



# Ανέπαφος έλεγχος και διάγνωση βλαβών σε στοιχεία σκυροδέματος με την εφαρμογή της μεθόδου Σάρωσης Ταλαντώσεων με Laser (Laser Scanning Vibrometry-LSV)

**18<sup>ο</sup> ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ 29-31 ΜΑΡΤΙΟΥ 2018  
ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ**

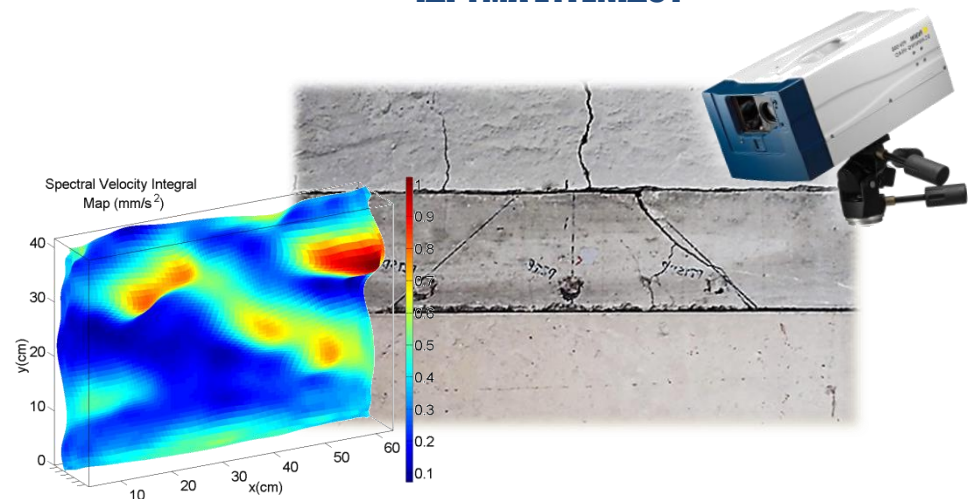
**Ευάγγελος Λιαράκος**

Μεταδιδακτορικός Ερευνητής

w: [eliarakos.wordpress.com](http://eliarakos.wordpress.com)

**Κωνσταντίνος Προβιδάκης**

Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης





# Δομή Παρουσίασης

---

1. Μη Καταστροφικός Έλεγχος Σκυροδέματος
2. Ανέπαφος Μη Καταστροφικός Έλεγχος
3. Δονησιομετρία Σάρωσης με Laser (Laser Scanning Vibrometry - LSV) και ΜΚΕ
4. Εφαρμογή της μεθόδου LSV στην διάγνωση και τον εντοπισμό βλαβών σε δοκούς σκυροδέματος
5. Συμπεράσματα – Συζήτηση



# 1. Μη Καταστροφικός Έλεγχος (ΜΚΕ) Σκυροδέματος

- Μη επεμβατικές μέθοδοι για την εκτίμηση φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών και των κατασκευών
- Δεν απαιτείται η λήψη υλικού ή παρασκευή δοκιμίων
- Δεν απαιτείται η εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού αντοχής
- Αποφυγή κόστους μεταφοράς και αποθήκευσης δοκιμίων
- Εκτίμηση μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων στο **χώρο της κατασκευής**
- Επιτάχυνση των διαδικασιών επιθεώρησης μιας κατασκευής και εκτίμησης της δομικής της αρτιότητας



# 1. Μη Καταστροφικός Έλεγχος (ΜΚΕ) Σκυροδέματος

---

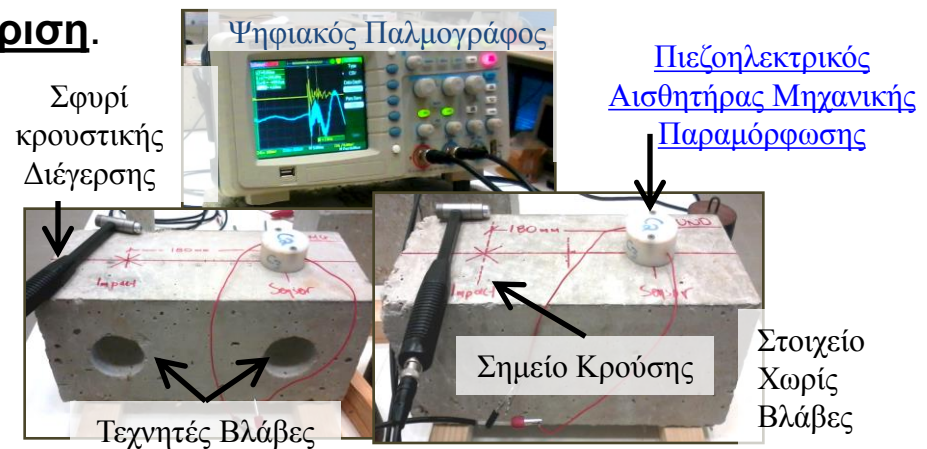
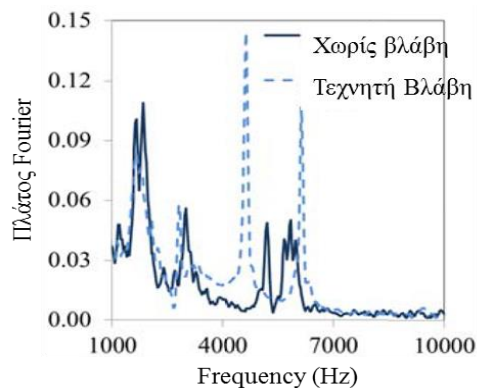
## ➤ Σκυρόδεμα.

- **Εκτίμηση Μέτρου Ελαστικότητας:** Μέτρηση ταχύτητας διαμήκων κυμάτων (Μέθοδος των υπερήχων)
- **Εκτίμηση μηχανικών χαρακτηριστικών (Μέτρο Ελαστικότητας/Λόγος poisson):** Καταγραφή δυναμικής απόκρισης σε κρούση (Μέθοδος Κρουστικού Παλμού-Impact Hammer) και ανάλυση Fourier
- **Εκτίμηση Αντοχής σε θλίψη:** Μέτρηση ταχύτητας μηχανικών κυμάτων και χρήση εμπειρικών εξισώσεων
- **Εκτίμηση Βάθους Ρωγμής:** Παρακολούθηση επιφανειακών κυμάτων Rayleigh

# 1. Μη Καταστροφικός Έλεγχος (ΜΚΕ) Σκυροδέματος

## ➤ Δυναμικές μέθοδοι.

- Καταγραφή δυναμικής απόκρισης δομικού συστήματος, συνήθως στο πεδίο του χρόνου (Δονησιόμετρα, Επιταχυνσιογράφοι κ.α.)
- Μετασχηματισμός Fourier – Φάσμα Απόκρισης
- Προσδιορισμός δυναμικών χαρακτηριστικών (Συχνότητες Συντονισμού, Πλάτη απόκρισης, Ιδιομορφές)
- Τα δυναμικά χαρακτηριστικά συνδέονται με τα μηχανικά χαρακτηριστικά μιας κατασκευής (δυσκαμψία, απόσβεση κ.α.)
- Κάθε μεταβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών λόγω βλάβης θα **αποτυπώνεται στην καταγραφόμενη δυναμική απόκριση.**





