

ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΚΟΧΛΙΩΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ LAMB.

Κ. Π. Προβιδάκης^a, Κ. Δ. Στεφανάκη^b

^a Καθηγητής, Δ/ντής Α.ΜΕ.Λ.

^b Υποψ. Διδ., MSc Πολιτικός Μηχανικός
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής (Α.ΜΕ.Λ)
Πολυτεχνείο Κρήτης
Χανιά, Ελλάδα
e-mail: cpprov@mred.tuc.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρακολούθηση των κρίσιμων μεταλλικών κοχλιωτών συνδέσεων σε πραγματικό χρόνο, έχει σαν στόχο τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας των μεταλλικών κατασκευών. Μια πλήρως προεντεταμένη κοχλιωτή σύνδεση μπορεί να μεταφέρει με ασφάλεια μεγαλύτερα φορτία απ' ό,τι μια χαλαρή και έτσι όλες οι τεχνικές ανίχνευσης απωλειών δύναμης προέντασης σε πραγματικό χρόνο είναι μεγάλης σημασίας. Σε αυτή την εργασία προτείνεται η χρήση έξυπνων πιεζοηλεκτρικών, κεραμικών (PZT) υλικών, ως αισθητήρες / διεγέρτες, ενώ για να διασφαλιστεί η υψηλή ευαισθησία στην ανίχνευση της απώλειας προέντασης, σε πρώιμο στάδιο, συνδυάζεται μία τεχνική χρονικής αντιστροφής των κυμάτων Lamb μικρού εύρους ως διαγνωστικό εργαλείο της βλάβης. Διαφορετικές συνθήκες επιβλήθηκαν για να προσομοιώσουν την απώλεια φορτίου σε πραγματικό χρόνο και να αποδείξουν την αποδοτικότητα της παραπάνω μεθόδου στην ανίχνευση και παρακολούθηση της ακεραιότητας κρίσιμων μεταλλικών συνδέσεων, μέσω μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κοχλιωτές συνδέσεις χρησιμοποιούνται επί το πλείστον στις μεταλλικές κατασκευές για να μεταφέρουν φορτίο μεταξύ των δομικών στοιχείων. Η περίπλοκη συμπεριφορά των κοχλιωτών συνδέσεων επηρεάζει σημαντικά τα δυναμικά χαρακτηριστικά κάθε δομικού συστήματος, όπως οι φυσικές συχνότητες και την μη-γραμμική απόκριση στις εξωτερικές διεγέρσεις. Οι κοχλιωτές συνδέσεις κατά κανόνα αποτελούν κρίσιμα σημεία των κατασκευών που αυξάνουν τον κίνδυνο δημιουργίας βλαβών και συχνά είναι δύσκολο να ελεγχθούν λόγω της γεωμετρίας τους και/ ή των φορτίων της κατασκευής. Συγκεκριμένα, οι κοχλιωτές συνδέσεις είναι επιρρεπείς στη χαλάρωση, την αύξηση των εφελκυστικών και διατμητικών τάσεων, το διαχωρισμό λόγω δόνησης, την αστοχία λόγω διάβρωσης και

κόπωσης. Παρά αυτές τις κοινές περιβαλλοντικές και λειτουργικές επιρροές, δεν έχει προταθεί μέχρι πρότινος στη διεθνή βιβλιογραφία κάποιο αποτελεσματικό εργαλείο για την αυτοματοποίηση της παρακολούθησης του φορτίου προέντασης των κοχλιωτών συνδέσεων. Έτσι, η διατήρηση της ακεραιότητας των κοχλιωτών συνδέσεων έχει ήδη αναγνωριστεί ως επιτακτική και ως μεγάλης σημασίας. Η ικανότητα να παρακολουθείται η συμπεριφορά της σύνδεσης για όλη τη διάρκεια ζωής της θα ήταν χρήσιμη για την επιμήκυνση της διάρκειας λειτουργίας στο σύνολο της κατασκευής.

