

**Ανέπαφος έλεγχος και διάγνωση βλαβών σε στοιχεία
σκυροδέματος με την εφαρμογή της μεθόδου Σάρωσης
Ταλαντώσεων με Laser (Laser Scanning Vibrometry-LSV)
Non-contact control and damage diagnosis in concrete elements
using Laser Scanning Vibrometry (LSV) method**

ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Β. ΛΙΑΡΑΚΟΣ¹, ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Π. ΠΡΟΒΙΑΔΑΚΗΣ²

*Λέξεις κλειδιά: Μη Καταστροφικός Έλεγχος, Σάρωση Ταλαντώσεων με Laser,
Χαρτογράφηση βλαβών σκυροδέματος*

*Keywords: Non-Destructive Testing, Laser Scanning Vibrometry, Concrete damage
mapping*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Οι μέθοδοι μη-καταστροφικού ελέγχου έχουν συμβάλει καθοριστικά στη γρήγορη και επιτόπου αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών. Ωστόσο στην πλειονότητα τους χαρακτηρίζονται από το μειονέκτημα των απαιτήσεων φυσικής επαφής καθώς ο σχετικός εξοπλισμός συνήθως αποτελείται από αισθητήρες που πρέπει να προσκολληθούν στην επιφάνεια της υπό παρακολούθηση κατασκευής. Η παρούσα εργασία ασχολείται με την εφαρμογή της καινοτόμας τεχνικής απομακρυσμένης και ανέπαφης Σάρωσης Ταλαντώσεων με Laser στον έλεγχο του τρόπου ταλάντωσης δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα. Η ταχύτητα ταλάντωσης καταγράφεται στο πεδίο των συχνοτήτων σε ένα πλέγμα σημείων παρακολούθησης και με την εφαρμογή μιας μεθόδου δυσδιάστατης πολυωνυμικής παλινδρόμησης υπολογίζονται οι χάρτες κατανομής των ταχυτήτων. Με τον τρόπο αυτό αποτυπώνεται η μορφή της ταλάντωσης και εξετάζεται το πώς αυτή μεταβάλλεται όταν εκδηλωθεί μια μηχανική βλάβη. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε στον έλεγχο μιας δοκού ινοπλισμένου σκυροδέματος η οποία εξωθήθηκε σταδιακά και ελεγχόμενα σε εφελκυστική αστοχία μέσω κάμψης τριών σημείων.

ABSTRACT: Non Destructive Testing methods have contributed crucially to the in-situ and time effective evaluation of constructions structural integrity. Although their advantages, they suffer from the important drawback of physical contact requirement as in most cases their implementation demands the installation of sensors on

¹ Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνείο Κρήτης, vagelis_41@yahoo.gr

² Καθηγητής, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνείο Κρήτης, cproov@mred.tuc.gr

monitoring structure surfaces. Present paper deals with the application of non-contact and remote scanning technique of Laser Scanning Vibrometry for the control of concrete structural elements. According to the specific method, vibration velocity of construction is acquired in frequency domain on several points of a monitoring grid and velocity distribution maps are designed by applying a two-dimensional polynomial regression. The abovementioned methodology is applied for the monitoring of dynamic behavior changes a steel-fiber reinforced concrete beam exhibits, when failures under three-point bending.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο ακριβής και τακτικός έλεγχος της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών συμβάλει καθοριστικά στην αποτελεσματική επιθεώρηση και συντήρησή τους. Ο έγκαιρος εντοπισμός μηχανικών βλαβών και η αξιόπιστη ταυτοποίησή τους, δίνουν τη δυνατότητα στους μηχανικούς να σχεδιάσουν τρόπους αντιμετώπισης, οι οποίοι διασφαλίζουν την ελάχιστη δυνατή επέμβαση στον φέρον οργανισμό μειώνοντας ταυτόχρονα το χρόνο αλλά και το κόστος εφαρμογής. Οι τεχνικές *Μη Καταστροφικού Ελέγχου* (ΜΚΕ) που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία 20 χρόνια, έχουν συμβάλει καθοριστικά στο σχεδιασμό μεθόδων άμεσης εκτίμησης των μηχανικών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής, στο χώρο αυτής και κυρίως χωρίς να απαιτείται η λήψη δοκιμών υλικού για εργαστηριακούς ελέγχους. Ο προσδιορισμός των ελαστικών σταθερών ενός δομικού υλικού από τη μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων στη μάζα του (Ultrasonic Methods) και ο υπολογισμός των συχνοτήτων συντονισμού ενός δομικού στοιχείου από την ανάλυση της απόκρισης που εμφανίζει σε μια κρουστική διέγερση (Impact-Echo Methods) αποτελούν κάποιες από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές των μεθόδων ΜΚΕ για την παρακολούθηση των δομικών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής (Maierhofer et al, 2010).

Ένα σημαντικό μειονέκτημα που συνοδεύει τις μεθόδους ΜΚΕ, όπως φυσικά και τις κλασικές καταστροφικές μεθόδους ελέγχου, είναι η απαιτούμενη φυσική επαφή με το υπό μελέτη δομικό σύστημα. Ο εξοπλισμός που σχετίζεται με την εφαρμογή τους, συνήθως αποτελείται από αισθητήρες οι οποίοι είναι απαραίτητο να προσκολληθούν στην επιφάνεια της κατασκευής που μελετάται (Maierhofer et al, 2010). Η χρήση των αισθητήρων επαφής λειτουργεί ως μειονέκτημα σε περιπτώσεις όπου η πρόσβαση στα σημεία διερεύνησης του δομικού συστήματος είναι περιορισμένη ή αδύνατη. Επιπλέον, ως προβληματικές μπορούν να χαρακτηριστούν και οι περιπτώσεις όπου η επαφή με την υπό μελέτη κατασκευή απαγορεύεται, είτε για λόγους ασφαλείας (π.χ. στοιχεία μηχανών σε λειτουργία), είτε λόγω προστασίας του δομικού συστήματος από πιθανές φθορές (π.χ. έργα τέχνης, μνημειακές κατασκευές κ.α.).

Αισθητήρες που στηρίζονται στην οπτοηλεκτρονική τεχνολογία, όπως οι αισθητήρες Laser, αποτελούν μια σημαντική εναλλακτική για την αντιμετώπιση του ζητήματος της πρόσβασης και της φυσικής επαφής με την κατασκευή. Η *Σάρωση Ταλαντώσεων με Laser* ή *Δονησιομετρία Σάρωσης με Laser* (*Laser Scanning Vibrometry - LSV*) είναι μια σύγχρονη και καινοτόμα τεχνική απομακρυσμένης και ανέπαφης

καταγραφής του τρόπου ταλάντωσης μιας κατασκευής και πιο συγκεκριμένα της ταχύτητας απόκρισης της (Chen & McKillip, 2007, Khan et al, 2000, Rothberg et al, 2016). Η συλλογή των δεδομένων συνήθως πραγματοποιείται σε ένα πλέγμα σημείων παρακολούθησης τα οποία ορίζουν μια επιφάνεια σάρωσης επάνω στην κατασκευή. Η τεχνική LSV είναι δυνατό να αξιοποιηθεί για την ανάπτυξη μεθόδων ΜΚΕ οι οποίες ανήκουν στη οικογένεια των μεθόδων που στηρίζονται στη μελέτη και αξιολόγηση των δυναμικών χαρακτηριστικών μιας κατασκευής (Doebbling et al, 1996). Τα δυναμικά χαρακτηριστικά, όπως οι συχνότητες συντονισμού και οι μορφές ταλάντωσης (vibration shape, vibration pattern), είναι φυσικά συσχετισμένα με τις μηχανικές ιδιότητες των δομικών υλικών, τη μικροδομή τους αλλά και τη μακροσκοπική γεωμετρία της ίδιας της κατασκευής. Οποιαδήποτε μεταβολή στις μηχανικές ιδιότητες ή τη γεωμετρία της κατασκευής λόγω μηχανικής βλάβης, θα έχει άμεσο αντίκτυπο στη δυναμική της συμπεριφορά.

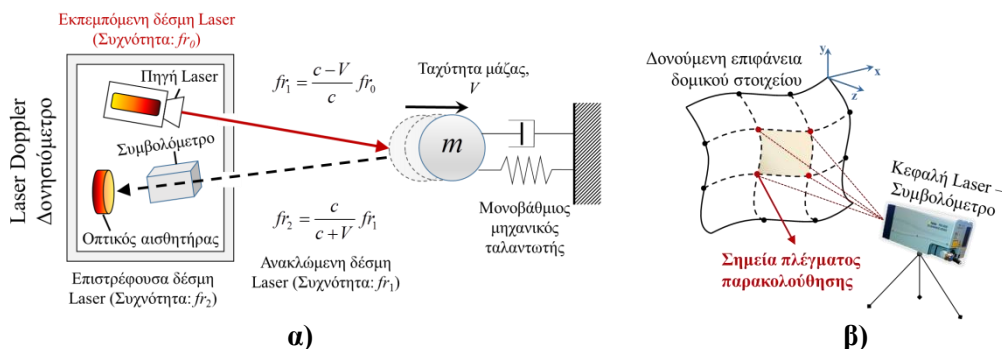
Η τεχνική της Δονησιομετρίας σάρωσης με Laser έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές εφαρμογές για τον προσδιορισμό των μορφών ταλάντωσης και των δυναμικών χαρακτηριστικών διαφόρων δομικών συστημάτων. Σε αυτές συμπεριλαμβάνονται κατά κύριο λόγο οι εφαρμογές που έχουν να κάνουν με τη δυναμική ανάλυση μεταλλικών κατασκευών ή δομικών στοιχείων (An et al, 2013, Siringoringo & Fujino, 2009, Staszewski et al, 2007) και την αποτύπωση της δυναμικής απόκρισης κινητών στοιχείων μηχανών και κελυφών μηχανών (Chen & McKillip, 2007, Halkon, 2004, Rothberg et al, 2016). Εφαρμογές επίσης της μεθόδου LSV έχουν παρουσιαστεί σχετικά με τη δυναμική ανάλυση και τον εντοπισμό βλαβών σε σύνθετα υλικά (Kudela, 2016), έργα τέχνης, μωσαϊκά, τοιχογραφίες και γενικά μνημειακές κατασκευές (Agnani & Esposito, 2003, Castellini et al, 2004, Collini et al, 2011, Rothberg et al, 2016), αλλά και στη χαρτογράφηση των περιοχών αποκόλλησης στρωμάτων συγκόλλησης δύο σωμάτων ή συνθετικών επικαλύψεων δομικών στοιχείων (Beyer et al, 2004). Στο πεδίο του ΜΚΕ δομικών στοιχείων σκυροδέματος η επιστημονική αρθρογραφία είναι σχετικά περιορισμένη, δημιουργώντας ένα αντικείμενο πρόσφορο για καινοτόμα έρευνα. Κάποιες αξιοσημείωτες εργασίες σχετικά με τον εντοπισμό και τη χαρτογράφηση βλαβών σε σκυρόδεμα έχουν δημοσιευτεί από τους Akamatsu et al (2013), Khan et al (2000) και Sugimoto et al (2011), ενώ σημαντική κρίνεται και η εργασία των Chen et al (2015) σχετικά με την εφαρμογή της μεθόδου LSV στην παρακολούθηση της δυναμικής απόκρισης ενός δομικού στοιχείου σκυροδέματος ενισχυμένο με FRP (Fiber Reinforced Plastic) και την ανίχνευση της αποκόλλησης του FRP.

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την εφαρμογή της μεθόδου LSV για την παρακολούθηση του τρόπου ταλάντωσης μιας κατασκευής από σκυρόδεμα και το πως αυτός επηρεάζεται όταν εκδηλωθεί μια μηχανική βλάβη. Για την πραγματοποίηση της σάρωσης παρασκευάστηκαν δοκοί ινοπλισμένου σκυροδέματος, οι οποίες εξωθήθηκαν σε καμπτική αστοχία μέσω της δοκιμής της κάμψης τριών σημείων. Επιλέχθηκε ο τύπος του ινοπλισμένου σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες για να επιτευχθεί η εκδήλωση μιας ελεγχόμενης εφελκυστικής αστοχίας, ώστε να μπορέσει να μελετηθεί η ανάπτυξης της βλάβης σε διαφορετικά στάδια σοβαρότητας. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την σάρωση είναι το Δονησιόμετρο Σάρωσης με Laser PSV-500H της εταιρίας Polytec Inc (Polytec Inc,

2017). Από την πειραματική διαδικασία διαπιστώθηκε ότι ανάλογα με τον τύπο της βλάβης, όταν η κατασκευή διεγερθεί με συγκεκριμένο ενεργειακό και συχνοτικό περιεχόμενο, εμφανίζονται μορφές ταλάντωσης-ιδιομορφές (vibration patterns) οι οποίες υποδηλώνουν μεταβολή-διαταραχή της συνέχειας της κατασκευής και των δομικών της χαρακτηριστικών. Τέλος, μέσω μιας μεθοδολογίας χαρτογράφησης η οποία συνδυάζει την απόδοση εκτιμώμενης τιμής της ταχύτητάς ταλάντωσης στα σημεία ενός κανάβου αξιοποιώντας τα κοντινότερα σημεία παρακολούθησης, με την πολωνυμική εξομάλυνση των εκτιμώμενων τιμών, επιτεύχθηκε η αξιόπιστη και παραστατική καταγραφή των τύπων ταλάντωσης της κατασκευής για τα διάφορα στάδια βλάβης.

ΣΑΡΩΣΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΜΕ LASER (LASER SCANNING VIBROMETRY-LSV)

Η αρχή λειτουργίας της Δονησιομετρίας Σάρωσης με Laser (LSV) στηρίζεται στην παρατήρηση του φαινομένου Doppler μιας ακτίνας Laser συγκεκριμένου μήκους κύματος η οποία προσπίπτει πάνω σε μια επιφάνεια που ταλαντώνεται. Η ανακλώμενη ακτινοβολία επιστρέφει στο σημείο εκπομπής και ανιχνεύεται από ένα οπτικό ανιχνευτή (photodetector). Μέσω μιας διατάξεως συμβολομετρίας (μελέτη της συμβολής των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων) καταγράφεται η διαφορά φάσης λόγω του φαινομένου Doppler Δfr , μεταξύ της εκπεμπόμενης δέσμης, συχνότητας fr_0 και της επιστρέφουσας δέσμης, συχνότητας fr_2 (Σχήμα 1 α) (Halkon, 2004).



Σχήμα 1. α) Αρχή λειτουργίας σημειακής μέτρησης ταχύτητας με βάση το φαινόμενο Doppler μιας δέσμης Laser. β) Πολύ-σημειακή Σάρωση Μηχανικών Ταλαντώσεων με Laser.

Στο **Σχήμα 1 α** απεικονίζεται ο προσδιορισμός της ταχύτητας ταλάντωσης της μάζας ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή με τη χρήση της μεθόδου LSV, για την περίπτωση που η μάζα απομακρύνεται από τη διάταξη του Laser Doppler Δονησιόμετρου (Laser Doppler Vibrometer – LDV). Η ενδιάμεση συχνότητα fr_1 είναι η φαινόμενη συχνότητα που φτάνει στη ταλαντευόμενη μάζα και ανακλάται από αυτή λόγω της σχετικής κίνησης μεταξύ πηγής και στόχου. Από τη διαφορά φάσης Δfr είναι δυνατό

να προσδιοριστεί η ταχύτητα ταλάντωσης του σημείου μελέτης στο πεδίο του χρόνου και να υπολογιστούν τα φάσματα απόκρισης Fourier. Η ταχύτητα ταλάντωσης V του σημείου προβολής της δέσμης Laser υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (βλ. **Σχήμα 1 α**):

$$\Delta f_r = f_{r_2} - f_{r_0} = \left(\frac{c+V}{c-V} - 1 \right) f_{r_0} \stackrel{c=\lambda f_{r_0}}{=} \frac{2V}{c-V} f_{r_0} = \frac{2Vc}{(c-V)\lambda} \stackrel{V \ll c}{\approx} \frac{2V}{\lambda} \Rightarrow$$

$$V = \frac{1}{2} \lambda \Delta f_r \quad (1)$$

όπου $c=3e+8$ (m/s) η ταχύτητα διάδοσης της δέσμης Laser (ταχύτητα φωτός), λ το μήκος κύματος της δέσμης Laser, f_{r_0} , f_{r_1} και f_{r_2} οι συχνότητες της εκπεμπόμενης, της ανακλώμενης από τη μάζα και της επιστρέφουσας δέσμης Laser.

Η πολύ-σημειακή συλλογή των δεδομένων της ταχύτητας ταλάντωσης που παρέχει η τεχνική LSV (**Σχήμα 1 β**), δίνει τη δυνατότητα μελέτης της χωρικής κατανομής του συγκεκριμένου μεγέθους, επιτρέποντας τη χαρτογράφηση του τρόπου ταλάντωσης της κατασκευής και την υλοποίηση μιας πειραματικής ιδιομορφικής ανάλυσης (experimental modal analysis). Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί η εργασία των Siringoringo & Fujino (2009), στην οποία γίνεται εκτενής ανάπτυξη της μεθοδολογίας ιδιομορφικής ανάλυσης μιας κατασκευής, με βάση την πολύ-σημειακή καταγραφή της δυναμικής απόκρισης με την εφαρμογή της τεχνικής LSV. Η καταγραφή της ταχύτητας γίνεται συνήθως στο πεδίο του χρόνου, ενώ στη συνέχεια μέσω του μετασχηματισμού Fourier, σε κάθε σημείο του πλέγματος παρακολούθησης, υπολογίζεται το φάσμα απόκρισης το οποίο και αποκαλύπτει τις συχνότητες συντονισμού της κατασκευής αλλά και τα αντίστοιχα φασματικά πλάτη.

ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΟΛΥΩΝΥΜΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ

Τα δεδομένα που προκύπτουν από τη διαδικασία σάρωσης της ταχύτητας ταλάντωσης πάνω στα σημεία του πλέγματος παρακολούθησης είναι δυνατό να οργανωθούν σε συμπαγή μητρική μορφή διευκολύνοντας με αυτόν τον τρόπο την μετα-επεξεργασία τους. Τα φάσματα απόκρισης Fourier της ταχύτητας ταλάντωσης για κάθε σημείο σάρωσης $p(x_p, y_p)$ μπορούν να οργανωθούν σε μορφή δισδιάστατου μητρώου, το οποίο καλείται πίνακας πλάτους ταχύτητας \mathbf{V}^{meas} και ορίζεται ως εξής:

$$\mathbf{V}_{(N \times N_p)}^{\text{meas}} = [V_{n,p}^{\text{meas}}] \quad , n = 1 : N \quad (2)$$

όπου N_p ο αριθμός των σημείων του πλέγματος παρακολούθησης, N ο αριθμός των σημείων εφαρμογής του μετασχηματισμού Fourier και $V_{n,p}^{\text{meas}}$ το πλάτος ταχύτητας Fourier που καταγράφεται στο σημείο $p(x_p, y_p)$ και αντιστοιχεί στη συχνότητα:

$$fr_n = \frac{n-1}{N-1} fr_s \quad (3)$$

όπου fr_s η συχνότητα δειγματοληψίας των χρονοϊστοριών της ταχύτητας. Σε κάθε διαδικασία χαρτογράφησης είναι απαραίτητο να οριστεί η χωρική και η θεματική πληροφορία. Στη περίπτωση της Σάρωσης Ταλαντώσεων η χωρική πληροφορία είναι οι συντεταγμένες των σημείων σάρωσης ενώ ως θεματική πληροφορία μπορεί να οριστεί μια μεταβλητή η οποία προκύπτει από τις μετρήσεις του Δονησιόμετρου και αποτυπώνει τη δυναμική απόκριση κάθε σημείου σάρωσης. Για κάθε συχνότητα του φάσματος Fourier fr_n μπορεί να οριστεί το διάνυσμα \mathbf{v}^n το οποίο περιγράφει το πλάτος Fourier των ταχυτήτων ταλάντωσης σε όλα τα σημεία N_p του πλέγματος παρακολούθησης και γράφεται ως εξής:

$$\mathbf{v}^n_{(N_p \times 1)} = [V_p^n] \quad (4)$$

Σε μια διαδικασία ιδιομορφικής ανάλυσης δεν χρειάζεται να χαρτογραφηθεί το πλάτος των τιμών απόκρισης της ταλάντωσης σε όλες τις συχνότητες της ανάλυσης Fourier αλλά μόνον σε αυτές που εμφανίζονται οι χαρακτηριστικές κορυφές συντονισμού. Έτσι αφού διαπιστωθεί από την πρώτη μετα-επεξεργασία των δεδομένων σάρωσης που εμφανίζονται αξιόλογες κορυφές, επιλέγονται τα πλάτη που αντιστοιχούν στην συχνότητα της κορυφής για όλα τα σημεία σάρωσης και διαμορφώνεται το διάνυσμα της Εξίσωσης (4).

Η δισδιάστατη κατανομή της ταχύτητας για κάθε συχνότητα ελέγχου και ο υπολογισμός των αντίστοιχων χαρτών στην περιοχή που εξετάζεται, επιτυγχάνεται με την εκτίμηση των τιμών της ταχύτητας πάνω στα σημεία $q_{i,j}(x_j, y_i)$ ενός επίπεδου ορθογώνιου κανάβου διαστάσεων $N \times M$ όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2**. Αρχικά γίνεται μια πρώτη εκτίμηση της τιμής του πλάτους της ταχύτητα πάνω στα σημεία του κανάβου χαρτογράφησης, με την μέθοδο της μέσης τιμής των N_c κοντινότερων σημείων σάρωσης, σύμφωνα με την εξίσωση:

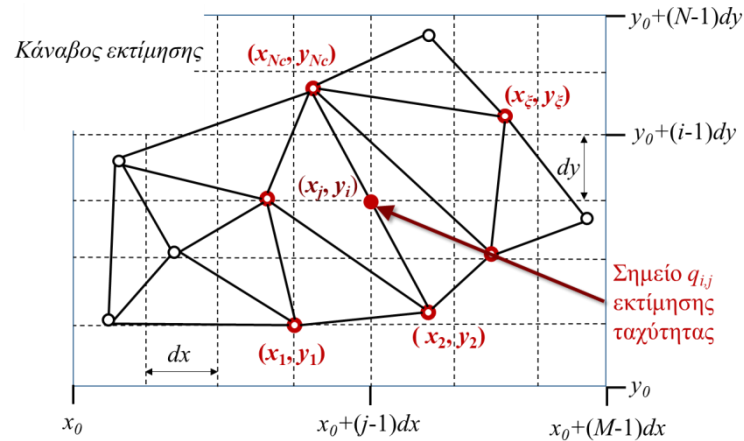
$$V_{i,j}^{avg} = \frac{1}{N_c} \sum_{\xi=1}^{N_c} V_{\xi}^n \quad (5)$$

Εφόσον γίνει η αρχική εκτίμηση πραγματοποιείται η διαδικασία της πολυωνμικής εξομάλυνσης του χάρτη που προκύπτει. Πρώτα για κάθε γραμμή i του κανάβου, γίνεται ο υπολογισμός των τιμών παλινδρόμησης σύμφωνα με το πολυώνυμο:

$$V_{i,j}^x = \sum_{k=1}^{m_x} a_{i,k} x_j^{k-1} \quad (6)$$

όπου m_x-1 είναι η τάξη του πολυωνύμου και $a_{i,k}$ οι συντελεστές του πολυωνύμου. Οι συντελεστές του πολυωνύμου προκύπτουν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων

χρησιμοποιώντας ως διάνυσμα εξαρτημένης μεταβλητής τις αρχικές τιμές εκτίμησης $V_{i,j}^{avg}$, που αντιστοιχούν στην i γραμμή του κανάβου.



Σχήμα 2. Κανάβος εκτίμησης τιμών ταχύτητας με βάση τις μετρήσεις που λαμβάνονται στο πλέγμα παρακολούθησης.

Στο επόμενο και τελευταίο στάδιο της χαρτογράφησης, πραγματοποιείται η παλινδρόμηση για κάθε στήλη του εξομαλυμένου κατά την οριζόντια διεύθυνση, πίνακα $\mathbf{V}^x = [V_{i,j}^x]$ σύμφωνα με το πολυώνυμο:

$$V_{i,j}^{fin} = V_{i,j}^y = \sum_{k=1}^{m_y} b_{k,j} y_i^{k-1} \quad (7)$$

όπου αντίστοιχα με την Εξίσωση (6), $m_y - 1$ είναι η τάξη του πολυωνύμου και $b_{k,j}$ οι συντελεστές του πολυωνύμου, οι οποίοι προκύπτουν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, χρησιμοποιώντας ως διάνυσμα εξαρτημένης μεταβλητής τις τιμές του εξομαλυμένου κατά τον οριζόντιο άξονα χάρτη ταχυτήτων $V_{i,j}^x$.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΚΑΙ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΒΛΑΒΗΣ ΔΟΚΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση της δυνατότητας εφαρμογής της μεθόδου Δονησιομετρίας Σάρωσης με Laser (LSV) στον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας στοιχείων σκυροδέματος με βάση τις μεταβολές που εκδηλώνουν στον τρόπο ταλάντωσης τους. Ως αντικείμενο διερεύνησης χρησιμοποιήθηκαν δοκοί ινοπλισμένου σκυροδέματος διαστάσεων 750x150x90 (mm). Η έρευνα επικεντρώθηκε αρχικά στην αξιόπιστη αποτύπωση των μορφών ταλάντωσης και σε δεύτερο στάδιο στην αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας της δοκού με βάση τον

τρόπο μεταβολής τους. Τα δοκίμια δοκών υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων (**Σχήμα 3 α**) η οποία σε συνδυασμό με την ινοπλισμένη δομή των δοκών, επέτρεψε την σταδιακή ανάπτυξη μιας εφελκυστικής αστοχίας στο σημείο εφαρμογής του καμπτικού φορτίου. Το άνοιγμα της δοκού μετά την τοποθέτηση της στις στηρίξεις της διατάξεως της κάμψης διαμορφώθηκε στα 450 (mm). Τα διαφορετικά στάδια ανάπτυξης της βλάβης που μελετήθηκαν είναι τα ακόλουθα:

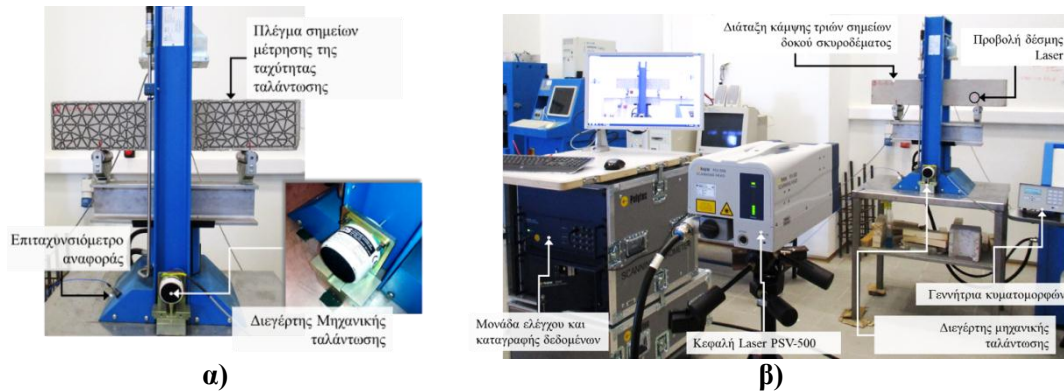
- **Στάδιο Βλάβης 0:** Δοκός άθικτη χωρίς μηχανικές βλάβες
- **Στάδιο Βλάβης I:** Έναρξη της εφελκυστικής αστοχίας
- **Στάδιο Βλάβης II:** Επέκταση εφελκυστικής ρωγμής – Ολική διάρρηξη της συνέχειας της δοκού

Τα παραπάνω Στάδια Βλάβης προέκυψαν με την εφαρμογή κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης με έλεγχο φορτίου μετά από κάθε στάδιο βλάβης και χρησιμοποιώντας ρυθμό φόρτισης 0.5 (kN/s). Το φορτίο της αρχικής αστοχίας (Στάδιο Βλάβης I) κυμάνθηκε μεταξύ 12-15 (kN), ενώ το καμπτικό φορτίο στο οποίο ολοκληρώθηκε η δοκιμή (Στάδιο Βλάβης II) κυμάνθηκε μεταξύ 4-6 (kN). Οι χαλύβδινες ίνες μήκους 45 (mm) οι οποίες διασπάρθηκαν στη μάζα του σκυροδέματος, επιτυγχάνουν να αποτρέψουν την κατάρρευση του στοιχείου επιτρέποντας την διατήρηση της γεωμετρικής συνέχειας που απαιτείται για υλοποιηθεί η διαδικασία της σάρωσης.

Η δυναμική διέγερση της κατασκευής αποτέλεσε και αυτή ένα ζήτημα διερεύνησης, καθώς το σκυρόδεμα, σε αντίθεση με τα μεταλλικά δομικά στοιχεία, παρουσιάζει κάποιες δομικές ιδιαιτερότητες οι οποίες δυσκολεύουν την εφαρμογή των δυναμικών μεθόδων ΜΚΕ. Λόγω της μικροδομής του σκυροδέματος, οι διατομές των δομικών στοιχείων που παρασκευάζονται είναι τουλάχιστον μερικές δεκάδες χιλιοστά, αναλόγως του δομικού στοιχείου και του μέγιστου κόκκου των αδρανών υλικών, και σίγουρα πάνω 70 (mm). Οι διατομές αυτές είναι κατά πολύ μεγαλύτερες των αντίστοιχων μεταλλικών κατασκευών καθιστώντας τα δομικά στοιχεία σημαντικού βάρους και δύσκαμπτα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται ένα σημαντικό ποσό μηχανικής ενέργειας για ενεργοποιηθούν οι μορφές ταλάντωσης εκείνες που θα επιτρέψουν την απεικόνιση της βλάβης.

Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο διεγέρτης μηχανικών ταλαντώσεων LDS-V101 της εταιρίας Bruel & Kjaer Sound and Vibration, του οποίου η ακίδα κρούσης τοποθετήθηκε σε επαφή με το πλαίσιο της μηχανής κάμψης, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3 α**. Η διεύθυνση της δύναμης ταλάντωσης είναι κάθετη στο επίπεδο της κάμψης και παράλληλη με τη δέσμη Laser. Η ενεργοποίηση του διεγέρτη μηχανικών ταλαντώσεων έγινε μέσω μιας γεννήτριας κυματομορφών στέλλοντας ένα συνεχές ημιτονοειδές σήμα πλάτους 1 Volt το οποίο δίνει μέσω του διεγέρτη μια δύναμη με πλάτος μέχρι και 8.9 (N). Για κάθε στάδιο βλάβης έγιναν σαρώσεις της ταχύτητας ταλάντωσης χρησιμοποιώντας συχνότητες διέγερσης 200, 300, 350, 500 και 600 (Hz). Στις χαμηλές συχνότητες διέγερσης, 200 και 300 (Hz), δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική διαφορά της μορφής ταλάντωσης για τα διαφορετικά στάδια βλάβης. Αντίθετα, όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, για συχνότητες διέγερσης 500

Hz και 600 Hz η δημιουργία της ρωγμής μεταβάλλει χαρακτηριστικά τη μορφή της ταλάντωσης στις συχνότητες συντονισμού.



Σχήμα 3. α) Πλέγμα παρακολούθησης δοκού στην μηχανή της κάμψης τριών σημείων. β) Πειραματική διάταξη σάρωσης δοκού με το σύστημα PSV-500H.

Στο **Σχήμα 3 β** απεικονίζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την σάρωση με τη μέθοδο LSV των δοκών σκυροδέματος. Η διαδικασία σάρωσης και συλλογής δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του πλέον σύγχρονου Δονησιόμετρου Σάρωσης με Laser PSV-500H της Polytec Inc, το οποίο διαθέτει το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής του Πολυτεχνείου Κρήτης (Πίνακας 1). Το πλέγμα παρακολούθησης κάθε δοκού που απεικονίζεται στο **Σχήμα 3 α** ορίζεται από **125** σημεία σάρωσης και αποτελείται από δύο τμήματα, καθώς το πλαίσιο της μηχανής κάμψης εμποδίζει τη λήψη μετρήσεων στο μέσο της δοκού.

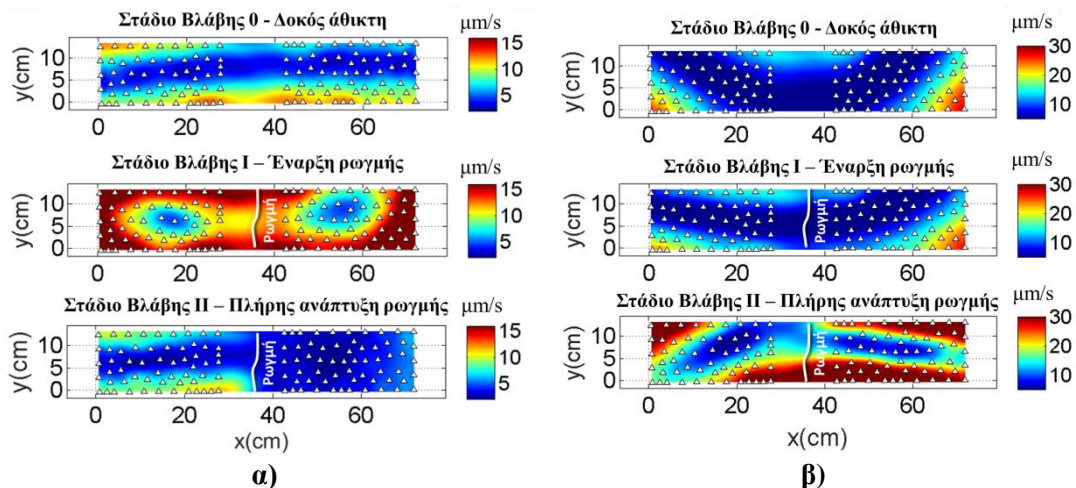
Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος PSV-500H (Polytec Inc, 2017)

Τύπος Laser:	He-Ne
Μήκος Κύματος:	633nm (red)
Απόσταση λειτουργίας από το αντικείμενο σάρωσης:	125 mm-100 m, ανάλογα με τις συνθήκες φωτισμού και ανακλαστικότητα του σώματος
Εύρος συχνοτήτων δυναμικής κίνησης που μπορεί να καταγραφεί :	0.1-100 kHz
Μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας στο πεδίο του χρόνου fr_s:	250 kHz

Η ταχύτητα ταλάντωσης λήφθηκε στο πεδίο του χρόνου με συχνότητα δειγματοληψίας $fr_s=3125$ (Hz), δίνοντας ένα χρονικό βήμα $dt=1/fr_s=32$ (ms) ενώ το φάσμα απόκρισης Fourier υπολογίστηκε για $N_f=800$ σημεία ανάλυσης. Το εύρος των

συχνοτήτων του φάσματος Fourier που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση είναι μεταξύ 100 και 1550 (Hz) με βήμα συχνότητας $df = fr_s / (N_f - 1) = 3125 / 800 = 3.9$ (Hz).

Στο **Σχήμα 4** παρουσιάζεται το τελικό αποτέλεσμα της συνδυασμένης δισδιάστατης πολυωνυμικής χαρτογράφησης για τις περιπτώσεις που η δοκός διεγείρεται από ημιτονοειδείς κυματομορφές συχνοτήτων 500 και 600 (Hz). Η πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι η διαδικασία της δισδιάστατης πολυωνυμικής παλινδρόμησης αποδίδει αξιόπιστα τη μορφή της ταλάντωσης της δοκού ακόμη και στο ενδιάμεσο τμήμα της όπου λόγω της ύπαρξης του πλαισίου της μηχανής κάμψης δεν λήφθηκαν μετρήσεις (**Σχήμα 3 α**). Η διαφοροποίηση του τρόπου ταλάντωσης της δοκού μεταξύ των διαφορετικών Σταδίων της Βλάβης είναι ευκρινέστατη και για τις δύο εξεταζόμενες συχνότητες, αναδεικνύοντας την μηχανική ασυνέχεια που προκαλεί η εκδήλωση της ρωγμής στο μέσο της δοκού. Επιπλέον καθώς η βλάβη επεκτείνεται (Στάδιο Βλάβης II) νέες μορφές ταλάντωσης αναδεικνύονται τονίζοντας την πλήρη αποσύνδεση του τρόπου ταλάντωσης στα δύο μέρη εκατέρωθεν της ρωγμής λόγω της διάρρηξης της δομικής συνέχειας της δοκού.



Σχήμα 4. Χαρτογράφηση κατανομής πλάτους Fourier για συχνότητα α) 500 (Hz) και β) 600 (Hz), με την εφαρμογή δισδιάστατης παλινδρόμησης για τα διαφορετικά στάδια ανάπτυξης της βλάβης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία για την ανέπαφη και απομακρυσμένη παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα με τη μέθοδο της Σάρωσης Ταλαντώσεων με Laser. Η δυναμική απόκριση ενός δομικού συστήματος διαμορφώνεται και καθορίζεται τόσο από τις μηχανικές ιδιότητες των δομικών υλικών όσο και την γεωμετρία του φορέα. Η οποιαδήποτε μηχανική βλάβη εκδηλωθεί θα επηρεάσει

άμεσα κάποια από τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Η πολύ-σημειακή καταγραφή της ταχύτητας ταλάντωσης σε μια κατασκευή επιτρέπει τη μελέτη της χωρικής κατανομή των δυναμικών χαρακτηριστικών. Με την εφαρμογή μιας μεθόδου συνδυασμένης απόδοσης εκτιμώμενης τιμής σε έναν κλίμακα χαρτογράφησης και δισδιάστατης πολυωνυμικής εξομάλυνσης των εκτιμώμενων τιμών επιτεύχθηκε η αξιόπιστη χαρτογράφηση του τρόπου ταλάντωσης μιας δοκού ινοπλισμένου σκυροδέματος για τα διαφορετικά στάδια μιας εφελκυστικής βλάβης. Η ύπαρξη της ρωγμής μεταβάλλει τη δυναμική απόκριση του συστήματος και αυτό αποτυπώθηκε ευκρινώς τόσο στα καταγραφόμενα φάσματα απόκρισης Fourier όσο και στους χάρτες των μορφών ταλάντωσης των δοκών. Η παραπάνω μεθοδολογία με ορισμένες τροποποιήσεις θα μπορούσε να βρει εφαρμογή και στο ανέπαφο και απομακρυσμένο ΜΚΕ ιστορικών κατασκευών οι οποίες αποτελούνται από τοιχοποιία, όπως και στην ανίχνευση βλαβών σε μνημειακά έργα τέχνης όπως μαρμάρινα αγάλματα και ψηφιδωτά.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το ερευνητικό έργο και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη εργασία, αποτελούν τμήμα μεταδιδακτορικής έρευνας η οποία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής του Πολυτεχνείου Κρήτης και χρηματοδοτήθηκε από την Επιτροπή Ερευνών του Ειδικού Λογαριασμού Κονδυλίων έρευνας του Πολυτεχνείου Κρήτης, την περίοδο Οκτ. 2016 – Σεπ. 2017 (Περισσότερα www.lsvcomand.wordpress.com).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Agnani, A. & Esposito, E., “Scanning Laser Doppler Vibrometry Application to Artworks: New Acoustic and Mechanical Exciters for Structural Diagnostics”, in Proceedings of the Lasers in the Conservation of Artworks LACONA V (Osnabrueck Germany Sep. 15-18, 2003), Springer-Verlag, Heidelberg, Germany (2005) 499-504

Akamatsu, R., Sugimoto, T., Utagawa, N. & Katakura, K., “Proposal of Non Contact Inspection Method for Concrete Structures Using High-Power Directional Sound Source and Scanning Laser Doppler Vibrometer”. Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 52 (2013) 07HC12

An, Y.K., Kwon, Y. & Sohn, H., “Noncontact laser ultrasonic crack detection for plates with additional structural complexities”. Structural Health Monitoring, Vol. 12, No 5-6 (2013) 522–538

Beyer, S., Gornicki, D. & Muller, G., “Analysis of laser-induced vibrations to detect non-adhesive regions of coatings”. Appl Phys, Vol. 79, No A (2004) 1501–1504

Castellini, P., Esposito, E., Marchetti, B., Paone, N. & Tomasini, E.P., “New applications of Scanning Laser Doppler Vibrometry (SLDV) to non-destructive diagnostics of artworks: mosaics, ceramics, inlaid wood and easel painting”. Journal of Cultural Heritage, Vol. 4 (2004) 321–329

Chen, F. & McKillip, D., "Measurement and analysis of vibration and deformation using laser metrology for automotive application". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 221, No 6 (2007) 725-738

Chen, J.G., Haupt, R.W. & Büyüköztürk, O., "Operational and defect parameters concerning the acoustic-laser vibrometry method for FRP-reinforced concrete". NDT&E International, Vol. 71 (2015) 43–53

Collini, L., Garziera, R. & Mangiavacca, F., "Development, experimental validation and tuning of a contact-less technique for the health monitoring of antique frescoes". NDT&E International, Vol. 44 (2011) 152–157.

Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B. & Shevitz, D.W., "Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review". Los Alamos National Laboratory, New Mexico, Report No: LA-13070-MS (1996)

Halkon, B.J., "Laser Doppler Vibrometry for vibration measurements on rotating structures". PhD Dissertation, Loughborough University, Leicestershire UK (2004)

Khan, A.Z., Stanbridge, A.B. & Ewins, D.J., "Detecting damage in vibrating structures with a scanning LDV". Optics and Lasers in Engineering, Vol. 32 (2000) 583-592

Kudela, P., Wandowski, T., Malinowski, P. & Ostachowicz, W., "Application of scanning laser Doppler vibrometry for delamination detection in composite structures". Optics and Lasers in Engineering, (2016) doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.10.022

Maierhofer, C., Reinhardt, H.W. & Dobmann, G., "Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures. Volume 2: Non-destructive testing methods". Woodhead Publishing Limited (2010)

Polytec Inc, PSV-500 Scanning Vibrometer: Datasheet. Polytec Inc web published (2017)

Rothberg, S.J., Allen, M.S., Castellini, P., Di Maio, D., Dirckx, J.J.J, Ewins, D.J. et al., "An international review of laser Doppler vibrometry: Making light work of vibration measurement". Optics and Lasers in Engineering, (2016) doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.10.023

Siringoringo, D.M. & Fujino, Y., "Noncontact Operational Modal Analysis of Structural Members by Laser Doppler Vibrometer". Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 24 (2009) 249–265

Staszewski, W.J., Lee, B.C. & Traynor, R., "Fatigue crack detection in metallic structures with Lamb waves and 3D laser vibrometry". Meas Sci Technol, Vol. 18 (2007) 727–739

Sugimoto, T., Akamatsu, R., Utagawa, N. & Tsujino, S., "Study on Non Contact Acoustic Imaging Method for Non Destructive Inspection using SLDV and LRAD", IEEE International Ultrasonic Symposium Proceedings 2011, (2011) doi: 10.1109/ULTSYM.2011.0181