

# ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών  
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής



## ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

*Διάγνωση βλαβών σε κατασκευές σκυροδέματος με  
χρήση "ευφρών" πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων σαν  
αδρανή σκυροδέματος*

**ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Β. ΛΙΑΡΑΚΟΣ**

Διπλ. Μηχανικός Ορυκτών Πόρων (Π.Κ.)

Επιβλέπων: Καθηγητής Κωνσταντίνος Π. Προβιδάκης

Χανιά, 2015



**TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE**

School of Architectural Engineering

Applied Mechanics Laboratory



**PHD DISSERTATION**

*Damage detection in concrete structures using  
“smart” piezoelectric sensors as concrete’s  
aggregates*

**EVANGELOS V. LIARAKOS**

Dipl., Mineral Resources Engineering (TUC)

Supervisor: Professor Constantinos P. Providakis

Chania, 2015





## Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

1. **Προβιδάκης Κωνσταντίνος**, *Επιβλέπων Καθηγητής*  
Καθηγητής Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Πολυτεχνείου Κρήτης.
2. **Μεσκούρης Κωνσταντίνος**, *Μέλος τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής*  
Καθηγητής Πανεπιστημίου Άαχεν (RWTH), Γερμανία.
3. **Τσομπανάκης Ιωάννης**, *Μέλος τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής*  
Αναπληρωτής Καθηγητής Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης.
4. **Σταυρουλάκης Γεώργιος**, *Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής*  
Καθηγητής Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης Πολυτεχνείου Κρήτης.
5. **Καραγιάννης Χρήστος**, *Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής*  
Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης.
6. **Χαλιορής Κωνσταντίνος**, *Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής*  
Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης.
7. **Σταυρουλάκη Μαρία**, *Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής*  
Επίκουρη Καθηγήτρια Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Πολυτεχνείου Κρήτης.



## Examining Committee:

1. **Professor Costas Providakis, *Supervisor***  
School of Architectural Engineering, Technical University of Crete.
2. **Professor Konstantin Meskouris, *Advisor***  
University Professor, RWTH Aachen University, German.
3. **Associate Professor Yiannis Tsompanakis, *Advisor***  
School of Environmental Engineering, Technical University of Crete.
4. **Professor Georgios Stavroulakis, *Member of Committee***  
School of Production Engineering and Management, Technical University of Crete.
5. **Professor Christos Karayannis, *Member of Committee***  
Department of Civil Engineering, Democritus University of Thrace.
6. **Associate Professor Costas Chalioris, *Member of Committee***  
Department of Civil Engineering, Democritus University of Thrace.
7. **Assistant Professor Maria Stavroulaki, *Member of Committee***  
School of Architectural Engineering, Technical University of Crete.



Η παρούσα διδακτορική έρευνα συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ).

Ερευνητικό Πρόγραμμα Χρηματοδότησης: Ηράκλειτος II. Η επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.



This Ph.D. research has been co-financed by the European Union (European Social Fund – ESF) and Greek national funds through the Operational Program "Education and Lifelong Learning" of the National Strategic Reference Framework (NSRF) - Research Funding Program: Heracleitus II. Investing in knowledge society through the European Social Fund.





# Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής, της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Πολυτεχνείου Κρήτης τη χρονική περίοδο Φεβρουάριος 2009-Οκτώβριος 2014. Το αντικείμενο της διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε είναι ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος-ΜΚΕ και η ανίχνευση βλαβών σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος, με την χρήση πιεζοηλεκτρικών αισθητήριων συσκευών. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες ενσωματώνονται στο νωπό σκυρόδεμα από τις πρώτες ώρες μετά τη σκυροδέτηση και παρακολουθούν την δομική ακεραιότητα μιας κατασκευής από τα πρώτα στάδια δόμησης έως και το σύνολο του χρόνου ζωής της. Δεδομένου ότι οι ενσωματωμένοι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες λειτουργούν ως τμήμα της μικροδομής του σκυροδέματος, χαρακτηρίζονται ως «ευφυή» αδρανή υλικά. Δηλαδή, ως συστατικά του σκυροδέματος τα οποία δεν αντιδρούν χημικά με τα υπόλοιπα συστατικά και παράλληλα «αντιλαμβάνονται» τις οποίες μεταβολές λαμβάνουν χώρα στη μηχανική συμπεριφορά του υπό μελέτη δομικού συστήματος.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους οι οποίοι συνέβαλαν καθοριστικά στην επιστημονική και ερευνητική καθοδήγηση για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής. Δικαιωματικά ο πρώτος άνθρωπος στο οποίο οφείλω τις ευχαριστίες και την εκτίμηση μου, είναι ο Καθηγητής της Αρχιτεκτονικής Σχολής του Πολυτεχνείου Κρήτης, Κώστας Προβιδάκης, ο οποίος είναι και ο επιβλέπων καθηγητής της διδακτορικής διατριβής. Η επιλογή του θέματος, η διάρθρωση της ερευνητικής διαδικασίας και η επιστημονική του καθοδήγηση, υπήρξε καθοριστική τόσο στην εκπόνηση της διατριβής όσο και στην καινοτομία που προέκυψε. Επιπλέον, ως δάσκαλος μου δίδαξε σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο με τον οποίο η επιστημονική σκέψη αποκρυσταλλώνεται σε τεχνολογικές εφαρμογές, με σκοπό την αντιμετώπιση των πραγματικών τεχνικών αναγκών.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Κωνσταντίνο Μεσκούρη, Καθηγητή του RWTH (Πανεπιστήμιο Άαχεν, Γερμανία) και Γιάννη Τσομπανάκη,

Αναπληρωτή Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τη συμμετοχή τους στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή, καθώς και για το χρόνο που διέθεσαν για την ανάγνωση και τη διόρθωση της παρούσας διατριβής.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Σταυρουλάκη Γεώργιο, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, Καραγιάννη Χρήστο, Καθηγητή του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, Κωνσταντίνο Χαλιορή, Αναπληρωτή Καθηγητή του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης και την κυρία Σταυρουλάκη Μαρία, Επίκουρο Καθηγήτρια του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τη συμμετοχή τους στην επταμελή εξεταστική επιτροπή της παρούσας διατριβής. Στη Μαρία Σταυρουλάκη θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου, για τη γενικότερη επιστημονική διαπαιδαγώγηση που μου πρόσφερε, κατά τη διάρκεια των συνολικών μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Ευχαριστίες επίσης στους ανθρώπους του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Μηχανικής και πιο συγκεκριμένα:

- Στον Αντώνη Σταμαθιουδάκη, μέλος ΕΔΙΠ του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την συμβολή του στη παρασκευή τμημάτων των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων στο μηχανουργείο του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Μηχανικής, καθώς και για τις διευκολύνσεις που μου προσέφερε όταν ο χρόνος μου ήταν πολύ περιορισμένος λόγω διδακτορικού.
- Το Γιάννη Καντηλιεράκη, μέλος ΕΤΕΠ του Πολυτεχνείου Κρήτης, κατ' αρχήν για την ηθική υποστήριξη, την ενθάρρυνση που μου έδωσε σε πολλά ζητήματα και τέλος για τις διευκολύνσεις που μου προσέφερε όταν ο χρόνος μου ήταν πολύ περιορισμένος λόγω διδακτορικού.
- Τη φίλη και συνάδελφο Μαριστέλλα Βουτετάκη, Διδάκτωρ του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τη πρακτική βοήθεια που μου προσέφερε στην αρχή των διδακτορικών μου σπουδών πάνω στα πιεζοηλεκτρικά υλικά, τις ουσιαστικές και πολύωρες συζητήσεις που είχαμε πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο και τέλος για την πολύ μεγάλη ηθική συμπαράσταση.
- Τους φίλους και συναδέλφους πολιτικούς μηχανικούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές του εργαστηρίου Σταύρο Τσιστράκη, Ιωάννα Τζαβάρα και Καλλιόπη Στεφανάκη, για τη βοήθεια που μου προσέφεραν στις σκυροδετήσεις των δομικών στοιχείων που χρησιμοποίησα.



Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ και την απέραντη ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου και την οικογένεια μου, για τη συνολική υποστήριξη που μου παρείχαν όσα χρόνια σπούδαζα.

Χανιά, Ιανουάριος 2015

Λιαράκος Βαγγέλης



# Επιστημονικές Δημοσιεύσεις

Από την ερευνητική διαδικασία στο πλαίσιο εκπόνησης της παρούσας διατριβής, προέκυψαν οι ακόλουθες δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια με κριτές.

## Άρθρα σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά

- J1. **Providakis CP and Liarakos EV, 2011.** *T-WiEYE: An early-age concrete strength development monitoring and miniaturized wireless impedance sensing system.* Engineering Procedia; **10** 484-89.
- J2. **Providakis CP, Liarakos EV and E. Kampionakis, 2013.** *Nondestructive Wireless Monitoring of Early-Age Concrete Strength Gain Using an Innovative Electromechanical Impedance Sensing System.* Smart Materials Research; doi:10.1155/2013/932568.
- J3. **Providakis CP and Liarakos EV, 2014.** *Web-based concrete strengthening monitoring using an innovative electromechanical impedance telemetric system and extreme values statistics.* Structural Control and Health Monitoring; **21:9** 1252–1268.

## Ανακοινώσεις σε διεθνή συνέδρια με κριτές

- C1. **Providakis CP and Liarakos EV, 2010.** *Early age concrete strength monitoring using embedded smart aggregates as sensors.* Structural Health Monitoring 2010: Proceedings of the Fifth European Workshop; DEStech Publications Inc, July 2010.
- C2. **Providakis CP, Liarakos EV and Voutetaki M, 2010.** *Damage detection in concrete components using PZT actuators/sensors and extreme value statistics.* 9<sup>th</sup> HSTAM Congress in Mechanics; Limassol, Cyprus, July 2010.

- C3. **Providakis CP and Liarakos EV, 2011.** *T-WiEYE: An early-age concrete strength development monitoring and miniaturized wireless impedance sensing system.* 11<sup>th</sup> International Conference on the Mechanical Behavior of Materials (ICM2011); Lake Como, Italy, June 2011.
- C4. **Providakis CP and Liarakos EV, 2012.** *T-WiEYE early-age concrete monitoring sensor: Computer modeling and simulation.* International Conference on Computational and Experimental Engineering and Science (ICCES' 12); May-June 2012, Crete, Greece.
- C5. **Liarakos EV and Providakis CP, 2013.** *A miniaturized early age concrete strengthening and hydration monitoring system based on Piezoelectric transducers.* 10th HSTAM Congress on Mechanics. 25-27 May 2013, Crete, Greece.

# Περίληψη

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται τη χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών στο μη καταστροφικό έλεγχο του σκυροδέματος και ειδικότερα τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε διαδικασίες ανίχνευσης μηχανικών βλαβών σε δομικά στοιχεία. Επιπλέον διερευνάται η εφαρμογή των πιεζοηλεκτρικών υλικών στην παρακολούθηση των μεταβολών της μηχανικής συμπεριφοράς του πρώιμου σκυροδέματος. Λόγω της ανάγκης ελέγχου του σκυροδέματος από τα πρώτα στάδια παρασκευής του, μια από τις θεμελιώδεις στοχεύσεις της παρούσας διατριβής είναι ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη διατάξεων-συσκευών παρακολούθησης με βάση τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, οι οποίες θα έχουν τη δυνατότητα εμφύτευσης στη μάζα του σκυροδέματος. Δεδομένου ότι οι αισθητήριες πιεζοηλεκτρικές συσκευές μετά την ενσωμάτωσή τους λειτουργούν μηχανικά ως τμήμα της μικροδομής του σκυροδέματος, ονομάζονται «ευφυή» πιεζοηλεκτρικά αδρανή. Το κύριο πιεζοηλεκτρικό υλικό που αξιοποιήθηκε για τις εφαρμογές που αναλύονται, είναι ο Μόλυβδος-Οξείδιο του Τιτανίου/Ζirkονίου το οποίο συναντάται στη διεθνή βιβλιογραφία με το αρκτικόλεξο PZT (Lead Zirconate Titanate).

Στο πεδίο της θεωρητικής ανάλυσης διερευνώνται οι φυσικές αρχές που διέπουν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, οι καταστατικοί νόμοι που το περιγράφουν μαθηματικά και ο τρόπος με τον οποίο αλληλεπιδρούν μηχανικά τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, με τις υπό παρακολούθηση κατασκευές στις οποίες έχουν εμφυτευθεί. Τα ηλεκτρικά μεγέθη παρατήρησης που εμπλέκονται στις συγκεκριμένες διεργασίες είναι η Ηλεκτρο-Μηχανική Αγωγιμότητα και η Ηλεκτρο-Μηχανική Εμπέδηση του πιεζοηλεκτρικού υλικού. Τα αντίστοιχα μηχανικά μεγέθη είναι η Μηχανική Εμπέδηση, τόσο της κατασκευής όσο και του PZT, και η Δυναμική Δυσκαμψία. Το σύνολο της πειραματικής και θεωρητικής ανάλυσης λαμβάνει χώρα στο πεδίο των συχνοτήτων, με τη καταγραφή ή τον αναλυτικό προσδιορισμό των φασμάτων απόκρισης των παραπάνω μεγεθών. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε ένα καινοτόμο αναλυτικό μοντέλο το οποίο περιγράφει τη φασματική

απόκριση της Μηχανικής Εμπέδησης του σκυροδέματος και στηρίζεται στη αλληλεπίδραση του υπό παρακολούθηση δομικού στοιχείου με τα διατμητικά κύματα που παράγονται από το εμφυτευμένο PZT.

Η κύρια τεχνική που εφαρμόστηκε για τη παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας του σκυροδέματος είναι η μέθοδος της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης. Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται στη συγκριτική ανάλυση μεταξύ ενός φάσματος απόκρισης αναφοράς το οποίο περιγράφει τη κατάσταση της δομικά «υγιούς» κατασκευής και ενός φάσματος απόκρισης που αναφέρεται σε μια κατασκευή με μηχανικές βλάβες ή διαφοροποιημένες μηχανικές ιδιότητες. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε μια καινοτόμα μέθοδος συγκριτικής ανάλυσης η οποία στηρίζεται στο στατιστικό έλεγχο των διαφορών που εμφανίζουν μεταξύ τους τα φάσματα αναφοράς και τα φάσματα απόκρισης μιας κατασκευής με μηχανικές βλάβες. Ο στατιστικός έλεγχος των διαφορών υλοποιείται, με τον προσδιορισμό των ορίων εμπιστοσύνης μέσα στα οποία θα πρέπει να κινούνται οι όποιες διαφοροποιήσεις εμφανίζονται μεταξύ διαδοχικών καταγραφών των φασμάτων απόκρισης της δομικά «υγιούς» κατασκευής.

Τα όρια εμπιστοσύνης προσδιορίζονται με βάση τη στατιστική ανάλυση των υπολοίπων (Residuals) μιας συναρτήσεως μεταφοράς, η οποία προσομοιώνει την απόκριση της «υγιούς» κατασκευής. Οι στατιστικές κατατομές που χρησιμοποιούνται είναι η Κανονική Κατανομή και η Γενικευμένη Κατανομή των Ακραίων Τιμών (Generalized Extreme Values). Ως μέγεθος που εκφράζει αφενός μεν την ύπαρξη ή όχι μιας βλάβης και αφετέρου δε τη σοβαρότητα της βλάβης, ορίζεται ο αριθμός των υπολοίπων που θέτονται εκτός των ορίων στατιστικού ελέγχου σε κάθε περίπτωση ανάλυσης. Η αξιολόγηση της παραπάνω μεθοδολογίας πραγματοποιήθηκε με την αριθμητική προσομοίωση συζευγμένων Ηλεκτρο-Μηχανικών Συστημάτων δομικών στοιχείων σκυροδέματος και επιθεμάτων PZT, με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Οι συναρτήσεις μεταφοράς της δομικά άρτιας ή «υγιούς» κατασκευής προκύπτουν από τη προσομοίωση της μηχανικής ή της ηλεκτρικής απόκρισης ενός Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος. Για την προσομοίωση αξιοποιήθηκε το πακέτο εργαλείων ταυτοποίησης δυναμικών συστημάτων σε περιβάλλον MATLAB, FDIDENT, καθώς και δύο προτεινόμενες στα πλαίσια της παρούσας διατριβής μεθοδολογίες. Η πρώτη προτεινόμενη μέθοδος στηρίζεται στη προσέγγιση της μηχανικής ή της ηλεκτρικής εμπέδησης ενός Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος με τη

χρήση ρητών πολυωνυμικών συναρτήσεων της γωνιακής συχνότητας. Η δεύτερη μεθοδολογία στηρίζεται στον αναλυτικό προσδιορισμό της μηχανικής εμπέδησης ενός ισοδύναμου με την πραγματική κατασκευή, διακριτού πολυβάθμιου δυναμικού συστήματος.

Σχετικά με την ενόργανη παρακολούθηση των δομικών συστημάτων σκυροδέματος τα οποία φέρουν τα «ευφυή» πιεζοηλεκτρικά αδρανή, αναπτύχθηκε ένα πρωτότυπο ολοκληρωμένο σύστημα αυτόματης καταγραφής της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης, το οποίο ενσωματώνει το χαμηλού κόστους τυπωμένο κύκλωμα μέτρησης της ηλεκτρικής εμπέδησης, AD5933 EB και ένα πρωτότυπο «ευφυές» αδρανές με βάση το Teflon. Επιπλέον το συγκεκριμένο σύστημα αξιοποιεί την ασύρματη τεχνολογία για τη μεταφορά δεδομένων από το τυπωμένο κύκλωμα μέτρησης της ηλεκτρικής εμπέδησης AD5933 EB, σε ένα υπολογιστή διαχείρισης και δίνει τη δυνατότητα της αυτόματης καταχώρησης των μετρήσεων σε μια κατάλληλα διαμορφωμένη βάση δεδομένων. Σημαντική καινοτομία της παρούσας εφαρμογής αποτελεί το γεγονός ότι δίνεται η δυνατότητα στον οποιοδήποτε χρήστη έχει δικαιώματα στη βάση δεδομένων, να συνδέεται απομακρυσμένα μέσω διαδικτύου σε αυτή και να ανακτά τις μετρήσεις της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης για περαιτέρω επεξεργασία και αξιολόγηση.

Η μέθοδος της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης, σε συνδυασμό με τη στατιστική ανάλυση των καταγραφόμενων φασμάτων απόκρισης και την αξιοποίηση του πρωτότυπου ολοκληρωμένου συστήματος καταγραφής, εφαρμόστηκαν σε μια σειρά περιπτώσεων μη καταστροφικού ελέγχου δομικών στοιχείων σκυροδέματος. Οι εφαρμογές που υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής είναι α) η παρακολούθηση της ανάπτυξης της δυσκαμψίας και της ωρίμανσης του πρώιμου σκυροδέματος τις πρώτες 28 ημέρες μετά τη σκυροδέτηση, β) η ανίχνευση βλαβών σε ένα κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος το οποίο εξωθείται σταδιακά στην αστοχία μέσω θλιπτικής αξονικής καταπόνησης και γ) η ανίχνευση βλαβών σε ένα δοκίμιο δοκού σκυροδέματος, το οποίο εξωθείται σταδιακά στην αστοχία μέσω καμπτικής καταπόνησης.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν διαπιστώθηκε, ότι οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία στη παρακολούθηση της ενυδάτωσης και ωρίμανσης του πρώιμου σκυροδέματος και την ανίχνευση μηχανικών βλαβών σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος. Λόγω της υψηλής δυσκαμψίας και της μεγάλης απόσβεσης που επιδεικνύει το σκυρόδεμα, η εμφύτευση των

πιεζοηλεκτρικών υλικών με τη μορφή «ευφών» αδρανών στη μάζα του σκυροδέματος, βελτιώνει σημαντικά την ικανότητα διείσδυσης των μηχανικών κυμάτων στη μάζα του σκυροδέματος, αυξάνοντας ταυτόχρονα την περιοχή σάρωσης και ελέγχου σε ένα δομικό στοιχείο. Τέλος αποδείχτηκε, ότι η ανάπτυξη του ολοκληρωμένου συστήματος καταγραφής και αποθήκευσης σε βάση δεδομένων της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης, συνεισφέρει σημαντικά στην αποτελεσματική διαχείριση και αξιολόγηση του μεγάλου όγκου δεδομένων που προκύπτουν, κατά τη παρακολούθηση μιας κατασκευής.



# Abstract

The present PhD thesis deals with the application of piezoelectric materials in non-destructive testing of concrete, and in particular, with their applicability in damage detection of structural elements. Moreover, the application of piezoelectric materials in monitoring of early age concrete mechanical behavior is investigated. Due to the need for continuous gathering of information regarding the condition of concrete structural members from the first stages of their construction, one of the main aims of the present research is the design and development of monitoring devices based on piezoelectric materials, which are embedded to concrete mass. Since the piezoelectric sensing devices after embedding are mechanically considered as part of concrete's microstructure, they can be characterized as "smart" piezoelectric aggregates. The basic piezoelectric material that has been utilized in the examined applications is Lead-Zirconium/Titanium Oxide, which is referred in related literature as PZT (Lead Zirconate Titanate).

In terms of theoretical analysis, the physical principles that govern the piezoelectric effect have been implemented. For this purpose, the constitutive laws which are describing the electromechanical behavior of PZTs as well as the mechanical interaction among piezoelectric and concrete materials have been thoroughly investigated. The electrical quantities which are involved in PZT's electromechanical behavior are the Electro-Mechanical Admittance and the Electro-Mechanical Impedance. The corresponding mechanical quantities are the Mechanical Impedance, both of the concrete and PZT, and the Dynamic Stiffness. Both the experimental and the theoretical analyses are performed in the frequency domain, by measuring or analytically calculating the response spectra of the aforementioned quantities. For this purpose, a novel analytical model has been developed herein, for obtaining the spectral response of concrete's Mechanical Impedance, which is based on the interaction of the monitored concrete structure with the shear waves generated by the embedded PZT.

The main technique that has been employed to monitor the structural integrity of the concrete is the method of Electro-Mechanical Impedance. This method is based on a comparative analysis between a reference response spectrum which corresponds to the state of the “healthy” structure and a spectrum associated with the state in which the structure is subjected to damages and/or degraded mechanical properties. In the context of this thesis a novel method for performing the aforementioned comparative analysis has been developed, which is based on the statistical control of changes that occur between the reference and the response spectrum of a structure which experiences mechanical failures.

Statistical control of the changes is implemented by identifying the confidence limits, within which every difference that occurs in the recorded spectra of the undamaged concrete structure must be confined. These confidence limits are calculated from the statistical analysis of the residual values of a suitable transfer function which describes the electromechanical response of the undamaged structure. The statistical distributions which are implemented for the confidence limits calculations are the Normal Distribution and the Generalized Extreme Value Distribution. To assess both the existence and the severity of any damage, the number of residual values that are set outside the range of statistical control (the so-called Outliers) for each analysis is used. The evaluation of the proposed statistic methodology, has been performed via finite element numerical simulations of coupled electromechanical systems which consist of the concrete structural member (damaged and undamaged) and embedded PZT patches.

Transfer functions of the undamaged structure are calculated from the simulation of the mechanical or the electrical response of the Electro-Mechanical system. For the simulation of Electro-Mechanical Systems a commercial MATLAB toolbox, i.e., FDIDENT, has been utilized that is focused in frequency domain dynamic system identification. In addition, two novel techniques have been introduced in the context of the present investigation. The first proposed method is based on the mechanical or electrical impedance of an Electro-Mechanical System, adopting rational polynomial functions of the angular frequency. The second method is based on the analytic approximation of the mechanical impedance which corresponds to a simplified multi-degree of freedom dynamic system which is equivalent to the real “healthy” structure.

Regarding the instrumental monitoring of concrete structural systems using “smart” piezoelectric aggregates, a cost-effective prototype integrated system has

been developed for the automatic recording of Electro-Mechanical Impedance at regular time intervals. This system includes a low-cost electronic board, referred as AD5933 EB (Evaluation Board), and a prototype Teflon based “smart” piezoelectric aggregate. Moreover, this system utilizes wireless technology to transfer data from the AD5933 EB to a client computer and enables the assembly of the impedance measurements in a suitably designed database. The main contribution of the proposed system is that it enables every user that has access rights in the database, to be connected remotely via internet and to extract, via properly scripted queries, the desired Electro-Mechanical Impedance measurements for real-time structural integrity assessment and post-processing.

The method of the Electro-Mechanical Impedance in conjunction with the statistical analysis performed on the recorded response spectra using the integrated prototype recording system, have been implemented in a number of characteristic tests of structural concrete elements. More specifically, the applications that have been examined within the present doctoral study are the following: a) monitoring of stiffness and strength development of the early age concrete, from the 3 first hours after casting until the age of 28 days, b) detection of damages in a cubic concrete specimen that is gradually led to failure via a compressive axial loading, and c) detection of damages in a concrete beam specimen that is gradually led to failure through a three-point bending loading.

Based the results which were obtained, it can be concluded that piezoelectric sensors can be successfully adopted in monitoring hydration and curing processes of early age concrete. Moreover, it has been showed that piezoelectric materials can be effectively implemented in structural health monitoring and damage detection of concrete elements. Due to high stiffness and high damping exhibited by concrete, the embedding of piezoelectric material in form of "smart" aggregates in concrete mass improves significantly the spreading of mechanical waves, while it also increase the available scanning area in a structural element. Finally, it is proven, that the development of an integrated system for recording and storing Electro-Mechanical Impedance spectra in a database, contributes significantly to the effective management and usage of the large volume of data, which are collected during monitoring of a structure.



# Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	VI
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ .....	X
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	XII
ABSTRACT .....	XVI
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	XX
ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ .....	XXIV

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

1.1. ΔΟΜΙΚΗ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ .....	1
1.1.1. Μηχανικές Βλάβες και απώλεια αντοχής .....	3
1.2. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΒΛΑΒΕΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ .....	5
1.2.1. Επίδραση των ρωγμών στην αντοχή του σκυροδέματος.....	6
1.3. ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΈΛΕΓΧΟΣ (ΜΚΕ) .....	
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	11
1.3.1. Μέθοδοι ΜΚΕ που στηρίζονται στην διάδοση μηχανικών κυμάτων και την ιδιοταλάντωση των κατασκευών .....	14
1.4. «ΕΥΦΥΗ» ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΚΕ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	16
1.4.1. Η μέθοδος της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης/Σύνθετης Αγωγιμότητας.....	19
1.4.2. Παθητικός και Ενεργητικός ΜΚΕ με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών .....	24
1.5. ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ .....	27
1.5.1. Σχεδιασμός και ανάπτυξη «ευφύων» αδρανών .....	28
1.5.2. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας με τη χρήση της στατιστικής ανάλυσης των ακραίων τιμών.....	30
1.5.3. Ολοκληρωμένο σύστημα καταγραφής, αποθήκευσης και αξιολόγηση των φασμάτων απόκρισης της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης/Αγωγιμότητας .....	32
1.6. ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	35

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΠΙΕΖΟΚΕΡΑΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

2.1.	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	37
2.2.	ΤΟ ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΑΔΕΣΜΕΥΤΟΥ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ .....	44
2.3.	ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΖΕΥΞΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	56
2.3.1.	Δυναμική Δυσκαμψία και Μηχανική Εμπέδηση .....	58
2.3.2.	Αναλυτική προσέγγιση της Ηλεκτρο-Μηχανικής σύζευξης επιθεμάτων PZT με κατασκευές σκυρόδεματος .....	63
2.3.3.	Αξιολόγηση των αναλυτικών μοντέλων Ηλεκτρο-Μηχανικής σ ύζευξης .....	72
2.4.	ΕΝΟΡΓΑΝΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟ-ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....	77

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

3.1.	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟ-ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ/ ΕΜΠΕΔΗΣΗΣ.....	93
3.2.	ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΒΗΣ.....	100
3.3.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟ-ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....	104
3.3.1.	Προσομοίωση της ηλεκτρικής απόκρισης με ισοδύναμα RLC κυκλώματα.....	105
3.3.2.	Πολυωνυμική προσομοίωση της ηλεκτρικής απόκρισης.....	112
3.3.3.	Προσομοίωση της μηχανικής απόκρισης με ισοδύναμα συστήματα Μηχανικών Δυναμικών Εμπεδήσεων.....	121
3.3.4.	Προσομοίωση με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων .....	127
3.4.	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ.....	136
3.4.1.	Κανονική Κατανομή .....	141
3.4.2.	ΓενικευμένηΚατανομήτωνΑκραιώνΤιμών.....	142
3.5.	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΚΕ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟ ΈΛΕΓΧΟ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ .....	145
3.5.1.	Σενάρια βλάβης δοκιμίου σκυροδέματος.....	148
3.5.2.	Συναρτήσεις μεταφοράς του ακέραiou συστήματος.....	151
3.5.3.	Στατιστικός έλεγχος υπολοίπων .....	152

3.5.4. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας με το στατιστικό έλεγχο των υπολοίπων των συναρτήσεων μεταφοράς.....	155
---	-----

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΗΜΕ ΓΙΑ ΤΟΝ ΜΚΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	159
4.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ «ΕΥΦΥΩΝ» ΑΔΡΑΝΩΝ.....	161
4.3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΗΜΕ. ....	169
4.3.1. Ολοκληρωμένο Κύκλωμα Μέτρησης ΗΜΕ, AD5933 .....	171
4.3.2. Ανάπτυξη Βάσης Δεδομένων ΗΜΕ .....	178
4.3.3. Διαχείριση δεδομένων με σύνδεση των εφαρμογών MATLAB και MySQL.....	180

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ «ΕΥΦΥΩΝ» ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΤΟΝ ΜΚΕ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	183
5.2. ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΩΙΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ .....	184
5.2.1. Παρακολούθηση της αναπτυσσόμενης αντοχής με δοκιμές αξονικής θλίψης.....	185
5.2.2. Παρακολούθηση της ενυδάτωσης και της ανάπτυξης της δυσκαμψίας με τη μέθοδο ΗΜΕ.....	188
5.2.2.1. Αξιολόγηση καταγραφών ΗΜΕ – Δείκτες Βλάβης.....	192
5.2.2.2. Αξιολόγηση καταγραφών ΗΜΕ – ..... Στατιστικός έλεγχος υπολοίπων.....	199
5.3. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΚΥΒΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ «ΕΥΦΥΩΝ» ΑΔΡΑΝΩΝ .....	208
5.4. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΟ ΔΟΚΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ «ΕΥΦΥΩΝ» ΑΔΡΑΝΩΝ .....	215

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	223
6.2.	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ ΤΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ .....	224
6.3.	ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....	225
6.4.	ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΑΣΥΡΜΑΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟ-ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΜΠΕΔΗΣΗΣ.....	227
6.5.	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ .....	228
6.6.	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ .....	229
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....		231
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....		233
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....		235



# Αρκτικόλεξα

## Λατινικοί Χαρακτήρες

---

<b>ADC:</b>	Analog to Digital Convertor
<b>APD:</b>	Autosensing Piezoelectric Device (Αυτό-Αισθητήρια Πιεζοηλεκτρική Συσκευή)
<b>BSC:</b>	Bonding Stiffness Coefficient (Συντελεστής Δυσκαμψίας Σύζευξης)
<b>CaR:</b>	Calibration Resistor
<b>CBSA:</b>	Cement Based Sensor-Actuator (Αισθητήρας-Διεγέρτης με βάση το τσιμέντο, τύπος SMA)
<b>CEB:</b>	Ευρώ-Διεθνής Επιτροπή Σκυροδέματος
<b>ClIC:</b>	Client Computer
<b>CS:</b>	Current State (Τρέχουσα Κατάσταση δομικής ακεραιότητας μιας κατασκευής)
<b>CSS:</b>	Current State Signature (HMY Τρέχουσας Κατάστασης)
<b>DAC:</b>	Digital to Analog Convertor
<b>DAQ:</b>	Data Acquisition Card
<b>DDS:</b>	Direct Digital Synthesizer
<b>DFT:</b>	Discrete Fourier Transform
<b>DI:</b>	Damage Index (Στατιστικός Δείκτης Βλάβης)
<b>DMI:</b>	Dynamic Mechanical Impedance (Δυναμική Μηχανική Εμπέδηση)
<b>DMS:</b>	Dynamic Mechanical Stiffness (Δυναμική Μηχανική Δυσκαμψία)
<b>DR:</b>	Detrended Residuals (Κανονικοποιημένα Υπόλοιπα)
<b>DUT:</b>	Device Under Test
<b>EB:</b>	Evaluation Board
<b>EC2:</b>	Euro-Code 2
<b>ECC:</b>	Electromechanical Coupling Coefficient (Συντελεστής Ηλεκτρομηχανικής Σύζευξης)

<b>ELIA:</b>	ELectro-mechanical Impedance Analyzer (Παραμετρικοί Αναλυτές Ηλεκτρικής Εμπέδησης)
<b>ELiS:</b>	Estimated Linear System (Συνάρτηση πακέτου εργαλείων MATLAB FDIDENT)
<b>EMA:</b>	Electro-Mechanical Admittance
<b>EMI:</b>	Electro-Mechanical Impedance
<b>EO:</b>	Electric Oscillator
<b>EVS:</b>	Extreme Values Statistics (Στατιστική των ακραίων τιμών)
<b>FRF:</b>	Frequency Response Function
<b>GEV:</b>	Generalized Extreme Values (Στατιστική Κατανομή)
<b>IC:</b>	Integrated Circuit
<b>LCS:</b>	Linear Chirp Signal (Γραμμικό Σήμα Chirp)
<b>LPF:</b>	Low-Pass Filter
<b>LRM:</b>	Linearized Regression Method (Μέθοδος Γραμμικοποιημένης Παλινδρόμησης)
<b>MAPD:</b>	Mean Absolute Percentage Deviation (Στατιστικός Δείκτης Βλάβης)
<b>MIS:</b>	Multi-mechanical Impedance System
<b>MPC:</b>	Multi-Peak Circuit (Ηλεκτρικό Κύκλωμα πολλαπλών συχνοτήτων συντονισμού)
<b>NDT:</b>	Non Destructive Testing (Μη Καταστροφικός Έλεγχος, ΜΚΕ)
<b>OVC:</b>	Output Voltage Circuit
<b>PCB:</b>	Printed Circuit Board
<b>PCC:</b>	Piezoelectric Charge Coefficient
<b>PSC:</b>	Piezoelectric Strain Coefficient
<b>PTFE:</b>	Poly-Tetra-Flouro-Ethylene – Teflon
<b>PZT:</b>	Lead Zirconate Titanate
<b>RDR:</b>	Reference Detrended Residuals (Κανονικοποιημένα Υπόλοιπα Αναφοράς)
<b>RFB:</b>	Feedback Resistor
<b>RMSD:</b>	Root Mean Square Deviation
<b>RS:</b>	Reference State (Κατάσταση Αναφοράς ως προς τη δομική ακεραιότητα μιας κατασκευής)
<b>RSS:</b>	Reference State Signature (HMY Κατάστασης Αναφοράς)

<b>SCoRe</b>	Statistical Control and evaluation of simulation Residuals (Μεθοδολογία στατιστικής αξιολόγησης των μεταβολών μεταξύ διαφορετικών φασμάτων απόκρισης)
<b>SerCo:</b>	Server Computer
<b>SHM:</b>	Structural Health Monitoring
<b>SiCMo</b>	Signature Changes Modulus
<b>SISO:</b>	Single Input – Single Output
<b>SMA:</b>	SMart Aggregate («Ευφυές» πιεζοηλεκτρικό αδρανές σκυροδέματος)
<b>SPC:</b>	Single Peak Circuit (Ηλεκτρικό Κύκλωμα μιας συχνότητας συντονισμού)
<b>TBSA:</b>	Teflon Based Sensor-Actuator (Αισθητήρας-Διεγέρτης με βάση το PTFE-Teflon, τύπος SMA)
<b>TF:</b>	Transfer Function
<b>UC:</b>	User Computer

## Ελληνικοί Χαρακτήρες

---

<b>A/Δ:</b>	Αισθητήρας/Διεγέρτης
<b>ΔΔΣ:</b>	Διάγραμμα Δυνάμεων-Στηρίξεων φορέα
<b>HMA:</b>	Ηλεκτρο-Μηχανική Αγωγιμότητα
<b>HME:</b>	Ηλεκτρο-Μηχανική Εμπέδηση
<b>ΗΜΗΣ:</b>	Ηλεκτρό-ΜΗχανικό Σύστημα
<b>ΗΜΥ:</b>	Ηλεκτρό-Μηχανική Υπογραφή
<b>Κ/Φ:</b>	Κατασκευή Φορέας, Υπό παρακολούθηση δομικό σύστημα
<b>ΜΚΕ:</b>	Μη Καταστροφικός Έλεγχος
<b>ΤΕΔΙΣ:</b>	Τετραεδρικά Ισοπαραμετρικά Στοιχεία



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή – Επισκόπηση Διατριβής

### 1.1. Δομική ακεραιότητα των κατασκευών

Οι κατασκευές σε κάθε περίοδο της ιστορίας του ανθρώπου αποτελούσαν αναπόσπαστο κομμάτι της διαβίωσης του, της εργασίας του και των πάσης φύσεως οικονομικών και κοινωνικών του δραστηριοτήτων. Από τις πιο απλές κατασκευές που εφηύρε ο πρωτόγονος άνθρωπος προκειμένου να μπορέσει να κυνηγήσει ή να πολεμήσει διασφαλίζοντας την επιβίωση του, μέχρι την υλοποίηση των σύγχρονων υπέρ-κατασκευών, ο κύριος στόχος του ανθρώπου ήταν να θεραπεύσει όσο το δυνατόν ασφαλέστερα και πληρέστερα τις ανάγκες του, με την ορθολογικότερη δυνατή χρήση των πόρων που διέθετε (οικονομία πόρων).

Η επιστήμη της μηχανικής των κατασκευών και των υλικών γεννήθηκε και συνέχισε να αναπτύσσεται προκειμένου να εκπληρώσει τους παραπάνω στόχους. Μέσα από τη συστηματική μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των δομικών υλικών και των τρόπων διαμόρφωσης λειτουργικών δομικών συστημάτων, έδωσε τα τεχνολογικά και επιστημονικά εργαλεία προκειμένου σε κάθε περίπτωση να είναι δυνατός ο βέλτιστος σχεδιασμός. Δηλαδή μέσα από επιστημονικά τεκμηριωμένες μεθοδολογίες να επιτυγχάνεται ο καλύτερος δυνατός συμβιβασμός μεταξύ της ασφάλειας, της πληρότητας και της οικονομίας των διαθέσιμων πόρων, ώστε μια κατασκευή να είναι άρτια.

Ο όρος Δομική Ακεραιότητα (Structural Integrity) ή Δομική «Υγεία» (Structural Health) μιας κατασκευής περιγράφει την ικανότητα της να ανταπεξέλθει στις ανάγκες για τις οποίες σχεδιάστηκε. Στο πεδίο της μηχανικής η δομική ακεραιότητα μιας

κατασκευής, μπορεί να εξειδικευτεί στην ικανότητα της να παραλαμβάνει κατά τη λειτουργίας της με ασφάλεια, όλα εκείνα τα μηχανικά φορτία, στατικά και δυναμικά, για τα οποία σχεδιάστηκε.

Δεδομένης της ευρύτητας που παρουσιάζουν ως προς τη δομική πολυπλοκότητα οι κατασκευές, η δομική ακεραιότητα αποτελεί μια πολυπαραμετρική ιδιότητα η οποία συνίσταται από ένα σύνολο α) μηχανικών, β) φυσικών και γ) κατασκευαστικών χαρακτηριστικών. Τα χαρακτηριστικά αυτά καλούνται Δομικά Χαρακτηριστικά, επηρεάζουν με διαφορετικό συντελεστή βαρύτητας το καθένα την συνολική μηχανική συμπεριφορά της κατασκευής και είναι επιβεβλημένο να συμμορφώνονται με τις κατά περίπτωση προδιαγραφές που καθορίζουν τη ασφαλή και αυτοτελή λειτουργία της κατασκευής. Στο πεδίο των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών εντάσσονται ιδιότητες όπως π.χ. η πυκνότητα, η θερμική αγωγιμότητα, η υδραυλική αγωγιμότητα, ο συντελεστής θερμικής διαστολής, οι μηχανικές αντοχές (σε θλίψη, εφελκυσμό, διάτμηση) και οι μηχανικές ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson, κ.α.) των υλικών που αποτελούν το υπό μελέτη δομικό σύστημα.

Όσον αφορά τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά αυτά εντοπίζονται στη γεωμετρία και το σχεδιασμό τόσο του συνόλου της κατασκευής όσο και των επιμέρους δομικών στοιχείων που τη συνθέτουν. Πιο συγκεκριμένα, μείζονος σημασίας κατασκευαστικά χαρακτηριστικά αποτελούν η διαδικασία παρασκευής των δομικών στοιχείων από συγκεκριμένα υλικά, η διάταξη των δομικών στοιχείων στο χώρο που ορίζει ο όγκος της κατασκευής, ο τρόπος και τα υλικά σύνδεσης των δομικών στοιχείων μεταξύ τους και τέλος η θεμελίωση τους στο χώρο λειτουργίας τους.

Η έννοια της δομικής ακεραιότητας σχετίζεται άμεσα με τις διαδικασίες αξιολόγησης της αρτιότητας μιας κατασκευής, δηλαδή με την ανίχνευση και τον εντοπισμό πιθανών βλαβών ή ατελειών. Ως ατέλεια χαρακτηρίζεται η μη συμμόρφωση κάποιου δομικού χαρακτηριστικού με τις προδιαγραφές και τους κανόνες διαμόρφωσης του δομικού συστήματος. Οι ατέλειες δύναται να προκληθούν σε μια κατασκευή α) από τη χρήση ακατάλληλων υλικών ως προς τις απαιτήσεις λειτουργίας του δομικού συστήματος, β) από τη χρήση υλικών των οποίων οι φυσικο-μηχανικές ιδιότητες δε συμμορφώνονται με τις αντίστοιχες απαιτήσεις ποιότητας και γ) λόγω του εσφαλμένου ή/και ελλιπούς σχεδιασμού του δομικού συστήματος. Οι ατέλειες συνήθως προκαλούνται κατά τα στάδια δόμησης μιας κατασκευής και

ανάλογα με την έκταση και τη σημαντικότητα τους είναι δυνατό να επηρεάσουν είτε κατά μέρος είτε συνολικά τη λειτουργία του.

Ως βλάβη χαρακτηρίζεται η οποιαδήποτε μεταβολή στα δομικά χαρακτηριστικά μιας υφιστάμενης κατασκευής, η οποία τα απομακρύνει από τα επιτρεπτά όρια συμμόρφωσης με τους κανονισμούς. Τέτοιου είδους μεταβολές προκαλούν την απώλεια μέρους της απαιτούμενης λειτουργικότητας, η οποία σε πολλές περιπτώσεις εάν δεν επιτευχθεί ο έγκαιρος εντοπισμός και επιδιόρθωση τους οδηγούν σε ολική απώλεια λειτουργικότητας. Η διαφορά μεταξύ βλάβης και ατέλειας εντοπίζεται στο γεγονός ότι συνήθως οι βλάβες προκαλούνται κατά τη λειτουργία του δομικού συστήματος. Οφείλονται σε εξωγενείς παράγοντες οι οποίοι εξαναγκάζουν το δομικό σύστημα να ανταποκριθεί σε συνθήκες καταπόνησης που υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα βάση σχεδιασμού όρια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση αστοχιών τόσο σε επίπεδο υλικών όσο και σε επίπεδο αρτιότητας του φέροντος οργανισμού. Βλάβες επίσης είναι δυνατό να προκληθούν ακόμη και στις περιπτώσεις που ναι μεν η κατασκευή λειτουργεί εντός των επιτρεπόμενων ορίων, αλλά λόγω ύπαρξης ατελειών η μηχανική της απόκριση δεν είναι η αναμενόμενη.

#### **1.1.1. Μηχανικές Βλάβες και απώλεια αντοχής**

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η έννοια της δομικής ακεραιότητας στο τεχνικό πεδίο της μηχανικής των κατασκευών και των υλικών, επικεντρώνεται στην ικανότητα του φέροντος οργανισμού ενός δομικού συστήματος να παραλαμβάνει με ασφάλεια όλα εκείνα τα μηχανικά φορτία που προβλέπεται να ασκηθούν σε αυτό. Η ικανότητα αυτή είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την αντοχή των υλικών που το συνιστούν, τη διαμόρφωση και το σχεδιασμό του, καθώς και με τους παράγοντες που επηρεάζουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Οποιαδήποτε μη προβλεπόμενη μεταβολή στη αντοχή των υλικών ή τη διαμόρφωση του φέροντος οργανισμού, η οποία επιδεινώνει τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής και επιδρά αρνητικά στη συνολική μηχανική αντοχή της, χαρακτηρίζεται ως Μηχανική Βλάβη. Η εμφάνιση μηχανικών βλαβών δεν σημαίνει αυτόματα την ολική απώλεια λειτουργικότητας της κατασκευής. Ωστόσο ανάλογα με την έκταση και τη σοβαρότητα της, εάν δεν εντοπιστεί και επιδιορθωθεί έγκαιρα είναι δυνατό να οδηγήσει σταδιακά στη πλήρη απώλεια αντοχών του δομικού συστήματος και πολλές φορές στην κατάρρευση του.

Οι μηχανικές βλάβες κατηγοριοποιούνται α) σε εκείνες που σχετίζονται με την απομείωση των μηχανικών αντοχών των δομικών υλικών, β) σε εκείνες που

σχετίζονται με τη διάρρηξη της δομικής συνέχειας στην έκταση ενός δομικού στοιχείου και γ) σε εκείνες που αφορούν τη διάρρηξη της δομικής συνέχειας σε επίπεδο φέροντος οργανισμού. Τα αίτια που προκαλούν την μείωση της αντοχής των δομικών υλικών, εντοπίζονται κυρίως στην αλληλεπίδραση των υλικών με τις συνθήκες του φυσικού περιβάλλοντος, στην ύπαρξη ατελειών στη μικροδομή τους και στην εκδήλωση συνθηκών καταπόνησης οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά τη συνέχεια της μικροδομής τους.

Η διάρρηξη της συνέχειας ενός δομικού στοιχείου προσδιορίζεται από την μεταβολή της εσωτερικής του γεωμετρίας η οποία έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων επιφανειών εσωτερικών και εξωτερικών. Κάθε τέτοιου είδους μεταβολή προκαλεί την ανακατανομή των μηχανικών τάσεων στο εσωτερικό του στοιχείου, δημιουργώντας περιοχές συγκέντρωσης των τάσεων κυρίως στα σημεία όπου η γεωμετρία μεταβάλλεται απότομα (οξείες γωνίες ή απλά γωνιακές μεταβολές). Οι περιοχές συγκέντρωσης των τάσεων αυτόματα μετατρέπονται σε ζώνες αδυναμίας καθώς εμφανίζεται τοπικά αυξημένη καταπόνηση του υλικού. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση της πιθανότητας η οποιαδήποτε γενικευμένη αστοχία να ξεκινήσει από τις συγκεκριμένες περιοχές. Για το λόγο αυτό η διάρρηξη της δομικής συνέχειας θεωρείτε μηχανική βλάβη και μάλιστα σοβαρή. Η εκδήλωση τέτοιων βλαβών ανάλογα με τα αίτια που την προκαλούν, εμφανίζεται είτε με τη μορφή κανονικών γεωμετρικών επιφανειών (διάτρηση, κοπή κ.α.) είτε με τη μορφή ακανόνιστων επιφανειών, τις ρωγμές (κάμψη δοκών ψαθυρών υλικών). Τα αίτια διάρρηξης της δομικής συνέχειας εντοπίζονται στη καταπόνηση του δομικού στοιχείου από μηχανικά φορτία που υπερβαίνουν τις αντοχές του και στη δημιουργία ασθενών μηχανικών ζωνών λόγω ερπυσμού ή/και κόπωσης.

Το τρίτο και τελευταίο είδος μηχανικής βλάβης είναι η διάρρηξη της συνέχειας του φέροντος οργανισμού της κατασκευής. Στη περίπτωση αυτή η βλάβη εκδηλώνεται ως αδυναμία συνεργασίας και μεταφοράς μηχανικών φορτίων μεταξύ δύο ή περισσότερων δομικών στοιχείων. Η διάρρηξη του φέροντος οργανισμού συνήθως συνοδεύεται και από ρωγμές στα σημεία σύνδεσης των δομικών στοιχείων. Τα αίτια που προκαλούν τέτοιου είδους βλάβες είναι η αυξημένη συγκέντρωση τάσεων στα σημεία σύνδεσης των δομικών στοιχείων λόγω μηχανικής βλάβης των τελευταίων (οι συνδέσεις αποτελούν περιοχές έντονης μεταβολής της γεωμετρίας) και τα ισχυρά μηχανικά φορτία, όπως π.χ. οι σεισμικές επιταχύνσεις, που είναι δυνατό να εφαρμοστούν στο φέροντα οργανισμό της κατασκευής.



Η περίπτωση μηχανικών βλαβών σε επίπεδο φέροντος οργανισμού καταδεικνύει, ότι παρόλο που το κάθε είδος βλάβης προκαλείται από συγκεκριμένα αίτια, είναι δυνατό όταν η βλάβη εντοπιστεί να εντάσσεται σε περισσότερα από ένα είδη. Δηλαδή, ένα είδος βλάβης να τροφοδοτεί τη γένεση ενός άλλου, το οποίο με τη σειρά του επιδεινώνει την κατάσταση της δομικής ακεραιότητας μιας κατασκευής. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας περίπτωσης είναι οι μικρό-ρηγματώσεις του σκυροδέματος. Οι ρωγμές λόγω συστολής-διαστολής αφενός μεν δημιουργούν περιοχές αδυναμίας λόγω συγκέντρωσης των τάσεων, αφετέρου δε λειτουργούν ως ενεργό πορώδες και διοχετεύουν την υγρασία στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Εάν αυτού του είδους οι μικρο-βλάβες δεν αποφευχθούν ή δεν διορθωθούν, τότε από τη μια μεριά λόγω του ιδίου βάρους της κατασκευής και του ερπυσμού του υλικού, οι ρωγμές θα αρχίσουν να επεκτείνονται και από την άλλη θα διευκολυνθεί η ροή του νερού στο εσωτερικό του σκυροδέματος δημιουργώντας συνθήκες διάβρωσης τόσο του υλικού όσο και του οπλισμού του (Mehta and Monteiro, 2009).

## 1.2. Μηχανικές Βλάβες και Αντοχή σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα μαζί με το χάλυβα και το ξύλο είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα δομικά υλικά. Το σκυρόδεμα έχει εφαρμοστεί και εφαρμόζεται στη παρασκευή μεγάλου πλήθους τεχνικών έργων (φράγματα, αγωγοί μεταφοράς νερού), έργων υποδομής (γέφυρες, σήραγγες, λιμάνια) πολιτικών και βιομηχανικών κατασκευών. Δεδομένου του μεγάλου εύρους των κοινωνικών και οικονομικών αναγκών που καλύπτουν οι κατασκευές από σκυρόδεμα, η ορθή συντήρηση των φερόντων οργανισμών, η αξιόπιστη ανίχνευση πιθανών βλαβών και η έγκαιρη επιδιόρθωσή τους, αποτελούν ζητήματα μείζονος σημασίας στην βιώσιμη λειτουργία των συγκεκριμένων δομικών συστημάτων.

Ο σημαντικότερος κίνδυνος που καλείται να αντιμετωπίσει ο σχεδιασμός των κατασκευών από σκυρόδεμα είναι η απώλεια αντοχής τους. Αναφέρονται ενδεικτικά οι παρακάτω περιπτώσεις αιτιών απώλειας αντοχής για το οπλισμένο σκυρόδεμα (Mehta and Monteiro, 2009):

- Χημική αλληλεπίδραση των συστατικών της τσιμεντόπαστας (του ενυδατωμένου και στερεοποιημένου τσιμέντου) με διαβρωτικούς παράγοντες του φυσικού περιβάλλοντος όπως είναι το νερό. Ιδιαίτερα τα νερά

βιομηχανικής προελεύσεως και το θαλασσινό νερό τα οποία συχνά εμφανίζουν pH μικρότερο του 6, δημιουργούν όξινες συνθήκες και αλλοιώνουν χημικά τα προϊόντα ενυδάτωσης της τσιμεντόπαστας. Η διάβρωση έχει σαν αποτέλεσμα την αλλοίωση της μικροδομής του σκυροδέματος κάτι το οποίο σταδιακά επιδρά αρνητικά και στη μηχανική του συμπεριφορά.

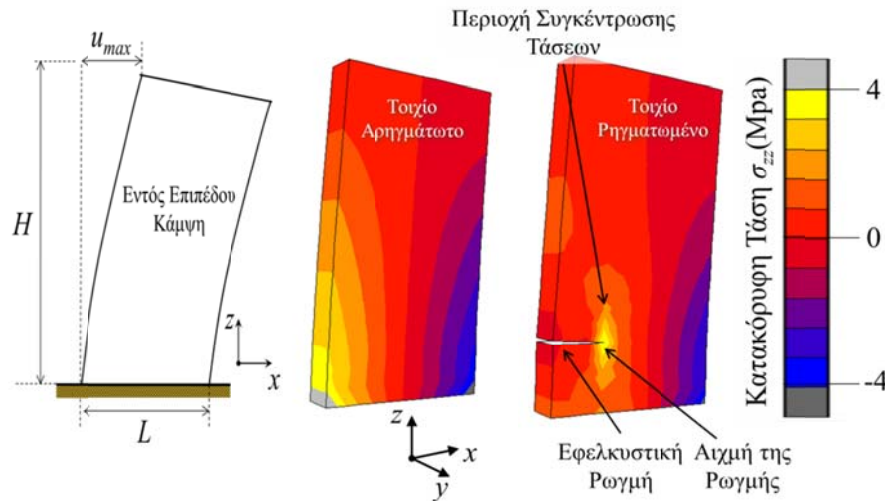
- Οι θερμοκρασιακές μεταβολές, οι μεταβολές στην υγρασία και η πίεση λόγω κρυστάλλωσης αλάτων στους πόρους του σκυροδέματος, έχουν ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του όγκου του υλικού και συχνά τη δημιουργία διαρρήξεων της μικροδομής και μακροσκοπικών ρηγματώσεων.
- Η έκθεση σε ακραίες καταστάσεις τυχατικής φόρτισης όπως οι πυρκαγιές και οι κύκλοι πήξης-απόψυξης του νερού στην επιφάνεια ή/και το εσωτερικό του σκυροδέματος, έχουν επίσης ως αποτέλεσμα τη διάρρηξη της μικροδομής και τη δημιουργία ασυνεχειών στο εσωτερικό του.
- Η ύπαρξη μικρο-ρωγμών λόγω συστολής-διαστολής του σκυροδέματος και ατελειών λόγω ελλιπούς ενυδάτωσης, αυξάνουν το ενεργό πορώδες του υλικού δημιουργώντας διόδους διάχυσης του νερού στο εσωτερικό του και προκαλούν την εμφάνιση όλων των αιτίων φθοράς που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επιπλέον το νερό που διεισδύει και κυκλοφορεί στο εσωτερικό του σκυροδέματος είναι υπεύθυνο για το τη διάβρωση του οπλισμού και τελικά την απώλεια συνάφειας μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος.

### 1.2.1. Επίδραση των ρωγμών στην αντοχή του σκυροδέματος

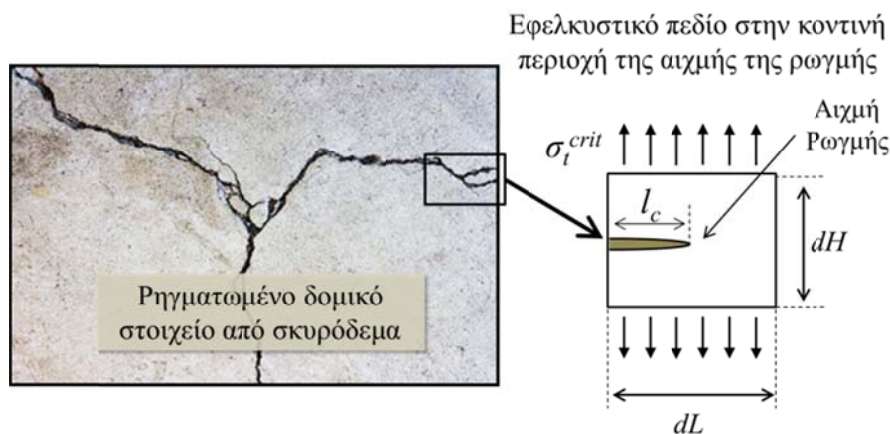
Η ρηγμάτωση είναι η συνηθέστερη μορφή με την οποία εκδηλώνεται μια βλάβη στις κατασκευές από σκυρόδεμα. Επειδή τα αίτια που την προκαλούν ποικίλουν μεταξύ ενός σημαντικού εύρους περιπτώσεων, οι ρωγμές συνοδεύουν τα περισσότερα είδη μηχανικών βλαβών. Οι ρωγμές λόγω της ακανόνιστης και έντονα μεταβαλλόμενης γεωμετρίας τους, δημιουργούν τοπικά εστίες ισχυρών καταπονήσεων εξαιτίας της συγκέντρωσης των τάσεων που εμφανίζεται γύρω από τις αιχμές τους (Σχήμα 1.1). Η συγκέντρωση των τάσεων διευκολύνει την επέκταση των ρωγμών ακόμη και αν το ολικό εφαρμοζόμενο εντατικό πεδίο δεν υπερβαίνει τις αντοχές του υλικού.

Η εκδήλωση μιας μηχανικής βλάβης η οποία συνοδεύεται και από την εμφάνιση ρωγμών, δεν συνεπάγεται την απευθείας ολική απώλεια λειτουργικότητας του δομικού συστήματος. Ενδέχεται δε, και δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις, να μην γίνει

καν αντιληπτή η ύπαρξη της εάν δεν χρησιμοποιηθεί κάποια μέθοδος εντοπισμού με υψηλή διακριτική ικανότητα. Όμως οι ρηγματωμένες περιοχές του υλικού αποτελούν εστίες δομικής τρωτότητας της κατασκευής και ανάλογα με την έκταση και τη διασπορά τους, εάν οι συνθήκες εξωτερικής καταπόνησης το επιτρέψουν, είναι δυνατό να λειτουργήσουν ως αφετηρία ακόμη μεγαλύτερων ασυνεχειών.



**Σχήμα 1.1:** Αριθμητική προσομοίωση τοιχίου-προβόλου σκυροδέματος υπό συνθήκες εντός επιπέδου κάμψης (αντοχή σε εφελκυσμό  $f_{ctm}=4.5\text{Mpa}$ ).



**Σχήμα 1.2:** Εφελκυστική εντατική κατάσταση στην περιοχή της ρωγμής, σε στοιχείο σκυροδέματος.

Η επιστήμη της Θραυστομηχανικής και πιο συγκεκριμένα η θεωρία των Griffith και Irwin για ρηγματωμένα ψαθυρά υλικά ορίζει ότι προκειμένου να επεκταθεί μια υφιστάμενη ρωγμή μήκους  $2l_c$  χρειάζεται να εφαρμοστεί ένα κρίσιμο πεδίο εφελκυστικών τάσεων  $\sigma_i^{crit}$ , σε μια στοιχειώδη περιοχή γύρω από την αιχμή της

ρωγμής ( $dLxdH$ ), με διεύθυνση δράσης κάθετα στον άξονα της (Σχήμα 1.2) (Zihai, 2009; Shah and CarPInteri, 1991). Το κριτήριο επέκτασης της ρωγμής των Griffith-Irwin, του οποίου η ανάπτυξη έχει στηριχθεί στη θεωρία της ελαστικότητας του συνεχούς μέσου, εκφράζεται μαθηματικά σύμφωνα με τη σχέση (Zihai, 2009):

$$\sigma_t^{crit} = g \left( \frac{l_c}{dL} \right) \sqrt{\frac{G_f E^*}{\pi l_c}} \quad (1.1)$$

όπου  $G_f$  ο ρυθμός απελευθέρωσης μηχανικής ενέργειας (Fracture Energy) ο οποίος αντιπροσωπεύει τη μηχανική ενέργεια που είναι αναγκαίο να αποδοθεί στο υλικό προκειμένου να επεκταθεί η ρωγμή κατά μια μονάδα επιφανείας (οι μονάδες του  $G_f$  στο SI είναι  $J/m^2=N/m$  ή  $J/mm^2=N/mm$ ),  $E^*$  το ενεργό μέτρο ελαστικότητας του υλικού, το οποίο για συνθήκες επίπεδης τάσης ισούται με το μέτρο ελαστικότητας του υλικού  $E$ , ενώ για επίπεδη παραμόρφωση δίνετε από τη σχέση  $E^*=E/(1-\nu^2)$ ,  $\nu$  ο λόγος Poisson του υλικού και  $g(l_c/dL)$  μια συνάρτηση επίδρασης του μεγέθους της στοιχειώδους περιοχής γύρω από την αιχμή της ρωγμής. Από την Εξίσωση (1.1) γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι όσο μεγαλύτερη σε μήκος είναι μια ρωγμή τόσο μικρότερη γίνεται η μακροσκοπική του εφελκυστική αντοχή  $\sigma_t^{crit}$ . Η παρατήρηση αυτή ποιοτικά συνεπάγεται ότι εκτεταμένες βλάβες που συνοδεύονται από την έντονη διάρρηξη της δομής των υλικών, έχουν σοβαρό και αρνητικό αντίκτυπο στη συνολική μηχανική συμπεριφορά της κατασκευής.

Ο ρυθμός απελευθέρωσης της μηχανικής ενέργειας είναι ένα μέγεθος με σημαντική χρησιμότητα στις μεθοδολογίες αξιολόγησης ανιχνευόμενων ρωγμών καθώς αντιπροσωπεύει τη ψαθυρότητα του υλικού. Λαμβάνει χαρακτηριστικές τιμές για κάθε ρηγματωμένο υλικό ανάλογα με το μέγεθος και τη διασπορά των ρωγμών, ενώ εξαρτάται και από τη συνοχή της μικροδομής του αέριου υλικού. Υλικά με χαμηλές τιμές ρυθμού απελευθέρωσης της μηχανικής ενέργειας, εμφανίζουν έντονα ψαθυρή συμπεριφορά με αποτέλεσμα αφενός μεν την εύκολη δημιουργία ρωγμών στο εσωτερικό τους και αφετέρου δε τη γρήγορη επέκταση υφιστάμενων ρωγμών. Η Ευρώ-Διεθνής Επιτροπή Σκυροδέματος (CEB) και η Διεθνής Ομοσπονδία Προέντασης (FIP), στο πλαίσιο του ολικού μοντέλου σχεδιασμού κατασκευών από σκυρόδεμα CEB-FIP Model for Concrete Structures 1990 (το οποίο για συντομία θα αναφέρεται ως CEB-FIP 1990), προτείνουν την ακόλουθη εμπειρική σχέση μεταξύ της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος  $f_{cm}$  και του ρυθμού απελευθέρωσης της

μηχανικής ενέργειας (Euro-International Concrete Committee, 1993; Camoes, et al., 2004):

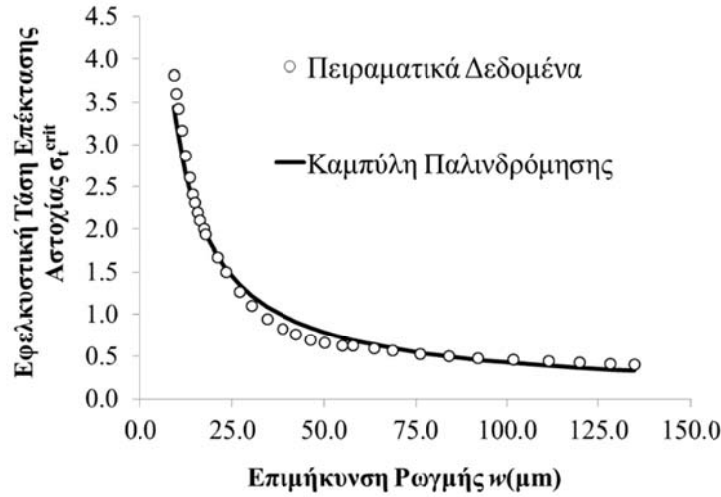
$$G_f = G_{f0} \left( \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)^{0.7} \quad (1.2)$$

όπου  $f_{cm0}$  μια θλιπτική αντοχή αναφοράς ίση με 10 MPa και  $G_{f0}$  ένας ρυθμός απελευθέρωσης μηχανικής ενέργειας αναφοράς του οποίου οι τιμές προσδιορίζονται με βάση το μέγιστο μεγέθους κόκκων των αδρανών που αποτελούν το σκυρόδεμα (Πίνακας 1.1).

**Πίνακας 1.1:** Τιμές  $G_{f0}$  (Camos et al., 2004)

Μέγεθος μέγιστου κόκκου αδρανών $d_{max}(mm)$	$G_{f0}$ (N/mm)
8	0.025
16	0.030
32	0.058

Πέραν του ρυθμού απελευθέρωσης της μηχανικής ενέργειας, ο προσδιορισμός της σχέσης μεταξύ της μακροσκοπικής εφελκυστικής αντοχής  $\sigma_t^{crit}$  και του διαστήματος επέκτασης μιας ρωγμής  $w$ , αποτελεί μείζονος σημασίας ζήτημα για τη μελέτη του τρόπου απώλειας αντοχής του υλικού εξαιτίας της επέκτασης μιας ρωγμής. Ο πειραματικός προσδιορισμός της καμπύλης μεταβολής της  $\sigma_t^{crit}$  συναρτήσει του  $w$  είναι μια σχετικά δύσκολη πειραματική διαδικασία δεδομένου ότι η συνεχής καταγραφή του διαστήματος επέκτασης μιας ρωγμής με ακρίβεια απαιτεί όργανα υψηλής διακριτικής ικανότητας (Shah and Carpinteri, 1991). Εντούτοις η απόκτηση αυτών των δεδομένων, προσφέρει σημαντικές πληροφορίες στη μαθηματική διατύπωση των καταστατικών μοντέλων βλάβης που περιγράφουν τη χαλάρωση (softening) των ψαθυρών υλικών, λόγω επέκτασης των υφιστάμενων ρωγμών. Τέτοιου είδους καταστατικά μοντέλα χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην αριθμητική προσομοίωση των διαδικασιών ανάπτυξης και επέκτασης βλαβών (Damage/Elastic-Plastic Analysis) σε ψαθυρά υλικά όπως τα πετρώματα, οι τοιχοποιίες και το σκυρόδεμα (Zihai, 2009). Στο Σχήμα 1.3 απεικονίζονται η πειραματική καταγραφή της εξέλιξης της μακροσκοπικής εφελκυστικής αντοχής ενός δοκιμίου σκυροδέματος, συναρτήσει της επιμήκυνσης μιας ρωγμής.



**Σχήμα 1.3:** Εφέλκυστική αντοχή συναρτήσει του διαστήματος επέκτασης της ρωγμής (Πηγή: Mehta and Monteiro, 2009).

Στα πειραματικά δεδομένα του Σχήματος 1.3 προσαρμόστηκε η ακόλουθη εκθετική καμπύλη με τη μέθοδο των μη-γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων (MathWorks, 2014):

$$\sigma_t^{crit} = f_{ctm} \left( \frac{w}{l_{c0}} \right)^k \quad (1.3)$$

όπου  $f_{ctm}$  η εφέλκυστική αντοχή του άρρηκτου σκυροδέματος,  $w$  η επιμήκυνση της ρωγμής,  $l_{c0}$  το αρχικό μήκος της ρωγμής και  $k$  μια μεταβλητή που διαμορφώνει το σχήμα της καμπύλης παρεμβολής. Οι τιμές των παραμέτρων της Εξίσωσης (1.3) που υπολογίστηκαν είναι  $l_{c0}=8.34 \mu\text{m}$ ,  $f_{ctm}=3.78 \text{ MPa}$  και  $k=-0.876$ . Ο ρυθμός απελευθέρωσης της μηχανικής ενέργειας είναι δυνατό να προσδιοριστεί από την ολοκλήρωση της καμπύλης  $\sigma_t^{crit}-w$  σύμφωνα με τη σχέση:

$$G_f = \int_{l_{c0}}^{w_c} \sigma_t^{crit} dw = \frac{f_{ctm}}{l_{c0}^k (k+1)} (w_c^{k+1} - l_{c0}^{k+1}) \quad (1.4)$$

όπου  $w_c$  η τελευταία καταγραφόμενη τιμή της επιμήκυνσης της ρωγμής πριν από την πλήρη αστοχία του δοκιμίου. Για την περίπτωση των πειραματικών δεδομένων του Σχήματος 1.3 η τιμή  $G_f$  βρέθηκε ίση με  $0.101 \text{ N/mm}$ . Από την παρατήρηση του Σχήματος 1.3 γίνεται αντιληπτό ότι από ένα σημείο μείωσης της μακροσκοπικής εφέλκυστικής τάσης και μετά (περίπου  $1 \text{ MPa}$ ), η επιμήκυνση της ρωγμής εξελίσσεται ραγδαία οδηγώντας το υλικό στην ολική απώλεια αντοχής. Η



παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει και θεωρητικά τη σπουδαιότητα του εγκαίρου εντοπισμού μιας βλάβης, καθώς και τη χρησιμότητα των θραυστομηχανικών μεγεθών ενός υλικού στην εκτίμηση της επικινδυνότητας της ρωγμής που ανιχνεύεται.

### **1.3. Μη Καταστροφικός Έλεγχος (ΜΚΕ) κατασκευών από σκυρόδεμα**

Η συστηματική εποπτεία της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών αποτελεί μια ανάγκη ζωτικής σημασίας πρωτίστως για την διασφάλιση της προβλεπόμενης και ασφαλούς λειτουργίας τους, αλλά και για μια σειρά άλλων ζητημάτων που ξεκινούν από την ορθή και έγκαιρη συντήρηση των κατασκευών και καταλήγουν στον ολικό έλεγχο ποιότητας αυτών. Στην κατεύθυνση αυτή έχει αναπτυχθεί τα τελευταία 40 χρόνια ένας ολόκληρος διεπιστημονικός κλάδος τεχνικών εφαρμογών και έρευνας ο οποίος έχει ως στόχο την αξιόπιστη ανίχνευση και τον έγκαιρο εντοπισμό των μηχανικών βλαβών ή/και ατελειών στο φέρον οργανισμό μιας κατασκευής. Ο κλάδος αυτός συναντάται στη βιβλιογραφία και τις εφαρμογές ως Έλεγχος Κατασκευών και Παρακολούθηση Δομικής Ακεραιότητας (Structures Control and Structural Integrity Monitoring) ή πιο απλά ως Παρακολούθηση της Δομικής Ακεραιότητας των Κατασκευών (Structural Health Monitoring-SHM), (Doebeling, et al., 1996; Sohn, et al., 2004; Giurgiutiu, 2008). Η έγκαιρη διάγνωση μιας μηχανικής βλάβης σε ένα δομικό σύστημα, συνεισφέρει καθοριστικά στην αποτελεσματική αντιμετώπιση της, καθώς επιτρέπει στους εμπλεκόμενους μηχανικούς να επιλέξουν και να εφαρμόζουν τη βέλτιστη διαδικασία επιδιόρθωσης.

Η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών συνίσταται από διαδικασίες μέτρησης και καταγραφής των τιμών φυσικών μεγεθών τα οποία συσχετίζονται είτε άμεσα είτε έμμεσα με τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά. Οι μεθοδολογίες παρακολούθησης χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, α) τις καταστροφικές και β) τις μη καταστροφικές μεθόδους. Στις καταστροφικές μεθόδους αξιολόγησης και παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας μιας κατασκευής εντάσσονται το σύνολο των πειραματικών διαδικασιών οι οποίες δοκιμάζουν άμεσα την αντοχή των δομικών υλικών. Για την εκτέλεση τέτοιου είδους δοκιμών κρίνεται αναγκαία η λήψη ή παρασκευή κατάλληλα διαμορφωμένων δοκιμίων των υλικών ή του τμήματος της κατασκευής που μελετάται. Ενδεικτικά είδη καταστροφικών δοκιμών για το σκυρόδεμα είναι η δοκιμή αξονικής θλίψης κυλινδρικών ή/και

κυβικών δοκιμίων, η κάμψη οπλισμένων και άοπλων δοκών και οι δοκιμές κόπωσης σε περιοδικά φορτία χαμηλής συχνότητας (Mehta and Monteiro, 2009; Πρασιανάκης και Κουρκουλής, 1999).

Σκοπός σε κάθε περίπτωση καταστροφικής μεθόδου είναι η σταδιακή εξώθηση (με συγκεκριμένο ρυθμό φόρτισης) των δοκιμίων σε αστοχία υλικού. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να προσδιοριστούν άμεσα και αξιόπιστα οι αντοχές των υλικών και των δομικών στοιχείων σε κάθε είδος καταπόνησης, καθώς και χρήσιμες μηχανικές ιδιότητες όπως το Μέτρο Ελαστικότητας και ο λόγος Poisson. Οι καταστροφικές μέθοδοι εμφανίζουν το σημαντικό πλεονέκτημα, έναντι των μη καταστροφικών μεθόδων, του άμεσου και με μεγάλη ακρίβεια υπολογισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών και της μελέτης του τρόπου αστοχίας ενός υλικού ή μιας κατασκευής. Ωστόσο χαρακτηρίζονται και από σοβαρά μειονεκτήματα όπως το υψηλό κόστος εφαρμογής, καθώς απαιτούν εξειδικευμένο και πιστοποιημένο εξοπλισμό, την εργαστηριακή παρασκευή ή/και λήψη δοκιμίων, με αποτέλεσμα την επέμβαση στη δομική συνέχεια της κατασκευής (πυρηνοληψία, κοπή κ.α.) και την αδυναμία της επί-τόπου και σε πραγματικό χρόνο εφαρμογής τους, καθώς πέραν του όγκου και του κόστους του εξοπλισμού συνοδεύονται από μεγάλο όγκο υπολογισμών και δεδομένων (Mehta and Monteiro, 2009; Πρασιανάκης και Κουρκουλής, 1999).

Σε αντίθεση με τις καταστροφικές τεχνικές, οι μέθοδοι Μη Καταστροφικού Ελέγχου-MKE (Non Destructive Testing-NDT) αναπτύχθηκαν ακριβώς για να ξεπεραστούν τα σοβαρά μειονεκτήματα των καταστροφικών μεθόδων. Οι διαδικασίες MKE στηρίζονται στον έμμεσο προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών με την μέτρηση άλλων φυσικών ή μηχανικών ιδιοτήτων οι οποίες όμως συσχετίζονται με τα ζητούμενα μηχανικά μεγέθη. Στην περίπτωση της έμμεσης καταγραφής των επιθυμητών στοιχείων της κατασκευής τα μετρούμενα μεγέθη καλούνται Μεγέθη Παρατήρησης ή Καταγραφόμενες Ποσότητες (Observation Magnitudes ή Recording Quantities) και τα προσδιοριζόμενα φυσικά μεγέθη ως Δομικά Χαρακτηριστικά/Ιδιότητες (Structural Characteristics/Properties). Ένα μειονέκτημα που συνοδεύει της μεθόδους MKE είναι η αβεβαιότητα στην ακρίβεια προσδιορισμού των τιμών των δομικών χαρακτηριστικών. Παρόλα αυτά, η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας και των υπολογιστικών συστημάτων, καθώς και υιοθέτηση σημαντικών στατιστικών εργαλείων, επιτρέπει πλέον τον περιορισμό της αβεβαιότητας σε συγκεκριμένα όρια εμπιστοσύνης (Worden et al., 2002).



Η συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών παρατήρησης και των δομικών χαρακτηριστικών επιτυγχάνετε είτε μέσω εμπειρικών κανόνων-μοντέλων τα οποία έχουν προκύψει από τη στατιστική συσχέτιση ενός επαρκούς όγκου πειραματικών δεδομένων, είτε από φυσικά μοντέλα-εξισώσεις τα οποία έχουν προκύψει μέσω θεωρητικής προσεγγίσεως του υπό μελέτη προβλήματος. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των μη καταστροφικών μεθόδων είναι η δυνατότητα εφαρμογή τους στον επί τόπου έλεγχο των δομικών συστημάτων και μάλιστα από τα πρώτα στάδια της κατασκευής.

Επιπλέον, με την υιοθέτηση της ασύρματης τεχνολογίας, των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου και την ανάπτυξη της διαδικτυακής μεταφοράς, αποθήκευσης και προσπέλασης των πληροφοριών, οι μέθοδοι ΜΚΕ προσφέρουν τη δυνατότητα ανάπτυξης ολοκληρωμένων συστημάτων παρακολούθησης, τα οποία εγκαθίστανται μόνιμα σε κατασκευές και καταγράφουν την εξέλιξη της δομικής τους ακεραιότητας από τα πρώτα στάδια δόμησης και για το σύνολο του χρόνου ζωής τους (Providakis and Liarakos, 2014). Σε αρκετές περιπτώσεις ο χρήστης δύναται να έχει άμεση και σε πραγματικό χρόνο διαδικτυακή πρόσβαση στα δεδομένα παρακολούθησης, πραγματοποιώντας απομακρυσμένο έλεγχο και επιθεώρηση της δομικής ακεραιότητας (Providakis and Liarakos, 2014).

Με βάση τα παραπάνω οι μέθοδοι ΜΚΕ αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο στο πεδίο της αξιολόγησης των εργασιών παρασκευής των δομικών υλικών, των εργασιών κατασκευής των δομικών συστημάτων, την επιθεώρηση της αρτιότητας μιας κατασκευής και τον εντοπισμό συνθηκών έντονης καταπόνησης. Συνοπτικά οι στόχοι του ΜΚΕ δομικών στοιχείων και συστημάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι οι ακόλουθοι (International Atomic Energy Agency, 2002):

- Επί τόπου έλεγχος ποιότητας των δομικών στοιχείων ή των υφιστάμενων δομικών συστημάτων.
- Αξιολόγηση του βαθμού συμμόρφωσης του σκυροδέματος με τους κανονισμούς και τις απαιτούμενες προδιαγραφές.
- Αξιολόγηση των διαδικασιών παραγωγής, μεταφοράς, ανάμιξης και διάστρωσης του σκυροδέματος στο χώρο της κατασκευής.
- Παρακολούθηση της ανάπτυξης της αντοχής του πρώιμου σκυροδέματος σε συνδυασμό με την εκτίμηση του ασφαλούς χρόνου αφαίρεσης του ξυλότυπου.

- Παρακολούθηση της διαδικασίας σκλήρυνσης και ενυδάτωσης του σκυροδέματος προκειμένου να περιοριστεί η ρηγμάτωση λόγω συστολής ξήρανσης.
- Ανίχνευση και εντοπισμός ρωγμών, ατελειών και κοιλοτήτων οι οποίες δύναται να προέρχονται είτε από έντονη μηχανική καταπόνηση, είτε από εσφαλμένη σκυροδέτηση.
- Προσδιορισμός της θέσης και της ποσότητας του οπλισμού.
- Περιορισμός του αριθμού των καταστροφικών δοκιμών που απαιτούνται για τον ακριβή προσδιορισμό των αντοχών του σκυροδέματος.
- Ανίχνευση περιοχών της κατασκευής όπου εντοπίζεται επιδείνωση της δομικής ακεραιότητας του σκυροδέματος λόγω έντονης μηχανικής φόρτισης, κόπωσης, εξωτερικής ή εσωτερικής χημικής διάβρωσης της τσιμεντόπαστας, καταστροφικών φαινομένων που σχετίζονται με ισχυρές θερμοκρασιακές (φωτιά) ή κρουστικές (εκρήξεις) καταπονήσεις, κ.α.
- Παροχή χρήσιμων πληροφοριών για την ασφάλεια της κατασκευής σε περιπτώσεις αλλαγής χρήσης ή μεταβίβασης ιδιοκτησίας.

### **1.3.1. Μέθοδοι ΜΚΕ που στηρίζονται στην διάδοση μηχανικών κυμάτων και την ιδιοταλάντωση των κατασκευών**

Η μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός υπό παρακολούθηση δομικού συστήματος από σκυρόδεμα και των διαδιδόμενων στο εσωτερικού του μηχανικών κυμάτων, είναι δυνατό να δώσει σημαντικές πληροφορίες για τα μηχανικά του χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά ενός μηχανικού κύματος, το οποίο εκπέμπεται από μια πηγή μηχανικής ταλάντωσης και διαδίδεται στο φέρον οργανισμό μιας κατασκευής, καθορίζονται από τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος, τη γεωμετρία της μικροδομής του και την εξωτερική γεωμετρία του δομικού φορέα που διαδίδεται. Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού και η γεωμετρία της κατασκευής επηρεάζουν την ταχύτητα, το συχνотικό περιεχόμενο και την ενέργεια του διαδιδόμενου κύματος. Η καταγραφή της δυναμικής απόκριση ενός δομικού συστήματος περιέχει το σύνολο της χρήσιμης πληροφορίας που σχετίζεται με τη δυσκαμψία του φορέα, την κατανομή της μάζας στο εσωτερικό του και την απόσβεση του υλικού (Doebeling et al., 1996; 1998; Βουτετάκη, 2009; Casado et al., 2013).

Οι δυναμικές μέθοδοι ΜΚΕ είναι δυνατό να διαχωριστούν σε παθητικές (passive control) και σε ενεργητικές μεθόδους (active control) (Doebeling et al., 1996; 1998).

Οι παθητικές μέθοδοι αναφέρονται στις περιπτώσεις όπου αισθητήρες καταγραφής της δυναμικής κίνησης τοποθετούνται σε συγκριμένα σημεία μιας κατασκευής, δημιουργώντας ένα πλέγμα παρακολούθησης και καταγράφουν την δυναμική απόκριση της ιδιοταλάντωσης του δομικού συστήματος. Η ιδιοταλάντωση ή φυσική ταλάντωση μιας κατασκευής, προκαλείται εξαιτίας εξωγενών διεγέρσεων που προέρχονται από το κοντινό περιβάλλον του δομικού συστήματος, όπως ο αέρας, η κίνηση οχημάτων, ο φυσικός θόρυβος, κ.α.

Τέτοιου είδους αισθητήρες συναντούνται σε κτίρια μεγάλου ύψους και σε τεχνικά έργα μεγάλης κλίμακας όπως αυτοκινητόδρομοι, γέφυρες και φράγματα. Στις περιπτώσεις αυτές οι παθητικές δυναμικές μέθοδοι είναι αποτελεσματικές επειδή το ενεργειακό περιεχόμενο της ιδιοταλάντωσης είναι σημαντικό, με αποτέλεσμα να ανιχνεύονται ευδιάκριτα τα δυναμικά χαρακτηριστικά του δομικού συστήματος κυρίως στο πεδίο των συχνοτήτων. Ο παθητικός ΜΚΕ δεν επικεντρώνεται τόσο στον αυστηρό προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών της κατασκευής, όσο στην αξιολόγηση της δομικής κατάστασης από την μελέτη των μεταβολών που δύναται να εμφανιστούν τόσο στις χρονο-ιστορίες, όσο και στα φάσματα απόκρισης που καταγράφονται από τους αισθητήρες της δυναμικής κίνησης (Casado et al., 2013; Glisic et al., 2002; Abrahamczyk et al., 2008).

Οι ενεργητικές δυναμικές μέθοδοι ΜΚΕ στηρίζονται στη στοχευμένη εκπομπή ενός μηχανικού κύματος με τη χρήση ενός διεγέρτη ο οποίος εξωθεί σε ταλάντωση μια περιοχή της κατασκευής. Το μηχανικό κύμα που προκαλείται, καταγράφεται καθώς διαδίδεται στο εσωτερικό του δομικού συστήματος από έναν ή και περισσότερους διατεταγμένους σε πλέγμα αισθητήρες ανίχνευσης της δυναμικής κίνησης. Οι μέθοδοι αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως για τον έμμεσο προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος, το πάχος επικάλυψης των οπλισμών, το πάχος των δομικών στοιχείων, τον προσδιορισμό διεπιφανειών στο εσωτερικό ενός δομικού στοιχείου και την αξιολόγηση του μεγέθους βλαβών (π.χ. βάθος ρωγμών), σε περιορισμένες περιοχές των δομικών στοιχείων (Qixian and Bungey, 1996; Malhotra and Carino, 2004; Kramer, 1996; Davis and Selvadurai, 1996; Carino, 2004; Liang and Su, 2001; Cam et al., 2005; Yu et al., 2004).

#### 1.4. «Ευφυή» πιεζοηλεκτρικά υλικά και ΜΚΕ σκυροδέματος

Η ραγδαία εξέλιξη της πολυπλοκότητας των σύγχρονων δομικών συστημάτων τα τελευταία 30 χρόνια, έχει δημιουργήσει αυξημένες ανάγκες για συχνότερη και συστηματικότερη παρακολούθηση της δομικής τους ακεραιότητας. Τα συστήματα παρακολούθησης που απαιτούνται προκειμένου να υπάρχει μια ολοκληρωμένη διαχείριση και εποπτεία της ασφάλειας μιας κατασκευής, είναι αναγκαίο να διαθέτουν τα εξής χαρακτηριστικά (Song et al., 2008; Providakis and Liarakos, 2010; 2011; 2014; Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013):

- Δυνατότητα μόνιμης εγκατάστασης στο χώρο της κατασκευής από τα πρώτα στάδια δόμησης και για όλο το χρόνο ζωής της.
- Δυνατότητα διαμόρφωσης ενός πλέγματος παρακολούθησης του δομικού συστήματος, το οποίο θα χαρακτηρίζεται από τη βέλτιστη διασπορά ενός ικανού αριθμού αισθητήρων στο χώρο του φέροντος οργανισμού. Επισημαίνεται δε ότι για να επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητο η τεχνολογία που θα υιοθετηθεί για την ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος να προσφέρει την ικανότητα πρόσβασης σε δυσπρόσιτα λόγω γεωμετρίας σημεία, όπως είναι η θεμελίωση.
- Ικανότητα διαχείρισης με γρήγορο και ασφαλή τρόπο του μεγάλου όγκου δεδομένων που θα καταγράφονται από τους αισθητήρες.
- Δυνατότητα απομακρυσμένης και σε πραγματικό χρόνο πρόσβασης στα δεδομένα καταγραφής του συστήματος παρακολούθησης.
- Σχετικά χαμηλό κόστος.

Οι κλασσικές μέθοδοι ΜΚΕ οι οποίες βασίζονται στην εκπομπή μηχανικών κυμάτων στο εσωτερικό του φέροντος οργανισμού μιας κατασκευής, εμφανίζουν κάποια μειονεκτήματα κυρίως όσον αφορά τα παραπάνω σημεία που αναπτύχθηκαν. Στην περίπτωση των ενεργητικών μεθόδων ελέγχου (active control) η εκπομπή των μηχανικών κυμάτων απαιτεί πολλές φορές τη χρήση ογκώδους εξοπλισμού με εκτεταμένη καλωδίωση και υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια (ηλεκτρική τροφοδοσία των γεννητριών παλμών και ενίσχυση σημάτων εξόδου). Από την άλλη μεριά οι παθητικοί μέθοδοι ΜΚΕ απαιτούν τη διασπορά στο χώρο της υπό παρακολούθηση κατασκευής μια σειράς από αισθητήριες συσκευές (επιταχυνσιογράφους, γεώφωνα), (Doebeling et al., 1996; 1998) οι οποίοι διασυνδέονται με καλώδια με μια κεντρική

μονάδα καταγραφής. Ένα τέτοιο σύστημα αν και προσφέρει υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία ως προς τη λειτουργία του, μειονεκτεί λόγω του μεγάλου μεγέθους των αισθητήρων, την αδυναμία πρόσβασης σε δυσπρόσιτα σημεία της κατασκευής, την πολυπλοκότητα στη συνδεσμολογία των αισθητήρων λόγω των καλωδίων και στο αρκετά υψηλό κόστος του. Το τελευταίο δε το καθιστά σε πολλές περιπτώσεις απαγορευτικό σε σχέση με τη μόνιμη εγκατάσταση του (Song et al., 2008).

Οι ανάγκες που παρουσιάστηκαν παραπάνω οδήγησαν στην ανάπτυξη ήδη από τη δεκαετία του 1990 των «ευφρών» υλικών και πιο συγκεκριμένα των πιεζοηλεκτρικών υλικών (Giurgiutiu and Rogers, 1997; Giurgiutiu, 2008). Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά χαρακτηρίζονται από τη ιδιότητα τους να εμφανίζουν ηλεκτρική τάση σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση (διεύθυνση πόλωσης), όταν σε αυτή τη διεύθυνση ασκείται μια μηχανική δύναμη. Η συμπεριφορά αυτή καλείται Ευθύ Πιεζοηλεκτρικό Φαινόμενο (Direct Piezoelectric Effect). Το αξιοσημείωτο όμως με τα συγκεκριμένα υλικά, είναι ότι επιδεικνύουν και την αντίστροφη συμπεριφορά. Δηλαδή, εμφανίζουν μηχανική παραμόρφωση σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση όταν σε αυτή εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο (Αντίστροφο Πιεζοηλεκτρικό Φαινόμενο-Inverse Piezoelectric Effect), (Giurgiutiu, 2008). Τα ηλεκτρικά και μηχανικά μεγέθη που εισέρχονται στη μελέτη του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου συσχετίζονται μεταξύ τους με βάση συγκεκριμένους ηλεκτρομηχανικούς καταστατικούς νόμους (Giurgiutiu, 2008).

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο αποτελεί ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο στο ΜΚΕ των κατασκευών καθώς τα συγκεκριμένα υλικά είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν ως στοιχεία αισθητήρων ή και πομπών μηχανικών κυμάτων (διεγέρτες μηχανικής ταλάντωσης). Στην πρώτη περίπτωση αξιοποιείται το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, όπου το υλικό αλληλεπιδρά με ένα διαδιδόμενο μηχανικό κύμα και παράγει ηλεκτρική τάση στη διεύθυνση ταλάντωσης του κύματος. Στη δεύτερη περίπτωση, με την εφαρμογή μιας εξωτερικής ηλεκτρικής τάσης σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση πόλωσης του υλικού, είναι δυνατό να εκπεμφθεί ένα μηχανικό κύμα με συχνότητα ίδια με εκείνη της ηλεκτρικής τάσης διέγερσης. Εξαιτίας της παραπάνω πολύ-λειτουργικής συμπεριφοράς τα συγκεκριμένα υλικά στη βιβλιογραφία συναντούνται και ως Αισθητήρες/Διεγέρτες (Sensors/Actuators) (Giurgiutiu, 2008; Song et al., 2008; Providakis and Liarakos, 2010; 2011; 2014).

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα φυσικά και τα τεχνητά. Τα φυσικά ή πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι όπως είναι ο χαλαζίας

(Διοξείδιο του Πυριτίου-SiO<sub>2</sub>) και ο τουρμαλίνης (Κυκλο-Πυριτικό ορυκτό, σε αρκετές περιπτώσεις πολύτιμος και ημιπολύτιμος λίθος), έχουν χρησιμοποιηθεί στην ωρολογοποιεία, στην παρασκευή μικροφώνων και ακουστικών και την κατασκευή ηλεκτρονικών ταλαντωτών (Malvino and Bates, 2006). Οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι έχουν σχετικά υψηλό κόστος καθώς για τις εφαρμογές τους απαιτείται η κατάλληλη κοπή των κρυστάλλων. Το κόστος αυξάνεται όσο το απαιτούμενο μέγεθος κοπής μειώνεται πλησιάζοντας τις διαστάσεις της κρυσταλλικής μικροδομής του ορυκτού. Επιπλέον η κανονική τους γεωμετρία εισάγει περιορισμούς ως προς το τελικό σχήμα του κρυστάλλου.

Η καταστατική συμπεριφορά που επιδεικνύουν τα πιεζοηλεκτρικά υλικά οφείλεται στο γεγονός ότι έχουν την ικανότητα να μετασχηματίζουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και το αντίστροφο. Η ικανότητα τους αυτή περιγράφεται από το Συντελεστή Ηλεκτρομηχανικής Σύζευξης (Electromechanical Coupling Coefficient-ECC) ο οποίος εκφράζεται από τη σχέση (Giurgiutiu, 2008):

$$\kappa^{em} = \sqrt{\frac{\text{Εκλυόμενη Μηχανική Ενέργεια}}{\text{Εφαρμοζόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια}}} \quad (1.5)$$

Τα φυσικά πιεζοηλεκτρικά υλικά σε αρκετές περιπτώσεις εφαρμογών που σχετίζονται με την ενσωμάτωση τους σε αισθητήρες και πομπούς μηχανικών κυμάτων, κρίνονται ανεπαρκή ως προς το μέγεθος του ECC. Δηλαδή η μηχανική ενέργεια που αποδίδουν με τη μορφή μηχανικών κυμάτων είναι χαμηλή σε σχέση με την ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για τον εξαναγκασμό τους σε ταλάντωση. Η αδυναμία αυτή καθώς και οι περιορισμοί που τα χαρακτηρίζουν λόγω της φυσικής τους δομής, οδήγησε στην ανάπτυξη των τεχνητών πιεζοηλεκτρικών υλικών. Τα συγκεκριμένα υλικά είναι κεραμικής προελεύσεως και για το λόγο αυτό στη βιβλιογραφία πολλές φορές αναφέρονται και ως Πιεζοκεραμικά Υλικά (Piezoceramic Materials). Παρασκευάζονται από κονιάματα χημικών ενώσεων του οξυγόνου με τα μέταλλα Βάριο (Br), Τιτάνιο (Ti), Ζιρκόνιο (Zr) και Μόλυβδο (Pb), (Giurgiutiu, 2008; PI Ceramics, 2014).

Η κονιώδης μορφή της συγκεκριμένης πρώτης ύλης προσφέρει τη δυνατότητα διαμόρφωσης πιεζοηλεκτρικών σωμάτων με μεγάλο εύρος γεωμετρικών χαρακτηριστικών (πλακίδια, ράβδοι, δίσκοι κ.α.) και διαστάσεων. Τα πιο διαδεδομένα πιεζοκεραμικά υλικά στις εφαρμογές ΜΚΕ δομικών συστημάτων, είναι



το Οξείδιο του Βαρίου και του Τιτανίου (Barium Titanate) με χημικό τύπο  $\text{BaTiO}_3$  και το Οξείδιο του μολύβδου και των Ζιρκονίου, Τιτανίου–PZT (Lead Zirconate Titanate) με χημικό τύπο  $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ . Τα PZT συναντούνται στο πεδίο των τεχνικών εφαρμογών του μη καταστροφικού ελέγχου, με τη μορφή δισκοειδών πλακιδίων ή παραλληλογράμμων επιθεμάτων (patches), των οποίων το πάχος κυμαίνεται από 0.2 έως 20 mm και η επιφάνεια από  $5 \text{ mm}^2$  έως και  $20 \text{ cm}^2$  (PI Ceramics, 2014).

#### 1.4.1. Η μέθοδος της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης/Σύνθετης Αγωγιμότητας

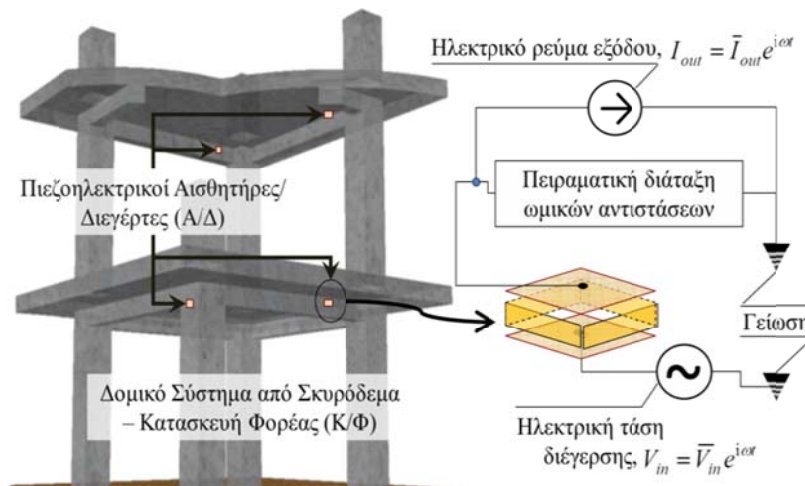
Η πολύ-λειτουργική ικανότητα των PZT έδωσε ώθηση στη ανάπτυξη μεθοδολογιών ΜΚΕ στις οποίες τα συγκεκριμένα υλικά έχουν το ρόλο τόσο του διεγέρτη όσο και του αισθητήρα δυναμικής κίνησης. Πιο συγκεκριμένα, συσκευές ελέγχου που φέρουν πιεζοηλεκτρικά υλικά σε μορφή πλακιδίων ή επιθεμάτων PZT, ενσωματώνονται στην υπό παρακολούθηση κατασκευή, η οποία από εδώ και στο εξής θα αναφέρετε ως Κατασκευή Φορέας (Κ/Φ, Host Structure) και διεγείρονται σε ταλάντωση με την εφαρμογή μιας εναλλασσόμενης ηλεκτρικής τάσης,  $V_{in}$ , στη διεύθυνση πόλωσης του υλικού. Λόγω της μηχανικής συνάφειας μεταξύ Κ/Φ και ενσωματωμένης συσκευής ελέγχου, η μηχανική διαταραχή που προκαλεί η συσκευή ελέγχου διαδίδεται στο εσωτερικό της Κ/Φ με τη μορφή κύματος και αλληλεπιδρά τόσο με τη μικροδομή του υλικού όσο και με τις συνοριακές συνθήκες της Κ/Φ.

Η μηχανική απόκριση της Κ/Φ στο εκπεμπόμενο μηχανικό κύμα καταγράφεται επίσης από τη συσκευή ελέγχου ως ηλεκτρική τάση  $V_{out}$ . Η πιεζοηλεκτρική συσκευή ελέγχου, η οποία από εδώ και στο εξής θα αναφέρετε ως Αισθητήρας/Διεγέρτης (Α/Δ), σε μια τέτοια διαδικασία ΜΚΕ συνδέεται με μια ηλεκτρική διάταξη ωμικών αντιστατών μέσω της οποίας καταγράφεται το ηλεκτρικό ρεύμα,  $I_{out}$ , που αντιστοιχεί στην τάση απόκρισης του Α/Δ. Ένα τέτοιο σύστημα κατασκευής-πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα/διεγέρτη, καλείται συζευγμένο Ηλεκτρο-ΜΗχανικό Σύστημα (ΗΜΗΣ) (Σχήμα 1.4).

Ο λόγος μεταξύ του πλάτους του ηλεκτρικού ρεύματος απόκρισης και του πλάτους της ηλεκτρικής τάσης διέγερσης, καλείται Ηλεκτρο-Μηχανική Σύνθετη Αγωγιμότητα (ΗΜΑ, Electro-Mechanical Admittance), αποτελεί τη συνάρτηση μεταφοράς (Transfer Function) της ηλεκτρικής απόκρισης του ΗΜΗΣ και εκφράζεται μαθηματικά από την ακόλουθη σχέση (Giurgiutiu, 2008; Βουτετάκη, 2009):

$$\bar{Y} = \frac{\bar{I}_{out}}{\bar{V}_{in}} \quad (1.6)$$

όπου  $\bar{Y}$  η HMA σε μονάδες siemens (siem). Το αντίστροφο μέγεθος της Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας καλείται Ηλεκτρο-Μηχανική Εμπέδηση-HME ή Σύνθετη Αντίσταση (Electro-Mechanical Impedance-EMI), συμβολίζεται ως  $\bar{Z}^e = 1/\bar{Y}$  και εκφράζεται σε μονάδες ηλεκτρικής αντίστασης, Ohm (Giurgiutiu, 2008; Βουτετάκη, 2009; Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013).



Σχήμα 1.4: Συζευγμένο ηλεκτρομηχανικό σύστημα κατασκευής σκυροδέματος με εμφυτευμένους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες/διεγέρτες.

Επειδή τα μεγέθη Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας/Εμπέδησης (HMA/HME) εμπεριέχουν την μηχανική απόκριση ενός Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος, επηρεάζονται από τις όποιες μεταβολές συμβαίνουν στα μηχανικά χαρακτηριστικά της κατασκευής που έχει ενσωματωθεί το PZT. Για το λόγο αυτό αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο στον ΜΚΕ των δομικών συστημάτων με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών. Οι πρώτες εφαρμογές ΜΚΕ βασισμένες σε PZT εντοπίζονται στο τεχνολογικό πεδίο της αεροναυπηγικής, με τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας τμημάτων αεροσκαφών (πτερύγια, άτρακτος, σημεία σύνδεσης κ.α.) και τον εντοπισμό και αξιολόγηση πιθανών βλαβών (Inman and Cudney, 1997; Zhou et al., 1995; 1996; Giurgiutiu and Rogers, 1997; 1999; Giurgiutiu et al., 2002). Οι Liang et al (1994a; 1994b; 1996) πρώτοι το 1994 παρουσιάζουν ένα αναλυτικό μοντέλο της HMA, το οποίο συσχετίζει την ηλεκτρική απόκριση ενός Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος (ΗΜΗΣ) με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της υπό παρακολούθησης κατασκευής (Κ/Φ), η οποία και φέρει το PZT. Για τη περιγραφή της μηχανικής



απόκρισης τόσο του PZT όσο και της Κ/Φ υιοθετήθηκε το μέγεθος της Δυναμικής Μηχανικής Εμπέδησης (Dynamic Mechanical Impedance-DMI) το οποίο ορίζεται ως ο λόγος της χρονικά μεταβαλλόμενης δύναμης που ασκείται σε κάποιο σημείο ενός δομικού συστήματος, προς την ταχύτητα ταλάντωσης του συγκεκριμένου σημείου. Η Μηχανική Εμπέδηση συμβολίζεται με  $Z$ , έχει μονάδες Ns/m και περιγράφεται μαθηματικά από τη σχέση:

$$Z_j = \frac{F_j}{\dot{u}_j} \quad (1.7)$$

όπου  $j=1:3$ ,  $F_j$  και  $u_j$  η δύναμη αντίδρασης και η μετατόπιση αντίστοιχα του σημείου μελέτης ως προς τη  $j$  διεύθυνση.

Η ανάλυση των Liang et al. (1994a; 1994b; 1996) αναπτύχθηκε περαιτέρω από τους Giurgiutiu and Rogers (1997; 1999) και οδήγησε στη αναλυτική διατύπωση της μονοδιάστατης Ηλεκτρο-Μηχανικής απόκρισης ενός PZT ή ενός ΗΜΗΣ στο πεδίο της συχνότητας, η οποία περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση (Giurgiutiu and Rogers, 1997; 1999; Zagrai, 2002):

$$Y_i(\omega) = G_i + iB_i = i\omega C_i \left\{ 1 - (\kappa_{ij}^{em})^2 \frac{Z_{St,j}}{Z_{pzt,j} + Z_{St,j}} \right\} \quad (1.8)$$

όπου  $i,j=1:3$ ,  $i=\sqrt{-1}$ ,  $G_i$  το πραγματικό μέρος της ΗΜΑ ή Αγωγιμότητα (Conductance),  $B_i$  το φανταστικό μέρος της ΗΜΑ ή Επιδεκτικότητα (Susceptance), (Βουτετάκη, 2009),  $\omega$  η γωνιακή συχνότητα απόκρισης,  $\kappa_{ij}^{em}$  ο ECC (βλ. εξίσωση 1.5) ο οποίος συνδέει την μηχανική ενέργεια που εκλύεται από το PZT στην διεύθυνση  $j$  με την ηλεκτρική ενέργεια που αποδίδεται σε αυτό μέσω ενός ηλεκτρικού πεδίου στη διεύθυνση  $i$ ,  $C_i$  (Farad ή  $\text{Cb}^2/\text{Joule}$ ) η χωρητικότητα του PZT σε στατικές συνθήκες στη διεύθυνση  $i$ ,  $Z_{St,j}$  και  $Z_{pzt,j}$  η μηχανική εμπέδηση της κατασκευής που φέρει το PZT (Κ/Φ) και του PZT αντίστοιχα στη διεύθυνση  $j$ . Αντίστοιχα με την ΗΜΑ, και η εμπέδηση στο πεδίο των συχνοτήτων αποτελεί έναν μιγαδικό αριθμό,  $Z^e = R + iX$ , όπου  $R$  το πραγματικό μέρος ή ηλεκτρική αντίσταση (Resistance) και  $X$  το φανταστικό ή ανάδραση ή άεργη αντίσταση (Reactance).

Σχετικά με την αναλυτική περιγραφή της μηχανικής εμπέδηση των κατασκευών έχουν προταθεί διάφορα αναλυτικά μοντέλα (Bhalla and Soh, 2007; 2008; Bhalla et

al., 2012). Οι Liang et al. (1994a; 1994b; 1996) και Giurgiutiu and Rogers (1997; 1999) έχουν προτείνει μονοδιάστατα μοντέλα τα οποία βασίζονται στην προσομοίωση της μηχανικής απόκρισης του συστήματος με πολυβάθμια διακριτά συστήματα μαζών-ελατηρίων-αποσβεστήρων. Ιδιαίτερα σημαντική κρίνεται η συνεισφορά των Giurgiutiu and Rogers (1999) στη διατύπωση ενός μοντέλου το οποίο συσχετίζει τη μηχανική εμπέδηση ενός ΗΜΗΣ από σύνθετα υλικά με τη δυναμική του δυσκαμψία. Οι Zhou et al. (1995; 1996) επέκτειναν τις εργασίες των προηγούμενων προσεγγίζοντας το πρόβλημα της μηχανικής απόκρισης στις δύο διαστάσεις, με την εφαρμογή των διαφορικών εξισώσεων διάδοσης των μηχανικών κυμάτων, τόσο στο PZT όσο και στα δομικά στοιχεία της Κ/Φ. Η αναλυτική περιγραφή που έδωσαν αποτελεί ένα ρεαλιστικότερο ηλεκτρομηχανικό μοντέλο το οποίο όμως μειονεκτεί λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας του.

