

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ



ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΙΟΡΘΩΣΗ ΒΛΑΒΗΣ
ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ
ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ “ΕΥΦΥΩΝ ΥΛΙΚΩΝ”

ΜΑΡΙΑ - ΣΤΥΛΙΑΝΗ ΒΟΥΤΕΤΑΚΗ
ΔΙΠΛ. ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ, MSc, Δ.Π.Θ.

Επιβλέπων: Καθηγητής **Κωνσταντίνος ΠΡΟΒΙΔΑΚΗΣ**

ΧΑΝΙΑ, 2009

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ



ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΙΟΡΘΩΣΗ ΒΛΑΒΗΣ
ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ
ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ “ΕΥΦΥΩΝ ΥΛΙΚΩΝ”

ΜΑΡΙΑ - ΣΤΥΛΙΑΝΗ ΒΟΥΤΕΤΑΚΗ
ΔΙΠΛ. ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ, MSc, Δ.Π.Θ.

Επιβλέπων: Καθηγητής **Κωνσταντίνος ΠΡΟΒΙΔΑΚΗΣ**

ΧΑΝΙΑ, 2009

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή της διδακτορικής διατριβής:

Προβιδάκης Κωνσταντίνος, Καθηγητής Π.Κ. (Επιβλέπων)

Σωτηρόπουλος Δημήτριος, Καθηγητής Π.Κ. (Μέλος Τριμελούς Επιτροπής)

Τσομπανάκης Ιωάννης, Επ. Καθηγητής Π.Κ. (Μέλος Τριμελούς Επιτροπής)

Σταυρουλάκη Μαρία, Λέκτορας Π.Κ.

Θεοτόκογλου Ευστάθιος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Λιώλιος Αστέριος, Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Καραγιάννης Χρήστος, Καθηγητής Δ.Π.Θ.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ανάπτυξη μεθοδολογιών για τον εντοπισμό βλαβών σε υλικά δομικών στοιχείων και κατασκευών, όπως το σκυρόδεμα και η επιδιόρθωσή τους αποτελεί βασικό ενδιαφέρον στον τομέα Εφαρμοσμένης Μηχανικής και ειδικότερα στην επιστήμη του Πολιτικού Μηχανικού. Σε χώρες με έντονη σεισμική επικινδυνότητα, όπως η Ελλάδα καθώς και στην ιδιαίτερα σεισμογενή περιοχή της Κρήτης, η δυνατότητα ελέγχου της δομικής ακεραιότητας των υφιστάμενων κατασκευών και η έγκαιρη προειδοποίηση τυχόν βλαβών σε αυτές αποτελεί έρευνα με μεγάλη σημασία. Η εμφάνιση και εξέλιξη των “ευφών” υλικών καθώς και η χρήση τους στον τομέα των κατασκευών, ανοίγει ένα νέο πεδίο έρευνας που μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση των μεθόδων ελέγχου των υλικών δόμησης και κατ’ επέκταση των κατασκευών. Συγχρόνως, λόγω των ήδη καταπονημένων κατασκευών από τη γήρανση και τη συνεχή σεισμική δραστηριότητα, σημαντικό επίτευγμα των Μηχανικών αποτελεί η επισκευή των βλαβών τους και πιθανώς η περαιτέρω ενίσχυσή τους με στόχο την παράταση της διάρκειας λειτουργίας τους και κυρίως τη διασφάλιση της ανθρώπινης ζωής.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης την περίοδο 2004-2009. Ο βασικός στόχος της είναι να αναπτύξει νέες μεθόδους για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας στοιχείων από σκυρόδεμα και κατ’ επέκταση κατασκευών, οι οποίες βασίζονται στα “ευφύη” υλικά. Ακόμα, αναπτύσσεται ειδική μεθοδολογία που επίσης βασίζεται στη χρήση “ευφών” υλικών και έχει ως στόχο αφ’ ενός τον εντοπισμό και την ταυτοποίηση βλάβης “εν τη γενέσει” της σε δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα και αφ’ ετέρου την επιδιόρθωσή της.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όσους με βοήθησαν και στήριξαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής και είχα την τύχη να γνωρίσω και να συνεργαστώ μαζί τους:

- Κατ’ αρχάς, τον επιβλέποντα της διδακτορικής διατριβής κ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την επιστημονική του στήριξη, τη συστηματική του καθοδήγηση και την αμέριστη συμπαράστασή του καθ’ όλη τη διάρκεια εκπόνησης και συγγραφής της παρούσας εργασίας. Η προσωπική του συμβολή ήταν καθοριστική για τη διεκπεραίωση της εν λόγω

διατριβής καθώς μέσα από τη συνεργασία μας επιτεύχθηκε, πέραν της ανάπτυξης της ερευνητικής μου σκέψης, μία νέα φιλοσοφία για την ολοκλήρωσή μου ως ακαδημαϊκός άνθρωπος και επιστήμονας. Θα ήθελα ακόμα να επισημάνω ότι λόγω του θετικού και αισιόδοξου χαρακτήρα του, ενθαρρύνθηκε επιτυχώς κάθε μας προσπάθεια, η οποία με επίμονη και επίπονη εργασία οδήγησε στην επίτευξη των ερευνητικών μας στόχων.

- Τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής:
 - κ. Δημήτριο Σωτηρόπουλο, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την υποστήριξη και τις χρήσιμες επιστημονικές συμβουλές που μου προσέφερε κατά την διάρκεια εκπόνησης της διατριβής, και
 - κ. Ιωάννη Τσομπανάκη, Επ. Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τις πολύτιμες υποδείξεις του για τη βελτίωση της διατριβής καθώς και για την ηθική του συμπαράσταση.
- Την κα. Μαρία Σταυρουλάκη, Λέκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης και μέλος της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, για την εποικοδομητική συνεργασία μας στα πλαίσια σχετικού ερευνητικού προγράμματος και για τις πολύτιμες επιστημονικές συμβουλές της καθ' όλη την πορεία της διατριβής.
- Τους Καθηγητές και μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:
 - κ. Ευστάθιο Θεοτόκογλου, Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου,
 - κ. Αστέριο Λιώλιο, Καθηγητή του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, και
 - κ. Χρήστο Καραγιάννη, Καθηγητή του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης,για την υποστήριξη της εργασίας και τις υποδείξεις τους. Θα ήθελα επί πλέον να ευχαριστήσω τους Καθηγητές μου από το ΔΠΘ, που με δίδαξαν στα πρώτα επιστημονικά μου βήματα στα πλαίσια των προπτυχιακών και μεταπτυχιακών μου σπουδών, για τη συνεχή τους συμπαράσταση και ιδιαιτέρως τον κ. Καραγιάννη με τον οποίο εκπόνησα τη διπλωματική μου εργασία.
- Τον κ. Βαγγέλη Λιαράκο, υποψ. διδάκτορα στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τις συζητήσεις και τις εύστοχες παρατηρήσεις του σε επιστημονικά θέματα σχετικά με την παρουσίαση της διατριβής.

- Όπως επίσης και όλα τα μέλη του Εργαστηρίου που μέσα από το θετικό και δημιουργικό κλίμα που επικρατεί συνέβαλαν με τον τρόπο τους στην ολοκλήρωση της προσπάθειάς μου.
- Τέλος, την οικογένειά μου για τη συνεχή και αμέριστη στήριξή της σε όλα τα επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, και ιδιαίτερα τον σύζυγο μου κ. Κωνσταντίνο Χαλιορή, Επ. Καθηγητή του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, τόσο για τη βοήθειά του σε επιστημονικά θέματα, όσο και για την ενθάρρυνση και εμπύχωση που μου προσέφερε, πάντα με θετικό πνεύμα.

Μαριστελλά Ε. Βουτετάκη

Χανιά, 2009

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

Στα πλαίσια εκπόνησης της διατριβής, έγινε η δημοσίευση και η ανακοίνωση των παρακάτω ερευνητικών εργασιών σε Διεθνή επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια, αντίστοιχα:

Εργασίες σε Διεθνή Περιοδικά:

1. C.P. Providakis, D.-P.N. Kontoni, M.E. Voutetaki, (2007), “Development of an electromechanical admittance approach for application in the vibration control of intelligent structures”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 2, pp. 275-281.
2. C.P. Providakis, M.E. Voutetaki, (2007), “Electromechanical admittance – based damage identification using Box-Behnken design of experiments”, *Structural Durability and Health Monitoring*, Vol. 3, No. 4, pp. 211-227.
3. C.P. Providakis, D.-P.N. Kontoni, M.E. Voutetaki, M.E. Stavroulaki, (2008), “Comparisons of smart damping treatments based on FEM modeling of electromechanical impedance”, *Smart Structures and Systems*, Vol. 4, No. 1, pp. 35-46.

Εργασίες σε Διεθνή Συνέδρια:

1. C.P. Providakis, M.E. Voutetaki, D.-P.N. Kontoni, M.E. Stauroulaki, (2005), “A comparison of active constrained layer damping treatments using FEM modeling of electromechanical impedance”, *Advances in Computational & Experimental Engineering and Sciences - Proceedings of the ‘International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences’ (ICCES’05)*, 1-6 Dec. 2005, Chennai, India, pp. 2094-2099.
2. C.P. Providakis, M.E. Voutetaki, (2005), “Stability and integrity of thermal actuators using local and global density”, *Proceedings of the “1st International Conference on Experiments/Process/System Modelling/Simulation/Optimization (1st IC-EpsMsO)”*, 6-9 July, 2005, Athens, Greece.
3. C.P. Providakis, M.E. Voutetaki, M.E. Stauroulaki, D.-P.N. Kontoni, (2005), “FEM modeling of electromechanical impedance for the analysis of smart damping treatments”, *Proceedings of the “International Conference on Industrial Electronics, Technology & Automation 2005 (IETA 05) - International Joint Conferences on Computer, Information, and Systems Sciences, and Engineering 2005 (CISSE 2005)”*, 12-18 Dec. 2005, and also in hardcover *Proceedings “Advances in Computer, Information, and Systems Sciences, and Engineering – Proceedings of IETA 2005, TeNe 2005 and EIAE 2005”*, 2006, Springer, pp. 129-133.
4. C.P. Providakis, D.-P.N. Kontoni, M.E. Voutetaki, (2006), “An electromechanical admittance approach for vibration damping control using PZT actuators”, *Proceedings of the “2nd International Conference ‘From Scientific Computing to Computational Engineering’ (2nd IC-SCCE)”*, 5-8 July 2006, Athens, Greece.
5. C.P. Providakis, D.-P.N. Kontoni, M.E. Voutetaki, (2006), “An electro-mechanical impedance approach for vibration control using multiple piezoelectric actuators and sensors”, *Proceedings of the “Eighth International Conference on Computational Structures Technology (CST 2006)”*, 12-15 September 2006, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, Paper Number: 280.
6. C.P. Providakis, M.E. Voutetaki, (2006), “Seismic damage detection using smart piezo-transducers and electromechanical impedance signatures”, *Proceedings of the “First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology 1st ECEES”*, 3-8 September 2006, Geneva, Switzerland, Paper Number: 307.

7. C.P. Providakis, M.E. Voutetaki, (2006), "Damage detection using electromechanical impedance signatures and statistical outliers", *Proceedings of the "2nd WSEAS Int. Conference on Applied and Theoretical Mechanics"*, November 20-22, 2006, Venice, Italy, pp. 313-318.
8. C.P. Providakis, D.-P.N. Kontoni, M.E. Voutetaki, (2007), "Vibration control using smart piezoelectric materials and response surface metamodels", *Proceedings of the "Eleventh International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing (CC2007)"*, 18-21 September 2007, Malta, Paper Number: 128.
9. C.P. Providakis, M.E. Voutetaki, (2007), "Damage prediction using response surface metamodels and electromechanical admittance signatures", *Poster in "4th International Conference on NDT of the Hellenic Society for NDT (HSNT)"*, 11-14 October 2007, Chania, Crete, Greece.
10. C.P. Providakis, M.E. Voutetaki, (2008), "Electro-mechanical admittance-based damage identification using Box-Behnken design of experiments", *Proceedings of the "15th International Conference on Computational and Experimental Engineering and Science"*, 16-22 Mar 2008, Honolulu, Hawaii, USA.
11. C.P. Providakis, M.E. Voutetaki, (2009), "PZT control of edge debonding in dynamically loaded concrete structures strengthened with composite materials", *Proceedings of the "2nd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering"*, 22-24 June 2009, Rhodes, Greece, Paper Number: 185.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αναπτύσσεται μία νέα μεθοδολογία για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας δομικών στοιχείων και κατ' επέκταση κατασκευών. Η μεθοδολογία βασίζεται στη χρήση και εφαρμογή νέων υλικών τεχνολογίας αιχμής, όπως τα ευφυή υλικά και ειδικότερα τα πιεζοηλεκτρικά υλικά. Οι ιδιότητες και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των πιεζοηλεκτρικών υλικών (lead zirconate titanate PZT), σε συνδυασμό με την αλληλεπίδρασή τους με την κατασκευή στην οποία εφαρμόζονται, αποτέλεσαν βασικό μέσο αξιοποίησης. Η χρήση τους είχε ως στόχο την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για τη διάγνωση βλάβης σε δομικά στοιχεία. Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται στην αλληλεπίδραση των PZT με την κατασκευή στην οποία εφαρμόζονται σύμφωνα με τη μέθοδο της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αντίστασης (Electro-Mechanical Impedance EMI) ή αλλιώς με το αντίστροφό της, τη μέθοδο της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας (Electro-Mechanical Admittance EMA).

Οι Ηλεκτρομηχανικές (H/M) αποκρίσεις των PZT που επικολλώνται σε ένα δομικό στοιχείο σύμφωνα με τη μέθοδο EMA προσφέρουν χρήσιμες και σημαντικές πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του δομικού στοιχείου. Η αναπτυσσόμενη μεθοδολογία αξιοποιεί αυτά τα δεδομένα με ειδικές στατιστικές διεργασίες για τη διάγνωση της βλάβης, η οποία περιλαμβάνει σε πρώτο στάδιο την ανίχνευση της βλάβης, και εφόσον αυτή υπάρχει, σε δεύτερο στάδιο την ταυτοποίηση της θέσης και του βαθμού της. Επειδή το πιο διαδεδομένο δομικό υλικό στις κατασκευές σήμερα είναι το σκυρόδεμα, εξετάζεται η αριθμητική εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας σε δομικό στοιχείο από σκυρόδεμα.

Για την επισκευή του δομικού στοιχείου χρησιμοποιείται η ήδη πολύ διαδεδομένη τεχνική επισκευής - ενίσχυσης με σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή (Fiber Reinforced Polymers, FRP). Η τεχνική αυτή ενώ παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, εντούτοις εμφανίζει ένα βασικό μειονέκτημα. Συνήθως η αστοχία των FRP προέρχεται εξαιτίας της αποκόλλησής τους από την επιφάνεια του δομικού στοιχείου στο οποίο επικολλώνται και έτσι δεν εξαντλούνται τα όρια αντοχής τους.

Διερευνάται επιπλέον ένας νέος τρόπος αντιμετώπισης των προβλημάτων αποκόλλησης των σύνθετων υλικών επισκευής FRP με τη χρήση ευφυών - πιεζοηλεκτρικών υλικών. Η τεχνική συνίσταται στην τοποθέτηση συστήματος πιεζοηλεκτρικών (αισθητήρα - διεγέρτη) στα άκρα του FRP. Η εφαρμογή του

συστήματος αυτού σε συνδυασμό με μία ειδική μέθοδο βελτιστοποίησης που βασίζεται στην H/M απόκριση των PZT, οδηγεί στην ανάπτυξη “ελεγχόμενων δευτερευουσών δυνάμεων” μέσω των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων. Οι δυνάμεις αυτές είναι ικανές να αντιστρέψουν και να αντισταθμίσουν την επικείμενη αποκόλληση των άκρων των FRP. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ο έλεγχος της αποκόλλησης των ινοπλισμένων πολυμερών ως υλικά επισκευής δομικών στοιχείων υπό δυναμική φόρτιση και προτείνεται ένα κριτήριο ενεργούς διασφάλισης της συνεχούς συνάφειας μεταξύ FRP και σκυροδέματος. Έτσι, αναπτύσσεται μία μέθοδος εφαρμογής ενός “ευφυούς και αναπροσαρμόσιμου FRP” για την επισκευή δομικών στοιχείων και κατ’ επέκταση κατασκευών υπό δυναμική φόρτιση.

Για τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων μεθόδων, η προσομοίωση του ευφυούς δομικού συστήματος γίνεται με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων COMSOL (πρώην FEMLAB). Η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων των H/M αποκρίσεων και η ανάπτυξη των προτεινόμενων μεθόδων βελτιστοποίησής τους επιτυγχάνεται σε περιβάλλον MATLAB.

ABSTRACT

The research presented in this thesis develops a new methodology for the structural health monitoring of structures. The methodology is based on the use and the application of smart materials and specifically the piezoelectric materials (lead zirconate titanate PZT). These materials are installed and applied in the concrete members of a structure. Therefore, the specific characteristics of the PZTs in combination with their interaction with the structure are used in order to develop the new health monitoring technique. Physical changes in the structure cause changes in the structural mechanical impedance. Due to electromechanical coupling between the piezoelectric material and the structure, the change in structural mechanical impedance induces a change in the electrical impedance of the piezoelectric material.

The proposed methodology is based on the interaction of PZT with the structure according to the Electro-Mechanical Impedance EMI or its inverse Electro-Mechanical Admittance EMA. The methodology uses the electromechanical data in frequency response with statistical techniques to damage detection. This includes two stages, in first stage the detection of damage, and if provided that this exists, in second stage the location and level of the damage.

Since the widespread building material in the existing structures is concrete, the examined numerical application of the proposed methodology is a concrete structural element.

The well-known strengthening technique of deficient concrete members using epoxy bonded Fibre Reinforced Polymer (FRP) materials is used herein in order to examine the application of smart materials and the proposed methodology in a FRP concrete component. These composite materials have experienced a continuous increase of use in structural strengthening and repair applications around the world in the last decade. High stiffness-to-weight and strength-to-weight ratios of these materials combined with their superior environmental durability have made them a competing alternative to the conventional strengthening and repair materials. From a structural mechanics point of view, an important concern regarding the effectiveness and safety of this method is the potential of brittle and premature failures due to the debonding of the FRP materials. Such failures, unless adequately considered in the design process, may significantly decrease the effectiveness of the strengthening.

In this thesis, a new method that prevents FRP debonding using smart piezoelectric materials is investigated. The technique consists of the installation of system of piezoelectric (sensor - actuator) at the edge of the epoxy bonded FRP to the concrete member. The application of this system in combination with a specific optimisation method that is based on the EMA response of PZT, can produce controlled local forces and moments with opposite effect to that of a harmonic load at the middle of the beam. These forces are capable to reverse and to compensate the imminent debonding of the edge of the FRP which are based on a new repair criterion.

Using the proposed method, the control of the FRP debonding in a concrete member under dynamic loading is achieved. Further, a special criterion for the “active” repair of the continuous contact between FRP and concrete is proposed. Thus, the application method of a “smart and readjusted FRP” for the repair of FRP concrete components under dynamic load is developed. Achieve

The effectiveness of the proposed method is analytically investigated using the finite element program COMSOL (former FEMLAB) for the simulation of the smart structural system. The statistical process of the EMA response data and the development of the proposed optimisation methods are achieved using MATLAB environment developed for the purposes of this study.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος	iii
Ερευνητική δραστηριότητα	vii
Περίληψη	ix
Περίληψη στα Αγγλικά	xi
Περιεχόμενα	xiii

1. Εισαγωγή

1.1. Έλεγχος δομικής ακεραιότητας των κατασκευών (SHM).....	1
1.2. Χρήση ευφών υλικών στον έλεγχο δομικής ακεραιότητας	5
1.3. Μοντέλα H/M σύνθετης αγωγιμότητας και προσομοίωση με τη θεωρία πεπερασμένων στοιχείων	8
1.4. Διάγνωση βλαβών σε δομικά στοιχεία με την χρήση της μεθόδου EMA ...	10
1.4.1. Ανίχνευση βλαβών σε δομικά στοιχεία	11
1.4.2. Ταυτοποίηση βλαβών σε δομικά στοιχεία	15
1.5. Επιδιόρθωση βλαβών σε δομικά στοιχεία	19
1.6. Συμβολή της διδακτορικής διατριβής	25
1.6.1. Εντοπισμός της βλάβης	26
1.6.2. Ταυτοποίηση της βλάβης	27
1.6.3. Επιδιόρθωση της βλάβης	28
1.7. Ανάλυση περιεχομένων κεφαλαίων διατριβής	30

2. Έλεγχος δομικής ακεραιότητας

2.1. Αναγκαιότητα ελέγχων στις κατασκευές	33
2.2. Παραδοσιακές μέθοδοι ελέγχου των κατασκευών	34
2.3. Έλεγχος δομικής ακεραιότητας SHM	36
2.3.1. Νέες αντιλήψεις στις μεθόδους ελέγχου των κατασκευών (SHM) ...	36
2.3.2. Στόχος του ελέγχου δομικής ακεραιότητας SHM	36
2.3.3. Βλάβη σε ένα δομικό σύστημα	36
2.3.4. Μέθοδοι SHM που βασίζονται στη μηχανική ταλάντωση της κατασκευής	37
2.3.5. Έλεγχος δομικής ακεραιότητας με χρήση ευφών υλικών	39
2.3.6. Ευφυή υλικά	40
2.3.7. Χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών	41
2.4. Θεωρία του πιεζοηλεκτρισμού και πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο	42
2.4.1. Πιεζοηλεκτρικά υλικά – ανασκόπηση	42

2.4.2.	Κατασκευή PZT	44
2.4.3.	Ηλεκτρική πόλωση και διηλεκτρικά υλικά	45
2.4.4.	Ιδιότητες πολωμένου πιεζοηλεκτρικού υλικού	47
2.4.5.	Δομή πιεζοηλεκτρικού υλικού (PZT) τύπου Perovskite	49
2.5.	Μέθοδοι SHM με χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών	50
2.5.1.	Εφαρμογές της μεθόδου EMA	52
2.5.2.	Μέθοδος EMA για τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας των κατασκευών	52
2.5.3.	Βασικές αρχές για την εφαρμογή της μεθόδου EMA	54
2.5.4.	Παράμετροι της μεθόδου σύνθετης αγωγιμότητας	55
2.5.4.1.	Περιοχές συχνοτήτων	55
2.5.4.2.	Το πραγματικό μέρος της ηλεκτρικής σύνθετης αγωγιμότητας	56
2.5.4.3.	Περιοχή κάλυψης των αισθητήρων σύνθετης αγωγιμότητας	56
2.6.	Σύγκριση και πλεονεκτήματα EMA με άλλες μεθόδους	57
2.6.1.	Μέθοδοι που βασίζονται στην μηχανική ταλάντωση	58
2.6.2.	Μέθοδος υπερηχητικού ελέγχου	59
2.6.3.	Μέθοδος ακουστικής εκπομπής	59
2.6.4.	Μέθοδος της επίδρασης του ηχοβολιστικού ελέγχου	60
 3. Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και μέθοδος EMA		
3.1.	Πιεζοηλεκτρισμός	65
3.2.	Γραμμικός πιεζοηλεκτρισμός	67
3.3.	Διεγέρτες και Αισθητήρες	69
3.4.	Χαρακτηριστικά των πιεζοηλεκτρικών υλικών	73
3.5.	Αναλυτικό μοντέλο μεθόδου σύνθετης αγωγιμότητας	75
3.5.1.	Ανάλυση των συνιστωσών της σύνθετης αγωγιμότητας	79
3.5.2.	Ηλεκτρομηχανική σύζευξη μεταξύ PZT και ελεγχόμενου δομικού συστήματος.....	82
3.5.3.	Υπολογισμός (συνιστωσών) της σύνθετης μηχανικής αγωγιμότητας της κατασκευής από την ηλεκτρομηχανική αγωγιμότητα του PZT...	87
3.6.	Το πραγματικό μέρος της ηλεκτρικής σύνθετης αντίστασης	89
3.7.	Δυνάμεις και ροπές αλληλεπίδρασης μεταξύ PZT & κατασκευής	91

4. Προσομοίωση ευφυούς δομικού συστήματος

4.1. Μοντέλα προσομοίωσης της μεθόδου ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας	93
4.2. Μοντέλο EMA για την προσομοίωση της απόκρισης αγωγιμότητας υπό δυναμικό φορτίο	96
4.2.1. Συμπεράσματα από την πειραματική εφαρμογή	100
4.3. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM)	104
4.3.1. Γεωμετρία και φόρτιση του δομικού συστήματος	105
4.3.2. Διαδικασία εφαρμογής της ΜΠΣ	108
4.4. Προσομοίωση ευφών κατασκευών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	108
4.5. Διατύπωση συζευγμένων πεπερασμένων στοιχείων	113
4.6. Η/Μ χαρακτηριστικά της σύνθετης αγωγιμότητας κατά τη δυναμική ανάλυση	115
4.7. Δυναμική ανάλυση στο πεδίο υψηλών συχνοτήτων	117

5. Διάγνωση βλαβών σε δομικά στοιχεία με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών

5.1. Εισαγωγή	119
5.2. Δείκτες ανίχνευσης βλαβών	120
5.3. Στατιστικές διαδικασίες ανίχνευσης βλαβών	121
5.3.1. Εκμάθηση των δεδομένων με επίβλεψη – κατηγοριοποίηση ομάδων	122
5.3.2. Εκμάθηση των δεδομένων με επίβλεψη - παλλινδρούμενες αναλύσεις	122
5.3.3. Εκμάθηση των δεδομένων χωρίς επίβλεψη - Εκτίμηση πυκνότητας πιθανότητας	123
5.4. Στατιστική επεξεργασία με εκτίμηση πυκνότητας πιθανότητας	124
5.4.1. Αυτοπαλλινδρούμενα μοντέλα FDARX αναπτυσσόμενα υπό δυναμική ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων	125
5.4.2. Κανονική κατανομή κατά Gauss	128
5.4.3. Θεωρία ακραίων τιμών	129
5.4.4. Γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών	130
5.5. Αριθμητική εφαρμογή ανίχνευσης βλαβών	132
5.5.1. Δείκτης βλάβης RMSD	135
5.5.2. Εφαρμογή στατιστικής διαδικασίας εντοπισμού βλάβης	139
5.5.2.1. Αυτοπαλλινδρούμενο μοντέλο FDARX	139
5.5.2.2. Στατιστική θεωρία ακραίων τιμών EVS	141

5.5.2.3. Εκτίμηση ορίων εμπιστοσύνης	143
5.6. Εισαγωγή στην αναλυτική μέθοδο ταυτοποίησης βλαβών	148
5.6.1. Θεωρία σχεδιασμού πειραμάτων	149
5.6.2. Στατιστική μέθοδος ανάλυσης της διακύμανσης	151
5.6.3. Μεθοδολογία μοντέλων επιφανειών απόκρισης	152
5.7. Μεθοδολογία ταυτοποίησης βλαβών με τη θεωρία σχεδιασμού πειραμάτων κατά Box-Behnken	154
5.7.1. Δημιουργία επιφανειών απόκρισης	155
5.7.2. Κανονικοποίηση μεταβλητών	157
5.8. Αριθμητική εφαρμογή ταυτοποίησης βλάβης – ορισμός δομικού συστήματος	160
5.8.1. Δημιουργία επιφανειών απόκρισης	162
5.8.2. Αντίστροφη διαδικασία προσδιορισμού βλάβης με βελτιστοποίηση	170
6. Επιδιόρθωση βλαβών σε δομικά στοιχεία με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών	
6.1. Επισκευή δομικών στοιχείων με χρήση FRP	175
6.2. Εφαρμογή των FRP σε δομικά στοιχεία και αποκόλληση.....	176
6.3. Επισκευή βλαβών σε δομικά συστήματα με χρήση ευφύων επικολλητών επιθεμάτων	179
6.3.1. Τεχνική επιδιόρθωσης	179
6.3.2. Κριτήρια επιδιόρθωσης	180
6.4. Επιδιόρθωση δομικού στοιχείου από σκυρόδεμα υπό δυναμικά φορτία με την εφαρμογή του “ευφυούς και αναπροσαρμόσιμου FRP”.....	182
6.4.1. Κριτήριο επιδιόρθωσης με τη χρήση της μεθόδου EMA	186
6.4.2. Βελτιστοποίηση του συστήματος των πιεζοηλεκτρικών (αισθητήρα-διεγέρτη)	188
6.5. Εφαρμογή επιδιόρθωσης βλάβης	191
6.5.1 Αριθμητικό μοντέλο	192
6.5.2. Διαδικασία βελτιστοποίησης με το κριτήριο EMA	192
6.5.3. Εφαρμογή του “ευφυούς και αναπροσαρμόσιμου FRP” για την επισκευή δοκού υπό δυναμική φόρτιση	193
6.6. Αποτελέσματα εφαρμογής του “ευφυούς & αναπροσαρμόσιμου FRP” ως μέσο επισκευής δομικών στοιχείων	196
6.6.1. Σύγκριση του μοντέλου με αποκόλληση του άκρου του FRP με το υγιές	196

6.6.2. Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης για έλεγχο της διασφάλισης μη-αποκόλλησης του άκρου του FRP	202
7. Συμπεράσματα	225
7.1. Ανίχνευση βλάβης	225
7.2. Ταυτοποίηση βλαβών	227
7.3. Επιδιόρθωση βλαβών	228
7.4. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	229
Βιβλιογραφία	231

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Έλεγχος δομικής ακεραιότητας των κατασκευών (Structural health monitoring SHM)

Η δυνατότητα ελέγχου μιας κατασκευής και ανίχνευσης βλάβης σε πρώιμο στάδιο αποτελεί κυρίαρχη παράμετρο σε όλα τα επιστημονικά πεδία της εφαρμοσμένης μηχανικής. Έτσι συνεχώς νέες μέθοδοι ελέγχου αναπτύσσονται συστηματικά και παράλληλα με τη βελτίωση και εξέλιξη νέων υλικών και τεχνολογιών. Ταυτόχρονα, λόγω των αυξημένων απαιτήσεων ασφάλειας και λειτουργικότητας στις κατασκευές, οι έλεγχοι θα πρέπει να γίνονται συχνά κατά την διάρκεια λειτουργίας τους και χωρίς να έχουν αρνητική επιρροή σε αυτές. Σήμερα έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται πολλές τεχνικές εντοπισμού βλαβών στις κατασκευές οι οποίες αποτελούν τις μεθόδους ελέγχου δομικής ακεραιότητας (Structural health monitoring SHM). Έλεγχος δομικής ακεραιότητας (SHM) είναι η διαδικασία της εφαρμογής μιας ολοκληρωμένης τεχνικής προσδιορισμού βλαβών στις κατασκευές, η οποία προκύπτει από τη συνύπαρξη διαφόρων τεχνικών και

περιλαμβάνει στη διαδικασία του προϋπάρχουσες παραδοσιακές μεθόδους ελέγχου των κατασκευών. Η βασική συνεισφορά του SHM βασίζεται στην ανάπτυξη νέων ευαίσθητων υλικών για την δημιουργία αισθητήρων και διεγερτών με στόχο το συνεχή και αδιάκοπο έλεγχο των κατασκευών με ταυτόχρονη λειτουργία της κατασκευής εν ώρα ελέγχου. Χαρακτηριστικό του SHM είναι ότι εφαρμόζεται στο σύνολο της κατασκευής και όχι τμηματικά. Ο αρχικός στόχος του SHM είναι να αντικαταστήσει τους τρέχοντες κύκλους επιθεώρησης με ένα ενσωματωμένο σύστημα συνεχούς παρακολούθησης και όχι απλά να ανιχνεύει τη δομική αστοχία, ενώ ταυτόχρονα να παρέχει και μια πρόωρη ένδειξη της βλάβης. Ως βλάβες ορίζονται οι αλλαγές που εισάγονται σε ένα δομικό σύστημα οι οποίες έχουν αρνητική επίδραση στην παρούσα ή μελλοντική απόκρισή του. Οι αλλαγές αυτές μπορεί να παρουσιαστούν στις ιδιότητες των υλικών, στις συνοριακές συνθήκες ή στην ενότητα του συστήματος. Σύμφωνα με αυτό τον ορισμό, η έννοια της βλάβης δεν είναι σημαντική χωρίς τη σύγκριση δύο διαφορετικών καταστάσεων του συστήματος, η μια από τις οποίες αντιπροσωπεύει υποχρεωτικά το αρχικό, και συχνά υγιές σύστημα. Η βλάβη δεν σημαίνει απαραίτητα τη συνολική απώλεια της λειτουργίας του συστήματος, αλλά ότι το σύστημα δεν λειτουργεί πλέον κατά το βέλτιστο τρόπο. Δεδομένου ότι η βλάβη έχει διαβαθμίσεις, διαδοχικά αυξάνεται και φθάνει σε ένα επίπεδο όπου οι επιπτώσεις της είναι σημαντικές για τη λειτουργία του δομικού συστήματος και δεν θεωρείται πλέον αποδεκτή. Αυτό το σημείο αναφέρεται ως αστοχία. Με την τεχνική SHM επιτυγχάνεται η πρόληψη της αστοχίας αφού ο εντοπισμός ή αλλιώς η διάγνωση της βλάβης γίνεται έγκαιρα σε αρχικό στάδιο.

Σύγχρονες μέθοδοι διάγνωσης βλαβών είναι οι οπτικές ή οι τοπικά πειραματικές μέθοδοι, όπως οι μέθοδοι ακουστικής ή υπερηχητικής εκπομπής, οι μέθοδοι μαγνητικών πεδίων, η ραδιογραφία, οι μέθοδοι ρευμάτων αυτεπαγωγής, θερμικού πεδίου κλ.π., (Doebeling et al., 1996). Όλες οι παραπάνω μέθοδοι είναι παραμετρικές, δηλαδή προαπαιτούν τη γνώση κάποιων παραμέτρων της κατασκευής. Μερικές από τις παραμέτρους της κατασκευής είναι οι ιδιότητες των υλικών, οι ιδιομορφές, οι συντελεστές απόσβεσης κ.λπ. Επίσης οι πειραματικές μέθοδοι μπορούν να διαγνώσουν τοπικές βλάβες, μόνο επάνω ή κοντά στην επιφάνεια της κατασκευής. Η ανάγκη ανάπτυξης γενικών μεθόδων διάγνωσης βλαβών που θα μπορούν να εφαρμοστούν σε περισσότερο πολύπλοκες κατασκευές έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη μη-παραμετρικών μεθόδων, οι οποίες εξετάζουν αλλαγές στα χαρακτηριστικά μηχανικής ταλάντωσης των κατασκευών.

Η βλάβη, που προσδιορίζεται από τις αλλαγές στα δυναμικά χαρακτηριστικά ή από την απόκριση της κατασκευής, έχει λάβει ιδιαίτερη σημασία στη σύγχρονη βιβλιογραφία, (Montalvao et al., 2006). Η βασική ιδέα είναι ότι οι ιδιομορφικές παράμετροι, ιδιοσυχνότητες, ιδιομορφές και ιδιομορφική απόσβεση έχουν σχέση με τις φυσικές ιδιότητες της κατασκευής όπως μάζα, απόσβεση και δυσκαμψία. Επομένως, αλλαγές στις φυσικές ιδιότητες μπορεί να προκαλέσουν αλλαγές στις ιδιομορφικές ιδιότητες και αντίστροφα.

Ο έλεγχος δομικής ακεραιότητας είναι μία διαδικασία εντοπισμού βλαβών, η οποία θα πρέπει α) να μπορεί να αναγνωρίσει τη βλάβη που εμφανίστηκε σε πρώιμο στάδιο, β) να εντοπίσει τη γενική και τοπική βλάβη με τη χρήση συστήματος αισθητήρων, γ) να παρέχει κάποια εκτίμηση της σοβαρότητας της βλάβης και δ) να προβλέπει την εναπομένουσα διάρκεια ζωής της κατασκευής, Doebbling et al (1996). Επιπλέον, η μέθοδος θα πρέπει να έχει ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε να λειτουργεί αυτόματα και αυτόνομα, χωρίς να βασίζεται στην κρίση του χρήστη ή του αναλυτικού μοντέλου της κατασκευής. Επίσης στην παραπάνω διαδικασία θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και να υπολογίζονται οι λειτουργικοί και περιβαλλοντικοί περιορισμοί ώστε να είναι όσο το δυνατό ακριβής.

Τα τελευταία χρόνια, ο έλεγχος δομικής ακεραιότητας θεωρείται όλο και περισσότερο ως πιθανή αξιόπιστη μέθοδος για τη βελτίωση της ασφάλειας και του επιπέδου λειτουργίας των κατασκευών. Έχει κατορθώσει να συνδυάσει τη χρήση διεπιστημονικών τομέων, όπως των υλικών, των αισθητήρων και της επεξεργασίας σήματος ως ολοκληρωμένα συνεργαζόμενα συστήματα. Σήμερα πλέον υπάρχουν διάφοροι τύποι συμβατικών αισθητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας. Μεγάλη ώθηση στον έλεγχο δομικής ακεραιότητας έχει δοθεί λόγω της ταχείας ανάπτυξης σύγχρονων αισθητήρων, όπως π.χ. οι πιεζοηλεκτρικοί, οι οπτικές ίνες, τα MEMS (Micro ElectroMechanical Systems), τα Strain-gauges (μετρητές τάσης), τα κράματα μνήμης σχήματος, τα ηλεκτρο-συστολικά υλικά, τα μαγνητο-συστολικά υλικά, τα ηλεκτρο-ρεολογικά υγρά κ.λπ., (Piefort, 2001). Συστήματα ελέγχου δομικής ακεραιότητας με ενόργανη επιθεώρηση έχουν αρχίσει να εφαρμόζονται σε γέφυρες στο Εθνικό οδικό δίκτυο της χώρας, (Panetsos et al., 2006a, 2006b), (Πανέτσος, Ρεντζεπέρης, Λιώλιος, 2006), (Πανέτσος, Ντότσιος, Παπαδημητρίου, 2008), (Ntotsios et al. 2009).

Οι παραπάνω τεχνολογικά προηγμένοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για να καταγράψουν μεταβλητές απόκρισης όπως παραμόρφωση, επιτάχυνση, κύματα ήχου,

ηλεκτρική ή μαγνητική αντίσταση, πίεση ή θερμοκρασία. Γενικά, τα παραπάνω συστήματα μπορούν να διαχωριστούν σε παθητικά και ενεργητικά συστήματα δειγματοληψίας, (Kessler, 2002). Τα παθητικά συστήματα δειγματοληψίας είναι εκείνα που λειτουργούν ανιχνεύοντας την απόκριση της κατασκευής λόγω των περιβαλλοντικών επιδράσεων ή συνθηκών χωρίς οποιαδήποτε εισαγόμενη τεχνητή ενέργεια, ενώ τα ενεργητικά συστήματα είναι εκείνα που απαιτούν εξωτερικά παρεχόμενη ενέργεια υπό μορφή πίεσης ή ηλεκτρομαγνητικού κύματος για να λειτουργήσουν κατάλληλα. Τα ενεργά συστήματα που λειτουργούν με τη μηχανική ταλάντωση περιλαμβάνουν τη μέθοδο συνάρτησης μετατροπής της ανάλυσης ιδιομορφών και τη διάδοση ελαστικών κυμάτων Lamb. Οι παθητικές τεχνικές τείνουν να είναι απλούστερες στην εφαρμογή και τη λειτουργία για ένα σύστημα SHM και παρέχουν χρήσιμες γενικές ικανότητες ανίχνευσης βλάβης, εντούτοις γενικά οι μέθοδοι με ενεργά συστήματα είναι περισσότερο ακριβείς στην παροχή συγκεκριμένων πληροφοριών για μια περιοχή με βλάβη. Γι' αυτό τα τελευταία χρόνια οι τεχνικές διάγνωσης βλάβης που χρησιμοποιούν εξαναγκασμένες μηχανικές ταλαντώσεις εξελίσσονται συνεχώς. Όσο οι κατασκευές γίνονται μεγαλύτερες και περισσότερο σύνθετες, μερικές από τις παθητικές τεχνικές γίνονται πρακτικά ανέφικτες και για τον λόγο αυτό θα πρέπει να αναπτυχθούν περισσότερο κατάλληλες μέθοδοι, (Kessler, 2002).

Για την εξέλιξη ενεργητικών μεθόδων ταλάντωσης έχει διαπιστωθεί ότι σε συμβατικούς αισθητήρες προβλήματα προκύπτουν από α) το μέγεθος του αισθητήρα ο οποίος είναι ογκώδης, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα σε μία συνήθη κατασκευή, και β) το κόστος των αισθητήρων το οποίο περιορίζει τον αριθμό τους και έτσι δεν μπορεί να αναπτυχθεί μία γενική ολοκληρωμένη διαδικασία αλλά μόνο επαναλαμβανόμενος και τοπικός έλεγχος. Λύση στο πρόβλημα αυτό αποτελούν πιθανώς τα “ευφυή” υλικά ως νέα υλικά που δίνουν τη δυνατότητα να βελτιωθούν σημαντικά οι μέθοδοι ελέγχου δομικής ακεραιότητας με μικρότερο κόστος. Ως “ευφυή” υλικά ορίζονται τα υλικά τεχνολογίας αιχμής τα οποία αλλάζουν κάποιες από τις ιδιότητές τους με συγκεκριμένο τρόπο μετά από επιβολή σε αυτά μιας εξωτερικής διέγερσης. Το κοινό χαρακτηριστικό όλων των ευφυνών υλικών είναι η ικανότητά τους να αντιδρούν μηχανικά σε εξωτερικά ερεθίσματα. Βασιζόμενοι στο κοινό αυτό χαρακτηριστικό, χρησιμοποιούνται ως βασικά στοιχεία σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα για τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας.

1.2 Χρήση ευφύων υλικών στον έλεγχο δομικής ακεραιότητας των κατασκευών

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε μία νέα μεθοδολογία για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας κατασκευών. Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στη χρήση και εφαρμογή των ευφύων υλικών, και ειδικότερα των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Οι ιδιότητες και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των πιεζοηλεκτρικών υλικών σε συνδυασμό με την αλληλεπίδραση τους με την κατασκευή στην οποία εφαρμόζονται, αποτέλεσαν βασικό μέσο αξιοποίησης με στόχο την ανάπτυξη ειδικής μεθοδολογίας για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά βασίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο δηλαδή όταν το υλικό υπόκειται σε μηχανική πίεση, τότε εμφανίζεται ανάλογο ηλεκτρικό φορτίο στην επιφάνειά του (άμεση επίδραση) και, αντιθέτως, όταν βρίσκεται κάτω από την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, αναπτύσσεται ανάλογη μηχανική παραμόρφωση στο υλικό (αντίστροφη επίδραση), (Giurgiutiu, 2007), (Piefort, 2001). Με αυτό τον τρόπο αυτά τα υλικά εκτελούν διπλή λειτουργία, διεγέρτη και αισθητήρα ταυτόχρονα.

Οι περισσότερες έρευνες στο πεδίο του ελέγχου της δομικής ακεραιότητας SHM μέχρι σήμερα έχουν εστιάσει σε μεθόδους μηχανικής ταλάντωσης, οι οποίες χρησιμοποιούν χαμηλές φυσικές συχνότητες και ιδιομορφές. Οι μέθοδοι δυναμικής απόκρισης αναπτύσσονται με την αρχή ότι η βλάβη έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή στις παραμέτρους της κατασκευής, όπως η μάζα, η απόσβεση και η δυσκαμψία. Το γεγονός ότι η βλάβη προκαλεί μείωση της δυσκαμψίας της κατασκευής με αποτέλεσμα έτσι να μειώνονται και οι φυσικές συχνότητές της έχει οδηγήσει πολλές τεχνικές ανίχνευσης βλάβης στη χρήση ιδιομορφικής ανάλυσης. Αυτές οι παραμετρικές μέθοδοι περιλαμβάνουν αποτίμηση των ιδιοσυχνοτήτων, των συντελεστών απόσβεσης και των ιδιομορφών, για συσχέτισμό της βλάβης στις κατασκευές, όπως π.χ. η μέθοδος που βασίζεται στην αλλαγή των ιδιομορφών, η μέθοδος που βασίζεται στην αλλαγή της δυσκαμψίας και η μέθοδος που βασίζεται στην αλλαγή της ελαστικότητας. Αν και αποδεκτές αυτές οι μέθοδοι που βασίζονται στην ταλάντωση, εντούτοις παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα (Banks et al., 1996). Οι παραπάνω μέθοδοι βασίζονται σε σχετικά μικρό αριθμό χαμηλόσυχων ιδιομορφών, οι οποίες δεν είναι ευαίσθητες στον εντοπισμό πολύ μικρών βλαβών, με αποτέλεσμα οι τεχνικές αυτές να τείνουν να αποτυγχάνουν στον εντοπισμό σχετικά μικρών αλλαγών στη δομική κατάσταση. Στις χαμηλές συχνότητες οι ιδιομορφές μπορούν να απεικονίσουν μόνο γενικευμένες αλλαγές σε μια κατασκευή. Η βλάβη

όμως είναι ένα τοπικό φαινόμενο, το οποίο δεν γίνεται διακριτό εύκολα από μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούν χαμηλές ιδιομορφές. Οι Doebling et al. (1998) επισημαίνουν ότι αυτός ο περιορισμός μπορεί να ξεπεραστεί εάν χρησιμοποιηθούν υψηλότερες ιδιοσυχνότητες, οι οποίες σχετίζονται με τοπικές αποκρίσεις. Για να παραχθεί υπολογίσιμη απόκριση σε υψηλές συχνότητες της κατασκευής, χρειάζεται περισσότερη ενέργεια, η οποία δυσκολότερα επιτυγχάνεται με συμβατικούς διεγέρτες. Ένας πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης διεγείρεται σε υψηλές συχνότητες, τυπικά από 10-500 kHz, επομένως μπορεί να ενεργοποιήσει σε υψηλές ιδιοσυχνότητες την κατασκευή. Σε αυτές τις υψηλές συχνότητες είναι ευκολότερο να εντοπιστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τοπικές αλλαγές της κατασκευής, όπως αλλαγές στη μάζα, στη δυσκαμψία, στην απόσβεση, όπου οι άλλες συμβατικές μέθοδοι μηχανικής ταλάντωσης αποτυγχάνουν.

Ο έλεγχος δομικής ακεραιότητας στην παρούσα διατριβή αφορά την ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη διάγνωση βλαβών σε ένα δομικό στοιχείο από σκυρόδεμα με χρήση ευφών και ειδικά πιεζοηλεκτρικών υλικών. Η παρούσα μεθοδολογία διάγνωσης αποτελείται από δύο στάδια, α) την ανίχνευση της βλάβης και β) την ταυτοποίηση της θέσης και του επιπέδου αυτής.

Σε αυτό το πεδίο έρευνας με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών χρησιμοποιούνται τρεις γνωστές ερευνητικές μέθοδοι: η μέθοδος της διάδοσης των ελαστικών κυμάτων, η μετατροπή της συνάρτησης απόκρισης κατά την ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων και η Μέθοδος Ηλεκτρο-Μηχανικής Σύνθετης Αντίστασης (EMI electromechanical impedance method), (ή το αντίστροφο της Ηλεκτρο-μηχανικής Σύνθετης Αγωγιμότητας, EMA, ElectroMechanical Admittance method), Giurgiutiu (2007).

Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται ενεργά πιεζοηλεκτρικά υλικά και ειδικά ο Ζirkονιούχος Τιτανιούχος Μόλυβδος (Lead Zirconate Titanate PZT). Η μέθοδος της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας (ή το αντίστροφο σύνθετης αντίστασης) πρόσφατα έχει προταθεί ως πολλά υποσχόμενη τεχνική για την εύρεση μικρών αλλαγών στη δομική ακεραιότητα των κατασκευών, (Park et al., 2000b), (Park et al., 2003). Η χρήση της μεθόδου της EMI ξεκίνησε από τον τομέα της Αεροναυπηγικής και Μηχανολογίας, όπου έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως και έχει δείξει μεγάλη αποτελεσματικότητα, και στη συνέχεια υιοθετήθηκε για τις εφαρμογές έργων πολιτικού μηχανικού (Park et al., 2000b). Οι εφαρμογές αυτές αφορούσαν κατ' αρχάς πειραματικές διατάξεις δομικών στοιχείων υπό κλίμακα, αλλά στη συνέχεια

εφαρμόστηκε και σε μεγάλα έργα, όπως γέφυρες, ειδικά έργα κλ.π. σε πραγματική πλέον κλίμακα. Η παραπάνω μέθοδος εφαρμόζεται είτε με την εμβάπτιση στο εσωτερικό των δομικών στοιχείων πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων κατάλληλα μονωμένων από την υγρασία ή με την επικόλληση πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων επάνω στο προς έλεγχο δομικό στοιχείο, τα οποία εκτελούν διπλή λειτουργία, διεγέρτη και αισθητήρα ταυτόχρονα. Στην τεχνική με την επικόλληση πιεζοηλεκτρικού στοιχείου η διέγερσή του επιτυγχάνεται με μικρής τάξης ηλεκτρικό φορτίο, ενώ ταυτόχρονα με ειδική συσκευή λαμβάνεται η απόκριση της ηλεκτρικής αντίστασης ή αγωγιμότητας. Ανάλογα με τη μεταβλητή απόκρισης που θα χρησιμοποιηθεί, η μέθοδος λέγεται H/M μέθοδος σύνθετης αντίστασης, EMI, ή H/M μέθοδος σύνθετης αγωγιμότητας, EMA. Τα μεγέθη της αντίστασης και της αγωγιμότητας είναι σύνθετα μιγαδικά μεγέθη, δηλαδή έχουν πραγματικό και φανταστικό μέρος, και είναι αντιστρόφως ανάλογα μεταξύ τους. Στην βιβλιογραφία συνήθως αναφέρεται ως μέθοδος ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αντίστασης (EMI method), αλλά στις μετρήσεις για τον υπολογισμό των ηλεκτρο-μηχανικών αποκρίσεων λαμβάνεται ως μεταβλητή συνήθως η αγωγιμότητα, και μάλιστα έχει αποδειχθεί ότι το πραγματικό μέρος της είναι αυτό που είναι πιο ευαίσθητο στην ύπαρξη βλάβης, και επομένως περισσότερο κατάλληλο για τον εντοπισμό βλαβών, (Sun et al., 1995). Οι Ayres et al. (1998) και Soh et al. (2000) εφάρμοσαν την μέθοδο της EMI σε μία μεταλλική κατασκευή και σε μία κατασκευή από σκυρόδεμα αντίστοιχα, για να εντοπίσουν την βλάβη και να ελέγξουν ενεργά την ακεραιότητα της κατασκευής. Οι Bhalla and Soh (2004a), στην εργασία τους περιγράφουν το θεωρητικό υπόβαθρο και τις τεχνικές λεπτομέρειες της μεθόδου EMI και υποδεικνύουν την αποτελεσματικότητά της στον εντοπισμό βλαβών σε ένα πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος υπό τη διέγερση υψηλών συχνοτήτων σε διαφορετικές καταστάσεις βλάβης. Τα στοιχεία συλλέχθηκαν άμεσα στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων, επειδή σε αυτές τις υψηλές συχνότητες εμφανίζει υψηλή ευαισθησία η μέθοδος σε μικρές βλάβες, και λόγω αυτού η χρήση αισθητήρων, όπως οι πιεζοηλεκτρικοί, μπορούν να το επιτύχουν. Κατά συνέπεια, η μέθοδος EMI με χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών φαίνεται να υπερέχει πέρα από τις υπάρχουσες συμβατικές μεθόδους.

Η βασική αρχή σε αυτή την προσέγγιση είναι ότι η διέγερση της κατασκευής σε υψηλές συχνότητες μπορεί να υποδηλώσει επικείμενη βλάβη με βάση τις αλλαγές στην απόκριση του πραγματικού μέρους της σύνθετης αγωγιμότητας. Βασιζόμενη σε

μηχανική ταλάντωση υψηλών συχνοτήτων, η μέθοδος παρουσιάζει εξαιρετική ευαισθησία σε πρώιμες βλάβες, (Tseng and Naidu, 2002). Η H/M απόκριση των PZT (πραγματικό μέρος σύνθετης αγωγιμότητας) που επικολλώνται σε ένα δομικό στοιχείο έχει αποδειχθεί ότι εισάγει χρήσιμες και σημαντικές πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του δομικού στοιχείου. Τα δεδομένα των αποκρίσεων των PZT (χαρακτηριστικά γνωρίσματα) χρησιμοποιούνται για την διάγνωση της βλάβης σε ένα δομικό στοιχείο και κατ' επέκταση σε μία κατασκευή.

1.3 Μοντέλα H/M σύνθετης αγωγιμότητας και προσομοίωση με τη θεωρία πεπερασμένων στοιχείων

Οι Liang et al. (1994) πρώτοι προσπάθησαν να περιγράψουν αναλυτικά την H/M αλληλεπίδραση της συμπεριφοράς ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου με μονοδιάστατα μοντέλα. Οι Zhou et al. (1996) επέκτειναν το μονοδιάστατο (1D) σε ένα δισδιάστατο (2D) μοντέλο. Στην συνέχεια, οι Bhalla and Soh (2004b) απλούστευσαν το 2D μοντέλο και προέκτειναν αυτή την προσέγγιση σε δισδιάστατες κατασκευές χρησιμοποιώντας ανάλυση της ενεργής σύνθετης αντίστασης. Οι καταστατικές εξισώσεις του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου δίδονται στην εργασία των Bhalla and Soh (2004b). Οι αποκρίσεις των μετατοπίσεων σε οριζόντια και κάθετη κατεύθυνση, που αποτελούν λύση του επίπεδου προβλήματος δόνησης (ή μηχανικής ταλάντωσης) του επιθέματος PZT δίδονται από τις εργασίες των Bhalla and Soh (2003).

Γενικά, ο μηχανισμός διέγερσης (Raja et al., 2002) του PZT παρουσία ηλεκτρικών πεδίων μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις κύριες αξονικές διευθύνσεις x , y και z και συνδυασμό αυτών xz , xy , zy . Στις εργασίες των Liang et al. (1994), Zhou et al. (1996), Park et al. (2003), Bhalla and Soh (2004b), Peairs et al. (2004) έχουν ερευνηθεί και αναπτυχθεί μόνο μοντέλα αλληλεπίδρασης κατά τη μία διεύθυνση x (1D) του PZT. Εντούτοις στη μέθοδο EMI η επίδραση των διεγέρσεων των PZT σε όλες τις διευθύνσεις θεωρούνται εξίσου σημαντικές ακόμη και αν κάποιες από αυτές είναι αμελητέες, (Annamdas and Soh 2007). Γι' αυτό το λόγο οι Annamdas και Soh (2007) ανέπτυξαν ένα μοντέλο γενικής χρήσης, το οποίο υπολογίζει τις διεγέρσεις σε όλες τις κατευθύνσεις και είναι μοντέλο τρισδιάστατης (3D) αλληλεπίδρασης PZT

και κατασκευής. Ως εκ τούτου, η διατύπωση που χρησιμοποιείται για αυτό το γενικής χρήσης μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξάγει τη μηχανική σύνθετη αντίσταση οποιασδήποτε «άγνωστης» κατασκευής.

Μέχρι τώρα η υπάρχουσα μέθοδος EMA δεν εξετάζει την επίδραση που προκαλείται στην απόκριση μιας κατασκευής στην οποία έχουν επικολληθεί πιεζοηλεκτρικά επιθέματα από την εξωτερική διέγερση εκτός από την διέγερση του PZT. Αυτό σημαίνει ότι τα προηγούμενα μοντέλα EMA ισχύουν μόνο στην περίπτωση που δεν εφαρμόζονται εξωτερικά φορτία στις κατασκευές. Οι περισσότερες όμως κατασκευές στην πράξη υποβάλλονται σε εξωτερικές δυναμικές φορτίσεις λόγω φορτίων λειτουργικότητας ή σεισμικών φορτίων, τα οποία θα πρέπει να συμπεριληφθούν στην ανάπτυξη ενός αναλυτικού μοντέλου. Πρόσφατα οι Youg και Miao (2008) δημιούργησαν ένα μοντέλο EMA για την περίπτωση όπου λαμβάνεται υπόψη το εξωτερικό δυναμικό φορτίο που ασκείται στο δομικό σύστημα. Στην εργασία των Yang και Miao αναπτύσσεται ένα μοντέλο EMA για ένα δομικό στοιχείο, το οποίο λαμβάνει υπόψη και την επίδραση της διέγερσης που προκαλείται σε αυτό από τα εξωτερικά εφαρμοζόμενα δυναμικά φορτία εκτός από την διέγερση του PZT. Από τα πειραματικά και τα αριθμητικά τους αποτελέσματα αποδεικνύεται ότι η εξωτερική δυναμική διέγερση επηρεάζει σημαντικά την απόκριση της ηλεκτρικής απόκρισης των πιεζοηλεκτρικών που επικολλώνται σε ένα δομικό στοιχείο. Συγκεκριμένα φαίνεται ότι σημαντικό ρόλο παίζει το μέγεθος της εξωτερικής δύναμης το οποίο επηρεάζει τη μορφή της απόκρισης ηλεκτρομηχανικής αγωγιμότητας. Το παραπάνω μοντέλο, αν και παρέχει χρήσιμες πληροφορίες όσον αφορά την επίδραση της δυναμικής διέγερσης, παρόλα αυτά είναι μίας διάστασης (1D) και δεν μπορεί να αποδώσει πλήρως την τρισδιάστατη φύση του PZT.

Στην παρούσα διατριβή η μοντελοποίηση της απόκρισης των πιεζοηλεκτρικών αποκρίσεων σε συνδυασμό με την απόκριση του υπό έλεγχο δομικού στοιχείου γίνεται με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (Finite element Modelling FEM). Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων έχει αποδειχθεί ένα ισχυρό και ευπροσάρμοστο εργαλείο για τον τρισδιάστατο (3D) σχεδιασμό και τη λεπτομερή προσομοίωση ευφυών κατασκευών που περιέχουν τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και διεγέρτες. Πολυάριθμες θεωρίες και τεχνικές προσομοίωσης σχετικά με την μέθοδο FEM έχουν προταθεί για την ανάλυση των πιεζοηλεκτρικών κατασκευών, (Varadan et al., 1996), (Lim et al., 1997a,b), (Wang et al., 2004). Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι ανισότροπα και το ελαστικό τους πεδίο συνδυάζεται με το ηλεκτρικό πεδίο. Υπάρχουν πολλά

διαθέσιμα λογισμικά για σχεδιασμό και ανάλυση κατασκευών με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων τα οποία προσφέρουν την επιπλέον δυνατότητα εισαγωγής στοιχείων με συζευγμένα πεδία. Αυτό σημαίνει ότι για να εκτελεστεί η ανάλυση συζευγμένων πεδίων ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, χρησιμοποιούνται τα συζευγμένα πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία μπορούν να εξετάσουν και τους μηχανικούς και ηλεκτρικούς τομείς ταυτόχρονα. Για τη συζευγμένη πιεζοηλεκτρική ανάλυση, το πεδίο των τάσεων και το ηλεκτρικό πεδίο συνδέονται το ένα με το άλλο έτσι ώστε η αλλαγή στο ένα πεδίο να προκαλέσει αλλαγή στο άλλο πεδίο. Όταν ένα στοιχείο χρησιμοποιείται για πιεζοηλεκτρική ανάλυση, αυτό έχει ένα πρόσθετο βαθμό ελευθερίας, την ηλεκτρική τάση. Αυτός ο ηλεκτρικός βαθμός ελευθερίας προστίθεται επιπλέον στους τρεις βαθμούς ελευθερίας των μετατοπίσεων (x , y , και z). Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται πιο συγκεκριμένα το λογισμικό πρόγραμμα COMSOL Multiphysics version 3.5 (2006) (πρώην FEMLAB) για την προσομοίωση των δομικών στοιχείων σε συνδυασμό με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα λόγω της δυνατότητας αυξημένης ακρίβειας στην συνδυασμένη μοντελοποίηση συνεζευγμένων υλικών. Το λογισμικό COMSOL Multiphysics χρησιμοποιεί την πλατφόρμα MATLAB (2006) για την εισαγωγή των δεδομένων και την ανάλυση και μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων.

1.4 Διάγνωση βλαβών σε δομικά στοιχεία με την χρήση της μεθόδου EMA

Ο έλεγχος δομικής ακεραιότητας στην παρούσα διατριβή αφορά μία ολοκληρωμένη ειδική μεθοδολογία για τον εντοπισμό ή αλλιώς τη διάγνωση βλάβης σε ένα δομικό στοιχείο από σκυρόδεμα. Η μεθοδολογία αυτή αποτελείται από δύο στάδια, α) την ανίχνευση της βλάβης και β) την ταυτοποίηση της θέσης και του επιπέδου της βλάβης. Η ανίχνευση της βλάβης περιλαμβάνει τη διαδικασία αυτή με την οποία διαπιστώνεται αν υπάρχει ή όχι βλάβη στο δοκίμιο. Εφόσον υπάρχει βλάβη, στο επόμενο στάδιο της διαδικασίας γίνεται η ταυτοποίηση της βλάβης, δηλαδή η διαπίστωση της θέσης και της έκτασης της βλάβης.

Η τεχνική της EMA παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα. Έχει την ικανότητα να ανιχνεύει ευρεία περιοχή βλαβών της κατασκευής, από μικρότερη σε μεγαλύτερη κλίμακα, να βρίσκεται υπό συνεχή έλεγχο, και να έχει εύκολη και πρακτική εφαρμογή. Η τεχνική αυτή έχει υλοποιηθεί επιτυχώς σε πολυάριθμες κατασκευές,

(Ayres et al., 1998), Soh et al., 2000), Park et al., 2000a), (Bhalla and Soh, 2003), (Bhalla and Soh, 2004a). Ωστόσο, σε αυτές τις έρευνες γίνεται διάγνωση της βλάβης από τις αλλαγές στην χαρακτηριστική απόκριση της σύνθετης αγωγιμότητας των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων που τοποθετούνται επάνω στην κατασκευή. Η ανίχνευση βλαβών μέχρι πρότινος δεν πραγματοποιούνταν με τη χρήση μη-παραμετρικών στατιστικών δεικτών με τη μέτρηση αλλαγών στην απόκριση αγωγιμότητας. Έτσι οι μετρήσεις αν και αποτελεσματικές στην ανίχνευση της ύπαρξης βλάβης, αποτύγχαναν να συσχετίσουν τις αλλαγές στην απόκριση σύνθετης αγωγιμότητας ώστε να δώσουν πληροφορίες για την θέση και την σοβαρότητα της βλάβης με σκοπό την ταυτοποίησή της.

1.4.1 Ανίχνευση βλαβών σε δομικά στοιχεία

Η ανίχνευση των βλαβών σε δομικά στοιχεία με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών που λειτουργούν ταυτόχρονα ως αισθητήρες και διεγέρτες και της μεθόδου EMA έχει αναδειχθεί ως αποτελεσματική μη-παραμετρική διαδικασία ελέγχου δομικών συστημάτων. Αυτό σημαίνει ότι σε αντίθεση με τις παραμετρικές μεθόδους, δεν χρειάζεται να είναι γνωστοί οι παράμετροι της κατασκευής για να γίνει ανίχνευση της βλάβης. Οι μη-παραμετρικές προσεγγίσεις δεν απαιτούν τέτοιες λεπτομερείς πληροφορίες, αλλά στερούνται χαρακτηριστικά τις άμεσες αντιστοιχίσεις μεταξύ του μοντέλου και της δυναμικής απόκρισης της κατασκευής, και παρέχουν περιορισμένη χρησιμότητα για τον ακριβή έλεγχο δομικής ακεραιότητας και την ταυτοποίηση της βλάβης. Για την ποσοτικοποίηση της απόκλισης των αποκρίσεων των κατασκευών με βλάβη και των αρχικών υγιών κατασκευών, χρησιμοποιούνται στατιστικές τεχνικές αναγνώρισης συστημάτων. Οι στατιστικές αυτές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον κατάλληλο χαρακτηρισμό και αξιολόγηση βλαβών βασίζονται σε στατιστικούς δείκτες βλάβης.

Ο δείκτης βλάβης (Damage Index) είναι μια ποσότητα που προκύπτει από τη συγκριτική επεξεργασία των αποκρίσεων σύνθετης αγωγιμότητας και είναι σε θέση να εμφανίσει τη διαφορά μεταξύ των αποκρίσεων λόγω της βλάβης. Μέχρι σήμερα, διάφοροι δείκτες βλάβης έχουν χρησιμοποιηθεί για να συγκρίνουν τα φάσματα σύνθετης αγωγιμότητας και να αξιολογήσουν την παρουσία βλάβης. Οι Zagrai και Giurgiutiu (2002) εξέτασαν διαφορετικούς δείκτες βλάβης βασισμένους σε

στατιστικές μετρήσεις, όπως η τετραγωνική ρίζα της μέσης τετραγωνικής απόκλισης (root mean square deviation, RMSD), η μέση απόλυτη ποσοστιαία απόκλιση (mean absolute percentage deviation, MAPD), η μεταβολή της συνδιακύμανσης (covariance change, CC) και ο συντελεστής συσχέτισης της απόκλισης (correlation coefficient deviation, CCD). Εντούτοις, το κύριο μειονέκτημα αυτών των δεικτών βλάβης είναι ο τρόπος που θα οριστούν τα κατάλληλα άνω και κάτω όρια, πέρα από τα οποία μπορεί να θεωρηθεί ύπαρξη κατάστασης βλάβης της κατασκευής. Στην εργασία των Tseng and Naidu (2002) συγκρίνονται διάφοροι δείκτες βλάβης όσο αφορά την καταλληλότητά τους σε διάφορες περιπτώσεις ανίχνευσης βλάβης.

Για την ανίχνευση της βλάβης στην παρούσα έρευνα κατ' αρχάς χρησιμοποιείται ο δείκτης που βασίζεται στην τετραγωνική ρίζα της μέσης τετραγωνικής απόκλισης (RMSD). Ο δείκτης αυτός βασίζεται στην μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων των σημείων των δεδομένων σε μία ευθεία ή κατ' επέκταση και σε γενικότερες συναρτήσεις μη-γραμμικής μορφής όπως είναι οι αποκρίσεις της H/M αγωγιμότητας. Όσο μεγαλύτερη η αριθμητική τιμή του δείκτη RMSD τόσο μεγαλύτερη η διαφορά μεταξύ της αρχικής και της 'υπό διερεύνηση' υπολογιστικής τιμής ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας, η οποία και καταδεικνύει την ύπαρξη βλάβης στο δομικό στοιχείο. Η μεταβολή του RMSD δεν αποτελεί απαραίτητα ένδειξη βλάβης, διότι η αλλαγή στην τιμή του μπορεί να έχει προέλθει και από λειτουργικές και περιβαλλοντικές μεταβλητότητες. Δεν γίνεται γνωστό από ποια τιμή και πάνω μπορεί να θεωρηθεί βλάβη, αν δεν υπάρχουν δεδομένα από μία τέτοια κατάσταση. Με την εφαρμογή του δείκτη αυτού συγκρίνονται οι δύο ηλεκτρικές αποκρίσεις (υγιούς και με βλάβη δομικού στοιχείου) και ορίζεται μια αριθμητική τιμή η οποία φανερώνει τη διαφορά τους και προφανώς την αλλαγή στα χαρακτηριστικά τους και κατ' επέκταση βλάβη. Παρόλο που στην παρούσα διατριβή γίνεται αρχικά χρήση του RMSD, η βασική διαδικασία υλοποίησης της προτεινόμενης στρατηγικής διάγνωσης βλάβης εξετάζεται ως πρόβλημα στατιστικής ανάλυσης για την αποφυγή λανθασμένων ενδείξεων.

Οι περιπτώσεις ελέγχου δομικής ακεραιότητας που λαμβάνουν τη μικρότερη προσοχή στη διεθνή τεχνική βιβλιογραφία αφορούν τη χρήση στατιστικών μοντέλων για την ανάπτυξη μεθόδων διάγνωσης βλαβών. Τα στατιστικά μοντέλα αναπτύσσονται κυρίως σε δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά την εκμάθηση των δεδομένων με επίβλεψη ("supervised learning"), κατά την οποία είναι

γνωστά τα δεδομένα και από την κατάσταση βλάβης και την αρχική (υγιή) κατάσταση, και η δεύτερη κατηγορία την εκμάθηση χωρίς επίβλεψη (“Unsupervised learning”), κατά την οποία δεν είναι γνωστά τα δεδομένα από την κατάσταση βλάβης, (Farrar et al., 1999).

Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται τα στατιστικά μοντέλα που χρησιμοποιούν τα δεδομένα και από τις δύο καταστάσεις (αρχική υγιής και με βλάβη) με την βοήθεια ενός δείκτη βλάβης. Όταν δεν είναι διαθέσιμα τα δεδομένα από την κατάσταση του δομικού στοιχείου με βλάβη, όπως γίνεται συνήθως στις πραγματικές κατασκευές, έχει αρχίσει πρόσφατα να υιοθετείται η στατιστική θεωρία ακραίων τιμών (Extreme Value Statistics, EVS). Με αυτό τον τύπο ανάλυσης γίνεται προσπάθεια να συγκριθούν τα παρατηρούμενα δεδομένα μιας κατασκευής με τα αμέσως προηγούμενα δεδομένα και ανάλογα κατά πόσο σημαντική στατιστικά θεωρηθεί η αλλαγή να εκτιμάται και η αντίστοιχη βλάβη. Η εκτίμηση της συνάρτησης πιθανότητας πυκνότητας (Probability density function) είναι ένα από τα θεμελιώδη στατιστικά μέσα που χρησιμοποιούνται σε αυτόν τον τύπο ανάλυσης. Μια ιδιαίτερη δυσκολία κατά την ανάλυση ακραίων τιμών είναι ότι όταν αυξάνεται το μέγεθος των διανυσμάτων των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων, απαιτείται μεγάλος αριθμός δεδομένων για να καθορισθεί κατάλληλα η συνάρτηση πυκνότητας.

Τρεις διαφορετικές τεχνικές χρησιμοποιούνται για να γίνει η λήψη των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων από τις διαφορές μεταξύ των αντίστοιχων τιμών: οι συντελεστές συσχέτισης (correlation coefficients), τα αυτοπαλινδρούμενα μοντέλα στο πεδίο του χρόνου ή των συχνοτήτων με εξωγενή δεδομένα (autoregressive with exogenous inputs (ARX)) και οι φασματικές αποκλίσεις (spectral moments), (Grisso, 2004). Στην παρούσα διατριβή γίνεται εφαρμογή των μοντέλων FDARX (frequency domain autoregressive with exogenous inputs). Για τη δημιουργία μοντέλων FDARX για τη διάγνωση βλαβών, τα δεδομένα της βλάβης μπορούν να προέλθουν από διαθέσιμα δεδομένα – εισόδου, αποτελέσματα - εξόδου ή μόνο εξόδου στο πεδίο των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται κατάλληλα για να ανιχνεύσουν τη βλάβη σε δομικά δυναμικά συστήματα. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι αυτό-παλινδρούμενοι και εξωτερικοί συντελεστές σε ένα μοντέλο δεδομένων στο πεδίο της συχνότητας που μπορούν επιπλέον να χρησιμοποιηθούν για να διαχωρίσουν τους γραμμικούς από τους μη-γραμμικούς τύπους βλάβης.

Σημαντικό θέμα κατά την ανάπτυξη στατιστικών μοντέλων είναι η διερεύνηση της πιθανότητας εσφαλμένων ενδείξεων βλάβης, (Adams, 2001). Η

πιθανότητα αυτή εμπίπτει σε δύο κατηγορίες: (α) σφάλμα θετικής ένδειξης βλάβης (ενώ δεν υπάρχει βλάβη), (β) σφάλμα αρνητικής ένδειξης βλάβης (ενώ υπάρχει βλάβη), (Fugate et al., 2001).

Στην παρούσα διατριβή, ο έλεγχος βασισμένος στην σύνθετη H/M αγωγιμότητα με τη χρήση μη-παραμετρικών μοντέλων FDARX, διεξάγεται με χρήση της στατιστικής μεθόδου ακραίων τιμών για να διαπιστωθεί αν υπάρχει ή όχι βλάβη στο δοκίμιο. Ένα τροποποιημένο FDARX στατιστικό μοντέλο αναπτύσσεται στο πεδίο υψηλών συχνοτήτων. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα ενδέχεται να έχουν μορφή η οποία δεν υπακούει στην στατιστική κατανομή κατά Gauss (non-Gaussian) και να προκύψουν εσφαλμένες ενδείξεις. Αν τα στατιστικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα δεν υπακούουν στην κατανομή κατά Gauss, υιοθετείται η θεωρία ακραίων τιμών για να αναπτυχθεί ένας ισχυρός δείκτης βλάβης. Υπάρχουν τρία βασικά μοντέλα ακραίων τιμών που βασίζονται στις κατανομές ακραίων τιμών, Gumbel, Weibull και Frechet, (Sohn et al., 2005). Ο Jenkinson (1955) προτείνει το συνδυασμό των τριών προηγούμενων κατανομών όπου προκύπτει η “γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών” (Generalized Extreme Value Distribution, GEV).

Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα σύνθετης H/M αγωγιμότητας που αναλύονται με την παρούσα μέθοδο για το μοντέλο FDARX προέρχονται από το πεδίο συχνοτήτων. Έτσι δίδεται η δυνατότητα περισσότερων πληροφοριών για το δομικό σύστημα. Σε αυτό συμβάλει, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ότι η μέθοδος EMI, που βασίζεται στη διέγερση συχνοτήτων και ειδικά υψηλών. Ένα μοντέλο πεδίου συχνότητας FDARX προσπαθεί να προβλέψει την απόκριση σε μια ιδιαίτερη συχνότητα βασισμένο στα δεδομένα εισόδου σε εκείνη την συχνότητα, καθώς επίσης και από τα αποτελέσματα στις γειτονικές συχνότητες. Τα αποτελέσματα στις γειτονικές συχνότητες συμπεριλαμβάνονται ως δεδομένα εισαγωγής που ανατροφοδοτούν το σύστημα. Σε μια τυπική εφαρμογή, οι προσπάθειες πρόβλεψης της απόκρισης ενός FDARX μοντέλου σε μία συγκεκριμένη συχνότητα βασίζονται σε αποκρίσεις προηγούμενων συχνοτήτων, καθώς επίσης και στις εισαγωγές δεδομένων στις τρέχουσες και προηγούμενες συχνότητες στο σύστημα.

Το μοντέλο FDARX εφόσον κατασκευαστεί από τα δεδομένα της υγιούς κατάστασης της κατασκευής σε μία περιοχή συχνοτήτων χρησιμοποιείται περαιτέρω για να υπολογίσει τις διαφορές των αποκρίσεων σε επόμενες καταστάσεις της κατασκευής. Κάθε φορά τα αποτελέσματά που αφορούν την αρχική κατάσταση συγκρίνονται με κάθε επόμενη κατάσταση με στόχο την εξαγωγή στατιστικών

διαφορών. Οι στατιστικές διαφορές που προκύπτουν λέγονται υπολειμματικά σφάλματα ή διαφορές και ποσοτικοποιούν τη διαφορά μεταξύ της πρόβλεψης από το μοντέλο FDARX και της πραγματικής μετρούμενης ποσότητας σε κάθε συχνότητα. Οι διαφορές αυτές προκύπτουν λόγω των εξωτερικά εισαγόμενων δεδομένων στην εξεταζόμενη κατάσταση της κατασκευής, (Park et al., 2005). Από τη στατιστική θεωρία ακραίων τιμών με τη χρήση κατάλληλης κατανομής ορίζονται τα άνω και κάτω όρια των τιμών τα οποία ξεχωρίζουν τις αποδεκτές τιμές των στατιστικών διαφορών λόγω άλλων παραγόντων (λειτουργικών και περιβαλλοντικών) από αυτών που δεικνύουν βλάβη στην κατασκευή. Οι τιμές εκτός των ορίων αναφέρονται ως «ακραίες τιμές». Ένας στατιστικά σημαντικός αριθμός «ακραίων τιμών» υποδηλώνει ανωμαλία του συστήματος και κατ' επέκταση βλάβη. Τα παραπάνω αντιπροσωπεύουν μια πρωτότυπη εφαρμογή της στατιστικής αναγνώρισης σφαλμάτων που έχει οδηγήσει σε επιτυχία δεδομένου την τεκμηριωμένη βιβλιογραφία, (Sohn et al., 2005), (Sohn et al., 2001), (Adams, 2001), (Adams and Farrar, 2002).

Στην παρούσα διατριβή αναπτύχθηκε αριθμητική μεθοδολογία που χρησιμοποιεί ένα νέο μοντέλο FDARX σε περιβάλλον MATLAB στο πεδίο των συχνοτήτων, το οποίο εξασφαλίζει μεγάλη προσέγγιση στα αποτελέσματα προσομοίωσης της υγιούς ή οποιασδήποτε περαιτέρω κατάστασης βλάβης. Στη συνέχεια με χρήση της στατιστικής θεωρίας ακραίων τιμών και συγκεκριμένα με την Γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών (Generalized Extreme Value Distribution GEV) στο πεδίο των συχνοτήτων και την εξαγωγή κατάλληλων ορίων εμπιστοσύνης επιτυγχάνεται υψηλού βαθμού ανίχνευση στατιστικά απομονωμένων χαρακτηριστικών (outliers) που ξεφεύγουν από τη συνήθη διακύμανση ενός συνόλου αποκρίσεων όπως στην παρούσα περίπτωση είναι η απόκριση του πραγματικού μέρους της ηλεκτρομηχανικής αγωγιμότητας.

1.4.2 Ταυτοποίηση βλαβών σε δομικά στοιχεία

Στην παρούσα διατριβή μετά την ανίχνευση βλάβης αναπτύχθηκε επίσης μία νέα ειδική μέθοδος ταυτοποίησης βλαβών με ευφυή υλικά η οποία αξιοποιεί με στατιστικό τρόπο τις ηλεκτρομηχανικές αποκρίσεις των PZT. Αφού διαπιστωθεί η ύπαρξη βλάβης (ανίχνευση) εν συνεχεία με τη χρήση στατιστικής τεχνικής

βελτιστοποίησης των αποκρίσεων των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων γίνεται η ταυτοποίηση των βλαβών. Για τη διαδικασία βελτιστοποίησης απαιτείται η κατασκευή ενός αριθμού μετα-μοντέλων. Ως μετα-μοντέλο ορίζεται ένα “προσεγγιστικό” μοντέλο το οποίο έχει προκύψει με στόχο να δίνει γρήγορα αποτελέσματα. Το μετα-μοντέλο έχει την δυνατότητα να “εκτελείται” γρήγορα σε ένα H/Y σε σχέση με ένα συμβατικό μοντέλο περισσότερο λεπτομερές, γιατί έχει μειωμένα ή αλλιώς “συμπυκνωμένα” κάποια χαρακτηριστικά και θα μπορούσε να εννοηθεί και ως στατιστικά παραγόμενο μοντέλο. Η ανάπτυξη του μετα-μοντέλου γίνεται συνήθως στατιστικά και απαιτείται να είναι όσο γίνεται περισσότερο ακριβής. Η κατασκευή μετα-μοντέλων μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους α) με τη χρήση επιφανειών απόκρισης, β) με τη χρήση νευρωνικών δικτύων και γ) με τη χρήση τυπικών μεθόδων υποβάθμισης μοντέλων. Για τη διαδικασία της ταυτοποίησης στην παρούσα διατριβή παράγονται μετα-μοντέλα επιφανειών απόκρισης χρησιμοποιώντας την θεωρία σχεδιασμού πειραμάτων (Design of Experiments, DoE) και με μία αντίστροφη διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων προκύπτουν η θέση και το επίπεδο της βλάβης στο δομικό στοιχείο.

Ο στατιστικός σχεδιασμός πειραμάτων (υπολογιστικών προσομοιώσεων) (Design of Experiment) είναι ο επιστημονικός τομέας που εξασφαλίζει το μέγιστο δυνατό ποσό πληροφοριών για ένα δυναμικό σύστημα με τη διεξαγωγή του μικρότερου αριθμού πειραμάτων (ή προσομοιώσεων), (Goh, 2001). Η τεχνική βελτιστοποίησης των αποκρίσεων των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων χρησιμοποιεί προσεγγίσεις απόκρισης από τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα μετα-μοντέλα με την μορφή επιφανειών απόκρισης, όπως ο κεντρικά σύνθετος σχεδιασμός (Central Composite Design CCD) ή ο σχεδιασμός Box-Behnken (BBD), (Box and Behnken, 1960). Διαδεδομένη ήδη, σε άλλους επιστημονικούς τομείς όπως στην επιστήμη του χημικού μηχανικού και την βιομηχανία, η τεχνική επιφανειών απόκρισης με τη χρήση μετα-μοντέλων είναι μία στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον προσεγγιστικό προσδιορισμό συστημάτων όταν η προσομοίωση και τα φυσικά πειράματα που θα έπρεπε να επιλυθούν είναι ανέφικτα και οι πηγές δεδομένων είναι ανεπαρκείς, (Montgomery, 1997).

Ο σχεδιασμός πειραμάτων ή προσομοιώσεων χρησιμοποιεί μοντέλα επιφανειών απόκρισης τα οποία χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε ποικίλα πεδία που σχετίζονται με την επιστήμη των υλικών Harmon (2003), αλλά η εφαρμογή τους στην ταυτοποίηση βλαβών σε κατασκευές είναι πολύ περιορισμένη. Μία

ανασκόπηση στη σχετικά μικρή βιβλιογραφία που αναφέρεται στη διάγνωση βλαβών σε κατασκευές χρησιμοποιώντας την τεχνική μοντέλων επιφανειών απόκρισης βρίσκεται στην εργασίες των Cundy et al., (Cundy, 2003), (Cundy et al., 2003). Μέσα από τις εργασίες τους αποδεικνύουν ότι τα μοντέλα επιφανειών απόκρισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πρόβλημα της διάγνωσης βλαβών σε κατασκευές πολύ απλών δυναμικών συστημάτων. Επίσης τα μετα-μοντέλα που ανέπτυξαν έδειξαν ικανοποιητική προσέγγιση παρουσιάζοντας πολύ μικρά πειραματικά σφάλματα και έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως απλοποιημένα μοντέλα (μετα-μοντέλα) και για γραμμικά και μη γραμμικά δυναμικά δομικά συστήματα. Στις εργασίες των Cundy et al. για την προσπάθεια της αναγνώρισης βλαβών με χρήση μοντέλων επιφανειών απόκρισης ως δεδομένα εισόδου για τον προσδιορισμό του συντελεστή βλάβης λαμβάνονται η δυσκαμψία και η θέση και ως χαρακτηριστικά αποτελέσματα εξόδου λαμβάνονται οι αλλαγές στις φυσικές ιδιοσυχνότητες της κατασκευής. Τέλος, μετά την κατασκευή των μετα-μοντέλων επιφανειών απόκρισης για κάθε χαρακτηριστικό αποτέλεσμα, αυτά χρησιμοποιούνται με μία αντίστροφη λογική για να επιτευχθεί η αναγνώριση βλάβης.

Στην παρούσα διατριβή για πρώτη φορά εφαρμόζεται η μέθοδος EMA και εξετάζεται με τη χρήση στατιστικών μεθόδων όπως ο σχεδιασμός πειραμάτων κατά Box-Behnken, (Box and Behnken, 1960) και την κατασκευή μετα-μοντέλων επιφανειών απόκρισης έχοντας ως στόχο την ταυτοποίηση βλαβών σε δομικά στοιχεία. Στις κατασκευές πραγματικής κλίμακας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν θα ήταν πρακτικό ή ακόμα μερικές φορές θα ήταν και αδύνατο να κατασκευαστεί πραγματικά ένας μεγάλος αριθμός από κατασκευές με βλάβες, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση μετα-μοντέλων. Έτσι υπολογιστικές προσομοιώσεις με την βοήθεια της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων του λογισμικού COMSOL Multiphysics ver. 3.5 (2006) και το σχεδιασμό πειραμάτων κατά Box και Behnken χρησιμοποιούνται για να κατασκευαστούν τα μοντέλα επιφανειών απόκρισης και να προσδιοριστεί η παρουσία βλάβης σε ένα δομικό στοιχείο σκυροδέματος.

Επειδή το πιο διαδεδομένο δομικό υλικό στις κατασκευές σήμερα είναι το σκυρόδεμα, εξετάζεται η αναλυτική εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας σε ένα δομικό στοιχείο από σκυρόδεμα. Με το συνδυασμό δυναμικής ανάλυσης σε περιοχή υψηλών συχνοτήτων της δοκού από σκυρόδεμα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και το σχεδιασμό πειραμάτων κατά Box-Behnken, υλοποιήθηκε η ανάλυση

των παραμέτρων επίδρασης βλάβης στη διαδικασία του προσδιορισμού της βλάβης. Έτσι η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της κατασκευής σε ποικίλες καταστάσεις βλάβης υλοποιείται αποδοτικά δίδοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα για την ταυτοποίησή της.

Η διαδικασία σχεδιασμού πειραμάτων με την μέθοδο επιφανειών απόκρισης (Response surface methodology, RSM) περιλαμβάνει, (Box et al., 1978): α) τον σχεδιασμό μιας σειράς πειραμάτων (προσομοιώσεις) για την επαρκή και αξιόπιστη μέτρηση της απόκρισης του ενδιαφέροντος, β) την ανάπτυξη ενός πολυωνυμικού μετα-μοντέλου δευτέρου βαθμού για την βέλτιστη προσαρμογή της επιφάνειας απόκρισης, γ) την εύρεση του βέλτιστου συνόλου πειραματικών παραμέτρων που παράγουν μια μέγιστη ή ελάχιστη τιμή της απόκρισης, δ) την αντιπροσώπευση των άμεσων και αλληλεπιδρώντων αποτελεσμάτων των παραμέτρων διαδικασίας μέσω δυσδιάστατων ή τρισδιάστατων απεικονίσεων.

Στην τελική φάση της παρούσας μεθοδολογίας ταυτοποίησης βλάβης, κατασκευάζεται η επιφάνεια απόκρισης των μετα-μοντέλων με βάση το σύνολο των σημείων σχεδιασμού κατά Box-Behnken. Στη συνέχεια οι παραπάνω επιφάνειες απόκρισης χρησιμοποιούνται υπό μια αντίστροφη έννοια για να πραγματοποιηθεί ο προσδιορισμός – η ταυτοποίηση βλάβης. Ο σχεδιασμός κατά Box-Behnken που επιλέχθηκε έχει ήδη εφαρμοστεί για βελτιστοποίηση πλήθους χημικών και φυσικών διαδικασιών, (Box and Behnken, 1960), (Montgomery, 1997).

Έχοντας λοιπόν ως δεδομένα τα μετα-μοντέλα επιφανειών απόκρισης με τη μορφή πολυωνύμων αυτά επιλύονται αντίστροφα με ειδική μέθοδο βελτιστοποίησης ώστε τα αποτελέσματα να αποδίδουν την θέση και το μέγεθος της βλάβης. Με την επίλυση των πολυωνύμων αυτών στόχος είναι να επιτευχθεί μία λύση η οποία να δίνει το γενικό ελάχιστο με την χρήση τεχνικών βελτιστοποίησης των σφαλμάτων και να οδηγεί σε σωστά αποτελέσματα ταυτοποίησης της βλάβης. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης μέσω των οποίων επιδιώκεται να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα για το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης της πολύ-παραγοντικής αυτής έρευνας. Θα πρέπει όμως να επιλεγθεί η κατάλληλη ώστε η επίλυση να δίνει το γενικό ελάχιστο δεδομένου ότι αυτό το είδος αντίστροφων προβλημάτων παρουσιάζει πολλά τοπικά ελάχιστα.

Το απαιτούμενο αυτό αντίστροφο πρόβλημα επιλύεται χρησιμοποιώντας κατάλληλο αλγόριθμο βελτιστοποίησης πολυωνύμων ο οποίος προτάθηκε από τους Henrion and Lassere (2006), πραγματοποιούμενος σε περιβάλλον MATLAB, το

οποίο συνεργάζεται με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων COMSOL Multiphysics. Μέσω του αλγόριθμου αυτού εντοπίστηκαν σωστά τα γενικά ελάχιστα για κάθε περίπτωση με αποτέλεσμα η ταυτοποίηση να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε διάφορες περιπτώσεις βλάβης. Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του αλγόριθμου ώστε να γίνεται η εξαγωγή των γενικών ελαχίστων και να μην γίνεται σύγχυση με τυχόν τοπικά ελάχιστα.

Η μεταβλητή που καθορίζει την βλάβη στην παρούσα εργασία σχετίζεται με τη μείωση της δυσκαμψίας στη θέση της βλάβης σε σχέση με το υπόλοιπο δομικό στοιχείο σκυροδέματος. Έτσι ο προσδιορισμός (θέση και επίπεδο βλάβης-ποσοστό δυσκαμψίας) εκτελέστηκε με την επίλυση ενός αντίστροφου προβλήματος χρησιμοποιώντας το σύνολο των πολωνύμων επιφάνειας απόκρισης που προέκυψαν από το σχεδιασμό κατά Box-Behnken δίδοντας το αντίστοιχο ποσοστό μείωσης δυσκαμψίας σε κάθε θέση πιθανής βλάβης.

1.5 Επιδιόρθωση βλαβών σε δομικά στοιχεία

Μετά από την ανίχνευση των βλαβών σε ένα δομικό σύστημα μιας κατασκευής, το κρίσιμο θέμα που απασχολεί τους Μηχανικούς είναι η επιδιόρθωσή τους με στόχο την αποκατάσταση της αντοχής της κατασκευής. Η τεχνική επισκευής των ρηγματωμένων κατασκευών με χρήση σύνθετων ινωπλισμένων πολυμερών υπό μορφή επικολλητών υφασμάτων (Fibre Reinforced Polymers, FRP) έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική κατασκευαστική τεχνική, (Baker and Jones, 1988). Εντούτοις, ο σχεδιασμός των ενισχύσεων με σύνθετα υλικά παρουσιάζει κάποιες δυσκολίες. Ορισμένες από αυτές σχετίζονται με το γεγονός ότι η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται και από το επιβαλλόμενο εξωτερικό φορτίο του φορέα. Ειδικά σε περιπτώσεις δυναμικής φόρτισης οι δυσκολίες εντείνονται λόγω της φύσης του επιβαλλόμενου εναλλασσόμενου φορτίου, ώστε ως εναλλακτική λύση της τεχνικής επισκευής με σύνθετα υλικά, οι Wang et al. (2002) προτείνουν τη χρήση επιθεμάτων PZT αντί για FRP για την επιδιόρθωση μιας μεταλλικής δοκού.

Τα PZT ως ευφυή υλικά έχουν την ιδιότητα να παράγουν ελεγχόμενες τοπικές δυνάμεις και ροπές με αντίθετη επίδραση από αυτή των εξωτερικών φορτίων που δρουν στο φορέα. Κατά αυτό τον τρόπο, όπως ερευνάται για παράδειγμα στις εργασίες του Wang et al., όταν μια ρωγμή σε μία μεταλλική δοκό τείνει να ανοίξει

λόγω των εξωτερικών φορτίων που δρουν, τα υλικά αυτά επιφέρουν μια αντίθετη δράση παραμόρφωσης που εξουδετερώνει - μειώνει την εξωτερική δράση. Το κριτήριο επισκευής στην έρευνα των Wang et al. ήταν η προσπάθεια εξάλειψης της ασυνέχειας της ελαστικής απόκρισης της δοκού που προκλήθηκε από την ρωγμή. Σκοπός της επιδιόρθωσης ήταν να αντισταθμιστούν οι συγκεντρώσεις τάσεων γύρω από τη ρωγμή κατά τη διάρκεια της κάμψης με την εφαρμογή μιας δύναμης αντίδρασης μέσω των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων.

Η διαδικασία αυτή ονομάστηκε τεχνική ενεργής επισκευής (active repair) περιορίστηκε όμως η χρήση της σε σχετικά λεπτές και ελαφριές ομοιογενείς μεταλλικές κατασκευές, στις οποίες το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα μπορεί να συνεισφέρει στη γενική απόκριση του στοιχείου. Επίσης εφαρμόζεται σε περιπτώσεις στις οποίες η προϋπάρχουσα βλάβη (ρωγμή ή μείωση δυσκαμψίας και ασυνέχεια της ελαστικής απόκρισης) σταθεροποιείται και δεν οδηγεί στην προοδευτική ή γενική αστοχία του στοιχείου. Το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα ως διεγέρτης λειτουργεί σε περιορισμένη επιφάνεια λόγω του μεγέθους του και λόγω των ορίων ενεργοποίησης του. Η επίδρασή του είναι τοπική και σε αυτό οφείλεται το ότι δεν μπορεί να επιφέρει πολύ μεγάλες παραμορφώσεις και προκαλούμενες δυνάμεις σε όλα τα υλικά. Απαραίτητη προϋπόθεση θεωρείται η σωστή και ολοκληρωμένη επικόλληση στην επιφάνεια του υπό εξέταση στοιχείου. Στην περίπτωση, όμως, κατασκευών από σκυρόδεμα όπου η συμπεριφορά του υλικού είναι σύνθετη και ψαθυρή, η επ' ευθείας τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων στην επιφάνειά του σκυροδέματος δεν ενδείκνυται για επιβολή υπολογίσιμου φορτίου, (Rabinovitch, 2007a, b). Για αυτό το λόγο, σε περιπτώσεις συνήθων δομικών στοιχείων σε πραγματική κλίμακα τα οποία είναι ογκώδη, βαριά και από ανομοιογενή υλικά, όπως π.χ. το σκυρόδεμα, η τοποθέτηση μόνο πιεζοηλεκτρικών διεγερτών αποδεικνύεται ελλιπής στο να συνεισφέρει αποδοτικά στη βελτίωση της γενικής απόκρισής του. Στο πρόβλημα αυτό μπορεί να δώσει λύση η επικόλληση προηγουμένως κάποιου άλλου υλικού το οποίο να συνεργάζεται ήδη καλά με το σκυρόδεμα και να ενισχύει την μεταβίβαση των επιδράσεων των πιεζοηλεκτρικών διεγερτών. Εν συνεχεία με την επικόλληση του PZT στη νέα επιφάνεια αυτό πρόκειται να λειτουργήσει αποτελεσματικά - μονολιθικά όπως στην περίπτωση της μεταλλικής δοκού και PZT στις εργασίες των Wang et al. Στην περίπτωση αυτή φαίνεται να μπορούν να δώσουν λύση ο συνδυασμός των PZT με τα ινοπλισμένα πολυμερή υλικά (Fibre Reinforced Polymers, FRP).

Η χρήση των ινοπλισμένων πολυμερών υλικών (Fibre Reinforced Polymers, FRP) ως υλικά επισκευής και ενίσχυσης οικοδομικών έργων από σκυρόδεμα είναι μία πρόσφατη αλλά ήδη πολύ διαδεδομένη τεχνική, η οποία εφαρμόζεται επιτυχώς τα τελευταία χρόνια και εκτενώς σε πραγματικές κατασκευές, (Teng et al., 2002), (Rosenboom et al., 2007), (Schnerch et al., 2007), (Chalioris, 2003), (Karayannis and Sirkelis, 2008). Η επιδιόρθωση με αυτά τα σύνθετα υλικά, τα οποία επικολλώνται εξωτερικά στις περιοχές βλάβης, έχει ως στόχο την αποκατάσταση της αντοχής και σε ορισμένες περιπτώσεις και της δυσκαμψίας του δομικού στοιχείου. Ελάσματα ή υφάσματα FRP τοποθετούνται στο σημείο βλάβης που έχει υποδειχθεί από τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας που υλοποιήθηκε στο προηγούμενο στάδιο. Οι Park et al. (2000b) ερεύνησαν την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος πραγματικών διαστάσεων, όπως τοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα, τα οποία έχουν ενισχυθεί με σύνθετα υλικά. Η ευκολία στην εφαρμογή, η υψηλή διακριτικότητα και οι βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζουν τα υλικά αυτά αποτελούν τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου. Βασικό μειονέκτημα όμως των υλικών αυτών ως υλικά επεμβάσεων (επισκευής - ενίσχυσης) είναι ότι στις συνηθέστερες και πιο κοινές περιπτώσεις η αστοχία προέρχεται εξαιτίας της αποκόλλησής τους από το δομικό στοιχείο και όχι λόγω της θραύσης τους, (Karayannis and Chalioris, 2003). Κατ' αυτόν τον τρόπο, δεν εξαντλείται η μέγιστη εφελκυστική αντοχή τους και δεν γίνεται η βέλτιστη εκμετάλλευση των υψηλών δυνατοτήτων και προδιαγραφών τους. Το φαινόμενο αυτό έχει επίσης διαπιστωθεί και σε πειραματικές δοκιμές δομικών υποσυστημάτων ακραίων κόμβων δοκού - υποστυλωμάτων που έχουν εξ αρχής ενισχυθεί (προσεισμική ενίσχυση) ή επισκευασθεί και εν συνεχεία ενισχυθεί (μετασεισμική ενίσχυση) με επικολλημένα υφάσματα από ινωπλισμένα πολυμερή, (Tsonos, 2008), (Karayannis and Sirkelis, 2002, 2008). Επί πλέον, τα πειραματικά αυτά αποτελέσματα υπέδειξαν ότι η εφαρμογή και η επαρκής αγκύρωση των σύνθετων υφασμάτων στην περιοχή του κόμβου έχει ιδιαίτερη σημασία για την επιτυχία της μεθόδου ενίσχυσης.

Διάφορες συμβατικές μη καταστρεπτικές τεχνικές αξιολόγησης (Non Destructive Evaluation, NDE) έχουν παρουσιαστεί και αναλυθεί από διάφορους ερευνητές με στόχο την ανίχνευση και τον προσδιορισμό της αποκόλλησης των άκρων των FRP, (Kaiser and Karbhari, 2004). Αυτές οι συμβατικές μη καταστρεπτικές τεχνικές έχουν αποδειχθεί χρήσιμες για την ανίχνευση των κενών.

Παρ' όλα αυτά, σε καμία δεν παρέχονται επαρκείς πληροφορίες για την έναρξη και την ανάπτυξη του μηχανισμού αποκόλλησης.