Σε αυτή την εργασία, παρουσιάζεται μια ενεργή μέθοδος παρακολούθησης, βασισμένη στη διάδοση των κυμάτων Lamb. Η ιδέα είναι ότι μια κατάσταση χαλάρωσης του κοχλία που διερευνάται από ένα ελαστικό κύμα διαφοροποιεί το σχήμα και το πλάτος της καταγραφής του κύματος σε σχέση με την καταγραφή σε μια πλήρως προεντεταμένη σύνθεση. Αυτές οι αλλαγές που προκύπτουν από το κύμα διέγερσης δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για την αλλαγή στη χαλάρωση που συναντάται σε κάθε κοχλιωτή σύνδεση. Εντούτοις, η συμπεριφορά τους δεν είναι ακόμη απολύτως κατανοητή καθότι συχνά είναι μη-γραμμική κυρίως λόγω της παρουσίας απόσβεσης ως αποτέλεσμα της τριβής μεταξύ των δομικών στοιχείων που αποτελούν τη σύνδεση. Λεπτομερείς βιβλιογραφικές έρευνες αυτού του αντικείμενου έχουν παρουσιαστεί από τους Esteban [3] και Gaul και Nitsche [4]. Η ιδέα της αντιστροφής του χρόνου χωρίς αλλοιώσεις μελετήθηκε σε ένα αριθμό κατασκευών χρησιμοποιώντας τεχνικές που συμπεριλαμβάνουν την υπερηχητική απεικόνιση, υποβρύχια ακουστική απεικόνιση, μη καταστρεπτικές δοκιμές και ασύρματες επικοινωνίες [5]. Σύμφωνα με την εργασία των Fink και συνεργατών [6], από τη στιγμή που οι εξισώσεις που διέπουν την κίνηση των κυμάτων σε μια κατασκευή χωρίς απώλειες και ανεξάρτητη από το χρόνο περιέχουν μόνο δεύτερης τάξης παραγώγους σε σχέση με το χρόνο, για κάθε κύμα που εκπέμπεται από μία πηγή, και που πιθανόν ανακλάται, διαθλάται και σκεδάζεται από εμπόδια, υπάρχει μία ομάδα κυμάτων που διαδίδεται επακριβώς σε όλες τις περίπλοκες πορείες και συγκλίνει στην αρχική πηγή, σαν ο χρόνος να πήγαινε πίσω. Ο τελικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι να χρησιμοποιηθεί η χρονική αντιστρεπτικότητα των κυμάτων Lamb για την ανίχνευση της χαλάρωσης των κοχλιών, πρόβλημα για το οποίο ελάχιστες λύσεις στην διεθνή βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί.

3. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΧΑΛΑΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΚΟΧΛΙΩΝ

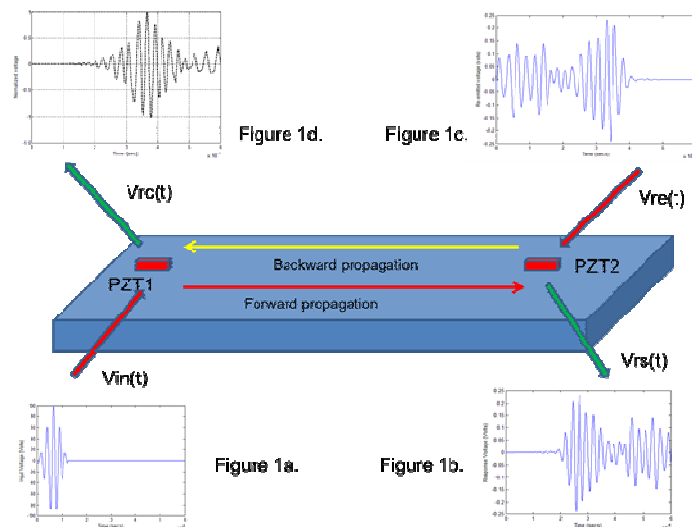
Για την εισαγωγή της τεχνικής ανίχνευσης της χαλάρωσης των κοχλιών με αντιστροφή του χρόνου, δύο PZT αισθητήρες εγκαθίστανται και χρησιμοποιούνται σε διάταξη pitch-catch (αυτή είναι όταν ένα σήμα ενεργοποιεί ένα αισθητήρα και καταγράφεται από τον άλλο). Από τη στιγμή που κάθε αισθητήρας λειτουργεί και ως αισθητήρας και ως ενεργοποιητής, πρακτικά πρέπει να χρησιμοποιούνται πιεζοηλεκτρικοί (PZT) αισθητήρες. Σύμφωνα με την τεχνική αντιστροφής του χρόνου μεταξύ δύο PZT αισθητήρων, ένα σήμα εισαγωγής μπορεί να ανακατασκευαστεί στο αρχικό PZT διεγέρτη ακολουθώντας τα επόμενα βήματα, όπως φαίνονται σχηματικά στην Εικόνα 1:

