλεγμένη τιμή: 10.

**Maxgenerations** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει το μέγιστο αριθμό των γενεών που παράγει ο Γενετικός Αλγόριθμος. Μεγάλος αριθμός γενεών δίνει τη δυνατότητα στον Γενετικό Αλγόριθμο να πλησιάσει περισσότερο στην περιοχή του βέλτιστου, εις βάρος όμως του υπολογιστικού χρόνου.

Προεπιλεγμένη τιμή: 200.

**PopulationSize** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει το μέγεθος του πληθυσμού για κάθε παράμετρο, δηλαδή τον αριθμό των δειγμάτων που λαμβάνει ο Γενετικός Αλγόριθμος από το χώρο που αντιστοιχεί σε κάθε παράμετρο. Μεγάλος μέγεθος πληθυσμού δίνει τη δυνατότητα στον Γενετικό Αλγόριθμο παίρνει περισσότερα

δείγματα στο χώρο ορισμού των παραμέτρων , εις βάρος όμως του υπολογιστικού χρόνου.

Προεπιλεγμένη τιμή: 50.

**CrossoverProbability** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει την πιθανότητα που αφορά στην ανταλλαγή “γονιδίων” μεταξύ “χρωμοσωμάτων”.

Προεπιλεγμένη τιμή: 0.9.

**MutationProbability** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει την πιθανότητα που αφορά στη μετάλλαξη των “γονιδίων”.

Προεπιλεγμένη τιμή: 0.1.

#### 2.1.5 ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΦΑΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ QUASI-NEWTON

**FminuncOptions** = (δες Matlab για περισσότερες λεπτομέρειες – εντολή *optimset*)

**GradObj** - 'on' | {'off'}- όταν είναι ενεργοποιημένο σημαίνει ότι ο χρήστης έχει συμπεριλάβει την αναλυτική μορφή των παραγώγων της αντικειμενικής συνάρτησης.

Προεπιλεγμένη τιμή: 'off'.

**Display** -'off' | 'iter' | 'final' | 'notify' - 'off' δε δείχνει output; 'iter' δείχνει το output σε κάθε επανάληψη; 'final' δείχνει το τελικό output; 'notify' δείχνει το output μόνο σε περίπτωση μη σύγκλισης.

Προεπιλεγμένη τιμή: 'iter'.

**DerivativeCheck** -'on' | {'off'}- όταν δίνονται οι παράγωγοι αναλυτικά και είναι ενεργοποιημένη αυτή η εντολή, τότε γίνεται σύγκριση μεταξύ των τιμών των παραγώγων που υπολογίζονται αναλυτικά και αριθμητικά

Προεπιλεγμένη τιμή: 'off'.

**MaxFunEvals** - θετικός, ακέραιος αριθμός που δηλώνει πόσοι υπολογισμοί της συνάρτησης σφάλματος επιτρέπονται.

Προεπιλεγμένη τιμή: 3000.

**LargeScale** - {'on'} | 'off' – όταν είναι ενεργοποιημένη κάνει χρήση αλγορίθμου μεγάλης κλίμακας.

Προεπιλεγμένη τιμή: 'off'.

**TolFun** - θετικός, ακέραιος αριθμός που δηλώνει το κριτήριο σύγκλισης της συνάρτησης σφάλματος.

Προεπιλεγμένη τιμή: 1.e-7.

**ToIX** - θετικός, ακέραιος αριθμός που δηλώνει το κριτήριο σύγκλισης των παραμέτρων.

Προεπιλεγμένη τιμή: 1.e-7.

**MaxIter** - θετικός, ακέραιος αριθμός που δηλώνει το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων που επιτρέπονται.

Προεπιλεγμένη τιμή: 200.

**Diagnostics** - 'on' | {'off'}- όταν είναι ενεργοποιημένη τυπώνει διαγνωστικές πληροφορίες σε σχέση με τη συνάρτηση που ελαχιστοποιείται.

Προεπιλεγμένη τιμή: 'on'

**SweepAccur** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει την ακρίβεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Προεπιλεγμένη τιμή: 1.e-03.

**MaxNumSweeps** = βαθμωτό μέγεθος που δηλώνει το μέγιστο αριθμό των σαρώσεων βελτιστοποίησης.

Προεπιλεγμένη τιμή: 15.

## **2.2 ΑΡΧΕΙΟ ΕΞΟΔΟΥ - OUTPUT FILE**

Το αρχείο αυτό προκύπτει μετά την ολοκλήρωση της εκτέλεσης της διαδικασίας μορφικής αναγνώρισης και περιέχει συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα αυτής σε ευανάγνωστη μορφή. Στο αρχείο αυτό δεν επεμβαίνει ο χρήστης, παρά μόνο παρακολουθεί την κατάληξη της διαδικασίας αναγνώρισης.

Αρχικά τυπώνονται οι βασικές παράμετρος εισόδου (**Input Parameters**), όπως το αρχείο από το οποίο ελήφθησαν οι μετρήσεις (**Loaded File Name with Measurements**), ο αριθμός των ιδιομορφών που επιλέχθηκε να αναγνωρισθεί πειραματικά (**Number of Modes to be Experimentally Identified**) και ο αριθμός των μετρούμενων χρονικών ιστοριών των αποκρίσεων (**Number of Measured Output Time Histories**).

Σε αυτό το αρχείο εξόδου εμφανίζονται επιπλέον η χαμηλότερη συχνότητα του συστήματος σε Hz (**fmin**), ο αριθμός των τμημάτων στα οποία διαιρούνται οι χρονικές ιστορίες (**Number of Segments**) και ο αριθμός των σημείων που περιλαμβάνει κάθε τμήμα (**Number of Points for each Segment**).

Κατόπιν, εμφανίζονται οι παράμετροι βάσει των οποίων έχει γίνει βελτιστοποίηση με Γενετικούς Αλγόριθμους (**Genetic Algorithm Parameters**), δηλαδή ο μέγιστος αριθμός παραγόμενων γενεών (**Max generations**), το μέγεθος του πληθυσμού για κάθε παράμετρο (**PopulationSize**), η διακριτοποίηση του χώρου για τις συχνότητες, τους συντελεστές απόσβεσης και τις συνιστώσες των ιδιομορφών (**DiscOmega**,

**DiscDamping, DiscPhi**), και οι πιθανότητες για ανταλλαγή γονιδίων και μετάλλαξη (**CrossoverProbability, MutationProbability**).

Στη συνέχεια, τυπώνονται οι αρχικές προβλέψεις (**Initial Guesses**), δηλαδή τα εύρη των παραμέτρων (**Range of Frequencies, Range of Damping ratios, Range of phi**) για τις ιδιομορφές που αναγνωρίζονται (**Modes**) και ακολουθούνται από τα ενδιάμεσα αποτελέσματα της αναγνώρισης (**Intermediate Results**), δηλαδή μετά τη πρώτη σάρωση των ιδιομορφών με Γενετικό Αλγόριθμο και αλγόριθμο Quasi-Newton δίνονται τα αποτελέσματα για τις ιδιοσυχνότητες (**frequencies**), τους συντελεστές απόσβεσης (**Damping ratios**) και συνιστώσες ιδιομορφών (**Modeshape Components**) που θα αποτελέσουν τις αρχικές εκτιμήσεις για τη δεύτερη σάρωση. Οι συνιστώσες ιδιομορφών δίνονται με τη μορφή πίνακα όπου στις σειρές αντιστοιχούν οι μετρούμενοι βαθμοί ελευθερίας (**Measured DOF** - θέσεις μετρούμενης απόκρισης) και στις στήλες ο αριθμός της ιδιομορφής (**Mode #**). Δίνεται πρόσθετα, η συνάρτηση σφάλματος (**Error**) της οποίας η μείωση από ιδιομορφή σε ιδιομορφή αποτελεί σημαντικό κριτήριο για την αποδοχή μιας αναγνωρισμένης λύσης ως ιδιομορφή του συστήματος. Αναφέρονται επίσης ο αριθμός των υπολογισμών για την αντικειμενική συνάρτηση (**Function Evaluations**) καθώς και ο αριθμός των επαναλήψεων (**Iterations**) για κάθε ιδιομορφή. Επίσης, δίνεται ο χρόνος σε min μέσα στον οποίο εκτελείται αυτό το τμήμα του κώδικα (**Elapsed Time**).

Τέλος, τυπώνονται τα τελικά αποτελέσματα της μορφικής αναγνώρισης (**Final Results**). Δίνονται πρόσθετα το εύρος των συχνοτήτων σε Hz που χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση (**Frequency Range for fit**), η χρονική περίοδος των διαστημάτων στα οποία έγινε η διαίρεση (**Segment Period**), καθώς και ο συνολικός αριθμός αυτών των διαστημάτων (**Number of Segments**). Επίσης, τυπώνονται η συχνότητα λήψης δείγματος σε Hz (**Dw = Sampling Frequency**) και το χρονικό διάστημα λήψης δείγματος σε sec (**Dt = Sampling Time**). Τα τελικά αποτελέσματα για τις παραμέτρους δίνονται σε παρόμοια μορφή με τα ενδιάμεσα αποτελέσματα με πρόσθετη πληροφορία τον αριθμό των σαρώσεων που απαιτήθηκαν για την αναγνώριση των ιδιομορφών (**Sweep**). Επίσης, δίνεται ο χρόνος σε min μέσα στον οποίο ολοκληρώνεται η διαδικασία μορφικής αναγνώρισης (**Elapsed Time**).

### 3. ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Η αποτελεσματική χρήση του κώδικα που αναπτύχθηκε για τη μορφική αναγνώριση κατασκευών απαιτεί ως ένα βαθμό την εμπειρία του χρήστη, ώστε να αποφεύγεται η κατανάλωση υπολογιστικού χρόνου και να παρουσιάζονται όσο το δυνατό λιγότερα προβλήματα στη σύγκλιση των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται. Σκόπιμο κρίνεται λοιπόν, να γίνει αναφορά σε κάποιες καταστάσεις που πιθανό να αντιμετωπίσει ο χρήστης κατά τη διάρκεια της εφαρμογής της διαδικασίας αναγνώρισης μιας δεδομένης κατασκευής.

- Η αναγνώριση να διεξάγεται λαμβάνοντας υπόψη ανά δύο (ή τρεις) τις ιδιομορφές, ώστε να μην επιβαρύνεται η διαδικασία σύγκλισης. Η επιτάχυνση της σύγκλισης επιτυγχάνεται με τον περιορισμό του διαστήματος της χρονικής ιστορίας της επιτάχυνσης (free vibration) ή του διαστήματος των συχνοτήτων των συναρτήσεων φασματικής πυκνότητας (ambient vibration), ώστε να περιλαμβάνει τις συχνότητες ενδιαφέροντος. Δυνατό είναι, αφού αναγνωριστούν π.χ. δύο ιδιομορφές και σωθεί το αρχείο των αποτελεσμάτων (σε .mat αρχείο Matlab), να προστεθεί στη συνέχεια επιπλέον ιδιομορφή ή ιδιομορφές που θα βελτιώσουν την προσαρμογή των προβλέψεων του μοντέλου στις μετρήσεις.
- Κύριο κριτήριο για την αποδοχή λύσεων ως ιδιομορφές του συστήματος αποτελεί η τιμή του συντελεστή απόσβεσης (damping ratio), ο οποίος πρέπει να κυμαίνεται σε φυσιολογικά επίπεδα για την υπό εξέταση κατασκευή, π.χ. για γέφυρες από 0.1% ως 5%. Όταν ο συντελεστής απόσβεσης είναι μεγάλος, τότε υπάρχουν αμφιβολίες για την εγκυρότητα της ιδιομορφής. Επίσης, ένδειξη αποτελεί και η μείωση της συνάρτησης σφάλματος (Error) μετά από τη σάρωση μιας ιδιομορφής. Όταν η μείωση είναι μικρή υπάρχουν αμφιβολίες για την εγκυρότητα της συγκεκριμένης ιδιομορφής που αναγνωρίστηκε οπότε και διαγράφεται από το χρήστη από τον κατάλογο των αναγνωρισμένων ιδιομορφών. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι στις υψηλές ιδιομορφές εμφανίζονται προβλήματα αναγνώρισης, με την έννοια ότι η μείωση του σφάλματος είναι μικρή, γεγονός αναμενόμενο, αν ληφθεί υπόψη η μικρή συνεισφορά των υψηλών ιδιομορφών στην απόκριση ενός συστήματος. Οι ιδιομορφές αυτές είναι αποδεκτές μόνο αν ο συντελεστής απόσβεσης είναι μικρός (π.χ. 0.1% ως 5%)
- Ο γενετικός αλγόριθμος συγκλίνει στη γειτονία της βέλτιστης λύσης και επειδή κάνει διερεύνηση του χώρου στα “τυφλά” υπάρχει περίπτωση (για μικρό σχετικά αριθμό γενεών (maxgenerations) και πληθυσμού (populationsize)) να αποκλίνει από την επιθυμητή οδό. Όταν συμβεί κάτι τέτοιο και δεν υπάρχει ένδειξη άλλου προβλήματος, τότε συνίσταται η επανάληψη της διαδικασίας με τις ίδιες ακριβώς συνθήκες ή με αλλαγή στον αριθμό γενεών ή του πληθυσμού ώστε να δοθεί η ευκαιρία στο γενετικό αλγόριθμο να συγκλίνει σε καλύτερη περιοχή.
- Για τη διευκόλυνση της σύγκλισης της μεθόδου, σκόπιμο θα είναι να λαμβάνονται κάθε φορά υπόψη οι χρονικές ιστορίες των επιταχύνσεων που αντιστοιχούν σε μία διεύθυνση και όχι σε πολλές διευθύνσεις μαζί, εκτός της περίπτωσης απλών μετρητικών δεδομένων.
- ΠΡΟΣΟΧΗ!!! → Ο κώδικας λειτουργεί σε έκδοση του Matlab R12 και επόμενες.

**Σημείωση:** Οι εντολές του κώδικα Matlab που αναφέρονται στο κείμενο, είναι σε **bold & italic** φόντο, έτσι ώστε να ξεχωρίζουν. Λεπτομέρειες για τη χρήση και τους ορισμούς υπάρχουν στο help του Matlab. Λόγω του ότι υπάρχει εύχρηστη και

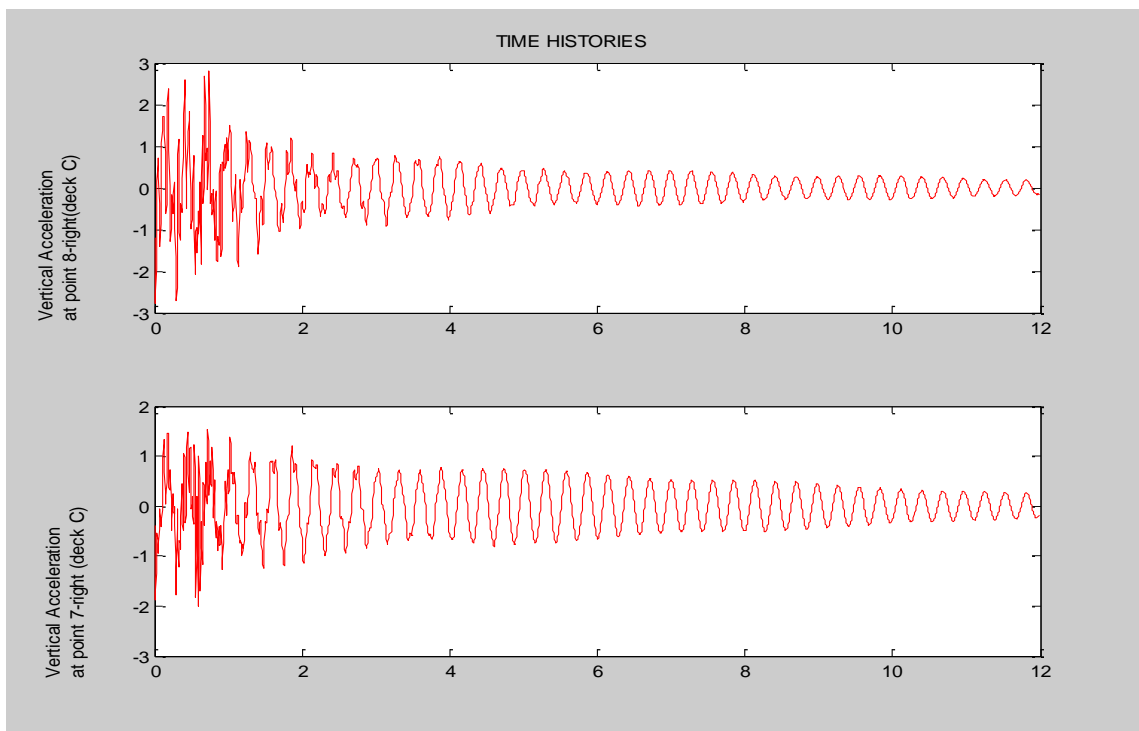
εκτεταμένη βοήθεια στο λογισμικό πακέτο κρίθηκε περιττή η εκτενής αναφορά στη λειτουργία των εντολών, δεδομένου ότι ο χρήστης θα πρέπει να κατέχει κάποια εξοικείωση με Matlab.

#### **4. ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ**

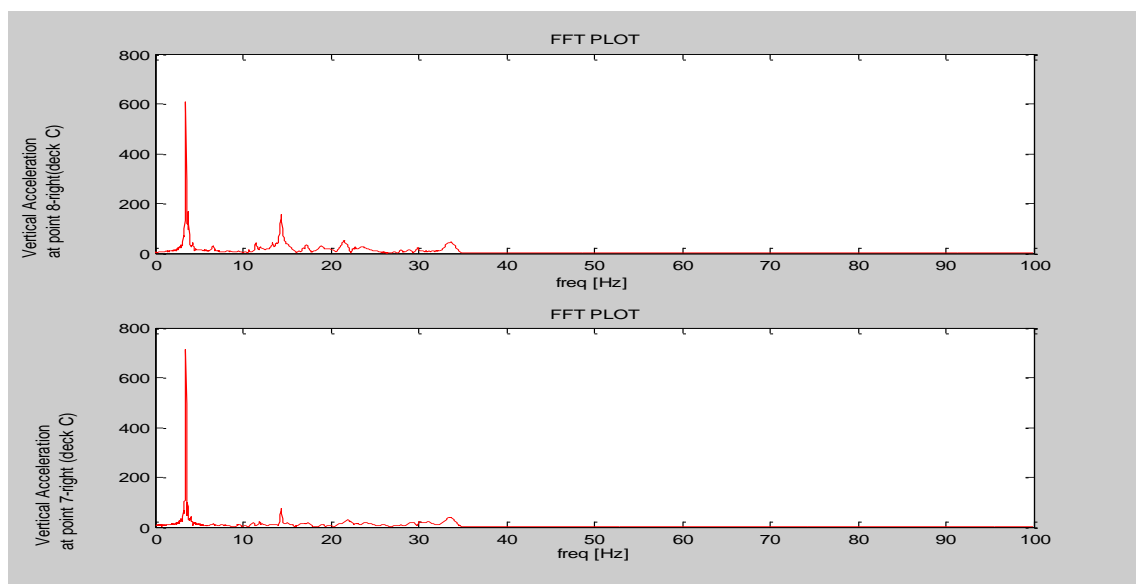
Παρατίθεται μία απλή περίπτωση αναγνώρισης μορφικών χαρακτηριστικών με σκοπό την εξοικείωση του χρήστη με τη διαδικασία του προγράμματος που χρησιμοποιεί το λογισμικό πακέτο Matlab. Το παράδειγμα ανταποκρίνεται στην περίπτωση της ελεύθερης ταλάντωσης.

Το παρόν παράδειγμα χρησιμοποιεί πραγματικά πειραματικά δεδομένα αποκρίσεων από τη χαραδρογέφυρα της Καβάλας. Το αρχείο των μετρήσεων αναφέρεται στην 1<sup>η</sup> φάση μετρήσεων στο γεγονός GR119 (άνοιγμα C). Τα δεδομένα των αποκρίσεων έχουν αποθηκευτεί σε ένα μητρώο με στήλες τις αποκρίσεις σε όλες τις διευθύνσεις στο αρχείο *Freevibr119.mat*. Οι αποκρίσεις που λαμβάνονται υπόψη στο παρόν παράδειγμα αντιστοιχούν σε δύο κατακόρυφες αποκρίσεις, μία αριστερά του καταστρώματος στη θέση 8 και μία δεξιά στη θέση 7. Από την υπορουτίνα *FrVibr\_Optim* μπορεί να επιλεγεί από το χρήστη αρχικά η απεικόνιση των χρονικών ιστοριών και των αντίστοιχων μετασχηματισμών Fourier που επιλέχθηκαν για τη μορφική αναγνώριση. Θα προκύψουν οι παρακάτω εικόνες 4.1 & 4.2. Κατόπιν, ο χρήστης εντοπίζει τις κορυφές των συχνοτήτων από τους μετασχηματισμούς Fourier και επιλέγει τα εύρη των συχνοτήτων που επιθυμεί να αναγνωρίσει. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε *RangeOmega=[1 5; 1 5; 14 15;]*. Καθώς ο κώδικας προχωρά τυπώνει στην οθόνη τις τιμές της συνάρτησης σφάλματος, αρχικά περνώντας από το Γενετικό Αλγόριθμο και μετά από τον αλγόριθμο Quasi-Newton. Μετά τη σύγκλιση στις τελικές τιμές των παραμέτρων εμφανίζονται εικόνες με την προσαρμογή των υπολογισμένων τιμών στις μετρούμενες με τελειότερη αυτή που εμφανίζεται τελευταία. Έτσι, στην προκειμένη περίπτωση η τελευταία εικόνα είναι όπως η 4.3.

Ακολουθούν τα αρχεία εισόδου και εξόδου για το παρόν παράδειγμα. Τα ίδια αποτελέσματα θα μπορούσαν να ληφθούν πολύ ταχύτερα με επιλογή *Maxgenerations=100* και *PopulationSize=10*;

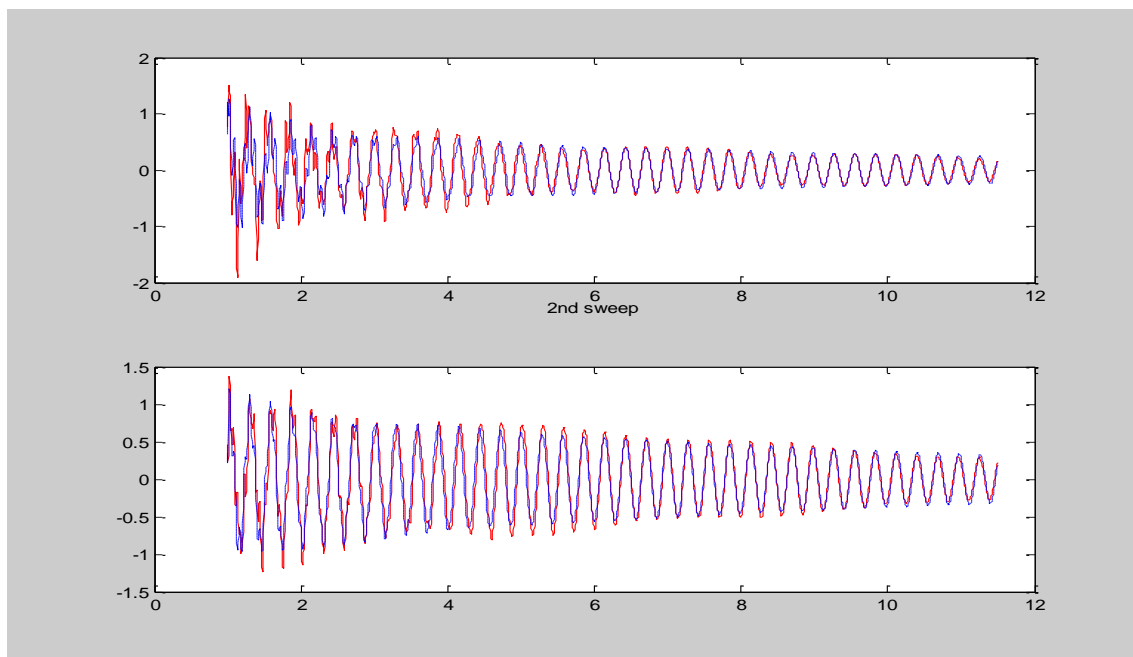


Εικόνα 4.1 Χρονικές ιστορίες επιταχύνσεων.



Εικόνα 4.2 Μετασχηματισμοί Fourier των χρονικές ιστοριών επιταχύνσεων.





