

Αναθεώρηση Προσομοιωμάτων Γεφυρών της Εγνατίας Οδού με Βάση την Απόκρισή τους σε Δυναμικές Διεγέρσεις Model Updating of Egnatia Odos Bridges based on their Dynamic Responses

Ευάγγελος ΝΤΟΤΣΙΟΣ¹, Κυριάκος ΠΕΡΡΟΣ¹, Κώστας ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ²,
Παναγιώτης ΠΑΝΕΤΣΟΣ³, Βασίλης ΛΕΚΙΔΗΣ⁴, Χρήστος ΚΑΡΑΚΩΣΤΑΣ⁴, Θωμάς
ΣΑΛΟΝΙΚΙΟΣ⁵, Τριαντάφυλλος ΜΑΚΑΡΙΟΣ⁵, Ισάμ ΣΟΥΣ⁵

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε κατάλληλη μεθοδολογία για την αναθεώρηση αναλυτικών μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων μιας κατασκευής, με βάση τις πραγματικές καταγραφές της απόκρισής των κατασκευών σε διάφορους τύπους δυναμικών διεγέρσεων. Η εν λόγω μεθοδολογία βασίζεται στη γνώση των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφικών συνιστωσών της κατασκευής, οι οποίες αναγνωρίζονται με κατάλληλη μεθοδολογία. Η μεθοδολογία αναθεώρησης επιτρέπει την βαθμονόμηση μεγεθών του αναλυτικού μοντέλου (π.χ. δυσκαμψία στοιχείων, μέτρο ελαστικότητας κλπ) μέσω μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης των προβλέψεων του μοντέλου ώστε τελικά να προσεγγίζει στο μέγιστο δυνατό βαθμό τα πραγματικά δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται σε δύο γέφυρες της Εγνατίας οδού που ενοργανώθηκαν με ειδικά δίκτυα επιταχυνσιογράφων και καταγράφηκε η απόκρισή τους τόσο λόγω κυκλοφοριακού φόρτου, όσο – σε μία από αυτές – και λόγω μικρής έντασης σεισμικής διέγερσης. Παρουσιάζονται με λεπτομέρεια τα αποτελέσματα της αναθεώρησης των μοντέλων και εξάγονται συμπεράσματα για την συμπεριφορά των γεφυρών με βάση τις μετρούμενες ταλαντώσεις.

ABSTRACT: In this work, a methodology for structural model updating based on vibration measurements has been developed. The methodology is based on the identified modal frequencies and modeshape components of the structure. The model updating methodology allows the reconciling of some properties of the FE model (e.g. stiffness of elements, modulus of elasticity etc) by optimizing an overall measure of fit between measured and model predicted modal characteristics. The proposed methodology has been applied for updating the FE models of two bridges of Egnatia Odos motorway, which have been instrumentated with a dense network of accelerometers and their response induced by ambient and earthquake excitations has been monitored. Detailed model updating results are presented and conclusions are drawn for the behavior of the bridges based on the measured vibrations.

¹ Διδακτορικός Φοιτητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, email: entotsio@mie.uth.gr, kyperros@mie.uth.gr

² Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, email: costasp@mie.uth.gr

³ Τμηματάρχης Τακτ. Συντήρησης Μεγ. Τεχν. Έργων, Εγνατία Οδός Α.Ε., email: ppane@egnatia.gr

⁴ Διευθυντής Ερευνών, Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας & Αντισεισμικών Κατασκευών, email: lekidis@itsak.gr, christos@itsak.gr

⁵ Ερευνητής, Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας & Αντισεισμικών Κατασκευών, email: salonikios@itsak.gr, makarios@itsak.gr, sous@teiser.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για το σχεδιασμό και την ανάλυση των κατασκευών απαιτείται γενικά ένα μαθηματικό μοντέλο που αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά της κατασκευής. Το καταλληλότερο εργαλείο μοντελοποίησης κατασκευών είναι στις μέρες μας η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Εντούτοις, συχνά παρατηρείται ότι το αρχικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων είναι μια φτωχή αντανάκλαση της κατασκευής, ιδιαίτερα στον τομέα πρόβλεψης της δυναμικής συμπεριφοράς της. Οι ανακρίβειες προκύπτουν λόγω των απλοποιήσεων και των εξιδανικεύσεων που γίνονται κατά τη μοντελοποίηση. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι αναθεώρησης του αρχικού μοντέλου των κατασκευών χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα (Christodoulou and Papadimitriou 2007). Αυτές οι τεχνικές βασίζονται στην ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων πρόβλεψης του μοντέλου είτε με βάση τις μετρούμενες χρονικές ιστορίες απόκρισης είτε με βάση τα μετρούμενα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά στην περίπτωση γραμμικών μοντέλων κατασκευών.

Σκοπός της αναθεώρησης μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων είναι η τροποποίηση παραμέτρων του αριθμητικού μοντέλου, όπως η μάζα, η δυσκαμψία και οι συντελεστές απόσβεσης, έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη συμφωνία μεταξύ των μετρήσεων και των προβλέψεων του μοντέλου. Ιδίως στην περίπτωση όπου το αναθεωρημένο μοντέλο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για λόγους πρόβλεψης της συμπεριφοράς της κατασκευής σε μη δοκιμασμένες συνθήκες φόρτισης ή σε τροποποιημένες δομικές διαμορφώσεις, είναι σημαντικό η βελτίωση της σύγκλισης ανάμεσα στα μετρητικά δεδομένα και στις προβλέψεις του μοντέλου να επέλθει από τη διόρθωση των εσφαλμένων υποθέσεων μοντελοποίησης και όχι με τη δημιουργία άλλων, χωρίς φυσικό νόημα, τροποποιήσεων στο μοντέλο.

Η αναθεώρηση μοντέλων κατασκευών είναι ένα αντίστροφο πρόβλημα, σύμφωνα με το οποίο το μοντέλο μίας κατασκευής, συνήθως ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, προσαρμόζεται έτσι ώστε είτε οι χρονικές ιστορίες απόκρισης είτε τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά που προβλέπονται από το μοντέλο, να συμπίπτουν όσο γίνεται περισσότερο με τις αντίστοιχες μετρούμενες ποσότητες. Τα αναθεωρημένα μοντέλα που προκύπτουν αναμένεται να είναι ακριβέστερα στις προβλέψεις απόκρισης σε μελλοντικά φορτία, και να μπορούν να δώσουν μία εκτίμηση των αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τις προβλέψεις απόκρισης. Συνήθως, στην πράξη κατά την εφαρμογή του αντίστροφου προβλήματος της αναθεώρησης μοντέλων παρουσιάζονται προβλήματα αριθμητικής δισεπιλυσιμότητας (ill-conditioning) λόγω της μη ευαισθησίας της απόκρισης σε μεταβολές των παραμέτρων των μοντέλων, και μη μοναδικότητας (Udwadia and Sharma 1978; Berman 1989; Katafygiotis and Beck 1998; Katafygiotis et al. 2000) λόγω του περιορισμένου αριθμού μετρητικών δεδομένων σε σχέση με τον μεγάλο αριθμό των παραμέτρων που απαιτούνται για την περιγραφή λεπτομερειών των κατασκευών κατά τη μοντελοποίηση. Πρόσθετες δυσκολίες και περιορισμοί στην ευρωστία και την αξιοπιστία, που σχετίζονται με την ανάπτυξη αποτελεσματικών μεθοδολογιών αναθεώρησης μοντέλων είναι:

- Τα σφάλματα μοντελοποίησης που είναι αναπόφευκτα, αφού η κατηγορία μοντέλων που συνήθως επιλέγεται δεν μπορεί να προσομοιώσει πλήρως την πραγματική συμπεριφορά της κατασκευής. Για παράδειγμα, το σφάλμα διακριτοποίησης, που προκύπτει λόγω της προσέγγισης μιας συνεχούς δομής από έναν πεπερασμένο αριθμό μεμονωμένων

στοιχείων, είναι έμφυτο στην τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων. Άλλα σφάλματα μπορεί να οφείλονται στις υποθέσεις και τις απλοποιήσεις που γίνονται σε σχέση με την επιλογή των στοιχείων, τη μοντελοποίηση των συντοριακών συνθηκών, των συνδέσεων, κλπ.

- Η παρουσία θορύβου στα δυναμικά μετρητικά δεδομένα, ιδιαίτερα στις μεγάλες ιδιοσυχνότητες. Τα δεδομένα δυναμικών μετρήσεων εμπεριέχουν σφάλματα που οφείλονται είτε σε ελαττωματικά όργανα, είτε σε περιβαλλοντικές αλλαγές κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, είτε σε ανεπαρκή επεξεργασία των αρχικών δεδομένων. Η παρουσία θορύβου, έχει σαν αποτέλεσμα να περιορίζεται ο αριθμός των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών που μπορούν να προσδιοριστούν αξιόπιστα και ιδίως αυτών των υψηλότερων συχνοτήτων, όπου η αναλογία σήματος προς θόρυβο είναι πολύ μικρή.
- Τα ελλιπή μετρητικά δεδομένα, αφού η απόκριση της κατασκευής καταγράφεται σε περιορισμένο αριθμό θέσεων, λόγω του περιορισμένου αριθμού διαθέσιμων αισθητήρων ή λόγω της περιορισμένης προσβασιμότητας στην κατασκευή. Επομένως, οι πληροφορίες σχετικά με την πλήρη ιδιομορφή είναι περιορισμένες. Επιπλέον, οι αισθητήρες δεν διατάσσονται πάντα κατάλληλα πάνω στην κατασκευή ώστε να συλλέγεται η μέγιστη δυνατή πληροφορία για το μετρούμενο σύστημα.
- Μη διέγερση όλων των ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής λόγω του περιορισμένου εύρους της διέγερσης και επομένως της απόκρισης. Η διέγερση ορισμένων μόνο ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής έχει σαν αποτέλεσμα να αποκρύπτονται μερικές από τις δυναμικές ιδιότητες του συστήματος. Από πειραματικής απόψεως, είναι δυσκολότερο να διεγείρει κάποιος τις υψηλότερες ιδιοσυχνότητες ενός συστήματος από ότι τις χαμηλότερες, καθώς απαιτείται περισσότερη ενέργεια.
- Η σύζευξη ιδιομορφών στο μετρούμενο εύρος συχνοτήτων δυσκολεύει την αναγνώριση ιδιομορφών με πολύ κοντινές συχνότητες. Αυτή η δυσκολία παρατηρείται κυρίως στις υψηλότερες συχνότητες όπου η πυκνότητα των ιδιομορφών είναι συνήθως μεγαλύτερη.