1. Εφαρμογή συμμετρικού παλμικού κύματος Lamb με χρήση ηλεκτρικής τάσης $V_{in}(t)$ σε ένα πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα PZT1 (Εικόνα 1α).
2. Μέτρηση της αντίστοιχης τάσης απόκρισης $V_{rs}(t)$ στον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα PZT2 (Εικόνα 1β).
3. Χρονική αντιστροφή της μέτρησης τάσης απόκρισης και επανεισαγωγή της αντεστραμμένης στο χρόνο τάσης $V_{re}(t)$ στο πιεζοηλεκτρικό PZT2 (Εικόνα 1γ).

4. Μέτρηση της τάσης απόκρισης στο αρχικό σημείο εισαγωγής PZT1, που ονομάζεται και ανακατασκευασμένη τάση εισαγωγής $V_{rc}(t)$ (Εικόνα 1δ).

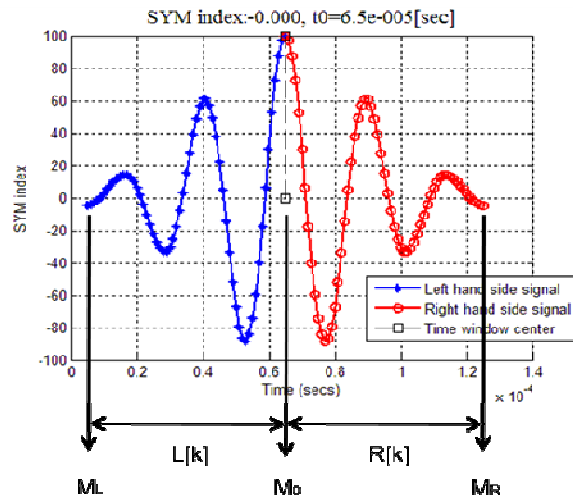
Παρόλο που το πλάτος της ανακατασκευασμένης τάσης $V_{rc}(t)$ είναι μικρότερο από αυτό της αρχικής τάσης εισαγωγής $V_{in}(t)$ λόγω απόσβεσης, και παρόλο που καταγράφονται στην χρονο-ιστορία μεταβολής της $V_{rc}(t)$ αρκετές παράπλευρες περιοχές που οφείλονται στη σκέδαση των κυμάτων Λ_{mb} , το σχήμα του κύριου μέρους της ανακατασκευασμένης τάσης $V_{rc}(t)$, όπου περιέχεται η περισσότερη ενέργεια του κύματος Λ_{mb} , παραμένει πανομοιότυπο με την αρχική τάση εισαγωγής $V_{in}(t)$. Η ανακατασκευασμένη τάση $V_{rc}(t)$ κανονικοποιείται έτσι ώστε το σχήμα του κύριου μέρους της ανακατασκευασμένης τάσης να μπορεί να συγκριθεί ποιοτικά με την αρχική τάση εισαγωγής $V_{in}(t)$ ως προς τη συμμετρία του σήματος.

Επομένως, η κατάσταση χαλάρωσης του κοχλία μπορεί να αναγνωριστεί από την απόκλιση της ανακατασκευασμένης τάσης στο PZT1 από το συμμετρικό σχήμα της αρχικής τάσης εισαγωγής στο ίδιο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο PZT1 (Εικόνα 1δ).



