



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

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

Υποστήριξη διδακτορικής διατριβής

Ευάγγελος Β. Λιαράκος

Μηχανικός Ορυκτών Πόρων

Επιβλέπων: Καθηγητής Κωνσταντίνος Π. Προβιδάκης

Χανιά, Ιανουάριος 2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
Πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

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.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



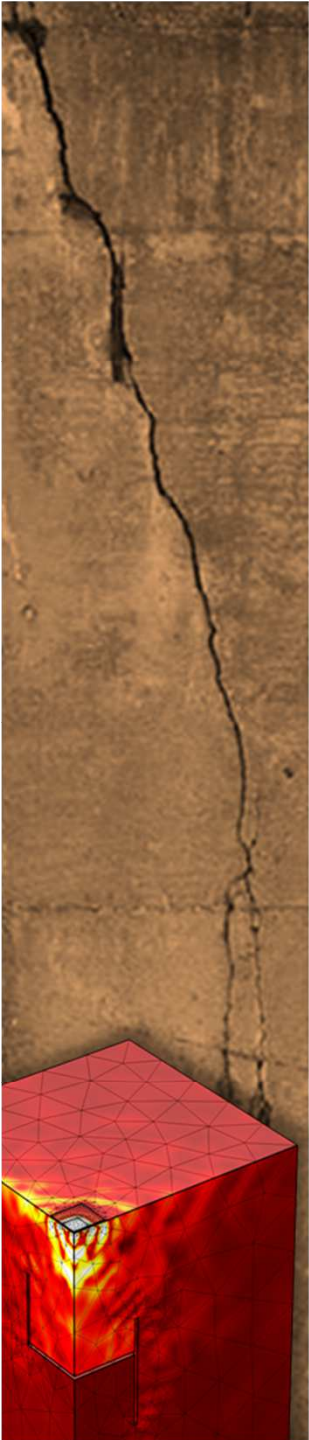
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

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. Kampianakis, 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; doi: 10.1002/stc.1645.

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.* 9th 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.* 11th 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.



Επισκόπηση Παρουσίασης

1. Αντικείμενο και Στόχοι της Διατριβής
2. Πιεζοηλεκτρικά υλικά και Ηλεκτρο-ΜΗχανικά Συστήματα (ΗΜΗΣ)
3. Η μέθοδος της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (ΗΜΕ)
4. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας κατασκευών σκυροδέματος
5. Ανάπτυξη ολοκληρωμένου ασύρματου συστήματος καταγραφής και αποθήκευσης της ΗΜΕ
6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος
7. Συμπεράσματα-Προτάσεις



1.

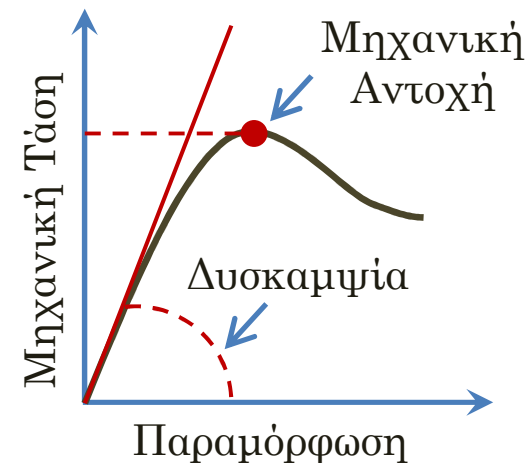
Αντικείμενο και Στόχοι της Διατριβής

Βασικοί Ορισμοί

- **Δομική Ακεραιότητα ή Δομική «υγεία».** Η ικανότητα μιας κατασκευής να παραλαμβάνει κατά τη λειτουργία της με ασφάλεια τα φορτία για τα οποία σχεδιάστηκε.
- **Δομικά Χαρακτηριστικά.** Το σύνολο των γεωμετρικών και μηχανικών ιδιοτήτων μιας κατασκευής, καθώς και των αντοχών των δομικών υλικών.
- **Μηχανική Βλάβη.** Οποιαδήποτε μη προβλεπόμενη μεταβολή στα δομικά χαρακτηριστικά μιας κατασκευής, η οποία επιδεινώνει τη δομική της ακεραιότητα και επιδρά αρνητικά στη συνολική μηχανική της συμπεριφορά.

Παρακολούθηση δομικών χαρακτηριστικών

- Η απόκριση μιας κατασκευής στην δράση εξωτερικών μηχανικών φορτίσεων (στατικών ή δυναμικών) καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των υλικών.
- Η παρακολούθηση των μηχανικών ιδιοτήτων αποτελεί μια διαδικασία ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών .



Μη Καταστρεπτικός Έλεγχος (ΜΚΕ) Σκυροδέματος

- Δυνατότητα **άμεσου** ελέγχου και αξιολόγησης της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών, από τα πρώτα στάδια δόμησης και για το σύνολο του χρόνου ζωής τους.
- Εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος **στο χώρο της κατασκευής**, χωρίς να απαιτείται η λήψη δοκιμίων.
- **Φιλοσοφία ΜΚΕ: Έμμεσος** προσδιορισμός (Εκτίμηση) των **μηχανικών ιδιοτήτων** (Δομικά Χαρακτηριστικά) με βάση την **άμεση** καταγραφή συγκεκριμένων **φυσικών μεγεθών** (Μεγέθη Παρατήρησης).

Μη Καταστρεπτικός Έλεγχος (ΜΚΕ) Σκυροδέματος – Στόχοι

- Παρακολούθηση των διαδικασιών **ενυδάτωσης** της τσιμεντόπαστας και **σκλήρυνσης** του πολύ πρώιμου σκυροδέματος, από τις πρώτες ώρες μετά τη σκυροδέτηση μέχρι και τις πρώτες 48 ώρες.
- Παρακολούθηση της διαδικασίας ωρίμανσης και ανάπτυξης της δυσκαμψίας του σκυροδέματος, τις πρώτες 28 ημέρες μετά την παρασκευή του.
- Ανίχνευση μεταβολών της δυσκαμψίας και των ελαστικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος, οι οποίες δύναται να συνδέονται με την ύπαρξη μηχανικών βλαβών.

Μη Καταστρεπτικός Έλεγχος (ΜΚΕ) Σκυροδέματος και Πιεζοηλεκτρικά Υλικά

- Τα **πιεζοηλεκτρικά υλικά** επιδεικνύουν την ικανότητα μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική και το αντίστροφο.
 - Αισθητήρες δυναμικής κίνησης (Sensors)
 - Γεννήτριες υψίσυχνων μηχανικών κυμάτων (Actuators, 10-400kHz)
 - Αυτό-αισθητήριες πιεζοηλεκτρικές συσκευές (Auto-sensing devices, Sensors/Actuators)
- Ανίχνευση αλλαγών στα δομικά χαρακτηριστικά μιας κατασκευής με βάση τη μεταβολή της ηλεκτρικής απόκρισης των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων.

Στόχοι Διατριβής

➤ Ανάπτυξη:

- Μαθηματικών μοντέλων Ηλεκτρο-Μηχανικής αλληλεπίδρασης μεταξύ πιεζοηλεκτρικών υλικών και κατασκευών από σκυρόδεμα.
- Μεθόδων αναλυτικής προσομοίωσης της ηλεκτρικής και της μηχανικής απόκρισης των Ηλεκτρο-ΜΗχανικών Συστημάτων.
- Κατάλληλων διατάξεων ενσωμάτωσης (Embedding) των πιεζοηλεκτρικών υλικών στη μάζα του σκυροδέματος.
- Τεχνικών στατιστικού ελέγχου, για την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών.

➤ Σχεδιασμός ολοκληρωμένου ασύρματου συστήματος ΜΚΕ σκυροδέματος, με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών.

Συνεισφορά Διατριβής

- Ανάπτυξη ενός μοντέλου περιγραφής της Ηλεκτρο-Μηχανικής αλληλεπίδρασης μεταξύ πιεζοηλεκτρικών υλικών και δομικών στοιχείων **σκυροδέματος**, το οποίο στηρίζεται στη διάδοση των **εγκαρσίων μηχανικών κυμάτων** και λαμβάνει υπόψη την υψηλή **δυσκαμψία** και **εσωτερική απόσβεση** του υλικού **[J3]**.
- Προσομοίωση της μηχανικής απόκρισης ενός δομικού στοιχείου σκυροδέματος με τη χρήση ισοδύναμων πολυβάθμιων δυναμικών συστημάτων **[C2-3, J3]**.
- Σχεδιασμός και ανάπτυξη ενός καινοτόμου πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα με βάση το Teflon, το οποίο συνδυάζει την επαρκή μηχανική αντοχή με τη χημική αδράνεια και δίνει τη δυνατότητα ανάκτησης και επανάχρησής τους **[J1-2, C3-5]**.

Συνεισφορά Διατριβής

- Ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος καταγραφής της ΗΜΕ το οποίο **συνδυάζει [J3,C5]**:
 - Πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες οι οποίοι λειτουργούν σαν «ευφυή» αδρανή υλικά.
 - Ασύρματη επικοινωνία των πιεζοηλεκτρικών «ευφυών» αδρανών με τα συστήματα καταγραφής.
 - Ολοκληρωμένα ηλεκτρικά κυκλώματα χαμηλού κόστους, για τη μέτρηση της ηλεκτρικής απόκρισης των αισθητήρων.
 - Μόνιμη Εγκατάσταση στο χώρο της κατασκευής.
 - Ολοκληρωμένη και απομακρυσμένη διαχείριση των δεδομένων καταγραφής, με τη συνδυασμένη χρήση MySQL και MATLAB.

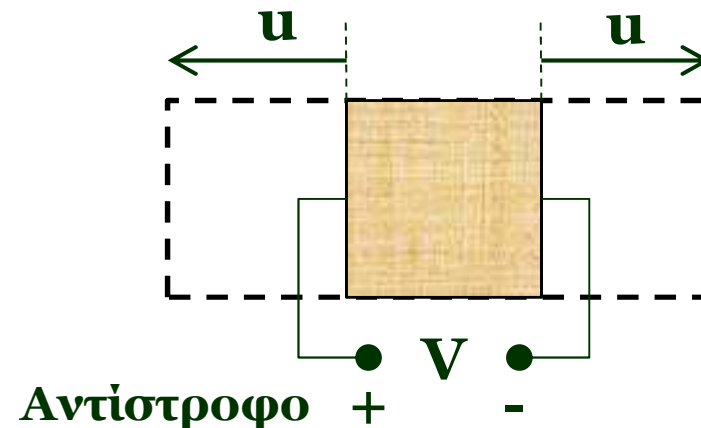
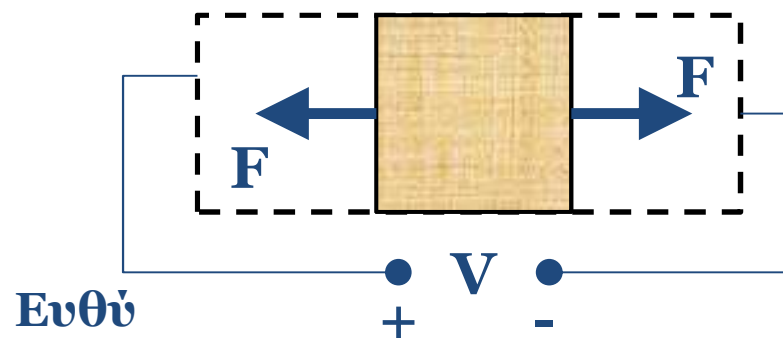


2.

Πιεζοηλεκτρικά υλικά και Ηλεκτρο- ΜΗχανικά Συστήματα (ΗΜΗΣ)

Πιεζοηλεκτρικά Υλικά

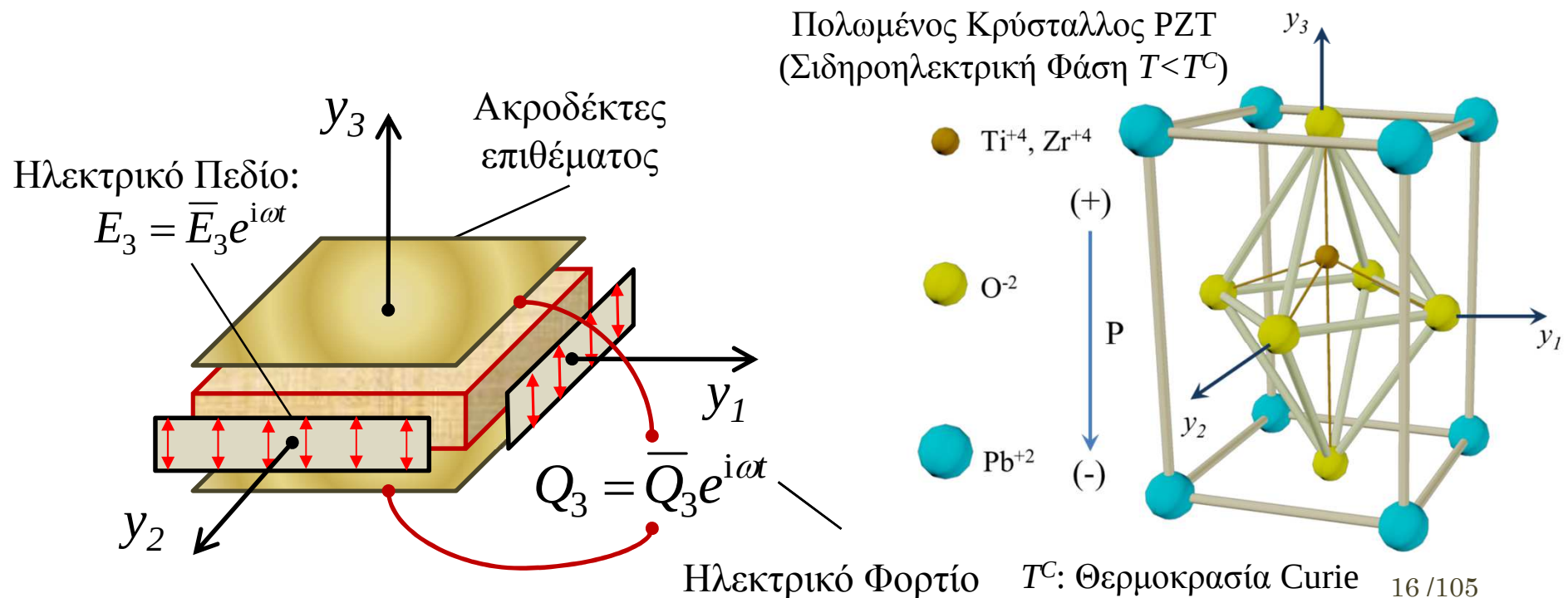
- Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά επιδεικνύουν το χαρακτηριστικό της εμφάνισης διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση, όταν εφαρμόζεται σε αυτά ένα μηχανικό φορτίο (**Ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο**).
- Αντιστρόφως, παραμορφώνονται σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση όταν βρίσκονται υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου (**Αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο**).



2. Πιεζοηλεκτρικά υλικά και Ηλεκτρο-ΜΗχανικά Συστήματα (ΗΜΗΣ)

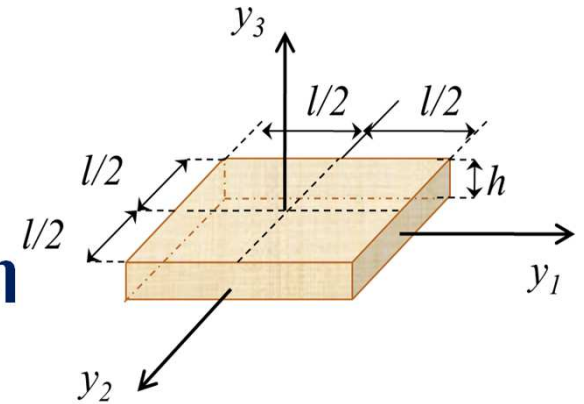
Πιεζοηλεκτρικά Υλικά: **Δομή**

- Πιεζοηλεκτρικό Επίθεμα PZT (Lead Zirconate Titanate).
- Κεραμικός Πυρήνας **Οξειδίου του Μολύβδου και του Ζιρκονίου ή Τιτανίου – $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$**
- Μεταλλικοί Ακροδέκτες – Διηλεκτρικό Στοιχείο



Πιεζοηλεκτρικά Υλικά: **Καταστατικές Εξισώσεις**

- Εξισώσεις **Παραμόρφωσης-Φορτίου**
- Τετραγωνικό Επίθεμα PZT: **Επίπεδη Τάση**



$$S_{11} = \frac{1}{\bar{Y}^E} (T_{11} - \nu_{12} T_{22}) + d_{31} E_3$$

$$S_{22} = \frac{1}{\bar{Y}^E} (T_{22} - \nu_{12} T_{11}) + d_{32} E_3$$

$$D_3 = d_{31} T_{11} + d_{32} T_{22} + \epsilon_{33} E_3$$

$$\bar{Y}^E = Y^E (1 + i n_{pzt}) \quad \bar{\epsilon}_{33} = \epsilon_0 \epsilon_{33} (1 - i \delta)$$

ϵ_{33} : Σχετική Διηλεκτρική Σταθερά

n_{pzt} : Συντελεστής Μηχανικών Απωλειών

δ : Συντελεστής Ηλεκτρικών Απωλειών

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ (F/m)

$y_j, j=1:3$: Καρτεσιανοί Δείκτες

S_{jj} : Παραμόρφωση

T_{jj} : Μηχανική Τάση (Pa)

Y^E : Μέτρο Ελαστικότητας (Επίπεδο y_1 - y_2)

ν_{12} : Λόγος Poisson (Επίπεδο y_1 - y_2)

$d_{31}=d_{32}$: Πιεζοηλεκτρικός Συντελεστής Φορτίου (C/N, Επίπεδο y_1 - y_2)

D_3 : Ηλεκτρική Μετατόπιση (C/m²)

E_3 : Ηλεκτρικό Πεδίο (V/m)

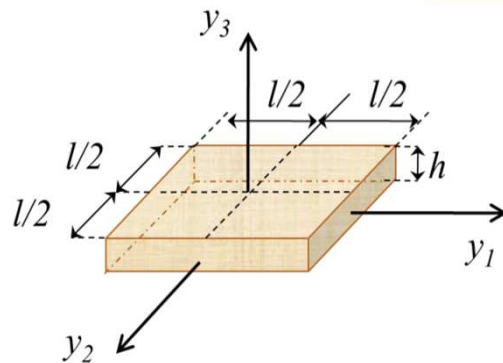
2. Πιεζοηλεκτρικά υλικά και Ηλεκτρο-ΜΗχανικά Συστήματα (ΗΜΗΣ)

Πιεζοηλεκτρικά Υλικά: **Ηλεκτρική Απόκριση**

- Ηλεκτρικό Ρεύμα Απόκρισης, I_3 : Αρμονική διέγερση (V_3)

$$I_3 = \frac{dQ_3}{dt} = i\omega Q_3 \Rightarrow \bar{I}_3 = i\omega \bar{Q}_3 = i\omega \int_{A_{pzt}} \bar{D}_3 dA$$

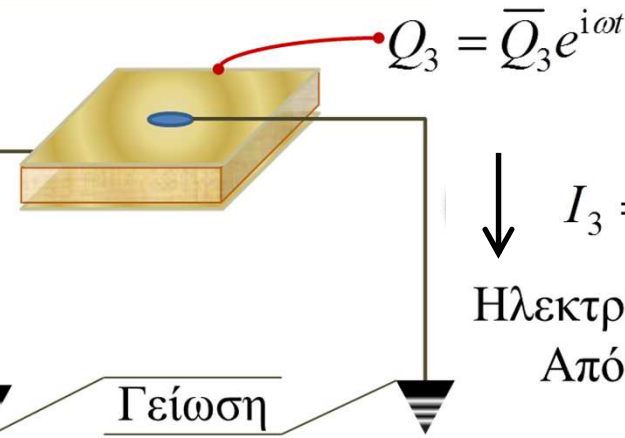
A_{pzt} : Επιφάνεια
Επιθέματος



Ηλεκτρική Τάση
διέγερσης

$$V_3 = \bar{V}_3 e^{i\omega t}$$

$$\bar{E}_3 = \frac{\bar{V}_3}{h}$$



$I_3 = \bar{I}_3 e^{i\omega t}$
↓
Ηλεκτρικό Ρεύμα
Απόκρισης

- Πλάτος ηλεκτρικής Μετατόπισης:

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

Ηλεκτρική Εμπέδηση/Αγωγιμότητα

➤ Ηλεκτρική Σύνθετη Αντίσταση-Ηλεκτρική Εμπέδηση:

- **R_3 : Ηλεκτρική Αντίσταση** (Resistance, Πραγματικό Μέρος)
- **X_3 : Άεργη Αντίσταση** (Reactance, Φανταστικό Μέρος, Επαγωγικά/Χωρητικά Φαινόμενα)

$$Z_3(\omega) = \frac{\bar{V}_3}{\bar{I}_3} = R_3(\omega) + iX_3(\omega)$$

➤ Σύνθετη Αγωγιμότητα- Αντίστροφο Ηλεκτρικής Εμπέδησης:

- **G_3 : Αγωγιμότητα** (Conductance, Πραγματικό Μέρος)
- **B_3 : Επιδεκτικότητα** (Susceptance, Φανταστικό Μέρος, Συνάρτηση της χωρητικότητας του PZT)

$$Y_3(\omega) = \frac{1}{Z_3} = G_3(\omega) + iB_3(\omega)$$

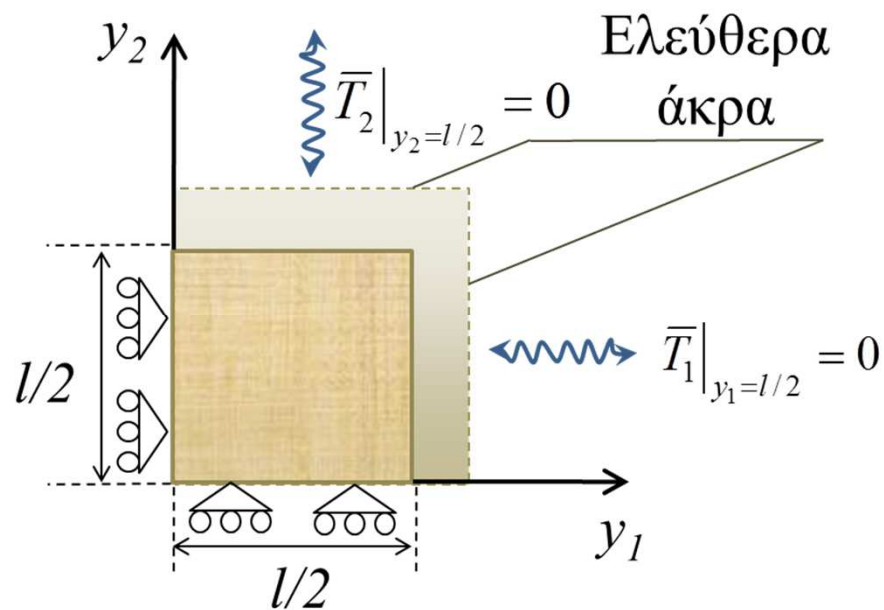
2. Πιεζοηλεκτρικά υλικά και Ηλεκτρο-ΜΗχανικά Συστήματα (ΗΜΗΣ)

Ηλεκτρο-Μηχανική Απόκριση επιθέματος PZT

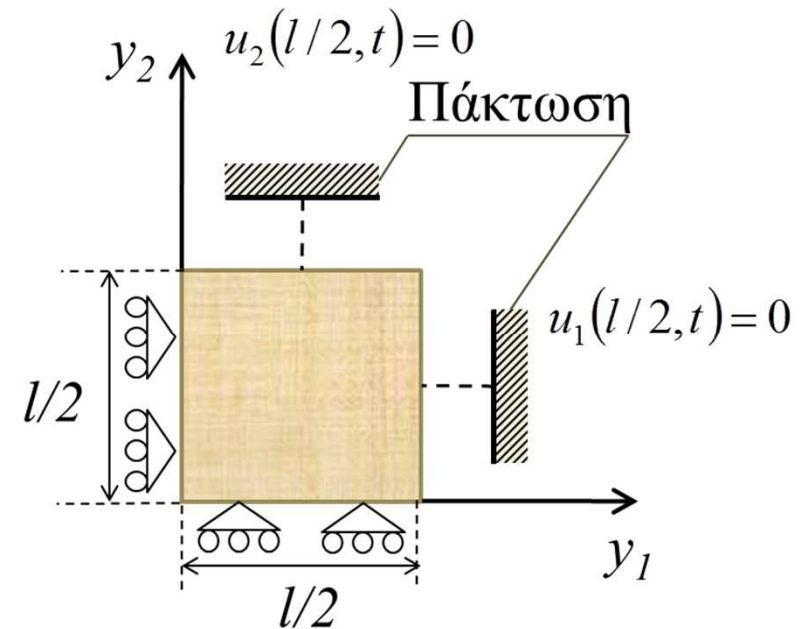
- Ηλεκτρο-Μηχανική Αγωγιμότητα, Y_3 : **Αρμονική διέγερση**

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

$\gamma = \kappa l/2$
 $\kappa = \omega \sqrt{\rho / \bar{Y}^E}$
 ρ : Πυκνότητα



Ελεύθερο Μηχανικά PZT (Y_3^{free})

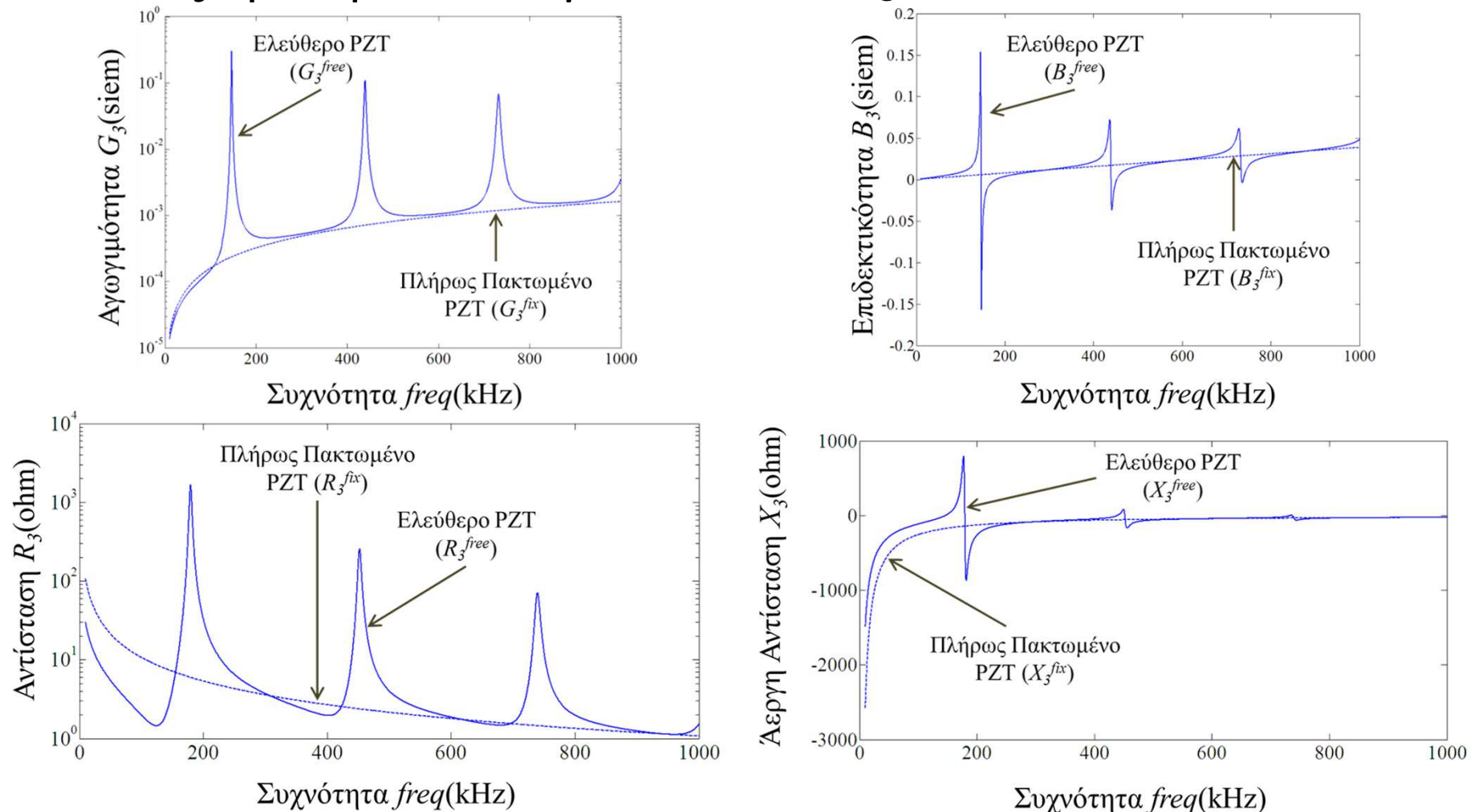


Πακτωμένο Πλευρικά PZT (Y_3^{fix})