Ένας μεγάλος αριθμός μεθοδολογιών αναθεώρησης μοντέλων κατασκευών (π.χ. Vanik et al. 2000; Bohle and Fritzen 2003; Hjelmstad and Shin 1996; Mottershead and Friswell 1993; Farhat and Hemez 1993; Carpechi and Vestroni 1993; Link 1998; Lam et al. 2004; Yuen and et al. 2006; Alvin 1997) έχουν προταθεί στο παρελθόν για να βελτιώσουν μοντέλα, κυρίως πεπερασμένων στοιχείων, με βάση δυναμικές μετρήσεις οι οποίες προκύπτουν από ένα σύστημα ενοργάνωσης. Κάθε μια από τις προτεινόμενες μεθόδους παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και γενικά δεν υπάρχει μια γενικής χρήσης, αποδεκτή, μεθοδολογία για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των προβλημάτων που παρουσιάζονται στην διαδικασία της αναθεώρησης μοντέλων. Λεπτομερείς ανασκοπήσεις σχετικά με την αναθεώρηση μοντέλων κατασκευών υπάρχουν στις εργασίες των Mottershead and Friswell (1993) και Doebling et al. (1996). Η εκτίμηση του βέλτιστου μοντέλου είναι ευαίσθητη σε αβεβαιότητες που οφείλονται στους περιορισμούς των μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της πραγματικής κατασκευής, τα σφάλματα που περιέχονται στις μετρήσεις, τον αριθμό και τύπο των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών ή των χρονοιστοριών απόκρισης που χρησιμοποιούνται στην διαδικασία

αναθεώρησης, όπως επίσης και στις συναρτήσεις σφαλμάτων οι οποίες εισάγονται για να μετρήσουν τη διαφορά μεταξύ των μετρούμενων χαρακτηριστικών και των χαρακτηριστικών που προβλέπονται από το μοντέλο. Τα βέλτιστα δομικά μοντέλα που προκύπτουν από αυτές τις μεθόδους χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της απόκρισης και της αξιοπιστίας της κατασκευής (Beck and Katafygiotis 1998; Papadimitriou et al. 2002; Beck and Au 2002), καθώς και για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητάς της (Sohn and Law 1997; Fritzen et al. 1998; Vestroni and Cappechi 2000; Vanik et al. 2000; Teughels and De Roeck 2005).

Στο αντίστροφο πρόβλημα της αναθεώρησης μοντέλων κατασκευών, οι τιμές των παραμέτρων ενός θεωρητικού μοντέλου μίας κατασκευής επαναπροσδιορίζονται, έτσι ώστε οι προβλεπόμενες ιδιομορφικές ιδιότητες του μοντέλου ή οι χρονικές ιστορίες απόκρισης, να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά με τις αντίστοιχες μετρούμενες ποσότητες (π.χ. Hjelmstad and Shin 1996; Alvin 1997; Bohle and Fritzen 2003; Teughels and De Roeck 2005). Αυτό το πρόβλημα υπολογισμού της τιμής των δομικών παραμέτρων ενός μοντέλου χρησιμοποιώντας μετρητικά δεδομένα (ιδιομορφικές ιδιότητες ή χρονικές ιστορίες απόκρισης) συνήθως διατυπώνεται σαν ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης σταθμισμένων υπολοίπων. Ως μέτρο των υπολοίπων ορίζεται η διαφορά μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων από το μοντέλο δεδομένων.

Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται συνηθισμένες τεχνικές βελτιστοποίησης για την εύρεση των βέλτιστων τιμών των δομικών παραμέτρων που ελαχιστοποιούν το μέτρο των σταθμισμένων υπολοίπων. Παρουσιάζονται αποτελέσματα αναθεώρησης μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για δύο ενοργανωμένες γέφυρες της Εγνατίας Οδού, Πολύμυλου (Γ9) και Καβάλας (Γ2). Για τη γέφυρα Γ9 του Πολύμυλου γίνεται αναθεώρηση δύο κατηγοριών μοντέλων χρησιμοποιώντας δεδομένα από περιβαλλοντικές και σεισμικές διεγέρσεις. Για τη γέφυρα Γ2 της Καβάλας, γίνεται αναθεώρηση τριών κατηγοριών μοντέλων, χρησιμοποιώντας προσομοιωμένα δεδομένα και δεδομένα από περιβαλλοντικές διεγέρσεις. Έμφαση δίνεται στην παρουσίαση των προβλημάτων που εμφανίζονται στην αναθεώρηση μοντέλων, όπως την ύπαρξη πολλαπλών τοπικών και καθολικών ελάχιστων.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στόχος των μεθοδολογιών αναθεώρησης μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων είναι ο υπολογισμός των παραμέτρων $\theta \in R^{N_\theta}$ μιας ομάδας γραμμικών μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφουν μια κατασκευή, έτσι ώστε οι ιδιοσυχνότητες και τα ιδιοδιανύσματα $\{\omega_r(\theta), \phi_r(\theta) \in R^{N_0}, r=1, \dots, m\}$ που προβλέπονται από τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων να προσεγγίζουν κατά το δυνατόν καλύτερα τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά $\{\hat{\omega}_r, \hat{\phi}_r \in R^{N_0}, r=1, \dots, m\}$ που προκύπτουν πειραματικά από την κατασκευή, όπου m είναι ο αριθμός των ιδιομορφών που λαμβάνονται υπόψη, και N_0 είναι ο αριθμός των μετρούμενων βαθμών ελευθερίας. Το πρόβλημα της εύρεσης των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων θ μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένα μονοκριτηριακό πρόβλημα ελαχιστοποίησης των σταθμισμένων ιδιομορφικών υπολοίπων (weighted modal residuals, Christodoulou και Papadimitriou 2007).

$$J(\boldsymbol{\theta}; \mathbf{w}) = \sum_{r=1}^m \left[w_{\omega_r} \frac{[\omega_r(\boldsymbol{\theta}) - \hat{\omega}_r]^2}{[\hat{\omega}_r]^2} + w_{\phi_r} \frac{\|\beta_r \boldsymbol{\phi}_r(\boldsymbol{\theta}) - \hat{\boldsymbol{\phi}}_r\|^2}{\|\hat{\boldsymbol{\phi}}_r\|^2} \right] \quad (1)$$

Ο πρώτος όρος στην εξίσωση (1) καλείται ιδιομορφικό υπόλοιπο για την r ιδιοσυχνότητα και εκφράζει τη διαφορά μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών για την r ιδιοσυχνότητα, ενώ ο δεύτερος όρος καλείται ιδιομορφικό υπόλοιπο για την r ιδιομορφή και εκφράζει τη διαφορά μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών για τις ιδιομορφικές συνιστώσες της r ιδιομορφής, όπου $\|z\|^2 = z^T z$ είναι το σύννηθες Ευκλείδειο μέτρο και $\beta_r = \hat{\boldsymbol{\phi}}_r^T \boldsymbol{\phi}_r(\boldsymbol{\theta}) / \boldsymbol{\phi}_r^T(\boldsymbol{\theta}) \boldsymbol{\phi}_r(\boldsymbol{\theta})$ είναι ένας συντελεστής κανονικοποίησης που εξασφαλίζει ότι οι μετρούμενες συνιστώσες των ιδιομορφών στους μετρούμενους βαθμούς ελευθερίας είναι κοντά στις προβλεπόμενες από το μοντέλο $\beta_r \boldsymbol{\phi}_r(\boldsymbol{\theta})$ συνιστώσες για μία συγκεκριμένη τιμή των παραμέτρων $\boldsymbol{\theta}$. Οι συντελεστές κανονικοποίησης προκύπτουν από την ελαχιστοποίηση του μέτρου της διαφοράς $\|\boldsymbol{\phi}_r(\boldsymbol{\theta}) - \beta_r(\boldsymbol{\theta}) \hat{\boldsymbol{\phi}}_r(\boldsymbol{\theta})\|$. Οι συντελεστές βαρύτητας $w_{\omega_r} \geq 0$ και $w_{\phi_r} \geq 0$, $r=1, \dots, m$, ικανοποιούν τη συνθήκη $\sum_{r=1}^m [w_{\omega_r} + w_{\phi_r}] = 1$. Η αντικειμενική συνάρτηση $J(\boldsymbol{\theta}; \mathbf{w})$ αντιπροσωπεύει το συνολικό μέτρο της διαφοράς μεταξύ των μετρούμενων δεδομένων και των προβλεπόμενων από το μοντέλο ιδιομορφικών χαρακτηριστικών. Η ευαισθησία των αναθεωρημένων μοντέλων στην επιλογή των συντελεστών βαρύτητας έχει μελετηθεί από Christodoulou και Papadimitriou (2007).

ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ Γ9 ΤΟΥ ΠΟΛΥΜΥΛΟΥ

Περιγραφή Γέφυρας

Η γέφυρα Γ9 του Πολύμυλου αποτελείται από δύο όμοιους, στατικά ανεξάρτητους κλάδους μορφής T με μικρή καμπυλότητα κατά μήκος τους (Σχήμα 1α). Το μήκος της είναι 170m και η διατομή του καταστρώματος είναι κυβοειδής, πλευράς που κυμαίνεται από 9m κοντά στο μεσόβαθρο ως 4m κοντά στα ακρόβαθρα. Έχει ένα μοναδικό βάθρο αποτελούμενο από δύο όμοιες κολώνες ύψους 35m μονολιθικά συνδεδεμένες με την ανωδομή που θεμελιώνονται με μια ογκώδη ορθογώνια βάση η οποία βρίσκεται μέσα στο έδαφος. Είναι κατασκευασμένη με προβολοδόμηση και εδράζεται στα ακρόβαθρα επί ελαστομεταλλικών εφεδράνων τα οποία όμως ουσιαστικά λειτουργούν μόνο κατά την εγκάρσια διεύθυνση ενώ κατά τη διαμήκη επιτρέπεται η ελεύθερη κύλιση. Ο βορεινός κλάδος της γέφυρας έχει ενοργανωθεί με είκοσι τέσσερα επιταχυνσιόμετρα από τα οποία τα δεκαπέντε είναι τοποθετημένα στις πλευρές του καταστρώματος, τρία στη βάση του μεσόβαθρου και από τρία στα δύο ακρόβαθρα στις βάσεις των ελαστομερών εφεδράνων.

Οι μετρήσεις των ταλαντώσεων της γέφυρας που καταγράφηκαν, χρησιμοποιηθήκαν για τον υπολογισμό των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών της γέφυρας με βάση διαθέσιμο λογισμικό ιδιομορφικής αναγνώρισης κατασκευών (Papadimitriou et al. 2008). Τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής αναγνώρισης για περιβαλλοντικές και σεισμικές διεγέρσεις δείχνονται στον Πίνακα 1 και παρουσιάζονται αναλυτικά στις εργασίες Ntotsios et al. (2008) και Karakostas et al. (2008).