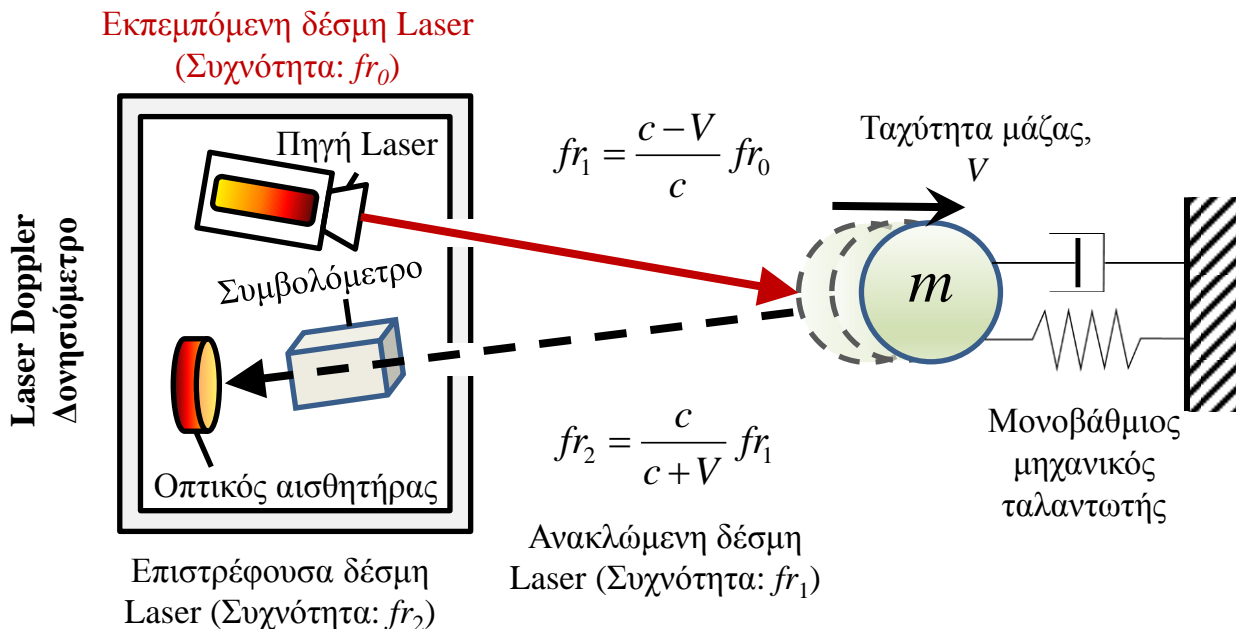
## 2. Ανέπαφος Μη Καταστροφικός Έλεγχος

- Η πλειοψηφία των μεθόδων ΜΚΕ απαιτούν φυσική επαφή με την κατασκευή.
  - Προετοιμασία επιφανειών (π.χ. καθαρισμός)
  - Εγκατάσταση αισθητήρων (π.χ. υλικά προσκόλλησης, πιθανές ηλώσεις)
- Περιορισμένη πρόσβαση στην κατασκευή
  - Γέφυρες, Φράγματα
  - Δοκοί σκυροδέματος
- Πρόσβαση αδύνατη ή απαγορευτική
  - Κινητά στοιχεία μηχανών
  - Μνημεία, Ιστορικές κατασκευές
  - Αγάλματα, Έργα Τέχνης

### 3. Δονησιμετρία Σάρωσης με Laser (Laser Scanning Vibrometry –LSV)

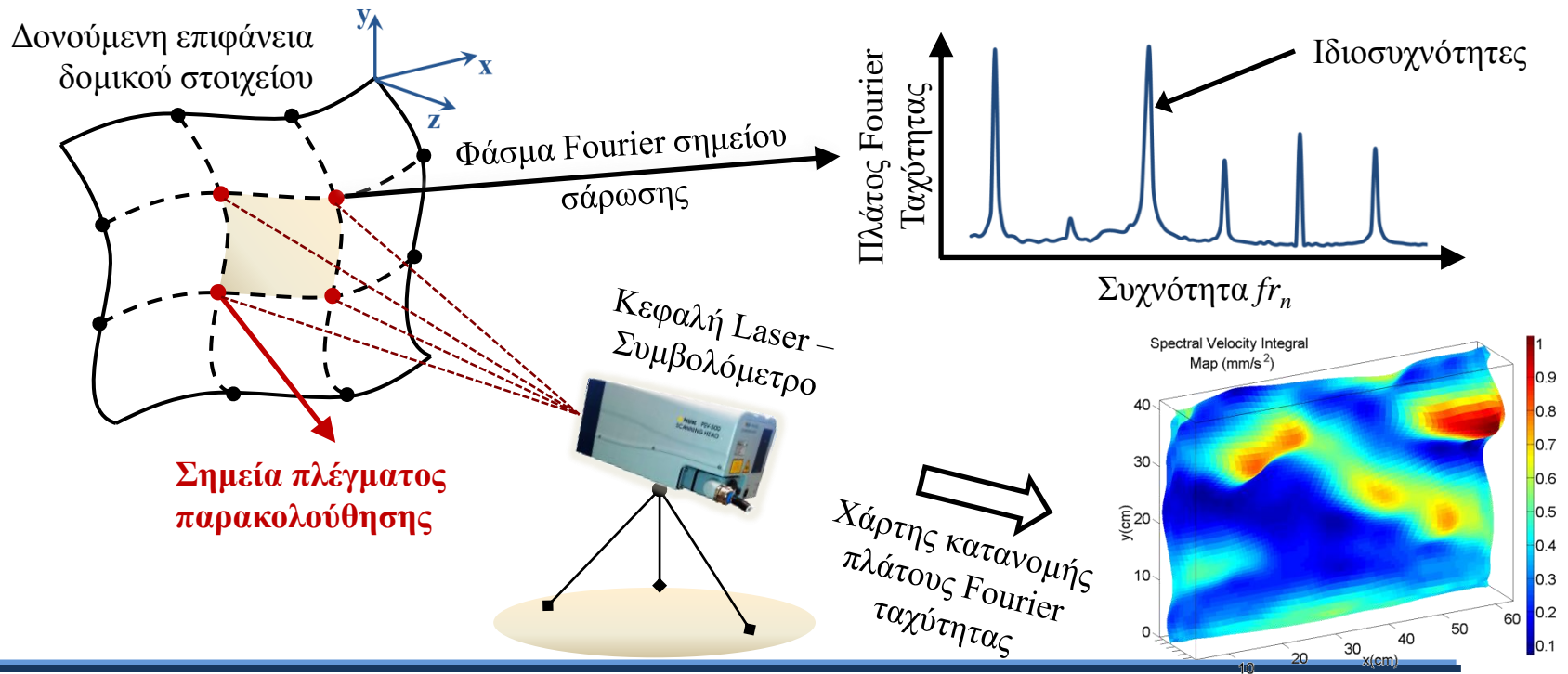
- Προσδιορισμός της ταχύτητας ταλάντωσης ενός σημείου αξιοποιώντας το φαινόμενο Doppler μιας ακτίνας Laser.

$$V = \frac{1}{2} \lambda \Delta fr = \frac{1}{2} \lambda (fr_2 - fr_0)$$



# 3. Δονησιμετρία Σάρωσης με Laser (Laser Scanning Vibrometry –LSV)

- Επιφανειακή σάρωση ταχύτητας ταλάντωσης σε πλέγμα σημείων παρακολούθησης στο πεδίο του χρόνου
- Υπολογισμός φάσματος Fourier σε κάθε σημείο σάρωσης
- Χαρτογράφηση επιφανειακής ταλάντωσης – Δυναμικά Χαρακτηριστικά





## 4. Εφαρμογή της μεθόδου LSV στην διάγνωση και τον εντοπισμό βλαβών σε δοκούς σκυροδέματος

- Ολοκληρωμένο σύστημα σάρωσης ταλαντώσεων **PSV-500H** ([Polytec Gmbh](http://www.polytec.com)). Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής, Πολυτεχνείο Κρήτης.