Οι Bhalla and Soh (2004a; 2004b; 2004c; 2007; 2008), λαμβάνοντας υπόψη αφενός μεν την αμεσότητα της προσεγγίσεως των Liang et al. και αφετέρου δε τις χρήσιμες παρατηρήσεις των Zhou et al. πρότειναν τη δική τους λύση με την εισαγωγή της ισοδύναμης ή ενεργής μηχανικής εμπέδησης (Effective Mechanical Impedance). Άλλες εργασίες οι οποίες έχουν συνεισφέρει στην αναλυτική περιγραφή της Μηχανικής Εμπέδησης, είναι αυτές των Xu and Liu (2002) η οποία ενσωματώνει στο μοντέλο μηχανικής απόκρισης την επίδραση των υλικών που αποτελούν τη διεπιφάνεια PZT-δομικό στοιχείο, των Zhang et al. (2011) στην οποία παρουσιάζεται η ανάλυση ενός ΗΜΗΣ το οποίο αποτελείται από μια δοκό και των Yan and Chen (2010) η οποία προτείνει μια απλοποιημένη εκδοχή του μοντέλου των Zhou et al. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε μια νέα αναλυτική προσέγγιση για τη μηχανική εμπέδηση  $Z_{st}$ , μιας υπό παρακολούθηση κατασκευής (Κ/Φ), η οποία στηρίζεται στη διατμητική αλληλεπίδραση μεταξύ ενός επιθέματος PZT και της Κ/Φ (Providakis and Liarakos, 2014).

Εκτός από το τεχνικό πεδίο της αεροναυπηγικής και των μεταλλικών κατασκευών, η χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών και της μεθόδου HMA/HME, είναι εξαιρετικά διαδεδομένη στα αντικείμενα του μη καταστροφικού ελέγχου και ανίχνευσης μηχανικών βλαβών των κατασκευών από σκυρόδεμα (Annamdas et al., 2010; Annamdas and Radhika, 2013; Bhalla and Soh, 2007; 2008; Bhalla et al., 2012; Gu et al., 2006; Hou et al., 2012; Kong et al., 2013; Laskar et al., 2009; Liarakos and Providakis, 2013; Providakis and Liarakos 2010; 2011; 2012; 2014; Providakis et al., 2014; Providakis, Liarakos and Voutetaki, 2010; Providakis, Liarakos and

Kampianakis 2013; Providakis et al., 2013a; 2013b; Shin et al., 2008; Soh and Bhalla; 2005; Soh et al., 2000; Song et al., 2007; 2008; Tawie and Lee, 2010a; 2010b; 2010c; Tseng and Wang, 2004; Βουτετάκη, 2009) των υπογείων τεχνικών έργων (Bhalla et al., 2005) και των πετρωμάτων (Yang et al., 2007). Η μέθοδος της HMA/HME αξιοποιεί τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα PZT ως συσκευές ανίχνευσης, στηριζόμενη στην διττή λειτουργία τους τόσο ως αισθητήρες όσο και ως διεγέρτες, για τη καταγραφή της HMA/HME στο πεδίο της συχνότητας. Τα εύρη των συχνοτήτων που κυρίως χρησιμοποιούνται κυμαίνονται από 5-500 kHz. Η αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας του υπό μελέτη δομικού συστήματος πραγματοποιείται είτε με τη συγκριτική ανάλυση των καταγραφόμενων φασμάτων απόκρισης της HMA/HME, είτε με την ταυτοποίηση των δυναμικών του χαρακτηριστικών (δυσκαμψία, σημειακές μάζες και απόσβεση). Σχετικά με την συγκριτική ανάλυση των φασμάτων απόκρισης HMA/HME, η διαδικασία που ακολουθείται συνίσταται από την καταγραφή της απόκρισης ενός Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος σε ένα συγκριμένο εύρος συχνοτήτων α) για μια αρχική κατάσταση αναφοράς (Φάσμα Αναφοράς) όπου η υπό παρακολούθηση κατασκευή (Κ/Φ) θεωρείται δομικά άρτια και β) για μια ή και περισσότερες μεταγενέστερες καταστάσεις δομικής ακεραιότητας, όπου δύναται να έχουν εμφανιστεί μηχανικές βλάβες. Η σύγκριση μεταξύ των φασμάτων απόκρισης HMA/HME υλοποιείται με τη χρήση στατιστικών δεικτών βλάβης, οι οποίοι υπολογίζονται από την απόκλιση των φασματικών αποκρίσεων της τρέχουσας κατάστασης δομικής ακεραιότητας, με τα αντίστοιχα φάσματα αναφοράς. Κάποιοι από τους δείκτες βλάβης που ενδεικτικά αναφέρονται στη βιβλιογραφία είναι οι δείκτες RMSD, MAPD, CCD (Tawie and Lee, 2010b).

Στο πεδίο του ΜΚΕ των δομικών στοιχείων σκυροδέματος η μέθοδος HMA/HME έχει βρει σημαντική εφαρμογή στην παρακολούθηση της ανάπτυξης της δυσκαμψίας και της αντοχής του πρωίμου σκυροδέματος (Annamdas and Radhika, 2013; Bhalla and Soh, 2007; 2008; Providakis and Liarakos 2010; 2011; 2012; 2014; Gu et al., 2006; Quinn et al., 2012; Shin et al., 2008; Tawie and Lee, 2010a; 2010b; 2010c). Στις συγκριμένες εφαρμογές τα PZT ή συσκευές με βάση τα PZT προσαρμόζονται στο σκυρόδεμα από τις πρώτες ημέρες (1-3) ή ακόμη και ώρες μετά τη παρασκευή του και η ηλεκτρομηχανική τους απόκριση καταγράφεται συνεχώς για τις 28 πρώτες ημέρες. Η αξιολόγηση της διαδικασίας σκλήρυνσης του σκυροδέματος είναι αντίστοιχη με εκείνη του ΜΚΕ της δομικής του ακεραιότητας. Και σε αυτή την περίπτωση γίνεται σύγκριση μεταξύ των ηλεκτρομηχανικών φασμάτων απόκρισης

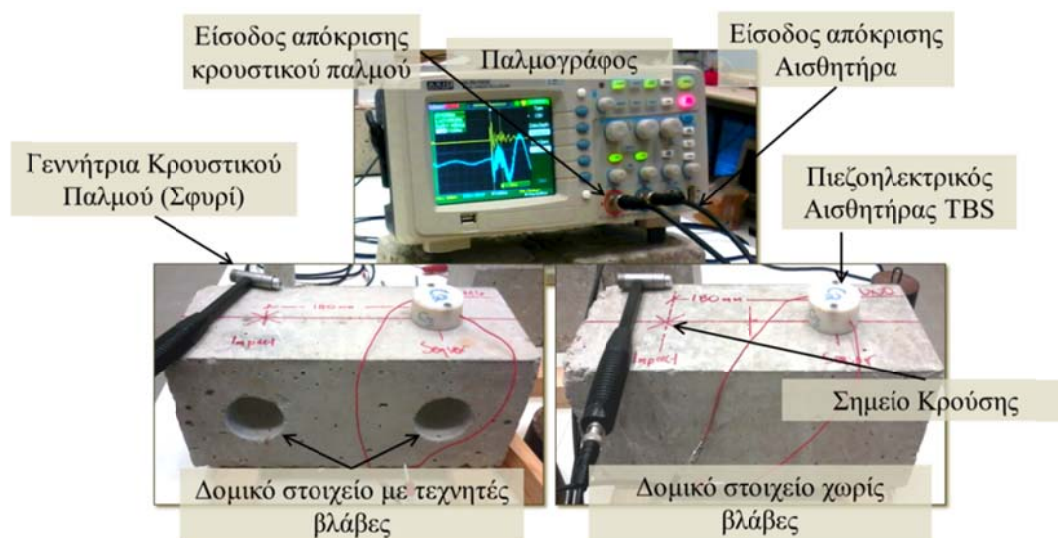
και του φάσματος αναφοράς. Η τεχνική εμφύτευσης των πιεζοηλεκτρικών υλικών στη μάζα του σκυροδέματος κατά τη σκυροδέτηση, προσφέρει τη δυνατότητα ολικής παρακολούθησης ενός δομικού στοιχείου, καθώς στα πρώιμα στάδια γίνετε η αξιολόγηση της διαδικασίας σκλήρυνσης και μετά τις 28 ημέρες τα ίδια PZT χρησιμοποιούνται ως συσκευές ανίχνευσης μηχανικών βλαβών (Gu et al., 2006; Song et al., 2007; 2008; Providakis and Liarakos, 2010).

#### **1.4.2. Παθητικός και Ενεργητικός ΜΚΕ με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών**

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι δυνατό να εφαρμοστούν και στις περιπτώσεις παθητικών και ενεργητικών μεθόδων παρακολούθησης και ελέγχου των δομικών συστημάτων (Bhalla and Soh, 2003; 2004b; Gu et al., 2006; Hou et al., 2012; Laskar et al., 2009; Providakis et al., 2013a; 2013b; Sohn and Lee, 2010; Song et al., 2007; 2008). Στις συγκριμένες εφαρμογές τα PZT αξιοποιούνται ως τμήματα είτε αισθητήριων συσκευών είτε ως διεγέρτες μηχανικών κυμάτων και ταλαντώσεων. Οι καταγραφές της ηλεκτρικής απόκρισης πραγματοποιούνται κυρίως στο πεδίο του χρόνου με τη ανάκτηση των χρόνο-ιστοριών της ηλεκτρικής τάσης απόκρισης. Η αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας υλοποιείται με μεθοδολογίες που βασίζονται α) στον υπολογισμό της ενέργειας των σημάτων καταγραφής, β) στην ανάλυση της καταγραφόμενης κυματομορφής σε στοιχειώδη πακέτα αρμονικών κυμάτων (wavelets) (Gu et al., 2006; Laskar et al., 2009; Song et al., 2007; 2008) και στον υπολογισμό και ερμηνεία των φασμάτων απόκρισης Fourier (Providakis et al., 2013a; 2013b).

Όσον αφορά τις εφαρμογές που σχετίζονται με το σκυρόδεμα, οι συσκευές που φέρουν τα PZT δύναται να είναι τόσο επιφανειακά επικολλημένες όσο και εμφυτευμένες στο εσωτερικό του (Gu et al., 2006; Laskar et al., 2009; Providakis and Liarakos, 2010; Song et al., 2007; 2008). Στο Σχήμα 1.5 απεικονίζεται μια πειραματική διάταξη ΜΚΕ δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα με την εφαρμογή της μεθόδου Κρούσης-Απόκρισης (Impact-Echo), (Carino, 2004; Liang and Su, 2001; Cam, Orhan et al., 2005) και τη χρήση ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα βασισμένου στο Teflon-PTFE. Η συγκριμένη διάταξη διαμορφώθηκε στα πλαίσια των ερευνητικών αναγκών της παρούσας διατριβής, για τη διερεύνηση των δυνατοτήτων και της συμπεριφοράς των επιθεμάτων PZT. Η ηλεκτρική απόκριση του αισθητήρα PZT στο μηχανικό κύμα που προκαλεί το κρουστικό φορτίο που ασκείται από το

σφυρί της δοκιμής, απεικονίζεται στο Σχήμα 1.6 για τις περιπτώσεις ενός δομικά «Υγιούς» στοιχείου και ενός με τεχνητές βλάβες.

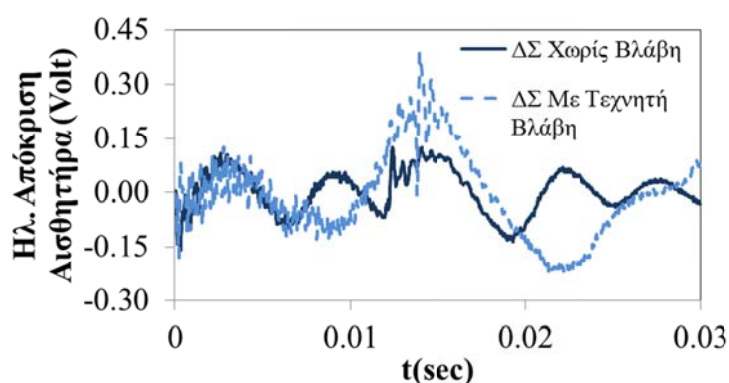


**Σχήμα 1.5:** Αξιολόγηση τεχνητής βλάβης δομικού στοιχείου σκυροδέματος με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων (Impact-Echo Method).

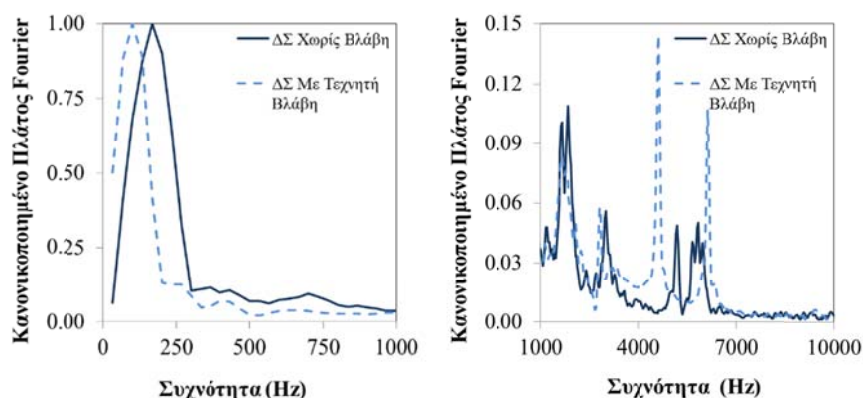
Οι μέθοδοι ενεργητικού ΜΚΕ στις οποίες εμπλέκονται πιεζοηλεκτρικοί διεγέρτες στηρίζονται στην αξιοποίηση του αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Οι πιεζοηλεκτρικοί διεγέρτες προσαρμόζονται αντίστοιχα με τους αισθητήρες στις υπό παρακολούθηση κατασκευές και με την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης εκπέμπουν μηχανικά κύματα στο εσωτερικό της (Xu, 2009; Zagrai, 2002). Οι συχνότητες των μηχανικών κυμάτων που δύναται να εκπέμψουν είναι από 5 έως και 400 kHz. Αυτό πρακτικά για το σκυρόδεμα σημαίνει ότι τα μήκη των μηχανικών κυμάτων που θα διαδοθούν στο εσωτερικό του θα κυμαίνονται μεταξύ 10 και 400 mm, έχοντας τη δυνατότητα να αλληλεπιδράσουν τόσο με τη μικροδομή του όσο και με τα γεωμετρικά όρια του δομικού στοιχείου που εξετάζεται.

Μια αρκετά διαδεδομένη περίπτωση ενεργητικού ΜΚΕ με τη χρήση PZT είναι η αξιοποίηση των επιφανειακά προσαρμοσμένων πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων και διεγερτών, για την εκπομπή και την ανίχνευση των κυμάτων Lamb (Kim, 2011; Providakis et al., 2013a; 2013b; Sohn and Lee, 2010; Su et al., 2006; Xu, 2009; Zagrai, 2002). Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόζεται στην εκπομπή μηχανικών κυμάτων σε δομικά στοιχεία με σχετικά μικρό πάχος όπως κελύφη αεροσκαφών, ελάσματα μετάλλων, σύνθετα στρωματοειδή υλικά και πλάκες σκυροδέματος. Επειδή η ταχύτητα, και η συχνότητα των κυμάτων Lamb είναι συνάρτηση του πάχους του

δομικού στοιχείου στο οποίο διαδίδονται, τα συγκεκριμένα κύματα καλούνται καθοδηγούμενα κύματα (Guided Waves).



α)



β)

**Σχήμα 1.6:** α) Χρονο-ιστορία ηλεκτρικής απόκρισης και β) φάσμα Fourier αισθητήρα και για τις περιπτώσεις δομικού στοιχείου με και χωρίς βλάβη (Σχήμα 1.6). ΔΣ: Δομικό Στοιχείο.

Τέλος αναφέρεται η υβριδική μέθοδος των καθοδηγούμενων κυμάτων-HMA/HME (Guided Waves-EMA/EMI) (Providakis et al., 2013a; 2013b), η οποία χρησιμοποιεί τουλάχιστον δύο συσκευές PZT τοποθετημένες επιφανειακά ή ενσωματωμένες στην κατασκευή και σε απόσταση μεταξύ τους, με την μια να λειτουργεί ως γεννήτρια υψηλής ενέργειας (πλάτους) και σταθερής συχνότητας μηχανικών κυμάτων και την άλλη ως πολύ-λειτουργικός αισθητήρας/διεγέρτης γραμμικά μεταβαλλόμενης συχνότητας διεγερσης (Chirp Signal Generator). Η συγκεκριμένη μέθοδος, έναντι της απλής HMA/HME, προσφέρει το πλεονέκτημα της διεύρυνσης του χώρου και της ευαισθησίας σχετικά με την ανίχνευση βλαβών και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη περίπτωση του σκυροδέματος το οποίο εμφανίζει υψηλές τιμές απόσβεσης.



## 1.5. Στόχος διατριβής και πρωτοτυπία

Στόχος της παρούσας διατριβής είναι αφενός μεν η αναλυτική και πειραματική διερεύνηση της μηχανικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των πιεζοηλεκτρικών υλικών και των κατασκευών από σκυρόδεμα και αφετέρου δε η ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων μη καταστροφικού ελέγχου (ΜΚΕ) με την χρήση πιεζοηλεκτρικών αυτό-αισθητηρίων συσκευών. Το πιεζοηλεκτρικό υλικό που μελετήθηκε και χρησιμοποιήθηκε στις εφαρμογές που παρουσιάζονται είναι το PZT (Lead Zirconate Titanate: Οξείδιο του Μολύβδου και των Ζιρκονίου, Τιτανίου), (PI Ceramics, 2014). Η μεθοδολογία που επιλέχθηκε να εφαρμοστεί για τον μη καταστροφικό έλεγχο του σκυροδέματος βασίζεται στη πειραματική καταγραφή ή αριθμητική προσομοίωση της ηλεκτρικής απόκρισης ενός Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος (ΗΜΗΣ) στο πεδίο της συχνότητας (Providakis and Liarakos, 2010; 2011; 2014; Providakis, Liarakos and Voutetaki, 2010; Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013). Ως κύρια εργαλεία αξιολόγησης της δομικής ακεραιότητας υιοθετήθηκαν τα πειραματικώς καταγραφόμενα φάσματα απόκρισης της Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας (ΗΜΑ) και της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (ΗΜΕ) και πιο συγκεκριμένα τα πραγματικά μέρη αυτών, αγωγιμότητα και αντίσταση αντίστοιχα.

Τα μεγέθη αυτά όπως θα παρουσιαστεί στα κεφάλαια που ακολουθούν, είναι τα πλέον ευαίσθητα στις μεταβολές της μηχανικής απόκρισης των υπό μελέτη Ηλεκτρο-Μηχανικών Συστημάτων. Δεδομένου ότι ένας από τους στόχους της έρευνας ήταν η επιτυχής ενσωμάτωση των πιεζοηλεκτρικών συσκευών στη μάζα του σκυροδέματος, μια σειρά από διατάξεις αυτό-αισθητήριων συσκευών με βάση τα PZT σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν (Σχήμα 1.7). Η εμφύτευση των συγκεκριμένων συσκευών στη μάζα του σκυροδέματος συνεπάγεται την αναπόφευκτη λειτουργία τους ως τμήμα της μικροδομής του και εξαιτίας αυτού οι συγκεκριμένες διατάξεις καλούνται «ευφυή» αδρανή (Smart Aggregate-SMA), (Providakis and Liarakos, 2010). Πιο συγκεκριμένα οι στόχοι που τέθηκαν στη παρούσα έρευνα είναι οι ακόλουθοι:

- α) η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων τα οποία θα περιγράφουν την ηλεκτρομηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ των PZT και των κατασκευών από σκυρόδεμα που τα φέρουν (Κ/Φ: Κατασκευή Φορέας),

- β) η ανάπτυξη καινοτόμων και ευέλικτων μεθοδολογιών προσομοίωσης της ηλεκτρικής και της μηχανικής απόκρισης των Ηλεκτρο-Μηχανικών Συστημάτων,
- γ) η σχεδίαση κατάλληλων διατάξεων εμφύτευσης των PZT στη μάζα του σκυροδέματος,
- δ) η αξιολόγηση των προτεινόμενων από τη διεθνή βιβλιογραφία στατιστικών δεικτών και η παρουσίαση νέων μεθοδολογιών με βάση τεχνικές στατιστικού ελέγχου για την ανίχνευση και τον εντοπισμό μηχανικών βλαβών,
- ε) ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός ολοκληρωμένου ασύρματου συστήματος μη καταστροφικού ελέγχου του σκυροδέματος, με δυνατότητα μόνιμης εγκατάστασης σε μια υπό παρακολούθηση κατασκευή σκυροδέματος, το οποίο θα προσφέρει απομακρυσμένη πρόσβαση και ανάκτηση των δεδομένων της Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας ή/και της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης.

#### **1.5.1. Σχεδιασμός και ανάπτυξη «ευφυνών» αδρανών**

Στο πλαίσιο της ανάπτυξης κατάλληλων διατάξεων για την ασφαλή ενσωμάτωση των πιεζοηλεκτρικών σωμάτων στη μάζα του σκυροδέματος, δύο κύριες εφαρμογές αυτό-αισθητήριων συσκευών υλοποιήθηκαν. Οι δύο διατάξεις αναπτύχθηκαν έχοντας ως βασικά κριτήρια (Providakis, Liarakos et al., 2013; Liarakos and Providakis, 2013):

- α) την ασφαλή τοποθέτηση του εύθραυστου PZT στο πολύ πρώιμο ρευστό σκυρόδεμα και τη προστασία του κατά τη διαδικασία διάστρωσης και δόνησης,
- β) την επίτευξη της μέγιστης δυνατής μηχανικής αγωγιμότητας, για τη διασφάλιση της διαβίβασης των παραγόμενων από τα PZT μηχανικών κυμάτων, στη μάζα του σκυροδέματος με τις μικρότερες δυνατές απώλειες ενέργειας και
- γ) τη προστασία του PZT από τις θερμικές παραμορφώσεις του σκυροδέματος, τη συστολή ξήρανσης και την χημική διάβρωση από την υγρασία.

Η πρώτη διάταξη προβλέπει την ενσωμάτωση του PZT στη μάζα του σκυροδέματος, μέσω της παρασκευής ενός ευφυνούς αδρανούς με βάση την ενυδατωμένη τσιμεντόπαστα ενός συνήθους τσιμέντου Portland. Το PZT, τύπου PIC 151 (PI Ceramics, 2014), το οποίο έχει τη μορφή επιθέματος διαστάσεων

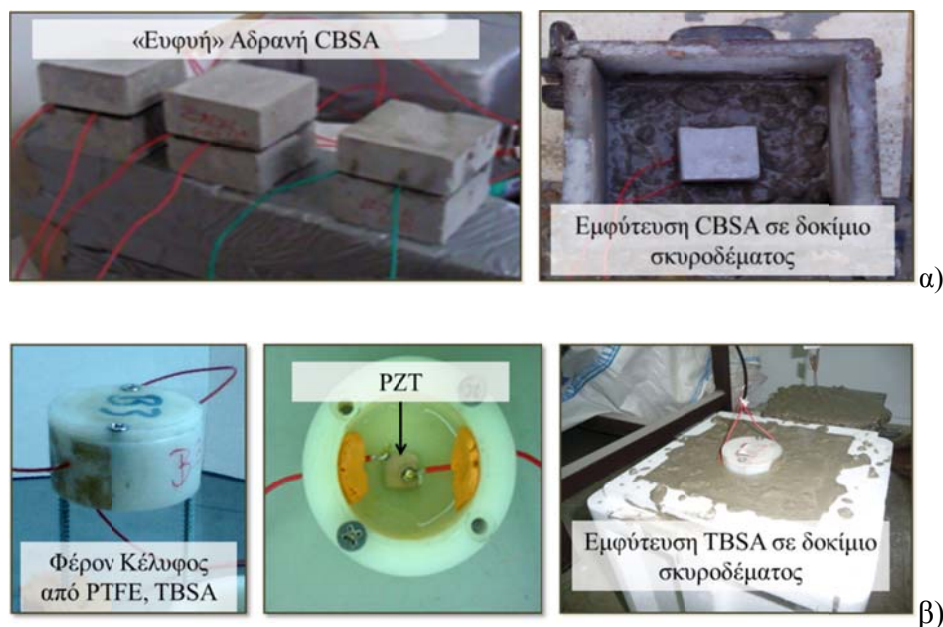


10x10x0.2mm, εμφυτεύεται σε ένα κύβο ενυδατωμένου τσιμεντοκονιάματος ακμής 50mm, αφού πρώτα προσαρμοστούν σε αυτό τα απαραίτητα ηλεκτρόδια και αδιαβροχοποιηθεί μέσω μιας εποξικής ρητίνης υψηλής μηχανικής αντοχής (Σχήμα 1.7.α), (Providakis and Liarakos, 2010). Στη συνέχεια το ευφύες αδρανές, το οποίο από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως CBSA (Cement Based Sensor-Actuator), εμφυτεύεται στη μάζα του δομικού στοιχείου κατά τη διαδικασία της σκυροδέτησης (Σχήμα 1.7.α). Τα CBSA πέραν της ικανοποίησης των βασικών κριτηρίων σχεδίασης, έχουν το σημαντικό πλεονέκτημα να επιδεικνύουν παραπλήσιες μηχανικές ιδιότητες με αυτές του σκυροδέματος, συντελώντας στην απαλοιφή ζωνών μηχανικής ετερογένειας και ανισοτροπίας καθώς και διεπιφανειών διαφορετικών υλικών.

Τα CBSA αν και προσφέρουν μια ικανοποιητική λύση εμφύτευσης των PZT στο σκυρόδεμα, εμφανίζουν τα μειονεκτήματα της αδυναμίας πρόσβασης στο PZT και ανάκτησης του «ευφυούς» αδρανούς. Δεδομένου ότι το «ευφύες» αδρανές μετά την εμφύτευση θα αποτελεί τμήμα της μικροδομής του σκυροδέματος, η διαδικασία εμφύτευσης είναι μη αναστρέψιμη. Αυτό καθιστά τα CBSA αδρανή μιας χρήσης καθώς το οποιοδήποτε σφάλμα δεν είναι δυνατό να διορθωθεί μετά την εμφύτευσης τους. Επιπλέον η αδυναμία πρόσβασης στο PZT συνεπάγεται την ύπαρξη περιορισμών σε περιπτώσεις όπου απαιτείται επιδιόρθωση των ηλεκτροδίων του PZT. Προκειμένου να ξεπεραστούν τα συγκεκριμένα μειονεκτήματα, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε ένας δεύτερος σχεδιασμός «ευφυούς» αδρανούς, ο οποίος προβλέπει την εμφύτευση του PZT στο σκυρόδεμα με τη χρήση ενός κατάλληλα διαμορφωμένου κελύφους από υλικά υψηλής μηχανικής αντοχής και χημικώς αδρανή σε σχέση με την ενυδατωμένη τσιμεντόπαστα (Σχήμα 1.7.β), (Providakis and Liarakos, 2011; 2014; Liarakos and Providakis, 2013).

Το υλικό που επιλέχθηκε για την κατασκευή του αδρανούς είναι το PTFE (Poly-Tetra-Fluoro-Ethylene ή Teflon), το οποίο αφενός μεν παρουσιάζει επαρκή αντοχή για την ασφαλή εμφύτευση του αδρανούς στη μάζα του σκυροδέματος και αφετέρου δε παρέχει τη δυνατότητα σχετικά εύκολης διαμόρφωσης του σε πληθώρα διαφορετικών σχημάτων με τη χρήση τυπικών εργαλειομηχανών (τόρνοι, φρέζες κτλ.), (Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013). Και σε αυτή την περίπτωση το πιεζοηλεκτρικό σώμα που επιλέχθηκε είναι ένα επίθεμα PZT τύπου PIC 151 (PI Ceramics, 2014). Το συγκεκριμένο «ευφύες» αδρανές από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως TBSA (Teflon Based Sensor Actuator). Το TBSA αποτελεί σημαντική καινοτομία της διατριβής καθώς ικανοποιεί όλα τα βασικά κριτήρια σχεδιασμού που

τέθηκαν παραπάνω, ενώ επιπλέον δίνει τις δυνατότητες α) της ασφαλούς ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης του και β) της πρόσβασης στο πιεζοηλεκτρικό επίθεμα για τυχόν απαιτούμενες επιδιορθώσεις και συντήρηση.



**Σχήμα 1.7:** Διατάξεις «Ευφών» Αδρανών. α) CBSA και β) TBSA (Providakis and Liarakos, 2010; 2011; Liarakos and Providakis, 2013).

### 1.5.2. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας με τη χρήση της στατιστικής ανάλυσης των ακραίων τιμών

Οι μέθοδοι ΜΚΕ που αξιοποιούν την καταγραφή των φασμάτων απόκρισης της Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας/Εμπέδησης (HMA/HME) με τη χρήση PZT, στηρίζονται στη συγκριτική ανάλυση μεταξύ της τρέχουσας ηλεκτρικής απόκρισης ενός Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος και ενός φάσματος αναφοράς το οποίο αντιπροσωπεύει την κατάσταση της δομικά «υγιούς» κατασκευής. Προκειμένου να αξιολογηθούν οι διαφοροποιήσεις που εμφανίζονται μεταξύ των φασμάτων απόκρισης ενός «υγιούς» δομικού συστήματος και δομικών συστημάτων-κατασκευών που έχουν υποστεί βλάβες, διερευνήθηκαν μια σειρά στατιστικών δεικτών βλάβης που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία (Tawie and Lee, 2010b). Οι συγκεκριμένοι δείκτες όπως είναι ο RMSD, στηρίζονται στον υπολογισμό της αριθμητικής αθροιστικής συν-διακύμανσης μεταξύ των φασμάτων αναφοράς και βλάβης, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η διαφοροποίηση της μορφής των φασμάτων απόκρισης. Η μορφή των φασμάτων απόκρισης της Ηλεκτρο-Μηχανικής

Αγωγιμότητας/Εμπέδησης χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη κορυφών (peaks) ή ασυνεχειών οι οποίες αντικατοπτρίζουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος. Ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλονται τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά είναι ενδεικτικός της διαφοροποίησης των μηχανικών ιδιοτήτων της υπό παρακολούθησης κατασκευής. Συνεπώς η εστίαση μόνο στην αριθμητική διαφοροποίηση των φασμάτων απόκρισης, σε αρκετές περιπτώσεις οδηγεί σε εσφαλμένα συμπεράσματα και ψευδή ανίχνευση βλάβης.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε μια πρωτότυπη υβριδική μεθοδολογία αξιολόγησης των μεταβολών των φασμάτων Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας/Εμπέδησης, αλλά και της μηχανικής εμπέδησης  $Z_{st}$  (DMI) της υπό παρακολούθησης κατασκευής. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία εισάγει τις εξής καινοτομίες (Providakis, Liarakos and Voutetaki, 2010; Liarakos and Providakis, 2011; 2014):

- I. Αξιοποιεί ως φάσμα αναφοράς ένα αναλυτικό μοντέλο που περιγράφει την ηλεκτρική ή τη μηχανική απόκριση του Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος αναφοράς στο πεδίο της συχνότητας και το οποίο αντιστοιχεί στην δομικά «υγιή» κατασκευή. Το συγκεκριμένο αναλυτικό μοντέλο προκύπτει από την προσομοίωση της πειραματικά καταγραφόμενης μηχανικής ή ηλεκτρικής απόκρισης του Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος αναφοράς, από μια συνάρτηση μεταφοράς με τη μέθοδο των μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων. Οι συναρτήσεις μεταφοράς που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται είτε από ρητές πολυωνυμικές συναρτήσεις της γωνιακής συχνότητας, είτε από συναρτήσεις που περιγράφουν τη δυναμική απόκριση πολυβάθμιων δυναμικών συστημάτων. Ιδιαίτερα για τη δεύτερη περίπτωση συναρτήσεων προτείνεται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής ένα καινοτόμο πολυβάθμιο δυναμικό σύστημα, το οποίο συγκροτείται από έναν πεπερασμένο αριθμό συνιστωσών μηχανικής εμπέδησης και προσομοιώνει τη συνολική μηχανική εμπέδηση της υπό παρακολούθησης κατασκευής. Η αναλυτική έκφραση της κάθε συνιστώσας μηχανικής εμπέδησης, βασίζεται στο αναλυτικό μοντέλο που έχει παρουσιαστεί από τους Providakis and Liarakos (2014).
- II. Η αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας μιας κατασκευής, στηρίζεται στον στατιστικό έλεγχο των υπολοίπων (Residuals) μεταξύ της εκτιμώμενης, σε

κάθε περίπτωση, συνάρτησης μεταφοράς του Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος αναφοράς και της τρέχουσας μετρούμενης ηλεκτρικής ή μηχανικής απόκρισης του. Τα όρια εμπιστοσύνης για το στατιστικό έλεγχο προσδιορίζονται με βάση την κανονική κατανομή αλλά και τη γενικευμένη κατανομή των Ακραίων Τιμών (Generalized Extreme Values distribution). Η έκταση και το μέγεθος των εντοπιζόμενων βλαβών θα αποτελεί αύξουσα συνάρτηση του αριθμού των υπολοίπων που θέτονται σε κάθε περίπτωση εκτός ελέγχου (Outliers) (Providakis and Liarakos, 2014).

### **1.5.3. Ολοκληρωμένο σύστημα καταγραφής, αποθήκευσης και αξιολόγηση των φασμάτων απόκρισης της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης/Αγωγιμότητας**

Πέραν της αξιοπιστίας των αυτό-αισθητήριων συσκευών και των μεθοδολογιών ανάλυσης και ερμηνείας των καταγραφόμενων μετρήσεων Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας/Εμπέδησης, εξίσου σημαντικό ζήτημα στο μη καταστροφικό έλεγχο των κατασκευών, αποτελεί η αυτοματοποίηση της διαδικασίας συλλογής δεδομένων και η δυνατότητα άμεσης και απομακρυσμένης πρόσβασης σε αυτά. Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου, η πολυπλοκότητα των σύγχρονων δομικών συστημάτων καθώς και η πολύ-λειτουργική τους χρήση επιβάλλουν το συνεχή και αδιάκοπο έλεγχο της δομικής τους ακεραιότητας, από τα πρώτα στάδια δόμησης έως και το σύνολο του χρόνου ζωής τους. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε ένα καινοτόμο ολοκληρωμένο σύστημα μη καταστροφικού ελέγχου των κατασκευών από σκυρόδεμα το οποίο ενσωματώνει:

- α) την τεχνολογία των επαναχρησιμοποιούμενων «ευφών» αδρανών, TBSA,
- β) την τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας των αισθητήρων με τις μονάδες καταγραφής δεδομένων,
- γ) το χαμηλό κόστος, και
- δ) την δυνατότητα απομακρυσμένης πρόσβασης στα δεδομένα της Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας/Εμπέδησης.

Τμήματα του προτεινόμενου συστήματος έχουν δημοσιευτεί από τους Providakis and Liarakos (2011; 2012; 2014) με την ονομασία T-WiEYE (Teflon-based Wireless integratEd monitoring sYstEm). Το συγκεκριμένο καινοτόμο σύστημα επιγραμματικά

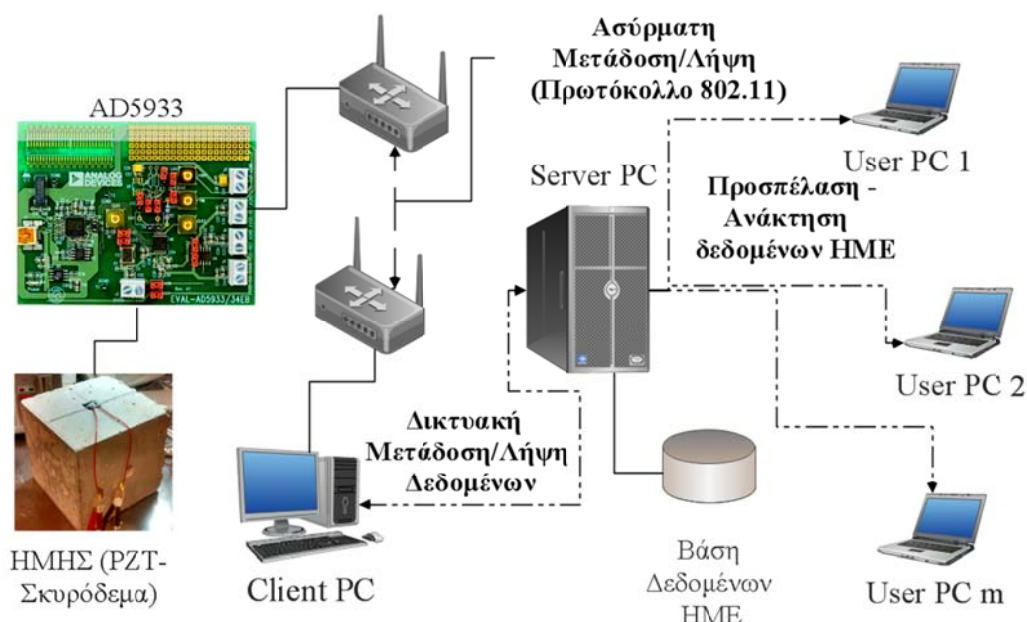
αποτελείται από τα παρακάτω επιμέρους τμήματα (Σχήμα 1.8), (Providakis and Liarakos, 2011; 2014; Liarakos and Providakis, 2013):

- Ένα ή περισσότερα TBSA, εμφυτευμένα σε διαφορετικά σημεία ενός ή περισσότερων δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα. Τα διατεταγμένα χωρικά TBSA διαμορφώνουν ένα πλέγμα παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας (Structural Health Monitoring Grid). Το κάθε TBSA λειτουργεί ως Αυτό-Αισθητήρια Συσκευή (Autosensing Device) αξιοποιώντας τόσο το ευθύ όσο και το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.
- Ένα τυπωμένο ηλεκτρονικό κύκλωμα (Printed Circuit Board-PCB) μέτρησης και καταγραφής της φασματικής απόκρισης της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης στο πεδίο της συχνότητας, για κάθε TBSA. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής επιλέχθηκε το τυπωμένο κύκλωμα AD5933 EB (Analog Devices, 2005-2007b), το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί για αντίστοιχες εφαρμογές μη καταστροφικού ελέγχου από διάφορους ερευνητές, αφενός μεν λόγω του χαμηλού του κόστους και αφετέρου δε, λόγω της ευελιξίας μεγέθους που διαθέτει σε σχέση με τα ολοκληρωμένα συστήματα καταγραφής των μεγεθών της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης.
- Λογισμικό για την διαχείριση των λειτουργιών και τη βαθμονόμηση (Calibration) του τυπωμένου κυκλώματος AD5933EB. Αρχικά για τη βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκε το πρωτότυπο λογισμικό της Analog Devices το οποίο συνοδεύει το τυπωμένο κύκλωμα AD5933EB. Το συγκεκριμένο λογισμικό έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον Visual Basic και είναι ανοικτού κώδικα (Analog Devices, 2005-2007b). Δεδομένης της ανάγκης για περαιτέρω αυτοματοποίηση της διαδικασίας μέτρησης και καταγραφής της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης, το λογισμικό τροποποιήθηκε κατάλληλα με την εισαγωγή επιπλέον εργαλείων για την αυτόματη καταγραφή και αποθήκευση των φασμάτων απόκρισης ανά τακτά χρονικά διαστήματα.
- Σύστημα ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ του κάθε τυπωμένου κυκλώματος AD5933 EB και των υπολογιστών διαχείρισης της διαδικασίας καταγραφής, λήψης και αποθήκευσης των φασμάτων απόκρισης της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης.
- Λογισμικό διαχείρισης των αποθηκευμένων φασμάτων απόκρισης της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης και καταχώρισης αυτών σε βάση δεδομένων



η οποία έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον MySQL (MySQL, 2010a). Το συγκριμένο λογισμικό αναπτύχθηκε σε Java και για την αυτόματη εκτέλεση του ενσωματώθηκε συντόμευση (.bat file) στο τροποποιημένο λογισμικό διαχείρισης του τυπωμένου κυκλώματος AD5933 EB. Οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών μεγεθών που περιγράφουν το ηλεκτρομηχανικό φάσμα απόκρισης, καταχωρούνται σε συγκεκριμένα πεδία της βάσης τα οποία είναι άμεσα συσχετισμένα με το χρόνο λήψης των μετρήσεων.

- Μονάδα Η/Υ με ρόλο διακομιστή, Server PC, στον οποίο βρίσκεται εγκατεστημένη η βάση δεδομένων και αποθηκεύονται οι μετρήσεις. Η μονάδα server επικοινωνεί με τον Η/Υ διαχείρισης του τυπωμένου κυκλώματος AD5933 EB, Client PC, μέσω τοπικού δικτύου (Local Net) ή διαδικτύου (Internet).



**Σχήμα 1.8:** Διάγραμμα ροής ολοκληρωμένου συστήματος μη καταστροφικού ελέγχου σκυροδέματος με τη χρήση «ευφών» αδρανών (Liarakos and Providakis, 2013; Providakis and Liarakos, 2014).

- Συναρτήσεις σε περιβάλλον MATLAB οι οποίες επιτρέπουν την σύνδεση ενός οποιουδήποτε υπολογιστή χρήστη, User PC, με το διακομιστή (Server PC), την προσπέλαση των καταχωρημένων δεδομένων της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης και την ανάκτηση αυτών με στόχο την μετά-επεξεργασία τους.
- Συναρτήσεις μετ-επεξεργασίας των φασμάτων απόκρισης της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης, για την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας του υπό παρακολούθηση δομικού συστήματος. Οι συγκριμένες συναρτήσεις έχουν

γραφεί σε περιβάλλον MATLAB και έχουν ως στόχο τον υπολογισμό δεικτών βλάβης με βάση τα καταγεγραμμένα φάσματα απόκρισης της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης, τον προσδιορισμό των συναρτήσεων μεταφοράς του Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος αναφοράς, καθώς και το στατιστικό έλεγχο των υπολοίπων (Residuals) με τη γενικευμένη κατανομή των ακραίων τιμών (GEV) για την εύρεση του αριθμού των τιμών που βρίσκονται εκτός των ορίων εμπιστοσύνης.

## 1.6. Συνοπτική επισκόπηση της δομής της διατριβής

Η διαμόρφωση της δομής της παρούσας διατριβής αποσκοπεί στην τεκμηριωμένη παράθεση των θεωρητικών αρχών που διέπουν τη λειτουργία των ηλεκτρομηχανικών συστημάτων και των τρόπων προσομοίωσης αυτών. Επιπλέον, γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση των εφαρμογών που αναπτύχθηκαν για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Στη συνέχεια, δίνεται ένα συνοπτικό περίγραμμα των περιεχομένων ανά κεφάλαιο.

Στο Δεύτερο Κεφάλαιο περιγράφεται η τεχνολογία των πιεζοηλεκτρικών υλικών, οι αρχές που διέπουν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και η μαθηματική προσέγγιση της καταστατικής συμπεριφοράς των συζευγμένων ηλεκτρομηχανικών συστημάτων. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, επίσης, αναπτύσσεται το αναλυτικό μοντέλο μηχανικής εμπέδησης για το σκυρόδεμα που έχει προταθεί από τους Providakis και Liarakos (2014). Τέλος, παρουσιάζονται οι διαδικασίες και οι θεωρητικές αρχές ενόργανης μέτρησης της φασματικής απόκρισης των μεγεθών της Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας/Εμπέδησης στο πεδίο των συχνοτήτων.

Το Τρίτο Κεφάλαιο εστιάζεται στη μέθοδο της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης, η οποία αποτελεί και την πιο διαδομένη πρακτική στις διαδικασίες μη καταστροφικού ελέγχου με τη χρήση PZT. Παρουσιάζονται οι πιο διαδεδομένοι στατιστικοί δείκτες βλάβης καθώς και οι μεθοδολογίες προσομοίωσης των Ηλεκτρο-Μηχανικών Συστημάτων. Στο πεδίο της προσομοίωσης παραθέτονται οι τεχνικές των μονοδιάστατων συναρτήσεων μεταφοράς και της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων. Τέλος, αναπτύσσεται η καινοτόμος μεθοδολογία αξιολόγησης της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών σκυροδέματος, η οποία διαμορφώθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής και συνδυάζει την προσομοίωση του «υγιούς» δομικού

συστήματος με κατάλληλες συναρτήσεις μεταφοράς και το στατιστικό έλεγχο των υπολοίπων.

Στο Τέταρτο Κεφάλαιο γίνεται εκτεταμένη περιγραφή του ολοκληρωμένου συστήματος T-WiEYE, το οποίο αναπτύχθηκε κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής για τον ασύρματο και απομακρυσμένο έλεγχο κατασκευών από σκυρόδεμα, με τη χρήση «ευφύων» πιεζοηλεκτρικών αδρανών. Στο Πέμπτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εφαρμογές του T-WiEYE στον μη καταστροφικό έλεγχο δομικών μελών. Στο Έκτο Κεφάλαιο παραθέτονται συνοπτικά τα συμπεράσματα της διατριβής καθώς και προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση.



# Κεφάλαιο 2

## Πιεζοκεραμικά Υλικά και Ανάλυση Ηλεκτρομηχανικών Συστημάτων

### 2.1. Τεχνολογία και καταστατική συμπεριφορά των πιεζοηλεκτρικών υλικών

Η κλιμακούμενη πολυπλοκότητα των δομικών συστημάτων σαν συνάρτηση των πολυ-επίπεδων αναγκών που έρχονται να καλύψουν, έχει αναπόφευκτα αυξήσει το κόστος κατασκευής και συντήρησης τους. Η βελτιστοποίηση των διαδικασιών εποπτείας και συντήρησης δημιούργησαν την απαίτηση σχεδιασμού συστημάτων μη καταστροφικού ελέγχου (ΜΚΕ) τα οποία α) θα είναι ευέλικτα ως προς την εγκατάσταση τους, β) θα έχουν χαμηλό κόστος και γ) θα προσφέρουν αξιόπιστα δεδομένα, τα οποία αντικατοπτρίζουν την κατάσταση δομικής ακεραιότητας μιας κατασκευής, με τη μικρότερη δυνατή αβεβαιότητα.

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά ως τμήματα συσκευών για ανίχνευση και εντοπισμό μηχανικών βλαβών, έχουν υιοθετηθεί επιτυχώς σε διαδικασίες ΜΚΕ δομικών συστημάτων τα οποία αποτελούνται τόσο από μεταλλικά στοιχεία όσο και από στοιχεία σκυροδέματος (Giurgiutiu and Rogers, 1997; Zagrai, 2002; Bhalla and Soh, 2007; Giurgiutiu, 2008; Xu, 2009; Annamdas and Radhika, 2013). Οι μέθοδοι ΜΚΕ που αξιοποιούν τα πιεζοηλεκτρικά υλικά βασίζονται στη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ενός δομικού συστήματος. Η ικανότητα των πιεζοηλεκτρικών υλικών να εμφανίζουν εναλλασσόμενη ηλεκτρική τάση όταν εξαναγκάζονται σε μηχανική ταλάντωση (ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο) και αντιστρόφως να εμφανίζουν δυναμικές μηχανικές παραμορφώσεις όταν βρεθούν υπό την επίδραση ενός

εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου (αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο), έχει αξιοποιηθεί προκειμένου να παρασκευαστούν αισθητήρια όργανα (αισθητήρες) και γεννήτριες (διεγέρτες) δυναμικής κίνησης. Επιπλέον η διττή Ηλεκτρο-Μηχανική τους συμπεριφορά έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη αυτό-αισθητήριων συσκευών (auto-sensing devices) δυναμικής κίνησης, όπου τα συστήματα παρακολούθησης ταυτόχρονα εξαναγκάζουν ένα δομικό σύστημα σε ταλάντωση και καταγράφουν τη δυναμική του απόκριση.

Ένα από τα πιο διαδεδομένα πιεζοηλεκτρικά υλικά στο πεδίο εφαρμογών του ΜΚΕ, είναι το Οξειδίο του Μολύβδου και των Ζιρκονίου, Τιτανίου-PZT (Lead Zirconate Titanate) με χημικό τύπο  $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ . Το PZT αποτελεί ένα τεχνητό υλικό το οποίο παρασκευάζεται από τη κεραμική επεξεργασία μιας κονιώδους πρώτης ύλης η οποία συνίσταται από κρυσταλλικά τεμαχίδια χημικών ενώσεων του οξυγόνου με τα μέταλλα Μόλυβδο (Pb), Ζιρκόνιο (Zr), Τιτάνιο (Ti) και σε κάποιες περιπτώσεις Λανθάνιο (La), (Giurgiutiu, 2008). Λόγω της στερεοχημικής δομής τους, τα PZT και γενικότερα τα κεραμικά πιεζοηλεκτρικά υλικά, χαρακτηρίζονται και ως Περοβσκίτες (Giurgiutiu, 2008; PI Ceramics, 2014). Ο Περοβσκίτης είναι ένα ορυκτό οξείδιο του ασβεστίου και του τιτανίου με χημικό τύπο  $\text{CaTiO}_3$  το οποίο κρυσταλλώνεται στο ρομβικό σύστημα. Ως περοβσκιτική κρυσταλλική δομή ορίζεται εκείνη που προσεγγίζει τη χαρακτηριστική ρομβοειδή δομή του ομώνυμου υλικού (Σχήμα 2.α.). Λόγω της κονιώδους μορφής της πρώτης ύλης των οξειδίων, τα πιεζοκεραμικά υλικά είναι δυνατό χυτευθούν σε διάφορα σχήματα και μεγέθη. Η δυνατότητα αυτή συγκαταλέγεται, πέραν του χαμηλού κόστους, στα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα φυσικά πιεζοηλεκτρικά υλικά όπως είναι ο χαλαζίας. Ο χαλαζίας ( $\text{SiO}_2$ ) λόγω της κανονικής του κρυσταλλικής γεωμετρίας είναι αρκετά δύσκολο ή και αδύνατο σε αρκετές περιπτώσεις, να διαμορφωθεί σε μεγάλο εύρος διαφορετικών σχημάτων και μεγεθών.

Η παρασκευή του PZT, αλλά και του έτερου αρκετά διαδεδομένου πιεζοκεραμικού υλικού, Οξειδίου του Βαρίου και του Τιτανίου ( $\text{BaTiO}_3$ ), υλοποιείται σύμφωνα με τα ακόλουθα γενικά βήματα (Giurgiutiu, 2008; PI Ceramics, 2014; Sirohi and Chopra, 2000; Cao and Randal, 1996; Panda et al., 2012; Nguyen et al., 2014; Fraden, 2004; Βουτετάκη, 2009; Hooker, 1998):

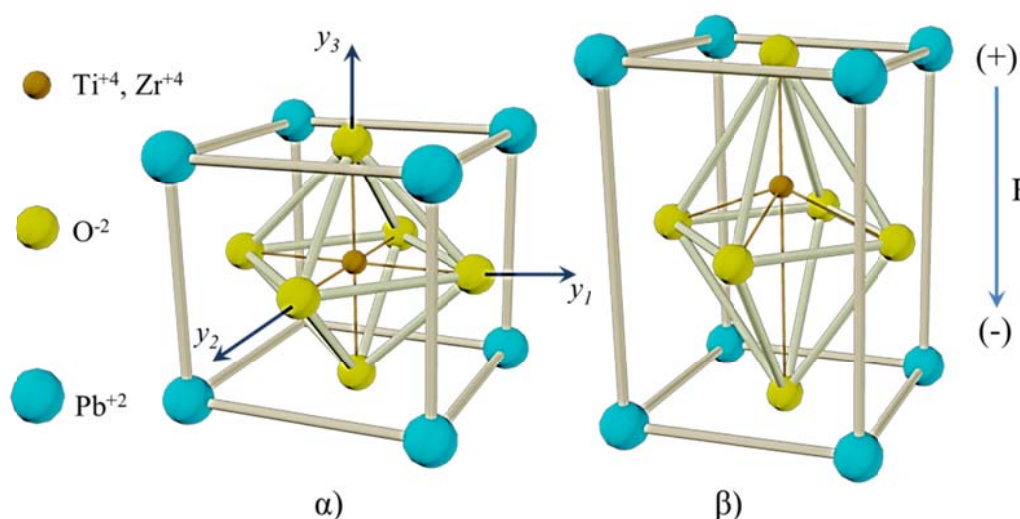
- Θραύση και λειοτρίβιση (άλεσμα λεπτόκοκκων υλικών) του μίγματος των οξειδίων Μολύβδου, Τιτανίου και Ζιρκονίου σε συγκεκριμένη κοκκομετρία

(0.2-15 $\mu\text{m}$ ) (Cao and Randal, 1996). Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η τάξη μεγέθους των κόκκων του μίγματος, αναφέρεται ότι η ασβεστολιθική παιπάλη των αδρανών υλικών του σκυροδέματος κυμαίνεται σε μεγέθη μικρότερα των 74 $\mu\text{m}$ .

- Ομογενοποίηση της κόνεως των οξειδίων και ανάμιξη της με οργανικούς διαλύτες και διαλύματα συνδετικής ύλης, σε θερμοκρασίες 800-1000°C και υψηλή πίεση (Giurgiutiu, 2008; Panda et al., 2012; Nguyen et al., 2014).
- Αναθέρμανση του μίγματος οξειδίων-διαλυτών-συνδετικής ύλης προκειμένου να αποκτήσει κρυσταλλική δομή σε θερμοκρασίες μεταξύ 1000-1300°C.
- Διαμόρφωση του κρυσταλλικού υλικού σε σώμα συγκεκριμένου σχήματος και μεγέθους, με κοπή και λείανση.

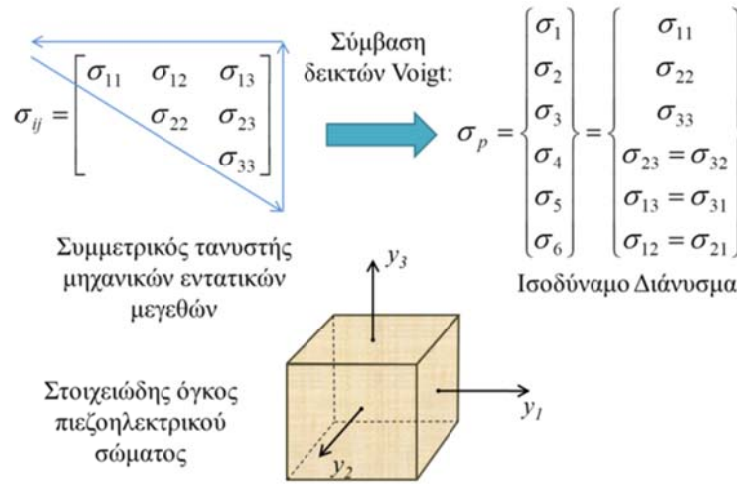
Μετά το πέρας της παραπάνω διαδικασίας έχει παρασκευαστεί ένα κεραμικό υλικό με κρυστάλλους συμμετρικής δομής περοβσκίτη, όπως αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1.α. Στη συγκεκριμένη περοβσκιτική δομή τα κατιόντα του μολύβδου βρίσκονται διατεταγμένα στις κορυφές ενός νοητού κύβου, ο οποίος αναπτύσσεται γύρω από ένα συμμετρικό οκτάεδρο, στου οποίου τις κορυφές βρίσκονται τα ανιόντα του οξυγόνου (Giurgiutiu, 2008). Στο κέντρο της όλης δομής βρίσκεται ένα κατιόν είτε Ζirkονίου είτε Τιτανίου το οποίο φέρει σημαντικά μεγαλύτερο φορτίο από τα ιόντα μολύβδου. Το συγκεκριμένο υλικό δεν έχει πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες, διότι λόγω της κρυσταλλικής συμμετρίας δεν προκύπτει ανισοκατανομή ηλεκτρικών φορτίων στο εσωτερικό των κρυστάλλων. Η φάση αυτή του υλικού χαρακτηρίζεται ως Παραηλεκτρική (Paraelectric). Ψύχοντας σταδιακά το υλικό σε θερμοκρασίες κατάντη μικρότερες από τη θερμοκρασία Curie  $T_c$  (Hooker, 1998), η οποία για τα PZT κυμαίνεται μεταξύ 250 και 400 °C (Giurgiutiu, 2008; PI Ceramics, 2014), το κατιόν του Ζirkονίου ή Τιτανίου μετατοπίζεται από τη συμμετρική δομή μετατρέποντας τον περοβσκιτικό κρύσταλλο σε ηλεκτρικό δίπολο (Σχήμα 2.1.β). Η φάση αυτή του υλικού καλείται Σιδηροηλεκτρική (Ferroelectric). Οι διπολικοί παραμορφωμένοι κρύσταλλοι βρίσκονται στη μάζα του κεραμικού υλικού κατανεμημένοι σε τυχαίους προσανατολισμούς, δίνοντας μακροσκοπικά μια κατάσταση μηδενικής πολικότητας. Τοποθετώντας το υλικό σε ένα λουτρό πυριτικού διαλύματος πετρελαίου (silicon oil bath) (Giurgiutiu, 2008; Βουτετάκη, 2009), και εφαρμόζοντας ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο της τάξεως των 1-3kV/mm, οι διπολικοί κρύσταλλοι προσανατολίζονται στη διεύθυνση του πεδίου (Giurgiutiu, 2008).

Αφαιρώντας το ηλεκτρικό πεδίο τα δίπολα που βρίσκονται στην κοντινή περιοχή των δυναμικών του γραμμών, παραμένουν μερικώς προσανατολισμένα δίνοντας στο υλικό μακροσκοπική πολικότητα. Από το σημείο αυτό και μετά το υλικό έχει αποκτήσει πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες κατά τη διεύθυνση πόλωσης του. Μετά την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας, στις επιφάνειες του κεραμικού σώματος που βρίσκονται κάθετα στη διεύθυνση πόλωσης, τοποθετούνται μεταλλικές στρωματοειδείς επικαλύψεις διαμορφώνοντας το πιεζοηλεκτρικό σώμα σε ένα διηλεκτρικό στοιχείο. Ως τέτοιο το πιεζοηλεκτρικό σώμα έχει πλέον την ικανότητα να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια, όταν σε αυτό εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο και μέρος αυτής να τη μετασχηματίζει σε μηχανική εμφανίζοντας παραμόρφωση (αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο).



**Σχήμα 2.1:** α) Συμμετρική Περοβσκιτική δομή (Παραηλεκτρική φάση  $T > T_c$ ). β) Πολωμένος κρύσταλλος (Σιδηροηλεκτρική φάση,  $T < T_c$ ).

Δύο σημεία σχετικά με τη ηλεκτρομηχανική συμπεριφορά των πιεζοηλεκτρικών υλικών τα οποία έχουν μεγάλη σημασία στις εφαρμογές, είναι η θερμοκρασία Curie και η διεύθυνση πόλωσης του υλικού. Η θερμοκρασία Curie αποτελεί ένα κρίσιμο φυσικό όριο για την πολικότητα του υλικού καθώς εάν αυτό θερμανθεί σε θερμοκρασίες υψηλότερες από το συγκεκριμένο όριο, επιστέφει στην παραηλεκτρική φάση χάνοντας την πολικότητα του και κατά συνέπεια τις πιεζοηλεκτρικές του ιδιότητες. Η πολικότητα από την άλλη πλευρά υποδεικνύει την διεύθυνση κατά την οποία η εφαρμογή ενός εναλλασσόμενου ηλεκτρικού πεδίου εξωθεί το πιεζοηλεκτρικό σώμα σε ταλάντωση.



**Σχήμα 2.2:** Ισοδύναμη έκφραση συμμετρικού μητρώου ως διάνυσμα σύμφωνα με τη σύμβαση δεικτών Voigt.

Η καταστατική συμπεριφορά των πιεζοηλεκτρικών υλικών περιγράφεται από τις εξισώσεις που συσχετίζουν τις μηχανικές παραμορφώσεις με το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο διέγερσης του υλικού (αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο). Χρησιμοποιώντας την τανυστική έκφραση των διανυσματικών μεγεθών και την σύμβαση δεικτών Voigt (Σχήμα 2.2) οι καταστατικές εξισώσεις παραμόρφωσης-φορτίου γράφονται (Giurgiutiu, 2008):

$$S_p = s_{pq} T_q + d_{jp}^T E_j \quad (2.1.a)$$

$$D_i = d_{iq} T_q + \varepsilon_{ii} E_i \quad (2.1.b)$$

όπου  $p, q=1:6$  οι δείκτες Voigt των διανυσμάτων μηχανικών τάσεων και παραμορφώσεων,  $i, j=1:3$  οι καρτεσιανοί δείκτες διεύθυνσης των διανυσμάτων,  $S_p$  και  $T_p$  τα διανύσματα των μηχανικών παραμορφώσεων και τάσεων αντίστοιχα,  $s_{pq}$  ο αντίστροφος πίνακας των ελαστικών σταθερών του υλικού (Compliance Matrix) (Giurgiutiu, 2008; Comsol, 2012),  $d_{jp}$  ο πιεζοηλεκτρικός συντελεστής ηλεκτρικού φορτίου-PCC (Piezoelectric Charge Coefficient) ή πιεζοηλεκτρικός συντελεστής παραμόρφωσης-PSC (Piezoelectric Strain Coefficient), ο οποίος έχει μονάδες Cb/N (Coulomb/Newton) και συσχετίζει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που εφαρμόζεται στην διεύθυνση  $y_j$  με την μηχανική παραμόρφωση  $S_p$ ,  $E_j$  (Volt/m ή V/m) το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται στη διεύθυνση  $y_j$ ,  $D_i$  (Cb/m<sup>2</sup>) η ηλεκτρική μετατόπιση (Electrical Displacement) ή επιφανειακή πυκνότητα φορτίου σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση  $y_i$  και  $\varepsilon_{ii}$  (Cb<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>/N ή Farad/m ή F/m) η διηλεκτρική σταθερά

(Dielectric Permittivity) του πιεζοηλεκτρικού υλικού. Σε αρκετές περιπτώσεις αντί της διηλεκτρικής σταθεράς δίδεται η Σχετική Διηλεκτρική Σταθερά (Relative Electric Permittivity) του πιεζοηλεκτρικού υλικού η οποία ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση (Giurgiutiu, 2008; Comsol, 2012):

$$\varepsilon_{ii}^r = \frac{\varepsilon_{ii}}{\varepsilon_0} \quad (2.2)$$

όπου  $\varepsilon_0=8.854\text{e-}12$  (F/m) η διηλεκτρική σταθερά του κενού (Vacuum Electrical Permittivity). Επειδή τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά συνήθως είναι πολωμένα σε μια συγκριμένη διεύθυνση, εμφανίζουν εγκάρσια μηχανική και ηλεκτρική ισοτροπία σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση πόλωσης. Αν υποθεθεί ότι το επίπεδο ισοτροπίας ενός πιεζοηλεκτρικού σώματος είναι το  $y_1$ - $y_2$  (Σχήμα 2.2), επαληθεύονται οι ακόλουθες ισότητες μεταξύ των στοιχείων των καταστατικών τανυστών:

$$\begin{aligned} s_{11} &= s_{22}, & s_{44} &= s_{55} \\ d_{31} &= d_{32}, & d_{24} &= d_{15} \\ \varepsilon_{11} &= \varepsilon_{22} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις Εξισώσεις (2.3) και αναπτύσσοντας τις Εξισώσεις (2.1) προκύπτει η μαθηματική έκφραση της καταστατικής συμπεριφοράς των εγκαρσίως ισότροπων πιεζοηλεκτρικών υλικών σε συμπαγή μορφή πινάκων ως εξής:

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{Bmatrix}}_{\mathbf{S}_{(6 \times 1)}} = \underbrace{\begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & & & \\ & s_{11} & s_{23} & & & \\ & & s_{33} & & & \\ & & & s_{44} & 0 & 0 \\ & \mathbf{O}_{3 \times 3} & & s_{44} & 0 & \\ & & & & s_{44} & 0 \\ & & & & & s_{66} \end{bmatrix}}_{\mathbf{s}_{(6 \times 6)}} \underbrace{\begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{Bmatrix}}_{\mathbf{T}_{(6 \times 1)}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{d}_{(3 \times 6)}} \underbrace{\begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix}}_{\mathbf{E}_{(3 \times 1)}} \quad (2.4.a)$$

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix}}_{\mathbf{D}_{(3 \times 1)}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{d}_{(3 \times 6)}} \underbrace{\begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{Bmatrix}}_{\mathbf{T}_{(6 \times 1)}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & & \\ & \varepsilon_{11} & \\ & & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}}_{\mathbf{\varepsilon}_{(3 \times 3)}} \underbrace{\begin{Bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix}}_{\mathbf{E}_{(3 \times 1)}} \quad (2.4.β)$$

Τα στοιχεία του αντίστροφου πίνακα των ελαστικών σταθερών ενός εγκάρσιως ισότροπου στο επίπεδο  $y_1$ - $y_2$  πιεζοηλεκτρικού υλικού, προσδιορίζονται συναρτήσει των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού σύμφωνα με τις σχέσεις (Giurgiutiu, 2008; Comsol, 2012):

$$\begin{aligned} s_{11} = s_{22} &= \frac{1}{Y^E} \\ s_{33} &= \frac{1}{Y_3^E} \\ s_{12} &= -\frac{\nu_{12}}{Y^E}, \quad s_{13} = s_{23} = -\frac{\nu_3}{Y_3^E} \\ s_{44} = s_{55} &= \frac{1}{G_{23}} = \frac{1}{G_{13}}, \quad s_{66} = \frac{1}{G_{12}} = \frac{2(\nu_{12} + 1)}{Y^E} \end{aligned} \quad (2.5)$$

όπου  $Y^E$  και  $\nu_{12} = -S_2/S_2$ , το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson αντίστοιχα εντός του επιπέδου ισοτροπίας  $y_1$ - $y_2$ ,  $Y_3^E$  και  $\nu_3 = -S_1/S_3 = -S_2/S_3$  το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson αντίστοιχα σε επίπεδα κάθετα στο επίπεδο ισοτροπίας και  $G_{23} = G_{13}$  το μέτρο διάτμησης σε επίπεδα κάθετα στο επίπεδο ισοτροπίας. Ο συντελεστής ηλεκτρομηχανικής σύζευξης ECC (Electro-Mechanical Coupled Coefficient) συσχετίζεται με τις ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες του πιεζοηλεκτρικού υλικού σύμφωνα με τη σχέση (Giurgiutiu, 2008):

$$\kappa_{jp}^{em} = \frac{|d_{jp}|}{\sqrt{s_{pp} \varepsilon_{jj}}} \quad (2.6)$$

Ο ECC στην περίπτωση της ηλεκτρικής διέγερσης ενός PZT σε διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο ισοτροπίας  $y_1$ - $y_2$ , με την εφαρμογή ενός ομοιόμορφα κατανεμημένου ηλεκτρικού πεδίου, θα δίνεται από τη σχέση (Giurgiutiu, 2008):

$$\begin{aligned} \kappa_{31}^{em} = \kappa_{32}^{em} &= \frac{|d_{31}|}{\sqrt{s_{11} \varepsilon_{33}}} \sqrt{\frac{2}{1 - \nu_{12}}} \xrightarrow{(2.5)} \\ \kappa_{31}^{em} &= |d_{31}| \sqrt{\frac{2Y^E}{(1 - \nu_{12}) \varepsilon_{33}}} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Στον Πίνακα 2.1 απεικονίζονται οι μηχανικές και διηλεκτρικές ιδιότητες ενός τυπικού PZT 5H (Βουτετάκη, 2009; Comsol, 2012), καθώς και δύο εμπορικών τύπων PZT τα οποία έχουν εφαρμοστεί ευρύτητα και επιτυχώς σε πληθώρα διαδικασιών ΜΚΕ δομικών συστημάτων (PI Ceramics, 2014).

**Πίνακας 2.1:** Φυσικές, διηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες πιεζοηλεκτρικών υλικών PZT (PI Ceramics, 2014; Comsol, 2012).

Τύπος PZT		5H	PIC 151	PIC 255
Φυσικές-διηλεκτρικές ιδιότητες				
Πυκνότητα, $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> ):		7500	7800	7800
Σχετική διηλεκτρική σταθερά, $\epsilon'_{11} = \epsilon'_{22}$		3100	1980	1650
$\epsilon'_{jj} = \epsilon_{jj} / \epsilon_0^{(1)}$ $\epsilon'_{33}$		3400	2400	1750
Παράγοντας ηλεκτρικών απωλειών, $\delta$ ή $\tan(\delta)$ :		0.02	0.02	0.02
Πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες				
Πιεζοηλεκτρικός συντελεστής	$d_{31}=d_{32}$	-274	-210	-180
παραμόρφωσης ή φορτίου, $d_{jp}^{(2)}$	$d_{33}$	593	500	400
(Cb/N)x10 <sup>-12</sup> :		$d_{15}$	-	550
Συντελεστής Ηλεκτρό-Μηχανικής	$\kappa_{31}^{em} = \kappa_{32}^{em}$	0.46	0.41	0.37
	$\kappa_{33}^{em}$	0.89	0.79	0.71
	$\kappa_{15}^{em}$	0.85	0.85	0.69
Μηχανικές ιδιότητες				
Μέτρο Ελαστικότητας, (Pa)x10 <sup>9</sup> :	$Y^E$	60.6	66.7	62.5
	$Y_3^E$	48.3	52.6	48.3
Λόγος Poisson:	$\nu_{12}$	0.29	0.34	0.34
	$\nu_3$	0.40	0.34	0.34
Συντελεστής Μηχανικών απωλειών, $n=2\zeta^{(3)}$ :		0.0125	0.01	0.0123

(1)  $\epsilon_0=8.854\text{e-}12$  (F/m): Διηλεκτρική Σταθερά του κενού(2)  $j=1:3$  (Καρτεσιανοί Δείκτες),  $p=1:6$  (Δείκτες Voigt)(3)  $\zeta$ : Λόγος απόσβεσης μηχανικής ενέργειας υλικού(Chopra, 1995)

## 2.2. Το θεμελιώδες μονοδιάστατο πρόβλημα του μηχανικά αδέσμευτου πιεζοηλεκτρικού στοιχείου

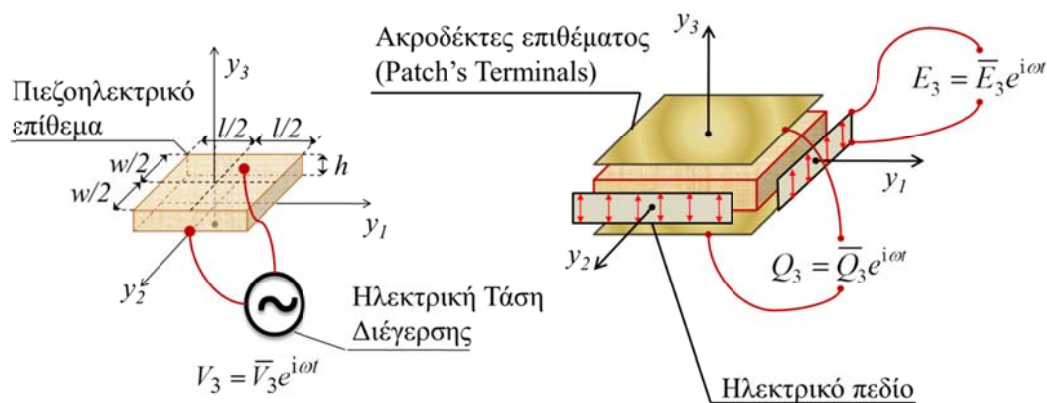
Τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά όπως έχει αναφερθεί είναι δυνατό να διαμορφωθούν σε ένα μεγάλο εύρος γεωμετρικών σχημάτων και διαστάσεων. Πολύ διαδεδομένα στις εφαρμογές ΜΚΕ είναι τα πιεζοκεραμικά επίπεδα επιθέματα PZT (PZT plane patches, Σχήμα 2.3). Τα συγκεκριμένα επιθέματα αποτελούν επίπεδα σώματα των οποίων η



επιφάνεια κυμαίνεται μεταξύ  $5\text{mm}^2$  έως και  $20\text{cm}^2$  και το πάχος από  $0.2$  έως  $20\text{mm}$  (PI Ceramics, 2014; Annamdas and Radhika, 2013). Τα σχήματα στα οποία συναντούνται είναι δισκοειδή, δακτυλιοειδή και ορθογώνια παραλληλεπίπεδα. Η διεύθυνση πόλωσης των επιθεμάτων PZT είναι κάθετη στο επίπεδο ανάπτυξης τους και οι εξωτερικές τους επιφάνειες είναι καλυμμένες με μια λεπτή μεταλλική ταινία υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Οι μεταλλικές επικαλύψεις καλούνται ακροδέκτες του επιθέματος (Patches Terminals) και η παρουσία τους τα καθιστά διηλεκτρικά στοιχεία. Τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα PZT όταν συμμετέχουν στη δομή ενός ηλεκτρικού κυκλώματος ως διηλεκτρικά στοιχεία, εμφανίζουν χωρητική συμπεριφορά (Capacitor, Πυκνωτής), (Zagrai, 2002). Η ηλεκτρική χωρητικότητα (Electrical Capacitance) ενός επιθέματος PZT, στη διεύθυνση πόλωσης και υπό συνθήκες εφαρμοζόμενης συνεχούς ηλεκτρικής τάσης (Στατικές ηλεκτρικές συνθήκες—Static Electrical Conditions), προσδιορίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$C_3^o = \frac{\epsilon_{33} A_{pzt}}{h} = \epsilon_{33} \frac{wl}{h} \quad (2.8)$$

όπου  $C_3^o$  και  $\epsilon_{33}$ , η στατική χωρητικότητα και η διηλεκτρική σταθερά του PZT στη διεύθυνση πόλωσης,  $A_{pzt}$  η επιφάνεια του επιθέματος (κάθετα στη διεύθυνση πόλωσης) και  $h$  το πάχος του επιθέματος (παράλληλα με τη διεύθυνση πόλωσης).



Σχήμα 2.3: Πιεζοηλεκτρικό επίθεμα PZT.

Στο πλαίσιο διερεύνησης της ηλεκτρομηχανικής συμπεριφορά ενός επιθέματος PZT ορίζεται το πιεζοκεραμικό σώμα του Σχήματος 2.3. Το συγκριμένο επίθεμα έχει τη μορφή ενός επίπεδου σώματος ( $y_1$ - $y_2$ ) και είναι πολωμένο σε διεύθυνση κάθετη ( $y_3$ ) στο επίπεδο αυτό. Εάν υποτεθεί ότι στους ακροδέκτες του PZT εφαρμόζεται ένα

ηλεκτρικό πεδίο μέσω μιας αρμονικά μεταβαλλόμενης ηλεκτρικής τάσης, ομοιόμορφα κατανεμημένης, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίο περιγράφεται από την σχέση:

$$E_3 = \bar{E}_3 e^{i\omega t} = \frac{\bar{V}_3}{h} e^{i\omega t} \quad (2.9)$$

όπου  $\bar{E}_3$  (V/m) και  $\bar{V}_3$  (V) τα πλάτη της εντάσεως και της διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού του ηλεκτρικού πεδίου αντίστοιχα,  $i=\sqrt{-1}$  και  $\omega$  (rad/s) η γωνιακή συχνότητα διέγερσης του PZT. Δεδομένης της εγκαρσίως ισότροπης ηλεκτρομηχανικής συμπεριφοράς του PZT οι καταστατικές Εξισώσεις (2.4) για τη θεώρηση επίπεδης τάσης ( $T_3=0$ ) γράφονται:

$$\bar{S}_1 = \frac{1}{\bar{Y}^E} (\bar{T}_1 - \nu_{12} \bar{T}_2) + d_{31} \bar{E}_3 \quad (2.10.\alpha)$$

$$\bar{S}_2 = \frac{1}{\bar{Y}^E} (\bar{T}_2 - \nu_{12} \bar{T}_1) + d_{31} \bar{E}_3 \quad (2.10.\beta)$$

$$\bar{S}_3 = -\frac{\nu_3}{\bar{Y}_3^E} (\bar{T}_1 + \bar{T}_2) + d_{33} \bar{E}_3 \quad (2.10.\gamma)$$

$$\bar{S}_6 = \frac{1}{G_{12}} \bar{T}_6 \quad (2.10.\delta)$$

$$\bar{D}_3 = d_{31} (\bar{T}_1 + \bar{T}_2) + \bar{\epsilon}_{33} \bar{E}_3 \quad (2.10.\epsilon)$$

όπου  $\bar{Y}^E = Y^E (1 + i n_{pzt})$  και  $n_{pzt}$ , το μιγαδικό μέτρο ελαστικότητας και ο συντελεστής μηχανικών απωλειών του PZT στο επίπεδο ισοτροπίας  $y_1$ - $y_2$  αντίστοιχα και  $\bar{\epsilon}_{33} = \epsilon_{33} (1 - i\delta)$  και  $\delta$ , η μιγαδική διηλεκτρική σταθερά και ο συντελεστής ηλεκτρικών απωλειών του PZT στη διεύθυνση πόλωσης αντίστοιχα. Από τις Εξισώσεις (2.10.α) και (2.10.β) προκύπτει ότι:

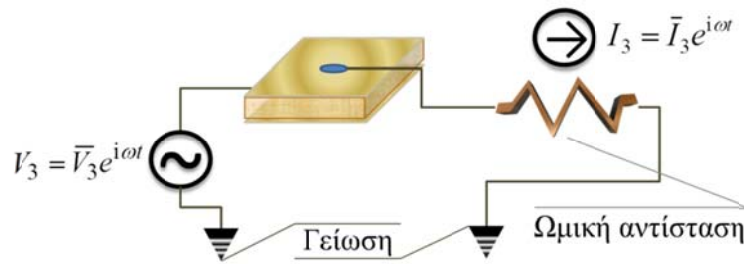
$$\bar{T}_1 + \bar{T}_2 = \frac{\bar{Y}^E}{(1 - \nu_{12})} (\bar{S}_1 + \bar{S}_2 - 2d_{31} \bar{E}_3) \quad (2.11)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την Εξίσωση (2.11), η εξίσωση της ηλεκτρικής μετατόπισης γράφεται:

$$\bar{D}_3 = \frac{d_{31}\bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})}(\bar{S}_1 + \bar{S}_2) + \left[ \bar{\varepsilon}_{33} - \frac{2d_{31}^2\bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \right] \bar{E}_3 \quad (2.12)$$

Εφόσον το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα αποτελεί διηλεκτρικό στοιχείο, στις επιφάνειες που εφαρμόζεται το ηλεκτρικό πεδίο θα συγκεντρωθεί ηλεκτρικό φορτίο εναλλασσόμενης πολικότητας το οποίο θα περιγράφεται από μια επίσης αρμονική συνάρτηση της μορφής  $Q_3 = \bar{Q}_3 e^{i\omega t}$ . Η ηλεκτρική μετατόπιση του PZT συνδέεται εξορισμού με το εναλλασσόμενο πολικότητας φορτίο σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q_3 = \int_{A_{pzt}} D_3 dA \Rightarrow \bar{Q}_3 = \int_{A_{pzt}} \bar{D}_3 dA \quad (2.13)$$



**Σχήμα 2.4:** Ηλεκτρικό κύκλωμα PZT και ωμικής αντίστασης εν σειρά.

Εάν το επίθεμα PZT συνδεθεί εν σειρά με μια ωμική αντίσταση όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4, το εναλλασσόμενο ρεύμα που θα διαρρέει την αντίσταση προκύπτει εξορισμού από τη σχέση:

$$I_3 = \frac{dQ_3}{dt} = i\omega Q_3 \Rightarrow \quad (2.13)$$

$$\bar{I}_3 = i\omega \bar{Q}_3 = i\omega \int_{A_{pzt}} \bar{D}_3 dA \quad (2.14)$$

Με αντικατάσταση του πλάτους της ηλεκτρικής μετατόπισης (Εξίσωση 2.12) στην Εξίσωση (2.14), το πλάτος του ηλεκτρικού ρεύματος γράφεται:

$$\bar{I}_3 = i\omega \frac{d_{31}\bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \int_{A_{pzt}} (\bar{S}_1 + \bar{S}_2) dA + i\omega \left[ \bar{\varepsilon}_{33} - \frac{2d_{31}^2\bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \right] \int_{A_{pzt}} \bar{E}_3 dA \Rightarrow \quad (2.9)$$

$$\bar{I}_3 = i\omega \frac{d_{31}\bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \int_{-w/2}^{w/2} \int_{-l/2}^{l/2} (\bar{S}_1 + \bar{S}_2) dy_1 dy_2 + i\omega \frac{wl}{h} \left[ \bar{\epsilon}_{33} - \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \right] \bar{V}_3 \quad (2.15)$$

όπου  $w$  και  $l$  οι διαστάσεις της επιφάνειας του PZT και  $h$  το πάχος του.

Οι μηχανικές παραμορφώσεις του PZT είναι δυνατό να προσδιοριστούν από τις αντίστοιχες συναρτήσεις που περιγράφουν τη μετατόπιση του επιθέματος στο επίπεδο ισοτροπίας  $y_1$ - $y_2$ . Για να εξαχθούν οι συναρτήσεις των εντός επιπέδου μετατοπίσεων, χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις της διάδοσης των μηχανικών κυμάτων, οι οποίες για θεώρηση επίπεδης τάσης γράφονται (Kramer, 1996):

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{11}}{\partial y_1} + \frac{\partial T_{21}}{\partial y_2} &= \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \\ \frac{\partial T_{12}}{\partial y_1} + \frac{\partial T_{22}}{\partial y_2} &= \rho \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.16)$$

όπου  $T_{ij}$  οι συνιστώσες του τανυστή των μηχανικών τάσεων,  $i,j=1:2$  οι καρτεσιανοί δείκτες διευθύνσεων,  $\rho$  η πυκνότητα του PZT,  $u_1$  και  $u_2$  οι μετατοπίσεις κατά τις διευθύνσεις  $y_1$  και  $y_2$  αντίστοιχα. Δεδομένου ότι α) στη περίπτωση ενός ελεύθερου μηχανικά PZT η επιβολή ηλεκτρικού πεδίου στη διεύθυνση πόλωσης, δεν έχει καμία επίδραση στις ασκούμενες διατμητικές τάσεις (Εξίσωση 2.10.δ) και β) οι εντός επιπέδου διατμητικές τάσεις δεν εμπλέκονται σε καμία από τις καταστατικές Εξισώσεις (2.10), οι κυματικές διαφορικές Εξισώσεις (2.16) μπορούν να γραφούν χρησιμοποιώντας τη σύμβαση δεικτών Voigt (Σχήμα 2.2) και τις Εξισώσεις (2.5) ως εξής:

$$\begin{aligned} \bar{Y}^E \frac{\partial S_1}{\partial y_1} &= \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad S_1 = \frac{\partial u_1}{\partial y_1} \\ \bar{Y}^E \frac{\partial S_2}{\partial y_2} &= \rho \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} \quad S_2 = \frac{\partial u_2}{\partial y_2} \end{aligned}$$

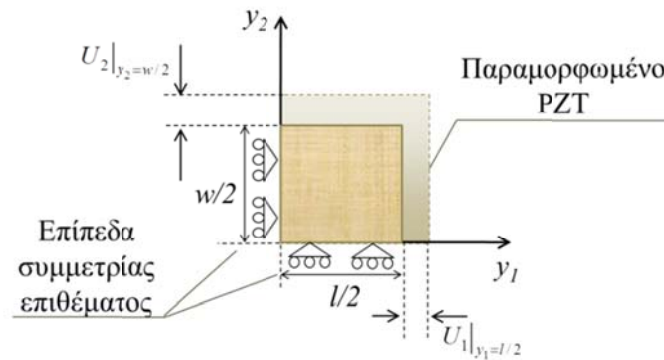
$$\begin{aligned} v_p^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial y_1^2} &= \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \\ v_p^2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial y_2^2} &= \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.17)$$

όπου  $v_p = \sqrt{\bar{Y}^E / \rho}$  η ταχύτητα του μηχανικού διαμήκους κύματος.

Η γενική λύση των διαφορικών εξισώσεων της κίνησης (Εξισώσεις 2.17), στο στάδιο της μόνιμης απόκρισης (steady state response) περιγράφεται από τη συνάρτηση:

$$u_j = \left[ \underbrace{C_{1j} \sin(\kappa y_j) + C_{2j} \cos(\kappa y_j)}_{U_j} \right] e^{i\omega t} \quad (2.18)$$

όπου  $j=1:2$  οι καρτεσιανοί δείκτες,  $C_{1j}$  και  $C_{2j}$  οι συντελεστές πλάτους των τριγωνομετρικών συναρτήσεων,  $\kappa = \omega / v_p = \omega \sqrt{\rho / \bar{Y}^E}$  και  $U_j$ , ο κυματάριθμος και η συνάρτηση πλάτους του μηχανικού κύματος αντίστοιχα.



**Σχήμα 2.5:** Μηχανικές συνοριακές συνθήκες πιεζοηλεκτρικού επιθέματος.

Λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρική συμμετρία του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος και τοποθετώντας το καρτεσιανό σύστημα αναφοράς στο κέντρο βάρους του (Σχήμα 2.5), διατυπώνονται οι ακόλουθες συνοριακές συνθήκες:

$$U_j|_{y_j=0} = 0, \quad U_1|_{y_1=l/2} = \bar{U}_1, \quad U_2|_{y_2=w/2} = \bar{U}_2 \quad (2.19)$$

Αντικαθιστώντας τις Εξισώσεις (2.19) στη συνάρτηση μετατοπίσεων (Εξίσωση 2.18) προκύπτουν οι τελικές συναρτήσεις μετατόπισης του PZT:

$$u_1 = \bar{U}_1 \sin(\kappa y_1) e^{i\omega t} \quad (2.20.a)$$

$$u_2 = \bar{U}_2 \sin(\kappa y_2) e^{i\omega t} \quad (2.20.a)$$

Από τις Εξισώσεις (2.20) προκύπτουν οι συναρτήσεις πλάτους των μηχανικών παραμορφώσεων ως εξής:

$$\bar{S}_1 = \frac{\partial U_1}{\partial y_1} = \bar{U}_1 \kappa \cos(\kappa y_1) \quad (2.21.a)$$

$$\bar{S}_2 = \frac{\partial U_2}{\partial y_2} = \bar{U}_2 \kappa \cos(\kappa y_2) \quad (2.21.a)$$

Επιστρέφοντας στην Εξίσωση (2.15) και αντικαθιστώντας τις Εξισώσεις (2.21), προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} \bar{I}_3 &= i\omega \frac{d_{31} \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \kappa \left\{ \bar{U}_1 \int_{-w/2-l/2}^{w/2-l/2} \cos(\kappa y_1) dy_1 dy_2 + \bar{U}_2 \int_{-w/2-l/2}^{w/2-l/2} \cos(\kappa y_2) dy_1 dy_2 \right\} + \dots \\ i\omega \frac{wl}{h} \left[ \bar{\varepsilon}_{33} - \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \right] \bar{V}_3 &\Rightarrow \\ \bar{I}_3 &= i\omega \frac{d_{31} \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \kappa \left\{ \frac{w}{\kappa} \bar{U}_1 [\sin(\kappa y_1)]_{-l/2}^{l/2} + \frac{l}{\kappa} \bar{U}_2 [\sin(\kappa y_2)]_{-w/2}^{w/2} \right\} + \dots \\ i\omega \frac{wl}{h} \left[ \bar{\varepsilon}_{33} - \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \right] \bar{V}_3 &\Rightarrow \\ \bar{I}_3 &= i\omega \frac{2d_{31} \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \{w \bar{U}_1 \sin(\gamma_1) + l \bar{U}_2 \sin(\gamma_2)\} + i\omega \frac{wl}{h} \left[ \bar{\varepsilon}_{33} - \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \right] \bar{V}_3 \end{aligned} \quad (2.22)$$

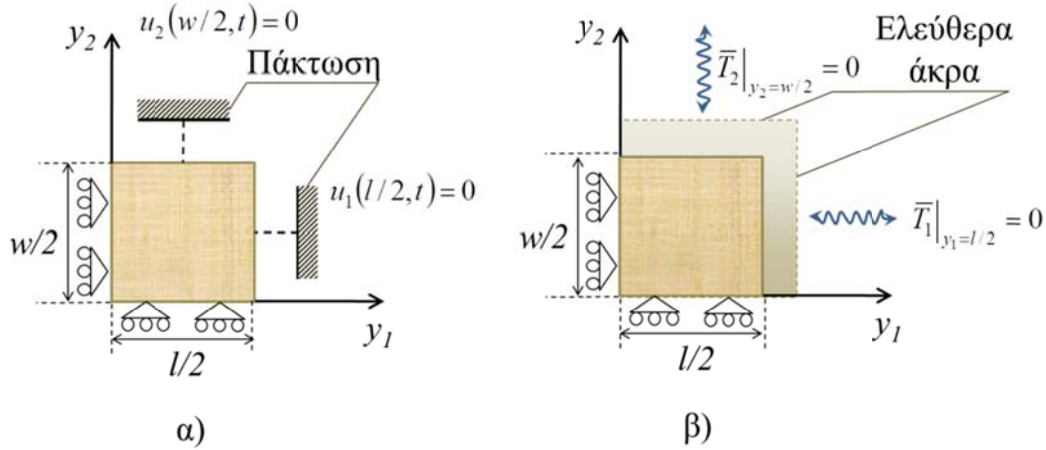
όπου  $\gamma_1 = \kappa l/2$  και  $\gamma_2 = \kappa w/2$ .

Είναι δυνατό να διακριθούν δύο ακραίες περιπτώσεις σε σχέση με τις μηχανικές συνοριακές συνθήκες του επιθέματος. Η πρώτη περίπτωση είναι εκείνη όπου οι μετατοπίσεις του PZT στο επίπεδο ισοτροπίας  $y_1$ - $y_2$ , είναι πλήρως περιορισμένες με την εφαρμογή πακτώσεων (Σχήμα 2.6.α). Στη περίπτωση αυτή η Εξίσωση (2.22) για μηδενικές μετατοπίσεις γράφεται:

$$\begin{aligned} \bar{I}_3 &= i\omega \frac{wl}{h} \left[ \bar{\varepsilon}_{33} - \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \right] \bar{V}_3 \Rightarrow \\ Y_3^{fix} &= \frac{\bar{I}_3}{\bar{V}_3} = i\omega \frac{wl}{h} \left[ \bar{\varepsilon}_{33} - \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \right] \end{aligned} \quad (2.23)$$

όπου  $Y_3^{fix}$  η Ηλεκτρό-Μηχανική Αγωγιμότητα (HMA) του πακτωμένου επιθέματος. Υπενθυμίζεται ότι HMA είναι ένας μιγαδικός αριθμός,  $Y_3 = G_3 + iB_3$ , με το

πραγματικό του μέρος να αντιπροσωπεύει την ηλεκτρική αγωγιμότητα (Conductance) και το φανταστικό την επιδεκτικότητα (Susceptance) (Giurgiutiu, 2008; Βουτετάκη, 2009).



**Σχήμα 2.6:** Επίθεμα α) πακτωμένο και β) ελεύθερο μηχανικά στο επίπεδο  $y_1$ - $y_2$ .

Η δεύτερη περίπτωση μηχανικών συνοριακών συνθηκών αντιπροσωπεύει το ελεύθερο επίθεμα PZT, το οποίο ταλαντώνεται αποκλειστικά και μόνο λόγω του ηλεκτρικού πεδίου που εφαρμόζεται σε αυτό, σαν συνέπεια του αντιστρόφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου (Σχήμα 2.6.β). Αντικαθιστώντας τις συναρτήσεις μηχανικών παραμορφώσεων (Εξισώσεις 2.21) στις καταστατικές Εξισώσεις (2.10.α) και (2.10.β) και λαμβάνοντας υπόψη ότι λόγω της μηχανικής ελευθερίας του σώματος οι συνιστώσες των τάσεων  $T_1$  και  $T_2$ , στις ακμές του επιθέματος ( $y_1=l/2$  και  $y_2=w/2$ ) είναι μηδενικές, προκύπτει ότι:

$$\bar{U}_1 = \frac{d_{31}\bar{E}_3}{\kappa \cos(\gamma_1)} \quad (2.24.α)$$

$$\bar{U}_2 = \frac{d_{31}\bar{E}_3}{\kappa \cos(\gamma_2)} \quad (2.24.α)$$

Επιστρέφοντας στην Εξίσωση (2.22) και αντικαθιστώντας τις Εξισώσεις (2.24) η εξίσωση του ηλεκτρικού ρεύματος γράφεται:

$$\bar{I}_3 = i\omega \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \left\{ \frac{w}{\kappa} \tan(\gamma_1) + \frac{l}{\kappa} \tan(\gamma_2) \right\} \bar{E}_3 + i\omega \frac{wl}{h} \left[ \bar{\epsilon}_{33} - \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \right] \bar{V}_3 \Rightarrow$$

$$\bar{I}_3 = i\omega \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \left\{ \frac{w}{\kappa} \tan(\gamma_1) + \frac{l}{\kappa} \tan(\gamma_2) \right\} \frac{\bar{V}_3}{h} + i\omega \frac{wl}{h} \left[ \bar{\varepsilon}_{33} - \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \right] \bar{V}_3 \quad (2.25)$$

Με βάση την Εξίσωση (2.25) η συνάρτηση της Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας για την περίπτωση του ελεύθερου PZT γράφεται:

$$Y_3^{free} = \frac{\bar{I}_3}{\bar{V}_3} = i\omega \frac{1}{h} \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \left\{ \frac{w}{\kappa} \tan(\gamma_1) + \frac{l}{\kappa} \tan(\gamma_2) \right\} + Y_3^{fix} \Rightarrow$$

$$Y_3^{free} = i\omega \frac{wl}{h} \frac{d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \left\{ \frac{\tan(\gamma_1)}{\gamma_1} + \frac{\tan(\gamma_2)}{\gamma_2} \right\} + Y_3^{fix} \quad (2.26)$$

Από τις τριγωνομετρικές συναρτήσεις που εμφανίζονται στην Εξίσωση (2.26) διαπιστώνεται ότι όσο τα ορίσματα  $\gamma_1$  και  $\gamma_2$  τείνουν σε ακέραια πολλαπλάσια του  $\pi/2$ , οι συναρτήσεις εφαπτομένης ( $\tan$ ) θα τείνουν στο άπειρο, με ρυθμό φθίνων σε σχέση με την αύξηση των τιμών που λαμβάνει ο συντελεστής μηχανικών απωλειών του PZT ( $n_{pzt}$ ). Η τιμή της συχνότητας που θα αντιστοιχεί στο όρισμα  $\gamma_j = m\pi/2$ , όπου  $j=1:2$ ,  $m=1:2:2M+1$  και  $M$  ακέραιος, θα αποτελεί τη συχνότητα συντονισμού της  $m$ τάξης αρμονικής. Με βάση τα παραπάνω οι συχνότητες ηλεκτρικού συντονισμού του ελεύθερου PZT θα δίνονται από τη σχέση:

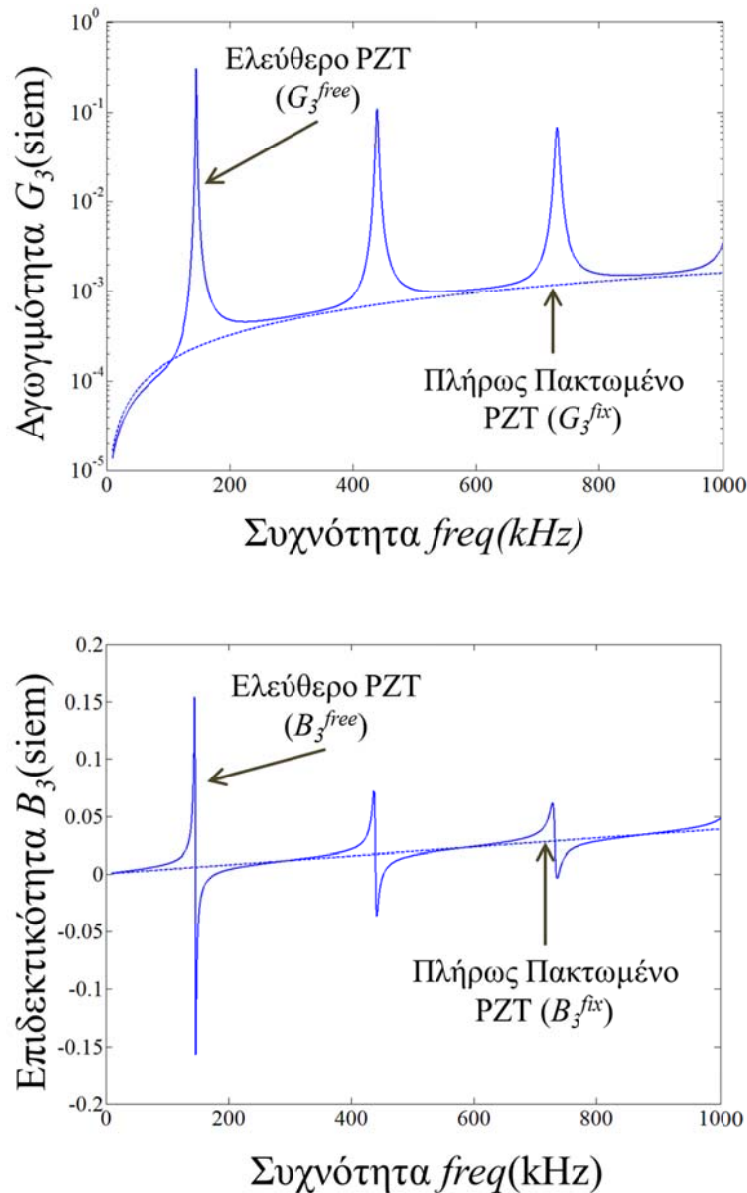
$$\gamma_j = \frac{m\pi}{2} \Rightarrow \begin{cases} freq_1^0 = \frac{m\nu_p}{2l} & j=1 \\ freq_2^0 = \frac{m\nu_p}{2w} & j=2 \end{cases} \quad (2.27)$$

Από τις Εξισώσεις (2.27) διαπιστώνεται ότι οι συχνότητες συντονισμού του επιθέματος, εξαρτώνται αποκλειστικά από τις γεωμετρικές, φυσικές και μηχανικές του ιδιότητες.

Στο Σχήμα 2.7 απεικονίζονται τα φάσματα της HMA όπως αυτά υπολογίζονται από τις Εξισώσεις 2.23 και 2.26, για τις περιπτώσεις ενός επιθέματος PZT πλήρως πακτωμένου και μηχανικά ελεύθερου αντίστοιχα. Το συγκεκριμένο επίθεμα πρόκειται για ένα εμπορικό PZT τύπου PIC 151 (Πίνακας 2.1), έχει διαστάσεις επιφανείας  $l=w=10\text{mm}$  (τετραγωνικό επίθεμα) και πάχος  $h=0.2\text{mm}$ . Οι συχνότητες σάρωσης της ηλεκτρικής του απόκρισης κυμαίνονται μεταξύ 10 και 1000 kHz. Το πραγματικό μέρος της HMA  $G_3^{free}$  (Σχήμα 2.7.α, Αγωγιμότητα), εμφανίζει ξεκάθαρες κορυφές-



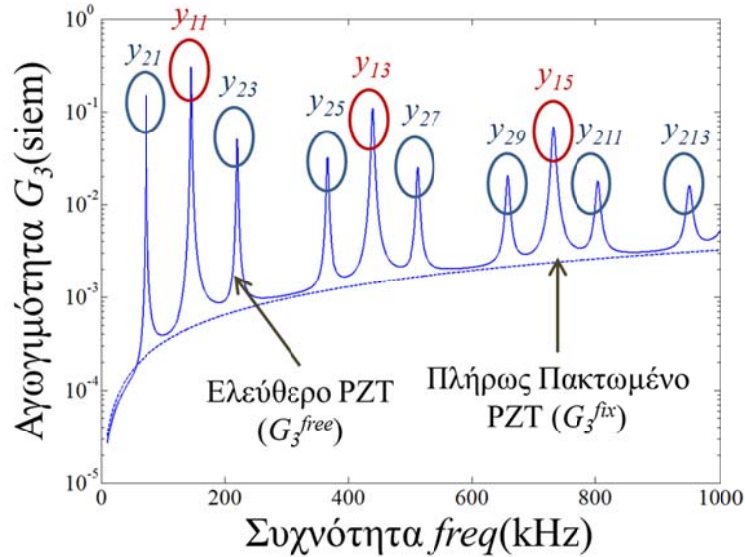
μέγιστα (peaks) στις Συχνότητες Συντονισμού (Electrical Resonant Frequencies), οι οποίες προσδιορίζονται από τις Εξισώσεις (2.27) (Πίνακας 2.2) για κάθε διεύθυνση ταλάντωσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επειδή το επίθεμα είναι τετραγωνικό οι συχνότητες συντονισμού στις δύο διευθύνσεις συμπίπτουν.



**Σχήμα 2.7:** Φάσματα Απόκρισης HMA για τις περιπτώσεις του πλήρως πακτωμένου και ελεύθερου επιθέματος PZT, τύπου PIC 151 και διαστάσεων,  $l=w=10\text{mm}$  και  $h=0.2\text{mm}$ .

Στο Σχήμα 2.8 απεικονίζεται η περίπτωση ενός επιθέματος PIC 151 μη τετραγωνικού όπου η επιφανειακή του διάσταση κατά τον άξονα  $y_2$ ,  $w$ , είναι διπλάσια της αντίστοιχης στον άξονα των  $y_1$ ,  $l=10\text{mm}$ . Η ιδιομορφή που αναφέρεται στο μηχανικό κύμα που διαδίδεται κατά τη διεύθυνση  $y_2$  παρουσιάζει αρκετά περισσότερες

αρμονικές, και άρα σημεία συντονισμού, από τις αντίστοιχες της διεύθυνσης  $y_l$ . Στο Σχήμα 2.8 οι αρμονικές της κάθε ιδιομορφής συμβολίζονται με  $y_{jm}$ , όπου  $j$  ο αριθμός της ιδιομορφής, ο οποίος ταυτίζεται με τη διεύθυνση των αξόνων διάδοσης των διαμήκων κυμάτων και  $m$  ο αριθμός της αρμονικής.



**Σχήμα 2.8:** Φασματική απόκριση αγωγιμότητας ελεύθερου και πλήρως πακτωμένου επιθέματος PIC151, διαστάσεων  $l=10\text{mm}$  και  $w=2l=20\text{mm}$ .

**Πίνακας 2.2:** Συχνότητες συντονισμού επιθεμάτων PZT, PIC151, με διαφορετική έκταση επιφανειών, για  $l=10\text{mm}$ . Αναλυτικός υπολογισμός από τις Εξισώσεις 2.27.

$m$ Αρμονική	$w=l$ $freq_1^0=freq_2^0(\text{kHz})$	$w=2l$	
		$freq_1^0(\text{kHz})$	$freq_2^0(\text{kHz})$
1	146.21	146.21	73.11
3	438.64	438.646	219.32
5	731.06	731.06	365.53
7	-	-	511.75
9	-	-	657.96
11	-	-	804.17
13	-	-	950.38

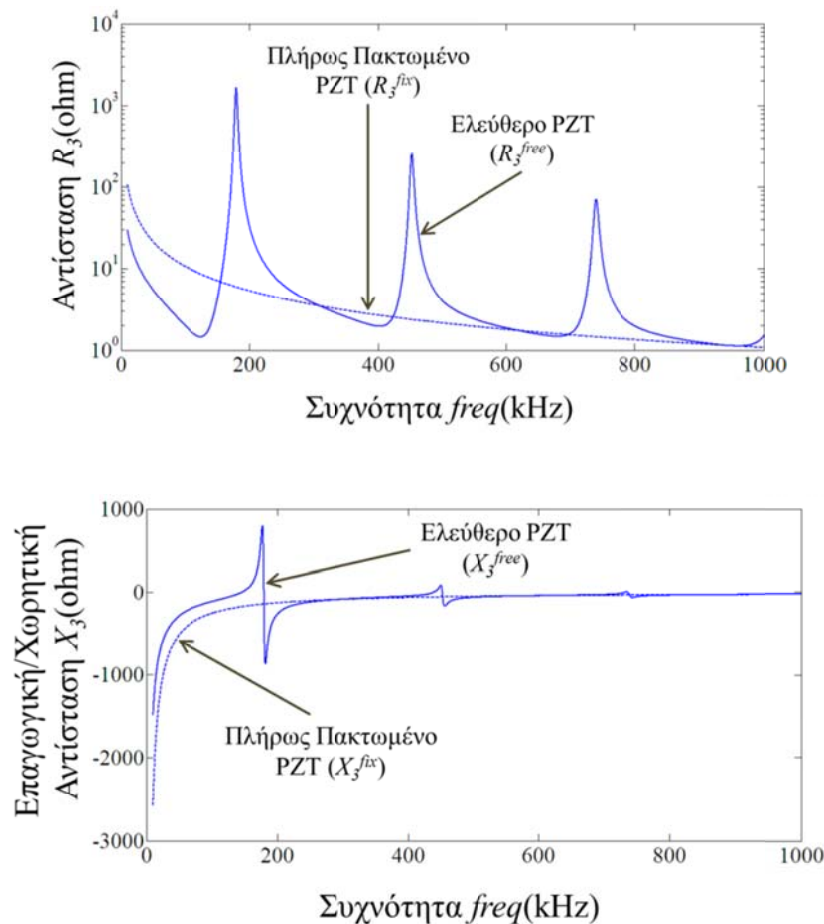
Από τη μαθηματική διερεύνηση της συχνотικής απόκρισης της HMA, είναι εύκολο να διαπιστωθεί ότι η κατανομή των κορυφών του φάσματος απόκρισης της αγωγιμότητας, εξαρτώνται αποκλειστικά από τους τριγωνομετρικούς όρους της

Εξίσωσης (2.26). Με βάση αυτή την παρατήρηση, οι συγκριμένοι όροι είναι δυνατό να διατυπωθούν σε μια ξεχωριστή συναρτησιακή έκφραση ως εξής:

$$H^{free}(\omega) = \frac{\tan(\gamma_1)}{\gamma_1} + \frac{\tan(\gamma_2)}{\gamma_2} \quad (2.28)$$

Η συνάρτηση  $H^{free}(\omega)$  είναι μια ιδιομορφική αδιάστατη συνάρτηση η οποία διαμορφώνεται μόνο από τις μηχανικές ιδιότητες του PZT και καθορίζει:

- τις συχνότητες συντονισμού, όπου το φάσμα απόκρισης της αγωγιμότητας εμφανίζει κορυφές-μέγιστα (εξίσωση 2.27),
- το πλάτος των κορυφών ως συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας και του συντελεστή μηχανικών απωλειών του PZT,
- την οξύτητα των κορυφών ως συνάρτηση του συντελεστή μηχανικών απωλειών PZT.