2. Πιεζοηλεκτρικά υλικά και Ηλεκτρο-ΜΗχανικά Συστήματα (ΗΜΗΣ)

Ηλεκτρο-Μηχανική Απόκριση επιθέματος PZT

➤ Πιεζοηλεκτρικό επίθεμα τύπου PIC 151 [2.1]



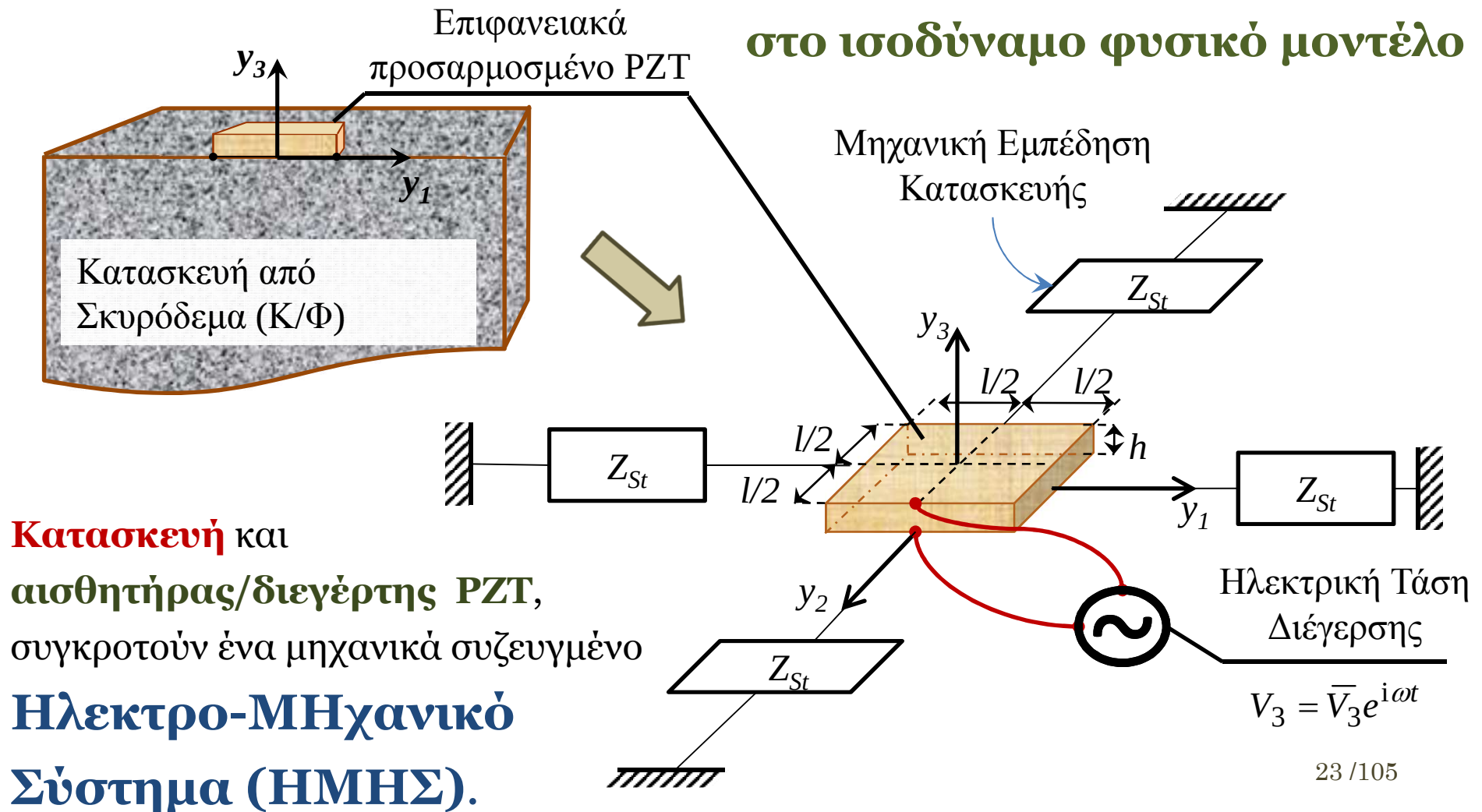
[2.1]. Pi Ceramics, 2014. Piezoelectric Ceramic Products. Fundamentals, Characteristics and Applications.

Πιεζοηλεκτρικά Υλικά και ΜΚΕ

- **Ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο:** Αισθητήρες μηχανικών παραμορφώσεων, Δέκτες μηχανικών κυμάτων.
 - Μέγεθος Παρατήρησης: **Ηλεκτρική Τάση.**
- **Αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο:** Εφαρμογή μηχανικών φορτίσεων, Πομποί μηχανικών κυμάτων.
 - Αξιοποιούμενο μέγεθος: **Μηχανική Παραμόρφωση.**
- Στις διαδικασίες ΜΚΕ, πιεζοηλεκτρικά επιθέματα τύπου **PZT (Lead Zirconate Titanate)** προσαρμόζονται στην υπό παρακολούθηση κατασκευή (Κατασκευή Φορέας – Κ/Φ), λειτουργώντας ως **διεγέρτες (actuator)** ή **αισθητήρες (sensors)** μηχανικών ταλαντώσεων.

Μηχανική σύζευξη PZT-Κατασκευής

➤ Από τη πραγματική κατασκευή...

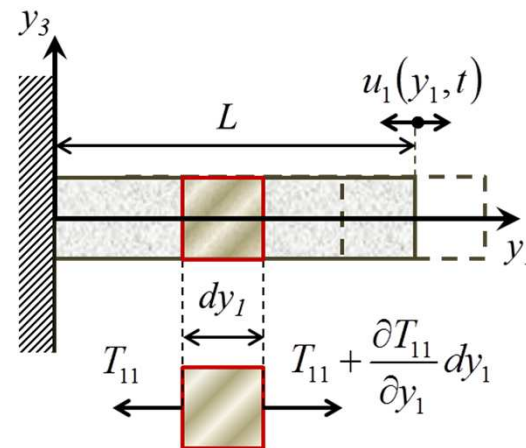
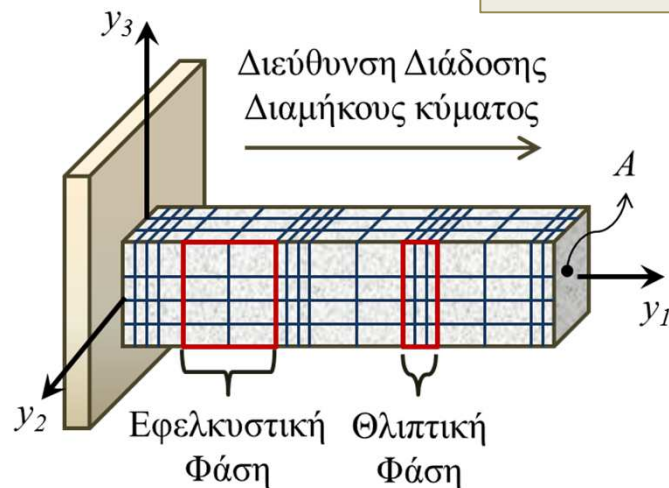


2. Πιεζοηλεκτρικά υλικά και Ηλεκτρο-ΜΗχανικά Συστήματα (ΗΜΗΣ)

Μηχανική σύζευξη PZT-Κατασκευής

➤ Μηχανική Εμπέδηση-DMI (Dynamic Mechanical Impedance)

$$Z_{St}(\omega) = \frac{\text{Φάσμα Απόκρισης Δυναμής}}{\text{Φάσμα Απόκρισης Ταχύτητας}}$$



Αρμονικό Κύμα:

$$u_1 = \underbrace{\bar{U}_1 \sin(\kappa_{St} y_1)}_{U_1} e^{i\omega t}$$

$$\kappa_{St} = \omega \sqrt{\rho / \bar{Y}_{St}^E}$$

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

$$Z_{St}(\omega) = \frac{\bar{F}_1|_{y_1=L}}{i\omega U_1|_{y_1=L}} = \frac{\bar{T}_{11}|_{y_1=L} A}{i\omega U_1|_{y_1=L}} = \frac{\bar{K}_{St} \kappa_{St} L}{i\omega \tan(\kappa_{St} L)}, \quad \underbrace{\bar{K}_{St} = \bar{Y}_{St}^E A / L}_{\text{Στατική Δυσκαμψία}}$$

A: Επιφάνεια Διατομής

Στατική Δυσκαμψία

Μηχανική σύζευξη PZT-Κατασκευής

Κατασκευή και **αισθητήρας/διεγέρτης PZT**, συγκροτούν ένα μηχανικά συζευγμένο **Ηλεκτρο-ΜΗχανικό Σύστημα (ΗΜΗΣ)**.

➤ **Ηλεκτρο-Μηχανική Αγωγιμότητα (ΗΜΑ).**

$$Y_3 = i\omega \frac{l^2}{h} \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12})} \left(\frac{Z_\alpha}{Z_a + Z_{St}} \right) \frac{\tan(a_l \gamma)}{a_l \gamma} + Y_3^{fix}$$

➔ Μηχανική Εμπέδηση PZT

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

➤ **a_l : Συντελεστής Δυσκαμψίας Σύζευξης** (Bonding Stiffness Coefficient). Διορθωτικός συντελεστής μετατόπισης των κορυφών του φάσματος ΗΜΑ λόγω της προσκόλλησης του PZT σε μια κατασκευή με υψηλότερη δυσκαμψία. Όσο η δυσκαμψία της κατασκευής αυξάνεται ο $a_l \rightarrow 0$.

Μηχανική σύζευξη PZT-Κατασκευής Ηλεκτρο-Μηχανικό Σύστημα Σκυροδέματος.

➤ Ηλεκτρο-Μηχανική Αγωγιμότητα:

Υψηλή Δυσκαμψία Σκυροδέματος σε σχέση
με τα επιθέματα PZT

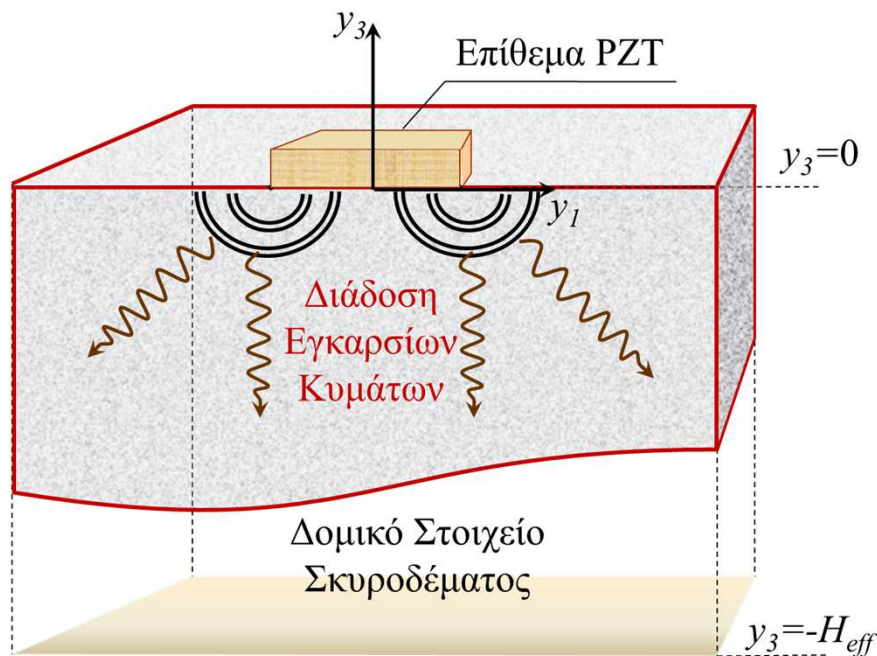
$$\alpha_l \rightarrow 0$$

$$\tan(\alpha_l \gamma) / \alpha_l \gamma \rightarrow 1$$

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

Μηχανική σύζευξη PZT-Κατασκευής Ηλεκτρο-Μηχανικό Σύστημα Σκυροδέματος.

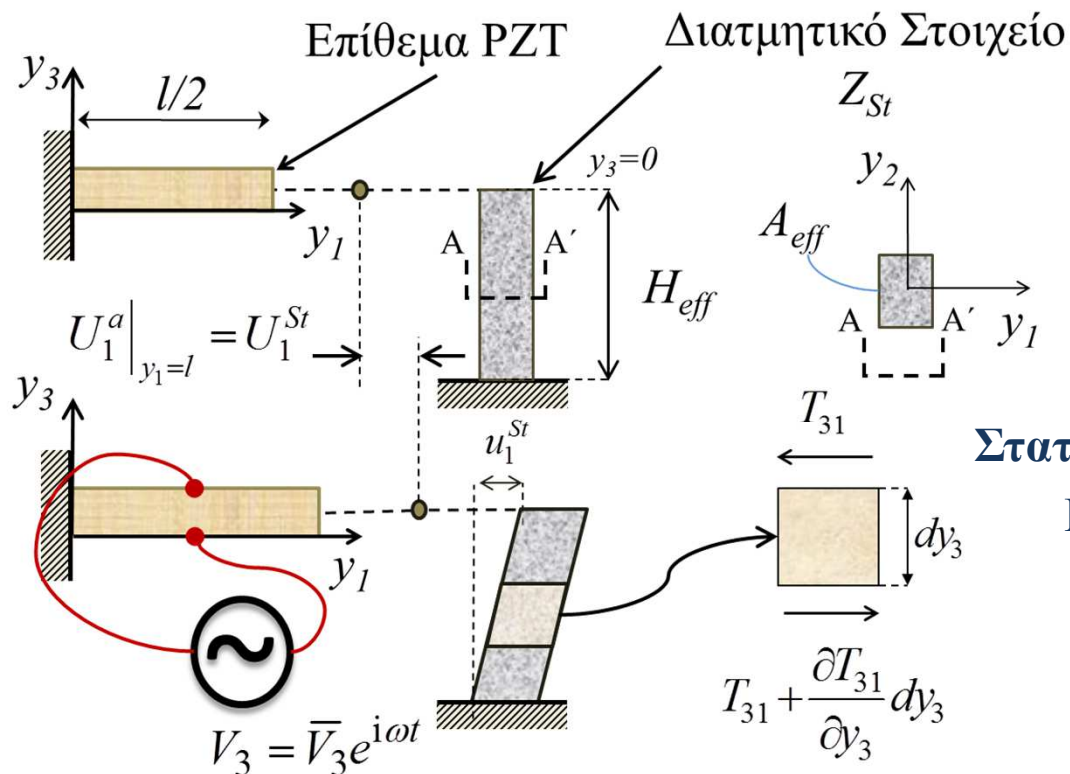
➤ Διατμητική Μηχανική Εμπέδηση [2.2]:



- Η μηχανική ενέργεια που εκλύεται από το ηλεκτρικά διεγερμένο PZT, μεταφέρεται στο εσωτερικό της κατασκευής με τη μορφή **εγκάρσιων (διατμητικών) κυμάτων**.
- Σε ένα κρίσιμο βάθος H_{eff} από τη διεπιφάνεια PZT-Κατασκευής, **το πεδίο μετατοπίσεων μηδενίζεται** λόγω της απόσβεσης του υλικού (n_{st}).

Μηχανική σύζευξη PZT-Κατασκευής Ηλεκτρο-Μηχανικό Σύστημα Σκυροδέματος.

➤ Διατμητική Μηχανική Εμπέδηση: **Αρμονική Διέγερση**



$$Z_{st} = \frac{\bar{T}_{31}|_{y_3=0} A_{eff}}{i\omega U_1^{St}|_{y_3=0}} = \frac{\bar{K}_{St}}{i\omega} \frac{\kappa_s H_{eff}}{\tan(\kappa_s H_{eff})}$$

Στατική Δυσκαμψία: $\bar{K}_{St} = A_{eff} \bar{G}_{St} / H_{eff}$

Μικαδικό Μέτρο

Διάτμησης: $\bar{G}_{St} = G_{St} (1 + i n_{St})$

$$\kappa_s = \omega \sqrt{\rho / \bar{G}_{St}}$$

Μηχανική σύζευξη PZT-Κατασκευής Ηλεκτρο-Μηχανικό Σύστημα Σκυροδέματος.

➤ Διατμητική Μηχανική Εμπέδηση:

- Το παρόν αναλυτικό μοντέλο προσομοιώνει την μηχανική απόκριση της φέρουσας κατασκευής σκυροδέματος με ένα ισοδύναμο **μονοβάθμιο συνεχές** σύστημα, διατμητικής λειτουργίας.
- Αποδεικνύει την ισχυρή συσχέτιση της μηχανικής απόκρισης μιας κατασκευής με την **γεωμετρία** και τις **μηχανικές ιδιότητες** του σκυροδέματος (Κρίσιμο Βάθος H_{eff} , Μέτρο Διάτμησης G_{St})
- Με βάση το συγκεκριμένο **μονοβάθμιο** σύστημα, στο **πλαίσιο της παρούσας διατριβής**, αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία προσομοίωση της μηχανικής απόκρισης της κατασκευής, από **πολυβάθμια** συστήματα διατμητικών μηχανικών εμπεδήσεων.



3.

Η μέθοδος της Ηλεκτρο-Μηχανικής
Εμπέδησης (ΗΜΕ)

3. Η μέθοδος της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (HME)

Βασικές αρχές εφαρμογής στον ΜΚΕ

- Η μέθοδος HME αποτελεί την πιο διαδεδομένη διαδικασία ΜΚΕ κατασκευών με τη χρήση επιθεμάτων PZT **[3.1]**.
- Τα επιθέματα PZT προσαρμόζονται στην υπό παρακολούθηση κατασκευή και διεγείρονται από μια χρονικά μεταβαλλόμενη, **συνήθως αρμονική**, ηλεκτρική τάση.
- Το μέγεθος παρατήρησης είναι το **φάσμα απόκρισης της Ηλεκτρικής Εμπέδησης** ενός ή περισσότερων επιθεμάτων PZT, σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων.
- Στις συνήθεις εφαρμογές το εύρος των συχνοτήτων καταγραφής κυμαίνεται μεταξύ **10 και 400 kHz [3.1]**.

3. Η μέθοδος της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (ΗΜΕ)

Βασικές αρχές εφαρμογής στον ΜΚΕ

- Οι διατάξεις παρατήρησης/καταγραφής της ΗΜΕ αξιοποιούν το ευθύ και το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ταυτόχρονα.
- Τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα λειτουργούν τόσο ως αισθητήρες μηχανικών κυμάτων όσο και ως διεγέρτες μηχανικών ταλαντώσεων (Αισθητήρες/Διεγέρτες – Α/Δ).



Βασικές αρχές εφαρμογής στον ΜΚΕ

➤ **Ηλεκτρική απόκριση** στο πεδίο των συχνοτήτων (Φάσμα Απόκρισης HME), ενός επιθέματος PZT το οποίο βρίσκεται ενσωματωμένο σε μια κατασκευή σκυροδέματος.

I. Είναι **μοναδική** και αποτελεί την **Ηλεκτρο-Μηχανική Υπογραφή (HMY)** του ΗΜΗΣ.

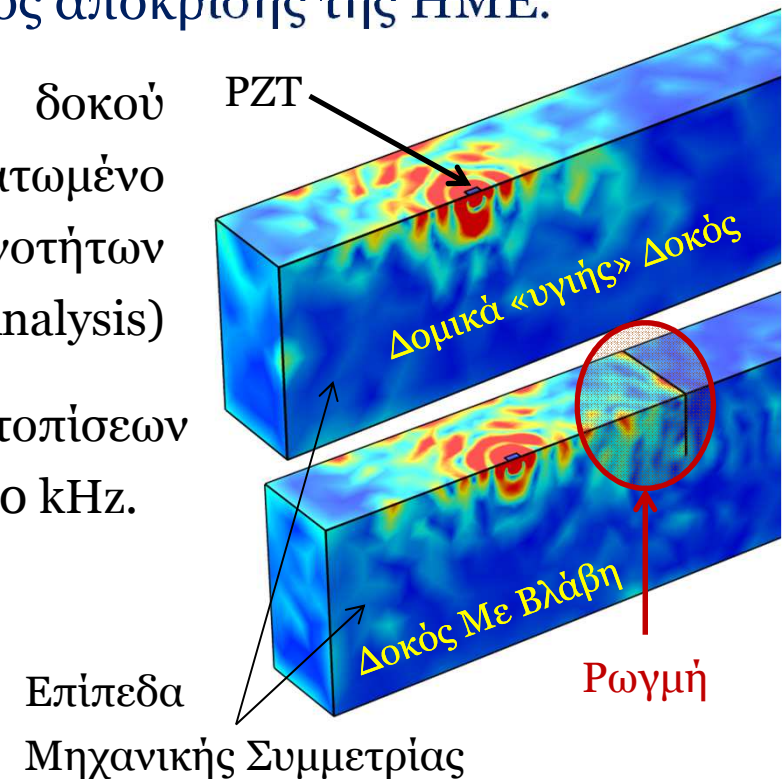
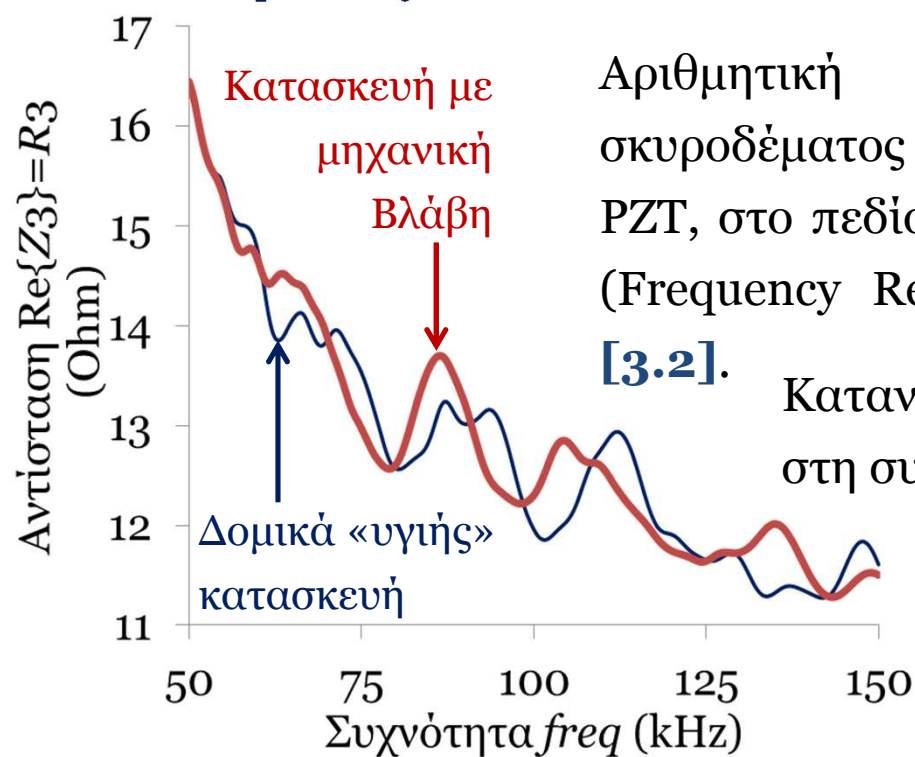
II. Εξαρτάται σημαντικά, ως προς τη μορφή του φάσματος, από τα **ηλεκτρο-μηχανικά χαρακτηριστικά** του **PZT**, αλλά και τις **μηχανικές** και **γεωμετρικές** ιδιότητες της υπό παρακολούθηση κατασκευής (Z_{St}).

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

3. Η μέθοδος της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (HME)

Βασικές αρχές εφαρμογής στον ΜΚΕ

Οποιαδήποτε μεταβολή στα μηχανικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, λόγω μηχανικής βλάβης ή διαφοροποίησης των μηχανικών ιδιοτήτων, **επιδρά άμεσα** στη μορφή του φάσματος απόκρισης της HME.



[3.2]. Providakis CP, Liarakos EV and Voutetaki M, 2010. Damage detection in concrete components using PZT actuators/sensors and extreme value statistics. 9th HSTAM Congress in Mechanics.