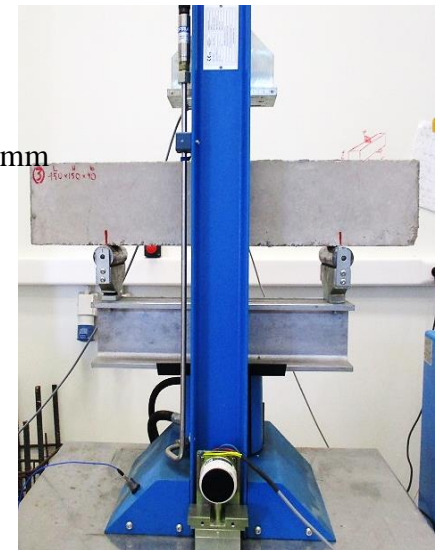
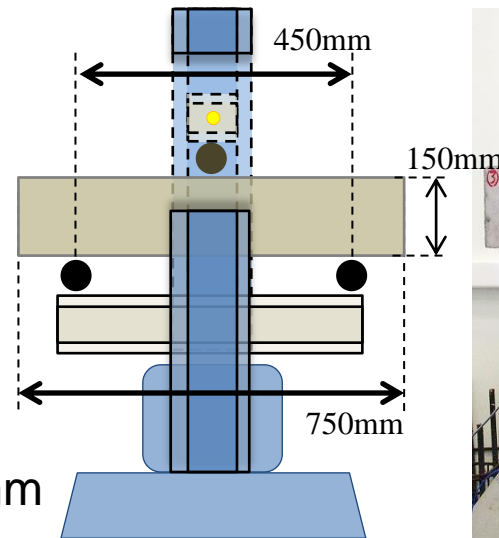


- Κεφαλή σάρωσης ταλαντώσεων (Πηγή Laser – Συμβολόμετρο)
- Μέτρηση ταχύτητας στη διεύθυνση του Laser
- Μήκος κύματος Laser: 633 nm (red light)
- Ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής δεδομένων
- Εύρος συχνοτήτων ταλάντωσης: 0 Hz-100 kHz
- Μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας: 250 kHz
- Μέγιστος αριθμός σημείων Fourier: 12800
- Εύρος ταχυτήτων ταλάντωσης: 1 mm/s – 10 m/s

## 4. Εφαρμογή της μεθόδου LSV στην διάγνωση και τον εντοπισμό βλαβών σε δοκούς σκυροδέματος

### ➤ Αντικείμενο διερεύνησης

- Δυνατότητα ανέπαφης και απομακρυσμένης ανίχνευσης και χαρτογράφησης βλάβης με τη μέθοδο LSV
- Κλιμακωτή ανάπτυξη εφελκυστικής αστοχίας σε δοκό σκυροδέματος
  - Κάμψη τριών σημείων
  - 2 Κύκλοι φόρτισης αποφόρτισης
  - Ρυθμός φόρτισης 0.5 (kN/s)
- Ινοπλισμένες δοκοί σκυροδέματος
  - C20/25, 3 μηνών
  - Άνοιγμα Δοκού, 450 mm
  - Διαστάσεις δοκών: 750x150x90 mm
  - Χαλύβδινες ίνες 45 mm – 30 kg/m<sup>3</sup>



# 4. Εφαρμογή της μεθόδου LSV στην διάγνωση και τον εντοπισμό βλαβών σε δοκούς σκυροδέματος

## ➤ Αντικείμενο διερεύνησης

- Στάδια Βλάβης
  - **Στάδιο Βλάβης 0:** Δοκός άθικτη
  - **Στάδιο Βλάβης I:** Εκδήλωση εφελκυστικής αστοχίας (12-15 kN)  
1<sup>ος</sup> Κύκλος φόρτισης
  - **Στάδιο Βλάβης II:** Πλήρης διάρρηξη\* (4-6 kN)  
2<sup>ος</sup> Κύκλος φόρτισης