Πίνακας 1. Αποτελέσματα αναγνώρισης ιδιομορφικών χαρακτηριστικών

| Ιδιομορφή | Περιβαλλοντική Διέγερση | | Σεισμική Διέγερση | | Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων |
|-------------------------|-------------------------|-------------|-------------------|-------------|--------------------------------|
| | ω Hz | ζ (%) | ω Hz | ζ (%) | ω Hz |
| 1 ^η Εγκάρσια | 1.13 | 2.0 | 1.29 | 1.8 | 0.96 |
| 1 ^η Διαμήκης | - | - | 1.17 | 1.8 | 0.70 |
| 2 ^η Εγκάρσια | 1.20 | 5.6 | 1.30 | 5.9 | 0.70 |
| 1 ^η Καμπτική | 2.13 | 0.6 | 2.20 | 0.6 | 2.18 |
| 3 ^η Εγκάρσια | 2.22 | 1.1 | 2.56 | 3.5 | 1.91 |
| 2 ^η Καμπτική | 3.07 | 0.4 | 3.20 | 0.7 | 3.21 |
| 4 ^η Εγκάρσια | 4.10 | 0.8 | 4.23 | 3.2 | 3.77 |
| 3 ^η Καμπτική | 6.66 | 0.5 | 6.89 | 0.6 | 7.10 |
| 5 ^η Εγκάρσια | 6.78 | 0.8 | 7.24 | 1.2 | 7.02 |

Περιγραφή Μοντέλου

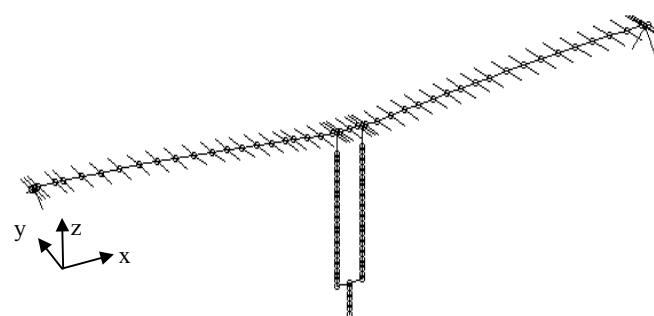
Για την προσομοίωση της γέφυρας χρησιμοποιήθηκαν κυρίως πεπερασμένα στοιχεία δοκού κατά Euler που τοποθετήθηκαν κατά τον κεντροβαρικό άξονα των διατομών. Οι ιδιότητες της διατομής κάθε διαμήκους δοκού αντιστοιχούν στην «ισοδύναμη» διατομή της προεντεταμένης δοκού καθώς και στο αντίστοιχο ενεργό πλάτος της πλάκας του καταστρώματος. Ειδικά, για την καλύτερη εμποπιεία του καταστρώματος προστέθηκε μια σειρά άκαμπτων δοκών μηδενικής μάζας εκατέρωθεν του κέντρου βάρους ώστε να εμφανιστούν πληρέστερα οι διάφορες ανώτερες ιδιομορφές του καταστρώματος της γέφυρας (ανωδομής). Για την σύνδεση του καταστρώματος με τα ακρόβαθρα χρησιμοποιήθηκαν άκαμπτα στοιχεία μηδενικής μάζας στα άκρα των οποίων τοποθετήθηκαν τα εφέδρανα τα οποία και εξαρτήθηκαν από την κατάλληλη θέση στην κορυφή των βάθρων. Αυτό το μοντέλο φαίνεται στο Σχήμα 1(β) και έχει 1350 βαθμούς ελευθερίας. Η όλη προσομοίωση γίνεται σε περιβάλλον προγραμματισμού COMSOL Multiphysics (COMSOL AB 2005). Τα ελαστομερή εφέδρανα προσομοιώνονται από ελατήρια, με κατάλληλες ελαστικές σταθερές, έτσι ώστε να παρέχουν την ισοδύναμη αξονική, εγκάρσια και κατακόρυφη δυσκαμψία των εφεδράνων. Τα ακρόβαθρα θεωρούνται ως απαραμόρφωτα σώματα, ενώ οι πυλώνες προσομοιώνονται με στοιχεία δοκού που οι ιδιότητές τους προκύπτουν από τα κατασκευαστικά σχέδια της γέφυρας. Για τους πυλώνες θεωρείται ότι συνδέονται άκαμπτα με τη θεμελίωση. Οι τιμές των ιδιοτήτων του υλικού και οι επιλογές της γεωμετρίας των παραπάνω στοιχείων δοκού και ελατηρίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 για το κατάστρωμα, το βάθρο και τα εφέδρανα. Το προαναφερόμενο μοντέλο με τις ιδιότητες του Πίνακα 2 θεωρείται ως το ονομαστικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας. Η αναθεώρηση μοντέλων επιτεύχθηκε με το λογισμικό αναθεώρησης μοντέλων που αναπτύχθηκε από τα μέλη του Εργαστηρίου Δυναμικής Συστημάτων (http://www.mie.uth.gr/files/sdl/vaggelis/mupdgui_manual_web.mht) και το οποίο χρησιμοποιεί το λογισμικό COMSOL Multiphysics.

Πίνακας 2. Ιδιότητες των δομικών στοιχείων της γέφυρας

| Ιδιότητες | | Κατάστρωμα (διαμήκη) | Κατάστρωμα (εγκάρσια) | Βάθος | Εφέδρανα |
|-----------------------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| μέγεθος διατομής | $A [m^2]$ | 10 | 15 | 14 | 1 |
| ροπή αδράνειας (ισχυρή διεύθυνση) | $I_z [m^4]$ | 80 | 120 | 45 | - |
| ροπή αδράνειας (ασθενή διεύθυνση) | $I_y [m^4]$ | 70 | 100 | 3 | - |
| στρεπτική σταθερά | $J [m^4]$ | 75 | 180 | 12 | - |
| μέτρο ελαστικότητας | $E [Pa]$ | 2.5×10^{10} | 2.5×10^{10} | 2.5×10^{10} | 1.0×10^7 |
| μάζα ανά μονάδα όγκου | $\rho [kg/m^3]$ | 2300 | 2300 | 2300 | - |



(α)

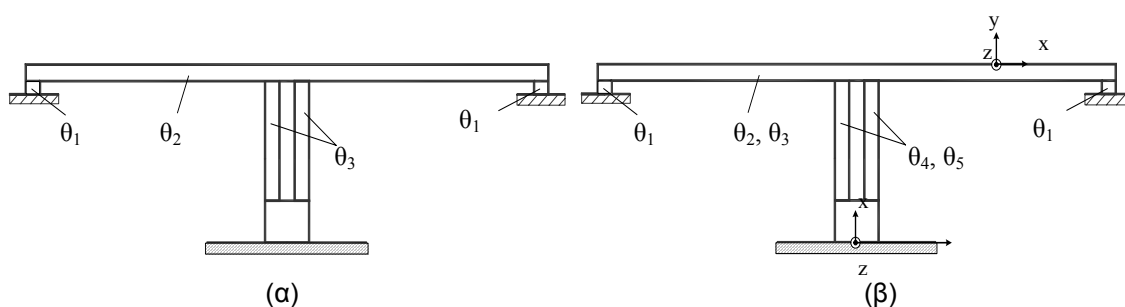


(β)

Σχήμα 1. (α) Αποψη γέφυρας Γ9 του Πολύμυλου, (β) Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας Γ9 του Πολύμυλου.

Παραμετροποιημένες Κατηγορίες Μοντέλων

Υιοθετήθηκαν δύο παραμετροποιημένα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για να γίνει επίδειξη της εφαρμογής και της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μεθοδολογίας αναθεώρησης μοντέλων. Οι κατηγορίες μοντέλων καθώς και η παραμετροποίησή τους φαίνονται στα Σχήματα 2(α) και 2(β). Οι κατηγορίες μοντέλων βασίζονται στο ίδιο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και διαφέρουν ως προς τον αριθμό και τον τύπο των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται.



(α)

(β)

Σχήμα 2. (α) κατηγορία μοντέλων I, (β) κατηγορία μοντέλων II

Περιγραφή Κατηγορίας Μοντέλων I

Η κατηγορία μοντέλων I περιλαμβάνει 3 παραμέτρους, τις θ_1 , θ_2 και θ_3 . Η πρώτη παράμετρος θ_1 περιγράφει την δυσκαμψία των ελαστομερών εφεδράνων στις δυο

διευθύνσεις παράλληλα στο κατάστρωμα, η δεύτερη παράμετρος θ_2 περιγράφει την δυσκαμψία του καταστρώματος και η τρίτη παράμετρος θ_3 περιγράφει την δυσκαμψία των βάθρων. Οι παράμετροι πολλαπλασιάζουν τις ονομαστικές τιμές των ιδιοτήτων των μοντέλων τις οποίες περιγράφουν, έτσι ώστε το μοντέλο που αντιστοιχεί σε τιμές των παραμέτρων $\theta_1=\theta_2=\theta_3=1$ να αντιστοιχεί στο ονομαστικό μοντέλο της γέφυρας που χρησιμοποιήθηκε στη φάση του σχεδιασμού. Αυτή η παραμετροποίηση του μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2(α).

Περιγραφή Κατηγορίας Μοντέλων II

Η κατηγορία μοντέλων II περιλαμβάνει 5 παραμέτρους, τις $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ και θ_5 . Η πρώτη παράμετρος θ_1 περιγράφει την δυσκαμψία των ελαστομερών εφεδράνων στις δυο διευθύνσεις παράλληλα στο κατάστρωμα, η δεύτερη και η τρίτη παράμετρος θ_2 και θ_3 περιγράφουν τις ροπές αδράνειας I_{yy} και I_{zz} , αντίστοιχα, της διατομής του καταστρώματος, η τέταρτη και η πέμπτη παράμετρος θ_4 και θ_5 περιγράφουν τις ροπές αδράνειας I_{yy} και I_{zz} , αντίστοιχα, της διατομής των άνω βάθρων. Οι παράμετροι πολλαπλασιάζουν τις ονομαστικές τιμές των ιδιοτήτων των μοντέλων τις οποίες περιγράφουν, έτσι ώστε το μοντέλο που αντιστοιχεί σε τιμές των παραμέτρων $\theta_1=\theta_2=\theta_3=\theta_4=\theta_5=1$ να αντιστοιχεί στο ονομαστικό μοντέλο της γέφυρας που χρησιμοποιήθηκε στη φάση του σχεδιασμού. Αυτή η παραμετροποίηση του μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2(β).

Αναθεώρηση της Κατηγορίας Μοντέλων I με 5 Ιδιομορφές

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η αναθεώρηση της κατηγορίας μοντέλων I με τις 3 παραμέτρους που φαίνονται στο Σχήμα 2(α). Η αναθεώρηση γίνεται για την περίπτωση που οι μετρούμενες ιδιομορφές είναι πέντε ($m=5$): η 1^η εγκάρσια, η 2^η εγκάρσια, η 1^η καμπτική, η 2^η καμπτική και η 4^η εγκάρσια. Η αναθεώρηση έγινε ξεχωριστά για την περίπτωση που τα ιδιομορφικά υπόλοιπα περιέχουν μόνο τις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων, δηλαδή $w_{\omega_r} \neq 0$ και $w_{\phi_r} = 0$ (περίπτωση ω στους πίνακες) και ξεχωριστά για την περίπτωση που τα ιδιομορφικά υπόλοιπα περιέχουν τις ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφικές συνιστώσες των ιδιομορφών στα σημεία μέτρησης, δηλαδή $w_{\omega_r} \neq 0$ και $w_{\phi_r} \neq 0$ (περίπτωση $\omega + \underline{\phi}$ στους πίνακες). Οι μη μηδενικοί συντελεστές βαρύτητας έχουν επιλεχθεί να είναι ίσοι με μονάδα για όλα τα ιδιομορφικά υπόλοιπα.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται οι βέλτιστες τιμές $\hat{\theta}$ των παραμέτρων για την κατηγορία μοντέλων I, χρησιμοποιώντας ιδιομορφικά δεδομένα από περιβαλλοντικές και σεισμικές διεγέρσεις. Εξετάζονται ξεχωριστά η περίπτωση που τα ιδιομορφικά υπόλοιπα αποτελούνται από τις ιδιοσυχνότητες μόνο (περίπτωση ω) και η περίπτωση που τα ιδιομορφικά υπόλοιπα αποτελούνται από τις ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφικές συνιστώσες (περίπτωση $\omega + \underline{\phi}$).