Ενόργανη καταγραφή HME: Διατάξεις

- Ολοκληρωμένα συστήματα καταγραφής της Ηλεκτρική Εμπέδησης (RLC-Meters) απευθείας στο πεδίο της συχνότητας.
 - Υψηλή ακρίβεια, Μεγάλο εύρος συχνοτήτων σάρωσης (1kHz-5MHz)
 - Υψηλό κόστος
 - Χαμηλή ευελιξία σε εφαρμογές εκτός εργαστηρίου
- Απλές ηλεκτρικές διατάξεις μέτρησης της ηλεκτρικής απόκρισης των Ηλεκτρο-Μηχανικών Συστημάτων.
 - Ικανοποιητική ακρίβεια μόνο σε συγκεκριμένα εύρη συχνοτήτων
 - Χαμηλού κόστους κυκλώματα ηλεκτρικών αντιστάσεων και πυκνωτών
 - Χαμηλού κόστους ολοκληρωμένα κυκλώματα μέτρησης της ηλεκτρικής εμπέδησης

3. Η μέθοδος της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (ΗΜΕ)

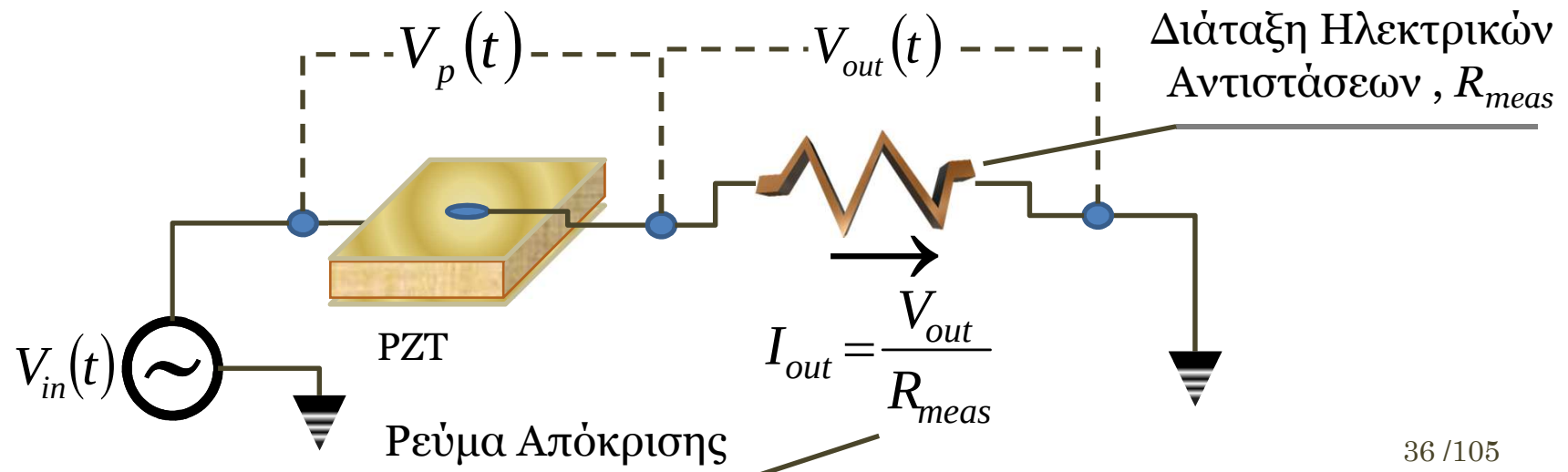
Ενόργανη καταγραφή ΗΜΕ: Αρχή λειτουργίας

Καταγραφή V_{in} και V_{out} στο πεδίο του χρόνου με συχνότητα δειγματοληψίας $F_s=1/dt$

Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier

$$Z_3 = \frac{\bar{V}_p}{\bar{I}_{out}} = R_{meas} \frac{FV_{in} - FV_{out}}{FV_{out}}$$

Υπολογισμός Φασμάτων Απόκρισης Fourier, FV_{in} και FV_{out}



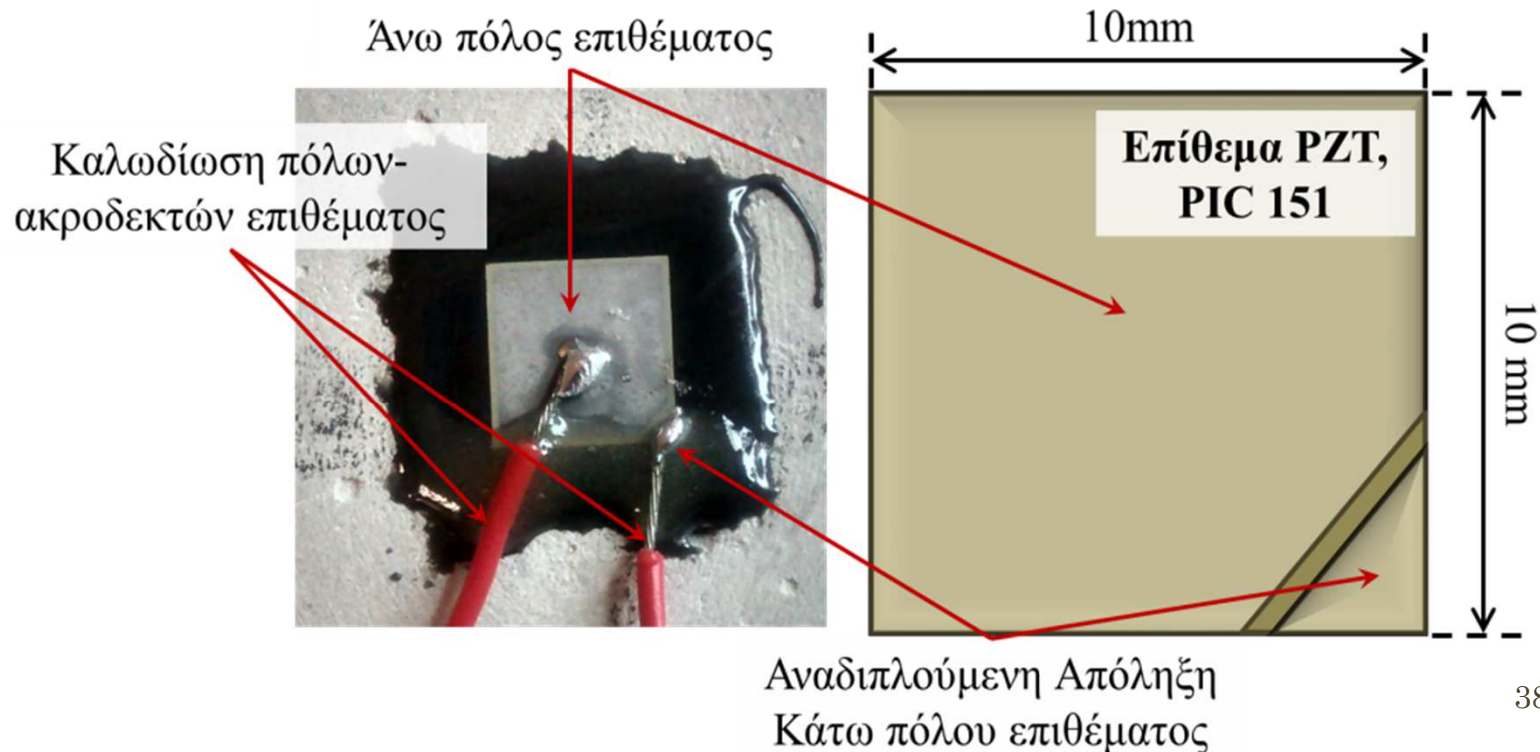
Ενόργανη καταγραφή HME: **Συναρτήσεις** **Ηλεκτρικής τάσης Διέγερσης, V_{in}**

- Αρμονικές ηλεκτρικές τάσεις V_{in}
- Σάρωση συγκριμένου εύρους συχνοτήτων, $[freq_{start}, freq_{end}]$
- **Μono-Αρμονικές συναρτήσεις.** Διαδοχικές διακριτές διεγέρσεις με απλές ημιτονοειδείς συναρτήσεις διαφορετικών συχνοτήτων (Single Sine Signals).
- **Πολύ-αρμονικές συναρτήσεις.** Συνεχής διέγερση για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (t_{sweep}).
 - Άθροισμα mono-αρμονικών συναρτήσεων διαφορετικών συχνοτήτων (Multi-Sine Signals)
 - Τριγωνομετρικές συναρτήσεις χρονικά μεταβαλλόμενης συχνότητας (Chirp Signals)

3. Η μέθοδος της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (ΗΜΕ)

Ενόργανη καταγραφή ΗΜΕ: Προσαρμογή ηλεκτροδίων στους ακροδέκτες ενός PZT

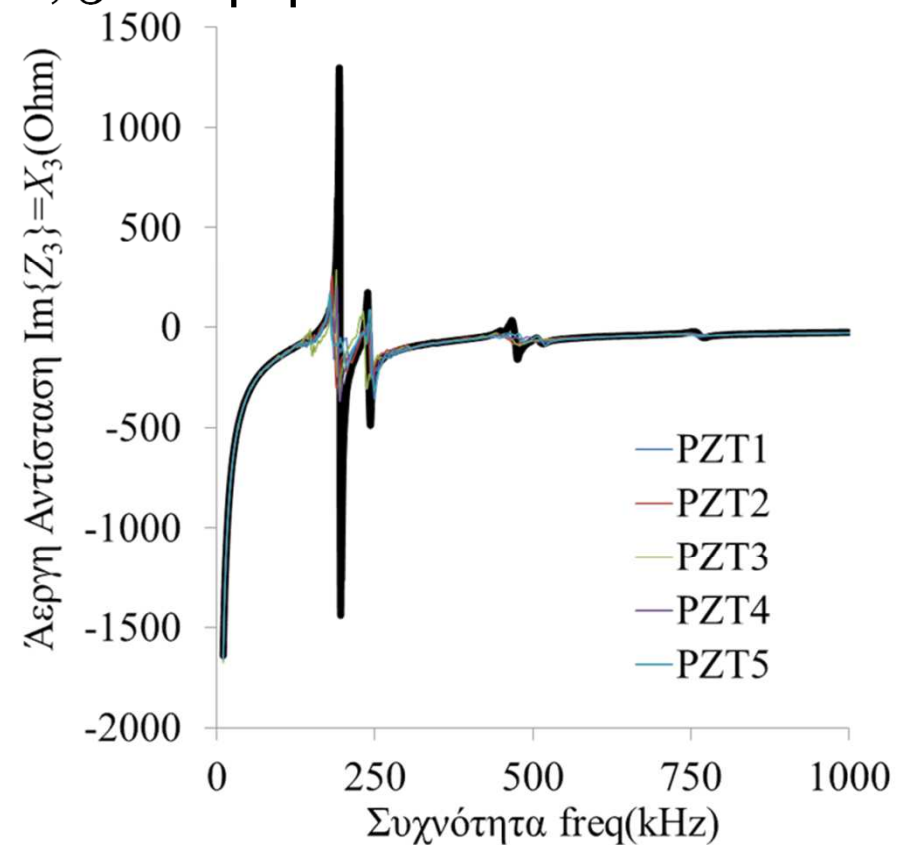
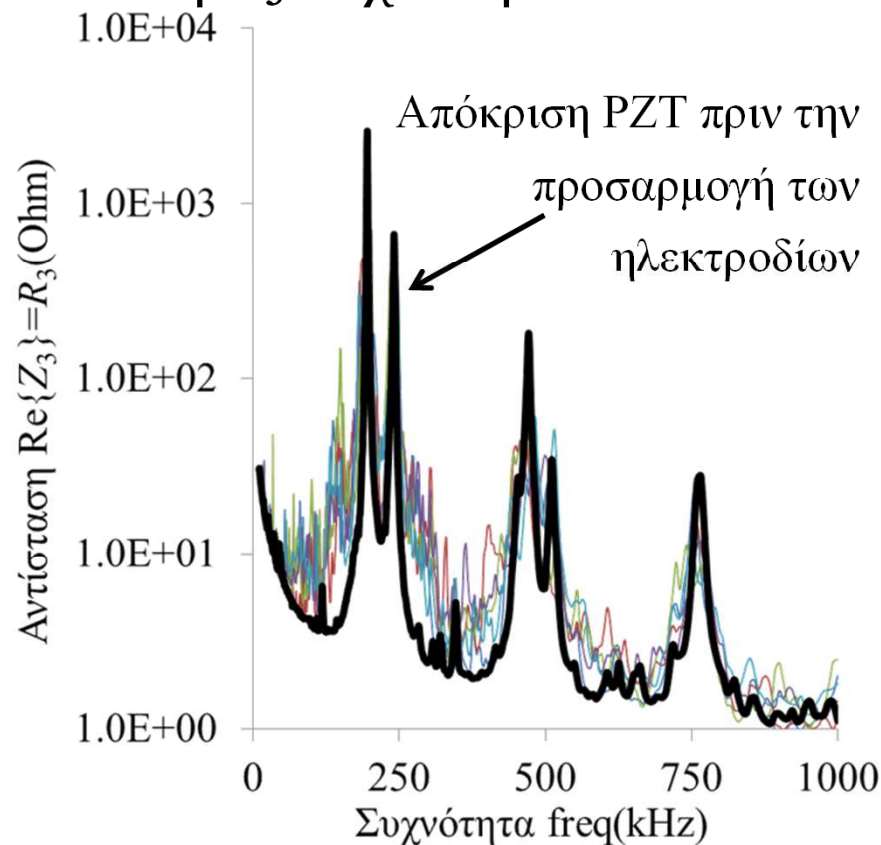
- Ελεύθερο μηχανικά PZT, τύπου PIC 151.
- Θερμική συγκόλληση ηλεκτροδίων με κράμα κασσίτερου.
- Θερμοκρασία συγκόλλησης μικρότερη της θερμοκρασίας Curie.



3. Η μέθοδος της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (HME)

Ενόργανη καταγραφή HME: Εργαστηριακές Μετρήσεις με RLC-Meter

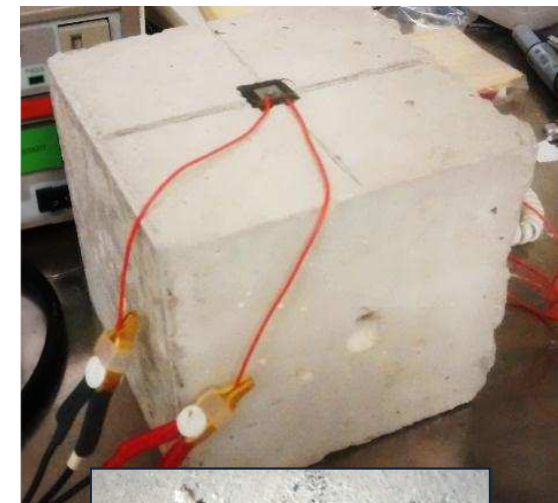
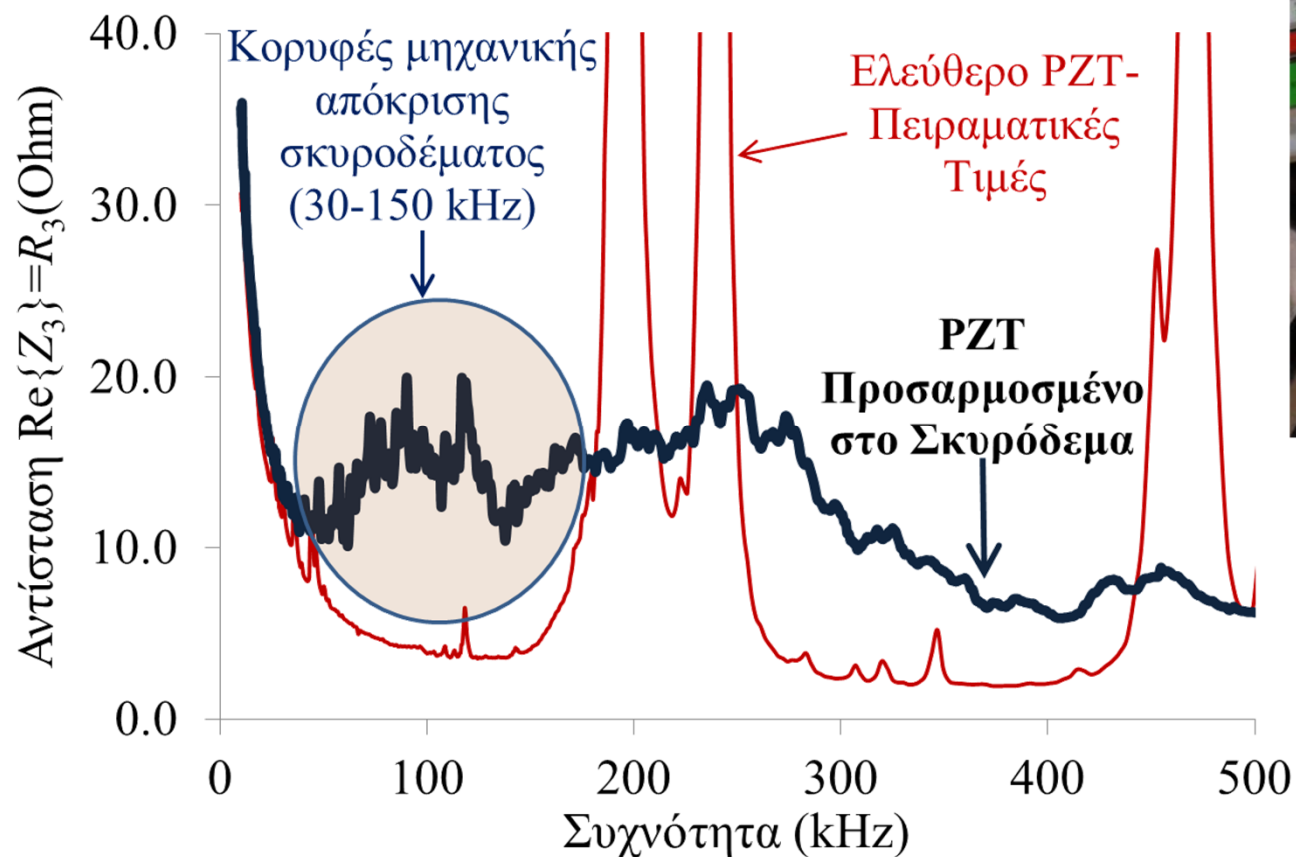
- Ελεύθερο μηχανικά PZT, τύπου PIC 151.
- Εύρος συχνοτήτων 10-1000 kHz, 5 Διαφορετικά PZT.



3. Η μέθοδος της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (HME)

Ενόργανη καταγραφή HME: Εργαστηριακές Μετρήσεις με RLC-Meter

- PZT επιφανειακά προσαρμοσμένο σε κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος (Μήκος Ακμής 150 mm).



3. Η μέθοδος της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (ΗΜΕ)

Προσδιορισμός της μηχανικής εμπέδησης Z_{St} , της υπό παρακολούθηση κατασκευής

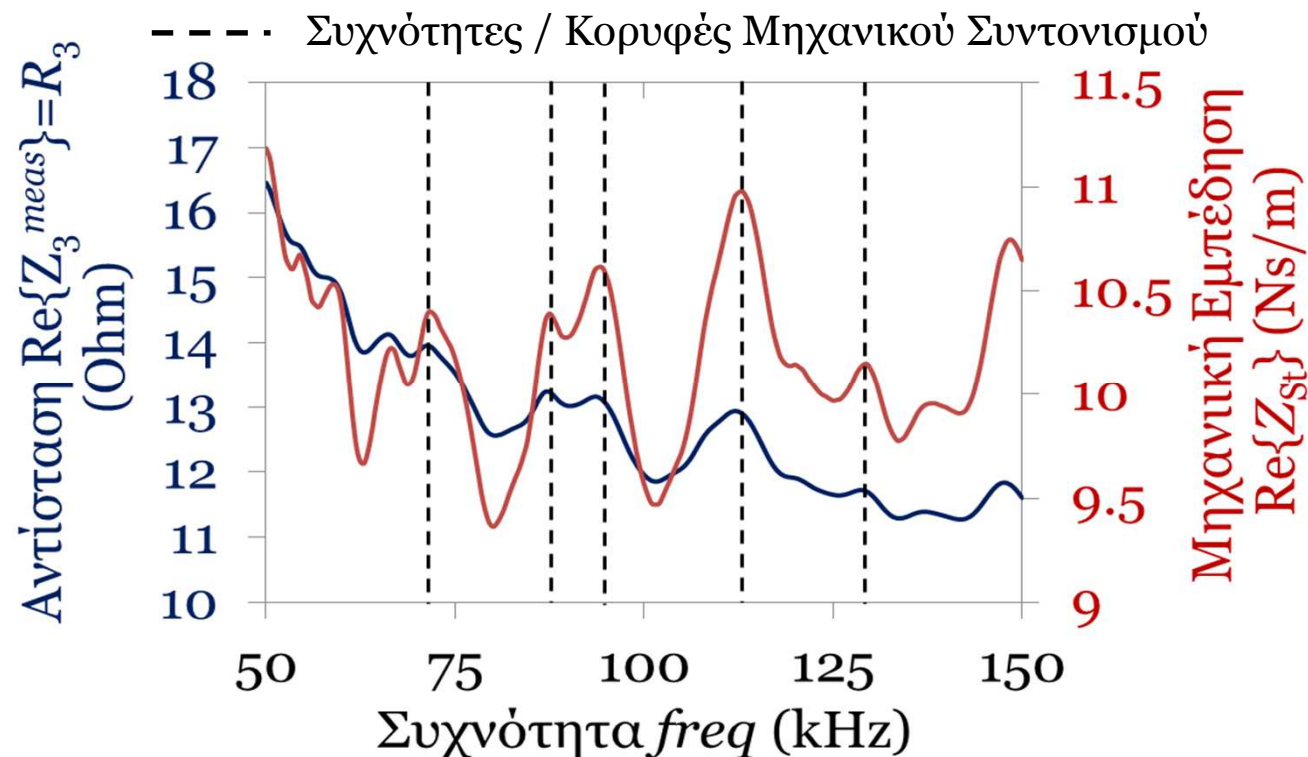
- Το φάσμα απόκρισης της μηχανικής εμπέδησης μιας κατασκευής Z_{St} , είναι δυνατό να υπολογιστεί με βάση:
 - Τα ηλεκτρομηχανικά χαρακτηριστικά του PZT
 - Το **πειραματικώς καταγραφόμενο** φάσμα απόκρισης της ΗΜΕ, Z_3^{meas}

$$Z_{St} = Z_a \left\{ i\omega \frac{l^2}{h} \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu_{12}) \left(\frac{1}{Z_3^{meas}} - Y_3^{fix} \right)} - 1 \right\}, \quad Z_a = \frac{2\bar{Y}^E h}{i\omega(1-\nu_{12})}$$

3. Η μέθοδος της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (HME)

Προσδιορισμός της μηχανικής εμπέδησης Z_{St} , της υπό παρακολούθηση κατασκευής

Το φάσμα απόκρισης της Μηχανικής Εμπέδησης (DMI) Z_{St} , σε αρκετές περιπτώσεις ΜΚΕ σκυροδέματος, **αποκαλύπτει** ή **ενισχύει** πληροφορίες σχετικά με τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής.





4.

Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας
κατασκευών σκυροδέματος

4. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας κατασκευών σκυροδέματος

Συγκριτική ανάλυση των φασμάτων απόκρισης

- Για την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας μιας κατασκευής με την μέθοδο HME, αξιοποιείται ως εργαλείο παρατήρησης το φάσμα απόκρισης της **ηλεκτρικής (Z_3)** ή της **μηχανικής εμπέδησης (Z_{St})** και πιο συγκεκριμένα τα πραγματικά μέρη αυτών, R_3 και R_{St} [4.1].
- Η αξιολόγηση αποτελεί μια διαδικασία συγκριτικής ανάλυσης μεταξύ ενός **φάσματος αναφοράς RS** (Reference Signature) και κάθε **άλλου φάσματος απόκρισης CS** (Current Signature), το οποίο αντιπροσωπεύει την τρέχουσα κατάσταση δομικής «υγείας» της κατασκευής.

[4.1]. **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*

Συγκριτική ανάλυση των φασμάτων απόκρισης

Το φάσμα αναφοράς RS , αντιστοιχεί:

- **Στη απόκριση της δομικά «υγιούς» κατασκευής.** Αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας.
- **Σε κάποια κατάσταση αναφοράς, σε σχέση με τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος.** Παρακολούθηση του πρώιμου σκυροδέματος.

Προσδιορίζεται:

- **Πειραματικά.** Ενόργανη καταγραφή της ηλεκτρικής απόκρισης.

Φάσμα απόκρισης RS^{meas} : F Ζεύγη τιμών $(\omega_i, Z_{3,i}^{meas})$, $i=1:F$

- **Προσεγγιστικά.** Προσομοίωση της απόκρισης του ΗΜΗΣ με κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα.

$Z_{3,i}^{meas} \approx Z_3^{est}(\omega_i, \mathbf{p})$, $i=1:F$, $\mathbf{p}$: Διάνυσμα παραμέτρων μοντέλου

4. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας κατασκευών σκυροδέματος

Στατιστικοί Δείκτες βλάβης

- **Μέτρα διαφοροποίησης** τα οποία στηρίζονται στον υπολογισμό της αθροιστικής απόκλισης, μεταξύ του RS και κάθε άλλου φάσματος απόκρισης CS , το οποίο αντιστοιχεί στη τρέχουσα κατάσταση δομικής «υγείας» της κατασκευής.
- **Root Mean Square Deviation - $RMSD$**

$$RMSD(\%) = 100 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^F (CS_i - RS_i)^2}{\sum_{i=1}^F RS_i^2}}$$

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

$i=1:F$, F το μέγεθος του διανύσματος τιμών κάθε φάσματος απόκρισης.

RS_i και CS_i , η i καταγεγραφήμενη τιμή κάθε φάσματος, η οποία αντιστοιχεί στη γωνιακή συχνότητα ω_i .

Στατιστικοί Δείκτες βλάβης

Πλεονεκτήματα

- Σημαντικά διαδεδομένοι στο ΜΚΕ κατασκευών με τη μέθοδο της ΗΜΕ.
- Χρηστική Ευελιξία: Χαμηλή μαθηματική πολυπλοκότητα.
- Μεγάλη αξιοπιστία, στις περιπτώσεις παρακολούθησης της διαδικασίας σκλήρυνσης και ωρίμανσης του πρώιμου σκυροδέματος.

Μειονεκτήματα

- Αδυναμία εστίασης σε τοπικές μεταβολές των φασμάτων ΗΜΕ οι οποίες δύναται να αντιπροσωπεύουν σοβαρές βλάβες.
- Δυσκολία προσδιορισμού ορίων εμπιστοσύνης, εντός των οποίων θα πρέπει να κυμαίνονται οι διαφορές των διαδοχικά καταγραφόμενων φασμάτων αναφοράς (*RS*).

Στατιστικός έλεγχος

- **Στόχος:** Αποφυγή σφάλματος στην αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας μιας κατασκευής.
 - **Σφάλμα τύπου I:** Ψευδής ανίχνευση μηχανικής βλάβης
 - **Σφάλμα τύπου II:** Αποτυχία ανίχνευσης υπαρκτής μηχανικής βλάβης
- Διατύπωση ενός **μέτρου διαφοροποίησης** των φασμάτων απόκρισης, με βάση τη προσομοίωση της απόκρισης του «υγιούς» δομικού συστήματος.
- Προσδιορισμός των **ορίων εμπιστοσύνης**, μέσα στα οποία είναι απαραίτητο να κινείται το μέγεθος διαφοροποίησης των φασμάτων απόκρισης της «υγιούς» κατασκευής.

4. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας κατασκευών σκυροδέματος

Στατιστικός έλεγχος: **Μεθοδολογία**

- Προσομοίωση των **μετρούμενων** φασμάτων αναφοράς RS^{meas} , της «υγιούς» κατασκευής, από ένα **μαθηματικό μοντέλο εκτίμησης** RS^{est} .
 - Μη γραμμικές συναρτήσεις παλινδρόμησης. Ρητά πολυώνυμα της γωνιακής συχνότητας ω , με μιγαδικούς συντελεστές.
 - Μαθηματικά μοντέλα τα οποία προκύπτουν από τη προσέγγιση της πραγματικής κατασκευής, από ισοδύναμα δυναμικά συστήματα.
- Υπολογισμός των **υπολοίπων (Residuals)** r , προσομοίωσης, μεταξύ του εκτιμώμενου φάσματος αναφοράς RS^{est} και του κάθε πειραματικώς καταγραφόμενου φάσματος CS^{meas} .

$$r = CS^{meas} - RS^{est}$$

4. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας κατασκευών σκυροδέματος

Στατιστικός έλεγχος: **Μεθοδολογία**

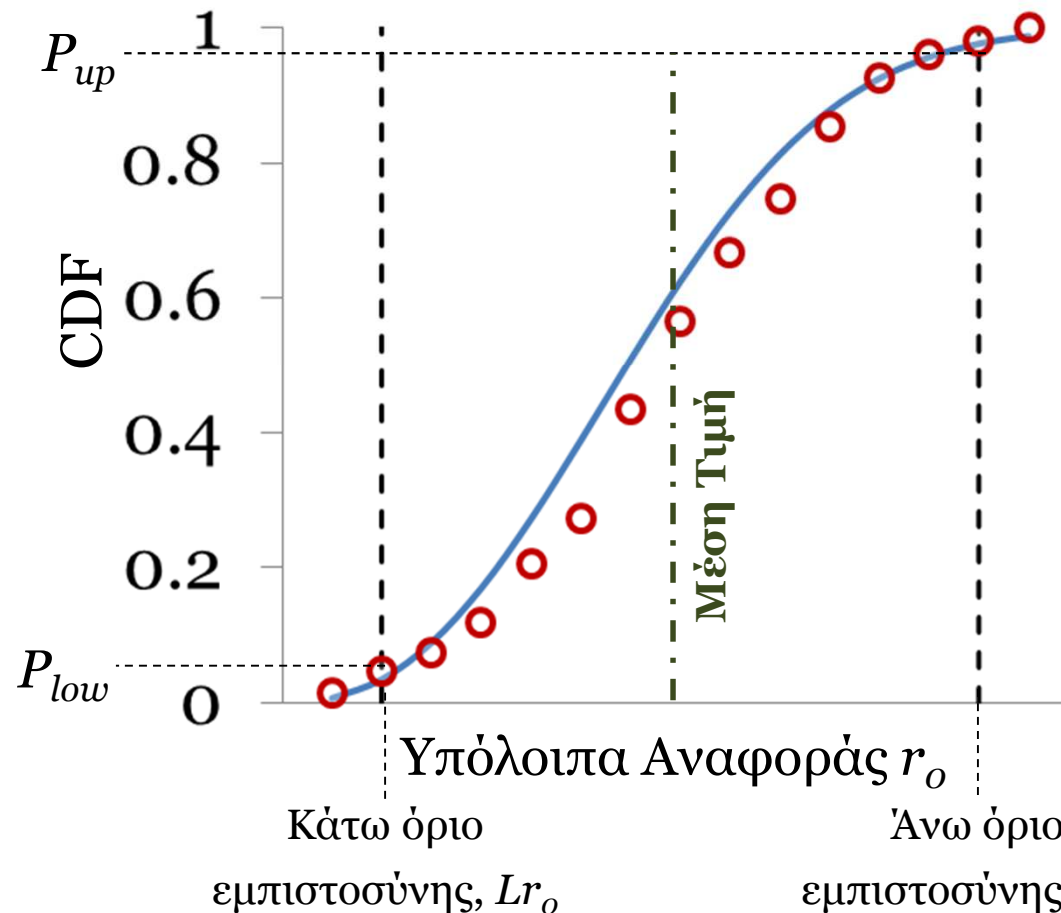
- **Μέτρο διαφοροποίησης φασμάτων:** Ο αριθμός των υπολοίπων N_{out} , που θέτονται εκτός των ορίων εμπιστοσύνης.
 - Τα όρια εμπιστοσύνης των **υπολοίπων** προσδιορίζονται από τη στατιστική ανάλυση των **υπολοίπων αναφοράς r_o** , λαμβάνοντας υπόψη συγκριμένα επίπεδα **βεβαιότητας**.
 - Κανονική Κατανομή (Normal Distribution)
 - Γενικευμένη Κατανομή των Ακραίων τιμών (Generalized Extreme Values – GEV)
- $$r_o = RS^{meas} - RS^{est}$$
- Όρια εμπιστοσύνης: Υπολογισμός της θεωρητικής **Συνάρτησης Αθροιστικής Πιθανότητας-CDF**, για την αντίστοιχη κατανομή που εφαρμόζεται.

4. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας κατασκευών σκυροδέματος

Στατιστικός έλεγχος: Όρια εμπιστοσύνης

Επιτρεπόμενος αριθμός υπολοίπων εκτός ορίων: $N_{out}^0 = F \times \{1 - (P_{up} - P_{low})\} \times 100$

Επίπεδο βεβαιότητας (%) = $(P_{up} - P_{low}) \times 100$



F : μέγεθος διανύσματος καταγραφόμενου RS :
 $(\omega_i, RS_i^{meas}), i=1:F$

— Θεωρητική Κατανομή

○ Πειραματική Κατανομή

$$Lr_0 = CDF^{-1}(P_{low})$$

$$Ur_0 = CDF^{-1}(P_{up})$$

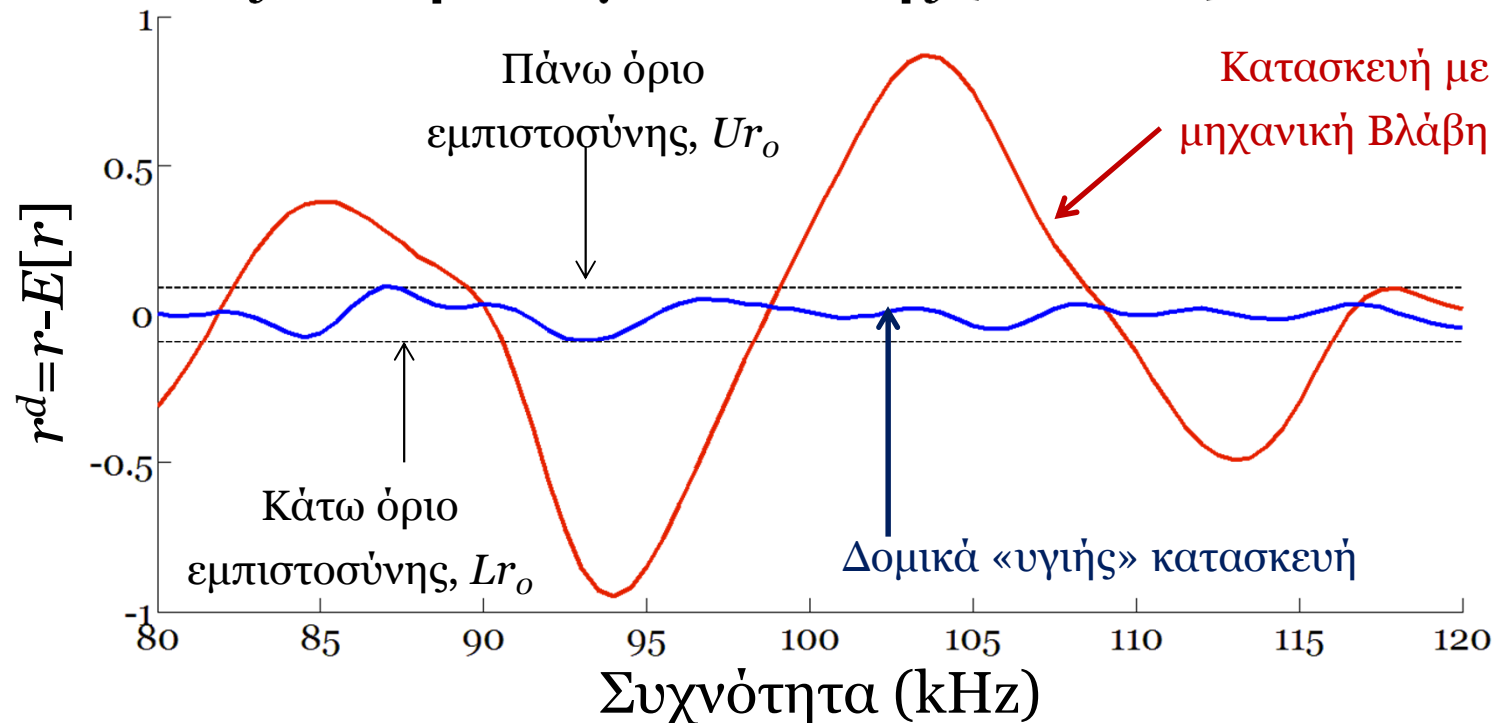
4. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας κατασκευών σκυροδέματος

Στατιστικός έλεγχος: **Αξιολόγηση φασμάτων**

Μεταβολή στη δομική ακεραιότητα της κατασκευής ή τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος.

$$N_{out} > N_{out}^0$$

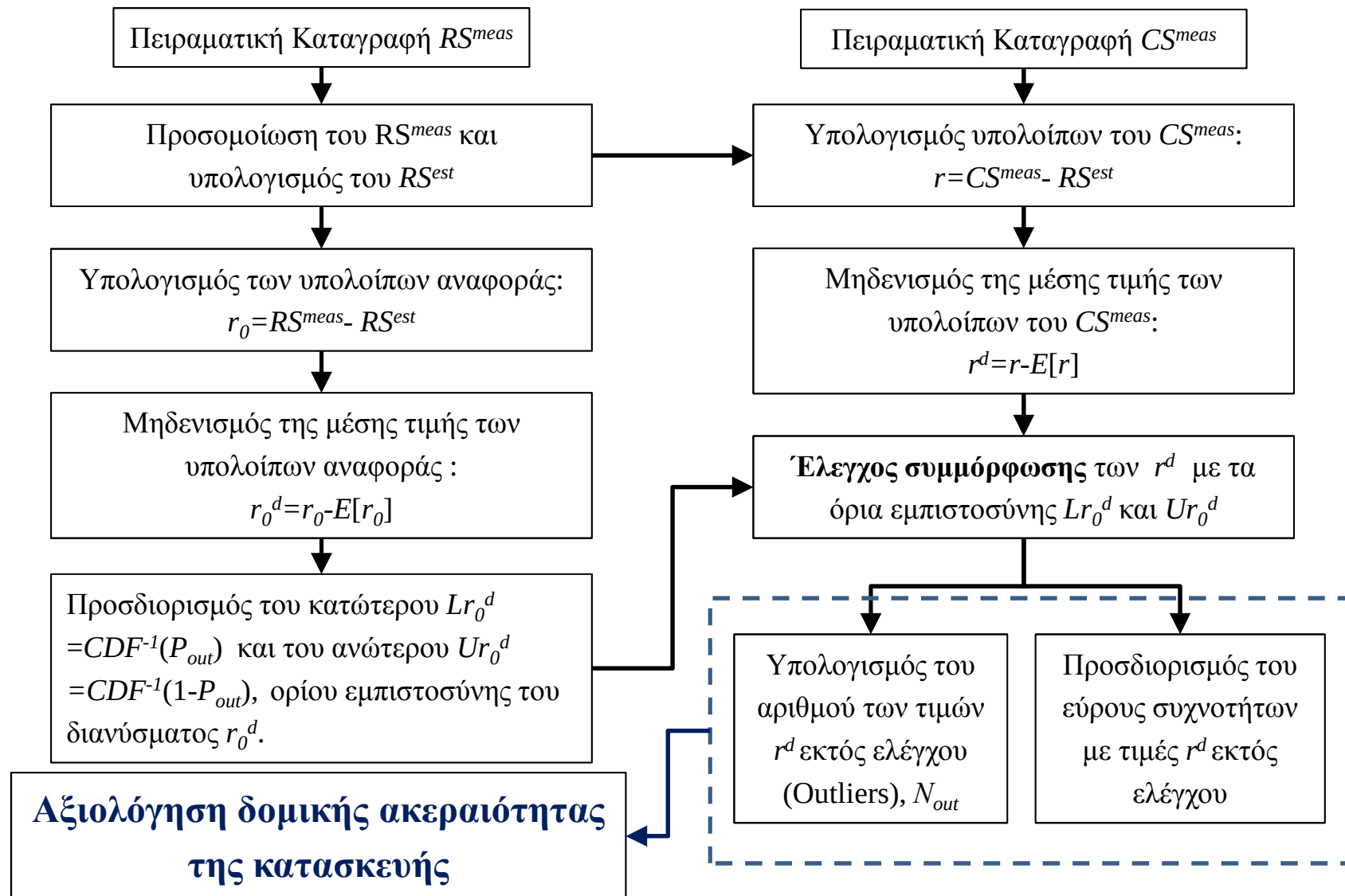
N_{out} : Ο αριθμός των υπολοίπων του φάσματος CS^{meas} , που βρίσκονται **εκτός των ορίων εμπιστοσύνης (Outliers)**.



Βεβαιότητα: 99%
 $P_{low} = 0.005$ ή 0.5 %
 $P_{up} = 0.995$ ή 99.5 %
 $N_{out}^0 = 1$
 $N_{out} = 68$
 $F = 105$
 $E[r]$: Μέση τιμή υπολοίπων

4. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας κατασκευών σκυροδέματος

Στατιστικός έλεγχος Υπολοίπων: **Διάγραμμα Ροής**



4. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας κατασκευών σκυροδέματος

Προσομοίωση του φάσματος αναφοράς της δομικά «υγιούς» κατασκευής: Ηλεκτρο-Μηχανική Εμπέδηση, Z_3

Η μετρούμενη ΗΜΕ Z_3^{meas} , είναι δυνατό να προσομοιωθεί από μια **ρητή πολυωνυμική συνάρτηση** της γωνιακής συχνότητας, $Z_3^{est}(\omega, \mathbf{p})$ [4.2].

$$Z_{3,i}^{meas} = R_{3,i}^{meas} + iX_{3,i}^{meas} = Z_3^{est}(\omega_i, \mathbf{p}) + r_i \quad i = 1:F$$

$$Z_3^{est}(\omega_i, \mathbf{p}) = \frac{N(\omega_i, \mathbf{b})}{D(\omega_i, \mathbf{a})} = \frac{\sum_{p=1}^{no+1} b_{p-1} \omega_i^{p-1}}{\sum_{q=1}^{do+1} a_{q-1} \omega_i^{q-1}}$$

$$\underset{(no+do+2 \times 1)}{\mathbf{p}} = [a_0 \quad a_1 \quad \cdots \quad a_{do} \quad b_0 \quad b_1 \quad \cdots \quad b_{no}]^T$$

4. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας κατασκευών σκυροδέματος

Προσομοίωση του φάσματος αναφοράς της δομικά «υγιούς» κατασκευής: Ηλεκτρο-Μηχανική Εμπέδηση, Z_3

Οι τιμές του διανύσματος $\mathbf{p}$ προσδιορίζονται από την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων της διαφοράς, μεταξύ μετρούμενου και εκτιμώμενου φάσματος απόκρισης (Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων-MTE).

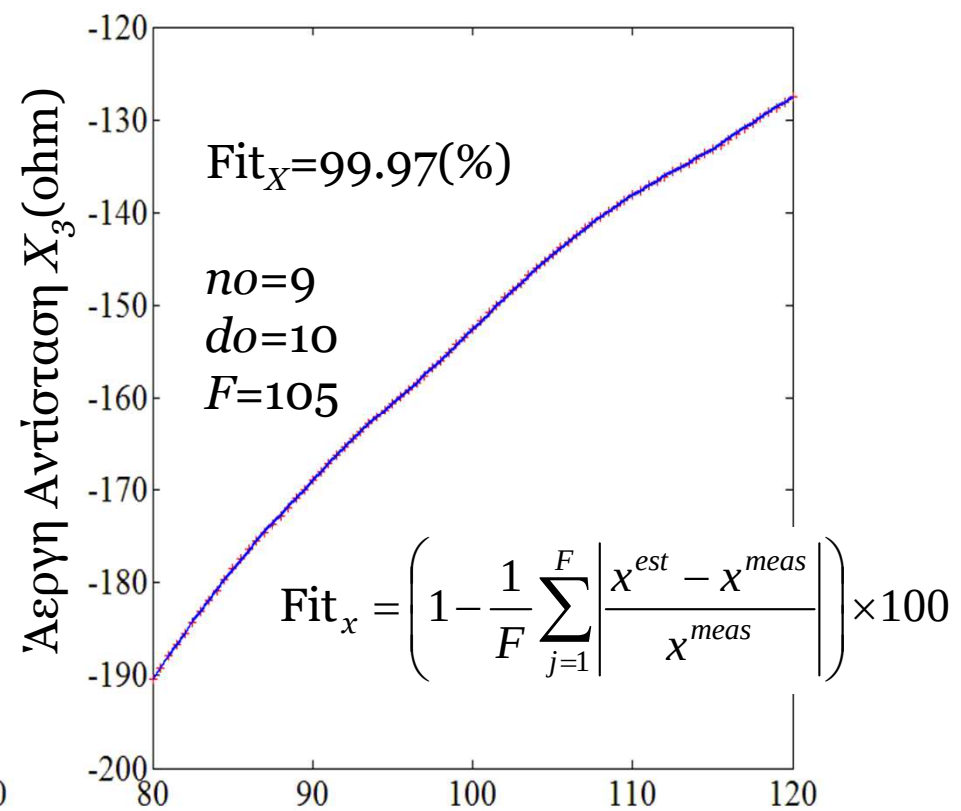
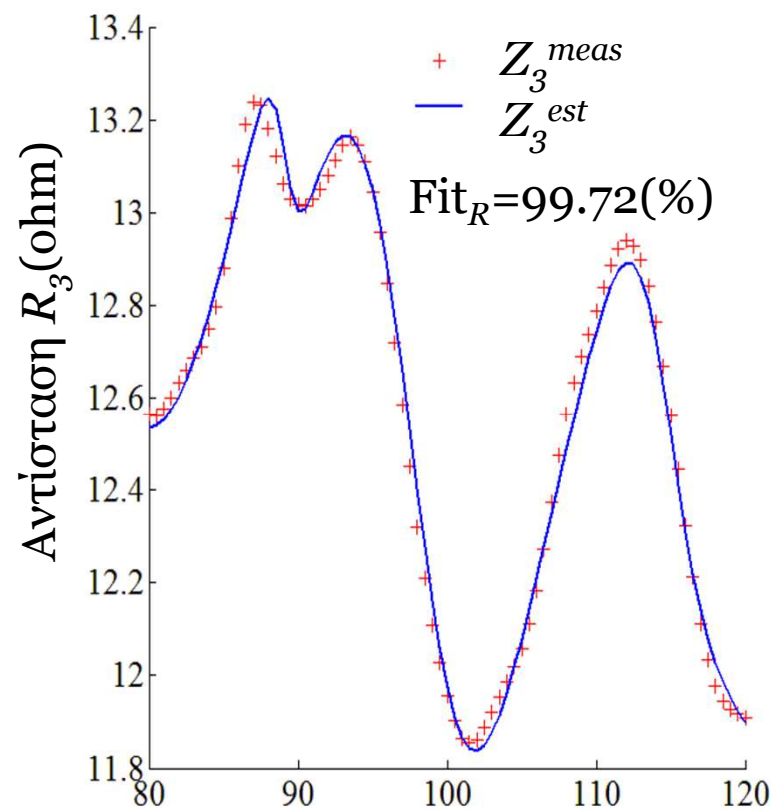
$$\min_{\mathbf{p}} \sum_{i=1}^F \left\{ Z_{3,i}^{meas} - Z_3^{est}(\omega_i, \mathbf{p}) \right\}^2 = \min_{\mathbf{p}} \sum_{i=1}^F r_i^2$$

Το συγκεκριμένο πρόβλημα, λόγω της φύσης της συνάρτησης παλινδρόμησης, αποτελεί ένα **μη γραμμικό πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων** και είναι δυνατό να επιλυθεί με τη χρήση της συνάρτησης **lsqnonlin**, του πακέτου εργαλείων Βελτιστοποίησης (Optimization Toolbox) του MATLAB.

4. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας κατασκευών σκυροδέματος

Προσομοίωση του φάσματος αναφοράς της δομικά «υγιούς» κατασκευής: Ηλεκτρο-Μηχανική Εμπέδηση, Z_3

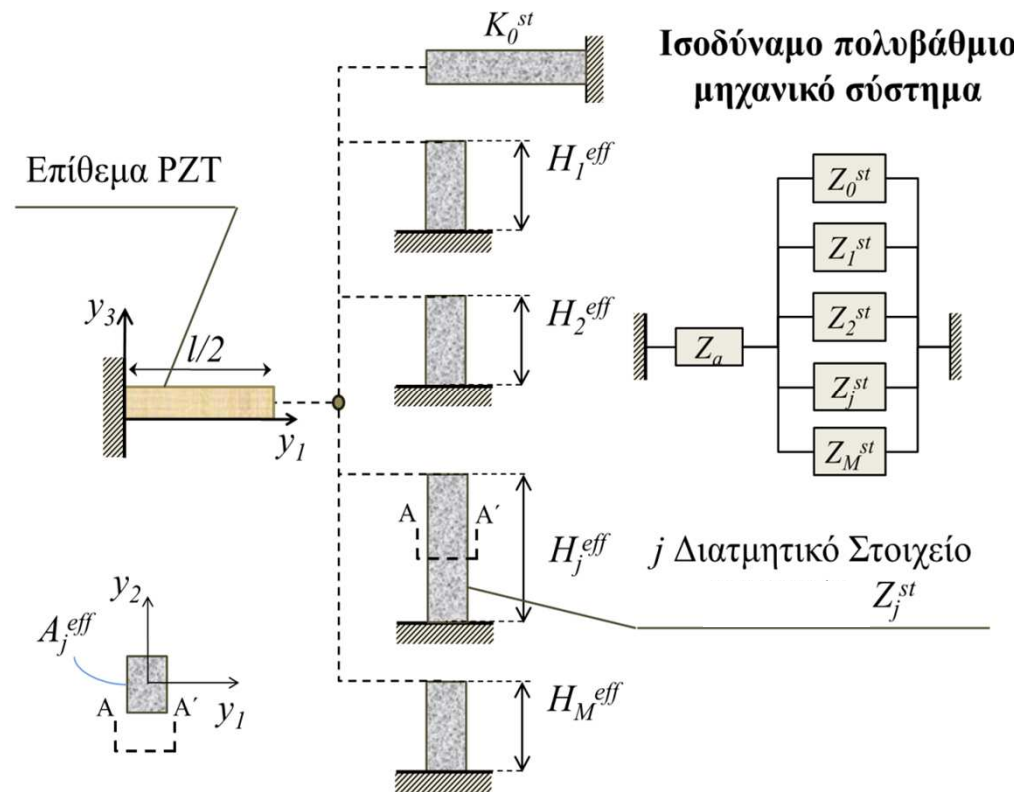
Σύνολο Παραμέτρων μοντέλου: $no+do+2=21$ Μιγαδικοί Αριθμοί



4. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας κατασκευών σκυροδέματος

Προσομοίωση του φάσματος αναφοράς της δομικά «υγιούς» κατασκευής: **Μηχανική Εμπέδηση, Z_{St}**

Μέθοδος των Πολλαπλών Μηχανικών Εμπεδήσεων – MIS (multi Mechanical Impedance System)



Η μηχανική απόκριση της κατασκευής, είναι δυνατό να προσομοιωθεί από ένα **ισοδύναμο** διακριτό σύστημα μονοβάθμιων διατμητικών μηχανικών εμπεδήσεων Z_j^{st} , συνδεδεμένων μεταξύ τους παράλληλα .

$$Z_{St} = \sum_{j=0}^M Z_j^{st}$$

4. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας κατασκευών σκυροδέματος

Προσομοίωση του φάσματος αναφοράς της δομικά «υγιούς» κατασκευής: Μηχανική Εμπέδηση, Z_{St}

Συνάρτηση απόκρισης του ισοδύναμου δυναμικού συστήματος.

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

$$\mathbf{p} = [K_0^{st} \quad A_1^{eff} \quad \dots \quad A_M^{eff} \quad H_1^{eff} \quad \dots \quad H_M^{eff} \quad n_1^{st} \quad \dots \quad n_M^{st}]$$

$$\begin{aligned} \bar{G}_{St,j} &= G_{St} (1 + i n_j^{st}) \\ \kappa_{s,j} &= \omega \sqrt{\rho_{St} / \bar{G}_{St,j}} \\ freq_{0j} &= \frac{1}{2H_j^{eff}} \sqrt{\frac{G_{St}}{\rho_{St}}} \end{aligned}$$

Το πειραματικό φάσμα απόκρισης της μηχανικής εμπέδησης Z_{St}^{meas} , προκύπτει από τη μετρούμενη ηλεκτρική Z_3^{meas} .

$$Z_{St,i}^{meas} = Z_{\alpha,i} \left\{ i\omega_i \frac{l^2}{h} \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1 - \nu_{12}) \left(\frac{1}{Z_{3,i}^{meas}} - Y_3^{fix} \right)} - 1 \right\}, \quad j = 1:F$$

4. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας κατασκευών σκυροδέματος

Προσομοίωση του φάσματος αναφοράς της δομικά «υγιούς» κατασκευής: Μηχανική Εμπέδηση, Z_{St}

Οι βέλτιστες τιμές του διανύσματος $\mathbf{p}$ προσδιορίζονται από την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων της διαφοράς, μεταξύ μετρούμενου και εκτιμώμενου φάσματος απόκρισης (Μη Γραμμικά Ελάχιστα Τετράγωνα **με περιορισμούς**, lsqnonlin-MATLAB).

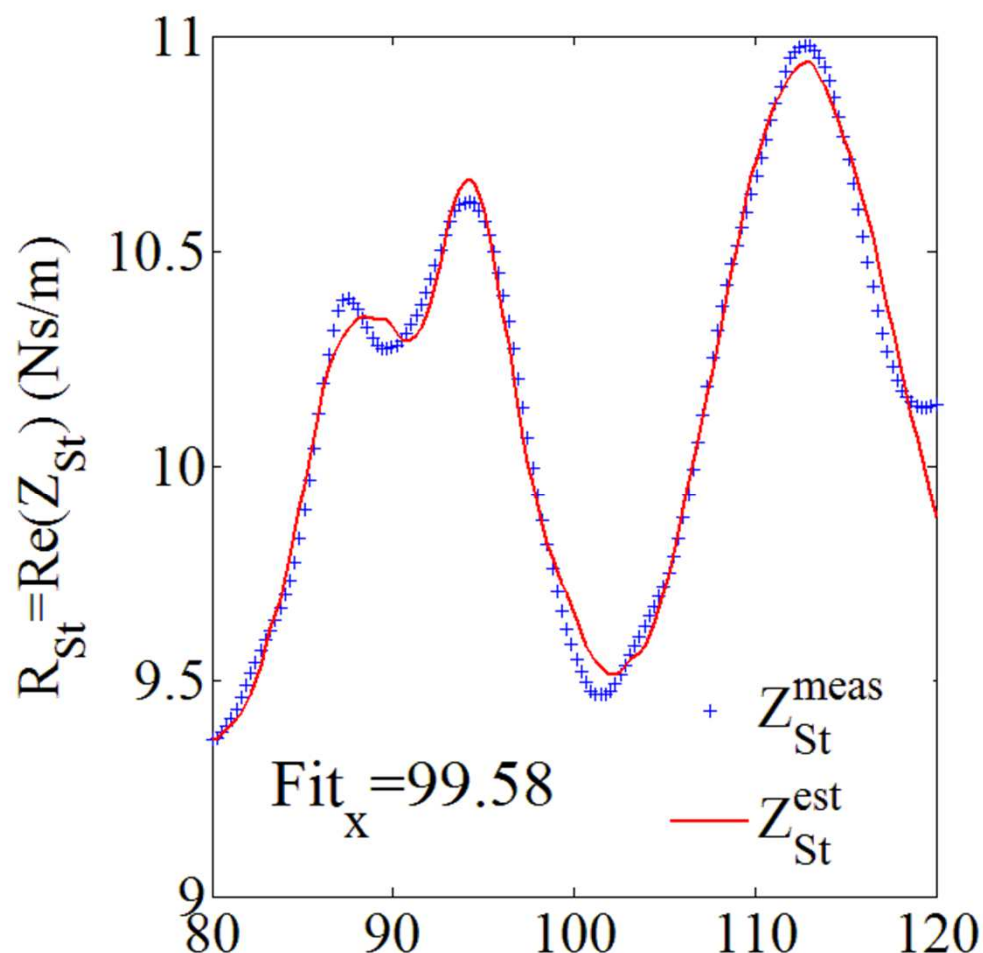
$$\min_{\mathbf{p}} \sum_{i=1}^F \left[\operatorname{Re}\{Z_{St,i}^{meas}\} - \operatorname{Re}\{Z_{St}^{est}(\omega_i, \mathbf{p})\} \right]^2$$

subject to $\mathbf{p} > 0$
 $n_j^{st} < 1$

$$\mathbf{p} = \left[K_0^{st} \quad A_1^{eff} \quad \dots \quad A_M^{eff} \quad H_1^{eff} \quad \dots \quad H_M^{eff} \quad n_1^{st} \quad \dots \quad n_M^{st} \right]$$

4. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας κατασκευών σκυροδέματος

Προσομοίωση του φάσματος αναφοράς της δομικά «υγιούς» κατασκευής: Μηχανική Εμπέδηση, Z_{St}



Σύνολο Παραμέτρων μοντέλου: 15

$freq_{0,j}$ (kHz)	$H_{eff,j}$ (mm)	$A_{eff,j}$ (mm ²)	$n_{st,j}$
3.32	343.24	2.20E-03	0.01
9.78	116.65	1.49E+00	0.17
85.67	13.32	6.73E-02	0.14
94.23	12.11	3.03E-02	0.07
112.22	10.17	9.55E-02	0.14

$$\begin{aligned}\bar{G}_{St,j} &= G_{St} (1 + i n_j^{st}) \\ \kappa_{s,j} &= \omega \sqrt{\rho_{St} / \bar{G}_{St,j}} \\ freq_{0,j} &= \frac{1}{2H_j^{eff}} \sqrt{\frac{G_{St}}{\rho_{St}}}\end{aligned}$$

4. Αξιολόγηση δομικής ακεραιότητας κατασκευών σκυροδέματος

Προσομοίωση του φάσματος αναφοράς της δομικά «υγιούς» κατασκευής: Μηχανική Εμπέδηση, Z_{St}

Πλεονεκτήματα σε σχέση με τη μη γραμμική παλινδρόμηση

- Σημαντικά μικρότερος αριθμός παραμέτρων προσομοίωσης.
- Οι παράμετροι της προσομοίωσης έχουν φυσική σημασία και σχετίζονται με τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής.
- Υπολογισμός των συχνοτήτων συντονισμού της κατασκευής.
- Εκτίμηση της δυναμικής απόκρισης της κατασκευής σε συχνότητες εκτός του εύρους των συχνοτήτων καταγραφής.

Περιορισμοί στις κατασκευές από σκυρόδεμα

- Το σκυρόδεμα είναι αναγκαίο να έχει αποκτήσει στοιχειώδη δυσκαμψία (τουλάχιστον 24 ώρες μετά τη σκυροδέτηση), προκειμένου να έχουν φυσική σημασία οι παράμετροι του μοντέλου.