**Σχήμα 2.9:** Φάσματα Απόκρισης HMA για τις περιπτώσεις του πλήρως πακτωμένου και ελεύθερου επιθέματος PZT, τύπου PIC 151 και διαστάσεων,  $l=w=10\text{mm}$  και  $h=0.2\text{mm}$ .

Εναλλακτικά της HMA ή και ταυτόχρονα με αυτή, σε πολλές εφαρμογές (Providakis and Liarakos, 2010; 2011; 2014; Providakis, Liarakos and Voutetaki, 2010; Providakis, Liarakos and Kampianakis 2013), χρησιμοποιείται η Ηλεκτρο-Μηχανική Εμπειση (HME) η οποία έχει διαστάσεις ωμικής αντίστασης και προσδιορίζεται ως το αντίστροφο μέγεθος της HMA ως εξής:

$$Z_3 = \frac{1}{Y_3} = R_3 + iX_3 \quad (2.29)$$

όπου  $R_3$  το πραγματικό μέρος της HME ή αντίσταση και  $X_3$  το φανταστικό μέρος της HME ή Επαγωγική/Χωρητική Αντίσταση ή Άεργη Αντίσταση. Στο σχήμα 2.9 απεικονίζεται (αντίστοιχα με το σχήμα 2.7 της HMA) η φασματική απόκριση της HME για το ελεύθερο και το πακτωμένο πλευρικά PIC151.

### 2.3. Ηλεκτρομηχανική σύζευξη πιεζοηλεκτρικών υλικών και δομικών συστημάτων σκυροδέματος

Η συνήθης πρακτική στο ΜΚΕ των κατασκευών με τη χρήση PZT, προβλέπει την προσαρμογή των επιθεμάτων στον φέρον οργανισμό του υπό παρακολούθηση δομικού συστήματος, είτε επιφανειακά είτε με εμφύτευση στη μάζα του. Η εμφύτευση επιθεμάτων PZT είναι μια σχετικά πρόσφατη τεχνική η οποία αναπτύχθηκε ειδικά για το ΜΚΕ του σκυροδέματος (Song et al., 2008; Annamdas and Radhika, 2013). Η υπό παρακολούθηση κατασκευή η οποία φέρει το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα ή γενικότερα τη Αυτό-Αισθητήρια Πιεζοηλεκτρική Συσκευή (Giurgiutiu, 2008), από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως Κατασκευή Φορέας (Κ/Φ, Host Structure). Η υπό παρακολούθηση κατασκευή (Κ/Φ) και η αυτό-αισθητήρια πιεζοηλεκτρική συσκευή διαμορφώνουν μια νέα φυσική οντότητα η οποία καλείτε Ηλέκτρο-ΜΗχανικό Σύστημα (ΗΜΗΣ) (Σχήμα 2.10).

Από τη θεωρητική διερεύνηση της ηλεκτρομηχανικής συμπεριφοράς του επιθέματος PZT προέκυψε ότι είναι δυνατό να διακριθούν δύο ακραίες περιπτώσεις σχετικά με τις μηχανικές συνοριακές συνθήκες που δύναται να εφαρμοστούν σε αυτό. Εύλογο λοιπόν είναι να υποτεθεί ότι μεταξύ των δύο ακραίων συνθηκών, οι οποίες είναι θεωρητικές και στη πράξη είναι δυνατό απλά να προσεγγιστούν, δύναται να υπάρξει ένα πλήθος διαφορετικών ενδιάμεσων συνοριακών συνθηκών. Οι ενδιάμεσες

συνοριακές συνθήκες θα περιγράφουν τις καταστάσεις μηχανικής στήριξης που διαμορφώνονται, όταν το επίθεμα περιορίζεται πλευρικά από ένα δομικό σύστημα, το οποίο φέρει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ως προς τη δυσκαμψία, τη μάζα και την εσωτερική απόσβεση μηχανικής ενέργειας.

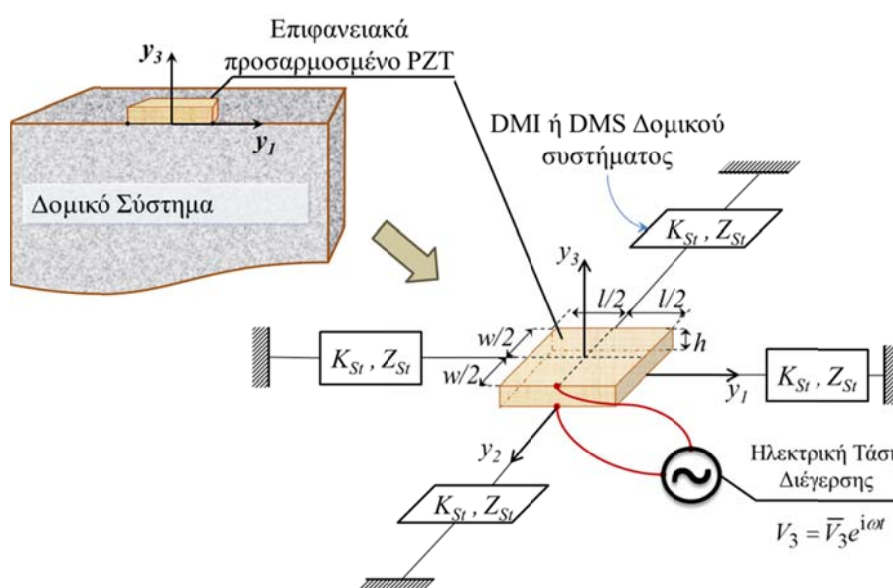
Σε αυτή ακριβώς τη περίπτωση εντάσσεται η λειτουργία των ΗΜΗΣ, όπου λόγω της προσαρμογής των επιθεμάτων PZT σε μια υπό παρακολούθηση κατασκευή, η πλευρική δυσκαμψία των στηρίξεων του δεν θα είναι ούτε άπειρη (πάκτωση), ούτε μηδενική (ελεύθερο PZT) αλλά θα λαμβάνει ενδιάμεσες τιμές. Με βάση αυτό το σκεπτικό, το οποίο θα διερευνηθεί αναλυτικά παρακάτω, και λαμβάνοντας υπόψη την αναλυτική έκφραση της HMA του ελεύθερου PZT, (Εξίσωση 2.26), η απόκριση της αγωγιμότητας για ένα οποιοδήποτε Ηλεκτρο-Μηχανικό Σύστημα (ΗΜΗΣ) είναι δυνατό να περιγραφεί από μια γενική συνάρτηση της μορφής:

$$Y_3 = i\omega \frac{wl}{h} \frac{d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1 - \nu_{12})} H(\omega) + Y_3^{fix} \quad (2.30)$$

όπου  $H(\omega)$  η ιδιομορφική συνάρτηση του συζευγμένου ΗΜΗΣ η οποία θα αντικατοπτρίζει τα δυναμικά χαρακτηριστικά τόσο του PZT όσο και της Κ/Φ. Εξορισμού λοιπόν η οποιαδήποτε μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών της Κ/Φ, με τη προϋπόθεση ότι η μηχανική απόκριση του PZT θα είναι αμετάβλητη, θα έχει άμεση επίδραση στη μορφή και τις τιμές της ιδιομορφικής συνάρτησης. Από την Εξίσωση (2.30) διαπιστώνεται ότι στη περίπτωση όπου η  $H(\omega)$  είναι μηδενική, η απόκριση της HMA ταυτίζεται με αυτή του πακτωμένου πλευρικά επιθέματος (Εξίσωση 2.23), ενώ στη περίπτωση που ταυτίζεται με την Εξίσωση (2.28) περιγράφει την ηλεκτρική απόκριση του ελεύθερου μηχανικά PZT (Εξίσωση 2.26).

Αρκετοί ερευνητές στη προσπάθεια τους να προσεγγίσουν αναλυτικά την μηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ μιας υπό παρακολούθηση κατασκευής και ενός πιεζοηλεκτρικού επιθέματος PZT, έχουν προτείνει διάφορα θεωρητικά αναλυτικά μοντέλα HMA των οποίων οι ιδιομορφικές συναρτήσεις βασίζονται είτε στην Δυναμική Μηχανική Εμπέδηση (Dynamic Mechanical Impedance-DMI),  $Z_{Si}$ , είτε στη Δυναμική Μηχανική Δυσκαμψία (Dynamic Mechanical Stiffness-DMS),  $K_{Si}$  της υπό παρακολούθησης κατασκευής (Σχήμα 2.10), (Liang et al., 1994a; 1994b; 1996; Zhou et al., 1995; 1996; Giurgiutiu and Rogers, 1997; 1999; Bhalla and Soh, 2004a; 2004b; 2004c; 2007; 2008; Giurgiutiu, 2008; Providakis and Liarakos, 2014). Η πλειοψηφία

των παραπάνω αναλυτικών προσεγγίσεων αναφέρονται σε ΗΜΗΣ των οποίων η υπό παρακολούθηση κατασκευή (Κ/Φ) αποτελεί συνήθως ένα δομικό σύστημα από μεταλλικά στοιχεία ή μεταλλικά κελύφη. Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε μια **νέα αναλυτική προσέγγιση** η οποία είναι προσαρμοσμένη στη φύση και τις ιδιαίτερες μηχανικές συνθήκες που συναντούνται στις κατασκευές σκυροδέματος. Η αναλυτική έκφραση της DMI διατυπώνεται με βάση τη διάδοση των εγκαρσίων μηχανικών κυμάτων, τα οποία παράγονται από την οριζόντια ταλάντωση ενός PZT που έχει επικολληθεί επιφανειακά σε ένα δομικό στοιχείο σκυροδέματος (Providakis and Liarakos, 2014).



**Σχήμα 2.10:** Επίθεμα PZT προσαρμοσμένο σε ένα υπό παρακολούθηση δομικό σύστημα (Κ/Φ) ισότροπης Δυναμικής Δυσκαμψίας  $K_{St}$  και Μηχανικής Εμπέδησης  $Z_{St}$ .

### 2.3.1. Δυναμική Δυσκαμψία και Μηχανική Εμπέδηση

Προκειμένου να δοθεί παραστατικά η φύση των μεγεθών της μηχανικής εμπέδησης (DMI) και της δυναμικής δυσκαμψίας (DMS) και να διατυπωθεί μια αναλυτική έκφραση αυτών, ορίζεται το απλό συνεχές δομικό σύστημα του Σχήματος 2.11. Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται από μια πρισματική δοκό-πρόβολο μήκους  $L$  και επιφάνειας διατομής  $A$ , στην οποία διαδίδεται ένα διαμήκες, μηχανικό κύμα κατά τη διεύθυνση του άξονα της.

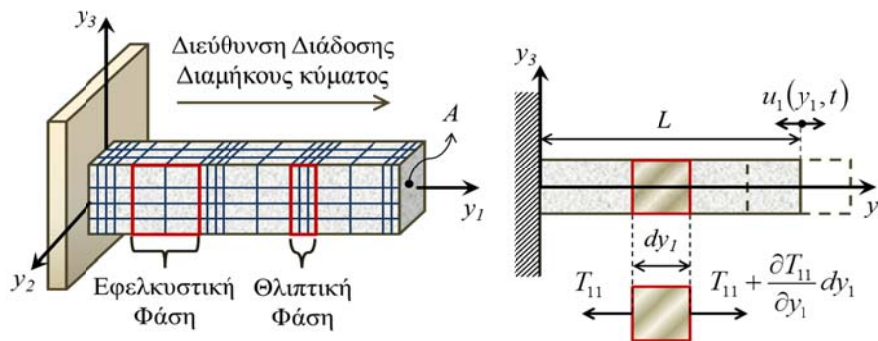
Εφαρμόζοντας τον δεύτερο νόμο του Newton σε ένα στοιχειώδες τμήμα της δοκού μήκους  $dy_1$  και διατομής  $A$ , προκύπτει:

$$\begin{aligned} \sum F_1 &= \rho A dy_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \Rightarrow \\ -T_{11}A + T_{11}A + \frac{\partial T_{11}}{\partial y_1} A dy_1 &= \rho A dy_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \Rightarrow \\ \frac{\partial T_{11}}{\partial y_1} &= \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.31)$$

όπου  $F_1$  οι εσωτερικές αξονικές δυνάμεις του προβόλου,  $T_{11}$  η μηχανική τάση κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και  $\rho$  η πυκνότητα του υλικού. Λαμβάνοντας υπόψη το νόμο του Hooke κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος,  $T_{11} = \bar{Y}_{St}^E \partial u_1 / \partial y_1$  και αντικαθιστώντας στην Εξίσωση (2.31) διαμορφώνεται η διαφορική εξίσωση της διαμήκουσ κίνησης η οποία γράφεται:

$$v_p^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial y_1^2} = \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (2.32)$$

όπου  $v_p = \sqrt{\bar{Y}_{St}^E / \rho}$  η ταχύτητα διάδοσης του διαμήκουσ κύματος,  $\bar{Y}_{St}^E = Y_{St}^E (1 + n_{St} i)$ ,  $Y_{St}^E$  και  $n_{St}$ , το μέτρο ελαστικότητας και ο συντελεστής μηχανικών απωλειών του υλικού αντίστοιχα.



**Σχήμα 2.11:** Διάδοση διαμήκουσ κύματος σε πρισματικό πρόβολο μήκους  $L$  και επιφάνειας διατομής  $A$ .

Η λύση της διαφορικής Εξίσωσης (2.32) στο στάδιο της μονίμου αποκρίσεως περιγράφεται από τη συνάρτηση:

$$u_1 = [C_1 \sin(\kappa_{St} y_1) + C_2 \cos(\kappa_{St} y_2)] e^{i\omega t} \quad (2.33)$$



όπου  $\kappa_{St} = \omega \sqrt{\rho / \bar{Y}_{St}^E}$  ο κυματάρριθμος του διαμήκους κύματος. Λαμβάνοντας υπόψη τη συνοριακή συνθήκη στήριξης του προβόλου,  $u_1|_{y_1=0} = 0$ , η λύση της Εξίσωσης (2.32) γράφεται:

$$u_1 = \underbrace{\bar{U}_1 \sin(\kappa_{St} y_1)}_{\bar{U}_1} e^{i\omega t} \quad (2.34)$$

όπου  $U_1$  το πλάτος της μετατόπισης του μηχανικού κύματος και  $\bar{U}_1$  η μέγιστη τιμή του.

Η αξονική παραμόρφωση του προβόλου θα δίδεται από την εξίσωση:

$$S_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial y_1} = \underbrace{\kappa_{St} \bar{U}_1 \cos(\kappa_{St} y_1)}_{\bar{S}_{11}} e^{i\omega t} \quad (2.35)$$

και η μηχανική τάση από τη συνάρτηση:

$$T_{11} = \bar{Y}_{St}^E S_{11} = \underbrace{\bar{Y}_{St}^E \kappa_{St} \bar{U}_1 \cos(\kappa_{St} y_1)}_{\bar{T}_{11}} e^{i\omega t} \quad (2.36)$$

Η αξονική δυσκαμψία (DMS)  $K_{St}$  του προβόλου, λαμβάνοντας υπόψη ότι η διατομή παραμένει αμετάβλητη κατά τον άξονα του, ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$K_{St} = \frac{F_1|_{y_1=L}}{u_1|_{y_1=L}} = \frac{T_{11}|_{y_1=L}}{u_1|_{y_1=L}} A \quad (2.37)$$

η οποία με αντικατάσταση των Εξισώσεων (2.34) και (2.36) γράφεται:

$$K_{St} = \frac{A \bar{Y}_{St}^E \kappa_{St}}{\tan(\kappa_{St} L)} = \bar{K}_{St} \frac{\kappa_{St} L}{\tan(\kappa_{St} L)} \quad (2.38)$$

όπου  $\bar{K}_{St} = \bar{Y}_{St}^E A / L$  η στατική δυσκαμψία.

Η μηχανική εμπέδηση (DMI)  $Z_{St}$ , ενός δομικού συστήματος, ορίζεται από το λόγο της δύναμης που ασκείται σε κάποιο σημείο του, προς την ταχύτητα του σημείου αυτού. Εξ' ορισμού η μηχανική εμπέδηση, σε αντίθεση με την δυσκαμψία, έχει φυσική σημασία μόνο στη περίπτωση της δυναμικής ανάλυσης. Για την περίπτωση του προβόλου που εξετάζεται, η DMI δίδεται από τη σχέση:



$$Z_{St} = \frac{F_1|_{y_1=L}}{i\omega u_1|_{y_1=L}} = \frac{T_{11}|_{y_1=L} A}{i\omega u_1|_{y_1=L}} \quad (2.39)$$

η οποία με αντικατάσταση των Εξισώσεων (2.34) και (2.36) γράφεται αντίστοιχα:

$$Z_{St} = \frac{A \bar{Y}_{St}^E \kappa_{St}}{i\omega \tan(\kappa_{St} L)} = \frac{\bar{K}_{St}}{i\omega} \frac{\kappa_{St} L}{\tan(\kappa_{St} L)} \quad (2.40)$$

Από τις Εξισώσεις (2.38) και (2.40) προκύπτει ότι μηχανική εμπέδηση και δυναμική δυσκαμψία, συνδέονται μεταξύ τους σύμφωνα με τη σχέση:

$$Z_{St} = \frac{K_{St}}{i\omega} \quad (2.41)$$

Επιπλέον παρατηρώντας τις ίδιες εξισώσεις διαπιστώνεται ότι:

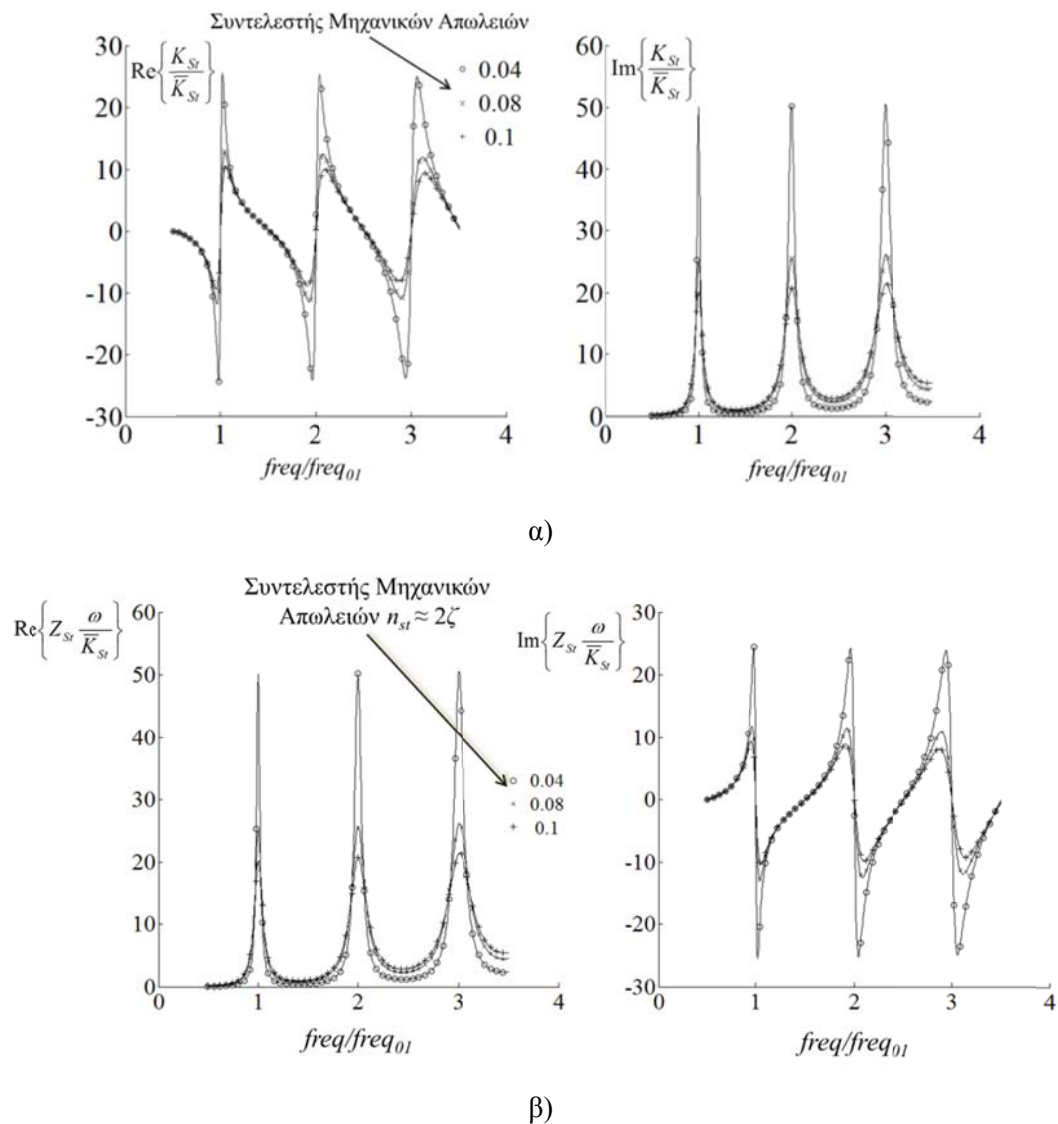
$$\begin{aligned} \kappa_{St} L \rightarrow m\pi &\Rightarrow \tan(\kappa_{St} L) \rightarrow 0 \Rightarrow \\ Z_{St}, K_{St} &\rightarrow \infty \end{aligned} \quad (2.42)$$

Από τις Εξισώσεις (2.42) συμπεραίνεται ότι οι συχνότητες συντονισμού του συστήματος θα συμπίπτουν με τις συχνότητες που οδηγούν τη μηχανική εμπέδηση και τη δυναμική δυσκαμψία στο άπειρο και θα δίδονται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \kappa_{St} L = m\pi &\Rightarrow \\ freq_{0m} &= \frac{m}{2L} \sqrt{\frac{\bar{Y}_{St}^E}{\rho}} \end{aligned} \quad (2.43)$$

Επειδή πρακτικά κάθε δομικό σύστημα αποσβένει έστω και ένα πολύ μικρό ποσό ενέργειας των διαδιδόμενων κυμάτων λόγω εσωτερικών τριβών, στις πραγματικές εφαρμογές, η μηχανική εμπέδηση και δυναμική δυσκαμψία ποτέ δεν απειρίζονται αλλά εμφανίζουν κορυφές-μέγιστα (peaks) στις συχνότητες συντονισμού. Η οξύτητα των κορυφών εξαρτάται αποκλειστικά από την τιμή του συντελεστή μηχανικών απωλειών. Στο Σχήμα 2.12 απεικονίζονται τα κανονικοποιημένα φάσματα απόκρισης της μηχανικής εμπέδησης (DMI) και της δυναμική δυσκαμψίας (DMS), όπως αυτά προκύπτουν από τις Εξισώσεις (2.38) και (2.40). Στον οριζόντιο άξονα εμφανίζεται η

συχνότητα απόκρισης κανονικοποιημένη ως προς τη θεμελιώδη συχνότητα  $freq_{01}$  η οποία προκύπτει από τη Εξίσωση (2.43) για  $m=1$ .



**Σχήμα 2.12:** Φασματική Απόκριση των α) DMS και β) DMI κανονικοποιημένων ως προς  $\bar{K}_{Sr}$ , συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς  $freq_{01}$ , συχνότητας.

Από τη μορφή των φασμάτων απόκρισης που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.12 διαπιστώνεται ότι οι αποκρίσεις του φανταστικού μέρους της DMS και του πραγματικού μέρους DMI είναι αυτές που εμφανίζουν κορυφές (peaks) στις συχνότητες συντονισμού του δομικού συστήματος και για το λόγο αυτό μπορούν να αξιοποιηθούν ως Συναρτήσεις Συχνотικής Απόκρισης (Frequency Response Function-FRF). Οι FRF του δομικού συστήματος όπως μπορεί να εξαχθεί από τις Εξισώσεις (2.38) και (2.40), εξαρτώνται α) από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού της κατασκευής (μέτρο ελαστικότητας και συντελεστής μηχανικών απωλειών), β)

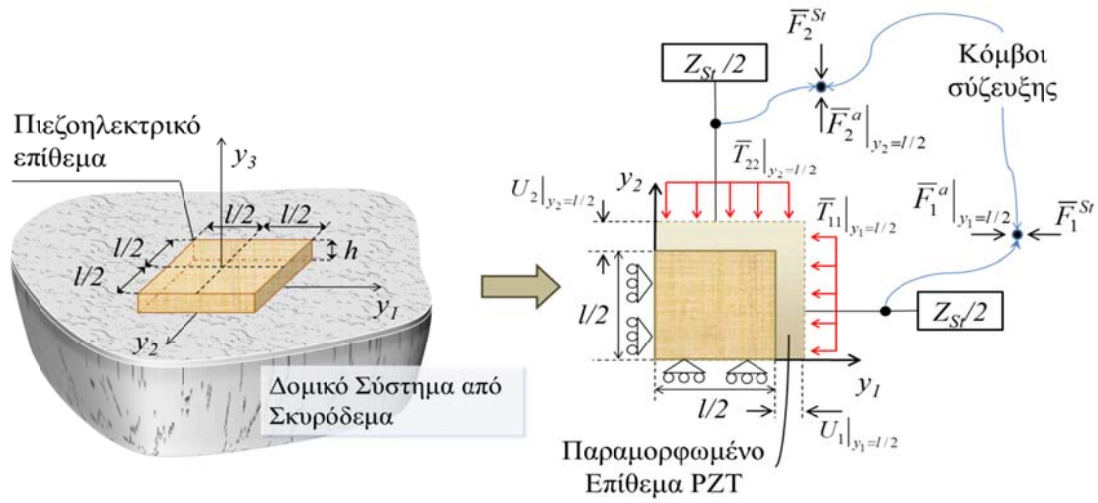
από τη γεωμετρία της κατασκευής και γ) από τις συνοριακές συνθήκες του συστήματος. Οποιαδήποτε μεταβολή σε κάποιο από τα παραπάνω δομικά χαρακτηριστικά θα έχει άμεσο αντίκτυπο στη μορφή της FRF και για το λόγο αυτό οι συγκεκριμένες συναρτήσεις αποτελούν σημαντικά εργαλεία στο ΜΚΕ της μηχανικής συμπεριφοράς των δομικών συστημάτων.

### **2.3.2. Αναλυτική προσέγγιση της Ηλεκτρο-Μηχανικής σύζευξης επιθεμάτων PZT με κατασκευές σκυροδέματος**

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε μια νέα αναλυτική προσέγγιση ειδικά για τα Ηλεκτρο-Μηχανικά Συστήματα (ΗΜΗΣ) τα οποία συγκροτούνται από κατασκευές σκυροδέματος και PZT. Στις κατασκευές σκυροδέματος η γεωμετρία των δομικών στοιχείων μιας Κ/Φ καθορίζεται σημαντικά από τις ελάχιστες διαστάσεις των κόκκων των αδρανών υλικών και του οπλισμού. Συνεπώς ακόμη και στην ακραία περίπτωση (πρακτικά ανεφάρμοστη) όπου η μικρότερη διάσταση ενός αόπλου δομικού στοιχείου θα προσεγγίζει το μέγεθος του μέγιστου κόκκου ενός ασβεστολιθικού αδρανούς (20-35mm), θα είναι περίπου 4 φορές μεγαλύτερη από τις επιφανειακές διαστάσεις του επιθέματος. Στις συνήθεις περιπτώσεις εφαρμογών το πάχος του δομικού στοιχείου είναι κατά μέσο όρο (πλάκες και εργαστηριακές δοκοί κάμψης) από 15 έως και 30 φορές μεγαλύτερο από τις επιφανειακές διαστάσεις του επιθέματος (Providakis, Liarakos and Voutetaki, 2010; Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013; Providakis and Liarakos 2011). Οι συνθήκες αυτές οδηγούν στη διαμόρφωση μιας Κ/Φ η οποία θα εμφανίζει σημαντικά μεγαλύτερη δυσκαμψία από αυτή του επιθέματος.

Στο Σχήμα 2.13 απεικονίζεται η δισδιάστατη προσέγγιση της μηχανικής αλληλεπίδρασης ενός ΗΜΗΣ, το οποίο αποτελείται από ένα τετραγωνικό επίθεμα PZT προσαρμοσμένο σε μια κατασκευή από σκυρόδεμα. Το πρόβλημα αναπτύσσεται στις δύο διαστάσεις θεωρώντας συνθήκες επίπεδης τάσης για το PZT και λαμβάνοντας υπόψη τη συμμετρία του τετραγωνικού επιθέματος στο οριζόντιο επίπεδο. Η μηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ Κ/Φ και PZT προσομοιώνεται με τον ορισμό δύο ισοδύναμων με τη κατασκευή σκυροδέματος, στοιχείων μηχανικής εμπεδήσεως  $Z_{Si}$ , ένα σε κάθε διεύθυνση του επιπέδου. Οι μηχανικές εμπεδήσεις της κατασκευής σαν μεγέθη, είναι ίσα μεταξύ τους λόγω της μηχανικής ισοτροπίας του σκυροδέματος. Τα στοιχεία των μηχανικών εμπεδήσεων βρίσκονται σε μηχανική συνέχεια με το PZT μέσω δύο κόμβων σύζευξης. Οι κόμβοι σύζευξης

προσομοιώνουν τη διεπιφάνεια μεταξύ σκυροδέματος και PZT, πάνω στην οποία τα δύο σώματα εμφανίζουν κοινές μετατοπίσεις.



**Σχήμα 2.13:** Δισδιάστατο μοντέλο μηχανικής αλληλεπίδρασης μεταξύ τετραγωνικού επιθέματος PZT και ισότροπου μηχανικά δομικού συστήματος από σκυρόδεμα.

Από ισορροπία δυνάμεων στους κόμβους σύνδεσης προκύπτει ότι (Σχήμα 2.13):

$$\bar{F}_1^a \Big|_{y_1=l/2} = \bar{T}_1 \Big|_{y_1=l/2} \frac{l}{2} h = -\bar{F}_1^{St} = -i\omega \frac{Z_{St}}{2} U_1^{St} \quad (2.44.\alpha)$$

$$\bar{F}_2^a \Big|_{y_2=l/2} = \bar{T}_2 \Big|_{y_2=l/2} \frac{l}{2} h = -\bar{F}_2^{St} = -i\omega \frac{Z_{St}}{2} U_2^{St} \quad (2.44.\beta)$$

όπου  $\bar{F}_{1,2}^a$  οι δυνάμεις που ασκούνται κάθετα στις πλευρικές επιφάνειες του PZT με διευθύνσεις παράλληλες στους άξονες  $y_{1,2}$ ,  $\bar{F}_{1,2}^{St}$  οι δυνάμεις απόκρισης της K/Φ και  $U_{1,2}^{St}$  τα πλάτη των μετατοπίσεων του στοιχείου  $Z_{St}$  στις οριζόντιες διευθύνσεις επίσης. Από τη συνέχεια των μετατοπίσεων στους κόμβους σύζευξης διατυπώνονται οι ακόλουθες δύο συνοριακές συνθήκες:

$$\begin{aligned} U_1^a \Big|_{y_1=l/2} &= U_1^{St} \\ U_2^a \Big|_{y_2=l/2} &= U_2^{St} \end{aligned} \quad (2.45)$$

όπου  $U_{1,2}^a \Big|_{y_{1,2}=l/2}$  τα πλάτη μετατόπισης των πλευρικών ορίων του PZT ( $y_{1,2}=l/2$ ) στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις. Αντικαθιστώντας τις Εξισώσεις (2.44) στις καταστατικές

εξισώσεις παραμόρφωσης-φορτίου (Εξισώσεις 2.10.α και β) και λαμβάνοντας υπόψη τις Εξισώσεις (2.45) προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} \bar{S}_1 \Big|_{y_1=l/2} = \frac{\partial U_1^a}{\partial y_1} \Big|_{y_1=l/2} &= -i\omega \frac{1}{lh\bar{Y}^E} Z_{St} (U_1^{St} - \nu_{12} U_2^{St}) + d_{31} \bar{E}_3 \quad \begin{matrix} U_1^a|_{y_1=l/2}=U_1^{St} \\ U_2^a|_{y_2=l/2}=U_2^{St} \end{matrix} \Rightarrow \\ \frac{\partial U_1^a}{\partial y_1} \Big|_{y_1=l/2} + i\omega \frac{1}{lh\bar{Y}^E} Z_{St} (U_1^a|_{y_1=l/2} - \nu_{12} U_2^a|_{y_2=l/2}) &= d_{31} \bar{E}_3 \end{aligned} \quad (2.46.\alpha)$$

και

$$\begin{aligned} \bar{S}_2 \Big|_{y_2=l/2} = \frac{\partial U_2^a}{\partial y_2} \Big|_{y_2=l/2} &= -i\omega \frac{1}{lh\bar{Y}^E} Z_{St} (U_2^{St} - \nu_{12} U_1^{St}) + d_{31} \bar{E}_3 \quad \begin{matrix} U_1^a|_{y_1=l/2}=U_1^{St} \\ U_2^a|_{y_2=l/2}=U_2^{St} \end{matrix} \Rightarrow \\ \frac{\partial U_2^a}{\partial y_2} \Big|_{y_2=l/2} + i\omega \frac{1}{lh\bar{Y}^E} Z_{St} (U_2^a|_{y_2=l/2} - \nu_{12} U_1^a|_{y_1=l/2}) &= d_{31} \bar{E}_3 \end{aligned} \quad (2.46.\beta)$$

Αντίστοιχα με τις λύσεις που έχουν αναπτυχθεί για το ελεύθερο PZT (Εξισώσεις 2.17-2.18) και τις συνοριακές συνθήκες λόγω συμμετρίας του επιθέματος,  $U_1^a|_{y_1=0} = U_2^a|_{y_2=0} = 0$ , οι λύσεις των διαφορικών Εξισώσεων (2.46.α) και (2.46.β), περιγράφονται από τη ακόλουθη συνάρτηση πλάτους της μετατόπισης:

$$U_j^a = \bar{U}_j^a \sin(a_l k y_j) \quad , j=1,2 \quad (2.47)$$

όπου  $a_l$  ο Συντελεστής Δυσκαμψίας Σύζευξης (Bonding Stiffness Coefficient-BSC).

Ο BSC εισήχθη στα πλαίσια της παρούσας ανάλυσης προκειμένου να εκφραστεί η μετατόπιση των συχνοτήτων συντονισμού του PZT σε υψηλότερες τιμές του φάσματος, λόγω της αύξησης της πλευρικής δυσκαμψίας που προκαλεί στο PZT η προσαρμογή του στην υπό παρακολούθηση κατασκευή. Ο συγκεκριμένος συντελεστής στη περίπτωση του ελεύθερου επιθέματος ( $Z_{St}=0$ ) είναι ίσος με τη μονάδα, ενώ τείνει στο μηδέν στη περίπτωση όπου η δυσκαμψία της κατασκευής είναι πολύ μεγαλύτερη από τη δυσκαμψία του επιθέματος ( $Z_{St} \rightarrow \infty$ , πλευρική πάκτωση). Λαμβάνοντας υπόψη τη Εξίσωση (2.47), οι Εξισώσεις (2.46) γράφονται:

$$a_l \kappa \bar{U}_1^a \cos(a_l \gamma) + i\omega \frac{Z_{st}}{\bar{Y}^E l h} (\bar{U}_1^\alpha - \nu_{12} \bar{U}_2^\alpha) \sin(a_l \gamma) = d_{31} \frac{\bar{V}_3}{h} \quad (2.48.a)$$

$$a_l \kappa \bar{U}_2^a \cos(a_l \gamma) + i\omega \frac{Z_{st}}{\bar{Y}^E l h} (\bar{U}_2^\alpha - \nu_{12} \bar{U}_1^\alpha) \sin(a_l \gamma) = d_{31} \frac{\bar{V}_3}{h} \quad (2.48.b)$$

όπου  $\gamma = \kappa l/2$ . Προσθέτοντας κατά μέλη τις Εξισώσεις (2.48) και επιλύοντας ως προς το άθροισμα των πλατών των μετατοπίσεων προκύπτει:

$$\bar{U}_1^\alpha + \bar{U}_2^\alpha = \left( \frac{Z_a}{Z_a + Z_{st}} \right) \frac{2d_{31}}{a_l \kappa \cos(a_l \gamma)} \frac{\bar{V}_3}{h} \quad (2.49)$$

όπου:

$$Z_a^{eff} = \frac{2\bar{Y}^E h}{i\omega(1-\nu_{12})} \frac{a_l \gamma}{\tan(a_l \gamma)} \quad (2.50)$$

η **Ενεργή Μηχανική Εμπέδηση** (Effective Mechanical Impedance) ή **Ενεργή DMI** του επιθέματος (Bhalla and Soh, 2007).

Η συνάρτηση της απόκρισης του ηλεκτρικού ρεύματος, ξεκινώντας από τη Εξίσωση (2.15) και λαμβάνοντας υπόψη την τετραγωνική μορφή του επιθέματος, γράφεται:

$$\begin{aligned} \bar{I}_3 &= i\omega l \frac{d_{31} \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \left( \int_{-l/2}^{l/2} \bar{S}_1 dy_1 + \int_{-l/2}^{l/2} \bar{S}_2 dy_2 \right) + i\omega \frac{l^2}{h} \left[ \bar{\varepsilon}_{33} - \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \right] \bar{V}_3 \quad \bar{S}_j = \frac{\partial U_j^a}{\partial y_j}, \quad j=1,2 \\ \bar{I}_3 &= i\omega l \frac{d_{31} \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \left( [U_1^a]_{-l/2}^{l/2} + [U_2^a]_{-l/2}^{l/2} \right) + i\omega \frac{l^2}{h} \left[ \bar{\varepsilon}_{33} - \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \right] \bar{V}_3 \end{aligned} \quad (2.51)$$

Αντικαθιστώντας στην Εξίσωση (2.51), τις Εξισώσεις (2.49) και (2.50) προκύπτει ότι η συνάρτηση απόκρισης της Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας (HMA) θα περιγράφεται από τη σχέση:

$$Y_3 = \frac{\bar{I}_3}{\bar{V}_3} = i\omega l \frac{2d_{31} \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \frac{(\bar{U}_1^\alpha + \bar{U}_2^\alpha) \sin(a_l \gamma)}{\bar{V}_3} + i\omega \frac{l^2}{h} \left[ \bar{\varepsilon}_{33} - \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \right] \Rightarrow$$

$$Y_3 = i\omega \frac{l^2}{h} \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \underbrace{\left( \frac{Z_a^{eff}}{Z_a^{eff} + Z_{St}} \right) \frac{\tan(a_l \gamma)}{a_l \gamma}}_{H(\omega)} + i\omega \frac{l^2}{h} \underbrace{\left[ \bar{\epsilon}_{33} - \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \right]}_{Y_3^{fix}} \quad (2.52)$$

όπου  $H(\omega)$  η ιδιομορφική συνάρτηση μηχανικής απόκρισης του ΗΜΗΣ και  $Y_3^{fix}$  η ΗΜΑ του πακτωμένου πλευρικά τετραγωνικού επιθέματος.

Στη περίπτωση των κατασκευών από σκυρόδεμα όπου η δυσκαμψία των δομικών τους στοιχείων είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των επιθεμάτων PZT, ο συντελεστής  $a_l \gamma$  λαμβάνει χαμηλές τιμές και ο λόγος  $\tan(a_l \gamma)/a_l \gamma$  τείνει στη μονάδα. Με βάση αυτή την παρατήρηση η συνάρτηση φασματικής απόκρισης της ΗΜΑ (Εξίσωση 2.52) για ένα ΗΜΗΣ με στοιχεία σκυροδέματος γράφεται:

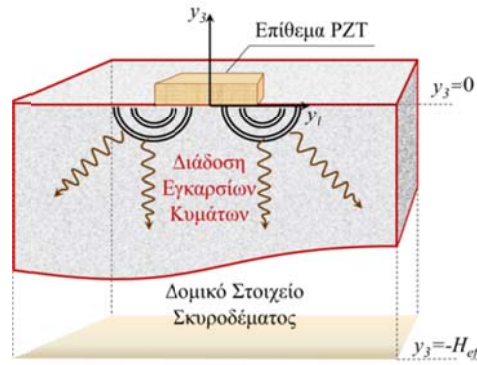
$$Y_3 = i\omega \frac{l^2}{h} \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \underbrace{\left( \frac{Z_a^{eff}}{Z_a^{eff} + Z_{St}} \right)}_{H(\omega)} + Y_3^{fix} \quad (2.53)$$

και η ενεργώς DMI,

$$Z_a^{eff} = \frac{2\bar{Y}^E h}{i\omega(1-\nu_{12})} \quad (2.54)$$

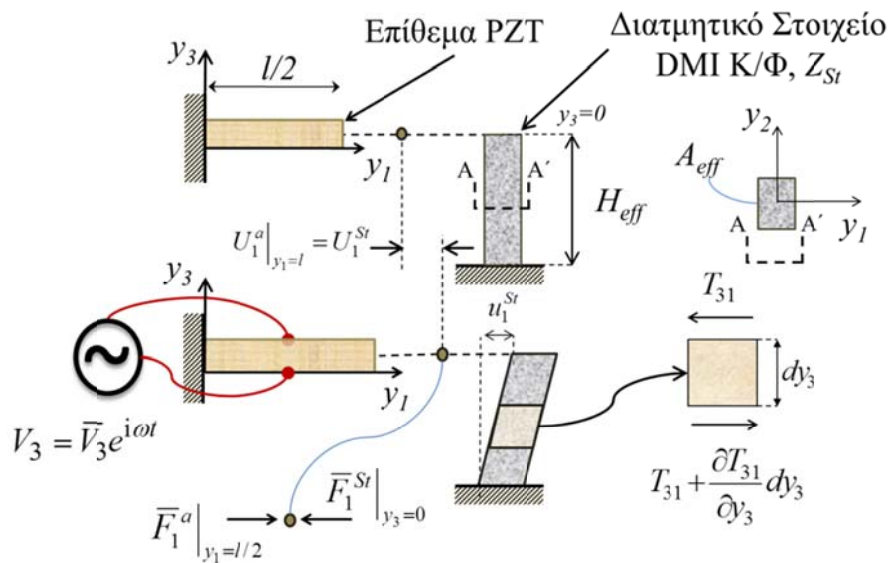
Σχετικά με τη φύση της μηχανικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιθεμάτων PZT και κατασκευών από σκυρόδεμα, στη παρούσα διατριβή προτείνεται ένα αναλυτικό μοντέλο μηχανικής εμπέδησης (DMI) το οποίο βασίζεται στη διάδοση των εγκάρσιων κυμάτων στο εσωτερικό του σκυροδέματος (Providakis and Liarakos, 2014). Όπως παρουσιάζεται στην εργασία των Providakis and Liarakos (2014) ένα επιφανειακώς προσαρμοσμένο πιεζοηλεκτρικό τετραγωνικό επίθεμα, το οποίο διεγείρεται σε μηχανική ταλάντωση κατά τις οριζόντιες διευθύνσεις ( $y_1$  και  $y_2$ ) λόγω της εφαρμογής ενός ηλεκτρικού πεδίου κάθετα στην επιφάνεια του ( $y_3$ ), θα εκπέμπει κυρίως διατμητικά κύματα στο εσωτερικό του σκυροδέματος εξαιτίας του μεγάλου πάχους των δομικών στοιχείων (Σχήμα 2.14). Θεωρώντας ισότροπη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος στο επίπεδο ταλάντωσης του PZT ( $y_1$ - $y_2$ ) και λαμβάνοντας υπόψη τη δισδιάστατη συμμετρία του επιθέματος, η μηχανική αλληλεπίδραση των στοιχείων του ΗΜΗΣ μπορεί να μελετηθεί στη μία οριζόντια διάσταση σύμφωνα με το ισοδύναμο σύστημα που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.15.





**Σχήμα 2.14:** Διάδοση μηχανικών κυμάτων στο εσωτερικό των δομικών στοιχείων σκυροδέματος (Providakis and Liarakos, 2014).

Εξαιτίας του μεγάλου πάχους του δομικού στοιχείου και της υψηλής δυσκαμψίας του σκυροδέματος, γίνεται η παραδοχή ότι σε ένα ενεργό ή κρίσιμο βάθος  $H_{eff}$  οι μετατοπίσεις του δομικού στοιχείου λόγω του εγκάρσιου κύματος μηδενίζονται, με αποτέλεσμα να θεωρείται πρακτικά πακτωμένο. Με βάση τη συγκεκριμένη παραδοχή διαμορφώνεται ένα ισοδύναμο του δομικού στοιχείου σκυροδέματος, στοιχείο μηχανικής εμπέδησης (DMI, Σχήμα 2.15), το οποίο έχει τη μορφή κατακόρυφου διατμητικού προβόλου με ύψος  $H_{eff}$  και ενεργό επιφάνεια διατομής  $A_{eff}$ . Η ενεργός επιφάνεια διατομής αποτελεί ένα γεωμετρικό συντελεστή δυσκαμψίας, ο οποίος περιγράφει το μέγεθος της επιφάνειας του τμήματος της κατασκευής που συμμετέχει στην ταλάντωση (Providakis and Liarakos, 2014).



**Σχήμα 2.15:** Σύστημα διατμητικής αλληλεπίδρασης επιθέματος PZT και του ισοδύναμου με το σκυρόδεμα στοιχείου DMI.



Εφαρμόζοντας τον 2<sup>ο</sup> νόμο του Newton στο διατμητικό στοιχείο DMI του ισοδύναμου συστήματος, προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} \sum F_1 &= \rho_{St} A_{eff} dy_3 \frac{\partial^2 u_1^{St}}{\partial t^2} \Rightarrow \\ -T_{31} A_{eff} + T_{31} A_{eff} + \frac{\partial T_{31}}{\partial y_3} A_{eff} dy_3 &= \rho_{St} A_{eff} dy_3 \frac{\partial^2 u_1^{St}}{\partial t^2} \Rightarrow \\ \frac{\partial T_{31}}{\partial y_3} &= \rho_{St} \frac{\partial^2 u_1^{St}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.55)$$

όπου  $F_1$  οι εσωτερικές τέμνουσες δυνάμεις του στοιχείου DMI,  $T_{31}$  η διατμητική μηχανική τάση σε διεύθυνση κάθετη στη διάδοση του κύματος και  $\rho$  η πυκνότητα του υλικού. Λαμβάνοντας υπόψη το νόμο του Hooke για διάτμηση κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος,  $T_{31} = \overline{G}_{St} \partial u_1 / \partial y_3$ , και αντικαθιστώντας στην Εξίσωση (2.55), διαμορφώνεται η διαφορική εξίσωση της εγκάρσιας κίνησης η οποία γράφεται:

$$v_s^2 \frac{\partial^2 u_1^{St}}{\partial y_3^2} = \frac{\partial^2 u_1^{St}}{\partial t^2} \quad (2.56)$$

όπου  $v_s = \sqrt{\overline{G}_{St} / \rho_{St}}$ , η ταχύτητα διάδοσης του εγκάρσιου κύματος,  $\overline{G}_{St} = G_{St} (1 + i n_{St})$ ,  $G_{St}$  και  $n_{St}$  το μέτρο διάτμησης και ο συντελεστής μηχανικών απωλειών αντίστοιχα του σκυροδέματος.

Η λύση της διαφορικής Εξίσωσης (2.56) στο στάδιο της μονίμου αποκρίσεως, θα δίνεται από τη συνάρτηση (Providakis and Liarakos, 2014):

$$u_1^{St}(y_3, t) = \underbrace{\{C_1 \sin(\kappa_s y_3) + C_2 \cos(\kappa_s y_3)\}}_{U_1^{St}} e^{i\omega t} \quad (2.57)$$

όπου  $\kappa_s = \omega \sqrt{\rho_{St} / \overline{G}_{St}}$  ο κυματάριθμος του εγκάρσιου κύματος και  $U_1^{St}$  η συνάρτηση πλάτους της μετατόπισης. Από τη συνάρτηση της μετατόπισης (Εξίσωση 2.57) και το σύστημα αναφοράς του στοιχείου DMI (Σχήμα 2.15) προκύπτει ότι:

$$C_2 = U_1^{St} \Big|_{y_3=0} \quad (2.58)$$

Εφαρμόζοντας τη συνοριακή συνθήκη πάκτωσης του διατμητικού στοιχείου DMI,  $u_1^{St}|_{y_3=-H_{eff}} = 0$ , στη Εξίσωση (2.57) και λαμβάνοντας υπόψη την Εξίσωση (2.58) εξάγεται ότι ο συντελεστής  $C_1$  θα δίνεται από τη σχέση:

$$C_1 = \frac{C_2}{\tan(\kappa_s H_{eff})} = \frac{U_1^{St}|_{y_3=0}}{\tan(\kappa_s H_{eff})} \quad (2.59)$$

Με βάση τις Εξισώσεις (2.57)-(2.59), η συνάρτηση της διατμητικής παραμόρφωσης γράφεται:

$$S_{31} = \frac{\partial u_1^{St}}{\partial y_3} = \underbrace{\kappa_s U_1^{St}|_{y_3=0}}_{\bar{S}_{31}} \left\{ \frac{\cos(\kappa_s y_3)}{\tan(\kappa_s H_{eff})} - \sin(\kappa_s y_3) \right\} e^{i\omega t} \quad (2.60)$$

Από την Εξίσωση (2.60) και το νόμο του Hooke προκύπτει η συνάρτηση της διατμητικής τάσης ως εξής:

$$T_{31} = \underbrace{\bar{G}_{St} \kappa_s U_1^{St}|_{y_3=0}}_{\bar{T}_{31}} \left\{ \frac{\cos(\kappa_s y_3)}{\tan(\kappa_s H_{eff})} - \sin(\kappa_s y_3) \right\} e^{i\omega t} \quad (2.61)$$

Η μηχανική εμπίεση (DMI) του ισοδύναμου διατμητικού προβόλου θα δίνεται από τις σχέσεις:

$$Z_{st} = \frac{F_1^{St}|_{y_3=0}}{\partial u_1^{St} / \partial t} = \frac{\bar{F}_1^{St}|_{y_3=0}}{i\omega U_1^{St}|_{y_3=0}} = \frac{\bar{T}_{31}|_{y_3=0} A_{eff}}{i\omega U_1^{St}|_{y_3=0}} \quad (2.62)$$

Αντικαθιστώντας στην Εξίσωση (2.62) τη Εξίσωση (2.61) για  $y_3=0$ , η εξίσωση της DMI γράφεται:

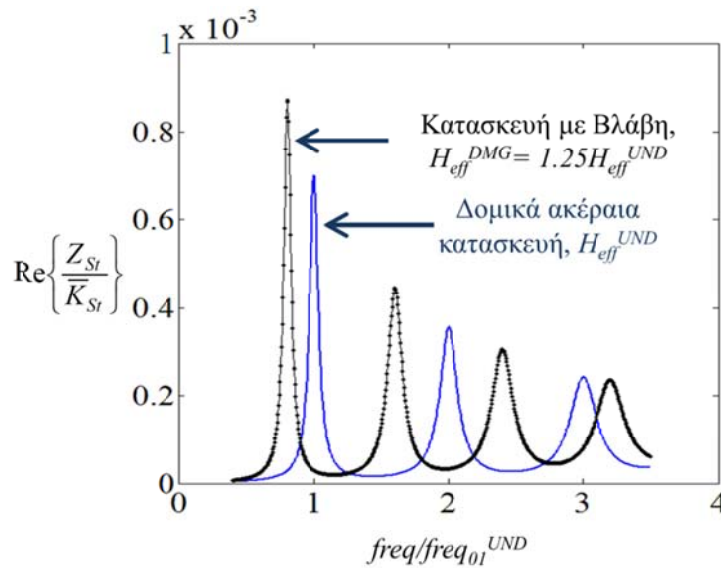
$$Z_{st} = \frac{A_{eff} \kappa_s \bar{G}_{St}}{i\omega \tan(\kappa_s H_{eff})} = \frac{\bar{K}_{St}}{i\omega} \frac{\kappa_s H_{eff}}{\tan(\kappa_s H_{eff})} \quad (2.63)$$

όπου  $\bar{K}_{St} = A_{eff} \bar{G}_{St} / H_{eff}$ , η διατμητική στατική δυσκαμψία της DMI.

Στην Εξίσωση (2.63) παρατηρείται για άλλη μια φορά (Εξίσωση 2.40) η τριγωνομετρική συνάρτηση της εφαπτομένης, η οποία έχει ως όρισμα το γινόμενο του κυματάριθμου του μηχανικού κύματος που διαδίδεται στο ισοδύναμο στοιχείο DMI, με το χαρακτηριστικό μήκος της DMI. Οι συχνότητες λοιπόν συντονισμού του διατμητικού στοιχείου DMI προκύπτουν από την ισότητα  $k_s H_{eff} = m\pi$  η οποία αν αναπτυχθεί δίνει τη σχέση:

$$freq_{0m} = \frac{m}{2H_{eff}} \sqrt{\frac{G_{St}}{\rho_{St}}} \quad (2.64)$$

Στη περίπτωση όπου το δομικό σύστημα υποστεί κάποια μηχανική βλάβη, θα διαρρηχθεί η δομική του συνέχεια και σαν συνέπεια αυτού θα μεταβληθούν οι συνοριακές συνθήκες του ισοδύναμου διατμητικού στοιχείου DMI. Η κατασκευή θα γίνει πιο εύκαμπτη και το ενεργό ή κρίσιμο βάθος  $H_{eff}$  θα αυξηθεί. Η αύξηση του κρίσιμου βάθους έχει ως αποτέλεσμα, όπως εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί από την Εξίσωση (2.64), τη μείωση των συχνοτήτων συντονισμού της μηχανικής εμπίδησης  $Z_{St}$ .



**Σχήμα 2.16:** Φάσμα απόκρισης πραγματικού μέρους μηχανικής εμπίδησης για τις περιπτώσεις δομικού συστήματος με ( $H_{eff}^{DMG}$ ) και χωρίς ( $H_{eff}^{UND}$ ) μηχανική βλάβη.

Στο σχήμα 2.16 απεικονίζεται το πραγματικό μέρος των κανονικοποιημένων ως προς τη στατική διατμητική δυσκαμψία  $\bar{K}_{St}$  (Εξίσωση 2.63), φασμάτων απόκρισης της μηχανικής εμπίδησης  $Z_{St}$ , ενός δομικού συστήματος πριν και μετά την εκδήλωση μιας

μηχανικής βλάβης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ανάλυσης θεωρείται αρχικά ότι η μηχανική εμπέδηση μιας κατασκευής από σκυρόδεμα, δομικά άρτιας και με έναν βαθμό ελευθέριας, περιγράφεται από ένα ισοδύναμο κρίσιμο βάθος  $H_{eff}^{UND}$  (Εξίσωση 2.63), το οποίο αντιστοιχεί σε μια θεμελιώδη συχνότητα συντονισμού  $freq_{01}^{UND}$ , (Εξίσωση 2.64,  $m=1$ ). Στη συνέχεια γίνεται η υπόθεση ότι το συγκεκριμένο δομικό σύστημα παρουσιάσει μια μηχανική βλάβη η οποία μειώνει τη δυσκαμψία του με αποτέλεσμα την αύξηση του κρίσιμου βάθους σε μια τιμή  $H_{eff}^{DMG}=1.25H_{eff}^{UND}$ . Παρατηρώντας το Σχήμα 2.16 διαπιστώνεται ότι το φάσμα απόκρισης της DMI, το οποίο αντιστοιχεί στη κατασκευή με βλάβη, α) εμφανίζει μια μετατόπιση των κορυφών προς τα αριστερά, δηλαδή προς μικρότερες συχνότητες σύμφωνα με την Εξίσωση (2.64), β) παρουσιάζει αυξημένες τιμές πλάτους σε σχέση με το αντίστοιχο φάσμα της «υγιούς» κατασκευής και γ) εμφανίζει νέες επιπλέον κορυφές (peak) στο εύρος συχνοτήτων μελέτης. Τα αποτελέσματα της παραπάνω περίπτωσης εργασίας είναι σημαντικά, καθώς υποδεικνύουν τη φύση των μεταβολών που δύναται να εμφανιστούν μεταξύ ενός δομικά ακεραίου δομικού συστήματος και ενός με μηχανική βλάβη, ενώ παράλληλα αναδεικνύουν τη χρησιμότητα του φάσματος απόκρισης της μηχανικής εμπέδησης ως εργαλείο αξιολόγησης της δομικής ακεραιότητας μιας κατασκευής από σκυρόδεμα. Τα συγκεκριμένα συμπεράσματα επιβεβαιώνονται και πειραματικά σε επόμενα κεφάλαια της παρούσας διατριβής μέσα από τις εφαρμογές που παρουσιάζονται.

### 2.3.3. Αξιολόγηση των αναλυτικών μοντέλων Ηλεκτρο-Μηχανικής σύζευξης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην αρχή της παρούσας ενότητας, τα αναλυτικά μοντέλα που έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές σχετικά με τη περιγραφή της απόκρισης της Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας (HMA) ενός ΗΜΗΣ στο πεδίο της συχνότητας, έχουν αναπτυχθεί για τη παρακολούθηση δομικών συστημάτων τα οποία αποτελούνται κατά κύριο λόγο από μεταλλικά στοιχεία μικρού πάχους. Πρώτοι οι Liang et al. (1994a; 1994b; 1996) πρότειναν την ακόλουθη εξίσωση για τη περιγραφή της φασματικής απόκρισης της Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας ενός PZT κολλημένου στην επιφάνεια ενός μικρού πάχους μεταλλικού προβόλου:

$$Y_3 = i\omega \frac{wl}{h} \left\{ \left( \bar{\epsilon}_{33} - d_{31}^2 \bar{Y}^E \right) + d_{31}^2 \bar{Y}^E \left( \frac{Z_a}{Z_{st} + Z_a} \right) \frac{\tan(\kappa l)}{\kappa l} \right\} \quad (2.65)$$

όπου,

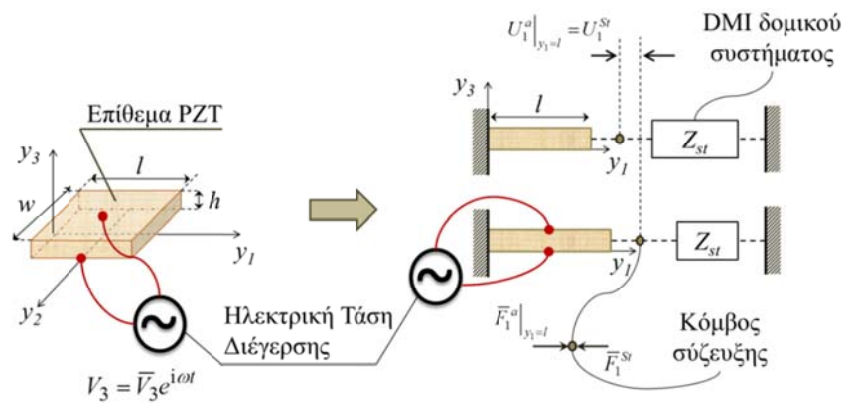
$$Z_a = \frac{wh \bar{Y}^E \kappa}{i\omega \tan(\kappa l)} \quad (2.66)$$

η μηχανική εμπέδηση του PZT (Σχήμα 2.17),  $Z_{st}$  η μηχανική εμπέδηση της υπό παρακολούθησης κατασκευής (DMI) και  $\kappa$  ο κυματάρριθμος του διαμήκους κύματος (Εξίσωση 2.18). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.17 το μοντέλο των Liang et al. αντιμετωπίζει το ζήτημα της μηχανικής απόκρισης του PZT και της Κ/Φ μονοδιάστατα.

Οι Giurgiutiu and Rogers (1997; 1999) βασιζόμενοι στην Εξίσωση (2.65) και λαμβάνοντας υπόψη ότι ο όρος  $\tan(\kappa l)/(kl)$  τείνει στη μονάδα για μικρές τιμές του γινομένου  $\kappa l$ , έχουν προτείνει την ακόλουθη σχέση για την απόκριση της HMA:

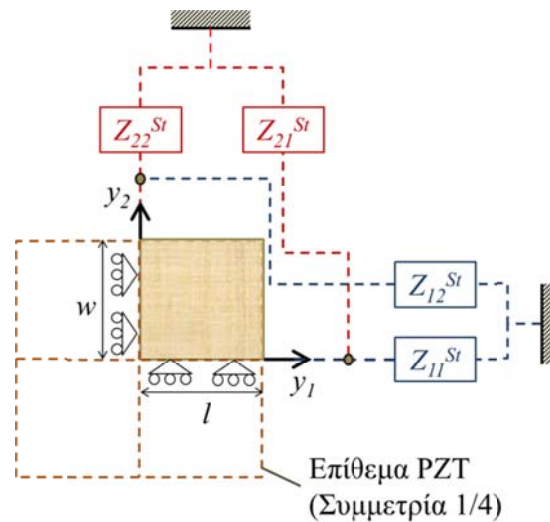
$$Y_3(\omega) = i\omega C_3^0 \left\{ 1 - (\kappa_{31}^{em})^2 \frac{Z_{st}}{Z_a + Z_{st}} \right\} \quad (2.67)$$

όπου  $C_3^0$  η χωρητικότητα του PZT σε συνθήκες στατικού ηλεκτρικού πεδίου (Εξίσωση 2.8) και  $\kappa_{31}^{em}$  ο συντελεστής ηλεκτρομηχανικής σύζευξης (ECC, Εξίσωση 2.6) του επιθέματος PZT. Το γινόμενο  $\kappa l$  λαμβάνει χαμηλές τιμές στις περιπτώσεις α) πολύ μικρού  $l$  σε σχέση με τις διαστάσεις της Κ/Φ και β) συχνότητας ηλεκτρικής διέγερσης αρκετά μικρότερης από τη πρώτη συχνότητα συντονισμού του επιθέματος  $freq_{01}$ .



**Σχήμα 2.17:** Μονοδιάστατο μοντέλο μηχανικής αλληλεπίδρασης μεταξύ επιθέματος PZT και υπό παρακολούθηση κατασκευής (Liang et al., 1994a; 1994b; 1996).

Οι Zhou et al. (1995; 1996) προσπαθώντας να επεκτείνουν την προηγούμενη μονοδιάστατη προσέγγιση των Liang et al. (1994a; 1994b; 1996) στις δύο διαστάσεις και μάλιστα σε εφαρμογές που έχουν να κάνουν με τον ΜΚΕ λεπτότοιχων μεταλλικών κελυφών (άτρακτοι και πτερυγώσεις αεροσκαφών), έχουν προτείνει το μοντέλο αλληλεπίδρασης – σύζευξης του Σχήματος 2.18. Στο συγκεκριμένο σύστημα κατ' αρχήν λαμβάνεται υπόψη η δισδιάστατη συμμετρία στο επίπεδο του επιθέματος.



**Σχήμα 2.18:** Δισδιάστατο μοντέλο μηχανικής αλληλεπίδρασης μεταξύ επιθέματος PZT υπό παρακολούθηση κατασκευής (Zhou et al., 1995; 1996).

Το επίθεμα PZT λειτουργεί συνδεδεμένο πλευρικά και στις δύο διατάσεις του επιπέδου του, με στοιχεία DMI τα οποία αντικατοπτρίζουν τόσο την ορθή μηχανική αλληλεπίδραση ( $Z_{11}^{St}$ ,  $Z_{22}^{St}$ ) όσο και τη διατμητική - στρεπτική αλληλεπίδραση ( $Z_{12}^{St}$ ,  $Z_{21}^{St}$ ) μεταξύ επιθέματος και κατασκευής. Οι καταστατικές εξισώσεις παραμόρφωσης-φορτίου διατυπώνονται με βάση τη θεώρηση επίπεδης τάσης, όπως ακριβώς έχει ήδη αναπτυχθεί σε προηγούμενη παράγραφο σχετικά με την ανάλυση του ελεύθερου επιθέματος (Εξισώσεις 2.10). Η HMA σύμφωνα με τη συγκεκριμένη αναλυτική προσέγγιση δίνεται από τη σχέση:

$$Y_3 = i\omega \frac{wl}{h} \left\{ \bar{\epsilon}_{33} - \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1 - \nu_{12})} + \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1 - \nu_{12})} \mathbf{H}(\omega) \right\} \quad (2.68)$$

όπου,

$$\mathbf{H}(\omega) = \begin{bmatrix} \frac{\sin(\kappa l)}{l} & \frac{\sin(\kappa w)}{w} \end{bmatrix} \mathbf{N}^{-1} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (2.69)$$

η μητρωική ιδιομορφική συνάρτηση του Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος,

$$\kappa = \omega \sqrt{\frac{\rho(1 - \nu_{12}^2)}{\bar{Y}^E}} \quad (2.70)$$

ο δισδιάστατος κυματάριθος του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος και

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \kappa \cos(\kappa l) \left\{ 1 - \nu_{12} \frac{w}{l} \frac{Z_{12}^{St}}{Z_{11}^a} + \frac{Z_{11}^{St}}{Z_{11}^a} \right\} & \kappa \cos(\kappa w) \left\{ \frac{l}{w} \frac{Z_{21}^{St}}{Z_{22}^a} - \nu_{12} \frac{Z_{22}^{St}}{Z_{22}^a} \right\} \\ \kappa \cos(\kappa l) \left\{ \frac{w}{l} \frac{Z_{12}^{St}}{Z_{11}^a} - \nu_{12} \frac{Z_{11}^{St}}{Z_{11}^a} \right\} & \kappa \cos(\kappa w) \left\{ 1 - \nu_{12} \frac{l}{w} \frac{Z_{21}^{St}}{Z_{22}^a} + \frac{Z_{22}^{St}}{Z_{22}^a} \right\} \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

το μητρώο αλληλεπίδρασης μεταξύ των DMI του επιθέματος και της Κ/Φ.

Το μοντέλο των Zhou, Liang et al. αν και προσεγγίζει με πολύ μεγάλη λεπτομέρεια την δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ πιεζοηλεκτρικών στοιχείων και φέρουσας κατασκευής, αφενός μεν εμφανίζει μαθηματική πολυπλοκότητα δυσχεραίνοντας τους αναλυτικούς υπολογισμούς και αφετέρου δε εισάγει αρκετές παραμέτρους στη περιγραφή της μηχανικής απόκρισης του ΗΜΗΣ. Τα συγκεκριμένα μειονεκτήματα το καθιστούν ακατάλληλο για ΗΜΗΣ όπου η υπό παρακολούθηση κατασκευή εμφανίζει μια σχετικά σύνθετη γεωμετρία ή συνδυάζει περισσότερα του ενός δομικά υλικά.

Οι Bhalla and Soh (2004a; 2004b; 2004c; 2007; 2008), οι οποίοι είναι από τους πρώτους ερευνητές που μελέτησαν συστηματικά την ηλεκτρομηχανική απόκριση στο πεδίο της συχνότητας, πιεζοηλεκτρικών επιθεμάτων προσαρμοσμένων σε κατασκευές σκυροδέματος (Bhalla and Soh, 2008), έχουν προτείνει την ακόλουθη συνάρτηση απόκρισης της HMA:

$$Y_3 = i\omega \frac{l^2}{h} \frac{8d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1 - \nu_{12})} \underbrace{\left( \frac{Z_a^{eff}}{Z_a^{eff} + Z_{St}^{eff}} \right) \bar{T}}_{H(\omega)} + i\omega \frac{4l^2}{h} \underbrace{\left[ \bar{\epsilon}_{33} - \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1 - \nu_{12})} \right]}_{Y_3^p} \quad (2.72)$$

όπου  $l$  το μισό μήκος ακμής ενός τετραγωνικού επιθέματος,  $Z_{St}^{eff}$  η ενεργός DMI της υπό παρακολούθησης κατασκευής,  $Y_3^p$  η Παθητική Συνιστώσα (Passive Component)

της HMA, η οποία ταυτίζεται την ηλεκτρική απόκριση του πακτωμένου πλευρικά PZT ( $Z_{St} \rightarrow \infty$ ),

$$Z_a^{eff} = \frac{2\bar{Y}^E h}{(1 - \nu_{12})\bar{T}} \quad (2.73)$$

η ενεργός DMI του επιθέματος PZT,

$$\begin{aligned} \bar{T} &= \frac{\tan(Ckl)}{Ckl} : \text{για την περίπτωση επιθέματος με μια} \\ &\quad \text{ιδιομορφή απόκρισης} \\ \bar{T} &= \frac{\tan(C_1 kl)}{C_1 kl} + \frac{\tan(C_2 kl)}{C_2 kl} : \text{για την περίπτωση επιθέματος με δύο} \\ &\quad \text{ιδιομορφές απόκρισης} \end{aligned} \quad (2.74)$$

$C$ ,  $C_1$  και  $C_2$  διορθωτικοί συντελεστές, οι οποίοι προσδιορίζονται εμπειρικά και συμβάλουν στο να επιτευχθεί η βέλτιστη προσαρμογή του θεωρητικού μοντέλου στα μετρούμενα πειραματικά φάσματα απόκρισης της HMA (Bhalla and Soh, 2008).

Το μοντέλο Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας που παρουσιάζεται στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής (Εξισώσεις 2.52-2.54) και αναπτύχθηκε με κριτήριο τη ικανότητα προσαρμογής του στη μηχανική συμπεριφορά των δομικών συστημάτων από σκυρόδεμα, επιδεικνύει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Σε σχέση με τα μονοδιάστατα μοντέλα των Liang et al. (Εξίσωση 2.65) και Giurgiutiu and Rogers (Εξίσωση 2.67), λαμβάνει υπόψη τη μηχανική αλληλεπίδραση του PZT με την υπό παρακολούθηση κατασκευή στις **δύο διαστάσεις** του επιπέδου του επιθέματος.
- Σε σχέση με το επίσης δισδιάστατο μοντέλο των Zhou et al. (Εξισώσεις 2.68-2.71), λαμβάνει υπόψη την ισοτροπία του σκυροδέματος ( $Z_{11}^{St} = Z_{22}^{St} = Z_{St}$ , Σχήμα 2.18) και την υψηλή δυσκαμψία των δομικών στοιχείων, απαλείφοντας συνιστώσες της μηχανικής εμπίδησης οι οποίες έχουν αμελητέα επίδραση στην απόκριση της HMA ( $Z_{12}^{St} = Z_{21}^{St} = 0$ , Σχήμα 2.18). Με τον τρόπο αυτό οι εξισώσεις απόκρισης της HMA απλοποιούνται σημαντικά.
- Σε σχέση με το μοντέλο των Bhalla and Soh (Εξισώσεις 2.72-2.74) εισάγει τον Συντελεστή Δυσκαμψίας Σύζευξη  $\alpha_l$  (Εξίσωση 2.47) ο οποίος δίνει τη δυνατότητα προσαρμογής των κορυφών του μαθηματικού μοντέλου της HMA στις κορυφές που εμφανίζονται στα πειραματικώς καταγραφόμενα φάσματα



απόκρισης. Ο συντελεστής  $\alpha_i$  εισάγεται ως παράμετρος με φυσική σημασία στη συγκεκριμένη αναλυτική σχέση (Εξίσωση 2.52) και όχι απλά ως ένας συντελεστής προσαρμογής στα πειραματικά δεδομένα όπως οι συντελεστές  $C$ ,  $C_1$  και  $C_2$  του μοντέλου των Bhalla and Soh (Εξίσωση 2.74).

- Τέλος σε σχέση με όλα τα παραπάνω αναλυτικά μοντέλα (Εξισώσεις 2.65-2.74), ενσωματώνει μια πρωτότυπη αναλυτική έκφραση της μηχανικής εμπίδησης της υπό παρακολούθηση κατασκευής  $Z_{St}$  (Εξίσωση 2.63), η οποία προκύπτει από τη θεωρητική διερεύνηση της διατμητικής αλληλεπίδρασης μεταξύ σκυροδέματος και PZT (Providakis and Liarakos, 2014).

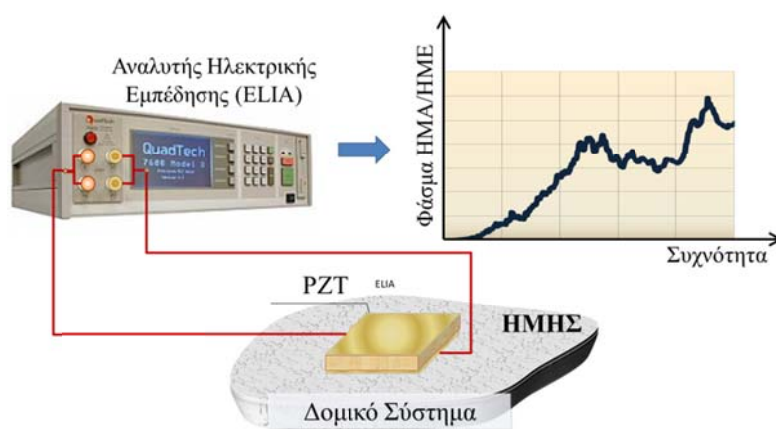
## 2.4. Ενόργανη ανάλυση της ηλεκτρικής απόκρισης των Ηλεκτρο-ΜΗχανικών Συστημάτων

Στις προηγούμενες ενότητες αναπτύχθηκε θεωρητικά η έννοια της Ηλεκτρο-Μηχανικής απόκρισης ενός συζευγμένου συστήματος, το οποίο αποτελείται από τουλάχιστον ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο είτε ελεύθερο μηχανικά, είτε προσαρμοσμένο σε μια κατασκευή υπό παρακολούθηση. Από την ανάλυση που έγινε διαπιστώνεται ότι η ηλεκτρική απόκριση του πιεζοηλεκτρικού σώματος εξαρτάται σημαντικά τόσο από τις μηχανικές του ιδιότητες, όσο και από τις συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται σε αυτό. Το φάσμα λοιπόν απόκρισης της HMA στη περίπτωση όπου το PZT προσαρμόσεται σε μια κατασκευή υπό παρακολούθηση (Κ/Φ), θα αντικατοπτρίζει πέρα από την διηλεκτρική και μηχανική συμπεριφορά του επιθέματος και τη δυναμική απόκριση της Κ/Φ. Για το λόγο αυτό στις μεθόδους ΜΚΕ κατασκευών που αξιοποιούν πιεζοηλεκτρικά υλικά, τα φάσματα απόκρισης των μεγεθών HMA και HME (Ηλεκτρο-Μηχανική Εμπέδηση) αποτελούν ισχυρά εργαλεία διάγνωσης βλαβών και αξιολόγησης της δομικής ακεραιότητας.

Αρκετοί ερευνητές έχουν προτείνει μια σειρά μεθόδων ενόργανης μέτρησης της HMA/HME στο πεδίο της συχνότητας, παρουσιάζοντας ταυτόχρονα και τις αντίστοιχες εργαστηριακές διατάξεις (Xu, 2009). Οι μέθοδοι που έχουν προταθεί δύναται να διαχωριστούν, ανάλογα με την εφαρμοζόμενη σε κάθε περίπτωση οργανολογία, α) σε εκείνες που αξιοποιούν ολοκληρωμένα εμπορικά συστήματα και β) σε αυτές που ενσωματώνουν απλές διατάξεις ηλεκτρικών στοιχείων, για την μέτρηση των HMA/HME. Ολοκληρωμένα συστήματα μέτρησης στο πεδίο της συχνότητας είναι οι Παραμετρικοί Αναλυτές Ηλεκτρικής Εμπέδησης-ELIA

(Electrical Impedance Analyzers) ή Αναλυτές RLC (RLC meters), οι οποίοι προσφέρουν μια συνολική λύση στο πρόβλημα προσδιορισμού των ηλεκτρικών παραμέτρων οποιουδήποτε αμετάβλητου χρονικά ηλεκτρικού κυκλώματος (Xu, 2009; QuadTech, 2002), (Σχήμα 2.19).

Τα ολοκληρωμένα συστήματα λόγω της υψηλής ακρίβειας που προσφέρουν, χρησιμοποιούνται κατά κόρον ως συσκευές αναφοράς στις εφαρμογές που έχουν να κάνουν με την ανάπτυξη νέων διατάξεων μέτρησης των HMA/HME. Ωστόσο εμφανίζουν το σημαντικό μειονέκτημα του υψηλού κόστους το οποίο αυξάνεται γεωμετρικά σε σχέση με την παρεχόμενη ακρίβεια. Το υψηλό κόστος των ELIA έχει οδηγήσει στην αναζήτηση εναλλακτικών μεθόδων μέτρησης της HMA/HME οι οποίες είτε ενσωματώνουν το Ηλεκτρο-Μηχανικό Σύστημα σε απλές διατάξεις ωμικών αντιστάσεων και πυκνωτών (Providakis et al., 2013), είτε αξιοποιούν τυπωμένα κυκλώματα (Printed Circuits Board-PCB) χαμηλού κόστους τα οποία έχουν την ικανότητα απευθείας μέτρησης κυρίως της Ηλεκτρικής Εμπέδησης (HME) (Mascarenas, 2006; Park et al., 2007; Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013; Providakis and Liarakos, 2014).



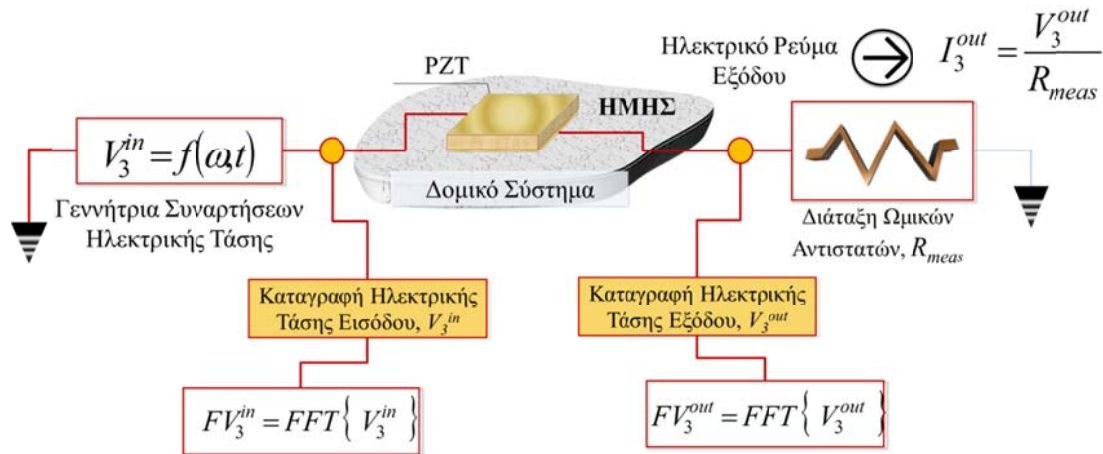
**Σχήμα 2.19:** Ενόργανος προσδιορισμός των HMA/HME με την χρήση ολοκληρωμένων συστημάτων ανάλυσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων (ELIA, RLCmeters).

Στο Σχήμα 2.20 απεικονίζεται σχηματικά μια απλή εργαστηριακή διάταξη προσδιορισμού της φασματικής απόκρισης των HMA/HME ενός Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος (ΗΜΗΣ). Το ΗΜΗΣ αποτελείται από ένα επίθεμα PZT προσαρμοσμένο στο φέροντα οργανισμό μιας Κ/Φ. Δεδομένου ότι το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα ηλεκτρικά αποτελεί ένα διπολικό διηλεκτρικό στοιχείο (Εξίσωση 2.8), το ΗΜΗΣ θα συμπεριφέρεται ηλεκτρικά επίσης ως ένα διπολικό σύστημα με δύο

ακροδέκτες, οι οποίοι ταυτίζονται με τους ακροδέκτες του επιθέματος. Ο ένας ακροδέκτης του ΗΜΗΣ συνδέεται με την έξοδο μια γεννήτριας χρονικά μεταβαλλόμενων συναρτήσεων ηλεκτρικής τάσης και ο άλλος ακροδέκτης με το ένα άκρο μιας επίσης διπολικής διάταξης ωμικών αντιστάσεων, συνολικής αντίστασης  $R_{meas}$ . Το άλλο άκρο της διάταξης των αντιστάσεων βρίσκεται γειωμένο, έχοντας προφανώς μηδενικό ηλεκτρικό δυναμικό. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι η ηλεκτρική τάση εισόδου του συστήματος  $V_3^{in}$  και η ηλεκτρική τάση εξόδου στα άκρα της αντίστασης  $V_3^{out}$ . Και οι δύο μεταβλητές ηλεκτρικής τάσης καταγράφονται στο πεδίο του χρόνου δίνοντας τις αντίστοιχες χρόνο-ιστορίες. Η Ηλεκτρο-Μηχανική Αγωγιμότητα του ΗΜΗΣ στο πεδίο του χρόνου προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$Y_3^{HMHS} = \frac{I_3^{out}}{V_3^{HMHS}} \quad (2.75)$$

όπου  $V_3^{HMHS}$  η χρονική απόκριση της ηλεκτρικής τάσης στα άκρα του ΗΜΗΣ (Σχήμα 2.21) και  $I_3^{out}$  η χρόνο-ιστορία του ρεύματος απόκρισης που διατρέχει τον κλάδο ΗΜΗΣ- $R_{meas}$  του ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος (Σχήμα 2.21).



**Σχήμα 2.20:** Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας ενόργανου προσδιορισμού των HMA/HME με την χρήση απλών διατάξεων ηλεκτρικών στοιχείων (ωμικές αντιστάσεις, πυκνωτές).

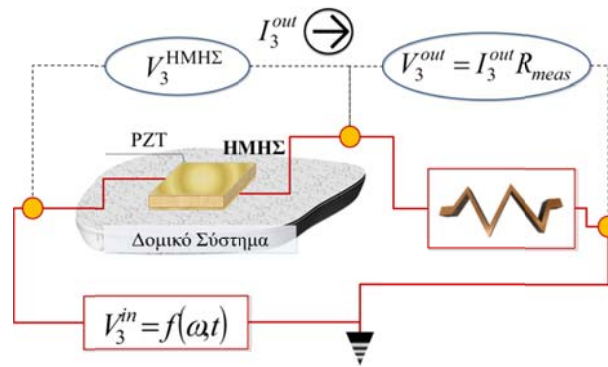
Εφαρμόζοντας τον **2<sup>ο</sup> νόμο του Kirchhoff** ή **κανόνα των βρόχων** στο ισοδύναμο κύκλωμα της πειραματικής διάταξης του Σχήματος 2.20 (Σχήμα 2.21) και λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση του Ohm για το κύκλωμα των αντιστάσεων μέτρησης, η Εξίσωση (2.75) γράφεται (Fasel et al., 2005):

$$Y_3^{\text{HMH}\Sigma} = \frac{I_3^{\text{out}}}{V_3^{\text{HMH}\Sigma}} \quad \begin{matrix} V_3^{\text{out}} = I_3^{\text{out}} R_{\text{meas}} \\ V_3^{\text{in}} = V_3^{\text{HMH}\Sigma} + V_3^{\text{out}} \end{matrix} \quad \frac{1}{R_{\text{meas}}} \left( \frac{V_3^{\text{out}}}{V_3^{\text{in}} - V_3^{\text{out}}} \right) \quad (2.76)$$

Ο προσδιορισμός της φασματικής απόκρισης της HMA προϋποθέτει το μετασχηματισμό των καταγραφόμενων χρόνο-ιστοριών ηλεκτρικής τάσης στο πεδίο της συχνότητας. Ο πιο εύκολος και αξιόπιστος τρόπος για να γίνει κάτι τέτοιο είναι η εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier (Ogata, 1998). Στη περίπτωση όπου η ισοδύναμη αντίσταση  $R_{\text{meas}}$  παραμένει αμετάβλητη στο πεδίο της συχνότητας, η φασματική συνάρτηση της HMA θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Y_3(\omega) = \frac{1}{R_{\text{meas}}} \left( \frac{FV_3^{\text{out}}}{FV_3^{\text{in}} - FV_3^{\text{out}}} \right) \quad (2.77)$$

όπου  $FV_3^{\text{out}} = \text{FFT}\{V_3^{\text{out}}\}$  και  $FV_3^{\text{in}} = \text{FFT}\{V_3^{\text{in}}\}$  τα φάσματα Fourier των μετρούμενων ηλεκτρικών τάσεων εξόδου και εισόδου αντιστοίχως.



**Σχήμα 2.21:** Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της μετρητικής διάταξης του Σχήματος 2.20.

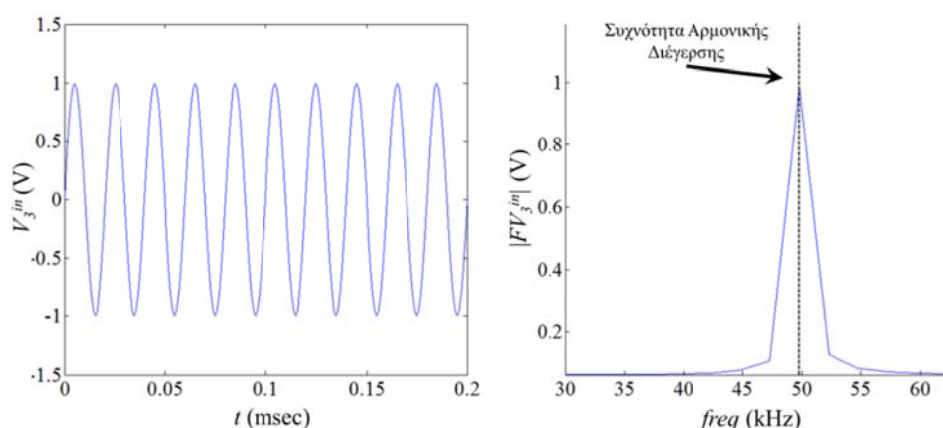
Στις πραγματικές εφαρμογές για την υλοποίηση του κυκλώματος 2.21 χρησιμοποιείται η προσαρμογή ηλεκτροδίων και ακροδεκτών για τη σύνδεση των επιμέρους στοιχείων που το απαρτίζουν. Αυτό έχει σαν συνέπεια στις περιπτώσεις σάρωσης υψηλών συχνοτήτων,  $freq > 200 \text{ kHz}$ , τα ηλεκτρόδια των στοιχείων και η καλωδίωση του συστήματος να εμφανίζουν επαγωγικά και χωρητικά φαινόμενα (Malvino and Bates, 2006). Στις περιπτώσεις αυτές η ισοδύναμη αντίσταση μέτρησης μεταβάλλεται συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης, εισάγοντας στην απόκριση της HMA ηλεκτρικό θόρυβο. Για το λόγο αυτό στις συγκεκριμένες εφαρμογές είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται ηλεκτρικές αντιστάσεις κατάλληλες για εφαρμογές ραδιοπομπών τύπου HF-VHF (RF-Resistors, 3-300 MHz),

οι οποίες παραμένουν πρακτικά αμετάβλητες σε υψηλές συχνότητες λειτουργίας (Malvino and Bates, 2006).

Η καταγραφή της χρονικής απόκρισης των ηλεκτρικών τάσεων εισόδου και εξόδου, είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί με τη χρήση παλμογράφων ή ολοκληρωμένων Καρτών Συλλογής-Καταγραφής Δεδομένων (Data Acquisition Cards-DAQ), (Agilent Technologies, 2012). Η ηλεκτρική τάση διέγερσης εφαρμόζεται στο κύκλωμα ΗΜΗΣ -  $R_{meas}$  με τη αξιοποίηση ολοκληρωμένων συσκευών παραγωγής σημάτων ή συναρτήσεων ηλεκτρικής τάσης (Electrical Function Generators), (Xu, 2009).

Ανάλογα με τη μορφή των συναρτήσεων ηλεκτρικής διεγέρσεως τα κυκλώματα μέτρησης των ΗΜΑ/ΗΜΕ μπορούν να διακριθούν:

- Στα εξαναγκαζόμενα από Μόνο-Αρμονικές Διεγέρσεις, ημιτονοειδούς μορφής (Single Sine Excitation) και συγκεκριμένης συχνότητας, με επαρκή αριθμό κύκλων ηλεκτρικής ταλάντωσης προκειμένου να είναι δυνατή η καταγραφή της Ηλεκτρο-Μηχανικής απόκρισης του συστήματος στο στάδιο της μόνιμου αποκρίσεως.
- Στα εξαναγκαζόμενα από Πολύ-Αρμονικές Διεγέρσεις, ημιτονοειδούς μορφής, οι οποίες προκύπτουν είτε από την άθροιση τριγωνομετρικών συναρτήσεων ημιτόνων και συνημιτόνων με διαφορετικά πλάτη, γωνιακές συχνότητες διέγερσης και φάσεις (Multi-Sine Signals), είτε από σήματα μιας αρμονικής συνάρτησης με μεταβαλλόμενη χρονικά φάση (Chirp Signals).

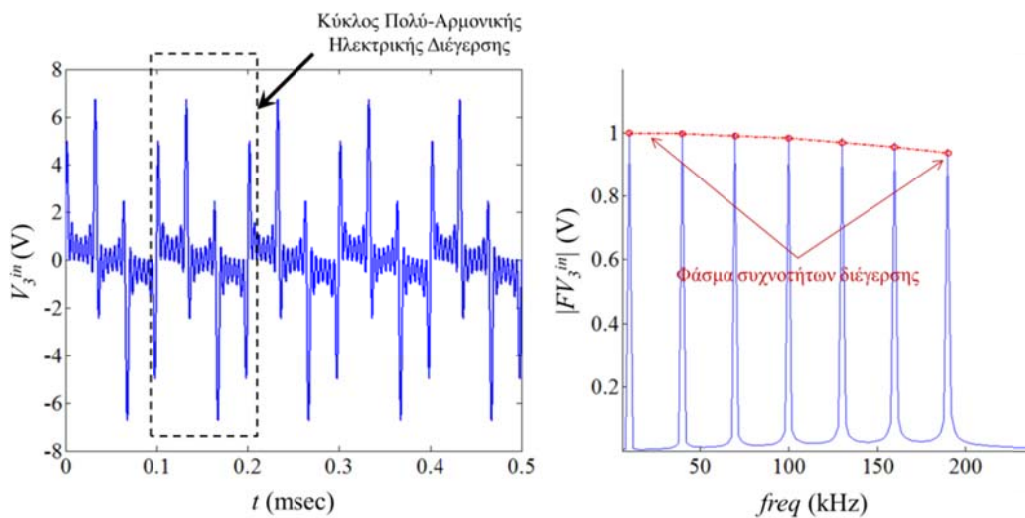


**Σχήμα 2.22:** Μονοαρμονικό σήμα ηλεκτρικής διέγερσης (αριστερά) και το αντίστοιχο φάσμα Fourier (Δεξιά). Συχνότητα διέγερσης 50kHz, Κύκλοι ταλάντωσης: 10.

Η μονοαρμονική διέγερση, η οποία αποτελεί και την απλούστερη δυνατή μορφή εξαναγκασμού του ΗΜΗΣ σε ταλάντωση, εξάγεται από τη γεννήτρια σήματος ηλεκτρικής τάσης με την χρήση τριγωνομετρικών συναρτήσεων της μορφής (Σχήμα 2.22):

$$V_3^{in} = A_C \cos(\omega t) + A_S \sin(\omega t) = \bar{V}_3^{in} \sin(\theta) \quad (2.78)$$

όπου  $\theta = \omega t + \varphi$ ,  $\bar{V}_3^{in} = \sqrt{A_C^2 + A_S^2}$  και  $\varphi = \text{atan}(A_C / A_S)$  το πλάτος και η φάση αντίστοιχα της αρμονικής διέγερσης.



**Σχήμα 2.23:** Πολυαρμονικό σήμα ηλεκτρικής διέγερσης (αριστερά) και το αντίστοιχο φάσμα Fourier (Δεξιά). Εύρος συχνοτήτων διέγερσης 10-200 kHz, Κύκλοι ταλάντωσης: 5.

Οι πειραματικές διαδικασίες που αξιοποιούν μονοαρμονικά σήματα διέγερσης, πρακτικά εξαναγκάζουν σε ταλάντωση το ΗΜΗΣ με μια μοναδική συχνότητα. Αυτό αποτελεί μειονέκτημα διότι προαπαιτεί τη γνώση της περιοχής των συχνοτήτων συντονισμού του συστήματος, έτσι ώστε η συχνότητα διέγερσης να βρίσκεται εντός αυτής. Σε διαφορετική περίπτωση η κορυφή της συχνότητας διέγερσης στο φάσμα Fourier της τάσεως εξόδου, θα υπερκαλύπτει τις άλλες μικρότερες κορυφές απόκρισης που δίνει ως έξοδο το ΗΜΗΣ. Οι μικρότερες κορυφές απόκρισης αντιπροσωπεύουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά της υπό παρακολούθησης κατασκευής και η καταγραφή της μεταβολής τους αποτελεί και το βασικό εργαλείο μιας διαδικασίας ΜΚΕ. Για το λόγο αυτό συνήθως προτιμούνται συναρτήσεις ηλεκτρικής διέγερσης οι οποίες σαρώνουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων όπως οι πολυαρμονικές και οι συναρτήσεις χρονικά μεταβαλλόμενης φάσης. Οι



πολυαρμονικές διεγέρσεις περιγράφονται από αθροιστικές συναρτήσεις της μορφής (Σχήμα 2.23) (Xu, 2009):

$$V_3^{in} = \sum_{j=1}^M \bar{V}_{3,j}^{in} \sin(\theta_j) \quad (2.79)$$

όπου  $\theta_j = \omega_j t + \varphi_j$ ,  $\bar{V}_{3,j}^{in}$  και  $\varphi_j$  το πλάτος και η φάση αντίστοιχα της *ja*ρμονικής συνιστώσας της ηλεκτρικής διέγερσης. Το εύρος των συχνοτήτων διέγερσης προσδιορίζεται από τη συνάρτηση:

$$\omega_j = \omega_{\min} + \frac{j-1}{M-1}(\omega_{\max} - \omega_{\min}) \quad (2.80)$$

Επιστρέφοντας στη κλασσική ημιτονοειδή διέγερση, είναι εύκολο να διαπιστωθεί ότι το όρισμα της τριγωνομετρικής συνάρτησης είναι μια γραμμική συνάρτηση του χρόνου,  $\theta(t) = \omega t + \varphi$ , όπου η πρώτη της παράγωγος,  $d\theta/dt = \omega$ , αντιπροσωπεύει την γωνιακή συχνότητα της διέγερσης. Αν υποθεθεί ότι το όρισμα της τριγωνομετρικής συνάρτησης περιγράφεται από ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού το οποίο έχει τη μορφή:

$$\theta(t) = \alpha_2 t^2 + \alpha_1 t + a_0 \quad (2.81)$$

όπου  $a_0 = \varphi$  η φάση της διέγερσης, τότε αντίστοιχα η γωνιακή συχνότητα διέγερσης θα δίδεται από τη σχέση:

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt} = 2\alpha_2 t + \alpha_1 \quad (2.82)$$

Από την Εξίσωση (2.82) προκύπτει ότι στη περίπτωση ενός σήματος τετραγωνικής φάσης η γωνιακή συχνότητα αποτελεί γραμμική συνάρτηση του χρόνου. Εάν τώρα ληφθεί υπόψη ότι σε ένα διάστημα χρόνου  $[0, t_{\text{sweep}}]$  η γωνιακή συχνότητα κυμαίνεται στο διάστημα τιμών  $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$  τότε οι συντελεστές της Εξίσωσης (2.81) προσδιορίζονται από τις σχέσεις:

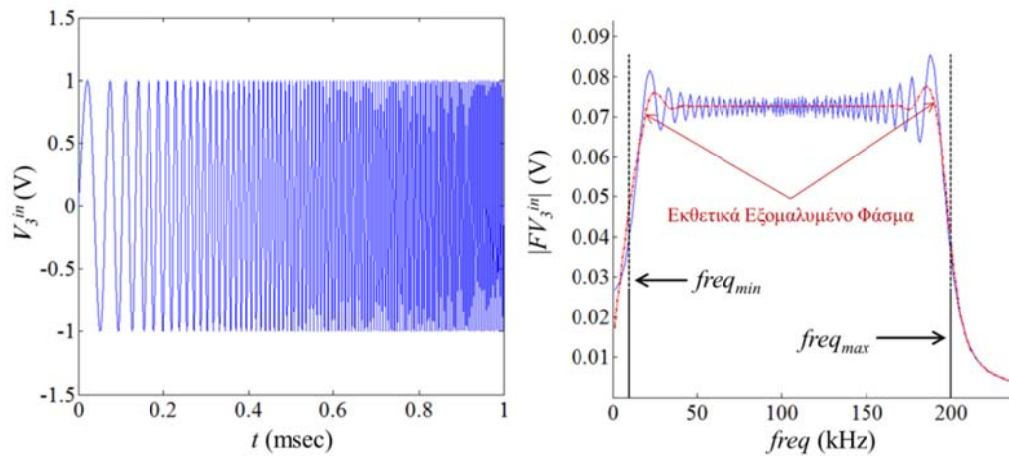
$$\alpha_1 = \omega_0 = 2\pi \text{freq}_{\min} \quad (2.83.\alpha)$$

$$\alpha_2 = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{2t_{\text{sweep}}} = \pi \frac{\text{freq}_{\max} - \text{freq}_{\min}}{t_{\text{sweep}}} \quad (2.83.\beta)$$

Με βάση τις Εξισώσεις (2.81) και (2.83) και υποθέτοντας σήμα μηδενικής φάσης μπορεί να ορισθεί η ακόλουθη συνάρτηση ηλεκτρικής διέγερσης:

$$V_3^{in} = \bar{V}_3^{in} \sin(\theta) \stackrel{\varphi=0}{=} \bar{V}_3^{in} \sin\left(\pi \frac{freq_{max} - freq_{min}}{t_{sweep}} t^2 + 2\pi freq_{min} t\right) \quad (2.84)$$

Η τριγωνομετρική συνάρτηση της Εξίσωσης (2.84), αποτελεί ένα αρμονικό ηλεκτρικό σήμα, του οποίου το όρισμα μεταβάλλεται τετραγωνικά συναρτήσει του χρόνου, συνεπάγοντας ότι και η γωνιακή συχνότητα είναι γραμμική συνάρτηση του χρόνου (Εξίσωση 2.82). Ο συγκριμένος τύπος σήματος καλείται Σήμα Τετραγωνικής Φάσης (Quadratic Phase Signal) ή Γραμμικό Σήμα Chirp (Linear Chirp Signal-LCS) (Xu, 2009; Pavle, 2011; Pavle et al., 2012), (Σχήμα 2.24).



**Σχήμα 2.24:** Γραμμικό σήμα Chirp (αριστερά) και το αντίστοιχο φάσμα Fourier (Δεξιά).  
Εύρος συχνοτήτων διέγερσης 10-200 kHz.

Από τη γραφική απεικόνιση ενός γραμμικού Chirp (LCS) στο Σχήμα 2.24, διαπιστώνεται ότι η χρόνο-ιστορία της ηλεκτρικής διεγέρσεως ξεκινάει με αραιούς ημιτονοειδείς κύκλους υποδηλώνοντας μεγάλη αρχική περίοδο και καθώς η κυματομορφή εξελίσσεται οι κύκλοι πυκνώνουν αντιπροσωπεύοντας την αύξηση της συχνότητας. Το φάσμα Fourier του LCS αντίστοιχα απεικονίζει μια περιοχή με πλάτος κυμαινόμενο εντός συγκριμένων ορίων, η οποία εκτείνεται στο διάστημα των συχνοτήτων διέγερσης  $[\omega_{min}, \omega_{max}]$ . Οι διακυμάνσεις του πλάτους Fourier εξομαλύνονται όσο αυξάνεται ο χρόνος σάρωσης  $t_{sweep}$ .

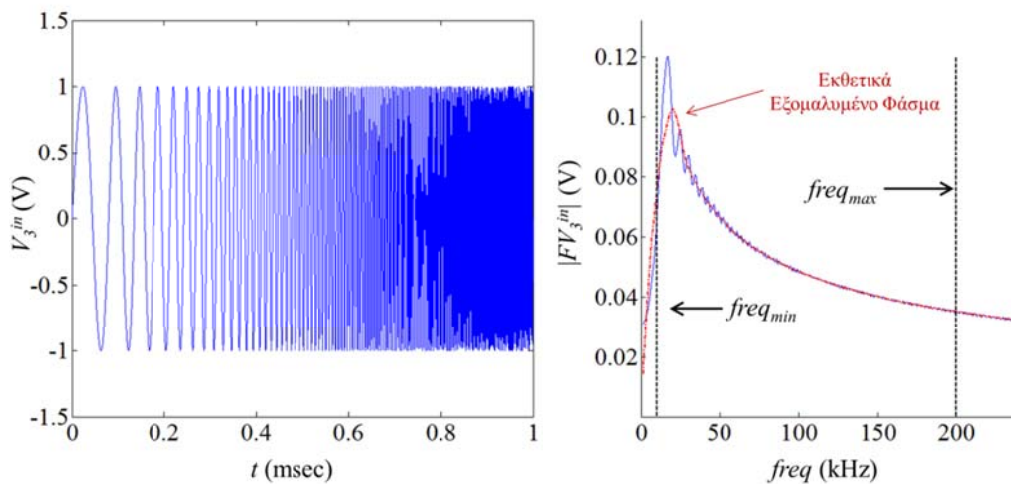
Τα LCS αποτελούν εξαιρετικά χρήσιμα εργαλεία σε πλήθος εφαρμογών που σχετίζονται με την σάρωση συχνοτήτων κυματομορφών, όπως είναι τα συστήματα



ανίχνευσης αντικειμένων (Radar), η εκπομπή ραδιοκυμάτων, η ταυτοποίηση ηλεκτρικών κυκλωμάτων και ο προσδιορισμός της HMA/HME πάση φύσεως δυναμικών συστημάτων με ηλεκτρική απόκριση (Xu, 2009; Malvino and Bates, 2006). Αναφέρεται επίσης ότι σε κάποιες περιπτώσεις συστημάτων ELIA η σάρωση συχνοτήτων υλοποιείται με τη χρήση Εκθετικών Σημάτων Chirp (Exponential Chirp Signals), τα οποία περιγράφονται από τη γενική συνάρτηση (Xu, 2009), (Σχήμα 2.25):

$$V_3^{in} = \bar{V}_3^{in} \sin(\omega_{\min} e^{kt} + \varphi) \quad (2.85)$$

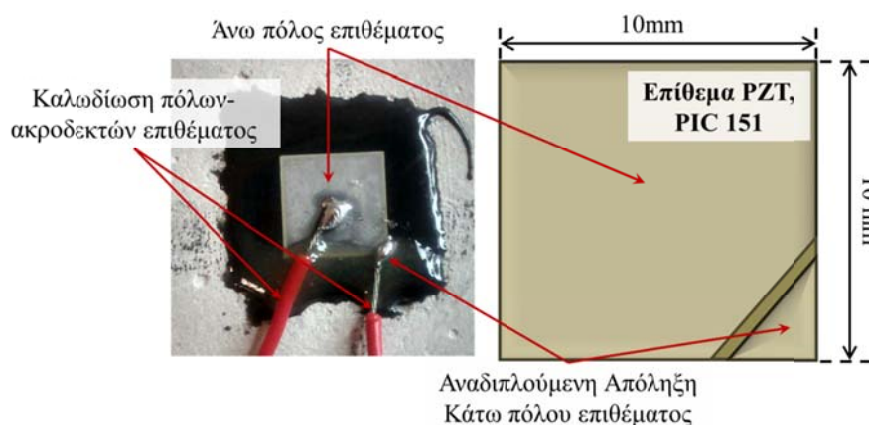
όπου  $t \in [0, t_{\text{sweep}}]$  και  $k = \ln(\omega_{\max} / \omega_{\min}) / t_{\text{sweep}}$ .



**Σχήμα 2.25:** Εκθετικό σήμα Chirp (αριστερά) και το αντίστοιχο φάσμα Fourier (Δεξιά).  
Εύρος συχνοτήτων διέγερσης 10-200 kHz.