Πίνακας 3. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων θ

| Ιδιότητες | Περιβαλλοντική Διέγερση | | Σεισμική Διέγερση | |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|
| | ω | $\omega + \underline{\phi}$ | ω | $\omega + \underline{\phi}$ |
| E εφεδράνων | 3.24 | 3.09 | 3.70 | 3.78 |
| E κατάστρωμα | 0.91 | 0.96 | 1.03 | 1.04 |
| E βάθρο | 0.94 | 0.99 | 1.56 | 1.53 |

Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 3, οι τιμές της δυσκαμψίας των εφεδράνων για περιβαλλοντικές διεγέρσεις είναι από 3.09 έως 3.24 φορές μεγαλύτερες από τις ονομαστικές τιμές και για σεισμικές διεγέρσεις είναι από 3.7 έως 3.78 φορές μεγαλύτερες από τις ονομαστικές τιμές. Οι αναγνωρισμένες τιμές της δυσκαμψίας των εφεδράνων είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από τις ονομαστικές τιμές εξαιτίας της σημαντικά μη γραμμικής υστερητικής (πλαστικής) συμπεριφοράς των ελαστομερών εφεδράνων. Το μέτρο διάτμησης των εφεδράνων για μικρές παραμορφώσεις εξαιτίας των μικρής έντασης περιβαλλοντικών και σεισμικών διεγέρσεων, είναι σημαντικά υψηλότερο από εκείνο που προβλέπεται κατά το σχεδιασμό των εφεδράνων για περίπτωση ισχυρού σεισμού ο οποίος καθορίζεται από τον αντισεισμικό κώδικα. Αυτές οι μεγάλες διαφορές μεταξύ των αναγνωρισμένων τιμών για τη δυσκαμψία των εφεδράνων και των τιμών για τη δυσκαμψία σχεδιασμού συμφωνούν με τα αποτελέσματα των Chaudhary et al. (2002) για γέφυρες και των Stewart et al. (1999) κτίρια με εφέδρανα για σεισμική απομόνωση.

Οι τιμές για το μέτρο ελαστικότητας του καταστρώματος εμφανίζονται να είναι κατά προσέγγιση πολύ κοντά στις ονομαστικές τιμές, ενώ οι τιμές για το μέτρο ελαστικότητας του βάθρου είναι πολύ κοντά στις ονομαστικές τιμές για περιβαλλοντικές διεγέρσεις. Οι τιμές της δυσκαμψίας του βάθρου για σεισμικές διεγέρσεις εμφανίζονται όμως πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές για περιβαλλοντικές διεγέρσεις. Ειδικότερα οι τιμές της δυσκαμψίας του βάθρου για σεισμικές διεγέρσεις εμφανίζονται να είναι 50% υψηλότερες από τις ονομαστικές τιμές. Επομένως, με βάση την κατηγορία μοντέλων I, τα εφέδρανα εμφανίζονται πιο δύσκαμπτα από τις τιμές σχεδιασμού, το κατάστρωμα δεν εμφανίζει σημαντικές διαφορές με τις τιμές σχεδιασμού, ενώ το βάθρο εμφανίζεται πιο δύσκαμπτο από τις τιμές σχεδιασμού για σεισμικές διεγέρσεις. Η διαφορά αυτή στις τιμές μπορεί να αποδοθεί στην συνεισφορά του εδάφους στη δυναμική του μοντέλου (Papadimitriou et al. 2008, Stewart et al 1999, Chaudhary et al 2002).

Στους Πίνακες 4 και 5 συγκρίνονται οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων που προβλέπονται από το βέλτιστο αναγνωρισμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με τις αντίστοιχες τιμές των μετρούμενων ιδιοσυχνοτήτων, χρησιμοποιώντας δεδομένα από περιβαλλοντικές (Πίνακας 4) και σεισμικές διεγέρσεις (Πίνακας 5) αντίστοιχα. Επίσης δίνονται τα επί τοις εκατό σφάλματα ($\|\Delta\omega\| = (\omega - \hat{\omega})/\hat{\omega}$) μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων ιδιοσυχνοτήτων. Επίσης, στους Πίνακες 4 και 5 δίνονται οι τιμές των MAC (Modal Assurance Criterion) οι οποίες αποτελούν ένα μέτρο σύγκρισης των μετρούμενων και των προβλεπόμενων από το βέλτιστο μοντέλο ιδιομορφών. Το MAC παίρνει τιμές στην περιοχή [0,1]. Τιμές κοντά στην μονάδα αντιστοιχούν σε πολύ καλές εκτιμήσεις των ιδιομορφών ενώ τιμές μακριά από τη μονάδα αντιστοιχούν σε κακές εκτιμήσεις των ιδιομορφών.

Πίνακας 4. Μετρούμενες και προβλεπόμενες ιδιοσυχνότητες με τα επί τοις εκατό σφάλματα στις ιδιοσυχνότητες και τις τιμές MAC για την Κατηγορία Μοντέλων I - περιβαλλοντική διέγερση

| Περιβαλλοντική Διέγερση | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------|------|-------------------------------|----------------------|------|
| Τύπος Ιδιομορφής | Αναγνωρισμένη Ιδιοσυχνότητα Hz | Αναθεωρημένη Ιδιοσυχνότητα Hz | $\ \Delta\omega\ $ % | MAC | Αναθεωρημένη Ιδιοσυχνότητα Hz | $\ \Delta\omega\ $ % | MAC |
| | ω | | | | $\omega + \phi$ | | |
| 1 ^η εγκάρσια | 1.13 | 1.16 | 3.0 | 0.79 | 1.16 | 3.3 | 0.79 |
| 2 ^η εγκάρσια | 1.20 | 1.15 | 4.3 | 0.67 | 1.14 | 5.2 | 0.93 |
| 1 ^η καμπτική | 2.13 | 2.11 | 1.2 | 0.88 | 2.16 | 1.4 | 0.98 |
| 4 ^η εγκάρσια | 2.22 | 2.11 | 4.7 | 0.51 | 2.13 | 4.0 | 0.76 |
| 2 ^η καμπτική | 3.07 | 3.08 | 0.3 | 0.98 | 3.16 | 3.0 | 0.98 |

Πίνακας 5. Μετρούμενες και προβλεπόμενες ιδιοσυχνότητες με τα επί τοις εκατό σφάλματα στις ιδιοσυχνότητες και τις τιμές MAC για την Κατηγορία Μοντέλων I - σεισμική διέγερση

| Σεισμική Διέγερση | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------|------|-------------------------------|----------------------|------|
| Τύπος Ιδιομορφής | Αναγνωρισμένη Ιδιοσυχνότητα Hz | Αναθεωρημένη Ιδιοσυχνότητα Hz | $\ \Delta\omega\ $ % | MAC | Αναθεωρημένη Ιδιοσυχνότητα Hz | $\ \Delta\omega\ $ % | MAC |
| | ω | | | | $\omega + \phi$ | | |
| 1 ^η εγκάρσια | 1.29 | 1.32 | 1.6 | 0.70 | 1.32 | 1.6 | 0.70 |
| 2 ^η εγκάρσια | 1.30 | 1.25 | 4.4 | 0.94 | 1.26 | 3.6 | 0.94 |
| 1 ^η καμπτική | 2.20 | 2.36 | 7.6 | 0.99 | 2.36 | 7.6 | 0.99 |
| 4 ^η εγκάρσια | 2.56 | 2.31 | 9.7 | 0.72 | 2.32 | 9.3 | 0.72 |
| 2 ^η καμπτική | 3.20 | 3.28 | 2.7 | 0.99 | 3.30 | 3.3 | 0.99 |

Για την περίπτωση που η αναθεώρηση βασίζεται μόνο στις ιδιοσυχνότητες, παρατηρείται ότι το σφάλμα μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων από το βέλτιστο μοντέλο ιδιοσυχνοτήτων για την κατηγορία μοντέλων I κυμαίνεται από 0.3% έως 4.7% για περιβαλλοντικές διεγέρσεις και από 1.6% έως 9.7% για σεισμικές διεγέρσεις. Οι τιμές του MAC θεωρούνται σχετικά καλές και κυμαίνονται από 0.51 έως 0.98 για περιβαλλοντικές διεγέρσεις και από 0.70 έως 0.99 για σεισμικές διεγέρσεις. Τα μικρά σφάλματα στις ιδιοσυχνότητες επιβεβαιώνουν ότι η κατηγορία μοντέλων η οποία επιλέχθηκε επαρκεί για την μοντελοποίηση των πέντε ιδιομορφικών χαρακτηριστικών της γέφυρας τα οποία χρησιμοποιούνται στην αναθεώρηση. Βέβαια αυτό δεν σημαίνει κατ' ανάγκη ότι το μοντέλο αυτό επαρκεί και για την μοντελοποίηση των ανώτερων ιδιομορφικών χαρακτηριστικών τα οποία δεν συμμετέχουν στην αναθεώρηση. Συνήθως πολύ καλά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων δίνουν και καλές εκτιμήσεις των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών που δεν συμμετέχουν στην αναθεώρηση.

Για την περίπτωση που η αναθεώρηση βασίζεται στις ιδιοσυχνότητες και στις ιδιομορφές, παρατηρείται ότι το σφάλμα μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων από το βέλτιστο μοντέλο ιδιοσυχνοτήτων για την κατηγορία μοντέλων I χειροτερεύει για τις περισσότερες ιδιομορφές και κυμαίνεται από 1.4% έως 5.2% για περιβαλλοντικές διεγέρσεις και από 1.6% έως 9.3% για σεισμικές διεγέρσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το βέλτιστο μοντέλο προσπαθεί να βελτιώσει τις εκτιμήσεις για τις ιδιομορφικές συνιστώσες

χειροτερεύοντας τις εκτιμήσεις των ιδιοσυχνοτήτων. Συγκεκριμένα, από τις τιμές των MAC στα αποτελέσματα των περιπτώσεων ω και $\omega + \underline{\phi}$ στους Πίνακες 4 και 5 φαίνεται καθαρά ότι βελτιώνονται οι τιμές MAC κυρίως για την 1^η καμπτική, την 2^η και 4^η εγκάρσια ιδιομορφή με σημαντικότερη βελτίωση να παρατηρείται για την περίπτωση των περιβαλλοντικών διεγέρσεων. Η χειροτέρευση των εκτιμήσεων των ιδιοσυχνοτήτων στην περίπτωση $\omega + \underline{\phi}$ οφείλονται στα μεγάλα συνήθως σφάλματα μετρήσεων που εμπεριέχονται στις πειραματικές εκτιμήσεις των ιδιομορφικών συνιστωσών. Επομένως, γενικά τα σφάλματα μετρήσεων και μοντελοποίησης επηρεάζουν, ανάλογα με το μέγεθος των σφαλμάτων, τις εκτιμήσεις του βέλτιστου αναθεωρημένου μοντέλου αλλά και των προβλέψεων των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών από το βέλτιστο αναθεωρημένο μοντέλο

Αναθεώρηση της Κατηγορίας Μοντέλων II με 5 Ιδιομορφές

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η αναθεώρηση της κατηγορίας μοντέλων II με τις 5 παραμέτρους που φαίνονται στο Σχήμα 2(β). Η αναθεώρηση γίνεται για την περίπτωση που οι μετρούμενες ιδιομορφές είναι πέντε ($m = 5$): η 1^η εγκάρσια, η 2^η εγκάρσια, η 1^η καμπτική, η 2^η καμπτική και η 4^η εγκάρσια. Η αναθεώρηση έγινε ξεχωριστά για την περίπτωση που τα ιδιομορφικά υπόλοιπα περιέχουν μόνο τις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων, δηλαδή $w_{\omega_r} \neq 0$ και $w_{\phi_r} = 0$ (περίπτωση ω στους πίνακες) και ξεχωριστά για την περίπτωση που τα ιδιομορφικά υπόλοιπα περιέχουν τις ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφικές συνιστώσες των ιδιομορφών στα σημεία μέτρησης, δηλαδή $w_{\omega_r} \neq 0$ και $w_{\phi_r} \neq 0$ (περίπτωση $\omega + \underline{\phi}$ στους πίνακες). Οι μη μηδενικοί συντελεστές βαρύτητας έχουν επιλεγεί να είναι ίσοι με μονάδα για όλα τα ιδιομορφικά υπόλοιπα.