5.

Ανάπτυξη ολοκληρωμένου ασύρματου
συστήματος καταγραφής και
αποθήκευσης της ΗΜΕ

5. Ανάπτυξη ολοκληρωμένου ασύρματου συστήματος καταγραφής και αποθήκευσης της ΗΜΕ

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε το ολοκληρωμένο σύστημα ΜΚΕ **T-WiEYE (Teflon-based Wireless intergratEd monitoring SYstEm)**, το οποίο συνδυάζει [5.1]:

- Πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες.
 - PZT – PIC 151 (PI Ceramics Inc.)
 - Εμφύτευση στη μάζα του σκυροδέματος κατά τη παρασκευή του. «Ευφυή» Αδρανή υλικά (SMart Aggregates-SMA).
 - Κέλυφος από Teflon. Προστασία του PZT από Υγρασία, Συστολή-Διαστολή Σκυροδέματος, Μηχανική Καταπόνιση.
- Ασύρματη επικοινωνία SMA – Συστήματος Καταγραφής και Αποθήκευσης Δεδομένων.

5. Ανάπτυξη ολοκληρωμένου ασύρματου συστήματος καταγραφής και αποθήκευσης της HME

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε το ολοκληρωμένο σύστημα ΜΚΕ **T-WiEYE (Teflon-based Wireless intergratEd monitoring SYstEm)**, το οποίο συνδυάζει **[5.1]**:

- Το χαμηλού κόστους ολοκληρωμένο κύκλωμα μέτρησης της HME στο πεδίο των συχνοτήτων, AD5933 (Analog Devices).
- Δυνατότητα μόνιμης εγκατάσταση στο χώρο της κατασκευής.
- Ολοκληρωμένη διαχείριση δεδομένων των φασμάτων απόκρισης HME.
 - Βάση δεδομένων (MySQL)
 - Διασύνδεση MySQL – MATLAB. Απομακρυσμένη ανάκτηση και μετα-επεξεργασία δεδομένων HME (Στατιστικός Έλεγχος).

5. Ανάπτυξη ολοκληρωμένου ασύρματου συστήματος καταγραφής και αποθήκευσης της HME

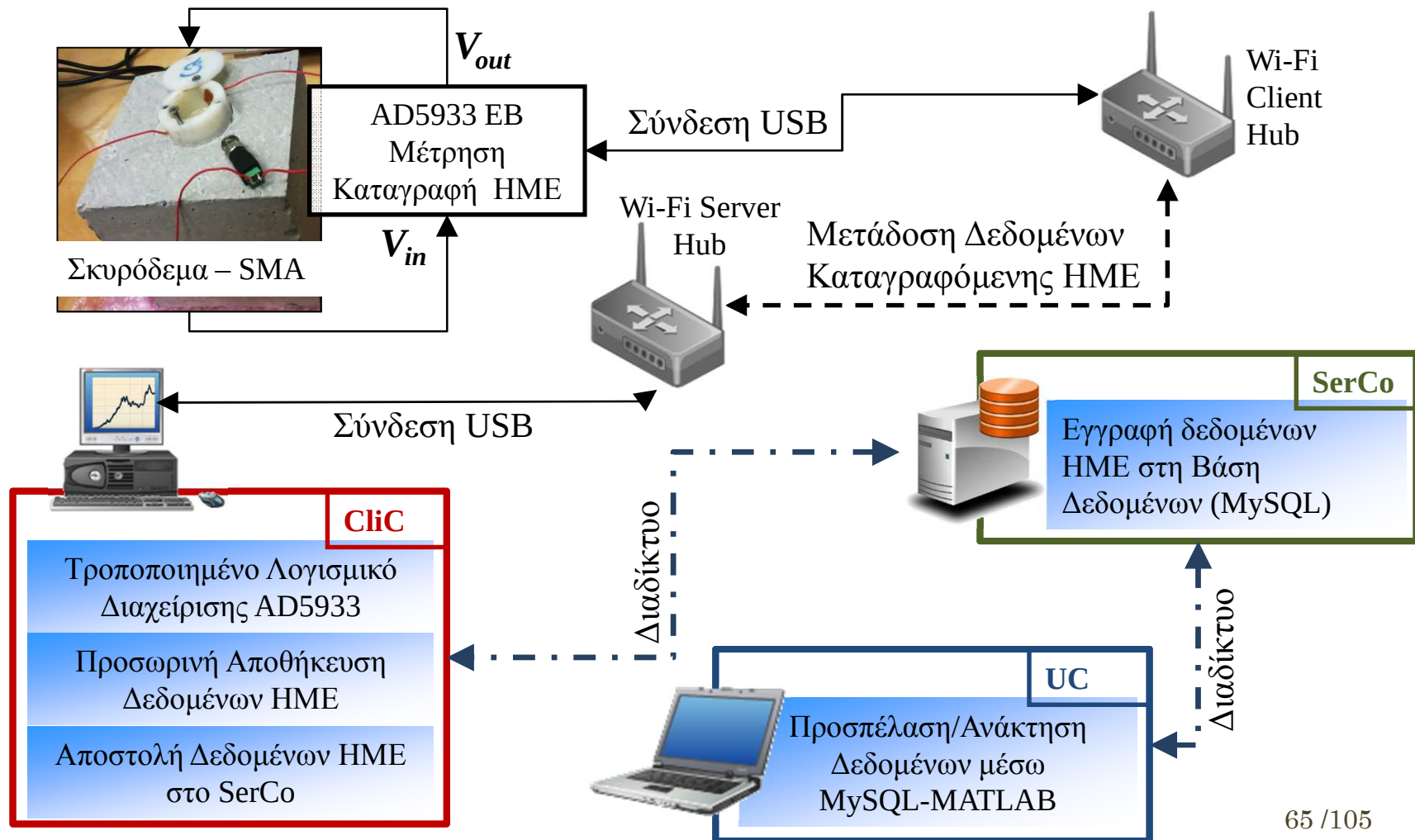
Σύστημα T-WiEYE

Διάγραμμα Ροής – Λειτουργιών

CliC: Client Computer

SerCo: Server Computer

UC: User Computer



5. Ανάπτυξη ολοκληρωμένου ασύρματου συστήματος καταγραφής και αποθήκευσης της HME

Σύστημα T-WiEYE

Διάγραμμα Ροής – Λειτουργιών

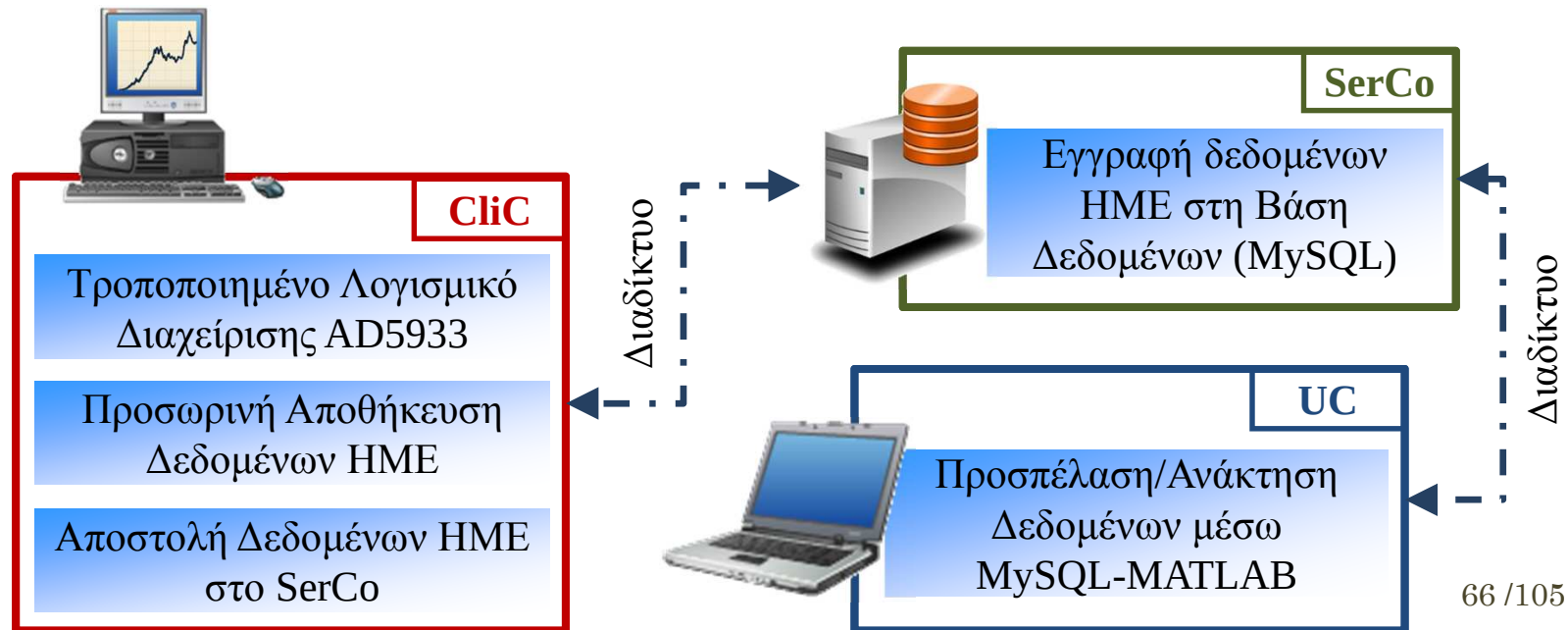
CliC: Client Computer

SerCo: Server Computer

UC: User Computer

➤ CliC: Client Computer.

- Διαχείριση συστημάτων μέτρησης της HME (AD5933).
- Στο χώρο της κατασκευής και εντός της εμβέλειας του Wi-Fi.
- Σύνδεση μέσω διαδικτύου ή τοπικού δικτύου με το SerCo.



5. Ανάπτυξη ολοκληρωμένου ασύρματου συστήματος καταγραφής και αποθήκευσης της HME

Σύστημα T-WiEYE

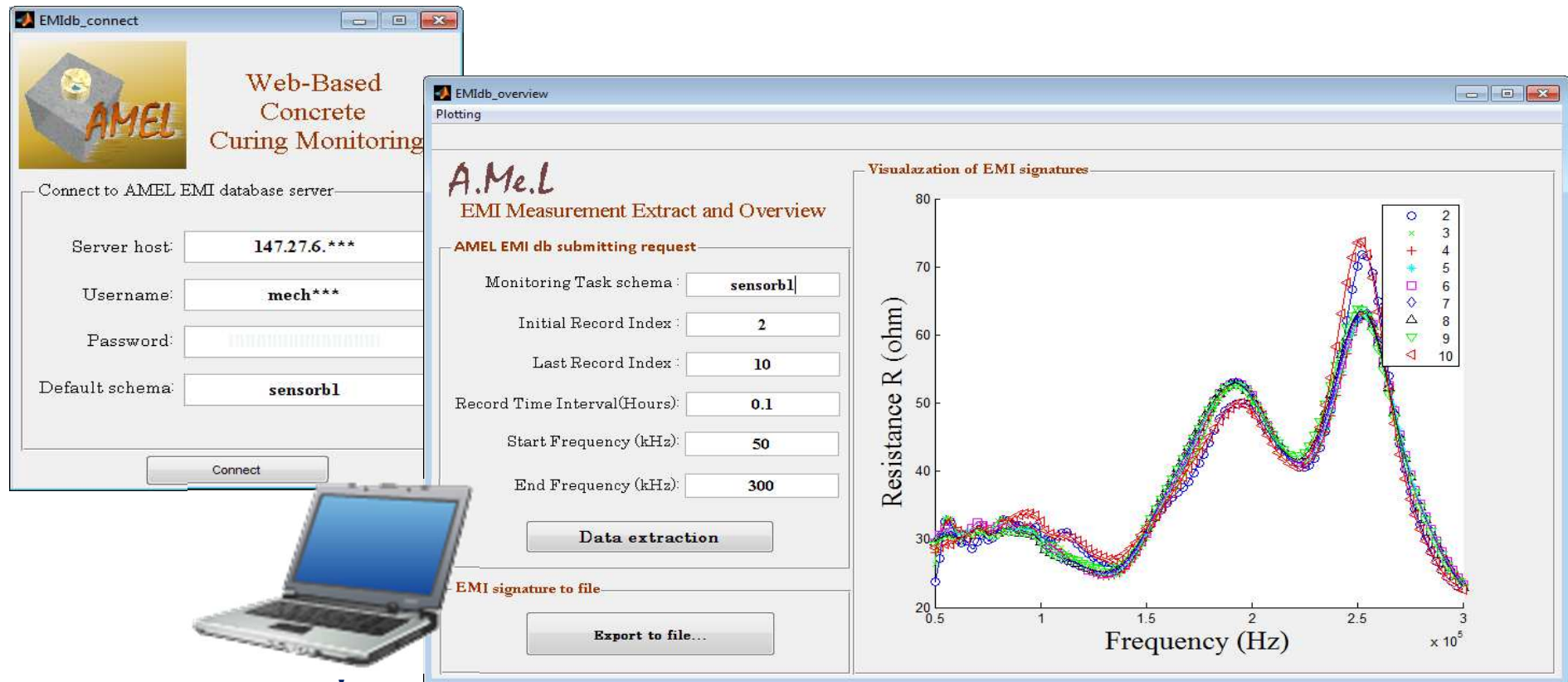
Διάγραμμα Ροής – Λειτουργιών

- Διασύνδεση λειτουργιών MySQL – MATLAB.

CliC: Client Computer

SerCo: Server Computer

UC: User Computer



UC: Απομακρυσμένος
Χρήστης

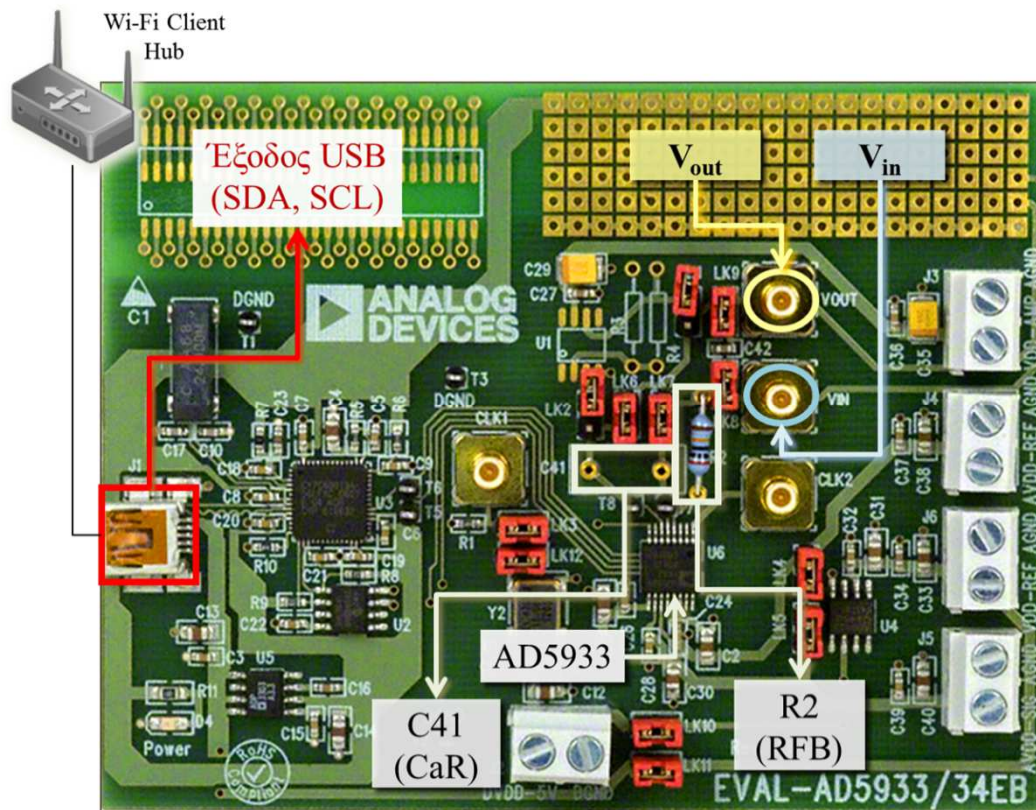
5. Ανάπτυξη ολοκληρωμένου ασύρματου συστήματος καταγραφής και αποθήκευσης της HME

Σύστημα T-WiEYE

Διάγραμμα Ροής – Λειτουργιών

➤ PCB: AD5933 Evaluation Board (Analog Devices).

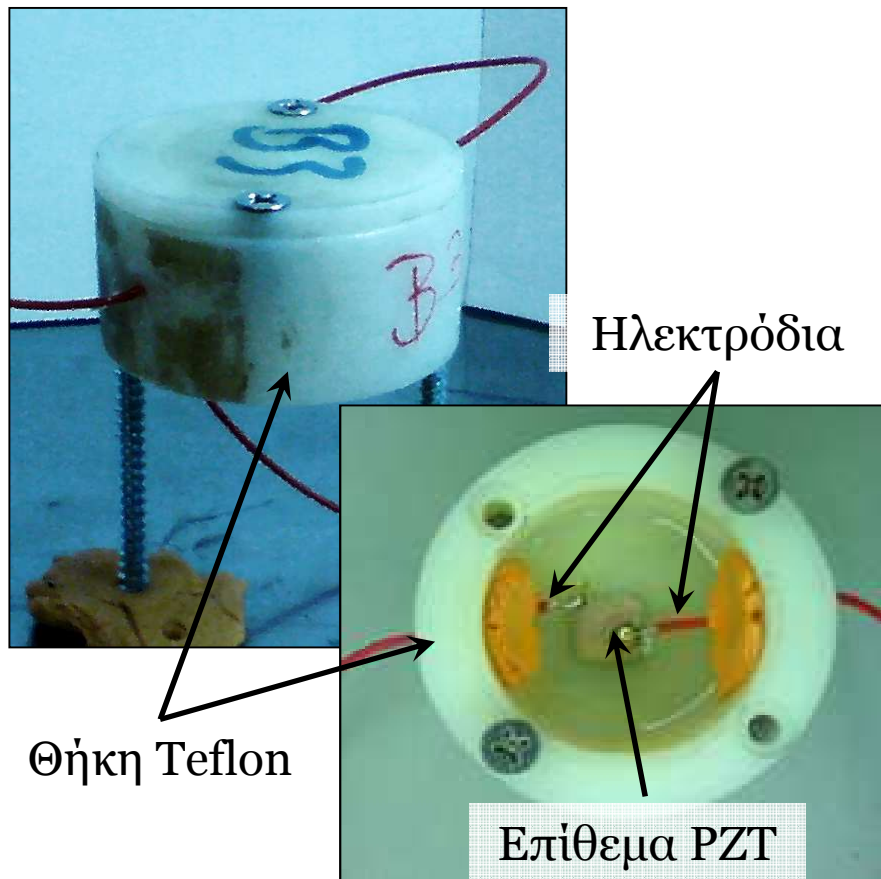
Ολοκληρωμένο κύκλωμα μέτρησης της HME.



- C41: Αντίσταση Βαθμονόμησης (Calibration Resistor).
 - R2: Αντίσταση ανατροφοδότησης (Feedback Resistor).
 - Ακρίβεια μέτρησης HME 99.5 %.
- Εύρος συχνοτήτων:
- 10-100 kHz: Καμία Διόρθωση
 - 100-150 kHz: Απλή γραμμική διόρθωση

Σύστημα T-WiEYE

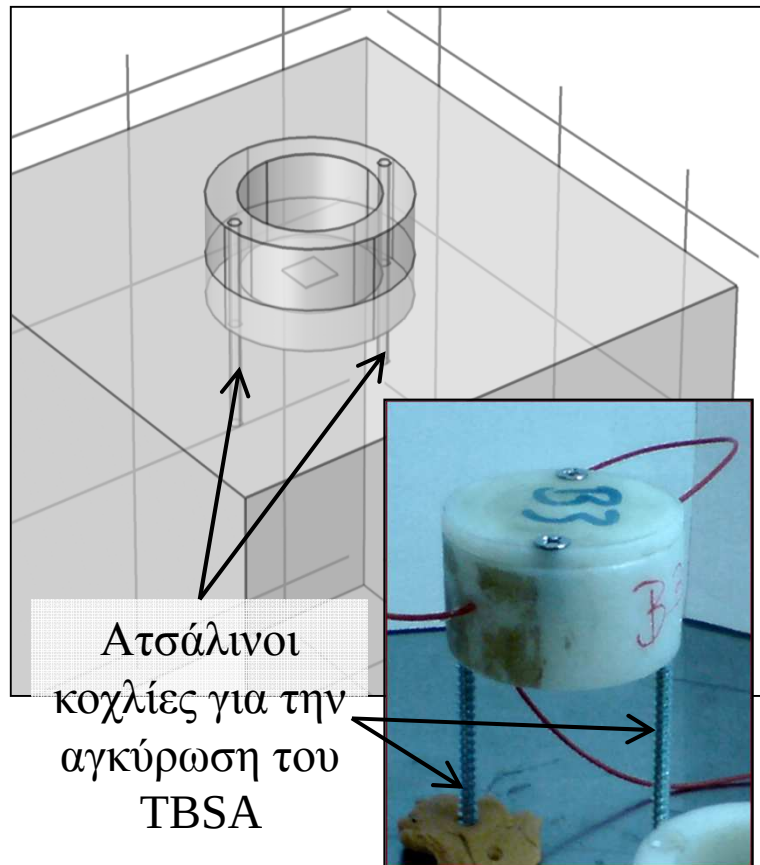
Ευφύες αδρανές με βάση το Teflon-TBSA (Teflon Based Smart Aggregate)



- Σχεδιασμός και κατασκευή κατάλληλα διαμορφωμένου κελύφους από Teflon.
- Προσαρμογή επιθέματος PZT, διαστάσεων 10x10x0.2mm, στο εσωτερικό του κελύφους.
- Προσθήκη ηλεκτροδίων στους ακροδέκτες του PZT, για τη διασύνδεση του με το AD5933 EB.

Σύστημα T-WiEYE

Ευφύες αδρανές με βάση το Teflon-TBSA (Teflon Based Smart Aggregate)



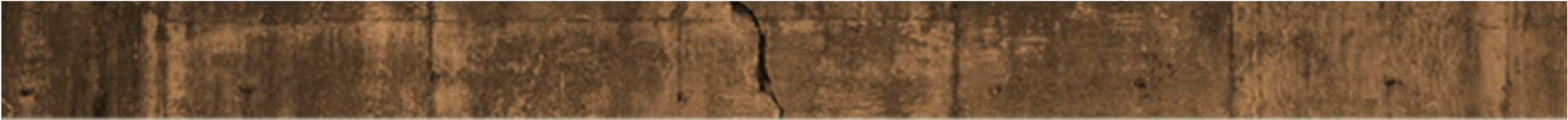
- Προσαρμογή ατσάλινων κοχλιών στη θήκη Teflon για τη διασφάλιση της επαρκούς συνάφειας μεταξύ TBSA και σκυροδέματος.
- Η επαρκής συνάφεια συντελεί στην αύξηση της μηχανικής αγωγιμότητας και τη διαβίβαση των μηχανικών κυμάτων στο εσωτερικό του σκυροδέματος, με τις μικρότερες δυνατές απώλειες ενέργειας.

Σύστημα T-WiEYE

Ευφύες αδρανές με βάση το Teflon-TBSA (Teflon Based Smart Aggregate)

Καινοτομία:

- Κέλυφος από Teflon. Επαρκής μηχανική αντοχή και χημική αδράνεια σε σχέση με τα υπόλοιπα συστατικά του σκυροδέματος.
- Αγκύρωση στη μάζα του σκυροδέματος.
- Δυνατότητα πρόσβασης στο πιεζοηλεκτρικό επίθεμα, για τυχόν επιδιορθώσεις στις συγκολλήσεις των ηλεκτροδίων.
- Δυνατότητα ανάκτησης του TBSA στις περιπτώσεις παρακολούθησης δοκιμών σκυροδέματος.



6.

Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία
σκυροδέματος

Δομικά στοιχεία σκυροδέματος εργαστηριακής κλίμακας

- Παρακολούθηση των διεργασιών:
 - Ενυδάτωσης του πολύ πρώιμου σκυροδέματος, ηλικίας μέχρι 48 ωρών.
 - Ανάπτυξης της δυσκαμψίας του πρώιμου σκυροδέματος μέχρι και τις 28 πρώτες ημέρες.
- Παρακολούθηση της ανάπτυξης μηχανικών βλαβών (ρωγμές) σε θλιβόμενο κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος .
- Παρακολούθηση της ανάπτυξης μηχανικών βλαβών (ρωγμές) σε καμπτόμενη δοκό σκυροδέματος.

Μηχανικά χαρακτηριστικά και ποιότητα σκυροδέματος

- Εργαστηριακό σκυρόδεμα (χωρίς χημικά πρόσμικτα)
- C20/25. Σύσταση (kg/m^3):
 - Χαλίκι ($d_g > 25\text{mm}$): **850**
 - Μεσαίου Μεγέθους Αδρανή ($2.5\text{ mm} < d_g < 9.5\text{mm}$): **450**
 - Άμμος ($d_g < 2.5\text{mm}$): **550**
 - Τσιμέντο, CEM II/A-M 42.5 N: **310**
 - $N/T = \mathbf{0.65}$
- Θεωρητική Πυκνότητα: 2360 kg/m^3
- Θεωρητικό Βάρος Κυβικού Δοκιμίου Θλίψης: 7.95 kg

d_g : Μέγεθος Κόκκου

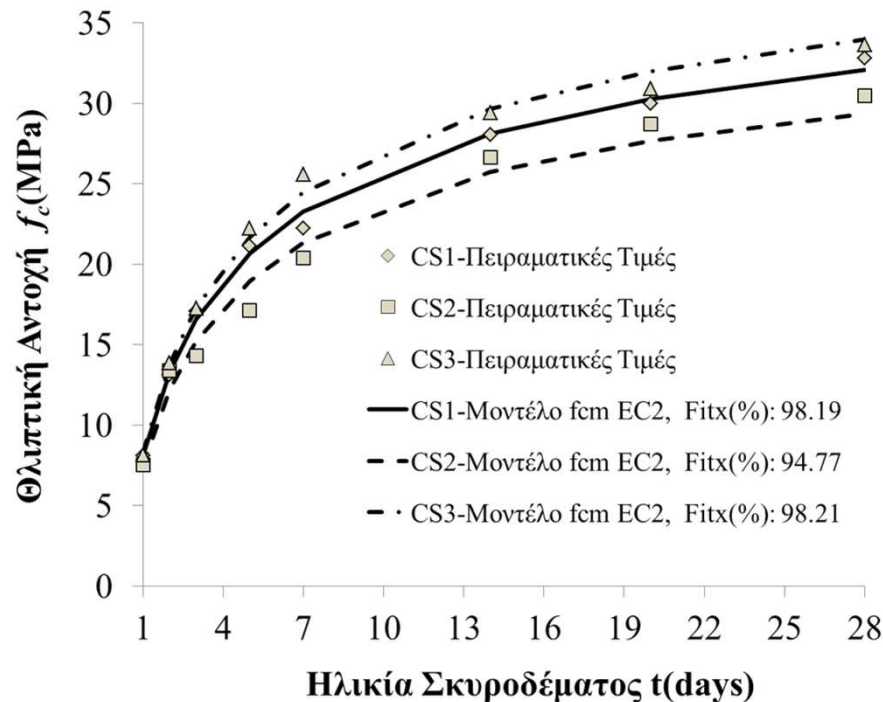
Ακμή Δοκιμίου Θλίψης: 150mm

6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Μηχανικά χαρακτηριστικά και ποιότητα σκυροδέματος

Μελέτη ανάπτυξης αντοχής του σκυροδέματος.

➤ Δοκιμές θλίψης σε ηλικίες: 1, 2, 3, 5, 7, 14, 20, 28.