Στην παρούσα διατριβή διερευνάται ένας νέος τρόπος αντιμετώπισης προβλημάτων αποκόλλησης των σύνθετων υλικών επισκευής δομικών στοιχείων με την χρήση ευφών και συγκεκριμένα πιεζοηλεκτρικών υλικών. Δεδομένου ότι οι H/M αποκρίσεις των επιθεμάτων PZT που επικολλώνται σε ένα δομικό στοιχείο εισάγουν χρήσιμες και σημαντικές πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του δομικού στοιχείου λειτουργούν ως αισθητήρες. Με τη λειτουργία του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου όταν ένα PZT βρίσκεται κάτω από την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου δημιουργείται μηχανική παραμόρφωση του υλικού με αποτέλεσμα να λειτουργεί ως διεγέρτης. Η προτεινόμενη διαδικασία βασίζεται στην τοποθέτηση συστήματος αισθητήρα - διεγέρτη στα άκρα του FRP. Ο συνδυασμός της απόκρισης του αισθητήρα με μία ειδική μέθοδο βελτιστοποίησης εξάγει την τάση που πρέπει να εφαρμοστεί στο διεγέρτη ώστε να αναπτυχθούν “ελεγχόμενες δευτερεύουσες δυνάμεις” ικανές να αντιστρέψουν και να αντισταθμίσουν την επικείμενη αποκόλληση στα άκρα του FRP. Θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα έχουν αναφερθεί για την σύνδεση πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων σε μία επιφάνεια στις εργασίες των Cheng and Taheri (2005), Giurgiutiu et al. (2003), Lin et al. (2001), Qing et al. (2006), Wu et al. (2006).

Η διαδικασία βελτιστοποίησης εφαρμόζεται στην περίπτωση δυναμικής φόρτισης και περιλαμβάνει τη χρήση του δείκτη σφάλματος E_r , ο οποίος υπολογίζει σε κάθε βήμα της ανάλυσης συχνотήτων του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων τη στατιστική διαφορά της σύνθετης αγωγιμότητας μεταξύ του υγιούς και με βλάβη δομικού στοιχείου. Η ανάλυση γίνεται με εναλλαγή των επιβαλλόμενων ηλεκτρικών φορτίων στο επίθεμα PZT της περίπτωσης του δομικού στοιχείου με βλάβη και στη συνέχεια σύγκριση (στατιστική διαφορά) με την απόκριση του υγιούς. Όταν αυτή η διαφορά του δείκτη βλάβης μηδενιστεί ή τείνει προς το μηδέν το πρόγραμμα βελτιστοποίησης έχει εντοπίσει και δίνει την αντίστοιχη τάση “επιδιόρθωσης”. Με την τάση “επιδιόρθωσης” αυτή εφαρμοζόμενη στον διεγέρτη επιτυγχάνεται η ταύτιση των ηλεκτρομηχανικών χαρακτηριστικών της σύνθετης αγωγιμότητας που λαμβάνεται από τον αισθητήρα, για τις δύο καταστάσεις (υγιούς και με βλάβη δομικού στοιχείου). Στόχος της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι να επιτευχθεί ταύτιση της απόκρισης του δομικού στοιχείου με βλάβη με την αντίστοιχη υγιή δοκό. Στην πραγματικότητα εφαρμόζοντας κατάλληλη τάση στο διεγέρτη λόγω του

αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου αυτός παράγει ‘δευτερεύουσες δυνάμεις’ ικανές να αντιστρέψουν και να αντισταθμίσουν την επικείμενη βλάβη. Ως «βλάβη» στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται η αποκόλληση του σύνθετου υλικού - FRP από την επιφάνεια του δομικού στοιχείου σκυροδέματος.

Σύμφωνα με την μεθοδολογία αυτή διερευνάται το πρόβλημα της αποκόλλησης των ινωπλισμένων πολυμερών ως υλικά επισκευής δομικών στοιχείων υπό δυναμική φόρτιση, με ταυτόχρονη χρήση πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων. Η διαδικασία βελτιστοποίησης επαναλαμβάνεται για κάθε συχνότητα του ενδιαφέροντος της κατασκευής όπου και λαμβάνεται η αντίστοιχη “τάση επιδιόρθωσης” για την περιοχή γύρω από κάθε ιδιοσυχνότητα. Με αυτό τον τρόπο παρέχεται μια τεχνική ενεργού διασφάλισης της συνάφειας μεταξύ FRP και σκυροδέματος. Αυτό το “ευφύες FRP” παρουσιάστηκε αρχικά στις εργασίες του Rabinovitch (2006a, 2006b) όπου η πρόληψη της αποκόλλησης της άκρης σε δοκούς σκυροδέματος ενισχύθηκε με εξωτερικά σύνθετα υλικά FRP. Στις εργασίες αυτές αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο προκειμένου να αξιολογηθεί η απόκριση μιας ενισχυμένης δοκού πραγματικού μεγέθους στην οποία συνεργαζόμενα στρώματα πιεζοηλεκτρικών ενεργών υλικών ενσωματώθηκαν στην επιφάνεια του FRP υπό στατικό φορτίο και για διαφορετικές διεγέρσεις των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Κατόπιν, η ηλεκτρική διέγερση βελτιστοποιήθηκε με την δυνατότητα διαφορετικών συνδυασμών πιεζοηλεκτρικών διεγέρσεων για να ελέγξει, να αποτρέψει, ή να καθυστερήσει την αποκόλληση των ακρών, χρησιμοποιώντας θεωρίες πρόβλεψης της αστοχίας, όπως τη θεωρία συγκέντρωσης τάσεων και του ποσοστού απελευθέρωσης ενέργειας. Το κριτήριο αστοχίας στην εργασία του Rabinovich για την αποκόλληση της άκρης του FRP βασίζεται στο «κριτήριο των τάσεων». Σε αυτή την περίπτωση οι τάσεις στο κρίσιμο σημείο καθορίζονται και συγκρίνονται με την αντιστοιχία μιας γενικευμένης «δύναμης» την οποία δεν πρέπει να υπερβούν.

Αν και, ο Rabinovitch (2007a,b) έδειξε θεωρητικά ότι με την εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων μειώθηκαν οι τάσεις στην άκρη του FRP με αποτέλεσμα να αποτραπεί η αποκόλληση και να αποφευχθεί η γενική αστοχία, έθεσε επίσης την ανάγκη μιας συστηματικότερης και ενεργού προσέγγισης για το σχεδιασμό και τη χρήση του πιεζοηλεκτρικού συστήματος αισθητήρα/διεγέρτη σε συνεργασία με το FRP. Κατ’ επέκταση της εργασίας του Rabinovitch, στην παρούσα διατριβή ερευνάται, η δυνατότητα χρήσης της θεωρίας ηλεκτρομηχανικής αγωγιμότητας σαν μία τεχνική ελέγχου της αποκόλλησης της άκρης του FRP στην

κρίσιμη διεπιφάνεια μεταξύ σκυροδέματος και κόλλας FRP σε πραγματικής κλίμακας κατασκευές υπό την επίδραση δυναμικών φορτίων.

Επίσης, η ιδέα του ελέγχου της αποκόλλησης του FRP και προσπάθειας της ενεργού διασφάλισης της συνάφειας μεταξύ FRP και σκυροδέματος βασίζεται στην αρχική ιδέα της εργασίας των Providakis et al. (2007a). Στην εργασία αυτή μελετάται η δυνατότητα ελέγχου της ταλάντωσης ενός δυναμικού συστήματος, όπως οι μεταλλικές πλάκες με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών (PZT) διεγερτών/αισθητήρων και τη θεωρία ηλεκτρομηχανικής αγωγιμότητας. Μία μεταλλική δοκός υποβάλλεται σε εξωτερική δυναμική φόρτιση και στην οποία επιδιώκεται η ενεργή μείωση των ταλαντώσεων της με τη χρήση πιεζοηλεκτρικού συστήματος αισθητήρα/διεγέρτη. Ο έλεγχος της απόκρισης των ταλαντώσεων στη μεταλλική πλάκα επιτυγχάνεται με τη διαδικασία βελτιστοποίησης των αποκρίσεων H/M αγωγιμότητας που λαμβάνονται από τα επιθέματα PZT. Η προτεινόμενη μεθοδολογία στην εργασία των Providakis et al. (2007a) οδηγεί στον υπολογισμό των απαραίτητων ηλεκτρικών τάσεων που δίνουν τις ‘δευτερεύουσες δυνάμεις’ που έχουν στόχο να ‘ακυρώσουν’ την απόκριση που προκαλείται από την εξωτερική δύναμη και να μειώσουν την ταλάντωση που αυτή προκαλεί. Σύμφωνα με την παραπάνω εργασία με τη χρήση των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων/διεγερτών είναι δυνατόν να ελεγχθεί η απόκριση ενός συστήματος και να επηρεαστεί με ‘ευφυείς δευτερεύουσες δυνάμεις’ με σκοπό τη μείωση των ταλαντώσεων κατά τη δυναμική φόρτιση.

Με βάση τα συμπεράσματα της παραπάνω εργασίας, αναπτύσσεται μια ειδική μεθοδολογία που επιδιώκει τη διασφάλιση της μεθόδου επισκευής με FRP σε ένα δομικό στοιχείο σκυροδέματος. Ο σκοπός αυτής της μεθοδολογίας είναι να παραχθούν κατάλληλες ‘δευτερεύουσες δυνάμεις’ από τα επιθέματα διεγερτών PZT ώστε να επιτευχθεί μία επιθυμητή απόκριση ενός δομικού στοιχείου με επικείμενη αποκόλληση του σύνθετου υλικού επισκευής του υπό εξωτερικό δυναμικό φορτίο. Στην περίπτωση αυτή ο στόχος της βελτιστοποίησης είναι η μείωση του κινδύνου αποκόλλησης της άκρης του FRP του δομικού στοιχείου λαμβάνοντας υπόψη την H/M απόκριση αγωγιμότητας του αντίστοιχου “υγιούς”. Ως “υγιές” θεωρείται το δομικό στοιχείο το οποίο υπό δυναμική φόρτιση εξακολουθεί να διατηρείται η συνάφεια μεταξύ της επιφάνειας του και του FRP.

Η χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών παρέχει το πλεονέκτημα της δυναμικής ασφαλούς επιδιόρθωσης με ενεργό τρόπο (active repair). Η βασική ηλεκτρομηχανική τους ιδιότητα λόγω του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, επιτρέπει να

εφαρμόζονται διαφορετικά φορτία τάσης ανάλογα με τη συχνότητα διέγερσης της κατασκευής ώστε η επιδιόρθωση να παραμένει ασφαλής, δηλαδή πλήρης και αποτελεσματική συνεχώς. Το σύστημα αισθητήρα/διεγέρτη εφαρμόζεται σε σημεία πιθανής αποκόλλησης στην επιφάνεια των FRP με τον ίδιο τρόπο που επικολλούνται σε άλλες επιφάνειες όπως π.χ. στις μεταλλικές πλάκες με χρήση εποξικής κόλλας. Τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα είναι ελαφριά, λεπτά και εύκολα να επικολληθούν σε μία κατασκευή και μπορούν να σχεδιαστούν με ελάχιστη αρνητική επιρροή στη γενική δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής.

Σε αυτή την περίπτωση η χρήση των ευφών υλικών και στην συγκεκριμένη μελέτη των πιεζοηλεκτρικών υλικών με τη μορφή επιθεμάτων δίνουν σημαντικά πλεονεκτήματα για την επιδιόρθωση της βλάβης των σύνθετων υλικών υπό δυναμική φόρτιση. Συγκεκριμένα μέσω των πιεζοηλεκτρικών διεγερτών επιδιώκεται να εφαρμόζεται κατά περίπτωση μία “δευτερεύουσα δύναμη” η οποία να αντιστρέφει και να αντισταθμίζει την επικείμενη βλάβη. Έτσι, αναπτύσσεται για πρώτη φορά μία διαδικασία εφαρμογής ενός “ευφούς και αναπροσαρμόσιμου FRP” με τη μέθοδο EMI για την επισκευή δομικών στοιχείων και κατ’ επέκταση κατασκευών υπό δυναμική φόρτιση.

1.6 Συμβολή της διδακτορικής διατριβής

Στην παρούσα διατριβή αναπτύσσεται μία μεθοδολογία ελέγχου δομικής ακεραιότητας με την οποία γίνεται διάγνωση της βλάβης σε δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα με χρήση ευφών πιεζοηλεκτρικών υλικών και τη μέθοδο EMA. Η διάγνωση της βλάβης αποτελείται από δύο στάδια, την ανίχνευση και την ταυτοποίησή της. Στη συνέχεια εφόσον διαγνωστεί η βλάβη προτείνεται μέθοδος επιδιόρθωσής της με τη χρήση επίσης της μεθόδου EMA και των ευφών πιεζοηλεκτρικών υλικών. Η επιδιόρθωση της βλάβης γίνεται σε συγκεκριμένες περιοχές του πεδίου των συχνοτήτων που έχουν σημαντικό πρακτικό ενδιαφέρον.

Η πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής έγκειται στη χρήση και εφαρμογή πρωτοποριακών μεθόδων ελέγχου δομικής ακεραιότητας σε δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα και χωρίζεται σε τρία στάδια: α) στην ανίχνευση της βλάβης, β) στην ταυτοποίηση της βλάβης και γ) στην επιδιόρθωση της βλάβης.

1.6.1 Εντοπισμός της βλάβης

Στο πρώτο στάδιο αρχικά για την ανίχνευση της βλάβης λαμβάνεται η απόκριση του υγιούς δομικού στοιχείου και του ίδιου σε μια οποιαδήποτε επόμενη κατάσταση βλάβης σε διάφορες συχνότητες διέγερσης. Στη συνέχεια με την εφαρμογή του δείκτη βλάβης RMSD μεταξύ των δύο καταστάσεων υπό δυναμικό εξωτερικό φορτίο γίνεται η αρχική διαπίστωση της βλάβης και διαπιστώνεται η ύπαρξη ή όχι της βλάβης. Στην παρούσα διατριβή ακολουθείται παρόμοια διαδικασία με αυτή που ακολουθείται πειραματικά από τους Tseng and Wang (2004), Soh et al. (2000), Yang et al. (2008) και Song et al. (2007). Συγκεκριμένα επεκτείνεται η παραπάνω μεθοδολογία και συγκρίνεται με την ανάπτυξη ενός μοντέλου FDARX στο πεδίο των συχνοτήτων. Στην περίπτωση που δεν είναι γνωστά τα δεδομένα από την κατάσταση βλάβης ο εντοπισμός της βλάβης γίνεται με την ανάπτυξη του στατιστικού μοντέλου FDARX. Το μοντέλο αυτό πρώτα αναπτύσσεται για το υγιές δομικό στοιχείο στο πεδίο των συχνοτήτων. Στη συνέχεια σε οποιαδήποτε επόμενη χρονική φάση αναπτύσσεται ένα νέο μοντέλο FDARX και διαπιστώνεται η βλάβη ανάλογα με τη στατιστική διαφορά - σφάλμα από το αρχικά παραχθέν “υγιές” μοντέλο. Το μοντέλο FDARX αναπτύσσεται στο πεδίο των συχνοτήτων λαμβάνοντας υπόψη τις αποκρίσεις ηλεκτρομηχανικής αγωγιμότητας των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων σε δομικό στοιχείο σκυροδέματος. Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται βασίστηκε στις εργασίες των Sohn et al. (2000), Rutherford et al. (2005), Adams (2001), Adams and Farrar (2002), Fasel et al. (2005) και Sohn et al. (2005). Οι Sohn et al. (2000) όμως εφάρμοσαν ένα μοντέλο ARX λαμβάνοντας υπόψη μόνο χρονο-ιστορίες με βάση επιταχύνσεις σε ένα δομικό στοιχείο σκυροδέματος και στη συνέχεια ακολούθησαν διαδικασία στατιστικού ελέγχου για την ανίχνευση βλάβης. Η εργασία των Rutherford et al. (2005) βασίζεται σε μοντέλα ARX της απόκρισης της ηλεκτρομηχανικής αγωγιμότητας στο χρόνο και στο πεδίο της συχνότητας και αναπτύσσει μεθοδολογία διάγνωσης βλάβης σε δυναμικά συστήματα λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή των μη γραμμικών όρων των μοντέλων ARX. Οι Adams (2001) και Adams and Farrar (2002) αναπτύσσουν γραμμικούς και μη-γραμμικούς τύπους μοντέλων ARX στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας για το χαρακτηρισμό βλαβών σε δομικά στοιχεία βασιζόμενοι στη μεταβολή των μη-γραμμικών συντελεστών των AR (Auto Regressive) αυτοπαλλινδρούμενων μοντέλων. Οι Fasel et al. (2005) βασίζονται σε μοντέλα ARX στο πεδίο συχνοτήτων και χρησιμοποιούν την

θεωρία των ακραίων τιμών για να εντοπίσουν βλάβες στους κόμβους μεταλλικού πλαισίου που εξετάζουν. Οι Sohn et al. (2005) αναλύουν ένα απλό δυναμικό σύστημα με τη χρήση μοντέλων ARX στο πεδίο του χρόνου και της θεωρίας ακραίων τιμών. Όλες οι προαναφερθείσες εργασίες αφορούν πειραματικές και μόνο μελέτες. Στην παρούσα διατριβή βασιζόμενοι στις παραπάνω εργασίες αναπτύχθηκε αριθμητική μεθοδολογία που χρησιμοποιεί ένα νέο μοντέλο FDARX σε περιβάλλον MATLAB στο πεδίο των συχνοτήτων, το οποίο εξασφαλίζει μεγάλη προσέγγιση στα αποτελέσματα προσομοίωσης της υγιούς ή οποιασδήποτε περαιτέρω κατάστασης βλάβης. Στη συνέχεια με χρήση της στατιστικής θεωρίας ακραίων τιμών στο πεδίο των συχνοτήτων και την εξαγωγή κατάλληλων ορίων εμπιστοσύνης επιτυγχάνεται υψηλού βαθμού αναγνώριση στατιστικά απομονωμένων χαρακτηριστικών (outliers) που ξεφεύγουν από τη συνήθη διακύμανση ενός συνόλου καταγραφών όπως στην παρούσα περίπτωση είναι η ηλεκτρομηχανική αγωγιμότητα. Ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός ότι με την υψηλού βαθμού αναγνώριση των απομονωμένων χαρακτηριστικών τιμών που επιτυγχάνεται στην παρούσα διατριβή βελτιώνεται αισθητά η ανίχνευση βλάβης στα υπό εξέταση δομικά στοιχεία.

1.6.2 Ταυτοποίηση της βλάβης

Εφόσον στο προηγούμενο στάδιο γίνει η διαπίστωση της βλάβης σε μία συγκεκριμένη φάση στο δομικό στοιχείο, στο επόμενο στάδιο γίνεται η ταυτοποίησή της. Δηλαδή η με υψηλή ακρίβεια εκτίμηση της θέσης και του επιπέδου της κατάστασης βλάβης. Η προτεινόμενη στην παρούσα διατριβή μεθοδολογία βασίζεται στη χρήση της μεθόδου EMA με τον σχεδιασμό προσομοιώσεων και τη χρήση μετα-μοντέλων για την ταυτόχρονη δημιουργία επιφανειών απόκρισης. Οι Moura και Steffen (2006) χρησιμοποίησαν αρχικά επιφάνειες απόκρισης με χαρακτηριστικό γνώρισμα τις ηλεκτρικές αποκρίσεις της σύνθετης αντίστασης στην επιφάνεια πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων για τη διάγνωση βλαβών στην περίπτωση αεροναυπηγικών εφαρμογών. Η συνδυασμένη χρήση μετα-μοντέλων και επιφανειών απόκρισης για τη διάγνωση βλαβών σε κατασκευές είναι γενικά πολύ περιορισμένη στη διεθνή βιβλιογραφία. Στις εργασίες των Cundy (2003) και Cundy et al. (2003) χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα επιφανειών απόκρισης που βασίστηκαν στο φαινόμενο της μεταβολής των ιδιοσυχνοτήτων σε κατασκευές απλών δυναμικών συστημάτων

που παρουσιάζουν βλάβη. Στην παρούσα εργασία τα μοντέλα επιφανειών απόκρισης χρησιμοποιούνται στην πιο σύνθετη περίπτωση δομικού στοιχείου από σκυρόδεμα. Επιπλέον γίνεται η χρήση της απόκρισης της ηλεκτρο-μηχανικής αγωγιμότητας στην επιφάνεια πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων η οποία είναι ενδεικτική και μοναδική για κάθε περίπτωση βλάβης. Έτσι αναπτύσσονται ειδικά μετα-μοντέλα με βάση αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα για κάθε περίπτωση βλάβης με βάση τη θεωρία στατιστικού σχεδιασμού πειραμάτων κατά τους Box-Behnken. Στη συνέχεια δημιουργούνται επιφάνειες απόκρισης των σχεδιασμένων απλοποιημένων μοντέλων οι οποίες χρησιμοποιούνται υπό μια αντίστροφη έννοια με τη χρήση προηγμένων τεχνικών βελτιστοποίησης σε περιβάλλον MATLAB για να πραγματοποιηθεί η ταυτοποίηση της θέσης και του επιπέδου της βλάβης.

1.6.3 Επιδιόρθωση της βλάβης

Μετά τη διάγνωση της βλάβης κατά την οποία γίνεται ο εντοπισμός και η ταυτοποίησή της, αναπτύσσεται μία μεθοδολογία επιδιόρθωσής της. Η επιδιόρθωση του δομικού στοιχείου σκυροδέματος γίνεται με εφαρμογή επικολλητών υφασμάτων FRP στο σημείο που υποδεικνύεται από την προαναφερθείσα διαδικασία ταυτοποίησης βλαβών. Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται σε ήδη γνωστή από τη βιβλιογραφία, (Teng et al., 2002), (Rosenboom et al., 2007), (Schnerch et al., 2007), (Dagher et al., 2002), (Karayannis, 2000), (Καραμπίνης και Πανταζοπούλου, 2000), μέθοδο επιδιόρθωσης δομικών στοιχείων με χρήση ινοοπλισμένων πολυμερών υλικών (FRP). Η μέθοδος αυτή όπως είναι γνωστό παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, εντούτοις εμφανίζει ένα πολύ βασικό μειονέκτημα. Τα υλικά αυτά ως υλικά επεμβάσεων συνήθως δεν προλαβαίνουν να εξαντλήσουν τις μέγιστες δυνατότητές τους λόγω της πρόωρης αποκόλλησής τους από το δομικό στοιχείο, (Καραμπίνης και Πανταζοπούλου, 2000), (Καραγιάννης και Σιρκελής, 2001), (Karayannis and Chalioris, 2003). Ειδικά στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης κατά την οποία αλλάζει συνεχώς φορά το εξωτερικά εφαρμοζόμενο φορτίο. Έτσι επέρχεται ευκολότερα το φαινόμενο της κόπωσης στις άκρες των FRP η οποία εντείνεται λόγω της εφαρμογής των υλικών αυτών σε επιφάνειες που είναι αδύνατη η περιτύλιξή τους με αποτέλεσμα την ευκολότερη αποκόλλησή τους λόγω των αναπτυσσόμενων τάσεων στην περιοχή. Αυτό συμβαίνει στις συνθήκες περιπτώσεις

πλακοδοκών ή κόμβων δοκών – υποστυλωμάτων. Στην περίπτωση της αποκόλλησης η οποία ξεκινάει συνήθως από τα άκρα του FRP η επέμβαση με τα υλικά αυτά δεν συνεισφέρει πια στην επιδιόρθωση του δομικού στοιχείου όπως αρχικά είχε σχεδιαστεί. Ωστόσο οι Wang et al. (2002) και Wang et al. (2004) αντικατέστησαν εξ' ολοκλήρου τα FRP με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα λόγω της προσαρμοστικότητάς τους στις διάφορες συνθήκες φόρτισης. Η διαδικασία άνω ονομάσθηκε ενεργή επισκευή (active repair), η εφαρμογή της όμως περιορίστηκε σε δομικά στοιχεία μικρά σε διαστάσεις και ελαφριά όπως οι μεταλλικές δοκοί όπου τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα μπορούν να συνεισφέρουν στην γενική απόκριση του δομικού στοιχείου. Στην περίπτωση συνήθων δομικών στοιχείων κατασκευασμένα από σκυρόδεμα τα οποία είναι ογκώδη και βαριά η τοποθέτηση και μόνο πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων δεν μπορεί να συνεισφέρει υπολογίσιμη επίδραση στη συνολική απόκριση του επί επιδιόρθωση δομικού στοιχείου. Στην παρούσα διατριβή προτείνεται ο συνδυασμός των FRP με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα, τα οποία λειτουργούν σαν διεγέρτες εφαρμογής της απαραίτητης αντίστροφης τάσης στην άκρη του FRP και έχουν σαν αποτέλεσμα την βελτίωση της συμπεριφοράς των. Έτσι καλύπτεται το μειονέκτημα των προηγούμενων εργασιών που εφαρμόζεται σε ελαφριές κατασκευές και ταυτόχρονα το πρόβλημα της αποκόλλησης των άκρων των FRP. Ο συνδυασμός αυτός έχει εφαρμοστεί σε στοιχεία σκυροδέματος σε παλαιότερες εργασίες του Rabinovitch (2006, 2007) όπου έχει φανεί αναλυτικά ότι ο συνδυασμός των πιεζοηλεκτρικών υλικών με FRP μειώνει τις τάσεις που δημιουργούνται στην άκρη του FRP με αποτέλεσμα να αποτραπεί η αποκόλλησή του. Βασιζόμενη στις παραπάνω εργασίες η παρούσα διατριβή εξετάζει την εφαρμογή του FRP σε στοιχείο σκυροδέματος, σε συνδυασμό με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα, τη μέθοδο EMA και μία προηγμένη τεχνική βελτιστοποίησης για την περίπτωση δυναμικής φόρτισης. Με αυτό τον τρόπο φαίνεται να βελτιώνεται ακόμη περισσότερο η αποτελεσματικότητα του FRP με μειωμένο τον κίνδυνο αποκόλλησης των άκρων του κατά τη διάρκεια της δυναμικής φόρτισης. Σαν κριτήριο ασφαλούς ενεργού επισκευής με χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών στην εργασία των Wang et al. (2002) το κριτήριο επισκευής που επιλέχθηκε είναι η εξάλειψη της ασυνέχειας της ελαστικής απόκρισης της δοκού. Σε επόμενη εργασία των Wang et al. (2004) το κριτήριο ασφαλούς ενεργούς επισκευής αποτέλεσε η αλλαγή των ιδιοσυχνοτήτων της δοκού με βλάβη. Ενώ στην εργασία του Liu (2007) επιλέχθηκε η ελαχιστοποίηση της πυκνότητας ενεργειακής παραμόρφωσης (strain energy density) στο άκρο της ρωγμής. Στην εργασία του

Rabinovitch (2006) ως κριτήριο ελέγχου της αποκόλλησης της άκρης του FRP ελέγχθηκαν δύο κριτήρια α) των τάσεων, σύμφωνα με το οποίο συγκρίνονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις στην άκρη του FRP με την αντοχή των υλικών της περιοχής, και β) τη θεωρία απελευθέρωσης ενέργειας, ως κριτήριο έναρξης της αποκόλλησης που έγκειται στην προσπάθεια μείωσης του ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας ο οποίος έχει συνέπεια τη μείωση των τάσεων που ευνοούν την έναρξη και ανάπτυξη της αποκόλλησης. Ως εναλλακτικό κριτήριο επισκευής στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται ο δείκτης σφάλματος E_r . Στα άκρα του FRP τοποθετείται σύστημα πιεζοηλεκτρικού διεγέρτη και αισθητήρα. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μεθοδολογία βελτιστοποίησης σε περιβάλλον MATLAB για την ελαχιστοποίηση του δείκτη σφάλματος E_r των ηλεκτρικών αποκρίσεων των αισθητήρων σε κάθε ξεχωριστή συχνότητα διέγερσης μεταξύ του αρχικού-υγιούς δομικού στοιχείου και του δομικού στοιχείου με επικείμενη αποκόλληση. Έτσι υπολογίζεται για κάθε συχνότητα του πεδίου η αντίστοιχη τάση επιδιόρθωσης που πρέπει να εφαρμοστεί στον διεγέρτη. Με την εφαρμογή της αντίστοιχης “τάσης επιδιόρθωσης” σε κάθε συχνότητα λόγω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου αναπτύσσονται οι αντίστοιχες “δευτερεύουσες” δυνάμεις και ροπές οι οποίες αντισταθμίζουν την επικείμενη αποκόλληση των άκρων του FRP κατά τη δυναμική φόρτιση.

1.7 Ανάλυση περιεχομένων κεφαλαίων διατριβής

Στο **δεύτερο** κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται διάφορες μέθοδοι ελέγχου δομικής ακεραιότητας των κατασκευών και συνοψίζονται οι στόχοι και τα πλεονεκτήματα των μεθόδων που χρησιμοποιούν ευφυή υλικά με έμφαση τη χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών και τη μέθοδο EMA. Αναφέρονται οι ιδιότητες των πιεζοηλεκτρικών υλικών και η λειτουργία του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Αναλύεται η έννοια της μεθόδου EMA και οι βασικές αρχές που διέπουν την εφαρμογή της κατά τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας.

Στο **τρίτο** κεφάλαιο αναπτύσσονται οι αναλυτικές σχέσεις της λειτουργίας του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου και της ηλεκτρομηχανικής αλληλεπίδρασης των πιεζοηλεκτρικών υλικών με την κατασκευή στην οποία επικολλώνται. Στη συνέχεια διατυπώνονται οι αναλυτικές σχέσεις που οδηγούν στη λειτουργία των πιεζοηλεκτρικών υλικών ως διεγέρτες και ως αισθητήρες και διατυπώνονται οι

καταστατικές εξισώσεις του συζευγμένου ηλεκτρομηχανικού πεδίου για το βασικό μοντέλο EMA και η χρήση του στον έλεγχο δομικής ακεραιότητας. Αναλύεται η σύνθετη μορφή της αντίστασης και της αγωγιμότητας.

Στο **τέταρτο** κεφάλαιο αναπτύσσεται ο τρόπος προσομοίωσης του σύνθετου ευφυούς δομικού συστήματος α) με τα αναλυτικά μοντέλα EMA και β) με τη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο **πέμπτο** κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η προτεινόμενη μεθοδολογία διάγνωσης βλάβης σε ένα δομικό στοιχείο. Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει αρχικά την ανίχνευση της βλάβης και εν συνεχεία την ταυτοποίησή της. Παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία και αξιολογούν τη χρήση της. Για την ανίχνευσή της εφαρμόζεται αρχικά ο δείκτης βλάβης RMSD και στη συνέχεια μία στατιστική επεξεργασία. Αναλύεται η στατιστική επεξεργασία η οποία περιλαμβάνει την εφαρμογή του στατιστικού μοντέλου FDARX και τη θεωρία ακραίων τιμών με την κατανομή GEV. Στη συνέχεια αναλύεται η θεωρία σχεδιασμού πειραμάτων και η μέθοδος επιφανειών απόκρισης που χρησιμοποιούνται για την ταυτοποίησή της.

Στο **έκτο** κεφάλαιο αναπτύσσεται η προτεινόμενη μεθοδολογία που αφορά την επιδιόρθωση βλαβών σε δομικά στοιχεία με τη χρήση της μεθόδου EMA υπό δυναμική φόρτιση. Η μεθοδολογία αφορά τον έλεγχο της αποκόλλησης των άκρων του FRP το οποίο έχει τοποθετηθεί ως υλικό επισκευής στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Ο έλεγχος της αποκόλλησης προκύπτει από το συνδυασμό χρήσης των FRP με πιεζοηλεκτρικό σύστημα διεγέρτη – αισθητήρα και μια διαδικασία βελτιστοποίησης που βασίζεται στον προτεινόμενο δείκτη ενεργούς επιδιόρθωσης. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά η ανωτέρω διαδικασία και τα αποτελέσματά της.

Τέλος στο **έβδομο** κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

2.1 Αναγκαιότητα ελέγχων στις κατασκευές

Οι κατασκευές πολιτικού μηχανικού αποτελούν σύνολα δομικών στοιχείων φέροντος οργανισμού φορτίων τα οποία έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να πληρούνται απαιτήσεις αντοχής και λειτουργικότητας. Κατά τη διάρκεια ζωής τους οι κατασκευές φθείρονται λόγω γήρανσης των υλικών κατασκευής, εκτεταμένης χρήσης, περιβαλλοντικών συνθηκών και ανεπαρκούς συντήρησης. Γι' αυτό πολλές φορές μετά από μία φυσική καταστροφή, όπως ένας σεισμός τα δομικά στοιχεία παρουσιάζουν βλάβες και δεν συμπεριφέρονται πλέον όπως αρχικά είχαν σχεδιαστεί. Έτσι κατά τη διάρκεια ζωής τους θέτονται κίνδυνοι ασφάλειας και τίθεται θέμα αξιοπιστίας.

Η κτιριακή υποδομή που περιλαμβάνει πολλά παλαιά κτίρια, γέφυρες, σήραγγες, φράγματα, μνημεία κ.λπ., από ποικίλα δομικά υλικά ανάλογα με την περίοδο κατασκευής τους, απαιτεί τον συνεχή έλεγχο και συντήρηση για να διατηρηθούν δομικά σε καλή κατάσταση με την έγκαιρη διάγνωση προβλημάτων στατικότητας ή ελλειπών

αντισεισμικής ικανότητας. Με το διαρκή έλεγχο και την απαραίτητη συντήρηση τα κτίρια θα είναι ασφαλή κατά τη διάρκεια της χρήσης τους από μόνιμα φορτία ή λόγω ενός επικείμενου σεισμού. Η γρήγορη απόκριση και ο αυτοματισμός με σκοπό τον εντοπισμό φθορών και βλαβών οι οποίες υπονομεύουν τη λειτουργικότητα των κατασκευών γίνεται επιτακτική ανάγκη και μάλιστα με συνεχείς και επί τόπου τεχνικές ελέγχου κυρίως σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα. Ο έλεγχος της δομικής κατάστασης γίνεται με μεθόδους οι οποίες συνεχώς βελτιώνονται μέσω της ανάπτυξης της τεχνολογίας και των υλικών στον τομέα αυτό.

Η δυνατότητα ελέγχου μιας κατασκευής και ανίχνευσης βλάβης σε αυτή στο πιο αρχικό στάδιό της αποτελεί κυρίαρχο ενδιαφέρον σε όλα τα επιστημονικά πεδία της εφαρμοσμένης μηχανικής. Συνεχώς νέοι μέθοδοι ελέγχου αναπτύσσονται συστηματικά και παράλληλα με τη βελτίωση και εξέλιξη νέων υλικών και τεχνολογιών. Ταυτόχρονα, λόγω των αυξημένων απαιτήσεων ασφάλειας και λειτουργικότητας στις κατασκευές οι έλεγχοι θα πρέπει να γίνονται συχνά κατά την διάρκεια λειτουργίας τους και χωρίς να έχουν αρνητική επιρροή σε αυτές.

2.2 Παραδοσιακές μέθοδοι ελέγχου των κατασκευών

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την τεχνική εφαρμογή τους, σε καταστρεπτικές και σε μη καταστρεπτικές μεθόδους (Non Destructive Evaluation, NDE). Για τις καταστρεπτικές δοκιμές, απαιτείται και λαμβάνεται για έλεγχο μικρό τμήμα της κατασκευής έτσι ώστε να αξιολογηθεί η δομική κατάσταση (μηχανικές ιδιότητες κλπ). Με αυτό τον τρόπο ο έλεγχος είναι προγραμματισμένος και περιορίζεται σε τοπικό επίπεδο ενώ ταυτόχρονα επηρεάζεται άμεσα η λειτουργία της κατασκευής. Οι μέθοδοι αυτοί παρουσιάζουν πολλές φορές προβλήματα λόγω της ιδιομορφίας, της πολυπλοκότητας και του μεγέθους της κατασκευής.

Η δεύτερη κατηγορία αφορά τις μη καταστρεπτικές μεθόδους οι οποίες δεν προκαλούν ζημιά στην κατασκευή. Έρευνες των τελευταίων ετών έχουν ως αποτέλεσμα την εξέλιξη και βελτίωση αυτών των τεχνικών. Σ' αυτές τις μεθόδους χρησιμοποιούνται κυρίως νέα υλικά τεχνολογίας αιχμής όπως είναι τα ευφυή υλικά. Αυτές οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι επιπλέον χρησιμοποιούνται και για τον έλεγχο της δομικής κατάστασης της κατασκευής και των υλικών (εντατική κατάσταση, ιδιότητες υλικών)

σε συνεχή βάση. Κυρίως αυτή η επιδίωξη οδήγησε στην δημιουργία και ανάπτυξη μεθόδων ελέγχου δομικής ακεραιότητας οι οποίες να έχουν τη δυνατότητα να διενεργούνται υπό συνεχή και αδιάκοπη λειτουργία.

Παραδοσιακές μέθοδοι διάγνωσης βλαβών είναι οι οπτικοί ή οι τοπικά πειραματικοί μέθοδοι, όπως οι μέθοδοι ακουστικής ή υπερηχητικής εκπομπής, οι μέθοδοι μαγνητικών πεδίων, η ραδιογραφία, οι μέθοδοι ρευμάτων αυτεπαγωγής, θερμικού πεδίου κ.λπ.. Όλες οι παραπάνω μέθοδοι είναι παραμετρικές δηλαδή περιορίζονται στην απαίτηση γνώσης κάποιων παραμέτρων της κατασκευής εκ των προτέρων. Μερικές από τις παραμέτρους της κατασκευής είναι οι ιδιότητες των υλικών, οι ιδιομορφές, οι συντελεστές απόσβεσης κ.λπ. Δεδομένων αυτών των περιορισμών αυτές οι πειραματικές μέθοδοι μπορούν να διαγνώσουν βλάβη μόνο επάνω ή κοντά στην επιφάνεια της κατασκευής. Η ανάγκη ανάπτυξης γενικών μεθόδων διάγνωσης βλαβών που θα μπορούν να εφαρμοστούν σε περισσότερο πολύπλοκες κατασκευές έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη μη-παραμετρικών μεθόδων οι οποίες εξετάζουν αλλαγές στα χαρακτηριστικά μηχανικής ταλάντωσης των κατασκευών.

Τις τελευταίες δεκαετίες σε έρευνες επάνω στο πεδίο του δομικού ελέγχου με χρήση μη καταστρεπτικών μεθόδων έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές. Μερικές από αυτές είναι η τεχνική στατικής απόκρισης των κατασκευών, η χαμηλής συχνότητας δυναμική απόκριση και οι τεχνικές οι οποίες υιοθετούν τα ευφυή υλικά και συστήματα. Τεχνικές οι οποίες βασίζονται στην μετατόπιση στατικής απόκρισης, (Banan and Hjelmstad, 1994) και σε υπολογισμό στατικής τάσης (Sanayei and Saletnik, 1996) εμπεριέχουν τον υπολογισμό πραγματικών μετατοπίσεων και τάσεων το οποίο όμως είναι περίπλοκη διαδικασία για μεγάλης κλίμακας κατασκευές. Η υπολογιστική μέθοδος για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της κατασκευής βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του δείκτη των διαφορών μεταξύ του μοντέλου και των πραγματικών μετρήσεων. Η μέθοδος αυτή που πραγματοποιείται επαναλαμβανόμενα εξαρτάται από την αρχική επιλογή των παραμέτρων και θεωρείται περίπλοκη. Πολλές από τις συμβατικές μη καταστρεπτικές μεθόδους αξιολόγησης (NDE), όπως η ραδιογραφία, η ακουστική εκπομπή, η επίδραση του μαγνητικού πεδίου, το ρεύμα αυτεπαγωγής, το θερμικό πεδίο και η τεχνική των υπερήχων εμφανίζουν σοβαρούς περιορισμούς για τις επιτόπου εφαρμογές. Όλες αυτές οι μέθοδοι απαιτούν δυνατότητα πρόσβασης στα επιθεωρούμενα δομικά στοιχεία και περιλαμβάνουν συνήθως ογκώδη εξοπλισμό.

2.3 Έλεγχος δομικής ακεραιότητας SHM

2.3.1 Νέες αντιλήψεις στις μεθόδους ελέγχου των κατασκευών (SHM)

Σήμερα έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται πολλές τεχνικές εντοπισμού βλαβών στις κατασκευές οι οποίες αποτελούν τις μεθόδους ελέγχου δομικής ακεραιότητας (Structural Health Monitoring, SHM). Έλεγχος δομικής ακεραιότητας SHM είναι η διαδικασία της εφαρμογής μιας ολοκληρωμένης τεχνικής προσδιορισμού βλαβών στις κατασκευές. Ο SHM δημιουργήθηκε από τη συνύπαρξη διαφόρων τεχνικών και μπορεί να περιλαμβάνει στη διαδικασία του προϋπάρχουσες παραδοσιακές μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου των κατασκευών.

Με την τεχνολογική πρόοδο των ευφών υλικών, των αισθητήρων, την επεξεργασία σήματος και την αύξηση της υπολογιστικής ισχύος καθώς επίσης και με τις αυξανόμενες ανάγκες για συνεχή έλεγχο και αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας, ο SHM έχει προκύψει ως φυσική εξέλιξη από τις παραδοσιακές τεχνολογίες δομικών ελέγχων για να καλύψει αυτές τις απαιτήσεις.

2.3.2 Στόχος του ελέγχου δομικής ακεραιότητας SHM

Η βασική συνεισφορά του SHM βασίζεται στην ανάπτυξη νέων ευαίσθητων υλικών τεχνολογίας αιχμής για τη δημιουργία αισθητήρων και διεγερτών με στόχο το συνεχή και αδιάκοπο έλεγχο των κατασκευών με ταυτόχρονη λειτουργία της κατασκευής εν ώρα ελέγχου. Χαρακτηριστικό του SHM είναι ότι εφαρμόζεται στο σύνολο της κατασκευής και όχι τμηματικά. Ο αρχικός στόχος του είναι να αντικαταστήσει τους τρέχοντες κύκλους επιθεώρησης με ένα ενσωματωμένο σύστημα συνεχούς ελέγχου - παρακολούθησης και όχι απλά να ανιχνεύει τη δομική αστοχία, αλλά και να παρέχει μια πρόωρη ένδειξη της βλάβης.

2.3.3 Βλάβη σε ένα δομικό σύστημα

Ως βλάβη ορίζονται οι αλλαγές που εισάγονται σε ένα δομικό σύστημα οι οποίες έχουν αρνητική επίδραση στην παρούσα ή μελλοντική απόκρισή του. Οι

αλλαγές αυτές μπορεί να συμβούν στις ιδιότητες των υλικών, στις συνοριακές συνθήκες ή στην ενότητα του συστήματος. Σύμφωνα με αυτό τον ορισμό, δεν είναι σημαντική η έννοια της βλάβης χωρίς τη σύγκριση δύο διαφορετικών καταστάσεων του συστήματος, μια από τις οποίες αντιπροσωπεύει το αρχικό, και συχνά υγιές σύστημα. Η βλάβη δεν σημαίνει απαραίτητα συνολική απώλεια της λειτουργίας του συστήματος, αλλά ότι το σύστημα δεν λειτουργεί πλέον με το βέλτιστο τρόπο. Δεδομένου ότι η βλάβη έχει διαβαθμίσεις, διαδοχικά αυξάνεται και φθάνει σε ένα επίπεδο όπου οι επιπτώσεις της είναι σημαντικές για τη λειτουργία του δομικού συστήματος και δεν θεωρείται πλέον αποδεκτή. Αυτό το σημείο αναφέρεται ως αστοχία. Με την τεχνική SHM επιτυγχάνεται η πρόληψη της αστοχίας αφού η διάγνωση της βλάβης γίνεται σε αρχικό στάδιο.

Η βλάβη που προσδιορίζεται από τις αλλαγές στα δυναμικά χαρακτηριστικά ή στην απόκριση των κατασκευών λαμβάνει ιδιαίτερη σημασία στη σύγχρονη βιβλιογραφία. Η βασική ιδέα για την ανίχνευσή της είναι ότι οι ιδιομορφικές παράμετροι, ιδιοσυχνότητες, ιδιομορφές και ιδιομορφική απόσβεση έχουν σχέση με τις φυσικές ιδιότητες της κατασκευής όπως μάζα, απόσβεση και δυσκαμψία. Επομένως, αλλαγές στις φυσικές ιδιότητες μπορεί να προκαλέσουν αλλαγές στις ιδιομορφικές ιδιότητες.

Είναι γνωστό, ότι οι βλάβες μικρού σχετικά βαθμού δεν εντοπίζονται άμεσα αλλά παραμένουν μη ανιχνεύσιμες ενώ ταυτόχρονα επεκτείνονται σε υψηλότερα επίπεδα και τελικώς προκαλούν την αστοχία. Όμως η έγκαιρη ανίχνευση της βλάβης μπορεί να αποτρέψει την καταστροφική αστοχία. Γι' αυτό, η οπτική μόνο επιθεώρηση από εκπαιδευμένους μηχανικούς δεν μπορεί να αξιολογήσει τη γενική κατάσταση μεγάλου αριθμού κατασκευών και μάλιστα σε σύντομο χρονικό διάστημα, όπως για παράδειγμα απαιτείται αμέσως μετά από έναν σεισμό. Κατά συνέπεια, διάφορες τεχνικές ανίχνευσης εντοπισμού βλαβών και ελέγχου δομικής κατάστασης έχουν ήδη προταθεί και μελετηθεί στη βιβλιογραφία, (Uomoto, 2000).

2.3.4 Μέθοδοι SHM που βασίζονται στη μηχανική ταλάντωση της κατασκευής

Οι περισσότερες έρευνες στο πεδίο του ελέγχου της δομικής ακεραιότητας SHM μέχρι σήμερα έχουν εστιάσει σε μεθόδους μηχανικής ταλάντωσης οι οποίες χρησιμοποιούν χαμηλές φυσικές συχνότητες και ιδιομορφές. Μεγάλη ώθηση στον έλεγχο δομικής ακεραιότητας έχει δοθεί λόγω της ταχείας ανάπτυξης αισθητήρων όπως

π.χ. οι πιεζοηλεκτρικοί, οι οπτικές ίνες, τα MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems), τα Strain-gages, τα κράματα μνήμης σχήματος, τα ηλεκτρο-συστολικά υλικά, τα μαγνητο-συστολικά υλικά, τα ηλεκτρο-ρεολογικά υγρά κ.λπ.

Οι παραπάνω αισθητήρες χρησιμοποιούνται για να καταγράψουν μεταβλητές απόκρισης όπως παραμόρφωση, επιτάχυνση, κύματα ήχου, ηλεκτρική ή μαγνητική αντίσταση, πίεση ή θερμοκρασία. Γενικά τα παραπάνω συστήματα μπορούν να διαχωριστούν σε παθητικά και ενεργητικά συστήματα δειγματοληψίας, Kessler (2002). Τα παθητικά συστήματα δειγματοληψίας είναι εκείνα που λειτουργούν ανιχνεύοντας την απόκριση της κατασκευής λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών χωρίς οποιαδήποτε εισαγόμενη τεχνητή ενέργεια, ενώ τα ενεργητικά συστήματα είναι εκείνα που απαιτούν εξωτερικά παρεχόμενη ενέργεια υπό μορφή πίεσης ή ηλεκτρομαγνητικού κύματος για να λειτουργήσουν κατάλληλα. Τα ενεργά συστήματα που λειτουργούν με τη μηχανική ταλάντωση περιλαμβάνουν την μέθοδο συνάρτησης μετατροπής στην ανάλυση ιδιομορφών και τη διάδοση κυμάτων Lamb. Οι παθητικές τεχνικές τείνουν να είναι απλούστερες στην εφαρμογή και τη λειτουργία σε ένα σύστημα SHM και παρέχουν χρήσιμες γενικές ικανότητες ανίχνευσης βλάβης, εντούτοις γενικά οι μέθοδοι με ενεργά συστήματα είναι περισσότερο ακριβείς στην παροχή συγκεκριμένων πληροφοριών για μια περιοχή με βλάβη. Γι' αυτό τα τελευταία χρόνια οι τεχνικές διάγνωσης βλάβης που χρησιμοποιούν εξαναγκασμένες μηχανικές ταλαντώσεις εξελίσσονται συνεχώς. Όσο οι κατασκευές γίνονται μεγαλύτερες και περισσότερο σύνθετες, μερικές από τις παθητικές τεχνικές γίνονται πρακτικά ανέφικτες και για το λόγο αυτό θα πρέπει να αναπτυχθούν περισσότερο κατάλληλες μέθοδοι. Έχει διαπιστωθεί ότι σε συμβατικούς αισθητήρες προβλήματα προκύπτουν από α) το μέγεθος του αισθητήρα ο οποίος είναι ογκώδης, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα σε μία συνήθη κατασκευή, και β) το κόστος των αισθητήρων το οποίο περιορίζει τον αριθμό τους και έτσι δεν μπορεί να αναπτυχθεί μία γενική ολοκληρωμένη διαδικασία αλλά μόνο επαναλαμβανόμενος και τοπικός έλεγχος.

Οι μέθοδοι δυναμικής απόκρισης χαμηλών συχνοτήτων αναπτύσσονται με την αρχή ότι η βλάβη έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή στις παραμέτρους της κατασκευής όπως η μάζα, η απόσβεση και η δυσκαμψία. Το γεγονός ότι η βλάβη έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της δυσκαμψίας της κατασκευής με αποτέλεσμα έτσι να μειώνονται οι φυσικές συχνότητές της έχει οδηγήσει πολλές τεχνικές ανίχνευσης βλάβης στη χρήση ιδιομορφικής ανάλυσης, (Tseng and Naidu, 2002). Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν αποτίμηση των ιδιοσυχνοτήτων, των συντελεστών απόσβεσης, και των

ιδιομορφών για συσχέτισμό της βλάβης στις κατασκευές. Για παράδειγμα η μέθοδος που βασίζεται στην αλλαγή των ιδιομορφών, η μέθοδος που βασίζεται στην αλλαγή της δυσκαμψίας, η μέθοδος που βασίζεται στην αλλαγή της ελαστικότητας. Αν και αποδεκτές αυτές οι μέθοδοι που βασίζονται στην ταλάντωση εντούτοις παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα, (Banks et al., 1996). Οι παραπάνω μέθοδοι βασίζονται σε σχετικά μικρό αριθμό πρώτων γενικών ιδιομορφών, οι οποίες δεν είναι ευαίσθητες στον εντοπισμό πολύ μικρών βλαβών με αποτέλεσμα οι τεχνικές αυτές να τείνουν να αποτυγχάνουν στο εντοπισμό σχετικά μικρών αλλαγών. Επίσης αυτές οι παραμετρικές τεχνικές απαιτούν λεπτομερή γνώση των ευαίσθητων τμημάτων της κατασκευής και των μορφών αστοχίας της. Στις χαμηλές συχνότητες οι ιδιομορφές μπορούν να απεικονίσουν μόνο γενικές αλλαγές σε μια κατασκευή. Η βλάβη όμως είναι ένα τοπικό φαινόμενο το οποίο δεν γίνεται διακριτό μόνο από μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούν χαμηλές ιδιομορφές. Έτσι προκύπτουν κάποιοι περιορισμοί λόγω του μήκους του κύματος που αναπτύσσεται στο υλικό. Οι περιορισμοί είναι ανάλογοι με την πολυπλοκότητα του υλικού που εξαρτάται από τις ιδιότητές του, (Sotiropoulos and Babatsouli, 2002).

Οι Doebling et al. (1998) επισημαίνουν ότι αυτός ο περιορισμός μπορεί να ξεπεραστεί εάν χρησιμοποιηθούν υψηλότερες ιδιοσυχνότητες, οι οποίες σχετίζονται με τοπικές αποκρίσεις. Όσο περισσότερη ενέργεια χρειάζεται για να παραχθεί υπολογίσιμη απόκριση σε υψηλές συχνότητες της κατασκευής τόσο δυσκολότερα αυτό επιτυγχάνεται με συμβατικούς διεγέρτες.

Η πρόσφατη χρήση των ευφύων υλικών, όπως τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, τα κράματα μνήμης σχήματος και οι οπτικές ίνες έχουν προσθέσει μια νέα προοπτική στον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών (Structural Health Monitoring, SHM).

2.3.5 Έλεγχος δομικής ακεραιότητας με χρήση ευφύων υλικών

Λύση στο πρόβλημα αυτό δίνουν πιθανώς τα “ευφυή” υλικά ως νέα υλικά που δίνουν τη δυνατότητα να βελτιωθούν σημαντικά οι μέθοδοι ελέγχου δομικής ακεραιότητας. Ως “ευφυή” υλικά ορίζονται τα υλικά τεχνολογίας αιχμής τα οποία αλλάζουν κάποιες από τις ιδιότητές τους με συγκεκριμένο τρόπο μετά από επιβολή σε αυτά μιας εξωτερικής διέγερσης. Το κοινό χαρακτηριστικό όλων των ευφύων υλικών

είναι η ικανότητά τους να αντιδρούν σε εξωτερικά ερεθίσματα. Βασιζόμενοι στο κοινό αυτό χαρακτηριστικό χρησιμοποιούνται ως βασικά στοιχεία σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα για τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας.

2.3.6 Ευφυή Υλικά

Λόγω της ανεπτυγμένης τεχνογνωσίας και βιομηχανικής παραγωγής προϊόντων σε μικρο-μακροσκοπικό επίπεδο, υπάρχει μεγάλη διαθεσιμότητα ευφυνών υλικών, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως διεγέρτες είτε ως αισθητήρες σε ευφυείς κατασκευές, ανάλογα με τα φυσικά τους χαρακτηριστικά. Αν και τα συγκεκριμένα υλικά στη βασική τους μορφή δεν είναι ευφυή, λόγω του ότι αποτελούν κύρια στοιχεία μιας ευφυνούς κατασκευής, έχει καθιερωθεί να αποκαλούνται ‘ευφυή’. Μερικά από τα πιο διαδεδομένα ευφυή υλικά που είναι διαθέσιμα για πρακτικές εφαρμογές είναι τα εξής:

- Κράματα Μνήμης Σχήματος (Shape Memory Alloys), τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως ως διεγέρτες και λειτουργούν υπό την αλληλεπίδραση θερμο-μηχανικού πεδίου.
- Οπτικές Ίνες (Fiber Optics), οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως διεγέρτες και ως αισθητήρες και η λειτουργία τους βασίζεται στην ενέργεια του φωτός.
- Ηλεκτρο-συστολικά Υλικά (Electrostrictive Materials), τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως ως διεγέρτες και λειτουργούν υπό την αλληλεπίδραση ηλεκτρικού και μηχανικού πεδίου.
- Μαγνητο-συστολικά Υλικά (Magnetostrictive Materials), τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως ως διεγέρτες και λειτουργούν υπό την αλληλεπίδραση μαγνητικού και μηχανικού πεδίου.
- Ηλεκτρο-ρεολογικά Υγρά (Electro-rheological Fluids) και Μαγνητοροικά Υγρά (Magnetorheological Fluids), τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως ως στοιχεία μεταβαλλόμενης απόσβεσης και λειτουργούν υπό την αλληλεπίδραση ηλεκτρο-μηχανικού πεδίου.

Από τα προαναφερθέντα ευφυή υλικά που είναι διαθέσιμα για χρήση σε ευφυείς κατασκευές, κυρίως τα πιεζοηλεκτρικά υλικά συνδυάζουν τη μοναδική ικανότητα να χρησιμοποιούνται και ως αισθητήρες και ως διεγέρτες ταυτόχρονα. Επιπλέον

πλεονεκτήματα των πιεζοηλεκτρικών υλικών που δικαιολογούν την ευρεία χρήση τους είναι:

- Το ευρύ φάσμα συχνοτήτων (0-1MHz) στο οποίο λειτουργούν και ο μικρός χρόνος απόκρισής τους.
- Η απλή ενσωμάτωσή τους στην κατασκευή λόγω του μεγέθους τους.
- Η δυνατότητά τους να παράγουν μεγάλη ισχύ.
- Η μεγάλη ποικιλία και διαθεσιμότητα πιεζοπολυμερών και πιεζοκεραμικών υλικών στην αγορά.
- Το χαμηλό κόστος τους.
- Η τεχνογνωσία, η οποία προήλθε χρησιμοποιώντας αυτά τα υλικά σε διατάξεις μετατροπών σήματος τα προηγούμενα χρόνια με αποτέλεσμα την καθιέρωσή τους σε διάφορους τομείς όπως και στον τομέα της μηχανικής των κατασκευών.

2.3.7 Χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών

Στην παρούσα διατριβή τα πιεζοηλεκτρικά υλικά χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα ως διεγέρτες και αισθητήρες και ως διεγέρτες απλώς. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε μία νέα μεθοδολογία για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας δομικών στοιχείων και κατ' επέκταση κατασκευών, η οποία βασίζεται στη χρήση και εφαρμογή των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Οι προτεινόμενες μέθοδοι οι οποίες αναπτύσσονται στα επόμενα κεφάλαια βασίζονται πρώτιστα στα παραπάνω πλεονεκτήματα των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Η ευρεία χρήση τους τις τελευταίες δεκαετίες στο πεδίο της μηχανικής ενισχύει την αποτελεσματικότητά τους με ποικίλη βιβλιογραφία.

Οι ιδιότητες και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των πιεζοηλεκτρικών υλικών σε συνδυασμό με την αλληλεπίδραση τους με την κατασκευή την οποία εφαρμόζονται, αποτέλεσαν βασικό μέσο αξιοποίησης με στόχο την ανάπτυξη ειδικής μεθοδολογίας για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας. Το ευρύ φάσμα συχνοτήτων στο οποίο λειτουργούν αλλά κυρίως η μεγάλη ισχύς που παράγουν τα κάνουν να ξεχωρίζουν έναντι άλλων τύπων αισθητήρων και διεγερτών. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά βασίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο δηλαδή όταν το υλικό υπόκειται σε μηχανική πίεση, τότε εμφανίζεται ανάλογο ηλεκτρικό φορτίο στην επιφάνειά του (άμεση επίδραση) και, αντιθέτως, όταν βρίσκεται κάτω από την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου αναπτύσσεται

ανάλογη μηχανική παραμόρφωση στο υλικό (αντίστροφη επίδραση), (Giurgiutiu, 2007), (Piefort, 2001). Η μέθοδος ελέγχου δομικής ακεραιότητας που προτείνεται στην παρούσα διατριβή στη συνολική διαδικασία χρησιμοποιεί ταυτόχρονα τις άμεσες και τις αντίστροφες εκδοχές της πιεζοηλεκτρικής επίδρασης, στην οποία ένα μεμονωμένο πιεζοηλεκτρικό επίθεμα μπορεί να χρησιμοποιείται και ως αισθητήρας και ως διεγέρτης ταυτόχρονα. Με αυτό τον τρόπο αυτά τα υλικά εκτελούν διπλή λειτουργία, διεγέρτη και αισθητήρα ταυτόχρονα με αποτέλεσμα μείωση της υλικοτεχνικής υποδομής.

Η παραπάνω μέθοδος εφαρμόζεται είτε με την ενσωμάτωση (embedded) στο εσωτερικό πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων κατάλληλα μονωμένων από την υγρασία ή με την επικόλληση πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων με κατάλληλη συγκολλητική ρητίνη επάνω στο προς έλεγχο δομικό σύστημα. Στην τεχνική με την επικόλληση πιεζοηλεκτρικού στοιχείου η διέγερσή του επιτυγχάνεται με μικρής τάξης ηλεκτρικό φορτίο, ενώ ταυτόχρονα με ειδική συσκευή λαμβάνεται η απόκριση.

Η χρήση ενός ενεργητικού συστήματος ταλάντωσης όπως ένας πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης, διεγείρει σε υψηλές συχνότητες, τυπικά από 10-500 kHz επομένως μπορεί να διεγείρει σε υψηλές ιδιοσυχνότητες την κατασκευή. Με αυτές τις υψηλές συχνότητες γίνεται περισσότερο εφικτός ο εντοπισμός με μεγαλύτερη ακρίβεια των τοπικών αλλαγών της κατασκευής, όπως αλλαγές στη μάζα, στη δυσκαμψία, στην απόσβεση όπου οι άλλες συμβατικές μέθοδοι ταλάντωσης αποτυγχάνουν. Έτσι οι συχνότητες οι οποίες χρησιμοποιούνται είναι της τάξης των kilohertz (kHz).

Η απόκριση των PZT που επικολλώνται σε ένα δομικό στοιχείο μέσω της H/M απόκρισης έχει αποδειχθεί ότι ανακλά χρήσιμες και σημαντικές πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του δομικού στοιχείου. Τα δεδομένα των αποκρίσεων των PZT (χαρακτηριστικά γνωρίσματα) μέσω μίας ειδικής διαδικασίας αναγνώρισης βλάβης χρησιμοποιούνται για την διάγνωση της βλάβης σε ένα δομικό στοιχείο και κατ' επέκταση σε μία κατασκευή.

2.4 Θεωρία του πιεζοηλεκτρισμού και πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

2.4.1 Πιεζοηλεκτρικά υλικά - ανασκόπηση

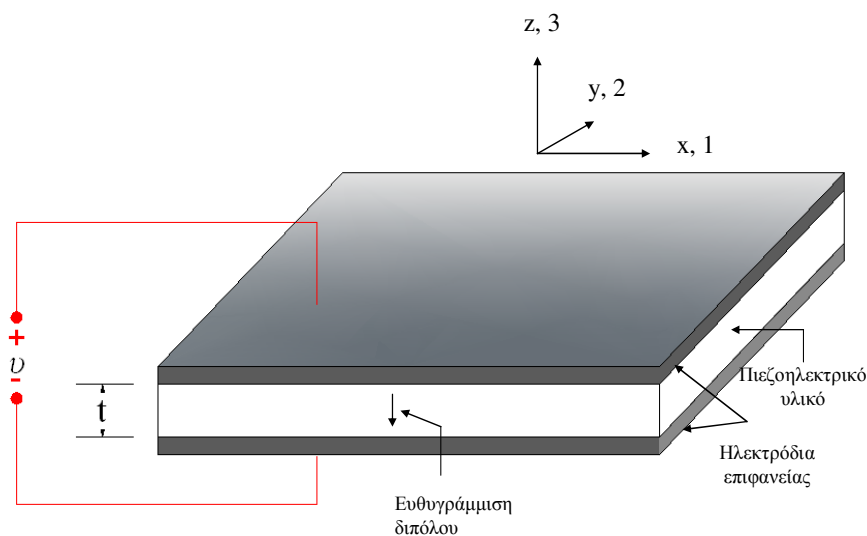
Από την αρχική ανακάλυψη του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου διάφορα φυσικά υλικά έχουν βρεθεί τα οποία κατέχουν αυτές τις ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένου του

κουόρτζ, του τοπάζ, της κρυσταλλικής ζάχαρης, του άλας Rochelle, των ελαστικών, του μαλλιού, του μεταξιού και πολλών άλλων. Παρατηρήθηκε ότι αυτά παρουσίαζαν αλλαγές στην επιφάνειά τους όταν δεχόταν μηχανική πίεση. Σήμερα πολυάριθμα υλικά κατασκευασμένα από τον άνθρωπο υπάρχουν για εμπορική χρήση, συμπεριλαμβανομένου των κεραμικών Τιτανιούχο Βάριο, Τιτανιούχο Στρόντιο, Ζirkονιούχος Τιτανιούχος Μόλυβδος PZT, και ακόμη το πολυμερές πολυβινυλιδικό φθορίδιο (PVDF). Στην παρούσα έρευνα το κεραμικό υλικό Lead Zirconate Titanate (PZT), χρησιμοποιήθηκε ταυτόχρονα ως αισθητήρας και ως διεγέρτης. Η άμεση επίδραση του πιεζοηλεκτρισμού, συνίσταται στη δυνατότητα ορισμένων κρυστάλλινων υλικών (π.χ. κεραμικά) να παράγουν ηλεκτρικό φορτίο σαν ποσοστό μιας εξωτερικά εφαρμοσμένης δύναμης. Αυτή η επίδραση έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στο σχεδιασμό αισθητήρων όπως επιταχυνσιόμετρα, μετατροπείς δύναμης και πίεσης, κλπ. Σύμφωνα με την αντίστροφη επίδραση του πιεζοηλεκτρισμού, ένα ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί μία παραμόρφωση του πιεζοηλεκτρικού υλικού όταν αυτό βρεθεί υπό τη επιρροή του. Η αντίστροφη επίδραση του πιεζοηλεκτρισμού έχει εφαρμοστεί στο σχεδιασμό μηχανισμών κίνησης (διεγερτών - actuators). Η χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών ως διεγέρτες, αισθητήρες θορύβου και ελέγχου ταλάντωσης έχει εξηγηθεί και προταθεί εκτενώς τα τελευταία χρόνια, (Piefort, 2001). Η πιεζοηλεκτρική απόκριση προκαλείται από ηλεκτρικά πολωμένα πολυκρυσταλλικά υλικά, όπως τα πιεζοκεραμικά εκτός από τα φυσικά υλικά που προαναφέρθηκαν.

Η εννοιολογική σημασία της λέξης πιεζοηλεκτρισμός προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις πίεση και ηλεκτρισμός και δηλώνει τον ηλεκτρισμό που παράγεται στο υλικό από την εξωτερικά επιβαλλόμενη πίεση που ασκείται επάνω σε αυτό. Υπάρχουν δύο κατηγορίες πιεζοηλεκτρικών υλικών που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο των ταλαντώσεων: τα κεραμικά και τα πολυμερή. Το πιο γνωστό πιεζοκεραμικό είναι ο Ζirkονιούχος Τιτανιούχος Μόλυβδος (PZT), ο οποίος έχει μία ανακτιήσιμη παραμόρφωση ίση με 0,1% και χρησιμοποιείται ευρέως ως διεγέρτης και αισθητήρας για ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των υπερηχητικών εφαρμογών και είναι επίσης κατάλληλος για απαιτήσεις υψηλής ακρίβειας. Τα πιεζοπολυμερή κυρίως χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες, και το πιο γνωστό είναι το πολυβινυλιδικό φθορίδιο (PVDF).

2.4.2 Κατασκευή PZT

Για την κατασκευή του PZT αναμειγνύονται τα συστατικά του, μεταλλικά οξείδια Ζirkονιούχου Τιτανιούχου Μολύβδου PZT σε συγκεκριμένες αναλογίες και στη συνέχεια αλέθονται σε πολύ λεπτή σκόνη. Η σκόνη αυτή θερμαίνεται για δημιουργηθεί μια ενιαία ομοιόμορφη σκόνη και έπειτα ανακατεύεται με ένα υγρό οργανικό συγκολλητικό και διαμορφώνεται σύμφωνα με το επιθυμητό σχήμα και στο τέλος συμπιέζεται. Το συμπίεσμένο μίγμα θερμαίνεται στους $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ περίπου προκειμένου να απομακρυνθεί το συγκολλητικό και η εναπομένονσα ποσότητα του υλικού συμπυκνώνεται στους $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ περίπου μέχρι το κεραμικό να αποκτήσει πυκνή κρυσταλλική δομή. Το κεραμικό διαμορφώνεται στην τελική μορφή του με την περιτύλιξη, τη στίλβωση, και την κοπή. Τα ηλεκτρόδια μπορούν να εφαρμοστούν κατά την επιμετάλλωση. Προκειμένου να μεταδοθούν οι πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες στο κεραμικό, η τελική του μορφή τοποθετείται σε περίσσεια πετρελαίου ή σιλικόνης που θερμαίνεται σε μια θερμοκρασία ελαφρώς κάτω από τη θερμοκρασία Curie του PZT (γύρω στους $130\text{ }^{\circ}\text{C}$). Το κεραμικό διατηρείται σε αυτή τη θερμοκρασία ενώ εφαρμόζεται σε αυτό ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, της τάξεως αρκετών kV/mm, Sirohi and Chopra (2000). Η εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου αναφέρεται γενικά ως διαδικασία πόλωσης και θα περιγραφεί λεπτομερώς σε επόμενη παράγραφο. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η τυπική μορφή ενός επιθέματος πιεζοηλεκτρικής διάταξης.



Σχήμα 2.1: Σχηματικό διάγραμμα πιεζοηλεκτρικής διάταξης

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά παράγουν ηλεκτρικό φορτίο όταν υποβληθούν σε μηχανική ένταση. Το φαινόμενο είναι γνωστό ως ευθύ πιεζοηλεκτρικό αποτέλεσμα. Το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο συμβαίνει όταν ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο παράγει μία μηχανική ένταση ως απόκριση ενός εφαρμοσμένου ηλεκτρικού πεδίου.

Οι επιδράσεις του πιεζοηλεκτρισμού μπορούν να θεωρηθούν ως μεταφορές μεταξύ της ηλεκτρικής και της μηχανικής ενέργειας. Τέτοιες μεταφορές μπορούν να εμφανιστούν μόνο εάν το υλικό αποτελείται από ηλεκτρικά φορτισμένα μόρια τα οποία μπορούν να πολωθούν. Για να παρουσιάσει ένα υλικό μια ανισότροπη ιδιότητα όπως ο πιεζοηλεκτρισμός, πρέπει η δομή του κρυστάλλου να μην έχει κανένα κέντρο συμμετρίας, (Flinn, 1975).

Τα περισσότερα από τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι κρυστάλλινα στερεά. Μπορούν να είναι απλά κρύσταλλα, είτε φυσικά διαμορφωμένα είτε από συνθετικές διαδικασίες, ή πολυκρυσταλλικά υλικά όπως τα φεροηλεκτρικά κεραμικά. Αυτά μπορούν να καταστούν πιεζοηλεκτρικά και να δώσουν, σε μια μακροσκοπική κλίμακα, μια συμμετρία ενιαίου κρυστάλλου με τη διαδικασία πόλωσης. Η πιεζοηλεκτρική επίδραση μπορεί επίσης να εμφανιστεί στα κρύσταλλα που αποτελούνται από έναν μόνο τύπο στοιχείου (σε αυτήν την περίπτωση, η πόλωση οφείλεται σε μια διαστρέβλωση της ηλεκτρονικής κατανομής). Ορισμένα πολυμερή μπορούν επίσης να γίνουν πιεζοηλεκτρικά με το τέντωμά τους κάτω από ένα ηλεκτρικό πεδίο. Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζεται η διαδικασία της ηλεκτρικής πόλωσης.

2.4.3 Ηλεκτρική πόλωση και διηλεκτρικά υλικά

Ένα υλικό καλείται διηλεκτρικό όταν έχει την ικανότητα να αποθηκεύει ενέργεια (ηλεκτρικό φορτίο) κατά την επιβολή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Για παράδειγμα όταν μεταξύ των παράλληλων πλακών (οπλισμών) ενός πυκνωτή βρίσκεται κάποιο διηλεκτρικό υλικό τότε αποθηκεύεται περισσότερη ενέργεια σε σύγκριση με την περίπτωση όπου μεταξύ των πλακών υπάρχει κενό ή αέρας.

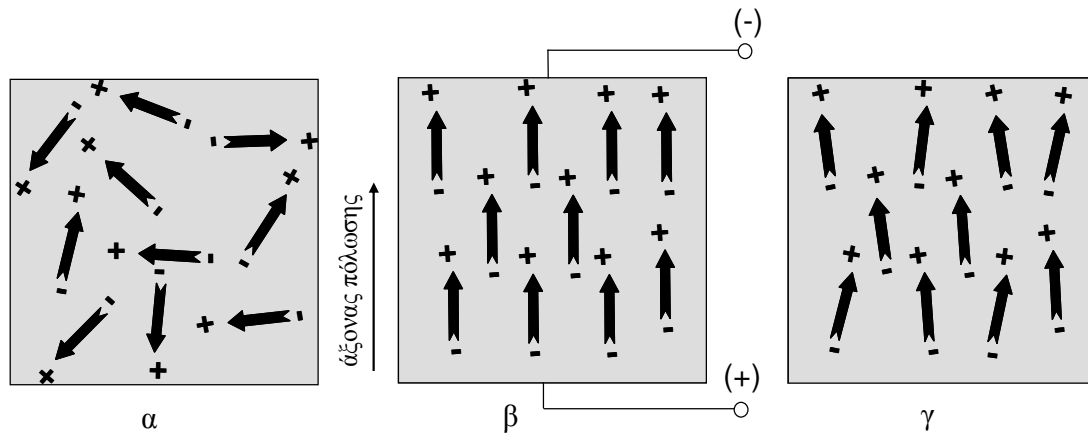
Η ικανότητα του διηλεκτρικού υλικού να αποθηκεύει ενέργεια όταν βρίσκεται κάτω από ένα ηλεκτρικό πεδίο ονομάζεται πόλωση. Η πόλωση είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται στα διηλεκτρικά και συνίσταται στο διαχωρισμό των θετικών και αρνητικών ηλεκτρικών φορτίων στις δύο άκρες του διηλεκτρικού υλικού κατά την εφαρμογή ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου.

Αν το υλικό αυτό χρησιμοποιηθεί για να καταλάβει όλο το χώρο μεταξύ των πλακών ενός πυκνωτή, τότε η χωρητικότητά του πυκνωτή αυξάνεται κατά ένα συντελεστή ϵ_r . Ο συντελεστής αυτός ονομάζεται σχετική διηλεκτρική σταθερά και είναι καθαρός αριθμός ενώ ως διηλεκτρική σταθερά ορίζεται η ποσότητα $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ όπου ϵ_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού ($8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}$). Έχει οριστεί

$$\epsilon_0 = \frac{1}{c^2 \mu_0} = \frac{1}{35950207149.4727056\pi} \text{ F/m} \approx 8.8541878176 \times 10^{-12} \text{ F/m}. \text{ Όπου } c \text{ (ή } c_0) \text{ είναι η}$$

ταχύτητα του φωτός σε κενό αέρα και μ_0 είναι μαγνητική σταθερά. Συνήθως η σχετική διηλεκτρική σταθερά αναφέρεται ως διηλεκτρική σταθερά. Παρουσία διηλεκτρικού υλικού η τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή παίρνει την τιμή: $C = \epsilon C_0$ όπου C_0 είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή απουσία διηλεκτρικού υλικού (ή θεωρώντας ως διηλεκτρικό υλικό τον αέρα). Στην περίπτωση πυκνωτή με επίπεδες και παράλληλες πλάκες, όταν γεμίσει με διηλεκτρικό, η χωρητικότητα γίνεται: $C = \epsilon \epsilon_0 A/d$, όπου A η επιφάνεια των πλακών και d η απόσταση μεταξύ τους. Επομένως η διηλεκτρική σταθερά μπορεί να οριστεί ως: $\epsilon = \frac{C}{C_0}$.

Κατά την είσοδο του διηλεκτρικού στο ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στις πλάκες του πυκνωτή, το εξωτερικό πεδίο πολώνει το διηλεκτρικό. Αυτό σημαίνει ότι τα θετικά του φορτία ωθούνται προς την κατεύθυνση του πεδίου, ενώ τα αρνητικά προς την αντίθετη. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται πόλωση και αίρεται μόνο με την αφαίρεση του εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2.2α η διεύθυνση της πόλωσης μεταξύ γειτονικών περιοχών είναι τυχαία. Συνεπώς τα στοιχεία δεν έχουν συνολική πολικότητα. Οι περιοχές των στοιχείων ευθυγραμμίζονται όταν εκτεθούν σε ένα ηλεκτρικό πεδίο, συνήθως ελαφρώς κάτω από την θερμοκρασία Curie (Σχήμα 2.2β). Αυτό ονομάζεται διαδικασία πόλωσης.



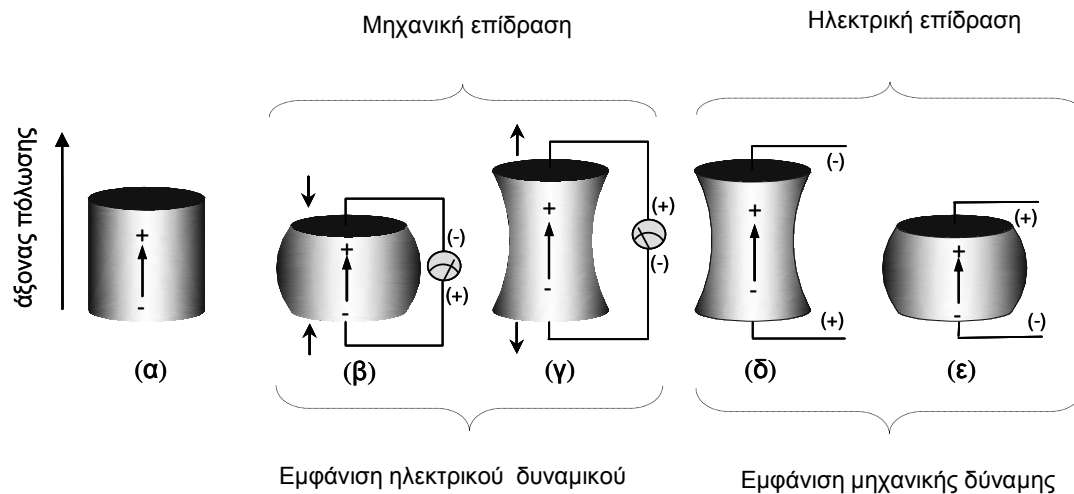
Σχήμα 2.2: Πόλωση υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου: (α) Τυχαίος προσανατολισμός περιοχών πριν την πόλωση, (β) Πόλωση πιεζοηλεκτρικού υλικού υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, (γ) Παραμένουσα πόλωση όταν απομακρυνθεί το ηλεκτρικό πεδίο

Μετά την διαδικασία της πόλωσης οι περιοχές οι πιο κοντινά ευθυγραμμισμένες με το ηλεκτρικό πεδίο εκτείνονται σε περιοχές οι οποίες δεν είναι ευθυγραμμισμένες με το ηλεκτρικό πεδίο, και τα στοιχεία εκτείνονται στην διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου. Όταν το ηλεκτρικό πεδίο αφαιρεθεί, τα περισσότερα από τα δίπολα παραμένουν σταθερά σε ένα σχηματισμό σχετικής ευθυγράμμισης (Σχήμα 1.2γ). Το στοιχείο έχει μία μόνιμη πολικότητα, κατάλοιπα πολικότητας, και παραμένει μόνιμα υπό επιμήκυνση.

2.4.4 Ιδιότητες πολωμένου πιεζοηλεκτρικού υλικού

Οι ιδιότητες του πολωμένου πιεζοηλεκτρικού κεραμικού μπορούν να εξηγηθούν από την σειρά εικόνων στο Σχήμα 2.3. Η μηχανική πίεση στο υλικό αλλάζει τη δίπολη σημασία που σχετίζεται με το υλικό και αυτό δημιουργεί μία ηλεκτρική τάση. Η συμπίεση κατά μήκος της διεύθυνσης πόλωσης, ή η μηχανική ένταση (έλξη) κάθετα στη διεύθυνση πόλωσης δημιουργεί τάση της ίδιας πολικότητας με την τάση πόλωσης (Σχήμα 2.3β). Η μηχανική ένταση (έλξη) κατά μήκος της διεύθυνσης πόλωσης, ή η συμπίεση κάθετα της διεύθυνσης πόλωσης δημιουργεί τάση με αντίθετη πολικότητα από την τάση πόλωσης (Σχήμα 2.3γ). Όταν λειτουργεί με αυτό τον τρόπο, η συσκευή χρησιμοποιείται ως αισθητήρας. Αυτό λέγεται μετασχηματισμός της μηχανικής ενέργειας συμπίεσης ή έλξης σε ηλεκτρική ενέργεια. Η τιμή της δύναμης συμπίεσης για την τάση που δημιουργείται εφαρμόζοντας πίεση στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο είναι

γραμμικά ανάλογη, μέχρι συγκεκριμένη δύναμη, η οποία εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού. Το ίδιο ισχύει για εφαρμοζόμενη τάση που δημιουργεί παραμόρφωση. Εάν εφαρμοστεί τάση με την ίδια πολικότητα με την τάση πόλωσης σε ένα στοιχείο στην διεύθυνση της τάσης πόλωσης, το στοιχείο επιμηκύνεται και η διάμετρος γίνεται μικρότερη (Σχήμα 2.3δ). Εάν η τάση πόλωσης είναι αντίθετη με αυτή της εφαρμοζόμενης τάσης πόλωσης το στοιχείο γίνεται πλατύτερο και κοντότερο (Σχήμα 2.3ε). Εάν εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση στο στοιχείο θα διαστέλλεται και θα συστέλλεται κυκλικά σύμφωνα με τη συχνότητα της εφαρμοζόμενης τάσης. Όταν λειτουργεί με αυτό τον τρόπο, η συσκευή χρησιμοποιείται ως διεγέρτης. Αυτό λέγεται μετασχηματισμός της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια.



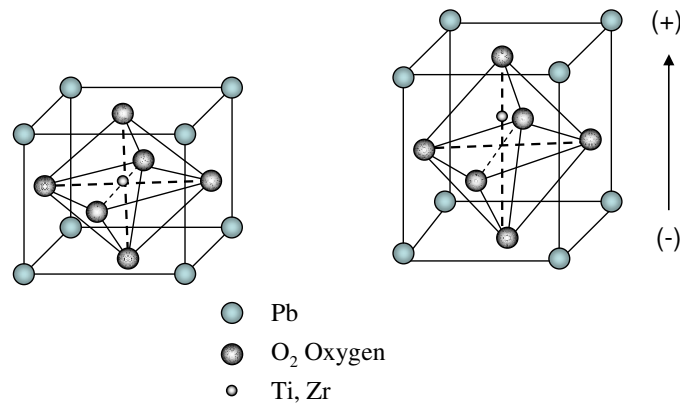
Σχήμα 2.3: Αντίδραση πολωμένου πιεζοηλεκτρικού στοιχείου σε εφαρμοζόμενη διέγερση (μηχανική και ηλεκτρική). (α) το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο ΠΣ μετά την πόλωση, (β) το ΠΣ συμπιέζεται και δημιουργείται τάση με την ίδια πολικότητα με την τάση πόλωσης, (γ) το ΠΣ εντίνεται και δημιουργείται τάση με την αντίθετη πολικότητα με την τάση πόλωσης, (δ) Η εφαρμοζόμενη τάση έχει την ίδια πολικότητα με την τάση πόλωσης. Το ΠΣ επιμηκύνεται, (ε) Η εφαρμοζόμενη τάση έχει την αντίθετη πολικότητα με την τάση πόλωσης. Το ΠΣ συμπιέζεται.

Επάνω από μια ορισμένη θερμοκρασία, αποκαλούμενη θερμοκρασία (θ_c) Curie, η κρυσταλλική δομή ενός σιδηροηλεκτρικού υλικού έχει ένα κέντρο συμμετρίας και επομένως δεν έχει καμία ηλεκτρική ροπή διπόλων. Αυτή η συμμετρική ρύθμιση δικτυωτού πλέγματος διαμορφώνει την παραηλεκτρική φάση που είναι γνωστή ως τύπος perovskite, όπως είναι στις υψηλές θερμοκρασίες. Όσο η θερμοκρασία μειώνεται, το δικτυωτό πλέγμα συρρικνώνεται και η συμμετρική ρύθμιση δεν είναι πλέον σταθερή. Κάτω από αυτήν την θερμοκρασία, υποβάλλεται σε μια αλλαγή φάσης και σε μια πιο

σύνθετη δομή που είναι ονομάζεται μη-κεντροσυμμετρική. Το δικτυωτό πλέγμα του κρυστάλλου διαστρεβλώνεται, δηλαδή ελαφρώς επιμηκύνεται προς μια κατεύθυνση. Η μετάβαση από μια φάση σε άλλη πραγματοποιείται στη θερμοκρασία φάσης μετάβασης, αποκαλούμενη συνήθως θερμοκρασία Curie. Στο οξείδιο Τιτανιούχου Βαρίου BaTiO_3 , η θερμοκρασία μετάβασης φάσης είναι περίπου 130°C . Δεδομένου ότι ο τύπος perovskite βρίσκεται κάτω από τη θερμοκρασία μετάβασης, T_C οι παραηλεκτρικές αλλαγές φάσης στη σιδηροηλεκτρική φάση, το υλικό παρουσιάζει αυτόματη παραμόρφωση S_S και αυτόματη πόλωση P_S . Αντίστοιχα, όταν οι τύποι perovskite θερμαίνονται πάνω από την θερμοκρασία curie, η φερροηλεκτρική φάση αλλάζει σε μία παραηλεκτρική φάση και η αυτόματη-αυθόρμητη παραμόρφωση S_S , και η αυτόματη πόλωση P_S παύουν να εμφανίζονται.

2.4.5 Δομή πιεζοηλεκτρικού υλικού (PZT) τύπου Perovskite

Πολλά πιεζοηλεκτρικά κεραμικά όπως το τριοξείδιο βαρίου τιτανίου (Ba Ti O_3), το τριοξείδιο μολύβδου τιτανίου (Pb Ti O_3), ο Ζirkονιούχος Τιτανιούχος Μόλυβδος PZT και το λανθάνιο Ζirkονιούχου Τιτανιούχου Μολύβδου (PLZT) παρουσιάζουν μια δομή τύπου περοβσκίτη (perovskite) (Σχήμα 2.4). Περοβσκίτης είναι το όνομα μιας ομάδας υλικών που έχουν την ίδια δομή όπως αυτή του τριοξειδίου τιτανίου ασβεστίου (Ca Ti O_3) που αποτελεί και την πιο απλή μορφή περοβσκίτη. Οι περοβσκίτες αντλούν το όνομά τους από ένα συγκεκριμένο μέταλλευμα γνωστό ως “perovskite” και είναι κρυστάλλινα οξείδια με το στοιχείο του μετάλλου προς το οξυγόνο σε αναλογία 2:3. Στην δομή του PZT τα ιόντα Tj και Zr στο κέντρο της δομής της κρυσταλλικής μονάδας του perovskite μετατοπίζονται όταν η θερμοκρασία είναι κάτω από τη θερμοκρασία Curie, που προκαλεί την πολικότητα.



Σχήμα 2.4 Δομή Perovskite σε PZT (lead zirconate titanate)

Αυτόματη παραμόρφωση και πόλωση σε μία δομή Perovskite lead zirconate titanate (PZT):

(α) Τύπος Perovskite κρυσταλλικής μονάδας στην συμμετρική κυβική κατάσταση πάνω από την θερμοκρασία Curie, (β) Τύπος Perovskite κρυσταλλικής μονάδας κάτω από τη θερμοκρασία Curie. Η κρυσταλλική μονάδα είναι τετραγωνικά διαστρεβλωμένη με το κεντρικό άτομο να τοποθετείται ασύμμετρα. Σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται πόλωση (φεροηλεκτρική φάση)

Στη γεωμετρία της δομής του Περοβσκίτη, θεωρείται ότι υπάρχει μια «τέλεια κατάλληλη» σχέση μεταξύ των ιόντων του Pb^{2+} και του O^{2-} . Εντούτοις, για πολλές ενώσεις που έχουν τη δομή perovskite, η σχέση αυτή δεν μπορεί να διατηρηθεί εύκολα έτσι ακριβώς λόγω των μικρών παραλλαγών του μεγέθους των ιόντων Pb^{2+} και του O^{2-} όπως στην περίπτωση του PZT. Η δομή perovskite είναι πολύ επιρρεπής στην αντικατάσταση στοιχείων “dopping effect” κατά το σχηματισμό των στερεών ενώσεων. Σε αυτή την περίπτωση, εμφανίζονται μικρές διαστρεβλώσεις του δικτυωτού πλέγματος προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η ενέργειά του. Αυτές ακριβώς οι διαστρεβλώσεις συμβάλλουν στις διηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών αυτών που τα κάνουν πολύ χρήσιμα στις σύγχρονες τεχνικές έρευνες με νέα υλικά.

2.5 Μέθοδοι SHM με χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών

Τα τελευταία χρόνια ταυτόχρονα με την αύξηση των απαιτήσεων για βελτίωση της συμπεριφοράς και της αξιοπιστίας των ελέγχων δομικών συστημάτων η ανάπτυξη των τεχνικών των επιτόπιων δομικών ελέγχων με χρήση πιεζοηλεκτρικών διατάξεων έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον των ερευνητών.

Προσπάθειες σε αυτό το πεδίο έρευνας με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών έχουν γίνει με τρεις γνωστές ερευνητικές μεθόδους: η μέθοδος των ελαστικών κυμάτων, η μέθοδος μετατροπής συνάρτησης απόκρισης στην ανάλυση ιδιομορφών και η Μέθοδος Ηλεκτρο-μηχανικής Σύνθετης Αντίστασης (EMI electromechanical

impedance method), (ή το αντίστροφό της Ηλεκτρο-μηχανικής Σύνθετης Αντίστασης EMA electromechanical admittance method), Giurgiutiu (2007).

Η μέθοδος σύνθετης ηλεκτρομηχανικής αντίστασης ή το αντίστροφο της σύνθετης αγωγιμότητας, προτάθηκε πρώτα από τον Liang (1994) στο κέντρο ευφών υλικών και κατασκευών (CIMMS) στο Πολυτεχνείο της Βιρτζίνια, και εξετάστηκε στις μηχανικές και αεροναυπηγικές κατασκευές. Εκτεταμένες έρευνες με τη χρήση της μεθόδου ηλεκτρομηχανικής αντίστασης για έλεγχο δομικής ακεραιότητας των κατασκευών συνεχίζονται σήμερα από πολλούς ερευνητές. Νεότερες αναλύσεις και έρευνες έχουν εστιάσει στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των ευφών αυτών υλικών για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας συστημάτων, (Park et al., 2000a).

Η μέθοδος της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας (ή το αντίστροφο σύνθετης αντίστασης) πρόσφατα έχει προταθεί ως πολλά υποσχόμενη τεχνική για την εύρεση μικρών αλλαγών στη δομική ακεραιότητα των κατασκευών, (Park et al., 2003). Η χρήση της μεθόδου της EMA ξεκίνησε από τον τομέα της Αεροναυπηγικής και Μηχανολογίας όπου έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως και έχει δείξει μεγάλη αποτελεσματικότητα και στη συνέχεια σε κατασκευές πολιτικού μηχανικού, (Park et al., 2000a). Οι κατασκευές πολιτικού μηχανικού αφορούν πειραματικές διατάξεις δομικών στοιχείων αλλά και μεγάλα έργα όπως γέφυρες, μεταλλικές κατασκευές, ειδικά κτίρια κ.λπ.

Ανάλογα με την μεταβλητή απόκρισης που θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος λέγεται H/M μέθοδος σύνθετης αντίστασης EMI ή H/M μέθοδος σύνθετης αγωγιμότητας EMA. Τα μεγέθη της αντίστασης και της αγωγιμότητας είναι σύνθετα μιγαδικά μεγέθη, δηλαδή έχουν πραγματικό και φανταστικό μέρος και είναι αντιστρόφως ανάλογα μεταξύ τους. Στην βιβλιογραφία συνήθως αναφέρεται ως μέθοδος ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αντίστασης (EMI method) αλλά στις μετρήσεις για τον υπολογισμό των ηλεκτρο-μηχανικών αποκρίσεων λαμβάνεται η αγωγιμότητα ως μεταβλητή και μάλιστα έχει αποδειχθεί ότι το πραγματικό μέρος είναι αυτό που είναι πιο ευαίσθητο στην ύπαρξη βλάβης και επομένως περισσότερο κατάλληλο για τον εντοπισμό βλαβών, (Sun et al., 1995).

2.5.1 Εφαρμογές της μεθόδου EMA

Η θεωρητική ανάπτυξη της εφαρμογής των μετρήσεων σύνθετης αντίστασης στο δομικό έλεγχο ακεραιότητας προτάθηκε αρχικά από τον Liang et al. (1994). Η τεχνική στην συνέχεια βελτιώθηκε από τους Sun et al. (1995), Giurgiutiu and Zagrai (2000), Giurgiutiu and Zagrai (2002), Bhalla and Soh (2004a), Park et al. (2000b), Park et al. (2003). Διάφορες πειραματικές έρευνες έχουν εκτελεσθεί επιτυχώς σε σύνθετες κατασκευές όπως αναφέρεται στην εργασία των Tseng and Wang (2005).

2.5.2 Μέθοδος EMA για τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας των κατασκευών

Τα τελευταία χρόνια αυτή η τεχνική έχει προσελκύσει την προσοχή στο επιστημονικό πεδίο των δομικών κατασκευών. Επιτυχείς πειραματικές εφαρμογές στις κατασκευές τέτοιων έργων βρίσκονται στις εργασίες των Ayres et al. (1998), Soh et al. (2000), Park et al. (2000a), Bhalla and Soh (2003) και Bhalla and Soh (2004a). Στις παραπάνω έχουν παρουσιάσει τη δυνατότητα επί τόπου ελέγχου των κατασκευών μέσω της ηλεκτρομηχανικής μεθόδου σύνθετης αντίστασης. Το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται εκτενώς στην κατασκευή των περισσότερων δομικών κατασκευών. Οι κατασκευές από σκυρόδεμα κατασκευάζονται για να καλύψουν πολλά χρόνια ζωής και σπάνια αντικαθίστανται εφόσον κατασκευαστούν. Κατά τη διάρκεια της ζωής τους, στο σκυρόδεμα επέρχεται φθορά και κόπωση, οδηγώντας στην απώλεια της δομικής του ακεραιότητας. Ο συνεχής έλεγχος της κατάστασης του σκυροδέματος είναι επομένως κρίσιμος στην εξασφάλιση της αξιόπιστης απόδοσης των κατασκευών.

Οι Ayres et al. (1998) και Soh et al. (2000) εφάρμοσαν την μέθοδο της EMA σε κατασκευές σκυροδέματος για να εντοπίσουν την βλάβη και να ελέγξουν ενεργά την ακεραιότητα της κατασκευής. Οι Bhalla and Soh (2004a), στην εργασία τους περιγράφουν το θεωρητικό υπόβαθρο και τις τεχνικές λεπτομέρειες της μεθόδου EMA και αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητά της στον εντοπισμό βλαβών σε ένα πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος υπό τη διέγερση υψηλών συχνοτήτων σε διαφορετικές καταστάσεις βλάβης. Τα αποτελέσματα συλλέγονται άμεσα στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων, επειδή σε αυτές τις συχνότητες εμφανίζει υψηλή ευαισθησία η μέθοδος σε μικρές βλάβες και λόγω αυτού η χρήση αισθητήρων όπως οι πιεζοηλεκτρικοί μπορούν να το επιτύχουν. Κατά συνέπεια, η μέθοδος EMA με χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών

φαίνεται να υπερέχει πέρα από τις υπάρχουσες συμβατικές μεθόδους, (Bhalla and Soh, 2003).

Συγκεκριμένα, η τεχνική ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας (electro-mechanical admittance EMA), που χρησιμοποιεί τα ευφυή πιεζοηλεκτρικά κεραμικά υλικά (PZT), έχει προκύψει ως ισχυρή τεχνική για τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας SHM (Structural Health Monitoring, SHM), (Soh et al., 2000), (Park et al., 2001), (Giurgiutiu and Zagrai, 2000), (Bhalla and Soh, 2004a), (Bhalla and Soh, 2004b). Στη συνέχεια αναπτύσσονται οι κύριες αρχές της, ερευνώνται οι ιδιότητες των πιεζοηλεκτρικών υλικών όσο αφορά τη μέθοδο αυτή καθώς και οι περιορισμοί που θα πρέπει να ξεπεραστούν για να είναι κατάλληλη η μέθοδος για ευρύ φάσμα κατασκευών.

Λόγω των ξεχωριστών πλεονεκτημάτων της η EMA έχει εξελιχθεί σε ισχυρή τεχνική για τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας των κατασκευών. Η μέθοδος αυτή αξιοποιεί την ιδιότητα της ηλεκτρομηχανικής σύζευξης των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Μία πιεζοηλεκτρική διάταξη επικολλάται στην κατασκευή και εξυπηρετεί διπλή λειτουργία, ταλαντώνει τοπικά σε υψηλές συχνότητες και ταυτόχρονα λαμβάνει την τοπική δυναμική απόκριση της κατασκευής. Ο έλεγχος της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών με χρήση της μεθόδου EMA βασίζεται στις ιδιότητες και την χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών.

Η νέα αυτή τεχνική που χρησιμοποιεί τα πιεζοκεραμικά υλικά όπως το lead zirconate titanate (PZT) για έλεγχο της δομικής ακεραιότητας προτάθηκε αρχικά από τους Sun et al. (1995). Βασιζόμενη σε ταλάντωση υψηλών συχνοτήτων η μέθοδος παρουσιάζει εξαιρετική ευαισθησία σε εν τη γεννέσει βλάβες, (Tseng and Naidu, 2002). Για την ποσοτικοποίηση των αλλαγών στην απόκριση λόγω της παρουσίας βλάβης αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα βαθμιαίο δείκτη βλάβης (π.χ. απόκλιση ελαχίστων τετραγώνων, απόκλιση μέσης τετραγωνικής τιμής ή κάποια άλλη στατιστική ένδειξη) ενώ δεν απαιτεί λεπτομερείς γνώσεις των ευπαθών μερών και της μορφολογίας της κατασκευής και μπορεί να αντιμετωπίσει απρόβλεπτους τύπους αστοχίας. Επομένως η μέθοδος αυτή παρέχει περισσότερες δυνατότητες και πλεονεκτήματα συγκρινόμενη με άλλες παραμετρικές μεθόδους όπως οι μέθοδοι μηχανικής ταλάντωσης σε χαμηλές συχνότητες. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να ελέγχεται διαρκώς σε πραγματικό χρόνο μία κατασκευή κατά την διάρκεια λειτουργίας της. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να γίνουν εμφανείς οι αστοχίες αλλά και ο ρυθμός με τον οποίο επεκτείνονται, ώστε να ληφθούν έγκαιρα τα κατάλληλα μέτρα για την ασφάλεια της κατασκευής που συνεπάγεται και της ανθρώπινης ζωής. Λόγω της διακριτικής εφαρμογής των υλικών αυτών η

λειτουργία της κατασκευής συνεχίζεται κατά την διενέργεια του ελέγχου ενώ ταυτόχρονα ο έλεγχος μπορεί να είναι αυτοματοποιημένος. Επιπλέον η μάζα των πιεζοηλεκτρικών υλικών είναι πολύ μικρή σχεδόν αμελητέα με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής στην οποία επικολλώνται.

2.5.3 Βασικές αρχές για την εφαρμογή της μεθόδου EMA

Η μέθοδος σύνθετης αγωγιμότητας ως τεχνική ελέγχου των κατασκευών έχει αναπτυχθεί ως σπουδαίο μέσο αξιολόγησης υλικών βλαβών σε πραγματικό χρόνο. Ο σκοπός αυτής της έρευνας είναι να μελετηθεί η σημασία και η αποτελεσματικότητα της μεθόδου σύνθετης αντίστασης, ή το αντίστροφο αγωγιμότητας για τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας και στη συνέχεια τον εντοπισμό και το χαρακτηρισμό βλαβών σε ένα δομικό στοιχείο. Η βασική αρχή ανάπτυξης της μεθόδου αυτής είναι η ηλεκτρομηχανική σύζευξη μεταξύ του πιεζοηλεκτρικού PZT - επιθέματος (PZT-patch) διεγέρτη/αισθητήρα και της κατασκευής. Βασική προϋπόθεση της μεθόδου είναι να χρησιμοποιηθούν υψηλής συχνότητας μηχανικές ταλαντώσεις που μόνο οι πιεζοηλεκτρικοί διεγέρτες μπορούν να προκαλέσουν. Η χρήση της στοχεύει στον έλεγχο της περιοχής μιας κατασκευής με γνώμονα τις αλλαγές στη δομική σύνθετη αντίσταση που θα προκαλούσε μια επικείμενη βλάβη.