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι βέλτιστες τιμές $\hat{\theta}$ των παραμέτρων για την κατηγορία μοντέλων II, χρησιμοποιώντας ιδιομορφικά δεδομένα από περιβαλλοντικές και σεισμικές διεγέρσεις. Εξετάζονται ξεχωριστά η περίπτωση που τα διαθέσιμα ιδιομορφικά υπόλοιπα αποτελούνται από τις ιδιοσυχνότητες μόνο (περίπτωση ω) και η περίπτωση που τα διαθέσιμα ιδιομορφικά υπόλοιπα αποτελούνται από τις ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφικές συνιστώσες (περίπτωση $\omega + \underline{\phi}$).

Πίνακας 6. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων θ

| Ιδιότητες | Περιβαλλοντική Διέγερση | | Σεισμική Διέγερση | |
|---------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|
| | ω | $\omega + \underline{\phi}$ | ω | $\omega + \underline{\phi}$ |
| E εφεδράνων | 3.46 | 3.19 | 3.94 | 3.83 |
| I_{yy} κατάστρωμα | 0.90 | 0.91 | 0.99 | 0.99 |
| I_{zz} κατάστρωμα | 1.12 | 0.90 | 1.68 | 1.60 |
| I_{yy} βάθρων | 0.78 | 1.02 | 1.30 | 1.47 |
| I_{zz} βάθρων | 1.12 | 1.75 | 0.98 | 0.99 |

Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 6, οι τιμές της δυσκαμψίας των εφεδράνων είναι 3,46 και 3,19 φορές τις ονομαστικές τιμές για περιβαλλοντικές διεγέρσεις και για τις δύο περιπτώσεις ιδιομορφικών υπολοίπων. Για σεισμικές διεγέρσεις οι τιμές της δυσκαμψίας των εφεδράνων είναι 3,94 και 3,83 φορές τις ονομαστικές τιμές, αντίστοιχα. Παρατηρούμε δηλαδή ότι οι τιμές της δυσκαμψίας των εφεδράνων για σεισμικές διεγέρσεις εμφανίζονται

μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές για περιβαλλοντικές διεγέρσεις. Οι τιμές αυτές είναι σε συμφωνία με τις τιμές που προέκυψαν από την προηγούμενη περίπτωση ανάλυσης με την κατηγορία μοντέλων I. Για άλλη μια φορά πιστοποιείται ότι τα εφέδρανα στο ονομαστικό μοντέλο έχουν θεωρηθεί πολύ εύκαμπτα ενώ στην πραγματικότητα είναι περίπου 3.6 φορές πιο δύσκαμπτα.

Για την κατηγορία μοντέλων II, οι βέλτιστες τιμές των ροπών αδράνειας ως προς την διεύθυνση y της διατομής του καταστρώματος για περιβαλλοντικές διεγέρσεις είναι περίπου 0.9 φορές τις ονομαστικές τιμές, ενώ για σεισμικές διεγέρσεις οι βέλτιστες τιμές των ροπών αδράνειας ως προς την διεύθυνση y έχουν σχεδόν ίδιες τιμές με τις ονομαστικές τιμές. Αντίστοιχα, οι βέλτιστες τιμές των ροπών αδράνειας ως προς την διεύθυνση z της διατομής του καταστρώματος για περιβαλλοντικές διεγέρσεις είναι από 0.9 έως 1.12 φορές τις ονομαστικές τιμές, ενώ για σεισμικές διεγέρσεις οι βέλτιστες τιμές των ροπών αδράνειας ως προς την διεύθυνση z είναι από 1.6 έως 1.68 φορές τις ονομαστικές τιμές. Παρομοίως, οι βέλτιστες τιμές των ροπών αδράνειας ως προς την διεύθυνση y της διατομής των βάθρων για περιβαλλοντικές διεγέρσεις είναι από 0.78 έως 1.02 φορές τις ονομαστικές τιμές, ενώ για σεισμικές διεγέρσεις οι βέλτιστες τιμές των ροπών αδράνειας ως προς την διεύθυνση y είναι από 1.3 έως 1.47 φορές τις ονομαστικές τιμές. Αντίστοιχα, οι βέλτιστες τιμές των ροπών αδράνειας ως προς την διεύθυνση z της διατομής των βάθρων για περιβαλλοντικές διεγέρσεις είναι από 1.12 έως 1.75 φορές τις ονομαστικές τιμές, ενώ για σεισμικές διεγέρσεις οι βέλτιστες τιμές των ροπών αδράνειας ως προς την διεύθυνση z έχουν σχεδόν ίδιες τιμές με τις ονομαστικές τιμές.

Στους Πίνακες 7 και 8 συγκρίνονται οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων που προβλέπονται από το βέλτιστο αναγνωρισμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με τις αντίστοιχες τιμές των μετρούμενων ιδιοσυχνοτήτων, χρησιμοποιώντας δεδομένα από περιβαλλοντικές και σεισμικές διεγέρσεις αντίστοιχα. Επίσης δίνονται τα επί τοις εκατό σφάλματα ($\|\Delta\omega\| = (\omega - \hat{\omega})/\hat{\omega}$) μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων ιδιοσυχνοτήτων. Επίσης, στους Πίνακες 7 και 8 δίνονται οι τιμές των MAC.

Πίνακας 7. Μετρούμενες και προβλεπόμενες ιδιοσυχνότητες με τα επί τοις εκατό σφάλματα στις ιδιοσυχνότητες και τις τιμές MAC για την Κατηγορία Μοντέλων II - περιβαλλοντική διέγερση

| Περιβαλλοντική Διέγερση | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------|------|
| Ιδιομορφή | Αναγνωρισμένη Ιδιοσυχνότητα Hz | Αναθεωρημένη Ιδιοσυχνότητα Hz | $\ \Delta\omega\ $ % | MAC | Αναθεωρημένη Ιδιοσυχνότητα Hz | $\ \Delta\omega\ $ % | MAC |
| ω | | | | $\omega + \phi$ | | | |
| 1 ^η εγκάρσια | 1.13 | 1.13 | 0.00 | 0.69 | 1.17 | 4.30 | 0.80 |
| 2 ^η εγκάρσια | 1.20 | 1.20 | 0.00 | 0.92 | 1.15 | 4.20 | 0.93 |
| 1 ^η καμπτική | 2.13 | 2.13 | 0.00 | 0.99 | 2.18 | 2.30 | 0.99 |
| 2 ^η καμπτική | 2.22 | 2.22 | 0.00 | 0.76 | 2.12 | 4.50 | 0.77 |
| 4 ^η εγκάρσια | 3.07 | 3.07 | 0.00 | 0.98 | 3.08 | 0.30 | 0.98 |

Πίνακας 8. Μετρούμενες και προβλεπόμενες ιδιοσυχνότητες με τα επί τοις εκατό σφάλματα στις ιδιοσυχνότητες και τις τιμές MAC για την Κατηγορία Μοντέλων II - σεισμική διέγερση

| Σεισμική Διέγερση | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|------|-------------------------------------|-------------------------|------|
| Ιδιομορφή | Αναγνωρισμένη Ιδιοσυχνότητα Hz | Αναθεωρημένη Ιδιοσυχνότητα Hz | $\ \Delta\omega\ $ % | MAC | Αναθεωρημένη Ιδιοσυχνότητα Hz | $\ \Delta\omega\ $ % | MAC |
| | | ω | | | $\omega + \phi$ | | |
| 1 ^η εγκάρσια | 1.29 | 1.29 | 0.53 | 0.32 | 1.32 | 2.00 | 0.71 |
| 2 ^η εγκάρσια | 1.30 | 1.30 | 0.20 | 0.56 | 1.28 | 1.80 | 0.94 |
| 1 ^η καμπτική | 2.20 | 2.18 | 0.60 | 0.99 | 2.18 | 0.60 | 0.99 |
| 2 ^η καμπτική | 2.56 | 2.57 | 0.40 | 0.73 | 2.55 | 0.50 | 0.73 |
| 4 ^η εγκάρσια | 3.20 | 3.21 | 0.40 | 0.99 | 3.21 | 0.40 | 0.99 |

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 6, προκύπτει ότι το βέλτιστο μοντέλο από την κατηγορία μοντέλων II, πέντε παραμέτρων, για την περίπτωση που οι μετρήσεις περιέχουν μόνο τις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων, έδωσε μηδενικά σφάλματα για όλες τις ιδιοσυχνότητες για περιβαλλοντικές διεγέρσεις. Οι τιμές του MAC θεωρούνται επίσης σχετικά καλές και κυμαίνονται από 0.69 έως 0.98. Για σεισμικές διεγέρσεις, οι τιμές των σφαλμάτων είναι ικανοποιητικές και κυμαίνονται από 0.2% έως 0.6%, το ίδιο και οι τιμές των MAC που κυμαίνονται από 0.32 έως 0.99. Τα μικρά σφάλματα στις ιδιοσυχνότητες επιβεβαιώνουν ότι οι κατηγορίες μοντέλων οι οποίες επιλέχθηκαν επαρκούν για την μοντελοποίηση των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών της γέφυρας τα οποία χρησιμοποιούνται στην αναθεώρηση.

Για την περίπτωση που η αναθεώρηση βασίζεται στις ιδιοσυχνότητες και στις ιδιομορφές, παρατηρείται ότι το σφάλμα μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων από το βέλτιστο μοντέλο ιδιοσυχνοτήτων χειροτερεύει και κυμαίνεται από 0.3% για την 4^η εγκάρσια έως 4.3% για την 1^η εγκάρσια ιδιομορφή, για περιβαλλοντικές διεγέρσεις. Για σεισμικές διεγέρσεις, οι τιμές των σφαλμάτων κυμαίνονται από 0.4% για την 4^η εγκάρσια έως 2% για την 1^η εγκάρσια ιδιομορφή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το βέλτιστο μοντέλο προσπαθεί να βελτιώσει τις εκτιμήσεις των ιδιομορφικών συνιστωσών χειροτερεύοντας τις εκτιμήσεις των ιδιοσυχνοτήτων. Από τις τιμές των MAC στα αποτελέσματα των περιπτώσεων ω και $\omega + \phi$ στον Πίνακα 6 φαίνεται ότι υπάρχει μικρή βελτίωση στις τιμές MAC κυρίως για την 1^η εγκάρσια ιδιομορφή τόσο για περιβαλλοντικές όσο και για σεισμικές διεγέρσεις. Η χειροτέρευση των εκτιμήσεων των ιδιοσυχνοτήτων στην περίπτωση $\omega + \phi$ οφείλονται στα μεγάλα συνήθως σφάλματα μετρήσεων που εμπεριέχονται στις πειραματικές εκτιμήσεις των συνιστωσών των ιδιομορφών.

ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ Γ2 ΤΗΣ ΚΑΒΑΛΑΣ

Περιγραφή Γέφυρας

Η γέφυρα Γ2 της Καβάλας αποτελείται από δύο κλάδους (Σχήμα 3α). Κάθε κλάδος έχει 4 ανοίγματα συνολικού μήκους 180m και πλάτους 13m (4×45m), καθένα από τα οποία αποτελείται από τέσσερις διαμήκεις δοκούς. Το κατάστρωμα στηρίζεται στους τρεις πυλώνες ύψους 30m, 53m και 30m αντίστοιχα και κοίλης διατομής 4m×4m με πάχος 40cm και στα δύο ακρόβαθρα διαμέσου των ενισχυμένων με χάλυβα ελαστομερών εφεδράνων. Η σύνδεση μεταξύ των ανοιγμάτων γίνεται με μία πλάκα μήκους 2m και πάχους 20cm.

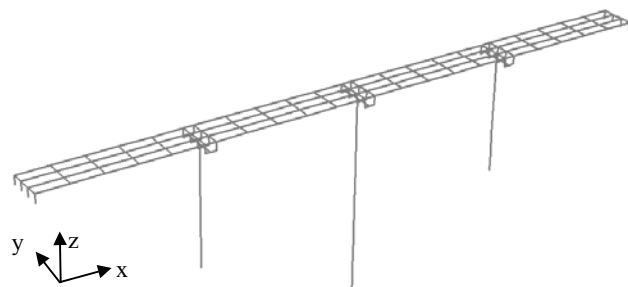
Οι μετρήσεις των ταλαντώσεων της γέφυρας που καταγράφηκαν, χρησιμοποιηθήκαν για τον υπολογισμό των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών της γέφυρας με βάση διαθέσιμο λογισμικό ιδιομορφικής αναγνώρισης κατασκευών (Papadimitriou et al. 2008). Τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής αναγνώρισης για περιβαλλοντικές διεγέρσεις δείχνονται στον Πίνακα 9 και παρουσιάζονται αναλυτικά στις εργασίες Ntotsios et al. (2008) και Karakostas et al. (2008).

Πίνακας 9. Αποτελέσματα αναγνώρισης ιδιομορφικών χαρακτηριστικών

| Ιδιομορφή | Περιβαλλοντική Διέγερση | | Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων |
|-------------------------|-------------------------|-------------|--------------------------------|
| | ω Hz | ζ (%) | ω Hz |
| 1 ^η Εγκάρσια | 0.81 | 1.4 | 0.53 |
| 1 ^η Διαμήκης | 1.29 | 5.6 | 0.57 |
| 2 ^η Εγκάρσια | 1.61 | 5.2 | 0.67 |
| 1 ^η Καμπτική | 3.40 | 0.6 | 2.78 |
| 2 ^η Καμπτική | 3.46 | 0.7 | 2.82 |
| 3 ^η Καμπτική | 3.47 | 0.4 | 2.82 |
| 4 ^η Καμπτική | 3.51 | 0.5 | 2.83 |

Περιγραφή Μοντέλου

Για την εφαρμογή των τεχνικών αναθεώρησης μοντέλων για τη γέφυρα Γ2 της Καβάλας, δημιουργήθηκε ένα κατάλληλο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας, το οποίο είναι όμοιο με εκείνο που χρησιμοποιήθηκε στη βάση σχεδιασμού της γέφυρας. Η γέφυρα προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας αποκλειστικά τρισδιάστατα στοιχεία δοκού κατά Euler δύο κόμβων για τη μοντελοποίηση του καταστρώματος, των πυλώνων και των εφεδράνων. Αυτό το μοντέλο φαίνεται στο Σχήμα 3(β) και έχει 900 βαθμούς ελευθερίας. Η όλη προσομοίωση γίνεται σε περιβάλλον προγραμματισμού COMSOL Multiphysics. Κάθε άνοιγμα αποτελείται από τέσσερις διαμήκεις δοκούς, οι οποίες παριστάνουν τα προεντεταμένα δοκάρια που στηρίζουν το κατάστρωμα, οι οποίες όλες μαζί σχηματίζουν το οριζόντιο πλέγμα που φαίνεται στο Σχήμα 3(β). Οι ιδιότητες της διατομής κάθε διαμήκου δοκού αντιστοιχούν στην «ισοδύναμη» διατομή της προεντεταμένης δοκού καθώς και στο αντίστοιχο ενεργό πλάτος της πλάκας του καταστρώματος. Τα εγκάρσια στοιχεία δοκού στα δύο άκρα των ανοιγμάτων αντιστοιχούν στα υπάρχοντα εγκάρσια δοκάρια πάνω από τα εφέδρανα, ενώ τα άλλα τέσσερα εγκάρσια δοκάρια προσομοιώνουν τη σύζευξη των διαμήκους δοκαριών στην εγκάρσια διεύθυνση λόγω της παρουσίας του καταστρώματος. Η εγκάρσια δοκός στην κορυφή κάθε πυλώνα θεωρείται απαραμόρφωτη, ενώ οι πυλώνες θεωρείται ότι συνδέονται άκαμπτα με τη θεμελίωση. Τα ελαστομερή εφέδρανα προσομοιώνονται από στοιχεία δοκού, με κατάλληλες γεωμετρικές ιδιότητες και ιδιότητες υλικού, έτσι ώστε να παρέχουν την ισοδύναμη αξονική και εγκάρσια δυσκαμψία των εφεδράνων, ενώ η στρεπτική δυσκαμψία των εφεδράνων θεωρείται αμελητέα. Τα στοιχεία δοκού που προσομοιώνουν τα εφέδρανα συνδέουν το κέντρο βάρους των διαμηκών δοκών του καταστρώματος με την κορυφή των πυλώνων ή των ακρόβαθρων. Η πλάκα η οποία συνδέει τα ανοίγματα προσομοιώνεται επίσης στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Τα ακρόβαθρα θεωρούνται ως απαραμόρφωτα σώματα, ενώ οι πυλώνες προσομοιώνονται με στοιχεία δοκού.



(α)

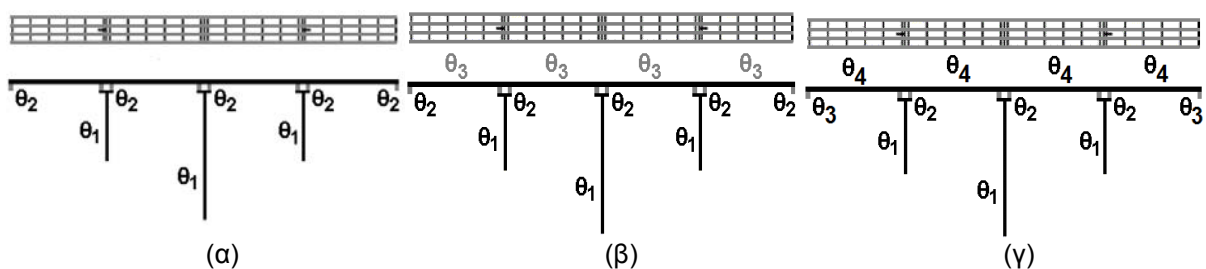
(β)

Σχήμα 3. (α) Αποψη γέφυρας Γ2 της Καβάλας, (β) Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας Γ2 της Καβάλας.

Σε αντίθεση με τη πιλοτική εφαρμογή στη Γέφυρα Γ9 του Πολύμυλου, έμφαση στη πιλοτική εφαρμογή της Γέφυρας Γ2 της Καβάλας δίνεται στην παρουσίαση των προβλημάτων που εμφανίζονται στην αναθεώρηση μοντέλων, όπως την ύπαρξη πολλαπλών τοπικών και καθολικών ελάχιστων.

Παραμετροποιημένες Κατηγορίες Μοντέλων

Υιοθετήθηκαν τρία παραμετροποιημένα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για να γίνει επίδειξη της εφαρμογής και της αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων μεθοδολογιών, καθώς και για την ανάδειξη των δυσκολιών που σχετίζονται με το πρόβλημα βελτιστοποίησης που παρουσιάζεται στην διαδικασία αναθεώρησης των μοντέλων. Οι κατηγορίες μοντέλων καθώς και η παραμετροποίησή τους φαίνονται σχηματικά στα Σχήματα 4(α-γ). Οι κατηγορίες μοντέλων βασίζονται στο ίδιο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και διαφέρουν ως προς τον αριθμό και τον τύπο των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται.



Σχήμα 4. Παραμετροποίηση των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων (α) κατηγορία μοντέλων I, (β) κατηγορία μοντέλων II, (γ) κατηγορία μοντέλων III

Κατηγορία Μοντέλων I

Η κατηγορία μοντέλων I περιλαμβάνει 2 παραμέτρους. Το μοντέλο καθώς και η παραμετροποίησή του παρουσιάζονται στο Σχήμα 4(α). Η πρώτη παράμετρος θ_1 περιγράφει την δυσκαμψία των τριών πυλώνων, ενώ η δεύτερη παράμετρος θ_2 περιγράφει στην δυσκαμψία των ελαστομερών εφεδράνων στους πυλώνες και τα ακρόβαθρα. Οι τιμές των παραμέτρων που αντιστοιχούν στο ονομαστικό μοντέλο της γέφυρας είναι $\theta_1 = \theta_2 = 1$.

Η παραμετροποιημένη κατηγορία μοντέλων I αναθεωρείται χρησιμοποιώντας τις επτά αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές της γέφυρας που παρουσιάζονται στην εργασία Christodoulou (2006). Η αναθεώρηση έγινε για την περίπτωση που τα ιδιομορφικά υπόλοιπα περιέχουν μόνο τις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και για την περίπτωση που τα ιδιομορφικά υπόλοιπα περιέχουν τις ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφικές συνιστώσες στα σημεία μέτρησης.