	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

Μοντέλο EC2 [5.1]:

$$f_{cm}(t) = f_{cm}^{28} \exp \left\{ cem \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right\}$$

Μοντέλο CEB-FIP:

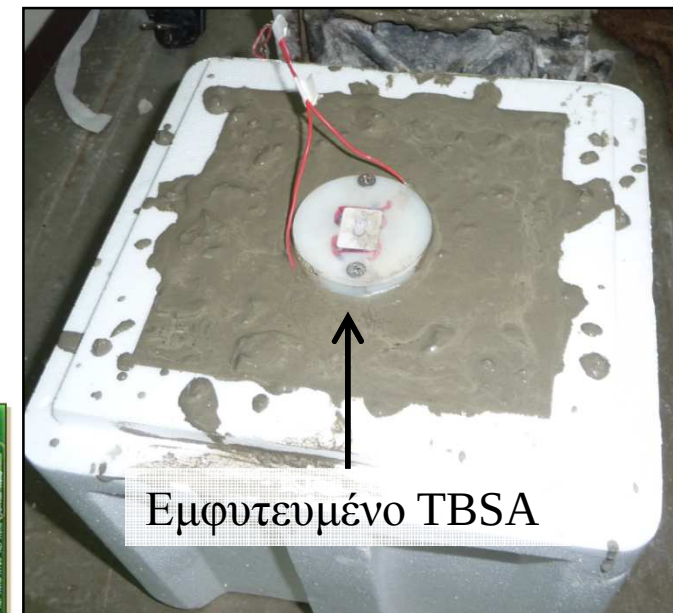
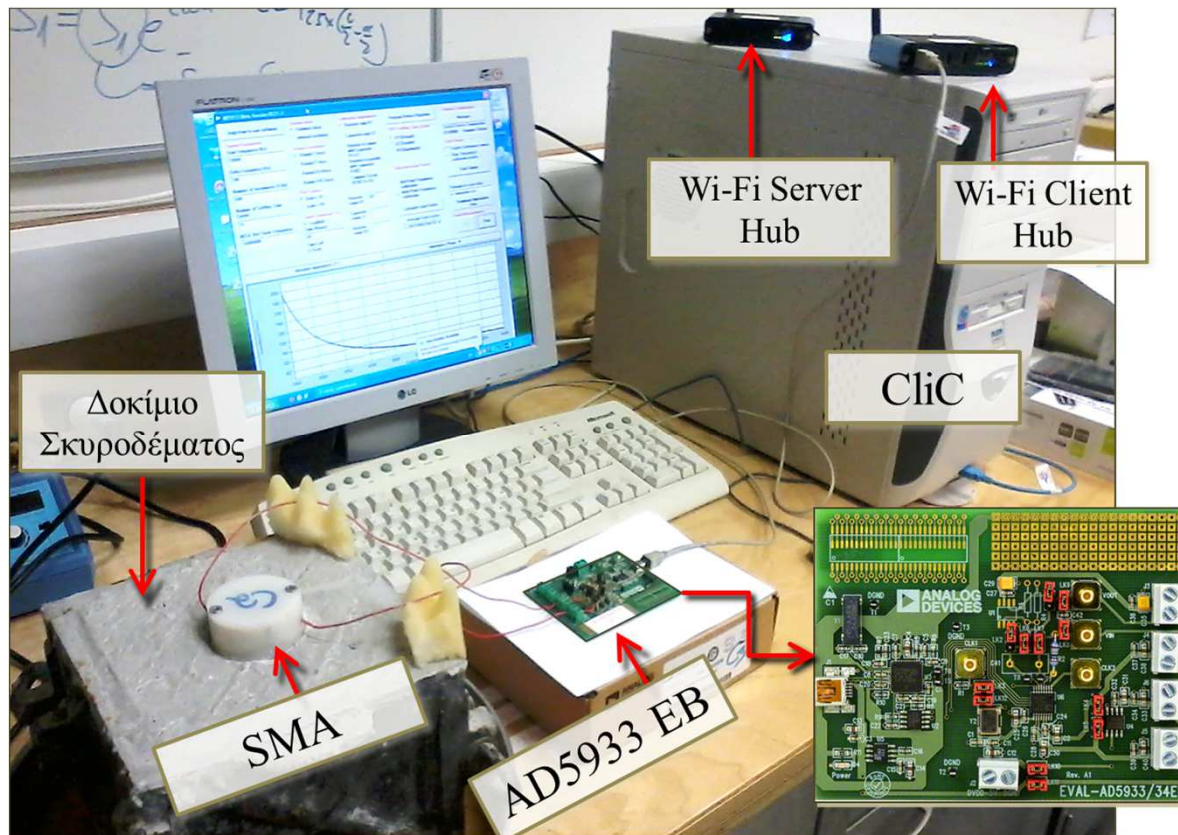
$$E_{cm}^{28} = a_e 21.5 \left(\frac{f_{cm}^{28}}{10} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$\alpha_e = 0.9$ (Ασβεστόλιθος)

6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση πρώιμου σκυροδέματος με την Μέθοδο ΗΜΕ.

- 5 Κυβικά δοκίμια σκυροδέματος. 3 από τη ίδια σκυροδέτηση (Δοκίμια C1-3) και 2 από διαφορετικές σκυροδετήσεις (C4, C5).



Παρακολούθηση πρώιμου σκυροδέματος με την Μέθοδο HME.

➤ Σύστημα T-WiEYE.

- Φάσμα απόκρισης: Πραγματικό μέρος HME, R_3 (Αντίσταση-Resistance).
- Εύρος συχνοτήτων: **50-100 kHz**
- Συνεχής καταγραφή φάσματος R_3 , ξεκινώντας 3 ώρες μετά τη σκυροδέτηση. **Ανά 1 ώρα**, τις πρώτες **192 ώρες** (8 ημέρες) και **ανά 1 ημέρα**, από τις **9** έως τις **28 ημέρες**.

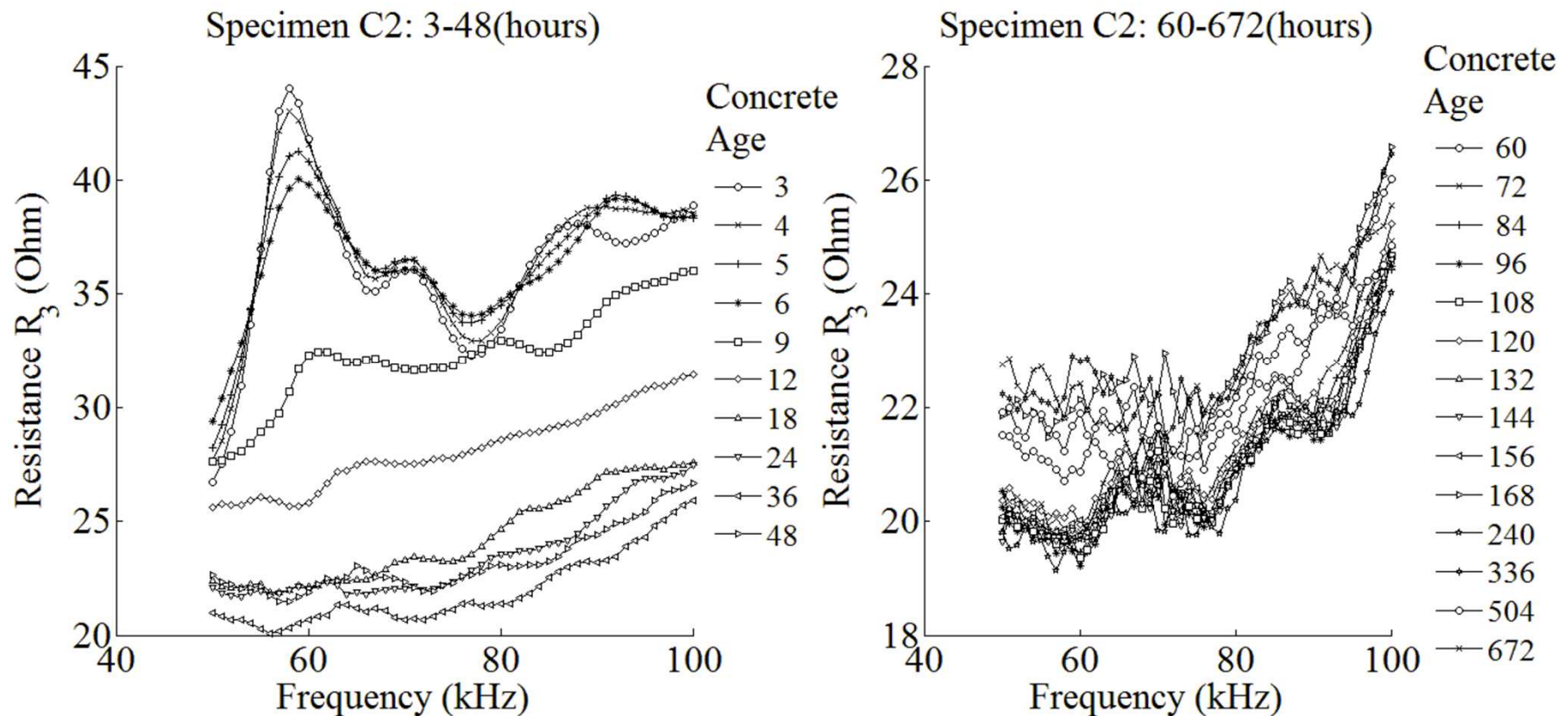
➤ Αξιολόγηση μεταβολής φασμάτων HME

- Φάσμα αναφοράς RS : Απόκριση R_3 , **3 ώρες** μετά τη σκυροδέτηση
- Μέτρο Διαφοροποίησης Φασμάτων: **Δείκτης $RMSD$**
- Μελέτη ρυθμού μεταβολής $RMSD$

6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση πρώιμου σκυροδέματος με την Μέθοδο ΗΜΕ.

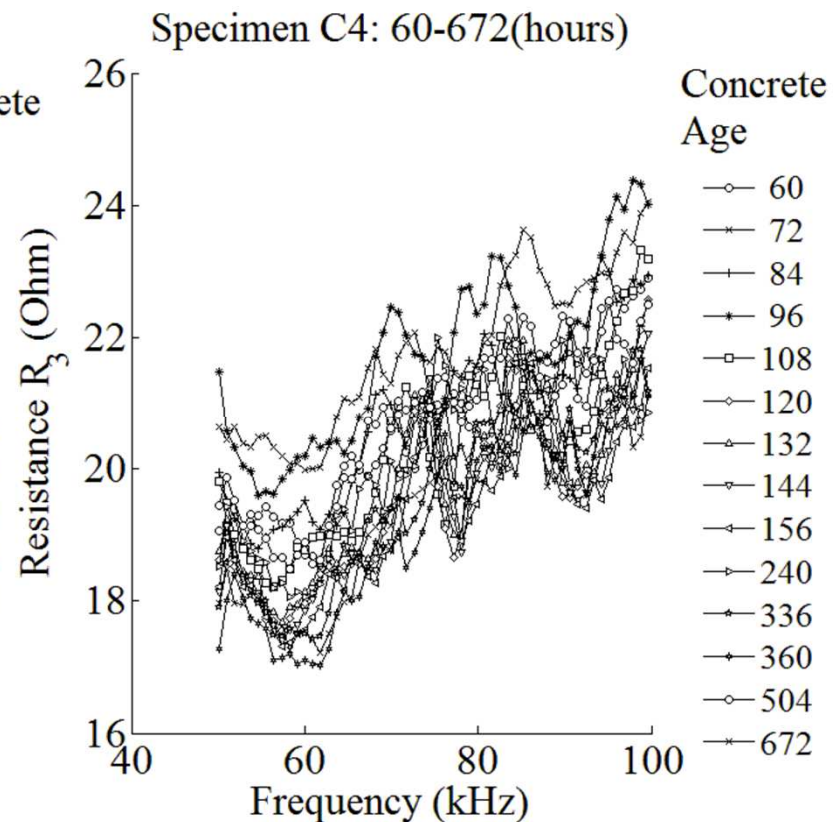
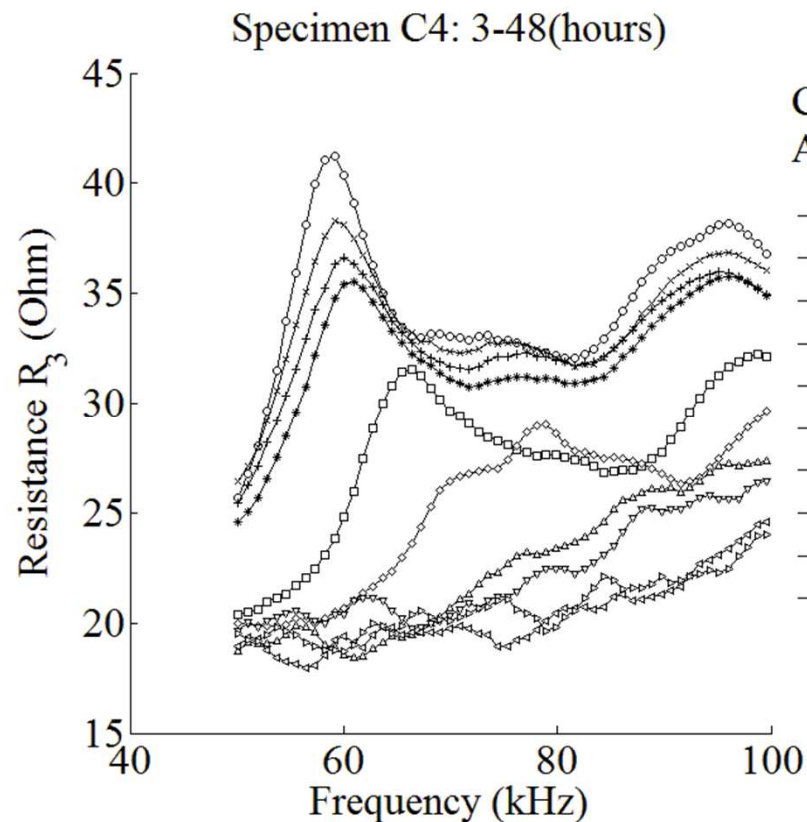
Δοκίμιο C2: Πραγματικό Μέρος ΗΜΕ (Αντίσταση), $R_3 = \text{Re}\{Z_3\}$.



6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση πρώιμου σκυροδέματος με την Μέθοδο ΗΜΕ.

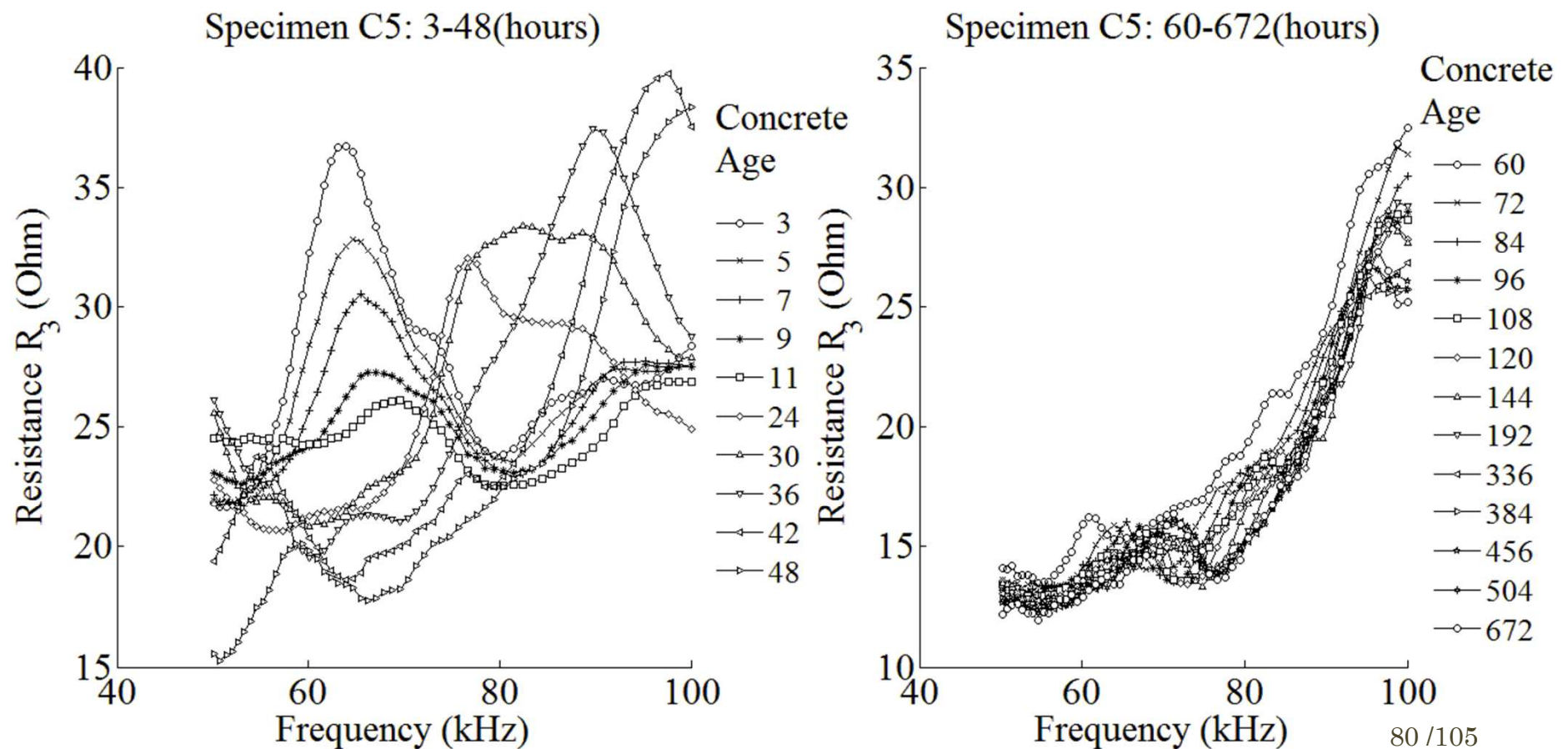
Δοκίμιο C4: Πραγματικό Μέρος ΗΜΕ (Αντίσταση), $R_3 = \text{Re}\{Z_3\}$.



6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση πρώιμου σκυροδέματος με την Μέθοδο ΗΜΕ.

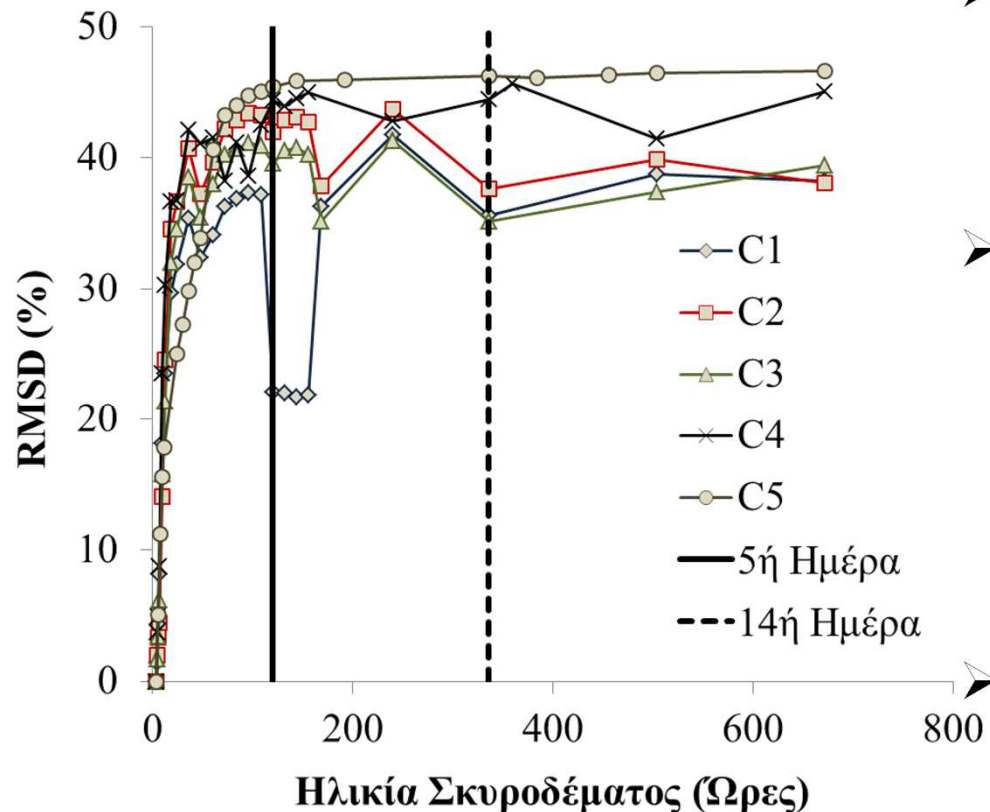
Δοκίμιο C5: Πραγματικό Μέρος ΗΜΕ (Αντίσταση), $R_3 = \text{Re}\{Z_3\}$.



6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση πρώιμου σκυροδέματος με την Μέθοδο ΗΜΕ.

Αξιολόγηση Φασμάτων: Δείκτης *RMSD*



➤ Οι τιμές του *RMSD* αυξάνονται συνεχώς μέχρι τις **120 ώρες** (Ηλικία: **5 ημέρες**).

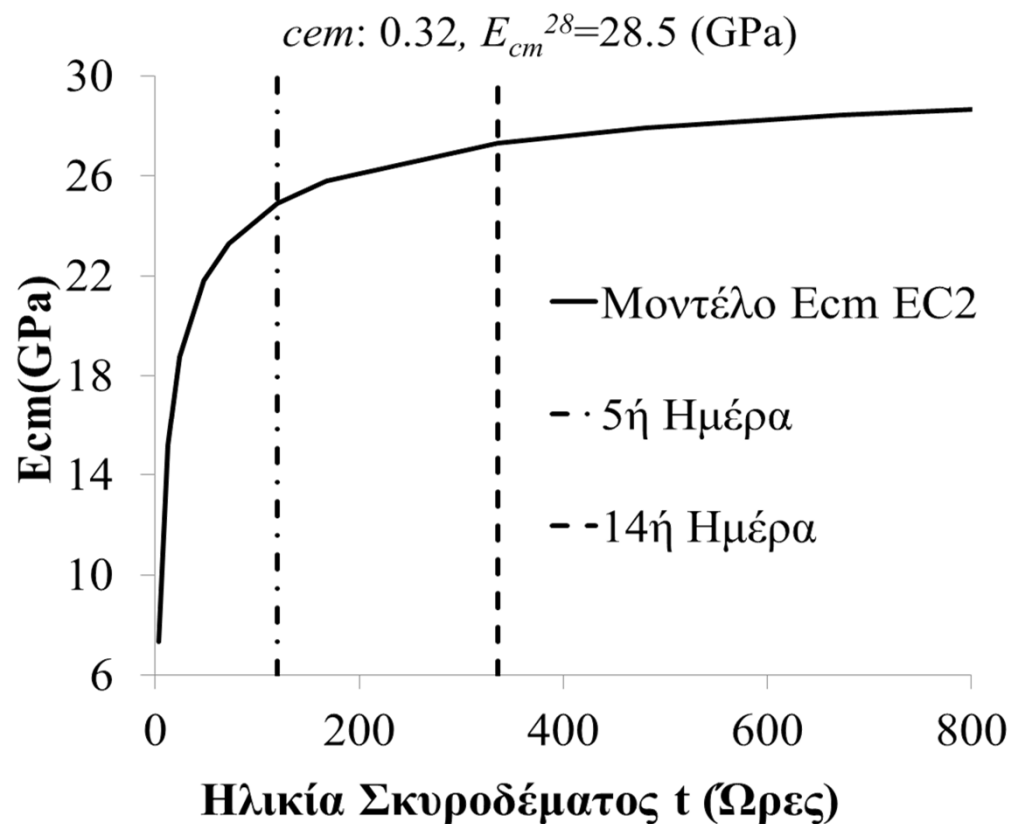
➤ Από τις **5** έως τις **14 ημέρες** κινούνται γύρω από μια μέση τιμή, 35-45% ανάλογα με το δοκίμιο, με ένα συγκεκριμένο εύρος διακύμανσης.

Μετά τις 14 ημέρες εμφανίζουν μια σχετική τάση σταθεροποίησης.

6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση πρώιμου σκυροδέματος με την Μέθοδο ΗΜΕ.

Σύγκριση *RMSD* με το Μέτρο Ελαστικότητας



➤ Μοντέλο E_{cm} , Ευρωκώδικας 2 [5.1].

➤ **5ή ημέρα:** 87% του E_{cm}^{28}

➤ **14ή ημέρα:** 96% του E_{cm}^{28}

$$E_{cm}(t) = E_{cm}^{28} \left(\exp \left\{ cem \left(1 - \sqrt{\frac{672}{t}} \right) \right\} \right)^{0.33}$$

6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση πρώιμου σκυροδέματος με την Μέθοδο ΗΜΕ.

Παρακολούθηση διαδικασίας ενυδάτωσης: 3-48 ώρες

- Ο ρυθμός μεταβολής του $RMSD$ είναι δυνατό να συσχετιστεί με το ρυθμό ενυδάτωσης και ανάπτυξης της δυσκαμψίας του πολύ πρώιμου σκυροδέματος (<24hr).
- Δείκτες ρυθμού μεταβολής $RMSD$.

$$DRMSD(t_n) = \begin{cases} \left| \frac{\Delta RMSD_n}{\Delta t_n} \right| = \left| \frac{RMSD_n - RMSD_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \right|, & n > 1 \\ 0, & n = 1 \end{cases}$$

$$RMSD_R(t_n) = \begin{cases} \frac{\sum_{m=1}^n \Delta RMSD_m}{\sum_{m=1}^n \Delta t_m} = \frac{\sum_{m=1}^n (RMSD_m - RMSD_{m-1})}{\sum_{m=1}^n (t_m - t_{m-1})}, & n > 1 \\ 0, & n = 1 \end{cases}$$

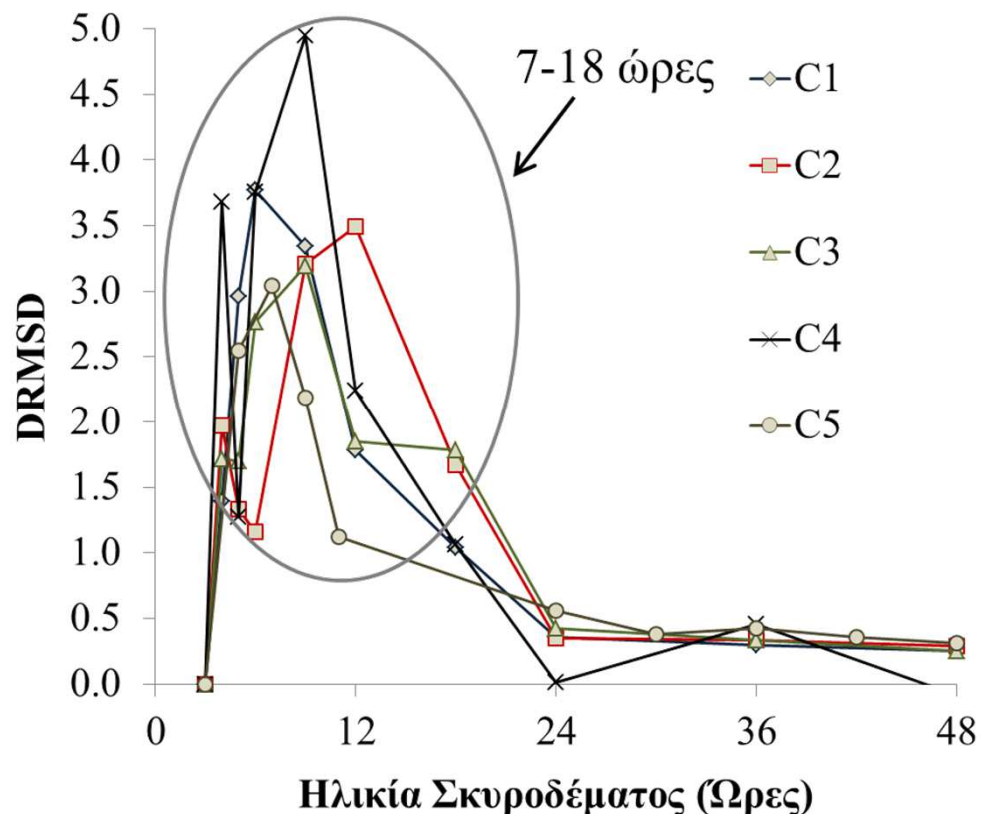
t_n : Ηλικία σκυροδέματος κατά τη καταγραφή του n -στού φάσματος απόκρισης.

t_1 : 3 ώρες

6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση πρώιμου σκυροδέματος με την Μέθοδο ΗΜΕ.