Στο Σχήμα 2.26 παρουσιάζεται ένα πιεζοηλεκτρικό επιθεμα PZT τύπου PIC 151 (PI Ceramics, 2014), καθώς και τα ηλεκτρόδια που απαιτούνται για τον ενόργανο προσδιορισμό της φασματικής απόκρισης των HMA/HME. Επειδή τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα αποτελούν διηλεκτρικά στοιχεία η δομή τους συνίσταται από ένα πιεζοηλεκτρικό πλακίδιο τοποθετημένο εντός δύο μεταλλικών φύλλων (Σχήμα 2.3). Τα μεταλλικά φύλλα αντιπροσωπεύουν τους οπλισμούς του διηλεκτρικού στοιχείου στους οποίους συγκεντρώνεται το ηλεκτρικό φορτίο όταν σε αυτούς εφαρμοστεί μια διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού. Επίσης οι οπλισμοί ή ακροδέκτες του επιθέματος είναι υπεύθυνοι για την εφαρμογή και τη διατήρηση του ηλεκτρικού πεδίου, εντός του οποίου το PZT εξαναγκάζεται σε μηχανική ταλάντωση. Προκειμένου να είναι δυνατή η ηλεκτρική διέγερση του επιθέματος μέσω κάποιας γεννήτριας χρονικών

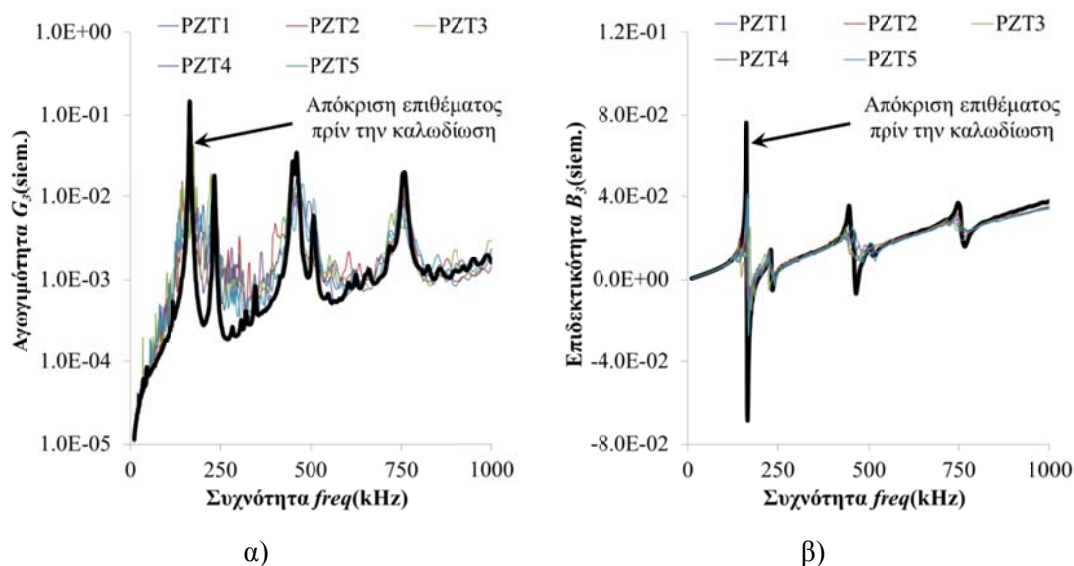
συναρτήσεων και η σύνδεση του με διατάξεις μέτρησης των HMA/HME, στους δύο ακροδέκτες προσαρμόζονται ηλεκτρόδια (Σχήμα 2.26). Τα ηλεκτρόδια «δένονται» στους ακροδέκτες του επιθέματος με θερμική κατεργασία (Κολλητήρια) μαλακών κραμάτων κασσιτέρου (Καλάι, Solder ή Kalay), (Providakis and Liarakos, 2011; 2014). Η διαδικασία θερμικής προσαρμογής πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι η θερμοκρασία κόλλησης δεν υπερβαίνει τη θερμοκρασία Curie του PZT ( $<250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), (PI Ceramics, 2014). Το συγκριμένο επίθεμα της PI Ceramics προσφέρει την πολύ σημαντική δυνατότητα προσαρμογής και των δύο ηλεκτροδίων στη μια του επιφάνεια, καθώς ο κάτω ακροδέκτης έχει αναδιπλωθεί δίνοντας μια προέκταση-απόληξη στην επάνω επιφάνεια. Έτσι προσαρμόζοντας και τα δύο ηλεκτρόδια στην επάνω επιφάνεια του επιθέματος, η κάτω μένει ελεύθερη για την προσαρμογή του επιθέματος στον φέρον οργανισμό της υπό παρακολούθησης κατασκευής.



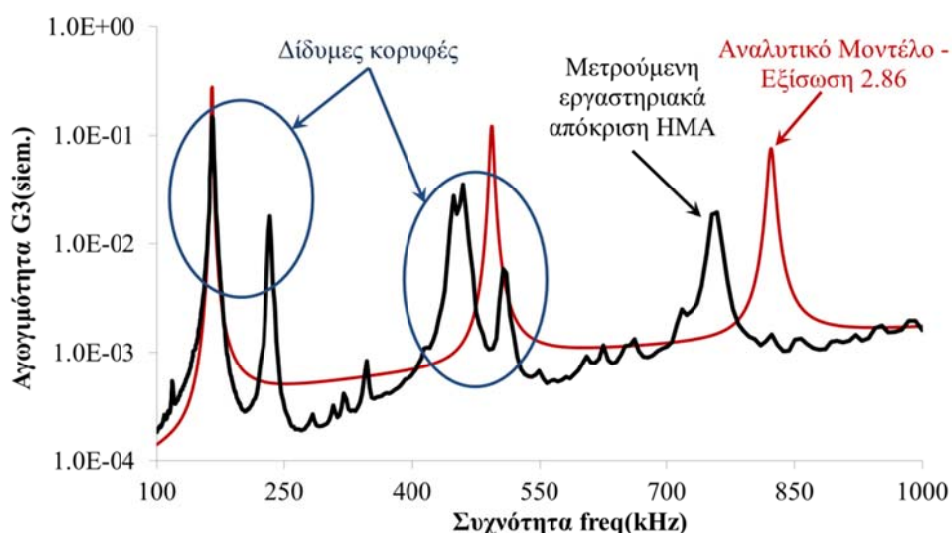
**Σχήμα 2.26:** Καλωδιωμένο Επίθεμα PIC 151 10x10x0.2mm.

Στο Σχήμα 2.27 παρουσιάζεται η φασματική απόκριση του πραγματικού (αγωγιμότητα) και του φανταστικού (επιδεκτικότητα) μέρους της HMA, ελεύθερων μηχανικά PZT, σε ένα εύρος συχνοτήτων μεταξύ 10 kHz και 1 MHz. Τα φάσματα προσδιορίστηκαν με τη χρήση ενός συστήματος ELIA της QuadTech με εμπορική σήμανση προϊόντος RLC Measuring Primer QuadTech 7600 (QuadTech, 2002). Η απόκριση μετρήθηκε για 5 επιθέματα με προσαρμοσμένα ηλεκτρόδια (Σχήμα 2.26) και ένα πλήρως ελεύθερο. Από τη μορφή των φασμάτων απόκρισης είναι εύκολο να διακριθεί η διαφοροποίηση της μορφής τους πριν και μετά την προσαρμογή των ηλεκτροδίων. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι τόσο τα ηλεκτρόδια όσο και ο όγκος του κράματος συγκόλλησης έχουν πάχος συγκρίσιμο με αυτό του

επιθέματος. Αυτό έχει ως συνέπεια να επιδεικνύουν παραπλήσια ή και μεγαλύτερη από το επίθεμα δυσκαμψία με αποτέλεσμα να συμπεριφέρονται ως υποτυπώδεις στηρίξεις. Με άλλα λόγια η συγκόλληση των ηλεκτροδίων στο επίθεμα επιδρά στις συνοριακές του συνθήκες απομακρύνοντας το από τη θεωρητική κατάσταση του πλήρως ελεύθερου μηχανικά επιθέματος.



**Σχήμα 2.27:** Πειραματικός προσδιορισμός της HMA μηχανικά ελευθέρων PZT τύπου PIC 151. α) Πραγματικό μέρος – Αγωγιμότητα. β) Φανταστικό μέρος – Επιδεκτικότητα.



**Σχήμα 2.28:** Συγκριτική παράθεση της πειραματικής και αναλυτικής φασματικής απόκρισης της αγωγιμότητας (Πραγματικό μέρος HMA),.

Στο σχήμα 2.28 αντιπαραβάλλεται η πειραματικώς καταγραφόμενη ηλεκτρική απόκριση της αγωγιμότητας ενός ελεύθερου PZT τύπου PIC 151 (PI Ceramics, 2014)

χωρίς προσαρμοσμένα ηλεκτρόδια, με το αντίστοιχο φάσμα απόκρισης που περιγράφεται από το αναλυτικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής (Εξίσωση 2.52). Η αναλυτική έκφραση της φασματικής απόκρισης ενός τετραγωνικού επιθέματος PZT, διαστάσεων ακμής  $l=10\text{mm}$  και πάχους  $h=0.2\text{mm}$ , προκύπτει από την Εξίσωση (2.52) με την αντικατάσταση της μηδενικής τιμής στη θέση της μηχανικής εμπίεσης  $Z_{Sf}$  και περιγράφεται από τη εξίσωση:

$$Y_3 = i\omega \frac{l^2}{h} \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \frac{\tan(a_l \gamma)}{a_l \gamma} + i\omega \frac{l^2}{h} \left[ \bar{\epsilon}_{33} - \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \right] \quad (2.86)$$

Οι τιμές των ηλεκτρομηχανικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν παραθέτονται στον Πίνακα 2.1, ενώ η τιμή του συντελεστή  $a_l$  λήφθηκε ίση με 0.89. Οι αποκλίσεις της πραγματικής απόκρισης από την αναλυτική οφείλεται στους παρακάτω παράγοντες:

- α) Η θεώρηση της επίπεδης τάσης παρόλο που πλησιάζει σημαντικά την μηχανική συμπεριφορά του επιθέματος, ενδέχεται να μην λαμβάνει υπόψη κάποιους επιπλέον βαθμούς ελευθερίας οι οποίοι εμφανίζονται στο πειραματικό φάσμα, δίνοντας δίδυμες κορυφές στις περιοχές συχνοτήτων 100-250 kHz και 400-550 kHz.
- β) Όλα τα αναλυτικά μοντέλα που έχουν παρουσιαστεί, μεταξύ των οποίων και το προτεινόμενο στη παρούσα διατριβή, θεωρούν ότι ο συντελεστής μηχανικών απωλειών του υλικού παραμένει αμετάβλητος συναρτήσει της συχνότητας. Αυτό είναι μια υπόθεση που σε ένα εύρος συχνοτήτων μικρότερο των 200 kHz δεν δίνει σημαντικές αποκλίσεις. Σε μεγαλύτερες όμως συχνότητες η απόκλιση μεταξύ των πειραματικών και των αναλυτικών κορυφών αυξάνεται σημαντικά. Ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο θα λάμβανε υπόψη του και τη μεταβολή του συντελεστή μηχανικών απωλειών συναρτήσει της συχνότητας, θα αύξανε σημαντικά τη μαθηματική πολυπλοκότητα.
- γ) Όσο λεπτομερής και αν είναι ο σχεδιασμός της πειραματικής διατάξεως που μετράει την απόκριση των HMA/HME, λόγω του πολύ μικρού πάχους του επιθέματος (0.2mm) οι συνθήκες του μηχανικά απολύτως ελεύθερου σώματος είναι πού δύσκολο να επιτευχθούν.

- δ) Ο συνδυασμός του συγκρίσιμου πάχους μεταξύ επιθέματος και ηλεκτροδίων, καθώς και των υψηλών συχνοτήτων σάρωσης, επάγει σημαντικό ηλεκτρικό θόρυβο ιδίως στην περιοχή συχνοτήτων πέραν των 200 kHz. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανίζονται μικρότερες κορυφές οι οποίες οφείλονται στο συντονισμό των ηλεκτροδίων που λόγω των υψηλών συχνοτήτων, πέραν της ωμικής αντιστάσεως, εμφανίζουν ταυτόχρονα επαγωγική και χωρητική συμπεριφορά. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι στη περίπτωση που το επίθεμα προσαρμόσεται σε μια Κ/Φ με πολύ μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση, όπως παραδείγματος χάριν τα μονωτικά υλικά, ο ηλεκτρικός θόρυβος εξαλείφεται σε μεγάλο βαθμό λόγω της μόνωσης που προκαλούν τα υλικά της κατασκευής.

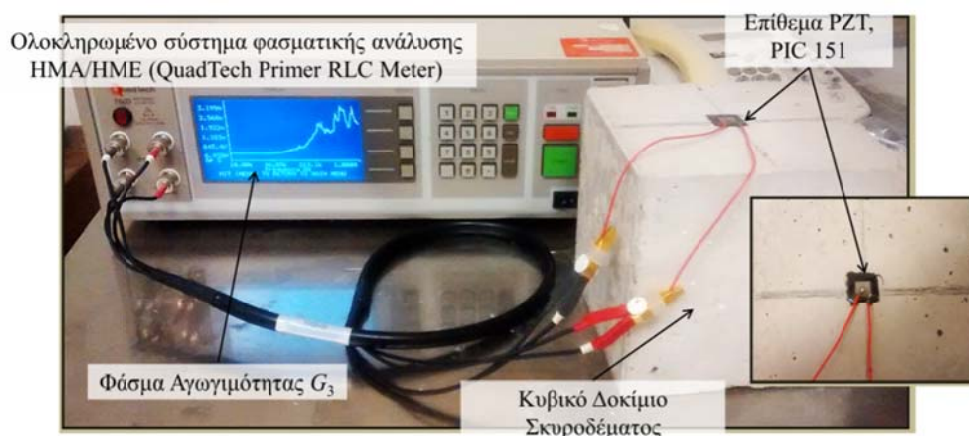
Παρά τις αποκλίσεις που εμφανίζει αναλυτικό μοντέλο προσέγγισης της απόκρισης του PZT είναι εξαιρετικά χρήσιμο διότι:

- α) Απεικονίζει ρεαλιστικά τη γενική ηλεκτρομηχανική συμπεριφορά των πιεζοηλεκτρικών υλικών, και ιδιαίτερα τα δυναμικά χαρακτηριστικά που οφείλονται στις μηχανικές ιδιότητες του επιθέματος.
- β) Επεξηγεί θεωρητικά τα πειραματικώς καταγραφόμενα δυναμικά στοιχεία.
- γ) Όπως θα δειχθεί αναλυτικά στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, δίνουν τα θεμελιώδη μαθηματικά και θεωρητικά εργαλεία για την ολική προσομοίωση της ηλεκτρικής απόκρισης οποιουδήποτε ΗΜΗΣ, με βάση τη πειραματικώς καταγραφόμενη απόκριση.
- δ) Στις εφαρμογές των PZT στο ΜΚΕ σκυροδέματος σπανίως η μέγιστη συχνότητα σάρωσης ξεπερνά τα 300 kHz (Annamdas and Radhika, 2013; Providakis and Liarakos 2011; 2014).

Στο Σχήμα 2.29 απεικονίζεται ένα μηχανικά συζευγμένο ηλεκτρομηχανικό σύστημα το οποίο ενσωματώνει ένα δομικό στοιχείο σκυροδέματος. Η συγκεκριμένη διάταξη είναι η απλούστερη που δύναται να διαμορφωθεί σε μια διαδικασία ΜΚΕ, με το δοκίμιο να αποτελεί την υπό παρακολούθηση κατασκευή. Το σύστημα αποτελείται από ένα πιεζοηλεκτρικό επίθεμα PIC 151 προσαρμοσμένο επιφανειακά σε ένα κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος C20/25, ακμής 150mm, αντίστοιχο με αυτά που χρησιμοποιούνται για τις καταστροφικές δοκιμές μοναξονικής θλίψης. Η προσαρμογή του επιθέματος υλοποιείται με τη χρήση μιας εποξικής κόλλας δύο συστατικών



(Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013; Permatex Inc., 2011), η οποία εμφανίζει χημική αδράνεια σε σχέση με το πιεζοηλεκτρικό υλικό, τους ακροδέκτες του επιθέματος, τα ηλεκτρόδια και το σκυροδέμα, ενώ παράλληλα διασφαλίζει α) την απαιτούμενη μηχανική δυσκαμψία, προκειμένου η μηχανική ενέργεια να διαβιβάζεται στο εσωτερικό του σκυροδέματος με τις μικρότερες δυνατές απώλειες και β) τη προστασία του επιθέματος από την υγρασία των πόρων του σκυροδέματος. Τα ηλεκτρόδια όπως και στη περίπτωση του Σχήματος 2.26 έχουν συγκολληθεί θερμικά με τη χρήση ενός μαλακού μεταλλικού κράματος (Καλάι-Κολλητήρι) στην άνω επιφάνεια του επιθέματος αξιοποιώντας την επιφανειακή απόληξη του κάτω ακροδέκτη.



**Σχήμα 2.29:** ΜΚΕ κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος με τη χρήση ενός επιφανειακώς προσαρμοσμένου πιεζοηλεκτρικού επιθέματος PIC 151.

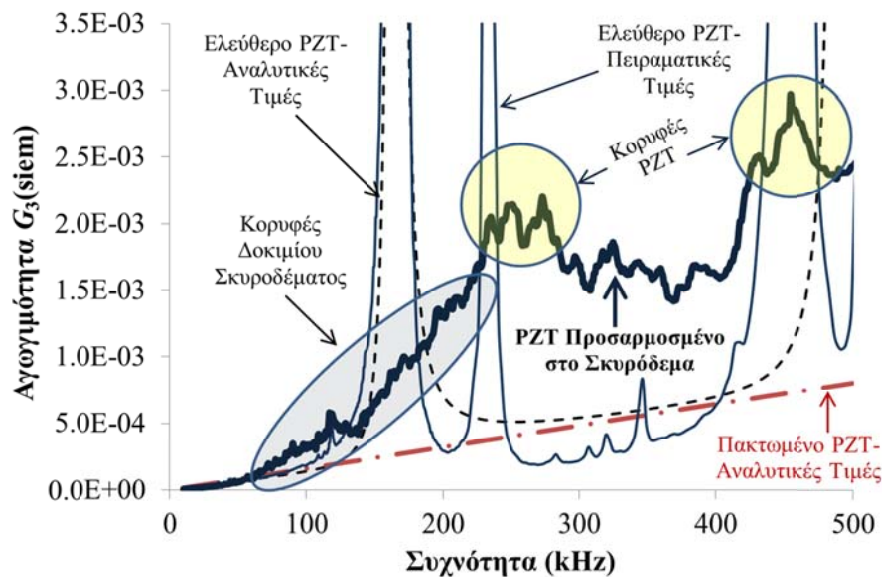
Η ηλεκτρική απόκριση του ΗΜΗΣ στο πεδίο της συχνότητας καταγράφεται ακριβώς με την ίδια διαδικασία που εφαρμόστηκε παραπάνω για τη περίπτωση των μηχανικά ελεύθερων επιθεμάτων PIC 151 (Σύστημα ELIA, QuadTech 7600). Η ηλεκτρική απόκριση της αγωγιμότητας του ΗΜΗΣ παρουσιάζεται στο γράφημα του Σχήματος 2.30, σε σχέση με την πειραματικά καταγραφόμενη απόκριση του μηχανικά ελεύθερου επιθέματος και τις αναλυτικώς προσδιοριζόμενες αποκρίσεις αγωγιμότητας για τις περιπτώσεις του ελεύθερου και πλευρικά πακτωμένου επιθέματος. Η αναλυτικές τιμές της απόκρισης του ελεύθερου και του πακτωμένου πλευρικά επιθέματος προκύπτουν με βάση την Εξίσωση 2.52, για τιμές  $Z_{st}=0$  και  $Z_{st} \rightarrow \infty$  αντίστοιχα.

Από το Σχήμα 2.30 παρατηρείται εμφανώς η καθολική μεταβολή της ηλεκτρικής απόκρισης του επιθέματος μετά την προσκόλληση του στην επιφάνεια του

σκυροδέματος. Η δραστηκή μείωση των τιμών της αγωγιμότητας οι οποίες από περίπου 0.09-0.12 (siem) πριν την επικόλληση (Σχήματα 2.27-2.28) λαμβάνουν τιμές μεταξύ 5e-4 και 3e-3 (siem) μετά από αυτή, οφείλεται στην απότομη μεταβολή των συνοριακών συνθηκών λόγω της υψηλής δυσκαμψίας του σκυροδέματος. Το φαινόμενο εξηγείται και θεωρητικά με βάση την Εξίσωση (2.53) η οποία λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση μεταξύ DMI και DMS,  $K_a^{eff} = i\omega Z_a^{eff}$  και  $K_{St} = i\omega Z_{St}^{eff}$ , γράφεται:

$$Y_3 = i\omega \frac{l^2}{h} \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \left( \frac{K_a^{eff}}{K_a^{eff} + K_{St}} \right) + Y_3^{fix} \quad (2.87)$$

Από τη Εξίσωση (2.87), διαπιστώνεται ότι όσο η δυναμική δυσκαμψία  $K_{St}$  (DMS) της υπό παρακολούθησης κατασκευής αυξάνεται, οι τιμές της αγωγιμότητας θα μειώνονται, εφόσον φυσικά οι ηλεκτρομηχανικές ιδιότητες του PZT παραμένουν αμετάβλητες. Επιπλέον τόσο από το συνδυαστικό Σχήμα 2.30 όσο και από την Εξίσωση (2.87) επιβεβαιώνεται η παραδοχή που έγινε στην Ενότητα 2.3 του παρόντος κεφαλαίου και εκφράστηκε μαθηματικά με την Εξίσωση 2.30, σχετικά με το γεγονός ότι η απόκριση της HMA οποιουδήποτε ΗΜΗΣ θα κυμαίνεται ανάλογα με τις συνοριακές συνθήκες του επιθέματος μεταξύ δύο ακραίων καταστάσεων, αυτής του πλήρως ελεύθερου μηχανικά και του πλήρως πακτωμένου PZT.



**Σχήμα 2.30:** Φασματική απόκριση επιθέματος PIC 151 προσαρμοσμένου επιφανειακά σε κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος (Εστίαση στη περιοχή τιμών Αγωγιμότητας, 0-0.0035).

Τέλος όσον αφορά τη μορφή του φάσματος απόκρισης της αγωγιμότητας του Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος σκυροδέματος, είναι δυνατό να διακριθούν τουλάχιστον δύο δεσπόζουσες κορυφές, η μια στο εύρος συχνοτήτων 240-270 kHz και η δεύτερη στο εύρος 430-460kHz, καθώς και αρκετές μικρότερες. Οι δεσπόζουσες κορυφές αντιπροσωπεύουν τις αρχικές κορυφές του ελεύθερου επιθέματος οι οποίες μετά την προσαρμογή του στην επιφάνεια του σκυροδέματος μετατοπίστηκαν στα δεξιά του φάσματος και η οξύτητα τους αμβλύνθηκε εξαιτίας της μεταβολής των συνοριακών συνθηκών. Από τις μικρότερες κορυφές, εκείνες που εμφανίζουν μια σχετική οξύτητα αντιπροσωπεύουν τόσο τα δυναμικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, όσο και την αλληλεπίδραση του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος με το στρώμα της εποξικής κόλλας που το δένει στο σκυρόδεμα. Οι υπόλοιπες κορυφές, οι οποίες πρακτικά αποτελούν διακυμάνσεις των μετρήσεων, οφείλονται πιθανώς στον ηλεκτρικό θόρυβο των ηλεκτροδίων, του καλπί καθώς και στις επιδράσεις του περιβάλλοντος ηλεκτρικού πεδίου, που αναπόφευκτα υπάρχει λόγω των συσκευών ενόργανης ανάλυσης.



# Κεφάλαιο 3

## Έλεγχος Δομικής Ακεραιότητας Κατασκευών με Χρήση Πιεζοηλεκτρικών Υλικών

### 3.1. Η Μέθοδος της Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας/ Εμπέδησης

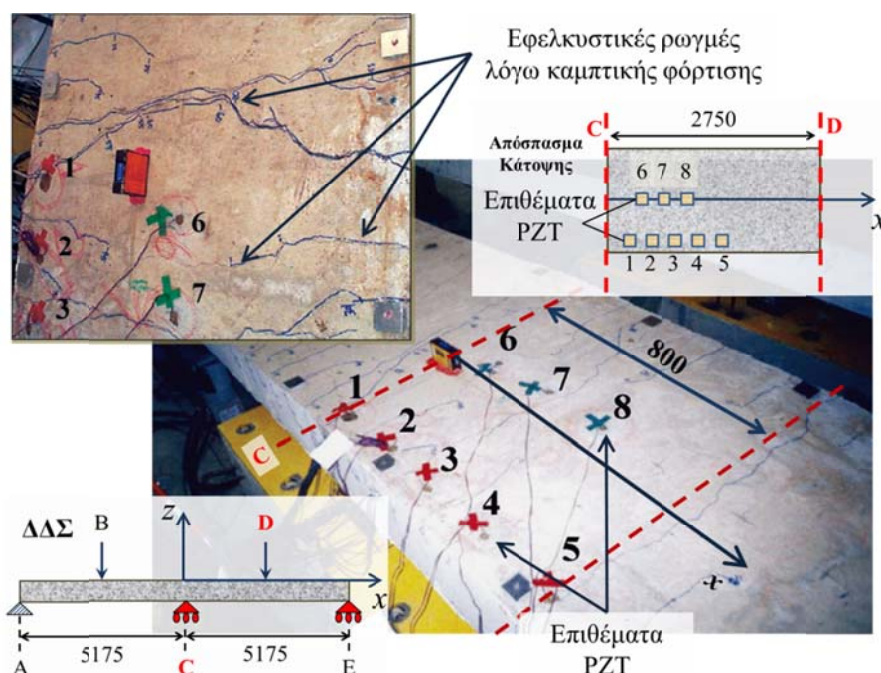
Η ηλεκτρομηχανική συμπεριφορά των πιεζοηλεκτρικών υλικών και η μηχανική αλληλεπίδραση που επιδεικνύουν με τις κατασκευές στις οποίες ενσωματώνονται, αποτελούν τις φυσικές αρχές πάνω στις οποίες στηρίζεται ένας ολόκληρος κλάδος μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου (ΜΚΕ). Οι μέθοδοι που έχουν προταθεί για τη παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών, αξιοποιούν ως βασικό εργαλείο παρατήρησης την απόκριση στο πεδίο της συχνότητας, των μεγεθών της Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας (ΗΜΑ) και της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (ΗΜΕ) (Giurgiutiu, 2008; Xu, 2009; Zagrai, 2002). Η μέθοδος ΗΜΑ/ΗΜΕ στηρίζεται στο γεγονός ότι κάθε Ηλεκτρο-Μηχανικό Σύστημα (ΗΜΗΣ) που συμπεριλαμβάνει ένα δομικό σύστημα υπό παρακολούθηση (Κατασκευή Φορέας) με συγκριμένα δυναμικά χαρακτηριστικά, θα δίνει ως έξοδο **ένα μοναδικό φάσμα** απόκρισης της ΗΜΑ/ΗΜΕ, το οποίο αποτελεί την Ηλεκτρο-Μηχανική του Υπογραφή (ΗΜΥ) ή Ταυτότητα (Electro-Mechanical Admittance/Impedance Signature).

Επιπλέον πέραν των μεγεθών ΗΜΑ/ΗΜΑ ως Ηλεκτρο-Μηχανική Υπογραφή δύναται να χρησιμοποιηθούν και μεγέθη παράγωγα αυτών, τα οποία προσδιορίζονται με βάση τα θεωρητικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την περιγραφή της

απόκρισης ενός ΗΜΗΣ στο πεδίο τα συχνότητας. Η εκδήλωση μίας ή και περισσότερων μηχανικών βλαβών, στο φέρον οργανισμό μιας κατασκευής στην οποία έχει εμφυτευτεί τουλάχιστον ένα PZT, επιδρά στη δυναμική απόκριση του δομικού συστήματος και έχει άμεσο αντίκτυπο στην μηχανική αλληλεπίδραση που εμφανίζει με τον ενσωματωμένο πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα. Η διαφοροποίηση αυτή επιδρά στην φασματική απόκριση των ΗΜΑ/ΗΜΕ και αποτυπώνεται στη μορφή της Ηλεκτρο-Μηχανικής Υπογραφής. Μελετώντας τις μεταβολές της Ηλεκτρο-Μηχανικής Υπογραφής ενός ΗΜΗΣ, είναι δυνατό α) να ανιχνευθούν πιθανές βλάβες στον φέρον οργανισμό της κατασκευής, β) να εκτιμηθεί η έκταση τους ανάλογα με την οξύτητα της μεταβολής που εμφανίζει η Ηλεκτρο-Μηχανική Υπογραφή και γ) να γίνει ταυτοποίηση της κάθε βλάβης ανάλογα με τη περιοχή συχνοτήτων που εμφανίζεται κατά περίπτωση η μεταβολή του φάσματος των ΗΜΑ/ΗΜΕ (Giurgiutiu, 2008; Xu, 2009; Zagrai, 2002; Providakis, Liarakos et al., 2010). Τονίζεται για άλλη μια φορά ότι οι μέθοδοι ΗΜΑ/ΗΜΕ υλοποιούνται αποκλειστικά στο πεδίο της συχνότητας και η καταγραφή των συγκεκριμένων μεγεθών στις πραγματικές εφαρμογές, γίνεται με τις μεθόδους ενόργανης μέτρησης που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 2.4.

Η πρώτη ολοκληρωμένη εφαρμογή των επιθεμάτων PZT στον ΜΚΕ κατασκευών σκυροδέματος με την μέθοδο των ΗΜΑ/ΗΜΕ, δημοσιεύτηκε από τους Soh, et al. (2000). Οι συγκεκριμένοι ερευνητές χρησιμοποίησαν ένα σύνολο επιθεμάτων PZT τύπου PIC 151, για τον ΜΚΕ μιας γέφυρας από οπλισμένο σκυρόδεμα σε εργαστηριακή κλίμακα (Σχήμα 3.1). Από το Διάγραμμα Δυνάμεων-Στηρίξεων (ΔΔΣ) του φέροντος οργανισμού της γέφυρας (Σχήμα 3.1), προκύπτει ότι ο συγκριμένος φορέας στηρίζεται με μια άρθρωση στο αριστερό του άκρο Α, μια κύλιση κατά τον οριζόντιο άξονα στο δεξιό άκρο Ε και μια ενδιάμεση κύλιση η οποία ισαπέχει από τα άκρα του (Σημείο C). Ο φορέας υποβάλλεται σε καμπτική καταπόνηση, με την εφαρμογή δύο κάθετων στον άξονα του δυνάμεων με κατεύθυνση προς τα κάτω. Κάθε μια από τις κάθετες δυνάμεις εφαρμόζεται στο μέσω των ανοιγμάτων του φορέα, τα οποία διαμορφώνονται με βάση την ενδιάμεση κύλιση. Η καμπτική καταπόνηση είναι επαναλαμβανόμενη, με τακτικούς κύκλους φόρτισης και το πλάτος της κλιμακώνεται από κύκλο σε κύκλο εωσότου η κατασκευή εξωθηθεί σταδιακά στην αστοχία. Η αστοχία εκδηλώνεται, όπως είναι αναμενόμενο από τη διαμόρφωση του φορέα, στην άνω επιφάνεια της κατασκευής και στη κοντινή περιοχή της

ενδιάμεσης κύλισης, με την εμφάνιση εφελκυστικών ρωγμών. Η ανάπτυξη των ρωγμών λαμβάνει χώρα σε διευθύνσεις περίπου κάθετες στον άξονα της γέφυρας.

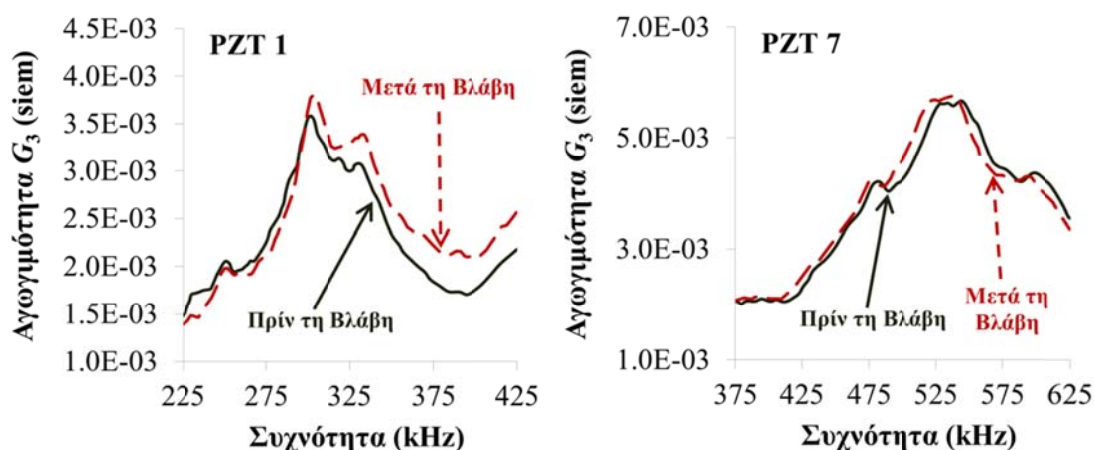


**Σχήμα 3.1:** Ανίχνευση βλαβών σε γέφυρα σκυροδέματος εργαστηριακής κλίμακας, με τη χρήση επιθεμάτων PZT, PIC 151 (Όλες οι διαστάσεις σε mm), (Soh et al., 2000).

Για την παρακολούθηση της μεταβολής της δομικής ακεραιότητας και της διαδικασίας ανάπτυξης των ρωγμών, τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα τοποθετούνται στην περιοχή του δεξιού ανοίγματος της γέφυρας (Σχήμα 3.1), μεταξύ της ενδιάμεσης κύλισης και του σημείου εφαρμογής της δύναμης D. Η τοποθέτηση των PZT έχει γίνει με στόχο την ανάπτυξη ενός πλέγματος παρακολούθησης (Monitoring Grid), το οποίο θα έχει την απαιτούμενη ευαισθησία προκειμένου να ανιχνεύει αξιόπιστα τις συντελούμενες μεταβολές στη δομική ακεραιότητα της κατασκευής. Η καταγραφή του φάσματος απόκρισης των μεγεθών HMA/HME, για κάθε ένα από τα PZT του πλέγματος, γίνεται απευθείας στο πεδίο της συχνότητας με τη χρήση ενός ολοκληρωμένου συστήματος τύπου ELIA (Electrical Impedance Analyzer, Βλ. Ενότητα 2.4). Τα εύρη των συχνοτήτων που σαρώνονται κυμαίνονται μεταξύ 175 και 625 kHz, είναι διαφορετικά για κάθε PZT, αλλά αρκετά από αυτά αλληλεπικαλύπτονται (Σχήμα 3.2), (Soh et al., 2000). Μετά από κάθε κύκλο φόρτισης λαμβάνονται για όλα τα PZT τα φάσματα HME/HMA, προκειμένου να είναι δυνατή

η παρακολούθηση της μεταβολής τους καθώς η εφελκυστική αστοχία εκδηλώνεται και επεκτείνεται.

Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζονται τα φάσματα απόκρισης της αγωγιμότητας δύο επιθεμάτων του πλέγματος παρακολούθησης, και πιο συγκριμένα των PZT 1 και 7 (Σχήμα 3.1). Από τη διαφοροποίηση των ΗΜΥ αγωγιμότητας μεταξύ δύο διαφορετικών καταστάσεων δομικής ακεραιότητας, αποδεικνύεται και πειραματικά η ισχυρή συσχέτιση της ηλεκτρικής απόκρισης του PZT με τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής που τη φέρει, επιβεβαιώνοντας τα γενικά συμπεράσματα που έχουν προκύψει από τη θεωρητική διερεύνηση των Ηλεκτρο-Μηχανικών Συστημάτων. Επιπλέον διαπιστώνεται ότι για κάθε διαδικασία ΜΚΕ είναι αναγκαίο να γίνετε μια ανάλυση ευαισθησίας των συγκολλημένων PZT, προκειμένου να προσδιοριστεί το εύρος συχνοτήτων όπου οι Ηλεκτρο-Μηχανικές Υπογραφές εμφανίζουν ευαισθησία στις μεταβολές των δυναμικών χαρακτηριστικών της υπό παρακολούθηση κατασκευής. Τέλος με βάση τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας, αποδείχτηκε ότι η μέθοδος της HMA/HME είναι δυνατό να αποτελέσει μια αξιόπιστη και εύελικτη λύση μη καταστροφικού ελέγχου των δομικών συστημάτων από σκυρόδεμα.



**Σχήμα 3.2:** Φασματική απόκριση αγωγιμότητας  $G_3$  δύο διαφορετικών PZT του πλέγματος παρακολούθησης της γέφυρας (Soh, Tseng et al., 2000).

Εκτός από το πεδίο της ανίχνευσης βλαβών σε δομικά στοιχεία, η μέθοδος HMA/HME έχει βρει ευρύτατη εφαρμογή και σε διαδικασίες παρακολούθησης της ανάπτυξης της αντοχής και της ενυδάτωσης του πρώιμου σκυροδέματος. Τα τελευταία δεκατέσσερα χρόνια, αρκετοί ερευνητές, ορμώμενοι από την εργασία των Soh et al. (2000), προσπάθησαν να εφαρμόσουν τα επιθέματα PZT σε συνδυασμό με

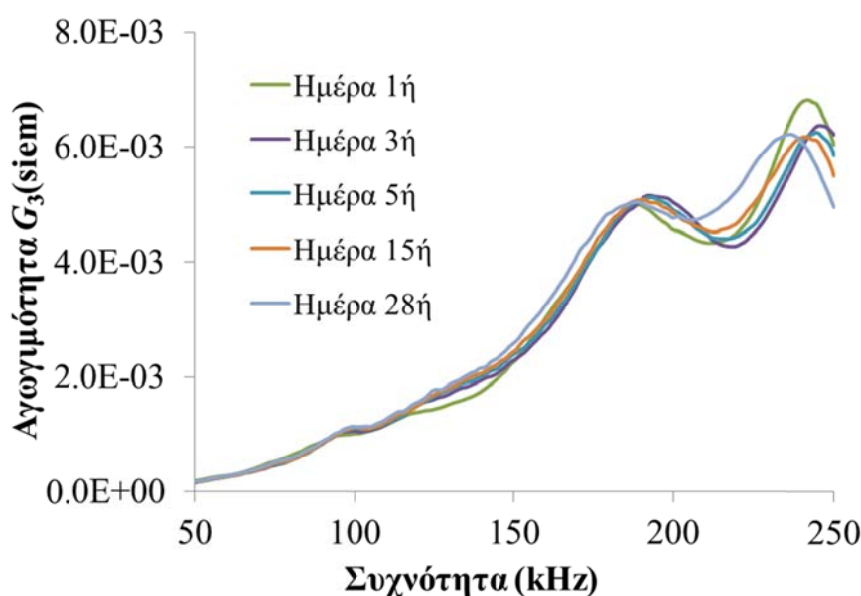
την μέθοδο HMA/HME στον μη καταστροφικό έλεγχο του πρώιμου σκυροδέματος (ηλικίας μικρότερης των 28 ημερών) προτείνοντας μια σειρά πειραματικών διατάξεων (Annamdas and Radhika, 2013; Tawie and Lee, 2010a; 2010b; 2010c; Providakis and Liarakos 2010; 2011; 2014; Liarakos and Providakis, 2013; Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013). Οι βασικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των προτεινόμενων διατάξεων εστιάζονται κυρίως στις τεχνικές προσαρμογής των επιθεμάτων στη μάζα του σκυροδέματος, καθώς το συγκεκριμένο υλικό παρουσιάζει αρκετές ιδιαιτερότητες σε σχέση τη φύση του και τη μικροδομή του. Τα κύρια προβλήματα που κλήθηκαν να αντιμετωπίζουν οι διάφοροι σχεδιασμοί διατάξεων παρακολούθησης είναι α) η δυνατότητα ασφαλούς τοποθέτησης του επιθέματος PZT στη μάζα του σκυροδέματος, καθώς τα επιθέματα είναι εξαιρετικά εύθραυστα και ευαίσθητα στην υγρασία και β) η δυνατότητα τοποθέτησης των επιθεμάτων από τα πρώτα στάδια της σκυροδέτησης (ηλικία μικρότερη των 24 ωρών), καθώς ένα σημαντικό τμήμα της ενυδάτωσης λαμβάνει χώρα τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο (Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013; Liarakos and Providakis, 2013).

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζονται τα φάσματα απόκρισης της αγωγιμότητας, τα οποία καταγράφηκαν κατά τη διαδικασία ανάπτυξης της δυσκαμψίας ενός κυβικού δοκιμίου πρώιμου σκυροδέματος (ακμής 150mm), σε διαφορετικές χρονικές στιγμές από τη σκυροδέτηση του (Providakis and Liarakos, 2011). Τα συγκριμένα φάσματα αποτελούν τις Ηλεκτρο-Μηχανικές Υπογραφές μιας κατάλληλα σχεδιασμένης αυτό-αισθητήριας συσκευής με βάση το PZT, η οποία αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής και ενσωματώθηκε στη μάζα του σκυροδέματος κατά την παρασκευή των δοκιμίων (Providakis and Liarakos, 2011).

Παρατηρώντας το Σχήμα 3.3 διαπιστώνεται ότι καθώς η διαδικασία ωρίμανσης του σκυροδέματος εξελίσσεται συναρτήσει του χρόνου, η Ηλεκτρο-Μηχανική Υπογραφή (HMY) του εμφυτευμένου αισθητήρα διαφοροποιείται, αντανakλώντας τη μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών του δοκιμίου. Έντονες μεταβολές ανιχνεύονται στην περιοχή συχνοτήτων 170-250 kHz, ενώ ταυτόχρονα παρατηρούνται μικρο-μεταβολές στη περιοχή συχνοτήτων κάτω των 150 kHz. Οι έντονες μεταβολές της αγωγιμότητας αντιπροσωπεύουν την αλλαγή των συνοριακών συνθηκών του PZT στη κοντινή περιοχή του αισθητήρα, λόγω της αύξησης της δυσκαμψίας του σκυροδέματος κατά τη διαδικασία ωρίμανσης. Οι μικρότερες μεταβολές σε συχνότητες χαμηλότερες των 170 kHz, αντιπροσωπεύουν τη

διαφοροποίηση της δυσκαμψίας τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και σε επίπεδο συννοριακών συνθηκών του δοκιμίου (περιορισμός του δοκιμίου από τη μήτρα σκυροδέτησης, συρρίκνωση λόγω απώλειας υγρασίας κ.α.).

Οι μικρο-μεταβολές είναι εξαιρετικά σημαντικές για τον μακροσκοπικό έλεγχο ενός δομικού συστήματος και όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό είναι δύσκολο να εντοπιστούν, εξαιτίας της ισχυρής αύξουσας τάσης που εμφανίζει η αγωγιμότητα στη συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων (<150kHz). Η τάση αυτή οφείλεται στα μηχανικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του PZT και υπερκαλύπτει τις επιδράσεις των μακροσκοπικών δυναμικών χαρακτηριστικών του υπό παρακολούθηση δομικού συστήματος.



**Σχήμα 3.3:** Παρακολούθηση της διαδικασίας σκλήρυνσης και ανάπτυξης της αντοχής δοκιμίου σκυροδέματος με τη μέθοδο των HMA/HME (Liarakos and Providakis, 2011).

Το συγκριμένο πρόβλημα αποτελεί μια συνήθη κατάσταση στις περιπτώσεις ΜΚΕ του σκυροδέματος και οφείλεται σε πολύ μεγάλο βαθμό στη αυξημένη δυσκαμψία των εν λόγω κατασκευών και την επίσης μεγάλη εσωτερική απόσβεση που αυτές εμφανίζουν (3-5%), (Bamforth et al., 2008; Mehta και Monteiro, 2009). Για το λόγο αυτό στις περιπτώσεις ΜΚΕ που έχουν να κάνουν με τη μακροσκοπική αξιολόγηση της κατασκευής (π.χ. ανίχνευση βλαβών ή αλλαγή συννοριακών συνθηκών), είναι αναγκαίο να προσδιοριστούν ΗΜΥ οι οποίες θα είναι απαλλαγμένες από την ηλεκτρομηχανική συμπεριφορά των PZT. Με βάση την



καταγραφή των φασμάτων HMA/HME είναι δυνατό να υπολογισθούν νέες Ηλεκτρο-Μηχανικές Υπογραφές οι οποίες απεικονίζουν αποκλειστικά τη μηχανική απόκριση των υπό παρακολούθηση κατασκευών. Ο πιο απλός τρόπος να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, είναι ο υπολογισμός της φασματικής απόκρισης της Μηχανικής Εμπέδησης  $Z_{st}$  (Dynamic Mechanical Impedance-DMI), του υπό μελέτη δομικού συστήματος. Λαμβάνοντας υπόψη το θεωρητικό μοντέλο Ηλεκτρο-Μηχανικής Σύνθετης Αγωγιμότητας  $Y_3$ , που διατυπώθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής (βλ. Ενότητα 2.3.2) και επιλύοντας την Εξίσωση (2.53) ως προς  $Z_{st}$ , προκύπτει ότι:

$$Z_{st} = Z_a^{eff} \left\{ i\omega \frac{l^2}{h} \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1 - \nu_{12})(Y_3^{meas} - Y_3^{fix})} - 1 \right\} \quad (3.1)$$

όπου  $Y_3^{meas}$  η πειραματικά καταγραφόμενη απόκριση της HMA στο πεδίο της συχνότητας,

$$Z_a^{eff} = \frac{2\bar{Y}^E h}{i\omega(1 - \nu_{12})} \quad (3.2)$$

και

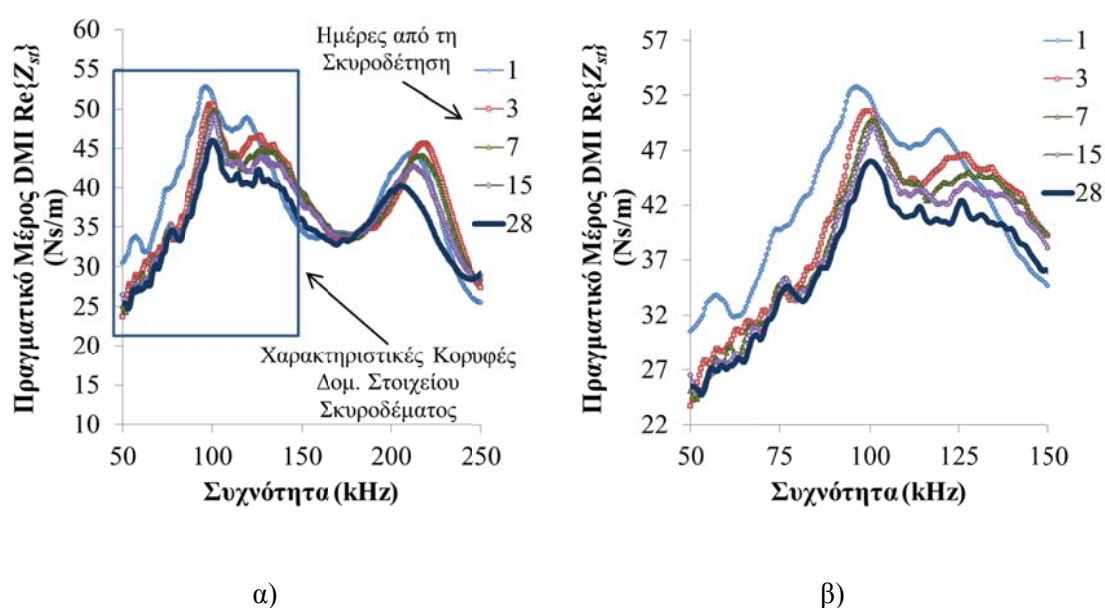
$$Y_3^{fix} = i\omega \frac{l^2}{h} \left[ \bar{\epsilon}_{33} - \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1 - \nu_{12})} \right] \quad (3.3)$$

Η Εξίσωση (3.1) είναι ένα από τα βασικότερα εργαλεία ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα διατριβή για το ΜΚΕ του σκυροδέματος με τη μέθοδο HMA/HME. Η χρησιμότητα της εντοπίζεται στη μεταφορά της παρακολούθησης από το πεδίο της ηλεκτρικής απόκρισης του PZT στο πεδίο της μηχανικής απόκρισης της κατασκευής που αξιολογείται.

Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται η απόκριση της  $Z_{st}$  στο πεδίο της συχνότητας, όπως υπολογίστηκε από τα πειραματικώς προσδιοριζόμενα φάσματα απόκρισης της αγωγιμότητας (Σχήμα 3.3) και τις ηλεκτρομηχανικές ιδιότητες του PIC 151 (Πίνακας 2.1, PI Ceramics, 2014). Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η Εξίσωση (3.1), αποτελεί μια ημι-πειραματική προσέγγιση της δυναμικής απόκρισης της κατασκευής, καθώς η ενεργός μηχανική εμπέδηση του PZT  $Z_a^{eff}$  (Effective Mechanical Impedance), όπως και η σύνθετη αγωγιμότητας του πλήρως πακτωμένου PZT  $Y_3^{fix}$ , προκύπτουν από

θεωρητικά μοντέλα. Είναι λογικό λοιπόν να υπάρχουν αποκλίσεις από την πραγματική μηχανική απόκριση του υπό παρακολούθηση δομικού συστήματος.

Ωστόσο, όπως σαφώς διαπιστώνεται από το Σχήμα 3.4, η μεταφορά της ανάλυσης από το πεδίο της ηλεκτρικής απόκρισης στο πεδίο της μηχανικής, αναδεικνύει ξεκάθαρα τις μεταβολές της HMY στις συχνότητες κάτω των 150 kHz. Όσο η διεργασία της ωρίμανσης του σκυροδέματος εξελίσσεται οι κορυφές του φάσματος DMI κινούνται προς τα δεξιά στο εύρος συχνοτήτων 50-150kHz, ως αποτέλεσμα της αύξησης των συχνοτήτων συντονισμού και αντικατοπτρίζουν την αύξηση της δυσκαμψίας του δομικού στοιχείου.



**Σχήμα 3.4:** Απόκριση Μηχανικής Εμπέδησης (DMI) κατά τη διαδικασία παρακολούθησης της ανάπτυξης της δυσκαμψίας ενός δοκιμίου πρωίμου σκυροδέματος. α) 50-250 kHz και β) 50-150 kHz.

### 3.2. Δείκτες Βλάβης

Ένα σημαντικό ζήτημα στον ΜΚΕ σκυροδέματος με την μέθοδο των HMA/HME, είναι η διαδικασία αξιολόγησης των μεταβολών των καταγραφόμενων Ηλεκτρο-Μηχανικών Υπογραφών, οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικές καταστάσεις δομική «υγείας» της υπό παρακολούθηση κατασκευής. Όλες οι μεθοδολογίες αξιολόγησης που έχουν προταθεί (Giurgiutiu, 2008; Xu, 2009; Zagrai, 2002; Tawie and Lee, 2010a; 2010b; 2010c; Providakis, Liarakos and Voutetaki, 2010; Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013), ανεξάρτητα από τα εργαλεία που υιοθετούν, βασίζονται στη



σύγκριση μεταξύ της HMY που αντιστοιχεί σε μια Κατάσταση Αναφοράς-RS (Reference State), ως προς τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής, και της αντίστοιχης HMY για μια Τρέχουσα Κατάσταση-CS (Current State) δομικής ακεραιότητας. Η HMY που αντιστοιχεί στην κατάσταση αναφοράς συνήθως καταγράφεται στα πρώτα στάδια της εμφύτευσης του PZT στον φέροντα οργανισμό της κατασκευής και αφού το Ηλεκτρο-Μηχανικό Σύστημα έχει έρθει σε μια κατάσταση ηλεκτρομηχανικής ισορροπίας.

Με τον όρο ηλεκτρομηχανική ισορροπία νοείται η κατάσταση κατά την οποία οι HMY της καταστάσεως αναφοράς, σταθεροποιούνται σε μια συγκεκριμένη μορφή και εντός ενός αποδεκτού εύρους διακύμανσης τιμών. Ιδιαίτερα για τις περιπτώσεις ΜΚΕ του σκυροδέματος, η αστάθεια που εμφανίζουν οι HMY για μια σύντομη χρονική περίοδο μετά την εμφύτευση του αισθητήρα, οφείλεται κυρίως στο γεγονός των παραμορφώσεων προσαρμογής του σκυροδέματος στη κοντινή περιοχή της αυτό-αισθητήριας συσκευής και της πιθανής ηλεκτρικής αστάθειας που δύναται να εμφανιστεί μέχρι να ομαλοποιηθούν οι επιδράσεις των ηλεκτρικών στοιχείων ενόργανης μέτρησης (βλ. Ενότητα 2.4).

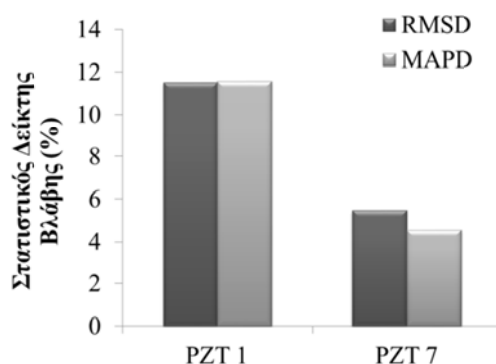
Η απλούστερη δυνατή μεθοδολογία αξιολόγησης της διαφοροποίησης των HMY, είναι ο προσδιορισμός στατιστικών μεγεθών τα οποία στηρίζονται στον υπολογισμό της απόκλισης (Deviation) μεταξύ των HMY που αντιστοιχούν στην Κατάσταση Αναφοράς (RS) και σε κάποια Τρέχουσα Κατάσταση (CS), του δομικού συστήματος. Τα μεγέθη αυτά συναντούνται στη διεθνή βιβλιογραφία ως Δείκτες Βλάβης (Damage Index). Οι πιο διαδεδομένοι δείκτες βλάβης είναι ο RMSD (Root Mean Square Deviation) και ο MAPD (Mean Absolute Percentage Deviation), οι οποίοι περιγράφονται μαθηματικά από τις σχέσεις (Tawie and Lee 2010b):

$$RMSD (\%) = 100 \times \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^F (CSS_j^n - RSS_j)^2}{\sum_{j=1}^F (RSS_j)^2}} \quad (3.4)$$

$$MAPD (\%) = 100 \times \frac{1}{F} \sum_{j=1}^F \left| \frac{CSS_j^n - RSS_j}{RSS_j} \right| \quad (3.5)$$

όπου  $j=1:F$ ,  $F$  ο αριθμός των στοιχείων του διανύσματος των συχνοτήτων καταγραφής της HMY (ταξινομημένα σε αύξουσα διάταξη),  $CSS_j^n$  η  $j$  τιμή της

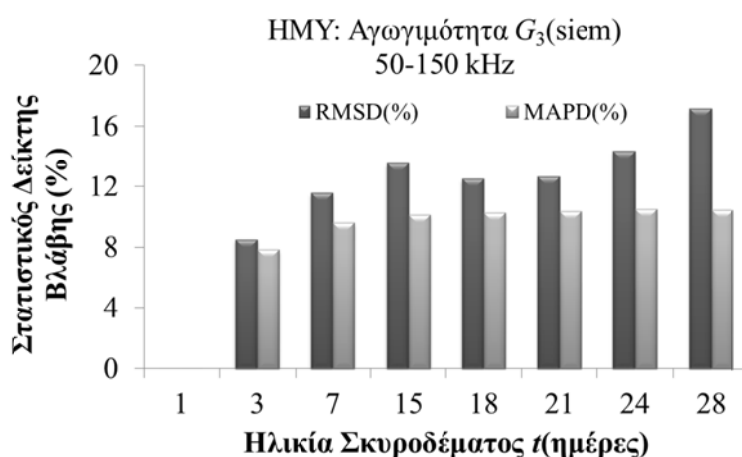
Ηλεκτρο-Μηχανικής Υπογραφής που αντιστοιχεί στην  $n$ -στη καταγραφή της τρέχουσας κατάστασης ( $n$ -th Current State Signature) και  $RSS_j$  η αντίστοιχη τιμή της Ηλεκτρο-Μηχανικής Υπογραφής αναφοράς (Reference State Signature). Σημειώνεται για άλλη μια φορά ότι κατά τον ενόργανο ΜΚΕ μιας κατασκευής με την μέθοδο HMA/HME τα μετρούμενα μεγέθη ή μεγέθη παρατήρησης είναι η HMA ή η HME. Άλλα μεγέθη αξιολόγησης, όπως η μηχανική εμπέδηση (DMI) της υπό παρακολούθηση κατασκευής αποτελούν μεγέθη παράγωγα και όχι απευθείας μετρούμενα.



**Σχήμα 3.5:** Υπολογισμός Δεικτών Βλάβης για τα φάσματα απόκρισης του σχήματος 3.2 (Soh et al., 2000).

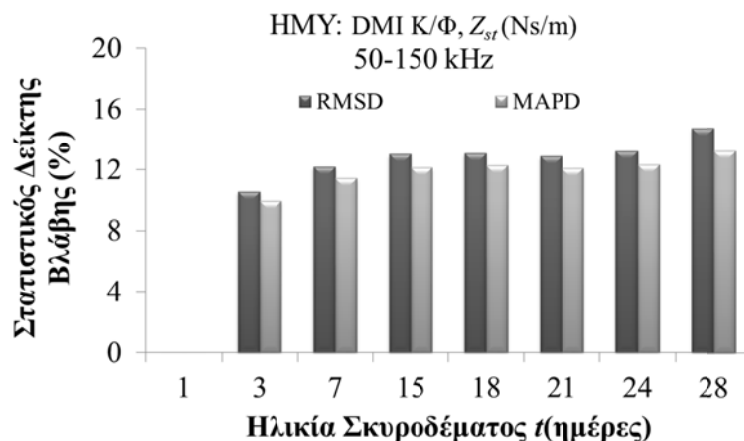
Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζονται οι τιμές των δεικτών RMSD και MAPD όπως αυτοί προσδιορίστηκαν με βάση την πειραματική μέτρηση της αγωγιμότητας, σε δύο από τα PZT του πλέγματος παρακολούθησης της εφαρμογής των Soh et al. (2000). Στην συγκεκριμένη περίπτωση ως RSS και CSS λήφθηκαν οι αποκρίσεις της αγωγιμότητας που αντιστοιχούν στη δομικά άρτια, χωρίς βλάβες, γέφυρα (RSS, Σχήμα 3.2) και στην δομική κατάσταση μετά την πλήρη εκδήλωση των αστοχιών (CSS, Σχήμα 3.2). Από την τιμή των δεικτών βλάβης, επιβεβαιώνεται αυτό που εποπτικά μπορεί να διαπιστωθεί, σχετικά με τη μεταβολή της αγωγιμότητας μεταξύ της δομικά άρτιας κατασκευής και εκείνης που φέρει μηχανικές βλάβες (Σχήμα 3.2). Επιπλέον διαπιστώνεται ότι ένα εύρος συχνοτήτων το οποίο φτάνει μέχρι και τα 300 kHz, αποτελεί μια επαρκή περιοχή συχνοτήτων σάρωσης, για τον αξιόπιστο ΜΚΕ του σκυροδέματος. Τέλος σημειώνεται ότι η χρήση των δεικτών βλάβης προϋποθέτει τόσο η RSS όσο και η οποιαδήποτε CSS να έχουν ληφθεί στο ίδιο διάστημα συχνοτήτων και με τον ίδιο ρυθμό δειγματοληψίας. Δηλαδή το πλήθος των τιμών  $F$ , να είναι το ίδιο μεταξύ των συγκρινόμενων Ηλεκτρο-Μηχανικών Υπογραφών.

Στο Σχήμα 3.6 απεικονίζεται η εξέλιξη των τιμών των δεικτών βλάβης RMSD και MAPD, στη περίπτωση παρακολούθησης της διαδικασίας ωρίμασης του πρώιμου σκυροδέματος (Providakis and Liarakos, 2011; Liarakos and Providakis, 2013). Οι δείκτες βλάβης προσδιορίζονται από το πακέτο δεδομένων της αγωγιμότητας που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3. Ως φάσμα αναφοράς (RSS) χρησιμοποιείται η ΗΜΥ του εμφυτευμένου αισθητήρα, σε εύρος συχνοτήτων μεταξύ 50 και 150 kHz, την πρώτη μέρα μετά την σκυροδέτηση (Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013).



**Σχήμα 3.6:** Δείκτες βλάβης συναρτήσει της ηλικίας του σκυροδέματος, με βάση την απόκριση της αγωγιμότητας  $G_3$  (Σχήμα 3.3), στο εύρος συχνοτήτων 50-150 kHz.

Η διαφοροποίηση των τιμών των δεικτών βλάβης αντικατοπτρίζουν την εξέλιξη της διεργασίας σκλήρυνσης του σκυροδέματος, εμφανίζοντας ξεκάθαρα μια αύξουσα μορφή, με τάση σχετικής σταθεροποίησης γύρω από μια μέση τιμή, 7-15 ημέρες μετά τη σκυροδέτηση του δοκιμίου. Επιβεβαιώνεται λοιπόν η σπουδαιότητα της μελέτης των φασμάτων της αγωγιμότητας στις σχετικά χαμηλές συχνότητες, όπου και αποτυπώνονται οι μακροσκοπικές μεταβολές της δομικής ακεραιότητας ενός δομικού συστήματος. Τέλος στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η εξέλιξη των δεικτών βλάβης που προσδιορίζονται με βάση την υπολογιζόμενη φασματική απόκριση της μηχανικής εμπέδησης (DMI) του υπό παρακολούθηση δοκιμίου (Σχήμα 3.4.β). Και στη συγκεκριμένη περίπτωση ως RSS χρησιμοποιείται το πραγματικό μέρος της DMI που αντιστοιχεί σε σκυρόδεμα ηλικίας μίας ημέρας.



**Σχήμα 3.7:** Δείκτες βλάβες συναρτήσει της ηλικίας του σκυροδέματος με βάση την απόκριση της μηχανικής εμπίδησης  $Z_{st}$  (Σχήμα 3.4.β), στο εύρος συχνοτήτων 50-150 kHz.

### 3.3. Προσομοίωση Απόκρισης Ηλεκτρο-Μηχανικών Συστημάτων

Η Ηλεκτρο-Μηχανική Υπογραφή αποτελεί το σημαντικότερο στοιχείο που δύναται να ανακτηθεί πειραματικά για τον προσδιορισμό της ταυτότητας, δηλαδή των μηχανικών και ηλεκτρικών παραμέτρων, ενός Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος (ΗΜΗΣ). Οι ηλεκτρομηχανικές παράμετροι αποτελούνται από τα δομικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, τα οποία μεταβάλλονται άλλοτε έντονα και άλλοτε αμυδρά στην περίπτωση που εκδηλωθεί μια μηχανική βλάβη και από τα ηλεκτρομηχανικά χαρακτηριστικά του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα (καταστροφή των ηλεκτροδίων, χημική αλλοίωση του PZT, καταστροφή της πόλωσης του PZT, ηλεκτρική αστάθεια της διάταξης λήψης μετρήσεων).

Η ταυτοποίηση ενός δυναμικού συστήματος (System Identification) αποτελεί τη διαδικασία προσδιορισμού αυτών των χαρακτηριστικών στο πεδίο είτε της ηλεκτρικής, είτε της μηχανικής απόκρισης (Lim and Bhalla, 2006). Η διαδικασία της ταυτοποίησης ενός ΗΜΗΣ το οποίο είναι χρονικά αμετάβλητο, γίνεται συνήθως στο πεδίο της συχνότητας με την προσομοίωση της πραγματικής του απόκρισης από ένα ισοδύναμο μηχανικό ή ηλεκτρικό σύστημα. Τα ισοδύναμα συστήματα συνήθως ορίζονται από ένα σύνολο απλών και ευκόλως μαθηματικά περιγράψιμων ηλεκτρικών ή μηχανικών στοιχείων. Ως χρονικά αμετάβλητο σύστημα (Time Invariant System) ορίζεται εκείνο του οποίου τα χαρακτηριστικά ή οι παράμετροι, δεν μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου.

Η προσομοίωση του ΗΜΗΣ δίνει την δυνατότητα ανάπτυξης ενός μαθηματικού μοντέλου το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαραγωγή της Ηλεκτρο-Μηχανικής Υπογραφής αναφοράς (RSS), όσες φορές χρειάζεται, προκειμένου να αξιολογηθεί η δομική ακεραιότητα μιας κατασκευής. Ως προς τη μεθοδολογία προσομοίωσης έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές προερχόμενες από τα επιστημονικά πεδία των δυναμικών συστημάτων, της δυναμικής των κατασκευών και του αυτομάτου ελέγχου (Malvino and Bates, 2006; Ogata, 1998).

### 3.3.1. Προσομοίωση της ηλεκτρικής απόκρισης με ισοδύναμο RLC κυκλώματα

Η ηλεκτρική απόκριση ενός ΗΜΗΣ είναι δυνατό να προσομοιωθεί από ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο συνίσταται από διπολικά ηλεκτρικά στοιχεία. Τα συνηθέστερα ηλεκτρικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι οι πυκνωτές ή χωρητικές αντιστάσεις (Capacitors), τα πηνία ή επαγωγικές αντιστάσεις (Inductors) και οι ωμικές αντιστάσεις (Resistors), (PI Ceramics, 2014; Malvino and Bates, 2006; Ogata, 1998). Η συνδεσμολογία των ηλεκτρικών στοιχείων όσο πολύπλοκη και εάν είναι, προκύπτει από το συνδυασμό δύο θεμελιωδών διατάξεων της σύνδεσης εν σειρά και εν παραλλήλω (Παράρτημα Α, Πίνακας Α.1). Η ηλεκτρική απόκριση ενός πιεζοηλεκτρικού επιθέματος σε μια περιοχή συχνοτήτων κοντά στις συχνότητες συντονισμού, είναι δυνατό να προσομοιωθεί από το κύκλωμα RLC του Σχήματος 3.8 (PI Ceramics, 2014; Malvino and Bates, 2006). Το συγκεκριμένο κύκλωμα αποτελείται από δύο κλάδους, εκ των οποίων ο πρώτος προκύπτει από τη σειριακή σύνδεση μιας αντίστασης  $R_1$ , ενός πηνίου  $L_1$  και ενός πυκνωτή  $C_1$  και ο δεύτερος από έναν πυκνωτή  $C_0$ . Ο RLC κλάδος προσομοιώνει την συνεισφορά των μηχανικών χαρακτηριστικών του PZT στην απόκριση της σύνθετης αγωγιμότητας και ο πυκνωτής  $C_0$  τη διηλεκτρική συμπεριφορά του PZT.

Το ισοδύναμο κύκλωμα είναι ένα Μονοβάθμιο Σύστημα ή Σύστημα μιας Συχνότητας Συντονισμού (Single Peak Circuit - SPC), καθώς όπως προκύπτει από την ανάλυση που ακολουθεί, η φασματική απόκριση της αγωγιμότητας  $G$ , εμφανίζει μια και μοναδική κορυφή (peak) σε όλο το εύρος συχνοτήτων. Επιπλέον το συγκεκριμένο κύκλωμα είναι ένα σύστημα Μοναδιαίας Εισόδου-Εξόδου – SISO (Single Input – Single Output), με είσοδο την ηλεκτρική τάση διέγερσης του ΗΜΗΣ και έξοδο το ηλεκτρικό ρεύμα απόκρισης που διαρρέει την συνισταμένη σύνθετη

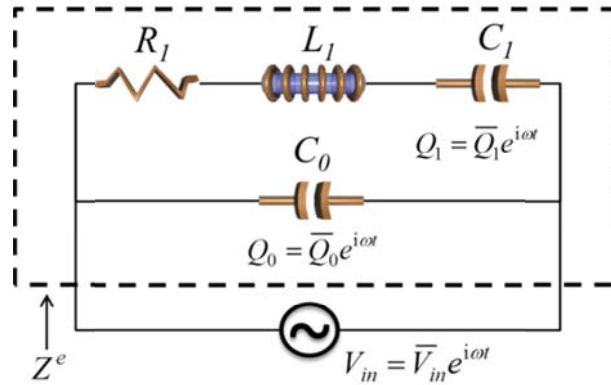
αντίσταση ή εμπέδηση,  $Z^e$  (Ogata, 1998). Από την παρατήρηση αυτή συνάγεται ότι η σύνθετη αγωγιμότητα  $Y$  (αντίστροφο της εμπέδησης), αποτελεί τη Συνάρτηση Μεταφοράς (Transfer Function - TF) του ηλεκτρικού κυκλώματος (Providakis and Liarakos, 2011; 2014) σύμφωνα με τη σχέση:

$$\bar{I}_{out} = Y\bar{V}_{in} = H(s)\bar{V}_{in} \quad (3.6)$$

όπου  $H(s)$  η συνάρτηση μεταφοράς,  $s=i\omega$  η μεταβλητή Laplace,  $\bar{I}_{out}$  το πλάτος του ρεύματος απόκρισης και  $\bar{V}_{in}$  το πλάτος της ηλεκτρικής τάσης διέγερσης.

Εάν υποθεθεί ότι το ισοδύναμο κύκλωμα διεγείρεται από μια μονοαρμονική τάση της μορφής  $V_{in} = \bar{V}_{in}e^{i\omega t}$ , τότε το ρεύμα απόκρισης που θα διαρρέει την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση θα δίδεται από τη σχέση  $I_{out} = \bar{I}_{out}e^{i\omega t}$ . Με βάση το ισοζύγιο του αποθηκευμένου φορτίου, το ρεύμα απόκρισης συνδέεται με τα φορτία που συγκεντρώνονται στους οπλισμούς των πυκνωτών σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_{out} = \frac{dQ}{dt} = i\omega(\bar{Q}_0 + \bar{Q}_1)e^{i\omega t} \quad (3.7)$$



**Σχήμα 3.8:** Ισοδύναμο μονοβάθμιο ηλεκτρικό κύκλωμα, SPC, ενός επιθέματος PZT στις περιοχές των συχνοτήτων συντονισμού (PI Ceramics, 2014).

Η συνισταμένη ή ισοδύναμη σύνθετη αγωγιμότητα  $Y$ , προκύπτει εφαρμόζοντας τους νόμους άθροισης ρευμάτων και ηλεκτρικών τάσεων του Kirchhoff (Παράρτημα Α, Πίνακας Α.1) και λαμβάνοντας υπόψη την έκφραση των επιμέρους ηλεκτρικών εμπεδήσεων των στοιχείων του κυκλώματος (Παράρτημα Α, Πίνακας Α.2), σύμφωνα με τη σχέση:

$$Y = \frac{1}{Z^e} = \frac{\bar{I}_{out}}{\bar{V}_{in}} = Y_0 + Y_1 = i\omega C_0 + \frac{1}{i\omega L_1 + R_1 + \frac{1}{i\omega C_1}} \Rightarrow$$

$$Y = i\omega C_0 + \frac{i\omega}{-\omega^2 L_1 + i\omega R_1 + \frac{1}{C_1}} \quad (3.8)$$

Αντικαθιστώντας τη μεταβλητή Laplace,  $s=i\omega$ , η Εξίσωση (3.8) γράφεται ισοδύναμα:

$$Y = H(s) = sC_0 + \frac{\frac{1}{L_1}s}{s^2 + \frac{R_1}{L_1}s + \frac{1}{C_1L_1}} \Rightarrow$$

$$Y = H(s) = s \frac{C_0s^2 + C_0\frac{R_1}{L_1}s + \left(\frac{C_0}{C_1} + 1\right)\frac{1}{L_1}}{s^2 + \frac{R_1}{L_1}s + \frac{1}{C_1L_1}} \quad (3.9)$$

Επιστρέφοντας στη συνάρτηση απόκρισης (Εξίσωση 3.8) και εκτελώντας κατάλληλες πράξεις διαχωρίζοντας το πραγματικό από το φανταστικό μέρος, προκύπτει ότι:

$$Y = iC_0\omega + \frac{i\omega}{\left(\frac{1}{C_1} - L_1\omega^2\right)^2 + R_1^2\omega^2} \left(\frac{1}{C_1} - L_1\omega^2 - i\omega R_1\right) \Rightarrow$$

$$Y = G + iB = \frac{\omega^2\eta\beta}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \eta^2\omega^2} + i\omega \left\{ C_0 + \frac{(\omega_0^2 - \omega^2)\beta}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \eta^2\omega^2} \right\} \quad (3.10)$$

όπου  $G$  η αγωγιμότητα (Conductance),  $B$  η επιδεκτικότητα (Susceptance) (Βουτετάκη, 2009),  $\eta=R_1/L_1$ ,  $\beta=1/L_1$  και  $\omega_0 = \sqrt{1/C_1/L_1}$  η συχνότητα συντονισμού του κλάδου RLC, η οποία για χαμηλές σχετικά τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης ( $R < 2k\Omega$ ), προσεγγίζει τη συχνότητα συντονισμού του ηλεκτρικού κυκλώματος (Malvino and Bates, 2006). Από την Εξίσωση (3.9) παρατηρείται ότι η διηλεκτρική συμπεριφορά ενός επιθέματος PZT επιδρά αποκλειστικά στο φανταστικό μέρος της HMA, όπου και εμφανίζεται η χωρητικότητα  $C_0$ . Το πραγματικό μέρος εξαρτάται



αποκλειστικά από τις παραμέτρους του κλάδου RLC, οι οποίες περιγράφουν τη μηχανική απόκριση του PZT. Για το λόγο αυτό στις εφαρμογές ΜΚΕ χρησιμοποιείται ως βασικό εργαλείο παρατήρησης το πραγματικό μέρος της HMA ή αγωγιμότητα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε μια πειραματική διαδικασία η HMA σαρώνεται σε ένα εύρος διακριτών συχνοτήτων, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ μιας ελάχιστης γωνιακής συχνότητας  $\omega_{min}$  και μιας μέγιστης  $\omega_{max}$ . Ο προσδιορισμός των ηλεκτρικών παραμέτρων ενός μονοβάθμιου ηλεκτρικού κυκλώματος, το οποίο προσομοιώνει τη μετρούμενη ηλεκτρική απόκριση ενός πραγματικού Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος, επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών, μεταξύ της μετρούμενης σύνθετης αγωγιμότητας  $Y_{3,i}^{meas}$  σε μια γωνιακή συχνότητα  $\omega_i$  και της αντίστοιχης εκτιμώμενης  $Y_3^{est}(\omega_i, \mathbf{p})$ . Το συγκριμένο πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$\min_{\mathbf{p}} \sum_{i=1}^F \{Y_{3,i}^{meas} - Y_3^{est}(\omega_i, \mathbf{p})\}^2 \quad (3.11)$$

subject to  $\mathbf{p} > 0$

όπου  $\mathbf{p} = [C_0 R_1 L_1 C_1]^T$  το διάνυσμα των παραμέτρων του ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος,  $i=1:F$  και  $F$  ο αριθμός των διακριτών συχνοτήτων σάρωσης  $\omega_i$ , οι τιμές των οποίων προκύπτουν από τη σχέση:

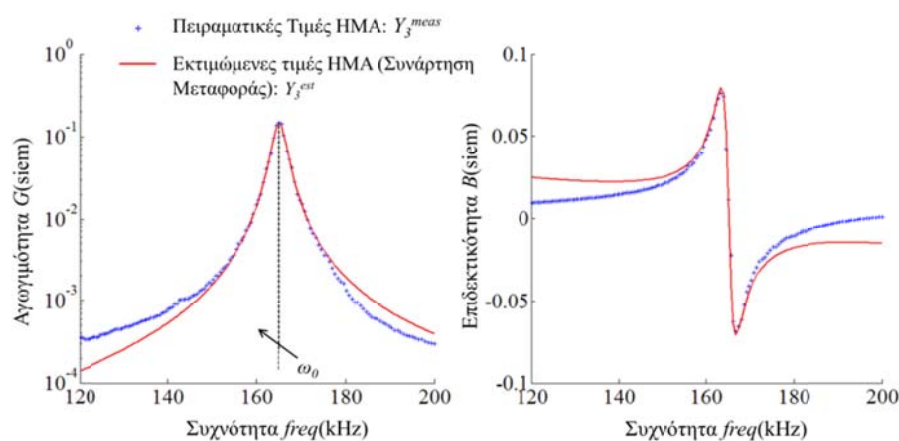
$$\omega_i = \omega_{min} + \frac{i-1}{F-1} (\omega_{max} - \omega_{min}) \quad (3.12)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα της συνάρτησης απόκρισης (Εξίσωση 3.10), διαπιστώνεται ότι η Εξίσωση (3.11) περιγράφει ένα μη γραμμικό πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων, με την ύπαρξη περιορισμών ( $\mathbf{p} > 0$ ). Το συγκριμένο πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί με την χρήση του πακέτου εργαλείων βελτιστοποίησης (Optimization Toolbox) του μαθηματικού λογισμικού MATLAB και πιο συγκριμένα με την συνάρτηση **lsqnonlin** (MathWorks, 2014). Η συγκεκριμένη συνάρτηση υλοποιεί αλγόριθμους βελτιστοποίησης, οι οποίοι στηρίζονται στην αρχική εκτίμηση του διανύσματος των παραμέτρων,  $\mathbf{p}_0$ , σε μια περιοχή εμπιστοσύνης (Trust-Region) όπου το εκτιμώμενο φάσμα προσεγγίζει ικανοποιητικά το μετρούμενο και την προσέγγιση του βέλτιστου διανύσματος  $\mathbf{p}$ , μέσα από επαναληπτικές αυξομειώσεις της περιοχής εμπιστοσύνης (MathWorks, 2014). Με αφετηρία το διάνυσμα  $\mathbf{p}_0$  η



αναζήτηση της βέλτιστης λύσης επεκτείνεται σε όλο το εύρος των συχνοτήτων καταγραφής της HMA έτσι ώστε να ικανοποιηθούν οι συνθήκες της Εξίσωσης (3.11). Ο αλγόριθμος τερματίζεται, είτε όταν επιτευχθεί η επιθυμητή σύγκλιση (Convergence) που περιγράφεται από τα όρια ανοχής του τετραγωνικού σφάλματος (Least Squares Tolerance), είτε όταν συμπληρωθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που έχει οριστεί (MathWorks, 2014).

Από τη μεθοδολογία αντιμετώπισης του παραπάνω προβλήματος γίνεται αντιληπτή η σπουδαιότητα της **εύστοχης** εκτίμησης του αρχικού διανύσματος  $\mathbf{p}_0$ , προκειμένου να επιτευχθεί η σύγκλιση προτού συμπληρωθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων. Στο Σχήμα 3.9 απεικονίζεται η συνδυασμένη γραφική παράσταση του μετρούμενου  $Y_3^{meas}$ , και του εκτιμώμενου φάσματος απόκρισης  $Y_3^{est}(\omega, \mathbf{p})$ , ενός ελεύθερου επιθέματος PZT, σε μια κοντινή περιοχή της θεμελιώδους συχνότητας συντονισμού. Επιπλέον στον Πίνακα 3.1 παραθέτονται οι παράμετροι του βέλτιστου διανύσματος  $\mathbf{p}$ .



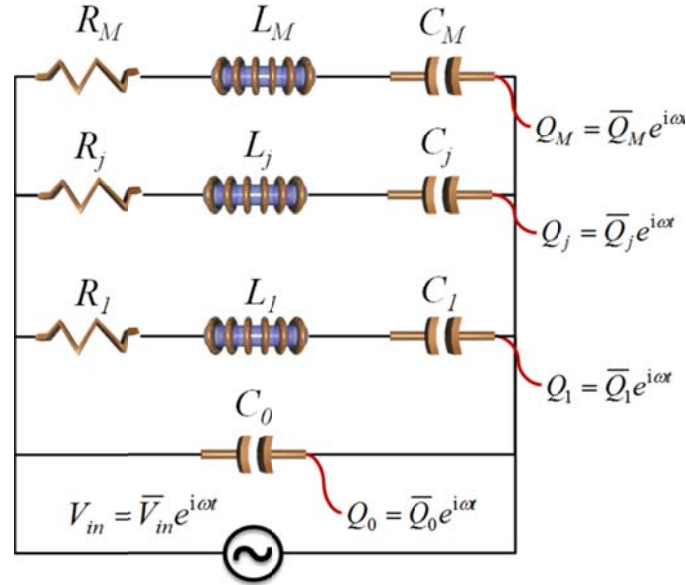
**Σχήμα 3.9:** Προσομοίωση της μετρούμενης φασματικής απόκρισης της HMA ενός ελεύθερου επιθέματος PZT από ένα ισοδύναμο SPC.

**Πίνακας 3.1:** Παράμετροι ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος για τη περίπτωση του ελεύθερου PZT.

$C_0(\text{pF})$	$R_1(\Omega)$	$L_1(\text{mH})$	$C_1(\text{pF})$	$freq_0(\text{kHz})$
2398	6.68	32	2867	165.12

Στην περίπτωση που το παράθυρο των συχνοτήτων σάρωσης διευρυνθεί και εμφανιστούν και άλλες κορυφές στο φάσμα απόκρισης της αγωγιμότητας, γίνεται ευκόλως αντιληπτό ότι δεν είναι δυνατό αυτό να προσεγγιστεί ρεαλιστικά από ένα

μονοβάθμιο ηλεκτρικό κύκλωμα. Για το λόγο αυτό στα πλαίσια της παρούσας διατριβής προτείνεται το Πολυβάθμιο Ηλεκτρικό Σύστημα ή Σύστημα Πολλαπλών Συχνοτήτων Συντονισμού (Multi Peak Circuit-MPC), που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.10.



**Σχήμα 3.10:** Ισοδύναμο πολυβάθμιο ηλεκτρικό κύκλωμα, MPC, ενός Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος στο σύνολο της περιοχής συχνοτήτων σάρωσης.

Το προτεινόμενο πολυβάθμιο ηλεκτρικό κύκλωμα συγκροτείται από ένα αριθμό RLC κλάδων συνδεδεμένων εν παραλλήλω, οι οποίοι με τη σειρά τους συνδέονται εν παραλλήλω με έναν πυκνωτή  $C_0$  (Σχήμα 3.10). Και σε αυτή την περίπτωση, ο πυκνωτής  $C_0$  προσομοιώνει τη στατική χωρητική συμπεριφορά του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος. Η συνάρτηση απόκρισης του πολυβάθμιου ηλεκτρικού κυκλώματος στο πεδίο της συχνότητας, προκύπτει από τους νόμους άθροισης των επιμέρους αγωγιμοτήτων του κάθε κλάδου του συστήματος (Παράρτημα Α, Πίνακες Α.1 και Α.2) και τη Εξίσωση 3.10, σύμφωνα με τη σχέση:

$$Y = G + iB = \sum_{j=1}^M \frac{\omega^2 \eta_j \beta_j}{(\omega_{0,j}^2 - \omega^2)^2 + \eta_j^2 \omega^2} + i\omega \left\{ C_0 + \sum_{j=1}^M \frac{(\omega_{0,j}^2 - \omega^2) \beta_j}{(\omega_{0,j}^2 - \omega^2)^2 + \eta_j^2 \omega^2} \right\} \quad (3.13)$$

όπου  $\eta_j = R_j/L_j$ ,  $\beta_j = 1/L_j$ ,  $\omega_{0,j} = \sqrt{1/C_j / L_j}$  η συχνότητα συντονισμού του  $j$  κλάδου RLC και  $M$  ο αριθμός των κλάδων.

Χρησιμοποιώντας τη μεταβλητή Laplace  $s=i\omega$ , και λαμβάνοντας υπόψη την Εξίσωση (3.9), η Εξίσωση (3.13) γράφεται στις ακόλουθες δύο ισοδύναμες μορφές:

$$Y = H(s) = s \sum_{j=1}^M \frac{C_0 s^2 + C_0 \eta_j s + \left( \frac{C_0}{C_j} + 1 \right) \beta_j}{s^2 + \eta_j s + \omega_{0,j}^2} \quad (3.14)$$

$$Y = H(s) = s \sum_{j=1}^M \frac{C_0 s^2 + C_0 \eta_j s + \left( \frac{C_0}{C_j} + 1 \right) \beta_j}{(s - P_j^+) (s - P_j^-)} \quad (3.15)$$

όπου  $P_j^\pm = \frac{1}{2} \left( -\eta_j \pm \sqrt{\eta_j^2 - 4\omega_{0,j}^2} \right)$ , οι ρίζες του δευτεροβάθμιου πολωνύμου του παρανομαστή της Εξίσωσης (3.14).

Στη περίπτωση όπου οι  $\eta_j < 2\omega_{0,j}$ , ο συγκεκριμένο κλάδος του ηλεκτρικού κυκλώματος θα εμφανίζει χαμηλές απώλειες ενέργειας, λόγω της μικρής αντίστασης και οι ρίζες του πολωνύμου του παρανομαστή θα είναι δύο συζυγείς μιγαδικούς,  $P_j$  και  $\bar{P}_j$ , με γενικό τύπο:

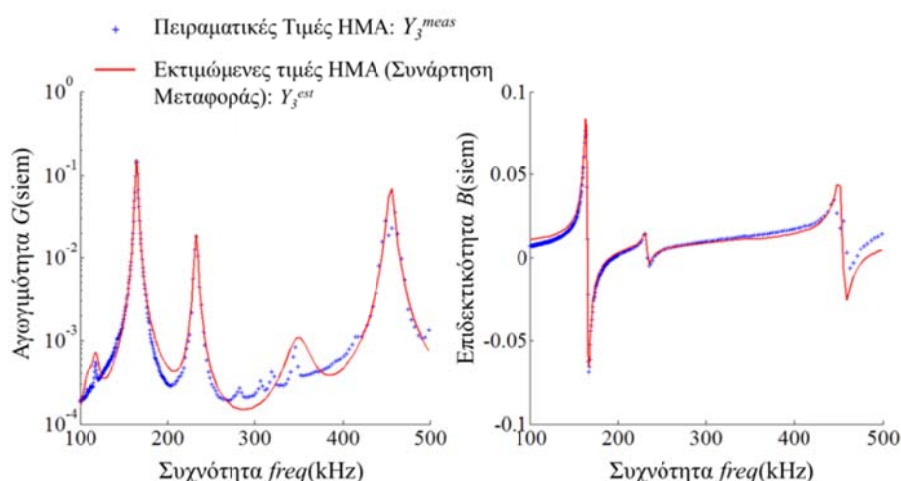
$$P_j = \frac{1}{2} \left( -\eta_j + i \sqrt{4\omega_{0,j}^2 - \eta_j^2} \right) \quad (3.16)$$

Η Εξίσωση (3.16) περιγράφει τις συνθήκες συντονισμού του πολυβάθμιου κυκλώματος, αντιπροσωπεύοντας την  $j$  κορυφή του φάσματος απόκρισης της αγωγιμότητας. Οι συζυγείς μιγαδικές ρίζες είναι γνωστές από τη θεωρία των δυναμικών συστημάτων ως πόλοι (poles) του συστήματος (Ogata, 1998; Kollar, 2004-2014).

Οι παράμετροι ενός ισοδύναμου πολυβάθμιου συστήματος προσδιορίζονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που αναπτύχθηκε παραπάνω για τα μονοβάθμια ηλεκτρικά κυκλώματα (Μη Γραμμικά Ελάχιστα Τετράγωνα). Στη συγκεκριμένη περίπτωση το διάνυσμα  $\mathbf{p}$  έχει τη μορφή:

$$\mathbf{p} = [C_0 \quad R_1 \quad \dots \quad R_M \quad L_1 \quad \dots \quad L_M \quad C_1 \quad \dots \quad C_M]^T \quad (3.17)$$

Στο Σχήμα 3.11 απεικονίζεται η προσέγγιση της απόκρισης ενός ελεύθερου πιεζοηλεκτρικού επιθέματος τύπου PIC 151, σε διάστημα συχνοτήτων μεταξύ 100 και 500 kHz, από ένα ισοδύναμο πολυβάθμιο κύκλωμα του οποίου οι παράμετροι παραθέτονται στον Πίνακα 3.2. Η προσέγγιση είναι αρκετά ικανοποιητική παρά τις όποιες επιμέρους αποκλίσεις, καθώς οι κύριες κορυφές απόκρισης προσομοιώνονται αξιόπιστα.



**Σχήμα 3.11:** Προσομοίωση της μετρούμενης φασματικής απόκρισης της HMA ενός ελεύθερου επιθέματος PZT από ένα ισοδύναμο πολυβάθμιο κύκλωμα.

**Πίνακας 3.2:** Παράμετροι ισοδύναμου πολυβάθμιου κυκλώματος για τη περίπτωση του ελεύθερου PZT.,  $C_0=2398\text{pF}$

Κλάδος Απόκρισης $j$	$R_j(\Omega)$	$L_j(\text{mH})$	$C_j(\text{pF})$	$freq_{0,j}(\text{kHz})$
1	3697.82	44.34	47.62	109.53
2	2082.81	39.74	45.31	118.60
3	6.69	0.32	2867.24	165.12
4	52.57	1.89	246.87	232.89
5	1031.22	5.87	35.24	349.83
6	13.67	0.26	466.44	455.21

### 3.3.2. Πολυωνυμική προσομοίωση της ηλεκτρικής απόκρισης

Το πρόβλημα της προσομοίωσης της ηλεκτρικής απόκρισης ενός ΗΜΗΣ στο πεδίο της συχνότητας, είναι δυνατό να διατυπωθεί στη γενική μορφή ανάλυσης των

φυσικών δυναμικών συστημάτων, τα οποία είναι μοναδιαίας εισόδου-εξόδου (SISO) και περιγράφονται από παραμέτρους χρονικά αμετάβλητες (Ogata, 1998; Kollar, 2004-2014). Με αφετηρία την Εξίσωση (3.14) η οποία περιγράφει τη συνάρτηση μεταφοράς ενός χρονικά αμετάβλητου (Time Invariant) ΗΜΗΣ, προκύπτει ότι:

$$Y = H(s) = s \frac{\sum_{j=1}^M \left\{ \left[ C_0 s^2 + C_0 \eta_j s + \left( \frac{C_0}{C_j} + 1 \right) \beta_j \right] \prod_{\substack{\xi=1 \\ \xi \neq j}}^M (s^2 + \eta_\xi s + \omega_{0,\xi}^2) \right\}}{\prod_{j=1}^M (s^2 + \eta_j s + \omega_{0,j}^2)} \Rightarrow$$

$$Y = H(s, \mathbf{p}) = s \frac{N(s, \mathbf{b})}{D(s, \mathbf{a})} = s \frac{\sum_{p=1}^{2M+1} b_{p-1} s^{p-1}}{\sum_{q=1}^{2M+1} a_{q-1} s^{q-1}} \quad (3.18)$$

όπου  $\mathbf{p} = [\mathbf{a} \ \mathbf{b}]^T = [a_0 \ a_1 \ \dots \ a_{do} \ b_0 \ b_1 \ \dots \ b_{no}]^T$  το διάνυσμα των συντελεστών των πολυωνύμων της συναρτήσεως μεταφοράς,  $N(s, \mathbf{b})$  το πολυώνυμο του αριθμητή της συναρτήσεως μεταφοράς (Numerator Polynomial) και  $D(s, \mathbf{a})$  το πολυώνυμο του παρονομαστή (Denominator Polynomial). Από την διατύπωση του προβλήματος στη μορφή της Εξίσωσης (3.18) διαπιστώνεται ότι η απόκριση της σύνθετης αγωγιμότητας ενός χρονικά αμετάβλητου ΗΜΗΣ είναι δυνατό να προσομοιωθεί από μια ρητή πολυωνυμική συνάρτηση παλινδρόμησης της μεταβλητής Laplace (Providakis and Liarakos, 2011; 2014). Επιπλέον από τις Εξισώσεις (3.18) προκύπτει ότι:

$$\frac{a_0}{a_{2M}} = \prod_{j=1}^M \omega_{0,j}^2, \quad \frac{b_{2M}}{a_{2M}} = M C_0$$

$$\frac{b_0}{a_{2M}} = \sum_{j=1}^M \left\{ \left( \frac{C_0}{C_j} + 1 \right) \beta_j \prod_{\substack{\xi=1 \\ \xi \neq j}}^M \omega_{0,\xi}^2 \right\} \quad (3.19)$$

Σε πολλές περιπτώσεις μη καταστροφικού ελέγχου όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου, αντί της Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας (HMA) καταγράφεται πειραματικά η Ηλεκτρο-Μηχανική Εμπέδηση

(HME)  $Z^e$ . Στη περίπτωση αυτή, λαμβάνοντας υπόψη την Εξίσωση (3.18), η συνάρτηση μεταφοράς του ισοδύναμου Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος γράφεται:

$$Z^e = \frac{1}{Y} = H^{-1}(s, \mathbf{p}) = \frac{1}{s} \frac{D(s, \mathbf{a})}{N(s, \mathbf{b})} = \frac{1}{s} \frac{\sum_{p=1}^{2M+1} a_{p-1} s^{p-1}}{\sum_{q=1}^{2M+1} b_{q-1} s^{q-1}} \quad (3.20)$$

Κατά τη διαδικασία ΜΚΕ μιας κατασκευής με τη χρήση PZT καταγράφονται τα φάσματα απόκρισης της HMA ή της HME, τα οποία είναι διακριτά και περιγράφονται από  $F$  ζεύγη τιμών  $(\omega_i, Y_{3,i}^{meas})$ , όπου  $i=1:F$ . Η τιμή της μετρούμενης HMA,  $Y_{3,i}^{meas}$ , σε κάθε γωνιακή συχνότητας καταγραφής  $\omega_i$ , θα περιγράφεται από μία σχέση της μορφής:

$$Y_{3,i}^{meas} = Y_3^{est}(s_i, \mathbf{p}) + r_{Y,i} \Rightarrow$$

$$Y_{3,i}^{meas} = s_i \frac{N^{est}(s_i, \mathbf{b})}{D^{est}(s_i, \mathbf{a})} + r_{Y,i} = s_i \frac{\sum_{p=1}^{2M+1} b_{p-1} s_i^{p-1}}{\sum_{q=1}^{2M+1} a_{q-1} s_i^{q-1}} + r_{Y,i} \quad (3.21)$$

όπου  $Y_3^{est}(s_i, \mathbf{p})$  η συνάρτηση μεταφοράς που εκτιμά την απόκριση του πραγματικού ΗΜΗΣ και  $r_{Y,i}$  το υπόλοιπο της συναρτήσεως μεταφοράς (Residual), στη συχνότητα  $\omega_i$ .

Το υπόλοιπο προκύπτει ως η διαφορά μεταξύ της μετρούμενης τιμής και της τιμής που δίνει το μοντέλο παλινδρόμησης. Επιπλέον έχει τη φυσική σημασία του θορύβου των μετρήσεων. Ως θόρυβος μέτρησης ενός φυσικού μεγέθους χαρακτηρίζεται η επιπλέον πληροφορία που λαμβάνεται συνήθως λόγω του συστηματικού σφάλματος των συνθηκών μέτρησης (Providakis and Liarakos, 2014; Βουτετάκη, 2009). Πιο συγκεκριμένα για την περίπτωση των ΗΜΗΣ ο θόρυβος συστηματικού σφάλματος προκύπτει από την πιθανή αστάθεια που δύναται να εμφανίσουν τα ηλεκτρικά στοιχεία της μετρητικής διάταξης στις υψηλές συχνότητες σάρωσης. Ο θόρυβος μπορεί να θεωρηθεί ως μια τυχαία μιγαδική μεταβλητή, η οποία ακολουθεί την κανονική κατανομή, με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση, ενώ εξαρτάται από την διακύμανση (Variation) της τελικής τάσης εισόδου του ΗΜΗΣ και του ρεύματος απόκρισης (έξοδος ΗΜΗΣ). Και στη παρούσα περίπτωση το ζήτημα

της παλινδρόμησης για τον προσδιορισμό της συναρτήσεως μεταφοράς  $Y_3^{est}(s_i, \mathbf{p})$  αποτελεί ένα πρόβλημα μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων το οποίο αποσκοπεί στην ικανοποίηση της ακόλουθης συνθήκης:

$$\min_{\mathbf{p}} \sum_{i=1}^F \{Y_{3,i}^{meas} - Y_3^{est}(s_i, \mathbf{p})\}^2 = \min_{\mathbf{p}} \sum_{i=1}^F r_{Y,i}^2 \quad (3.22)$$

δηλαδή στον προσδιορισμό του βέλτιστου διανύσματος παραμέτρων  $\mathbf{p}$ , με στόχο την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των υπολοίπων στο εύρος των συχνοτήτων σάρωσης (Εξίσωση 3.12). Από την Εξίσωση (3.21) προκύπτει ότι η εκτιμώμενη συνάρτηση μεταφοράς περιγράφει την απόκριση ενός ισοδύναμου με το υπό μελέτη ΗΜΗΣ, το οποίο όμως είναι απαλλαγμένο από το θόρυβο.

Ο Istvan Kollar (Kollar, 2004-2014) έχει αναπτύξει και παρουσιάσει ένα ολοκληρωμένο πακέτο εργαλείων σε περιβάλλον MATLAB, με την εμπορική ονομασία **FDIdent** (**F**requency **D**omain **S**ystems **I**dentification **T**oolbox), το οποίο εκτελεί διαδικασίες προσομοίωσης και ταυτοποίησης γραμμικών χρονικά αμετάβλητων δυναμικών συστημάτων. Μέσω του **FDIdent** και πιο συγκριμένα της συναρτήσεως **ELiS** (**E**stimation for **L**inear **S**ystem), παρέχεται η δυνατότητα παλινδρόμησης των μετρούμενων φασμάτων HMA/HME και προσδιορισμού του διανύσματος  $\mathbf{p}$  της ρητής πολωνυμικής συνάρτησης μεταφοράς (Εξίσωση 3.21). Η συνάρτηση ELiS είναι ένα από τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα διατριβή για την προσομοίωση των αποκρίσεων HMA/HME.

Εναλλακτικά των εργαλείων του πακέτου FDIdent, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε μια νέα τεχνική παλινδρόμησης των φασμάτων HMA/HME. Η συγκριμένη τεχνική, η οποία από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως **Μέθοδος Γραμμικοποιημένης Παλινδρόμησης (Linearized Regression Method-LRM)**, στηρίζεται στη γραμμικοποίηση του προβλήματος προσδιορισμού της συναρτήσεως μεταφοράς και την απευθείας επίλυση του με την κλασική μέθοδο των γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων (MathWorks, 2014). Στις περισσότερες εργαστηριακές εφαρμογές της παρούσας διατριβής, ως Ηλεκτρο-Μηχανική Υπογραφή του ΗΜΗΣ επιλέχθηκε η Ηλεκτρική Εμπέδηση  $Z_3^{meas}$ , καθώς τα ολοκληρωμένα κυκλώματα καταγραφής που αξιοποιήθηκαν παρείχαν τη δυνατότητα απευθείας μέτρησης της (Providakis and Liarakos, 2011; 2014; Liarakos and Providakis, 2013; Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013).

Η συνάρτηση μεταφοράς του ΗΜΗΣ είναι μια ρητή πολυωνυμική συνάρτηση της γωνιακής συχνότητας  $\omega$ , ενώ οι συντελεστές των πολυωνύμων του αριθμητή και του παρονομαστή είναι μιγαδικές ποσότητες. Κάθε ζεύγος καταγραφόμενων τιμών  $(\omega_i, Z_{3,i}^{meas})$ , με  $i=1:F$ , συσχετίζεται με τη συνάρτηση μεταφοράς και τουπόλοιπο της εκτίμησης (Residual), σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$Z_{3,i}^{meas} = R_{3,i}^{meas} + iX_{3,i}^{meas} = Z_3^{est}(\omega_i, \mathbf{p}) + r_{Z,i} \quad (3.23)$$

όπου  $Z_{3,i}^{meas}$  και  $Z_3^{est}(\omega_i, \mathbf{p})$  η μετρούμενη και η εκτιμώμενη τιμή της ΗΜΕ αντίστοιχα στην  $\omega_i$  γωνιακή συχνότητα. Η εκτιμώμενη τιμή προσδιορίζεται με βάση την ακόλουθη συνάρτηση μεταφοράς:

$$Z_3^{est}(\omega_i, \mathbf{p}) = \frac{N_Z(\omega_i, \mathbf{b})}{D_Z(\omega_i, \mathbf{a})} = \frac{\sum_{p=1}^{no+1} b_{p-1}^Z \omega_i^{p-1}}{\sum_{q=1}^{do+1} a_{q-1}^Z \omega_i^{q-1}} \quad (3.24)$$

όπου  $\mathbf{p} = [\mathbf{a} \ \mathbf{b}]^T = [a_0^Z \ a_1^Z \ \dots \ a_{do}^Z \ b_0^Z \ b_1^Z \ \dots \ b_{no}^Z]^T$  το διάνυσμα των παραμέτρων της συναρτήσεως μεταφοράς,  $no$  και  $do$  η τάξη μεγέθους του πολυωνύμου του αριθμητή και του παρονομαστή αντίστοιχα.

Δεδομένου ότι η γωνιακή συχνότητα είναι πραγματικός αριθμός και η Ηλεκτρο-Μηχανική Εμπέδησης, μιγαδικός, οι συντελεστές της συναρτήσεως μεταφοράς θα είναι μιγαδικοί αριθμοί. Με βάση την τελευταία παρατήρηση η Εξίσωση (3.24) γράφεται στην ισοδύναμη μορφή:

$$Z_3^{est}(\omega_i, \mathbf{p}) = \frac{N_Z(\omega_i, \mathbf{b})}{D_Z(\omega_i, \mathbf{a})} = \frac{\sum_{p=1}^{no+1} |b_{p-1}^Z| e^{i\theta_{p-1}} \omega_i^{p-1}}{\sum_{q=1}^{do+1} |a_{q-1}^Z| e^{i\theta_{q-1}} \omega_i^{q-1}} \quad (3.25)$$

όπου:

$$\theta_{p-1} = \text{atan}\left(\frac{\text{Im}\{b_{p-1}\}}{\text{Re}\{b_{p-1}\}}\right) \quad (3.26.a)$$

και



$$\varphi_{q-1} = \text{atan}\left(\frac{\text{Im}\{a_{q-1}\}}{\text{Re}\{a_{q-1}\}}\right) \quad (3.26.\beta)$$

Από την αντικατάσταση της Εξίσωσης (3.24), στην Εξίσωση (3.23) προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} (Z_{3,i}^{meas} - r_{Z,i})D_Z(\omega_i, \mathbf{a}) - N_Z(\omega_i, \mathbf{b}) &= 0 \Rightarrow \\ Z_{3,i}^{meas}D_Z(\omega_i, \mathbf{a}) - N_Z(\omega_i, \mathbf{b}) &= r_{Zd,i} \end{aligned} \quad (3.27)$$

όπου

$$r_{Zd,i} = D_Z(\omega_i, \mathbf{a})r_{Z,i} \quad (3.28)$$

τα εξαρτημένα υπόλοιπα. Η Εξίσωση (3.27) γράφεται σε συμπαγή μορφή πινάκων ως εξής:

$$\left[ \mathbf{Z}_3^{meas} \mathbf{\Omega}_D - \mathbf{\Omega}_N \right] \mathbf{p} = \underbrace{\mathbf{A}}_{F \times (no+do+2)} \underbrace{\tilde{\mathbf{p}}}_{(no+do+2) \times 1} = \underbrace{\mathbf{r}_{Zd}}_{(no+do+2) \times 1} \quad (3.29)$$

όπου:

$$\mathbf{Z}_3^{meas} = \text{diag}(Z_{3,i}^{meas}) \quad (3.30.\alpha)$$

$$\mathbf{\Omega}_{N,D} = \begin{bmatrix} 1 & \omega_1 & \omega_1^2 & \cdots & \omega_1^{no,do} \\ 1 & \omega_2 & \omega_2^2 & \cdots & \omega_2^{no,do} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega_F & \omega_F^2 & \cdots & \omega_F^{no,do} \end{bmatrix} \quad (3.30.\beta)$$

$$\mathbf{r}_{Zd} = [r_{Zd,1} \quad r_{Zd,2} \quad \cdots \quad r_{Zd,F}]^T \quad (3.30.\gamma)$$

Η Εξίσωση (3.29) περιγράφει ένα γραμμικό πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων και το διάνυσμα των παραμέτρων της συναρτήσεως μεταφοράς  $\mathbf{p}$ , είναι δυνατό να προσδιοριστεί από τη σχέση:

$$\mathbf{p} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{r}_{Zd} \quad (3.31)$$

όπου  $\mathbf{A}^H$  ο ερμιτιάνος πίνακας του  $\mathbf{A}$  (Αβδελάς και Σίμος, 2003). Ένα σοβαρό υπολογιστικό ζήτημα που προκύπτει από την αντιστροφή του όρου  $\mathbf{G}_A = \mathbf{A}^H \mathbf{A}$ , είναι ότι τα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{G}_A$  εμφανίζουν μεταξύ τους διαφορές αρκετών τάξεων μεγέθους, με αποτέλεσμα ο πίνακας να είναι ασταθής στις επαναληπτικές μεθόδους αντιστροφής. Η διαφορές αυτές γίνονται ακόμη μεγαλύτερες όσο αυξάνεται η τάξη των πολωνύμων του παρανομαστή και του αριθμητή. Από την Εξίσωση (3.30.β) είναι εύκολο να διαπιστωθεί, ότι το στοιχείο  $\mathbf{G}_A(1,1)$  με το στοιχείο  $\mathbf{G}_A(F, no+1)$  θα διαφέρουν μεταξύ τους τουλάχιστον  $no+1$  τάξεις μεγέθους. Ως μέτρο αστάθειας του πίνακα  $\mathbf{G}_A$  χρησιμοποιείται ο δείκτης κατάστασης πίνακα, ο οποίος μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση (Αβδελάς και Σίμος, 2003):

$$K(\mathbf{G}_A) = \|\mathbf{G}_A\|_{Fr} \|\mathbf{G}_A^{-1}\|_{Fr} \quad (3.32)$$

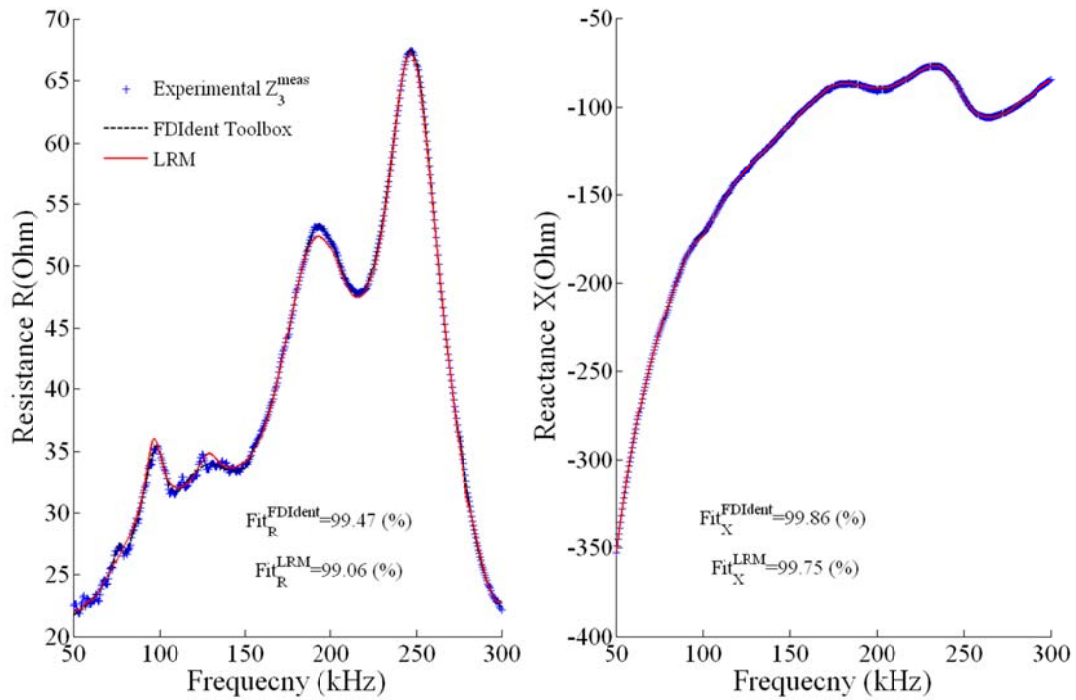
όπου  $\|\mathbf{G}_A\|_{Fr}$  η νόρμα του Frobenius.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του MATLAB, εάν ο  $K(\mathbf{G}_A)$  είναι μικρότερος του  $10^{19}$  το σφάλμα αστάθειας είναι διαχειρίσιμο και οδηγεί σε αξιόπιστα αποτελέσματα. Σε κάθε περίπτωση πάντως, προκειμένου να αποφευχθούν τα προβλήματα αστάθειας ή τουλάχιστον να περιοριστούν σημαντικά, επιλέχθηκε κατά τη διαδικασία των ελαχίστων τετραγώνων να χρησιμοποιηθεί ως ανεξάρτητη μεταβλητή των πολωνύμων, η κανονικοποιημένη γωνιακή συχνότητα η οποία προκύπτει από τον ακόλουθο μετασχηματισμό του διανύσματος  $\omega_i$ :

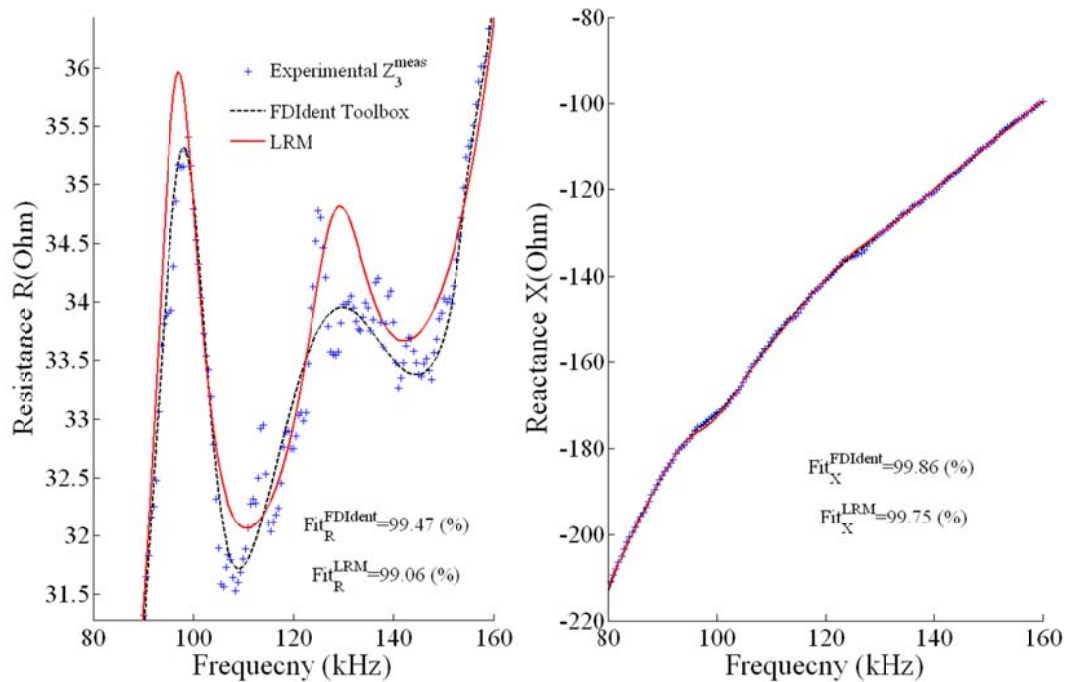
$$\bar{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} = \frac{\omega_i}{\omega_F - \omega_1} \quad (3.33)$$

Τα υπόλοιπα (Residuals) όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο σημείο της παρούσας ενότητας, οφείλονται στο θόρυβο των μετρήσεων όποτε και στη παρούσα μεθοδολογία περιγράφονται από μια τυχαία μεταβλητή, η οποία ακολουθεί την κανονική κατανομή έχοντας μηδενική μέση τιμή, πραγματικού και φανταστικού μέρους.