\* Η συνέχεια διατηρείται αποκλειστικά από τις ίνες

Δοκός άθικτη –  
Χωρίς βλάβες

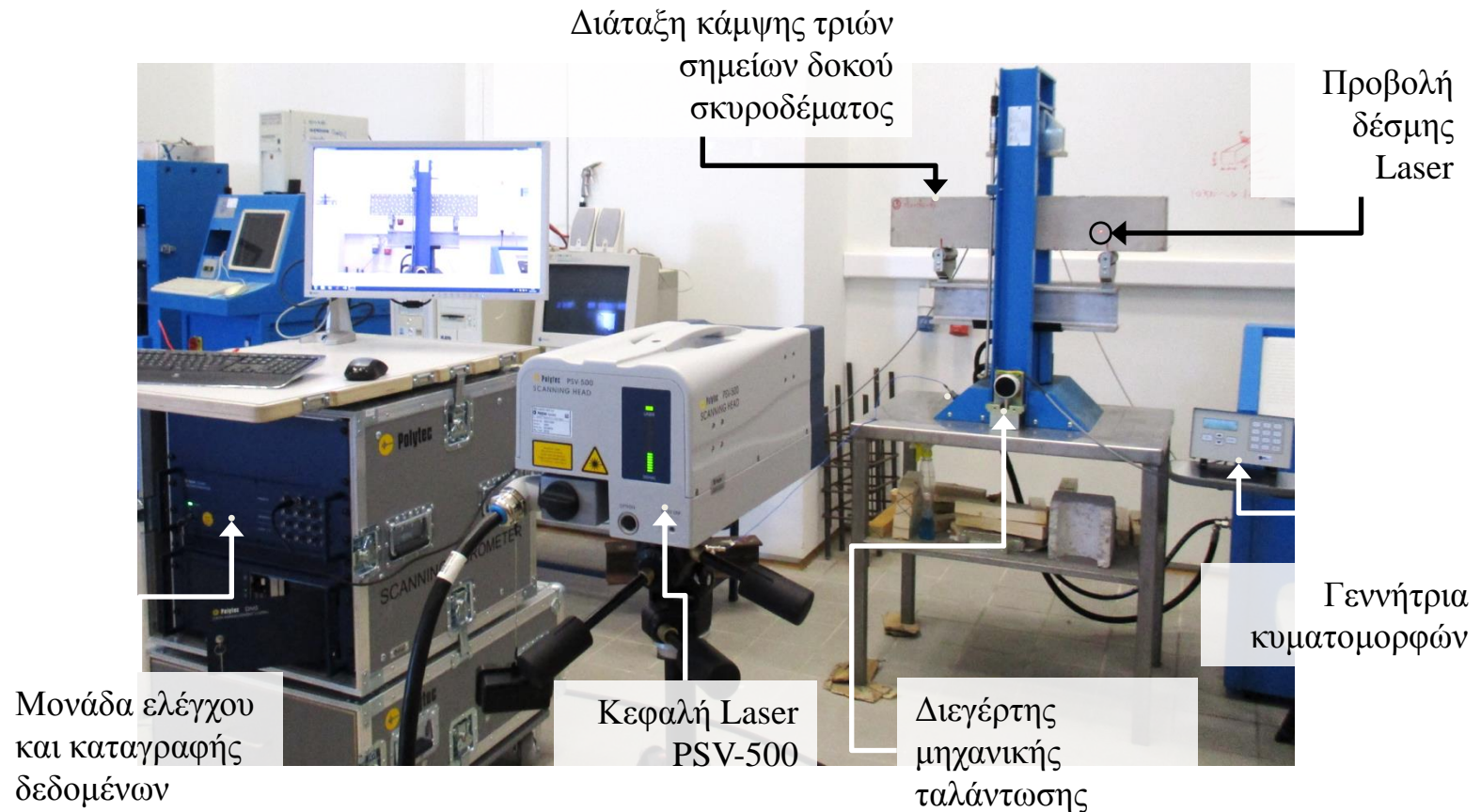


Στάδιο Βλάβης II



## 4. Εφαρμογή της μεθόδου LSV στην διάγνωση και τον εντοπισμό βλαβών σε δοκούς σκυροδέματος

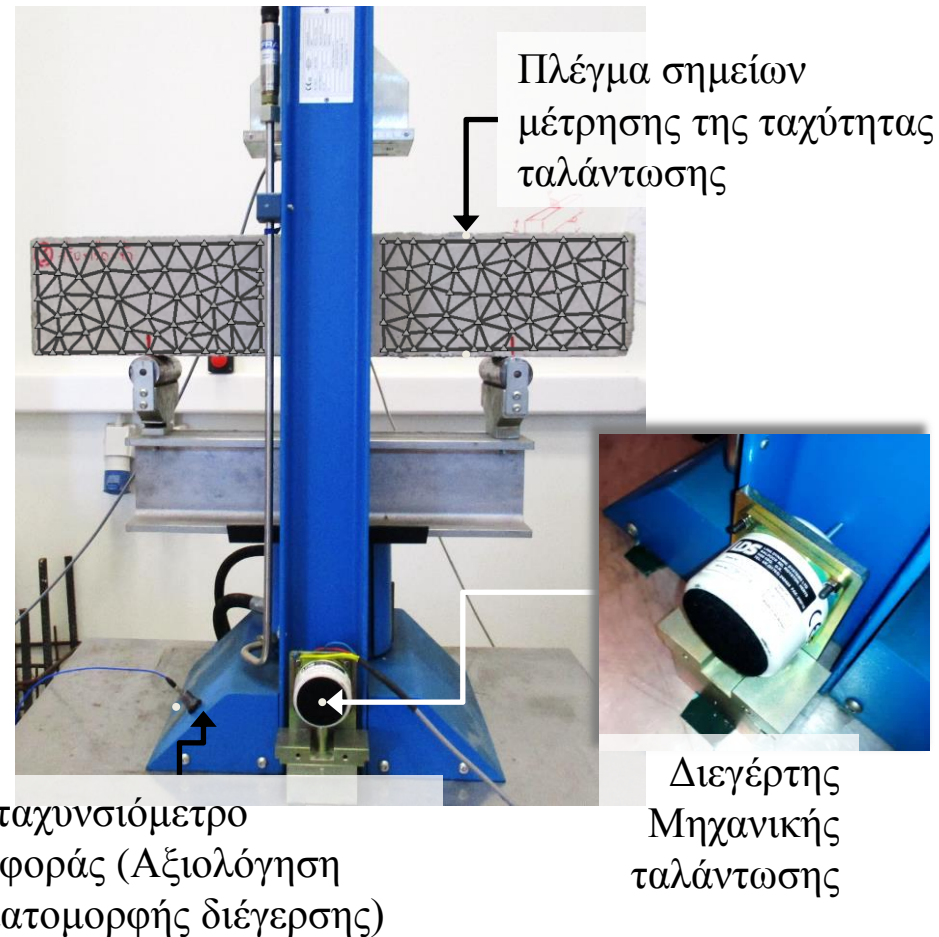
- Εργαστηριακή διάταξη σάρωσης δοκού σκυροδέματος





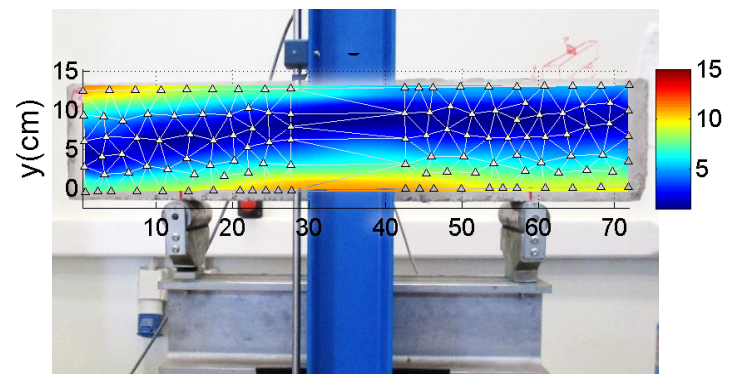
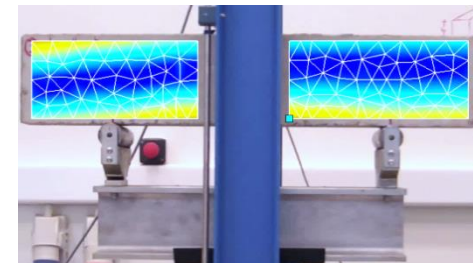
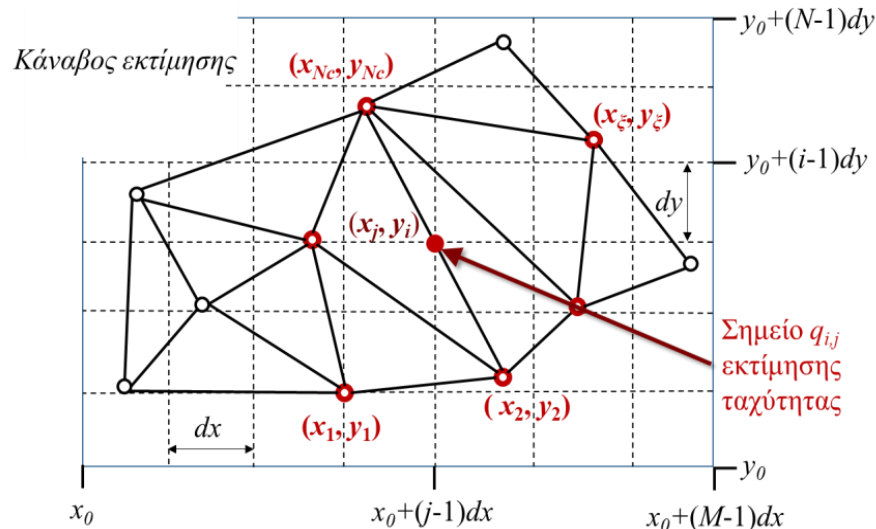
## 4. Εφαρμογή της μεθόδου LSV στην διάγνωση και τον εντοπισμό βλαβών σε δοκούς σκυροδέματος