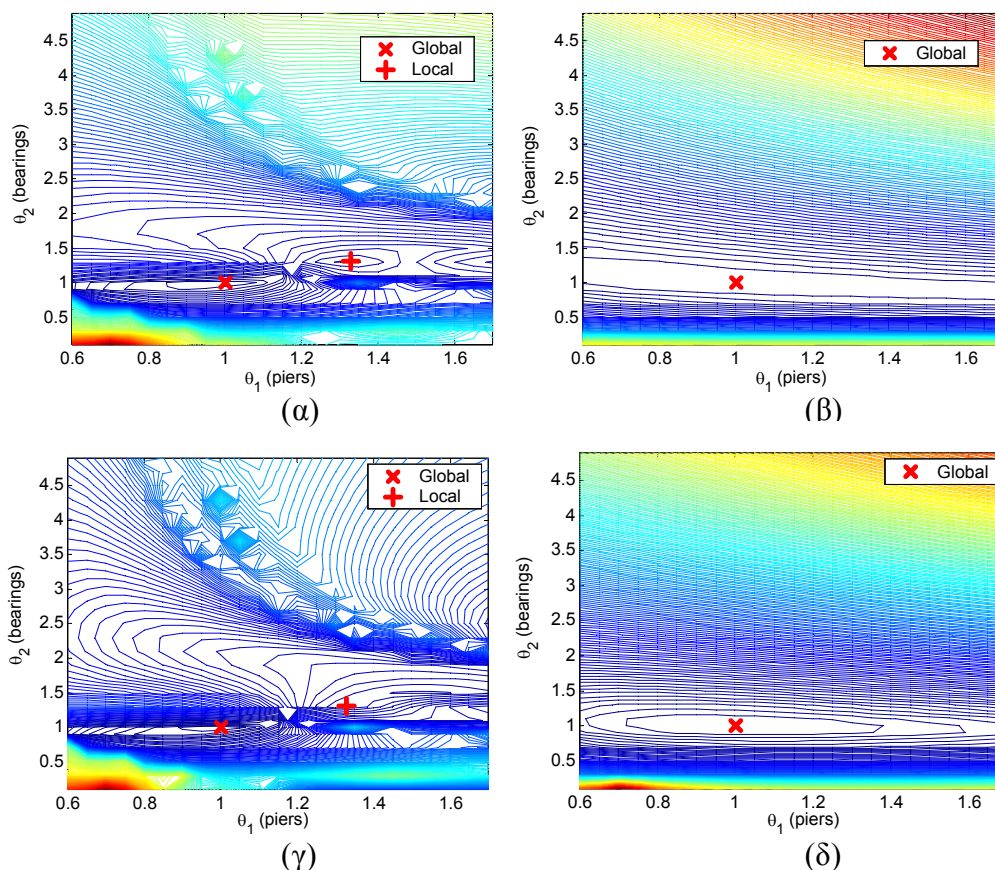
Στην ανάλυση που ακολουθεί, λαμβάνονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα για τις περιπτώσεις που αντιστοιχούν στις ακόλουθες τιμές των συντελεστών βαρύτητας: (α) $w_{\omega_r} = w_{\phi_r} = 1$, (β) $w_{\omega_r} = 1$ και $w_{\phi_r} = 0$, που αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου λαμβάνεται υπόψη μόνο το ιδιομορφικό υπόλοιπο των ιδιοσυχνοτήτων και (γ) $w_{\omega_r} = 0$ και $w_{\phi_r} = 1$, που αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου λαμβάνεται υπόψη μόνο το ιδιομορφικό υπόλοιπο των ιδιομορφικών συνιστωσών.

Παρουσία Πολλαπλών Τοπικών Ελάχιστων

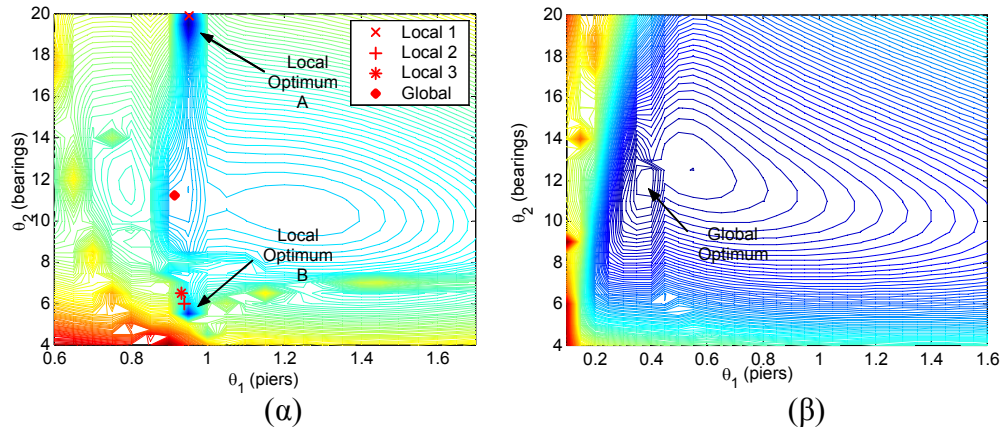
Με σκοπό να αποκαλυφθούν συγκεκριμένα γνωρίσματα και δυσκολίες που σχετίζονται με την αναθεώρηση μοντέλων, για την αναθεώρηση των παραμέτρων του μοντέλου χρησιμοποιούνται προσομοιωμένα αντί για μετρούμενα δεδομένα, που αποτελούνται από τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά των επτά αναγνωρισμένων ιδιομορφών. Ειδικότερα, τα «μετρούμενα» προσομοιωμένα δεδομένα δημιουργούνται από ένα μοντέλο που αντιστοιχεί σε τιμές των παραμέτρων $\theta_1 = 1$ και $\theta_2 = 1$. Με αυτόν τον τρόπο τα μετρητικά δεδομένα δεν περιέχουν καθόλου σφάλματα μοντελοποίησης ή σφάλματα μετρήσεων. Αυτά τα προσομοιωμένα δεδομένα, χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον υπολογισμό των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων του μοντέλου θ_1 και θ_2 . Τα διαγράμματα των ισοϋψών των αντικειμενικών συναρτήσεων στο διδιάστατο χώρο των παραμέτρων φαίνονται στα Σχήματα 5(α-γ) για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Οι περιοχές με το βαθύ μπλε χρώμα αντιστοιχούν στις περιοχές των ελαχίστων της συνάρτησης.

Για την περίπτωση (α) εκτός από το αναμενόμενο καθολικό ελάχιστο στο σημείο $\theta_1 = \theta_2 = 1$, παρατηρούνται επιπλέον μερικά τοπικά ελάχιστα. Για την περίπτωση (β) προκύπτει μόνο ένα βέλτιστο, το καθολικό βέλτιστο, στο σημείο $\theta_1 = \theta_2 = 1$. Για την περίπτωση (γ) εκτός από το αναμενόμενο καθολικό ελάχιστο στο σημείο $\theta_1 = \theta_2 = 1$, υπάρχουν επιπλέον ακόμη μερικά τοπικά ελάχιστα. Συγκρίνοντας τις τρεις πρώτες περιπτώσεις, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η παρουσία των πολλαπλών τοπικών ελαχίστων στην αντικειμενική συνάρτηση οφείλεται στο ιδιομορφικό υπόλοιπο των ιδιομορφικών συνιστωσών. Για την περαιτέρω αναγνώριση των ιδιομορφών, στις οποίες οφείλεται η ύπαρξη πολλαπλών τοπικών ελαχίστων, στο Σχήμα 5(δ) παρουσιάζεται το διάγραμμα των ισοϋψών της αντικειμενικής συνάρτησης (1) για την περίπτωση (α) αλλά χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το ιδιομορφικό υπόλοιπο των τριών καμπτικών ιδιομορφών στην αντικειμενική συνάρτηση (1), δηλαδή περιέχονται μόνο οι ιδιομορφικές συνιστώσες των τεσσάρων άλλων ιδιομορφών. Στο Σχήμα 5(δ), παρατηρείται ότι υπάρχει ένα μοναδικό (καθολικό) και καλά ορισμένο ελάχιστο. Με αυτόν τον τρόπο πιστοποιείται ότι η παρουσία των πολλαπλών τοπικών ελαχίστων οφείλεται στις τρεις κοντινές και επικαλυπτόμενες καμπτικές ιδιομορφές που παρουσιάζονται στη γέφυρα αυτού του τύπου.

Η διαδικασία αναθεώρησης μοντέλων επαναλαμβάνεται χρησιμοποιώντας τις επτά αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές με βάση τα μετρητικά δεδομένα. Διαγράμματα ισοϋψών για τις αντικειμενικές συναρτήσεις φαίνονται στο Σχήμα 6(α) και 6(β), για τις περιπτώσεις: (α) $w_{\omega_r} = w_{\phi_r} = 1$ και (β) $w_{\omega_r} = w_{\phi_r} = 1$ εξαιρώντας τις ιδιομορφικές συνιστώσες των καμπτικών ιδιομορφών. Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα ότι η αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιώντας μετρητικά δεδομένα, συμπεριφέρεται κατά τον ίδιο τρόπο με την αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιώντας προσομοιωμένα δεδομένα, η οποία παρατηρείται στα Σχήματα 5(α) και 5(δ). Η παρουσία των πολλαπλών τοπικών ελαχίστων οφείλεται στην παρουσία των κοντινών και επικαλυπτόμενων καμπτικών ιδιομορφών, ενώ τα σφάλματα μοντελοποίησης και τα σφάλματα των μετρήσεων για τις αναγνωρισμένες ιδιομορφικές συνιστώσες τείνουν να αυξήσουν τον αριθμό των τοπικών ελαχίστων. Αυτή η αύξηση των τοπικών ελαχίστων περιπλέκει επιπλέον το πρόβλημα εύρεσης του καθολικού ελαχίστου. Συνοψίζοντας, τα παραπάνω αποτελέσματα υποδεικνύουν τη σπουδαιότητα της χρήσης μεθόδων καθολικής βελτιστοποίησης για την αναθεώρηση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, όπως τη χρήση υβριδικών αλγόριθμων βελτιστοποίησης (Christodoulou 2006, Christodoulou and Papadimitriou 2007).



Σχήμα 5. Διάγραμμα των ισοϋψών της αντικειμενικής συνάρτησης χρησιμοποιώντας προσομοιωμένα δεδομένα, για (α) $w_{\omega_r} = w_{\phi_r} = 1$, (β) $w_{\omega_r} = 1$ και $w_{\phi_r} = 0$, (γ) $w_{\omega_r} = 0$ και $w_{\phi_r} = 1$, (δ) $w_{\omega_r} = w_{\phi_r} = 1$ εξαιρώντας τις ιδιομορφικές συνιστώσες των καμπτικών ιδιομορφών.



Σχήμα 6. Διάγραμμα των ισοϋψών της αντικειμενικής συνάρτησης χρησιμοποιώντας προσομοιωμένα δεδομένα για (α) $w_{\omega_r} = w_{\phi_r} = 1$, (β) $w_{\omega_r} = w_{\phi_r} = 1$ εξαιρώντας τις ιδιομορφικές συνιστώσες των καμπτικών ιδιομορφών.

Κατηγορίες Μοντέλων II & III

Η κατηγορία μοντέλων II περιλαμβάνει 3 παραμέτρους, τις θ_1 , θ_2 και θ_3 . Η πρώτη παράμετρος θ_1 περιγράφει την δυσκαμψία των τριών πυλώνων οι οποίες υποτίθεται ότι είναι πλήρως συσχετιζόμενες, η δεύτερη παράμετρος θ_2 περιγράφει στην δυσκαμψία των ελαστομερών εφεδράνων στους πυλώνες και τα ακρόβαθρα και η τρίτη παράμετρος θ_3 περιγράφει στην δυσκαμψία του καταστρώματος. Η κατηγορία μοντέλων III περιλαμβάνει 4 παραμέτρους. Η παράμετρος θ_1 περιγράφει την δυσκαμψία των πυλώνων, η θ_2 περιγράφει την δυσκαμψία των εφεδράνων των πυλώνων, η θ_3 περιγράφει την δυσκαμψία των εφεδράνων των δύο ακρόβαθρων και η θ_4 περιγράφει την δυσκαμψία του καταστρώματος. Αυτή η παραμετροποίηση του μοντέλου φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 4(γ). Οι παράμετροι πολλαπλασιάζουν τις ονομαστικές τιμές των ιδιοτήτων των μοντέλων τις οποίες περιγράφουν, έτσι ώστε το μοντέλο που αντιστοιχεί σε τιμές των παραμέτρων $\theta_1 = \dots = \theta_4 = 1$ να αντιστοιχεί στο ονομαστικό μοντέλο της γέφυρας που χρησιμοποιήθηκε στη φάση του σχεδιασμού.