Στο Σχήμα 3.12 απεικονίζεται συγκριτικά η προσομοίωση της απόκρισης ενός Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος, το οποίο συμπεριλαμβάνει ένα κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος (Providakis and Liarakos, 2011), τόσο με την μέθοδο της LRM (Εξισώσεις 3.29-3.31), όσο και με τη χρήση του πακέτου εργαλείων FDIIdent.



α)



β)

**Σχήμα 3.12:** Προσομοίωση της μετρούμενης εμπέδησης  $Z_3^{\text{meas}}$  ενός ΗΜΗΣ σκυροδέματος. α) Συνολικό εύρος συχνοτήτων σάρωσης. β) Εστίαση στη περιοχή 80-160kHz.

Η αξιολόγηση της προσέγγισης της πειραματικώς καταγραφόμενης HME  $Z_3^{meas}$ , γίνεται με τη χρήση του ακόλουθου δείκτη προσαρμογής:

$$Fit_x = \left( 1 - \frac{1}{F} \sum_{j=1}^F \left| \frac{x^{est} - x^{meas}}{x^{meas}} \right| \right) \times 100 \quad (3.34)$$

όπου  $x^{meas}$  και  $x^{est}$  η μετρούμενη και η εκτιμώμενη τιμή αντίστοιχα. Όσο πιο κοντά στο 100% βρίσκεται η τιμή του  $Fit_x$  τόσο καλύτερη είναι η προσέγγιση της απόκρισης του ΗΜΗΣ.

**Πίνακας 3.3:** Παράμετροι των συναρτήσεων μεταφοράς της φασματικής απόκρισης  $Z_3$  του Σχήματος 3.12 με την μέθοδο LRM και τη συνάρτηση ELiS του πακέτου FDIIdent.

LRM, $no=16, do=16$ (Εξίσωση 3.25)					FDIdent, $M=8$ (Εξίσωση 3.21)		
$p, q$	$ \alpha^Z $	$\theta$	$ b^Z $	$\varphi$	$p, q$	$\alpha$	$b$
1	1.98E-15	1.80	2.55E-12	-29.25	1	1.45E-08	8.26E-04
2	4.25E-20	-5.71	1.82E-17	-54.43	2	7.29E-12	2.55E-09
3	2.56E-25	-17.39	4.66E-23	-59.70	3	2.16E-17	1.18E-14
4	6.69E-31	-43.68	5.04E-29	-57.63	4	9.85E-23	2.73E-20
5	8.68E-37	56.79	4.26E-35	-45.10	5	2.24E-28	6.24E-26
6	6.69E-43	6.49	5.93E-41	-8.31	6	4.94E-34	1.09E-31
7	5.25E-49	-24.69	3.33E-47	43.69	7	8.57E-40	1.58E-37
8	2.81E-55	83.58	9.03E-54	88.18	8	1.18E-45	2.09E-43
9	1.19E-61	62.02	2.08E-60	-27.59	9	1.57E-51	2.09E-49
10	3.04E-68	-19.92	6.38E-66	-0.53	10	1.44E-57	2.10E-55
11	5.23E-75	-17.53	6.50E-72	-65.82	11	1.49E-63	1.45E-61
12	1.74E-80	3.85	2.92E-78	-6.75	12	9.08E-70	1.10E-67
13	1.15E-86	86.37	1.01E-84	-26.91	13	7.40E-76	5.14E-74
14	4.68E-93	-32.47	6.71E-91	-76.39	14	2.77E-82	2.84E-80
15	1.32E-99	43.34	1.98E-97	-31.14	15	1.78E-88	7.97E-87
16	1.15E-105	-74.26	1.20E-103	18.21	16	3.19E-95	2.76E-93
17	2.50E-112	-60.62	2.38E-110	21.37	17	1.62E-101	3.36E-100

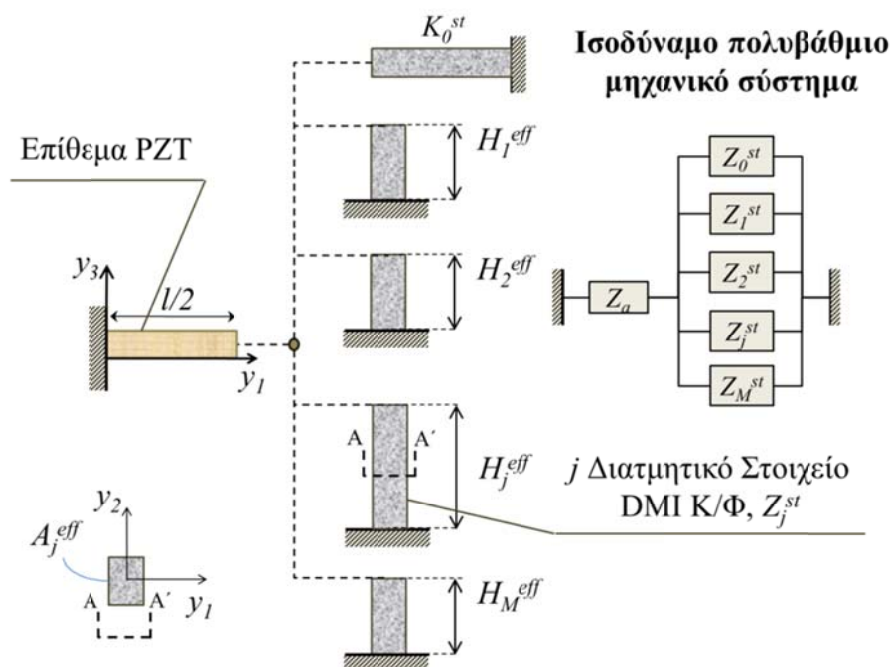
Από τη συγκριτική παράθεση των υπολογιζόμενων συναρτήσεων μεταφοράς (Σχήμα 3.12), διαπιστώνεται ότι τόσο το πακέτο FDIIdent, όσο και η προτεινόμενη στα πλαίσια της παρούσας διατριβής μέθοδος παλινδρόμησης LRM, προσεγγίζουν τη πειραματικώς καταγραφόμενη απόκριση της ηλεκτρικής εμπίεσης  $Z_3^{meas}$  του ΗΜΗΣ πολύ ικανοποιητικά, δίνοντας σε όλες τις περιπτώσεις ένα δείκτη προσαρμογής πάνω από 99%.

Στον Πίνακα 3.3 παραθέτονται οι παράμετροι των συναρτήσεων μεταφοράς για τις μεθόδους LRM και ELiS. Η προτεινόμενη μέθοδος εμφανίζει κάποια μειονεκτήματα σε σχέση με τη συνάρτηση ELiS καθώς ενσωματώνει τις διπλάσιες παραμέτρους ( $|a^Z|$ ,  $\theta$ ,  $|b^Z|$ ,  $\varphi$ ) στη συνάρτηση μεταφοράς και επιδεικνύει λίγο μικρότερη προσαρμοστικότητα στα πειραματικά δεδομένα (Σχήμα 3.12:  $Fit_R^{FDIdent}=99.47\%$ ,  $Fit_R^{LRM}=99.06\%$ ). Ωστόσο τα μειονεκτήματα αυτά αντισταθμίζονται σημαντικά από το γεγονός ότι η LRM, α) ανεξαρτητοποιεί τις μεθόδους αξιολόγησης των ΗΜΗΣ, αλλά και των εφαρμογών που θα παρουσιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο, από εμπορικά πακέτα με σχετικά υψηλό κόστος και β) επιδεικνύει χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα, κάτι που την καθιστά ταχύτερη και ευκόλως προγραμματίσιμη ακόμη και σε απλά υπολογιστικά συστήματα. Τα συγκριμένα χαρακτηριστικά καθιστούν την LRM μια σημαντική καινοτομία της διατριβής.

### 3.3.3. Προσομοίωση της μηχανικής απόκρισης με ισοδύναμα συστήματα Μηχανικών Δυναμικών Εμπεδήσεων

Εξίσου σημαντική και ίσως σημαντικότερη στη περίπτωση των Ηλεκτρο-Μηχανικών Συστημάτων σκυροδέματος, είναι η προσομοίωση της μηχανικής απόκρισης των υπό παρακολούθηση κατασκευών που φέρουν τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες. Ιδιαίτερα στη περίπτωση του σκυροδέματος όπου τα δομικά στοιχεία εμφανίζουν υψηλή δυσκαμψία και απόσβεση, η εξαγωγή της μηχανικής απόκρισης από τη μετρούμενη ηλεκτρική δίνει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη δυναμική συμπεριφορά και τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής (Σχήμα 3.4). Η μηχανική απόκριση αποτυπώνεται στις Ηλεκτρο-Μηχανικές Υπογραφές της Δυναμικής Μηχανικής Εμπέδησης (DMI)  $Z_{Si}$ , η οποία προσδιορίζεται υπολογιστικά από την μετρούμενη Ηλεκτρική Αγωγιμότητα  $Y_3^{meas}$ , τις ηλεκτρομηχανικές ιδιότητες του PZT και τις Εξισώσεις (3.1)-(3.3).

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκε το μοντέλο της διατμητικής DMI (Σχήματα 2.14-2.15) το οποίο έχει προταθεί από τους Providakis και Liarakos (2014), (Εξίσωση 2.63) και στηρίζεται στη παραδοχή ότι η μηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ PZT και Κ/Φ οφείλεται στη διάδοση των εγκάρσιων μηχανικών κυμάτων (Providakis and Liarakos, 2014). Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι μονοδιάστατο, περιγράφοντας μια υπό παρακολούθηση κατασκευή σκυροδέματος με έναν βαθμό ελευθερίας. Προκειμένου λοιπόν να μελετηθούν και να προσομοιωθούν οι πραγματικές κατασκευές, οι οποίες διαθέτουν περισσότερους του ενός βαθμούς ελευθερίας, το μοντέλο της διατμητικής DMI επεκτάθηκε με βάση τη φιλοσοφία που απεικονίζεται παραστατικά στο Σχήμα 3.13.



**Σχήμα 3.13:** Πολυβάθμιο μηχανικό σύστημα διατμητικών DMI το οποίο προσομοιώνει τη μηχανική απόκριση μιας κατασκευής σκυροδέματος που φέρει ενσωματωμένο ένα PZT (Κατασκευής Φορέας-Κ/Φ).

Η δυναμική συμπεριφορά της Κ/Φ προσομοιώνεται από περισσότερα του ενός στοιχεία ή συνιστώσες διατμητικής μηχανικής εμπεδήσεως (DMI), τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους παράλληλα διαμορφώνοντας ένα ισοδύναμο σύστημα πολλαπλών μηχανικών εμπεδήσεων-MIS (Multi-mechanical Impedance System). Λαμβάνοντας υπόψη την βασική εξίσωση απόκρισης του μονοβάθμιου διατμητικού στοιχείου DMI (Εξίσωση 2.63) και τους γενικούς κανόνες άθροισης μηχανικών

στοιχείων (Harris and Piersol, 2002), η συνολική Μηχανική Εμπέδηση  $Z_{St}$ , του MIS προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$Z_{St}(\omega, \mathbf{p}) = Z_0^{st} + \sum_{j=1}^M Z_j^{st} = \frac{K_0^{st}}{i\omega} + \frac{1}{i\omega} \sum_{j=1}^M \frac{A_j^{eff} \kappa_{s,j} \overline{G}_{St,j}}{\tan(\kappa_{s,j} H_j^{eff})} \quad (3.35)$$

όπου  $K_0^{st}$  η καθολική ή γενική δυσκαμψία του MIS, η οποία περιγράφει ένα δυναμικό στοιχείο με μηδενική απόσβεση,  $A_j^{eff}$ ,  $H_j^{eff}$  και  $n_j^{st}$ , η ενεργός επιφάνεια, το ενεργό βάθος και ο συντελεστής μηχανικών απωλειών αντίστοιχα, της  $j$  συνιστώσας του MIS,  $\overline{G}_{St,j} = G_{St}(1 + i n_j^{st})$ ,  $\kappa_{s,j} = \omega \sqrt{\rho_{St} / \overline{G}_{St,j}}$ ,  $G_{St}$  το μέτρο διάτμησης του υλικού,  $\rho_{St}$  η πυκνότητα και  $\mathbf{p} = [K_0^{st} \quad A_1^{eff} \quad \dots \quad A_M^{eff} \quad H_1^{eff} \quad \dots \quad H_M^{eff} \quad n_1^{st} \quad \dots \quad n_M^{st}]$  το γενικό διάνυσμα παραμέτρων του MIS.

Εάν η πειραματικώς προσδιοριζόμενη μηχανική απόκριση της  $K/\Phi$  ενός Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος (με βάση την καταγραφόμενη σύνθετη αγωγιμότητα  $Y_3^{meas}$ , Εξισώσεις 3.1-3.3), περιγράφεται από  $F$  ζεύγη τιμών ( $\omega_i$ ,  $Z_{St,i}^{meas}$ ) με  $i=1:F$ , οι παράμετροι του ισοδύναμου MIS προσδιορίζονται με την μέθοδο των μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων σύμφωνα με τη σχέση:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{p}} \sum_{i=1}^F \left[ \operatorname{Re}\{Z_{St,i}^{meas}\} - \operatorname{Re}\{Z_{St}^{est}(\omega_i, \mathbf{p})\} \right]^2 \\ \text{subject to } \mathbf{p} > 0 \\ n_j^{st} < 1 \end{aligned} \quad (3.36)$$

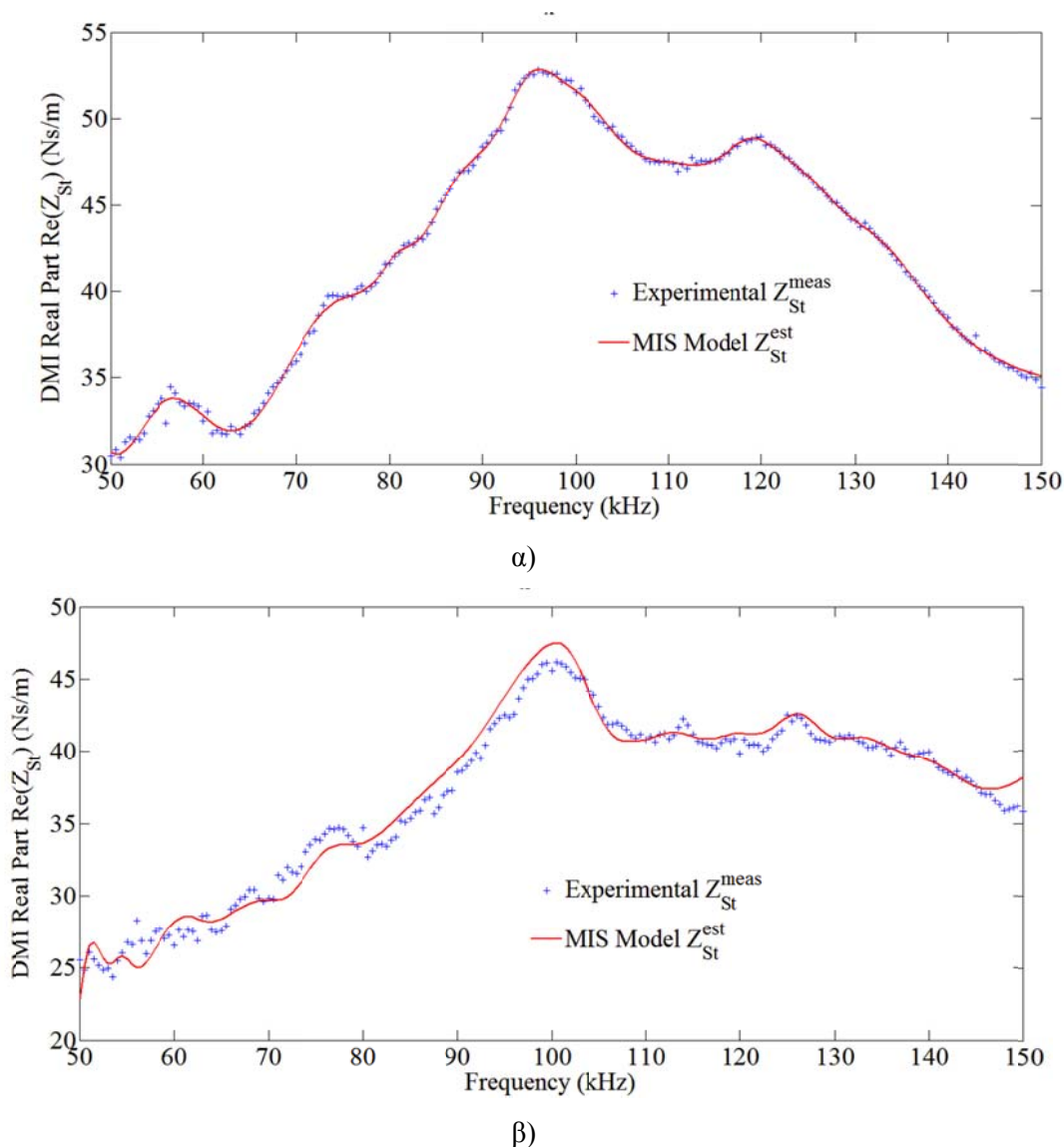
όπου  $Z_{St}^{meas}(\omega_i, \mathbf{p})$  η εκτιμώμενη τιμή της μηχανικής εμπέδησης του ισοδύναμου MIS.

Όπως και στην περίπτωση της προσομοίωσης της ηλεκτρικής απόκρισης ενός Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος από ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, το συγκριμένο πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί με την χρήση της συνάρτησης **lsqnonlin** (Trust-Region-Reflective ή Levenberg–Marquardt Algorithm) του πακέτου εργαλείων βελτιστοποίησης (Optimization Toolbox) του MATLAB (MathWorks, 2014). Τονίζεται δε για άλλη μια φορά η σπουδαιότητα της εύστοχης εκτίμησης του αρχικού διανύσματος  $\mathbf{p}_0$  και του καθορισμού ρεαλιστικών ορίων ανοχής του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων εκτίμησης, έτσι ώστε ο αλγόριθμος να συγκλίνει σε αξιόπιστη επίλυση του προβλήματος.

Στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζεται η προσομοίωση του πραγματικού μέρους της μηχανικής εμπέδησης (DMI), ενός κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος, το οποίο φέρει



ενσωματωμένο ένα «ευφύες» πιεζοηλεκτρικό αδρανές (Providakis and Liarakos, 2011). Η μηχανική απόκριση του δοκιμίου (δοκίμιο σκυροδέματος) υπολογίστηκε από τις Εξισώσεις 3.1-3.3 και την πειραματικά καταγραφόμενη φασματική απόκριση της αγωγιμότητας (Σχήμα 3.3), κατά τη διαδικασία παρακολούθησης της ωρίμανσης του σκυροδέματος τις πρώτες 28 ημέρες. Η μηχανική απόκριση του δοκιμίου προσομοιώθηκε για σκυρόδεμα ηλικίας α) 1 και β) 28 ημερών. Η αξιολόγηση της προσέγγισης της DMI, γίνεται με τη χρήση του δείκτη προσαρμογής  $Fit_x$  (Εξίσωση 3.34).



**Σχήμα 3.14:** Προσέγγιση της μηχανικής απόκρισης ενός δοκιμίου σκυροδέματος από ισοδύναμο MIS. Σκυρόδεμα ηλικίας, α) 1 ημέρας,  $Fit_x=99.53\%$  και β) 28 ημερών,  $Fit_x=97.72\%$ .



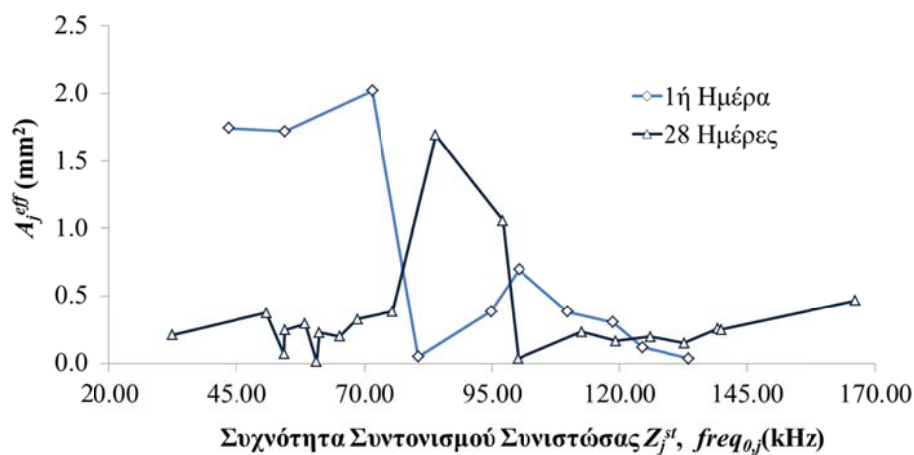
Από τα Σχήματα 3.14 και τις τιμές του δείκτη προσαρμογής, διαπιστώνεται ότι το προτεινόμενο μοντέλο MIS, δίνει εκτιμήσεις υψηλής ακρίβειας σε σχέση με τη μηχανική απόκριση του δοκιμίου. Επιπλέον οι παράμετροι της συναρτήσεως μεταφοράς (Εξίσωση 3.35) αποτελούν μεγέθη με φυσικό-μηχανική ερμηνεία ( $A_{eff}$ ,  $H_{eff}$ ,  $n_{SI}$ ).

**Πίνακας 3.4:** Παράμετροι ισοδύναμων MIS (Σχήμα 3.14).  $Q_j^{st}=1/n_j^{st}$  ο μηχανικός συντελεστής Q (Mechanical Quality Factor ή Q Factor), (Giurgiutiu, 2008).

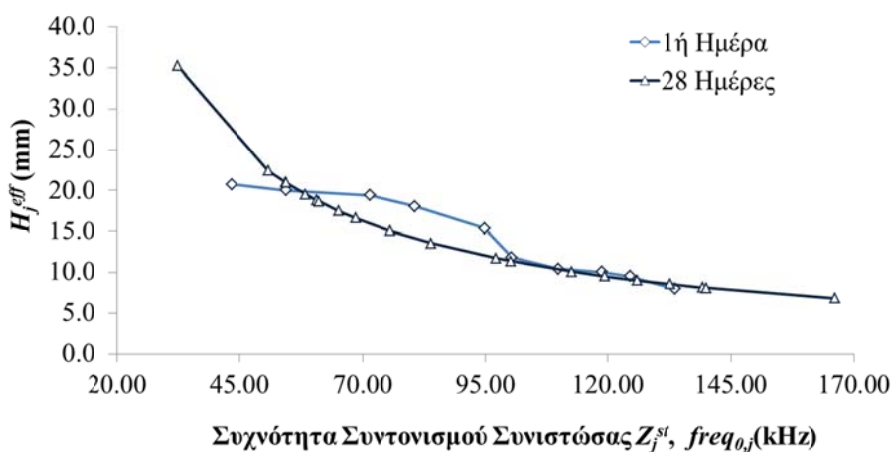
Δοκίμιο Σκυροδέματος					Δοκίμιο Σκυροδέματος				
Ηλικίας 1 Ημέρας. $K_0^{st}=36.56\text{MN}$					Ηλικίας 28 Ημερών, $K_0^{st}=33\text{MN}$				
$j$	$freq_{0j}(\text{kHz})$	$A_j^{eff}(\text{mm}^2)$	$H_j^{eff}(\text{m})$	$Q_j^{st}$	$j$	$freq_{0j}(\text{kHz})$	$A_j^{eff}(\text{mm}^2)$	$H_j^{eff}(\text{m})$	$Q_j^{st}$
1	43.45	1.75	20.73	5.49	1	32.36	0.21	35.27	3.30
2	54.51	1.72	20.02	3.08	2	50.86	0.38	22.44	10.89
3	71.46	2.02	19.42	3.05	3	54.34	0.07	21.00	15.82
4	80.60	0.05	18.06	14.66	4	54.47	0.25	20.95	5.64
5	94.80	0.39	15.38	8.82	5	58.40	0.29	19.54	7.01
6	100.34	0.70	11.85	6.24	6	60.63	0.01	18.82	3.59
7	109.85	0.38	10.47	6.45	7	61.14	0.23	18.66	8.08
8	118.75	0.31	10.09	9.22	8	65.10	0.20	17.53	7.02
9	124.48	0.12	9.55	10.57	9	68.57	0.33	16.64	6.68
10	133.68	0.04	8.02	10.89	10	75.54	0.38	15.11	6.94
					11	83.96	1.69	13.59	3.28
					12	97.08	1.06	11.75	5.11
					13	100.10	0.04	11.40	4.07
					14	112.65	0.23	10.13	10.24
					15	119.31	0.17	9.56	11.01
					16	126.04	0.20	9.05	13.23
					17	132.77	0.15	8.59	12.17
					18	139.30	0.26	8.19	3.07
					19	139.99	0.25	8.15	8.79
					20	166.14	0.47	6.87	4.51

Ιδιαίτερα η τελευταία ιδιότητα του μοντέλου MIS θεωρείται σημαντικό πλεονέκτημα και συνεισφορά της παρούσας διατριβής, έναντι των μεθόδων προσομοίωσης LRM και FDIIdent, καθώς πέραν της εκτίμησης της μηχανικής απόκρισης της υπό παρακολούθηση κατασκευής, επιτυγχάνεται και η ταυτοποίηση (Identification) του ισοδύναμου δυναμικού συστήματος. Στον Πίνακα 3.4, παραθέτονται οι παράμετροι (διανύσματα **p**) των ισοδύναμων MIS που

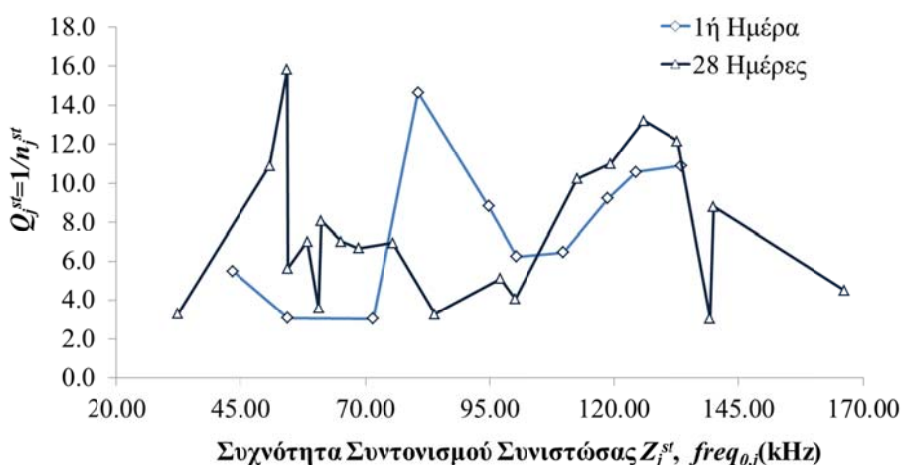
αντιπροσωπεύουν τις δύο διαφορετικές φάσεις ανάπτυξης της αντοχής και της δυσκαμψίας του σκυροδέματος.



α)



β)



γ)

**Σχήμα 3.15:** Κατανομή παραμέτρων ισοδύναμων MIS, συναρτήσει των συχνοτήτων συντονισμού της κάθε συνιστώσας μηχανικής εμπέδησης,  $Z_j^{st}$  (Πίνακας 3.4).

Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζεται η μεταβολή των παραμέτρων του MIS συναρτήσει των συχνοτήτων συντονισμού της κάθε δυναμικής συνιστώσας για τις περιπτώσεις δοκιμίου σκυροδέματος ηλικίας 1 και 28 ημερών. Παράμετροι του εκτιμώμενου MIS με ιδιαίτερη φυσική σημασία, είναι τα προσδιοριζόμενα ενεργά βάθη  $H_j^{eff}$  τα οποία συσχετίζονται άμεσα με τις θεμελιώδεις συχνότητες συντονισμού της κάθε δυναμικής συνιστώσας. Οι θεμελιώδεις συχνότητες συντονισμού υπολογίζονται αναλυτικά σύμφωνα με την Εξίσωση 2.64, η οποία για την περίπτωση του πολυβάθμιου συστήματος γράφεται:

$$freq_{0j} = \frac{1}{2H_j^{eff}} \sqrt{\frac{G_{St}}{\rho_{St}}} \quad (3.37)$$

Μια άλλη σημαντική παράμετρος του MIS είναι οι ενεργές επιφάνειες  $A_j^{eff}$  οι οποίες σχετίζονται άμεσα με την στατική δυσκαμψία  $K_{0j}^{st}$  της κάθε δυναμικής συνιστώσας (Εξίσωση 2.63), σύμφωνα με τη σχέση:

$$K_{0j}^{st} = \frac{G_{St} A_j^{eff}}{H_j^{eff}} \quad (3.38)$$

Το Σχήμα 3.15.α αποτυπώνει ξεκάθαρα το πώς η ενεργώς επιφάνεια του συστήματος, ανακατανέμεται μεταξύ των δυναμικών συνιστωσών, καθώς τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος μεταβάλλονται κατά τη διαδικασία ωρίμασης. Η κατανομή αυτή αντικατοπτρίζει άμεσα και την μεταβολή της στατικής δυσκαμψίας (Εξίσωση 3.38) του συστήματος, η οποία για την περίπτωση του σκυροδέματος ηλικίας 28 ημερών φαίνεται να λαμβάνει υψηλότερες τιμές στις μεγαλύτερες συχνότητες συντονισμού.

### 3.3.4. Προσομοίωση με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η δυναμική απόκριση των ΗΜΗΣ είναι δυνατό να προσομοιωθεί με την ευρύτητα διαδεδομένη και εφαρμοζόμενη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ), (Benjeddou, 2000; Piefort, 2001; Providakis et al., 2007; Perry et al., 2008; Comsol, 2012). Η ΜΠΣ αποτελεί μια μεθοδολογία αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους. Αν και εμφανίζει υψηλό υπολογιστικό φόρτο και μαθηματική πολυπλοκότητα είναι η πλέον ευέλικτη και ευπροσάρμοστη μέθοδος

προσομοίωσης, καθώς δίνει τη δυνατότητα επίλυσης εξαιρετικά σύνθετων προβλημάτων της δυναμικής των κατασκευών.

Η φύση της πολυπλοκότητας που καθιστά τη ΜΠΣ ισχυρό εργαλείο, εντοπίζεται κυρίως στη γεωμετρία των πραγματικών δομικών συστημάτων, η οποία στις περισσότερες των περιπτώσεων ξεφεύγει από τις απλές εκδοχές των γραμμικών ή πρισματικών δομικών στοιχείων. Στη περίπτωση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το δυναμικό πεδίο μετατοπίσεων  $u_j$  και το ηλεκτρικό πεδίο  $E_j$ , στον όγκο  $V_{slid}$  ενός πιεζοηλεκτρικού σώματος, και την ηλεκτρική μετατόπιση στην επιφάνεια του  $S_{slid}$ , είναι οι ακόλουθες (Piefort, 2001; Providakis et al., 2007; Perry et al., 2008):

$$\rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} = \nabla \sigma_{ij,i} + f_j^b + \frac{\partial f_j^s}{\partial y_j} \quad (3.39.\alpha)$$

$$E_j = -\frac{\partial V}{\partial y_j} \quad (3.39.\beta)$$

$$D_j = -\varepsilon_{jj} \frac{\partial V}{\partial y_j} \quad (3.39.\gamma)$$

όπου  $i, j=1:3$  οι δείκτες διευθύνσεων του καρτεσιανού χώρου,  $\rho$  η πυκνότητα του υλικού,  $\sigma_{ij}$  ο τανυστής των τάσεων (Σχήμα 2.2),  $f_j^b$  και  $f_j^s$ , οι δυνάμεις σώματος-όγκου (Body Forces N/m<sup>3</sup>) και οι επιφανειακές δυνάμεις (Surface ή Boundary Forces N/m<sup>2</sup>) αντίστοιχα,  $E_j$  η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου,  $\varepsilon_{jj}$  η διηλεκτρική σταθερά του υλικού,  $D_j$  η ηλεκτρική μετατόπιση και  $V$  το ηλεκτρικό δυναμικό. Υπενθυμίζεται ότι τα μηχανικά μεγέθη σε ένα πρόβλημα πιεζοηλεκτρικών υλικών συσχετίζονται με τα ηλεκτρικά, σύμφωνα με τις καταστατικές εξισώσεις που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 2 (Βλ. Ενότητα 2.1).

Για τις ανάγκες της κατάλληλης μαθηματικής μορφοποίησης που απαιτεί η ΜΠΣ, οι καταστατικές Εξισώσεις (2.4) γράφονται ισοδύναμα ως εξής:

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e}^T \mathbf{E} \quad (3.40.\alpha)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{e} \mathbf{S} + \varepsilon \mathbf{E} \quad (3.40.\beta)$$

όπου  $c^E = s^{-1}$  το μητρώο των ελαστικών σταθερών και  $e^T = c^E d^T$  το μητρώο ηλεκτρομηχανικής σύζευξης (Perry et al., 2008; Comsol, 2012). Οι Εξισώσεις (3.40) αντιπροσωπεύουν τις καταστατικές εξισώσεις Δύναμης-Ηλεκτρικού Φορτίου (Stress-Charge Form) οι οποίες χρησιμοποιούνται εναλλακτικά των Εξισώσεων (2.1) και (2.4).

Η εφαρμογή της ΜΠΣ στηρίζεται στη διαίρεση του υπό μελέτη σώματος σε ένα πεπερασμένο αριθμό στοιχείων (διακριτοποίηση, πλέγμα ΜΠΣ) και τη διατύπωση για το κάθε ένα από αυτά δύο βασικών συναρτήσεων μορφής (Shape Function). Οι συναρτήσεις μορφής περιγράφουν την κατανομή των μετατοπίσεων και της ηλεκτρικής τάσης στο εσωτερικό του κάθε στοιχείου. Τα στοιχεία του πλέγματος συνδέονται μεταξύ τους με τους κόμβους πάνω στους όποιους διατυπώνονται οι μαθηματικές συνθήκες που περιγράφουν τη δομική και ηλεκτρική συνέχεια του σώματος (Συνέχεια των μετατοπίσεων και του ηλεκτρικού φορτίου).

Στο Σχήμα 3.16 απεικονίζεται η διαδικασία προσέγγισης του δυναμικού προβλήματος απόκρισης ενός επιθέματος PZT, στις τρεις διαστάσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το PZT έχει διακριτοποιηθεί με τη χρήση ενός τρισδιάστατου πλέγματος ΤετραΕΔρικών Ισοπαραμετρικών Στοιχείων-ΤΕΔΙΣ τα οποία φέρουν τέσσερις κόμβους το καθένα. Ο κάθε κόμβος διαθέτει τέσσερις βαθμούς ελευθερίας, εκ των οποίων οι τρεις αναφέρονται στις μετατοπίσεις που δύναται να γράψει στο χώρο και ο τέταρτος στο ηλεκτρικό δυναμικό που εμφανίζει λόγω της δράσης του ηλεκτρικού πεδίου. Η κατανομή των μετατοπίσεων στο εσωτερικό του ΤΕΔΙΣ περιγράφεται από μια γραμμική συνάρτηση μορφής, διατυπωμένη σε ένα αυθαίρετο τοπικό σύστημα αναφοράς (Σχήμα 3.16), η οποία γράφεται:

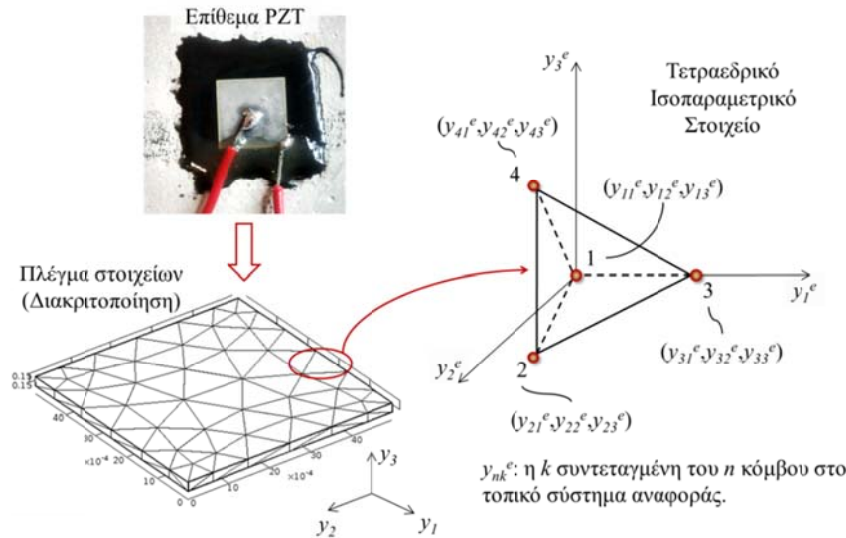
$$u_j^e = a_{j0}^e + \sum_{k=1}^3 a_{jk}^e y_k^e \quad (3.41)$$

όπου  $u_j^e$  η μετατόπιση του σημείου ( $y_1^e, y_2^e, y_3^e$ ) στη  $j$  διεύθυνση και  $a_{jk}^e$  οι συντελεστές μορφής του  $j$  βαθμού ελευθερίας στην  $k$  διεύθυνση, με  $j, k=1:3$ . Σημειώνεται εδώ ότι αποτελεί συνήθης πρακτική στην ΜΠΣ για την διευκόλυνση των υπολογισμών και του προγραμματισμού της διαδικασίας, οι εργασίες ανάλυσης του κάθε στοιχείου να πραγματοποιούνται σε ένα τοπικό αυθαίρετο σύστημα αναφοράς  $y_1^e - y_2^e - y_3^e$  (Elements Local System) και τα αποτελέσματα που προκύπτουν να ανάγονται στο καθολικό

σύστημα  $y_1$ - $y_2$ - $y_3$  (Structure's Global System), (University of Colorado at Boulder, 2013). Η Εξίσωση (3.41) γράφεται στη συμπαγή μορφή πινάκων για όλους τους βαθμούς ελευθερίας των μετατοπίσεων ως εξής:

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} u_1^e \\ u_2^e \\ u_3^e \end{Bmatrix}}_{\mathbf{u}^e \quad (3 \times 1)} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{x} & \mathbf{o} & \mathbf{o} \\ \mathbf{o} & \mathbf{x} & \mathbf{o} \\ \mathbf{o} & \mathbf{o} & \mathbf{x} \end{bmatrix}}_{\mathbf{X}^e \quad (3 \times 12)} \underbrace{\begin{Bmatrix} \mathbf{a}_1^e \\ \mathbf{a}_2^e \\ \mathbf{a}_3^e \end{Bmatrix}}_{\mathbf{a}^e \quad (12 \times 1)} \quad (3.42)$$

όπου  $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 1 & y_1^e & y_2^e & y_3^e \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{a}_j^e = \begin{bmatrix} a_{j0}^e & a_{j1}^e & a_{j2}^e & a_{j3}^e \end{bmatrix}^T$  και  $\mathbf{o}$  ο μηδενικός πίνακας διαστάσεων  $(1 \times 4)$ .



**Σχήμα 3.16:** Προσομοίωση επιθέματος PZT με την ΜΠΣ και τη χρήση πλέγματος ΤΕΔΙΣ.  $y_j$ : συντεταγμένες καθολικού συστήματος αναφοράς,  $y_j^e$ : Τοπικό σύστημα αναφοράς,  $j=1:3$ .

Εξορισμού η συνάρτηση μορφής του στοιχείου θα επαληθεύεται και στους κόμβους του δίνοντας το ακόλουθο γραμμικό σύστημα εξισώσεων:

$$u_{nj}^e = a_{j0}^e + \sum_{k=1}^3 a_{jk}^e y_{nk} \quad (3.43)$$

όπου  $n=1:4$  οι κόμβοι του  $e$  στοιχείου. Αντίστοιχα με την Εξίσωση (3.41), το σύστημα (3.43) γράφεται στην ισοδύναμη μορφή πινάκων:

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} \mathbf{u}_1^e \\ \mathbf{u}_2^e \\ \mathbf{u}_3^e \\ \mathbf{u}_4^e \\ \mathbf{u}_n^e \end{Bmatrix}}_{\substack{\mathbf{u}_n^e \\ (12 \times 1)}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{X}_1^e & \mathbf{X}_2^e & \mathbf{X}_3^e & \mathbf{X}_4^e \end{bmatrix}^T}_{\substack{\mathbf{X}_n^e \\ (12 \times 12)}} \underbrace{\begin{Bmatrix} \mathbf{a}_1^e \\ \mathbf{a}_2^e \\ \mathbf{a}_3^e \end{Bmatrix}}_{\substack{\mathbf{a}^e \\ (12 \times 1)}} \quad (3.44)$$

$$\text{όπου } \mathbf{X}_n^e = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{X}_n & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{X}_n & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{X}_n \end{bmatrix}}_{(3 \times 12)}, \quad \mathbf{x}_n = \begin{bmatrix} 1 & y_{n1}^e & y_{n2}^e & y_{n3}^e \end{bmatrix} \text{ και } \mathbf{u}_n^e = \begin{bmatrix} u_{n1}^e & u_{n2}^e & u_{n3}^e \end{bmatrix}^T.$$

Από τις Εξισώσεις (3.42) και (3.44) προκύπτει ότι το διάνυσμα των μετατοπίσεων σε κάθε εσωτερικό σημείο του στοιχείου θα περιγράφεται συναρτήσει του διανύσματος των μετατοπίσεων σε όλους τους κόμβους του στοιχείου από την εξίσωση:

$$\mathbf{a}^e = \mathbf{X}_n^{e-1} \mathbf{u}_n^e \Rightarrow$$

$$\mathbf{u}^e = \underbrace{\mathbf{X}^e \mathbf{X}_n^{e-1}}_{(3 \times 12)} \mathbf{u}_n^e = \mathbf{N}_e^u \mathbf{u}_n^e \quad (3.45)$$

όπου  $\mathbf{N}_e^u$  ο πίνακας μορφής των μετατοπίσεων του στοιχείου. Η εξίσωση (3.45) γράφεται για κάθε βαθμό ελευθερίας των μετατοπίσεων ως εξής:

$$u_j^e = \mathbf{N}_{e(j, 4j-3:4j)}^u \mathbf{u}_{n(4j-3:4j, 1)}^e \quad (3.46)$$

Αντίστοιχα με τις μετατοπίσεις, το ηλεκτρικό δυναμικό (τέταρτος βαθμός ελευθερίας) σε κάθε σημείο του στοιχείου θα δίδεται από τη γραμμική συνάρτηση μορφής:

$$V^e = b_0^e + \sum_{k=1}^3 b_k^e y_k^e \quad (3.47)$$

Ακολουθώντας διαδικασία αντίστοιχη με αυτή της μετατόπισης, η συνάρτηση μορφής του ηλεκτρικού δυναμικού σε κάθε σημείο του στοιχείου, συναρτήσει του δυναμικού των κόμβων γράφεται:

$$V^e = \underbrace{\mathbf{N}_e^V}_{(1 \times 4)} \underbrace{\mathbf{V}_n^e}_{(4 \times 1)} \quad (3.48)$$

όπου  $\mathbf{N}_e^V = \mathbf{x} \left( \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 & \mathbf{x}_2 & \mathbf{x}_3 & \mathbf{x}_4 \end{bmatrix}^T}_{(4 \times 4)} \right)^{-1}$  ο πίνακας μορφής του ηλεκτρικού δυναμικού

και  $\mathbf{V}_n^e = \underbrace{\begin{bmatrix} V_1^e & V_2^e & V_3^e & V_4^e \end{bmatrix}^T}_{(1 \times 4)}$  το διάνυσμα του ηλεκτρικού δυναμικού στους

κόμβους του στοιχείου.

Από τις εξισώσεις (3.45) και (3.48) προκύπτει ότι το διάνυσμα των μηχανικών παραμορφώσεων  $\mathbf{S}$  (Εξίσωση 3.40.α) και το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου  $\mathbf{E}$  (Εξίσωση 3.38.β), σε επίπεδο στοιχείου, θα περιγράφονται από τις ακόλουθες σχέσεις (Piefort, 2001; Providakis et al., 2007; Perry et al., 2008):

$$\underbrace{\mathbf{S}_e^e}_{(6 \times 1)} = \underbrace{\mathbf{\Theta}}_{(6 \times 3)} \mathbf{u}_e^e \stackrel{(3.45)}{=} \underbrace{\mathbf{\Theta} \mathbf{N}_e^u}_{6 \times 12} \mathbf{u}_n^e = \underbrace{\mathbf{B}_e^u}_{6 \times 12} \mathbf{u}_n^e \quad (3.49.α)$$

$$\underbrace{\mathbf{E}_e^e}_{(3 \times 1)} = - \underbrace{\mathbf{\theta}}_{(3 \times 1)} V^e \stackrel{(3.48)}{=} - \underbrace{\mathbf{\Theta} \mathbf{N}_e^V}_{(3 \times 4)} \mathbf{V}_n^e = - \underbrace{\mathbf{B}_e^V}_{(3 \times 4)} \mathbf{V}_n^e \quad (3.49.β)$$

όπου (Perry et al., 2008):

$$\mathbf{\Theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial y_1^e} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y_3^e} & \frac{\partial}{\partial y_2^e} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y_2^e} & 0 & \frac{\partial}{\partial y_3^e} & 0 & \frac{\partial}{\partial y_1^e} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y_3^e} & \frac{\partial}{\partial y_2^e} & \frac{\partial}{\partial y_1^e} & 0 \end{bmatrix}^T \quad \text{και}$$

$$\mathbf{\theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial y_1^e} & \frac{\partial}{\partial y_2^e} & \frac{\partial}{\partial y_3^e} \end{bmatrix}^T.$$

Η τελική μαθηματική διατύπωση του συζευγμένου πιεζοηλεκτρικού προβλήματος σε επίπεδο στοιχείου σύμφωνα με την ΜΠΣ, περιγράφεται από τις μητρωικές σχέσεις (Piefort, 2001; Providakis et al., 2007; Perry et al., 2008):

$$\mathbf{M}^e \ddot{\mathbf{u}}_n^e + \mathbf{K}_{uu}^e \mathbf{u}_n^e + \mathbf{K}_{uV}^e \mathbf{V}_e^n = \mathbf{f}_n^e \quad (3.50.α)$$

$$\mathbf{K}_{Vu}^e \mathbf{u}_n^e + \mathbf{K}_{VV}^e \mathbf{V}_e^n = \mathbf{q}_n^e \quad (3.50.β)$$



όπου:

$$\mathbf{M}^e = \rho \int_{V_{elm}} \mathbf{N}_e^u \mathbf{N}_e^u dV_{elm} \quad \text{το μητρώο μάζας,}$$

$$\mathbf{K}_{uu}^e = \int_{V_{elm}} \mathbf{B}_e^u \mathbf{c}^E \mathbf{B}_e^u dV_{elm} \quad \text{το μητρώο μηχανικής δυσκαμψίας,}$$

$$\mathbf{K}_{uv}^e = \int_{V_{elm}} \mathbf{B}_e^u \mathbf{e}^T \mathbf{B}_e^v dV_{elm} \quad \text{το μητρώο ηλεκτρομηχανικής σύζευξη,}$$

$$\mathbf{K}_{vv}^e = \int_{V_{elm}} \mathbf{B}_e^v \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{B}_e^v dV_{elm} \quad \text{το μητρώο ηλεκτρικής δυσκαμψίας ή ηλεκτρικής} \\ \text{χωρητικότητας,}$$

$$\mathbf{K}_{vu}^e = \mathbf{K}_{uv}^{eT},$$

$$\underbrace{\mathbf{f}_n^e}_{(12 \times 1)} = \int_{V_{elm}} \underbrace{\mathbf{N}_e^u}_{(3 \times 1)}^T \underbrace{\mathbf{f}^b}_{(3 \times 1)} dV_{elm} + \int_{S_{elm}} \underbrace{\mathbf{N}_e^u}_{(3 \times 1)}^T \underbrace{\mathbf{f}^s}_{(3 \times 1)} dS_{elm} + \underbrace{\mathbf{N}_e^u}_{(3 \times 1)}^T \underbrace{\mathbf{f}^p}_{(3 \times 1)} \quad (3.51)$$

$$\underbrace{\mathbf{q}_n^e}_{(4 \times 1)} = - \int_{S_{elm}} \underbrace{\mathbf{N}_e^v}_{(4 \times 1)}^T q^{selm} dS_{elm} + \underbrace{\mathbf{N}_e^v}_{(4 \times 1)}^T q^p \quad (3.52)$$

$\ddot{\mathbf{u}}_n^e$  το διάνυσμα επιταχύνσεων των κόμβων του στοιχείου,  $\mathbf{f}_n^e$  το διάνυσμα της συνισταμένης των εξωτερικών φορτίσεων που δρουν στους κόμβους,  $\mathbf{f}^b$  το διάνυσμα της συνισταμένης των δυνάμεων πεδίου που δρουν κατανεμημένες στον όγκο του στοιχείου,  $\mathbf{f}^s$  το διάνυσμα της συνισταμένης των δυνάμεων που δρουν στην εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου,  $\mathbf{f}^p$  το διάνυσμα των σημειακών φορτίσεων,  $q^p$  το συγκεντρωμένο ηλεκτρικό φορτίο,  $q^{selm}$  το κατανεμημένο στην επιφάνεια του στοιχείου ηλεκτρικό φορτίο,  $V_{elm}$  ο όγκος και  $S_{elm}$  η επιφάνεια του στοιχείου.

Στη περίπτωση που το πιεζοηλεκτρικό ΤΕΔΙΣ διεγείρεται σε μηχανική ταλάντωση με την εφαρμογή ενός διανύσματος αρμονικών τάσεων κατανεμημένων στους κόμβους,  $\mathbf{V}_e^n = \bar{\mathbf{V}}_e^n e^{i\omega t}$ , η μηχανική απόκριση του στοιχείου θα περιγράφεται από μια επίσης αρμονική συνάρτηση των μετατοπίσεων των κόμβων,  $\mathbf{u}_e^n = \mathbf{U}_e^n e^{i\omega t}$  και η ηλεκτρική απόκριση από μια αρμονική συνάρτηση του διανύσματος των ηλεκτρικών φορτίων των κόμβων,  $\mathbf{q}_n^e = \bar{\mathbf{q}}_n^e e^{i\omega t}$ . Αντικαθιστώντας της συναρτήσεις διέγερσης και απόκρισης στις μητρωικές εξισώσεις (3.50), προκύπτει ότι:

$$\left. \begin{aligned} (\mathbf{K}_{uu}^e - \omega^2 \mathbf{M}^e) \mathbf{U}_e^n + \mathbf{K}_{uv}^e \bar{\mathbf{V}}_e^n &= \mathbf{O} \\ \mathbf{K}_{vu}^e \mathbf{U}_e^n + \mathbf{K}_{vv}^e \bar{\mathbf{V}}_e^n &= \bar{\mathbf{q}}_n^e \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\mathbf{U}_e^n = -(\mathbf{K}_{uu}^e - \omega^2 \mathbf{M}^e)^{-1} \mathbf{K}_{uv}^e \bar{\mathbf{V}}_e^n \quad (3.53)$$

$$\bar{\mathbf{q}}_n^e = (\mathbf{K}_{vv}^e - \mathbf{K}_{vu}^e (\mathbf{K}_{uu}^e - \omega^2 \mathbf{M}^e)^{-1} \mathbf{K}_{uv}^e) \bar{\mathbf{V}}_e^n \quad (3.54)$$

Το διάνυσμα του ηλεκτρικού ρεύματος απόκρισης στους κόμβους του στοιχείου προσδιορίζεται από τη μητρική σχέση του πλάτους των κομβικών ηλεκτρικών φορτίων σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$\mathbf{I}_n^e = \frac{\partial \mathbf{q}_n^e}{\partial t} = i\omega \bar{\mathbf{q}}_n^e e^{i\omega t} \xrightarrow{(3.54)}$$

$$\bar{\mathbf{I}}_n^e = i\omega (\mathbf{K}_{vv}^e - \mathbf{K}_{vu}^e (\mathbf{K}_{uu}^e - \omega^2 \mathbf{M}^e)^{-1} \mathbf{K}_{uv}^e) \bar{\mathbf{V}}_e^n \quad (3.55)$$

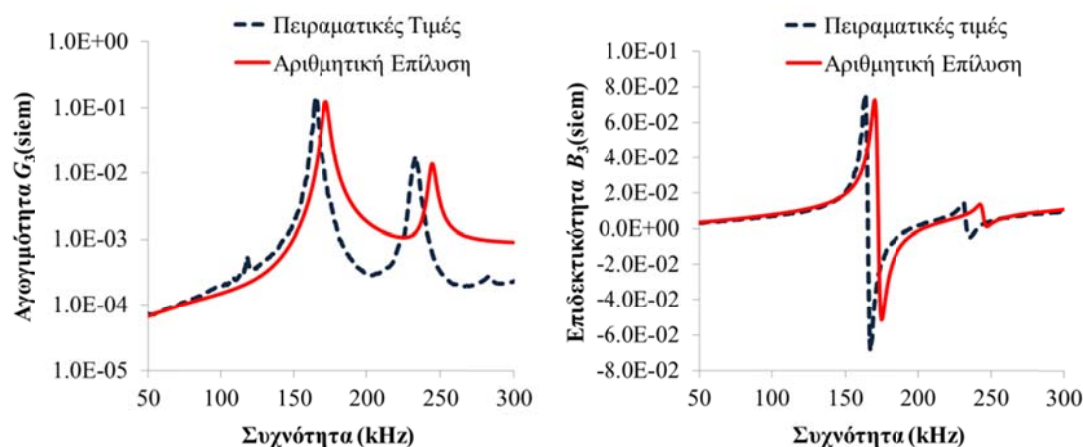
Τέλος το μητρώο της HMA  $\mathbf{Y}_e^n$  στους κόμβους του στοιχείου υπολογίζεται από την εξίσωση (3.55) ως εξής:

$$\underbrace{\mathbf{Y}_e^n}_{(4 \times 4)} = \bar{\mathbf{I}}_n^e \bar{\mathbf{V}}_e^{nT} (\bar{\mathbf{V}}_e^n \bar{\mathbf{V}}_e^{nT})^{-1} = i\omega (\mathbf{K}_{vv}^e - \mathbf{K}_{vu}^e (\mathbf{K}_{uu}^e - \omega^2 \mathbf{M}^e)^{-1} \mathbf{K}_{uv}^e) \quad (3.56)$$

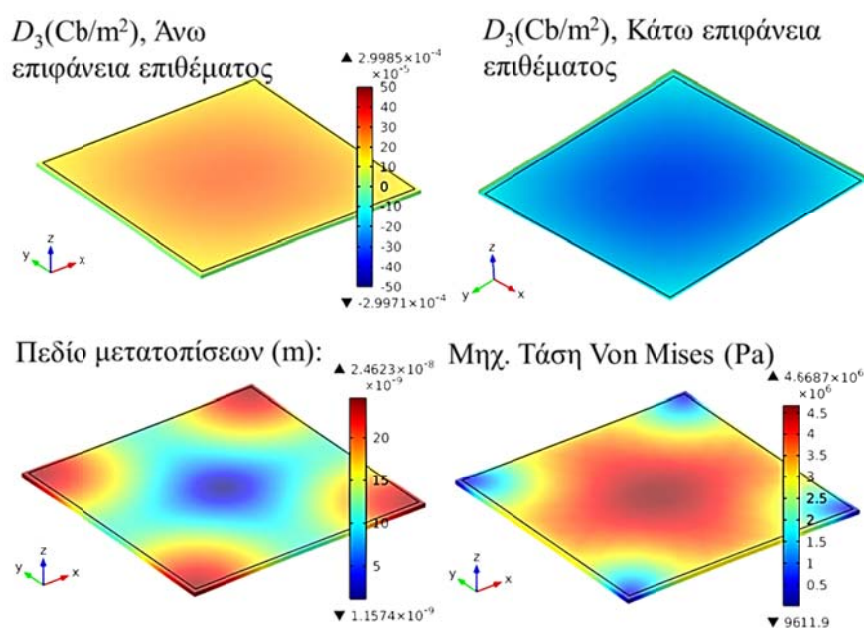
Η εξίσωση 3.56 περιγράφει το θεμελιώδες πρόβλημα της ηλεκτρικής απόκρισης ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου στο πεδίο της συχνότητας. Για άλλη μια φορά αποδεικνύεται θεωρητικά η ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της ηλεκτρικής απόκρισης ( $\mathbf{Y}_e^n$ ) και των δυναμικών χαρακτηριστικών  $(\mathbf{K}_{uu}^e, \mathbf{M}^e)$  του πιεζοηλεκτρικού σώματος. Στη περίπτωση όπου ένα PZT ενσωματώνεται σε μια κατασκευή, η επίδραση του αντίστοιχου μητρώου δυσκαμψίας της κατασκευής εμφανίζεται στο διάνυσμα των πλατών των μετατοπίσεων των κόμβων  $\mathbf{U}_e^n$ . Πιο συγκεκριμένα λόγω της συνθήκης της συνέχειας των μετατοπίσεων στους κοινούς κόμβους μεταξύ PZT και κατασκευής, η δυσκαμψία της κατασκευής επιδρά στις συνιστώσες του διανύσματος  $\mathbf{U}_e^n$ , που αναφέρονται στους συγκεκριμένους κόμβους.

Στο Σχήμα 3.18 απεικονίζεται η αριθμητικώς προσδιοριζόμενη με τη ΜΠΣ, ηλεκτρική απόκριση ενός ελεύθερου μηχανικά επιθέματος PZT, σε σχέση με τις πειραματικώς καταγραφόμενες τιμές. Το PZT είναι τύπου PIC 151 (Παράρτημα Β, Πίνακας Β.1) και διεγείρεται σε μηχανική ταλάντωση με την εφαρμογή στην άνω επιφάνεια του επιθέματος, ενός ηλεκτρικού δυναμικού μοναδιαίου πλάτους (Σχήμα

3.17) και γείωσης (μηδέν ηλεκτρικό δυναμικό) στην αντίστοιχη κάτω επιφάνεια. Από τη γραφική απεικόνιση της απόκρισης διαπιστώνεται ότι η ΜΠΣ, όπως ήταν αναμενόμενο, προσεγγίζει την απόκριση του πραγματικού επιθέματος με μεγάλη ακρίβεια.



**Σχήμα 3.17:** Αξιολόγηση της αριθμητικώς προσδιοριζόμενης ηλεκτρικής απόκρισης ενός ελεύθερου PZT τύπου PIC 151 στο πεδίο της συχνότητας με τη ΜΠΣ.



**Σχήμα 3.18:** Αριθμητική επίλυση PZT τύπου PIC 151. Ηλεκτρομηχανικά μεγέθη στη θεμελιώδη συχνότητα συντονισμού του επιθέματος ( $freq_{01}=172\text{kHz}$ ).

Οι οποίες αποκλίσεις οφείλονται τόσο στους παράγοντες ηλεκτρικής αστάθειας που έχουν αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες αλλά και στο γεγονός ότι η ΜΠΣ

όσο ρεαλιστική και αν είναι, η προσομοίωση πάντα θα περιγράφει ένα εξιδανικευμένο ισοδύναμο του πραγματικού, σύστημα.

### 3.4. Αξιολόγηση Δομικής Ακεραιότητας με τη Χρήση της Στατιστικής Ακραίων Τιμών

Η μέθοδος HMA/HME ανήκει στις τεχνικές ΜΚΕ που στηρίζονται στη συγκριτική αξιολόγηση της καταγραφόμενης δυναμικής απόκρισης μιας μηχανικής κατασκευής στο πεδίο της συχνότητας. Για την αξιολόγηση της μεταβολής των καταγραφόμενων Ηλεκτρο-Μηχανικών Υπογραφών (HMY) απαιτείται να είναι διαθέσιμα και σαφώς ορισμένα τα ακόλουθα στοιχεία:

- A. Η HMY που αντιστοιχεί στη κατάσταση της «υγιούς» ή δομικά άρτιας (χωρίς βλάβες) κατασκευής και αποτελεί τη Ηλεκτρο-Μηχανική Υπογραφή Αναφοράς, RSS (Reference State Signature). Η RSS σε μια πειραματική ή αριθμητική διαδικασία περιγράφεται από  $F$  ζεύγη τιμών ( $\omega_i, RSS_i^{meas}$ ), με  $i=1:F$ .
- B. Τουλάχιστον μια HMY η οποία αντιστοιχεί σε μια οποιαδήποτε κατάσταση δομικής ακεραιότητας της υπό παρακολούθησης κατασκευής, διαφορετική από εκείνη που περιγράφει η RSS και είναι δυνατό να χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη δομικών βλαβών. Η συγκεκριμένες HMY αναφέρονται στην τρέχουσα κατάσταση δομικής ακεραιότητας της κατασκευής, (Current State Signatures-CSS) και περιγράφονται από  $F$  ζεύγη τιμών ( $\omega_i, CSS_i^{Ds}$ ), με  $i=1:F$  και  $Ds=1:M$ , όπου  $M$  ο αριθμός των καταγραφόμενων CSS.
- Γ. Ένα σαφώς μαθηματικά ορισμένο **Μέτρο Διαφοροποίησης** της κάθε μιας  $CSS^{Ds}$  από την RSS.
- Δ. Τα όρια εμπιστοσύνης του Μέτρου Διαφοροποίησης, έτσι ώστε να αποφεύγεται ταυτόχρονα, α) η ψευδής ανίχνευση βλάβης (Διάγνωση Ανύπαρκτης Βλάβης-Σφάλμα Τύπου I) και β) η εσφαλμένη αποδοχή μιας κατασκευής ως δομικά «υγιή» (Αποτυχία Διάγνωσης Υπαρκτής Βλάβης-Σφάλμα τύπου II), (Providakis, Liarakos and Voutetaki, 2010; Providakis and Liarakos, 2014; Worden et al., 2002; Βουτετάκη, 2009).

Το σημείο Δ των παραπάνω στοιχείων αποτελεί ένα εξαιρετικά σημαντικό ζήτημα σχετικά με την αξιολόγηση των μεγεθών παρατήρησης μια μεθοδολογίας ΜΚΕ, καθώς από την σωστή εκτίμηση των ορίων εμπιστοσύνης εξαρτάται και η

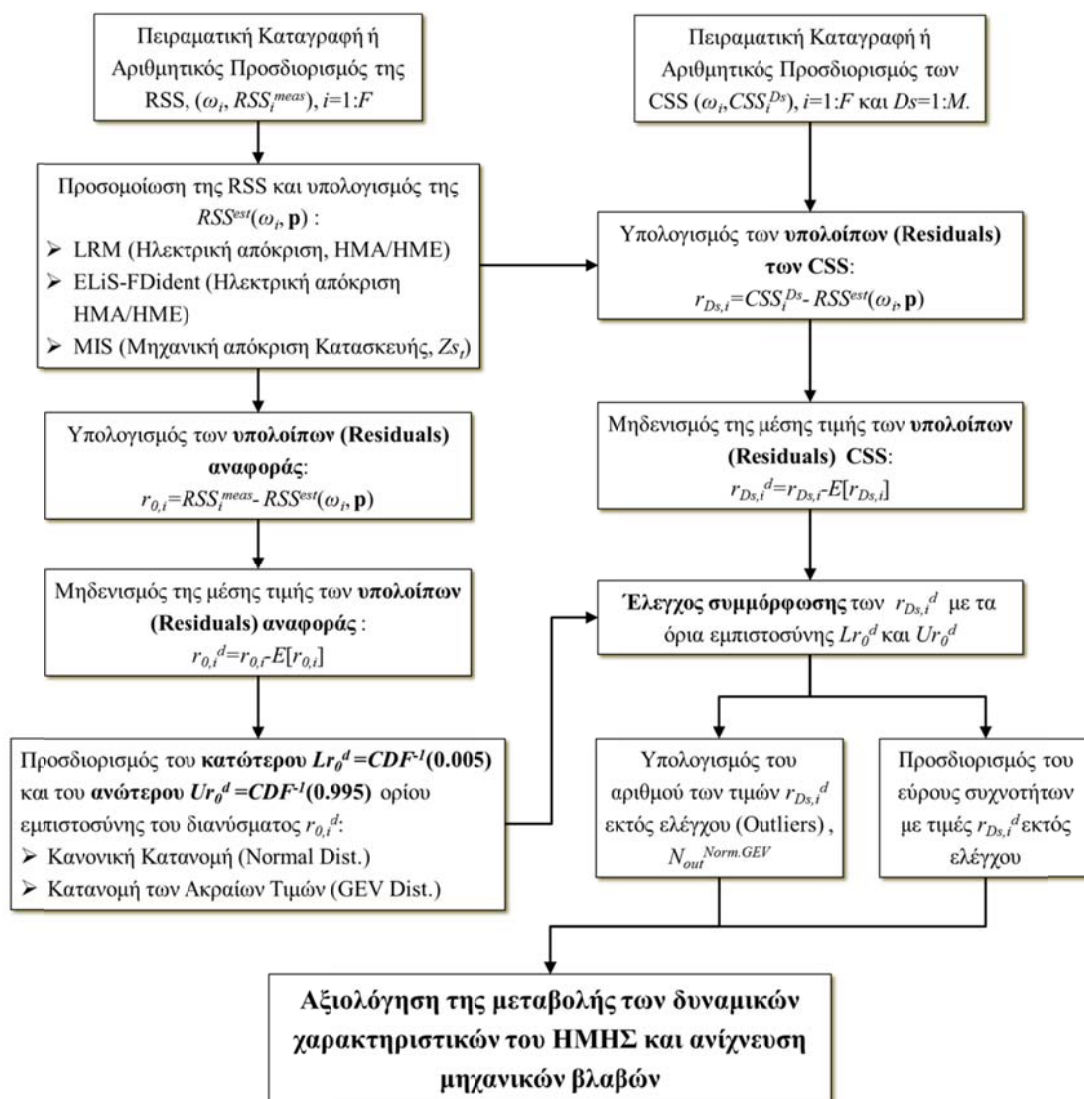
αξιοπιστία της μεθόδου. Οι δείκτες βλάβης (RMSD, MAPD) που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 3.2 του παρόντος κεφαλαίου, παρόλο που αποτελούν ευρύτητα εφαρμοζόμενα μέτρα διαφοροποίησης φασμάτων, υστερούν σημαντικά ως προς την αξιοπιστία ανίχνευσης μια βλάβης (Providakis and Liarakos, 2014). Ιδιαίτερα στις περιπτώσεις ΜΚΕ σκυροδέματος με τη χρήση PZT, οι δείκτες βλάβης δίνουν πολλά σφάλματα τύπου II (αποτυχία ανίχνευσης υπαρκτής βλάβης), εξαιτίας της υψηλής δυσκαμψίας και απόσβεσης του συγκεκριμένου υλικού και σφάλματα τύπου I εξαιτίας της συνήθους ύπαρξης ηλεκτρικών ασταθειών των διατάξεων μέτρησης (ψευδής ανίχνευση βλάβης), (Providakis, Liarakos and Voutetaki, 2010; Providakis and Liarakos, 2014).

Τα μειονέκτημα αυτά προκύπτουν από το γεγονός ότι οι συγκεκριμένοι δείκτες αξιολογούν αθροιστικά τις μεταβολές μεταξύ της RSS και κάποιας CSS. Ανάλογα με την πολυπλοκότητα της κατασκευής που μελετάται, η εκδήλωση μιας βλάβης, ακόμη και σοβαρής, δύναται να επηρεάσει σημαντικά μόνο ένα τμήμα συχνοτήτων της HMY (μετατόπιση κορυφών στο άξονα των συχνοτήτων, εμφάνιση νέων κορυφών, αύξηση του πλάτους των κορυφών), το οποίο ενδέχεται να εμφανίζει σχετικά μικρό εύρος σε σχέση με το συνολικό εύρος σάρωσης. Οι δείκτες βλάβης επικεντρώνονται στη συνολική εικόνα της HMY, αποτυγχάνοντας να αποδώσουν την απαιτούμενη βαρύτητα στα εύρη συχνοτήτων που έχουν επηρεαστεί από την ύπαρξη μιας δομικής ασυνέχειας. Λογικό είναι επίσης με βάση τα παραπάνω η αναποτελεσματικότητα των δεικτών βλάβης να αυξάνεται όσο διευρύνεται το εύρος των συχνοτήτων σάρωσης.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε μια καινοτόμα προσέγγιση της αξιολόγησης των φασμάτων απόκρισης των HMA/HME, αλλά και των παράγωγων φασματικών μεγεθών όπως είναι η μηχανική εμπέδηση της κατασκευής (Εξισώσεις 3.1-3.3), η οποία αντιμετωπίζει επιτυχώς τα προβλήματα αξιοπιστίας που επιδεικνύουν οι δείκτες βλάβης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία, η οποία από εδώ και εξής θα αναφέρεται ως **S-CoRe** (**S**tatistical **C**ontrol and **E**valuation of **S**imulation **R**esiduals, Σχήμα 3.19), στηρίζεται στην ανάπτυξη ενός Μέτρου Διαφοροποίησης των φασμάτων, με βάση τα υπόλοιπα (Residuals) μεταξύ της προσομοιωμένης RSS(Ενότητα 3.3) και της κάθε CSS, και τον προσδιορισμό των ορίων εμπιστοσύνης του Μέτρου Διαφοροποίησης με τη χρήση στατιστικών κατανομών.

Οι στατικές κατανομές που υιοθετήθηκαν είναι η κλασική Κανονική Κατανομή-ND (Normal ή Gaussian Distribution) και η Γενικευμένη Κατανομή των Ακραίων

τιμών-GEV (Generalized Extreme Values Distribution). Αντίστοιχες μεθοδολογίες ΜΚΕ έχουν παρουσιαστεί από τους Worden et al. (2002), Fasel et al. (2005), Park et al. (2005) και Sohn et al. (2005), για εφαρμογές στο πεδίο του χρόνου και από την Βουτετάκη (2009) για εφαρμογές στο πεδίο της συχνότητας.



Σχήμα 3.19: Διάγραμμα ροής μεθόδου SCoRe.

Η βασική συνεισφορά της προτεινόμενης μεθόδου SCoRe, σε σχέση με αυτές που έχουν ήδη παρουσιαστεί, είναι ότι στην παρούσα διατριβή αντί της αποκλειστικής προσομοίωσης της ηλεκτρικής απόκρισης με μεθόδους μη γραμμικής παλινδρόμησης, εφαρμόστηκαν επιπλέον, οι μέθοδοι της γραμματικοποιημένης παλινδρόμησης (LRM, Εξισώσεις 3.24-3.30) και της προσομοίωσης της μηχανικής απόκρισης με μη γραμμικά καταστατικά μοντέλα (Μέθοδος MIS, Εξισώσεις 3.35-3.36). Με την εισαγωγή των παραπάνω μεθόδων προσομοίωσης στο σχήμα ανάλυσης των



δεδομένων, ενσωματώνονται σε αυτό όλα τα πλεονεκτήματα που επιδεικνύουν ως προς την ακρίβεια και την ευελιξία οι συγκριμένες μέθοδοι.

Τα σημεία της μεθόδου SCoRe, όπως αυτή αναπτύσσεται στο διάγραμμα του Σχήματος 3.19, τα οποία χρήζουν ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι τα ακόλουθα:

- I. Προσομοίωση της πειραματικώς καταγεγραμμένης ή αριθμητικώς προσδιοριζόμενης RSS με κάποια από τις μεθοδολογίες που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 3.3. Συνήθως εάν ως Ηλεκτρο-Μηχανική Υπογραφή χρησιμοποιούνται τα μεγέθη ηλεκτρικής απόκρισης HMA/HME, η μέθοδοι προσομοίωσης που εφαρμόζονται είναι η LRM (Εξισώσεις 3.24-3.30) και η συνάρτηση ELiS του πακέτου εργαλείων FDIIdent (Εξίσωση 3.21) (Kollar, 2004-2014). Στη περίπτωση που μελετάται η μηχανική απόκριση της κατασκευής, η προσέγγιση της συναρτήσεως μεταφοράς της γίνεται με τη μέθοδο των Μηχανικών Εμπειδήςσεων, MIS (Εξισώσεις 3.35-3.36).
- II. Ως Μέτρο Διαφοροποίησης των φασμάτων απόκρισης, μηχανικής ή ηλεκτρικής, χρησιμοποιείται ο αριθμός,  $N_{out}$ , των κανονικοποιημένων υπολοίπων-DR (Detrended Residual)  $r_{Ds,i}^d$ , μεταξύ της οποιαδήποτε καταγεγραμμένης  $CSS_i^{Ds}$  και της εκτιμώμενης τιμής  $RSS^{est}(\omega_i, \mathbf{p})$ , που ξεφεύγουν από τα όρια εμπιστοσύνης που έχουν οριστεί για τη μεταβλητή  $r_{Ds,i}^d$ . Τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα προσδιορίζονται με βάση τη σχέση:

$$r_{Ds,i}^d = r_{Ds,i} - E[r_{Ds,i}] \quad (3.57)$$

όπου  $E[r_{Ds,i}]$  η μέση τιμή των υπολοίπων, στο εύρος των συχνοτήτων σάρωσης και  $r_{Ds,i} = CSS_i^{Ds} - RSS^{est}(\omega_i, \mathbf{p})$ .

- III. Τα όρια εμπιστοσύνης του  $r_{Ds,i}^d$ , προσδιορίζονται με βάση την θεωρητική κατανομή (Κανονική ή GEV) που επιλέγεται να εφαρμοστεί στην πειραματική συνάρτηση Αθροιστικής Πυκνότητας Πιθανότητας-ΑΠΠ (Cumulative Probability Density Function-CDF) των κανονικοποιημένων υπολοίπων αναφοράς-RDR (Reference Detrended Residuals)  $r_{0,i}^d$ , τα οποία δίνονται από τη σχέση:

$$r_{0,i}^d = r_{0,i} - E[r_{0,i}] \quad (3.58)$$

όπου  $r_{0,i} = RSS_i^{meas} - RSS^{est}(\omega_i, \mathbf{p})$ .

IV. Οι τιμές των ορίων εμπιστοσύνης του  $r_{Ds,i}^d$  υπολογίζονται από τη CDF της εκάστοτε θεωρητικής στατιστικής κατανομής που προσαρμόζεται στην πειραματική ΑΠΠ, για συγκεκριμένα επίπεδα βεβαιότητας. Μαθηματικά τα όρια εμπιστοσύνης δίνονται από τις σχέσεις (Worden et al., 2002; Montgomery and Runger, 2003):

$$\textbf{Κάτω όριο (Lower Limit ή Boundary)} : Lr_0^d = CDF^{-1}(P_{low}) \quad (3.59.α)$$

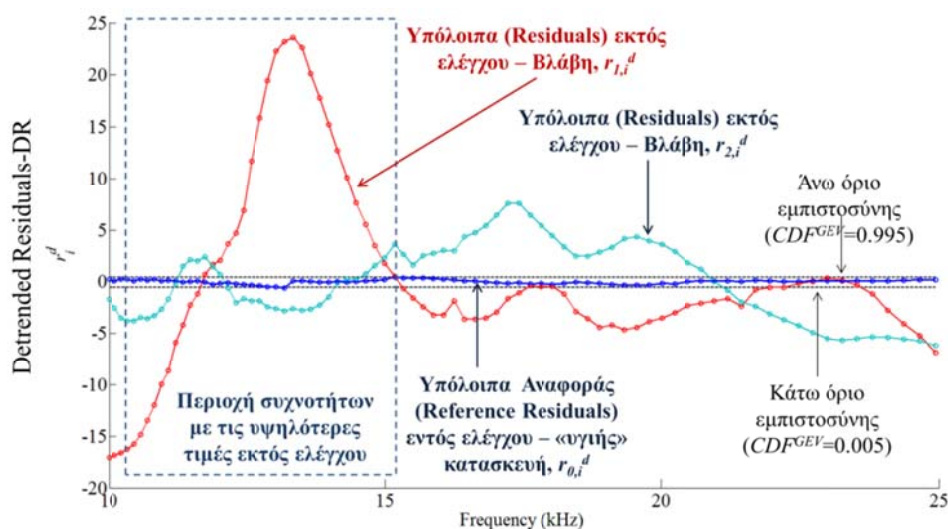
$$\textbf{Άνω όριο (Upper Limit ή Boundary)} : Ur_0^d = CDF^{-1}(P_{up}) \quad (3.59.β)$$

όπου  $P_{low} = \text{Prob}(r_{0,i}^d \leq Lr_0^d)$  και  $P_{up} = 1 - \text{Prob}(r_{0,i}^d \geq Ur_0^d)$  τα επίπεδα βεβαιότητας του στατιστικού ελέγχου.

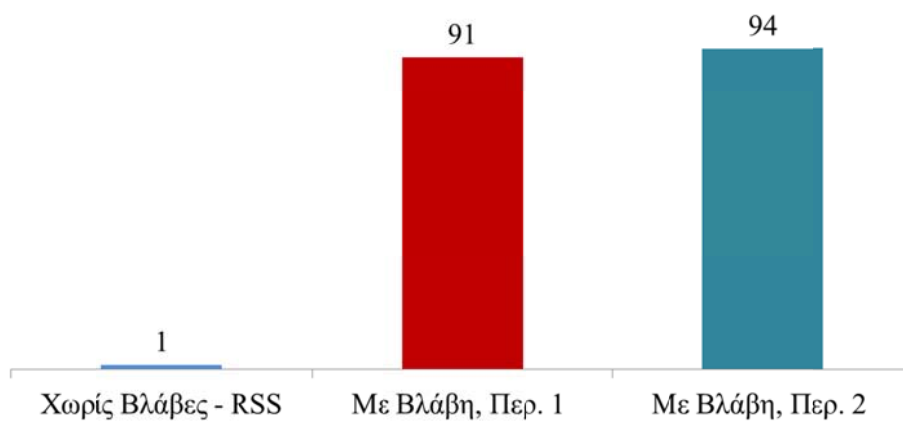
Στο Σχήμα 3.20 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας περίπτωσης εργασίας των Providakis, Liarakos and Voutetaki (2010), σχετικά με την αριθμητική διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής της μεθόδου SCoRe στην αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας μιας δοκού σκυροδέματος. Στο Σχήμα 3.20.α απεικονίζονται τα RDR, τα οποία αναφέρονται στη δομικά άρτια κατάσταση της κατασκευής, σε σχέση με τα DR δύο διαφορετικών περιπτώσεων βλάβης  $r_{1,i}^d$  και  $r_{2,i}^d$ . Διαπιστώνεται ότι στις περιπτώσεις ύπαρξης βλάβης τα DR ξεφεύγουν από τη περιοχή στατιστικού ελέγχου που ορίζουν τα όρια εμπιστοσύνης των RDR και επιπλέον η περιοχή συχνοτήτων 10-15 kHz, εμφανίζεται ως η περισσότερο επηρεαζόμενη από τη μεταβολή της δομικής ακεραιότητας. Τα όρια εμπιστοσύνης των DR,  $Lr_0^d$  και  $Ur_0^d$ , έχουν προσδιοριστεί με βάση τη κατανομή GEV για κάτω όριο βεβαιότητας  $P_{low}=0.005$  ή 0.5% και άνω όριο βεβαιότητας  $P_{up}=0.995$  ή 99.5%. Τα όρια εμπιστοσύνης ορίζονται έτσι ώστε το 99% των υπολοίπων να βρίσκονται εντός στατιστικού ελέγχου ή διαφορετικά το 1% εκτός ελέγχου (Outliers).

Από το Σχήμα 3.20.β παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις βλάβης, ο αριθμός των DR εκτός στατιστικού ελέγχου  $N_{out}$ , ανεβαίνει από 1.25% (RDR, δομικά άρτια δοκός), σε τιμές άνω του 90%, εντοπίζοντας επιτυχώς την ύπαρξη βλαβών και μάλιστα εκτεταμένων.





α)

Αριθμός DR Εκτός Ελέγχου (Outliers),  $N_{out}$  (%).

β)

**Σχήμα 3.20:** α) Στατιστικός έλεγχος των DR με βάση την κατανομή GEV, για την περίπτωση ενός δοκιμίου-δοκού σκυροδέματος πριν και μετά την εκδήλωση μηχανικών βλαβών. β) Αριθμός DR εκτός στατιστικού ελέγχου,  $N_{out}$ . (Providakis, Liarakos and Voutetaki, 2010)

### 3.4.1. Κανονική Κατανομή

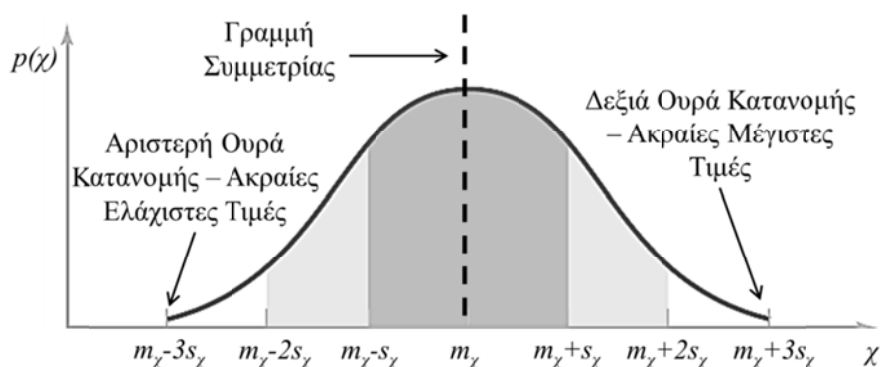
Η **συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας-PDF** (Probability Density Function) μιας συνεχούς τυχαίας μεταβλητής  $\chi$  με μέση τιμή  $m_\chi$  και τυπική απόκλιση  $s_\chi$ , η οποία ακολουθεί την κανονική κατανομή, δίνεται από τη σχέση (Montgomery and Runger, 2003):

$$PDF_\chi = p(\chi) = \frac{1}{s_\chi \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\chi - m_\chi}{s_\chi} \right)^2 \right\} \quad (3.60)$$

όπου  $p(\chi_i)$ , με  $i=1:F$ , η πιθανότητα εμφάνισης της τιμής  $\chi_i$ . Η CDF της κανονικής κατανομής δίδεται από τη σχέση:

$$CDF_{\chi} = P(\chi) = \int p(\chi) d\chi \quad (3.61)$$

όπου  $P(\chi_i)$ , με  $i=1:F$ , η πιθανότητα εμφάνισης μιας τιμής **μικρότερης ή ίσης** με την τιμή  $\chi_i$ . Η κανονική κατανομή αποτελεί τη πιο διαδεδομένη στατιστική κατανομή τυχαίων μεταβλητών. Έχει βρει ευρύτατες εφαρμογές σε πληθώρα επιστημονικών κλάδων, οι οποίοι εκτείνονται από τη οικονομία, τον ολικό έλεγχο ποιότητας, τη θερμοδυναμική, τη μηχανική των υλικών και των κατασκευών, έως και τη κβαντική μηχανική (Montgomery and Runger, 2003). Από την Εξίσωση (3.58) διαπιστώνεται ότι η PDF της κανονικής κατανομής είναι μια συνάρτηση συμμετρική, με κέντρο συμμετρίας τη μέση τιμή γύρω από την οποία «απλώνονται», όλες η πιθανές τιμές που δύναται να λάβει η τυχαία μεταβλητή  $\chi$ .



**Σχήμα 3.21:** Κανονική κατανομή (Montgomery and Runger, 2003).

Το πόσο «απλώνονται» οι τιμές της μεταβλητής  $\chi$  εξαρτάται από την τυπική απόκλιση και είναι αύξουσα συνάρτηση αυτής. Η μορφή της PDF είναι δυνατό να περιγραφεί από μια καμπύλη η οποία είναι αύξουσα για τιμές μικρότερες της  $m_{\chi}$ , λαμβάνει μέγιστη τιμή στη τιμή  $m_{\chi}$ , καθιστώντας τη την πιθανότερη τιμή εμφάνισης για τη μεταβλητή  $\chi$  και φθίνει για τιμές της  $\chi > m_{\chi}$ , με ακριβώς συμμετρικό τρόπο ως προς των αύξων (αριστερό) κλάδο αυτής (Σχήμα 3.21).

### 3.4.2. ΓενικευμένηΚατανομήτωνΑκραίωνΤιμών

Η κανονική κατανομή λόγω της απόλυτα συμμετρικής μορφής της, έχει ένα πολύ σοβαρό μειονέκτημα. Δεν δίνει την απαιτούμενη βαρύτητα σε τιμές της μεταβλητής  $\chi$

οι οποίες χαρακτηρίζονται μεν από πολύ μικρή πιθανότητα εμφάνισης, ωστόσο επειδή εντοπίζονται στις «ουρές» της κατανομής έχουν υψηλό μέγεθος. Οι ακραίες αυτές τιμές μπορεί να οφείλονται α) σε κάποιο σφάλμα μέτρησης της τυχαίας μεταβλητής, οπότε ορθώς αποδίδεται σε αυτές μικρή βαρύτητα και β) σε κάποια ακραία ή εκτός ελέγχου φυσική κατάσταση η οποία επιδρά στη συμπεριφορά της τυχαίας μεταβλητής. Στη δεύτερη περίπτωση εάν η τυχαία μεταβλητή είναι συσχετισμένη με τη δομική αρτιότητα ενός συστήματος, είναι εξαιρετικά επικίνδυνο για την εποπτεία και το σχεδιασμό του συστήματος να απορριφθεί ως σφάλμα.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας κατάστασης αποτελεί ο αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών (Providakis and Yeroynani, 1998). Η εκτίμηση της εδαφικής επιτάχυνσης κατά τη εκδήλωση ενός σεισμικού γεγονότος σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, είναι δυνατό να επιτευχθεί μέσω της στατιστικής ανάλυσης των ενόργανων καταγραφών της εδαφικής επιτάχυνσης, οι οποίες έχουν ληφθεί σε παρελθόντα χρόνο και για μια καθορισμένη χρονική περίοδο (Providakis and Yeroynani, 1998). Δεδομένου ότι οι εδαφικές επιταχύνσεις πέραν του μεγέθους του σεισμού εξαρτώνται και από τις ιδιαίτερες στρωματογραφικές, τεκτονικές και γεωμορφολογικές συνθήκες της περιοχής, εφόσον οι συνθήκες αυτές δεν έχουν μεταβληθεί, οι τιμές των εδαφικών επιταχύνσεων κινούνται γύρω από μια μέση τιμή με συγκεκριμένα όρια εμπιστοσύνης, τα οποία δύναται να περιγραφούν με βάση την κανονική κατανομή. Στη περίπτωση τώρα που έχει λάβει χώρα έστω και ένα σεισμικό γεγονός το οποίο συνοδευόταν από μια κατά πολύ μεγαλύτερη σεισμική επιτάχυνση, από εκείνη που περιγράφει η μέση τιμή, τότε η κανονική κατανομή παύει να είναι κατάλληλη για την ανάλυση των δεδομένων και τα όρια εμπιστοσύνης είναι αναγκαίο να προσδιοριστούν με βάση μια άλλη στατιστική κατανομή, η οποία λαμβάνει υπόψη της και εκείνες τις ακραίες τιμές.

Γενικώς οι ακραίες τιμές, όπως ειπώθηκε προηγουμένως, έχουν μικρή πιθανότητα εμφάνισης όμως στη περίπτωση που προκύπτουν είναι εξαιρετικά επικίνδυνες για τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής. Ανάλογες συνθήκες εκτίμησης εντοπίζονται και σε άλλες τεχνικές εφαρμογές όπως ο σχεδιασμός ανεμογεννητριών, ατράκτων αεροσκαφών, αντιπλημμυρικών έργων, εκτίμησης αντοχής των υλικών αλλά και στις χρηματοοικονομικές επιστήμες με την ανάλυση του ρίσκου μίας επένδυσης ή της πιθανής επισφάλειας ενός μεγάλου δανείου (Montgomery and Runger, 2003).

Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη στατιστική κατανομή για τις περιπτώσεις μελέτης που μόλις περιγράφηκαν, είναι η Γενικευμένη Κατανομή των Ακραίων Τιμών-GEV (Generalized Extreme Values Distribution). Στη περίπτωση όπου αναλύονται οι ελάχιστες αλγεβρικά ακραίες τιμές μιας τυχαίας μεταβλητής, οι οποίες συγκεντρώνονται στα αριστερά της μέσης τιμής, η CDF της GEV περιγράφεται από τη συνάρτηση:

$$CDF_{\chi}^{\min} = P^{\min}(\chi) = 1 - \exp \left\{ - \left[ 1 + \xi \left( \frac{\mu - \chi}{\sigma_{gev}} \right) \right]^{-1/\xi} \right\} \quad (3.62.α)$$

για  $\sigma_{gev} + \xi(\mu - \chi) \geq 0$  και  $\sigma_{gev} > 0$ , όπου  $\mu$  η παράμετρος θέσης, η οποία εκφράζει τη τιμή με την μέγιστη πιθανότητα εμφάνισης,  $\sigma_{gev}$  η παράμετρος κλίμακας, η οποία εκφράζει την οξύτητα της κορυφής της PDF και  $\xi$  η παράμετρος μορφής. Αντίστοιχα για τις μέγιστες ακραίες τιμές μιας τυχαίας μεταβλητής, οι οποίες συγκεντρώνονται στα δεξιά της μέσης τιμής, η CDF της GEV περιγράφεται από τη συνάρτηση:

$$CDF_{\chi}^{\max} = P^{\max}(\chi) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \xi \left( \frac{\chi - \mu}{\sigma_{gev}} \right) \right]^{-1/\xi} \right\} \quad (3.62.β)$$

για  $\sigma_{gev} + \xi(\chi - \mu) \geq 0$  και  $\sigma_{gev} > 0$ . Ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου μορφής  $\xi$ , η κατανομή GEV μεταπίπτει σε κάποια από τις ακόλουθες κατανομές (Worden, Allenetal., 2002):

- Gumbel, για  $\xi \rightarrow 0$ ,
- Frechet, για  $\xi > 0$  και
- Weibull, για  $\xi < 0$ .

ΗPDF της GEV δίνεται από τη γενική εξίσωση:

$$PDF_{\chi}^{\min, \max} = p^{\min, \max}(\chi) = \frac{dP^{\min, \max}(\chi)}{d\chi} \quad (3.63)$$

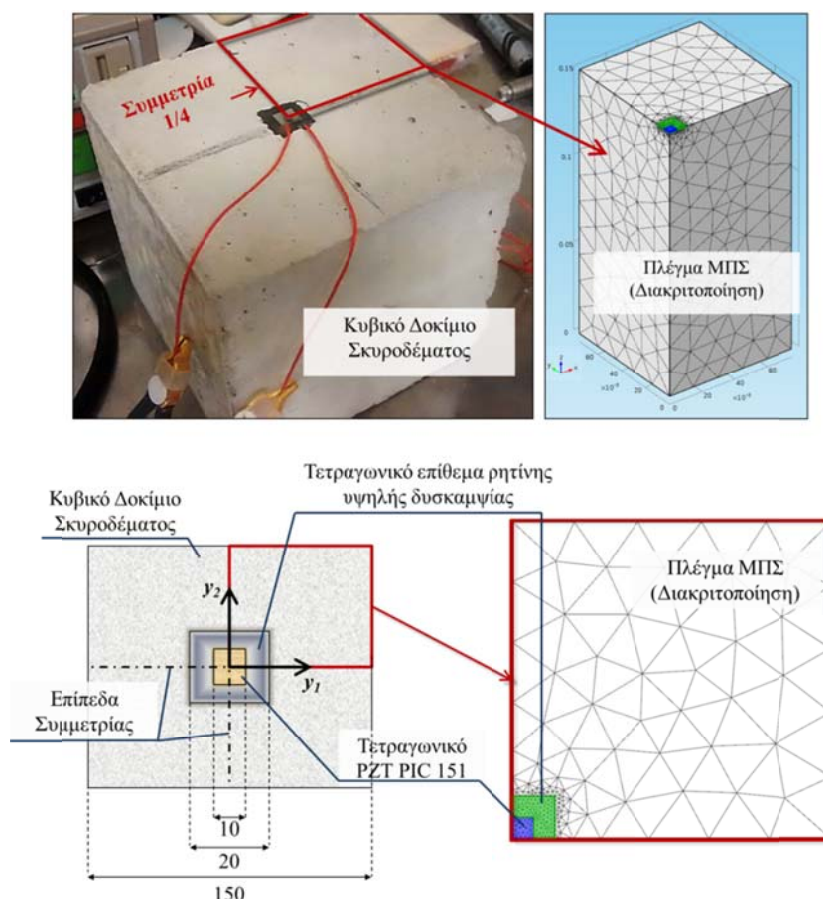
Σε προηγούμενο σημείο της παρούσας ενότητας, διατυπώθηκε ότι η ύπαρξη μιας βλάβης σε μια κατασκευή είναι δυνατό να επηρεάσει μόνον ένα συγκεκριμένο τμήμα

των φασμάτων απόκρισης. Οι μεταβολές που είναι δυνατό να εμφανιστούν στα φάσματα, χαρακτηρίζονται από την πιθανή μετατόπιση των χαρακτηριστικών κορυφών (Resonant Frequencies Peaks) στον άξονα των συχνοτήτων, τη δημιουργία νέων κορυφών και την αυξομείωση του πλάτους τους. Οι μεταβολές αυτές, θα θέσουν τοπικά τα υπόλοιπα (Residuals) της συναρτήσεως μεταφοράς του συστήματος εκτός στατιστικού ελέγχου, δίνοντας ακραίες τιμές ή τιμές εκτός ελέγχου (Outliers). Η χρήση της κανονικής κατανομής ενδέχεται να αγνοήσει αυτές τις ακραίες τιμές και να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα σε σχέση με τη δομική «υγεία» της κατασκευής (Σφάλμα Τύπου II). Για το λόγο αυτό στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και της μεθόδου SCoRe, πέραν της κανονικής υιοθετείται και η κατανομή GEV προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία των προσδιοριζόμενων με βάση τα RDR, ορίων εμπιστοσύνης.

### **3.5. Αξιολόγηση της ολοκληρωμένης διαδικασίας ΜΚΕ σκυροδέματος με Στατιστικό Έλεγχο Ακραίων Τιμών**

Στη παρούσα ενότητα αναπτύσσεται μια αριθμητική εφαρμογή της μεθόδου SCoRe για την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας ενός κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος C20/25, με μέγεθος ακμής 150mm. Στην επιφάνεια του δοκιμίου έχει προσαρμοστεί ένα PZT τύπου PIC 151 (Πίνακας 2.1), με τη χρήση μιας εποξικής κόλλας δύο συστατικών, υψηλής δυσκαμψίας και διατμητικής αντοχής περίπου ίσης με 20MPa (3000psi), (Permatex Inc, 2011).

Προκειμένου να μειωθεί ο υπολογιστικός φόρτος της προσομοίωσης, αξιοποιείται η συμμετρία που εμφανίζουν δοκίμιο και επιθέμα PZT (Συμμετρία  $\frac{1}{4}$ ), σε επίπεδα κάθετα στο επίπεδο του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος (Σχήμα 3.22). Για τη διακριτοποίηση του Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος, χρησιμοποιείται ένα πλέγμα από 6495 τετραεδρικά ισοπαραμετρικά στοιχεία στερεού σώματος (Σχήμα 3.16), η διάταξη των οποίων πυκνώνει στις κοντινές περιοχές του ενσωματωμένου επιθέματος PZT. Η μαθηματική έκφραση της γεωμετρικής συμμετρίας, διατυπώνεται με την εφαρμογή συνοριακών συνθηκών μηχανικής συμμετρίας, οι οποίες περιορίζουν τις μετατοπίσεις του δοκιμίου, του στρώματος εποξικής κόλλας (πάχους 1mm) και του PZT, σε διευθύνσεις κάθετες στα επίπεδα συμμετρίας.



**Σχήμα 3.22:** Προσομοίωση ενός Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος δοκιμίου σκυροδέματος με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Όλες οι διαστάσεις σε mm).

Το PZT διεγείρεται σε μηχανική ταλάντωση με την εφαρμογή ενός αρμονικού ηλεκτρικού δυναμικού στην άνω ελεύθερη επιφάνεια του και γείωσης στην κάτω επιφάνεια που βρίσκεται σε επαφή με την κόλλα. Το πρόβλημα επιλύεται στο πεδίο της συχνότητας (Εξίσωση 3.55-3.56) για ένα εύρος συχνοτήτων μεταξύ 50 και 300 kHz. Το σκυρόδεμα και η εποξική κόλλα προσομοιώνονται ως γραμμικά ελαστικά, ομογενή και ισότροπα υλικά και οι μηχανικές τους ιδιότητες παραθέτονται στον Πίνακα 3.5.

Οι μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος προσδιορίστηκαν πειραματικά στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής (AMEL, Πολυτεχνείο Κρήτης) με τις μεθόδους μοναξονικής θλίψης και υπερήχων. Το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson και ο λόγος απόσβεσης της εποξικής κόλλας, λήφθηκαν με βάση τόσο τις τιμές που έχουν δημοσιευθεί στη διεθνή βιβλιογραφία όσο και με τα περιεχόμενα των τεχνικών φυλλαδίων του σκευάσματος που εφαρμόστηκε στο πραγματικό

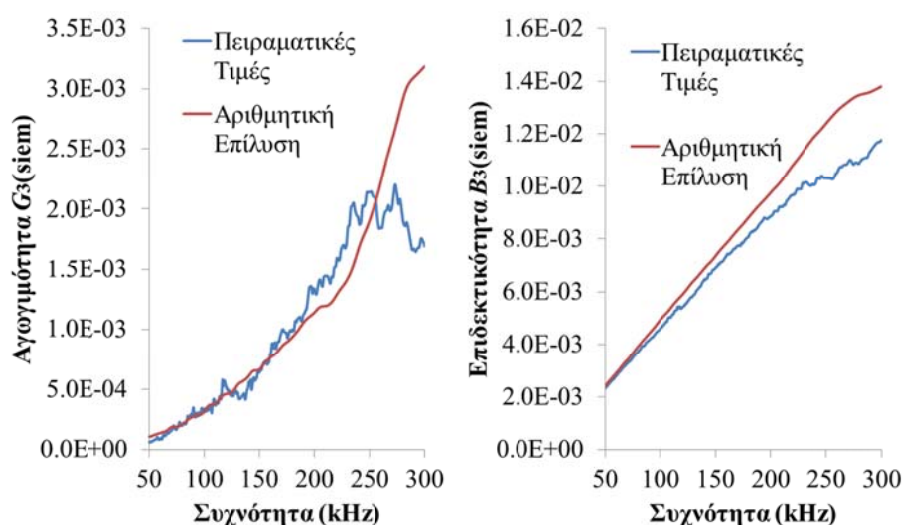


πειραματικό σύστημα (Σχήμα 3.22), (Permatex Inc, 2011; Smith et al., 1974; O' Brien et al., 2007).

**Πίνακας 3.5:** Μηχανικές Ιδιότητες Σκυροδέματος και εποξικής κόλλας.

	Πυκνότητα $\rho(\text{Kg/m}^3)$	Μέτρο Ελαστικότητας $Y^E(\text{GPa})$	Λόγος Poisson $\nu$	Λόγος Απόσβεσης $\zeta(\%)$	Συντελεστής μηχανικών απωλειών $n$
Σκυρόδεμα	2400	30	0.2	3	0.06
Κόλλα	1800	5	0.4	0.5	0.01

Οι ηλεκτρομηχανικές ιδιότητες του PIC 151 δίνονται κατ' αρχήν περιγραφικά στον Πίνακα 2.1 και σε μορφή καταστατικών μητρών στον Πίνακα Β.1 (Παράρτημα Β). Η καταστατική συμπεριφορά του PZT περιγράφεται με τη χρήση των εξισώσεων Παραμόρφωσης-Φορτίου (Εξισώσεις 2.1 και 2.4). Όλες οι εργασίες προσομοίωσης και επίλυσης υλοποιούνται με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων COMSOL Multiphysic V3.6-4.2.a (Comsol, 2012).



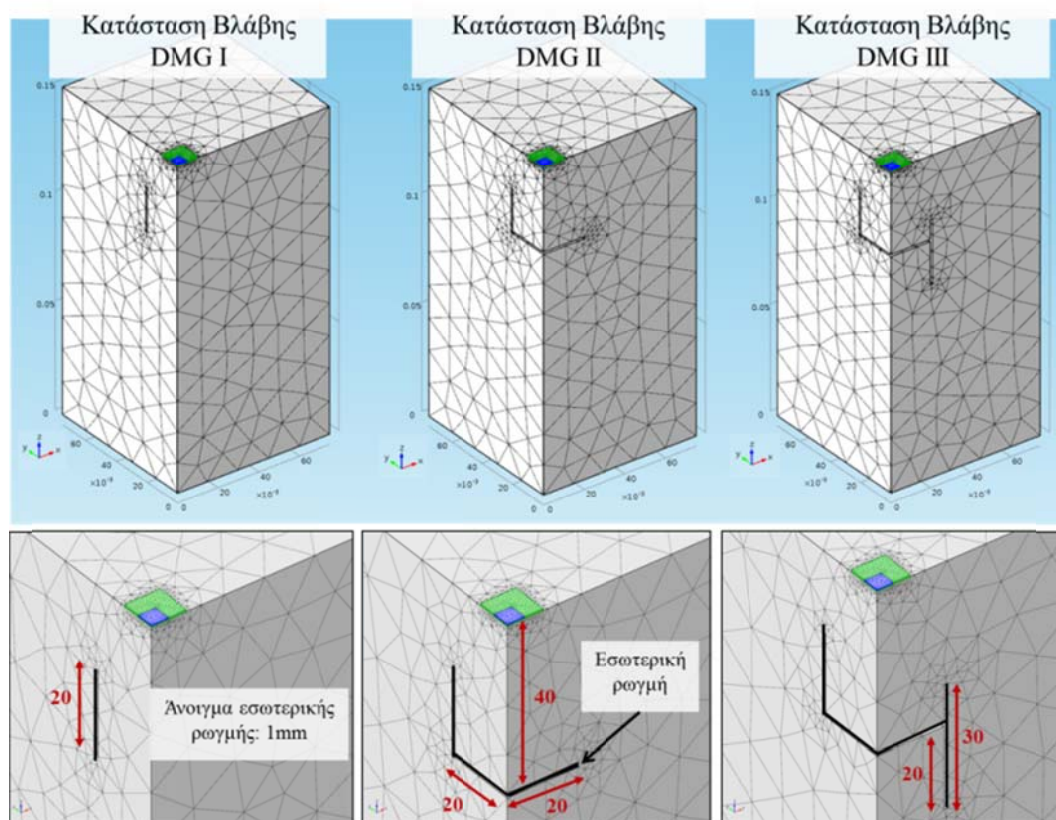
**Σχήμα 3.23:** Αξιολόγηση αριθμητικής επίλυσης.