- Πλέγμα 125 σημείων σάρωσης
- Διεγέρτης μηχανικών ταλαντώσεων LDS-V101 (Bruel & Kjaer) καθοδηγούμενος από γεννήτρια κυματομορφών
- Ημιτονοειδής διέγερση συχνότητας 150, 200, 300, 350, 500 και 600 (Hz), **κάθετα στο επίπεδο κάμψης**
- Συχνότητα δειγματοληψίας χρονο-ιστοριών  $fr_s=3125$  (Hz)
- Εύρος συχνοτήτων φάσματος Fourier 100-1550 (Hz)



# 4. Εφαρμογή της μεθόδου LSV στην διάγνωση και τον εντοπισμό βλαβών σε δοκούς σκυροδέματος

- Δισδιάστατη πολυωνυμική παλινδρόμηση φασματικής ταχύτητας ταλάντωσης
- Λίγα σημεία – Αξιόπιστη αποτύπωση ιδιομορφής
- Εκτίμηση κατανομής ταχύτητας σε περιοχές μη λήψης μετρήσεων (Περιορισμός λόγω πλαισίου μηχανής)

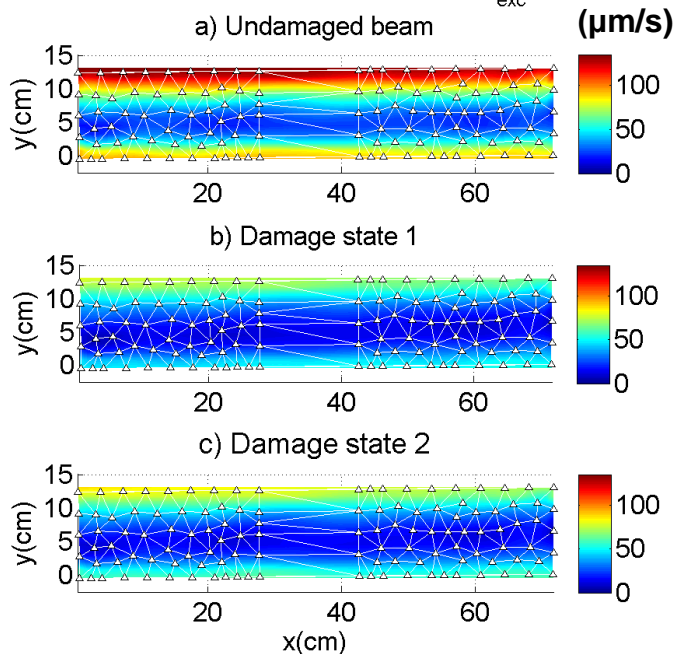


# 4. Εφαρμογή της μεθόδου LSV στην διάγνωση και τον εντοπισμό βλαβών σε δοκούς σκυροδέματος

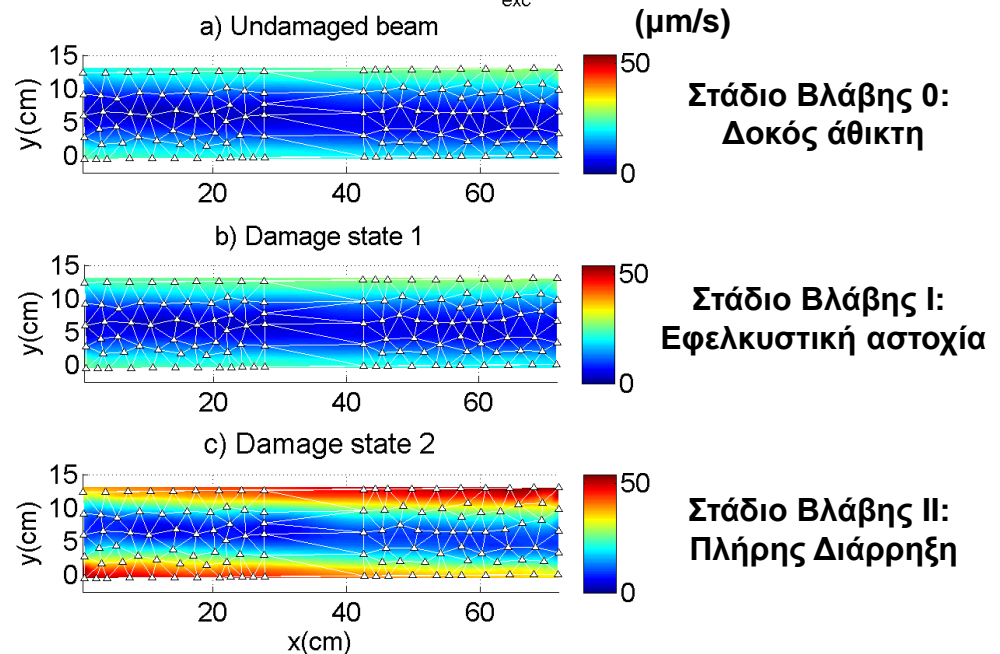
## ➤ Αποτελέσματα Σάρωσης

- Κατανομή φασματικής ταχύτητας ταλάντωσης ( $\mu\text{m/s}$ ) για συχνότητες διέγερσης **150** και **200 Hz**.
- **Καμία αξιόλογη μεταβολή της μορφής επιφανειακής ταλάντωσης**

Velocity response colormap at 150Hz for  $fr_{exc} = 150\text{Hz}$



Velocity response colormap at 200Hz for  $fr_{exc} = 200\text{Hz}$

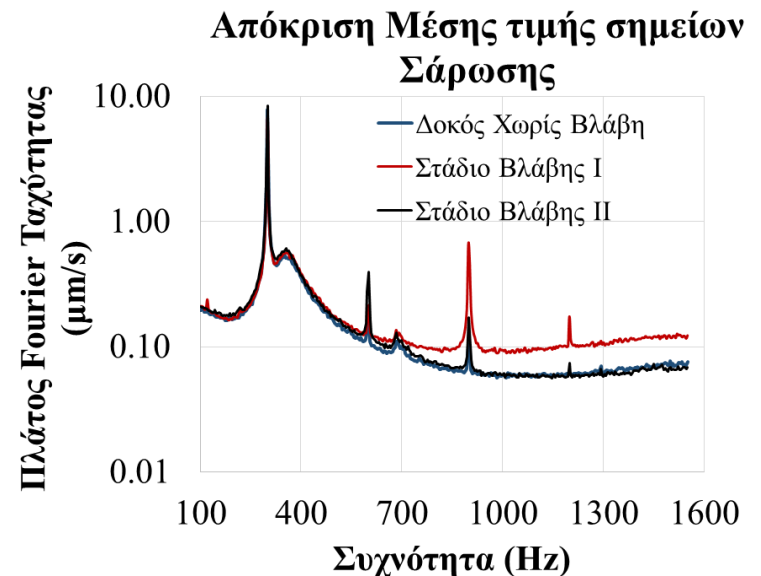
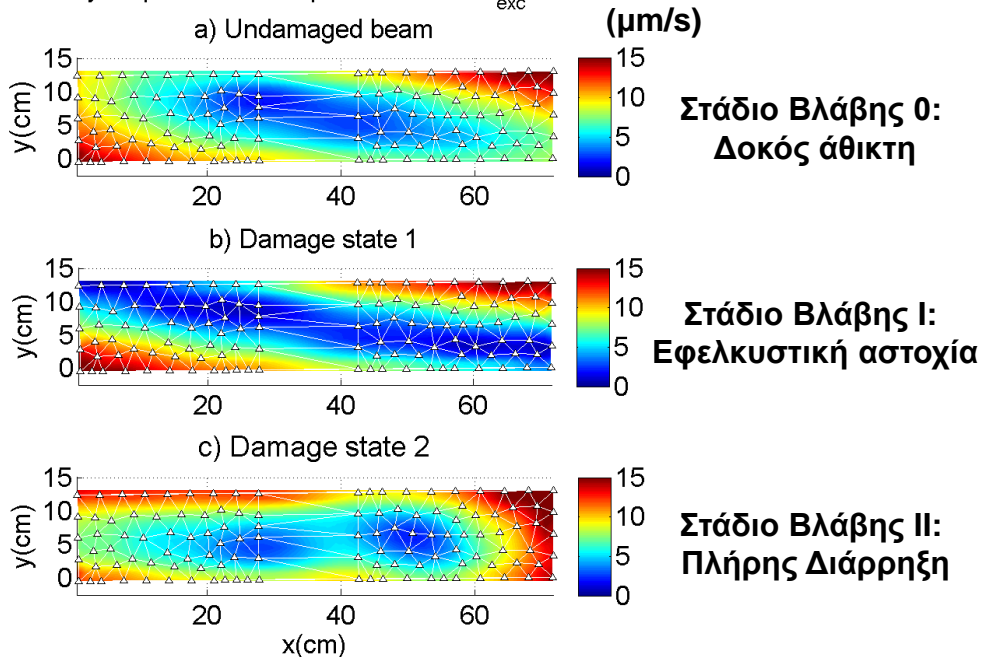