Παρακολούθηση διαδικασίας ενυδάτωσης: *DRMSD*

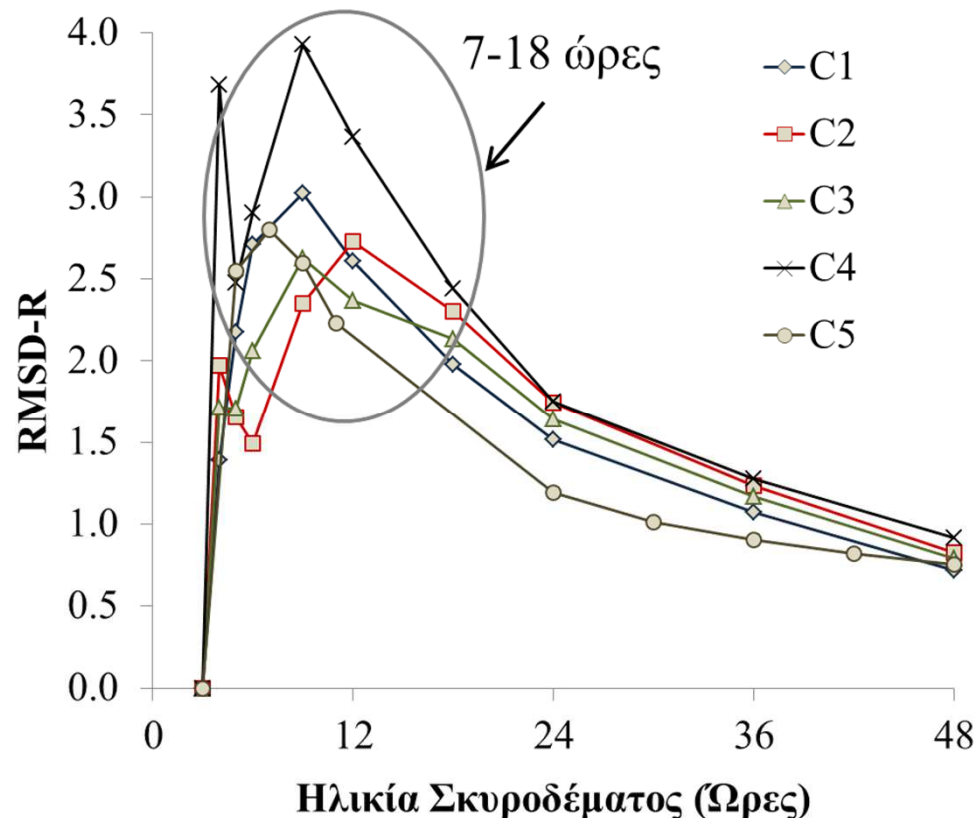


- Από τις **3** έως και τις **7** περίπου ώρες μετά την ανάμιξη των συστατικών διαπιστώνεται απότομη αύξηση του *DRMSD*.
- Μετά τις **7** ώρες και μέχρι τις **24**, ομαλότερη μείωση των τιμών του δείκτη.
- Το χρονικό διάστημα μεταξύ **7-18** ωρών ο δείκτης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή.

6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση πρώιμου σκυροδέματος με την Μέθοδο ΗΜΕ.

Παρακολούθηση διαδικασίας ενυδάτωσης: *RMSD-R*



- Αντίστοιχη συμπεριφορά με τον δείκτη *DRMSD*.
- Ομαλότερη μεταβολή σε σχέση με τον δείκτη *DRMSD*.
- Η συμπεριφορά και των δύο δεικτών αντικατοπτρίζει την μεταβολή της ταχύτητας ενυδάτωσης των συστατικών του τσιμέντου, τα οποία αυξάνουν σταδιακά τη δυσκαμψία του υλικού.

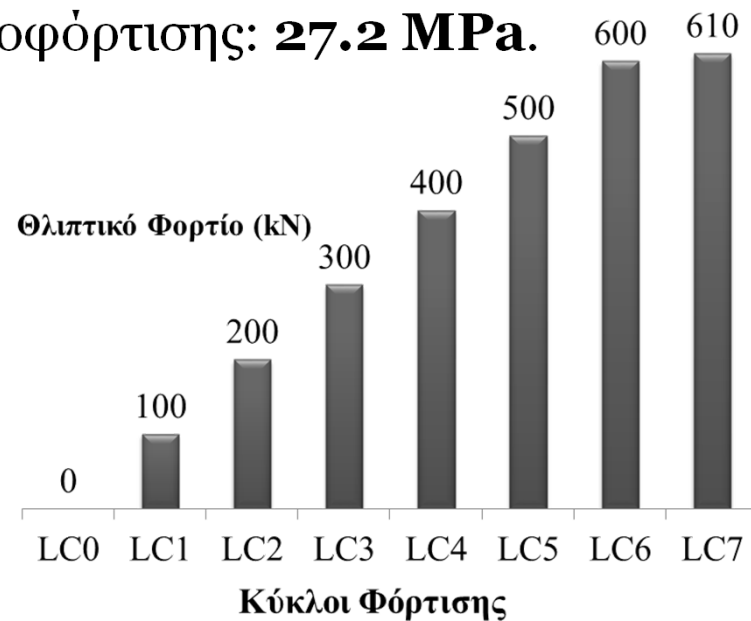
6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση ανάπτυξης μηχανικών βλαβών σε θλιβόμενο κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος.



Θλιπτική καταπόνηση δοκιμίου σκυροδέματος

- Κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος, ακμής 150mm, C20/25.
- Ηλικία σκυροδέματος: **2 μήνες**.
- Αντοχή που καταγράφηκε μετά από **7 κύκλους** κλιμακούμενης φόρτισης-αποφόρτισης: **27.2 MPa**.



Παρακολούθηση ανάπτυξης μηχανικών βλαβών σε θλιβόμενο κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος.

➤ Σύστημα T-WiEYE.

- Καταγραφόμενο Φάσμα απόκρισης: HME Z_3 .
- Υπολογισμός της μηχανικής εμπίεσης: Z_{St} .
- Εύρος συχνοτήτων: **10-65 kHz**

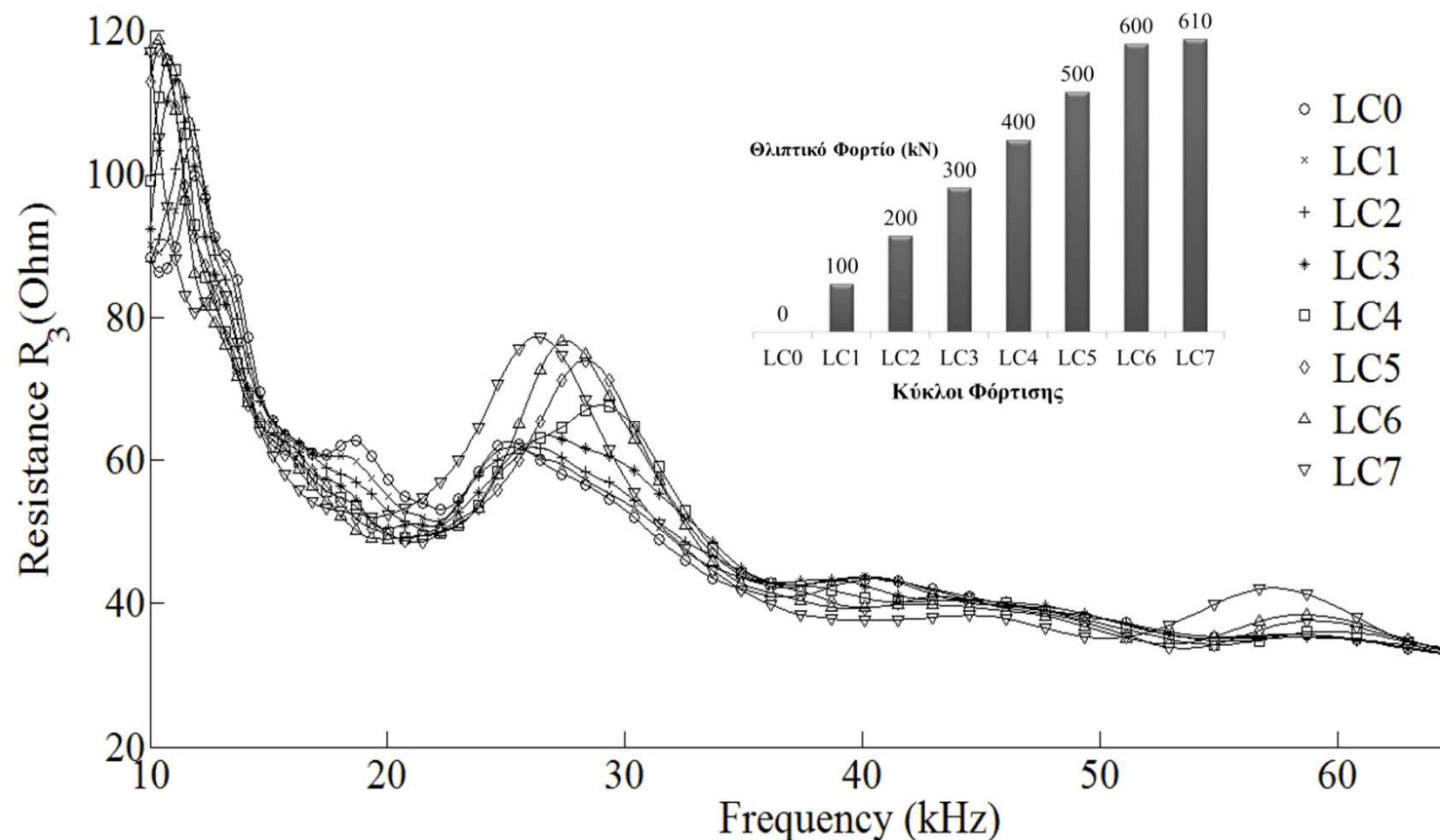
➤ Αξιολόγηση μεταβολής φασμάτων μηχανικής εμπίεσης

- Φάσμα αναφοράς RS : Πραγματικό μέρος Z_{St} δομικά ακέραιου δοκιμίου (LCo).
- Στατιστικός έλεγχος υπολοίπων. Κανονική Κατανομή και Κατανομή GEV.
- Προσομοίωση του φάσματος αναφοράς με ένα ισοδύναμο σύστημα μηχανικών εμπεδήσεων.

6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση ανάπτυξης μηχανικών βλαβών σε θλιβόμενο κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος.

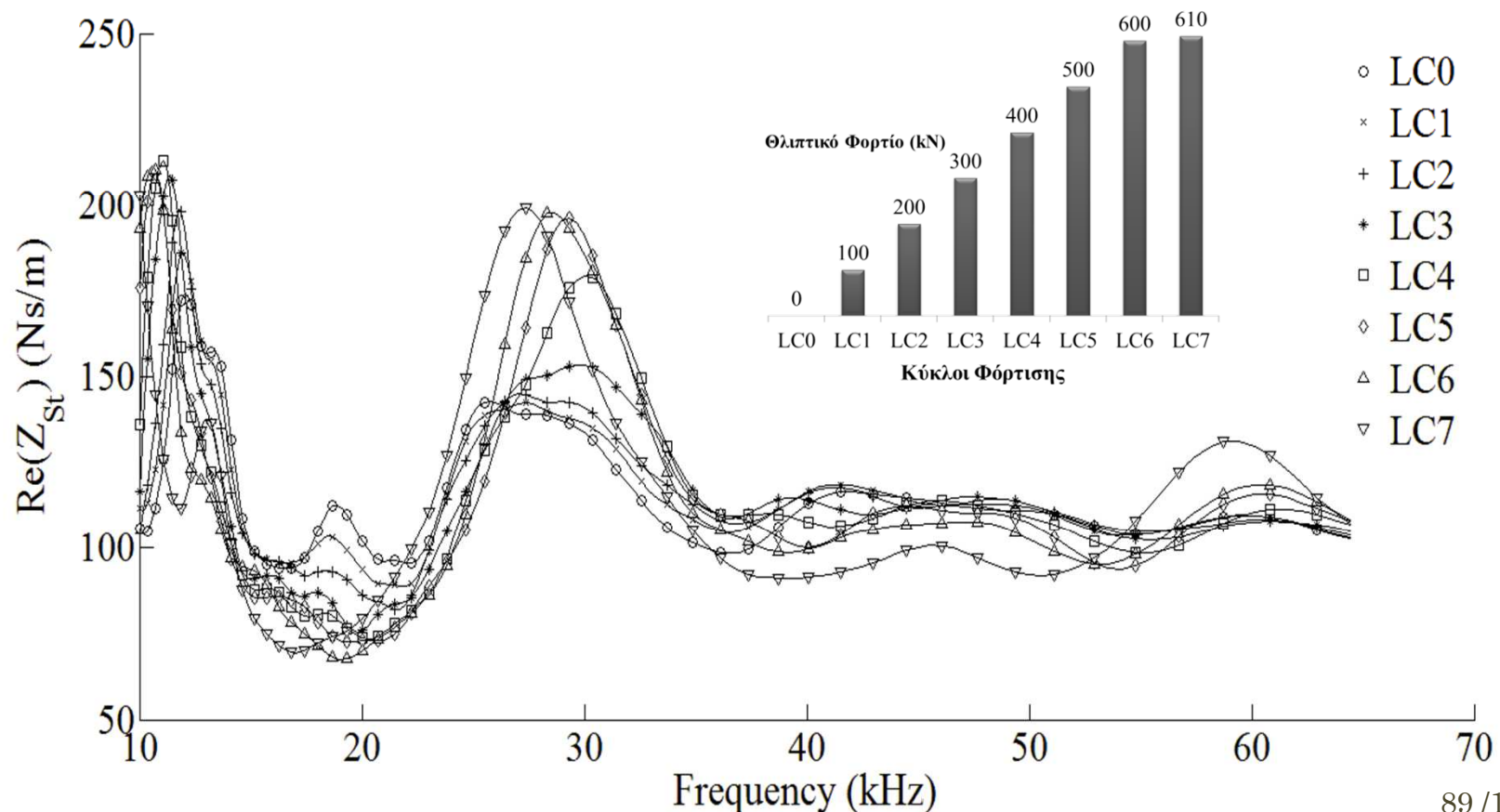
➤ Πραγματικό μέρος ΗΜΕ: R_3 (Αντίσταση-Resistance).



6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση ανάπτυξης μηχανικών βλαβών σε θλιβόμενο κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος.

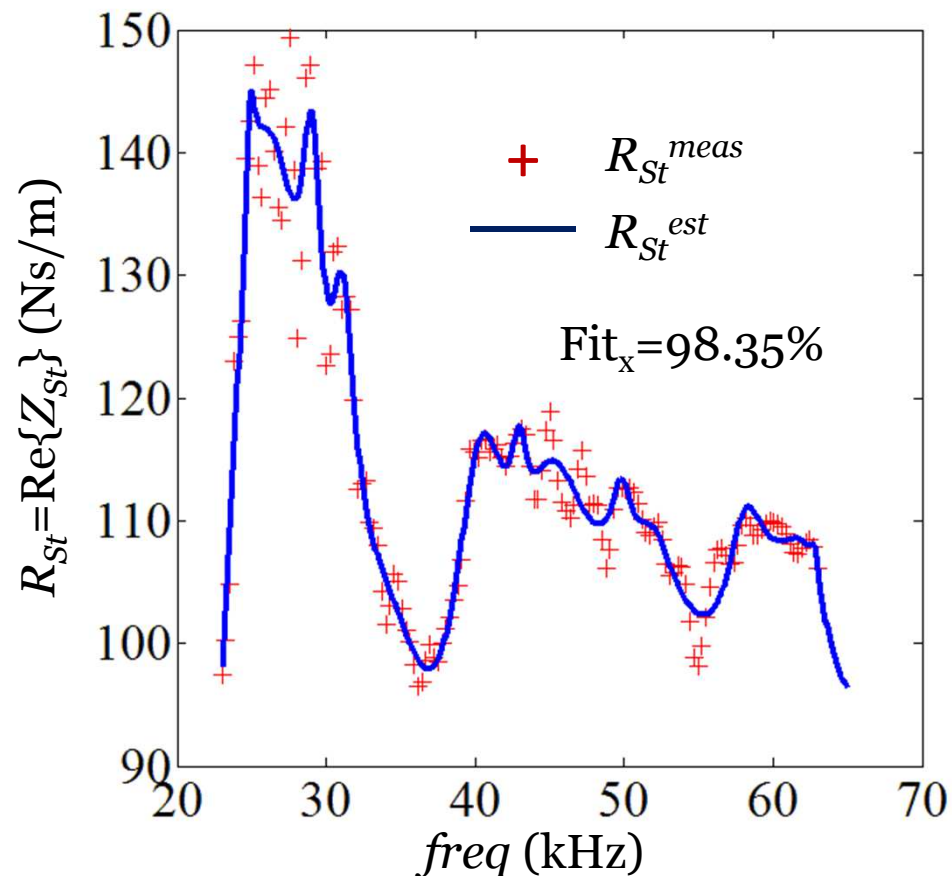
➤ Πραγματικό μέρος Μηχανικής Εμπέδησης: $R_{St} = \text{Re}\{Z_{St}\}$.



6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση ανάπτυξης μηχανικών βλαβών σε θλιβόμενο κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος.

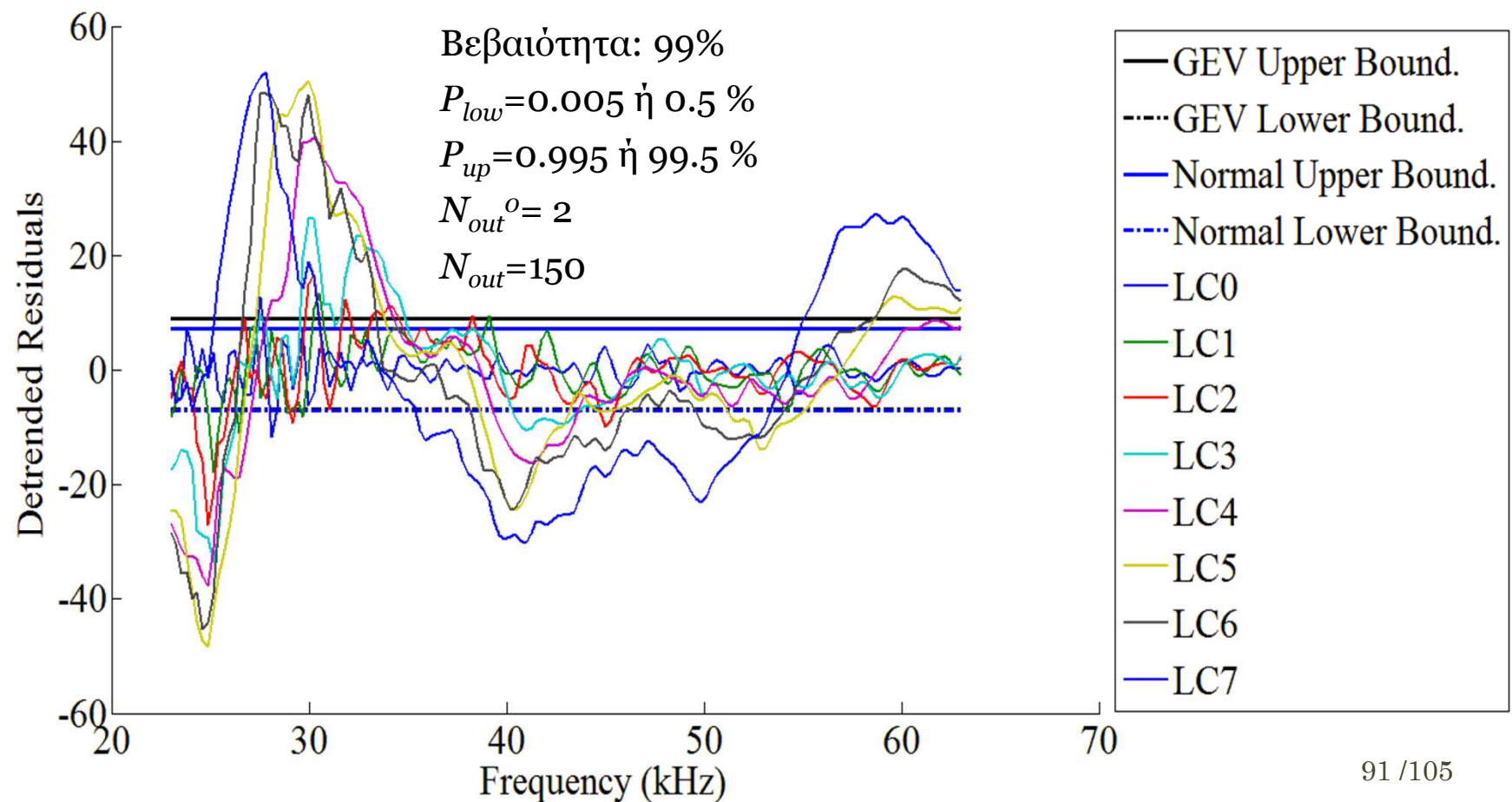
➤ Προσομοίωση Φάσματος Αναφοράς $RS^{meas}: Z_{St}^{meas} | LCo$



j	$freq_{o,j}$ (kHz)	A_j^{eff} (mm ²)	H_j^{eff} (mm)	n_j^{st}
1	24.91	0.10	45.82	0.03
2	31.09	0.40	36.71	0.06
3	29.02	0.37	39.32	0.06
4	24.64	11.89	46.31	0.38
5	40.21	1.50	28.38	0.13
6	42.94	0.07	26.57	0.03
7	33.32	3.05	34.24	0.30
8	44.90	1.12	25.41	0.14
9	51.99	0.05	21.95	0.05
10	59.96	0.52	19.03	0.12
11	62.78	0.01	18.17	0.01

Παρακολούθηση ανάπτυξης μηχανικών βλαβών σε θλιβόμενο κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος.

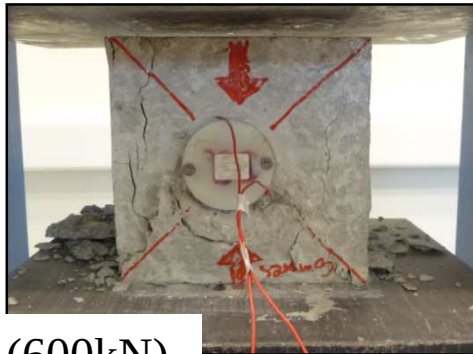
➤ Στατιστικός έλεγχος υπολοίπων: $r_{LC0-7} = (R_{st}^{meas})_{LC0-7} - R_{St}^{est}$



6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση ανάπτυξης μηχανικών βλαβών σε
θλιβόμενο κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος.

Αξιολόγηση εξέλιξης βλάβης



LC6 (600kN)

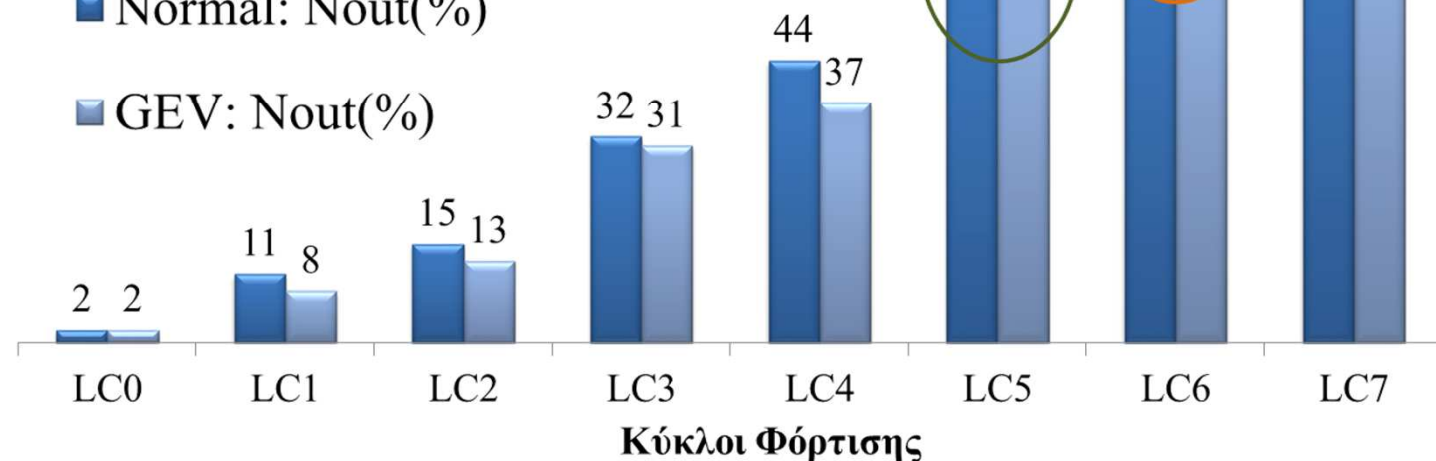


LC7 (610 kN)

Πλήρης Αστοχία ←
Εκτεταμένη ρηγμάτωση ←
Επιφανειακές μικρορωγμές ←

■ Normal: Nout(%)

■ GEV: Nout(%)



Βεβαιότητα: 99%

$P_{low}=0.005$ ή 0.5 %

$P_{up}=0.995$ ή 99.5 %

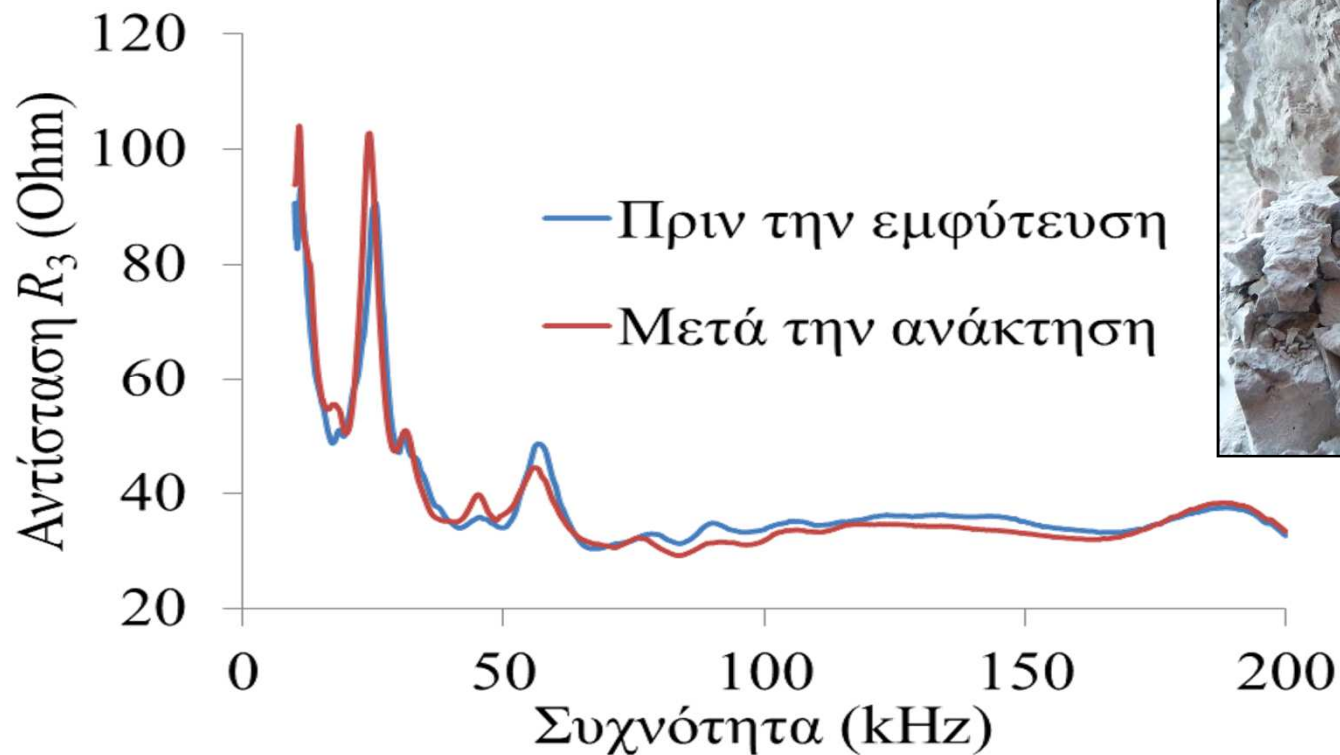
$N_{out}^0 = 2$

$N_{out}=150$

6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση ανάπτυξης μηχανικών βλαβών σε θλιβόμενο κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος.

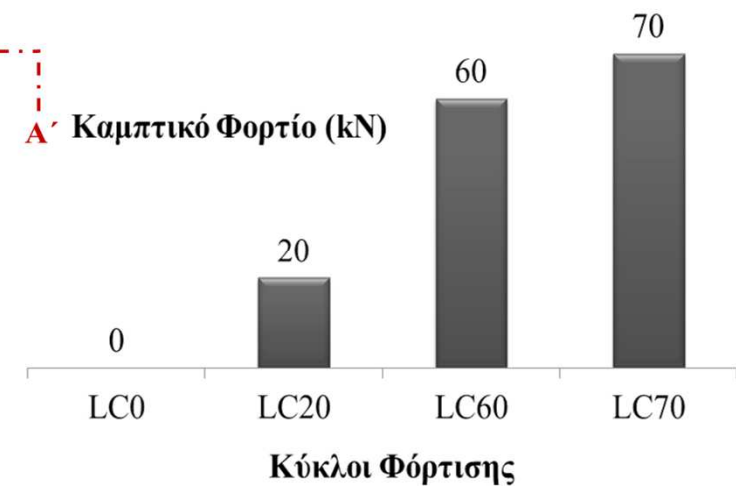
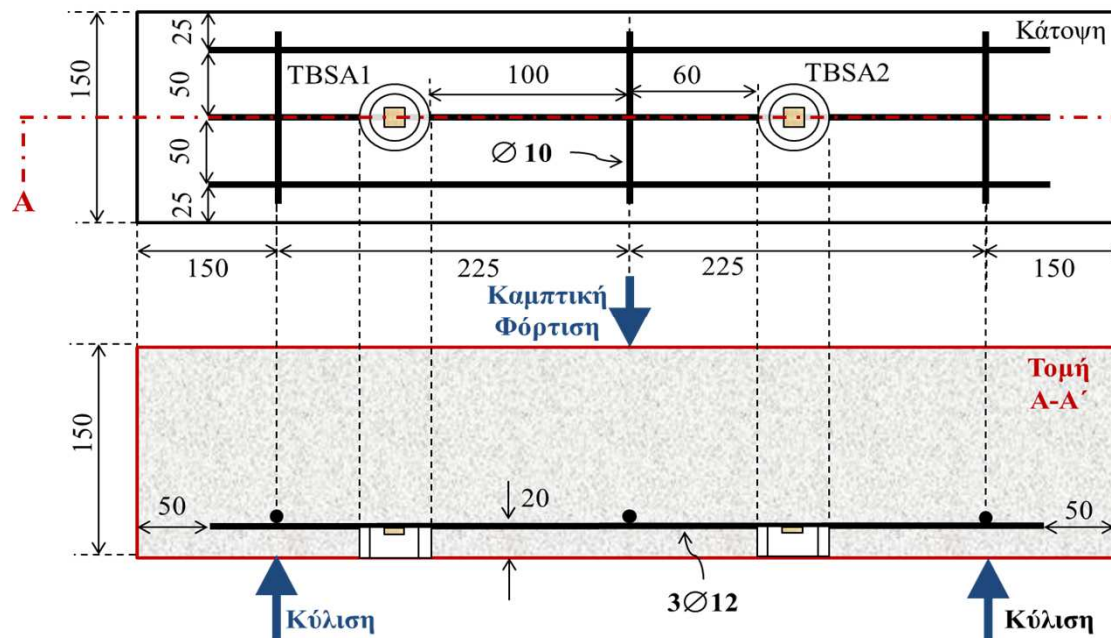
Ανάκτηση του TBSA



6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση ανάπτυξης μηχανικών βλαβών σε καμπτόμενη δοκό σκυροδέματος.

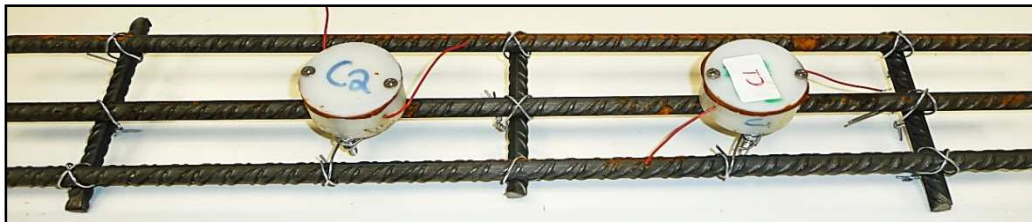
- Δοκός Σκυροδέματος, **150 x 150 x 750 mm**, C20/25.
- Ηλικία σκυροδέματος: **4 μήνες**.
- Κάμψη τριών σημείων. Φορτίο που καταγράφηκε μετά από **4 κύκλους** κλιμακούμενης φόρτισης-αποφόρτισης: **70 kN**.



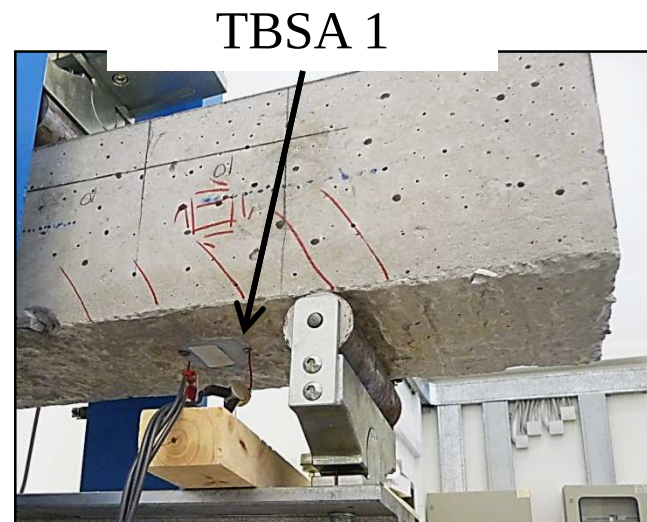
6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση ανάπτυξης μηχανικών βλαβών σε καμπτόμενη δοκό σκυροδέματος.

- Μόνο θλιβόμενος οπλισμός
- Πρόσδεση TBSA στον οπλισμό



Πλέγμα με TBSA πριν την εμφύτευση



Παρακολούθηση ανάπτυξης μηχανικών βλαβών σε καμπτόμενη δοκό σκυροδέματος.

➤ Σύστημα T-WiEYE.

- Καταγραφόμενο Φάσμα απόκρισης: $HME Z_3$.
- Υπολογισμός της μηχανικής εμπέδησης: Z_{St} .
- Εύρος συχνοτήτων: **10-100 kHz**

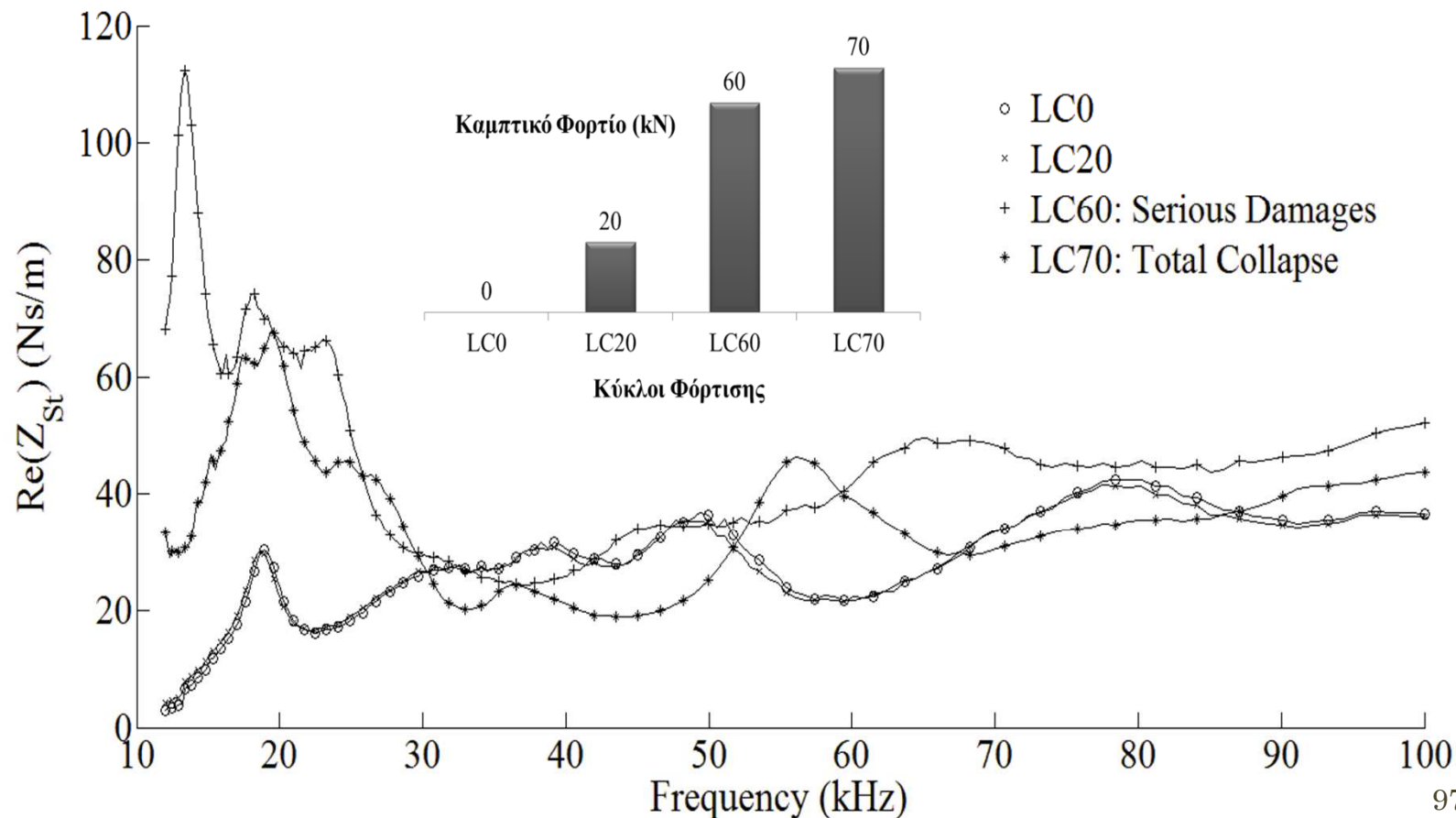
➤ Αξιολόγηση μεταβολής φασμάτων μηχανικής εμπέδησης

- Μόνο το TBSA 1
- Φάσμα αναφοράς RS : Πραγματικό μέρος $Z_{St} \rightarrow LC0$
- Στατιστικός έλεγχος υπολοίπων. Κανονική Κατανομή, Κατανομή GEV.
- Προσομοίωση του φάσματος αναφοράς με ένα ισοδύναμο σύστημα μηχανικών εμπεδήσεων.

6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση ανάπτυξης μηχανικών βλαβών σε καμπτόμενη δοκό σκυροδέματος.

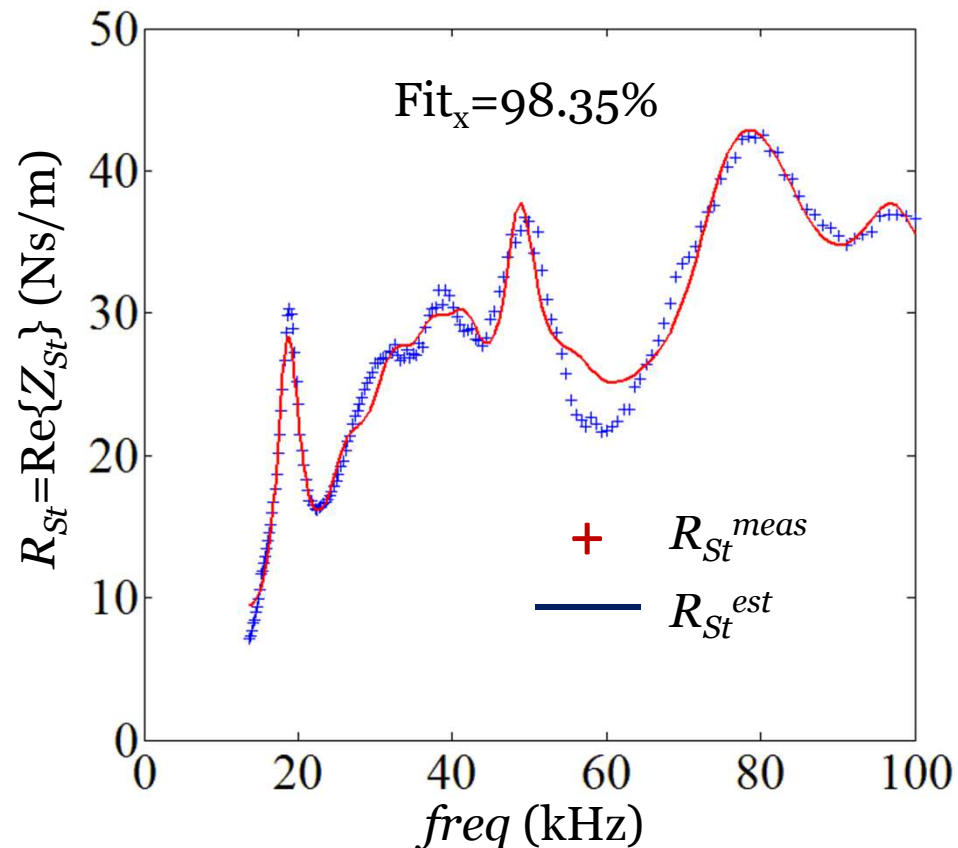
➤ Πραγματικό μέρος Μηχανικής Εμπέδησης: $R_{St} = \text{Re}\{Z_{St}\}$.



6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση ανάπτυξης μηχανικών βλαβών σε καμπτόμενη δοκό σκυροδέματος.

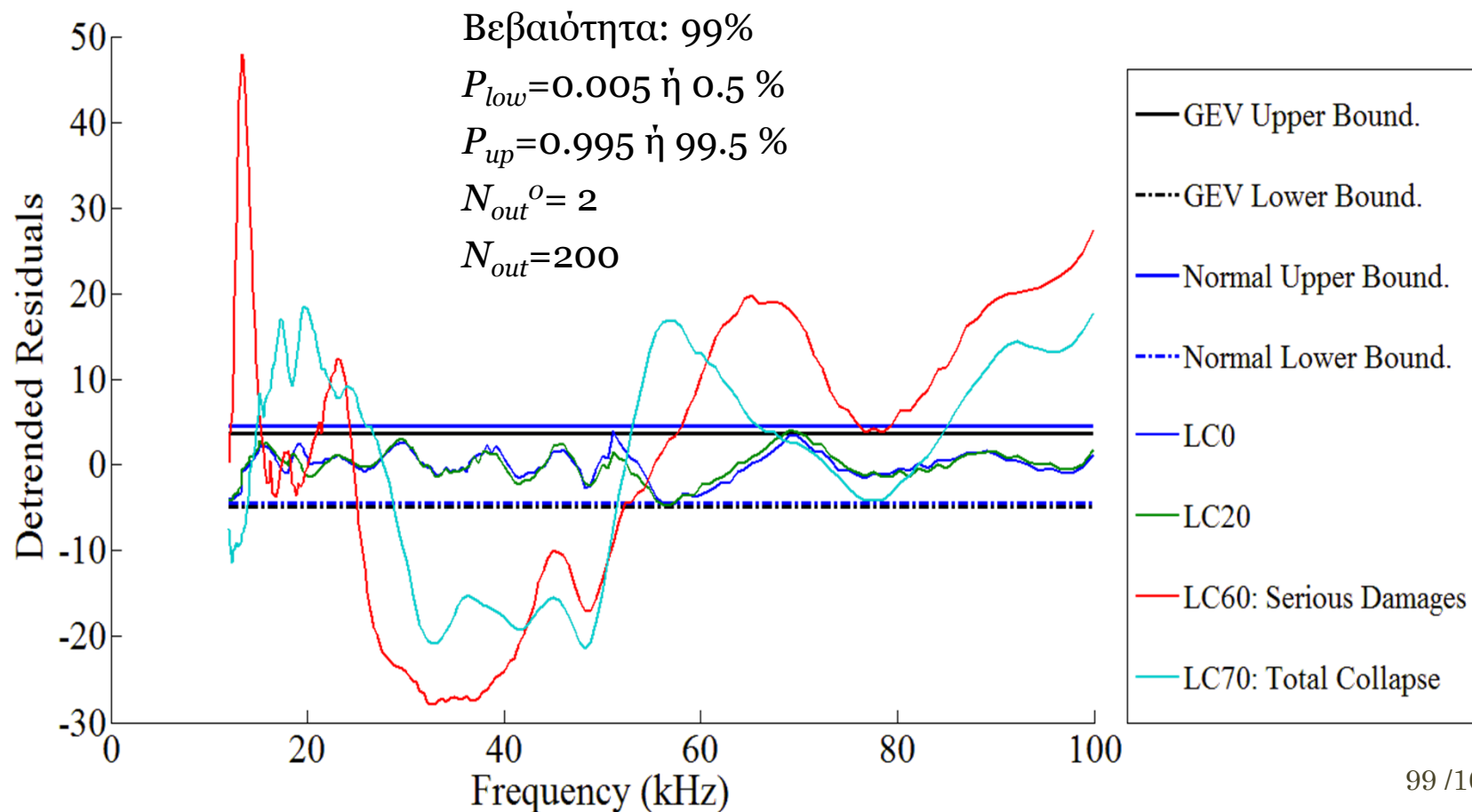
- Προσομοίωση Φάσματος Αναφοράς $RS^{meas}: Z_{St}^{meas} | LCo$



j	$freq_{o,j}$ (kHz)	A_j^{eff} (mm ²)	H_j^{eff} (mm)	n_j^{st}
1	18.43	1.21	61.91	0.21
2	25.73	0.91	44.36	0.31
3	31.65	0.96	36.05	0.26
4	41.30	0.70	27.63	0.20
5	48.55	0.60	23.50	0.12
6	76.36	1.26	14.94	0.24
7	116.92	2.86	9.76	0.02

Παρακολούθηση ανάπτυξης μηχανικών βλαβών σε καμπτόμενη δοκό σκυροδέματος.

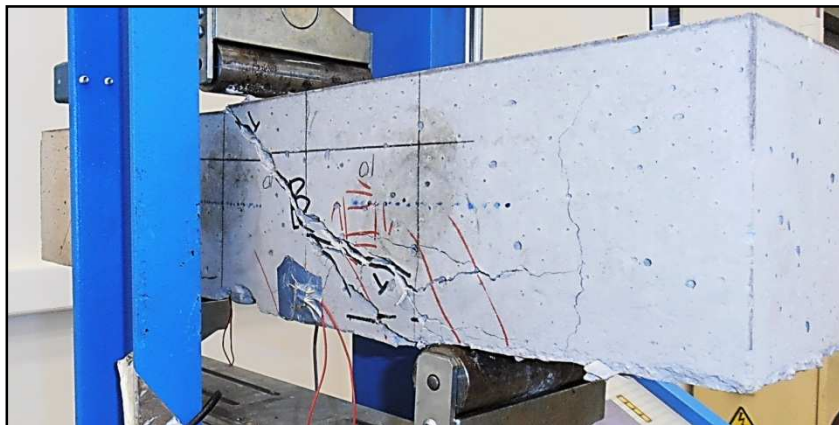
➤ Στατιστικός έλεγχος υπολοίπων: $r_{LC0-7} = (R_{st}^{meas})_{LC0-7} - R_{St}^{est}$



6. Εφαρμογές σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος

Παρακολούθηση ανάπτυξης μηχανικών βλαβών σε καμπτόμενη δοκό σκυροδέματος.

Αξιολόγηση εξέλιξης βλάβης: Αστοχία σε διάτμηση



Βεβαιότητα: 99%

$N_{out}^0 = 2$

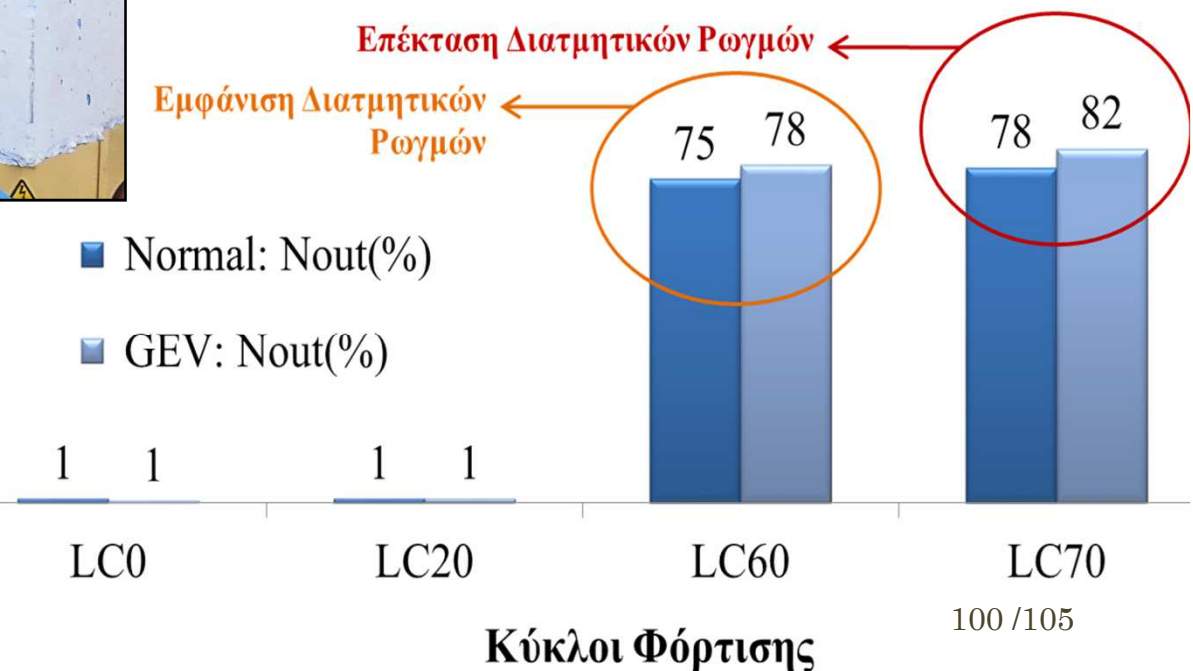
$P_{low} = 0.005$ ή 0.5 %

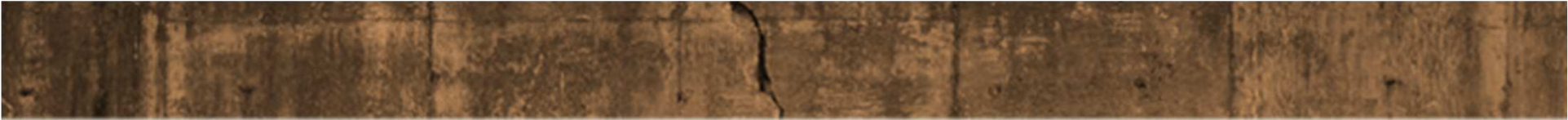
$N_{out} = 200$

$P_{up} = 0.995$ ή 99.5 %

Επέκταση Διατμητικών Ρωγμών

Εμφάνιση Διατμητικών Ρωγμών





7.

Συμπεράσματα-Προτάσεις

Συμπεράσματα

- Τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά επιθέματα PZT (Lead Zirconate Titanate) είναι δυνατό να εφαρμοστούν επιτυχώς στο ΜΚΕ δομικών στοιχείων σκυροδέματος.
- Η θεωρητική διερεύνηση της μηχανικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των PZT και των κατασκευών που τα φέρουν, αποδεικνύει την **ισχυρή συσχέτιση της ηλεκτρικής απόκρισης του PZT με τη μηχανική απόκριση της κατασκευής.**
- Το ενοργάνως καταγραφόμενο φάσμα απόκρισης της Ηλεκτρο-Μηχανικής Εμπέδησης (ΗΜΕ) ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα, αποτελεί το κύριο μέγεθος παρατήρησης της μηχανικής απόκρισης μιας κατασκευής.

Συμπεράσματα

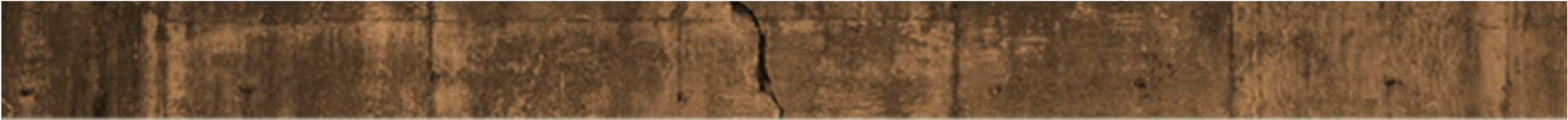
- Από τα θεωρητικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν, διαπιστώνεται ότι είναι δυνατό να προσδιοριστεί η μηχανική απόκριση των κατασκευών από τη καταγραφόμενη ηλεκτρική απόκριση των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων.
- Οι στατιστικοί δείκτες βλάβης και ο στατιστικός έλεγχος των υπολοίπων, συμβάλουν σημαντικά στη συγκριτική ανάλυση των φασμάτων απόκρισης της ΗΜΕ και την αξιόπιστη αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών.
- Τα «ευφυή» πιεζοηλεκτρικά αδρανή λειτουργούν ως τμήμα της μικροδομής του σκυροδέματος και καθιστούν δυνατή τη παρακολούθηση μιας κατασκευής από τα πολύ πρώιμα στάδια δόμησης της, έως και το σύνολο του χρόνου ζωής τους.

Συμπεράσματα

- Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου ασύρματου συστήματος αυτόματης και συνεχούς καταγραφής της ΗΜΕ, προσφέρει σημαντική ευελιξία στις διαδικασίες ΜΚΕ μιας κατασκευής, καθώς:
 - Μειώνει σημαντικά την απαιτούμενη φυσική παρουσία του μηχανικού στο χώρο της κατασκευής.
 - Δίνει τη δυνατότητα καταγραφής μεγάλου όγκο δεδομένων σε σύντομο χρονικό διάστημα.
 - Διευκολύνει την ανάπτυξη και τη διαχείριση ενός εκτεταμένου πλέγματος παρακολούθησης μιας κατασκευής.
- Η καταχώρηση των μετρήσεων σε βάση δεδομένων και η διασύνδεση της βάσης με λογισμικά μαθηματικής ανάλυσης, καθιστά δυνατή την απομακρυσμένη παρακολούθηση και αξιολόγηση μιας κατασκευής.

Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση

- Εξέλιξη των αλγορίθμων προσομοίωσης της απόκρισης των Ηλεκτρο-Μηχανικών Συστημάτων.
- Βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του πρωτότυπου πιεζοηλεκτρικού «ευφυούς» αδρανούς από Teflon.
- Περαιτέρω ανάπτυξη του λογισμικού διαχείρισης και μετα-επεξεργασίας των δεδομένων ΗΜΕ μέσω MATLAB και σχεδίαση ολοκληρωμένης αυτόνομης εφαρμογής.
- Εφαρμογή του ολοκληρωμένου συστήματος T-WiEYE σε μεγάλης κλίμακας τεχνικά έργα από σκυρόδεμα.
- Διερεύνηση εφαρμογής της όλης τεχνολογίας και στον παθητικό έλεγχο των κατασκευών, με την αξιοποίηση των φυσικών ταλαντώσεων.



Ευχαριστώ για
την προσοχή σας.