Η βάση αυτής της αντίληψης ενεργού τεχνολογίας είναι η μεταφορά ενέργειας μεταξύ του διεγέρτη και του μηχανικού συστήματος της κατασκευής. Έχει αποδειχθεί ότι η ηλεκτρική σύνθετη αντίσταση του υλικού PZT επηρεάζεται άμεσα από τη μηχανική σύνθετη αντίσταση ενός δομικού τμήματος της κατασκευής όπου επικολλάται το επίθεμα PZT.

Το μικρό, μη καταστρεπτικό PZT μπορεί να εγκατασταθεί εύκολα και να χρησιμοποιηθεί για να ελέγξει μακρινή, απρόσιτη θέση χωρίς να χρειάζεται αφαίρεση μετά το πέρας της διαδικασίας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος και το βάρος του επιθέματος PZT θεωρούνται αμελητέα σε σχέση με τις κατασκευές έτσι ώστε η επικόλλησή τους στην κατασκευή δεν δημιουργεί καμία μεταβολή στα δυναμικά χαρακτηριστικά της. Κατά συνέπεια, η μέθοδος σύνθετης αντίστασης φαίνεται να υπερέχει πέρα από τις υπάρχουσες συμβατικές μεθόδους μηχανικής ταλάντωσης, (Bhalla and Soh, 2003). Στη συνέχεια αναπτύσσονται οι βασικές παράμετροι της μεθόδου EMA, (Park et al., 2003).

2.5.4 Παράμετροι της μεθόδου σύνθετης αγωγιμότητας

2.5.4.1 Περιοχές συχνοτήτων

Η μέθοδος σύνθετης αντίστασης ακολουθεί την μεθοδολογία που βασίζεται στη συνεχή σύγκριση των αποκρίσεων μηχανικής ταλάντωσης που λαμβάνονται από τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες για να αξιολογήσει τη δομική ακεραιότητα μιας κατασκευής. Η μέθοδος αυτή λαμβάνει τις αποκρίσεις της μηχανικής ταλάντωσης σε μία «υγρή» κατάσταση μιας κατασκευής, σε σύγκριση με την απόκριση της μηχανικής ταλάντωσης που λαμβάνεται σε διάφορους χρόνους κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της κατασκευής για την αξιολόγηση της κατάστασής της. Τα δεδομένα των μετρήσεων εξετάζονται χρησιμοποιώντας τεχνικές επεξεργασίας σήματος για να διερευνηθούν οι αλλαγές στα χαρακτηριστικά που θα δηλώσουν την παρουσία βλάβης.

Η ευαισθησία της τεχνικής αυτής για την ανίχνευση της βλάβης συνδέεται στενά με τη ζώνη συχνότητας που επιλέγεται. Ειδικό βάρος κατά την εφαρμογή της τεχνικής αυτής δίδεται στις περιοχές των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των αλλαγών των αποκρίσεων. Η πιο συνηθισμένη τεχνική ανάλυσης βασίζεται στην ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων.

Για να διαισθανθεί τον τύπο βλάβης που ενδεχομένως να αντιστοιχεί ακόμη και στην έναρξή της, θα πρέπει το μήκος κύματος της διέγερσης να είναι μικρότερο από το χαρακτηριστικό μήκος της βλάβης που ανιχνεύεται. Προκειμένου να εξασφαλιστεί υψηλή ευαισθησία στην επικείμενη βλάβη, η απόκριση της ηλεκτρικής σύνθετης αντίστασης λαμβάνεται σε υψηλές συχνότητες συνήθως μέσα στις περιοχές των 30-400 kHz. Κάτω από αυτές τις υψηλές τάξεις συχνοτήτων, το μήκος κύματος της διέγερσης είναι μικρό, και αρκετά ευαίσθητο ώστε να ανιχνεύσει τις ελάχιστες αλλαγές στην ακεραιότητα της κατασκευής. Η περιοχή συχνοτήτων για μια δεδομένη κατασκευή καθορίζεται συνήθως από μία διαδικασία δοκιμής σφάλματος και έχει υπάρξει λίγη αναλυτική ερευνητική εργασία σχετικά με τις κατάλληλες περιοχές συχνοτήτων.

Για τη μέθοδο H/M σύνθετης αγωγιμότητας EMA επιλέγονται συνήθως, τα φάσματα συχνότητας που περιέχουν αρκετές αιχμές στην απόκρισή τους. Η μεγάλη πυκνότητα των αιχμών σε μια περιοχή συχνότητας αποτελεί ένδειξη μεγαλύτερης δυναμικής αλληλεπίδρασης στο φάσμα αυτό της συχνότητας σε σχέση με κάποια άλλα φάσματα. Εκτός λοιπόν από την ανάγκη διέγερσης σε περιοχές υψηλών συχνοτήτων, θα πρέπει η απόκριση να περιέχει αρκετές αιχμηρές κορυφές για να είναι αξιολογήσιμη.

Οι Sun et al. (1995) πρότειναν ότι μια περιοχή διέγερσης σε υψηλές συχνότητες με πλήθος αιχμηρών κορυφών είναι ευνοϊκή δεδομένου ότι περιέχει γενικά περισσότερες αξιολογήσιμες δομικές πληροφορίες για την κατάσταση μιας κατασκευής. Επίσης προτείνουν ότι οι συχνότητες πάνω από 200 kHz μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ληφθούν περιορισμένες περιοχές βλάβης, ενώ για συχνότητες κάτω από 70 kHz μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καλύψουν μεγαλύτερες περιοχές ελέγχου.

Οι περιοχές συχνοτήτων υψηλότερες από 500 kHz έχει παρατηρηθεί ότι είναι δυσμενείς. Σε αυτή την περίπτωση επειδή η περιοχή κάλυψης γίνεται εξαιρετικά μικρή, οι αισθητήρες PZT παρουσιάζουν δυσμενή ευαισθησία στις συνοριακές συνθήκες τους με την κατασκευή και όχι ευαισθησία του PZT σε σχέση με την συμπεριφορά της ελεγχόμενης κατασκευής. Στις υψηλές συχνότητες όπως πάνω από 500 kHz οι συνθήκες επικόλλησης των PZT επάνω στην κατασκευή φαίνεται να παίζουν σημαντικότερο ρόλο από την αλληλεπίδραση του PZT και της κατασκευής λόγω βλάβης της κατασκευής.

2.5.4.2 Το πραγματικό μέρος της ηλεκτρικής σύνθετης αγωγιμότητας

Σύμφωνα με τους Sun et al. (1995) και Bhalla et al. (2003) το πραγματικό μέρος της ηλεκτρικής σύνθετης αγωγιμότητας είναι πιο ευαίσθητο στην βλάβη ή αλλιώς στην αλλαγή της δομικής ακεραιότητας της κατασκευής από ότι το φανταστικό μέρος. Η αλλαγή της απόκρισης της σύνθετης αγωγιμότητας της κατασκευής αποδίδεται στην αλλαγή της δομικής ακεραιότητάς της λόγω της βλάβης. Αυτό το χαρακτηριστικό εκδηλώνεται έντονα μόνο στο πραγματικό μέρος της απόκρισης της σύνθετης αγωγιμότητας.

2.5.4.3 Περιοχή κάλυψης των αισθητήρων σύνθετης αγωγιμότητας

Κάτω από περιοχές υψηλών συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο που βασίζεται στη σύνθετη αντίσταση, η περιοχή κάλυψης του PZT περιλαμβάνει τη γύρω περιοχή που έχει τοποθετηθεί. Ο σκοπός της τοποθέτησης του PZT στην περιοχή πρέπει να εξασφαλίζει το γεγονός ότι ο αισθητήρας δεν θα είναι ευαίσθητος στις αλλαγές των

συνοριακών συνθηκών ή οποιονδήποτε λειτουργικών δονήσεων, οι οποίες συνήθως δίνουν χαμηλού βαθμού ιδιοσυχνότητες.

Με κατάλληλη αριθμητική προσομοίωση οι Esteban and Rogers (1999) βασιζόμενοι στη θεωρία διάδοσης κυμάτων ερευνούν τον προσδιορισμό της περιοχής του κάλυψης των PZT που βασίζεται η μέθοδος στην σύνθετης αγωγιμότητας. Η εργασία τους περιλαμβάνει επίσης μια παραμετρική μελέτη για την περιοχή κάλυψης ενός διεγέρτη - αισθητήρα PZT ή ενός με την εξέταση διαφόρων παραγόντων όπως της γεωμετρίας, την επίδραση του φορτίου μάζας, τις ασυνέχειες στη διατομή, τις πολυμελείς συνδέσεις, τις άκαμπτες κατασκευές, και τα ενεργειακά απορροφητικά ενδιάμεσα στρώματα.

Εντούτοις σε τέτοιες περιοχές υψηλής συχνότητας οι υπολογιστικές μετρήσεις και ο προσδιορισμός της ποσότητας της ενεργειακής απώλειας, γίνεται δύσκολος και έχουν ληφθεί λίγες πρόσθετες πληροφορίες από τη διεθνή βιβλιογραφία. Συμπερασματικά από την βιβλιογραφία προκύπτει ότι η περιοχή κάλυψης ενός αισθητήρα σύνθετης αντίστασης είναι στενά συνδεδεμένη με τις ιδιότητες του υλικού μιας κατασκευής, της γεωμετρίας της, των περιοχών συχνότητας που χρησιμοποιούνται, και των ιδιοτήτων του πιεζοηλεκτρικού υλικού PZT. Με βάση τη γνώση που αποκτάται μέσω των διάφορων περιπτώσιολογικών ερευνών, έχει υπολογιστεί ότι η περιοχή αισθαντικότητας ή αλλιώς κάλυψης ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα μπορεί να ποικίλει γύρω στα 0.4m (ακτίνα αντίληψης-κάλυψης) στις σύνθετες κατασκευές και σε 2m στις απλές μεταλλικές δοκούς. Δηλαδή η περιοχή κάλυψης των αισθητήρων εξαρτάται άμεσα από την πολυπλοκότητα των κατασκευών.

2.6 Σύγκριση και πλεονεκτήματα EMA σε σχέση με άλλες μεθόδους

Η δυνατότητα και τα πλεονεκτήματα της μεθόδου ηλεκτρομηχανικής αγωγιμότητας EMA σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές έχουν πειραματικά αναγνωριστεί, (Sun et al., 1995), (Ayres et al., 1998), (Giurgiutiu and Rogers, 1999), (Park et al., 1999, 2000a, 2000b, 2001), (Soh et al., 2000). Υπάρχουν πολλές διαθέσιμες προσεγγίσεις για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας και η περιοχή αυτή της έρευνας παρουσιάζει συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον από τους ερευνητές. Μία αναλυτική προοπτική της μεθόδου EMA παρουσιάζεται και στην εργασία των Park et al. (2003).

Στις παραδοσιακές μη καταστρεπτικές μεθόδους αποτίμησης περιλαμβάνονται η τεχνολογία των υπερήχων, της ακουστικής εκπομπής, η ανάλυση μαγνητικού πεδίου, οι διεισδυτικές δοκιμές, οι τεχνικές ρευμάτων αυτεπαγωγής, η ανάλυση με ακτίνες X, ο έλεγχος επίδρασης ηχοβολισμού, οι γενικές αναλύσεις απόκρισης κατασκευής, και οι οπτικές παρατηρήσεις. Κάθε μέθοδος από τις προαναφερόμενες είναι διαδεδομένη σε ποικίλες εφαρμογές. Για παράδειγμα η οπτική επιθεώρηση χρησιμοποιείται στην ανάλυση για παραθαλάσσιες πλατφόρμες πετρελαίου. Οι τεχνικές ακουστικών εκπομπών χρησιμοποιούνται για εξ' αποστάσεως επιθεώρηση πυρήνων πυρηνικών αντιδραστήρων. Κάθε μία από αυτές τις τεχνικές παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Για παράδειγμα η μέθοδος των υπερήχων είναι χρήσιμη στο να παρέχει πληροφορίες λεπτομερειών των βλαβών σε μία κατασκευή. Κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, εντούτοις χρειάζεται η γνώση της θέσης της βλάβης εκ των προτέρων και θέτει την κατασκευή μη διαθέσιμη κατά την διάρκεια του ελέγχου. Πολλές NDE τεχνικές απαιτούν περιόδους εκτός λειτουργίας της κατασκευής, ή εφαρμογή σε συγκεκριμένες περιόδους ή διαστήματα, ενώ η μέθοδος EMA εξασφαλίζει συνεχή έλεγχο και ελεγχόμενη εποπτεία από υπολογιστή και με το ενδεχόμενο αυτόνομης χρήσης.

2.6.1 Μέθοδοι που βασίζονται στην μηχανική ταλάντωση

Η EMA σε σύγκριση με τις γενικές μεθόδους που βασίζονται στην μηχανική ταλάντωση είναι ότι χρησιμοποιεί ευφυή υλικά μικρών διαστάσεων με δυνατότητα συνεχούς σύγκρισης των μηχανικών ταλαντώσεων (ηλεκτρικών αποκρίσεων) που λαμβάνονται σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Η μεγαλύτερη διαφορά έγκειται στην περιοχή των συχνοτήτων που διεγείρεται η κατασκευή για να γίνει διάγνωση των αλλαγών στην δομική ακεραιότητα. Βασιζόμενες σε χαμηλού βαθμού γενικές ιδιομορφές οι τεχνικές που χρησιμοποιούν χαμηλές συχνότητες δεν είναι ευαίσθητες στις βλάβες που μόλις δημιουργήθηκαν. Η απόκριση της ταλάντωσης σε χαμηλές συχνότητες δεν παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στις μικρές αλλαγές. Χρησιμοποιώντας υψηλές συχνότητες, η μέθοδος EMA μια εναλλακτική διαδικασία η οποία εντοπίζει τοπικές, μικρές αλλαγές στην δομική ακεραιότητα.

2.6.2 Μέθοδος υπερηχητικού ελέγχου

Στον υπερηχητικό έλεγχο (Ultrasonic Testing UT) των δομικών στοιχείων, χρησιμοποιείται ένας πιεζομετατροπέας για να παράγει ένα ακουστικό κύμα στο εξεταζόμενο στοιχείο. Η μέθοδος βασίζεται στο χρόνο καθυστέρησης της ταχύτητας μετάδοσης των κυμάτων, όπου προσδιορίζεται η αλλαγή στο μήκος (τάση) και/ή στην πυκνότητα του στοιχείου. Συνήθως πριν από τον έλεγχο απαιτείται να είναι γνωστή η μηχανική φύση του στοιχείου έτσι ώστε να μπορεί επιλεχτεί η συχνότητα του υπερηχητικού σήματος για να συσχετιστεί στη συνέχεια με τη μηχανική απόκριση του στοιχείου. Η υπερηχητική μέθοδος είναι χρήσιμη σε μερικές κατασκευές για να ληφθεί μία εικόνα των ενσωματωμένων στοιχείων ή ανωμαλιών του υλικού. Η μέθοδος εντούτοις δεν μπορεί να είναι αυτόνομη στην χρήση της όπως η μέθοδος σύνθετης αντίστασης και απαιτούνται πεπειραμένοι τεχνικοί για να μελετήσουν τα υπερηχητικά δεδομένα και να διακρίνουν τις λεπτομέρειες μεταξύ τους.

2.6.3 Μέθοδος ακουστικής εκπομπής

Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής (acoustic emission AE) χρησιμοποιεί τα ελαστικά κύματα που δημιουργούνται με την έναρξη της ρωγμής, τις κινούμενες αρθρώσεις και τις ασυνέχειες για την διερεύνηση και την ανάλυση των κατασκευών. Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής είναι κατάλληλη για μεγάλα διαστήματα ελέγχων, ελέγχους υπό λειτουργία κατασκευών όπως και η μέθοδος σύνθετης αντίστασης. Και οι δύο μέθοδοι είναι ιδανικές για έλεγχο κρίσιμων τμημάτων όπου απαιτείται η διατήρηση υψηλής δομικής ακεραιότητας. Η μέθοδος ακουστικής εκπομπής περιλαμβάνει φαινόμενα που σχετίζονται με τη δημιουργία και μετάδοση των ελαστικών κυμάτων που παράγονται μέσα σε ένα υλικό με απότομη απελευθέρωση ενέργειας, ενώ η μέθοδος σύνθετης αγωγιμότητας μπορεί εύκολα να επιλύσει το πρόβλημα αυτό χρησιμοποιώντας την αρχή του πιεζοηλεκτρικού διεγέρτη-αισθητήρα. Το πλεονέκτημα του πιεζοηλεκτρικού διεγέρτη-αισθητήρα έγκειται στο γεγονός ότι λειτουργεί ταυτόχρονα και ως διεγέρτης και ως αισθητήρας. Υπερέχει με την έννοια ότι στη μέθοδο ακουστικής εκπομπής, η ύπαρξη πολλών αριθμών διαδρομών από την πηγή στον αισθητήρα μπορεί να δημιουργήσει δυσκολίες στην αναγνώριση του σήματος. Επιπλέον, η μέθοδος ακουστικής εκπομπής χρειάζεται να φιλτράρει την ηλεκτρική

παρέμβαση (παράσιτα) και τον περιβάλλοντα θόρυβο από τα σήματα εκπομπής. Επειδή, η περιορισμένη περιοχή κάλυψης της μεθόδου σύνθετης αντίστασης βοηθάει στην απομόνωση των αλλαγών στην απόκριση της σύνθετης αντίστασης εξαιτίας άλλων αλλαγών μακρινών πεδίων (far field) όπως φορτίο μάζας, κανονικές λειτουργικές ταλαντώσεις και συνοριακές συνθήκες.

2.6.4 Μέθοδος της επίδρασης του ηχοβολιστικού ελέγχου

Για την εφαρμογή της μεθόδου ηχοβολιστικού ελέγχου (Impact-Echo Testing IE) από μία πηγή επιρροής εισάγεται μία παλμική ένταση στην υπό έλεγχο κατασκευή με αποτέλεσμα από μία διάταξη μετατροπής να λαμβάνονται και να αναλύονται κύματα έντασης. Ο παλμός διαδίδεται μέσα στην κατασκευή και ανακλάται από τις ρωγμές ή τις ασυνέχειες της κατασκευής. Ο ηχοβολιστικός έλεγχος έχει χρησιμοποιηθεί για να αποτιμήσει την κατάσταση ποικίλων κατασκευών πολιτικού μηχανικού, περιλαμβανομένου κατασκευές σκυροδέματος, ξύλου, και τοιχοποιίας. Εντούτοις, ο ηχοβολιστικός έλεγχος απαιτεί ένα παλμό τον οποίο να δημιουργήσουν εξωτερικές πηγές και δεν μπορεί να προσαρμοστεί σε αυτόνομη χρήση όπως η μέθοδος σύνθετης αντίστασης. Ο ηχοβολιστικός έλεγχος έχει επιδείξει μεγάλη αποτελεσματικότητα για διάγνωση και εντοπισμό μεγάλων κενών αλλά δεν είναι ευαίσθητος στην παρουσία μικρών ρωγμών και ασυνεχειών εξαιτίας των σχετικά χαμηλών συχνοτήτων που εφαρμόζεται.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της τεχνικής H/M σύνθετης αγωγιμότητας EMA συγκριτικά με άλλες τεχνικές είναι: [Park and Inman, (2005), Kessler (2002), Wang (2004)]

(1) Η τεχνική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε μοντέλο και κατ' επέκταση σε πολύπλοκες κατασκευές.

(2) Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί μικρούς παρειασθητικούς διεγέρτες - αισθητήρες για να ελέγξουν ακόμη και απρόσιτες περιοχές.

(3) Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες - διεγέρτες (PZT) υπό φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας παρουσιάζουν πολύ καλά χαρακτηριστικά, έχουν μεγάλο εύρος γραμμικότητας, γρήγορη απόκριση, είναι ελαφρού βάρους, έχουν υψηλή αποδοτικότητα σε μετατροπές και σταθερότητα για μεγάλη χρονική διάρκεια.

(4) Η τεχνική, λόγω των υψηλών συχνοτήτων, είναι πολύ ευαίσθητη σε μικρές αλλαγές των δομικών ιδιοτήτων και κατ' επέκταση βλαβών.

(5) τα δεδομένα που λαμβάνονται, εύκολα μπορούν να ερμηνευτούν και άμεσα να χρησιμοποιηθούν σε στατιστικές επεξεργασίες.

(6) η τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί και για συνεχή έλεγχο της δομικής ακεραιότητας μιας κατασκευής μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.

(7) ο συνεχής έλεγχος εξασφαλίζει καλύτερη αποτίμηση της τρέχουσας κατάστασης της κατασκευής, η οποία μπορεί να αποκλείει την ανάγκη προγραμματισμένων κύριων ελέγχων.

Συμπερασματικά, η τεχνική σύνθετης αντίστασης είναι ικανή να εξασφαλίζει αποτελεσματικά μέσα για ποιοτική ανίχνευση εν τη γενέσει βλαβών σε περίπλοκες κατασκευές. Ενώ κάθε μία από τις προαναφερθείσες τεχνικές έχει τα πλεονεκτήματά της, η τεχνική σύνθετης αντίστασης προτείνεται στην παρούσα έρευνα με το ενδεχόμενο ότι μπορεί να εξελιχθεί σε απολύτως αυτόνομο σύστημα ελέγχου. Στον Πίνακα 3.1 συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα, οι περιορισμοί και οι δυνατότητες εφαρμογής διαφόρων μεθόδων ελέγχων δομικής ακεραιότητας διαφόρων συστημάτων, (Kessler, 2002). Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζεται μία γενική σύγκριση μεταξύ των παραδοσιακών μεθόδων ελέγχου των κατασκευών και ελέγχου δομικής ακεραιότητας.

Πίνακας 3.1 Σύγκριση των δυνατοτήτων, των περιορισμών και του ενδεχομένου υλοποίησης SHM από διάφορα συστήματα ελέγχου

Μέθοδος	Δυνατότητες	Περιορισμοί	Ενδεχόμενο SHM
Οπτικού ελέγχου	-Εξοπλισμός χαμηλού κόστους -Χωρίς ανάλυση δεδομένων -Φορητός εξοπλισμός -Απλή διαδικασία	-Μόνο επιφανειακές βλάβες -Μόνο μεγάλου μεγέθους βλάβες -Υποκειμενική ερμηνεία αποτελεσμάτων εξαρτώμενη άμεσα από το χρήστη -Χρονοβόρα διαδικασία	κανένα
Ραδιογραφία με χρήση ακτίνων X	-Διεisdύει στις επιφάνειες -Εντοπίζει μικρές ατέλειες λόγω της διείσδυσης -Χωρίς ανάλυση δεδομένων -Διαθέτει μόνιμο αρχείο αποτελεσμάτων -Απλή διαδικασία	-Εξοπλισμός υψηλού κόστους -Ακριβό κόστος εφαρμογής -Υποκειμενική ερμηνεία αποτελεσμάτων εξαρτώμενη άμεσα από το διαχειριστή -Χρονοβόρα διαδικασία -Απαιτεί πρόσβαση και από τις δύο πλευρές -Κίνδυνος ασφαλείας	κανένα

συνέχεια Πίνακα 3.1			
Μέθοδος	Δυνατότητες	Περιορισμοί	Ενδεχόμενο SHM
Μετρητές παραμορφώσεων	-Φορητός εξοπλισμός -Ενσωματώσιμοι -Αναρτημένη προσαρμόσιμη επιφάνεια -Απλή διαδικασία -Χαμηλός όγκος δεδομένων	-Εξοπλισμός υψηλού κόστους -Ακριβό κόστος εφαρμογής -Απαιτεί διαδικασία ανάλυσης δεδομένων -Τοπικά αποτελέσματα	-Ελαφρύς εξοπλισμός -Προσαρμόσιμος -Δυνατότητες αποθήκευσης δεδομένων -Ενέργεια χαμηλής ισχύος -Μικρή περιοχή κάλυψης
Οπτικές ίνες	-Εξοπλισμός χαμηλού κόστους -Ενσωματώσιμες -Γρήγορη εξέταση μεγάλων περιοχών	-Υψηλό κόστος εφαρμογής -Απαιτεί διαδικασία ανάλυσης δεδομένων -Υψηλός όγκος δεδομένων -Τίθεται θέμα ακριβείας	-Ελαφρύς εξοπλισμός -Προσαρμόσιμος -Δυνατότητες αποθήκευσης δεδομένων -Ενέργεια χαμηλής ισχύος -Μικρή περιοχή κάλυψης
Υπέρηχοι	-Χαμηλό κόστος εφαρμογής -Φορητός εξοπλισμός -Ευαίσθητοι σε μικρές βλάβες -Γρήγορη εξέταση μεγάλων περιοχών	-Εξοπλισμός υψηλού κόστους -Πολυσύνθετα αποτελέσματα -Εξειδικευμένο λογισμικό -Υψηλός όγκος δεδομένων -Απαιτείται συνδετικό υλικό -Απαιτεί πρόσβαση και από τις δύο πλευρές	κανένα
Ρεύμα αυτεπαγωγής	-Χαμηλό κόστος εφαρμογής -Φορητός εξοπλισμός -Αναρτημένη προσαρμόσιμη επιφάνεια -Ευαίσθητη σε μικρές βλάβες	-Εξοπλισμός υψηλού κόστους -Πολυσύνθετα αποτελέσματα -Κίνδυνος ασφάλειας -Μόνο για αγωγή υλικά	-Ελαφρύς εξοπλισμός -Προσαρμόσιμο -Δυνατότητες αποθήκευσης δεδομένων -Ενέργεια υψηλής ισχύος -μικρή περιοχή κάλυψης
Ακουστική εκπομπή	-Εξοπλισμός χαμηλού κόστους -Χαμηλό κόστος εφαρμογής -Αναρτημένη προσαρμόσιμη επιφάνεια -Φορητός εξοπλισμός -Γρήγορη εξέταση μεγάλων περιοχών -Ευαίσθητο σε μικρές αλλαγές	-Πολυσύνθετα αποτελέσματα -Πολύ υψηλός όγκος δεδομένων -Εξειδικευμένο λογισμικό	-Ελαφρύς εξοπλισμός -Προσαρμόσιμο -Δυνατότητες αποθήκευσης δεδομένων -Δεν απαιτεί ενέργεια -Μεγάλη περιοχή κάλυψης -Ικανότητα τριγωνικής διάταξης

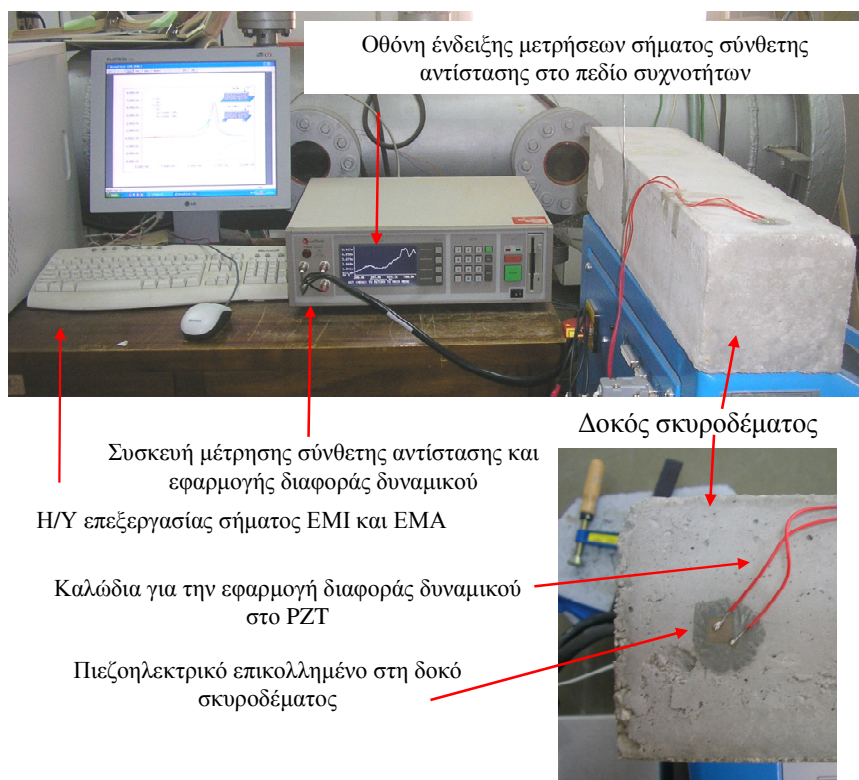
συνέχεια Πίνακα 3.1			
Μέθοδος	Δυνατότητες	Περιορισμοί	Ενδεχόμενο SHM
Ανάλυση απόκρισης ιδιομορφών	-Εξοπλισμός χαμηλού κόστους -Χαμηλό κόστος εφαρμογής -Αναρτημένη προσαρμόσιμη επιφάνεια -Φορητός εξοπλισμός -Απλή διαδικασία -Γρήγορη εξέταση μεγάλων περιοχών	-Σύνθετα αποτελέσματα -Υψηλός όγκος δεδομένων -Εξειδικευμένο λογισμικό -Γενικά αποτελέσματα	-Ελαφρύς εξοπλισμός -Προσαρμόσιμο -Δυνατότητες αποθήκευσης δεδομένων -Αισθητήρες πολλαπλής χρήσης -Απαιτείται χαμηλή ισχύς -μικρή περιοχή κάλυψης
Κύματα Lamb	-Εξοπλισμός χαμηλού κόστους -Χαμηλό κόστος εφαρμογής -Αναρτημένη προσαρμόσιμη επιφάνεια -Φορητός εξοπλισμός -Ευαισθησία σε μικρές βλάβες -Γρήγορη ανίχνευση γραμμικού διαστήματος	-Πολυσύνθετα αποτελέσματα -Υψηλός όγκος δεδομένων -Εξειδικευμένο λογισμικό	-Ελαφρύς εξοπλισμός -Προσαρμόσιμο -Δυνατότητες αποθήκευσης δεδομένων -Ενέργεια μέτριας ισχύς -Γραμμικά αποτελέσματα ανίχνευσης -Πιθανότητα τριγωνικής διάταξης

Πίνακας 3.2 Συνοπτική σύγκριση μεταξύ παραδοσιακών μεθόδων ελέγχου των κατασκευών και του ελέγχου δομικής ακεραιότητας SHM

	Παραδοσιακές μέθοδοι	SHM
Στόχος	Διάγνωση τοπικών βλαβών	Συνεχής αξιολόγηση των συνθηκών δομικής ακεραιότητας, συμπεριλαμβανομένης της διάγνωσης βλάβης και της πρόβλεψης διάρκειας ζωής
Ιστορικό δεδομένων	Δεν απαιτείται ιστορικό δεδομένων	Χρειάζεται ιστορικό δεδομένων για το συνεχή έλεγχο
Τρόπος επιθεώρησης	Προγραμματισμένοι έλεγχοι, γενική επισκευή σε συγκεκριμένο χρόνο	Εξαρτώνται από την δομική κατάσταση
Μορφές βλάβης	Ρωγμές (εσωτερικές ή επιφανειακές), κενά, πόροι, επιφανειακή διάβρωση κ.λπ.	Οποιοδήποτε είδος βλάβης
Χρήση εξοπλισμού αισθητήρων	Απλού τύπου αισθητήρες, απομονωμένοι από την κατασκευή υπό έλεγχο	Διάταξη αισθητήρων, συγχώνευση διαφορετικών ειδών αισθητήρων, ενσωμάτωση αισθητήρων με την υπο έλεγχο κατασκευή

συνέχεια Πίνακα 3.2	Παραδοσιακές μέθοδοι	SHM
Διενέργεια ελέγχου	Προγραμματισμένος έλεγχος	Συνεχής έλεγχος, άμεσα συνδεδεμένο σύστημα ελέγχου καθ'όλη τη διάρκεια ζωής της κατασκευής
Προσέγγιση περιοχών ελέγχου	Άμεση προσέγγιση των περιοχών βλάβης	Δεν απαιτείται άμεση προσέγγιση των περιοχών βλάβης
Διαδικασία λειτουργίας	Επέμβαση μετά την διενέργεια του προγραμματισμένου ελέγχου εφόσον υπάρχει βλάβη	Δυνατότητα λήψης απόφασης για άμεση επέμβαση κατά την έναρξη της βλάβης

Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη μέτρησης του σήματος H/M σύνθετης αντίστασης ή αγωγιμότητας που έχει εγκατασταθεί στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την πειραματική διερεύνηση των μετρήσεων για τον έλεγχο δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα.



Σχήμα 2.5 Πειραματική διάταξη μέτρησης σήματος H/M σύνθετης αντίστασης και αγωγιμότητας στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ EMA

Στο κεφάλαιο αυτό σκοπός είναι να διατυπωθούν οι καταστατικές σχέσεις που διέπουν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ώστε γίνει περισσότερο κατανοητή η χρήση του στην παρούσα διατριβή. Στη συνέχεια από αυτές τις καταστατικές εξισώσεις προκύπτει το βασικό μοντέλο που περιγράφει τη λειτουργία της μεθόδου EMA στην οποία βασίζονται οι μεθοδολογίες που προτείνονται.

3.1 Πιεζοηλεκτρισμός

Πιεζοηλεκτρισμός είναι η ιδιότητα ενός υλικού να εμφανίζει ηλεκτρικό φορτίο στην επιφάνειά του κάτω από την εφαρμογή μιας εξωτερικής μηχανικής πίεσης. Ο πιεζοηλεκτρισμός σχετίζεται με μόνιμη πόλωση, και μπορεί να αποδοθεί στη μόνιμη πόλωση που αλλάζει όταν υποβάλλεται το υλικό σε μηχανική παραμόρφωση λόγω της

εφαρμοσμένης πίεσης. Αντιθέτως, η αλλαγή της μόνιμης πόλωσης παράγει μια μηχανική παραμόρφωση, η οποία επιφέρει μηχανική πίεση.

Σε ένα αφόρτιστο (ασυμπίεστο) μονοδιάστατο διηλεκτρικό μέσο, η διηλεκτρική μετατόπιση D (ηλεκτρικό φορτίο ανά μονάδα επιφανείας, που εκφράζεται σε Cb/m^2) σχετίζεται με το ηλεκτρικό πεδίο E (V/m) και την πόλωση P (Cb/m^2) σύμφωνα με την εξίσωση (3.1).

$$D = \epsilon E = \epsilon_0 E + P \quad (3.1)$$

Ομοίως όταν ένα μονοδιάστατο ελαστικό σώμα βρίσκεται υπό την επίδραση μηδενικού ηλεκτρικού πεδίου, η σχέση της τάσης T (N/m^2) και της παραμόρφωσης S (m) δίδεται από τη σχέση (3.2).

$$T = cS \quad (3.2)$$

όπου το c είναι η δυσκαμψία του υλικού (Μοντέλο ελαστικότητας του Young).

Για ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό, οι ηλεκτρικές και μηχανικές καταστατικές εξισώσεις είναι συζευγμένες. Μία προκαλούμενη παραμόρφωση S στο υλικό δημιουργεί πόλωση ίση με eS από την άμεση πιεζοηλεκτρική επίδραση. Η συνολική προκληθείσα πόλωση δίδεται από τη σχέση (3.3).

$$P = (\epsilon - \epsilon_0)E + eS \quad (3.3)$$

Αντιθέτως, με την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου E τείνουν να ευθυγραμμιστούν τα εσωτερικά δίπολα, προκαλώντας τάσεις $-eE$ στο υλικό από την αντίστροφη πιεζοηλεκτρική επίδραση, (Tiersten, 1963), (Zhou and Tiersten, 1994), (Piefort, 2001). Οι συζευγμένες εξισώσεις που προκύπτουν είναι:

$$T = c^E S - eE \quad (3.4)$$

$$D = eS + \epsilon^S E \quad (3.5)$$

Στην εξίσωση (3.4), η πιεζοηλεκτρική σταθερά e αφορά την τάση του ηλεκτρικού πεδίου E απουσία μηχανικών παραμορφώσεων και το c^E αναφέρεται στην ακαμψία του υλικού όταν το ηλεκτρικό πεδίο είναι σταθερό. Στην εξίσωση (3.5) το e συσχετίζει το ηλεκτρικό φορτίο ανά μονάδα επιφανείας D με την παραμόρφωση απουσία ηλεκτρικού πεδίου. Το e εκφράζεται σε $\text{NV}^{-1}\text{m}^{-1}$ ή σε Cb/m^2 , η διηλεκτρική σταθερά είναι ϵ^S υπό σταθερή παραμόρφωση. Η εξίσωση (3.4) αποτελεί αφετηρία για την διατύπωση της εξίσωσης ενός πιεζοηλεκτρικού διεγέρτη, ενώ η εξίσωση (3.5) αντίστοιχα ενός

αισθητήρα. Στην επόμενη παράγραφο, δίδονται οι γραμμικές καταστατικές εξισώσεις για ένα πιεζοηλεκτρικό μέσο.

3.2 Γραμμικός πιεζοηλεκτρισμός

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των πιεζοηλεκτρικών υλικών έναντι άλλων ευφυών υλικών είναι η γραμμική τους συμπεριφορά μέσα σε μια ορισμένη περιοχή. Στην παράγραφο αυτή δίδονται οι εξισώσεις από τα πρότυπα IEEE με τη διαφορά ότι θεωρείται μόνο η πιεζοηλεκτρική σύζευξη και οι θερμοηλεκτρικοί όροι παραλείπονται. Στο γραμμικό πιεζοηλεκτρισμό, οι εξισώσεις γραμμικής ελαστικότητας συνδέονται με τις ηλεκτροστατικές εξισώσεις του ηλεκτρικού φορτίου μέσω των πιεζοηλεκτρικών σταθερών.

Οι καταστατικές εξισώσεις δίνονται, με βάση τις (3.4) και (3.5) με την παρακάτω μορφή πινάκων:

$$\{T\} = [c^E] \{S\} - [e]^T \{E\} \quad (3.6)$$

$$\{D\} = [e] \{S\} + [\epsilon^S] \{E\} \quad (3.7)$$

Από τις εξισώσεις (3.6) προκύπτουν οι θεμελιώδεις σχέσεις του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Πιεζοηλεκτρισμός είναι η συζευγμένη επίδραση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς των υλικών σύμφωνα με το νόμο του Gauss (3.8) και του νόμου του Hook (3.9).

$$D = \epsilon E \quad (3.8)$$

$$D, \text{ η διηλεκτρική μετατόπιση } \left[\frac{Cb}{m^2} \right]$$

$$\epsilon, \text{ η διηλεκτρική σταθερά } \left[\frac{N}{mV} \right]$$

$$E, \text{ το ηλεκτρικό πεδίο } \left[\frac{V}{m} \right]$$

$$S = sT \quad (3.9)$$

$$S, \text{ η μηχανική παραμόρφωση } [m]$$

s , η ελαστικότητα του υλικού (ενδοτικότητα) $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{N}} \right]$

T , η μηχανική τάση $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$

$$\{S\} = [s^E]\{T\} + [d]^T \{E\} \quad (3.10)$$

$$\{D\} = [d]\{T\} + [\varepsilon]^T \{E\}$$

$$\{S\} = [s^D]\{T\} + [g]^T \{D\} \quad (3.11)$$

$$\{E\} = -g\{T\} + [\beta^T]\{D\}$$

$$\{T\} = [c^D]\{S\} - [h]^T \{D\} \quad (3.12)$$

$$\{E\} = -[h]\{S\} + [\beta^S]\{D\}$$

με

$\{T\} = \{T_{11} \ T_{22} \ T_{33} \ T_{23} \ T_{13} \ T_{12}\}^T$ είναι το διάνυσμα τάσης

$\{S\} = \{S_{11} \ S_{22} \ S_{33} \ 2S_{23} \ 2S_{13} \ 2S_{12}\}^T$, το διάνυσμα παραμόρφωσης

$\{E\} = \{E_1 \ E_2 \ E_3\}$, το διάνυσμα ηλεκτρικού πεδίου

$\{D\} = \{D_1 \ D_2 \ D_3\}$, το διάνυσμα ηλεκτρικών μετατοπίσεων

$[c]$ και $[s]$, τα μητρώα σταθερών ελαστικότητας

$[\varepsilon]$ και $[\beta]$, τα μητρώα διηλεκτρικών σταθερών

$[d]$, $[e]$, $[g]$ και $[h]$, τα μητρώα πιεζοηλεκτρικών σταθερών

και οι εκθέτες D , E , S και T υποδηλώνουν τις τιμές των σταθερών D , E , S και T αντίστοιχα.

Το στοιχείο d_{ij} του $[d]$ αντιπροσωπεύει τη σύζευξη μεταξύ της μηχανικής επίδρασης και του ηλεκτρικού πεδίου στην κατεύθυνση i (εάν υπάρχει πόλωση, η κατεύθυνση του λαμβάνεται ως κατεύθυνση 3), έτσι η παραμόρφωση στην κατεύθυνση j είναι $S_j = d_{ij}E_i$.

Οι σχέσεις μεταξύ των διηλεκτρικών, ελαστικών και πιεζοηλεκτρικών σταθερών είναι οι εξής:

$$[c^E][s^E] = [c^D][s^D] = I_6 \quad (3.13)$$

$$[\beta^S][\varepsilon^S] = [\beta^T][\varepsilon^T] = I_3 \quad (3.14)$$

$$[c^D] = [c^E] + [e]^T [h] \quad (3.15)$$

$$[s^D] = [c^D] - [d]^T [g] \quad (3.16)$$

$$[\varepsilon^T] = [\varepsilon^S] - [d]^T [e] \quad (3.17)$$

$$[\beta^S] = [\beta^T] - [g]^T [h] \quad (3.18)$$

$$[e] = [d][c^E] \quad (3.19)$$

$$[d] = [\varepsilon^T][g] \quad (3.20)$$

$$[g] = [h][s^D] \quad (3.21)$$

$$[h] = [\beta^S][e] \quad (3.22)$$

3.3 Διεγέρτες και Αισθητήρες

Η χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών για τη δημιουργία διεγερτών και αισθητήρων έχει αυξηθεί κατά την διάρκεια των τελευταίων χρόνων. Λόγω των κρυσταλλικών συμμετριών των υλικών αυτών, οι πίνακες των πιεζοηλεκτρικών συζεύξεων έχουν μερικά μη-μηδενικά στοιχεία. Ο σχεδιασμός διεγερτών και αισθητήρων υπαγορεύεται από τις λειτουργίες των συζεύξεων (μη-μηδενικά στοιχεία στον πίνακα πιεζοηλεκτρικών συζεύξεων εξίσωση 3.9).

Για γραμμικά πιεζοηλεκτρικά υλικά, η αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτρικών και μηχανικών μεταβλητών μπορούν να περιγραφούν από τις γραμμικές σχέσεις. Οι βασικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται μεταξύ των μηχανικών και ηλεκτρικών μεταβλητών στη τανυστική μορφή που προκύπτουν από το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι:

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k \quad (3.23)$$

$$D_i = d_{ikl} T_{kl} + \varepsilon_{ik}^T E_k \quad (3.24)$$

Όπου s_{ijkl}^E είναι η μηχανική ελαστικότητα - ενδοτικότητα του υλικού απουσία ηλεκτρικού φορτίου ($E=0$) που εκφράζει την παραμόρφωση ανά μονάδα τάσης, ε_{ik}^T είναι η διηλεκτρική σταθερά υπολογισμένη για μηδενική μηχανική πίεση ($T=0$), και οι σταθερές d_{kij} και d_{ikl} εκφράζουν την πιεζοηλεκτρική σύζευξη μεταξύ των ηλεκτρικών

και μηχανικών μεταβλητών (πιεζοηλεκτρική σταθερά παραμόρφωσης ή αλλιώς λέγεται και πιεζοηλεκτρική σταθερά ηλεκτρικής φόρτισης) που εκφράζουν το ηλεκτρικό φορτίο ανά μονάδα τάσης ή την παραμόρφωση ανά μονάδα ηλεκτρικού πεδίου. Η δεύτερη εξίσωση εκφράζει την άμεση πιεζοηλεκτρική επίδραση, ενώ η πρώτη εξίσωση την αντίστροφη πιεζοηλεκτρική επίδραση. Η εφαρμογή μηχανικής πίεσης σε ένα υλικό οδηγεί στην παραγωγή ενός ηλεκτρικού φορτίου και αυτό καλείται ‘άμεσο’ ή ‘ευθύ’ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Αντιστρόφως, όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο κατά τη διεύθυνση πόλωσης, το πιεζοηλεκτρικό υλικό υπόκειται σε μηχανική παραμόρφωση και αυτό καλείται ως ‘έμμεσο’ ή ‘αντίστροφο’ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

Από τις εξισώσεις (3.23) και (3.24) οι πίνακες μπορούν να αναπροσαρμοστούν χρησιμοποιώντας την συνεπτυγμένη μορφή (δείκτες Voigt) κατά την οποία οι τελεστές της τάσης και της παραμόρφωσης λαμβάνονται ως διάνυσμα 6-στοιχείων, με τα πρώτα τρία στοιχεία να αντιπροσωπεύουν την άμεση τάση και παραμόρφωση, ενώ τα υπόλοιπα τρία στοιχεία να αντιπροσωπεύουν τη διατμητική τάση και παραμόρφωση, (Giurgiutiu, 2007).

Χρησιμοποιώντας τις συμμετρίες των τελεστών (tensors), εισάγεται μια συνεπτυγμένη μορφή συστήματος χαρακτήρων και συμβόλων μητρώου Voigt αντί του συμβολισμού των τελεστών. Αυτό το σύστημα σήμανσης των μητρώων προκύπτει από την αντικατάσταση των δεικτών ij ή kl όπου $i, j, k, l=1,2,3$.

Λόγω των συμμετριών του κρυστάλλου, τα πιεζοηλεκτρικά μητρώα σύζευξης $[d]$ και $[e]$ μπορούν να έχουν μόνο λίγα μη μηδενικά στοιχεία. Οι συνεπτυγμένοι πίνακες έχουν το πλεονέκτημα της συνοπτικότητας και χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές μηχανικής. Οι τιμές των συντελεστών πιεζοηλεκτρικής σύζευξης διαφέρουν από υλικό σε υλικό. Τα περισσότερα πιεζοηλεκτρικά υλικά που ενδιαφέρουν είναι τα κρυσταλλικά στερεά. Αυτά είναι ενιαία απλά κρύσταλλα (είτε φυσικά είτε συνθετικά) ή πολυκρυσταλλικά υλικά όπως τα φεरोηλεκτρικά κεραμικά, (Pietfort, 2001).

Έτσι οι θεμελιώδεις εξισώσεις (3.23) και (3.24) λαμβάνουν τις παρακάτω μορφές πινάκων:

Διεγέρτης:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E = 2(s_{11}^E - s_{12}^E) \end{bmatrix}}_{\text{ελαστικότητα-ενδοτικότητα}} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix}}_{\text{σύζευξη}} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Αισθητήρας:

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix}}_{\text{σύζευξη}} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}}_{\text{διηλεκτρική σταθερά}} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Ο πιεζοηλεκτρικός πίνακας $[d]$ στην εξίσωση (3.25) είναι αντιμετατιθέμενος στην εξίσωση (3.26). Για τις συνήθεις περιπτώσεις πιεζοκεραμικών, οι θεμελιώδεις πιεζοηλεκτρικές εξισώσεις από τις συνεπτυγμένες εκφράσεις πινάκων (Voigt) γίνονται:

Διεγέρτης:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E = 2(s_{11}^E - s_{12}^E) \end{bmatrix}}_{\text{ελαστικότητα-ενδοτικότητα}} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{σύζευξη}} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Αισθητήρας:

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{σύζευξη}} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}}_{\text{διηλεκτρική σταθερά}} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

όπου η πρώτη εξίσωση εκφράζει την σχέση του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου και η δεύτερη του άμεσου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Οι τέσσερις πιεζοηλεκτρικές σταθερές d_{ij} , e_{ij} , g_{ij} και h_{ij} ορίζονται από τις σχέσεις:

$$d_{ij} = \left(\frac{\partial D_i}{\partial T_j} \right)^E = \left(\frac{\partial S_i}{\partial E_j} \right)^T$$

$$e_{ij} = \left(\frac{\partial D_i}{\partial S_j} \right)^E = - \left(\frac{\partial T_i}{\partial E_j} \right)^S$$

$$g_{ij} = - \left(\frac{\partial E_i}{\partial T_j} \right)^D = \left(\frac{\partial S_i}{\partial D_j} \right)^T$$

$$h_{ij} = - \left(\frac{\partial E_i}{\partial S_j} \right)^D = - \left(\frac{\partial T_i}{\partial D_j} \right)^S$$

όπου οι δύο πρώτες σχέσεις αντιστοιχούν στο ευθύ - άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και οι δύο επόμενες στο αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

Τα περισσότερα κοινώς χρησιμοποιούμενα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι τα πιεζοκεραμικά (PZT) και τα πιεζο-πολυμερικά (PVDF). Οι διαθέσιμες καταστάσεις διέγερσης για ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό προσδιορίζονται από τον πίνακα ηλεκτρικής σύζευξης. Οι πίνακες ηλεκτρικής σύζευξης για το PZT και το PVDF δίδονται με τις παρακάτω μορφές:

$$[d]_{\text{PZT}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (d_{32} = d_{31}, \quad d_{24} = d_{15})$$

$$[d]_{\text{PVDF}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Οι τρεις κύριες καταστάσεις διέγερσης είναι η εντός επιπέδου κατάσταση (d_{31}, d_{32}), η κάθετη κατάσταση (d_{33}) και η κατάσταση διάτμησης (d_{15}, d_{24}).

3.4 Χαρακτηριστικά των πιεζοηλεκτρικών υλικών

- Σταθερά συχνότητας N : η ταχύτητα διάδοσης του ήχου διαμέσου ενός πιεζοηλεκτρικού κεραμικού έχει μια ειδική τιμή για κάθε τρόπο μηχανικής ταλάντωσης. Ισχύει:

$$\frac{\lambda}{2} = \ell \quad (\text{m}) \quad (3.29)$$

όπου λ το μήκος κύματος μηχανικής ταλάντωσης και ℓ το μήκος διάδοσης στη συχνότητα συντονισμού. Επειδή η ταχύτητα του ήχου είναι σταθερή ισχύει:

$$u = f_r \cdot \lambda \quad (\text{m/sec}) \quad (3.30)$$

$$\text{και } f_r \cdot \ell = \frac{u}{2} N \quad (\text{m/sec ή Hz m}) \quad (3.31)$$

όπου $N = n$ η σταθερά συχνότητας εξαρτώμενη από τον τρόπο μηχανικής ταλάντωσης.

Από τη σχέση (3.31) υπολογίζεται η συχνότητα συντονισμού $f_r = \frac{N}{\ell}$ (Hz)

- Λόγος Poisson σ^E : όταν σε ένα ελαστικό σώμα εφαρμόζεται μια σταθερή μηχανική τάση μέσα στα όρια της ελαστικής περιοχής, τότε ο λόγος αυτός δίδεται από τον τύπο :

$$\sigma^E = \frac{\text{ρυθμός παραμόρφωσης κάθετης στη μηχανική τάση}}{\text{ρυθμός παραμόρφωσης κατά μήκος της τάση αυτής}} \leq 0.5$$

- Μέτρο ελαστικότητας του Young Y^E : για ένα ελαστικό σώμα και μέσα στα όρια της ελαστικής του περιοχής ορίζεται ως:

$$Y^E = \frac{\text{εφελκυστική τάση ανά μονάδα επιφάνειας}}{\text{αύξηση του μήκους ανά μονάδα μήκους}} \quad (\text{N/m}^2)$$

και το αντίστροφο $S^E = \frac{1}{Y^E}$ καλείται σταθερά ελαστικότητας ή ενδοτικότητα.

Γενικά η απόκριση ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού υπό μηχανική τάση είναι η σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτρικών και μηχανικών παραμέτρων.

$$S = S^E T + dE \quad (3.32)$$

αφού ισχύει: $d = g\varepsilon^T$ και $\varepsilon^T E = D$ τότε:

$$S = S^D T + gD \quad (3.33)$$

όπου S^E , S^D οι ειδικές ενδοτικότητες για σταθερό E και D αντίστοιχα.

- Σχετική διηλεκτρική σταθερά $\varepsilon^T/\varepsilon_0$ είναι ο λόγος της διηλεκτρικής σταθεράς ε^T προς την διηλεκτρική σταθερά του κενού $\varepsilon_0=8.854 \cdot 10^{-12}\text{F/m}$.

ενώ για κατά πάχος τρόπο ταλάντωσης:

$$\frac{\varepsilon_{11}^T}{\varepsilon_0} = \frac{C_f \cdot t}{\ell \cdot a \cdot \varepsilon_0} \quad (3.34)$$

εφόσον η χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων στο 1 KHz αποτελείται από τη σχέση $C_f = C_1 + C_0$.

- Πιεζοηλεκτρικές σταθερές d και g :

α. Σταθερά πιεζοηλεκτρικής παραμόρφωσης d είναι η παραμόρφωση που προκύπτει από την εφαρμογή ενός ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου χωρίς μηχανική τάση σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό και είναι ίση με

$$d = k \sqrt{\frac{\varepsilon^T}{Y^E}} \quad \left(\frac{\text{m}}{\text{V}} \right) \quad (3.35)$$

$$\text{συγκεκριμένα: } d_{31} = k_{31} \sqrt{\frac{\varepsilon_{33}^T}{Y_{11}^E}}, \quad d_{33} = k_{33} \sqrt{\frac{\varepsilon_{33}^T}{Y_{33}^E}}, \quad d_{15} = k_{15} \sqrt{\frac{\varepsilon_{11}^T}{Y_{44}^E}}$$

β. Ο συντελεστής τάσης εξόδου αναφέρεται στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που προκύπτει από μια ομοιόμορφη κρούση, η οποία εφαρμόζεται χωρίς ηλεκτρική μετατόπιση και είναι :

$$g = \frac{d}{\varepsilon^T} \quad \left(\frac{\text{V} \cdot \text{m}}{\text{N}} \right) \quad (3.36)$$

$$\text{συγκεκριμένα: } g_{31} = \frac{d_{31}}{\varepsilon_{33}^T}, \quad g_{33} = \frac{d_{33}}{\varepsilon_{33}^T}, \quad g_{15} = \frac{d_{15}}{\varepsilon_{11}^T}$$

Οι σταθερές d και g εξαρτώνται από τον τρόπο της ταλάντωσης.

- Ο ηλεκτρομηχανικός συντελεστής σύζευξης k δείχνει την ικανότητα μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική και δίδεται:

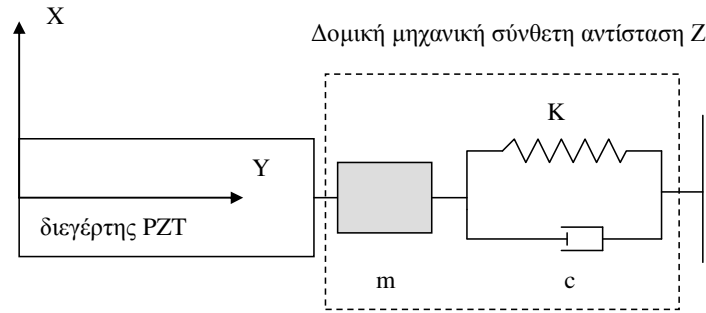
$$k = \sqrt{\frac{\text{ωφέλιμη μηχανική ενέργεια}}{\text{παρεχόμενη ηλεκτρική ενέργεια}}}$$

Από τις σχέσεις 3.32 και 3.33 προκύπτουν:

$$k^2 = \frac{d^2}{S^E \epsilon^T} \quad \text{ή} \quad \frac{k^2}{1-k^2} = \frac{g^2 \epsilon^T}{S^D}$$

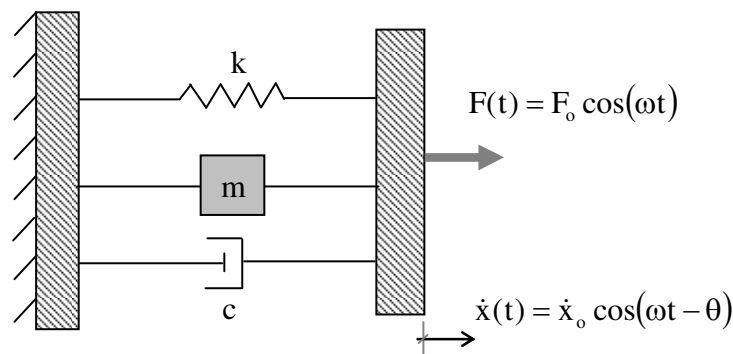
3.5 Αναλυτικό μοντέλο μεθόδου σύνθετης αγωγιμότητας

Η ηλεκτρομηχανική προσομοίωση των συστημάτων στα οποία καθοριστικό ρόλο παίζουν οι πιεζοηλεκτρικοί διεγέρτες PZT αναπτύχθηκε από τους Liang et al. (1994). Η μέθοδος σύνθετης αντίστασης για την ανάλυση της δυναμικής απόκρισης των συστημάτων που περιλαμβάνουν ενεργά υλικά μπορεί να περιγραφεί από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ευφών υλικών και των απλών συστημάτων. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διεγερτών και των κατασκευών ελέγχονται από τα εξωτερικά δυναμικά χαρακτηριστικά των διεγερτών και των δυναμικών χαρακτηριστικών της κατασκευής όπως η δομική σύνθετη αντίσταση. Η σύνθετη αντίσταση της κατασκευής εξαρτάται από τη μάζα, την απόσβεση, τις συνοριακές συνθήκες, την ακαμψία, και την θέση της. Η δυναμική αλληλεπίδραση του PZT και της κατασκευής (Σχήμα 3.1) καθορίζεται από τη σύζευξη μίας από τις θεμελιώδεις εξισώσεις (αντίστροφης επίδρασης) του PZT και της κατασκευής και με τους συμβατικούς όρους από τις εξισώσεις της κίνησης ταυτόχρονα για τον διεγέρτη και την κατασκευή.



Σχήμα 3.1 Σχηματική απεικόνιση του συστήματος διεγέρτη PZT - μηχανικό σύστημα που αντιπροσωπεύει τη δομική σύνθετη αντίσταση (Σύστημα Μάζας Δυσκαμψίας Απόσβεσης, Spring – Mass – Damper, SMD) ενός βαθμού ελευθερίας που συνδέεται με έναν πιεζοηλεκτρικό διεγέρτη PZT)

Ένα σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας (single degree of freedom, SDOF) μάζας - δυσκαμψίας - απόσβεσης υποβαλλόμενο σε μία δύναμη διέγερσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 Σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας υπό δυναμική διέγερση

Η σχέση δύναμης - μετατόπισης για το διεγέρτη PZT μπορεί να εκφραστεί ως:

$$F = K_A (x - x_{in}) \quad (3.37)$$

όπου x είναι η μετατόπιση, F είναι η δύναμη που ασκείται από τον διεγέρτη, και K_A είναι η στατική δυσκαμψία του PZT η οποία δίδεται από τη σχέση: $Y_{22}^E w_A h_A / \ell_A$, όπου w_A , h_A , ℓ_A είναι το πλάτος, το πάχος και το μήκος του διεγέρτη PZT, αντίστοιχα. x_{in} είναι η ελεύθερα προκληθείσα μετατόπιση του διεγέρτη η οποία δίδεται από τη σχέση $d_{32} E \ell_A$, όπου d_{32} είναι η πιεζοηλεκτρική σταθερά και E το ηλεκτρικό πεδίο.

Η ακόλουθη σχέση βασίζεται στην αρχή της μηχανικής σύνθετης αντίστασης η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για ένα μονοβάθμιο σύστημα ελατήριο – μάζα – απόσβεση SMD (spring - mass - damper system). Εκφράζει τη δύναμη που εφαρμόζεται σε ένα σημείο του συστήματος η οποία είναι ίση με τη μηχανική αντίσταση του συστήματος επί την ταχύτητα στο ίδιο σημείο:

$$F = -Z\dot{x} \quad (3.38)$$

όπου Z είναι η μηχανική σύνθετη αντίσταση του συστήματος SMD ελατήριο – μάζα – απόσβεση η οποία δίδεται από την εξίσωση:

$$Z = c + m \frac{\omega^2 - \omega_n^2}{\omega} i \quad (3.39)$$

όπου $i = (-1)^{1/2}$, c είναι ο συντελεστής απόσβεσης, m είναι η μάζα, K_s είναι ο συντελεστής του ελατηρίου, ω είναι η συχνότητα διέγερσης. Η συχνότητα συντονισμού του SMD συστήματος είναι ω_n και δίδεται από τη σχέση:

$$\omega_n = \sqrt{K_s/m} \quad (3.40)$$

Έστω μία σταθερή αρμονική διέγερση κατά την οποία

$$\dot{x} = \omega i x \quad (3.41)$$

Η δύναμη του συστήματος SMD μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$F = -K_D x = -[c\omega i - m(\omega^2 - \omega_n^2)]x \quad (3.42)$$

όπου K_D είναι η δυσκαμψία του συστήματος.

Η δύναμη δυναμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ του διεγέρτη και του συστήματος, SMD μπορεί να προσδιοριστεί από τις εξισώσεις (3.42) και (3.37) όπως:

$$F = -\frac{K_D K_A}{K_D + K_A} x_m \quad (3.43)$$

Επειδή το K_D είναι εξαρτώμενο από την συχνότητα, η δύναμη που ασκείται στην κατασκευή από έναν πιεζοηλεκτρικό διεγέρτη είναι επίσης εξαρτώμενη από τη συχνότητα.. Από τη σχέση (3.39) και (3.40) προκύπτει η σχέση (3.41):

$$Z = c + m\omega i - \frac{k}{\omega} i \quad (3.44)$$

η οποία εκφράζει την μηχανική αντίσταση του συστήματος SMD.

c : απόσβεση της κατασκευής

m : μάζα

k : δυσκαμψία

ω : η συχνότητα διέγερσης

Για ένα σύνθετο δομικό σύστημα, το παραπάνω μοντέλο σύνθετης δομικής μηχανικής αντίστασης μπορεί εύκολα να επεκταθεί σε σύστημα με πολλούς βαθμούς ελευθερίας συνδυάζοντας έναν αριθμό από SDOF στοιχείων.

Θεωρητικά, κάθε μηχανικό σύστημα αποτελείται από ποικίλους συνδυασμούς των τριών βασικών στοιχείων, μάζα, δυσκαμψία και απόσβεση και μπορούν να δοθούν για :

$$\text{επίδραση μόνο της απόσβεσης: } Z_c = c \quad (3.45)$$

$$\text{επίδραση μόνο της δυσκαμψίας: } Z_k = \frac{-ik}{\omega} \quad (3.46)$$

$$\text{επίδραση μόνο της μάζας: } Z_m = i\omega m \quad (3.47)$$

Η μηχανική αντίσταση που συνδέεται με τη δυσκαμψία και τη μάζα εξαρτάται άμεσα από τη συχνότητα. Στην ανάλυση σύνθετων μηχανικών συστημάτων (δομικό σύστημα πολλαπλών βαθμών ελευθερίας - MDOF multiple degree of freedom, συχνά συνδυάζονται κατάλληλα οι ομάδες βασικών μηχανικών στοιχείων έτσι ώστε να μπορούν αντιπροσωπευθούν από μια ενιαία σύνθετη αντίσταση.

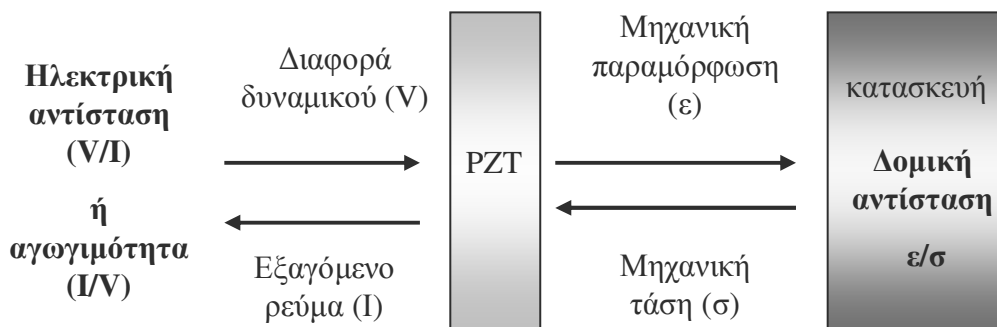
Εξαιτίας της διαφοράς φάσης μεταξύ της εφαρμοζόμενης δύναμης και της ταχύτητας, η μηχανική σύνθετη αντίσταση, για κάθε συχνότητα προέρχεται στην πραγματικότητα από ένα σύνθετο αριθμό που δηλώνεται με τις μεταβλητές x και y , αντίστοιχα:

$$Z=x+yi \quad (3.48)$$

Οι Bhalla και Soh (2004b) διαπίστωσαν ότι μέσα σε ένα ορισμένο δυναμικό φάσμα συχνότητας, μια σύνθετη κατασκευή μπορεί πολλές φορές να εξιδανικευθεί ως ένα απλό ισοδύναμο μηχανικό σύστημα. Η βασική έννοια είναι ότι, για μια σύνθετη κατασκευή κάτω από τη διέγερση υψηλών συχνοτήτων του επιθέματος PZT, η απόκριση της συχνότητας από την άποψη της μηχανικής σύνθετης αντίστασης παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με αυτήν ενός συνδυασμού απλών κατασκευών.

Στις πραγματικού μεγέθους κατασκευές, η δομική μηχανική σύνθετη αντίσταση μπορεί να ληφθεί με την επικόλληση ενός επιθέματος PZT, επάνω στην κατασκευή και την διέγερσή του με ένα ηλεκτρικό φορτίο. Στη συνέχεια λαμβάνεται η απόκριση της σύνθετης αντίστασης, και με τον αντίστροφο υπολογισμό χρησιμοποιώντας την

ηλεκτρομηχανική σύζευξη λαμβάνεται η σύνθετη μηχανική αγωγιμότητα της κατασκευής στο σημείο αυτό. Η παραπάνω υπόθεση παρουσιάζεται διαγραμματικά στο Σχήμα 3.3. Εφαρμόζοντας διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού διεγέρτη-αισθητήρα προκαλείται μηχανική παραμόρφωση της κατασκευής στη γύρω περιοχή. Λόγω της μηχανικής παραμόρφωσης η κατασκευή αντιδρά με την ανάπτυξη μηχανικής τάσης η οποία επιδρά ακολούθως στο επικολλημένο PZT με αποτέλεσμα να αναπτυχθεί ρεύμα στην επιφάνειά του. Ο λόγος της διαφοράς δυναμικού προς το αναπτυσσόμενο ρεύμα δίνει την ηλεκτρική αντίσταση, ενώ το αντίστροφο μέγεθος την ηλεκτρική αγωγιμότητα.



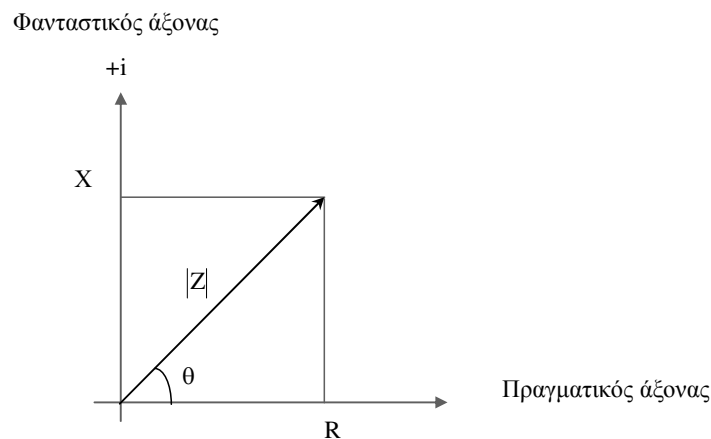
Σχήμα 3.3 Συσχετισμός ηλεκτρο- μηχανικής αλληλεπίδρασης της κατασκευής με την ηλεκτρική αντίσταση του PZT

3.5.1 Ανάλυση των συνιστωσών της σύνθετης ηλεκτρομηχανικής αντίστασης και αγωγιμότητας (Impedance Measurement Handbook ή Agilent Technologies)

Η σύνθετη αντίσταση είναι ένας σημαντικός παράγοντας που χαρακτηρίζει τα ηλεκτρονικά κυκλώματα, απλά συστήματα και υλικά ή ευφυή συστήματα και υλικά που χρησιμοποιούνται για να κατασκευαστούν σύνθετα ευφυή συστήματα. Η σύνθετη αντίσταση (Z) ορίζεται γενικά ως η συνολική αντίσταση ενός συστήματος ή ενός κυκλώματος να προσφέρει στη ροή ενός εναλλασσόμενου ρεύματος σε μια δεδομένη συχνότητα, και αντιπροσωπεύεται ως σύνθετη ποσότητα που παρουσιάζεται γραφικά σε ένα διανυσματικό επίπεδο.

Το διάνυσμα της σύνθετης αντίστασης αποτελείται από το πραγματικό μέρος (ωμική αντίσταση, R) και το φανταστικό μέρος (επαγωγική ή χωρητική αντίσταση, X) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Η σύνθετη αντίσταση μπορεί να εκφραστεί χρησιμοποιώντας ένα ορθογωνικό σύστημα συντεταγμένων με την μορφή $R+jX$ ή στην

πολική μορφή ως μέγεθος και γωνία φάσης: $|Z| < \theta$. Το Σχήμα 3.4 παρουσιάζει επίσης τη μαθηματική σχέση μεταξύ του R , X , $|Z|$ και θ . Σε μερικές περιπτώσεις, από μαθηματική άποψη η χρησιμοποίηση του αντίστροφου της σύνθετης αντίστασης αποδεικνύεται πολύ χρήσιμη. Στην περίπτωση αυτή $1/Z = 1/(R + jX) = Y = G + jB$, όπου το Y εκφράζει την σύνθετη αγωγιμότητα, G την αγωγιμότητα (πραγματικό μέρος) και B την ενδοτικότητα (φανταστικό μέρος). Η μονάδα μέτρησης της σύνθετης αντίστασης είναι $\text{ohm} (\Omega)$, και της σύνθετης αγωγιμότητας siemens (Siemens) ή $\text{ohm}^{-1} (\Omega)^{-1}$. Η σύνθετη αντίσταση είναι μια συνηθισμένη παράμετρος που χρησιμοποιείται και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για μια σύνδεση σε σειρά της ωμικής αντίστασης και της χωρητικής αντίστασης, επειδή μπορεί να εκφραστεί απλά ως άθροισμα, R και X . Για παράλληλη σύνδεση αποδεικνύεται καλύτερη η χρήση της σύνθετης αγωγιμότητας ή για πραγματικό και φανταστικό μέρος παράλληλα είναι καλύτερη η χρήση της σύνθετης αγωγιμότητας. Για σύνδεση σε σειρά αποδεικνύεται καλύτερη η χρήση της σύνθετης αντίστασης ή για πραγματικό και φανταστικό μέρος σε σειρά είναι καλύτερη η χρήση της σύνθετης αντίστασης. Γι' αυτό το λόγο επιλέγεται το μέγεθος της σύνθετης αγωγιμότητας να εξετάζεται γιατί η προσομοίωση του μηχανικού συστήματος επιτυγχάνεται αποδοτικότερα (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.4 Σύνθετη αντίσταση (Z). Αποτελείται από το πραγματικό μέρος (R) και το φανταστικό μέρος (X)

$$\text{όπου } Z = R + iX, \quad |Z| < \theta$$

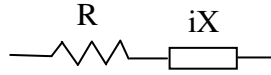
$$R = |Z| \cos \theta$$

$$X = |Z| \sin \theta$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)$$

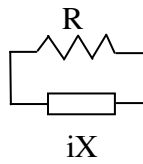
Πραγματικό και φανταστικό μέρος σε σειρά



$$Z = R + iX$$

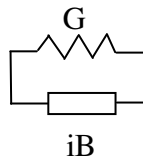
Η αντίσταση εκφράζει καλύτερα την συνδεσμολογία,

Πραγματικό και φανταστικό μέρος παράλληλα



Η αντίσταση εκφράζει με περίπλοκο τρόπο την συνδεσμολογία

$$Z = \frac{iRX}{R + iX} = \frac{RX^2}{R^2 + X^2} + i \frac{R^2X}{R^2 + X^2}$$

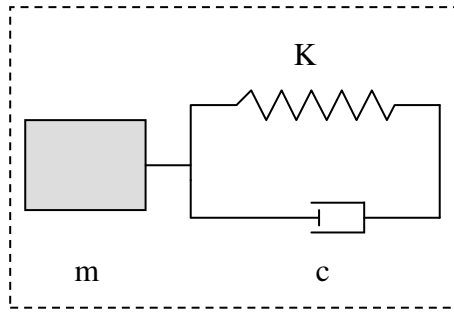


Η αγωγιμότητα εκφράζει καλύτερα την συνδεσμολογία

$$Y = G + iB$$

Σχήμα 3.5 Εκφράσεις για την σύνδεση σε σειρά και παράλληλα της πραγματικής και της φανταστικής συνιστώσας της σύνθετης αντίστασης και σύνθετης αγωγιμότητας.

Στην περίπτωση που εξετάζεται στην παρούσα διατριβή, η κατάλληλη προσομοίωση του συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6 δηλαδή φανταστικό και πραγματικό μέρος που αντιπροσωπεύουν την δυσκαμψία και την απόσβεση της κατασκευής να συνδέονται παράλληλα.



Σχήμα 3.6 Συνδεσμολογία συστατικών της μηχανικής αντίστασης της κατασκευής

Για ένα σύστημα με παράλληλες συνδέσεις, η συνολική μηχανική αντίσταση της κατασκευής (structural mechanical impedance SMI), Z_p μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα των σύνθετων αντιστάσεων, Z_i για κάθε δομικό στοιχείο.

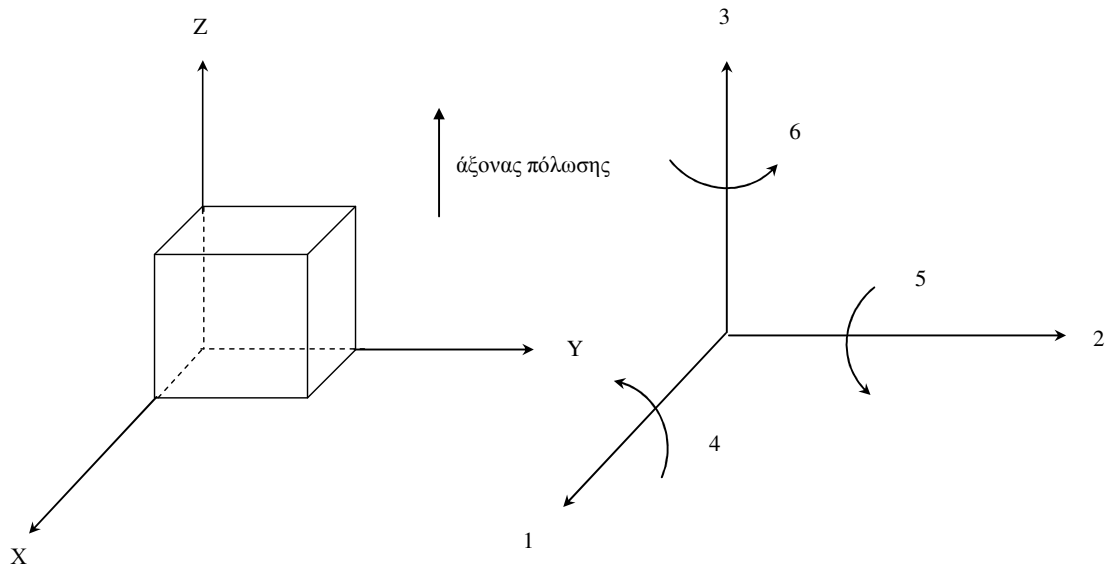
$$Z_p = \sum_{i=1}^n Z_i \quad (3.49)$$

Για ένα σύστημα με συνδέσεις σε σειρά, η συνολική μηχανική αντίσταση της κατασκευής (structural mechanical impedance SMI), Z_s μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\frac{1}{Z_s} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i} \quad (3.50)$$

3.5.2 Ηλεκτρομηχανική σύζευξη μεταξύ PZT και ελεγχόμενου δομικού συστήματος

Τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα που χρησιμοποιούνται στην τεχνική της σύνθετης ηλεκτρομηχανικής αγωγιμότητας είναι λεπτοί κεραμικοί δίσκοι Lead Zirconate Titanate (PZT) που επικολλώνται με την κατασκευή. Σε αυτό το σύνθετο “ευφύες” σύστημα η μηχανική τάση και παραμόρφωση εφαρμόζονται στην πρώτη 1 και δεύτερη 2 διεύθυνση στο επίπεδο της επιφάνειας, ενώ το ηλεκτρικό φορτίο ενεργεί στην τρίτη 3 διεύθυνση κάθετα στην επιφάνεια όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7 Άξονας πόλωσης και δείκτες

Γι' αυτό το λόγο σημαντική ηλεκτρομηχανική σύζευξη σε αυτό τον τύπο της ανάλυσης έχουν οι επιδράσεις 31 και 32. Η εφαρμογή του ηλεκτρικού φορτίου E_3 , επιφέρει επιφανειακές παραμορφώσεις, S_{11} και S_{22} , και αντίστροφα. Για ένα πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα θεωρούμενο μονοδιάστατο μέλος 1D, για παράδειγμα μία δοκό κατά την διεύθυνση-1, η ανάλυση είναι κυρίως μονοδιάστατη. Σε αυτή την περίπτωση η κύρια ηλεκτρομηχανική σταθερά σύζευξης είναι d_{31} . Εάν ο μετατροπέας τοποθετηθεί σε δυσδιάστατη επιφάνεια 2D η ανάλυση θα είναι δισδιάστατη. Επειδή οι ηλεκτρομηχανικές σταθερές σύζευξης είναι d_{31} και d_{32} και έχουν ουσιαστικά την ίδια τιμή μπορεί να εφαρμοστεί η αξονική συμμετρία και η ανάλυση γίνεται μίας διάστασης με βάση την ακτινική συντεταγμένη r .

Η επίδραση του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος το οποίο επικολλάται στην επιφάνεια της κατασκευής είναι η εφαρμογή μίας τοπικής μηχανικής τάσης παράλληλης στην επιφάνεια της κατασκευής η οποία δημιουργεί ελαστικά κύματα σε αυτή. Η κατασκευή παρουσιάζει μέσω του μετατροπέα τη σύνθετη αντίσταση από την σχέση $Z_{str}(\omega) = i\omega m_e(\omega) + c_e(\omega) - ik_e(\omega)/\omega$. Μέσω της σύζευξης μεταξύ των μηχανικών και ηλεκτρικών επιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα-διεγέρτη, η σύνθετη αντίσταση της κατασκευής τροποποιεί την ενεργή ηλεκτρική σύνθετη αντίσταση του πιεζοηλεκτρικού, (Tseng and Naidu, 2002).

Η τεχνική της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αντίστασης για τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας και μη καταστροφικό έλεγχο αξιοποιεί τις αλλαγές οι οποίες εμφανίζονται στο χαρακτηριστικό γνώρισμα της σύνθετης αντίστασης ή αντίστροφα

αγωγιμότητας για να ανιχνεύσει επικείμενες βλάβες στην κατασκευή. Η αλλαγή στην απόκριση της σύνθετης αγωγιμότητας ανιχνεύεται ηλεκτρικά μέσω της ηλεκτρομηχανικής σύζευξης του πιεζοηλεκτρικού.

Θεωρείται ο μονοδιάστατος πιεζοηλεκτρικός διεγέρτης όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Το ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται στην z-διεύθυνση, και θεωρείται ότι επεκτείνεται και περιορίζεται μόνο κατά την διεύθυνση-y. Οι θεμελιώδεις σχέσεις του PZT συναρτήσει της τάσης T και του ηλεκτρικού πεδίου E ως βασικές μεταβλητές μπορούν να εκφραστούν από τις βασικές σχέσεις που περιγράφουν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (3.23) και (3.24) για μονοδιάστατο μοντέλο 1D.

$$S_1 = \bar{s}_{11}^E T_1 + d_{31} E_3 \quad (3.51)$$

και

$$D_3 = \bar{\epsilon}_{33}^T E_3 + d_{31} T_1 \quad (3.52)$$

S_1 : παραμόρφωση

T_1 : τάση

$\bar{s}_{11}^E$: σύνθετη ελαστικότητα σε μηδενικό ηλεκτρικό πεδίο

d_{31} : πιεζοηλεκτρική σταθερά

E_3 : ηλεκτρικό πεδίο

$\bar{\epsilon}_{33}^T$: σύνθετη διηλεκτρική σταθερά για μηδενική τάση, δίδεται από $\epsilon_{33}^T (1 - \delta i)$, όπου δ ο

διηλεκτρικός συντελεστής απωλειών

D_3 : ηλεκτρική μετατόπιση

Η εξίσωση της κίνησης για το μηχανικά ταλαντούμενο PZT κατά την διεύθυνση y δίδεται από τη σχέση:

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \bar{Y}_{22}^E \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (3.53)$$

όπου v είναι η μετατόπιση στην διεύθυνση y, ρ είναι η πυκνότητα του PZT,

$\bar{Y}_{22}^E = \bar{Y}_{22}^E (1 + i\eta)$ είναι το σύνθετο μέτρο ελαστικότητας του PZT σε μηδενικό ηλεκτρικό πεδίο, και η ο μηχανικός συντελεστής απωλειών του PZT.

Από την εξίσωση (3.53) προκύπτει:

$$v = \bar{v}e^{i\omega t} = (A \sin ky + B \cos ky)e^{i\omega t} \quad (3.54)$$

όπου

$$k^2 = \omega^2 \rho / \bar{Y}_{22}^E \quad (3.55)$$

Το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα (PZT) συνδέεται με την κατασκευή της οποίας η σύνθετη αντίσταση αντιπροσωπεύεται από το Z . Η σχέση ισορροπίας και συμβατότητας μεταξύ της κατασκευής και του PZT μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη σχέση:

$$T_{2_{y=\ell_A}} = \bar{T}_{2_{y=\ell_A}} e^{i\omega t} = -\frac{Z \bar{v}_{y=\ell_A} i\omega}{w_A h_A} e^{i\omega t} \quad (3.56)$$

Η απλούστερη έκφραση για τη δομική σύνθετη αντίσταση είναι αυτή της εξίσωσης (3.39) για ένα σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας SMD.

Η εξίσωση (3.56) παρέχει μία συνοριακή συνθήκη για την εξίσωση (3.19). Μία άλλη συνοριακή συνθήκη δίδεται από $\bar{v}_{y=0} = 0$, η οποία οδηγεί σε $B = 0$.

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (3.56) στην εξίσωση (3.51) δίδεται:

$$\bar{S}_2 = \left. \frac{d\bar{v}}{dy} \right|_{y=\ell_A} = -\bar{s}_{22}^E \frac{Z \bar{v}_{y=\ell_A} i\omega}{w_A h_A} + d_{32} \bar{E} \quad (3.57)$$

$$A = \frac{d_{32} \bar{E}}{k \cos(k\ell_A) + \frac{\bar{s}_{22}^E Z i\omega}{w_A h_A} \sin(k\ell_A)} \quad (3.58)$$

Προκειμένου να απλοποιηθούν περαιτέρω οι παραπάνω εξισώσεις, εισάγεται η μηχανική σύνθετη αντίσταση του PZT. Εάν μία δύναμη διέγερσης εφαρμόζεται στο διεγέρτη PZT (όπως στο Σχήμα 3.6) στην διεύθυνση y , η απόκριση του διεγέρτη μπορεί να προσδιοριστεί ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που περιγράφεται στις εξισώσεις (3.54) με (3.58). Η μηχανική σύνθετη αντίσταση του πιεζοηλεκτρικού διεγέρτη, ορίζεται ως η αναλογία της δύναμης διέγερσης προς την απόκριση της ταχύτητας, και εκφράζεται:

$$Z_A = \frac{K_A (1 + \eta i)}{\omega} \frac{k\ell_A}{\tan(k\ell_A)} i \quad (3.59)$$

Ο συντελεστής A δίδεται από την εξίσωση (3.58) και μπορεί να απλουστευτεί όπως:

$$A = \frac{Z_A d_{32} \bar{E}}{k \cos(k \ell_A) (Z_A + Z)} \quad (3.60)$$

Η μετατόπιση που αντιστοιχεί στον πιεζοηλεκτρικό διεγέρτη, η παραμόρφωση, η τάση και η ηλεκτρική μετατόπιση μπορούν να επιλυθούν όπως ακολούθως:

$$\bar{x} = \bar{v}_{y=\ell_A} = \frac{Z_A d_{32} \bar{E} \ell_A \tan(k \ell_A)}{Z_A + Z} \quad (3.61)$$

η παραμόρφωση:

$$\bar{S}_2 = \frac{Z_A d_{32} \bar{E}}{Z_A + Z} \frac{\cos(ky)}{\cos(k \ell_A)} \quad (3.62)$$

η τάση:

$$\bar{T}_2 = \left(\frac{Z_A}{Z_A + Z} \frac{\cos(ky)}{\cos(k \ell_A)} - 1 \right) d_{32} \bar{Y}_{22}^E \bar{E} \quad (3.63)$$

το πεδίο της ηλεκτρικής μετατόπισης:

$$\bar{D} = \frac{Z_A \bar{Y}_{22}^E d_{32}^2 \bar{E} \cos(ky)}{Z_A + Z} \frac{\cos(ky)}{\cos(k \ell_A)} + (\bar{\epsilon}_{22}^E - d_{32}^2 \bar{Y}_{22}^E) \bar{E} \quad (3.64)$$

Το ηλεκτρικό ρεύμα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$I = i\omega \iint D_3 dx dy \quad (3.65)$$

το οποίο αποδίδεται:

$$I = \bar{I} e^{i\omega t} \quad (3.66)$$

όπου

$$\bar{I} = i\omega \bar{E} w_A \ell_A \left(\frac{d_{32}^2 \bar{Y}_{22}^E Z_A}{Z + Z_A} \frac{\tan(k \ell_A)}{k \ell_A} + \bar{\epsilon}_{33}^T - d_{32}^2 \bar{Y}_{22}^E \right) \quad (3.67)$$

Επειδή το ηλεκτρικό πεδίο εκφράζεται ως $E = V/h_A$, η σύνθετη αγωγιμότητα $Y = I/V$, ισχύει:

$$Y = i\omega \frac{w_A \ell_A}{h_A} \left(\frac{d_{32}^2 \bar{Y}_{22}^E Z_A}{Z + Z_A} \frac{\tan(k \ell_A)}{k \ell_A} + \bar{\epsilon}_{33}^T - d_{32}^2 \bar{Y}_{22}^E \right) \quad (3.68)$$

Ο όρος $\tan(k\ell_A)/k\ell_A$ κατά την αναλυτική λύση λαμβάνεται κοντά στο ένα, στα περισσότερα ευφυή υλικά.

$$Y = i\omega \frac{w_A \ell_A}{h_A} \left(\bar{\epsilon}_{33}^T - \frac{Z}{Z_A + Z} d_{32}^2 \bar{Y}_{22}^E \right) \quad (3.69)$$

Η εξίσωση (3.69) δείχνει καθαρά ότι η σύνθετη αγωγιμότητα σχετίζεται απευθείας με τη μηχανική αντίσταση του συστήματος Z . Λύνοντας τη εξίσωση (3.69) ως προς την μηχανική αντίσταση της κατασκευής Z , φαίνεται ότι αυτή μπορεί να υπολογιστεί άμεσα από την ηλεκτρική σύνθετη αγωγιμότητα του πιεζοηλεκτρικού.

Η μηχανική αντίσταση της κατασκευής περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά της κατασκευής, όπως μάζα, δυσκαμψία και απόσβεση. Εφόσον τα χαρακτηριστικά του πιεζοηλεκτρικού παραμένουν σταθερά η ηλεκτρική αντίσταση που παράγεται εξολοκλήρου από το πιεζοηλεκτρικό αφορά την μηχανική αντίσταση της κατασκευής και κατ' επέκταση τα δομικά χαρακτηριστικά της.

$$Z = \frac{i\omega \frac{w_A \ell_A}{h_A} \bar{\epsilon}_{33}^T - Y}{Y - i\omega \frac{w_A \ell_A}{h_A} \bar{\epsilon}_{33}^T + d_{32}^2 \bar{Y}_{22}^E} \cdot Z_A \quad (3.70)$$

Είναι εμφανές ότι η συζευγμένη ηλεκτρομηχανική σύνθετη αγωγιμότητα περιλαμβάνει την χωρητικότητα του πιεζοηλεκτρικού υλικού και τη μηχανική αλληλεπίδρασή του εκφράζεται από τη μηχανική σύνθετη αντίσταση. Ο συντονισμός του ηλεκτρομηχανικού συστήματος εμφανίζεται όταν η σύνθετη αντίσταση του διεγέρτη Z_A , και η σύνθετη αντίσταση της κατασκευής Z αντιστοιχηθούν (σύνθετη σύζευξη).

3.5.3 Υπολογισμός (συνιστωσών) της σύνθετης μηχανικής αγωγιμότητας της κατασκευής από την ηλεκτρομηχανική αγωγιμότητα του PZT

Η H/M σύνθετη μηχανική αντίσταση ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα - διεγέρτη και μιας κατασκευής εκφράζονται ως σύνθετα μεγέθη από τις σχέσεις:

$$Z_a = x_a + iy_a \quad (3.71)$$

$$Z = x + iy \quad (3.72)$$

Όπου x_a και y_a είναι το πραγματικό και το φανταστικό τμήμα αντίστοιχα της μηχανικής αντίστασης ενός αισθητήρα - διεγέρτη PZT, και x και y είναι το πραγματικό και το φανταστικό τμήμα αντίστοιχα της αντίστασης της κατασκευής.

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (3.71) και (3.72) στην εξίσωση (3.68), και απαλείφοντας τον φανταστικό όρο από τον παρονομαστή, λαμβάνεται:

$$Y_A = Y - i\omega \frac{w_a l_a}{h_a} (\bar{\epsilon}_{33}^T - d_{31}^2 \bar{Y}^E) = iK\omega \frac{(P + iQ)(R + iT)}{(x + x_a)^2 + (y + y_a)^2} \quad (3.73)$$

Όπου

$$K = \frac{w_a l_a}{h_a} (d_{31}^2 Y^E) \quad (3.74)$$

$$P = x_a (x + x_a) + y_a (y + y_a), \quad Q = y_a (x + x_a) - x_a (y + y_a), \quad (3.75)$$

$$R = r - \eta t, \quad T = t - \eta r \quad (3.76)$$

η : συντελεστής απωλειών

Τα r και t μπορούν να ληφθούν από την ακόλουθη εξίσωση:

$$r + it = \frac{\tan \kappa \ell_a}{\kappa \ell_a} \quad (3.77)$$

Ο όρος Y_A μπορεί να αναλυθεί σε πραγματικό και φανταστικό μέρος, G_A και B_A από την (3.73) όπως:

$$G_A = \frac{-K(QR + PT)\omega}{(x + x_a)^2 + (y + y_a)^2} \quad (3.78)$$

$$B_A = \frac{K(PR + QT)\omega}{(x + x_a)^2 + (y + y_a)^2} \quad (3.79)$$

Γι' αυτό το λόγο, λύνοντας τις εξισώσεις (3.78) και (3.79) λαμβάνεται η έκφραση για την σύνθετη αντίσταση της κατασκευής όπως:

$$x = \frac{-K\omega(cR + T)(y_a D + x_a)}{G_A(1 + D^2)} - x_a \quad \text{και} \quad y = D(x + x_a) - y_a \quad (3.80)$$

όπου

$$c = \frac{(G_A / B_A)R + T}{(G_A / B_A)T - R} \quad (3.81)$$

$$D = \frac{y_a - c x_a}{c y_a + x_a} \quad (3.82)$$

Ακολουθώντας αυτή την διαδικασία υπολογισμού, η σύνθετη αντίσταση της κατασκευής μπορεί να εξαχθεί από τις αποκρίσεις της αγωγιμότητας (πραγματικό

μέρος) και της ενδοτικότητας (φανταστικό μέρος) που λαμβάνονται από τους αισθητήρες PZT. Σε αυτό τον υπολογισμό, οι όροι r και t πρέπει να προσδιοριστούν ακριβώς από την εξίσωση (3.77) χρησιμοποιώντας άλγεβρα μιγαδικών.

3.6 Το πραγματικό μέρος της ηλεκτρικής σύνθετης αντίστασης

Σύμφωνα με τους Sun et al (1995) το πραγματικό μέρος της ηλεκτρικής σύνθετης αγωγιμότητας είναι αυτό που είναι περισσότερο ευαίσθητο στις αλλαγές των δομικών χαρακτηριστικών των κατασκευών σε σχέση με το φανταστικό μέρος. Στην εργασία τους αναλύουν τους όρους της σύνθετης αγωγιμότητας δείχνοντας ότι οι αλλαγές του πραγματικού μέρους απεικονίζουν αποτελεσματικότερα τη δομική κατάσταση. Η συζευγμένη ηλεκτρομηχανική σύνθετη αγωγιμότητα στην διεύθυνση z εκφράζεται από την σχέση (3.33)

$$Y = [i\omega\alpha\bar{\epsilon}_{33}^T(1-i\delta)] - \left[i\omega\alpha \frac{Z(\omega)}{Z(\omega) + Z_A(\omega)} (d_{32})^2 \bar{Y}_{22}^E \right] \quad (3.83)$$

$$\text{ισχύουν } \delta = \frac{\tan(k\ell_A)}{k\ell_A} \text{ και } \alpha = \frac{w_A \ell_A}{h_A}$$

Το πρώτο μέρος εκφράζει τη χωρητικότητα της σύνθετης αγωγιμότητας του PZT και το δεύτερο μέρος την ηλεκτρομηχανική αλληλεπίδραση του PZT και της κατασκευής. Για ένα πιεζοηλεκτρικό διεγέρτη που επικολλάται σε μια κατασκευή, Z_A είναι η γνωστή ηλεκτρομηχανική αντίσταση κατά την απόκριση της συχνότητας, συνεπώς αυτή η συζευγμένη ηλεκτρική σύνθετη αγωγιμότητα προσδιορίζεται αποκλειστικά από τη σύνθετη αντίσταση της κατασκευής στο σημείο της σύνδεσης. Η σύνθετη αγωγιμότητα χαρτογραφεί πλήρως την απόκριση της κατασκευής μέσω της ηλεκτρομηχανικής αλληλεπίδρασης. Εντούτοις, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αλληλεπίδραση είναι αδύναμη και η σύνθετη μεταβλητή Y είναι κυρίως χωρητική και το φανταστικό μέρος κυριαρχεί. Η εξίσωση (3.83) γίνεται:

$$Y = \omega\alpha(\delta\epsilon_{33}^T - y_r) + i\omega\alpha(\epsilon_{33}^T + y_i) \quad (3.84)$$

Όπου

$$y_r = \frac{Z_s^r(Z_s^r + Z_a^r) + Z_s^i(Z_s^i + Z_a^i)}{(Z_s^r + Z_a^r)^2 + (Z_s^i + Z_a^i)^2} (d_{32})^2 Y_{22}^E \quad (3.85_a)$$

και

$$y_i = \frac{Z_s^i(Z_s^r + Z_\alpha^r) - Z_s^r(Z_s^i + Z_\alpha^i)}{(Z_s^r + Z_\alpha^r)^2 + (Z_s^i + Z_\alpha^i)^2} (d_{32})^2 Y_{22}^E \quad (3.85\beta)$$

όπου y_i και y_r είναι οι όροι σύζευξης, Z_s^r , Z_α^r , Z_s^i και Z_α^i είναι το πραγματικό και το φανταστικό τμήμα αντίστασης της κατασκευής και του διεγέρτη αντίστοιχα. Από την εξίσωση 3.84 φαίνεται ότι και η πραγματική αλλά και η φανταστική σύνθετη αγωγιμότητα του PZT είναι γραμμικά ανάλογη με την συχνότητα ω . Εντούτοις η κλίση του φανταστικού μέρους $\alpha \varepsilon_{33}^T$ είναι αρκετά μεγαλύτερη από του πραγματικού αd_{32}^T εφόσον το δ είναι τυπικά μικρότερο από 1 %. Με την ίδια λογική στη μηχανική διαμόρφωση της σύνθετης αγωγιμότητας (εξισώσεις 3.84 και 3.85), το φανταστικό μέρος αυξομειώνεται πολύ λιγότερο σε σχέση με το πραγματικό μέρος. Αυτή η χωρητική φύση του διεγέρτη PZT μπορεί να μειώσει την ανάλυση κατά τον προσδιορισμό των μορφών των αποκρίσεων. Κάθε ένα τμήμα δίνει αρκετές πληροφορίες για την αναγνώριση της απόκρισης στη δομική ακεραιότητα, αλλά το πραγματικό μέρος είναι αυτό που κρίνεται ότι αποδίδει περισσότερο για αυτό το σκοπό.

Σύμφωνα με τους Sun et al. (1995a), Bhalla et al. (2002a) το πραγματικό μέρος της ηλεκτρικής σύνθετης αγωγιμότητας είναι πιο ευαίσθητο στην βλάβη ή στην αλλαγή της δομικής ακεραιότητας της κατασκευής από ότι το φανταστικό μέρος. Το φανταστικό μέρος είναι ευαίσθητο στις θερμοκρασιακές μεταβολές επειδή η διηλεκτρική σταθερά ε_{33}^T είναι ευαίσθητη στην θερμοκρασία. Η αλλαγή της απόκρισης της σύνθετης αγωγιμότητας της κατασκευής αποδίδεται στην αλλαγή της δομικής ακεραιότητάς της λόγω της βλάβης. Αυτό το χαρακτηριστικό εκδηλώνεται έντονα μόνο στο πραγματικό μέρος της απόκρισης της σύνθετης αντίστασης.

Ενώ οι περισσότερες αναφερόμενες μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει το μετρούμενο πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης ή της σύνθετης αγωγιμότητας άμεσα, οι Bhalla et al. (2002a) εισήγαγαν μια νέα έννοια της «ενεργής» απόκρισης, κατά την οποία είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η άμεση συνιστώσα αλληλεπίδρασης της απόκρισης μετά από το διαχωρισμό της «αδρανούς» συνιστώσας.

Γενικά, για μία σύνθετη κατασκευή σε πραγματικό χρόνο οι δύο συνιστώσες (πραγματικό και φανταστικό) που εξάγονται δεν επιδεικνύουν αμιγή συμπεριφορά, όπως μόνο καθαρή μάζα, ή μόνο καθαρή δυσκαμψία ή μόνο καθαρή απόσβεση. Ταυτόχρονα και οι δύο όροι ποικίλουν ανάλογα με τη συχνότητα, με παρεμφερείς συνδυασμούς των βασικών στοιχείων, (Lim et al., 2006), (Bhalla and Soh, 2003).