# 4. Εφαρμογή της μεθόδου LSV στην διάγνωση και τον εντοπισμό βλαβών σε δοκούς σκυροδέματος

## ➤ Αποτελέσματα Σάρωσης

- Κατανομή φασματικής ταχύτητας ταλάντωσης ( $\mu\text{m/s}$ ) για συχνότητα διέγερσης **300 Hz**.
- **Εντοπισμός μεταβολών στον τρόπο επιφανειακής ταλάντωσης**

Velocity response colormap at 300Hz for  $f_{exc}=300\text{Hz}$



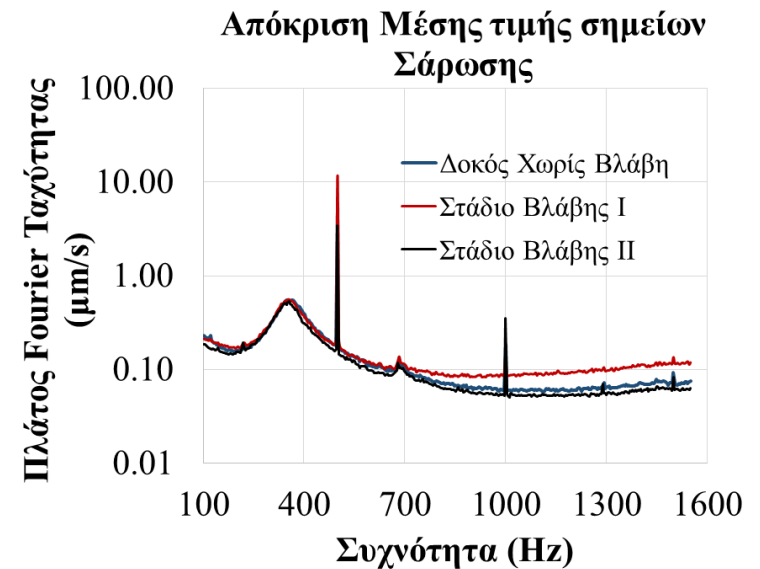
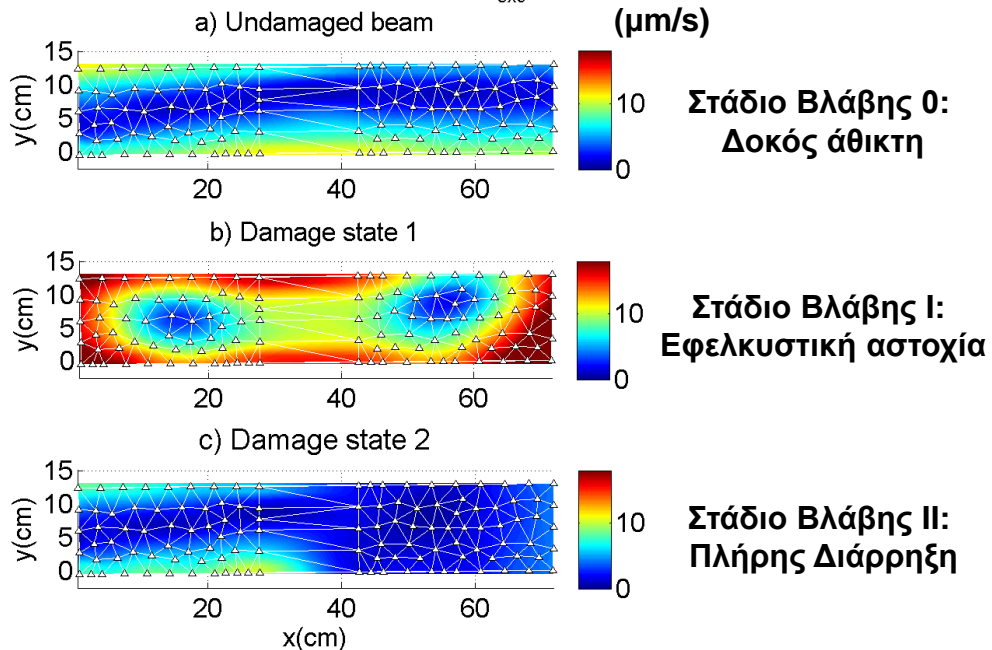


# 4. Εφαρμογή της μεθόδου LSV στην διάγνωση και τον εντοπισμό βλαβών σε δοκούς σκυροδέματος

## ➤ Αποτελέσματα Σάρωσης

- Κατανομή φασματικής ταχύτητας ταλάντωσης ( $\mu\text{m/s}$ ) για συχνότητα διέγερσης **500 Hz**.
- **Σημαντικές μεταβολές στον τρόπο επιφανειακής ταλάντωσης**