Οι παραμετροποιημένες κατηγορίες μοντέλων αναθεωρούνται χρησιμοποιώντας τις επτά αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές της γέφυρας που παρουσιάζονται στον Πίνακα 9 (Παπαδημητρίου και άλλοι 2008). Η αναθεώρηση έγινε για την περίπτωση που οι μετρήσεις περιέχουν τις ιδιοσυχνότητες και τις συνιστώσες των ιδιομορφών στα σημεία μέτρησης. Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται οι βέλτιστες τιμές $\hat{\theta}$ των παραμέτρων για τις κατηγορίες μοντέλων II & III, χρησιμοποιώντας δεδομένα από περιβαλλοντικές διεγέρσεις.

Πίνακας 10. Βέλτιστες τιμές $\hat{\theta}$ των παραμέτρων θ , για τις κατηγορίες μοντέλων II & III

| Ιδιότητες | Κατηγορία μοντέλων II | Κατηγορία μοντέλων III |
|---------------------------|-----------------------|------------------------|
| E πυλώνων | 1.63 | 1.66 |
| E εφεδράνων (πυλώνες) | 9.07 | 7.57 |
| E εφεδράνων (ακρόβαθρα) | 9.07 | 9.27 |
| E κατάστρωμα | 1.57 | 1.58 |

Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 10, η τιμή της δυσκαμψίας των εφεδράνων εμφανίζεται 9.07 φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική τιμή για την κατηγορία μοντέλων II, 8 έως 9 φορές μεγαλύτερη για τους πυλώνες και τα ακρόβαθρα αντίστοιχα, για την κατηγορία μοντέλων III. Αυτό σημαίνει πως τα εφέδρανα στο ονομαστικό μοντέλο έχουν θεωρηθεί πολύ εύκαμπτα ενώ στην πραγματικότητα είναι περίπου 9 φορές πιο δύσκαμπτα (για την περίπτωση των ακρόβαθρων). Η τιμές της δυσκαμψίας των πυλώνων και του καταστρώματος εμφανίζονται και για τις δύο κατηγορίες μοντέλων, περίπου 1.6 φορές μεγαλύτερες από τις ονομαστικές τιμές. Να σημειωθεί ότι παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν από τις αναλύσεις της Γέφυρας του Πολύμυλου.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις εφαρμογές στις δύο γέφυρες της Εγνατίας Οδού συμπεραίνεται ότι η αναθεώρηση μοντέλων και η επιλογή των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων των μοντέλων, εξαρτάται καταρχάς από τη κατηγορία μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων που επιλέγεται να προσομοιώσει την κατασκευή. Επίσης η ομαδοποίηση των χαρακτηριστικών απόκρισης η οποία επιλέγεται για την αναθεώρηση μοντέλων παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς και τα σφάλματα μοντελοποίησης τα οποία εξαρτώνται από τις υποθέσεις που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη του αρχικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

Όσον αφορά τα αριθμητικά αποτελέσματα, οι αναγνωρισμένες τιμές των ιδιοσυχνοτήτων των δύο γεφυρών είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων που προκύπτουν από τον αρχικό σχεδιασμό των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων. Τα αναθεωρημένα μοντέλα με βάση τις αναγνωρισμένες ιδιοσυχνότητες, αποδεικνύουν ότι αυτές οι διαφορές οφείλονται στις πολύ υψηλότερες τιμές της δυσκαμψίας των ελαστομερών εφεδράνων σε χαμηλής έντασης ταλαντώσεις των γεφυρών. Αυτή η δυναμική συμπεριφορά είναι ίδια και για τις δύο γέφυρες και αποδίδεται στην υψηλά μη γραμμική υστερητική (πλαστική) συμπεριφορά των πολυστρωματικών ελαστομερών εφεδράνων. Ειδικότερα, το μέτρο διάτμησης των εφεδράνων για μικρές παραμορφώσεις κάτω από μικρής έντασης ταλαντώσεις σύμφωνα με τις μετρήσεις, είναι σημαντικά υψηλότερο από εκείνο που παρουσιάζονται για μεγάλες παραμορφώσεις σύμφωνα με τον ισχυρό σεισμό σχεδιασμού ο οποίος καθορίζεται από τον σεισμικό κώδικα.

Όσον αφορά την παρουσία προβλημάτων που εμφανίζονται στην αναθεώρηση μοντέλων, με την εφαρμογή στη γέφυρα Γ2 της Καβάλας, δείχθηκε ότι απαιτούνται εργαλεία καθολικής βελτιστοποίησης έτσι ώστε να επιτευχθεί αξιόπιστα η αναθεώρηση των μοντέλων και να αναγνωρισθεί το καθολικό βέλτιστο μοντέλο. Ένα παράδειγμα είναι οι κοντινές και επικαλυπτόμενες ιδιομορφές για τις οποίες εμφανίζονται πολλαπλές τοπικές καθολικές λύσεις στην αναζήτηση του βέλτιστου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας για την οικονομική στήριξη της ερευνητικής προσπάθειας μέσω του Γ' Κοινοτικού Πλαισίου στήριξης – Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητα (ερευνητικό πρόγραμμα ΑσΠροΓε ΕΠΑΝ– ΔΠ15)

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alvin K.F., (1997), "Finite Element Model Update via Bayesian Estimation and Minimization of Dynamic Residuals", *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 35 (5), pp. 879-886.
- Beck J.L., Au S.K., (2002), "Bayesian updating of structural models and reliability using Markov chain Monte Carlo simulation", *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)* 128, pp. 380-391.
- Beck J.L., and Katafygiotis L.S., (1998), "Updating Models and their Uncertainties. I: Bayesian Statistical Framework", *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 124(4), pp. 455-461.
- Berman A., (1989), "Non-unique Structural System Identification", *Proceedings of the 7th International Modal Analysis Conference*, pp. 355-359.
- Bohle K. and Fritzen C.P., (2003), "Results Obtained by Minimizing Natural Frequencies and MAC-value Errors of a Plate Model", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(1), pp. 55-64.
- Capecchi D., Vestroni F., (1993), "Identification of finite-element models in structural dynamics:", *Engineering Structures*, 15(1), pp. 21-30.
- Chaudhary M.T.A., Abe M., Fujino Y., (2002), "Role of structural details in altering the expected seismic response of base-isolated bridges", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 16(2-3), pp: 413-428.
- Christodoulou K. and Papadimitriou C., (2007), "Structural Identification Based on Optimally Weighted Modal Residuals", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21, pp. 4-23.
- Christodoulou K., (2006), "Methodology for Structural Identification and Damage Detection", PhD Thesis Report SDL-06-01, *Department of Mechanical and Industrial Engineering*, University of Thessaly.
- COMSOL AB., (2005), *COMSOL Multiphysics User's Guide*. [<http://www.comsol.com/>].
- Doebling S.W., Farrar C.R., Prim, M.B. and Shevitz D.W., (1996), "A Summary Review of Vibration-based Damage Identification Methods", *The Shock and Vibration Digest*, 30(2), pp. 91-105.
- Farhat C. and Hemez P.M., (1993), "Updating Finite Element Dynamics Models Using an Element-by-Element Sensitivity Methodology", *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 31(9), pp. 1702-1711.
- Fritzen C.P., Jennewein D. and Kiefer T., (1998), "Damage detection based on model updating methods", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 12(1), pp. 163-186.
- Hjelmstad K.D. and Shin S., (1996), "Crack Identification in a Cantilever Beam from Modal Response", *Journal of Sound and Vibration*, 198(5), pp: 527-545.
- Καρακώστας Χ., Παπαδημητρίου Κ., Λεκίδης Β., Πανέτσος Π., Ντότσιος Ε., Σαλονικιός Θ., Μακάριος Τ., Σους Ι., (2008), "Αποτίμηση δυναμικών χαρακτηριστικών γεφυρών της Εγνατίας Οδού με βάση την απόκριση τους σε δυναμικές διεγέρσεις", *3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας*, Αθήνα.
- Katafygiotis L.S. and Beck J.L., (1998), "Updating Models and Their Uncertainties - Model Identifiability", *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 124(4), pp. 463-467.
- Katafygiotis L.S., Lam H.F. and Papadimitriou C., (2000), "Treatment of Unidentifiability in Structural Model Updating", *Advances in Structural Engineering - An International Journal*, 3(1), pp. 19-39.
- Lam H.F., Katafygiotis L.S., Mickleborough N.C., (2004), "Application of a statistical model updating approach on phase I of the IASC-ASCE structural health monitoring benchmark study J", *Engineering Mechanics (ASCE)*, 130 (1), pp. 34-48 JAN.
- Link M., (1998), "Updating analytical models by using local and global parameters and relaxed optimization requirements", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 12(1), pp. 7-22.

- Mottershead J.E. and Friswell M.I., (1993) "Model Updating in Structural Dynamics: A Survey", *Journal of Sound and Vibration*, 167(2), pp. 347-375.
- Ntotsios E., Karakostas Ch., Lekidis V., Panetsos P., Nikolaou I. and Papadimitriou C., (2008), "Structural Identification of Egnatia Odos Bridges based on Ambient and Earthquake Induced Vibrations." *Bulletin of Earthquake Engineering*, submitted for publication.
- Papadimitriou C., Karamanos S.A., Christodoulou K., Pavlidou M., Lekidis V.A. and Karakostas C.Z., (2002), "Model Updating of Bridges Using Vibration Measurements," *12th European Conference on Earthquake Engineering*, England, 485.
- Παπαδημητρίου Κ., Ντότσιος Ε., Νικολάου Ι., (2008), "Αναγνώριση Μοντέλων Κατασκευών βάσει Μετρήσεων των Ταλαντώσεων σε Περιβαλλοντικές και Σεισμικές Διεγέρσεις", 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Αθήνα.
- Sohn H. and Law K.H., (1997), "Bayesian Probabilistic Approach for Structural Damage Detection", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, pp. 1259-1281.
- Stewart J.P., Conte J.P., Aiken I.D., (1999), "Observed behavior of seismically isolated buildings", *Journal of Structural Engineering*, 125, pp: 955-964.
- Teughels A., De Roeck G., (2005), "Damage detection and parameter identification by finite element model updating", *Archives of Computational Methods in Engineering*, 12(2), pp. 123-164.
- Udwadia F.E. and Sharma D.K., (1978), "Some Uniqueness Results Related to Building Structural Identification", *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 34(1), pp. 104–151.
- Vanik M.W., Beck J.L. and Au S.K., (2000), "Bayesian Probabilistic Approach to Structural Health Monitoring", *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 126(7), pp. 738-745.
- Vestroni F., Capecchi D., (2000), "Damage detection in beam structures based on frequency measurements", *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 126(7), pp. 761-768.
- Yuen K.V., Beck J.L., Katafygiotis L.S., (2006) "Unified probabilistic approach for model updating and damage detection", *Journal of Applied Mechanics – Transactions of the ASME*, 73(4), pp. 555-564.