Θεωρώντας ότι οι ιδιότητες του υλικού του PZT είναι γνωστές, από την εξίσωση (3.66) με την ακόλουθη μορφή:

$$Y = i\omega\alpha\epsilon_{33}^T - i\omega\alpha\frac{Z_\alpha}{(Z + Z_\alpha)}d_{3x}^2\hat{Y}_{xx}^E = Y_p + Y_A \quad (3.86)$$

όπου το παθητικό τμήμα της σύνθετης αγωγιμότητας Y_p δείχνει τη συμβολή του PZT και το ενεργό τμήμα Y_A αντιπροσωπεύει την αλληλεπίδραση μεταξύ PZT - κατασκευής. Με βάση το γεγονός ότι το Y_p έχει επίσης πραγματικό μέρος και το Y_A περιέχει και φανταστικό μέρος, η ενεργή συνιστώσα μπορεί να ληφθεί με το να διαχωρίσει την ενεργητική συνιστώσα της απόκρισης του PZT με τη σχέση της εξίσωσης (3.87):

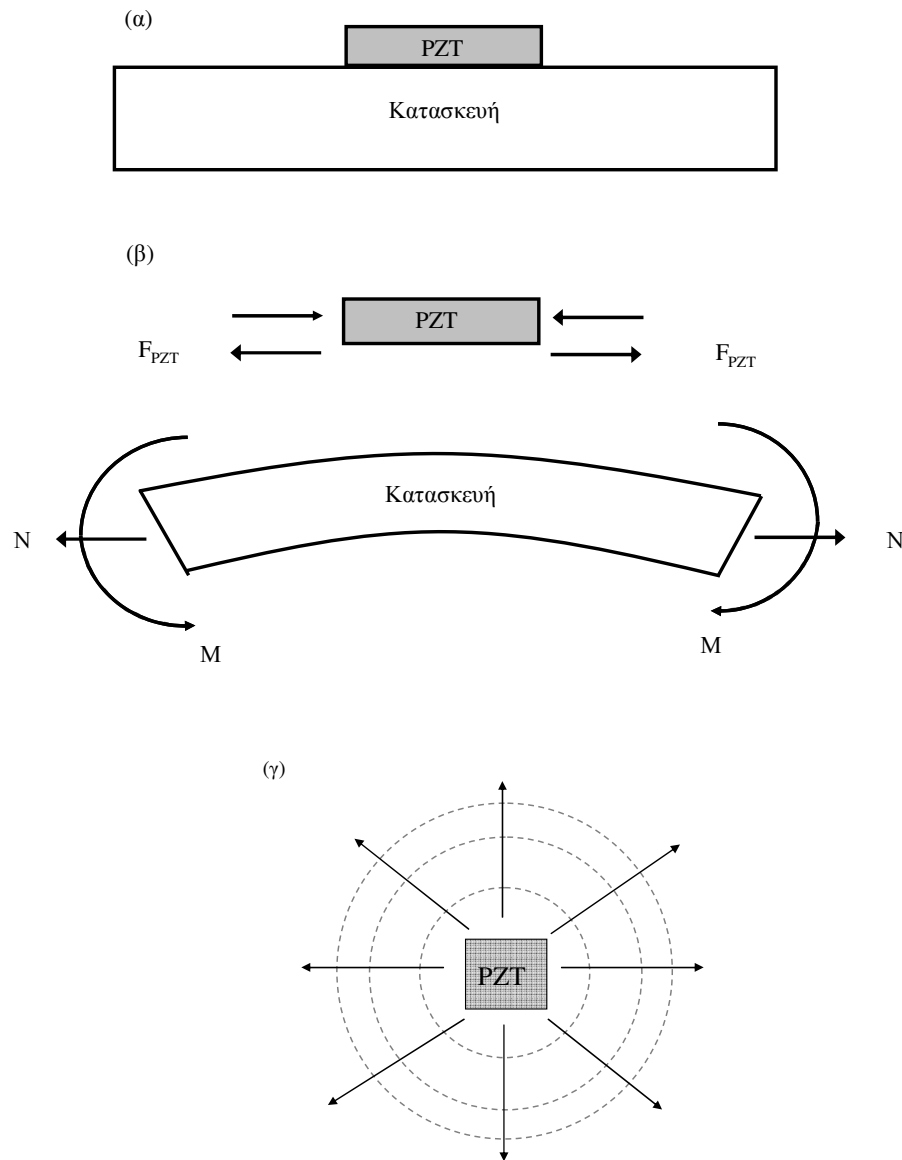
$$Y_A = Y - Y_p \quad (3.87)$$

Η λήψη της ‘ενεργής’ συνιστώσας βρίσκεται να είναι καταλληλότερη στον έλεγχο μιας κατασκευής με μεγαλύτερη ανοχή στις διακυμάνσεις θερμοκρασίας. Επιπλέον, οι Bhalla et al. αναφέρουν ότι κατά τη διαδικασία αυτή είναι πιθανό να χρησιμοποιηθεί η κατάλληλη ποσότητα από το φανταστικό καθώς επίσης και από το πραγματικό μέρος για τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας, ο οποίος μεγιστοποιεί τις πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση μιας κατασκευής.

3.7 Δυνάμεις και ροπές αλληλεπίδρασης μεταξύ PZT και κατασκευής

Κατά τη διέγερση του επιθέματος PZT με ένα δυναμικό φορτίο σε πεδίο υψηλών συχνοτήτων, δημιουργούνται ελαστικά κύματα στο εσωτερικό της κατασκευής που είναι τοποθετημένο Σχήμα 3.8(γ). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται δυνάμεις και ροπές αλληλεπίδρασης όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.8, (Giurgiutiu et al., 2001).

$$F_{PZT} = \hat{F}_{PZT}e^{i\omega t}, \quad M_a = F_{PZT}\frac{h}{2}, \quad N_A = F_{PZT}$$



Σχήμα 3.8 (α) Πιεζοηλεκτρικός ενεργός αισθητήρας επικολλημένος σε κατασκευή, (β) δυνάμεις και ροπές αλληλεπίδρασης, (γ) Αλληλεπίδραση ελαστικών κυμάτων ενεργού αισθητήρα με την επιφάνεια της κατασκευής (Giurguiutiu 1999).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΥΦΥΟΥΣ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό της παρούσας διατριβής αναπτύσσεται ο τρόπος προσομοίωσης των πιεζοηλεκτρικών υλικών και του συνόλου της κατασκευής στην οποία επικολλώνται κατά την δυναμική ανάλυση. Αρχικά με την διατύπωση ενός αναλυτικού μοντέλου και στη συνέχεια για πιο περίπλοκες κατασκευές με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων η οποία χρησιμοποιεί συζευγμένα πεδία για την ηλεκτρομηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ πιεζοηλεκτρικών και κατασκευής.

4.1 Μοντέλα προσομοίωσης της μεθόδου ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας

Με την τεχνική της EMA, το επίθεμα PZT τοποθετείται στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου που εξετάζεται είτε ενσωματώνεται κατάλληλα μέσα στην κατασκευή. Η βασική αρχή που διέπει την μεθοδολογία είναι ότι το PZT ταλαντώνεται αρμονικά λόγω του ηλεκτρικού πεδίου για να παράγει τη δυναμική απόκριση της

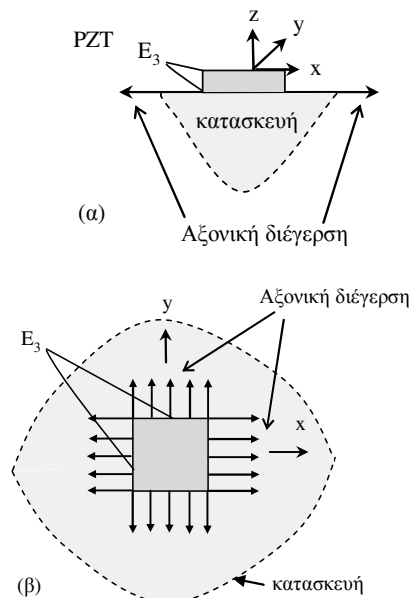
σύνθετης αγωγιμότητας. Η απόκριση σύνθετης αγωγιμότητας θεωρείται ότι συνδέεται άμεσα με τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής όπως τη δυσκαμψία, τη μάζα, και την απόσβεση της κατασκευής και ταυτόχρονα εξαρτάται από το μήκος, το πλάτος και το πάχος του PZT, (Sun et al., 1995). Οι αλλαγές στην απόκριση της σύνθετης αγωγιμότητας των PZT εφόσον εξαρτώνται από τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής είναι ενδεικτικές της παρουσίας βλαβών στην κατασκευή. Κατά συνέπεια, είναι σημαντικό για οποιοδήποτε αριθμητικό ή αναλυτικό μοντέλο να προσομοιώνει κατάλληλα και να περιγράφει την απόκριση της σύνθετης αγωγιμότητας που προκύπτει από τη διέγερση του PZT.

Οι Liang et al. (1994) πρώτοι εισήγαγαν την έννοια ενός μονοδιάστατου (1D) ηλεκτρομηχανικού μοντέλου σύνθετης αγωγιμότητας (EMA) που απλοποίησε την κατασκευή του PZT σε μια θεμελιακή κατασκευή. Ανάπτυξαν το πρώτο (1D) μοντέλο για να περιγράψουν την αλληλεπίδραση μεταξύ του PZT και της κατασκευής (Σχήμα 4.1α). Το επίθεμα PZT θεωρούν ότι είναι μία λεπτή ράβδος που υποβάλλεται στις μονοαξονικές διεγέρσεις κατά τη διεύθυνση X και οι αλληλεπιδράσεις του με την κατασκευή περιορίζονται στα συνοριακά σημεία του με την κατασκευή. Θεωρώντας ιδανική σύνδεση μεταξύ επιθέματος PZT και κατασκευής, δηλαδή η επίδραση του στρώματος σύνδεσης (Xu and Liu, 2002), (Nguyen et al., 2004) αγνοείται και έτσι ολόκληρη η κατασκευή αντιπροσωπεύεται από τη μηχανική σύνθετη αντίστασή της. Η εξίσωση (3.66) εκφράζει την ηλεκτρομηχανική σύνθετη αγωγιμότητα (Liang et al., 1994). Η εξίσωση αυτή προσομοιάζει άμεσα τη σχέση της ηλεκτρικής σύνθετης αγωγιμότητας του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος που επικολλάται πάνω στην κατασκευή με τη μηχανική σύνθετη αντίσταση της κατασκευής.

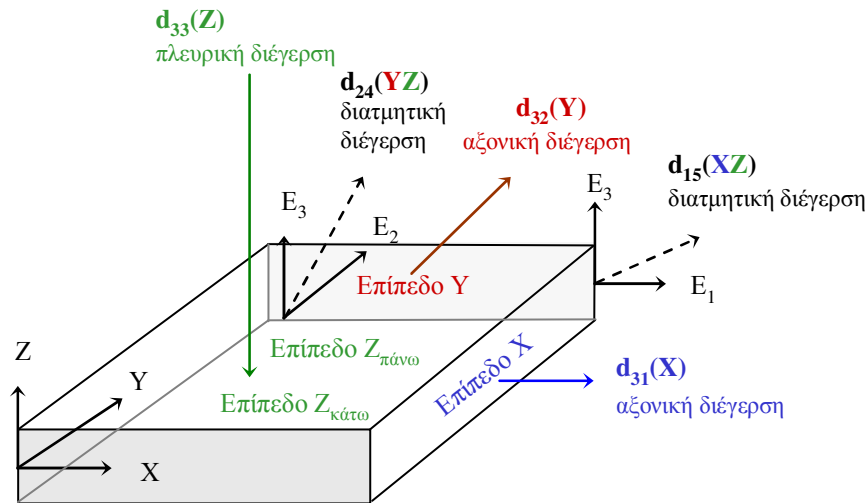
Οι Zhou et al. (1996) επέκτειναν το μονοδιάστατο (1D) σε ένα δισδιάστατο (2D) μοντέλο. Στην συνέχεια οι Bhalla and Soh (2004) (Σχήμα 4.1β), απλούστευσαν το 2D μοντέλο υποθέτοντας ότι η ταλάντωση μεταξύ της διάταξης των πιεζοηλεκτρικών και της βασικής κατασκευής δεν περιορίζεται μόνο κατά την X-διεύθυνση αλλά η ταλάντωση διαδίδεται κατά τις δυο διευθύνσεις σε όλο το μέγεθος του πεπερασμένου στοιχείου του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος κατά μήκος της X αλλά και της Y κατεύθυνσης. Το επίθεμα επίσης θεωρείται ότι είναι μηχανικά και ηλεκτρικά ιστροπικό με κατάσταση επίπεδης έντασης στο εσωτερικό του. Επιπλέον, το επίθεμα PZT θεωρείται ότι είναι τετραγωνικό σε μορφή και μικρό σε πάχος.

Γενικά ο μηχανισμός διέγερσης του PZT (Σχήμα 4.2) παρουσία ηλεκτρικών πεδίων (E_1 , E_2 και E_3) μπορεί να διαχωριστεί σε κατά μήκος (κατά X-Y διευθύνσεις),

και σε κατά πάχος (κατά μήκος Z διεύθυνσης), και διατμητικές διεγέρσεις (κατά XZ , XY και XZ επίπεδα), (Raja et al., 2004). Το πιεζοηλεκτρικό υπό την επίδραση του πεδίου E_1 και E_2 παράγει διατμητικές διεγέρσεις (d_{15} , d_{24}), και υπό την επίδραση του E_3 αξονικές διεγέρσεις (d_{31} , d_{32}), και κατά πάχος (d_{33}). Μέχρι σήμερα ερευνητές όπως οι Liang et al. (1993), Zhou et al. (1996), Giurgiutiu et al. (1999), Park et al. (2003), Bhalla and Soh (2004), Peairs et al. (2004) έχουν μελετήσει και αναπτύξει μόνο μοντέλα αλληλεπίδρασης που βασίζονται σε αξονικές διεγέρσεις του PZT. Εντούτοις στην μέθοδο EMI ταυτόχρονα κατά μήκος και κατά πάχος διεγέρσεις των PZT είναι εξίσου σημαντικές ακόμη και αν οι διατμητικές διεγέρσεις δεν δημιουργούνται. Γι' αυτό το λόγο οι Annamdas και Soh (2007) ανέπτυξαν ένα γενικό (3D) μοντέλο το οποίο υπολογίζει τις διαμήκης διέγερσεις αλληλεπίδρασης του PZT και της κατασκευής. Σημαντικό χαρακτηριστικό αυτού του μοντέλου είναι ότι δεν υπάρχει κανένας περιορισμός στη μορφή ή το μέγεθος του PZT, και το επίθεμα δεν χρειάζεται να είναι απαραίτητα ηλεκτρικά ισοτροπικό. Ταυτόχρονα δίδεται η ίδια βαρύτητα στις ταλαντώσεις κατά μήκος, κατά πλάτος και κατά πάχος του PZT, που παράγονται ως αποτέλεσμα των αξονικών και των διαμήκων διεγέρσεων. Ως εκ τούτου, η διατύπωση που χρησιμοποιείται για αυτό το γενικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσομοιάσει τη μηχανική σύνθετη αγωγιμότητα οποιασδήποτε πιεζοηλεκτρικής κατασκευής.



Σχήμα 4.1 Διέγερση του PZT παρουσία ηλεκτρικού πεδίου E_3 : (α) 1D, (β) 2D μοντέλα αλληλεπίδρασης



Σχήμα 4.2 Διέγερση του PZT παρουσία ηλεκτρικών πεδίων E_1 , E_2 και E_3 : 3D μοντέλο αλληλεπίδρασης

4.2 Μοντέλο EMA για την προσομοίωση της απόκρισης αγωγιμότητας υπό δυναμικό φορτίο

Μέχρι πρόσφατα τα μοντέλα EMA δεν εξετάζαν τη μηχανική ταλάντωση που προκαλείται από την εξωτερική διέγερση εκτός από τη μηχανική ταλάντωση του PZT. Κατά συνέπεια τα προηγούμενα μοντέλα της μεθόδου EMA ισχύουν μόνο σε περίπτωση που δεν ασκούνται εξωτερικά φορτία στις κατασκευές. Εντούτοις πολλές κατασκευές στην πράξη υποβάλλονται σε μηχανικές ταλαντώσεις οι οποίες επηρεάζουν τα αποτελέσματα SHM λόγω των αλλαγών των αποκρίσεων των PZT. Τελευταία οι Youg και Miao (2008) μελέτησαν την επίδραση ενός εξωτερικού δυναμικού φορτίου στην σύνθετη αγωγιμότητα και δημιούργησαν ένα μοντέλο EMA για την περίπτωση όπου λαμβάνεται υπόψη το εξωτερικό δυναμικό φορτίο σε ένα δομικό στοιχείο και συγκεκριμένα σε μία δοκό.

Στην εργασία τους οι Yang και Miao αναπτύσσουν ένα μοντέλο EMA για τις δοκούς, το οποίο λαμβάνει υπόψη την επίδραση της διέγερσης των δοκών που προκαλείται από τις εξωτερικές δυναμικές διεγέρσεις, εκτός από τη δυναμική διέγερση του PZT. Στη συνέχεια πραγματοποιούν αντίστοιχη πειραματική μελέτη για να ελέγξουν το θεωρητικό μοντέλο.

Η απόκριση της ηλεκτρομηχανικής αγωγιμότητας του ευφυούς συστήματος προέρχεται και πάλι από τη δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ του επιθέματος PZT και της κατασκευής. Οι αλλαγές στις αποκρίσεις των PZT που προκαλούνται από την

εξωτερική διέγερση διακρίνονται από τις αλλαγές στην απόκριση λόγω βλάβης έτσι ώστε να μπορούν να ληφθούν οι σωστές πληροφορίες για τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας. Οι Yang και Miao μελέτησαν την επίδραση της εξωτερικής δυναμικής ταλάντωσης στην απόκριση του PZT με την ανάπτυξη ενός νέου μοντέλου EMA για τις δοκούς που υποβάλλονται σε εξωτερικές δυναμικές διεγέρσεις.

Στην μελέτη τους εξετάζουν ομοιόμορφες δοκούς με απλά στηριζόμενα άκρα. Η εξίσωση της κίνησης κατά μήκος της μηχανικής ταλάντωσης μιας λεπτής δοκού Euler-Bernoulli που υποβάλλεται σε κατανεμημένη δύναμη δίνεται από την εξίσωση:

$$E_s A_s u'' - \rho_s A_s \ddot{u} = f(x, t) \quad (4.1)$$

όπου E_s είναι το μέτρο ελαστικότητας, $A_s = h_s b_s$ είναι το εμβαδόν της διατομής της δοκού, ρ_s είναι η πυκνότητα υλικού της δοκού, $u(x, t)$ είναι η κατά μήκος μετατόπιση της δοκού, $f(x, t)$ είναι η αρμονικά κατανεμημένη δύναμη και b_s και h_s είναι το πλάτος και ύψος της δοκού, αντίστοιχα. Θέτοντας την μετατόπιση και την κατανεμημένη δύναμη ως ξεχωριστές μεταβλητές ισχύουν:

$$u(x, t) = U(x)e^{i\omega t}, \quad f(x, t) = \hat{f}(x)e^{i\omega t} \quad \text{και} \quad \hat{f}(x) = \sum_{k=1}^{\infty} F_k \cos \frac{k\pi}{l_s} x \quad (4.2)$$

όπου $F_k = \frac{2}{l_s} \int_0^{l_s} \hat{f}(x) \cos \frac{k\pi}{l_s} x dx$, ω είναι η συχνότητα της εξωτερικής διέγερσης, και l_s είναι το μήκος της δοκού.

Για μια απλά στηριζόμενη δοκό της οποίας οι παραμορφώσεις στα δύο άκρα είναι μηδέν, οι συνοριακές συνθήκες είναι:

$$u'(0, t) = 0 \quad \text{και} \quad u'(l_s, t) = 0 \quad (4.3)$$

Από τις εξισώσεις (4.1) με (4.3), η κατά μήκος μετατόπιση της δοκού για την εξαναγκασμένη ταλάντωση μπορεί να ληφθεί ως:

$$u(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{F_k}{\rho_s A_s \left[\omega^2 - \left(\frac{k\pi}{l_s} \right)^2 \frac{E_s}{\rho_s} \right]} \cos \frac{k\pi}{l_s} x e^{i\omega t} \quad (4.4)$$

Η εξίσωση της κίνησης για την εγκάρσια ταλάντωση της ίδιας δοκού δίνεται:

$$E_s I_s w^{iv} + \rho_s A_s \ddot{w} = g(x, t) \quad (4.5)$$

Όπου $I_s = h_s^3 b_s / 12$ είναι η ροπή αδρανείας της δοκού, $w(x, t)$ είναι η εγκάρσια μετατόπιση της δοκού, ο δείκτης iv σημαίνει η τέταρτη παράγωγος ως προς x , και $g(x, t)$ είναι η κατανεμημένη δύναμη. Υποθέτοντας ότι η μετατόπιση και η κατανεμημένη δύναμη είναι ξεχωριστές μεταβλητές:

$$w(x, t) = W(x)e^{i\omega t}, \quad g(x, t) = \bar{g}(x)e^{i\omega t} \quad \text{και} \quad \bar{g}(x) = \sum_{k=1}^{\infty} G_k \sin \frac{k\pi}{l_s} x \quad (4.6)$$

$$\text{όπου } G_k = \frac{2}{l_s} \int_0^{l_s} \bar{g}(x) \sin \frac{k\pi}{l_s} x dx$$

Για την ίδια δοκό όπου οι μετατοπίσεις και οι καμπτικές ροπές στα δύο άκρα είναι μηδέν, οι συνοριακές συνθήκες είναι:

$$w(0, t) = 0, \quad w''(0, t) = 0, \quad w(l_s, t) = 0 \quad \text{και} \quad w''(l_s, t) = 0 \quad (4.7)$$

Από τις εξισώσεις (4.6) με (4.7), η εγκάρσια μετατόπιση για την εξαναγκασμένη ταλάντωση της δοκού μπορεί να ληφθεί ως:

$$w(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{G_k}{\rho_s A_s \left[\left(\frac{k\pi}{l_s} \right)^4 \frac{E_s I_s}{\rho_s A_s} - \omega^2 \right]} \sin \frac{k\pi}{l_s} x e^{i\omega t} \quad (4.8)$$

Με βάση τη θεώρηση για μικρή μετατόπιση, καθορίζεται το ακόλουθο πεδίο μετατοπίσεων για τη κατά μήκος μετατόπιση ενός σημείου στην επιφάνεια της δοκού:

$$u_s(x, t) = u(x, t) - \frac{h_s}{2} w'(x, t) \quad (4.9)$$

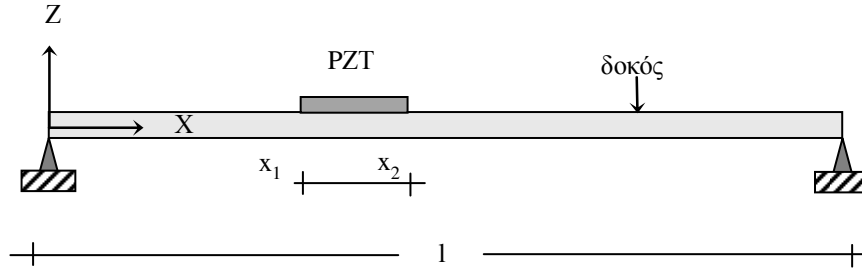
Επομένως, η συνολική κατά μήκος μετατόπιση είναι:

$$u_s(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{F_k}{\rho_s A_s \left[\omega^2 - \left(\frac{k\pi}{l_s} \right)^2 \frac{E_s}{\rho_s} \right]} \cos \frac{k\pi}{l_s} x e^{i\omega t} - \frac{kh_s \pi}{2l_s} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{G_k}{\rho_s A_s \left[\left(\frac{k\pi}{l_s} \right)^4 \frac{E_s I_s}{\rho_s A_s} - \omega^2 \right]} \cos \frac{k\pi}{l_s} x e^{i\omega t} \quad (4.10)$$

Ως εκ τούτου, η συνολική μετατόπιση που προκαλείται στο πιεζοηλεκτρικό επίθεμα, είναι ίση με τη διαφορά των μετατοπίσεων μεταξύ δύο συγκεκριμένων σημείων στην επιφάνεια της δοκού, που συμπίπτει με τις άκρες του επιθέματος PZT:

$$u_{PZT} = u_s(x, t) \Big|_{x_2} - u_s(x, t) \Big|_{x_1} \quad (4.11)$$

όπου x_1 και x_2 είναι οι συντεταγμένες των δύο ακρών του επιθέματος PZT, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3 Απλά στηριζόμενη δοκός με επικολλημένο επίθεμα PZT.

Συνεπώς, η συνολική μετατόπιση του επιθέματος PZT είναι:

$$u_{PZT}(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{F_k}{\rho_s A_s \left[\omega^2 - \left(\frac{k\pi}{l_s} \right)^2 \frac{E_s}{\rho_s} \right]} - \frac{kh_s \pi}{2l_s} \frac{G_k}{\rho_s A_s \left[\left(\frac{k\pi}{l_s} \right)^4 \frac{E_s I_s}{\rho_s A_s} - \omega^2 \right]} \right\} \left[\cos \frac{k\pi}{l_s} x_2 - \cos \frac{k\pi}{l_s} x_1 \right] e^{i\omega t} \quad (4.12)$$

Έτσι η μετατόπιση του PZT λόγω της ταλάντωσής του όταν υποβάλλεται σε ένα ηλεκτρικό δυναμικό:

$$u_{PZT}(x, t) = \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{F_n (\phi_n(x_2) - \phi_n(x_1))}{\rho_s A_s (\Phi_n^2 - \omega_{PZT}^2)} + \frac{h_s}{2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{F_m (\phi'_m(x_1) - \phi'_m(x_2))}{\rho_s A_s (\Omega_m^2 - \omega_{PZT}^2)} \right] e^{i\omega_{PZT} t} \quad (4.13)$$

όπου ω_{PZT} είναι η συχνότητα διέγερσης του PZT,

$$\phi_n(x) = \cos\left(\frac{n\pi x}{l_s}\right), \quad \Phi_n = \frac{n\pi}{l_s \sqrt{\frac{E_s}{\rho_s}}},$$

$$F_n = Q_u^{-1} \hat{F}_{PZT} [\phi_n(x_2) - \phi_n(x_1)], \quad \phi_m(x) = \sin\left(\frac{m\pi x}{l_s}\right), \quad \Omega_n = \left(\frac{m\pi}{l_s}\right)^2 \sqrt{\frac{E_s I_s}{\rho_s A_s}},$$

$$F_m = Q_w^{-1} \frac{h_s}{2} \hat{F}_{PZT} [\phi'_m(x)|_{x=x_1} - \phi'_m(x)|_{x=x_2}], \quad Q_u = Q_w = 0.5l_s \text{ και } \hat{F}_{PZT} \text{ είναι το μέγεθος}$$

της δύναμης διέγερσης του PZT.

Τέλος λαμβάνεται η ηλεκτρομηχανική σύνθετη αγωγιμότητα του επιθέματος PZT:

$$Y = \frac{I}{V} = \frac{\tilde{Y}_{11}^E db}{h} \left\{ \frac{\frac{d}{\psi} \sin(\gamma l) i \omega_{PZT} + \frac{d}{K_{PZT} l} \sin^2(\gamma l) \sum_{k=1}^{\infty} \vartheta(k) \chi(k) e^{i(\omega - \omega_{PZT})t} i(\omega - \omega_{PZT})}{\psi^2 \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \delta(n) + \frac{h_s}{2} \sum_{m=1}^{\infty} \zeta(m) + \sum_{k=1}^{\infty} \{\vartheta(k)\} \chi(k) e^{i(\omega - \omega_{PZT})t} \right\}^2 - di \omega_{PZT} l} \right\} + \frac{\tilde{\epsilon} i \omega_{PZT} lb}{h} \quad (4.14)$$

όπου:

$$\psi = \gamma \cos(\gamma l) + \frac{R}{l} \sin(\gamma l)$$

$$\varsigma = \rho_s A_s \hat{F}_{PZT}$$

$$\vartheta(k) = \frac{F_k}{\varsigma[\omega^2 - \Phi_k^2]} - \frac{kh_s \pi}{2l_s} \frac{G_k}{\varsigma[\Omega_k^2 - \omega^2]}$$

$$\chi(k) = \cos \frac{k\pi}{l_s} x_2 - \cos \frac{k\pi}{l_s} x_1$$

$$\delta(n) = \frac{F_n (\phi_n(x_2) - \phi_n(x_1))}{\varsigma(\Phi_n^2 - \omega_{PZT}^2)}$$

$$\zeta(m) = \frac{F_m (\phi'_m(x_1) - \phi'_m(x_2))}{\varsigma(\Omega_m^2 - \omega_{PZT}^2)}$$

Όπου $\tilde{Y}_{11}^E$ είναι το σύνθετο μέτρο ελαστικότητας, d είναι ο συντελεστής πιεζοηλεκτρικής σύζευξης, γ είναι ο αριθμός των κυμάτων, $R = K_{str} K_{PZT}^{-1}$ είναι ο λόγος δυσκαμψίας, K_{str} είναι η δυναμική δυσκαμψία της δοκού, $K_{PZT} = \tilde{Y}_{11}^E b h l^{-1}$ είναι η δυσκαμψία του πιεζοηλεκτρικού PZT, $\tilde{\epsilon}$ είναι η σύνθετη διηλεκτρική σταθερά του PZT και l , b και h είναι το μήκος, το πλάτος και το ύψος του επιθέματος PZT, αντίστοιχα.

4.2.1 Συμπεράσματα από την πειραματική εφαρμογή

Προκειμένου να ελεγχθεί το αναπτυγμένο θεωρητικό μοντέλο, οι Yang and Miao (2008) πραγματοποίησαν μία πειραματική δοκιμή σε μία δοκό αλουμινίου που

συνδέεται με ένα επίθεμα PZT. Χρησιμοποίησαν τη συσκευή του αναλυτή σύνθετης αντίστασης HP4192A για να διεγείρουν το επίθεμα PZT και ταυτόχρονα να καταγράψουν την απόκριση της σύνθετης αγωγιμότητας. Με τη συσκευή ανάλυσης θέτονται ως στόχος η σάρωση και η ανάλυση ενός φάσματος συχνότητας για να καταγράψουν την απόκριση σύνθετης αγωγιμότητας του PZT.

Θεωρώντας ότι στις πρακτικές περιπτώσεις η εγκάρσια ταλάντωση της δοκού είναι κρισιμότερη έναντι της κατά μήκους ταλάντωσης, εξέτασαν μόνο την εγκάρσια ταλάντωση στην πειραματική δοκιμή. Έτσι η απόκριση της ηλεκτρομηχανικής αγωγιμότητας του PZT λαμβάνεται από την εξίσωση (4.15):

$$Y = \frac{I}{V} = \frac{\tilde{Y}_{11}^E db}{h} \left\{ \frac{\frac{d}{\psi} \sin(\gamma l) i \omega_{PZT} - \frac{d}{K_{PZT}} \sin^2(\gamma l) K_{str}^2 \sum_{k=1}^{\infty} \vartheta(k) \chi(k) e^{i(\omega - \omega_{PZT})t} i(\omega - \omega_{PZT})}{\left\{ \frac{h_s \pi}{2l_s l_\varsigma} \sum_{k=1}^{\infty} k \chi(k) \left[\frac{G}{\Omega_k^2 - \omega^2} e^{i(\omega - \omega_{PZT})t} i(\omega - \omega_{PZT}) \right] \right\} - l d i \omega_{PZT}} \right\} + \frac{\tilde{\epsilon} i \omega_{PZT} l b}{h} \quad (4.15)$$

Μετά την αντικατάσταση των τιμών των διάφορων παραμέτρων στη θεωρητική διατύπωση και μια σειρά υπολογισμών με τη χρήση του προγράμματος MATLAB, λαμβάνονται τα θεωρητικά αποτελέσματα. Οι δύο παράγοντες που εξέτασαν είναι η αλλαγή στην συχνότητα και η αλλαγή του μεγέθους της δύναμης διέγερσης. Η αλλαγή αυτών των παραγόντων επιφέρει ανάλογη αλλαγή όπως είναι αναμενόμενο στην απόκριση της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας.

Από την σύγκριση των τιμών της θεωρητικής και της πειραματικής εφαρμογής φαίνεται και στις δύο περιπτώσεις ότι το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της απόκρισης του αισθητήρα PZT επηρεάζονται σημαντικά από τη συχνότητα διέγερσης. Με τις αλλαγές των συχνοτήτων, αλλάζουν ταυτόχρονα και η θέση αιχμηρής κορυφής και η μέγιστη τιμή της απόκρισης της σύνθετης αγωγιμότητας του PZT. Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ότι η συχνότητα της εξωτερικής διέγερσης είναι μια κρίσιμη παράμετρος που επηρεάζει την απόκριση του PZT.

Παρατήρησαν επίσης ότι και η απόκριση της αγωγιμότητας του πραγματικού και του φανταστικού μέρους του αισθητήρα PZT δεν αλλάζουν δραστικά για τα διαφορετικά μεγέθη της δύναμης διέγερσης. Οι θέσεις των αιχμηρών κορυφών της αγωγιμότητας του PZT είναι σχεδόν οι ίδιες για τα διαφορετικά μεγέθη της δύναμης διέγερσης. Αλλά, με την αύξηση του μεγέθους της δύναμης διέγερσης, η μέγιστη τιμή

της απόκρισης της αγωγιμότητας αυξάνεται επίσης. Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ότι το μέγεθος της δύναμης διέγερσης έχει σημαντική επιρροή στη μέγιστη τιμή της απόκρισης της αγωγιμότητας αλλά η επίδρασή της στη θέση αιχμηρής κορυφής είναι αμελητέα.

Για να ελέγξουν το αναπτυγμένο μοντέλο EMI, σύγκριναν αρχικά τις προβλεφθείσες θέσεις αιχμηρών κορυφών από το θεωρητικό μοντέλο με αυτές που προέκυψαν από το πειραματικό. Οι διαφορές μεταξύ των θεωρητικών προβλέψεων και των πειραματικών αποτελεσμάτων μπορούν να αποδοθούν σε διάφορες υποθέσεις καθώς επίσης και σε πειραματικά σφάλματα. Ένας από τους κυριότερους λόγους που εμφανίζονται αποκλίσεις μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών προβλέψεων είναι η επίδραση του συνδετικού στρώματος (εποξειδική ρητίνη) μεταξύ του επιθέματος PZT και της κατασκευής, όπου δεν εξετάζεται στη θεωρητική προσέγγιση. Συνολικά, η ακρίβεια του θεωρητικού μοντέλου θεωρείται αποδεκτή.

Οι συγκρίσεις δείχνουν ότι το θεωρητικό μοντέλο μπορεί να προβλέψει αρκετά καλά μερικές από τις ηλεκτρομηχανικές αιχμηρές κορυφές συντονισμού που μπορούν να βρεθούν και στην πειραματική απόκριση. Εν τούτοις, υπάρχουν αποκλίσεις μεταξύ της προβλεφθείσας απόκρισης και της πειραματικής απόκρισης. Η πιο φανερή απόκλιση βρίσκεται στις τιμές των κορυφών.

Αυτή η απόκλιση μπορεί να αποδοθεί στην απλουστευμένη μονοδιάστατη φύση (1D) του επιθέματος PZT. Επιπλέον, σημαντικά αποτελέσματα εξάγονται καθώς εισάγεται βλάβη στο δομικό στοιχείο κατά την πειραματική δοκιμή. Σε αυτή την προσπάθεια συγκρίνονται οι μέγιστες μετατοπίσεις που προκαλούνται από τη βλάβη και εκείνες που προκαλούνται από την εξωτερική διέγερση.

Όπως αναμένεται, οι μετατοπίσεις των αιχμών είναι προφανείς και παρατηρήθηκε ότι οι αλλαγές στις αιχμές λόγω βλάβης είναι συγκρίσιμες για τη δοκό με ή χωρίς εξωτερική δύναμη διέγερσης. Παρατηρήθηκε επίσης ότι οι μέγιστες αλλαγές στις αιχμές λόγω βλάβης και λόγω εξωτερικής δύναμης διέγερσης παρατηρήθηκαν με την ίδια σειρά, που σημαίνει ότι η επίδραση της εξωτερικής δύναμης διέγερσης (εξωτερική ταλάντωση) δεν θα μπορούσε να αγνοηθεί στην απόκριση αγωγιμότητας του PZT.

Για την εκτίμηση των βλαβών, αυτή η επίδραση πρέπει να εξαλειφτεί, διαφορετικά, μπορεί να οδηγήσει σε παρερμηνεία των δομικών βλαβών. Όταν η εξωτερική συχνότητα ω είναι κατά πολύ μικρότερη από τη συχνότητα του PZT, ω_{PZT}

(5-50 kHz), $\omega/\omega_{\text{PZT}} \leq 1/25$, μπορεί να παρατηρηθεί ότι δεν υπάρχει σχεδόν καμία μετατόπιση αιχμής στην απόκριση της αγωγιμότητας. Ομοίως, εάν η ω είναι πολύ μεγαλύτερη από την ω_{PZT} , π.χ. $\omega/\omega_{\text{PZT}} \geq 40$, η μετατόπιση αιχμής στο πραγματικό μέρος είναι επίσης αμελητέα. Εντούτοις, για $1/17 \leq \omega/\omega_{\text{PZT}} \leq 20$ μπορούν να παρατηρηθούν αλλαγές στις αιχμηρές κορυφές των αποκρίσεων.

Οι Yang και Miao αποδεικνύουν ότι μόνο όταν η συχνότητα του φορτίου είναι πολύ μικρότερη ή πολύ μεγαλύτερη από τη συχνότητα διέγερσης του PZT, η επιρροή της εξωτερικής ταλάντωσης στην απόκριση της EMA μπορεί να αγνοηθεί. Αλλιώς, η επίδραση της εξωτερικής διέγερσης πρέπει να εξετάζεται από το θεωρητικό μοντέλο της EMA.

Οι περαιτέρω πειραματικές δοκιμές πραγματοποιούνται για να συγκρίνουν τις επιδράσεις της εξωτερικής διέγερσης και της βλάβης στην απόκριση της αγωγιμότητας. Συνάγεται το συμπέρασμα ότι η επίδραση της εξωτερικής δύναμης διέγερσης στην απόκριση αγωγιμότητας του PZT δεν θα μπορούσε να παραληφθεί εάν η εξωτερική συχνότητα της δύναμης διέγερσης και η συχνότητα διέγερσης του PZT είναι συγκρίσιμες.

Το παραπάνω θεωρητικό μοντέλο που αναπτύσσεται στην εργασία των Yang and Miao (2008) παρόλο που έχει αναπτυχθεί για να συμπεριλάβει την περίπτωση εξωτερικής δυναμικής φόρτισης εκτός από την διέγερση που προκαλείται από το PZT, είναι ένα μονοδιάστατο μοντέλο (1D). Εξετάζει δηλαδή την επίδραση δυναμικού φορτίου και την παρουσία βλάβης σε μία δοκό με τη χρήση της μονοδιάστατης φύσης του πιεζοηλεκτρικού. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν κατά την πειραματική τους δοκιμή ήταν χρήσιμα και ενθαρρυντικά για τη μελέτη του φαινομένου αλλά ταυτόχρονα παρουσίασαν αποκλίσεις από τη θεωρητική εφαρμογή. Αυτό γιατί στην πειραματική δοκιμή εξετάστηκε το πιεζοηλεκτρικό ως τρισδιάστατο σώμα σε αντίθεση με την θεωρητική προσέγγιση στη οποία εισήγαγαν απλοποίηση. Θεώρησαν ότι στις πρακτικές εφαρμογές η εγκάρσια ταλάντωση της δοκού είναι κρίσιμότερη έναντι της κατά μήκους ταλάντωσης και εξέτασαν μόνο αυτή κατά την πειραματική δοκιμή.

Στην παρούσα διατριβή λαμβάνοντας υπόψη την τρισδιάστατη φύση των προβλημάτων που εξετάζονται θεωρείται κρίσιμη η διερεύνηση του προβλήματος μέσω της εξελιγμένης θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων. Στον τομέα εφαρμοσμένης μηχανικής, μια εναλλακτική λύση των αναλυτικών μεθόδων έχει αναπτυχθεί με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM), η οποία μπορεί να εκτελέσει την

αριθμητική ανάλυση των περίπλοκων κατασκευών χρησιμοποιώντας διακριτοποίηση μικρών στοιχείων. Η θεωρία FEM έχει κερδίσει την αποδοχή ειδικά για την ευκολία στη χρήση και στη διαμόρφωση των περίπλοκων κατασκευών. Αν και η προσέγγιση συζευγμένων πεδίων στην θεωρία FEM αναπτύχθηκε αρχικά για την θερμο-ελαστο-δυναμική ανάλυση, οι τρέχουσες εξελίξεις στη θεωρία FEM έχουν παράγει τους προηγμένους κώδικες που είναι σε θέση να χειριστούν τα πιο σύνθετα προβλήματα σύνθετων συζευγμένων πεδίων (multi-physics), όπως η αλληλεπίδραση των ελαστικών, δυναμικών, και ηλεκτρικών τομέων που πραγματοποιούνται στις πιεζοηλεκτρικές συσκευές. Υπάρχουν πολλά διαθέσιμα πακέτα λογισμικών για σχεδιασμό και ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων FEM τα οποία προσφέρουν την επιλογή στοιχείων με συζευγμένα πεδία. Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιείται το Comsol Multiphysics. Εφαρμόζεται η προσέγγιση συζευγμένων πεδίων FEM για να προβλεφθεί η απόκριση της H/M σύνθετης αγωγιμότητας των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων.

Με τη χρήση της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων επιτυγχάνεται η τρισδιάστατη (3D) προσομοίωση των κατασκευών και ταυτόχρονα των πιεζοηλεκτρικών. Επιπλέον η χρήση συζευγμένων πεδίων τάσεων – παραμορφώσεων των διαφορετικών υλικών προσομοιώνει καλύτερα αυτή την αλληλεπίδραση σε τρισδιάστατα προβλήματα.

4.3 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, ΜΠΣ, (Finite Element Modeling FEM) αποτελεί σήμερα τη σημαντικότερη μέθοδο της υπολογιστικής μηχανικής. Η ανάπτυξή της μπορεί να θεωρηθεί ως συμβολή τριών βασικών επιστημονικών περιοχών, των ενεργειακών μεθόδων της μηχανικής (energy methods), της θεωρίας προσεγγίσεων των μαθηματικών (approximation theory), αλλά και των πληροφοριακών συστημάτων σχεδιασμού CAD (Computer Aided Design). Η θεμελιώδης αρχή της ΜΠΣ βασίζεται στην αντικατάσταση του γεωμετρικά σύνθετου πεδίου του προβλήματος με ένα σύνολο απλών υποπεδίων που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία ΠΣ. Η μέθοδος αυτή είναι μια αριθμητική προσεγγιστική μέθοδος για την επίλυση των προβλημάτων μηχανικής. Η αρχική διατύπωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζεται για πρώτη φορά στην εργασία των Argyris και Kelsey (1960).

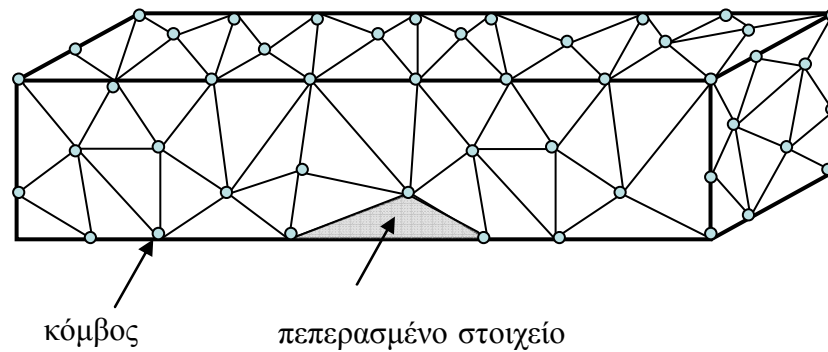
Από τότε και μέχρι σήμερα αναπτύσσεται και επεκτείνεται συνεχώς λόγω της ραγδαίας τεχνολογικής ανάπτυξης και διάδοσης των ηλεκτρονικών υπολογιστών Η/Υ. Αυτό γιατί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων καταλήγει σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων που το πλήθος τους ταυτίζεται με το πλήθος των βαθμών ελευθερίας του προβλήματος και το οποίο μπορεί να επιλυθεί μόνο με τη βοήθεια Η/Υ. Η εξέλιξη των Η/Υ με τις ολοένα και μεγαλύτερες δυνατότητες διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων αλλά και με την αύξηση της ταχύτητας εκτελέσεως των αριθμητικών υπολογισμών κατέστησε εφικτή την επίλυση σύνθετων προβλημάτων του μηχανικού τα οποία θεωρούνταν απροσπέλαστα πριν από μερικά χρόνια. Η ΜΠΣ αν και επινοήθηκε και εφαρμόστηκε για την στατική ανάλυση φορέων, έχει καθολικότερη εφαρμογή σε μια ευρύτερη κατηγορία προβλημάτων του μηχανικού όπως για παράδειγμα στη ρευστομηχανική, στη μεταφορά θερμότητας, στην ακουστική, στον ηλεκτρομαγνητισμό, στον πιεζοηλεκτρισμό κ.λπ.

Η αξία της μεθόδου έγκειται στη δυνατότητα της να αποτελεί μία ενιαία τεχνική για τη στατική και δυναμική γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση των κατασκευών από ραβδωτούς, επιφανειακούς και χωρικούς φορείς ή συνδυασμό τους, για τυχαία γεωμετρία, φόρτιση και συνοριακές συνθήκες. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ως προσεγγιστική μέθοδος επιδέχεται βελτιώσεις και προσφέρεται για διαρκή έρευνα με σκοπό τη βελτίωση και εξέλιξή της.

4.3.1 Γεωμετρία και φόρτιση του δομικού συστήματος

Στη μέθοδο ΠΣ θεωρείται ότι ο φορέας αποτελείται από ένα σύνολο διακριτών πεπερασμένων στοιχείων τα οποία εφάπτονται μεταξύ τους χωρίς να αφήνουν κανένα κενό και συνδέονται μεταξύ τους με διακριτά σημεία που ονομάζονται κόμβοι οι οποίοι βρίσκονται στα σύνορα των στοιχείων. Το σύνολο των στοιχείων αυτών ονομάζεται δίκτυο ή πλέγμα και η προσομοίωση του φορέα με το δίκτυο των ΠΣ διακριτοποίηση του φορέα. Σε κάθε κόμβο αντιστοιχεί ένας αριθμός δυνατών μετακινήσεων του συγκεκριμένου σημείου που ονομάζονται βαθμοί ελευθερίας. Βασική παράμετρος της μεθόδου είναι η διακριτοποίηση κατά την οποία η κατασκευή υποδιαιρείται σε μικρότερα στοιχεία (Σχήμα 4.4). Η εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία βασίζεται στην επιλογή ενός κατάλληλου μοντέλου που περιλαμβάνει τον αριθμό, το σχήμα, το μέγεθος και τη διάταξη των στοιχείων, το οποίο θα πρέπει να

αντιπροσωπεύει την κατασκευή με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Για την τελική επιλογή του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων είναι απαραίτητος ο έλεγχος αξιοπιστίας του που σχετίζεται με τη μορφή και τις διαστάσεις των στοιχείων που χρησιμοποιούνται, ώστε να αποφεύγονται λάθη αριθμητικής ακρίβειας, (Τσαμασφύρος και Θεοτόκογλου, 1994).



Σχήμα 4.4 Διακριτοποίηση δομικού συστήματος με τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία

Η βασική αρχή που διέπει την επιλογή της γεωμετρικής μορφής και του μεγέθους του κάθε πεπερασμένου στοιχείου είναι το κατά πόσο απότομα μεταβάλλεται η κατανομή των ζητούμενων μεταβλητών σε κάθε περιοχή του δομικού συστήματος. Στις περιοχές που υπάρχει έντονη αλλαγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών ή αναμένεται απότομη μεταβολή των τάσεων ή υψηλή συγκέντρωση τάσεων, η διακριτοποίηση θα πρέπει να είναι πιο λεπτομερής και κατά συνέπεια το μέγεθος των στοιχείων να μειωθεί. Το φαινόμενο αυτό είναι δυνατό να εμφανιστεί σε περιοχές που υπάρχει απότομη μεταβολή της γεωμετρίας του σώματος όπως γωνίες, κοιλότητες, ρωγμές και ασυνέχειες. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στην περίπτωση της διακριτοποίησης του πιεζοηλεκτρικού το οποίο επικολλάται στη δοκό από σκυρόδεμα.

Στην περίπτωση των πιεζοηλεκτρικών υλικών που επικολλώνται στην επιφάνεια της δοκού από σκυρόδεμα, η διακριτοποίηση θα γίνει για όλο το σύστημα, λαμβάνοντας υπόψη ταυτόχρονα τη γεωμετρία των εμπεριεχομένων στοιχείων. Επειδή το πλέγμα των ΠΣ που υποδιαιρείται το πιεζοηλεκτρικό, λαμβανομένου τις διαστάσεις του κατά τους κύριους άξονες X, Y και Z είναι πολύ πιο πυκνό κατά την διεύθυνση Z, λόγω του μικρού του πάχους. Επίσης η περιοχή του σκυροδέματος στην οποία επικολλάται το PZT θα έχει επίσης πυκνότερο πλέγμα από το σύνολο της δοκού ώστε

να μεταβαίνει ομαλά η αλληλουχία του πλέγματος από στοιχείο σε στοιχείο με κλιμακωτή αύξηση και μείωση των πεπερασμένων στοιχείων του.

Η μείωση του μεγέθους των στοιχείων καθώς και η μεταβολή της γεωμετρίας τους κοντά στην περιοχή μεταβολής της γεωμετρίας του πεδίου, έχει ως στόχο την αύξηση της ακρίβειας των υπολογισμών στις περιοχές αυτές. Επειδή οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων συνδέονται με τις μετατοπίσεις που εμφανίζονται στους κόμβους τους με τη χρήση συναρτήσεων παρεμβολής, η ακρίβεια των τιμών που υπολογίζονται στο εσωτερικό κάθε στοιχείου εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος αυτού. Γενικά θα μπορούσε να αναφερθεί, ότι όσο πιο μικρό είναι το στοιχείο και όσο πιο κανονικό γεωμετρικά είναι το σχήμα του (π.χ. κανονικό πολύγωνο), τόσο αυξάνεται η αξιοπιστία των συναρτήσεων παρεμβολής.

Μετά τη διαδικασία διακριτοποίησης του μοντέλου ακολουθεί ο υπολογισμός των εξισώσεων ισορροπίας σε κάθε στοιχείο και κατ' επέκταση ο σχηματισμός της εξίσωσης ισορροπίας όλου του μοντέλου. Η εξίσωση ισορροπίας του μοντέλου αποτελεί μια καταστατική εξίσωση που συνδέει το αίτιο (π.χ. δύναμη) με το αποτέλεσμα (π.χ. μετατόπιση).

Το μητρώο ακαμψίας εξαρτάται αποκλειστικά από τη γεωμετρία των στοιχείων, τη διάταξη τους στο χώρο και τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού. Για να επιλυθεί το σύστημα εξισώσεων ισορροπίας και να υπολογιστούν οι μετατοπίσεις στους κόμβους, πρέπει να αντιστραφεί το μητρώο ακαμψίας εφόσον έχουν προσδιοριστεί οι συνοριακές συνθήκες. Οι συνοριακές συνθήκες αποτελούν προκαθορισμένες τιμές της δύναμης ή της μετατόπισης σε κάποιον ή κάποιους από τους κόμβους. Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων ισορροπίας είναι μια εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία εάν το πλήθος των στοιχείων είναι μεγάλο ή εάν χρειάζεται να μοντελοποιηθούν στοιχεία με απότομες μεταβολές στην γεωμετρία τους (π.χ. ρωγμές). Ο αριθμός των εξισώσεων σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να φτάσει τις δεκάδες χιλιάδες και η χρήση τόσο των υπολογιστών όσο και της εφαρμογής σύγχρονων μεθόδων γραμμικής άλγεβρας είναι απολύτως αναγκαία για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων. Εφόσον το σύστημα των εξισώσεων ισορροπίας επιλυθεί, είναι δυνατό να προσδιοριστούν οι παραμορφώσεις στους κόμβους από τις υπολογισμένες μετατοπίσεις και οι τάσεις από τις παραμορφώσεις μέσω καταστατικών εξισώσεων.

4.3.2 Διαδικασία εφαρμογής της ΜΠΣ

Η ΜΠΣ είναι μία αριθμητική μέθοδος επίλυσης διαφορικών εξισώσεων. Η διαδικασία που ακολουθείται για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση προβλημάτων μηχανικής είναι η ακόλουθη:

1. Εισαγωγή της γεωμετρίας της κατασκευής και δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου.
2. Διακριτοποίηση της κατασκευής σε πεπερασμένο αριθμό στοιχείων. Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει την επιλογή του μεγέθους και του τύπου των στοιχείων για την καλύτερη προσομοίωση για κάθε περίπτωση ανάλογα με τη γεωμετρία του μοντέλου και τη φύση των υλικών που θα επιλεγθούν. Στη συνέχεια επιλέγονται οι αντίστοιχες εξισώσεις (κατάλληλες συναρτήσεις για την κατανομή των αγνώστων μεταβλητών σε κάθε στοιχείο) που διέπουν το πρόβλημα και κατασκευάζεται το τελικό μητρώο των εξισώσεων. Προσδιορισμός των συναρτήσεων (σύνδεση αιτίου με αποτέλεσμα). Κατασκευή καταστατικών εξισώσεων για κάθε στοιχείο με σκοπό τον σχηματισμό του τελικού συστήματος των εξισώσεων.
3. Εισαγωγή των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών και των παραμέτρων της καταστατικής τους συμπεριφοράς, των φορτίσεων και των συνθηκών στήριξης.
4. Επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που αυτό απαιτεί, όπως και η μέθοδος επίλυσης που θα χρησιμοποιηθεί.
5. Ακολουθεί η επίλυση και υπολογίζονται τα αποτελέσματα. Υπολογίζεται η εντατική κατάσταση, τα άγνωστα μεγέθη στους κόμβους σαν συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους των στοιχείων.

4.4 Προσομοίωση ευφυνών κατασκευών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

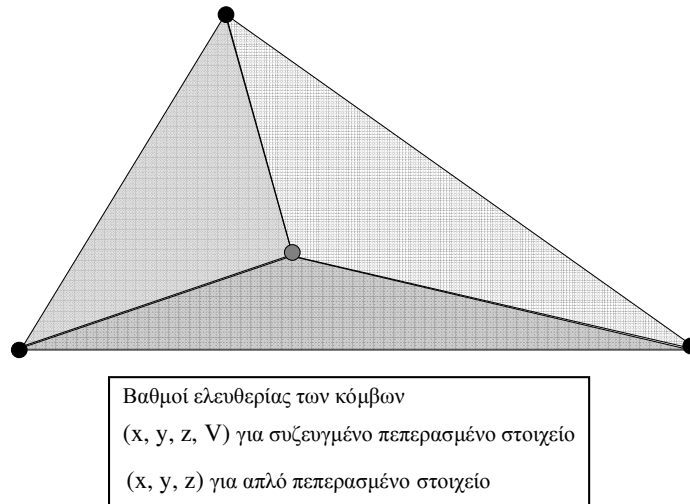
Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων έχει αποδειχθεί μία ισχυρή και ευπροσάρμοστη τεχνική για την προσομοίωση ευφυνών κατασκευών που περιέχουν τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και διεγέρτες, (Providakis et al., 2005a, 2005b, 2005c, 2008). Πολυάριθμες θεωρίες και τεχνικές προσομοίωσης σχετικά με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων έχουν προταθεί για την ανάλυση των πιεζοηλεκτρικών κατασκευών, (Piefort, 2001), (Lim et al., 1997a,b).

Στο κεφάλαιο αυτό της παρούσας εργασίας αναλύεται η αριθμητική τεχνική για το σχεδιασμό των ταλαντούμενων πιεζοηλεκτρικών κατασκευών για την εφαρμογή της μεθόδου που εστιάζει στη μελέτη της επίδρασης των βλαβών στην απόκριση δομικών συστημάτων και στη συνέχεια την επισκευή τους με τη χρήση σύνθετων και πιεζοηλεκτρικών υλικών. Ένα δομικό στοιχείο από σκυρόδεμα με περιοχές ενδεχόμενης βλάβης και πιεζοηλεκτρικά επιθέματα προσομοιώνεται με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

Για τη διακριτοποίηση των μοντέλων η οποία γίνεται με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων COMSOL, χρησιμοποιούνται τετραεδρικά στοιχεία “Lagrange-quadratic” δηλαδή στοιχεία που χρησιμοποιούν εξισώσεις δευτέρου βαθμού τύπου “Lagrange”. Τα στοιχεία “Lagrange” που προσομοιάζουν τα στοιχεία σκυροδέματος, εποξεικής κόλλας και σύνθετων υλικών FRP διαθέτουν τρεις βαθμούς ελευθερίας κατά X, Y και Z (κύριοι άξονες καρτεσιανών συντεταγμένων). Ενώ τα στοιχεία “Lagrange” τα οποία προσομοιάζουν τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία διαθέτουν τέσσερις βαθμούς ελευθερίας κατά X, Y, Z και ένα βαθμό για το δυναμικό φορτίο που εφαρμόζεται στο πιεζοηλεκτρικό επίθεμα.

Τα τρισδιάστατα μοντέλα επιλύονται με την μέθοδο επίλυσης “Direct(SPOOLES)”. Αυτός ο τύπος είναι χαρακτηριστικός για τα προβλήματα που χρησιμοποιούν συζευγμένα πεδία, “multiphysics”. Οι (Solvers) επιλυτές του COMSOL Multiphysics αναλύουν κάθε πρόβλημα ενός ή περισσότερων γραμμικών συστημάτων εξισώσεων. Κατά συνέπεια, σε όλους τους επιλυτές η επιλογή μεταξύ άμεσων και επαναληπτικών για τα γραμμικά συστήματα έχει επιπτώσεις στο χρόνο επίλυσης και τις απαιτήσεις μνήμης. Οι άμεσοι επιλυτές λύνουν ένα γραμμικό σύστημα με την αρχή της απαλοιφής του Gauss. Αυτή η διαδικασία είναι σταθερή και αξιόπιστη αλλά λόγω των μεγάλων απαιτήσεων μνήμης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλου μεγέθους προβλήματα. Η επίδραση του χρόνου καθυστέρησης εμφανίζεται κυρίως σε τρισδιάστατα μεγάλα προβλήματα όπου θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί άλλος είδος επιλυτή.

Το στοιχείο “Lagrange” είναι ένα πεπερασμένο στοιχείο που λειτουργεί με τη μορφή πολωνυμικών συναρτήσεων. Η τιμή της συνάρτησης χρησιμοποιείται ως βαθμός ελευθερίας για τα σημεία των κόμβων που ορίζουν το πεπερασμένο στοιχείο. Στο Σχήμα 4.5 φαίνονται σχηματικά τα τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τα στοιχεία σκυροδέματος, FRP, κόλλας και πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων.



Σχήμα 4.5 Τετραεδρικό πεπερασμένο στοιχείοLagrange

Οι περιορισμοί τάσης εφαρμόζονται στα ηλεκτρόδια των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων. Μια αρμονική ανάλυση συχνότητας εκτελείται στο μοντέλο FEM και ελέγχεται η μεταβολή του ηλεκτρικού φορτίου σε σχέση με τη συχνότητα. Από τα δεδομένα του ηλεκτρικού φορτίου, μπορεί να υπολογιστεί το ηλεκτρικό ρεύμα και έπειτα η σύνθετη E/M αντίσταση ή το αντίστροφο σύνθετη E/M αγωγιμότητα του πιεζοηλεκτρικού. Η E/M σύνθετη αντίσταση $Z(\omega)$ υπολογίζεται για κάθε συχνότητα ως την αναλογία V/I , όπου το V είναι η τάση και I το ηλεκτρικό ρεύμα. Σε αυτόν τον υπολογισμό, η τάση V είναι η πραγματική τάση που εφαρμόζεται στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Το ηλεκτρικό ρεύμα υπολογίζεται από το ηλεκτρικό φορτίο που “συγκεντρώθηκε” δυναμικά στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων.

Για να εκτελεστεί η ανάλυση συζευγμένων πεδίων ενός πιεζοηλεκτρικού, χρησιμοποιούνται τα συζευγμένα στοιχεία, τα οποία εξετάζουν τις επιδράσεις ταυτόχρονα για τους μηχανικούς και για τους ηλεκτρικούς παράγοντες. Για την συζευγμένη πιεζοηλεκτρική ανάλυση, το πεδίο των τάσεων και το ηλεκτρικό πεδίο συνδέονται το ένα με το άλλο έτσι ώστε η αλλαγή στο ένα πεδίο να προκαλέσει αλλαγή στο άλλο πεδίο. Όταν ένα στοιχείο χρησιμοποιείται για πιεζοηλεκτρική ανάλυση, αυτό έχει πρόσθετο βαθμό ελευθερίας (degree of freedom, dof), την ηλεκτρική τάση. Αυτός ο ηλεκτρικός βαθμός ελευθερίας προστίθεται επιπλέον στους βαθμούς ελευθερίας των μετατοπίσεων dof. Για κάθε βαθμό ελευθερίας ενός κόμβου, υπάρχει μια δύναμη αντίδρασης. Δύναμη αντίδρασης F_x, F_y, F_z αντιστοιχεί στη μετατόπιση με βαθμό ελευθερίας X, Y και Z , αντίστοιχα. Η ηλεκτρική φόρτιση Q είναι η ηλεκτρική

αντίδραση που αντιστοιχεί στον βαθμό ελευθερίας της τάσης. Το φορτίο Q χρησιμοποιείται για να υπολογιστούν τα δεδομένα της σύνθετης αγωγιμότητας. Μία εναλλασσόμενη ηλεκτρική τάση V εφαρμόζεται σε όλα τα συζευγμένα στοιχεία υπό μορφή όπως περιγράφηκε ηλεκτρικού βαθμού ελευθερίας, το ηλεκτρικό φορτίο “συγκεντρώνεται” ως ηλεκτρική αντίδραση Q στην επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού. Το ηλεκτρικό ρεύμα I στην επιφάνεια των πιεζοηλεκτρικών υπολογίζεται από τον τύπο $I = I_0 e^{i\omega t}$, όπου ω είναι η συχνότητα λειτουργίας, $i = \sqrt{-1}$. Όταν διεγείρεται από μια εναλλασσόμενη ηλεκτρική τάση, το ελεύθερο πιεζοηλεκτρικό ενεργεί ως ηλεκτρομηχανικός συντονιστής. Η προσομοίωση ενός ελεύθερου πιεζοηλεκτρικού είναι χρήσιμη για την κατανόηση της ηλεκτρομηχανικής σύζευξης μεταξύ της μηχανικής απόκρισης ταλάντωσης και της σύνθετης ηλεκτρικής απόκρισης του αισθητήρα.

Όταν ένα πιεζοηλεκτρικό διεγερθεί είτε ηλεκτρικά είτε μηχανικά, ο συντονισμός μπορεί να συμβεί όταν η απόκριση είναι πολύ μεγάλη. Ο συντονισμός μπορεί να είναι δύο τύπων: α) ηλεκτρομηχανικός συντονισμός και β) μηχανικός συντονισμός.

Ο μηχανικός συντονισμός προκύπτει με τον ίδιο τρόπο όπως σε μια απλή ελαστική κατασκευή ενώ ο ηλεκτρομηχανικός συντονισμός αφορά τα πιεζοηλεκτρικά υλικά (ηλεκτρομηχανικές ιδιότητες). Ο ηλεκτρομηχανικός συντονισμός απεικονίζει τη σύζευξη μεταξύ των μηχανικών και ηλεκτρικών μεταβλητών, που συμβαίνουν κάτω από την ηλεκτρική διέγερση, η οποία παράγει την ηλεκτρομηχανική απόκριση. (δηλ., ταυτόχρονα με μια μηχανική ταλάντωση παρουσιάζεται μια αλλαγή στην ηλεκτρική αγωγιμότητα και την αντίσταση). Όταν ένα πιεζοηλεκτρικό επίθεμα διεγείρεται αρμονικά με μια σταθερή τάση σε μία συγκεκριμένη συχνότητα, ο ηλεκτρικός συντονισμός συνδέεται με την κατάσταση στην οποία μια συσκευή παρουσιάζει πολύ μεγάλη αγωγιμότητα. Κατά το συντονισμό, η αγωγιμότητα γίνεται πολύ μεγάλη ενώ η σύνθετη αντίσταση τείνει στο μηδέν. Δεδομένου ότι η αγωγιμότητα γίνεται πολύ μεγάλη, το ρεύμα που διαρέει τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα γίνεται πολύ μεγάλο επειδή $I = Y \cdot V$. Στις πιεζοηλεκτρικές συσκευές, η μηχανική απόκριση κατά τον ηλεκτρικό συντονισμό γίνεται επίσης πολύ μεγάλη. Αυτό συμβαίνει επειδή η ηλεκτρομηχανική σύζευξη των πιεζοηλεκτρικών υλικών μεταφέρει την ενέργεια από την ηλεκτρικά εισαγόμενη ενέργεια στη μηχανική απόκριση.

Οι δυναμικές εξισώσεις ενός ομογενούς πιεζοηλεκτρικού μέσου μπορούν να προέλθουν από την αρχή του “Hamilton”, στην οποία το μοντέλο “Lagrange” χρησιμοποιείται κατάλληλα για να περιλάβει τη συμβολή των ηλεκτρικών αλλά και των μηχανικών ιδιοτήτων. Η ενεργειακή πυκνότητα ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού

περιλαμβάνει ταυτόχρονα συνεισφορές από την ενέργεια παραμόρφωσης και από την ηλεκτροστατική ενέργεια, (Piefort, 2001).

$$H = \frac{1}{2} \left[\{S^T\} \{T\} - \{E\}^T \{D\} \right] \quad (4.16)$$

Η ενεργειακή πυκνότητα δίδεται από τη σχέση:

$$\delta W = \{ \delta u^T \} \{ F \} - \delta \phi \sigma \quad (4.17)$$

όπου $\{F\}$ η εξωτερική δύναμη και σ το ηλεκτρικό φορτίο

Η ηλεκτρομηχανική αναλογία μεταξύ των βασικών ηλεκτρομηχανικών παραμέτρων παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Ηλεκτρομηχανική αναλογία

Μηχανική		Ηλεκτρική	
Δύναμη	$\{ F \}$	Ηλεκτρικό φορτίο	$\{ \sigma \}$
Μετατόπιση	$\{ u \}$	Διαφορά δυναμικού – ηλεκτρική τάση	$\{ \phi \}$
Τάση	$\{ T \}$	Ηλεκτρική μετατόπιση	$\{ D \}$
Παραμόρφωση	$\{ S \}$	Ηλεκτρικό πεδίο	$\{ E \}$

Η βασική αρχή που διέπει τα πιεζοηλεκτρικά υλικά προέρχεται από την αντικατάσταση της σχέσης H και δW στην αρχή Hamilton.

$$0 = - \int_V \left[\rho \{ \delta u \}^T \{ \ddot{u} \} - \{ \delta S \}^T [c^E] \{ S \} + \{ \delta S \}^T [e]^T \{ E \} + \{ \delta E \}^T [e] \{ S \} + \{ \delta E \}^T [\epsilon^S] \{ E \} + \{ \delta u \}^T \{ f_b \} \right] dV + \\ + \int_{S_1} \{ \delta u \}^T \{ f_s \} dS + \{ \delta u \}^T \{ f_c \} - \int_{S_2} \delta \phi \sigma dS - \delta \phi Q \quad (4.18)$$

4.5 Διατύπωση συζευγμένων πεπερασμένων στοιχείων

Οι γραμμικές θεμελιώσεις σχέσεις που περιγράφουν τη σύζευξη μεταξύ του ελαστικού και του ηλεκτρικού πεδίου δίδονται από τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 3. Το ηλεκτρικό πεδίο E σχετίζεται με το ηλεκτρικό δυναμικό ϕ από τη σχέση $E = -\nabla\phi$. Η μετατόπιση και το δυναμικό για κάθε στοιχείο μπορεί να εκφραστεί, αντίστοιχα, όπως:

$$u = N_u u_i \quad (4.19)$$

$$\phi = N_\phi \phi_i \quad (4.20)$$

όπου u το διάνυσμα της μετατόπισης, N_u και N_ϕ είναι η συνάρτηση μορφής της παρεμβολής για τις μεταβλητές u και ϕ (ο συμβολισμός του δείκτη i εκφράζει τις τιμές των κομβικών σημείων) αντίστοιχα. Επομένως το πεδίο παραμορφώσεων S και το ηλεκτρικό πεδίο E σχετίζονται με τις κομβικές μετατοπίσεις και το δυναμικό από την παράγωγο της συνάρτησης της μορφής B_u και B_ϕ . Τα B_u και B_ϕ προκύπτουν από τις διαφορικές εξισώσεις μεταξύ των μητρώων που σχετίζονται με την παραμόρφωση S της συνάρτησης μορφής των μητρώων N_u και N_ϕ .

$$\{S\} = [D][N_u]\{u_i\} = [B_u]\{u_i\} \quad (4.21)$$

$$\{E\} = -\nabla[N_\phi]\{\phi_i\} = -[B_\phi]\{\phi_i\} \quad (4.22)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (4.19) και (4.22) στην (4.18):

$$\begin{aligned} 0 = & -\{\delta u_i\}^T \int_V \rho [N_u]^T [N_u] dV \{\ddot{u}_i\} - \{\delta u_i\}^T \int_V [B_u]^T [c^E] [B_u] dV \{u_i\} \\ & - \{\delta u_i\}^T \int_V [B_u]^T [e] [B_\phi] dV \{\phi_i\} - \{\delta \phi_i\}^T \int_V [B_\phi]^T [e^T] [B_u] dV \{u_i\} \\ & + \{\delta \phi_i\}^T \int_V [B_\phi]^T [\epsilon^S] [B_\phi] dV \{\phi_i\} + \{\delta u_i\}^T \int_V [N_u]^T [f_b] dV \\ & + \{\delta \phi_i\}^T \int_{S_1} [N_u]^T \{f_s\} dS + \{\delta u_i\}^T [N_u]^T \{f_c\} \\ & - \{\delta \phi_i\}^T \int_{S_2} [N_\phi]^T \sigma dS - \{\delta \phi_i\}^T [N_\phi]^T Q \end{aligned}$$

Η οποία μπορεί να επαληθευτεί για οποιαδήποτε αλλαγή των μετατοπίσεων $\{\delta u_i\}$ και του ηλεκτρικού δυναμικού $\{\delta \phi_i\}$ και να είναι συμβατή με τις θεμελιώδεις συνοριακές συνθήκες.

Για ένα πεπερασμένο στοιχείο η προηγούμενη εξίσωση παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$[M_{uu}]\ddot{u}_i + [K_{uu}]u_i + [K_{u\phi}]\phi_i = \{F_i\} \quad (4.23)$$

$$[K_{\phi u}^T]u_i + [K_{\phi\phi}]\phi_i = \{Q_i\}$$

όπου $[M_{uu}] = \int \rho N_u^T N_u dV$, πίνακας κινηματικής σταθεράς μάζας

$$[K_{uu}] = \int B_u^T c^E B_u dV, \text{ πίνακας δυσκαμψίας}$$

$$[K_{u\phi}] = \int B_u^T e^T B_\phi dV, \text{ πίνακας πιεζοηλεκτρικής σύζευξης}$$

$$[K_{\phi\phi}] = - \int B_\phi^T \epsilon^S B_\phi dV, \text{ πίνακας διηλεκτρικής δυσκαμψίας}$$

$$[K_{\phi u}] = [K_{u\phi}]^T$$

$$\{F_i\} = \int_V N_u^T f_b dV + \int_{S_1} N_u^T f_s dS + N_u^T f_c, \text{ μηχανικό φορτίο}$$

$$\{Q_i\} = - \int_{S_2} N_\phi^T \sigma dS - N_\phi^T q, \text{ ηλεκτρικό φορτίο}$$

Όπου ο δείκτης T είναι ο ανάστροφος πίνακας. Όπου f_b , είναι η δύναμη του σώματος, f_s είναι η δύναμη επιφανείας, f_c είναι η συγκεντρωμένη δύναμη, σ είναι το επιφανειακό φορτίο, q είναι το συγκεντρωμένο φορτίο, S_1 είναι η περιοχή στην οποία εφαρμόζονται τα μηχανικά φορτία και S_2 είναι η περιοχή στην οποία εφαρμόζονται τα ηλεκτρικά φορτία. (η διηλεκτρική σταθερά είναι ϵ^S υπό σταθερή παραμόρφωση).

Κάθε στοιχείο του δικτύου διακριτοποίησης συνδέεται με τα γειτονικά στοιχεία στους γενικούς κόμβους και η μετατόπιση θεωρείται συνεχής από το ένα στοιχείο στο επόμενο. Όταν το φορτίο που ασκείται στο πιεζοηλεκτρικό επίθεμα είναι αρμονικό με την μορφή $F = F e^{i\omega t}$, η λύση των εξισώσεων (4.23) για τον υπολογισμό της αρμονικής απόκρισης μπορούν να ληφθεί από την διατύπωση των πεπερασμένων στοιχείων με τις ακόλουθες εξισώσεις σε μορφή πίνακα:

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} [M_{uu}] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{uu}] & [K_{u\phi}] \\ [K_{u\phi}]^T & [K_{\phi\phi}] \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \{u_i\} \\ \{\phi_i\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_i\} \\ \{Q_i\} \end{Bmatrix} \quad (4.24)$$

Όπου ω είναι η γωνιακή συχνότητα. Η απόκριση μπορεί να ληφθεί στην περιοχή των συχνοτήτων για τις μετατοπίσεις $\{u_i\}$ και για το δυναμικό $\{\phi_i\}$, για ένα δεδομένο

φορτίο δύναμης διέγερσης σε δοσμένη γωνιακή συχνότητα. Πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα διανύσματα θεωρούνται σύνθετα μιγαδικά μεγέθη.

Η μορφή της σχέσης (4.24) ισχύει για όλες τις κατασκευές που περιέχουν πιεζοηλεκτρικά στοιχεία αλλά και για απλές κατασκευές με τη διαφορά ότι το πιεζοηλεκτρικό μητρώο συζεύξεων και το διηλεκτρικό μητρώο ακαμψίας είναι μηδέν σε αυτή την περίπτωση.

Στην παρούσα διατριβή, προκειμένου να δημιουργηθούν διαφορετικές περιοχές στις οποίες θα εισάγεται η βλάβη η δοκός διαμορφώνεται χωριστά με διαφορετικά πεπερασμένα στοιχεία για κάθε περιοχή ενδεχόμενης βλάβης. Για να διεξαχθούν οι συγκριτικές μελέτες των διαφορετικών περιπτώσεων βλάβης, οι ηλεκτρομηχανικές αρμονικές αναλύσεις εκτελούνται με χρήση του λογισμικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων COMSOL το οποίο διαθέτει πιεζοηλεκτρικές ικανότητες ανάλυσης.

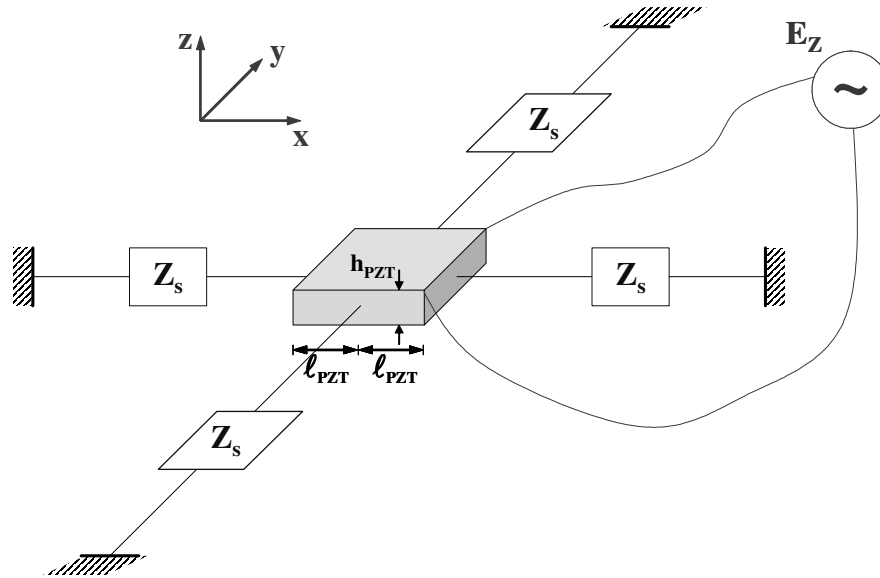
4.6 H/M χαρακτηριστικά της σύνθετης αγωγιμότητας κατά τη δυναμική ανάλυση

Για αναλυτική επίλυση με τη βοήθεια H/Y ένα σύνολο αριθμητικών προσομοιώσεων που χρησιμοποιούν την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων εκτελείται στα συγκεκριμένα δομικά στοιχεία στα οποία επικολλώνται επιθέματα PZT. Τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν τα πλεονεκτήματα της χρήσης μαθηματικών μεθόδων προσομοίωσης συστημάτων όταν συγκρίνονται με προηγούμενες μεθόδους διάγνωσης βλαβών, στις οποίες απαιτείται καλή χρήση εφαρμοσμένης μηχανικής και είναι ανεπαρκείς σε περίπλοκες κατασκευές. Η τεχνική συνίσταται στη λήψη της απόκρισης της κατασκευής σε μία περίοδο συχνοτήτων (frequency response functions FRFs). Οι αλλαγές στη συνάρτηση απόκρισης συχνοτήτων (frequency response functions FRFs) μπορούν να υποδείξουν την παρουσία βλάβης, (Raju, 1997).

Ακολουθώντας την ανωτέρω περιγραφή, όταν εφαρμόζεται μια μονάδα ηλεκτρικής τάσης στο πιεζοηλεκτρικό στρώμα του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων του ενεργού επιθέματος μπορεί να υπολογιστεί η σύνθετη αγωγιμότητα. Η εφαρμογή της μονάδας ηλεκτρικής τάσης προσομοιώνεται με τη θεώρηση ενός θετικού και ενός αρνητικού ηλεκτροδίου τοποθετημένων στην πάνω και κάτω, αντίστοιχα, επιφάνεια του επιθέματος PZT. Στο μοντέλο, αυτά τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται «δεσμεύοντας» τον βαθμό ελευθερίας του δυναμικού όλων των κόμβων των αντίστοιχων επιφανειών.

Κατ' αυτό τον τρόπο, η σύνθετη αγωγιμότητα μπορεί εύκολα να υπολογιστεί. Η σύνθετη αγωγιμότητα είναι ο λόγος του προκύπτοντος ηλεκτρικού ρεύματος και της εφαρμοζόμενης ηλεκτρικής τάσης.

Το σχετικό φυσικό μοντέλο του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6 για ένα τετραγωνικό επίθεμα PZT μήκους $2l_{PZT}$ και πάχους h_{PZT} .



Σχήμα 4.6 Μοντέλο αλληλεπίδρασης μεταξύ πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα και κατασκευής

Όταν ένα αρμονικό φορτίο τάσης $V=V_0e^{i\omega t}$ με $i = \sqrt{-1}$ εφαρμοστεί στον z άξονα, δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο $E=E_0e^{i\omega t}$ και μία επίπεδη ταλάντωση δημιουργείται ταυτόχρονα στις κατευθύνσεις x και y .

Το ηλεκτρικό ρεύμα που διέρχεται μέσα από το επίθεμα PZT:

$$I=I_0e^{i\omega t} \quad (4.25)$$

$$I = i\omega \int_{-\frac{l_{PZT}}{2}}^{\frac{l_{PZT}}{2}} \int_{-\frac{l_{PZT}}{2}}^{\frac{l_{PZT}}{2}} D \, dx \, dy \quad (4.26)$$

Το ηλεκτρικό πεδίο καθορίζεται από τον τύπο:

$$E = \frac{V}{h_{PZT}} \quad (4.27)$$

και η εισαγόμενη τάση είναι τάση εναλλασσόμενου ρεύματος μεγέθους 1 V (rms). Έτσι η ηλεκτρική σύνθετη αγωγιμότητα του επιθέματος PZT εκφράζεται ως:

$$Y = \frac{I}{V} \quad (4.28)$$

Η απόκριση της ηλεκτρομηχανικής αγωγιμότητας των PZT διατάξεων εξαρτώμενη από τη συχνότητα συγκρίνεται με την απόκριση της αρχικής υγιούς κατασκευής για να χαρακτηρίσει το επίπεδο κατάστασης της κατασκευής προς διερεύνηση. Από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων COMSOL μετά την δυναμική επίλυση λαμβάνεται το πραγματικό μέρος της σύνθετης αγωγιμότητας ως αποτέλεσμα εξόδου σε κάθε συχνότητα που διεγείρεται η κατασκευή.

4.7 Δυναμική ανάλυση στο πεδίο υψηλών συχνοτήτων

Τα τελευταία χρόνια, διάφορες έρευνες έχουν γίνει που χρησιμοποιούν δεδομένα από την απόκριση ανάλυσης συχνοτήτων για την ανίχνευση βλαβών στις κατασκευές. Αυτή η τεχνική έχει ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις τεχνικές ανάλυσης ιδιομορφών ή απόκριση στο πεδίο του χρόνου. Η δυναμική απόκριση συχνοτήτων (Frequency Response Function FRF) περιέχει περισσότερες πληροφορίες από αυτές που παρέχουν οι τεχνικές ανάλυσης ιδιομορφών, (Park et al., 2000a).

Η δυναμική απόκριση ενός συστήματος υπολογίζεται εφαρμόζοντας ένα δυναμικό φορτίο στο σύστημα και λαμβάνοντας τις αντίστοιχες αποκρίσεις. Ένα σύνθετο δυναμικό φορτίο είναι ημιτονοειδούς μορφής. Αυτής της μορφής το δυναμικό φορτίο δίνει απόκριση η οποία έχει επίσης ημιτονοειδή μορφή σε άλλο πλάτος και σε άλλη φάση. Υπολογίζοντας το εξαγόμενο πλάτος και τη φάση ενός συστήματος σε μία περιοχή συχνοτήτων για ένα ημιτονοειδές φορτίο, κατασκευάζεται η δυναμική απόκριση της κατασκευής.

Όσο αυξάνεται η συχνότητα τόσο το μήκος κύματος μειώνεται και επομένως χρειάζεται ένας πιο λεπτομερής κανάβος πεπερασμένων στοιχείων για να συλλάβει το την διαδικασία της διάδοσης των κυμάτων στο εσωτερικό των στοιχείων. Έχει διαπιστωθεί ότι τα όρια χαμηλής συχνότητας είναι ευκολότερο να προσομοιωθούν επειδή στις χαμηλές συχνότητες το μήκος κύματος είναι πιο μακρύ και εκτείνεται σε αρκετά πεπερασμένα στοιχεία, και ως εκ τούτου η παραμόρφωση κάθε στοιχείου έχει λιγότερες επιπτώσεις. Συνεπώς, σε χαμηλές συχνότητες, θα μπορούσαν να

χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερα στοιχεία, δηλ., ένα πιο αραιό δίκτυο, και λιγότερος χρόνος υπολογισμού. Εντούτοις, τα χαμηλής συχνότητας κύματα είναι ακατάλληλα για τις υπερηχητικές εφαρμογές, (Giurgiutiu, 2007).

Για να επιτευχθεί η ανίχνευση βλάβης με τη μέθοδο διάδοσης των κυμάτων, το μήκος των κυμάτων πρέπει να είναι πολύ μικρό. Παρατηρήθηκε ότι, στις χαμηλές συχνότητες η απόκριση αρχίζει να εμφανίζεται προτού να ολοκληρώσει την διάδοσή του το προσπίπτον κύμα, με συνέπεια να εμποδίζει τη διαδικασία ανίχνευσης βλάβης. Όσο αυξάνεται η συχνότητα διέγερσης, το μήκος κύματος μειώνεται, και ως εκ τούτου απαιτείται ένα πυκνότερο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για να συλλάβει τη διαδικασία διάδοσης κυμάτων, η οποία αυξάνει αρκετά την υπολογιστική ακρίβεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Το πιο σημαντικό θέμα που διερευνούν οι μέθοδοι διάγνωσης βλαβών είναι η βεβαίωση της ύπαρξης ή όχι της βλάβης. Αυτό αποτελεί θεμελιώδες ζήτημα σε όλες τις μεθόδους ελέγχου δομικής ακεραιότητας από τις πιο απλές μέχρι τις πιο σύνθετες και από τις πιο παλιές μέχρι τις πιο σύγχρονες. Εφόσον ανιχνευθεί η βλάβη ουσιαστικής σημασίας κρίνεται επίσης η ταυτοποίησή της. Με αυτό τον τρόπο γίνεται γνωστή η θέση και η έκτασή της ώστε να προσδιοριστεί στη συνέχεια και ο τρόπος επιδιόρθωσής της.

Στην παρούσα διατριβή, η διαδικασία ελέγχου ακεραιότητας των κατασκευών με τη χρήση ευφυών υλικών και συγκεκριμένα πιεζοηλεκτρικών υλικών περιλαμβάνει δύο βασικά στάδια. Το πρώτο αφορά την ανίχνευση και το δεύτερο την ταυτοποίηση των βλαβών σε ένα δομικό σύστημα. Η μέθοδος της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας EMA, σε συνδυασμό με στατιστικές μεθόδους χρησιμοποιούνται στην

παρούσα διατριβή για τη διάγνωση της βλάβης σε μία δοκό από σκυρόδεμα. Η ανίχνευση έχει ως στόχο την πιστοποίηση της ύπαρξης ή όχι βλάβης σε αυτό. Στην περίπτωση που η ανίχνευση είναι θετική και άρα υπάρχει κάποια μορφή βλάβης, η διαδικασία συνεχίζεται με την ταυτοποίησή της. Η ταυτοποίηση έχει ως στόχο τον προσδιορισμό της θέσης και της έκτασης της βλάβης στο δομικό στοιχείο.

Η διαδικασία υλοποίησης μιας μεθοδολογίας ανίχνευσης βλάβης εξετάζεται ως πρόβλημα στατιστικής διαμόρφωσης. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται αρχικά ένας στατιστικός δείκτης βλάβης και στη συνέχεια μία στατιστική διαδικασία.

5.2 Δείκτες ανίχνευσης βλαβών

Ο δείκτης βλάβης (Damage Index) είναι μια αριθμητική τιμή που προκύπτει από τη συγκριτική επεξεργασία των αποκρίσεων σύνθετης H/M αγωγιμότητας και εκφράζει τη διαφορά μεταξύ των αποκρίσεων δύο καταστάσεων λόγω της παρουσίας βλάβης. Μέχρι σήμερα, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι δείκτες βλάβης για να συγκρίνουν τις αποκρίσεις σύνθετης αγωγιμότητας και να αξιολογήσουν την παρουσία βλάβης. Οι Zagrai και Giurgiutiu (2002) εξέτασαν δείκτες βλάβης βασισμένους σε στατιστικές μετρήσεις, όπως η τετραγωνική ρίζα της μέσης τετραγωνικής απόκλισης, η μέση απόλυτη ποσοστιαία απόκλιση, η μεταβολή της συνδιακύμανσης και ο συντελεστής συσχέτισης της απόκλισης. Το βασικό μειονέκτημα αυτών των δεικτών βλάβης είναι ο τρόπος που θα καθοριστούν τα κατάλληλα όρια εμπιστοσύνης και η στατιστική σταθερότητα που θα οδηγήσει στην απόφαση ότι υπάρχει ή όχι βλάβη σε μια κατασκευή.

Για την ποσοτικοποίηση της βλάβης στην παρούσα διατριβή αρχικά χρησιμοποιείται ο δείκτης απόκλισης μέσης τετραγωνικής τιμής (RMSD) ο οποίος είναι ποσοτικός και φαίνεται να μπορεί να δώσει μία αρχική ποσοτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Αυτός ο δείκτης βλάβης συγκρίνει δύο τουλάχιστον διαφορετικές αποκρίσεις (εκ των οποίων η μία αντιπροσωπεύει την αρχική) του συστήματος και ορίζει μια τιμή η οποία υπολογίζεται με βάση τον τύπο 5.1.

$$\text{RMSD} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{[\text{Re}(Y_{i,1}) - \text{Re}(Y_{i,2})]^2}{[\text{Re}(Y_{i,1})]^2}} \quad (5.1)$$

όπου n είναι ο αριθμός των σημείων i των αποκρίσεων σε μία περιοχή συχνοτήτων, $Y_{i,1}$ είναι η απόκριση της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος PZT που υπολογίζεται στην υγιή ή αρχική κατάσταση και $Y_{i,2}$ η απόκριση της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας του πιεζοηλεκτρικού PZT για την 'υπό διερεύνηση' κατάσταση καθώς συγκρίνεται με το σύστημα αναφοράς (αρχικό δοκίμιο) υπολογισμένο σε κάθε σημείο i του διαστήματος συχνοτήτων.

Ο δείκτης βλάβης RMSD βασίζεται στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων η οποία ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγώνων των κατακόρυφων αποκλίσεων των σημείων των δεδομένων σε μία ευθεία ή κατ' επέκταση και σε γενικότερες συναρτήσεις μη-γραμμικής μορφής όπως είναι οι αποκρίσεις της H/M αγωγιμότητας. Όσο μεγαλύτερη η αριθμητική τιμή του RMSD τόσο μεγαλύτερη η διαφορά μεταξύ του αρχικού και του 'υπό διερεύνηση' υπολογισμού ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας, η οποία και δεικνύει ύπαρξη βλάβης στο δομικό σύστημα.

Η ανάλυση δυναμικής απόκρισης στο πεδίο υψηλών συχνοτήτων εκτελέστηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων COMSOL, (COMSOL, 2006) με το χαρακτηριστικό γνώρισμα της πιεζοηλεκτρικής ανάλυσης σε συνεργασία με τις ικανότητες προσδιορισμού συστημάτων του μαθηματικού λογισμικού MATLAB, (MATLAB, 2006).

5.3 Στατιστικές διαδικασίες ανίχνευσης βλαβών

Πολλές μέθοδοι έχουν προταθεί για την ανίχνευση βλάβης βασισμένες στην αναγνώριση χαρακτηριστικών γνωρισμάτων με πολυπαραγοντικές στατιστικές μεθόδους. Η ιδέα της ανάπτυξης στατιστικών μοντέλων με εφαρμογή αλγορίθμων χρησιμοποιεί τα εξαγόμενα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του αρχικού συστήματος ή και των διαφορετικών καταστάσεων. Με αυτά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα από το αρχικό σύστημα που ελέγχεται (pristine - υγιές), οι επόμενες καταστάσεις συγκρίνονται με αυτά για να φανεί εάν τα νέα χαρακτηριστικά γνωρίσματα είναι ακραία σημεία, τα οποία διαφέρουν σημαντικά από αυτά του αρχικού δομικού συστήματος.

Για την εξέλιξη της μεθόδου σύνθετης αγωγιμότητας υιοθετούνται στατιστικοί αλγόριθμοι για να εκτιμήσουν την απόκλιση των αποκρίσεων που προκαλούνται από τις αλλαγές των μηχανικών ιδιοτήτων των συστημάτων και κατ' επέκταση την εμφάνιση δομικών βλαβών. Τα στατιστικά μοντέλα αναπτύσσονται σε δύο βασικές

κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία “supervised learning” αφορά τη διαδικασία “εκμάθησης των δεδομένων με επίβλεψη”. Αυτό σημαίνει ότι είναι γνωστά τα δεδομένα και από την αρχική κατάσταση αλλά και την κατάσταση βλάβης. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τις υποκατηγορίες κατηγοριοποίηση σε ομάδες - “Group classification” και παλλινδροούμενες αναλύσεις - “regression analysis”. Η δεύτερη κατηγορία μοντέλων “Unsupervised learning” προκύπτει από τη διαδικασία “εκμάθησης των δεδομένων χωρίς επίβλεψη”. Αυτή η διαδικασία ανάπτυξης μοντέλου δεν χρησιμοποιεί δεδομένα από την κατάσταση βλάβης όπου συνήθως στις πραγματικές κατασκευές δεν παρέχονται. Χρησιμοποιεί στατιστικές μεθόδους όπως η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας - “Probability density function”. Με τις μεθόδους αυτές καταφέρνει να αναλύσει τις αποκρίσεις της υγιούς κατασκευής και να καθορίσει από αυτά τα δεδομένα τα αντίστοιχα όρια τα οποία πιθανοτικά δεν πρέπει να ξεπεραστούν σε μελλοντικές αποκρίσεις της κατασκευής. Ενώ αν ξεπεραστούν κατά κάποιο ποσοστό δεικνύουν βλάβη στην κατασκευή.

5.3.1 Εκμάθηση των δεδομένων με επίβλεψη - κατηγοριοποίηση ομάδων

Η κατηγοριοποίηση σε ομάδες επιχειρεί να τοποθετήσει τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα στις αντίστοιχες καταστάσεις βλάβης (υγιές και με βλάβη) κατά στατιστικά ποσοτικοποιημένο τρόπο. Οι παρατηρήσεις μπορούν να συνδυαστούν με την εμπειρία του ερευνητή για προηγούμενα υγιή και με βλάβη συστήματα και οι αλλαγές στα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που συνδέονται με τις προηγούμενες παρατηρηθείσες περιπτώσεις βλάβης να συμπεράνουν την παρουσία, τον τύπο και το επίπεδο της βλάβης.

5.3.2 Εκμάθηση των δεδομένων με επίβλεψη - παλλινδροούμενες αναλύσεις

Μια άλλη κατηγορία στατιστικής διαμόρφωσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία ανίχνευσης βλάβης είναι η παλλινδροούμενη ανάλυση. Αυτή η ανάλυση αναφέρεται στη διαδικασία εξαγωγής συσχετιζόμενων δεδομένων για τις συγκεκριμένες θέσεις ή την έκταση της βλάβης. Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα χαρτογραφούνται με μια συνεχή παράμετρο, όπως η χωρική θέση ή μια χρονική παράμετρο, σε αντιδιαστολή

με την κατηγοριοποίηση ομάδων όπου τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα αντιστοιχούν στις ιδιαίτερες κατηγορίες όπως «υγιή» ή «με βλάβη». Η ανάλυση παλινδρόμησης για την ανίχνευση βλάβης απαιτεί τη διαθεσιμότητα των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων από την υγιή κατασκευή και από την κατασκευή σε ποικίλα επίπεδα βλάβης.

5.3.3 Εκμάθηση των δεδομένων χωρίς επίβλεψη - Εκτίμηση πυκνότητας πιθανότητας

Στην περίπτωση αυτή όπου δεν είναι διαθέσιμα τα δεδομένα από την κατάσταση βλάβης σε μια κατασκευή υιοθετείται η στατιστική θεωρία ακραίων τιμών για να οριστούν κατάλληλα τα όρια εμπιστοσύνης. Η θεωρία αυτή χρησιμοποιείται ώστε από τα διαθέσιμα δεδομένα μιας αρχικής και συχνά υγιούς κατάστασης να μπορούν να προβλεφθούν τα όρια που θα διαχωρίσουν μια επόμενη κατάσταση πιθανής βλάβης από την αρχική κατάσταση της κατασκευής. Η εκτίμηση της συνάρτησης πυκνότητας είναι μία από τις βασικές στατιστικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε αυτόν τον τύπο ανάλυσης.

Μια ιδιαίτερη δυσκολία που αντιμετωπίζεται κατά την εφαρμογή της ανάλυσης ακραίων τιμών είναι ότι όταν μεγαλώνει η διάσταση του διανύσματος των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων χρειάζεται μεγάλα ποσά δεδομένων για να καθορίσουν κατάλληλα τη συνάρτηση πυκνότητας. Σημαντικό θέμα κατά την ανάπτυξη στατιστικών μοντέλων είναι η διερεύνηση της πιθανότητας εσφαλμένων ενδείξεων βλάβης. Η πιθανότητα αυτή εμπίπτει σε δύο κατηγορίες: (α) σφάλμα θετικής ένδειξης βλάβης (δείχνει ύπαρξη βλάβης, ενώ δεν υπάρχει βλάβη), (β) σφάλμα αρνητικής ένδειξης βλάβης (δεν δείχνει ύπαρξη βλάβης, ενώ υπάρχει βλάβη).

Εντούτοις, η στατιστική επεξεργασία της απόκρισης της σύνθετης H/M αγωγιμότητας είναι μία νέα περιοχή ενδιαφέροντος για τους ερευνητές. Ο έλεγχος της δομικής ακεραιότητας βασισμένος στην σύνθετη H/M αγωγιμότητα βασίζεται στην απόκλιση των αποκρίσεων της μεταξύ διαφορετικών καταστάσεων, σε ενδεχομένως διαφορετικές χρονικές περιόδους.

Οι αποκρίσεις των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων που προκύπτουν χρησιμοποιούνται για να γίνει μια ποιοτική σύγκριση μεταξύ του συνόλου των δεδομένων. Η μέθοδος αυτή όταν στηρίζεται σε πειραματικά δεδομένα, απαιτείται η χρήση στατιστικών διαδικασιών ανάλυσης για να διαχωριστούν οι αλλαγές της

σύνθετης H/M αγωγιμότητας που προκαλούνται από τις δομικές βλάβες από εκείνες που προκαλούνται από τη λειτουργική και περιβαλλοντική μεταβλητότητα.

Στην παρούσα διατριβή, ο έλεγχος δομικής ακεραιότητας βασίζεται στην θεωρία EMA όπου διεξάγεται στα πλαίσια ανίχνευσης ακραίων τιμών με τη βοήθεια ενός αυτοπαλλινδρούμενου μοντέλου με εξωγενή δεδομένα εισαγωγής (FDARX-Frequency Response Auto Regressive with eXogenous input) που αναπτύσσεται στο πεδίο υψηλών συχνοτήτων.

5.4 Στατιστική επεξεργασία με εκτίμηση πυκνότητας πιθανότητας

Η διαδικασία υλοποίησης μιας τεχνικής διάγνωσης βλαβών μπορεί να εξεταστεί ως πρόβλημα στατιστικής διαμόρφωσης του συστήματος. Σε αντίθεση με τους στατιστικούς δείκτες βλάβης η διαδικασία αυτή παρέχει τη δυνατότητα καθορισμού ορίων στις τιμές που καθορίζουν πότε μία απόκριση εμπεριέχει κάποια μορφή βλάβης ή όχι. Σαν γενικότερος όρος, ως βλάβη μπορεί να θεωρηθούν οι αλλαγές που εμφανίζονται σε ένα δομικό σύστημα που το επηρεάζουν αρνητικά κατά την τρέχουσα ή τη μελλοντική απόκρισή του. Σύμφωνα με αυτό τον ορισμό - θεώρηση η έννοια της βλάβης δεν είναι σημαντική χωρίς τη σύγκριση δύο διαφορετικών καταστάσεων του συστήματος, μία από τις οποίες αντιπροσωπεύει το αρχικό, και συχνά υγιές σύστημα. Η βλάβη μπορεί να οριστεί ανάλογα και να οριοθετηθεί σύμφωνα με τις ιδιότητες των υλικών, τις συννοριακές συνθήκες, την αλλαγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών κ.λπ.