Εικ. 1: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας αντιστροφής του χρόνου

Για την ποσοτική εκτίμηση της απόκλισης του κύριου τύπου της ανακατασκευασμένης τάσης από τις συνθήκες συμμετρίας της αρχικής τάσης εισαγωγής χρησιμοποιείται ένας δείκτης, ο δείκτης SYM [7], βασιζόμενος στην απαιτούμενη συμμετρία της ανακατασκευασμένης τάσης όπως αυτή διαμορφώνεται σε κάθε συχνότητα διέγερσης όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση (1), όπου τα $L[k]$ και $R[k]$ είναι οι πλευρικές ζώνες (δεξιά και αριστερά, αντίστοιχα) ως προς το κύριο μέρος του ανακατασκευασμένου παλμικού κύματος, το οποίο τοποθετείται στο κέντρο του χρονικού διαστήματος διερεύνησης της κατάστασης συμμετρίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.



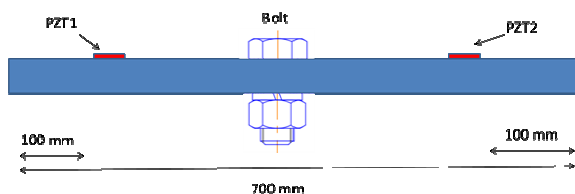
Εικ. 2: Καθορισμός του δείκτη SYM

$$SYM = 1 - \sqrt{\left\{ \sum_{k=M_L}^{M_0} L[k] r[2M_0 - k] \right\}^2 / \left\{ \sum_{k=M_L}^{M_0} (L[k])^2 \sum_{k=M_0}^{M_R} (R[k])^2 \right\}}$$

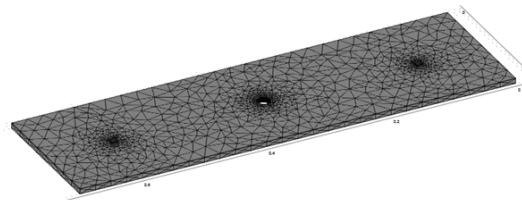
4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ

Η προτεινόμενη τεχνική ανίχνευσης της χαλάρωσης των κοχλιών επιτυγχάνεται μέσω αριθμητικής προσομοίωσης σε μοντέλο μεταλλικής πλάκας $700 \times 200 \times 8$ mm με ένα ζευγάρι PZT αισθητήρων επικολλημένων στην επιφάνεια (PZT1 και PZT2) όπως φαίνεται στο φυσικό μοντέλο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3α. Οι μηχανικές παράμετροι των δύο PZTs προέκυψαν από τα χαρακτηριστικά του τύπου PZT-5H των PZT τεμαχίων που είναι διαθέσιμος στην αγορά ως PIC151 από την εταιρία PI Ceramic GmbH [8]. Οι διαστάσεις κάθε τεμαχίου PZT είναι $10 \times 10 \times 0,1$ mm. Τα δύο PZTs τοποθετήθηκαν σε απόσταση 500 mm το ένα από το άλλο και σε απόσταση 100 mm από τα άκρα. Ένα 5-κυκλο παλμικό κύμα χρησιμοποιείται για να διεγείρει το PZT1 ως το αρχικό σήμα εισαγωγής για τη δημιουργία των κυμάτων Lamb, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1α.

Δύο περιπτώσεις αναλύονται: Η πρώτη είναι σε συνθήκες πρακτικά κοχλία με φορτίο σχεδόν πλήρους προέντασης που χαρακτηρίζεται από μια υψηλή ποσοστιαία τιμή της ολικής ροπής του κοχλία, της τάξης του 80% της έντασης που μπορεί να δεχτεί ο κοχλιάς ενώ η δεύτερη αναφέρεται σε κατάσταση ολικής αφαίρεσης της ροπής του κοχλία (κατάσταση κοχλία χωρίς καθόλου προένταση).