Velocity response colormap at 500Hz for  $f_{exc}=500\text{Hz}$

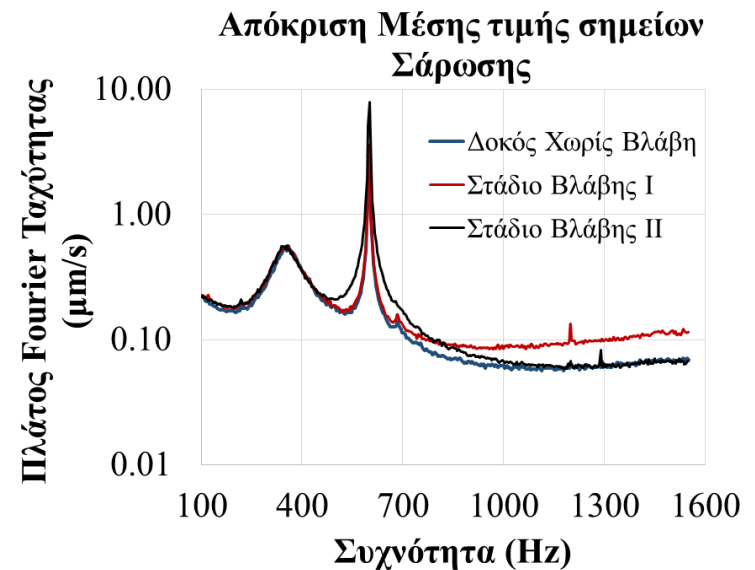
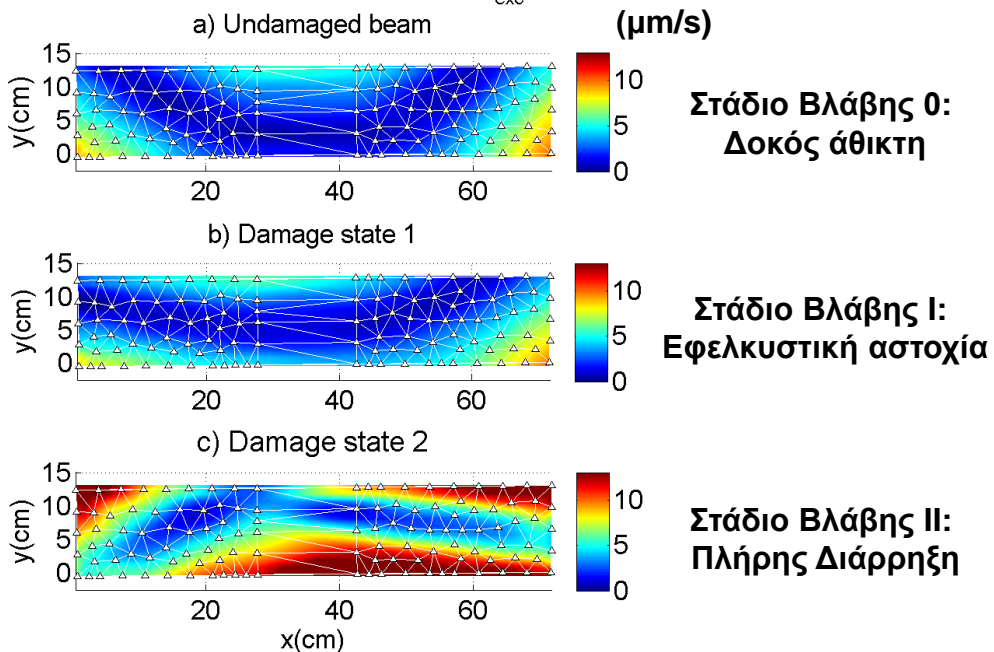


# 4. Εφαρμογή της μεθόδου LSV στην διάγνωση και τον εντοπισμό βλαβών σε δοκούς σκυροδέματος

## ➤ Αποτελέσματα Σάρωσης

- Κατανομή φασματικής ταχύτητας ταλάντωσης ( $\mu\text{m/s}$ ) για συχνότητα διέγερσης **600 Hz**.
- **Σημαντικές μεταβολές στον τρόπο επιφανειακής ταλάντωσης**

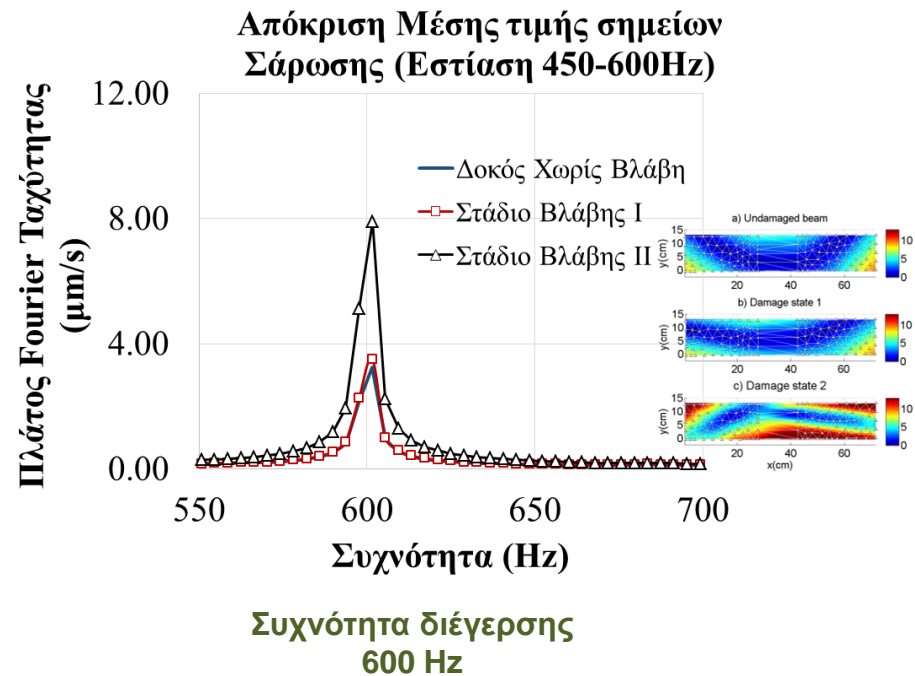
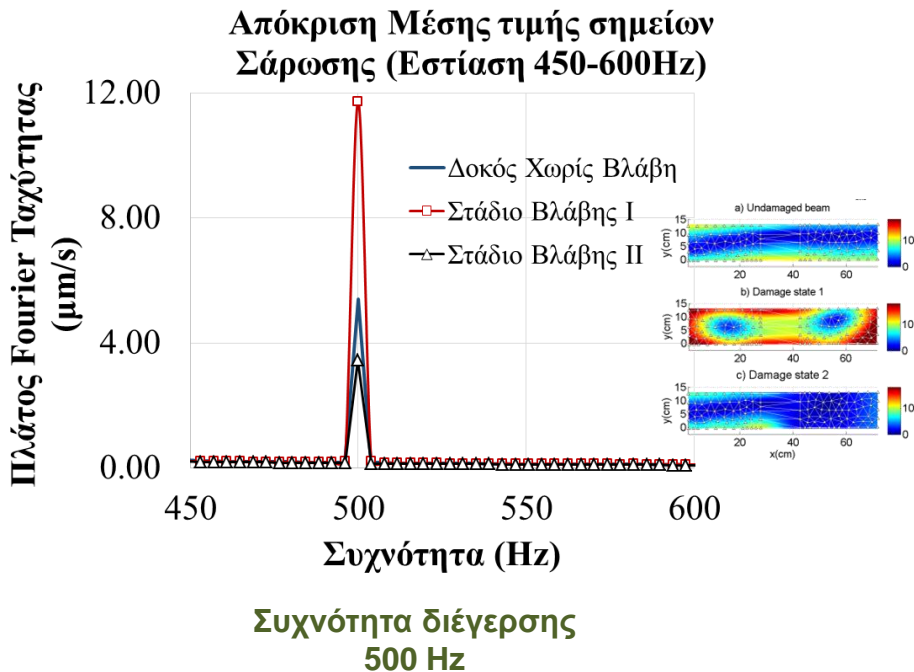
Velocity response colormap at 600Hz for  $f_{exc} = 600\text{Hz}$



# 4. Εφαρμογή της μεθόδου LSV στην διάγνωση και τον εντοπισμό βλαβών σε δοκούς σκυροδέματος

## ➤ Αποτελέσματα Σάρωσης

- Σημαντικές μεταβολές στο πλάτος του φάσματος απόκρισης της ταχύτητας





## 5. Συμπεράσματα – Συζήτηση αποτελεσμάτων

---

- Η καταγραφή της ταχύτητας ταλάντωσης ενός σημείου μιας κατασκευής με την αξιοποίηση του φαινομένου Doppler μιας ακτίνας Laser, αποτελεί σημαντική συμβολή στην **ανέπαφη** και **απομακρυσμένη** παρακολούθηση της δυναμικής απόκρισης.
- Η Δονησιομετρία Σάρωσης με Laser – LSV (Laser Scanning Vibrometry) επιτρέπει την **πολυσημειακή** καταγραφή της δυναμικής απόκρισης μιας κατασκευής, καθιστώντας δυνατή την χαρτογράφηση του τρόπου ταλάντωσης της επιφάνειας των δομικών στοιχείων.



## 5. Συμπεράσματα – Συζήτηση αποτελεσμάτων

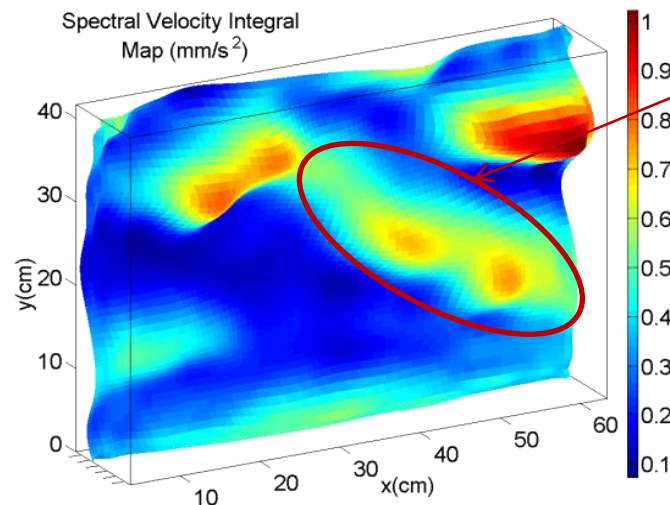
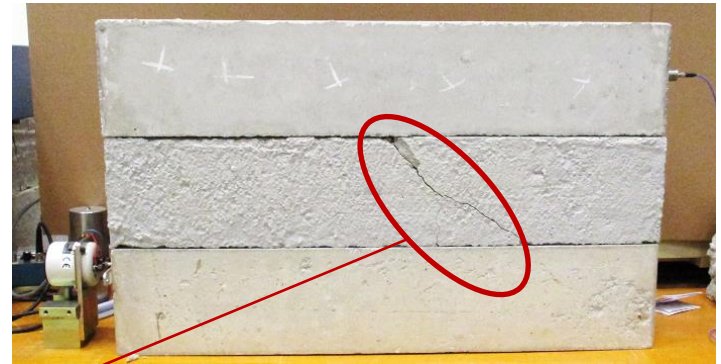
---

- Με τη χρήση της μεθόδου LSV
  - Παρακολούθηση της μεταβολής του τρόπου ταλάντωσης μιας δοκού σκυροδέματος καθώς αυτή αστοχεί σταδιακά σε εφελκυσμό
  - Παρακολούθηση της μεταβολής των δυναμικών χαρακτηριστικών της δοκού
  - Εντοπισμός περιοχής εκδήλωσης της βλάβης
  
- Η παραπάνω μεθοδολογία με ορισμένες τροποποιήσεις θα μπορούσε να βρει εφαρμογή και στο ανέπταφο και απομακρυσμένο ΜΚΕ ιστορικών κατασκευών οι οποίες αποτελούνται από τοιχοποιία, όπως και στην ανίχνευση βλαβών σε μνημειακά έργα τέχνης όπως μαρμάρινα αγάλματα και ψηφιδωτά.

## 5. Συμπεράσματα – Συζήτηση αποτελεσμάτων

### ➤ Τρέχουσα ερευνητική δραστηριότητα

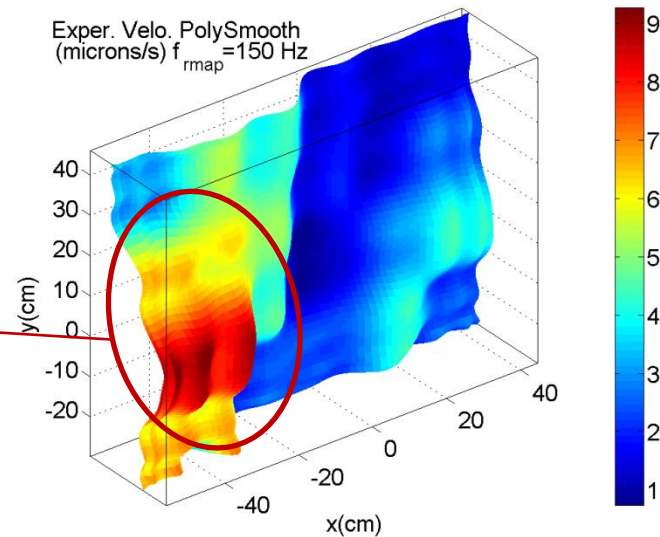
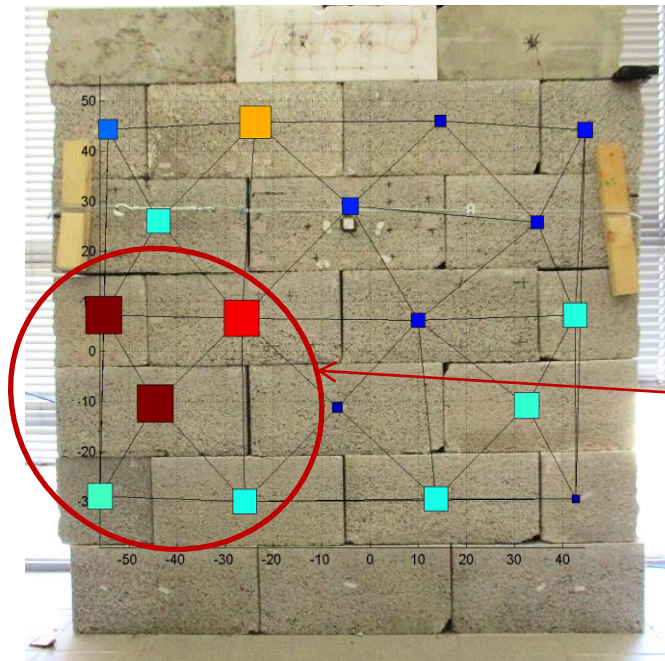
- Εντοπισμός και χαρτογράφηση βλάβης τοιχίων σκυροδέματος





## 5. Συμπεράσματα – Συζήτηση αποτελεσμάτων

- Τρέχουσα ερευνητική δραστηριότητα
  - Ανίχνευση βλαβών σε τοιχοποιίες



# Ευχαριστίες

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν αποτελούν τμήμα μεταδιδακτορικής έρευνας η οποία χρηματοδοτήθηκε από την Επιτροπή Ερευνών<sup>(1)</sup> του Ειδικού Λογαριασμού Κονδυλίων Έρευνας του **Πολυτεχνείου Κρήτης** στα πλαίσια ενίσχυσης των μεταδιδακτορικών φοιτητών του Ιδρύματος, κατά το Ακαδημαϊκό Έτος 2016-17.







# ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ

**18<sup>ο</sup> ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ 29-31 ΜΑΡΤΙΟΥ 2018  
ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ**

Ευάγγελος Λιαράκος

Μεταδιδακτορικός Ερευνητής

w: [eliarakos.wordpress.com](http://eliarakos.wordpress.com)

Κωνσταντίνος Προβιδάκης

Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