Η συγκέντρωση των δεδομένων που χρειάζονται για τη διαδικασία ελέγχου δομικής ακεραιότητας αφορά τον αριθμό, τη θέση και την επιλογή των τύπων των αισθητήρων που θα χρησιμοποιηθούν, και παράλληλα το μέσο που θα ληφθούν, θα αποθηκευτούν και θα μεταφερθούν τα δεδομένα. Η επιλογή των αισθητήρων όσο αφορά την παρούσα διατριβή είναι ένας πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας, ο οποίος τοποθετείται σε μία δοκό από σκυρόδεμα λαμβάνοντας υπόψη την γεωμετρία της η οποία είναι απλή. Όταν η γεωμετρία του δομικού στοιχείου είναι πιο σύνθετη για την επιλογή των περιοχών που θα τοποθετηθούν οι αισθητήρες, μελετώνται οι αλλαγές στη γεωμετρία του δομικού συστήματος, οι περιοχές συγκέντρωσης των τάσεων, οι περιοχές πιθανής φόρτισης και άλλοι παράγοντες που πιθανώς επηρεάζουν σημαντικά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Επειδή το εξεταζόμενο δομικό στοιχείο είναι σχετικά μικρό η κάλυψη της περιοχής επιτυγχάνεται και με την εφαρμογή ενός μόνο αισθητήρα.

Για τη διάγνωση ενδεχόμενης ή επικείμενης βλάβης αρχικά γίνεται η λήψη των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων (δεδομένων και αποτελεσμάτων). Η επιλογή των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων σχετίζεται με την ανάλυση που είναι κατάλληλη για κάθε περίπτωση. Σε κάποιες περιπτώσεις γίνονται αναλύσεις των πρώτων ιδιομορφών του συστήματος (ιδιομορφική ανάλυση), ή δυναμική ανάλυση, αναλύσεις στο πεδίο του χρόνου ή στο πεδίο των συχνοτήτων. Για τη λήψη των δεδομένων και των αποτελεσμάτων η δυναμική ανάλυση θεωρείται κατάλληλη μέθοδος για την εξαγωγή αποτελεσμάτων που αφορούν τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας αλλά και την διάγνωση ενδεχόμενης ή επικείμενης βλάβης. Για τη διαμόρφωση μίας στατιστικής διαδικασίας αρχικά χρειάζεται να γίνει ο συσχετισμός των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων. Μία νέα τεχνική συσχετισμού δεδομένων και αποτελεσμάτων στο πεδίο συχνοτήτων αποτελούν τα αυτοπαλλινδρούμενα μοντέλα με εξωγενή δεδομένα (FDARX Frequency Domain Auto Regressive model with eXogenous inputs).

5.4.1 Αυτοπαλλινδρούμενα μοντέλα FDARX αναπτυσσόμενα υπό δυναμική ανάλυση για την προσομοίωση της απόκρισης στο πεδίο των συχνοτήτων

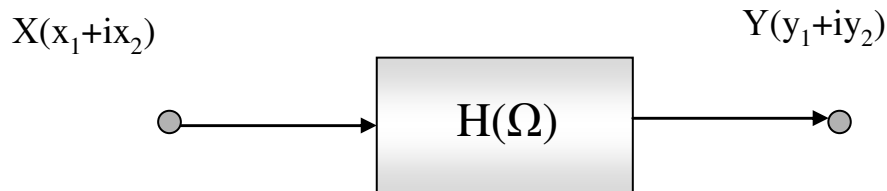
Χαρακτηριστικό γνώρισμα σε μια περιοχή συχνοτήτων είναι το μέγεθος εκείνο που ταυτίζεται με την απόκριση ενός δομικού συστήματος στην περιοχή αυτή. Κατά συνέπεια αυτό θα πρέπει να είναι ευαίσθητο στις αλλαγές που προκαλούνται στο δομικό σύστημα από ενδεχόμενες βλάβες και ταυτόχρονα ανεπηρέαστο από περιβαλλοντικές μεταβλητότητες. Συγκεκριμένα σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιείται η δυναμική ανάλυση σε πεδίο υψηλών συχνοτήτων και ως αποτέλεσμα λαμβάνεται η σύνθετη H/M αγωγιμότητα από το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η βλάβη με στατιστική ακρίβεια και να εξεταστεί η συλλογή των δεδομένων που περιλαμβάνονται στην εξέταση του μεγάλου αριθμού των αποκρίσεων σύνθετης αγωγιμότητας, ερευνάται η χρήση του στατιστικού ελέγχου διαδικασίας με έναν τρόπο εκπαίδευσης χωρίς επίβλεψη “unsupervised”, ο οποίος είναι το πρώτο στάδιο διάγνωσης βλάβης. Σε αυτό το πεδίο της έρευνας υπάρχουν περιορισμένες αναφορές όπως των Sohn and Farrar (2001) και Park et al. (2005). Στις εργασίες αυτές έχει χρησιμοποιηθεί ένα αυτοπαλλινδρούμενο μοντέλο τύπου ARX (Auto-Regressive model with eXogenous input). Στην παρούσα διατριβή προτείνεται το

αυτοπαλινδούμενο μοντέλο FDARX το οποίο δημιουργείται με τη χρήση της συνάρτησης μεταφοράς του συστήματος σε περιβάλλον MATLAB.

Ως πρώτο βήμα για την ανάπτυξη του μοντέλου FDARX είναι η λήψη των αποκρίσεων των δεδομένων της σύνθετης αγωγιμότητας (EMA) κατά την αρχική υγιή κατάσταση του δομικού στοιχείου η οποία ονομάζεται “μέτρηση αναφοράς”. Η μέτρηση αναφοράς ως προς την οποία θα συγκρίνονται, οι μετέπειτα μετρήσεις, προκειμένου να αποφασίζεται εάν απαιτείται περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων για την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς τη δοκιμή ακεραιότητα της κατασκευής. Τα δεδομένα λαμβάνονται σε πεδίο υψηλών συχνοτήτων και με την κατάλληλη αυτοπαλινδρούμενη διαδικασία μέσω του λογισμικού προγράμματος MATLAB υπολογίζονται τα πολώνυμα που περιγράφουν την απόκριση της υγιούς κατάστασης μέσω της συνάρτησης μεταφοράς του συστήματος.

Το γενικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του δυναμικού συστήματος σε περιοχή συχνοτήτων φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Όπου X τα δεδομένα που εισάγονται τα οποία αντιστοιχούν στην τάση διέγερσης του PZT για κάθε συχνότητα κατά τη δυναμική ανάλυση και Y η απόκριση της σύνθετης αγωγιμότητας. Τα X και Y εισάγονται ως μιγαδικά μεγέθη. Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος $H(\Omega)$ δίδεται από τη σχέση 5.2, όπου $\Omega_k = s = i\omega = i2\pi f$ με s ο συντελεστής Laplace.



Σχήμα 5.1 Μοντέλο FDARX (Συνάρτηση μεταφοράς δομικού συστήματος)

Η συνάρτηση μεταφοράς δίδει την πλήρη περιγραφή του δομικού συστήματος, διότι μπορεί να συσχετίσει τα δεδομένα με τα αποτελέσματα με τη μορφή εισόδου – εξόδου του συστήματος. Η απόκριση Y_k που λαμβάνεται ως αποτέλεσμα είναι μιγαδικός αριθμός με γωνιακή συχνότητα Ω_k . Η βασική εξίσωση για το παραμετρικό μοντέλο FDARX για τη απόκριση του συστήματος στη συχνότητα (Ω_k) είναι:

$$Y_k = H(\Omega_k)X_k \quad \text{για } k=1, \dots, f \quad (5.2)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος δίδεται από τον τύπο 5.3α και 5.3β. Το $H(\Omega_k)$ υπολογίζεται από τα πολυώνυμα $N(\Omega_k)$ και $D(\Omega_k)$..:

$$H(\Omega) = \frac{N(\Omega_k)}{D(\Omega_k)} \quad (5.3\alpha)$$

$$H(\Omega) = \delta \frac{b_0\Omega^0 + b_1\Omega^1 + \dots + b_{nn}\Omega^{nn}}{a_0\Omega^0 + a_1\Omega^1 + \dots + a_{ad}\Omega^{nd}} \quad (5.3\beta)$$

Όπου $\delta = e^{-i\omega T_d}$ είναι ο συντελεστής καθυστέρησης και T_d η καθυστέρηση, το διάστημα μεταξύ δύο συνεχόμενων συχνοτήτων.

Οι συντελεστές των πολυωνύμων αυτών και η καθυστέρηση T_d υπολογίζονται με τη χρήση του μαθηματικού λογισμικού της MATLAB και την ρουτίνα FDIDENT και έτσι ελαχιστοποιείται το τελικό σφάλμα πρόβλεψης. Μετά από αυτή την διαδικασία μπορούν να ληφθούν τα πολυώνυμα $N(\Omega_k)$ και $D(\Omega_k)$ ώστε να υπολογιστεί το $H(\Omega_k)$ που χρησιμοποιούνται για την έκφραση της απόκρισης σύνθετης αγωγιμότητας $Y(\omega_k)$.

Το μοντέλο FDARX υπολογίζει τους συντελεστές των πολυωνύμων N και D για την περίπτωση υγιούς κατάστασης, και κατασκευάζει το τελικό πολυώνυμο προσομοίωσης αυτής της κατάστασης. Έτσι στη συνέχεια λαμβάνεται η μετρούμενη απόκριση από μία επόμενη κατάσταση της κατασκευής και με τη χρήση του μοντέλου FDARX υπολογίζεται η διαφορά στην απόκρισή της. Η σύγκριση της προσομοιωμένης απόκρισης από το μοντέλο FDARX και της πραγματικής μετρούμενης απόκρισης για μία υπό διερεύνηση κατάσταση οδηγεί σε ενδεχόμενες διαφορές. Οι διαφορές αυτές προκαλούνται από την ύπαρξη βλάβης και λαμβάνονται ως υπολειμματικά σφάλματα τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως δείκτες βλάβης της ελεγχόμενης κατάστασης της κατασκευής. Η εμφάνιση ακραίων τιμών (outliers) στις διαφορές των αποκρίσεων της κατασκευής (υγιούς και με βλάβη) δηλώνουν τα υπολειμματικά σφάλματα.

Το κριτήριο επιλογής των κατάλληλων ορίων για την σωστή διάκριση των ακραίων σημείων από μια υγιή κατάσταση και μια κατάσταση με βλάβη αποτελεί κρίσιμη διαδικασία κατά τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας. Για τον καθορισμό των κατάλληλων ορίων εμπιστοσύνης που θα διαχωρίσουν την κατάσταση βλάβης από την υγιή υιοθετείται η θεωρία ακραίων τιμών (EVS) για να αναπτυχθεί ένας ισχυρός δείκτης βλάβης. Η χρήση της θεωρίας των ακραίων τιμών φαίνεται να προσομοιώνει με

μεγαλύτερη ακρίβεια την εμφάνιση ακραίων τιμών. Με τη χρήση κανονικών κατανομών όπως είναι η κατανομή κατά Gauss, η μορφή της συνάρτησης κατανομής πιθανοτήτων εμφάνισης μεγίστων και ελαχίστων επειδή μπορεί μην συμπεριλάβει όλες τις ακραίες τιμές και να δώσει αποτελέσματα λανθασμένων ενδείξεων. Η αποφυγή της λάθους εκτίμησης της συνάρτησης κατανομής πιθανοτήτων ακραίων τιμών μπορεί να αντιμετωπιστεί με την θεωρία ακραίων τιμών, (Fasel et al., 2005).

Εάν αλλάξει το φάσμα της δυναμικής απόκρισης του συστήματος, το μοντέλο αναφοράς FDARX δεν μπορεί να προσομοιάσει επαρκώς τη νέα απόκριση, με συνέπεια σημαντικές αποκλίσεις. Τα παραπάνω αντιπροσωπεύουν μια πρωτότυπη εφαρμογή της στατιστικής αναγνώρισης μορφών απόκρισης μηχανικής ταλάντωσης στο πεδίο των συχνοτήτων για την ανίχνευση βλάβης σε δομικά συστήματα.

5.4.2 Κανονική κατανομή κατά Gauss

Η κατανομή του Gauss είναι μία από τις σημαντικότερες κατανομές της θεωρίας των πιθανοτήτων. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κατά Gauss για μια κανονική κατανομή δίδεται από τον τύπο:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

όπου $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ ο συντελεστής κανονικοποίησης, μ ο μέσος όρος των δεδομένων, σ η τυπική απόκλιση. Χρησιμοποιείται για την εξαγωγή αποτελεσμάτων στην οικονομία στην κοινωνιολογία στην βιολογία και στον ποιοτικό έλεγχο των προϊόντων, (Castillo et al., 2005). Πρόσφατα έχει χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό βλαβών σε κατασκευές, (Giurgiutiu and Zagrai, 2000). Λόγω όμως της μορφής των στατιστικά παραγόμενων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων τα οποία ενδεχομένως δεν υπακούν πάντα στην κανονική κατανομή κατά Gauss υιοθετείται η θεωρία ακραίων τιμών για να οριστούν τα κατάλληλα όρια εμπιστοσύνης με περισσότερες πιθανότητες σωστών ενδείξεων, (Park et al., 2004).

5.4.3 Θεωρία ακραίων τιμών

Υπάρχουν τρία βασικά μοντέλα που βασίζονται στις κατανομές ακραίων τιμών Gumbel, Weibull και Frechet, (Fasel et al., 2005), (Sohn et al., 2005), (Worden et al., 2002), τα οποία χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθεί ένα διάστημα εμπιστοσύνης της βέλτιστης λύσης. Η προκληθείσα αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας των μεγίστων των τιμών, τείνει ασυμπτωτικά σε μία από τις τρεις πιθανές κατανομές, (Castillo et al., 2005).

$$\text{Gumbel: } F(x; \lambda, \delta) = \exp \left[-\exp \left(\frac{\lambda - x}{\delta} \right) \right] \quad -\infty < x < \infty \quad \text{και} \quad \delta > 0$$

$$\text{Weibull: } F(x; \lambda, \delta, \beta) = \begin{cases} 1 & \text{για } x \geq \lambda \\ \exp \left[-\left(\frac{\lambda - x}{\delta} \right)^\beta \right] & \text{για } x < \lambda \end{cases}$$

$$\text{Frechet: } F(x; \lambda, \delta, \beta) = \begin{cases} \exp \left[-\left(\frac{\delta}{x - \lambda} \right)^\beta \right] & \text{για } x \geq \lambda \\ 0 & \text{για } x < \lambda \end{cases}$$

όπου λ, δ και β είναι οι παράμετροι του μοντέλου (θέση-παράμετρος τοποθεσίας, αναλογία-τυπική απόκλιση, μορφή-δείκτης ακολουθίας) οι οποίες υπολογίζονται από τα δεδομένα της αρχικής – υγιούς κατάστασης. Ομοίως αναπτύσσονται οι τρεις αυτές κατανομές για τα ελάχιστα. Επιλέγεται η κατάλληλη κατανομή με την εξαγωγή του διάνυσματος των τιμών των μεγίστων. Εάν έχει γραμμική μορφή λαμβάνεται η κατανομή κατά Gumbel. Διαφορετικά, το διάνυσμα θα έχει μια σχετική καμπυλότητα. Εάν σε αυτό το διάνυσμα η καμπυλότητα είναι κοίλη, το διάνυσμα χαρακτηριστικών γνωρισμάτων έχει μια μέγιστη κατανομή κατά Weibull. Ομοίως, εάν η καμπυλότητα είναι κυρτή το διάνυσμα χαρακτηριστικών γνωρισμάτων έχει μια μέγιστη κατανομή κατά Frechet. Οι παράμετροι της κατανομής έπειτα υπολογίζονται προσαρμοζόμενοι στην επιλεγμένη κατανομή των δεδομένων. Για τις κατανομές κατά Frechet και Weibull αρχικά πρέπει να εκτιμηθεί η παράμετρος λ για να υπολογιστούν στη συνέχεια οι παράμετροι δ και β .

Μόλις επιλεχτούν οι παράμετροι της κατανομής, υπολογίζονται τα όρια εμπιστοσύνης που επιλέγονται ανάλογα την κατανομή. Αυτά τα όρια είναι πολύ περισσότερο ακριβή από αυτά που μπορούν να ληφθούν κατά την κατανομή Gauss. Τα κατώτερα όρια που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο όριο εμπιστοσύνης για τις τρεις κατανομές δίδονται από τις ακόλουθες τρεις εξισώσεις:

$$\text{Gumbel: } F(x; \lambda, \delta) = 1 - \exp \left[- \exp \left(\frac{x - \lambda}{\delta} \right) \right] \quad -\infty < x < \infty \quad \text{και} \quad \delta > 0$$

$$\text{Weibull: } F(x; \lambda, \delta, \beta) = \begin{cases} 0 & \text{για } x \leq \lambda \\ 1 - \exp \left[- \left(\frac{x - \lambda}{\delta} \right)^\beta \right] & \text{για } x > \lambda \end{cases}$$

$$\text{Frechet: } F(x; \lambda, \delta, \beta) = \begin{cases} 1 - \exp \left[- \left(\frac{\delta}{\lambda - x} \right)^\beta \right] & \text{για } x \leq \lambda \\ 1 & \text{για } x > \lambda \end{cases}$$

5.4.4 Γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών (Generalized Extreme Value Distribution GEV)

Ο Jenkinson (1955) σύνεστησε ότι οι τρεις προηγούμενες κατανομές μεγίστων και ελαχίστων αντίστοιχα μπορούν να συγχωνευτούν σε μία κατανομή τη “Γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών” (Generalized Extreme Value Distribution GEV). Η συνδυασμένη αυτή κατανομή για το μέγιστο και το ελάχιστο αντίστοιχα δίδεται από τους ακόλουθους τύπους:

Μέγιστο:

$$\bar{\Phi}(x; \mu, \sigma, \gamma) = \exp \left\{ - \left[1 + \gamma \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\gamma} \right\},$$

$$-\sigma - \gamma(x - \mu) \leq 0, \quad \sigma > 0$$

Ελάχιστο:

$$\Phi(x; \mu, \sigma, \gamma) = 1 - \exp \left\{ - \left[1 + \gamma \left(\frac{\mu - x}{\sigma} \right) \right]^{-1/\gamma} \right\},$$

$$-\sigma - \gamma(\mu - x) \leq 0, \quad \sigma > 0$$

όπου μ, σ και γ είναι οι παράμετροι της κατανομής (θέση-παράμετρος τοποθεσίας, αναλογία-τυπική απόκλιση, μορφή-δείκτης ακολουθίας) για την κατανομή GEV αντίστοιχα.

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται η κατανομή GEV, για την στατιστική επεξεργασία των δεδομένων τα οποία είναι τα στατιστικά υπολειμματικά σφάλματα που προκύπτουν από το μοντέλο FDARX. Έτσι υπολογίζονται οι τιμές των ορίων εμπιστοσύνης τα οποία καθορίζουν τις ακραίες τιμές που αν ξεπεραστούν από τις τιμές των υπολογισμένων υπολειμματικών σφαλμάτων δεικνύουν βλάβη στην κατασκευή. Η “γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών” συνδυάζει τις τρεις προαναφερόμενες στατιστικές κατανομές σε μία διαδικασία η οποία επιλέγει την κατάλληλη κατανομή ανάλογα με τη μορφή των δεδομένων επεξεργασίας. Η κατάλληλη κατανομή επιλέγεται αφού κατασκευαστεί η καμπύλη των ακολουθιών των μεγίστων ή ελαχίστων και για την κατανομή κατά Gumbel θα έχει γραμμική μορφή. Διαφορετικά θα έχει σχετική καμπυλότητα και ανάλογα χρησιμοποιείται η κατανομή Weibull ή η κατανομή κατά Frechet. Αν $\gamma > 0$ η γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών αντιστοιχεί στην κατανομή Weibull ενώ αν $\gamma < 0$ στην κατανομή Frechet. Αν $\gamma = 0$ τότε η κατανομή τείνει στην Gumbel η οποία θεωρείται και το γεφύρωμα των κατανομών Frechet και Weibull καθώς το γ τείνει στο 0, $\gamma \rightarrow 0$.

Η γενικευμένη κατανομή ακραίων τιμών σε σχέση με τις κατανομές κατά Frechet, Weibull και Gumbel δίδεται από τους ακόλουθους τύπους για τα μέγιστα:

Frechet:

$$\text{Εάν } \gamma > 0 \quad F(x; \lambda, \delta, \beta) = \Phi(x; \mu, \sigma, \gamma) \quad \mu = \lambda + \delta, \quad \sigma = \frac{\delta}{\beta}, \quad \gamma = \frac{1}{\beta}$$

Weibull:

$$\text{Εάν } \gamma < 0 \quad F(x; \lambda, \delta, \beta) = \Phi(x; \mu, \sigma, \gamma) \quad \mu = \lambda - \delta, \quad \sigma = \frac{\delta}{\beta}, \quad \gamma = -\frac{1}{\beta}$$

Gumbel:

Εάν $\gamma \rightarrow 0$ $F(x; \lambda, \delta) = \Phi(x; \mu, \sigma, \gamma) | \mu = \lambda, \sigma = \delta$

Αντίστοιχα για τα ελάχιστα:

Frechet:

Εάν $\gamma > 0$ $F(x; \lambda, \delta, \beta) = \Phi(x; \mu, \sigma, \gamma) | \mu = \lambda - \delta, \sigma = \frac{\delta}{\beta}, \gamma = \frac{1}{\beta}$

Weibull:

Εάν $\gamma < 0$ $F(x; \lambda, \delta, \beta) = \Phi(x; \mu, \sigma, \gamma) | \mu = \lambda + \delta, \sigma = \frac{\delta}{\beta}, \gamma = -\frac{1}{\beta}$

Gumbel:

Εάν $\gamma \rightarrow 0$ $F(x; \lambda, \delta) = \Phi(x; \mu, \sigma, \gamma) | \mu = \lambda, \sigma = \delta$

5.5 Αριθμητική εφαρμογή ανίχνευσης βλαβών

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα αριθμητικό παράδειγμα ελέγχου δομικής ακεραιότητας και αναγνώρισης βλάβης σε μία δοκό από σκυρόδεμα αναλυτικά με βοήθεια του λογισμικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων COMSOL. Η ανίχνευση των βλαβών επιτυγχάνεται με την εξαγωγή των ηλεκτρομηχανικών χαρακτηριστικών σύνθετης αγωγιμότητας στην επιφάνεια των επιθεμάτων πιεζοηλεκτρικών κεραμικών αισθητήρων. Η απόκριση της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας των πιεζοηλεκτρικών (PZT) εξαρτώμενη από τη συχνότητα συγκρίνεται με την απόκριση της αρχικής δοκού χωρίς βλάβη για να χαρακτηριστεί η κατάσταση της “υπό διερεύνηση” δοκού.

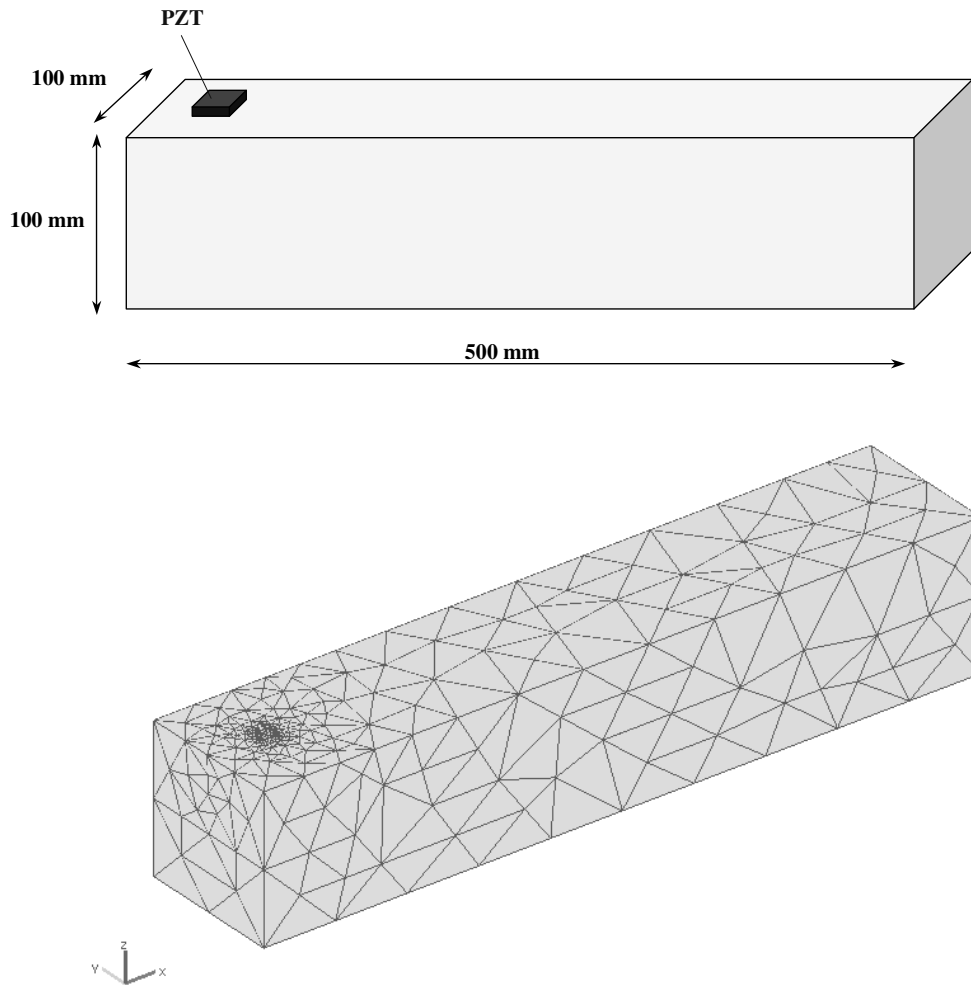
Η προσομοίωση του δομικού συστήματος σε συνδυασμό με τις στατιστικές διαδικασίες ανάλυσης επιτρέπει την προσομοίωση της συμπεριφοράς του δομικού συστήματος, καθώς επίσης και τη διάγνωση της βλάβης λόγω της αλλαγής των δομικών ιδιοτήτων. Κατ’ αρχήν διερευνάται η διαδικασία της αναγνώρισης του συστήματος και του αποτελέσματος του ελέγχου, που βασίζεται στην μέθοδο της σύνθετης αγωγιμότητας με το δείκτη βλάβης RMSD και στη συνέχεια στα πλαίσια στατιστικής διαδικασίας ανίχνευσης ακραίων σημείων. Ο σκοπός αυτής της έρευνας ήταν να δημιουργηθούν τα μαθηματικά μοντέλα των δεδομένων των αποκρίσεων της σύνθετης

αγωγιμότητας και να εξεταστεί η ισχύς και η ακρίβεια της προτεινόμενης τεχνικής ανίχνευσης βλάβης.

Σε αυτήν την τεχνική, ένα πιεζοηλεκτρικό επίθεμα PZT συνδέεται με τη κατασκευή και λαμβάνεται η ηλεκτρομηχανική απόκριση της σύνθετης αγωγιμότητας σε πεδίο υψηλών συχνοτήτων. Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται η γεωμετρία και η διακριτοποίηση της δοκού μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Το δομικό στοιχείο που εξετάζεται είναι μια δοκός διαστάσεων (0.5m, 0.1m, 0.1m). Θεωρείται ότι το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα PZT επικολλάται στην ανώτερη επιφάνεια της ελεγχόμενης δοκού σε μια απόσταση 50mm από το αριστερό άκρο της δοκού όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Πραγματοποιείται ανάλυση απόκρισης συχνοτήτων στο προσομοιωμένο μοντέλο της δοκού που αποτελείται από 2244 πεπερασμένα στοιχεία. Στον Πίνακα 5.1 δίδονται οι ιδιότητες των υλικών του “ευφυούς” δομικού συστήματος.

Πίνακας 5.1: Ιδιότητες των υλικών του δομικού συστήματος

Ιδιότητες υλικών						
Σκυρόδεμα	E (Μέτρο Ελαστικότητας Pa)	ρ (Πυκνότητα Kg/m ³)		ν (Λόγος Poisson)		
	25×10 ⁹	2300		0.33		
PZT	S _E (1/Pa) πίνακας ενδοτικότητας					
	$\begin{bmatrix} 16.5e-12 & -4.78e-12 & -8.45e-12 & 0 & 0 & 0 \\ -4.78e-12 & 16.5e-12 & -8.45e-12 & 0 & 0 & 0 \\ -8.45e-12 & -8.45e-12 & 20.7e-12 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 43.5e-12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 43.5e-12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 42.6e-12 \end{bmatrix}$					
	d (C/N) πίνακας σύζευξης					
	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 741e-12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 741e-12 & 0 & 0 \\ -274e-12 & -274e-12 & 593e-12 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$					
	ε _{rT} σχετική διηλεκτρική σταθερά					
	$\begin{bmatrix} 3130 & 0 & 0 \\ 0 & 3130 & 0 \\ 0 & 0 & 3400 \end{bmatrix}$					
	και ρ=7500 kg/m ³ πυκνότητα					

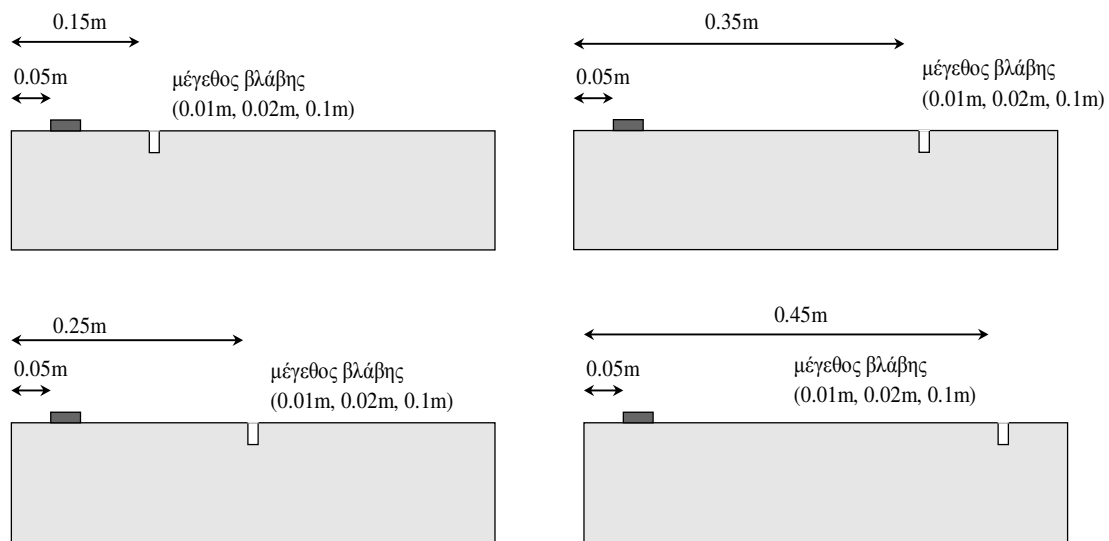


Σχήμα 5.2 Σχηματική διάταξη, γεωμετρικά χαρακτηριστικά και διακριτοποίηση ευφούς δομικού συστήματος

Η λειτουργία του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος γίνεται όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας διατριβής. Στη συνέχεια προσομοιώνονται οι ρωγμές στην ανώτερη επιφάνεια της δοκού υπό την μορφή εγκοπών κάθετα σε όλο το πλάτος της δοκού και σε βάθος 20mm. Η πρώτη προσομοιωμένη ρωγμή εξετάστηκε σε μια απόσταση 150mm από το αριστερό άκρο της δοκού και η τελευταία σε απόσταση 450mm.

Η πρώτη ρωγμή αντιπροσωπεύει την έναρξη της βλάβης ενώ κάθε νέα ρωγμή αντιπροσωπεύει μια νέα κατάσταση βλάβης της εξεταζόμενης δοκού. Συνολικά τέσσερις προκληθέντες καταστάσεις βλάβης αντιπροσωπεύουν τη διαδοχική μετακίνηση της βλάβης. Με αυτό τον τρόπο προσομοίωσης των βλαβών επιτυγχάνεται η παρατήρηση της διαδοχικής αλλαγής της απόκρισης της σύνθετης αγωγιμότητας καθώς η βλάβη πλησιάζει το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα PZT.

Η ανάλυση απόκρισης συχνοτήτων πραγματοποιήθηκε σε ένα φάσμα συχνοτήτων 200000-500000 kHz και σε διαστήματα των 1000 Hz. Σε κάθε κατάσταση βλάβης, το πραγματικό μέρος της σύνθετης αγωγιμότητας λαμβάνεται και συγκρίνεται με την υγιή κατάσταση του δοκιμίου. Η υγιής κατάσταση λαμβάνεται προτού προσομοιωθεί η πρώτη ρωγμή. Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται σχηματικά η διαδοχική αλλαγή της θέσης της βλάβης σε σχέση με την απόσταση x από το αριστερό άκρο της δοκού και κατ' επέκταση από το PZT.



Σχήμα 5.3 Σχηματική προσομοίωση θέσης βλάβης στο δοκίμιο (περιπτώσεις 0.15, 0.25, 0.35, 0.45 m από το αριστερό άκρο της δοκού)

5.5.1 Δείκτης βλάβης RMSD

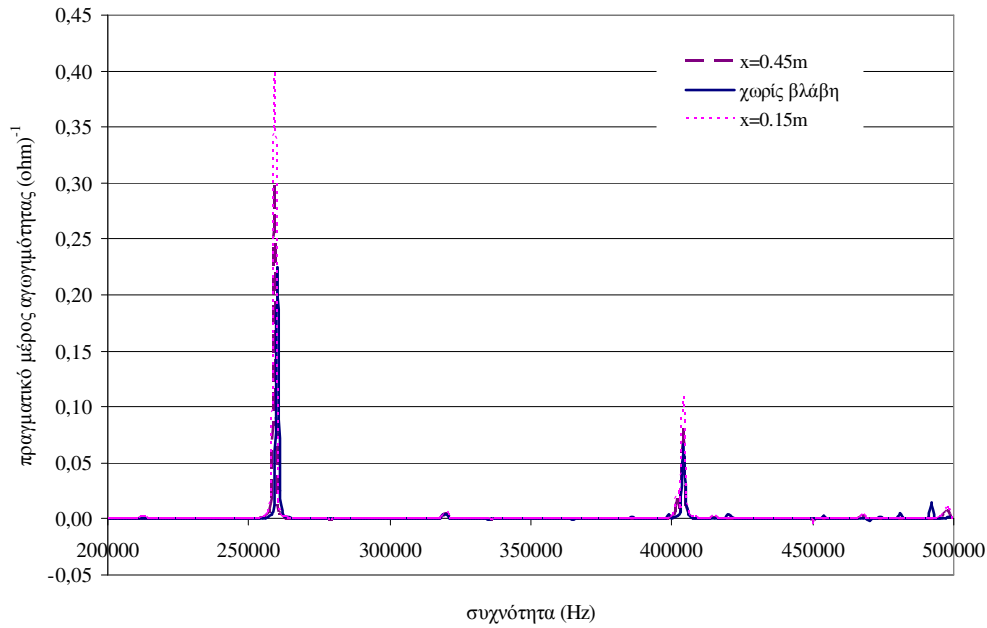
Τα πρώτα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ύπαρξη βλάβης επηρεάζει την απόκριση των φυσικών ιδιομορφικών συχνοτήτων της δοκού όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.2. Παρατηρείται το φαινόμενο της μετάθεσης των ιδιομορφών το οποίο είναι μία πρώτη ένδειξη της ύπαρξης βλάβης στο σύστημα. Οι πρώτες ιδιοσυχνότητες μειώνονται στις περιπτώσεις με βλάβη σε σχέση την αρχική δοκό.

Πίνακας 5.2: Πρώτες τρεις ιδιοσυχνότητες δοκού (φαινόμενο μετάθεσης ιδιοσυχνοτήτων λόγω βλάβης)

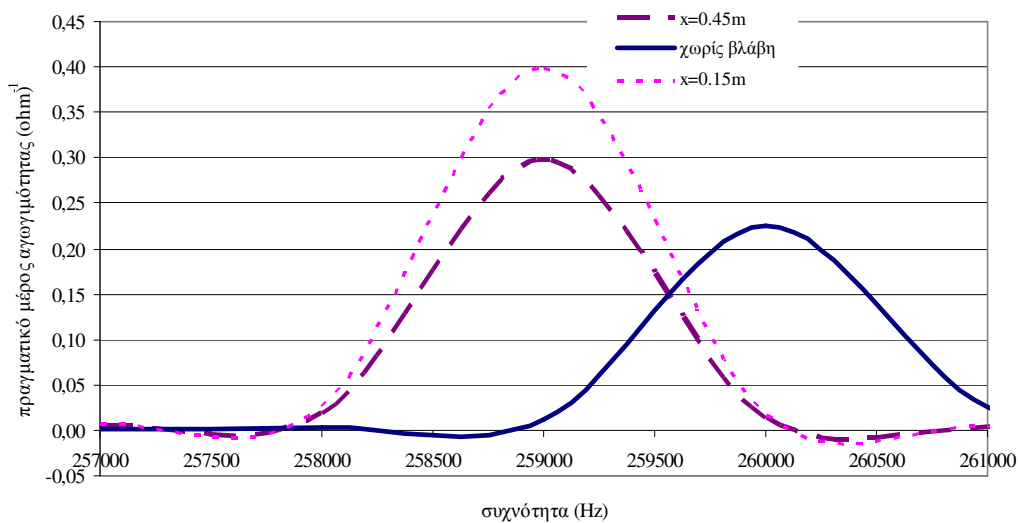
Ιδιοσυχνότητες	Χωρίς βλάβη	Βλάβη σε απόσταση 15cm	Βλάβη σε απόσταση 25cm	Βλάβη σε απόσταση 45cm
1 ^η	1203	1181	1193	1172
2 ^η	2829	2776	2774	2769
3 ^η	3261	3193	3232	3185

Η σύγκριση των αποκρίσεων της σύνθετης αγωγιμότητας μεταξύ της υγιούς κατάστασης και μιας κατάστασης με βλάβη μετά τις αναλύσεις οδηγεί συγκεκριμένα στα ακόλουθα συμπεράσματα. Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η απόκριση του πραγματικού μέρους της σύνθετης αγωγιμότητας στο διάστημα συχνοτήτων 200-500 kHz για τις περιπτώσεις υγιούς δοκού και δοκού με βλάβη. Για την περίπτωση δοκού με βλάβη εξετάζονται αρχικά μία περίπτωση κοντά στο PZT και μία περίπτωση μακριά από το PZT. Η απόκριση της υγιούς κατάστασης εμφανίζει αιχμηρές κορυφές σε κάποιες συχνότητες. Παρατηρείται αύξηση των τιμών των αιχμηρών κορυφών των αποκρίσεων και μετατόπιση τους σε χαμηλότερες συχνότητες στις περιπτώσεις των δοκών με βλάβη.

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η απόκριση του πραγματικού μέρους της σύνθετης αγωγιμότητας στο διάστημα συχνοτήτων 257-261 kHz για τις περιπτώσεις υγιούς δοκού και δοκού με βλάβη όπου μπορεί να παρατηρηθεί το φαινόμενο μετάθεση των συχνοτήτων λόγω της βλάβης σε σχέση με την υγιή δοκό.



Σχήμα 5.4 Απόκριση πραγματικού μέρους σύνθετης αγωγιμότητας στο διάστημα 200-500 kHz

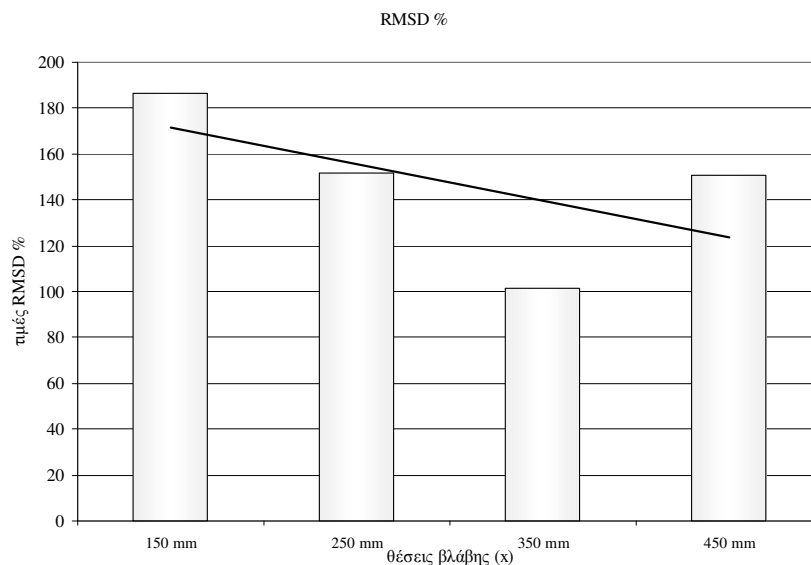


Σχήμα 5.5 Απόκριση πραγματικού μέρους σύνθετης αγωγιμότητας στο διάστημα 257-261 kHz

Οι παραπάνω παρατηρήσεις φαίνεται ότι έχουν άμεση σχέση με την παρουσία της βλάβης και μπορούν να αποτελέσουν πολύ καλούς δείκτες ύπαρξης και έκτασής της. Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιούνται ως δεδομένα για την εφαρμογή του δείκτη βλάβης RMSD. Ο υπολογισμός του δείκτη βλάβης RMSD της εξίσωσης (5.1) αποτυπώνεται για τις τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις βλάβης σε σχέση με την απόκριση της υγιούς κατάστασης (αρχική δοκός) όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6.

Καθώς οι ρωγμές (βλάβες) απομακρύνονται από τον πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα PZT οι τιμές των δεικτών βλάβης RMSD μειώνονται βαθμιαία, αυτό φαίνεται από τη γραμμή γραμμικής συμμεταβολής (τάση) στο Σχήμα 5.6, το οποίο είναι πρωταρχικού ενδιαφέροντος στο χαρακτηρισμό των βλαβών. Επιπλέον, οι μικρές μειώσεις στο δείκτη βλάβης RMSD στην γραμμή τάσης για όλες τις επόμενες ρωγμές μετά από την πρώτη μπορούν να γίνουν κατανοητές από το γεγονός ότι το εύρος των συναφών ελαστικών κυμάτων που παράγονται από τον πιεζοηλεκτρικό PZT αλλοιώνεται μετά που αντιμετωπίζει την πρώτη ρωγμή (βλάβη). Οι ενεργειακές απώλειες οδηγούν στον εντοπισμό του ελαστικού κύματος διάδοσης στην κοντινή περιοχή του πιεζοηλεκτρικού PZT.

Η τιμή του δείκτη βλάβης RMSD για την περίπτωση που η ρωγμή βρίσκεται πολύ κοντά στο PZT είναι 186.44 και μειώνεται σταδιακά καθώς η ρωγμή βρίσκεται μακρύτερα από το PZT. Μπορεί να παρατηρηθεί όμως ότι με την εμφάνιση βλάβης ως ρωγμή σε μια απόσταση 450mm από την άκρη της δοκού, ο δείκτης RMSD έχει μια υψηλή τιμή 150.5. Επομένως, το αποτέλεσμα αυτό δείχνει μια υψηλή ευαισθησία και ότι ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας PZT είναι ευαίσθητος στις βλάβες που βρίσκονται ακόμη και σε μακρινές αποστάσεις. Έτσι επιβεβαιώνεται και η αρχική επιλογή χρήσης μόνο ενός αισθητήρα για το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο.



Σχήμα 5.6 Τιμές RMSD των δοκών σε σχέση με τη θέση της βλάβης και η αντίστοιχη γραμμή τάσης

Σημαντικό μειονέκτημα των δεικτών βλάβης είναι ότι δεν καθορίζονται όρια για το σημείο πέρα από το οποίο υπάρχει σίγουρα βλάβη. Ο δείκτης βλάβης RMSD δεν

έχει άνω όριο στην τιμή που μπορεί να πάρει και εξαρτάται άμεσα από τις ιδιότητες της υπό μελέτη κατασκευής. Επομένως δεν υπάρχει τρόπος να διαχωριστούν οι τιμές του λόγω βλάβης ή περιβαλλοντικής μεταβλητότητας εάν δεν είναι γνωστή η τιμή του έστω και για μια περίπτωση βλάβης. Η ανάγκη ορισμού ορθών ορίων εμπιστοσύνης στις διάφορες αποκρίσεις οδήγησε στη χρήση στατιστικών μεθόδων προσδιορισμού συστημάτων.

5.5.2 Εφαρμογή στατιστικής διαδικασίας εντοπισμού βλάβης

Στην παράγραφο αυτή αναπτύσσεται το μοντέλο FDARX σε συνδυασμό με την θεωρία ακραίων τιμών EVS όπου λαμβάνονται τα αποτελέσματα εντοπισμού βλαβών για τη δοκό από σκυρόδεμα.

5.5.2.1 Αυτοπαλλινδρούμενο μοντέλο FDARX

Η διαδικασία προσομοίωσης συστημάτων βασίζεται στο αυτοπαλλινδρούμενο μοντέλο FDARX σε περιοχή συχνοτήτων με εξωγενή δεδομένα (ARX) που παρέχεται από την επιλογή προσδιορισμού συστημάτων από το “System Identification Toolbox” του λογισμικού προγράμματος MATLAB, (MATLAB, 2006). Με την προσομοίωση της υγιούς κατάστασης του δομικού στοιχείου, επιχειρεί να προβλέψει την απόκριση της αγωγιμότητας (output signal) σε μια συγκεκριμένη συχνότητα βασισμένη στην ημιτονοειδή μορφή τάσης 1 volt (rms) (input signal) που εφαρμόζεται στο PZT.

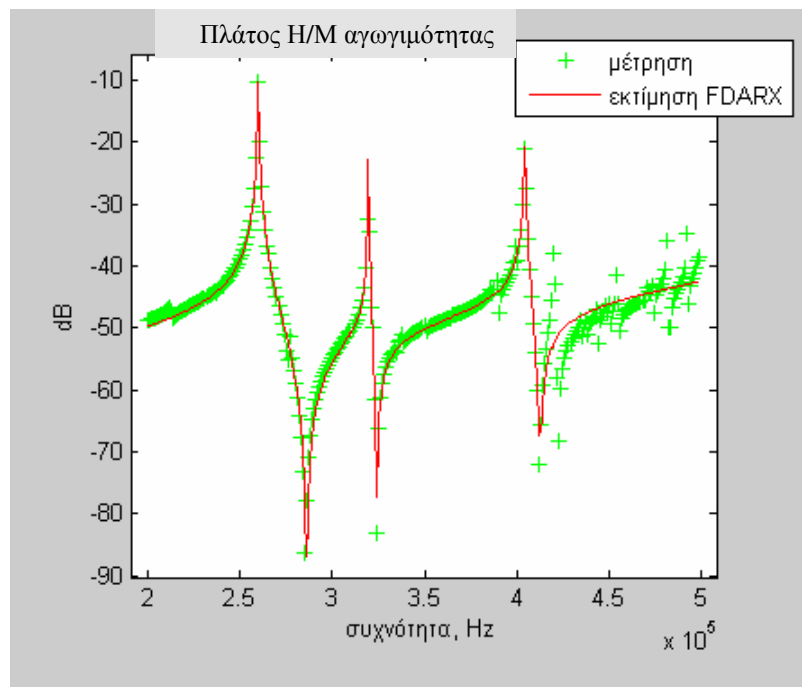
Προκειμένου να προχωρήσει η διαδικασία στατιστικής ανάλυσης η μέτρηση του αρχικού δοκιμίου και το λογισμικό πρόγραμμα προσδιορισμού συστημάτων MATLAB (System Identification Toolbox of MATLAB) χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι παράμετροι του προτεινόμενου αυτοπαλλινδρούμενου μοντέλου με εξωγενή δεδομένα (autoregressive models with exogenous inputs FDARX) για την υγιή κατάσταση. Ως δεδομένα για την κατασκευή του μοντέλου αυτού λαμβάνονται οι αποκρίσεις σε μία περιοχή συχνοτήτων (250000-500000 kHz).

Από αυτό, οι συντελεστές D (s) και N (s) υπολογίζονται από τη σχέση (5.2):

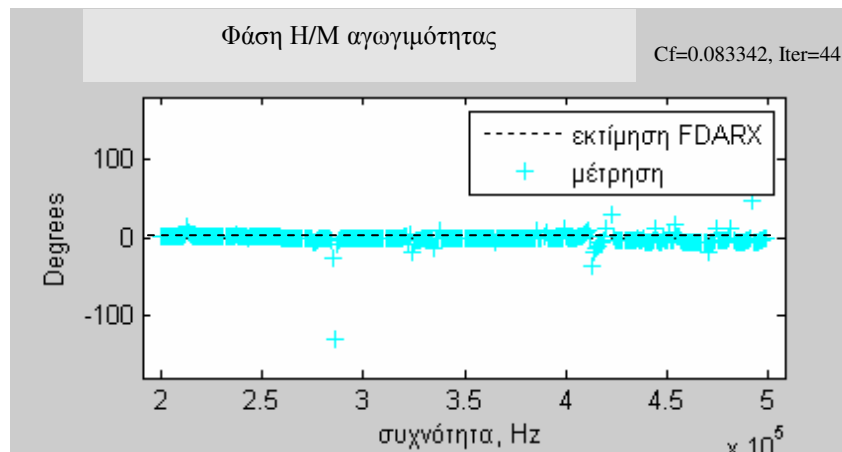
$$D(s) = 1.035e^{-52}s^8 + 8.042e^{-47}s^7 + 3.327e^{-39}s^6 + 1.07e^{-33}s^5 + 3.144e^{-26}s^4 + 4.443e^{-21}s^3 + 1.133e^{-13}s^2 + 5.793e^{-9}s + 0.1365$$

$$N(s) = 9.459e^{-56}s^8 + 2.808e^{-48}s^7 + 1.285e^{-42}s^6 + 3.958e^{-35}s^5 + 5.065e^{-30}s^4 + 1.768e^{-22}s^3 + 3.756e^{-18}s^2 + 2.529e^{-10}s - 7.766e^{-6}$$

Στο Σχήμα 5.7α και 5.7β παρουσιάζονται διαγραμματικά η προσομοίωση του μοντέλου FDARX για το πλάτος απόκρισης της H/M αγωγιμότητας και η φάση της μετρούμενα σε dB. Όπως φαίνεται το μοντέλο FDARX προσεγγίζει πολύ καλά την απόκριση της σύνθετης H/M αγωγιμότητας.



Σχήμα 5.7α Σύγκριση μετρούμενου πλάτους H/M απόκρισης αγωγιμότητας και εκτιμώμενου μοντέλου FDARX



Σχήμα 5.7β Σύγκριση μετρούμενης φάσης H/M απόκρισης αγωγιμότητας και εκτιμώμενου μοντέλου FDARX

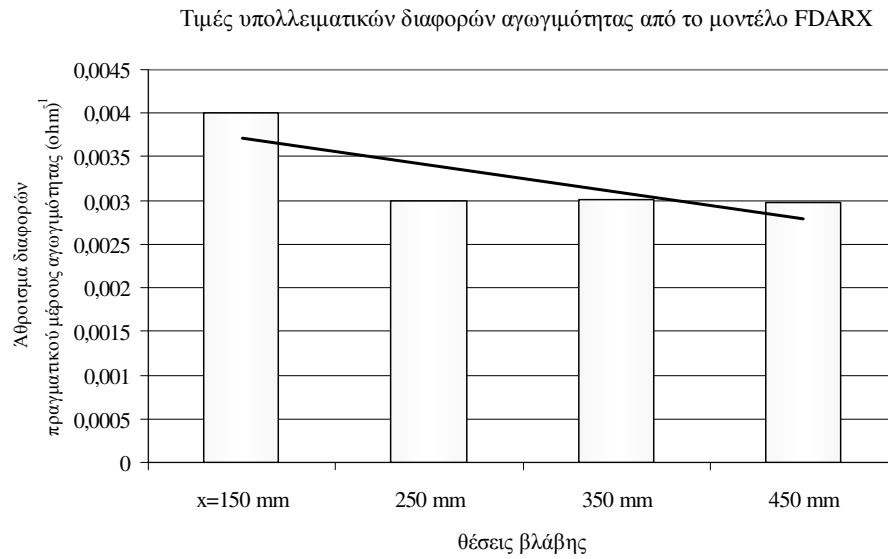
5.5.2.2 Στατιστική θεωρία ακραίων τιμών EVS

Στην απόκριση συχνοτήτων της υγιούς δοκού, υπάρχουν διάφορα ακραία σημεία η επιλογή των οποίων εξαρτάται από τα όρια απόφασης που βασίζονται στη συγκεκριμένη κατασκευή και τον τύπο βλάβης που ερευνάται. Στην παρούσα διατριβή εφαρμόζεται η κατανομή EVS και επιλέγεται διάστημα εμπιστοσύνης 99.5% επειδή παρέχει αποδεκτό ρίσκο.

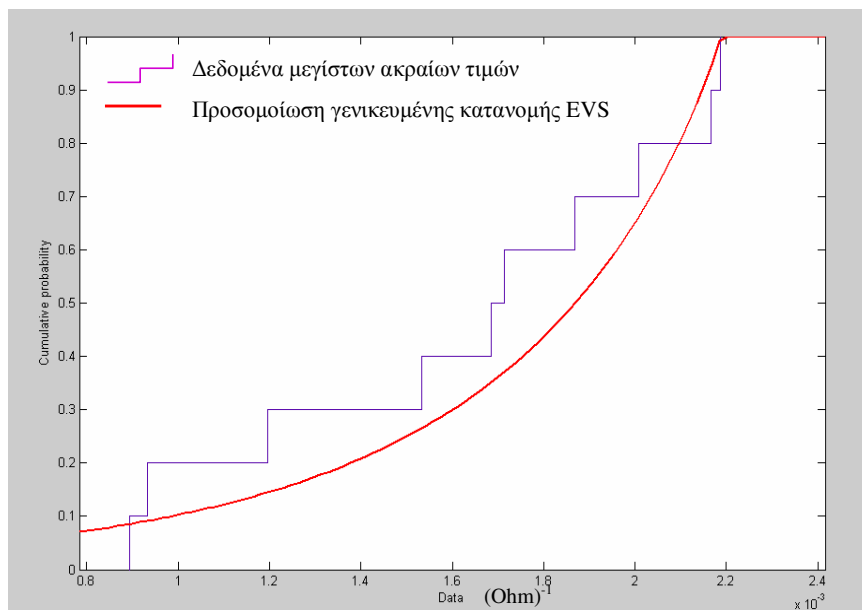
Παρόμοιο παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου αλλά με την χρήση της κατανομής κατά Gauss παρουσιάστηκε στην εργασία των Providakis and Voutetaki (2006) όπου έδειξε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, χωρίς ενδείξεις σφάλματος. Στη συνέχεια επειδή η κατανομή κατά Gauss δεν εκφράζει πάντα επιτυχώς την κατανομή μεγίστων και ελαχίστων στις “ουρές” των ακολουθιών υιοθετήθηκε η κατανομή ακραίων τιμών.

Από την αναπτυσσόμενη συνάρτηση μεταφοράς του μοντέλου FDARX υπολογίζονται οι απόλυτες τιμές των υπολειμματικών σφαλμάτων για κάθε περίπτωση βλάβης και για κάθε εξεταζόμενη συχνότητα, σε σχέση με το αρχικό υγιές. Για κάθε περίπτωση βλάβης αθροίζονται οι απόλυτες τιμές των υπολειμματικών σφαλμάτων δίδοντας μία τιμή. Οι τιμές αυτές για όλες τις περιπτώσεις βλάβης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.8. Ο προτεινόμενος αυτός δείκτης EVS μπορεί να θεωρηθεί ως ένας αρχικός δείκτης βλάβης όπως ο RMSD και όπως μπορεί να παρατηρηθεί η γραμμή τάσης έχει την ίδια κλίση με το δείκτη βλάβης RMSD.

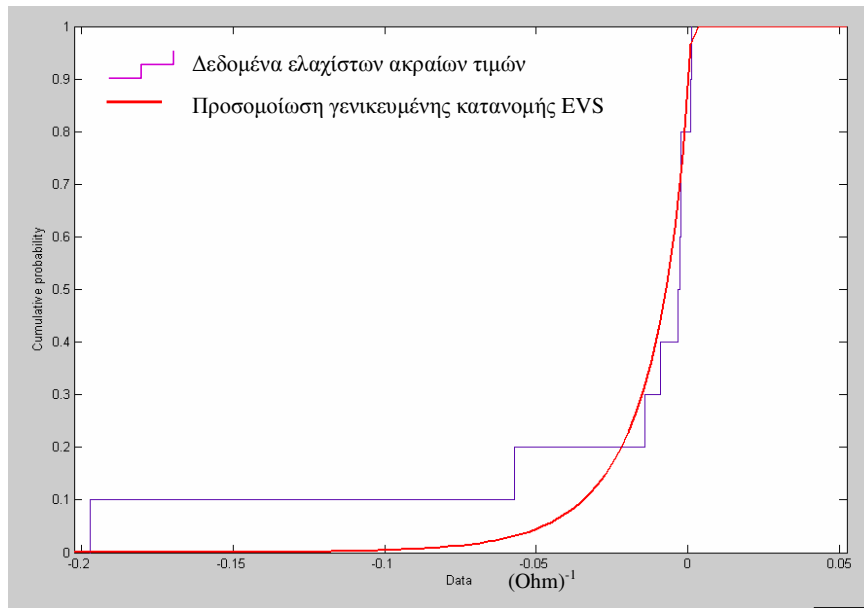
Στα Σχήματα 5.9 και 5.10 παρουσιάζεται η αθροιστική πιθανότητα κατανομής των μεγίστων τιμών και η αθροιστική πιθανότητα κατανομής των ελαχίστων τιμών αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι τα δεδομένα που αντιστοιχούν στην πρώτη περίπτωση με τις υψηλές τιμές στο διάγραμμα έχουν καλύτερη προσαρμογή γιατί οι μέγιστες τιμές των υπολειμματικών σφαλμάτων της υγιούς δοκού δεν παρουσιάζουν ακραία σημεία. Στην δεύτερη περίπτωση οι υψηλότερες τιμές στο διάγραμμα εμφανίζουν καλύτερη προσαρμογή στην κατανομή. Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί οι χαμηλές τιμές σε αυτή την περίπτωση αντιστοιχούν σε σημεία ακραίων τιμών. Και στις δύο περιπτώσεις οι καμπύλες κατανομής είναι με τα κοίλα άνω και με τη χρήση της EVS μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντίστοιχα και η κατάλληλη συνάρτηση κατανομής για να προσομοιάσει τα δεδομένα για κάθε περίπτωση.



Σχήμα 5.8 Τιμές υπολειμματικών διαφορών αγωγιμότητας υπολογισμένες από το μοντέλο FDARX για κάθε περίπτωση βλάβης



Σχήμα 5.9 Αθροιστική πιθανότητα κατανομής EVS μεγίστων τιμών



Σχήμα 5.10 Αθροιστική πιθανότητα κατανομής EVS ελαχίστων τιμών

5.5.2.3 Εκτίμηση ορίων εμπιστοσύνης

Για την εκτίμηση των άνω και κάτω ορίων εμπιστοσύνης από τα δεδομένα των αντίστοιχων κατανομών αθροιστικής πιθανότητας αρχικά θεωρείται ένα διάστημα εμπιστοσύνης. Τα άνω και κάτω όρια ορίζονται βάση της θεώρησης ότι η βλάβη είναι τύπου I, από τη σχέση 5.4, (Worden et al., 2002).

$$100 \times (1 - \alpha) \%, \text{ (με } 0 \leq \alpha \leq 1) \quad (5.4)$$

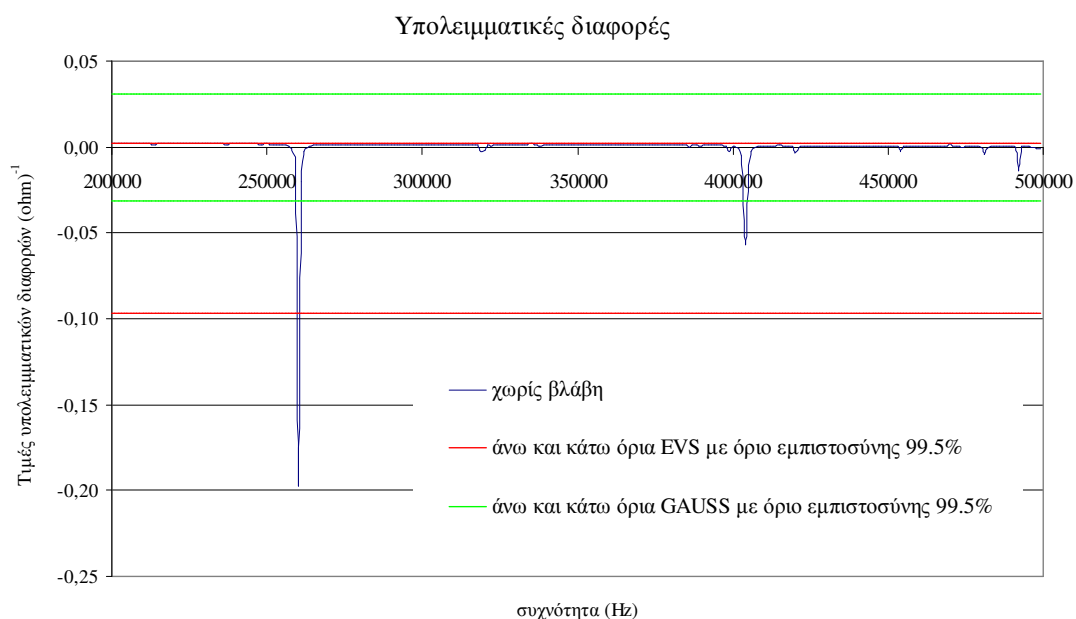
Αυτό σημαίνει ότι $100 \times (1 - \alpha) \%$ των δεδομένων από μία κανονική κατανομή θα πρέπει να βρίσκονται κάτω από τα όρια εμπιστοσύνης. Έτσι $100 \times \alpha \%$ αναμένονται να είναι ακραία σημεία. Συνεπώς τα χαμηλότερα και υψηλότερα όρια του διαστήματος εμπιστοσύνης μπορούν να τεθούν $F^{-1}(\alpha/2)$ και $F^{-1}(1 - \alpha/2)$ αντίστοιχα, όπου $F^{-1}(x)$ είναι το αντίστροφο της αθροιστικής πιθανότητας μιας κατανομής. Αυτό το όριο αντιστοιχεί σε $100 \times (1 - \alpha) \%$ διάστημα εμπιστοσύνης.

Το διάστημα εμπιστοσύνης που ορίζεται στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι το 99.5 %, όπου $\alpha = 0.005$. Για μία περιοχή συχνοτήτων με 300 σημεία λαμβάνοντας τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές από το 10% των σημείων, επιλέγονται 30 σημεία για να κατασκευαστεί η καμπύλη πιθανότητας κατανομής για τα μέγιστα και αντίστοιχα για τα ελάχιστα. Με διάστημα εμπιστοσύνης 99.5%, θα ήταν αναμενόμενο το πολύ ένα (1)

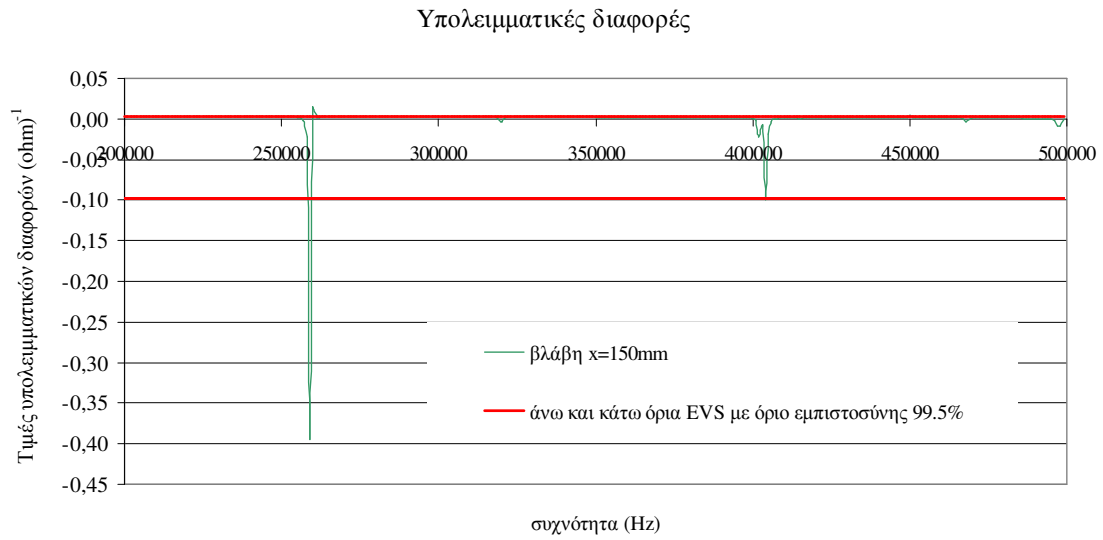
ακραίο σημείο για μία υγιή κατάσταση πέρα από το διάστημα εμπιστοσύνης. Στο Σχήμα 5.11 φαίνεται ότι τα εξωτασικά υπολειμματικά σφάλματα για την υγιή κατάσταση είναι 1 ακραίο σημείο πέρα από το διάστημα εμπιστοσύνης 99.5% ενώ για τις καταστάσεις βλάβης είναι πάνω από ένα ακραίο σημείο πέρα από το ανώτερο και κατώτερο διάστημα εμπιστοσύνης 99.5% .

Στο Σχήμα 5.11 φαίνεται η απόκριση των υπολειμματικών σφαλμάτων για την περίπτωση της υγιούς δοκού. Έχουν οριστεί τα όρια εμπιστοσύνης με την EVS (κάτω όριο:-0,097041, άνω όριο: 0,002186) και κατά Gauss (κάτω όριο:-0,0311354, άνω όριο: 0,0311354). Μπορεί να παρατηρηθεί ότι κατά την κατανομή κατά Gauss εμφανίζονται δύο ακραία σημεία για την υγιή δοκό που σημαίνει σφάλμα θετικής ένδειξης βλάβης (ένδειξη βλάβης ενώ δεν υπάρχει βλάβη). Ενώ με τη χρήση της EVS τα όρια παρέχουν σωστές εκτιμήσεις, δηλαδή ένα ακραίο σημείο το οποίο είναι αποδεκτό για το διάστημα εμπιστοσύνης 99.5%.

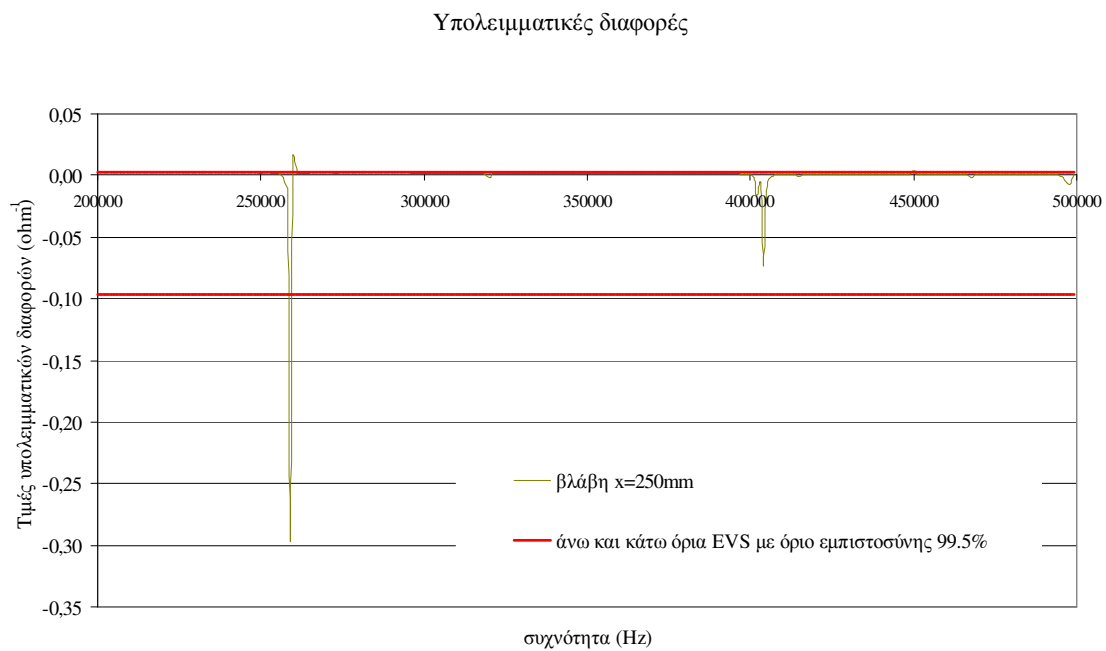
Με τη χρήση της EVS παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.12, 5.13, 5.14 και 5.15 οι αποκρίσεις των υπολειμματικών σφαλμάτων για τις περιπτώσεις με βλάβη, στις θέσεις 0.15m, 0.25m, 0.35m και 0.45m αντίστοιχα. Για την πιο κοντινή περίπτωση ($x=0.15m$) παρατηρούνται τέσσερα ακραία σημεία το οποίο κρίνεται αναμενόμενο λόγω της πολύ κοντινής θέσης της βλάβης στο PZT. Για τις υπόλοιπες καταστάσεις βλάβης εντοπίζονται τρία ακραία σημεία που οδηγούν στην απόφαση ότι υπάρχει βλάβη.



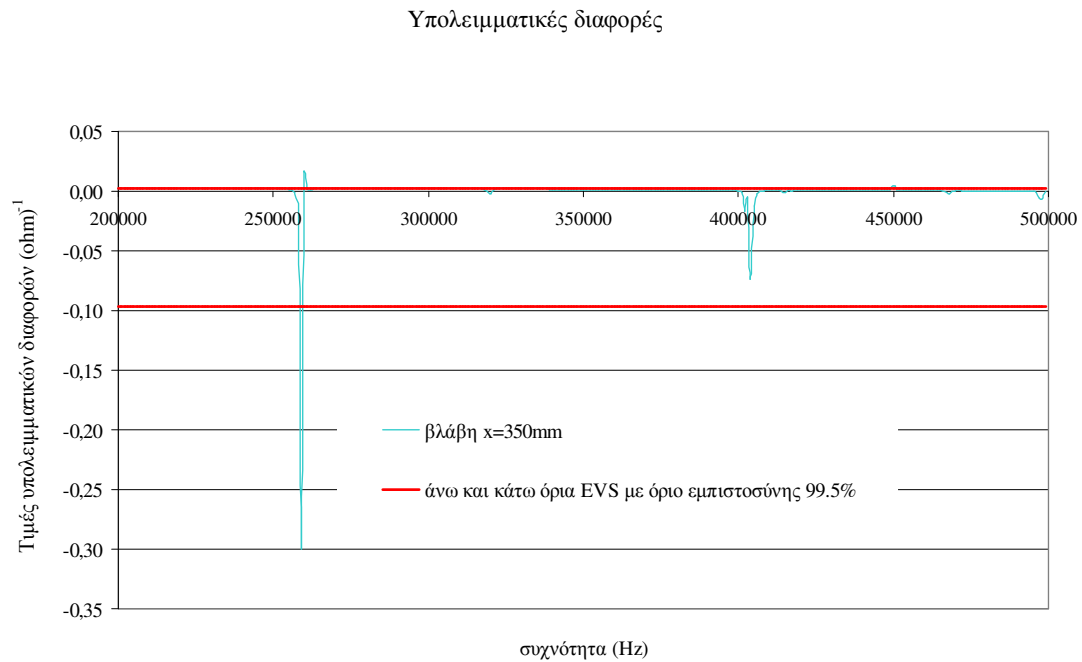
Σχήμα 5.11 Τιμές υπολειμματικών διαφορών πραγματικού μέρους αγωγιμότητας σε σχέση με τη συχνότητα για την υγιή δοκό



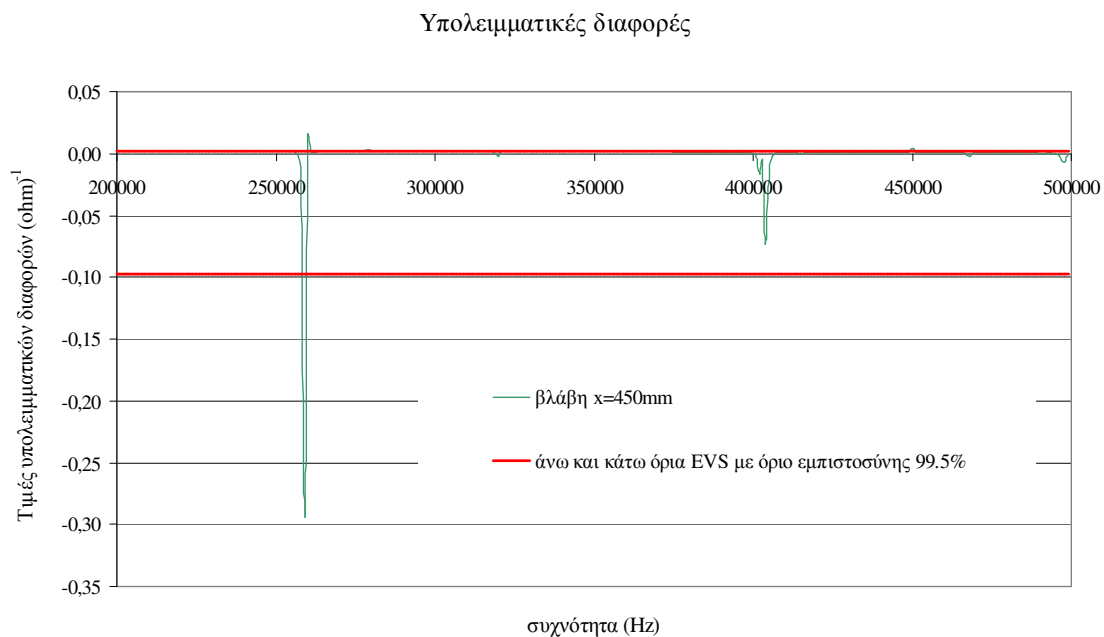
Σχήμα 5.12 Τιμές υπολειμματικών διαφορών πραγματικού μέρους αγωγιμότητας σε σχέση με τη συχνότητα για τη δοκό με βλάβη, $x=0.15\text{m}$



Σχήμα 5.13 Τιμές υπολειμματικών διαφορών πραγματικού μέρους αγωγιμότητας σε σχέση με τη συχνότητα για τη δοκό με βλάβη, $x=0.25\text{m}$

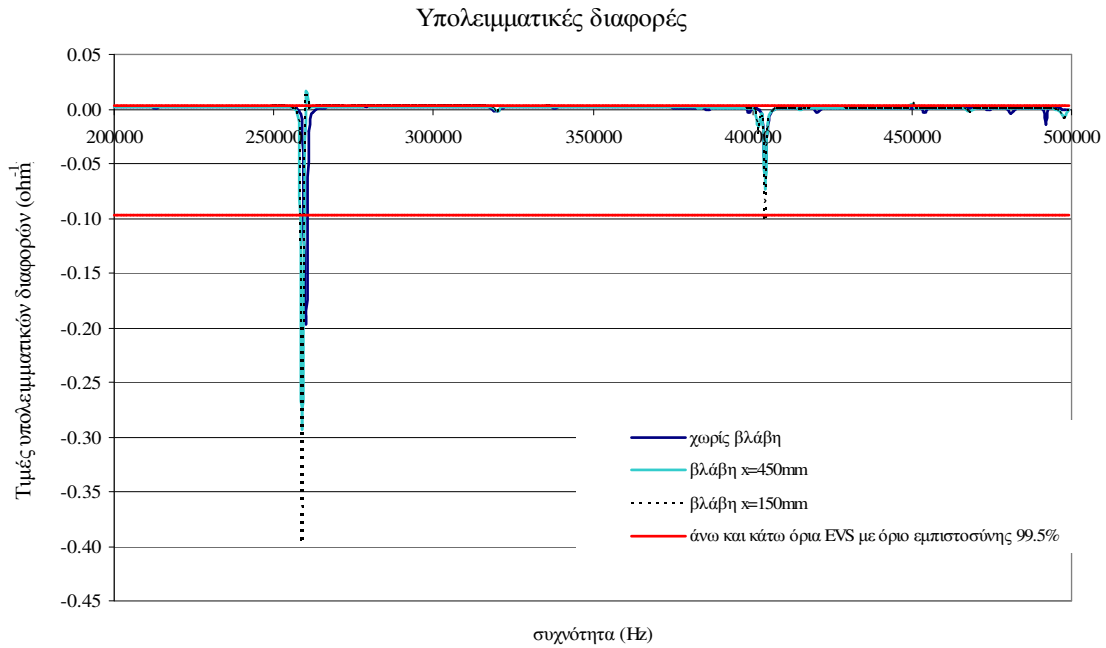


Σχήμα 5.14 Τιμές υπολειμματικών διαφορών πραγματικού μέρους αγωγιμότητας σε σχέση με τη συχνότητα για τη δοκό με βλάβη, $x=0.35\text{m}$



Σχήμα 5.15 Τιμές υπολειμματικών διαφορών πραγματικού μέρους αγωγιμότητας σε σχέση με τη συχνότητα για τη δοκό με βλάβη, $x=0.45\text{m}$

Στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται οι αποκρίσεις της υγιούς δοκού και των δοκών με βλάβη της πιο κοντινής και πιο μακρινής περίπτωσης.



Σχήμα 5.16 Τιμές υπολειμματικών διαφορών πραγματικού μέρους αγωγιμότητας σε σχέση με τη συχνότητα συγκριτικά για την υγιή δοκό τη δοκό με βλάβη $x=0.15m$ και δοκό με βλάβη $x=0.45m$

Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι τα αποτελέσματα της υγιούς κατάστασης είναι πολύ καλά, δηλαδή δεν εμφανίζεται παραπάνω από ένα ακραίο σημείο για να δεικνύει βλάβη.

Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να θεωρηθεί κυρίως ποσοτική προσέγγιση για την ανίχνευση των υγιών και με βλάβη καταστάσεων. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στον αριθμό των ακραίων σημείων μέσα ή κάτω από τα όρια ελέγχου. Με τη χρήση του μαθηματικού λογισμικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, απλοποιήθηκε αρκετά και πραγματοποιήθηκε αποδοτικά η διαδικασία προσδιορισμού του συστήματος και αναγνώρισης των βλαβών.

Η χρήση του μοντέλου FDARX φαίνεται να μπορεί να προσομοιάσει ικανοποιητικά την απόκριση ενός δομικού στοιχείου σε μία περιοχή συχνοτήτων. Για την ανάλυση της τρέχουσας κατάστασης της δομικής ακεραιότητας ενός συστήματος αλλά και για την πρόβλεψη της δομικής συμπεριφοράς του σε διάφορες καταστάσεις βλάβης είναι σημαντικό να κατασκευαστεί ένα ακριβές λεπτομερές παραμετρικό μοντέλο FDARX. Συγχρόνως με την θεωρία ακραίων τιμών EVS βελτιώνεται η αξιοπιστία της μεθόδου ορίζοντας ένα στατιστικό πλαίσιο εντοπισμού βλαβών σε δομικά στοιχεία. Το πλεονέκτημα της θεωρίας των ακραίων τιμών είναι ότι με τη χρήση

της απαιτούνται μόνο δεδομένα από την αρχική – υγιή κατάσταση του δομικού στοιχείου με τα οποία ορίζονται τα κατάλληλα όρια εμπιστοσύνης.

Με αυτή τη διαδικασία ελέγχου δομικής ακεραιότητας προτείνεται η χρήση του χαρακτηριστικού γνωρίσματος των ηλεκτρομηχανικών αποκρίσεων σύνθετης αγωγιμότητας σε συνδυασμό με τη στατιστική μεθοδολογία και αποδεικνύεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά στην ανίχνευση βλάβης σε μια κατασκευή πέρα από τις παραδοσιακές προσεγγίσεις ελέγχου δομικής ακεραιότητας (Structural health monitoring SHM).

Με την παραπάνω μεθοδολογία πραγματοποιήθηκε αποτελεσματικά η διάγνωση της βλάβης σε μία δοκό από σκυρόδεμα. Η διαδικασία αυτή απαντά στο ερώτημα αν υπάρχει ή όχι βλάβη στο δομικό στοιχείο και δεν μπορεί να δώσει λεπτομερείς πληροφορίες για τη θέση και την έκτασή της. Για την ταυτοποίηση της βλάβης συνεχίζεται η διαδικασία με την αναλυτική μέθοδο ταυτοποίησης βλαβών.

5.6 Εισαγωγή στην αναλυτική μέθοδο ταυτοποίησης βλαβών

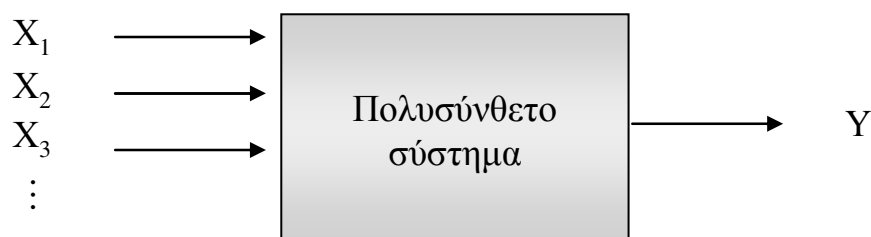
Η τεχνική της H/M σύνθετης αγωγιμότητας σε συνδυασμό με τη στατιστική διαδικασία υλοποιήθηκε επιτυχώς σύμφωνα με το προηγούμενο αριθμητικό παράδειγμα της παρούσας διατριβής. Αυτές οι μετρήσεις, αν και αποτελεσματικές στην ανίχνευση της βλάβης, δεν καταφέρνουν να συσχετίσουν τις αλλαγές στην απόκριση της σύνθετης αγωγιμότητας ώστε να πληροφορήσουν για τη θέση και τη σοβαρότητα της βλάβης με σκοπό την ταυτοποίησή της. Ωστόσο, σε αυτή την έρευνα η ύπαρξη βλάβης ανιχνεύεται από τις αλλαγές στη χαρακτηριστική απόκριση της σύνθετης αγωγιμότητας. Ο εντοπισμός της θέσης και ο προσδιορισμός του βαθμού της βλάβης σε ένα δομικό στοιχείο είναι απαραίτητα για να πραγματοποιηθεί εν συνεχεία η επιδιόρθωσή της. Στην παρούσα διατριβή αναπτύσσεται μία αναλυτική μέθοδος ταυτοποίησης της βλάβης, ώστε εκτός από την παρουσία της να μπορεί να ταυτοποιηθεί η θέση και η έκτασή της. Η μέθοδος που αναπτύσσεται βασίζεται επίσης στη μέθοδο EMA κατά την οποία γίνεται προσπάθεια να προβλεφθεί η θέση και η σοβαρότητα της βλάβης.

Ένα δυναμικό σύστημα στο οποίο υπάρχει βλάβη διαφέρει από το ίδιο δυναμικό σύστημα το οποίο όμως εμπεριέχει διαφορετικού τύπου βλάβη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι αποκρίσεις της H/M αγωγιμότητας να διαφέρουν για τις διαφορετικές περιπτώσεις βλάβης. Η μεθοδολογία ταυτοποίησης της βλάβης με τη μέθοδο EMA

διαμορφώνεται με την χρήση στατιστικών μεθόδων που βασίζονται στην θεωρία σχεδιασμού πειραμάτων, (Providakis and Voutetaki, 2007b).

5.6.1 Θεωρία σχεδιασμού πειραμάτων

Ο σχεδιασμός πειραμάτων (Design of Experiment DoE) ως επιστημονικό μέσο βελτίωσης ενός αποτελέσματος ή μίας διαδικασίας έχει καθιερωθεί και αναλυθεί σε πολλές εργασίες, με κυριότερες των Box et al. (1978), Box and Behnken (1960a), Montgomery (1997). Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται διαγραμματικά η λειτουργία της θεωρίας του σχεδιασμού πειραμάτων. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.17, η θεωρία αυτή στοχεύει στην κατανόηση της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών εισόδου (παράγοντες ή παράμετροι) $X_1, X_2, \dots, X_n$, και της μεταβλητής ή της απόκρισης Y στην έξοδο ενός Πολυσύνθετου Συστήματος, το οποίο θα μπορούσε να αντιπροσωπεύσει ένα αποτέλεσμα ή μια διαδικασία. Όταν διερευνηθεί η σχέση δεδομένων εισόδου και της απόκρισης, μπορεί να γίνει εφικτή η μεταβολή των χαρακτηριστικών της απόκρισης Y με τον κατάλληλο χειρισμό των μεταβλητών εισαγωγής – δεδομένων $X_1, X_2, \dots, X_n$. Ο σχεδιασμός πειραμάτων επιτρέπει τον έλεγχο των πιθανών σημαντικών παραγόντων $X_1, X_2, \dots, X_n$, που συμβάλουν στο χαρακτηρισμό ή την απόκριση της μεταβλητής του πειράματος (Y).



Σχήμα 5.17 Πλαίσιο του σχεδιασμού πειραμάτων

Ο στατιστικός σχεδιασμός πειραμάτων είναι η επιστήμη η οποία εξασφαλίζει το μέγιστο δυνατό ποσό πληροφοριών για ένα δυναμικό σύστημα με το μικρότερο αριθμό πειραμάτων (ή προσομοιώσεων) (Goh, 2001). Η επιστήμη των υπολογιστών έχει δώσει κίνητρα για μία σειρά από περίπλοκους μαθηματικούς υπολογισμούς οι οποίοι εκτελούνται αρκετά γρήγορα ακόμη και για περίπλοκες αναλύσεις. Με βάση αυτό το είδος της ανάλυσης, γίνεται εφικτή η βελτιστοποίηση μιας διαδικασίας θέτοντας

σχεδιαστικά όρια στην απόκρισή της. Ο σωστός σχεδιασμός των ορίων σε κάθε περίπτωση πρέπει να επιλέγεται ανάλογα με το κύριο αντικείμενο του προβλήματος που είναι υπό έρευνα. Ο σχεδιασμός έχει ως κύριο στόχο να επιλέγει αποτελεσματικά τον κατάλληλο αριθμό συντελεστών που ελέγχουν πραγματικά το δυναμικό σύστημα και συντελούν στην απόκρισή του. Τυπικά, πολύ-παραγοντικοί ή απλώς κλασματικοί συντελεστές σχεδιασμού χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν ταυτόχρονα κύρια αποτελέσματα και αλληλεπιδράσεις. Κύρια αποτελέσματα είναι οι αποκρίσεις εξόδου Y και αλληλεπιδράσεις είναι οι επιδράσεις μεταξύ των δεδομένων εισόδου.

Όταν κάποιοι από τους συντελεστές έχουν δευτέρου βαθμού και πάνω σχέση με κάποιες αποκρίσεις, υλοποιείται ένα στάδιο βελτιστοποίησης. Αυτή η βελτιστοποίηση χρησιμοποιεί προσεγγίσεις επιφανειών απόκρισης μετα-μοντέλων, όπως ο κεντρικά σύνθετος σχεδιασμός (CCD), ο D-optimal και ο σχεδιασμός των Box-Behnken (BBD).

Ως μετα-μοντέλο ορίζεται το “προσεγγιστικό” μοντέλο το οποίο έχει προκύψει με στόχο να δίνει γρήγορα αποτελέσματα. Το μετα-μοντέλο έχει την δυνατότητα να “εκτελείται” γρηγορότερα σε σχέση με ένα μοντέλο περισσότερο λεπτομερές, γιατί έχει μειωμένα ή αλλιώς “συμπυκνωμένα” κάποια σημαντικά αξιολογήσιμα χαρακτηριστικά και θα μπορούσε να εννοηθεί και ως στατιστικά παραγόμενο μοντέλο.

Η τεχνική μετα-μοντέλων επιφανειών απόκρισης που βασίζεται στο σχεδιασμό πειραμάτων, διαδομένη ήδη σε άλλους επιστημονικούς τομείς όπως την επιστήμη του χημικού μηχανικού, η τη φαρμακευτική βιομηχανία κ.λπ. είναι μία στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον ευφυή προσδιορισμό συστημάτων όταν η προσομοίωση και τα φυσικά πειράματα που θα έπρεπε να επιλυθούν είναι ανέφικτα ή οι πηγές των δεδομένων είναι ανεπαρκείς. Η μέθοδος των μετα-μοντέλων επιφανειών απόκρισης βασίζεται επίσης στην μέθοδο της ανάλυσης της διακύμανσης κατά παράγοντες (Analysis of Variance ANOVA). Με τη μέθοδο αυτή επιλέγονται μερικά σημεία σχεδιασμού από το πλήρες παραγοντικό σύνολο (το σύνολο των δεδομένων) τα οποία παρέχουν αποτελεσματικά τις απαραίτητες πληροφορίες για ένα πλήρες διάστημα απόκρισης. Η ανάλυση διακύμανσης κατά παράγοντες (ANOVA) είναι η πρώτη μέθοδος που παρέχει σημαντικά συμπεράσματα αφενός μεν για το αν ένας παράγοντας επηρέασε τα αποτελέσματα της ανάλυσης και, αφετέρου, αν οι παράγοντες εισόδου αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

5.6.2 Στατιστική μέθοδος ανάλυσης της διακύμανσης (Analysis of variance – ANOVA)

Η ανάλυση της διακύμανσης κατά παράγοντες (ANalysis Of VAriance – ANOVA) είναι μία στατιστική μέθοδος με την οποία διασπάται η μεταβλητότητα που υπάρχει σ' ένα σύνολο δεδομένων στις επιμέρους συνιστώσες της με στόχο την κατανόηση της σημαντικότητας των διαφορετικών πηγών προέλευσής της. Στην πραγματικότητα η μέθοδος ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA) περιλαμβάνει μία ομάδα στατιστικών μεθόδων καταλλήλων για την ανάλυση δεδομένων που προκύπτουν από πειραματικούς σχεδιασμούς. Τα δεδομένα ενός δείγματος ανάλογα με την προέλευσή τους διακρίνονται σε παρατηρήσεις (observational sampling) ή σε διαμορφωμένα δεδομένα (designed sampling). Στην πρώτη κατηγορία απλά παρατηρούνται οι τιμές που εμφανίζονται χωρίς να υπάρχει δυνατότητα επέμβασης στις αντίστοιχες μεταβλητές. Οι μεταβλητές αυτές αναφέρονται συνήθως σαν παράγοντες (factors) και μπορούν να είναι είτε ποσοτικές είτε ποιοτικές. Οι χαρακτηριστικές τιμές του παράγοντα που προσδιορίζονται στο πείραμα λέγονται επίπεδα (levels). Αντίθετα στη δεύτερη κατηγορία γίνεται προσπάθεια να ελεγχθούν τα επίπεδα μίας ή περισσότερων ανεξάρτητων (independent) μεταβλητών προκειμένου να προσδιοριστεί η επίδραση που ασκούν στην υπό μελέτη μεταβλητή που καλείται εξαρτημένη απόκριση Y (dependent response). Επίπεδο μιας ανεξάρτητης μεταβλητής ορίζεται το ποσοστό συμμετοχής της μεταβλητής στην επίδραση της εξαρτημένης απόκρισης Y. Το ποσοστό αυτό κατά τον σχεδιασμό συμμετέχει με συγκεκριμένες βαθμίδες δύο τριών ή και παραπάνω συνεχόμενων διαβαθμίσεων. Συνήθως ορίζονται τα πάνω και κάτω όρια της μεταβλητής και μία ενδιάμεση τιμή αυτών των δύο, δηλαδή τρία επίπεδα.

Η στατιστική επεξεργασία που χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή ανήκει στην πρώτη περίπτωση κατά την οποία επιλέγονται βάση συγκεκριμένου σχεδιασμού πειραμάτων οι ανεξάρτητες μεταβλητές και επιδιώκεται η λήψη της απόκρισής τους. Ο σχεδιασμός δεν γίνεται αυθαίρετα αλλά θέτονται κάποιοι κανόνες. Αυτοί οι κανόνες έχουν στόχο να καλυφθούν οι περιοχές των μεταβλητών που ενδιαφέρουν την έρευνα. Ταυτόχρονα χρησιμοποιείται μια μεθοδολογία κανονικοποίησης των μεταβλητών αυτών. Στόχος κάθε στατιστικού πειράματος είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης μίας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών στην απόκριση. Άλλο ένα πλεονέκτημα της μεθόδου ANOVA είναι ότι δίδει τη δυνατότητα εντοπισμού των αποτελεσμάτων της αλληλεπίδρασης μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών. Έτσι για διαφορετικές

περιπτώσεις στις οποίες αλλάζουν οι τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών έχει ως αποτέλεσμα να μην εμφανίζονται αλλαγές στην απόκριση. Με αυτό τον τρόπο έχοντας την επιθυμητή απόκριση μπορεί να γίνει βελτιστοποίηση της χρήσης των ανεξάρτητων μεταβλητών. Με την τεχνική της βελτιστοποίησης η οποία αποτελεί μια αντίστροφη λογική, οι ανεξάρτητες μεταβλητές που μπορούν να προκύψουν από μια απόκριση θα μπορούσαν να ονομαστούν “βελτιστοποιημένες μεταβλητές”.

5.6.3 Μεθοδολογία μοντέλων επιφανειών απόκρισης

Η μεθοδολογία επιφανειών απόκρισης RSM (Response Surface Methodology RSM) αποτελεί μια συλλογή στατιστικών σχεδιασμών και αριθμητικών τεχνικών βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται για να βελτιστοποιήσουν διαδικασίες και αποτελέσματα. Η μεθοδολογία έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως, ειδικά στους τομείς της χημείας και της φαρμακευτικής βιομηχανίας, (Box and Draper, 2007).

Ο σχεδιασμός των πειραμάτων και των επιφανειών απόκρισης βασίζονται στον τρόπο επιλογής αυστηρά συγκεκριμένων σημείων σε ένα διάστημα του σχεδιασμού με σκοπό να αντιπροσωπεύσουν αποτελεσματικά όλα τα πιθανά σημεία του ενδιαφέροντος. Έτσι ως βασικό πλεονέκτημά τους είναι η μείωση των υπολογιστικών ή φυσικών πειραμάτων που είναι απαραίτητα για τη διερεύνηση της απόκρισής τους.

Πολλοί διαφορετικοί τύποι σχεδιασμού έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία οι οποίοι διαφέρουν κυρίως στα σημεία τα οποία επιλέγονται για την αντιπροσώπευση του πλήρους παραγοντικού συνόλου. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι κανένας σχεδιασμός, δεν μπορεί πάντα να δίνει μια τέλεια προσαρμογή, εκτός αν αυτός περιλαμβάνει κάθε πιθανό σημείο του ενδιαφέροντος (πλήρης παραγοντικός). Όλοι οι σχεδιασμοί επιβάλλουν ορισμένους περιορισμούς στη μορφή του μοντέλου που μπορεί να προσαρμοσθεί. Παραμετρικά μετα-μοντέλα μπορούν να προσαρμοστούν στα επιλεγμένα σημεία σχεδιασμού δεδομένων χρησιμοποιώντας μεθόδους παλινδρόμησης με αποτέλεσμα τη δημιουργία πολωνύμων τα οποία να συσχετίζουν τα δεδομένα με τα αποτελέσματα.

Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούν μετα-μοντέλα τα οποία εκπαιδεύονται, ανάλογα με τις αναλύσεις που απαιτούνται για κάθε συγκεκριμένο πρόβλημα. Τα μετα-μοντέλα που εκπαιδεύονται υπό την δυναμική ανάλυση φαίνεται να δίνουν ενθαρρυντικά αποτελέσματα στην αναγνώριση των παραμέτρων των κατασκευών και

κατ' επέκταση βλαβών. Η μέθοδος αντίστροφης αναγνώρισης βλαβών βασίζεται στην ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων μεταξύ δεδομένων και αποτελεσμάτων. Οι άγνωστες παράμετροι της κατασκευής (θέση και επίπεδο βλάβης) εκφράζονται με πραγματικές συνεχής μεταβλητές. Εν συνεχεία πραγματοποιούνται κάποιες πειραματικές δοκιμές οι οποίες αντιστοιχίζονται με τις άγνωστες παραμέτρους της κατασκευής, (Tsompanakis et al. 2008).

Η μέθοδος επιφανειών απόκρισης σε κάποιες περιπτώσεις παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες τεχνικές όπως τα νευρωνικά δίκτυα και με τη χρήση τυπικών μεθόδων υποβάθμισης μοντέλων. Σε σχέση με τα νευρωνικά δίκτυα χρειάζεται πολύ μικρότερο όγκο δεδομένων και σε σχέση με τις άλλες τυπικές μεθόδους μπορεί να επιλύσει μη γραμμικά δυναμικά προβλήματα με λιγότερα δεδομένα, (Cundy, 2002). Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζεται μια συνοπτική σύγκριση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των πιο συνηθισμένων τεχνικών που χρησιμοποιούν μετα-μοντέλα.

Πίνακας 5.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τεχνικών που χρησιμοποιούν μετα-μοντέλα

	Μέθοδοι επιφανειών απόκρισης	Νευρωνικά δίκτυα	Τυπικές μέθοδοι υποβάθμισης μοντέλων
Γραμμικά δυναμικά μοντέλα	Ναι	Ναι	Ναι
Μη-γραμμικά δυναμικά μοντέλα	Ναι	Ναι	Όχι
Δεδομένα που απαιτούνται	Λίγου όγκου	Υψηλού όγκου	Μεσαίου όγκου
Ικανότητα ανίχνευσης βλάβης	Ναι λύνοντας αντίστροφο πρόβλημα	Ναι	Ναι λύνοντας αντίστροφο πρόβλημα

Ο σχεδιασμός πειραμάτων χρησιμοποιεί μοντέλα επιφανειών απόκρισης τα οποία χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε ποικίλα πεδία που σχετίζονται με την επιστήμη των υλικών, (Harmon, 2003), αλλά η εφαρμογή τους στην ταυτοποίηση βλαβών σε κατασκευές δεν έχει διερευνηθεί. Αναφορές από την περιορισμένη βιβλιογραφία σε αυτή την περιοχή με τη χρήση της τεχνικής μοντέλων επιφανειών απόκρισης βρίσκονται στις εργασίες της Cundy, (Cundy, 2003), (Cundy et al., 2003).