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων την αριθμητικής επίλυσης με τις πειραματικές καταγραφές (Σχήμα 3.23), προκύπτει ότι η απόκριση της HMA του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων προσεγγίζει ικανοποιητικά την απόκριση του πραγματικού ΗΜΗΣ στην περιοχή συχνοτήτων μεταξύ 50 και 200 kHz. Οι διαφοροποιήσεις που εντοπίζονται οφείλονται κυρίως, α) στην απόκλιση που εμφανίζει σε επίπεδο μικροδομής το μοντέλο ΜΠΣ του σκυροδέματος (ομογενές και

ισότροπο υλικό) από το πραγματικό δοκίμιο (ανομοιογενές σύνθετο υλικό), β) στην ηλεκτρική αστάθεια του ΗΜΗΣ λόγω της καλωδίωσης του ΡΖΤ και γ) στις ενδεχόμενες αποκλίσεις των μηχανικών ιδιοτήτων προσομοίωσης της εποξικής κόλλας και σκυροδέματος, από τις πραγματικές. Η διαδικασία σύγκρισης των αποτελεσμάτων της ΜΠΣ με τα πειραματικά δεδομένα, αποσκοπεί στην ταυτοποίηση της μεθοδολογίας προσομοίωσης ενός ΗΜΗΣ με τη ΜΠΣ, προκειμένου αυτή να εφαρμοστεί στην αριθμητική αξιολόγηση των μεθόδων ΜΚΕ σκυροδέματος.

### 3.5.1. Σενάρια βλάβης δοκιμίου σκυροδέματος.

Τα σενάρια βλάβης του δοκιμίου που εξεταστήκαν, αποτελούν τα διαφορετικά στάδια επέκτασης μιας μικρορωγμής στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Η διεργασία επέκτασης της βλάβης δεν περιγράφεται από κάποιο συγκεκριμένο κριτήριο θραυστομηχανικής και θεωρείται τυχαία. Διατυπώθηκαν τρία διαφορετικά σενάρια τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 3.24.

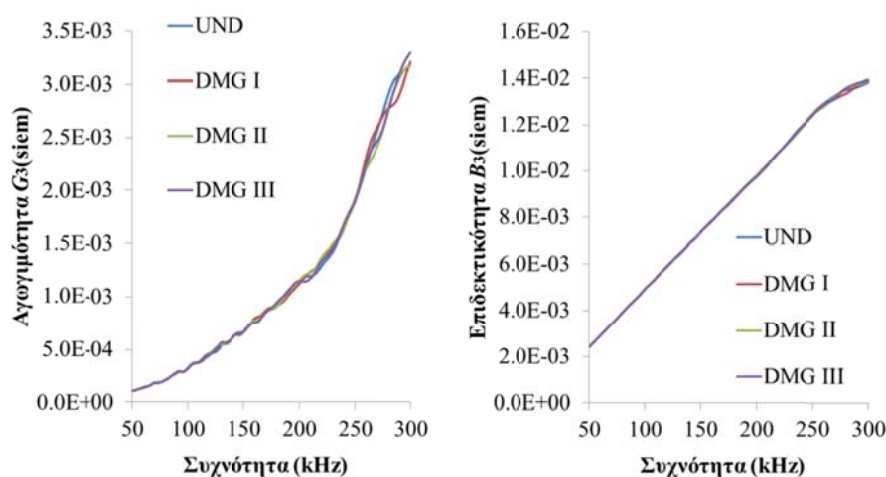


Σχήμα 3.24: Σενάρια Βλάβης. (Όλες οι διαστάσεις σε mm).

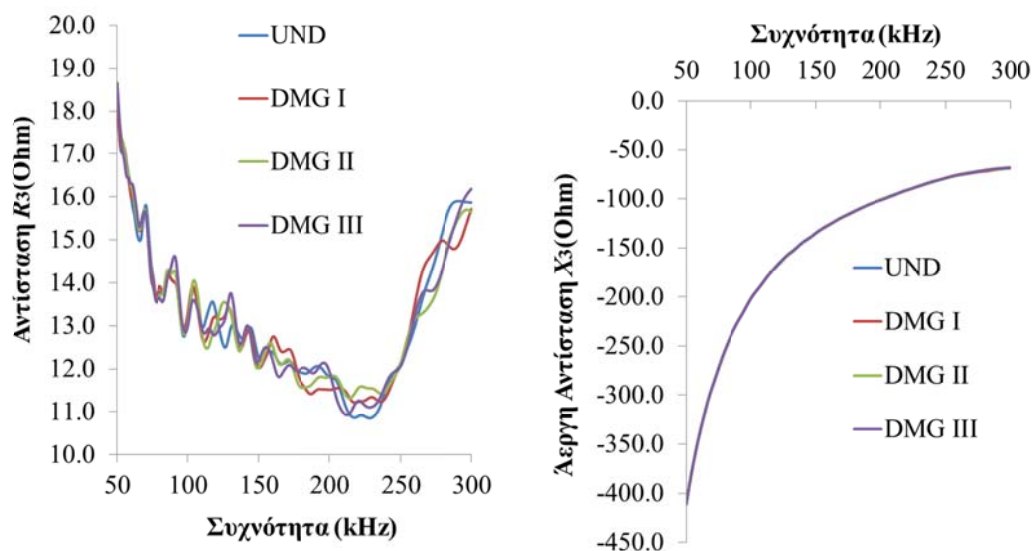
Η μεθοδολογία προσομοίωσης είναι ακριβώς η ίδια με αυτή που περιγράφηκε παραπάνω για το δομικά άρτιο δοκίμιο. Στα Σχήματα 3.25-3.27 παρουσιάζονται τα



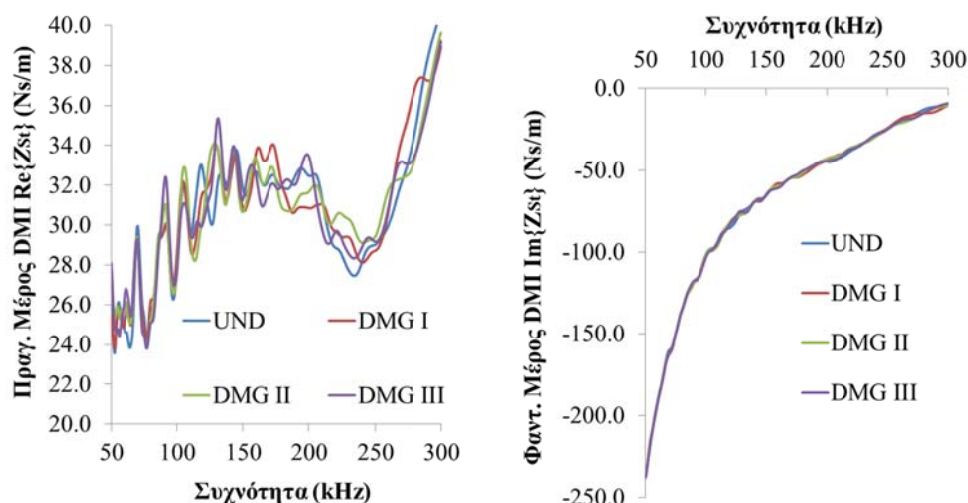
φάσματα απόκρισης της Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας (HMA), της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (HME) και της Μηχανικής Εμπέδησης (DMI) του δοκιμίου, η οποία προσδιορίζεται από το φάσμα απόκρισης της HMA, με βάση τις Εξισώσεις (3.1)-(3.3), για τα τρία διαφορετικά σενάρια βλάβης (DMGI-III), αλλά και για το δομικά άρτιο δοκίμιο (UNDamaged State).



**Σχήμα 3.25:** Φασματική Απόκριση HMA μοντέλου ΜΠΣ για τα τρία διαφορετικά σενάρια βλάβης.

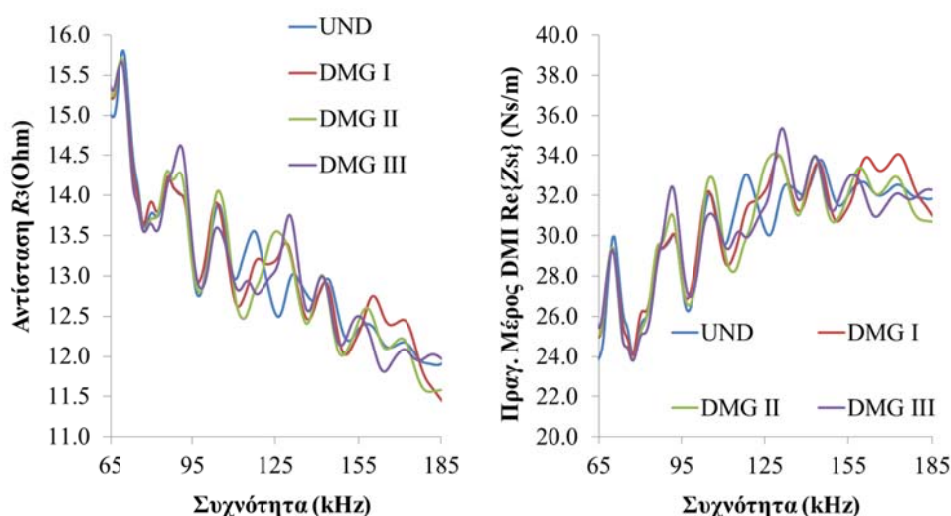


**Σχήμα 3.26:** Φασματική Απόκριση HME μοντέλου ΜΠΣ για τα τρία διαφορετικά σενάρια βλάβης.



**Σχήμα 3.27:** Φασματική Απόκριση DMI δοκιμίου μοντέλου ΜΠΣ για τα τρία διαφορετικά σενάρια βλάβης.

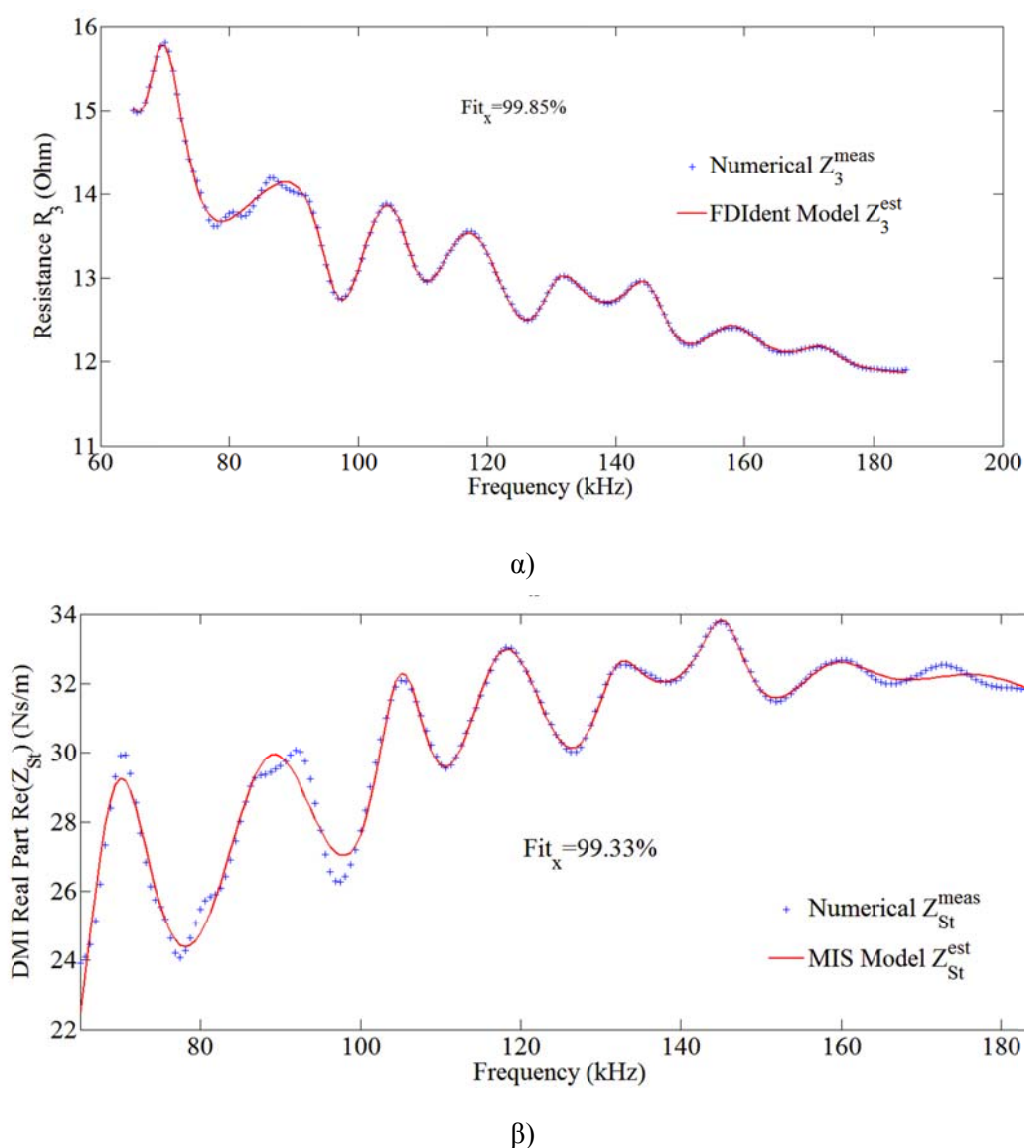
Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα επιλέγεται η μέθοδος SCoRe να εφαρμοστεί για δύο διαφορετικές περιπτώσεις ανάλυσης, με τη πρώτη να υλοποιείται στο πεδίο της ηλεκτρικής απόκρισης, λαμβάνοντας υπόψη ως  $RSS^{meas}$  το πραγματικό μέρος της HME ( $Z_3^{meas}$ ) και τη δεύτερη στο πεδίο της μηχανικής απόκρισης, λαμβάνοντας υπόψη ως  $RSS^{meas}$  το πραγματικό μέρος της DMI του δοκιμίου ( $Z_{St}^{meas}$ ). Η αξιολόγηση των φασμάτων απόκρισης, επικεντρώνεται στο εύρος συχνοτήτων μεταξύ 65 και 185 kHz, καθώς στη συγκριμένη περιοχή παρατηρούνται οι εντονότερες μεταβολές μεταξύ των διαφορετικών σεναρίων βλάβης (Σχήμα 3.28).



**Σχήμα 3.28:** Φασματική Απόκριση HME μοντέλου ΜΠΣ για τα τρία διαφορετικά σενάρια βλάβης σε εύρος συχνοτήτων 65-185 kHz.

### 3.5.2. Συναρτήσεις μεταφοράς του αέριου συστήματος

Η προσέγγιση της συναρτήσεως μεταφοράς  $RSS^{est}$  για την περίπτωση της ανάλυσης στο πεδίο της ηλεκτρικής απόκρισης γίνεται με την προσομοίωση της  $Z_3^{meas}$  με τη χρήση των ρητών πολωνομικών συναρτήσεων της μεταβλητής Laplace (Εξίσωση 3.20) και της συναρτήσεως ELiS του εμπορικού πακέτου FDIIdent (Σχήμα 3.29.α και Πίνακας 3.6). Αντίστοιχα η προσέγγιση της συναρτήσεως μεταφοράς στο πεδίο της μηχανικής απόκρισης επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της μεθόδου MIS (Εξισώσεις 3.35-3.36) για τη προσομοίωση της απόκρισης της DMI του δοκιμίου,  $Z_{St}^{meas}$  (Σχήμα 3.29.β και Πίνακας 3.7).



**Σχήμα 3.29:** Προσομοίωση της απόκρισης του δομικά άρτιου δοκιμίου α) στο πεδίο της ηλεκτρικής απόκρισης (αντίσταση) και β) στο πεδίο της μηχανικής απόκρισης (πραγματικό μέρος μηχανικής εμπίεσης).

**Πίνακας 3.6:** Παράμετροι της πολυωνυμικής συνάρτησης μεταφοράς,  $Z_3^{est}$  (Εξίσωση 3.20) του ΗΜΗΣ για τη περίπτωση του δομικά άρτιου δοκιμίου.

$p, q$	$a_{p-l}$	$b_{q-l}$	$p, q$	$a_{p-l}$	$b_{q-l}$
1	-5.6959E-04	9.6996E-09	12	8.7686E-66	2.4058E-69
2	7.3467E-10	-4.3761E-12	13	1.9961E-72	6.9884E-74
3	-9.8587E-15	6.6857E-18	14	1.1343E-77	1.0214E-80
4	2.0716E-20	-7.5790E-23	15	2.6328E-84	8.9534E-86
5	-6.4850E-26	1.7762E-28	16	8.9207E-90	1.3244E-92
6	2.2447E-31	-5.0416E-34	17	1.7798E-96	6.9801E-98
7	-1.9175E-37	1.8693E-39	18	3.8917E-102	7.9549E-105
8	1.2715E-42	-1.5653E-45	19	5.7855E-109	3.0206E-110
9	-1.5132E-49	1.0392E-50	20	7.2082E-115	1.8671E-117
10	4.2420E-54	-1.7842E-57	21	6.3855E-122	5.5517E-123
11	6.1323E-61	3.4190E-62			

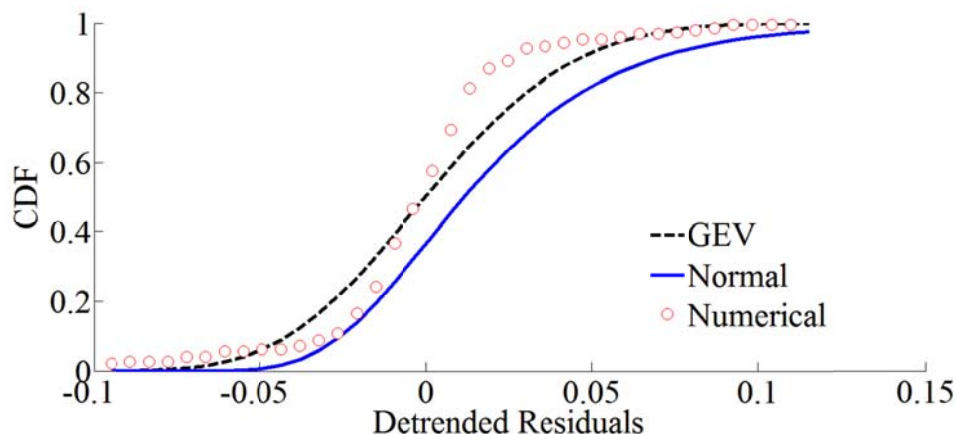
**Πίνακας 3.7:** Παράμετροι του μοντέλου  $MISZ_{st}^{est}$  (Εξίσωση 3.35) που περιγράφει την απόκριση της DMI του δομικά άρτια δοκιμίου.

$M$	$freq_{0,j}(kHz)$	$A_j^{eff}(mm^2)$	$H_j^{eff}(mm)$	$Q_j^{st}$
1	70.14	0.27	16.22	9.45
2	87.64	0.78	12.41	4.42
3	104.75	0.22	10.84	11.72
4	117.29	0.56	9.64	6.61
5	132.26	0.19	8.58	10.82
6	145.33	0.07	7.87	17.30
7	156.39	0.39	7.13	5.61

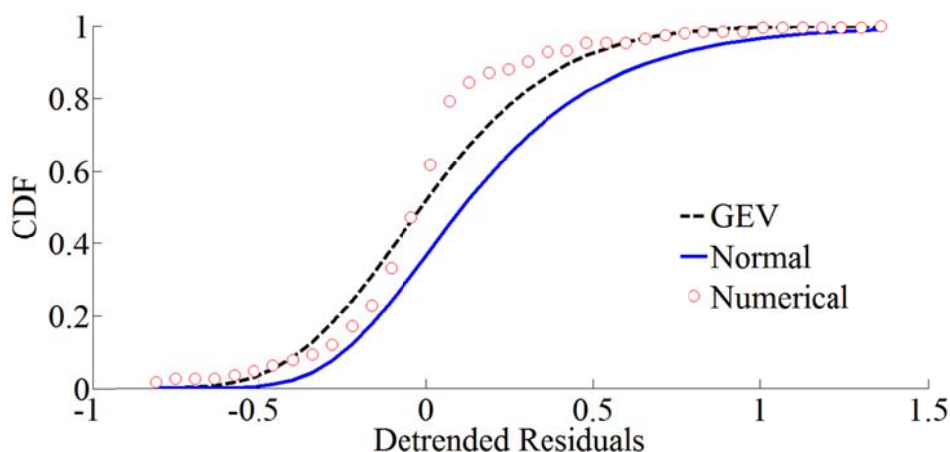
### 3.5.3. Στατιστικός έλεγχος υπολοίπων

Με βάση τις  $RSS^{est}$  υπολογίζονται τα Κανονικοποιημένα Υπόλοιπα Αναφοράς, RDR (Reference Detrended Residuals), (Εξίσωση 3.58), για τις δύο περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου SCoRe. Από τη στατιστική ανάλυση των RDR και τον υπολογισμό της Αθροιστικής Πυκνότητας Πιθανότητας (Σχήμα 3.30, Σημειακή καμπύλη κύκλων) προσδιορίζονται οι παράμετροι της κανονικής κατανομής και της κατανομής GEV. Από το Σχήμα 3.30 γίνεται ξεκάθαρο ότι η CDF της GEV έχει μεγαλύτερη ικανότητα προσαρμογής στην αριθμητική καμπύλη της Αθροιστικής Πυκνότητας Πιθανότητας (ΑΠΠ) σε σχέση με εκείνη της κανονικής κατανομής. Αυτό οφείλεται στην επιπλέον

παράμετρο μορφής  $\xi$  που ενσωματώνεται στην αναλυτική της έκφραση (Εξισώσεις 3.62), σε σχέση με τη κανονική κατανομή η οποία περιγράφεται μόνον από δύο παραμέτρους (Εξίσωση 3.60,  $m_\chi$  και  $s_\chi$ ).



α)

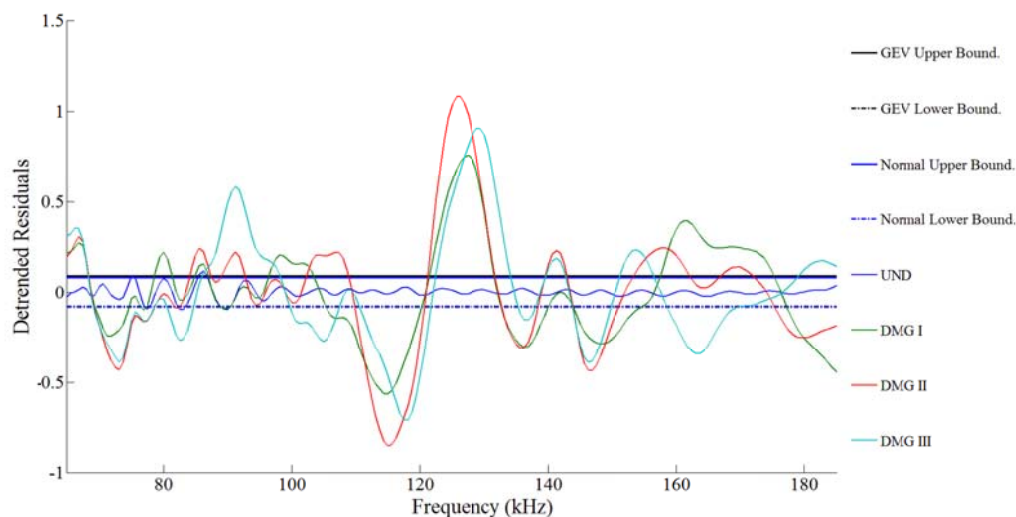


β)

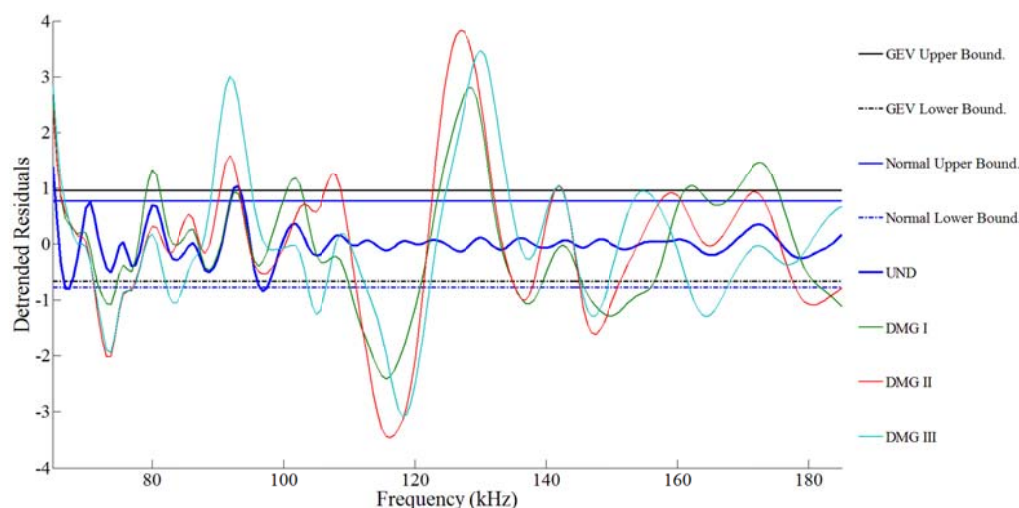
**Σχήμα 3.30:** Προσαρμογή θεωρητικών CDF στην αριθμητική ΑΠΠ των RSR, για τις περιπτώσεις όπου α)  $RSS^{est}=Z_3^{est}$  και β)  $RSS^{est}=Z_{St}^{est}$ .

Με βάση τις CDF της κανονικής κατανομής και της κατανομής GEV, προσδιορίζονται τα όρια εμπιστοσύνης των RDR,  $Lr_o^d$  (Κάτω όριο) και  $Ur_o^d$  (Πάνω όριο), από τις Εξισώσεις (3.59) για βεβαιότητες  $P_{low}=0.005$  ή 0.5% και  $P_{up}=0.995$  ή 99.5%. Παράλληλα με την διαδικασία στατιστικής ανάλυσης των RDR, υπολογίζονται τα Κανονικοποιημένα Υπόλοιπα, DR (Detrended Residuals), με βάση την Εξίσωση 3.57, τις εκτιμώμενες  $RSS^{est}$  (Ηλεκτρική και Μηχανική) και τις αντίστοιχες  $CSS^{Ds}$ , όπου για τη συγκεκριμένη περίπτωση ορίζεται ότι  $Ds=[DMGI,$

DMGII, DMGIII]. Με βάση τα προσδιοριζόμενα όρια εμπιστοσύνης θέτονται υπό στατιστικό έλεγχο οι DR της κάθε περίπτωσης βλάβης και προσδιορίζεται α) ο αριθμός των DR που βρίσκονται εκτός ορίων εμπιστοσύνης ή στατιστικού ελέγχου και β) οι περιοχές συχνотήτων που επηρεάζονται περισσότερο από την εκδήλωση βλάβης (Σχήμα 3.31).



α)



β)

**Σχήμα 3.31:** Στατιστικός έλεγχος των DR για τις περιπτώσεις όπου α)  $RSS^{est} = Z_3^{est}$  (απόκριση HME) και β)  $RSS^{est} = Z_{St}^{est}$  (Απόκριση DMI του δοκιμίου).

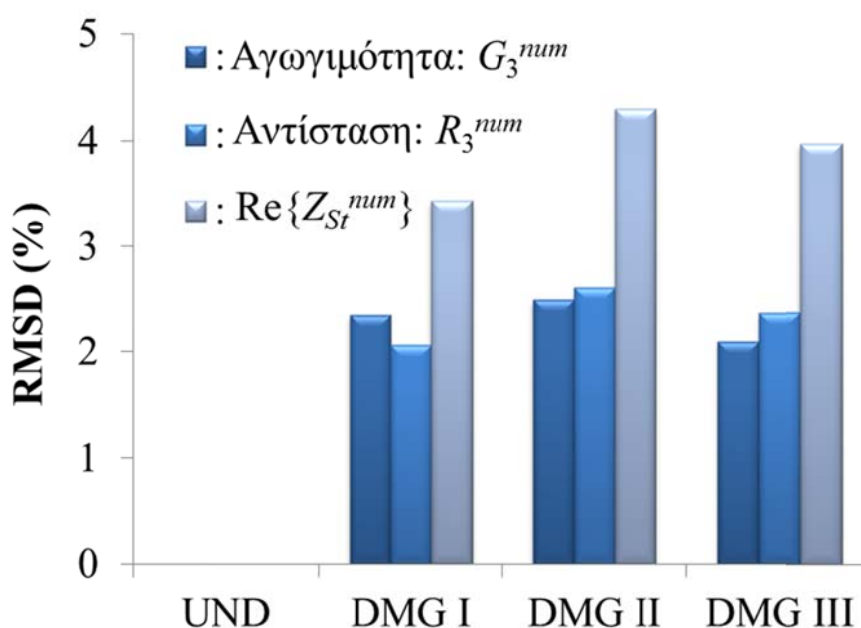
Από το Σχήμα 3.31 παρατηρείται ότι όλες οι περιπτώσεις βλάβης επιδρούν σημαντικά στα φάσματα απόκρισης στη περιοχή συχνοτήτων μεταξύ 115 και 135



kHz, δίνοντας υψηλές ακραίες τιμές και θέτοντας αρκετά DR σε κάθε περίπτωση εκτός ελέγχου. Το ίδιο επίσης συμβαίνει και στη περιοχή συχνοτήτων που βρίσκεται κοντά στα 65 kHz. Διαπιστώνεται όμως ότι το σενάριο βλάβης DMG III (Σχήμα 3.24) αν και δίνει γενικώς χαμηλότερες ακραίες τιμές από το σενάριο DMG II (ηπιότερη βλάβη), εντούτοις είναι το μόνο που δίνει σημαντικού μεγέθους ακραίες τιμές και στη περιοχή συχνοτήτων μεταξύ 65 και 110 kHz. Επιπλέον στη συγκεκριμένη περιοχή εμφανίζεται και σημαντική ποιοτική διαφοροποίηση της μορφής των φασμάτων με μετακινήσεις κορυφών και δημιουργία νέων ανάλογα με τη κάθε περίπτωση βλάβης.

### 3.5.4. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας με το στατιστικό έλεγχο των υπολοίπων των συναρτήσεων μεταφοράς

Η αρχική αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας του δοκιμίου, ανάλογα με τη κάθε περίπτωση βλάβης, γίνεται με τη χρήση του δείκτη RMSD. Ο δείκτης RMSD υπολογίζεται για τα πραγματικά μέρη των φασμάτων απόκρισης της HMA, της HME και της DMI του δοκιμίου.

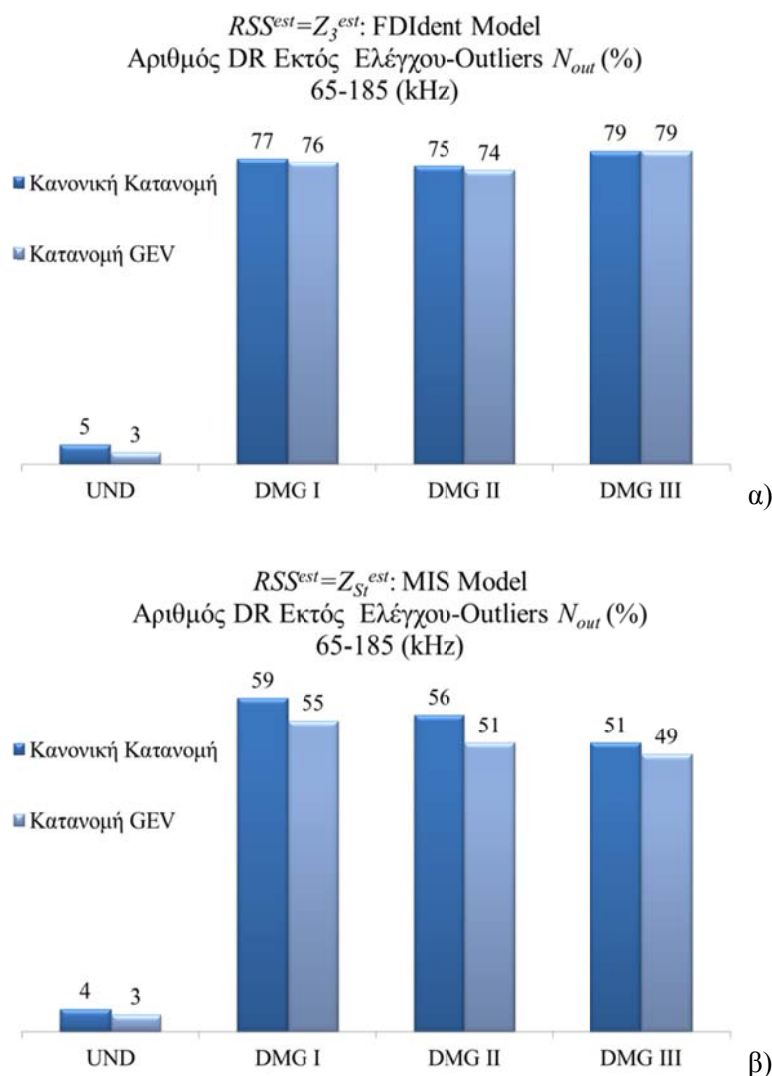


Σχήμα 3.32: Αξιολόγηση βλαβών με τη χρήση του RMSD σε εύρος συχνοτήτων 65-185 kHz.

Από το Σχήμα 3.32 διαπιστώνεται ότι ο δείκτης RMSD ανιχνεύει τη βλάβη σε κάθε περίπτωση, δίνοντας τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 2 και 5% ανάλογα με τη περίπτωση βλάβης. Επιπλέον παρατηρείται ότι το πλέον ευαίσθητο φάσμα στις μεταβολές της δυσκαμψίας του δοκιμίου είναι το πραγματικό μέρος της DMI του



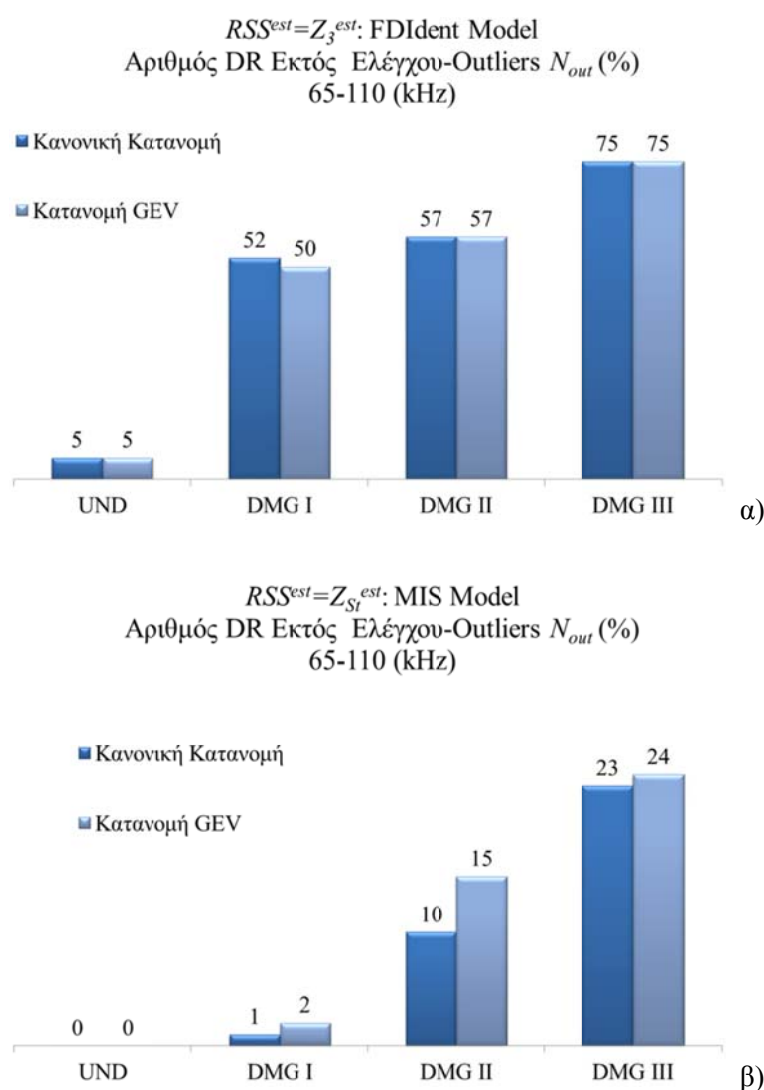
δοκιμίου. Ωστόσο όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 3.4, ο δείκτης RMSD δε προσφέρει μια ασφαλή αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας του δοκιμίου καθώς δεν συνοδεύεται από κάποιο αριθμητικό όριο ανίχνευσης βλάβης.



**Σχήμα 3.33:** Αξιολόγηση βλαβών με βάση το μέγεθος  $N_{out}$ , σε εύρος συχνοτήτων 65-185 kHz, για τις περιπτώσεις όπου α)  $RSS^{est}=Z_3^{est}$  και β)  $RSS^{est}=Z_{St}^{est}$ .

Αντίθετα με το RMSD η μέθοδος SCoRe αφενός μεν εντοπίζει την ύπαρξη μηχανικών βλαβών τόσο στη περίπτωση που ως  $RSS^{meas}$  χρησιμοποιείται το πραγματικό μέρος της HME όσο και στη περίπτωση που ως  $RSS^{meas}$  ορίζεται το πραγματικό μέρος της DMI του δοκιμίου. Επιπλέον ο αριθμός των τιμών εκτός ελέγχου  $N_{out}$  για της περιπτώσεις ύπαρξης βλάβης εκτοξεύεται από 10 έως 20 φορές πάνω από το  $N_{out}$  που αναφέρεται στο δομικά «υγιές» δοκίμιο (Σχήμα 3.33).

Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου SCoRe συγκαταλέγεται το γεγονός ότι από τα διαγράμματα στατιστικού ελέγχου των DR (Σχήμα 2.31) δύναται να προσδιοριστεί και η περιοχή των συχνοτήτων με τις μεγαλύτερες ποιοτικές αλλαγές στα φάσματα απόκρισης. Έτσι εάν υπολογιστεί ο αριθμός των DR που βρίσκονται εκτός των ορίων στο εύρος συχνοτήτων 65-110 kHz (Σχήμα 2.34), διαπιστώνεται ότι όσο η βλάβη επεκτείνεται στο εσωτερικό του δοκιμίου όλο και περισσότερες τιμές ξεπερνάνε τα όρια εμπιστοσύνης των RDR.



**Σχήμα 3.34:** Αξιολόγηση βλαβών με βάση το μέγεθος  $N_{out}$ , σε εύρος συχνοτήτων 65-110 kHz, για τις περιπτώσεις όπου α)  $RSS^{est}=Z_3^{est}$  και β)  $RSS^{est}=Z_{St}^{est}$ .



# Κεφάλαιο 4

## Ανάπτυξη Ολοκληρωμένου Ασύρματου Συστήματος Καταγραφής ΗΜΕ για τον ΜΚΕ Κατασκευών από Σκυρόδεμα

### 4.1. Εισαγωγή

Ο αποτελεσματικός έλεγχος της ασφάλειας των κατασκευών μεγάλης κλίμακας από σκυρόδεμα, απαιτεί τη συνεχή παρακολούθηση των δομικών τους χαρακτηριστικών από τα πρώτα στάδια δόμησης έως και το σύνολο του χρόνου ζωής τους. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι μια διαδικασία ολικού ελέγχου είναι απαραίτητο να ικανοποιεί τα ακόλουθα γενικά κριτήρια:

- α) Καταγραφή των μεγεθών παρακολούθησης στο χώρο του δομικού συστήματος (In Situ Control) σε τακτά χρονικά διαστήματα.
- β) Αξιοποίηση μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου για την αποφυγή λήψης δοκιμών υλικού από υφιστάμενες κατασκευές.
- γ) Δυνατότητα μόνιμης εγκατάστασης των συσκευών παρακολούθησης και εν γένει του συνόλου του εξοπλισμού στο υπό παρακολούθηση δομικό σύστημα από τα πρώτα στάδια δόμησης.
- δ) Προσβασιμότητα στα δυσπρόσιτα λόγω γεωμετρίας μέρη της κατασκευής (Κόμβοι δοκών-υποστυλωμάτων, θεμελίωση, διεπιφάνειες σκυροδέματος-ράβδων οπλισμού, κ.α.).

- ε) Ολοκληρωμένο σύστημα αυτοματοποιημένης λήψης μετρήσεων των μεγεθών παρατήρησης, αποθήκευσης των δεδομένων και δυνατότητας απομακρυσμένης πρόσβασης σε αυτά, για μετα-επεξεργασία και αξιολόγηση.
- στ) Το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας των συστημάτων παρακολούθησης να δικαιολογείται από την αποτελεσματικότητα τους στην διαχείριση της ασφάλειας λειτουργίας της κατασκευής και την έγκαιρη συντήρηση της.

Με γνώμονα τα σημεία που παρατέθηκαν παραπάνω, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα μη καταστροφικού ελέγχου (ΜΚΕ) το οποίο αξιοποιεί τις δυνατότητες των πιεζοηλεκτρικών υλικών και πιο συγκεκριμένα των PZT και διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (Providakis and Liarakos, 2011; 2014; Liarakos and Providakis, 2013):

- Μια ή περισσότερες κατάλληλα σχεδιασμένες αυτό-αισθητήριες συσκευές (Α/Δ: Αισθητήρες/Διεγέρτες) με βάση το PZT PIC 151 (Πίνακας 2.1), οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα εμφύτευσης στη μάζα του σκυροδέματος από τα πρώτα στάδια της δόμησης, όπου το σκυρόδεμα βρίσκεται στη ρευστή φάση, λειτουργώντας ως «ευφυή» αδρανή υλικά (SMA: Smart Aggregates) (Providakis and Liarakos, 2010). Το μέγεθος των συγκεκριμένων αισθητήρων είναι τέτοιο που επιτρέπει τη τοποθέτηση τους σε δυσπρόσιτα λόγω γεωμετρίας σημεία της κατασκευής. Επιπλέον το σχετικά χαμηλό κόστος παρασκευής τους δικαιολογεί την μόνιμη εγκατάσταση στο χώρο του υπό παρακολούθηση δομικού συστήματος.
- Τυπωμένα κυκλώματα (Printed Circuit Board- PCB) για τη μέτρηση και την καταγραφή της απόκρισης της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (ΗΜΕ) στο πεδίο της συχνότητας. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε το PCB AD5933 EB (Evaluation Board) της Analog Devices (Analog Devices, 2005-2007b) το οποίο φέρει το ολοκληρωμένο κύκλωμα (Integrated Circuit) μέτρησης της ΗΜΕ, AD5933 (Analog Devices, 2005-2007a). Η επιλογή του AD5933 EB έγινε με γνώμονα αφενός μεν το μικρό και διαχειρίσιμο μέγεθος του (100 x 75 mm) και αφετέρου δε το χαμηλό κόστος που έχει σε σχέση με τα ολοκληρωμένα συστήματα ανάλυσης της ΗΜΕ (ELIA, βλ. Ενότητα 2.4).
- Ασύρματη διασύνδεση μεταξύ των AD5933 EB και μιας κεντρικής μονάδας Η/Υ (Client Computer-ClIC) για την διαχείριση του δικτύου παρακολούθησης

των εμφυτευμένων SMA και τη καταγραφή και αποθήκευση των δεδομένων HME.

- Βάση δεδομένων για τη καταχώριση των καταγραφόμενων φασμάτων απόκρισης της HME με τη μορφή διακεκριμένων εγγραφών οι οποίες ορίζονται με βάση το χρόνο και την ημερομηνία λήψης μετρήσεων. Η βάση δεδομένων είναι αποθηκευμένη σε κάποιο H/Y με λειτουργία εξυπηρετητή (Server Computer- SerCo) ο οποίος δέχεται δεδομένα από τον CliC μέσω τοπικού δικτύου (LAN) ή διαδικτύου (Internet). Ο σχεδιασμός της συγκεκριμένης βάσης αποτελεί ένα σημαντικότατο εργαλείο στο ΜΚΕ των δομικών συστημάτων, καθώς δίνει τη δυνατότητα απομακρυσμένης πρόσβασης, προσπέλασης και ανάκτησης των δεδομένων HME, από οποιαδήποτε χρήστη (User Computer- UC) που απλά διαθέτει μια τοπική ή διαδικτυακή σύνδεση.

Συστήματα μη καταστροφικού ελέγχου κατασκευών με τη χρήση PZT, τα οποία ενσωματώνουν κάποια χαρακτηριστικά αντίστοιχα με τα παραπάνω, έχω δημοσιευτεί από τους Annamdas and Radhika (2013), Lynch and Loh (2006), Park et al. (2007), Park et al. (2008) και Mascarenas et al. (2007). Η πρωτοτυπία του συστήματος που προτείνεται στη παρούσα διατριβή, εντοπίζεται στο γεγονός ότι είναι το πρώτο ολοκληρωμένο ασύρματο σύστημα, αυτόματης καταγραφής και αποθήκευσης των δεδομένων της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης, το οποίο επιδεικνύει ταυτόχρονα την ικανότητα καταχώρισης των μετρήσεων σε μια κατάλληλα διαμορφωμένη βάση δεδομένων, καθώς και απομακρυσμένης πρόσβασης μέσω διαδικτύου στα δεδομένα. Οι δυνατότητες αυτές συνεισφέρουν σημαντικά στην απευθείας μετα-επεξεργασία των μετρήσεων Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης με το λογισμικό MATLAB, μέσω της διασύνδεσης του με το περιβάλλον της MySQL (Providakis and Liarakos, 2014; Liarakos and Providakis, 2013).

## 4.2. Σχεδιασμός και Ανάπτυξη «Ευφυών» Αδρανών

Η ιδέα ανάπτυξης των «ευφυών» αδρανών προέκυψε καταρχήν από την ανάγκη παρακολούθησης των φυσικών διεργασιών της ενυδάτωσης της τσιμεντόπαστας και της ανάπτυξης της αντοχής του πρώιμου σκυροδέματος (Song et al., 2008). Η

διεργασία ενυδάτωσης της τσιμεντόπαστας, δηλαδή της χημικής αντίδρασης του νερού με το τσιμεντοκονίαμα, αποτελεί μια παράμετρο μείζονος σημασίας σε σχέση με τις τελικές αντοχές και τις μηχανικές ιδιότητες που θα αναπτύξει το σκυρόδεμα. Πιο συγκεκριμένα, η τελική θλιπτική αντοχή ή το μέτρο ελαστικότητας ενός δομικού στοιχείου από σκυρόδεμα, επηρεάζεται καθοριστικά από το πόσο ολοκληρωμένη θα είναι η διαδικασία ενυδάτωσης του τσιμέντου (Barroca et al., 2013; Mehta and Monteiro, 2009; Ye et al., 2004).

Ο χρόνος εξέλιξης του φαινομένου ξεκινάει από τη στιγμή που τσιμέντο θα έρθει σε επαφή με το νερό και θεωρείται σύμφωνα με τις προδιαγραφές ότι έχει ολοκληρωθεί 28 ημέρες μετά τη σκυροδέτηση (Bamfort et al., 2008). Πρακτικά εφόσον οι κανόνες σκυροδέτησης και συντήρησης (διαβροχή δομικών στοιχείων-διατήρηση υγρασίας) τηρηθούν, σε 7 ημέρες από τη σκυροδέτηση το μεγαλύτερο τμήμα της ενυδάτωσης έχει ολοκληρωθεί (Mehta and Monteiro, 2009). Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα για παρατήρηση στάδια της διεργασίας ενυδάτωσης, λαμβάνει χώρα σε χρόνο μεταξύ 3 και 48 ωρών από τη σκυροδέτηση, χρονική περίοδο κατά την οποία το σκυρόδεμα βρίσκεται μεταξύ της ρευστής-ιξώδους (<20 ώρες) και της υδαρής και εύθραυστης φάσης (20-48 ώρες). Το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα συντελείται η εντονότερη φάση της ενυδάτωσης των συστατικών του τσιμεντοκονιάματος, η οποία συνδέεται με τη δημιουργία των ένυδρων κρυστάλλων της τσιμεντόπαστας.

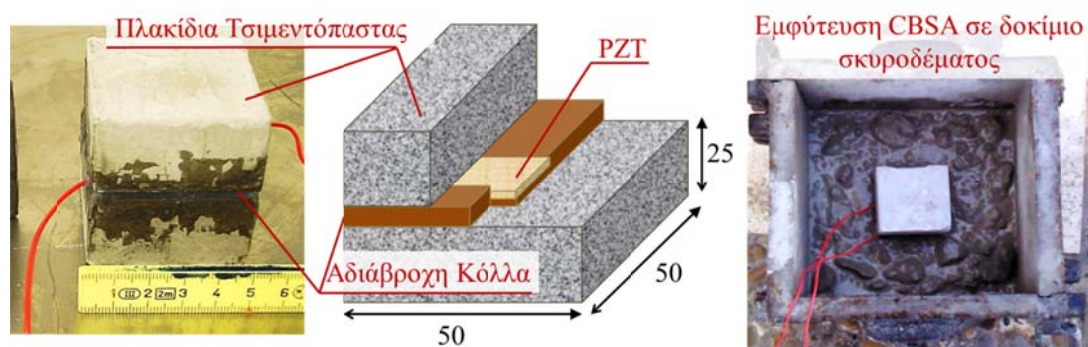
Η δημιουργία των κρυστάλλων σηματοδοτεί την έναρξη της εμφάνισης μηχανικής συνοχής στη μάζα του πρώιμου σκυροδέματος. Η ρευστή φυσική κατάσταση του σκυροδέματος τις πρώτες ώρες μετά τη σκυροδέτηση, καθιστά πρακτικά αδύνατη τη τοποθέτηση των επιθεμάτων PZT στην επιφάνεια του, καθώς η υγρασία δύναται να καταστρέψει τόσο τα επιθέματα όσο και τα ηλεκτρόδια (βλ. Ενότητα 2.4). Επιπλέον λόγω της ευθραυστότητας που εμφανίζουν πολλά επιθέματα PZT (κεραμικά υλικά με πάχος <1 mm) και των συνθηκών έντονης μηχανικής καταπόνησης που διαμορφώνονται κατά τη σκυροδέτηση, η απλή αδιαβροχοποίηση τους κρίνεται ανεπαρκής για την ασφαλή εμφύτευση τους στη μάζα του σκυροδέματος.

Οι παραπάνω λόγοι οδήγησαν στο σχεδιασμό κατάλληλα διαμορφωμένων αυτό-αισθητήριων συσκευών οι οποίες φέρουν στο εσωτερικό τους το PZT, παρέχοντας του προστασία τόσο από το έντονα διαβρωτικό περιβάλλον της τσιμεντόπαστας, όσο



και από τα ισχυρά μηχανικά φορτία που δύναται να δεχθεί κατά την ενσωμάτωση του στη μάζα του σκυροδέματος. Οι συγκεκριμένες συσκευές ονομάστηκαν «ευφυή» αδρανή (SMA: Smart Aggregates) καθώς τοποθετούνται στο εσωτερικό των δομικών στοιχείων και αναπόφευκτα λειτουργούν ως τμήμα της μικροδομής τους.

Όλα τα SMA απαρτίζονται υποχρεωτικά από τρία λειτουργικά τμήματα α) ένα περίβλημα ή κέλυφος υψηλής αντοχής (SMA Casing), το οποίο φέρει στο εσωτερικό του το PZT, β) το PZT με τα ηλεκτρόδια του και γ) μια υψηλής αντοχής αδιάβροχη κόλλα η οποία χρησιμοποιείται τόσο για την επικόλληση του PZT στο περίβλημα, όσο και για την αδιαβροχοποίηση του PZT και του περιβλήματος. Η κόλλα και το υλικό του περιβλήματος είναι απαραίτητο να έχουν δυσκαμψία παραπλήσια με αυτή του σκυροδέματος έτσι ώστε να αποφεύγεται πρώτον, η δημιουργία εστιών μηχανικής ανομοιογένειας και ανισοτροπίας στο εσωτερικό των δομικών στοιχείων και δεύτερον, να διασφαλίζεται η απαραίτητη μηχανική αγωγιμότητα μεταξύ του SMA και του σκυροδέματος. Ως μηχανική αγωγιμότητα μεταξύ δύο στερεών σωμάτων, ορίζεται η ικανότητα να διαβιβάζεται η μηχανική ενέργεια με τη μορφή κυμάτων από το ένα σώμα στο άλλο, με τις μικρότερες δυνατές απώλειες λόγω απόσβεσης των υλικών (Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013).



**Σχήμα 4.1:** «Ευφυές» Αδρανές CBSA. Γεωμετρία (όλες οι διαστάσεις σε mm) και εμφύτευση σε δοκίμιο σκυροδέματος (Providakis and Liarakos, 2010).

Το πρώτο SMA που παρασκευάστηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, αποτελείται από ένα περίβλημα με βάση την τσιμεντόπαστα, το οποίο φέρει στο εσωτερικό του ένα αδιαβροχοποιημένο επίθεμα PZT τύπου PIC 151 με δύο ηλεκτρόδια (Σχήμα 4.1). Το συγκεκριμένο SMA από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως **CBSA** (**Cement Based Sensor-Actuator**). Το περίβλημα αποτελείται από δύο παραλληλεπίπεδες πλάκες σκληρυμένου τσιμέντου (28 ημέρες μετά τη

σκυροδέτηση), τύπου TITAN CEM II/A-M 42.5 N, με αναλογίες μίξης C:W, 1.0:0.42 (C: Cement, W: Water) και διαστάσεις 50x50x25 mm. Οι δύο πλάκες τοποθετούνται η μια πάνω από την άλλη και συγκολλούνται μεταξύ τους με τη χρήση μιας αδιάβροχης εποξικής κόλλας δύο συστατικών υψηλής αντοχής (Sandwich Structure), (Permatex, 2011). Το PZT αφού προσαρμοστούν σε αυτό τα ηλεκτρόδια και επικαλυφθεί από ένα λεπτό στρώμα εποξικής κόλλας (αδιαβροχοποίηση), τοποθετείται μεταξύ των δύο πλακών της τσιμεντόπαστας (Σχήμα 4.1).

Το CBSA δοκιμάστηκε αρχικά στη παρακολούθηση της ενυδάτωσης και της ανάπτυξης της δυσκαμψίας ενός κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος, κατηγορίας C20/25, όμοιο με εκείνα που χρησιμοποιούνται στις δοκιμές μοναξονικής θλίψης, με μήκος ακμής 150mm. Το δοκίμιο σκυροδετήθηκε σε μια μεταλλική μήτρα (Σχήμα 4.1) και το CBSA τοποθετήθηκε στο κέντρο βάρους του. Προκειμένου να μην υπάρξει καμία μεταβολή στις συννοριακές συνθήκες του δοκιμίου κατά τη διαδικασία παρακολούθησης, η μήτρα διατηρήθηκε μέχρι την παρέλευση και των 28 ημερών ωρίμανσης. Η ενυδάτωση του σκυροδέματος επιτεύχθηκε με τη διαρκή διαβροχή της άνω επιφάνειας του δοκιμίου και τη τοποθέτηση βρεγμένης λινάτσας.

Η παρακολούθηση της ωρίμανσης του σκυροδέματος έγινε με την εφαρμογή της μεθόδου HME (βλ. Ενότητα 3.1). Η καταγραφή της φασματικής απόκρισης της ηλεκτρικής αντίστασης  $R_3$ , ξεκίνησε 3 ώρες μετά τη σκυροδέτηση και ολοκληρώθηκε μετά από 28 ημέρες. Για τη καταγραφή της HME χρησιμοποιήθηκε ο αναλυτής ηλεκτρικών κυκλωμάτων (ELIA) QuadTech 7600, οποίος παρέχει 99.95% ακρίβεια στη μέτρηση οποιουδήποτε ηλεκτρικού στοιχείου ή RLC κυκλώματος (Σχήμα 4.2), (QuadTech, 2002).

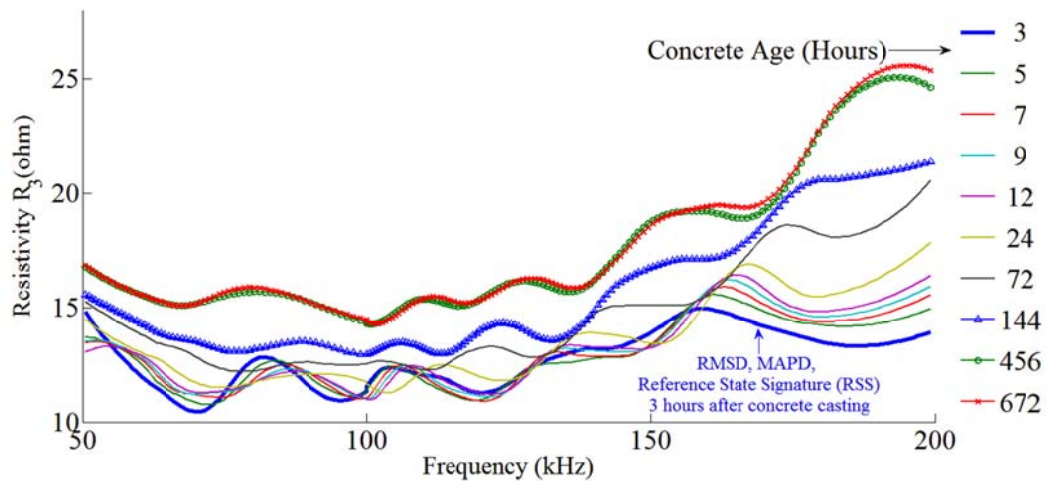
Η απόκριση της HME καταγράφηκε σε ένα εύρος συχνοτήτων μεταξύ 50 και 200 kHz, προκειμένου να είναι δυνατό να ανιχνευθούν οι μεταβολές της δυσκαμψίας τόσο σε επίπεδο μικροδομής όσο και σε επίπεδο δοκιμίου (βλ. Ενότητες 2.4 και 3.1). Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας παρακολούθησης του σκυροδέματος σε επιλεγμένες χρονικές στιγμές (ηλικία σκυροδέματος) από τη σκυροδέτηση του δοκιμίου.

Η αξιολόγηση της μεταβολής των φασμάτων απόκρισης της αντίστασης  $R_3$  (πραγματικό μέρος HME) έγινε με τη χρήση των στατιστικών δεικτών βλάβης, RMSD και MAPD. Ως Ηλεκτρο-Μηχανική Υπογραφή Αναφοράς, RSS (Εξισώσεις

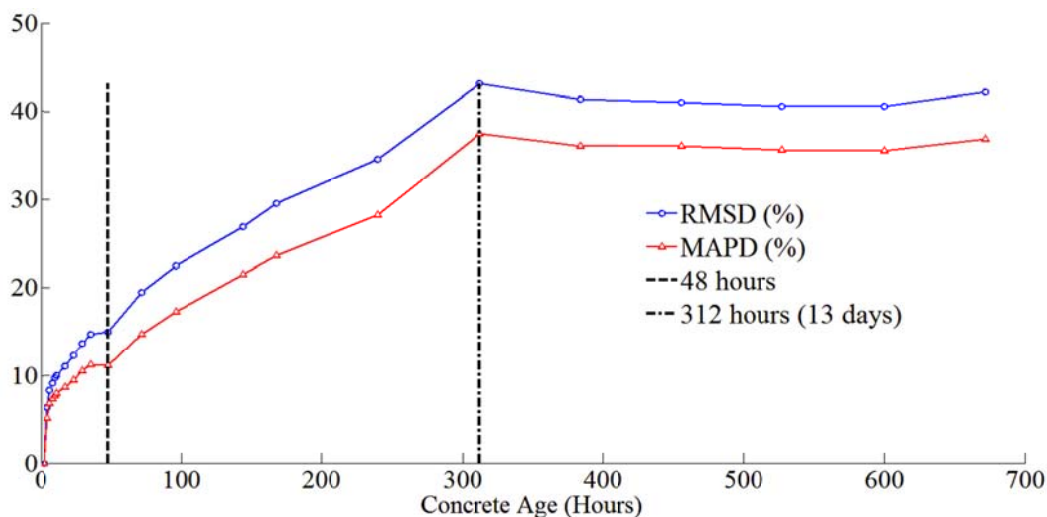
3.4 και 3.5), λήφθηκε η απόκριση του Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος στις 3 ώρες μετά τη σκυροδέτηση του δοκιμίου.



α)



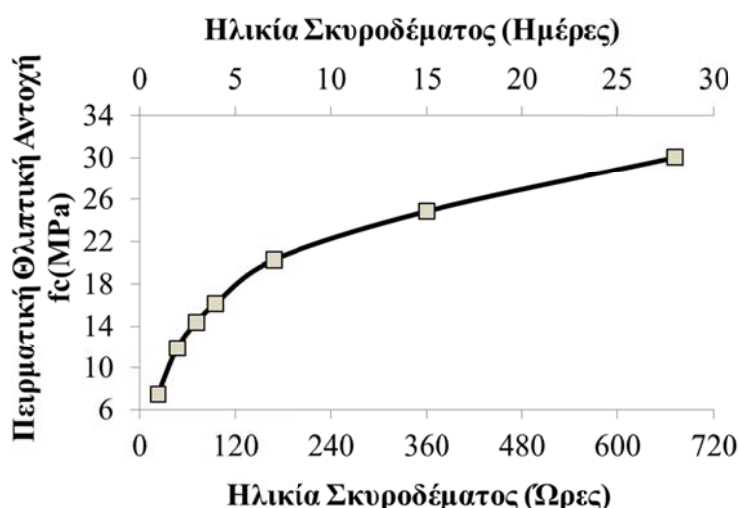
β)



γ)

**Σχήμα 4.2:** Παρακολούθηση της ενυδάτωσης και της ανάπτυξης της δυσκαμψίας του σκυροδέματος με τη μέθοδο ΗΜΕ και τη χρήση ενός CBSA. α) Πειραματική διάταξη. β) Φάσμα Αντίστασης  $R_3$  (Ohm). γ) Εξέλιξη στατιστικών δεικτών RMSD, MAPD.

Από τα διαγράμματα των δεικτών μεταβολής διαπιστώνεται ότι τις πρώτες 48 ώρες, τα φάσματα απόκρισης της ΗΜΕ, μεταβάλλονται με γοργό ρυθμό αντικατοπτρίζοντας την ανάπτυξη της δυσκαμψίας του σκυροδέματος κατά τη μετάβαση του υλικού από τη ημίρρευστη στη στερεά φάση. Από τις 48 ώρες μέχρι και τις 312 ώρες (13 ημέρες), η μεταβολή των φασμάτων είναι πιο ομαλή, ενώ από τις 312 ώρες και μετά οι τιμές των δεικτών σταθεροποιούνται γύρω από μια τιμή.



**Σχήμα 4.3:** Πειραματική καμπύλη ανάπτυξης αντοχής σκυροδέματος.

Κατά τη παρασκευή του δοκιμίου σκυροδέματος με το εμφυτευμένο CBSA, παρασκευάστηκαν άλλα 7 δοκίμια ίδιας σύστασης, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον πειραματικό προσδιορισμό με δοκιμές αξονικής θλίψης, της αντοχής του πρώιμου σκυροδέματος συναρτήσει της ηλικίας του. Στο Σχήμα 4.3 απεικονίζεται η πειραματικώς προσδιοριζόμενη αντοχή σε αξονική θλίψη, συναρτήσει της ηλικίας των δοκιμίων. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν στις δοκιμές για ηλικίες σκυροδέματος, 1, 2, 3, 4, 7, 15 και 28 ημερών. Από τη συνδυασμένη παρατήρηση των Σχημάτων 4.2.γ και 4.3, διαπιστώνεται ότι τα δύο γραφήματα έχουν παραπλήσια μορφή. Η διαπίστωση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το CBSA αποτελεί ένα αξιόπιστο SMA καθώς επιτυγχάνει να αποτυπώσει ρεαλιστικά τη μεταβολή που συντελείται στα δομικά χαρακτηριστικά ενός δοκιμίου πρώιμου σκυροδέματος κατά τη διαδικασία ωρίμασης του.

Μέχρι να υλοποιηθεί η πρώτη πετυχημένη δοκιμή ΜΚΕ με τους CBSA προηγήθηκαν αρκετές αποτυχημένες προσπάθειες. Σε όλες τις δοκιμές που έγιναν το SMA παρασκευάστηκε επιτυχώς, εμφυτεύτηκε σωστά στη μάζα του σκυροδέματος, αλλά σε αρκετές περιπτώσεις (5 στις 10) μετά τις πρώτες 24 ώρες το SMA έπανε να

λειτουργεί κανονικά. Η δυσλειτουργία του CBSA ανιχνευόταν σε κάθε περίπτωση στα φάσματα απόκρισης της ΗΜΕ, τα οποία είτε λάμβαναν πολύ υψηλές τιμές (MΩm), είτε αρνητικές τιμές για την ηλεκτρική αντίσταση (Resistance).

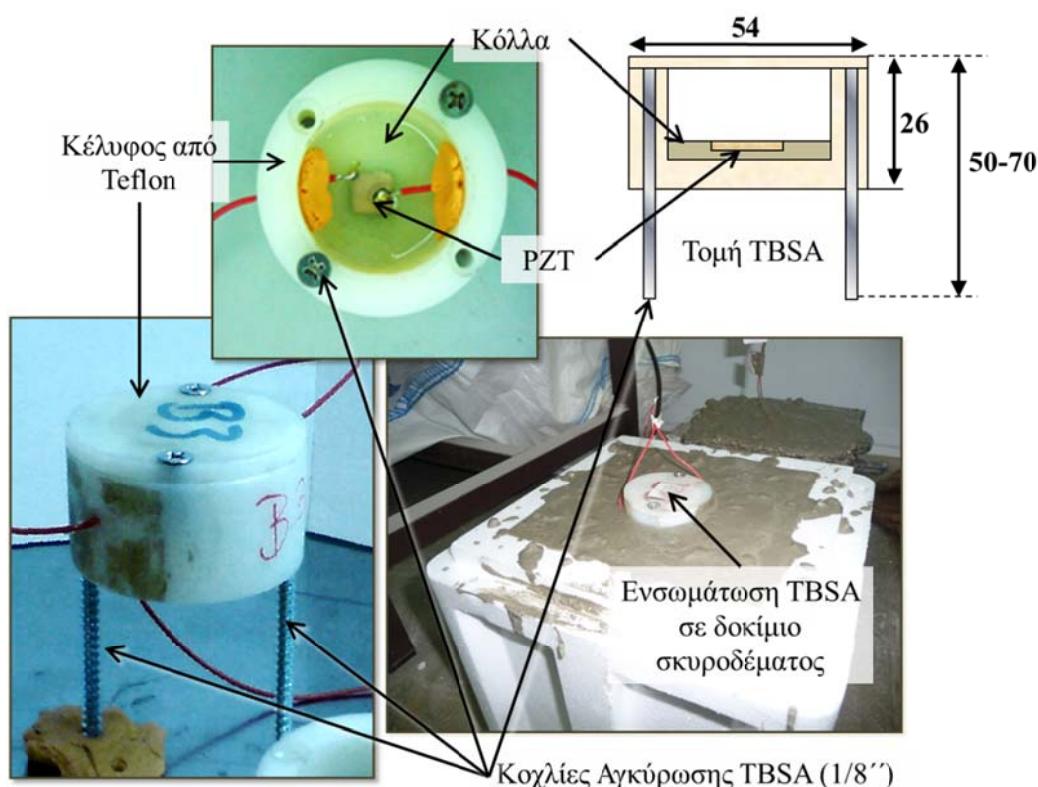
Τα προβλήματα αυτά οδήγησαν στη διαπίστωση ότι το CBSA μειονεκτεί σημαντικά στο πεδίο της συντήρησης και επιθεώρησης της λειτουργίας του. Από τη στιγμή που θα εμφυτευθεί στη μάζα του σκυροδέματος η πρόσβαση στον αυτό-αισθητήριο πυρήνα του, το PZT, είναι αδύνατη. Αυτό καθιστά τη διαδικασία εγκατάστασης ενός δικτύου παρακολούθησης αρκετά αβέβαιη διότι δεν διασφαλίζεται η σίγουρη λειτουργία των SMA. Το μειονέκτημα αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη ενός καινοτόμου SMA, το οποίο ενσωματώνει ένα κατάλληλα σχεδιασμένο κέλυφος από Teflon (PTFE) ως περίβλημα του PZT (Σχήμα 4.3).

Το συγκεκριμένο SMA, το οποίο από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως **TBSA** (**Teflon Based Sensor Actuator**), προσφέρει τη δυνατότητα πρόσβασης στο PZT, για τυχόν αναγκαίες επισκευές στα ηλεκτρόδια του, αλλά και τη δυνατότητα ολικής απομάκρυνσης από την κατασκευή. Ιδιαίτερα το τελευταίο χαρακτηριστικό εξασφαλίζει ότι στη περίπτωση που ένα TBSA καταστραφεί, μπορεί να αντικατασταθεί από ένα άλλο, ενώ επιπλέον μπορεί να ανακτηθεί ώστε να επαναχρησιμοποιηθεί σε κάποια άλλη διαδικασία ΜΚΕ.

Το TBSA όπως γράφτηκε προηγουμένως αποτελεί ένα SMA του οποίου το περίβλημα είναι ένα κυλινδρικό σωληνοειδές κέλυφος από PTFE (Σχήμα 4.4). Στη στέψη του φέρει ένα αποσπώμενο καπάκι το οποίο δίνει τη δυνατότητα πρόσβασης στο PZT. Το PZT, τύπου PIC 151 (Πίνακας 2.1), προσαρμόζεται στο εσωτερικό του κελύφους και στον πυθμένα του, με τη χρήση μιας αδιάβροχης εποξικής κόλλας δύο συστατικών υψηλής αντοχής (Permatex, 2011). Στη στέψη των τοιχίων του κελύφους, τα οποία έχουν πάχος περίπου 8 mm, και κάτω από το καπάκι του TBSA, τοποθετούνται αντιδιαμετρικά δύο χαλύβδινοι ανοξείδωτοι κοχλίες αγκύρωσης, διαμέτρου 1/8'', οι οποίοι αποσκοπούν αφενός μεν στην αύξηση της μηχανικής αγωγιμότητας του SMA και αφετέρου δε στη σταθεροποίηση του στη ρευστή μάζα του πολύ πρώιμου σκυροδέματος. Το TBSA τοποθετείται στη μάζα του ρευστού σκυροδέματος αμέσως μετά τη σκυροδέτηση και προσαρμόζεται κοντά στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου, προκειμένου το καπάκι του να είναι προσβάσιμο στο χρήστη.



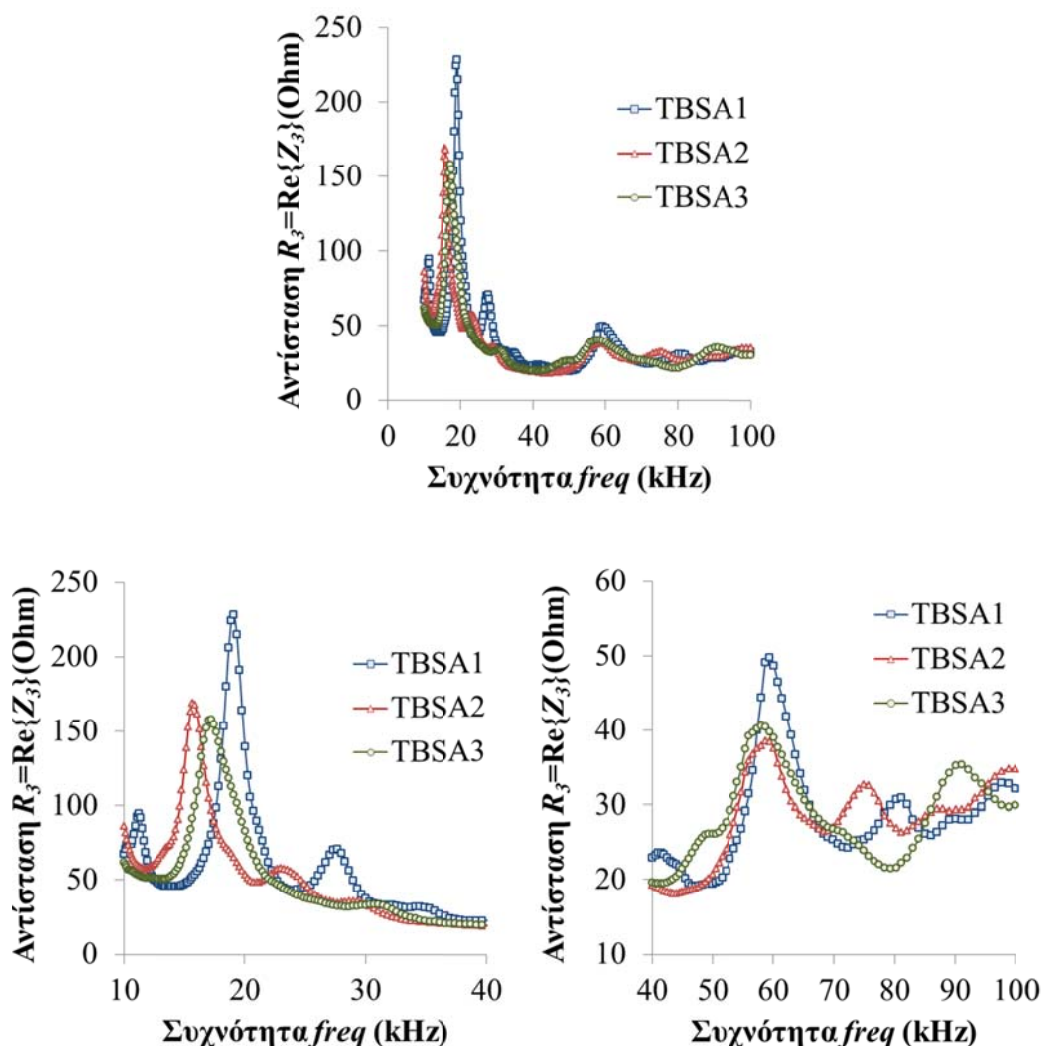
Ένα πολύ σημαντικό σημείο στο οποίο το TBSA υπερτερεί του CBSA, εντοπίζεται στο γεγονός ότι επειδή το PZT είναι προσαρμοσμένο στο εσωτερικό του κελύφους με τέτοιο τρόπο ώστε η πάνω επιφάνεια του να είναι ελεύθερη (βλ. Τομή στο σχήμα 4.5), η μηχανική ενέργεια μεταφέρεται στο εσωτερικό του σκυροδέματος με την μορφή **εγκαρσίων κυμάτων**. Η συγκριμένη ιδιότητα είναι πολύ σημαντική καθώς συμβαδίζει με τις παραδοχές εφαρμογής της μεθόδου MIS (βλ. Ενότητα 3.3.3), για την ταυτοποίηση του Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος και την προσομοίωση της ηλεκτρομηχανικής του απόκρισης στο πεδίο της συχνότητας.



**Σχήμα 4.4:** «Ευφύες Αδρανές TBSA. Γεωμετρία (όλες οι διαστάσεις σε mm) και ενσωμάτωση, σε δοκίμιο σκυροδέματος.

Στο Σχήμα 4.5, απεικονίζεται η φασματική απόκριση της αντίστασης  $R_3$ , τριών πρότυπων TBSA, τα όποια παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής του Πολυτεχνείου Κρήτης και χρησιμοποιήθηκαν στο ΜΚΕ δομικών στοιχείων σκυροδέματος (Providakis and Liarakos, 2011; 2012; 2014; Liarakos and Providakis, 2013; Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013). Η καταγραφή της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης των TBSA, έγινε με τη χρήση του συστήματος καταγραφής ηλεκτρικής εμπέδησης, QuadTech 7600. Οι εφαρμογές των συγκριμένων

SMA στη παρακολούθηση της ενυδάτωσης και της ανάπτυξης της αντοχής του πρώιμου σκυροδέματος παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5.



Σχήμα 4.5: Απόκριση της ηλεκτρικής αντίστασης τριών διαφορετικών ελεύθερων TBSA.

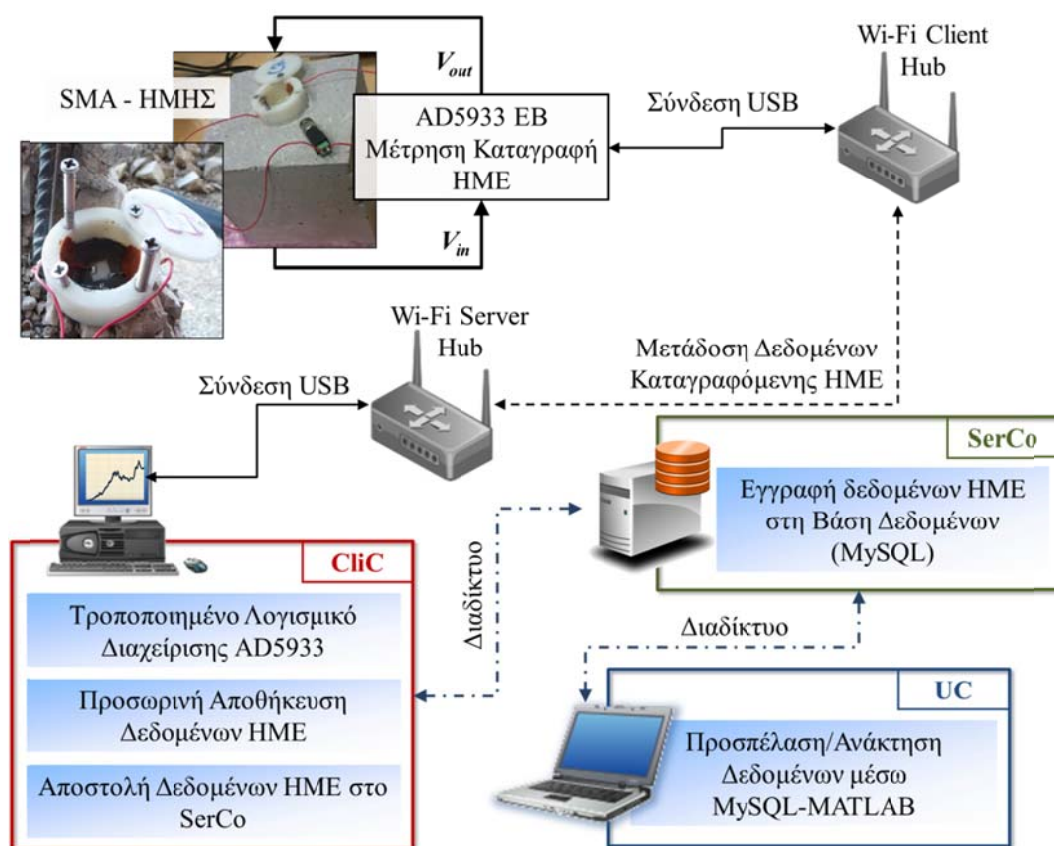
### 4.3. Περιγραφή Ολοκληρωμένου Ασύρματου Συστήματος Μέτρησης ΗΜΕ.

Τα «ευφυή» αδρανή (SMA), όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου, αποτελούν λειτουργικό στοιχείο ενός ολοκληρωμένου ασύρματου συστήματος ΜΚΕ δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα. Τμήμα του συγκεκριμένου συστήματος έχει παρουσιαστεί και δημοσιευτεί από τους Providakis and Liarakos (2011; 2012; 2014), με τη χρήση του ακρωνυμίου T-WiEYE (Teflon-based Wireless



integratEd monitoring sYstEm). Ο όρος Teflon στη συγκεκριμένη εφαρμογή αναφέρετε στο υλικό παρασκευής (PTFE, Poly-Tetra-Flouro-Ethylenium) του κελύφους του TBSA.

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται το διάγραμμα λειτουργιών του T-WiEYE. Τα «ευφυή» αδρανή (SMA) και το υπό παρακολούθηση δομικό στοιχείο σκυροδέματος διαμορφώνουν ένα Ηλεκτρο-Μηχανικό Σύστημα (ΗΜΗΣ), του οποίου η φασματική απόκριση της ΗΜΕ προσδιορίζεται με τη χρήση ενός χαμηλού κόστους ηλεκτρονικό κύκλωμα (Park et al., 2007; Park et al., 2008; Mascarenas et al., 2007; Xu, 2009). Το συγκεκριμένο ηλεκτρονικό κύκλωμα (Printed Circuit Board-PCB) είναι το AD5933 EB (Evaluation Board), το οποίο φέρει το ολοκληρωμένο κύκλωμα της Analog Devices, AD5933 (Analog Devices, 2005-2007a; 2005-2007b).



**Σχήμα 4.6:** Διάγραμμα λειτουργιών T-WiEYE (Liarakos and Providakis, 2013; Providakis and Liarakos, 2014).

Το AD5933 έχει την ικανότητα μέτρησης της ΗΜΕ ενός RLC συστήματος στο πεδίο της συχνότητας. Το AD5933 EB επικοινωνεί με έναν Η/Υ μέσω ενός ζεύγους ασύρματων συσκευών Wi-Fi της Gefen (Providakis and Liarakos, 2014), εκ των

οποίων η πρώτη συνδέεται απευθείας στο AD5933 EB (Client Hub) και η δεύτερη στη μονάδα του H/Y (Server Hub). Η σύνδεση και των δύο WiFi συσκευών γίνεται μέσω θυρών USB 2.

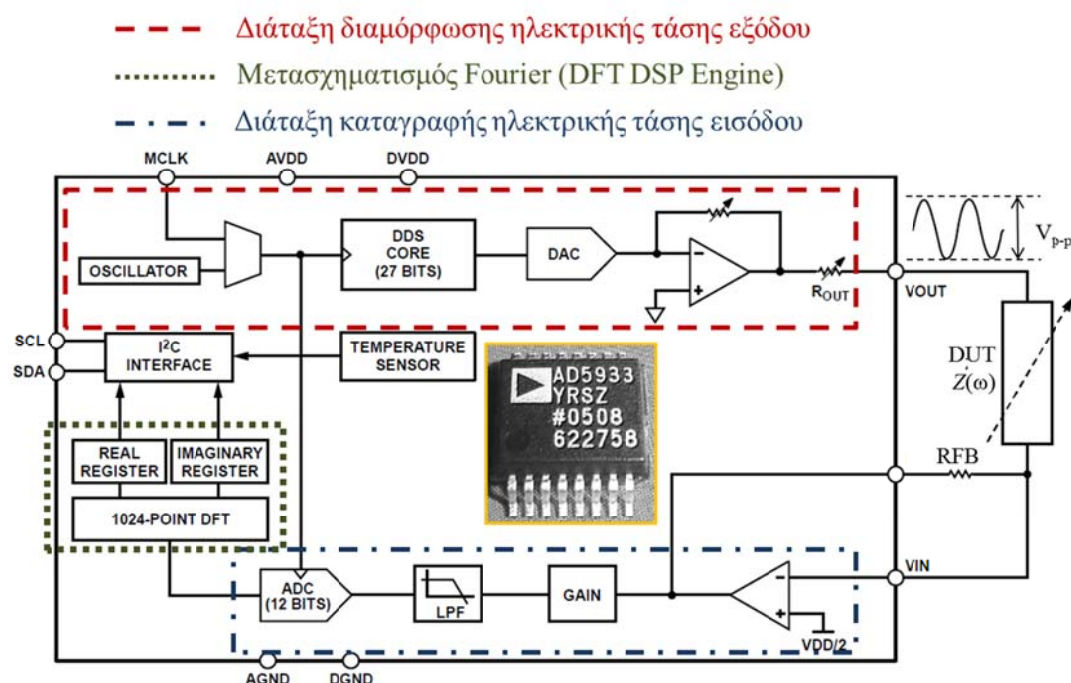
Ο H/Y, ο οποίος από εδώ και το εξής θα αναφέρεται ως CliC (Client Computer), αποτελεί τη μονάδα μέσω της οποίας πραγματοποιείται α) η παραμετροποίηση της καταγραφής της HME στο πεδίο της συχνότητας, β) η γενική διαχείριση των λειτουργιών του AD5933 EB, γ) η μεταφορά των δεδομένων της HME από τη μνήμη του AD5933 EB στον CliC, δ) η προσωρινή αποθήκευση τους και ε) η αποστολή των αποθηκευμένων δεδομένων της HME στον υπολογιστή διαχείρισης δεδομένων του συστήματος, SerCo (Server Computer), μέσω κάποιας τοπική σύνδεσης δικτύου (LAN) ή διαδικτύου (Internet). Στον SerCo βρίσκεται αποθηκευμένη μια βάση δεδομένων αναπτυγμένη σε MySQL στην οποία καταχωρούνται τα φάσματα απόκρισης της HME ως ξεχωριστές εγγραφές με βάση το χρόνο λήψης της κάθε μέτρησης. Από τη στιγμή που τα δεδομένα HME καταχωρηθούν στη βάση δεδομένων είναι πλέον προσπελάσιμα από οποιοδήποτε χρήστη (User Computer-UC) ο οποίος έχει α) σύνδεση στο διαδίκτυο και β) δικαίωμα πρόσβασης στα δεδομένα της βάσης. Η προσπέλαση των δεδομένων και η διαχείριση της βάσης επιτυγχάνεται γενικά με τη χρήση του πακέτου εργαλείων της MySQL, MySQL GUI Tools (MySQL, 2010b).

#### 4.3.1. Ολοκληρωμένο Κύκλωμα Μέτρησης HME, AD5933

Το AD5933 είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα, το οποίο έχει τη δυνατότητα μέτρησης της ηλεκτρικής εμπέδησης  $Z(\omega)$  ενός δυναμικού συστήματος RLC ή ενός οποιουδήποτε δυναμικού συστήματος με ηλεκτρική απόκριση, στο πεδίο της συχνότητας με τη χρήση του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (Discrete Fourier Transform-DFT), (Analog Devices, 2005-2007a; 2005-2007b; Mascarenas et al., 2007; Xu, 2009). Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το διάγραμμα λειτουργιών του AD5933 (Σχήμα 4.7), οι επιμέρους διατάξεις του μπορούν να διακριθούν σε τρεις ομάδες.

Η πρώτη διάταξη, η οποία περικλείεται από την κόκκινη διακεκομμένη γραμμή, ενσωματώνει τα ηλεκτρικά στοιχεία και τις συσκευές που εμπλέκονται στη δημιουργία ενός ημιτονοειδούς αναλογικού σήματος ηλεκτρικής τάσης εξόδου. Η τάση εξόδου του AD5933 είναι εκείνη που εξωθεί σε ηλεκτρική ταλάντωση το υπομελέτη ηλεκτρικό κύκλωμα ή συσκευή DUT (Device Under Test). Η διάταξη

διαμόρφωσης της ηλεκτρικής τάσης εξόδου OVC (Output Voltage Circuit) αποτελείται από έναν ηλεκτρικό ταλαντωτή (Electrical Oscillator), (Malvino and Bates, 2006), σε συνδυασμό με μια γεννήτρια ψηφιακών κυματομορφών DDS (Direct Digital Synthesizer), 27-bit (Analog Devices, 2005-2007a).



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα Λειτουργιών AD5933 (Analog Devices, 2005-2007a).

Το στοιχείο DDS έχει την δυνατότητα να μεταβάλλει τη συχνότητα της ημιτονοειδούς κυματομορφής αναφοράς που παράγει ο ηλεκτρικός ταλαντωτής, με την αλλαγή της φάσης του ψηφιακού σήματος (Analog Devices, 2008). Το ψηφιακό σήμα εξόδου του DDS μετατρέπεται σε αναλογικό μέσω ενός μετατροπέα DAC (Digital to Analog Converter) και το πλάτος του διαμορφώνεται κατάλληλα μέσω ενός ενισχυτή πριν εφαρμοστεί στην είσοδο της DUT. Η διάταξη OVC του AD5933, σύμφωνα με τις προδιαγραφές των κατασκευαστών, μπορεί να δώσει ηλεκτρικές τάσεις εξόδου με αθροιστικό πλάτος  $V_{out}^{P-P}$  (Output Voltage Peak to Peak), το οποίο εμπίπτει σε μια από τις τέσσερις κατηγορίες του πίνακα 4.1 (Analog Devices, 2005-2007b).

Η εσωτερική ηλεκτρική αντίσταση του AD5933  $R_{out}$  (Σχήμα 4.7), η οποία ρυθμίζει το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει την DUT, εξαρτάται από το μέγεθος του αθροιστικού πλάτους της τάσης εξόδου του OVC και αθροίζεται στο πραγματικό μέρος της  $Z(\omega)$  της DUT. Στη περίπτωση που στη θέση της DUT τοποθετηθεί ένα Ηλεκτρο-Μηχανικό Σύστημα Σκυροδέματος-PZT, του οποίου το πραγματικό μέρος

της ηλεκτρικής εμπέδησης κυμαίνεται μεταξύ 20 και 300 Ohm (Providakis, Liarakos and Kamprianakis, 2013), η τάση εξόδου που επιλέγεται να εφαρμοστεί για τη μελέτη του εμπίπτει στη πρώτη κατηγορία του Πίνακα 4.1, με  $V_{out}^{p-p}=2V$  και  $R_{out}=200\Omega$ . Γενικώς ανάλογα με το εκτιμώμενο μέγεθος του πραγματικού μέρους της HME της DUT, επιλέγεται και η  $V_{out}^{p-p}$  έτσι ώστε η  $R_{out}$  να μην είναι πολύ μεγαλύτερη από το μέγεθος που θα μετρηθεί.

**Πίνακας 4.1:** Εσωτερική ηλεκτρική αντίσταση AD5933 ανάλογα με την τάση εξόδου του OVC (Analog Devices, 2005-2007b).

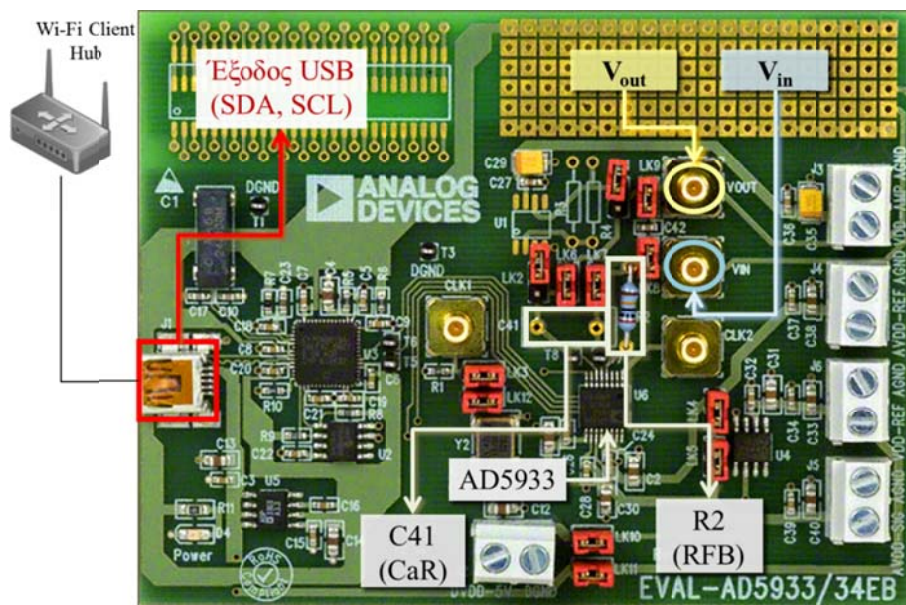
Εύρος Τάσης Εξόδου, $R_{out}$	$V_{out}^{p-p}(V)$	Εσωτερική Αντίσταση AD5933, $R_{out}$ (Ohm)
1	2	200
2	1	2400
3	0.4	1000
4	0.2	600

Η δεύτερη διάταξη, η οποία περικλείεται από τη μπλε διακεκομμένη-εστιγμένη (Dash-Dot) γραμμή, ενσωματώνει τα ηλεκτρικά στοιχεία και τις συσκευές που εμπλέκονται στη καταγραφή του αναλογικού ρεύματος εξόδου ή απόκρισης της DUT. Το ρεύμα απόκρισης μετατρέπεται σε αναλογική ηλεκτρική τάση (ηλεκτρική τάση απόκρισης) μέσω ενός μετατροπέα ρεύματος-τάσης, ο οποίος διαμορφώνεται από έναν τελεστικό ενισχυτή και μια αντίσταση ανατροφοδότησης RFB (Feedback Resistor). Στη συνέχεια οι τιμές του αναλογικού σήματος τάσης εξομαλύνονται από τον θόρυβο μέσω ενός φίλτρου LPF (Low-Pass Filter) και τέλος με τη χρήση ενός μετατροπέα ADC (Analog to Digital Converter) 12-bit, μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα. Η τρίτη διάταξη η οποία περικλείεται από την εστιγμένη γραμμή (Σχήμα 4.7), υλοποιεί τον διακριτό μετασχηματισμό Fourier (DFT) του ψηφιακού σήματος της ηλεκτρικής τάσης απόκρισης. Το AD5933 έχει τη δυνατότητα εκτέλεσης DFT  $1024=2^{10}$  (10 bit) σημείων (Analog Devices, 2005-2007a; 2005-2007b).

Επιστρέφοντας τώρα στο T-WiEYE, το AD5933 όπως έχει ήδη γραφεί, εμπλέκεται στη λειτουργικότητα του συγκεκριμένου συστήματος μέσω ενός PCB, το AD5933 EB (Σχήμα 4.8). Το συγκεκριμένο σύστημα προσφέρει τη δυνατότητα ολοκληρωμένης καταγραφής της  $Z(\omega)$  μιας συσκευής υπό δοκιμή (Device Under Test-DUT), με τη σάρωση συγκριμένου εύρους συχνοτήτων. Σύμφωνα με τις



προδιαγραφές που δίνει η Analog Devices (Analog Devices, 2005-2007b), το AD5933 EB έχει τη δυνατότητα μέτρησης της  $Z(\omega)$  με ακρίβεια 99.5% για ένα εύρος συχνοτήτων μεταξύ 10 και 100 kHz.



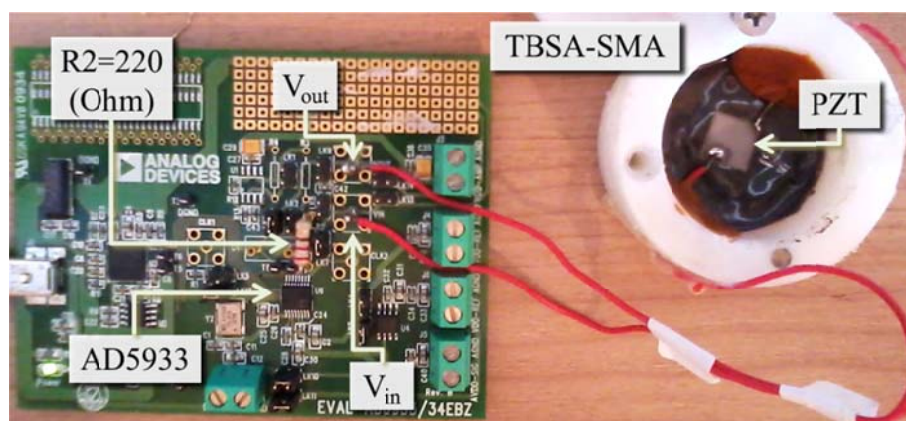
**Σχήμα 4.8:** Τυπωμένο Ηλεκτρονικό Κύκλωμα-PCB AD5933 EB.

Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική του AD5933 EB ενώ επισημαίνονται τα τμήματα εκείνα του PCB τα οποία διαμορφώνει κατάλληλα ο χρήστης για την μέτρηση της  $Z(\omega)$  μιας DUT. Πρώτα απ' όλα διακρίνονται οι ακροδέκτες (ακίδες ή καρφίδες, Pins) με τις ενδείξεις VIN και VOUT, στις οποίες συνδέονται τα ηλεκτρόδια της DUT. Στους ακροδέκτες με την ένδειξη R2 προσαρμόζεται η ηλεκτρική αντίσταση ανατροφοδότησης, RFB (Σχήμα 4.8). Επειδή από το μέγεθος της RFB εξαρτάται η ηλεκτρική τάση εισόδου του ADC, είναι αναγκαίο η τιμή της να επιλεγεί κατάλληλα έτσι ώστε να συμβαδίζει τουλάχιστον με την τάξη μεγέθους της μετρούμενης  $Z(\omega)$ . Για τον προσδιορισμό της  $Z(\omega)$  είναι απαραίτητο να υπολογιστεί ο παράγοντας κέρδους *gain*, του AD5933, ο οποίος δίνεται από τη σχέση (Analog Devices, 2005-2007a; 2005-2007b; Brennan, 2006; 2007; Riordan, 2007):

$$Gain = \frac{1}{Z(\omega) \times FV(\omega)} \quad (4.1)$$

όπου  $FV(\omega)$  το πλάτος (Magnitude) του DFT.

Το κέρδος υπολογίζεται κάθε φορά πριν την έναρξη της καταγραφής της απόκρισης μιας DUT, με τη χρήση μιας αντίστασης βαθμονόμησης CaR (Calibration Resistor). Η CaR προσαρμόζεται στους ακροδέκτες του AD5933 EB με την ένδειξη C41 (Σχήμα 4.8). Το μέγεθος της CaR, όπως και της RFB, επιλέγεται κατάλληλα ανάλογα με το μέγεθος μετρούμενης  $Z(\omega)$ . Επιπλέον στο μέγεθος της CaR θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η  $R_{out}$  η οποία αθροίζεται στη τιμή του αντιστάτη βαθμονόμησης. Το AD5933 EB φέρει ενσωματωμένο ένα μικροελεγκτή USB 2.0 ο οποίος επιτρέπει η μεταφορά των αποθηκευμένων δεδομένων από τη μνήμη του PCB στον υπολογιστή διαχείρισης. Τέλος το σύνολο των διαδικασιών ελέγχου του ηλεκτρονικού κυκλώματος πραγματοποιείται μέσω ενός λογισμικού ανοικτού κώδικα, ανεπτυγμένου σε γλώσσα VB (Visual Basic), το οποίο συνοδεύει το AD5933 EB.

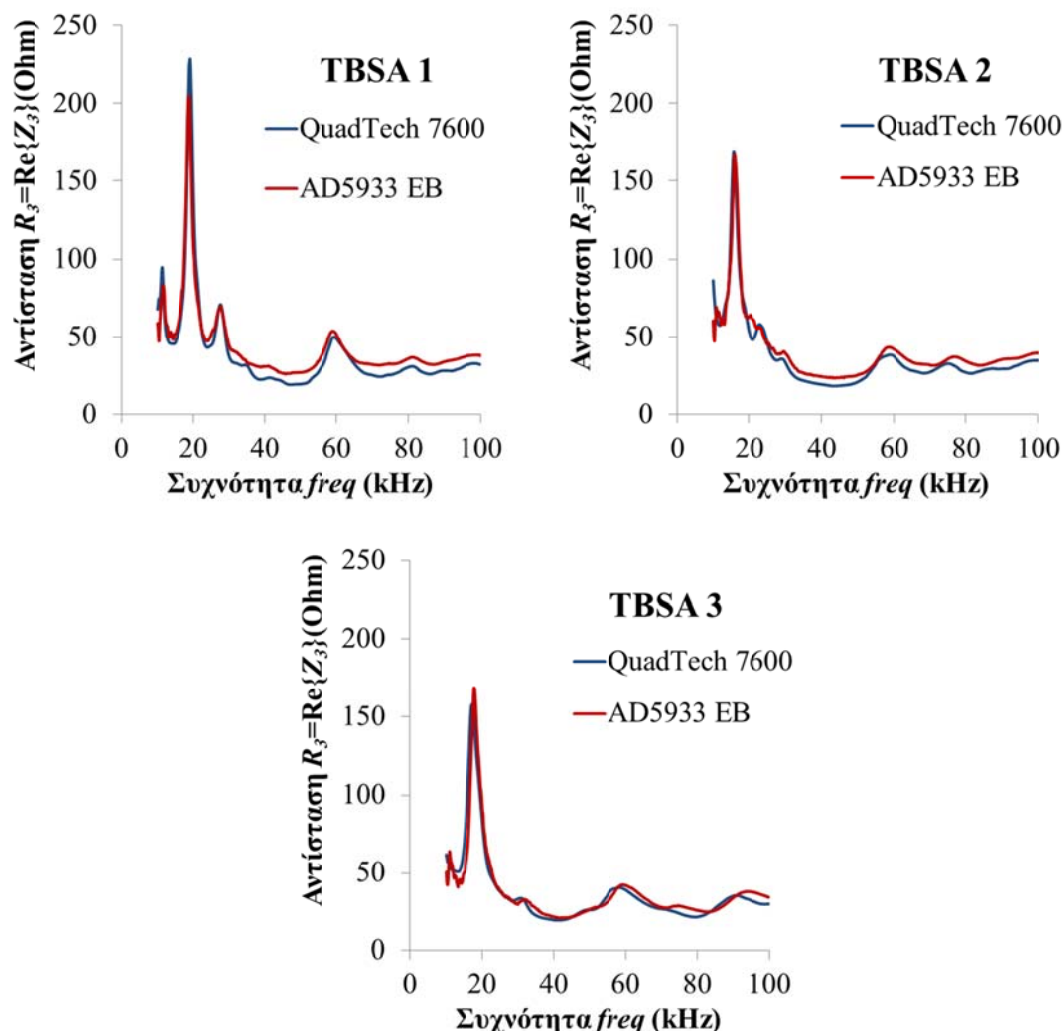


Σχήμα 4.9: Καταγραφή HME ελεύθερου μηχανικά TBSA με το AD5933 EB.

Προκειμένου το AD5933 EB να ενσωματωθεί στο T-WiEYE έγιναν κάποιες εργασίες βαθμονόμησης. Η πρώτη μέριμνα ήταν η επιλογή των παραμέτρων του συστήματος (RFB, CaR,  $V_{out}^{p-p}$ ) με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να είναι εφικτή η καταγραφή της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (HME) ενός TBSA ενσωματωμένου στη μάζα του σκυροδέματος. Δεδομένου ότι οι τιμές της HME του ελεύθερου μηχανικά TBSA είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του εμφυτευμένου (βλ. Ενότητα 2.4), ως DUT Βαθμονόμησης του συστήματος επιλέχθηκε το μηχανικά ελεύθερο TBSA έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι είναι δυνατή η αξιόπιστη καταγραφή της HME για κάθε δυνατό εύρος τιμών.

Η απόκριση της HME τριών πρότυπων TBSA αρχικά καταγράφηκε με το ολοκληρωμένο σύστημα ανάλυσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων QuadTech 7600, σε ένα εύρος συχνοτήτων 10-100 kHz (Σχήμα 4.5). Τα συγκεκριμένα φάσματα αποτέλεσαν

τα φάσματα αναφοράς ή βαθμονόμησης του AD5933 EB. Από την τάξη μεγέθους του πραγματικού μέρους της HME  $R_3$  (Αντίσταση), επιλέχθηκε αθροιστικό πλάτος τάσης εξόδου ίσο με 2 V<sub>p-p</sub>.

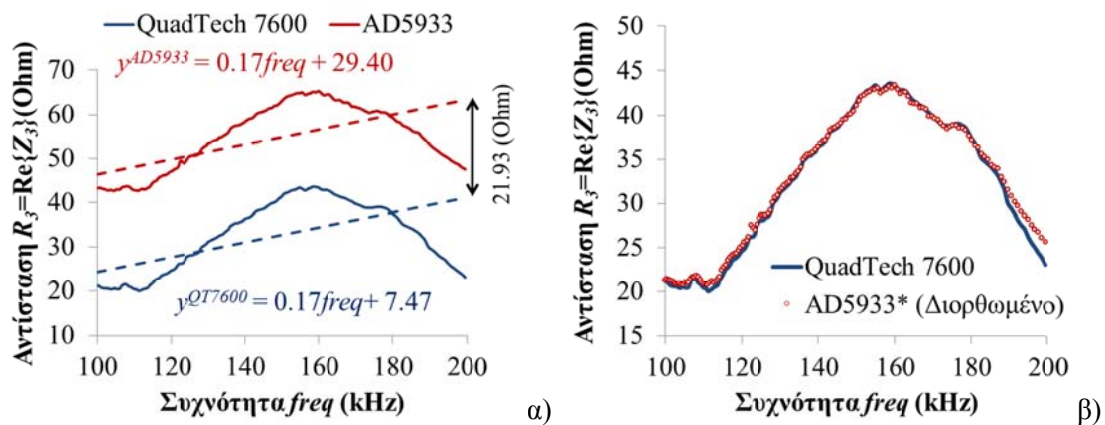


**Σχήμα 4.10:** Αξιολόγηση του AD5933 EB με τον αναλυτή ηλεκτρικής εμπέδησης QuadTech 7600 και την παράλληλη καταγραφή της HME για τρία διαφορετικά TBSA (Σχήμα 4.5).

Στη συνέχεια καταγράφηκαν τα φάσματα απόκρισης της HME με το AD5933 EB, δοκιμάζοντας αρκετούς συνδυασμούς αντιστατών RFB (R2) και CaR (C41), με μεγέθη που κυμαίνονταν από 20 έως 500 Ohm (Σχήμα 4.9). Με γνώμονα τη καλύτερη δυνατή σύγκλιση των φασμάτων που καταγράφηκαν από το AD5933 EB, με τα φάσματα αναφοράς (Σχήμα 4.10), επιλέχθηκαν οι αντιστάτες **RFB=220 ohm** και **CaR=267 ohm**. Σημειώνεται ότι στη τιμή του CaR περιέχεται και η τιμή της  $R_{out}$ , η οποία για  $V_{out}^{p-p}=2$  V είναι ίση με 200 Ohm (Πίνακας 4.1). Η τιμή της  $R_{out}$  κάθε φορά αφαιρείται από τις τιμές του πραγματικού μέρους της HME (Riordan, 2007).



Επειδή οι εφαρμογές των PZT στο ΜΚΕ σκυροδέματος αρκετές φορές απαιτούν τη σάρωση συχνοτήτων άνω των 100 kHz κρίθηκε αναγκαίο να διερευνηθεί κατά πόσο το AD5933 ΕΒ συμπεριφέρεται αξιόπιστα στο εύρος συχνοτήτων 100-200 kHz. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ως Ηλεκτρο-Μηχανικό Σύστημα δοκιμής ένα κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος ηλικίας 7 ημερών, στο έχει ενσωματωθεί ένα ΤΒSΑ. Η φασματική απόκριση της ΗΜΕ καταγράφηκε αρχικά με τον αναλυτή ηλεκτρικής εμπέδησης QuadTech 7600 ( $QT7600$ ) σε εύρος συχνοτήτων 100-200 kHz (Φάσμα Αναφοράς). Στη συνέχεια καταγράφηκε η ΗΜΕ στο ίδιο εύρος συχνοτήτων με το AD5933 ΕΒ και διατηρώντας τις παραμέτρους του συστήματος που προσδιορίστηκαν παραπάνω ( $R_{FB}=220\text{ Ohm}$ ,  $V_{out}^{P-P}=2\text{ V}$  και  $CaR=267\text{ Ohm}$ ).