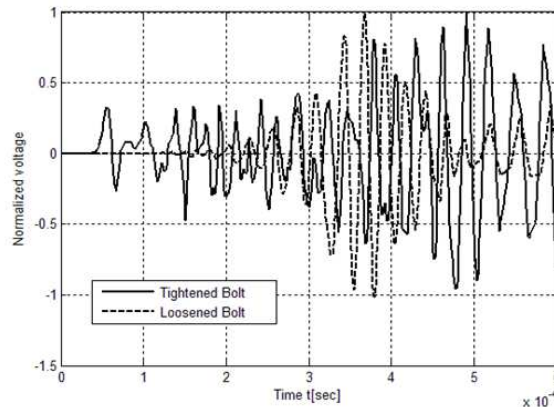
Εικ. 3α: Φυσικό μοντέλο του προβλήματος



Εικ. 3β: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

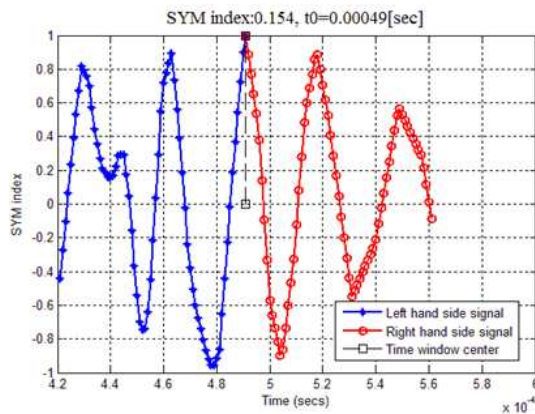
Η αριθμητική ανάλυση, εδώ, διεξάγεται από το λογισμικό COMSOL [9] που έχει τη δυνατότητα να αναλύει πολυφασικές καταστάσεις αλληλεπίδρασης διαφορετικών υλικών. Ακολουθώντας τη διαδικασία αντιστροφής του χρόνου, που παρουσιάζεται παραπάνω, τα λαμβανόμενα σήματα στο PZT2 αντιστρέφονται χρονικά και επανεισάγονται στο PZT2. Τελικά, μετά την διάδοση προς τα πίσω των επαναεκπεμπόμενων σημάτων από τις

περιπτώσεις του 80% προεντεταμένου κοχλία και του πλήρως προεντεταμένου κοχλία, η χρονοιστορία της ανακατασκευασμένης τάσης στο πιεζοηλεκτρικό PZT1 μετράται και συγκρίνεται με την αρχικά εισαγόμενη τάση παλμικού κύματος όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. Σημειώνεται ότι παρόλο που έγινε αποσυμπίεση του κύματος στην πορεία των κυμάτων μέσω του αισθητήρα PZT1, το επανασυμπιεζόμενο κύμα δεν είναι το ίδιο με το αρχικό παλμικό κύμα και αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στην επίδραση της συχνότητας στη συγκεκριμένη τεχνική της αντιστροφής στο χρόνο.

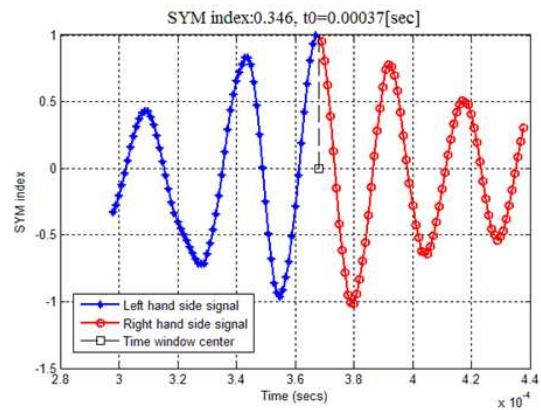


Εικ. 4: Ανακατασκευασμένα σήματα σε περιπτώσεις κοχλιών 80% και πλήρως προεντεταμένους.

Ο δείκτης SYM υπολογισμένος από τη χρήση της εξίσωσης (1) προκύπτει να είναι ίσος με 0,154 για την ανακατασκευασμένη τάση του 80% προεντεταμένου κοχλία όπως φαίνεται στην εικόνα 5α, ενώ για την περίπτωση της πλήρους αφαίρεσης της δύναμης προέντασης του κοχλία ο δείκτης SYM είναι 0,346 όπως φαίνεται στην εικόνα 5β. Τα αποτελέσματα αυτά επικυρώνουν την επίδραση της επιλεγμένης τιμής ροπής του κοχλία στο ανακατασκευασμένο σήμα.



Εικ. 5α: Δείκτης SYM για 80% προένταση



Εικ. 5β: Δείκτης SYM για χαλαρό κοχλία

Από τη σύγκριση των δύο τιμών των δεικτών SYM προκύπτει το σημαντικό συμπέρασμα ότι χρησιμοποιώντας ένα απλό δείκτη έχει τη δυνατότητα να κάνει συγκρίσεις των ανακατασκευασμένων σημάτων χωρίς την εισαγωγή συμβατικών τεχνικών αναγνώρισης προτύπων.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται και διερευνάται με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων μια πολλά υποσχόμενη τεχνική ανίχνευσης απωλειών φορτίου προέντασης κοχλιών μεταλλικών συνδέσεων, βασισμένη στη διαδικασία αντιστροφής του χρόνου με κύματα Lamb. Προτάθηκαν και διερευνήθηκαν δύο PZT αισθητήρες επικολλημένοι στην επιφάνεια μιας μεταλλικής πλάκας εκατέρωθεν του κοχλία. Στο προσομοιωμένο μοντέλο πλάκας η χρονοιστορία της ανακατασκευασμένης τάσης διαφέρει σημαντικά από την αρχική τάση εισαγωγής σε ένα παλμικό κύμα. Η απώλεια ροπής του κοχλία ανιχνεύθηκε επιτυχώς χρησιμοποιώντας το δείκτη SYM. Περαιτέρω, προσπάθειες είναι σε εξέλιξη για τη βελτιστοποίηση του προτεινόμενου συστήματος παρακολούθησης με PZT βελτιστοποιώντας την τοποθέτηση των αισθητήρων PZT ή εξετάζοντας διαφορετικού εύρους συχνότητα για την παρεχόμενη συχνότητα διέγερσης του κύματος εισαγωγής.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] S.S. Kessler, S.M. Spearing and C. Soutis, "Damage detection in Composite materials using Lamb wave methods", *Smart Materials and Structures*, 11, 2002, pp. 269-278.
- [2] N. Bourasseau, E. Moulin, C. Delebare and P. Bonniaou, "Radom health monitoring with Lamb waves: experimental approach", *NDT&E International*, 33, 393-400, 2000.
- [3] J. Esteban, "Modeling of the Sensing Region of a Piezoelectric ctuator/Sensor," Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 1996.
- [4] L. Gaul and R. Nitsche, "The Role of Friction in Mechanical Joints", *Applied Mechanics Reviews*, 54 (2), 93-106, 2001.
- [5] H.W. Park, H. Sohn, K.H. Low and C.R. Farrar, "Time reversal active sensing for health monitoring of a composite plate", *J. Sound Vib.*, 302, 50-66, 2007.
- [6] M. Fink, G. Montaldo, M. Tanter, "Time-reversal acoustics in biomedical engineering", *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, 5, 465-497, 2003.
- [7] S.D. Kim, C.W. In, K.E. Cronin, H. Sohn, and K. Harries, "A reference-free NDT technique for debonding detection in CFRP strengthened RC structures", *J. Struct. Eng.*, 133, 1080-1091, 2007.
- [8] PI Ceramic GmbH, www.piceramic.com
- [9] COMSOL Multiphysics, www.comsol.com

Detection of bolt load loss in metallic bolted joints using a time reversal imaging technique

C. P. Providakis^a, K. D. Stefanaki^b

^a Professor, Administrator of A.ME.L.

^b Phd. Cand., MSc Civil Engineer

Applied Mechanics Laboratory

Department of Applied Sciences

Technical University of Crete

GR-73100 Chania, Greece

Email: cpprov@mred.tuc.gr

Abstract

Real-time condition monitoring of critical metallic joints will improve the reliability and safety of many structures where bolted joints are used. A fully tightened bolted joint can support much more load cycles than an untightened one and thus any real-time method of detecting loss of bolt force is of great importance. In this paper, a time reversal Lamb wave technique is proposed which uses smart piezoelectric ceramic (PZT) materials as sensors/actuators while in order to ensure high sensitivity to incipient bolt loss procedure, it combines a narrowband Lamb wave imaging method to serve as a diagnostic tool of the structural metallic component. Moreover, this paper numerically investigates the performance of the Lamb wave time reversal imaging technique for bolt load loss detection using finite element models of critical joints in metallic structural components. Different conditions were imposed to simulate real-time bolt load loss and prove the efficiency of the present time reversal imaging method in tracking and monitoring the integrity of critical metallic bolted joints.