5.7 Μεθοδολογία ταυτοποίησης βλαβών με τη θεωρία σχεδιασμού πειραμάτων κατά Box-Behnken

Στην παρούσα διατριβή, αναπτύσσεται μία νέα μεθοδολογία στο πεδίο της έρευνας για τον εντοπισμό βλαβών σε δομικά στοιχεία. Η μέθοδος EMA συνδυάζεται με τη μέθοδο σχεδιασμού πειραμάτων των Box-Behnken και την τεχνική επιφανειών απόκρισης με στόχο την ταυτοποίηση των βλαβών σε δομικά στοιχεία. Περαιτέρω ελέγχεται η αποτελεσματικότητα της χρήσης της προτεινόμενης τεχνικής επιφανειών απόκρισης μετα-μοντέλων με αριθμητικό παράδειγμα.

Η ανάπτυξη των μετα-μοντέλων γίνεται με τη χρήση του στατιστικού πακέτου προγραμμάτων της MATLAB. Στη συνέχεια έχοντας ως δεδομένα τις επιφάνειες απόκρισης δημιουργούνται τα μετα-μοντέλα. Οι επιφάνειες απόκρισης αντιστοιχούν με τα πολυώνυμα που αντιστοιχούν τις ανεξάρτητες μεταβλητές εισόδου με τις εξαρτημένες μεταβλητές εξόδου. Με το συσχετισμό αυτό προκύπτουν σημεία στο χώρο τα οποία είναι δυνατόν όταν ενωθούν να δημιουργήσουν μία επιφάνεια, την επιφάνεια απόκρισης. Κάθε σημείο της επιφάνειας απόκρισης αντιστοιχεί σε ένα σημείο το οποίο είτε ανήκει στο σχεδιασμό, είτε βρίσκεται στην επιφάνεια μετά την ένωση των σημείων του σχεδιασμού. Τα πολυώνυμα από τα οποία προέκυψαν οι επιφάνειες σχεδιασμού επιλύονται αντίστροφα ώστε τα αποτελέσματα να αποδώσουν τη θέση και το μέγεθος της βλάβης. Περαιτέρω η μεθοδολογία αυτή έχει τη δυνατότητα επειδή εξάγει αποτελέσματα υπό μορφή επιφανειών απόκρισης ορισμένα από αυτά να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιστοιχία δεδομένων που δεν έχουν εισαχθεί στην αρχική διαδικασία σχεδιασμού ως “βελτιστοποιημένες τιμές”. Οι “βελτιστοποιημένες τιμές” ανήκουν στην επιφάνεια απόκρισης χωρίς να αποτελούν σημείο σχεδιασμού αλλά προκύπτουν από την ενοποίηση των σημείων σχεδιασμού σε μία ενιαία επιφάνεια. Το απαιτούμενο αυτό αντίστροφο πρόβλημα επιλύεται χρησιμοποιώντας γενικές τεχνικές βελτιστοποίησης πολυωνύμων πραγματοποιούμενες σε περιβάλλον MATLAB, (Henrion and Lasserre, 2006). Οι αποκρίσεις της H/M σύνθετης αγωγιμότητας που είναι απαραίτητες για το σχεδιασμό λαμβάνονται αριθμητικά χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων COMSOL 3.5, (COMSOL, 2006).

5.7.1 Δημιουργία επιφανειών απόκρισης

Η μεθοδολογία βασίζεται στην επαναλαμβανόμενη αλλαγή μίας μεταβλητής του πειράματος και κατόπιν στην εξέταση της επιρροής της μεταβλητής αυτής στην απόκριση. Η τεχνική αυτή είναι περίπλοκη, ειδικά σε ένα πολύ-παραγοντικό σύστημα ή σε ένα σύστημα που κρίνεται σημαντική περισσότερο από μία απόκριση, (Box and Draper, 2007). Ο σχεδιασμός πειραμάτων βασίζεται σε στατιστικές μεθοδολογίες οι οποίες χρησιμοποιούνται για να βελτιστοποιούν τέτοια πολύ-παραγοντικά συστήματα.

Η μεθοδολογία των επιφανειών απόκρισης (Response surface methodology RSM) χρησιμοποιείται για να συμπεριλάβει επιλεκτικά σημαντικούς παράγοντες στη βελτιστοποίηση χωρίς τη χρήση και την ανάγκη για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των πειραματικών δεδομένων. Επιπλέον μπορούν να καθοριστούν, τα επίπεδα εισαγωγής των διαφορετικών ανεξάρτητων μεταβλητών για μία συγκεκριμένη επιθυμητή απόκριση. Η μεθοδολογία επιφανειών απόκρισης (Response surface methodology RSM) περιλαμβάνει ένα σύνολο στατιστικών μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία και την αξιοποίηση του μετα-μοντέλου. Με προσεκτικό σχεδιασμό και ανάλυση των πειραμάτων (προσομοιώσεων), ερευνά να συσχετίσει την απόκριση ή τις μεταβλητές εξόδου με τα επίπεδα ενός αριθμού προβλέψεων των μεταβλητών εισόδου τα οποία τα επηρεάζουν.

Επιτρέπει τον υπολογισμό των επιπέδων των ανεξάρτητων μεταβλητών που επηρεάζουν την απόκριση. Το επίπεδο που υπολογίζεται μέσω της βελτιστοποίησης μπορεί να είναι μεταξύ των συγκεκριμένων βαθμίδων που έχουν αρχικά οριστεί για τον σχεδιασμό. Με αυτό τον τρόπο η μεθοδολογία αυτή επιτρέπει υπολογισμούς που αφορούν μία απόκριση η οποία αντιστοιχεί σε ενδιάμεσα επίπεδα εισαγωγής δεδομένων που δεν ερευνήθηκαν πειραματικά. Λόγω της ικανότητας αυτής δίνεται η ευκαιρία να αλλαχθούν τα επίπεδα εισαγωγής δεδομένων με εμφανή την κατεύθυνση της τιμής του επιπέδου που πρέπει να πάρουν ώστε να μειωθεί ή να αυξηθεί το αποτέλεσμα της απόκρισης. Αποτελεί συνηθισμένη τεχνική σε πλήθος χημικών και βιομηχανικών εφαρμογών, (Ferreira et al., 2007).

Η διαδικασία σχεδιασμού της μεθόδου επιφανειών απόκρισης (Response surface methodology RSM) περιλαμβάνει:

- Σχεδιασμό μιας σειράς πειραμάτων ή προσομοιώσεων για την επαρκή και αξιόπιστη μέτρηση της απόκρισης του ενδιαφέροντος.

- Ανάπτυξη ενός πολυωνυμικού μετα-μοντέλου δευτέρου βαθμού της επιφάνειας απόκρισης με την καλύτερη προσαρμογή.
 - Εύρεση του βέλτιστου συνόλου πειραματικών παραμέτρων που παράγουν μια μέγιστη ή ελάχιστη τιμή της απόκρισης.
 - Αντιπροσώπευση των άμεσων και αλληλεπιδρώντων αποτελεσμάτων των παραμέτρων διαδικασίας μέσω δυσδιάστατων ή τρισδιάστατων απεικονίσεων.
- Εάν θεωρηθεί ότι όλες οι μεταβλητές είναι μετρήσιμες, η επιφάνεια απόκρισης μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k) \quad (5.5)$$

Όπου Y είναι η απόκριση (αποτέλεσμα ή έξοδος) του συστήματος, και X_i οι μεταβλητές που επηρεάζουν την απόκριση που ονομάζονται συντελεστές ή παράγοντες (δεδομένα εισόδου). Ο στόχος είναι να γίνει βελτιστοποίηση της απόκρισης της μεταβλητής Y . Θεωρείται ότι οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι συνεχείς και ελεγχόμενες από τα πειράματα ή προσομοιώσεις με αμελητέα λάθη.

Σαν πρώτο βήμα απαιτείται να βρεθεί μια κατάλληλη διαδικασία προσέγγισης για την πραγματική λειτουργική σχέση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών X_i και της επιφάνειας απόκρισης. Συνήθως το δευτέρου βαθμού μετα-μοντέλο της σχέσης (5.6) χρησιμοποιείται στη μεθοδολογία επιφάνειας απόκρισης.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k b_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (5.6)$$

Όπου $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$ είναι οι συντελεστές δεδομένων εισόδου οι οποίοι επηρεάζουν την απόκριση Y , b_0, b_{ii} ($i=1,2,\dots,k$), b_{ij} ($i=1,2, \dots,k ; j=1,2,\dots,k$) είναι άγνωστες παράμετροι παλινδρόμησης b και ε είναι ένα τυχαίο σφάλμα.

Οι συντελεστές παλινδρόμησης b , οι οποίοι μπορούν να καθοριστούν σε δευτέρου βαθμού μετα-μοντέλο, λαμβάνονται με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Ο αριθμός των παραμέτρων εισαγωγής δεδομένων του δευτέρου βαθμού πολυωνύμου μπορεί να είναι απεριόριστος. Στην περίπτωση όπου συμπεριλαμβάνονται περισσότερα επίπεδα παραμέτρων εισαγωγής δεδομένων σε ένα μοντέλο θα πρέπει να κατασκευαστεί υψηλότερης τάξης μετα-μοντέλο. Δηλαδή όσο περισσότερα επίπεδα ενσωματώνονται

σε ένα σχεδιασμό τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο σχεδιασμός για την ίδια απόκριση σε σχέση με λιγότερα επίπεδα παραμέτρων εισαγωγής δεδομένων για την ίδια απόκριση.

5.7.2 Κανονικοποίηση μεταβλητών

Κατά την εκτέλεση της ανάλυσης επιφάνειας απόκρισης, γίνεται χρήση της κανονικοποίησης. Αυτή η διαδικασία γίνεται έτσι ώστε να συσχετίζονται καλύτερα τα δεδομένα με τα αποτελέσματα με σκοπό την καλύτερη οργάνωση των δεδομένων σε ξεχωριστά και μοναδικά σημεία. Με την κανονικοποίηση τα δεδομένα και τα αποτελέσματα για κάθε προσομοιωμένο πείραμα-ανάλυση που προκύπτει από το σχεδιασμό μπορεί άμεσα να συσχετιστεί με τα επόμενα. Αυτό γιατί για κάθε σημείο θα υπάρχει μία τιμή η οποία ταυτόχρονα θα συσχετίζεται με τα ίδια όρια επιπέδων για τα μέγιστα και τα ελάχιστα για όλα τα σημεία σχεδιασμού. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται μία βάση δεδομένων κατά την οποία υπάρχει ενιαία σημειολογία. Η κανονικοποίηση “κωδικοποιεί” τις τιμές των επιπέδων εισαγωγής δεδομένων μεταξύ των τιμών -1 και +1, συνήθως λαμβάνεται και η ενδιάμεση τιμή 0 προκειμένου να υπάρχει μεγαλύτερη σαφήνεια στην επιρροή των επιπέδων των παραμέτρων με σκοπό τον άμεσο συσχετισμό των αποτελεσμάτων και την άμεση εξαγωγή συμπερασμάτων.

Οι τρεις συνηθισμένες φυσικές τιμές των παραμέτρων εισαγωγής δεδομένων X_i , (αντιστοιχούν σε χαμηλής, μεσαίας τάξης - κεντρικού σημείου, και υψηλής τιμής) οι οποίες ταξινομούνται σε τρία κωδικοποιημένα επίπεδα, x_i , που είναι -1, 0, και +1, αντίστοιχα.

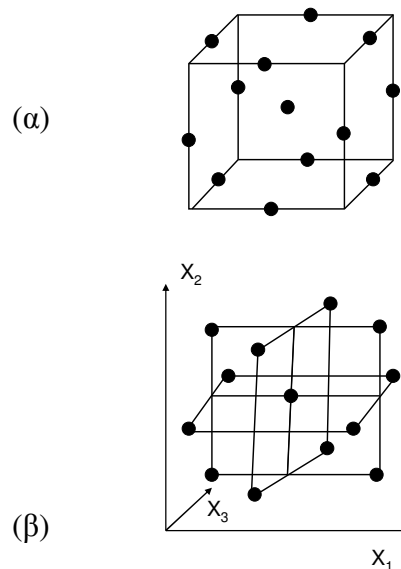
Γενικά, η σχέση μεταξύ των φυσικών X_i και κωδικοποιημένων τιμών x_i παραμέτρων εισαγωγής δεδομένων μπορεί να εκφραστεί ως:

$$x_i = \frac{2 \cdot X_i - (X_i^{\text{MAX}} + X_i^{\text{MIN}})}{(X_i^{\text{MAX}} - X_i^{\text{MIN}})} \quad (5.7)$$

όπου οι όροι X_i^{MIN} και X_i^{MAX} αντιστοιχούν στη χαμηλή και υψηλή φυσική τιμή της i -ης ανεξάρτητης παραμέτρου εισαγωγής δεδομένων και X_i είναι η φυσική τιμή που κωδικοποιημένη αντιστοιχεί στην τιμή x_i .

Μερικοί διαφορετικοί τύποι σχεδιασμού επιφανειών απόκρισης RSM είναι: ο 3-επιπέδος παραγοντικός σχεδιασμός, ο κεντρικός σύνθετος σχεδιασμός, ο σχεδιασμός Box-Behnken, και ο σχεδιασμός D-optimal. Ο σχεδιασμός κατά Box-Behnken, είναι ένας παραγοντικός, ανεξάρτητος, συμμετρικός, κυβικός σχεδιασμός όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.18. Τα διακριτά σημεία επάνω στις ακμές του κύβου αποτελούν σημεία που θα πρέπει να εμπεριέχονται στα πειράματα που θα γίνουν ώστε τα αποτελέσματα να περικλείουν όλα τα πιθανά σημεία του σχεδιασμού μέσα στον κύβο, κατά το σχηματισμό των επιφανειών απόκρισης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.18 υπάρχει ένα κεντρικό σημείο και ενδιάμεσα σημεία στις ακμές. Μπορεί επίσης να θεωρηθεί ότι περιέχει τρεις αλληλοεξαρτώμενους 2^2 παραγοντικούς σχεδιασμούς και ένα κεντρικό σημείο. Κάθε σημείο αποτελεί και ένα πείραμα – προσομοίωση που είναι απαραίτητο για την κατασκευή της επιφάνειας απόκρισης.

Ο σχεδιασμός κατά Box-Behnken απαιτεί έναν αριθμό πειραμάτων (προσομοιώσεων) σύμφωνα με τη σχέση $N=k^2+k+cp$, όπου (k) είναι ο αριθμός των παραγόντων και (cp) ο επαναλαμβανόμενος αριθμός των κεντρικών σημείων. Ο βαθμός του πολωνύμου που θα δημιουργηθεί είναι δευτέρου βαθμού με B συντελεστές. Ο αριθμός των συντελεστών B δίδεται από τον τύπο: $B = \frac{(k+d)!}{k!d!}$ όπου d ο βαθμός του πολωνύμου ο οποίος που είναι συνήθως δευτέρου βαθμού (2).



Σχήμα 5.18: Σχεδιασμός των Box-Behnken (Μοντέλο τριών επιπέδων) (α) ο σχεδιασμός λαμβάνεται από τα διακριτά σημεία στα μέσα των ακμών του κύβου, (β) αναπαράσταση από τρεις 2^2 αλληλοεξαρτώμενους επίπεδους παραγοντικούς σχεδιασμούς

Σε πραγματικές εφαρμογές, όπως έχει ήδη αναφερθεί δεν θα ήταν πρακτικό ή ακόμα μερικές φορές θα ήταν και αδύνατο να κατασκευαστεί πραγματικά ένας μεγάλος αριθμός από κατασκευές με βλάβες, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση πιθανών μετα-μοντέλων. Έτσι αναπτύσσονται υπολογιστικές προσομοιώσεις με την βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με το σχεδιασμό (υπολογιστικών) πειραμάτων των Box και Behnken. Τρεις μεταβλητές εισόδου (περιοχές ενδεχόμενης βλάβης) χρησιμοποιούνται για να κατασκευάσουν τα μοντέλα επιφανειών απόκρισης για να ταυτοποιηθεί η ύπαρξη βλάβης σε ένα δομικό στοιχείο και συγκεκριμένα μία δοκό από σκυρόδεμα.

Ο σχεδιασμός κατά Box-Behnken για τρεις μεταβλητές, οι οποίες διαθέτουν τρία επίπεδα η κάθε μία δίνεται από τον Πίνακα 5.5 με όλους τους αντίστοιχους συνδυασμούς.

Πίνακας 5.5 Συνδυασμοί τρι-επίπεδου σχεδιασμού τριών μεταβλητών κατά Box-Behnken

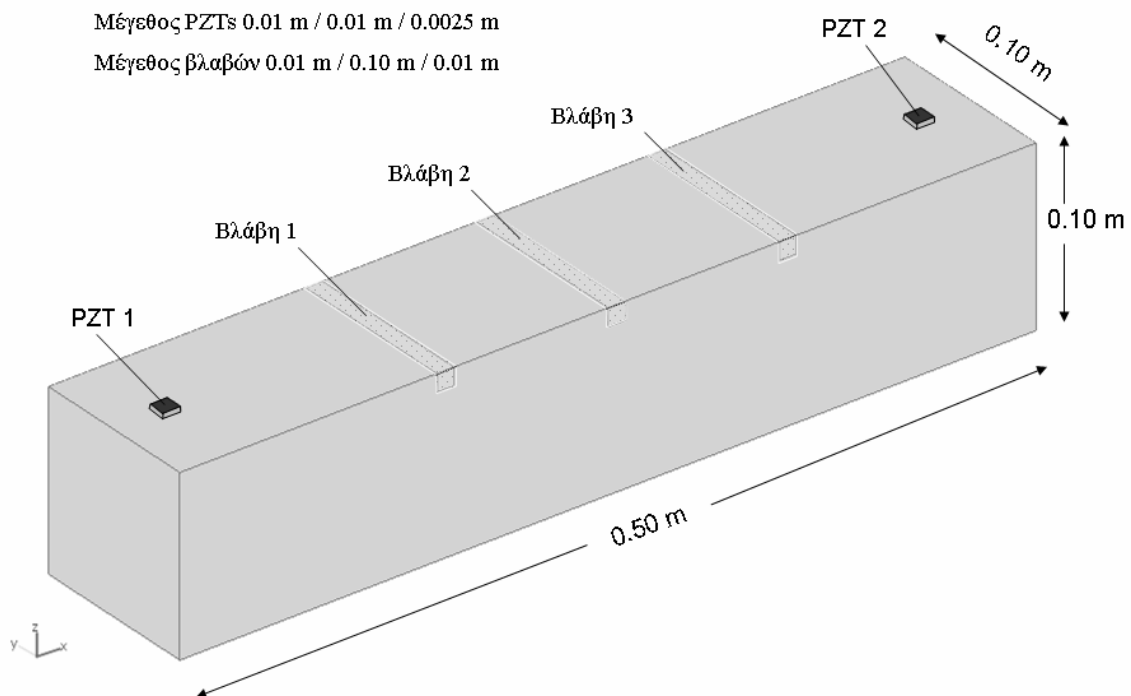
συνδυασμοί	X_1 (βλάβη 1)	X_2 (βλάβη 2)	X_3 (βλάβη 3)
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

Για τρι-επίπεδους σχεδιασμούς με περισσότερες μεταβλητές (παράμετροι εισαγωγής δεδομένων) οι συνοπτικοί πίνακες δίδονται από την εργασία των Box and Behnken (1960b).

5.8 Αριθμητική εφαρμογή ταυτοποίησης βλάβης – ορισμός δομικού συστήματος

Το δομικό στοιχείο που εξετάζεται είναι μία δοκός από σκυρόδεμα (διαστάσεις δοκού 0.1m 0.1m 0.5m) με τρεις προεπιλεγμένες θέσεις - περιοχές βλάβης στην επάνω επιφάνειά της. Για την προσομοίωση της βλάβης λαμβάνονται μειωμένοι συντελεστές δυσκαμψίας στις περιοχές ενδεχόμενης βλάβης της δοκού. Η δοκός είναι πρόβολος με πάκτωση στο αριστερό άκρο της.

Για την αρχική – υγιή δοκό ορίζεται συντελεστής δυσκαμψίας $E=22.5 \times 10^9$ N/m σε όλη την δοκό. Η βλάβη ορίζεται ως ποσοστό του συντελεστή δυσκαμψίας E διανεμημένη κατά μήκος του πλάτους των τρισδιάστατων περιοχών (διαστάσεις περιοχών, 0.01m σε βάθος, 0.01m πάχος) τοποθετημένες σε τρεις προεπιλεγμένες αποστάσεις $D1=150$ mm, $D2=250$ mm και $D3=350$ mm, αντίστοιχα, από το αριστερό άκρο της δοκού όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.19.

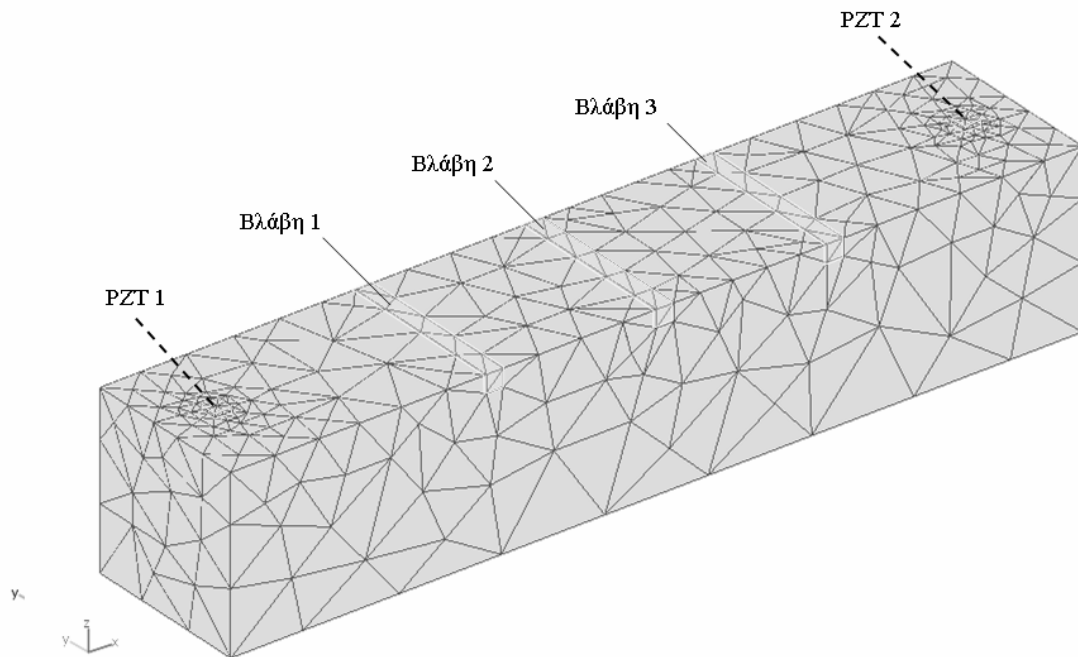


Σχήμα 5.19: Τρισδιάστατο μοντέλο δοκού από σκυρόδεμα με περιοχές βλάβης

Ο αρχικός στόχος στην παρούσα έρευνα ήταν να αναπτυχθούν μετα-μοντέλα επιφανειών απόκρισης που να απομονώνουν την επίδραση των τριών παραμέτρων διαμόρφωσης βλάβης στην απόκριση ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας στην επιφάνεια των πιεζοηλεκτρικών (3-παραγοντικό πείραμα). Δηλαδή βλάβη 1 στην θέση D_1 , X_1 ; βλάβη 2 στην θέση D_2 , X_2 ; βλάβη 3 στην θέση D_3 , X_3 . Τρία διαφορετικά

επίπεδα βλάβης (3-επίπεδο πείραμα) εξετάζονται στην έρευνα αυτή, στην θέση D_1 ($X_1=0\%$, 20% και 40%), στην θέση D_2 ($X_2=0\%$, 20% και 40%) και στην θέση D_3 ($X_3=0\%$, 20% και 40%). Προκειμένου να εφαρμοσθεί η τεχνική της σύνθετης ηλεκτρομηχανικής αγωγιμότητας η δοκός σκυροδέματος διεγείρεται χρησιμοποιώντας δύο πιεζοκεραμικά τρισδιάστατα επιθέματα (διαστάσεων 0.01m 0.01m 0.0025m) το κάθε ένα και τοποθετούνται σε απόσταση 25mm από τα άκρα της δοκού όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Η δυναμική ανάλυση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το λογισμικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων COMSOL 3.3a, (COMSOL, 2006).

Οι ενδεχόμενες περιοχές βλάβης παρουσιάζονται ως χρωματισμένες διακριτοποιημένες περιοχές στην πιο πάνω επιφάνεια του μοντέλου της δοκού στο Σχήμα 5.20. Πραγματοποιείται ανάλυση απόκρισης συχνότητας στο μοντέλο που αποτελείται από 2838 τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία.



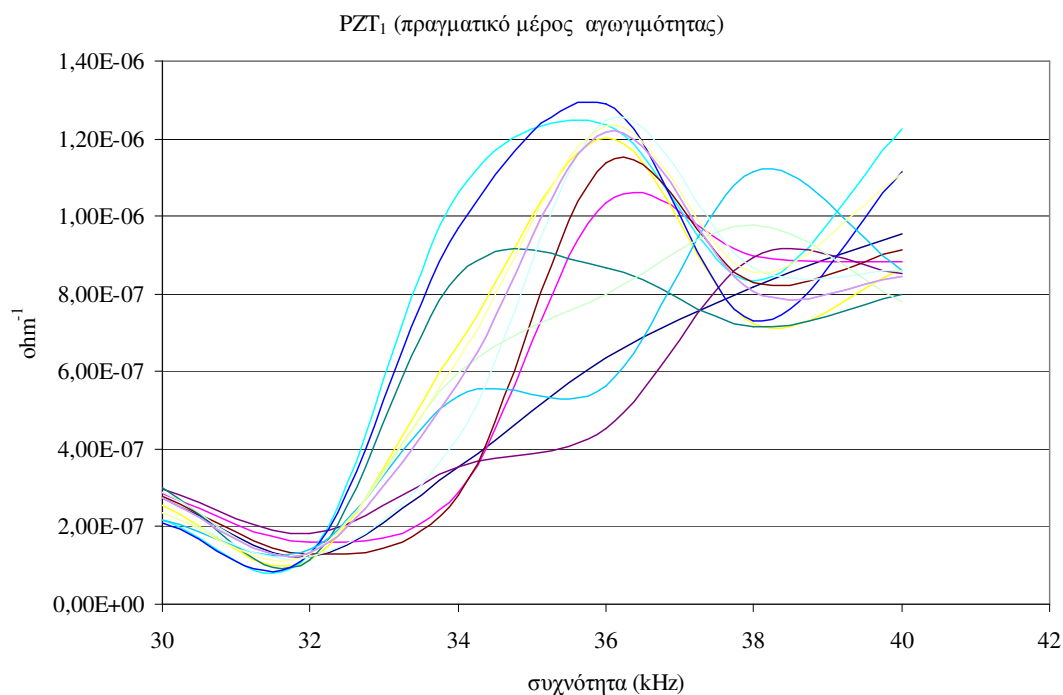
Σχήμα 5.20: Μοντέλο δοκού σκυροδέματος με πεπερασμένα στοιχεία

Με την εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας γίνεται η λήψη της απόκρισης του πραγματικού μέρους της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας του κάθε πιεζοηλεκτρικού για κάθε συχνότητα, χρησιμοποιώντας συχνότητες μεγαλύτερες από 30 kHz, προκειμένου να συγκριθεί περαιτέρω η τροποποίηση αυτών των αποκρίσεων όπως προκαλούνται από την βλάβη.

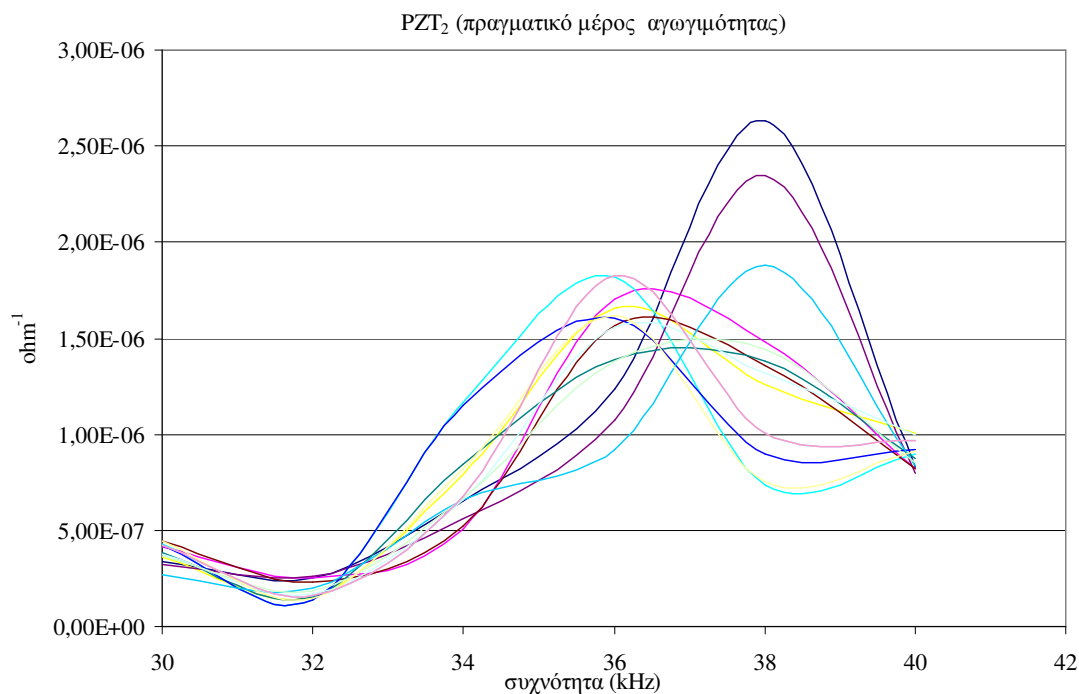
Η διαφοροποίηση αυτών των αποκρίσεων μπορεί να υποδηλώσει την παρουσία της βλάβης σε κάθε περίπτωση. Σε αυτή την έρευνα, υιοθετείται μία διαδικασία δοκιμής και σφάλματος για τον προσδιορισμό των περισσότερο κατάλληλων περιοχών συχνοτήτων για να ελεγχθεί το εξεταζόμενο μοντέλο δοκού σκυροδέματος. Από την παρατήρηση των αιχμών στις αποκρίσεις του πραγματικού μέρους της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας όπως λαμβάνεται από τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα, PZT₁ και PZT₂, φαίνεται ότι η περιοχή συχνοτήτων μεταξύ 30-40 kHz είναι κατάλληλη περιοχή συχνοτήτων για την πραγματοποίηση της δοκιμής.

5.8.1 Δημιουργία επιφανειών απόκρισης

Οι καταγραφές των αποκρίσεων του πραγματικού μέρους της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας για την επιλεγμένη περιοχή συχνοτήτων μεταξύ 30-40 kHz για τα επιθέματα PZT₁ και PZT₂ παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.21 και 5.22. Στα Σχήματα αυτά παρουσιάζονται οι αποκρίσεις ταυτόχρονα και για τις 15 διαφορετικές περιπτώσεις βλάβης και όπως φαίνεται διαφοροποιούνται λόγω ύπαρξης διαφορετικής βλάβης. Οι τιμές του πραγματικού μέρους της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας σε έξι επιλεγμένες συχνότητες ($f_1=30$ kHz, $f_2=32$ KHz, $f_3=34$ kHz, $f_4=36$ kHz, $f_5=38$ kHz and $f_6=40$ kHz) και για τα δύο PZT, στην εξεταζόμενη περιοχή συχνοτήτων θεωρούνται ως χαρακτηριστικά αποτελέσματα εξόδου. Ο αριθμός των χαρακτηριστικών αποτελεσμάτων εξόδου είναι κρίσιμος, διότι όσο περισσότερα χαρακτηριστικά αποτελέσματα εξόδου ενσωματώνονται μέσα στο σχεδιασμό, τόσο μεγαλύτερου υπολογιστικού κόστους σχεδιασμός θα είναι για την ίδια απόκριση σχεδιασμού από ότι με λιγότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα αποτελέσματα εξόδου.



Σχήμα 5.21 Απόκριση του πραγματικού μέρους της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας στην επιφάνεια του PZT₁ για το διάστημα συχνοτήτων 30-40 kHz.



Σχήμα 5.22 Απόκριση του πραγματικού μέρους της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας στην επιφάνεια του PZT₂ για το διάστημα συχνοτήτων 30-40 kHz.

Ανάμεσα από όλους τους σχεδιασμούς RSM, σε αυτή την έρευνα, ο σχεδιασμός Box-Behnken επιλέχθηκε ειδικά, δεδομένου ότι απαιτεί λιγότερες αναλύσεις (15 runs) για 3-παραμετρικό πειραματικό σχεδιασμό. Ένας τρι-παραγοντικός, τρι-επίπεδος σχεδιασμός είναι κατάλληλος για να διερευνήσει δευτέρου βαθμού αποκρίσεις επιφανειών και να κατασκευάσει δευτέρου βαθμού πολυώνυμα. Αυτός ο κυβικός σχεδιασμός χαρακτηρίζεται από μία σειρά σημείων που βρίσκονται στο μεσαίο σημείο κάθε ακμής του πολυδιάστατου κύβου και σειρά κεντρικών σημείων που επαναλαμβάνονται ($n=3$) ενώ τα σημεία που λείπουν από τις άκρες του κύβου βοηθούν ώστε να αποφευχθούν οι συνδυασμένοι ακραίοι παράγοντες, με σκοπό να αποτραπεί η πιθανή απώλεια δεδομένων σε αυτές τις περιπτώσεις, (Box and Behnken, 1960a). Η ειδική ρύθμιση του σχεδιασμού επιπέδων των Box-Behnken επιτρέπει στον αριθμό των σημείων σχεδιασμού να αυξηθεί με τον ίδιο ρυθμό που αυξάνεται ο αριθμός των συντελεστών του πολυωνυμικού μετα-μοντέλου. Για παράδειγμα για τρεις συντελεστές, ο σχεδιασμός μπορεί να κατασκευαστεί ως τρία τμήματα τεσσάρων πειραμάτων αποτελούμενα από πλήρες διπαραγοντικό σχεδιασμό όπου το επίπεδο του τρίτου συντελεστή να τίθεται ίσο με μηδέν. Ο Πίνακας 5.6 ανακεφαλαιώνει τις φυσικές τιμές και τις κωδικοποιημένες τιμές των (3-factor, $k=3$) ανεξάρτητων μεταβλητών εισόδου (X_1, X_2, X_3) που εξετάζονται σε αυτή την έρευνα.

Πίνακας 5.6 : Φυσικές και κωδικοποιημένες τιμές των παραμέτρων εισαγωγής δεδομένων.

i	Μεταβλητή βλάβης	Φυσική τιμή, X_i	Κωδικοποιημένη τιμή, x_i
1	Στην θέση D1=	0 % 20% 40%	-1 0 +1
2	Στην θέση D2=	0 % 20% 40%	-1 0 +1
3	Στην θέση D3=	0% 20% 40%	-1 0 +1

Καθορίζοντας το πραγματικό μέρος της απόκρισης της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας που λαμβάνεται από το πρώτο PZT από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και για την m προεπιλεγμένη-εξεταζόμενη συχνότητα της προσομοιωμένης απόκρισης Y_1^m , η προσομοιωμένη απόκριση του πραγματικού μέρους της σύνθετης αγωγιμότητας δίδεται από την εξίσωση (5.5):

$$Y_1^m = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 \quad (5.8)$$

όπου x_i είναι το κωδικοποιημένο επίπεδο της i ανεξάρτητης μεταβλητής. Αντίστοιχα υπολογίζεται και η Y_2^m η οποία είναι για το δεύτερο PZT.

Σύμφωνα με την εργασία των Box and Behnken (1960a), ο πίνακας των συνδυασμών προσομοίωσης (Πίνακας 5.5) που χρησιμοποιείται στην παρούσα έρευνα για να υπολογιστούν οι συντελεστές παλινδρόμησης (b_0 , b_i , και b_{ij} , όπου $i, j=1, 2, 3$) της εξίσωσης (5.9) απαιτεί να συνδυάζονται τα υψηλά και χαμηλά επίπεδα (οι τιμές -1 και 1) οποιονδήποτε δύο ανεξάρτητων παραγόντων σε όλους τους πιθανούς σχηματισμούς ενώ προσδιορίζουν τον τρίτο ανεξάρτητο παράγοντα στην κωδικοποιημένη ενδιάμεσου επιπέδου τιμή του (δηλαδή στο 0). Αυτές οι αναλύσεις πραγματοποιούνται σε συνδυασμό με τρεις επιπρόσθετες αναλύσεις στις οποίες οι ανεξάρτητοι παράγοντες είναι σταθεροί στα επίπεδα ενδιάμεσων τιμών ($x_1=x_2=x_3=0$) και κατά συνέπεια προκύπτει το σύνολο των 15 αναλύσεων. Οι τελευταίες τρεις αναλύσεις είναι σημαντικές για την αξιολόγηση της καμπυλότητας της απόκρισης όπως και υπολογισμού του σφάλματος του μοντέλου και χρηστότητας της προσαρμογής.

Στους Πίνακες 5.7 και 5.8 παρουσιάζονται τα δεδομένα της αγωγιμότητας που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των επιφανειών απόκρισης. Στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζεται το πραγματικό μέρος της μετρούμενης ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας Y_{PZT1m} για $m=1,2,...,6$ για το πρώτο PZT και στον Πίνακα 5.8 το πραγματικό μέρος της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας Y_{PZT2m} για $m=1,2,...,6$ για το δεύτερο PZT για κάθε συχνότητα m .

Πίνακας 5.7 Μητρώο ελέγχου τιμών των *Box-Behnken*, του πραγματικού μέρους ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αντίστασης στην επιφάνεια του *PZT1*

Ανάλυση k	Θέση βλάβης x_1	Θέση βλάβης x_2	Θέση βλάβης x_3	Y_{11} για 30kHz	Y_{12} για 32kHz	Y_{13} για 34kHz	Y_{14} για 36kHz	Y_{14} για 38kHz	Y_{16} για 40kHz
1	-1	-1	0	2.107E-07	1.218E-07	1.073E-06	1.242E-06	8.529E-07	1.279E-06
2	-1	1	0	2.358E-07	1.384E-07	8.809E-07	1.331E-06	6.871E-07	9.708E-07
3	1	-1	0	2.589E-07	1.340E-07	5.003E-07	1.238E-06	8.550E-07	9.776E-07
4	1	1	0	2.644E-07	1.251E-07	4.342E-07	1.195E-06	8.426E-07	8.243E-07
5	-1	0	-1	2.100E-07	1.238E-07	1.018E-06	1.272E-06	7.803E-07	1.198E-06
6	-1	0	1	2.463E-07	1.380E-07	9.709E-07	1.239E-06	7.383E-07	1.005E-06
7	1	0	-1	2.560E-07	1.360E-07	4.804E-07	1.280E-06	7.990E-07	9.547E-07
8	1	0	1	2.786E-07	1.319E-07	4.774E-07	1.058E-06	8.810E-07	7.995E-07
9	0	-1	-1	2.260E-07	1.230E-07	7.800E-07	1.236E-06	8.926E-07	1.188E-06
10	0	-1	1	2.544E-07	1.391E-07	7.649E-07	1.193E-06	8.718E-07	9.975E-07
11	0	1	-1	2.410E-07	1.412E-07	6.558E-07	1.332E-06	7.484E-07	9.409E-07
12	0	1	1	2.783E-07	1.236E-07	6.266E-07	1.112E-06	7.755E-07	8.060E-07
13	0	0	0	2.447E-07	1.394E-07	7.317E-07	1.287E-06	7.914E-07	1.003E-06
14	0	0	0	2.447E-07	1.394E-07	7.317E-07	1.287E-06	7.914E-07	1.003E-06
15	0	0	0	2.447E-07	1.394E-07	7.317E-07	1.287E-06	7.914E-07	1.003E-06

Πίνακας 5.8: Μητρώο ελέγχου τιμών των *Box-Behnken*, του πραγματικού μέρους ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αντίστασης στην επιφάνεια του *PZT2*

Ανάλυση k	Θέση βλάβης x_1	Θέση βλάβης x_2	Θέση βλάβης x_3	Y_{21} για 30kHz	Y_{22} για 32kHz	Y_{23} για 34kHz	Y_{24} για 36kHz	Y_{24} για 38kHz	Y_{26} για 40kHz
1	-1	-1	0	4.247E-07	1.326E-07	1.219E-06	1.727E-06	7.797E-07	9.044E-07
2	-1	1	0	4.234E-07	1.431E-07	1.004E-06	1.818E-06	8.785E-07	9.766E-07
3	1	-1	0	4.523E-07	1.646E-07	6.504E-07	1.831E-06	8.005E-07	8.970E-07
4	1	1	0	4.071E-07	1.808E-07	5.940E-07	1.690E-06	1.210E-06	9.605E-07
5	-1	0	-1	4.165E-07	1.348E-07	1.210E-06	1.599E-06	9.055E-07	9.137E-07
6	-1	0	1	4.313E-07	1.411E-07	1.020E-06	1.915E-06	8.285E-07	9.234E-07
7	1	0	-1	4.537E-07	1.624E-07	6.459E-07	1.708E-06	8.216E-07	9.135E-07
8	1	0	1	3.990E-07	1.895E-07	5.859E-07	1.696E-06	1.257E-06	9.187E-07
9	0	-1	-1	4.326E-07	1.394E-07	9.752E-07	1.602E-06	7.803E-07	9.163E-07
10	0	-1	1	4.376E-07	1.502E-07	8.377E-07	1.910E-06	7.697E-07	9.019E-07
11	0	1	-1	4.297E-07	1.506E-07	8.208E-07	1.697E-06	8.641E-07	9.693E-07

συνέχεια Πίνακα 5.8									
Ανάλυση k	Θέση βλάβης x_1	Θέση βλάβης x_2	Θέση βλάβης x_3	Y_{21} για 30kHz	Y_{22} για 32kHz	Y_{23} για 34kHz	Y_{24} για 36kHz	Y_{24} για 38kHz	Y_{26} για 40kHz
12	0	1	1	3.950E-07	1.626E-07	7.064E-07	1.693E-06	1.195E-06	9.696E-07
13	0	0	0	4.386E-07	1.484E-07	8.416E-07	1.820E-06	7.849E-07	9.367E-07
14	0	0	0	4.386E-07	1.484E-07	8.416E-07	1.820E-06	7.849E-07	9.367E-07
15	0	0	0	4.386E-07	1.484E-07	8.416E-07	1.820E-06	7.849E-07	9.367E-07

Οι συντελεστές παλινδρόμησης των πολυωνύμων επιλέχθηκαν με κατάλληλη τεχνική βελτιστοποίησης των αποκρίσεων του πραγματικού μέρους της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας με το στατιστικό πρόγραμμα της MATLAB.

Με τις τιμές της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας από τους Πίνακες 5.7 και 5.8, σε περιβάλλον MATLAB με τη ρουτίνα Response Surface Tool, RSTool, μπορεί να κατασκευαστεί η δευτέρου βαθμού απόκριση επιφανειών. Η απόκριση επιφανειών εκφράζει το προσομοιωμένο πραγματικό μέρος της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας, και δίδεται από την εξίσωση (5.8) χρησιμοποιώντας τους συντελεστές παλινδρόμησης b όπως φαίνονται στους Πίνακες 5.9 και 5.10. Οι συντελεστές b των πολυωνύμων που θα προκύψουν από την εξίσωση (5.9) παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.9 και 5.10 ως συνάρτηση των έξι προεπιλεγμένων συχνοτήτων (1^{η} , 2^{η} , 3^{η} , 4^{η} , 5^{η} και 6^{η}) για το πρώτο PZT και οι επόμενες έξι ίδιες συχνότητες (7^{η} , 8^{η} , 9^{η} , 10^{η} , 11^{η} και 12^{η}) για το δεύτερο PZT.

Πίνακας 5.9 Συντελεστές για την εξίσωση 5.8 του PZT₁

Εξίσωση	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η	6 ^η
Συντελεστής						
b_0	2.447E-07	1.394E-07	7.317E-07	1.287E-06	7.914E-07	1.003E-06
b_1	1.937E-08	6.201E-10	-2.563E-07	-3.896E-08	3.986E-08	-1.120E-07
b_2	8.690E-09	1.292E-09	-6.511E-08	7.825E-09	-5.234E-08	-1.124E-07
b_3	1.555E-08	1.072E-09	-1.181E-08	-6.466E-08	5.782E-09	-8.423E-08
b_{11}	-4.896E-09	-6.370E-09	3.148E-08	-3.297E-08	3.833E-08	3.870E-08
b_{22}	-3.435E-09	-4.566E-09	1.105E-08	-4.704E-08	3.099E-08	9.543E-09

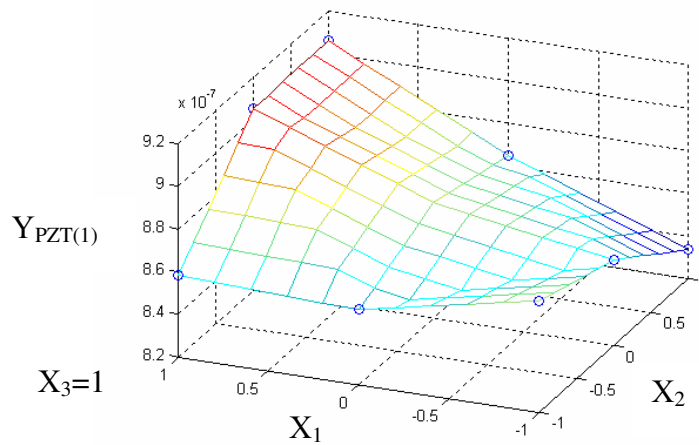
συνέχεια Πίνακα 5.9						
Εξίσωση	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η	6 ^η
Συντελεστής						
b_{33}	2.243E-09	-8.422E-09	-3.530E-09	-4.402E-08	1.197E-08	1.381E-08
b_{12}	-2.216E-09	-4.443E-09	1.014E-08	-2.085E-08	-2.251E-09	7.993E-09
b_{13}	-4.115E-11	-5.146E-09	-1.976E-08	-1.516E-08	2.020E-08	1.765E-09
b_{23}	5.257E-09	-2.564E-09	-5.169E-09	-5.415E-08	1.045E-08	-2.186E-08

Πίνακας 5.10: Συντελεστές για την εξίσωση 5.8 του PZT₂

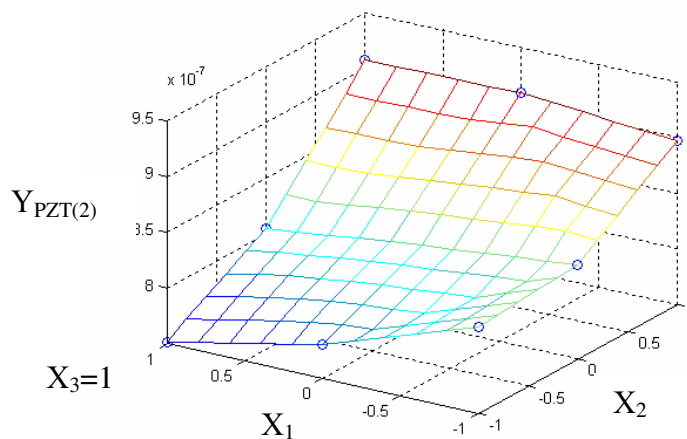
Εξίσωση	7 ^η	8 ^η	9 ^η	10 ^η	11 ^η	12 ^η
Συντελεστής						
b_o	4.386E-07	1.484E-07	8.416E-07	1.820E-06	7.849E-07	9.367E-07
b_1	2.024E-09	1.821E-08	-2.471E-07	-1.669E-08	8.715E-08	-3.546E-09
b_2	-1.149E-08	6.283E-09	-6.958E-08	-2.150E-08	1.272E-07	3.207E-08
b_3	-8.713E-09	7.025E-09	-6.275E-08	7.601E-08	8.489E-08	8.793E-11
b_{11}	-1.099E-08	1.423E-09	3.951E-08	-5.789E-08	7.770E-08	-2.181E-09
b_{22}	-1.737E-08	5.204E-09	3.251E-08	-8.187E-08	1.281E-07	-1.143E-09
b_{33}	-9.926E-09	2.850E-10	5.770E-09	-7.799E-08	8.544E-08	3.698E-09
b_{12}	-5.160E-09	6.552E-09	2.782E-08	-2.493E-08	9.157E-08	-1.201E-08
b_{13}	-6.530E-09	3.160E-10	-2.531E-09	-2.880E-08	4.072E-08	9.947E-09
b_{23}	-8.294E-09	1.968E-09	-4.035E-09	-6.589E-08	7.670E-08	-7.358E-09

Στα Σχήματα 5.23 και 5.24, παρουσιάζονται δύο ενδεικτικά παραδείγματα κατασκευής τρισδιάστατων επιφανειών απόκρισης που δημιουργούνται από τα PZT στις θέσεις PZT₁ και PZT₂. Κάθε ένα από τα Σχήματα 5.23 και 5.24 αντιστοιχεί σε μία προεπιλεγμένη συχνότητα m. Λόγω του ότι είναι τρισδιάστατα λαμβάνονται οι δύο από τις τρεις παραμέτρους εισόδου δεδομένων βλάβης $D_1(x_1)$ και $D_2(x_2)$ ενώ η τρίτη $D_3(x_3)$ παραμένει σταθερή. Για παράδειγμα στο Σχήμα 5.23 κατά τον ένα άξονα του επιπέδου λαμβάνεται η μεταβολή της παραμέτρου X_1 για τα επίπεδα -1, 0 και 1. Κατά τον άλλο

άξονα του επιπέδου η X_2 για τα επίπεδα -1, 0 και 1 ενώ η X_3 παραμένει σταθερή και ίση με 1. Στον κάθετο άξονα φαίνεται η απόκριση των προσομοιωμένων τιμών της αγωγιμότητας για κάθε πιθανή κατάσταση που εμπεριέχεται στο διάστημα $\{X_1, X_2, X_3\} = \{-1, 1\}, [-1, 1], 1\}$. Αντίστοιχα ισχύουν για το PZT₂ η επιφάνεια απόκρισης του Σχήματος 5.24. Συνολικά για την αναπαράσταση του πολύ-παραγοντικού σχεδιασμού για τη δοκό να δημιουργούνται 36 επιφάνειες απόκρισης, 12 για τα δύο PZT για κάθε συχνότητα και επειδή κάθε περιοχή (οι οποίες είναι τρεις) λαμβάνεται σταθερή από μία φορά η κάθε μία χρειάζονται 12×3 , δηλαδή 36 διαφορετικές επιφάνειες απόκρισης.



Σχήμα 5.23 Ενδεικτική τρισδιάστατη απεικόνιση επιφάνειας απόκρισης του PZT1 σε σχέση με τις μεταβλητές της βλάβης και τα επίπεδά τους



Σχήμα 5.24 Ενδεικτική τρισδιάστατη απεικόνιση επιφάνειας απόκρισης του PZT₂ σε σχέση με τις μεταβλητές της βλάβης και τα επίπεδά τους

Από τις επιφάνειες απόκρισης φαίνεται η επιρροή που έχει κάθε παράγοντας στην απόκριση Η/Μ αγωγιμότητας του πιεζοηλεκτρικού για κάθε επίπεδο βλάβης. Για οποιοδήποτε σημείο επάνω στην επιφάνεια μπορεί να υπολογιστεί η προσομοιωμένη απόκριση της αγωγιμότητας που λαμβάνεται από τα PZT.

5.7.2 Αντίστροφη διαδικασία προσδιορισμού βλάβης με βελτιστοποίηση

Στη τελική φάση της προτεινόμενης μεθοδολογίας ταυτοποίησης βλάβης, έχουν κατασκευαστεί οι επιφάνειες απόκρισης των μετα-μοντέλων στο σύνολο των σημείων σχεδιασμού των Box-Behnken. Για να ταυτοποιηθεί η βλάβη σε μία δοκό λαμβάνεται η αγωγιμότητα μέσω των δύο πιεζοηλεκτρικών για όλες τις συχνότητες m . Κατ' αρχάς γίνεται βαθμονόμηση της διαδικασίας ταυτοποίησης βλάβης. Η βαθμονόμηση επιτεύχθηκε με το να εκτιμηθούν οι αρχικές τιμές των παραμέτρων (X_1 , X_2 και X_3) που δείχνουν το επίπεδο και τη θέση της βλάβης γνωρίζοντας μόνο τα αποτελέσματα των αποκρίσεων του πραγματικού μέρους της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας. Τέλος για την διαπίστωση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου γίνεται σύγκριση με τις αρχικές τιμές.

Σε προβλήματα χημικών ή βιομηχανικών διεργασιών όπου έχει χρησιμοποιηθεί ο σχεδιασμός Box-Behnken όπως στις εργασίες των Aslan and Cebeci (2006) και Muthukumar et al. (2002) το αποτέλεσμα της εξαρτημένης μεταβλητής είναι το ζητούμενο και αυτό προκύπτει από την επιφάνεια απόκρισης. Στις περιπτώσεις αυτές το αποτέλεσμα της απόκρισης – εξόδου μπορεί να εξαχθεί και να μην ενδιαφέρει αν η λύση είναι μοναδική. Στην περίπτωση όμως της ταυτοποίησης βλάβης η λύση είναι μία και μοναδική γιατί διαφορετικά υπάρχει ενδεχόμενο σύγχυσης με άλλο σημείο που σημαίνει διαφορετική βλάβη (άλλη θέση και άλλο επίπεδο). Η σημασία της μοναδικότητας της λύσης στην περίπτωση ταυτοποίησης βλαβών είναι ουσιαστική για την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος. Γι' αυτό το λόγο στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκαν πάνω από μία επιφάνεια απόκρισης για να αποφευχούν τα τοπικά ελάχιστα για κάθε περίπτωση.

Για το πρόβλημα αυτό αρχικά έγινε προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί μία διαδικασία βελτιστοποίησης η οποία χρησιμοποιούσε εναλλακτικά με διάφορους συνδυασμούς τις τιμές των επιπέδων (X_1 , X_2 και X_3) ξεκινώντας από μία αρχική επιλογή ($X_1=0$, $X_2=0$ και $X_3=0$) σε περιβάλλον MATLAB. Αυτή η διαδικασία

βελτιστοποίησης ολοκληρώθηκε μόλις επιτεύχθηκε το πρώτο ελάχιστο μεταξύ της πραγματικής και προβλεφθείσας χαρακτηριστικής τιμής του πραγματικού μέρους της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας. Αλλά, ήταν πολύ εύκολο να αποδειχθεί ότι αυτές οι ελάχιστες τιμές δεν ήταν μοναδικές δεδομένου ότι αυτό το είδος αντίστροφων προβλημάτων έχει πολλά τοπικά ελάχιστα. Έτσι για να λυθεί το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης του πολύ-παραγοντικού αυτού προβλήματος αποφασίστηκε στην παρούσα διατριβή να χρησιμοποιηθεί μία εξειδικευμένη υπορουτίνα ('GLOPTIPOLY') της MATLAB που προτάθηκε από τους Henrion and Lassere (2008). Η υπορουτίνα αυτή έχει ευρεία χρήση σε διάφορους τομείς όπως των μαθηματικών, της ανάλυσης Fourier, της ανάλυσης συναρτήσεων, της στατιστικής και των πιθανοτήτων. Επιπλέον έχει ήδη εφαρμοστεί σε διάφορους τομείς όπως η βελτιστοποίηση, η επεξεργασία σήματος, η χημεία, η τομογραφία. Η υπορουτίνα αυτή έχει σαν στόχο το σχηματισμό και την επίλυση πολυωνύμων δευτέρου βαθμού με τρεις μεταβλητές με περιορισμούς ανισοτήτων για το γενικό πρόβλημα της βελτιστοποίησης. Έχει την δυνατότητα να ελαχιστοποιεί τις πολυμεταβλητές πολυωνυμικές συναρτήσεις υποκειμένη στους πολυωνυμικούς περιορισμούς ανισότητας, ισότητας ή ακέραιων αριθμών και να παράγει μια σειρά χαμηλότερων ορίων που συγκλίνουν μονοτονικά στο γενικό βέλτιστο. Έτσι πραγματοποιείται η γενική βελτιστοποίηση και εξάγονται αυτόματα οι μοναδικές βέλτιστες λύσεις. Οι λύσεις αυτές στην ουσία αποτελούν τομή όλων των παραγόμενων πολυωνύμων για κάθε περίπτωση και έτσι η τελική λύση δίνει με ακρίβεια το καθολικό ελάχιστο.

Με τη χρήση της υπορουτίνας αυτής επιτεύχθηκε η παραγωγή μιας σειράς χαμηλότερων ορίων που συγκλίνουν μονοτονικά στο γενικό βέλτιστο με χαμηλό υπολογιστικό κόστος. Για να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης διαδικασίας γενικής βελτιστοποίησης, χρησιμοποιήθηκαν μία σειρά από αναλύσεις οι οποίες περιλαμβάνουν 15 σημεία σχεδιασμού Box-Behnken. Αυτό σημαίνει ότι γνωρίζοντας τις δώδεκα χαρακτηριστικές τιμές αποτελεσμάτων εξόδου (2 θέσεις PZT $\times$ 6 επιλεγμένες εκ των προτέρων συχνότητες) του πραγματικού μέρους της H/M σύνθετης αγωγιμότητας, μπορεί να εκτιμηθεί το επίπεδο των τιμών των παραμέτρων της βλάβης στις θέσεις D_1 , D_2 και D_3 . Στην συνέχεια επιλέχθηκαν επιπλέον 7 σημεία που δεν περιλαμβάνονται στο σχεδιασμό, ώστε σε αυτά να γίνει ο τελικός έλεγχος των αποτελεσμάτων με σύνολο τα 22 σημεία.

Τα αποτελέσματα προσδιορισμού βλαβών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.11, για το επίπεδο βλάβης το οποίο προβλέπεται από τη διαδικασία βελτιστοποίησης

πολυωνύμων. Αποτελέσματα επίσης παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.25, 5.26 και 5.27 υπό μορφή τριών απεικονίσεων (ένα για κάθε θέση ενδεχόμενης βλάβης) του πραγματικού επιπέδου βλάβης σε σχέση με το προβλεφθέν επίπεδο βλάβης από τη γενική διαδικασία βελτιστοποίησης. Στα Σχήματα 5.25, 5.26 και 5.27 παρουσιάζονται οι κωδικοποιημένες τιμές που εισάγονται ως δεδομένα (τα πρώτα 15) και οι τυχαίες δοκιμές (επόμενες 7) (στήλη με ανοιχτό χρώμα) και δίπλα οι τιμές που προβλέπονται από τη διαδικασία προσδιορισμού βλάβης (στήλη με σκούρο χρώμα). Παρατηρείται ότι οι προβλεφθείσες κωδικοποιημένες τιμές πλησιάζουν με μεγάλη ακρίβεια τις πραγματικές αρχικές τιμές και τα αποτελέσματα είναι επίσης καλά και στις περιπτώσεις μετά τον αριθμό 15 όπου οι αρχικές τιμές δεν είχαν συμπεριληφθεί στο σχεδιασμό.

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η ταυτοποίηση της βλάβης είναι περισσότερο επιτυχής στις θέσεις D_1 και D_3 . Αυτό είναι ένα αναμενόμενο αποτέλεσμα δεδομένου ότι είναι γνωστό ότι οι θέσεις που είναι πιο κοντά στις θέσεις των αισθητήρων PZT προβλέπονται καλύτερα από αυτές που είναι μακριά από αυτούς. Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί σε αυτά τα σχήματα ότι η προτεινόμενη διαδικασία αντιστροφής απεικονίζει καλύτερα την κύρια κατεύθυνση για το προβλεπόμενο επίπεδο βλάβης των σημείων που συμμετέχουν στο σχεδιασμό προσομοίωσης των Box-Behnken παρά για τα σημεία τα οποία δεν είναι μέσα στο σύνολο του σχεδιασμού. Ένα πιθανός λόγος για το σφάλμα στην αναγνώριση βλάβης πιθανώς είναι επειδή χρησιμοποιήθηκαν συνεχείς μεταβλητές για να αναπαράγουν διακριτές παραμέτρους βλάβης.

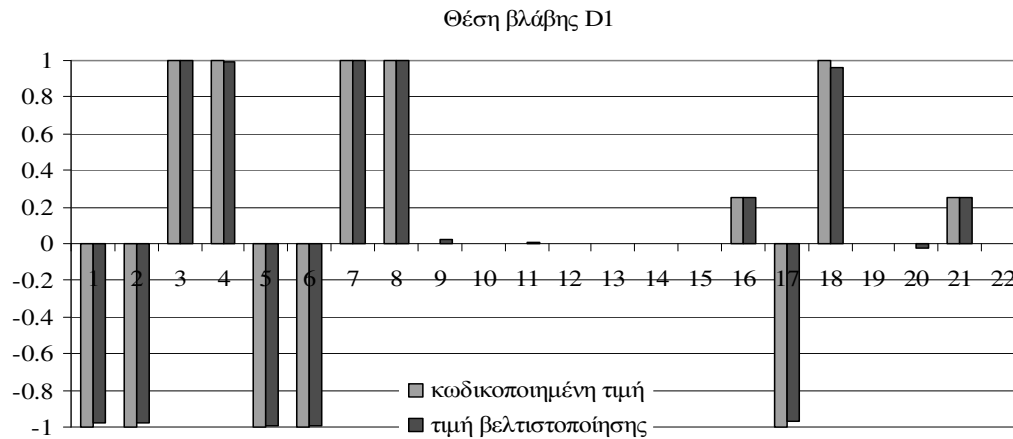
Με το συνδυασμό της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και τον σχεδιασμό πειραμάτων των Box-Behnken, η ανάλυση των παραμέτρων επίδρασης βλάβης απλοποιήθηκε αρκετά και η διαδικασία του προσδιορισμού της βλάβης με την τεχνική βελτιστοποίησης που επιλέχθηκε πραγματοποιήθηκε επιτυχώς. Η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της κατασκευής σε ποικίλες καταστάσεις βλάβης γίνεται με την ανάλυση της κατασκευής αυτής και ταυτόχρονα δημιουργώντας τα κατάλληλα δευτέρου βαθμού μετα-μοντέλα απόκρισης επιφανειών των δεδομένων στα κατάλληλα σημεία σχεδιασμού. Με την εφαρμογή αυτής της διαδικασίας χαρακτηρίζεται το μέγεθος της βλάβης σε προεπιλεγμένες περιοχές που ενδεχομένως μπορεί να εμφανιστεί (η βλάβη λαμβάνεται θεωρώντας μειωμένους συντελεστές δυσκαμψίας στις προεπιλεγμένες περιοχές).

Ο προσδιορισμός μείωσης δυσκαμψίας εκτελέσθηκε με την επίλυση ενός αντίστροφου προβλήματος χρησιμοποιώντας ένα σύνολο δώδεκα πολυωνύμων που προέκυψαν από το σχεδιασμό των Box-Behnken με τη χρήση 15 σημείων σχεδιασμού.

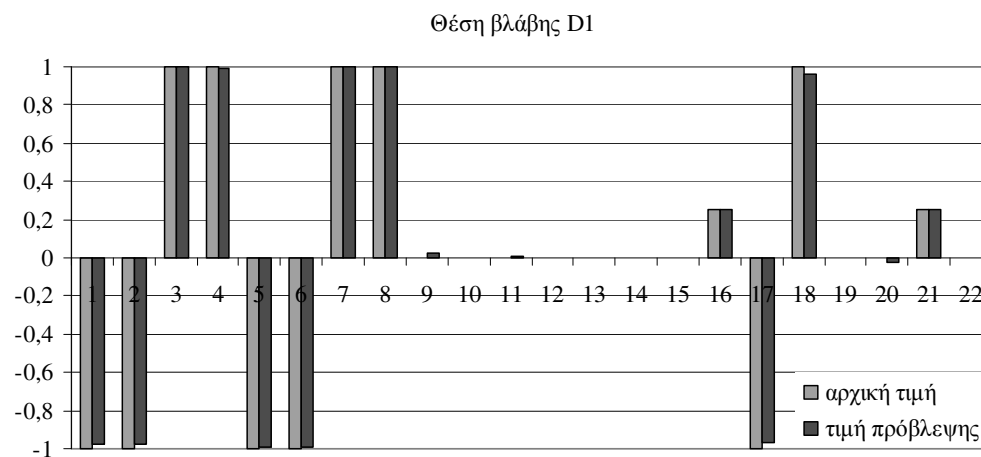
Τα αποτελέσματα για το σύνολο των προσομοιώσεων ήταν ενθαρρυντικά με τις σωστές κατευθύνσεις στις προβλέψεις που απεικονίσθηκαν για τις περιπτώσεις βλάβης οι οποίες συμμετείχαν στην ανάπτυξη των επιφανειών απόκρισης αλλά και για τις τυχαίες περιπτώσεις.

Πίνακας 5.11 Αποτελέσματα ταυτοποίησης βλαβών. Τα σημεία με τα οποία πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός Box-Behnken φαίνονται με έντονη γραμματοσειρά.

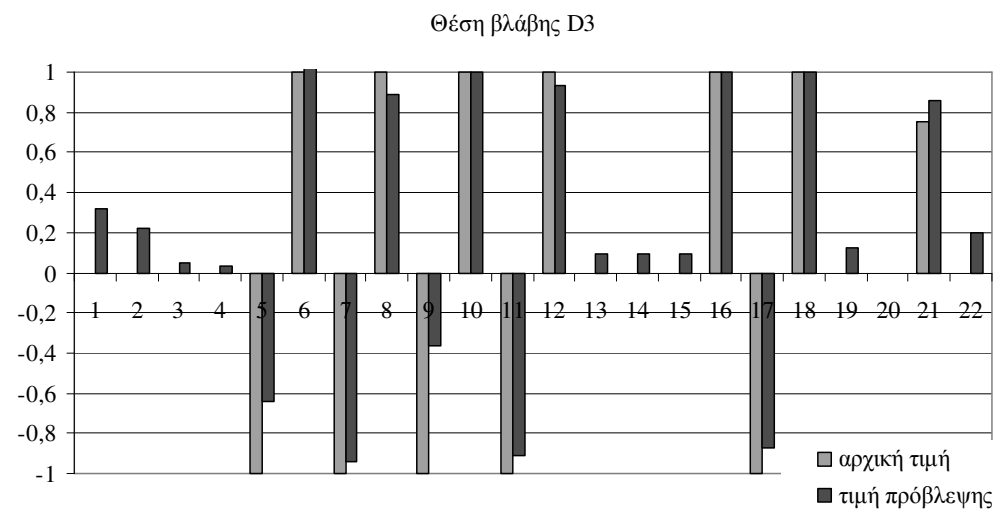
Ανάλυση	Παράμετροι βλάβης			Πρόβλεψη παραμέτρων βλάβης χρησιμοποιώντας την ρουτίνα βελτιστοποίησης Gloptipoly		
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	0	-0.98	-0.94	0.32
2	-1	1	0	-0.98	1	0.22
3	1	-1	0	1	-0.91	0.05
4	1	1	0	0.99	0.37	0.03
5	-1	0	-1	-0.99	0.023	-0.64
6	-1	0	1	-0.99	0.01	1.03
7	1	0	-1	1	0.056	-0.94
8	1	0	1	1	0.05	0.89
9	0	-1	-1	0.02	-0.87	-0.36
10	0	-1	1	0	-0.9	1
11	0	1	-1	0.01	1.1	-0.91
12	0	1	1	0	1	0.93
13	0	0	0	0	0.023	0.09
14	0	0	0	0	0.023	0.09
15	0	0	0	0	0.023	0.09
16	0.25	-0.5	1	0.25	-0.44	1
17	-1	1	-1	-0.97	1	-0.87
18	1	-1	1	0.96	-0.82	1
19	0	0.5	0	0	0.5	0.12
20	0	-0.5	0	-0.02	-0.26	0
21	0.25	0.25	0.75	0.25	0.28	0.86
22	0	0.25	0	0	0.33	0.2



Σχήμα 5.25 Σύγκριση μεταξύ πραγματικών και προβλεπόμενων κωδικοποιημένων τιμών για ενδεχόμενη βλάβη στη θέση 1 για το σύνολο των 22 περιπτώσεων.



Σχήμα 5.26 Σύγκριση μεταξύ πραγματικών και προβλεπόμενων κωδικοποιημένων τιμών για ενδεχόμενη βλάβη στη θέση 2 για το σύνολο των 22 περιπτώσεων.



Σχήμα 5.27 Σύγκριση μεταξύ πραγματικών και προβλεπόμενων κωδικοποιημένων τιμών για ενδεχόμενη βλάβη στη θέση 3 για το σύνολο των 22 περιπτώσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΠΙΔΙΟΡΘΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

6.1 Επισκευή δομικών στοιχείων με χρήση σύνθετων ινοπλισμένων υλικών, (Fiber Reinforced Polymers, FRP)

Η χρήση των FRP ως υλικά επισκευής και ενίσχυσης οικοδομικών έργων είναι ήδη πολύ διαδεδομένη στην τεχνική βιβλιογραφία και εφαρμόζεται εκτενώς σε πραγματικές κατασκευές τις τελευταίες δεκαετίες. Ινοπλισμένα σύνθετα πολυμερή υλικά (FRP) έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για να ενισχύσουν υπάρχοντα δομικά στοιχεία. Τα σύνθετα FRP έχουν εφαρμοστεί ως εξωτερικά επικολλητά φύλλα σε υπάρχουσες κατασκευές σε ποικίλα υλικά κατασκευής όπως οπλισμένο σκυρόδεμα (RC) (Teng et al., 2002), προεντεταμένο σκυρόδεμα (Rosenboom et al., 2007) και χάλυβα (Schnerch et al., 2007).

Η χρήση υλικών από σύνθετα ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) αποτελεί μία σχετικά νέα τεχνική για την ενίσχυση δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η

ευκολία στην εφαρμογή και οι βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζουν τα υλικά αυτά αποτελούν τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου. Ταυτόχρονα με την εφαρμογή τους δεν αυξάνονται οι αρχικές διαστάσεις του επί επισκευή δομικού στοιχείου με αποτέλεσμα να μην αλλάζουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά των επιμέρους δομικών στοιχείων.

Πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι η χρήση εποξειδικά επικολλημένων υφασμάτων από ινοπλισμένα πολυμερή για την καμπτική ενίσχυση και επισκευή δομικών στοιχείων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική, εφόσον ληφθεί υπ' όψη η μικρή παραμόρφωση αστοχίας, η έλλειψη πλαστιμότητας, οι δυσκολίες αγκύρωσης και η απότομη αστοχία των συνθέτων υλικών, (Καραμπίνης και Πανταζοπούλου, 2000), (Karayannis and Sirkelis, 2008), (Tsonos, 2008), (Teng et al., 2004). Επικολλητά υφάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή υπό μορφή ολόσωμων κλειστών μανδυνών ή μεμονωμένων λωρίδων έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την αύξηση της διατμητικής αντοχής δοκών με ορθογωνική διατομή, (Kalifa et al., 1998), (Chaallal et al., 1998), (Li et al., 2001), (Τριανταφύλλου 2003), (Chalioris, 2003). Η επιδιόρθωση με σύνθετα υλικά που επικολλώνται στις περιοχές βλάβης έχει ως στόχο την αποκατάσταση της αντοχής και της δυσκαμψίας του δομικού στοιχείου. Επίσης χρησιμοποιούνται και για την ενίσχυση του δομικού στοιχείου, πέραν της επισκευής, δηλαδή για λόγους πρόληψης πριν εμφανιστεί βλάβη ή αστοχία στο δομικό υποσύστημα ή στην κατασκευή. Η ενίσχυση με την εφαρμογή των ινωπλισμένων υλικών αυξάνει την αντοχή και να βελτιώνει τη συνολική συμπεριφορά, ενώ η αποκατάσταση δομικών στοιχείων με βλάβες και ρηγματώσεις φαίνεται να αποκαθιστά επιτυχώς την αρχική αντοχή.

6.2 Εφαρμογή των FRP σε δομικά στοιχεία και αποκόλληση

Βασικό μειονέκτημα των ινοπλισμένων υλικών FRP ως υλικά επεμβάσεων (επισκευής - ενίσχυσης) είναι ότι στις συνηθέστερες - πιο κοινές περιπτώσεις η αστοχία προέρχεται εξαιτίας της αποκόλλησής τους και όχι λόγω της θραύσης τους. Έτσι δεν εξαντλείται η μέγιστη εφελκυστική αντοχή τους και δεν γίνεται η βέλτιστη εκμετάλλευση των υψηλών δυνατοτήτων και προδιαγραφών τους.

Οι κατασκευές αποτελούνται από δομικά στοιχεία όπως δοκούς και υποστυλώματα τα οποία καταπονούνται από τα μόνιμα και ωφέλιμα φορτία (κατακόρυφες δράσεις) της κατασκευής αλλά και από σεισμικά φορτία (οριζόντιες

δράσεις). Τα πρώτα είναι σταθερά στατικά φορτία για τα οποία συνήθως έχουν γίνει οι απαραίτητοι υπολογισμοί και τα μέλη της κατασκευής έχουν σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να μην κινδυνεύει η κατασκευή από βλάβες και κατ' επέκταση κατάρρευση. Για τα φορτία σεισμού τα οποία αποτελούν τη δυναμική φόρτιση της κατασκευής συνήθως έχουν γίνει αντίστοιχοι υπολογισμοί και αναλύσεις που επιβάλλουν κατάλληλο σχεδιασμό με βάση την πιθανότητα εκδήλωσης σεισμικής διέγερσης. Σε περίπτωση δυναμικής φόρτισης τα εξωτερικά φορτία δεν είναι σταθερά αλλά επιβάλλονται εναλλασσόμενα, η έντασή τους είναι εν γένει απροσδιόριστη και συμβαίνουν απροειδοποίητα. Έτσι, πολλές φορές η αποτελεσματικότητα της αρχικής ανάλυσης και σχεδιασμού των επισκευών αποδεικνύεται ανεπαρκής. Σε αυτές τις περιπτώσεις προκύπτουν βλάβες οι οποίες χρίζουν επισκευής.

Σε συνήθη δομικά συστήματα από οπλισμένο σκυρόδεμα, η ενίσχυση δομικών στοιχείων με χρήση FRP έχει ορισμένες κατασκευαστικές δυσκολίες. Συγκεκριμένα στις περιπτώσεις δοκών που στηρίζουν πλάκες (πλακοδοκούς) δεν είναι εφικτή η εφαρμογή ινωπλισμένων πολυμερών υλικών γύρω από την διατομή. Επίσης κατασκευαστικά προβλήματα εμφανίζονται στην στήριξη δοκών - υποστυλωμάτων (περιοχές κόμβων) όπου και εκεί η ενίσχυση με FRP έχει πολλαπλά προβλήματα αγκύρωσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις αναγκαστικά η εφαρμογή των FRP αφήνει εκτεθειμένες τις άκρες τους με κίνδυνο την αστοχία λόγω αποκόλλησης. Γενικά, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων που εφαρμόζεται η τεχνική των FRP για την επισκευή πραγματικών κατασκευών, κατασκευαστικά προβλήματα καθιστούν την αποτελεσματικότητά τους μειωμένη έως και ανεπαρκή. Έτσι η αστοχία τους σχεδόν πάντα διέπεται από την αποκόλληση των υλικών αυτών λόγω της υπέρβασης της αντοχής συνάφειας στη διεπιφάνεια του ινωπλισμένου πολυμερούς, της εποξειδικής κόλλας συγκόλλησης και του σκυροδέματος, (Karayannis and Chalioris, 2003). Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 6.1 που προέρχεται από την προαναφερόμενη εργασία η ανάγκη εξασφάλισης επαρκούς συνάφειας και αγκύρωσης των υλικών FRP με το δομικό στοιχείο προς επισκευή ή ενίσχυση κρίνεται απαραίτητη για την αύξηση της αποτελεσματικότητά τους. Στο ίδιο σχήμα γίνεται εμφανής η επίδραση των κατασκευαστικών δυσκολιών κατά την εφαρμογή των FRP. Στην πρώτη περίπτωση είναι δυνατή η περιτύλιξη της δοκού (ορθογωνική) ενώ στις επόμενες δύο (πλακοδοκοί) δεν είναι εφικτή η περιτύλιξή τους με αποτέλεσμα περισσότερα σημεία και με μεγαλύτερη πιθανότητα αποκόλλησης των άκρων τους.



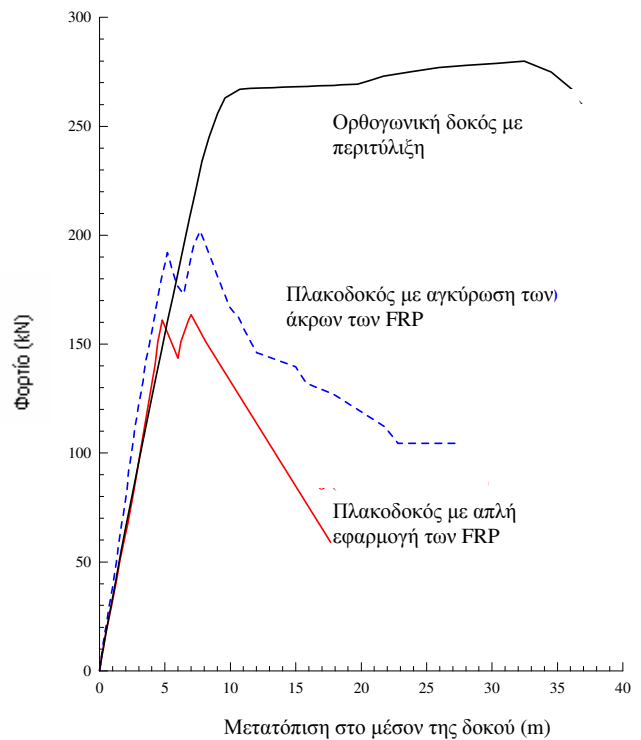
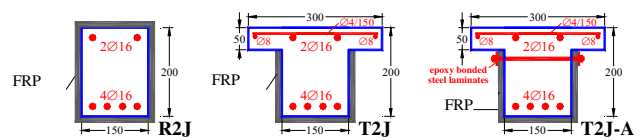
Ορθογωνική δοκός R2J. Αστοχία από διάρρηξη των FRP.



Πλακοδοκός T2J-A. Προσπάθεια αγκύρωσης των FRP.



Πλακοδοκός T2J. Αστοχία από αποκόλληση των FRP.



Σχήμα 6.1 Επίδραση της αποκόλλησης και αναγκαιότητα της αγκύρωσης των FRP με στόχο της αύξηση της αποτελεσματικότητάς τους, (Karayannis and Chaliotis, 2003)

Αντίστοιχα προβλήματα εμφανίζονται και σε κατασκευές από άλλα υλικά όπως τοιχοποιία, χάλυβας κλπ. Στόχος πολλών τεχνικών επεμβάσεων είναι να αποτραπεί η αστοχία των ινωπλισμένων πολυμερών λόγω αποκόλλησής τους, ώστε να γίνει καλύτερη εκμετάλλευση των υψηλών ιδιοτήτων τους (αστοχία λόγω θραύσης). Έχουν ήδη αναπτυχθεί κάποιες μεθοδολογίες τεχνικών αγκύρωσης – ελέγχου αποκόλλησής τους, που έχουν στόχο την αύξηση της αντοχής συνάφειας αυτών με τις επιφάνειες εφαρμογής τους.

Για παράδειγμα, οι Rosenboom et al. (2007) προτείνουν συγκεκριμένη διαδικασία για την κατάλληλη και σωστή τοποθέτηση του FRP ώστε να ενισχύεται αποτελεσματικά το δομικό στοιχείο. Η επιτυχία στην τοποθέτησή του έγκειται στην τέλεια σύνδεση του FRP με το δομικό σύστημα στην περιοχή της βλάβης, είτε πρόκειται για εφελκυστική - καμπτική είτε για διατμητική επισκευή. Επιπλέον, η

προσπάθεια ελαχιστοποίησης των κενών που μπορούν να υπάρξουν λόγω των ατέλειων που προϋπάρχουν μεταξύ του FRP και των δομικών επιφανειών κατά τη διάρκεια της εφαρμογής FRP, με συνέπεια αυτά να επιταχύνουν τη διαδικασία αποκόλλησης.

Επομένως, δεδομένου ότι η έναρξη και η επέκταση της αποκόλλησης των άκρων των FRP αποδεικνύεται ιδιαίτερα κρίσιμη, για την αποτελεσματικότητα της επισκευής η ανάγκη προσδιορισμού και μείωσης των παραγόντων που τη συντελούν χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση.

Διάφοροι ερευνητές, (Kaiser and Karbhari, 2004), έχουν παρουσιάσει συμβατικές μη καταστρεπτικές τεχνικές αξιολόγησης (NDE) με στόχο την ανίχνευση και τον προσδιορισμό του μηχανισμού της αποκόλλησης των άκρων των FRP. Αν και αυτές οι συμβατικές μη καταστρεπτικές τεχνικές έχουν αποδειχθεί χρήσιμες για τον εντοπισμό των κενών, εντούτοις σε καμία δεν παρέχονται επαρκείς πληροφορίες για την έναρξη και την ανάπτυξη του μηχανισμού αποκόλλησης. Επιπλέον, δεδομένου ότι όλες αυτές οι τεχνικές εφαρμόζονται ακριβώς επάνω ή σε μικρή απόσταση από τη θέση ενίσχυσης με FRP σημαίνει πρακτικά ότι η κατασκευή θα πρέπει να είναι συνεχώς προσβάσιμη.

6.3 Επισκευή βλαβών σε δομικά συστήματα με χρήση ευφύων επικολλητών επιθεμάτων

6.3.1. Τεχνική επιδιόρθωσης

Η τεχνική επισκευής των ρηγματωμένων κατασκευών με χρήση σύνθετων ινοπλισμένων πολυμερών υπό μορφή επικολλητών υφασμάτων (Fibre Reinforced Polymers, FRP) έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική και η χρήση της έχει αυξηθεί αισθητά στον τομέα των μηχανικών. Εντούτοις, ο σχεδιασμός των ενισχύσεων με σύνθετα υλικά παρουσιάζει κάποιες δυσκολίες. Ορισμένες από αυτές σχετίζονται με το γεγονός ότι η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται και από το επιβαλλόμενο εξωτερικό φορτίο του φορέα. Έτσι οι Wang et al. (2000) αντικαθιστούν τα σύνθετα υλικά FRP με επιθέματα PZT λόγω του πλεονεκτήματος των υλικών αυτών τα οποία αλλάζουν τις ιδιότητές τους ανάλογα με την εξωτερική φόρτιση που δέχονται. Με τον τρόπο αυτό συμπεριφέρονται ανάλογα ή αλλιώς “ευφυνώς” σε κάθε περίπτωση φόρτισης.

6.3.2 Κριτήρια επιδιόρθωσης

Τα PZT ως ευφυή υλικά έχουν την ιδιότητα να παράγουν ελεγχόμενες τοπικές δυνάμεις και ροπές με αντίθετη επίδραση από αυτή των εξωτερικών φορτίων που δρουν στο φορέα. Κατά αυτό τον τρόπο, όπως ερευνάται για παράδειγμα στις εργασίες των Wang et al., όταν μια ρωγμή σε μία μεταλλική δοκό τείνει να ανοίξει λόγω των εξωτερικών φορτίων που δρουν, τα υλικά αυτά επιφέρουν μια αντίθετη δράση παραμόρφωσης που εξουδετερώνει - μειώνει την εξωτερική δράση. Το κριτήριο επισκευής στην έρευνα των Wang et al. (2000) ήταν η προσπάθεια εξάλειψης της ασυνέχειας της ελαστικής απόκρισης της δοκού που προκλήθηκε από την ρωγμή. Σκοπός της επιδιόρθωσής τους ήταν να αντισταθμιστούν οι συγκεντρώσεις τάσεων γύρω από τη ρωγμή κατά τη διάρκεια της κάμψης με την εφαρμογή μιας δύναμης αντίδρασης μέσω των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων.

Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρονται για την επισκευή μιας ρηγματωμένης μεταλλικής δοκού υπό στατικό φορτίο από τους Wang et al. (2002), υπό δυναμικό φορτίο από τους Wang et al. (2004), από αξονικά θλιπτικό στατικό φορτίο από τους Wang and Quek (2005) και δοκών κάτω από μια θλιπτική στατική δύναμη από τους Wang et al. (2005). Από τις παραπάνω εργασίες προκύπτει ότι χρησιμοποιώντας το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα που λειτουργεί ως διεγέρτης, όταν εφαρμόζεται σε αυτό ένα ηλεκτρικό φορτίο, δημιουργούνται τοπικές δυνάμεις και ροπές. Το σύστημα αυτό δυνάμεων και ροπών μπορεί να είναι ελεγχόμενο για να έχει αντίθετη επίδραση στο εξωτερικό εφαρμοζόμενο φορτίο επάνω στη δοκό. Σε επόμενη εργασία των Wang et al. (2004) εφαρμόζεται η περίπτωση της ίδιας δοκού υπό δυναμικό φορτίο και επεκτείνεται η χρήση του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος για επιδιόρθωση ρηγματωμένης μεταλλικής δοκού υπό δυναμικό φορτίο. Έτσι υιοθετείται η βασική ιδέα προσπάθειας μείωσης της κλίσης της ελαστικής απόκρισης που προκαλείται από την ρωγμή με χρήση του πιεζοηλεκτρικού διεγέρτη. Το κριτήριο επισκευής που χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή είναι η ταύτιση των συχνοτήτων συντονισμού της ρηγματωμένης μεταλλικής δοκού με τις συχνότητες συντονισμού της υγιούς και χωρίς ρηγματώσεις δοκού.

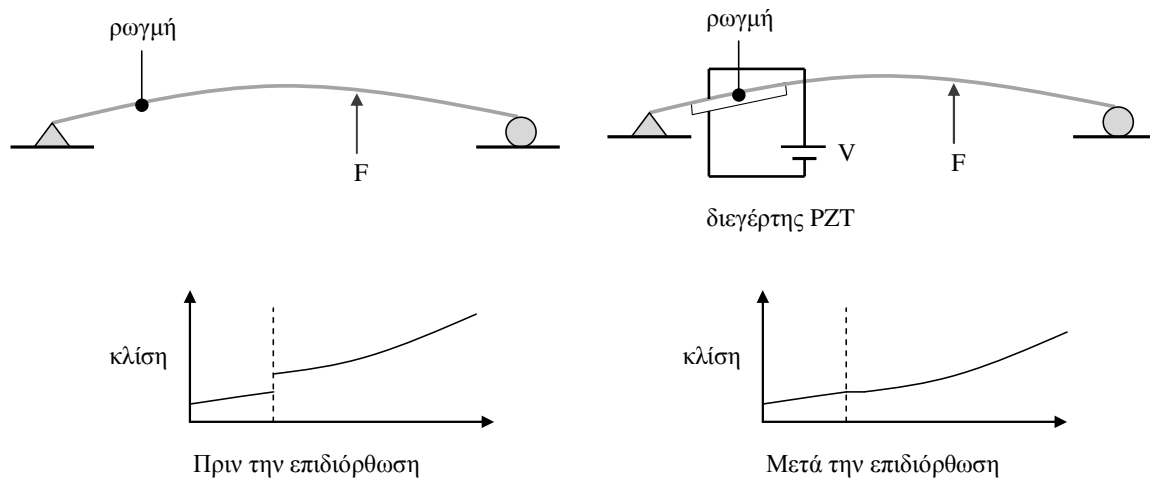
Σύμφωνα με τις προαναφερθείσες έρευνες, η παρουσία ρωγμής σε μία δοκό επιδρά με το να προκαλεί ασυνέχεια στην κλίση της ελαστικής απόκρισης, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της δυσκαμψίας της. Ως εκ τούτου, αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση των τιμών των συχνοτήτων συντονισμού της δοκού, φαινόμενο “μετάθεσης συχνοτήτων συντονισμού”. Αντίστοιχο συμπέρασμα έχει εξαχθεί και σε πρόσφατη

εργασία των Providakis and Voutetaki (2009) μεταξύ υγιούς κατασκευής και κατασκευής με βλάβη.

Η ασυνέχεια της κλίσης της ελαστικής απόκρισης που προκαλείται από τη ρωγμή με χρήση των πιεζοηλεκτρικών διεγερτών μειώνεται και συνεπώς οι συχνότητες συντονισμού της ρηγματωμένης δοκού μπορούν να συγκλίνουν με αυτές της υγιούς δοκού. Έτσι η ρηγματωμένη δοκός θεωρείται ως “επισκευασμένη” επειδή συμπεριφέρεται όπως η υγιής δοκός.

Στην εργασία τους οι Wang et al. επισημαίνουν ότι τα αναλυτικά τους προσομοιώματα βασίστηκαν στην θεωρία της απλής δοκού Euler-Bernoulli και δεν έχουν ελεγχθεί σε ένα μοντέλο μεγαλύτερης ακρίβειας όπως με τη χρήση της θεωρίας πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι, χρειάζονται περαιτέρω ακριβέστερες αναλύσεις ώστε να υπολογιστεί λεπτομερώς η ιδιομορφία της έντασης και της παραμόρφωσης στην περιοχή της βλάβης.

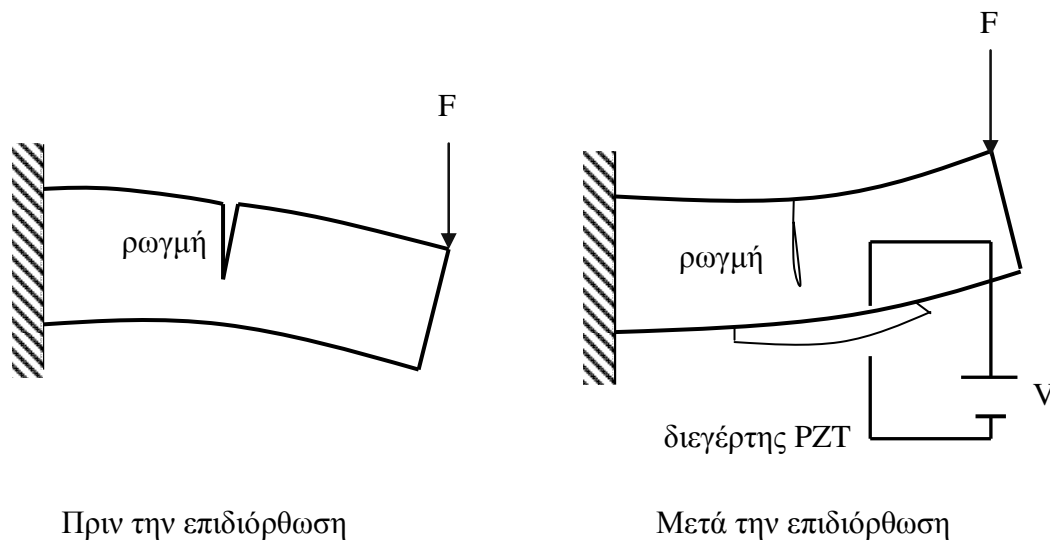
Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζεται το κριτήριο ενεργούς επισκευής των Wang et al. που βασίζεται στη μείωση της ιδιομορφίας ή αλλιώς στην εξάλειψη της ασυνέχειας στην ελαστική απόκριση της δοκού που προκαλείται από τη ρωγμή.



Σχήμα 6.2 Κριτήριο ενεργούς επιδιόρθωσης των Wang et al (2002)

Ένα άλλο κριτήριο επισκευής (μηχανική της θραύσης) στην εργασία του Liu (2008) που στοχεύει στην ενεργή επιδιόρθωση με τη χρήση πιεζοηλεκτρικού διεγέρτη, συνιστά να μειωθεί στο ελάχιστο ο συντελεστής ενεργειακής παραμορφωσιακής πυκνότητας S_{min} (strain energy density) στην άκρη των ρωγμών. Επίσης κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο συντελεστής ενεργειακής παραμορφωσιακής πυκνότητας μειώνεται στο ελάχιστο όταν οι δύο επιφάνειες της ρωγμής αρχίζουν να έρχονται σε επαφή η μια

με την άλλη Liu (2007). Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή κατάλληλης διαφοράς δυναμικού στον πιεζοηλεκτρικό διεγέρτη όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3. Το ίδιο κριτήριο αστοχίας, έχει χρησιμοποιηθεί στην παρούσα έρευνα αντίστροφα ως κριτήριο επιτυχούς εφαρμογής της ενεργού διασφάλισης της αποκόλλησης της άκρης του FRP. Δηλαδή ότι οι δύο επιφάνειες του FRP και του σκυροδέματος αρχίζουν να έρχονται σε επαφή ή μια με την άλλη.



Σχήμα 6.3 Κριτήριο ενεργούς επισκευής του Liu(2008)

Εντούτοις, οι παραπάνω μέθοδοι περιορίζονται στις σχετικά λεπτές και ελαφριές μεταλλικές κατασκευές, στις οποίες το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα μπορεί να συνεισφέρει στη γενική απόκριση του στοιχείου. Για αυτό το λόγο, σε περιπτώσεις συνήθων δομικών στοιχείων μεγάλης κλίμακας τα οποία είναι ογκώδη, βαριά και από ανομοιογενή υλικά, όπως π.χ. το σκυρόδεμα, η τοποθέτηση μόνο πιεζοηλεκτρικών διεγερτών αποδεικνύεται ελλιπής στο να συνεισφέρει αποδοτικά στη βελτίωση της γενικής απόκρισής του.

6.4 Επιδιόρθωση δομικού στοιχείου από σκυρόδεμα υπό δυναμικά φορτία με την εφαρμογή του “ευφυσούς και αναπροσαρμόσιμου FRP”

Για την επισκευή συνήθων δομικών στοιχείων κατασκευασμένα από σκυρόδεμα η τοποθέτηση και μόνο πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων δεν μπορεί να συνεισφέρει υπολογίσιμη επίδραση στη συνολική απόκριση του επί επιδιόρθωση δομικού στοιχείου.

Αυτό γιατί το σκυρόδεμα είναι ανομοιογενές υλικό όπου στην επιφάνειά του η επίδραση πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων εκτός από την περίπτωση αισθητήρων δεν μπορεί να προσδώσει υπολογίσιμη επίδραση.

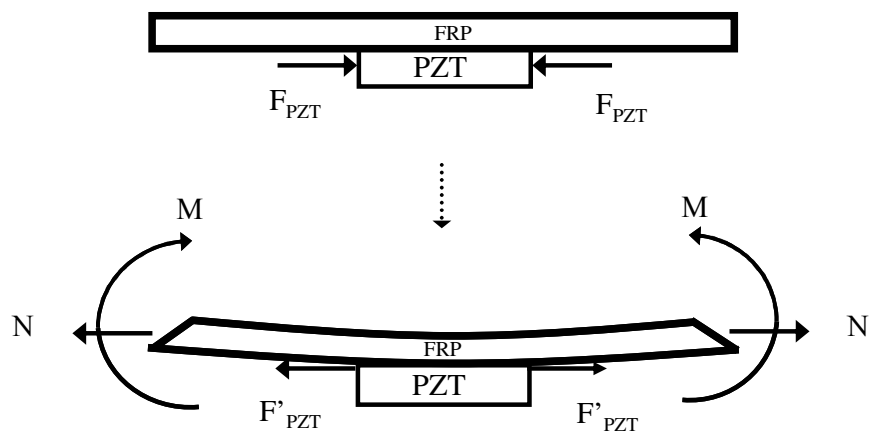
Στην παρούσα διατριβή προτείνεται ο συνδυασμός των FRP με πιεζοηλεκτρικά επιθέματα. Τα τελευταία λειτουργούν ως διεγέρτες όπου σε συνδυασμό με τα FRP και τροφοδοτώντας τα με την απαραίτητη ηλεκτρική τάση έχουν σαν αποτέλεσμα την βελτίωση της συμπεριφοράς των FRP.

Σε αυτό το πλαίσιο, μερικοί από τους ήδη αναφερθέντες ερευνητές έχουν αναπτύξει τεχνικές τοποθέτησης FRP με ικανότητες ενεργού ελέγχου, εφαρμόζοντας πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και διεγέρτες ταυτόχρονα. Θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα έχουν αναφερθεί για τη σύνδεση πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων σε μία επιφάνεια στις εργασίες των Cheng and Taheri (2005), Giurgiutiu et al. (2003), Lin et al. (2001), Qing et al. (2006), Wu et al. (2006).

Αν και όλες αυτές οι τεχνικές που βασίζονται στις ιδιότητες των πιεζοηλεκτρικών υλικών εφαρμόστηκαν για τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας κυρίως στον τομέα αεροναυπηγικής στον τομέα εφαρμοσμένης μηχανικής, η εφαρμογή τους σε δομικά συστήματα ενισχυμένα με FRP είναι περιορισμένη. Στην πραγματικότητα, η πρόβλεψη της αποκόλλησης των FRP παραμένει ακόμα ένα θέμα προς διερεύνηση (θεωρητική και πειραματική), (ACI, 2006). Κατά τη διενέργεια του ελέγχου και μόλις προσδιοριστεί η αποκόλληση, ταυτόχρονα θα πρέπει να αναπτύσσεται μία τεχνική η οποία να συντελεί στη μείωση του κινδύνου αποκόλλησης των άκρων του FRP. Οι προαναφερθείσες τεχνικές που βασίζονται στα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα μπορούν να αποτελούν ολοκληρωμένες τεχνικές εφόσον λειτουργούν ταυτόχρονα αφ' ενός ως έλεγχος δομικής ακεραιότητας και αφ' ετέρου για να παρέχουν τεχνικές ενεργούς διασφάλισης της αποκόλλησης της άκρης του FRP.

Μια αντιμετώπιση του ζητήματος με χρήση του συνδυασμένου συστήματος ταυτόχρονου ελέγχου της αποκόλλησης του FRP και παροχής τεχνικής μείωσης του κινδύνου της αποκόλλησης θα μπορούσε να είναι η διαδικασία εφαρμογής ενός “ευφυούς και αναπροσαρμόσιμου FRP”. Αυτό σημαίνει ότι το ίδιο το FRP υπό κατάλληλες συνθήκες θα μπορεί να “αντιλαμβάνεται” την έναρξη του μηχανισμού αποκόλλησης και ταυτόχρονα να “ενεργεί” ανάλογα για την αντιμετώπισή του. Επιπλέον, αυτή η διαδικασία θα πρέπει να παρέχει τοπική και γενική διέγερση, ενώ οι μετρήσεις από τους τοπικούς αισθητήρες θα πρέπει να συνδυάζονται με τις γενικές πληροφορίες των αισθητήρων για να διακρίνουν καλύτερα τον τύπο αστοχίας.