**Σχήμα 4.11:** Βαθμονόμηση συστήματος για μέτρηση φασμάτων ΗΜΕ σε εύρη συχνοτήτων μεγαλύτερα των 100kHz.

Από τη συνδυασμένη απεικόνιση των φασμάτων του πραγματικού μέρους της ΗΜΕ (Σχήμα 4.11.α) διαπιστώθηκε ότι μπορεί το μέγεθος της μετρούμενης εμπέδησης από το AD5933 ΕΒ να διαφέρει από το φάσμα αναφοράς, ωστόσο η μορφή του φάσματος παραμένει αναλλοίωτη, όπως αποδεικνύουν και οι κλίσεις των ευθειών παλινδρόμησης του κάθε φάσματος. Έτσι αφαιρώντας από το φάσμα του AD5933 ΕΒ μια ποσότητα η οποία προκύπτει από την αφαίρεση των μηδενικών όρων των ευθειών παρεμβολής  $\left(y^{AD5933}\Big|_{freq=0} - y^{QT7600}\Big|_{freq=0} = 29.40 - 7.47 = 21.93\text{ Ohm}\right)$ , το τελευταίο ταυτίζεται με το φάσμα αναφοράς που δίδει ο QuadTech 7600 (Σχήμα 4.11.β). Με βάση τη παρατήρηση αυτή συμπεραίνεται ότι εφόσον α) η μέθοδος ΗΜΕ αποτελεί μια μέθοδο συγκριτικής ανάλυσης φασμάτων απόκρισης (βλ. Ενότητα 3.1) και β) η μετάβαση από τα τις τιμές του AD5933 στις πραγματικές μπορεί να

πραγματοποιηθεί με απλές γραμμικές πράξεις, το AD5933 μπορεί να εφαρμοστεί αξιόπιστα και στη καταγραφή φασμάτων HME σε εύρη συχνοτήτων 100-200 kHz.

#### 4.3.2. Ανάπτυξη Βάσης Δεδομένων HME

Μια διαδικασία ΜΚΕ με τη μέθοδο της HME συνήθως συνοδεύεται από έναν μεγάλο αριθμό δεδομένων καταγραφής. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στη περίπτωση που το αντικείμενο του ΜΚΕ είναι η παρακολούθηση της ενυδάτωσης **ενός και μονό** δοκιμίου σκυροδέματος, τις πρώτες 48 ώρες λαμβάνονται τα φάσματα απόκρισης της HME κάθε μια ώρα, ξεκινώντας από τις 3 ώρες μετά τη σκυροδέτηση (46 φάσματα). Λαμβάνοντας τώρα υπόψη ότι το κάθε φάσμα απόκρισης καταγράφεται σε ένα ενδεικτικό διάστημα συχνοτήτων 50-100 kHz, με βήμα συχνότητας 250 Hz και ότι για τη πλήρη περιγραφή του φάσματος απαιτείται η μέτρηση τουλάχιστον του πλάτους και της φάσης της HME, διαπιστώνεται ότι κάθε φάσμα αποτελείται από ένα σύνολο 400 τιμών (200 τιμές για το πλάτος και άλλες τόσες για τη φάση). Επιπλέον κάθε σύνολο δεδομένων που περιγράφει ένα συγκριμένο φάσμα είναι αναγκαίο να λαμβάνει μια μοναδική ταυτότητα η οποία θα υποδηλώνει τη χρονική στιγμή που λήφθηκε. Από το παραπάνω συντηρητικό παράδειγμα συνεπάγεται ότι μόνο οι πρώτες ώρες παρακολούθησης **ενός και μόνο TBSA ή άλλου αισθητήρα** απαιτεί τη λήψη,  $(45 \text{ φάσματα}) \times (400 \text{ τιμές/φάσμα}) = 18000 \text{ μετρήσεων}$ .

Ο αριθμός των μετρήσεων αυξάνεται δραματικά εάν η εφαρμογή περιλαμβάνει τη μακροχρόνια και λεπτομερέστερη παρακολούθηση ενός δομικού συστήματος με τη μέθοδο της HME. Επιπλέον μαζί με τον όγκο των δεδομένων αυξάνεται και η πολυπλοκότητα των διαδικασιών ταξινόμησης των φασμάτων. Οι παραπάνω απαιτήσεις οι οποίες διαπιστώθηκαν κατά την εφαρμογή της αρχικής μορφή του T-WiEYE, οδήγησαν στη διατύπωση δύο θεμελιωδών αναγκών που το συγκεκριμένο σύστημα θα πρέπει να θεραπεύει. Η πρώτη ανάγκη εστιάζεται στην αυτοματοποίηση της διαδικασίας μέτρησης των φασμάτων της HME ανά τακτά χρονικά διαστήματα τα οποία θα ελέγχονται από το χρήστη και η δεύτερη στη συστηματική (ταξινομημένη) καταχώριση σε διακριτές μορφές των καταγραφών της HME σε ένα ψηφιακό χώρο, ο οποίος θα δίνει τη δυνατότητα της σύνθετης αναζήτησης και ανάκτησης τους.

Η αυτοματοποίηση της διαδικασίας λήψης μετρήσεων υλοποιήθηκε με την προσθήκη ενός εργαλείου χρονικού ελέγχου (Timer) στο λογισμικού διαχείρισης του AD5933 EB, του οποίου ο κώδικας όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι ανοικτός (Analog

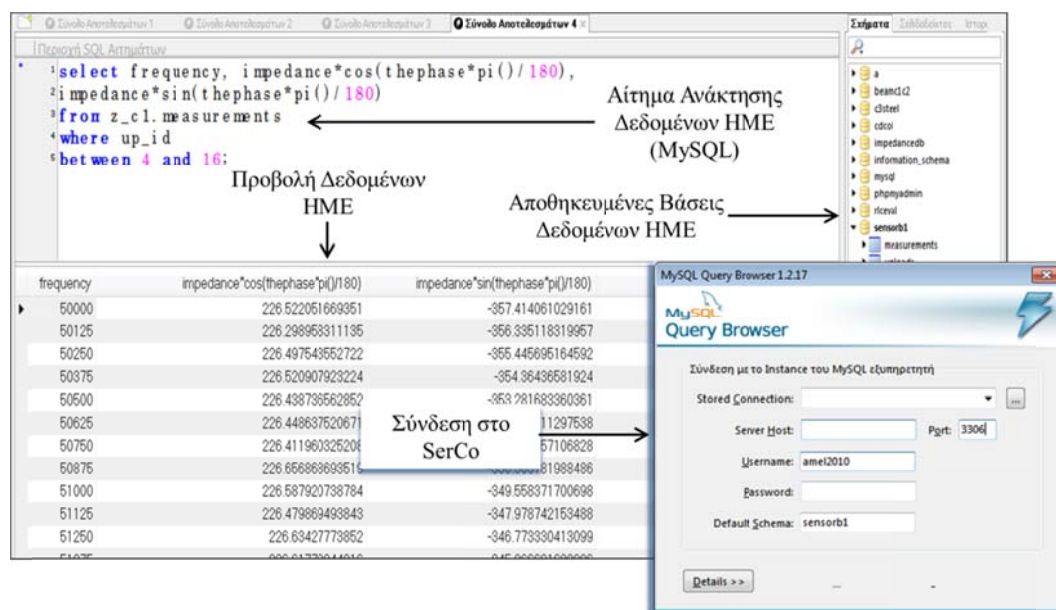
Devices, 2005-2007b). Το συγκεκριμένο εργαλείο δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να ορίζει μια διαδικασία συνεχούς καταγραφής των φασμάτων απόκρισης της HME ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Σε κάθε κύκλο μετρήσεων οι τιμές εξόδου του AD5933 EB αποθηκεύονται προσωρινά σε ένα αρχείο .csv, προκειμένου στη συνέχεια να καταχωρηθούν σε μια βάση δεδομένων. Το τροποποιημένο λογισμικό διαχείρισης βρίσκεται εγκατεστημένο στον CliC ο οποίος επικοινωνεί με το AD5933 EB μέσω ενός ζεύγους συσκευών Wi-Fi Client-Server (Σχήμα 4.6).

Η συστηματοποίηση των καταγραφόμενων φασμάτων απόκρισης της HME επιτυγχάνεται με την καταχώριση τους σε μια βάση δεδομένων η οποία βρίσκεται αποθηκευμένη στο SerCo (Σχήμα 4.6). Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον MySQL με τη χρήση του ελεύθερου λογισμικού MySQL GUI Tools 5.0 (MySQL, 2010b). Οι λειτουργίες εξυπηρετητή του SerCo διαμορφώθηκαν με το επίσης ελεύθερο λογισμικό MySQL Server 5 (MySQL, 2010a).

Η βάση δεδομένων αποτελείται από ένα σύνολο οντοτήτων (Object), τα σχήματα (Schemas), καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε μια μοναδική αυτό-αισθητήρια συσκευή SMA. Κάθε σχήμα αποτελείται από δύο πίνακες (Tables) εκ των οποίων τα πεδία του πρώτου (Upload Table) σχετίζονται με τη ταυτοποίηση της εγγραφής-καταχώρισης του φάσματος HME και του δεύτερου (Measurements Table), με την αναλυτική περιγραφή του κάθε φάσματος (συχνότητα, πλάτος HME, φάση, κα). Στον πρώτο πίνακα η ταυτοποίηση του κάθε φάσματος υλοποιείται με τη καταχώριση ενός μοναδικού κωδικού *id*, ο οποίος συσχετίζεται με την ώρα και την ημερομηνία της εγγραφής. Το πεδίο *id* αποτελεί το πρωτεύον κλειδί (Primary Key) του πίνακα Upload. Ο ίδιος κωδικός καταχωρείται ως ξένο κλειδί (Foreign Key) σε ένα ξεχωριστό πεδίο στον πίνακα των τιμών του φάσματος, Measurements, με ονομασία πεδίου *up\_id*, συσχετίζοντας τις τιμές του φάσματος με την ταυτότητα του.

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό τα καταγραφόμενα φάσματα απόκρισης να ταξινομούνται διακριτά με βάση τον κωδικό *up\_id* και φυσικά να μπορούν να ανακτηθούν με την υποβολή στο SerCo κατάλληλων αιτημάτων (Queries). Η διαδικασία καταχώρισης των προσωρινά αποθηκευμένων τιμών του κάθε φάσματος HME από το αρχείο .csv στη βάση δεδομένων (SerCo), πραγματοποιείται με την εκτέλεση ενός αρχείου κώδικα java (JavaScript, .jar), το οποίο βρίσκεται αποθηκευμένο στον CliC και καλείται μέσω του προγράμματος διαχείρισης του AD5933 EB, σε κάθε κύκλο μέτρησης.

Η προσπέλαση και ανάκτηση των δεδομένων της HME μπορεί να επιτευχθεί μέσω της πλατφόρμας MySQL Query Browser του πακέτου MySQL GUI Tools 5.0, με την υποβολή κατάλληλων ερωτημάτων στη βάση (Σχήμα 4.12). Η βάση δεδομένων είναι προσπελάσιμη από οποιοσδήποτε εξωτερικό χρήστη (Σχήμα 4.6) ο οποίος διαθέτει, α) εγκατεστημένο το πακέτο MySQL GUI Tools 5.0, β) σύνδεση στο διαδίκτυο ή τοπική σύνδεση με το SerCo και γ) πιστοποιημένα από το διαχειριστή της βάσης δικαιώματα χρήσης.



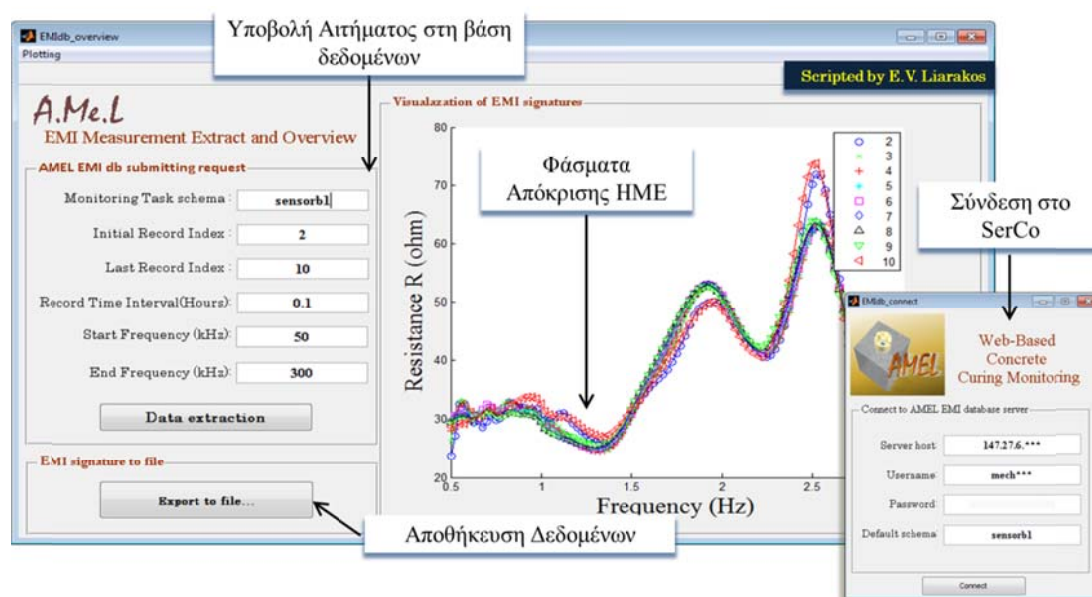
Σχήμα 4.12: Διαχείριση βάσεων δεδομένων με τη χρήση των εργαλείων της MySQL, MySQL GUI Tools.

#### 4.3.3. Διαχείριση δεδομένων με σύνδεση των εφαρμογών MATLAB και MySQL

Στο Κεφάλαιο 3 αναπτύχθηκαν εκτενώς οι αρχές του ΜΚΕ με τη μέθοδο της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης και οι τεχνικές αξιολόγησης της δομικής ακεραιότητας ενός δομικού συστήματος με τη συγκριτική ανάλυση των φασμάτων απόκρισης. Από τη περιγραφή των συγκεκριμένων τεχνικών διαπιστώνεται ότι η ολική αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας ενός υπό μελέτη δομικού συστήματος, απαιτεί την εκτέλεση μιας σειράς υπολογισμών με τις τιμές των φασμάτων απόκρισης. Οι συγκεκριμένες υπολογιστικές διαδικασίες, είτε είναι σχετικά απλές, στη περίπτωση των δεικτών βλάβης, είτε εμφανίζουν κάποιες ιδιαίτερες, αλλά όχι εξεζητημένες, προγραμματιστικές απαιτήσεις (Μέθοδοι SCoRe, MIS. βλ. Ενότητες

3.3.3 και 3.4). Για το λόγο αυτό στα πλαίσια ολοκλήρωσης του συστήματος T-WiEYE αναπτύχθηκαν διάφορες εφαρμογές σε περιβάλλον MATLAB οι οποίες επιτρέπουν:

- τη σύνδεση ενός χρήστη στο SerCo (Υπολογιστής με λειτουργία εξυπηρετητή, Σχήμα 4.6),
- την υποβολή τυποποιημένων ερωτημάτων στη βάση δεδομένων,
- την προσπέλαση, ανάκτηση και ομαδοποίηση των δεδομένων της HME και
- την άμεση εκτέλεση των υπολογιστικών εργασιών που απαιτούνται για την αξιολόγηση των καταγραφών κάποιου κόμβου παρακολούθησης.



**Σχήμα 4.13:** Ανάπτυξη γραφικού περιβάλλοντος (GUI: GraphicUsersInterface) για τη διαχείριση βάσεων δεδομένων μέσω MATLAB(ProvidakisandLiarakos, 2014).

Υπενθυμίζεται για άλλη μια φορά ότι κάθε εγκατεστημένο SMA αποτελεί έναν κόμβο παρακολούθησης του οποίου τα δεδομένα αποθηκεύονται σε ένα ξεχωριστό σχήμα της βάσης. Η επικοινωνία του περιβάλλοντος του MATLAB με τη βάση δεδομένων στηρίχθηκε σε ένα αρχείο ανοικτού κώδικα C++ το οποίο διατίθεται από το δημιουργό του ελεύθερα μέσω διαδικτύου (Almgren, 2005), σύμφωνα με την άδεια χρήσης BSD (Berkeley Software Distribution).



# Κεφάλαιο 5

## Εφαρμογές Πιεζοηλεκτρικών «Ευφυών» Αδρανών στον ΜΚΕ και την Ανίχνευση Βλαβών Σκυροδέματος

### 5.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αντιπροσωπευτικότερες εφαρμογές των «ευφυών» αδρανών (SMA) και πιο συγκριμένα του TBSA (Teflon Based Sensor-Actuator), στο μη καταστροφικό έλεγχο (ΜΚΕ) εργαστηριακής κλίμακας δομικών στοιχείων σκυροδέματος, με τη μέθοδο της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (HME) (Providakis and Liarakos, 2014; Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013). Οι συγκριμένες εφαρμογές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής του Πολυτεχνείου Κρήτης, στο πλαίσιο εκπόνησης της παρούσας διατριβής. Επικεντρώνονται σε τρία βασικά αντικείμενα διερεύνησης τα οποία είναι

- α) η παρακολούθηση της διεργασίας ενυδάτωσης του πολύ πρώιμου σκυροδέματος ηλικίας μέχρι 48 ωρών,
- β) η παρακολούθηση της διαδικασίας ανάπτυξης της δυσκαμψίας του πρώιμου σκυροδέματος ηλικίας μεταξύ 2 και 28 ημερών (48 και 672 ώρες αντίστοιχα) και
- γ) η παρακολούθηση της εξέλιξης μιας μηχανικής βλάβης η οποία εκδηλώνεται με τη δημιουργία και την επέκταση ενός δικτύου ρωγμών.



Σε όλες τις εφαρμογές η καταγραφή των φασμάτων απόκρισης της ΗΜΕ πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του συστήματος T-WiEYE (βλ. Ενότητα 4.3). Επιπλέον το σύνολο της υπολογιστικής μετά-επεξεργασίας των δεδομένων ΗΜΕ υλοποιήθηκε με βάση τη διεπαφή του μαθηματικού πακέτου MATLAB και του περιβάλλοντος διαχείρισης της βάσης, MySQL.

## 5.2. Παρακολούθηση της ενυδάτωσης και της ανάπτυξης δυσκαμψίας του πρώιμου σκυροδέματος

Τα δομικά στοιχεία τα οποία αποτέλεσαν το αντικείμενο διερεύνησης της εφαρμογής των SMA στην παρακολούθηση των διεργασιών ενυδάτωσης και ανάπτυξης της δυσκαμψίας του πρώιμου σκυροδέματος, είναι κυβικά δοκίμια ακμής 150mm, όμοια με εκείνα που χρησιμοποιούνται στις δοκιμές μοναξονικής θλίψης. Για τους σκοπούς της διερεύνησης παρασκευάστηκαν πάνω από 12 κυβικά δοκίμια σκυροδέματος στο καθένα από τα οποία εμφυτεύτηκε ένα SMA-TBSA (βλ. Ενότητα 4.2). Σε όλες τις περιπτώσεις τα TBSA τοποθετήθηκαν στη μάζα του σκυροδέματος κατά τη παρασκευή των δοκιμίων και η καταγραφή των φασμάτων ΗΜΕ ξεκίνησε τρεις ώρες μετά τη σκυροδέτηση (Σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1: Παρασκευή δοκιμίων σκυροδέματος.

Η σύσταση κατά βάρος του σκυροδέματος είναι  $C:W:FA:MA:CA=1:0.65:1.77:1.45:2.74$  όπου C:Τσιμέντο (Cement), W:Νερό (Water), FA:Άμμος (Fine Aggregate,  $d_g < 2.5\text{mm}$ ), MA: Γαρμπίλι (Middle size Aggregate,  $2.5\text{mm} < d_g < 12.5\text{mm}$ ), CA: Χαλίκι Χονδρό (Coarse Aggregate,  $16\text{mm} < d_g < 37.5\text{mm}$ ) και  $d_g$  το μέγεθος ανοίγματος της βροχίδας των κοσκίνων

ASTME11 (Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013; Προβιδάκης, 2011). Ο μέγιστος κόκκος των αδρανών υλικών είναι  $d_g^{max}=25 \text{ mm}$  (1'') και προσδιορίστηκε εργαστηριακά με κοκκομετρική ανάλυση δειγμάτων που λήφθηκαν από τους σάκους των αδρανών. Ο τύπος του τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε είναι TITAN CEM II/A-M 42.5 N και η ποσότητα κατ' όγκο που λήφθηκε υπόψη,  $310 \text{ kg/m}^3$  (Κατηγορία σκυροδέματος C20/25).

### 5.2.1. Παρακολούθηση της αναπτυσσόμενης αντοχής με δοκιμές αξονικής θλίψης

Πριν από την έναρξη των πειραμάτων παρακολούθησης του πρώιμου σκυροδέματος με τη μέθοδο της HME, πραγματοποιήθηκε μια διερεύνηση του φαινομένου με την εφαρμογή καταστρεπτικών μεθόδων. Η διαδικασία καταστρεπτικού ελέγχου υλοποιήθηκε με τη δοκιμή σε μοναξονική θλίψη κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος (ακμής 150mm) διαφορετικής ηλικίας.

Πιο συγκεκριμένα παρασκευάστηκαν τρεις σειρές κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος C20/25, οι οποίες σκυροδετήθηκαν ξεχωριστά και κάθε μια από αυτές αποτελούνταν από 8 κυβικά δοκίμια. Η σύσταση του σκυροδέματος για όλες τις σειρές δοκιμίων (Concrete Series-CS) είναι εκείνη που περιγράφηκε προηγουμένως και χρησιμοποιήθηκε και σε επόμενο στάδιο για τη παρασκευή των δοκιμίων που μελετήθηκαν με το T-WiEYE. Μετά τη σκυροδέτηση της κάθε σειράς, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε δεξαμενές νερού για την επαρκή ενυδάτωση του τσιμέντου. Τα δοκίμια της κάθε σειράς υποβλήθηκαν σε αξονική θλιπτική καταπόνηση σε διαφορετικές χρονικές στιγμές από τη σκυροδέτησή τους, για τον προσδιορισμό της αντίστοιχης αντοχής,  $f_c$ . Με τον τρόπο αυτό επιτεύχθηκε η συσχέτιση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος με την ηλικία του. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

Στα πειραματικά δεδομένα των δοκιμών αξονικής θλίψης προσαρμόστηκε για κάθε σειρά μελέτης η συνάρτηση συσχέτισης της μέσης θλιπτικής αντοχής  $f_{cm}$  με την ηλικία του σκυροδέματος (Σχήμα 5.2), η οποία προτείνεται από τον Ευρωκώδικα 2-EC2 και περιγράφεται από την εξίσωση (Bamforth et al., 2008):

$$f_{cm}(t) = f_{cm}^{28} \exp \left\{ cem \left( 1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right\} \quad (5.1)$$

όπου  $f_{cm}^{28}$  (MPa) η μέση θλιπτική αντοχή 28 ημέρες μετά τη σκυροδέτηση,  $cem$  ένας συντελεστής ο οποίος εξαρτάται από την κατηγορία του τσιμέντου (R:0.20, N:0.25, S:0.38) και  $t$  (>24) η ηλικία του σκυροδέματος σε ημέρες.

**Πίνακας 5.1:** Αποτελέσματα δοκιμών αξονικής θλίψης.

Ηλικία Σκυροδέματος (Ημέρες)	Ηλικία Σκυροδέματος (Ωρες)	Θλιπτική Αντοχή δοκιμών σκυροδέματος $f_c$ (MPa)		
		CS1	CS2	CS3
1	24	8.08	7.52	8.16
2	48	13.12	13.37	13.86
3	72	17.08	14.31	17.25
5	120	21.14	17.12	22.23
7	168	22.23	20.40	25.56
14	336	28.02	26.64	29.41
20	480	29.99	28.70	30.93
28	672	32.78	30.45	33.63

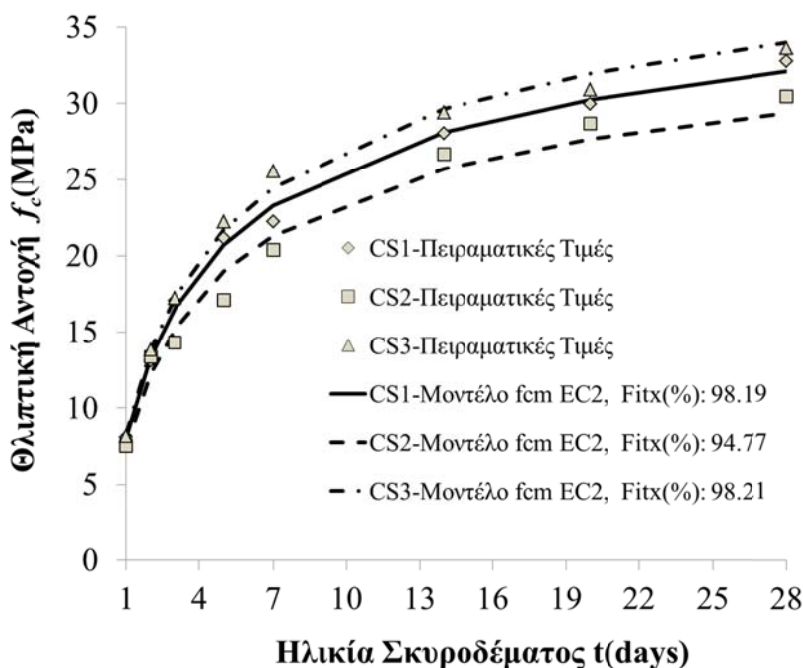
Οι παράμετροι της Εξίσωσης (5.1) υπολογίστηκαν από τα πειραματικά δεδομένα της θλίψης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και τη χρήση της γραμμικοποιημένης έκφρασης της εξίσωσης (5.1):

$$y = Ax + B \quad (5.2)$$

όπου  $y = \ln\{f_{cm}(t)\}$ ,  $x = 1 - \sqrt{28/t}$ ,  $A = cem$  και  $B = \ln(f_{cm}^{28})$ . Οι τιμές των παραμέτρων παραθέτονται στον Πίνακα 5.2. Επιπλέον από τις τιμές της μέσης θλιπτικής αντοχής  $f_{cm}^{28}$  προσδιορίστηκε αναλυτικά το μέσο μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος ηλικίας 28 ημερών  $E_{cm}^{28}$  (Πίνακας 2.2), σύμφωνα με την εξίσωση που προτείνει το μοντέλο CEB-FIP 1990 (Mehta και Monteiro, 2009):

$$E_{cm}^{28} = a_e 21.5 \left( \frac{f_{cm}^{28}}{10} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.3)$$

όπου  $f_{cm}^{28}$  σε MPa,  $E_{cm}^{28}$  σε GPa και  $a_e$  διορθωτικός συντελεστής του οποίου οι τιμές σχετίζονται με την πυκνότητα των αδρανών υλικών (Βασάλτης: 1.2, Χαλαζίας: 1, Ασβεστόλιθος: 0.9 και Ψαμμίτης 0.7), (Mehta και Monteiro, 2009).



**Σχήμα 5.2:** Πειραματική καταγραφή της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος και θεωρητικές καμπύλες  $f_{cm}$  σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, EC2 (Εξίσωση 5.1).

**Πίνακας 5.2:** Παράμετροι μοντέλου  $f_{cm}$ -EC2 και εκτίμηση μέτρου ελαστικότητας  $E_{cm}$  με βάση το μοντέλο CEB-FIP.

Παράμετροι Σκυροδέματος	CS1	CS2	CS3
$f_{cm}^{28}$ (MPa)	32.09	29.35	33.97
$cem$	0.321	0.320	0.328
$E_{cm}^{28}$ (GPa)	28.54	27.71	29.09

Από τις τιμές τόσο της μετρούμενης θλιπτικής αντοχής (Πίνακας 5.1) όσο και της υπολογιζόμενης μέσης θλιπτικής αντοχής (Πίνακας 5.2), διαπιστώνεται ότι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ηλικίας 28 ημερών προσεγγίζει περίπου τα 32 MPa κατά μέσο όρο για τις τρεις σειρές δοκιμίων, με εύρος διακύμανσης από 29 έως 34 MPa. Από το Σχήμα 5.2, παρατηρείται ότι οι καμπύλες του Ευρωκώδικα προσαρμόζονται ικανοποιητικά στα πειραματικά δεδομένα, δίνοντας για το δείκτη προσαρμογής  $Fit_x$  (Εξίσωση 3.34), τιμές πάνω από 90 % για όλες τις σειρές δοκιμίων.

Με βάση τις τιμές του δείκτη προσαρμογής και τη μορφή του Σχήματος 5.2, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η εξάρτηση της θλιπτικής αντοχής από την ηλικία του σκυροδέματος, είναι μια εκθετική αύξουσα συνάρτηση η οποία τείνει ασύμπτωτα στη

μέση θλιπτική αντοχή με ρυθμό που εξαρτάται από την τιμή της παραμέτρου  $c_{em}$ . Επιπλέον παρατηρείται ότι τις 7 πρώτες ημέρες ο ρυθμός μεταβολής της πειραματικής και μέσης θλιπτικής αντοχής είναι υψηλός ενώ μετά από αυτές μειώνεται αισθητά, υποδηλώνοντας την ολοκλήρωση του μεγαλύτερου τμήματος της διαδικασίας ενυδάτωσης του τσιμέντου και σκλήρυνσης του σκυροδέματος (Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013; Providakis and Liarakos, 2014).

Τα παραπάνω αποτελέσματα και κυρίως η επαναληψιμότητα μεταξύ των διαφορετικών σειρών δοκιμίων, επιβεβαίωσαν ότι η διαδικασία παρασκευής του σκυροδέματος καθώς και η σύσταση που εφαρμόστηκε, οδηγούν σε ένα υλικό το οποίο υπακούει στις προδιαγραφές του EC2 για σκυρόδεμα C20/25. Η απόκλιση που εμφανίζει η μέση θλιπτική αντοχή των 28 ημερών από την προβλεπόμενη, η οποία για σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25 με χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή  $f_{ck}=20$  MPa, είναι  $f_{cm}=28$  MPa (Bamforth et al., 2008; Mehta και Monteiro, 2009), οφείλεται στο γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά χονδρόκοκκα χαλίκια στη σύσταση των αδρανών υλικών.

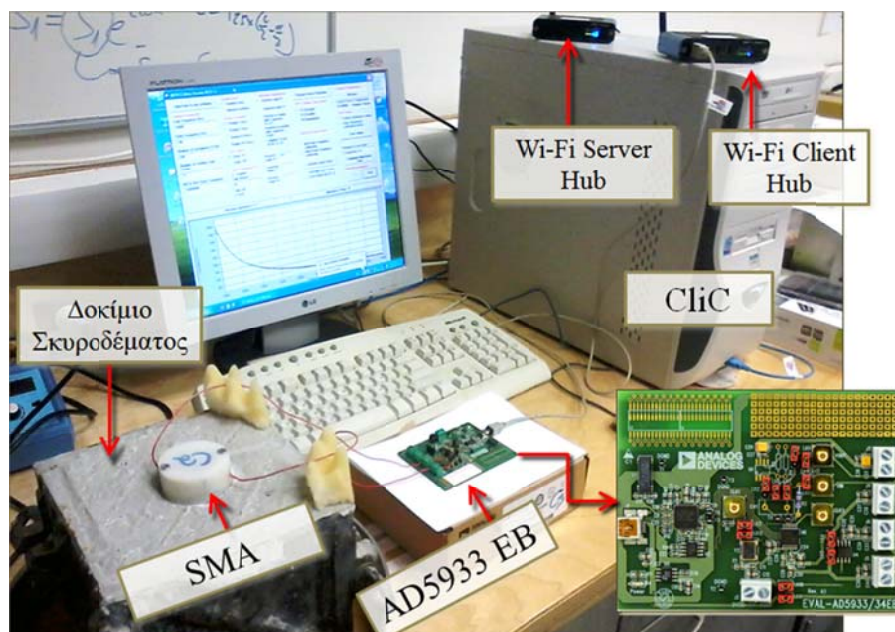
#### **5.2.2. Παρακολούθηση της ενυδάτωσης και της ανάπτυξης της δυσκαμψίας με τη μέθοδο HME**

Εφόσον προσδιορίστηκε ο τρόπος εξέλιξης της ανάπτυξης της δυσκαμψίας του σκυροδέματος χρησιμοποιώντας ως μέγεθος παρακολούθησης τη θλιπτική του αντοχή, παρασκευάστηκαν νέα κυβικά δοκίμια με εμφυτευμένα «ευφυή» αδρανή (SMA). Το «ευφυνές» αδρανές που χρησιμοποιήθηκε είναι το TBSA (βλ. Ενότητα 4.2), το οποίο έχει σαν βάση ένα περίβλημα από Teflon. Τα TBSA τοποθετήθηκαν στη μάζα των δοκιμίων κατά τη σκυροδέτηση και η καταγραφή της απόκρισης της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (HME) ξεκίνησε τρεις ώρες μετά με τη χρήση του συστήματος T-WiEYE (βλ. Ενότητα 4.3 και Σχήμα 5.3).

Το εύρος των συχνοτήτων που ελέγχθηκε ήταν μεταξύ 50 και 100 kHz, με βήμα συχνότητας 100 Hz. Το συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων επιλέχθηκε με βάση δοκιμαστικές μετρήσεις που έγιναν και από τις οποίες διαπιστώθηκε ότι στη συγκεκριμένη περιοχή η αντίσταση  $R_3$  (Πραγματικό Μέρος HME) του TBSA, εμφανίζει κάποιες κορυφές (peaks) με μεγάλη ευαισθησία στις μεταβολές της δυσκαμψίας και κυρίως των φάσεων του υλικού. Τις πρώτες 7 ημέρες λαμβάνονταν καταγραφές ανά μια ώρα αξιοποιώντας την αυτοματοποίηση της διαδικασίας που



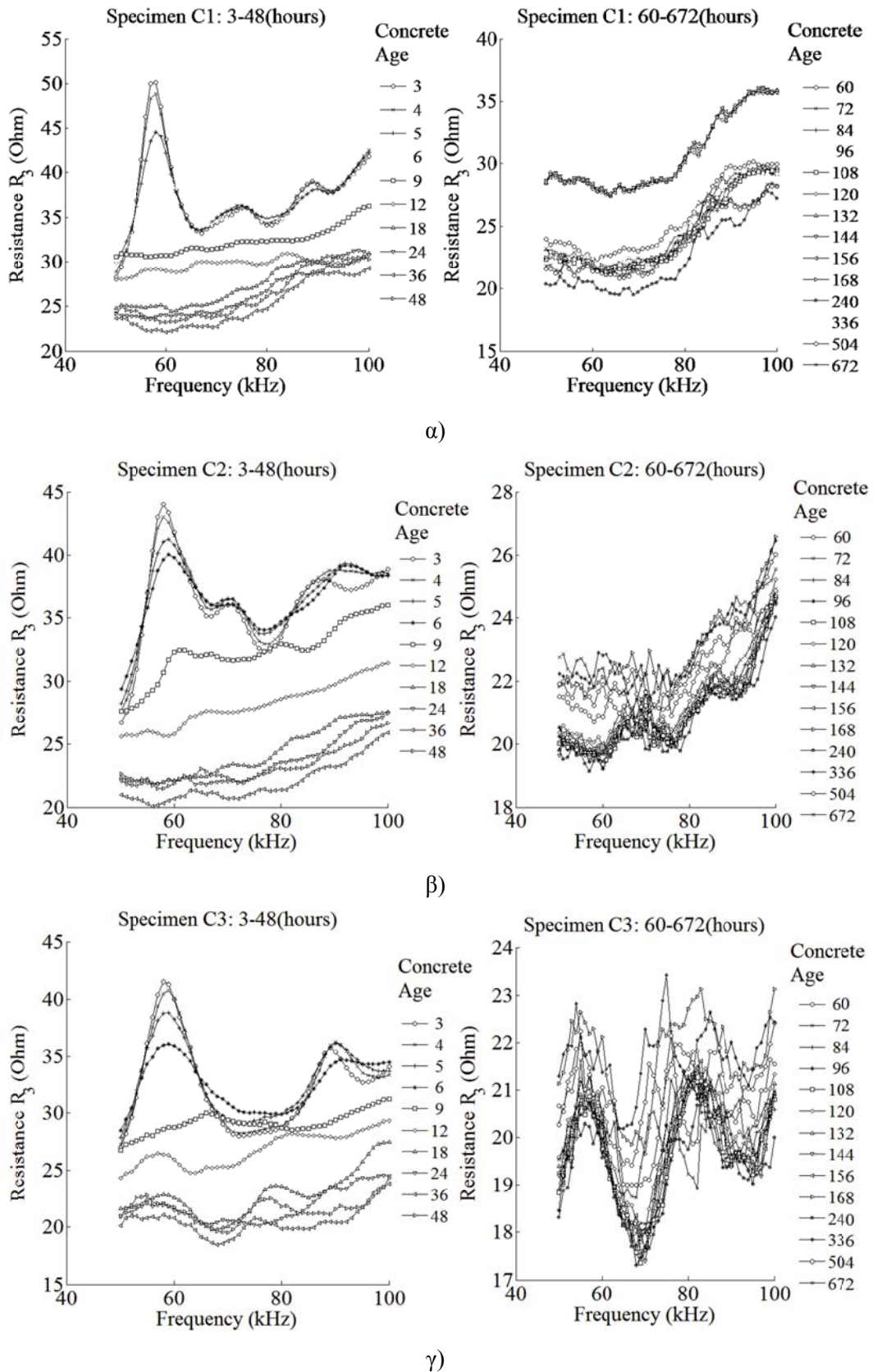
προσφέρει το τροποποιημένο λογισμικό διαχείρισης του AD5933 EB (βλ. Ενότητα 4.3.2). Μετά τις 7 ημέρες έγινε επαναπρογραμματισμός του AD5933 EB έτσι ώστε να λαμβάνονται μετρήσεις κάθε 24 ώρες (1 ημέρα) μέχρι και τις 28 ημέρες.



**Σχήμα 5.3:** Παρακολούθηση δοκιμίου σκυροδέματος με το σύστημα T-WiEYE.

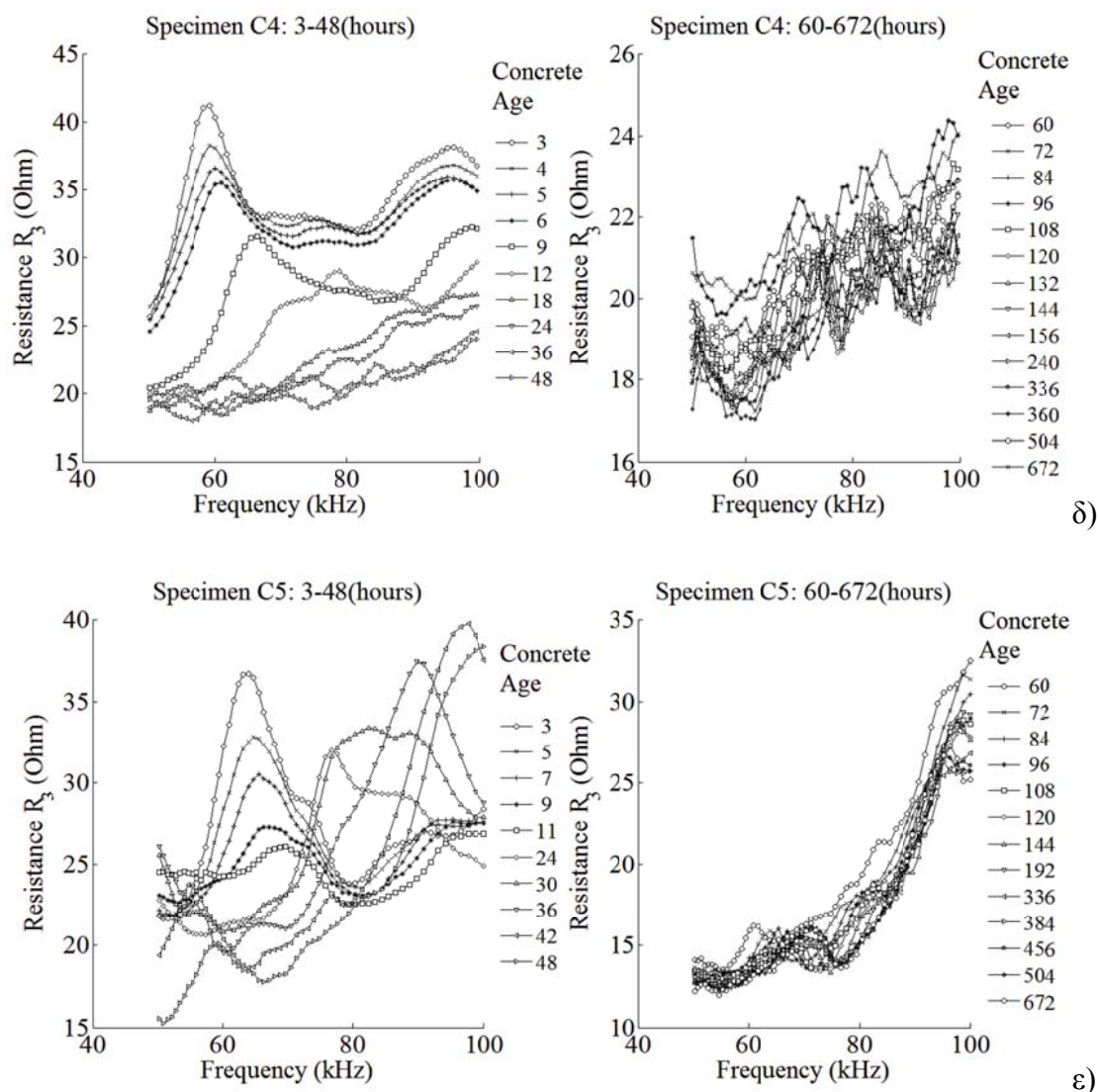
Συνολικά στο πλαίσιο της διατριβής παρασκευάστηκαν πάνω από 12 δοκίμια με εμφυτευμένα TBSA. Στη παρούσα ενότητα θα παρατεθεί η ανάλυση πέντε περιπτώσεων δοκιμίων των οποίων τα αποτελέσματα κρίθηκαν τα πιο αντιπροσωπευτικά της διαδικασίας παρακολούθησης (C1-5). Τα τρία πρώτα δοκίμια C1-3 παρασκευάστηκαν από τη ίδια σκυροδέτηση ενώ τα C4 και C5, από διαφορετικές σκυροδετήσεις τόσο μεταξύ τους όσο και με τα τρία πρώτα. Το συγκεκριμένο σχήμα διερεύνησης εφαρμόστηκε για να ελεγχθεί η επαναληψιμότητα των παρατηρήσεων τόσο μεταξύ ταυτοχρόνως σκυροδετούμενων και παρακολουθούμενων δομικών στοιχείων (C1-3), όσο και μεταξύ δομικών στοιχείων που έχουν σκυροδετηθεί σε διαφορετικές εργασίες (C1-3, C4, C5).

Τα δοκίμια C4-5 σκυροδετήθηκαν μερικούς μήνες μετά τα C1-3 και έφεραν τα TBSA που είχαν ανακτηθεί σχεδόν άθικτα από τα πρώτα δοκίμια. Με τον τρόπο αυτό επιβεβαιώθηκε το πλεονέκτημα της ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης των TBSA σε σχέση με τα CBSA (βλ. Ενότητα 4.2).



**Σχήμα 5.4:** Φάσματα ηλεκτρικής αντίστασης  $R_3$  (Resistance) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές από τη σκυροδέτηση. α)-γ): Δοκίμια C1-3.





**Σχήμα 5.4 (Συνέχεια):** Φάσματα ηλεκτρικής αντίστασης  $R_3$  (Resistance) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές από τη σκυροδέτηση.δ)-ε): Δοκίμια C4-5.

Στο σχήμα 5.4 απεικονίζονται τα φάσματα απόκρισης της ηλεκτρικής αντίστασης  $R_3$  (Resistance) για επιλεγμένες διαφορετικές χρονικές στιγμές από τη σκυροδέτηση (Ηλικία Σκυροδέματος). Για κάθε δοκίμιο έχουν δημιουργηθεί δύο ξεχωριστά γραφήματα εκ των οποίων το αριστερό απεικονίζει τη μεταβολή της αντίστασης τις πρώτες 48 ώρες, ενώ το δεξιό αναφέρεται στην ηλεκτρική απόκριση του TBSA από τις 60 έως τις 672 ώρες. Ο διαχωρισμός των καταγραφών με βάση την ηλικία του σκυροδέματος έγινε προκειμένου να αναδειχθούν οι έντονες μεταβολές, σε τιμές και μορφή φάσματος, που καταγράφονται τις πρώτες 48 ώρες. Η ηλικία του σκυροδέματος καταγράφεται σε ώρες προκειμένου να είναι εφικτή η διατύπωση της ηλικίας με ακέραιους αριθμούς τις πρώτες ώρες μετά τη σκυροδέτηση. Στον πίνακα

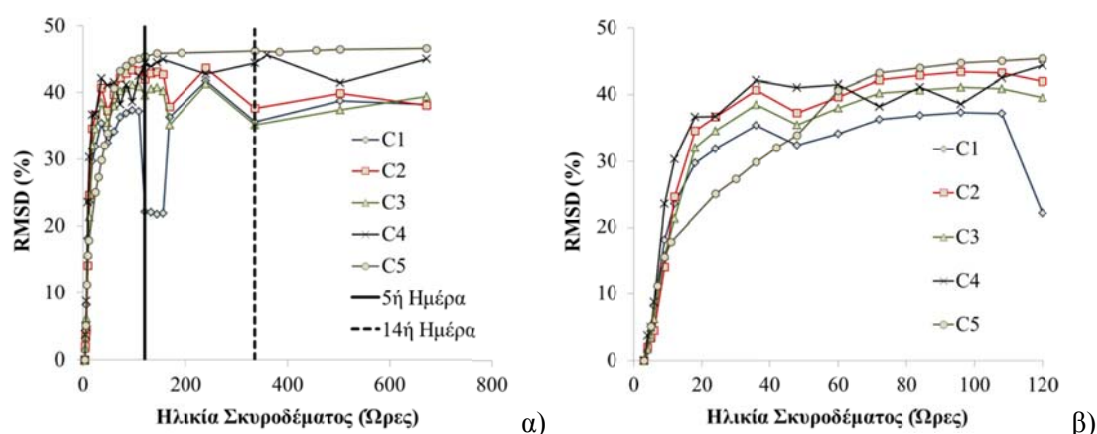
5.3 για τη διευκόλυνση της ανάγνωσης του Σχήματος 5.4 παρατίθεται η αντιστοίχιση ωρών-ημερών.

**Πίνακας 5.3:** Αντιστοίχιση ωρών-ημερών από τη σκυροδέτηση για την ανάγνωση του σχήματος 5.4.

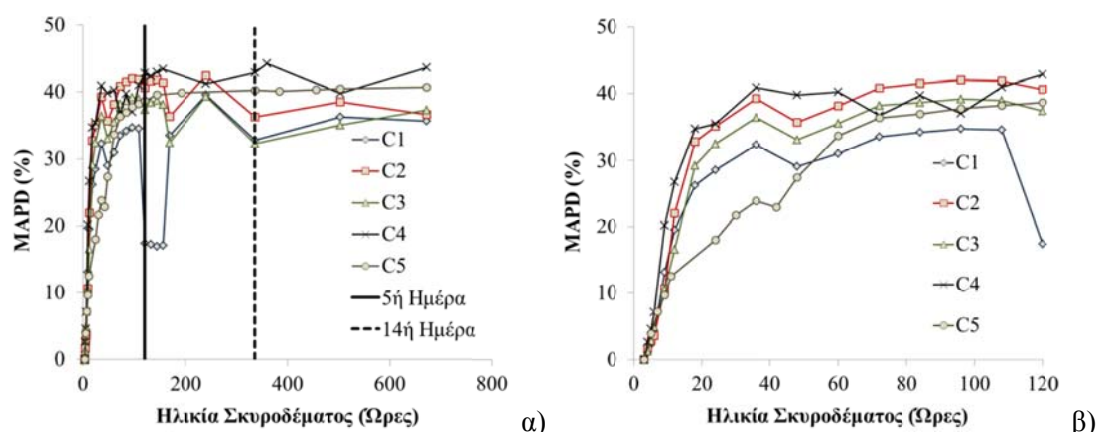
Ωρες:	48	60	72	84	96	108	120	132
Ημέρες:	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
Ωρες:	144	156	168	240	336	504	672	
Ημέρες:	6	6.5	7	10	14	21	28	

### 5.2.2.1. Αξιολόγηση καταγραφών ΗΜΕ – Δείκτες Βλάβης

Η πρώτη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων καταγραφής της ΗΜΕ για τα 5 δοκίμια έγινε με τη χρήση των δεικτών βλάβης RMSD και MAPD (Εξισώσεις 3.4-3.5). Σε όλες τις περιπτώσεις ως φάσμα δομικής κατάστασης αναφοράς - RSS (Reference State Signature) λήφθηκε η απόκριση της αντίστασης που αντιστοιχεί στις 3 ώρες μετά τη σκυροδέτηση. Σημειώνεται πως η αξιολόγηση των μεταβολών των φασμάτων από τις 3 ώρες και μετά γινόταν σε πραγματικό χρόνο με την αξιοποίηση της διασύνδεσης της MySQL με το περιβάλλον του MATLAB (βλ. Ενότητα 4.3.3, Providakis and Liarakos, 2014). Επιπλέον λόγω της δυνατότητας απομακρυσμένης διαδικτυακής πρόσβασης που προσφέρει το T-WiEYE στα δεδομένα της βάσης, εφόσον η διαδικασία παρακολούθησης εξελισσόταν ομαλά, δεν ήταν απαραίτητη η φυσική παρουσία του χρήστη στο χώρο εκτέλεσης του πειράματος.



**Σχήμα 5.5:** Εξέλιξη του RMSD συναρτήσει της ηλικίας του σκυροδέματος. α) 3 ώρες – 28 ημέρες (672 ώρες) και β) 3-120 ώρες.



**Σχήμα 5.6:** Εξέλιξη του MAPD συναρτήσει της ηλικίας του σκυροδέματος. α) 3 ώρες – 28 ημέρες (672 ώρες) και β) 3-120 ώρες.

Παρατηρώντας τα Σχήματα 5.5 και 5.6 των στατιστικών δεικτών βλάβης, διαπιστώνεται μια εικόνα παρόμοια με εκείνη που αποτυπώθηκε κατά την παρακολούθηση της ανάπτυξης της αντοχής του σκυροδέματός με τη εφαρμογή των δοκιμών μοναξονικής θλίψης (Σχήμα 5.2). Οι τιμές των δεικτών βλάβης αυξάνονται όσο εξελίσσεται η διαδικασία ενυδάτωσης και ανάπτυξης της δυσκαμψίας του σκυροδέματος. Η αύξουσα τάση που εμφανίζεται αντικατοπτρίζει τις αθροιστικές μεταβολές των φασμάτων αντίστασης που παραθέτονται στο Σχήμα 5.4. Και στη περίπτωση αυτή μπορεί να διακριθεί, όπως ακριβώς με την εξέλιξη την αναπτυσσόμενης αντοχής (Σχήμα 5.2), μια χρονική περίοδος μέχρι τις 120 ώρες όπου ο ρυθμός αύξησης είναι υψηλός εκτοξεύοντας τα RMSD και MAPD από το 0 στο 40%. Μια δεύτερη περίοδος ξεκινά μετά τις 120 ώρες με το ρυθμό μεταβολής των δεικτών βλάβης να μειώνεται και τις τιμές τους να σταθεροποιούνται γύρω από μια μέση τιμή.

Με βάση τις παρατηρήσεις που έγιναν σε σχέση με το ρυθμό μεταβολής των τιμών των δεικτών βλάβης, δημιουργήθηκε η ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση του συνολικού τρόπου εξέλιξης τους. Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης διερεύνησης στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκαν δύο νέοι δείκτες βλάβης οι οποίοι εστιάζουν κυρίως στο ρυθμό μεταβολής του RMSD. Κατά τη διδακτορική έρευνα διαπιστώθηκε ότι ο ρυθμός μεταβολής του RMSD, αλλά και άλλων μέτρων διαφοροποίησης των φασμάτων, εμφανίζει συσχέτιση με τη διαδικασία ενυδάτωσης του σκυροδέματος.

Ο πρώτος δείκτης βλάβης προσδιορίζεται αριθμητικά απευθείας από το ρυθμό μεταβολής του RMSD και περιγράφεται μαθηματικά από σχέση (Liarakos and Providakis, 2013):

$$DRMSD(t_n) = \begin{cases} \left| \frac{\Delta RMSD_n}{\Delta t_n} \right| = \left| \frac{RMSD_n - RMSD_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \right|, & n > 1 \\ 0, & n = 1 \end{cases} \quad (5.4)$$

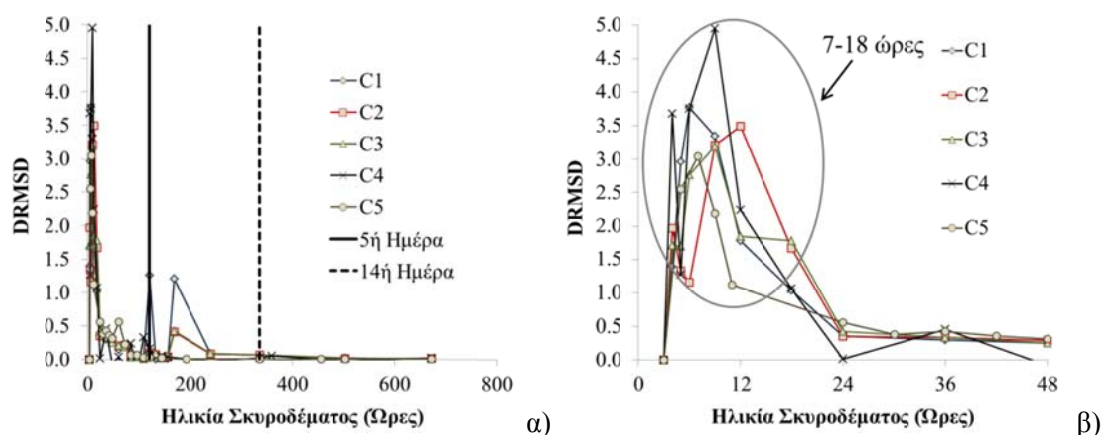
όπου  $t_n$  η τρέχουσα ηλικία του σκυροδέματος ή η  $n$ -στη μελετούμενη καταγραφή μετά τη σκυροδέτηση. Ο δεύτερος δείκτης βλάβης υπολογίζεται από το λόγο της αθροιστικής μεταβολής του RMSD 3 ώρες μετά τη σκυροδέτηση και μέχρι τη τρέχουσα χρονική στιγμή παρακολούθησης  $t_n$ , προς το χρόνο που έχει μεσολαβήσει. Ο συγκεκριμένος δείκτης περιγράφεται μαθηματικά από τη σχέση (Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013):

$$RMSD\_R(t_n) = \begin{cases} \frac{\sum_{m=1}^n \Delta RMSD_m}{\sum_{m=1}^n \Delta t_m} = \frac{\sum_{m=1}^n (RMSD_m - RMSD_{m-1})}{\sum_{m=1}^n (t_m - t_{m-1})}, & n > 1 \\ 0, & n = 1 \end{cases} \quad (5.5)$$

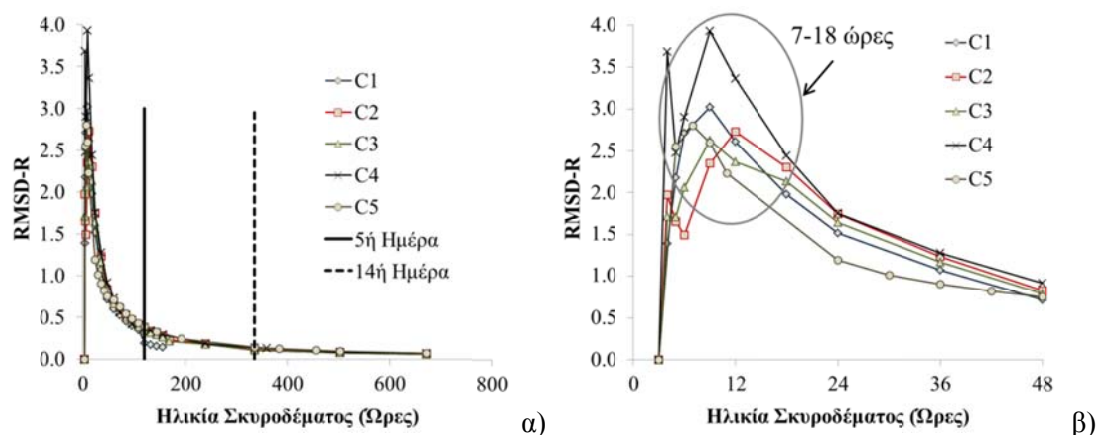
Στα σχήματα 5.7 και 5.8, απεικονίζεται η εξέλιξη των δεικτών  $DRMSD$  και  $RMSD-R$  συναρτήσει της ηλικίας του σκυροδέματος. Και οι δύο δείκτες εκφράζουν μια ποσοτικοποίηση του ρυθμού μεταβολής του RMSD. Από την εστίαση στη χρονική περίοδο των πρώτων 48 ωρών διαπιστώνεται ότι για όλα τα δοκίμια και οι δύο νέοι δείκτες βλάβης εμφανίζουν μια περιοχή έντονης αύξησης μέχρι περίπου τις 7-18 ώρες και αφού λάβουν κάποια μέγιστη τιμή (κορυφή-peak) αρχίζουν από κει και πέρα να φθίνουν. Από τη γενική εικόνα της εξέλιξης των ρυθμών μεταβολής (Σχήματα 5.7.α και 5.8.α) διαπιστώνεται ότι περίπου μετά τις 5-7 ημέρες τείνουν ασύμπτωτα στο μηδέν ερμηνεύοντας με αυτόν τρόπο τη σταθεροποίηση του RMSD την ίδια χρονική περίοδο γύρω από μια μέση τιμή (Σχήμα 5.5). Στον Πίνακα 5.4 απεικονίζεται ένα υπολογιστικό παράδειγμα προσδιορισμού του δείκτη  $RMSD-R$  για το δοκίμιο C2.

Οι δύο νέοι δείκτες βλάβης ανιχνεύουν ξεκάθαρα ότι μια σημαντική δομική μεταβολή λαμβάνει χώρα στη μάζα του σκυροδέματος τις πρώτες 7-18 ώρες. Το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα συμπίπτει με τη χρονική περίοδο που συντελείται η

εντονότερη φάση ενυδάτωσης των συστατικών του τσιμεντοκονιάματος (Mehta και Monteiro, 2009).



Σχήμα 5.7: Εξέλιξη δείκτη  $DRMSD$  συναρτήσει της ηλικίας του σκυροδέματος.



Σχήμα 5.8: Εξέλιξη δείκτη  $RMSD-R$  συναρτήσει της ηλικίας του σκυροδέματος.

Η ενυδάτωση των συστατικών του τσιμέντου είναι μια εξώθερμη χημική αντίδραση και το ποσό της θερμότητας που εκλύεται συνδέεται με τη ποσότητα του νερού που δεσμεύεται από τις κρυσταλλικές δομές που σχηματίζονται στη μάζα της τσιμεντόπαστας. Από μετρήσεις που έχουν γίνει σχετικά με το ρυθμό έκλυσης της θερμότητας έχει διαπιστωθεί ότι είναι δυνατό να διακριθούν τρία διαφορετικά στάδια στον τρόπο εξέλιξης της ενυδάτωσης του σκυροδέματος (Mehta και Monteiro, 2009; Barroca et al., 2013).

Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τη διάλυση των χημικών ενώσεων του τσιμέντου η οποία διαρκεί συνήθως λιγότερο από μια ώρα και είναι μια διεργασία ισχυρά εξώθερμη. Ο υψηλός ρυθμός έκλυσης θερμότητας που καταγράφεται στο πρώτο στάδιο μειώνεται σημαντικά μια ώρα περίπου μετά τη προσθήκη του νερού στο



τσιμέντο και ξαναρχίζει να αυξάνεται στις 2-3 ώρες μετά. Το δεύτερο στάδιο εντοπίζεται στο χρονικό διάστημα μεταξύ 3-20 ωρών όπου ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας αυξάνεται εωσότου λάβει μια μέγιστη τιμή στις 4-8 ώρες και από το σημείο αυτό και μετά αρχίζει να φθίνει (Bentz, 1995; Mehta και Monteiro, 2009). Το τρίτο και τελευταίο στάδιο τοποθετείται μετά τις 24 ώρες, όπου ο ρυθμός έκλυσης της θερμότητας ενυδάτωσης βαίνει μειούμενος ασύμπτωτα στη μηδενική τιμή. Η φάση αυτή αντιπροσωπεύει την ωρίμαση του σκυροδέματος και την ανάπτυξη της αντοχής του, ενώ διαρκεί ακόμη και αρκετούς μήνες μετά τη σκυροδέτηση (Bentz, 1995; Mehta και Monteiro, 2009). Σημειώνεται ότι η διεργασία που μόλις περιγράφηκε αντιπροσωπεύει σκυροδέματα χωρίς χημικά πρόσμικτα· μόνο νερό, τσιμέντο και ασβεστολιθικά αδρανή.

**Πίνακας 5.4:** Υπολογιστικό σχήμα προσδιορισμού του  $RMSD-R$  (Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013). Σε γκρίζο φόντο οι τιμές τις περιοχής μεγίστου-κορυφής του δείκτη (Σχήμα 5.8.β).

Ηλικία Σκυροδέματος $t(\Omega\text{ρες})$	$\Delta t$	$\Sigma(\Delta t)$	$RMSD$	$\Delta RMSD$	$\Sigma(\Delta RMSD)$	$RMSD\_R$
3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	1.00	1.00	1.97	1.97	1.97	1.97
5.00	1.00	2.00	3.31	1.34	3.31	1.65
6.00	1.00	3.00	4.47	1.16	4.47	1.49
9.00	3.00	6.00	14.10	9.63	14.10	2.35
<b>16.00</b>	3.00	9.00	24.57	10.47	24.57	<b>2.73</b>
18.00	6.00	15.00	34.57	10.00	34.57	2.30
24.00	6.00	21.00	36.66	2.09	36.66	1.75
36.00	12.00	33.00	40.68	4.02	40.68	1.23
48.00	12.00	45.00	37.25	-3.43	37.25	0.83

Το σημαντικότερο σημείο από άποψη μηχανικής συμπεριφοράς στην παραπάνω διαδικασία, εντοπίζεται στο δεύτερο στάδιο κατά το οποίο σχηματίζονται οι ένυδροι κρύσταλλοι της τσιμεντόπαστας (Ye et al., 2004). Το νερό που δεσμεύουν καθώς και η κρυσταλλική δομή που σχηματίζουν, έχει άμεσο αντίκτυπο στη στερεοποίηση και ανάπτυξη της δυσκαμψίας του πρώιμου σκυροδέματος (Mehta και Monteiro, 2009).

Η δομική μεταβολή που ανιχνεύουν οι δείκτες  $RMSD-R$  και  $DRMSD$  στη χρονική περίοδο μεταξύ 7-18 ωρών μετά τη σκυροδέτηση (Κορυφή/Μέγιστο καμπυλών σχημάτων 5.7.α και 5.8.β), οφείλεται στην απότομη αλλαγή της δυσκαμψίας του υλικού λόγω σκλήρυνσης η οποία με τη σειρά της αποτελεί συνέπεια της ενυδάτωσης των συστατικών του τσιμέντου. Σε παρόμοια συμπεράσματα ως προς την εξέλιξη του ρυθμού μεταβολής της ενυδάτωσης έχουν καταλήξει και οι Lianzhen and Zongjin (2008), οι οποίοι μετρώντας την ηλεκτρική αντίσταση δοκιμίων σκυροδέματος προσδιόρισαν τη χρονική περίοδο εμφάνισης της μέγιστης τιμής στις 4-22 ώρες.

Επιστρέφοντας στη συνάρτηση της χρονικής μεταβολής της μέσης θλιπτικής αντοχής  $f_{cm}$ , ο ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής του σκυροδέματος είναι δυνατό να προσδιοριστεί από τη πρώτη παράγωγο της Εξίσωσης (5.1) ως εξής:

$$f'_{cm} = \frac{df_{cm}}{dt} = \frac{cem}{2} \sqrt{\frac{672}{t^3}} f_{cm}(t) \quad (5.6)$$

όπου  $t$  η ηλικία του σκυροδέματος σε ώρες. Από τη συνθήκη μηδενισμού της δεύτερης παραγώγου της Εξίσωσης (5.1), προκύπτει ότι:

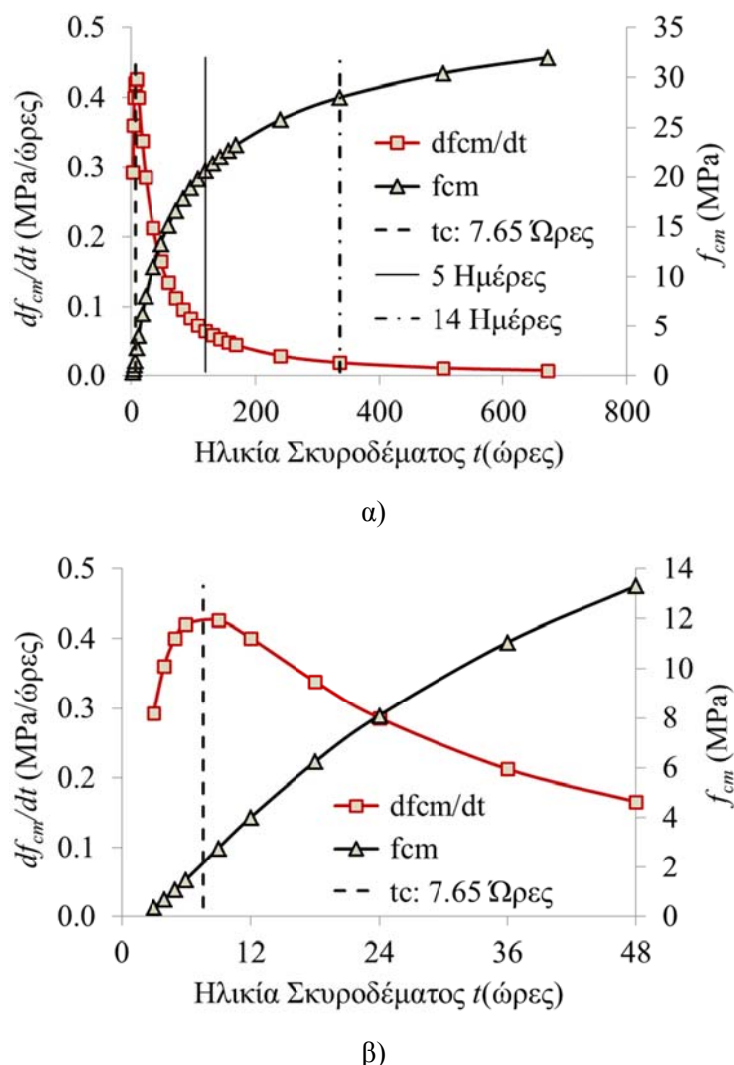
$$\left. \frac{d^2 f_{cm}}{dt^2} \right|_{t_c=0} = 0 \Rightarrow \frac{cem\sqrt{672}}{4} \left( \frac{cem\sqrt{672}}{t^3} - \sqrt{\frac{9}{t^5}} \right) f_{cm} = 0 \Rightarrow$$

$$t_c = \frac{672cem^2}{9} \quad (5.7)$$

όπου  $t_c$  η χρονική στιγμή κατά την οποία η δεύτερη παράγωγος της Εξίσωσης (5.1) μηδενίζεται και ο ρυθμός μεταβολής της  $f_{cm}$ , όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα 5.9, εμφανίζει μέγιστο.

Τα γραφήματα του Σχήματος 5.9 έχουν προκύψει από τη συνδυασμένη γραφική απεικόνιση των συναρτήσεων της  $f_{cm}$  (Εξίσωση 5.1) και του ρυθμού μεταβολής της (Εξίσωση 5.6) για  $cem=0.32$  και  $f_{cm}^{28}=32$  MPa. Οι τιμές των παραμέτρων λήφθηκαν ίσες με τους μέσους όρους των πειραματικώς προσδιοριζόμενων τιμών του Πίνακα 5.2, για τις τρεις διαφορετικές σειρές δοκιμίων μοναξονικής θλίψης (Σχήμα 5.2). Εστιάζοντας στο χρονικό διάστημα των 48 πρώτων ωρών από τη σκυροδέτηση, διαπιστώνεται ότι η μορφή της γραφικής παράστασης του ρυθμού μεταβολής της  $f_{cm}$  (Σχήμα 5.9.β) προσομοιάζει σε μεγάλο βαθμό εκείνη των δεικτών  $RMSD-R$  και  $DRMSD$  (Σχήματα 5.7.β και 5.8.β).





**Σχήμα 5.9:** Εξέλιξη της μέσης θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος  $f_{cm}$  και του ρυθμού μεταβολής της σύμφωνα με το μοντέλο του Ευρωκώδικα (Εξίσωση 5.1).

Ο ρυθμός μεταβολής της μέσης θλιπτικής αντοχής,  $f_{cm}$  εμφανίζει τις πρώτες 7 ώρες ένα αύξων κλάδο (Σχήμα 5.9.β) και αφού λάβει μια μέγιστη τιμή τη χρονική στιγμή  $t_c=7.65$  ώρες, αρχίζει να φθίνει εκθετικά λαμβάνοντας τιμές κάτω του 20% της μέγιστης τιμής ( $f_{cm}^{max}=0.43$ ), μετά τις 5 πρώτες ημέρες. Η χρονική στιγμή εμφάνισης του μέγιστου ρυθμού μεταβολής της  $f_{cm}$ , βρίσκεται μέσα στο χρονικό διάστημα που λαμβάνουν μέγιστες τιμές οι δείκτες  $RMSD-R$  και  $DRMSD$ . Η τελευταία διαπίστωση αποτελεί σημαντική συνεισφορά της παρούσας διατριβής καθώς με βάση την Εξίσωση (5.7) και τις παρατηρούμενες χρονικές στιγμές εμφάνισης των μέγιστων τιμών των νέων δεικτών  $RMSD-R$  και  $DRMSD$ , μπορεί να εκτιμηθεί η παράμετρος  $cem$  η οποία εξαρτάται από την ποιότητα του τσιμέντου. Επιπλέον, η μορφή των γραφημάτων των νέων δεικτών τις πρώτες 48 ώρες μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ

σημαντικό εργαλείο για την επί τόπου αξιολόγηση της διεργασίας ενυδάτωσης του σκυροδέματος (Providakis, Liarakos and Kampianakis, 2013; Liarakos and Providakis, 2013).

#### 5.2.2.2. Αξιολόγηση καταγραφών ΗΜΕ – Στατιστικός έλεγχος υπολοίπων

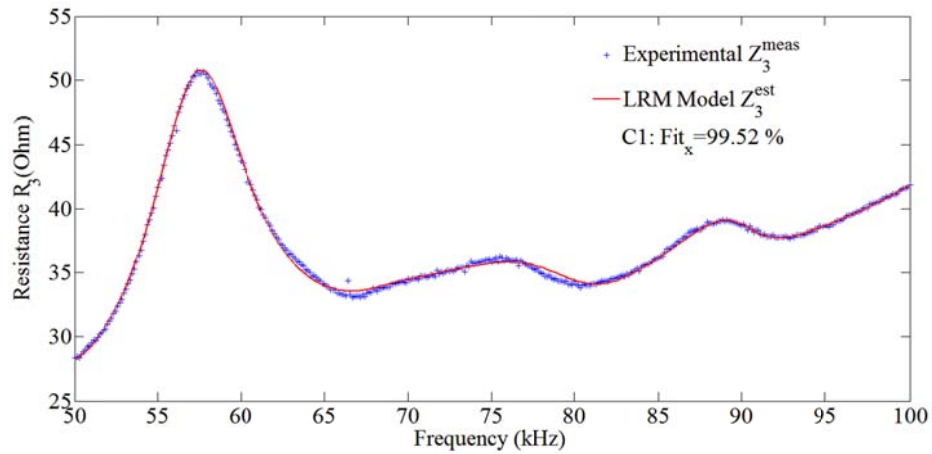
Η αξιολόγηση των μεταβολών των φασμάτων απόκρισης της ηλεκτρικής αντίστασης  $R_3$  (Σχήμα 5.4) πραγματοποιήθηκε και με το στατιστικό έλεγχο των υπολειμματικών τιμών εφαρμόζοντας τη μέθοδο SCoRe, η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής (βλ. Ενότητα 3.4). Ως Ηλεκτρο-Μηχανική Υπογραφή Αναφοράς- $RSS^{meas}$  (Reference State Signature) λήφθηκε η απόκριση της  $R_3^{meas}$  που αντιστοιχεί σε σκυρόδεμα ηλικίας 3 ωρών. Ως συνάρτηση μεταφοράς του Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος (ΗΜΗΣ) επιλέχθηκε η ρητή πολυωνυμική συνάρτηση που περιγράφεται από την Εξίσωση (3.25), της οποίας οι παράμετροι προσδιορίστηκαν με βάση τη μέθοδο LRM (Linearized Regression Model, Εξισώσεις 3.25-3.30).

Ο στατιστικός έλεγχος των κανονικοποιημένων υπολοίπων – DR (Detrended Residuals, Σχήμα 3.19) πραγματοποιήθηκε τόσο με την κανονική κατανομή (Normal Distribution) όσο και με τη γενικευμένη κατανομή των ακραίων τιμών-GEV (Generalized Extreme Values Distribution). Το άνω όριο εμπιστοσύνης των DR  $Ur_0^d$ , προσδιορίστηκε για βεβαιότητα  $P_{up}=99.5\%$  και το κάτω όριο  $Lr_0^d$ , για βεβαιότητα  $P_{low}=0.5\%$  (Εξισώσεις 3.59).

Στα σχήματα 5.10, 12, 14, 16 και 18 παρουσιάζεται η προσαρμογή της εκτιμώμενης συνάρτησης μεταφοράς της ηλεκτρικής αντίστασης,  $R_3^{est}=\text{Re}\{Z_3^{est}\}$  στα πειραματικά δεδομένα,  $R_3^{meas}=\text{Re}\{Z_3^{meas}\}$  που καταγράφηκαν με το T-WiEYE, για τα 5 δοκίμια μελέτης (C1-5). Οι παράμετροι των συναρτήσεων μεταφοράς παραθέτονται στους Πίνακες 5.5-9. Υπενθυμίζεται ότι τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα, DR προκύπτουν από τη σχέση:

$$DR_i^n = r_i^n - E[r_i^n] \quad (5.8)$$

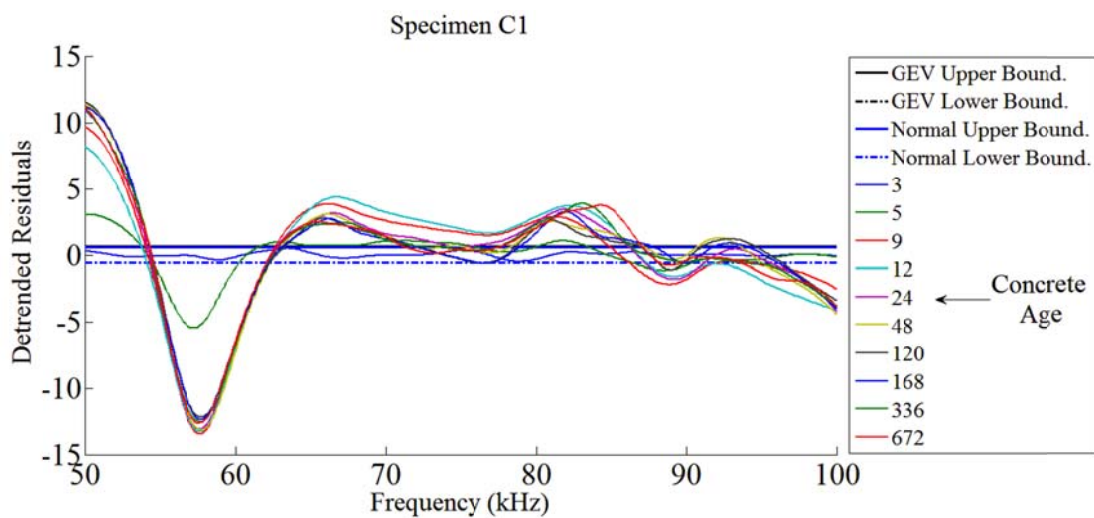
όπου  $r_i^n = R_{3,i}^{meas,n} - R_{3,i}^{est}$  τα υπόλοιπα,  $n$  η  $n$ -στη καταγραφή σε χρόνο  $t_n$  (Ηλικία Σκυροδέματος) μετά τη σκυροδέτηση,  $i=1:F$  και  $F$  ο αριθμός των ζευγών  $(\omega_i, Z_{3,i}^{meas,n})$  του μετρούμενου φάσματος ΗΜΕ.



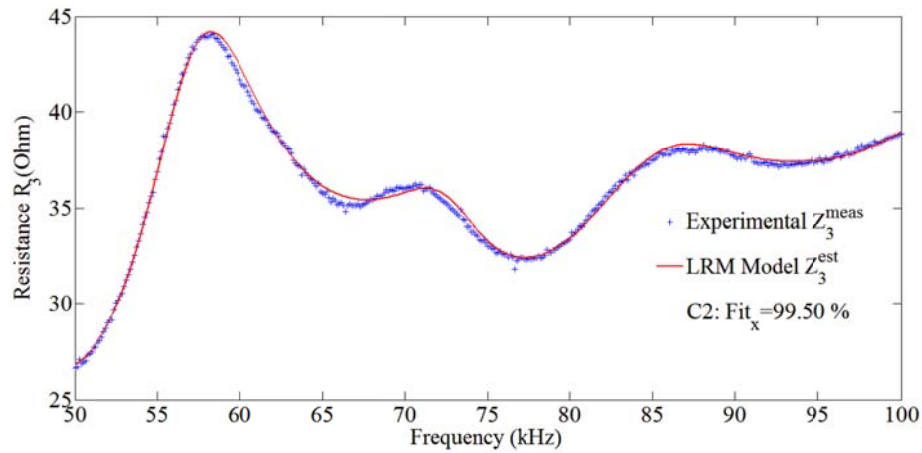
Σχήμα 5.10: Συνάρτηση μεταφοράς (Μοντέλο LRM) δοκιμίου C1.

Πίνακας 5.5: Παράμετροι μοντέλου LRM (Εξίσωση 3.25) δοκιμίου C1.

$p, q$	$ b $	$\theta^\circ$	$ a $	$\varphi^\circ$
0	1.974E-07	86.85	1.985E-10	-78.53
1	1.928E-12	72.08	2.482E-15	62.69
2	7.475E-18	61.87	1.366E-20	18.64
3	1.328E-23	72.46	5.634E-26	-22.88
4	2.339E-29	-49.14	1.408E-31	-40.16
5	3.951E-35	-24.71	1.221E-37	-36.98
6	1.537E-41	-74.31	1.996E-43	-8.75
7	8.324E-47	-47.18	9.049E-49	11.91
8	5.585E-53	-64.93	1.358E-54	23.96
9	1.525E-59	35.06	7.046E-61	29.56



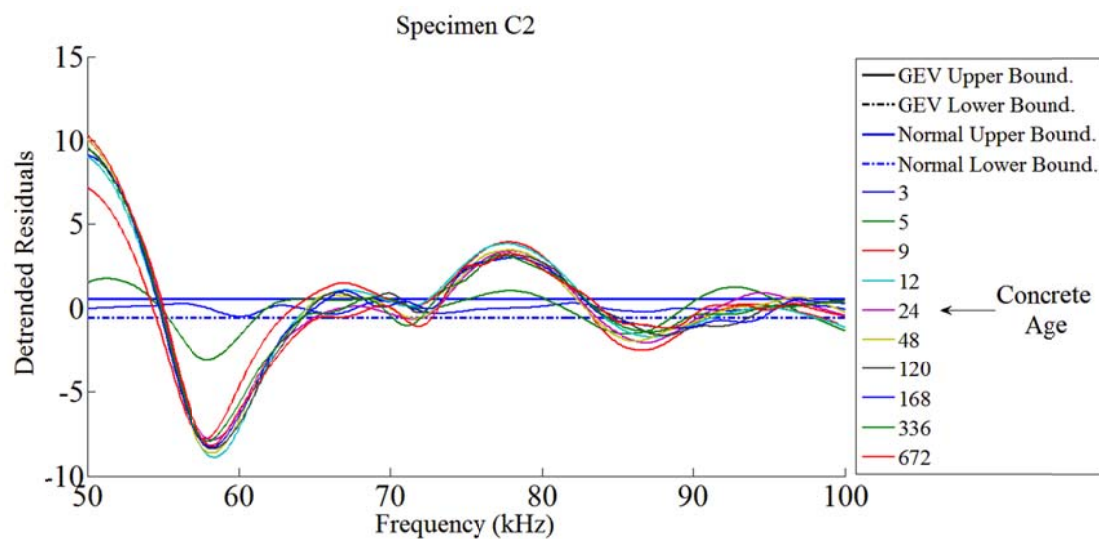
Πίνακας 5.11: Στατιστικός έλεγχος υπολειμματικών τιμών (Residuals) για το δοκίμιο C1.



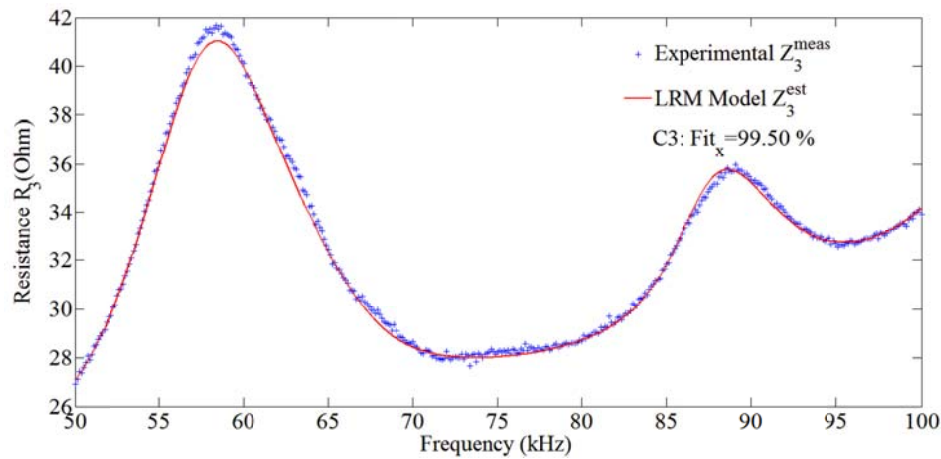
Σχήμα 5.12: Συνάρτηση μεταφοράς (Μοντέλο LRM) δοκιμίου C2.

Πίνακας 5.6: Παράμετροι μοντέλου LRM (Εξίσωση 3.25) δοκιμίου C2.

$p, q$	$ b $	$\theta^\circ$	$ a $	$\varphi^\circ$
0	1.076E-07	-8.41	2.249E-10	54.39
1	1.173E-12	-3.10	2.456E-15	42.92
2	5.574E-18	8.59	1.198E-20	16.01
3	1.372E-23	21.40	5.434E-26	-27.55
4	6.157E-30	50.46	2.088E-31	-52.86
5	5.937E-35	16.62	3.725E-37	-67.26
6	1.363E-40	11.26	9.712E-44	-15.34
7	9.827E-47	-17.58	1.243E-48	-71.77
8	8.154E-53	65.86	1.749E-54	-80.87
9	6.123E-59	34.98	8.021E-61	-88.50



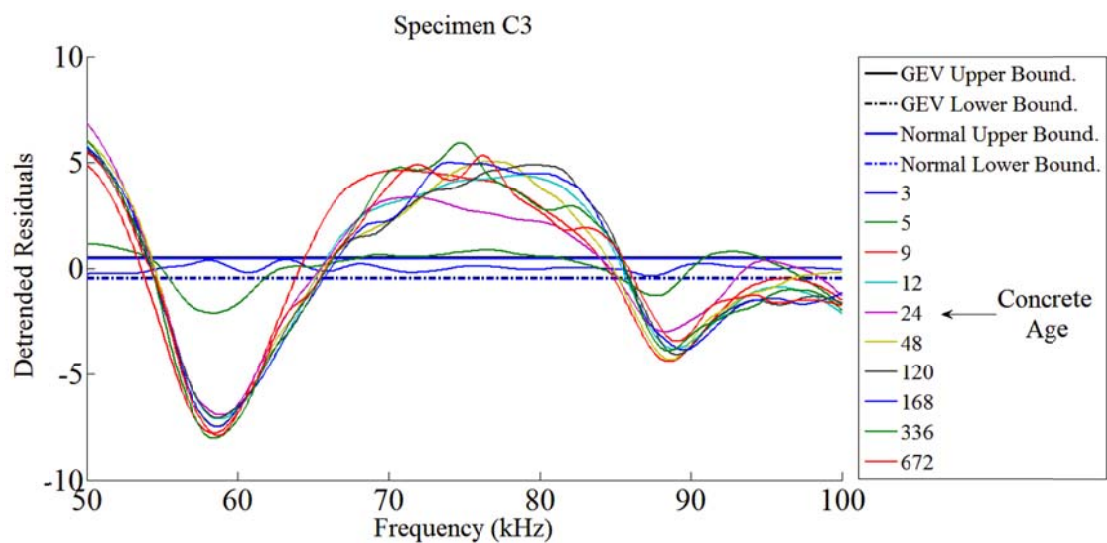
Πίνακας 5.13: Στατιστικός έλεγχος υπολειμματικών τιμών (Residuals) για το δοκίμιο C2.



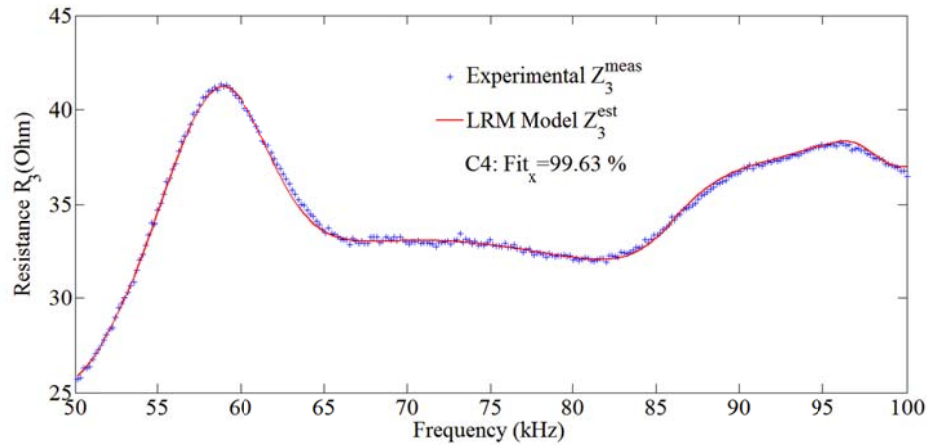
Σχήμα 5.14: Συνάρτηση μεταφοράς (Μοντέλο LRM) δοκιμίου C3.

Πίνακας 5.7: Παράμετροι μοντέλου LRM (Εξίσωση 3.25) δοκιμίου C3.

$p, q$	$ b $	$\theta^\circ$	$ a $	$\varphi^\circ$
0	9.249E-08	60.23	5.206E-11	25.07
1	6.500E-13	49.65	1.546E-15	-9.76
2	1.105E-18	38.28	1.165E-20	-23.57
3	1.707E-24	12.77	4.024E-26	-33.63
4	5.574E-30	-18.25	8.703E-32	-41.12
5	1.251E-35	39.43	1.675E-37	-50.81
6	4.592E-41	-0.45	3.138E-43	-70.08
7	6.097E-47	-19.50	4.549E-49	85.77
8	3.423E-53	-32.49	4.011E-55	63.50
9	5.845E-60	-38.51	1.524E-61	45.75



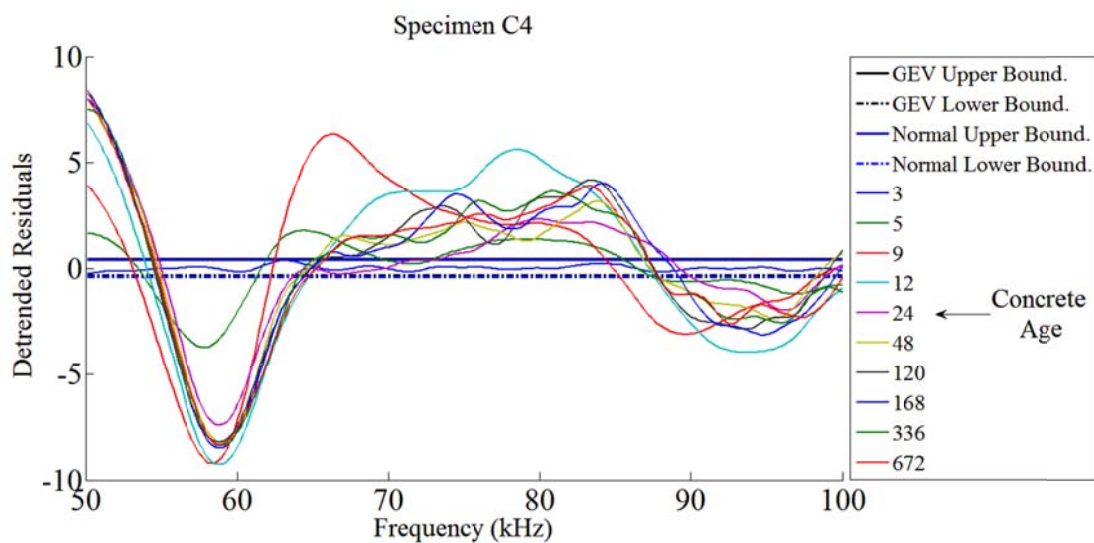
Πίνακας 5.15: Στατιστικός έλεγχος υπολειμματικών τιμών (Residuals) για το δοκίμιο C3.



Σχήμα 5.16: Συνάρτηση μεταφοράς (Μοντέλο LRM) δοκιμίου C4.

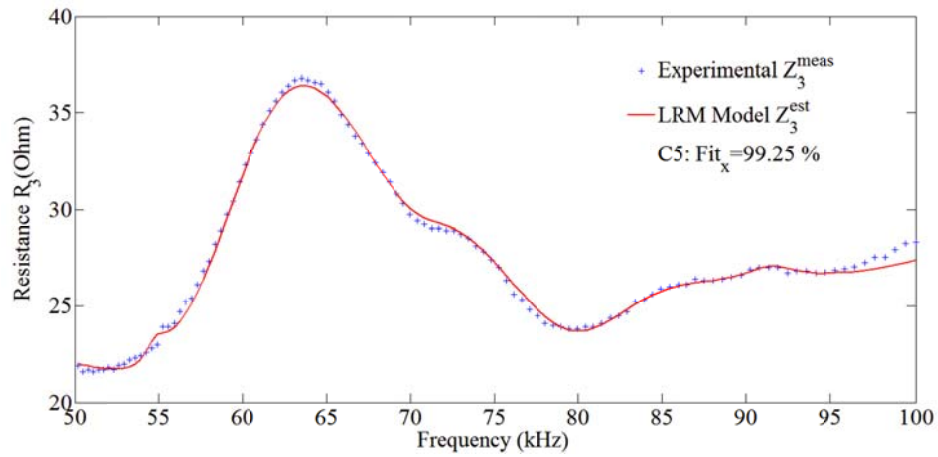
Πίνακας 5.8: Παράμετροι μοντέλου LRM (Εξίσωση 3.25) δοκιμίου C4.

$p, q$	$ b $	$\theta^\circ$	$ a $	$\varphi^\circ$
0	1.554E-07	74.48	1.161E-10	-5.43
1	1.632E-12	79.61	7.133E-16	37.68
2	6.889E-18	80.61	5.071E-21	-62.46
3	1.397E-23	65.45	3.290E-26	-36.11
4	2.347E-29	12.19	1.040E-31	-32.64
5	4.419E-35	-11.13	1.580E-37	-36.65
6	4.243E-41	47.82	7.372E-44	41.32
7	1.237E-46	-86.09	5.325E-49	-86.18
8	1.399E-52	-87.48	8.339E-55	-89.09
9	5.545E-59	81.87	4.275E-61	87.59



Πίνακας 5.17: Στατιστικός έλεγχος υπολειμματικών τιμών (Residuals) για το δοκίμιο C4.

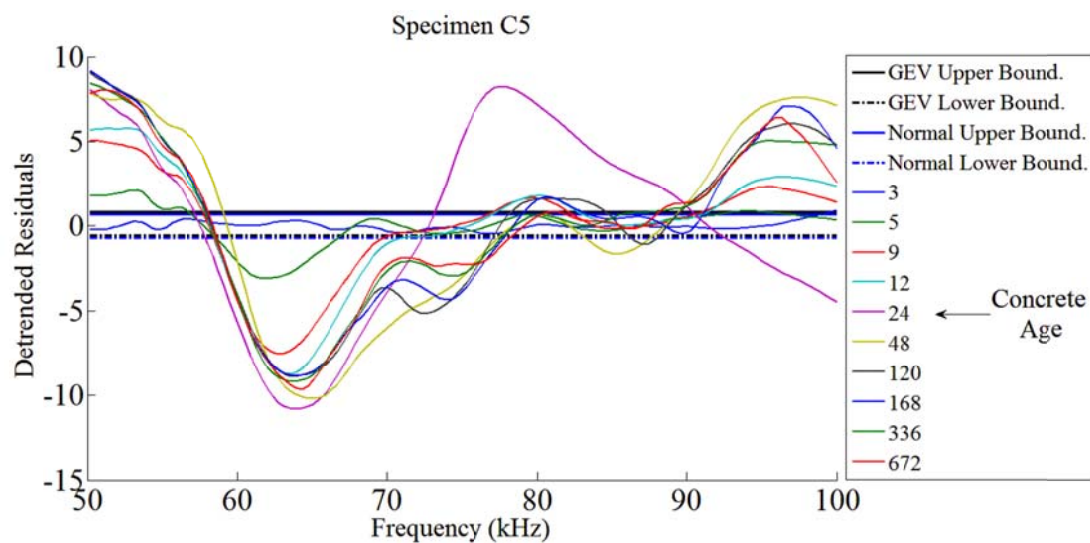




Σχήμα 5.18: Συνάρτηση μεταφοράς (Μοντέλο LRM) δοκιμίου C5.

Πίνακας 5.9: Παράμετροι μοντέλου LRM (Εξίσωση 3.25) δοκιμίου C5.

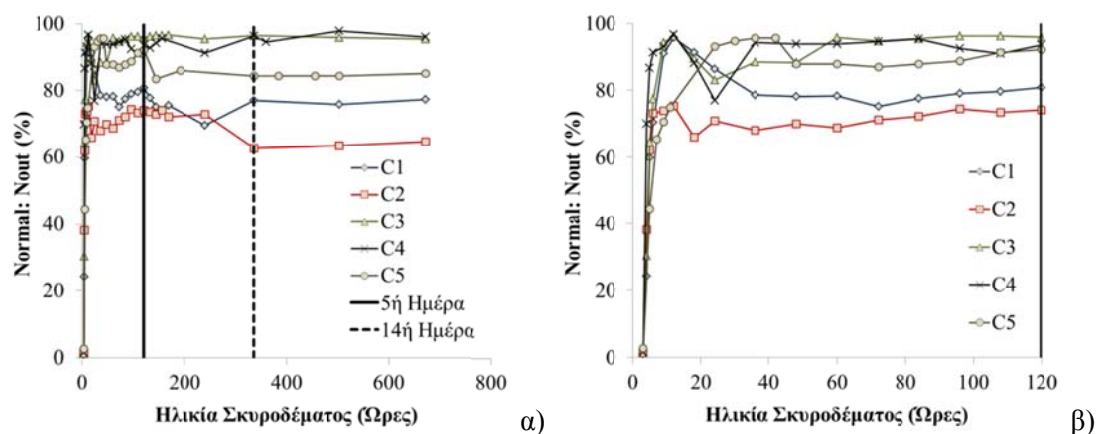
$p, q$	$ b $	$\theta^\circ$	$ a $	$\varphi^\circ$
0	8.108E-07	22.84	7.194E-10	18.52
1	5.791E-12	8.40	1.101E-14	55.37
2	1.551E-17	-46.70	6.772E-20	72.61
3	7.448E-23	84.02	1.357E-25	-82.21
4	1.908E-28	-88.01	3.992E-31	19.86
5	2.774E-34	-57.91	1.316E-36	36.81
6	4.667E-41	60.96	7.720E-43	75.02
7	1.006E-45	-47.04	3.969E-48	-5.53
8	1.504E-51	-51.07	6.893E-54	-11.30
9	7.045E-58	-61.45	3.746E-60	-21.80



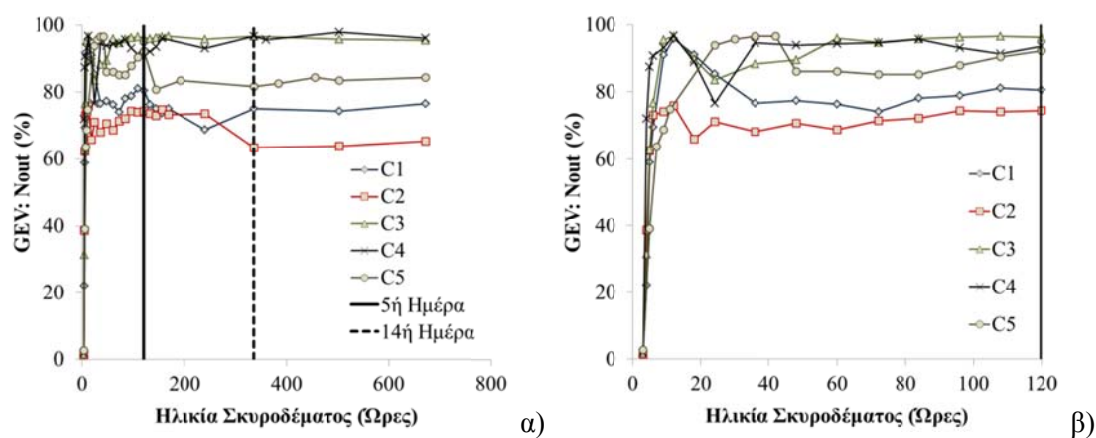
Πίνακας 5.19: Στατιστικός έλεγχος υπολειμματικών τιμών (Residuals) για το δοκίμιο C5.



Από το στατιστικό έλεγχο των DR με βάση τα όρια εμπιστοσύνης που προσδιορίζονται από τη κανονική κατανομή και την κατανομή GEV (Σχήματα 5.11, 13, 15, 17 και 19), υπολογίζεται σε κάθε περίπτωση ο αριθμός των υπολοίπων που βρίσκονται εκτός των ορίων εμπιστοσύνης (Outliers),  $N_{out}$  (Providakis, Liarakos and Voutetaki, 2010; Providakis and Liarakos, 2011, 2014).



**Σχήμα 5.20:** Ποσοστό τιμών DR εκτός στατιστικού ελέγχου με βάση τη κανονική κατανομή (Normal), συναρτήσει της ηλικίας του σκυροδέματος.



**Σχήμα 5.21:** Ποσοστό τιμών DR εκτός στατιστικού ελέγχου με βάση τη κατανομή GEV, συναρτήσει της ηλικίας του σκυροδέματος.

Στα Σχήματα 5.20 και 5.21 απεικονίζεται η εξέλιξη του ποσοστού των DR που βρίσκονται εκτός των ορίων εμπιστοσύνης σε σχέση με την ηλικία των δοκιμών του σκυροδέματος, για τις περιπτώσεις της κανονικής κατανομής (Normal) και της κατανομής GEV αντιστοίχως. Η μορφή που παρουσιάζουν τα συγκεκριμένα γραφήματα είναι αντίστοιχη με εκείνη της χρονικής εξέλιξης των δεικτών βλάβης RMSD και MAPD (Σχήματα 5.5 και 5.6). Τις πρώτες ώρες μετά τη σκυροδέτηση

παρουσιάζεται μια έντονη αύξηση των τιμών που θέτονται εκτός των ορίων εμπιστοσύνης και από ένα χρονικό σημείο και μετά σταθεροποιούνται γύρω από μια μέση τιμή. Η βασική διαφορά που εντοπίζεται σε σχέση με τα αντίστοιχα γραφήματα των RMSD και MAPD, είναι η πολύ πιο έντονη αύξηση των  $N_{out}$  τις πρώτες 24 ώρες και η σταθεροποίηση γύρω από μια μέση τιμή για κάθε δοκίμιο από τις 48 ώρες και μετά. Ακολουθώντας σκεπτικό ανάλογο με εκείνο που εφαρμόστηκε για τη μελέτη του τρόπου μεταβολή του RMSD σε σχέση με την ηλικία του σκυροδέματος, ορίζονται οι παρακάτω δύο δείκτες βλάβης με βάση το ρυθμό μεταβολή των  $N_{out}$  (Providakis and Liarakos, 2014):

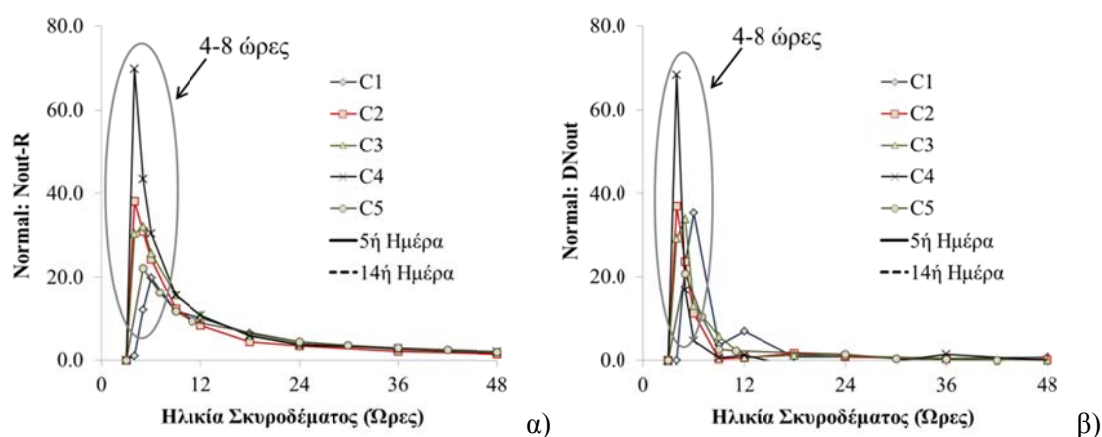
$$DN_{out}(t_n) = \begin{cases} \left| \frac{\Delta N_{out,n}}{\Delta t_n} \right| = \left| \frac{N_{out,n} - N_{out,n-1}}{t_n - t_{n-1}} \right|, & n > 1 \\ 0, & n = 1 \end{cases} \quad (5.9)$$

$$N_{out-R}(t_n) = \begin{cases} \frac{\sum_{m=1}^n N_{out,m}}{\sum_{m=1}^n \Delta t_m} = \frac{\sum_{m=1}^n (N_{out,m} - N_{out,m-1})}{\sum_{m=1}^n (t_m - t_{m-1})}, & n > 1 \\ 0, & n = 1 \end{cases} \quad (5.10)$$

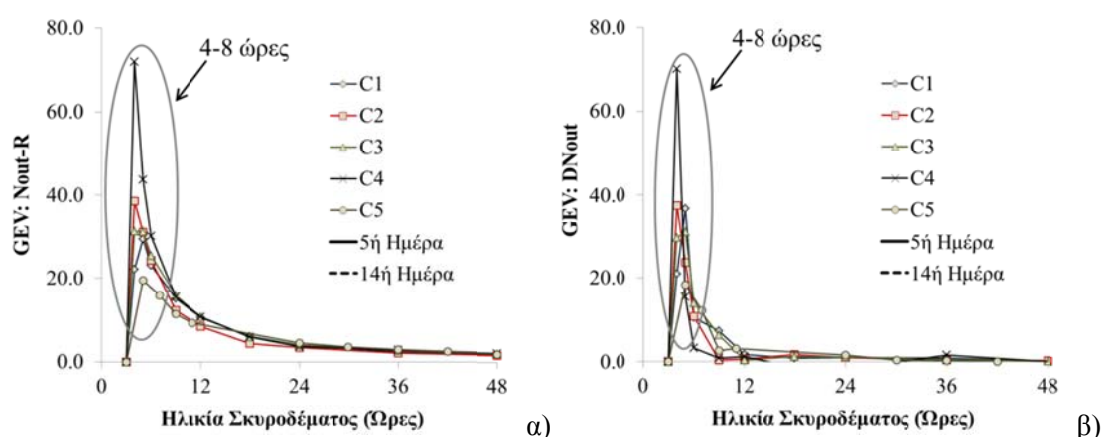
όπου  $t_n$  η τρέχουσα ηλικία του σκυροδέματος ή η  $n$ -στη μελετούμενη καταγραφή μετά τη σκυροδέτηση. Οι επίσης νέοι δείκτες,  $DN_{out}$  και  $N_{out-R}$  εκφράζουν αντίστοιχα με τους του  $DRMSD$  και  $RMSD-R$ , το ρυθμό μεταβολής του αριθμού (%) των υπολειμματικών τιμών  $N_{out}$  που ξεπερνούν τα όρια εμπιστοσύνης (Outliers), συναρτήσει της ηλικίας του σκυροδέματος. Σημειώνεται για άλλη μια φορά ότι όσο η δυσκαμψία του πρωίμου υλικού αναπτύσσεται λόγω της ενυδάτωσης των στατιστικών του τσιμέντου, τα φάσματα απόκρισης της  $R_3$  θα αποκλίνουν από την ηλεκτρική απόκριση αναφοράς (3 ώρες μετά τη σκυροδέτηση) και κατά συνέπεια θα αυξάνεται ο αριθμός των υπολοίπων της συνάρτησης μεταφοράς (η οποία προσομοιώνει την απόκριση αναφοράς) που βρίσκονται εκτός των ορίων εμπιστοσύνης.