*Εικόνα 4.3 Τελική προσαρμογή στα μετρητικά δεδομένα βάσει των ιδιομορφών που αναγνωρίστηκαν.*

## 4.1. ΠΡΟΤΥΠΟ ΑΡΧΕΙΟ ΕΙΣΟΔΟΥ

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% BASIC INPUT DATA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
MeasDataFile='C:\maria_p_122\FREE_VIBR_CDC_GAs_moremodes\Freevibr119.mat';
    %---Path for the mat file which the measured data-->           %%
PathName='C:\maria_p_122\FREE_VIBR_CDC_GAs_moremodes\Output\';
    %---Path for the output file to print on results--->           %%
OutputName='test1';
    %---Specify the name of the output mat file----->           %%

%%
ActiveMeasData=[3 5];    %---array with the measurement data columns to be examined-->
%%
EventName=['Freevibr119'];    %---Name of the measurement event used
%%
AMDLabels=['Ch3';Ch5];    %---Names of the measurement locations
%%
Dt=0.005;                %---Discretization time----->
%%
Tmin=0;                  %---Tmin of the time history----->
%%
IMode=0;                 %---Number of modes from where on starts the optimization for
modes---->               %%                               the remaining
NumMode=3;               %---Number of modes to be identified!---->
%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% DATA RANGE FOR COMPUTATION %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
Lowert='1';              %---lower time in sec--->
%%
Highert='11.5';         %---upper time limit in sec--->
%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% GA PARAMETERS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
RangeOmega=[...
    %---GA Search range for frequencies---[lower limit upper limit]-----> %%
    1 5;
    1 5;
    14 15;
    ]
    %---Add as many lines as the number of modes to be identified...           %%
    %...(see NumMode variable)
%%
RangeDamping=[0.01 1]   %---GA Search area for damping ratios---[lower limit upper limit]----->
%%
Rangee=[-5 5];
%%
DiscOmega=8;            %---Control of the discretization of the population space...
%%
DiscDamping=8;         %...(Real Integer Positive)
%%
Disce=10;
%%
Maxgenerations=200;     %---Maximum Number of Generations
%%
PopulationSize=50;     %---Population Size
%%
CrossoverProbability=0.9;%---Probability of Crossover
%%
MutationProbability=0.1;%---Probability of Mutation
%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% OPTIMIZATION OPTIONS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%---Options for Quasi-Newton Algorithm (for optimization routine fminunc)
%%
FminuncOptions=optimset('GradObj','off','Display','iter','DerivativeCheck','off','MaxFunEvals',3000,...
    %---
    'LargeScale','off','TolFun',1.e-7,'TolX',1.e-7,'MaxIter',200,'Diagnostics','on');
%%
SweepAccur=1.e-03;    %---Sweep accuracy used in optimization----->           %%
MaxNumSweeps=15       %---Maximum Number of sweep iterations----->           %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

## 4.2 ΠΡΟΤΥΠΟ ΑΡΧΕΙΟ ΕΞΟΔΟΥ

### INPUT PARAMETERS

Loaded File Name with Measurements.....: Freevibr119.mat

Number of Modes to be Experimentally Identified.....: 3

Number of Measured Output Time Histories.....: 2

### GENETIC ALGORITHM PARAMETERS

Max Generations	Population Size	Frequency Discretization	Damping Discretization	e Discretization	Crossover Probability	Mutation Probability
200	50	8	8	10	0.90	0.10

### INITIAL GUESSES

Modes	Range of Frequencies(Hz)	Range of Damping ratios(%)	Range of e
1	1.00- 5.00	0.01 - 1.00	-5.00 - 5.00
2	1.00- 5.00	0.01 - 1.00	-5.00 - 5.00
3	14.00- 15.00	0.01 - 1.00	-5.00 - 5.00

### INTERMEDIATE RESULTS from 1st sweep == INITIAL GUESSES for 2nd sweep

Modes	Frequencies (Hz)	Damping ratios (%)	Error (%)	Function Evaluations	Iterations
1	3.52	0.45	19.37	145	23
2	14.36	0.82	15.50	51	7
3	87.99	99.61	15.37	13	2

Modeshape Components			
Measured DOF	Mode 1	Mode 2	Mode 3
1	0.289688	-0.239660	-68.576836
2	0.384469	-0.122501	72.881023

Elapsed Time(min)

11.20
-------

### FINAL RESULTS

Initial Time.....: 1 sec  
 Final Time.....: 1.150000e+001 sec  
 Time Duration.....: 1 - 1.150000e+001 sec  
 Dt = Sampling Time .....: 0.0050

Modes	Frequencies (Hz)	Damping ratios (%)	Error (%)	Function Evaluations	Iterations	Sweep
1	3.52	0.45	19.37	38	5	2
2	14.36	0.82	15.50	4	1	2
3	87.99	99.61	15.37	4	1	2

Modeshape Components			
Measured DOF	Mode 1	Mode 2	Mode 3
1	0.289688	-0.239660	-68.576836
2	0.384469	-0.122501	72.881023

Elapsed Time(min)
11.40

## 5. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- Οι υπορουτίνες του κώδικα μορφικής αναγνώρισης, γραμμένες σε MATLAB:

### *a. Κώδικας για ταλάντωση από λειτουργικά φορτία - AMBIENT VIBRATION*

```

*****
*****
* * *                               I D E M O                               * * *
*****
*****

%-----AmbientVibrOptim.m-----
%-----Main m.file: Runs optimization sweeps =>----finds the optimal theta
parameters/modal properties----->
%----- Plots fit between measured and calculated response----->
%----- Prints intermediate & final results----->
clear all;
close all;
tic
global SAxy
[data,thetaga]=pre_processing %---read & process input data-----
[datamode,theta]=moremodes(data);
options=data.options; %---Options for optimization routine---
[fid]=print_on_input_1(data,thetaga); %---Prints input data on output file-
%-----1st Modal Sweep-----
for r=data.imode+1:data.nmode
    data.nm=r;
    data.nmodecurrent=r;
    r,pause(1)
    %-----Call of the Genetic Algorithm-----
    data.optimnumber=2+data.nout+r*(r-1); %Estimation of the variables' number
    [x]=Main(data,thetaga,theta,r);
    %-----Call of the Quasi-Newton (fminunc) Algorithm-----
    th0(1)=2*x(2)*x(1);;
    th0(2)=x(1)^2;
    th0(3:data.nout+2)=x(3:data.nout+2);
    th0(data.nout+3:data.nout+r*(r-1)/2+2)=x(data.nout+3:data.nout+r*(r-1)/2+2);
    th0(data.nout+r*(r-1)/2+3:data.nout+2*r*(r-1)/2+2)=x(data.nout+r*(r-
1)/2+3:data.nout+2*r*(r-1)/2+2);
    [th,fval,exitflag,output]=fminunc('ObjAmbientVibr',th0,options,data,theta);
    theta.funval(r)=fval; theta.eval(r)=output.funcCount;
theta.iter(r)=output.iterations;
    theta.a(r)=th(1);
    theta.b(r)=th(2);
    theta.phi(:,r)=reshape(th(3:data.nout+2),data.nout,1);
    theta.fre(1:r*(r-1)/2)=th(data.nout+3:data.nout+r*(r-1)/2+2);
    theta.fim(1:r*(r-1)/2)=th(data.nout+r*(r-1)/2+3:data.nout+2*r*(r-1)/2+2);
    Eprev(r)=theta.funval(r);
end
%-----
%-----Computation of relative error for each mode----->
for k=1:r
    data.nmodecurrent=k;
    [E,theta]=ObjAmbientVibr(th,data,theta);
    theta.E(k)=E;
end;
%----->
data.f0=0;
data.title=char('Sweep',' 1');
plot_fit(data); %---Plots fit for 1st modal sweep---->

%---Computation of modal properties from 1st sweep--->

```

```

theta.w1=(sqrt(theta.b(1:data.nmode)))';
theta.v1=theta.w1/(2*pi);
theta.Z1=((theta.a(1:data.nmode))'./(2*theta.w1));
theta.t1=toc/60 %minutes

%----->
[fid]=print_on_output_1(data,theta,fid); %---Prints results from 1st sweep on
output file----->
E=10^10;
numswEEP=0;
while abs(E-Eprev)/E>=data.sweepaccur
    Eprev=E;
    numswEEP=numswEEP+1;
    fprintf('\n      Modal sweep: %g ',numswEEP)
    for r=data.imode+1:data.nmode
        clear E;
        data.nm=r;
        r,pause(1)
        th0(1)=theta.a(r);
        th0(2)=theta.b(r);
        th0(3:data.nout+2)=theta.phi(:,r);
        th0(data.nout+3:data.nout+r*(r-1)/2+2)=theta.fre(1:r*(r-1)/2);
        th0(data.nout+r*(r-1)/2+3:data.nout+2*r*(r-1)/2+2)=theta.fim(1:r*(r-1)/2);
        [th,fval,exitflag,output]=fminunc('ObjAmbientVibr',th0,options,data,theta);
        data.f0=data.f0+1;
        data.title=char('Sweep ',num2str(numswEEP));
        theta.funval(r)=fval; theta.eval(r)=output.funcCount;
theta.iter(r)=output.iterations;
        theta.a(r)=th(1);
        theta.b(r)=th(2);
        theta.phi(:,r)=reshape(th(3:data.nout+2),data.nout,1);
        theta.fre(1:r*(r-1)/2)=th(data.nout+3:data.nout+r*(r-1)/2+2);
        theta.fim(1:r*(r-1)/2)=th(data.nout+r*(r-1)/2+3:data.nout+2*r*(r-1)/2+2);
        E(r)=theta.funval(r);
    end;
    E,pause(2);
end;
%----Computation of relative error for each mode----->
for k=1:r
    data.nmodecurrent=k;
    [E,theta]=ObjAmbientVibr(th,data,theta);
    theta.E(k)=E;
end;
%----->
data.f0=data.nout;
data.title=('Final sweep');
plot_Final_fit(data);%---Plots final fit ----->

%---Computation of final modal properties----->
theta.w2=(sqrt(theta.b(1:data.nmode)))';
theta.v2=theta.w2/(2*pi);
theta.Z2=((theta.a(1:data.nmode))'./(2*theta.w2));
theta.t2=toc/60 %minutes
theta.sweeps=numswEEP;
%----->
[fid]=print_on_output_2(data,theta,fid); %---Prints final results on output file--
----->

% %-----Save all workspace variables in a user specified mat file in the current
directory----->
    AmbientVibr_data_save=[data.path,data.output,'.mat'];
% AmbientVibr_data_save=input('>>>>> Set name for MAT file to save the output =>>
','s')
    save(eval('AmbientVibr_data_save'),'*') % '*' is a wildcard that saves all
variables!
%----->

*****

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% BASIC INPUT DATA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
MeasDataFile='C:\maria_p_122\AMBIENT\mat_files_AnoigmaA\AM027.mat';
%---Path for the mat file with the measured data---> %%
PathName='C:\maria_p_122\AMBIENT\ \output\';
%---Path for the output file summarizing the results---> %%
OutputName='Kavala_AM082_7';
%---Name of the output mat file containing the modal frequencies & modeshape
component----> %%
%%
ActiveMeasData=[4];
%---array with the measurement data columns to be examined--AMD----->
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
EventName=['AM027'];
%%
AMDLabels=['ARLB (Ch5) '];
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Dt=0.005; %---Discretization time----->
%%
Tmin=0; %---Initial Time of the time history----->
%%
IMode=0; %---Number of modes from where on starts the optimization
for the remaining modes----> %%
NumMode=2; %---Number of modes to be identified!---->
%%
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% PARAMETERS for CROSS-SPECTRAL DENSITY FORMATION %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%%
OmegaMin=0.4; %--- the lower system frequency--->
%%
NumberOfPeriods=5; %--- the number of periods included in a segment--->
%%
ZoomCSD=4; %--- number of times to divide the frequency range of CDS
for zooming purposes %%
%%
window=[]; %--- specifies a windowing function and the number of
samples csd uses in its sectioning %%
%% % - DEFAULT [] = [HANN WINDOW]
%%
numoverlap=[0]; %--- the number of overlapping samples between segments
%%
% - DEFAULT [] = [0]
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% DATA RANGE FOR COMPUTATION %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
Lowerf='9'; %---lower limit frequency in Hz--->
%%
Higherf='10.3'; %---upper limit frequency in Hz--->
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% GA PARAMETERS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
RangeOmega=[... %---GA Search range for frequencies---[lower limit
upper limit]-----> %%
9 10;
9 10;
]
%%
RangeDamping=[0.01 1]; %---GA Search range for damping ratios---[lower limit
upper limit]----->%%
%%
Rangephi=[-6 6];
%%
DiscOmega=10; %---Control of the discretization of the population
space... %%

```

```

DiscDamping=10;                %...(Real Integer Positive)
%%
Discphi=10;
%%
Maxgenerations=200;           %---Maximum Number of Generations
%%
PopulationSize=50;           %---Population Size
%%
CrossoverProbability=0.9;     %---Probability of Crossover
%%
MutationProbability=0.1;     %---Probability of Mutation
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% OPTIMIZATION OPTIONS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%---Options for Quasi-Newton Algorithm (for optimization routine fminunc)
%%
FminuncOptions=optimset('GradObj','off','Display','iter','DerivativeCheck','off','MaxFunEvals',3000,...
    'LargeScale','off','TolFun',1.e-8,'TolX',1.e-8,'MaxIter',200,'Diagnostics','on','DiffMinChange',1.e-7); %%
SweepAccur=5e-04; %---Sweep accuracy used in optimization----->
%%
MaxNumSweeps=15; %---Maximum Number of Sweeps allowed by the user
%%
%DiffMaxChange-----Maximum change in variables for finite difference
derivatives Default:1.e-1      %%
%DiffMinChange Minimum change in variables for finite difference derivatives
Default:1.e-8                  %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
*****
function [data,thetaga]=pre_processing

[data,thetaga]=structuring;

data.filename=[data.path, data.output,'.out'];
load(data.measdata); %---read output time histories from specified mat file-

data.Accel=Accel;
clear Accel;

for i=1:length(data.ActiveMD)
data.AbsAccel(:,i)=[data.Accel(:,data.ActiveMD(i))];
end;

clear data.Accel;

data.nout=size(data.AbsAccel,2);
%-----Total data range----->
data.tmax=data.dt*length(data.AbsAccel)-data.dt;%---Tmax of the time history [sec]-
->
data.t=data.tmin:data.dt:data.tmax; %---Sampled time from {Tmin,Tmax}--->
data.fs=1/data.dt; %---sample frequency = 1/dt-----Hz->
ex=ceil(log(length(data.t))/log(2)); %---exponent----->
data.n=2^ex; %--- # of points for FFT in initial plots---
->
%-----Check of desired # of points of each segment of the time history for
csd----->
data.Tsegment=data.numper/data.fmin; %---time duration of each segment
data.Nsegment=floor(data.tmax/data.Tsegment); %---number of segments
NumFFTPoints=(length(data.Accel)-data.overlap)/data.Nsegment + data.overlap; %
minimum # of points for FFT used by CrossSpectralDensity->%%
data.ncsd=2^round(log2(NumFFTPoints))
%% NumFFTPoints is not a power of 2! %%
%% NumSegmentPoints =~ to NumFFTPoints -as a power of 2 number- so that k=~30
%%
%%

```



```

for l=1:data.nout
    for j=1:data.nout
        data.FFTx(:, :, j)=fftm((data.AbsAccel(:, j))', data);
        data.FFTAbsAccel(:, j)=data.FFTx(:, 4, j);
        [data.Pxy(:, l, j)
data.f]=csd((data.AbsAccel(:, l))', (data.AbsAccel(:, j))', data.ncsd, data.fs, [], []);
        end;
    end;
data.Sxy=permute(data.Pxy, [2 3 1]);
%----->
Q1=input('>>>>> Plot Time Histories? [yes=1]/[no=0]=>>', 's');
A1=eval(Q1);
if A1 == '1'
    initial_timehistory_plots(data, thetaga) %---plot of total time histories---->
elseif A1 == '0'
end

Q2=input('>>>>> Plot Cross Spectral Densities? [yes=1]/[no=0]=>>', 's');
A2=eval(Q2);
if A2 == '1'
    initial_plots(data, thetaga) %---plot of Cross Spectral Density---->
elseif A2 == '0'
end
Q3=input('>>>>> Continue execution of the program?
[yes=1]/[no=0]=>>', 's'); A3=eval(Q3);
if A3 == '0'
    fprintf('\n\n
    fprintf('** (IGNORE ERROR MESSAGES) ** \n\n', j);
    error('
    fprintf('\n\n
elseif A3 == '1'
end
%----->
data.dw=data.f(2)-data.f(1);
data.n1=round((eval(data.f1)/data.dw)+1);
data.n2=round((eval(data.f2)/data.dw)+1);
data.duration=data.n1:data.n2;
data.W=2*pi*data.f(data.duration); %!!according to nfft used in csd (data.ncsd)!-->
data.WW=data.W.^2;%
%initial_fit_plot(data, thetaga); %---plots initial fit--->

thetaga.wmin=2*pi*thetaga.RangeOmega(:, 1)';
thetaga.wmax=2*pi*thetaga.RangeOmega(:, 2)';
thetaga.zmin=thetaga.RangeDamping(1);
thetaga.zmax=thetaga.RangeDamping(2);

*****
function [data, thetaga]=structuring

AmbientVibr_data_file;

data.path=PathName;
data.output=OutputName;
data.measdata=MeasDataFile;
data.ActiveMD=ActiveMeasData;
data.dt=Dt;
data.tmin=Tmin;
data.imode=IMode;
data.nmode=NumMode;
data.fmin=OmegaMin;
data.numper=NumberOfPeriods;
data.window=window;
data.overlap=numoverlap;
data.f1=Lowerf;
data.f2=Higherf;
data.discw=DiscOmega;
data.discz=DiscDamping;
data.discphi=Discphi;

```

```

data.maxgen=Maxgenerations;
data.popsiz=PopulationSize;
data.Pc=CrossoverProbability;
data.Pm=MutationProbability;
data.options=FminuncOptions;
data.sweepaccr=SweepAccur;

thetaga.Rangephi=Rangephi;
thetaga.RangeOmega=RangeOmega;
thetaga.RangeDamping=RangeDamping;

*****
%----initial_timehistory_plots.m----- (called by AmbientVibr_data_file.m)-->
function initial_timehistory_plots(data,theta)
%----Time history plots----->
for l=1:data.nout
    for j=1:data.nout
        figure(1),subplot(data.nout,1,j)
        plot(data.t(1:length(data.AbsAccel)),data.AbsAccel(:,j)','r');
        title('TIME HISTORIES'); ylabel(['DATA ',num2str(j)])%plot of time
    histories
    end
end
*****
%----initial_plots.m---- (called by AmbientVibr_data_file.m)----->
function initial_plots(data,theta)
%---- Cross Spectral Density plots----->
% The following loop plots only one figure with the i-i Cross Spectral Densities
for i=1:data.nout
    figure(3),subplot(data.nout,1,i)

plot(data.f(1:round(length(data.f)/8)),abs(data.Pxy(1:round(length(data.f)/8),i,i))
,'r');...
    %plot Auto=Power Spectral Density/Cross Spectral Density PROSOXH! DIVISION
with 4 for zooming reasons
    ylabel('SPECT. DENSITY ii'); xlabel('freq [Hz]'); ylabel(['SPECT. DENSITY
',num2str(i),'-',num2str(i)]);
% saveas(gcf,[data.path, data.name,'SpDen-ii','.fig'])
end
%----->
*****

function [datamode,theta]=moremodes(data)
question=input('>>>>> Want to load data from previous session? [yes=1]/[no=0]=>>
','s');
answer=eval(question);
if answer == '1'
    Namesavedfile=eval(input('>>>>> Set name of the saved data file to load? =>>
','s'))
    savedfile=[data.path,Namesavedfile,'.mat'];
    load(savedfile)
    mode=input('>>>>> From which mode to start? =>> ','s');
    datamode.imode=eval(mode);
elseif answer == '0'
datamode.imode=data.imode;
end;
*****
%---print_on_input_1.m----- (called by AmbientVibrOptim)----->
%---prints on a specified file the necessary initial estimates----->
function[fid]=print_on_input_1(data,thetaga)
data.filename=[data.path, data.output,'.out'];
if exist(data.filename)==2; delete (data.filename); end %if the file exist,
replase with a new one
fid=fopen(data.filename,'a');
fprintf(fid,'
=====\n');
fprintf(fid,' INPUT PARAMETERS\n');

```

```

fprintf(fid,'
=====\n');
%1=====
fprintf(fid,' Loaded File Name with Measurements.....:
%s',data.measdata);

%2=====
fprintf(fid,'\n\n Number of Modes to be Experimentaly
Identified....:%6g',length(thetaga.RangeOmega));

%3=====
fprintf(fid,'\n Number of Measured Output Time
Histories.....:%6g',length(data.ActiveMD));
fprintf(fid,'\n fmin .....:%6g
Hz',data.fmin);
fprintf(fid,'\n Number of
Segments.....:%6g',data.Nsegment);
fprintf(fid,'\n Number of Points for each Segment.....:%6g',data.ncsd);

%4=====
fprintf(fid,'\n=====
=====\n');
fprintf(fid,'
GENETIC ALGORITHM PARAMETERS\n');
fprintf(fid,'
=====\n');

%5=====
fprintf(fid,'| Max | Population | Frequency | Damping |
Phi |Crossover | Mutation | \n');
fprintf(fid,'| Generations | Size | Discretization | Discretization|
Discretization |Probability | Probability|\n');
fprintf(fid,'|-----|-----|-----|-----|-----|
-----|-----|-----|\n');
fprintf(fid,'| %2i | %2i | %2i | %2i |
%2i | %2.2f | %2.2f |\n',
data.maxgen,data.popsz,data.discw,data.discz,data.discphi,data.Pc,data.Pm);
%6=====
vmin=thetaga.wmin/(2*pi);vmax=thetaga.wmax/(2*pi);
zmin=thetaga.zmin;zmax=thetaga.zmax;
fprintf(fid,'\n\n');
fprintf(fid,'
=====');
fprintf(fid,'\n
INITIAL GUESSES\n');
fprintf(fid,'
=====\n');
fprintf(fid,'| Range of | Range of | Range of
|\n');
fprintf(fid,'| Modes | Frequencies(Hz) | Damping ratios(%) | Phi
|\n');
fprintf(fid,'|-----|-----|-----|-----|
----|\n');
for r=1:data.nmode
fprintf(fid,'| %2i | %6.2f\t-%6.2f | %6.2f -%6.2f | %6.2f -%6.2f
|\n',r,vmin(r),vmax(r),zmin,zmax,thetaga.Rangephi);
end;
fprintf(fid,'\n\n');
fprintf(fid,'
=====');
fprintf(fid,'\n
INTERMEDIATE RESULTS from 1st sweep == INITIAL GUESSES for
2nd sweep\n');
fprintf(fid,'
=====\n');
%----->
*****
function [x]=Main(data,thetaga,theta,r)

vimaphi=(-thetaga.Rangephi(1)+thetaga.Rangephi(2))/(2^data.discphi-1);
vimaw(r)=(thetaga.wmax(r)-thetaga.wmin(r))/(2^data.discw-1);

```

```

vimaz=(thetaga.zmax-thetaga.zmin)/(2^data.discz-1);

param.d=[ thetaga.wmin(r) vimaw(r) thetaga.wmax(r);   %population range of a
          thetaga.zmin vimaz thetaga.zmax;          %population range of b
          thetaga.Rangephi(1)*ones(data.optimnumber-2,1)
vimaphi*ones(data.optimnumber-2,1) ...
          thetaga.Rangephi(2)*ones(data.optimnumber-2,1)];   %population range of
thetaga.phi, thetaga.f

param.n=data.optimnumber;   %number of variables of the objective function

% control parameters
options = foptions([1 1e-6 1e-6]);
maxgen = data.maxgen;       % max # of generations [200 100 40 10]
Pc =data.Pc;                % probability of crossover
Pm =data.Pm;                % probability of mutation
popsize = data.popsize;     % population size [10 20 50 100]
% initialization of population
initpop = bininit(popsize,param,'GA_ObjAmbientVibr',data,theta);

% GA run
[bestsol,endpop,bestpop,traceinfo]=ga('GA_ObjAmbientVibr',param,initpop,[1e-6 1
1],maxgen,Pc,Pm,data,theta);
[x,valid] = decode(bestsol,param);

*****
%----GA_ObjAmbientVibr.m----->
%----Computation of the objective function J & relative error E----->
function [E,th]=GA_ObjAmbientVibr(th,param,data,theta)
global SAxy
[th,valid]=decode(th,param);

if valid==1
    r=data.nm;
    s=data.duration;
    theta.a(r)=2*th(2)*th(1);
    theta.b(r)=th(1)^2;
    theta.phi(:,r)=reshape(th(3:data.nout+2),data.nout,1);
    theta.fre(1:r*(r-1)/2)=th(data.nout+3:data.nout+r*(r-1)/2+2);
    theta.fim(1:r*(r-1)/2)=th(data.nout+r*(r-1)/2+3:data.nout+2*r*(r-1)/2+2);
    for j=1:data.nout;
        for l=1:data.nout;
            for r=1:data.nmodecurrent;
                a(r)=theta.a(r);
                b(r)=theta.b(r);
                phi(j,r)=theta.phi(j,r);   phi(l,r)=theta.phi(l,r);
                f(1:r)=1;   fre(1:r*(r-1)/2)=theta.fre(1:r*(r-1)/2);   fim(1:r*(r-
1)/2)=theta.fim(1:r*(r-1)/2);
                WW=data.WW;W=data.W;
                %-----H-formulation-----
                S1(s,r)=(-WW);   S2(s,r)=(b(r)-WW+a(r).*W.*i);
h(s,r)=(S1(s,r)./S2(s,r));   H(s,r,1)=h(s,r);
                HL(1,r,s)=permute(H(s,r,1),[3 2 1]);   HR(r,1,s)=permute(H(s,r,1),[2
3 1]);   TH(r,1,s)=conj(HR(r,1,s));
                Tleft(j,r,s)=phi(j,r).*HL(1,r,s);
                Tright(r,l,s)=TH(r,1,s).*phi(l,r)';
                %-----Sf-formulation!-----
                c=0;d=0;
                for m=1:r
                    c=d+1;   d=c+r-m-1;
                    Sf(m,m)=f(m);
                    Sf(m,m+1:r)=fre(c:d)+i*fim(c:d);
                    Sf(m+1:r,m)=fre(c:d)'+i*fim(c:d)';
                end;
            end;
        end;
    end;
end;
%-----CSD-formulation-----

```

```

for omega=s
    SAxy(:, :, omega)=Tleft(:, :, omega)*Sf*Tright(:, :, omega);
    J(omega)=trace((data.Sxy(:, :, omega)-SAxy(:, :, omega))^2);
    G(omega)=trace(data.Sxy(:, :, omega)^2);
end;
%-----
E=-abs(sum(J)/sum(G));
else
    E=-inf;
end
*****
%----ObjAmbientVibr.m----- (called by fminunc in AmbientVibrOptim)---->
%----Computation of the objective function J & relative error E----->
function [E,theta]=ObjAmbientVibr(th,data,theta)
global SAxy
r=data.nm;s=data.duration;
theta.a(r)=th(1);
theta.b(r)=th(2);
theta.phi(:,r)=reshape(th(3:data.nout+2),data.nout,1);
theta.fre(1:r*(r-1)/2)=th(data.nout+3:data.nout+r*(r-1)/2+2);
theta.fim(1:r*(r-1)/2)=th(data.nout+r*(r-1)/2+3:data.nout+2*r*(r-1)/2+2);
for j=1:data.nout;
    for l=1:data.nout;
        for r=1:data.nmodecurrent;
            a(r)=theta.a(r);
            b(r)=theta.b(r);
            phi(j,r)=theta.phi(j,r);    phi(l,r)=theta.phi(l,r);
            f(1:r)=1;
            fre(1:r*(r-1)/2)=theta.fre(1:r*(r-1)/2);    fim(1:r*(r-
1)/2)=theta.fim(1:r*(r-1)/2);
            WW=data.WW;W=data.W;
            %-----H-formulation-----
            S1(s,r)=(-WW);    S2(s,r)=(b(r)-WW+a(r).*W.*i);
h(s,r)=(S1(s,r)./S2(s,r));    H(s,r,1)=h(s,r);
            HL(1,r,s)=permute(H(s,r,1),[3 2 1]);    HR(r,1,s)=permute(H(s,r,1),[2 3
1]);    TH(r,1,s)=conj(HR(r,1,s));
            Tleft(j,r,s)=phi(j,r).*HL(1,r,s);
            Tright(r,1,s)=TH(r,1,s).*phi(l,r)';
            %-----Sf-formulation!-----
            c=0;d=0;
            for m=1:r
                c=d+1;    d=c+r-m-1;
                Sf(m,m)=f(m);
                Sf(m,m+1:r)=fre(c:d)+i*fim(c:d);
                Sf(m+1:r,m)=fre(c:d)-i*fim(c:d)';
            end;
        end;
    end;
end;
%-----CSD-formulation-----
for omega=s
    SAxy(:, :, omega)=Tleft(:, :, omega)*Sf*Tright(:, :, omega);
    J(omega)=trace((data.Sxy(:, :, omega)-SAxy(:, :, omega))^2);
    G(omega)=trace(data.Sxy(:, :, omega)^2);
end;
%-----
E=abs(sum(J)/sum(G));
*****
%----plot_fit.m---- (called by AmbientVibrOptim)----->
%----plots the fit between measured & calculated csd, that results after the
sweeps--->
function plot_fit(data)
global SAxy;
%----plots the fit between measured & calculated csd (only the i-i plots)--->
for j=1:data.nout
    figure(data.f0+1)
    subplot(data.nout,1,j)

```

```

plot(data.W/(2*pi),abs(data.Pxy(data.duration,j,j)), 'r:');
hold on;
plot(data.W/(2*pi),abs(permute(SAxy(j,j,data.duration),[3 1 2])), 'b');
title(data.title);
ylabel(['Spect. Density ', num2str(j), '- ', num2str(j)]);
saveas(gcf,[data.path, data.output, num2str(data.f0), '_Initial_Fit', '.fig'])

end;

*****
%----print_on_output_1.m----- (called by AmbientVibrOptim)--->
%----prints on the specified file the results from 1st sweep----->
function [fid]=print_on_output_1(data,theta,fid)
w=theta.wl;Z=theta.Zl;v=theta.vl;t=theta.tl;Error=theta.E;funval=theta.funval;eval=
theta.eval;iter=theta.iter;
fprintf(fid,'| Modes | Frequencies | Damping ratios | Error
| Function | Iterations |\n');
fprintf(fid,'| (Hz) | (%) | (%)
| Evaluations | |\n');
fprintf(fid,'|-----|-----|-----|-----
|-----|\n');
for r=1:data.nmode
fprintf(fid,'| %2i | %8.2f | %8.2f | %8.2f |
%4d | %4d |\n',r,v(r),Z(r)*100,Error(r)*100,eval(r),iter(r));
end;
fprintf(fid,'\n\n| Modeshape Components |');
fprintf(fid,'\n|-----|\n');
%<<<<<<-----<<<<<<-----<<<<<<-----<<<<<<-----
frq_per_row=5;
frq_per_rowSS=frq_per_row; %is needed to print the last line of matrix
frqA=1:length(v);
if length(v)<frq_per_row %#of frequencies
frq_per_row=length(v);
end
tt=ceil(length(v)/frq_per_row); %how many times matrix will be written
for g=1:tt
if tt~=1 & g==tt & rem(length(v),(tt-1)*frq_per_row)~=0
frq_per_row=rem(length(v),(tt-1)*frq_per_row);
end
if tt~=1 & g==tt & rem(length(v),(tt-1)*frq_per_rowSS)~=0 %loop for the case
#frq is not devided exact with frq_per_row
fprintf(fid,'\n\n| Measured DOF |');
for r=1: rem(length(v),(tt-1)*frq_per_rowSS)
fprintf(fid,' Mode %2i |',frqA((tt-1)*frq_per_rowSS+r));
end
fprintf(fid,'\n|-----|');
for m=1:frq_per_row*16
fprintf(fid,'-%',m);
end
for j=1:data.nout
fprintf(fid,'\n| %2i |',j);
for r=1: rem(length(v),(tt-1)*frq_per_rowSS)
fprintf(fid,' %8.2f |',theta.phi(j,(tt-1)*frq_per_rowSS+r));
end
end
else
fprintf(fid,'\n| Measured DOF |');
for r=1:frq_per_row
fprintf(fid,' Mode %2i |',frqA((g-1)*frq_per_row+r));
end
fprintf(fid,'\n|-----|');
for m=1:frq_per_row*16
fprintf(fid,'-%',m);
end
for j=1:data.nout
fprintf(fid,'\n| %2i |',j);
for r=1: frq_per_row

```

```

        fprintf(fid,' %8.2f      |',theta.phi(j,(g-1)*frq_per_row+r));
    end
end
end
end;

fprintf(fid,'\n');
fprintf(fid,'\n\n| Elapsed Time(min)      |');
fprintf(fid,'\n|-----|');
fprintf(fid,'\n|      %8.2f      |',t);
%----->
fprintf(fid,'\n\n\n\n\n');
fprintf(fid,'
=====');
fprintf(fid,'\n
                        FINAL RESULTS\n');
fprintf(fid,'
=====\\n');
*****
%---plot_Final_fit.m----- (called by AmbientVibrOptim)----- >
%---plots the fit between measured & calculated csd, that results after the
sweeps--->
function plot_Final_fit(data)
global E theta data SAxy;

figure(data.f0+2)
for j=1:data.nout
    subplot(data.nout,1,j)
    plot(data.W/(2*pi),abs(data.Pxy(data.duration,j,j)),'r');
    hold on;
    plot(data.W/(2*pi),abs(permute(SAxy(j,j,data.duration),[3 1 2])),'b');
    title(data.title);
    ylabel(['Spect. Density',num2str(j),'-',num2str(j)])
    saveas(gcf,[data.path, data.output,'-Final-Fit','fig'])
end;

*****
%---print_on_output_2.m---- (called by AmbientVibrOptim)----->
%---prints on the specified file the final results----->
function [fid]=print_on_output_2(data,theta,fid)
fprintf(fid,'   Frequency Range for fit.....: %4d - %4d
Hz',eval(data.f1),eval(data.f2));
fprintf(fid,'\n\n   Segment Period.....:%8.2f
sec',data.Tsegment);
fprintf(fid,'\n\n   Number of Segments
.....:%8.2f',data.Nsegment);
fprintf(fid,'\n\n   Dw = Sampling Frequency.....:%8.2f',data.dw);
fprintf(fid,'\n\n   Dt = Sampling Time .....:
%6.4f',data.dt);

data.nmode=data.nm;%for intermediate results
w=theta.w2;Z=theta.Z2;v=theta.v2;t=theta.t2;sweep=theta.sweeps;Error=theta.E;
funval=theta.funval;eval=theta.eval;iter=theta.iter;
fprintf(fid,'\n\n\n| Modes | Frequencies      | Damping ratios  | Error      |
Function  | Iterations | Sweep  |\n');
fprintf(fid,'|      |      (Hz)      |      (%)      |      (%)      |
Evaluations |      |      |\n');
fprintf(fid,'|-----|-----|-----|-----|-----|
---|-----|-----|\n');
for r=1:data.nmode
    fprintf(fid,'| %2i |      %8.2f |      %8.2f | %8.2f | %4d |
%4d | %4d |\n',r,v(r),Z(r)*100,Error(r)*100,eval(r),iter(r),sweep);
end;
fprintf(fid,'\n\n| Modeshape Components      |');
fprintf(fid,'\n|-----|\n');
%<<<<<<-----<<<<<<-----<<<<<<-----
frq_per_row=5;
frq_per_rowSS=frq_per_row; %is needed to print the last line of matrix
frqA=1:length(v);

```

```

    if length(v)<frq_per_row      %#of frequencies
        frq_per_row=length(v);
    end
tt=ceil(length(v)/frq_per_row);  %how many times matrix will be written
for g=1:tt
    if tt~=1 & g==tt & rem(length(v),(tt-1)*frq_per_row)~=0
        frq_per_row=rem(length(v),(tt-1)*frq_per_row);
    end
    if tt~=1 & g==tt & rem(length(v),(tt-1)*frq_per_rowSS)~=0  %loop for the case
#frq is not divided exact with frq_per_row
        fprintf(fid,'\n\n| Measured DOF |');
        for r=1: rem(length(v),(tt-1)*frq_per_rowSS)
            fprintf(fid,'    Mode  %2i    |',frqA((tt-1)*frq_per_rowSS+r));
        end
        fprintf(fid,'\n|-----|');
        for m=1:frq_per_row*16
            fprintf(fid,'-%',m);
        end

        for j=1:data.nout
            fprintf(fid,'\n|    %2i    |',j);
            for r=1: rem(length(v),(tt-1)*frq_per_rowSS)
                fprintf(fid,'  %8.2f    |',theta.phi(j,(tt-1)*frq_per_rowSS+r));
            end
        end
    else
        fprintf(fid,'\n| Measured DOF |');
        for r=1:frq_per_row
            fprintf(fid,'    Mode  %2i    |',frqA((g-1)*frq_per_row+r));
        end
        fprintf(fid,'\n|-----|');
        for m=1:frq_per_row*16
            fprintf(fid,'-%',m);
        end

        for j=1:data.nout
            fprintf(fid,'\n|    %2i    |',j);
            for r=1: frq_per_row
                fprintf(fid,'  %8.2f    |',theta.phi(j,(g-1)*frq_per_row+r));
            end
        end
    end
end
end;fprintf(fid,'\n');
fprintf(fid,'\n\n| Elapsed Time(min)    |');
fprintf(fid,'\n|-----|');
fprintf(fid,'\n|    %8.2f    |',t);
%----->
fclose(fid);
%----->

```

### ***β. Κώδικας για ελεύθερη ταλάντωση - FREE VIBRATION***

```

%-----FreeVibrOptim.m----->
%-----Main m.file: Runs optimization sweeps => finds the optimal theta
parameters/modal properties----->
%----- Plots fit between measured and calculated response----->
%----- Prints intermediate & final results----->
%----- Uses the Classically Damped Case Algorithm----->
clear all;
close all;
tic
global XA;
[data,thetaga]=pre_processing;      %---read & process input data----->
[datamode,theta]=moremodes(data);
options=data.options;               %---Options for optimization routine--->
[fid]=print_on_input_1(data,thetaga); %---Prints input data on output file->

```



```

%---1st Modal Sweep----->
for r=datamode.imode+1:data.nmode
    data.nm=r;
    data.nmodecurrent=r;
    r,pause(1)
    fprintf('\n Genetic Algorithm Optimization Performance \n')
    data.optimumnumber=3; %Number of the optimization parameters
    [x]=Main(data,thetaga,theta,r);
    th0(1)=x(1);
    th0(2)=x(2);
    th0(3)=x(3);
    th0
    fprintf('\n Fminunc Algorithm Optimization Performance \n')
    [th,fval,exitflag,output]=fminunc('ObjFreeVibr',th0,options,data,theta);
    th
    theta.funval(r)=fval; theta.eval(r)=output.funcCount;
theta.iter(r)=output.iterations;
    Eprev(r)=theta.funval(r);

    theta.lambda(r)= 2*pi*(-th(2).*th(1)+i.*th(1).*sqrt(1-th(2).^2));
    theta.rhoRE(r)=real( exp( theta.lambda(r)*data.dt ) );
    theta.rhoIM(r)=imag( exp( theta.lambda(r)*data.dt ) );
    theta.e(r)=th(3);

    theta.t1(r)=th(1);
    theta.t2(r)=th(2);
    theta.t3(r)=th(3);
end;
%----->
%---Computation of relative error for each mode----->
for k=1:r
    data.nmodecurrent=k;
    E=ObjFreeVibr(th,data,theta);
    theta.E(k)=E;
end;
%----->
figure(4)
plot_fit(data);title('1st sweep'); %---Plots fit for 1st modal sweep----->
saveas(gcf,[data.path, data.output,'4','fig'])
[omega,freqHz,zeta,phi]=modal_properties(th,data,theta); %---Computation of modal
properties from 1st sweep--->
theta.phi=phi;

theta.time1=toc/60 %minutes
[fid]=print_on_output_1(data,theta,fid); %---Prints results from 1st sweep on
output file---->

fprintf('hello')

%---Continue Modal Sweeps for higher accuracy----->
data.nmodecurrent=data.nmode;
Esw=10^10;
numswEEP=0;
while Esw>=data.sweepaccur & numswEEP<data.maxnumswEEps
    numswEEP=numswEEP+1;
    fprintf('\n Modal sweep: %g ',numswEEP)
    for r=datamode.imode+1:data.nmode
        data.nm=r;
        r,pause(1)
        th0(1)=theta.t1(r);
        th0(2)=theta.t2(r);
        th0(3)=theta.t3(r);
        [th,fval,exitflag,output]=fminunc('ObjFreeVibr',th0,options,data,theta);
        theta.funval(r)=fval; theta.eval(r)=output.funcCount;
    theta.iter(r)=output.iterations;
        res=(th-th0)./th;
        EswEEP(r)=1/size(th,2)*norm(res,2);
    end;
end;

```

```

theta.lambda(r)= 2*pi*(-th(2).*th(1)+i.*th(1).*sqrt(1-th(2).^2));
theta.rhoRE(r)=real( exp( theta.lambda(r)*data.dt ) );
theta.rhoIM(r)=imag( exp( theta.lambda(r)*data.dt ) );
theta.e(r)=th(3);

theta.t1(r)=th(1);
theta.t2(r)=th(2);
theta.t3(r)=th(3)
end;
Esw=1/data.nmode*norm(Esweep,2);
end;
theta;
%----->
%---Computation of relative error for each mode----->
for v=1:data.nmode
    data.nmodecurrent=v;
    E=ObjFreeVibr(th,data,theta);
    theta.E(v)=E;
end;
saveas(gcf,[data.path, data.output,'5','fig'])
%----->
figure(6)
plot_fit(data);title('2nd sweep'); %---Plots final fit ----->
saveas(gcf,[data.path, data.output,'6','fig'])
[omega,freqHz,zeta,phi]=modal_properties(th,data,theta); %---Computation of final
modal properties--->
theta.freqHz2=freqHz;
theta.zeta2=zeta;
theta.phi2=phi;
theta.time2=toc/60 %minutes
theta.sweeps=numsweep;
[fid]=print_on_output_2(data,theta,fid); %---Prints final results on output file--
-->
FreeVibr_data_save=[data.path,data.output,'.mat']
save(eval('FreeVibr_data_save'),'*')
%----->
*****

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% BASIC INPUT DATA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
MeasDataFile='FreeVibr119.mat'; %---Path for the mat file whith
the measured data--> %%
PathName='C:\maria_p_122\IDEMO\FREE_VIBR\Output\'; %---Path for the output file to
print on results---> %%
OutputName='test'; %---Specify the name of the
output mat file-----> %%
%%
ActiveMeasData=[3 5]; %---array with the measurement data columns to be
examined-----> %%
Dt=0.005; %---Discretization time----->
%%
Tmin=0; %---Tmin of the time history----->
%%
IMode=0; %---Number of modes from where on starts the optimization
for the remaining modes----> %%
NumMode=2; %---Number of modes to be identified!---->
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% DATA RANGE FOR COMPUTATION %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
Lowert='1'; %---lower time in sec--->
%%
Highert='5'; %---upper time limit in sec--->
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% GA PARAMETERS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
RangeOmega=[... %---GA Search range for frequencies---[lower limit upper
limit]-----> %%

```

```

1 5;
1 5;
]          %---Add as many lines as the number of modes to be
identified...          %%
                    %...(see NumMode variable)
%%
RangeDamping=[0.01 1] %---GA Search area for damping ratios---[lower limit
upper limit]---->          %%
Rangee=[-5 5];
%%
DiscOmega=8;          %---Control of the discretization of the population
space...          %%
DiscDamping=8;       %...(Real Integer Positive)
%%
Disce=10;
%%
Maxgenerations=100;  %---Maximum Number of Generations
%%
PopulationSize=20;   %---Population Size
%%
CrossoverProbability=0.9;%---Probability of Crossover
%%
MutationProbability=0.1; %---Probability of Mutation
%%
%%%%%%%%%% OPTIMIZATION OPTIONS %%%%%%%%%%%
%%
%---Options for Quasi-Newton Algorithm (for optimization routine fminunc)
%%
FminuncOptions=optimset('GradObj','off','Display','iter','DerivativeCheck','off','M
axFunEvals',3000,...          %%
    'LargeScale','off','TolFun',1.e-7,'TolX',1.e-7,'MaxIter',200,'Diagnostics','on');
%%
SweepAccur=1.e-03; %---Sweep accuracy used in optimization----->
%%
MaxNumSweeps=15      %---Maximum Number of sweep iterations----->
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [data,thetaga]=pre_processing

[data,thetaga]=structuring;

data.filename=[data.path, data.output,'.out'];
load(data.measdata); %---read output time histories from specified mat file>
data.Accel=Accel;clear Accel;

for i=1:length(data.ActiveMD)
data.AbsAccel(:,i)=[data.Accel(:,data.ActiveMD(i))];
end;

clear data.Accel;

data.nout=size(data.AbsAccel,2);

%data.nmode=length(thetaga.wmin);          %---Number of freq values defines # of
modes to be identified!---->

%-----Total data range----->
data.tmax=data.dt*length(data.AbsAccel)-data.dt;%---Tmax of the time history [sec]-
->
data.t=data.tmin:data.dt:data.tmax;      %---Sampled time from {Tmin,Tmax}--->
ex=ceil(log(length(data.t))/log(2));      %---exponent----->
data.n=2^ex;                               %--- # of points for FFT----->

%----->
Q1=input('>>>>> Plot Time Histories & FFT plots? [yes=1]/[no=0]=>>','s');
A1=eval(Q1);
if A1 == '1'

```

```

        initial_plots(data,thetaga)           %---plot of total time histories---->
elseif A1 == '0'
end

Q3=input('>>>>> Continue execution of the program?
[yes=1]/[no=0]=>>', 's');A3=eval(Q3);
if A3 == '0'
    fprintf('\n\n
    fprintf('* (IGNORE ERROR MESSAGES) *
    error('
    fprintf('\n\n
elseif A3 == '1'
end
%----->
data.n1=eval(data.t1)/data.dt+1;
data.n2=eval(data.t2)/data.dt+1;
data.duration=data.n1:data.n2;

thetaga.wmin=2*pi*thetaga.RangeOmega(:,1)';
thetaga.wmax=2*pi*thetaga.RangeOmega(:,2)';
thetaga.zmin=thetaga.RangeDamping(1);
thetaga.zmax=thetaga.RangeDamping(2);
thetaga.emin=thetaga.Rangee(1);
thetaga.emax=thetaga.Rangee(2);

*****
%---initial_plots.m----- (called by FrVibr_data_file.m) ----->
function initial_plots(data,theta)
%---Time history & FFT plots----->
for j=1:data.nout
    data.y(:, :, j)=fft((data.AbsAccel(:, j))', data);
    data.yh(:, j)=data.y(:, 4, j);
    figure(1), subplot(data.nout, 1, j)
    plot(data.t(1:length(data.AbsAccel)), data.AbsAccel(:, j)', 'r'); title('TIME
HISTORIES');%plot of time histories
    figure(2), subplot(data.nout, 1, j);
    plot(data.y(1:data.n/2, 1, 1), abs(data.yh(1:data.n/2, j)), 'r');%plot of fft
    title('FFT PLOT');xlabel('freq [Hz]')
%----->
end;
*****

function [data,thetaga]=structuring

FrVibr_data_file;

data.path=PathName;
data.output=OutputName;
data.measdata=MeasDataFile;
data.ActiveMD=ActiveMeasData;
data.dt=Dt;
data.tmin=Tmin;
data.imode=IMode;
data.nmode=NumMode;
data.t1=Lowert;
data.t2=Highert;
data.discw=DiscOmega;
data.discz=DiscDamping;
data.disce=Disce;
data.maxgen=Maxgenerations;
data.popsize=PopulationSize;
data.Pc=CrossoverProbability;
data.Pm=MutationProbability;
data.options=FminuncOptions;
data.sweepaccur=SweepAccur;
data.sweepaccur=SweepAccur;
data.maxnumsweeps=MaxNumSweeps;

```

```

thetaga.RangeOmega=RangeOmega;
thetaga.RangeDamping=RangeDamping;
thetaga.Rangee=Rangee;

*****
function [x]=Main(data,thetaga,theta,r)
%----->
----->
vimaw(r)=(thetaga.wmax(r)-thetaga.wmin(r))/(2^data.discw-1);
vimaz=(thetaga.zmax-thetaga.zmin)/(2^data.discz-1);
vimaе=(thetaga.emax-thetaga.emin)/(2^data.disce-1);

param.d=[thetaga.wmin(r) vimaw(r) thetaga.wmax(r); %population range of
thetaga.freq coef
        thetaga.zmin vimaz thetaga.zmax;           %population range of
thetaga.zeta coef
        thetaga.emin vimaе thetaga.emax];         %population range of thetaga.e

param.n=data.optimnumber; %number of variables of the objective function

% control parameters
options = foptions([1 1e-6 1e-6]);
maxgen = data.maxgen; % max # of generations [200 100 40 10]
Pc= data.Pc; % probability of crossover
Pm =data.Pm; % probability of mutation
popsize =data.popsize; % population size [10 20 50 100]

% initialization of population
initpop = bininit(popsize,param,'GAObjFree',data,theta);

% GA run
[bestsol,endpop,bestpop,traceinfo]=...
    ga('GAObjFree',param,initpop,[1e-6 1 1],maxgen,Pc,Pm,data,theta);
[x,valid] = decode(bestsol,param);
*****
%----GAObjFree.m----->
%----Computation of the objective function J & relative error E----->
function [E, th]=GAObjFree(th,param,data,theta)
global XA;
[th,valid]=decode(th,param);
if valid==1
    s=data.duration;
    k=1:length(s);
    r=data.nm;
    theta.lambda(r)= 2.*pi.*(-th(2).*th(1)+i.*th(1).*sqrt(1-th(2).^2));
    theta.rhoRE(r)=real( exp(theta.lambda(r)*data.dt) );
    theta.rhoIM(r)=imag( exp(theta.lambda(r)*data.dt) );
    theta.e(r)=th(3);
    %-----Computation of alpha----->
    for r=1:data.nmodecurrent;
        alpha(r,k)=2*real((1+i*theta.e(r))*((theta.rhoRE(r)+i*theta.rhoIM(r)).^k));
    end;

    %-----Computation of phi for given theta----->
    for j=1:data.nout;
        for g=1:data.nmodecurrent
            for h=g:data.nmodecurrent
                A(g,h)=alpha(g,:)*alpha(h,:);
                A(h,g)=A(g,h);
                b(j,g)=data.AbsAccel(s,j)'*alpha(g,:);
            end;
        end;
        phi(:,j)=A(:,:)\b(j,:);
    end;

    %----Objective function----->
    for j=1:data.nout;
        XA(j,:)=phi(:,j)'*alpha;
    end;
end;

```

```

J=(data.AbsAccel(s,j) '-XA(j,:)').^2;
G=((data.AbsAccel(s,j)')).^2);
Jf(j)=sum(J);
Gf(j)=sum(G);
end;
%----Error----->
E=-sum(Jf)/sum(Gf);
%----->

else
    E=-inf;
end
*****
%----ObjFreeVibr.m----- (called by fminunc in FreeVibrOptim)----->
%----Computation of the objective function J & relative error E----->
function E=ObjFreeVibr(th,data,theta)
global XA;
s=data.duration;
[phi,alpha]=phi_form_CDC(th,data,theta);
%----Objective function----->
for j=1:data.nout;

XA(j,:)=phi(:,j) '*alpha;

J=(data.AbsAccel(s,j) '-XA(j,:)').^2;
G=((data.AbsAccel(s,j)')).^2);
Jf(j)=sum(J);
Gf(j)=sum(G);
end;
%----Error----->
E=sum(Jf)/sum(Gf);
%----->
*****
%---print_on_input_1.m----- (called by FrVibr_Optim)----->
%---prints on a specified file the necessary initial estimates----->
function[fid]=print_on_input_1(data,thetaga)
data.filename=[data.path, data.output, '.out'];
if exist(data.filename)==2; delete (data.filename); end %if the file exist,
replase with a new one
fid=fopen(data.filename, 'a');
fprintf(fid, '
===== \n');
fprintf(fid, '          INPUT PARAMETERS \n');
fprintf(fid, '
===== \n');
%1=====
fprintf(fid, ' Loaded File Name with Measurements.....:
%s', data.measdata);

%2=====
fprintf(fid, '\n\n Number of Modes to be Experimentaly
Identified....: %6g', length(thetaga.RangeOmega));

%3=====
fprintf(fid, '\n Number of Measured Output Time
Histories.....: %6g', length(data.ActiveMD));

%4=====
fprintf(fid, '\n\n=====
===== \n');
fprintf(fid, '          GENETIC ALGORITHM PARAMETERS \n');
fprintf(fid, '
===== \n');

%5=====
fprintf(fid, '|    Max    | Population | Frequency   | Damping   | e
|Crossover  | Mutation  | \n');

```

```

fprintf(fid,'| Generations |      Size      | Discretization | Discretization|
Discretization |Probability | Probability|\n');
fprintf(fid,'|-----|-----|-----|-----|-----|
-----|\n');
fprintf(fid,'|      %2i      |      %2i      |      %2i      |      %2i      |
%2i      |      %2.2f      |      %2.2f      |\n',
data.maxgen,data.popsize,data.discw,data.discz,data.disce,data.Pc,data.Pm);

%6=====
vmin=thetaga.wmin/(2*pi);vmax=thetaga.wmax/(2*pi);
zmin=thetaga.zmin;zmax=thetaga.zmax;
fprintf(fid,'\n\n');
fprintf(fid,'
=====');
fprintf(fid,'\n
INITIAL GUESSES\n');
fprintf(fid,'
=====\n');
fprintf(fid,'|
|      Range of      |      Range of      |      Range of
|\n');
fprintf(fid,'|      Modes      |      Frequencies(Hz) |      Damping ratios(%) |      e
|\n');
fprintf(fid,'|-----|-----|-----|-----|
----|\n');
for r=1:data.nmode
    fprintf(fid,'|      %2i      | %6.2f\t-%6.2f      | %6.2f -%6.2f      | %6.2f -%6.2f
|\n',r,vmin(r),vmax(r),zmin,zmax,thetaga.Rangee);
end;
fprintf(fid,'\n\n');
fprintf(fid,'
=====');
fprintf(fid,'\n
INTERMEDIATE RESULTS from 1st sweep == INITIAL GUESSES for
2nd sweep\n');
fprintf(fid,'
=====\n');
%----->

*****
%----plot_fit.m----- (called by FrVibr_Optim)----->
%----plots the fit between measured & calculated response, that results after the
sweeps--->
function plot_fit(data)
global XA;
for j=1:data.nout
    subplot(data.nout,1,j)
        plot(data.t(data.duration),(data.AbsAccel(data.duration,j)), 'r');
        hold on;plot(data.t(data.duration),XA(j,:), 'b--');
end;
%----->
*****
%----modal_properties.m----- (called by FrVibr_Optim)----->
%----Computation of modal properties from theta estimates----->
function [omega,freqHz,zeta,phi]=modal_properties(th,data,theta)
freqHz=theta.t1;
zeta=theta.t2;
[phi,alpha]=phi_form_CDC(th,data,theta);
phi=phi';
%----->
*****
%----phi_form_CDC.m----- (called by ObjFreeVibr.m & Xdiff_form.m)----->
%----Computation of phi parameters for given theta----->
function [phi,alpha]=phi_form(th,data,theta)
s=data.duration;k=1:length(s);
r=data.nm;

theta.lambda(r) = 2.*pi.*(-th(2).*th(1)+i.*th(1).*sqrt(1-th(2).^2));
theta.rhoRE(r)=real( exp(theta.lambda(r)*data.dt) );
theta.rhoIM(r)=imag( exp(theta.lambda(r)*data.dt) );
theta.e(r)=th(3);

```

```

%-----Computation of alpha----->
for r=1:data.nmodecurrent;
alpha(r,k)=2*real((1+i*theta.e(r))*((theta.rhoRE(r)+i*theta.rhoIM(r)).^k));
end;

%-----Computation of phi for given theta----->
for j=1:data.nout;
    for g=1:data.nmodecurrent
        for h=g:data.nmodecurrent
            A(g,h)=alpha(g,:)*alpha(h,:);
            A(h,g)=A(g,h);
            b(j,g)=data.AbsAccel(s,j)'*alpha(g,:);
        end;
    end;%A,b,pause
phi(:,j)=A(:,:)\b(j,:);
end;

%----->
*****
%----print_on_output_1.m----- (called by FrVibr_Optim)----->
%----prints on the specified file the results from 1st sweep----->
function [fid]=print_on_output_1(data,theta,fid)
v=theta.t1;Z=theta.t2;t=theta.timel;e=theta.e;Error=theta.E;funval=theta.funval;eval=theta.eval;iter=theta.iter;
fprintf(fid,'| Modes | Frequencies | Damping ratios | Error
| Function | Iterations |\n');
fprintf(fid,'| (Hz) | (%%) | (%%)
| Evaluations | |\n');
fprintf(fid,'|-----|-----|-----|-----
-|-----|\n');
for r=1:data.nmode
    fprintf(fid,'| %2i | %8.2f | %8.2f | %8.2f |
%4d | %4d |\n',r,v(r),Z(r)*100,Error(r)*100,eval(r),iter(r));
end;
fprintf(fid,'\n\n| Modeshape Components |');
fprintf(fid,'\n|-----|\n');
%<<<<<<-----<<<<<<-----<<<<<<-----
frq_per_row=5;
frq_per_rowSS=frq_per_row; %is needed to print the last line of matrix
frqA=1:length(v);
    if length(v)<frq_per_row %#of frequencies
        frq_per_row=length(v);
    end
tt=ceil(length(v)/frq_per_row); %how many times matrix will be written
for g=1:tt
    if tt~=1 & g==tt & rem(length(v),(tt-1)*frq_per_row)~=0
        frq_per_row=rem(length(v),(tt-1)*frq_per_row);
    end
    if tt~=1 & g==tt & rem(length(v),(tt-1)*frq_per_rowSS)~=0 %loop for the case
#frq is not divided exact with frq_per_row
        fprintf(fid,'\n\n| Measured DOF |');
        for r=1:rem(length(v),(tt-1)*frq_per_rowSS)
            fprintf(fid,' Mode %2i |',frqA((tt-1)*frq_per_rowSS+r));
        end
        fprintf(fid,'\n|-----|');
        for m=1:frq_per_row*18
            fprintf(fid,'-%',m);
        end
    end

    for j=1:data.nout
        fprintf(fid,'\n| %2i |',j);
        for r=1:rem(length(v),(tt-1)*frq_per_rowSS)
            fprintf(fid,' %10.6f |',theta.phi(j,(tt-1)*frq_per_rowSS+r));
        end
    end
else
    fprintf(fid,'\n| Measured DOF |');
    for r=1:frq_per_row

```





```

    if tt~=1 & g==tt & rem(length(v),(tt-1)*frq_per_rowSS)~=0 %loop for the case
#frq is not devided exact with frq_per_row
    fprintf(fid,'\n\n| Measured DOF |');
    for r=1:rem(length(v),(tt-1)*frq_per_rowSS)
        fprintf(fid,'      Mode  %2i      |',frqA((tt-1)*frq_per_rowSS+r));
    end
    fprintf(fid,'\n|-----|');
    for m=1:frq_per_row*18
        fprintf(fid,'-%',m);
    end

    for j=1:data.nout
        fprintf(fid,'\n|      %2i      |',j);
        for r=1:rem(length(v),(tt-1)*frq_per_rowSS)
            fprintf(fid,' %10.6f      |',theta.phi(j,(tt-1)*frq_per_rowSS+r));
        end
    end
else
    fprintf(fid,'\n| Measured DOF |');
    for r=1:frq_per_row
        fprintf(fid,'      Mode  %2i      |',frqA((g-1)*frq_per_row+r));
    end
    fprintf(fid,'\n|-----|');
    for m=1:frq_per_row*18
        fprintf(fid,'-%',m);
    end

    for j=1:data.nout
        fprintf(fid,'\n|      %2i      |',j);
        for r=1:frq_per_row
            fprintf(fid,' %10.6f      |',theta.phi(j,(g-1)*frq_per_row+r));
        end
    end
end
end;
fprintf(fid,'\n');
fprintf(fid,'\n\n| Elapsed Time(min) |');
fprintf(fid,'\n|-----|');
fprintf(fid,'\n|      %8.2f      |',t);
%----->
fclose(fid);
%----->
*****

```

### γ. ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

```

function [pop] = bininit(popsize,param,evalFN,data,theta)
numbit=1;
for i=1:param.n
    numbit=numbit+ceil(log2(length([param.d(i,1):param.d(i,2):param.d(i,3)])));
    pop=rand(popsize,numbit)<0.5;
end

for i=1:popsize
    x = pop(i,1:numbit-1);
    [fit x] = feval(evalFN,x,param,data,theta);
    pop(i,numbit) = fit;
end
*****
function [x,endPop,bPop,traceInfo] = ga(evalFN,evalOps,startPop,opts,termOps,...
    xOverOps, mutOps,data,theta)
% GA run a genetic algorithm
% function [x,endPop,bPop,traceInfo]=ga(evalFN,evalOps,startPop,opts,termOps,...
%     xOverOps, mutOps)
%
%

```

```

% Output Arguments:
%   x           - the best solution found during the course of the run
%   endPop      - the final population
%   bPop        - a trace of the best population
%   traceInfo   - a matrix of best and means of the ga for each generation
%
% Input Arguments:
%   bounds      - a matrix of upper and lower bounds on the variables
%   evalFN      - the name of the evaluation .m function
%   evalOps     - options to pass to the evaluation function ([NULL])
%   startPop    - a matrix of solutions that can be initialized
%               from initialize.m
%   opts        - [epsilon prob_ops display] change required to consider two
%               solutions different, prob_ops 0 if you want to apply the
%               genetic operators probabilistly to each solution, 1 if
%               you are supplying a deterministic number of operator
%               applications and display is 1 to output progress 0 for
%               quiet. ([1e-6 1 0])
%   termFN      - name of the .m termination function (['maxGenTerm'])
%   termOps     - options string to be passed to the termination function
%               ([100]).

mutFNs=['binaryMutation'];
xOverFNs=['simpleXover'];
selectFN=['tournSelect'];
selectOps=[2];

xZomeLength = size(startPop,2);           %Length of the xzome=numVars+fitness
numVar      = xZomeLength-1;             %Number of variables
popSize     = size(startPop,1);          %Number of individuals in the pop
endPop      = zeros(popSize,xZomeLength); %A secondary population matrix
c1          = zeros(1,xZomeLength);     %An individual
c2          = zeros(1,xZomeLength);     %An individual
epsilon     = opts(1);                  %Threshold for two fitness to differ
oval        = max(startPop(:,xZomeLength)); %Best value in start pop
bFoundIn   = 1;                          %Number of times best has changed
done        = 0;                          %Done with simulated evolution
gen         = 1;                          %Current Generation Number
collectTrace = (nargout>3);              %Should we collect info every gen
display     = opts(3);                    %Display progress
%numXOvers  = size(xOverFNs,1);          %Number of Crossover operators
%numMuts    = size(mutFNs,1);            %Number of Mutation operators

% main GA loop
while(~done)

    %Elitist Model - find the best individual
    [bval,bindx] = max(startPop(:,xZomeLength)); %Best of current pop
    best = startPop(bindx,:);

    % collect data
    if collectTrace
        traceInfo(gen,1)=gen;                %current generation
        traceInfo(gen,2)=startPop(bindx,xZomeLength); %Best fitness
        traceInfo(gen,3)=mean(startPop(:,xZomeLength)); %Avg fitness
    end

    %If we have a new best sol
    if ( (abs(bval - oval)>epsilon) | (gen==1))
        if display
            fprintf(1,'\n%d %f\n',gen,bval); %Update the display
        end

        %Update bPop Matrix

        %   bPop(bFoundIn,:)= [gen startPop(bindx,:) startPop(bindx,xZomeLength)];
        %   bPop(bFoundIn,:)= [gen startPop(bindx,:)]];

```

```

        bFoundIn=bFoundIn+1;           %Update number of changes
        oval=bval;                     %Update the best val
    else
        if display
            fprintf(1,'%d ',gen);     %Otherwise just update num gen
        end
    end

    % Selection
    endPop = feval(selectFN,startPop,[gen selectOps]); %Select

    % Crossover
    cp=find(rand(popSize,1)<xOverOps(1)==1);
    if rem(size(cp,1),2) cp=cp(1:(size(cp,1)-1)); end
    cp=reshape(cp,size(cp,1)/2,2);
    for j=1:size(cp,1)
        a=cp(j,1); b=cp(j,2);

    [endPop(a,:) endPop(b,)] = simpleXover(endPop(a,:),endPop(b,:),...
        [],[gen xOverOps]);
    end

    %Mutation
    for j=1:popSize
        endPop(j,:) = binaryMutation(endPop(j,:),[],[gen mutOps]);

        % Update string and its fitness
        x = endPop(j,1:numVar);
        [fit x] = feval(evalFN,x,evalOps,data,theta);
        endPop(j,xZomeLength) = fit;
    end

    gen=gen+1;

    % done=feval(termFN,[gen termOps],bPop,endPop); %See if the ga is done
    done = maxGenTerm([gen termOps],bPop,endPop);
    startPop=endPop;           %Swap the populations

    [bval,bindx] = min(startPop(:,xZomeLength)); %Keep the best solution
    startPop(bindx,:) = best;           %replace it with the worst
end

[bval,bindx] = max(startPop(:,xZomeLength));
if display
    fprintf(1,'\n%d %f\n',gen,bval);
end

x=startPop(bindx,:);

bPop(bFoundIn,:)=[gen startPop(bindx,:)];

if collectTrace
    traceInfo(gen,1)=gen;           %current generation
    traceInfo(gen,2)=startPop(bindx,xZomeLength); %Best fitness
    traceInfo(gen,3)=mean(startPop(:,xZomeLength)); %Avg fitness
end
*****
function [x,valid] = decode(delta,param)

x=zeros(1,param.n);

for i=1:param.n
    cat(i)=ceil(log2(length([param.d(i,1):param.d(i,2):param.d(i,3)])));
end
index(1)=0;

```

```

for i=1:param.n
    tmp=[param.d(i,1):param.d(i,2):param.d(i,3)];
    index(1+i)=index(i)+cat(i);
    z=1;
    for j=1:cat(i)
        z=z+delta(index(i)+j)*2^(cat(i)-j);
    end
    if (z<=length(tmp))
        x(i)=tmp(z);
        valid=1;
    else
        valid=0;
        return
    end
end
end
*****
function [parent] = binaryMutate(parent,bounds,Ops)
% Binary mutation changes each of the bits of the parent
% based on the probability of mutation
%
% function [newSol] = binaryMutate(parent,bounds,Ops)
% parent - the first parent ( [solution string function value] )
% bounds - the bounds matrix for the solution space
% Ops - Options for binaryMutation [gen prob_of_mutation]

pm=Ops(2);
numVar = size(parent,2)-1; % Get the number of variables
% Pick a variable to mutate randomly from 1-number of vars
rN=rand(1,numVar)<pm;
parent=[abs(parent(1:numVar) - rN) parent(numVar+1)];
*****
function [Cmax,binvec]=maxfunction(binvec,param)

[x,valid]=decode(binvec,param);

if valid==1
    E=x(1)^2-x(2)^2+x(3)^2-x(4)^2+x(5)^2-x(6)^2;
else
    E=-inf;
end
*****
function [done] = maxGenTerm(ops,bPop,endPop)
% function [done] = maxGenTerm(ops,bPop,endPop)
%
% Returns 1, i.e. terminates the GA when the maximal_generation is reached.
%
% ops - a vector of options [current_gen maximum_generation]
% bPop - a matrix of best solutions [generation_found solution_string]
% endPop - the current generation of solutions
currentGen = ops(1);
maxGen = ops(2);
done = currentGen >= maxGen;
*****
function [c1,c2] = simpleXover(p1,p2,bounds,Ops)
% Simple crossover takes two parents P1,P2 and performs simple single point
% crossover.
%
% function [c1,c2] = simpleXover(p1,p2,bounds,Ops)
% p1 - the first parent ( [solution string function value] )
% p2 - the second parent ( [solution string function value] )
% bounds - the bounds matrix for the solution space
% Ops - Options matrix for simple crossover [gen #SimpXovers].

numVar = size(p1,2)-1; % Get the number of variables
% Pick a cut point randomly from 1-number of vars
cPoint = round(rand * (numVar-2)) + 1;

```

```

c1 = [p1(1:cPoint) p2(cPoint+1:numVar+1)]; % Create the children
c2 = [p2(1:cPoint) p1(cPoint+1:numVar+1)];
*****
function[newPop] = tournSelect(oldPop,options)
% Performs a tournament selection.
%
% function[newPop] = tournSelect(oldPop,options)
% newPop - the new population selected from the oldPop
% oldPop - the current population
% options - options to normGeomSelect [gen tournament_size]

tournSize=options(2); % Get the number of tournaments
e = size(oldPop,2); % xZome length
n = size(oldPop,1); % number in Population
newPop = zeros(n,e); % Create the memory for newPop
turns=floor(rand(tournSize,n)*n)+1; % Schedule of tournaments

% Determine the winner of the tournaments
[c b]=max(reshape(oldPop(turns,e),tournSize,n));
newPop=oldPop(diag(turns(b,:),:)); % Copy the winners in to newPop
*****

```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Θ

### ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ FEMUpdating

#### 1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

#### 2. ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ

#### ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Θ.....	1
1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	2
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	2
1.2.1 Μητρώο FEnode.....	2
1.2.2 Μητρώο FEelt.....	3
1.2.3 Μητρώο pl.....	6
1.2.4 Μητρώο il.....	7
1.2.5 Μητρώο gdof.....	7
1.3 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	9
1.3.1 Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων, Γέφυρας Καβάλας.....	9
2. ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ.....	17
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	17
2.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ.....	17
2.2.1 Δεδομένα Εισόδου για Προχωρημένους Χρήστες.....	22
2.3 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗΣ.....	23
2.4 ΑΝΑΓΝΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	24
2.4.1 Πρώτο Μέρος: Δεδομένα Εισόδου.....	24
2.4.2 Δεύτερο Μέρος: Αποτελέσματα.....	24
2.5 ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	26
2.6 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	27
2.6.1 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	28
2.6.2 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	35
2.6.3 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ C.....	40
α. Simulated Data.....	40
β. Real Data.....	41
2.6.4 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ D.....	42

# 1. Σχεδιασμός Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων

## 1.1 Εισαγωγή

Κατά το σχεδιασμό ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων μίας κατασκευής, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για αναθεώρηση στο λογισμικό FEMUpdating, ο χρήστης πρέπει να δημιουργήσει τους εξής πίνακες:

**FNode** : Περιέχει τις συντεταγμένες των κόμβων

**FEelt** : Εδώ δηλώνονται οι κόμβοι που αποτελούν το κάθε στοιχείο, καθώς και οι ιδιότητες του κάθε στοιχείου.

**pl** : Περιέχει τις ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή που μοντελοποιείται. (μέτρο ελαστικότητας, λόγος του Poisson, πυκνότητα)

**il** : Περιέχει τις ιδιότητες των στοιχείων του μοντέλου (καμπτικές ροπές αδράνειας, στρεπτική ροπή αδράνειας, μέγεθος διατομής).

**gdof** : Περιέχει τους βαθμούς ελευθερίας των οποίων η κίνηση δεν επιτρέπεται.

Για να διευκρινιστεί ο τρόπος σχεδιασμού ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και οι λεπτομέρειες που πρέπει να προσεχτούν, ακολουθεί ένα παράδειγμα σχεδιασμού μοντέλου, μίας απλής δισδιάστατης κατασκευής. (σχήμα 1).

Στο παράρτημα του παρόντος εγχειριδίου χρήσης, παρατίθεται ο κώδικας μοντελοποίησης της γέφυρας της Καβάλας.

## 1.2 Ορισμός του μοντέλου

Έστω ότι επιθυμείται η σχεδίαση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων της δισδιάστατης κατασκευής του σχήματος 1.

### 1.2.1 Μητρώο FNode

Η γεωμετρία της κατασκευής δηλώνεται στον πίνακα **FNode**, όπου περιέχονται οι συντεταγμένες των κόμβων. Κάθε γραμμή του πίνακα είναι της μορφής

[NodeID PID DID GID x y z]

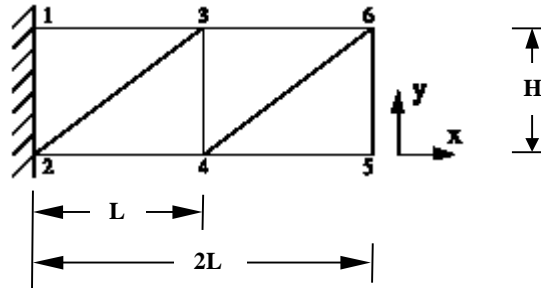
όπου,

NodeID = ο αριθμός του κόμβου. Η αρίθμηση των κόμβων δεν είναι απαραίτητο να είναι διαδοχική. Κατά την αρίθμηση δηλαδή, είναι δυνατόν να παραλειφθούν μερικοί αριθμοί. Αλλά δεν είναι δυνατόν, 2 κόμβοι με διαφορετικές συντεταγμένες να έχουν το ίδιο NodeID.

PID, DID και GID , δηλώνονται ίσες με μηδέν. Είναι παράμετρος που θα χρησιμεύσουν σε μελλοντική έκδοση του λογισμικού.



$x, y, z$  = οι συντεταγμένες των κόμβων. Σε περίπτωση κυλινδρικών συντεταγμένων, οι συντεταγμένες αντιστοιχούν σε  $r, \theta, z$  (ακτίνα, γωνία σε μοίρες και η τιμή του άξονα). Σε περίπτωση πολικών συντεταγμένων, οι συντεταγμένες αντιστοιχούν σε  $r, \theta, z$  (ακτίνα, γωνία σε μοίρες από τον κατακόρυφο άξονα και η τιμή που έχει το αζιμούθιο σε μοίρες).



Σχήμα 1.1

Ο πίνακας FEnode λοιπόν, έχει 7 στήλες. Στην περίπτωση που εξετάζεται το μητρώο θα έχει την παρακάτω μορφή:

```

NodeID      unused      x      y      z
FEnode=[    1  0  0  0  0  1  0;
            2  0  0  0  0  0  0;
            3  0  0  0  1  1  0;
            4  0  0  0  1  0  0;
            5  0  0  0  2  0  0;
            6  0  0  0  2  1  0;
            7  0  0  0  1  1  1];% (κόμβος αναφοράς)
    
```

Ο κόμβος αναφοράς δεν είναι κατ' ανάγκη κόμβος που ανήκει στην κατασκευή. Μπορεί να ανήκει στην κατασκευή ή όχι, ανάλογα με την περίπτωση. Η χρήση του γίνεται στο μητρώο FEelt και θα περιγραφεί με περισσότερη λεπτομέρεια, τόσο η ανάγκη ύπαρξης του όσο και ο τρόπος επιλογής των συντεταγμένων του, στην αντίστοιχη παράγραφο.

### 1.2.2 Μητρώο FEelt

Σε αυτό το μητρώο γίνεται ο ορισμός του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή δηλώνεται από ποιους κόμβους αποτελείται το κάθε στοιχείο και οι ιδιότητες αυτού. Χρησιμοποιούνται ομάδες στοιχείων οι οποίες στοιβάζονται η μια πάνω στην άλλη και οι οποίες διαχωρίζονται από γραμμές "επικεφαλίδες", των οποίων το πρώτο στοιχείο είναι το "Inf" και το οποίο ακολουθείται από το όνομα (τύπο) του στοιχείου.

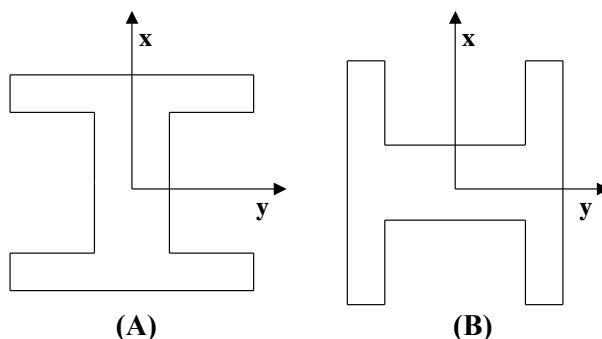
Τα στοιχεία μπορεί να είναι είτε στοιχεία δοκού, είτε συγκεντρωμένες μάζες, είτε απαραμόρφωτα στοιχεία, που υποδηλώνουν άπειρη δυσκαμψία.

Για παράδειγμα ένα μοντέλο (όχι αυτό του σχήματος 1.1) θα μπορούσε να περιγράφεται από τον παρακάτω πίνακα:

```
FEelt =[Inf abs('beam1')    0 0
        1 2 11 12 5         0 0 0
        2 3 11 12 5         0 0 0
        Inf abs('mass1')    0 0
        2 100 100 100 0    0 0 0 ];
```

Το παραπάνω μοντέλο αποτελείται από 2 ομάδες στοιχείων. Η πρώτη ομάδα περιέχει 2 **beam1** στοιχεία. Το ένα στοιχείο οριοθετείται από τους κόμβους 1-2 ενώ το δεύτερο από τους κόμβους 2-3. Και τα δύο στοιχεία έχουν ιδιότητα υλικού 11, ιδιότητα διατομής 12. Το επίπεδο κάμψης του στοιχείου, είναι αυτό που ορίζεται από τους κόμβους του στοιχείου και τον κόμβο 5. Ο κόμβος 5 ονομάζεται κόμβος αναφοράς.

Ο κόμβος αναφοράς είναι απαραίτητος για να περιγραφεί ο προσανατολισμός του κάθε στοιχείου, έτσι ώστε να προκύψουν οι ροπές αδράνειας  $I_1$  και  $I_2$ . Με άλλα λόγια, χρειάζεται για να μπορέσει το λογισμικό να καταλάβει αν για παράδειγμα, το στοιχείο έχει τη διατομή A ή B του σχήματος 1.2.



Σχήμα 1.2

Γενικότερα, οι γραμμές του πίνακα FEelt που αναφέρονται σε στοιχεία δοκού (**beam1**), έχουν την μορφή:

[n1 n2 MatID ProID nR]

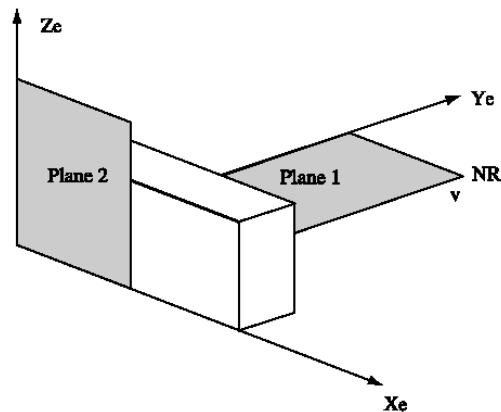
όπου

n1 n2 = οι αριθμοί των κόμβων που συνδέονται

MatID = αριθμός αναγνώρισης ιδιοτήτων του υλικού

ProID = αριθμός αναγνώρισης ιδιοτήτων διατομής του στοιχείου

$nR$  = αριθμός κόμβου που δεν είναι στην διεύθυνση του στοιχείου δοκού και προσδιορίζει το επίπεδο κάμψης 1, σχήμα 3. (κόμβος αναφοράς).



Σχήμα 3. Ορισμός καμπτικού επιπέδου.

Η δεύτερη ομάδα στοιχείων περιέχει 1 στοιχείο μάζας (**mass1**). Με τον τρόπο αυτό στον κόμβο 2 τοποθετείται συγκεντρωμένη μάζα 100 κιλών.

Γενικότερα, οι γραμμές του πίνακα FEelt που αναφέρονται σε στοιχεία μάζας (**mass1**), έχουν την μορφή:

[NodeID mxx myy mzz 0 0 0 0]

όπου

NodeID = ο αριθμός του κόμβου όπου τοποθετείται συγκεντρωμένη μάζα.

mx x myy mzz = οι τιμές της συγκεντρωμένης μάζας για τους 3 μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας του κόμβου

0 0 0 0 = σε μελλοντική έκδοση του λογισμικού στις θέσεις των μηδενικών θα αναφέρονται οι τιμές της συγκεντρωμένης ροπής αδράνειας στον κόμβο και ως προς τους 3 στρωφικούς βαθμούς ελευθερίας. Στη θέση του 4ου μηδενικού θα δηλώνεται ο αριθμός αναγνώρισης του στοιχείου. Προς το παρόν τα 4 αυτά στοιχεία έχουν την τιμή 0.

Αν υπήρχαν rigid elements, οι γραμμές του πίνακα FEelt που θα αναφέρονταν σε αυτά τα στοιχεία (**rigid**), θα είχαν τη μορφή

[n1 n2 DofSel MatID ProlD 0]

όπου ο κόμβος n2 θα παραμείνει άκαμπτα συνδεδεμένος με τον κόμβο n1.

DofSel = Εδώ ορίζονται ορίζεται ποιοι από τους 3 μεταφορικούς και ποιοι από τους 3 στρωφικούς βαθμούς ελευθερίας είναι συνδεδεμένοι (π. χ. Όταν έχει την τιμή 123, συνδέονται μόνο οι μεταφορικοί βαθμοί ελευθερίας, ενώ όταν έχει την τιμή 123456 συνδέονται τόσο οι μεταφορικοί όσο και οι στρωφικοί βαθμοί ελευθερίας.)

MatID = αριθμός αναγνώρισης ιδιοτήτων του υλικού

ProlD = αριθμός αναγνώρισης ιδιοτήτων διατομής του στοιχείου

Μπορεί να θεωρηθεί για ευκολία ότι ο πίνακας FEelt, αποτελείται από τους υποπίνακες BEAM, MASS, RIGID, χωρίς οι δύο τελευταίοι να είναι απαραίτητοι (π.χ. μοντέλο γέφυρας, Παράρτημα Α). Ανάλογα με την κατασκευή που μοντελοποιείται, μπορεί να χρειαστούν ή όχι.

Το μητρώο FEelt του δικτυώματος του σχήματος 1 δίνεται παρακάτω:

```
FEelt=[
% declaration of element group for longerons
Inf abs('beam1') 0 0
%node1 node2 MatID ProID nodeR , zeros to fill the matrix
1 3 1 1 7 0 0 0
3 6 1 1 7 0 0 0
2 4 1 1 7 0 0 0
4 5 1 1 7 0 0 0
% declaration of element group for diagonals
Inf abs('beam1') 0 0
2 3 1 2 7 0 0 0
4 6 1 2 7 0 0 0
% declaration of element group for battens
Inf abs('beam1') 0 0
3 4 1 3 7 0 0 0
5 6 1 3 7 0 0 0];
```

### 1.2.3 Μητρώο ρl

Στο μητρώο ρl δηλώνονται οι ιδιότητες των υλικών των στοιχείων του μοντέλου. Οι γραμμές του πίνακα έχουν την εξής μορφή:

[MatID 1 E nu rho G]

όπου

MatID = θετικός ακέραιος αριθμός που προσδιορίζει τις ιδιότητες ενός συγκεκριμένου υλικού.

E = το μέτρο ελαστικότητας

Nu = ο λόγος του Poisson  $\nu$

Rho = η πυκνότητα  $\rho$

G = το μέτρο διάτμησης (αν πάρει την τιμή 0, τότε αυτόματα παίρνει την τιμή  $G=E/2(\nu+1)$ )

Το μητρώο ρl του δικτυώματος του σχήματος 1 δίνεται παρακάτω:

```
% MatId      E      nu rho
pl = [ 1 1 7.2e+10 0.3 2700 ];
```

### 1.2.4 Μητρώο *il*

Στο μητρώο *il* δηλώνονται οι ιδιότητες των στοιχείων του μοντέλου. Οι γραμμές του πίνακα έχουν την εξής μορφή:

```
[ProID 1 J I1 I2 A]
```

όπου

ProID = αριθμός αναγνώρισης ιδιοτήτων διατομής του στοιχείου

J = στρεπτική ροπή αδράνειας περί τον άξονα του στοιχείου

I1 = καμπτική ροπή αδράνειας για την επί του επιπέδου κίνηση και περιστροφή γύρω από άξονα που δεν ανήκει στο επίπεδο ( επίπεδο που περιέχει το στοιχείο δοκού και τον κόμβο αναφοράς nR, σχήμα 3)

I2 = καμπτική ροπή αδράνειας για το επίπεδο που περιέχει το στοιχείο δοκού και είναι κάθετο στο επίπεδο που χρησιμοποιήθηκε για το I1

A = επιφάνεια διατομής

Το μητρώο *il* του δικτυώματος του σχήματος 1 δίνεται παρακάτω:

```
% ProID J I1 I2 A
il = [ 1 1 5e-09 5e-09 5e-09 2e-05 % longerons
      2 1 5e-09 5e-09 5e-09 2e-05 % diagonals
      3 1 5e-09 5e-09 5e-09 2e-05]; % battens
```

### 1.2.5 Μητρώο *gdof*

Το μητρώο *gdof* είναι ένα διάνυσμα στήλη που περιγράφει τις συνοριακές συνθήκες. Περιέχονται δηλαδή, όλοι εκείνοι οι βαθμοί ελευθερίας στους οποίους δεν επιτρέπεται η κίνηση.

Κάθε κόμβος έχει 6 βαθμούς ελευθερίας, 3 μεταφορικούς και 3 στροφικούς. Οι βαθμοί ελευθερίας από 1 έως 3 αναφέρονται στη μετατόπιση κατά τον άξονα x, y και z αντίστοιχα (αναφέρονται οι άξονες του καθολικού συστήματος συντεταγμένων). Οι βαθμοί ελευθερίας από 4 έως 6 αναφέρονται αντίστοιχα, στην περιστροφή γύρω από τους ίδιους άξονες (x, y και z).

Όταν για παράδειγμα, χρειαστεί να γίνει αναφορά στο μεταφορικό βαθμό ελευθερίας κατά τον άξονα y του κόμβου με αριθμό (NodeID) 25, θα δηλωθεί ως 25.02. Αν χρειαζόταν να γίνει αναφορά στο στροφικό, περί τον άξονα z, βαθμό ελευθερίας του κόμβου 53, θα δηλωνόταν ως 56.06.

Το μητρώο  $gdof$  του δικτυώματος του παραδείγματος που εξετάζουμε (σχήμα1), όπου όλοι οι βαθμοί ελευθερίας των κόμβων 1 και 2 είναι πακτωμένοι και συνεπώς δεν επιτρέπεται καμία κίνηση δίνεται παρακάτω:

$gdof = [$         1.01; 1.02; 1.03; 1.04; 1.05; 1.06;  
                  2.01; 2.02; 2.03; 2.04; 2.05; 2.06]

Όλοι οι υπόλοιποι βαθμοί ελευθερίας που δεν αναφέρονται στο παραπάνω μητρώο είναι ελεύθεροι να κινηθούν με οποιοδήποτε τρόπο.

## 1.3 Παράρτημα

### 1.3.1 Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων, Γέφυρας Καβάλας.

```
%kavala_model.m
%Definition of FEelt, FEnode, il, pl, gdof for Kavala Bridge
```

```
%-----DEFINE NODES-----%
FEnode=[1 0 0 0 0 0 0;
2 0 0 0 8.55 0 0;
3 0 0 0 17.1 0 0;
4 0 0 0 25.65 0 0;
5 0 0 0 34.2 0 0;
6 0 0 0 42.75 0 0;
7 0 0 0 45.75 0 0;
8 0 0 0 54.3 0 0;
9 0 0 0 62.85 0 0;
10 0 0 0 71.4 0 0;
11 0 0 0 79.95 0 0;
12 0 0 0 88.5 0 0;
13 0 0 0 91.5 0 0;
14 0 0 0 100.05 0 0;
15 0 0 0 108.6 0 0;
16 0 0 0 117.15 0 0;
17 0 0 0 125.7 0 0;
18 0 0 0 134.25 0 0;
19 0 0 0 137.25 0 0;
20 0 0 0 145.8 0 0;
21 0 0 0 154.35 0 0;
22 0 0 0 162.9 0 0;
23 0 0 0 171.45 0 0;
24 0 0 0 180 0 0;
25 0 0 0 0 3.3 0;
26 0 0 0 8.55 3.3 0;
27 0 0 0 17.1 3.3 0;
28 0 0 0 25.65 3.3 0;
29 0 0 0 34.2 3.3 0;
30 0 0 0 42.75 3.3 0;
31 0 0 0 45.75 3.3 0;
32 0 0 0 54.3 3.3 0;
33 0 0 0 62.85 3.3 0;
34 0 0 0 71.4 3.3 0;
35 0 0 0 79.95 3.3 0;
36 0 0 0 88.5 3.3 0;
37 0 0 0 91.5 3.3 0;
38 0 0 0 100.05 3.3 0;
39 0 0 0 108.6 3.3 0;
40 0 0 0 117.15 3.3 0;
41 0 0 0 125.7 3.3 0;
42 0 0 0 134.25 3.3 0;
43 0 0 0 137.25 3.3 0;
44 0 0 0 145.8 3.3 0;
45 0 0 0 154.35 3.3 0;
46 0 0 0 162.9 3.3 0;
47 0 0 0 171.45 3.3 0;
48 0 0 0 180 3.3 0;
49 0 0 0 0 6.6 0;
50 0 0 0 8.55 6.6 0;
51 0 0 0 17.1 6.6 0;
52 0 0 0 25.65 6.6 0;
```

53	0	0	0	34.2	6.6	0;
54	0	0	0	42.75	6.6	0;
55	0	0	0	45.75	6.6	0;
56	0	0	0	54.3	6.6	0;
57	0	0	0	62.85	6.6	0;
58	0	0	0	71.4	6.6	0;
59	0	0	0	79.95	6.6	0;
60	0	0	0	88.5	6.6	0;
61	0	0	0	91.5	6.6	0;
62	0	0	0	100.05	6.6	0;
63	0	0	0	108.6	6.6	0;
64	0	0	0	117.15	6.6	0;
65	0	0	0	125.7	6.6	0;
66	0	0	0	134.25	6.6	0;
67	0	0	0	137.25	6.6	0;
68	0	0	0	145.8	6.6	0;
69	0	0	0	154.35	6.6	0;
70	0	0	0	162.9	6.6	0;
71	0	0	0	171.45	6.6	0;
72	0	0	0	180	6.6	0;
73	0	0	0	0	9.9	0;
74	0	0	0	8.55	9.9	0;
75	0	0	0	17.1	9.9	0;
76	0	0	0	25.65	9.9	0;
77	0	0	0	34.2	9.9	0;
78	0	0	0	42.75	9.9	0;
79	0	0	0	45.75	9.9	0;
80	0	0	0	54.3	9.9	0;
81	0	0	0	62.85	9.9	0;
82	0	0	0	71.4	9.9	0;
83	0	0	0	79.95	9.9	0;
84	0	0	0	88.5	9.9	0;
85	0	0	0	91.5	9.9	0;
86	0	0	0	100.05	9.9	0;
87	0	0	0	108.6	9.9	0;
88	0	0	0	117.15	9.9	0;
89	0	0	0	125.7	9.9	0;
90	0	0	0	134.25	9.9	0;
91	0	0	0	137.25	9.9	0;
92	0	0	0	145.8	9.9	0;
93	0	0	0	154.35	9.9	0;
94	0	0	0	162.9	9.9	0;
95	0	0	0	171.45	9.9	0;
96	0	0	0	180	9.9	0;
107	0	0	0	0	0	-2.1;
108	0	0	0	0	3.3	-2.1;
109	0	0	0	0	6.6	-2.1;
110	0	0	0	0	9.9	-2.1;
111	0	0	0	42.75	0	-2.1;
112	0	0	0	42.75	3.3	-2.1;
113	0	0	0	42.75	6.6	-2.1;
114	0	0	0	42.75	9.9	-2.1;
115	0	0	0	45.75	0	-2.1;
116	0	0	0	45.75	3.3	-2.1;
117	0	0	0	45.75	6.6	-2.1;
118	0	0	0	45.75	9.9	-2.1;
119	0	0	0	88.5	0	-2.1;
120	0	0	0	88.5	3.3	-2.1;
121	0	0	0	88.5	6.6	-2.1;
122	0	0	0	88.5	9.9	-2.1;
123	0	0	0	91.5	0	-2.1;



```

124 0 0 0 91.5 3.3 -2.1;
125 0 0 0 91.5 6.6 -2.1;
126 0 0 0 91.5 9.9 -2.1;
127 0 0 0 134.25 0 -2.1;
128 0 0 0 134.25 3.3 -2.1;
129 0 0 0 134.25 6.6 -2.1;
130 0 0 0 134.25 9.9 -2.1;
131 0 0 0 137.25 0 -2.1;
132 0 0 0 137.25 3.3 -2.1;
133 0 0 0 137.25 6.6 -2.1;
134 0 0 0 137.25 9.9 -2.1;
135 0 0 0 180 0 -2.1;
136 0 0 0 180 3.3 -2.1;
137 0 0 0 180 6.6 -2.1;
138 0 0 0 180 9.9 -2.1;
139 0 0 0 44.24 0 -2.1;
140 0 0 0 44.24 3.3 -2.1;
141 0 0 0 44.24 6.6 -2.1;
142 0 0 0 44.24 9.9 -2.1;
143 0 0 0 44.24 4.95 -2.1;
144 0 0 0 44.24 4.95 -7.1;
145 0 0 0 44.24 4.95 -12.1;
146 0 0 0 44.24 4.95 -17.1;
147 0 0 0 44.24 4.95 -22.1;
148 0 0 0 44.24 4.95 -27.1;
149 0 0 0 44.24 4.95 -32.1;
150 0 0 0 90 0 -2.1;
151 0 0 0 90 3.3 -2.1;
152 0 0 0 90 6.6 -2.1;
153 0 0 0 90 9.9 -2.1;
155 0 0 0 90 4.95 -2.1;
156 0 0 0 90 4.95 -11;
157 0 0 0 90 4.95 -19.9;
158 0 0 0 90 4.95 -28.8;
159 0 0 0 90 4.95 -37.7;
160 0 0 0 90 4.95 -46.6;
161 0 0 0 90 4.95 -55.5;
162 0 0 0 135.75 0 -2.1;
163 0 0 0 135.75 3.3 -2.1;
164 0 0 0 135.75 6.6 -2.1;
165 0 0 0 135.75 9.9 -2.1;
166 0 0 0 135.75 4.95 -2.1;
167 0 0 0 135.75 4.95 -7.1;
168 0 0 0 135.75 4.95 -12.1;
169 0 0 0 135.75 4.95 -17.1;
170 0 0 0 135.75 4.95 -22.1;
171 0 0 0 135.75 4.95 -27.1;
172 0 0 0 135.75 4.95 -32.1];

```

```

%
%-----BEAM ELEMENTS-----%
BEAM=[Inf abs('beam1') 0 0
1 2 2 2 107 0 0 0
2 3 2 2 107 0 0 0
3 4 2 2 107 0 0 0
4 5 2 2 107 0 0 0
5 6 2 2 107 0 0 0
6 7 7 7 107 0 0 0
7 8 2 2 107 0 0 0
8 9 2 2 107 0 0 0
9 10 2 2 107 0 0 0

```

10	11	2	2	107	0	0	0
11	12	2	2	107	0	0	0
12	13	7	7	107	0	0	0
13	14	2	2	107	0	0	0
14	15	2	2	107	0	0	0
15	16	2	2	107	0	0	0
16	17	2	2	107	0	0	0
17	18	2	2	107	0	0	0
18	19	7	7	107	0	0	0
19	20	2	2	107	0	0	0
20	21	2	2	107	0	0	0
21	22	2	2	107	0	0	0
22	23	2	2	107	0	0	0
23	24	2	2	107	0	0	0
25	26	1	1	108	0	0	0
26	27	1	1	108	0	0	0
27	28	1	1	108	0	0	0
28	29	1	1	108	0	0	0
29	30	1	1	108	0	0	0
30	31	7	7	108	0	0	0
31	32	1	1	108	0	0	0
32	33	1	1	108	0	0	0
33	34	1	1	108	0	0	0
34	35	1	1	108	0	0	0
35	36	1	1	108	0	0	0
36	37	7	7	108	0	0	0
37	38	1	1	108	0	0	0
38	39	1	1	108	0	0	0
39	40	1	1	108	0	0	0
40	41	1	1	108	0	0	0
41	42	1	1	108	0	0	0
42	43	7	7	108	0	0	0
43	44	1	1	108	0	0	0
44	45	1	1	108	0	0	0
45	46	1	1	108	0	0	0
46	47	1	1	108	0	0	0
47	48	1	1	108	0	0	0
49	50	1	1	109	0	0	0
50	51	1	1	109	0	0	0
51	52	1	1	109	0	0	0
52	53	1	1	109	0	0	0
53	54	1	1	109	0	0	0
54	55	7	7	109	0	0	0
55	56	1	1	109	0	0	0
56	57	1	1	109	0	0	0
57	58	1	1	109	0	0	0
58	59	1	1	109	0	0	0
59	60	1	1	109	0	0	0
60	61	7	7	109	0	0	0
61	62	1	1	109	0	0	0
62	63	1	1	109	0	0	0
63	64	1	1	109	0	0	0
64	65	1	1	109	0	0	0
65	66	1	1	109	0	0	0
66	67	7	7	109	0	0	0
67	68	1	1	109	0	0	0
68	69	1	1	109	0	0	0
69	70	1	1	109	0	0	0
70	71	1	1	109	0	0	0
71	72	1	1	109	0	0	0
73	74	3	3	110	0	0	0

74	75	3	3	110	0	0	0
75	76	3	3	110	0	0	0
76	77	3	3	110	0	0	0
77	78	3	3	110	0	0	0
78	79	7	7	110	0	0	0
79	80	3	3	110	0	0	0
80	81	3	3	110	0	0	0
81	82	3	3	110	0	0	0
82	83	3	3	110	0	0	0
83	84	3	3	110	0	0	0
84	85	7	7	110	0	0	0
85	86	3	3	110	0	0	0
86	87	3	3	110	0	0	0
87	88	3	3	110	0	0	0
88	89	3	3	110	0	0	0
89	90	3	3	110	0	0	0
90	91	7	7	110	0	0	0
91	92	3	3	110	0	0	0
92	93	3	3	110	0	0	0
93	94	3	3	110	0	0	0
94	95	3	3	110	0	0	0
95	96	3	3	110	0	0	0
1	25	4	4	2	0	0	0
25	49	4	4	2	0	0	0
49	73	4	4	2	0	0	0
2	26	5	5	1	0	0	0
26	50	5	5	1	0	0	0
50	74	5	5	1	0	0	0
3	27	6	6	1	0	0	0
27	51	6	6	1	0	0	0
51	75	6	6	1	0	0	0
4	28	6	6	1	0	0	0
28	52	6	6	1	0	0	0
52	76	6	6	1	0	0	0
5	29	5	5	1	0	0	0
29	53	5	5	1	0	0	0
53	77	5	5	1	0	0	0
6	30	4	4	1	0	0	0
30	54	4	4	1	0	0	0
54	78	4	4	1	0	0	0
7	31	4	4	1	0	0	0
31	55	4	4	1	0	0	0
55	79	4	4	1	0	0	0
8	32	5	5	1	0	0	0
32	56	5	5	1	0	0	0
56	80	5	5	1	0	0	0
9	33	6	6	1	0	0	0
33	57	6	6	1	0	0	0
57	81	6	6	1	0	0	0
10	34	6	6	1	0	0	0
34	58	6	6	1	0	0	0
58	82	6	6	1	0	0	0
11	35	5	5	1	0	0	0
35	59	5	5	1	0	0	0
59	83	5	5	1	0	0	0
12	36	4	4	1	0	0	0
36	60	4	4	1	0	0	0
60	84	4	4	1	0	0	0
13	37	4	4	1	0	0	0
37	61	4	4	1	0	0	0
61	85	4	4	1	0	0	0

14	38	5	5	1	0	0	0
38	62	5	5	1	0	0	0
62	86	5	5	1	0	0	0
15	39	6	6	1	0	0	0
39	63	6	6	1	0	0	0
63	87	6	6	1	0	0	0
16	40	6	6	1	0	0	0
40	64	6	6	1	0	0	0
64	88	6	6	1	0	0	0
17	41	5	5	1	0	0	0
41	65	5	5	1	0	0	0
65	89	5	5	1	0	0	0
18	42	4	4	1	0	0	0
42	66	4	4	1	0	0	0
66	90	4	4	1	0	0	0
19	43	4	4	1	0	0	0
43	67	4	4	1	0	0	0
67	91	4	4	1	0	0	0
20	44	5	5	1	0	0	0
44	68	5	5	1	0	0	0
68	92	5	5	1	0	0	0
21	45	6	6	1	0	0	0
45	69	6	6	1	0	0	0
69	93	6	6	1	0	0	0
22	46	6	6	1	0	0	0
46	70	6	6	1	0	0	0
70	94	6	6	1	0	0	0
23	47	5	5	1	0	0	0
47	71	5	5	1	0	0	0
71	95	5	5	1	0	0	0
24	48	4	4	1	0	0	0
48	72	4	4	1	0	0	0
72	96	4	4	1	0	0	0
1	107	13	13	2	0	0	0
25	108	13	13	26	0	0	0
49	109	13	13	50	0	0	0
73	110	13	13	74	0	0	0
6	111	15	15	2	0	0	0
30	112	15	15	26	0	0	0
54	113	15	15	50	0	0	0
78	114	15	15	74	0	0	0
7	115	15	15	2	0	0	0
31	116	15	15	26	0	0	0
55	117	15	15	50	0	0	0
79	118	15	15	74	0	0	0
12	119	17	17	2	0	0	0
36	120	17	17	26	0	0	0
60	121	17	17	50	0	0	0
84	122	17	17	74	0	0	0
13	123	17	17	2	0	0	0
37	124	17	17	26	0	0	0
61	125	17	17	50	0	0	0
85	126	17	17	74	0	0	0
18	127	16	16	2	0	0	0
42	128	16	16	26	0	0	0
66	129	16	16	50	0	0	0
90	130	16	16	74	0	0	0
19	131	16	16	2	0	0	0
43	132	16	16	26	0	0	0
67	133	16	16	50	0	0	0
91	134	16	16	74	0	0	0

24	135	14	14	2	0	0	0
48	136	14	14	26	0	0	0
72	137	14	14	50	0	0	0
96	138	14	14	74	0	0	0
111	139	11	11	6	0	0	0
139	115	11	11	6	0	0	0
112	140	11	11	30	0	0	0
140	116	11	11	30	0	0	0
113	141	11	11	54	0	0	0
141	117	11	11	54	0	0	0
114	142	11	11	78	0	0	0
142	118	11	11	78	0	0	0
139	140	10	10	115	0	0	0
141	142	10	10	115	0	0	0
140	143	10	10	115	0	0	0
143	141	10	10	115	0	0	0
143	144	8	8	139	0	0	0
144	145	8	8	139	0	0	0
145	146	8	8	139	0	0	0
146	147	8	8	139	0	0	0
147	148	8	8	139	0	0	0
148	149	8	8	139	0	0	0
119	150	11	11	12	0	0	0
150	123	11	11	12	0	0	0
120	151	11	11	36	0	0	0
151	124	11	11	36	0	0	0
121	152	11	11	60	0	0	0
152	125	11	11	60	0	0	0
122	153	11	11	84	0	0	0
153	126	11	11	84	0	0	0
150	151	10	10	123	0	0	0
151	155	10	10	123	0	0	0
155	152	10	10	123	0	0	0
152	153	10	10	123	0	0	0
155	156	9	9	153	0	0	0
156	157	9	9	153	0	0	0
157	158	9	9	153	0	0	0
158	159	9	9	153	0	0	0
159	160	9	9	153	0	0	0
160	161	9	9	153	0	0	0
127	162	11	11	18	0	0	0
162	131	11	11	18	0	0	0
128	163	11	11	42	0	0	0
163	132	11	11	42	0	0	0
129	164	11	11	66	0	0	0
164	133	11	11	66	0	0	0
130	165	11	11	90	0	0	0
165	134	11	11	90	0	0	0
162	163	10	10	131	0	0	0
163	166	10	10	131	0	0	0
166	164	10	10	131	0	0	0
164	165	10	10	131	0	0	0
166	167	12	12	165	0	0	0
167	168	12	12	165	0	0	0
168	169	12	12	165	0	0	0
169	170	12	12	165	0	0	0
170	171	12	12	165	0	0	0
171	172	12	12	165	0	0	0];

```

%-----FINITE ELEMENT MODEL DESCRIPTION MATRIX-----%
FEelt=[BEAM];

%
%-----MATERIAL PROPERTIES-----%
%
%      MatId      E      nu      rho
pl=[ 1      1      30000000      0.2      3 0      %deck long
     2      1      30000000      0.2      3.3 0      %deck long
     3      1      30000000      0.2      3.454 0      %deck long
     4      1      30000000      0.2      2.5 0      %deck wide
     5      1      30000000      0.2      0 0      %deck wide
     6      1      30000000      0.2      0 0      %deck wide
     7      1      30000000      0.2      2.5 0      %deck long over kolona
     8      1      30000000      0.2      2.5 0      %kolona
     9      1      30000000      0.2      2.5 0      %kolona
    10      1      30000000      0.2      0 0      %deck long over kolona
    11      1      30000000      0.2      0 0      %deck long over kolona
    12      1      30000000      0.2      2.5 0      %kolona
    13      1      1000 0.2      0 0      %akriano efedrano
    14      1      1000 0.2      0 0      %akriano efedrano
    15      1      1000 0.2      0 0      %efedrano deksias kolonas
    16      1      1000 0.2      0 0      %akriano efedrano
    17      1      1000 0.2      0 0];      %akriano efedrano

%
%-----ELEMENT PROPERTIES-----%
%
%      ProID      J      I1      I2      A
il=[ 1      1      3.12      2.254      0.6855      1.912
     2      1      3.8      2.739      1.061      2.294
     3      1      3.208      2.294      0.9145      1.924
     4      1      1      0.0294      0.9344      1.41
     5      1      1      47.4      0.021      3.46
     6      1      1      14      0.014      2.308
     7      1      1      0.0055      0.808      0.891
     8      1      25.3      12.6      12.6      5.77
     9      1      25.3      12.6      12.6      5.77
    10      1      1000000      1000000      1000000      1000
    11      1      1000000      1000000      1000000      1000
    12      1      25.3      12.6      12.6      5.77
    13      1      1      1.982      1.982      2787
    14      1      1      1.982      1.982      2787
    15      1      1      3.13      3.13      4581
    16      1      1      3.13      3.13      4581
    17      1      1      4.504      4.504      7087.5];

%----- Boundary Conditions (Grounded Dofs)-----%
gdof=[107.01;      107.02;      107.03;      107.04;      107.05;      107.06;
      108.01;      108.02;      108.03;      108.04;      108.05;      108.06;
      109.01;      109.02;      109.03;      109.04;      109.05;      109.06;
      110.01;      110.02;      110.03;      110.04;      110.05;      110.06;
      135.01;      135.02;      135.03;      135.04;      135.05;      135.06;
      136.01;      136.02;      136.03;      136.04;      136.05;      136.06;
      137.01;      137.02;      137.03;      137.04;      137.05;      137.06;
      138.01;      138.02;      138.03;      138.04;      138.05;      138.06;
      149.01;      149.02;      149.03;      149.04;      149.05;      149.06;
      161.01;      161.02;      161.03;      161.04;      161.05;      161.06;
      172.01;      172.02;      172.03;      172.04;      172.05;      172.06];

```

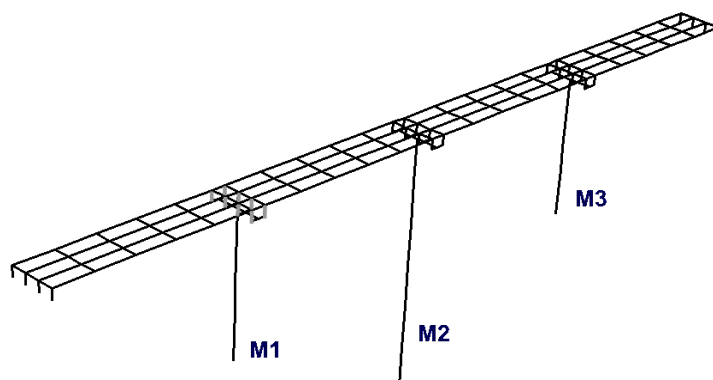
## 2. Αναθεώρηση Μοντέλων Πεπερασμένων Στοιχείων και Διάγνωση Βλαβών

### 2.1 Εισαγωγή

Η διάγνωση βλαβών επιτυγχάνεται με την συνεχή αναθεώρηση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων και παρατηρώντας τις τυχόν μεταβολές στις παραμέτρους του μοντέλου. Επομένως, παρακάτω περιγράφεται ο τρόπος χρήσης του λογισμικού αναθεώρησης μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων. Στο Παράρτημα Α παρουσιάζεται ενδεικτικά το αρχείο δεδομένων και το αρχείο αποτελεσμάτων για τη δεύτερη περίπτωση προσομοιωμένων δεδομένων βλάβης που περιγράφεται στο κεφάλαιο 6.5 της Τελικής Τεχνικής Έκθεσης.

Για να γίνει ευκολότερα κατανοητός τόσο ο τρόπος εισαγωγής των δεδομένων, όσο και ο τρόπος ανάγνωσης των αποτελεσμάτων, θα χρησιμοποιηθούν ως παράδειγμα το αρχείο εισόδου και εξόδου που προέκυψαν για την εξέταση προσομοιωμένων δεδομένων από τη γέφυρα της Καβάλας.

Τα προσομοιωμένα δεδομένα, αντιστοιχούν σε μοντέλο της γέφυρας το οποίο έχει μειωμένη την ακαμψία των εφεδράνων του πυλώνα M1 κατά 25% (σχήμα 1.1). Η κατασκευή έχει παραμετροποιηθεί με 7 παράμετρος  $\theta$ . Στην κατασκευή χωρίς βλάβη η τιμή των παραμέτρων είναι ίση με μονάδα. Αναζητούνται οι νέες τιμές των παραμέτρων, που αντιστοιχούν στα προσομοιωμένα δεδομένα που επεξεργάζονται.



**Σχήμα 2.1** Τα στοιχεία που μοντελοποιούν τα εφεδράνα του πυλώνα M1, τα 8 κάθετα στοιχεία με γκρι χρώμα, έχουν μειωμένο το μέτρο ελαστικότητας κατά 25%.

Στο παράρτημα του παρόντος εγχειριδίου, παρατίθενται ολοκληρωμένα τα αρχεία εισόδου και εξόδου τόσο της περίπτωσης όπου μελετώνται τα προσομοιωμένα δεδομένα, όσο και της περίπτωσης που γίνεται αναθεώρηση του μοντέλου με πραγματικά δεδομένα.

### 2.2 Δεδομένα Εισόδου

Όλα τα δεδομένα εισόδου του λογισμικού αναθεώρησης μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων δηλώνονται από το χρήστη στο αρχείο "InputData.m". Οι μεταβλητές που πρέπει να δηλώσει ο χρήστης στο αρχείο αυτό, δίνονται παρακάτω:

**Casestudy:** Η μεταβλητή αυτή είναι string variable. Εδώ δηλώνεται το όνομα της περίπτωσης που εξετάζεται. Το όνομα αυτό μπορεί να είναι ο τίτλος της εξεταζόμενης περίπτωσης. Η μεταβλητή αυτή χρησιμεύει μόνο για να μπει ως τίτλος στο output file με τα αποτελέσματα (το οποίο είναι σε .txt μορφή) έτσι ώστε να ξέρει ο χρήστης σε πια περίπτωση (case study) αντιστοιχούν τα αποτελέσματα που διαβάζει. Σε περίπτωση που δε δηλωθεί από το χρήστη τιμή για αυτή την μεταβλητή, εξ' ορισμού παίρνει την τιμή "Untitled".

Π. χ. Case study='KAVALA BRIDGE, CASE: Damage 25% at Bearing of Left Column'

**modaldata:** Η μεταβλητή αυτή είναι string variable και υποχρεωτική. Εδώ δηλώνεται το όνομα του .mat file το οποίο περιέχει τα μετρούμενα μορφικά δεδομένα. Όταν φορτωθεί το .mat file, θα πρέπει στο Workspace του MATLAB να υπάρχουν τα εξής μητρώα:

- 1) **measuredDOF** : Είναι ένας πίνακας στήλη. Στοιχεία αυτού του πίνακα είναι οι βαθμοί ελευθερίας του μοντέλου, που αντιστοιχούν στα σημεία μέτρησης της κατασκευής.
- 2) **omegahat** : Είναι ένας πίνακας στήλη. Στοιχεία αυτού του πίνακα είναι οι αναγνωρισμένες από τις μετρήσεις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής.
- 3) **phihat** : Είναι ένας πίνακας που έχει τόσες γραμμές όσοι είναι οι μετρούμενοι βαθμοί ελευθερίας (*measuredDOF*) και τόσες στήλες όσες και οι αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες. Επομένως, τα στοιχεία της κάθε στήλης αυτού του πίνακα, είναι οι ιδιομορφές που αναγνωρίστηκαν για την κάθε ιδιοσυχνότητα στους αντίστοιχους μετρούμενους βαθμούς ελευθερίας.

Στην ειδική περίπτωση, όπου για την αναγνώριση έστω π.χ. 2 ιδιοσυχνοτήτων χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό set μετρούμενων βαθμών ελευθερίας για κάθε ιδιοσυχνότητα, οι πίνακες θα πρέπει να έχουν την εξής μορφή:

Το μητρώο *measuredDOF* εξακολουθεί να είναι πίνακας στήλη και θα πρέπει να περιέχει όλους τους βαθμούς ελευθερίας που μετρήθηκαν και στις 2 περιπτώσεις. Στο μητρώο *omegahat* θα περιέχονται και οι 2 αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες. Στο μητρώο *phihat*, στην πρώτη στήλη που αντιστοιχεί στην πρώτη ιδιοσυχνότητα, οι τιμές των μορφών που αντιστοιχούν σε βαθμούς ελευθερίας που δεν μετρήθηκαν για τον προσδιορισμό της πρώτης ιδιοσυχνότητας, θα έχουν την τιμή 0.

Π. χ. modaldata='SimData\_kav\_mat15\_Dam25'

Όπως φαίνεται και από το παράδειγμα στο όνομα του αρχείου δεν πρέπει να προστίθεται η κατάληξη ".mat".

**finite\_element\_model:** Η μεταβλητή αυτή είναι string variable και υποχρεωτική. Περιέχει το όνομα του .m file που σχεδιάζει το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Συνήθως ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του μοντέλου γίνεται σε περιβάλλον windows με τη χρήση προγραμμάτων, όπως είναι το ABAQUS, NASTRAN, SAP και άλλα, τα οποία διαθέτουν έξυπνα σχεδιαστικά εργαλεία. Στη συνέχεια, το αρχείο που



δημιουργείται μετατρέπεται κατάλληλα ,ώστε να είναι δυνατή η αναγνώριση των δεδομένων από το MATLAB.

Π. Χ. `finite_element_model='kavala_model'`

Όπως φαίνεται και από το παράδειγμα στο όνομα του αρχείου δεν πρέπει να προστίθεται η κατάληξη “.m”.

**group:** Η μεταβλητή αυτή είναι structure variable. Περιέχει τόσα πεδία όσες είναι και οι ομάδες (group) στις οποίες έχουμε παραμετροποιήσει την κατασκευή. Σε κάθε πεδίο της, δηλαδή σε κάθε ομάδα, δηλώνονται οι αριθμοί των στοιχείων (element ID) που απαρτίζουν την κάθε ομάδα. Στο παράδειγμα που μελετάται η κατασκευή έχει παραμετροποιηθεί ως προς 7 παράμετρους, για κάθε μία από τις οποίες ορίζουμε και ένα group, που περιέχει τα ID των στοιχείων (elements) που παραμετροποιούνται ως προς την ίδια παράμετρο. Η παραμετροποίηση γίνεται ως προς το μέτρο ελαστικότητας του κάθε στοιχείου. Για παράδειγμα, το μέτρο ελαστικότητας των στοιχείων του group 2, πολλαπλασιάζεται με την παράμετρο  $\theta_2$ , ισχύει δηλαδή  $E=E_0*\theta_2$ . Αντίστοιχα, το μέτρο ελαστικότητας των στοιχείων του group 4, πολλαπλασιάζεται με την παράμετρο  $\theta_4$  κ.ο.κ.

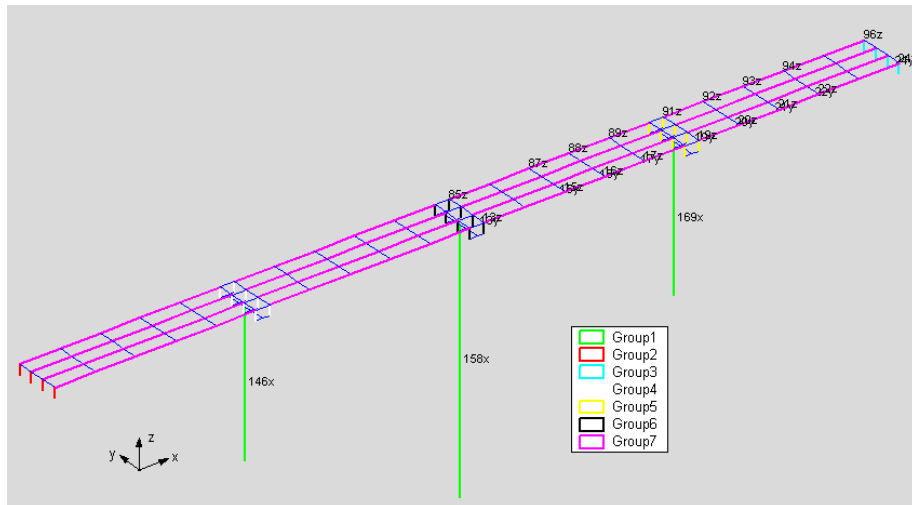
Π. Χ.

```
group(1).g=[209; 210; 211; 212; 213; 214; 227; 228; 229; 230; 231; 232; 245; 246; 247; 248; 249; 250];
group(2).g=[165;166;167;168];
group(3).g=[193;194;195;196];
group(4).g=[169;170;171;172;173;174;175;176];
group(5).g=[185;186;187;188;189;190;191;192];
group(6).g=[177;178;179;180;181;182;183;184];
group(7).g=[1; 2; 3; 4; 5; 7; 8; 9; 10; 11; 13; 14; 15; 16; 17; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 30; 31; 32; 33;
34; 36; 37; 38; 39; 40; 42; 43; 44; 45; 46; 47; 48; 49; 50; 51; 53; 54; 55; 56; 57; 59; 60; 61; 62; 63;
65; 66; 67; 68; 69; 70; 71; 72; 73; 74; 76; 77; 78; 79; 80; 82; 83; 84; 85; 86; 88; 89; 90; 91; 92];
```

Στο group 1, περιέχονται όλα τα στοιχεία που μοντελοποιούν τους τρεις πυλώνες της γέφυρας. Στο group 2 και στο group 3, περιέχονται όλα τα στοιχεία που μοντελοποιούν τα εφέδρανα στο αριστερό και δεξί ακρόβαθρο της γέφυρας, αντίστοιχα. Στα group 4 5 6, περιέχονται όλα τα στοιχεία που μοντελοποιούν τα εφέδρανα του αριστερού, του δεξιού και του κεντρικού πυλώνα αντίστοιχα. Στο group 7, περιέχονται όλα τα όλα τα διαμήκη στοιχεία που μοντελοποιούν το κατάστρωμα της γέφυρας. Υπενθυμίζεται ότι στην περίπτωση που μελετάται υπάρχει μείωση του μέτρου ελαστικότητας κατά 25% στα στοιχεία του group 4.

Στο σχήμα (1.2) φαίνονται τα group που έχουν οριστεί. Τα στοιχεία του κάθε group έχουν διαφορετικό χρώμα. Έτσι είναι εύκολο για το χρήστη να διαπιστώσει αν όντως έχει κάνει την παραμετροποίηση όπως επιθυμεί και δεν έχει κάνει κάποιο λάθος κατά τον ορισμό των group. Στο σχήμα φαίνονται επίσης και τα σημεία μέτρησης κατά τη διάρκεια του πειράματος (measuredDOF). Το αρχείο που τυπώνει το σχήμα αυτό, είναι το “plot\_groups.m” και καλείται στο τέλος του προγράμματος.

(Για να γίνει δυνατή η απεικόνιση του μοντέλου και των group, πρέπει να έχουν “τρέξει” πρώτα τα αρχεία InputData.m και ProcessInput.m (παράγραφος 1.3)).



**Σχήμα 2.2** Παραμετροποίηση της γέφυρας με 7 παράμετρος. Επομένως δημιουργούνται και 7 group. Διακρίνονται επίσης, τα σημεία μέτρησης (κόμβοι) κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Για τα στοιχεία που δεν παραμετροποιούνται, δε χρειάζεται να οριστεί άλλο group. Group ορίζονται, μόνο για τα στοιχεία που παραμετροποιούνται. Επιπλέον, όσα από αυτά παραμετροποιούνται με την ίδια παράμετρο, ταξινομούνται στο ίδιο group.

Η ανεύρεση των στοιχείων, που έχουν κάποιο κοινό γνώρισμα, γίνεται είτε εξετάζοντας όλα τα στοιχεία του μητρώου FEelt, είτε χρησιμοποιώντας μερικές εξελιγμένες συναρτήσεις:

```
Π. χ. femesh('findelt pro 15')-1
femesh('findelt mat 13')-1
```

Η παραπάνω σύνταξη θα έχει σαν αποτέλεσμα να βρεθούν ποια είναι τα στοιχεία του μοντέλου που έχουν την ιδιότητα 15 (proID) καθώς και τα στοιχεία εκείνα που το υλικό κατασκευής τους (material) αντιστοιχεί στην ιδιότητα 13 (matID). Το “-1” χρειάζεται γιατί στη πρώτη γραμμή του μητρώου FEelt όπου ορίζονται τα στοιχεία, περιέχονται πληροφορίες για το είδος των στοιχείων (π. χ. “beam”) και όχι πληροφορίες για τον ορισμό των στοιχείων. Επιπλέον, για να βρεθούν τα στοιχεία που έχουν την ιδιότητα 13 15 και 17, η σύνταξη θα έχει ως εξής:

```
Π. χ. femesh('findelt pro 13 15 17')-1
```

**Η εύρεση των στοιχείων, που το ένα τους άκρο ορίζεται από π. χ. τον κόμβο 3 μπορεί να γίνει γρήγορα με την παρακάτω εντολή:**

```
Π. χ. femesh('findelt with node 3')-1
```

**groupname:** Η μεταβλητή αυτή είναι *structure variable*. Περιέχει τόσα πεδία όσες είναι και οι ομάδες (*group*) στις οποίες έχει παραμετροποιηθεί η κατασκευή. Το κάθε πεδίο είναι *string variable* και περιέχει το όνομα του αντίστοιχου *group*. Το όνομα, είναι συνήθως μία σύντομη περιγραφή της τοποθεσίας ή των ιδιοτήτων που έχουν τα στοιχεία του αντίστοιχου *group*. Η μεταβλητή αυτή δεν είναι απαραίτητο να οριστεί, αλλά είναι πολύ χρήσιμη γιατί τα ονόματα αυτά τυπώνονται στο *output file* (μορφής *.txt*) και δεν είναι ανάγκη ο χρήστης να θυμάται τις ιδιότητες των στοιχείων του κάθε *group*. Το όνομα του κάθε πεδίου μπορεί να έχει μήκος μέχρι 24 χαρακτήρες, συμπεριλαμβανομένου των κενών ανάμεσα στις λέξεις, σε περίπτωση που υπάρχουν περισσότερες από μία. Σε περίπτωση που το όνομα έχει παραπάνω από 24 χαρακτήρες, στην εκτύπωση των αποτελεσμάτων θα χρησιμοποιηθούν οι 24 πρώτοι χαρακτήρες.

```
Π. χ. groupname(1).g='Columns';
      groupname(2).g='Left Edge Bearing';
      groupname(3).g='Right Edge Bearing';
      groupname(4).g='Left Column Bearing';
      groupname(5).g='Center Column Bearing';
      groupname(6).g='Right Column Bearing';
      groupname(7).g='Deck longitudinal Elements';
```

**thita:** Είναι ένας πίνακας στήλη. Περιέχει τόσα στοιχεία όσες είναι και οι παράμετρος με τις οποίες έχει παραμετροποιηθεί η κατασκευή. Είναι οι αρχικές εκτιμήσεις για τις τιμές των παραμέτρων. Στην 1<sup>η</sup> γραμμή του πίνακα δίνεται η αρχική εκτίμηση για την 1<sup>η</sup> παράμετρο, στη 2<sup>η</sup> γραμμή η αρχική εκτίμηση για την 2<sup>η</sup> παράμετρο κ.ο.κ.

Σε περίπτωση που ο χρήστης δε δηλώσει εκ παραδρομής τις τιμές του πίνακα αυτού, δίνεται εξ' ορισμού η τιμή =1 για όλες τις παράμετρος. Οι τιμές εξ' ορισμού δίνονται είτε όταν η παράμετρος *thita* δεν έχει οριστεί καθόλου είτε όταν της έχει δοθεί η τιμή *thita=[]*.

```
Π. χ. thita=[1.2;1.1;0.9;0.6;1.3;1;0.9];
```

**thita\_lower\_bound:** Είναι ένας πίνακας στήλη. Περιέχει τόσα στοιχεία όσες είναι και οι παράμετρος με τις οποίες έχει παραμετροποιηθεί η κατασκευή. Η μεταβλητή αυτή χρησιμοποιείται μόνο στην περίπτωση που ο χρήστης έχει επιλέξει να κάνει βελτιστοποίηση υπό περιορισμό (βλέπε θεωρία). Κάθε γραμμή περιέχει την ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει η τιμή της αντίστοιχης παραμέτρου κατά τη βελτιστοποίηση. Στην 1<sup>η</sup> γραμμή του πίνακα δίνεται η ελάχιστη τιμή για την 1<sup>η</sup> παράμετρο, στη 2<sup>η</sup> γραμμή η ελάχιστη τιμή για την 2<sup>η</sup> παράμετρο κ.ο.κ.

Σε περίπτωση που ο χρήστης δε δηλώσει εκ παραδρομής τις τιμές του πίνακα αυτού, δίνεται εξ' ορισμού η τιμή =0 για όλες τις παράμετρος. Οι τιμές εξ' ορισμού δίνονται είτε όταν η παράμετρος *thita\_lower\_bound* δεν έχει οριστεί καθόλου είτε όταν της έχει δοθεί η τιμή *thita\_lower\_bound=[]*.

```
Π. χ. thita_lower_bound=[];
      ή thita_lower_bound=[0;0;0;0;0;0;0];
```

ή `thita_lower_bound=[0.5;0.3;0.1;0;0.4;0.5;0.3];`

**thita\_upper\_bound:** Είναι ένας πίνακας στήλη. Περιέχει τόσα στοιχεία όσες είναι και οι παράμετροι με τις οποίες έχει παραμετροποιηθεί η κατασκευή. Η μεταβλητή αυτή χρησιμοποιείται μόνο στην περίπτωση που ο χρήστης έχει επιλέξει να κάνει βελτιστοποίηση υπό περιορισμό. Κάθε γραμμή περιέχει τη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η τιμή της αντίστοιχης παραμέτρου κατά τη βελτιστοποίηση. Στην 1<sup>η</sup> γραμμή του πίνακα δίνεται η μέγιστη τιμή για την 1<sup>η</sup> παράμετρο, στη 2<sup>η</sup> γραμμή η μέγιστη τιμή για την 2<sup>η</sup> παράμετρο κ.ο.κ.

Σε περίπτωση που ο χρήστης δε δηλώσει εκ παραδρομής τις τιμές του πίνακα αυτού, δίνεται εξ' ορισμού η τιμή =10 για όλες τις παράμετροι. Οι τιμές εξ' ορισμού δίνονται είτε όταν η παράμετρος `thita_upper_bound` δεν έχει οριστεί καθόλου είτε όταν της έχει δοθεί η τιμή `thita_upper_bound=[]`.

Π. Χ. `thita_upper_bound=[];`  
 ή `thita_upper_bound=[10;10;10;10;10;10;10];`  
 ή `thita_upper_bound=[1;1;2;1.3;1.2;1.3;1];`

**output\_path:** Η μεταβλητή αυτή είναι string variable. Στη μεταβλητή αυτή δηλώνεται ο φάκελος στον οποίο θα αποθηκευτεί το output file.

Π. Χ. `output_path='C:\MATLABR11\work\';`

**output\_name:** Η μεταβλητή αυτή είναι string variable. Στη μεταβλητή αυτή δηλώνεται το όνομα του output αρχείου. Το output αρχείο, το οποίο περιέχει τα αποτελέσματα της αναθεώρησης, έχει εξ' ορισμού κατάληξη “.txt”. Για καλύτερη θέαση, προτείνεται το αρχείο αυτό να ανοίγεται με το πρόγραμμα WordPad των Windows.

Π. Χ. `output_name='SimData_kav_mat15_Dam25';`

### 2.2.1 Δεδομένα Εισόδου για Προχωρημένους Χρήστες

Εκτός από το αρχείο “InputData.m”, μεταβλητές εισόδου ορίζονται και στις πρώτες γραμμές του αρχείου “ProcessInput.m”, με τη διαφορά ότι οι μεταβλητές αυτές αναφέρονται σε προχωρημένους χρήστες που έχουν πολύ καλή γνώση της μεθοδολογίας αναθεώρησης μοντέλων αλλά και των μεθοδολογιών βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί το MATLAB. Δύο είναι οι μεταβλητές που μπορεί να οριστούν εδώ.

**num\_of\_modes\_calculated:** (number of modes calculated). Η εύρεση όλων των ιδιοσυχνοτήτων ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, ιδίως όταν πρόκειται για μοντέλο με πολλούς βαθμούς ελευθερίας (300 και άνω), είναι υπολογιστικά χρονοβόρα διαδικασία. Από την άλλη, οι πειραματικά αναγνωρίσιμες ιδιοσυχνότητες κατασκευών είναι οι χαμηλότερες ιδιοσυχνότητες. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία της αναθεώρησης, γίνεται σύγκριση ανάμεσα στις πειραματικά και υπολογιστικά προσδιοριζόμενες ιδιοσυχνότητες. Επομένως, είναι περιττός ο υπολογισμός όλων των ιδιοσυχνοτήτων του μοντέλου της κατασκευής, αφού θα χρειαστούν για σύγκριση

μερικές από αυτές. Τα παραπάνω θα γίνουν καλύτερα αντιληπτά, με το παρακάτω παράδειγμα.

Έστω ότι για τη γέφυρα της Καβάλας που μελετάται, πειραματικά αναγνωρίστηκαν 2 συχνότητες: 0.81Hz και 3.54Hz. Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων έχει 900 βαθμούς ελευθερίας και η επίλυση του ιδιοπρόβληματος θα δώσει 900 ιδιοσυχνότητες. Μια τέτοια διαδικασία όμως είναι πολύ χρονοβόρα. Από τις 900 ιδιοσυχνότητες, οι 40 πρώτες κυμαίνονται από 0.57Hz μέχρι 13.86Hz, ενώ οι 15 πρώτες από 0.57Hz μέχρι 4.63Hz. Είναι εμφανές λοιπόν, ότι δεν ωφελεί να υπολογιστούν όλες οι ιδιοσυχνότητες του μοντέλου, αλλά οι περίπου 15 πρώτες αφού οι πειραματικά υπολογιζόμενες συχνότητες εμπεριέχονται σε αυτές. Ο χρόνος προσδιορισμού των 15 πρώτων ιδιοσυχνοτήτων είναι σαφώς μικρότερος από το χρόνο υπολογισμού και των 900 ιδιοσυχνοτήτων.

Στην παρούσα μεταβλητή *num\_of\_modes\_calculated*, δηλώνεται πόσες ιδιοσυχνότητες του μοντέλου να υπολογιστούν. Πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα έτσι ώστε οι *num\_of\_modes\_calculated* ιδιοσυχνότητες του μοντέλου (στο παρόν παράδειγμα 15), να εμπεριέχουν τις πειραματικά προσδιοριζόμενες συχνότητες, διαφορετικά δημιουργείται πρόβλημα στην εφαρμογή της μεθοδολογίας αναθεώρησης.

Ένα άλλο θέμα που τίθεται άμεσα, είναι η αντιστοιχία των πειραματικά αναγνωρισμένων ιδιοσυχνοτήτων με τις υπολογιστικά προσδιοριζόμενες. Ποίες είναι οι 2 από τις 15 ιδιοσυχνότητες του μοντέλου που αντιστοιχούν στις μετρούμενες; Η απάντηση δίνεται με την εφαρμογή του κριτηρίου “Modal Assurance Criterion”. Οι 2 πειραματικά προσδιοριζόμενες ιδιοσυχνότητες, συσχετίζονται διαδοχικά μέσω μιας συνάρτησης με κάθε μία από τις 15 υπολογιστικά προσδιοριζόμενες ιδιοσυχνότητες. Το αποτέλεσμα της συσχέτισης είναι μία τιμή μικρότερη της μονάδας (MAC value). Σε κάθε μια από τις πειραματικά προσδιοριζόμενες ιδιοσυχνότητες αντιστοιχίζεται εκείνη η υπολογιστικά προσδιοριζόμενη, που η τιμή του MAC είναι πιο κοντά στη μονάδα.

Στο αρχείο των αποτελεσμάτων τυπώνονται οι τιμές του MAC. Αν αυτές είναι αρκετά μακριά από τη μονάδα, πρέπει να αυξηθεί η τιμή της μεταβλητής *num\_of\_modes\_calculated*, γιατί η ιδιοσυχνότητα που αναγνωρίστηκε πειραματικά δεν εμπεριέχεται στις υπολογιστικά προσδιοριζόμενες ιδιοσυχνότητες.

**options:** Στη μεταβλητή αυτή δηλώνονται οι παράμετρος βελτιστοποίησης της συνάρτησης *fminunc* ή *fmincon* του MATLAB. Για περισσότερες πληροφορίες, στο command prompt του παράθυρου του MATLAB, πληκτρολογήστε την εντολή: “help optimset” (χωρίς τα εισαγωγικά).

## 2.3 Εκτέλεση Προγράμματος Αναθεώρησης

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων του προγράμματος, η εκτέλεση του προγράμματος γίνεται με την εντολή “FEMUpdating”.

Στην αρχή το πρόγραμμα “διαβάζει” τα δεδομένα εισόδου (διαβάζει το αρχείο InputData.m) και στη συνέχεια τα επεξεργάζεται για να τα φέρει στην τελική μορφή που απαιτείται (αυτό γίνεται με το αρχείο “ProcessInput.m”).

Στη συνέχεια ανοίγει ένα πλαίσιο διαλόγου το οποίο ρωτάει το χρήστη, ποια από τις τέσσερις αντικειμενικές συναρτήσεις που διαθέτει ως τώρα ο λογισμικό, θέλει

να χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα για να κάνει την αναθεώρηση. Συνίσταται να χρησιμοποιείται η δεύτερη επιλογή “omega+phi, constrained”, που χρησιμοποιεί για αναθεώρηση τη συνάρτηση  $J = \|\omega - \hat{\omega}\| + \|\varphi - \hat{\varphi}\|$  και η οποία υπόκειται στους περιορισμούς που δηλώνονται στο αρχείο “InputData.m” με τις μεταβλητές *thita\_lower\_bound* και *thita\_upper\_bound*.

Μετά το τέλος του προγράμματος σχεδιάζονται 3 σχήματα, το κάθε ένα σε ξεχωριστό παράθυρο. Στην κεφαλίδα του κάθε παραθύρου δίνονται πληροφορίες για το τι ακριβώς απεικονίζεται. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων αναφέρονται στην παράγραφο 1.5

## 2.4 Ανάγνωση Αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα καταγράφονται αυτόματα σε ένα αρχείο μορφής “.txt”, ονομάζεται σύμφωνα με την τιμή τις παραμέτρου *output\_name* και για καλύτερη θέαση, προτείνεται να ανοίγεται με το πρόγραμμα WordPad των Windows. Διαβάζοντας κάποιος ένα αρχείο αποτελεσμάτων, αμέσως διαπιστώνει ότι χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος καταγράφονται τα δεδομένα εισόδου ενώ στο δεύτερο τα αποτελέσματα.

### 2.4.1 Πρώτο Μέρος: Δεδομένα Εισόδου

Στην πρώτη γραμμή αναγράφεται ο τίτλος της περίπτωσης (case study) που μελετάται. Σαν τίτλος αναγράφεται η τιμή της μεταβλητής *Casestudy*, όπως αυτή δηλώνεται στο αρχείο όπου εισάγονται τα δεδομένα, InputData.m.

Στη συνέχεια αναφέρεται το όνομα του .mat file, που περιέχει τα μετρούμενα μορφικά δεδομένα και φορτώθηκε στο Workspace του MATLAB. Αναφέρεται δηλαδή, η τιμή της μεταβλητής *modaldata*, όπως αυτή δηλώνεται στο αρχείο εισαγωγής δεδομένων, InputData.m.

Παρακάτω, αναφέρεται το πλήθος των πειραματικά αναγνωρισμένων ιδιοσυχνοτήτων και οι τιμές αυτών. Στη συνέχεια αναφέρονται οι μετρούμενοι βαθμοί ελευθερίας του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Πιο κάτω, δηλώνεται ποία από τις τέσσερις μεθοδολογίες αναθεώρησης μοντέλων χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη.

Ακολούθως, στην περίπτωση που έχει επιλεγεί να χρησιμοποιηθεί για αναθεώρηση, μια από τις μεθόδους όπου γίνεται βελτιστοποίηση υπό συνθήκη, αναγράφεται ο πίνακας με τους περιορισμούς. Στην πρώτη στήλη αναγράφεται για κάθε παράμετρο η κατώτερη πιθανή τιμή ενώ στη δεύτερη η ανώτερη. Στην πρώτη στήλη δηλαδή, αναγράφονται οι τιμές της μεταβλητής *thita\_lower\_bound* ενώ στη δεύτερη οι τιμές της μεταβλητής *thita\_upper\_bound*.

Στον τελευταίο πίνακα του πρώτου μέρους, καταγράφονται τα group στα οποία έχει παραμετροποιηθεί η κατασκευή, η ονομασία αυτών (αν έχουν δηλωθεί στη μεταβλητή *groupname* στο αρχείο InputData.m) και τα στοιχεία (*elementID*) που αποτελούν το κάθε group.

### 2.4.2 Δεύτερο Μέρος: Αποτελέσματα

Στην πρώτη γραμμή αναγράφεται ποιές από τις ιδιοσυχνότητες του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν για να συγκριθούν με τις πειραματικά υπολογιζόμενες

ιδιοσυχνότητες. Στη συνέχεια δίνεται ένας πίνακας που περιέχει τις τιμές του “Modal Assurance Criterion” για κάθε ζευγάρι συχνοτήτων (της πειραματικά υπολογιζόμενης με την αντίστοιχη υπολογιστικά υπολογιζόμενης). Περισσότερες λεπτομέρειες για τις δύο αυτές εγγραφές του output αρχείου, δίνονται στην παράγραφο 1.2.1 και συγκεκριμένα όταν γίνεται αναφορά στη μεταβλητή *num\_of\_modes\_calculated*.

π. χ. Model Modes Used for Update: 1 2 3 8

π. χ.

MAC values for each frequency				
frequency	1	2	3	4
MAC value	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000

**Στη συνέχεια, καταγράφεται το σφάλμα της βελτιστοποίησης.**

Π. χ. Optimization Error, J= 4.382109e-007 or 0.00000044

Αμέσως από κάτω, ακολουθεί ένας πίνακας που στην πρώτη στήλη περιέχει τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του κάθε group, ενώ στην δεύτερη, τις αρχικές εκτιμήσεις των παραμέτρων, που είχαν δηλωθεί από το χρήστη στη μεταβλητή *thita* του “InputData.m” αρχείου. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει άμεσα αντιληπτή η διαφορά της αρχικής εκτίμησης από την τελική τιμή.

Π. χ.

Parameter Values	
Optimal Values for parameters	Initial Estimations for parameters
1.0000	1.2000
0.9992	1.2000
0.9997	1.2000
0.7502	1.2000
1.0000	1.2000
0.9993	1.2000
1.0000	1.2000

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, οι βέλτιστες τιμές των μεταβλητών είναι περίπου ίσες με τη μονάδα, εκτός από την παράμετρο που αντιστοιχεί στο group 4, το οποίο περιέχει τα στοιχεία του εφεδράνου του πυλώνα M1, η οποία είναι ίση με 0,75.

Στον παρακάτω πίνακα του αρχείου, καταγράφονται οι πειραματικά αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες, οι υπολογιστικά υπολογιζόμενες ιδιοσυχνότητες για το μοντέλο που αντιστοιχεί στις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων και η επί της εκατό (%) διαφορά τους. Είναι εμφανές ότι όσο πιο μικρή είναι η διαφορά ανάμεσα στις δύο συχνότητες τόσο πιο κοντά είναι το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στην πραγματική κατασκευή, από όπου προέρχονται οι μετρήσεις.

Π. Χ. Comparison between Measured and Model based frequencies

Ω Measured	ω Model Based	% Difference
0.5408	0.5408	-0.00%
0.5667	0.5667	-0.01%
0.6763	0.6762	-0.02%
2.7846	2.7846	0.00%

Στον τελευταίο μέρος των αποτελεσμάτων ακολουθεί ένας πίνακας για κάθε group στοιχείων που έχει παραμετροποιηθεί με μια παράμετρο. Στην πρώτη στήλη δίνεται ο αριθμός του στοιχείου (elementID) ενώ στη δεύτερη η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του στοιχείου, όπως αυτή προέκυψε μετά την αναθεώρηση.

Π. Χ. Group 4

Elem. #	Eo*θ
169	7.502371e+002
170	7.502371e+002
171	7.502371e+002
172	7.502371e+002
173	7.502371e+002
174	7.502371e+002
175	7.502371e+002
176	7.502371e+002

## 2.5 Γραφική Απεικόνιση Αποτελεσμάτων

Μετά το τέλος του προγράμματος, ανοίγουν 3 παράθυρα που βοηθάνε το χρήστη να κατανοήσει καλύτερα τα αποτελέσματα. Στον τίτλο του κάθε παραθύρου δίνεται μία περιγραφή του τι απεικονίζεται σε κάθε παράθυρο.

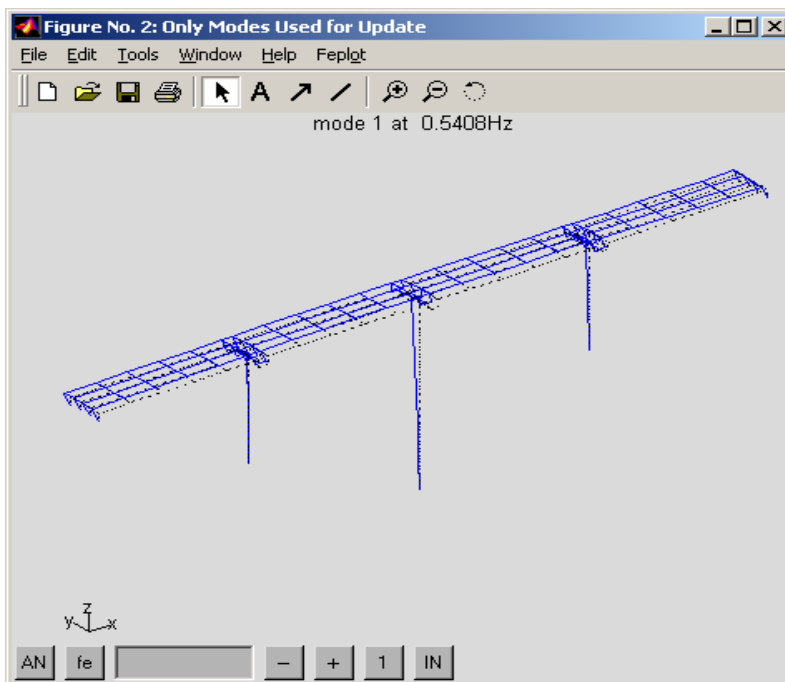
Το παράθυρο figure 2 (σχήμα 1.3), περιέχει τις ιδιομορφές του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν για την αναθεώρηση. Είναι αυτές οι ιδιοσυχνότητες που καταγράφονται και στο αρχείο εξόδου (output file) υπό τον τίτλο “Model Modes Used for Update” (Στην παρούσα περίπτωση τις ιδιομορφές 1, 2, 3, 8). Πατώντας τα κουμπιά “+” και “-” απεικονίζεται η επόμενη και η προηγούμενη ιδιομορφή αντίστοιχα. Πατώντας το κουμπί “AN” ξεκινάει animation για κάθε ιδιομορφή.

Το παράθυρο figure 3, περιέχει όλες τις ιδιομορφές του αναθεωρημένου μοντέλου που υπολογίστηκαν και ο αριθμός τους δηλώνεται στη μεταβλητή *num\_of\_modes\_calculated* (παράγραφος 1.2.1)

Το παράθυρο figure 5, απεικονίζει τα group που παραμετροποιήθηκαν με τις παραμέτρους  $\theta$  και είναι αυτό που περιγράφεται στο σχήμα (1.2)

Για να ανοίξουν αυτά τα παράθυρα το κυρίως πρόγραμμα “διαβάζει” τα αρχεία *plot\_modes\_used\_for\_update*, *plot\_all\_modes* και *plot\_groups* αντίστοιχα.





**Σχήμα (3.3)** Figure 2. Εμφανίζεται μετά το τέλος του προγράμματος και απεικονίζει μόνο τις μορφές του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν για αναθεώρηση.

## 2.6 Παραρτήματα

Στο Παράρτημα Α, παρατίθενται ο κώδικας του αρχείου `InputData.m` και το αρχείο εξόδου για την περίπτωση μελέτης προσομοιωμένων δεδομένων, τα οποία αντιστοιχούν στην κατασκευή της γέφυρας της Καβάλας όταν έχει μειωθεί το μέτρο ελαστικότητας των εφεδράνων του αριστερού πυλώνα κατά 25%.

Στο Παράρτημα Β, παρατίθενται ο κώδικας του αρχείου `InputData.m` και το αρχείο εξόδου για την περίπτωση μελέτης πραγματικών δεδομένων, που προήλθαν από την επεξεργασία μετρήσεων που είχε διεξάγει το ΙΤΣΑΚ. Στην περίπτωση αυτή, το μοντέλο παραμετροποιείται με δύο παράμετρος, δημιουργούνται δηλαδή δύο `group`. Το πρώτο περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που μοντελοποιούν τους τρεις πυλώνες και των οποίων το μέτρο ελαστικότητας  $E$  παραμετροποιείται με την παράμετρο  $\theta_1$ . Το δεύτερο `group`, περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που μοντελοποιούν τα διαμήκη οριζόντια στοιχεία του καταστρώματος της γέφυρας και των οποίων το μέτρο ελαστικότητας  $E$  παραμετροποιείται με την παράμετρο  $\theta_2$ .

Στο Παράρτημα C, παρατίθενται τα μορφικά δεδομένα και τα σημεία μέτρησης της κατασκευής για κάθε μία από τις περιπτώσεις που δίνονται στα παραρτήματα Α και Β. Πρόκειται για τα δεδομένα που “φορτώνονται” από το αρχείο που δηλώνεται στη μεταβλητή `modaldata`.

Τέλος, στο Παράρτημα D, παρουσιάζεται ο κώδικας αναθεώρησης του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας, με όλες τις υπορουτίνες που τον αποτελούν.

## 2.6.1 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

```
%InputData.m for case with simulated Data
casestudy='KAVALA BRIDGE, CASE: Damage 25% at Bearing of Left Column'; %Name of Case Study
modaldata='SimData_kav_mat15_Dam25'; %name of .mat file containing modal data: omegahat, phihat, measuredDOF
finite_element_model=('kavala_model'); %Finite Element model

%-----GROUPS-----%
group(1).g=[209; 210; 211; 212; 213; 214; 227; 228; 229; 230; 231; 232; 245; 246; 247; 248; 249; 250];
group(2).g=[165:168]';
group(3).g=[193:196]';
group(4).g=[169:176]';
group(5).g=[185:192]';
group(6).g=[177:184]';
group(7).g=[1; 2; 3; 4; 5; 7; 8; 9; 10; 11; 13; 14; 15; 16; 17; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27;
            28; 30; 31; 32; 33; 34; 36; 37; 38; 39; 40; 42; 43; 44; 45; 46; 47; 48; 49; 50; 51; 53;
            54; 55; 56; 57; 59; 60; 61; 62; 63; 65; 66; 67; 68; 69; 70; 71; 72; 73; 74; 76; 77; 78;
            79; 80; 82; 83; 84; 85; 86; 88; 89; 90; 91; 92];

groupname(1).g='Columns'; %Group Name, not necessary to declare.
groupname(2).g='Left Edge Bearing'; %(till 24characters, space included, rest will be ignored)
groupname(3).g='Right Edge Bearing';
groupname(4).g='Left Column Bearing';
groupname(5).g='Right Column Bearing';
groupname(6).g='Centre Column Bearing';
groupname(7).g='Deck longitudinal Elements';

%--Initial estimation for the parameters of each group-----%
thita=[1.2;1.1;0.9;0.6;1.3;1;0.9]; %Suggested and Default values, thita=[1;1;1;....;1;1]

thita_lower_bound=[]; %For constrained optimization, Lower Bound. Default value=0

thita_upper_bound=[1;1;1;1;1;1;1]; %For constrained optimization, Upper Bound. Default value=10

output_path='C:\MATLABR11\work\'; %Directory where OUTPUT file will be saved
output_name='SimData_kav_mat15_Dam25'; %Name of the OUTPUT .txt file with results
%For better view, file should be opened with WordPad.
```

KAVALA BRIDGE, CASE: Damage 25% at Bearing of Left Column

~~~~~  
~

Input Parameters

=====  
=

Loaded File Name with Measurements.....: SimData\_kav\_mat15\_Dam25.mat

Number of Modes Experimentaly Identified..: 4

Identified Frequencies (in Hz).....: 0.5408 0.5667 0.6763  
2.7846

Number of Measured DOFs.....: 30

Measured DOFs.....: 74 75 86 87 92  
93 98  
122 123  
519 525  
573 763  
823 883

Objective Function used for Optimization..:  $J=||\omega-\omega_{hat}||+||\phi-\phi_{hat}||$

| Groups | Group Name            | Elements                                                                      |
|--------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 1      | Columns               | 209 210 211 212 213 214 227 228 229 230 231 232 245<br>246 247 248<br>249 250 |
| 2      | Left Edge Bearing     | 165 166 167 168                                                               |
| 3      | Right Edge Bearing    | 193 194 195 196                                                               |
| 4      | Left Column Bearing   | 169 170 171 172 173 174 175 176                                               |
| 5      | Right Column Bearing  | 185 186 187 188 189 190 191 192                                               |
| 6      | Center Column Bearing | 177 178 179 180 181 182 183 184                                               |

|    |              |              |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|--------------|--------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 7  | Deck longitu |              | 1 | 2  | 3  | 4  | 5  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 13 | 14 | 15 |    |
| 16 | 17           | 19           |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|    |              | dinal Elemen |   | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 30 | 31 | 32 | 33 |
| 34 | 36           | 37           |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|    |              |              |   | 38 | 39 | 40 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 |
| 53 | 54           | 55           |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|    |              |              |   | 56 | 57 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 |
| 71 | 72           | 73           |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|    |              |              |   | 74 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 88 | 89 |
| 90 | 91           | 92           |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

Output Parameters

=====  
=

Model Modes Used for Update.....: 1 2 3 8

MAC values for each frequency

|           |  |         |         |         |         |
|-----------|--|---------|---------|---------|---------|
| frequency |  | 1       | 2       | 3       | 4       |
| MAC value |  | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 |

Optimization Error, J= 3.386555e-007 or 0.00000034

Parameter Values

| Optimal Values<br>for parameters | Initial Estimations<br>for parameters |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| 1.0009                           | 1.2000                                |
| 0.9990                           | 1.1000                                |
| 0.9994                           | 0.9000                                |
| 0.7502                           | 0.6000                                |
| 1.0001                           | 1.3000                                |
| 0.9989                           | 1.0000                                |
| 1.0002                           | 0.9000                                |

Comparison between Measured and  
Model based frequencies

| $\omega$ Measured | $\omega$ Model Based | % Difference |
|-------------------|----------------------|--------------|
| 0.5408            | 0.5408               | 0.01%        |
| 0.5667            | 0.5667               | 0.00%        |
| 0.6763            | 0.6762               | -0.02%       |
| 2.7846            | 2.7850               | 0.01%        |

Updated Modulus of Elasticity  
for each Parametrized Element

-----

Group 1  
=====

| Elem. # | Eo*θ          |
|---------|---------------|
| 209     | 3.002821e+007 |
| 210     | 3.002821e+007 |
| 211     | 3.002821e+007 |
| 212     | 3.002821e+007 |
| 213     | 3.002821e+007 |
| 214     | 3.002821e+007 |
| 227     | 3.002821e+007 |
| 228     | 3.002821e+007 |
| 229     | 3.002821e+007 |
| 230     | 3.002821e+007 |
| 231     | 3.002821e+007 |
| 232     | 3.002821e+007 |
| 245     | 3.002821e+007 |
| 246     | 3.002821e+007 |
| 247     | 3.002821e+007 |
| 248     | 3.002821e+007 |
| 249     | 3.002821e+007 |
| 250     | 3.002821e+007 |

-----

Group 2  
=====

| Elem. # | Eo*θ          |
|---------|---------------|
| 165     | 9.990142e+002 |
| 166     | 9.990142e+002 |
| 167     | 9.990142e+002 |
| 168     | 9.990142e+002 |

-----

Group 3  
=====

| Elem. # | Eo*θ          |
|---------|---------------|
| 193     | 9.993696e+002 |
| 194     | 9.993696e+002 |
| 195     | 9.993696e+002 |
| 196     | 9.993696e+002 |

-----

Group 4  
=====

| Elem. # | Eo*θ |
|---------|------|
|---------|------|

-----

| Elem. # | Eo*θ          |
|---------|---------------|
| 169     | 7.501880e+002 |
| 170     | 7.501880e+002 |
| 171     | 7.501880e+002 |
| 172     | 7.501880e+002 |
| 173     | 7.501880e+002 |
| 174     | 7.501880e+002 |
| 175     | 7.501880e+002 |
| 176     | 7.501880e+002 |

Group 5

| Elem. # | Eo*θ          |
|---------|---------------|
| 185     | 1.000088e+003 |
| 186     | 1.000088e+003 |
| 187     | 1.000088e+003 |
| 188     | 1.000088e+003 |
| 189     | 1.000088e+003 |
| 190     | 1.000088e+003 |
| 191     | 1.000088e+003 |
| 192     | 1.000088e+003 |

Group 6

| Elem. # | Eo*θ          |
|---------|---------------|
| 177     | 9.989317e+002 |
| 178     | 9.989317e+002 |
| 179     | 9.989317e+002 |
| 180     | 9.989317e+002 |
| 181     | 9.989317e+002 |
| 182     | 9.989317e+002 |
| 183     | 9.989317e+002 |
| 184     | 9.989317e+002 |

Group 7

| Elem. # | Eo*θ          |
|---------|---------------|
| 1       | 3.000635e+007 |
| 2       | 3.000635e+007 |

|    |               |
|----|---------------|
| 3  | 3.000635e+007 |
| 4  | 3.000635e+007 |
| 5  | 3.000635e+007 |
| 7  | 3.000635e+007 |
| 8  | 3.000635e+007 |
| 9  | 3.000635e+007 |
| 10 | 3.000635e+007 |
| 11 | 3.000635e+007 |
| 13 | 3.000635e+007 |
| 14 | 3.000635e+007 |
| 15 | 3.000635e+007 |
| 16 | 3.000635e+007 |
| 17 | 3.000635e+007 |
| 19 | 3.000635e+007 |
| 20 | 3.000635e+007 |
| 21 | 3.000635e+007 |
| 22 | 3.000635e+007 |
| 23 | 3.000635e+007 |
| 24 | 3.000635e+007 |
| 25 | 3.000635e+007 |
| 26 | 3.000635e+007 |
| 27 | 3.000635e+007 |
| 28 | 3.000635e+007 |
| 30 | 3.000635e+007 |
| 31 | 3.000635e+007 |
| 32 | 3.000635e+007 |
| 33 | 3.000635e+007 |
| 34 | 3.000635e+007 |
| 36 | 3.000635e+007 |
| 37 | 3.000635e+007 |
| 38 | 3.000635e+007 |
| 39 | 3.000635e+007 |
| 40 | 3.000635e+007 |
| 42 | 3.000635e+007 |
| 43 | 3.000635e+007 |
| 44 | 3.000635e+007 |
| 45 | 3.000635e+007 |
| 46 | 3.000635e+007 |
| 47 | 3.000635e+007 |
| 48 | 3.000635e+007 |
| 49 | 3.000635e+007 |
| 50 | 3.000635e+007 |
| 51 | 3.000635e+007 |
| 53 | 3.000635e+007 |
| 54 | 3.000635e+007 |
| 55 | 3.000635e+007 |
| 56 | 3.000635e+007 |
| 57 | 3.000635e+007 |
| 59 | 3.000635e+007 |
| 60 | 3.000635e+007 |
| 61 | 3.000635e+007 |
| 62 | 3.000635e+007 |
| 63 | 3.000635e+007 |
| 65 | 3.000635e+007 |
| 66 | 3.000635e+007 |
| 67 | 3.000635e+007 |
| 68 | 3.000635e+007 |
| 69 | 3.000635e+007 |
| 70 | 3.000635e+007 |
| 71 | 3.000635e+007 |
| 72 | 3.000635e+007 |

|  |       |  |               |  |
|--|-------|--|---------------|--|
|  | 73    |  | 3.000635e+007 |  |
|  | 74    |  | 3.000635e+007 |  |
|  | 76    |  | 3.000635e+007 |  |
|  | 77    |  | 3.000635e+007 |  |
|  | 78    |  | 3.000635e+007 |  |
|  | 79    |  | 3.000635e+007 |  |
|  | 80    |  | 3.000635e+007 |  |
|  | 82    |  | 3.000635e+007 |  |
|  | 83    |  | 3.000635e+007 |  |
|  | 84    |  | 3.000635e+007 |  |
|  | 85    |  | 3.000635e+007 |  |
|  | 86    |  | 3.000635e+007 |  |
|  | 88    |  | 3.000635e+007 |  |
|  | 89    |  | 3.000635e+007 |  |
|  | 90    |  | 3.000635e+007 |  |
|  | 91    |  | 3.000635e+007 |  |
|  | 92    |  | 3.000635e+007 |  |
|  | ----- |  | -----         |  |



## 2.6.2 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

```
%InputData for real data

casestudy='KAVALA BRIDGE, CASE: Real Data';      %Name of Case Study
modaldata='kavala_data';                        %name of .mat file containing modal data: omegahat, phihat, measuredDOF
finite_element_model='kavala_model';           %Finite Element model

%-----GROUPS-----%
group(1).g=[1;2;3;4;5;7;8;9;10;11;13;14;15;16;17;19;20;21;22;23;24;25;26;27;28;30;31;32;33;34;
            36;37;38;39;40;42;43;44;45;46;47;48;49;50;51;53;54;55;56;57;59;60;61;62;63;65;66;
            67;68;69;70;71;72;73;74;76;77;78;79;80;82;83;84;85;86;88;89;90;91;92];
group(2).g=[165;166;167;168;169;170;171;172;173;174;175;176;177;178;179;180;181;182;
            183;184;185;186;187;188;189;190;191;192;193;194;195;196];

groupname(1).g='Deck Horizontal Elements';      %Group Name, not necessary to declare.
groupname(2).g='Columns';                       %(till 24characters, space included, rest will be ignored)

%--Initial estimation for the parameters of each group-----%
thita=[1;1];                                    %Suggested and Default values, thita=[1;1;1;...;1;1]

thita_lower_bound=[];                            %For constrained optimization, Lower Bound. Default value=0

thita_upper_bound=[]                             %For constrained optimization, Upper Bound. Default value=10

output_path='C:\MATLABR11\work\';               %Directory where OUTPUT file will be saved
output_name='kavala_results_real_data';         %Name of the OUTPUT .txt file with results
                                                %For better view, file should be opened with WordPad.
```

KAVALA BRIDGE, CASE: Real Data

~~~~~  
~

Input Parameters

=====

```

=
Loaded File Name with Measurements.....: kavala_data.mat

Number of Modes Experimentally Identified..: 2

Identified Frequencies (in Hz).....: 0.8100 3.5400

Number of Measured DOFs.....: 27

Measured DOFs.....: 74 75 86 87 92
93 98
                        99 110 111 116 117
122 123
                        128 129 140 141 507
519 525
                        531 543 549 555 561
573
    
```

Objective Function used for Optimization...:  $J = ||\omega - \hat{\omega}|| + ||\phi - \hat{\phi}||$

Groups	Group Name	Elements
1	Deck Horizon	1 2 3 4 5 7 8 9 10 11 13 14 15
16 17 19	total Elements	20 21 22 23 24 25 26 27 28 30 31 32 33
34 36 37		38 39 40 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51
53 54 55		56 57 59 60 61 62 63 65 66 67 68 69 70
71 72 73		74 76 77 78 79 80 82 83 84 85 86 88 89
90 91 92		
2	columns	165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177
178 179 180		181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193
194 195 196		

Output Parameters

=====

Model Modes Used for Update.....: 1 8

MAC values for each frequency

frequency	1	2
MAC value	0.95434	0.90972

Optimization Error, J= 3.843849e-005 or 0.00003844

Parameter Values

Optimal Values for parameters	Initial Estimations for parameters
1.5384	1.0000
6.0805	1.0000

Comparison between Measured and  
Model based frequencies

$\omega$ Measured	$\omega$ Model Based	% Difference
0.8100	0.8101	0.01%
3.5400	3.5396	-0.01%

Updated Modulus of Elasticity  
for each Parametrized Element

Group 1

Elem. #	$E_0 \cdot \theta$
1	4.615237e+007
2	4.615237e+007
3	4.615237e+007
4	4.615237e+007
5	4.615237e+007
7	4.615237e+007
8	4.615237e+007
9	4.615237e+007
10	4.615237e+007
11	4.615237e+007
13	4.615237e+007
14	4.615237e+007
15	4.615237e+007
16	4.615237e+007
17	4.615237e+007
19	4.615237e+007
20	4.615237e+007
21	4.615237e+007

22	4.615237e+007
23	4.615237e+007
24	4.615237e+007
25	4.615237e+007
26	4.615237e+007
27	4.615237e+007
28	4.615237e+007
30	4.615237e+007
31	4.615237e+007
32	4.615237e+007
33	4.615237e+007
34	4.615237e+007
36	4.615237e+007
37	4.615237e+007
38	4.615237e+007
39	4.615237e+007
40	4.615237e+007
42	4.615237e+007
43	4.615237e+007
44	4.615237e+007
45	4.615237e+007
46	4.615237e+007
47	4.615237e+007
48	4.615237e+007
49	4.615237e+007
50	4.615237e+007
51	4.615237e+007
53	4.615237e+007
54	4.615237e+007
55	4.615237e+007
56	4.615237e+007
57	4.615237e+007
59	4.615237e+007
60	4.615237e+007
61	4.615237e+007
62	4.615237e+007
63	4.615237e+007
65	4.615237e+007
66	4.615237e+007
67	4.615237e+007
68	4.615237e+007
69	4.615237e+007
70	4.615237e+007
71	4.615237e+007
72	4.615237e+007
73	4.615237e+007
74	4.615237e+007
76	4.615237e+007
77	4.615237e+007
78	4.615237e+007
79	4.615237e+007
80	4.615237e+007
82	4.615237e+007
83	4.615237e+007
84	4.615237e+007
85	4.615237e+007
86	4.615237e+007
88	4.615237e+007
89	4.615237e+007
90	4.615237e+007
91	4.615237e+007

```
|      92      | 4.615237e+007 |
|-----|-----|
```

Group 2

=====

Elem. #	Eo*θ
165	6.080533e+003
166	6.080533e+003
167	6.080533e+003
168	6.080533e+003
169	6.080533e+003
170	6.080533e+003
171	6.080533e+003
172	6.080533e+003
173	6.080533e+003
174	6.080533e+003
175	6.080533e+003
176	6.080533e+003
177	6.080533e+003
178	6.080533e+003
179	6.080533e+003
180	6.080533e+003
181	6.080533e+003
182	6.080533e+003
183	6.080533e+003
184	6.080533e+003
185	6.080533e+003
186	6.080533e+003
187	6.080533e+003
188	6.080533e+003
189	6.080533e+003
190	6.080533e+003
191	6.080533e+003
192	6.080533e+003
193	6.080533e+003
194	6.080533e+003
195	6.080533e+003
196	6.080533e+003

### 2.6.3 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ C

#### α. Simulated Data

Προσομοιωμένα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για αναθεώρηση.

a/a	measuredDOF	phihat (μετρούμενες ιδιομορφές)			
		$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$
1	74	-1,578E-02	5,525E-05	-1,766E-03	-1,101E-04
2	75	-1,731E-03	-4,306E-04	-1,946E-04	2,575E-03
3	86	-1,509E-02	8,351E-05	-6,628E-03	-1,334E-04
4	87	-1,593E-03	-1,017E-04	-5,848E-04	2,583E-02
5	92	-1,459E-02	9,776E-05	-8,964E-03	-1,268E-04
6	93	-1,513E-03	1,114E-04	-7,828E-04	2,562E-02
7	98	-1,399E-02	1,121E-04	-1,125E-02	-1,106E-04
8	99	-1,428E-03	2,954E-04	-9,742E-04	1,638E-02
9	110	-1,298E-02	1,305E-04	-1,430E-02	-6,482E-05
10	111	-1,301E-03	-3,875E-04	-1,158E-03	3,385E-04
11	116	-1,232E-02	1,458E-04	-1,663E-02	-4,281E-05
12	117	-1,071E-03	-4,321E-04	-9,581E-04	1,936E-03
13	122	-1,166E-02	1,614E-04	-1,883E-02	-2,424E-05
14	123	-8,276E-04	-3,869E-04	-7,458E-04	2,887E-03
15	128	-1,095E-02	1,767E-04	-2,094E-02	-3,722E-06
16	129	-5,774E-04	-2,789E-04	-5,261E-04	2,824E-03
17	140	-9,367E-03	2,052E-04	-2,472E-02	3,924E-05
18	141	-8,155E-05	-2,362E-06	-8,387E-05	8,146E-05
19	507	1,729E-03	-4,429E-04	1,846E-04	1,888E-03
20	519	1,589E-03	-1,199E-04	5,796E-04	2,525E-02
21	525	1,509E-03	9,550E-05	7,833E-04	2,507E-02
22	531	1,426E-03	2,799E-04	9,805E-04	1,586E-02
23	543	1,301E-03	-4,098E-04	1,153E-03	-1,066E-04
24	549	1,070E-03	-4,567E-04	9,498E-04	1,533E-03
25	555	8,246E-04	-4,063E-04	7,361E-04	2,548E-03
26	561	5,730E-04	-2,911E-04	5,171E-04	2,573E-03
27	573	7,778E-05	-3,820E-06	8,062E-05	4,192E-05
28	763	5,271E-06	1,577E-03	1,566E-05	-2,022E-03
29	823	1,046E-05	4,085E-03	4,180E-05	-1,629E-04
30	883	3,546E-06	1,872E-03	1,832E-05	1,097E-03

α/α	omegahat
	Πειραματικά αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες
$\omega_1$	0,5408
$\omega_2$	0,5667
$\omega_3$	0,6763
$\omega_4$	2,7846

## β. Real Data

Δεδομένα προερχόμενα από την επεξεργασία πραγματικών μετρήσεων και χρησιμοποιήθηκαν για αναθεώρηση.

a/a	measuredDOF	phi_hat (μετρούμενες ιδιομορφές)	
		$\omega_1$	$\omega_2$
1	74	1,0000	0
2	75	0	0,1344
3	86	0,8970	0
4	87	0	1,0000
5	92	0,8880	0
6	93	0	1,0104
7	98	0,8000	0
8	99	0	0,6415
9	110	0,6810	0
10	111	0	-0,1803
11	116	0,4880	0,0000
12	117	0	-1,4821
13	122	0,4680	0
14	123	0	-1,7074
15	128	0,3730	0
16	129	0	-1,4903
17	140	0,2020	0
18	141	0	-0,0322
19	507	0	0,0989
20	519	0	0,9863
21	525	0	1,0170
22	531	0	0,6670
23	543	0	-0,1828
24	549	0	-1,5563
25	555	0	-1,6757
26	561	0	-1,5862
27	573	0	-0,0339

omegahat	
a/a	Πειραματικά αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες
$\omega_1$	0,8100
$\omega_2$	3,5400

Στους βαθμούς ελευθερίας όπου η τιμή των μετρούμενων ιδιομορφών είναι μηδέν, σημαίνει είτε ότι δεν υπήρχε μέτρηση στο αντίστοιχο σημείο της πραγματικής κατασκευής για να προσδιοριστεί η τιμή της ιδιομορφής, είτε ότι κατά την επεξεργασία των μετρήσεων στα σημεία αυτά δεν αναγνωρίστηκε η ιδιοσυχνότητα για την οποία γίνεται αναφορά

## 2.6.4 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ D

- Οι υπορουτίνες του κώδικα αναθεώρησης, γραμμένες σε MATLAB:

```

*****
*****
* * *                               FEMUpdating                               * * *
*****
*****
clear all
InputData          %Read input data (for real data use the 'ready to use' file
InputData_real.m
ProcessInput       %Check if all necessary variables have been declared.
                  %If not, it asks user to define its value.
                  %It also puts all parameters into a structure named "data".

format long;
t0 = clock;
%=====
%=====          Main Program          =====
%=====

if Obj_fun==[1];
    [thita_opt,J,EXITFLAG,OUTPUT]=fminunc('J_omega_phi',thita,options,data);
elseif Obj_fun==[2];
    x3=thita_lower_bound;x4=thita_upper_bound;

[thita_opt,J,EXITFLAG,OUTPUT]=fmincon('J_omega_phi',thita,[],[],[],[],x3,x4,[],opti
ons,data);
elseif Obj_fun==[3];
    [thita_opt,J,EXITFLAG,OUTPUT]=fminunc('J_omega',thita,options,data);
elseif Obj_fun==[4];
    x3=thita_lower_bound;x4=thita_upper_bound;

[thita_opt,J,EXITFLAG,OUTPUT]=fmincon('J_omega',thita,[],[],[],[],x3,x4,[],options,
data);
else
    error('You should select one method. Run the program from the beginning','!!
Warning !!')
end

data.Obj_fun=Obj_fun; clear Obj_fun
total_time_in_minutes=etime(clock,t0)/60 %total time of calculation in minutes
clear x3 x4 i g t0;

optimal_models %Calculates omega and phi for the models witch corresponds to
thita_opt values
write_results %writes results in a .txt file

plot_modes_used_for_update; %plots modes of refined model used for update
plot_all_modes; %plots all modes of refined model
plot_groups; %plots model with each group having different color

*****

%InputData
case study='KAVALA BRIDGE, CASE: Damage 25% at Bearing of Left Column'; %Name of
Case Study
modaldata='SimData_kav_mat15_Dam25'; %name of .mat file containing modal data:
omegahat, phihat, measuredDOF
finite_element_model=('kavala_model'); %Finite Element model

%-----GROUPS-----%

```



```

group(1).g=[209; 210; 211; 212; 213; 214; 227; 228; 229; 230; 231; 232; 245; 246;
247; 248; 249; 250];
group(2).g=[165:168]';
group(3).g=[193:196]';
group(4).g=[169:176]';
group(5).g=[185:192]';
group(6).g=[177:184]';
group(7).g=[1; 2; 3; 4; 5; 7; 8; 9; 10; 11; 13; 14; 15; 16; 17; 19; 20; 21; 22; 23;
24; 25; 26; 27;
      28; 30; 31; 32; 33; 34; 36; 37; 38; 39; 40; 42; 43; 44; 45; 46; 47; 48; 49;
50; 51; 53;
      54; 55; 56; 57; 59; 60; 61; 62; 63; 65; 66; 67; 68; 69; 70; 71; 72; 73;
74; 76; 77; 78;
      79; 80; 82; 83; 84; 85; 86; 88; 89; 90; 91; 92];

groupname(1).g='Columns'; %Group Name,not necessary to declare.
groupname(2).g='Left Edge Bearing'; % (till 24characters, space
included,rest will be ignored)
groupname(3).g='Right Edge Bearing';
groupname(4).g='Left Column Bearing';
groupname(5).g='Right Column Bearing';
groupname(6).g='Center Column Bearing';
groupname(7).g='Deck longitudinal Elements';

%--Initial estimation for the parameters of each group-----%
thita=[1.2;1.1;0.9;0.6;1.3;1;0.9]; %Suggested and Default values,
thita=[1;1;1;...;1;1]

thita_lower_bound=[]; %For constrained optimization, Lower
Bound. Default value=0

thita_upper_bound=[1;1;1;1;1;1;1]; %For constrained optimization, Upper
Bound. Default value=10

%output_path='C:\Kostis\SingleCaseDemonstration\'; %Directory where OUTPUT
file will be saved
output_path='C:\Kostis\FEMUpdating_Egnatia\'; %Directory where OUTPUT
file will be saved
output_name='SimData_kav_mat15_Dam25'; %Name of the OUTPUT .txt
file with results
%For better view, file
should be opened with WordPad.

*****
%ProcessInput
num_of_modes_calculated=15;
%num_of_modes_calculated=2*length(omegahat); %number of modes to be calculated
(for the model)

%===== Optimization parameters =====
options=optimset('TolFun',1e-8,'TolX',1e-8,'MaxIter',10000000,'GradObj','off',...
'DiffMaxChange',1e-4,'DiffMinChange',1e-4); %==
%=====

data.modaldata=modaldata; clear modaldata;
load(data.modaldata) %load .mat file containing modal data :
omegahat, sphihat, measuredDOF
data.group=group; %put group into structure data
data.path=output_path; %Directory where OUTPUT file will
be saved
data.name=output_name; %Name of the OUTPUT file

clear group output_path output_name
%=====
%== Check Input ==
%=====

```

```

%1##      Frequencies+Modeshapes Identified
if exist('omegahat','var')==1
    omegahat=omegahat;
else
omegahat=input('Frequencies identified in Hz (in vector)...(for example
[1.5;3.34;4.56]) ')
end
data.omegahat=omegahat;clear omegahat;

if exist('phihat','var')==1
    phihat=phihat;
else
phihat=input('Modeshapes identified (a martix,one column for each mode).....:')
end
data.phihat=phihat;clear phihat;
%=====
%2##      Modes of the model to be calculated for comparison
if exist('num_of_modes_calculated','var')==1
    num_of_modes_calculated=num_of_modes_calculated;
else
num_of_modes_calculated=input('Number of Modes to be calculated for the FEM
model.....:')
end
data.num_of_modes_calculated=num_of_modes_calculated;clear num_of_modes_calculated;
%=====
%3##      Initial Estimations for Parameters
if exist('thita','var')==1
    if isempty(thita)==1; thita=ones(length(data.group),1);end
    thita=thita;
else
    msgbox('"thita" is a parameter which should be declared. Is a vector containing
initial estimates for parameters. If not declared, default value thita=1 for all
parameters would be used','Define parameter "thita"')
    thita=input('Give vector "thita" with initial estimates for Updated
Parameters.....:')
    if isempty(thita)==1; thita=ones(length(data.group),1);end
end
%=====
%4##      Finite Element Model for Update
if exist('finite_element_model','var')==1
    finite_element_model=finite_element_model;
else
    %model_for_update=input('Give the filename of the FEM model to be
updated.....:', 's');
    finite_element_model=inputdlg({'Name of .m file calculating FE Model Matrices
(FEelt, FEnode, adof,il, pl)'},...
    'Define FE Model',1,{'bench_model','s'});
    finite_element_model=strvcat(finite_element_model);
end
%=====
%5##      Actually Measured DOFS
if exist('measuredDOF','var')==1
    measuredDOF=measuredDOF;
else
measuredDOF=input('Give vector with measured NODES .....:')
end
data.measured_dofs=measuredDOF;clear measuredDOF;
%=====
%6##      Transformation Matrix check
%if exist('special_transformation','var')==1
%    special_transformation=special_transformation;
%else
%    special_transformation=input('Does Transformation Matrix is needed?
(0=No,1=Yes).....:')
%end
%data.special_transformation=special_transformation; clear special_transformation

%if data.special_transformation==1

```

```

% if exist('transformation_matrix_name','var')==1
% data.transformation_matrix_name=transformation_matrix_name;clear
transformation_matrix_name
% else
% [data.transformation_matrix_name,Fpath]=uigetfile('*.m','Load Transformation
Matrix');
% data.transformation_matrix_name=data.transformation_matrix_name...
% (1:length(data.transformation_matrix_name)-2)
% % or data.transformation_matrix_name=input('Give the name of the .m file
which calculates Transformation Matrix.....','s')
% end
%end
%clear Fpath
%=====
%7## Choose Method for Update (select J function to use for update)
[Obj_fun]=listdlg('PromptString','Suggested function:"frq+phi"', 'SelectionMode',
...
'single','Name','Select Objective function to
use','fus',12,'ffs',10,'uh',25,'ListSize',[200 250],...
'ListString',{'omega+phi' 'omega+phi, constrained' 'omega' 'omega,
constrained'});

if Obj_fun==1; data.method='J=||ω-ωhat||+||φ-φhat||'; end %data.method
is used for the output file only
if Obj_fun==2; data.method='J=||ω-ωhat||+||φ-φhat||, constrained';end
if Obj_fun==3; data.method='J=||ω-ωhat||'; end
if Obj_fun==4; data.method='J=||ω-ωhat||, constrained'; end
%=====
%8## CONSTRAINS, In case of constrained optimization
if Obj_fun==2 | Obj_fun==4
%===== Lower Boundary =====
if exist('thita_lower_bound','var')==1
thita_lower_bound=thita_lower_bound;
if isempty(thita_lower_bound)==1;
thita_lower_bound=zeros(length(thita),1); %default value=0
end
else
thita_lower_bound=input('Give Lower Limits (matrix, one column for each
model_for update.....:');
if isempty(thita_lower_bound)==1;
thita_lower_bound=zeros(length(thita),1); %default value=0
warndlg('Default values (Lower Boudary=0) will be used for all
parameters','!! Warning !!','replace');
end
end
if length(thita_lower_bound)~=length(thita) %check that there are
boudaries for all parameters
warndlg('You should give boudaries for all parameters','!! Warning !!');
error('You should give boudaries for all parameters')
end
%===== Upper Boundary =====
if exist('thita_upper_bound','var')==1
thita_upper_bound=thita_upper_bound;
if isempty(thita_lower_bound)==1;
thita_lower_bound=zeros(length(thita),1); %default value=0
end
else
thita_upper_bound=input('Give Upper Limits (matrix, one column for each
model_for update.....:');
if isempty(thita_upper_bound)==1;
thita_upper_bound=10*ones(length(thita),1); %default value=10
warndlg('Default values (Upper Boudary=10) will be used for all
parameters','!! Warning !!','replace');
disp('hit ENTER to continue')
pause
end
end
end
end

```

```

    if length(thita_upper_bound)~=length(thita)           %check that there are
boudaries for all parameters
        warndlg('You should give boudaries for all parameters','!! Warning !!');
        error ('You should give boudaries for all parameters')
    end
end
end
=====

eval(finite_element_model);                               %call FEM for update
adof=activeDOF(FEelt,FEnode,gdof,il,pl);                 %activeDOF = allDOF-inactiveDOF
(adof=allDof-gdof)
[data.T,data.cdof]=rigid(FEnode,FEelt,adof);            %Transformation matrix for rigid
body elements
[FEelt,FEel0]=regroup_FEelt(data);                     %Re-group FEelt according to new
groups
data.FEelt=FEelt; data.FEnode=FEnode; data.adof=adof; data.il=il;data.pl=pl;
clear FEelt FEnode adof il pl
clear global

*****
function [J]=J_omega_phi(thita,data)
global model_modes_used q
=====          PART I          =====
%=== calculation of phi+omega ===
%=====
[Ktot,Mtot,phi,omega]=core_data(thita,data);
thita
%=====          PART II          =====
%=== Modal assurance criterion ===
%=== +rearrange of phi+omega ===
%=====
[phi,omega,model_modes_used,mac]=modal_assurance_criterion(data,phi,omega);

%===== Objective function J =====
J1=sum((omega-data.omegahat).^2./data.omegahat.^2);
J1

%===== normalizing coefficient =====
for i=1:length(omega)
a(i)=(data.phihat(:,i)'*phi(:,i))/(data.phihat(:,i)'*data.phihat(:,i));
end
a=a';

for i=1:length(omega)
    q(:,i)=a(i)*data.phihat(:,i);
end

for i=1:length(omega)
    J2(i)=((phi(:,i)-q(:,i))'*(phi(:,i)-
q(:,i)))/(data.phihat(:,i)'*data.phihat(:,i));
end
J2=sum(J2)
J=J1+J2;

*****
function [J]=J_omega(thita,data)

%=====          PART I          =====
%=== calculation of phi+omega ===
%=====
[Ktot,Mtot,phi,omega]=core_data(thita,data);
thita

%=====          PART II          =====
%=== Modal assurance criterion ===
%=== +rearrange of phi+omega ===
%=====
[phi,omega,model_modes_used,mac]=modal_assurance_criterion(data,phi,omega);

```

```

%===== Objective function J =====
J1=sum((omega-data.omegahat).^2./data.omegahat.^2);
J=J1
*****
%initial_model

eval(finite_element_model);
adof=activeDOF(FEelt,FEnode,gdof,il,pl); %activeDOF = allDOF-inactiveDOF
(adof=allDof-gdof)
[data.T,data.cdof]=rigid(FEnode,FEelt,adof); %Transformation
matrix for rigid body elements
[FEelt,FEel0]=regroup_FEelt(data); %Re-group FEelt
according to new groups
data.FEelt=FEelt; data.FEnode=FEnode; data.adof=adof; data.il=il;data.pl=pl;
clear FEelt FEnode adof il pl;clear global

disp('calculating frq (in Hz) and phi...')
[Ktot_in,Mtot_in,phi_in,omega_in,phi_in_all]=core_data(thita,data);
Ktot_in=full(Ktot_in);Mtot_in=full(Mtot_in);
[phi_in,omega_in,model_modes_used,mac_in]=modal_assurance_criterion(data,phi_in,ome
ga_in);
fprintf(1,'\nMatrices "frq_initial" and "phi_initial" have been crated in
Workspace \n')
fprintf(1,'Matrix "mac_initial" contain MAC values for each frequency of initial
model\n\n');disp('');disp('');
%disp('Ok.Program terminated.')

clear i nmodels Ktot_in Mtot_in model_updated ff ;

*****
%optimal_models

eval(finite_element_model);
adof=activeDOF(FEelt,FEnode,gdof,il,pl); %activeDOF = allDOF-inactiveDOF
(adof=allDof-gdof)
[data.T,data.cdof]=rigid(FEnode,FEelt,adof); %Transformation
matrix for rigid body elements
[FEelt,FEel0]=regroup_FEelt(data); %Re-group FEelt
according to new groups
data.FEelt=FEelt; data.FEnode=FEnode; data.adof=adof; data.il=il;data.pl=pl;
clear FEelt FEnode adof il pl;clear global

disp('calculating frq (in Hz) and phi...')
[Ktot,Mtot,phi,omega,phi_all]=core_data(thita_opt,data);
Ktot=full(Ktot);Mtot=full(Mtot);
Ktot_opt=Ktot;Mtot_opt=Mtot;
[phi_opt,omega_opt,model_modes_used,mac]=modal_assurance_criterion(data,phi,omega);
fprintf(1,'\nMatrices "frq_opt" and "phi_opt" have been crated in Workspace \n')
fprintf(1,'Matrix "mac" contain MAC values for each
frequency\n\n');disp('');disp('');
disp('Ok.Program terminated.')

clear i nmodels Ktot Mtot omega_optall model_updated ff ;

*****
%write_results
data.filename=[data.path, data.name, '.txt'];
if exist(data.filename)==2; delete (data.filename); end %if the file exist,
replase with a new one
fid=fopen(data.filename,'a');
fprintf(fid,'\t\t');
if exist('casestudy','var')==1
fprintf(fid,'%c',casestudy);
else
fprintf(fid,'\t\t Untitled');
end

```

```

fprintf(fid, '\n
~~~~~');
fprintf(fid, '\n\n\n                               Input Parameters\n');
fprintf(fid, '
===== \n');
%1=====
fprintf(fid, ' Loaded File Name with Measurements.....: %s.mat', data.modaldata);

%2=====
fprintf(fid, '\n\n Number of Modes Experimentaly
Identified...: %4g', length(data.omegahat));

%3=====
fprintf(fid, '\n\n Identified Frequencies (in Hz).....:');
for i=1:length(data.omegahat)
    if rem(i-2,5)==4    %<<<<<<----- 6= #
of frq per row
        fprintf(fid, '\n                               ');
    end
    fprintf(fid, '%8.4f ', data.omegahat(i));
end

%4=====
fprintf(fid, '\n\n Number of Measured
DOFs.....: %4g', length(data.measured_dofs));

%5=====
fprintf(fid, '\n\n Measured DOFs.....:');
for i=1:length(data.measured_dofs)
    if rem(i-2,7)==6    %<<<<<<----- 7=
# of dofs per row
        fprintf(fid, '\n                               ');
    end
    fprintf(fid, '%5g ', data.measured_dofs(i));
end

%6=====
fprintf(fid, '\n\n Objective Function used for Optimization..: %s', data.method);

%7=====
%if data.special_transformation==1
%    fprintf(fid, '\n\n File with Transformation Matrix.....:
%s.m', data.transformation_matrix_name);
%end

%8=====
if data.Obj_fun==2 | data.Obj_fun==4
    fprintf(fid, '\n\n\n     Constrains of Model Parameters   ');
    fprintf(fid, '\n -----|-----');
    fprintf(fid, '\n     Lower Bound   |   Upper Bound   ');
    fprintf(fid, '\n -----|-----');
    for i=1:length(thita)
        fprintf(fid, '\n     %8.4f           |', thita_lower_bound(i));
        fprintf(fid, '\t %8.4f', thita_upper_bound(i));
    end
end

%9=====
if exist('groupname', 'var')==1
    fprintf(fid, '\n\n\n Groups | Group Name |Elements   ');
else
    fprintf(fid, '\n\n\n Groups | Elements   ');
end

for i=1:length(data.group)    %this loop is for determine the lenght of horizontal
line in matrix (dd)
    nn(i)=length(data.group(i).g);
end

```



```

for i=1:length(data.omegahat)
    if rem(i,11)==0 %<<<<<<<-----
11-1=10= # of dofs per row
        fprintf(fid,'\n
                ');
        end
        fprintf(fid,'%4g',model_modes_used(i));
    end
end
%-----
frq_per_row=6; %<<<<<<<-----<<<<<<<-----
<<<<<<<<<-----
frq_per_rowSS=frq_per_row; %is needed to print the last line of matrix
if exist('mac','var')==1
    fprintf(fid,'\n\n\n MAC values for each frequency ');
    frqA=1:length(data.omegahat);
    if length(data.omegahat)<frq_per_row %#of frequencies
        frq_per_row=length(data.omegahat);
    end
    tt=ceil(length(data.omegahat)/frq_per_row); %how many times matrix will be
written

    for l=1:tt %how many times matrix will be
written
        if tt~=1 & l==tt & rem(length(data.omegahat),(tt-1)*frq_per_row)~=0
            frq_per_row=rem(length(data.omegahat),(tt-1)*frq_per_row);
        end

        fprintf(fid,'\n -----|');
        for m=1:frq_per_row*9
            fprintf(fid,'-%',m);
        end

        fprintf(fid,'\n frequency |');
%-----
        if tt~=1 & l==tt & rem(length(data.omegahat),(tt-1)*frq_per_rowSS)~=0
%loop for the case #frq is not divided exact with frq_per_row
            for i=1: rem(length(data.omegahat),(tt-1)*frq_per_rowSS)
                fprintf(fid,' %1g ',frqA((tt-1)*frq_per_rowSS+i));
            end
            fprintf(fid,'\n MAC value |');
            for i=1: rem(length(data.omegahat),(tt-1)*frq_per_rowSS)
                fprintf(fid,' %6.5f ',mac((tt-1)*frq_per_rowSS+i));
            end
        else
            for i=1:frq_per_row
                fprintf(fid,' %1g ',frqA((l-1)*frq_per_row+i));
            end
            fprintf(fid,'\n MAC value |');
            for i=1:frq_per_row
                fprintf(fid,' %6.5f ',mac((l-1)*frq_per_row+i));
            end
        end
    end
%-----
        fprintf(fid,'\n -----|');
        for m=1:frq_per_row*9
            fprintf(fid,'-%',m);
        end
    end
end

end

%11=====
fprintf(fid,'\n\n Optimization Error, J= %e or %8.8f',J,J);

clear i k l dd frq_per_row ss m frq_per_rowSS frqA tt %Do some cleaning

%12=====
fprintf(fid,'\n\n\n\n');

```



```

fprintf(fid,'
                Parameter Values\n');
fprintf(fid,' |-----|-----|\n');
fprintf(fid,' | Optimal Values | Initial Estimations |');
fprintf(fid,'\n | for parameters | for parameters |');
fprintf(fid,'\n |-----|-----|');
for i=1:length(thita)
    fprintf(fid,'\n |\t%8.4f          |',thita_opt(i));
    fprintf(fid,'\t          %8.4f          |',thita(i));
end
fprintf(fid,'\n |-----|-----|');

%13=====
fprintf(fid,'\n\n\n          Comparison between Measured and \n ');
fprintf(fid,'          Model based frequencies \n');
fprintf(fid,' |-----|-----|-----|\n');
fprintf(fid,' |      ω Measured | ω Model Based | % Difference |\n');
fprintf(fid,' |-----|-----|-----|\n');
for i=1:length(data.omegahat)
    diff_per_cent=(omega_opt(i)-data.omegahat(i))*100/data.omegahat(i);
    fprintf(fid,' |      %8.4f |      %8.4f |      %5.2f%%
|\n',data.omegahat(i),omega_opt(i),diff_per_cent);
end
fprintf(fid,' |-----|-----|-----|\n');
clear diff_per_cent

%14=====
FEelt=data.FEelt;
fprintf(fid,'\n\n\n          Updated Modulus of Elasticity \n ');
fprintf(fid,'          for each Parametrized Element \n');
fprintf(fid,' -----\n');
for i=1:length(data.group)
    fprintf(fid,'          Group %3g \n',i);
    fprintf(fid,'          ===== \n');
    fprintf(fid,' |-----|-----|\n');
    fprintf(fid,' | Elem. # |          Eo*θ |\n');
    fprintf(fid,' |-----|-----|\n');

    femesh('SelGroup %g',i); %create FEelt0 matrix, which contains the elements of
the group
    for k=1:length(data.group(i).g)
        mat_id_select=FEelt0(k+1,3); %finds
which matID corresponds to each element
        final_modulus_of_elast=data.pl(mat_id_select,3)*thita_opt(i); %E=Eo*θ
        fprintf(fid,' |          %3g | %e
|\n',data.group(i).g(k),final_modulus_of_elast);
    end

fprintf(fid,' |-----|-----|\n\n\n');
end

disp('FEelt0 matrix was temporary created')
clear mat_id_select final_modulus_of_elast FEelt FEelt0 FEelt1 FEN0 FEN1 FENode i k

%=====
fclose all;

*****

%plot_modes_used_for_update
cf=feplot(2);
cf.model={data.FENode,data.FEelt};
set(gcf,'Name','Only Modes Used for Update')

cf.def(1)={phi_all(:,model_modes_used),data.adof}
%cf.def(2)={phi_all,data.adof}
%===== HEADINGS Modeshape =====
for i=1:length(data.omegahat)
headname(i,:)=sprintf('mode %g at %7.4fHz',model_modes_used(i),omega_opt(i));

```

```

end
fecom('head',headname);
fecom('Triaxon'); %show orientation triax
fecom('ScaleDef3'); %<<<<<----- 3=scale factor
fecom('UnDefLine'); %show undeformed model, plotted with line

%uu=data.adof(data.measured_dofs); %node measured
%cf.sens={data.adof(data.measured_dofs)};
%fecom('textdof',uu); %show measured dofs
clear uu headname
plottedit on

*****
%plot_all_modes
cf1=feplot(3);
cf1.model={data.FENode,data.FEelt};
cf1.def={phi_all,data.adof};
set(gcf,'Name','Modes of Damaged Structure')

for i=1:data.num_of_modes_calculated
headname(i,:)=sprintf('mode %2g at %8.4fHz', (i),omega(i,1));
end
fecom('head',headname);
fecom('ScaleDef3'); %<<<<<----- 3=scale factor
fecom('Triaxon'); %show orientation triax
fecom('UnDefLine'); %show undeformed model, plotted with line
plottedit on

clear headname

*****
%plot_groups
cf3=feplot(5);
cf3.model={data.FENode,data.FEelt};
set(gcf,'Name','Groups in Parametrized Structure and MEASURED DOFs')

%groupcolors=['g';'r';'c';'w';'y';'k';'m';'b'];
groupcolors=[0 1 0;1 0 0;0 1 1;1 1 1;1 1 0;0 0 0;1 0 1;0 0 1;0.5 0.5 0.5;0.5 0.5
0;0 0.5 0;0.5 0 0.5;0 0 0.5]; %colors in RGB mode

for i=1:length(data.group)+1
cf3.sel(i)=sprintf('group%g',i); %select groups
end

for i=1:length(data.group)+1
temp(i,:)=sprintf('tyl%g',i); %select groups
end

for i=1:length(data.group)+1 %color groups
cf3.o(i)={temp(i,:), 'edgecolor',groupcolors(i,:), 'linewidth',2};
if i=length(data.group)+1
cf3.o(i)={temp(i,:), 'edgecolor',groupcolors(i,:), 'linewidth',1};
end
end

fecom('Triaxon'); %show orientation triax
plottedit on

uu=data.adof(data.measured_dofs); %node measured
cf3.sens={data.adof(data.measured_dofs)};
fecom('textdof',uu); %show measured dofs
clear uu headname

%===== plto legend
for i=1:length(data.group)
plot_legent(i)={sprintf('Group%g',i)};
end
legend(plot_legent,4)

```

```

*****

function adof=activeDOF(FEelt,FEnode,inactiveDOF,il,pl)
[m,k,mdof]=fe_mk(FEnode,FEelt,pl,il);
ind=fe_c(mdof,inactiveDOF,'ind'); ind=mdof(ind,:); %inactive DOFs manual p.46
adof=setdiff(mdof,ind); %active DOFs
%clear a ind k m mdof

*****

function [FEelt,FEel0]=regroup_FEelt(data)
%=====
%== Re-grouping FEelt according to parametrized groups ==
%=====
aa='findel0 with node';
j='findnode inelt{eltind}';
f='}';
c='& with node';
a='findel0 eltind';
s1='& eltname beam1';
s='group';
s2='divide';
s3='eltind';
s4='findelt';
[qq,FEel0]=femesh('findelt eltname beam1'); %Finds the group with the name
beam1%

group=data.group
for k=1:length(group); %Counts the number of groups%
    for i=1:length(group(k).g);
        element=num2str((group(k).g(i))+1);
        findnodes=strcat(j,element,f); %Finds the nodes of every element
    from matrix FEel0%
        w(k).q(i,:)=femesh(findnodes); %Stores the nodes%
    end
end

for I=1:length(w)
    [M,N]=size(w(I).q);
    for J=1:M
        fnode=num2str(w(I).q(J,1));
        snode=num2str(w(I).q(J,2));
        findindex=strcat(aa,fnode,c,snode,s1); %Finds the index of every element
    from matrix FEel0%
        ww(I).qq(J)=femesh(findindex); %Stores the index%
    end
    femesh(strcat(s2,s,num2str(I),s3),ww(I).qq); %Divides group k in two groups%
    [qqq,FEel0]=femesh(strcat(s4,s,num2str(I+1))); %Finds the group k+1.This is the
    next group that will be divided in 2 new groups%
end
clear aa j f c a s1 s s2 s3 s4 qq qqq I J N M i k w ww %Do some cleaning of
unused variables
clear element findindex findnodes fnode snode %Do some cleaning of
unused variables

%=====
%== Extract from FEelt, Rigid Elements Group ==
%=====
[o]=find(FEelt==inf);
oo=find(FEelt(o,2)==114); %114=code for rigid elements, 109=code
for mass elements
rr=o(oo);
if isempty(oo)==1 %check if rigid elements exist in FEelt
    FEelt=FEelt;
elseif oo==length(o); %if Rigid is the Last group
    FEelt=FEelt(1:rr-1,:);
elseif oo==1 %if Rigid is the First group

```

```

    FEelt=FEelt(rr:size(FEelt,1),:);
else
    remain_rows=[1:rr-1,oo(oo+1):size(FEelt,1)'];
    FEelt=FEelt(remain_rows,:);
end
clear o oo rr;

*****
function [Ktot,Mtot,phi,omega,phi_all]=core_data(thita,data)

%=====
%====      K and M calculation for parametrized model      =====
%=====
[Ktot,Mtot]=parametrized_M_K(thita,data);

%=====
%====      Eigenvalues calculation      =====
%=====
opt=[3 data.num_of_modes_calculated 0 0 0.00001 50];
[phi_all,omega]=fe_eig(Mtot,Ktot,opt);
omega=omega./(2*pi);    %/2*pi in order to get frq in Hz

%=====
%====      Get phi in measured dof      =====
%=====
Lzero=zeros(length(data.measured_dofs),length(phi_all));
for i=1:length(data.measured_dofs)
    Lzero(i,data.measured_dofs(i,1))=1;
end

%=====
%====      Calculation of Transformation Matrix if exist      =====
%=====
%====      Benchmark transformation matrix from 12-->16 or 8
%if data.special_transformation==1
% transformation_matrix=strvcat(data.transformation_matrix_name);
% [R]=feval(transformation_matrix,data);
%else R=1;
%end
R=1;
phi=R*Lzero*phi_all;

*****
function [Ktot,Mtot]=parametrized_M_K(thita,data);

FEelt=data.FEelt; FEnode=data.FEnode; adof=data.adof; il=data.il; pl=data.pl;
T=data.T;

%=====
%====      Parametrization Starts here      =====
%=====
if ~exist('FileName','var')|(exist(FileName)~=2 & exist([FileName '.mat'])~=2)
    FileName ='C:\MATLABR11\work\jo_temp';
end

upcom(['load ' FileName]);
upcom('setnominal',FEnode,FEelt,pl,il,[],adof)

%The Matrix "par" defines the parameters.The upper and low bounds are used only for
updating.
%This limits are not used for our Update Method. Kostas Christodoulou 23/10/2002
for i=1:length(data.group)
par(i,:)= [ 1 1.0 0.001 3.0 1 i+0.1]; %The first one means that the E will be
parametrized.
end
                                %The last number defines the group
which will be parametrized%

upcom('parinit',par)

```

```

upcom('parcoef',thita)           %Sets parameters values by changing the current value

[M,K]=upcom('assemble');
Mtot=T'*M*T;Ktot=T'*K*T;

delete ([FileName,'.mat']);
clear i FileName M K Up         %Do some cleaning of unused variables

*****

function [phi,omega,model_modes_used,mac]=modal_assurance_criterion(data,phi,omega)

A=(data.phihat'*phi).^2;
bhat=sum(data.phihat.*data.phihat,1);
b=sum(phi.*phi);
MACl=A./(bhat'*b);

for i=1:length(data.omegahat)
[mac(i),model_modes_used(i)]=max(MACl(i,:));
end
%model_modes_used=[1 2 4 5 7 9 10 12]
phi=phi(:,model_modes_used);
omega=omega(model_modes_used,:);
mac;
model_modes_used

*****

```