Η τυπική λειτουργία ενός τέτοιου “ευφυούς και αναπροσαρμόσιμου FRP” μπορεί να περιγραφεί συνοπτικά σύμφωνα με το Σχήμα 6.4. Η τοποθέτηση συστήματος (αισθητήρα - διεγέρτη) πιεζοηλεκτρικών στην επιφάνεια του FRP σε συνδυασμό με μία ειδική μέθοδο βελτιστοποίησης που βασίζεται στην H/M απόκριση του PZT, οδηγεί στην ανάπτυξη αδρανειακών δυνάμεων ή “ελεγχόμενων δευτερευουσών δυνάμεων” μέσω των πιεζοηλεκτρικών διεγερτών, οι οποίες είναι ικανές να αντιστρέψουν και να αντισταθμίζουν την επικείμενη αποκόλληση των άκρων του FRP.



F_{PZT} : Δύναμη πιεζοηλεκτρικού διεγέρτη

F'_{PZT} : “δευτερεύουσα” δύναμη διεγέρτη

M: Ροπή κάμψης

Σχήμα 6.4 Λειτουργία “δευτερευουσών” αδρανειακών δυνάμεων PZT στο FRP

Αυτό το “ευφύες FRP” παρουσιάστηκε αρχικά στις εργασίες του Rabinovitch (2006a, 2006b) όπου η πρόληψη της αποκόλλησης της άκρης σε δοκούς σκυροδέματος ενισχύθηκε με εξωτερικά επικολλημένα σύνθετα υλικά FRP. Αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο προκειμένου να αξιολογηθεί η συμπεριφορά μιας ενισχυμένης δοκού πραγματικού μεγέθους στην οποία συνεργαζόμενα στρώματα πιεζοηλεκτρικών ενεργών υλικών ενσωματώθηκαν στην επιφάνεια του FRP υπό στατικό φορτίο και για διαφορετικές διεγέρσεις στην επιφάνεια των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων. Κατόπιν, με τη δυνατότητα διαφορετικών συνδυασμών πιεζοηλεκτρικών διεγέρσεων επιτεύχθηκε ο έλεγχος, η αποτροπή, ή η καθυστέρηση της αποκόλλησης των ακρών, χρησιμοποιώντας θεωρίες πρόβλεψης της αστοχίας, όπως τη θεωρία συγκέντρωσης τάσεων και του ποσοστού απελευθέρωσης ενέργειας για συγκεκριμένα στατικά φορτία. Ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης θεωρείται αξιόπιστο κριτήριο το οποίο

σχετίζεται με την ανάπτυξη ή το κλείσιμο της ρωγμής σε ένα υλικό όπως και σε προβλήματα επαφής, (Theotokoglou, 1997), (Providakis and Voutetaki, 2005a), (Zacharopoulos, 2004).

Το κριτήριο αστοχίας στην εργασία του Rabinovich για την αποκόλληση της άκρης του FRP βασίζεται στο «κριτήριο των τάσεων». Σε αυτή την περίπτωση οι τάσεις στο κρίσιμο σημείο καθορίζονται και συγκρίνονται με την αντιστοιχία μιας γενικευμένης «δύναμης».

$$\sigma \geq S$$

όπου σ είναι η συνιστώσα του τανυστή τάσεων ή ο γραμμικός ή ο μη γραμμικός συνδυασμός του τανυστή τάσεων και S η γενικευμένη «δύναμη». Το σ μπορεί να αντιπροσωπεύει τις τάσεις Mohr–Coulomb, τις κύριες τάσεις, τις δι-αξονικές τάσεις του σκυροδέματος, τη μέγιστη ελαστική διατμητική τάση διεπιφάνειας, τις τάσεις Von-Mises, ή τις μέγιστες τάσεις της διατομής, (Rabinovitch, 2007b). Στην περίπτωση αυτή, σ και S ορίζονται ως η μέγιστη κατακόρυφη εφελκυστική αντοχή στην κρίσιμη διεπαφή κόλλας-σκυροδέματος και η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος αντίστοιχα. Το ίδιο κριτήριο αστοχίας, στην εργασία των Providakis and Voutetaki (2009) έχει χρησιμοποιηθεί αντίστροφα ως κριτήριο της αποτελεσματικότητας της ενεργού διασφάλισης της μη-αποκόλλησης της άκρης του FRP. Στην εργασία του Rabinovitch (2007b) με τη διαδικασία ενεργού ελέγχου επιδιόρθωσης (active repair) με την εφαρμογή των κατάλληλων τάσεων στην επιφάνεια των PZT, ισχύει σε κάθε σημείο της δυναμικής ανάλυσης ότι $\sigma \leq S$. Η δεύτερη προσέγγιση για το κριτήριο αστοχίας στην εργασία του Rabinovitch αφορά την θεωρία της απελευθέρωσης ενέργειας κατά τη μηχανική θραύση.

Αν και, ο Rabinovitch έδειξε θεωρητικά ότι με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων μειώθηκαν οι τάσεις στην άκρη του FRP με αποτέλεσμα να αποτραπεί η αποκόλληση και να αποφευχθεί η τοπική αστοχία, έθεσε επίσης την ανάγκη μιας συστηματικότερης και ενεργού προσέγγισης για το σχεδιασμό και τη χρήση του πιεζοηλεκτρικού συστήματος αισθητήρα/διεγέρτη σε συνεργασία με το FRP. Κατ' επέκταση της εργασίας του Rabinovitch, στην παρούσα διατριβή διερευνάται, η δυνατότητα χρήσης της θεωρίας EMA σαν μία τεχνική ελέγχου της μη-αποκόλλησης της άκρης του FRP στην κρίσιμη διεπιφάνεια μεταξύ σκυροδέματος και κόλλας FRP σε πραγματικές δομικές κατασκευές υπό την επίδραση δυναμικών φορτίων.

6.4.1 Κριτήριο επιδιόρθωσης με τη χρήση της μεθόδου EMA

Στην παρούσα διατριβή εκμεταλλευόμενοι τις ιδιότητες των πιεζοηλεκτρικών υλικών με τη μέθοδο EMA, και των FRP ως υλικών επισκευής δομικών στοιχείων και με βάση τα αποτελέσματα των Wang et al. γίνεται προσπάθεια επισκευής δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα υπό δυναμική φόρτιση. Τα σεισμικά φορτία που επιβάλλονται στις κατασκευές αποτελούν σημαντικό παράγοντα για την ακεραιότητά τους κατά τη διάρκεια ζωής τους. Γι' αυτό η διερεύνηση του βέλτιστου ελέγχου της δυναμικής απόκρισης των κατασκευών αποτελεί σημαντικό παράγοντα στον τομέα της μηχανικής, (Liolios and Boglou, 2003), (Λιώλιος, 2000), (Favvata et al., 2008). Λόγω των προβλημάτων συνάφειας που εμφανίζονται μεταξύ των FRP και των επιφανειών σκυροδέματος, το ζήτημα αυτό αντιμετωπίζεται περαιτέρω με τον έλεγχο και τη διασφάλιση της καλής συνάφειας μεταξύ FRP και σκυροδέματος.

Στόχος ήταν να διερευνηθεί ένας νέος τρόπος αντιμετώπισης προβλημάτων αποκόλλησης των σύνθετων υλικών επισκευής δομικών στοιχείων με τη χρήση ευφυών και συγκεκριμένα πιεζοηλεκτρικών υλικών με τη μέθοδο EMA. Τα H/M χαρακτηριστικά που λαμβάνονται από τον αισθητήρα σχετίζονται με τη δομική κατάσταση της περιοχής της κατασκευής. Λαμβάνοντας υπόψη την απόκριση αυτή εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για την συνάφεια μεταξύ FRP και επιφάνειας σκυροδέματος. Σύμφωνα με την επίδραση του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου όταν ένα PZT βρίσκεται υπό ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται μηχανική παραμόρφωση σε αυτό με αποτέλεσμα να λειτουργεί ως διεγέρτης. Εκμεταλλευόμενοι την ιδιότητα αυτή του υλικού επιχειρείται να αναπτυχθεί μεθοδολογία που να εξασφαλίζει τον ενεργό έλεγχο της τοποθέτησης των FRP που να αξιολογεί και να ελέγχει κατάλληλα την αποκόλληση στην άκρη τους σε γενικά και σε τοπικά επίπεδα.

Η ιδέα του ελέγχου της μη-αποκόλλησης των FRP και προσπάθειας της ενεργού διασφάλισης της συνεχούς συνάφειας μεταξύ FRP και σκυροδέματος βασίζεται στην αρχική ιδέα της εργασίας των Providaki et al. (2007a). Στην εργασία αυτή μελετάται η δυνατότητα ελέγχου της ταλάντωσης ενός δυναμικού συστήματος, όπως οι μεταλλικές πλάκες με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών (PZT) διεγερτών/αισθητήρων και τη θεωρία της EMA. Η μεταλλική δοκός υποβάλλεται σε εξωτερική δυναμική φόρτιση και επιδιώκεται η ενεργή απόσβεση των ταλαντώσεων της με τη χρήση πιεζοηλεκτρικού συστήματος αισθητήρα/διεγέρτη. Ο έλεγχος της απόκρισης των ταλαντώσεων στη

μεταλλική πλάκα επιτυγχάνεται με τη διαδικασία βελτιστοποίησης της απόκρισης του πραγματικού μέρους της σύνθετης αγωγιμότητας που λαμβάνονται από τα PZT.

Η τοποθέτηση των διεγερτών PZT στις κατασκευές χρησιμοποιούνται για την ενεργό ταλάντωση και τον ακουστικό έλεγχο. Με αυτό τον τρόπο λαμβάνεται το επιθυμητό πεδίο παραμόρφωσης στη κατασκευή μέσω της εφαρμογής συγκεντρωμένων δυνάμεων και ροπών που δημιουργούνται κατά την εφαρμογή ενός κατάλληλου ηλεκτρικού πεδίου στις εξωτερικές επιφάνειες των επιθεμάτων PZT.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία στην εργασία των Providaki et al. (2007a) οδηγεί στον υπολογισμό της βέλτιστης ηλεκτρικής τάσης (διαφορά δυναμικού) που εφαρμοζόμενη προκαλεί τις ‘ευφυείς δευτερεύουσες δυνάμεις’ που έχουν στόχο να ‘ακυρώσουν’ την απόκριση που προκύπτει από το εξωτερικό δυναμικό φορτίο και να μειώσουν την ταλάντωση που αυτό προκαλεί. Στην παραπάνω έρευνα με τη διαδικασία βελτιστοποίησης των αποκρίσεων των αισθητήρων PZT υπολογίζονται οι τάσεις που πρέπει να εφαρμοστούν στα επιθέματα των διεγερτών PZT για να παραχθούν οι ‘δευτερεύουσες δυνάμεις’. Η ηλεκτρομηχανική αγωγιμότητα που παράγεται στην επιφάνεια των PZT εξάγεται ώστε με τη διαδικασία βελτιστοποίησης να οδηγήσει στην επιθυμητή απόκριση της απόσβεσης με σκοπό τη μείωση των μηχανικών ταλαντώσεων. Η αποτελεσματικότητά της σε αυτό το πεδίο έρευνας οφείλεται στο ότι η απόκριση των αισθητήρων ανακλά άμεσα τις μηχανικές ιδιότητες της κατασκευής. Η διαδικασία πραγματοποιείται με ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων FEM που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της διαφοράς μεταξύ της υπολογισμένης και της επιθυμητής απόκρισης ηλεκτρομηχανικής αγωγιμότητας για τα φάσματα συχνότητας που ενδιαφέρουν. Η υπολογισμένη απόκριση είναι αυτή του αρχικού συστήματος (αυτό που επιδιώκεται η μείωση της ταλάντωσης) και η επιθυμητή είναι η απόκριση του συστήματος στο οποίο έχει ληφθεί συντελεστής απόσβεσης.

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται μια ειδική μεθοδολογία που επιδιώκει τη διασφάλιση της μεθόδου επισκευής με FRP σε ένα δομικό σύστημα με βάση τα μέχρι τώρα συμπεράσματα. Ο σκοπός αυτής της μεθοδολογίας είναι να παραχθούν κατάλληλες ‘δευτερεύουσες δυνάμεις’ από τα επιθέματα διεγερτών PZT ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή απόκριση μίας ενισχυμένης δοκού υπό εξωτερικό δυναμικό φορτίο. Στην περίπτωση αυτή ο στόχος της βελτιστοποίησης είναι η μείωση του κινδύνου αποκόλλησης της άκρης του FRP της δοκού λαμβάνοντας υπόψη την απόκριση της H/M αγωγιμότητας της αρχικής ενισχυμένης δοκού. Ως “αρχική

ενισχυμένη δοκός” θεωρείται η δοκός στην οποία υπό δυναμική ανάλυση εξακολουθεί να διατηρείται άριστη η συνάφεια μεταξύ δοκού σκυροδέματος και FRP.

Η χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών παρέχει το πλεονέκτημα της δυναμικής επιδιόρθωσης με ενεργό τρόπο (active repair). Η βασική ηλεκτρομηχανική τους ιδιότητα λόγω του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, επιτρέπει να εφαρμόζονται διαφορετικά φορτία τάσης ώστε η επιδιόρθωση να παραμένει πλήρης και αποτελεσματική. Το σύστημα αισθητήρα/διεγέρτη εφαρμόζεται σε σημεία πιθανής αποκόλλησης στην επιφάνεια των FRP με τον ίδιο τρόπο που επικολλούνται σε άλλες επιφάνειες όπως π.χ. στις μεταλλικές πλάκες με χρήση εποξειδικής κόλλας. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι ελαφριά, λεπτά και εύκολα μπορούν να επικολληθούν σε μία κατασκευή και μπορούν να σχεδιαστούν με ελάχιστη αρνητική επιρροή στην γενική δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής.

Σε αυτή την περίπτωση η χρήση των ευφυών υλικών και στην συγκεκριμένη μελέτη των πιεζοηλεκτρικών υλικών εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα για την επιδιόρθωση της βλάβης των σύνθετων υλικών υπό δυναμική φόρτιση. Συγκεκριμένα μέσω των πιεζοηλεκτρικών διεγερτών επιδιώκεται να εφαρμόζεται κατά περίπτωση μία “ευφυής δευτερεύουσα δύναμη” η οποία να αντιστρέφει και να αντισταθμίζει την επικείμενη βλάβη. Προφανώς ως «βλάβη» στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται η αποκόλληση του σύνθετου υλικού-FRP από την επιφάνεια της δοκού σκυροδέματος. Τα σύνθετα υλικά FRP τοποθετούνται στο σημείο το οποίο έχει υποδείξει ο έλεγχος δομικής ακεραιότητας που πραγματοποιείται σε προηγούμενο στάδιο. Ο διεγέρτης τοποθετείται στην άκρη του FRP στο σημείο αναμενόμενης αποκόλλησης σε όλο το πλάτος της δοκού και ο αισθητήρας σε σχετικά κοντινό σημείο. Όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο επιδρά στο διεγέρτη PZT, λόγω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου μια μηχανική δύναμη παράγεται σε απόκριση του ηλεκτρικού φορτίου. Στη συνέχεια η μηχανική δύναμη μεταφέρεται από το PZT στο FRP προκαλώντας αντίθετη δύναμη από αυτή που συντελεί στην αποκόλλησή του. Η βλάβη εισάγεται στο αναλυτικό προσομοίωμα FEM με τον ίδιο τρόπο όπως στην περίπτωση του ελέγχου δομικής ακεραιότητας δηλαδή με την μείωση του μέτρου ελαστικότητας του υλικού.

6.4.2 Βελτιστοποίηση του συστήματος των πιεζοηλεκτρικών (αισθητήρα-διεγέρτη)

Στην περίπτωση του ελέγχου της αποκόλλησης του FRP η μεθοδολογία εστιάζει στον προσδιορισμό των κατάλληλων τάσεων εφαρμογής στους πιεζοηλεκτρικούς

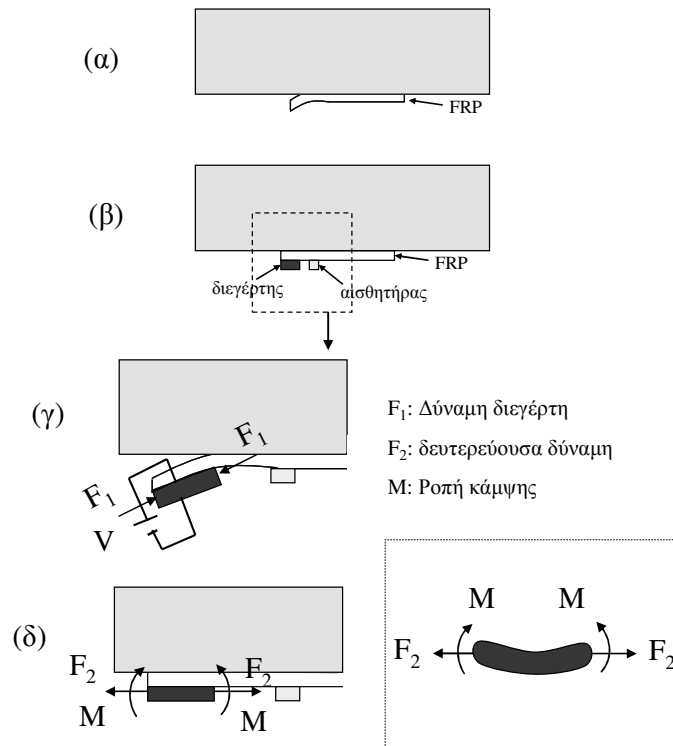
διεγέρτες PZT. Οι τιμές των τάσεων που εφαρμόζονται μεταβάλλονται ανάλογα με τη μορφή της κάθε ιδιοσυχνότητας. Λόγω των εφαρμοζόμενων τάσεων το πιεζοηλεκτρικό - αισθητήρας δίνει την απόκριση της H/M σύνθετης αγωγιμότητας της επιθυμητής υγιούς δοκού στις επιλεγμένες εκ των προτέρων ιδιοσυχνότητες της ταλαντούμενης κατασκευής με βλάβη. Ως πρώτο βήμα σε αυτή τη διαδικασία, χρησιμοποιείται μία δεδομένη ή γνωστή απόκριση H/M σύνθετης αγωγιμότητας. Η απόκριση αυτή λαμβάνεται από τον αισθητήρα της υγιούς δοκού και έτσι ορίζεται η επιθυμητή απόκριση $\bar{Y}^*(\omega_\ell)$ αγωγιμότητας. Η απόκριση αυτή αφορά την απόκριση της υγιούς κατασκευής στο συγκεκριμένο επίθεμα PZT με ω_1 το σημείο δειγματοληψίας της συχνότητας. Το δεύτερο βήμα είναι να οριστεί η απαιτούμενη τάση που θα εφαρμοστεί στους διεγέρτες της δοκού με βλάβη. Η τάση αυτή θα έχει ως αποτέλεσμα να παραχθεί η επιθυμητή απόκριση σύνθετης αγωγιμότητας της επιδιωρθωμένης δοκού. Η απόκριση αυτή θα είναι η πλησιέστερη απόκριση $\bar{Y}(\omega_\ell)$ στην απόκριση της $\bar{Y}^*(\omega_\ell)$ υγιούς δοκού στον αντίστοιχο αισθητήρα PZT. Η ιδέα αυτής της προσέγγισης μπορεί να θεωρηθεί στην ουσία ως ένα αντίστροφο πρόβλημα. Η λύση αυτού του αντίστροφου προβλήματος επιτυγχάνεται σε περιβάλλον MATLAB ελαχιστοποιώντας τις διαφορές των τιμών απόκρισης μεταξύ της υπολογισμένης διεπιφάνειας βλάβης και της επιθυμητής επιφάνειας υγιούς δοκού. Η προσπάθεια αυτή πραγματοποιείται σε προεπιλεγμένη περιοχή συχνοτήτων. Γι' αυτό το λόγο για ένα επίθεμα PZT το E_r είναι το κριτήριο επιδιόρθωσης, το οποίο περιγράφει την απόκλιση μεταξύ της σύνθετης H/M αγωγιμότητας υπολογισμένης από το μοντέλο με βλάβη και το επιθυμητό αντίστοιχο του μοντέλο (υγιές) από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και μπορεί να οριστεί ως:

Κριτήριο επιδιόρθωσης: $E_r \rightarrow 0$

$$E_r = \left[\bar{Y}(\omega_\ell) - \bar{Y}^*(\omega_\ell) \right]^2, \quad \ell = 1, \dots, nf \quad (6.1)$$

όπου nf είναι ο αριθμός των σημείων δειγματοληψίας των συχνοτήτων του ενδιαφέροντος, και E_r είναι η λειτουργία βελτιστοποίησης. Η τιμή της εξίσωσης (6.1) δεν θα είναι μηδενική ή ελάχιστη αν τα μητρώα της κατασκευής και η απόκριση της ταλάντωσης δεν είναι ικανή να αναπαραστήσει την επιθυμητή απόκριση. Επομένως, ο βασικός στόχος από αυτή την προσέγγιση είναι να ενημερωθεί η τάση εισαγωγής των

διεγερτών PZT για να αντιπροσωπεύσει την επιθυμητή απόκριση με τη χρήση μιας τεχνικής βελτιστοποίησης που ρυθμίζει την απόκριση της H/M αγωγιμότητας. Το παρόν πρόβλημα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα είδος αντίστροφου προβλήματος. Για το μη γραμμικό αντίστροφο αυτό πρόβλημα, απαιτείται μια κατάλληλη τεχνική βελτιστοποίησης. Η τεχνική βελτιστοποίησης σε περιβάλλον του MATLAB που βασίζεται στη διαδοχική αναζήτηση, αναπτύχθηκε για να καθορίσει τις απαραίτητες τάσεις εισαγωγής για το επιλεγμένο πεδίο συχνότητας. Η αναζήτηση μιας προσαρμογής ολοκληρώνεται όταν το κριτήριο επιδιόρθωσης ικανοποιείται δηλαδή το E_r τείνει στο ελάχιστο. Στο Σχήμα 6.5 περιγράφεται σχηματικά η διαδικασία της εφαρμογής του “ευφυούς αναπροσαρμόσιμου FRP”.



Σχήμα 6.5 Διαδικασία της εφαρμογής του “ευφυούς αναπροσαρμόσιμου FRP”

(α) η δοκός σκυροδέματος με το FRP το οποίο έχει υποστεί αποκόλληση στο αριστερό άκρο του,

(β) επικολλάται το σύστημα αισθητήρα-διεγέρτη,

(γ) εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού στον διεγέρτη και

(δ) δημιουργούνται “ευφυνείς” δευτερεύουσες δυνάμεις οι οποίες τείνουν να επαναφέρουν την κατάσταση του FRP πριν την αποκόλληση.

6.5 Εφαρμογή επιδιόρθωσης βλάβης

6.5.1 Αριθμητικό μοντέλο

Το δομικό στοιχείο που εξετάζεται είναι μία δοκός από σκυρόδεμα (διαστάσεις δοκού 0.1m 0.1m 0.5m) στην οποία έχει διαγνωστεί βλάβη και για την επισκευή της έχει τοποθετηθεί κατάλληλα FRP (0.12m, 0.1m, 0.0012m) όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4. Το FRP επικολλάται με εποξειδική κόλλα (0.12m, 0.1m, 0.0040m) στην επιφάνεια της δοκού. Η παραπάνω δοκός τίθεται σε ανάλυση συχνοτήτων στην περιοχή των πρώτων ιδιομορφών στις οποίες φαίνεται ότι υπάρχουν ακραίες αποκρίσεις.

Στην παρούσα έρευνα μελετάται η συμπεριφορά του μοντέλου της παραπάνω δοκού στην οποία έχει εισαχθεί βλάβη-αποκόλληση (0.01m, 0.1m, 0.0040m) στην περιοχή της κόλλας σε όλο το πλάτος της αριστερής άκρης του. Η βλάβη σε αυτό το σημείο κρίνεται αναμενόμενη (όπως αντίστοιχα θα μπορούσε να εμφανιστεί και στην δεξιά άκρη) λόγω των αυξημένων τάσεων στην περιοχή (ακραίο σημείο). Στο τμήμα αυτό της κόλλας μεταξύ σύνθετου υλικού και δοκού σκυροδέματος θεωρήθηκαν μειωμένοι συντελεστές δυσκαμψίας οι οποίοι δεικνύουν βλάβη με αποτέλεσμα την αποκόλληση του FRP από τη δοκό που οδηγεί στη μείωση της συνεισφοράς του σε ακραίες αποκρίσεις. Για τη δοκό από σκυρόδεμα έχει ληφθεί μέτρο ελαστικότητας $E=22.5 \times 10^9$ N/m. Η περιοχή της βλάβης-αποκόλλησης ορίστηκε ως ποσοστό του συντελεστή δυσκαμψίας του μέτρου ελαστικότητας E διανεμημένη κατά μήκος του πλάτους της τρισδιάστατης περιοχής της βλάβης (διάσταση περιοχής, 0.01m σε βάθος, 0.01m πάχος και 0.10m σε πλάτος). Για να περιγραφεί και να προσομοιωθεί η δυναμική συμπεριφορά της δοκού και των πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων, χρησιμοποιούνται τα προγράμματα προσομοίωσης και επεξεργασίας COMSOL και MATLAB. Η βλάβη αυτή στο αριστερό άκρο (τοπική αστοχία) λόγω των αναπτυσσόμενων τάσεων στην περιοχή εξαιτίας του εφαρμοζόμενου δυναμικού φορτίου θα οδηγήσει σταδιακά σε αποκόλληση σημαντικού ή όλου του τμήματος του FRP με αποτέλεσμα τη γενική αστοχία.

Για την αντιμετώπιση αυτού του είδους αστοχίας στην δοκό, πρώτη φορά χρησιμοποιείται η μέθοδος EMA. Στη δοκό τοποθετούνται δύο πιεζοηλεκτρικά επιθέματα. Ένας αισθητήρας και ένας διεγέρτης. Ο αισθητήρας είναι το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα που τοποθετείται κοντά στην περιοχή που έχει παρουσιαστεί η βλάβη ώστε να λαμβάνει συνεχώς την απόκριση της περιοχής. Έχει τετραγωνική μορφή και είναι

διαστάσεων 1cm x 1cm x 0.025cm όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.6. Ο διεγέρτης είναι ορθογωνικής μορφής με διαστάσεις 1cm x 10cm x 0.025cm και τοποθετείται στην άκρη κατά μήκος του σύνθετου υλικού και καλύπτει όλο το πλάτος της δοκού στην περιοχή που έχει παρουσιαστεί η βλάβη-αποκόλληση. Στον αισθητήρα εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού-τάση ίση με 1 Volt με σκοπό να διεγερθεί ώστε να ληφθούν τα ηλεκτρομηχανικά χαρακτηριστικά της σύνθετης αγωγιμότητας τα οποία είναι χρήσιμα στην μεθοδολογία που θα αναπτυχθεί και βασίζεται στην θεωρία EMA. Ο διεγέρτης που είναι τοποθετημένος στο σημείο της βλάβης είναι απενεργοποιημένος με σκοπό στο επόμενο στάδιο στην επιφάνεια του να εφαρμοστεί κατάλληλη διαφορά δυναμικού η οποία έχει προέλθει από τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Μετά την συλλογή των δεδομένων της σύνθετης αγωγιμότητας του αισθητήρα και με τη διαδικασία βελτιστοποίησης λαμβάνεται η τάση που πρέπει να εφαρμοστεί στο διεγέρτη με σκοπό να προκληθούν κατάλληλες δυνάμεις στα σημεία επαφής του με το σύνθετο υλικό και να αποτραπεί η αποκόλληση.

6.5.2 Διαδικασία βελτιστοποίησης με το κριτήριο EMA

Η διαδικασία βελτιστοποίησης περιλαμβάνει τη χρήση του κριτηρίου επιδιόρθωσης E_r , με το οποίο υπολογίζεται σε κάθε βήμα της ανάλυσης συχνοτήτων του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων η διαφορά της απόκρισης της σύνθετης αγωγιμότητας μεταξύ της υγιούς και με βλάβη δοκού. Η ανάλυση γίνεται με εναλλαγή των επιβαλλόμενων ηλεκτρικών φορτίων στο διεγέρτη PZT της περίπτωσης της δοκού με βλάβη. Όταν αυτή η διαφορά μηδενιστεί ή τείνει προς το μηδέν το πρόγραμμα βελτιστοποίησης έχει εντοπίσει και δίνει την αντίστοιχη τάση “επιδιόρθωσης”. Με την τάση “επιδιόρθωσης” αυτή εφαρμοζόμενη στο διεγέρτη επιτυγχάνεται η ταύτιση της απόκρισης των H/M χαρακτηριστικών της σύνθετης αγωγιμότητας που λαμβάνεται από τον αισθητήρα, για τις δύο καταστάσεις (υγιούς και με βλάβη δοκού).

Η βασική ιδέα της μεθόδου βελτιστοποίησης στηρίζεται στην εξής θεώρηση. Έστω δύο συστήματα: A το αρχικό δομικό σύστημα με απόκριση H/M αγωγιμότητας στο συγκεκριμένο διάστημα συχνοτήτων A' και B το αρχικό σύστημα στο οποίο όμως εισάγεται βλάβη με αντίστοιχη απόκριση B'. Η θεώρηση που λαμβάνεται κατά την εφαρμογή της βελτιστοποίησης είναι ότι θα πρέπει να ισχύει $A'=B'$.

Η απόκριση της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας που λαμβάνεται από την κάθε περίπτωση όπως έχει ερευνηθεί και αποδειχθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο εκφράζει τα μηχανικά και δυναμικά χαρακτηριστικά του δομικού στοιχείου και δίνει πληροφορίες για τη δομική κατάστασή του. Όταν για το δομικό στοιχείο A με απόκριση A' και για το δομικό στοιχείο B με απόκριση B' ισχύει $A'=B'$, έχουν δηλαδή την ίδια απόκριση H/M σύνθετης αγωγιμότητας σε ένα συγκεκριμένο διάστημα συχνοτήτων έχουν τα ίδια μηχανικά και δυναμικά χαρακτηριστικά. Όταν για το δομικό στοιχείο A με απόκριση A' και για το δομικό στοιχείο B με απόκριση B' που ισχύει $A' \neq B'$ έχουν κάποια διαφορά στα χαρακτηριστικά τους μικρή ή μεγάλη ανάλογα με τη διαφορά μεταξύ των αποκρίσεών τους. Στην παρούσα έρευνα η βελτιστοποίηση ολοκληρώνεται όταν ισχύει $A'=B'$. Αναλυτικά η ισότητα αυτή εκφράζεται από την εξίσωση (6.2). Στην περίπτωση αυτή οι αποκρίσεις της H/M αγωγιμότητας ταυτίζονται που σημαίνει ότι το δομικό στοιχείο με βλάβη συμπεριφέρεται όπως το υγιές. Κατ' επέκταση θεωρείται ότι έχει επιδιορθωθεί η βλάβη δηλαδή η αποκόλληση στο άκρο του FRP. Γι' αυτό στη συνέχεια αναπτύσσεται αριθμητικό παράδειγμα όπου από τα αποτελέσματα προκύπτει η επιτυχής εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου.

$$A'[\text{Δομικό στοιχείο υγιές}] = B'[\text{Δομικό στοιχείο με βλάβη} + \text{Εφαρμογή βέλτιστης τιμής διαφοράς δυναμικού στο διεγέρτη}] \quad (6.2)$$

6.5.3 Εφαρμογή του “ευφυούς και αναπροσαρμόσιμου FRP” για την επισκευή δοκού υπό δυναμική φόρτιση

Για τη διερεύνηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας αναπτύχθηκε ένα μοντέλο μιας δοκού από σκυρόδεμα η οποία έχει επισκευαστεί με FRP. Βασιζόμενοι στο κριτήριο επιδιόρθωσης με τη μέθοδο EMA αναπτύσσεται το ακόλουθο μοντέλο προσομοίωσης για την επιβεβαίωση της λειτουργίας του.

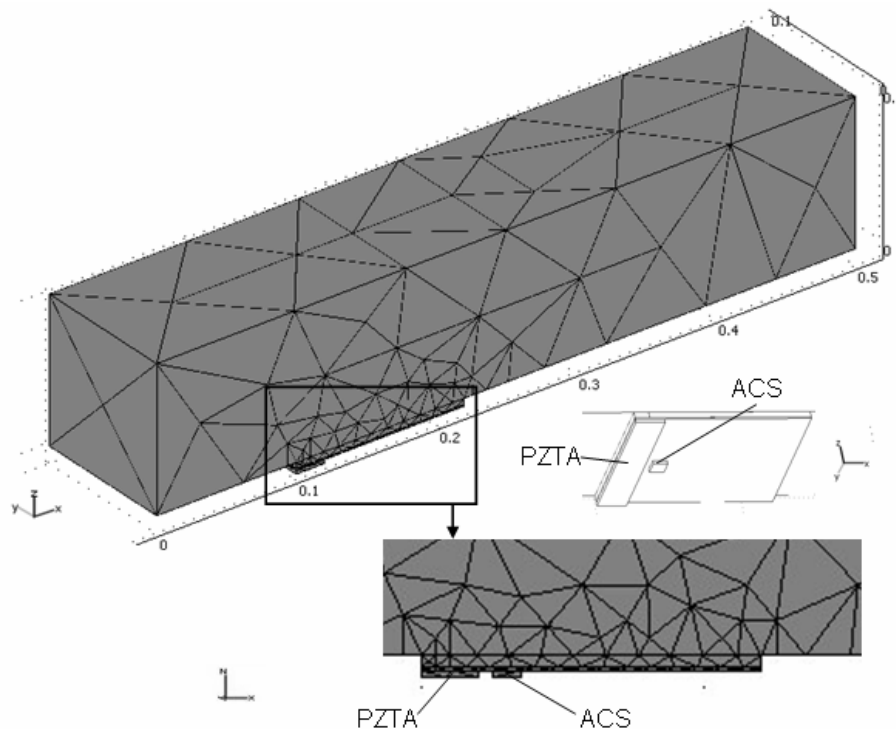
Η προσομοίωση της δοκού στην οποία εφαρμόζεται το “ευφύες και αναπροσαρμόσιμο FRP” για την επισκευή της υπό δυναμική φόρτιση γίνεται με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων COMSOL. Στο Σχήμα 5.6 φαίνεται η γεωμετρία της δοκού και η διακριτοποίησή της μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Στην περιοχή με έντονη γεωμετρική ποικιλομορφία

παρατηρείται πύκνωση του κανάβου όπως φαίνεται και από το σχήμα. Στον Πίνακα 6.1 δίδονται οι ιδιότητες των υλικών του “ευφυούς” δομικού συστήματος δηλαδή της δοκού, του FRP, των πιεζοηλεκτρικών και του στρώματος της κόλλας. Η βλάβη - αποκόλληση του FRP εισάγεται στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας του τμήματος της κόλλας στην άκρη του FRP. Στο Σχήμα 6.7 παρουσιάζεται το προσομοίωμα της δοκού με αποκόλληση 10mm στο άκρο του FRP η οποία εκτείνεται σε όλο το πλάτος της δοκού. Το τμήμα βλάβης - αποκόλλησης του ακραίου τμήματος της κόλλας στην άκρη του FRP έχει μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με το υπόλοιπο τμήμα της κόλλας $E_{\text{dam}} = 10\% E_{\text{undam}}$.

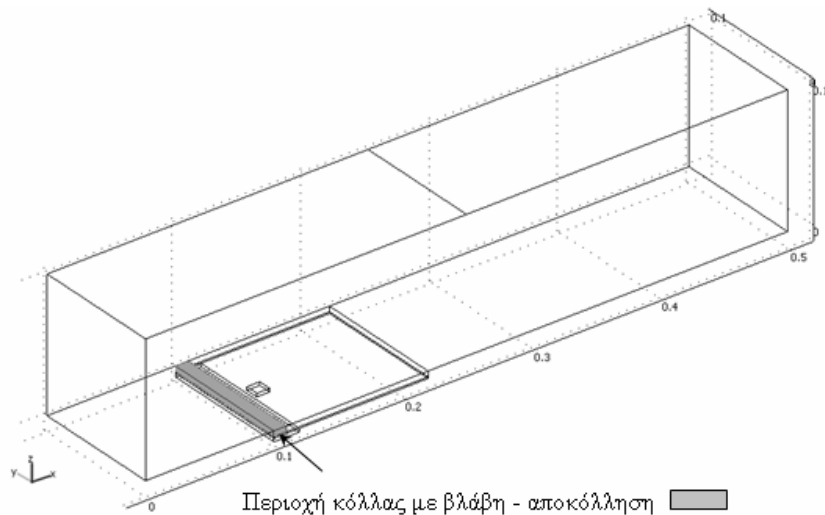
Πίνακας 5.1: Ιδιότητες των υλικών του δομικού συστήματος

Ιδιότητες υλικών				
	Σκυρόδεμα	FRP	κόλλα	Κόλλα με βλάβη
E (Μέτρο Ελαστικότητας Pa)	22.5×10 ⁹	32×10 ⁶	3.8×10 ⁶	3.8×10 ⁴
ρ (Πυκνότητα Kg/m ³)	2400	2000	1310	1310
ν (Λόγος Poisson)	0.21	0.20	0.21	0.21
Εφελκυστική δύναμη (GPa)		2.4		
PZT	S _E (1/Pa) πίνακας ενδοτικότητας			
	$\begin{bmatrix} 16.5e-12 & -4.78e-12 & -8.45e-12 & 0 & 0 & 0 \\ -4.78e-12 & 16.5e-12 & -8.45e-12 & 0 & 0 & 0 \\ -8.45e-12 & -8.45e-12 & 20.7e-12 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 43.5e-12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 43.5e-12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 42.6e-12 \end{bmatrix}$			
	d (C/N) πίνακας σύζευξης			
	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 741e-12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 741e-12 & 0 & 0 \\ -274e-12 & -274e-12 & 593e-12 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$			
	ε _{rT} σχετική διηλεκτρική σταθερά			
	$\begin{bmatrix} 3130 & 0 & 0 \\ 0 & 3130 & 0 \\ 0 & 0 & 3400 \end{bmatrix}$			
ρ=7500 kg/m ³ πυκνότητα				

Με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιείται ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων και για τις δύο περιπτώσεις (δοκό με αποκόλληση και υγιή δοκό) για την εύρεση των πρώτων τιμών των ιδιοσυχνοτήτων. Στον Πίνακα 6.2 δίδονται οι τιμές των πρώτων ιδιοσυχνοτήτων της δοκού με βλάβη και χωρίς βλάβη. Παρατηρείται το φαινόμενο μετάθεσης ιδιοσυχνοτήτων λόγω της παρουσίας βλάβης. Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων της δοκού με βλάβη είναι μειωμένες σε σχέση με τις τιμές της υγιούς δοκού. Το κριτήριο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί ως δείκτης βλάβης στην εργασία της Cundy et al. (2003) που γίνεται εντοπισμός βλάβης. Στη συνέχεια πραγματοποιείται δυναμική ανάλυση και των δύο περιπτώσεων δοκού (με και χωρίς βλάβη) σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων που περιλαμβάνει την πρώτη θεμελιώδη ιδιοσυχνότητα και τις επόμενες πέντε ιδιοσυχνότητες των δοκών, με έμφαση τις γειτονικές συχνότητες των ιδιοσυχνοτήτων της δοκού με βλάβη. Αυτό γιατί η διαδικασία στοχεύει στην ταύτιση της H/M αγωγιμότητας της δοκού με βλάβη με την υγιή δοκό. Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από 1425 τετραεδρικά στοιχεία. Το δυναμικό φορτίο που ασκείται στο μέσον κατά μήκος της δοκού είναι ίσο με $-100e^{-i\omega t}$ N.



Σχήμα 6.6 Γεωμετρία και διακριτοποίηση του δομικού συστήματος



Σχήμα 6.7 Προσομοίωση δομικού συστήματος με βλάβη-αποκόλληση της άκρης του FRP

Πίνακας 5.2 Τιμές τριών πρώτων ιδιομορφών δομικών συστημάτων

Ιδιομορφές	Χωρίς βλάβη	Με βλάβη
1 ^η	727,54	723,91
2 ^η	753,15	732,60
3 ^η	895,70	769,90

6.6 Αποτελέσματα εφαρμογής του “ευφυούς και αναπροσαρμόσιμου FRP” ως μέσο επισκευής δομικών στοιχείων

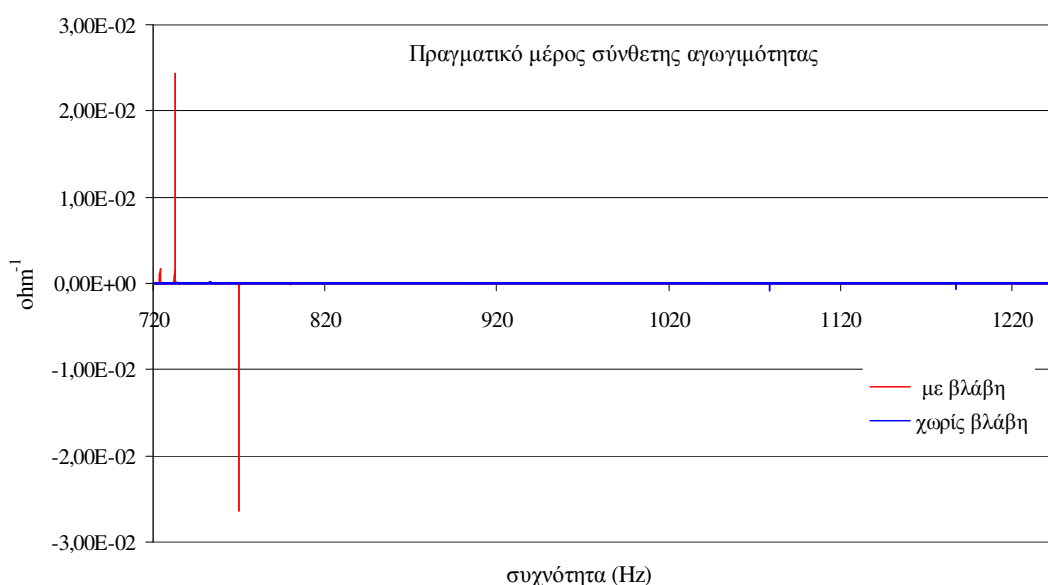
Η βεβαίωση της ύπαρξης βλάβης - αποκόλλησης αποδεικνύεται εφόσον εμφανιστούν διαφορές στις αποκρίσεις της H/M αγωγιμότητας μεταξύ των δύο περιπτώσεων.

6.6.1 Σύγκριση του μοντέλου με αποκόλληση του άκρου του FRP με το υγιές

Οι ιδιοσυχνότητες της δοκού με βλάβη αποτελούν τις ιδιοσυχνότητες που λαμβάνονται υπόψη κατά τον έλεγχο λόγω των υψηλών τιμών της απόκρισης αγωγιμότητας επειδή έχουν αιχμηρές κορυφές με μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την υγιή δοκό.

Στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζεται η απόκριση των έξι πρώτων ιδιομορφών της σύνθετης αγωγιμότητας σε σχέση με τη συχνότητα και για τις δύο περιπτώσεις (δοκού με βλάβη και χωρίς). Οι αποκρίσεις των H/M χαρακτηριστικών προέρχονται από τον τετραγωνικής μορφής διεγέρτη-αισθητήρα ο οποίος βρίσκεται σε κοντινή απόσταση με την περιοχή που προβλέπεται η αποκόλληση του άκρου του FRP.

Όπως παρατηρείται από αυτό το διάγραμμα υπάρχει μεγάλη διαφορά στην απόκριση αγωγιμότητας που διακρίνεται περισσότερο στην δεύτερη και την τρίτη ιδιομορφή της κατασκευής. Αμέσως μικρότερη διαφορά υπάρχει στην 1η και από την 4η μέχρι και την 6η οι διαφορές μειώνονται ακόμη περισσότερο. Αυτό σημαίνει ότι το σημείο της αποκόλλησης δεν επηρεάζεται κατά τη δυναμική απόκριση σε αυτές τις ιδιοσυχνότητες οπότε δεν αναμένεται επιδείνωση της αποκόλλησης. Έτσι η διαδικασία επιδιόρθωσης βλάβης αφορά τις πρώτες τρεις ιδιοσυχνότητες στις οποίες φαίνεται να υπάρχει μεγαλύτερη απόκλιση του E_r .

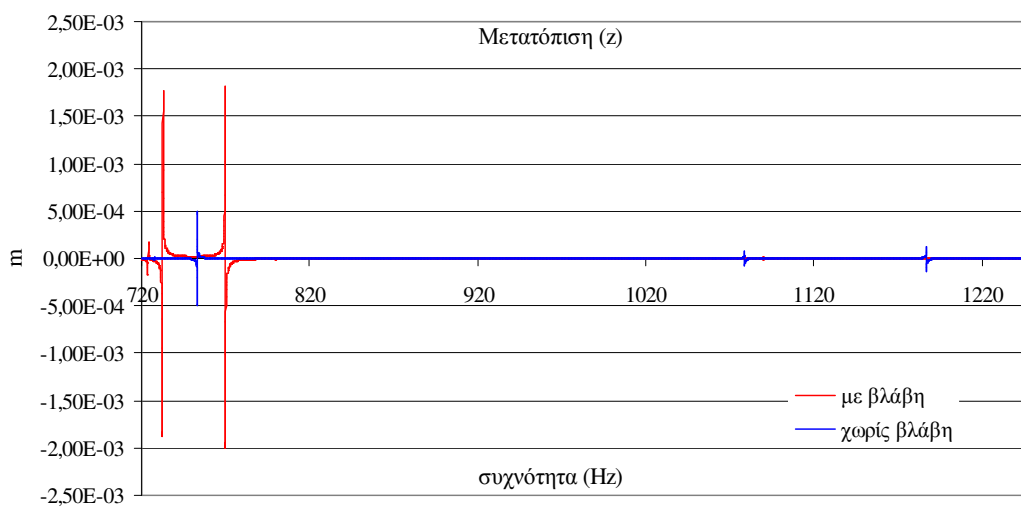


Σχήμα 6.8 Σύγκριση απόκρισης αγωγιμότητας στο πεδίο συχνοτήτων ελέγχου

Η απόκριση της δοκού χωρίς βλάβη παρουσιάζει και αυτή διακυμάνσεις στα σημεία γύρω από τις πρώτες ιδιοσυχνότητές της αλλά δεν εμφανίζει τις υψηλές τιμές αιχμηρών κορυφών όπως στην περίπτωση της δοκού με βλάβη.

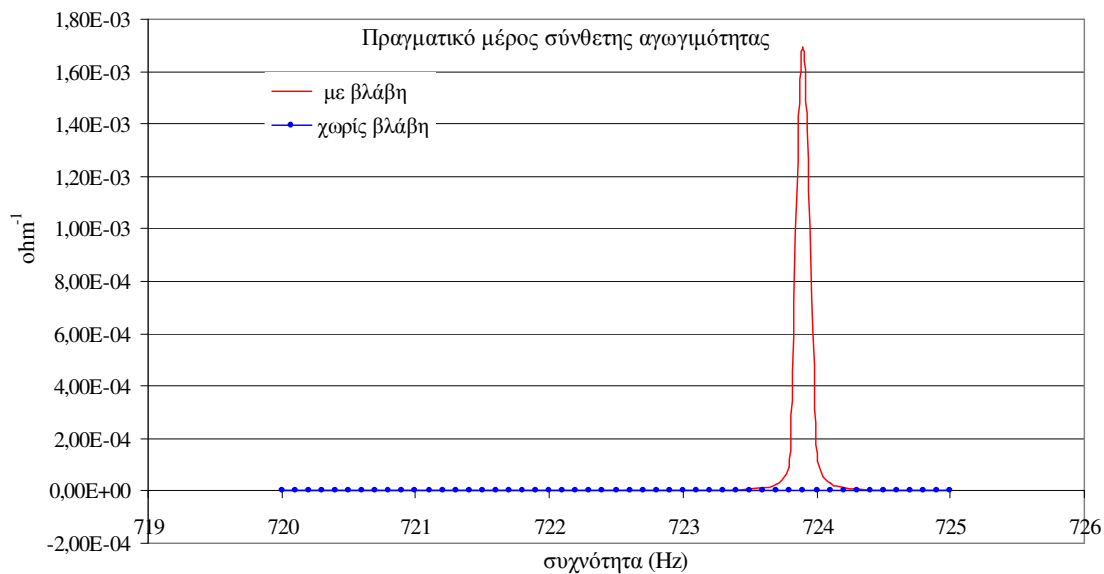
Στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζεται η απόκριση της κατακόρυφης μετατόπισης σε σημείο στην άκρη του FRP μεταξύ της διεπιφάνειας του σύνθετου υλικού με το σκυρόδεμα. Παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις που εμφανίζονται στην περίπτωση

της κατακόρυφης μετατόπισης στην περίπτωση της δοκού με βλάβη. Η απόκριση αυτή φαίνεται να είναι συμβατή (σύμφωνη) με το γεγονός ότι η άκρη του ινοπλισμένου πολυμερούς FRP έχει αποκολληθεί. Στο σχήμα αυτό μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι αιχμηρές κορυφές στην απόκριση της κάθετης μετατόπισης στην άκρη της αποκόλλησης συμπίπτουν με την απόκριση του πραγματικού μέρους της σύνθετης αγωγιμότητας. Γεγονός το οποίο δείχνει επίσης την άμεση σχέση της απόκρισης της αγωγιμότητας με την δομική ακεραιότητα της δοκού. Οι αιχμηρές κορυφές στο Σχήμα 6.9 δείχνουν ότι το FRP έχει αποκολληθεί από την επιφάνεια του σκυροδέματος και ακολουθεί εντονότερη δυναμική απόκριση από ότι το υγιές δομικό σύστημα.

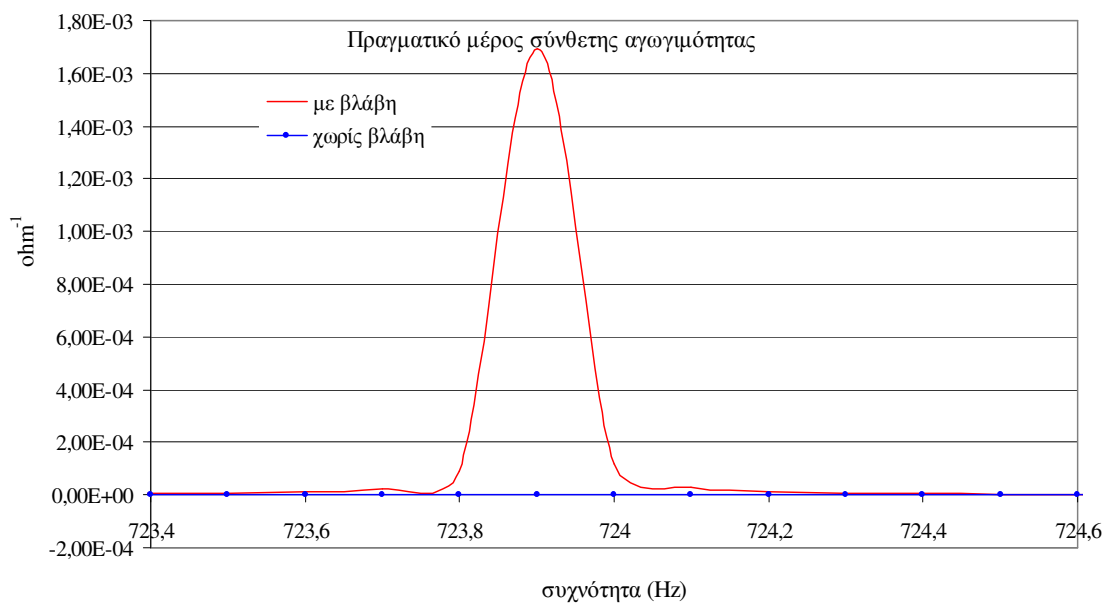


Σχήμα 6.9 Απόκριση κάθετης μετατόπισης σημείου στην άκρη του FRP

Στο Σχήμα 6.10 παρουσιάζεται η απόκριση της σύνθετης αγωγιμότητας για την πρώτη ιδιομορφή για τη δοκό με βλάβη και την δοκό χωρίς βλάβη. Στο Σχήμα 6.11 φαίνεται η μεγέθυνση της περιοχής γύρω από την πρώτη αιχμηρή κορυφή (πρώτη ιδιοσυχνότητα) της δοκού με βλάβη. Στο σχήμα αυτό διακρίνεται ότι η έντονη διαφορά εντοπίζεται στην περιοχή συχνοτήτων 723.6 Hz μέχρι και 724.5 Hz με μέγιστο το σημείο 723.9 Hz.

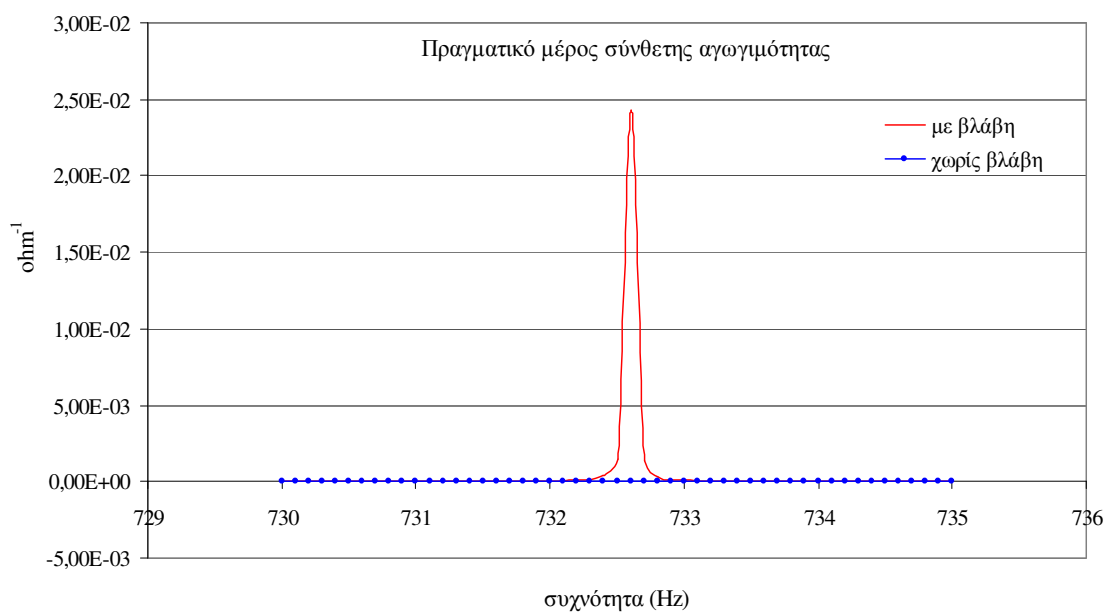


Σχήμα 6.10 Απόκριση αγωγιμότητας στην περιοχή της 1^{ης} ιδιομορφής ελέγχου.

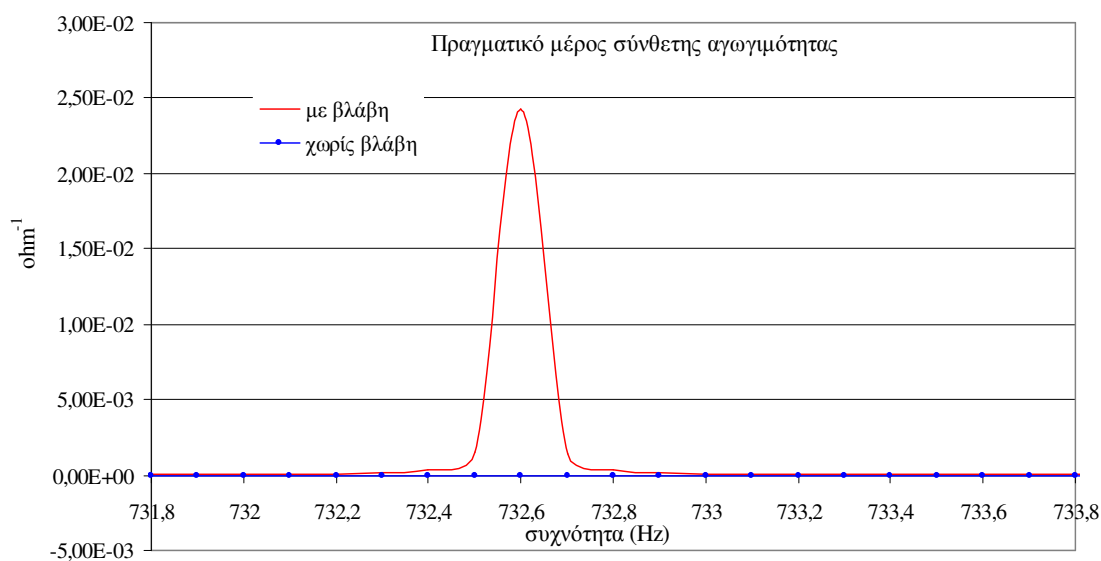


Σχήμα 6.11 Μεγέθυνση της περιοχής των γειτονικών συχνοτήτων της 1^{ης} ιδιομορφής

Στο Σχήμα 6.12 παρουσιάζεται αντίστοιχα η απόκριση της σύνθετης αγωγιμότητας για την δεύτερη ιδιομορφή της δοκού με βλάβη και η αντίστοιχη της υγιούς δοκού και στο Σχήμα 6.13 φαίνεται η μεγέθυνση της περιοχής γύρω από την αιχμηρή κορυφή της δοκού με βλάβη. Στο σχήμα αυτό διακρίνεται ότι η έντονη διαφορά της απόκρισης εμφανίζεται στην περιοχή συχνοτήτων 732.3 Hz μέχρι 732.9 Hz με μέγιστο το σημείο 732.6 Hz.

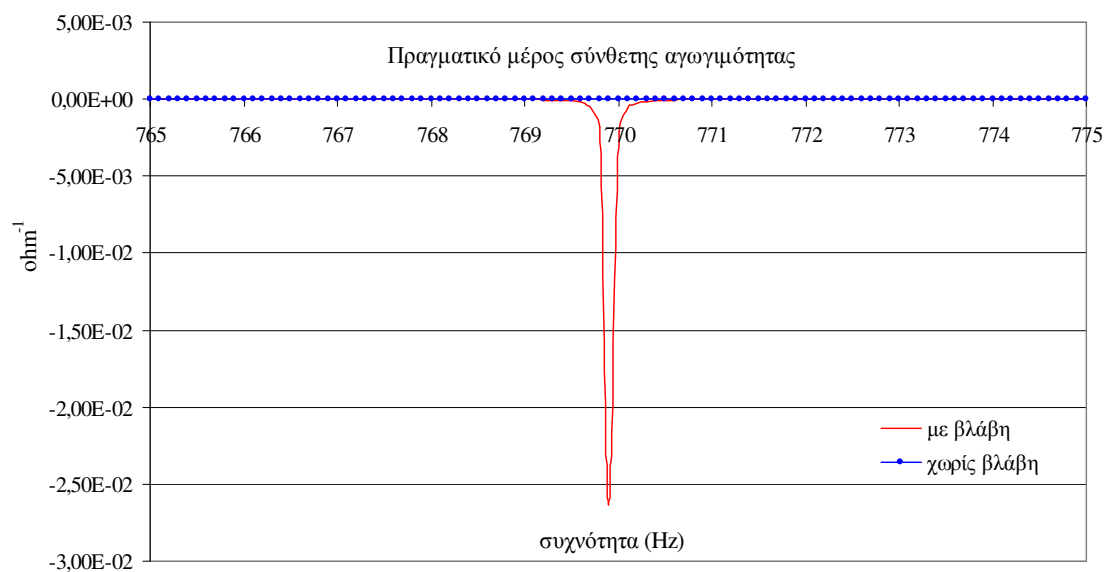
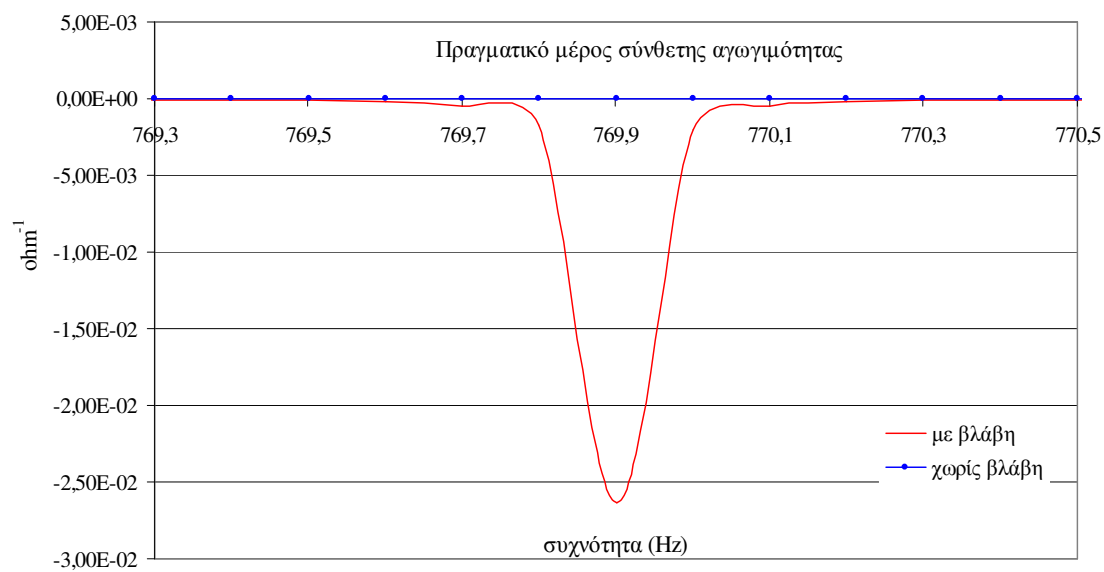


Σχήμα 6.12 Απόκριση αγωγιμότητας στην περιοχή της 2^{ης} ιδιομορφής ελέγχου



Σχήμα 6.13 Μεγέθυνση της περιοχής των γειτονικών συχνοτήτων της 2^{ης} ιδιομορφής

Στο Σχήμα 6.14 παρουσιάζεται η απόκριση της σύνθετης αγωγιμότητας για την τρίτη ιδιομορφή για τη δοκό με βλάβη και δοκό χωρίς βλάβη. Στο Σχήμα 6.15 φαίνεται η μεγέθυνση της περιοχής γύρω από την αιχμηρή κορυφή της δοκού με βλάβη. Στο σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η έντονη διαφορά στην απόκριση εντοπίζεται στην περιοχή συχνοτήτων 769.4 Hz μέχρι 770.4 Hz με μέγιστο το σημείο 769.9 Hz.

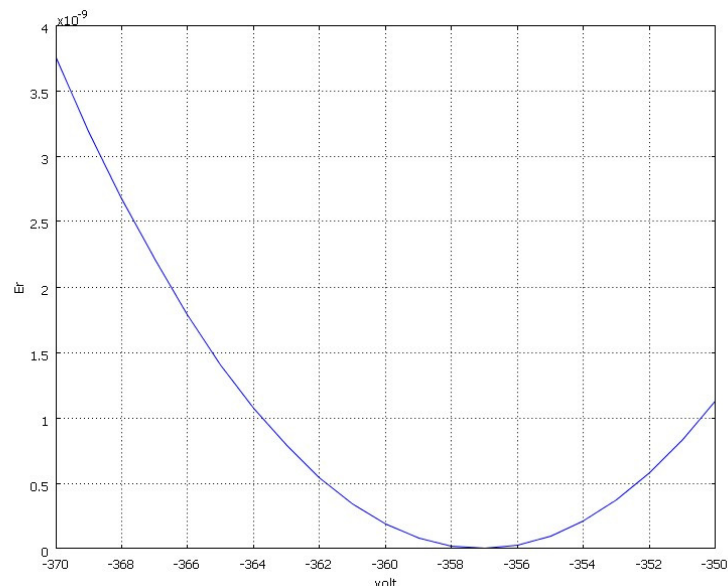
Σχήμα 6.14 Απόκριση αγωγιμότητας στην περιοχή της 3^{ης} ιδιομορφής ελέγχουΣχήμα 6.15 Μεγέθυνση της περιοχής των γειτονικών συχνοτήτων της 3^{ης} ιδιομορφής

6.6.2 Αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης για τον έλεγχο της διασφάλισης της μη-αποκόλλησης του άκρου του FRP

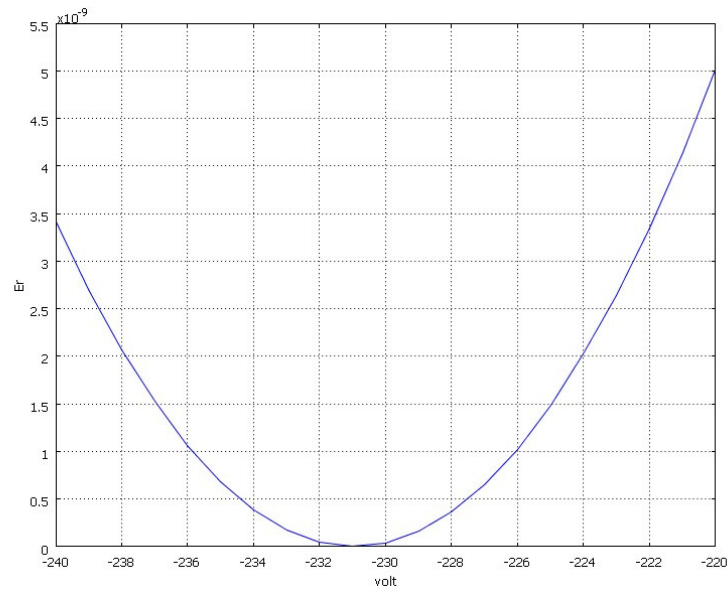
Κατά τη δυναμική ανάλυση της δοκού σκυροδέματος, με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ενεργοποιείται ο αισθητήρας-διεγέρτης με την παροχή ενός (1) Volt και ταυτόχρονα λαμβάνεται η H/M απόκριση. Ως αποτέλεσμα της διαδικασίας βελτιστοποίησης λαμβάνονται οι τάσεις που θα πρέπει να εφαρμοστούν στο διεγέρτη στην περιοχή γύρω από κάθε ιδιοσυχνότητα.

Με την εφαρμογή του προτεινόμενου κριτηρίου επιδιόρθωσης και τη διαδικασία βελτιστοποίησης όπως περιγράφηκε, λαμβάνονται τα κατάλληλα φορτία διαφοράς δυναμικού για κάθε ιδιοσυχνότητα. Η διαφορά δυναμικού ή η ηλεκτρική τάση για κάθε περίπτωση προκύπτει ως η τάση εκείνη η οποία είναι σε θέση να επιφέρει αντίθετης επίδρασης δυνάμεις που μεταφέρονται στο σύνθετο στρώμα επισκευής FRP της δοκού σκυροδέματος και ονομάζεται ‘τάση επιδιόρθωσης’.

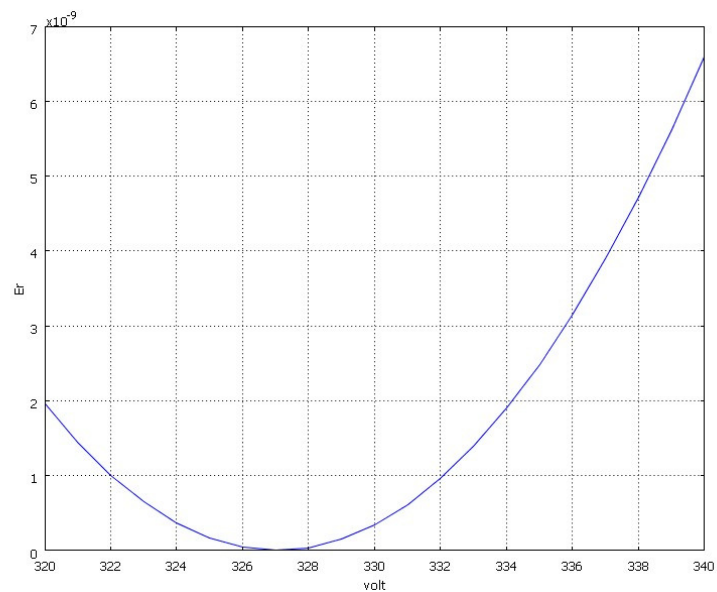
Στη συνέχεια, πραγματοποιείται δυναμική ανάλυση στη δοκό με βλάβη, με ταυτόχρονη εφαρμογή των ‘τάσεων επιδιόρθωσης’ στο διεγέρτη που βρίσκεται στο άκρο του FRP. Στα Σχήματα 6.16, 6.17 και 6.18 παρουσιάζονται οι τιμές των τάσεων στο PZT σε διάγραμμα βελτιστοποίησης και στον Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται οι τελικές τιμές των τάσεων επιδιόρθωσης.



Σχήμα 6.16: Τιμές E_r σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα του διεγέρτη για την βελτιστοποίηση της απόκρισης της 1^{ης} ιδιομορφής ελέγχου



Σχήμα 6.17: Τιμές E_r σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα του διεγέρτη για την βελτιστοποίηση της απόκρισης της 2^{ης} ιδιομορφής ελέγχου



Σχήμα 6.18: Τιμές E_r σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα του διεγέρτη για την βελτιστοποίηση της απόκρισης της 3^{ης} ιδιομορφής ελέγχου

Στο Πίνακα 6.3 παρατηρείται ότι το πρόσημο της τάσης επιδιόρθωσης μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό. Αυτό το φαινόμενο είναι άμεσα εξαρτώμενο από την αντίστοιχη ιδιομορφή και την παραμόρφωση που έχει η δοκός και το FRP κατά την δυναμική ανάλυση.

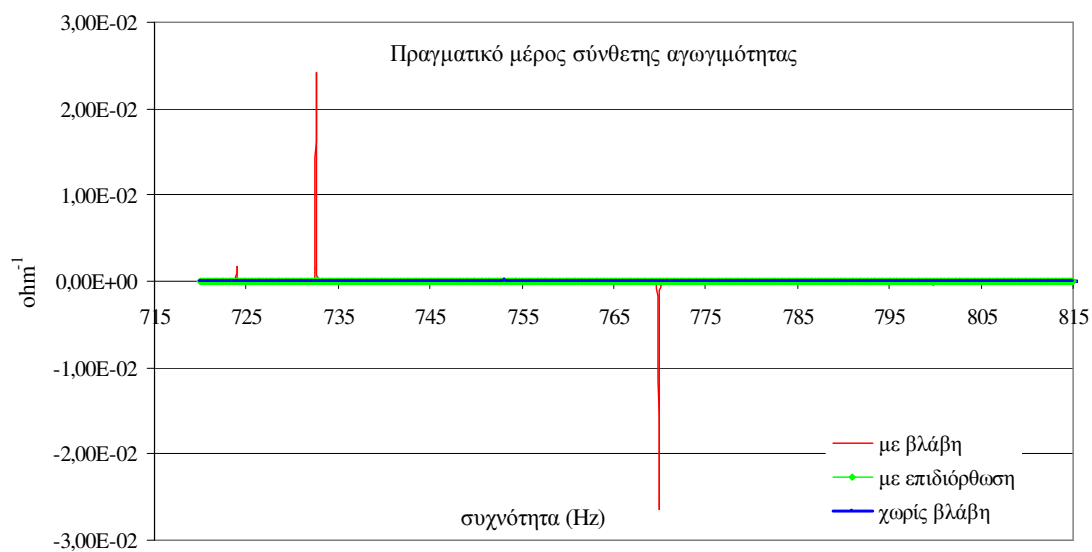
Πίνακας 6.3 Τιμές τάσεων επιδιόρθωσης για την κάθε συχνότητα ελέγχου

Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Διαφορά δυναμικού (volt) Τάση επιδιόρθωσης
723,91	-357
732,60	-231
769,90	327

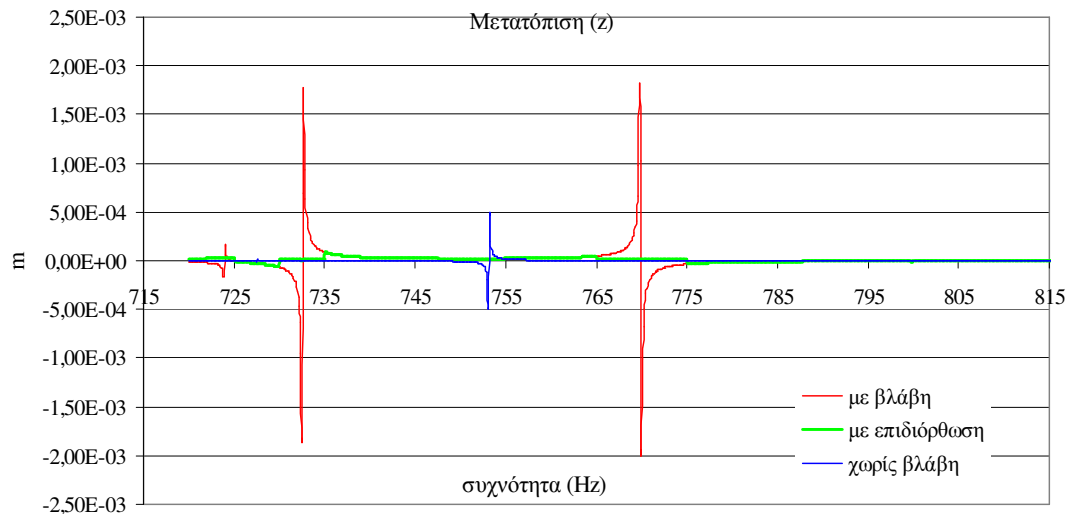
Παρατηρείται ότι α) στο Σχήμα 6.8 η τιμή της απόκρισης του πραγματικού μέρους της σύνθετης αγωγιμότητας είναι θετική για τις πρώτες δύο ιδιοσυχνότητες και αρνητική για την τρίτη και β) στον Πίνακα 6.3 η τάση επιδιόρθωσης είναι αρνητική για τις πρώτες δύο ιδιοσυχνότητες και θετική για την τρίτη. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω δύο παρατηρήσεις και την αντίστροφη επίδραση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, είναι αναμενόμενο η τάση επιδιόρθωσης να έχει αντίθετο πρόσημο από την απόκριση του αισθητήρα. Έτσι λειτουργεί κατά κάποιο τρόπο ως ένα σύστημα δράσης – αντίδρασης, όπου η αντίδραση είναι η “δευτερεύουσα” δύναμη του διεγέρτη η οποία αντισταθμίζει την δράση που είναι η εξωτερική δύναμη που συντελεί στην αποκόλληση.

Στο Σχήμα 6.9 παρατηρείται ότι οι αρνητικές κάθετες μετατοπίσεις δεικνύουν τάση αποκόλλησης του σύνθετου υλικού για τις δύο πρώτες ιδιοσυχνότητες η κίνηση του σημείου του FRP στην αποκολλημένη περιοχή ξεκινάει πρώτα από κάτω (αρνητική μετατόπιση) και μετά πάνω (θετική μετατόπιση) ενώ για την τρίτη πρώτα από πάνω (θετική μετατόπιση) και μετά κάτω (αρνητική μετατόπιση). Αυτό δείχνει κατά κάποιο τρόπο και την επίδραση της ιδιομορφής και ο τρόπος που παραμορφώνεται η δοκός και το σύνθετο ινοπλισμένο FRP.

Στο Σχήμα 6.19 παρουσιάζεται η απόκριση αγωγιμότητας (πραγματικό μέρος) για τις πρώτες τρεις εξεταζόμενες ιδιοσυχνότητες για τις περιπτώσεις της υγιούς δοκού, της δοκού με βλάβη και της “επιδιορθωμένης” δοκού. Ως “επιδιορθωμένη” δοκός εννοείται η δοκός με βλάβη στην οποία έχουν εφαρμοστεί επιπρόσθετα οι τάσεις επιδιόρθωσης που προκύπτουν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Παρατηρείται ότι οι αιχμηρές κορυφές που αντιστοιχούν στην περίπτωση της επιδιόρθωσης έχουν μειωθεί κατά πολύ και έχουν πλησιάσει την τάξη μεγέθους των τιμών της υγιούς - αρχικής δοκού.



Σχήμα 6.19 Σύγκριση της απόκρισης αγωγιμότητας για τις τρεις περιπτώσεις των δοκών



Σχήμα 6.20 Σύγκριση της κατακόρυφης μετατόπισης ακραίου σημείου του FRP στο σημείο της αποκόλλησης για τις τρεις περιπτώσεις των δοκών

Το αποτέλεσμα της τεχνικής ενεργού διασφάλισης της συνάφειας μεταξύ FRP και σκυροδέματος φαίνεται και στο Σχήμα 6.20 το οποίο απεικονίζει την κάθετη

μετατόπιση του σημείου στην άκρη του FRP για όλες τις περιπτώσεις: υγιούς δοκού, δοκού με βλάβη και επιδιορθωμένης δοκού.

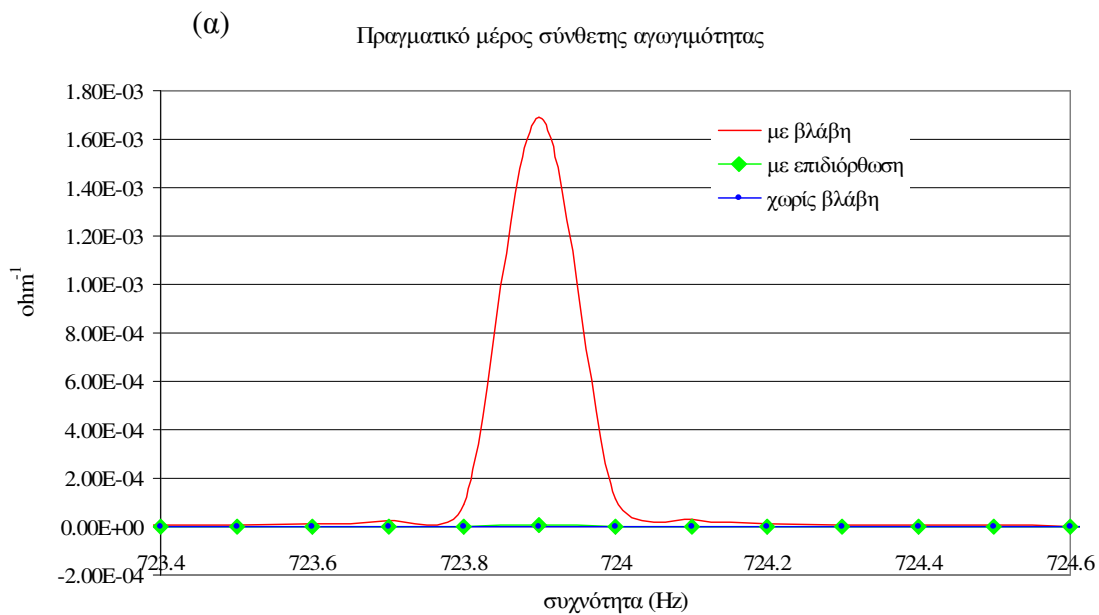
Εφόσον εφαρμόζονται στο διεγέρτη οι τάσεις επιδιόρθωσης, παρατηρείται έντονη μείωση των κάθετων μετατόπισεων του χαρακτηριστικού σημείου στην άκρη του FRP και η επιδιορθωμένη κατάσταση τείνει να συμπεριφερθεί όπως η υγιής.

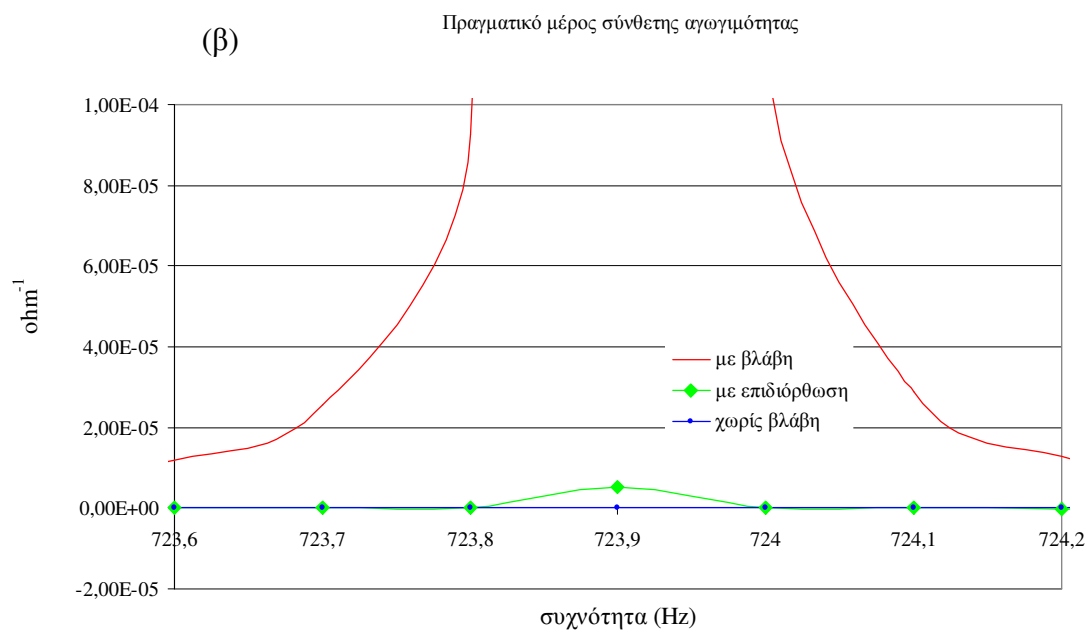
Παρακάτω στα Σχήματα 6.21 μέχρι και 6.26 παρουσιάζονται συγκριτικά για κάθε ιδιοσυχνότητα οι παρακάτω αποκρίσεις:

α) πραγματικό μέρος απόκρισης αγωγιμότητας σε σχέση με τη συχνότητα, (Σχήματα 6.21, 6.23, 6.25)

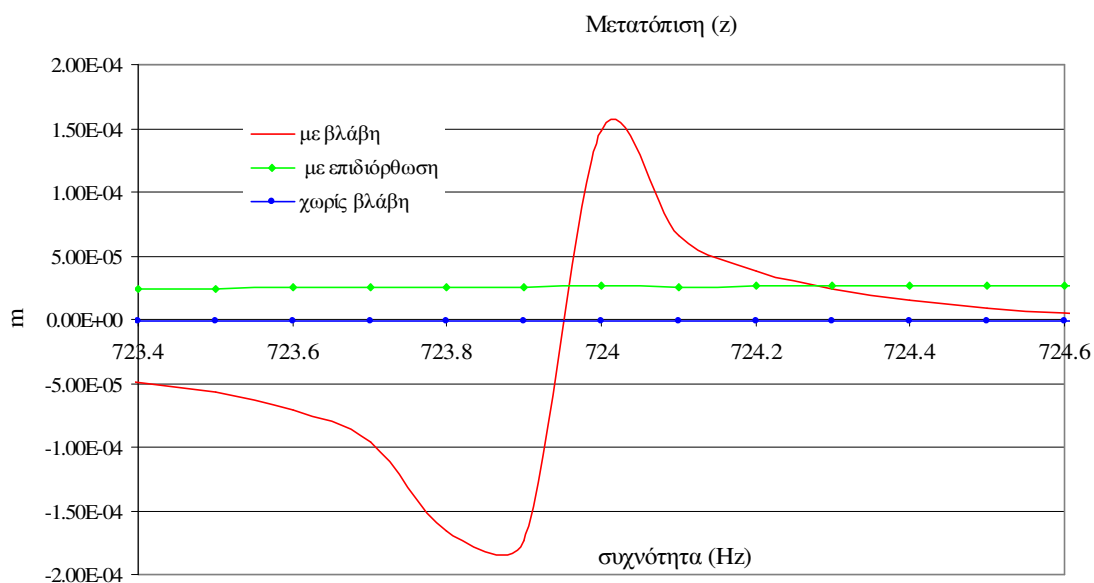
β) κάθετη μετατόπιση σημείου στην άκρη της αποκόλλησης του FRP σε σχέση με τη συχνότητα, (Σχήματα 6.22, 6.24, 6.26)

για την υγιή δοκό, τη δοκό με βλάβη και την επιδιορθωμένη δοκό αντίστοιχα στις υπό έλεγχο περιοχές συχνοτήτων:

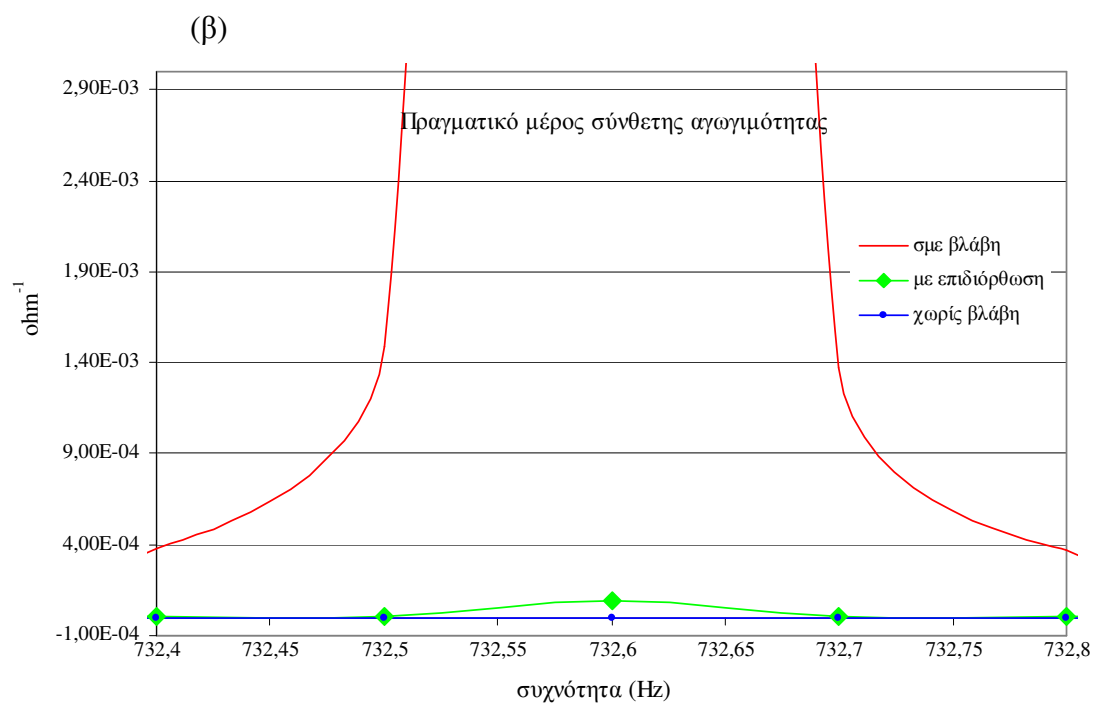
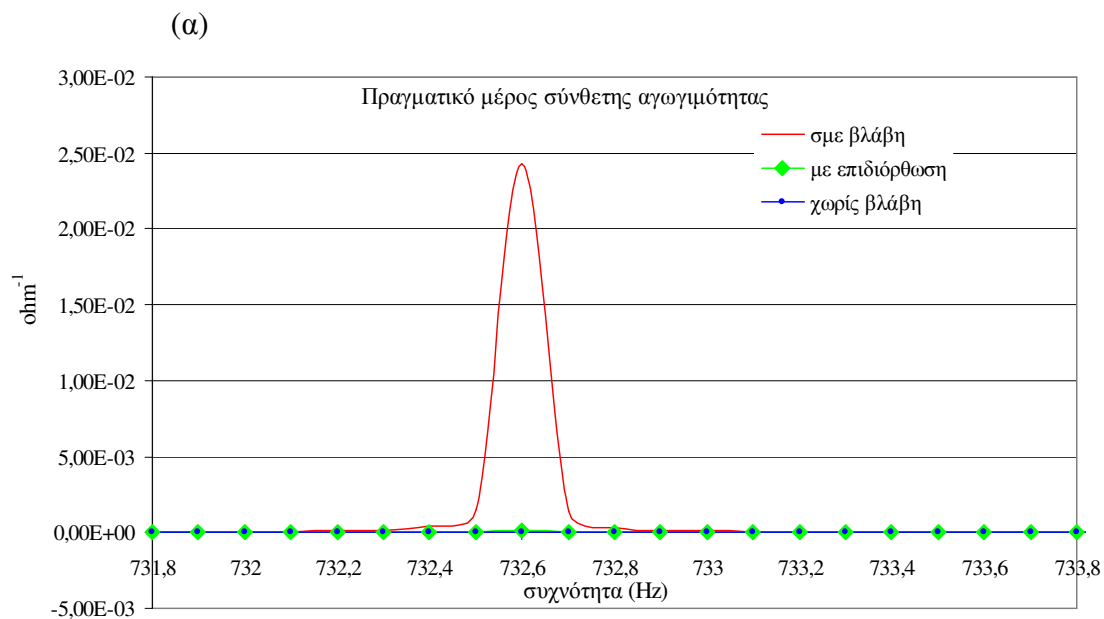




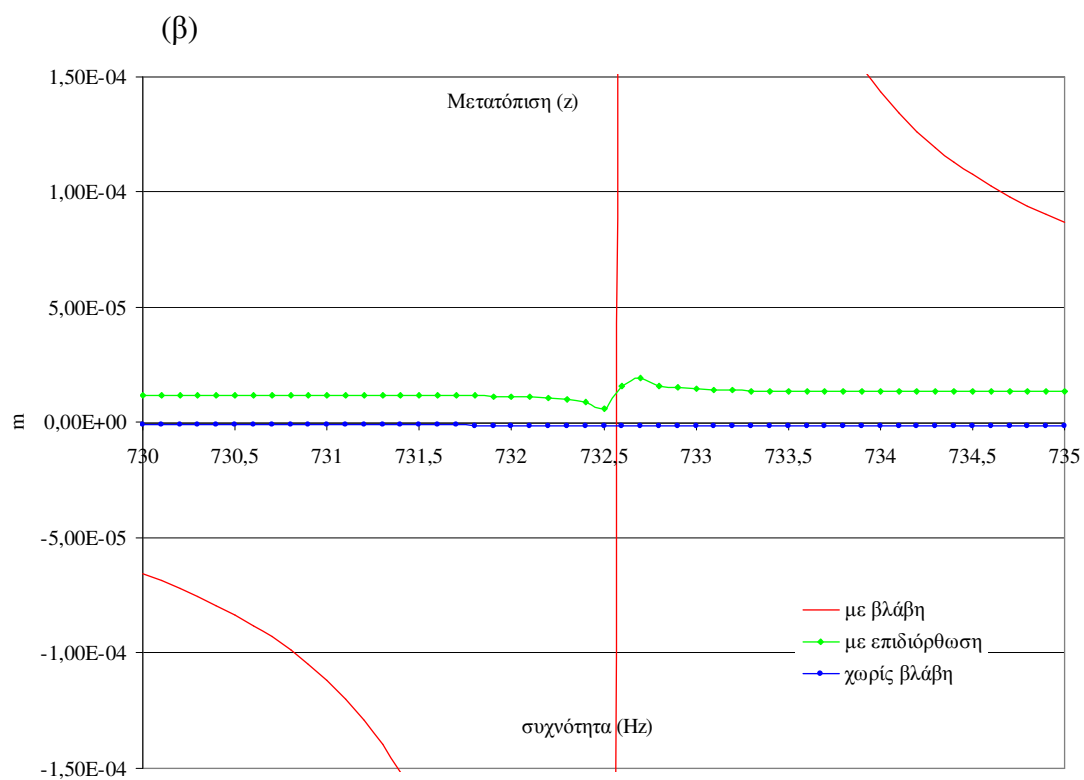
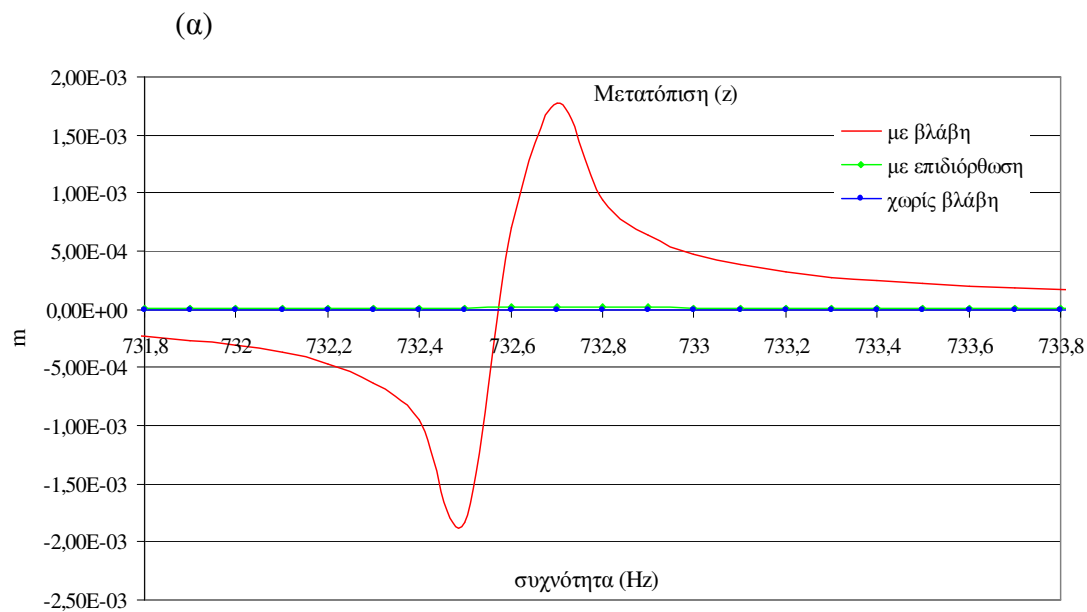
Σχήμα 6.21 (α) Απόκριση αγωγιμότητας στην γειτονική περιοχή της $I^{\text{ης}}$ ελεγχόμενης συχνότητας
(β) μεγέθυνση γύρω από τη $I^{\text{η}}$ ελεγχόμενη συχνότητα



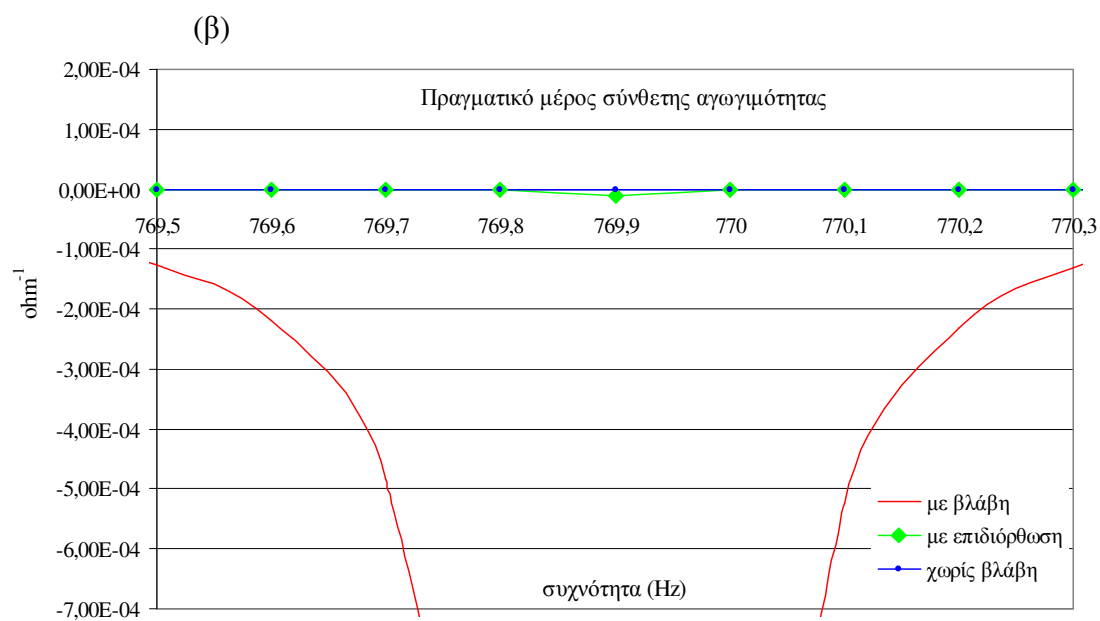
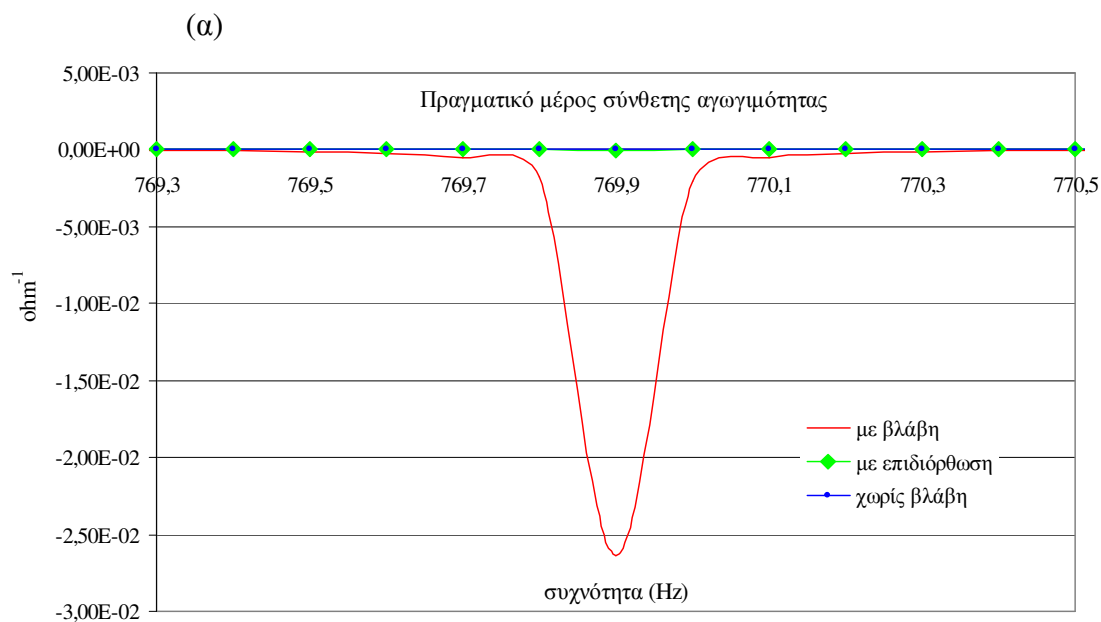
Σχήμα 6.22 Κάθετη μετατόπιση ακραίου σημείου του FRP στο σημείο της αποκόλλησης στην περιβάλλουσα περιοχή της $I^{\text{ης}}$ ελεγχόμενης συχνότητας



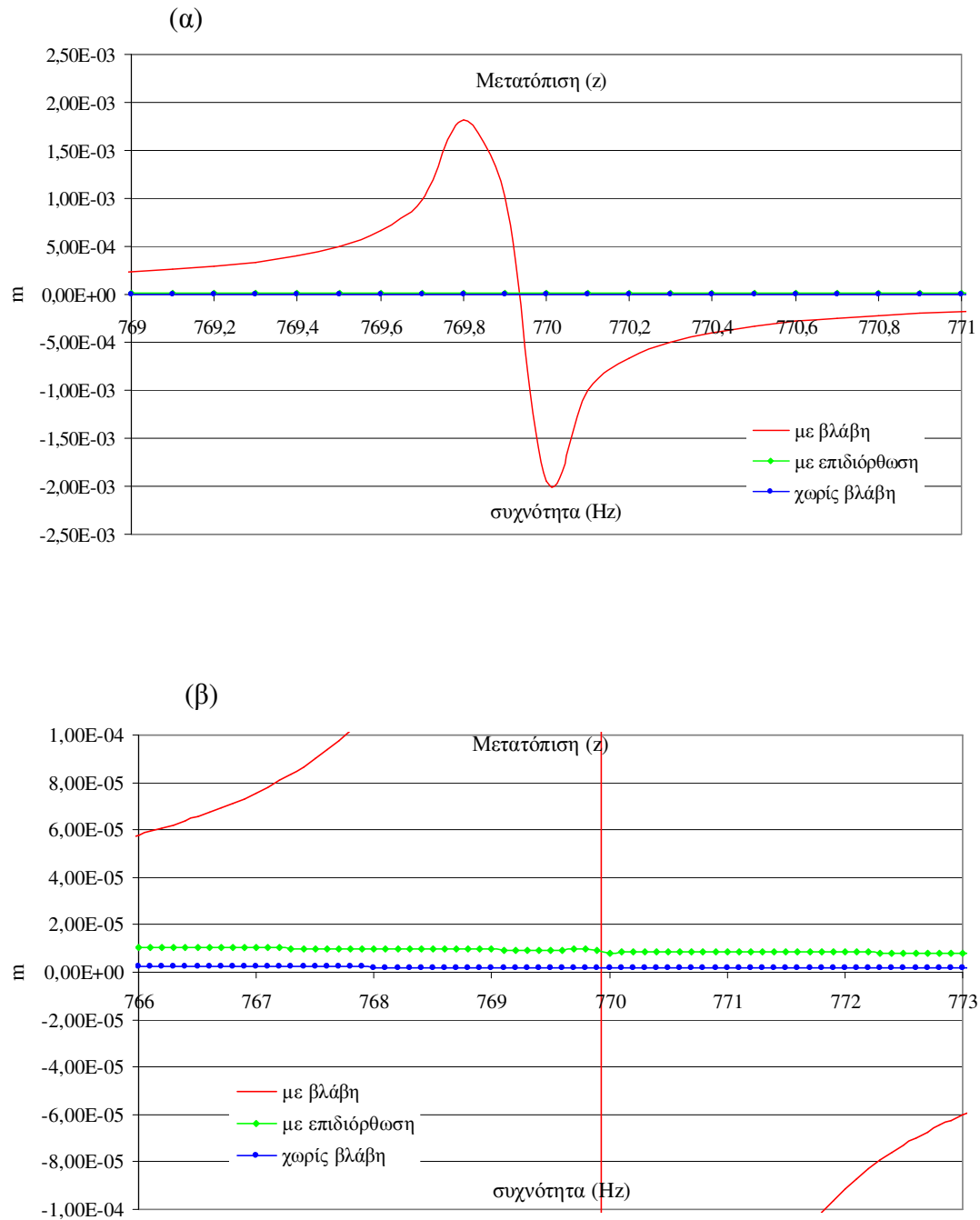
Σχήμα 6.23(α) Απόκριση αγωγιμότητας στην περιβάλλουσα περιοχή της 2^{ης} ελεγχόμενης συχνότητας
(β) μεγέθυνση γύρω από τη 2^η ελεγχόμενη συχνότητα



Σχήμα 6.24 (α) Κάθετη μετατόπιση ακραίου σημείου του FRP στο σημείο της αποκόλλησης στην περιβάλλουσα περιοχή της 2^{ης} ελεγχόμενης συχνότητας (β) μεγέθυνση γύρω από τη 2^η ελεγχόμενη συχνότητα



Σχήμα 6.25 (α) Απόκριση αγωγιμότητας στην γειτονική περιοχή της 3ης ελεγχόμενης συχνότητας
(β) μεγέθυνση γύρω από τη 3^η ελεγχόμενη συχνότητα

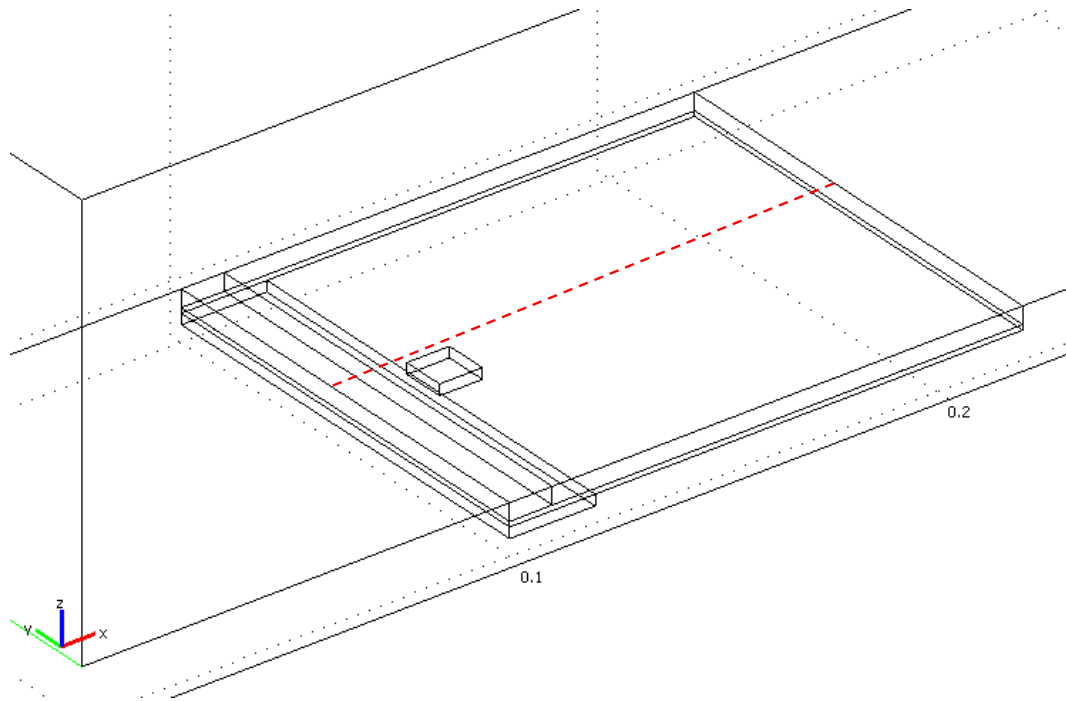


Σχήμα 6.26 (α) Κάθετη μετατόπιση ακραίου σημείου του FRP στο σημείο της αποκόλλησης στην περιβάλλουσα περιοχή της 3ης ελεγχόμενης συχνότητας, (β) μεγέθυνση γύρω από τη 3^η ελεγχόμενη συχνότητα

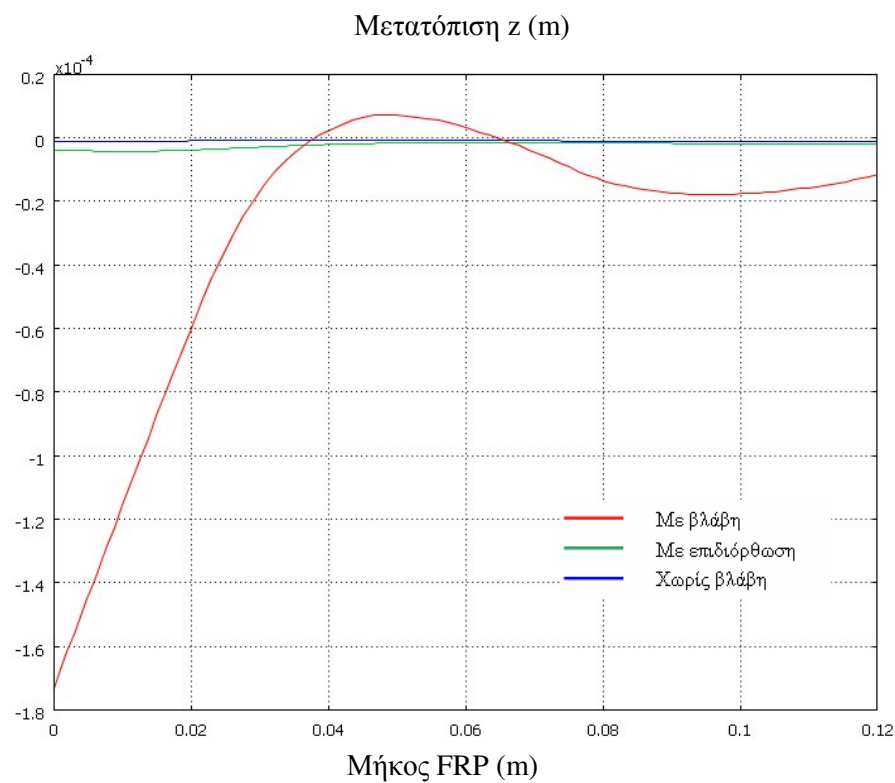
Όπως φαίνεται στα παραπάνω σχήματα έχει εφαρμοστεί επιτυχώς η ενεργή διασφάλιση της συνάφειας μεταξύ FRP και σκυροδέματος σε όλες τις συχνότητες γύρω από κάθε ιδιοσυχνότητα του ενδιαφέροντος. Με αυτό τον τρόπο ενεργοποιείται η τεχνική αυτή και κατά τη διάρκεια έναρξης του μηχανισμού της αποκόλλησης που συμβαίνει στις γειτονικές συχνότητες των κρίσιμων ιδιοσυχνοτήτων. Με αυτή τη

διαδικασία εφαρμογής του “ευφούς και αναπροσαρμόσιμου FRP” επαναφέρεται η επαφή των δύο επιφανειών και κατά συνέπεια διασφαλίζεται η επισκευή που έγινε.