Από τη χρονική εξέλιξη των δεικτών  $N_{out-R}$  και  $DN_{out}$  τις πρώτες 48 ώρες μετά τη σκυροδέτηση (Σχήματα 5.22 και 5.23) και για τις δύο περιπτώσεις στατιστικού ελέγχου (Normal και GEV), επιβεβαιώνονται οι παρατηρήσεις που έγιναν σχετικά με τη διεργασία της ενυδάτωσης του σκυροδέματος με βάση τόσο τους δείκτες  $DRMSD$  και  $RMSD-R$  (Σχήματα 5.7 και 5.8), όσο και το ρυθμό ανάπτυξης της θλιπτικής

αντοχής του σκυροδέματος (Σχήμα 5.9). Η σημαντική διαφορά με τις προηγούμενες περιπτώσεις ανάλυσης, εντοπίζεται στο γεγονός ότι ο ρυθμός μεταβολής του αριθμού των υπολοίπων (Residuals) εκτός ελέγχου  $N_{out}$ , εμφανίζει μέγιστη τιμή στις 4-8 ώρες, αντί του χρονικού διαστήματος των 7-18 ωρών που εντοπίζονται οι μέγιστες τιμές των  $DRMSD$  και  $RMSD-R$ . Το χρονικό διάστημα της κορυφής των  $N_{out}-R$  και  $DN_{out}$  είναι πολύ κοντά στις τιμές που δίνει ο αναλυτικός ρυθμός μεταβολής της θλιπτικής αντοχής (Σχήμα 5.9,  $t_c=7.65$  ώρες). Το αποτέλεσμα αυτό αποδεικνύει την υπεροχή της μεθόδου SCoRe έναντι των κλασσικών στατιστικών δεικτών βλάβης σε σχέση με τον ακριβή εντοπισμό των μεταβολών της φασματικής απόκρισης ενός ηλεκτρομηχανικού συστήματος.



**Σχήμα 5.22:** Εξέλιξη δεικτών α)  $N_{out}-R$  και β)  $DN_{out}$ , συναρτήσει της ηλικίας του σκυροδέματος για τη περίπτωση ελέγχου με τη κανονική κατανομή (Normal).



**Σχήμα 5.23:** Εξέλιξη δεικτών α)  $N_{out}-R$  και β)  $DN_{out}$ , συναρτήσει της ηλικίας του σκυροδέματος για τη περίπτωση ελέγχου με τη κατανομή GEV.

### 5.3. Ανίχνευση Βλαβών σε κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος με τη χρήση «ευφυνών» αδρανών

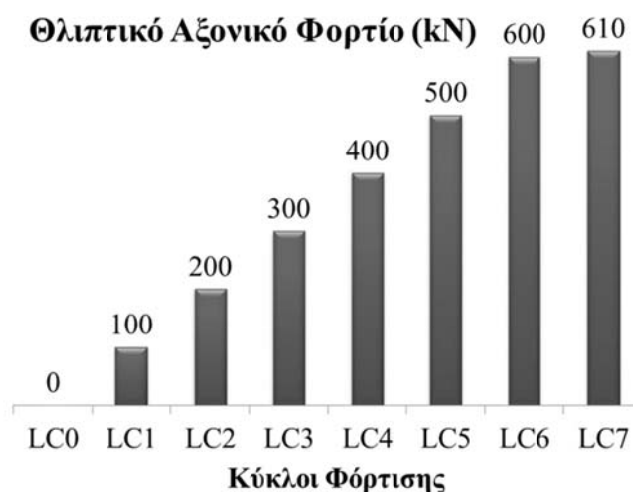
Όπως έχει αναφερθεί ο στόχος των «ευφυνών» αδρανών (SMA) είναι αφενός μεν η παρακολούθηση της ανάπτυξης της αντοχής και της δυσκαμψίας του πρώιμου σκυροδέματος, αλλά και η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας του δομικού συστήματος για όλο το χρόνο ζωής του. Στη παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η εφαρμογή του TBSA στην αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας ενός κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος το οποίο εμφανίζει σταδιακά μηχανικές βλάβες. Το κυβικό δοκίμιο που φέρει εμφυτευμένο το TBSA είναι ακριβώς το ίδιο, τόσο ως προς τη γεωμετρία όσο και ως προς τη σύσταση του σκυροδέματος, με τα δοκίμια μοναξονικής θλίψης που εξετάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες.



**Σχήμα 5.24:** Σταδιακή θλιπτική καταπόνηση δοκιμίου σκυροδέματος με εμφυτευμένο TBSA.

Οι μηχανικές βλάβες προκαλούνται τεχνητά και ελεγχόμενα με καταπόνηση σε μοναξονική θλίψη (Σχήμα 5.24). Το είδος των μηχανικών βλαβών είναι ρωγμές οι οποίες εμφανίζονται και επεκτείνονται σταδιακά με τη εφαρμογή επαναλαμβανόμενων κύκλων φόρτισης-LC (Loading Cycles) αυξανόμενου πλάτους (Σχήμα 5.25). Το βήμα με το οποίο αυξάνεται το πλάτος κάθε φορά είναι 100 kN. Η ηλικία του σκυροδέματος είναι 3 μήνες και η πλήρης αστοχία του εκδηλώνεται στον τελευταίο κύκλο φόρτισης (LC7, Σχήμα 5.25) καταγράφοντας φορτίο 610 kN και

αντοχή 27 MPa. Κάθε κύκλος φόρτισης ξεκινάει από τα 0 kN (πλήρης αποφόρτιση) και προσεγγίζει το αντίστοιχο πλάτος με ρυθμό φόρτισης 10 kN/sec.

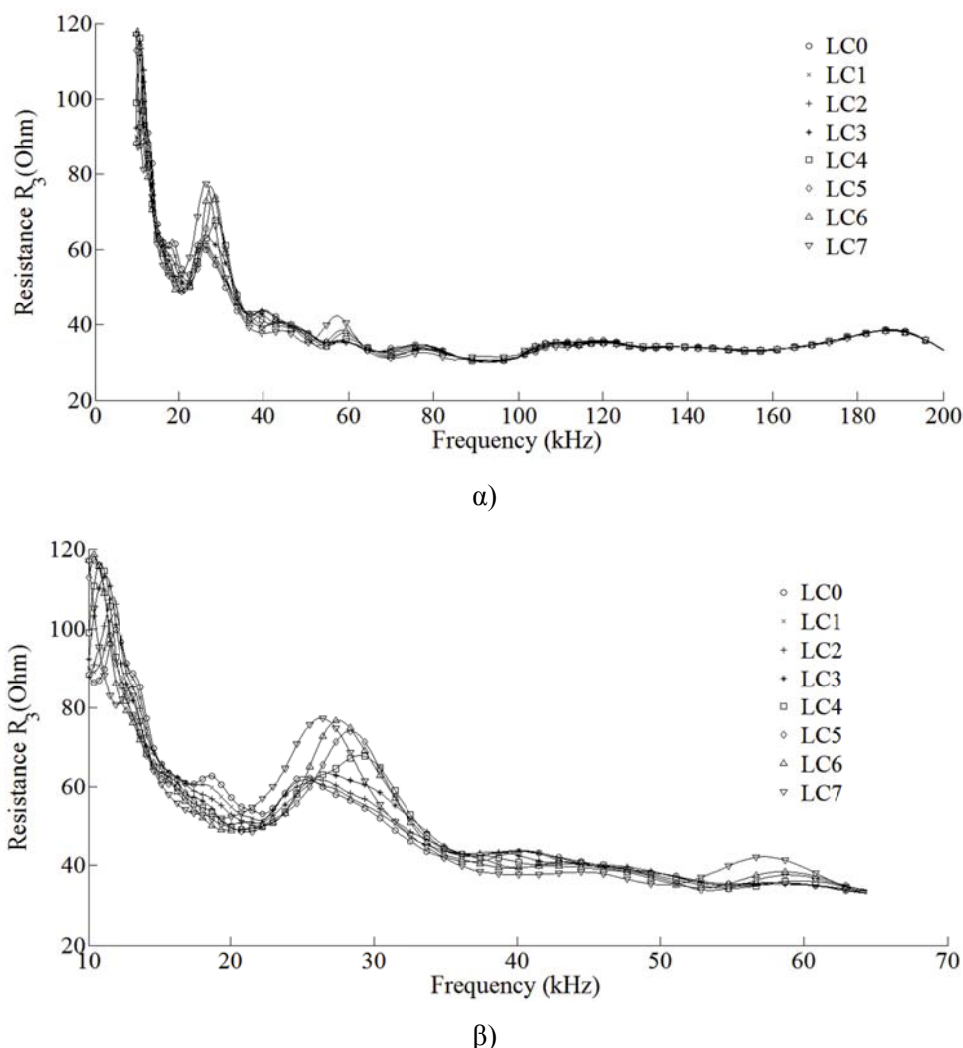


Σχήμα 5.25: Κύκλοι φόρτισης δοκιμίου.

Η θλιπτική αντοχή που καταγράφεται στον τελευταίο κύκλο φόρτισης (LC7) είναι μειωμένη κατά 3 περίπου MPa από τη προβλεπόμενη ( $32 \pm 2$  MPa, Πίνακας 5.2) και οφείλεται στο γεγονός της σταδιακής ανάπτυξης και επέκτασης των μικρορωγμών που εμφανίζονται κατά τη εφαρμογή των προηγούμενων κύκλων φόρτισης. Οι συγκεκριμένες μικρορωγμές οφείλονται στην σταδιακή καταστροφή των υφιστάμενων πόρων του υλικού και την απώλεια συνοχής στη διεπιφάνεια μεταξύ αδρανών υλικών και τσιμεντόπαστας. Μετά από κάθε κύκλο φόρτισης καταγράφεται με τη χρήση του αυτοματοποιημένου συστήματος T-WiEYE η φασματική απόκριση της ηλεκτρομηχανικής εμπίδησης (HME)  $Z_3$ , του εμφυτευμένου TBSA και καταχωρείται στη βάση δεδομένων για μετα-επεξεργασία και αξιολόγηση.

Στο Σχήμα 5.26, παρουσιάζεται η απόκριση της ηλεκτρικής αντίστασης  $R_3$  (Πραγματικό μέρος HME) για κάθε κύκλο φόρτισης. Το εύρος των συχνοτήτων καταγραφής βρίσκεται μεταξύ των 10 και των 200 kHz με βήμα συχνότητας 380 kHz (αριθμός καταγραφών ανά φάσμα  $F=500$ ). Στη συγκεκριμένη περίπτωση ανάλυσης αξιοποιείται η πρωτότυπη προσέγγιση των συχνοτήτων σάρωσης άνω των 100 kHz με το AD5933 EB, η οποία αναλύθηκε εκτενώς στην Ενότητα 4.3.1 (Σχήμα 4.11) και αποτελεί σημαντική καινοτομία της διατριβής καθώς δεν έχουν εντοπιστεί στη διεθνή βιβλιογραφία αντίστοιχες εφαρμογές.



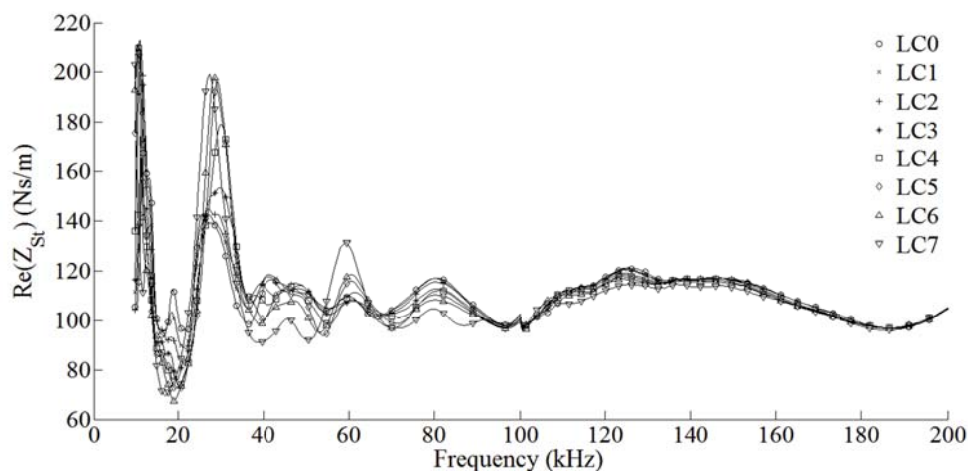


**Σχήμα 5.26:** Φασματική απόκριση της ηλεκτρικής αντίστασης  $R_3$  (Resistance) μετά από κάθε κύκλο φόρτισης. α) 10-200 kHz. β) Εστίαση στο εύρος 10-65kHz.

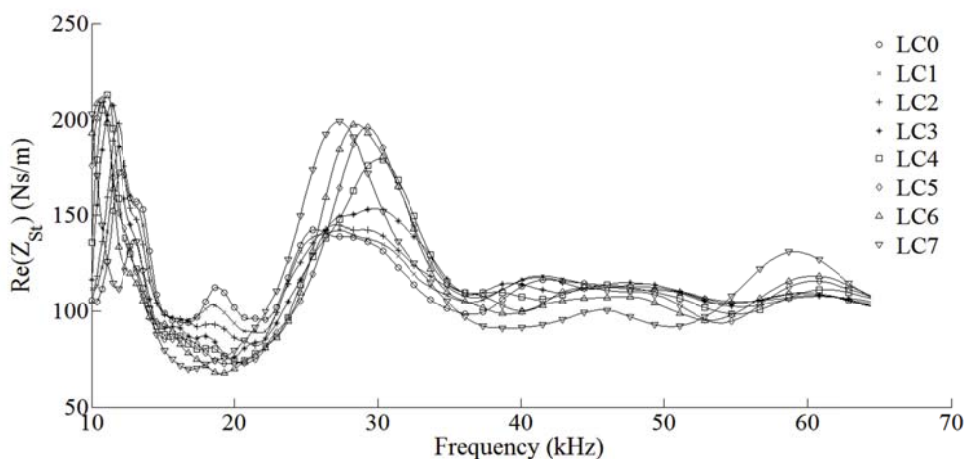
Από τις πειραματικές καταγραφές τη ΗΜΕ, με βάση τις Εξισώσεις (3.1)-(3-3) και τις ηλεκτρομηχανικές ιδιότητες του PIC 151 (βλ. Πίνακα 2.1), προσδιορίζεται η απόκριση της δυναμικής μηχανικής εμπέδησης του σκυροδέματος (DMI)  $Z_{St}$  (Σχήμα 5.27). Τόσο από τα φάσματα της ηλεκτρικής αντίστασης του ΤΒSΑ (Σχήμα 5.26) όσο και από τα φάσματα της  $Z_{St}$  (Σχήμα 5.27) διαπιστώνεται ότι οι εντονότερες μεταβολές εμφανίζονται στη περιοχή συχνοτήτων μεταξύ 10 και 65 kHz.

Συγκρίνοντας τα φάσματα των Σχημάτων 5.26.β και 5.27.β μεταξύ τους, διαπιστώνεται ότι το πραγματικό μέρος της μηχανικής εμπέδησης  $\text{Re}(Z_{St})$  εμφανίζει, όπως ήταν αναμενόμενο με βάση τα όσα αναπτύχθηκαν στην Ενότητα 3.1, μεγαλύτερη ευαισθησία από την ηλεκτρική αντίσταση  $R_3$ , λόγω του ότι είναι απαλλαγμένο από τις ηλεκτρικές επιδράσεις του PIC 151. Με βάση τη συγκριμένη

παρατήρηση επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας του δοκιμίου το πραγματικό μέρος της  $Z_{St}$ .



α)

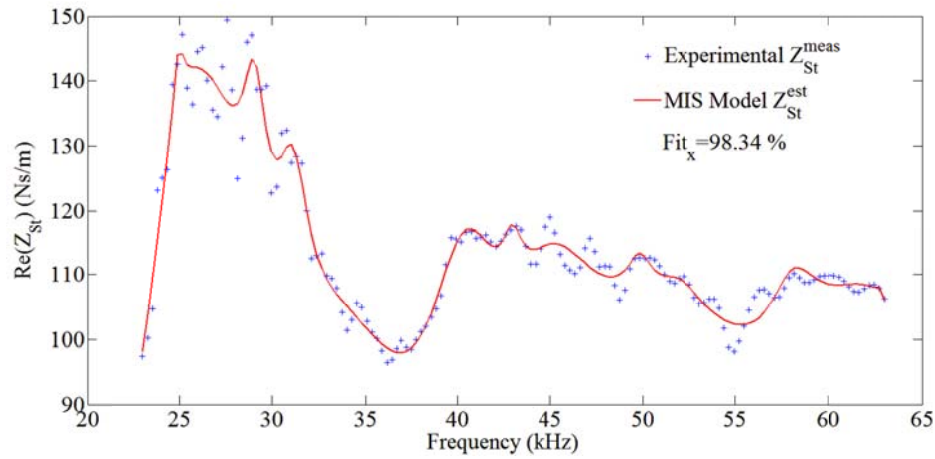


β)

**Σχήμα 5.27:** Φασματική απόκριση του πραγματικού μέρους της μηχανικής εμπέδησης DMI μετά από κάθε κύκλο φόρτισης. α) 10-200 kHz. β) Εστίαση στο εύρος 10-65kHz.

Η αξιολόγηση των μεταβολών της  $Z_{St}$  πραγματοποιήθηκε με το στατιστικό έλεγχο των υπολειμματικών τιμών εφαρμόζοντας τη μέθοδο SCoRe (βλ. Ενότητα 3.4, Σχήμα 3.19). Ως Ηλεκτρο-Μηχανική Υπογραφή Αναφοράς- $RSS^{meas}$  (Reference State Signature) λήφθηκε το πραγματικό μέρος της μηχανικής εμπέδησης,  $Re(Z_{St})$  το οποίο αντιστοιχεί στο δομικά ακέραιο χωρίς ρωγμές δοκίμιο (LC0). Η συνάρτηση μεταφοράς του δομικά άρτιου δοκιμίου προσδιορίστηκε με βάση τη καινοτόμα μέθοδο των Συστημάτων Πολλαπλών Μηχανικών Εμπεδήσεων - MIS (Ενότητα 3.3.3) η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και περιγράφεται από την Εξίσωση (3.35).

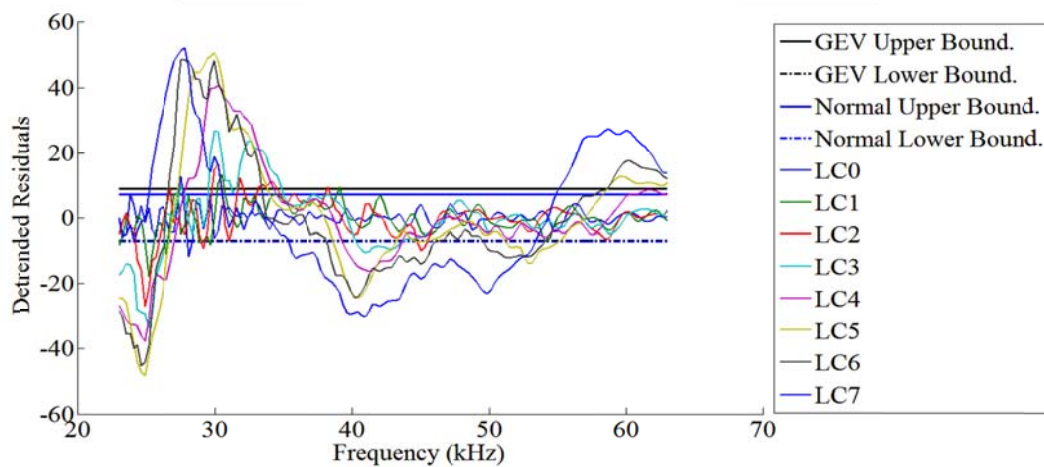




Σχήμα 5.28: Συνάρτηση μεταφοράς-μοντέλο MIS δομικά άρτιου δοκιμίου (LC0).

Πίνακας 5.10: Παράμετροι συνάρτησης μεταφοράς μοντέλου MIS ( $K_0^{st}=6e+7$  N/m).

$M$	$freq_{0,j}(kHz)$	$A_j^{eff}(mm^2)$	$H_j^{eff}(mm)$	$Q_j^{st}$
1	2.49	0.10	45.82	31.45
2	3.11	0.40	36.71	15.55
3	2.90	0.37	39.32	17.83
4	2.46	11.89	46.31	2.66
5	4.02	1.50	28.38	7.54
6	4.29	0.07	26.57	31.75
7	3.33	3.05	34.24	3.37
8	4.49	1.12	25.41	6.99
9	5.20	0.05	21.95	19.69
10	6.00	0.52	19.03	8.38
11	6.28	0.01	18.17	99.01



Σχήμα 5.29: Στατιστικός έλεγχος υπολειμματικών τιμών για κάθε κύκλο φόρτισης.

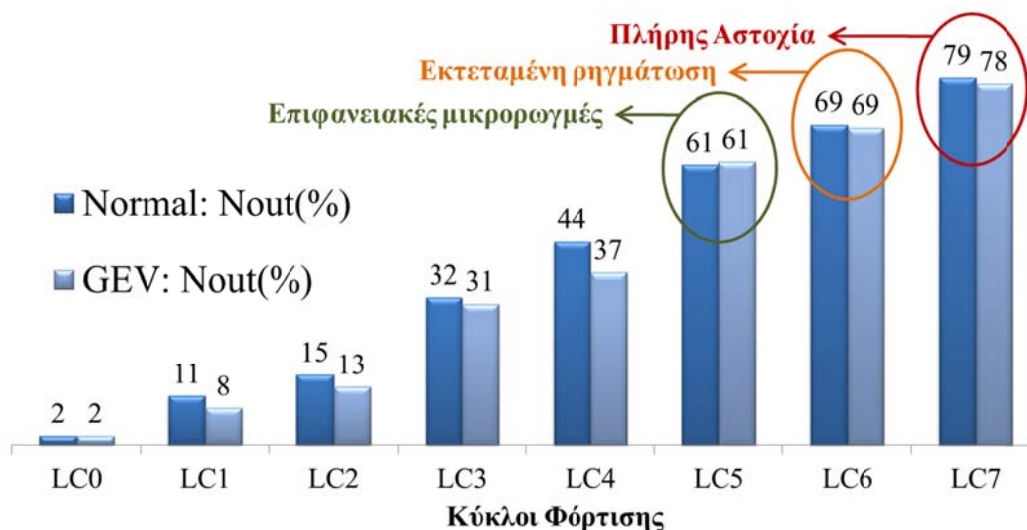
Ο στατιστικός έλεγχος των κανονικοποιημένων υπολοίπων-DR (Detrended Residuals, Σχήμα 3.19) πραγματοποιήθηκε τόσο με την κανονική κατανομή-Normal (Normal Distribution) όσο και με τη γενικευμένη κατανομή των ακραίων τιμών-GEV (Generalized Extreme Values Distribution). Το άνω όριο εμπιστοσύνης των  $DRUr_0^d$ , προσδιορίστηκε για βεβαιότητα  $P_{up}=99.5\%$  και το κάτω όριο  $Lr_0^d$ , για βεβαιότητα  $P_{low}=0.5\%$  (Εξισώσεις 3.59). Η ανάλυση επικεντρώθηκε στη περιοχή του φάσματος απόκρισης του  $Re(Z_{St})$  10-65kHz όπου εμφανίζονται οι εντονότερες μεταβολές μεταξύ των διαφορετικών κύκλων φόρτισης.

Στο Σχήμα 5.28 απεικονίζεται η προσαρμογή της συναρτήσεως μεταφοράς στα δεδομένα της  $Re(Z_{St})$ , ενώ οι παράμετροι του μοντέλου MIS (Εξίσωση 3.35) παραθέτονται στον Πίνακα 5.10. Από το στατιστικό έλεγχο των DR με βάση τα όρια εμπιστοσύνης που προσδιορίζονται από τη κανονική κατανομή και την κατανομή GEV (Σχήμα 5.29), υπολογίζεται σε κάθε περίπτωση ο αριθμός υπολοίπων που βρίσκονται εκτός των ορίων εμπιστοσύνης (Outliers),  $N_{out}$  (Providakis, Liarakos and Voutetaki, 2010; Providakis and Liarakos, 2011, 2014).

Στο Σχήμα 5.30 απεικονίζεται η διαφοροποίηση του αριθμού των υπολειμματικών τιμών που θέτονται εκτός ελέγχου συναρτήσει των κύκλων φόρτισης. Κατά τους πρώτους κύκλους φόρτισης μέχρι και τον LC2 (200 kN) εκτιμάται ότι οι ανιχνευόμενες μεταβολές της δυσκαμψίας οφείλονται στο πορώδες του σκυροδέματος που σταδιακά καταστρέφεται κάτω από την επίδραση του θλιπτικού φορτίου, μεταβάλλοντας τη δυσκαμψία του. Από τον κύκλο φόρτισης LC3 και μετά αρχίζουν να δημιουργούνται εσωτερικές μικρορωγμές λόγω της απώλειας συνοχής που πιθανώς λαμβάνει χώρα στις διεπιφάνειες μεταξύ της τσιμεντόπαστας και των κόκκων των αδρανών υλικών. Στους επόμενους κύκλους φόρτισης νέες μικρορωγμές εμφανίζονται και οι υφιστάμενες επεκτείνονται οδηγώντας τελικά στην καθολική αστοχία του υλικού.

Όσο λοιπόν η δομική κατάσταση του δοκιμίου απομακρύνεται από αυτή που περιγράφει η συνάρτηση μεταφοράς (Σχήμα 5.28), η οποία αντιπροσωπεύει τη κατάσταση του δομικά αέριου δοκιμίου (Κατάσταση Αναφοράς), τόσο περισσότερες τιμές των υπολοίπων θα βρίσκονται εκτός των ορίων εμπιστοσύνης. Από τα παραπάνω αποτελέσματα αποδεικνύεται ότι ο συνδυασμός της μεθόδου SCoRe και των μοντέλων MIS συγκροτούν ένα αξιόπιστο εργαλείο για τη

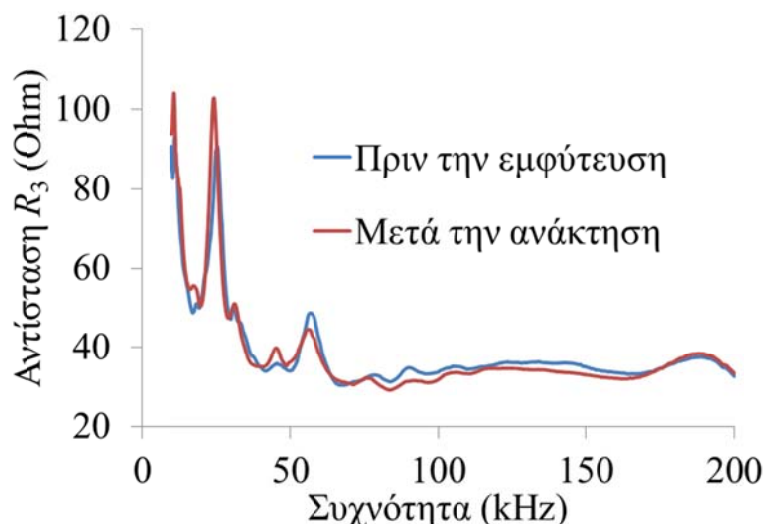
παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας και την ανίχνευση μηχανικών βλαβών σε ένα δομικό σύστημα σκυροδέματος.



**Σχήμα 5.30:** Αριθμός υπολειμματικών τιμών εκτός ελέγχου για κάθε κύκλο φόρτισης-επίπεδο βλάβης.

Στο Κεφάλαιο 4 και πιο συγκεκριμένα στην Ενότητα 4.2, διατυπώθηκε η ανάγκη παρασκευής ενός «ευφυνούς» αδρανούς (SMA), το οποίο μεταξύ των άλλων θα δίνει τη δυνατότητα ανάκτησης του από τη μάζα του σκυροδέματος έτσι ώστε να είναι σε θέση να επαναχρησιμοποιηθεί. Επίσης τέθηκε το κριτήριο της επαρκούς μηχανικής αντοχής που θα πρέπει να διαθέτει το κέλυφος του SMA ώστε να είναι σε θέση να παραλαμβάνει ασφαλώς τα δυσμενή μηχανικά φορτία προστατεύοντας το PIC 151. Μετά το πέρας της παραπάνω εργαστηριακής διαδικασίας το TBSA ανακτήθηκε σχεδόν ανεπηρέαστο μετά από τρεις μήνες εμφύτευσης στη μάζα του σκυροδέματος. Από το συγκριτικό γράφημα του Σχήματος 5.31, διαπιστώνεται ότι το PIC 151 συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά μετά την ανάκτηση (Σχήμα 5.24), εμφανίζοντας πολύ μικρές αποκλίσεις στην απόκριση του σε σχέση με την αρχική απόκριση που εμφάνιζε πριν την εμφύτευση.

Συνοψίζοντας, το TBSA α) τοποθετήθηκε επιτυχώς στη μάζα του σκυροδέματος κατά τη σκυροδέτηση προστατεύοντας επαρκώς το PIC 151 τόσο από τις μηχανικές καταπονήσεις παρασκευής του δοκιμίου (δόνηση, κτυπήματα κ.α.), όσο και από τη υγρασία και β) το κέλυφος από Teflon και η εποξική κόλλα (Permatex, 2011) αποδείχθηκαν ικανά να διασφαλίσουν τη συνοχή του αισθητήρα και την αρτιότητα του PIC 151.



**Σχήμα 5.31:** Αξιολόγηση επανακτησιμότητας (Recoverability) του TBSA.

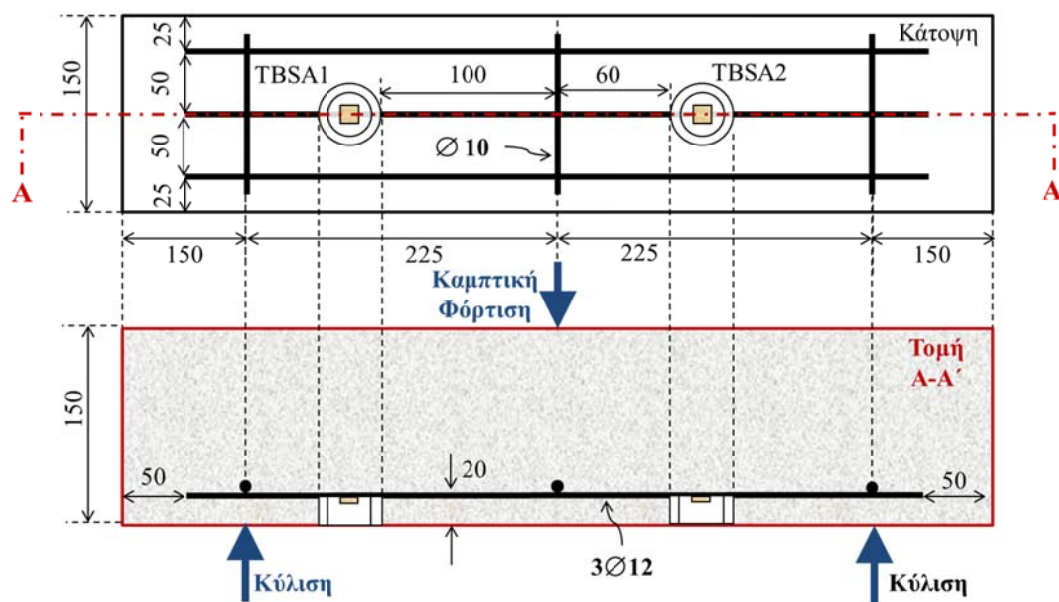
Σημειώνεται ότι στη διεθνή βιβλιογραφία οι μόνες εφαρμογές επαναχρησιμοποιούμενων αισθητήρων με βάση το PZT έχουν δημοσιευθεί από τους Yang, et al (2010) και τους Tawie and Lee (2010a). Ωστόσο ο σχεδιασμός του TBSA προχωράει ένα βήμα πιο μπροστά καθώς α) λόγω του υλικού παρασκευής του δεν αντιμετωπίζει τα προβλήματα ανθεκτικότητας των μεταλλικών κελυφών που αναφέρουν οι παραπάνω συγγραφείς και β) λειτουργεί σαν αδρανές υλικό του σκυροδέματος αποτελώντας κομμάτι της μικροδομής του και όχι ως ένα ετερόκλητο σώμα στο εσωτερικό του. Όλες οι παραπάνω διαπιστώσεις καταστούν το TBSA μια σημαντική συνεισφορά της διατριβής στο ΜΚΕ σκυροδέματος με SMA.

#### **5.4. Ανίχνευση Βλαβών σε δοκίμιο δοκού σκυροδέματος με τη χρήση «ευφυνών» αδρανών**

Στη παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η χρήση των TBSA στην ανίχνευση βλαβών μιας δοκού σκυροδέματος C20/25, σύστασης ίδιας με εκείνη που εφαρμόστηκε και στις προηγούμενες ενότητες (βλ. Ενότητα 5.2), διαστάσεων 150x150x750mm, η οποία καταπονείται σε κάμψη τριών σημείων. Το TBSA προσδέθηκε στις ράβδους του εφελκυσμένου οπλισμού της δοκού. Στο Σχήμα 5.32 απεικονίζεται η κάτοψη της δοκού και οι συνοριακές συνθήκες της καμπτικής φόρτισης.

Τα TBSA προσδέθηκαν στην ενδιάμεση διαμήκη ράβδο του πλέγματος του οπλισμού και στη συνέχεια μαζί με το πλέγμα του οπλισμού τοποθετήθηκαν κατά τη σκυροδέτηση στη μάζα της δοκού (Σχήματα 5.32 και 5.33). Στη συγκεκριμένη

πειραματική διαδικασία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μόνον εφελκόμενος οπλισμός προκειμένου να προκύψει μια ελεγχόμενη διαδικασία εφελκυστικής αστοχίας.

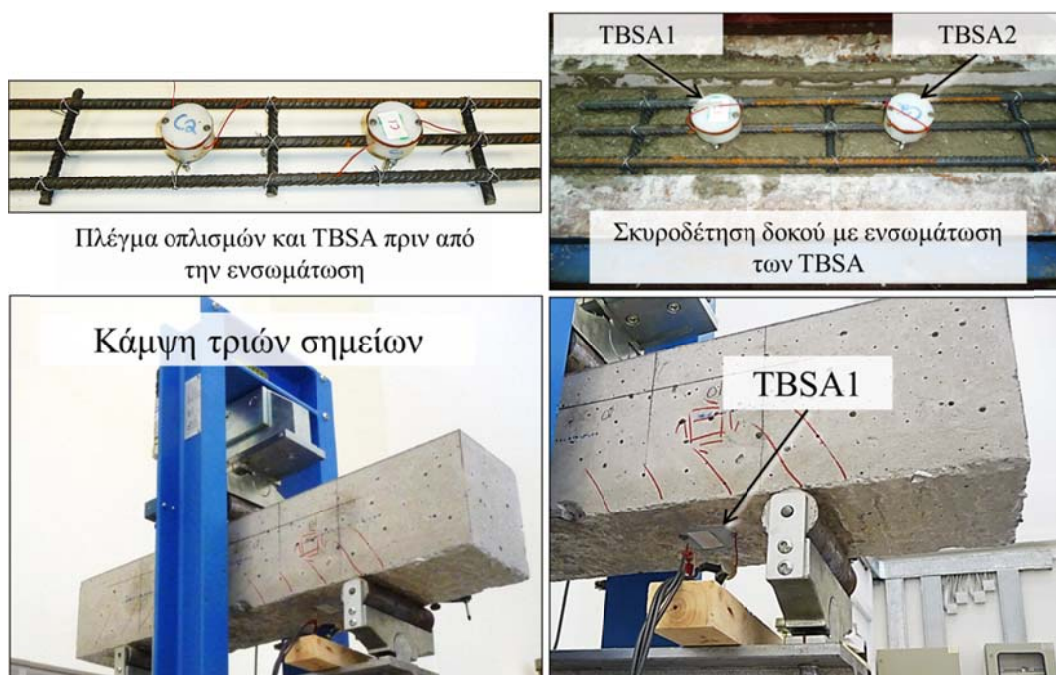


**Σχήμα 5.32:** Διαμόρφωση δοκού σκυροδέματος και συνοριακές συνθήκες κάμψης τριών σημείων.

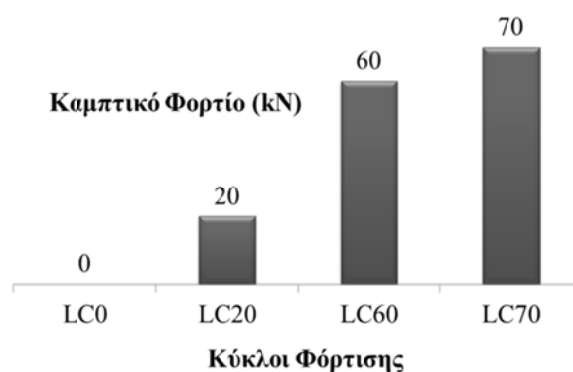
Η φόρτιση της δοκού έλαβε χώρα σε 4 ανομοιόμορφους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης (σχήμα 5.34) με κοινό ρυθμό φόρτισης για όλες τις περιπτώσεις 0.5kN/s. Κατά την εξωτερική εποπτεία της δοκού διαπιστώθηκε ότι οι πρώτες επιφανειακές διατμητικές ρωγμές άρχισαν να εμφανίζονται στον κύκλο φόρτισης L60 (Σχήμα 5.34). Επιπλέον κατά τον συγκεκριμένο κύκλο φόρτισης διαπιστώθηκε και ηχητικά η έναρξη της αστοχίας. Η καταπόνηση συνεχίστηκε και για έναν ακόμη κύκλο φόρτισης (LC70, 70kN) προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της επέκτασης των διατμητικών ρωγμών στην απόκριση των TBSA.

Όπως και στη περίπτωση μελέτης του κυβικού δοκιμίου της Ενότητας 5.3, μετά από κάθε κύκλο φόρτισης καταγράφηκαν με τη χρήση του αυτοματοποιημένου συστήματος T-WiEYE, η φασματική απόκριση της ηλεκτρομηχανικής εμπίδησης (HME)  $Z_3$ , των εμφυτευμένων TBSA και καταχωρήθηκαν στη βάση δεδομένων για μετα-επεξεργασία και αξιολόγηση. Στο Σχήμα 5.35, απεικονίζεται η απόκριση της ηλεκτρικής αντίστασης  $R_3$  (Πραγματικό μέρος HME) του TBSA1 για κάθε κύκλο φόρτισης. Το TBSA2 παρουσίασε κάποια προβλήματα επαφής μεταξύ των ηλεκτροδίων και αποσυνδέθηκε τελικά από τη διαδικασία παρακολούθησης.





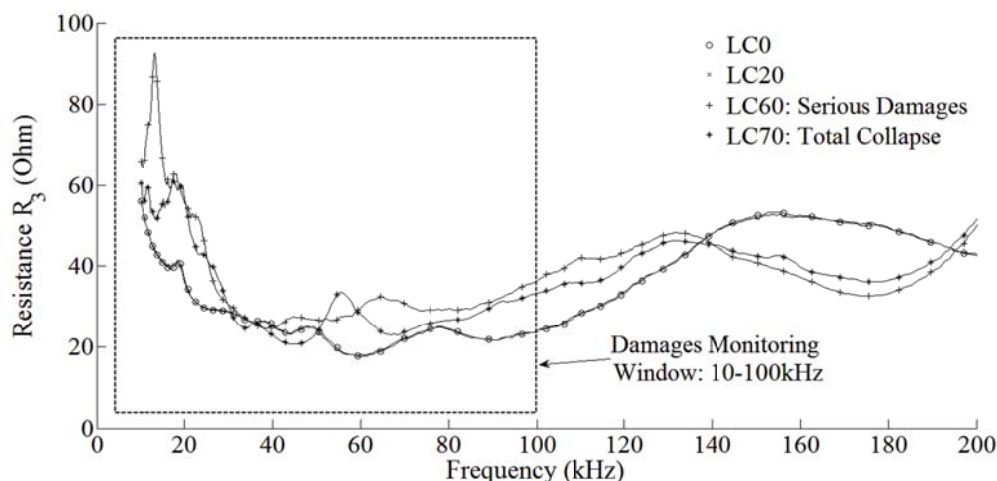
Σχήμα 5.33: Ενσωμάτωση TBSA και πειραματική διάταξη κάμψης τριών σημείων.



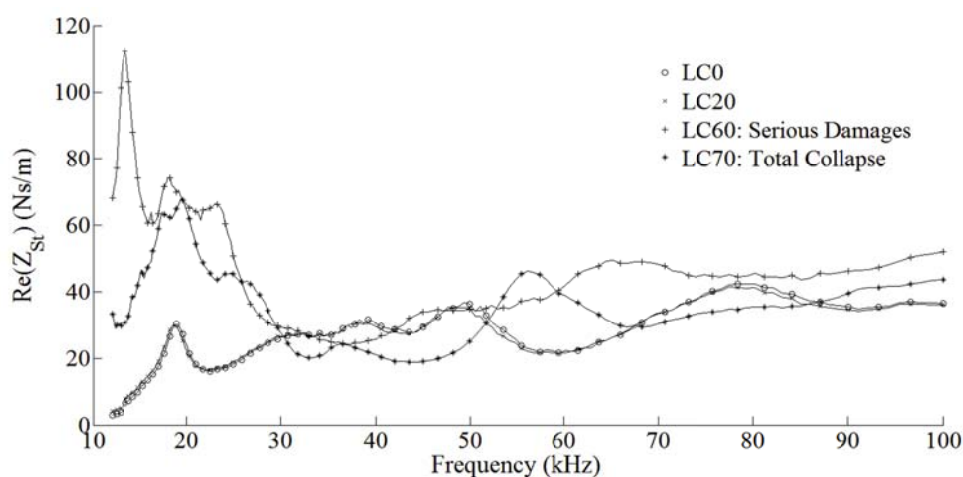
Σχήμα 5.34: Κύκλοι φόρτισης δοκού.

Το εύρος των συχνοτήτων καταγραφής βρίσκεται μεταξύ των 10 και των 200 kHz με βήμα συχνότητας 380 kHz (αριθμός καταγραφών ανά φάσμα  $F=500$ ). Και στη παρούσα ανάλυση εφαρμόστηκε η πρωτότυπη προσέγγιση των συχνοτήτων σάρωσης άνω των 100 kHz με το AD5933 EB (βλ. Ενότητα 3.4.1).

Από το Σχήμα 5.35 διαπιστώνεται ότι οι σημαντικότερες και εντονότερες μεταβολές του φάσματος της ηλεκτρικής αντίστασης εντοπίζονται στη περιοχή συχνοτήτων μεταξύ 10-100 kHz. Για τη συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων υπολογίστηκε και η φασματική απόκριση της μηχανικής εμπίδησης,  $Z_{St}$  με βάση τις ηλεκτρομηχανικές ιδιότητες του PIC 151 (Πίνακας 2.1) και τη χρήση των Εξισώσεων (3.1)-(3.3), (Σχήμα 5.36).



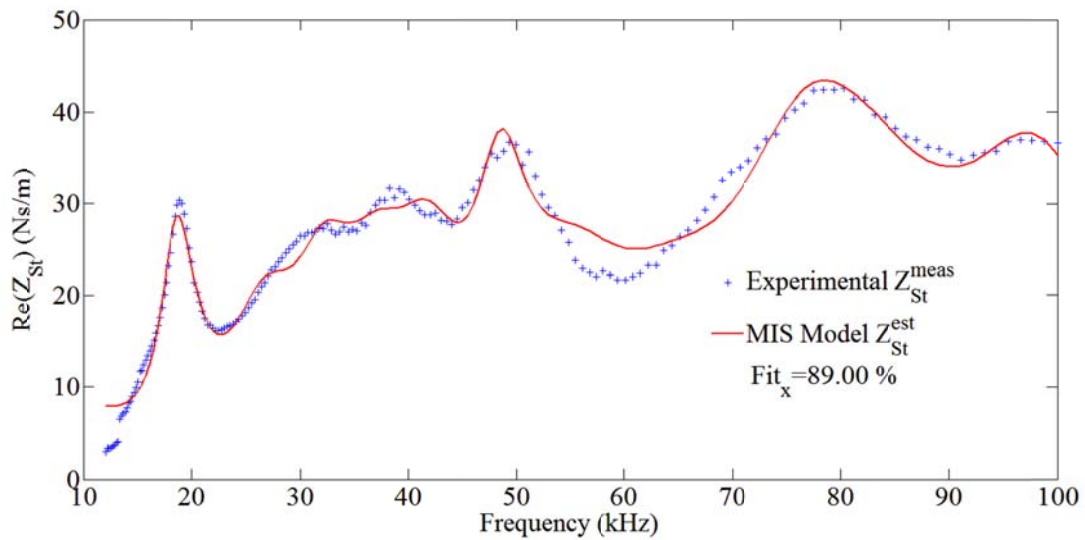
**Σχήμα 5.35:** Φασματική απόκριση της ηλεκτρικής αντίστασης  $R_3$  (Resistance) μετά από κάθε κύκλο φόρτισης για το TBSA1.



**Σχήμα 5.36:** Φασματική απόκριση του πραγματικού μέρους της μηχανικής εμπέδησης,  $Z_{st}^{meas}$  μετά από κάθε κύκλο φόρτισης.

Στη παρούσα περίπτωση μελέτης επιλέγεται για άλλη μια φορά να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας της δοκού, το πραγματικό μέρος της  $Z_{st}$ . Η αξιολόγηση των μεταβολών της  $Z_{st}$  πραγματοποιήθηκε με το στατιστικό έλεγχο των υπολειμματικών τιμών εφαρμόζοντας τη μέθοδο SCoRe (βλ. Ενότητα 3.4, Σχήμα 3.19). Ως Ηλεκτρο-Μηχανική Υπογραφή Αναφοράς –  $RSS_{meas}$  (Reference State Signature) λήφθηκε το πραγματικό μέρος της μηχανικής εμπέδησης,  $Re(Z_{st})$  το οποίο αντιστοιχεί στη δομικά ακέραιη χωρίς βλάβες δοκό (LC0). Η συνάρτηση μεταφοράς της δομικά άρτιας δοκού προσδιορίστηκε με βάση τη μέθοδο των Συστημάτων Πολλαπλών Μηχανικών Εμπεδήσεων-MIS (Ενότητα 3.3.3) η οποία περιγράφεται από την εξίσωση (3.35).

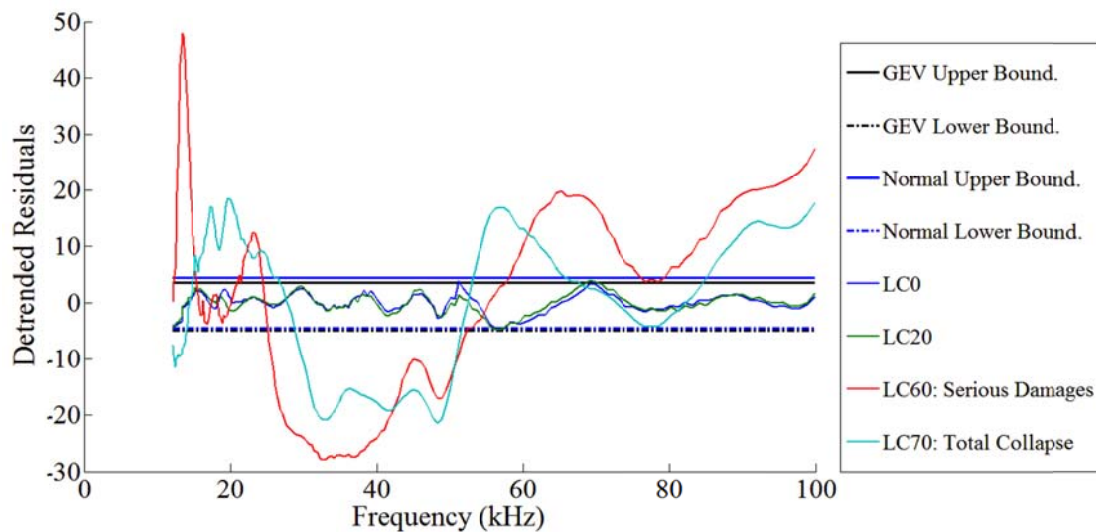




Σχήμα 5.37: Συνάρτηση μεταφοράς-μοντέλο MIS δομικά άρτιας δοκού (LC0).

Πίνακας 5.11: Παράμετροι συνάρτησης μεταφοράς μοντέλου MIS ( $K_0^{St}=5e+7$  N/m).

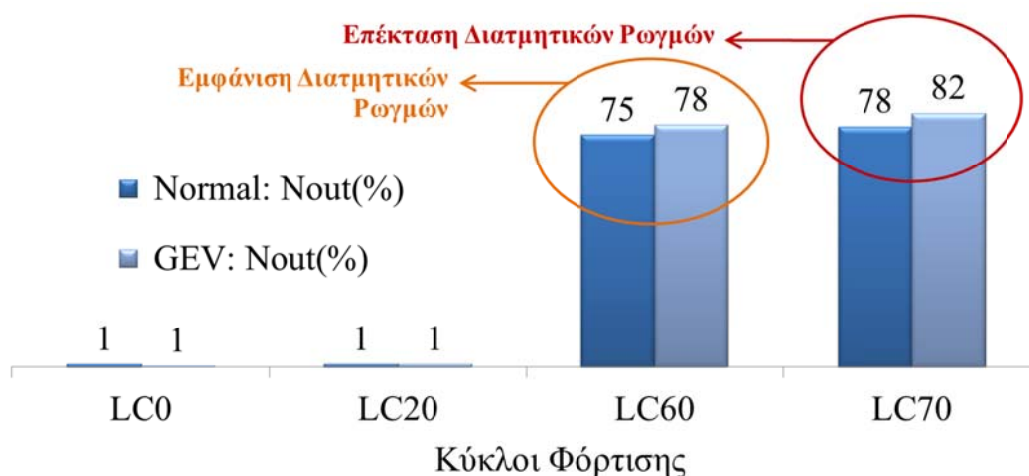
$M$	$freq_{0,j}(kHz)$	$A_j^{eff}(mm^2)$	$H_j^{eff}(mm)$	$Q_j^{st}$
1	18.40	1.36	62.03	4.64
2	26.02	0.97	43.85	3.39
3	31.84	0.88	35.84	4.30
4	41.39	0.65	27.57	5.47
5	48.40	0.64	23.58	8.67
6	76.60	1.18	14.90	4.65
7	99.23	0.03	11.50	19.42



Σχήμα 5.38: Στατιστικός έλεγχος υπολειμματικών τιμών για κάθε κύκλο φόρτισης.

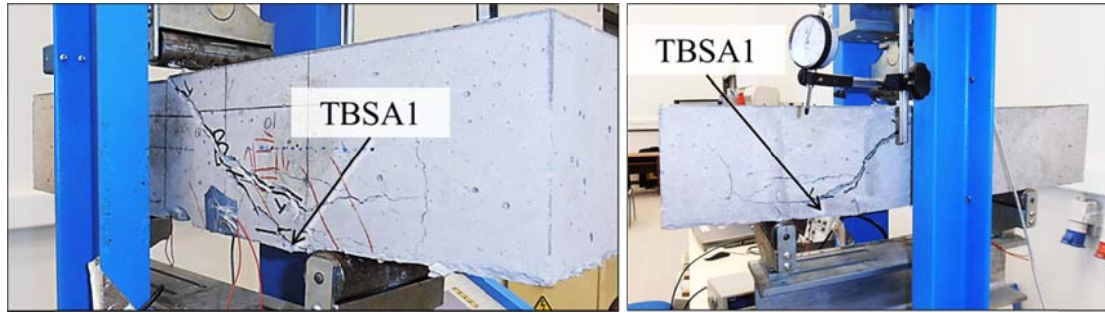
Ο στατιστικός έλεγχος των κανονικοποιημένων υπολοίπων-DR (Detrended Residuals, Σχήμα 3.19) πραγματοποιήθηκε τόσο με την κανονική κατανομή (Normal Distribution) όσο και με τη γενικευμένη κατανομή των ακραίων τιμών-GEV (Generalized Extreme Values Distribution). Το άνω όριο εμπιστοσύνης των DR  $Ur_0^d$ , προσδιορίστηκε για βεβαιότητα  $P_{up}=99.5\%$  και το κάτω όριο  $Lr_0^d$ , για βεβαιότητα  $P_{low}=0.5\%$  (Εξισώσεις 3.59).

Στο Σχήμα 5.37 απεικονίζεται η προσαρμογή της συναρτήσεως μεταφοράς στα δεδομένα της  $Re(Z_{SI})$ , ενώ οι παράμετροι του μοντέλου MIS (Εξίσωση 3.35) παραθέτονται στον Πίνακα 5.11. Από το στατιστικό έλεγχο των DR με βάση τα όρια εμπιστοσύνης που προσδιορίζονται από τη κανονική κατανομή και την κατανομή GEV (Σχήμα 5.38), υπολογίζεται σε κάθε περίπτωση ο αριθμός των υπολοίπων που βρίσκονται εκτός των ορίων εμπιστοσύνης (Outliers),  $N_{out}$  (Providakis, Liarakos and Voutetaki, 2010; Providakis and Liarakos, 2011, 2014). Στο Σχήμα 5.39 απεικονίζεται η διαφοροποίηση του αριθμού των υπολειμματικών τιμών που θέτονται εκτός ελέγχου συναρτήσει των κύκλων φόρτισης και της επέκτασης των διατμητικών ρωγμών.



**Σχήμα 5.39:** Αριθμός υπολειμματικών τιμών εκτός ελέγχου για κάθε κύκλο φόρτισης-επίπεδο βλάβης.

Με βάση την εξέλιξη του αριθμού των υπολοίπων που θέτονται εκτός ελέγχου σε κάθε κύκλο φόρτισης  $Nout$  (%), όπως διαπιστώνεται και από το Σχήμα 5.39, όσο η δομική κατάσταση της δοκού απομακρύνεται από αυτή που περιγράφει η συνάρτηση μεταφοράς (Σχήμα 5.37), τόσο περισσότερες υπολειμματικές τιμές θα βρίσκονται εκτός των ορίων εμπιστοσύνης.



**Σχήμα 5.40:** Δοκός μετά των κύκλο φόρτισης LC70. Επέκταση διατμητικών ρωγμών και πλήρης αστοχία.

Από την μελέτη που παρουσιάστηκε αποδεικνύεται ότι όπως και στη περίπτωση του θλιβόμενου κυβικού δοκιμίου με εμφυτευμένο TBSA (Βλ. Ενότητα 5.3), ο συνδυασμός της μεθόδου SCoRe και των μοντέλων MIS αποτελούν ένα αξιόπιστο εργαλείο για τη παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας και την ανίχνευση μηχανικών βλαβών σε δομικά μέλη σκυροδέματος.



# Κεφάλαιο 6

## Συμπεράσματα - Προτάσεις

### 6.1. Εισαγωγή

Με βάση το ερευνητικό έργο που υλοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής, προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα και παράχθηκε πρωτότυπη τεχνογνωσία σχετικά με την ανίχνευση βλαβών και εν γένει τον μη καταστροφικό έλεγχο (ΜΚΕ) μελών σκυροδέματος, με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου οι οποίες στηρίζονται:

- α) στην ενόργανη καταγραφή της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (ΗΜΕ) ή/και της Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας (ΗΜΑ) στο πεδίο των συχνοτήτων,
- β) στην προσομοίωση της μηχανικής και της ηλεκτρικής απόκρισης της «υγιούς» δομικά κατασκευής με χρήση πολυωνυμικών ή τριγωνομετρικών συναρτήσεων μεταφοράς,
- γ) στην ανάπτυξη μεθοδολογιών αξιολόγησης των φασμάτων απόκρισης της ΗΜΕ και της ΗΜΑ, με βάση τον στατιστικό έλεγχο των υπολοίπων των συναρτήσεων μεταφοράς,
- δ) στην ενσωμάτωση των πιεζοηλεκτρικών υλικών με τη μορφή «ευφών» αδρανών στη μάζα του σκυροδέματος από τα πρώτα στάδια της παρασκευής των δομικών στοιχείων, και
- ε) στο σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου ασύρματου συστήματος καταγραφής και αποθήκευσης σε βάση δεδομένων των

μετρήσεων της HME, το οποίο είναι χαμηλού κόστους και προσφέρει τη δυνατότητα απομακρυσμένης διαδικτυακής πρόσβασης στα δεδομένα.

## **6.2. Αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας με στατιστικό έλεγχο των υπολειμματικών τιμών**

Οι στατιστικοί δείκτες βλάβης (RMSD, MAPD) που προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία για την αξιολόγηση των μεταβολών στα καταγραφόμενα φάσματα των HME/HME, προσφέρουν μια χρήσιμη πρώτη εκτίμηση για την έκταση διαφοροποίησης της δομικής κατάστασης μιας κατασκευής σκυροδέματος. Όμως, όπως διαπιστώθηκε από τη σχετική διερεύνηση, εμφανίζουν δύο πολύ σημαντικά μειονεκτήματα. Το πρώτο μειονέκτημα εντοπίζεται στο γεγονός ότι για να εφαρμοστούν απαιτείται η ακριβής γνώση της φασματικής απόκρισης του «υγιούς» υπό μελέτη δομικού συστήματος (Φάσματα Αναφοράς, RSS: Reference State Signatures). Η πληροφορία αυτή στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογών δεν είναι διαθέσιμη. Το δεύτερο σημείο στο οποίο μειονεκτούν εντοπίζεται στο γεγονός ότι εξετάζουν τη μεταβολή των φασμάτων απόκρισης αθροιστικά σε όλο το εύρος των συχνοτήτων σάρωσης. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό συνεπάγεται, ότι οι δείκτες βλάβης δεν έχουν την ικανότητα να εστιάζουν στις περιοχές όπου λαμβάνουν χώρα οι εντονότερες μεταβολές μεταξύ ενός φάσματος που αντιστοιχεί στη δομικά «υγιή» κατασκευή και ενός φάσματος που αντιστοιχεί σε μια κατασκευή με δομικές βλάβες.

Προκειμένου να ξεπεραστούν τα σφάλματα που μπορεί να εισάγουν οι δείκτες βλάβης και να διευρυνθεί η ικανότητα των μεθόδων αξιολόγησης της δομικής ακεραιότητας, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε η μέθοδος SCoRe (Statistical Control and Evaluation of simulation Residuals). Η συγκεκριμένη μεθοδολογία βασίζεται στη στατιστική ανάλυση των υπολοίπων (Residuals) μιας συναρτήσεως μεταφοράς, η οποία προσομοιώνει-εκτιμά την πραγματική απόκριση του υπό μελέτη «υγιούς» δομικού συστήματος στο πεδίο των συχνοτήτων. Με βάση τα προσδιοριζόμενα υπόλοιπα υπολογίζονται τα όρια εμπιστοσύνης τους με τη χρήση τόσο της Κανονικής Κατανομής, όσο και της Γενικευμένης Κατανομής των Ακραιών Τιμών. Ως μέγεθος αξιολόγησης της δομικής ακεραιότητας λαμβάνεται ο αριθμός των υπολοίπων που θέτονται εκτός στατιστικού ελέγχου (Outliers), κατά τη σύγκριση του αναλυτικού φάσματος απόκρισης της συναρτήσεως μεταφοράς και του φάσματος

απόκρισης που καταγράφεται πειραματικά και αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη κατάσταση δομικής ακεραιότητας της υπό παρακολούθηση κατασκευής (CSS: Current State Signature).

Από την αριθμητική αξιολόγηση της μεθόδου SCoRe, η οποία παρουσιάζεται στην Ενότητα 3.5 της παρούσας διατριβής, διαπιστώνεται ότι η συγκεκριμένη διαδικασία έχει την ικανότητα να ανιχνεύει αξιόπιστα τις μηχανικές βλάβες που εμφανίζονται με τη μορφή ρωγμών στη μάζα του σκυροδέματος, ενώ επιπλέον εντοπίζει και την περιοχή των φασμάτων απόκρισης οι οποίες επηρεάζονται περισσότερο από μια συγκεκριμένη βλάβη. Η ξεκάθαρη υπεροχή της προτεινόμενης μεθόδου έναντι των υφιστάμενων δεικτών βλάβης, διαπιστώνεται από τη σύγκριση των Σχημάτων 3.32 και 3.34, όπου αποδεικνύεται ότι η μέθοδος SCoRe αφού ανιχνεύσει επιτυχώς την περιοχή συχνοτήτων με τις εντονότερες μεταβολές των κανονικοποιημένων (DR: Detrended Residuals), δίνει μια εικόνα εξέλιξης του αριθμού των τιμών που θέτονται εκτός στατιστικού ελέγχου (Σχήμα 3.34), αντίστοιχη με τη σοβαρότητα των μηχανικών βλαβών (Σχήμα 3.24). Οι δείκτες βλάβης (Σχήμα 3.32) να μεν εντοπίζουν τη διαφοροποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς μεταξύ της «υγιούς» κατασκευής και εκείνης που έχει βλάβες, ωστόσο δεν έχουν την ικανότητα να περιγράψουν ξεκάθαρα την κλιμακούμενη επιδείνωση της βλάβης με την επέκταση των ρωγμών (Σχήμα 3.24). Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και από την εφαρμογή της μεθόδου SCoRe στις πειραματικές εφαρμογές που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5 της παρούσας διατριβής.

### **6.3. Συναρτήσεις μεταφοράς και προσομοίωση απόκρισης ηλεκτρομηχανικών συστημάτων**

Η συνάρτηση μεταφοράς του ηλεκτρομηχανικού συστήματος που ενσωματώνει την «υγιή» δομικά κατασκευή είναι δυνατό να προσεγγιστεί είτε με τη χρήση ρητών πολυωνυμικών συναρτήσεων της γωνιακής συχνότητας και της μεταβλητής Laplace ( $s=i\omega$ ), είτε με τη χρήση αναλυτικών θεωρητικών μοντέλων. Οι παράμετροι των συναρτήσεων μεταφοράς προκύπτουν από την προσομοίωση της πειραματικώς καταγραφόμενης ηλεκτρικής ή μηχανικής αποκρίσεως του «υγιούς» συστήματος με τη μέθοδο των μη-γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων. Η ηλεκτρική απόκριση, η οποία αποτελεί και τη φυσική έξοδο του Ηλεκτρο-Μηχανικού Συστήματος,



εκφράζεται με την Ηλεκτρο-Μηχανική Εμπέδηση (HME) που μετράται στους ακροδέκτες του «ευφυσού» αδρανούς.

Στη περίπτωση που επιλέγεται η απόκριση της HME να προσεγγιστεί από μια ρητή πολυωνυμική συνάρτηση της μεταβλητής Laplace, η εφαρμογή των μη-γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων υλοποιείται με τη χρήση του εμπορικού πακέτου εργαλείων της MATLAB, FDIDENT. Προκειμένου να επιτευχθεί η αυτονομία της μεθόδου SCoRe από εμπορικά υπολογιστικά πακέτα, τα οποία έχουν σημαντικό κόστος, αναπτύχθηκε μια καινοτόμα μεθοδολογία προσομοίωσης της HME η οποία στηρίζεται στη χρήση ρητών πολυωνυμικών συναρτήσεων της γωνιακής συχνότητας.

Οι παράμετροι της συγκεκριμένης πολυωνυμικής συνάρτησης προσδιορίζονται από τη γραμμικοποίηση του προβλήματος των ελαχίστων τετραγώνων (Εξισώσεις 3.27-3.31) και για τον λόγο αυτό η διαδικασία ονομάστηκε Μέθοδος της Γραμματικοποιημένης Παλινδρόμησης-LRM (Linearized Regression Method). Η LRM εφαρμόστηκε επιτυχώς στις πειραματικές εφαρμογές παρακολούθησης της ανάπτυξης της δυσκαμψίας του πρώιμου σκυροδέματος, οι οποίες παρουσιάζονται στην Ενότητα 5.1. Ως βασικό εργαλείο της μεθόδου SCoRE, η μέθοδος LRM όπως σαφώς διαπιστώνεται και από τα Σχήματα 5.10, 5.12, 5.14, 5.16 και 5.18, επιτυγχάνει να προσομοιώσει αξιόπιστα τη φασματική απόκριση της ηλεκτρικής αντίστασης  $R_3$ , η οποία αντιστοιχεί σε πρώιμο σκυρόδεμα ηλικίας μόλις 3 ωρών. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις προσομοίωσης, ο δείκτης προσαρμογής (Εξίσωση 3.34) στα πειραματικά δεδομένα είναι άνω του 99%.

Μια ακόμη σημαντική καινοτομία της παρούσας διατριβής, αποτελεί η υιοθέτηση της μηχανικής εμπέδησης (Dynamic Mechanical Impedance-DMI) της κατασκευής που φέρει το PZT,  $Z_{St}$  ως εργαλείο παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας μια κατασκευής από σκυρόδεμα. Όπως αναπτύχθηκε στην Ενότητα 3.1, η μηχανική εμπέδηση  $Z_{St}$ , είναι δυνατό να υπολογιστεί από τις πειραματικές καταγραφές της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης ή της Ηλεκτρο-Μηχανικής Αγωγιμότητας με βάση τις Εξισώσεις (3.1)-(3.3) και τη γνώση των ηλεκτρομηχανικών χαρακτηριστικών του χρησιμοποιούμενου PZT. Αναφέρεται εδώ ότι σε όλες τις εφαρμογές και τις θεωρητικές αναλύσεις της παρούσας διατριβής, το πιεζοηλεκτρικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το PIC 151 της PI Ceramics (PI Ceramics, 2014). Στη περίπτωση που ως μέγεθος παρακολούθησης επιλέγεται η μηχανική εμπέδηση  $Z_{St}$ , η προσομοίωση της για το προσδιορισμό της συναρτήσεως μεταφοράς της «υγιούς»

δομικά κατασκευής υλοποιείται με τη πρωτότυπη μέθοδο MIS (Multi mechanical Impedance System), η οποία παρουσιάζεται στην Ενότητα 3.3.3.

Η μέθοδος MIS στηρίζεται στον υπολογισμό των παραμέτρων ενός πολυβάθμιου διακριτού δυναμικού συστήματος το οποίο είναι ισοδύναμο με την πραγματική κατασκευή και αποτελείται από μηχανικά στοιχεία διατμητικής λειτουργίας συνδεδεμένα μεταξύ τους εν παραλλήλω (Σχήμα 3.13). Οι παράμετροι του πολυβάθμιου συστήματος υπολογίζονται με βάση την πειραματικώς καταγραφόμενη απόκριση της μηχανικής εμπίδησης  $Z_{Si}$  και κάποια μέθοδο μη-γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων. Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος, προκύπτει μαθηματικά από το άθροισμα των αναλυτικών συναρτήσεων που περιγράφουν τις συνιστώσες μηχανικές εμπεδήσεις του ισοδύναμου πολυβάθμιου δυναμικού συστήματος.

Ως αναλυτικό μοντέλο περιγραφής της μηχανικής εμπίδησης της κάθε συνιστώσας του συστήματος, λήφθηκε το μαθηματικό μοντέλο που έχει προταθεί από τους Providakis and Liarakos (2014). Οι συναρτήσεις μεταφοράς που προκύπτουν από τη μέθοδο MIS, χρησιμοποιήθηκαν επιτυχώς ως επιμέρους εργαλεία της μεθόδου SCoRe, σε διαδικασίες εντοπισμού δομικών βλαβών σε στοιχεία σκυροδέματος, τόσο στην αριθμητική εφαρμογή/αξιολόγηση που παρουσιάζεται στην Ενότητα 3.5, όσο και στις πειραματικές εφαρμογές παρακολούθησης της εξέλιξης της αστοχίας του σκυροδέματος οι οποίες παρουσιάζονται στις Ενότητες 5.3 και 5.4.

#### **6.4. Ολοκληρωμένο ασύρματο σύστημα αυτόματης καταγραφής της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπίδησης**

Η ανάγκη για συνεχή και ολική παρακολούθηση της μηχανικής συμπεριφοράς ενός δομικού συστήματος από σκυρόδεμα, από τα πρώτα στάδια της σκυροδέτησης των δομικών του στοιχείων, οδήγησε στην ανάπτυξη του ολοκληρωμένου συστήματος αυτόματης καταγραφής της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπίδησης, T-WiEYE (Teflon-based Wireless integratEd monitoring sYstEm), (Βλ. Ενότητα 4.3). Το συγκεκριμένο σύστημα, το οποίο αποτελεί σημαντική τεχνολογική συνεισφορά της παρούσας διατριβής, συνίσταται από το χαμηλού κόστους τυπωμένο κύκλωμα AD5933 EB, το οποίο καταγράφει τη φασματική απόκριση της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπίδησης ενός ή περισσότερων «ευφυνών» αδρανών που βρίσκονται ενσωματωμένα σε μια κατασκευή από σκυρόδεμα. Κάθε αδρανές αποτελεί ένα κόμβο παρακολούθησης του δομικού

συστήματος, είναι συνδεδεμένο με το AD5933 EB και επικοινωνεί ασύρματα με ένα υπολογιστή διαχείρισης και συλλογής των δεδομένων. Οι μετρήσεις της HME λαμβάνονται αυτόματα και σε τακτά χρονικά διαστήματα, ενώ στη συνέχεια καταχωρούνται σε μια κατάλληλα σχεδιασμένη βάση δεδομένων.

Σημαντική καινοτομία του T-WiEYE είναι η δυνατότητα της απομακρυσμένης πρόσβασης στις μετρήσεις HME μέσω της διαδικτυακής σύνδεσης ενός χρήστη με τη βάση δεδομένων. Η λειτουργικότητα και η ευελιξία του συγκεκριμένου συστήματος, ενισχύεται σημαντικά από τη διασύνδεση του περιβάλλοντος MySQL, στο οποίο και έχει αναπτυχθεί η βάση, με το λογισμικό MATLAB. Η συγκεκριμένη σύνδεση επιτρέπει την άμεση εφαρμογή της μεθόδου SCoRe στα δεδομένα HME σε πραγματικό χρόνο. Το T-WiEYE χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς στην αυτοματοποιημένη παρακολούθηση της ανάπτυξης της δυσκαμψίας του πρώιμου σκυροδέματος (Βλ. Ενότητα 5.2) αλλά και στην διάγνωση βλαβών σε δομικά μέλη σκυροδέματος.

### 6.5. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων εφαρμογών

Η αποτελεσματικότητα του ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης T-WiEYE με «ευφυή» αδρανή, καθώς και η αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθόδου SCoRe, ελέγχθηκε με την εφαρμογή τους σε μια σειρά πειραματικών περιπτώσεων μη καταστροφικού ελέγχου, δομικών στοιχείων σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόστηκαν στην παρακολούθηση της ανάπτυξης της δυσκαμψίας και της αντοχής κυβικών δοκιμίων πρώιμου σκυροδέματος και την παρακολούθηση της επέκτασης ρωγμών σε δομικά μέλη κατασκευών. Από τις παραπάνω διαδικασίες, οι οποίες παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5 της παρούσας διατριβής, διαπιστώθηκε ότι το T-WiEYE σε συνδυασμό με τον προγραμματισμό των εργαλείων της μεθόδου SCoRe σε περιβάλλον MATLAB και τη διασύνδεση του MATLAB με τη MySQL, επιτυγχάνει να εντοπίσει και να καταγράψει αξιόπιστα τόσο τις μεταβολές της μηχανικής συμπεριφοράς του πρώιμου σκυροδέματος, λόγω ενυδάτωσης και σκλήρυνσης, όσο και τη διαφοροποίηση λόγω ανάπτυξης και επέκτασης μηχανικών βλαβών όπως οι ρωγμές.

Επιπλέον, προτάθηκαν δυο νέοι δείκτες βλάβης οι οποίοι εστιάζουν στη παρακολούθηση του ρυθμού μεταβολής, καθώς και της αθροιστικής μεταβολής του κλασσικού δείκτη RMSD. Οι νέοι δείκτες καταγράφουν αξιόπιστα το ρυθμό

μεταβολής των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος τις πρώτες 24 ώρες, αποτυπώνοντας τις μεταβολές του ρυθμού ενυδάτωσης της τσιμεντόπαστας. Με τη χρήση τους εξάγονται συμπεράσματα για τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, αντίστοιχα με εκείνα που προκύπτουν από τη μελέτη άλλων φυσικών μεγεθών, όπως ο ρυθμός μεταβολής της εκλυόμενης θερμότητας και της ηλεκτρικής αντίστασης του υλικού (Barroca et al., 2013; Bentz, 1995; Lianzhen and Zongjin, 2008).

## 6.6. Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα, κάποια ζητήματα τα οποία χρήζουν επιπλέον θεωρητικής και τεχνικής διερεύνησης και είναι δυνατό να αποτελέσουν το αντικείμενο μελλοντικής έρευνας, είναι τα ακόλουθα:

- α) Βελτιστοποίηση των αλγορίθμων προσομοίωσης των Ηλεκτρο-Μηχανικών Συστημάτων, καθώς και του προσδιορισμού των συναρτήσεων μεταφοράς, με μαθηματική απλοποίηση των προσομοιωμάτων που εφαρμόστηκαν και μείωση της πολυπλοκότητας των υπολογισμών.
- β) Βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του πρωτότυπου πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα/ «ευφυσός» αδρανούς από Teflon, με κριτήρια την επιπλέον μείωση του μεγέθους του, τη χρήση διαφορετικών τύπων εποξικών υλικών και την ενσωμάτωση διαφορετικών επιθεμάτων PZT, όπως το επίσης πολύ διαδεδομένο PIC 255 (Annamdas and Radhika, 2013; PI Ceramics, 2014).
- γ) Βελτιστοποίηση του λογισμικού διαχείρισης και μετα-επεξεργασίας των δεδομένων HME μέσω MATLAB, με την ενσωμάτωση περισσότερων συναρτήσεων αξιολόγησης των μεταβολών της HME και την αναδιαμόρφωση του γραφικού περιβάλλοντος έτσι ώστε να γίνει ακόμη πιο φιλικό στον χρήστη.
- δ) Αξιοποίηση εργαλείων της MySQL όπως το λογισμικό διαχείρισης των δεδομένων μέσω Excel, το οποίο προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία σε χρήστες μη εξοικειωμένους με το προγραμματιστικό περιβάλλον της MATLAB, ως προς την υποβολή ερωτημάτων (Queries) στη βάση δεδομένων.
- ε) Εφαρμογή του ολοκληρωμένου συστήματος T-WiEYE σε μεγάλης κλίμακας τεχνικά έργα από σκυρόδεμα, για τον έλεγχο της ποιότητας του πρώιμου σκυροδέματος και την ανίχνευση μηχανικών βλαβών στην περιοχή των

συνδέσεων των δομικών στοιχείων, οι οποίες αποτελούν ασθενείς μηχανικά ζώνες λόγω της απότομης μεταβολής της γεωμετρίας της κατασκευής.

# Παράρτημα Α

## Στοιχεία ανάλυσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων

**Πίνακας Α.1:** Κανόνες άθροισης ηλεκτρικών μεγεθών (Νόμοι Kirchhoff) συναρτήσει της συνδεσμολογίας (Ogata, 1998).

Διάταξη Ηλεκτρικών Στοιχείων.	Ισοζύγιο ηλεκτρικών μεγεθών	Ισοδύναμη ΗΜΕ, $Z^e$	Ισοδύναμη ΗΜΑΥ
Σύνδεση εν παραλλήλω ( $M$ : Αριθμός των κλάδων):	$I = \sum_{j=1}^M I_j$	$\frac{1}{Z^e} = \sum_{j=1}^M \frac{1}{Z_j^e}$	$Y = \sum_{j=1}^M Y_j$
Σύνδεση εν σειρά ( $M$ : Αριθμός των διπολικών στοιχείων):	$V = \sum_{j=1}^M V_j$	$Z^e = \sum_{j=1}^M Z_j^e$	$\frac{1}{Y} = \sum_{j=1}^M \frac{1}{Y_j}$

**Πίνακας Α.2:** ΗΜΑ και ΗΜΕ διπολικών ηλεκτρικών στοιχείων (Ogata, 1998).

Ηλεκτρικό Στοιχείο	ΗΜΕ, $Z^e$	ΗΜΑ, $Y$
Πυκνωτής, $C$ (F)	$Z_c^e = -i \frac{1}{\omega C}$	$Y_c = i\omega C$
Ωμική Αντίσταση, $R$ ( $\Omega$ )	$Z_R^e = R$	$Y_R = \frac{1}{R}$
Πηνίο $L$ (H)	$Z_L^e = i\omega L$	$Y_L = -i \frac{1}{\omega L}$





## Παράρτημα Β

### Ηλεκτρομηχανικά Μητρώα PIC 151

**Πίνακας Β.1:** Ηλεκτρομηχανικά μητρώα PZT τύπου PIC 151 (PI Ceramics, 2014; Comsol, 2012).

Αντίστροφος πίνακας ελαστικών σταθερών (1/Pa):	$\mathbf{s} = \mathbf{c}^{\text{E-1}} = \begin{bmatrix} 15 & -5.10 & -6.46 & & & \\ -5.10 & 15 & -6.46 & & & \\ -6.46 & -6.46 & 19 & & & \\ & & & \mathbf{O}_{3 \times 3} & & \\ & & & & 43.5 & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 43.5 & 0 \\ & & & & 0 & 0 & 40.2 \end{bmatrix} \times 10^{-12}$
Πίνακας πιεζοηλεκτρικών συντελεστών φορτίου (Cb/N):	$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 741 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 741 & 0 & 0 \\ -210 & -210 & 500 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-12}$
Πίνακας διηλεκτρικών σταθερών (F/m):	$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} 1980 & 0 & 0 \\ 0 & 1980 & 0 \\ 0 & 0 & 2400 \end{bmatrix} \times 8.854e-12$



# Βιβλιογραφία

## Ξενόγλωσσοι τίτλοι

- Abrahamczyk L., Schwarz J., Lang D.H., Leipold M., Golbs Ch., Genes M.C., Bikce M., Kacin S. and Gulkan P., 2008. *Building monitoring for seismic risk assessment (I): Instrumentation of RC frame structures as a part of Seramar project*. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- Agilent Technologies, 2013. *Agilent Impedance Measurement Handbook. A guide to measurement technology and techniques*. Agilent Technologies, Inc., 4<sup>th</sup> Edition, Manual Part Number: 5950-3000, USA.
- Almgren R., 2005. *MySQL and Matlab*. Web Published (<http://www.cims.nyu.edu/~almgren/>)
- Analog Devices, 2005-2007a. *AD5933, 1 MSPS 12-Bit Impedance Converter Network Analyzer*. Preliminary Technical Data, EVAL-AD5933EB.
- Analog Devices, 2005-2007b. *AD5933, Evaluation Board for the 1 MSPS 12-Bit Impedance Converter Network Analyzer*. Preliminary Technical Data, EVAL-AD5933EB.
- Analog Devices, 2008. *Fundamentals of Direct Digital Synthesis (DDS)*. Tutorial, MT-085.
- Annamdas V.G.M. and Radhika M.A., 2013. *Electromechanical impedance of Piezoelectric transducers for monitoring metallic and non-metallic structures: A review of wired, wireless and energy-harvesting methods*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 24:9 1021-1042.
- Annamdas V.G.M., Yang Y. and Soh C.K., 2010. *Impedance based concrete monitoring using embedded PZT sensors*. International Journal of Civil and Structural Engineering, 1:3, 414-424.
- Bamforth P., Chisholm D., Gibbs J. and Harisson T., 2008. *Properties of concrete for use in EuroCode 2*. The Concrete Center Report CCIP-029.

- Barroca N., Borges L.M., Velez F.J., Monteiro F., Gorski M. and Castro-Gomes J., 2013. *Wireless sensor networks for temperature and humidity monitoring within concrete structures*. Construction and Building Materials, 40, 1156–1166.
- Benjeddou A., 2000. *Advances in Piezoelectric finite element modeling of adaptive structural elements: a survey*. Computers and Structures, 76, 347–363.
- Bentz D.P., 1995. *A three dimensional cement hydration and microstructure program. I. Hydration rate, Heat of Hydration and Cement Shrinkage*. Building and Fire Research Laboratory. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.
- Bhalla S. and Soh C.K., 2003. *Structural Impedance Based Damage Diagnosis by Piezo-Transducers*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32:12, 1897-1916.
- Bhalla S. and Soh C.K., 2004a. *Electromechanical Impedance Modeling for Adhesively Bonded Piezo-Transducers*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 15, 955-971.
- Bhalla S. and Soh C.K., 2004b. *High Frequency Piezoelectric Signatures for Diagnosis of Seismic/ Blast Induced Structural Damages*. NDT & E International, 37:1, 23-33.
- Bhalla S. and Soh C.K., 2004c. *Structural Health monitoring by Piezo-Impedance Transducers: Modeling*. Journal of Aerospace Engineering, ASCE, 17:4, 154-165.
- Bhalla S. and Soh C.K., 2007. *Progress in Structural Health Monitoring and Non-Destructive Evaluation Using Piezo-Impedance Transducers*. Smart Materials and Structures: New Research, Nova Science Publishers, Inc., New York, 177-228.
- Bhalla S. and Soh C.K., 2008. *Electro-Mechanical Impedance technique for structural health monitoring and nondestructive evaluation*. National workshop on structural health monitoring, nondestructive evaluation and retrofitting of structures, March 7-8, 2008, Indian Institute of Technology, Delhi, India.
- Bhalla S., Gupta, A., Bansal S. and Garg, T., 2009. *Ultra Low Cost Adaptations of Electro Mechanical Impedance Technique for Structural Health Monitoring*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 20:8, 991-999.
- Bhalla S., Soh C. K. and Liu Z., 2005. *Wave propagation approach for NDE using surface bonded Piezoceramics*. NDT & E International 38 143–150.

- Bhalla S., Yang Y.W., Annamdas V.G.M., Lim Y.Y. and Soh C.K., 2012. *Impedance Models for Structural Health Monitoring Using Piezo-Impedance Transducers*. Smart Materials in Structural Health Monitoring, Control and Biomechanics, Zhejiang University Press, Hangzhou and Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Bhalla S., Yang Y.W., Zhao J. and Soh C.K., 2005. *Structural Health Monitoring of Underground Facilities- Technological Issues and Challenges*. Tunneling and Underground Space Technology, 20:5, 487-500.
- Brennan S., 2006. *Measuring a Grounded Impedance Profile Using the AD5933*. Analog Devices AD 5933 Application Notes, AN-847.
- Brennan S., 2007. *Measuring a Loudspeaker Impedance Profile Using the AD5933*. Analog Devices AD 5933 Application Notes, AN-843.
- Cam E., Orhan S. and Lu M., 2005. *An analysis of cracked beam structure using impact-echo method*. NDT & E International 38, 368–373.
- Camoes A., Barros J. and Aguiar B., 2004. *Flexural tensile Behavior of enhanced performance concrete*. 9<sup>th</sup> Portuguese Conference on Fracture.
- Cao W. and Randal C.A., 1996. *Grain Size and Domain Size Relations in Bulk Ceramic Ferroelectric Materials*. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 57:10, 1499-1505.
- Carino N.J., 2004. *The impact Echo Method: An Overview*. Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, May 21-23, 2001, Washington, D.C.
- Casado C. M., Diaz I.M., de Sebastian J., Poncela A.V. and Lorenzana A., 2013. *Implementation of passive and active vibration control on an in-service footbridge*. Structural Control Health Monitoring, 20, 70–87. doi: 10.1002/stc.471.
- Cervera M., Faria R., Oliver J. and Prato T., 2002. *Numerical modeling of concrete curing, regarding hydration and temperature phenomena*. Computers and Structures, 80, 1511–1521.
- Cherrier O., Selva P., Pommier-Budinger V., Lachaud F. and Morlier J., 2013. *Damage localization map using electromechanical impedance spectrums and inverse distance weighting interpolation: Experimental validation on thin composite structures*. Structural Health Monitoring, 12:4 311–324.
- Chopra A.K., 1995. *Dynamics of Structures*. Prentice-Hall, New Jersey.
- Comsol 2012. *Structural Mechanics Module User's Guide*. Version 4.3, Mai 2012.

- Davis R.O. and Selvadurai A.P.S., 1996. *Elasticity and Geomechanics*. Cambridge University Press, New York, NY.
- Doebbling S.W., Farrar C.R. and Prime M.B., 1998. *A summary review of vibration-based damage identification methods*. Web Published.
- Doebbling S.W., Farrar C.R., Prime M.B. and Shevitz D.W., 1996. *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review*. Los Alamos National Laboratory Report, LA-13070-MS.
- European International Concrete Committee, 1993. *CEB-FIP model code 1990. Design Code*. Thomas Telford, London.
- Fasel T.R., Sohn H., Park G. and Farrar C.R., 2005. *Active sensing using impedance-based ARX models and extreme value statistics for damage detection*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 34, 763–785.
- Fraden J., 2004. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. 3<sup>rd</sup> Edition, Springer, New York, NY.
- Giurgiutiu V. and Rogers C.A., 1999. *Modeling of the Electro-Mechanical (E/M) Impedance Response of a damaged composite beam*. ASME Winter Annual Meeting, ASME Aerospace and Materials Divisions, Adaptive Structures and Material Systems Symposium, November 14-19, 1999, Nashville, TN.
- Giurgiutiu V., 2008. *Structural Health Monitoring: with Piezoelectric Wafer Active Sensors*. Academic Press Elsevier, Oxford.
- Giurgiutiu V., Zagrai A. and Bao J.J., 2002. *Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring*. Structural Health Monitoring, 1:1, 41–61.
- Giurgiutiu, V. and Rogers C.A., 1997. *Electro-mechanical (E/M) impedance method for structural health monitoring and non-destructive evaluation*. Int. Workshop on Structural Health Monitoring, September 18–20, 1997, Stanford University, CA.
- Glisic B., Inaudi D. and Vurpillot S., 2002. *Structural Monitoring of Concrete Structures*. 3rd World Conference on Structural Control, May 7-12, 2002, Como, Italy.
- Gu H., Song G., Dhonde H. and Mo Y.L., 2006. *Concrete early-age strength monitoring using embedded Piezoelectric transducers*. Smart Materials and Structures, 15, 1837–1845.

- Harris C.M. and Piersol A.G., 2002. *Shock and Vibration Handbook*. McGraw-Hill, 5<sup>th</sup> Edition, USA.
- Hey F., Bhalla S. and Soh C.K., 2006. *Optimized Parallel Interrogation and Protection of Piezo-Transducers in Electro Mechanical Impedance Technique*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 17:6, 457-468.
- Hooker M.W., 1998. *Properties of PZT-Based Piezoelectric Ceramics between -150 and 250 °C*. National Aeronautics and Space Administration, NASA, CR-1998-208708.
- Hou S., Zhang H.B. and Ou J.P., 2012. *A PZT-based smart aggregate for compressive seismic stress monitoring*. Smart Materials and Structures, 21, 105035, 9pp.
- Inman D.J. and Cudney H.H., 1997. *Smart Materials, Structures and Mathematical issues for active damage control*. Final Progress Report, U.S. Army Research Office.
- International Atomic Energy Agency, 2002. *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*. Training Courses Series No. 17, Vienna.
- Kim E.J., 2011. *Elasto-Dynamic Interpretation of a Coupled PZT Beam System for Reference-free Damage Diagnosis of a Plate*. Ph.D. dissertation, Dept. of Civil Engineering, Graduate School, Dong-A University Busan, Korea.
- Kollar I. and Balogh L. 2001. *Generalization of a Total Least Squares Problem in Frequency Domain System Identification*. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, May, 21-23 2001, Budapest, Hungary.
- Kollar I., 2004-14. *Frequency Domain System Identification Toolbox for Matlab – FDIIdent*. Budapest.
- Kong Q., Hou S., Ji Q., Mo Y.L., and Song G., 2013. *Very early age concrete hydration characterization monitoring using Piezoceramic based smart aggregates*. Smart Materials and Structures, 22, 085025, 7pp.
- Kramer S.L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, New Jersey.
- Laskar A., Gu H., Mo Y.L. and Song G., 2009. *Progressive collapse of a two-story reinforced concrete frame with embedded smart aggregates*. Smart Materials and Structures, 18, 075001, 10pp.
- Liang C., Sun F.P. and Rogers C.A., 1994a. *An Impedance Method for Dynamic Analysis of Active Material Systems*. Journal of Vibration and Acoustics, 116:1, 120-128.



- Liang C., Sun F.P. and Rogers C.A., 1994b. *Coupled electromechanical analysis of adaptive material systems-Determination of the actuator power consumption and system energy transfer*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 5:1, 12-20.
- Liang C., Sun F.P. and Rogers C.A., 1996. *Electro-mechanical impedance modeling of active material systems*. Smart Materials and Structures, 5, 171–186.
- Liang M.T. and Su P.J., 2001. *Detection of the corrosion damage of rebar in concrete using impact-echo method*. Cement and Concrete Research 31, 1427–1436.
- Lianzhen X. and Zongjin L., 2008. *Early-age hydration of fresh concrete monitored by non-contact electrical resistivity measurement*. Cement and Concrete Research, 38, 312–319.
- Liarakos E.V. and Providakis C.P., 2013. *A miniaturized early age concrete strengthening and hydration monitoring system based on Piezoelectric transducers*. 10th HSTAM International Congress on Mechanics. May, 25-27 2013, Crete, Greece.
- Lim Y.Y., Bhalla S. and Soh C.K., 2006. *Structural identification and damage diagnosis using self-sensing Piezo-impedance transducers*. Smart Materials and Structures, 15, 987–995.
- Lynch J.P. and Loh K.J., 2006. *A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring*. The Shock and Vibration Digest, 38, 91–128.
- Malhotra V.M. and Carino N.J., 2004. *Handbook on Non Destructive Testing of Concrete*, 2<sup>nd</sup> Edition CRC Press, West Conshohocken PA.
- Malvino A.P. and Bates D.J., 2006. *Electronic Principles*. 7<sup>th</sup> Edition, Mc Grow Hill.
- Mascarenas D.D.L., 2006. *Development of an impedance method based wireless sensor node for monitoring of bolted joint preload*. M.Sc. Thesis, University of California, San Diego, USA.
- Mascarenas D.D.L., Todd M.D., Park G. and Farrar C.R., 2007. *Development of an Impedance-based Wireless Sensor Node for Structural Health Monitoring*. Smart Materials and Structures, 16:6, 2137-2145.
- MathWorks, 2014. *MATLAB R2014a: Optimization Toolbox User's Guide*. The Mathworks Inc, MA, USA.

- Mehta P.K. και Monteiro P.J.M., 2009. *Σκυρόδεμα: Μικροδομή, Ιδιότητες και υλικά*. Μετάφραση/Επιστημονική Επιμέλεια: Παπαγιάννη Ι., 3ή Αμερικάνικη Έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
- Mita A., Inamura T. and Yoshikawa S., 2006. *Structural Health Monitoring System for Building with an Automatic Management System*. 4th International Conference on Earthquake Engineering, October 12-13, Taipei, Taiwan.
- Montgomery D.C. and Runger G.C., 2003. *Applied Statistics and Probabilities for Engineers*. John Wiley and Sons Inc, 3<sup>rd</sup> Edition, USA.
- Murach J. and Harris R., 2010. *Murach's PHP and MySQL*. Mike Murach and Associates Inc. ISBN 978-1-890774-56-1.
- Murthy A.C., Palani G.S. and Riyer N., 2009. *State-of-the-art review on fracture analysis of concrete structural components*. Sadhana, 34:2, 345–367.
- MySQL™, 2010a. *MySQL 5.6 Reference Manual*. Web Published.
- MySQL™, 2010b. *MySQL GUI Tools Manual*. MySQL AB, 2009 Sun Microsystems, Inc.
- Nguyen Dinh Tung Luan, Le Dai Vuong, Truong Van Chuong, and Nguyen Truong Tho, 2014. *Structure and Physical Properties of PZT-PMnN-PSN Ceramics Near the Morphological Phase Boundary*. Advances in Materials Science and Engineering, 2014, Article ID 821404, 8 pages, doi: 10.1155/2014/821404.
- O'Brien D.J., Sottos N.R. and White S.R., 2007. *Cure-dependent Viscoelastic Poisson's Ratio of Epoxy*. Experimental Mechanics, 47, 237–249.
- Ogata K., 1998. *System Dynamics*. Prentice Hall International, 3<sup>rd</sup> Edition, New Jersey.
- Paavle T., Min M. and Parve T., 2012. *Aspects of Using Chirp Excitation for Estimation of Bioimpedance Spectrum*. Fourier Transform-Signal Processing, Dr Salih Salih (Ed.), ISBN: 978-953-51-0453-7.
- Paavle T., 2011. *Short-time chirp excitation for wideband identification of dynamic objects*. Estonian Journal of Engineering, 17:2, 169–179.
- Panda P.K., Sahoo B., Raja S., Vijaya Kumar M. P., and Shanka V., 2012. *Electromechanical and Dynamic Characterization of In-House-Fabricated Amplified Piezo Actuator*. Smart Materials Research, 2012, Article ID 203625, 8 pages, doi: 10.1155/2012/203625.

- Park G., Rutherford A.C., Sohn H. and Farrar C.R., 2005. *An outlier analysis framework for impedance-based structural health monitoring*. Journal of Sound and Vibration, 286, 229–250.
- Park S., Grisso B.L., Inman D.J. and Yun C.B., 2007. *MFC-based structural health monitoring using a miniaturized impedance measuring chip for corrosion detection*. Research in Nondestructive Evaluation, 18:2, 139–150.
- Park S., Yun B. and Inman D.J., 2008. *Structural health monitoring using electro-mechanical impedance sensors*. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 31, 714–724.
- Permatex, Inc., 2011. *Permatex Cold Weld. Technical Data Sheet*.
- Perry M.A., Bates R.A., Atherton M.A. and Wynn H.P, 2008. *A Finite Element Based Formulation for Sensitivity Studies of Piezoelectric Systems*. Smart Materials and Structure, 17, 015015.
- PI Ceramics, 2014. *Piezoelectric Ceramic Products. Fundamentals, Characteristics and Applications*. PI Ceramic's Piezoelectric Materials Catalog and Tutorial.
- Piefort V., 2001. *Finite Element Modelling of Piezoelectric Active Structures*. Ph.D. dissertation, Department of Mechanical Engineering and Robotics, Universite Libre de Bruxelles.
- Ping L. *Scalable Web-Based Data Management System in Long Term Structure Health Monitoring*. Web published.
- Pintelon R., Guillaume P., Vandersteen G. and Rolain Y., 1998. *Analysis, Development and Application of TLS Algorithms in frequency Domain System Identification*. Siam J. Matrix Anal. Appl., Society for Industrial and Applied Mathematics, 19:4 983-1004.
- Providakis C.P. and Liarakos E.V., 2010. *Early age concrete strength monitoring using embedded smart aggregates as sensors*. Structural Health Monitoring 2010: Proceedings of the Fifth European Workshop, DEStech Publications Inc.
- Providakis C.P. and Liarakos E.V., 2011. *T-WiEYE: An early-age concrete strength development monitoring and miniaturized wireless impedance sensing system*. Engineering Procedia 2011, 10, 484-89.
- Providakis C.P. and Liarakos E.V., 2012. *T-WiEYE early-age concrete monitoring sensor: Computer modeling and simulation*. International Conference on Computational and Experimental Engineering and Science (ICCES' 12), May 30 – June 4, 2012, Crete, Greece.

- Liarakos E.V. and Providakis C.P., 2013. *A miniaturized early age concrete strengthening and hydration monitoring system based on Piezoelectric transducers*. 10th HSTAM Congress on Mechanics. May, 25-27 2013, Crete, Greece.
- Providakis C.P. and Liarakos E.V., 2014. *Web based concrete strengthening monitoring using an innovative EMI telemetric system and extreme values statistics*. Structural Control Health Monitoring, 21:9, 1252–1268.
- Providakis C.P. and Voutetaki M.E., 2007. *Electromechanical admittance – based damage identification using Box-Behnken design of experiments*. Structural Durability and Health Monitoring, 3:4, 211-227.
- Providakis C.P. and Yeroyanni, M., 1998. *Earthquake Strong Ground Motion Evaluation: Application for Earthquake Disaster Mitigation*. European Commission, Directorate General XII, Brussels, Belgium.
- Providakis C.P., Angeli G.M., Favvata M.J., Papadopoulos N.A., Chalioris N.A., and Karayannis C.G., 2014. *Detection of Concrete Reinforcement Damage Using Piezoelectric Materials - Analytical and Experimental Study*. International Journal of Civil, Architectural Science and Engineering, 8:2.
- Providakis C.P., Kontoni P.N. and Voutetaki M.E., 2007. *Development of an electromechanical admittance approach for application in the vibration control of intelligent structures*, Smart Materials and Structures, 16:2, 275-281.
- Providakis C.P., Kontoni P.N., Voutetaki M.E. and Stavroulaki M.E., 2008. *Comparisons of smart damPing treatments based on FEM modeling of electromechanical impedance*, Smart Structures and Systems, 4:1, 35-46.
- Providakis C.P., Liarakos E.V. and Kampianakis E., 2013. *Non-destructive wireless monitoring of early-age concrete strength gain using an innovative electromechanical impedance sensing system*. Smart Materials Research, 2013, Article ID 932568, 10 pages, doi: 10.1155/2013/932568.
- Providakis C.P., Liarakos E.V. and Voutetaki M., 2010. *Damage detection in concrete components using PZT actuators/sensors and extreme value statistics*. 9<sup>th</sup> HSTAM International Congress in Mechanics, July 12-14, 2010, Limassol, Cyprus.
- Providakis C.P., Stefanaki K.D., Voutetaki M.E., Tsompanakis Y. and Stavroulaki M., 2013a. *Damage detection in concrete structures using a simultaneously*

- activated multi-mode PZT active sensing system: numerical modeling*. Structure and Infrastructure Engineering. doi: 10.1080/15732479.2013.831908.
- Providakis C.P., Stefanaki K.D., Voutetaki M.E., Tsompanakis Y. and Stavroulaki M., 2013b. *DeveloPing a multi-mode PZT sensing solution for active SHM in concrete structures*. IEEE: Sensors Applications Symposium (SAS), Feb. 19-21, 2013, 61-65.
- Qixian L. and Bungey J.H., 1996. *Using compression wave ultrasonic transducers to measure the velocity of surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete*. Construction and Building Materials, 10:4, 237-242.
- QuadTech, 2002. *RLC Measurement Primer*. Impedance Measuring Instrumentation Technical Notes.
- Quinn W., Kelly G. and Barrett J., 2012. *Development of an embedded wireless sensing system for the monitoring of concrete*. Structural Health Monitoring, 11:4, 381-392.
- Riordan L. 2007. *AD5933 Evaluation Board Example Measurement*. Analog Devices, Application Notes, AN-1053.
- Shah S.P. and Carpinteri A., 1991. *Fracture Mechanics Test Methods for Concrete*. RILEM's report, Chapman and Hall, 1<sup>st</sup> Edition, Great Britain.
- Shin S.W., Qureshi A.R., Lee J.Y. and Yun C.B., 2008. *Piezoelectric sensor based nondestructive active monitoring of strength gain in concrete*. Smart Materials and Structures. 17, 055002, 8pp.
- Sirohi J. and Chopra I., 2000. *Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors*. Journal of Intelligent Materials Systems and Structures, 11, 246-257.
- Smith A., Wilkinson S.D. and Reynolds W.N., 1974. *The elastic constants of some epoxy Resins*. Journal of Materials Science, 9, 547-550.
- Soh C.K. and Bhalla S., 2005. *Calibration of Piezo-Impedance Transducers for Strength Prediction and Damage Assessment of Concrete*. Smart Materials and Structures, 14, 671–684.
- 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 Materials and Structures, 9, 533–542.
- Sohn H. and Lee S.J., 2010. *Lamb wave tuning curve calibration for surface-bonded Piezoelectric transducers*. Smart Materials and Structures, 19, 015007, 12pp.

- Sohn H., Allen D.W., Worden K. and Farrar C.R., 2005. *Structural Damage Classification Using Extreme Value Statistics*. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 127, 125-132.
- Sohn H., Farrar C.R., Hemez F.M., Shunk D.D., Stinemates D.W., Nadler B.R. and Czarnecki J.J., 2004. *A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996–2001*. Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS.
- Song G., Gu H., Mo Y.L., Hsu T.T.C., and Dhonde H., 2007. *Concrete structural health monitoring using embedded Piezoceramic transducers*. Smart Materials and Structures, 16, 959–968.
- Song G.B., Gu H. and Mo Y.L., 2008. *Smart aggregates: Multi-functional sensors for concrete structures—a tutorial and a review*. Smart Materials and Structures, 17, 033001.
- Su Z., Ye L. and Lu Y., 2006. *Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review*. Journal of Sound and Vibration, 295 753–780.
- Tawie R. and Lee H.K., 2010a. *Characterization of cement-based materials using a reusable Piezoelectric impedance-based sensor*. Smart Materials and Structures, 20, 085023, 9pp.
- Tawie R. and Lee H.K., 2010b. *Monitoring the strength development in concrete by EMI sensing technique*. Construction and Building Materials, 24, 1746–1753.
- Tawie R. and Lee H.K., 2010c. *Piezoelectric -based non-destructive monitoring of hydration of reinforced concrete as an indicator of bond development at the steel–concrete interface*. Cement and Concrete Research, 40, 1697–1703.
- Tawie R., 2011. *Health monitoring of Concrete Structures by Electro-Mechanical Impedance Approach using PZT Transducers*. Ph.D. dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Korea.
- Tseng K.K. and Wang L., 2004. *Smart Piezoelectric transducers for in situ health monitoring of concrete*. Smart Materials and Structures, 13, 1017–1024.
- Ullman L., 2008. *PHP 6 and MySQL 5 for Dynamic Web Sites*. Pearson Education Inc, PeachPlt Press.
- University of Colorado at Boulder, 2013. *Advanced Finite Element Methods*. Graduate Core Course: ASEN 6367, Department of Aerospace Engineering Sciences, Spring Semester, 2013.



- Worden K, Allen D.W., Sohn H. and Farrar C.R., 2002. *Extreme Value Statistics For Damage Detection in Mechanical Structures*. Los Alamos National Laboratory Report, LA-13903-MS.
- Xu B., 2009. *Structural Health Monitoring Instrumentation, Signal Processing and Interpretation with Piezoelectric Wafer Active Sensors*. PhD Dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of South Carolina, USA
- Xu Y.G. and Liu G.R., 2002. *A Modified Electro-Mechanical Impedance Model of Piezoelectric Actuator-Sensors for Debonding Detection of Composite Patches*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures , 13, 389-396
- Yan W. and Chen W.Q., 2010. *Structural Health Monitoring Using High-Frequency Electromechanical Impedance Signatures*. Advances in Civil Engineering, 2010, Article ID 429148, 11 pages, doi:10.1155/2010/429148.
- Yang Y., Divsholi B.S. and Soh C.K., 2010. *A Reusable PZT Transducer for Monitoring Initial Hydration and Structural Health of Concrete*. Sensors, 10, 5193-5208.
- Yang Y., Hu Y. and Lu Y., 2008. *Sensitivity of PZT Impedance Sensors for Damage Detection of Concrete Structures*. Sensors, 8, 327-346.
- Yang Y.W., Bhalla S., Wang C., Soh C.K. and Zhao J., 2007. *Monitoring of Rocks Using Smart Sensors*. Tunneling and Underground Space Technology, 22:2, 206-221.
- Ye G., Lura P., Van B.K. and Fraaij A.L.A., 2004. *Study on the development of the microstructure in cement-based material by means of numerical simulation and ultrasonic pulse velocity measurement*. Cement and Concrete. Composites, 26, 491-497.
- Yu E., Whang D.L., Venugopal R., Steward J.P. and Wallace J.W., 2004. *Force vibration testing of buildings using the Linear Shaker Seismic Simulation (LSSS) method*. 13th World Conference on Earthquake Engineering, August 1-6, 2004, Vancouver, Canada.
- Zagrai A.N., 2002. *Piezoelectric -Wafer Active Sensors Electro-Mechanical Impedance Structural Health Monitoring*. PhD Dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of South Carolina, USA.
- Zhang Y., Xu F., Chen J., Wu C. and Wen D., 2011. *Electromechanical impedance response of a cracked Timoshenko beam*. Sensors, 11:7, 7285-301.



- Zhong Y., Yuan S. and Qiu L., 2013. *Multi-impact source localization on aircraft composite structure using uniform linear PZT sensors array*. Structure and Infrastructure Engineering. doi: 10.1080/15732479.2013.878732.
- Zhou S., Liang C. and Rogers C.A., 1995. *Integration and Design of Piezoceramic Elements in Intelligent Structures*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 6:6, 733-743.
- Zhou S., Liang C. and Rogers C.A., 1996. *An Impedance-Based System Modeling Approach for Induced Strain Actuator-Driven Structures*. Journal of Vibrations and Acoustics, ASME, 118:3, 323-331.
- Zihai S., 2009. *Crack Analysis in Structural Concrete. Theory and Applications*. Butterworth-Heinemann, Elsevier.

### Ελληνικοί τίτλοι

- Αβδελάς Γ. και Σίμος Θ., 2003. *Αριθμητική Γραμμική Άλγεβρα*. ΣΥΜΕΩΝ, ΑΘΗΝΑ.
- Βουτετάκη Μ.Σ., 2009. *Εντοπισμός και επιδιόρθωση βλάβης σε δομικά στοιχεία με τη χρήση «Ευφρών Υλικών»*. Διδακτορική Διατριβή, Γενικό Τμήμα, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Πρασιανάκης Ι. και Κουρκουλής Σ., 1999. *Πειραματική Αντοχή των Υλικών*. Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, Αθήνα.
- Προβιδάκης Κ.Π., 2011. *Αρχιτεκτονική Τεχνολογία-Οπλισμένο Σκυρόδεμα*. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Τσιστράκης Σ.Ε., 20013. *Ανάπτυξη ενός καινοτόμου συστήματος παρακολούθησης βλάβης σε κατασκευές από σκυρόδεμα με χρήση έξυπνων πιεζοηλεκτρικών υλικών*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Γενικό Τμήμα, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.