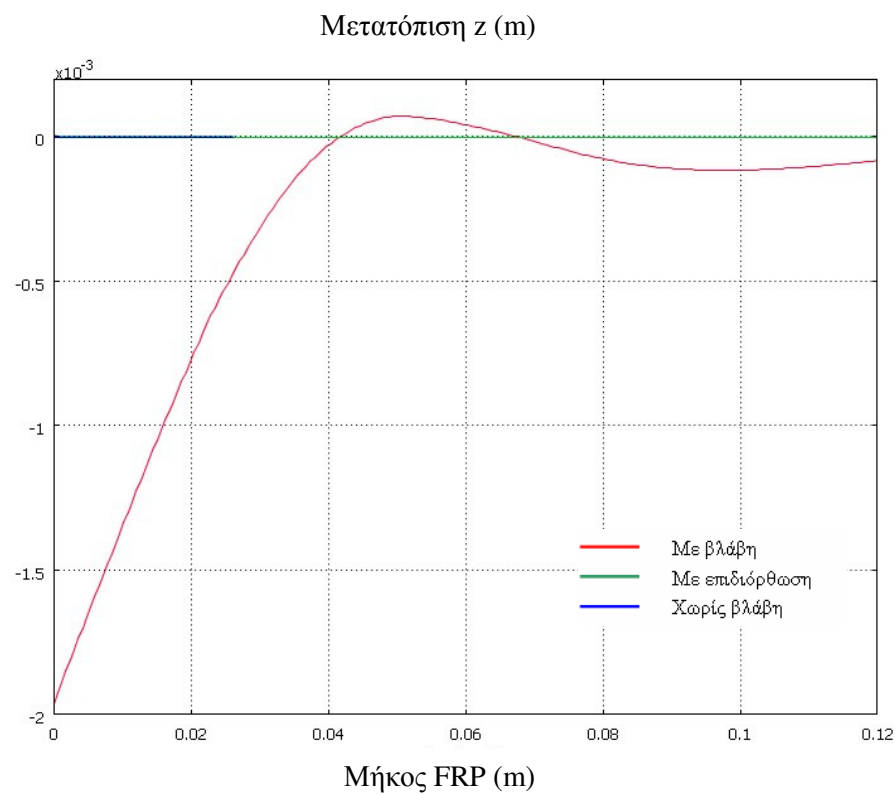
Στα Σχήματα 6.28, 6.29 και 6.30 παρουσιάζεται η απόκριση της κάθετης μετατόπισης κατά μήκος της μίας άκρης εφαρμογής του “ευφούς και αναπροσαρμόσιμου FRP” σε περιοχή όπως επισημαίνεται με την κόκκινη γραμμή στο Σχήμα 6.27. Στο σχήμα 6.28 φαίνεται η απόκριση της 1^{ης} ιδιομορφής στο 6.29 της 2^{ης} ιδιομορφής και στο 6.30 της 3^{ης} ιδιομορφής κατά την μέγιστη κάθετη μετατόπιση (z) κατά μήκος του FRP. Παρατηρείται σύμπτωση της κλίσης της απόκρισης του FRP της επιδιορθωμένης με την υγιή δοκό που σημαίνει ότι έχει σχεδόν πλήρως αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της αποκόλλησης.



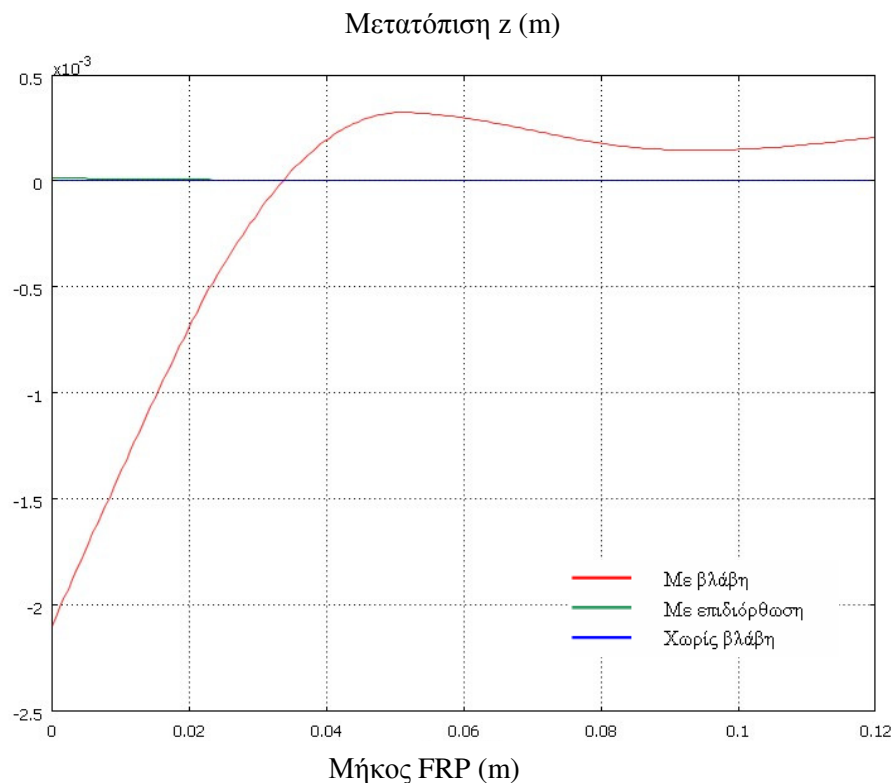
Σχήμα 6.27 Σημεία λήψης απόκρισης της κάθετης μετατόπισης



Σχήμα 6.28 Συγκριτική απόκριση κάθετης μετατόπισης κατά μήκος του “ευφυνούς και αναπροσαρμόσιμου FRP” κατά την 1^η ιδιομορφή



Σχήμα 6.29 Συγκριτική απόκριση κάθετης μετατοπισης κατα μήκος του “ευφυνούς και αναπροσαρμόσιμου FRP” κατά την 2^η ιδιομορφή

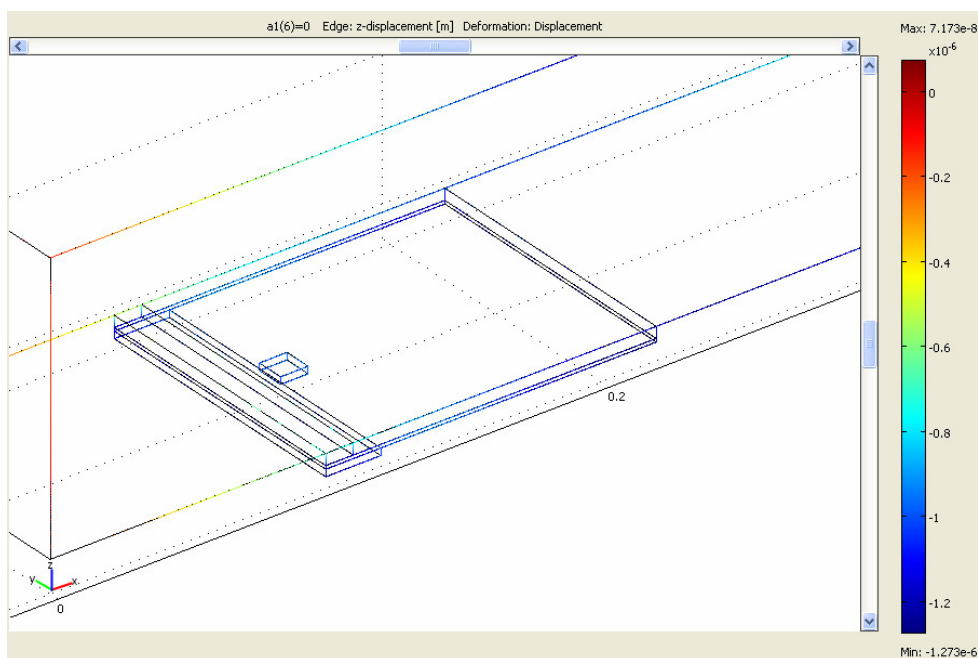


Σχήμα 6.30 Συγκριτική απόκριση κάθετης μετατόπισης κατά μήκος του “ευφυούς και αναπροσαρμόσιμου FRP” κατά την 3^η ιδιομορφή

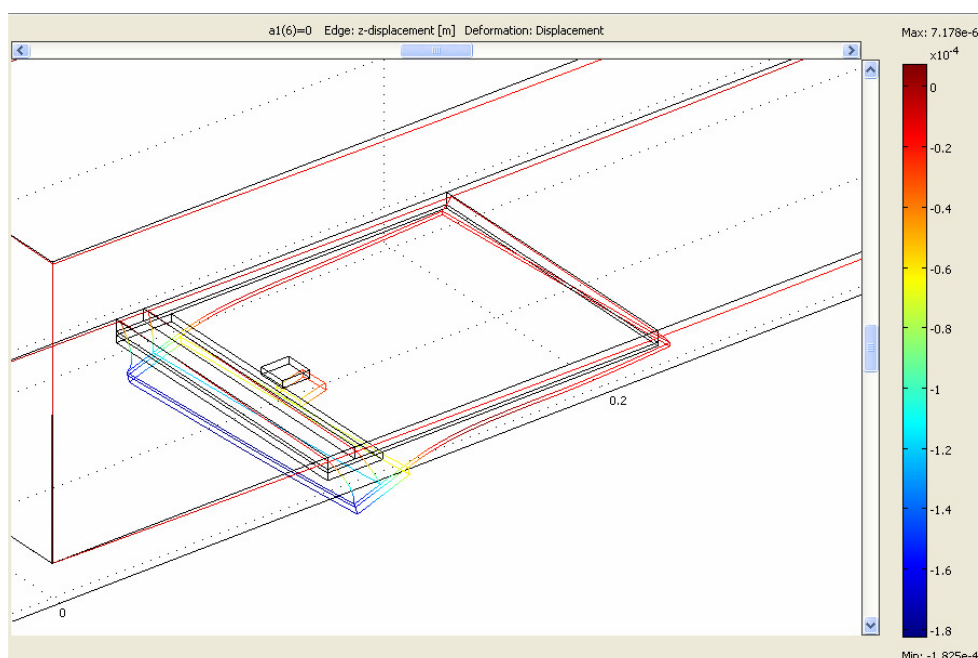
Στη συνέχεια με τη δυνατότητα τρισδιάστατης απεικόνισης των αποτελεσμάτων μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων COMSOL, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής του “ευφυούς και αναπροσαρμόσιμου FRP” στην επισκευή δομικών στοιχείων.

Στα Σχήματα 6.31 μέχρι και 6.39 παρουσιάζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση των τριών περιπτώσεων κατά τη δυναμική ανάλυση των τριών πρώτων ιδιοσυχνοτήτων και για τις τρεις περιπτώσεις δοκών για την κάθετη μετατόπιση- z [m]. Στα Σχήματα 6.31, 6.32 και 6.33 παρουσιάζεται η απόκριση για την πρώτη ιδιοσυχνότητα για την υγιή δοκό, τη δοκό με βλάβη και την επιδιορθωμένη δοκό αντίστοιχα. Στα Σχήματα 6.34, 6.35 και 6.36 αντίστοιχα για την 2^η ιδιοσυχνότητα και στα 6.37, 6.38 και 6.39 αντίστοιχα για την 3^η ιδιοσυχνότητα. Στα Σχήματα 6.31, 6.34 και 6.37 παρουσιάζεται η απόκριση της υγιούς δοκού κατά την οποία φαίνεται η άριστη συνάφεια μεταξύ FRP και επιφάνειας δοκού. Στα Σχήματα 6.32, 6.35 και 6.38 παρουσιάζεται η απόκριση της δοκού με εμφανή την αποκόλληση του άκρου του FRP. Ενώ στα Σχήματα 6.33, 6.36 και 6.39 φαίνεται η λειτουργία του “ευφυούς αναπροσαρμόσιμου FRP” το οποίο

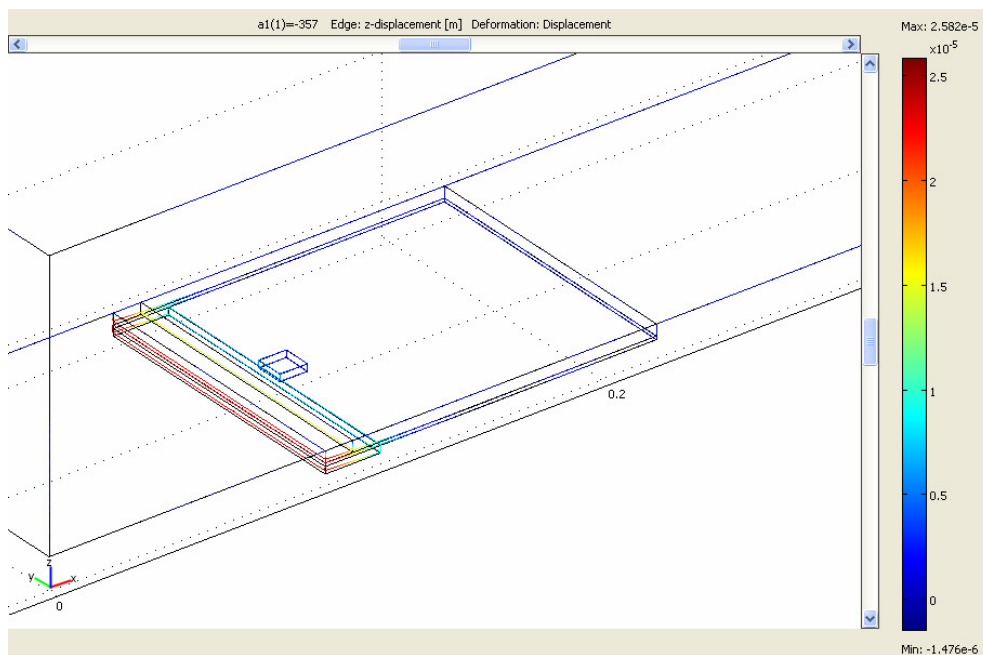
φαίνεται να παρέχει ενεργή διασφάλιση της συνάφειάς του με την επιφάνεια σκυροδέματος του δομικού στοιχείου.



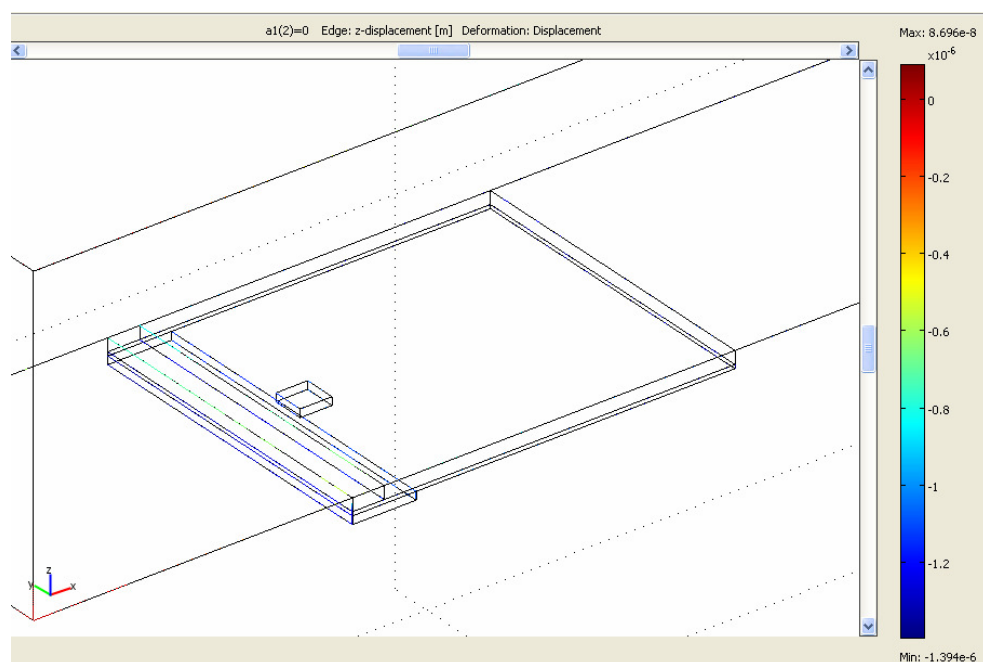
Σχήμα 6.31 Τρισδιάστατη απεικόνιση κάθετων μετατοπίσεων (z) κατά την 1^η ιδιομορφή στην περίπτωση της υγιούς δοκού



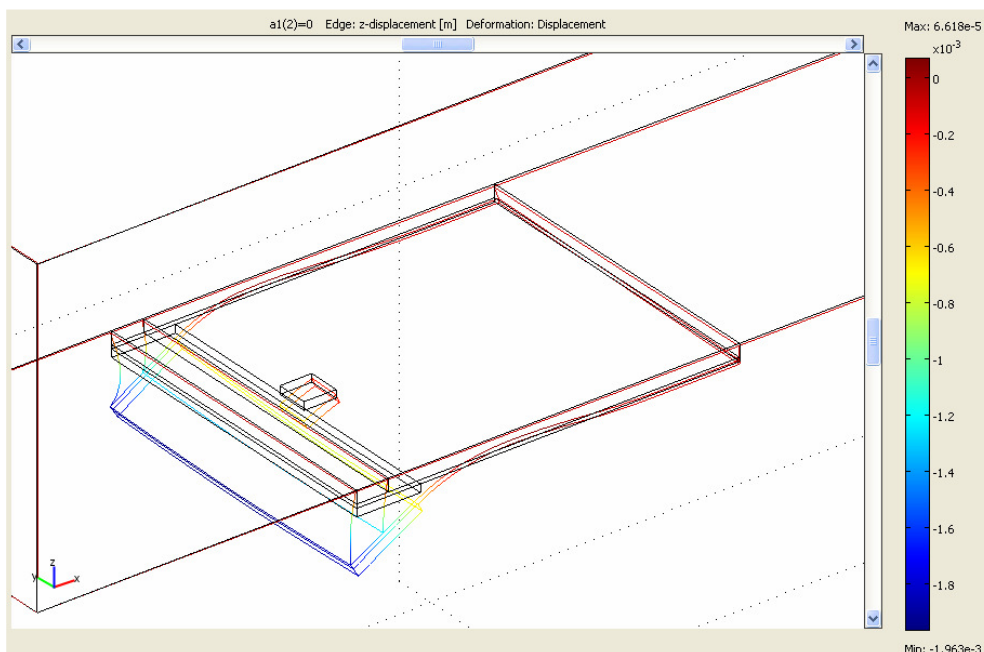
Σχήμα 6.32 Τρισδιάστατη απεικόνιση κάθετων μετατοπίσεων (z) κατά την 1^η ιδιομορφή στην περίπτωση της δοκού με βλάβη – αποκόλληση της άκρης του FRP



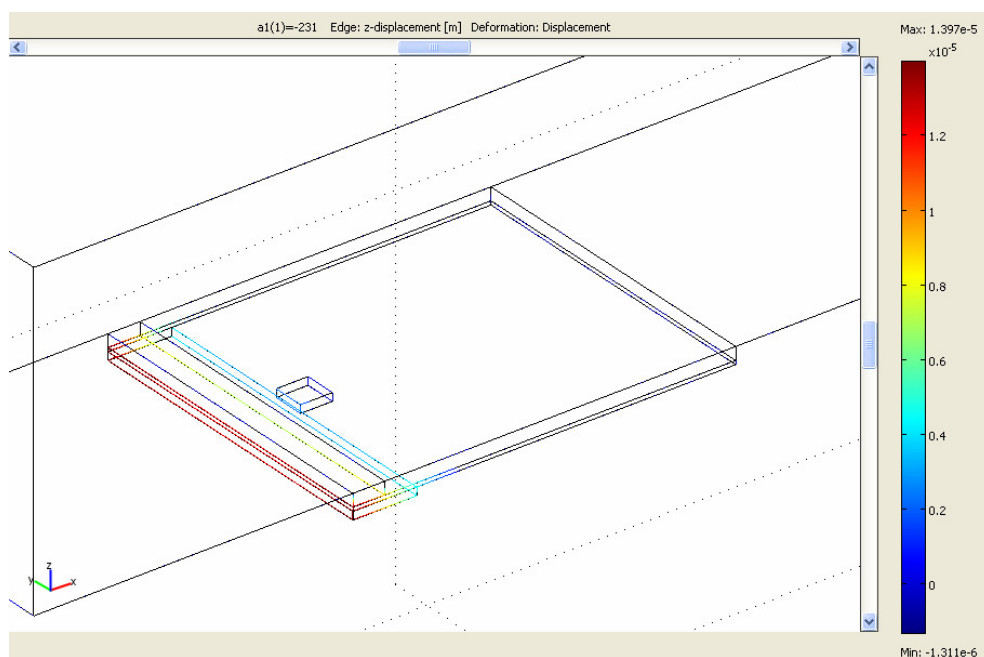
Σχήμα 6.33 Τρισδιάστατη απεικόνιση κάθετων μετατοπίσεων (z) κατά την 1^η ιδιομορφή στην περίπτωση της δοκού με χρήση του “ευφούς και αναπροσαρμόσιμου FRP”



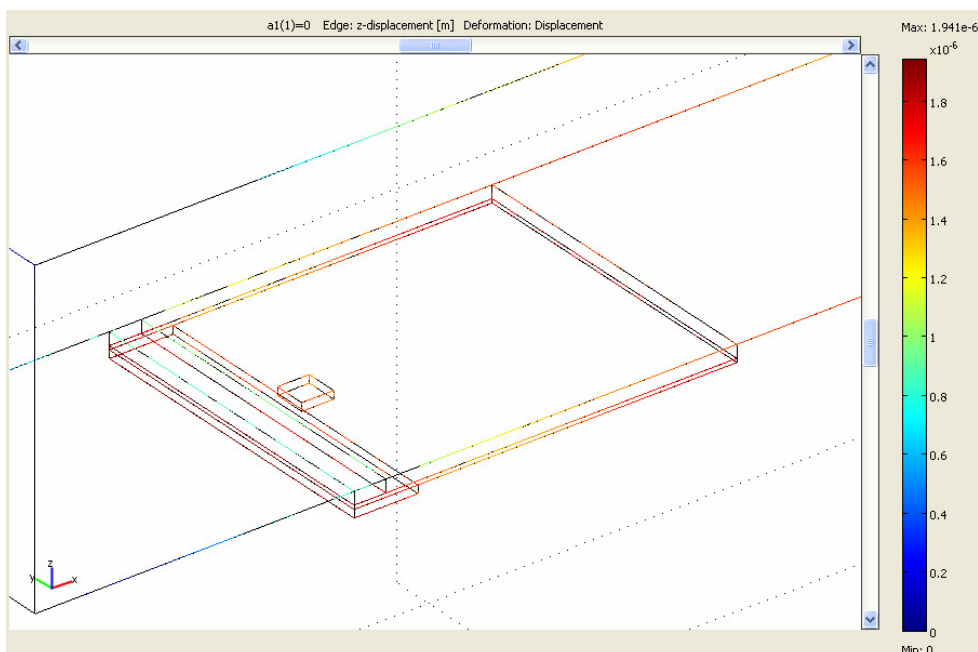
Σχήμα 6.34 Τρισδιάστατη απεικόνιση μετατοπίσεων (z) κατά την 2^η ιδιομορφή στην περίπτωση της υγιούς δοκού



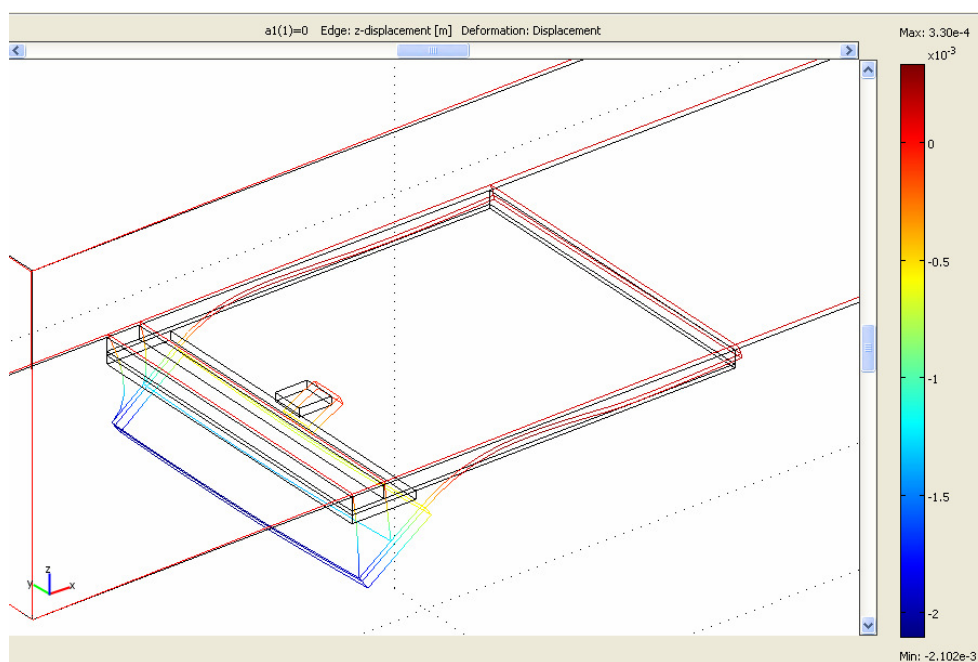
Σχήμα 6.35 Τρισδιάστατη απεικόνιση μετατοπίσεων (z) κατά την 2^η ιδιομορφή στην περίπτωση της δοκού με βλάβη – αποκόλληση της άκρης του FRP



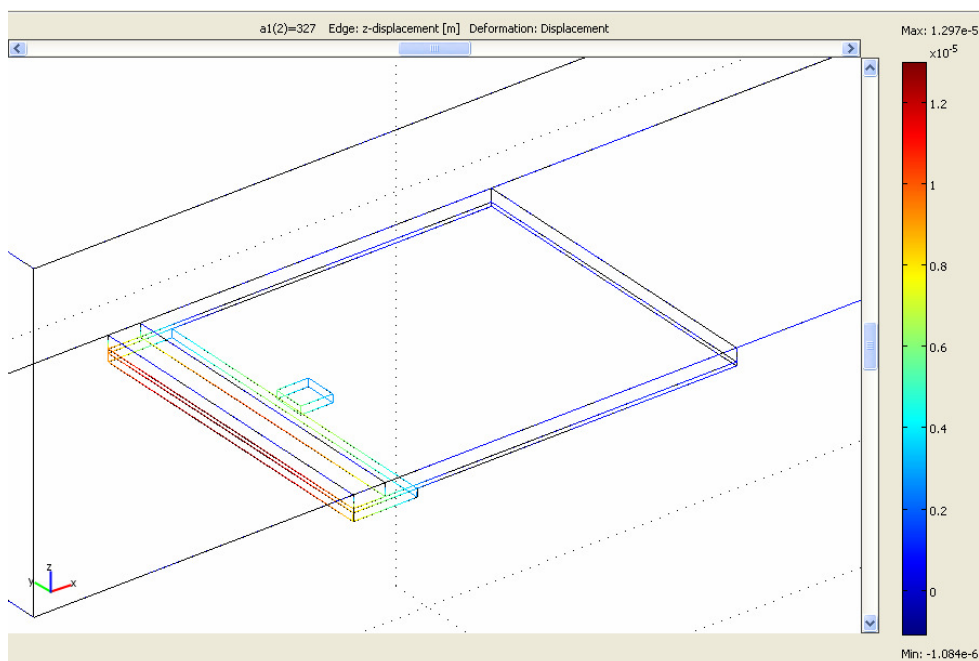
Σχήμα 6.36 Τρισδιάστατη απεικόνιση μετατοπίσεων (z) κατά την 2^η ιδιομορφή στην περίπτωση της δοκού με χρήση του “ευφούς και αναπροσαρμόσιμου FRP”



Σχήμα 6.37 Τρισδιάστατη απεικόνιση μετατοπίσεων (z) κατά την 3^η ιδιομορφή στην περίπτωση της υγιούς δοκού



Σχήμα 6.38 Τρισδιάστατη απεικόνιση μετατοπίσεων (z) κατά την 3^η ιδιομορφή στην περίπτωση της δοκού με βλάβη – αποκόλληση της άκρης του FRP



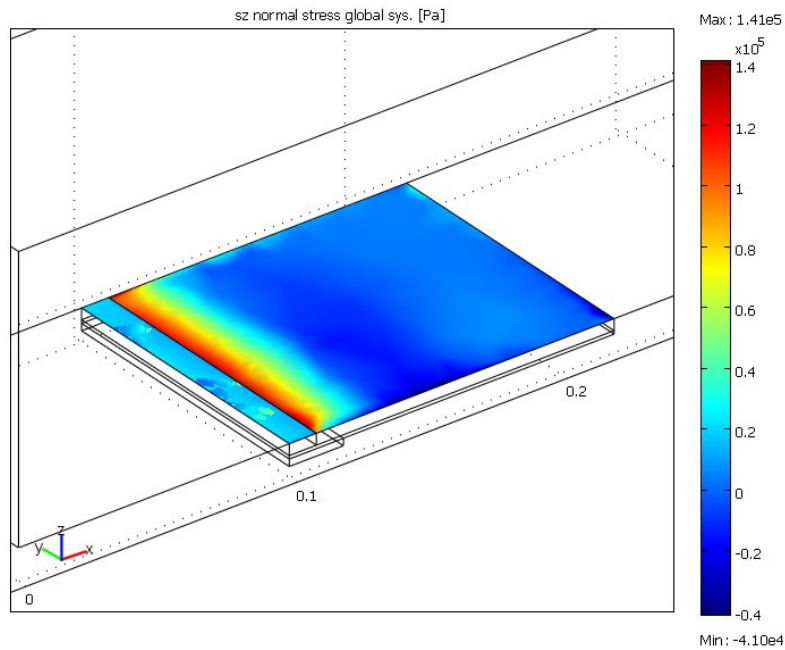
Σχήμα 6.39 Τρισδιάστατη απεικόνιση μετατοπίσεων (z) κατά την 3^η ιδιομορφή στην περίπτωση της δοκού με χρήση του “ευφυούς και αναπροσαρμόσιμου FRP”

Στα Σχήματα 6.40 μέχρι και 6.48 παρουσιάζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση των τριών μοντέλων κατά την δυναμική ανάλυση των τριών πρώτων ιδιομορφών και για τις τρεις περιπτώσεις δοκών για την επιφανειακή κατανομή των ορθών τάσεων [Pa]. Στα Σχήματα 6.41, 6.42α και 6.42β παρουσιάζεται η απόκριση της πρώτης ιδιοσυχνότητας για τη δοκό με βλάβη και την επιδιορθωμένη δοκό σε δύο περιοχές κλιμάκων για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων. Στα Σχήματα 6.44, 6.45α και 6.45β αντίστοιχα για την 2^η ιδιοσυχνότητα και στα 6.47, 6.48α και 6.48β αντίστοιχα για την 3^η ιδιοσυχνότητα.

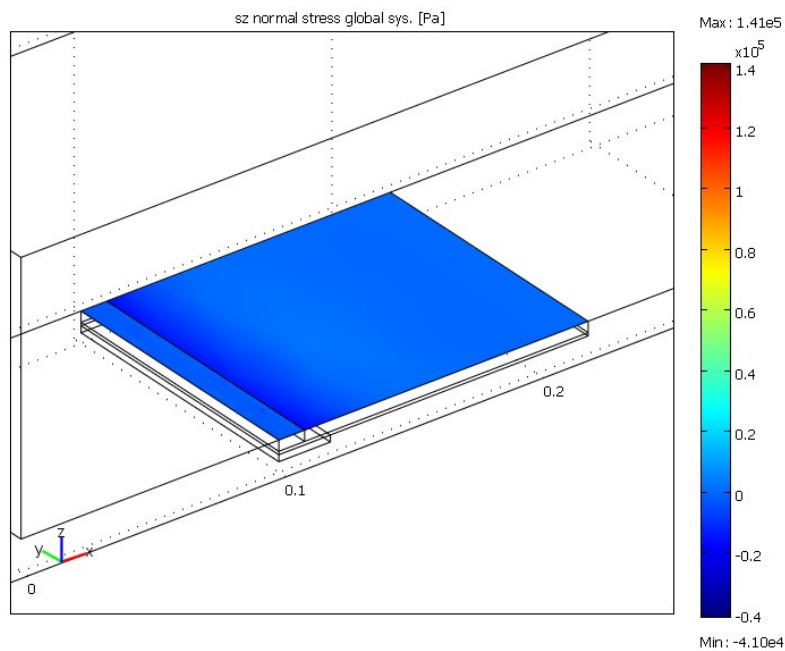
Στα Σχήματα 6.42α, 6.45α και 6.48α παρουσιάζεται η απόκριση της επιδιορθωμένης δοκού κατά την οποία φαίνεται η πολύ καλή συνάφεια μεταξύ FRP και επιφάνειας δοκού και η μείωση της συγκέντρωσης των τάσεων στο άκρο της βλάβης. Η συνάφεια φαίνεται λόγω των συγκριτικά μικρών τιμών τάσεων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια της περιοχής της άκρης του FRP. Στα Σχήματα 6.41, 6.44 και 6.47 παρουσιάζεται η απόκριση της δοκού με αποκόλληση του άκρου του FRP. Σε αυτή την περίπτωση φαίνεται η ανάπτυξη των εφελκυστικών τάσεων στην επιφάνεια της περιοχής της άκρης της αποκόλλησης είναι μεγάλη.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα αποδεικνύεται ότι η λειτουργία του “ευφυούς αναπροσαρμόσιμου FRP” έχει επιφέρει την ανατροπή των εφελκυστικών τάσεων στην περιοχή της αποκόλλησης με αποτέλεσμα οι τάσεις να είναι θλιπτικές (αντίθετες με το

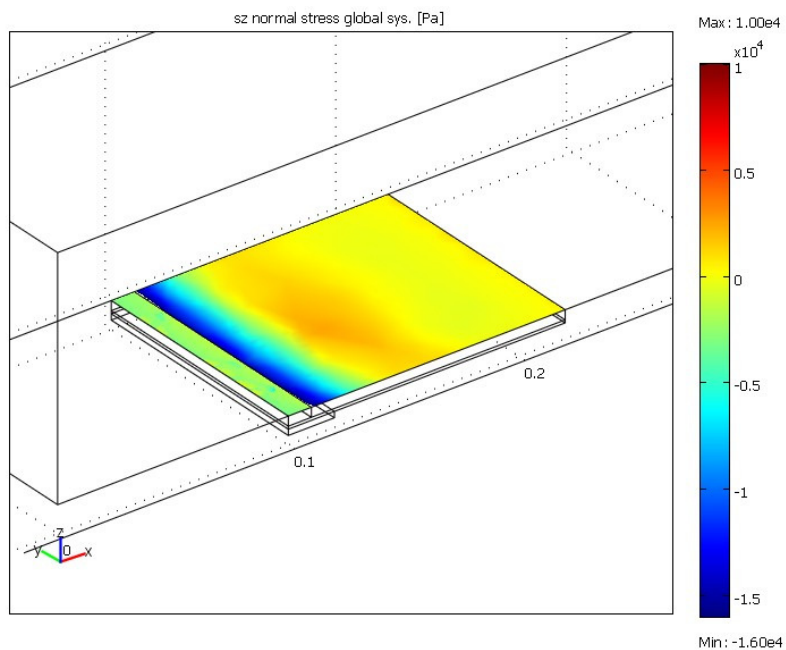
αίτιο της αποκόλλησης) και πολύ μικρότερης τάξης μεγέθους από τις εφελκυστικές. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το “ευφρές και αναπροσαρμόσιμο FRP” κατάφερε να μειώσει τη συγκέντρωση τάσεων στα άκρα της περιοχής αποκόλλησης γεγονός που διασφαλίζει την αποτελεσματικότητα της επισκευής με χρήση ινωπλισμένων πολυμερών υλικών.



Σχήμα 6.41 Τρισδιάστατη απεικόνιση της επιφανειακής κατανομής των ορθών τάσεων [Pa] για την 1^η ιδιομορφή στην περίπτωση της δοκού με βλάβη – αποκόλληση της άκρης του FRP

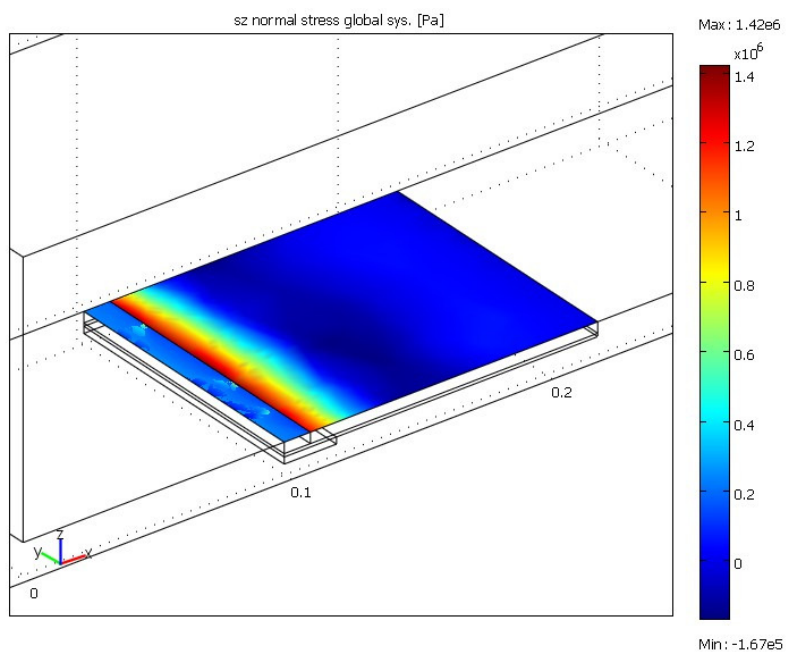


(α)

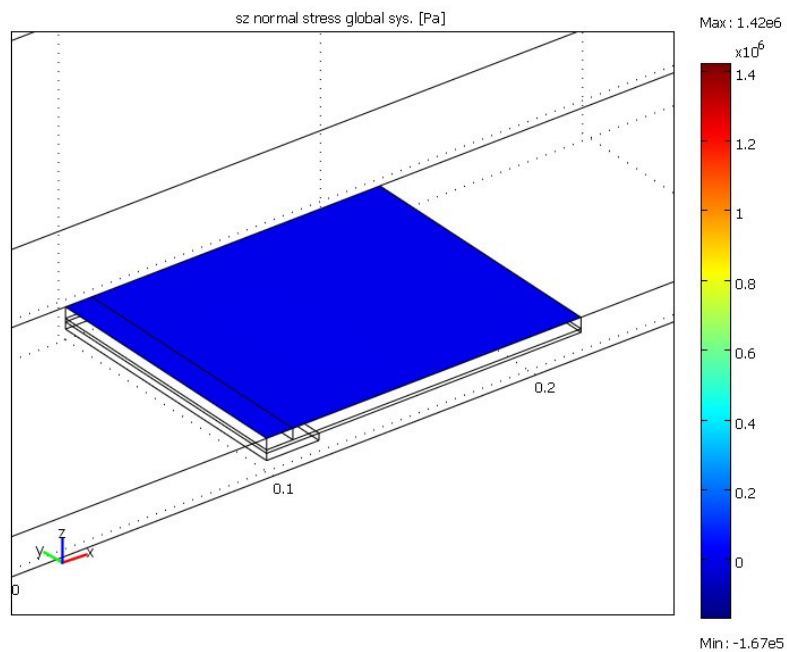


(β)

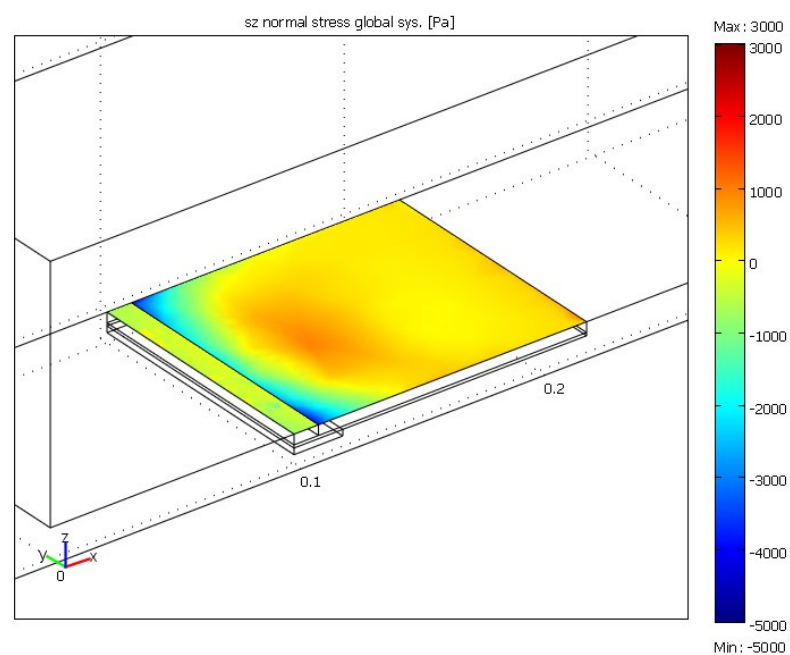
Σχήμα 6.42 Τρισδιάστατη απεικόνιση της επιφανειακής κατανομής των ορθών τάσεων [Pa] για την 1^η ιδιομορφή στην περίπτωση της δοκού με χρήση του “ευφυνούς και αναπροσαρμόσιμου FRP”
(α) στην ίδια κλίμακα με τη δοκό με αποκόλληση, (β) σε πιο στενό εύρος κλίμακας



Σχήμα 5.43 Τρισδιάστατη απεικόνιση της επιφανειακής κατανομής των ορθών τάσεων [Pa] για την 2^η ιδιομορφή στην περίπτωση της δοκού με βλάβη – αποκόλληση της άκρης του FRP

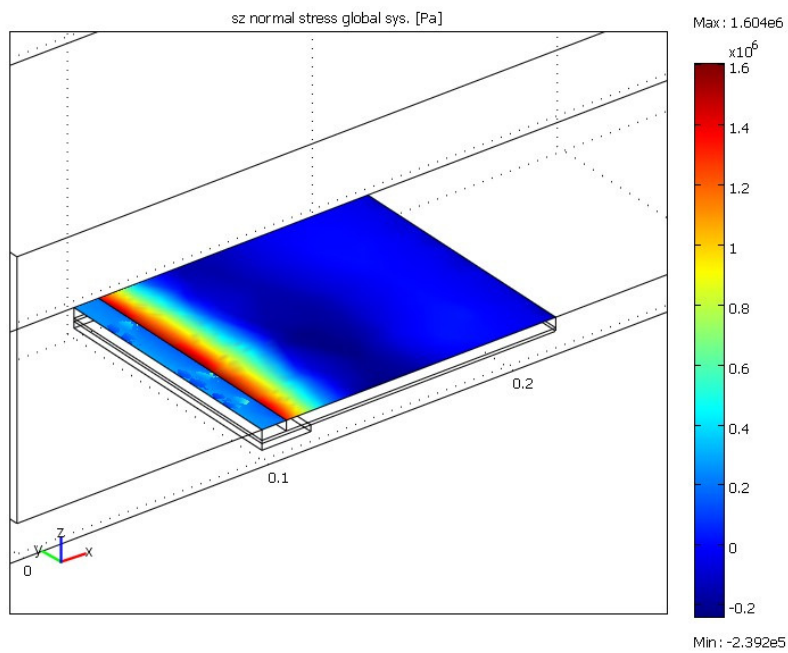


(α)

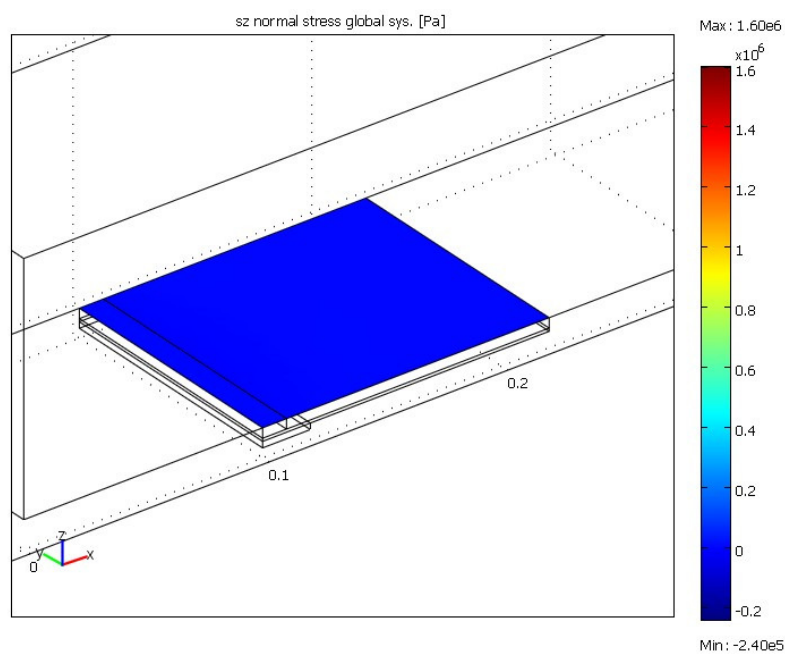


(β)

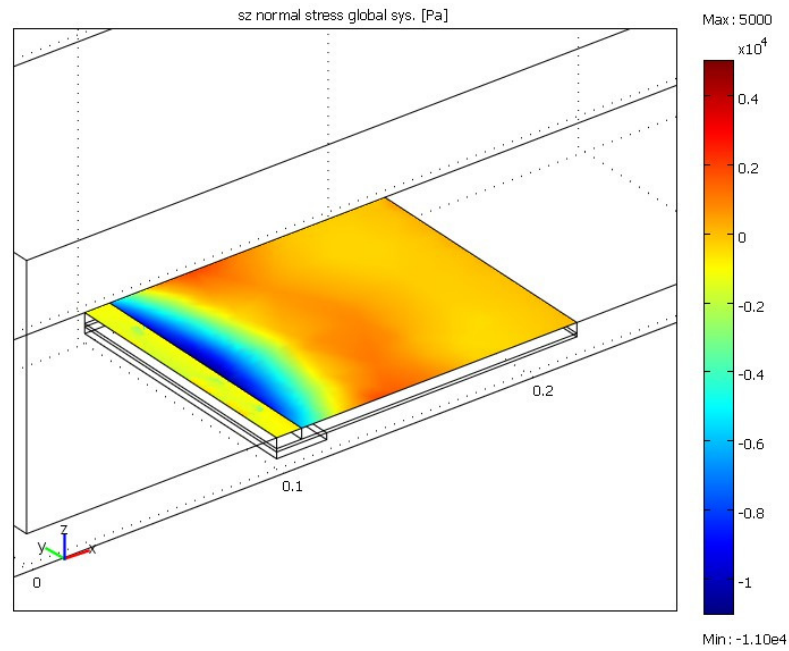
Σχήμα 5.44 Τρισδιάστατη απεικόνιση της επιφανειακής κατανομής των ορθών τάσεων [Pa] για την 2^η ιδιομορφή στην περίπτωση της δοκού με χρήση του “ευφούς και αναπροσαρμόσιμου FRP”
(α) στην ίδια κλίμακα με τη δοκό με αποκόλληση, (β) σε πιο στενό εύρος κλίμακας



Σχήμα 5.46 Τρισδιάστατη απεικόνιση της επιφανειακής κατανομής των ορθών τάσεων [Pa] για την 3^η ιδιομορφή στην περίπτωση της δοκού με βλάβη – αποκόλληση της άκρης του FRP



(α)



(β)

Σχήμα 5.47 Τρισδιάστατη απεικόνιση της επιφανειακής κατανομής των ορθών τάσεων [Pa] για την 3^η ιδιομορφή στην περίπτωση της δοκού με χρήση του “ευφυούς και αναπροσαρμόσιμου FRP”
 (α) στην ίδια κλίμακα με τη δοκό με αποκόλληση, (β) σε πιο στενό εύρος κλίμακας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία διάγνωσης και επιδιόρθωσης βλαβών σε δομικά στοιχεία, η οποία χρησιμοποιεί την αλληλεπίδραση των πιεζοηλεκτρικών υλικών με την κατασκευή σύμφωνα με τη μέθοδο της Η/Μ αγωγιμότητας (EMA). Εκμεταλλευόμενοι την αλληλεπίδραση αυτή επιτυγχάνεται α) η ανίχνευση της βλάβης, εφόσον υπάρχει, β) η ταυτοποίησή της και γ) η επιδιόρθωσή της.

7.1 Ανίχνευση βλάβης

Αρχικά, η ανίχνευση της βλάβης πραγματοποιήθηκε αποτελεσματικά για διάφορες περιπτώσεις βλάβης σε δοκό από σκυρόδεμα με τη χρήση του δείκτη βλάβης RMSD. Αυτός ο δείκτης συγκρίνει δύο τουλάχιστον διαφορετικές αποκρίσεις δυναμικής ανάλυσης (εκ των οποίων η μία αντιπροσωπεύει την αρχική) του συστήματος. Το μειονέκτημα των δεικτών βλάβης έγκειται στην απαίτηση γνώσης

έστω και μιας κατάστασης βλάβης του δομικού στοιχείου για σύγκριση των τιμών. Λόγω αυτού του μειονεκτήματος στη συνέχεια η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, βασιζόμενη στην εκμάθηση των δεδομένων της H/M αγωγιμότητας χωρίς επίβλεψη με την εφαρμογή του αυτοπαλλινδρούμενου μοντέλου FDARX στο πεδίο των συχνοτήτων, και σε συνδυασμό με τη θεωρία ακραίων τιμών, έδωσε πολύ καλά αποτελέσματα. Η διαδικασία εκμάθησης των δεδομένων χωρίς επίβλεψη παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα επειδή δεν απαιτεί δεδομένα από καμία κατάσταση βλάβης παρά μόνο από την αρχική. Κατά την ανάπτυξη της μεθοδολογίας αυτής σημαντικές παράμετροι θεωρούνται α) η κατασκευή ενός αντιπροσωπευτικού μοντέλου FDARX που προκύπτει από την απόκριση του αρχικού – υγιούς δομικού στοιχείου στην περιοχή συχνοτήτων και β) ο υπολογισμός των κατάλληλων ορίων εμπιστοσύνης από τα οποία διακρίνονται οι υπό διερεύνηση καταστάσεις (με ή χωρίς βλάβη).

Το μοντέλο FDARX που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή έδειξε πολύ καλή προσέγγιση μεταξύ των πραγματικών αποτελεσμάτων της ανάλυσης και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την προσεγγιστική εξίσωση της συνάρτησης μεταφοράς του συστήματος. Η συνάρτηση μεταφοράς αποτελεί την πλήρη περιγραφή του συστήματος, η οποία συσχετίζει άμεσα τα δεδομένα με τα αποτελέσματα. Από το μοντέλο FDARX μέσω των μετρούμενων αποκρίσεων της H/M σύνθετης αγωγιμότητας υπολογίζονται τα υπολειμματικά σφάλματα για κάθε περίπτωση. Έτσι ορίστηκαν επιτυχώς τα όρια εμπιστοσύνης με τη χρήση της θεωρίας ακραίων τιμών. Με τη χρήση της θεωρίας ακραίων τιμών αποφεύχθηκαν εσφαλμένες ενδείξεις στην ανίχνευση βλάβης. Οι ενδείξεις ήταν σωστές όσον αφορά τον αριθμό των ακραίων τιμών που ξεπερνούν τα όρια εμπιστοσύνης και για την περίπτωση της μη ύπαρξης βλάβης (περίπτωση υγιούς δοκού) και για τις περιπτώσεις ύπαρξης βλάβης.

Οι τιμές των υπολειμματικών σφαλμάτων που προκύπτουν από τη χρήση του δείκτη RMSD και την εφαρμογή του προτεινόμενου από τη παρούσα διατριβή αυτοπαλλινδρούμενου μοντέλου FDARX είναι άμεσα συγκρίσιμες και έχουν την τάση να μειώνονται όσο οι βλάβες απομακρύνονται από τον αισθητήρα. Η διάγνωση της βλάβης με τη χρήση του δείκτη βλάβης RMSD αλλά και με την προτεινόμενη μεθοδολογία επιτεύχθηκε αποδοτικά ακόμη και για την πιο μακρινή κατάσταση βλάβης. Έτσι στο σχετικό παράδειγμα της δοκού φαίνεται ότι η περιοχή κάλυψης του αισθητήρα καλύπτει το μήκος της δοκού, το οποίο είναι 0.5m. Για την πιο κοντινή περίπτωση εντοπίζονται περισσότερα ακραία σημεία από τα ακραία σημεία που

εμφανίζονται για τις υπόλοιπες καταστάσεις βλάβης, που είναι αναμενόμενο γιατί η βλάβη κοντά στον αισθητήρα επηρεάζει περισσότερο το αποτέλεσμα της απόκρισης.

7.2 Ταυτοποίηση βλαβών

Η μεθοδολογία αυτή βασίστηκε επίσης στη μέθοδο EMA. Η επεξεργασία των δεδομένων που ελήφθησαν αξιοποιήθηκαν κατάλληλα με την θεωρία σχεδιασμού (υπολογιστικών) πειραμάτων. Πραγματοποιήθηκε μία σειρά αναλύσεων (προσομοιώσεις με τη χρήση H/Y ως υπολογιστικό πείραμα) για διαφορετικές ενδεχόμενες βλάβες με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων και το σχεδιασμό πειραμάτων κατά τη θεωρία των Box Behnken. Ο σχεδιασμός αυτός χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην παρούσα διατριβή με δεδομένα από την απόκριση της H/M σύνθετης αντίστασης για την ταυτοποίηση βλαβών σε δομικά στοιχεία και έδειξε ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα. Με μία αντίστροφη διαδικασία βελτιστοποίησης επιτυγχάνεται η ακριβής λύση ώστε η θέση και το επίπεδο της βλάβης να προσδιοριστεί με ικανοποιητική ακρίβεια.

Τα πολυώνυμα που προέκυψαν από τα σημεία σχεδιασμού κατά Box Behnken για την κατασκευή των επιφανειών απόκρισης έδειξαν ικανοποιητική ακρίβεια στην προσέγγιση των τιμών του πραγματικού μέρους της H/M αγωγιμότητας. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου έγκειται στην πρόβλεψη της ταυτοποίησης της βλάβης σε όλη την περιοχή σχεδιασμού του υπολογιστικού πειράματος.

Με την ανάπτυξη της παραπάνω μεθοδολογίας εκτιμήθηκε με ικανοποιητική ακρίβεια η κατάσταση βλάβης ενός δομικού στοιχείου δοκού από σκυρόδεμα. Με το συνδυασμό της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και τη μεθοδολογία του σχεδιασμού πειραμάτων κατά Box-Behnken, η ανάλυση των παραμέτρων επίδρασης της βλάβης απλοποιήθηκε αρκετά. Η διαδικασία προσδιορισμού της βλάβης με την τεχνική της βελτιστοποίησης που επιλέχτηκε πραγματοποιήθηκε επιτυχώς. Η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της κατασκευής σε ποικίλες καταστάσεις βλάβης γίνεται με την ανάλυση της κατασκευής αυτής με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων στο πεδίο των συχνοτήτων σε συνδυασμό με την δημιουργία κατάλληλων μετα-μοντέλων επιφανειών απόκρισης δευτέρου βαθμού σε κατάλληλα σημεία σχεδιασμού.

Σαν γενικό συμπέρασμα μπορεί να ειπωθεί ότι η ταυτόχρονη χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών ως αισθητήρες και διεγέρτες έδειξε πολύ καλά αποτελέσματα

όσον αφορά τη διάγνωση των βλαβών σε δομικά στοιχεία, τόσο σε επίπεδο ανίχνευσης, όσο και στην ταυτοποίησή τους. Ο έλεγχος της δομικής ακεραιότητας που προτάθηκε στην παρούσα διατριβή βασίζεται στον προσδιορισμό κατάλληλου αριθμού σημείων με την τεχνική των μετα-μοντέλων απόκρισης επιφανειών με στόχο τον περιορισμό των σχετικών σφαλμάτων πρόβλεψης και χρησιμοποιείται αποτελεσματικά στον προσδιορισμό της κατάστασης βλάβης μιας κατασκευής.

7.3 Επιδιόρθωση βλαβών

Στα πλαίσια της συνολικής αντιμετώπισης του θέματος «διάγνωση και επιδιόρθωση βλαβών σε δομικά στοιχεία» αναπτύχθηκε μια ειδική μεθοδολογία επιδιόρθωσης με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών «ευφών» επιθεμάτων. Για την επιδιόρθωση του δομικού στοιχείου από σκυρόδεμα θεωρείται ότι εφαρμόζονται επικολλητά ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) επιθέματα, στη θέση που έχει διαγνωστεί και ταυτοποιηθεί βλάβη. Εξαιτίας μιας πιθανής πρώιμης αποκόλλησης των FRP επιθεμάτων, η συνεισφορά τους μειώνεται στη συνολική απόκριση του επισκευασμένου δομικού στοιχείου. Γι' αυτό το λόγο διερευνήθηκε ο έλεγχος της αποκόλλησης των υλικών αυτών κατά τη διάρκεια δυναμικής φόρτισης. Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία, τοποθετείται σύστημα πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα-διεγέρτη στα άκρα του FRP με στόχο τον ενεργό έλεγχο της πιθανής αποκόλλησής του. Με την εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής φαίνεται να μειώνονται αισθητά οι τάσεις που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια του σκυροδέματος και του FRP κατά τη διάρκεια δυναμικής φόρτισης. Η προτεινόμενη τεχνική ταυτοποίησης των φασματικών τιμών της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας του υγιούς δοκιμίου ελέγχου και του αντίστοιχου δοκιμίου, όπου έχει ανιχνευτεί βλάβη, δείχνει πολύ ελπιδοφόρα αποτελέσματα για να θεωρηθεί σαν ένα αξιόπιστο κριτήριο ενεργούς επιδιόρθωσης της βλάβης με τη χρήση της μεθόδου EMA.

Το κριτήριο αυτό εφαρμόζεται με μια κατάλληλη διαδικασία βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από τον αισθητήρα. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή υπολογίζονται τα βέλτιστα ηλεκτρικά φορτία που πρέπει να εφαρμοστούν στον διεγέρτη που τοποθετείται στην άκρη του FRP στο σημείο της αποκόλλησης με σκοπό τον έλεγχο αυτής κατά τη διάρκεια δυναμικής φόρτισης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αναλυτική εφαρμογή, η παραπάνω διαδικασία έδειξε πολύ

καλή προσαρμογή. Κατά κάποιο τρόπο λειτουργεί ως ένα “ευφύες” σύστημα δράσης – αντίδρασης, όπου η αντίδραση είναι η “δευτερεύουσα” δύναμη του διεγέρτη, και αντισταθμίζει τη δράση που είναι η εξωτερική εναλλασσόμενη δύναμη και συντελεί στην αποκόλληση. Από την διαδικασία βελτιστοποίησης του δείκτη σφάλματος μεταξύ των φασματικών τιμών της σύνθετης αγωγιμότητας του υγιούς δοκιμίου και αυτού με βλάβη, προκύπτουν οι τιμές των τάσεων επιδιόρθωσης για κάθε ιδιοσυχνότητα. Έτσι αντιμετωπίζεται με ενεργό τρόπο το πρόβλημα της αποκόλλησης του FRP.

Με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας προέκυψε ότι: α) μειώθηκαν οι αναπτυσσόμενες τάσεις στη διεπιφάνεια σκυροδέματος – FRP στην άκρη της αποκόλλησης πλησιάζοντας τις τιμές της υγιούς κατάστασης, β) μειώθηκε η κάθετη μετατόπιση του αποκολλημένου άκρου του FRP, με αποτέλεσμα να διατηρείται συνεχώς η επαφή του με την επιφάνεια της δοκού. Με την προτεινόμενη μεθοδολογία φαίνεται να αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά το πρόβλημα της αποκόλλησης των FRP για δυναμικές φορτίσεις σύμφωνα με την εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε.

7.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ελέγχου δομικής ακεραιότητας για την ανίχνευση βλαβών σε δομικά στοιχεία με τη χρήση του ανεξάρτητου μοντέλου FDARX θα είχε ενδιαφέρον να ελεγχθεί και πειραματικά. Δεδομένου ότι αποτελεί ανεξάρτητη μεθοδολογία “εκμάθησης των δεδομένων χωρίς επίβλεψη”, δηλαδή χωρίς την ανάγκη επιπλέον δεδομένων από μία κατάσταση βλάβης, θα ήταν εφικτό να δοκιμαστεί άμεσα σε πειραματική εφαρμογή. Επίσης ερευνητικό αλλά και πρακτικό ενδιαφέρον για την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης διαδικασίας ανίχνευσης θα είχε και η εξέταση διάφορων συνδυασμών όσον αφορά τον αριθμό αλλά και την τοποθέτηση των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων στην επιφάνεια του στοιχείου στο οποίο ανιχνεύεται βλάβη.

Η μεθοδολογία ταυτοποίησης βλάβης εφαρμόστηκε αποδοτικά για μία δοκό από σκυρόδεμα, ώστε να εξεταστεί η αποδοτικότητά της. Η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της κατασκευής σε διάφορες καταστάσεις βλάβης προβλέφθηκε αρκετά ικανοποιητικά. Σε μελλοντική έρευνα μπορεί να εφαρμοστεί για δομικό στοιχείο από σκυρόδεμα σε περίπτωση που υπόκειται σε ταυτόχρονη εξωτερική δυναμική φόρτιση. Δεδομένου ότι κατά την ταυτόχρονη εξωτερική φόρτιση αλλάζει η απόκριση της H/M αγωγιμότητας

που λαμβάνεται από τους αισθητήρες, θα ήταν αρκετά ενδιαφέρον να συμπεριληφθεί και αυτός ο παράγοντας στην έρευνα.

Σύμφωνα με την αναπτυσσόμενη μεθοδολογία επιδιόρθωσης φαίνεται ότι το “ευφύες και αναπροσαρμόσιμο FRP” συνεισφέρει αποτελεσματικά στη μείωση των τάσεων στην περιοχή που έχει υποστεί αποκόλληση κατά τη δυναμική φόρτιση. Τέλος, θα ήταν πολύ σημαντικό σε μελλοντική έρευνα να μπορεί να επιβεβαιωθεί και πειραματικά η μέθοδος αυτή, ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί και σε εφαρμογές κατασκευών σε πραγματική κλίμακα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **ACI Committee 440, 440.2R-02, 2006**, 'Design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures', American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
2. **Adams D.E., Farrar C.R., 2002**, 'Classifying Linear and Nonlinear Structural Damage Using Frequency Domain ARX Models', Journal of Structural Health Monitoring, Vol. 1, No. 2, 185-201.
3. **Adams D.E., 2001**, 'Frequency domain ARX models and multi-harmonic FRF estimators for nonlinear dynamic systems', Journal of Sound and Vibrations, Vol. 250, 5, 935-950.
4. **Annamdas V. G. M., Soh C.K., 2007**, 'Three-Dimensional Electromechanical Impedance Model. I: Formulation of Directional Sum Impedance', Journal of Aerospace Engineering of ASCE, Vol. 20, No. 1, 53-62.
5. **Aslan N., Cebeci Y., 2007**, 'Application of Box-Behnken design and response surface methodology for modeling of some Turkish coals', Fuel 86, 90-97.
6. **Ayres J.W., Lalande F., Chaudhry Z., Rogers C.A., 1998**, 'Qualitative impedance-based health monitoring of civil infrastructures', Smart Materials and Structures, Vol. 7, 599-605.
7. **Baker A.A., Jones R., 1988**, 'Bonded Repair of an Aircraft Structure', The Netherlands: Martinus Nijhoff Publishers.
8. **Banan M. R., Hjelmstad K. D., 1994**, 'Parameter estimation of structures from static response', I. Computational aspects J. Struct. Eng. ASCE, 120, 3243-3258.
9. **Banks H. T., Inman D. J., Leo D. J., Wang Y., 1996**, 'An experimentally validated damage detection theory in smart structures', Journal of Sound Vibration, Vol. 191, 5, 859-880.
10. **Bhalla S., Soh, C. K., 2003**, 'Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers', Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 32, No. 12, 1897-1916.
11. **Bhalla S., Soh C.K., 2004a**, 'High Frequency Piezoelectric Signatures for Diagnosis of Seismic Blast Induced Structural Damages', NDT and E. Int., 37, 23-33.
12. **Bhalla, S., Soh, C.K., 2004b**, 'Structural Health Monitoring by Piezo-impedance Transducers I: modelling, Journal of Aerospace Engineering', ASCE, 17, 4, 154-165.
13. **Box E.P., Draper N.R., 2007**, 'Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses', Second edition, Wiley.
14. **Box E.P., Behnken D.W., 1960**, 'Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables', Technometrics 2, 195.

15. **Box G.E.P., Hunter W.G., Hunter J.S., 1978**, ‘Statistics for experiments—an introduction to design, data analysis and model building’, John Wiley & Sons, New York.
16. **Castillo E., Hadi A. S., Balakrishnan N., Sarabia J.M., 2005**, ‘Extreme Value And Related Models With Applications In Engineering And Science’, Wiley Interscience, a John Wiley & Sons, INC. Publication.
17. **Chaallal O., Nollet M.J., Perraton D., 1998**, ‘Shear strengthening of RC beams by externally bonded side CFRP strips’, Composites for Construction, ASCE, Vol. 2, No. 2, 111-113.
18. **Chalioris, C.E., 2003**, ‘Shear Performance of RC Beams using FRP Sheets Covering Part of the Shear Span’, Proceedings of the 1st International Conference on Concrete Repair, St-Malo, Brittany, France, Vol. 2, 809-816.
19. **Cheng C.C., Lin C.C., 2005**, ‘An impedance approach for vibration response synthesis using multiple PZT actuators’, Sensors and Actuators, A, 118, 116-126.
20. **Cheng J., Taheri F., 2005**, ‘A novel smart adhesively bonded joint system’, Smart Materials and Structures, 14, 5, 971-981.
21. **COMSOL, 2006**, Ltd, London, Comsol Multiphysics, Modelling 3.5, www.comsol.com, 2006, Users Guide.
22. **Cundy A.L., Hemez F.M., Inman D.J., Park G., 2003**, ‘Use of response surface metamodells for damage identification of a simple non-linear system’, Key Engineering Materials, vols. 245- 246, 167-174.
23. **Cundy, A.L. 2002**, ‘Use of Response Surface Metamodels in Damage Identification of Dynamic Structures’, Masters Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
24. **Doebling S. W., Farrar C. R., Prime M. B., Shevitz D. W., 1996**, ‘Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics’, A Literature Review.
25. **Doebling, S. W., C. R. Farrar, M. B. Prime and D. W. Shevitz, 1998** ‘A Review of Damage Identification Methods that Examine Changes in Dynamic Properties’, Shock and Vibration Digest, 30, 2, 91-105.
26. **Duan W.H., Quek S.T., Wang Q., 2008**, ‘Finite element analysis of the piezoelectric-based repair of a delaminated beam’, Smart Mater. Struct., 17, 7.
27. **Esteban J., Rogers A. C., 1999**, ‘Wave localization due to material damping’, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 177, 93-107.
28. **Farrar C.R., Duffey T.A., Doebling S.W, Nix D. A., 1999**, ‘A statistical pattern recognition paradigm for vibration0based structural health monitoring’, 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford U., CA, 8-10 Sept.

29. **Fasel T.R., Sohn H., Park G., Farrar C. R., 2005**, 'Active sensing using impedance-based ARX models and extreme value statistics for damage detection', *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 34, 763-785.
30. **Favvata M.J., Karayannis C.G., Liolios A.A., 2008**, 'Non-linear static versus dynamic analyses for the interaction of structures', In: *Proceedings of 7th European conference on structural dynamics, (EURODYN)*, at Southampton University, United Kingdom, 7-9 July, paper no. E218.
31. **Ferreira S.L.C., Bruns R.E., Ferreira H.S., Matos G.D., David J.M., Brandao G.C., da Silva E.G.P., Portugal L.A., dos Reis P.S. Souza A.S., dos Santos W.N.L., 2007**, 'Review Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods', *Analytica Chimica Acta*, 597, 179-186.
32. **Fugate M.L., Sohn H., Farrar C.R., 2001**, 'Vibration-based damage detection using statistical process control', *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15, 707-721.
33. **Giurgiutiu V., Rogers C.A., 1998**, 'Application of the electro-mechanical (E/M) impedance method to machinery failure prevention, 52nd Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology, March 30 - April 2, Cavalier Hotel, Virginia Beach, VA.
34. **Giurgiutiu V., Rogers C.A., 1999**, 'Recent progress in the application of E/M impedance method to structural health monitoring, damage detection and failure prevention. In: 2nd International Workshop of Structural Health Monitoring, Stanford U., CA, 8-10 Sept, 298-307.
35. **Giurgiutiu V., Zagrai A. N. 2002**, 'Embedded self-sensing piezoelectric active sensors for on-line structural identification', *J. Vib. Acoust., ASME*, 124, 116-25.
36. **Giurgiutiu V., 2007**, 'Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors', Academic press.
37. **Giurgiutiu V., and Zagrai A. N., 2000**, 'Characterization of piezoelectric wafer active sensors', *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 11, 12, 959- 976.
38. **Giurgiutiu V., Harries K., Petrou M., Bost J., Quattlebaum J.B., 2003**, 'Disbond detection with piezoelectric wafer active sensors in RC structures strengthened with FRP composite overlays', *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2, 2, 213-224.
39. **Giurgiutiu V., Zagrai A.N., Bao J., 2001**, 'Embedded Active Sensors for In-situ Structural Health Monitoring of Aging Aircraft Structures', In: *Proceedings of the 7th ASME NDE Topical Conference*, Vol. 20.
40. **Goh, T.N., 2001**, 'Pragmatic Approach to Experimental Design in Industry', *Journal of Applied Statistics*, vol.28, 391-398.
41. **Grisso B.L., 2004**, 'Considerations of the impedance method, wave propagation, and wireless systems for structural health monitoring', *Mechanical Engineering thesis*, Virginia Tech, Blacksburg, VA, 108.

42. **Harmon L., 2003**, ‘Experiment planning for combinatorial materials discovery’, *Journal of materials science*, 38, 4479 - 4485.
43. **Henrion D., Lasserre J., 2003**, ‘GloptiPoly: Global optimization over polynomials with Matlab and SeDuMi’, *ACM Trans. Math. Soft.*, 29, 2, 165-194.
44. **Henrion D., Lasserre J., 2006**, ‘Gloptipoly: Global optimization over polynomials with Matlab and Se-DuMi by Didier Henrion and Jean Lasserre. Available at http://www.laas.fr/_henrion/software/gloptipoly/, version 2.3.0 of December 13.
45. **Impedance Measurement Handbook, 2003**, Agilent Technologies Co. Ltd. USA.
46. **Jenkinson A.F., 1955**, ‘The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) of meteorological elements’, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 81, 158-71.
47. **Kaiser H., Karbhari V.M., 2004**, ‘Non-destructive testing techniques for FRP rehabilitated concrete. I: A Critical Review, *Materials and Product Technology*, 21, 5, 349-384.
48. **Kalifa A., Gold W.J., Nanni A., Aziz A.M., 1998**, ‘Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members’, *Composites for Construction*, ASCE, Vol. 2, No. 4, 195-202.
49. **Karayannis C.G., Chalioris C.E., 2003a**, ‘Strengthening of Shear T-beams using Carbon FRP’, *Proceedings of the 1st International Conference on Concrete Repair*, St-Malo, Brittany, France, Vol. 2, 775-782.
50. **Karayannis C.G., Chalioris C.E., 2003b**, ‘Experimental Investigation of the Contribution of Bonded C-FRP jackets to Shear Capacity of RC Beams’, *Proceedings of the International Symposia ‘Celebrating Concrete: People and Practice’*, University of Dundee, Scotland, UK, Vol. Role of Concrete in Sustainable Development, 689-696, Sept. 2003.
51. **Karayannis C.G., Sirkelis G.M., 2008**, ‘Strengthening and rehabilitation of RC beam-column joints using carbon-FRP jacketing and epoxy resin injection’, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 37, No. 5, 769-790.
52. **Kessler S.S., 2002**, ‘Piezoelectric-Based In-Situ Damage Detection of Composite Materials for Structural Health Monitoring Systems’, *Department of Aeronautics and Astronautics in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctorate of philosophy in aeronautics and astronautics at the Massachusetts institute of technology*.
53. **Kim J., Ko B., Lee J.-K., Cheong C.-C., 1999**, ‘Finite element modeling of a piezoelectric smart structure for the cabin noise problem’, *Smart Mater. Struct.*, 8, 380-389.

54. **Li A., Assih J., Delmas Y., 2001**, 'Shear strengthening of RC beams with externally bonded CFRP sheets', *Structural Engineering, ASCE*, Vol. 127, No.4, 374-380.
55. **Liang C., Sun F. P., and Rogers C. A., 1994**, 'Coupled electromechanical analysis of adaptive material systems-Determination of the actuator power consumption and system energy transfer', *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 5, 1, 12-20.
56. **Liang, C., Sun, F., and Rogers, C. A., 1996**, 'Electro-mechanical impedance modeling of active material systems, *Smart Mater. Struct.*, 5, 171-186.
57. **Lim Y.-H., Varadan V.V., Varadan V.K., 1997**, 'Finite-element modeling of the transient response of MEMS sensors, *Smart Mater. Struct.* 6, 53-61.
58. **Lim Y.Y., Bhalla S., Soh C.K., 2006**, 'Structural identification and damage diagnosis using self-sensing piezo-impedance transducers', *Smart Mater. Struct.* 15, 987-995.
59. **Lim Y-H, Varadan V.V., Varadan V.K., 1997**, 'Closed loop finite element modeling of active structural damping in the frequency domain', *Smart Mater. Struct.* 6, 161-8.
60. **Lin M., Qing X., Kumar A., Beard S.J., 2001**, 'Smart layer and smart suitcase for structural health monitoring applications', *SPIE on Smart Structures and Material Systems*, San Diego, CA, 4332, 98-106, 2001.
61. **Liolios A.A., Boglou A.K., 2003**, 'Chaotic behaviour in the non-linear optimal control of unilaterally contacting building systems during earthquakes', *Chaos, Solitons and Fractals*, 17, 493-498.
62. **Liu T. J-C., 2007**, 'Fracture mechanics and crack contact analyses of the active repair of multi-layered piezoelectric patches bonded on cracked structures', *Theor Appl Fract Mech*, 47, 120-32.
63. **Liu T. J-C., 2008**, 'Crack repair performance of piezoelectric actuator estimated by slope continuity and fracture mechanics', *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 2566-2574.
64. **MATLAB, 2006**, The Mathworks Inc. U.S., www.mathworks.com., 2006, Users Guide.
65. **Montalvão D., Maia N.M.M., Ribeiro A.M.R., 2006**, 'A Review of Vibration-based Structural Health Monitoring with Special Emphasis on Composite Materials', *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 38, No. 4, SAGE Publications.
66. **Montgomery D.C., 1997**, 'Design and Analysis of Experiments, fifth ed., John Wiley & Sons, USA.
67. **Muthukumar M., Mohan D., Rajendran M., 2002**, 'Optimization of mix proportions of mineral aggregates using Box Behnken design of experiments', *Cement & Concrete Composites*, 25, 751-758.

68. **Ntotsios E., Papadimitriou C., Panetsos P., Karaiskos G., Perros K., Perdikaris P., 2009**, ‘Bridge health monitoring system based on vibration measurements’, *Bull Earthquake Eng.*, Vol. 7, No. 2, 469–483.
69. **Panetsos P., Lambropoulos S., Papadimitriou K., Karamanos S., Lekidis V., Karakostas C., 2006a**, ‘Bridge health monitoring for egnatia odos bridge management system’, *Third European Workshop on Structural Health Monitoring July 5-7*, Univ. Politecnica Madrid, Univ. Granada Granada, Spain.
70. **Panetsos P., Theodulidis N., Roumelioti Z., 2006b**, ‘Seismic risk assessment in egnatia motorway long bridges based on ground motion monitoring’, *Third European Workshop on Structural Health Monitoring July 5-7*, Univ. Politecnica Madrid, Univ. Granada Granada, Spain.
71. **Park G., Cudney H. H., Inman D. J., 2000a**, ‘An integrated health monitoring technique using structural Impedance sensors’, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 11, No. 6, 448-455.
72. **Park G., Cudney H., Inman D.J., 2000b**, ‘Impedance-based health monitoring of civil structural components’, *ASCE Journal of Infrastructure Systems*, 6, 153-160.
73. **Park G., Cudney H.H., Inman D.J., 1999**, ‘Impedance-based Health Monitoring for Civil Structures’, *2nd International Workshop on Structural Health Monitoring*, 523-532, September 8-10, Stanford, CA.
74. **Park G., Cudney H.H., Inman D.J., 2001**, ‘Feasibility of using Impedance-based Damage Assessment for Pipeline Structures’, *Journal of Earthquake Engineering Structures and Dynamics*, 30, 1463-1474.
75. **Park G., Inman D.J., 2005**, ‘Impedance-Based Structural Health Monitoring’, *Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical Systems, Part II*, 13, 275-292, Chichester, John Wiley & Sons Ltd, England.
76. **Park G., Rutherford A., Sohn H., Farrar C.R., 2005**, ‘An outlier analysis framework for impedance-based structural health monitoring’, *Journal of Sound and Vibrations*, vol. 286, 229-250.
77. **Park G., Sohn H., Farrar C.R., Inman D.J., 2003**, ‘Overview of piezoelectric impedance based health monitoring and path forward’, *Journal of Shock and Vibration Digest*, vol. 35, 6, 451-463.
78. **Park H.W., Sohn H., 2006**, ‘Parameter estimation of the generalized extreme value distribution for structural health monitoring’, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 21, 366-376.
79. **Park, G., Rutherford, A. C., Sohn, H. & Farrar, C. R., 2005**, ‘An outlier analysis framework for impedance-based structural health monitoring’, *J. Sound Vib.*, 286, 229-250.

80. **Peairs, D.M., Park, G., Inman, D.J., 2004**, 'Improving accessibility of the impedance-based structural health monitoring method', *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 15, 129-139.
81. **Piefort V., 2001**, 'Finite Element Modelling of Piezoelectric Active Structure', Thesis submitted in candidature for the degree of Doctor in Applied Sciences, Active Structures Laboratory, Department of Mechanical Engineering and Robotics, Universite Libre de Bruxelles.
82. **Providakis C.P., Voutetaki M.E., 2005a**, "Stability and Integrity of Thermal Actuators Using Local and Global Density", in Proceedings of 'the 1st International Conference on Experiments/Process/System Modelling/Simulation/Optimization (1st IC-EpsMsO)', Athens, 6-9 July, 2005.
83. **Providakis C. P., Voutetaki M. E., Kontoni D.- P. N. & Stauroulaki M. E., 2005b**, 'A Comparison of active constrained layer damping treatments using FEM modeling of electromechanical impedance', in 'Advances in Computational & Experimental Engineering and Sciences - Proceedings of the 'International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences', (ICCES'05), 1-6 Dec. 2005, Chennai, India.
84. **Providakis C. P., Voutetaki M. E., Stauroulaki M. E. & Kontoni D.- P. N., 2005c**, 'FEM Modeling of Electromechanical Impedance for the Analysis of Smart Damping Treatments', in Proceedings of the 'International Conference on Industrial Electronics, Technology & Automation 2005 (IETA 05) - International Joint Conferences on Computer, Information, and Systems Sciences, and Engineering 2005 (CISSE 2005)', 12-18 Dec. 2005, and also in Hardcover Proceedings 'Advances in Computer, Information, and Systems Sciences, and Engineering – Proceedings of IETA 2005, TeNe 2005 and EIAE 2005', Elleithy K., Sobh T., Mahmood A., Iskander M. & Karim M. (Eds.), 2006, Hardcover, Springer, pp. 129-133.
85. **Providakis C.P., Voutetaki M.E., 2006**, 'Seismic Damage Detection Using Smart Piezo-Transducers and Electromechanical Impedance Signatures', in Proceedings of 'First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology 1st ECEES', Geneva, Switzerland, 3-8 September, Paper Number: 307.
86. **Providakis C.P., Kontoni D.-P.N., Voutetaki M.E., 2007a**, 'Development of an electromechanical admittance approach for application in the vibration control of intelligent structures', *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 2, 275-281.
87. **Providakis C.P., Voutetaki M.E., 2007b**, 'Electromechanical Admittance - Based Damage Identification Using Box-Behnken Design of Experiments', *SDHM Structural Durability and Health Monitoring*, vol. 3, No. 4, 211-227.
88. **Providakis C.P., Kontoni D.-P.N, Voutetaki M.E., Stavroulaki M.E., 2008**, 'Comparisons of smart damping treatments based on fem modeling of electro-mechanical impedance', *Structures and Systems*, Vol. 4, No. 1, 35-46.

89. **Providakis C. P., Voutetaki M. E., 2009**, 'PZT control of edge debonding in dynamically loaded concrete structures strengthened with composite materials', in Proceedings of the '2nd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering', Rhodes, Greece, 22-24 June 2009, Paper Number: 185.
90. **Qing X. P., Beard S. J., Kumar A., Hannum R., 2006**, 'Technical Note: A real-time active smart patch system for monitoring the integrity of bonded repair on an aircraft structure', *Smart Materials and Structures*, 15, 3, N66-N73.
91. **Rabinovitch O., 2007a**, 'Piezoelectric Control of edge debonding in beams strengthened with composite materials: Part I - Analytical Modeling', *Composite Materials*, 41, 5, 525-546.
92. **Rabinovitch O., 2007b**, 'Piezoelectric Control of edge debonding in beams strengthened with composite materials: Part II - Failure Criteria & Optimization', *Composite Materials*, 41, 6, 657-677.
93. **Raja S., Sinha P.K., Prathap G., Bhattacharya P., 2002**, 'Influence of one and two dimensional piezoelectric actuation on active vibration control of smart panels', *Aerospace Science and Technology*, 6, 209-216.
94. **Raju, V., 1998**, 'Implementing Impedance-Based Health Monitoring', Master's thesis, Virginia Polytechnic institute and State University, Blacksburg, VA.
95. **Rosenboom O.A., Hassan T.K., Rizkalla S., 2007**, 'Flexural behavior of aged prestressed concrete girders strengthened with various FRP systems', *Construction and Building Materials*, 21, 4, 764-776.
96. **Sanayei M., Saletnik M. J., 1996**, 'Parameter estimation of structures from static strain measurements I: formulation', *J. Struct. Eng. ASCE*, 122, 555-62.
97. **Schnerch D., Dawood M., Rizkalla S., Sumner E., 2007**, 'Proposed design guidelines for strengthening of steel bridges with FRP materials', *Construction and Building Materials*, 21, 5, 1001-1010.
98. **Sirohi J., and Chopra I., 2000**, 'Fundamental understanding of piezoelectric strain sensors', *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 11, 4, 246-257.
99. **Soh C. K., Tseng K. K.-H., Bhalla S., and Gupta A., 2000**, 'Performance of smart piezoceramic patches in health monitoring of a RC bridge', *Smart Mater. Struct.*, 9, 4, 533-542.
100. **Soh C.K., Bhalla S., 2005**, 'Calibration of Piezo-transducers for Strength Prediction and Damage Assessment of Concrete', *Smart Materials and Structures*, 14, 671-684.
101. **Soh C.K., Tseng K.K.H., Bhalla S., Gupta A., 2000**, 'Performance of Smart Piezoceramic Patches in Health Monitoring of a RC Bridge', *Smart Materials and Structures*, Vol. 9, 533-542.

102. **Sohn H., Farrar C., 2001**, ‘Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals’, *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, 446-451.
103. **Sohn H., Allen D.W., Worden K., Farrar C.R., 2005**, ‘Structural damage classification using extreme value statistics’, *J. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, ASME, 127, 125-132.
104. **Sohn H., Czarnecki J.A., and Farrar C.R., 2001**, ‘Structural health monitoring using statistical process control’, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 11, 1356-1363.
105. **Sotiropoulos D.A., 2007**, ‘Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures’, *Proceedings of the 13th International Conference on Experimental Mechanics*, Alexandroupolis, Greece, July 1-6.
106. **Sotiropoulos D.A., Babatsouli E., 2002**, ‘Experimental Limitations to Guided Wave Generation in Elastic Materials’, Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. E.E. Gdoutos (ed.), *Recent Advances in Experimental Mechanics*, 389-396.
107. **Sun F., Chaudhry Z., Liang C., and Rogers C.A., 1995**, ‘Truss structure integrity identification using PZT sensor-actuator’, *J. Intelligent Mat. Sys., Struct.*, 6, 134-139.
108. **Teng J.G., Lam L., Chen J.F., 2004**, ‘Shear strengthening of RC beams with FRP composites’, *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. 6, 173-184.
109. **Teng J.G., Zhang J.W., Smith S.T., 2002**, ‘Interfacial stresses in reinforced concrete beams bonded with a soffit plate: A Finite Element Study’, *Construction and Building Materials*, 16, 1, 1-14.
110. **Tiersen H.F., 1963**, ‘Wave propagation in an infinite piezoelectric plate’, *J. Acoust. Soc. Am.*, 35, 234-239.
111. **Theotokoglou E.E., 1997**, ‘Interlaminar cracking of composite shells’, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 27, 13-20.
112. **Tseng K.K., Naidu A.S.K., 2002**, ‘Nonparametric damage detection and characterization using smart piezoelectric material’, *Smart Materials and Structures*, vol.11, 317-329.
113. **Tseng K.K., Wang L., 2005**, ‘Impedance-based method for nondestructive damage identification’, *Journal of Engineering Mechanics*, vol.131, 58-64.
114. **Tsompanakis Y., Lagaros N.D., Stavroulakis G.E., 2008**, ‘Soft computing techniques in parameter identification and probabilistic seismic analysis of structures’, *Advances in Engineering Software*, 39, 612-624.
115. **Tsonos A.G., 2008**, ‘Effectiveness of CFRP-jackets and RC-jackets in post-earthquake and pre-earthquake retrofitting of beam-column subassemblages’, *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 3, 777-793.

116. **Uomoto T., 2000**, 'Non destructive testing in civil engineering', Center for Collaborative Research, University of Tokyo, Japan, First edition, Elsevier Science Ltd.
117. **Varadan V.V., Lim Y-It., and Varadan V.K., 1996**, 'Closed loop finite element modeling of active/passive damping in structural vibration control', *Smart Mater. Struct.*, vol.5, 685- 694.
118. **Wang K., 2004**, 'Vibration Analysis of Cracked Composite Bending-torsion Beams for Damage Diagnosis', Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Department of Mechanical Engineering.
119. **Wang Q., Duan W.H., Quek S.T., 2004**, 'Repair of notched beam under dynamic load using piezoelectric patch *Int. J. Mech. Sci.*, 46, 1517-33.
120. **Worden K., Allen D.W., Sohn H., Stinemates D.W., Farrar C.R., 2002**, 'Extreme Value Statistics for Damage Detection in Mechanical Structures', Los Alamos National Laboratory Report, LA-13903-MS.
121. **Wu Z., Ghosh K., Qing X., Karbhari V., Chang F.K., 2006**, 'Structural health monitoring of composite repair patches in bridge rehabilitation', *SPIE Smart Structures and Materials 2006: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 6174, 670-678, 2006.
122. **Yang Y., Miao A., 2008**, 'Effect of External Vibration on PZT Impedance Signature', *Sensors*, 8, 6846-6859.
123. **Yang Y., Hu Y., Lu Y., 2008**, 'Sensitivity of PZT Impedance Sensors for Damage Detection of Concrete Structures', *Sensors*, 8, 327-346.
124. **Zacharopoulos, D.A., 2004**, 'Stability Analysis of Crack Path Using the Strain Energy Density Theory', *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 41, pp. 327-337.
125. **Zagrai A., Giurgiutiu V., 2002**, 'Electro-Mechanical Impedance Method for Crack Detection in Thin Plates', *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 12, 709.
126. **Zhou Y.S. and Tiersten H.F., 1994**, 'Elastic analysis of laminated composite plates in cylindrical bending due to piezoelectric actuators', *Smart Mater. Struct.*, Vol. 3, 225-265.
127. **Zhou, S. W., Liang, C., and Rogers, C. A., 1996**, 'An impedance-based system modeling approach for induced strain actuator-driven structures', *J. Vibr. Acoust.*, 118, 3, 323-331.
128. **Καραμπίνης Α., Πανταζοπούλου Σ., 2000**, 'Η χρήση των συνθέτων υλικών στο σχεδιασμό και την ενίσχυση στοιχείων Ο.Σ.', *Τεχνικά Χρονικά*, 3, 75-86.
129. **Λιώλιος Α.Α., 1997**, 'Δυναμική των κατασκευών', Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης.

130. **Πανέτσος Π., Ρεντζεπέρης Ι., Λιώλιος Α., 2006**, 'Σύστημα Διαχείρισης Κύριας Συντήρησης Οδικών Γεφυρών από Σκυρόδεμα στην ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε.', 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου.
131. **Πανέτσος Π., Ντότσιος Ε., Παπαδημητρίου Κ., 2008**, 'Αξιολόγηση της Δομικής Κατάστασης των Γεφυρών βάσει Συνδυασμένης Οπτικής και Ταχείας Ενόργανης Επιθεώρησής τους', 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, 5-7 Νοεμβρίου, Άρθρο 2054.
132. **Τριανταφύλλου Α.Χ., 2003**. 'Ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά (ινοπλισμένα πολυμερή)', Πάτρα.
133. **Τσαμασφύρος Γ., Θεοτόκογλου Ε., 1994**, 'Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων', Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ.