

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Γ. ΣΙΟΡΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΟΥΧΟΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΛΟΓΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ, MSc

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΓΕΩΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΕΣ
ΜΕΘΟΔΟΥΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΠΑΤΡΑ 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του συγγραφέα/ δημιουργού που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/ δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/ δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/ δημιουργού. Ο συγγραφέας/ δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Αφιερώνεται στους γονείς μου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί την κατάληξη μιας πορείας πολλών ετών, η οποία δεν θα ήταν εφικτή χωρίς τη συμβολή ορισμένων ανθρώπων και φορέων που οφείλω να αναφέρω.

Πρωτίστως, εκφράζω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα της διατριβής, κ. Παναγιώτη Πελέκη, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναλαμβάνοντας την επίβλεψη του εν λόγω ερευνητικού θέματος, καθώς και για την επιστημονική καθοδήγηση και τη συνεχή υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης. Πέρα από τον επίσημο ρόλο του ως επιβλέποντα, η φιλία και η συνύπαρξή μας στην ίδια ερευνητική ομάδα υπήρξε καθοριστική για τη διαμόρφωση της σκέψης και των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στις σελίδες που ακολουθούν.

Ευχαριστώ θερμά τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, τον κ. Γεώργιο Χατζηγεωργίου, Καθηγητή της Σχολής Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου, και τον κ. Νικόλαο Πνευματικό, Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για τις εύστοχες παρατηρήσεις και τις ουσιαστικές υποδείξεις τους.

Ξεχωριστή θέση στις ευχαριστίες μου κατέχει ο κ. Κωνσταντίνος Π. Αντωνόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής του Τμήματος Εκπαιδευτικών Πολιτικών Μηχανικών της ΑΣΠΑΙΤΕ, συνάδελφος, φίλος και βασικό μέλος της ερευνητικής μας ομάδας, για την πολύτιμη συμβολή του στο πειραματικό σκέλος της εργασίας και για τις γόνιμες επιστημονικές συζητήσεις που έχουμε όλα αυτά τα χρόνια.

Επίσης, ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Geraldo D. Osmani, μέλος της ίδιας ερευνητικής ομάδας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, για τη συνεργασία και τη συμβολή του στην ερευνητική προσπάθεια.

Η ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής στηρίχθηκε στη συνδρομή τριών ιδρυμάτων. Το Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, ως κύριος φορέας εκπόνησης, παρείχε το ακαδημαϊκό πλαίσιο για την υλοποίησή της. Η Ανώτατη Σχολή Παιδαγωγικής και Τεχνολογικής Εκπαίδευσης (ΑΣΠΑΙΤΕ) χρηματοδότησε την πρώτη εκ των δύο δημοσιεύσεων σε διεθνές επιστημονικό περιοδικό, καθώς και μία εκ των τριών δημοσιεύσεων σε πρακτικά διεθνών συνεδρίων που προέκυψαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, ενώ διέθεσε τον εξοπλισμό και τα λογισμικά του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος & Τεχνολογίας Δομικών Υλικών του Τμήματος Εκπαιδευτικών Πολιτικών Μηχανικών για τη διεξαγωγή των δισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων (PLAXIS 2D), την προετοιμασία των δοκιμών σκυροδέματος, την κοπή των πυρήνων, καθώς και την εκτέλεση των δοκιμών ταχύτητας υπερήχων (UPV) και ακουστικού συντονισμού (IE). Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω την ΑΣΠΑΙΤΕ για τη χορήγηση εκπαιδευτικής άδειας κατά το δεύτερο ήμισυ της εκπόνησης της διατριβής, η οποία υπήρξε καθοριστική για την ολοκλήρωσή της. Το Πανεπιστήμιο

Πατρών χρηματοδότησε τη δεύτερη δημοσίευση σε διεθνές περιοδικό και τις δύο εκ των τριών δημοσιεύσεων σε διεθνή συνέδρια, και διέθεσε τον εξοπλισμό και τα λογισμικά του Εργαστηρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής για τη διεξαγωγή των τρισδιάστατων αριθμητικών αναλύσεων (PLAXIS 3D), καθώς και για την εκτέλεση συμπληρωματικών δοκιμών ταχύτητας υπερηχητικού παλμού (UPV), ακουστικού συντονισμού (IE) και μονοαξονικής θλίψης (UCS). Σε όλους τους παραπάνω φορείς οφείλω ευγνωμοσύνη για την έμπρακτη υποστήριξη.

Πάνω από όλα όμως, η ολοκλήρωση αυτής της διατριβής δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την οικογένειά μου, που υπέμεινε όλη αυτή τη δοκιμασία μαζί μου. Στη σύζυγό μου Παναγιώτα οφείλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου γιατί ήταν πάντα δίπλα μου στις ώρες της αμφιβολίας, όταν η ολοκλήρωση φάνταζε μακρινή και για την αντοχή και την υπομονή της στα δύσκολα. Στην αδελφή μου Ελένη για την αμέριστη ψυχολογική υποστήριξη και γιατί κατάφερε με τα κλειδιά της να ξεκλειδώσει αρκετά από τα λουκέτα που έβαζα στις σκέψεις μου. Τέλος, στους γονείς μου, που πίστεψαν σ' εμένα από την αρχή.

Βασίλης Γ. Σιορίκης

Αθήνα, Μάιος 2026

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή διερευνά τη δυνατότητα αξιόπιστου προσδιορισμού των δυναμικών ελαστικών παραμέτρων σε κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος και γεωυλικών, με ιδιαίτερη έμφαση σε κοντούς κυλίνδρους ($L/D < 2$) όπως αυτοί που προκύπτουν κατά την πυρηνοληψία υφιστάμενων κατασκευών. Προς τον σκοπό αυτό, εξετάζονται συστηματικά δύο μέθοδοι μη καταστροφικών δοκιμών (NDT): η μέτρηση ταχύτητας υπερηχητικού παλμού (Ultrasonic Pulse Velocity – UPV) και η δοκιμή ακουστικού συντονισμού (Impact Echo – IE) κατά ASTM C215.

Η ερευνητική μεθοδολογία συνδυάζει εκτεταμένη αριθμητική προσομοίωση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και πλούσιο πειραματικό πρόγραμμα. Το αριθμητικό σκέλος περιλαμβάνει 156 παραμετρικές αναλύσεις στο λογισμικό PLAXIS 2D/3D: 72 αξονοσυμμετρικές αναλύσεις 2D για τον προσδιορισμό του διορθωτικού συντελεστή σχήματος (Shape Correction Factor – SCF), 24 τρισδιάστατες αναλύσεις για τους διορθωτικούς συντελεστές μάζας αισθητήρα (Mass Correction Factor – MCF) και αδράνειας (Inertia Correction Factor – ICF), και 60 αξονοσυμμετρικές αναλύσεις 2D για τη διερεύνηση του αυτόνομου προσδιορισμού του v_d μέσω της IE. Το πειραματικό σκέλος βασίζεται σε 232 πυρήνες σκυροδέματος από υφιστάμενες κατασκευές και 12 κυλινδρικά δοκίμια αλουμινίου και χάλυβα γνωστών ιδιοτήτων.

Η πρωτότυπη συνεισφορά της έρευνας εκτείνεται στους παρακάτω άξονες. Ποσοτικοποιείται για πρώτη φορά το σφάλμα που εισάγεται στον υπολογισμό του E_d μέσω της UPV όταν υιοθετείται αυθαίρετη τιμή του λόγου Poisson, αναδεικνύοντας τους περιορισμούς της μεθόδου ως αυτόνομης δοκιμής. Αναπτύσσεται ολοκληρωμένο σύστημα τριών διορθωτικών συντελεστών (SCF, MCF, ICF) ως αναλυτικών συναρτήσεων της λυγηρότητας L/D και του λόγου Poisson, μέσω στατιστικής παλινδρόμησης κλασματικών πολυωνύμων (Multivariable Fractional Polynomial – MFP), με πειραματική επαλήθευση σε δοκίμια χάλυβα και αλουμινίου. Προτείνεται η μεθοδολογία UPIES (UPV – Impact Echo Synergy) για τον ταυτόχρονο προσδιορισμό των E_d και v_d χωρίς την ανάγκη υιοθέτησης αυθαίρετης τιμής του λόγου Poisson. Διερευνώνται παράλληλα δύο εναλλακτικές μεθοδολογίες αυτόνομου προσδιορισμού του v_d αποκλειστικά μέσω της IE — βασιζόμενες στην καταγραφή πλευρικών και κατακόρυφων επιταχύνσεων — ενώ αξιολογείται και η δυνατότητα χρήσης του λόγου f_2/f_1 για τον ίδιο σκοπό. Τέλος, αναπτύσσονται εμπειρικές σχέσεις συσχέτισης της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής, των ταχυτήτων διάδοσης και ειδικού βάρους αξιοποιώντας το σύνολο του πειραματικού δείγματος.

Η πρακτική σημασία της έρευνας έγκειται στη δυνατότητα μείωσης των θέσεων πυρηνοληψίας κατά την αξιολόγηση υφιστάμενων κατασκευών, καθώς οι διορθωτικοί συντελεστές εξαρτώνται αποκλειστικά από τη γεωμετρία και τον λόγο Poisson — και όχι από το υλικό — γεγονός που επιτρέπει τη γενίκευσή τους σε βραχομάζες και άλλα γεωυλικά υπό τις ίδιες γεωμετρικές προϋποθέσεις.

Λέξεις-κλειδιά: Ακουστικός συντονισμός (Impact-Echo, IE), Ταχύτητα Υπερηχητικού Παλμού (Ultrasonic Pulse Velocity – UPV), Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων, Δυναμικός Λόγος Poisson, Δυναμικό Μέτρο Ελαστικότητας, Μη Καταστροφικές Δοκιμές, Διορθωτικός Συντελεστής Σχήματος, Κοντοί κύλινδροι, Πυρηνοληψία, Σκυρόδεμα, Γεωυλικά.

Numerical and Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Geomaterials and Concrete Using Non-Destructive Methods

ABSTRACT

This doctoral dissertation investigates the reliable determination of dynamic elastic parameters on cylindrical specimens of concrete and geomaterials, with particular emphasis on short cylinders ($L/D < 2$) such as those typically obtained by coring existing structures. To this end, two non-destructive testing (NDT) methods based on elastic wave propagation are systematically examined: Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) and the Impact Echo (IE) resonance frequency method in accordance with ASTM C215.

The research methodology combines extensive finite element method (FEM) numerical simulations with a comprehensive experimental programme. The numerical component comprises 156 parametric analyses carried out using PLAXIS 2D/3D software: 72 axisymmetric 2D analyses for the determination of the Shape Correction Factor (SCF), 24 three-dimensional analyses for the Mass Correction Factor (MCF) and Inertia Correction Factor (ICF), and 60 axisymmetric 2D analyses for investigating the autonomous determination of v_d through IE alone. The experimental component is based on 232 concrete cores extracted from existing structures and 12 aluminium and steel cylinders of known properties used for verification purposes.

The original contributions of this research span the areas outlined below. The error introduced in the calculation of E_d via UPV when an arbitrary Poisson's ratio is assumed is quantified for the first time, highlighting the limitations of UPV as a standalone test. A comprehensive system of three correction factors (SCF, MCF, ICF) is developed as analytical functions of the slenderness ratio L/D and Poisson's ratio through Multivariable Fractional Polynomial (MFP) regression and experimentally validated on steel and aluminium specimens. The UPIES methodology (Ultrasonic Pulse – Impact Echo Synergy) is proposed for the simultaneous determination of E_d and v_d through the combined use of UPV and IE, eliminating the need for an assumed Poisson's ratio. Two alternative methodologies for the autonomous determination of v_d exclusively through IE are also investigated, based on the recording of lateral and vertical accelerations along the free surface of the specimen, while the feasibility of using the f_2/f_1 frequency ratio for the same purpose is evaluated. Finally, empirical correlations relating uniaxial compressive strength, wave propagation velocities, and specific gravity are developed utilising the full experimental dataset.

The practical significance of this research lies in the potential to reduce the number of concrete cores required during the assessment of existing structures. The proposed correction factors depend solely on specimen geometry and Poisson's ratio — and not on

material type — thereby enabling their generalisation to rock cores and other geomaterials under the same geometric conditions.

Keywords: Impact-Echo (IE), Ultrasonic Pulse Velocity (UPV), Finite Element Method (FEM), Dynamic Poisson's Ratio, Dynamic Young's Modulus, Non-Destructive Testing (NDT), Shape Correction Factor, Short Cylinders, Core Testing, Concrete, Geomaterials.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	xviii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	xxiii
ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ	xxv
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	xxvii
Κεφάλαιο 1	1
1. Εισαγωγή	1
1.1 Επιστημονικό Υπόβαθρο	1
1.2 Ερευνητικό Πρόβλημα	3
1.2.1 Περιορισμοί της Μεθόδου UPV	3
1.2.2 Περιορισμοί της Μεθόδου IE	3
1.2.3 Ερευνητικό κενό στη Γεωμετρία Δοκιμίων	4
1.2.4 Κεντρικό Ερευνητικό Πρόβλημα	4
1.3 Στόχοι, Αντικείμενο και Ερευνητικά Ερωτήματα	5
1.3.1 Αντικείμενο Έρευνας	5
1.3.2 Γενικός Στόχος	5
1.3.3 Ειδικοί Στόχοι και Ερευνητικά Ερωτήματα	5
1.4 Σημαντικότητα της Έρευνας	7
1.4.1 Επιστημονική Συνεισφορά	7
1.4.2 Πρακτική Σημασία	7
1.5 Περιορισμοί της Έρευνας	8
1.5.1 Περιορισμοί Υλικών και Δειγμάτων	8
1.5.2 Περιορισμοί Γεωμετρίας	8
1.5.3 Περιορισμοί Περιβαλλοντικών Συνθηκών	9
1.5.4 Περιορισμοί Αριθμητικής Προσομοίωσης	9
1.5.5 Περιορισμοί Εξοπλισμού και Συχνοτήτων	9
1.5.6 Περιορισμοί Χρονικής Εξέλιξης	9
1.5.7 Στατιστικοί Περιορισμοί	9
1.6 Επισκόπηση της δομής της διατριβής	9
Κεφάλαιο 2	11

2.	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	11
2.1	Οι μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος	11
2.1.1	Μέτρο Ελαστικότητας (Young's Modulus)	11
2.1.2	Σχέση δυναμικού και στατικού μέτρου ελαστικότητας.....	13
2.1.3	Ο λόγος Poisson.....	20
2.2	Επισκόπηση καταστροφικών δοκιμών στο σκυρόδεμα	21
2.2.1	Εξέλιξη των καταστροφικών δοκιμών στην Ελλάδα	22
2.2.2	Πυρηνοληψία - Η κύρια καταστροφική δοκιμή.....	22
2.2.3	Παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα αντοχής in situ.....	22
2.2.4	Η «ελληνική μέθοδος» εξαγωγής καρφιών	23
2.2.5	Τρέχον κανονιστικό πλαίσιο	23
2.2.6	Μειονεκτήματα της πυρηνοληψίας.....	24
2.2.7	Συμπέρασμα.....	25
2.3	Επισκόπηση μη καταστροφικών δοκιμών στο σκυρόδεμα	25
2.3.1	Πρώιμες μηχανικές δοκιμές και προσεγγίσεις	26
2.4	Μέθοδος ταχύτητας παλμού υπερήχων – Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)	28
2.4.1	Ιστορικό υπόβαθρο της UPV	28
2.4.2	Αρχές της μεθόδου UPV	32
2.4.3	Παράγοντες Επιρροής στη δοκιμή UPV	36
2.4.4	Εφαρμογές.....	43
2.4.5	Εκτίμηση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας Young και υπολογισμός του δυναμικού λόγου Poisson	47
2.4.6	Πλεονεκτήματα της UPV	49
2.4.7	Μειονεκτήματα της UPV	50
2.4.8	Συσχέτιση με την μονοαξονική αντοχή σε θλίψη	51
2.5	Μέθοδος Κρούσης – Ηχούς – Impact – Echo (IE)	54
2.5.1	Ιστορικό υπόβαθρο της IE	56
2.5.2	Αρχές της μεθόδου IE.....	62
2.5.3	Παράγοντες Επιρροής στη δοκιμή IE	67
2.5.4	Εκτίμηση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας Young και υπολογισμός του δυναμικού λόγου Poisson	70

2.5.5	Πλεονεκτήματα της Impact Echo	75
2.5.6	Μειονεκτήματα της Impact Echo	76
2.5.7	Συσχέτιση με τη μονοαξονική αντοχή σε θλίψη	77
2.6	Συμπέρασμα	78
Κεφάλαιο 3		81
3.	Αριθμητική μεθοδολογία – Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων	81
3.1	Ιστορική Εξέλιξη της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων	81
3.2	Θεωρητική Θεμελίωση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων	82
3.2.1	Γενική Αρχή της Μεθόδου	82
3.2.2	Δυναμική Ανάλυση – Εξίσωση Κίνησης	83
3.2.3	Απόσβεση Rayleigh	84
3.2.4	Χρονική Ολοκλήρωση – Μέθοδος Newmark.....	84
3.3	Διάδοση Ελαστικών Κυμάτων σε Πεπερασμένα Κυλινδρικά Σώματα	85
3.3.1	Θεωρητικό Πλαίσιο	85
3.3.2	Ιδιοσυχνότητες Κυλινδρικών Δοκιμίων	86
3.4	Υπολογιστικό Περιβάλλον – Λογισμικό PLAXIS	86
3.4.1	Γενική Περιγραφή	86
3.4.2	Τύποι Πεπερασμένων Στοιχείων.....	87
3.4.3	Αξονοσυμμετρική Μοντελοποίηση.....	87
3.5	Καταστατικό Μοντέλο Υλικού	88
3.6	Παραμετροποίηση και Στρατηγική Αναλύσεων	89
3.6.1	Μέγεθος Δικτύου Πεπερασμένων Στοιχείων	89
3.6.2	Μοντελοποίηση Δυναμικής Διέγερσης.....	89
3.6.3	Ορισμός Υπολογιστικών Φάσεων	90
3.6.4	Εξαγωγή και Επεξεργασία Αποτελεσμάτων.....	91
3.7	Ανάλυση Ευαισθησίας – Μεθοδολογία OAT	91
3.8	Συμπέρασμα	92
Κεφάλαιο 4		93
4.	Ανάπτυξη διορθωτικών συντελεστών σχήματος	93
4.1	Εισαγωγή	93
4.2	Αριθμητική Προσομοίωση με Πεπερασμένα Στοιχεία	94

4.2.1	Μοντελοποίηση γεωμετρίας και οριακών συνθηκών	94
4.2.2	Κατασκευή δικτύου πεπερασμένων στοιχείων	95
4.2.3	Ορισμός υπολογιστικών φάσεων και χρονικών παραμέτρων	96
4.2.4	Εξαγωγή και επεξεργασία αποτελεσμάτων	96
4.2.5	Φάσματα ιδιοσυχνοτήτων	96
4.2.6	Επίδραση λόγου Poisson	98
4.2.7	Επαλήθευση αξιοπιστίας αριθμητικών αναλύσεων	99
4.3	Προσαρμογή Εμπειρικής Εξίσωσης Διορθωτικού Συντελεστή Σχήματος (SCF)	100
4.3.1	Ορισμός Μεταβλητών και Φυσική Ερμηνεία	100
4.3.2	Μεθοδολογία Προσαρμογής	100
4.3.3	Αποτελέσματα – 1 ^η Ιδιομορφή (Mode 1)	100
4.3.4	Αποτελέσματα – 2 ^η Ιδιομορφή (Mode 2)	102
4.3.5	Συγκριτική Αξιολόγηση Mode 1 – Mode 2	103
	Κεφάλαιο 5	105
5.	Ανάπτυξη διορθωτικών συντελεστών μάζας και αδράνειας	105
5.1	Προσομοίωση δοκιμών αλουμινίου και χάλυβα και ανάπτυξη διορθωτικών συντελεστών μάζας και αδράνειας	105
5.2	Επίδραση μάζας αισθητήρα	107
5.3	Επίδραση της αδράνειας	107
	Κεφάλαιο 6	108
6.	Προσδιορισμός Δυναμικού Λόγου Poisson Κυλινδρικών Δοκιμών με τη χρήση της ΙΕ ως αυτόνομης δοκιμής	108
6.1	Μεθοδολογία 1 – Με χρήση 2 μονοαξονικών επιταχυνσιομέτρων	110
6.2	Μεθοδολογία 2 – Με χρήση ενός τριαξονικού επιταχυνσιομέτρου	111
	Κεφάλαιο 7	113
7.	Πειραματική Μεθοδολογία - Εξοπλισμός	113
7.1	Πειραματική επιβεβαίωση διορθωτικών συντελεστών SCF, MCF, ICF με δοκίμια αλουμινίου και χάλυβα διαφορετικού υλικού	113
7.1.1	Γεωμετρικές Ιδιότητες δειγμάτων	113
7.1.2	Δοκιμή UPV	114
7.1.3	Δοκιμή Impact Echo	116

7.1.4	Μεθοδολογία πειραματικής επιβεβαίωσης	117
7.2	Λήψη Πυρήνων από υπάρχουσες κατασκευές	119
7.2.1	Προσδιορισμός Γεωμετρικών Μεγεθών & Ειδικού Βάρους	119
7.2.2	Δοκιμή UPV.....	121
7.2.3	Δοκιμή Impact Echo	122
7.2.4	Υπολογισμός λόγου Poisson.....	124
7.2.5	Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης - UCS.....	125
	Κεφάλαιο 8	129
8.	Ανάπτυξη εμπειρικών σχέσεων θλιπτικής αντοχής, ταχυτήτων διάδοσης και ειδικού βάρους	129
8.1	Πειραματικά δεδομένα και μεταβλητές	129
8.1.1	Δομή δεδομένων	129
8.1.2	Μεταβλητές μοντέλου	130
8.1.3	Κλιμακοποίηση μεταβλητών	130
8.2	Μετασχηματισμός Box–Cox της μεταβλητής απόκρισης	131
8.2.1	Μαθηματική διατύπωση.....	131
8.2.2	Διάστημα εμπιστοσύνης και κριτήριο επιλογής.....	131
8.3	Κλασματικά πολυώνυμα	131
8.3.1	Ορισμός και θεωρητικό υπόβαθρο.....	131
8.3.2	Μορφές κλασματικών πολυωνύμων	132
8.3.3	Πολυμεταβλητή επιλογή (MFP)	132
8.4	Γραμμικά μοντέλα μικτών αποτελεσμάτων	132
8.4.1	Γενική διατύπωση	132
8.4.2	Ενδοταξικός συντελεστής συσχέτισης	133
8.4.3	Μέθοδοι εκτίμησης.....	133
8.5	Διαδικασία επιλογής μεταβλητών	133
8.5.1	Αρχικό μοντέλο.....	133
8.5.2	Αυτοματοποιημένος αντίστροφος αποκλεισμός.....	133
8.6	Δείκτες αξιολόγησης μοντέλων	134
8.6.1	Επεξηγηματική ισχύς (Coefficient of Determination)	134
8.6.2	Πρακτικό σφάλμα πρόβλεψης.....	134

8.6.3 Έλεγχος συστηματικού σφάλματος (Joint F-test)	135
8.7 Γενικευμένη δομή προτεινόμενου μοντέλου	135
8.8 Διαδικασία εξαγωγής απλοποιημένων διμεταβλητών σχέσεων	136
Κεφάλαιο 9	137
9. Αποτελέσματα	137
9.1 Απόδειξη της διασποράς των αποτελεσμάτων της μεθόδου UPV	137
9.1.1 Ποσοτικοποίηση του σφάλματος της UPV	137
9.1.2 Αξιολόγηση της UPV ως μεμονωμένη δοκιμή	140
9.2 Ανάπτυξη διορθωτικού συντελεστή Σχήματος – SCF	143
9.2.1 Ποσοτικοποίηση του σφάλματος της IE	143
9.2.2 Σύγκριση IE έναντι UPV – Νέα Μεθοδολογία	145
9.3 Ανάπτυξη διορθωτικών συντελεστών Μάζας – MCF και Αδράνειας – ICF	148
9.4 Πειραματική επιβεβαίωση SCF – MCF – ICF σε χάλυβα και αλουμίνιο	150
9.4.1 Αποτελέσματα UPV	150
9.4.2 Αποτελέσματα IE – Διαμήκης κρούση (Longitudinal mode).....	150
9.4.3 Αποτελέσματα IE – Στρεπτική κρούση (Torsional mode)	152
9.4.4 Υπολογισμός του λόγου Poisson	153
9.5 Αποτελέσματα υπολογισμού λόγου Poisson μέσω της IE ως αυτόνομης δοκιμής 157	
9.5.1 Αποτελέσματα Μεθοδολογίας 1	157
9.5.2 Αποτελέσματα Μεθοδολογίας 2	163
9.5.3 Συγκριτική αξιολόγηση και πρακτική εφαρμογή	169
9.6 Αποτελέσματα υπολογισμού λόγου Poisson μέσω της IE 1 ^{ης} και 2 ^{ης} ιδιομορφής 171	
9.7 Αποτελέσματα εμπειρικών συσχετίσεων θλιπτικής αντοχής, ταχυτήτων διάδοσης και ειδικού βάρους	175
9.7.1 Πειραματικό δείγμα	175
9.7.2 Προκαταρκτική στατιστική ανάλυση	175
9.7.3 Κύριο προτεινόμενο μοντέλο: Μοντέλο μικτών αποτελεσμάτων.....	176
9.7.4 Εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου: περιορισμοί δεδομένων.....	180
9.7.5 Προτεινόμενη εμπειρική σχέση: θλιπτική αντοχή – ταχύτητα ράβδου	180

9.7.6	Προτεινόμενη εμπειρική σχέση: θλιπτική αντοχή – ταχύτητα παλμού υπερήχων	181
9.7.7	Σχέσεις ταχυτήτων διάδοσης – ειδικού βάρους	182
9.7.8	Αξιολόγηση εμπειρικών σχέσεων	183
	Κεφάλαιο 10	188
10.	Συμπεράσματα, επιπτώσεις και συστάσεις για μελλοντική έρευνα	188
10.1	Συμπεράσματα	188
10.1.1	Ποσοτικοποίηση του σφάλματος στη μέθοδο UPV (Στόχος 1)	188
10.1.2	Κριτική αξιολόγηση της UPV ως αυτόνομης δοκιμής (Στόχος 2)	188
10.1.3	Αξιολόγηση της ΙΕ ως αυτόνομης δοκιμής (Στόχος 3)	189
10.1.4	Ανάπτυξη διορθωτικών συντελεστών SCF, MCF, ICF (Στόχος 4)	189
10.1.5	Πειραματική επαλήθευση σε κοντούς κυλίνδρους (Στόχος 5)	189
10.1.6	Προσδιορισμός του $νd$ μέσω της ΙΕ ως αυτόνομης δοκιμής (Στόχος 6)	190
10.1.7	Μεθοδολογία UPIES (Στόχος 7)	190
10.1.8	Εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης θλιπτικής αντοχής και ειδικού βάρους (Στόχος 8)	191
10.2	Επιπτώσεις στην πρακτική εφαρμογή	192
10.3	Συστάσεις για μελλοντική έρευνα	192
10.3.1	Ανάπτυξη εμπειρικών σχέσεων για τον άμεσο υπολογισμό του λόγου Poisson .	192
10.3.2	Πειραματική επαλήθευση των μεθοδολογιών προσδιορισμού του λόγου Poisson μέσω της ΙΕ ως αυτόνομης δοκιμής	192
10.3.3	Εξάλειψη της επίδρασης του αισθητήρα μέσω εναλλακτικών τεχνικών μέτρησης	193
10.3.4	Κατηγοριοποίηση αποτελεσμάτων κατά τύπο δομικού στοιχείου	193
10.3.5	Επίδραση σύνθεσης σκυροδέματος, μεγέθους αδρανών και συνθηκών ωρίμανσης	194
10.3.6	Εμπλουτισμός της βάσης δεδομένων	195
10.3.7	Επέκταση σε σύνθετες γεωμετρίες και ειδικά σκυροδέματα	195
	Αναφορές	197
	Παραρτήματα	212
	Παράρτημα Α	212
	Παράρτημα Β	225

Παράρτημα Γ	256
Παράρτημα Δ	270
Παράρτημα Ε	295
Παράρτημα ΣΤ	367
Παράρτημα Ζ	374

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Σχέση μεταξύ στατικού και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας για τρεις διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος [32]	15
Εικόνα 2: Πειραματικά αποτελέσματα δυναμικού και στατικού μέτρου ελαστικότητας, αριστερά από 3 διαφορετικές λιμενικές περιοχές και δεξιά από τρεις διαφορετικές ζώνες παλιρροϊκής περιοχής [33]	15
Εικόνα 3: Σχέση μεταξύ στατικού και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας σε σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε πυρκαγιά [34]	16
Εικόνα 4: Διάγραμμα διακύμανσης δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E_{cu} και στατικού μέτρου ελαστικότητας E_c της Α και Β κατηγορίας δοκιμίων συναρτήσει της διαδικασίας σύνθεσής τους Ν και S [36]	17
Εικόνα 5: Ultrasonic Concrete Tester [57]	30
Εικόνα 6: Αισθητήρες συσκευής ταχύτητας υπερήχων [57]	30
Εικόνα 7: Συσκευή PUNDIT 1987 [59], [60]	32
Εικόνα 8: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου UPV	33
Εικόνα 9: Τρόποι τοποθέτησης εξοπλισμού [18]	34
Εικόνα 10: Συσκευή PUNDIT plus [64]	35
Εικόνα 11: Συσκευή UPV, TICO, ράβδος βαθμονόμησης και λιπαντική ουσία	35
Εικόνα 12: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής αδρανών [69]	38
Εικόνα 13: Άξονες οπλισμών κάθετοι προς την διεύθυνση διαδόσεως των υπερηχητικών κυμάτων [40]	41
Εικόνα 14: Άξονες οπλισμών παράλληλοι στην διεύθυνση διαδόσεως των υπερηχητικών κυμάτων [63]	42
Εικόνα 15: Διάταξη μετρήσεως για τον προσδιορισμό βάθους ρωγμής [40]	46
Εικόνα 16: Συσκευή υπερήχων για υποβρύχια μέτρηση: α) Πλήρως βυθισμένος εξοπλισμός, β) Αδιάβροχος αισθητήρας συσκευής [75]	47
Εικόνα 17: Εμπειρικές συσχετίσεις της αντοχής του σκυροδέματος σε θλίψη, F_c , έναντι του V_p [102]	53
Εικόνα 18: (Αριστερά) Στις πρώτες έρευνες χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες σφαίρες για να επιτευχθούν κρούσεις με διαφορετικούς χρόνους επαφής. (Δεξιά) Η χαλύβδινη σφαίρα προσαρμόστηκε σε χαλύβδινη ράβδο ώστε να είναι κατάλληλη για δοκιμές πεδίου [50]	55
Εικόνα 19: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου IE	63
Εικόνα 20: Ο λόγος της δεύτερης προς την πρώτη ιδιοσυχνότητα f_2/f_1 , σε σχέση με την τιμή του λόγου Poisson για (α) δοκίμια με $L/D=0,1$ έως 1 και (β) $L/D=1$ έως 3 (β) [10]	73
Εικόνα 21: Ο λόγος f_j/f_i σε σχέση με το λόγο Poisson ν για διάφορες τιμές L/D [10]	73
Εικόνα 22: Ο αρμονικός παλμός της διέγερσης	90
Εικόνα 23: Αξονοσυμμετρικό προσομοίωμα.	93
Εικόνα 24: Παράδειγμα δημιουργίας αξονοσυμμετρικού δικτύου πεπερασμένων στοιχείων μοντέλου κυλίνδρου	94
Εικόνα 25: Παράδειγμα εισαγωγής δεδομένων στο PLAXIS	95

Εικόνα 26: Παράδειγμα αυτόματης δημιουργίας δικτύου πεπερασμένων στοιχείων	95
Εικόνα 27: Εισαγωγή αρμονικού παλμού διέγερσης	96
Εικόνα 28: Παράδειγμα σχεδίασης και εξαγωγής χρονικής ιστορίας επιταχύνσεων στο κέντρο της ελεύθερης επιφάνειας	97
Εικόνα 29: Υπολογισμός φάσματος Fourier της χρονικής ιστορίας των επιταχύνσεων με σημειωμένες τις ιδιοσυχνότητες ταλάντωσης (1η και 2η)	97
Εικόνα 30: Διάγραμμα Διορθωτικού Συντελεστή Σχήματος έναντι λυγηρότητας L/D για έξι τιμές του λόγου Poisson	99
Εικόνα 31: Επιφάνεια παλινδρόμησης της εξίσωσης της 1 ^{ης} ιδιομορφής	102
Εικόνα 32: Επιφάνεια παλινδρόμησης της εξίσωσης της 2 ^{ης} ιδιομορφής	103
Εικόνα 33: Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων στο PLAXIS 3D για προσομοίωση δοκιμών ΙΕ υπό διαμήκη και στρεπτική κρούση	106
Εικόνα 34: Κύλινδροι από χάλυβα και αλουμίνιο με έξι διαφορετικούς λόγους λυγηρότητας	113
Εικόνα 35: Μέτρηση διαστάσεων σε δοκίμιο αλουμινίου	114
Εικόνα 36: Δοκιμή UPV σε δοκίμιο χάλυβα (με μη κατάλληλους αισθητήρες)	115
Εικόνα 37: Δοκιμή UPV σε δοκίμιο αλουμινίου με αισθητήρες 150kHz	116
Εικόνα 38: Δοκιμή ΙΕ σε κοντούς κυλίνδρους χάλυβα	117
Εικόνα 39: Φάσμα συχνοτήτων ενός χαλύβδινου κυλίνδρου με λυγηρότητα $L/D = 4,0$	117
Εικόνα 40: Καροτιέρα και εξαχθέντες πυρήνες	120
Εικόνα 41: Ραβδογράμματα κατανομής του συνολικού αριθμού δοκιμών ως προς το ύψος (αριστερά) και το ειδικό βάρος (δεξιά)	121
Εικόνα 42: Διεξαγωγή μέτρησης επί δοκιμίου σκυροδέματος με τη χρήση της μεθόδου UPV	122
Εικόνα 43: Εκτέλεση δοκιμής ΙΕ	123
Εικόνα 44: Εξοπλισμός εκτέλεσης δοκιμής ΙΕ	123
Εικόνα 45: Φάσμα ελεύθερης ταλάντωσης ιδιομορφής	124
Εικόνα 46 (a) Μηχανή μονοαξονικής συμπίεσης (b) Πυρήνας σκυροδέματος μετά τη δοκιμή	125
Εικόνα 47: Διάγραμμα συντελεστή $L1$, με λόγο ύψους προς διάμετρο $H:D \neq 2$,	127
Εικόνα 48: Διάγραμμα συντελεστή $L2$, και διαμέτρου D	128
Εικόνα 49: Κατανομή του δυναμικού λόγου Poisson των 232 πυρήνων σκυροδέματος	137
Εικόνα 50: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής (CDF) του δυναμικού λόγου Poisson	138
Εικόνα 51: Θλιπτική αντοχή συναρτήσει ταχυτήτων V_c (ΙΕ) και V_p (UPV)	138
Εικόνα 52: Θλιπτική αντοχή συναρτήσει ταχυτήτων V_c και V_p για $\nu = 0,25-0,30$	139
Εικόνα 53: Σφάλμα στην εκτίμηση του E_d συναρτήσει αυθαίρετης επιλογής λόγου Poisson	140
Εικόνα 54: Εμπειρικές συσχετίσεις της αντοχής του σκυροδέματος σε θλίψη, F_c , έναντι του V_p	142

Εικόνα 55: Συντελεστής διόρθωσης σχήματος έναντι λυγηρότητας L/D για έξι διαγράμματα τιμών συντελεστή Poisson, με το σφάλμα υπολογισμού του μέσου συντελεστή Poisson για $L/D=1,0$ και $L/D=2,0$	143
Εικόνα 56: Διάγραμμα συντελεστή διόρθωσης σχήματος έναντι λυγηρότητας L/D για έξι τιμές του συντελεστή Poisson με επισήμανση της διακύμανσης σφάλματος	144
Εικόνα 57: Συντελεστής διόρθωσης σχήματος έναντι λυγηρότητας L/D για έξι τιμές του συντελεστή Poisson με την απόκλιση σφάλματος για τον τυπικό δυναμικό συντελεστή Poisson στο σκυρόδεμα σημειωμένη	144
Εικόνα 58: Σύγκριση του SCF με τον CF του Love για μέσες τιμές του λόγου Poisson $\nu=0,32$	145
Εικόνα 59: Διάγραμμα ροής που απεικονίζει την προτεινόμενη διαδικασία για τον προσδιορισμό της τιμής του συντελεστή Poisson	146
Εικόνα 60: Διάγραμμα ροής της εφαρμογής της UPIES – νέα μεθοδολογία	147
Εικόνα 61: Διορθωτικός Συντελεστής Μάζας (MCF) για δοκίμια FEM από χάλυβα και αλουμίνιο υπό διαμήκη κρούση συναρτήσει του λόγου μάζας του δοκιμίου προς τη μάζα του επιταχυνσιομέτρου (W/W_0)	149
Εικόνα 62: Συντελεστής διόρθωσης αδράνειας (ICF) για τα δείγματα FEM από χάλυβα και αλουμίνιο υπό στρεπτική κρούση συναρτήσει του λόγου μάζας του δοκιμίου προς τη μάζα του επιταχυνσιομέτρου (W/W_0)	149
Εικόνα 63: Πειραματικά αποτελέσματα για χαλύβδινους κυλίνδρους με έξι διαφορετικές τιμές λυγηρότητας σε σχέση με το SCF με και χωρίς διόρθωση	151
Εικόνα 64: Πειραματικά αποτελέσματα για κυλίνδρους αλουμινίου με έξι διαφορετικές τιμές λυγηρότητας σε σχέση με το SCF με και χωρίς διόρθωση	152
Εικόνα 65: Σύγκριση του λόγου Poisson μεταξύ χαλύβδινων κυλίνδρων συναρτήσει της λυγηρότητας για τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς δοκιμών χωρίς διόρθωση	154
Εικόνα 66: Σύγκριση του λόγου Poisson μεταξύ χαλύβδινων κυλίνδρων συναρτήσει της λυγηρότητας για τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς δοκιμών με διόρθωση	154
Εικόνα 67: Σύγκριση του λόγου Poisson μεταξύ κυλίνδρων αλουμινίου συναρτήσει της λυγηρότητας για τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς δοκιμών χωρίς διόρθωση	155
Εικόνα 68: Σύγκριση του λόγου Poisson μεταξύ κυλίνδρων αλουμινίου συναρτήσει της λυγηρότητας για τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς δοκιμών με διόρθωση	155
Εικόνα 69: Παράδειγμα του σφάλματος του λόγου Poisson σε συναρτήσει του λόγο Poisson από τους τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς δοκιμών, όταν το σφάλμα στον μετρημένο λόγο ταχύτητας είναι 1%	156
Εικόνα 70: Διάγραμμα ροής του υπολογισμού του λόγου Poisson χρησιμοποιώντας τους προτεινόμενους CF	157
Εικόνα 71: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου L/D με το ύψος τοποθέτησης του επιταχυνσιομέτρου (z/L) για την εύρεση του λόγου Poisson ν , Μεθοδολογία 1	158
Εικόνα 72: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=5$, Μεθοδολογία 1 – Μεταβολή του λόγου Poisson με το ύψος	159

Εικόνα 73: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=5$, Μεθοδολογία 1 – Μεταβολή του κανονικοποιημένου λόγου Poisson με το ύψος	159
Εικόνα 74: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=2$, Μεθοδολογία 1 – Μεταβολή του λόγου Poisson με το ύψος	160
Εικόνα 75: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=2$, Μεθοδολογία 1 – Μεταβολή του κανονικοποιημένου λόγου Poisson με το ύψος	160
Εικόνα 76: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=1$, Μεθοδολογία 1 – Μεταβολή του λόγου Poisson με το ύψος	161
Εικόνα 77: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=1$, Μεθοδολογία 1 – Μεταβολή του κανονικοποιημένου λόγου Poisson με το ύψος	161
Εικόνα 78: Διάγραμμα απεικόνισης σφαλμάτων (%) Μεθοδολογίας 1 συναρτήσει των διαστάσεων L/D του δοκιμίου	162
Εικόνα 79: Διάγραμμα απεικόνισης σφαλμάτων (%) Μεθοδολογίας 1 συναρτήσει των διαστάσεων L/D του δοκιμίου για εύρος λόγου Poisson 0,2 – 0,4	163
Εικόνα 80: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου L/D με το ύψος τοποθέτησης του επιταχυνσιομέτρου (z/L) για την εύρεση του λόγου Poisson ν , Μεθοδολογία 2.	164
Εικόνα 81: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=5$, Μεθοδολογία 2 – Μεταβολή του λόγου Poisson με το ύψος	165
Εικόνα 82: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=5$, Μεθοδολογία 2 – Μεταβολή του κανονικοποιημένου λόγου Poisson με το ύψος	165
Εικόνα 83: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=2$, Μεθοδολογία 2 – Μεταβολή του λόγου Poisson με το ύψος	166
Εικόνα 84: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=2$, Μεθοδολογία 2 – Μεταβολή του κανονικοποιημένου λόγου Poisson με το ύψος	166
Εικόνα 85: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=1$, Μεθοδολογία 2 – Μεταβολή του λόγου Poisson με το ύψος	167
Εικόνα 86: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=1$, Μεθοδολογία 2 – Μεταβολή του κανονικοποιημένου λόγου Poisson με το ύψος	167
Εικόνα 87: Διάγραμμα απεικόνισης σφαλμάτων (%) Μεθοδολογίας 2 συναρτήσει των διαστάσεων L/D του δοκιμίου	168

Εικόνα 88: Διάγραμμα απεικόνισης σφαλμάτων (%) Μεθοδολογίας 2 συναρτήσει των διαστάσεων L/D του δοκιμίου για εύρος λόγου Poisson 0,2 – 0,4	169
Εικόνα 89: Λόγος δεύτερης προς πρώτης συχνότητας συντονισμού συναρτήσει του λόγου L/D για έξι τιμές του λόγου Poisson	171
Εικόνα 90: Διάγραμμα θεωρητικών και υπολογισμένων συχνοτήτων σε συνάρτηση με τον λόγο L/D για τρεις τιμές του λόγου Poisson, σε σύγκριση με τις καμπύλες που προέκυψαν από τη μελέτη των Kolluru et al. (2000)	172
Εικόνα 91: Διακύμανση των θεωρητικών προς υπολογισμένων συχνοτήτων σε σχέση με L/D= 1 για έξι τιμές του συντελεστή Poisson, όπως προκύπτουν από την ανάλυση FEM	173
Εικόνα 92: Σύγκριση μεταξύ της παρούσας έρευνας και της μελέτης των Nieves et al. (2002) όσον αφορά το λόγο της δεύτερης προς πρώτης συχνότητας συντονισμού συναρτήσει του λόγου L/D για τρεις τιμές του συντελεστή Poisson	174
Εικόνα 93: Φάσμα συχνοτήτων της διαμήκουσ δόνησης που αντιστοιχεί σε μια ράβδο με μήκος ίσο με τη διάμετρό της, σύμφωνα με τους Nieves et al. (1998)	174
Εικόνα 94: Καμπύλη λογαριθμοπιθανοφάνειας προφίλ της παραμέτρου λ του μετασχηματισμού Box–Cox	176
Εικόνα 95: Διαγνωστικά διαγράμματα τελικού μοντέλου. Αριστερά: Πραγματική έναντι προβλεπόμενη θλιπτική αντοχή ανά τύπο δομικού στοιχείου. Δεξιά: Υπόλοιπα έναντι προσαρμοσμένων τιμών στη λογαριθμική κλίμακα, για τον έλεγχο της ομοσκεδαστικότητας	184
Εικόνα 96: Τυχαία αποτελέσματα ανά θέση πυρηνοληψίας (Site Random Effects)	185
Εικόνα 97: Προσαρμογή καμπυλών στα δεδομένα θλιπτικής αντοχής και ταχυτήτων διάδοσης	185
Εικόνα 98: Προσαρμογή καμπυλών στα δεδομένα ταχυτήτων διάδοσης και ειδικού βάρους	186
Εικόνα 99: Ραβδόγραμμα κατηγοριών υλικού	193
Εικόνα 100: Αριστερά – Παρασκευή και Δεξιά – Ωρίμανση δοκιμών σκυροδέματος	194
Εικόνα 101: Αριστερά – Δοκιμή UPV – Δοκιμή IE δοκιμίου σκυροδέματος με L/D= 2,0	195
Εικόνα 102: Δοκίμια αλουμινίου, χάλυβα, ακρυλικού και μαρμάρου	196

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικές τιμές μέτρου ελαστικότητας δομικών υλικών	13
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικές τιμές λόγου Poisson δομικών υλικών	21
Πίνακας 3: Ποιοτική ταξινόμηση κανονικού σκυροδέματος σύμφωνα με την ακουστική ταχύτητα [56]	29
Πίνακας 4: Επίδραση της θερμοκρασίας σκυροδέματος στην ταχύτητα υπερήχων κατά RILEM [19]	38
Πίνακας 5: Επίδραση της συντήρησης στην ταχύτητα υπερήχων [71]	39
Πίνακας 6: Απαιτούμενη συχνότητα οργάνου συναρτήσεως του μήκους διαδρομής των υπερήχων [19]	40
Πίνακας 7: Ταχύτητα παλμού, συχνότητα πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα και ελάχιστη επιτρεπόμενη πλευρική διάσταση δείγματος [72]	40
Πίνακας 8: Διόρθωση της ταχύτητας των υπερήχων συναρτήσεως της εντατικής καταστάσεως [40]	41
Πίνακας 9: Διορθωτικοί συντελεστές της ταχύτητας υπερήχων παρουσία οπλισμών [63]	43
Πίνακας 10: Εμπειρικές σχέσεις συσχέτισης F_c και V_p	52
Πίνακας 11: Δεδομένα και αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων για $\nu=0,20$	97
Πίνακας 12: Επιλεγθέντες μετασχηματισμοί από τον αλγόριθμο MFP	100
Πίνακας 13: Εκτιμήσεις Συντελεστών, Mode 1	101
Πίνακας 14: Επιλεγθέντες μετασχηματισμοί από τον αλγόριθμο MFP	102
Πίνακας 15: Εκτιμήσεις Συντελεστών, Mode 2	102
Πίνακας 16: Συγκριτικός Πίνακας Mode 1 vs Mode 2	103
Πίνακας 17: Ιδιότητες δοκιμών χάλυβα και αλουμινίου όπως μοντελοποιήθηκαν στο PLAXIS 3D για προσομοιώσεις δοκιμών IE υπό διαμήκη και στρεπτική κρούση	106
Πίνακας 18: Αποτελέσματα MCF και ICF από αριθμητικές προσομοιώσεις δοκιμών IE υπό διαμήκη και στρεπτική πρόσκρουση	107
Πίνακας 19: Δεδομένα και αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων μεθοδολογίας 1 για τη δοκιμή με $L/D=1, 2$ και 5	110
Πίνακας 20: Δεδομένα και αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων για τη δοκιμή με $L/D=1,0, L/D=2$ και $L/D=5$, Μεθοδολογία 2	111
Πίνακας 21: Γεωμετρικές ιδιότητες δοκιμών χάλυβα και αλουμινίου	113
Πίνακας 22: Γεωμετρικά στοιχεία πυρήνα	120
Πίνακας 23: Μετρήσεις δοκιμής UPV	121
Πίνακας 24: Αποτελέσματα δοκιμής IE και υπολογισμός λόγου Poisson	124
Πίνακας 25: Συντελεστής L_1 , αναγωγής αντοχής κυλίνδρου με λόγο ύψους προς διάμετρο $H:D \neq 2$, σε αντοχή κυλίνδρου με λόγο $H:D=2$	125
Πίνακας 26: Συντελεστής L_2 , αναγωγής κυλίνδρου διαμέτρου D και λόγου $H:D=2$ σε αντοχή κυλίνδρου 15×30 cm	126
Πίνακας 27: Συνεχείς ανεξάρτητες μεταβλητές μοντέλου	130
Πίνακας 28: Αποτελέσματα UPV	150

Πίνακας 29: Αποτελέσματα διαμήκους ΙΕ	151
Πίνακας 30: Αποτελέσματα στρεπτικής ΙΕ	152
Πίνακας 31: Υπολογισμός του λόγου Poisson	153
Πίνακας 32: Αριθμητικά αποτελέσματα συσχέτισης λόγου L/D με το ύψος τοποθέτησης του επιταχυνσιομέτρου (z/L) για την εύρεση του λόγου Poisson ν , Μεθοδολογία 1	158
Πίνακας 33: Προσδιορισμός σφαλμάτων κατά την εύρεση του λόγου Poisson	161
Πίνακας 34: Αριθμητικά αποτελέσματα συσχέτισης λόγου L/D με το ύψος τοποθέτησης του επιταχυνσιομέτρου (z/L) για την εύρεση του λόγου Poisson ν , Μεθοδολογία 2	164
Πίνακας 35: Προσδιορισμός σφαλμάτων κατά την εύρεση του λόγου Poisson	168
Πίνακας 36: Αποτελέσματα $f_{2, \text{Theoretical}/\text{FEM}} / f_{1, \text{Theoretical}/\text{FEM}}$	171
Πίνακας 37: Περιγραφική στατιστική μεταβλητών δείγματος ($N = 232$)	175
Πίνακας 38: Ακολουθία αυτοματοποιημένου αντίστροφου αποκλεισμού	177
Πίνακας 39: Εκτιμήσεις σταθερών αποτελεσμάτων τελικού μοντέλου (REML)	178
Πίνακας 40: Δείκτες απόδοσης τελικού μοντέλου	179
Πίνακας 41: Εκτιμήσεις συντελεστών σχέσης $f_c - V_c$	180
Πίνακας 42: Δείκτες απόδοσης σχέσης $f_c - V_c$	181
Πίνακας 43: Εκτιμήσεις συντελεστών σχέσης $f_c - V_p$	181
Πίνακας 44: Δείκτες απόδοσης σχέσης $f_c - V_p$	182
Πίνακας 45: Εκτιμήσεις συντελεστών σχέσης $V_c - \gamma_c$	183
Πίνακας 46: Εκτιμήσεις συντελεστών σχέσης $V_p - \gamma_c$	183

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

Λατινικά σύμβολα	
D	Διάμετρος δοκιμίου
E	Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus)
E_d	Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας
E_s	Στατικό μέτρο ελαστικότητας
E_{cm}	Μέσο εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (EN 1992-1-1)
f	Συχνότητα
f_1, f_2	Πρώτη και δεύτερη κυρίαρχη ιδιοσυχνότητα
F_c	Μονοαξονική θλιπτική αντοχή
F_{cm}	Μέση κυλινδρική θλιπτική αντοχή
f_{max}	Μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας
G	Μέτρο διάτμησης
G_d	Δυναμικό μέτρο διάτμησης
ICF	Διορθωτικός συντελεστής αδράνειας (Inertia Correction Factor)
K	Μέτρο όγκου (Bulk modulus)
L	Μήκος (ύψος) δοκιμίου
L/D	Λυγηρότητα δοκιμίου (λόγος ύψους προς διάμετρο)
LR	Μήκος κύματος
M	Περιορισμένο μέτρο ελαστικότητας (Constrained modulus)
MCF	Διορθωτικός συντελεστής μάζας αισθητήρα (Mass Correction Factor)
N	Αριθμός χρονικών βημάτων
N_f	Συχνότητα δειγματοληψίας
SCF	Διορθωτικός συντελεστής σχήματος (Shape Correction Factor)
t	Χρόνος
T	Περίοδος
TR	Χρόνος δειγματοληψίας
V_c	Ταχύτητα διάδοσης κύματος ράβδου
V_{co}	Παράμετρος εμπειρικής σχέσης ταχύτητας ράβδου
V_p	Ταχύτητα διάδοσης διαμηκών (P) κυμάτων
V_s	Ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιων (S) κυμάτων
W	Μάζα δοκιμίου
W_0	Μάζα επιταχυνσιομέτρου
W/W_0	Λόγος μάζας δοκιμίου προς μάζα επιταχυνσιομέτρου
Y_0	Παράμετρος εμπειρικής σχέσης
z	Ύψος σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου
z/L	Αδιάστατος λόγος ύψους μέτρησης
Ελληνικά Σύμβολα	
α	Σταθερά απόσβεσης Rayleigh (συντελεστής μάζας)
β	Σταθερά απόσβεσης Rayleigh (συντελεστής δυσκαμψίας)
γ, γ_c	Ειδικό βάρος σκυροδέματος
Δf	Φασματική διακριτική ικανότητα (frequency resolution)

Δt	Χρονικό βήμα δυναμικής ανάλυσης
ε	Ορθή ειδική παραμόρφωση
λ	Πρώτη σταθερά Lamé
ν	Λόγος Poisson
ν_d	Δυναμικός λόγος Poisson
ρ	Πυκνότητα υλικού
σ	Ορθή τάση
σ_y	Τάση διαρροής (όριο ελαστικότητας)

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

Λατινικές συντομογραφίες

ACI	American Concrete Institute
AIC	Akaike Information Criterion
ASTM	American Society for Testing and Materials
CI	Confidence Interval
EC	Eurocode
EN	European Norm
FEM	Finite Element Method
FFT	Fast Fourier Transform
FP	Fractional Polynomial
ICC	Intraclass Correlation Coefficient
ICF	Inertia Correction Factor
IE	Impact Echo
LMM	Linear Mixed Model
MAE	Mean Absolute Error
MCF	Mass Correction Factor
MFP	Multivariable Fractional Polynomial
NDT	Non- Destructive Testing
PLAXIS	Plaxis Geotechnical Software
RILEM	International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
RMSE	Root Mean Square Error
SCF	Shape Correction Factor
UCS	Uniaxial Compressive Strength
UPIES	Ultrasonic Pulse – Impact Echo Synergy
UPV	Ultrasonic Pulse Velocity

Ελληνικές συντομογραφίες

ΑΣΠΑΙΤΕ	Ανώτατη Σχολή Παιδαγωγικής και Τεχνολογικής Εκπαίδευσης
ΕΑΠ	Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
ΚΑΝ.ΕΠΕ.	Κανονισμός Επεμβάσεων
ΜΚΔ	Μη Καταστροφικές Δοκιμές

Κεφάλαιο 1

1. Εισαγωγή

Η αξιολόγηση μηχανικών παραμέτρων όπως ο λόγος Poisson (ν), το μέτρο ελαστικότητας (E) και το μέτρο διάτμησης (G) αποτελεί κεντρικό ζήτημα στον σχεδιασμό και την αξιολόγηση υλικών και κατασκευών πολιτικού μηχανικού. Αυτές οι παράμετροι καθορίζουν τη συμπεριφορά παραμόρφωσης, τη διάδοση κυμάτων και τους μηχανισμούς αστοχίας. Ειδικότερα, για υλικά όπως το σκυρόδεμα, ο βράχος και τα σύνθετα υλικά, ο ακριβής προσδιορισμός των δυναμικών ιδιοτήτων είναι απαραίτητος για την πρόβλεψη της φέρουσας ικανότητας και της διάρκειας ζωής.

Οι συμβατικές μέθοδοι δοκιμών (π.χ. μονοαξονική θλίψη, τριαξονικές δοκιμές) απαιτούν καταστροφική δειγματοληψία και πολύπλοκες συσκευές φόρτισης. Αντίθετα, οι τεχνικές μη καταστροφικών δοκιμών (NDT) παρέχουν γρήγορες και επαναλαμβανόμενες εναλλακτικές λύσεις, αναλύοντας την απόκριση του υλικού σε μηχανική ή ακουστική διέγερση. Η ανάπτυξη αξιόπιστων μεθοδολογιών NDT που δύνανται να αντικαταστήσουν ή να μειώσουν τις καταστροφικές δοκιμές αποτελεί διαρκές αντικείμενο ερευνητικού ενδιαφέροντος, δεδομένου ότι η μονοαξονική θλίψη — παρά τον ρόλο της ως σημείο αναφοράς — παραμένει επεμβατική και συχνά μη πρακτική για κατασκευές εν λειτουργία [1].

Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στη συγκριτική μελέτη δύο κυρίαρχων μεθόδων NDT που βασίζονται στη διάδοση ελαστικών κυμάτων, της δοκιμής μέτρησης ταχύτητας υπερηχητικού παλμού (Ultrasonic Pulse Velocity – UPV) και της δοκιμής ακουστικού συντονισμού (Impact Echo – IE). Μέσω εκτεταμένης πειραματικής και αριθμητικής ανάλυσης, η έρευνα διερευνά την ακρίβεια, την επαναληψιμότητα και τις πρακτικές δυνατότητες εφαρμογής των δύο μεθόδων στον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας (E_d) και του δυναμικού λόγου Poisson (ν_d).

1.1 Επιστημονικό Υπόβαθρο

Τόσο η δοκιμή UPV όσο και η δοκιμή IE βασίζονται στα φαινόμενα διάδοσης των κυμάτων, ωστόσο διαφέρουν ουσιαστικά ως προς τον μηχανισμό μέτρησης και την ερμηνεία των δεδομένων για τον προσδιορισμό παραμέτρων όπως οι E_d και ν_d .

Η UPV μετρά την ταχύτητα διάδοσης ενός υπερηχητικού παλμού διαμέσου ενός υλικού. Θεωρητικά όταν η μετρούμενη ταχύτητα συνδυαστεί με δεδομένα πυκνότητας και μια δεύτερη ανεξάρτητη ελαστική σταθερά, επιτρέπει τον υπολογισμό των E_d και ν_d [2]. Η ευρεία υιοθέτηση της μεθόδου οφείλεται στην απλότητά της, στη δυνατότητα για ταχεία αξιολόγηση με φορητό εξοπλισμό και στην τυποποίηση της διαδικασίας μέσω του ASTM C597 [3]. Η μέθοδος έχει εφαρμοστεί σε ευρύ φάσμα βράχων αλλά και

σκυροδεμάτων, περιλαμβανομένων συμβατικών, αυτοσυμπυκνούμενων και σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα αδρανή [4]. Ωστόσο, η ευαισθησία της σε τοπικές ανομοιογένειες — όπως η κατανομή αδρανών, τα κενά και η υγρασία — αποτελεί γνωστό περιοριστικό παράγοντα, καθώς ο χρόνος διάδοσης ακολουθεί τη συντομότερη διαδρομή και επηρεάζεται δυσανάλογα από τοπικά χαρακτηριστικά κατά μήκος αυτής [5].

Η μέθοδος ΙΕ, αντίθετα, βασίζεται στην ανάλυση της δυναμικής απόκρισης του υλικού μετά από μια σύντομη μηχανική κρούση. Η αρχή λειτουργίας διαφοροποιείται ανάλογα με τη γεωμετρία του εξεταζόμενου στοιχείου. Στη μορφή που εφαρμόζεται στην παρούσα διατριβή — δηλαδή η δοκιμή ακουστικού συντονισμού σε ελεύθερα κυλινδρικά δοκίμια κατά ASTM C215 [6] — η μέθοδος μετρά τις ιδιοσυχνότητες συντονισμού του σώματος (διαμήκη, εγκάρσια, στρεπτική ιδιομορφή), οι οποίες συνδέονται αναλυτικά με τις ελαστικές σταθερές του υλικού. Η κλασική μορφή ΙΕ σε πλάκες (κατά ASTM C1383), η οποία βασίζεται στις ανακλάσεις διαμήκων κυμάτων μεταξύ των δύο επιφανειών και τον εντοπισμό της αντίστοιχης συχνότητας πάχους, δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας έρευνας [2].

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της ΙΕ έναντι της UPV είναι ότι η απόκρισή της αντιπροσωπεύει τη μηχανική συμπεριφορά ολόκληρου του όγκου του δοκιμίου, εξομαλύνοντας τοπικές ανομοιογένειες που διαφορετικά θα επηρέαζαν τον χρόνο διάδοσης. Παράλληλα, η μέθοδος παρουσιάζει καλή ευαισθησία τόσο σε μακροσκοπικές βλάβες (ρωγμές, κενά) όσο και σε μικροδομικές μεταβολές, καθιστώντας την κατάλληλη όχι μόνο για τη δομική αξιολόγηση αλλά και για τη διερεύνηση αλλαγών στη δυσκαμψία ή στο μέτρο διάτμησης υπό ελεγχόμενη φόρτιση.

Η αλληλεπίδραση με τις καταστροφικές δοκιμές είναι ουσιαστική, καθώς αυτές παρέχουν άμεσες καμπύλες τάσης–παραμόρφωσης από τις οποίες εξάγονται τόσο η θλιπτική αντοχή όσο και τα μέτρα ελαστικότητας υπό τυποποιημένες συνθήκες φόρτισης. Ιστορικά, τόσο η UPV όσο και η ΙΕ απαιτούσαν βαθμονόμηση μέσω δειγμάτων πυρήνα ή συνοδευτικών δοκιμών προτού αξιοποιηθούν ως αυτόνομοι δείκτες [7]. Ωστόσο, πρόσφατες βελτιώσεις στην ανάλυση του σήματος συντονισμού υποδηλώνουν ότι η ΙΕ ενδέχεται να επιτρέψει σημαντική μείωση του αριθμού πυρηνοληψιών χωρίς υποβάθμιση της αξιοπιστίας [1].

Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι, παρά τη σημαντική πρόοδο στις μεθόδους NDT, παραμένουν κρίσιμα ανοικτά ζητήματα σχετικά με τις πηγές σφάλματος, την αυτονομία κάθε μεθόδου, και την εφαρμοσιμότητά τους σε γεωμετρίες δοκιμών που αντιστοιχούν στην πρακτική της πυρηνοληψίας. Τα ζητήματα αυτά αναλύονται στη συνέχεια.

1.2 Ερευνητικό Πρόβλημα

1.2.1 Περιορισμοί της Μεθόδου UPV

Όσο αφορά στη UPV, πρακτικοί περιορισμοί δεν επιτρέπουν τον άμεσο προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων με αποτελεσματικότητα. Ένα από τα σοβαρά μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η ευαισθησία της σε παράγοντες όπως η κατανομή των αδρανών, η ύπαρξη κενών, υγρασίας ή μικρορωγμών και η κατάσταση της επιφάνειας [5]. Αυτή η ευαισθησία μειώνει την αναπαραγωγικότητα και δημιουργεί αβεβαιότητες όταν χρησιμοποιείται ως μοναδική δοκιμή μηχανικής συμπεριφοράς.

Σημαντικό μειονέκτημα είναι επίσης η απαίτηση της εκ των προτέρων γνώσης του ν_d για τον υπολογισμό του E_d , κάτι που είτε δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί είτε απαιτεί πρόσθετες δοκιμές. Η δυσκολία αυτή ωθεί τους ερευνητές στην αυθαίρετη υπόθεση μιας τιμής του λόγου Poisson η οποία μπορεί εν τέλει να οδηγήσει σε μεγάλο σφάλμα στον προσδιορισμό του E_d . Τα μοντέλα στατιστικής παλινδρόμησης που συνδυάζουν την UPV με άλλες καταστροφικές δοκιμές π.χ. σφύρα Schmidt, μπορούν να βελτιώσουν τη συσχέτιση με τη θλιπτική αντοχή, αλλά η εγγενής διασπορά της UPV την καθιστά λιγότερο πειστική για τον προσδιορισμό του E_d [4].

1.2.2 Περιορισμοί της Μεθόδου IE

Ενώ η IE έχει επιδείξει καλύτερη επαναληψιμότητα από την UPV σε ορισμένες περιπτώσεις υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας [5], παραμένει εξαρτημένη από την ακριβή ερμηνεία των φασμάτων συχνοτήτων και τις υποθέσεις σχετικά με τις οριακές συνθήκες που ενδέχεται να παραβιαστούν σε πολύπλοκες γεωμετρίες. Ο τρόπος στήριξης και το μέσο συγκόλλησης μεταξύ των αισθητήρων και της επιφάνειας του δείγματος καθώς και ο τρόπος και το μέσο κρούσης εισάγουν επίσης πιθανές πηγές σφάλματος.

Επιπροσθέτως, αν και η εργαστηριακή βαθμονόμηση με βάση τα αποτελέσματα των καταστροφικών δοκιμών μπορεί να δημιουργήσει αξιόπιστα μοντέλα πρόβλεψης [1], η μεταφορά αυτών των μοντέλων σε πραγματικές συνθήκες παραμένει δύσκολη λόγω παραγόντων θορύβου που είναι διαφορετικοί για κάθε πεδίο.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι, αν και θεωρητικά δεν απαιτεί εκ των προτέρων γνώση του λόγου Poisson για τον υπολογισμό του E_d στην πράξη χρειάζεται διόρθωση των μετρούμενων συχνοτήτων λόγω της επίδρασης του σχήματος (λυγηρότητα), και οι αντίστοιχοι διορθωτικοί συντελεστές εξαρτώνται από τον λόγο Poisson. Κατά συνέπεια, η γνώση του ν_d καθίσταται και για τη μέθοδο αυτή ουσιαστικά αναγκαία.

Επίσης, το πρότυπο ASTM C215 προτείνει διορθωτικούς συντελεστές σχήματος μόνο για τη διαμήκη ιδιομορφή, χωρίς αντίστοιχη πρόβλεψη για την εγκάρσια. Ωστόσο, ερευνητικά ευρήματα δείχνουν ότι η επιρροή της μάζας του αισθητήρα είναι σημαντική

στη διαμήκη διάδοση, ενώ η αδράνεια του συστήματος παίζει καθοριστικό ρόλο στην εγκάρσια [8].

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η δυνατότητα προσδιορισμού του δυναμικού λόγου Poisson αποκλειστικά μέσω της μεθόδου IE, χωρίς τη συνδρομή της UPV ή άλλης ανεξάρτητης δοκιμής, δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς στη βιβλιογραφία. Ειδικότερα, η αξιοποίηση των πλευρικών επιταχύνσεων κατά μήκος της ελεύθερης επιφάνειας του δοκιμίου — σε συνδυασμό με τις κατακόρυφες — ως μέσο υπολογισμού του ν_d δεν έχει μελετηθεί συστηματικά. Ομοίως, ο υπολογισμός του ν_d μέσω του λόγου της δεύτερης προς την πρώτη κυρίαρχη ιδιοσυχνότητα ($\frac{f_2}{f_1}$) παρουσιάζει σημαντικούς πρακτικούς περιορισμούς, ιδίως για δοκίμια μικρής λυγηρότητας, οι οποίοι δεν έχουν ποσοτικοποιηθεί.

1.2.3 Ερευνητικό κενό στη Γεωμετρία Δοκιμών

Οι περιορισμοί που σχετίζονται με την επίδραση του μεγέθους των δοκιμών στις συχνότητες συντονισμού έχουν αντιμετωπιστεί εν μέρει μέσω διορθωτικών συντελεστών που συνδέονται με τη λυγηρότητα, επιτρέποντας τη διεξαγωγή δοκιμών σε κοντούς κυλίνδρους [2]. Οι περισσότερες δημοσιευμένες έρευνες έχουν ασχοληθεί με δοκίμια με λυγηρότητα L/D μεγαλύτερη ή κοντά στο 2 [9], [10], [11] ενώ το ASTM προτείνει για βέλτιστα αποτελέσματα τη χρήση δοκιμών με λυγηρότητα $3 < L/D < 5$ [12].

Ωστόσο, στην περίπτωση του σκυροδέματος, ο έλεγχος της εφαρμογής της μεθόδου σε δοκίμια με $L/D = 1$ αποκτά ιδιαίτερη σημασία, δεδομένου ότι αυτός είναι ο τυπικός λόγος διαστάσεων του πυρήνα που εξάγεται κατά την πυρηνοληψία υφιστάμενων κατασκευών.

1.2.4 Κεντρικό Ερευνητικό Πρόβλημα

Από την ανάλυση των περιορισμών των δύο μεθόδων προκύπτει το κεντρικό ερευνητικό πρόβλημα της παρούσας διατριβής: **δεν υπάρχει σαφής κατανόηση του μεγέθους του σφάλματος που εισάγεται στον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας όταν υιοθετείται μια αυθαίρετη τιμή του λόγου Poisson στη μέθοδο UPV, ούτε έχει διευκρινιστεί κατά πόσον η μέθοδος IE μπορεί να χρησιμοποιηθεί αξιόπιστα ως αυτόνομη δοκιμή χωρίς την προηγούμενη γνώση του ν_d .** Επιπλέον, η έλλειψη ολοκληρωμένου συστήματος διορθωτικών συντελεστών — συντελεστή σχήματος (SCF), συντελεστή μάζας αισθητήρα (MCF) και συντελεστή αδράνειας (ICF) — που να λαμβάνει ταυτοχρόνως υπόψη τη λυγηρότητα των δοκιμών, τον λόγο Poisson και την αλληλεπίδραση του αισθητήρα με το δοκίμιο, περιορίζει την ακρίβεια αμφότερων των μεθόδων, ιδιαιτέρως σε κυλινδρικά δοκίμια μικρής λυγηρότητας ($L/D \leq 2$) όπως αυτά που προκύπτουν κατά την πυρηνοληψία.

1.3 Στόχοι, Αντικείμενο και Ερευνητικά Ερωτήματα

1.3.1 Αντικείμενο Έρευνας

Η παρούσα διατριβή εστιάζει στη συστηματική διερεύνηση των δύο κυρίαρχων μη καταστροφικών μεθόδων — της ταχύτητας παλμού υπερήχων (UPV) και του ακουστικού συντονισμού (Impact Echo, IE) — για τον προσδιορισμό των δυναμικών ελαστικών παραμέτρων του σκυροδέματος. Επίκεντρο της έρευνας αποτελεί η ανάπτυξη βελτιωμένων πρωτοκόλλων μέτρησης και ερμηνείας, τα οποία θα καταστήσουν εφικτή την αξιόπιστη αξιολόγηση υφιστάμενων κατασκευών από σκυρόδεμα με ελάχιστη ή και χωρίς καταστροφική δειγματοληψία.

Η ερευνητική προσέγγιση συνδυάζει αριθμητικές προσομοιώσεις με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και εκτεταμένο πειραματικό πρόγραμμα. Το αριθμητικό σκέλος περιλαμβάνει 156 παραμετρικές αναλύσεις FEM σε τρία υλικά (σκυρόδεμα, αλουμίνιο, χάλυβας), με χρήση του λογισμικού PLAXIS 2D/3D. Το πειραματικό σκέλος βασίζεται σε 232 πυρήνες σκυροδέματος από υφιστάμενες κατασκευές και 12 δοκίμια μετάλλων (αλουμίνιο και χάλυβας) γνωστών ιδιοτήτων για σκοπούς επαλήθευσης.

1.3.2 Γενικός Στόχος

Γενικός στόχος της παρούσας διατριβής είναι **η βελτίωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας στον προσδιορισμό των δυναμικών μηχανικών παραμέτρων** του σκυροδέματος και των βράχων— του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E_d και του δυναμικού λόγου Poisson ν_d — μέσω των μεθόδων UPV και IE, με ιδιαίτερη έμφαση στην εφαρμογή τους σε κυλινδρικά δοκίμια μικρής λυγηρότητας ($L/D \geq 0,8$) που προκύπτουν κατά την πυρηνοληψία υφιστάμενων κατασκευών.

Ειδικότερα, η έρευνα επιδιώκει: (α) τον εντοπισμό και την ποσοτικοποίηση των πηγών σφάλματος που εγγενώς συνοδεύουν τις δύο μεθόδους, (β) την ανάπτυξη ολοκληρωμένου συστήματος διορθωτικών συντελεστών που αντιμετωπίζει τις επιδράσεις της γεωμετρίας, της μάζας του αισθητήρα και της αδράνειας κατά τη δοκιμή IE, (γ) τη θεμελίωση μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό του ν_d χωρίς προηγούμενη γνώση αυτού, και (δ) τη διατύπωση εμπειρικών σχέσεων και πρακτικών οδηγιών που θα επιτρέψουν στον μηχανικό πράξης τη μείωση των θέσεων πυρηνοληψίας χωρίς απώλεια αξιοπιστίας.

1.3.3 Ειδικοί Στόχοι και Ερευνητικά Ερωτήματα

Οι ειδικοί στόχοι της διατριβής εξειδικεύονται ως εξής, με κάθε στόχο να συνοδεύεται από το αντίστοιχο ερευνητικό ερώτημα.

Στόχος 1: Ποσοτικοποίηση του σφάλματος στη μέθοδο UPV

- Ποιο είναι το μέγεθος του σφάλματος στον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E_d όταν υιοθετείται μια αυθαίρετη τιμή του λόγου Poisson κατά

την εφαρμογή της μεθόδου UPV, και πώς διαφοροποιείται αυτό το σφάλμα ως συνάρτηση της πραγματικής τιμής του ν_d ;

Στόχος 2: Κριτική αξιολόγηση της UPV ως αυτόνομης δοκιμής

- Μπορεί η μέθοδος UPV να χρησιμοποιηθεί ως μεμονωμένη δοκιμή για τον αξιόπιστο προσδιορισμό του E_d , και εάν ναι, υπό ποιες προϋποθέσεις και με ποια μέγιστη αναμενόμενη αβεβαιότητα;

Στόχος 3: Αξιολόγηση της IE ως αυτόνομης δοκιμής

- Μπορεί η μέθοδος IE, η οποία θεωρητικά δεν απαιτεί εκ των προτέρων γνώση του ν_d , να λειτουργήσει στην πράξη ως αυτόνομη δοκιμή προσδιορισμού του E_d , λαμβανομένης υπόψη της εξάρτησης των διορθωτικών συντελεστών σχήματος από τον λόγο Poisson;

Στόχος 4: Ανάπτυξη διορθωτικών συντελεστών σχήματος, μάζας και αδράνειας

- Να αναπτυχθούν, μέσω παραμετρικών αναλύσεων FEM, τρεις διακριτοί διορθωτικοί συντελεστές — ο συντελεστής σχήματος (SCF), ο συντελεστής μάζας αισθητήρα (MCF) και ο συντελεστής αδράνειας (ICF) — ως συναρτήσεις της λυγηρότητας L/D και του ν_d , και να περιγραφούν με αναλυτικές εμπειρικές εξισώσεις μέσω στατιστικής παλινδρόμησης.

Στόχος 5: Επέκταση και πειραματική επαλήθευση σε κοντούς κυλίνδρους

- Να ελεγχθεί πειραματικά η εγκυρότητα των προτεινόμενων διορθωτικών συντελεστών σε δοκίμια με λυγηρότητα $L/D \geq 0,8$, με ιδιαίτερη έμφαση στην τιμή $L/D = 1$ που αντιστοιχεί στον τυπικό πυρήνα πυρηνοληψίας. Η επαλήθευση περιλαμβάνει δοκίμια αλουμινίου και χάλυβα γνωστών ιδιοτήτων καθώς και πυρήνες σκυροδέματος από υφιστάμενες κατασκευές.

Στόχος 6: Προσδιορισμός του δυναμικού λόγου Poisson μέσω της IE

- Να αναπτυχθεί και να αξιολογηθεί μεθοδολογία προσδιορισμού του ν_d αξιοποιώντας τη σχέση μεταξύ των ιδιοσυχνοτήτων της 1ης και της 2ης ιδιομορφής (f_1 , f_2) κυλινδρικών δοκιμίων, ώστε η IE να δύναται να χρησιμοποιηθεί ως μοναδική δοκιμή χωρίς εξωτερική πληροφορία για τον λόγο Poisson. Παράλληλα, να διερευνηθεί η αξιοπιστία εναλλακτικών μεθοδολογιών βασισμένων στον λόγο οριζόντιων και κατακόρυφων επιταχύνσεων κατά μήκος της πλευρικής επιφάνειας του δοκιμίου.

Στόχος 7: Ανάπτυξη ολοκληρωμένης μεθοδολογίας UPIES

- Να αναπτυχθεί μια τυποποιημένη μεθοδολογία συνδυαστικής χρήσης UPV και IE (UPIES), η οποία αξιοποιεί τους διορθωτικούς συντελεστές SCF και MCF για τον ταυτόχρονο προσδιορισμό του E_d , του G_d και του ν_d κυλινδρικών δοκιμίων, ελαχιστοποιώντας την ανάγκη για αυθαίρετες υποθέσεις.

Στόχος 8: Εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης θλιπτικής αντοχής, ταχυτήτων διάδοσης και ειδικού βάρους

- Να προταθούν εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού τόσο της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής F_c όσο και των δυναμικών παραμέτρων E_d και ν_d του σκυροδέματος, ως συναρτήσεων των ταχυτήτων διάδοσης (V_p , V_c) και του ειδικού βάρους γ_c , αξιοποιώντας το εκτεταμένο πειραματικό δείγμα πυρήνων σκυροδέματος και εργαστηριακών δοκιμών

1.4 Σημαντικότητα της Έρευνας

1.4.1 Επιστημονική Συνεισφορά

Η έρευνα αυτή συνεισφέρει στην επιστημονική γνώση στους ακόλουθους άξονες:

(α) Παρέχει για πρώτη φορά συστηματική ποσοτικοποίηση του σφάλματος που εισάγεται στον προσδιορισμό του E_d όταν υιοθετείται μια αυθαίρετη τιμή του λόγου Poisson στη μέθοδο UPV (Στόχοι 1, 2).

(β) Αναπτύσσει ολοκληρωμένο σύνολο διορθωτικών συντελεστών που λαμβάνουν υπόψη παράγοντες που έχουν αγνοηθεί ή υποτιμηθεί στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, όπως η μάζα του αισθητήρα και η αδράνειά του (Στόχοι 3, 4, 5).

(γ) Επεκτείνει την εφαρμογή της μεθόδου IE σε κοντούς κυλίνδρους με λυγηρότητα $L/D \geq 0,8$, καλύπτοντας ένα κρίσιμο κενό για την αξιολόγηση πυρήνων σκυροδέματος (Στόχος 5).

(δ) Προτείνει δύο μεθοδολογίες προσδιορισμού του ν_d μέσω μίας μόνο δοκιμής IE, βασιζόμενες στην καταγραφή οριζόντιων και κατακόρυφων επιταχύνσεων επί της πλευρικής επιφάνειας του δοκιμίου και καθορίζει τη βέλτιστη θέση τοποθέτησης του αισθητήρα ως συνάρτηση της λυγηρότητας (Στόχος 6).

(ε) Αξιολογεί τη δυνατότητα εναλλακτικού υπολογισμού του ν_d μέσω του λόγου της δεύτερης προς την πρώτη κυρίαρχη ιδιοσυχνότητα ($\frac{f_2}{f_1}$), αναδεικνύοντας τους πρακτικούς περιορισμούς της προσέγγισης αυτής σε δοκίμια μικρής λυγηρότητας (Στόχος 6).

(στ) Αναπτύσσει την ολοκληρωμένη μεθοδολογία UPIES (Ultrasonic Pulse Velocity – Impact Echo Synergy), η οποία αξιοποιεί τον ταυτόχρονο προσδιορισμό του E_d και του ν_d μέσω συνδυαστικής χρήσης UPV και IE, εξαλείφοντας την ανάγκη υιοθέτησης αυθαίρετης τιμής του λόγου Poisson (Στόχος 7).

(ζ) Προτείνει εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού θλιπτικής αντοχής και δυναμικών παραμέτρων με βελτιωμένη ακρίβεια (Στόχος 8).

1.4.2 Πρακτική Σημασία

Η πρακτική σημασία της έρευνας είναι πολύπλευρη. Οι συσχετίσεις μεταξύ των μετρήσεων NDT και των καταστροφικών δοκιμών αντοχής επηρεάζουν τις αποφάσεις αποδοχής για την ευρύτερη υιοθέτηση των NDT. Η ανάπτυξη αξιόπιστων πρωτοκόλλων που μειώνουν ή εξαλείφουν την ανάγκη για βαθμονόμηση μέσω πυρηνοληψιών αποτελεί

σημαντική πρόοδο για τη βιομηχανία των κατασκευών, καθώς επιτρέπει την οικονομικότερη και ταχύτερη αξιολόγηση υφιστάμενων κατασκευών.

Η διαχρονική προτίμηση της UPV λόγω της απλότητάς της δέχεται πλέον ανταγωνισμό, καθώς η βιβλιογραφική ανασκόπηση του Κεφαλαίου 2 καταδεικνύει την αυξανόμενη αναλυτική σταθερότητα της IE για την αξιολόγηση των E και ν [1]. Καθώς εμφανίζονται περισσότερα συγκριτικά σύνολα δεδομένων — ιδίως εκείνα που συνδέουν και τις δύο μεθόδους άμεσα με δεδομένα μονοαξονικής θλίψης — ενισχύεται η δυνατότητα αναλύσεων IE στις ρουτίνες αξιολόγησης σκυροδέματος που μέχρι πρόσφατα βασιζόνταν αποκλειστικά σε μετρήσεις UPV.

Η βέλτιστη στρατηγική δεν εδράζεται στην αποκλειστική χρήση μίας μεθόδου, αλλά στον σχεδιασμό πρωτοκόλλων που αξιοποιούν τα πλεονεκτήματα κάθε μεθόδου μέσω σταδίων διασταυρούμενης επιβεβαίωσης, βασισμένων σε πειραματική βαθμονόμηση ανά σύνθεση σκυροδέματος και περιβαλλοντική συνθήκη [13]. Η μεθοδολογία UPIES που αναπτύσσεται στην παρούσα διατριβή (Στόχος 7) αποτελεί ένα συγκεκριμένο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα Κεφάλαια 3–8 αποτελούν τη βάση μιας τέτοιας ολοκληρωμένης προσέγγισης.

1.5 Περιορισμοί της Έρευνας

Παρά την εκτεταμένη πειραματική και αριθμητική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε, η παρούσα έρευνα υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και την εφαρμογή των συστάσεων.

1.5.1 Περιορισμοί Υλικών και Δειγμάτων

Η πειραματική έρευνα βασίστηκε σε πυρήνες σκυροδέματος από υπάρχουσες κατασκευές και σε εργαστηριακά δοκίμια αλουμινίου και χάλυβα. Αν και το σύνολο των 232 πυρήνων σκυροδέματος παρέχει σημαντική στατιστική βάση, η ποικιλομορφία των συνθέσεων σκυροδέματος που αντιπροσωπεύεται μπορεί να μην καλύπτει πλήρως το εύρος των σύγχρονων ειδικών μειγμάτων (π.χ. υπερυψηλής αντοχής, ινοπλισμένα, αυτοσυμπυκνούμενα). Επομένως, η γενίκευση των εμπειρικών σχέσεων σε εξειδικευμένα μείγματα απαιτεί περαιτέρω επαλήθευση.

1.5.2 Περιορισμοί Γεωμετρίας

Η επέκταση της μεθόδου IE σε δοκίμια με λυγνρότητα $L/D \geq 0,8$ αποτελεί σημαντική καινοτομία, όμως η πλειονότητα των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια. Η εφαρμογή των ευρημάτων σε πιο πολύπλοκες γεωμετρίες (π.χ. πλάκες με μεταβλητό πάχος, δοκοί, υποστυλώματα, με περίπλοκη διατομή) ενδέχεται να απαιτήσει πρόσθετες προσαρμογές των διορθωτικών συντελεστών.

1.5.3 Περιορισμοί Περιβαλλοντικών Συνθηκών

Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν υπό ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία). Η μεταφορά των μεθοδολογιών σε πραγματικές συνθήκες πεδίου, όπου οι περιβαλλοντικοί παράγοντες ποικίλλουν σημαντικά, μπορεί να εισάγει πρόσθετες πηγές σφάλματος που δεν έχουν πλήρως διερευνηθεί στην παρούσα μελέτη.

1.5.4 Περιορισμοί Αριθμητικής Προσομοίωσης

Οι αριθμητικές αναλύσεις βασίστηκαν σε υποθέσεις ιδανικών ομογενών και ισотροπικών υλικών. Αν και αυτές οι υποθέσεις είναι αναγκαίες για την απλοποίηση του υπολογιστικού προβλήματος και την εξαγωγή θεωρητικών συμπερασμάτων, το πραγματικό σκυρόδεμα είναι ένα ανομοιογενές, πολυφασικό υλικό με τοπικές διακυμάνσεις στις μηχανικές ιδιότητες. Η επίδραση της μικροδομής του σκυροδέματος στη διάδοση των κυμάτων δεν έχει μοντελοποιηθεί σε μικροσκοπικό επίπεδο.

1.5.5 Περιορισμοί Εξοπλισμού και Συχνοτήτων

Οι μετρήσεις UPV πραγματοποιήθηκαν σε τυποποιημένη συχνότητα 54kHz και 150kHz βάσει προτύπων, ενώ οι μετρήσεις IE κάλυψαν ένα εύρος συχνοτήτων ανάλογα με το ύψος των δοκιμών. Η επίδραση διαφορετικών συχνοτήτων διέγερσης και διαφορετικών τύπων αισθητήρων στην ακρίβεια των μετρήσεων δεν εξετάστηκε συστηματικά.

1.5.6 Περιορισμοί Χρονικής Εξέλιξης

Η έρευνα επικεντρώθηκε στον προσδιορισμό των μηχανικών παραμέτρων σε πυρήνες από πραγματικές κατασκευές. Η χρονική εξέλιξη των ιδιοτήτων του σκυροδέματος λόγω γήρανσης, περιβαλλοντικής έκθεσης ή προοδευτικής βλάβης υπαρχουσών κατασκευών δεν αποτέλεσε αντικείμενο της μελέτης. Η εφαρμογή των μεθοδολογιών για την παρακολούθηση της χρονικής εξέλιξης των ιδιοτήτων απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση.

1.5.7 Στατιστικοί Περιορισμοί

Οι προτεινόμενες εμπειρικές σχέσεις αναπτύχθηκαν με βάση στατιστική ανάλυση παλινδρόμησης. Όπως συμβαίνει με κάθε εμπειρικό μοντέλο, υπάρχει εγγενής αβεβαιότητα στις προβλέψεις, ειδικά κοντά στα όρια του εύρους των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξή τους. Η εξωτερική επικύρωση των μοντέλων σε ανεξάρτητα σύνολα δεδομένων θα ενισχύσει την εμπιστοσύνη στην προβλεπτική τους ικανότητα.

1.6 Επισκόπηση της δομής της διατριβής

Η δομή της παρούσας διατριβής περιλαμβάνει δέκα Κεφάλαια (συμπεριλαμβανομένου του παρόντος) το περιεχόμενο των οποίων περιγράφεται παρακάτω:

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται εκτενής ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος, τη σχέση δυναμικού και στατικού μέτρου ελαστικότητας, καθώς και τις μεθόδους UPV και IE. Εξετάζονται οι αρχές λειτουργίας, οι παράγοντες επιρροής, τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί κάθε μεθόδου, ενώ ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στις εμπειρικές συσχετίσεις θλιπτικής αντοχής με παραμέτρους NDT.

Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται η αριθμητική μεθοδολογία που υιοθετήθηκε, η οποία βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Παρουσιάζονται η θεωρητική θεμελίωση, οι παράμετροι της δυναμικής ανάλυσης (απόσβεση Rayleigh, ολοκλήρωση Newmark), το υπολογιστικό περιβάλλον PLAXIS 2D/3D, η στρατηγική παραμετροποίησης και η μεθοδολογία ανάλυσης ευαισθησίας OAT.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα 72 αξονοσυμμετρικών αναλύσεων 2D για τον προσδιορισμό του διορθωτικού συντελεστή σχήματος (SCF) ως συνάρτηση της λυγηρότητας L/D και του λόγου Poisson. Προτείνεται εμπειρική εξίσωση υπολογισμού του SCF μέσω στατιστικής παλινδρόμησης.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα 24 τρισδιάστατων αναλύσεων σε δοκίμια χάλυβα και αλουμινίου υπό διαμήκη και στρεπτική κρούση, από τις οποίες προσδιορίζονται οι διορθωτικοί συντελεστές μάζας αισθητήρα (MCF) και αδράνειας (ICF).

Στο **Κεφάλαιο 6** διερευνάται η δυνατότητα αυτόνομου προσδιορισμού του δυναμικού λόγου Poisson αποκλειστικά μέσω της μεθόδου IE, μέσω 60 αξονοσυμμετρικών αναλύσεων 2D. Εξετάζονται δύο εναλλακτικές μεθοδολογίες, βασιζόμενες στην καταγραφή πλευρικών επιταχύνσεων κατά μήκος της ελεύθερης επιφάνειας του δοκιμίου.

Στο **Κεφάλαιο 7** περιγράφεται το πειραματικό πρόγραμμα, το οποίο περιλαμβάνει δοκιμές σε 12 κυλινδρικά δοκίμια αλουμινίου και χάλυβα γνωστών ιδιοτήτων για σκοπούς επαλήθευσης, καθώς και σε 232 πυρήνες σκυροδέματος από υφιστάμενες κατασκευές. Περιγράφονται ο εξοπλισμός, η μεθοδολογία μέτρησης UPV, IE και μονοαξονικής θλίψης, καθώς και η επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων.

Στο **Κεφάλαιο 8** αναπτύσσονται εμπειρικές σχέσεις συσχέτισης της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής, των ταχυτήτων διάδοσης και του ειδικού βάρους, αξιοποιώντας το σύνολο του πειραματικού δείγματος πυρήνων σκυροδέματος.

Στο **Κεφάλαιο 9** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της έρευνας. Ποσοτικοποιείται το σφάλμα της UPV, αξιολογείται η IE ως αυτόνομη και ως συνδυαστική δοκιμή μέσω της μεθοδολογίας UPIES, επαληθεύονται πειραματικά οι διορθωτικοί συντελεστές, και εξετάζεται η δυνατότητα προσδιορισμού του λόγου Poisson μέσω μίας μόνο δοκιμής IE.

Στο **Κεφάλαιο 10** συνοψίζονται τα συμπεράσματα κατά ερευνητικό στόχο, αξιολογούνται οι επιπτώσεις των ευρημάτων στην πρακτική εφαρμογή, και διατυπώνονται συστάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Οι μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα αποτελεί, μαζί με τον δομικό χάλυβα, το πλέον διαδεδομένο δομικό υλικό τόσο στην Ελλάδα όσο και διεθνώς. Ως ανομοιογενές, πολυφασικό σύνθετο υλικό — αποτελούμενο κατά προσέγγιση από 75% αδρανή, 15% τσιμέντο και 10% νερό [14]— παρουσιάζει μηχανική συμπεριφορά που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σύνθεση, τις συνθήκες σκλήρυνσης και τον βαθμό συμπύκνωσης. Η θλιπτική αντοχή αποτελεί την κύρια παράμετρο σχεδιασμού των κατασκευών από σκυρόδεμα [6], [15], καθώς η αντοχή σε εφελκυσμό αντιστοιχεί κατά μέσο όρο στο $\approx 10\%$ της θλιπτικής, κυμαινόμενη από 7–8% για υψηλής αντοχής σκυρόδεμα έως 11–12% για χαμηλής [16], [17]. Για την αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων υφιστάμενων κατασκευών έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που διακρίνονται σε μη καταστροφικές (NDT), οι οποίες εφαρμόζονται χωρίς επέμβαση στην κατασκευή, και σε καταστροφικές ή ημικαταστροφικές (DT), οι οποίες απαιτούν αποκοπή τεμαχίων από φέροντα στοιχεία [18]. Μέσω των NDT δύναται ο προσδιορισμός των δυναμικών ελαστικών παραμέτρων, ενώ μέσω των DT εξάγονται οι στατικές. Η αξιόπιστη αποτίμηση της συμπεριφοράς μιας κατασκευής κατά τη διάρκεια ενός δυναμικού γεγονότος (π.χ. σεισμός) απαιτεί τη χρήση δυναμικών παραμέτρων, ενώ η υιοθέτηση στατικών τιμών δεν αποτυπώνει την πραγματική εικόνα της λειτουργίας της κατασκευής. Η μεγάλη απόκλιση μεταξύ δυναμικών και στατικών παραμέτρων μπορεί να οδηγήσει σε μη αξιόπιστα αποτελέσματα ανάλυσης, με ενδεχόμενες συνέπειες τόσο οικονομικές όσο και σε θέματα ασφαλείας.

2.1.1 Μέτρο Ελαστικότητας (Young's Modulus)

Το μέτρο ελαστικότητας E , γνωστό ευρέως ως μέτρο Young προς τιμήν του Βρετανού φυσικού Thomas Young, αποτελεί βασική ελαστική σταθερά που ποσοτικοποιεί την ακαμψία ενός υλικού υπό μονοαξονική καταπόνηση εντός του ελαστικού ορίου [19]. Ορίζεται επισήμως ως ο λόγος της ορθής τάσης σ προς την αντίστοιχη ορθή ειδική παραμόρφωση ε και εκφράζεται με την εξίσωση (1).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

Η εξίσωση αυτή αποτελεί την αναλυτική διατύπωση του νόμου του Hooke για μονοδιάστατη ελαστική καταπόνηση, ο οποίος ισχύει εφόσον το υλικό παραμένει εντός του γραμμικώς ελαστικού πεδίου, δηλαδή για παραμορφώσεις μικρότερες του ελαστικού ορίου σ_y [20]. Από φυσικής άποψης, το E εκφράζει τη δυσκαμψία των διαμοριακών δεσμών του υλικού και αποτελεί έμμεσο μέτρο της αντίστασής του στην ελαστική

παραμόρφωση υπό εξωτερική φόρτιση. Υψηλές τιμές E υποδηλώνουν υλικό με υψηλή ακαμψία, το οποίο παραμορφώνεται ελάχιστα υπό δεδομένη τάση, ενώ χαμηλές τιμές αντιστοιχούν σε εύκαμπτα υλικά.

Σε μικροδομικό επίπεδο, το μέτρο ελαστικότητας συνδέεται με την κλίση του δυναμικού αλληλεπίδρασης μεταξύ γειτονικών ατόμων ή μορίων στη θέση ισορροπίας. Για κρυσταλλικά στερεά, η θεωρητική εκτίμηση του E βασίζεται στην εξίσωση (2).

$$E \approx \frac{1}{r_0} \left. \frac{d^2 U}{dr^2} \right|_{r=r_0} \quad (2)$$

όπου $U(r)$ είναι το δυναμικό ενέργειας αλληλεπίδρασης και r_0 η απόσταση ισορροπίας μεταξύ ατόμων [21]. Η ανωτέρω έκφραση ερμηνεύει γιατί υλικά με ισχυρούς διαμοριακούς δεσμούς, όπως ο χάλυβας ή το τιτάνιο, εμφανίζουν υψηλές τιμές E , σε αντίθεση με πολυμερή ή πορώδη υλικά με ασθενέστερους δεσμούς [19], [21]. Σημειωτέον ότι το μέτρο ελαστικότητας είναι κατά κανόνα ανεξάρτητο της θερμοκρασίας εντός εύλογων ορίων λειτουργίας, εμφανίζει όμως μείωση σε υψηλές θερμοκρασίες λόγω αύξησης της θερμικής διέγερσης των ατομικών πλεγμάτων [22].

2.1.1.1. Σχέση με Λοιπές Ελαστικές Σταθερές

Εντός του πλαισίου της γραμμικής ελαστικότητας για ισότροπα υλικά, το μέτρο ελαστικότητας E δεν αποτελεί ανεξάρτητη ποσότητα, αλλά συνδέεται αλγεβρικά με το σύνολο των ελαστικών σταθερών. Συγκεκριμένα, ισχύουν οι εξισώσεις (3) - (5) [20], [23].

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (5)$$

όπου G είναι το μέτρο διάτμησης, K το μέτρο όγκου (bulk modulus), ν ο λόγος Poisson και λ η πρώτη σταθερά Lamé. Οι ανωτέρω σχέσεις καταδεικνύουν ότι για ένα γραμμικώς ελαστικό, ισότροπο υλικό, δύο και μόνο ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές επαρκούν για την πλήρη περιγραφή της ελαστικής του συμπεριφοράς [20]. Επομένως, ο προσδιορισμός του E σε συνδυασμό με οποιαδήποτε εκ των G , K , ν ή λ καθορίζει μονοσήμαντα το σύνολο του ελαστικού ταχυστή.

2.1.1.2. Τιμές Μέτρου Ελαστικότητας για Δομικά Υλικά

Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας κυμαίνονται σε εύρος πολλών τάξεων μεγέθους μεταξύ των δομικών υλικών. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει χαρακτηριστικές τιμές όπως αυτές ορίζονται από διεθνή πρότυπα και βιβλιογραφικές πηγές.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικές τιμές μέτρου ελαστικότητας δομικών υλικών

Υλικό	Μέτρο Ελαστικότητας E	Πηγή
Δομικός χάλυβας	210 GPa	EN 1993-1-1 [24]
Σκυρόδεμα C30/37	≈ 33 GPa	EN 1992-1-1 [25]
Αλουμίνιο	70 GPa	[19]
Ξυλεία (κατά ίνες)	8–16 GPa	[26]
Γρανίτης	40–70 GPa	[27]
Αργιλώδες έδαφος	1–50 MPa	[27]

Ειδικά για το σκυρόδεμα, ο Ευρωκώδικας 2 (EN 1992-1-1) προβλέπει τον υπολογισμό του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας E_{cm} μέσω της εμπειρικής εξίσωσης (6).

$$E_{cm} = 22 \left(\frac{F_{cm}}{10} \right)^{0.3} \text{ (GPa)} \quad (6)$$

όπου F_{cm} είναι η μέση κυλινδρική θλιπτική αντοχή σε MPa. Η σχέση αυτή αντικατοπτρίζει την εξάρτηση της ακαμψίας του σκυροδέματος από τη σύνθεση του τσιμεντοπολτού και τα χαρακτηριστικά των αδρανών, και εφαρμόζεται για σκυρόδεμα κανονικής πυκνότητας $\rho \approx \frac{2400 \text{ kg}}{\text{m}^3}$ [25].

2.1.2 Σχέση δυναμικού και στατικού μέτρου ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας είναι μια βασική μηχανική ιδιότητα που αντιπροσωπεύει την αντίσταση ενός υλικού στην ελαστική παραμόρφωση υπό εφαρμοζόμενα φορτία. Στη δομική μηχανική, αυτή η παράμετρος είναι απαραίτητη για την ανάλυση της απόκρισης του οπλισμένου σκυροδέματος υπό δυναμικά φορτία και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των κατασκευών στο πέρασμα του χρόνου [28]. Οι σύγχρονες προδιαγραφές κατασκευής απαιτούν όλο και περισσότερο την επίτευξη συγκεκριμένων τιμών. Για παράδειγμα, ο σχεδιαστής του κτιρίου Two Union Square στο Σιάτλ απαίτησε σκυρόδεμα με ελάχιστο συντελεστή 50 GPa για να περιορίσει την υπερβολική παραμόρφωση και ταλάντωση [29]. Υπάρχει σαφής διάκριση μεταξύ του στατικού μέτρου ελαστικότητας E_s , που προσδιορίζεται μέσω δοκιμών αργής μονοαξονικής θλίψης, και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E_d , που προκύπτει από συνθήκες δόνησης ή διάδοσης κυμάτων.

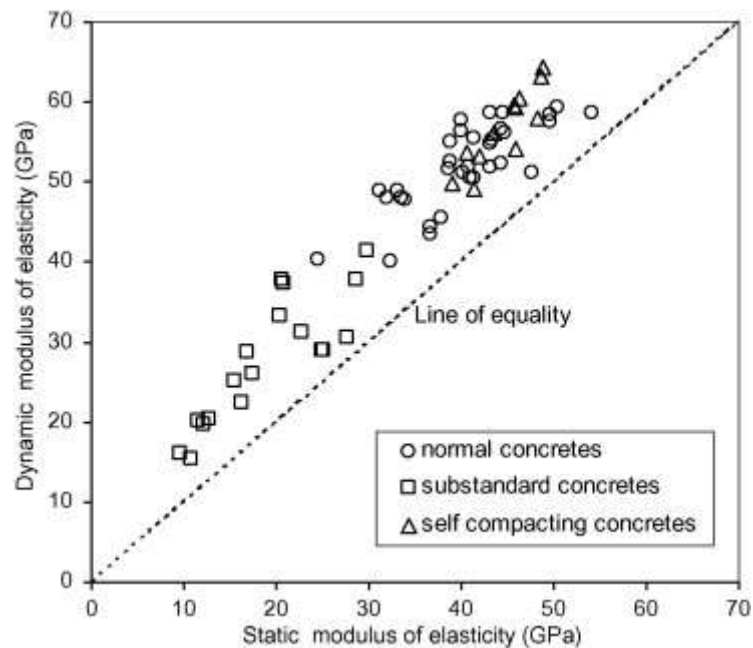
Ενώ το E_s , παραμένει η κύρια παράμετρος που χρησιμοποιείται σε κώδικες σχεδιασμού όπως ο ACI 318 και ο Ευρωκώδικας 2, η άμεση μέτρησή του γίνεται με καταστροφικές δοκιμές και είναι συχνά χρονοβόρα. Μόλις ανεγερθεί μια κατασκευή, οι ελαστικές ιδιότητες επί τόπου του έργου (in-situ) δεν μπορούν να μετρηθούν άμεσα χωρίς να προκληθεί ζημιά στην ίδια την κατασκευή. Συχνότερα το E_s συνάγεται από τη θλιπτική αντοχή συνοδευτικών κυλίνδρων μέσω της εφαρμογής καθιερωμένων εμπειρικών σχέσεων, αντί να μετράται άμεσα [29]. Το ενδιαφέρον για χρήση ΜΚΔ για την εξαγωγή του E_s , από το E_d , αυξάνεται συνεχώς, αν και η σχέση μεταξύ αυτών των δύο παραμέτρων

είναι πολύπλοκη και επηρεάζεται από μια πληθώρα παραγόντων που σχετίζονται με τα υλικά και το περιβάλλον. Μια αυθαίρετη υπόθεση του E_d , μπορεί να οδηγήσει σε ακατάλληλη αξιολόγηση της δομικής ασφάλειας. Ο Zhu, 2009, (όπως αναφέρεται στους Lu et al. (2013)) απέδειξε ότι εάν το E_d , υποτιμηθεί κατά 32%, η θεμελιώδης συχνότητα ενός φράγματος από σκυρόδεμα θα υπερεκτιμηθεί κατά περίπου 21% και το σεισμικό φορτίο θα υποτιμηθεί κατά περίπου 19% [30], [31].

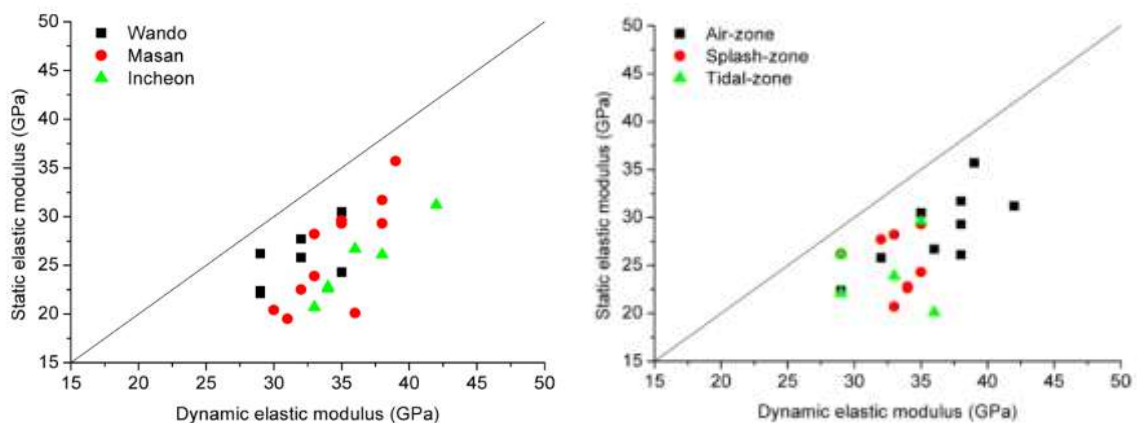
2.1.2.1. Θεωρητική βάση για την απόκλιση μεταξύ E_d και E_s

Μια συνεπής παρατήρηση σε όλες τις έρευνες είναι ότι το E_d είναι σημαντικά υψηλότερο από το E_s για το σκυρόδεμα. Διαχρονικά, αυτή η διαφορά αποδιδόταν στη μη γραμμική συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης του σκυροδέματος. Οι δυναμικές δοκιμές περιλαμβάνουν απειροελάχιστες παραμορφώσεις, καταγράφοντας μια τιμή πιο κοντά στο αρχικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας, ενώ οι στατικές δοκιμές περιλαμβάνουν υψηλότερες παραμορφώσεις, όπου οι μικρορωγμές και η μη γραμμικότητα του υλικού μειώνουν την παρατηρούμενη δυσκαμψία. Οι Yindirir et al. (2011) υπολόγισαν το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας χρησιμοποιώντας μια υποθετική τιμή του λόγου Poisson και το συνέκριναν με το στατικό μέτρο ελαστικότητας σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα της έρευνας φαίνονται στην Εικόνα 1 και δείχνουν ότι οι τιμές του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας που υπολογίστηκαν είναι, κατά μέσο όρο, περίπου 30% υψηλότερες από το στατικό μέτρο ελαστικότητας που προέκυψε από τις δοκιμές θραύσης [32]. Οι Han et al. (2009) εκτελώντας δοκιμές σε πυρήνες σκυροδέματος από τρεις λιμενικές ζώνες και τρεις διαφορετικές ζώνες παλιρροϊκής περιοχής, διαπίστωσαν ότι η σχέση μεταξύ του δυναμικού και του στατικού μέτρου ελαστικότητας ποικίλλει ανάλογα με την τοποθεσία του λιμανιού, πιθανώς λόγω των διαφορών στα υλικά ανάμειξης του σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα με ισχυρότερα αδρανή όπως φαίνεται στην Εικόνα 2 τείνει να έχει υψηλότερο δυναμικό μέτρο ελαστικότητας σε σύγκριση με το στατικό μέτρο ελαστικότητας [33].

Εντούτοις, άλλες έρευνες υποδηλώνουν ότι αυτό το επιχείρημα μπορεί να είναι ανεπαρκές, καθώς τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι τα αποτελέσματα των στατικών δοκιμών χαμηλής παραμόρφωσης (low strain) συχνά ευθυγραμμίζονται με τα δεδομένα των στατικών δοκιμών υψηλότερης παραμόρφωσης (high strain – quasi static). [29]. Επίσης, οι Lee et al. (2015) εκτελώντας πειραματικές δοκιμές σε σκυρόδεμα το οποίο εκτέθηκε σε υψηλή θερμοκρασία λόγω πυρκαγιάς, διαπίστωσαν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3, ότι το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας έδειξε γραμμική συσχέτιση με το στατικό.

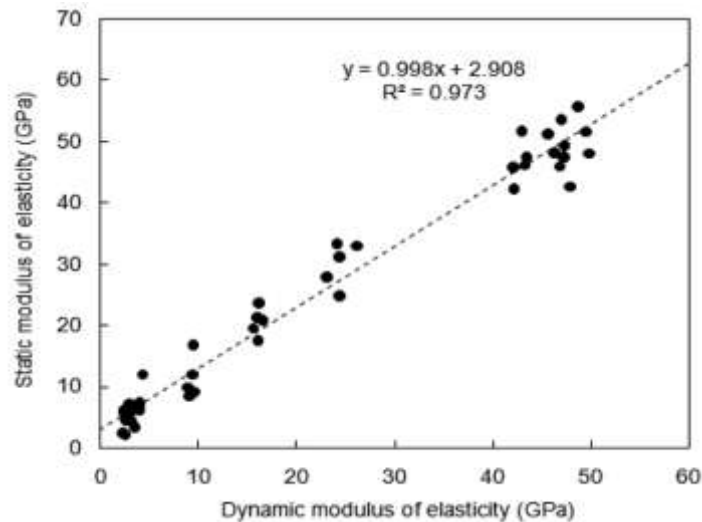


Εικόνα 1: Σχέση μεταξύ στατικού και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας για τρεις διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος [32]



Εικόνα 2: Πειραματικά αποτελέσματα δυναμικού και στατικού μέτρου ελαστικότητας, αριστερά από 3 διαφορετικές λιμενικές περιοχές και δεξιά από τρεις διαφορετικές ζώνες παλιρροϊκής περιοχής [33]

Μια εναλλακτική θεωρία υποστηρίζει ότι η σύνθετη φύση του σκυροδέματος —που αποτελείται από τσιμεντοκονίαμα και αδρανή— είναι ο κύριος παράγοντας της διαφοράς E_d και E_s . Ο Poronics, 2008, διεξήγαγε δοκιμές σε ειδικά παρασκευασμένα δείγματα σύνθετων υλικών δύο φάσεων με διαφορετικές αναλογίες τσιμεντοκονίας και χονδρόκοκκων αδρανών υλικών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το δυναμικό μέτρο τείνει να ακολουθεί τον κανόνα του ανώτερου ορίου του μοντέλου Voigt (παράλληλη διαμόρφωση), ενώ το στατικό βρίσκεται μεταξύ του ανώτερου ορίου του μοντέλου Voigt και του κατώτερου ορίου του μοντέλου Reuss. Αυτή η διαφορά στη συμπεριφορά του μείγματος εξηγεί γιατί το E_d υπερβαίνει το E_s σε ανομοιογενές σκυρόδεμα, αλλά όχι απαραίτητα σε πιο ομοιογενή δείγματα τσιμεντοκονίας.



Εικόνα 3: Σχέση μεταξύ στατικού και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας σε σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε πυρκαγιά [34]

Επιπλέον, η διαφορά συνδέεται άρρηκτα με τους ρυθμούς παραμόρφωσης. Υπό συνθήκες στατικής φόρτισης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C469, η φορτίο συμπίεσης εφαρμόζεται με σταθερό ρυθμό περίπου $241 \pm 34 \text{ kPa/s}$, που αντιστοιχεί σε ρυθμό παραμόρφωσης της τάξης των 10^{-6} s^{-1} , ο οποίος είναι σημαντικά χαμηλότερος από τις κυκλικές δυναμικές συνθήκες στις δοκιμές ΙΕ [30]. Πειραματικές μελέτες υπερηχητικού συντονισμού σε κυκλική φόρτιση έχουν δείξει ότι η μη γραμμικότητα της απόκρισης του σκυροδέματος εξαρτάται από το επίπεδο της εντατικής κατάστασης, γεγονός που υπεισέρχεται έμμεσα στα φάσματα ταλάντωσης σε δυναμικές δοκιμές μη-καταστροφικού ελέγχου [35]. Υπό στατικές φορτίσεις, οι μικρορωγμές εντός των αδρανών υλικών και στις διεπαφές αδρανών υλικών-μήτρας έχουν αρκετό χρόνο να αναπτυχθούν και να εξαπλωθούν, αυξάνοντας την παραμόρφωση και μειώνοντας το μετρούμενο μέτρο. Σε δυναμικές συνθήκες, η υψηλή συχνότητα δεν παρέχει αρκετό χρόνο για την εξάπλωση των μικρορωγμών, με αποτέλεσμα την μέτρηση υψηλότερης δυσκαμψίας.

2.1.2.2. Επίδρασεις των υλικών και του περιβάλλοντος

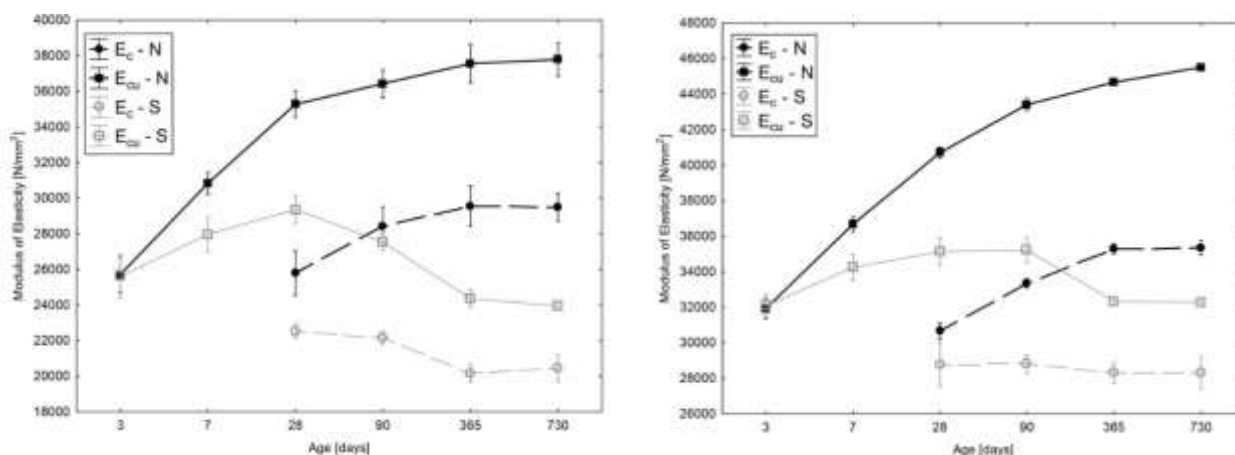
2.1.2.2.1. Επίδραση του τύπου και της ποιότητας των αδρανών υλικών

Τα αδρανή ασκούν μεγαλύτερη επίδραση στο E_s , παρά στο E_d . Οι Lu et al. (2013) ερεύνησαν σκυρόδεμα με σκληρά ασβεστολιθικά αδρανή (με μέτρο 68,6GPa) και σχετικά ασθενέστερα σχιστολιθικά αδρανή (με μέτρο 46,2GPa). Για το σκυρόδεμα με αδρανή ασβεστόλιθου, λόγος $\frac{E_s}{E_d}$ ήταν περίπου 92–97% στις 28 ημέρες, ενώ για το σκυρόδεμα με αδρανή σχιστόλιθου, η αναλογία αυτή μειώθηκε δραματικά σε μόλις 55–60%. Στις 28 ημέρες, το E_d του ασβεστολιθικού σκυροδέματος ήταν περίπου 20–25% υψηλότερο από αυτό του σχιστολιθικού σκυροδέματος με την ίδια αναλογία νερού προς τσιμέντο, αλλά για το στατικό E_s , αυτή η διαφορά αυξήθηκε σε σχεδόν 100%.

Αυτή η σημαντική διαφορά υπογραμμίζει ότι η εκτίμηση του E_d αποκλειστικά από το E_s , χρησιμοποιώντας εμπειρικές εξισώσεις όπως $E_d = 1,15 E_s$ μπορεί να είναι αρκετά εσφαλμένη για σκυρόδεμα που περιέχει ασθενέστερα αδρανή. Εάν το E_d ληφθεί ως 115% του E_s για σχιστολιθικό σκυρόδεμα, η εκτιμώμενη τιμή θα εξακολουθεί να είναι περίπου 30% χαμηλότερη από την πραγματική μετρούμενη τιμή, με πιθανό αποτέλεσμα τη σημαντική υποεκτίμηση των δυναμικών φορτίων στις κατασκευές [30].

2.1.2.2.2. Επίδραση των συνθηκών ωρίμανσης

Οι συνθήκες ωρίμανσης επηρεάζουν σημαντικά τόσο την ανάπτυξη όσο και τις τελικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας. Οι Kocab et al. (2017) απέδειξαν ότι το σκυρόδεμα που ωρίμασε κάτω από το νερό παρουσίασε σταθερή αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, με αρκετά απότομες αυξήσεις κατά τις πρώτες ημέρες. Αντίθετα, τα δείγματα που αποθηκεύτηκαν σε εργαστηριακές συνθήκες ($20 \pm 3^\circ\text{C}$, $50 \pm 10\%$ σχετική υγρασία) παρουσίασαν αρχικά μια λιγότερο σημαντική αύξηση, ακολουθούμενη από στασιμότητα ή ακόμη και μείωση των τιμών του μέτρου μεταξύ 28 και 90 ημερών. Η ταχεία εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια του σκυροδέματος επιταχύνει τη συρρίκνωση και η εσωτερική τάση που προκύπτει προκαλεί το σχηματισμό μικρορωγμών που επηρεάζουν αρνητικά την ανάπτυξη των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι το δυναμικό μέτρο των μη ωριμασμένων δειγμάτων μετά από 730 ημέρες ήταν συγκρίσιμο ή ακόμη και χαμηλότερο από τις τιμές των 3 ημερών, αποδεικνύοντας ότι η ανεπαρκής ωρίμανση οδηγεί σε ατελή ενυδάτωση του τσιμέντου και μη αναστρέψιμη βλάβη στη μικροδομή του σκυροδέματος [36]. Στην Εικόνα 4 με τετράγωνα φαίνεται E_d για δείγματα ωριμασμένα κάτω από το νερό (δείκτης N) και με κύκλους το E_s για δείγμα ωριμασμένα σε συνθήκες εργαστηρίου (δείκτης S). Σε όλες τις περιπτώσεις το E_d είναι μεγαλύτερο από το E_s ήδη από τις πρώτες 7 ημέρες ωρίμανσης.



Εικόνα 4: Διάγραμμα διακύμανσης δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E_{cu} και στατικού μέτρου ελαστικότητας E_c της Α και Β κατηγορίας δοκιμίων συναρτήσει της διαδικασίας σύνθεσής τους N και S [36]

2.1.2.2.3. Ηλικία και ανάπτυξη πρώιμης αντοχής

Το δυναμικό μέτρο αναπτύσσεται πολύ πιο γρήγορα από την αντοχή σε θλίψη σε πρώιμες ηλικίες. Οι Lu et al. (2013) διαπίστωσαν ότι το σκυρόδεμα σε 7 ημέρες μπορούσε

να επιτύχει περίπου το 83–95% της τιμής E_d των 28 ημερών, ανάλογα με τον τύπο του αδρανούς υλικού, ενώ η αντοχή σε θλίψη έφτασε μόνο το 65–78% της τιμής των 28 ημερών κατά την ίδια περίοδο [30]. Αυτή η ταχεία πρώιμη ανάπτυξη καθιστά τις δυναμικές δοκιμές ένα ισχυρό εργαλείο για την αξιολόγηση της δομής και τον ποιοτικό έλεγχο σε πρώιμη ηλικία, επιτρέποντας στους μηχανικούς να προβλέπουν τις μακροπρόθεσμες ιδιότητες από μετρήσεις που λαμβάνονται εντός της πρώτης εβδομάδας μετά τη χύτευση.

2.1.2.2.4. Επίδραση του μεγέθους και της γεωμετρίας των δειγμάτων

Για σκυρόδεμα κανονικής αντοχής (≤ 40 MPa), τα μεγέθη κυλίνδρων 100×200 mm και 150×300 mm δεν οδηγούν σε σημαντικές διαφορές στις τιμές του μέτρου ελαστικότητας. Οι Lee et al. (2015) διαπίστωσαν ότι το μέσο απόλυτο σφάλμα μεταξύ των καμπυλών καλύτερης προσαρμογής για τα δύο μεγέθη κυλίνδρων ήταν μικρότερο από 0,1 GPa στην περιοχή αντοχής σε θλίψη 10–40 MPa, αντιθέτως στο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (> 40 MPa), παρατηρείται σημαντική επίδραση του μεγέθους. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στο «φαινόμενο τοιχώματος», όπου η ποσότητα κονιάματος που απαιτείται για να γεμίσει ο χώρος μεταξύ των χονδροειδών σωματιδίων αδρανούς υλικού και του τοιχώματος του καλουπιού είναι μεγαλύτερη από εκείνη που απαιτείται στην εσωτερική μάζα, και δεδομένου ότι το τσιμεντοκονίαμα έχει γενικά υψηλότερη ελαστικότητα από το σκυρόδεμα, τα μικρότερα δείγματα παρουσιάζουν αυξημένη αποτελεσματική ελαστικότητα [28]

2.1.2.2.5. Εμπειρικές συσχετίσεις και μαθηματικά μοντέλα

Για να συμβιβάσουν τις διαφορές μεταξύ στατικών και δυναμικών μέτρων, οι ερευνητές έχουν αναπτύξει διάφορες εμπειρικές εξισώσεις. Οι Lydon και Balendran, (όπως δημοσιεύεται στον Neville, 2011), πρότειναν μια απλή γραμμική σχέση: $E_s = 0,83 E_d$, η οποία συχνά θεωρείται η απλούστερη συσχέτιση, αλλά μπορεί να είναι ακατάλληλη για σκυρόδεμα υψηλής αντοχής. Το βρετανικό πρότυπο BS8110 Μέρος 2 παρέχει μια εναλλακτική εξίσωση: $E_s = 1,25 E_d - 19$, αν και αυτή η έκφραση δεν ισχύει για ελαφρύ σκυρόδεμα ή σκυρόδεμα που περιέχει περισσότερο από 500 kg/m^3 τσιμέντου [15].

Ο Poronics πρότεινε μια πιο γενική σχέση που λαμβάνει υπόψη την πυκνότητα του σκυροδέματος: $E_s = \frac{449,09 \cdot E_d^{1,4}}{w_c}$, η οποία ισχύει τόσο για το ελαφρύ όσο και για το κανονικού βάρους σκυρόδεμα. Αυτή η εξίσωση έχει δείξει αποτελεσματικά αποτελέσματα για σκυρόδεμα με αντοχή σε θλίψη έως 60 MPa, ανεξάρτητα από το μέγεθος του δείγματος, με μέσο απόλυτο σφάλμα μικρότερο από 1,5 [28]. Επιπρόσθετα, ο Noguchi, 2007 στην εξίσωσή του ενσωματώνει συντελεστές διόρθωσης για συγκεκριμένα χονδροειδή αδρανή και ορυκτά πρόσμικτα, παρέχοντας σημαντικά υψηλότερη ακρίβεια με μέσο απόλυτο σφάλμα κάτω από 2 GPa σε σύγκριση με τις τυπικές εξισώσεις κώδικα [37]

Για τις μετρήσεις διαμήκους συντονισμού σε κυλίνδρους, η μέθοδος διόρθωσης Love χρησιμοποιεί έναν υποθετικό λόγο Poisson για να παρέχει πιο ακριβή αποτελέσματα που ευθυγραμμίζονται με τις εγκάρσιες μετρήσεις. Ο Poronics, 2008, απέδειξε ότι η εφαρμογή της διόρθωσης Love στα δεδομένα διαμήκους συντονισμού βελτιώνει τη συμφωνία με τις εγκάρσιες μετρήσεις, μειώνοντας τη συστηματική απόκλιση μεταξύ διαφορετικών δυναμικών τρόπων δοκιμής [29].

2.1.2.2.6. Συμφωνία και αποκλίσεις μεταξύ δυναμικών μεθόδων δοκιμής

Οι Lu et al. (2013) απέδειξαν μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και πειραματικής επικύρωσης ότι το δυναμικό μέτρο που λαμβάνεται από τη μέθοδο IE είναι ουσιαστικά ισοδύναμο με αυτόν που προκύπτει από τη συμβατική μέθοδο εγκάρσιας συχνότητας συντονισμού, με διαφορές γενικά μικρότερες από 2%. Η ανάλυσή τους επιβεβαίωσε ότι οι ταχύτητες των P-κυμάτων που υπολογίστηκαν από τις μέγιστες συχνότητες στα φάσματα απόκρισης αντιστοιχούν καλά στις θεωρητικές μονοδιάστατες ταχύτητες των P-κυμάτων τόσο για πρίσματα 100×100×400 mm όσο και για κυλίνδρους Ø150×300 mm [30].

Παρόλα αυτά, υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων δυναμικών δοκιμών. Ο Poronics, 2008, διαπίστωσε ότι οι μετρήσεις εγκάρσιου συντονισμού αποδίδουν σταθερά υψηλότερες τιμές E_d από τις μετρήσεις διαμήκους συντονισμού σε πανομοιότυπα δείγματα, με την απόκλιση να αυξάνεται καθώς αυξάνεται το E_d [29]. Οι Lee et al. (2015) διαπίστωσαν ότι ο λόγος E_s/E_d ήταν κατά μέσο όρο μόνο 0,56, μακριά από τη γραμμή ισότητας και από τις καθιερωμένες εμπειρικές εξισώσεις, υποδηλώνοντας ότι οι εκτιμήσεις E_d από την ταχύτητα του κύματος P ενδέχεται να μην είναι αξιόπιστες για το σκυρόδεμα χωρίς προσεκτική εξέταση του λόγου Poisson [28].

2.1.2.3. Συμπέρασμα

Η σχέση μεταξύ του στατικού και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας στο σκυρόδεμα στο σκυρόδεμα δεν είναι μονοσήμαντη και εξαρτάται από τον τύπο και την ποιότητα των αδρανών υλικών, τις επιδράσεις του ρυθμού παραμόρφωσης, τις συνθήκες ωρίμανσης, την ηλικία του δείγματος και τη μεθοδολογία δοκιμών. Ενώ το στατικό μέτρο παραμένει η βάση για τον δομικό σχεδιασμό, οι δυναμικές μέθοδοι, προσφέρουν, μη καταστρεπτικές και οικονομικά αποδοτικές εναλλακτικές λύσεις για τον έλεγχο ποιότητας επί τόπου και την αξιολόγηση της δομής.

Εντούτοις, το E_d δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά του E_s . Η ακριβής μετατροπή απαιτεί την επιλογή εμπειρικών μοντέλων, όπως οι εξισώσεις Poronics ή Noguchi, που λαμβάνουν υπόψη τον τύπο του αδρανούς υλικού, το ιστορικό σκλήρυνσης και τη συγκεκριμένη δυναμική μέθοδο που χρησιμοποιείται. Η αποκλειστική χρήση μιας σταθερής ποσοστιαίας σχέσης μπορεί να οδηγήσει σε επικίνδυνες υποτιμήσεις των δυναμικών φορτίων, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται αδύναμα αδρανή υλικά.

2.1.3 Ο λόγος Poisson

Ο λόγος Poisson αποτελεί μία από τις βασικές ελαστικές σταθερές των υλικών και εκφράζει την αναλογία μεταξύ της εγκάρσιας (πλευρικής) παραμόρφωσης και της αξονικής παραμόρφωσης ενός υλικού υπό μονοαξονική φόρτιση [19]. Ορίζεται επισήμως από την εξίσωση (7).

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\text{trans}}}{\varepsilon_{\text{axial}}} \quad (7)$$

όπου $\varepsilon_{\text{trans}}$ είναι η εγκάρσια ειδική παραμόρφωση και $\varepsilon_{\text{axial}}$ η αξονική ειδική παραμόρφωση. Το αρνητικό πρόσημο εισάγεται συμβατικά, ώστε ο λόγος Poisson να λαμβάνει θετικές τιμές για τα συνήθη ισότροπα υλικά, τα οποία συστέλλονται εγκάρσια όταν εφελκύνονται αξονικά [38].

Η θεωρητική θεμελίωση του λόγου Poisson εντάσσεται στο πλαίσιο της γραμμικής ελαστικότητας για ισότροπα υλικά. Σύμφωνα με τον γενικευμένο νόμο του Hooke σε τρεις διαστάσεις, οι ειδικές παραμορφώσεις στους τρεις κύριους άξονες συνδέονται με τις αντίστοιχες τάσεις μέσω των εξισώσεων (8) - (10) [20].

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] \quad (8)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})] \quad (9)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] \quad (10)$$

όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας και σ_{ij} οι κύριες ορθές τάσεις. Οι ανωτέρω εξισώσεις καταδεικνύουν ότι ο λόγος Poisson λειτουργεί ως συζευκτική παράμετρος μεταξύ των παραμορφώσεων κατά τους διαφορετικούς άξονες, ελέγχοντας τη μεταφορά επιδράσεων από τη μία διεύθυνση στις υπόλοιπες [20], [38].

2.1.3.1. Θερμοδυναμικοί Περιορισμοί

Από θεωρητικής άποψης, η θερμοδυναμική της ελαστικότητας επιβάλλει αυστηρούς περιορισμούς στις τιμές που δύναται να λάβει ο λόγος Poisson για ένα γραμμικώς ελαστικό, ισότροπο υλικό. Συγκεκριμένα, η θετικότητα της ενέργειας παραμόρφωσης απαιτεί $-1 < \nu \leq 0,5$ [19], [23]. Το άνω όριο $\nu = 0,5$ αντιστοιχεί σε υλικά που θεωρούνται πλήρως ασυμπίεστα (incompressible materials), όπως το ελαστικό (rubber) σε κατάσταση μεγάλων παραμορφώσεων, για τα οποία ο όγκος παραμένει αμετάβλητος κατά τη φόρτιση [23]. Όπως είδαμε και στο Κεφάλαιο 2.1.1.1, η συνθήκη αναλλοίωτου όγκου συνδέεται άμεσα με το μέτρο όγκου K , το οποίο εκφράζεται συναρτήσει των E και ν από την εξίσωση (4). Για $\nu \rightarrow 0,5$, προκύπτει $K \rightarrow \infty$, επιβεβαιώνοντας την ασυμπίεστότητα του υλικού, ενώ για $\nu \leq 0$, το υλικό επεκτείνεται εγκάρσια υπό αξονική εφελκυστική φόρτιση, συμπεριφορά που χαρακτηρίζει τα λεγόμενα αυξητικά υλικά (Auxetics) [39].

2.1.3.2. Σχέση με Λοιπές Ελαστικές Σταθερές

Ο λόγος Poisson δεν αποτελεί ανεξάρτητη ποσότητα, αλλά συνδέεται αλγεβρικά με τις λοιπές ελαστικές σταθερές του ισότροπου υλικού. Μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας E , του μέτρου διάτμησης G και του λόγου Poisson ν ισχύει η εξίσωση (3) που περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 2.1.1.1, η οποία επιτρέπει τον υπολογισμό οποιασδήποτε εκ των τριών ποσοτήτων, εφόσον είναι γνωστές οι άλλες δύο.

2.1.3.3. Τιμές Λόγου Poisson για Δομικά Υλικά

Οι τιμές του λόγου Poisson ποικίλλουν σημαντικά μεταξύ των δομικών υλικών. Ο Πίνακας 2 συνοψίζει τις χαρακτηριστικές τιμές για υλικά ευρείας χρήσης, όπως αυτές προσδιορίζονται από διεθνή πρότυπα και βιβλιογραφικές πηγές.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικές τιμές λόγου Poisson δομικών υλικών

Υλικό	Λόγος Poisson ν	Πηγή
Δομικός χάλυβας	0,27 – 0,30	EN 1993-1-1 [24]
Σκυρόδεμα	0,15 – 0,20	EN 1992-1-1 [25]
Ξυλεία	0,20 – 0,45	[26]
Αργίλιο (Al)	0,32 – 0,33	[19]
Βράχος (γρανίτης)	0,20 – 0,30	[27]
Αργιλώδες έδαφος	0,35 – 0,45	[27]

Αξίζει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 (EN 1992-1-1), για τον υπολογισμό συνήθων κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα προτείνεται η χρήση $\nu = 0,2$ για μη ρηγματωμένο σκυρόδεμα, ενώ η τιμή $\nu = 0$ δύναται να χρησιμοποιείται για ρηγματωμένες διατομές, εφόσον τούτο είναι συντηρητικό.

2.2 Επισκόπηση καταστροφικών δοκιμών στο σκυρόδεμα

Στον κλάδο της δομικής μηχανικής, ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων ενός υλικού είναι ουσιώδης για την αξιολόγηση της ασφάλειας και της μακροβιότητας των υφιστάμενων υποδομών. Το έργο αυτό είναι πολύ κρίσιμο στην Ελλάδα, μια περιοχή που χαρακτηρίζεται από υψηλή σεισμική δραστηριότητα, όπου η αξιολόγηση των υφιστάμενων κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (RC) απαιτεί αυστηρές δοκιμές για τον προσδιορισμό της πραγματικής αντοχής επί τόπου. Ενώ ο σχεδιασμός νέων κατασκευών βασίζεται στην «συμβατική» αντοχή ($F_{c,stand}$), που προκύπτει από τυποποιημένα εργαστηριακά δείγματα, η πραγματική «επιτόπια» αντοχή ($F_{c,ins}$) μιας κατασκευής επηρεάζεται από μεταβλητές όπως η μεταφορά, η συμπίκνωση, οι συνθήκες σκλήρυνσης και η συγκεκριμένη θέση του σκυροδέματος εντός ενός δομικού στοιχείου. Κατά συνέπεια, οι καταστροφικές δοκιμές (DT) —κυρίως η εξαγωγή και θραύση πυρήνων σκυροδέματος— παραμένουν το «χρυσό πρότυπο» για την ακρίβεια στην αξιολόγηση των κατασκευών [40].

2.2.1 Εξέλιξη των καταστροφικών δοκιμών στην Ελλάδα

Ιστορικά, η αξιολόγηση του σκυροδέματος στην Ελλάδα έδινε προτεραιότητα στις νέες κατασκευές έναντι της συστηματικής αξιολόγησης των παλαιότερων κτιρίων. Πριν από τη δεκαετία του 1980, οι δοκιμές περιορίζονταν σε μεγάλο βαθμό σε τυποποιημένα δείγματα κύβων ή κυλίνδρων που χυτεύονταν κατά τη διάρκεια της κατασκευής, ενώ η αξιολόγηση παλαιότερων κτιρίων παρέμενε υποκειμενική ή βασιζόταν σε περιορισμένη δειγματοληψία πυρήνων χωρίς τυποποιημένο στατιστικό πλαίσιο.

Το τοπίο άλλαξε σημαντικά με την εισαγωγή του Κανονισμού Επεμβάσεων (ΚΑΝΕΠΕ). Ο κώδικας αυτός έφερε επανάσταση στην προσέγγιση των καταστροφικών δοκιμών, μετατοπίζοντας την εστίαση από απλούς ελέγχους αντοχής σε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση «επιπέδου γνώσης». Σύμφωνα με αυτό το πλαίσιο, η ποσότητα των καταστροφικών δειγμάτων καθορίζει άμεσα τους συντελεστές ασφαλείας που χρησιμοποιούνται στη δομική μοντελοποίηση, παροτρύνοντας τους μηχανικούς να πραγματοποιούν πιο εκτεταμένες δοκιμές για τη μείωση της αβεβαιότητας [41].

Σήμερα, οι καταστροφικές δοκιμές στην Ελλάδα διέπονται από ένα συνδυασμό των Εθνικών Παραρτημάτων των Ευρωκωδίκων και του ΚΑΝΕΠΕ [42], [43].

2.2.2 Πυρηνοληψία - Η κύρια καταστροφική δοκιμή

Η εξαγωγή πυρήνα κατηγοριοποιείται ως «ημι-καταστροφική» μέθοδος, επειδή η τοπική αφαίρεση υλικού μπορεί να επιδιορθωθεί χωρίς να διακυβεύεται η ακεραιότητα του στοιχείου. Παρέχει άμεση μέτρηση της αντοχής σε θλίψη, της πυκνότητας και της κατάστασης της εσωτερικής ενίσχυσης.

Η ακρίβεια των δοκιμών πυρήνα είναι ιδιαιτέρως ευαίσθητη στη γεωμετρία των δειγμάτων. Τα διεθνή και ελληνικά πρότυπα (ISO DIS7034, ASTM C42) προτείνουν διαμέτρους πυρήνα 10 cm ή 15 cm [18], [40]. Έρευνες δείχνουν ότι οι πυρήνες διαμέτρου 10 cm αποδίδουν αντοχές περίπου 88% των τυπικών εργαστηριακών κυλίνδρων, ενώ οι μικρότεροι πυρήνες διαμέτρου 5 cm είναι σημαντικά λιγότερο αξιόπιστοι, αποδίδοντας μόνο 65% έως 70%. Οι μικρότερες διάμετροι χρησιμοποιούνται γενικά για εσωτερικούς ελέγχους δομών, και όχι για την ποσοτικοποίηση της αντοχής.

Η αναλογία ύψους προς διάμετρο ή λυγηρότητα (L/D) είναι ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας, με την τυπική πρακτική να επιτρέπει ένα εύρος μεταξύ 0,95 και 2,0. Ενώ οι υψηλότερες αναλογίες L/D προσεγγίζουν τη γεωμετρία των τυπικών εργαστηριακών κυλίνδρων, οι πρακτικοί περιορισμοί συχνά περιορίζουν το μήκος του πυρήνα στο πάχος της πλάκας ή του στοιχείου, έτσι οι αναλογίες κοντά στο 1,0 είναι οι συνηθισμένες στην ελληνική πρακτική [40].

2.2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα αντοχής in situ

- **Τύπος αδρανούς υλικού:** Το χονδρόκοκκο αδρανές υλικό επηρεάζει σημαντικά το στατικό μέτρο ελαστικότητας (E_s). Το σκυρόδεμα που περιέχει ασβεστολιθικά αδρανή —

που είναι διαδεδομένα σε πολλές περιοχές της Ελλάδας — εμφανίζει μεγαλύτερη δυσκαμψία. Για αυτά τα μείγματα, το E_s είναι συνήθως 95% του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας. Τα ασθενέστερα αδρανή υλικά, όπως ο σχιστόλιθος, μπορούν να προκαλέσουν πτώση αυτού του λόγου στο 55–60% [30].

- **Παρουσία οπλισμού:** Η συμπερίληψη χαλύβδινων ράβδων σε ένα δείγμα πυρήνα μειώνει τη μετρηθείσα αντοχή του κατά 8% έως 13%. Οι κανονισμοί απαιτούν την προσαρμογή της αντοχής του πυρήνα χρησιμοποιώντας συγκεκριμένους τύπους για να ληφθεί υπόψη η διάμετρος και η θέση του ενσωματωμένου χάλυβα [18].

- **Θέση και κατεύθυνση:** Το σκυρόδεμα στην κορυφή ενός χυτού στοιχείου (π.χ. το άνω μέρος μιας πλάκας ή υποστυλώματος) παρουσιάζει συνήθως χαμηλότερη αντοχή λόγω αιμορραγίας και καθίζησης. Στην Ελλάδα, ο λόγος αντοχής από πάνω προς τα κάτω (f_{top}/f_{bot}) για τις πλάκες εκτιμάται σε 0,85, ενώ για τα υποστυλώματα μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 0,70 και 1,00 [18], [40].

- **Ιστορικό ωρίμανσης:** Η ακατάλληλη ωρίμανση οδηγεί σε εξάτμιση νερού και μικρορωγμές που προκαλούνται από συρρίκνωση. Το μη ωριμασμένο σκυρόδεμα μπορεί να παρουσιάσει στατικό μέτρο ελαστικότητας στις 730 ημέρες που είναι στην πραγματικότητα χαμηλότερος από την τιμή των 28 ημερών [36].

2.2.4 Η «ελληνική μέθοδος» εξαγωγής καρφιών

Μια μοναδική συμβολή στο ελληνικό τεχνικό τοπίο είναι η μέθοδος εξόλκευσης ήλων (μέθοδος Τάσσιου – Δεμίρη). Αυτή περιλαμβάνει τη χρήση μιας ειδικής συσκευής για την εκτόξευση ενός χαλύβδινου καρφιού στο σκυρόδεμα και στη συνέχεια τη μέτρηση της δύναμης που απαιτείται για την εξαγωγή του. Αυτή η ημι-καταστροφική τεχνική χρησιμεύει ως γέφυρα μεταξύ της DT και της μη καταστροφικής δοκιμής (NDT), καθώς η δύναμη εξαγωγής συσχετίζεται εμπειρικά με την αντοχή σε θλίψη. Ενώ ουσιαστικά δοκιμάζει ένα επιφανειακό στρώμα (περίπου 4 cm), παρέχει μια πιο άμεση μηχανική ένδειξη από τις δοκιμές σκληρότητας επιφάνειας [18].

2.2.5 Τρέχον κανονιστικό πλαίσιο

Ο προσδιορισμός της αντοχής του σκυροδέματος επί τόπου στην Ελλάδα διέπεται επί του παρόντος από τρία κανονιστικά κείμενα: τους Ευρωκώδικες (EN 13791), το ΚΑΝΕΠΕ και την Εγκύκλιο Ε7 (1997). Η Εγκύκλιος Ε7 παραμένει η πιο εφαρμοζόμενη διοικητική οδηγία για την καταστροφική αξιολόγηση υφιστάμενων κτιρίων. Η διαδικασία περιλαμβάνει:

- **Διαχωρισμός:** Διαχωρισμός της δομής σε «παρτίδες» που σκυροδετήθηκαν κατά την ίδια περίοδο.
- **Δειγματοληψία:** Εξαγωγή έξι πυρήνων ανά παρτίδα από τυχαίες θέσεις.

- **Διόρθωση:** Εφαρμογή τεσσάρων συντελεστών (L_1, L_2, L_3, L_4) για τη μετατροπή της ακατέργαστης αντοχής του πυρήνα σε ισοδύναμη αντοχή κύβου με βάση τη γεωμετρία και την ηλικία.
- **Στατιστικό φιλτράρισμα:** Προσδιορισμός της εκτιμώμενης χαρακτηριστικής αντοχής χρησιμοποιώντας τον τύπο: $F_{\pi} = x - 1,60s$, όπου x είναι ο μέσος όρος και s είναι η τυπική απόκλιση [44].

Σύμφωνα με τον ΚΑΝΕΠΕ, ο πολιτικός μηχανικός πρέπει να διακρίνει μεταξύ τριών Σταθμών Αξιοπιστίας Δεδομένων (α) Υψηλή, (β) Ικανοποιητική, (γ) Ανεκτή. Γι' αυτό πρέπει να επιτύχει ένα από τα τρία επίπεδα γνώσης: Περιορισμένο, Κανονικό ή Πλήρες. Η επίτευξη ενός υψηλότερου ΕΓ απαιτεί μεγαλύτερη πυκνότητα δειγμάτων πυρήνων (π.χ. ανά όροφο ή τύπο δομικού στοιχείου), η οποία με τη σειρά της επιτρέπει χαμηλότερους μερικούς συντελεστές ασφαλείας (γ_m) στη δομική ανάλυση. Αυτή η ενσωμάτωση ευθυγραμμίζει την ελληνική πρακτική με το EN 13791, το οποίο για την εκτίμηση της χαρακτηριστικής επί τόπου αντοχής διακρίνει την «Περίπτωση Α» που βασίζεται κυρίως στην πυρηνοληψία για τον ακριβή προσδιορισμό της αντοχής, και την «Περίπτωση Β» η οποία βασίζεται σε έμμεσες μεθόδους όταν η λήψη πυρήνων δεν είναι εφικτή ή επιθυμητή σε μεγάλο αριθμό [41], [42].

2.2.6 Μειονεκτήματα της πυρηνοληψίας

Παρόλο ότι αυτή τη στιγμή είναι μοναδική μέθοδος που μπορεί να εξάγει ακριβή και αναπαραγώγιμα αποτελέσματα σχετικά με την αντοχή του σκυροδέματος, η πυρηνοληψία παρουσιάζει σειρά μειονεκτημάτων που καθιστούν τη χρήση της σύνθετη και συχνά περιορισμένη. Αρχικά, η μέθοδος συνεπάγεται σημαντικά υψηλό κόστος σε σύγκριση με τις έμμεσες μεθόδους και προκαλεί τοπικές φθορές στα δομικά στοιχεία, οι οποίες απαιτούν ειδική και δαπανηρή αποκατάσταση. Επιπλέον, ανακύπτει το πρόβλημα της αντιπροσωπευτικότητας, καθώς οι πυρήνες λαμβάνονται από συγκεκριμένα σημεία και δεν μπορούν πάντα να αποδώσουν τη μεγάλη στατιστική διασπορά της αντοχής σε ολόκληρη την κατασκευή, η οποία στην πράξη είναι μεγαλύτερη από εκείνη των εργαστηριακών δοκιμών. Η ίδια η διαδικασία της διάτρησης με καροτιέρα ενδέχεται να προκαλέσει μικροβλάβες ή μικρορηγματώσεις στον ίδιο το δοκίμιο, οδηγώντας σε μείωση της μετρούμενης αντοχής. Παράλληλα, η λήψη πυρήνων από κρίσιμα μέλη, όπως τα υποστυλώματα, είναι πρακτικά δύσκολη και συχνά αποφεύγεται για λόγους ασφαλείας, με αποτέλεσμα οι μηχανικοί να καταφεύγουν κυρίως στις πλάκες, οι οποίες όμως συνήθως εμφανίζουν μειωμένη αντοχή λόγω κακής συντήρησης ή δόνησης. Τέλος, το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο, όπως η Εγκύκλιος Ε7, επικρίνεται για υπερβολικό συντηρητισμό, καθώς οι συντελεστές αναγωγής που χρησιμοποιεί μπορούν να οδηγήσουν σε υποεκτίμηση της συμβατικής αντοχής σε σχέση με άλλα πρότυπα, ενώ στερείται μηχανισμών στατιστικής απόρριψης ακραίων τιμών που ενδέχεται να οφείλονται στη μηχανική διατάραξη κατά τη λήψη. [18], [40]

2.2.7 Συμπέρασμα

Στην κατασκευαστική πραγματικότητα εν γένει αλλά και ειδικά στη χώρα μας που χαρακτηρίζεται από υψηλή σεισμική επικινδυνότητα και γηρασμένο κτιριακό απόθεμα, η αποτίμηση της υφιστάμενης αντοχής του σκυροδέματος αποτελεί τον θεμέλιο λίθο για κάθε δομική επέμβαση, με τις καταστροφικές δοκιμές (DT) — και κυρίως την πυρηνοληψία — να παραμένουν το πρότυπο αναφοράς λόγω της αμεσότητας στον προσδιορισμό της in-situ θλιπτικής αντοχής. Η εφαρμογή τους όμως συνοδεύεται από σημαντικούς περιορισμούς και αυστηρό κανονιστικό πλαίσιο καθώς η εξαγωγή πυρήνων προκαλεί τοπική αποδυνάμωση των στοιχείων, απαιτεί δαπανηρή αποκατάσταση και συχνά αδυνατεί να αποδώσει τη συνολική στατιστική διασπορά της κατασκευής, η οποία στην πράξη είναι μεγαλύτερη από εκείνη των εργαστηριακών δοκιμών, ενώ πολλές φορές υποεκτιμά την αντοχή.

Αυτά τα εγγενή μειονεκτήματα, σε συνδυασμό με την ανάγκη για επίτευξη υψηλών Σταθμών Αξιοπιστίας (ΣΓ) κατά τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. χωρίς τον «τραυματισμό» κρίσιμων μελών όπως τα υποστυλώματα, οδηγούν αναπόφευκτα στην υιοθέτηση των NDT. Η σύγχρονη τάση κινείται προς μια εξελιγμένη ενσωμάτωση των DT και NDT. Δεδομένου του κόστους και της φθοράς που συνεπάγεται η μεγάλης κλίμακας πυρηνοληψία, οι μηχανικοί ερευνούν ως προς την αύξηση της αξιοπιστίας των NDT για τη μείωση των θέσεων πυρηνοληψίας.

2.3 Επισκόπηση μη καταστροφικών δοκιμών στο σκυρόδεμα

Η αξιολόγηση των δυναμικών ελαστικών παραμέτρων του σκυροδέματος έχει αποδειχθεί μια μακρά πρόκληση, κυρίως όταν ο στόχος είναι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων χωρίς τη χρήση καταστροφικών τεχνικών. Παρόλο που υπάρχει πληθώρα μη καταστροφικών δοκιμών (ΜΚΔ) ή Non-destructive Testing (NDT), που εφαρμόζονται στο σκυρόδεμα όπως:

- Δοκιμή κρουσιμέτρου – Rebound Hammer Test (RHT)
- Ραντάρ διείσδυσης – Ground Penetration Radar (GPR)
- Δοκιμή ηλεκτρικής αντίστασης – Electrical Resistivity Testing (ERT)
- Υπέρυθρη θερμογραφία – Infrared Thermography Testing (IRT)
- Δοκιμή ακουστικής εκπομπής – Acoustic Emission Testing (AET)

δύο μέθοδοι έχουν αναδειχθεί περισσότερο όσον αφορά σ' αυτό το σκοπό. Η δοκιμή ταχύτητας υπερήχων αγγλιστί Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) και η δοκιμή κρούσης ηχούς ή αλλιώς Impact Echo (IE). Στο παρόν Κεφάλαιο αλλά θα αναλυθούν εκτενώς μόνο οι UPV και IE, καθώς αποτελούν το κύριο αντικείμενο έρευνας της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

2.3.1 Πρώιμες μηχανικές δοκιμές και προσεγγίσεις

Πριν από την εμφάνιση εξελιγμένων τεχνικών μη καταστροφικής αξιολόγησης, όπως η UPV και η IE, ο χαρακτηρισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος βασιζόταν σχεδόν εξ ολοκλήρου σε καταστροφικές μεθόδους. Κύρια δοκιμή ήταν αυτή της μονοαξονικής θλίψης. Ένας πυρήνας ή δοκίμιο, συνήθως ένας τυπικός κύλινδρος ή κύβος, υποβαλλόταν σε θλίψη μέχρι να θραυτεί, παρέχοντας άμεσα δεδομένα τάσης-παραμόρφωσης από τα οποία μπορούσαν να εξαχθούν τόσο η τελική αντοχή όσο και το στατικό μέτρο ελαστικότητας (E). Η κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης στην ελαστική περιοχή έδινε μια απλή μέτρηση υπό ελεγχόμενη εφαρμογή φορτίου [45]. Ο λόγος Poisson (ν) μπορούσε επίσης να ληφθεί με τη μέτρηση της πλευρικής παραμόρφωσης παράλληλα με την αξονική παραμόρφωση, αν και απαιτούσαν ακριβείς μετρήσεις με μηκυνσιόμετρα που δεν εφαρμόζονταν πάντα στον συνήθη έλεγχο ποιότητας. Αυτά τα παραδοσιακά πρωτόκολλα προσέφεραν υψηλή αξιοπιστία για τα δεδομένα αναφοράς, αλλά ήταν εγγενώς επεμβατικά. Κάθε δοκιμή κατέστρεφε το δείγμα, πράγμα που σήμαινε ότι οι αξιολογήσεις των επιτόπιων κατασκευών απαιτούσαν τη λήψη πυρήνων ή τη χύτευση συνοδευτικών δοκιμών κατά τη στιγμή της κατασκευής, γεγονός που δημιουργούσε προκλήσεις κατά τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων με το ηλικιωμένο σκυρόδεμα που είχε εκτεθεί σε περιβαλλοντική φθορά κατά τη διάρκεια των ετών [45]. Ενώ τα δείγματα μπορούσαν να αναπαράγουν τα γεωμετρικά πρότυπα για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας, δεν αντανakλούσαν πάντα την ακριβή σύνθεση ή την ποιότητα συμπίκνωσης που υπήρχε σε μεγαλύτερο βάθος μέσα στην κατασκευή. Η στατική φύση αυτών των δοκιμών περιόριζε επίσης την κατανόηση των δυναμικών ιδιοτήτων που σχετίζονται με τις συνθήκες λειτουργίας, όπου είχε σημασία η απόκριση σε βραχυπρόθεσμα ή περιοδικά φορτία.

Η αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων οδήγησε σε πρώιμα πειράματα με μεθόδους μηχανικού συντονισμού σε μικρές δοκούς ή κυλίνδρους από σκυρόδεμα. Διεγείροντας τα δείγματα σε διαφορετικές συχνότητες και παρατηρώντας τις κορυφές συντονισμού, οι μηχανικοί μπορούσαν να συμπεράνουν άμεσα τις δυναμικές παραμέτρους χωρίς να τα καταστρέψουν. Ακόμη και σε πρωτογενείς μορφές, αυτές οι δοκιμές συντονισμού υποδήλωναν συσχετίσεις μεταξύ του δυναμικού μέτρου και της αντοχής σε θλίψη όμως η ακρίβεια εξαρτιόταν σε μεγάλο βαθμό από τις οριακές συνθήκες και την ομοιομορφία της γεωμετρίας εισάγοντας σφάλματα που υπονόμευαν την αξιοπιστία σε σχέση με τα καταστροφικά κριτήρια αναφοράς [46].

Όταν η UPV εισήχθη στην πρακτική εφαρμογή πριν από δεκαετίες, ήταν μια σημαντική αλλαγή στη μηχανική, επειδή παρέκαμπτε την καταστροφική δειγματοληψία. Η μέθοδος μετρούσε τον χρόνο διαδρομής των υπερηχητικών παλμών μέσω τμημάτων σκυροδέματος για να υπολογίσει τιμές ταχύτητας που συνδέονταν θεωρητικά με τα E και ν [47]. Ωστόσο, παρατηρήθηκε σημαντική διασπορά στα αποτελέσματα σε σύγκριση με αυτά που προέκυπταν από μονοαξονική θλίψη καθιστώντας την αυτόνομη εφαρμογή της

UPV ακατάλληλη για την ακριβή εξαγωγή δυναμικών ιδιοτήτων χωρίς προσεκτική βαθμονόμηση [3], [48], [49]. Έτσι, στις πρώτες φάσεις υιοθέτησης, το UPV χρησιμοποιούνταν συχνά για ποιοτική αξιολόγηση. Για παράδειγμα περιοχές με σημαντικά χαμηλότερες ταχύτητες επισημαίνονταν ως περιοχές πιθανής αστοχίας αντί να τους αποδίδονται ρητά αριθμητικά μεγέθη.

Αυτές οι πρώιμες προσπάθειες άνοιξαν το δρόμο για τις σύγχρονες μεθοδολογίες συντονισμού όπως η IE η οποία ακολούθησε μια διαφορετική εξελικτική πορεία. Μια στιγμιαία πρόσκρουση παρήγαγε κύματα τάσης, των οποίων οι ανακλάσεις παρείχαν πληροφορίες για τη κυρίαρχη συχνότητα που συνδέονταν με το πάχος της πλάκας και τις παραμέτρους δυσκαμψίας [50]. Επειδή οι αποκρίσεις της IE ενσωματώνουν ολοκληρωμένη ογκομετρική συμπεριφορά και όχι μια μεμονωμένη διαδρομή παλμού μεταξύ σταθερών σημείων, οι εκτιμήσεις των ιδιοτήτων παρουσίαζαν γενικά λιγότερη διακύμανση σε ισοδύναμες ρυθμίσεις πεδίου σε σύγκριση με την UPV [5]. Παρόλα αυτά, οι πρώτες εφαρμογές της IE εστίαζαν κυρίως στον εντοπισμό ελαττωμάτων και τη μέτρηση του πάχους. Η αξιοποίηση της IE για τον προσδιορισμό E και ν ήρθε αργότερα, καθώς βελτιώθηκαν οι τεχνικές φασματικής ανάλυσης. Η ιστορική αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των τεχνικών και της UCS είναι ενδεικτική. Αρχικά, τόσο η UPV όσο και η IE απαιτούσαν εκτεταμένα σύνολα δεδομένων βαθμονόμησης που προέρχονταν από καταστροφικές δοκιμές σε αντιπροσωπευτικά μείγματα, προτού να γίνουν αξιόπιστες πέρα από τον ποιοτικό έλεγχο [1]. Στις πρακτικές ροές εργασίας των τελευταίων δεκαετιών, ήταν συνηθισμένο να πραγματοποιούνται δοκιμές UCS όταν οι μετρήσεις NDT απέκλιναν από τις οριακές τιμές, χρησιμοποιώντας τις NDT για ένδειξη και όχι για απόλυτη αποτίμηση. Σε περιπτώσεις όπου ήταν απαραίτητα επαναλαμβανόμενα αποτελέσματα μέτρου ελαστικότητας (όπως η επαλήθευση του σχεδιασμού προεντεταμένων στοιχείων), χρησιμοποιούνταν σταθερά οι στατικές δοκιμές. Με την πάροδο του χρόνου, οι τροποποιήσεις και βελτιώσεις σε κάθε μέθοδο μετατόπισαν ελαφρώς αυτή την ισορροπία. Για την UPV, ο συνδυασμός δεδομένων ταχύτητας με άλλους ανεξάρτητους δείκτες σκληρότητας επιφάνειας, όπως οι μετρήσεις με δοκιμή κρουσιμέτρησης (RHT), βελτίωσε τη συσχέτιση με τις προβλέψεις αντοχής σε θλίψη [5], αν και η υψηλή διασπορά παρέμενε για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας λόγω της εγγενούς ετερογένειας του σκυροδέματος [7]. Η πρόοδος στη σωστή σύζευξη των αισθητήρων και του φιλτραρίσματος των σημάτων μείωσαν κάπως τη μεταβλητότητα, αλλά δεν ξεπέρασαν ποτέ πλήρως αυτούς τους εγγενείς περιορισμούς που εξαρτώνται από τις ιδιότητες του υλικού. Για την IE, οι βελτιώσεις, συμπεριλαμβανομένης της εκμετάλλευσης της ομάδας σημείων μηδενικής ταχύτητας για ορισμένες ιδιομορφές των κυμάτων Lamb, βελτίωσαν την ακρίβεια στην εξαγωγή τόσο του E όσο και ν απευθείας από τα φάσματα συχνοτήτων, όταν γνωστή η πυκνότητα [51], [52]. Αυτή η προσέγγιση μείωσε την απόκλιση του μέτρου ελαστικότητας μεταξύ μη καταστροφικού και καταστροφικού ελέγχου σε τέτοιο βαθμό, ώστε σε ορισμένες

περιπτώσεις απαιτούνταν λιγότεροι πυρήνες αποκλειστικά για σκοπούς βαθμονόμησης. Σημειωτέον ότι η χαμηλότερη ευαισθησία της ΙΕ σε τοπικές μικροδομικές ανωμαλίες έρχεται σε έντονη αντίθεση με την τάση της UPV για φαινόμενα διασποράς.

Από μια ευρύτερη ιστορική προοπτική, η εξέλιξη θα μπορούσε συνοπτικά να καταγραφεί ως εξής: η καταστροφική μονοαξονική θλίψη εδραίωσε τις σχέσεις μεταξύ της συμπεριφοράς τάσης-παραμόρφωσης και των ελαστικών σταθερών. Τα πειράματα μηχανικού συντονισμού εισήγαγαν μη επεμβατικές έννοιες μέτρησης. Η UPV έφερε ταχύτερη κάλυψη, αλλά υστερεί λόγω περιορισμών ακρίβειας. Η ΙΕ εξελίχθηκε από την ανίχνευση ελαττωμάτων προς την αξιόπιστη εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας μέσω της βελτιωμένης φασματικής ερμηνείας. Σήμερα υπάρχει μια εμφανή τάση για μετάβαση προς υβριδικές στρατηγικές που αξιοποιούν την ταχύτητα έρευνας της UPV παράλληλα με την αυξανόμενη αναλυτική σταθερότητα της ΙΕ για την αξιολόγηση των E και ν [1]. Παρόλη την πρόοδο η πλήρης απομάκρυνση από τις καταστροφικές δοκιμές αναφοράς εξακολουθεί να αντιμετωπίζεται με προσοχή και όχι ως δεδομένη.

2.4 Μέθοδος ταχύτητας παλμού υπερήχων – Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

2.4.1 Ιστορικό υπόβαθρο της UPV

Εδώ και δεκαετίες, οι τεχνολόγοι σκυροδέματος ενδιαφέρονται να προσδιορίσουν τις ιδιότητες του σκυροδέματος με μη καταστρεπτικές μεθόδους. Ξεκινώντας από την δεκαετία του 1930, πολλές μέθοδοι έχουν προταθεί για εργαστηριακές δοκιμές [53]. Συγκεκριμένα οι καταστροφές κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, επίσπευσαν την έρευνα σχετικά με τις μη καταστροφικές μεθόδους που χρησιμοποιούσαν τη τεχνολογία υπερήχων. Η πρώτη προσέγγιση στην εκτίμηση της ποιότητας του σκυροδέματος, αφορούσε δυναμικά μοντέλα υπολογισμού της ελαστικότητας και πραγματοποιήθηκε από τους Long et al, 1945. Συμπεριλάμβανε δύο δέκτες που προσκολλούσαν στο σκυρόδεμα και μια μεταλλική σφύρα. Πιο συγκεκριμένα, με την μεταλλική σφύρα πραγματοποιούνταν κρούση σε ένα δοκίμιο και οι δέκτες τοποθετούνταν στη νοητή ευθεία της κρούσης. Με τη χρήση ενός συγχρονισμένου χρονομέτρου μετριούνταν ο χρόνος που χρειαζόταν για να φτάσει το κύμα από τον πρώτο στον δεύτερο δέκτη [54].

Το 1946 η Επιτροπή Υδροηλεκτρικής Ενέργειας του Οντάριο (Ontario Hydro) έπειτα από πειραματικές μελέτες κατέληξε στην ανάπτυξη ενός οργάνου, του Soniscope. Έχοντας ως σκοπό τη μελέτη ρωγμής σε μονολιθικό σκυρόδεμα, αποδείχτηκε ένα πολύτιμο βοήθημα για την εποχή στη μελέτη ποιότητας του σκυροδέματος [55]. Αποτελούνταν από αισθητήρα εκπομπής 20kHz, είχε την ικανότητα να διαπεράσει έως και 15 μέτρα σκυροδέματος και ακρίβεια μέτρησης χρόνου ταξιδιού 3%. Σκοποί του οργάνου ήταν ο εντοπισμός παρουσίας εσωτερικής ρωγμής, ο προσδιορισμός βάθους επιφανειακών ρωγμών και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος. Επισημάνθηκε ότι

βασική μέτρηση του οργάνου ήταν ο χρόνος ταξιδιού. Το πλάτος του λαμβανόμενου σήματος θεωρούνταν δευτερεύουσας σημασίας, καθώς η μεταφορά ενέργειας μεταξύ των αισθητήρων και του σκυροδέματος δεν μπορούσε να ελεγχθεί. Ακόμη, τονίστηκε ότι για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων ήταν απαραίτητη η γνώση του ιστορικού της δομής που ερευνάται.

Στις πρώτες χρήσεις του Soniscope σε στοιχεία σκυροδέματος, δόθηκε έμφαση στη μέτρηση της ταχύτητας του παλμού, παρά στην εκτίμηση της αντοχής ή στον υπολογισμό της ελαστικής ακαμψίας. Μετρώντας την ταχύτητα σε ένα πλέγμα κανάβου, η ύπαρξη σκυροδέματος που είχε υποστεί φθορά μπορούσε εύκολα να εντοπιστεί. Η Ontario Hydro πραγματοποίησε τις πρώτες προσπάθειες ανάπτυξης σχέσεων μεταξύ ταχύτητας παλμού και αντοχής σε θλίψη. Αναλυτικότερα, διερευνήθηκαν σαράντα έξι μείγματα που περιείχαν το ίδιο μείγμα αδρανών, διαφορετικούς τύπους τσιμέντου και διαφορετικές προσμίξεις. Τα αποτελέσματα δεν έδειξαν σημαντικές διαφορές στις σχέσεις μεταξύ ταχύτητας και αντοχής για τα διαφορετικά μείγματα. Το 1947 ερευνητές του Portland Cement Association, σε συνεργασία με την Ontario Hydro, ανέπτυξαν ένα είδος Soniscope. Από τις εφαρμογές του σε σκυρόδεμα πυκνότητας περίπου 2400kg/m^3 , προέκυψε η ποιοτική ταξινόμηση του Πίνακα 3 για τη χρήση της ταχύτητας παλμού ως δείκτη ποιότητας.

Πίνακας 3: Ποιοτική ταξινόμηση κανονικού σκυροδέματος σύμφωνα με την ακουστική ταχύτητα [56]

Ταχύτητα παλμού, m/s	Κατάσταση
Πάνω από 4570	Πολύ καλή
3660–4570	Σχετικά καλή
3050–3660	Αμφισβητήσιμη
2130–3050	Γενικώς κακή
Κάτω από 2130	Πολύ κακή

Ο παραπάνω Πίνακας 3 αναφέρθηκε σε μεταγενέστερες δημοσιεύσεις [56]. Εντούτοις, σύμφωνα με τον Whitehurst, 1951, οι παραπάνω ταξινομήσεις δεν ήταν ακριβείς, καθώς εντοπίστηκαν εξαιρέσεις στις περισσότερες κατηγορίες. Επισήμανε επίσης, ότι για το σκυρόδεμα η ταχύτητα παλμού μεταβαλλόταν σημαντικά ανάλογα με τις αλλαγές στα αδρανή, την περιεκτικότητα σε τσιμέντο ή την αναλογία νερού προς τσιμέντο. Επομένως, η προσπάθεια σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών δειγμάτων με βάση τη ταχύτητα παλμού ήταν άστοχη [55].

Ενώ οι μελέτες για το Soniscope ήταν σε εξέλιξη στον Καναδά, ο R. Jones και οι συνεργάτες του στο Road Research Laboratory (RRL) στην Αγγλία, ερευνούσαν την ανάπτυξη μιας συσκευής ελέγχου υπερήχων σκυροδέματος. Σε αντίθεση με την Ontario Hydro, οι μελέτες του RRL περιλάμβαναν μικρότερα μήκη διαδρομής. Πιο συγκεκριμένα, οι ερευνητές προσπάθησαν να μελετήσουν την ποιότητα πεζοδρομίων σκυροδέματος. Ως

αποτέλεσμα, η συσκευή που αναπτύχθηκε λειτουργούσε σε υψηλότερη συχνότητα από το Soniscope και ονομάστηκε Ultrasonic Concrete Tester (Εικόνα 5). Για την διεξαγωγή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες με συντονισμένες συχνότητες από 60kHz έως 200kHz, ανάλογα με την επιθυμητή διείσδυση. Εκτός από τη χρήση διαφορετικής συχνότητας λειτουργίας, χρησιμοποιήθηκε και διαφορετική προσέγγιση στη μέτρηση χρόνου ταξιδιού του κύματος, λόγω μικρότερων μηκών διαδρομής. Η συσκευή ελέγχου υπερήχων σκυροδέματος (Ultrasonic Concrete Tester), είχε την δυνατότητα μέτρησης χρόνου διαδρομής κύματος εντός $\pm 0,2\mu s$ [56]. Επιπρόσθετα, διερευνήθηκε η επίδραση της αναλογίας νερού προς τσιμέντο, ο τύπος του αδρανούς και τα αποτελέσματα της ακουστικής ταχύτητας, καθώς και η σχέση μεταξύ της ακουστικής ταχύτητας και της θλιπτικής αντοχής [54]



Εικόνα 5: Ultrasonic Concrete Tester [57]

Στις αρχές της δεκαετίας του 1960 μεγάλο μέρος της έρευνας επικεντρώθηκε στη βελτίωση της μεθόδου ταχύτητας παλμών υπερήχων και στην κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την ταχύτητα παλμού. Παρόλα αυτά, η πιο σημαντική πρόοδος παρατηρήθηκε στην ανάπτυξη βελτιωμένων οργάνων πεδίου. Λόγω της προόδου στα μικροηλεκτρονικά κυκλώματα, τα ογκώδη και δύσχρηστα όργανα που αναπτύχθηκαν τις προηγούμενες δεκαετίες (Εικόνα 6), έδωσαν τη θέση τους σε συμπαγείς φορητές συσκευές [56].



Εικόνα 6: Αισθητήρες συσκευής ταχύτητας υπερήχων [57]

Το 1967 η UPV καθορίστηκε επίσημη μέθοδος δοκιμής στις Ηνωμένες Πολιτείες. Η Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών (ASTM) υιοθέτησε την προτεινόμενη μέθοδο δοκιμής, που δημοσιεύτηκε από τον Leslie το 1955. Το 1969 στην Ευρώπη η Διεθνής Ένωση Εργαστηρίων Δοκιμών και Ερευνών για Υλικά και Κατασκευές (RILEM), δημοσίευσε προσχέδια συστάσεων για δοκιμές σκυροδέματος χρησιμοποιώντας τη συγκεκριμένη μέθοδο. Την ίδια περίοδο ερευνητές από τον Ολλανδικό Οργανισμό Εφαρμοσμένης Επιστημονικής Έρευνας (TNO), ανέπτυξαν μια φορητή και εύχρηστη συσκευή UPV. Χαρακτηριστικά της συσκευής η χαμηλή ακρίβεια, κυρίως στις μετρήσεις σύντομης διαδρομής – μήκους, και η περιορισμένη ικανότητα διείσδυσης. Μια παρόμοια φορητή συσκευή γνωστή ως PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester), αναπτύχθηκε επίσης από τον Elvery. Συνεπώς, είναι φανερή η αυξανόμενη τάση για επιτόπιες δοκιμές της κατασκευής σκυροδέματος, όχι μόνο κατά τη διάρκεια της κατασκευής, αλλά και σε όλη τη διάρκεια ζωής της. Η αποτυχία αξιολόγησης της αντοχής του σκυροδέματος μπορεί να οδηγήσει σε τραγική κατασκευαστική αστοχία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα, η κατάρρευση του Skyline Plaza στη Βιρτζίνια το 1973 και η καταστροφή του πύργου ψύξης μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας στο νησί Willow της Δυτικής Βιρτζίνια το 1978. Η τελευταία καταστροφή οδήγησε τους ερευνητές σε εκτενέστερη παρακολούθηση της αντοχής του φρέσκου σκυροδέματος [54]

Από τη δεκαετία του 1980 οι καινοτομίες της τεχνολογίας έχουν επηρεάσει θετικά τις μεθόδους NDT. Η μείωση του κόστους επιθεώρησης και των απροσδόκητων βλαβών, ήταν οι βασικές απαιτήσεις κατά την ανάπτυξη νέων συστημάτων ελέγχου (Εικόνα 7) [51]. Τα τελευταία χρόνια έχουν καταβληθεί προσπάθειες προκειμένου να αναπτυχθούν πλήρως αυτοματοποιημένα συστήματα παρακολούθησης της υγείους λειτουργίας (Structural Health Monitoring – SHM) της δομής σε πραγματικό χρόνο, που βασίζονται στη διάδοση κυμάτων υπερήχων για επί τόπου εφαρμογές. Το SHM αναφέρεται στη διαδικασία εφαρμογής μιας στρατηγικής για την απομακρυσμένη ανίχνευση βλάβης και την παρακολούθηση της υποβάθμισης του υλικού σε τεχνολογικές δομές και κατασκευές. Συσκευές και μέθοδοι SHM επιτρέπουν την εξ αποστάσεως ανίχνευση και ποσοτικοποίηση της υποβάθμισης της δομικής ακεραιότητας του υλικού, κάνοντας δυνατή τη διαχείριση των εξαρτημάτων μιας κατασκευής για τη βέλτιστη χρήση τους κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής τους [58]. Τέλος, ερευνητικές ομάδες ανέπτυξαν τη μέθοδο UPV χρησιμοποιώντας κυρίως επιφανειακούς αισθητήρες και χρησιμοποιήθηκε σε κατασκευές από σκυρόδεμα, όχι μόνο για την ανίχνευση ελαττωμάτων, αλλά και για την παρακολούθηση της ενυδάτωσης [51].



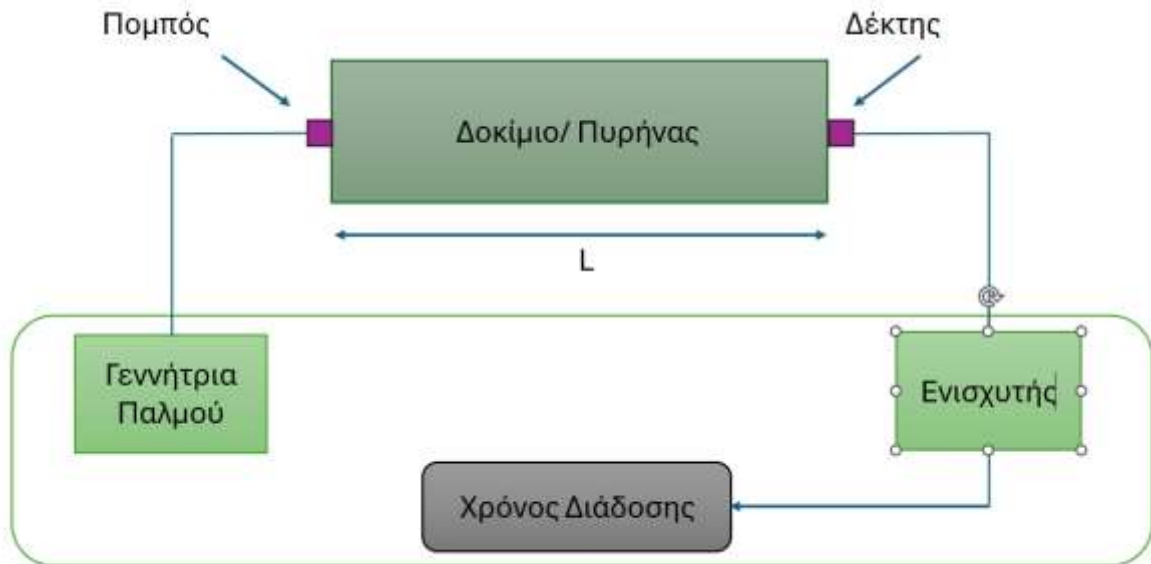
Εικόνα 7: Συσκευή PUNDIT 1987 [59], [60]

2.4.2 Αρχές της μεθόδου UPV

Πρόκειται για μια σημαντική μη καταστροφική τεχνική, που παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα βασισμένα σε γρήγορες μετρήσεις με χρήση οικονομικού εξοπλισμού. Έχει τη βάση της στη θεωρία της ελαστικότητας. Όταν η επιφάνεια ενός ελαστικού στερεού σώματος δέχεται ένα εξωτερικό ερέθισμα, τότε αναπτύσσονται μηχανικά ελαστικά κύματα. Έτσι και στο σκυρόδεμα η διάδοση των κυμάτων διέπεται από την πολύπλοκη αλληλεπίδραση των τασικών κυμάτων, κυρίως των διαμηκών κυμάτων (longitudinal waves ή compressional waves ή P – waves), των εγκάρσιων κυμάτων διάτμησης (shear waves ή S – waves) και, σε ορισμένες περιπτώσεις, των επιφανειακών κυμάτων (surface waves ή Rayleigh waves), με ένα ετερογενές μέσο. Κάθε είδος κύματος διαδίδεται με χαρακτηριστική ταχύτητα σε κάθε υλικό. Στα στερεά τα διαμήκη κύματα διαδίδονται με την μεγαλύτερη ταχύτητα, ενώ τα εγκάρσια με τη μικρότερη. Συγκεκριμένα για το σκυρόδεμα, οι ταχύτητες των εγκάρσιων και των επιφανειακών κυμάτων είναι περίπου το 55-60% της ταχύτητας των διαμηκών κυμάτων. Οι τιμές της ταχύτητας των διαμηκών κυμάτων στο σκυρόδεμα κυμαίνονται από 3000m/s μέχρι 5000m/s και συγκεκριμένα για ένα τυπικό σκυρόδεμα, η ταχύτητα των υπερηχητικών κυμάτων κυμαίνεται από 3700m/s μέχρι 4200m/s [53].

Η γενικότερη αρχή της μεθόδου UPV βασίζεται στη μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων σε δοκίμια γνωστού μήκους. Η διαδικασία ξεκινά όταν παράγεται ένα διάμηκες κύμα υψηλής συχνότητας (παλμός) από έναν πομπό. Ο παλμός που δημιουργείται μεταδίδεται στο σκυρόδεμα χρησιμοποιώντας λιπαντική ουσία, όπως γράσο, βαζελίνη ή γενικά κάποιο παράγωγο του πετρελαίου, και υφίσταται πολλαπλές αντανάκλασεις στα όρια των φάσεων (διεπιφανειών – ένωσης των υλικών) των διαφορετικών υλικών εντός του. Αναπτύσσεται ένα πολύπλοκο σύστημα κυμάτων, το οποίο περιλαμβάνει τόσο διαμήκη όσο και εγκάρσια κύματα. Τα πρώτα κύματα που φτάνουν στον αισθητήρα – δέκτη είναι τα διαμήκη κύματα, τα οποία διαδίδονται κατά μήκος της συντομότερης διαδρομής και ο χρόνος διέλευσής τους χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας $V_p = \frac{L}{t}$, όπου L είναι το μήκος της διαδρομής και t είναι ο μετρούμενος χρόνος διέλευσης [61].

Η συσκευή των υπερήχων αποτελείται από μια γεννήτρια παραγωγής υπερηχητικών κυμάτων, δύο αισθητήρες (έναν πομπό και έναν δέκτη) και έναν μετρητή του χρόνου που χρειάζεται ο υπέρηχος για να διανύσει το προς εξέταση δοκίμιο σκυροδέματος [40]. Ο εξοπλισμός είναι φορητός, απλός στη χρήση και περιλαμβάνει επαναφορτιζόμενη μπαταρία και μονάδα φόρτισης [53]. Το βασικό διάγραμμα ενός συστήματος ελέγχου με υπερήχους φαίνεται την Εικόνα 8.



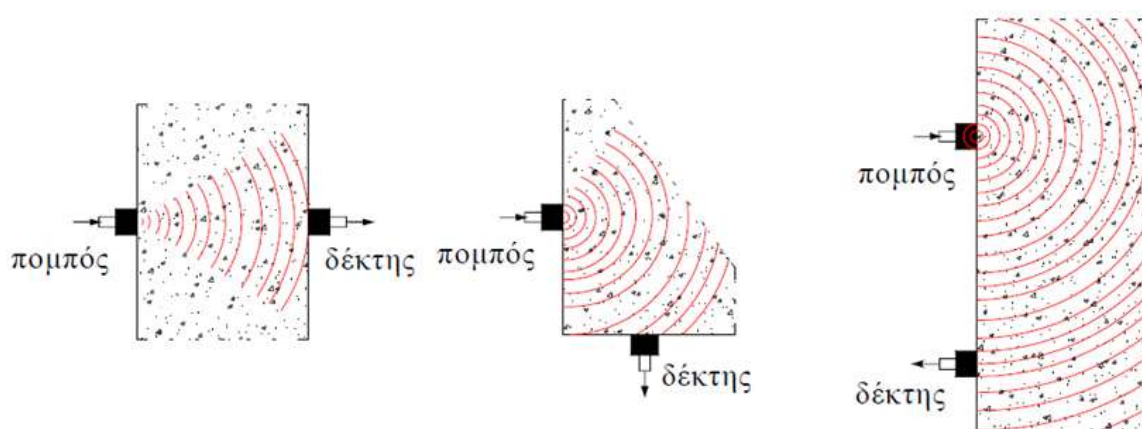
Εικόνα 8: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου UPV

Οι αισθητήρες εμπεριέχουν πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους. Υπό την επιβολή κατάλληλου ρεύματος ο κρύσταλλος πομπός πάλλεται με τη φυσική του υπερηχητική συχνότητα ($>20\text{kHz}$). Η ταλάντωση αυτή του κρυστάλλου προκαλεί την παραγωγή τασικών κυμάτων, τα οποία διαδίδονται διαμέσου του σκυροδέματος. Παράλληλα η συσκευή ενσωματώνει και ένα ηλεκτρονικό χρονόμετρο ακριβείας. Μόλις ο παλμός φθάσει στο δέκτη παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο σταματά το χρονόμετρο και στην οθόνη της συσκευής αναγράφεται ο αντίστοιχος χρόνος.

Η καλύτερη επαφή μεταξύ κρυστάλλων και επιφάνειας σκυροδέματος όπως ειπώθηκε επιτυγχάνεται με τη χρήση λιπαντικής ουσίας, συνήθως κάποιας γέλης, η οποία καλύπτει τυχόν ατέλειες της επιφάνειας. Τοποθετείται σε μικρή ποσότητα, γιατί διαφορετικά προκαλεί διαφοροποιήσεις στην μετρούμενη ταχύτητα των υπερήχων. Οι διαφοροποιήσεις οφείλονται στο γεγονός ότι η ταχύτητα διαδόσεως των υπερήχων είναι διαφορετική στο σκυρόδεμα από ότι στην χρησιμοποιούμενη λιπαντική ουσία. Παράλληλα με την χρήση λιπαντικών ουσιών κατά την διάρκεια της δοκιμής, για να επιτευχθεί η μέτρηση του σωστού χρόνου διαδόσεως των υπερηχητικών κυμάτων, θα πρέπει οι αισθητήρες να πιέζονται με μεγάλη δύναμη πάνω στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Στην περίπτωση που οι εξωτερικές επιφάνειες του σκυροδέματος είναι πολύ ανώμαλες, θα πρέπει πριν την τοποθέτηση της λιπαντικής ουσίας, να γίνεται καθαρισμός και λείανση των επιφανειών με την χρήση ηλεκτρικού περιστροφικού

συμριδόπανου. Πριν από κάθε μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων, είναι απαραίτητο να ελέγχεται η ένδειξη του οργάνου. Για άμεση επαφή των δύο αισθητήρων η ένδειξη πρέπει να είναι μηδέν, ενώ, αν χρησιμοποιείται όργανο βαθμονομήσεως πρέπει να είναι τόση όση δίνεται πάνω στην ράβδο του οργάνου. Η ακρίβεια πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ $\pm 1\%$ κατά ISO ή $\pm 2\%$ κατά ASTM [40].

Οι αισθητήρες τοποθετούνται με τρεις τρόπους. Ο πρώτος είναι τοποθετώντας τους δύο αισθητήρες σε δύο αντικριστές πλευρές του προς εξέταση δοκιμίου (direct transmission), ο δεύτερος τοποθετώντας τους σε δύο κάθετες μεταξύ τους πλευρές (semi-direct transmission), ενώ στον τρίτο οι αισθητήρες τοποθετούνται στην μοναδική προσιτή πλευρά του δομικού στοιχείου (indirect surface transmission) [18]. Οι τρόποι τοποθέτησης των κρυστάλλων παρουσιάζονται στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9: Τρόποι τοποθέτησης εξοπλισμού [18]

Ο πρώτος τρόπος μέτρησης της ταχύτητας των υπερήχων είναι περισσότερο ακριβής, καθώς με την τοποθέτηση των αισθητήρων αντικριστά επιτυγχάνεται η μεταφορά της μέγιστης ενέργειας απ' τον πομπό στον δέκτη. Ταυτόχρονα, η μέτρηση του διανυόμενου απ' το υπερηχητικό κύμα μήκους του δομικού στοιχείου, γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η ακρίβεια των μετρήσεων με τον δεύτερο τρόπο παρουσιάζεται μειωμένη, καθώς είναι δύσκολο να προσδιοριστεί επακριβώς η πορεία που διατρέχει το ηχητικό κύμα μέσα στην μάζα του σκυροδέματος και άρα δύσκολο να μετρηθεί το μήκος L . Για την απλούστευση των ενεργειών, θεωρείται ότι το μήκος L που διανύει το κύμα είναι ίσο με την απόσταση μεταξύ των κέντρων των δύο αισθητήρων. Ο τρίτος τρόπος χρησιμοποιείται όταν είναι προσιτή η μία μόνον πλευρά του προς εξέταση δοκιμίου, ή όταν αναζητείται το βάθος μιας επιφανειακής ρωγμής, ή τέλος όταν υπάρχουν υποψίες για διαφοροποίηση της ποιότητας του σκυροδέματος απ' την επιφάνεια προς το κέντρο του στοιχείου [18].

Η ιδιοσυχνότητα των κρυστάλλων κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 20kHz έως και 1MHz. Μικρής συχνότητας κρύσταλλοι, 20kHz, χρησιμοποιούνται σε στοιχεία με μεγάλη μάζα σκυροδέματος, ενώ μεγαλύτερης συχνότητας κρύσταλλοι, 150kHz, χρησιμοποιούνται σε στοιχεία μικρού πάχους. Οι παλμοί υψηλής συχνότητας έχουν καθορισμένη έναρξη, αλλά καθώς περνούν μέσα από το σκυρόδεμα, εξασθενούν πιο γρήγορα από τους παλμούς χαμηλότερης συχνότητας. Επομένως, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται αισθητήρες

υψηλής συχνότητας για μικρά μήκη διαδρομής και χαμηλής συχνότητας για μεγάλα μήκη διαδρομής. Οι αισθητήρες με συχνότητα από 50kHz έως 60kHz είναι κατάλληλοι για τις περισσότερες κοινές εφαρμογές με συνηθέστερη τιμή αυτή των 54kHz για το σκυρόδεμα [62], [63].

Τα τελευταία χρόνια πληθώρα συσκευών που ικανοποιούν τις παραπάνω απαιτήσεις είναι διαθέσιμη στο εμπόριο. Μία από τις δημοφιλέστερες είναι η συσκευή PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester), η οποία παρουσιάζεται στην παρακάτω Εικόνα 10, ενώ στην Εικόνα 11 η πλήρης διάταξη της συσκευής TICO Ultrasonic Testing Instrument της εταιρείας Proseq, που διαθέτει το Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος & Αντοχής Υλικών του Τμήματος Εκπαιδευτικών Πολιτικών Μηχανικών της ΑΣΠΑΙΤΕ.



Εικόνα 10: Συσκευή PUNDIT plus [64]



Εικόνα 11: Συσκευή UPV, TICO, ράβδος βαθμονόμησης και λιπαντική ουσία

2.4.3 Παράγοντες Επιρροής στη δοκιμή UPV

Η κυματική διάδοση είναι άμεσα επηρεαζόμενη από τις ελαστικές ιδιότητες, την πυκνότητα και την γενική κατάσταση του υλικού στο οποίο γίνεται η διάδοση. Ερευνητές μελέτησαν τη σχέση ταχύτητας διάδοσης υπερηχητικού παλμού και αντοχής σκυροδέματος και διαπίστωσαν ότι οι παράγοντες επιρροής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτούς που εξαρτώνται αποκλειστικά από τις ιδιότητες του σκυροδέματος και σε αυτούς που εξαρτώνται από άλλους παράγοντες [51].

2.4.3.1. Παράγοντες εξαρτώμενοι από τις ιδιότητες σκυροδέματος

2.4.3.1.1. Μέγεθος και τύπος αδρανών

Η ταχύτητα υπερήχων στο σκυρόδεμα επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από τον τύπο, το μέγεθος και την ποιότητα των αδρανών [51], [65], [66]. Γενικά, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των αδρανών που περιέχεται στο σκυρόδεμα, τόσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα UPV. Αντιθέτως, όσο μειώνεται το μέγεθος των αδρανών, τόσο αυξάνεται η θλιπτική αντοχή [51]. Επιπροσθέτως, ερευνητές διαπίστωσαν ότι το είδος και το σχήμα των αδρανών επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την ταχύτητα των υπερήχων. Οι Mohammed & Rahman, 2016, μελέτησαν τη διακύμανση της ταχύτητας των υπερήχων στο σκυρόδεμα συναρτήσει διαφόρων τύπων αδρανών, όπως θρυμματισμένη πέτρα, κυκλικό χαλίκι, πλίνθους και μαύρη πέτρα και διαπίστωσαν ότι η ταχύτητα για την ίδια αντοχή σκυροδέματος, ήταν μεγαλύτερη στα δοκίμια με την μαύρη πέτρα. Ακολουθούσαν τα δοκίμια με τη θρυμματισμένη πέτρα και τέλος, με τη μικρότερη ταχύτητα ήταν τα δοκίμια με τους πλίνθους [65]. Οι Solís-Carcaño & Moreno, 2008, μελέτησαν εκατό δοκίμια σκυροδέματος, τα οποία περιείχαν θρυμματισμένο χαλίκι από δέκα διαφορετικά ορυχεία της χερσονήσου Yucatan του Μεξικό. Παρατηρήθηκε ότι για της ίδιας αντοχής σκυρόδεμα, τα δοκίμια που είχαν καλύτερης ποιότητας αδρανή είχαν ταχύτητα υπερήχων 400m/s υψηλότερα συγκρίσει των δοκιμών που συντέθηκαν με χαμηλής ποιότητας αδρανή [66].

2.4.3.1.2. Τύπος τσιμέντου

Ο Jones, 1963 ανέφερε ότι ο τύπος τσιμέντου δεν έχει σημαντική επίδραση στην ταχύτητα του κύματος των υπερήχων όμως ο ρυθμός ενυδάτωσης είναι διαφορετικός για κάθε τύπο τσιμέντου και αναπόφευκτα θα επηρεάσει την ταχύτητα. Όσο ο ρυθμός της ενυδάτωσης του τσιμέντου αυξάνεται, αυξάνεται και το μέτρο ελαστικότητας. Εξίσου όμως, αυξάνεται και η ταχύτητα των διαμηκών κυμάτων. Οπότε γίνεται κατανοητό, ότι η χρήση τσιμεντών ταχείας σκλήρυνσης έχει ως αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται υψηλότερες τιμές αντοχής για μια δεδομένη τιμή ταχύτητας [57], [67].

2.4.3.1.3. Λόγος νερού/τσιμέντου

Στην αντοχή του σκυροδέματος παίζει σπουδαίο ρόλο ο λόγος νερού/τσιμέντου (w/c). Έχει αποδειχθεί ότι όσο αυξάνεται ο λόγος νερού/τσιμέντου, μειώνονται οι αντοχές σε

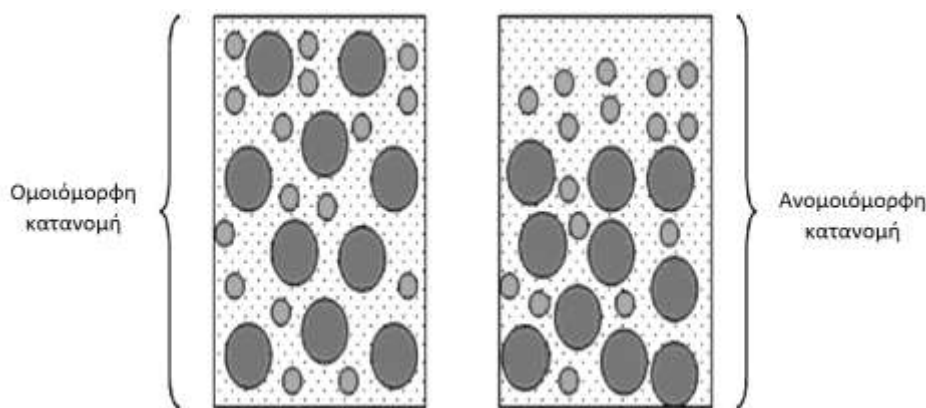
θλίψη και κάμψη, καθώς και η αντίστοιχη ταχύτητα UPV, υποθέτοντας ότι δεν υπάρχουν άλλες αλλαγές στη σύνθεση του σκυροδέματος [53]. Αντίστοιχα, το σκυρόδεμα με χαμηλότερη αναλογία νερού/τσιμέντου, παρουσιάζει υψηλότερες τιμές ταχύτητας UPV και θλιπτικής αντοχής, γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη ποσότητα στερεών συστατικών του μείγματος [68].

2.4.3.1.4. Πρόσμικτα

Εκτός από αδρανή, τσιμέντο και νερό υπάρχουν ορισμένα υλικά, τα οποία προστίθενται πριν ή κατά τη διάρκεια της ανάμιξης του σκυροδέματος και προσδίδουν στο τελικό προϊόν μεγάλα οφέλη. Ρευστοποιητικά ή υπερρευστοποιητικά πρόσμικτα, που έχουν σκοπό τη μείωση του νερού του αναμίγματος και την αύξηση της ρευστότητας, έχουν γενικά θετική επίδραση στο βαθμό ενυδάτωσης και στην ανάπτυξη αντοχής στα αρχικά στάδια της ενυδάτωσης. Επιταχυντικά ή επιβραδυντικά της πήξης πρόσμικτα επηρεάζουν σημαντικά τις αρχικές αντοχές, τις αυξάνουν ή τις μειώνουν αντίστοιχα, όχι όμως και τις τελικές [15]. Ορισμένα πρόσμικτα με τον ίδιο τρόπο που επηρεάζουν τον ρυθμό ενυδάτωσης και την αντοχή του σκυροδέματος, επηρεάζουν και την ταχύτητα υπερήχων. Για παράδειγμα, η προσθήκη χλωριούχου ασβεστίου θα μειώσει τον χρόνο πήξης του σκυροδέματος και θα αυξήσει τον ρυθμό αύξησης της ταχύτητας UPV. Αντιθέτως, η εσκεμμένη εισαγωγή αέρα μέσω αερακτικών πρόσμικτων δεν φαίνεται να επηρεάζει τη σχέση ταχύτητας παλμού και θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος [53].

2.4.3.1.5. Ανομοιογένεια σκυροδέματος

Εξαιτίας της ανομοιογένειας στη σύνθεση του σκυροδέματος, τα αδρανή με μεγαλύτερη πυκνότητα τείνουν να εγκαθίστανται στη κάτω περιοχή του καλουπιού κατά τη σύνθεση του σκυροδέματος. Τα αδρανή έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα από ότι η κονία, που έχει ως αποτέλεσμα η κάτω περιοχή του σκυροδέματος να περιέχει περισσότερα αδρανή από ότι στη μέση και στη πάνω περιοχή (Εικόνα 12). Δοκιμές που διεξήχθησαν στις τρεις περιοχές δοκιμίου, έδειξαν ότι η ταχύτητα των υπερήχων ήταν μεγαλύτερη στη κάτω περιοχή του δείγματος [67]. Συνεπώς, οι ανομοιογένειες στο σκυρόδεμα προκαλούν διακυμάνσεις στην ταχύτητα του παλμού, οι οποίες σχετίζονται με διακυμάνσεις στην ποιότητά του [62].



Εικόνα 12: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής αδρανών [69]

2.4.3.1.6. Ηλικία σκυροδέματος

Η επίδραση της ηλικίας του σκυροδέματος στην ταχύτητα των υπερήχων είναι παρόμοια με την επίδρασή της στην ανάπτυξη της αντοχής του σκυροδέματος. Οι Bogas et al. (2013) αναφέρουν ότι η ταχύτητα των υπερήχων και η αντοχή του σκυροδέματος, αυξάνονται κατά τη διαδικασία σύνθεσης του σκυροδέματος, δηλαδή συναρτήσει του χρόνου από 0 έως 28 ημέρες. Οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα είναι μικρότερη στα μικροκενά που υπάρχουν στο εσωτερικό του σκυροδέματος, σε σχέση με τη στερεά του μάζα, οπότε όσο μεγαλύτερη γίνεται η ενυδάτωση κατά τη διάρκεια της σύνθεσής του, τόσο κλείνουν οι πόροι σταδιακά, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων [70]. Οι Poronics et al. στην δημοσίευσή τους το 1990 εξέτασαν δοκίμια σκυροδέματος σε διαφορετικά στάδια σύνθεσης για να προσδιορίσουν τη συμπεριφορά της ταχύτητας διάδοσης συναρτήσει της διαδικασίας σύνθεσης. Παρατήρησαν ότι η ταχύτητα αυξάνεται με την ηλικία και ότι έχει παρόμοια συμπεριφορά με την αντοχή συναρτήσει της ηλικίας. Ακολουθώντας, συμπέραναν ότι η ταχύτητα διάδοσης στο σκυρόδεμα αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό σε σύγκριση με το τσιμέντο ή την τσιμεντοκονία [67]

2.4.3.2. Άλλοι παράγοντες

2.4.3.2.1. Θερμοκρασία

Έχει παρατηρηθεί μέσα από μία σειρά πειραμάτων, ότι όταν η θερμοκρασία κυμαίνεται από +5°C έως +30°C, δεν παρατηρείται καμία σημαντική διαφοροποίηση στην μετρούμενη ταχύτητα των υπερήχων, ενώ όταν η θερμοκρασία είναι μικρότερη από +5°C ή υψηλότερη από +30°C, τότε διαπιστώνονται σημαντικές μεταβολές στην ταχύτητα των υπερήχων για σκυροδέματα συντηρημένα τόσο σε ξηρές, όσο και σε υγρές συνθήκες. Στον Πίνακα 4, δίνονται οι διορθωτικοί συντελεστές με τους οποίους προσαυξάνεται ή μειώνεται η μετρούμενη ταχύτητα των υπερήχων, όταν η θερμοκρασία βρίσκεται εκτός του διαστήματος +5°C έως +30°C [18]

Πίνακας 4: Επίδραση της θερμοκρασίας σκυροδέματος στην ταχύτητα υπερήχων κατά RILEM [18]

Θερμοκρασία °C	Διόρθωση της μετρούμενης UPV	
	Ξηρές συνθήκες	Υγρές συνθήκες
60	+5,0	+4,0
40	+2,0	+1,7
20	±0,0	±0,0
0	-0,5	-1,0
-4	-1,5	-7,5

Για θερμοκρασίες μεταξύ των τιμών που δίνονται στον παραπάνω Πίνακα 2, γίνεται γραμμική παρεμβολή για τον προσδιορισμό του σωστού διορθωτικού συντελεστή. Η μείωση που παρατηρείται στην ταχύτητα των υπερήχων στις θερμοκρασίες 40°C και 60°C, είναι πιθανό να προέρχεται από τις εσωτερικές μικρορηγματώσεις που σημειώνονται στην μάζα του σκυροδέματος στις συγκεκριμένες θερμοκρασίες. Επειδή δεν υπάρχει αντίστοιχη μείωση και στην αντοχή του σκυροδέματος, οι συντελεστές του Πίνακα 2 βοηθούν στην σωστή συσχέτιση της ταχύτητας των υπερήχων με την αντοχή του σκυροδέματος της κατασκευής. Η αύξηση της ταχύτητας των υπερήχων σε θερμοκρασίες μικρότερες των -4°C, οφείλεται στην μετατροπή του νερού των πόρων σε πάγο [40].

2.4.3.2.2. Υγρασία

Ανιχνεύσιμη επίδραση έχει το ποσοστό υγρασίας, καθώς η ταχύτητα διάδοσης μετριέται ανάλογα με εκείνη, λόγω πιθανότατα της πλήρωσης των κενών πόρων που διευκολύνουν την κυματική διάδοση [71]. Όταν στο δοκιμαζόμενο στοιχείο το ποσοστό υγρασίας είναι υψηλό, παρατηρείται μια αύξηση της μετρούμενης ταχύτητας των υπερήχων, ενώ η θλιπτική του αντοχή μειώνεται [51]. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος συνιστάται η χρήση των διορθωτικών συντελεστών που φαίνονται στον παρακάτω Πίνακας 5:

Πίνακας 5: Επίδραση της συντήρησης στην ταχύτητα υπερήχων [72]

Συντήρηση σκυροδέματος	Διορθωτικός Συντελεστής
Στον ξηρό αέρα	1,03
Συμβατική	1,00
Στο νερό	0,97

Σημειώνεται ότι είναι δυνατή η χρήση ενδιάμεσων τιμών κατ' εκτίμηση του βαθμού ξηράνσεως ή του βαθμού κορεσμού της υπό έλεγχο μάζας σκυροδέματος [40].

2.4.3.2.3. Μήκος διαδρομής (path length)

Το ελάχιστο μήκος διαδρομής πρέπει να είναι ίσο με 100mm για σκυροδέματα με μέγιστο μέγεθος αδρανούς 20mm και ίσο με 150mm για μέγιστο μέγεθος αδρανούς μεταξύ 20mm και 40mm [73]. Στο ISO DIS 8047 (1982) αναφέρεται ότι το ελάχιστο μήκος διαδρομής θα πρέπει να είναι πενταπλάσιο του μέγιστου κόκκου αδρανών, και σε καμία περίπτωση μικρότερο των 150mm. Είναι όμως δυνατό, όπως αναφέρεται στο ASTM C597, το μήκος διαδρομής να κυμαίνεται από 50mm έως 15m. Το ανώτερο όριο του μήκους

διαδρομής εξαρτάται απ' την κατάσταση της εξωτερικής επιφάνειας του στοιχείου, όπως επίσης και από τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος από το οποίο είναι κατασκευασμένο. Τονίζεται ότι για μεγάλα μήκη απαιτούνται συχνότητες της τάξεως των 20kHz, ενώ για μικρά μήκη οι συχνότητες μπορούν να φτάσουν μέχρι τα 200kHz. Στην δημοσίευση της RILEM NDT1 (1972) για τις μη καταστρεπτικές μεθόδους, δίνεται ο Πίνακας 6 για την επιλογή της συχνότητας ανάλογα με το μήκος διαδρομής [18].

Πίνακας 6: Απαιτούμενη συχνότητα οργάνου συναρτήσει του μήκους διαδρομής των υπερήχων [18]

Μήκος διαδρομής (mm)	Συχνότητα (kHz)	Ελάχιστη εγκάρσια απόσταση (mm)
100-700	>60	70
200-1500	>40	150
>1500	>20	300

2.4.3.2.4. Σχήμα και διαστάσεις δοκιμίου

Η ταχύτητα των υπερήχων δεν εξαρτάται από το σχήμα και τις διαστάσεις των δοκιμαζόμενων στοιχείων, εκτός και αν η διάσταση είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη. Όταν η διάσταση του δοκιμίου είναι μικρή, τότε υπάρχει μείωση και στην ταχύτητα υπερήχων. Η μείωση εξαρτάται κυρίως από τον λόγο του μήκους κύματος προς την ελάχιστη διάσταση του δοκιμίου. Στον Πίνακα 7 φαίνεται η συνιστώμενη ελάχιστη διάσταση του δοκιμίου συναρτήσει της συχνότητας του οργάνου και της ταχύτητας των υπερήχων [73].

Πίνακας 7: Ταχύτητα παλμού, συχνότητα πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα και ελάχιστη επιτρεπόμενη πλευρική διάσταση δείγματος [73]

Συχνότητα Αισθητήρα (kHz)	Ταχύτητα Παλμού στο Σκυρόδεμα (km/s)		
	$V_c = 3,5$	$V_c = 4,0$	$V_c = 4,5$
	Ελάχιστη επιτρεπόμενη διάσταση πλευρικού δείγματος (mm)		
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	49	55
150	23	27	30

2.4.3.2.5. Εντατική κατάσταση σκυροδέματος

Η ταχύτητα των υπερήχων αυξάνει ελαφρά όταν το σκυρόδεμα φορτίζεται προοδευτικά σε χαμηλά επίπεδα, αλλά μειώνεται απότομα όταν η εξωτερική τάση γίνει ίση με το 70% της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Το συγκεκριμένο φαινόμενο ερμηνεύεται απ' το γεγονός ότι με την προοδευτική αύξηση της τάσεως, μειώνονται τα κενά στην μάζα του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα να έχουμε μικρότερους χρόνους διαδόσεως των υπερήχων. Αντίθετα, όταν η τάση είναι μεγάλη και εφαρμοστεί απότομα δημιουργούνται ρωγμές στη μάζα του σκυροδέματος, με συνέπεια να έχουμε αύξηση του χρόνου διαδόσεως των υπερηχητικών κυμάτων [18]. Ο Λογοθέτης, 1979, αναφέρει ότι

τόσο η εντατική κατάσταση του σκυροδέματος, όσο και ο αριθμός των κύκλων φορτίσεως και αποφορτίσεως σε υψηλές τάσεις, επηρεάζουν την ταχύτητα των υπερήχων, καθώς αύξηση των τάσεων προκαλεί μείωση της ταχύτητας «V» [72]. Στον Πίνακα 8 δίνονται οι αναγκαίες διορθώσεις που πρέπει να γίνονται για κάθε περίπτωση. Οι τιμές που παρατίθενται πρέπει να προστίθενται στις μετρούμενες ταχύτητες.

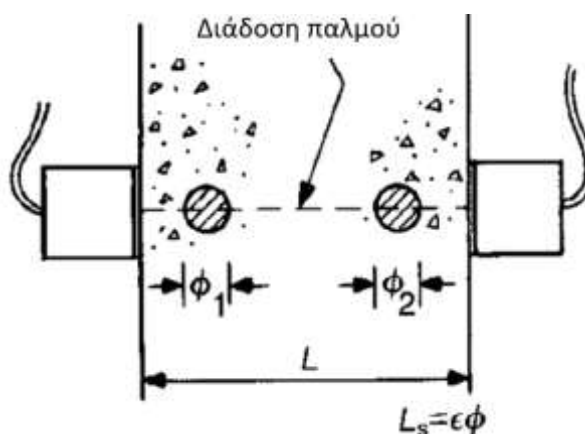
Πίνακας 8: Διόρθωση της ταχύτητας των υπερήχων συναρτήσει της εντατικής καταστάσεως [40]

Σκυρόδεμα	Κύκλος φορτίσεως	σ/F_c	$\Delta V/V$
Πρωτοφορτιζόμενο	1 ^{ος}	0,0-0,4	0
		0,4-0,6	$0,06 \cdot \sigma/F_c$
		0,6-0,8	$\{0,04 + 0,2[(\sigma/F_c) - 0,6]\}$
Προφορτισθέν και πλήρως αποφορτισθέν	2 ^{ος}	0,0-0,5	4%
	3 ^{ος}		6%
	4 ^{ος}		8%

2.4.3.2.6. Ράβδοι οπλισμού

Η μετρούμενη ταχύτητα των υπερήχων στις περιοχές των δομικών στοιχείων που περιέχουν ράβδους οπλισμού, είναι συνήθως υψηλότερη σε σχέση με την ταχύτητα που μετράται σε περιοχές ελεύθερες από οπλισμό. Η αύξηση δικαιολογείται από το γεγονός ότι στον χάλυβα η ταχύτητα των υπερήχων είναι από 1,2 έως 2,0 φορές μεγαλύτερη από την ταχύτητα στο σκυρόδεμα. Η παρατηρούμενη αύξηση εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό των ράβδων οπλισμού, την διάμετρό τους και την απόσταση του κέντρου των αισθητήρων από τον διαμήκη άξονα των ράβδων. Πρόσθετος παράγοντας στην αύξηση της ταχύτητας των υπερήχων, αποτελεί και η κατάσταση της εξωτερικής επιφάνειας των ράβδων οπλισμού. Το σύνολο των ερευνητών συνιστούν να αποφεύγονται οι μετρήσεις σε περιοχές με υψηλό ποσοστό οπλισμού και κυρίως παράλληλα προς αυτούς. Όταν όμως τέτοιου είδους μετρήσεις είναι επιβεβλημένες, τότε τα αποτελέσματα των μετρήσεων θα πρέπει να διορθώνονται σύμφωνα με τις κατωτέρω προτεινόμενες διαδικασίες:

α) Οι άξονες των οπλισμών κάθετοι προς την διεύθυνση διαδόσεως των υπερηχητικών κυμάτων (Εικόνα 13) [40].



Εικόνα 13: Άξονες οπλισμών κάθετοι προς την διεύθυνση διαδόσεως των υπερηχητικών κυμάτων [40]

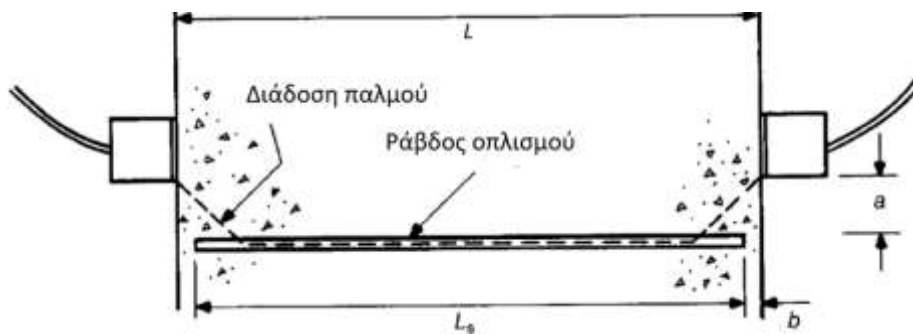
Έστω ότι στο στοιχείο που εξετάζεται υπάρχουν «n» διαφορετικές ράβδοι οπλισμού με διαμέτρους $\varnothing_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Η σχέση μέσω της οποίας γίνονται οι απαραίτητες διορθώσεις των υπολογισμών φαίνεται στην εξίσωση (11).

$$\frac{V_c}{V} = \frac{\frac{1 - L_s}{L}}{1 - \frac{L_s \cdot V}{L \cdot V_s}} \quad (11)$$

όπου:

- V : η ταχύτητα των υπερήχων στο οπλισμένο σκυρόδεμα (η μετρούμενη ταχύτητα)
- V_c : η ταχύτητα των υπερήχων στο καθαρό σκυρόδεμα
- V_s : η ταχύτητα των υπερήχων στο χάλυβα από 5,2km/s έως 6,0km/s
- L : το πάχος του στοιχείου που εξετάζεται
- L_s : Σ $\varnothing$ i το μήκος της διαδρομής μέσα από τους χάλυβες

β) Οι άξονες των οπλισμών παράλληλοι προς την διεύθυνση διαδόσεως των υπερηχητικών κυμάτων (Εικόνα 14) [40].



Εικόνα 14: Άξονες οπλισμών παράλληλοι στην διεύθυνση διαδόσεως των υπερηχητικών κυμάτων [63]

Ο διορθωτικός συντελεστής εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ του άξονα διαδρομής του κύματος και την ράβδο οπλισμού, καθώς και από την ταχύτητα των υπερήχων στο καθαρό από οπλισμούς σκυρόδεμα.

Η ταχύτητα διαδόσεως των υπερήχων στο σκυρόδεμα V_c δίνεται από την εξίσωση (12).

$$\frac{V_c}{V} = \frac{V_c}{V_s} + 2 * \frac{a}{L} * \sqrt{1 - \left(\frac{V_c}{V_s}\right)^2} \quad (12)$$

για $4 \left\{ \frac{a}{L} \right\}^2 < \left(\frac{V_s - V_c}{V_s + V_c} \right)$, όπου:

- V : η ταχύτητα των υπερήχων στο οπλισμένο σκυρόδεμα (η μετρούμενη ταχύτητα)
- V_c : η ταχύτητα των υπερήχων στο καθαρό σκυρόδεμα
- V_s : η ταχύτητα των υπερήχων στο χάλυβα σε (km/sec)
- a : η απόσταση μεταξύ της ράβδου οπλισμού και του πλησιέστερου αισθητήρα (σε mm)
- T : ο χρόνος διαδόσεως των υπερήχων (sec)
- L : το μήκος διαδρομής

Η επίδραση των οπλισμών μηδενίζεται όταν $4 \left\{ \frac{a}{L} \right\}^2 > \left(\frac{V_s - V_c}{V_s + V_c} \right)$ και η ανωτέρω σχέση παύει να ισχύει. Ο λόγος $\frac{a}{L}$ έχει μέγιστο όριο περίπου το 0,25 για σκυροδέματα χαμηλής ποιότητας και οπλισμούς με διάμετρο αρκετά μεγάλη. Από την άλλη πλευρά για σκυροδέματα υψηλής ποιότητας που περιέχουν ράβδους οπλισμού με διάμετρο μικρότερη ή ίση των 12mm, ο λόγος $\frac{a}{L}$ παίρνει το ελάχιστο όριο που είναι περίπου 0.15. Στον Πίνακα 9, δίνονται οι τιμές του διορθωτικού συντελεστή, για διάφορες τιμές των λόγων $\frac{V_c}{V_s}$ και $\frac{a}{L}$ [40].

Πίνακας 9: Διορθωτικοί συντελεστές της ταχύτητας υπερήχων παρουσία οπλισμών [63]

a/L	Πραγματική ταχύτητα υπερήχων στο σκυρόδεμα/Μετρούμενη ταχύτητα υπερήχων V_c/V_s			
	$V_c/V_s = 0,90$	$V_c/V_s = 0,80$	$V_c/V_s = 0,71$	$V_c/V_s = 0,60$
0	0,90	0,80	0,71	0,60
1/20	0,94	0,86	0,78	0,68
1/15	0,96	0,88	0,80	0,71
1/10	0,99	0,92	0,85	0,76
1/7	1,00	0,97	0,91	0,83
1/5	1,00	1,00	0,99	0,92
1/4	1,00	1,00	1,00	1,00

2.4.4 Εφαρμογές

2.4.4.1. Εκτίμηση και παρακολούθηση εξέλιξης της αντοχής σκυροδέματος

Η μέθοδος των υπερήχων παρέχει ένα μέσο εκτίμησης της αντοχής του σκυροδέματος και σε επί τόπου μετρήσεις αλλά και στο εργαστήριο. Ωστόσο, δεν υπάρχει φυσική σχέση που να συνδέει την αντοχή του σκυροδέματος με την ταχύτητα. Όπως αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 2.4.3, η σχέση μεταξύ ταχύτητας και αντοχής σκυροδέματος, δεν είναι μοναδική και επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, γεγονός που καθιστά τα τελικά αποτελέσματα ποιοτικά και όχι ποσοτικά. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιείται ο όρος εκτίμηση της αντοχής και όχι μέτρηση. Ερευνητές έχουν υποδείξει ότι δεν πρέπει να γίνονται προσπάθειες εκτίμησης της αντοχής του σκυροδέματος από τις τιμές της υπερηχητικής ταχύτητας, εκτός μόνον αν υπάρχει βάση δεδομένων για κάθε είδος σκυροδέματος ξεχωριστά. Η RILEM, το British Standard (BS) και το American Concrete Institute (ACI) συνιστούν πρακτικές για την ανάπτυξη της σχέσης μεταξύ ταχύτητας παλμού και θλιπτικής αντοχής, η οποία μπορεί αργότερα να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της επί τόπου αντοχής με βάση την ταχύτητα παλμού [53].

Η μέθοδος των υπερήχων χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της εξέλιξης της αντοχής του σκυροδέματος με διαδοχικές μετρήσεις κατά χρονικά διαστήματα. Η ταχύτητα διαδόσεως των υπερήχων είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του μέτρου

ελαστικότητας του σκυροδέματος και αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της πυκνότητάς του. Αν γίνει αποδεκτό ότι το μέτρο ελαστικότητας είναι επίσης ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, προκύπτει ότι η ταχύτητα των υπερήχων είναι ανάλογη της τέταρτης ρίζας της θλιπτικής αντοχής του. Συνεπώς, για μια δεδομένη σύνθεση σκυροδέματος και καθώς αυξάνει η αντοχή του με τον χρόνο, υπάρχει μια αναλογικώς μικρότερη αύξηση της ταχύτητας των υπερήχων. Όπως αναφέρεται στην έκθεση του ACI 228 (1996), από σχετικό δημοσίευμα της RILEM, φαίνεται ότι μια αύξηση της αντοχής σκυροδέματος μικρής ηλικίας από 3,4MPa σε 10,3MPa, έχει αύξηση της ταχύτητας των υπερήχων από 4,0km/s σε 4,6km/s. Αντίθετα, σε μεγαλύτερης ηλικίας σκυρόδεμα, η αύξηση της αντοχής από 27,6MPa σε 34,5MPa έχει αύξηση της ταχύτητας των υπερήχων από 5,09km/s σε 5,22km/s. Σε μεγάλες ηλικίες η ταχύτητα των υπερήχων δεν είναι ευαίσθητη στην αύξηση της αντοχής [18].

Μια πρωτοποριακή εξέλιξη στην τεχνολογία μέτρησης UPV αφορά στη χρήση ενσωματωμένων πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων (PZT) χαμηλού κόστους, οι οποίοι τοποθετούνται εντός της μάζας του σκυροδέματος κατά τη σκυροδέτηση. Οι Kee και Zhu, 2013, εξέτασαν τη σκοπιμότητα χρήσης τέτοιων αισθητήρων σε δοκίμιο οπλισμένου σκυροδέματος υπό ποικίλες φορτικές καταστάσεις. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι οι ενσωματωμένοι αισθητήρες παρέχουν σήματα ευρέος φάσματος με κεντρική συχνότητα περί τα 80kHz και συνεκτικότητα σήματος (coherence) $\geq 0,995$ στο εύρος 30–180kHz. Ο συντελεστής μεταβλητότητας (COV) της μετρούμενης ταχύτητας Ρ-κυμάτων κυμάνθηκε μεταξύ 0,04% και 0,89% ανάλογα με τη μέθοδο υπολογισμού, τιμές χαμηλότερες σε σχέση με το εύρος 1–3% που αναφέρεται στη βιβλιογραφία για συμβατικούς αισθητήρες UPV υπό ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες. Η ενσωμάτωση αυτή εξαλείφει το πρόβλημα μεταβλητότητας σύζευξης αισθητήρα-επιφάνειας και καθιστά δυνατή τη μακροχρόνια παρακολούθηση (monitoring) κατασκευών σκυροδέματος, αν και η εφαρμογή της περιορίζεται σε νέες κατασκευές λόγω της ανάγκης τοποθέτησης των αισθητήρων πριν τη σκυροδέτηση [74]

2.4.4.2. Έλεγχος ομοιογένειας σκυροδέματος

Η μέθοδος UPV είναι κατάλληλη για τη μελέτη της ομοιογένειας του σκυροδέματος και ως εκ τούτου, για τη αξιολόγηση της ποιότητάς του. Η επί τόπου αντοχή του σκυροδέματος ποικίλλει σε μια κατασκευή, λόγω της ποικιλομορφίας στην προέλευση και τις αναλογίες των υλικών, την ομοιομορφία της ανάμειξης και της ανεπαρκούς ή μεταβλητής στερεοποίησης. Η μέθοδος της ταχύτητας υπερήχων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για τη δημιουργία συγκριτικών δεδομένων και για την ποιοτική αξιολόγηση του σκυροδέματος. Για τη λήψη ποιοτικών δεδομένων δημιουργείται ένα πλέγμα σημείων μέτρησης (κάναβος). Ανάλογα με την ποσότητα του προς αξιολόγηση σκυροδέματος, το μέγεθος της κατασκευής, την αναμενόμενη μεταβλητότητα και την απαιτούμενη ακρίβεια, θα πρέπει να δημιουργηθεί ένας κάναβος τουλάχιστον 300x300mm. Άλλες εφαρμογές της ποιοτικής σύγκρισης επί τόπου δοκιμών ή δοκιμίων

σκυροδέματος, είναι ο έλεγχος της διακύμανσης της πυκνότητας του σκυροδέματος για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της στερεοποίησης, ο εντοπισμός περιοχών εγκλωβισμένου αέρα, εσωτερικών ρωγμών και κενών.

2.4.4.3. Μελέτες ενυδάτωσης τσιμέντου

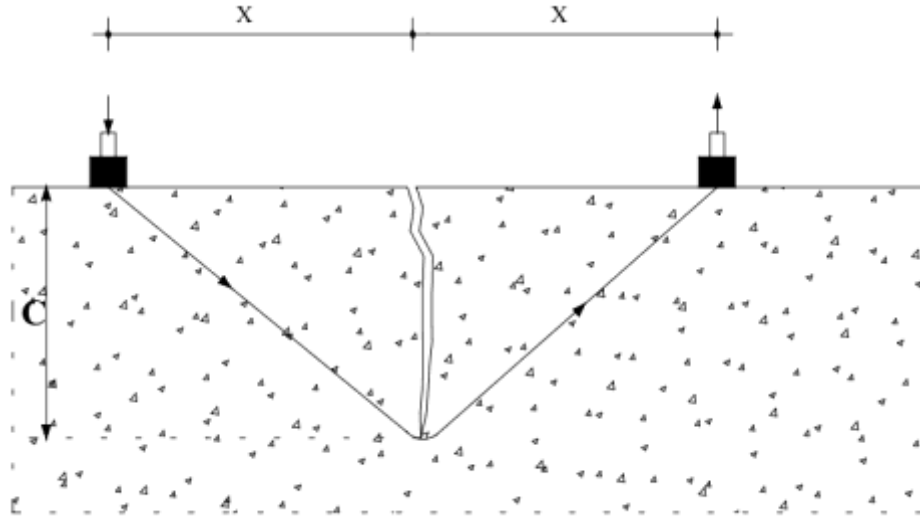
Ερευνητές έχουν δημοσιεύσει πληροφορίες σχετικά με την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου για την παρακολούθηση της διαδικασίας πήξης και σκλήρυνσης τσιμεντοπολτού, κονιάματος και σκυροδέματος. Η μέθοδος είναι χρήσιμη για την ανίχνευση αλλαγών κατά τις πρώτες 36 ώρες μετά την προσθήκη νερού στο σκυρόδεμα. Σημαντική πρακτική χρήση της μεθόδου είναι η αξιολόγηση του ρυθμού πήξης για διαφορετικούς τύπους τσιμέντων ή πρόσμικτων, που θα χρησιμοποιηθούν για ένα δεδομένο έργο.

2.4.4.4. Εκτίμηση ανθεκτικότητας σκυροδέματος

Δυσμενείς περιβαλλοντικοί παράγοντες φθείρουν το σκυρόδεμα και μειώνουν την ταχύτητα παλμού. Οι φθορές του σκυροδέματος που προκαλούνται από τον παγετό και την απόψυξη, την έκθεση σε θειικά, την αλκαλοπυριτική αντίδραση και την οξείδωση των οπλισμών, μπορούν να ανιχνευθούν με τη μέθοδο UPV και έχουν μελετηθεί από διάφορους ερευνητές. Η φθορά με την πάροδο του χρόνου είτε ενός δοκιμίου σκυροδέματος, είτε ενός δομικού στοιχείου υπάρχουσας κατασκευής, μπορεί να παρακολουθηθεί με τη διεξαγωγή επαναλαμβανόμενων δοκιμών. Με την ίδια μέθοδο έχει διερευνηθεί η φθορά του σκυροδέματος λόγω έκθεσης σε φωτιά [53].

2.4.4.5. Εξέταση ύπαρξης ατελειών στη μάζα σκυροδέματος

Η μέθοδος των υπερήχων συμβάλλει στον προσδιορισμό της ύπαρξης και του μεγέθους κατασκευαστικών σφαλμάτων, ρωγμών και κενών στην μάζα του σκυροδέματος. Η ύπαρξη κενού διαπιστώνεται μόνο όταν η προβολή του κατά μήκος της διαδρομής των υπερήχων είναι μεγαλύτερη από το πλάτος των αισθητήρων και από το μήκος κύματος των υπερήχων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση οι παλμοί διανύουν μεγαλύτερο μήκος και έτσι ο χρόνος διαδόσεως του υπερηχητικού κύματος παρουσιάζεται σημαντικά αυξημένος σε σχέση με τον χρόνο διαδόσεως σε γειτονικές θέσεις χωρίς ρωγμές και κενά. Απαραίτητη προϋπόθεση για να είναι οι μετρηθέντες χρόνοι συγκρίσιμοι είναι η ομοιογένεια του σκυροδέματος του εξεταζόμενου στοιχείου. Η εκτίμηση του βάθους μίας επιφανειακής ρωγμής κάθετης στην επιφάνεια μπορεί να γίνει τοποθετώντας τους αισθητήρες όπως φαίνεται στην Εικόνα 15.



Εικόνα 15: Διάταξη μετρήσεως για τον προσδιορισμό βάθους ρωγμής [40]

Δίνονται στο x οι τιμές 150mm και 300mm και μετρούνται οι χρόνοι διαδόσεως των υπερήχων t_1 και t_2 . Χρησιμοποιώντας τις τιμές υπολογίζεται το βάθος της ρωγμής C (σε mm) μέσω της εξίσωσης (13):

$$\left(\frac{C}{150}\right)^2 = \left[\frac{4 * t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}\right] \quad (13)$$

όπου:

t_1 : ο χρόνος διαδόσεως για $L = 150mm$

t_2 : ο χρόνος διαδόσεως για $L = 300mm$

Πρέπει να σημειωθεί ότι προϋπόθεση για την ισχύ εξίσωσης (13) είναι η ομογένεια του σκυροδέματος του δομικού στοιχείου [40].

2.4.4.6. Υποβρύχιες εφαρμογές

Η φθορά του σκυροδέματος κάτω από την ίσαλο γραμμή εμφανίζεται με την παρουσία ρωγμών, θραυσμάτων και κοιλιοτήτων. Κύρια αιτία εμφάνισής της αποτελούν οι χημικές διεργασίες που πραγματοποιούνται στο θαλάσσιο περιβάλλον, ενώ μερικές φορές προκαλείται και από χημική αντίδραση με τη μάζα του σκυροδέματος, όπως η αλκαλοποίηση [75]. Η υποβρύχια επιθεώρηση σκυροδέματος απαιτείται για λόγους συντήρησης, για νέες συνθήκες φόρτισης, τροποποίησης ή επέκτασης της υπάρχουσας κατασκευής και για να διασφαλιστεί ότι μια νέα κατασκευή βασίζεται στις ισχύουσες προδιαγραφές. Επίσης, η υποβρύχια επιθεώρηση απαιτείται στις περιπτώσεις αστοχίας της κατασκευής έπειτα από σεισμούς, συγκρούσεις πλοίων, τυφώνες και έντονες πλημμύρες [75].

Στην υποβρύχια επιθεώρηση συμμετέχουν ένας ή περισσότεροι δύτες ή ένα τηλεχειριζόμενο όχημα (Remotely Operated Vehicle – ROV). Τα ROV αποτελούνται συνήθως από εγκατεστημένες βιντεοκάμερες, αισθητήρες υπερήχων και φώτα και ελέγχονται από τον δύτε στην επιφάνεια. Κύρια πλεονεκτήματα των ROV είναι η

ικανότητα επιθεώρησης σε μεγάλα βάθη, καθώς και η χρήση σε τοποθεσίες όπου τα υδάτινα ρεύματα και οι παλιρροϊκές συνθήκες δεν επιτρέπουν τη συμμετοχή του δύτη. Η υποβρύχια επιθεώρηση σκυροδέματος πραγματοποιείται με τυπικό εξοπλισμό υπερήχων. Το νερό λειτουργεί ως μέσο σύζευξης και ενισχύει τη μεταφορά σήματος από τον αισθητήρα στο υπό εξέταση υλικό. Επίσης είναι δυνατός ο έλεγχος στις κατασκευές με την τεχνική που ονομάζεται ponding. Η τεχνική στηρίζεται στη δημιουργία ενός στρώματος νερού ή “λίμνης” μεταξύ της κατασκευής και του αισθητήρα και εφαρμόζεται μόνο στην άνω επιφάνεια ή στα βυθισμένα τμήματα της κατασκευής [51].

Υπάρχουν τρία στάδια υποβρύχιας επιθεώρησης. Το πρώτο είναι η γενική οπτική ή τακτική υποβρύχια επιθεώρηση (General Visual or Routine Underwater Inspection), η οποία είναι η πιο γρήγορη μέθοδος αλλά και η λιγότερο αποτελεσματική. Το δεύτερο στάδιο είναι η υποβρύχια επιθεώρηση σε κοντινό επίπεδο (Close Level or Detail Underwater Inspection), η οποία είναι πιο λεπτομερής και στοχεύει στη λήψη περιορισμένων μετρήσεων των φθαρμένων περιοχών. Τέλος, το τρίτο είναι η εξαιρετικά λεπτομερής υποβρύχια επιθεώρηση (Highly Detailed Underwater Inspection), η οποία χρησιμοποιείται και για τον προσδιορισμό της ομοιγένειας του υλικού [75].

Υπάρχουν δύο τύποι συστημάτων μέτρησης του πάχους δομικού στοιχείου με υπερήχους σε υποβρύχιες εφαρμογές. Ο πρώτος είναι πλήρως βυθισμένος και ο δύτης πρέπει να καταγράψει ή να μεταφέρει τις μετρήσεις στην επιφάνεια (Εικόνα 16α). Ο δεύτερος αποτελείται από αδιάβροχο αισθητήρα και καλώδιο που μεταφέρονται κάτω από το νερό, ενώ η οθόνη παραμένει στην επιφάνεια (Εικόνα 16β). Τέλος, υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης του εξοπλισμού σε αδιάβροχο περίβλημα με σκοπό την πλήρη βύθισή του [76].



Εικόνα 16: Συσσκευή υπερήχων για υποβρύχια μέτρηση: α) Πλήρως βυθισμένος εξοπλισμός, β) Αδιάβροχος αισθητήρας συσκευής [75]

2.4.5 Εκτίμηση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας Young και υπολογισμός του δυναμικού λόγου Poisson

Η εκτίμηση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας (E_d) του σκυροδέματος μέσω μη καταστροφικών τεχνικών περιλαμβάνει τη μετατροπή μετρήσιμων φαινομένων κυμάτων

σε ελαστικές σταθερές χρησιμοποιώντας καθιερωμένες σχέσεις από τη θεωρία της ελαστικότητας και βασίζεται στη μέτρηση διάδοσης της ταχύτητας ενός διαμήκους κύματος που διέρχεται σε ένα ελαστικό υλικό, η οποία καθορίζεται με μοναδικό τρόπο και σχετίζεται στενά με τις μηχανικές ιδιότητες του [77]. Συγκεκριμένα μέσω της UPV, υπό ισοτροπικές ελαστικές παραδοχές για ένα άπειρο μέσο, η ταχύτητα V_p σχετίζεται άμεσα με το περιορισμένο μέτρο ελαστικότητας M και με το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (E_d) όταν η πυκνότητα ρ και ο λόγος Poisson (ν_d) είναι γνωστά μέσω των εξισώσεων (14) και (15) αντίστοιχα [62]:

$$M = \rho V_p^2 \quad (14)$$

$$E_d = \rho V_p^2 \frac{(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)}{(1 - \nu_d)} \quad (15)$$

Αυτή η θεωρητική σχέση προϋποθέτει ομοιομορφία διάδοσης του κύματος μέσα από πανομοιότυπες φάσεις του υλικού, κάτι που σπάνια ισχύει στην πραγματικότητα [7]. Οποιαδήποτε ανωμαλία στην κατανομή των αδρανών ή κενά κατά μήκος αυτής της διαδρομής μπορεί να προκαλέσει απόκλιση των χρόνων άφιξης κατά μικροδευτερόλεπτα και δεδομένου ότι όπως φαίνεται στην εξίσωση (15) το E_d είναι ανάλογο με το τετράγωνο της ταχύτητας (V_p^2), αυτές οι μικρές αποκλίσεις στο χρόνο μεταφράζονται σε δυσανάλογα μεγάλα σφάλματα που προκαλούν ενισχυμένη αβεβαιότητα στην εκτίμηση του μέτρου. Μια περαιτέρω δυσκολία έγκειται στον αξιόπιστο προσδιορισμό του λόγου Poisson που λειτουργεί ως διορθωτικός συντελεστής στην εξίσωση (15). Στην πράξη, συχνά χρησιμοποιείται μια υποθετική τιμή ν , η οποία μπορεί να αποκλίνει από την πραγματική ανάλογα με τη σύνθεση του μίγματος και την κατάσταση της βλάβης [78]. Ένας ακόμη παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι όταν εξετάζουμε σκυροδέματα υψηλής αντοχής. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι δυναμικές ιδιότητες τείνουν να έχουν υψηλότερες τιμές από τις στατικές καθώς αυξάνεται η αντοχή, επειδή η δυναμική φόρτιση διεγείρει την ελαστική απόκριση πριν οι μικρορωγμές επηρεάσουν την δυσκαμψία.

Ο υπολογισμός του δυναμικού λόγου Poisson (ν_d) του σκυροδέματος μέσω UPV απαιτεί τη μετατροπή των μετρούμενων φαινομένων κυμάτων σε σχέσεις πλευρικής προς αξονικής παραμόρφωσης υπό συνθήκες δυναμικής φόρτισης. Αυτό παρουσιάζει πρόσθετες προκλήσεις, επειδή δεν είναι άμεσα προσδιορίσιμος μέσω μιας μόνο δοκιμής. Σε αντιδιαστολή, ο αξιόπιστος προσδιορισμός απαιτεί τη μέτρηση τουλάχιστον δύο ανεξάρτητων ταχυτήτων ελαστικών κυμάτων, έτσι ώστε να μπορεί να υπολογιστεί από τη θεωρία ελαστικότητας χωρίς να καταφεύγουμε σε αυθαίρετες υποθέσεις [79]. Με γνωστά τα M και E_d ο λόγος Poisson μπορεί να υπολογιστεί από τις εξισώσεις (16) και (17) [80].

$$\nu_d = \frac{E_d - M + S}{4 \cdot M} \quad (16)$$

$$S = \pm \sqrt{E_d^2 + 9M^2 - 10E_d M} \quad (17)$$

Στην πράξη, οι διαμήκεις ταχύτητες V_L και οι εγκάρσιες ταχύτητες V_S αποτελούν τα απαραίτητα δεδομένα για τον υπολογισμό του ν_d , όμως η μη καταστροφική μέτρηση των ταχυτήτων των διατμητικών κυμάτων είναι τεχνικά απαιτητική. Συνήθως μετράται μόνο η διαμήκης ταχύτητα V_L , με αποτέλεσμα να χρειάζεται η υπόθεση μιας αρχικής τιμής ν_d με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία, συχνά κοντά στο 0,2 για μείγματα τυπικής αντοχής. Αυτή η υπόθεση εισάγει δυνητικά μεγάλα σφάλματα καθώς το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson συνδέονται μη γραμμικά όπως φαίνεται και στην εξίσωση (15) μέσω του λόγου $\frac{(1+\nu_d)(1-2\nu_d)}{(1-\nu_d)}$, οπότε η πιθανή απόκλιση του ν έχει μη ανάλογη επιρροή στην εκτίμηση του E_d [1]. Για παράδειγμα, ένας πραγματικός $\nu = 0,25$ έναντι ενός υποθετικού $\nu = 0,20$ μετατοπίζει σημαντικά το E_d , ακόμη και αν η μετρούμενη V_L παραμένει σταθερή [78]. Η συνήθης πρακτική καθορισμού του ν αγνοεί τις διακυμάνσεις που προκαλούνται από τον τύπο του αδρανούς υλικού, το ιστορικό ωρίμανσης ή μια μικροδομική βλάβη [81]. Η περιεκτικότητα σε υγρασία επηρεάζει περαιτέρω τον φαινόμενο λόγο Poisson καθώς ο λόγος Poisson του νερού είναι περίπου 0,5, ο αυξημένος κορεσμός ωθεί τον ενεργό λόγο προς τα πάνω [82].

2.4.6 Πλεονεκτήματα της UPV

Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα τόσο της UPV είναι η δυνατότητα προσδιορισμού των δυναμικών ελαστικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος χωρίς να αλλοιώνει ή να καταστρέφει το υπό εξέταση στοιχείο. Αυτή η μη επεμβατική ιδιότητα την καθιστά σε μεγάλο βαθμό κατάλληλη τόσο για επιτόπιες αξιολογήσεις, όπου η πυρηνοληψία θα ήταν πρακτικά αδύνατη και δαπανηρή ή ακόμα στην περίπτωση αξιολόγησης βάθρων και φορέων γεφυρών, τοίχων αντιστήριξης ή μνημείων όπου οι περιορισμοί πρόσβασης και οι απαιτήσεις διατήρησης συχνά υπαγορεύουν ότι οι δοκιμές πρέπει να αφήνουν την κατασκευή ανέπαφη, όσο και στο εργαστήριο [51].

Επιπροσθέτως, η μεγάλη διεισδυτική ικανότητα επιτρέπει την ανίχνευση ατελειών σε μεγάλο βάθος. Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να ελεγχθούν αντικείμενα με μήκος και πάχος αρκετών μέτρων. Πλεονεκτήματα αποτελούν επίσης η ευαισθησία σε επιφανειακές και υπό – επιφανειακές ασυνέχειες, καθώς και στην ανίχνευση πολύ μικρών ατελειών, ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης και μεγέθους εσωτερικών ατελειών και ο χαρακτηρισμός του προσανατολισμού, μορφής και τύπου τους.

Η απλότητα εφαρμογής της μεθόδου UPV αποτελεί επιπλέον πρακτικό πλεονέκτημα. Με ελάχιστη προετοιμασία, συχνά μόνο λείανση της επιφάνειας, εφαρμογή μίας γέλης σύζευξης και τους ειδικούς αισθητήρες στην επιφάνεια του σκυροδέματος, επιτρέπει μετρήσεις που μπορούν να ληφθούν γρήγορα σε ευρείς περιοχές [83]. Οι μετρήσεις μπορούν να ολοκληρωθούν σε δευτερόλεπτα, παρέχοντας άμεσες τιμές ταχύτητας που δίνουν ποιοτική εικόνα για πιθανά προβλήματα επί τόπου, όπως κενά, ρωγμές ή ζώνες χαμηλής πυκνότητας [84]. Αυτή η ταχύτητα είναι ιδανική για έρευνες μεγάλης κλίμακας, όπου πρέπει να εξεταστούν εκατοντάδες σημεία εντός περιορισμένων χρονικών ορίων

επιθεώρησης, όπως κατά τη διάρκεια σύντομων διακοπών συντήρησης για γέφυρες. Οι χειριστές μπορούν να χαρτογραφήσουν γρήγορα τις διακυμάνσεις της ταχύτητας σε ολόκληρη τη δομή και να εντοπίσουν ζώνες που αποκλίνουν από τη βασική συμπεριφορά. Αυτές οι εντοπισμένες ανωμαλίες αποτελούν στη συνέχεια τη βάση για την απόφαση σχετικά με την ανάγκη διεξαγωγής περαιτέρω στοχευμένων δοκιμών.

Δεδομένου ότι δεν απαιτείται διάτρηση, τα σημεία δοκιμής μπορούν να επανεξεταστούν με την πάροδο του χρόνου για την παρακολούθηση των αλλαγών στις ιδιότητες. Οι τιμές ταχύτητας που προκύπτουν παρέχουν άμεση ποιοτική ανατροφοδότηση σχετικά με πιθανές ζώνες φθοράς. Αυτό είναι επωφελές κατά τη χαρτογράφηση κατασκευών για τον σχεδιασμό αποκατάστασης, επειδή οι ίδιες τοποθεσίες μπορούν να παρακολουθούνται διαδοχικά, επιτρέποντας χρονικές συγκρίσεις που επισημαίνουν τα εξελισσόμενα προβλήματα [62].

Η λειτουργική ασφάλεια προσθέτει μια άλλη διάσταση στη συζήτηση για τη μη επεμβατικότητα. Η δοκιμή δεν επηρεάζει τη φέρουσα ικανότητα ούτε προκαλεί δυνητική αποδυνάμωση των στοιχείων όπως η πυρηνοληψία, που είναι σημαντικό πρόβλημα σε προεντεταμένα στοιχεία ή λεπτά κελύφη, σε κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία ή θαλάσσιες υποδομές που υπόκεινται σε επιθετικά περιβάλλοντα και η διατήρηση της συνέχειας κατά τη διάρκεια της αξιολόγησης είναι κρίσιμη.

Τέλος, κατά τη διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου δοκιμής, δεν προκύπτει κανένας κίνδυνος για την υγεία των χειριστών με τη χρήση του εξοπλισμού [58].

2.4.7 Μειονεκτήματα της UPV

Παρόλα τα πλεονεκτήματα της μεθόδου, παρουσιάζονται περιορισμοί στην εφαρμογή της. Αρχικά, απαιτείται μέσο σύζευξης για την αποτελεσματική μεταφορά της ηχητικής ενέργειας στο δοκίμιο, γεγονός που καθιστά τη διαδικασία χρονοβόρα, ειδικά εάν εξετάζεται μεγάλη επιφάνεια σκυροδέματος [85]. Επιπλέον, δεν υπάρχει μόνιμη καταγραφή των δεδομένων, παρά μόνο όταν χρησιμοποιούνται προηγμένα συστήματα ελέγχου και τα αποτελέσματα απαιτούν ερμηνεία, με εξαίρεση τους ψηφιακούς μετρητές πάχους τοιχώματος. Όσον αφορά τον χειριστή, πρέπει να είναι έμπειρος για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ελέγχου, καθώς η ανάπτυξη διαδικασιών απαιτεί εκτεταμένες τεχνικές γνώσεις. Η επιφάνεια του δοκιμίου πρέπει να είναι προσπελάσιμη για την μετάδοση υπερήχων, ενώ αντικείμενα που έχουν τραχεία επιφάνεια, ακανόνιστο σχήμα, ή είναι πολύ μικρά σε μέγεθος ή έχουν πολύ λεπτή διατομή ή μη ομοιογενή, είναι δύσκολο να ελεγχθούν.

Πέραν των ανωτέρω πρακτικών περιορισμών, η αξιοπιστία του προσδιορισμού των δυναμικών ελαστικών ιδιοτήτων μέσω UPV περιορίζεται σημαντικά από παράγοντες που αναλύθηκαν διεξοδικά στο Κεφάλαιο 2.4.3. Συγκεκριμένα, η ανομοιογένεια του σκυροδέματος προκαλεί φαινόμενα διασποράς και εξασθένησης των κυμάτων τάσης, με αποτέλεσμα σημαντική μεταβλητότητα στις μετρούμενες ταχύτητες ακόμη και σε

διαφορετικά σημεία του ίδιου στοιχείου [79], [83]. Η επίδραση της υγρασίας αυξάνει ψευδώς τις ταχύτητες παλμού λόγω βελτίωσης της σύζευξης μεταξύ των φάσεων, ενώ οι μεταβολές θερμοκρασίας εισάγουν τόσο αναστρέψιμες όσο και μη αναστρέψιμες μεταβολές στις μετρούμενες τιμές Παράλληλα, η παρουσία χαλύβδινου οπλισμού εισάγει ψευδώς υψηλές εκτιμήσεις ταχύτητας εάν η διαδρομή του κύματος βρίσκεται κοντά σε ράβδους οπλισμού. Οι ανωτέρω παράγοντες, σε συνδυασμό με την ηλικία του σκυροδέματος λόγω ενανθράκωσης και μακροχρόνιας φόρτισης, καθιστούν τις μετρήσεις UPV ιδιαίτερες ευαίσθητες σε μη ελεγχόμενες μεταβλητές. Χωρίς προσεκτική βαθμονόμηση μέσω καταστροφικών δοκιμών, οι υπολογισμένες τιμές του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας μπορούν να αποκλίνουν σημαντικά, ενώ η μεταβλητότητα μεγεθύνεται ακόμη περισσότερο εάν γίνει αυθαίρετη υπόθεση για την τιμή του λόγου Poisson [78].

Τέλος, οι γραμμικές ατέλειες προσανατολισμένες παράλληλα με τη δέσμη των υπερήχων, μπορεί να μην ανιχνευτούν και απαιτούνται πρότυπα αναφοράς, τόσο για την βαθμονόμηση του εξοπλισμού, όσο και για τον χαρακτηρισμό των ατελειών [58].

2.4.8 Συσχέτιση με την μονοαξονική αντοχή σε θλίψη

Η καθιέρωση εμπειρικών σχέσεων μεταξύ των αποτελεσμάτων των μη καταστροφικών δοκιμών και αυτών της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη αποτελεί διαχρονικά μια πρακτική για την εξαγωγή αξιοποιήσιμων πληροφοριών από τα δεδομένα πεδίου. Για την UPV, η διαδικασία συχνά περιλαμβάνει τη συλλογή μετρήσεων ταχύτητας σε δείγματα ή σε σημεία επί τόπου του έργου (in-situ) γνωστής αντοχής σε θλίψη που προσδιορίζεται από συνοδευτική πυρηνοληψία ή κυβικά δοκίμια, ακολουθούμενη από μοντελοποίηση παλινδρόμησης για την προσαρμογή μιας κατάλληλης γραμμικής, πολυωνυμικής, εκθετικής, συνάρτησης που συνδέει τη θλιπτική αντοχή (F_c) και την ταχύτητα. Σε ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες, αυτό μπορεί να αποδώσει υψηλούς συντελεστές προσδιορισμού [86], [87], αντανakλώντας ισχυρή συσχέτιση όταν ο τύπος των αδρανών, η διαβάθμιση, η ωρίμανση, η υγρασία και η ηλικία διατηρούνται σταθερά μεταξύ των δειγμάτων βαθμονόμησης και των υπό δοκιμή στοιχείων. Εμπειρικά, αυτές οι συσχετίσεις συχνά έχουν έναν πολύ καλό δείκτη προσαρμογής (R^2) σε σύγκριση με τις μονοαπαραμετρικές προσαρμογές, αλλά και πάλι οι προβλέψεις δεν θεωρούνται αξιόπιστες [88].

Πολλές μελέτες έχουν γίνει και σε διάφορους τύπου σκυρόδεμα και έχουν εξαχθεί εμπειρικές σχέσεις (συχνά εκθετικές, μερικές φορές γραμμικές ή τετραγωνικές) μεταξύ της UPV και της αντοχής σε θλίψη. Πρόσφατα, οι Choi et al. (2022) χρησιμοποίησαν την UPV για να εκτιμήσουν την αντοχή σε θλίψη και σε εφελκυσμό σκυροδέματος που περιείχε λεπτά ελαστικά σωματίδια από καουτσούκ προτείνοντας την εξίσωση (18) με εκθετική συσχέτιση ($R^2 = 0,74$), οι Irlan et al. (2025) αναφέρουν μια ισχυρή εκθετική

συσχέτιση ($R^2 = 0,793$) από την εξίσωση (19) ενώ οι Tayeh et al. (2021) αναφέρουν τετραγωνικές σχέσεις με υψηλούς συντελεστές ($R^2 = 0,97 - 0,99$) [89], [90].

$$F_c = 0,194e^{0,00102V_p} \quad (18)$$

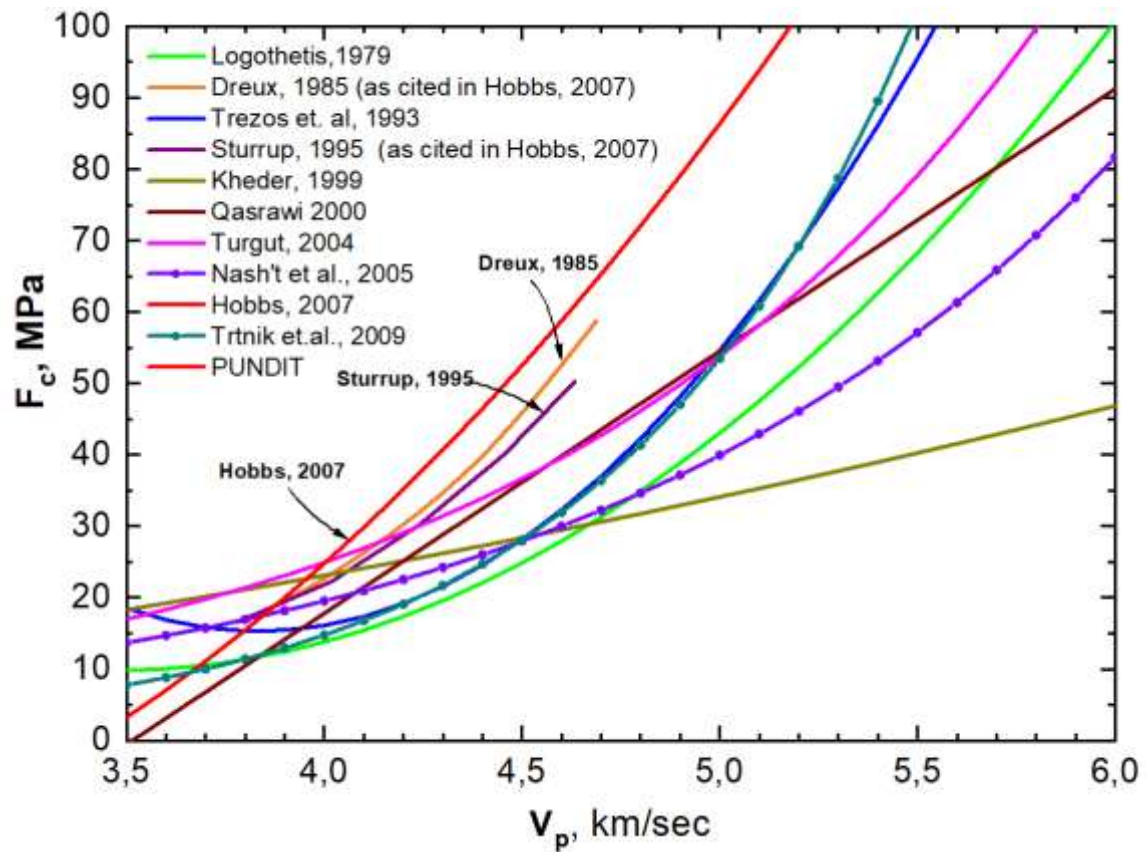
$$F_c = 0,045e^{0,0015V_p} \quad (19)$$

Αναλύσεις παλινδρόμησης σε διάφορες μελέτες αποδίδουν υψηλούς συντελεστές συσχέτισης ($R = 0,98 - 0,993$), υποδηλώνοντας εξαιρετική προβλεψιμότητα της αντοχής σε θλίψη από μετρήσεις UPV [91], [92], [93], [94]. Έχουν δημοσιευθεί πολλές εμπειρικές σχέσεις για την απόκτηση αυτής της συσχέτισης [48], [72], [83], [95], [96], [97], [98], [99], [100], [101] και στον. Όλες αυτές οι εμπειρικές εξισώσεις, όταν παρουσιάζονται μεμονωμένα, έχουν πολύ καλή συσχέτιση, αλλά σε σύγκριση μεταξύ τους, είναι προφανές ότι υπάρχει μεγάλη διασπορά στα αποτελέσματά τους όπως φαίνεται στην Εικόνα 17. Αυτό οφείλεται στην επίδραση διαφόρων παραγόντων, οι οποίοι έχουν ήδη αναφερθεί, όπως ο τύπος των αδρανών και/ή οι αναλογίες, η αρχική αναλογία νερού/τσιμέντου, οι συνθήκες ωρίμανσης, το επίπεδο συμπύκνωσης και η περιεκτικότητα σε υγρασία, όπου κάθε καμπύλη χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της αντοχής ενός συγκεκριμένου μίγματος σκυροδέματος [48], [102]. [86].

Πίνακας 10: Εμπειρικές σχέσεις συσχέτισης F_c και V_p

Ερευνητής (Έτος)	Εξίσωση F_c [MPa] ως συνάρτηση V_p [km/s]
Logothetis (1979)	$F_c = 14,18 \cdot V_p^2 - 98,37 \cdot V_p + 180,39$
Trezos et al. (1993)	$F_c = 28,9 \cdot V_p^2 - 221,6 \cdot V_p + 440,1$
Kheder (1999)	$F_c = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot (1000 \cdot V_p)^{1,7447}$
Qasrawi (2000)	$F_c = 36,72 \cdot V_p - 129,077$
Turgut (2004)	$F_c = 1,146 \cdot e^{0,77 \cdot V_p}$
Nash't et al. (2005)	$F_c = 1,119 \cdot e^{0,715 \cdot V_p}$
Hobbs (2007)	$F_c = 12,289 \cdot V_p^2 - 49,024 \cdot V_p + 24,271$
Trtnik et al. (2009)	$F_c = 0,0854 \cdot e^{1,288 \cdot V_p}$

Ο λόγος που είναι και το πολύ σοβαρό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μαζί με τις μετρήσεις της UPV, πρέπει να είναι γνωστές ή να υποτεθούν και άλλες παράμετροι. Ωστόσο, το κύριο ζήτημα θεωρείται η αυθαίρετη υπόθεση του λόγου Poisson για τον υπολογισμό του E_d , η οποία οδηγεί σε διασπορά αποτελεσμάτων και αβεβαιότητες.



Εικόνα 17: Εμπειρικές συσχετίσεις της αντοχής του σκυροδέματος σε θλίψη, F_c , έναντι του V_p [102]

Το πρότυπο ASTM C597 συνιστά τη ΙΕ στη μέθοδο δοκιμής C215, για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας των δοκιμίων που λαμβάνονται από σκυρόδεμα πεδίου, επειδή δεν είναι απαραίτητο να είναι γνωστός ο λόγος Poisson [61].

2.5 Μέθοδος Κρούσης – Ηχούς – Impact – Echo (IE)

Η μέθοδος Impact-Echo εμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 ως επακόλουθο των συνεχιζόμενων ερευνών πάνω στις ΜΚΔ στο σκυρόδεμα, αν και η ιδέα χρονολογείται παλιότερα σε τεχνικές τασικών κυμάτων στον έλεγχο υλικών. Η έρευνα στο Εθνικό Γραφείο Προτύπων (National Bureau of Standards – NBS), σήμερα γνωστό ως Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (National Institute of Standards and Technology – NIST) είχε ως αντικείμενο τη συστηματική διερεύνηση της ανίχνευσης εσωτερικών βλαβών στο σκυρόδεμα, «ξεφεύγοντας» από τις καθαρά επιφανειακές αξιολογήσεις. Αυτή η αλλαγή προκλήθηκε από τους εγγενείς περιορισμούς του οπτικού ελέγχου και των συμβατικών καταστροφικών μεθόδων, οι οποίες είτε δεν μπορούσαν να εντοπίσουν κρυμμένες βλάβες, είτε απαιτούσαν δαπανηρές και επεμβατικές παρεμβάσεις. Εξετάζοντας εναλλακτικές προσεγγίσεις, οι ερευνητές κατέληξαν στις μεθόδους διάδοσης τασικών κυμάτων, καθώς αυτές είναι ευαίσθητες στις αλλαγές των μηχανικών ιδιοτήτων και της εσωτερικής γεωμετρίας. Τα αρχικά εργαστηριακά πειράματα εφήρμοσαν αριθμητική μοντελοποίηση μέσω προσομοιώσεων πεπερασμένων στοιχείων, σε συνδυασμό με ελεγχόμενες δοκιμές βλαβών σε δείγματα σκυροδέματος σε μορφή πλακών, προκειμένου να προσδιοριστούν οι βέλτιστες ρυθμίσεις για την ανίχνευση βλαβών. Η πειραματική επιβεβαίωση έδειξε ότι οι μηχανικές κρούσεις δημιουργούσαν παλμούς τάσης ικανούς να διεισδύουν βαθιά στο σκυρόδεμα.

Το 1987 η έρευνα μεταφέρθηκε στο Πανεπιστήμιο Cornell, υπό τη διεύθυνση της Mary Sansalone και οι εξελίξεις διεύρυναν τις πρακτικές εφαρμογές και οδήγησαν στα πρώτα πατενταρισμένα όργανα πεδίου. Η πορεία από το θεωρητικό μοντέλο στον αξιόπιστο εξοπλισμό προχώρησε με τη πειραματική μέθοδο δοκιμής – λάθους, (trial and error), και βελτίωσε την εφαρμοσιμότητα αυτής της μεθόδου σε πραγματικά σενάρια πολιτικού μηχανικού. Οι Carino et al. (2004) περιγράφουν ότι οι παραδοσιακές διαγνωστικές πρακτικές, όπως το χτύπημα ενός αντικειμένου με ένα σφυρί, παρείχαν ένα διαισθητικό σημείο εκκίνησης για τεχνικές βασισμένες σε κρούση, αλλά δεν διέθεταν εργαλεία ποσοτικής ερμηνείας [50]. Η ενσωμάτωση της ανάλυσης σημάτων στο πεδίο συχνότητας επέτρεψε τη μετατροπή των καταγεγραμμένων κυματομορφών φάσματα, όπου χαρακτηριστικά όπως οι κυρίαρχες κορυφές συχνότητας συσχετίζονται άμεσα με τα μήκη διαδρομής και, συνεπώς, με το βάθος της βλάβης. Αυτό το βήμα απλοποίησε σημαντικά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των δοκιμών σε σύγκριση με τις μη επεξεργασμένες κυματομορφές στο πεδίο χρόνου.

Η αρχή λειτουργίας επικεντρώνεται στη δημιουργία ενός παροδικού παλμού τάσης σε ένα σημείο της επιφάνειας του σκυροδέματος χρησιμοποιώντας ένα μηχανικό κρουστικό σώμα, όπως μια σφαίρα από σκληρυμένο χάλυβα που πέφτει από ένα σταθερό ύψος [103]. Αυτός ο παλμός διαδίδεται ως διαμήκη κύματα (longitudinal waves ή compressional waves ή P – waves), εγκάρσια κύματα (shear waves ή S – waves) στη δομή κατά μήκος ημισφαιρικών διατομών, ενώ τα επιφανειακά κύματα (surface waves ή Rayleigh waves),

παραμένουν περιορισμένα κοντά στην επιφάνεια [104]. Μια τυπική διάταξη του εξοπλισμού όπως αυτός χρησιμοποιήθηκε στις αρχικές έρευνες φαίνεται στην Εικόνα 18. Τα εσωτερικά όρια, είτε πρόκειται για κενά, ρωγμές ή διεπαφές υλικών, μεταβάλλουν την αντίσταση και ανακλούν τμήματα αυτών των κυμάτων πίσω προς την επιφάνεια. Ένας αισθητήρας μετατόπισης τοποθετημένος κοντά στο σημείο πρόσκρουσης καταγράφει αυτές τις ανακλάσεις. Ο χρόνος άφιξής τους περιέχει άμεσες γεωμετρικές πληροφορίες σχετικά με τις αποστάσεις που διανύθηκαν εντός του υλικού.



Εικόνα 18: (Αριστερά) Στις πρώτες έρευνες χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες σφαίρες για να επιτευχθούν κρούσεις με διαφορετικούς χρόνους επαφής. (Δεξιά) Η χαλύβδινη σφαίρα προσαρμόστηκε σε χαλύβδινη ράβδο ώστε να είναι κατάλληλη για δοκιμές πεδίου [50]

Από αυτές τις καταγραφές, η εφαρμογή της ανάλυσης συχνότητας παράγει εκτιμήσεις των μηκών διαδρομής χρησιμοποιώντας γνωστές ταχύτητες διαμήκων κυμάτων. Τα πρότυπα ASTM ορίζουν παραλλαγές όπως η Procedure A για τη μέτρηση της ταχύτητας διαμήκων κυμάτων από μια γνωστή απόσταση αισθητήρα. Τα δεδομένα ταχύτητας στη συνέχεια παρέχουν πληροφορίες για τις μετρήσεις πάχους ή τον εντοπισμό βλαβών. Αξίζει να σημειωθεί ότι πιθανά υψηλά επίπεδα ηλεκτρικού θορύβου μπορούν να καταστήσουν ορισμένες διαδικασίες ακατάλληλες χωρίς τεχνικές μείωσης του θορύβου [105]. Έτσι, οι συνθήκες πεδίου καθορίζουν τόσο την επιλογή των οργάνων όσο και τη ρύθμιση της διαδικασίας.

Η αξιοπιστία της μεθόδου Impact-Echo καθιερώθηκε σταδιακά μέσω πολυάριθμων μελετών επιβεβαίωσης που συνέκριναν τα διάφορα πάχη που προέκυψαν από μετρήσεις κυμάτων με αυτά που προέκυψαν από την πυρηνοληψία. Οι αποκλίσεις συχνά κυμαίνονταν εντός του 3% [50], η σωστή ερμηνεία όμως απαιτεί την εξοικείωση του χειριστή με τα χαρακτηριστικά των κυματομορφών, καθώς εσφαλμένες μετρήσεις μπορεί

να οφείλονται σε προβλήματα σύζευξης του αισθητήρα με το υπό εξέταση μέσο, ανωμαλίες της επιφάνειας ή εξωτερικές ανακλάσεις που προκαλούνται από πολύπλοκες γεωμετρίες. Αν και εφαρμόζεται κυρίως σε κατασκευές από σκυρόδεμα, όπως πλάκες, γέφυρες, οδοστρώματα και τοιχοποιίες, η επιστημονική της σημασία επεκτείνεται σε οποιοδήποτε στερεό υλικό όπου είναι εφικτή η αντανάκλαση ελαστικών κυμάτων. Η αξιοπιστία αυτής της τεχνικής προκύπτει από τον συνδυασμό της θεωρίας των ελαστικών κυμάτων με την εμπειρική βαθμονόμηση, μια αλληλεπίδραση που έχει τελειοποιηθεί μέσω συνεχών πειραματικών κύκλων επί δεκαετίες [104]. Δεδομένα από σχετικές μελέτες απεικονίζουν συσχετίσεις μεταξύ λόγων συχνοτήτων και των γεωμετρικών διαμορφώσεων που ορίζουν όρια ευαισθησίας για την ανίχνευση βλαβών υπό διαφορετικές συνθήκες υλικών [106].

2.5.1 Ιστορικό υπόβαθρο της ΙΕ

2.5.1.1. Προέλευση και ανάπτυξη

Η ΙΕ ανήκει στη γενική ομάδα μη καταστροφικών τεχνικών με βάση τις δονήσεις που περιλαμβάνουν τη μέτρηση και την ανάλυση των δονήσεων σε μια δομή και προσφέρουν μια σειρά από πλεονεκτήματα όπως για παράδειγμα την αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, συμπεριλαμβανομένης της δυσκαμψίας, της απόσβεσης και των φυσικών συχνοτήτων τους και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση ρωγμών, κενών, αποκόλλησης και άλλων τύπων βλαβών και την εν τέλει την αξιολόγηση της κατάστασης των κατασκευών [107]. Μετρώντας την απόκριση της δομής σε εξωτερική διέγερση, οι τεχνικές αυτές παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών και μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό προβληματικών περιοχών για περαιτέρω επιθεώρηση ή επισκευή.

Είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές με αρκετές διαφορετικές προσεγγίσεις όπως για παράδειγμα τη μέθοδο της συχνότητας συναρτήσεως της απόκρισης ή Frequency Response Function (FRF), η οποία περιλαμβάνει την εφαρμογή μιας εξωτερικής διέγερσης σε μια δομή και τη μέτρηση της αντίστοιχης απόκρισης ως προς τη μετατόπιση ή την επιτάχυνσή της. Η FRF υπολογίζεται στη συνέχεια διαιρώντας τη μετρούμενη απόκριση με τη διέγερση και παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες της κατασκευής, όπως οι φυσικές συχνότητες, οι λόγοι απόσβεσης και οι μορφές λειτουργίας. Μια άλλη τεχνική NDT που βασίζεται σε δονήσεις είναι η μέθοδος της ανάλυσης ιδιομορφών, η οποία περιλαμβάνει τη μέτρηση των φυσικών συχνοτήτων και των μορφών ιδιομορφών μιας κατασκευής και τη χρήση αυτών των πληροφοριών για τον εντοπισμό ελαττωμάτων ή βλαβών. Η ανάλυση ιδιομορφών μπορεί να εκτελεστεί με διάφορες τεχνικές, συμπεριλαμβανομένων των δοκιμών κρούσης, των δοκιμών εξωτερικών δονήσεων και της ανάλυσης ιδιομορφών κατά τη λειτουργία. Στην ίδια κατηγορία ανήκει επίσης η μέθοδος ακουστικής εκπομπής, η οποία περιλαμβάνει την ανίχνευση και ανάλυση των

σημάτων υψηλής συχνότητας που παράγονται από την ταχεία απελευθέρωση ενέργειας εντός ενός υλικού.

Η απαρχή της μεθόδου ΙΕ ανάγεται σε παλαιότερες τεχνικές εφαρμογές τασικών κυμάτων για την αξιολόγηση υλικών όπως μέταλλα, κεραμικά και σύνθετα υλικά. Σε αυτά τα πλαίσια, οι ακουστικές μέθοδοι ήταν ήδη καθιερωμένες, όπου με τη χρήση υπερήχων, καταγράφονταν οι ανακλάσεις τους στα εσωτερικά όρια και υπολογίζονταν οι αποστάσεις από τα δεδομένα χρόνου διάδοσης και τις γνωστές ταχύτητες των κυμάτων. Ωστόσο, η προσπάθεια μεταφοράς αυτής της πρακτικής απευθείας από την έλεγχο υλικών όπως το μέταλλο, στο σκυρόδεμα, αποκάλυψαν γρήγορα τεχνικές δυσκολίες. Το ανομοιογενές σκυρόδεμα περιέχει κενά αέρα, διεπαφές αδρανών-τσιμέντου και χαλύβδινο οπλισμό. Αυτά τα χαρακτηριστικά δημιουργούν πολυάριθμες επικαλυπτόμενες ανακλάσεις που αλληλεπιδρούν με τα σήματα από πραγματικές βλάβες [50]. Οι φυσικοί μηχανισμοί παρέμειναν οι ίδιοι, αλλά τα όργανα και οι αναλυτικές μέθοδοι χρειάστηκαν προσαρμογή. Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές της δεκαετίας του 1980, εντατικοποιήθηκε η έρευνα πάνω στις δοκιμές με βάση τα κύματα, ώστε να προσαρμοστούν στην πολύπλοκη ακουστική συμπεριφορά του σκυροδέματος. Η μέθοδος ΙΕ εξελίχθηκε αντικαθιστώντας τους παλμούς υπερήχων υψηλής συχνότητας με μικρότερες μηχανικές κρούσεις. Αυτή η επιλογή μείωσε την ευαισθησία σε μικρής κλίμακας ανομοιογένειες και έδωσε έμφαση σε χαμηλότερες συχνότητες των οποίων τα μήκη κύματος προσεγγίζουν τις διαστάσεις της δομής. Οι μεταβατικές ζώνες ή τα εξωτερικά όρια αντανακλούν αυτά τα κύματα πίσω προς το σημείο πρόσκρουσης. Οι χρόνοι επιστροφής τους κωδικοποιούν γεωμετρικές πληροφορίες σχετικά με το πάχος ή το βάθος των ελαττωμάτων. Μέσα σε αυτό το μεθοδολογικό πλαίσιο, η ανάλυση της συχνότητας συντονισμού κατέστη κρίσιμη. Οι επιφανειακές προσκρούσεις προκαλούν πολλαπλές ανακλάσεις κυμάτων μέσα στο δείγμα. Το χαρακτηριστικό που διερευνάται συνήθως είναι το πάχος του δείγματος που συνδέεται με τη διέλευση κυμάτων P [13]. Η αναγνώριση των φασματικών κορυφών σηματοδότησε μια αναλυτική καινοτομία, μετατρέποντας τις φυσικές κρούσεις σε ποσοτικές μετρήσεις δυναμικών ελαστικών ιδιοτήτων. Η εξέλιξη κατά τη διάρκεια αυτών των ετών κατέδειξε επίσης τον τρόπο με τον οποίο ο λόγος Poisson επηρεάζει την ερμηνεία. Οι διακυμάνσεις στον λόγο Poisson μεταβάλλουν τις υπολογιζόμενες ταχύτητες των κυμάτων και, ως εκ τούτου, επηρεάζουν τα αποτελέσματα που προκύπτουν για το πάχος ή το μέτρο ελαστικότητας. Η επισήμανση αυτής της αλληλεξάρτησης ενθάρρυνε το συνδυασμό της ΙΕ με συμπληρωματικές μορφές NDT, όπως UPV, μεθόδους ελεύθερης δόνησης, για τον καλύτερο έλεγχο του υπολογισμού των ελαστικών σταθερών σύμφωνα με πρότυπα όπως αυτά που ορίζονται από την ASTM [11]. Η βελτιστοποίηση της ανίχνευσης και της φασματικής διάκρισης, οδήγησε σε συγκρίσεις μεταξύ των εκτιμήσεων του δυναμικού ελαστικού μέτρου ελαστικότητας που προέκυπτε από την ΙΕ και της μονοαξονικής θλίψης οι οποίες έδειχναν ισχυρή συμφωνία. Οι βελτιώσεις στις τεχνικές φασματικής διάκρισης μείωσαν τα

φαινόμενα διασποράς που είναι εγγενή στις συνθήκες πεδίου [13]. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, οι ερευνητές διερεύνησαν τις συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων του λόγου των πρώτων δύο ιδιοσυχνοτήτων και των ορίων ανιχνευσιμότητας σε διάφορους λόγους λυγηρότητας (λόγος μήκος προς διάμετρο). Τέτοιες πληροφορίες συνέβαλαν άμεσα στον καθορισμό των βέλτιστων ενεργειών πρόσκρουσης και των θέσεων των αισθητήρων για συγκεκριμένες γεωμετρίες. Η δοκιμή όμως έπρεπε να μπορεί να εφαρμοστεί εκτός εργαστηρίου. Η τάση προς χρήση κινητών μονάδων πεδίου αντανακλούσε τις ευρύτερες τάσεις της NDT, μεταφράζοντας την ακρίβεια της εργαστηριακής ποιότητας σε λειτουργικά πλαίσια, όπως γέφυρες ή πλάκες οδοστρώματος, διατηρώντας παράλληλα τη σταθερότητα έναντι των επιδράσεων των διαβαθμίσεων θερμοκρασίας ή της υγρασίας. Η εφαρμογή στο πεδίο απέκτησε έτσι αξιοπιστία για την παρακολούθηση τόσο του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας όσο και του λόγου Poisson κατά τη διάρκεια της ζωής μεγάλων κατασκευών. Ερευνητές όπως οι Lee et al. (1997) τόνισαν ότι οι δυναμικές δοκιμές όχι μόνο ελαχιστοποιούν τις απαιτήσεις πυρηνοληψιών, αλλά και μειώνουν τις αποκλίσεις μεταξύ στατικών και δυναμικών μετρήσεων των συντελεστών, καθώς βελτιώθηκε η ακρίβεια των στατικών δοκιμών [46]. Αυτή η μείωση του χάσματος ενίσχυσε την εμπιστοσύνη στις εκτιμήσεις ιδιοτήτων που προέρχονται από την ΙΕ, ευθυγραμμίζοντάς τις πιο στενά με τις αποδεκτές βασικές μηχανικές γραμμές. Από ιστορική άποψη, τα ορόσημα της ανάπτυξης περιλαμβάνουν διάφορες αλληλένδετες εξελίξεις, (α) την επιλογή των κυμάτων τάσης που δημιουργούνται από κρούση έναντι των υπερήχων για ανομοιογενή μέσα, (β) την τυποποίηση της αναγνώρισης φασματικών κορυφών ως εργαλείου εξαγωγής ιδιοτήτων, (γ) την ενσωμάτωση διορθωτικών συντελεστών που συνδέονται με τη γεωμετρία και τις σταθερές των υλικών, (δ) την επικύρωση των αποτελεσμάτων σε σχέση με καταστροφικά πρότυπα και, τέλος, (ε) τη σχεδίαση οργάνων για συνεπή χρήση στο πεδίο χωρίς εξάρτηση της βαθμονόμησης από την περιβαλλοντική μεταβλητότητα [50]. Μέσα από αυτή την πορεία προόδου, η ΙΕ εξελίχθηκε από μια προσαρμογή παλαιότερων διαγνωστικών μεθόδων βασισμένων σε μεταλλικά δείγματα σε μια εξειδικευμένη τεχνική, προσαρμοσμένη με ακρίβεια στη συμπεριφορά του σκυροδέματος σε διαφορετικές ηλικίες και συνθήκες. Ξεκίνησε ως μια προσπάθεια να ξεπεραστεί η σύγχυση των ακουστικών σημάτων και εξελίχθηκε σε μια ποσοτικοποιήσιμη μέθοδο ικανή να χαρτογραφεί την εσωτερική δομή, μετρώντας ταυτόχρονα τις αλλαγές του μέτρου ελαστικότητας κατά τη διάρκεια των φάσεων σκλήρυνσης ή της μακροχρόνιας έκθεσης σε συνθήκες λειτουργίας [46].

2.5.1.2. Τεχνολογικές εξελίξεις

Οι εξελίξεις στην τεχνολογία Impact-Echo (ΙΕ) έχουν διαμορφωθεί σε μεγάλο βαθμό από την ανάγκη να αυξηθεί η αξιοπιστία των μετρήσεων, η συνέπεια των χειριστών και η ακρίβεια της ερμηνείας τόσο σε εργαστηριακές όσο και σε συνθήκες πεδίου. Οι πρώτες εφαρμογές χρησιμοποιούσαν σχετικά απλή ανάλυση Fourier για να μετατρέψουν τις

καταγεγραμμένες αποκρίσεις στο πεδίο του χρόνου σε φάσματα συχνοτήτων. Αν και αποτελεσματική για καθαρά σήματα, η προσέγγιση αυτή αντιμετώπιζε δυσκολίες όταν οι φασματικές κορυφές καλύπτονταν από φαινόμενα διασποράς ή υψηλό θόρυβο. Οι πιο πρόσφατες εξελίξεις έχουν επικεντρωθεί σε εξελιγμένα σχήματα φιλτραρίσματος και ανάλυσης ικανά να απομονώνουν τις σωστές συχνότητες συντονισμού παρά τις παρεμβολές αυτές.

Η πολυπλοκότητα που ενυπάρχει στην ερμηνεία μεγάλων συνόλων δεδομένων έχει οδηγήσει σε στατιστικές προσεγγίσεις ενσωματωμένες σε πλαίσια μετα-επεξεργασίας ΙΕ. Για παράδειγμα, η εφαρμογή συντελεστών συσχέτισης όπως ο συντελεστής συσχέτισης Pearson (C_{XY}^j) που προέρχεται από τους τύπους συσχέτισης Pearson επιτρέπει την ποσοτική αξιολόγηση της ομοιότητας του φασματογραφήματος μεταξύ των μετρήσεων αναφοράς και μιας δεδομένης θέσης δοκιμής [52]. Μετρά την γραμμική αλληλεξάρτηση υπολογίζοντας την κανονικοποιημένη συνδιακύμανση μέσω των προϊόντων διακύμανσης όπως φαίνεται στην εξίσωση (20).

$$C_{XY}^j = \frac{\text{Cov}[X, Y^j]}{\sqrt{\text{Var}(X) \cdot \text{Var}(Y^j)}} \quad (20)$$

Εάν τα δύο φασματογραφήματα ταιριάζουν ακριβώς, ο συντελεστής φτάνει το ± 1 . Περαιτέρω εξελίξεις επεκτείνονται πέρα από τον αισθητήρα υλικού σε βαθύτερη φυσική μοντελοποίηση των γεωμετρικών διάδοσης κυμάτων που σχετίζονται με κυλινδρικά ή πλακοειδή στοιχεία από σκυρόδεμα. Αναλυτικές λύσεις που χρησιμοποιούν συναρτήσεις Bessel J_0 έχουν εφαρμοστεί υπό οριακές συνθήκες όπου μόνο η συνιστώσα p_{rz} είναι διαφορετική από το μηδέν στην ακτίνα της επιφάνειας ενός κυλίνδρου $r = \frac{D}{2}$, οδηγώντας σε διακριτές ιδιοτιμές που σχετίζονται με ακτινικές λειτουργίες. Αυτές οι διατυπώσεις επιτρέπουν την ακριβότερη εκτίμηση των αναμενόμενων θέσεων συντονισμού ακόμη και για πεπερασμένες γεωμετρίες όπου συμβαίνουν διασταυρώσεις διαμήκων και ακτινικών ιδιομορφών, για παράδειγμα, όταν η λυγηρότητα $\frac{L}{D}$ πλησιάζει μια γενική τιμή όπως 0,85, όπου πολλαπλές ιδιομορφές μοιράζονται παρόμοιες συχνότητες, ο διαχωρισμός των ιδιομορφών γίνεται δύσκολος [108]. Τέτοια θεωρητικά σημεία αναφοράς βοηθούν στη βαθμονόμηση των οργάνων, προβλέποντας φασματικά χαρακτηριστικά κοινά σε διαφορετικά σχήματα δειγμάτων. Οι εργαστηριακές έρευνες επεδίωξαν επίσης να παραμετροποιήσουν τις σχέσεις υπολογισμού των συχνοτήτων που λαμβάνουν υπόψη την εξάρτηση από το λόγο Poisson ν μέσω εξισώσεων όπως οι (21) και (22).

$$f_3 = \beta_3 f_1, \text{ και } \beta_3 = \sqrt{(3,827 + 0,839\nu - 0,503\nu^2 + 0,125\nu^3)} \quad (21)$$

$$f_4 = \beta_4 f_1, \text{ και } \beta_4 = \sqrt{(5,599 + 1,574\nu - 0,765\nu^2 + 0,076\nu^3)} \quad (22)$$

και ούτω καθεξής για ιδιομορφές υψηλότερης τάξης έως το f_6 [109]. Συνδέοντας τους συντελεστές β απευθείας με τους λόγους ταχύτητας κύματος ($\frac{V_s}{V_p}$), αυτές οι εξισώσεις

διευκρινίζουν πώς οι ελαστικές σταθερές που εξαρτώνται από τη γεωμετρία και το υλικό επηρεάζουν την κλιμάκωση της συχνότητας, κάτι που είναι σημαντικό κατά τη μεταφορά της βαθμονόμησης μεταξύ σκυροδέματος με διαφορετικές συνθέσεις.

2.5.1.3. Αρχικές δομικές αξιολογήσεις στο σκυρόδεμα

Στις πρώτες εφαρμογές της μεθόδου Impact-Echo (IE) σε δομικές αξιολογήσεις, οι μηχανικοί αντιμετώπισαν τόσο εννοιολογικά όσο και υπολογιστικά ζητήματα που επηρέασαν τον τρόπο με τον οποίο αυτή η δυναμική μέθοδος δοκιμών εφαρμόστηκε στο πεδίο. Με βάση την πειραματική επικύρωσή της σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα, η έρευνα μετατοπίστηκε στην αξιολόγηση μεγάλων, λειτουργικών στοιχείων από σκυρόδεμα, όπως πλάκες, γέφυρες και τοίχοι αντιστήριξης, χωρίς να την ανάγκη καταστροφικών πυρηνοληψιών. Για τις αρχικές δομικές αξιολογήσεις, η ερμηνεία των σημάτων εξαρτάται από τον προσδιορισμό των κυρίαρχων κορυφών στο φάσμα συχνοτήτων τους. Σε ένα στοιχείο τύπου πλάκας με πλευρικές διαστάσεις που υπερβαίνουν κατά πολύ το πάχος, οι πολλαπλές ανακλάσεις κυμάτων P παράγουν σημαντική παρεμβολή σε συχνότητες ανάλογες με $\frac{V_p}{2d}$, όπου V_p είναι η ταχύτητα κυμάτων P και d το πάχος [52], [104]. Εάν είναι γνωστή η V_p , είτε από μετρήσεις της μεθόδου IE είτε από προηγούμενα δεδομένα πεδίου, η κύρια κορυφή συντονισμού δίνει αμέσως μια εκτίμηση του πάχους. Όταν εμφανίζονται επιπλέον δευτερεύουσες κορυφές, αυτές συχνά συσχετίζονται με εσωτερικές ασυνέχειες, όπως αποκολλήσεις ή ενσωματωμένα εγκλείσματα. Η σχέση μεταξύ της απόστασης μεταξύ των κορυφών και του βάθους του ελαττώματος γίνεται ένα εργαλείο ερμηνείας για τους ερευνητές [50]. Ενώ αρχικά μια τέτοια ερμηνεία ήταν εννοιολογικά απλή για ομοιόμορφες πλάκες, η μετάβαση σε πιο σύνθετες γεωμετρίες αύξησε γρήγορα τη δυσκολία, επειδή πολλαπλά όρια μπορούσαν να «γεμίσουν» το φασματικό χώρο. Τα στοιχεία από σκυρόδεμα και άλλα δομικά τρισδιάστατα στοιχεία εισήγαγαν ακριβώς αυτή την πρόκληση. Σε αντίθεση με τις απειρομήκειες πλάκες ή τις μακριές λεπτές ράβδους, οι κοντινές επιφάνειες και οι διεπαφές τους δημιουργούν πολλαπλές ανακλάσεις που οδηγούν σε πυκνές φασματικές αποκρίσεις. Οι αρχικές έρευνες των περιελάμβαναν τη συσχέτιση των μετρημένων συχνοτήτων θεμελιωδών ιδιομορφών με γνωστές ταχύτητες διαμηκών κυμάτων για τον καθορισμό των βασικών συνθηκών. Οι αποκλίσεις από τη βασική γραμμή σε ορισμένες επιφάνειες, οι λεγόμενες «ανωμαλίες πρόσκρουσης», επισημάνθηκαν για περαιτέρω επιθεώρηση. Εργαστηριακές μελέτες έδειξαν ότι τα στοιχεία με διαστάσεις κατά μήκος τουλάχιστον διπλάσιες από τη διατομή τους συμπεριφέρονταν παρόμοια με τα δείγματα τύπου ράβδου όσον αφορά την απόκριση σε δονήσεις, επιτρέποντας την προσαρμογή απλοποιημένων μοντέλων ερμηνείας σε αυτές τις περιπτώσεις [104]. Ένα επαναλαμβανόμενο θέμα στις πρώτες δομικές εφαρμογές ήταν η απαίτηση για εξειδικευμένη λειτουργία. Η ακρίβεια των δεδομένων εξαρτιόταν σε μεγάλο βαθμό από τη σταθερή ενέργεια του κρουστικού και την ευθυγράμμιση του αισθητήρα. Ακόμη και μικρές μετατοπίσεις στη θέση μπορούσαν να αλλάξουν τους

χρόνους άφίξης των ανακλώμενων κυμάτων αρκετά ώστε να διαταράξουν τη φασματική σαφήνεια [50]. Για να μετριάσουν αυτή τη μεταβλητότητα, οι πρώτες ομάδες έρευνας χρησιμοποιούσαν ειδικά εξαρτήματα ή πρότυπα για να σταθεροποιήσουν τη θέση του αισθητήρα σε σχέση με τη θέση πρόσκρουσης. Η βαθμονόμηση με τη χρήση δειγμάτων αναφοράς παρόμοιας γεωμετρίας βοήθησε τους χειριστές να εξοικειωθούν με τα αναμενόμενα φασματικά χαρακτηριστικά. Η εκτίμηση των δυναμικών ελαστικών ιδιοτήτων πρόσθεσε ένα πρόσθετο επίπεδο χρησιμότητας κατά τη διάρκεια αυτών των αρχικών αξιολογήσεων. Για παράδειγμα, τμήματα που παρουσίαζαν μειωμένο μέτρο ελαστικότητας σε σύγκριση με τις τιμές αναφοράς ενδέχεται να υποδηλώνουν περιοχές που υφίστανται προοδευτική φθορά, ακόμη και αν δεν υπήρχε σαφές γεωμετρικό ελάττωμα. Κατά τη διάρκεια των διαμορφωτικών ετών προέκυψαν προσαρμογές τόσο των παραμέτρων κρούσης όσο και των θέσεων των αισθητήρων, ανάλογα με τη λυγρηρότητα των μελών. Έγινε επίσης εμφανές ότι ορισμένα ελαττώματα δεν μπορούσαν να ανοιχνευτούν με τις τυπικές διατάξεις της ΙΕ, ιδίως όταν οι αντιθέσεις σύνθετης αντίστασης ήταν ανεπαίσθητες (π.χ. κακώς αρμολογημένοι αγωγοί τενόντων σε συστήματα μετα-έντασης). Τέτοιες διεπαφές δημιουργούσαν πολύπλοκες ανακλάσεις μικτού τύπου, οι οποίες ήταν δύσκολο να διακριθούν από τα όρια του περιβάλλοντος χωρίς εκτεταμένα πλέγματα σάρωσης ή βελτιωμένες μεθόδους φιλτραρίσματος σημάτων. Παρ' όλα αυτά, ακόμη και με αυτούς τους περιορισμούς, οι πρώτες περιπτώσεις εφαρμογής κατέγραψαν επιτυχή ανίχνευση κενών κάτω από τις επικαλύψεις των γεφυρών και των μη συνδεδεμένων ζωνών μεταξύ των προκατασκευασμένων πάνελ, αποδεικνύοντας την πρακτική χρησιμότητα και την απόδειξης της ιδέας εκτός εργαστηρίου [50].

Με βάση τα αποτελέσματα των πρώτων επιτόπιων ερευνών, η τεχνική έρευνα στον τομέα της Impact-Echo (ΙΕ) μετατοπίστηκε σταθερά προς τη βελτίωση της ικανότητάς της να ανιχνεύει ένα ευρύτερο φάσμα τύπων ελαττωμάτων με μεγαλύτερη ακρίβεια. Μια σημαντική κατεύθυνση αφορούσε τη βελτίωση της διάκρισης των φασματικών χαρακτηριστικών, έτσι ώστε οι κορυφές που συνδέονται με εσωτερικά ελαττώματα να μπορούν να διαχωριστούν με μεγαλύτερη αξιοπιστία από εκείνες που προκύπτουν λόγω μεταβατικών ζωνών ή φυσικής ανομοιογένειας. Σε πλακοειδή στοιχεία από σκυρόδεμα, για παράδειγμα, οι ανακλάσεις από επίπεδα ελαττώματα επαρκούς έκτασης συμπεριφέρονται ως κυρίαρχες ανακλαστικές διεπαφές που κόβουν το αποτελεσματικό μήκος της διαδρομής του κύματος, αλλάζοντας τις συνθήκες συντονισμού και παράγοντας επιπλέον κορυφές που διαφέρουν από την κυρίαρχη ιδιομορφή. Η βασική πρόκληση ήταν η επιβεβαίωση τέτοιων κορυφών ανωμαλίας εν μέσω συχνοτήτων που δημιουργούνται από πολύπλοκες παρεμβολές πολλαπλών διαδρομών. Εργαστηριακά πειράματα έδειξαν ότι όταν ο χρόνος επαφής μεταξύ του κρουστικού σώματος και της επιφάνειας του δείγματος παρέμενε κάτω από τα τρία τέταρτα περίπου του χρόνου διαδρομής του κύματος P , οι μετρήσεις βάθους ελαττωμάτων διατηρούσαν σταθερή ακρίβεια σε μια

ποικιλία μεγεθών επίπεδων ελαττωμάτων [50]. Η ανιχνευσιμότητα βελτιώθηκε όταν οι πειραματικές εφαρμογές συνδυάστηκαν με προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων. Οι προσομοιώσεις εξέτασαν σενάρια όπου μικρότερες αναλογίες μήκους προς διάμετρο παράγουν ψευδείς κορυφές φάσματος, γνώση που ενημέρωσε στρατηγικές πεδίου όπως ο μέσος όρος πολλαπλών σημείων πρόσκρουσης ή η προσαρμογή της τοποθέτησης των αισθητήρων για την απομόνωση των πραγματικών αποκρίσεων ελαττωμάτων.

Η εφαρμοσιμότητα της μεθόδου Impact-Echo σε διάφορα στοιχεία σκυροδέματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις γεωμετρικές τους αναλογίες, τις οριακές συνθήκες και την παρουσία ή απουσία οπλισμού ή εσωτερικών διεπαφών. Η γεωμετρία των στοιχείων επηρεάζει άμεσα τον τρόπο με τον οποίο τα κύματα τάσης διαδίδονται, ανακλώνται και αλληλεπιδρούν μέσα στη δομή. Για παράδειγμα, τα πλακοειδή στοιχεία, όπως οι πλάκες και τα καταστρώματα γεφυρών που έχουν μία διάσταση (πάχος) πολύ μικρότερη από άλλες διαστάσεις τους στο επίπεδο, απλοποιεί τις διαδρομές των κυμάτων σε ανακλάσεις κυρίως μέσω του πάχους. Αυτά τα στοιχεία έχουν ιστορικά προτιμηθεί για έγκαιρη υιοθέτηση στο πεδίο, επειδή τα φάσματά τους περιέχουν λιγότερη συσσώρευση από πλευρικές αλληλεπιδράσεις ορίων σε σύγκριση με πιο συμπαγείς γεωμετρίες. Οι δοκοί από την άλλη εισάγουν πολυπλοκότητα μέσω εμπλεκόμενων διαμηκών και ακτινικών ιδιομορφών. Οι χειριστές που εργάζονται σε δοκούς συχνά προσαρμόζουν τη θέση πρόσκρουσης για να διεγείρουν επιλεκτικά είτε καμπτικές ιδιομορφές είτε ιδιομορφές συμπίεσης που σχετίζονται με το πάχος.

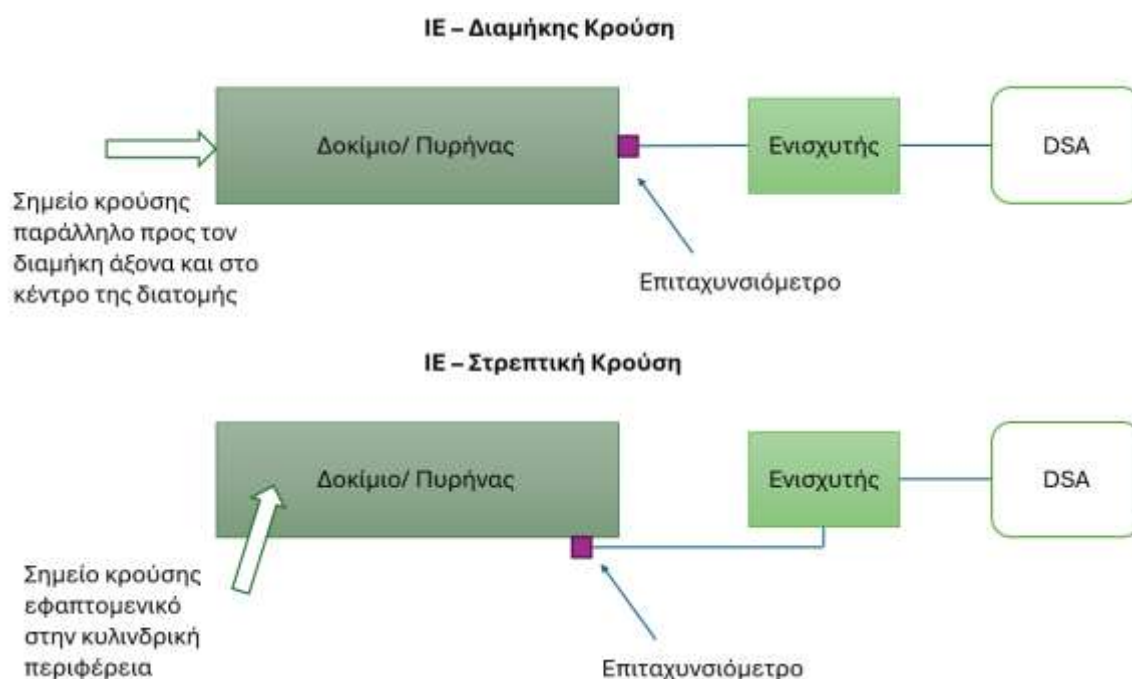
2.5.2 Αρχές της μεθόδου IE

2.5.2.1. Δημιουργία και ανάκλαση κυμάτων τάσης

Στη μέθοδο Impact Echo (IE), η διαδικασία ξεκινά με την ελεγχόμενη εφαρμογή μιας μηχανικής πρόσκρουσης μικρής διάρκειας στην επιφάνεια ενός στοιχείου από σκυρόδεμα. Ο κρουστικός μηχανισμός, συνήθως μια μικρή σφαίρα από χάλυβα ή ένα σφυρί με όργανα μέτρησης, ασκεί ένα παροδικό φορτίο που δημιουργεί έναν ευρυζωνικό παλμό τάσης που παράγει διαμήκη κύματα συμπίεσης (P) τα οποία διαπερνούν το πάχος του δείγματος, εγκάρσια κύματα διάτμησης (S) τα οποία ακολουθούν παρόμοια διαδρομή αλλά με μικρότερη ταχύτητα και επιφάνειας (Rayleigh, R) τα οποία περιορίζονται κοντά στην επιφάνεια [50], [104], [110]. Αυτά τα κύματα διαδίδονται μακριά από το σημείο πρόσκρουσης ακολουθώντας διαδρομές που καθορίζονται από τη γεωμετρία και τις οριακές συνθήκες του στοιχείου, καθώς και από την ανομοιογενή σύνθεση του δείγματος. Το βασικό διάγραμμα ενός συστήματος ελέγχου με δοκιμή IE φαίνεται στην Εικόνα 19.

Το διαμήκες κύμα P συνήθως ταξιδεύει ταχύτερα και αποτελεί την κύρια πηγή για την αξιολόγηση των δυναμικών ελαστικών ιδιοτήτων. Διαδίδεται τόσο μέσω του συνδετικού υλικού όσο και των αδρανών υλικών, αλληλεπιδρώντας με εγκλείσματα και διεπαφές κατά μήκος της διαδρομής του. Τα κύματα διάτμησης, παίζουν μικρότερο ρόλο στις

τυπικές αναλύσεις ΙΕ που στοχεύουν στον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας (E_d). Τα επιφανειακά κύματα παραμένουν συγκεντρωμένα κοντά στην επιφάνεια δοκιμής και μπορούν να αποτελέσουν πηγή χρήσιμων δεδομένων για την ανίχνευση ρηχών ελαττωμάτων, αλλά και παράγοντα παρεμβολής, εάν δεν γίνει κατανοητή η επίδρασή τους στα φάσματα συντονισμού [111].



Εικόνα 19: Σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου ΙΕ

Κατά τη δοκιμή συντονισμού δειγμάτων σκυροδέματος, ενδέχεται να εμφανιστούν δύο συχνότητες συντονισμού που είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Οι Kesler και Higuchi πίστευαν ότι αυτό οφειλόταν στο ασύμμετρο σχήμα του δείγματος, το οποίο προκαλούσε παρεμβολές λόγω της δόνησης του δείγματος σε κάποια άλλη κατεύθυνση εκτός από την επιθυμητή [56]. Η πραγματικότητα όμως είναι αρκετά πιο σύνθετη. Όταν αυτά τα μηχανικά διεγερμένα κύματα τάσης συναντούν μεταβατικές ζώνες όπου αλλάζουν οι ιδιότητες του υλικού, για παράδειγμα στην απομακρυσμένη επιφάνεια μιας πλάκας που εκτίθεται στον αέρα, ή σε εσωτερικές ασυνέχειες όπως κενά ή αποκολλήσεις, ανακλώνται εν μέρει πίσω προς την επιφάνεια. Η φύση αυτής της ανάκλασης εξαρτάται από τις αντιθέσεις της ακουστικής αντίστασης: όταν ένα μέσο χαμηλότερης αντίστασης, όπως ο αέρας, είναι μέρος της διεπαφής, τα κύματα P ανακλώνται με ανεστραμμένη φάση. Αντίθετα, εάν το κύμα συναντήσει ένα όριο υψηλότερης αντίστασης, όπως οπλισμό από χάλυβα, επιστρέφει χωρίς αντιστροφή φάσης [47], [50]. Αυτές οι μεταβατικές ζώνες επηρεάζουν τα μοτίβα παρεμβολής που ανιχνεύονται κατά τη διάρκεια της ανάλυσης συντονισμού, επηρεάζοντας άμεσα την ακρίβεια αναγνώρισης συχνότητας για τους επακόλουθους υπολογισμούς του συντελεστή.

Σε ελαστικά σώματα με πεπερασμένες πλευρικές διαστάσεις, τα χαρακτηριστικά διάδοσης των διαμηκών κυμάτων αποκλίνουν σημαντικά από αυτά που προβλέπονται

από τη μονοδιάστατη θεωρία κυμάτων. Συγκεκριμένα, σε υλικά ικανά να αντέχουν διατμητική παραμόρφωση, υπάρχει μια δευτερεύουσα διαμήκης ιδιομορφή, που συνήθως ονομάζεται ταχύτητα επέκτασης, ράβδου ή λεπτής ράβδου (extensional velocity). Όταν κυλινδρικά στελέχη, ράβδοι ή σύρματα υποβάλλονται σε διέγερση Ρ κυμάτων με μήκη κύματος που υπερβαίνουν περίπου πέντε φορές τη χαρακτηριστική διατομή, τα πλευρικά όρια του κυματοδηγού εισάγουν γεωμετρικά φαινόμενα διασποράς που τροποποιούν την ταχύτητα διάδοσης σε σχέση με την ταχύτητα του διαμήκους κύματος [112], [113], [114], [115]. Η μειωμένη αυτή ταχύτητα, γνωστή ως ταχύτητα ράβδου (bar velocity ή extensional velocity) V_c , ορίζεται από την εξίσωση (23) [116], [117].

$$V_c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (23)$$

όπου E αντιπροσωπεύει το μέτρο ελαστικότητας και ρ δηλώνει την πυκνότητα του υλικού [118], [119].

Η μειωμένη ταχύτητα προκύπτει από τη δυναμικό συνδυασμό των πεδίων αξονικής και ακτινικής μετατόπισης, όπου τα φαινόμενα πλευρικής αδράνειας και του λόγου Poisson γίνονται μη αμελητέα [117], [120], [121]. Η κλασική μονοδιάστατη προσέγγιση, η οποία αγνοεί την ακτινική κίνηση και υποθέτει ότι οι επίπεδες διατομές παραμένουν επίπεδες και κάθετες στον άξονα της ράβδου, αποδίδει αυτόν τον απλοποιημένο τύπο ταχύτητας επέκτασης ως το ασυμπτωτικό όριο χαμηλής συχνότητας της ακριβούς εξίσωσης συχνότητας Rochhammer-Chree [112], [115]. Σε υψηλότερες συχνότητες ή μικρότερα μήκη κύματος, η διασπορά γίνεται πιο έντονη και τα χαρακτηριστικά διάδοσης πρέπει να περιγραφούν με πιο εξελιγμένες θεωρίες που λαμβάνουν ρητά υπόψη την πλευρική αδράνεια, την ακτινική διατμητική παραμόρφωση και το λόγο Poisson μεταξύ των αξονικών και εγκάρσιων συνιστωσών παραμόρφωσης [116], [117], [120], [122], [123].

Η σχέση μεταξύ V_c , V_p και ν εκφράζεται από την εξίσωση (24).

$$V_c = V_p \sqrt{\frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu}} \quad (24)$$

Η ανωτέρω σχέση καταδεικνύει ότι η V_c αποτελεί πάντοτε κλάσμα της V_p και η αναλογία μεταξύ τους εξαρτάται αποκλειστικά από τον λόγο Poisson. Για τυπικές τιμές $\nu = 0,15 - 0,40$ που χαρακτηρίζουν τα δομικά υλικά, ο λόγος V_c/V_p κυμαίνεται περίπου μεταξύ 0,83 και 0,58 [124].

Για την εκτίμηση των ιδιοτήτων, η ΙΕ εστιάζει στις συντονισμένες συχνότητες που προκαλούνται από επαναλαμβανόμενες ανακλάσεις μεταξύ παράλληλων ορίων, κυρίως μεταξύ της επιφάνειας που έχει υποστεί κρούση και της αντίθετης πλευράς της σε στοιχεία τύπου πλάκας. Η κυρίαρχη ιδιοσυχνότητα f αντανακλά τον χρόνο διαδρομής ενός κύματος Ρ μεταξύ αυτών των επιφανειών. Μέσω της εξίσωσης (25) αυτή η συχνότητα μπορεί να μετατραπεί σε ταχύτητα ράβδου V_c όταν είναι γνωστό το L [125].

$$V_c = 2fL \quad (25)$$

Μαζί με τη μετρούμενη πυκνότητα ρ και το λόγο Poisson ν , η V_c μέσω της εξίσωσης (23) μπορεί να αποδώσει το E_d . Αυτό διαφέρει ουσιαστικά από την προσέγγιση άμεσου χρόνου διέλευσης της UPV καθώς στην ΙΕ, η προκύπτουσα ταχύτητα υπολογίζεται ως μέσος όρος πολλαπλών διελεύσεων κατά μήκος του μέσου κατά τη διάρκεια της συντονισμένης δόνησης και όχι ακολουθώντας μια ενιαία ευθεία διαδρομή [5].

2.5.2.2. Μέτρηση και συλλογή δεδομένων

Η αποτελεσματική μέτρηση και η συλλογή δεδομένων στις δοκιμές Impact-Echo βασίζονται στον έλεγχο της πηγής διέγερσης, στην ακριβή καταγραφή των κυματομορφών και στην επεξεργασία τους για την αποκάλυψη διαγνωστικών φασματικών χαρακτηριστικών. Μια τυπική διάταξη ΙΕ χρησιμοποιεί ένα μηχανικό κρουστήρα, συχνά μια σφαίρα από σκληρυμένο χάλυβα συνδεδεμένη με μια ράβδο από χάλυβα, για τη δημιουργία ενός ελαστικού παλμού. Το προφίλ δύναμης-χρόνου μιας τέτοιας πρόσκρουσης μπορεί να προσεγγιστεί με μια ημικυκλική συνάρτηση ημιτόνου που χαρακτηρίζεται από μέγιστη δύναμη $F_{\max}$ και διάρκεια κρούσης t_c , με το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας να περιέχεται σε συχνότητες κάτω από $\frac{1,5}{t_c}$ [104]. Οι μικρότερες διάρκειες πρόσκρουσης διευρύνουν το περιεχόμενο συχνότητας, αλλά σε βάρος του πλάτους της συχνότητας, επηρεάζοντας την ανιχνευσιμότητα της συντονισμού. Η επιλογή και η τοποθέτηση των αισθητήρων είναι κρίσιμης σημασίας για τη λήψη καθαρών δεδομένων. Τα μηχανοσκόπια ή τα επιταχυνσιομέτρα τοποθετούνται συνήθως κοντά, στο σημείο πρόσκρουσης, έτσι ώστε οι πρώιμες αφίξεις των P κυμάτων να καταγράφονται πριν από την ουσιαστική παρεμβολή των R κυμάτων [50]. Ειδικά για κυλινδρικά δείγματα, η τοποθέτηση του επιταχυνσιομέτρου πρέπει να είναι εφαπτόμενη σε μια κυκλική διατομή που περιέχει έναν κόμβο για θεμελιώδη εγκάρσια δόνηση. Η τοποθέτηση των αισθητήρων γίνεται με τη χρήση προσωρινής κόλλας ή κεριού στην επιφάνεια. Αυτή η μηχανική σύζευξη πρέπει να είναι σταθερή, καθώς η ασυνεπής επαφή του αισθητήρα αλλάζει τις σχέσεις πλάτους μεταξύ των συχνοτήτων και μπορεί να καλύψει λεπτές ατέλειες στις κορυφές των ιδιομορφών. Κατά την κρούση, ο ψηφιακός καταγραφέας κυματομορφών (DSA) καταγράφει σήματα με ρυθμούς όπως 20kHz με επαρκή μήκη καταγραφής (π.χ. 1024 σημεία) για την ανάλυση των φασμάτων. Η συλλογή δεδομένων ξεκινά συχνά με τη χρήση του σήματος του επιταχυνσιομέτρου ως έναρξη (trigger) [12]. Τα σύγχρονα όργανα επιτρέπουν την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της απόδοσης του κρουστικού σώματος παράλληλα με τα ληφθέντα φάσματα, έτσι ώστε οι μη βέλτιστες κρούσεις, που κρίνονται με βάση παραμέτρους όπως ανεπαρκής ενέργεια ή παραμορφωμένες κυματομορφές, να μπορούν να απορριφθούν πριν από την επεξεργασία. Η μετατροπή των καταγεγραμμένων δεδομένων του χρονικού πεδίου σε χρήσιμες πληροφορίες του φασματικού πεδίου χρησιμοποιεί συνήθως την ανάλυση Fast Fourier Transform (FFT). Σε δομές όπου αφθονούν οι ανακλάσεις πολλαπλών διαδρομών,

όπως κύβοι που οριοθετούνται από έξι ελεύθερες επιφάνειες, τα φάσματα που προέρχονται από FFT εμφανίζουν πολλαπλές διακριτές κορυφές που αντιστοιχούν σε ιδιομορφές από διαφορετικές διαδρομές ανάκλασης [104]. Ένα βασικό πρώτο βήμα είναι η απομόνωση των κυρίαρχων κορυφών συντονισμού εντός του φάσματος πλάτους που λαμβάνεται μέσω της ανάλυσης FFT. Η σωστή συσχέτιση αυτών των κορυφών με τις διαστάσεις της δομής απαιτεί εξοικείωση με την αναμενόμενη κατανομή των ιδιομορφών για δεδομένες γεωμετρίες. Η παρουσία εσωτερικών ελαττωμάτων τροποποιεί το χρόνο ανάκλασης και τα μήκη των διαδρομών, δημιουργώντας δευτερεύουσες κορυφές που διακρίνονται όταν διατηρείται επαρκής χρονική ανάλυση (που καθορίζεται από το διάστημα δειγματοληψίας). Για παράδειγμα, οι προσομοιώσεις που χρησιμοποιούν το σύστημα ανίχνευσης κρούσης $\Delta t = 1,334\mu s$ αποδίδουν ανάλυση συχνότητας κοντά στα 0,366kHz [109], επαρκή για την ανάλυση στενά διαχωρισμένων συντονισμών σε ενισχυμένα ή γεωμετρικά πολύπλοκα στοιχεία. Η αξιοπιστία των δεδομένων βελτιώνεται όταν οι διαδικασίες μέτρησης ακολουθούν τυποποιημένες θέσεις κρούσης σε σχέση με τη γεωμετρία του δείγματος. Για πρισματικά στοιχεία, αυτό μπορεί να σημαίνει κρούση σε απόσταση $0,132 \pm 0,01$ του μήκους του στοιχείου από το ένα άκρο [12].

Η ανάλυση της συχνότητας συντονισμού μετατρέπει το περίπλοκο μοτίβο των ανακλάσεων που δημιουργούνται από την πρόσκρουση σε μια επιφάνεια σε ποσοτικούς δείκτες των δυναμικών ελαστικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Σε πρακτικό επίπεδο, η πιο χρήσιμη από διαγνωστική άποψη συντονισμένη συχνότητα για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων του όγκου είναι η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα που σχετίζεται με τη διάδοση του κύματος P σε όλο το δείγμα. Το κρίσιμο σημείο στην ανάλυση της συχνότητας συντονισμού είναι η απομόνωση αυτών των πραγματικών κορυφών από άλλα φασματικά συστατικά που δεν αντικατοπτρίζουν τη συνολική συμπεριφορά του υλικού. Ψευδείς μέγιστες τιμές μπορούν να προκύψουν από ανακλάσεις από ενσωματωμένο σπλισμό, από πολύπλοκες γεωμετρίες ορίων ή από ελαττώματα κοντά στην επιφάνεια που διαταράσσουν ορισμένες συχνότητες δυσανάλογα [13]. Η εσφαλμένη ερμηνεία αυτών των ψευδών στοιχείων οδηγεί άμεσα σε εσφαλμένες ταχύτητες P -κύματος και, ως εκ τούτου, σε λανθασμένες εκτιμήσεις E_d ή ν . Η ακρίβεια εξαρτάται τόσο από την απόκτηση σήματος υψηλής πιστότητας όσο και από την ισχυρή μετα-επεξεργασία της ανάλυσης συντονισμού, η οποία είναι ικανή να διακρίνει τις πραγματικές θεμελιώδεις ιδιομορφές από τις τοπικές συντονισμένες συχνότητες. Η σύγχρονη πρακτική της ανάλυσης συντονισμού (IE) χρησιμοποιεί αυτοματοποιημένους αλγόριθμους επιλογής κορυφών, οι οποίοι έχουν βαθμονομηθεί σε αναμενόμενα εύρη λειτουργιών με βάση τη γεωμετρία και προηγούμενα δεδομένα βαθμονόμησης [51]. Αυτά τα συστήματα διασταυρώνουν τις υποψήφιες κορυφές με τις θεωρητικές μορφές λειτουργίας, απορρίπτοντας τις ακραίες τιμές που δεν συνάδουν με τα πρότυπα δόνησης.

2.5.3 Παράγοντες Επιρροής στη δοκιμή ΙΕ

Η αξιοπιστία της δοκιμής Impact-Echo εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων που σχετίζονται με τη γεωμετρία του εξεταζόμενου δοκιμίου, τις ιδιότητες του υλικού και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της πειραματικής διάταξης. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν τη θέση, την ένταση και τη διακριτότητα των κορυφών στο φάσμα συχνοτήτων και, κατ' επέκταση, την ακρίβεια προσδιορισμού των ελαστικών παραμέτρων. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι κυριότεροι από αυτούς τους παράγοντες.

2.5.3.1. Γεωμετρικοί παράγοντες

2.5.3.1.1. Λυγνρότητα δοκιμίου (L/D)

Ο λόγος του ύψους προς τη διάμετρο L/D αποτελεί τον σημαντικότερο γεωμετρικό παράγοντα στη δοκιμή ΙΕ επί κυλινδρικών δοκιμίων. Για απειρομήκη θεωρητικά δοκίμια ($L/D > 5$), η μετρούμενη θεμελιώδης διαμήκης ιδιοσυχνότητα συνδέεται με την ταχύτητα διάδοσης σε λεπτή ράβδο V_c . Σε άπειρο μέσο (πολύ κοντό δοκίμιο όπου κυριαρχεί η συμπεριφορά μάζας ($L/D \rightarrow 0$ ή πάχος $\ll$ μήκος κύματος), η αντίστοιχη συχνότητα συνδέεται με την ταχύτητα διάδοσης του διαμήκους κύματος V_p . Για ενδιάμεσες τιμές L/D εμφανίζεται σύζευξη μεταξύ διαμήκων και εγκάρσιων ιδιομορφών ταλάντωσης και η μετρούμενη ταχύτητα παίρνει ενδιάμεσες τιμές μεταξύ της V_c (όριο λεπτής ράβδου) και της V_p (όριο άπειρου μέσου) [10], [109]. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο σε δοκίμια με $L/D < 2$, όπως αυτά που προκύπτουν από πυρηνοληψία υφιστάμενων κατασκευών, και επιβάλλει την εισαγωγή διορθωτικών συντελεστών σχήματος.

Στη διεθνή βιβλιογραφία, η εξάρτηση των ιδιοσυχνοτήτων από τη λυγνρότητα έχει μελετηθεί συστηματικά τόσο αναλυτικά όσο και αριθμητικά. Οι Nieves et al. (2002) προσδιόρισαν τις ελαστικές σταθερές κοντών ισότροπων κυλίνδρων μέσω αναλυτικής επίλυσης των εξισώσεων ταλάντωσης [10], ενώ οι Wang et al. (2010) πρότειναν αναλυτικούς συντελεστές διόρθωσης για ένα ευρύ φάσμα τιμών L/D και ν [109]. Πιο πρόσφατα, οι Yao et al. (2022) ανέπτυξαν εμπειρικούς συντελεστές για μικρού μεγέθους κοντούς κυλίνδρους και κυκλικούς σωλήνες

2.5.3.1.2. Σχήμα διατομής

Πέραν της λυγνρότητας, το σχήμα της διατομής επηρεάζει επίσης τις θεμελιώδεις ιδιομορφές ταλάντωσης. Στο πλαίσιο της εφαρμογής της ΙΕ σε δομικά στοιχεία διαφορετικής διατομής, οι Sansalone & Streett (1997) εισήγαγαν τους χαρακτηριστικούς συντελεστές β , οι οποίοι συσχετίζουν τη μετρούμενη συχνότητα με την ταχύτητα διάδοσης V_p ανάλογα με τη γεωμετρία [126]. Ενδεικτικά, για κυκλική διατομή με $\nu \approx 0,20$ ο συντελεστής β λαμβάνει τιμή της τάξης του 0,96.

2.5.3.1.3. Συνοριακές συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες κατά την εκτέλεση της δοκιμής επηρεάζουν την ανάπτυξη των στάσιμων κυμάτων στο εσωτερικό του δοκιμίου. Το πρότυπο ASTM C215 [12] προδιαγράφει τη χρήση μαλακών εδράσεων ώστε να προσομοιωθούν συνθήκες ελεύθερης ταλάντωσης. Σε εφαρμογές πεδίου, όπου το εξεταζόμενο στοιχείο εδράζεται σε υπόστρωμα μη αμελητέας ακαμψίας, όπως στην περίπτωση φρεάτων θεμελίωσης σε έδαφος, η αλληλεπίδραση με το υπόστρωμα εισάγει πρόσθετες κορυφές και μετατοπίσεις στο φάσμα συχνοτήτων [127]. Στα πειραματικά δοκίμια της παρούσας διατριβής, η έδραση πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ASTM C215.

2.5.3.2. Παράγοντες υλικού

2.5.3.2.1. Λόγος Poisson

Για ένα ιδανικά λυγηρό κυλινδρικό δοκίμιο, η θεωρητικά δεν εμφανίζει άμεση εξάρτηση από τον λόγο Poisson. Στην πράξη όμως, για πεπερασμένες τιμές λυγηρότητας, η μετρούμενη ιδιοσυχνότητα αποκλίνει από εκείνη της ιδανικής ράβδου, με την απόκλιση να εξαρτάται γεωμετρικά τόσο από τον λόγο L/D όσο και από τον λόγο Poisson του υλικού. Ο Poronics (1997) διερεύνησε αναλυτικά την επίδραση του λόγου Poisson στα αποτελέσματα της ΙΕ και έδειξε ότι ακόμη και μικρές αποκλίσεις από την τυπική τιμή $\nu = 0,20$ για το σκυρόδεμα μπορούν να εισαγάγουν σημαντικά σφάλματα στον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης [128]. Οι Wang et al. (2010) πρότειναν εξισώσεις διόρθωσης που λαμβάνουν υπόψη τον λόγο Poisson στο εύρος 0,01–0,49 [109].

2.5.3.2.2. Ηλικία σκυροδέματος

Η ηλικία του σκυροδέματος επηρεάζει τις μετρούμενες ιδιοσυχνότητες μέσω της εξέλιξης της διαδικασίας ενυδάτωσης και της σταδιακής αύξησης του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας. Οι Pessiki & Carino (1988) αξιοποίησαν αυτό το φαινόμενο ώστε να παρακολουθήσουν τον χρόνο πήξης και την ανάπτυξη της αντοχής του σκυροδέματος μέσω της δοκιμής ΙΕ [129]. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί από τους Lee et al. (1997), οι οποίοι παρατήρησαν αύξηση των μετρούμενων ιδιοσυχνοτήτων με την ηλικία του σκυροδέματος σε πρώιμα στάδια ωρίμανσης [46].

2.5.3.2.3. Παρουσία οπλισμού

Η παρουσία ράβδων οπλισμού στο εξεταζόμενο σκυρόδεμα μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα της ΙΕ, καθώς η διαφορά της ακουστικής εμπίδησης μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος προκαλεί μερική ανάκλαση των κυμάτων στη διεπιφάνεια. Οι Cheng & Sansalone (1993) διερεύνησαν συστηματικά την επίδραση του οπλισμού και των πιθανών κενών γύρω από τις ράβδους στα φάσματα ΙΕ και έδειξαν ότι ο οπλισμός εισάγει πρόσθετες κορυφές στο φάσμα, οι οποίες είναι έντονες όταν το σημείο πρόσκρουσης βρίσκεται κοντά στη ράβδο [130].

2.5.3.2.4. Παρουσία ασυνεχειών (ρωγμές, κενά, αποκολλήσεις)

Η ύπαρξη εσωτερικών ασυνεχειών — ρωγμών, κενών, αποκολλήσεων ή ζωνών χαμηλής ποιότητας σκυροδέματος — αλλοιώνει το κυματικό πεδίο εντός του δοκιμίου και προκαλεί εμφάνιση πρόσθετων κορυφών συχνότητας ή μετατόπιση των υφιστάμενων προς χαμηλότερες τιμές [50], [104], [126]. Άλλωστε, η ίδια αυτή ευαισθησία της ΙΕ στις ασυνέχειες αποτελεί τη βασική αρχή λειτουργίας της ως μεθόδου ανίχνευσης ελαττωμάτων σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος.

2.5.3.2.5. Επίδραση υψηλών θερμοκρασιών

Η έκθεση του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς, προκαλεί μικρορηγματώσεις και υποβάθμιση της δομής, οδηγώντας σε μείωση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας και μετατόπιση των ιδιοσυχνοτήτων προς χαμηλότερες τιμές. Οι Lee et al. (2015) μελέτησαν τη συμπεριφορά σκυροδέματος υψηλής αντοχής μετά από έκθεση σε φωτιά μέσω της ΙΕ και έδειξαν ότι η μέθοδος είναι ικανή να ανιχνεύσει τη θερμική φθορά [34].

2.5.3.3. Παράγοντες πειραματικής διάταξης

2.5.3.3.1. Διάμετρος σφαιριδίου και διάρκεια κρούσης

Η διάρκεια επαφής t_c μεταξύ του σφαιριδίου κρούσης και της επιφάνειας του δοκιμίου καθορίζει το ανώτατο όριο του εύρους συχνοτήτων που διεγείρονται κατά την κρούση. Μικρότερα σφαιρίδια οδηγούν σε συντομότερες κρούσεις και διεγείρουν υψηλότερες συχνότητες, ενώ μεγαλύτερα σφαιρίδια διεγείρουν χαμηλότερες συχνότητες με μεγαλύτερο ενεργειακό περιεχόμενο. Η μέγιστη συχνότητα ενδιαφέροντος δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση $f_{max} \approx 1,25/t_c$ [50]. Η επιλογή της διαμέτρου του σφαιριδίου πρέπει να προσαρμόζεται στις διαστάσεις του δοκιμίου και στην περιοχή ενδιαφέροντος του φάσματος συχνοτήτων.

2.5.3.3.2. Θέση πρόσκρουσης και αισθητήρα

Η σχετική θέση του σημείου πρόσκρουσης και του αισθητήρα καταγραφής επηρεάζει την επιλεκτικότητα ανίχνευσης των διαφόρων ιδιομορφών ταλάντωσης. Για την ανίχνευση της θεμελιώδους διαμήκου ιδιομορφής σε κυλινδρικά δοκίμια, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C215 η πρόσκρουση εφαρμόζεται στο ένα άκρο και ο αισθητήρας τοποθετείται στο αντιδιαμετρικό άκρο [12]. Για στρεπτικές ιδιομορφές οι θέσεις διαφοροποιούνται ανάλογα, ενώ για εγκάρσιες ιδιομορφές απαιτείται πλευρική πρόσκρουση και πλευρική καταγραφή. Οι Wang et al. (2012) έδειξαν ότι η κατάλληλη επιλογή θέσης αισθητήρα σε διαφορετικά ύψη της κυλινδρικής επιφάνειας μπορεί να αξιοποιηθεί για τον αυτόνομο προσδιορισμό του λόγου Poisson [11].

2.5.3.3.3. Μάζα και αδράνεια αισθητήρα

Ο αισθητήρας καταγραφής δεν αποτελεί ιδανικό μέσο καταγραφή καθώς εισάγει στο σύστημα πρόσθετη μάζα και αδρανειακή ροπή στο σημείο επαφής. Όταν η μάζα του

αισθητήρα είναι συγκρίσιμη με τη μάζα του δοκιμίου, όπως συμβαίνει σε δοκίμια πυρηνοληψίας μικρών διαστάσεων, οι μετρούμενες ιδιοσυχνότητες μετατοπίζονται σε σχέση με τις πραγματικές ιδιοσυχνότητες του δοκιμίου, εισάγοντας συστηματικό σφάλμα στον υπολογισμό των ελαστικών παραμέτρων [106]. Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει συμβάλει στην ανάπτυξη ελαφρών επιταχυνσιομέτρων μικρής μάζας η χρήση των οποίων επιβάλλεται προς την κατεύθυνση της μείωσης αυτής της επιρροής.

2.5.3.3.4. Συχνότητα δειγματοληψίας και φασματική ανάλυση

Η ακρίβεια στον προσδιορισμό των ιδιοσυχνοτήτων εξαρτάται από τη συχνότητα δειγματοληψίας του συστήματος καταγραφής και τη διάρκεια του παραθύρου παρατήρησης. Σύμφωνα με το θεώρημα Nyquist, η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια της μέγιστης συχνότητας ενδιαφέροντος, ενώ στην πράξη συνιστάται ένας λόγος της τάξης του 5 έως 10 για τη διασφάλιση επαρκούς ποιότητας σήματος [12]. Η μετατροπή του σήματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας επιτυγχάνεται με τη χρήση του ταχέος μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform — FFT), η διακριτική ικανότητα του οποίου εξαρτάται από τη συνολική διάρκεια καταγραφής [52].

2.5.4 Εκτίμηση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας Young και υπολογισμός του δυναμικού λόγου Poisson

Ο προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας (E_d) με τη χρήση της μεθόδου Impact Echo (IE) βασίζεται στην ακριβή σύνδεση των μετρήσιμων συχνοτήτων συντονισμού με τις μέσες ταχύτητες των κυμάτων σε ολόκληρο τον όγκο του σκυροδέματος και, στη συνέχεια, στην εφαρμογή των σχέσεων των ελαστικών κυμάτων που ενσωματώνουν την πυκνότητα ρ και τον δυναμικό λόγο Poisson ν_d . Η διαδικασία ακολουθεί τις αρχές της ιδιομορφικής ανάλυσης. Μόλις προσδιοριστεί η κυρίαρχη ιδιοσυχνότητα f_c , μετατρέπεται σε ταχύτητα ράβδου V_c με την Εξίσωση (25). Από αυτή, το E_d υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (26) [5].

$$E_d = \rho V_c^2 \quad (26)$$

Στη συνέχεια μέσω της μέτρησης της διατμητικής ταχύτητας V_s μπορεί να υπολογιστεί το μέτρο διάτμησης (G) μέσω της εξίσωσης (27) [5].

$$G_d = \rho V_s^2 \quad (27)$$

Ο προσδιορισμός του δυναμικού λόγου Poisson (ν_d) μπορεί να υπολογιστεί από το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (E_d) και το μέτρο διάτμησης (G_d) ως ακολούθως στην εξίσωση (28) [131] ή από την εξίσωση (29) από το περιορισμένο μέτρο ελαστικότητας (M) και το μέτρο διάτμησης (G_d) [80].

$$\nu_d = \left(\frac{E_d}{2G_d} \right) - 1 \quad (28)$$

$$v_d = \frac{M - 2G_d}{2M - 2G_d} \quad (29)$$

Όπως γίνεται αντιληπτό στις μεθόδους που βασίζονται σε κύματα, ο λόγος αυτός δεν μπορεί να υπολογιστεί μόνο από μία μέτρηση ταχύτητας. Αντιθέτως, πρέπει να προσδιοριστούν τουλάχιστον δύο ανεξάρτητες ταχύτητες κύματος που αντιπροσωπεύουν διαφορετικές ιδιομορφές παραμόρφωσης, έτσι ώστε οι σχέσεις ελαστικότητας να αποδίδουν τον λόγο χωρίς να βασίζονται σε υποθετικές ονομαστικές τιμές [79]. Γενικά η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων λαμβάνεται εύκολα με τη μέτρηση του χρόνου διέλευσης κατά μήκος ενός γνωστού μήκους διαδρομής. Ωστόσο, η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων είναι πολύ πιο δύσκολο να καταγραφεί αξιόπιστα στο σκυρόδεμα χωρίς καταστροφή, επειδή τα διατμητικά κύματα εξασθενούν γρήγορα και είναι πιο ευαίσθητα σε ανωμαλίες σύζευξης και διαδρομής [82]. Ως αποτέλεσμα, συχνά παραλείπονται οι άμεσες μετρήσεις της ταχύτητας διάτμησης και υιοθετούν μια γενική τιμή v_d , που συχνά λαμβάνεται γύρω στο 0,20 για μείγματα κανονικής αντοχής, με βάση δημοσιευμένους μέσους όρους από προηγούμενες μελέτες [79], [82], [132]. Η ΙΕ προσφέρει έναν άμεσο τρόπο μέτρησης του λόγου (v_d) μη καταστροφικά, επειδή το φάσμα συντονισμού περιέχει πολλαπλές ιδιομορφές που συνδέονται με διακριτές συμπεριφορές παραμόρφωσης εντός του δοκιμαζόμενου όγκου. Με την ανάλυση τουλάχιστον δύο κατάλληλα επιλεγμένων συχνοτήτων συντονισμού, συνήθως μιας θεμελιώδους συχνότητας P-κύματος σε συνδυασμό με μία συχνότητα κάμψης ή στρέψης, καθίσταται δυνατή η ταυτόχρονη επίλυση ως προς E_d και v_d χρησιμοποιώντας καθιερωμένες σχέσεις ελαστικότητας χωρίς την εισαγωγή αυθαίρετων σταθερών [29].

Οι Wang et al. (2012) προτείνουν μια νέα προσέγγιση για την εύρεση του λόγου Poisson με χρήση της δοκιμής ακουστικού συντονισμού [11]. Σύμφωνα με αυτή, το μόνο που χρειάζεται είναι δύο συχνότητες συντονισμού, μία στη διαμήκη και μία στην εγκάρσια τομή κυκλικής ράβδου γνωστής διάστασης.

$$f_0 = \frac{1}{2L} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (30)$$

όπου, ρ = η πυκνότητα (g/mm³),

f_0 = η διαμήκης συχνότητα συντονισμού (Hz),

L = το ύψος του κυλίνδρου (mm),

E = το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (Pa)

Στην πράξη, η δυσκολία εντοπισμού της εγκάρσιας συχνότητας συντονισμού f_1 , άρεται με τη βοήθεια της εξίσωσης (31) όπου ο προσδιορισμός της f_1 γίνεται αρκετά εύκολος και αξιόπιστος.

$$0,87 \cdot \frac{L}{D} \cdot f_0 \leq f_1 \leq 1,05 \cdot \frac{L}{D} \cdot f_0 \quad (31)$$

όπου, ρ = η πυκνότητα (g/mm^3),

f_0 = η διαμήκης συχνότητα συντονισμού (Hz),

f_1 = η εγκάρσια συχνότητα συντονισμού (Hz),

L = το ύψος του κυλίνδρου (mm),

D = η διάμετρος του κυλίνδρου (mm)

Μετά τον προσδιορισμό της συχνότητας συντονισμού στην εγκάρσια διεύθυνση, υπολογίζεται ο δυναμικός λόγος Poisson ν μέσω των εξισώσεων (30), (32) και (33).

$$\nu = -1,0477 + \frac{1,1582}{\kappa^2} \quad (32)$$

$$\kappa = \frac{f_1}{f_0} \cdot \frac{D}{L} \quad (33)$$

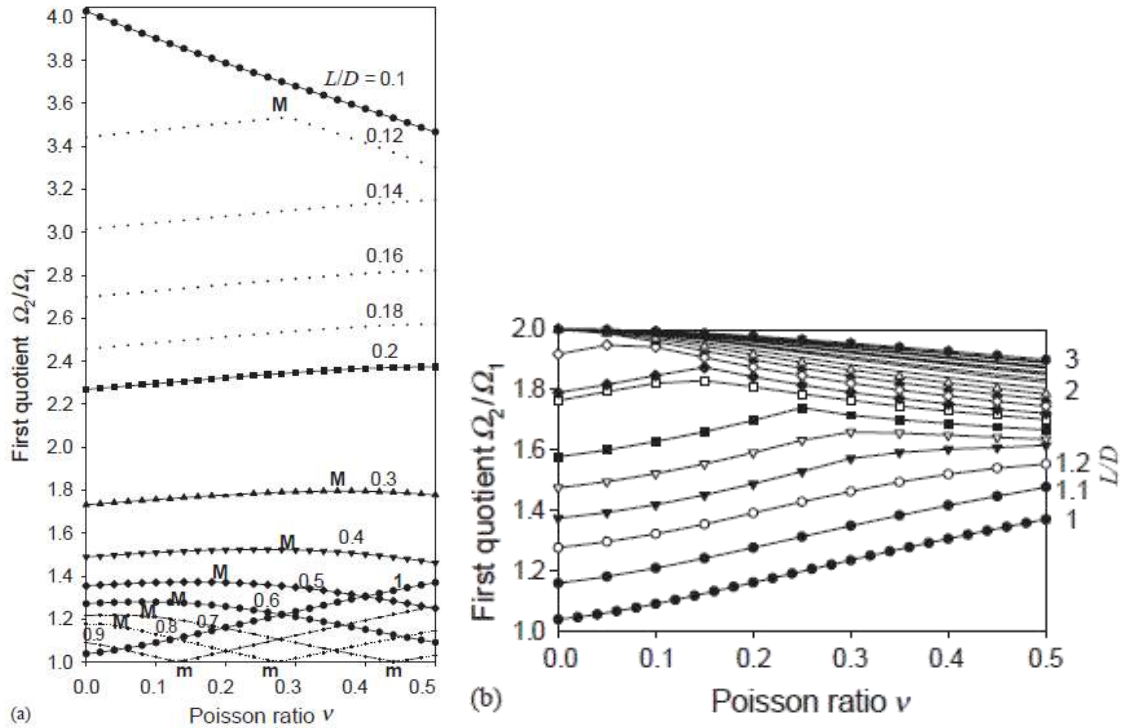
όπου, κ = συντελεστής σχήματος με εύρος τιμών από 0,87 έως 1,05.

Οι Kolluru et al. (2000) πρότειναν τη χρήση του λόγου συχνοτήτων των δύο πρώτων διαμήκων συχνοτήτων συντονισμού για τον προσδιορισμό του λόγου Poisson. Παρέχουν επίσης εμπειρική σχέση όπως φαίνεται στην εξίσωση (34) για τον προσδιορισμό της διορθωμένης ιδιοσυχνότητας με βάση τον λόγο L/D [9].

$$\nu = A_1 \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 + B_1 \left(\frac{f_2}{f_1}\right) + C_1 \quad (34)$$

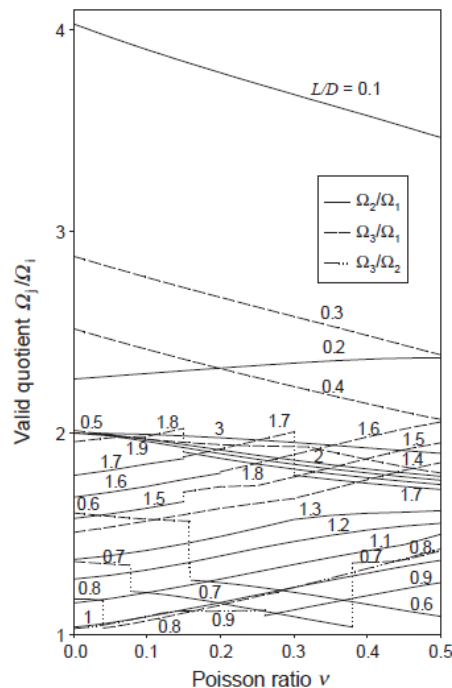
όπου f_1 και f_2 είναι η πρώτη και η δεύτερη μετρούμενη διαμήκης συχνότητα συντονισμού, αντίστοιχα. Οι συντελεστές A_1 , B_1 και C_1 εξαρτώνται από το λόγο L/D .

Οι Nieves et al. (1998) χρησιμοποίησαν τις αξονοσυμμετρικές ιδιομορφές ενός ελεύθερα δονόμενου ισοτροπικού κυλίνδρου με μήκος ίσο με τη διάμετρό του για να υπολογίσει τον δυναμικό λόγο Poisson και το μέτρο διάτμησης, ενώ το 2002, προτείναν μια μέθοδο για τον προσδιορισμό των ελαστικών σταθερών σε κοντούς ισοτροπικούς κυλίνδρους των οποίων ο λόγος L/D κυμαίνεται από 0,1 έως 3, μέσω της μεθόδου Rayleigh-Ritz. Η μεθοδολογία βασίζεται στην απόκτηση του ελεύθερου φάσματος ταλάντωσης ενός κυλινδρικού δείγματος. Συγκεκριμένα, μετά από μηχανική πρόσκρουση, το δείγμα αφήνεται να ταλαντωθεί από μόνο του και η ελεύθερη ταλάντωση ανιχνεύεται με τη βοήθεια ενός παρεμβολόμετρου (interferometer) που επιτρέπει, σε μία μόνο δοκιμή, τον προσδιορισμό του φάσματος συχνοτήτων. Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται στη μέτρηση δύο ιδιομορφών του υλικού, μέσω των οποίων υπολογίζονται ο λόγος Poisson και το μέτρο διάτμησης ενώ για κάποιες τιμές λυγηρότητας χρειάστηκε η αναγνώριση των πρώτων τριών ιδιομορφών του υλικού [10], [133]. Για τιμές του λόγου $L/D = 0,1, 0,14 - 0,2, 1,0 - 1,3$ και $1,9 - 3,0$ η ανάλυση απαιτεί αποκλειστικά τις δύο χαμηλότερες ιδιοσυχνότητες f_1 και f_2 του δοκιμίου. Ο λόγος $\frac{f_2}{f_1}$ αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος το οποίο, μέσω αδιάστατων γραφημάτων συσχέτισης της Εικόνα 20 αντιστοιχεί μονοσήμαντα σε συγκεκριμένη τιμή του λόγου Poisson ν .



Εικόνα 20: Ο λόγος της δεύτερης προς την πρώτη ιδιοσυχνότητα f_2/f_1 , σε σχέση με την τιμή του λόγου Poisson για (a) δοκίμια με $L/D=0,1$ έως 1 και (b) $L/D=1$ έως 3 (b) [10]

Για τιμές του λόγου $L/D = 0,3 - 0,9$ και $1,4 - 1,8$ η χρήση μόνο των δύο χαμηλότερων ιδιοσυχνοτήτων κρίνεται ανεπαρκής λόγω της εγγύτητας ή εναλλαγής ιδιομορφών. Συνεπώς, απαιτείται ο προσδιορισμός και της τρίτης ιδιοσυχνότητας f_3 . Ο υπολογισμός των ελαστικών ιδιοτήτων επιτυγχάνεται μέσω των λόγων $\frac{f_3}{f_1}$ ή $\frac{f_3}{f_2}$, όπως αυτοί αποτυπώνονται στην Εικόνα 21.



Εικόνα 21: Ο λόγος f_3/f_1 σε σχέση με το λόγο Poisson ν για διάφορες τιμές L/D [10]

Προς επαλήθευση της αποτελεσματικότητας της μεθοδολογίας και αξιολόγηση της επίδρασης του λόγου L/D στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων, κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν πειραματικά δύο χαλύβδινοι κύλινδροι με λόγους $L/D = 0,1$ και $L/D = 1,0$. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι για $L/D = 1,0$ επιτυγχάνεται σημαντικά μικρότερο σφάλμα στον υπολογισμό των ελαστικών ιδιοτήτων σε σχέση με $L/D = 0,1$ και προτείνεται οι χρήση κυλίνδρων με $L/D = 1,0$ για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου.

Αυτό όμως πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον υπολογισμό σε κάθε περίπτωση είναι η λυγηρότητα του εξεταζόμενου δοκιμίου. Το ASTM C215, δίνει τις εξισώσεις (35) και (36), για τον υπολογισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας (E_d) και του μέτρου διάτμησης (G_d) ενώ και ο λόγος Poisson μπορεί να υπολογιστεί μέσω της εξίσωσης (28) [12]

$$E_d = 5,093 \left(\frac{L}{D^2} \right) \cdot m \cdot f_c^2 \quad (35)$$

$$G_d = 4 \left(\frac{L \cdot R}{A} \right) \cdot m \cdot f_s^2 \quad (36)$$

όπου L είναι το μήκος και D είναι η διάμετρος του κυλίνδρου, R είναι ο συντελεστής σχήματος, m είναι η μάζα, A είναι η διατομή του δείγματος δοκιμής και, τέλος, f_c και f_s είναι οι συχνότητες συντονισμού κατά μήκος και στρέψης, αντίστοιχα.

Λόγω της λυγηρότητας, τόσο η διαμήκης όσο και η στρεπτική συχνότητα πρέπει να διορθωθούν, ενώ το πρότυπο ASTM C215 προτείνει έναν συντελεστή διόρθωσης σχήματος μόνο για τις στρεπτικές συχνότητες, ο οποίος για κυλινδρικά δείγματα είναι ίσος με 1. Η πλειονότητα των ερευνών έχει εξετάσει την επίδραση δειγμάτων με $L/D > 2,0$. Ωστόσο, δεδομένου ότι αυτό δεν είναι το συνηθισμένο μέγεθος των πυρήνων σκυροδέματος που εξάγονται από υπάρχουσες κατασκευές, είναι πιο χρήσιμο να συλλέγονται δεδομένα για δείγματα με $L/D = 1,0$. Οι τρέχουσες μέθοδοι υπολογισμού είναι ανεπαρκείς για να αντιπροσωπεύσουν τα ευρήματα της εφαρμογής ΙΕ για μικρούς, κοντούς κυλίνδρους, επειδή είναι θεμελιωδώς διαφορετικές από αυτές για μακριούς κυλίνδρους. Σε κυλίνδρους με μικρή τιμή του λόγου L/D , η συστολή ή η επέκταση του σχήματος του δείγματος προκαλεί μη αμελητέες ακτινικές μετατοπίσεις, οι οποίες εξαρτώνται από τον λόγο Poisson. Οι μετρημένες συχνότητες πρέπει να προσαρμοστούν ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση της λυγηρότητας. Οι Yao et al. (2022) αναγνώρισαν την ανάγκη για εφαρμογή διορθωτικών συντελεστών στην ΙΕ και πρότειναν την εξίσωση (37) για τη διόρθωση της συχνότητας [134]

$$f_{ie} = [(0,58L^{-1,01}) \cdot D - 0,060] \frac{0,92 \cdot C_p}{2D} \quad (37)$$

όπου f_{ie} δηλώνει τη διόρθωση συχνότητας, L δηλώνει το μήκος του δείγματος, D δηλώνει τη διάμετρο του δείγματος και C_p δηλώνει την ταχύτητα διάδοσης του κύματος. Οι Wang et al. (2012) επιβεβαίωσαν ότι υπάρχει ανάγκη εφαρμογής ενός διορθωτικού συντελεστή στη διαμήκη συχνότητα [11].

2.5.5 Πλεονεκτήματα της Impact Echo

Η μέθοδος Impact Echo έχει τυποποιηθεί μέσω του προτύπου ASTM C1383, το οποίο καθορίζει τη διαδικασία μέτρησης της ταχύτητας των κυμάτων P και του πάχους πλακοειδών κατασκευών από σκυρόδεμα [105]. Αυτή η τυποποίηση παρέχει ένα σαφές πλαίσιο για την εκτέλεση και την ερμηνεία των δοκιμών, διασφαλίζοντας τη συνέπεια και την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων.

Ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου Impact Echo είναι ο πλήρως μη καταστροφικός και μη επεμβατικός της χαρακτήρας. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι κατ'εξοχήν σημαντικό σε ευαίσθητες κατασκευές όπου καθώς και σε ιστορικά κτίρια και μνημεία όπου η διατήρηση της αυθεντικότητας είναι υψίστης σημασίας.

Επιπλέον, η μέθοδος IE επιτρέπει την πρόσβαση από μία μόνο πλευρά (single-side access), γεγονός που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα σε πολυάριθμες πρακτικές εφαρμογές [135]. Σε πολλές κατασκευές, όπως γέφυρες, σήραγγες, δεξαμενές και τοίχοι αντιστήριξης, η πρόσβαση είναι δυνατή μόνο από τη μία πλευρά του στοιχείου. Συμβατικές υπερηχητικές μέθοδοι, απαιτούν συχνά πρόσβαση από δύο πλευρές. Η IE ξεπερνά αυτούς τους περιορισμούς χρησιμοποιώντας την ανάλυση των ανακλώμενων τασικών κυμάτων που δημιουργούνται από μία μηχανική κρούση στην προσβάσιμη επιφάνεια.

Η ευκολία χρήσης αποτελεί άλλο ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου. Ο εξοπλισμός IE είναι σχετικά απλός και φορητός, αποτελούμενος από έναν μηχανικό κρουστήρα (συνήθως μια μεταλλική σφαίρα), έναν αισθητήρα μετατόπισης και μια μονάδα απόκτησης δεδομένων με λογισμικό ανάλυσης [126]. Η εκτέλεση μιας δοκιμής IE είναι γρήγορη και δεν απαιτεί εκτεταμένη προετοιμασία της επιφάνειας, εκτός από τον καθαρισμό της από σαθρά υλικά. Σύγχρονα συστήματα IE διαθέτουν ενσωματωμένο λογισμικό που επιτρέπει την άμεση επεξεργασία και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων επί τόπου, διευκολύνοντας τη λήψη αποφάσεων κατά τη διάρκεια της επιθεώρησης.

Το μεγαλύτερο βάθος ανίχνευσης της μεθόδου IE σε σύγκριση με άλλες τεχνικές NDT αποτελεί σημαντικό τεχνικό πλεονέκτημα. Ενώ πολλές υπερηχητικές μέθοδοι περιορίζονται σε σχετικά μικρά βάθη λόγω της εξασθένησης των υψίσυχων κυμάτων στο σκυρόδεμα, η IE μπορεί να ανιχνεύσει ελαττώματα και να μετρήσει πάχη σε σημαντικά μεγαλύτερα βάθη [135]. Αυτό οφείλεται στη χρήση χαμηλότερων συχνοτήτων που παράγονται από τη μηχανική κρούση, οι οποίες έχουν μεγαλύτερη ικανότητα διείσδυσης στο σκυρόδεμα.

Από οικονομική άποψη, η μέθοδος IE προσφέρει σημαντικά οφέλη κόστους – αποτελεσματικότητας. Ο εξοπλισμός είναι σχετικά οικονομικός και η ταχύτητα εκτέλεσης των δοκιμών επιτρέπει την κάλυψη μεγάλων περιοχών σε σύντομο χρόνο, μειώνοντας το κόστος εργασίας και την απαιτούμενη διάρκεια διακοπής λειτουργίας της κατασκευής. Σε περιπτώσεις όπως η επιθεώρηση καταστρώματος γέφυρας, η ταχύτητα της δοκιμής είναι κρίσιμη για την ελαχιστοποίηση της διακοπής της κυκλοφορίας. Επιπρόσθετα, η μη

καταστροφική φύση της μεθόδου εξαλείφει το κόστος επισκευών που συνδέονται με τις καταστροφικές δοκιμές.

2.5.6 Μειονεκτήματα της Impact Echo

Η εφαρμογή της ΙΕ για τον προσδιορισμό δυναμικών ελαστικών ιδιοτήτων, όπως ο E_d και ο ν_d , απαιτεί πολύ μεγαλύτερη εξειδίκευση από τον χειριστή σε σύγκριση με πολλές άλλες μη καταστρεπτικές δοκιμές. Σε αντίθεση για παράδειγμα με την UPV, όπου η κύρια απαίτηση είναι η σταθερή τοποθέτηση του αισθητήρα και η σύζευξη για να εξασφαλιστεί η ακριβής μέτρηση του χρόνου διαδρομής, η ΙΕ εξαρτάται σε κρίσιμο βαθμό από τη διατήρηση αναπαραγωγίμων συνθηκών πρόσκρουσης, την ακριβή ευθυγράμμιση των αισθητήρων, τη σωστή επιλογή των σημείων μέτρησης σε σχέση με τη γεωμετρία και την αυστηρή φασματική ερμηνεία για την αποφυγή εσφαλμένης αναγνώρισης ψευδών κορυφών ως ιδιοσυχνοτήτων [13]. Ένας βασικός λειτουργικός παράγοντας είναι η συνέπεια της πρόσκρουσης. Οι διακυμάνσεις στο μέγεθος της δύναμης ή στη διάρκεια της επαφής μεταβάλλουν το φάσμα συχνοτήτων που εισάγεται. Ανεπαρκείς υψηλές συχνότητες μπορούν να αποκρύψουν ιδιομορφές λεπτότερων δειγμάτων, ενώ υπερβολική κρούση μπορεί να υπερβεί το εύρος μέτρησης των αισθητήρων ή να ενισχύσει θόρυβο από ιδιομορφές που συνδέονται με επιφάνειακες ανακλάσεις [111]. Η εμπειρία οδηγεί τους χειριστές να ελέγχουν διαισθητικά τη μάζα του κρούσης, το ύψος πτώσης και το υλικό επαφής για να εξισορροπήσουν το εύρος του φάσματος με την καθαρότητα του σήματος, αποφεύγοντας ταυτόχρονα μη αντιπροσωπευτικές διεγέρσεις. Έτσι, η μεταβλητότητα που προκαλείται από τον χειριστή στη διέγερση ΙΕ μπορεί να γίνει ένας σημαντικός παράγοντας της επαναληψιμότητας, εάν δεν τυποποιηθεί προσεκτικά. Η σύζευξη και η τοποθέτηση των αισθητήρων παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο. Στις δοκιμές ΙΕ, τα επιταχυνσιόμετρα ή τα μηκυνσιόμετρα πρέπει να συνδέονται με ασφάλεια χωρίς να μειώνουν τα κρίσιμα πλάτη συντονισμού. Η κακή σύζευξη οδηγεί σε παραμορφωμένα φάσματα με μειωμένες ή μετατοπισμένες ιδιομορφές [136].

Το κύριο πρόβλημα, εντούτοις, είναι ότι η μετρούμενη συχνότητα συντονισμού εξαρτάται από τη λυγηρότητα του δείγματος και πρέπει να διορθωθεί. Ο συντελεστής διόρθωσης σχήματος (Shape Correction Factor – SCF) εξαρτάται από τον λόγο Poisson, ο οποίος αντανάκλα την ανάγκη να γνωρίζουμε εκ των προτέρων τον λόγο Poisson. Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας αναδεικνύει μια σημαντική κενή περιοχή αναφορικά με τη μελέτη κυλινδρικών δοκιμών με λόγο λυγηρότητας $\frac{L}{D} < 2$. Η πλειονότητα των ερευνητικών εργασιών που ασχολούνται με τον υπολογισμό δυναμικών ελαστικών σταθερών μέσω μη-καταστροφικών δοκιμών εστιάζει αποκλειστικά ή κατά κύριο λόγο σε δοκίμια τυπικών προδιαγραφών, ήτοι με $\frac{L}{D} = 2$. Ειδικότερα, το πρότυπο ASTM C215, το οποίο ορίζει τη διαδικασία μέτρησης ιδιοσυχνοτήτων εγκάρσιας, διαμήκους και στρεπτικής ταλάντωσης σε δοκίμια σκυροδέματος, καθορίζει ρητά ότι οι τύποι υπολογισμού εφαρμόζονται σε δοκίμια για τα οποία ο λόγος $\frac{L}{D} \geq 2$, ενώ τα βέλτιστα

αποτελέσματα επιτυγχάνονται στο εύρος $3 \leq \frac{L}{D} \leq 5$ [12]. Αναλόγως, το πρότυπο ASTM E1876 για τον προσδιορισμό δυναμικών ελαστικών σταθερών μέσω κρουστικής διέγερσης υιοθετεί παρόμοια δεσμευτική προϋπόθεση διαστάσεων [95]. Η κανονιστική αυτή απαίτηση αντανακλά τις θεωρητικές παραδοχές της μονοδιάστατης εξίσωσης κύματος, η ισχύς της οποίας προϋποθέτει ότι τα μήκη κύματος υπερβαίνουν σημαντικά τις εγκάρσιες διαστάσεις του δοκιμίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι άλλες ιδιομορφές μπορεί να παρεμβαίνουν στη συχνότητα συντονισμού εάν οι πλευρικές διαστάσεις δεν είναι πέντε ή έξι φορές μεγαλύτερες από τις διαστάσεις παράλληλες προς την πρόσκρουση [105], [116], [137]. Οι Nieves et al. (2002) όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2.5.3 μελέτησαν δοκίμια με $\frac{L}{D} < 2$, εξετάζοντας εύρος $0,1 \leq \frac{L}{D} \leq 3$. Ωστόσο, η ανάλυση αυτή αφενός δεν εστιάζει στη μέθοδο IE ως εργαλείο μη-καταστροφικής αξιολόγησης σκυροδέματος, αλλά στον προσδιορισμό ελαστικών σταθερών από τον λόγο των δύο χαμηλότερων αξονοσυμμετρικών ιδιοσυχνοτήτων, αφετέρου, οι ίδιοι οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι για εύρη λυγηρότητας $0,3 \leq \frac{L}{D} \leq 0,9$ και $1,4 \leq \frac{L}{D} \leq 1,8$ η μέθοδος παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες λόγω του ότι ο λόγος $\frac{\Omega_2}{\Omega_1}$ δεν αποτελεί μοναδική συνάρτηση του λόγου Poisson, αναδεικνύοντας τον εγγενώς πολύπλοκο χαρακτήρα των κοντύτερων κυλίνδρων.

Στην πράξη όμως ακόμη κι αν όλα υλοποιηθούν σωστά κατά τη διάρκεια της μέτρησης, η μετα-επεξεργασία ενέχει κινδύνους ερμηνείας που απαιτούν τεχνική επάρκεια λόγω της πολυπλοκότητας στην ερμηνεία των δεδομένων. Η αναγνώριση των ιδιομορφών έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα απαιτητική και ο ακριβής προσδιορισμός των κορυφών που αντιστοιχούν στη συχνότητα συντονισμού είναι μία από τις δυσκολίες αυτής της προσέγγισης. Ενώ οι Pandum et al. (2024) χρησιμοποίησαν τεχνητή νοημοσύνη και μεθόδους βαθιάς μάθησης για να αντιμετωπίσουν αυτό το ζήτημα, οι Malone et al. (2023) χρησιμοποίησαν μια πολυεπίπεδη μη γραμμική ανάλυση για να ανακαλύψουν τις θεμελιώδεις συχνότητες IE [138], [139].

2.5.7 Συσχέτιση με τη μονοαξονική αντοχή σε θλίψη

Πολλές μελέτες επιβεβαιώνουν μια σαφή συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων που προέρχονται από την IE (όπως η ταχύτητα του κύματος P και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας) και της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη.

Η κύρια προσέγγιση για την πρόβλεψη της αντοχής σε θλίψη (σ ή F_c) βασίζεται στη σχέση της με το E_d το οποίο υπολογίζεται από τις ταχύτητες των διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων. Για παράδειγμα, οι Hung et al. (2017) απέδειξαν ότι το δυναμικό μέτρο που υπολογίζεται από τις μετρήσεις IE μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της αντοχής σε θλίψη, με τα πειραματικά αποτελέσματα να υποστηρίζουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, ενώ από τα πειραματικά τους αποτελέσματα φαίνεται

ότι η πρόβλεψη της αντοχής με τη χρήση του δυναμικού μέτρου έναντι του στατικού γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια και πρότειναν τις εξισώσεις (38) και (39) [140].

$$E_d = 4,90\sigma + 5,5 \quad (38)$$

$$E_s = 4,83\sqrt{\sigma} - 7,10 \quad (39)$$

Η συσχέτιση μεταξύ E_d και αντοχής σε θλίψη βρέθηκε να είναι $R^2 = 0,80$, ενώ η αντίστοιχη συσχέτιση για E_s ήταν χαμηλότερη, στο $R^2 = 0,67$.

Οι Lee et al. (1997) για την εκτίμηση της αντοχής σκυροδέματος σε πρώιμη ηλικία, πρότειναν την εξίσωση (40) [46].

$$F_c = 3,88 \cdot 10^{-4} \cdot E_d^{3,182} \quad (40)$$

Ομοίως, οι Han και Park (2009) διαπίστωσαν ότι η σχέση μεταξύ του δυναμικού μέτρου και της αντοχής σε θλίψη αντικατοπτρίζει τη σχέση μεταξύ του δυναμικού και του στατικού συντελεστή, και πρότειναν εξισώσεις σχέσης για πρακτική εκτίμηση βασισμένη σε εμπειρικούς συντελεστές [33].

Ανεξάρτητα από τα χρησιμοποιούμενα πρότυπα (ACI, BS), οι τιμές που προβλέπονται από τις εμπειρικές εξισώσεις τείνουν να είναι ελαφρώς χαμηλότερες από τις πραγματικές εργαστηριακές μετρήσεις, παρέχοντας έτσι ένα ασφαλές περιθώριο στον δομικό σχεδιασμό [140].

2.6 Συμπέρασμα

Η αξιολόγηση των δυναμικών ελαστικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος μέσω μη καταστροφικών μεθόδων δοκιμών έχει προχωρήσει σημαντικά, με την UPV και την IE να αναδεικνύονται ως κορυφαίες τεχνικές σε αυτόν τον τομέα. Κάθε μέθοδος προσφέρει ξεχωριστά πλεονεκτήματα και αντιμετωπίζει εγγενείς περιορισμούς που διαμορφώνονται από τις φυσικές αρχές που χρησιμοποιούν και την ανομοιογενή φύση των υλικών του σκυροδέματος.

Η προτίμηση στη χρήση UPV έγκειται στην απλότητα της λειτουργίας της και στην ταχεία συλλογή δεδομένων, επιτρέποντας εκτεταμένη κάλυψη και έγκαιρη ανίχνευση μικροδομικών αλλαγών, όπως μικρορωγμές. Η εξάρτησή της όμως από τους χρόνους διέλευσης της άμεσης διαδρομής την καθιστά ευαίσθητη σε τοπικές ανομοιογένειες, διακυμάνσεις υγρασίας, παρουσία οπλισμού και επιφανειακές συνθήκες, με αποτέλεσμα σημαντική διασπορά στις μετρήσεις ταχύτητας. Επίσης ο ακριβής προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας προϋποθέτει την υπόθεση μιας αυθαίρετης τιμής λόγου Poisson που εισάγει περαιτέρω αβεβαιότητα. Αυτό εν τέλει αποτυπώνεται και στη μεγάλη διασπορά που εμφανίζουν οι εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος καταλήγοντας ότι η UPV δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μεμονωμένη δοκιμή για τον αξιόπιστο προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων

Σε αντιδιαστολή, η IE αξιοποιεί τα φαινόμενα συντονισμού που δημιουργούνται από μηχανικές κρούσεις για να καταγράψει τις συνολικές δονητικές καταστάσεις εντός των στοιχείων σκυροδέματος. Αυτή η επίδραση ογκομετρικού μέσου όρου μειώνει την

ευαισθησία σε τοπικές ανωμαλίες που επηρεάζουν δυσανάλογα τις μετρήσεις UPV, αποδίδοντας πιο συνεπείς και επαναλαμβανόμενες εκτιμήσεις των δυναμικών ελαστικών ιδιοτήτων. Οι εξελίξεις στην επεξεργασία σημάτων, έχουν βελτιώσει την ακρίβεια και την αξιοπιστία της ΙΕ, απομονώνοντας τις συχνότητες που επηρεάζονται λιγότερο από γεωμετρικές ανωμαλίες ή χαλύβδινο οπλισμό. Η δυνατότητα προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας απευθείας χωρίς την προηγούμενη γνώση του λόγου Poisson είναι πολύ ενδιαφέρουσα αλλά και πάλι υπάρχει ανάγκη διόρθωσης των αποτελεσμάτων καθώς αυτά επηρεάζονται από τη λυγνρότητα. Οι συντελεστές διόρθωσης εξαρτώνται όμως κι αυτοί με τη σειρά τους από το λόγο Poisson. Παρόλα αυτά σε αντίθεση με την UPV, η ΙΕ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μεμονωμένη δοκιμή για τον αξιόπιστο προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων υπό προϋποθέσεις (εκτέλεση δύο μετρήσεων διαμήκη – εγκάρσια).

Τέλος υπάρχει ένα ακόμα ερευνητικό κενό που έχει να κάνει με την τιμή λυγνρότητας $L/D = 1$. Αυτό είναι σημαντικό γιατί αυτός είναι ο τυπικός κύλινδρος που προκύπτει από μια συνήθη πυρηνοληψία. Η μείωση των θέσεων λήψης πυρήνων από μία κατασκευή μπορεί να προέλθει μόνο με την αύξηση της αξιοπιστίας του υπολογισμού των δυναμικών παραμέτρων μέσω των NDT.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση αναδεικνύει ότι η σχέση μεταξύ στατικών και δυναμικών παραμέτρων του σκυροδέματος είναι σύνθετη και επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων. Παρά την πρόοδο των NDT, παραμένουν κρίσιμα κενά που καθιστούν αναγκαία την παρούσα έρευνα, όπως αυτά εξειδικεύονται στους στόχους του Κεφαλαίου 1.3.

1. Αβεβαιότητα και Σφάλμα στη Μέθοδο UPV

Η τρέχουσα πρακτική στη μέθοδο UPV βασίζεται συχνά στην αυθαίρετη υπόθεση μιας τιμής για τον λόγο Poisson, γεγονός που εισάγει σημαντικά σφάλματα στον υπολογισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας.

•**Ερευνητική Ανάγκη:** Είναι απαραίτητη η ποσοτικοποίηση αυτού του σφάλματος (Στόχος 1) και η κριτική αξιολόγηση της UPV ως αυτόνομης μεθόδου (Στόχος 2), ώστε να προσδιοριστεί αν και υπό ποιες προϋποθέσεις μπορεί να παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα χωρίς τη χρήση καταστροφικών δοκιμών.

2. Περιορισμοί και Βελτίωση της Μεθόδου ΙΕ

Ενώ η μέθοδος Impact-Echo (ΙΕ) πλεονεκτεί λόγω της ογκομετρικής φύσης των μετρήσεών της, η αξιοπιστία της παραμένει δέσμια της ακριβούς ερμηνείας των φασμάτων συχνοτήτων και της επιρροής της γεωμετρίας.

•**Ερευνητική Ανάγκη:** Απαιτείται η διερεύνηση της δυνατότητας της ΙΕ να λειτουργήσει ως **αυτόνομη δοκιμή** (Στόχος 3) μέσω της ανάπτυξης νέων **διορθωτικών συντελεστών** που θα λαμβάνουν υπόψη τη μάζα του αισθητήρα και την αδράνεια του συστήματος (Στόχος 4), παράγοντες που συχνά αγνοούνται στη βιβλιογραφία.

3. Το Κενό της Γεωμετρίας και των Κοντών Κυλίνδρων

Η βιβλιογραφία εστιάζει κυρίως σε δοκίμια με λυγνρότητα $L/D > 2$, όμως στην πράξη οι πυρήνες που εξάγονται από υφιστάμενες κατασκευές έχουν συνήθως λόγο $L/D = 1$.

•**Ερευνητική Ανάγκη:** Η έρευνα πρέπει να καλύψει το κενό στην εφαρμογή της ΙΕ σε κοντούς κυλίνδρους (Στόχος 5), αναπτύσσοντας ένα αναλυτικό πλαίσιο που θα συνδέει τις μετρούμενες συχνότητες με τον λόγο Poisson σε αυτές τις ειδικές γεωμετρίες (Στόχος 6).

4. Ανάπτυξη Εμπειρικών Σχέσεων και Πρακτικών Πρωτοκόλλων

Υπάρχει μεγάλη διασπορά στις υπάρχουσες εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν τις NDT με τη θλιπτική αντοχή, γεγονός που περιορίζει την πρακτική τους εφαρμογή.

•**Ερευνητική Ανάγκη:** Είναι αναγκαία η πρόταση νέων, ακριβέστερων εμπειρικών σχέσεων που θα ενσωματώνουν παραμέτρους όπως το ειδικό βάρος (Στόχοι 7 & 8). Τελικός σκοπός είναι η διαμόρφωση πρακτικών συστάσεων (Στόχος 9) που θα επιτρέψουν στους μηχανικούς να ελαχιστοποιήσουν τη διασπορά των μετρήσεων στο πεδίο.

Συνοψίζοντας, η παρούσα διατριβή δεν επιδιώκει απλώς τη σύγκριση δύο μεθόδων, αλλά την **επιστημονική θεμελίωση ενός νέου πλαισίου αξιολόγησης** που θα επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος, μειώνοντας την ανάγκη για επεμβατικές πυρηνοληψίες.

Κεφάλαιο 3

3. Αριθμητική μεθοδολογία – Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

3.1 Ιστορική Εξέλιξη της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method–FEM) αποτελεί σήμερα το κυρίαρχο υπολογιστικό εργαλείο στη μηχανική για την αριθμητική επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων σε πεδία αυθαίρετης γεωμετρίας. Η γένεσή της εντοπίζεται στη δεκαετία του 1940, όταν ο Courant πρότεινε τη χρήση τριγωνικών τμηματικά γραμμικών συναρτήσεων για την προσέγγιση λύσεων ελλειπτικών μερικών διαφορικών εξισώσεων στο πλαίσιο της μεθόδου Rayleigh–Ritz [141]. Η εργασία αυτή υπέδειξε τη δυνατότητα υποδιαίρεσης ενός συνεχούς πεδίου σε πεπερασμένα υποπεδία εντός των οποίων η λύση προσεγγίζεται τοπικά, αλλά παρέμεινε σχετικά αδιάφορη για περισσότερο από μία δεκαετία, εν μέρει λόγω της έλλειψης υπολογιστικών μέσων που θα επέτρεπαν την πρακτική εφαρμογή της μεθόδου.

Η ανάπτυξη της μεθόδου σε πρακτικό εργαλείο μηχανικής πραγματοποιήθηκε κυρίως κατά τη δεκαετία του 1950, υπό την ώθηση της αεροναυπηγικής βιομηχανίας. Οι Turner et al. δημοσίευσαν το 1956 μία εργασία στην οποία παρουσίασαν τη μεθοδολογία σύνθεσης μητρώων ακαμψίας τριγωνικών στοιχείων για τη δομική ανάλυση πτερυγίων αεροσκαφών [142]. Η εργασία αυτή θεωρείται ευρέως ως η αφετηρία της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων ως μεθοδολογίας δομικής ανάλυσης. Η βασική ιδέα ήταν η αντικατάσταση μιας σύνθετης κατασκευής από ένα σύνολο απλών στοιχείων, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από ένα τοπικό μητρώο δυσκαμψίας, με τη μέθοδο της επαλληλίας να εξασφαλίζει τη συμβατότητα μεταξύ γειτονικών στοιχείων.

Ο όρος «πεπερασμένο στοιχείο» (finite element) εισήχθη επισήμως από τον Clough το 1960, σε εργασία που παρουσιάστηκε στο 2ο Συνέδριο Ηλεκτρονικών Υπολογισμών της ASCE στο Pittsburgh. Ο Clough γενίκευσε τη μεθοδολογία σε επίπεδα προβλήματα ελαστικότητας, σηματοδοτώντας τη μετάβαση της μεθόδου από την αεροναυτική στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού [143].

Κατά τη δεκαετία του 1960, η μαθηματική θεμελίωση της μεθόδου ενισχύθηκε ουσιαστικά μέσω των εργασιών των Argyris, 1954 [144] και Zienkiewicz et al. (1967) [145]. Ο Argyris ανέπτυξε τη μητρωϊκή διατύπωση των ενεργειακών θεωρημάτων για τη δομική ανάλυση, εισάγοντας τη συστηματική χρήση μητρώων δυσκαμψίας και ευκαμψίας. Η σειρά δημοσιεύσεών του στο Aircraft Engineering, αρχής γενομένης από το 1954, συνέβαλε καθοριστικά στη θεωρητική ωρίμανση της μεθόδου, μέσω της διατύπωσης της αρχής του ελαχίστου δυναμικού και της θεμελίωσης του δυαδικού πλαισίου (dual formulation) μεταξύ δυνάμεων και μετατοπίσεων. Οι Zienkiewicz et al. μέσω του

εμβληματικού συγγράμματός τους «The Finite Element Method», καθιέρωσαν τη μέθοδο ως γενικό εργαλείο επίλυσης πεδιακών προβλημάτων πέρα από τη δομική ανάλυση, συμπεριλαμβανομένων της μεταφοράς θερμότητας, της ρευστομηχανικής και της ηλεκτρομαγνητικής. Παράλληλα, η αυστηρή μαθηματική ανάλυση της σύγκλισης και του σφάλματος αναπτύχθηκε από τους Strang και Fix, θέτοντας τις βάσεις για τη σύγχρονη θεωρία προσέγγισης πεπερασμένων στοιχείων σε πλαίσιο χώρων Sobolev [146].

Η αλματώδης εξέλιξη της υπολογιστικής ισχύος κατά τις δεκαετίες 1970–1990 μετέτρεψε τη FEM από ακαδημαϊκό εργαλείο σε βιομηχανικό πρότυπο. Εμπορικά λογισμικά όπως τα NASTRAN, ANSYS, ABAQUS και PLAXIS κατέστησαν τη μέθοδο προσβάσιμη σε μηχανικούς πολλών ειδικοτήτων. Ιδιαίτερη ανάπτυξη σημειώθηκε στον τομέα της δυναμικής ανάλυσης, όπου η χρονική ολοκλήρωση της εξίσωσης κίνησης μέσω σχημάτων Newmark [147] και Wilson-θ [148] κατέστησε εφικτή τη μελέτη παροδικών φαινομένων, όπως η διάδοση ελαστικών κυμάτων, η σεισμική απόκριση κατασκευών και η δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους–κατασκευής. Η δεύτερη έκδοση του εγχειριδίου του Bathe αποτελεί κεντρικό έργο αναφοράς, ιδίως για τη μη γραμμική ανάλυση και τη διατύπωση ισοπαραμετρικών στοιχείων [149].

3.2 Θεωρητική Θεμελίωση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων

3.2.1 Γενική Αρχή της Μεθόδου

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στη διακριτοποίηση ενός συνεχούς πεδίου σε πεπερασμένο αριθμό υποπεριοχών (στοιχείων), εντός των οποίων η άγνωστη συνάρτηση (π.χ. η μετατόπιση) προσεγγίζεται μέσω κατάλληλων συναρτήσεων σχήματος (shape functions). Η διαδικασία αυτή μετατρέπει το πρόβλημα συνεχούς μέσου, το οποίο περιγράφεται από μερικές διαφορικές εξισώσεις (Μ.Δ.Ε.), σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων που επιλύεται αριθμητικά [145], [149].

Η θεωρητική βάση της μεθόδου εδράζεται στην αρχή των δυνατών έργων (Principle of Virtual Work) ή, ισοδυνάμως, στη μέθοδο σταθμικών υπολοίπων (Weighted Residual Method). Για ένα ελαστικό σώμα που καταλαμβάνει τον όγκο Ω και οριοθετείται από την επιφάνεια Γ , η αδύνατη μορφή της εξίσωσης ισορροπίας εκφράζεται με την (41) [145].

$$\int_{\Omega} \delta \varepsilon^T \cdot \sigma d\Omega = \int_{\Omega} \delta u^T \cdot b d\Omega + \int_{\Gamma} \delta u^T \cdot t d\Gamma \quad (41)$$

όπου $\delta \varepsilon$ είναι η δυνατή παραμόρφωση, σ ο τανυστής τάσεων, δu η δυνατή μετατόπιση, b οι ογκικές δυνάμεις και t οι επιφανειακές δυνάμεις. Η εξίσωση (41) αποτελεί τη βάση για τη διατύπωση της μεθόδου Galerkin, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στα εμπορικά λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων, συμπεριλαμβανομένου του PLAXIS [150].

Στο πλαίσιο της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, το πεδίο μετατοπίσεων εντός κάθε στοιχείου προσεγγίζεται μέσω των συναρτήσεων σχήματος N και των κομβικών μετατοπίσεων d όπως στην εξίσωση (42):

$$u(x, t) = N(x) \cdot d(t) \quad (42)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (42) στην αδύνατη μορφή (41) και εφαρμόζοντας τον καταστατικό νόμο $\sigma = D \cdot \varepsilon$, όπου D το μητρώο ελαστικότητας, προκύπτει το διακριτοποιημένο σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων. Για το στατικό πρόβλημα, το σύστημα λαμβάνει τη μορφή $K \cdot d = f$, όπου K το συνολικό μητρώο ακαμψίας και f το διάνυσμα των εξωτερικών φορτίων [145].

Ο Chopra εμβάθυνε στη σύνδεση μεταξύ ιδιομορφικής και χρονικής ανάλυσης, παρέχοντας ολοκληρωμένο πλαίσιο για τη σεισμική ανάλυση που εφαρμόζεται πλέον και στην αξιολόγηση δυναμικών ιδιοτήτων υλικών μέσω μεθόδων NDT [151]. Στο πεδίο της κυματικής διάδοσης σε ελαστικά στερεά, οι Achenbach και Graff παρέχουν τη θεωρητική βάση για την κατανόηση των μηχανισμών διάδοσης διαμηκών, εγκάρσιων και επιφανειακών κυμάτων. Η εξίσωση κίνησης Navier, η οποία για ομογενές ισότροπο μέσο εκφράζεται από την εξίσωση (43), αποτελεί τη βασική μερική διαφορική εξίσωση που επιλύεται αριθμητικά μέσω FEM στις αναλύσεις κυματικής διάδοσης.

$$(\lambda + G)\nabla(\nabla \cdot u) + G\nabla^2 u + \rho b = \rho \ddot{u} \quad (43)$$

Η FEM επιτρέπει τη μελέτη πολύπλοκων γεωμετριών και οριακών συνθηκών που δεν επιδέχονται αναλυτική επίλυση, γεγονός που την κάνει αναντικατάστατη στη μελέτη πεπερασμένων σωμάτων [152], [153].

3.2.2 Δυναμική Ανάλυση – Εξίσωση Κίνησης

Η δυναμική ανάλυση αποτελεί βασική συνιστώσα της παρούσας διατριβής, καθώς η δοκιμή ΙΕ βασίζεται εξ ορισμού στη δυναμική απόκριση του δοκιμίου υπό παροδική μηχανική διέγερση. Η εξίσωση κίνησης ενός διακριτοποιημένου συστήματος πεπερασμένων στοιχείων με n βαθμούς ελευθερίας εκφράζεται από την εξίσωση (44) [149], [154].

$$M \ddot{u}(t) + C \dot{u}(t) + K u(t) = F(t) \quad (44)$$

όπου M είναι το συνολικό μητρώο μάζας (mass matrix), C το μητρώο απόσβεσης (damping matrix), K το μητρώο ακαμψίας (stiffness matrix), $u(t)$ το διάνυσμα κομβικών μετατοπίσεων, $\dot{u}(t)$ το διάνυσμα κομβικών ταχυτήτων, $\ddot{u}(t)$ το διάνυσμα κομβικών επιταχύνσεων και $F(t)$ το διάνυσμα εξωτερικών δυναμικών φορτίων. Το μητρώο μάζας M υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (45) στην οποία ρ είναι η πυκνότητα του υλικού και N οι συναρτήσεις σχήματος. Το μητρώο ακαμψίας K υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (46) όπου B το μητρώο παραμόρφωσης-μετατόπισης (strain-displacement matrix) και D το μητρώο ελαστικότητας [151].

$$M = \int_{\Omega} \rho N^T N d\Omega \quad (45)$$

$$K = \int_{\Omega} B^T D B d\Omega \quad (46)$$

3.2.3 Απόσβεση Rayleigh

Οι Clough και Penzien συστηματοποίησαν την εφαρμογή της δυναμικής ανάλυσης σε κατασκευές, εισάγοντας μεταξύ άλλων το πλαίσιο της μοντελοποίησης απόσβεσης Rayleigh, η οποία αποτελεί μια ευρέως χρησιμοποιούμενη προσέγγιση στις αριθμητικές αναλύσεις δυναμικής και η οποία χρησιμοποιήθηκε και στις δυναμικές αναλύσεις της παρούσας διατριβής [147], [152], [154]. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το μητρώο απόσβεσης C συντίθεται ως γραμμικός συνδυασμός του μητρώου μάζας και του μητρώου ακαμψίας, σύμφωνα με την εξίσωση (47).

$$C = \alpha M + \beta K \quad (47)$$

όπου α και β είναι οι σταθερές Rayleigh. Ο συντελεστής α (σταθερά ανάλογη με τη μάζα) αποσβένει κυρίως τις χαμηλές συχνότητες, ενώ ο συντελεστής β (σταθερά ανάλογη με την ακαμψία) αποσβένει κυρίως τις υψηλές συχνότητες [147]. Ο λόγος απόσβεσης ξ για τη φυσική συχνότητα ω_n δίνεται από την εξίσωση (48).

$$\xi_n = \frac{\alpha}{2\omega_n} + \frac{\beta \omega_n}{2} \quad (48)$$

Η θεώρηση αυτή αποδείχθηκε χρήσιμη σε εφαρμογές όπου η πλαστικότητα του υλικού δεν αρκεί για να αποδώσει ρεαλιστική απόσβεση, όπως στις δοκιμές ελαστικού συντονισμού.

Στην παρούσα διατριβή, οι σταθερές Rayleigh επιλέχθηκαν ίσες με $\alpha = 10^{-5}$ και $\beta = 10^{-6}$, σε όλες στις αναλύσεις των Κεφαλαίων 4 και 6, ή με απευθείας επιλογή ενός χαμηλού $\xi = 2\%$, στις αναλύσεις του κεφαλαίου 5, ώστε να εισαχθεί ελάχιστη απόσβεση. Οι χαμηλές τιμές επιλέχθηκαν σκοπίμως, καθώς στη δοκιμή ακουστικού συντονισμού η απόσβεση του υλικού πρέπει να είναι ελάχιστη, ώστε να επιτρέπεται η αποτελεσματική ανάπτυξη στάσιμων κυμάτων και η σαφής εμφάνιση των κορυφών συντονισμού στο φάσμα συχνοτήτων. Υπερβολική απόσβεση θα οδηγούσε σε εξασθένηση των κορυφών και μείωση της φασματικής διακριτικής ικανότητας, δυσχεραίνοντας τον ακριβή προσδιορισμό των ιδιοσυχνοτήτων [126], [155].

Η επιλογή της απόσβεσης Rayleigh, αν και αριθμητικής φύσεως, κρίθηκε αναγκαία για τη σταθεροποίηση της δυναμικής ανάλυσης και την αποφυγή ψευδών αριθμητικών ταλαντώσεων υψηλής συχνότητας (numerical noise), χωρίς ωστόσο να αλλοιώνει τα φυσικά χαρακτηριστικά της δυναμικής απόκρισης [147], [152].

3.2.4 Χρονική Ολοκλήρωση – Μέθοδος Newmark

Η αριθμητική ολοκλήρωση της εξίσωσης κίνησης (44) στο πεδίο του χρόνου πραγματοποιείται μέσω σχημάτων βήμα-προς-βήμα (step-by-step time integration), τα οποία υπολογίζουν την απόκριση του συστήματος σε διακριτά χρονικά σημεία. Στο λογισμικό PLAXIS χρησιμοποιείται η μέθοδος Newmark, η οποία ανήκει στην οικογένεια των σχημάτων άμεσης ολοκλήρωσης (implicit integration schemes) [150].

Η μέθοδος Newmark βασίζεται στις εξισώσεις (49) και (50) προσέγγισης των μετατοπίσεων και ταχυτήτων στο χρονικό βήμα $t + \Delta t$ [147]

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \Delta t \dot{u}_t + [(1/2 - \gamma_N)\ddot{u}_t + \gamma_N \ddot{u}_{t+\Delta t}]\Delta t^2 \quad (49)$$

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + [(1 - \delta_N)\ddot{u}_t + \delta_N \ddot{u}_{t+\Delta t}]\Delta t \quad (50)$$

όπου γ_N και δ_N είναι οι παράμετροι Newmark. Για τις τιμές $\gamma_N = 1/4$ και $\delta_N = 1/2$, η μέθοδος ταυτίζεται με τη μέθοδο σταθερής μέσης επιτάχυνσης (constant average acceleration method), η οποία είναι άνευ αριθμητικής απόσβεσης (no algorithmic dissipation) και παρέχει απεριόριστα ευσταθή λύση (unconditionally stable), δηλαδή η ευστάθεια δεν εξαρτάται από το μέγεθος του χρονικού βήματος Δt [153]. Η ιδιότητα αυτή είναι κρίσιμη για προβλήματα κυματικής διάδοσης όπου η διατήρηση της ενέργειας είναι ουσιώδης και κατά συνέπεια σημαντική για τις αναλύσεις της παρούσας διατριβής, καθώς η ακρίβεια στον προσδιορισμό των ιδιοσυχνοτήτων εξαρτάται κρίσιμα από τη σωστή αποτύπωση της δυναμικής απόκρισης σε μεγάλο εύρος χρονικών βημάτων.

Παρά την απεριόριστη ευστάθεια, η ακρίβεια της λύσης υπαγορεύει τον περιορισμό του χρονικού βήματος. Στην παρούσα μελέτη, το χρονικό βήμα Δt επιλέχθηκε ώστε η μέγιστη καταγεγραμμένη συχνότητα f_{max} να ισούται τουλάχιστον με το πενταπλάσιο της αναμενόμενης πρώτης ιδιοσυχνότητας, σύμφωνα με την εξίσωση (51).

$$\Delta t = \frac{1}{2f_{max}} \quad (51)$$

Ο ανωτέρω περιορισμός διασφαλίζει ότι πληρείται το κριτήριο δειγματοληψίας Nyquist–Shannon, αποτρέποντας τη φασματική αλλοίωση (aliasing) και εξασφαλίζοντας επαρκή χρονική ανάλυση για την αποτύπωση τόσο της πρώτης όσο και της δεύτερης ιδιοσυχνότητας [112].

3.3 Διάδοση Ελαστικών Κυμάτων σε Πεπερασμένα Κυλινδρικά Σώματα

3.3.1 Θεωρητικό Πλαίσιο

Η θεωρία διάδοσης ελαστικών κυμάτων σε στερεά μέσα αποτελεί τη φυσική βάση τόσο της μεθόδου UPV όσο και της μεθόδου IE. Σε ένα ομογενές, ισότροπο και γραμμικώς ελαστικό μέσο άπειρου μήκους, τα ελαστικά κύματα διαδίδονται με δύο χαρακτηριστικές ταχύτητες: την ταχύτητα των διαμηκών κυμάτων V_p και την ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων V_s . Στην περίπτωση σώματος πεπερασμένων διαστάσεων, τα κύματα υπόκεινται σε πολλαπλές ανακλάσεις στα ελεύθερα όρια, δημιουργώντας στάσιμα κύματα και φαινόμενα συντονισμού [126], [155].

Η ακριβής λύση για αξονοσυμμετρικά κύματα σε άπειρο ισότροπο κυκλικό κύλινδρο διατυπώθηκε ανεξάρτητα από τον Rochhammer το 1876 και τον Chree το 1889 [112], [124]. Η εξίσωση Rochhammer–Chree αποτελεί υπερβατική εξίσωση σε όρους συναρτήσεων Bessel που δεν επιδέχεται κλειστή αναλυτική λύση. Η αριθμητική επίλυσή

της αποκαλύπτει ότι ακόμη και ο θεμελιώδης τρόπος ταλάντωσης παρουσιάζει διασπορά: η ταχύτητα φάσης εξαρτάται από τη συχνότητα [152], [153].

3.3.2 Ιδιοσυχνότητες Κυλινδρικών Δοκιμίων

Η θεωρία Love αποτελεί μια κλασική αλλά απλοποιημένη προσέγγιση, βασιζόμενη σε παραδοχές (ισοεπίπεδες διατομές, αμελητέα ακτινική διάτμηση) που περιορίζουν την ακρίβειά της σε κοντούς κυλίνδρους. Ο συντελεστής Love, εξίσωση (52) αποδίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα για κυλίνδρους μεγάλης λυγηρότητας ($L/D > 3$), παρόλα αυτά, παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις για κοντούς κυλίνδρους ($L/D \leq 2,0$), ιδίως για υψηλές τιμές του λόγου Poisson [19], [116].

$$\frac{f_{\text{infinite}}}{f_m} = \frac{1}{1 - \frac{\pi^2}{16} \cdot \nu^2 \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^{-2}} \quad (52)$$

Οι Mindlin και McNiven ανέπτυξαν ένα σύστημα προσεγγιστικών μονοδιάστατων εξισώσεων για αξονοσυμμετρικές ταλαντώσεις, τη λεγόμενη «θεωρία τριών ιδιομορφών» (three-mode theory) για κυλινδρικές ράβδους, η οποία λαμβάνει υπόψη τρεις συνιστώσες μετατόπισης (αξονική, ακτινική και διατμητική) και αποδίδει με σημαντικά μεγαλύτερη ακρίβεια τις σχέσεις διασποράς σε σύγκριση με τη μονοδιάστατη θεωρία Love [117]. Η θεωρία αυτή αποτελεί ενδιάμεση λύση μεταξύ της απλοποιημένης θεωρίας Love και της πλήρους θεωρίας Rochhammer–Chree, και χρησιμοποιείται ως αναλυτικό σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση αριθμητικών μοντέλων FEM.

Η αριθμητική προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία παρέχει σημαντικά ακριβέστερα αποτελέσματα, καθώς λαμβάνει υπόψη το πλήρες τρισδιάστατο κυματικό πεδίο. Η πρώτη ιδιοσυχνότητα διαμήκους ταλάντωσης ενός κυλίνδρου μήκους L με ελεύθερα άκρα δίνεται από τη θεωρία της άπειρης ράβδου από την εξίσωση (62).

$$f_1 = \frac{V_c}{2L} \quad (53)$$

Η εξίσωση (62) ισχύει με ικανοποιητική ακρίβεια για κυλίνδρους μεγάλης λυγηρότητας ($L/D > 5$), όπου ο κύλινδρος συμπεριφέρεται πρακτικά ως μονοδιάστατη ράβδος, ενώ για μικρότερες τιμές λυγηρότητας, η αλληλεπίδραση μεταξύ αξονικών και ακτινικών ιδιομορφών οδηγεί σε σημαντική απόκλιση της πραγματικής ιδιοσυχνότητας από τη θεωρητική [11], [156]. Η απόκλιση αυτή ποσοτικοποιείται μέσω του διορθωτικού συντελεστή σχήματος (Shape Correction Factor–SCF), ο οποίος αναπτύσσεται αριθμητικά στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας διατριβής.

3.4 Υπολογιστικό Περιβάλλον – Λογισμικό PLAXIS

3.4.1 Γενική Περιγραφή

Για τις αριθμητικές αναλύσεις της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS, ανεπτυγμένο από την Bentley Systems. Το PLAXIS

αποτελεί ένα εξειδικευμένο λογισμικό που σχεδιάστηκε αρχικά για γεωτεχνικές εφαρμογές, αλλά οι δυνατότητες δυναμικής ανάλυσης και αξονοσυμμετρικής μοντελοποίησης το καθιστούν ιδιαιτέρως κατάλληλο για την προσομοίωση της διάδοσης ελαστικών κυμάτων σε κυλινδρικά δοκίμια.

Στην παρούσα μελέτη αξιοποιήθηκαν δύο εκδόσεις του λογισμικού. Η έκδοση PLAXIS 2D χρησιμοποιήθηκε για τις αξονοσυμμετρικές αναλύσεις που αφορούσαν στον προσδιορισμό του διορθωτικού συντελεστή σχήματος – SCF (Κεφάλαιο 4) και στη διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης της IE ως αυτόνομης δοκιμής για τον προσδιορισμό του δυναμικού λόγου Poisson – IE single test (Κεφάλαιο 6), ενώ η έκδοση PLAXIS 3D χρησιμοποιήθηκε για τις τρισδιάστατες αναλύσεις υπό στρεπτική κρούση, οι οποίες ήταν αναγκαίες για τον προσδιορισμό των διορθωτικών συντελεστών μάζας – MCF και αδράνειας αισθητήρα – ICF (Κεφάλαιο 5).

Το λογισμικό PLAXIS αποτελείται από τέσσερις ανεξάρτητες εφαρμογές (modules): (α) την εφαρμογή εισαγωγής δεδομένων (Input), στην οποία ορίζονται η γεωμετρία, οι μηχανικές παράμετροι των υλικών, οι οριακές συνθήκες και τα εξωτερικά φορτία, (β) την εφαρμογή υπολογισμών (Calculation), όπου καθορίζονται οι φάσεις ανάλυσης και εκτελούνται οι αριθμητικές επιλύσεις, (γ) την εφαρμογή επισκόπησης αποτελεσμάτων (Output), για τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων, και (δ) την εφαρμογή εξαγωγής αποτελεσμάτων (Curves), για τη σχεδίαση χρονοϊστοριών και άλλων καμπυλών.

3.4.2 Τύποι Πεπερασμένων Στοιχείων

Σε όλες τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία 15 κόμβων, τα οποία αποτελούν τον υψηλότερης τάξεως τύπο στοιχείων που διατίθεται στο PLAXIS. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούν πολυωνυμικές συναρτήσεις σχήματος τετάρτης τάξεως (quartic interpolation), παρέχοντας εξαιρετική ακρίβεια στην αποτύπωση τόσο του πεδίου μετατοπίσεων όσο και του πεδίου τάσεων. Η υψηλή τάξη παρεμβολής είναι πολύ σημαντική σε δυναμικές αναλύσεις, καθώς επιτρέπει την ακριβή αποτύπωση κυμάτων με μήκος κύματος συγκρίσιμο με τις διαστάσεις των στοιχείων, μειώνοντας τα φαινόμενα αριθμητικής διασποράς (numerical dispersion) που θα αλλοίωναν τις υπολογιζόμενες ιδιοσυχνότητες.

3.4.3 Αξονοσυμμετρική Μοντελοποίηση

Η αξιοποίηση του αξονοσυμμετρικού μοντέλου αποτελεί βασική στρατηγική της παρούσας μελέτης, καθώς τα κυλινδρικά δοκίμια παρουσιάζουν πλήρη συμμετρία ως προς τον κατακόρυφο άξονά τους. Η αξονοσυμμετρία επιτρέπει τη μοντελοποίηση μόνο μιας ακτινικής τομής του κυλίνδρου (ήμισυ της κυκλικής διατομής), ενώ η τρισδιάστατη συμπεριφορά ανακατασκευάζεται αυτομάτως μέσω περιστροφής του δισδιάστατου μοντέλου γύρω από τον άξονα συμμετρίας. Η προσέγγιση αυτή μειώνει δραστικά τον υπολογιστικό χρόνο και τις απαιτήσεις μνήμης, επιτρέποντας ταυτόχρονα τη χρήση πολύ

πυκνότερων δικτύων πεπερασμένων στοιχείων σε σύγκριση με ένα πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο.

Στο αξονοσυμμετρικό μοντέλο, οι μετατοπίσεις στον άξονα συμμετρίας περιορίζονται στην κατακόρυφη διεύθυνση (δηλαδή, οι οριζόντιες μετατοπίσεις κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα τίθενται ίσες με μηδέν), ενώ όλες οι υπόλοιπες επιφάνειες παραμένουν ελεύθερες, προσομοιώνοντας έτσι κύλινδρο ελεύθερο κατά τη δοκιμή ΙΕ.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η αξονοσυμμετρική μοντελοποίηση δεν μπορεί να αποδώσει μη αξονοσυμμετρικές ιδιομορφές, όπως καμπτικές ή στρεπτικές, και για τον λόγο αυτό οι αναλύσεις του Κεφαλαίου 5 (υπό στρεπτική κρούση) πραγματοποιήθηκαν σε πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο με χρήση του PLAXIS 3D.

3.5 Καταστατικό Μοντέλο Υλικού

Σε όλες τις αριθμητικές αναλύσεις της παρούσας μελέτης, το υλικό μοντελοποιήθηκε ως γραμμικώς ελαστικό, ισότροπο και μη πορώδες. Η παραδοχή της γραμμικής ελαστικότητας βασίζεται στο γεγονός ότι η δοκιμή ακουστικού συντονισμού περιλαμβάνει απειροελάχιστες παραμορφώσεις, πολύ μικρότερες του ελαστικού ορίου οποιουδήποτε δομικού υλικού, ώστε ο νόμος του Hooke να ισχύει πλήρως [146], [152]. Ο καταστατικός νόμος εκφράζεται μέσω του τανυστή ελαστικότητας τετάρτης τάξεως, ο οποίος για ισότροπα υλικά παραμετροποιείται πλήρως με δύο ανεξάρτητες σταθερές, τις σταθερές Lamé λ και G , ή ισοδυνάμως, τις παραμέτρους E και ν .

Η ρύθμιση μη πορώδους συμπεριφοράς (non-porous behaviour) στο PLAXIS σημαίνει ότι δεν λαμβάνονται υπόψη αρχικές ούτε υπερπιέσεις πόρων. Η ρύθμιση αυτή είναι κατάλληλη για τη μοντελοποίηση ξηρών δοκιμών στερεών υλικών, όπως το σκυρόδεμα υπό εργαστηριακές συνθήκες, ο χάλυβας και το αλουμίνιο. Συνδυαστικά, το γραμμικό ελαστικό μοντέλο με μη πορώδη συμπεριφορά αντιπροσωπεύει τον νόμο του Hooke σε τρισδιάστατη μορφή, αποδίδοντας την ισότροπη γραμμική ελαστική συμπεριφορά.

Στις αναλύσεις που αφορούσαν σκυρόδεμα, οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με χαμηλή αυθαίρετη ταχύτητα $V_p = 200 \text{ m/s}$ (στις αναλύσεις για τον SCF) και $V_s = 100 \text{ m/s}$ (στις αναλύσεις για την ΙΕ – single test), ώστε τα αποτελέσματα να εκφράζονται σε κανονικοποιημένη μορφή και να είναι ανεξάρτητα του απόλυτου μεγέθους των ελαστικών σταθερών. Η κανονικοποίηση αυτή επιτρέπει τη γενίκευση των αποτελεσμάτων σε οποιοδήποτε ομογενές, ισότροπο υλικό, καθώς οι διορθωτικοί συντελεστές εξαρτώνται μόνο από τη λυγηρότητα L/D και τον λόγο Poisson ν , και όχι από τις απόλυτες τιμές των ελαστικών σταθερών.

Στις αναλύσεις του Κεφαλαίου 5, που αφορούσαν την προσομοίωση δοκιμών χάλυβα και αλουμινίου, χρησιμοποιήθηκαν ρεαλιστικές τιμές ελαστικών σταθερών, $V_p = 5910 \text{ m/s}$ και $\nu = 0,285$ για τον χάλυβα, $V_p = 6410 \text{ m/s}$ και $\nu = 0,341$ για το αλουμίνιο. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στα πραγματικά δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική επαλήθευση (Κεφάλαιο 7).

3.6 Παραμετροποίηση και Στρατηγική Αναλύσεων

3.6.1 Μέγεθος Δικτύου Πεπερασμένων Στοιχείων

Η πυκνότητα του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί κρίσιμη παράμετρο στις δυναμικές αναλύσεις, καθώς καθορίζει τη μέγιστη συχνότητα που μπορεί να αποτυπωθεί με ικανοποιητική ακρίβεια. Ο γενικός κανόνας απαιτεί τουλάχιστον 8–10 στοιχεία ανά μήκος κύματος για την αποφυγή αριθμητικής διασποράς [154]. Στην παρούσα μελέτη, η πυκνότητα του δικτύου σε κάθε ανάλυση ρυθμίστηκε ώστε η μέγιστη επιθυμητή συχνότητα f_{max} να ισούται τουλάχιστον με το πενταπλάσιο της αναμενόμενης πρώτης ιδιοσυχνότητας f_1 . Αυτό εξασφαλίζει ότι τόσο η πρώτη όσο και η δεύτερη ιδιοσυχνότητα αποτυπώνονται με επαρκή ακρίβεια, χωρίς να αυξάνεται υπερβολικά ο υπολογιστικός χρόνος. Επιπροσθέτως, το χρονικό βήμα Δt επιλέχθηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος, το κύμα να μη διανύει μεγαλύτερη απόσταση από τη μικρότερη διάσταση του πεπερασμένου στοιχείου. Αυτός ο περιορισμός, γνωστός και ως κριτήριο Courant–Friedrichs–Lewy (CFL), αποτελεί αναγκαία συνθήκη για τη χωρική ακρίβεια της δυναμικής επίλυσης [157].

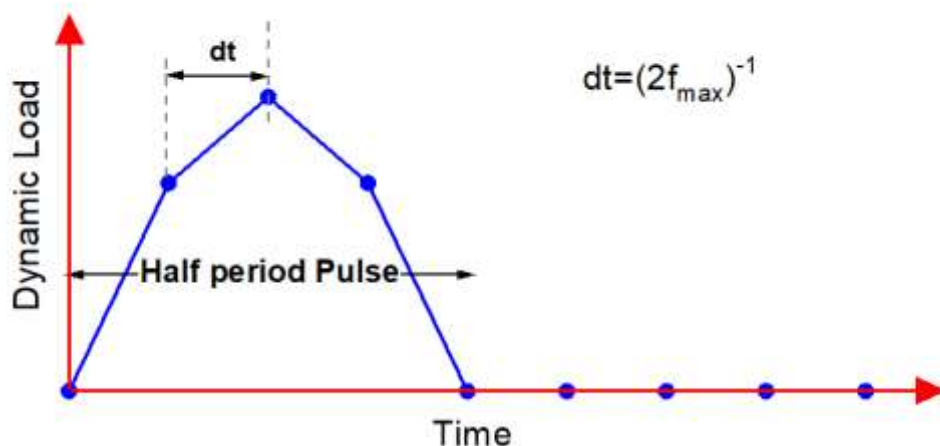
Για τις τρισδιάστατες αναλύσεις (Κεφάλαιο 5), η πυκνότητα δικτύου ορίστηκε σε περίπου 16 στοιχεία ανά τετραγωνικό εκατοστό, η οποία εξασφαλίζει επαρκή χωρική ανάλυση για τις εξεταζόμενες συχνότητες.

3.6.2 Μοντελοποίηση Δυναμικής Διέγερσης

Η μηχανική κρούση στη δοκιμή IE μοντελοποιήθηκε μέσω ημιτονοειδούς παλμού ημιπεριόδου (half-sine pulse), εφαρμοζόμενου στο κέντρο μίας ελεύθερης επιφάνειας του κυλίνδρου. Ο παλμός αυτός αντιπροσωπεύει με ικανοποιητική ακρίβεια τη μηχανική πρόσκρουση μιας χαλύβδινης σφαίρας, η οποία αποτελεί τον τυπικό τρόπο διέγερσης στη δοκιμή IE. Η χρονική διάρκεια του παλμού t_c σχετίζεται με το εύρος ζώνης της ενέργειας κρούσης, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας περιέχεται σε συχνότητες κάτω από $1,5/t_c$ [126]. Η συχνότητα του παλμού διέγερσης ρυθμίστηκε σε κάθε ανάλυση ώστε η τιμή της να προσεγγίζει την αναμενόμενη πρώτη ιδιοσυχνότητα. Αυτή η επιλογή εξασφαλίζει τη βέλτιστη ενεργειακή σύζευξη μεταξύ της διέγερσης και της θεμελιώδους ιδιομορφής, μεγιστοποιώντας το πλάτος του φάσματος ελεύθερης ταλάντωσης στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Το χρονικό βήμα της δυναμικής ανάλυσης, προκύπτει ως το ήμισυ της μέγιστης συχνότητας ως εξής $\Delta t = \frac{1}{2 \cdot f_{max}}$. Το χρονικό βήμα επιλέχθηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε κατά τη διάρκεια ενός βήματος το κύμα να μη διανύει μεγαλύτερη απόσταση από το μικρότερο μέγεθος του πεπερασμένου στοιχείου. Η Εικόνα 22 απεικονίζει ενδεικτικό παράδειγμα του εφαρμοζόμενου παλμού.

Στις αναλύσεις υπό στρεπτική κρούση (Κεφάλαιο 5), η διέγερση εφαρμόστηκε ως ζεύγος δυνάμεων (couple) παλμού ημιπεριόδου, εφαρμοζόμενου εγκάρσια προς τον άξονα του δοκιμίου.



Εικόνα 22: Ο αρμονικός παλμός της διέγερσης

3.6.3 Ορισμός Υπολογιστικών Φάσεων

Σε κάθε αριθμητική ανάλυση, η δυναμική επίλυση οργανώθηκε σε πέντε διαδοχικές υπολογιστικές φάσεις, ο σχεδιασμός των οποίων αποσκοπούσε στην ελαχιστοποίηση των αριθμητικών τεχνουργημάτων (numerical artifacts) και στη βελτιστοποίηση της φασματικής ανάλυσης:

Φάση 1 – Μηδενική φάση (Quiet Zone): Φάση 10 χρονικών βημάτων χωρίς ενεργό δυναμικό φορτίο. Η φάση αυτή εξασφαλίζει τη σωστή αρχικοποίηση του συστήματος και αποτρέπει την εισαγωγή ψευδών φασματικών συνιστωσών στον υπολογισμό των φασμάτων Fourier.

Φάση 2 – Διέγερση: Εφαρμογή του ημιτονοειδούς παλμού ημιπεριόδου. Ο αριθμός χρονικών βημάτων αυτής της φάσης καθορίζεται από τη χρονική διάρκεια του παλμού διαιρούμενη με το χρονικό βήμα Δt .

Φάση 3 – Ελεύθερη ταλάντωση (N= 512): Η πρώτη φάση ελεύθερης ταλάντωσης με 512 χρονικά βήματα, κατά την οποία το δοκίμιο ταλαντώνεται ελεύθερα χωρίς εξωτερική διέγερση. Ο αριθμός $512 = 2^9$ βημάτων επιλέχθηκε ώστε να επιτρέπει την αποτελεσματική εφαρμογή του αλγορίθμου FFT.

Φάση 4 – Ελεύθερη ταλάντωση (N= 1024): Δεύτερη φάση ελεύθερης ταλάντωσης με διπλάσιο αριθμό βημάτων ($1024 = 2^{10}$), η οποία παρέχει διπλάσια φασματική ανάλυση στο πεδίο συχνοτήτων. Αυτή η φάση χρησιμοποιήθηκε σε περιπτώσεις όπου η φασματική διακριτική ικανότητα της Φάσης 3 δεν επαρκούσε για τον σαφή διαχωρισμό κοντινών ιδιοσυχνοτήτων.

Φάση 5 – Ελεύθερη ταλάντωση (N= 2048): Τρίτη φάση ελεύθερης ταλάντωσης με $2048 = 2^{11}$ βήματα, η οποία παρέχει τη μέγιστη φασματική ανάλυση.

Για την ελαχιστοποίηση του αριθμητικού σφάλματος, κάθε χρονικό βήμα υποδιαιρέθηκε σε τουλάχιστον 10 υποβήματα (substeps), εξασφαλίζοντας τη σύγκλιση της επαναληπτικής διαδικασίας σε κάθε βήμα της δυναμικής ανάλυσης.

3.6.4 Εξαγωγή και Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

Μετά την ολοκλήρωση κάθε ανάλυσης, εξήχθη η χρονοϊστορία των επιταχύνσεων σε επιλεγμένους κόμβους του μοντέλου. Για τις αναλύσεις του SCF, ο κόμβος καταγραφής τοποθετήθηκε στο κέντρο της ελεύθερης επιφάνειας του κυλίνδρου, ενώ στις αναλύσεις της IE – single test καταγράφηκαν επιπροσθέτως επιταχύνσεις σε σημεία κατά μήκος της πλευρικής (κατακόρυφης) ελεύθερης επιφάνειας.

Οι χρονοϊστορίες επιταχύνσεων μετασχηματίστηκαν στο πεδίο συχνοτήτων μέσω του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform–FFT). Ο αλγόριθμος FFT μετατρέπει ένα σήμα N σημείων στο πεδίο του χρόνου σε $N/2 + 1$ φασματικές γραμμές, με φασματική ανάλυση (frequency resolution) $\Delta f = \frac{1}{(N \cdot \Delta t)}$.

Από τα φάσματα πλάτους (amplitude spectra), προσδιορίστηκαν οι κυρίαρχες ιδιοσυχνότητες, αντιστοιχούσες στις κορυφές μέγιστου πλάτους. Η πρώτη κυρίαρχη ιδιοσυχνότητα f_1 χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των διορθωτικών συντελεστών.

3.7 Ανάλυση Ευαισθησίας – Μεθοδολογία OAT

Η μεθοδολογία ανάλυσης ευαισθησίας που υιοθετήθηκε στην παρούσα μελέτη είναι τύπου «One-factor-At-a-Time» (OAT), σύμφωνα με την οποία μεταβάλλεται μία μόνο εισαγόμενη παράμετρος κάθε φορά, ενώ οι υπόλοιπες παραμένουν σταθερές [158]. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη μονοσήμαντη αντιστοίχιση κάθε μεταβολής στη εξαγόμενη μεταβλητή (ιδιοσυχνότητα) με τη μεταβλητή εισόδου (λυγηρότητα ή λόγος Poisson), αποσαφηνίζοντας τον ρόλο κάθε παράγοντα.

Οι κύριες παράμετροι που μεταβλήθηκαν στις αναλύσεις ήταν: (α) η λυγηρότητα L/D , η οποία κυμάνθηκε από 0,7 έως 5,0 (με σταθερή διάμετρο $D = 0,1 \text{ m}$), και (β) ο λόγος Poisson ν , ο οποίος κυμάνθηκε από 0,10 έως 0,49, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα τιμών που αντιπροσωπεύει τόσο το σκυρόδεμα ($\nu \approx 0,15 - 0,25$), τον χάλυβα ($\nu \approx 0,27 - 0,30$), το αλουμίνιο ($\nu \approx 0,33$) όσο και πλησιάζοντας το θεωρητικό άνω όριο ασυμπίεστων υλικών ($\nu = 0,50$).

Το κατώτερο όριο λυγηρότητας ($L/D = 0,7$) ορίστηκε με βάση τη φυσική σκοπιμότητα, καθώς για μικρότερες τιμές η καταγραφή της διάδοσης του κύματος καθίσταται πολύπλοκη λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων. Το ανώτερο όριο ($L/D = 5,0$) αντιστοιχεί στην τιμή πέρα της οποίας ο κύλινδρος συμπεριφέρεται πρακτικά ως «άπειρη ράβδος», δηλαδή η ιδιοσυχνότητά του ταυτίζεται με τη θεωρητική τιμή της εξίσωσης (62). Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στο εύρος $L/D = 0,8 - 2,0$, όπου η βιβλιογραφία παρουσιάζει σημαντικά κενά και η πρακτική αξία είναι μεγίστη, δεδομένου ότι ο τυπικός πυρήνας σκυροδέματος κατά την πυρηνοληψία έχει $L/D \approx 1,0$.

3.8 Συμπέρασμα

Η μεθοδολογία που περιγράφηκε αποτελεί τη βάση για τρεις διακριτές αναλυτικές εφαρμογές που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια:

Στο Κεφάλαιο 4, εφαρμόζονται 72 αξονοσυμμετρικές αναλύσεις 2D για τον προσδιορισμό του διορθωτικού συντελεστή σχήματος (SCF) ως συνάρτηση της λυγηρότητας L/D και του λόγου Poisson ν .

Στο Κεφάλαιο 5, πραγματοποιούνται 24 τρισδιάστατες αναλύσεις υπό διαμήκη και στρεπτική κρούση για τον προσδιορισμό των διορθωτικών συντελεστών μάζας αισθητήρα (MCF) και αδράνειας (ICF) σε δοκίμια χάλυβα και αλουμινίου.

Στο Κεφάλαιο 6, διενεργούνται 60 αξονοσυμμετρικές αναλύσεις 2D για τη διερεύνηση της δυνατότητας αυτόνομου προσδιορισμού του δυναμικού λόγου Poisson από τη μέθοδο IE μέσω δύο εναλλακτικών μεθοδολογιών.

Η θεωρητική θεμελίωση και η μεθοδολογική προσέγγιση που υιοθετήθηκε για τις αριθμητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων της παρούσας διατριβής καθώς και οι βασικές παραδοχές που υιοθετήθηκαν, δηλαδή η γραμμική ελαστικότητα, η ισοτροπία και η μη πορώδης συμπεριφορά, ανταποκρίνονται στις φυσικές συνθήκες της δοκιμής ακουστικού συντονισμού, κατά την οποία οι παραμορφώσεις παραμένουν εντός του γραμμικώς ελαστικού πεδίου. Αυτό εξασφαλίζει ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα Κεφάλαια 4, 5 και 6 είναι αναπαραγώγιμα και ότι η αξιοπιστία τους έχει τεκμηριωθεί μέσω εσωτερικών ελέγχων σύγκλισης (convergence checks) και σύγκρισης με αναλυτικές λύσεις όπου αυτές είναι διαθέσιμες.

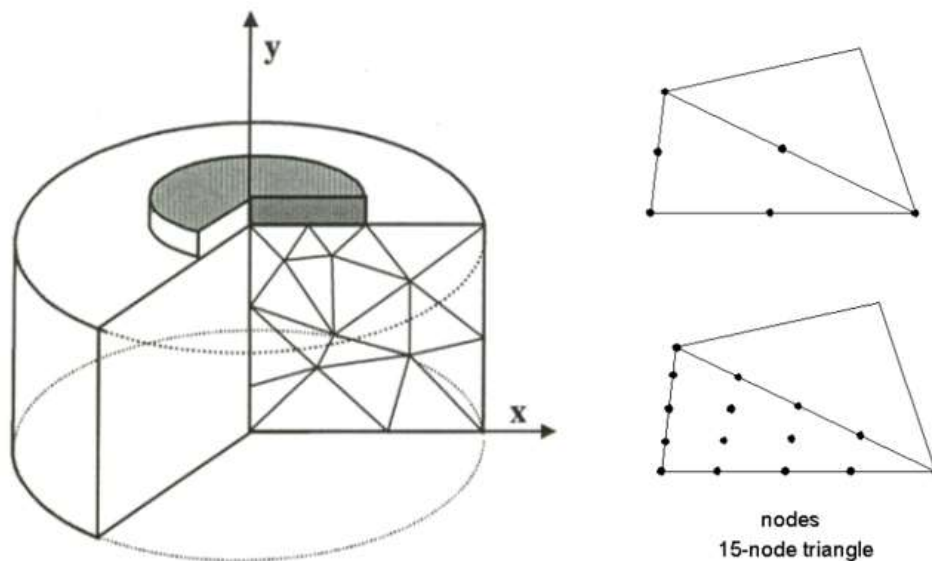
Κεφάλαιο 4

4. Ανάπτυξη διορθωτικών συντελεστών σχήματος

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα εκτέλεσης της αριθμητικής προσομοίωσης της δοκιμής ακουστικού συντονισμού με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Σκοπός των διενεργηθεισών αναλύσεων είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης της γεωμετρίας των δοκιμίων στον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης κύματος κατά μήκος της ράβδου.

Συνολικά διενεργήθηκαν 72 αριθμητικές προσομοιώσεις για την αξιολόγηση της επίδρασης του σχήματος των δοκιμίων στον προσδιορισμό του λόγου Poisson. Για την συγκεκριμένη αριθμητική προσομοίωση της δοκιμής ακουστικού συντονισμού χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS 2D της Bentley Systems, το οποίο επιτρέπει τη δημιουργία αξονοσυμμετρικού μοντέλου γύρω από κεντρικό άξονα, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 23.



Εικόνα 23: Αξονοσυμμετρικό προσομοίωμα.

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν πεπερασμένα στοιχεία 15 κόμβων για τη δημιουργία μοντέλων με τις ακόλουθες παραμέτρους:

- **Λόγος ύψος/διάμετρος:**

$L/D = 0,7, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8, 2,0, 2,5, 3,0, 4,0$ και $5,0$

- **Λόγος Poisson**

$\nu = 0,20, 0,25, 0,30, 0,36, 0,40$ και $0,45$

Σε όλες τις προσομοιώσεις, η διάμετρος παρέμεινε σταθερή και ίση με 0,1 m.

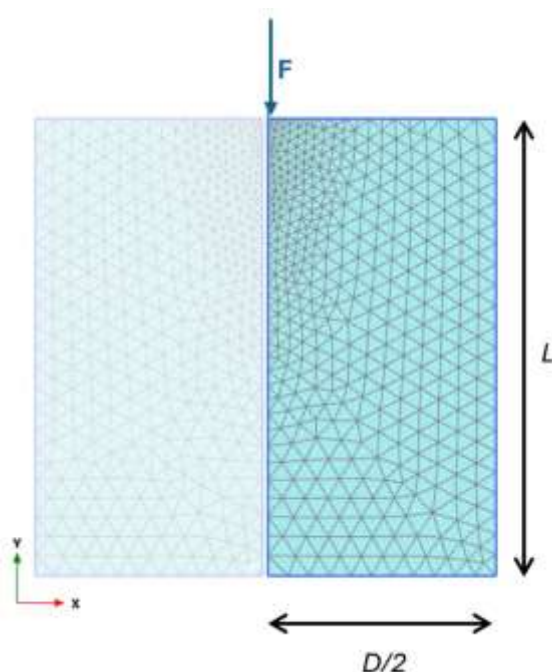
4.2 Αριθμητική Προσομοίωση με Πεπερασμένα Στοιχεία

4.2.1 Μοντελοποίηση γεωμετρίας και οριακών συνθηκών

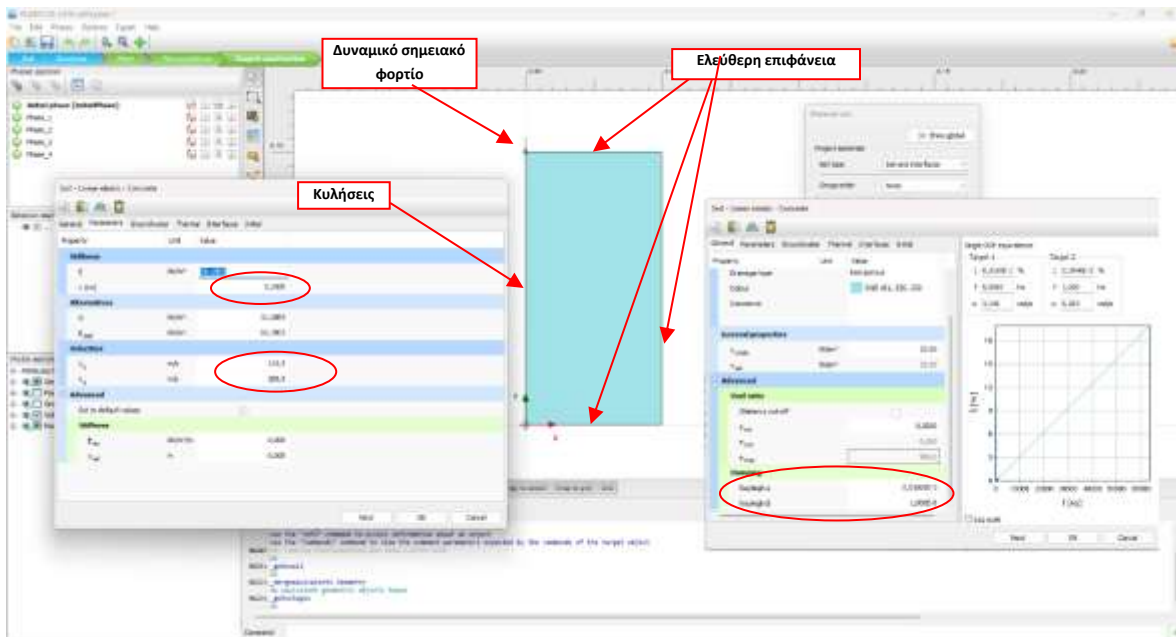
Προκειμένου να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος, μοντελοποιήθηκε μόνο το ήμισυ της κυκλικής διατομής των δοκιμίων, Εικόνα 24. Κατά συνέπεια, οι οριζόντιες μετακινήσεις των κόμβων κατά μήκος του κατακόρυφου επιπέδου συμμετρίας περιορίστηκαν ώστε να εξασφαλιστούν οι κατάλληλες οριακές συνθήκες. Στην εισαγωγή δεδομένων ορίζονται η γεωμετρία του δικτύου και οι μηχανικές παράμετροι των υλικών και καθορίζονται οι οριακές συνθήκες, οι θέσεις και το είδος των εξωτερικών φορτίων ή μετακινήσεων.

Στην Εικόνα 25 παρουσιάζεται ενδεικτικό παράδειγμα εισαγωγής δεδομένων με τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Ύψος δοκιμίου, $L = 0,1 \text{ m}$
- Διάμετρος δοκιμίου, $D = 0,1 \text{ m}$
- Ταχύτητα διαμήκων κυμάτων, $V_p = 200 \text{ m/s}$ (σταθερή σε όλες τις αναλύσεις)
- Λόγος Poisson, $\nu = 0,25$
- Σταθερές απόσβεσης Rayleigh, $\alpha = 10^{-5}$, $\beta = 10^{-6}$ (σταθερές σε όλες τις αναλύσεις)



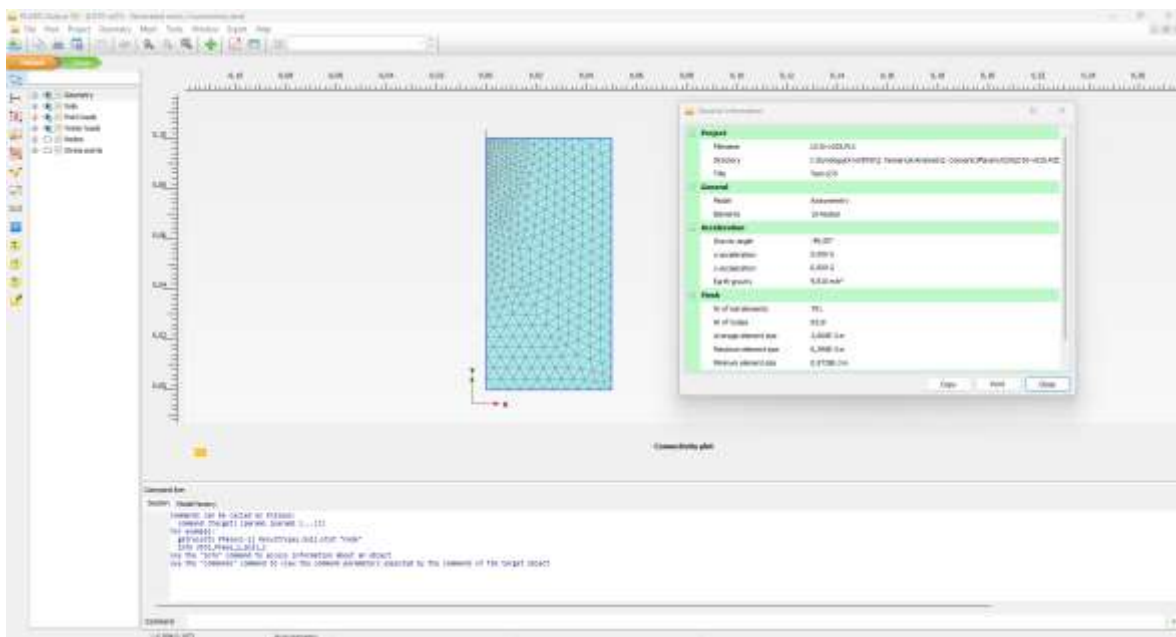
Εικόνα 24: Παράδειγμα δημιουργίας αξονοσυμμετρικού δικτύου πεπερασμένων στοιχείων μοντέλου κυλίνδρου



Εικόνα 25: Παράδειγμα εισαγωγής δεδομένων στο PLAXIS

4.2.2 Κατασκευή δικτύου πεπερασμένων στοιχείων

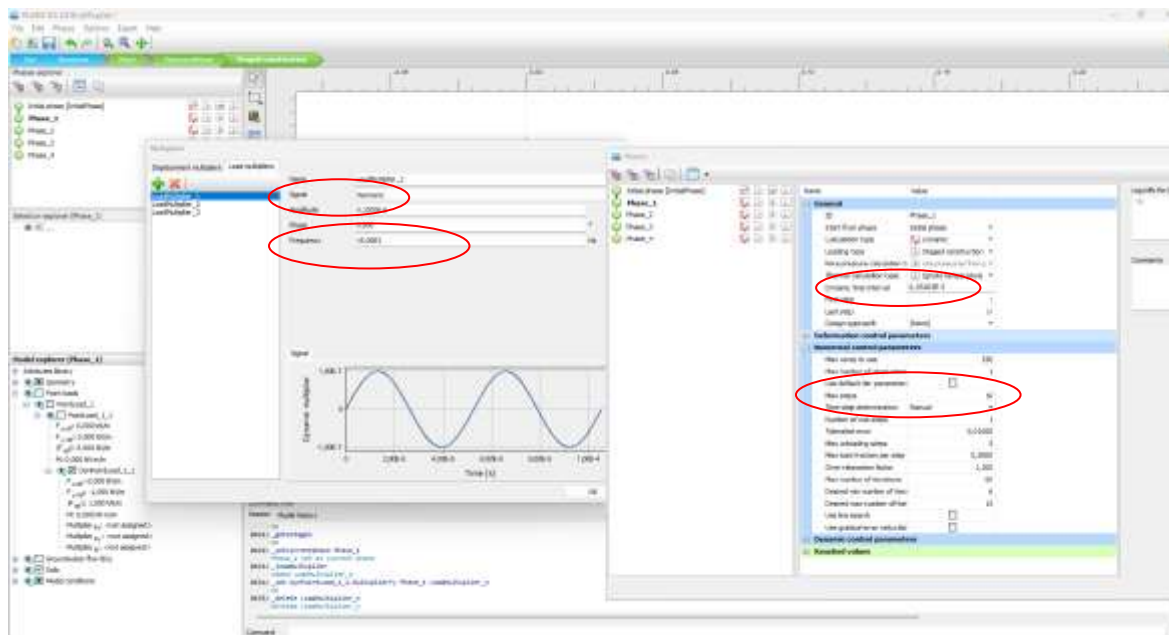
Το λογισμικό PLAXIS διαθέτει αυτοματοποιημένο αλγόριθμο κατασκευής δικτύου, παρέχοντας στον χρήστη τη δυνατότητα πύκνωσης ή αραιώσης του δικτύου. Ο συνολικός αριθμός των στοιχείων και τα μεγέθη τους καθορίστηκαν με βάση τη μέγιστη επιθυμητή συχνότητα, Εικόνα 26. Συγκεκριμένα, η μέγιστη συχνότητα, f_{max} , ορίστηκε ως πενταπλάσια της αναμενόμενης πρώτης ιδιοσυχνότητας, η οποία είναι αρκετά ευρεία ώστε να καταγράφει τις επιθυμητές συχνότητες συντονισμού, διατηρώντας παράλληλα την υπολογιστική αποδοτικότητα.



Εικόνα 26: Παράδειγμα αυτόματης δημιουργίας δικτύου πεπερασμένων στοιχείων

4.2.3 Ορισμός υπολογιστικών φάσεων και χρονικών παραμέτρων

Σε όλες τις αναλύσεις εφαρμόστηκε η πενταφασική δομή υπολογισμού που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.6.3. Η Εικόνα 27 απεικονίζει ενδεικτικό παράδειγμα εισαγωγής των χρονικών παραμέτρων στο λογισμικό PLAXIS.



Εικόνα 27: Εισαγωγή αρμονικού παλμού διέγερσης

4.2.4 Εξαγωγή και επεξεργασία αποτελεσμάτων

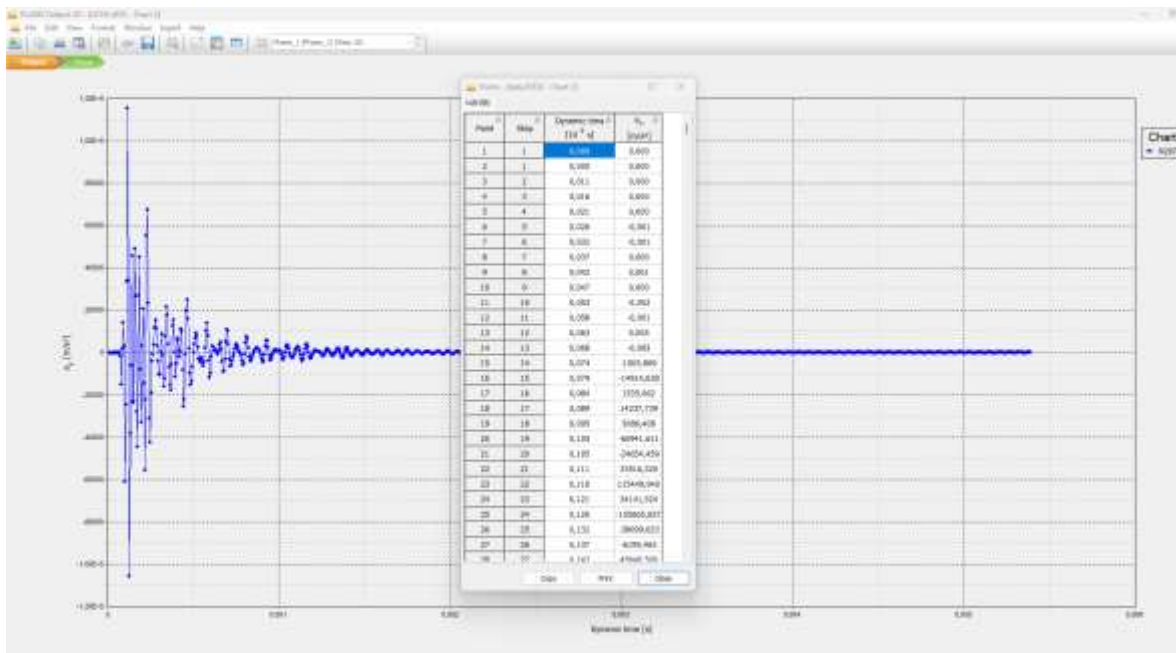
Η εξαγωγή και η φασματική επεξεργασία των χρονοϊστοριών επιταχύνσεων ακολούθησαν τη διαδικασία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.6.4. Ο κόμβος καταγραφής τοποθετήθηκε στο κέντρο της ελεύθερης επιφάνειας του κυλίνδρου, Εικόνα 28.

4.2.5 Φάσματα ιδιοσυχνοτήτων

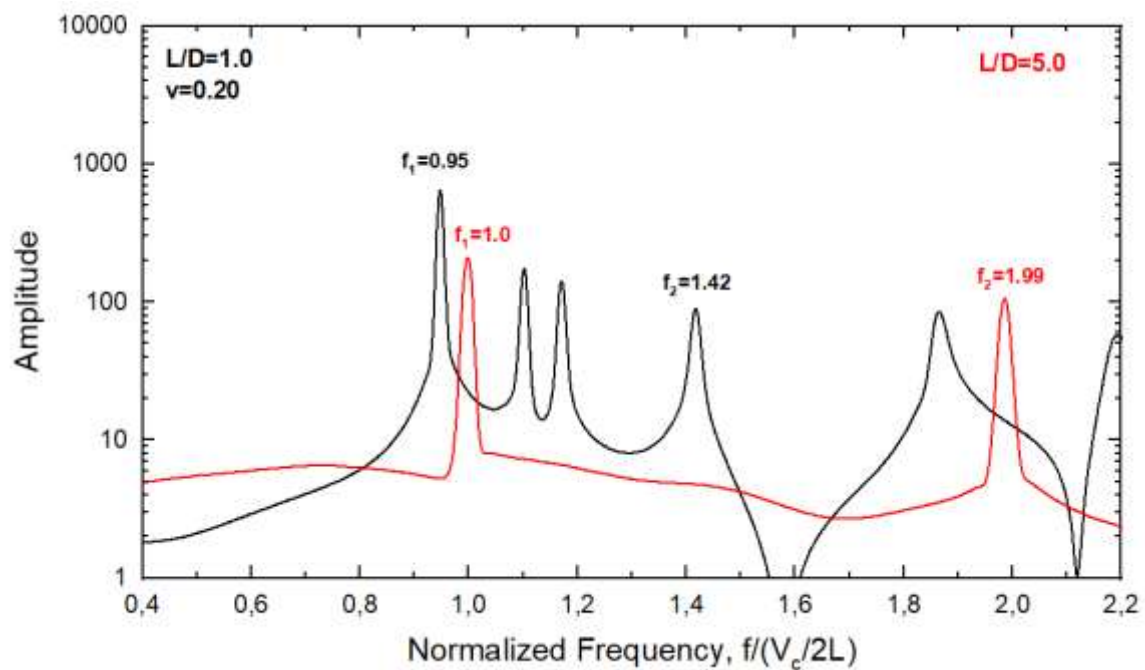
Το επόμενο βήμα αφορούσε στον υπολογισμό των φασμάτων Fourier (FFT) των εξαχθέντων χρονοϊστοριών επιταχύνσεων και στον προσδιορισμό των ιδιοσυχνοτήτων κατά την ελεύθερη ταλάντωση του μοντέλου. Στην Εικόνα 29 παρουσιάζεται ενδεικτικό παράδειγμα υπολογισμού φάσματος ελεύθερης ταλάντωσης για $L/D = 1,0$ και $L/D = 5,0$ με επισημειωμένες τις τιμές για τις πρώτες δύο κυρίαρχες κανονικοποιημένες ιδιοσυχνότητες με μαύρο και κόκκινο χρώμα αντίστοιχα. Στο **Παράρτημα Α** παρουσιάζονται τα διαγράμματα των φασμάτων ελεύθερης ταλάντωσης για το σύνολο των εξεταζόμενων περιπτώσεων.

Στον Πίνακα 11, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα δεδομένα και τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για την περίπτωση του λόγου Poisson $\nu = 0,20$. Οι αντίστοιχοι πίνακες για όλες τις τιμές του λόγου Poisson παρουσιάζονται στο

Παράρτημα Α.



Εικόνα 28: Παράδειγμα σχεδίασης και εξαγωγής χρονικής ιστορίας επιταχύνσεων στο κέντρο της ελεύθερης επιφάνειας



Εικόνα 29: Υπολογισμός φάσματος Fourier της χρονικής ιστορίας των επιταχύνσεων με σημειωμένες τις ιδιοσυχνότητες ταλάντωσης (1η και 2η)

Πίνακας 11: Δεδομένα και αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων για $\nu=0,20$

Vp= 200m/s, Vc= 190m/s, $\nu= 0,20$														
No.	File name	No. of elements	dt (s)	N	fmax	df (s)	L/D	Infinite Rod (Hz)		FEM (Hz)		Infinite/FEM		
								f1	f2	f1	f2	f1	f2	f2/f1
1	LD50_V02	104	0,00050	1024	1000	1,953	5,0	189,7	379,5	189,7	377,1	1,0002	1,0063	1,9879
2	LD40_V02	106	0,00050	1024	1000	1,953	4,0	237,2	474,3	237,1	470,0	1,0003	1,0092	1,9823
3	LD30_V02	110	0,00025	1024	2000	3,906	3,0	316,4	632,5	315,8	622,0	1,0014	1,0168	1,9696
4	LD25_V02	110	0,00025	1024	2000	3,906	2,5	379,5	758,9	378,5	737,0	1,0026	1,0298	1,9472

Vp= 200m/s, Vc= 190m/s, ν= 0,20

No.	File name	No. of elements	dt (s)	N	fmax	df (s)	L/D	Infinite Rod (Hz)		FEM (Hz)		Infinite/FEM		
								f1	f2	f1	f2	f1	f2	f2/f1
5	LD20_V02	108	0,00025	1024	2000	3,906	2,0	474,3	947,7	471,7	896,5	1,0056	1,0582	1,9006
6	LD18_V02	106	0,00025	512	2000	7,813	1,8	527,0	1054,1	523,0	975,0	1,0077	1,0811	1,8642
7	LD16_V02	104	0,00025	512	2000	7,813	1,6	592,9	1185,9	586,0	1050,0	1,0118	1,1294	1,7918
8	LD14_V02	118	0,00025	512	2000	7,813	1,4	677,6	1355,3	665,0	1133,5	1,0190	1,1956	1,7045
9	LD12_V02	116	0,00025	1024	2000	3,906	1,4	790,6	1581,1	768,0	1227,0	1,0294	1,2886	1,5977
10	LD10_V02	118	0,00025	1024	2000	3,906	1,2	948,7	1897,4	899,0	1347,0	1,0553	1,4086	1,4983
11	LD08_V22	106	0,00025	1024	2000	3,906	1,0	1185,3	2371,7	1050,0	1506,0	1,1294	1,5748	1,4343
12	LD07_V02	106	0,00010	2048	5000	9,766	0,8	1355,3	2710,5	1122,0	1587,0	1,2079	1,7080	1,4144

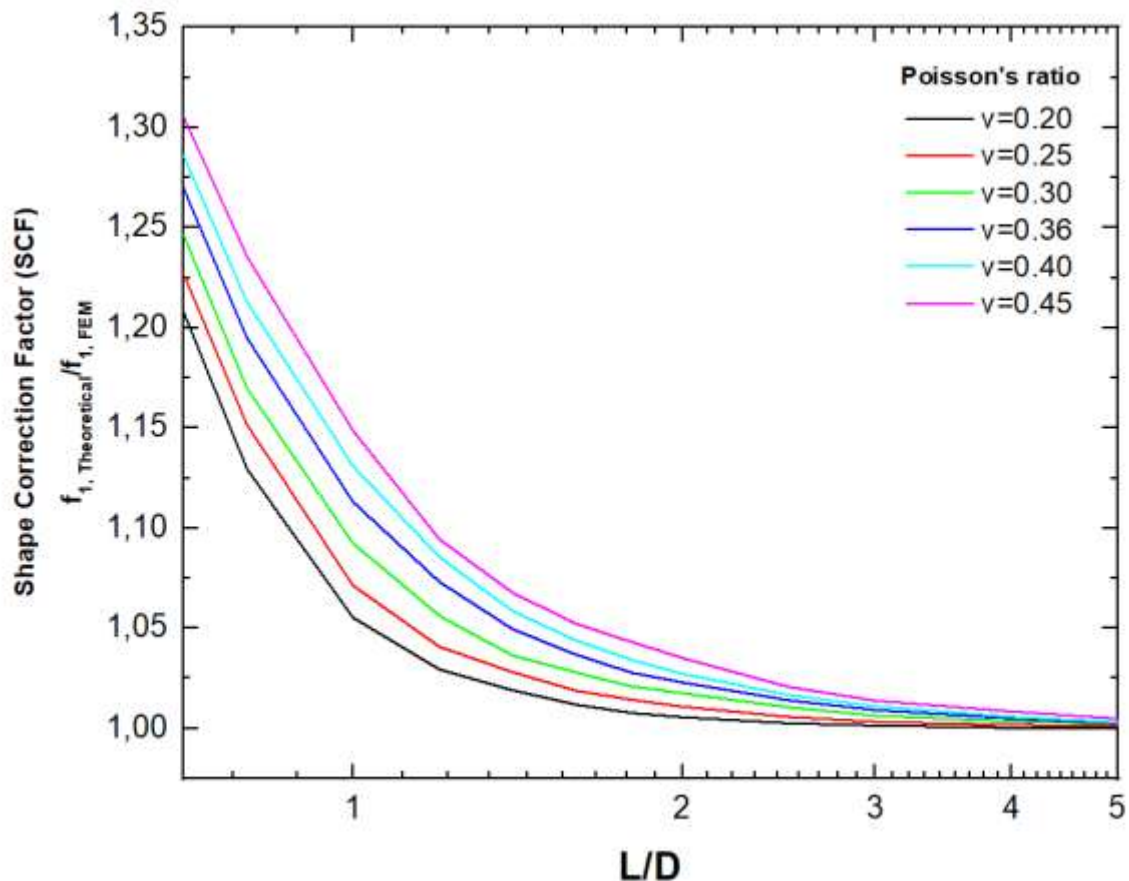
Στους πίνακες δεδομένων και αποτελεσμάτων καταγράφονται πληροφορίες σχετικά με τη γεωμετρία του δικτύου (αριθμός στοιχείων, λόγος L/D), τις παραμέτρους υπολογισμών (χρονικό βήμα Δt , μέγιστη συχνότητα f_{max} , συνολικός αριθμός χρονικών βημάτων ανά ανάλυση). Στις στήλες με κοινό τίτλο «Infinite Rod» αναγράφονται οι θεωρητικές τιμές των συχνοτήτων των δύο πρώτων ιδιομορφών, δηλαδή εκείνες που αντιστοιχούν σε άπειρη ράβδο, ενώ στις στήλες με κοινό τίτλο «FEM» αναγράφονται οι αντίστοιχες υπολογισθείσες τιμές από τις αριθμητικές αναλύσεις. Επίσης, καταγράφεται ο λόγος των τιμών των ιδιοσυχνοτήτων (f_1/f_2), καθώς και ο λόγος των θεωρητικών προς τις υπολογισθείσες τιμές για τις δύο ιδιοσυχνότητες.

4.2.6 Επίδραση λόγου Poisson

Η επίδραση της γεωμετρίας των δοκιμών στην μετρούμενη ταχύτητα ράβδου μπορεί να ποσοτικοποιηθεί μέσω του διορθωτικού συντελεστή σχήματος (Shape Correction Factor, SCF), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της θεωρητικής πρώτης ιδιοσυχνότητας προς την υπολογισμένη από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και φαίνεται στην εξίσωση (54).

$$SCF = \frac{f_{1,Theoretical}}{f_{1,FEM}} \quad (54)$$

Στην Εικόνα 30 απεικονίζεται η μεταβολή του ανωτέρω λόγου συναρτήσει της λυγηρότητας L/D για έξι τιμές του λόγου Poisson.



Εικόνα 30: Διάγραμμα Διορθωτικού Συντελεστή Σχήματος έναντι λυγηρότητας L/D για έξι τιμές του λόγου Poisson

4.2.7 Επαλήθευση αξιοπιστίας αριθμητικών αναλύσεων

Η αξιοπιστία των αριθμητικών αποτελεσμάτων επαληθεύτηκε μέσω συστηματικών ελέγχων σύγκλισης σε τρία επίπεδα. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε έλεγχος χωρικής σύγκλισης (mesh convergence) μέσω διαδοχικής πύκνωσης του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων, κατά τον οποίο διαπιστώθηκε ότι οι υπολογιζόμενες ιδιοσυχνότητες σταθεροποιούνται πλήρως για την υιοθετηθείσα πυκνότητα δικτύου, με περαιτέρω πύκνωση να μην επιφέρει μεταβολή μεγαλύτερη του 0,1%. Στη συνέχεια, εξετάστηκε η χρονική σύγκλιση μέσω μείωσης του χρονικού βήματος Δt κατά το ήμισυ, η οποία δεν κατέδειξε σημαντική διαφοροποίηση στις ιδιοσυχνότητες, επιβεβαιώνοντας την επάρκεια του επιλεγέντος χρονικού βήματος. Τέλος, πραγματοποιήθηκε σύγκριση με αναλυτικές λύσεις για κυλίνδρους μεγάλης λυγηρότητας ($L/D = 5,0$), όπου η θεωρία της άπειρης ράβδου παρέχει ακριβείς τιμές ιδιοσυχνοτήτων. Ο λόγος θεωρητικής προς υπολογισμένη ιδιοσυχνότητα (στήλη «Infinite/FEM» των πινάκων αποτελεσμάτων) κυμάνθηκε μεταξύ 0,999 και 1,007 για $L/D = 5,0$, επιβεβαιώνοντας ότι το αριθμητικό μοντέλο αναπαράγει με εξαιρετική ακρίβεια τη φυσική συμπεριφορά του συστήματος. Η σταδιακή αύξηση της απόκλισης για μικρότερες τιμές λυγηρότητας (π.χ. λόγος έως 1,04 για $L/D = 1,0$) αντανακλά την πραγματική επίδραση της γεωμετρίας και αποτελεί ακριβώς το φαινόμενο που ποσοτικοποιήθηκε μέσω του διορθωτικού συντελεστή σχήματος (SCF).

4.3 Προσαρμογή Εμπειρικής Εξίσωσης Διορθωτικού Συντελεστή Σχήματος (SCF)

4.3.1 Ορισμός Μεταβλητών και Φυσική Ερμηνεία

Για γνωστή ταχύτητα διαμήκων κυμάτων V_p , η θεωρητική ταχύτητα διάδοσης κύματος κατά μήκος της ράβδου V_c προκύπτει από τις κατάλληλες θεωρητικές σχέσεις μέσω των εξισώσεων (15) και (26), και η θεωρητική πρώτη ιδιοσυχνότητα υπολογίζεται από τη θεωρία διάδοσης κυμάτων μέσω της εξίσωσης (25). Για την προσαρμογή εξίσωσης στην καμπύλη της εξίσωσης (54), οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος ορίζονται ως εξής:

- $X_1 = L/D$: λυγηρότητα (slenderness ratio) κοντών κυλίνδρων, που εκφράζει τη γεωμετρική αναλογία μεταξύ μήκους L και διαμέτρου D .
- $X_2 = \nu$: ο λόγος Poisson του υλικού [7].

Εξετάστηκαν δύο ανεξάρτητα σύνολα δεδομένων αντιστοιχούντα στην 1η ιδιομορφή (Mode 1) και 2η ιδιομορφή (Mode 2) ταλάντωσης αντίστοιχα.

4.3.2 Μεθοδολογία Προσαρμογής

Για τον προσδιορισμό αναλυτικής έκφρασης $SCF = f(L/D, \nu)$, εφαρμόστηκε η μέθοδος Multivariable Fractional Polynomial (MFP) regression [159], [160], η οποία επιτρέπει τη μη-γραμμική μοντελοποίηση χωρίς εκ των προτέρων παραδοχή συγκεκριμένης συναρτησιακής μορφής. Η ανάλυση υλοποιήθηκε στο περιβάλλον στατιστικής γλώσσας R, με χρήση του πακέτου mfp [161], [162]. Ο πλήρης πηγαίος κώδικας αναφέρεται στο **Παράρτημα Α**. Εισήχθη ο όρος αλληλεπίδρασης

$X_{12} = (L/D) \cdot \nu$ ώστε να αποτυπωθεί η συνεργιστική επίδραση γεωμετρίας και υλικού στον SCF. Η γενική μορφή του μοντέλου φαίνεται στην εξίσωση (55).

$$SCF = \beta_0 + \sum_j \beta_j H_j\left(\frac{L}{D}\right) + \sum_k \gamma_k H_k(\nu) + \sum_m \delta_m H_m\left(\frac{L}{D} \cdot \nu\right) + \varepsilon \quad (55)$$

όπου $H(\cdot)$ είναι κλασματικές πολυωνυμικές συναρτήσεις εκ του συνόλου $\{X^{-2}X^{-1}, X^{-0.5}, \ln X, X^{0.5}, X, X^2, X^3\}$ κατά Royston & Sauerbrei [159], και $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ ο τυχαίος σφαλματικός όρος.

4.3.3 Αποτελέσματα – 1^η Ιδιομορφή (Mode 1)

Το βέλτιστο μοντέλο για τον SCF της 1^{ης} ιδιομορφής ($n=72$ παρατηρήσεις, 67 βαθμοί ελευθερίας) προσδιορίστηκε ως η εξίσωση (56).

$$SCF_1 = 0,8838 + \frac{0,0215}{\nu} + 0,1990 \cdot \nu - \frac{0,0302}{\left(\frac{L}{D}\right) \cdot \nu} + \frac{0,1851}{\left(\frac{L}{D}\right)^2} \quad (56)$$

Οι επιλεχθέντες εκθέτες από τον αλγόριθμο MFP φαίνονται στον Πίνακα 12.

Πίνακας 12: Επιλεχθέντες μετασχηματισμοί από τον αλγόριθμο MFP

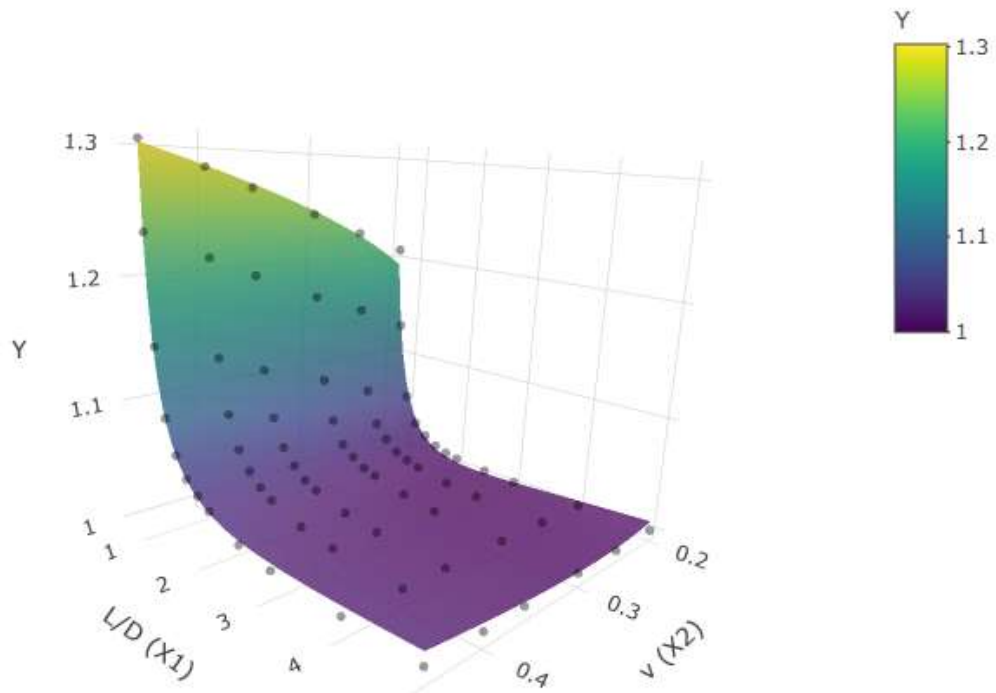
Μεταβλητή	Μετασχηματισμός	Φυσική ερμηνεία
$\left(\frac{L}{D}\right)$	$\left(\frac{L}{D}\right)^{-2}$	Ισχυρή μη-γραμμική μείωση του SCF με αύξηση λυγηρότητας
ν	ν^{-1} και ν^1 (FP2)	Μη-μονότονη εξάρτηση από τον λόγο Poisson
$\left(\frac{L}{D}\right) \cdot \nu$	$\left[\left(\frac{L}{D}\right) \cdot \nu\right]^{-1}$	Αντίστροφη αλληλεπίδραση γεωμετρίας-υλικού

Στον Πίνακα 13, φαίνονται οι Εκτιμήσεις Συντελεστών της εξίσωσης της 1^{ης} ιδιομορφής με δείκτες αξιολόγησης $R^2 = 99,63\%$, $RMSE = 0,00481$, $AIC = -552,31$, $\sigma^2 = 2,483 \times 10^{-5}$.

Πίνακας 13: Εκτιμήσεις Συντελεστών, Mode 1

Όρος	Εκτίμηση $\hat{\beta}$	Τυπ. Σφάλμα	t-τιμή	p-τιμή
Σταθερά	0,88377	0,01872	47,22	$< 2 \times 10^{-16}$
ν^{-1}	0,02152	0,00285	7,56	$1,53 \times 10^{-10}$
ν^1	0,19896	0,03003	6,63	$7,05 \times 10^{-9}$
$[(L/D) \cdot \nu]^{-1}$	-0,03024	0,00131	-23,06	$< 2 \times 10^{-16}$
$(L/D)^{-2}$	0,18508	0,00276	66,96	$< 2 \times 10^{-16}$

Ο κυρίαρχος όρος $(L/D)^{-2}$ αντικατοπτρίζει την αναμενόμενη συμπεριφορά κοντών κυλίνδρων όπου οι επιδράσεις άκρων (boundary effects) και η τρισδιάστατη φύση του πεδίου παραμορφώσεων οδηγούν σε σημαντική απόκλιση από τη θεωρία μονοδιάστατης μετάδοσης σε άπειρο μέσο. Η αρνητική αλληλεπίδραση $[(L/D) \cdot \nu]^{-1}$ υποδηλώνει ότι για μεγαλύτερους λόγους Poisson, η απόκλιση $\frac{f_{1,Theoretical}}{f_{1,FEM}}$ μειώνεται καθώς αυξάνεται η λυγηρότητα, συμπεριφορά φυσικά συνεπής με τη μείωση της εγκάρσιας δέσμευσης σε πιο υψίκορμες κατασκευές. Η Εικόνα 31 απεικονίζει την επιφάνεια παλινδρόμησης της εξίσωσης της 1^{ης} ιδιομορφής.



Εικόνα 31: Επιφάνεια παλινδρόμησης της εξίσωσης της 1^{ης} ιδιομορφής

4.3.4 Αποτελέσματα – 2η Ιδιομορφή (Mode 2)

Το βέλτιστο μοντέλο για τον SCF της 2ης ιδιομορφής ($n=72$, 68 βαθμοί ελευθερίας) προσδιορίστηκε ως η εξίσωση (57).

$$SCF_2 = 0,5426 + \frac{0,9003}{\left(\frac{L}{D}\right)} + \frac{0,1146}{\sqrt{\nu}} + 0,1878 \cdot \ln\left(\left(\frac{L}{D}\right) \cdot \nu\right) \quad (57)$$

Οι επιλεχθέντες εκθέτες από τον αλγόριθμο MFP φαίνονται στον Πίνακα 14.

Πίνακας 14: Επιλεχθέντες μετασχηματισμοί από τον αλγόριθμο MFP

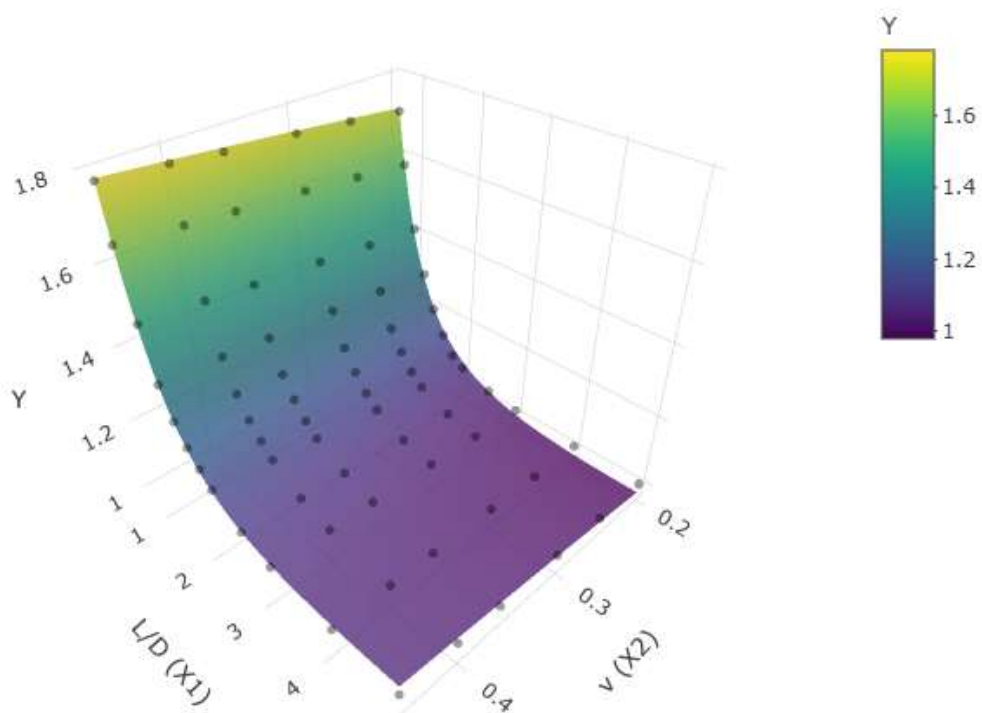
Μεταβλητή	Μετασχηματισμός	Φυσική ερμηνεία
$\left(\frac{L}{D}\right)$	$\left(\frac{L}{D}\right)^{-1}$	Υπερβολική μείωση SCF με αύξηση λυγηρότητας στη 2 ^η ιδιομορφή
ν	$\nu^{-0,5}$	Ριζική εξάρτηση – ηπιότερη επίδραση Poisson στη 2 ^η ιδιομορφή
$\left(\frac{L}{D}\right) \cdot \nu$	$\ln\left[\left(\frac{L}{D}\right) \cdot \nu\right]$	Λογαριθμική αύξηση SCF με το γινόμενο γεωμετρίας-υλικού

Στον Πίνακα 15, φαίνονται οι Εκτιμήσεις Συντελεστών της εξίσωσης της 2^{ης} ιδιομορφής με δείκτες αξιολόγησης $R^2 = 99,79\%$, $RMSE = 0,01068$, $AIC = -439,33$, $\sigma^2 = 1,208 \times 10^{-4}$.

Πίνακας 15: Εκτιμήσεις Συντελεστών, Mode 2

Όρος	Εκτίμηση $\hat{\beta}$	Τυπ. Σφάλμα	t-τιμή	p-τιμή
Σταθερά	0,54261	0,02098	25,86	$< 2 \times 10^{-16}$
$(L/D)^{-1}$	0,90033	0,01242	72,50	$< 2 \times 10^{-16}$
$\nu^{-0.5}$	0,11460	0,00992	11,55	$< 2 \times 10^{-16}$
$\ln[(L/D) \cdot \nu]$	0,18778	0,00786	23,91	$< 2 \times 10^{-16}$

Ο κυρίαρχος όρος $(L/D)^{-1}$ υποδηλώνει ηπιότερη εξάρτηση από τη λυγηρότητα σε σχέση με την 1^η ιδιομορφή (εκθέτης -1 έναντι -2). Ο λογαριθμικός όρος $\ln\left[\left(\frac{L}{D}\right) \cdot \nu\right]$ αντικατοπτρίζει ομαλή, σταδιακή αύξηση της διόρθωσης με το γινόμενο γεωμετρικής–υλικής παραμέτρου. Η Εικόνα 32 απεικονίζει την Επιφάνεια παλινδρόμησης της εξίσωσης της 2^{ης} ιδιομορφής.



Εικόνα 32: Επιφάνεια παλινδρόμησης της εξίσωσης της 2^{ης} ιδιομορφής

4.3.5 Συγκριτική Αξιολόγηση Mode 1 – Mode 2

Σύμφωνα με το κριτήριο AIC [163], η εξίσωση Mode 1 υπερτερεί στατιστικώς ($\Delta AIC = 113,0 \gg 10$), υποδηλώνοντας ότι αποτελεί σαφώς ανώτερη προσέγγιση ανεξαρτήτως της ελαφρώς χαμηλότερης τιμής R^2 [164]. Η εξίσωση Mode 2 επιτυγχάνει υψηλό R^2 με λιγότερες παραμέτρους, πλεονεκτώντας σε ερμηνευσιμότητα. Στον Πίνακα 16 φαίνεται η σύγκριση των κριτηρίων των δύο εξισώσεων.

Πίνακας 16: Συγκριτικός Πίνακας Mode 1 vs Mode 2

Κριτήριο	Mode 1	Mode 2
R^2	99,63%	99,79%
RMSE	0,00481	0,01068

Κριτήριο	Mode 1	Mode 2
AIC	-552,31	-439,33
Αριθμός παραμέτρων	5	4
Κυρίαρχος εκθέτης L/D	-2	-1
Μετ/σμός ν	FP2 (-1, +1)	-0,5
Μετ/σμός αλληλεπίδρασης	(-1)	ln(·)
ΔAIC	-	+113,0

Κεφάλαιο 5

5. Ανάπτυξη διορθωτικών συντελεστών μάζας και αδράνειας

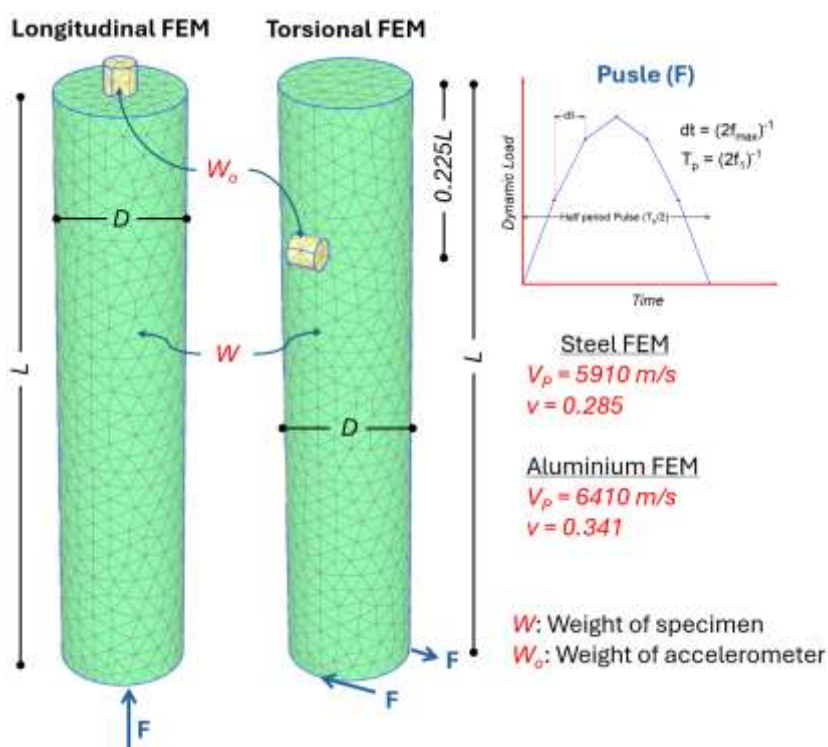
Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τον προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων είναι η επιρροή της μάζας του αισθητήρα. Παρόλο που υπάρχουν πλέον αισθητήρες με σημαντικά μειωμένο βάρος (lightweight accelerometers) περίπου 3-4 γραμμαρίων, η επιρροή της μάζας τους (λόγω της κατασκευής τους από χάλυβα) παίζει σημαντικό ρόλο κυρίως σε κυλίνδρους μικρής λυγνρότητας. Δεδομένου ότι ο λόγος της μάζας του δείγματος (W) προς τη μάζα του επιταχυνσιόμετρου (W_0) είναι σημαντικά μικρή για ορισμένα δείγματα, είναι απαραίτητη μια αριθμητική έρευνα για την αξιολόγηση της επίδρασης της μερικώς προσκολλημένης μάζας σε ένα δείγμα όταν οι ταχύτητες V_c και V_s προσδιορίζονται από τη δοκιμή ΙΕ. Σε αυτό το πλαίσιο, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 24 προσομοιώσεις για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων διορθώσεων στις μετρηθείσες συχνότητες. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τις προαναφερθείσες προσομοιώσεις είναι το PLAXIS 3D της Bentley Systems που είναι στην ουσία ίδιο με την αριθμητική ανάλυση για το προσδιορισμό του SCF, αλλά με τη δυνατότητα προσομοίωσης σε τρεις διαστάσεις ώστε να προσομοιωθεί η στρεπτική φόρτιση και να μετρηθεί η διατμητική συχνότητα και υπολογισθεί η διατμητική ταχύτητα.

5.1 Προσομοίωση δοκιμών αλουμινίου και χάλυβα και ανάπτυξη διορθωτικών συντελεστών μάζας και αδράνειας

Η μοντελοποίηση και η διαδικασία των αναλύσεων ακολουθούν τη λογική των κεφαλαίων 4.2 και 4.3. Συνοπτικά Σε αυτή την έρευνα, η δοκιμή ΙΕ υπό διαμήκη και στρεπτική κρούση προσομοιώθηκε για δείγματα χάλυβα και αλουμινίου. Το υλικό των προσομοιωμένων δειγμάτων μοντελοποιήθηκε ως γραμμικά ελαστικό, με $V_p = 5910 \text{ m/s}$ και $V_p = 6410 \text{ m/s}$ και λόγο Poisson $\nu = 0,285$ και $\nu = 0,341$ για τα μοντέλα χάλυβα και αλουμινίου, αντίστοιχα. Τα ειδικά βάρη των προσομοιωμένων υλικών ορίστηκαν ώστε να ταιριάζουν με αυτά των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική επιβεβαίωση των συντελεστών σχήματος όπως περιγράφονται στο Κεφάλαιο 7.1 και αναφέρονται στον Πίνακα 11. Το επιταχυνσιόμετρο μοντελοποιήθηκε ως κύλινδρος με διάμετρο 10mm και ύψος 8mm, με ειδικό βάρος $\gamma = 46,84 \text{ kN/m}^3$, ώστε να ταιριάζει με τη μάζα $W_0 = 3,0g$, που ήταν η μάζα του που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές ΙΕ.

Η πυκνότητα του πλέγματος ορίστηκε σε περίπου 16 στοιχεία ανά τετραγωνικό εκατοστό. Οι δυναμικές διεγέρσεις εφαρμόστηκαν ως φορτία παλμού μισής περιόδου παράλληλα προς τον άξονα του δείγματος για τα διαμήκη μοντέλα και ως ζεύγος δυνάμεων παλμού μισής περιόδου που εφαρμόστηκαν εγκάρσια προς τον άξονα του

δείγματος για τα στρεπτικά μοντέλα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 33. Η συχνότητα είναι ίση με το ήμισυ της αναμενόμενης πρώτης κυρίαρχης ιδιοσυχνότητας, f_1 . Η χρονική αύξηση μεταξύ των βημάτων της ανάλυσης επιλέχθηκε έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι η μέγιστη συχνότητα που καταγράφηκε ήταν τουλάχιστον $f_{max} = 3f_1$. Για την επικύρωση του μοντέλου, πραγματοποιήθηκαν δυναμικές αναλύσεις σε δείγματα FEM αναφοράς χωρίς τη μάζα του επιταχυνσιόμετρου και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αναλυτικές λύσεις. Για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα μεταξύ των αποτελεσμάτων FEM αναφοράς και των αναλυτικών λύσεων, κάθε χρονική αύξηση χωρίστηκε σε τουλάχιστον 10 υποβήματα (substeps).



Εικόνα 33: Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων στο PLAXIS 3D για προσομοίωση δοκιμών ΙΕ υπό διαμήκη και στρεπτική κρούση

Οι ιδιότητες των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων (FEM) που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των δοκιμών ΙΕ τόσο στη διαμήκη όσο και στη στρεπτική φόρτιση παρουσιάζονται στον Πίνακα 17.

Πίνακας 17: Ιδιότητες δοκιμών χάλυβα και αλουμινίου όπως μοντελοποιήθηκαν στο PLAXIS 3D για προσομοιώσεις δοκιμών ΙΕ υπό διαμήκη και στρεπτική κρούση

A/A	Δείγμα	W (gr)	W _o (gr)	L (m)	D (m)	L/D	W/W _o
1	Χάλυβας	1968,1	3,0	0,20	0,04	5,0	656,0
2	Χάλυβας	1575,4	3,0	0,16	0,04	4,0	525,1
3	Χάλυβας	1182,3	3,0	0,12	0,04	3,0	394,1
4	Χάλυβας	787,8	3,0	0,08	0,04	2,0	262,6
5	Χάλυβας	473,3	3,0	0,048	0,04	1,2	157,8
6	Χάλυβας	394,1	3,0	0,04	0,04	1	131,4

A/A	Δείγμα	W (gr)	W ₀ (gr)	L (m)	D (m)	L/D	W/W ₀
7	Αλουμίνιο	707,4	3,0	0,20	0,04	5,0	235,8
8	Αλουμίνιο	565,7	3,0	0,16	0,04	4,0	188,6
9	Αλουμίνιο	425,5	3,0	0,12	0,04	3,0	141,8
10	Αλουμίνιο	285,3	3,0	0,08	0,04	2,0	95,1
11	Αλουμίνιο	171,6	3,0	0,048	0,04	1,2	57,2
12	Αλουμίνιο	142,0	3,0	0,04	0,04	1,0	47,3

5.2 Επίδραση μάζας αισθητήρα

Η επίδραση της μάζας του αισθητήρα στην μετρούμενη ταχύτητα ράβδου μπορεί να ποσοτικοποιηθεί μέσω του διορθωτικού συντελεστή μάζας (Mass Correction Factor, MCF), της εξίσωσης (58).

$$MCF = \frac{f_L}{f_{L,mass}} \quad (58)$$

όπου f_L και $f_{L,mass}$ αντιπροσωπεύουν τις συχνότητες που προέκυψαν από προσομοιώσεις FEM της δοκιμής IE κατά μήκος, χωρίς και με τη μάζα του επιταχυνσιόμετρου αντίστοιχα.

5.3 Επίδραση της αδράνειας

Ο συντελεστής διόρθωσης για τις δοκιμές στρέψης IE καθορίζεται από τον συντελεστή διόρθωσης αδράνειας (ICF) της εξίσωσης (59).

$$ICF = \frac{f_T}{f_{T,mass}} \quad (59)$$

όπου f_T και $f_{T,mass}$ αντιστοιχούν στις συχνότητες που προέκυψαν από τη δοκιμή IE στρέψης, με και χωρίς τη μάζα του επιταχυνσιόμετρου, αντίστοιχα.

Στον Πίνακα 18, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του MCF και του ICF για τα 12 δοκίμια FEM από χάλυβα και αλουμίνιο που προέκυψαν από προσομοιώσεις δοκιμών IE υπό διαμήκη και στρεπτική κρούση αντίστοιχα.

Πίνακας 18: Αποτελέσματα MCF και ICF από αριθμητικές προσομοιώσεις δοκιμών IE υπό διαμήκη και στρεπτική πρόσκρουση

A/A	Δείγμα	L/D	W/W ₀	MCF	ICF
1	Χάλυβας	5,0	656,0	1,0035	1,0008
2	Χάλυβας	4,0	525,1	1,0042	1,0009
3	Χάλυβας	3,0	394,1	1,0045	1,0012
4	Χάλυβας	2,0	262,6	1,0068	1,0015
5	Χάλυβας	1,2	157,8	1,0096	1,0041
6	Χάλυβας	1,0	131,4	1,0120	1,0072
7	Αλουμίνιο	5,0	235,8	1,0075	1,0091
8	Αλουμίνιο	4,0	188,6	1,0083	1,0091
9	Αλουμίνιο	3,0	141,8	1,0110	1,0109
10	Αλουμίνιο	2,0	95,1	1,0136	1,0136
11	Αλουμίνιο	1,2	57,2	1,0214	1,0233
12	Αλουμίνιο	1,0	47,3	1,0297	1,0347

Κεφάλαιο 6

6. Προσδιορισμός Δυναμικού Λόγου Poisson Κυλινδρικών Δοκιμών με τη χρήση της ΙΕ ως αυτόνομης δοκιμής

Για τον πλήρη προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών ενός υλικού απαιτείται η γνώση τουλάχιστον δύο ανεξάρτητων παραμέτρων. Όπως εκτενώς αναλύθηκε και στο Κεφάλαιο 2, στην πράξη, οι περισσότερες μέθοδοι δυναμικού ελέγχου επικεντρώνονται στη μέτρηση των ταχυτήτων διάδοσης των διαμήκων και των διατμητικών κυμάτων, V_p και V_s αντίστοιχα. Εφόσον είναι γνωστή η πυκνότητα του υλικού, οι δύο αυτές ταχύτητες επιτρέπουν τον έμμεσο υπολογισμό των υπόλοιπων δυναμικών μεγεθών, όπως του μέτρου ελαστικότητας, του μέτρου διάτμησης και του λόγου Poisson. Ως εκ τούτων απαιτούνται τουλάχιστον δύο ανεξάρτητες δοκιμές ή μετρήσεις για τον αξιόπιστο προσδιορισμό των δυναμικών παραμέτρων.

Θεωρητικά ωστόσο, μπορεί η ΙΕ να λειτουργήσει ως αυτόνομη δοκιμή για τον υπολογισμό του δυναμικού λόγου Poisson. Σε κάθε στερεό υλικό που υπόκειται σε εξωτερικά φορτία αναπτύσσονται εσωτερικές δυνάμεις, οι οποίες, κατανεμημένες στην επιφάνεια της διατομής, οδηγούν στη δημιουργία ορθών και διατμητικών τάσεων. Οι τάσεις αυτές προκαλούν την παραμόρφωση του στερεού σώματος, δηλαδή τη μεταβολή των διαστάσεων και/ή του σχήματός του. Όπως έχει ήδη ειπωθεί, ο λόγος των παραμορφώσεων στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση του κυλινδρικού δοκιμίου εκφράζεται μέσω του λόγου Poisson και αποτελεί βασική δυναμική παράμετρο της ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού. Ο λόγος Poisson όπως φαίνεται στην εξίσωση (7), προσαρμοσμένος στο δυσδιάστατο κυλινδρικό μοντέλο προσομοίωσης μπορεί να γραφεί όπως στην εξίσωση (60).

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (60)$$

όπου, $\varepsilon_x = \frac{\Delta d}{d}$ η παραμόρφωση του κυλίνδρου στον άξονα x και $\varepsilon_y = \frac{\Delta l}{l}$ η παραμόρφωση του κυλίνδρου στον άξονα y.

Όπως και στην προσομοίωση του Κεφαλαίου 4, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS 2D, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα ανάπτυξης αξονοσυμμετρικών προσομοιωμάτων γύρω από έναν κεντρικό άξονα. Η παραδοχή της αξονοσυμμετρίας συνεπάγεται ότι οι πραγματικές μετατοπίσεις των ελεύθερων επιφανειών του κυλινδρικού δοκιμίου είναι διπλάσιες από τις υπολογιζόμενες στο αριθμητικό μοντέλο. Συνεπώς, ισχύουν οι σχέσεις $\Delta d = 2 \cdot u_x$ και $\Delta l = 2 \cdot u_y$, όπου u_x η οριζόντια μετατόπιση και u_y η κατακόρυφη μετατόπιση του κυλίνδρου. Με βάση τα παραπάνω η εξίσωση (60) μπορεί να γραφεί όπως η εξίσωση (61).

$$\nu = -\frac{u_x}{u_y} \cdot \frac{L}{D} \quad (61)$$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυματικές εξισώσεις που περιγράφουν τη μετατόπιση και την επιτάχυνση του δοκιμίου στις δύο κύριες διευθύνσεις, δηλαδή την οριζόντια και την κατακόρυφη. Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν τη βάση για την ανάλυση της δυναμικής απόκρισης του κυλινδρικού συστήματος και χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των αντίστοιχων παραμορφώσεων και τάσεων.

$$u_x = U_x \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (62)$$

$$u_y = U_y \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (63)$$

$$a_x = -\omega^2 \cdot U_x \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (64)$$

$$a_y = -\omega^2 \cdot U_y \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (65)$$

Με αντικατάσταση των εξισώσεων (62), (63) στις εξισώσεις (64), (65) αντίστοιχα, προκύπτει η ακόλουθη απλουστευμένη μορφή των εξισώσεων (66) - (69),

$$a_x = -\omega^2 \cdot u_x \quad (66)$$

$$a_y = -\omega^2 \cdot u_y \quad (67)$$

$$u_x = -\frac{a_x}{\omega^2} \quad (68)$$

$$u_y = -\frac{a_y}{\omega^2} \quad (69)$$

Και τελικά, η εξίσωση (61) διαμορφώνεται στην εξίσωση (70).

$$\nu = -\frac{a_x}{a_y} \cdot \frac{L}{D} \quad (70)$$

όπου, a_x η επιτάχυνση στην οριζόντια διεύθυνση του δοκιμίου (m/s^2), a_y η επιτάχυνση στην κατακόρυφη διεύθυνση του δοκιμίου (m/s^2), L το ύψος του δοκιμίου (m) και D η διάμετρος του δοκιμίου (m).

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα εκτέλεσης της αριθμητικής προσομοίωσης της δοκιμής ακουστικού συντονισμού με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Σκοπός των διενεργηθεισών αναλύσεων είναι να ερευνηθεί αριθμητικά η δυνατότητα αξιόπιστου προσδιορισμού της τιμής του δυναμικού λόγου Poisson κυλινδρικών δοκιμίων και του μέτρου ελαστικότητας με μία αυτόνομη δοκιμή ΙΕ.

Συνολικά διενεργήθηκαν 60 αριθμητικές αναλύσεις σύμφωνα με την ακόλουθη παραμετροποίηση:

- **Λόγος ύψος/διάμετρος:**

$L/D = 0,7, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8, 2,0, 2,5, 3,0, 4,0$ και $5,0$

- **Λόγος Poisson**

$\nu = 0,10, 0,20, 0,30, 0,40$ και $0,49$

- **Σημείο τοποθέτησης αισθητήρα**

$z \approx 0,60L, 0,70L, 0,8L$ και L

Σε όλες τις προσομοιώσεις, η διάμετρος παρέμεινε σταθερή και ίση με $0,1m$ και η ταχύτητα $V_s = 100m/s$.

Διερευνήθηκαν δύο διακριτές μεθοδολογικές προσεγγίσεις με παράμετρο τη θέση του επιταχυνσιομέτρου επί του δοκιμίου. Η προσομοίωση των μοντέλων ακολούθησε τις βασικές αρχές που περιεγράφηκαν στα Κεφάλαια 4.1 - 4.2 και όπου κάτι διαφοροποιείται αυτό παρουσιάζεται στα Κεφάλαια 6.1 και 6.2.

6.1 Μεθοδολογία 1 – Με χρήση 2 μονοαξονικών επιταχυνσιομέτρων

Η Μεθοδολογία 1 βασίζεται στον προσδιορισμό του λόγου Poisson από τον λόγο των πλευρικών οριζόντιων επιταχύνσεων προς την κατακόρυφη επιτάχυνση στην ελεύθερη επιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται η επιτάχυνση a_y στο κέντρο της οριζόντιας ελεύθερης επιφάνειας και η επιτάχυνση a_x σε συγκεκριμένα σημεία της κατακόρυφης ελεύθερης επιφάνειας μήκους L .

Στον Πίνακα 19, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα δεδομένα και τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για τις δοκιμές με λυγηρότητα $L/D = 1, L/D = 2$ και $L/D = 5$, και σταθερή ταχύτητα $V_s = \frac{100m}{s}$ σύμφωνα με τη Μεθοδολογία 1. Οι αναλυτικοί πίνακες για όλες τις τιμές του λόγου L/D , καθώς και οι αντίστοιχες τιμές του υπολογισμένου λόγου Poisson, παρατίθενται στο **Παράρτημα Β**.

Στους πίνακες καταγράφονται στοιχεία που αφορούν τόσο τη γεωμετρία του μοντέλου (λόγος L/D) όσο και τις παραμέτρους της αριθμητικής επίλυσης, όπως το χρονικό βήμα Δt , η μέγιστη συχνότητα f_{max} και ο συνολικός αριθμός χρονικών βημάτων ανά ανάλυση. Στις στήλες «Infinite Rod» παρατίθενται οι θεωρητικές τιμές της πρώτης ιδιοσυχνότητας, ενώ στις στήλες «FEM» παρουσιάζονται οι υπολογισθείσες ιδιοσυχνότητες από τις αριθμητικές αναλύσεις. Ακόμη, καταγράφεται ο λόγος των θεωρητικών προς τις υπολογισθείσες τιμές, επιτρέποντας την αξιολόγηση της συμφωνίας μεταξύ θεωρίας και αριθμητικού μοντέλου. Στις στήλες με τίτλο «Υπολογισμένος λόγος Poisson» παρουσιάζονται οι τιμές του δυναμικού λόγου Poisson για κάθε σημείο της κατακόρυφης ελεύθερης επιφάνειας L , όπου z δηλώνεται το ύψος του σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου.

Πίνακας 19: Δεδομένα και αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων μεθοδολογίας 1 για τη δοκιμή με $L/D=1, 2$ και 5

Θεωρούμενος Λόγος Poisson	dt (sec)	N	fmax (Hz)	L/ D	Infinite Rod f1 (Hz)	FEM f1 (Hz)	Infinite /FEM	Υπολογισμένος Λόγος Poisson			
								z=0,5L	z=0,6L	z=0,75L	z=0,91L
0,1	0,001	512	500	5	148,32	148,4	0,9992	0,159	0,15	0,124	0,065
0,2	0,001	512	500	5	154,92	154,3	1,004	0,316	0,298	0,224	0,085
0,3	0,001	512	500	5	161,25	160,14	1,0068	0,470	0,448	0,333	0,126

Θεωρούμενος Λόγος Poisson	dt (sec)	N	fmax (Hz)	L/ D	Infinite Rod f1 (Hz)	FEM f1 (Hz)	Infinite /FEM	Υπολογισμένος Λόγος Poisson			
								z=0,5L	z=0,6L	z=0,75L	z=0,91L
0,4	0,001	512	500	5	167,33	166,02	1,0079	0,622	0,585	0,438	0,162
0,49	0,001	512	500	5	172,63	171,88	1,0044	0,755	0,711	0,536	0,203
								z=0,5L	z=0,625L	z=0,75L	z=0,875L
0,1	0,00025	512	2000	2	370,81	367,18	1,0099	0,176	0,163	0,126	0,066
0,2	0,00025	512	2000	2	387,3	384,75	1,0066	0,331	0,306	0,231	0,122
0,3	0,00025	512	2000	2	403,11	396,1	1,0177	0,470	0,434	0,335	0,180
0,4	0,00025	512	2000	2	418,33	406,3	1,0296	0,600	0,558	0,432	0,228
0,49	0,00025	512	2000	2	431,57	414,06	1,0423	0,690	0,638	0,491	0,265
								z=0,5L	z=0,65L	z=0,8L	z=0,9L
0,1	0,0001	1024	5000	1	741,62	722,66	1,0262	0,305	0,277	0,207	0,077
0,2	0,0001	1024	5000	1	778,41	754,25	1,032	0,411	0,374	0,281	0,112
0,3	0,0001	1024	5000	1	814,75	786,71	1,0356	0,509	0,464	0,348	0,145
0,4	0,0001	1024	5000	1	839,63	808,42	1,0387	0,600	0,547	0,412	0,176
0,49	0,0001	1024	5000	1	863,13	741,88	1,163	0,694	0,633	0,470	0,152

6.2 Μεθοδολογία 2 – Με χρήση ενός τριαξονικού επιταχυνσιόμετρου

Στο πλαίσιο της Μεθοδολογίας 2, ο υπολογισμός του λόγου Poisson πραγματοποιήθηκε μέσω της αξιοποίησης του λόγου των οριζόντιων προς τις κατακόρυφες επιταχύνσεις που καταγράφηκαν σε κάθε ένα από τα πλευρικά σημεία του υπό εξέταση δοκιμίου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της εν λόγω μεθοδολογίας παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 20 για $L/D = 1, 2$ και 5 , και σταθερή ταχύτητα $V_s = 100m/s$. Η πλήρης ανάπτυξη των αποτελεσμάτων για το σύνολο των εξεταζόμενων τιμών του γεωμετρικού λόγου L/D , καθώς και οι αντίστοιχες τιμές του

λόγου Poisson, παρατίθενται αναλυτικά στο **Παράρτημα Β**.

Πίνακας 20: Δεδομένα και αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων για τη δοκιμή με $L/D=1,0$, $L/D=2$ και $L/D=5$, Μεθοδολογία 2

Θεωρούμενος Λόγος Poisson	dt (sec)	N	fmax (Hz)	L/ D	Infinite Rod f1 (Hz)	FEM f1 (Hz)	Infinite /FEM	Υπολογισμένος Λόγος Poisson			
								z=0,5L	z=0,6L	z=0,75L	z=0,91L
0,1	0,001	512	500	5	148,32	148,44	0,9992	0,455	0,162	0,045	0,017
0,2	0,001	512	500	5	154,92	154,3	1,004	0,908	0,323	0,090	0,016
0,3	0,001	512	500	5	161,25	160,16	1,0068	1,358	0,483	0,134	0,016
0,4	0,001	512	500	5	167,33	166,02	1,0079	1,803	0,642	0,179	0,015
0,49	0,001	512	500	5	172,63	171,88	1,0044	2,200	0,784	0,218	0,014
								z=0,625L	z=0,75L	z=0,875L	z=L
0,1	0,00025	512	2000	2	370,81	367,18	1,0099	0,460	0,193	0,078	0,030
0,2	0,00025	512	2000	2	387,3	384,75	1,0066	0,896	0,374	0,155	0,025
0,3	0,00025	512	2000	2	403,11	396,1	1,0177	1,343	0,558	0,232	0,021
0,4	0,00025	512	2000	2	418,33	406,25	1,0297	1,712	0,712	0,295	0,02

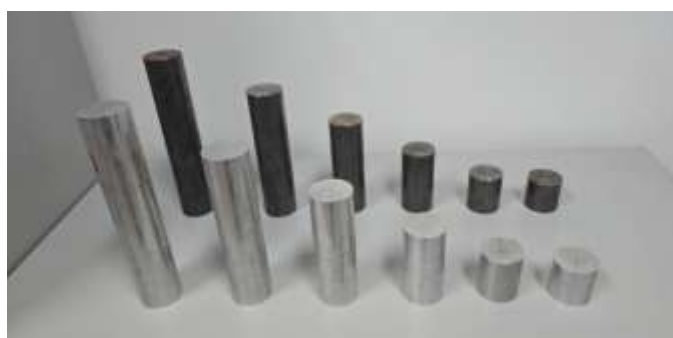
Θεωρούμενος Λόγος Poisson	dt (sec)	N	fmax (Hz)	L/ D	Infinite Rod f1 (Hz)	FEM f1 (Hz)	Infinite /FEM	Υπολογισμένος Λόγος Poisson			
								z=0,5L	z=0,6L	z=0,75L	z=0,91L
0,49	0,00025	512	2000	2	431,57	414,06	1,0423	2,042	0,849	0,352	0,023
								z=0,65L	z=0,8L	z=0,9L	z=L
0,1	0,0001	1024	5000	1	741,62	722,66	1,0262	0,981	0,349	0,136	0,068
0,2	0,0001	1024	5000	1	774,66	732,42	1,0576	1,905	0,679	0,264	0,061
0,3	0,0001	1024	5000	1	806,23	742,18	1,0863	2,053	0,73	0,284	0,056
0,4	0,0001	1024	5000	1	836,57	751,94	1,1125	2,412	0,857	0,335	0,052
0,49	0,0001	1024	5000	1	862,18	764,12	1,163	2,488	0,912	0,354	0,051

Κεφάλαιο 7

7. Πειραματική Μεθοδολογία - Εξοπλισμός

7.1 Πειραματική επιβεβαίωση διορθωτικών συντελεστών SCF, MCF, ICF με δοκίμια αλουμινίου και χάλυβα διαφορετικού υλικού

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, πραγματοποιήθηκε αρχικά πειραματική αξιολόγηση των διορθωτικών συντελεστών σχήματος SCF, μάζας αισθητήρα MCF, και αδράνειας ICF για τη διαμήκη και τη στρεπτική συχνότητα σε δοκίμια χάλυβα και αλουμινίου με διαφορετική λυγηρότητα. Για να καλυφθεί ένα ευρύ φάσμα διαμορφώσεων, επιλέχθηκαν συνολικά έξι διαφορετικοί λόγοι $L/D = 1,0, 1,2, 2,0, 3,0, 4,0$ και $5,0$. Το σύνολο των δοκιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 34. Τα δύο υλικά επιλέχθηκαν λόγω των διαφορετικών μηχανικών χαρακτηριστικών τους, τα οποία παρέχουν μια ολοκληρωμένη βάση για σύγκριση.



Εικόνα 34: Κύλινδροι από χάλυβα και αλουμίνιο με έξι διαφορετικούς λόγους λυγηρότητας

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμές UPV και IE (διαμήκους και στρεπτικής κρούσης) και τα αποτελέσματα διορθώθηκαν εφαρμόζοντας τους προτεινόμενους διορθωτικούς συντελεστές που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις.

7.1.1 Γεωμετρικές Ιδιότητες δειγμάτων

Η πειραματική αξιολόγηση σχεδιάστηκε έτσι ώστε να αναπαράγει τις οριακές συνθήκες και τα σενάρια φόρτισης που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις FEM των SCF, MCF και ICF. Καταγράφηκαν και αναλύθηκαν βασικές παράμετροι, όπως το μέγεθος και η μάζα του υλικού με ψηφιακά όργανα, όπως βερνιέρος και ζυγαριά ακριβείας (Εικόνα 35). Οι ιδιότητες των δοκιμών φαίνονται στον Πίνακα 21, όπου W είναι το βάρος, L είναι το μήκος, D είναι η διάμετρος, γ είναι το ειδικό βάρος και ρ είναι η πυκνότητα των δοκιμών.

Πίνακας 21: Γεωμετρικές ιδιότητες δοκιμών χάλυβα και αλουμινίου

A/A	Δοκίμιο	W (g)	L (m)	D (m)	γ (kN/m ³)	ρ (kg/m ³)
1	Χάλυβας	1968,1	0,20	0,04	76,81	7830,70
2	Χάλυβας	1575,4	0,16	0,04	76,86	7835,40
3	Χάλυβας	1182,3	0,12	0,04	76,91	7840,37
4	Χάλυβας	787,8	0,08	0,04	76,87	7836,39
5	Χάλυβας	473,3	0,048	0,04	76,83	7831,99
6	Χάλυβας	394,1	0,04	0,04	76,90	7839,38
7	Αλουμίνιο	707,4	0,20	0,04	27,61	2814,66
8	Αλουμίνιο	565,7	0,16	0,04	27,60	2813,56
9	Αλουμίνιο	425,5	0,12	0,04	27,67	2821,35
10	Αλουμίνιο	285,3	0,08	0,04	27,90	2796,68
11	Αλουμίνιο	171,6	0,048	0,04	27,91	2845,06
12	Αλουμίνιο	142,0	0,04	0,04	27,50	2803,97



Εικόνα 35: Μέτρηση διαστάσεων σε δοκίμιο αλουμινίου

7.1.2 Δοκιμή UPV

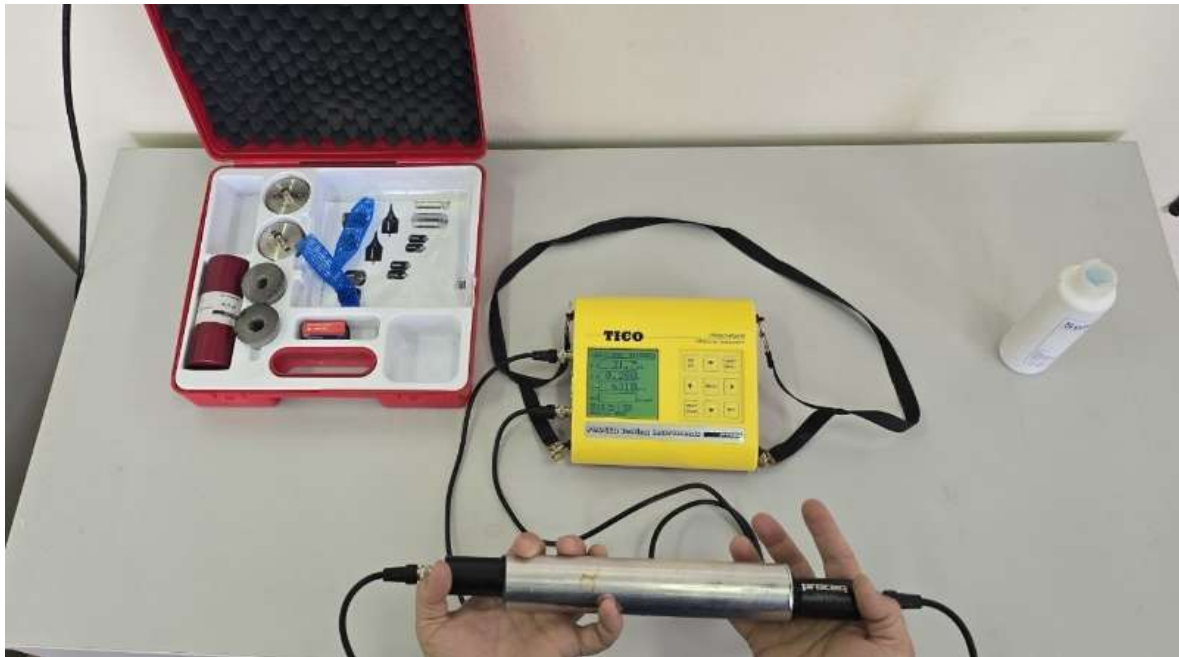
Για τη δοκιμή UPV, η ταχύτητα παλμού V_p μετρήθηκε μέσω συσκευής Proceq Tico με εύρος μέτρησης από -15 έως 6550μs και ανάλυση 0,1μs. Σύμφωνα με το πρότυπο BS 1881: Μέρος 203, οι τυπικοί αισθητήρες 54kHz δεν είναι κατάλληλοι λόγω του μεγέθους των δειγμάτων [84]. Στην Εικόνα 36 φαίνεται δοκιμή πειραματικής επιβεβαίωσης της ακαταλληλότητας των τυπικών αισθητήρων 54kHz σε δοκίμιο χάλυβα. Στις περιπτώσεις δοκιμής λεπτών υψίκορμων δοκιμών πρέπει να χρησιμοποιούνται αισθητήρες 150kHz.

Στην πειραματική επιβεβαίωση χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες Proceq UPV 150kHz με ευαισθησία $\pm 10\text{kHz}$. Η συσκευή απεικονίζεται στην Εικόνα 37.



Εικόνα 36: Δοκιμή UPV σε δοκίμιο χάλυβα (με μη κατάλληλους αισθητήρες)

Η οθόνη της συσκευής δείχνει τον χρόνο t (μsec) που χρειάζεται η δέσμη ηχητικών κυμάτων για να διαπεράσει το υλικό, την απόσταση (m) την οποία εισάγει ο χρήστης, καθώς και την εκτιμώμενη ταχύτητα διέλευσης V (m/s). Πριν την έναρξη των μετρήσεων της ταχύτητας των υπερήχων, πραγματοποιήθηκε η διαδικασία βαθμονόμησης του οργάνου με τη ράβδο βαθμονόμησης (*calibration rod*). Οι πειραματικές μετρήσεις των δοκιμών έγιναν ανά κατηγορία υλικού με απ' ευθείας διάδοση κύματος (*direct transmission*) πάντα με χρήση λιπαντικής ουσίας για καλύτερη επαφή των αισθητήρων. Τέλος, ανά δύο μετρήσεις ελεγχόταν εκ νέου η βαθμονόμηση της συσκευής.



Εικόνα 37: Δοκιμή UPV σε δοκίμιο αλουμινίου με αισθητήρες 150kHz

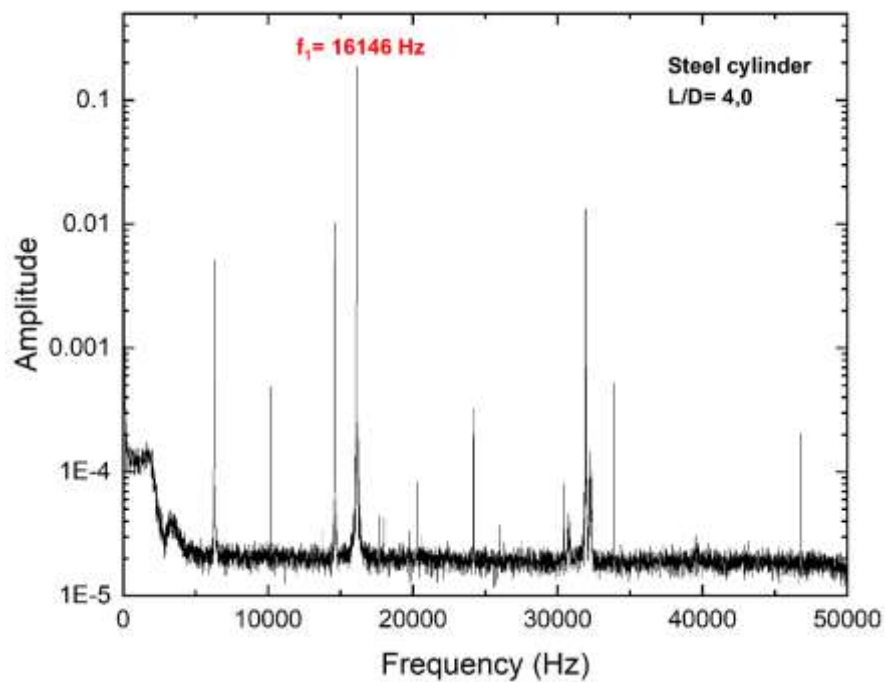
7.1.3 Δοκιμή Impact Echo

Για τη δοκιμή IE, οι διαμήκειες και στρεπτικές ταχύτητες ράβδου μετρήθηκαν με δύο ανεξάρτητες δοκιμές μέσω ενός ελαφρού επιταχυνσιόμετρου (lightweight accelerometer) Kistler KS94C100 με μάζα 3,0 γραμμάρια, ευαισθησία 100mV/g και εύρος συχνοτήτων μεγαλύτερο από 70kHz. Είναι ένας πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας δόνησης IEPE (Integrated Electronics Piezo-Electric) και είναι κατάλληλος για περιπτώσεις όπου οι μικρές διαστάσεις του αισθητήρα είναι κρίσιμες, καθώς και για ελαφριές συσκευές μέτρησης. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η υψηλή ανώτερη συχνότητα αποκοπής. Χάρη στην πιεζοηλεκτρική μέθοδο μέτρησης με εξαιρετικά χαμηλό θόρυβο, μπορούν να καταγραφούν εξίσου υψηλές επιταχύνσεις και σε συνδυασμό με τον κατάλληλο ενισχυτή, πολύ χαμηλές επιταχύνσεις. Καταγράφηκε η απόκριση των δοκιμών μετά τη διέγερση στον φάσμα του χρόνου. Τα σήματα καταγράφηκαν μέσω του ψηφιακού αναλυτή σημάτων (DSA) Spider 20HE της Crystal Instruments με μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας 512kHz και μέγιστο εύρος ζώνης 115,2kHz σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερο από 20kHz και μέγεθος δειγματοληψίας τουλάχιστον 1024 σημείων της κυματομορφής. Η είσοδός του είναι προγραμματιζόμενη ξεχωριστά για να δέχεται τάση από έναν αισθητήρα IEPE (Integrated Circuit-Piezoelectric - ICP) με ενσωματωμένα ηλεκτρονικά, όπως το επιταχυνσιόμετρο KS94C100. Το DSA παρέχει την ευκολία παρουσίασης σε πραγματικό χρόνο τόσο την απόκριση των δοκιμών στο φάσμα του χρόνου όσο και στο φάσμα των συχνοτήτων εφαρμόζοντας τον γρήγορο μετασχηματισμό Fourier του καταγεγραμμένου σήματος του επιταχυνσιόμετρου. Η συχνότητα συντονισμού είναι η συχνότητα με την υψηλότερη κορυφή στο φάσμα πλάτους ή στο φάσμα ισχύος σύμφωνα με το ASTM C215 [12]. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 38. Στην Εικόνα 39,

παρουσιάζεται ένα παράδειγμα του φάσματος συχνοτήτων ενός δείγματος χαλύβδινου κυλίνδρου με $L/D = 4,0$ με την πρώτη κυρίαρχη συχνότητα σημειωμένη.



Εικόνα 38: Δοκιμή ΙΕ σε κοντούς κυλίνδρους χάλυβα



Εικόνα 39: Φάσμα συχνοτήτων ενός χαλύβδινου κυλίνδρου με λυγηρότητα $L/D= 4,0$

Στο **Παράρτημα Δ** παρουσιάζονται όλα τα φάσματα της πειραματικής μεθόδου ΙΕ, για διαμήκη και στρεπτική διάδοση.

7.1.4 Μεθοδολογία πειραματικής επιβεβαίωσης

Από τον μετρημένο χρόνο διαδρομής UPV, υπολογίζεται η ταχύτητα παλμού και, κατά συνέπεια, μέσω της εξίσωσης (14) μπορεί να υπολογιστεί το περιορισμένο μέτρο ελαστικότητας, M .

Από την πρώτη δοκιμή ΙΕ μετά από διαμήκη κρούση, οι μετρημένες διαμήκεις συχνότητες διορθώθηκαν λόγω της επιρροής σχήματος μέσω των εξισώσεων (54), (56) και μάζας αισθητήρα, μέσω της εξίσωσης (58) που προέκυψαν από την εκτενή αριθμητική ανάλυση των Κεφαλαίων 4 και 5, με λόγο Poisson 0,285 για τα δοκίμια χάλυβα και $\nu = 0,341$ για τα δοκίμια αλουμινίου και ταχύτητες αναφοράς ράβδου 5155m/s και 5070m/s, αντίστοιχα, στη θεωρητική βάση ότι από τις τιμές αυτές, που αντιστοιχούν σε λυγηρότητα $L/D = 5$ και άνω, ο κύλινδρος συμπεριφέρεται ως άπειρη ράβδος. Στη συνέχεια, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δεύτερη δοκιμή ΙΕ υπό στρεπτική κρούση για τη μέτρηση των στρεπτικών συχνοτήτων. Οι συχνότητες της στρεπτικής ΙΕ διορθώθηκαν στη συνέχεια λόγω του φαινομένου της αδράνειας μέσω της εξίσωσης (59). Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις καμπύλες των SCF, MCF και ICF για τις αντίστοιχες τιμές του λόγου Poisson.

Τέλος, χρησιμοποιώντας την ταχύτητα παλμού V_p , τις διορθωμένες τιμές της διαμήκου ταχύτητας της ράβδου V_c και της ταχύτητας διάτμησης V_s , ο λόγος Poisson υπολογίζεται μέσω τριών μεθόδων:

1. Με δοκιμές ΙΕ (διαμήκεις) και ΙΕ (στρεπτικές) μέσω της εξίσωσης (28)
2. Με δοκιμές UPV και ΙΕ (διαμήκεις) μέσω των εξισώσεων (14), (16) και (26).
3. Με δοκιμές UPV και ΙΕ (στρεπτικές) μέσω των εξισώσεων (14), (27) και (29).

Όλες οι μέθοδοι απαιτούσαν δύο ανεξάρτητες δοκιμές. Η μέθοδος 1 διαφέρει από την 3 στο ότι χρησιμοποιήθηκε και πάλι μόνο η μέθοδος ΙΕ, με δύο ανεξάρτητες εφαρμογές.

7.2 Λήψη Πυρήνων από υπάρχουσες κατασκευές

Η ανάλυση και η διαστασιολόγηση φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα διενεργείται βάσει της χαρακτηριστικής θλιπτικής αντοχής F_c , η οποία προσδιορίζεται εργαστηριακώς επί τυποποιημένων δοκιμών. Εντούτοις, η επιτόπου αντοχή του σκυροδέματος αποκλίνει από την τυπική τιμή λόγω πλήθους παραμέτρων, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται η απόμειξη, ο βαθμός συμπίκνωσης, η ηλικία και οι συνθήκες συντήρησης του υλικού, η φύση του δομικού στοιχείου, καθώς και διάφορες περιβαλλοντικές επιδράσεις. Καθοριστικής σημασίας μεταξύ των ανωτέρω παραμέτρων κρίνεται ο τύπος του εξεταζόμενου δομικού στοιχείου.

Στο πλαίσιο επίσης της παρούσας διδακτορικής διατριβής, διενεργήθηκε εκτεταμένη πειραματική διερεύνηση σε σύνολο 232 δοκιμών οπλισμένου σκυροδέματος, τα οποία ελήφθησαν με πυρηνοληψία από υφιστάμενες κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος (κτήρια και γέφυρες). Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η αβεβαιότητα που σχετίζεται με τον προσδιορισμό του λόγου Poisson, πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά παγκοσμίως μια τόσο εκτεταμένη πειραματική έρευνα με δοκίμια που ελήφθησαν από πραγματικές κατασκευές.

Τα κτίρια από τα οποία ελήφθησαν δοκίμια κατασκευάστηκαν μεταξύ 1960 και 1990, με θλιπτική αντοχή μεταξύ $C_{12/15}$ και $C_{20/25}$ σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206, και μέγιστο κόκκο αδρανών 25–30mm ενώ ελήφθησαν ακόμη δοκίμια από τέσσερις γέφυρες. Τρεις εξ αυτών κατασκευάστηκαν με συμβατικό σκυρόδεμα και μέγιστο κόκκο αδρανών 30–35mm μεταξύ 1960 και 1970, ενώ μία γέφυρα κατασκευάστηκε με προεντεταμένο σκυρόδεμα και φυσικά αδρανή μέγιστου κόκκου 25mm το έτος 1970. Το σκυρόδεμα και των τεσσάρων γεφυρών κατατάσσεται στην κατηγορία $C_{20/25}$.

Η πειραματική μεθοδολογία περιελάμβανε τον συνδυασμό των μη καταστροφικών δοκιμών, UPV και IE σε συνδυασμό με δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης. Σκοπός των δοκιμών αυτών ήταν ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος και η συσχέτισή τους με τη θλιπτική αντοχή. Η μέθοδος UPV επιτρέπει τον υπολογισμό του περιορισμένου μέτρου ελαστικότητας M ενώ η μέθοδος IE παρέχει το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας E_d και παρουσιάζεται η μεθοδολογία έμμεσου προσδιορισμού του λόγου Poisson ν_d μέσω των δυναμικών μέτρων ελαστικότητας M και E_d .

Στο **Παράρτημα Ε**, παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά κάθε δοκιμίου, τις γεωμετρικές διαστάσεις, τα πρωτογενή πειραματικά δεδομένα από τις εφαρμοσθείσες μεθόδους, καθώς και τα παράγωγα υπολογισμένα μεγέθη.

7.2.1 Προσδιορισμός Γεωμετρικών Μεγεθών & Ειδικού Βάρους

Ο εξοπλισμός πυρηνοληψίας που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, καθώς και η μορφολογία των ληφθέντων πυρήνων, απεικονίζονται στην

Εικόνα 40. Οι πυρήνες που εξήχθησαν είχαν κυμαινόμενη διάμετρο D μεταξύ 90 και 110 mm και μήκους περίπου ίσου προς τη διάμετρο τους.



Εικόνα 40: Καροτιέρα και εξαχθέντες πυρήνες

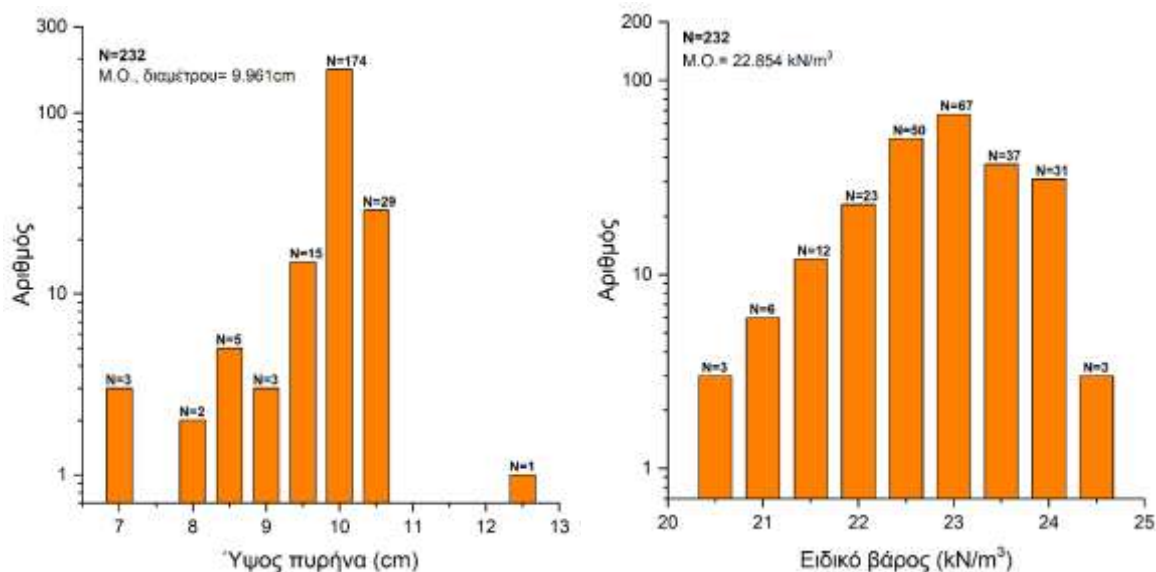
Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας πυρηνοληψίας και προ της εφαρμογής οποιασδήποτε πειραματικής μεθόδου, πραγματοποιήθηκε μέτρηση των βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δοκιμίων, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στο

Παράρτημα Ε. Ενδεικτικά στον Πίνακα 22, στις στήλες (4) έως (6) καταγράφονται το ύψος, η διάμετρος και το βάρος των δοκιμίων, ενώ στις στήλες (8) και (9) υπολογίζονται το ειδικό βάρος και ο λόγος L/D αντίστοιχα

Στα ραβδογράμματα της Εικόνα 41 απεικονίζεται η κατανομή των δοκιμίων ως προς το ύψος και το ειδικό βάρος τους. Από την ανάλυση των δεδομένων προκύπτει ότι η πλειονότητα των δοκιμίων παρουσιάζει ειδικά βάρη εντός του εύρους $20,5\text{kN/m}^3$ έως $24,5\text{kN/m}^3$, ενώ το 90% του συνολικού δείγματος συγκεντρώνεται στο στενότερο εύρος των 22kN/m^3 έως 24kN/m^3 . Αναφορικά με το ύψος των δοκιμίων, το 95% του δείγματος εμφανίζει τιμές εντός του εύρους 9,5cm έως 10,5cm.

Πίνακας 22: Γεωμετρικά στοιχεία πυρήνα

A/A	ΕΡΓΟ	ΠΥΡΗΝΑΣ	Ύψος L (cm)	Διάμετρος D (cm)	Βάρος (gr)	failure load (KN)	γ_b (kN/m^3)	L/D
1	4ο ΔΗΜΟΤΙΚΟ ΣΧΟΛΕΙΟ ΑΡΓΟΣΤΟΛΙΟΥ	Π1-Ι	9,81	9,91	1624	60	21,46	0,990



Εικόνα 41: Ραβδογράμματα κατανομής του συνολικού αριθμού δοκιμών ως προς το ύψος (αριστερά) και το ειδικό βάρος (δεξιά)

7.2.2 Δοκιμή UPV

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε είναι η συσκευή Proseq Pundit Lab (+) (Εικόνα 42), με αισθητήρες συχνότητας συντονισμού 54kHz, κατάλληλους για μετρήσεις σε σκυρόδεμα. Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία βαθμονόμησης ενώ και σε αυτή την πειραματική διαδικασία οι μετρήσεις έγιναν με απ' ευθείας διάδοση κύματος (direct transmission). Στον Πίνακα 23, στην στήλη 4 φαίνεται η μετρούμενη ταχύτητα υπερήχων ενώ στη στήλη 5, το υπολογισμένο περιορισμένο μέτρο ελαστικότητας (M), όπως προκύπτει από την εξίσωση (14).

Πίνακας 23: Μετρήσεις δοκιμής UPV

A/A	ΕΡΓΟ	ΠΥΡΗΝΑΣ	UPV V_p (m/s)	M (GPa)
1	4 ^ο ΔΗΜΟΤΙΚΟ ΣΧΟΛΕΙΟ ΑΡΓΟΣΤΟΛΙΟΥ	Π1-I	4130	37,32



Εικόνα 42: Διεξαγωγή μέτρησης επί δοκιμίου σκυροδέματος με τη χρήση της μεθόδου UPV

7.2.3 Δοκιμή Impact Echo

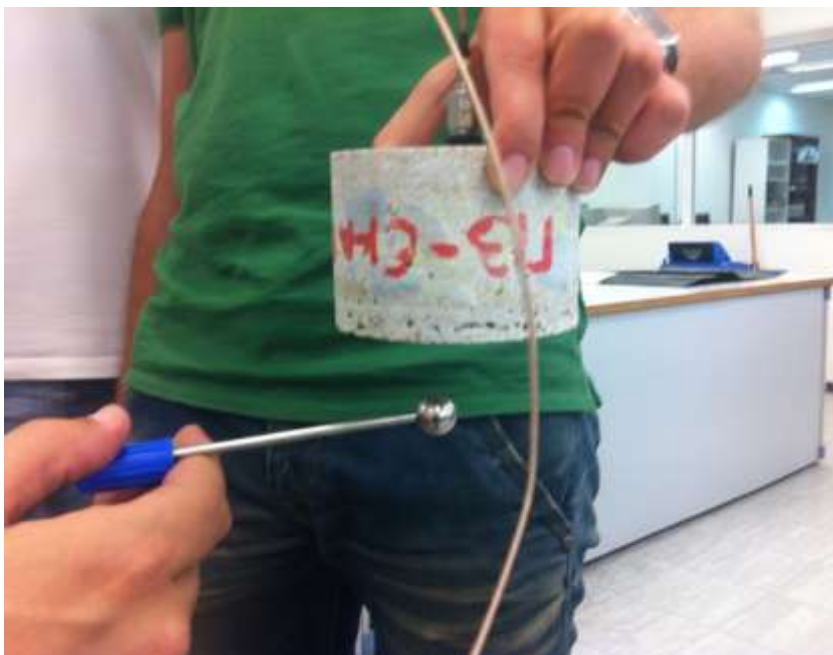
Για τη διεξαγωγή της μεθόδου IE, η κρούση δημιουργήθηκε στο κάτω μέρος του δοκιμίου με σκληρό αντικείμενο, προκαλώντας έτσι ελεύθερη ταλάντωση, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 43.

Χρησιμοποιήθηκε επιταχυνσιόμετρο της εταιρείας Kistler 8704B50 με εύρος μέτρησης $\pm 50g$, ευαισθησία $100,3mV/g$ και βάρος $10,6$ γραμμάρια. Το επιταχυνσιόμετρο τοποθετήθηκε στο άνω μέρος του δοκιμίου και συγκρατήθηκε με τη βοήθεια κεριού. Η δυναμική απόκριση του δοκιμίου καταγράφηκε με τη χρήση του αναλυτή δυναμικού σήματος (Dynamic Signal Analyzer) Agilent 35670A, Εικόνα 44.

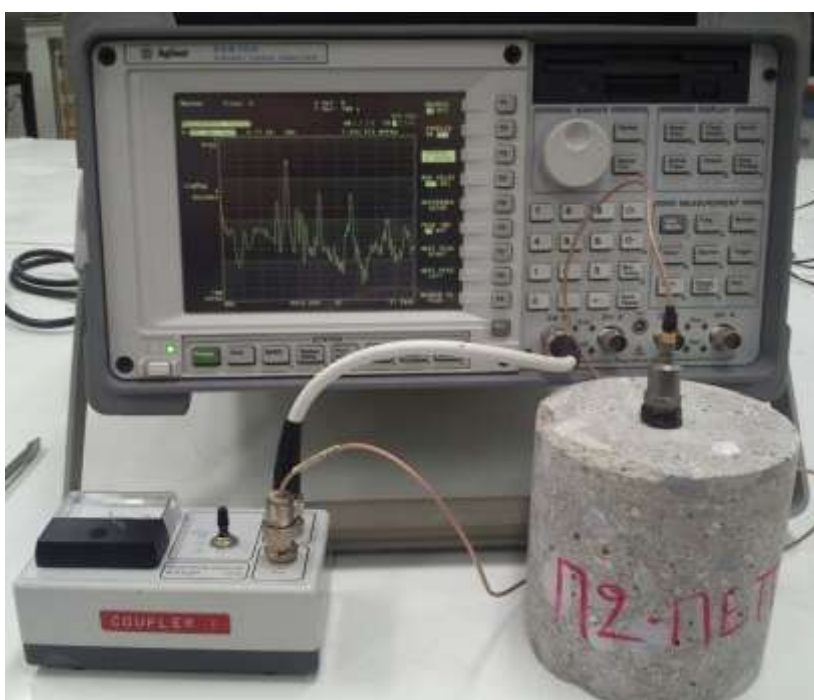
Τα καταγραφόμενα σήματα μεταφέρθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για την περαιτέρω ανάλυσή τους και την επισκόπηση του φάσματος ελεύθερης απόκρισης σε πραγματικό χρόνο. Μέσω της εφαρμογής του αλγορίθμου Fast Fourier Transform (FFT) στα ληφθέντα φάσματα, προσδιορίστηκαν οι συχνότητες συντονισμού (ιδιοσυχνότητες)

του δοκιμίου, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 45 και στη συνέχεια υπολογίστηκε η ταχύτητα διάδοσης του κύματος κατά μήκος της ράβδου, V_c .

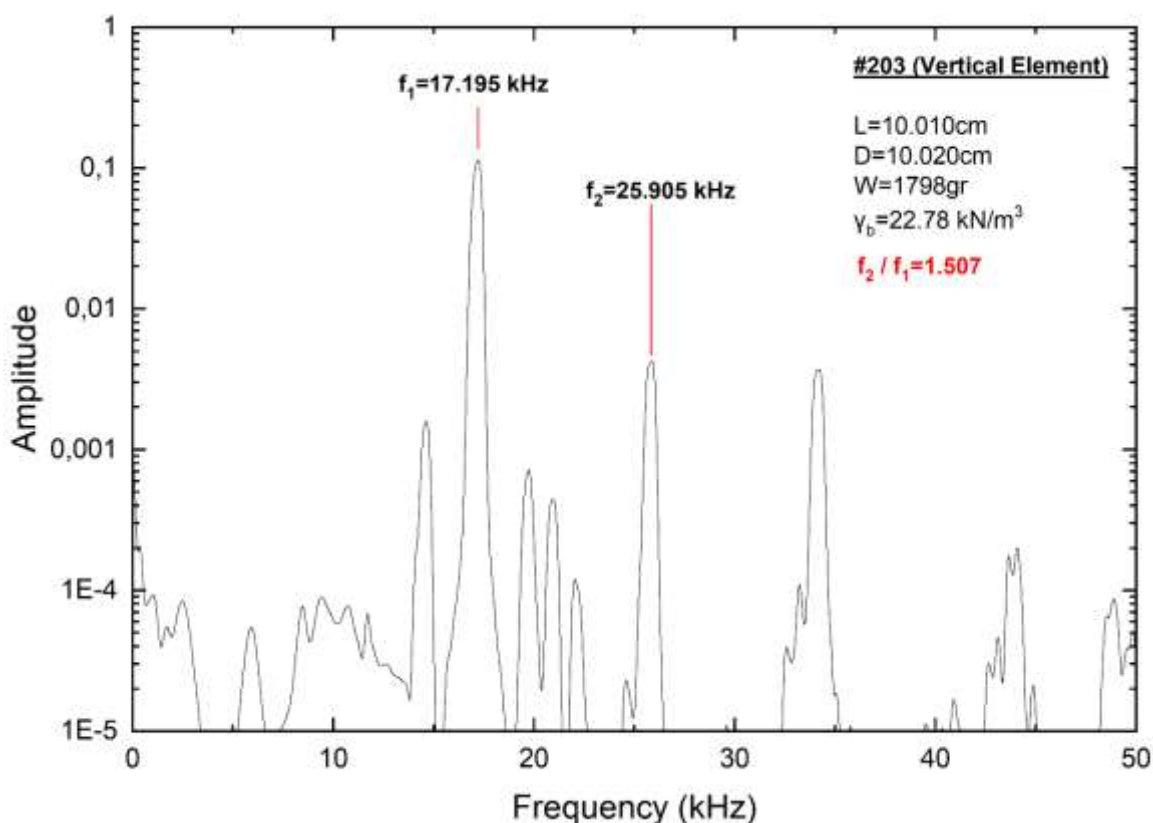
Η ανωτέρω διαδικασία εφαρμόστηκε σε όλα τα δοκίμια και στον Πίνακα 24 φαίνονται οι τιμές της 1^{ης} και της 2^{ης} ιδιοσυχνότητας (η 2η καταγράφηκε όπου ήταν διαθέσιμη) στις Στήλες (4) και (5) αντίστοιχα. Στο **Παράρτημα Ε** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ιδιοσυχνοτήτων, τα φωτογραφικά στιγμιότυπα της πειραματικής διάταξης καθώς και τα φάσματα ελεύθερης ταλάντωσης των δοκιμίων.



Εικόνα 43: Εκτέλεση δοκιμής ΙΕ



Εικόνα 44: Εξοπλισμός εκτέλεσης δοκιμής ΙΕ



Εικόνα 45: Φάσμα ελεύθερης ταλάντωσης ιδιομορφής

Πίνακας 24: Αποτελέσματα δοκιμής ΙΕ και υπολογισμός λόγου Poisson

A/A	ΕΡΓΟ	ΠΥΡΗΝΑ Σ	f ₁ (kHz)	f ₂ (kHz)	assumed Poisson	f ₁ (kHz) CORRECTED	v _{c1} (km/s) CORRECTED	E _d (Gpa)	ν (M - E _d)
1	4 ^ο ΔΗΜΟΤΙΚΟ ΣΧΟΛΕΙΟ ΑΡΓΟΣΤΟΛΙΟΥ	Π1-Ι	12,93		0,393	14,75	2,89	18,31	0,393

7.2.4 Υπολογισμός λόγου Poisson

Με βάση τα ευρήματα του Κεφαλαίου 4 και εφαρμόζοντας τον διορθωτικό συντελεστή μεγέθους, διορθώθηκε η τιμή της 1^{ης} ιδιοσυχνότητας. Τα αποτελέσματα των διορθωμένων τιμών της ιδιοσυχνότητας παρουσιάζονται στη Στήλη (7) του Πίνακας 24. Στη Στήλη (8) υπολογίζεται η ταχύτητα διάδοσης του κύματος κατά μήκος της ράβδου από εξίσωση (25) με διόρθωμένη συχνότητα όπως συνοπτικά φαίνεται στην εξίσωση (71)

$$V_c = 2 \cdot L \cdot f_{cor} \quad (71)$$

όπου L = μήκος δοκιμίου, (m) f_{cor} = διορθωμένη τιμή της συχνότητας, (Hz)

Τελικά, ο υπολογισμός του E_d , προκύπτει από την εξίσωση (26). Ο λόγος Poisson μπορεί να προσδιοριστεί έμμεσα από τις υπολογισμένες τιμές M και E_d , σύμφωνα με τις εξισώσεις (16) και (17), που συνδέουν τα δύο μέτρα ελαστικότητας.

Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας Young απαιτεί τη γνώση του συντελεστή διόρθωσης σχήματος, ο οποίος εξαρτάται από τον λόγο Poisson. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται επαναληπτική διαδικασία για την εύρεση του λόγου Poisson που ικανοποιεί

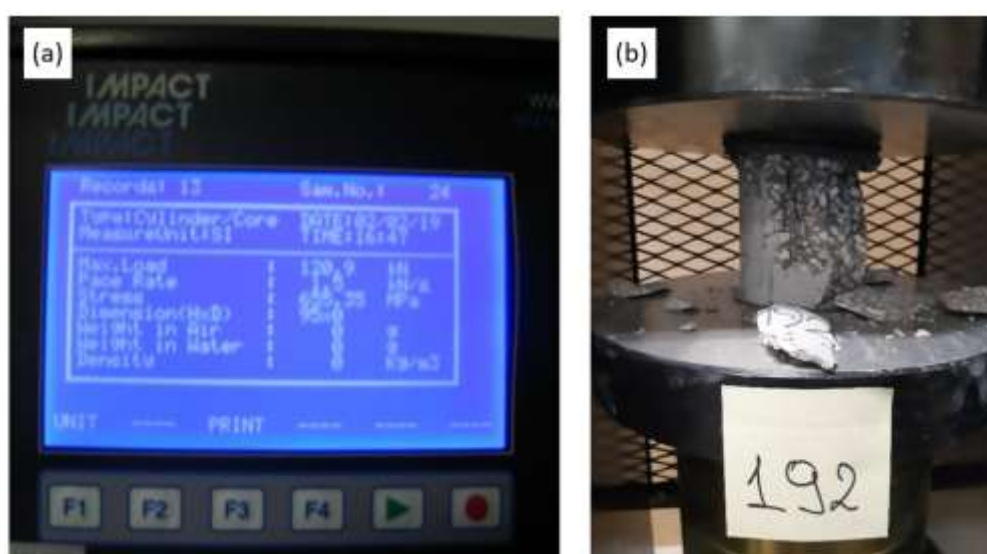
την ανωτέρω εξίσωση. Στη στήλη (6) του Πίνακα 24 παρουσιάζεται η υποτιθέμενη αρχική τιμή του λόγου Poisson, η οποία μετά την επαναληπτική διαδικασία είναι ίδια με την υπολογισμένη τιμή του λόγου Poisson που φαίνεται στη στήλη (10).

7.2.5 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης - UCS

Οι πυρήνες υποβλήθηκαν σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης με μηχανή θλίψης Impact CS7156 με χωρητικότητα κυψέλης φορτίου 2000kN. Στην Εικόνα 46 φαίνεται η ψηφιακή οθόνη της μηχανής και ένας θραυσμένος πυρήνας μετά τη δοκιμή. Η θλιπτική αντοχή κάθε πυρήνα υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (72).

$$F_c = \frac{P}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} \quad (72)$$

όπου P το μέγιστο εφαρμοζόμενο θλιπτικό φορτίο, D η διάμετρος του πυρήνα.



Εικόνα 46 (α) Μηχανή μονοαξονικής συμπίεσης (β) Πυρήνας σκυροδέματος μετά τη δοκιμή

Για τον ακριβή προσδιορισμό της τελικής θλιπτικής αντοχής κατέστη αναγκαία η εφαρμογή διορθωτικών συντελεστών λόγω επίδρασης του μεγέθους των δοκιμίων. Η εν λόγω διόρθωση πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις διατάξεις της Εγκυκλίου Ε7, η οποία εφαρμόζεται για την εκτίμηση της κατηγορίας αντοχής σκυροδέματος σε υφιστάμενες κατασκευές [165]. Κάθε τιμή αντοχής πυρήνα ληφθέντος από ιδιωτικά έργα ανάγεται σε αντοχή κυλίνδρου με λόγο $\frac{H}{D} = 2$, μέσω πολλαπλασιασμού με τους διορθωτικούς συντελεστές L_1 και L_2 . Οι τιμές των συντελεστών αυτών προκύπτουν από τους αντίστοιχους συντελεστές λ_1 και λ_2 του Σχεδίου Προτύπου ΕΛΟΤ-344, παρατίθενται εντός της Εγκυκλίου και παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 25: Συντελεστής L_1 , αναγωγής αντοχής κυλίνδρου με λόγο ύψους προς διάμετρο $H:D \neq 2$, σε αντοχή κυλίνδρου με λόγο $H:D = 2$

H:D	L_1	H:D	L_1	H:D	L_1
0,90	0,820	1,09	0,872	1,27	0,913

H:D	L ₁	H:D	L ₁	H:D	L ₁
0,91	0,823	1,10	0,874	1,28	0,915
0,92	0,826	1,11	0,876	1,29	0,916
0,93	0,829	1,12	0,879	1,30	0,918
0,94	0,832	1,13	0,881	1,31	0,920
0,95	0,835	1,14	0,884	1,32	0,921
0,96	0,838	1,15	0,886	1,33	0,923
0,97	0,841	1,16	0,888	1,34	0,924
0,98	0,844	1,17	0,891	1,35	0,926
0,99	0,847	1,18	0,893	1,36	0,928
1,00	0,850	1,19	0,896	1,37	0,929
1,01	0,852	1,20	0,898	1,38	0,931
1,02	0,855	1,21	0,900	1,39	0,932
1,03	0,857	1,22	0,903	1,40	0,934
1,04	0,860	1,23	0,905	1,41	0,936
1,05	0,862	1,24	0,918	1,42	0,937
1,06	0,864	1,25	0,910	1,43	0,939
1,07	0,867	1,26	0,912	1,44	0,940
1,08	0,869			1,45	0,942

Πίνακας 26: Συντελεστής L_2 , αναγωγής κυλίνδρου διαμέτρου D και λόγου $H:D=2$ σε αντοχή κυλίνδρου 15x30 cm

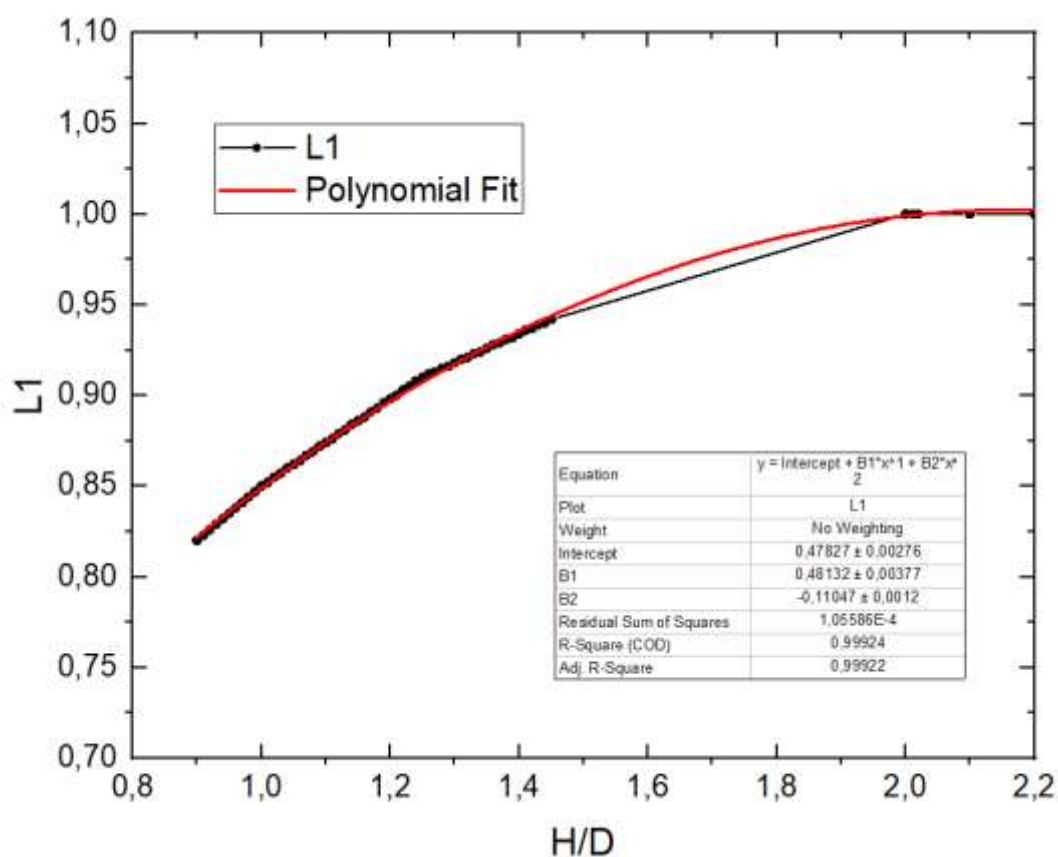
D (cm)	L ₂	D (cm)	L ₂
9,5	0,956	10,1	0,961
9,6	0,957	10,2	0,962
9,7	0,958	10,3	0,962
9,8	0,958	10,4	0,963
9,9	0,959	10,5	0,964
10,0	0,960		

Ο Πίνακας 25 περιλαμβάνει τον συντελεστή L_1 για την αναγωγή της αντοχής κυλίνδρου με λόγο $H:D \neq 2$ σε αντοχή κυλίνδρου με λόγο $H:D = 2$, ενώ ο Πίνακας 26 περιλαμβάνει

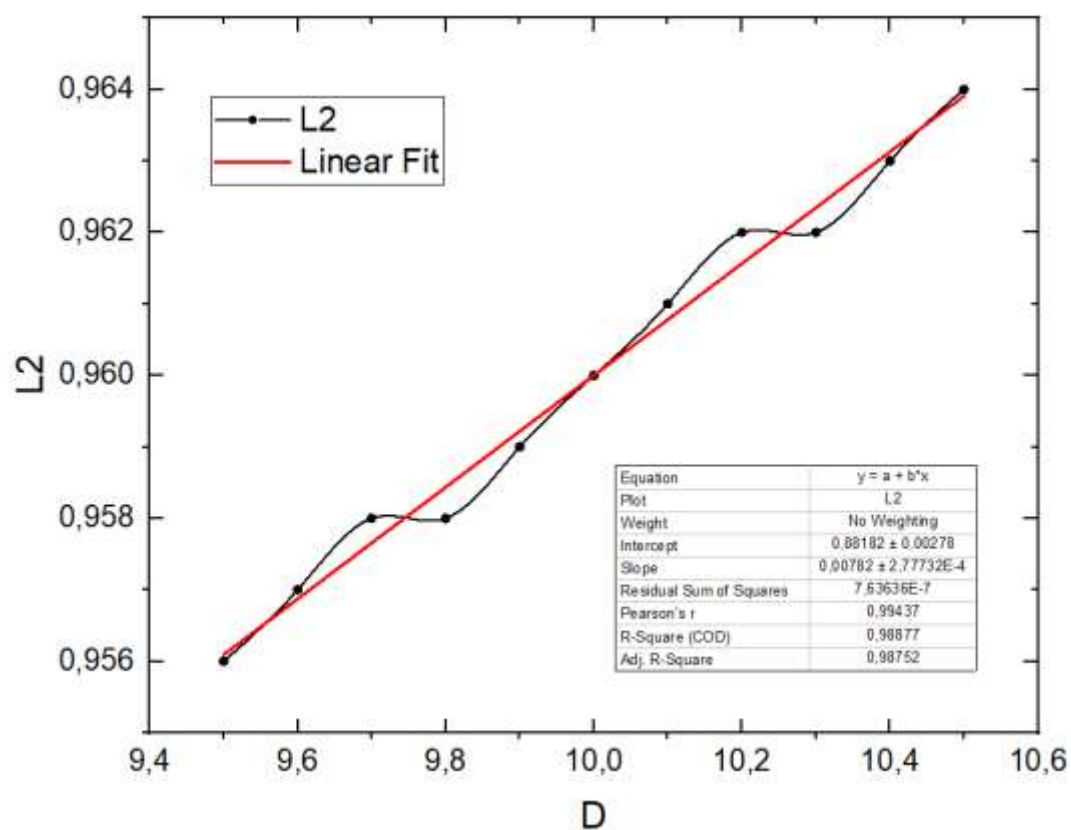
τον συντελεστή L_2 για την αναγωγή κυλίνδρου διαμέτρου D και λόγου $H:D = 2$ σε αντοχή κυλίνδρου αναφοράς διαστάσεων 15×30cm.

Βάσει των τιμών των ανωτέρω πινάκων κατασκευάσθηκαν τα διαγράμματα που φαίνονται στην Εικόνα 47 και Εικόνα 48, από τα οποία εξήχθησαν αντίστοιχες πολυωνυμικές σχέσεις παρεμβολής, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τη διόρθωση των πρωτογενών αποτελεσμάτων. Αναφορικά με τον συντελεστή L_2 , υιοθετήθηκε σταθερή τιμή ίση με 0,96, η οποία, σύμφωνα με τον Πίνακα 26, αντιπροσωπεύει επαρκώς το σύνολο των εξεταζόμενων διαμέτρων. Η διόρθωση των πρωτογενών τιμών αντοχής διενεργήθηκε σύμφωνα με εξίσωση (73).

$$F_{c,cor} = F_c \cdot L_1 \cdot L_2 \quad (73)$$



Εικόνα 47: Διάγραμμα συντελεστή L_1 , με λόγο ύψους προς διάμετρο $H:D \neq 2$,



Εικόνα 48: Διάγραμμα συντελεστή L2, και διαμέτρου D

Στο Παράρτημα Ε, στους πίνακες μετρήσεων και αποτελεσμάτων η στήλη (10) με τίτλο «Αντοχή F_c » αναφέρεται στην αρχική αντοχή ενώ αποτελεσμάτων η στήλη (11) με τίτλο «Corrected F_c » αναφέρεται στη διορθωμένη αντοχή.

Κεφάλαιο 8

8. Ανάπτυξη εμπειρικών σχέσεων θλιπτικής αντοχής, ταχυτήτων διάδοσης και ειδικού βάρους

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται η στατιστική μεθοδολογία που εφαρμόζεται για τη διατύπωση εμπειρικών σχέσεων μεταξύ της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος και των μετρούμενων μεγεθών ΜΚΔ (ταχύτητα παλμού υπερήχων V_p , ταχύτητα ράβδου V_c , ειδικό βάρος γ_c). Η προσέγγιση συνδυάζει τέσσερις αλληλένδετες τεχνικές: τον μετασχηματισμό Box–Cox της μεταβλητής απόκρισης, τα κλασματικά πολυώνυμα (Multivariable Fractional Polynomials, MFP) για τον εντοπισμό μη-γραμμικών σχέσεων, τα γραμμικά μοντέλα μικτών αποτελεσμάτων (Linear Mixed-Effects Models, LMM) για τη μοντελοποίηση της ιεραρχικής δομής του δείγματος, και την αυτοματοποιημένη διαδικασία αντίστροφου αποκλεισμού όρων για την επιλογή των τελικών ανεξάρτητων μεταβλητών.

Στόχος της ανάλυσης είναι η διατύπωση μιας ενιαίας εμπειρικής εξίσωσης η οποία αποτυπώνει την εξάρτηση της θλιπτικής αντοχής από τις φυσικές μεταβλητές ΜΚΔ, χωρίς εξάρτηση από δευτερεύουσες μεταβλητές (όπως ο τύπος δομικού στοιχείου ή η θέση πυρηνοληψίας). Η επιλογή αυτή διασφαλίζει ότι η τελική εξίσωση έχει γενική εφαρμογή και είναι άμεσα χρησιμοποιήσιμη σε νέες κατασκευές, χωρίς ανάγκη γνώσης πρόσθετων χαρακτηριστικών πέραν αυτών που μετρούνται με τις ΜΚΔ.

Το σύνολο της στατιστικής ανάλυσης πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον R [161] με αξιοποίηση των βιβλιοθηκών `mfr` [159], [162], [166] για τα κλασματικά πολυώνυμα, `lme4` [167] για τα μοντέλα μικτών αποτελεσμάτων, `lmerTest` [168] για τους ελέγχους σημαντικότητας μέσω της προσέγγισης Satterthwaite, `MuMIn` [169] για τους δείκτες R_m^2 και R_c^2 , `performance` [170] για τον υπολογισμό του ICC, `MASS` [171] για τον μετασχηματισμό Box–Cox, και `car` [172] για τον έλεγχο Joint F-test. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθοδολογίας στα πειραματικά δεδομένα της παρούσας διατριβής παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 9.7. Ο πλήρης πηγαίος κώδικας αναφέρεται στο Παράρτημα ΣΤ.

8.1 Πειραματικά δεδομένα και μεταβλητές

8.1.1 Δομή δεδομένων

Η στατιστική ανάλυση βασίζεται σε σύνολο $N = 232$ πυρήνων σκυροδέματος, εξαχθέντων με πυρηνοληψία από διαφορετικές θέσεις δοκιμών σε υφιστάμενες κατασκευές (κτήρια και γέφυρες). Κάθε πυρήνας i συνδέεται με ένα διάνυσμα μετρούμενων μεγεθών x_i και μία απόκριση y_i . Το δείγμα παρουσιάζει ιεραρχική δομή: οι

232 πυρήνες ομαδοποιούνται σε J=22 θέσεις πυρηνοληψίας, που δημιουργούν συστηματική ενδο-ομαδική συσχέτιση μεταξύ των παρατηρήσεων.

8.1.2 Μεταβλητές μοντέλου

Η θλιπτική αντοχή F_c (MPa), προσδιοριζόμενη μέσω μονοαξονικής δοκιμής σε θλίψη, αποτελεί την μεταβλητή απόκρισης (Y) ενώ στον Πίνακα 27 φαίνονται οι συνεχείς ανεξάρτητες μεταβλητές.

Πίνακας 27: Συνεχείς ανεξάρτητες μεταβλητές μοντέλου

Σύμβολο	Φυσικό μέγεθος	Μονάδα Μέτρησης
X_1	Λυγηρότητα L/D	–
X_2	Ταχύτητα παλμού υπερήχων V_p	km/s
X_3	Ταχύτητα ράβδου V_c	km/s
X_4	Ειδικό βάρος γ_c	kN/m ³

Πέραν των συνεχών μεταβλητών, στην ανάλυση εισάγεται η κατηγορική μεταβλητή τύπου δομικού στοιχείου, η οποία λαμβάνει έξι πιθανές τιμές αντιστοιχούσες σε διακριτές κατηγορίες δομικών μελών (Κ: Κολώνα, Π: Πλάκα, Δ: Δοκός, Γ-Β: Γέφυρα–Βάθρο, Γ-Δ: Γέφυρα–Δοκός, Γ-Δ-ΠΡ: Γέφυρα–Δοκός–Προεντεταμένη). Για τη στατιστική μοντελοποίηση, ο τύπος κωδικοποιείται με δύο δυαδικές μεταβλητές δείκτες:

$$\mathbb{I}_K = \begin{cases} 1, & \text{εάν τύπος} = K \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad \mathbb{I}_{GDP} = \begin{cases} 1, & \text{εάν τύπος} = \text{Γ-Δ-ΠΡ} \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Όταν $\mathbb{I}_K = \mathbb{I}_{GDP} = 0$, ο πυρήνας ανήκει στην ομάδα αναφοράς (Reference Types: Π, Δ, Γ-Β, Γ-Δ). Η επιλογή των δύο αυτών κατηγοριών ως διακριτών βασίζεται στην παρατήρηση ότι παρουσιάζουν χαρακτηριστική διαφοροποίηση των μέσων τιμών θλιπτικής αντοχής σε σχέση με την ομάδα αναφοράς, υποδεικνύοντας διαφοροποιημένες σχεδιαστικές κατηγορίες σκυροδέματος και διαφορετικά μηχανικά ιστορικά κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Τέλος, η μεταβλητή θέσης πυρηνοληψίας (ID) εισάγεται στην ανάλυση ως κατηγορική ομαδοποιητική μεταβλητή με 22 επίπεδα, αξιοποιούμενη μέσω του μηχανισμού των τυχαίων αποτελεσμάτων όπως αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 8.4.

8.1.3 Κλιμακοποίηση μεταβλητών

Για αριθμητική σταθερότητα κατά την εκτίμηση των μοντέλων, οι ταχύτητες και το ειδικό βάρος εκφράζονται κλιμακοποιημένα:

$$X_2^* = \frac{V_p}{10}, \quad X_3^* = \frac{V_c}{10}, \quad X_4^* = \frac{\gamma_c}{10}$$

Η κλιμακοποίηση δεν επηρεάζει τη φυσική ερμηνεία των συντελεστών, αλλά εξασφαλίζει ότι όλες οι μεταβλητές βρίσκονται σε συγκρίσιμη τάξη μεγέθους ($\sim 10^{-1}$ έως 10^0), βελτιώνοντας τη σύγκλιση των αλγορίθμων εκτίμησης.

8.2 Μετασχηματισμός Box–Cox της μεταβλητής απόκρισης

8.2.1 Μαθηματική διατύπωση

Πριν τη διατύπωση οποιουδήποτε γραμμικού μοντέλου, αξιολογείται η ανάγκη μετασχηματισμού της μεταβλητής απόκρισης ώστε να ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις κανονικότητας, γραμμικότητας και ομοσκεδαστικότητας των υπολοίπων. Για τον σκοπό αυτόν εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός Box–Cox [173], ο οποίος ορίζεται όπως στην (74).

$$y^{(\lambda)} = \begin{cases} \frac{y^\lambda - 1}{\lambda}, & \lambda \neq 0 \\ \ln(y), & \lambda = 0 \end{cases} \quad (74)$$

Η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου λ προσδιορίζεται μέσω μεγιστοποίησης της λογαριθμοπιθανοφάνειας (log-likelihood) προφίλ $\ell(\lambda)$ εντός ενός βοηθητικού γραμμικού μοντέλου $y \sim x^T \beta$, όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση (75).

$$\hat{\lambda} = \operatorname{argmax}_{\lambda} \ell(\lambda) = \operatorname{argmax}_{\lambda} \left[-\frac{n}{2} \ln \hat{\sigma}^2(\lambda) + (\lambda - 1) \sum_{i=1}^n \ln y_i \right] \quad (75)$$

όπου $\hat{\sigma}^2(\lambda)$ είναι η εκτιμώμενη διακύμανση των υπολοίπων του βοηθητικού μοντέλου για δεδομένη τιμή λ .

8.2.2 Διάστημα εμπιστοσύνης και κριτήριο επιλογής

Το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της παραμέτρου λ προκύπτει από το σύνολο των τιμών που ικανοποιούν την ανίσωση (76).

$$\ell(\lambda) \geq \ell(\hat{\lambda}) - \frac{1}{2} \chi_{1,0,95}^2 \quad (76)$$

όπου $\chi_{1,0,95}^2 = 3,841$ είναι η κρίσιμη τιμή της κατανομής χ^2 με έναν βαθμό ελευθερίας σε επίπεδο σημαντικότητας 5%. Εάν η τιμή $\lambda = 0$ εμπίπτει εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης, ο λογαριθμικός μετασχηματισμός $y \rightarrow \ln(y)$ αποτελεί στατιστικά αιτιολογημένη επιλογή.

8.3 Κλασματικά πολυώνυμα

8.3.1 Ορισμός και θεωρητικό υπόβαθρο

Τα κλασματικά πολυώνυμα (Fractional Polynomials, FP) αναπτύχθηκαν από τους Royston και Altman [159], [166] ως ευέλικτη παραμετρική εναλλακτική των κανονικοποιημένων κυβικών splines. Παρέχουν τη δυνατότητα μη-γραμμικής μοντελοποίησης μιας θετικής συνεχούς μεταβλητής $x > 0$ μέσω συνδυασμού δυνάμεων από ένα προκαθορισμένο διακριτό σύνολο εκθετών:

$$S = \{-2, -1, -0,5, 0, 0,5, 1, 2, 3\}$$

με τη σύμβαση ότι $x^{(0)} = \ln(x)$.

8.3.2 Μορφές κλασματικών πολυωνύμων

Ένα κλασματικό πολυώνυμο πρώτου βαθμού (FP1) ορίζεται όπως η εξίσωση (77).

$$\phi_1(x; \beta, p) = \beta_1 \cdot x^{(p)} \quad (77)$$

Ένα κλασματικό πολυώνυμο δεύτερου βαθμού (FP2) λαμβάνει τη μορφή της εξίσωσης (78).

$$\phi_2(x; \beta, p_1, p_2) = \begin{cases} \beta_1 x^{(p_1)} + \beta_2 x^{(p_2)}, & p_1 \neq p_2 \\ \beta_1 x^{(p)} + \beta_2 x^{(p)} \ln(x), & p_1 = p_2 = p \end{cases} \quad (78)$$

Η ειδική μορφή για επαναλαμβανόμενο εκθέτη ($p_1 = p_2 = p$) εισάγει έναν λογαριθμικό όρο πολλαπλασιασμένο με $x^{(p)}$, παρέχοντας πρόσθετη ευελιξία στην αποτύπωση καμπυλότητας.

8.3.3 Πολυμεταβλητή επιλογή (MFP)

Στην πολυμεταβλητή εκδοχή της μεθόδου (Multivariable Fractional Polynomials, MFP) [159], η διαδικασία εφαρμόζεται διαδοχικά για κάθε συνεχή ανεξάρτητη μεταβλητή. Για κάθε μεταβλητή X_k , η μέθοδος συγκρίνει τέσσερα διαδοχικά μοντέλα: (α) πλήρη αποκλεισμό, (β) γραμμικό όρο, (γ) FP1, και (δ) FP2. Η επιλογή της βέλτιστης μορφής βασίζεται σε διαδοχικούς ελέγχους λόγου πιθανοφάνειας σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0,05$.

8.4 Γραμμικά μοντέλα μικτών αποτελεσμάτων

Η εφαρμογή κλασικής γραμμικής παλινδρόμησης ελαχίστων τετραγώνων (OLS) στα παρόντα δεδομένα θα ήταν στατιστικά εσφαλμένη, καθώς οι παρατηρήσεις εντός της ίδιας θέσης πυρηνοληψίας είναι συσχετισμένες, παραβιάζοντας την υπόθεση ανεξαρτησίας των υπολοίπων του OLS. Η συσχέτιση αυτή, εάν αγνοηθεί, οδηγεί σε υποεκτίμηση των τυπικών σφαλμάτων των συντελεστών και σε παραπλανητικά υψηλή στατιστική σημαντικότητα [167]. Τα γραμμικά μοντέλα μικτών αποτελεσμάτων (LMM) αντιμετωπίζουν συστηματικά το πρόβλημα αυτό, ενσωματώνοντας ρητά την ιεραρχική δομή των δεδομένων.

8.4.1 Γενική διατύπωση

Το γραμμικό μοντέλο μικτών αποτελεσμάτων με τυχαία σταθερά (random intercept) διατυπώνεται μέσω της εξίσωσης (79).

$$y_{ij} = x_{ij}^T \beta + u_j + \varepsilon_{ij} \quad (79)$$

όπου y_{ij} είναι η μεταβλητή απόκρισης για την παρατήρηση i εντός της θέσης j , x_{ij} το διάνυσμα των ανεξάρτητων μεταβλητών, β το διάνυσμα των σταθερών αποτελεσμάτων (fixed effects), u_j η τυχαία σταθερά της θέσης (random intercept), και ε_{ij} το σφάλμα παρατήρησης. Οι τυχαίες συνιστώσες υποτίθενται ανεξάρτητες και κανονικά κατανοημένες:

$$u_j \sim \mathcal{N}(0, \sigma_u^2), \quad \varepsilon_{ij} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\varepsilon^2)$$

8.4.2 Ενδοταξικός συντελεστής συσχέτισης

Η δομή συσχέτισης των ενδοταξικών παρατηρήσεων ποσοτικοποιείται μέσω του προσαρμοσμένου ενδοταξικού συντελεστή συσχέτισης (Adjusted Intra-class Correlation Coefficient, ICC) [170] της εξίσωσης (80).

$$ICC = \frac{\sigma_u^2}{\sigma_u^2 + \sigma_\varepsilon^2} \quad (80)$$

Τιμές $ICC > 0,10$ θεωρούνται ενδεικτικές σημαντικής ομαδοποίησης που δικαιολογεί τη χρήση μοντέλου μικτών αποτελεσμάτων έναντι κλασικού OLS.

8.4.3 Μέθοδοι εκτίμησης

Η εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου πραγματοποιείται με δύο εναλλακτικές μεθόδους. Η μέθοδος μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood, ML) παρέχει αμερόληπτες εκτιμήσεις των σταθερών αποτελεσμάτων αλλά υποεκτιμά τις συνιστώσες διακύμανσης σε πεπερασμένα δείγματα και χρησιμοποιείται κατά τη σύγκριση φωλιασμένων μοντέλων μέσω ελέγχου λόγου πιθανοφάνειας. Η μέθοδος REML (Restricted Maximum Likelihood) παρέχει αμερόληπτες εκτιμήσεις των συνιστωσών διακύμανσης και χρησιμοποιείται για το τελικό επιλεγμένο μοντέλο, για ακριβή αναφορά τυπικών σφαλμάτων και τιμών p . Οι τιμές p των σταθερών αποτελεσμάτων υπολογίζονται με την προσέγγιση των βαθμών ελευθερίας κατά Satterthwaite μέσω της βιβλιοθήκης lmerTest [168].

8.5 Διαδικασία επιλογής μεταβλητών

8.5.1 Αρχικό μοντέλο

Η διαδικασία επιλογής εκκινεί από ένα μεγιστικό μοντέλο, το οποίο περιλαμβάνει το σύνολο των κύριων όρων και των αλληλεπιδράσεων του τύπου δομικού στοιχείου με τους μη-γραμμικούς όρους που εντοπίστηκαν από την ανάλυση MFP της Παραγράφου 8.3. Η γενική μορφή του μεγιστικού μοντέλου φαίνεται στην εξίσωση (81).

$$\ln(y_{ij}) = \beta_0 + x_{ij}^T \beta_M + \mathbb{I}_K x_{ij}^T \beta_K + \mathbb{I}_{GDP} x_{ij}^T \beta_{GDP} + u_j + \varepsilon_{ij} \quad (81)$$

όπου β_M , β_K , β_{GDP} είναι τα διανύσματα συντελεστών των κύριων όρων και των αλληλεπιδράσεων με τους τύπους K και Γ - Δ -ΠΡ αντίστοιχα.

8.5.2 Αυτοματοποιημένος αντίστροφος αποκλεισμός

Η επιλογή των τελικών ανεξάρτητων μεταβλητών πραγματοποιείται μέσω της διαδικασίας αντίστροφου αποκλεισμού (backward elimination). Ξεκινώντας από το αρχικό μοντέλο, σε κάθε επανάληψη αφαιρείται ο όρος με τη μεγαλύτερη τιμή p , υπό την προϋπόθεση της εξίσωσης (82).

$$p_{\max} = \max_k p_k \geq \alpha_{\text{drop}} \quad (82)$$

Το επίπεδο σημαντικότητας τέθηκε σε $\alpha_{\text{drop}} = 0,10$, ελαφρώς υψηλότερο από το συμβατικό $\alpha = 0,05$, ώστε να αποφευχθεί πρόωρη αποβολή οριακά σημαντικών όρων. Η διαδικασία εφαρμόζεται χωρίς ιεραρχικούς περιορισμούς, δηλαδή ένας κύριος όρος ενδέχεται να αφαιρεθεί ακόμη και εάν αλληλεπίδραση που τον περιέχει διατηρείται στο μοντέλο. Η επιλογή αυτή αντικατοπτρίζει αυστηρή στατιστική προσέγγιση όπου διατηρούνται μόνο οι όροι με ίδια σημαντικότητα. Η διαδικασία τερματίζει όταν όλοι οι εναπομείναντες όροι ικανοποιούν $p_k < \alpha_{\text{drop}}$.

Κατά τη διαδικασία της αφαίρεσης χρησιμοποιείται εκτίμηση ML, καθώς αυτή επιτρέπει τη σύγκριση μοντέλων με διαφορετικούς συνδυασμούς σταθερών αποτελεσμάτων. Το τελικό επιλεγμένο μοντέλο επανεκτιμάται με REML, για ακριβή αναφορά συνιστωσών διακύμανσης και τυπικών σφαλμάτων.

8.6 Δείκτες αξιολόγησης μοντέλων

Η αξιολόγηση του τελικού μοντέλου βασίζεται σε τρεις συμπληρωματικούς άξονες: (α) επεξηγηματική ισχύς, (β) ακρίβεια πρόβλεψης, και (γ) απουσία συστηματικού σφάλματος.

8.6.1 Επεξηγηματική ισχύς (Coefficient of Determination)

Η επεξηγηματική ισχύς αξιολογείται μέσω των δεικτών R_m^2 (marginal) και R_c^2 (conditional) κατά Nakagawa και Schielzeth [174], [175] που φαίνονται στις εξισώσεις (83).

$$R_m^2 = \frac{\sigma_f^2}{\sigma_f^2 + \sigma_u^2 + \sigma_\varepsilon^2}, \quad R_c^2 = \frac{\sigma_f^2 + \sigma_u^2}{\sigma_f^2 + \sigma_u^2 + \sigma_\varepsilon^2} \quad (83)$$

όπου $\sigma_f^2 = \text{Var}(X\beta)$ είναι η διακύμανση που ερμηνεύεται από τα σταθερά αποτελέσματα. Ο R_m^2 αντικατοπτρίζει την προβλεπτική ισχύ των φυσικών μεταβλητών, ενώ ο R_c^2 ενσωματώνει επιπλέον την επεξηγηματική συνεισφορά της δομής ομαδοποίησης ανά θέση πυρηνοληψίας.

8.6.2 Πρακτικό σφάλμα πρόβλεψης

Δεδομένου του λογαριθμικού μετασχηματισμού της μεταβλητής απόκρισης, οι προβλέψεις επανέρχονται στην αρχική κλίμακα μέσω εκθετικής αντίστροφης μετατροπής της εξίσωσης (84).

$$\hat{F}_{c,i} = \exp(\mathbf{x}_i^\top \hat{\beta} + \hat{u}_i) \quad (84)$$

Το σφάλμα πρόβλεψης αξιολογείται στην αρχική κλίμακα (MPa) μέσω δύο μετρικών, του Μέσου Απόλυτου Σφάλματος (MAE= Mean Absolute Error - Εξίσωση (85)) και της Ρίζας Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (RMSE= Root Mean Square Error Εξίσωση (86)).

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |F_{c,i} - \hat{F}_{c,i}| \quad (85)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_{c,i} - \hat{F}_{c,i})^2} \quad (86)$$

Το σχετικό σφάλμα ορίζεται ως $\text{MAE}/\bar{F}_c$, όπου $\bar{F}_c$ η μέση θλιπτική αντοχή του δείγματος.

8.6.3 Έλεγχος συστηματικού σφάλματος (Joint F-test)

Για την ανίχνευση συστηματικού σφάλματος (bias) στις προβλέψεις, εφαρμόζεται ο έλεγχος Joint F-test [176], [177] στο γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης πραγματικών έναντι προβλεπόμενων τιμών που φαίνεται στην εξίσωση (87).

$$F_{c,i} = a_0 + a_1 \hat{F}_{c,i} + \eta_i \quad (87)$$

με μηδενική υπόθεση:

$$H_0: (a_0, a_1) = (0, 1)$$

Η μη-απόρριψη της H_0 ($p > 0,05$) υποδεικνύει ότι η γραμμή προσαρμογής πραγματικών–προβλεπόμενων τιμών δεν αποκλίνει στατιστικά σημαντικά από τη διχοτόμο $y = x$, δηλαδή το μοντέλο δεν παρουσιάζει συστηματική υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση της θλιπτικής αντοχής.

8.7 Γενικευμένη δομή προτεινόμενου μοντέλου

Με βάση την παραπάνω μεθοδολογία, στο Κεφάλαιο 9.7 βαθμονομείται και αξιολογείται η ακόλουθη γενικευμένη μορφή εμπειρικής εξίσωσης πρόβλεψης της θλιπτικής αντοχής όπως αυτή εκφράζεται μέσω της εξίσωσης (88).

$$\begin{aligned} \ln(F_c)_{ij} = & \beta_0 + \beta_1 \frac{V_c}{10} + \phi_2\left(\frac{V_c}{10}; \beta_c, p\right) + \phi_2\left(\frac{V_p}{10}; \beta_p, p\right) \\ & + \mathbb{I}_K \cdot \phi_2\left(\frac{V_c}{10}; \beta_{c,K}, p\right) + \mathbb{I}_K \cdot \phi_2\left(\frac{V_p}{10}; \beta_{p,K}, p\right) \\ & + \mathbb{I}_{GDP} \cdot \phi_2\left(\frac{V_c}{10}; \beta_{c,GDP}, p\right) + u_j + \varepsilon_{ij} \end{aligned} \quad (88)$$

όπου $\phi_2(\cdot)$ είναι κλασματικά πολυώνυμα δευτέρου βαθμού των κλιμακοποιημένων ταχυτήτων διάδοσης. Η γενικευμένη δομή του μοντέλου ενσωματώνει όλα τα στοιχεία της μεθοδολογίας: τον λογαριθμικό μετασχηματισμό της απόκρισης, την κλασματική πολυωνυμική μορφή των ταχυτήτων διάδοσης, τη δομή τυχαίας σταθεράς ανά θέση πυρηνοληψίας, και τις αλληλεπιδράσεις του τύπου δομικού στοιχείου με τους κλασματικούς πολυωνυμικούς όρους. Οι αριθμητικοί συντελεστές β_0, β_1 και τα διανύσματα $\beta_c, \beta_p, \beta_{c,K}, \beta_{p,K}, \beta_{c,GDP}$, καθώς και ο εκθέτης p , προσδιορίζονται μέσω εφαρμογής στα πειραματικά δεδομένα στο Κεφάλαιο 9.7, μετά τον αυτοματοποιημένο αντίστροφο αποκλεισμό.

8.8 Διαδικασία εξαγωγής απλοποιημένων διμεταβλητών σχέσεων

Παράλληλα με το πλήρες πολυμεταβλητό μοντέλο αναπτύχθηκαν και απλοποιημένες διμεταβλητές εμπειρικές σχέσεις, στις οποίες κάθε εξαρτημένη μεταβλητή συνδέεται με μία μόνο ανεξάρτητη μεταβλητή. Στόχος των σχέσεων αυτών είναι η παροχή πρακτικών εργαλείων πρόβλεψης για περιπτώσεις όπου το σύνολο των δεδομένων που απαιτείται από το πλήρες πολυμεταβλητό μοντέλο δεν είναι διαθέσιμο.

Η μεθοδολογία εξαγωγής των διμεταβλητών σχέσεων είναι κατά βάση η ίδια με αυτή του πολυμεταβλητού μοντέλου, με τέσσερις συγκεκριμένες απλοποιήσεις.

(α) Παράλειψη της τυχαίας σταθεράς ανά θέση πυρηνοληψίας: Οι διμεταβλητές σχέσεις βαθμονομούνται μέσω κλασικής μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων (OLS) χωρίς ενσωμάτωση των τυχαίων αποτελεσμάτων u_j . Η επιλογή αυτή απορρέει από τον προορισμό των διμεταβλητών σχέσεων ως εργαλείων γενικής εφαρμογής σε νέες κατασκευές, όπου η εκτίμηση τυχαίων αποτελεσμάτων θα ήταν πρακτικά αδύνατη.

(β) Παράλειψη των αλληλεπιδράσεων με τον τύπο δομικού στοιχείου: Οι διμεταβλητές σχέσεις δεν περιλαμβάνουν τους όρους $\mathbb{I}_K$ και $\mathbb{I}_{GDP}$ της Παραγράφου 8.7. Η σχέση είναι ομοιόμορφη για το σύνολο των δομικών στοιχείων του δείγματος, με αποτέλεσμα μειωμένη προβλεπτική ακρίβεια αλλά αυξημένη πρακτική χρηστικότητα.

(γ) Παράλειψη του αυτοματοποιημένου αντίστροφου αποκλεισμού: Δεδομένου ότι η μορφή των διμεταβλητών σχέσεων είναι εξ ορισμού περιορισμένη σε δύο όρους κλασματικού πολυωνύμου ή σε έναν γραμμικό όρο, δεν εφαρμόζεται διαδικασία αντίστροφου αποκλεισμού. Η μορφή των κλασματικών πολυωνυμικών όρων διατηρείται όπως υπέδειξε η ανάλυση MFP του Κεφαλαίου 8.3 (FP2 με $p = 3$ για τις ταχύτητες, γραμμική για το ειδικό βάρος).

(δ) Δείκτες αξιολόγησης: Οι διμεταβλητές σχέσεις, επειδή δεν ενσωματώνουν τυχαία αποτελέσματα, αξιολογούνται μέσω του απλού συντελεστή προσδιορισμού R^2 και του προσαρμοσμένου R^2_{adj} , αντί των δεικτών R^2_m και R^2_c . Οι υπόλοιποι δείκτες (MAE, RMSE, σχετικό σφάλμα, Joint F-test) παραμένουν αμετάβλητοι.

Η γενικευμένη μορφή κάθε διμεταβλητής σχέσης δίνεται από την εξίσωση (89)

$$g(y_i) = \beta_0 + \phi(x_i; \beta, p) + \varepsilon_i \quad (89)$$

όπου $g(\cdot)$ είναι ο μετασχηματισμός της εξαρτημένης μεταβλητής (λογαριθμικός για τη θλιπτική αντοχή, ταυτοτικός για τις ταχύτητες), και $\phi(\cdot)$ είναι κλασματικό πολυώνυμο της μορφής FP2 με $p = 3$ για τις σχέσεις αντοχής–ταχύτητας ή απλή γραμμική μορφή για τις σχέσεις ταχύτητας–ειδικού βάρους.

Η αριθμητική βαθμονόμηση και αξιολόγηση όλων των προτεινόμενων σχέσεων παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 9.7.8.

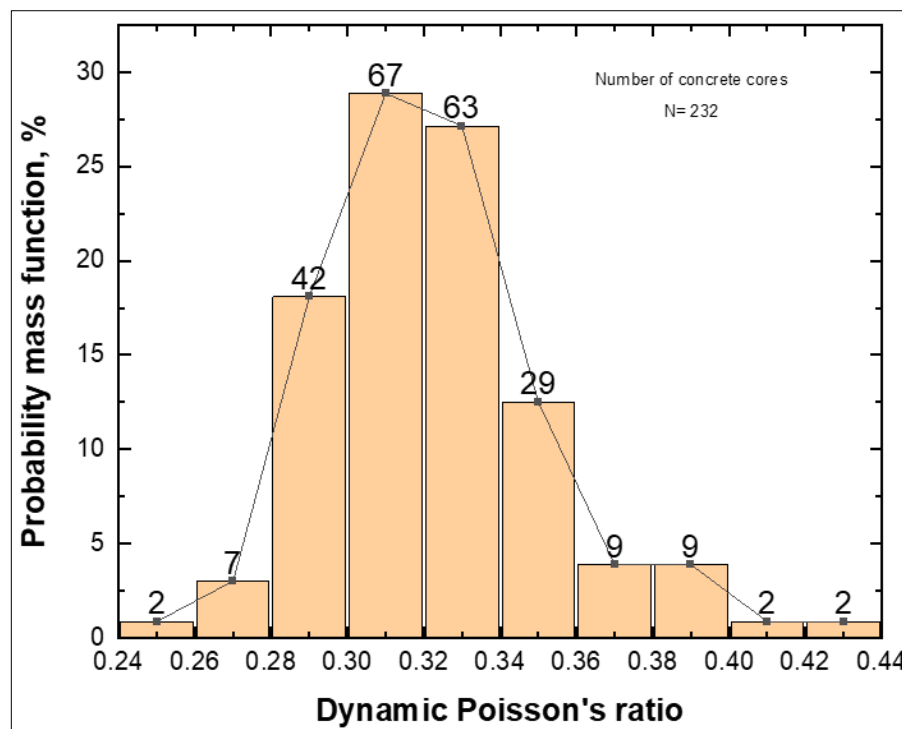
Κεφάλαιο 9

9. Αποτελέσματα

9.1 Απόδειξη της διασποράς των αποτελεσμάτων της μεθόδου UPV

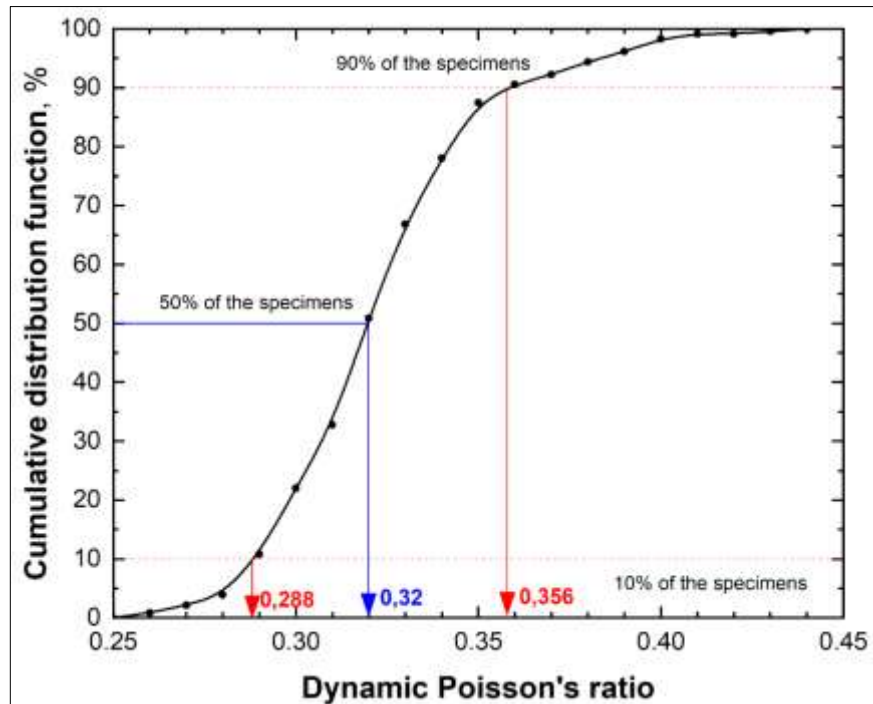
9.1.1 Ποσοτικοποίηση του σφάλματος της UPV

Στο πλαίσιο της παρούσας ερευνητικής εργασίας, διενεργήθηκε εκτεταμένη πειραματική διερεύνηση σε 232 πυρήνες σκυροδέματος που εξήχθησαν από υφιστάμενες κατασκευές. Μετά τον υπολογισμό του λόγου Poisson χρησιμοποιώντας την εξίσωση (16), η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων αποκαλύπτει ότι αυτός κυμαίνεται από 0,25 έως 0,44, με μέση τιμή $\nu = 0,32$. Το ιστόγραμμα στην Εικόνα 49 δείχνει την κατανομή των πυρήνων σε σχέση με την τιμή του δυναμικού λόγου Poisson.



Εικόνα 49: Κατανομή του δυναμικού λόγου Poisson των 232 πυρήνων σκυροδέματος

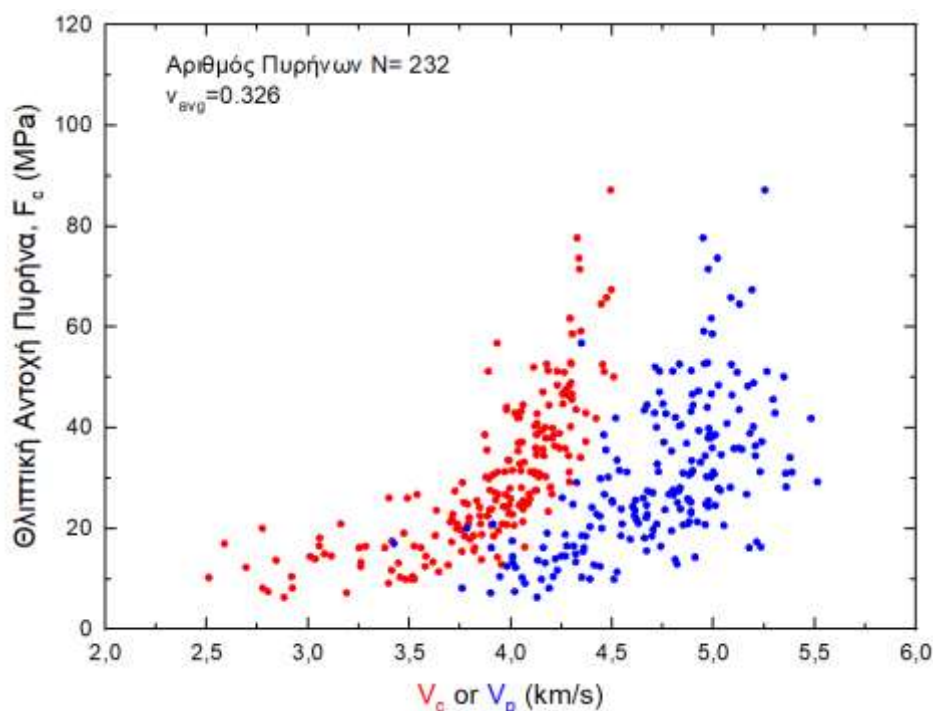
Για το κατώτερο 10% των δειγμάτων, ο λόγος Poisson είναι $\nu < 0,288$, ενώ για το ανώτερο 10% των δειγμάτων, $\nu > 0,356$, όπως φαίνεται στην αθροιστική συνάρτηση κατανομής στην Εικόνα 50.



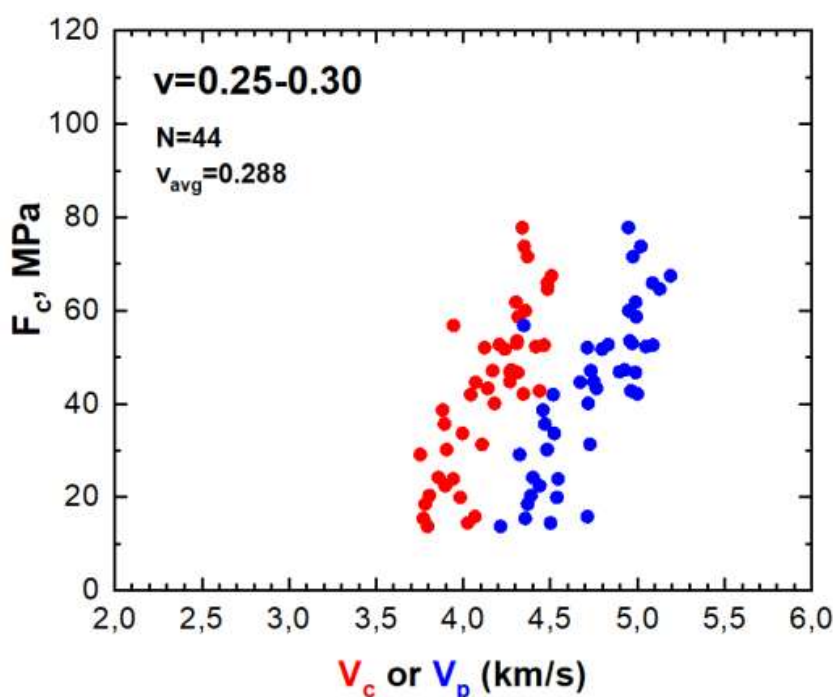
Εικόνα 50: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής (CDF) του δυναμικού λόγου Poisson

Στην Εικόνα 51 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ ταχυτήτων V_p , V_c όπως προέκυψαν από τις δοκιμές UPV και ΙΕ αντίστοιχα έναντι της θλιπτικής αντοχής. Η διασπορά της UPV είναι αισθητά μεγαλύτερη. Τα αποτελέσματα διαχωρίστηκαν σε 10 κλάσεις και είναι ενδιαφέρον ότι για στενότερο εύρος ($\nu = 0,25 - 0,30$), οι δυο μέθοδοι φαίνονται να είναι ισοδύναμες και η διασπορά βελτιώνεται σημαντικά όπως φαίνεται στην Εικόνα 52. Τα αποτελέσματα όλων των κλάσεων είναι διαθέσιμα συγκεντρωτικά στο

Παράρτημα Ε.



Εικόνα 51: Θλιπτική αντοχή συναρτήσει ταχυτήτων V_c (IE) και V_p (UPV)



Εικόνα 52: Θλιπτική αντοχή συναρτήσει ταχυτήτων V_c και V_p για $\nu = 0,25-0,30$

Η υιοθέτηση σταθερής τιμής λόγου Poisson αποτελεί κοινή πρακτική στη βιβλιογραφία, καθώς ο πειραματικός προσδιορισμός του για κάθε μεμονωμένο δοκίμιο δεν είναι πάντοτε εφικτός. Η ευαισθησία όμως του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ως προς τον λόγο Poisson καθιστά αναγκαία την αξιολόγηση του εισαγόμενου σφάλματος. Προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση της υιοθέτησης μιας σταθερής αυθαίρετης τιμής του λόγου Poisson επί του υπολογισμού του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας,

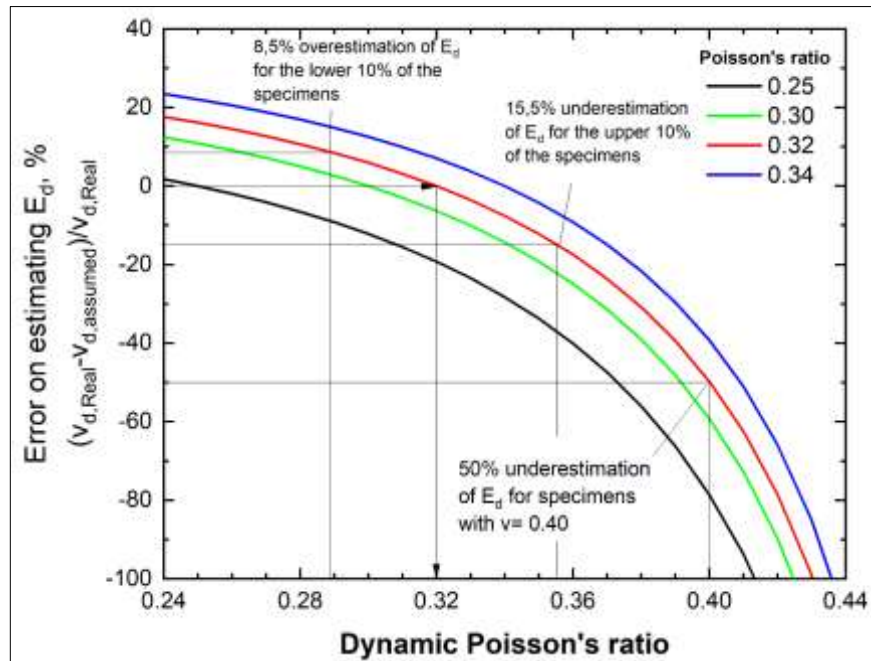
εφαρμόσθηκε η τιμή $\nu = 0,32$, η οποία αντιστοιχεί στον μέσο όρο του λόγου Poisson του συνόλου των εξεταζόμενων πυρήνων. Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας που προέκυψε υπό την εν λόγω παραδοχή συγκρίθηκε με το αντίστοιχο μέτρο που υπολογίσθηκε βάσει του πραγματικού λόγου Poisson του κάθε δοκιμίου, ώστε να ποσοτικοποιηθεί το σφάλμα που εισάγεται από την προαναφερθείσα απλοποιητική παραδοχή.

Κανονικοποιώντας την ποσότητα $\frac{(1+\nu_d)(1-2\nu_d)}{(1-\nu_d)}$ της εξίσωσης (15), η οποία χρησιμεύει ως συντελεστής διόρθωσης για τον υπολογισμό του E_d , για τιμές του λόγου Poisson από $\nu = 0,24 - 0,44$, προκύπτουν οι καμπύλες της Εικόνα 53 μέσω της εξίσωσης (90).

$$E\% = \frac{\nu_{d,Real} - \nu_{d,assumed}}{\nu_{d,Real}} \quad (90)$$

Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 53, το σχετικό σφάλμα κυμαίνεται εντός ενός σημαντικού εύρους τιμών. Για δοκίμια με πραγματικό λόγο Poisson $\nu = 0,288$ — τιμή που αντιστοιχεί στο κατώτερο δεκατημόριο (10° εκατοστημόριο) της κατανομής — παρατηρείται υπερεκτίμηση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας της τάξεως του +8,5%. Αντιθέτως, για δοκίμια με πραγματικό λόγο Poisson $\nu = 0,356$ — τιμή αντίστοιχη προς το ανώτερο δεκατημόριο (90° εκατοστημόριο) — καταγράφεται υποεκτίμηση της τάξεως του -15,5%. Στην ακραία περίπτωση πραγματικού λόγου Poisson $\nu = 0,40$, το σφάλμα υποεκτιμήσεως δύναται να ανέλθει έως και 50%, γεγονός που υποδεικνύει ότι η αδιάκριτη υιοθέτηση σταθερής τιμής λόγου Poisson ενδέχεται να οδηγήσει σε σημαντική στέβλωση των αποτελεσμάτων, ιδιαιτέρως για σκυροδέματα με υψηλότερο πραγματικό λόγο Poisson.

Η ανωτέρω ανάλυση ευαισθησίας αναδεικνύει τη σημασία του ακριβούς προσδιορισμού του λόγου Poisson κατά τον υπολογισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας.



Εικόνα 53: Σφάλμα στην εκτίμηση του E_d συναρτήσει αυθαίρετης επιλογής λόγου Poisson

9.1.2 Αξιολόγηση της UPV ως μεμονωμένη δοκιμή

Προκειμένου να αξιολογηθεί η αξιοπιστία και η εγκυρότητα των εμπειρικών συσχετίσεων που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, τα αποτελέσματα που προέκυψαν βάσει της προτεινόμενης εμπειρικής σχέσεως συσχετίσεως της θλιπτικής αντοχής με την ταχύτητα διάδοσης, στο Κεφάλαιο 8, συγκρίθηκαν με αντίστοιχες συσχετίσεις που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Η σύγκριση αυτή αποτυπώνεται στο διάγραμμα της Εικόνα 54.

Ειδικότερα, απεικονίζονται ενδεικτικώς δύο καμπύλες που προέκυψαν από την παρούσα έρευνα, που αντιστοιχούν σε δύο διακριτές τιμές του λόγου Poisson, $\nu = 0,29$ (διακεκομμένη γραμμή) και $\nu = 0,33$ (συνεχής γραμμή). Διαπιστώνεται ότι οι εξισώσεις παλινδρόμησης που προτάθηκαν από ορισμένους ερευνητές παρουσιάζουν ικανοποιητική σύγκλιση με τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, ενώ άλλες αποκλίνουν σημαντικά.

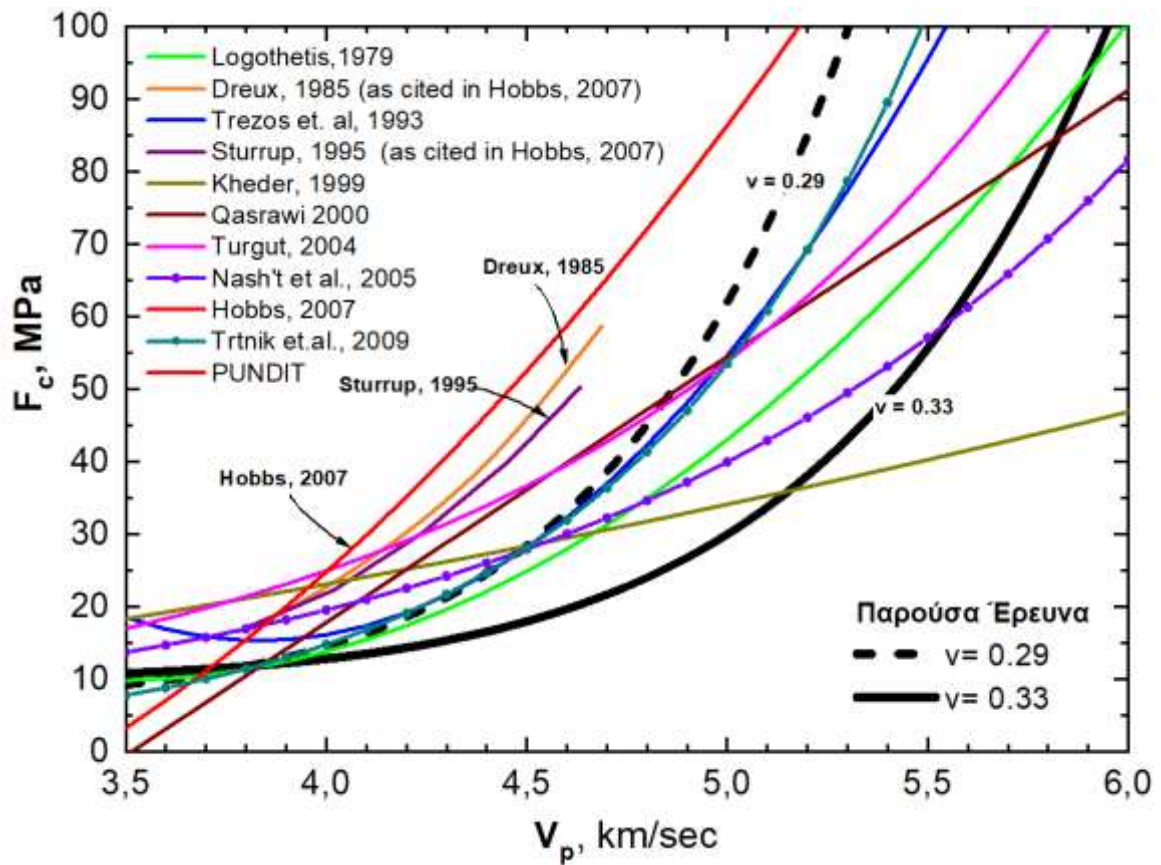
Αναλυτικότερα, οι εμπειρικές καμπύλες των Λογοθέτη (1979), Τρέζου κ.ά. (1993) και Trtnik κ.ά. (2009) περιλαμβάνουν εντός του εύρους τους τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, παρουσιάζοντας ικανοποιητική συμφωνία τόσο στην περιοχή χαμηλών όσο και υψηλών ταχυτήτων υπερήχων. Η σύγκλιση αυτή δύναται να αποδοθεί, μεταξύ άλλων, στη χρήση παρεμφερών τύπων σκυροδέματος, αδρανών υλικών και πειραματικών μεθοδολογιών, καθώς και στο γεγονός ότι οι εν λόγω ερευνητικές εργασίες αναπτύχθηκαν υπό συνθήκες αντιπροσωπευτικές της ελληνικής και ευρωπαϊκής πρακτικής παρασκευής σκυροδέματος.

80 Αντιθέτως, οι εξισώσεις παλινδρομήσεως των Hobbs (2007), Dreux (1985) και Sturru
81 (1995) αποκλίνουν αισθητά από τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας εργασίας.
82 Ειδικότερα, η καμπύλη του Dreux (1985) τείνει να υπερεκτιμά την θλιπτική αντοχή στην
83 περιοχή ταχυτήτων $V_p > 4,5\text{km/s}$, ενώ η καμπύλη του Hobbs (2007) παρουσιάζει
84 χαρακτηριστικά διαφορετική κλίση, υποεκτιμώντας την αντοχή στην περιοχή χαμηλών
85 ταχυτήτων και υπερεκτιμώντας την στην περιοχή υψηλών ταχυτήτων. Η καμπύλη των
86 Sturru (1995) εμφανίζει ομοίως σημαντική απόκλιση, ιδιαιτέρως στο μεσαίο εύρος
87 ταχυτήτων. Οι αποκλίσεις αυτές δύνανται να αποδοθούν σε διαφοροποιήσεις ως προς τη
88 σύνθεση των σκυροδεμάτων, τον τύπο και την προέλευση των αδρανών υλικών, τις
89 συνθήκες ωριμάνσεως, καθώς και τη μεθοδολογία μετρήσεως και επεξεργασίας των
90 πειραματικών δεδομένων.

91 Αναφορικά με τις υπόλοιπες καμπύλες, η εξίσωση του Kheder (1999) και του Qasrawi
92 (2000) παρουσιάζουν μερική σύμπτωση με τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής
93 στην περιοχή μεσαίων ταχυτήτων ($4,0 < V_p < 4,8\text{km/s}$), αποκλίνοντας όμως σταδιακά
94 στις ακραίες τιμές. Η καμπύλη του Turgut (2004) εμφανίζει εξίσου αισθητή απόκλιση,
95 ιδίως στην περιοχή υψηλών αντοχών.

96 Από την ανωτέρω σύγκριση καθίσταται εμφανές ότι, παρά τη γενική ποιοτική
97 συμφωνία μεταξύ των διαφόρων εμπειρικών συσχετίσεων ως προς τη μορφή της σχέσεως
98 F_c-V_p (εκθετική ή πολυωνυμική αύξηση της αντοχής με την ταχύτητα), η ποσοτική
99 διασπορά μεταξύ αυτών παραμένει σημαντική. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαφοροποίηση
100 μεταξύ των δύο καμπυλών της παρούσας έρευνας ($\nu = 0,29$ και $\nu = 0,33$) καταδεικνύει
101 την ουσιαστική επίδραση του λόγου Poisson επί της εκτιμώμενης θλιπτικής αντοχής, ιδίως
102 στην περιοχή υψηλών τιμών ταχύτητας υπερήχων ($V_p > 5,0\text{km/s}$), όπου η απόκλιση
103 μεταξύ των δύο καμπυλών αυξάνεται αισθητά.

104 Κατά συνέπεια, βάσει των πειραματικών ευρημάτων και της συγκριτικής ανάλυσης
105 επιβεβαιώνεται ότι η μέθοδος UPV δεν πρέπει να χρησιμοποιείται ως αυτόνομη δοκιμή
106 για τον αξιόπιστο προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ή της θλιπτικής
107 αντοχής του σκυροδέματος.

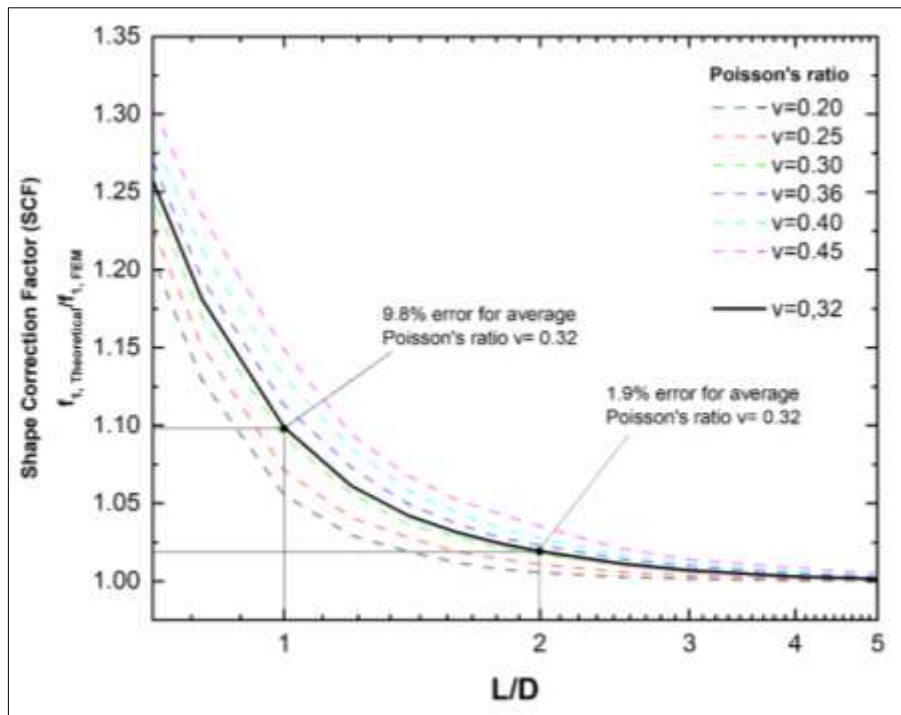


Εικόνα 54: Εμπειρικές συσχετίσεις της αντοχής του σκυροδέματος σε θλίψη, F_c , έναντι του V_p

9.2 Ανάπτυξη διορθωτικού συντελεστή Σχήματος – SCF

9.2.1 Ποσοτικοποίηση του σφάλματος της ΙΕ

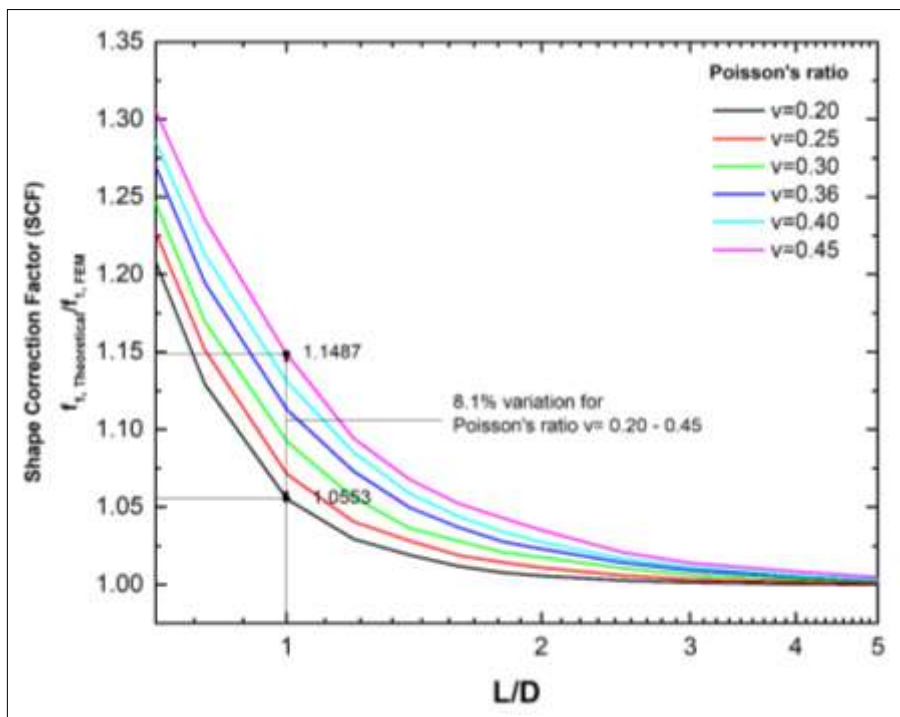
Από την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η μέθοδος ΙΕ, σε συνδυασμό με τον προτεινόμενο συντελεστή διορθώσεως σχήματος SCF που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4.3, παρέχει σημαντικά ακριβέστερες εκτιμήσεις του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας συγκριτικά με τη μέθοδο UPV. Ειδικότερα, η Εξίσωση (56), εφαρμοζόμενη με μέσο λόγο Poisson $\nu = 0,32$, δύναται να εκτιμήσει με ικανοποιητική ακρίβεια το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας. Στην Εικόνα 55 απεικονίζεται ο προτεινόμενος SCF συναρτήσει του λόγου L/D για διάφορες τιμές του λόγου Poisson, όπου η μαύρη συνεχής καμπύλη αντιστοιχεί στην τιμή $\nu = 0,32$. Το σχετικό σφάλμα που προκύπτει από την υιοθέτηση της μέσης τιμής του λόγου Poisson παραμένει μικρότερο του 2% για δοκίμια με λόγο $L/D = 2,0$, ενώ ανέρχεται σε περίπου 9,8% για δοκίμια με λόγο $L/D = 1,0$ ($\nu = 0,32 \pm 0,0313$).



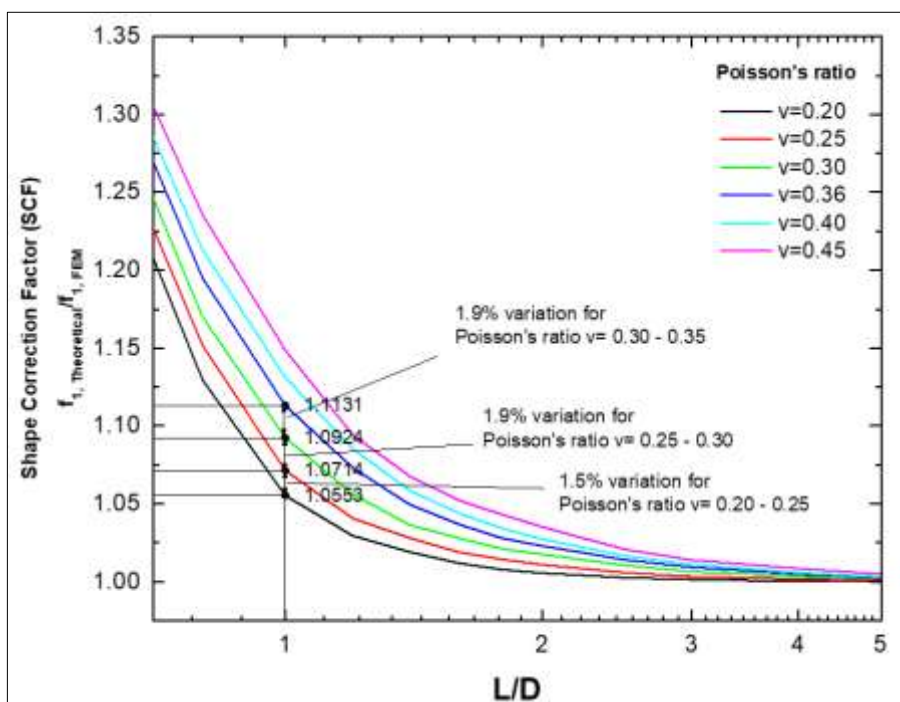
Εικόνα 55: Συντελεστής διόρθωσης σχήματος έναντι λυγηρότητας L/D για έξι διαγράμματα τιμών συντελεστή Poisson, με το σφάλμα υπολογισμού του μέσου συντελεστή Poisson για $L/D=1,0$ και $L/D=2,0$

Η λεπτομερέστερη εξέταση της Εικόνας 56 αναδεικνύει ότι, για λόγο $L/D = 1,0$ — ο οποίος αντιστοιχεί στο τυπικό μέγεθος πυρήνων σκυροδέματος που λαμβάνονται κατά μια πυρηνοληψία — ο συντελεστής διόρθωσης σχήματος κυμαίνεται μεταξύ 1,05 και 1,15, επιφέροντας συνολική διακύμανση σφάλματος της τάξεως του 8,1% επί του συνόλου του εύρους τιμών του λόγου Poisson. Παρόλα αυτά, η εν λόγω διακύμανση μειώνεται σημαντικά εφόσον ο λόγος Poisson περιορισθεί εντός των τυπικών τιμών που απαντώνται στο σκυρόδεμα. Για τιμές του λόγου Poisson εντός του εύρους $\nu = 0,20 - 0,25$, η

134 διακύμανση του SCF ανέρχεται σε μόλις 1,5%, ενώ για τα εύρη $\nu = 0,25 - 0,30$ και $\nu =$
 135 $0,30 - 0,35$ η αντίστοιχη διακύμανση ανέρχεται σε 1,9%, όπως απεικονίζεται στην
 136 Εικόνα 57.

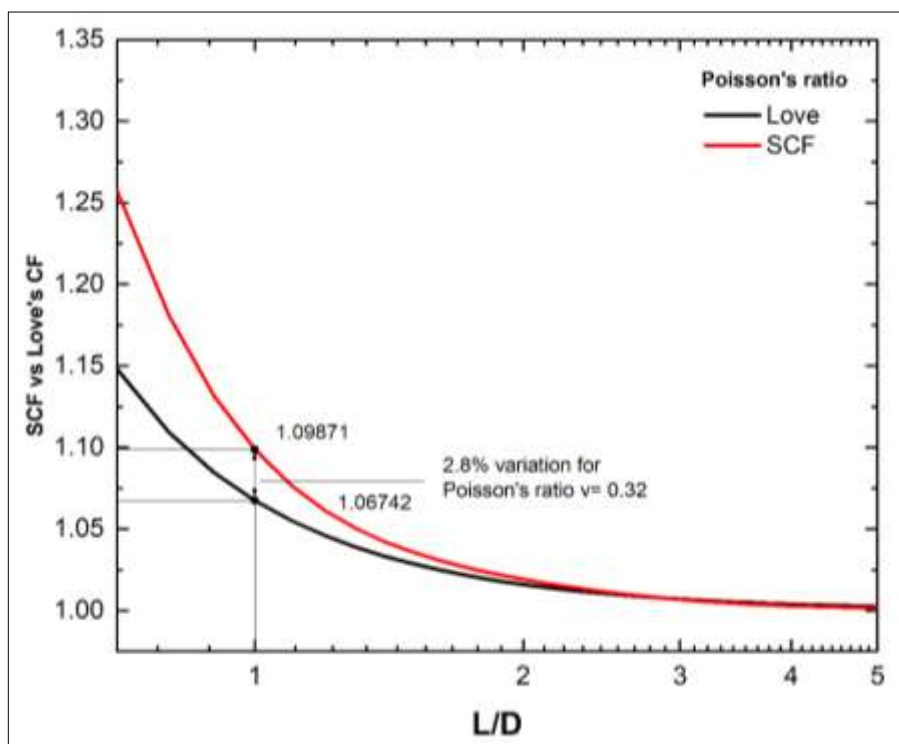


Εικόνα 56: Διάγραμμα συντελεστή διόρθωσης σχήματος έναντι λυγηρότητας L/D για έξι τιμές του συντελεστή Poisson με επισήμανση της διακύμανσης σφάλματος



Εικόνα 57: Συντελεστής διόρθωσης σχήματος έναντι λυγηρότητας L/D για έξι τιμές του συντελεστή Poisson με την απόκλιση σφάλματος για τον τυπικό δυναμικό συντελεστή Poisson στο σκυρόδεμα σημειωμένη

Είναι προφανές, σε κάθε περίπτωση ότι απαιτείται μεγαλύτερη προσαρμογή όταν μειώνεται η λυγηρότητα. Αυτό αποδεικνύει γιατί ο SCF είναι κρίσιμος για τους κοντούς κυλίνδρους καθώς η διόρθωση είναι σημαντική και η υπόθεση μιας τιμής για τον συντελεστή Poisson μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική ανακρίβεια, ειδικά κοντά στο $L/D = 1$. Στην Εικόνα 58 παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ του SCF της παρούσας μελέτης και του προτεινόμενου CF του Love, όπως εκφράζεται από την Εξίσωση 5. Οι δύο CF είναι παρόμοιοι, αν και ο προτεινόμενος SCF παρέχει μεγαλύτερη διόρθωση. Για $L/D = 1$, η διακύμανση στα δύο CF ήταν μόνο 2,8%, με μέσο λόγο Poisson $\nu = 0,32$.



Εικόνα 58: Σύγκριση του SCF με τον CF του Love για μέσες τιμές του λόγου Poisson $\nu=0,32$

9.2.2 Σύγκριση ΙΕ έναντι UPV – Νέα Μεθοδολογία

Η συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη μέθοδος ΙΕ-SCF έναντι της μεθόδου UPV υπερέχει, δεδομένου ότι η πρώτη χαρακτηρίζεται από σημαντικά μικρότερο πιθανό σφάλμα εκτίμησης σε όλο το εξεταζόμενο εύρος τιμών του λόγου Poisson και της λυγηρότητας. Ο περιορισμός που συνίσταται στην ανάγκη εκ των προτέρων γνώσης της τιμής του λόγου Poisson — ο οποίος, όπως αποδείχθηκε, αποτελεί κρίσιμη παράμετρο ευαισθησίας — δύναται να ξεπεραστεί μέσω της ταυτόχρονης εφαρμογής των δοκιμών ΙΕ και UPV και της αξιοποίησης των Εξισώσεων (14) και (16) για τον υπολογισμό του περιορισμένου και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας και στη συνέχεια μέσω της εξίσωσης (26) για τον τελικό υπολογισμό του δυναμικού λόγου Poisson. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί τη βάση της νέας προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Η εν λόγω μεθοδολογία, που ονομάστηκε UPIES (Ultrasonic Pulse velocity – Impact-Echo Synergy), συνίσταται στον ταυτόχρονο προσδιορισμό τόσο του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας όσο και του λόγου Poisson, χωρίς την ανάγκη υιοθέτησης αυθαίρετων τιμών για τον τελευταίο. Η αλγοριθμική διαδικασία εφαρμογής της μεθοδολογίας UPIES παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής της Εικόνα 59, ενώ η συνολική σχηματική απεικόνιση της εφαρμογής της αποτυπώνεται στην Εικόνα 60. Η μεθοδολογία αυτή αξιοποιεί τη συμπληρωματικότητα των δύο μη καταστροφικών δοκιμών, εξαλείφοντας τον βασικό περιορισμό που εντοπίσθηκε κατά τη μεμονωμένη εφαρμογή εκάστης μεθόδου, και αναμένεται να οδηγήσει σε αξιοπιστέστερο προσδιορισμό τόσο των ελαστικών σταθερών όσο και, εμμέσως, της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος.

Βήμα 1: Υπολογισμός της ταχύτητας υπερηχητικού παλμού, V_p :
μέσω της εφαρμογής της μεθόδου UPV



Βήμα 2: Υπολογισμός της πρώτης συχνότητας συντονισμού, f_c :
μέσω της εφαρμογής της μεθόδου IE



Βήμα 3: Διόρθωση της μετρούμενης f_c μέσω του προτεινόμενου
SCF



Βήμα 4: Υπολογισμός της ταχύτητας της ράβδου V_c μέσω της
εξίσωσης 15

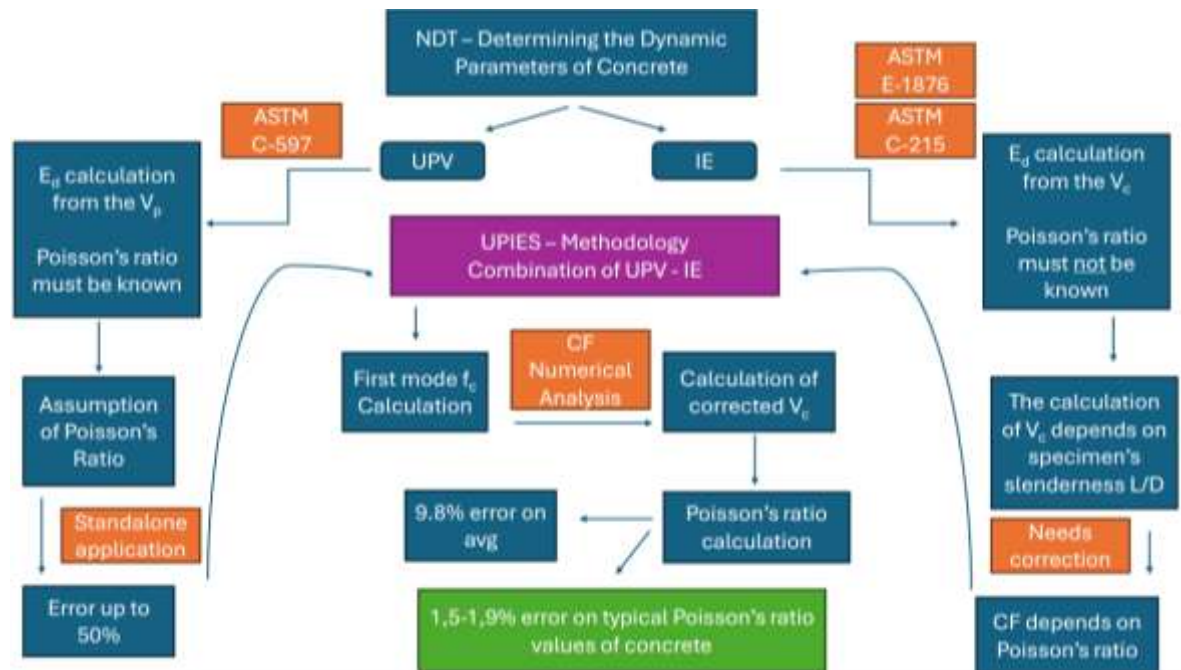


Βήμα 5: Υπολογισμός του περιορισμένου και του δυναμικού
μέτρου ελαστικότητας μέσω των εξισώσεων (14) και (16)



Βήμα 6: Υπολογισμός του λόγου Poisson μέσω της εξίσωσης (26)

Εικόνα 59: Διάγραμμα ροής που απεικονίζει την προτεινόμενη διαδικασία για τον προσδιορισμό της τιμής του συντελεστή Poisson

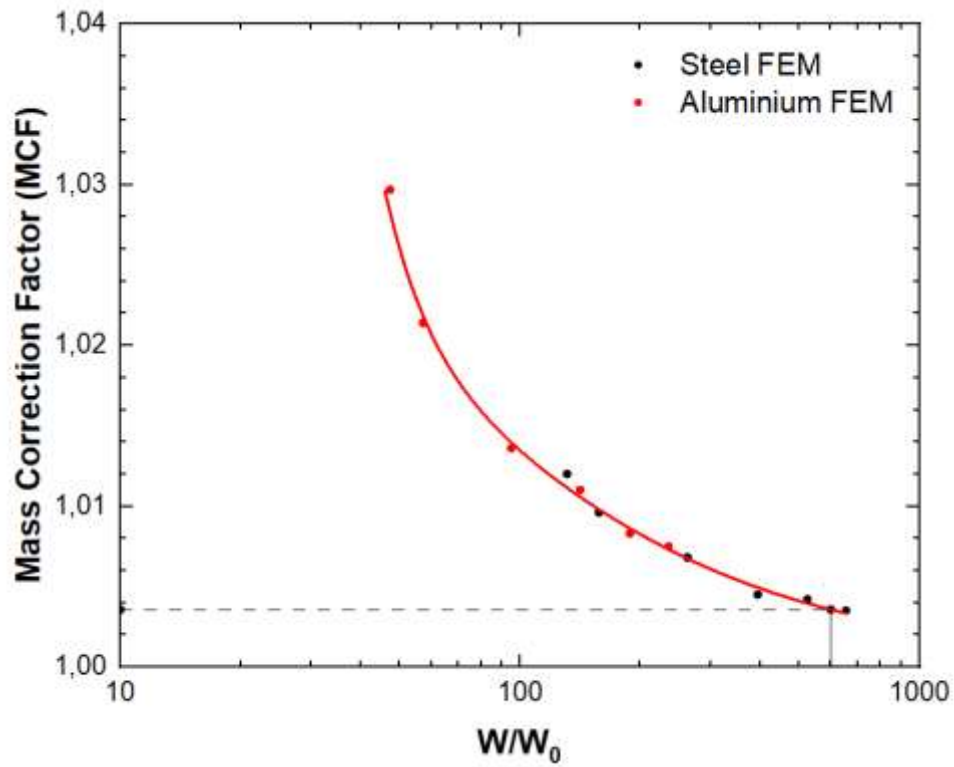


Εικόνα 60: Διάγραμμα ροής της εφαρμογής της UPIES – νέα μεθοδολογία

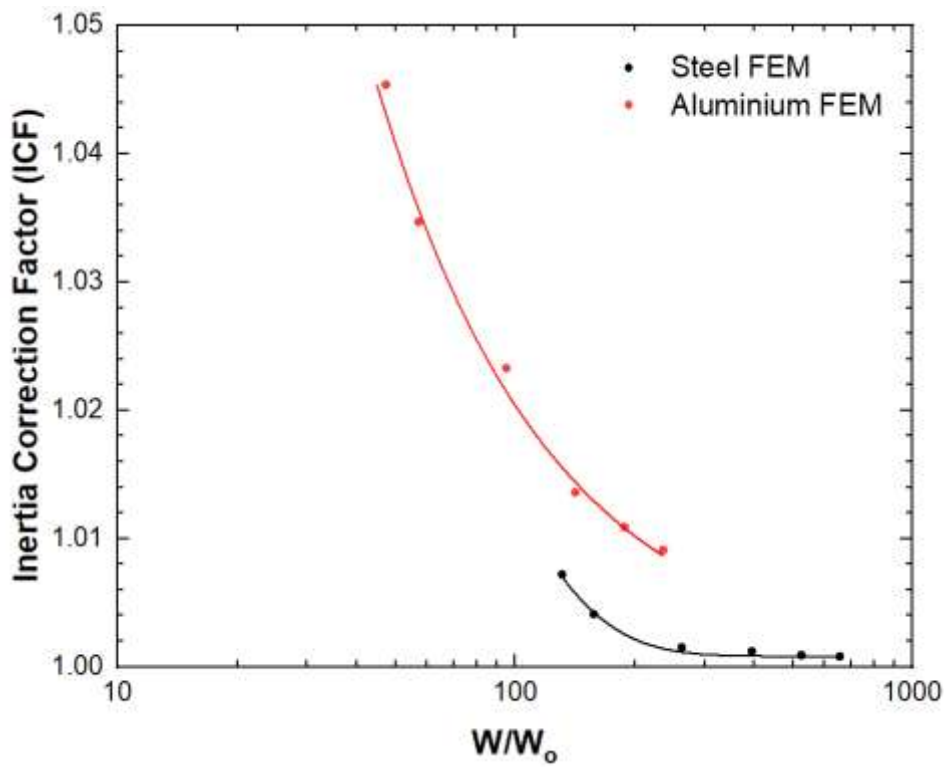
9.3 Ανάπτυξη διορθωτικών συντελεστών Μάζας – MCF και Αδράνειας – ICF

Η δυναμική ανάλυση των προσομοιώσεων δοκιμών IE, τόσο με όσο και χωρίς τη μάζα του επιταχυνσιομέτρου, δείχνει ότι πρέπει να εφαρμοστούν διορθώσεις στις μετρούμενες διαμήκεις συχνότητες (longitudinal mode) όταν περιλαμβάνεται η μάζα του επιταχυνσιομέτρου, προκειμένου να ευθυγραμμιστούν με τις συχνότητες που λαμβάνονται χωρίς τη μάζα. Όταν ο λόγος W/W_0 (μάζα/ μάζα αισθητήρα) είναι χαμηλότερος από 200, πρέπει να εφαρμοστεί ο MCF. Για υψηλές τιμές του λόγου W/W_0 , ο MCF φαίνεται να μην έχει σημαντική επίδραση, καθώς για μια τιμή περίπου 600, που είναι περίπου η τιμή ενός τυπικού πυρήνα σκυροδέματος ή βράχου με $L/D = 1$, η αντίστοιχη διόρθωση είναι περίπου 3,5%. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη μόνο την επίδραση της μάζας του αισθητήρα, η IE μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς καμία διόρθωση στις διαμήκεις ή στρεπτικές συχνότητες των πυρήνων σκυροδέματος και βραχομαζών.

Η λυγηρότητα δεν είχε καμία επίδραση στα αποτελέσματα των δοκιμών IE υπό στρεπτική κρούση (torsional mode), επομένως δεν εφαρμόστηκε καμία διόρθωση σχήματος. Από την άλλη πλευρά, η αδράνεια παίζει σημαντικό ρόλο, στη στρεπτική κρούση, ειδικά για μικρή λυγηρότητα, και πρέπει να εφαρμοστεί ο ICF. Στην Εικόνα 61 φαίνονται τα αποτελέσματα του συντελεστή διόρθωσης μάζας (MCF) για τα δοκίμια από χάλυβα και αλουμίνιο, που προέκυψαν από δοκιμές FEM impact echo (IE) υπό διαμήκη πρόσκρουση με και χωρίς συνεκτίμηση της μάζας του επιταχυνσιομέτρου συναρτήσει του λόγου μάζας δοκιμίου προς μάζα επιταχυνσιομέτρου (W/W_0), ενώ στην Εικόνα 62 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του συντελεστή διόρθωσης αδράνειας (ICF) για τα ίδια δοκίμια από χάλυβα και αλουμίνιο, που προέκυψαν από δοκιμές FEM Impact Echo (IE) υπό στρεπτική πρόσκρουση με και χωρίς να ληφθεί υπόψη η μάζα του επιταχυνσιομέτρου, συναρτήσει του λόγου μάζας δοκιμίου προς μάζα επιταχυνσιομέτρου (W/W_0).



Εικόνα 61: Διορθωτικός Συντελεστής Μάζας (MCF) για δοκίμια FEM από χάλυβα και αλουμίνιο υπό διαμήκη κρούση συναρτήσει του λόγου μάζας του δοκιμίου προς τη μάζα του επιταχυνσιομέτρου (W/W_0)



Εικόνα 62: Συντελεστής διόρθωσης αδράνειας (ICF) για τα δείγματα FEM από χάλυβα και αλουμίνιο υπό στρεπτική κρούση συναρτήσει του λόγου μάζας του δοκιμίου προς τη μάζα του επιταχυνσιομέτρου (W/W_0)

9.4 Πειραματική επιβεβαίωση SCF – MCF – ICF σε χάλυβα και αλουμίνιο

Οι προτεινόμενοι διορθωτικοί συντελεστές επιβεβαιώθηκαν πειραματικά σε κυλινδρικά δοκίμια χάλυβα και αλουμινίου. Παράλληλα εξετάστηκαν τρεις διαφορετικοί συνδυασμοί δοκιμών NDT για τον αξιόπιστο προσδιορισμό του λόγου Poisson σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Κεφαλαίου 7.1.4. Η νέα προτεινόμενη μεθοδολογία, UPIES, ταυτόχρονης χρήσης της UPV και της IE ελέγχθηκε και αποδίδει τον λόγο Poisson των κυλινδρικών δοκιμών χάλυβα και αλουμινίου με τη μεγαλύτερη ακρίβεια.

9.4.1 Αποτελέσματα UPV

Ο Πίνακας 28 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των 12 δοκιμών με τη μέθοδο UPV. Η 3^η στήλη δείχνει την λυγηρότητα του δείγματος L/D , η 4^η στήλη δείχνει τον χρόνο διάδοσης του παλμού σε μs , η 5^η στήλη δείχνει την υπολογισμένη ταχύτητα του παλμού σε m/s και η 6^η στήλη δείχνει το υπολογισμένο περιορισμένο μέτρο ελαστικότητας και τη μέση τιμή του στη στήλη 7.

Πίνακας 28: Αποτελέσματα UPV

A/A	Δείγμα	L/D	t_p (μs)	V_p (m/s)	M (GPa)	$M_{\text{μέσος όρος}}$ (GPa)
1	Χάλυβας	5,0	34,0	5882	270,96	273,93
2	Χάλυβας	4,0	27,1	5904	273,13	
3	Χάλυβας	3,0	20,3	5911	273,97	
4	Χάλυβας	2,0	13,5	5926	275,19	
5	Χάλυβας	1,2	8,1	5926	275,03	
6	Χάλυβας	1,0	6,8	5926	275,29	
7	Αλουμίνιο	5,0	31,40	6369	114,19	115,79
8	Αλουμίνιο	4,0	25,10	6394	115,04	
9	Αλουμίνιο	3,0	18,90	6339	113,36	
10	Αλουμίνιο	2,0	12,60	6443	116,09	
11	Αλουμίνιο	1,2	7,40	6486	119,70	
12	Αλουμίνιο	1,0	6,21	6441	116,33	

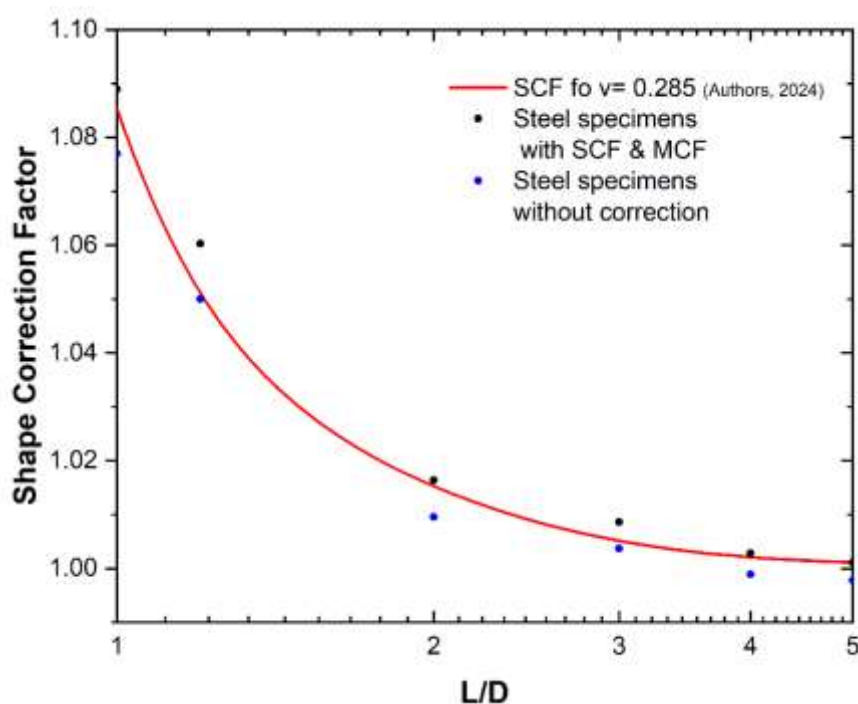
9.4.2 Αποτελέσματα IE – Διαμήκης κρούση (Longitudinal mode)

Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την ανάγκη χρήσης ενός SCF για τη διαμήκη λειτουργία, ενώ ο MCF που προέκυψε από την αριθμητική ανάλυση αποκάλυψε ότι η αλληλεπίδραση της μάζας του επιταχυνσιομέτρου με τη μάζα του δοκιμίου ήταν σημαντική και δεν μπορεί να αγνοηθεί. Η Εικόνα 63 και η Εικόνα 64 δείχνουν τα πειραματικά αποτελέσματα για κυλίνδρους από χάλυβα και αλουμίνιο με έξι διαφορετικές τιμές λυγηρότητας με διόρθωση (SCF και MCF) και χωρίς διόρθωση. Η απόκλιση είναι αξιοσημείωτη, ενώ οι καμπύλες που απεικονίζονται για λόγο Poisson $\nu = 0,285$ για τον χάλυβα και $\nu = 0,341$, οι οποίες είναι σύμφωνες με τα αποτελέσματα, επιβεβαιώνουν την ανάγκη διόρθωσης του σχήματος και της μάζας στις μετρηθείσες συχνότητες. Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε με βάση τις διορθωμένες

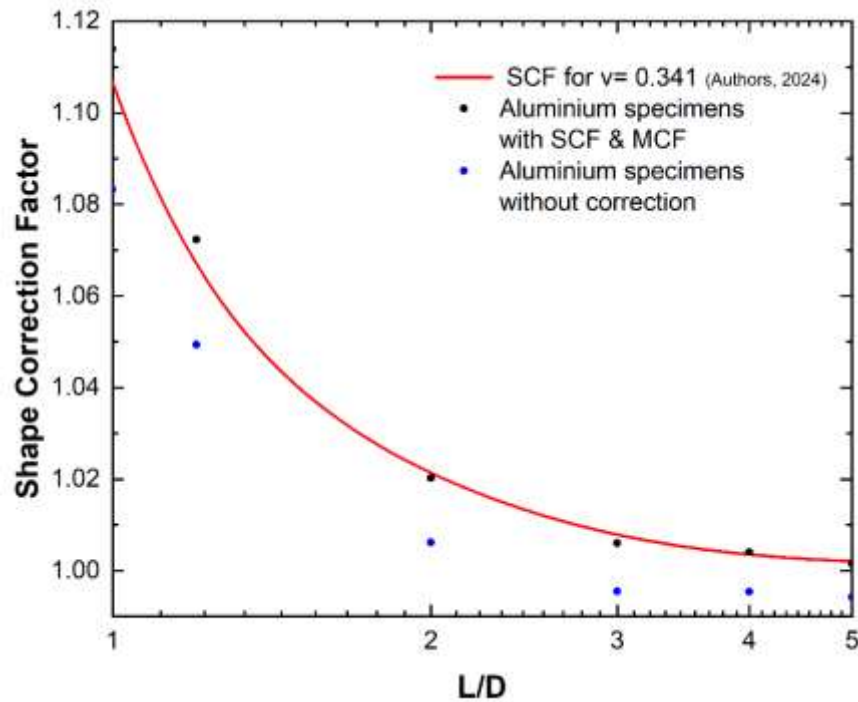
259 συχνότητες/διαμήκεις ταχύτητες. Στον Πίνακα 29, φαίνονται τα αποτελέσματα για τα 12
260 δοκίμια που υποβλήθηκαν σε διαμήκη κρούση, όπου η 3^η στήλη είναι η λυγηρότητα του
261 δοκιμίου, η 4^η στήλη είναι η μάζα του δοκιμίου προς τη μάζα του επιταχυνσιομέτρου, η
262 5^η στήλη είναι η μετρούμενη διαμήκης συχνότητα συντονισμού σε Hz, η 6^η στήλη είναι ο
263 SCF, η 7^η στήλη είναι ο MCF που προέρχεται από την καμπύλη FEM, η 8^η στήλη είναι ο
264 τελικός συντελεστής διόρθωσης, η 9^η στήλη είναι η διορθωμένη ταχύτητα ράβδου, η
265 10^η στήλη είναι ο λόγος της ταχύτητας ράβδου προς την ταχύτητα UPV και η 11^η στήλη είναι
266 το υπολογισμένο δυναμικό μέτρο ελαστικότητας και η μέση τιμή του στη στήλη 12. Στο
267

Πίνακας 29: Αποτελέσματα διαμήκους ΙΕ

A/A	Δείγμα	L/D	W/W ₀	f _{cm} (Hz)	SCF	MCF	Τελική διόρθωση	V _{c cor} (m/s)	V _c /V _p	E (GPa)	Εμέσος όρος (GPa)
1	Χάλυβας	5,0	492,0	12931	0,99777	1,00333	1,00109	5178	0,88027	209,96	211,49
2	Χάλυβας	4,0	393,9	16146	0,99886	1,00395	1,00281	5181	0,87758	210,35	
3	Χάλυβας	3,0	295,6	21485	1,00367	1,00494	1,00862	5186	0,87736	210,89	
4	Χάλυβας	2,0	197,0	31950	1,00956	1,00674	1,01636	5196	0,87677	211,54	
5	Χάλυβας	1,2	118,3	51400	1,04998	1,00980	1,06027	5211	0,87943	212,71	
6	Χάλυβας	1,0	98,5	59900	1,07697	1,01114	1,08897	5218	0,88060	213,48	
7	Αλουμίνιο	5,0	176,9	12775	0,99424	1,00731	1,00151	5118	0,80348	73,72	74,90
8	Αλουμίνιο	4,0	141,4	15900	0,99543	1,00862	1,00401	5124	0,80138	73,88	
9	Αλουμίνιο	3,0	106,4	21300	0,99551	1,01056	1,00603	5134	0,80999	74,37	
10	Αλουμίνιο	2,0	71,3	31100	1,00617	1,01397	1,02023	5152	0,79958	74,22	
11	Αλουμίνιο	1,2	42,9	50432	1,04939	1,02186	1,07233	5192	0,80038	76,68	
12	Αλουμίνιο	1,0	35,5	58624	1,08330	1,02825	1,11390	5224	0,81104	76,52	



Εικόνα 63: Πειραματικά αποτελέσματα για χαλύβδινους κυλίνδρους με έξι διαφορετικές τιμές λυγηρότητας σε σχέση με το SCF με και χωρίς διόρθωση



Εικόνα 64: Πειραματικά αποτελέσματα για κυλίνδρους αλουμινίου με έξι διαφορετικές τιμές λυγηρότητας σε σχέση με το SCF με και χωρίς διόρθωση

9.4.3 Αποτελέσματα ΙΕ – Στρεπτική κρούση (Torsional mode)

Τα πειραματικά αποτελέσματα διορθώθηκαν με τον ICF. Μέσω των διορθωμένων στρεπτικών συχνοτήτων/ταχυτήτων, υπολογίστηκε το δυναμικό μέτρο διάτμησης των δοκιμίων. Στον Πίνακα 30, φαίνονται τα αποτελέσματα για τα 12 δοκίμια χάλυβα και αλουμινίου υπό στρεπτική κρούση, όπου η 3^η στήλη είναι η λυγηρότητα, η 4^η στήλη είναι η μετρούμενη στρεπτική συχνότητα σε Hz, η 5^η στήλη είναι ο συντελεστής διόρθωσης αδράνειας ICF που προέρχεται από την καμπύλη FEM, η 6^η στήλη είναι η διορθωμένη ταχύτητα στρέψης, η 7^η στήλη είναι ο λόγος ταχύτητας στρέψης προς UPV και η 8^η στήλη είναι το υπολογισμένο δυναμικό μέτρο ελαστικότητας και η μέση τιμή του στη στήλη 9.

Πίνακας 30: Αποτελέσματα στρεπτικής ΙΕ

A/A	Δείγμα	L/D	f_{sm} (Hz)	ICF	$V_{s,cor}$ (m/s)	V_s/V_p	G (GPa)	Γ μέσος όρος (GPa)
1	Χάλυβας	5	8075	1	3230	0,54910	81,70	82,27
2	Χάλυβας	4	10100	1	3232	0,54742	81,85	
3	Χάλυβας	3	13475	1	3234	0,54709	82,00	
4	Χάλυβας	2	20250	1	3240	0,54675	82,26	
5	Χάλυβας	1,2	33725	1,004	3251	0,54853	82,75	
6	Χάλυβας	1	40448	1,007	3254	0,54919	83,03	
1	Αλουμίνιο	5	7740	1,00865	3123	0,49028	76,36	77,73
2	Αλουμίνιο	4	9640	1,01082	3128	0,48916	76,66	
3	Αλουμίνιο	3	12850	1,01439	3123	0,49272	76,48	

A/A	Δείγμα	L/D	f_{sm} (Hz)	ICF	$V_{s,cor}$ (m/s)	V_s/V_p	G (GPa)	Γμέσος όρος (GPa)
4	Αλουμίνιο	2	19010	1,02145	3153	0,48933	77,89	
5	Αλουμίνιο	1,2	31940	1,03567	3176	0,48957	78,98	
6	Αλουμίνιο	1	38285	1,04310	3195	0,49600	80,02	

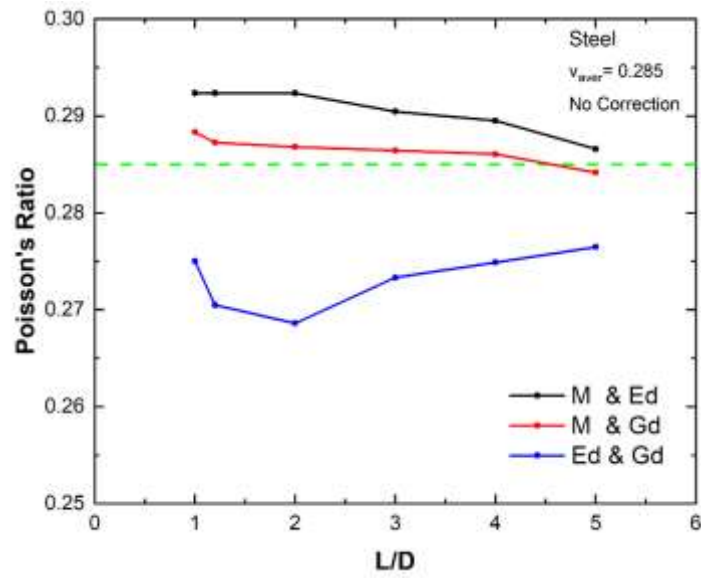
9.4.4 Υπολογισμός του λόγου Poisson

Με τα τρία μέτρα (Περιορισμένο – Δυναμικό – Διάτμησης) ήδη υπολογισμένα και χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που περιγράφονται στην μεθοδολογία του Κεφαλαίου 7.1.4, υπολογίστηκε ο συντελεστής Poisson. Ο Πίνακας 31 παρουσιάζει τους μεμονωμένους υπολογισμούς για όλα τα δοκίμια, καθώς και τις μέσες τιμές των δύο υλικών. Οι τρεις μέθοδοι συγκρίθηκαν και είναι προφανές ότι το σφάλμα στον υπολογισμό του λόγου Poisson, όταν δεν εφαρμόζονται διορθωτικοί συντελεστές, είναι σημαντικό. Η Εικόνα 65 παρουσιάζει μια σύγκριση του λόγου Poisson των χαλύβδινων κυλίνδρων συναρτήσει της λυγηρότητας για τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς δοκιμών, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο MCF στη δοκιμή IE υπό διαμήκη κρούση (που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του E_d) και ο ICF υπό στρεπτική κρούση (που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του G_d), ενώ η Εικόνα 67 παρουσιάζει τον ίδιο υπολογισμό του λόγου Poisson για το αλουμίνιο. Η Εικόνα 66 παρουσιάζει μια σύγκριση του λόγου Poisson για κυλίνδρους από χάλυβα συναρτήσει της λυγηρότητας για τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς δοκιμών, λαμβάνοντας υπόψη τον MCF στη δοκιμή IE υπό διαμήκη κρούση (που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του E_d) και τον ICF υπό στρεπτική κρούση (που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του G_d), ενώ η Εικόνα 68 παρουσιάζει τα ίδια αποτελέσματα για κυλίνδρους από αλουμίνιο. Οι μεμονωμένες τιμές τους έχουν πολύ καλή κατανομή γύρω από τον μέσο όρο.

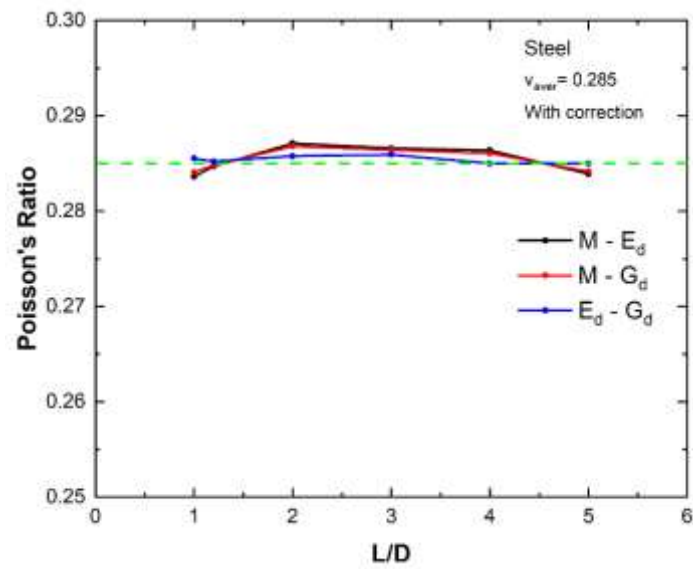
Πίνακας 31: Υπολογισμός του λόγου Poisson

A/A	Δείγμα	M - E_d	M - G_d	E_d - G_d
1	Χάλυβας	0,284	0,284	0,285
2	Χάλυβας	0,286	0,286	0,285
3	Χάλυβας	0,287	0,286	0,286
4	Χάλυβας	0,287	0,287	0,286
5	Χάλυβας	0,285	0,285	0,285
6	Χάλυβας	0,284	0,284	0,286
Μέσος		0,285	0,285	0,285
7	Αλουμίνιο	0,342	0,342	0,343
8	Αλουμίνιο	0,343	0,343	0,342
9	Αλουμίνιο	0,338	0,340	0,351
10	Αλουμίνιο	0,344	0,343	0,335

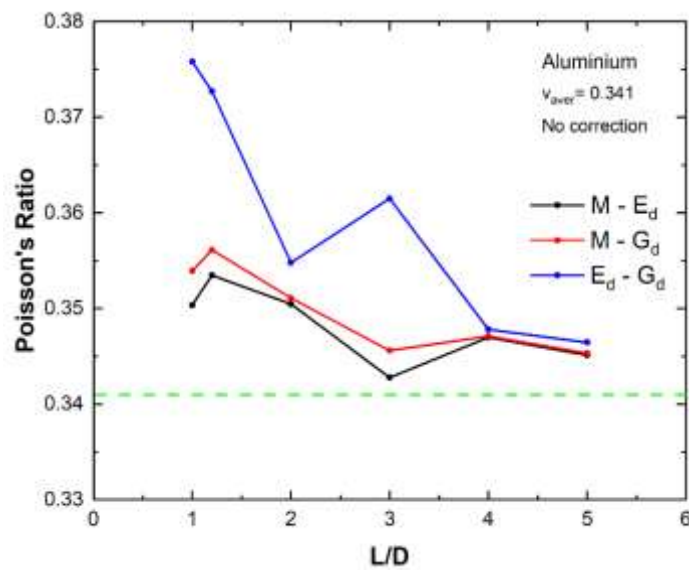
A/A	Δείγμα	M - E _d	M - G _d	E _d - G _d
11	Αλουμίνιο	0,343	0,342	0,336
12	Αλουμίνιο	0,337	0,337	0,337
	Μέσος	0,341	0,341	0,341



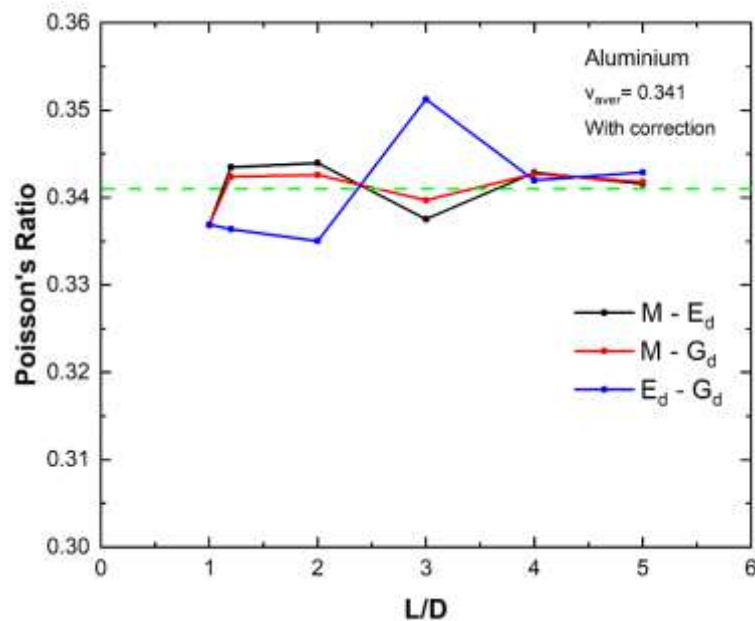
Εικόνα 65: Σύγκριση του λόγου Poisson μεταξύ χαλύβδινων κυλίνδρων συναρτήσει της λυγηρότητας για τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς δοκιμών χωρίς διόρθωση



Εικόνα 66: Σύγκριση του λόγου Poisson μεταξύ χαλύβδινων κυλίνδρων συναρτήσει της λυγηρότητας για τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς δοκιμών με διόρθωση



Εικόνα 67: Σύγκριση του λόγου Poisson μεταξύ κυλίνδρων αλουμινίου συναρτήσει της λυγηρότητας για τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς δοκιμών χωρίς διόρθωση

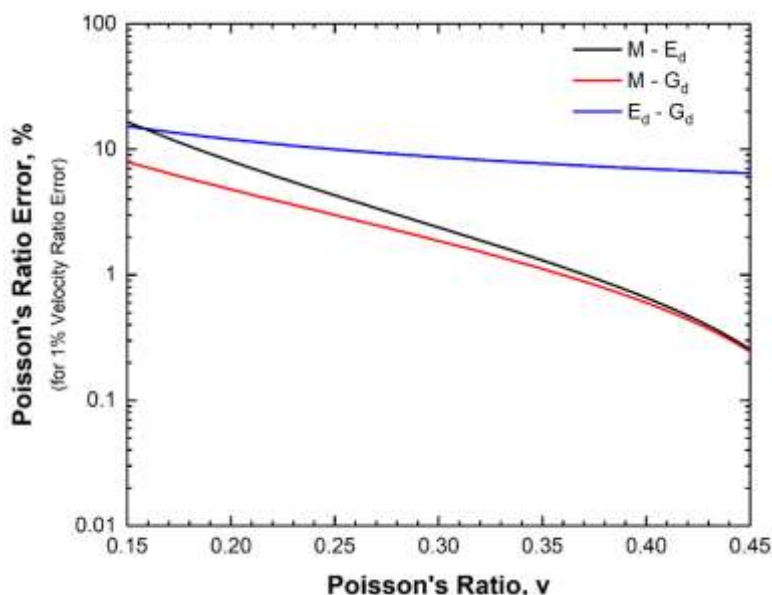


Εικόνα 68: Σύγκριση του λόγου Poisson μεταξύ κυλίνδρων αλουμινίου συναρτήσει της λυγηρότητας για τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς δοκιμών με διόρθωση

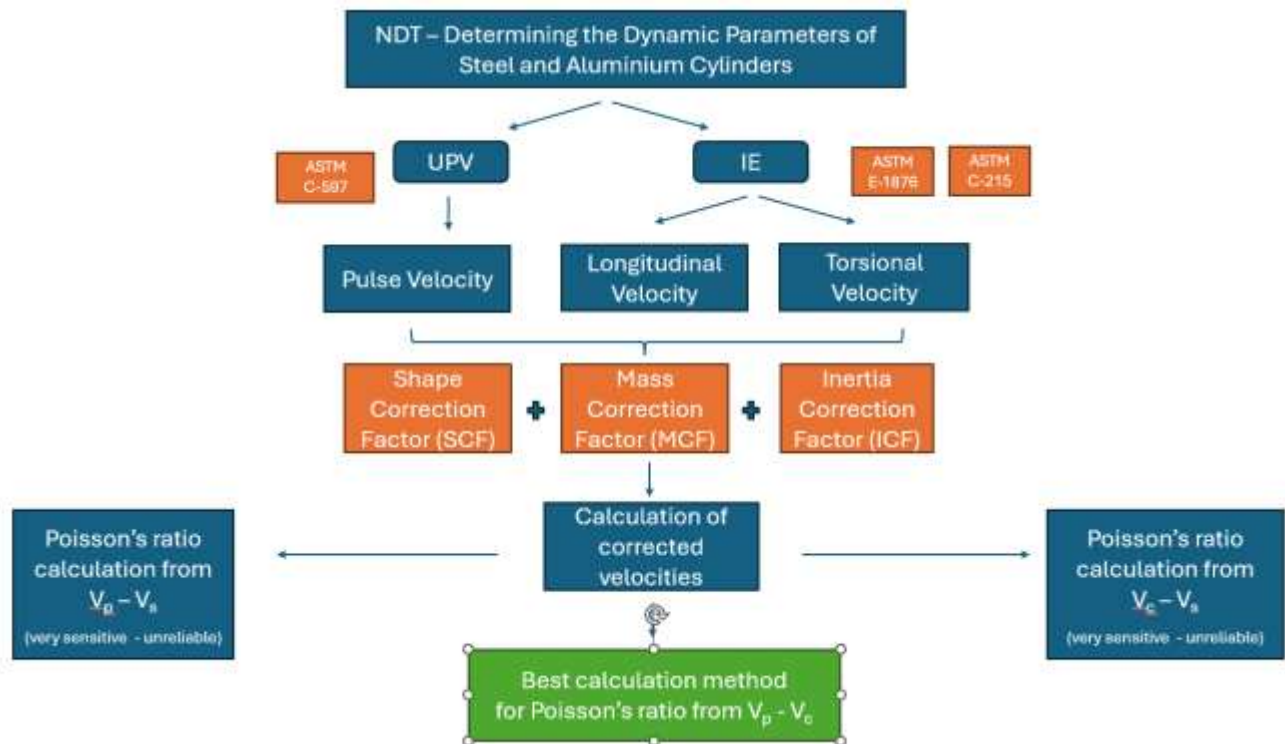
Η Εικόνα 69 απεικονίζει ένα θεωρητικό παράδειγμα του σφάλματος του λόγου Poisson σε σχέση με τον λόγο Poisson που προέκυψε από τους τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς δοκιμών ($M - E_d$, $M - G_d$ και $E_d - G_d$) όταν το σφάλμα στον μετρημένο λόγο ταχύτητας των τριών συνδυασμών δοκιμών, V_p/V_c , V_p/V_s και V_c/V_s , είναι 1%. Η λιγότερο αξιόπιστη μέθοδος φαίνεται να είναι η IE για το συνδυασμό διαμήκους και στρεπτικής δοκιμής, καθώς μια μεγάλη διακύμανση στον πραγματικό λόγο Poisson έχει ως αποτέλεσμα περίπου το ίδιο σφάλμα, ειδικά αν περιορίσουμε το εύρος του λόγου μεταξύ 0,25 και 0,35, όπου η πραγματική τιμή είναι αβέβαιη. Οι άλλες δύο μέθοδοι είναι αρκετά παρόμοιες για

υψηλές τιμές του λόγου, αλλά και πάλι, αν επικεντρωθούμε στο προαναφερθέν εύρος, ο συνδυασμός της UPV και της διαμήκουσ λειτουργίας της IE αποδίδει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Για τον προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων κοντών κυλίνδρων, η μεθοδολογία URIES, ο συνδυασμός δηλαδή δύο ανεξάρτητων δοκιμών, μιας UPV και μιας IE σε διαμήκη διάδοση, είναι μια πιο αξιόπιστη προσέγγιση. Κατά τη δοκιμή κυλίνδρων από χάλυβα και αλουμίνιο, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της λυγηρότητας. Η μάζα του αισθητήρα προστίθεται επίσης στα αποτελέσματα. Οι μετρημένες συχνότητες πρέπει να διορθωθούν μέσω SCF και MSC. Για τους κυλίνδρους από σκυρόδεμα ή βράχο, οι συχνότητες πρέπει να διορθωθούν λόγω του φαινομένου λυγηρότητας, αλλά λόγω του μεγάλου λόγου W/W_0 δεν απαιτείται διόρθωση μάζας. Ένα διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 70.



Εικόνα 69: Παράδειγμα του σφάλματος του λόγου Poisson σε συνάρτησι του λόγου Poisson από τους τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς δοκιμών, όταν το σφάλμα στον μετρημένο λόγο ταχύτητας είναι 1%



Εικόνα 70: Διάγραμμα ροής του υπολογισμού του λόγου Poisson χρησιμοποιώντας τους προτεινόμενους CF

9.5 Αποτελέσματα υπολογισμού λόγου Poisson μέσω της IE ως αυτόνομης δοκιμής

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων αναφορικά με τον προσδιορισμό του δυναμικού λόγου Poisson (ν_d) κυλινδρικών δοκιμών μέσω της IE ως αυτόνομης δοκιμής. Ειδικότερα, εξετάζεται η κατανομή του υπολογισμένου λόγου Poisson κατά μήκος της πλευρικής (διαμήκου) ελεύθερης επιφάνειας L του δοκιμίου, σε συνάρτηση με τη θέση τοποθέτησης του αισθητήρα μέτρησης. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται διαγραμματικά ως προς τον αδιάστατο λόγο z/L , όπου z αντιπροσωπεύει το ύψος του σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου και L το συνολικό ύψος αυτού. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται κανονικοποιημένα διαγράμματα, στα οποία ο υπολογισμένος λόγος Poisson (ν_{calc}) εκφράζεται ως προς τον θεωρούμενο (εισαγόμενο στο μοντέλο) λόγο Poisson (ν_{used}), δηλαδή ν_{calc}/ν_{used} .

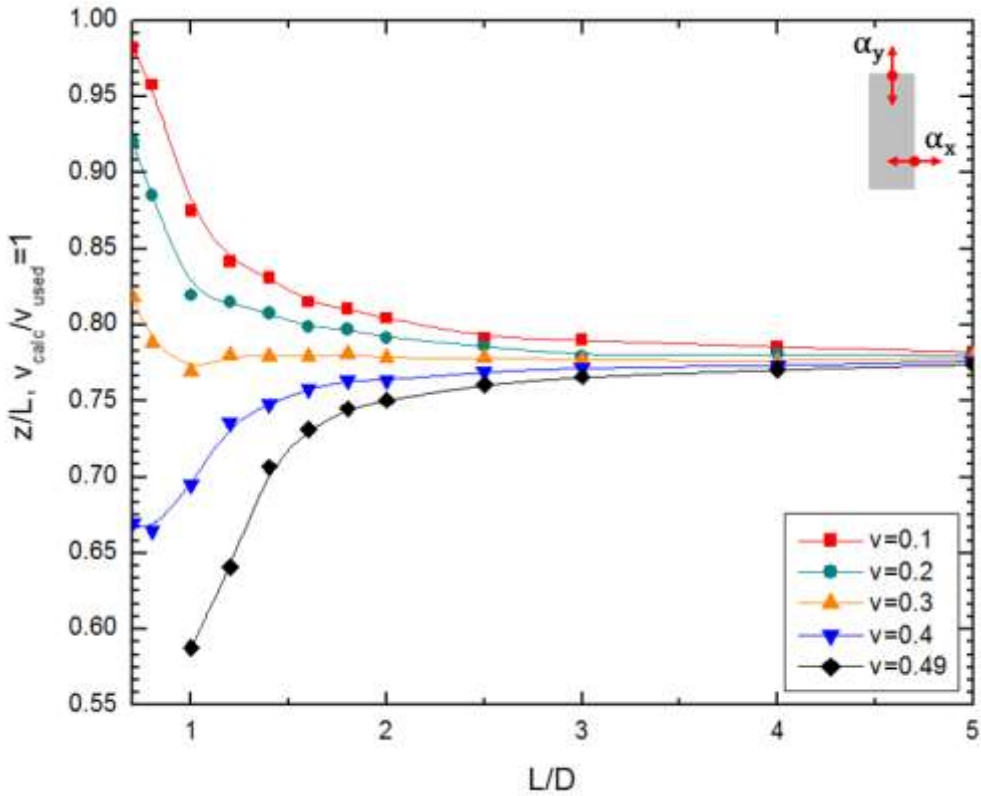
9.5.1 Αποτελέσματα Μεθοδολογίας 1

Σύμφωνα με τη Μεθοδολογία 1, ο υπολογισμός του δυναμικού λόγου Poisson βασίζεται στον λόγο των οριζόντιων (πλευρικών) επιταχύνσεων, καταγεγραμμένων σε σημεία της κατακόρυφης ελεύθερης επιφάνειας L , προς την κατακόρυφη επιτάχυνση στο κέντρο της οριζόντιας ελεύθερης επιφάνειας D . Στον Πίνακα 32 και στην Εικόνα 71 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ του λόγου Poisson και του βέλτιστου ύψους τοποθέτησης z/L του επιταχυνσιομέτρου, δηλαδή εκείνου στο οποίο ο

κανονικοποιημένος λόγος ν_{calc}/ν_{used} ισούται με τη μονάδα, επιτρέποντας τον ακριβή προσδιορισμό του δείκτη Poisson χωρίς συστηματικό σφάλμα. Η πληροφορία αυτή αποτελεί κεντρικό εύρημα της μεθοδολογίας, καθώς παρέχει πρακτικές κατευθυντήριες οδηγίες για τη βέλτιστη τοποθέτηση του αισθητήρα κατά τις πειραματικές δοκιμές.

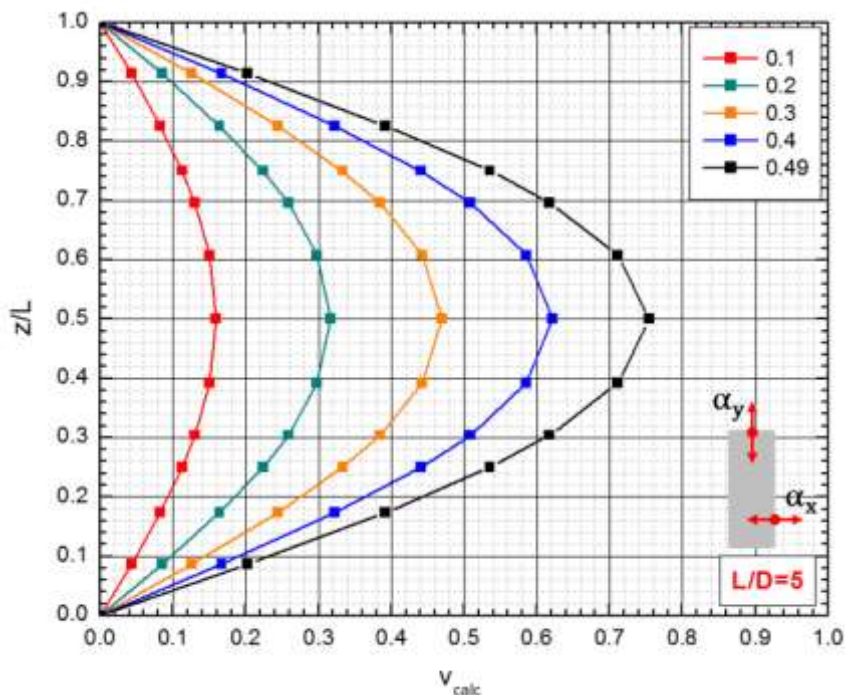
Πίνακας 32: Αριθμητικά αποτελέσματα συσχέτισης λόγου L/D με το ύψος τοποθέτησης του επιταχυνσιομέτρου (z/L) για την εύρεση του λόγου Poisson ν , Μεθοδολογία 1

Poisson's ratio	$\nu=0,1$	$\nu=0,2$	$\nu=0,3$	$\nu=0,4$	$\nu=0,49$	Μέσο Ύψος Τοποθέτησης
L/D	z/L					
5,0	0,7824	0,7799	0,7784	0,7762	0,7740	0,78
4,0	0,7854	0,7806	0,7762	0,7733	0,7705	0,78
3,0	0,7900	0,7795	0,7770	0,7719	0,7661	0,78
2,5	0,7915	0,7861	0,7784	0,7693	0,7611	0,78
2,0	0,8045	0,7915	0,7781	0,7636	0,7505	0,78
1,8	0,8104	0,7973	0,7806	0,7636	0,7450	0,78
1,6	0,8150	0,7987	0,7795	0,7581	0,7313	0,78
1,4	0,8310	0,8075	0,7795	0,7484	0,7067	0,77
1,2	0,8419	0,8150	0,7783	0,7356	0,6409	0,76
1,0	0,8753	0,8197	0,7698	0,6951	0,5879	0,75
0,8	0,9577	0,8850	0,7879	0,6647	-	0,82
0,7	0,9817	0,9200	0,8184	0,6696	-	0,85



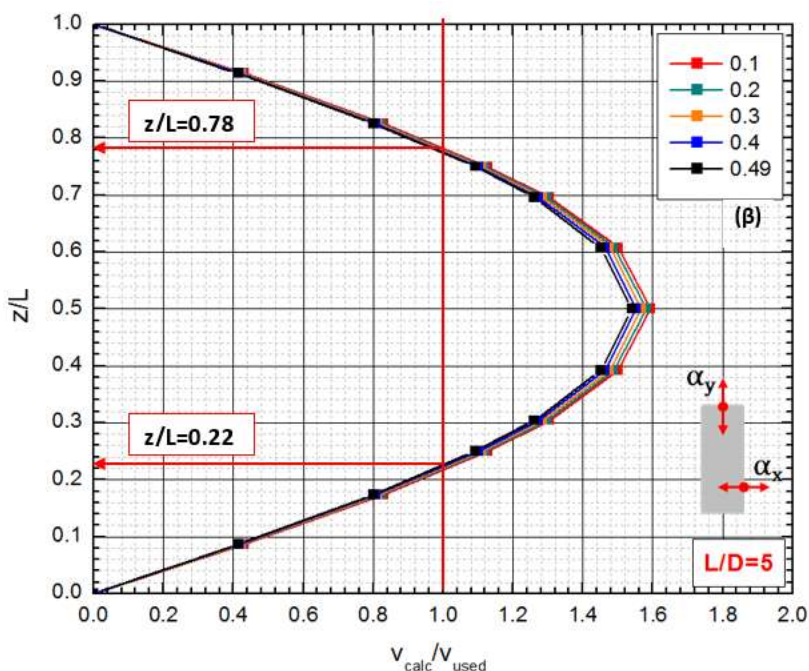
Εικόνα 71: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου L/D με το ύψος τοποθέτησης του επιταχυνσιομέτρου (z/L) για την εύρεση του λόγου Poisson ν , Μεθοδολογία 1

373 Από την εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας προέκυψαν τα διαγράμματα μεταβολής
 374 του λόγου Poisson ως προς τον αδιάστατο λόγο ύψους z/L , για τις εξεταζόμενες τιμές
 375 λυγρότητας L/D (Εικόνα 72 - Εικόνα 77). Στο **Παράρτημα Β** παρατίθενται τα
 376 πλήρη διαγράμματα για κάθε εξεταζόμενη τιμή L/D , καθώς και πινακοποιημένα
 377 αριθμητικά αποτελέσματα για το σύνολο των αναλύσεων.



378

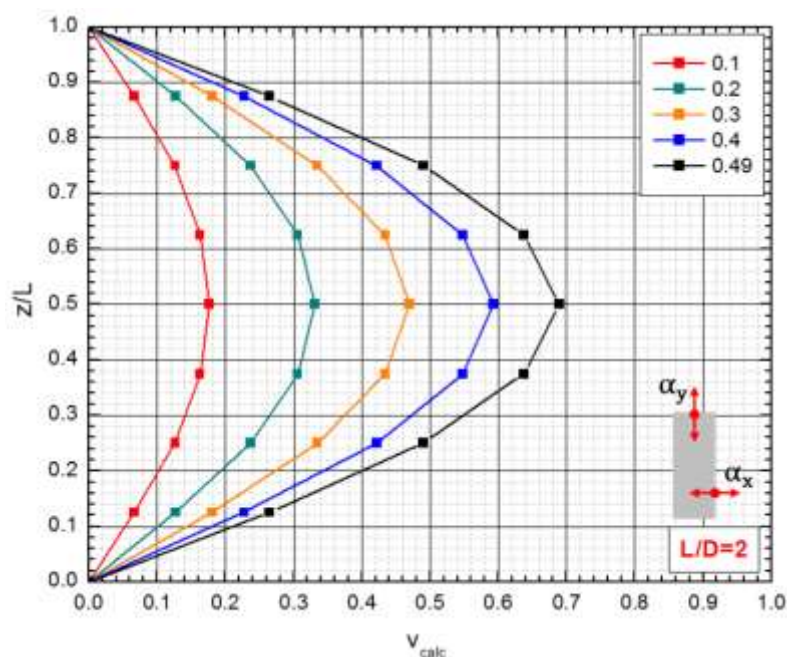
379 Εικόνα 72: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του
 380 δοκιμίου για λόγο $L/D=5$, Μεθοδολογία 1 – Μεταβολή του λόγου Poisson με το ύψος



381

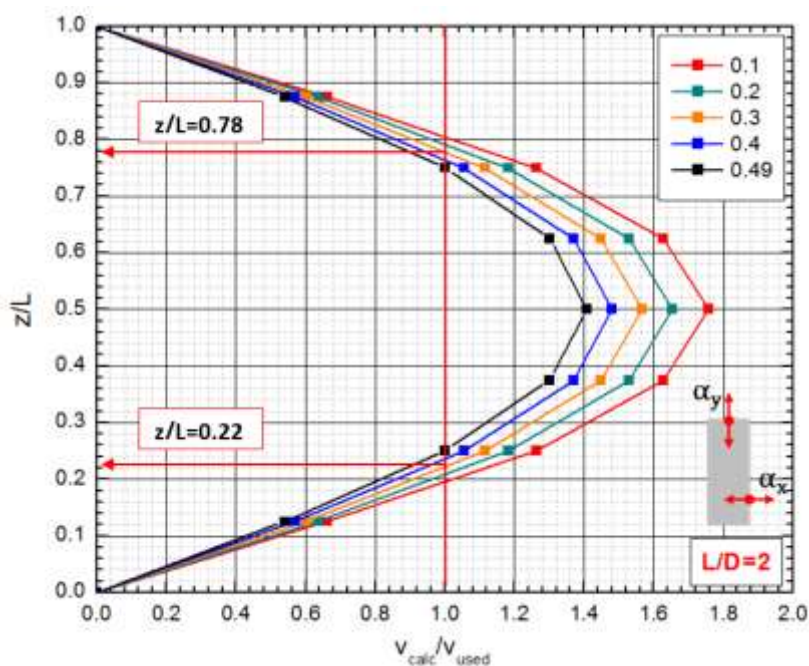
382
383

Εικόνα 73: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=5$, Μεθοδολογία 1 – Μεταβολή του κανονικοποιημένου λόγου Poisson με το ύψος



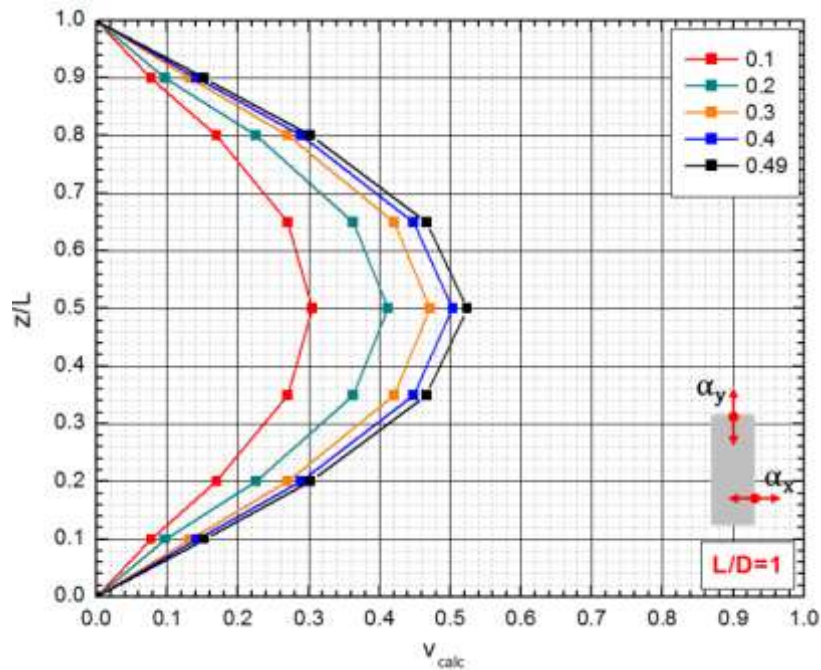
384
385
386

Εικόνα 74: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=2$, Μεθοδολογία 1 – Μεταβολή του λόγου Poisson με το ύψος

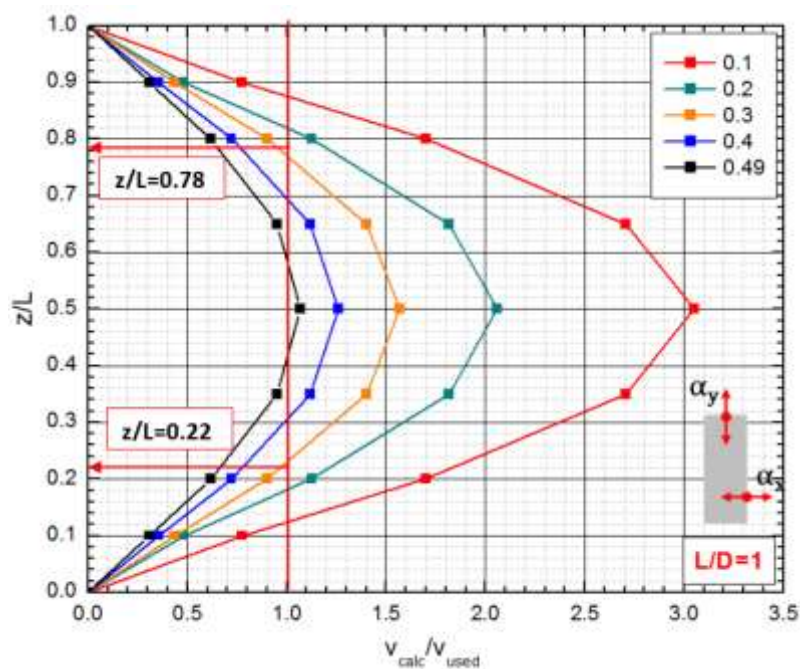


387
388
389

Εικόνα 75: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=2$, Μεθοδολογία 1 – Μεταβολή του κανονικοποιημένου λόγου Poisson με το ύψος



Εικόνα 76: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=1$, Μεθοδολογία 1 – Μεταβολή του λόγου Poisson με το ύψος



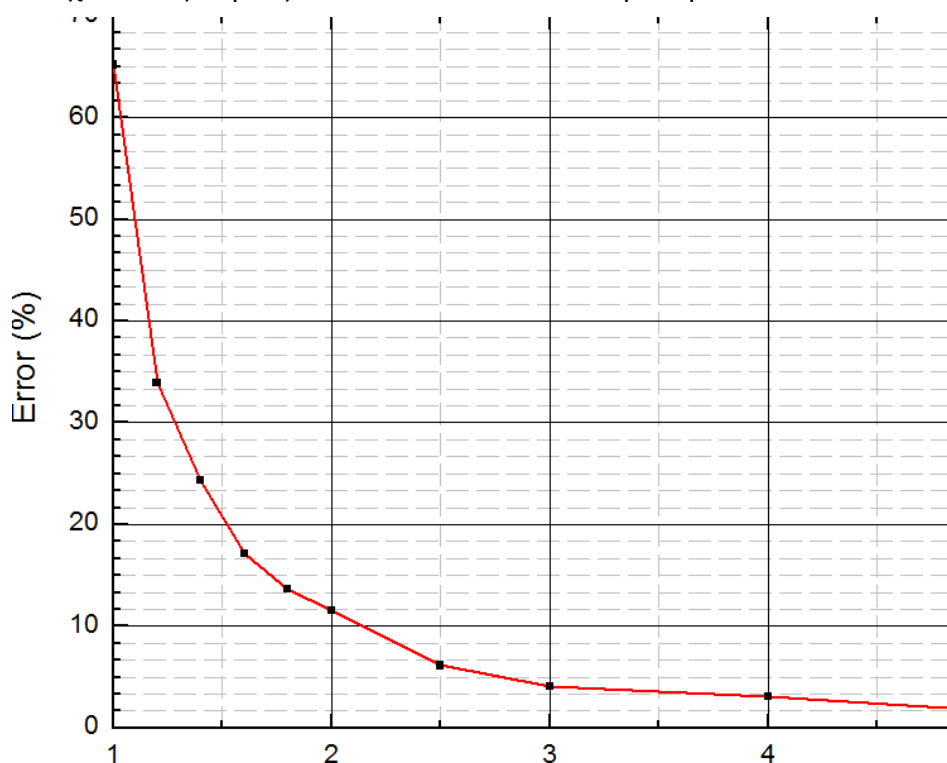
Εικόνα 77: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=1$, Μεθοδολογία 1 – Μεταβολή του κανονικοποιημένου λόγου Poisson με το ύψος

Στον Πίνακα 33 συνοψίζονται, για κάθε εξεταζόμενη τιμή L/D , το εύρος του κανονικοποιημένου λόγου ν_{calc}/ν_{used} καθώς και το αντίστοιχο ποσοστιαίο μέσο σφάλμα προσδιορισμού, σε συνάρτηση με το ύψος μέτρησης z/L για όλο το εύρος του λόγου Poisson και για ένα μικρότερο εύρος του λόγου Poisson $\nu = 0,2 - 0,4$, που αντιστοιχεί στους λόγους που απαντώνται στο σκυρόδεμα.

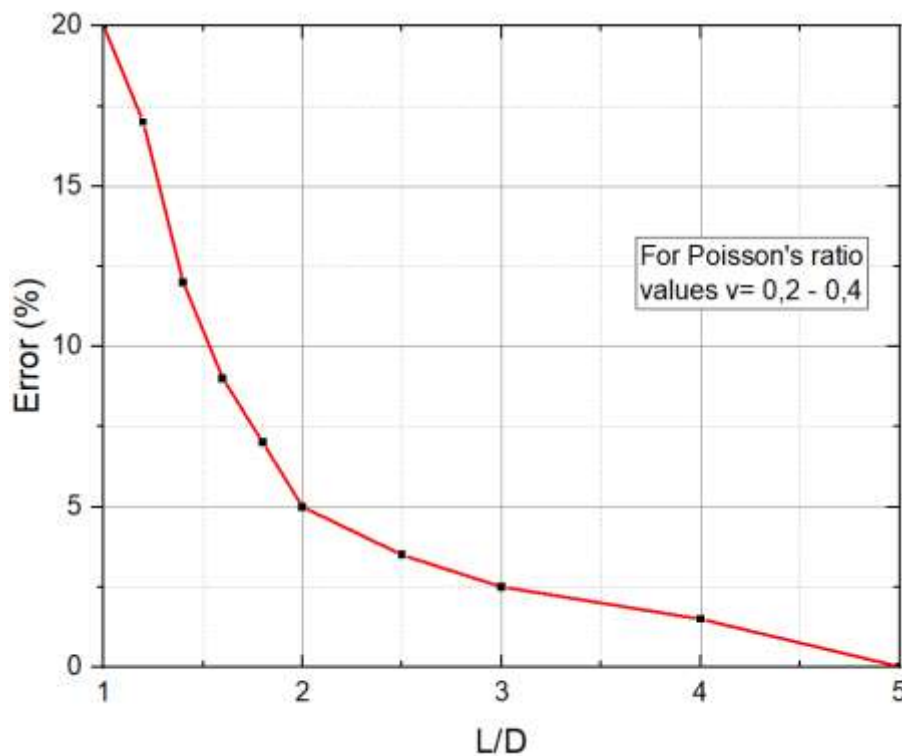
Πίνακας 33: Προσδιορισμός σφαλμάτων κατά την εύρεση του λόγου Poisson

L/D	z/L	Εύρος τιμών v_{calc}/v_{theor}		Μέσο Σφάλμα (%)	Εύρος τιμών v_{calc}/v_{theor} $\nu = 0.2-0.4$		Μέσο Σφάλμα (%) $\nu = 0.2-0.4$
1,0	0,750	0,729	2,033	65,19	0,721	1,125	20,18
1,2	0,774	0,770	1,449	33,95	0,967	1,359	19,59
1,4	0,773	0,828	1,315	24,36	0,997	1,268	13,53
1,6	0,779	0,850	1,194	17,16	1,033	1,235	10,09
1,8	0,781	0,877	1,150	13,69	1,052	1,210	7,89
2,0	0,778	0,897	1,127	11,50	1,055	1,183	6,41
2,5	0,778	0,936	1,059	6,59	1,070	1,145	3,75
3,0	0,779	0,967	1,049	4,09	1,089	1,144	2,74
4,0	0,778	0,969	1,030	3,03	1,097	1,129	1,59
5,0	0,779	0,982	1,017	1,73	1,102	1,119	0,85

402 Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε η γραφική απεικόνιση του σφάλματος (%) συναρτήσει
 403 του λόγου L/D , όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 78. Η γραφική αυτή παράσταση
 404 αναδεικνύει τη σαφή εξάρτηση του σφάλματος από τη γεωμετρία του δοκιμίου, κάνοντας
 405 εμφανή την αυξανόμενη απόκλιση καθώς μειώνεται η λυγνότητα. Στην Εικόνα 79
 406 παρουσιάζεται το σφάλμα για ένα μικρότερο εύρος του λόγου Poisson $\nu = 0,2 - 0,4$,
 407 που αντιστοιχεί στους λόγους που απαντώνται στο σκυρόδεμα.



408 Εικόνα 78: Διάγραμμα απεικόνισης σφαλμάτων (%) Μεθοδολογίας 1 συναρτήσει των διαστάσεων L/D του δοκιμίου
 409



Εικόνα 79: Διάγραμμα απεικόνισης σφαλμάτων (%) Μεθοδολογίας 1 συναρτήσει των διαστάσεων L/D του δοκιμίου για εύρος λόγου Poisson 0,2 – 0,4

Κατόπιν, πραγματοποιήθηκε συστηματική αξιολόγηση των σφαλμάτων που ενδέχεται να προκύψουν κατά τον προσδιορισμό του λόγου Poisson, βάσει της ανάλυσης των ανωτέρω διαγραμμάτων. Διατηρώντας σταθερή τη θέση μέτρησης στο ύψος $z = 0,22L$ (ή, λόγω συμμετρίας, $z = 0,78L$), τα ευρήματα συνοψίζονται ως εξής:

- Για δοκίμια με λυγηρότητα $L/D > 5$, το σφάλμα προσδιορισμού του λόγου Poisson είναι πρακτικά αμελητέο, σε ολόκληρο το εξεταζόμενο εύρος τιμών ($\nu = 0,10$ έως $0,49$).
- Για δοκίμια με $L/D = 2$, παρατηρείται σφάλμα της τάξης του 6%, εντός του εύρους $\nu = 0,20$ έως $0,40$.
- Για δοκίμια με $L/D = 1$, το σφάλμα αυξάνεται σημαντικά και ανέρχεται περίπου σε 20%, εντός του αντίστοιχου εύρους τιμών.

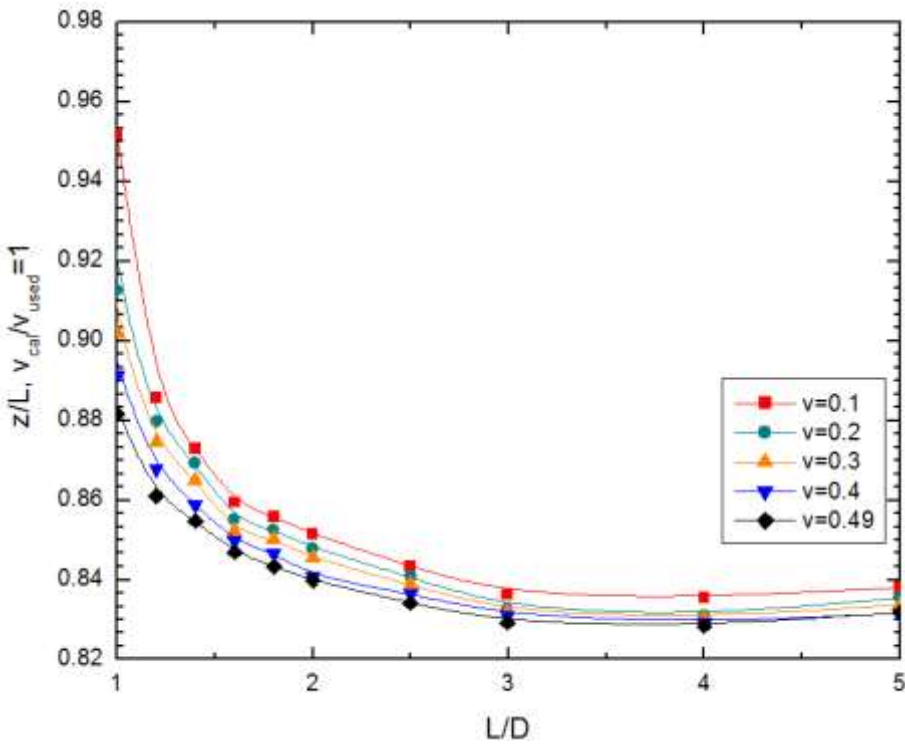
9.5.2 Αποτελέσματα Μεθοδολογίας 2

Η ανωτέρω αριθμητική διερεύνηση επαναλήφθηκε με εφαρμογή της Μεθοδολογίας 2, η οποία διαφοροποιείται ως προς τον τρόπο υπολογισμού του λόγου Poisson. Ειδικότερα, ο λόγος Poisson προσδιορίζεται μέσω του λόγου των οριζόντιων προς τις κατακόρυφες επιταχύνσεις σε πλευρικά σημεία του δοκιμίου, αντί της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην ελεύθερη επιφάνεια D που χρησιμοποιείται στη Μεθοδολογία 1. Οι αναλύσεις εκτελέστηκαν για τις ίδιες τιμές λυγηρότητας L/D και το πλήρες εύρος τιμών του λόγου Poisson ($\nu = 0,10$ έως $0,49$). Στον Πίνακα 34 και στην Εικόνα 80 παρουσιάζεται η

συσχέτιση μεταξύ του λόγου Poisson και του βέλτιστου ύψους τοποθέτησης z/L του επιταχυνσιομέτρου, δηλαδή εκείνου στο οποίο ο κανονικοποιημένος λόγος ν_{calc}/ν_{used} ισούται με τη μονάδα, επιτρέποντας τον ακριβή προσδιορισμό του δείκτη Poisson χωρίς συστηματικό σφάλμα.

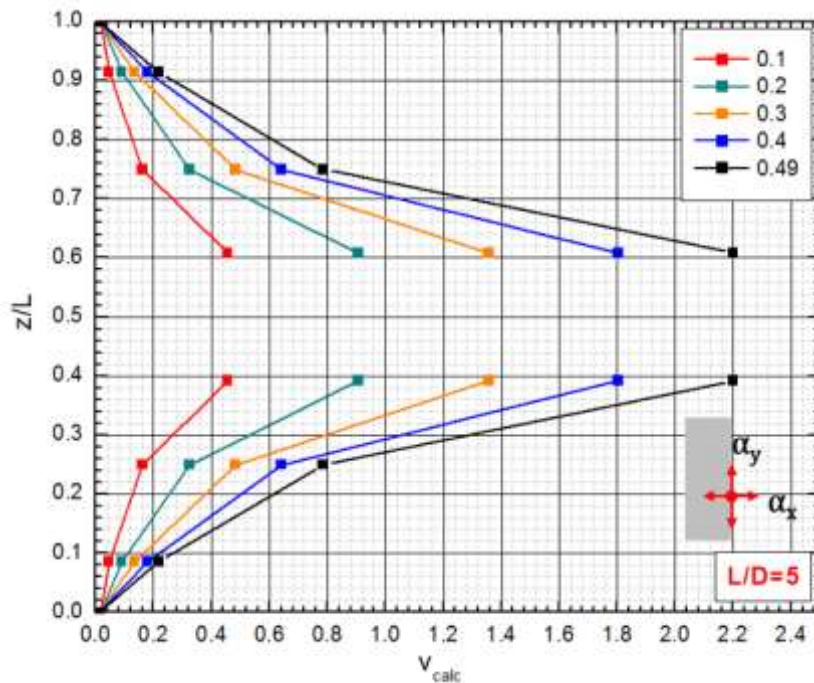
Πίνακας 34: Αριθμητικά αποτελέσματα συσχέτισης λόγου L/D με το ύψος τοποθέτησης του επιταχυνσιομέτρου (z/L) για την εύρεση του λόγου Poisson ν , Μεθοδολογία 2

Poisson's ratio	$\nu=0,1$	$\nu=0,2$	$\nu=0,3$	$\nu=0,4$	$\nu=0,49$	Μέσο Ύψος Τοποθέτησης
L/D	z/L					
5,0	0,8381	0,8355	0,8337	0,8317	0,8319	0,83
4,0	0,8355	0,8310	0,8305	0,8292	0,8284	0,83
3,0	0,8362	0,8327	0,8319	0,8310	0,8292	0,83
2,5	0,8434	0,8408	0,8388	0,8365	0,8341	0,84
2,0	0,8514	0,8479	0,8454	0,8408	0,8398	0,84
1,8	0,8558	0,8526	0,8501	0,8466	0,8434	0,85
1,6	0,8594	0,8550	0,8523	0,8497	0,8469	0,85
1,4	0,8730	0,8692	0,8645	0,8589	0,8547	0,86
1,2	0,8857	0,8796	0,8744	0,8678	0,8611	0,87
1,0	0,9518	0,9127	0,9019	0,8913	0,8816	0,90
0,8	-	0,9971	0,9713	0,9393	0,9145	0,96
0,7	0,9817	0,9200	0,8184	0,6696	-	0,85



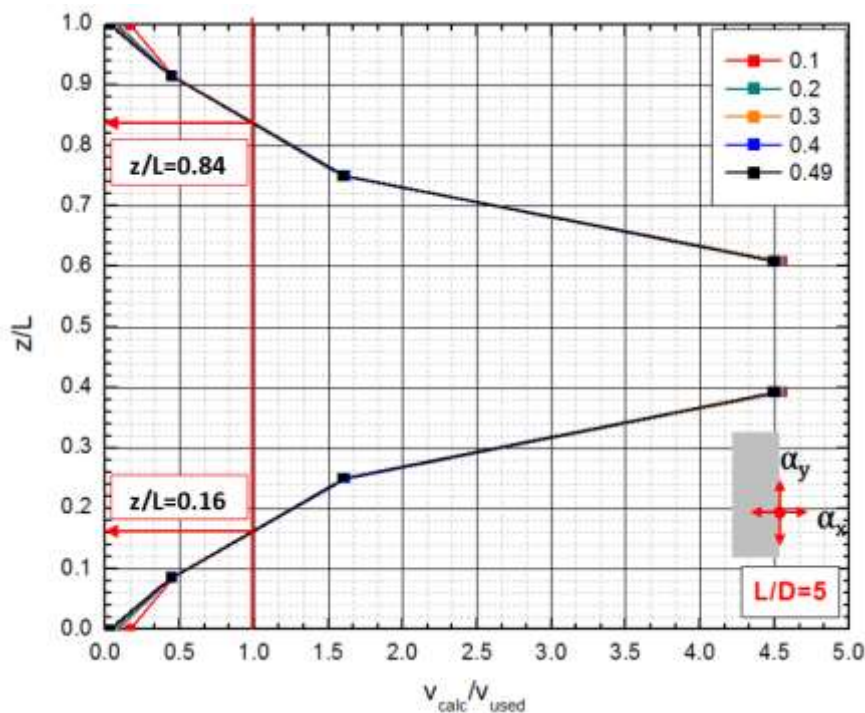
Εικόνα 80: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου L/D με το ύψος τοποθέτησης του επιταχυνσιομέτρου (z/L) για την εύρεση του λόγου Poisson ν , Μεθοδολογία 2.

442 Τα αντίστοιχα διαγράμματα μεταβολής του λόγου Poisson ως προς τον αδιάστατο λόγο
 443 ύψους z/L , για τις εξεταζόμενες τιμές λυγηρότητας L/D φαίνονται στις Εικόνα 81 - Εικόνα
 444 86. Τα αναλυτικά αποτελέσματα παρατίθενται στο Παράρτημα Β.



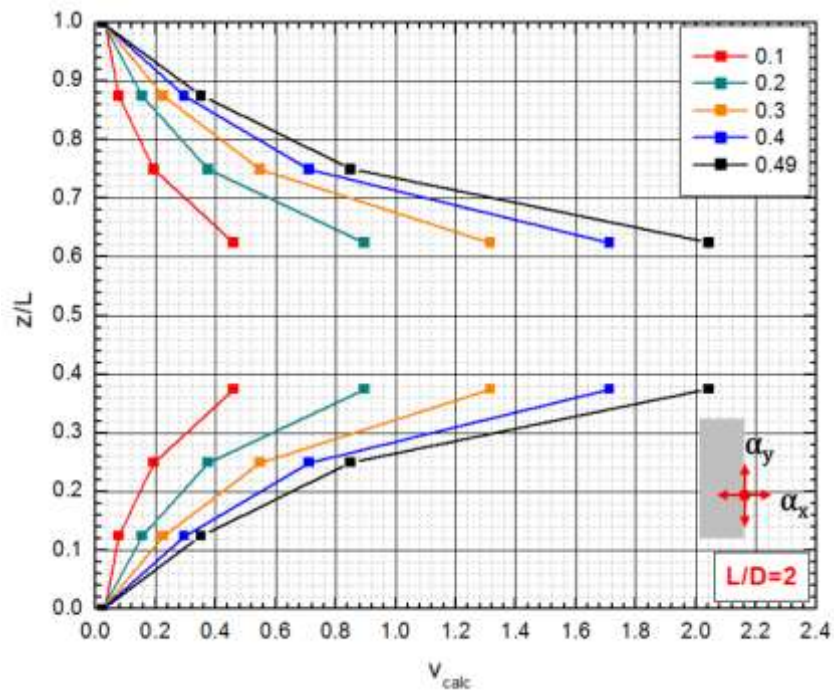
445

446 Εικόνα 81: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του
 447 δοκιμίου για λόγο $L/D=5$, Μεθοδολογία 2 – Μεταβολή του λόγου Poisson με το ύψος

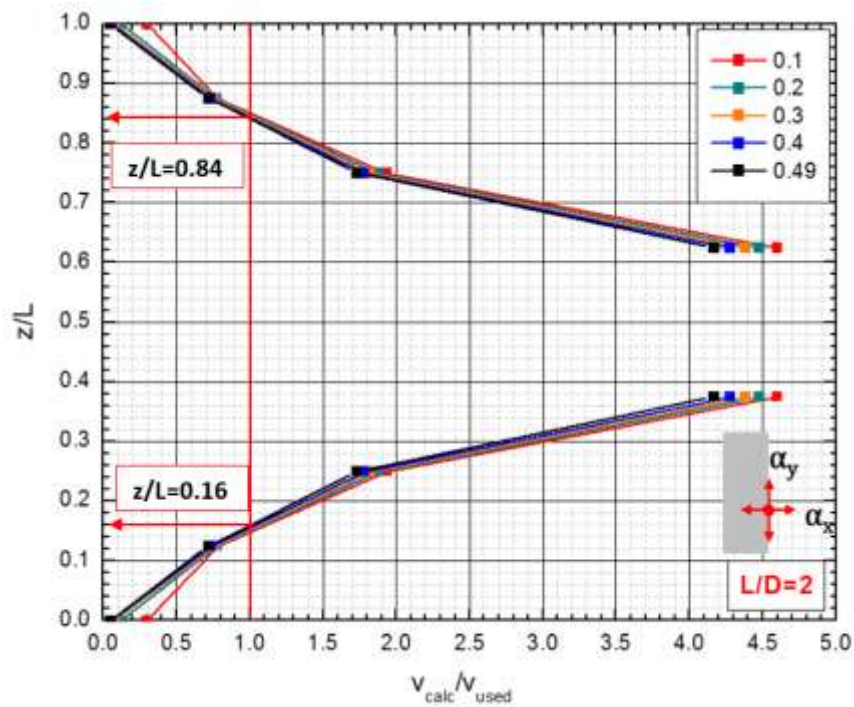


448

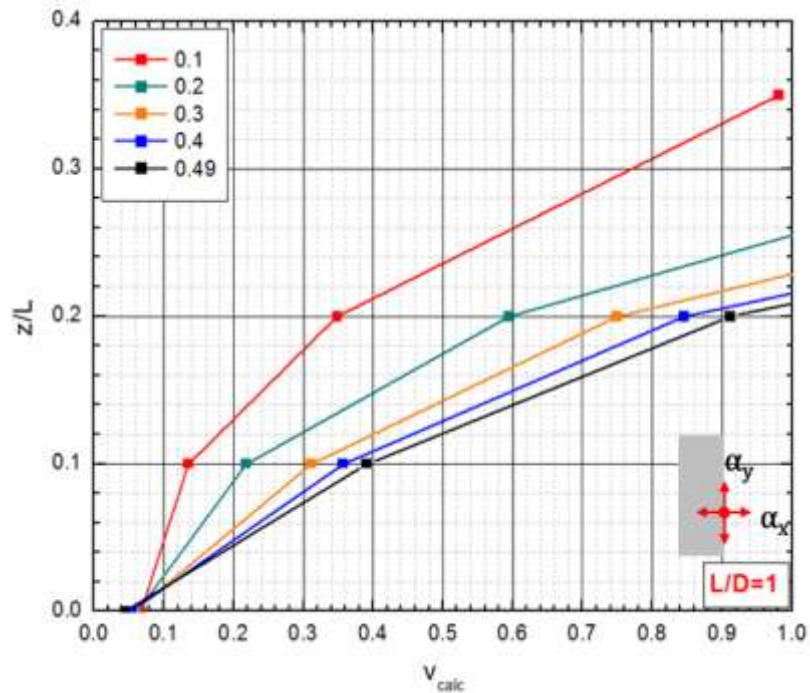
449 Εικόνα 82: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του
 450 δοκιμίου για λόγο $L/D=5$, Μεθοδολογία 2 – Μεταβολή του κανονικοποιημένου λόγου Poisson με το ύψος



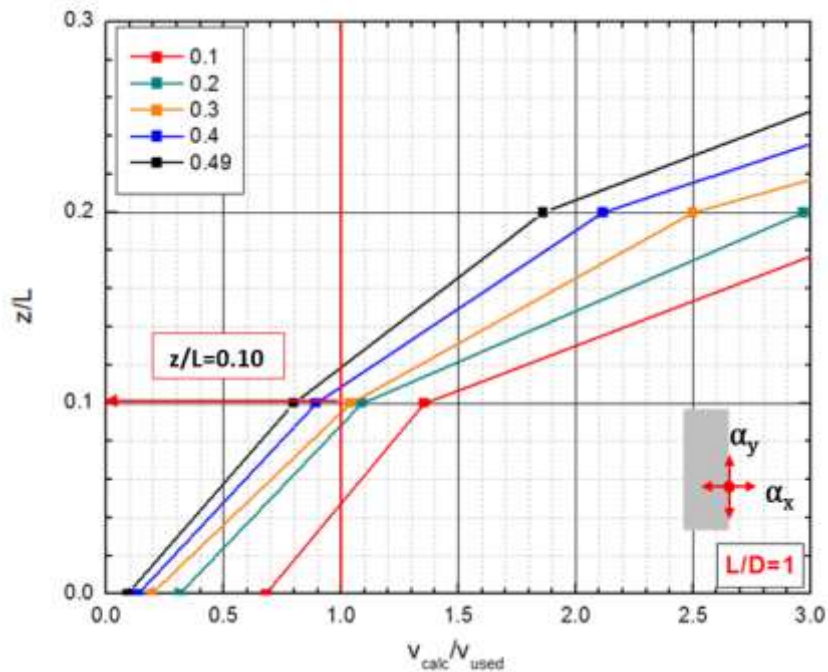
Εικόνα 83: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=2$, Μεθοδολογία 2 – Μεταβολή του λόγου Poisson με το ύψος



Εικόνα 84: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=2$, Μεθοδολογία 2 – Μεταβολή του κανονικοποιημένου λόγου Poisson με το ύψος



Εικόνα 85: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=1$, Μεθοδολογία 2 – Μεταβολή του λόγου Poisson με το ύψος



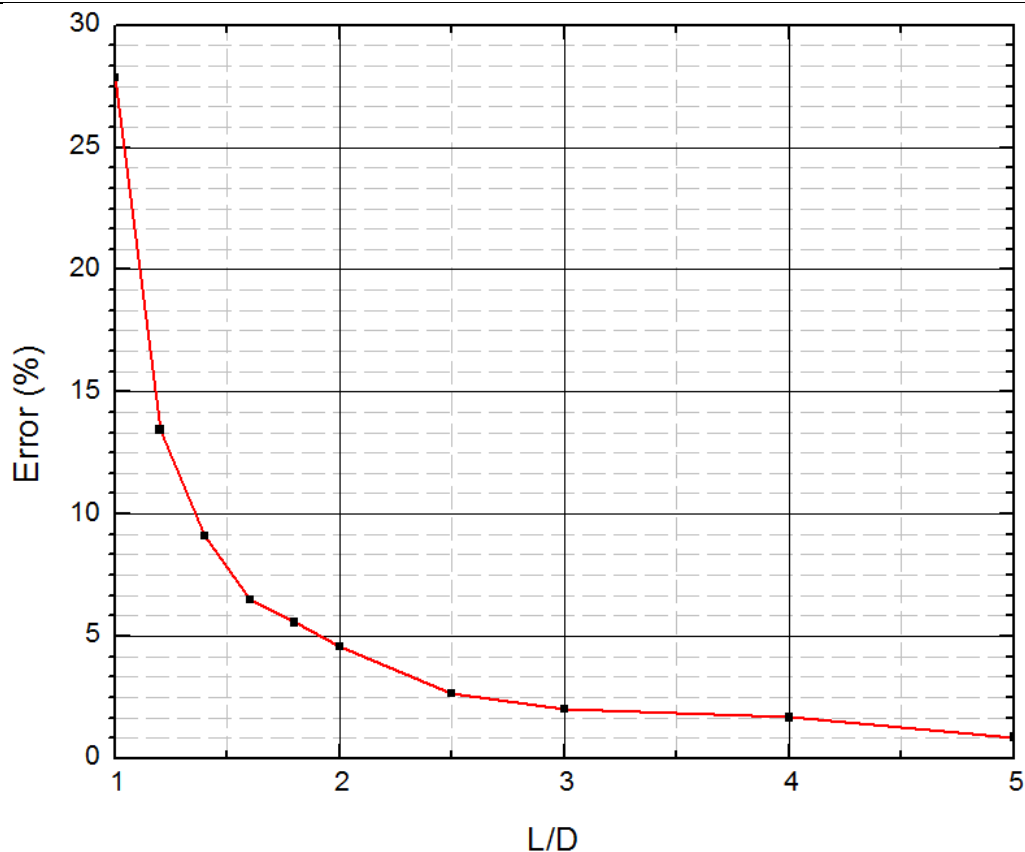
Εικόνα 86: Διάγραμμα συσχέτισης λόγου Poisson και ύψους z του κάθε σημείου μέτρησης από τη βάση του δοκιμίου για λόγο $L/D=1$, Μεθοδολογία 2 – Μεταβολή του κανονικοποιημένου λόγου Poisson με το ύψος

Κατ' αναλογία με τη Μεθοδολογία 1, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση των σφαλμάτων προσδιορισμού του λόγου Poisson καθώς και εντοπισμός του βέλτιστου ύψους τοποθέτησης του αισθητήρα, στο οποίο ο κανονικοποιημένος λόγος ν_{calc}/ν_{used} λαμβάνει τιμή ίση με τη μονάδα. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στον Πίνακα 35 και

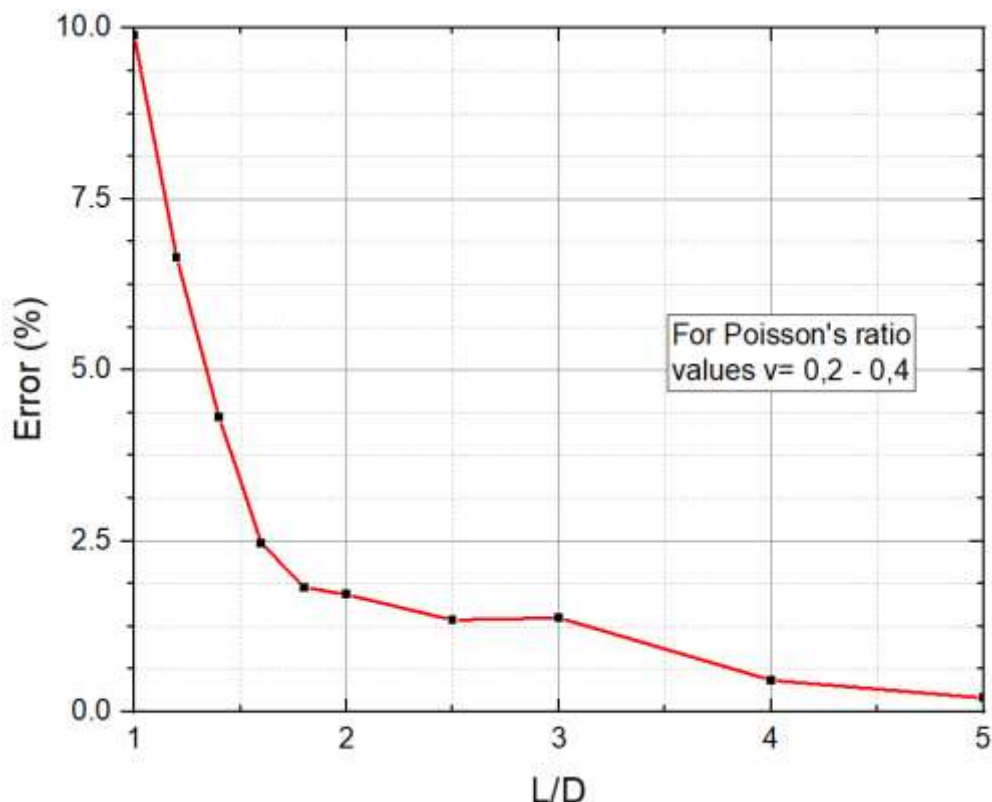
467 παριστάνονται γραφικά στην Εικόνα 87 για όλο το εύρος του λόγου Poisson και στην
 468 Εικόνα 88 για το υπο-εύρος Poisson $\nu = 0,2 - 0,4$.

469 Πίνακας 35: Προσδιορισμός σφαλμάτων κατά την εύρεση του λόγου Poisson

L/D	z/L	Εύρος τιμών v_{calc}/v_{theor}		Μέσο Σφάλμα (%)	Εύρος τιμών v_{calc}/v_{theor} $\nu = 0.2-0.4$		Μέσο Σφάλμα (%) $\nu = 0.2-0.4$
1,0	0,900	0,799	1,356	27,86	0,892	1,090	9,89
1,2	0,893	0,873	1,142	13,44	0,831	0,964	6,65
1,4	0,890	0,911	1,093	9,10	0,839	0,925	4,30
1,6	0,878	0,937	1,067	6,50	0,715	0,765	2,47
1,8	0,879	0,948	1,060	5,57	0,753	0,789	1,82
2,0	0,876	0,958	1,049	4,55	0,738	0,773	1,72
2,5	0,871	0,974	1,027	2,66	1,087	1,114	1,34
3,0	0,872	0,977	1,017	2,03	1,660	1,688	1,38
4,0	0,867	0,977	1,011	1,70	0,670	0,679	0,46
5,0	0,852	0,987	1,004	0,87	0,446	0,450	0,20



470
 471 Εικόνα 87: Διάγραμμα απεικόνισης σφαλμάτων (%) Μεθοδολογίας 2 συναρτήσει των διαστάσεων L/D του δοκιμίου



Εικόνα 88: Διάγραμμα απεικόνισης σφαλμάτων (%) Μεθοδολογίας 2 συναρτήσει των διαστάσεων L/D του δοκιμίου για εύρος λόγου Poisson 0,2 – 0,4

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Για δοκίμια με λόγο $L/D > 5$, σε ύψος μέτρησης $z = 0,84L$ (ή, λόγω συμμετρίας, $z = 0,16L$), το σφάλμα είναι πρακτικά μηδενικό για ολόκληρο το εξεταζόμενο εύρος τιμών του λόγου Poisson ($\nu = 0,10$ έως $0,49$).
- Για δοκίμια με $L/D = 2$, στο ίδιο ύψος μέτρησης $z = 0,84L$ (ή $z = 0,16L$), το σφάλμα δεν υπερβαίνει το 5%, για ολόκληρο το εύρος τιμών του λόγου Poisson.
- Για δοκίμια με $L/D = 1$, σε ύψος μέτρησης $z = 0,90L$ (ή $z = 0,10L$), το σφάλμα παραμένει εντός του 10%, για τιμές $\nu = 0,20$ έως $0,40$.

9.5.3 Συγκριτική αξιολόγηση και πρακτική εφαρμογή

Η συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθοδολογιών αναδεικνύει ότι η Μεθοδολογία 2 εμφανίζει συστηματικά μικρότερα σφάλματα προσδιορισμού, ειδικά για δοκίμια χαμηλής λυγηρότητας. Ειδικότερα, για $L/D = 1$, η Μεθοδολογία 2 περιορίζει το μέγιστο σφάλμα στο 10% (έναντι 21% στη Μεθοδολογία 1), ενώ για $L/D = 2$, το σφάλμα μειώνεται στο 5% (έναντι 6%). Η βελτίωση αυτή αποδίδεται στον τρόπο υπολογισμού: στη Μεθοδολογία 2, αμφότερες οι συνιστώσες της επιτάχυνσης (οριζόντια και κατακόρυφη) λαμβάνονται στο ίδιο σημείο μέτρησης, με αποτέλεσμα ο υπολογιζόμενος λόγος να αντικατοπτρίζει πιστότερα την τοπική κατάσταση παραμόρφωσης και να ελαχιστοποιούνται οι επιδράσεις των φαινομένων οριακών συνθηκών.

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων παρέχουν πρακτικούς κανόνες για τη βέλτιστη πειραματική διάταξη, οι οποίοι δύνανται να εφαρμοστούν απευθείας στη μη-καταστροφική αξιολόγηση κυλινδρικών δοκιμίων σκυροδέματος όπως περιγράφεται παρακάτω:

Μεθοδολογία 1 – Πειραματική διάταξη δύο μονοαξονικών επιταχυνσιομέτρων: ένα οριζόντιο στην πλευρική επιφάνεια L και ένα κατακόρυφο στο κέντρο της ελεύθερης επιφάνειας D , τοποθετώντας το οριζόντιο επιταχυνσιόμετρο σε ύψος $z = 0,78L$ (ή $z = 0,22L$).

Μεθοδολογία 2 – Πειραματική διάταξη ενός τριαξονικού επιταχυνσιομέτρου στην πλευρική επιφάνεια L , το οποίο καταγράφει ταυτόχρονα τις οριζόντιες και κατακόρυφες επιταχύνσεις στο ίδιο σημείο, τοποθετώντας το τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο σε ύψος $z = 0,84L$ (ή $z = 0,16L$), όσον αφορά σε δοκίμια με λόγο L/D μεγαλύτερο του 2 και σε ύψος μέτρησης $z = 0,90L$ (ή $z = 0,10L$), για δοκίμια με λόγο $L/D = 1$.

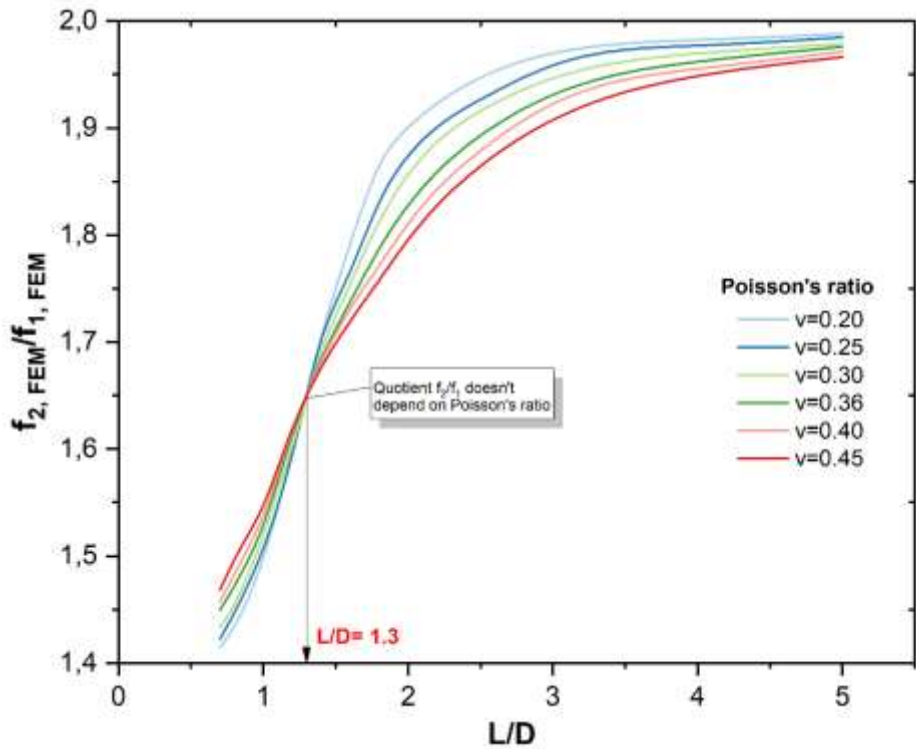
Κατά συνέπεια καθίσταται δυνατός ο ταυτόχρονος προσδιορισμός και του δυναμικού λόγου Poisson ν_d και του μέτρου ελαστικότητας E_d και του λόγου Poisson ν_d μέσω μίας και μόνο δοκιμής ακουστικού συντονισμού (Impact Echo), χρησιμοποιώντας κατάλληλη διάταξη μέτρησης σημειακών επιταχύνσεων και η ακρίβειά του εξαρτάται κρίσιμα τόσο από τη γεωμετρία του δοκιμίου (λυγηρότητα L/D) όσο και από τη θέση τοποθέτησης του αισθητήρα (ύψος z/L). Η Μεθοδολογία 2, με χρήση ενός τριαξονικού επιταχυνσιομέτρου, αποτελεί την προτεινόμενη προσέγγιση, καθώς συνδυάζει απλούστερη πειραματική διάταξη με υψηλότερη ακρίβεια, κυρίως σε δοκίμια χαμηλής λυγηρότητας, όπως οι πυρήνες σκυροδέματος ($L/D \leq 2$) που αποτελούν τη συνήθη πρακτική κατά την αξιολόγηση υφιστάμενων κατασκευών.

9.6 Αποτελέσματα υπολογισμού λόγου Poisson μέσω της ΙΕ 1^{ης} και 2^{ης} ιδιομορφής

Προκειμένου να διερευνηθεί εάν ο λόγος της δεύτερης προς την πρώτη κυρίαρχη συχνότητα συντονισμού της μεθόδου ΙΕ παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα στον υπολογισμό του συντελεστή Poisson, υπολογίστηκε ο λόγος της δεύτερης προς την πρώτη συχνότητα συντονισμού ($f_{2,Theoretical/FEM} / f_{1,Theoretical/FEM}$) σε συνάρτηση με το L/D για έξι τιμές του λόγου Poisson, όπως φαίνονται στον Πίνακα 36 και απεικονίζεται στο διάγραμμα της Εικόνα 89.

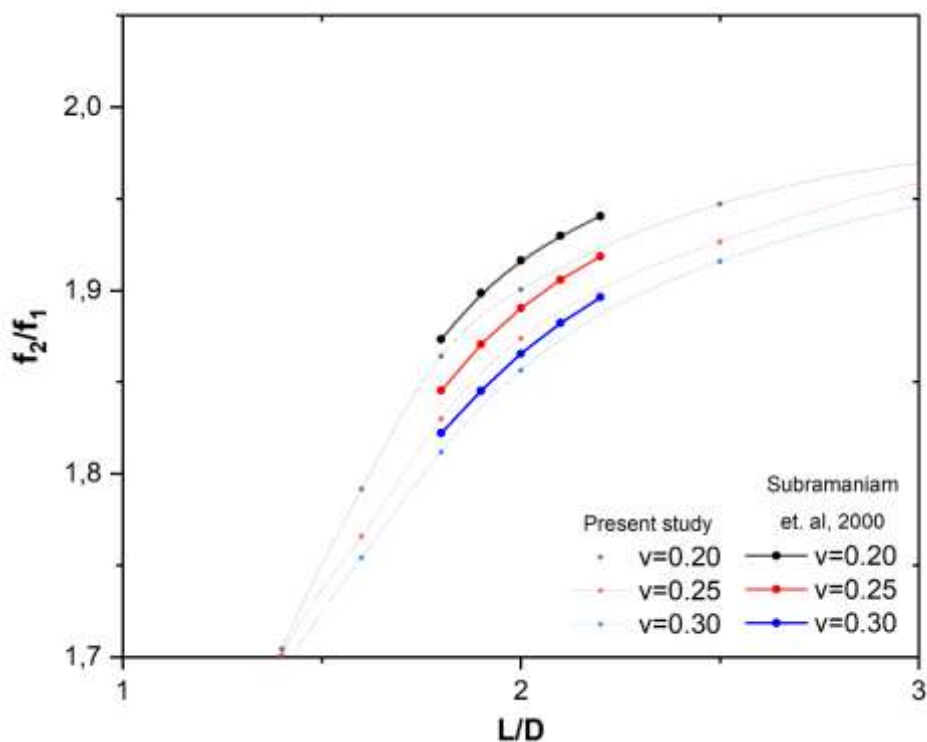
Πίνακας 36: Αποτελέσματα $f_{2,Theoretical/FEM} / f_{1,Theoretical/FEM}$

L/D	$f_{2,Theoretical/FEM} / f_{1,Theoretical/FEM}$					
	$\nu=0,20$	$\nu=0,25$	$\nu=0,30$	$\nu=0,36$	$\nu=0,4$	$\nu=0,45$
5,0	1,987876	1,984733	1,978677	1,975956	1,971308	1,966341
4,0	1,982362	1,977107	1,969774	1,961929	1,955288	1,948599
3,0	1,969709	1,958614	1,946422	1,931114	1,922609	1,90762
2,5	1,947174	1,926635	1,915939	1,893037	1,878765	1,864475
2,0	1,900586	1,873772	1,856438	1,827602	1,810539	1,795663
1,8	1,864212	1,830041	1,81189	1,786683	1,771174	1,757372
1,6	1,791748	1,765991	1,754266	1,737702	1,731034	1,719281
1,4	1,704583	1,701307	1,690701	1,683915	1,681226	1,676138
1,2	1,597703	1,595187	1,602731	1,612593	1,616863	1,618787
1,0	1,498367	1,506998	1,519332	1,528879	1,538043	1,547071
0,8	1,434341	1,447063	1,454975	1,472154	1,482944	1,496669
0,7	1,414403	1,422377	1,433237	1,449284	1,457245	1,468166



Εικόνα 89: Λόγος δεύτερης προς πρώτης συχνότητας συντονισμού συναρτήσει του λόγου L/D για έξι τιμές του λόγου Poisson

Οι Kolluru et al. (2000) [178], χρησιμοποίησαν τις δύο πρώτες συχνότητες συντονισμού του φάσματος και τα αποτελέσματά τους ήταν παρόμοια με αυτά που προέκυψαν από την παρούσα έρευνα χρησιμοποιώντας τις δύο κυρίαρχες συχνότητες συντονισμού, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 90. Ωστόσο, η έρευνά τους σχετικά με το L/D περιορίζεται σε ένα εύρος μεταξύ 1,8 και 2,2. Για τόσο μικρά περιθώρια, μπορεί να θεωρηθεί ότι με τον πειραματικό υπολογισμό των δύο πρώτων συχνοτήτων συντονισμού και με τη χρήση της εξίσωσης (34) είναι εφικτό να προσδιοριστεί ο λόγος Poisson χρησιμοποιώντας αποκλειστικά τη μέθοδο ΙΕ. Η παρούσα προσομοίωση, αποκάλυψε, ότι για $L/D = 1$ δεν υπάρχει σαφής προσδιορισμός του λόγου Poisson χρησιμοποιώντας τον λόγο $f_{2,FEM}/f_{1,FEM}$, καθώς τα αποτελέσματα είναι πολύ ευαίσθητα στη διακύμανση του λόγου. Είναι προφανές στην Εικόνα 91 ότι για μια πραγματικά μικρή διακύμανση μόλις 3% του λόγου $f_{2,FEM}/f_{1,FEM}$, μπορεί να προκύψει ένα ευρύ φάσμα συντελεστή Poisson, $\nu = 0,20 - 0,45$, καθιστώντας ουσιαστικά αδύνατο τον υπολογισμό του συντελεστή Poisson, χρησιμοποιώντας μόνο τη μέθοδο ΙΕ μέσω των δύο κυρίαρχων συχνοτήτων συντονισμού. Επιπλέον, για $L/D = 1,3$ ο λόγος Poisson δεν εξαρτάται από το σχήμα των δοκιμίων, Εικόνα 89.

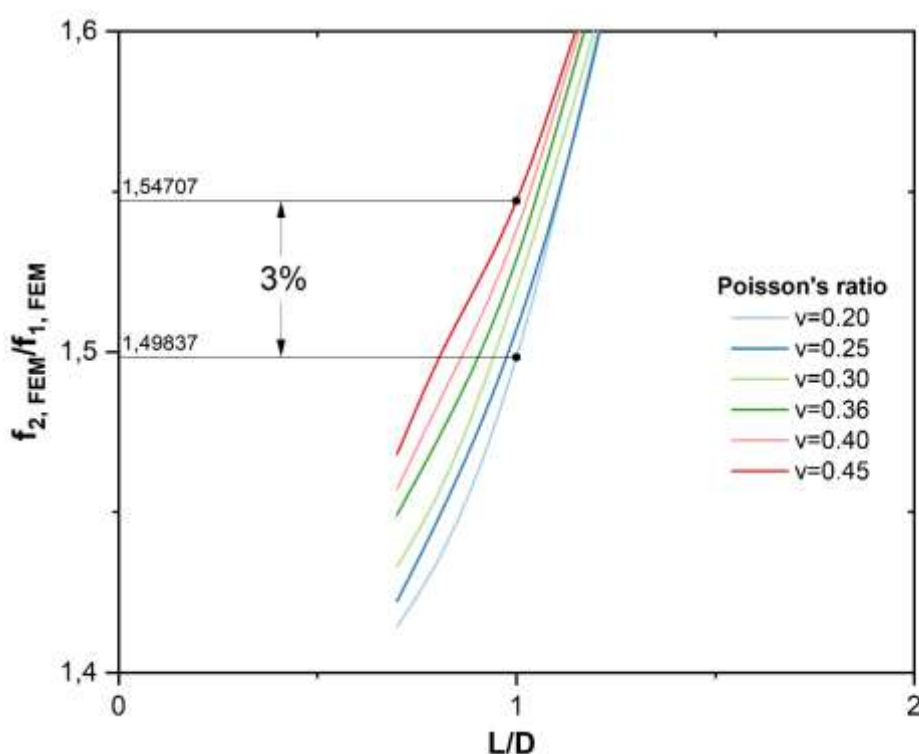


Εικόνα 90: Διάγραμμα θεωρητικών και υπολογισμένων συχνοτήτων σε συνάρτηση με τον λόγο L/D για τρεις τιμές του λόγου Poisson, σε σύγκριση με τις καμπύλες που προέκυψαν από τη μελέτη των Kolluru et al. (2000)

Οι Nieves et al. (2002) χρησιμοποίησαν επίσης τις δύο πρώτες συχνότητες συντονισμού του φάσματος [10]. Πρέπει να επισημανθεί ότι η κρούση που εφαρμόζεται για τη διέγερση του κυλίνδρου έχει ένα πολύπλοκο φάσμα συχνοτήτων όπως φαίνεται και στην Εικόνα 45, επομένως δεν είναι πάντα δυνατό να ανιχνευθούν η δεύτερη και η τρίτη συχνότητα

συντονισμού, κάτι που αποτελεί τη συνήθη περίπτωση για δείγματα σκυροδέματος με $L/D = 1,0$.

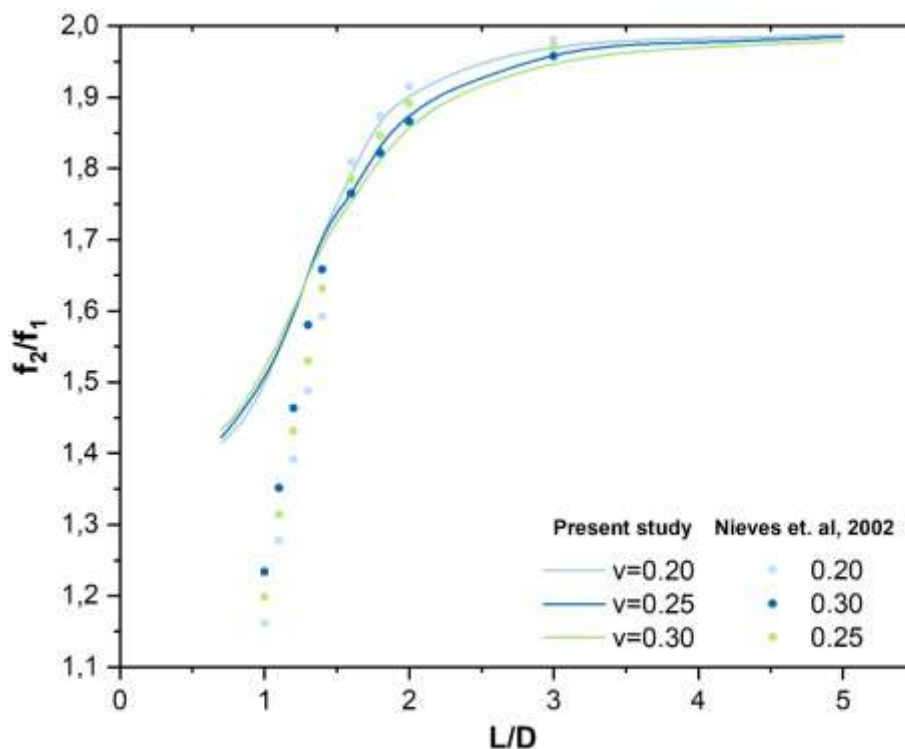
Στην Εικόνα 92 παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ της παρούσας μελέτης και της μελέτης των Nieves et al. (2002) όσον αφορά την αναλογία της πρώτης και της δεύτερης συχνότητας συντονισμού ως προς το L/D για τρεις τιμές του λόγου Poisson. Στο εύρος $L/D = 1,1 - 3,0$ τα αποτελέσματα είναι παρόμοια, αν και στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιούνται οι δύο κυρίαρχες συχνότητες. Όμως καθώς πλησιάζουμε στο $L/D = 1,0$, παρατηρείται ότι ο λόγος f_2/f_1 της μελέτης των Nieves et al. (2002) είναι σημαντικά χαμηλότερος από αυτόν της παρούσας μελέτης. Αυτή η διαφορά πιθανώς αποδίδεται στις διαφορετικές συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν στις δύο μελέτες.



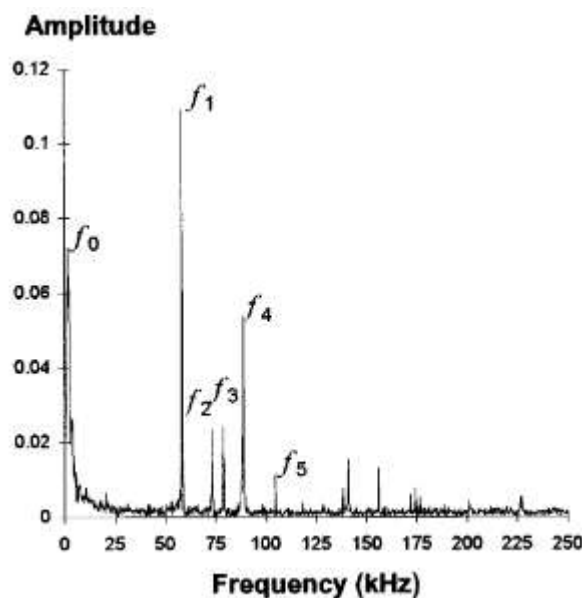
Εικόνα 91: Διακύμανση των θεωρητικών προς υπολογισμένων συχνοτήτων σε σχέση με $L/D = 1$ για έξι τιμές του συντελεστή Poisson, όπως προκύπτουν από την ανάλυση FEM

Δεδομένου ότι τα πειραματικά αποτελέσματα στο σκυρόδεμα έδειξαν ότι συχνά η δεύτερη και η τρίτη χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού είναι μη ανιχνεύσιμες, ο λόγος f_2/f_1 , που προκύπτει από τις κυρίαρχες συχνότητες είναι πιο χρήσιμος πειραματικά και έχει την τιμή $f_2/f_1 \approx 1,5$, όπως φαίνεται από τις επισημασμένες τιμές στα φάσματα της Εικόνα 45. Επίσης, οι Nieves et al. (1998) [156], στη μελέτη τους σχετικά με εμπορικό κύλινδρο αλουμινίου με $L/D = 1,0$, ανίχνευσαν τις συχνότητες συντονισμού $f_1 = 58,349\text{Hz}$, $f_2 = 73,242\text{Hz}$, $f_3 = 78,857\text{Hz}$ και $f_4 = 88,867\text{Hz}$ και, όπως φαίνεται στο φάσμα Εικόνα 93, ο λόγος των δύο κυρίαρχων συχνοτήτων είναι $f_4/f_1 \approx 1,5$, ο οποίος συμφωνεί με την παρούσα μελέτη. Επομένως, ο λόγος Poisson δεν μπορεί πρακτικά να

573 προσδιοριστεί μέσω του λόγου των πρώτων 2 ιδιομορφών f_2/f_1 . Εφόσον τεχνικά
 574 καταστεί εφικτό, είναι δυνατός ο προσδιορισμός με τις πρώτες δύο κυρίαρχες ιδιομορφές.



575
 576 Εικόνα 92: Σύγκριση μεταξύ της παρούσας έρευνας και της μελέτης των Nieves et al. (2002) όσον αφορά το λόγο της
 577 δεύτερης προς πρώτης συχνότητας συντονισμού συναρτήσει του λόγου L/D για τρεις τιμές του συντελεστή Poisson



578
 579 Εικόνα 93: Φάσμα συχνότητων της διαμήκουσ δόνησης που αντιστοιχεί σε μια ράβδο με μήκος ίσο με τη διάμετρό
 580 της, σύμφωνα με τους Nieves et al. (1998)

9.7 Αποτελέσματα εμπειρικών συσχετίσεων θλιπτικής αντοχής, ταχυτήτων διάδοσης και ειδικού βάρους

Ακολουθώντας τη φιλοσοφία των κλασικών εμπειρικών συσχετίσεων, προτείνονται εμπειρικές εξισώσεις πρόβλεψης της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος και των ταχυτήτων διάδοσης. Η ανάλυση διατυπώνεται με βάση τέσσερις ανεξάρτητες διμεταβλητές σχέσεις (bivariate relationships), στις οποίες κάθε εξαρτημένη μεταβλητή συνδέεται με μία μόνο ανεξάρτητη μεταβλητή. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει τρία ουσιαστικά πλεονεκτήματα (α) σαφή φυσική ερμηνεία κάθε σχέσης, (β) άμεση χρηστικότητα σε πρακτικές εφαρμογές όπου διατίθεται μόνο ένα πρωτογενές μέγεθος ΜΚΔ, και (γ) δυνατότητα σύγκρισης με τις δημοσιευμένες εμπειρικές σχέσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας οι οποίες παραδοσιακά διατυπώνονται με την ίδια μορφή.

9.7.1 Πειραματικό δείγμα

Η στατιστική ανάλυση εφαρμόστηκε στο σύνολο των $N = 232$ πυρήνων σκυροδέματος που εξήχθησαν με πυρηνοληψία από υφιστάμενες κατασκευές (κτήρια και γέφυρες) από $J = 22$ θέσεις πυρηνοληψίας. Η περιγραφική στατιστική των μεταβλητών του δείγματος παρουσιάζεται στον Πίνακα 37.

Πίνακας 37: Περιγραφική στατιστική μεταβλητών δείγματος ($N = 232$)

Μεταβλητή	Μ.Ο.	Τ.Α.	Min	Max	Μονάδα
F_c	29,16	13,47	6,32	87,21	MPa
V_c	3,918	0,344	2,520	4,521	km/s
V_p	4,731	0,304	3,424	5,514	km/s
γ_c	22,854	0,802	20,454	24,441	kN/m ³
L/D	0,998	0,139	0,701	1,234	–

Η θλιπτική αντοχή κυμαίνεται από 6,32 έως 87,21MPa με μέση τιμή 29,16MPa, καλύπτοντας ευρύ φάσμα κατηγοριών σκυροδέματος. Το εύρος αυτό αντικατοπτρίζει την ποικιλομορφία των κατασκευών από τις οποίες προήλθαν οι πυρήνες, εξασφαλίζοντας τη γενικευσιμότητα των εξαγόμενων εμπειρικών σχέσεων.

9.7.2 Προκαταρκτική στατιστική ανάλυση

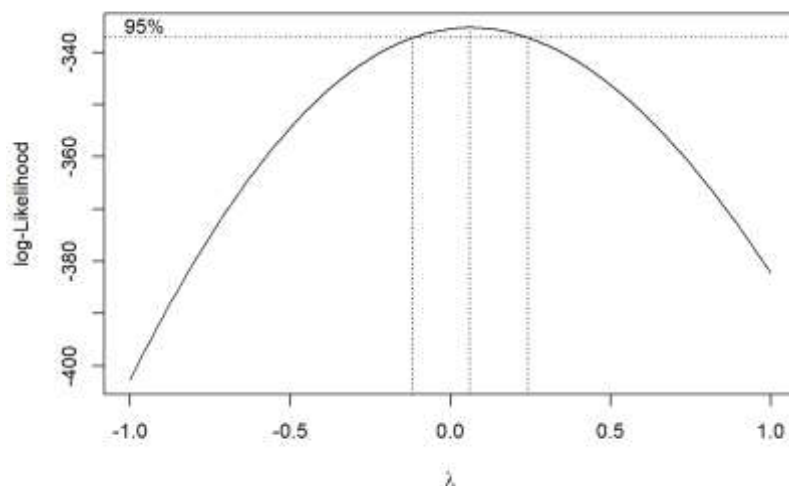
9.7.2.1. Εφαρμογή μετασχηματισμού Box–Cox

Ο μετασχηματισμός Box–Cox εφαρμόστηκε στο βοηθητικό γραμμικό μοντέλο $F_c \sim L/D + V_p + V_c + \gamma_c$. Η μεγιστοποίηση της λογαριθμοπιθανοφάνειας προφίλ $\ell(\lambda)$ στο διάστημα $\lambda \in [-1,1]$ οδήγησε στα ακόλουθα αποτελέσματα:

$$\hat{\lambda} = 0,06, \quad 95\% \text{ CI}_{\lambda} = [-0,11, 0,24]$$

Δεδομένου ότι η τιμή $\lambda = 0$ εμπίπτει εντός του 95% διαστήματος εμπιστοσύνης, ο λογαριθμικός μετασχηματισμός $F_c \rightarrow \ln(F_c)$ αποτελεί στατιστικά αιτιολογημένη επιλογή και υιοθετείται για όλες τις σχέσεις με τη θλιπτική αντοχή ως μεταβλητή απόκρισης. Η

611 καμπύλη πιθανοφάνειας παρουσιάζεται στην Εικόνα 94. . Οι κατακόρυφες διακεκομμένες
612 γραμμές οριοθετούν το 95% διάστημα εμπιστοσύνης ($\hat{\lambda} = 0,06$, $CI = [-0,11, 0,24]$).



613

614 Εικόνα 94: Καμπύλη λογαριθμοπιθανοφάνειας προφίλ της παραμέτρου λ του μετασχηματισμού Box-Cox

615 9.7.2.2. Αποτελέσματα MFP – Επιλογή κλασματικών πολυωνύμων

616 Η εφαρμογή της μεθόδου MFP (Multivariable Fractional Polynomials) με επίπεδο
617 σημαντικότητας $\alpha = 0,05$ ανέδειξε τις ακόλουθες βέλτιστες μορφές για κάθε ανεξάρτητη
618 μεταβλητή:

- 619 • Για την ταχύτητα ράβδου V_c : επιλέχθηκε $FP2$ με επαναλαμβανόμενο εκθέτη $p = 3$,
620 δηλαδή οι όροι $(V_c/10)^3$ και $(V_c/10)^3 \cdot \ln(V_c/10)$.
- 621 • Για την ταχύτητα παλμού υπερήχων V_p : επιλέχθηκε ομοίως $FP2$ με $p = 3$, δηλαδή οι
622 όροι V_p^3 και $V_p^3 \cdot \ln(V_p)$.
- 623 • Για το ειδικό βάρος γ_c : επιλέχθηκε γραμμική μορφή.
- 624 • Για τη λυγρηρότητα L/D : επιλέχθηκε γραμμική μορφή.

625 Η ταυτόχρονη επιλογή δυνάμεων τρίτου βαθμού για αμφότερες τις ταχύτητες, σε
626 συνδυασμό με τους αντίστοιχους λογαριθμικούς όρους, υποδηλώνει ισχυρή μη-
627 γραμμικότητα στις σχέσεις αντοχής-ταχύτητας. Η συμπεριφορά αυτή είναι συνεπής με τη
628 φυσική της διάδοσης κυμάτων σε ανομοιογενές μέσο όπως το σκυρόδεμα.

629 9.7.3 Κύριο προτεινόμενο μοντέλο: Μοντέλο μικτών αποτελεσμάτων

630 9.7.3.1. Αυτοματοποιημένος αντίστροφος αποκλεισμός

631 Το μεγιστικό μοντέλο μικτών αποτελεσμάτων που τέθηκε ως αφετηρία της διαδικασίας
632 αποκλεισμού περιλαμβάνει είκοσι έναν κύριους όρους και αλληλεπιδράσεις με τους
633 τύπους δομικού στοιχείου $\mathbb{I}_K$ και $\mathbb{I}_{GDP}$. Η εκτέλεση του αυτοματοποιημένου αντίστροφου

634 αποκλεισμού ($\alpha_{\text{drop}} = 0,10$) οδήγησε σε δώδεκα διαδοχικές αφαιρέσεις, με την
635 ακολουθία που παρουσιάζεται στον Πίνακας 38.

636 Πίνακας 38: Ακολουθία αυτοματοποιημένου αντίστροφου αποκλεισμού

Βήμα	Όρος που αφαιρέθηκε	p-value
1	$\mathbb{I}_K \cdot (L/D)$	0,9572
2	$(V_p/10)^3$	0,9168
3	L/D	0,7648
4	$\mathbb{I}_{GDP} \cdot (\gamma_c/10)$	0,6833
5	$\mathbb{I}_{GDP}$	0,4371
6	$\mathbb{I}_K \cdot (\gamma_c/10)$	0,1740
7	$\mathbb{I}_K$	0,2881
8	$(V_c/10)^3 \cdot \ln(V_c/10)$	0,1377
9	$\mathbb{I}_{GDP} \cdot (L/D)$	0,1136
10	$\mathbb{I}_{GDP} \cdot (V_p/10)^3$	0,1346
11	$\mathbb{I}_{GDP} \cdot (V_p/10)^3 \cdot \ln(V_p/10)$	0,7849
12	$\mathbb{I}_{GDP} \cdot (V_c/10)^3 \cdot \ln(V_c/10)$	0,3146

637

638 Η διαδικασία τερματίστηκε μετά από δώδεκα διαδοχικές αφαιρέσεις, με όλους τους
639 εναπομείναντες όρους να ικανοποιούν αυστηρά την προϋπόθεση $p < 0,10$.

640 Είναι αξιοσημείωτο ότι η λυγνρότητα L/D αφαιρέθηκε από το μοντέλο σε πρώιμο
641 στάδιο της διαδικασίας αντίστροφου αποκλεισμού ($p = 0,7648$, πολύ ανώτερο του
642 $\alpha_{\text{drop}} = 0,10$). Δεδομένου ότι οι ταχύτητες V_c και V_p που εισάγονται στο μοντέλο είναι ήδη
643 γεωμετρικά διορθωμένες μέσω του διορθωτικού συντελεστή σχήματος (SCF) που
644 αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4, η απόρριψη της μεταβλητής L/D υποδηλώνει ότι **δεν**
645 **υπάρχει στατιστικά ανιχνεύσιμη υπολειπόμενη εξάρτηση** της θλιπτικής αντοχής από τη
646 λυγνρότητα του πυρήνα μετά την εφαρμογή του SCF. Το εύρημα αυτό αποτελεί **έμμεση**
647 **επικύρωση** της ορθότητας του προτεινόμενου διορθωτικού συντελεστή. Εάν ο SCF δεν
648 αφαιρούσε επιτυχώς τη γεωμετρική επίδραση, η μεταβλητή L/D θα εμφανιζόταν ως
649 στατιστικά σημαντική στο τελικό μοντέλο, απορροφώντας την υπολειπόμενη γεωμετρική
650 πληροφορία. Η επικύρωση αυτή είναι έμμεση, καθώς προέρχεται από στατιστική ανάλυση
651 πειραματικών δεδομένων και συμπληρώνει την άμεση αναλυτική επικύρωση μέσω FEM
652 προσομοιώσεων του Κεφαλαίου 4.

9.7.3.2. Εκτιμήσεις συντελεστών

Το τελικό μοντέλο που προέκυψε από τη διαδικασία αποκλεισμού και φαίνεται στην εξίσωση (88) περιλαμβάνει εννέα σταθερούς όρους και μία τυχαία σταθερά ανά θέση πυρηνοληψίας. Οι εκτιμήσεις των σταθερών αποτελεσμάτων του τελικού μοντέλου, με τη μέθοδο REML και αξιοποιώντας την προσέγγιση Satterthwaite για τους βαθμούς ελευθερίας, παρουσιάζονται στον Πίνακας 39.

Πίνακας 39: Εκτιμήσεις σταθερών αποτελεσμάτων τελικού μοντέλου (REML)

Συντελεστής	Όρος	Εκτίμηση	Τυπικό Σφάλμα	df	t value	p-value
β_0	(Intercept)	-0,06718	0,71163	218,98	-0,094	0,924874
β_1	$\gamma_c/10$	+1,12621	0,33088	215,71	3,404	0,000793 ***
β_2	$(V_c/10)^3$	+23,40842	2,38736	209,51	9,805	$< 2 \times 10^{-16}$ ***
β_3	$(V_p/10)^3 \ln(V_p/10)$	+9,95243	3,67941	209,51	2,705	0,007395 **
β_4	$\mathbb{I}_K \cdot (V_c/10)^3$	+73,23637	22,22479	204,35	3,295	0,001159 **
β_5	$\mathbb{I}_K \cdot (V_c/10)^3 \ln(V_c/10)$	+118,80134	32,77341	204,57	3,625	0,000365 ***
β_6	$\mathbb{I}_K \cdot (V_p/10)^3$	-23,41615	9,14325	203,36	-2,561	0,011161 *
β_7	$\mathbb{I}_K \cdot (V_p/10)^3 \ln(V_p/10)$	-60,46394	18,06276	203,39	-3,347	0,000972 ***
β_8	$\mathbb{I}_{GDP} \cdot (V_c/10)^3$	+2,49245	0,88523	215,15	2,816	0,005321 **

Όλοι οι σταθεροί όροι του τελικού μοντέλου είναι στατιστικά σημαντικοί ($p < 0,05$). Ο όρος $(V_c/10)^3$ αναδεικνύεται ως ο κυρίαρχος προβλεπτικός παράγοντας ($t = 9,805$, $p < 2 \times 10^{-16}$). Ο όρος του ειδικού βάρους $\gamma_c/10$ είναι επίσης άκρως σημαντικός ($p = 0,0008$). Η σταθερά (intercept) δεν διαφέρει στατιστικά σημαντικά από το μηδέν ($p = 0,925$), εύρημα συνεπές με τη φύση του λογαριθμικού μοντέλου.

Ιδιαίτερα σημαντικό εύρημα συνιστά η διατήρηση πέντε αλληλεπιδράσεων με τον τύπο δομικού στοιχείου στο τελικό μοντέλο: τέσσερις για τον τύπο Κ (κολώνες) και μία για τον τύπο Γ-Δ-ΠΡ (προεντεταμένες δοκοί γέφυρας). Η διατήρηση αυτών των όρων αποτελεί κεντρικό εύρημα της ανάλυσης και υποδηλώνει ότι οι σχέσεις ταχύτητας-αντοχής τροποποιούνται συστηματικά ανάλογα με τον τύπο του δομικού στοιχείου από τον οποίο προήλθε ο πυρήνας. Από φυσική άποψη, η διαφοροποίηση αυτή ερμηνεύεται ως αποτέλεσμα διαφορετικών σχεδιαστικών κατηγοριών σκυροδέματος (συστηματικά υψηλότερες κατηγορίες σε προεντεταμένα στοιχεία γεφυρών έναντι υποστηλωμάτων κτηρίων).

9.7.3.3. Συνιστώσες τυχαίας διακύμανσης

Οι συνιστώσες της τυχαίας διακύμανσης του μοντέλου εκτιμήθηκαν ως:

676 $\hat{\sigma}_u^2 = 0,06444$ ($\hat{\sigma}_u = 0,2539$), $\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = 0,03595$ ($\hat{\sigma}_\varepsilon = 0,1896$)
677 Είναι αξιοσημείωτο ότι $\hat{\sigma}_u^2 > \hat{\sigma}_\varepsilon^2$, δηλαδή η διακύμανση μεταξύ θέσεων πυρηνοληψίας
678 υπερβαίνει τη διακύμανση εντός θέσεων. Αυτό αντικατοπτρίζει τη συστηματική επίδραση
679 μη-μετρούμενων ειδικών ανά θέση παραγόντων (συνθήκες ωρίμανσης, τύπος αδρανών,
680 ηλικία, ιστορικό φόρτισης) στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

681 9.7.3.4. Προτεινόμενη πολυμεταβλητή εμπειρική εξίσωση

682 Η αντικατάσταση των εκτιμώμενων τιμών των συντελεστών στη γενικευμένη δομή της
683 εξίσωσης (88) παρέχει την προτεινόμενη εμπειρική εξίσωση (91) πρόβλεψης της θλιπτικής
684 αντοχής.

$$\begin{aligned} \ln(\hat{F}_c) = & -0,067 + 1,126 \cdot \frac{\gamma_c}{10} + 23,408 \left(\frac{V_c}{10}\right)^3 + 9,952 \left(\frac{V_p}{10}\right)^3 \ln\left(\frac{V_p}{10}\right) \\ & + 73,236 \mathbb{I}_K \left(\frac{V_c}{10}\right)^3 + 118,801 \mathbb{I}_K \left(\frac{V_c}{10}\right)^3 \ln\left(\frac{V_c}{10}\right) \\ & - 23,416 \mathbb{I}_K \left(\frac{V_p}{10}\right)^3 - 60,464 \mathbb{I}_K \left(\frac{V_p}{10}\right)^3 \ln\left(\frac{V_p}{10}\right) \\ & + 2,492 \mathbb{I}_{GDP} \left(\frac{V_c}{10}\right)^3 \end{aligned} \quad (91)$$

685 με τις θέσεις πυρηνοληψίας να εισάγουν τυχαία απόκλιση u_j από τη μέση πρόβλεψη του
686 μοντέλου, με τυπική απόκλιση $\hat{\sigma}_u = 0,254$ στην κλίμακα $\ln(F_c)$.

687 9.7.3.5. Αξιολόγηση μοντέλου

688 Οι δείκτες αξιολόγησης του μοντέλου, υπολογιζόμενοι σύμφωνα με τη μεθοδολογία
689 του Κεφαλαίου 8, παρουσιάζονται στον Πίνακα 40.

690 Πίνακας 40: Δείκτες απόδοσης τελικού μοντέλου

Δείκτης	Τιμή
R_m^2 – σταθερά αποτελέσματα μόνο	59,7 %
R_c^2 – συνολικό μοντέλο	85,6 %
Adjusted ICC	64,2 %
Μέση θλιπτική αντοχή δείγματος ($\bar{F}_c$)	29,16 MPa
MAE	3,71 MPa
RMSE	5,03 MPa
Σχετικό σφάλμα ($MAE/\bar{F}_c$)	12,72 %
Joint F-test – F-statistic	2,07
Joint F-test – p-value	0,1285

691

9.7.4 Εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου: περιορισμοί δεδομένων

Η προτεινόμενη εμπειρική εξίσωση του Κεφαλαίου 9.7.3 αποτελεί το πληρέστερο μοντέλο πρόβλεψης της θλιπτικής αντοχής που μπορεί να εξαχθεί από το παρόν πειραματικό δείγμα. Η εφαρμογή του ωστόσο προϋποθέτει τη διαθεσιμότητα του πλήρους συνόλου των απαιτούμενων δεδομένων για τον υπό εξέταση πυρήνα ή θέση μέτρησης, και συγκεκριμένα: (α) και τις δύο ταχύτητες διάδοσης V_c και V_p , (β) το ειδικό βάρος γ_c , και (γ) τη γνώση του τύπου δομικού στοιχείου από τον οποίο προέρχεται η μέτρηση.

Σε ορισμένες πρακτικές εφαρμογές, ωστόσο, ένα ή περισσότερα από αυτά τα δεδομένα ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμα. Για παράδειγμα, σε διαγνωστικές μελέτες με περιορισμένο εξοπλισμό, μπορεί να διεξάγεται μόνο μέτρηση UPV (διαθέσιμο μόνο V_p) ή μόνο Impact-Echo (διαθέσιμο μόνο V_c). Για την κάλυψη αυτών των πρακτικών αναγκών, στο ακόλουθο κεφάλαιο παρουσιάζονται απλοποιημένες διμεταβλητές εμπειρικές σχέσεις, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μειωμένο σύνολο δεδομένων.

9.7.5 Προτεινόμενη εμπειρική σχέση: θλιπτική αντοχή – ταχύτητα ράβδου

9.7.5.1. Διατύπωση μοντέλου

Για τη συσχέτιση θλιπτικής αντοχής και ταχύτητας ράβδου V_c υιοθετείται η μορφή κλασματικού πολυωνύμου $FP2$ με $p = 3$, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του MFP όπως φαίνεται στην εξίσωση (92).

$$\ln(F_c) = \beta_0 + \beta_1 V_c^3 + \beta_2 V_c^3 \ln(V_c) + \varepsilon \quad (92)$$

9.7.5.2. Εκτιμήσεις συντελεστών

Η εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων στα $N = 232$ πειραματικά δεδομένα παρέχει τις εκτιμήσεις του Πίνακα 41.

Πίνακας 41: Εκτιμήσεις συντελεστών σχέσης $f_c - V_c$

Συντελεστής	Όρος	Εκτίμηση	Τυπ. Σφάλμα	t value	p-value
β_0	(Intercept)	+3,0133	0,348	8,659	$< 10^{-15}$ ***
β_1	V_c^3	-0,10491	0,0294	-3,572	$4,5 \times 10^{-4}$ ***
β_2	$V_c^3 \cdot \ln(V_c)$	+0,07825	0,0177	4,413	$1,6 \times 10^{-5}$ ***

Όλοι οι συντελεστές είναι άκρως σημαντικοί (***) $p < 0,001$). Η αντικατάσταση των εκτιμώμενων τιμών παρέχει την προτεινόμενη εξίσωση (93).

$$\ln(\hat{F}_c) = 3,013 - 0,1049 V_c^3 + 0,0783 V_c^3 \ln(V_c) \quad (93)$$

με F_c σε MPa και V_c σε km/s.

9.7.5.3. Αξιολόγηση μοντέλου

Οι δείκτες απόδοσης της σχέσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 42.

Πίνακας 42: Δείκτες απόδοσης σχέσης $f_c - V_c$

Δείκτης	Τιμή
R^2 (στην κλίμακα $\ln F_c$)	66,28 %
R^2_{adj}	65,99 %
R^2 (στην αρχική κλίμακα MPa)	64,57 %
MAE	6,52 MPa
RMSE	8,75 MPa
Σχετικό Σφάλμα	22,35 %
Joint F-test – F	2,005
Joint F-test – p	0,1371

Η εξίσωση επιτυγχάνει $R^2 = 66,3\%$ στην κλίμακα του λογαρίθμου της θλιπτικής αντοχής. Ιδιαίτερα σημαντικό εύρημα αποτελεί η μη απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης του Joint F-test ($p = 0,137 > 0,05$), η οποία υποδεικνύει ότι το μοντέλο **δεν** παρουσιάζει συστηματική υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση της θλιπτικής αντοχής σε κανένα τμήμα του εύρους τιμών.

9.7.6 Προτεινόμενη εμπειρική σχέση: θλιπτική αντοχή – ταχύτητα παλμού υπερήχων

9.7.6.1. Διατύπωση μοντέλου

Για τη συσχέτιση θλιπτικής αντοχής και ταχύτητας υπερήχων V_p υιοθετείται ομοίως κλασματικό πολυώνυμο $FP2$ με $p = 3$, φαίνεται στην εξίσωση (94).

$$\ln(F_c) = \beta_0 + \beta_1 V_p^3 + \beta_2 V_p^3 \ln(V_p) + \varepsilon \quad (94)$$

9.7.6.2. Εκτιμήσεις συντελεστών

Η εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων στα $N = 232$ πειραματικά δεδομένα παρέχει τις εκτιμήσεις του Πίνακα 43.

Πίνακας 43: Εκτιμήσεις συντελεστών σχέσης $f_c - V_p$

Συντελεστής	Όρος	Εκτίμηση	Τυπ. Σφάλμα	t value	p-value
β_0	(Intercept)	+0,0674	0,744	0,091	0,928
β_1	V_p^3	+0,10892	0,0414	2,633	$8,7 \times 10^{-3} **$
β_2	$V_p^3 \cdot \ln(V_p)$	-0,05065	0,0220	-2,305	$2,2 \times 10^{-2} *$

735 Με αντικατάσταση των συντελεστών προκύπτει η εξίσωση (95).

$$\ln(\hat{F}_c) = 0,067 + 0,1089 V_p^3 - 0,0506 V_p^3 \ln(V_p) \quad (95)$$

736 με F_c σε MPa και V_p σε km/s.

737 9.7.6.3. Αξιολόγηση μοντέλου

738 Οι δείκτες απόδοσης της σχέσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 44.

739

Πίνακας 44: Δείκτες απόδοσης σχέσης $f_c - V_p$	
Δείκτης	Τιμή
R^2 (στην κλίμακα $\ln F_c$)	41,61 %
R^2_{adj}	41,10 %
R^2 (στην αρχική κλίμακα MPa)	30,43 %
MAE	8,91 MPa
RMSE	12,26 MPa
Σχετικό σφάλμα	30,54 %
Joint F-test – F	3,910
Joint F-test – p	0,0214

740 Η σχέση $F_c - V_p$ παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερη προβλεπτική ικανότητα από την
741 αντίστοιχη $F_c - V_c$ το R^2 μειώνεται από 66,3% σε 41,6%, ενώ το σχετικό σφάλμα αυξάνεται
742 από 22,3% σε 30,5%. Επιπλέον, ο έλεγχος Joint F-test απορρίπτει τη μηδενική υπόθεση
743 ($p = 0,021 < 0,05$), υποδεικνύοντας την παρουσία συστηματικού σφάλματος (bias) στις
744 προβλέψεις του μοντέλου.

745 Η σχέση $F_c - V_p$ συμπεριλαμβάνεται στην παρούσα διατριβή για λόγους πληρότητας και
746 διευκόλυνσης σύγκρισης με την κλασική βιβλιογραφία της μεθόδου UPV. Συνιστάται όμως
747 **όπου είναι διαθέσιμη η μέτρηση της ταχύτητας ράβδου V_c , η προτίμησή της έναντι της**
748 **V_p για την εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής.**

749 9.7.7 Σχέσεις ταχυτήτων διάδοσης – ειδικού βάρους

750 Οι ταχύτητες διάδοσης κυμάτων στο σκυρόδεμα συνδέονται με την πυκνότητα του
751 υλικού μέσω των θεμελιωδών εξισώσεων κύματος της μηχανικής συνεχούς μέσου. Για το
752 λόγο αυτό, διερευνήθηκαν επίσης οι γραμμικές σχέσεις των V_c και V_p με το ειδικό βάρος
753 γ_c , σύμφωνα με τη μορφή που υπέδειξε το MFP για τη μεταβλητή γ_c (γραμμική).

754 9.7.7.1. Σχέση $V_c - \gamma_c$

755 Η εφαρμογή απλής γραμμικής παλινδρόμησης στα δεδομένα ταχύτητας ράβδου και
756 ειδικού βάρους οδηγεί στις εκτιμήσεις του Πίνακα 45.

757

Πίνακας 45: Εκτιμήσεις συντελεστών σχέσης $V_c - \gamma_c$

Συντελεστής	Όρος	Εκτίμηση	Τυπ. Σφάλμα	t value	p-value
β_0	(Intercept)	-4,1045	0,5311	-7,728	$1,1 \times 10^{-12} ***$
β_1	γ_c	+0,3510	0,0232	15,123	$< 10^{-34} ***$

758 Η προτεινόμενη εξίσωση μεταξύ $V_c - \gamma_c$ είναι η εξίσωση (96).

$$\hat{V}_c = -4,105 + 0,351 \gamma_c \quad (96)$$

759 με V_c σε km/s και γ_c σε kN/m³. Δείκτες απόδοσης: $R^2 = 48,6\%$, $R^2_{adj} = 48,3\%$, MAE=

760 0,205 km/s, RMSE= 0,287 km/s.

761 9.7.7.2. Σχέση $V_p - \gamma_c$ 762 Με αντίστοιχη μεθοδολογία στα δεδομένα ταχύτητας υπερήχων και ειδικού βάρους
763 προκύπτουν οι εκτιμήσεις του Πίνακα 46.

764

Πίνακας 46: Εκτιμήσεις συντελεστών σχέσης $V_p - \gamma_c$

Συντελεστής	Όρος	Εκτίμηση	Τυπ. Σφάλμα	t value	p-value
β_0	(Intercept)	-2,9840	0,4598	-6,490	$1,3 \times 10^{-9} ***$
β_1	γ_c	+0,3376	0,0201	16,802	$< 10^{-39} ***$

765 Η προτεινόμενη εξίσωση μεταξύ $V_p - \gamma_c$ είναι η εξίσωση (97).

$$\hat{V}_p = -2,984 + 0,338 \gamma_c \quad (97)$$

766 με V_p σε km/s και γ_c σε kN/m³. Δείκτες απόδοσης: $R^2 = 53,8\%$, $R^2_{adj} = 53,6\%$, MAE=

767 0,185 km/s, RMSE= 0,249 km/s.

768 Οι δύο εξισώσεις παρουσιάζουν παρόμοιους συντελεστές κλίσης (0,351 για V_c , 0,338
769 για V_p), δείγμα μιας θεμελιώδους φυσικής συσχέτισης μεταξύ ταχυτήτων διάδοσης και
770 πυκνότητας του σκυροδέματος. Η πιο αρνητική τιμή της σταθεράς β_0 στη σχέση $V_c - \gamma_c$
771 (-4,105 έναντι -2,984) αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι, για δεδομένο ειδικό βάρος, η
772 ταχύτητα ράβδου V_c είναι συστηματικά μικρότερη από την ταχύτητα υπερήχων V_p , εύρημα
773 συνεπές με τη θεωρία ελαστικότητας ($V_p > V_c$ σε ισότροπο μέσο).

774 9.7.8 Αξιολόγηση εμπειρικών σχέσεων

775 9.7.8.1. Πολυμεταβλητό μοντέλο

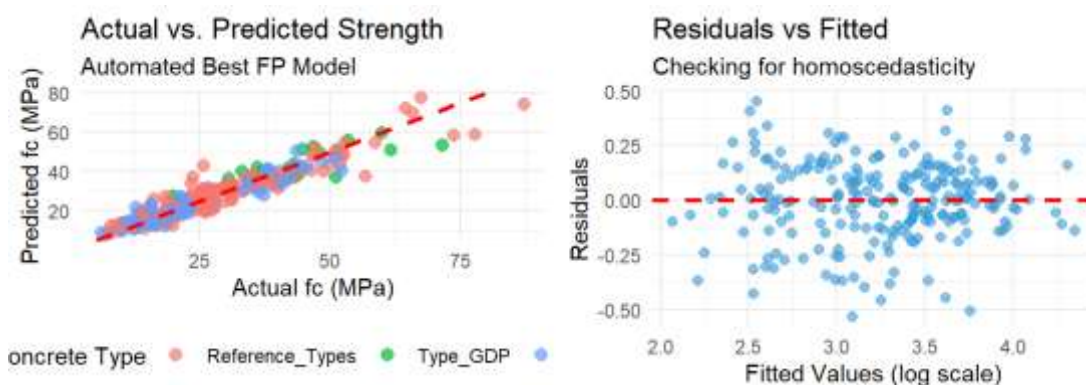
776 Ο δείκτης $R^2_m = 59,7\%$ υποδεικνύει ότι οι φυσικές μεταβλητές ΜΚΔ (V_c , V_p , γ_c) σε
777 συνδυασμό με τις μεταβλητές τύπου δομικού στοιχείου ερμηνεύουν περίπου τα τρία
778 πέμπτα της μεταβλητότητας της θλιπτικής αντοχής. Η ενσωμάτωση της τυχαίας σταθεράς
779 ανά θέση πυρηνοληψίας ανεβάζει την επεξηγηματική ισχύ στο $R^2_c = 85,6\%$.

Ο προσαρμοσμένος συντελεστής ενδοταξικής συσχέτισης $ICC = 64,2\%$ εκφράζει ότι το 64,2% της ανεξήγητης διακύμανσης που απομένει μετά τα σταθερά αποτελέσματα αποδίδεται συστηματικά σε διαφορές μεταξύ θέσεων πυρηνοληψίας. Η εξαιρετικά υψηλή τιμή ICC δικαιολογεί πλήρως τη χρήση μοντέλου μικτών αποτελεσμάτων έναντι κλασικού μοντέλου ελαχίστων τετραγώνων.

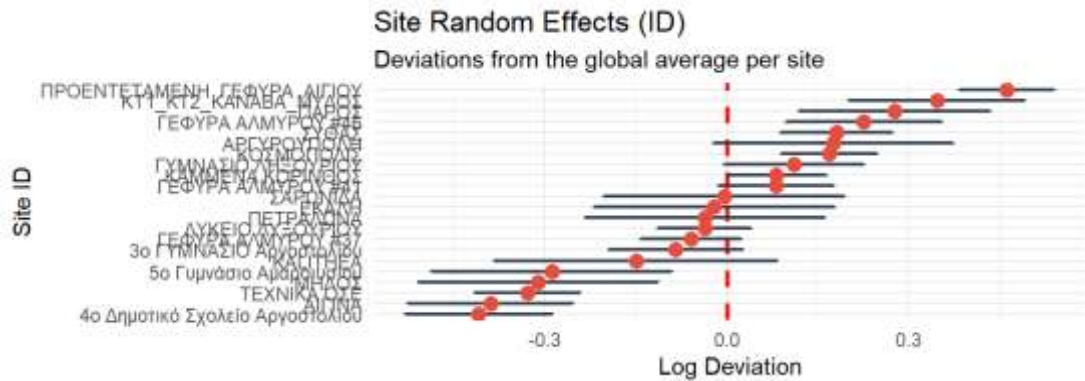
Το μέσο απόλυτο σφάλμα της πρόβλεψης ανέρχεται σε $MAE = 3,71$ MPa και η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος σε $RMSE = 5,03$ MPa, στην αρχική κλίμακα MPa μετά από εκθετική αντίστροφη μετατροπή των προβλέψεων. Με μέση θλιπτική αντοχή δείγματος $\bar{F}_c = 29,16$ MPa, το σχετικό σφάλμα της πρόβλεψης είναι 12,72%, τιμή ικανοποιητική δεδομένης της εγγενούς μεταβλητότητας του σκυροδέματος in-situ και της ευρύτητας του δείγματος.

Ο έλεγχος Joint F-test εφαρμόστηκε στο γραμμικό μοντέλο πραγματικών έναντι προβλεπόμενων τιμών, με μηδενική υπόθεση $H_0: (a_0, a_1) = (0,1)$. Η στατιστική του ελέγχου ήταν $F = 2,07$ με αντίστοιχη τιμή $p = 0,1285$. Δεδομένου ότι $p > 0,05$, η μηδενική υπόθεση δεν απορρίπτεται: η γραμμή προσαρμογής πραγματικών–προβλεπόμενων τιμών δεν αποκλίνει στατιστικά σημαντικά από τη διχοτόμο $y = x$. Επομένως, το προτεινόμενο μοντέλο **δεν** παρουσιάζει συστηματική υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση της θλιπτικής αντοχής.

Τα διαγνωστικά διαγράμματα του τελικού μοντέλου παρουσιάζονται στην Εικόνα 95, όπου αριστερά αποτυπώνεται η πραγματική έναντι της προβλεπόμενης θλιπτικής αντοχής ανά τύπο δομικού στοιχείου, με την κόκκινη διακεκομμένη γραμμή να αντιστοιχεί στη διχοτόμο $y = x$ ενώ δεξιά τα υπόλοιπα έναντι προσαρμοσμένων τιμών στη λογαριθμική κλίμακα, για τον έλεγχο της ομοσκεδαστικότητας και στην Εικόνα 96 φαίνονται τα τυχαία αποτελέσματα ανά θέση πυρηνοληψίας (Site Random Effects) με κόκκινα σημεία τις σημειακές εκτιμήσεις και ραβδώσεις τα 95% διαστήματα εμπιστοσύνης



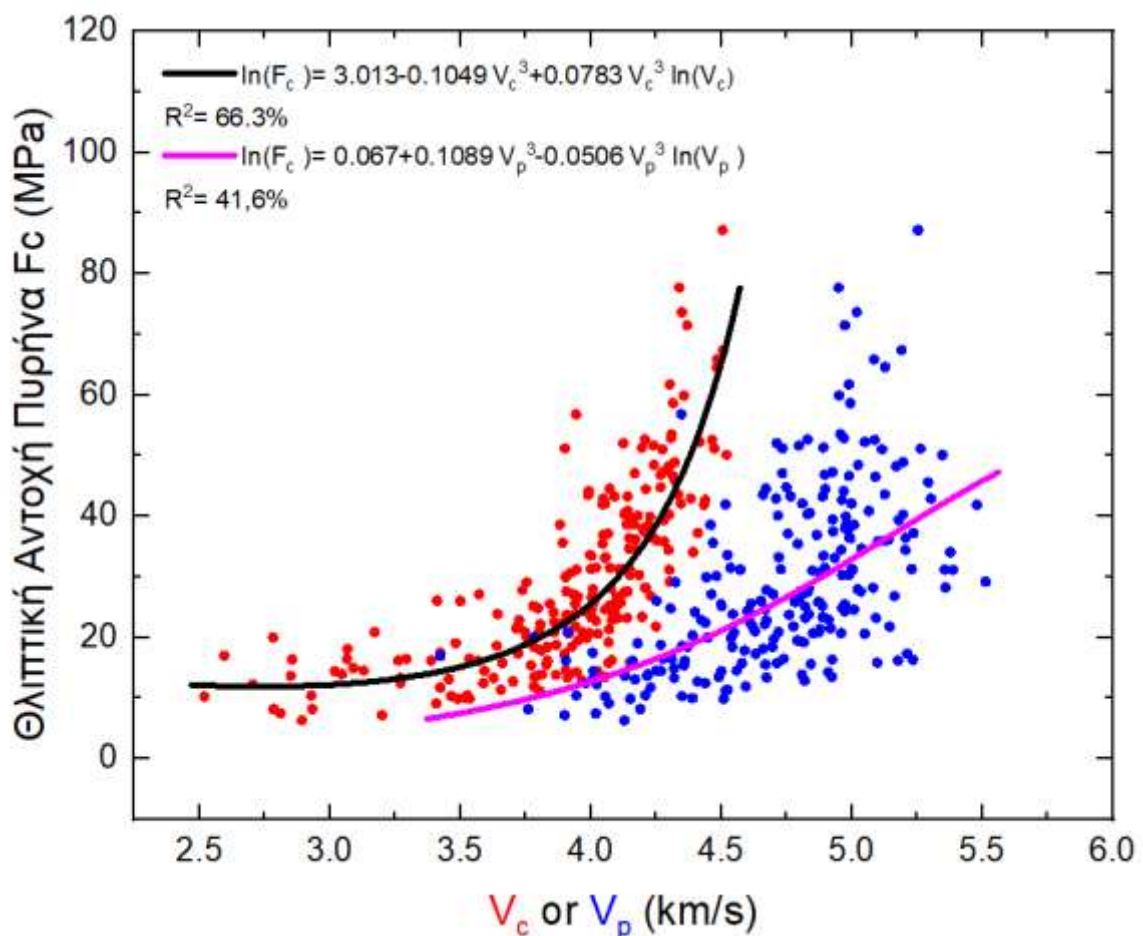
Εικόνα 95: Διαγνωστικά διαγράμματα τελικού μοντέλου. Αριστερά: Πραγματική έναντι προβλεπόμενη θλιπτική αντοχή ανά τύπο δομικού στοιχείου. Δεξιά: Υπόλοιπα έναντι προσαρμοσμένων τιμών στη λογαριθμική κλίμακα, για τον έλεγχο της ομοσκεδαστικότητας



Εικόνα 96: Τυχασία αποτελέσματα ανά θέση πυρηνοληψίας (Site Random Effects)

9.7.8.2. Διμεταβλητές σχέσεις

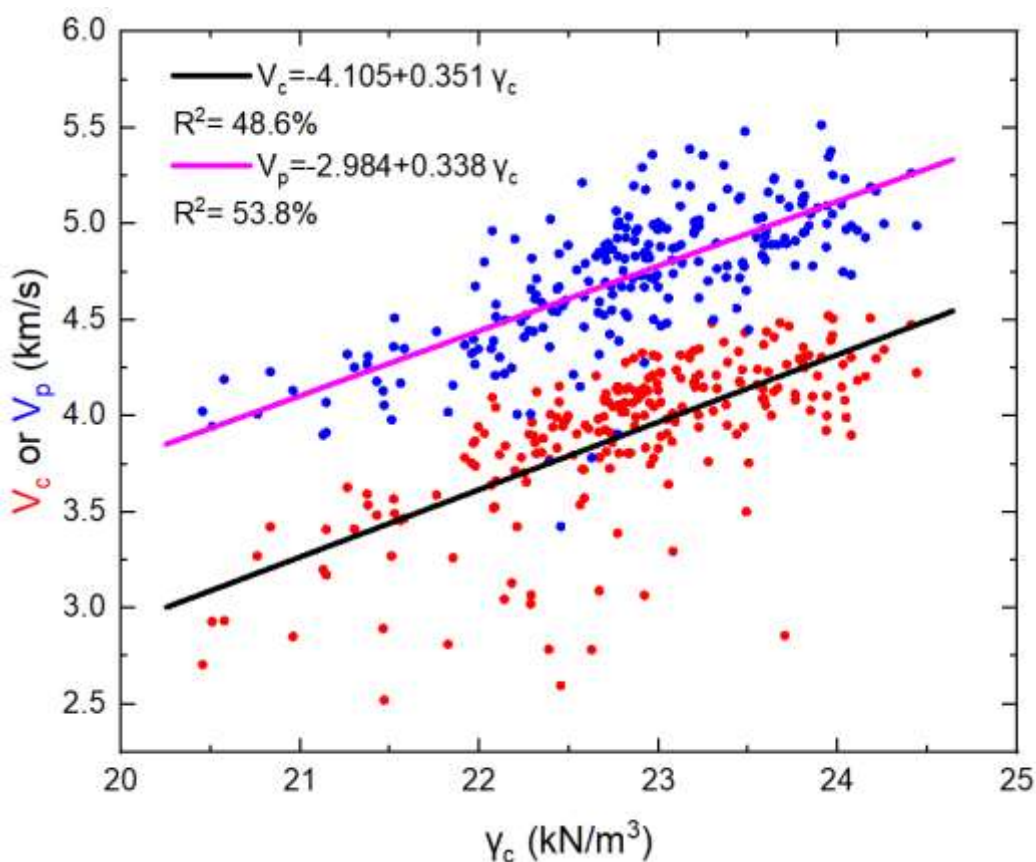
Από τη συγκριτική αξιολόγηση προκύπτει ότι η σχέση $F_c - V_c$ είναι σαφώς ανώτερη της $F_c - V_p$ ως προς την εξηγηματική ισχύ ($R^2 = 66,3\%$ έναντι $41,6\%$) και την απουσία συστηματικού σφάλματος (Joint F-test με $p = 0,137$ έναντι $p = 0,021$). Στην Εικόνα 97 φαίνεται η προσαρμογή των καμπυλών των προτεινόμενων εμπειρικών σχέσεων στα δεδομένα Θλιπτικής αντοχής και ταχυτήτων διάδοσης.



Εικόνα 97: Προσαρμογή καμπυλών στα δεδομένα Θλιπτικής αντοχής και ταχυτήτων διάδοσης

Οι σχέσεις των ταχυτήτων με το ειδικό βάρος εμφανίζουν συγκρίσιμη επεξηγηματική ισχύ (R^2 μεταξύ 48,6% και 53,8%), αντικατοπτρίζοντας τη θεμελιώδη φυσική σύζευξη ταχύτητας–πυκνότητας. Στην Εικόνα 98 φαίνεται η προσαρμογή καμπυλών στα δεδομένα ταχυτήτων διάδοσης και ειδικού βάρους.

Η μη-γραμμικότητα στις σχέσεις αντοχής–ταχύτητας (επιλογή $FP2$ με $p = 3$) έναντι της απλής γραμμικότητας στις σχέσεις ταχύτητας–ειδικού βάρους αντικατοπτρίζει διαφορετικούς φυσικούς μηχανισμούς: η σχέση δυσκαμψίας–αντοχής στο σκυρόδεμα είναι εγγενώς εκθετική, ενώ η σχέση ταχύτητας–πυκνότητας ακολουθεί απλούστερη γραμμική συμπεριφορά εντός του εξεταζόμενου φάσματος τιμών.



Εικόνα 98: Προσαρμογή καμπυλών στα δεδομένα ταχυτήτων διάδοσης και ειδικού βάρους

Από τη σύγκριση μεταξύ των πολυμεταβλητού και διμεταβλητών μοντέλων προκύπτει ότι το πλήρες πολυμεταβλητό μοντέλο **μειώνει το σχετικό σφάλμα κατά 9,7 ποσοστιαίες μονάδες** (από 22,4% σε 12,7%) σε σχέση με την καλύτερη διμεταβλητή σχέση ($F_c - V_c$), και κατά **17,8 ποσοστιαίες μονάδες** σε σχέση με τη χειρότερη διμεταβλητή ($F_c - V_p$). Η διαφορά αυτή ποσοτικοποιεί το όφελος που προσφέρει η ενσωμάτωση της πληροφορίας του τύπου δομικού στοιχείου, της θέσης πυρηνοληψίας, και των πολλαπλών μετρούμενων μεγεθών στο μοντέλο πρόβλεψης.

Συνοψίζοντας: **το πλήρες LMM της αποτελεί το προτεινόμενο μοντέλο της παρούσας διατριβής** όπου είναι εφικτή η συγκέντρωση όλων των απαιτούμενων δεδομένων. Οι

839 διμεταβλητές παρέχονται ως **εφεδρικές πρακτικές εναλλακτικές** για περιπτώσεις
840 περιορισμένων διαθέσιμων δεδομένων.

841 Σημειώνεται ρητά ότι οι διμεταβλητές σχέσεις **παρέχουν χαμηλότερη προβλεπτική**
842 **αξιοπιστία** έναντι του πλήρους πολυμεταβλητού μοντέλου και πρέπει να
843 χρησιμοποιούνται μόνον όταν η εφαρμογή του πλήρους μοντέλου είναι αδύνατη λόγω
844 έλλειψης δεδομένων.

845

846

Κεφάλαιο 10

10. Συμπεράσματα, επιπτώσεις και συστάσεις για μελλοντική έρευνα

10.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διατριβή αντιμετώπισε ένα κεντρικό ερευνητικό πρόβλημα στον τομέα των μη καταστροφικών δοκιμών: την ακριβή εκτίμηση των δυναμικών ελαστικών παραμέτρων κυλινδρικών δοκιμίων σκυροδέματος, με ιδιαίτερη εστίαση σε γεωμετρίες μικρής λυγρηρότητας που αντιστοιχούν στα πρακτικά δεδομένα της πυρηνοληψίας υφιστάμενων κατασκευών. Μέσω 156 παραμετρικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων σε PLAXIS 2D/3D, πειραματικών δοκιμών σε 232 πυρήνες σκυροδέματος από υφιστάμενες κατασκευές και 12 κυλινδρικά δοκίμια αλουμινίου και χάλυβα γνωστών ιδιοτήτων, η έρευνα απέδωσε συμπεράσματα που συνοψίζονται κατά ερευνητικό στόχο.

10.1.1 Ποσοτικοποίηση του σφάλματος στη μέθοδο UPV (Στόχος 1)

Η ανάλυση ευαισθησίας κατέδειξε ότι η υιοθέτηση μιας σταθερής τιμής λόγου Poisson κατά τον υπολογισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας E_d μέσω της μεθόδου UPV εισάγει σφάλμα σημαντικού μεγέθους. Για τη μέση τιμή $\nu = 0,32$ του εξεταζόμενου δείγματος, οι πυρήνες που αντιστοιχούν στο κατώτερο δεκατημόριο ($\nu = 0,288$) παρουσιάζουν υπερεκτίμηση του E_d κατά +8,5%, ενώ εκείνοι στο ανώτερο δεκατημόριο ($\nu = 0,356$) υποεκτίμηση κατά -15,5%. Στην ακραία περίπτωση $\nu = 0,40$ — τιμή που δεν αποτελεί σπανιότητα στο εξεταζόμενο δείγμα — η υποεκτίμηση δύναται να ανέλθει έως 50%. Το εύρημα αυτό ποσοτικοποιεί για πρώτη φορά συστηματικά τον κίνδυνο που ενέχει η κοινή πρακτική υιοθετήσεως σταθερής τιμής ν , και τεκμηριώνει ότι η αβεβαιότητα δεν είναι αμελητέα ακόμη και εντός του τυπικού εύρους $\nu = 0,25 - 0,35$.

10.1.2 Κριτική αξιολόγηση της UPV ως αυτόνομης δοκιμής (Στόχος 2)

Η σύγκριση των εμπειρικών συσχετίσεων $F_c - V_p$ που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 8 με αντίστοιχες δημοσιευμένες σχέσεις ανέδειξε σημαντική ποσοτική διασπορά μεταξύ των καμπυλών, η οποία εντείνεται στην περιοχή $V_p > 5,0 \text{ km/s}$. Η αντιπαράθεση δύο καμπυλών που αντιστοιχούν σε $\nu = 0,29$ και $\nu = 0,33$ κατέδειξε ότι η διαφοροποίηση μεταξύ τους αυξάνεται αισθητά για υψηλές τιμές ταχύτητας υπερήχων. Βάσει των πειραματικών ευρημάτων, η μέθοδος UPV δεν δύναται να χρησιμοποιηθεί αξιόπιστα ως αυτόνομη δοκιμή για τον προσδιορισμό του E_d ή της F_c χωρίς ανεξάρτητο προσδιορισμό του λόγου Poisson.

10.1.3 Αξιολόγηση της ΙΕ ως αυτόνομης δοκιμής (Στόχος 3)

Η μέθοδος ΙΕ, σε συνδυασμό με τον προτεινόμενο διορθωτικό συντελεστή σχήματος SCF, παρέχει εκτιμήσεις του E_d με σφάλμα μικρότερο του 2% για δοκίμια λυγηρότητας $L/D = 2,0$ και περίπου 9,8% για $L/D = 1,0$, εφόσον υιοθετηθεί η μέση τιμή $\nu = 0,32$. Εντός του τυπικού εύρους τιμών $\nu = 0,25 - 0,30$ που απαντάται στο σκυρόδεμα, η διακύμανση του SCF μειώνεται σε μόλις 1,9% για $L/D = 1,0$. Η συγκριτική αξιολόγηση κατέδειξε ότι η μέθοδος ΙΕ-SCF υπερέρχει συστηματικά της UPV σε ολόκληρο το εξεταζόμενο εύρος τιμών ν και L/D , καθώς ο διορθωτικός συντελεστής σχήματος απορροφά σημαντικό μέρος της εξάρτησης από τον λόγο Poisson. Η σύγκριση του προτεινόμενου SCF με τον κλασικό συντελεστή Love έδειξε ότι ο SCF παρέχει ελαφρώς μεγαλύτερη διόρθωση, με απόκλιση μεταξύ των δύο μόλις 2,8% για $L/D = 1,0$ και $\nu = 0,32$.

10.1.4 Ανάπτυξη διορθωτικών συντελεστών SCF, MCF, ICF (Στόχος 4)

Αναπτύχθηκε ολοκληρωμένο σύστημα τριών διορθωτικών συντελεστών μέσω παραμετρικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων. Ο συντελεστής σχήματος SCF προσδιορίστηκε από 72 αξονοσυμμετρικές αναλύσεις 2D σε εύρος $L/D = 0,7 - 5,0$ και $\nu = 0,20 - 0,45$ και περιγράφηκε μέσω αναλυτικής εμπειρικής εξίσωσης. Οι συντελεστές μάζας αισθητήρα (MCF) και αδράνειας (ICF) προσδιορίστηκαν από 24 τρισδιάστατες αναλύσεις σε δοκίμια χάλυβα και αλουμινίου υπό διαμήκη και στρεπτική κρούση. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι ο MCF καθίσταται σημαντικός για λόγους μάζας $W/W_0 < 200$ — τιμή που αντιστοιχεί σε μεταλλικά δοκίμια μικρής μάζας — ενώ για πυρήνες σκυροδέματος τυπικού μεγέθους ($W/W_0 \approx 600$) η αντίστοιχη διόρθωση είναι περίπου 3,5‰, δηλαδή πρακτικά αμελητέα. Αντίθετα, ο ICF διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη στρεπτική κρούση, ιδίως σε δοκίμια μικρής λυγηρότητας. Η λυγηρότητα δεν εμφάνισε καμία επίδραση στα αποτελέσματα υπό στρεπτική κρούση, επιβεβαιώνοντας ότι η στρεπτική ιδιομορφή δεν χρειάζεται διόρθωση σχήματος.

10.1.5 Πειραματική επαλήθευση σε κοντούς κυλίνδρους (Στόχος 5)

Οι τρεις διορθωτικοί συντελεστές επαληθεύτηκαν πειραματικά σε 12 κυλινδρικά δοκίμια χάλυβα και αλουμινίου με λυγηρότητες $L/D = 1,0$ έως 5,0. Η μέση τιμή του λόγου Poisson που υπολογίστηκε μέσω τριών ανεξάρτητων συνδυασμών δοκιμών ($M-E_d$, $M-G_d$, E_d-G_d) ανήλθε σε $\nu = 0,285$ για τον χάλυβα και $\nu = 0,341$ για το αλουμίνιο, σε πλήρη συμφωνία με τις γνωστές τιμές των εν λόγω υλικών. Η διασπορά μεταξύ των μεμονωμένων τιμών ήταν εξαιρετικά μικρή, τόσο μεταξύ των δοκιμών διαφορετικής λυγηρότητας όσο και μεταξύ των τριών μεθοδολογιών υπολογισμού, επιβεβαιώνοντας τόσο την ορθότητα των αριθμητικών μοντέλων όσο και την πρακτική εφαρμοσιμότητα των προτεινόμενων διορθωτικών συντελεστών.

10.1.6 Προσδιορισμός του ν_d μέσω της ΙΕ ως αυτόνομης δοκιμής (Στόχος 6)

Η δυνατότητα αυτόνομου προσδιορισμού του δυναμικού λόγου Poisson αποκλειστικά μέσω δοκιμών ΙΕ διερευνήθηκε μέσω 60 αξονοσυμμετρικών αναλύσεων 2D και δύο εναλλακτικών μεθοδολογιών. Η Μεθοδολογία 1, η οποία βασίζεται στον λόγο οριζόντιων επιταχύνσεων της πλευρικής επιφάνειας προς την κατακόρυφη επιτάχυνση στο κέντρο της ελεύθερης επιφάνειας, αποδίδει σφάλμα μικρότερο του 6% για $L/D = 2$ και βέλτιστη θέση τοποθέτησης $z = 0,22L$. Η Μεθοδολογία 2, η οποία χρησιμοποιεί τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο στην πλευρική επιφάνεια, εμφανίζει συστηματικά μικρότερα σφάλματα, με μέγιστο 5% για $L/D = 2$ και 10% για $L/D = 1$ (έναντι 6% και 21% αντιστοίχως στη Μεθοδολογία 1), με βέλτιστη θέση τοποθέτησης $z = 0,16L$ για $L/D \geq 2$ και $z = 0,10L$ για $L/D = 1$. Η Μεθοδολογία 2 προτείνεται ως η καταλληλότερη προσέγγιση, καθώς συνδυάζει απλούστερη πειραματική διάταξη με υψηλότερη ακρίβεια.

Παράλληλα, η διερεύνηση του λόγου f_2/f_1 ως εναλλακτικής οδού προσδιορισμού του ν κατέδειξε ότι η μέθοδος αυτή είναι πρακτικά εφαρμόσιμη μόνο για δοκίμια μεγάλης λυγηρότητας ($L/D > 2$). Για $L/D = 1$, μια διακύμανση μόλις 3% στον λόγο f_2/f_1 αντιστοιχεί σε εύρος $\nu = 0,20 - 0,45$, καθιστώντας τον προσδιορισμό ουσιαστικά αδύνατο. Η περιορισμένη δυνατότητα ανίχνευσης της δεύτερης ιδιοσυχνότητας σε δοκίμια σκυροδέματος μικρής λυγηρότητας ενισχύει περαιτέρω τον πρακτικό αυτό περιορισμό.

10.1.7 Μεθοδολογία UPIES (Στόχος 7)

Η σύνθεση των ανωτέρω ευρημάτων οδήγησε στην ανάπτυξη της μεθοδολογίας UPIES (Ultrasonic Pulse Velocity – Impact Echo Synergy), η οποία αξιοποιεί τη συμπληρωματικότητα των δύο μεθόδων NDT για τον ταυτόχρονο προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας, του μέτρου διάτμησης και του λόγου Poisson χωρίς την ανάγκη υιοθέτησεως αυθαίρετων τιμών για τον τελευταίο. Η UPIES βασίζεται στην εφαρμογή μιας δοκιμής UPV για τον υπολογισμό του περιορισμένου μέτρου ελαστικότητας M και μιας δοκιμής ΙΕ σε διαμήκη διάδοση, με διόρθωση μέσω SCF (και MCF όπου απαιτείται), για τον υπολογισμό του E_d . Ο λόγος Poisson εξάγεται αλγεβρικά από τον λόγο M/E_d . Η πειραματική εφαρμογή σε δοκίμια χάλυβα και αλουμινίου γνωστών ιδιοτήτων απέδωσε τιμές ν σε πλήρη συμφωνία με τις αναμενόμενες, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία της μεθοδολογίας. Η σύγκριση μεταξύ τριών εναλλακτικών συνδυασμών ($M-E_d$, $M-G_d$, E_d-G_d) κατέδειξε ότι ο συνδυασμός UPV με διαμήκη ΙΕ — δηλαδή η μεθοδολογία UPIES — αποδίδει τα πλέον αξιόπιστα αποτελέσματα εντός του τυπικού εύρους $\nu = 0,25 - 0,35$.

10.1.8 Εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης θλιπτικής αντοχής και ειδικού βάρους (Στόχος 8)

Πέραν του προσδιορισμού των ελαστικών παραμέτρων, η αξιολόγηση υφιστάμενων κατασκευών απαιτεί συχνά την εκτίμηση και της θλιπτικής αντοχής μέσω μη καταστροφικών δοκιμών. Στο πλαίσιο αυτό, η στατιστική μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 8 εφαρμόστηκε στο σύνολο των πειραματικών δεδομένων της παρούσας διατριβής, αξιοποιώντας τις διορθωμένες ταχύτητες διάδοσης που προκύπτουν μέσω των διορθωτικών συντελεστών SCF. Στόχος ήταν η βαθμονόμηση εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης τόσο της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος όσο και των ταχυτήτων διάδοσης από το ειδικό βάρος, με ταυτόχρονη έμμεση επικύρωση της αποτελεσματικότητας των διορθωτικών συντελεστών. Τα κύρια ευρήματα συνοψίζονται ως εξής:

(α) Ο μετασχηματισμός Box–Cox επιβεβαίωσε στατιστικά τη χρήση του λογαριθμικού μετασχηματισμού της θλιπτικής αντοχής, με βέλτιστο εκθέτη $\hat{\lambda} = 0,06$ και 95% διάστημα εμπιστοσύνης $[-0,11, 0,24]$.

(β) Η ανάλυση κλασματικών πολυωνύμων ανέδειξε ισχυρή μη-γραμμικότητα στις σχέσεις θλιπτικής αντοχής με τις ταχύτητες διάδοσης ($FP2$ με $p = 3$), και απλή γραμμικότητα στις σχέσεις ταχυτήτων με ειδικό βάρος.

(γ) Η εξάλειψη της λυγηρότητας L/D από όλες τις σχέσεις συνιστά έμμεση επικύρωση των διορθωτικών συντελεστών σχήματος (SCF) που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Αν ο SCF δεν αφαιρούσε επιτυχώς τη γεωμετρική επίδραση της λυγηρότητας από τις διορθωμένες ταχύτητες, η μεταβλητή L/D θα εμφανιζόταν ως στατιστικά σημαντική στο τελικό μοντέλο.

(δ) Ως κύρια προτεινόμενη σχέση πρόβλεψης της θλιπτικής αντοχής διατυπώθηκε ένα γραμμικό μοντέλο μικτών αποτελεσμάτων (LMM) με τυχαία σταθερά ανά θέση πυρηνοληψίας και αλληλεπιδράσεις του τύπου δομικού στοιχείου ($\mathbb{I}_K$ για κολώνες, $\mathbb{I}_{GDP}$ για προεντεταμένες δοκούς γέφυρας) με τους κλασματικούς πολυωνυμικούς όρους των ταχυτήτων (εξίσωση (91)). Η σχέση επιτυγχάνει $R_c^2 = 85,6\%$, $MAE = 3,71$ MPa και σχετικό σφάλμα 12,7%, ενώ ο έλεγχος Joint F-test ($p = 0,13 > 0,05$) επιβεβαιώνει την απουσία συστηματικού σφάλματος στις προβλέψεις. Η διατήρηση πέντε αλληλεπιδράσεων με τον τύπο δομικού στοιχείου στο τελικό μοντέλο αποτελεί κεντρικό εύρημα της ανάλυσης και υποδηλώνει ότι οι σχέσεις ταχύτητας–αντοχής τροποποιούνται συστηματικά ανάλογα με τον τύπο του δομικού στοιχείου από τον οποίο προέρχεται ο πυρήνας.

(ε) Συμπληρωματικά διατυπώθηκαν τέσσερις απλοποιημένες διμεταβλητές σχέσεις, ως πρακτικές εναλλακτικές για περιπτώσεις περιορισμένων διαθέσιμων δεδομένων, με ρητή αναγνώριση της μειωμένης τους προβλεπτικής αξιοπιστίας.

(στ) Η σύγκριση μεταξύ του πλήρους πολυμεταβλητού μοντέλου και της καλύτερης διμεταβλητής σχέσης ($F_c - V_c$) δείχνει μείωση του σχετικού σφάλματος κατά 9,7 ποσοστιαίες μονάδες (από 22,4% σε 12,7%), ποσοτικοποιώντας το όφελος που προσφέρει

η ταυτόχρονη ενσωμάτωση όλων των μετρούμενων μεγεθών, του τύπου δομικού στοιχείου και της θέσης πυρηνοληψίας στο μοντέλο πρόβλεψης.

10.2 Επιπτώσεις στην πρακτική εφαρμογή

Τα ευρήματα της παρούσας διατριβής φέρουν άμεσες πρακτικές επιπτώσεις στον τρόπο αξιολόγησης υφιστάμενων κατασκευών από σκυρόδεμα. Η τεκμηριωμένη αδυναμία της μεθόδου UPV να παρέχει αξιόπιστες εκτιμήσεις του E_d χωρίς γνώση του ν υποδεικνύει ότι η αποκλειστική χρήση της ως μοναδικής δοκιμής πρέπει να αντιμετωπίζεται με επιφύλαξη. Η μεθοδολογία UPIES, η οποία αξιοποιεί τη συμπληρωματικότητα UPV και IE, προσφέρει τη δυνατότητα ταυτόχρονου προσδιορισμού τριών ελαστικών σταθερών (E_d , G_d , ν_d) με ελάχιστο πρόσθετο κόστος χρόνου και εξοπλισμού, δεδομένου ότι η IE χρησιμοποιεί φορητό εξοπλισμό και δεν απαιτεί πρόσβαση σε δύο αντικείμενες επιφάνειες. Η ανάπτυξη ολοκληρωμένων διορθωτικών συντελεστών για κοντούς κυλίνδρους ($L/D \geq 0,8$) — ιδίως για τη γεωμετρία $L/D = 1,0$ που αντιστοιχεί στον τυπικό πυρήνα πυρηνοληψίας — καθιστά εφικτή την εφαρμογή της μεθόδου σε πραγματικές συνθήκες αξιολόγησης. Η συνδυαστική αυτή προσέγγιση δύναται να ελαχιστοποιήσει την ανάγκη επεμβατικής δειγματοληψίας, παρέχοντας ταυτόχρονα αξιόπιστα δεδομένα μηχανικών ιδιοτήτων για την τεκμηριωμένη συντήρηση, την πρόβλεψη της αντοχής και την αξιολόγηση της απόδοσης υποδομών από σκυρόδεμα.

10.3 Συστάσεις για μελλοντική έρευνα

Παρά την εκτεταμένη αριθμητική και πειραματική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε, η παρούσα έρευνα ανέδειξε ζητήματα που χρήζουν περαιτέρω μελέτης. Οι ακόλουθες συστάσεις αντιστοιχούν τόσο στους περιορισμούς που αναγνωρίστηκαν στο Κεφάλαιο 1.5 όσο και σε νέες κατευθύνσεις που προέκυψαν από τα ευρήματα.

10.3.1 Ανάπτυξη εμπειρικών σχέσεων για τον άμεσο υπολογισμό του λόγου Poisson

Τα αριθμητικά αποτελέσματα των Μεθοδολογιών 1 και 2, τα οποία παρέχουν τον λόγο Poisson ως συνάρτηση του ύψους τοποθέτησης z/L και της λυγηρότητας L/D , δύνανται να εκφραστούν υπό τη μορφή αναλυτικών εμπειρικών εξισώσεων. Τέτοιες σχέσεις θα επιτρέψουν στον μηχανικό πράξης τον άμεσο υπολογισμό του ν_d χωρίς αναγωγή στους πλήρεις πίνακες αποτελεσμάτων, διευκολύνοντας την ενσωμάτωση της μεθοδολογίας σε πρωτόκολλα επιτόπιας αξιολόγησης.

10.3.2 Πειραματική επαλήθευση των μεθοδολογιών προσδιορισμού του λόγου Poisson μέσω της IE ως αυτόνομης δοκιμής

Η αριθμητική διερεύνηση του Κεφαλαίου 6 κατέδειξε ότι ο προσδιορισμός του ν_d μέσω πλευρικών και κατακόρυφων επιταχύνσεων (Μεθοδολογίες 1 και 2) είναι θεωρητικά

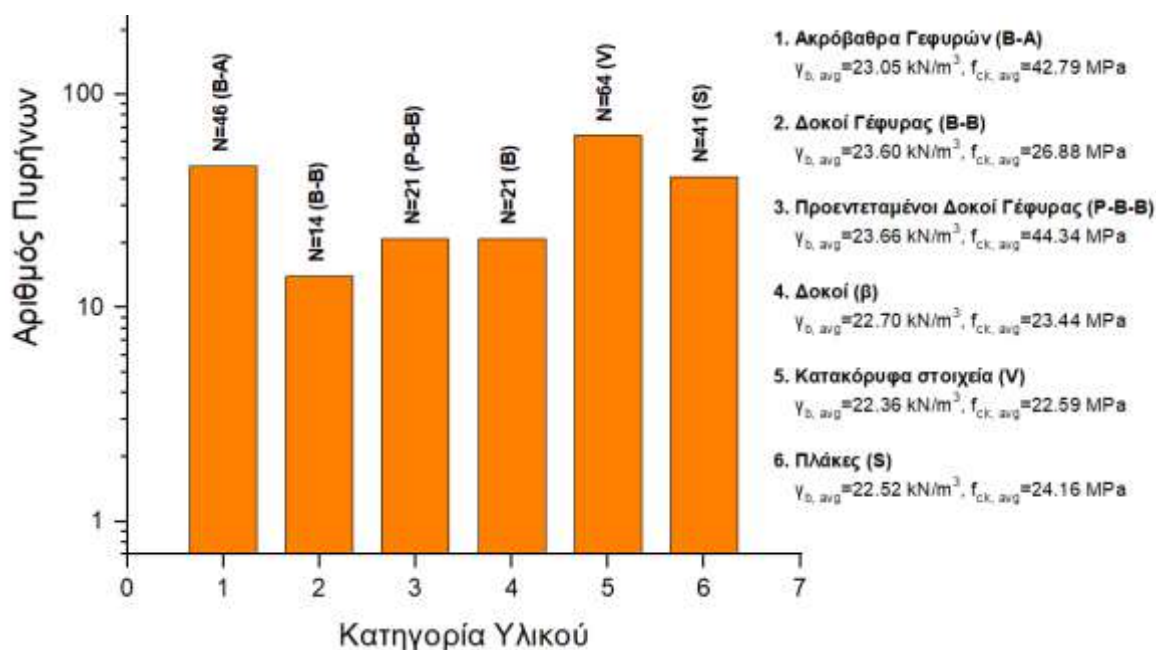
εφικτός, αλλά η πειραματική επαλήθευση δεν έχει ακόμη πραγματοποιηθεί. Συνιστάται η διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών σε μεταλλικούς κυλίνδρους μεγάλης λυγρηότητας ($L/D \geq 5$) με χρήση τριαξονικών επιταχυνσιομέτρων, ώστε να επιβεβαιωθούν τα αριθμητικά αποτελέσματα υπό συνθήκες όπου η θεωρία προβλέπει ελάχιστο σφάλμα. Στη συνέχεια, η εφαρμογή σε κυλίνδρους σκυροδέματος με $L/D = 1,0$ θα παρέχει τη δυνατότητα αξιολόγησης της μεθόδου υπό τις πρακτικά δυσκολότερες συνθήκες.

10.3.3 Εξάλειψη της επίδρασης του αισθητήρα μέσω εναλλακτικών τεχνικών μέτρησης

Η χρήση παρεμβολομέτρου laser (interferometer) ως μέσου μέτρησης των ταλαντώσεων δύναται να εξαλείψει πλήρως την επίδραση της μάζας και της αδράνειας του αισθητήρα, καθιστώντας περιττούς τους διορθωτικούς συντελεστές MCF και ICF. Η αξιολόγηση αυτής της τεχνικής, τόσο ως προς την ακρίβειά της όσο και ως προς την πρακτική εφαρμοσιμότητά της σε εργαστηριακές και πεδιακές συνθήκες, αποτελεί κατεύθυνση ενδιαφέροντος.

10.3.4 Κατηγοριοποίηση αποτελεσμάτων κατά τύπο δομικού στοιχείου

Τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας διατριβής προέρχονται από πυρήνες ληφθέντες από διαφορετικούς τύπους δομικών στοιχείων: ακρόβαθρα γεφυρών, δοκούς γέφυρας, προεντεταμένες δοκούς γέφυρας, δοκούς, υποστηλώματα και πλάκες. Κτηρίων, Εικόνα 99.



Εικόνα 99: Ραβδόγραμμα κατηγοριών υλικού

Δεδομένου ότι η επιτόπου χύτευση σε σχέση με την βιομηχανική κατασκευή προκατασκευασμένων προεντεταμένων στοιχείων, οι συνθήκες δόνησης κατά τη σκυροδέτηση, ο βαθμός συμπύκνωσης και ο βαθμός φόρτισης διαφοροποιούνται μεταξύ

των τύπων στοιχείων, η συσχέτιση και η τυχόν διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων ανά κατηγορία αποτελεί αντικείμενο μελλοντικής ανάλυσης.

10.3.5 Επίδραση σύνθεσης σκυροδέματος, μεγέθους αδρανών και συνθηκών ωρίμανσης

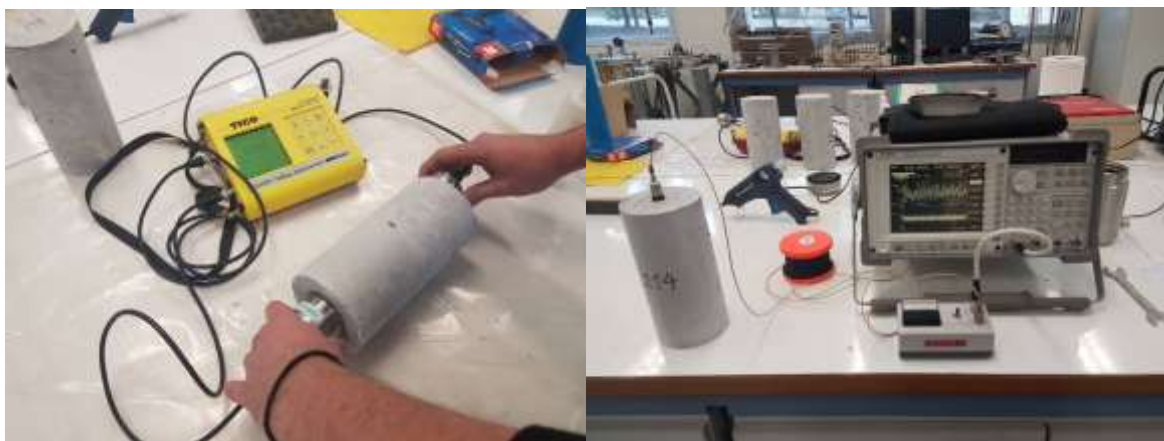
Οι πυρήνες σκυροδέματος που εξετάστηκαν στην παρούσα έρευνα προέρχονται από υφιστάμενες κατασκευές γνωστής ηλικίας αλλά αγνώστου σύνθεσης. Κατά συνέπεια, η επίδραση συγκεκριμένων παραμέτρων — όπως η κοκκομετρία αδρανών, ο λόγος νερού τσιμέντου (N/T) και οι συνθήκες ωρίμανσης — δεν δύναται να απομονωθεί.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί ο ανωτέρω περιορισμός, η ερευνητική ομάδα έχει ήδη σχεδιάσει και πραγματοποιήσει σκυροδέτηση 234 κυλινδρικών δοκιμών σε δύο λυγηρότητες ($L/D = 1,0$ και $2,0$), τρεις κοκκομετρίες αδρανών, τρεις λόγους N/T και τρεις ηλικίες ωρίμανσης. Τα δοκίμια αυτά υποβλήθηκαν σε δοκιμές υπερήχων, ακουστικού συντονισμού και μονοαξονικής θλίψης σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια ωρίμανσης σε δεξαμενή νερού. Το πειραματικό αυτό πρόγραμμα εκτελέστηκε σε συνεργασία του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος της ΑΣΠΑΙΤΕ — όπου πραγματοποιήθηκαν η σκυροδέτηση και οι μετρήσεις UPV — και του Εργαστηρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου Πατρών, όπου διεξήχθησαν οι μετρήσεις ΙΕ και μονοαξονικής θλίψης. Στην Εικόνα 100 φαίνεται η Παρασκευή και ωρίμανση των δοκιμών και στην Εικόνα 101 η εκτέλεση δοκιμών UPV και ΙΕ σε δοκίμιο με $L/D = 2,0$. Επιπλέον φωτογραφικό υλικό υπάρχει στο Παράρτημα Ζ.

Η επεξεργασία και αξιολόγηση αυτών των δεδομένων σε συνδυασμό και με την ηλικία των πυρήνων από τις υπάρχουσες κατασκευές αναμένεται να παρέχει πληθώρα στατιστικών στοιχείων σχετικά με την επίδραση των ανωτέρω παραμέτρων και της γήρανσης στις δυναμικές ιδιότητες του σκυροδέματος και να επιτρέψει τη βελτίωση των εμπειρικών σχέσεων που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 8.



Εικόνα 100: Αριστερά – Παρασκευή και Δεξιά – Ωρίμανση δοκιμών σκυροδέματος



Εικόνα 101: Αριστερά – Δοκιμή UPV – Δοκιμή ΙΕ δοκιμίου σκυροδέματος με $L/D = 2,0$

10.3.6 Εμπλουτισμός της βάσης δεδομένων

Η γενίκευση των εμπειρικών σχέσεων θα ενισχυθεί μέσω του εμπλουτισμού της βάσης δεδομένων με πρόσθετους πυρήνες από υφιστάμενες κατασκευές, συνοδευόμενους από πληροφορίες σχετικά με την ηλικία του σκυροδέματος, τη σύνθεσή του και τις συνθήκες περιβαλλοντικής έκθεσης. Η χρονική εξέλιξη των δυναμικών ιδιοτήτων, η οποία δεν αποτέλεσε αντικείμενο της παρούσας μελέτης, δύναται να διερευνηθεί μέσω διαχρονικών μετρήσεων σε ελεγχόμενο δείγμα κατασκευών.

10.3.7 Επέκταση σε σύνθετες γεωμετρίες και ειδικά σκυροδέματα

Η εφαρμοσιμότητα των διορθωτικών συντελεστών σε γεωμετρίες πέραν του κυλίνδρου — όπως πρίσματα, δοκίμια μη κυκλικής διατομής ή στοιχεία μεταβλητού πάχους — δεν εξετάστηκε συστηματικά στην παρούσα έρευνα. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια του πειραματικού προγράμματος, παράλληλα με τα δοκίμια αλουμινίου και χάλυβα, εκτελέστηκαν δοκιμές σε κυλινδρικά δοκίμια ακρυλικού πλαστικού καθώς και σε πρισματικά δοκίμια μαρμάρου. Τα αποτελέσματα των δοκιμών ακρυλικού παρουσίασαν απόκλιση από τις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές, γεγονός που αποδόθηκε στη μη κυκλική (ωοειδή) διατομή τους, η οποία δεν ήταν οπτικά αντιληπτή αλλά επαρκούσε για να επηρεάσει τα φάσματα συντονισμού. Η παρατήρηση αυτή υπογραμμίζει τη σημασία της γεωμετρικής ακρίβειας των δοκιμών κατά την εφαρμογή της μεθόδου ΙΕ. Αντιστοίχως, τα πρισματικά δοκίμια μαρμάρου παρουσίασαν πρόσθετη πολυπλοκότητα λόγω της ύπαρξης ρωγμών και ασυνεχειών στη μάζα τους, σε συνδυασμό με τη διαφοροποίηση του θεωρητικού πλαισίου ανάλυσης της δυναμικής απόκρισης πρισμάτων έναντι κυλίνδρων. Τα ανωτέρω ευρήματα, αν και προκαταρκτικά, αναδεικνύουν την ανάγκη διεύρυνσης της αριθμητικής και πειραματικής διερεύνησης σε μη κυλινδρικές γεωμετρίες και σε υλικά με εγγενείς ασυνέχειες. Στην Εικόνα 102, φαίνονται δοκίμια αλουμινίου, χάλυβα, ακρυλικού και μαρμάρου που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα. Περισσότερο φωτογραφικό υλικό υπάρχει στο Παράρτημα Ζ.

1101 Ομοίως, η γενίκευση των εμπειρικών σχέσεων σε ειδικά σκυροδέματα (υπερυψηλής
1102 αντοχής, ινοπλισμένα, αυτοσυμπυκνούμενα, ελαφροβαρή) απαιτεί πρόσθετη
1103 πειραματική διερεύνηση, καθώς οι ελαστικές ιδιότητες αυτών των υλικών ενδέχεται να
1104 αποκλίνουν από τις τιμές του σκυροδέματος κανονικού βάρους που αποτέλεσε τη βάση
1105 της παρούσας μελέτης.



Εικόνα 102: Δοκίμια αλουμινίου, χάλυβα, ακρυλικού και μαρμάρου

Αναφορές

- [1] V. G. Siorikis, C. P. Antonopoulos, G. D. Hatzigeorgiou, and P. Pelekis, “Comparative Study of UPV and IE Results on Concrete Cores from Existing Structures,” *Civil Engineering Journal (Iran)*, vol. 10, no. 9, pp. 2804–2819, Sep. 2024, doi: 10.28991/CEJ-2024-010-09-03.
- [2] P. Pelekis, V. G. Siorikis, C. P. Antonopoulos, and G. D. Hatzigeorgiou, “Determination of Dynamic Elastic Properties on Short Cylinders Using Impact-Echo Method-A Numerical Study,” in *13th HSTAM International Congress on Mechanics*, Patras: Hellenic Society for Theoretical and Applied Mechanics (HSTAM), 2022.
- [3] M. Ju, K. Park, and H. Oh, “Estimation of Compressive Strength of High Strength Concrete Using Non-Destructive Technique and Concrete Core Strength,” *Applied Sciences*, vol. 7, no. 12, p. 1249, Dec. 2017, doi: 10.3390/app7121249.
- [4] A. B. Espinosa, V. Revilla-Cuesta, M. Skaf, F. Faleschini, and V. Ortega-López, “Utility of Ultrasonic Pulse Velocity for Estimating the Overall Mechanical Behavior of Recycled Aggregate Self-Compacting Concrete,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 2, Jan. 2023, doi: 10.3390/app13020874.
- [5] A. El-Newihy, “Application of Impact Resonance Method for Evaluation of the Dynamic Elastic Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete,” University of Victoria, 2017. Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: https://dspace.library.uvic.ca/bitstream/handle/1828/8417/El-Newihy_Adham_MASc_2017.pdf
- [6] Αθανάσιος Τριανταφύλλου, *Δομικά Υλικά*. Πάτρα: Gotsis Εκδόσεις, 2017.
- [7] N. Sabha and O. Uyanik, “Prediction of reinforced concrete strength by ultrasonic velocities,” *J. Appl. Geophy.*, vol. 141, pp. 36–44, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jappgeo.2017.03.008.
- [8] P. Pelekis, V. G. Siorikis, C. P. Antonopoulos, G. L. Osmani, and G. D. Hatzigeorgiou, “Impact-Echo Method on Short Cylinders: A Numerical and Experimental Investigation,” *Civil Engineering Journal (Iran)*, vol. 11, no. 9, pp. 3574–3591, Sep. 2025, doi: 10.28991/CEJ-2025-011-09-02.
- [9] S. V. Kolluru, J. S. Popovics, and S. P. Shah, “Determining elastic properties of concrete using vibrational resonance frequencies of standard test cylinders,” *Cement Concrete and Aggregates*, vol. 22, no. 2, pp. 81–89, 2000, doi: 10.1520/CCA10467J.

- [10] F. J. Nieves, F. Gascón, and A. Bayón, "Measurement of the dynamic elastic constants of short isotropic cylinders," *J. Sound Vib.*, vol. 265, no. 5, pp. 917–933, Aug. 2002, doi: 10.1016/S0022-460X(02)01563-8.
- [11] J. J. Wang, T. P. Chang, B. T. Chen, and H. Wang, "Determination of Poisson's ratio of solid circular rods by impact-echo method," *J. Sound Vib.*, vol. 331, no. 5, pp. 1059–1067, 2012, doi: 10.1016/j.jsv.2011.10.030.
- [12] ASTM C215, "Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens," West Conshohocken, PA, USA, 2003. doi: 10.1520/C0215-14.2.
- [13] J. S. Popovics, A. Gibson, and G. Gallo, "Development of Nondestructive Methods for Measurement of Slab Thickness and Modulus of Rupture in Concrete Pavements - VTRC 06-CR9," Dec. 2005.
- [14] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2014.
- [15] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 5th ed. Pearson Education Limited, 2011.
- [16] H. Irie, Y. Yoshida, Y. Sakurada, and T. Ito, "Non-destructive-testing methods for concrete structures," 2008. doi: 10.53829/ntr200805le3.
- [17] American Concrete Institute, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary ACI 318-19*, no. ACI 318-19. Farmington Hills, MI, USA, 2019. doi: 10.14359/51716937.
- [18] Chr. Spanos, M. Spithakis, and C. Trezos, "In situ assessment of materials' characteristics," 2001. [Online]. Available: <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teeait/drast/hmerida-11-12-2004/TAB5851916/TEEInsituAssessmentTextBook.pdf> (in Greek)
- [19] S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, *Theory of Elasticity*, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1970.
- [20] L. E. Malvern, *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1969.
- [21] M. A. Meyers and K. K. Chawla, *Mechanical Behavior of Materials*, 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009.
- [22] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 10th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018.
- [23] M. H. Sadd, *Elasticity: Theory, Applications, and Numerics*, 3rd ed. Waltham, MA, USA: Academic Press, 2014.
- [24] European Committee for Standardization, *EN 1993-1-1: Eurocode 3 – Design of Steel Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. Brussels, Belgium: CEN, 2005.

- [25] European Committee for Standardization, *EN 1992-1-1: Eurocode 2 – Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. Brussels, Belgium: CEN, 2004.
- [26] U. Müller, R. Brandner, and G. Schickhofer, "Properties of wood and wood-based materials," in *Wood-Based Panels: An Introduction for Specialists*, H. Thoemen, M. Irle, and M. Sernek, Eds., London, UK: Brunel University Press, 2010, pp. 1–38.
- [27] E. Hoek and E. T. Brown, *Underground Excavations in Rock*. London, UK: Institution of Mining and Metallurgy, 1980.
- [28] B. J. Lee, S. H. Kee, T. Oh, and Y. Y. Kim, "Effect of Cylinder Size on the Modulus of Elasticity and Compressive Strength of Concrete from Static and Dynamic Tests," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015, no. 2, 2015, doi: 10.1155/2015/580638.
- [29] J. S. Popovics, J. Zemajtis, and I. Shkolnik, "A study of static and dynamic modulus of elasticity of concrete," *ACI-CRC Final Report, Civil and Environmental Engineering, University of Illinois, Urbana IL*, no. October, p. 16, 2008, [Online]. Available: https://www.concreteresearchcouncil.org/portals/7/files/pdfs/crc_43.pdf
- [30] X. Lu, Q. Sun, W. Feng, and J. Tian, "Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method," *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 231–239, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.043.
- [31] B. F. Zhu, "On the dynamic modulus of elasticity of concrete in anti-earthquake design of concrete dams," *Water Res. Hydropower Eng.*, vol. 40, no. 11, pp. 19–22, 2009.
- [32] H. Yildirim and O. Sengul, "Modulus of elasticity of substandard and normal concretes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 4, pp. 1645–1652, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.10.009.
- [33] S. Han and W. Park, "Analysis of Dynamic and Static Elastic Modulus of In-situ Marine Concrete," *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, vol. 21, pp. 437–443, 2009.
- [34] J. C. Lee, C. J. Lee, W. J. Kim, and J. H. Lee, "Characteristics of Elastic Wave in Fire damaged High Strength Concrete using Impact-echo Method," *Fire Science and Engineering*, vol. 29, no. 1, pp. 1–6, Feb. 2015, doi: 10.7731/kifse.2015.29.1.001.
- [35] S.-J. Park, G. J. Kim, and H.-G. Kwak, "Characterization of stress-dependent ultrasonic nonlinearity variation in concrete under cyclic loading using nonlinear resonant ultrasonic method," *Constr. Build. Mater.*, vol. 145, pp. 272–282, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.201.

- [36] D. Kocab, B. Kucharczykova, P. Misak, P. Zitt, and M. Kralikova, "Development of the Elastic Modulus of Concrete under Different Curing Conditions," *Procedia Eng.*, vol. 195, pp. 96–101, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.529.
- [37] T. Noguchi and K. M. Nemati, "Relationship between compressive strength and modulus of elasticity of High-Strength Concrete," in *International Association of Fracture Mechanics for Concrete and Concrete Structures (IA-FraMCoS)*, Catania (Italy): International Association of Fracture Mechanics for Concrete and Concrete Structures, 2007.
- [38] R. M. Christensen, *Mechanics of Composite Materials*. New York, NY, USA: Wiley-Interscience, 1979.
- [39] K. E. Evans, "Auxetic polymers: a new range of materials," *Endeavour*, vol. 15, no. 4, pp. 170–174, 1991, doi: 10.1016/0160-9327(91)90123-S.
- [40] K. Trezos, "Assessment of in situ concrete's durability," Technical Chamber of Greece, 1999, pp. 1–33. [Online]. Available: <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teeait/drast/hmerida-11-12-2004/TAB5851916/InsituCoresUpvRebound.pdf>
- [41] V. Abakoumkin *et al.*, "Code of Structural Interventions (KAN.ΕΠΕ.)," 2022. Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: https://oasp.gr/sites/default/files/inline-files/%CE%9A%CE%91%CE%9D%CE%95%CE%A0%CE%95_2022.pdf
- [42] ΕΛΟΤ EN 13791 E2, "Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components," Athens, 2020.
- [43] EN 1998-1: 2004, "Eurocode 8," 2004. Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: https://www.teetas.gr/sites/default/files/seminaria/1.ek_8_-_sholia_hronopoylos.pdf
- [44] Εγκύκλιος Ε7, "Εκτίμηση της κατηγορίας αντοχής του σκυροδέματος υφιστάμενων κατασκευών," Υπουργείου Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων. Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/slideshow/7-9518648/9518648>
- [45] A. G. Davis *et al.*, "Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures ACI 228 . 2 R-98 Reported by ACI Committee 228," 1998. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:17139304>
- [46] K.-M. Lee, D.-S. Kim, and J.-S. Kim, "Determination of dynamic Young's modulus of concrete at early ages by impact resonance test," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 11–18, Dec. 1997, doi: 10.1007/bf02830459.
- [47] P. G. Asteris and V. G. Mokos, "Concrete compressive strength using artificial neural networks," *Neural Comput. Appl.*, vol. 32, no. 15, pp. 11807–11826, Aug. 2020, doi: 10.1007/s00521-019-04663-2.

- [48] B. Hobbs and M. Tchoketch Kebir, "Non-destructive testing techniques for the forensic engineering investigation of reinforced concrete buildings," *Forensic Sci. Int.*, vol. 167, no. 2–3, pp. 167–172, Apr. 2007, doi: 10.1016/J.FORSCIINT.2006.06.065.
- [49] M. Sadiq Radhi and H. Joni, "Effect of age on nondestructive tests results for existing concrete," *The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering*, vol. 12, no. 4, 2012.
- [50] N. J. Carino, "The impact-echo method: An overview," *Structures - A Structural Engineering Odyssey, Structures 2001 - Proceedings of the 2001 Structures Congress and Exposition*, vol. 109, no. May 2001, 2004, doi: 10.1061/40558(2001)15.
- [51] H. Jain, V. Patankar, and M. Kulkarni, "Ultrasonic Testing Of Concrete Structures: A Review - BARC/2021/E/01," Mumbai, India, Nov. 2021. Accessed: Nov. 26, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/355157966_ULTRASONIC_TESTING_OF_CONCRETE_STRUCTURES_A_REVIEW
- [52] F. Schubert and B. Köhler, "Ten lectures on impact-echo," *J. Nondestr. Eval.*, vol. 27, no. 1–3, pp. 5–21, 2008, doi: 10.1007/s10921-008-0036-2.
- [53] V. M. Malhotra and N. J. Carino, *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. Washington, New York: ASTM International, CRC Press, 2004. [Online]. Available: www.astm.org,
- [54] G. Karaiskos, A. Deraemaeker, D. G. Aggelis, and D. Van Hemelrijck, "Monitoring of concrete structures using the ultrasonic pulse velocity method," *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 11, p. 113001, Nov. 2015, doi: 10.1088/0964-1726/24/11/113001.
- [55] E. A. Whitehurst, "The Soniscope – a Device for Field Testing of Concrete," *ACI Journal*, pp. 1–20, 1951.
- [56] N. Carino, "Nondestructive testing of concrete : History and challenges," 1994. doi: 10.14359/4456.
- [57] R. Jones, "The ultrasonic testing of concrete," *Ultrasonics*, vol. 1, no. 2, pp. 78–82, 1963, doi: 10.1016/0041-624X(63)90058-1.
- [58] Θ. Ματίκας and Δ. Αγγέλης, "Εισαγωγή στους μη καταστροφικούς ελέγχους," in *Μη καταστροφικοί έλεγχοι [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]*, Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2015. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11419/3608>
- [59] M. Shariati, H. Sulong, A. M, P. Shafigh, and H. Sinaei, "Assessing the strength of reinforced Concrete Structures Through Ultrasonic Pulse Velocity And Schmidt Rebound Hammer tests," *Scientific Research and Essays*, vol. 6, pp. 213–220, Jan. 2011.

- [60] B. H. Hertlein, "Stress wave testing of concrete: A 25-year review and a peek into the future," *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 1240–1245, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.029.
- [61] ASTM C597, "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete," 1997.
- [62] International Atomic Energy Agency, "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures," *Industrial Applications and Chemistry Section, IAEA*, vol. 17, no. 17, p. 231, 2002, [Online]. Available: http://200.10.161.33/cirsoc/pdf/ensayos/tcs-17_web.pdf
- [63] J. H. Bungey and M. G. Grantham, *Testing of Concrete in Structures*, 4th ed. CRC Press, 2006. doi: 10.1201/9781482264685.
- [64] I. Lawson *et al.*, "Non-destructive evaluation of concrete using ultrasonic pulse velocity," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 3, no. 6, pp. 499–504, 2011.
- [65] T. U. Mohammed and M. N. Rahman, "Effect of types of aggregate and sand-to-aggregate volume ratio on UPV in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 832–841, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.102.
- [66] R. Solís-Carcaño and E. I. Moreno, "Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 6, pp. 1225–1231, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.01.014.
- [67] S. Popovics, J. L. Rose, and J. S. Popovics, "The behaviour of ultrasonic pulses in concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 20, no. 2, pp. 259–270, Mar. 1990, doi: 10.1016/0008-8846(90)90079-D.
- [68] Z. Zebari, "Using Ultrasonic Pulse Velocity Test to Assess the Effect of Water-Cement Ratio on the Compressive Strength of Concrete," *Journal of Engineering*, vol. 25, no. 5, pp. 79–86, May 2019, doi: 10.31026/j.eng.2019.05.06.
- [69] M. Benaicha, O. Jalbaud, X. Roguiez, A. Hafidi Alaoui, and Y. Burtshell, "Prediction of Self-Compacting Concrete homogeneity by ultrasonic velocity," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 54, no. 4, pp. 1181–1191, 2015, doi: 10.1016/j.aej.2015.08.002.
- [70] J. A. Bogas, M. G. Gomes, and A. Gomes, "Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method," *Ultrasonics*, vol. 53, no. 5, pp. 962–972, 2013, doi: 10.1016/j.ultras.2012.12.012.
- [71] E. Ohdaira and N. Masuzawa, "Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete – the possibility of NDE," *Ultrasonics*, vol. 38, no. 1, pp. 546–552, 2000, doi: 10.1016/S0041-624X(99)00158-4.

- [72] L. Logothetis, "A contribution to the in-situ assessment of concrete strength by means of combined non-destructive methods," PhD Dissertation (in Greek), National Technical University, Athens, 1979. doi: 10.12681/eadd/2558.
- [73] BS 1881-203, "BS 1881: Part 203 (1986). Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete," 1986.
- [74] S.-H. Kee and J. Zhu, "Using piezoelectric sensors for ultrasonic pulse velocity measurements in concrete," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, p. 5016, Dec. 2013, doi: 10.1088/0964-1726/22/11/115016.
- [75] H. Jain and V. Patankar, "Advances in Ultrasonic Instrumentation for Inspection of Concrete/RCC Structures," in *NDE 2018 Conference & Exhibition of the society for NDT (ISNT)*, Mumbai, India, Jan. 2018.
- [76] T. M. Browne, T. J. Collins, M. J. Garlich, J. E. O'Leary, D. G. Stromberg, and K. C. Heringhaus, "Underwater Bridge Inspection," Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., Jun. 2010.
- [77] R. Gül, R. Demirboğa, and T. Güvercin, "Compressive strength and ultrasound pulse velocity of mineral admixed mortars," *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, vol. 13, pp. 18–24, 2006.
- [78] V. G. Siorikis, P. Pelekis, C. P. Antonopoulos, and G. D. Hatzigeorgiou, "Shape correction factors for impact-echo method on short cylinders-A numerical and experimental study," in *13th HSTAM International Congress on Mechanics*, Patras: Hellenic Society for Theoretical and Applied Mechanics (HSTAM), 2022.
- [79] R. N. Swamy, "Dynamic Poisson's ratio of portland cement paste, mortar and concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 1, pp. 559–583, 1971, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:137053907>
- [80] G. Mavko, T. Mukerji, and J. Dvorkin, *The Rock Physics Handbook*, 3rd ed. Cambridge University Press, 2003.
- [81] M. Traboulsi and R. Al Wardany, "Correlations between Dynamic and Static Mechanical Properties of Clayey Soils," *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET)*, vol. 10, no. 1, pp. 2602–2612, 2019, [Online]. Available: <https://iaeme.com/Home/issue/IJCET?Volume=10&Issue=1>
- [82] P. Pal, "Dynamic Poisson's Ratio and Modulus of Elasticity of Pozzolana Portland Cement Concrete," *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, vol. 9, pp. 131–144, Nov. 2019.
- [83] T. H. Panzera, A. L. Christoforo, F. de Paiva Cota, P. H. Ribeiro Borges, and C. R. Bowen, "Ultrasonic Pulse Velocity Evaluation of Cementitious Materials," in *Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials*, Dr. P. Tesinova, Ed., InTech, 2011. doi: 10.5772/17167.

- [84] British Standards Institution., *Specification for testing concrete. Part 203. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete.* British Standards Institution, 1986.
- [85] J. R. S. Berriman, "The application of air-coupled ultrasonic systems and signal processing to the interrogation of concrete," Sep. 2004. [Online]. Available: <http://webcat.warwick.ac.uk/record=b1780465~S9>
- [86] Y. Choi, I. H. Kim, H. J. Lim, and C. G. Cho, "Investigation of Strength Properties for Concrete Containing Fine-Rubber Particles Using UPV," *Materials*, vol. 15, no. 10, May 2022, doi: 10.3390/ma15103452.
- [87] F. T. Johora, C. M. T. Amin, Toufiq Amin, S. M. Ibrahim, A. Haque, and A. S. Amin, "Measurement of Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete for Assessing Compressive Strength," in *First International Conference on Advances in Civil Infrastructure and Construction Materials*, Dhaka, Dec. 2015.
- [88] K. Ali-Benyahia, Z. M. Sbartaï, D. Breyse, S. Kenai, and M. Ghrici, "Analysis of the single and combined non-destructive test approaches for on-site concrete strength assessment: General statements based on a real case-study," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 6, pp. 109–119, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.cscm.2017.01.004.
- [89] A. O. Irlan, H. Parung, M. W. Tjaronge, and M. A. Caronge, "Mechanical, environmental, and cost evaluation of concrete using recycled polypropylene," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 12, 2025, doi: 10.1016/j.cscee.2025.101255.
- [90] B. A. Tayeh, I. Almeshal, H. M. Magbool, H. Alabduljabbar, and R. Alyousef, "Performance of sustainable concrete containing different types of recycled plastic," *J. Clean. Prod.*, vol. 328, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129517.
- [91] T.-P. Chang, H.-C. Lin, W.-T. Chang, and J.-F. Hsiao, "Engineering properties of lightweight aggregate concrete assessed by stress wave propagation methods," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, 2006, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2005.08.003.
- [92] H. Khan, J. Ahmad, Z. Bin Zahid, S. Irfan, and M. Umer, "Development of extrusion based artificial lightweight aggregates from sand-plastic waste composite for sustainable concrete production: Performance evaluation and Life Cycle Assessment," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 22, 2025, doi: 10.1016/j.cscm.2025.e04663.
- [93] A. Mustafa Mohamed, M. Azreen Mohd Ariffin, H. Smaoui, and M. Hanim Osman, "Performance evaluation of concrete with Arabic gum biopolymer," *Mater. Today Proc.*, vol. 39, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.576.

- [94] M. F. Cosmes-López, F. Castellanos, and P. F. de J. Cano-Barrita, "Ultrasound frequency analysis for identification of aggregates and cement paste in concrete," *Ultrasonics*, vol. 73, 2017, doi: 10.1016/j.ultras.2016.08.016.
- [95] ASTM E1876-01, "Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excite of Vibration," pp. 1–16, 2001.
- [96] C. Trezos, P. Papakyriakopoulos, and Chr. Spanos, "Calibration of the Rebound Hammer and Pulse Velocity Methods through in situ concrete cores and standard cube specimens," Agrinio - Greece: Technical Chamber of Greece, 1993. [Online]. Available: <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teeait/drast/hmerida-11-12-2004/TAB5851916/CalibrationUpvRebound.pdf>
- [97] P. Turgut, "Evaluation of the ultrasonic pulse velocity data coming on the field," in *4th international conference on NDE in relation to structural integrity for nuclear and pressurised components*, London, 2004, pp. 573–578.
- [98] G. Trtnik, F. Kavčič, and G. Turk, "Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks," *Ultrasonics*, vol. 49, no. 1, pp. 53–60, 2009, doi: 10.1016/j.ultras.2008.05.001.
- [99] H. Y. Qasrawi, "Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 5, pp. 739–746, May 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00226-X.
- [100] G. F. Kheber, "A two stage procedure for assessment of in situ concrete strength using combined non-destructive testing," *Mater. Struct.*, vol. 32, pp. 410–417, 1999.
- [101] I. H. Nash't, S. H. A'bour, and A. A. Sadoon, "Finding an unified relationship between crushing strength of concrete and non-destructive tests," in *3rd MENDT - Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition*, Manama, Bahrain, Nov. 2005.
- [102] V. G. Siorikis, C. P. Antonopoulos, P. Pelekis, K. Christovasili, and G. D. Hatzigeorgiou, "Numerical and experimental evaluation of sonic resonance against ultrasonic pulse velocity and compression tests on concrete core samples," *Vibroengineering PROCEDIA*, 2020, pp. 168–173. doi: 10.21595/vp.2020.21328.
- [103] K. Christovasili, "Correlation of Ultrasonic Pulse Velocity & Sonic Resonance Test Results in determination of Compressive Strength in Concrete Cores," Hellenic Open University - Greece, 2018.
- [104] C. Hsiao, C. C. Cheng, T. Liou, and Y. Juang, "Detecting flaws in concrete blocks using the impact-echo method," *NDT and E International*, vol. 41, no. 2, pp. 98–107, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.ndteint.2007.08.008.
- [105] ASTM C1383-98a, "Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method," 1998.

- [106] M. Alfano and L. Pagnotta, "Determining the elastic constants of isotropic materials by modal vibration testing of rectangular thin plates," *J. Sound Vib.*, vol. 293, no. 1–2, pp. 426–439, May 2006, doi: 10.1016/j.jsv.2005.10.021.
- [107] L. Meirovitch, *Fundamentals of Vibrations*. McGraw-Hill, 2010. Accessed: Jan. 22, 2026. [Online]. Available: [https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=1W8bAAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=Meirovitch,+L.+\(2010\).+Fundamentals+of+vibrations.+McGraw-Hill.&ots=he4BxVVbu7&sig=ZeoEh8QODNki1qRVa8XYc2fYkSY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=1W8bAAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=Meirovitch,+L.+(2010).+Fundamentals+of+vibrations.+McGraw-Hill.&ots=he4BxVVbu7&sig=ZeoEh8QODNki1qRVa8XYc2fYkSY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- [108] F. J. Nieves, F. Gascón, and A. Bayón, "An analytical, numerical, and experimental study of the axisymmetric vibrations of a short cylinder," *J. Sound Vib.*, vol. 313, no. 3–5, pp. 617–630, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.jsv.2007.11.041.
- [109] J.-J. Wang, T.-P. Chang, B.-T. Chen, H.-C. Lin, and H. Wang, "Evaluation of Resonant Frequencies of Solid Circular Rods with Impact-Echo Method," *J. Nondestr. Eval.*, vol. 29, no. 2, pp. 111–121, Jun. 2010, doi: 10.1007/s10921-010-0070-8.
- [110] P. A. Bahati, V. D. Le, and Y. Lim, "An impact echo method to detect cavities between railway track slabs and soil foundation," *Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 68, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1186/s44147-021-00008-w.
- [111] Y. Liu, H. Xu, X. Ma, D. Wang, and X. Huang, "Study on Impact–Echo Response of Concrete Column near the Edge," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 9, May 2023, doi: 10.3390/app13095590.
- [112] L. Pochhammer, "Über die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten kleiner Schwingungen in einem unbegrenzten isotropen Kreiscylinder," *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 1876.
- [113] M. Viens, Y. Liu, C. K. Jen, Z. Wang, and J. D. N. Cheeke, "Investigations of Extensional and Torsional Acoustic Wave Thin Rod Sensors," in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D. E. Thompson Donald O. and Chimenti, Ed., Boston, MA: Springer US, 1992, pp. 1059–1065. doi: 10.1007/978-1-4615-3344-3_136.
- [114] P. A. Martin and J. R. Berger, "Waves in wood: free vibrations of a wooden pole," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 49, no. 5, pp. 1155–1178, 2001, doi: 10.1016/S0022-5096(00)00068-5.
- [115] C. Chree, "Longitudinal Vibrations of a Circular Bar," *The Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 21, pp. 287–298, 1886.
- [116] A. E. H. Love, *A treatise on the mathematic theory of elasticity*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1944.

- [117] R. D. Mindlin and H. D. McNiven, "Axially symmetric waves in elastic rods," *J. Appl. Mech.*, vol. 27, no. 1, pp. 145–151, Mar. 1960.
- [118] T. D. Northwood, "Sonic determination of the elastic properties of ice," *Can. J. Res.*, vol. 25A, no. 2, pp. 88–95, 1947.
- [119] D. Bancroft, "The velocity of longitudinal waves in cylindrical bars," *Physical Review*, vol. 59, no. 7, pp. 588–593, 1941.
- [120] M. Onoe, H. D. McNiven, and R. D. Mindlin, "Dispersion of axially symmetric waves in elastic rods," *J. Appl. Mech.*, vol. 29, no. 4, pp. 729–734, Dec. 1962.
- [121] A. H. Meitzler, "Mode coupling occurring in the propagation of elastic pulses in wires," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 33, no. 4, pp. 435–445, Apr. 1961.
- [122] H. N. Abramson, P. F. Plass, and E. A. Ripperger, "Stress wave propagation in rods and beams," *Advances in Applied Mechanics*, vol. 5, pp. 111–194, 1958.
- [123] G. Herrmann and I. Mirsky, "Three-dimensional and shell-theory analysis of axially symmetric motions of cylinders," *J. Appl. Mech.*, vol. 23, no. 4, pp. 563–568, Dec. 1956.
- [124] C. Chree, "The equations of an isotropic elastic solid in polar and cylindrical coordinates: Their solution and application," *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 14, pp. 250–369, 1889.
- [125] Y. G. Yoon, C. M. Kim, and T. K. Oh, "A Study on the Applicability of the Impact-Echo Test Using Semi-Supervised Learning Based on Dynamic Preconditions," *Sensors*, vol. 22, no. 15, Aug. 2022, doi: 10.3390/s22155484.
- [126] M. Sansalone and W. B. Streett, *Impact echo: Non-destructive Evaluation of Concrete and Masonry*. Bullbrier Press, 1997.
- [127] Y. Lin, M. Sansalone, and N. J. Carino, "Impact-Echo Response of Concrete Shafts," *Geotechnical Testing Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 121–137, 1991, doi: 10.1520/GTJ10554J.
- [128] J. S. Popovics, "Effects of Poisson's Ratio on Impact-Echo Method Analysis," *J. Eng. Mech.*, vol. 123, no. 8, pp. 843–851, 1997, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:8(843).
- [129] S. P. Pessiki and N. J. Carino, "Setting Time and Strength of Concrete Using the Impact-Echo Method," *ACI Mater. J.*, vol. 85, no. 5, pp. 389–399, 1988.
- [130] C. C. Cheng and M. Sansalone, "Effects on Impact-Echo Signals Caused by Steel Reinforcing Bars and Voids Around Bars," *ACI Mater. J.*, vol. 90, no. 5, pp. 421–434, 1993, doi: 10.14359/3870.

- [131] ASTM E1875-08, "Standard Test Method for Dynamic Young ' s Modulus , Shear Modulus , and Poisson ' s Ratio by Sonic Resonance 1," 2013. doi: 10.1520/E1875-08.2.
- [132] L. Ahmed, "Dynamic Measurements for Determining Poisson's Ratio of Young Concrete," *Nordic Concrete Research*, vol. 58, pp. 95–106, Jan. 2018, doi: 10.2478/ncr-2018-0006.
- [133] E. Kitsou, "Poisson's Ratio Determination on Cylindrical Specimens: A Numerical Study," University of Patra, Patras, 2020.
- [134] F. Yao, J. Zhuang, and A. Abulikemu, "Shape coefficient of impact-echo for small-size short cylinder/circular tube structures," *Materialpruefung/Materials Testing*, vol. 64, no. 4, pp. 574–583, 2022, doi: 10.1515/mt-2021-2043.
- [135] O. Abraham and X. Dérobert, "Non-destructive testing of fired tunnel walls: the Mont-Blanc Tunnel case study," *NDT & E International*, vol. 36, no. 6, pp. 411–418, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0963-8695(03)00034-3.
- [136] C. Thurnherr, A. Muller, and D. Algernon, "Drone-based impact-echo inspection system for non-destructive testing of concrete structures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 477, May 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141147.
- [137] F. Dethof and S. Keßler, "Explaining impact echo geometry effects using modal analysis theory and numerical simulations," *NDT and E International*, vol. 143, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.ndteint.2023.103035.
- [138] J. Pandum, K. Hashimoto, T. Sugiyama, and W. Yodsudjai, "Impact-Echo for Crack Detection in Concrete with Artificial Intelligence based on Supervised Deep Learning," 2024, doi: 10.58286/29925.
- [139] C. Malone, H. Sun, and J. Zhu, "Nonlinear Impact-Echo Test for Quantitative Evaluation of ASR Damage in Concrete," *J. Nondestr. Eval.*, vol. 42, no. 4, Dec. 2023, doi: 10.1007/s10921-023-01003-2.
- [140] C. C. Hung, W. T. Lin, A. Cheng, and K. C. Pai, "Concrete compressive strength identification by impact-echo method," *Computers and Concrete*, vol. 20, no. 1, pp. 49–56, Jul. 2017, doi: 10.12989/cac.2017.20.1.049.
- [141] R. Courant, "Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations," *Bull. of the American Mathematical Society*, vol. 49, no. 1, pp. 1–23, 1943, doi: 10.1090/S0002-9904-1943-07818-4.
- [142] R. D. Cook, D. S. Malkus, M. E. Plesha, and R. J. Witt, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 4th ed. New York, NY, USA: Wiley, 2002.
- [143] R. W. Clough, "The finite element method in plane stress analysis," in *Proceedings of the 2nd ASCE Conference on Electronic Computation*, Pittsburgh, PA, USA, 1960, pp. 345–378.

- [144] J. H. Argyris, "Energy theorems and structural analysis: A generalized discourse with applications on energy principles of structural analysis including the effects of temperature and non-linear stress-strain relations," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 26, no. 10, pp. 347–356, 1954, doi: 10.1108/eb032482.
- [145] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and J. Z. Zhu, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 6th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2005.
- [146] G. Strang and G. J. Fix, *An Analysis of the Finite Element Method*, 2nd ed. Wellesley, MA, USA: Wellesley-Cambridge Press, 2008.
- [147] N. M. Newmark, "A method of computation for structural dynamics," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 85, no. 3, pp. 67–94, 1959.
- [148] E. L. Wilson, I. Farhoomand, and K.-J. Bathe, "Nonlinear dynamic analysis of complex structures," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 1, no. 3, pp. 241–252, 1972, doi: 10.1002/eqe.4290010305.
- [149] K.-J. Bathe, *Finite Element Procedures*, 2nd ed. Watertown, MA, USA: K. J. Bathe, 2014.
- [150] Bentley Systems, "PLAXIS Scientific Manual PLAXIS 2D," 2025, Exton, PA, USA.
- [151] A. K. Chopra, *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 5th ed. Hoboken, NJ, USA: Pearson, 2017.
- [152] J. D. Achenbach, *Wave Propagation in Elastic Solids*. Amsterdam, Netherlands: North-Holland Publishing Company, 1973.
- [153] K. F. Graff, *Wave Motion in Elastic Solids*. Mineola, NY, USA: Dover, 1991. Accessed: Mar. 17, 2026. [Online]. Available: https://books.google.com/books?id=jorRAGAAQBAJ&dq=the+Wave+motion+in+elastic+solids+graff+karl&lr=&source=gbp_navlinks_s
- [154] R. W. Clough and J. Penzien, *Dynamics of Structures*, 3rd ed. Berkeley, CA, USA: Computers & Structures, Inc., 2003.
- [155] M. Sansalone and N. J. Carino, "Detecting delaminations in concrete slabs with and without overlays using the impact-echo method," *ACI Mater. J.*, vol. 86, no. 2, pp. 175–184, 1989.
- [156] F. J. Nieves, F. Gascón, and A. Bayón, "Estimation of the elastic constants of a cylinder with a length equal to its diameter," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 104, no. 1, pp. 176–180, 1998, doi: 10.1121/1.423266.
- [157] R. Courant, K. Friedrichs, and H. Lewy, "Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik," *Math. Ann.*, vol. 100, pp. 32–74, 1928, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:120760331>
- [158] S. Razavi and H. V. Gupta, "What do we mean by sensitivity analysis? the need for comprehensive characterization of 'global' sensitivity in Earth and Environmental

- systems models,” *Water Resour. Res.*, vol. 51, no. 5, pp. 3070–3092, May 2015, doi: 10.1002/2014WR016527.
- [159] P. Royston and W. Sauerbrei, *Multivariable Model-Building: A Pragmatic Approach to Regression Analysis Based on Fractional Polynomials for Modelling Continuous Variables*. Chichester, UK: Wiley, 2008. doi: 10.1002/9780470770771.
- [160] W. Sauerbrei and P. Royston, “Building multivariable prognostic and diagnostic models: transformation of the predictors by using fractional polynomials,” *Journal of the Royal Statistical Society: Series A*, vol. 162, no. 1, pp. 71–94, 1999, doi: 10.1111/1467-985X.00122.
- [161] R Core Team, “R: A Language and Environment for Statistical Computing,” 2024, Vienna, Austria. [Online]. Available: <https://www.R-project.org/>
- [162] W. Sauerbrei, C. Meier-Hirmer, A. Benner, and P. Royston, “Multivariable regression model building by using fractional polynomials: Description of SAS, STATA and R programs,” *Comput. Stat. Data Anal.*, vol. 50, no. 12, pp. 3464–3485, 2006, doi: 10.1016/j.csda.2005.07.015.
- [163] H. Akaike, “A new look at the statistical model identification,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 19, no. 6, pp. 716–723, 1974, doi: 10.1109/TAC.1974.1100705.
- [164] K. P. Burnham and D. R. Anderson, *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2002.
- [165] Greek Ministry of Environment Physical Planning and Public Works, “Assessment of concrete’s strength classification of existing structures.” Accessed: Jan. 22, 2020. [Online]. Available: http://fakisc.weebly.com/uploads/3/2/7/6/3276490/Εγκύκλιος_7_28-3-1997.pdf
- [166] P. Royston and D. G. Altman, “Regression using fractional polynomials of continuous covariates: parsimonious parametric modelling,” *J. R. Stat. Soc. Ser. C Appl. Stat.*, vol. 43, no. 3, pp. 429–467, 1994, doi: 10.2307/2986270.
- [167] D. Bates, M. Mächler, B. Bolker, and S. Walker, “Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4,” *J. Stat. Softw.*, vol. 67, no. 1, pp. 1–48, 2015, doi: 10.18637/jss.v067.i01.
- [168] A. Kuznetsova, P. B. Brockhoff, and R. H. B. Christensen, “lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models,” *J. Stat. Softw.*, vol. 82, no. 13, pp. 1–26, 2017, doi: 10.18637/jss.v082.i13.
- [169] K. Bartón, “MuMIn: Multi-Model Inference.” [Online]. Available: <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn>
- [170] D. Lüdtke, M. S. Ben-Shachar, I. Patil, P. Waggoner, and D. Makowski, “performance: An R Package for Assessment, Comparison and Testing of Statistical

- Models,” *J. Open Source Softw.*, vol. 6, no. 60, p. 3139, 2021, doi: 10.21105/joss.03139.
- [171] W. N. Venables and B. D. Ripley, *Modern Applied Statistics with S*, 4th ed. New York, NY, USA: Springer, 2002.
- [172] J. Fox and S. Weisberg, *An R Companion to Applied Regression*, 3rd ed. Thousand Oaks, CA, USA: SAGE Publications, 2019.
- [173] G. E. P. Box and D. R. Cox, “An analysis of transformations,” *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, vol. 26, no. 2, pp. 211–252, 1964, doi: 10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x.
- [174] S. Nakagawa and H. Schielzeth, “A general and simple method for obtaining R^2 from generalized linear mixed-effects models,” *Methods Ecol. Evol.*, vol. 4, no. 2, pp. 133–142, 2013, doi: 10.1111/j.2041-210x.2012.00261.x.
- [175] S. Nakagawa, P. C. D. Johnson, and H. Schielzeth, “The coefficient of determination R^2 and intra-class correlation coefficient from generalized linear mixed-effects models revisited and expanded,” *J. R. Soc. Interface*, vol. 14, no. 134, p. 20170213, 2017, doi: 10.1098/rsif.2017.0213.
- [176] D. G. Mayer and D. G. Butler, “Statistical validation,” *Ecol. Modell.*, vol. 68, no. 1–2, pp. 21–32, 1993, doi: 10.1016/0304-3800(93)90105-2.
- [177] P. Economou, A. Batsidis, and K. Kounetas, “Evaluation of the OECD’s prediction algorithm for the annual GDP growth rate,” *Commun. Stat. Case Stud. Data Anal. Appl.*, vol. 7, no. 1, pp. 67–87, Jan. 2021, doi: 10.1080/23737484.2020.1805818.
- [178] S. V. Kolluru, J. S. Popovics, and S. P. Shah, “Determining the dynamic elastic modulus of concrete using resonance and pulse velocity methods,” *ACI Mater. J.*, vol. 97, no. 5, pp. 571–579, 2000.

Παραρτήματα

Παράρτημα Α - Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων 2D (για την ανάπτυξη του SCF)

1. Πινακοποιημένα Αποτελέσματα
2. Φάσματα Ελεύθερης Ταλάντωσης
3. Πηγαίος Κώδικας R Στατιστικής Ανάλυσης SCF

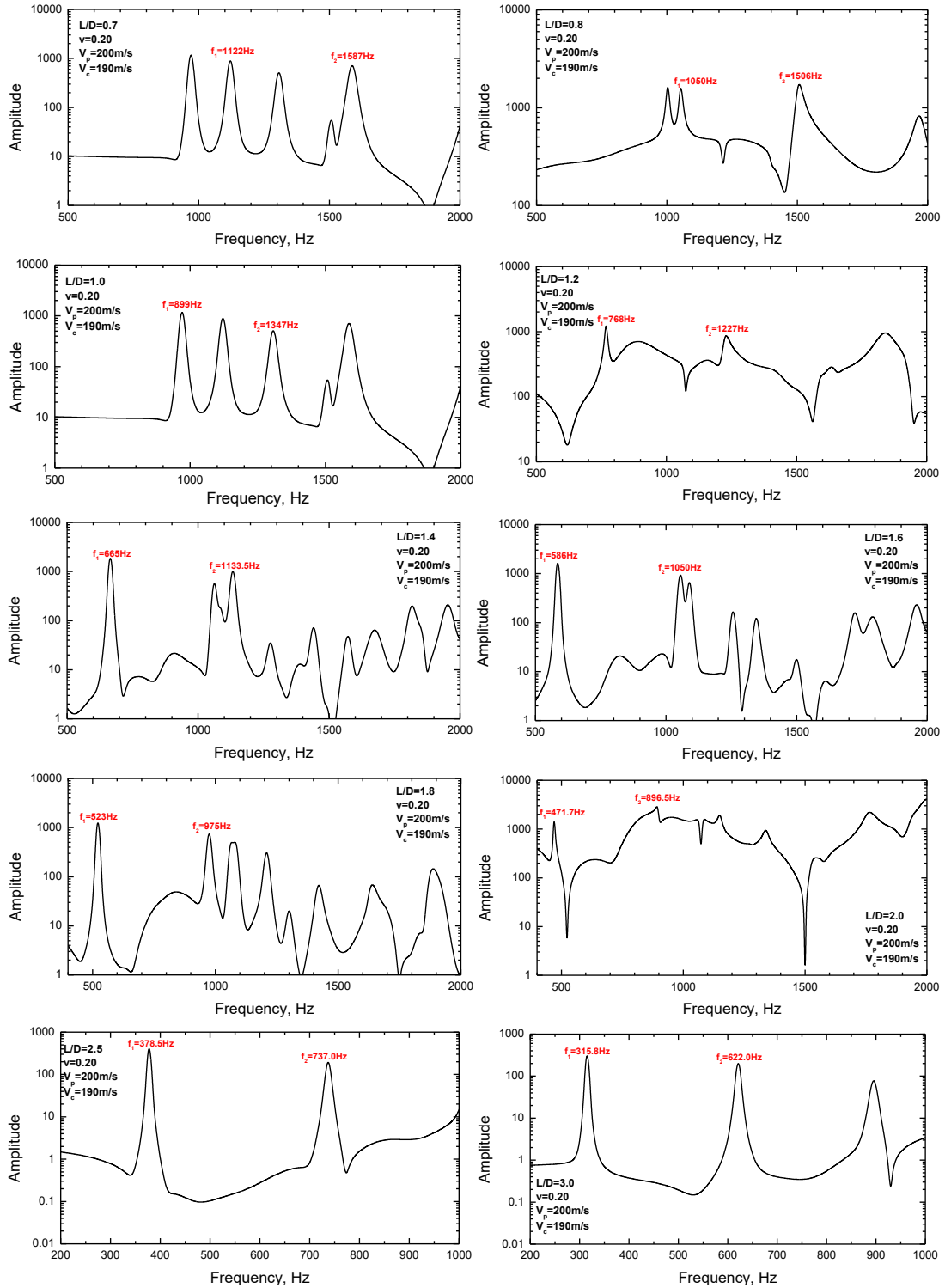
Πινακοποιημένα αποτελέσματα

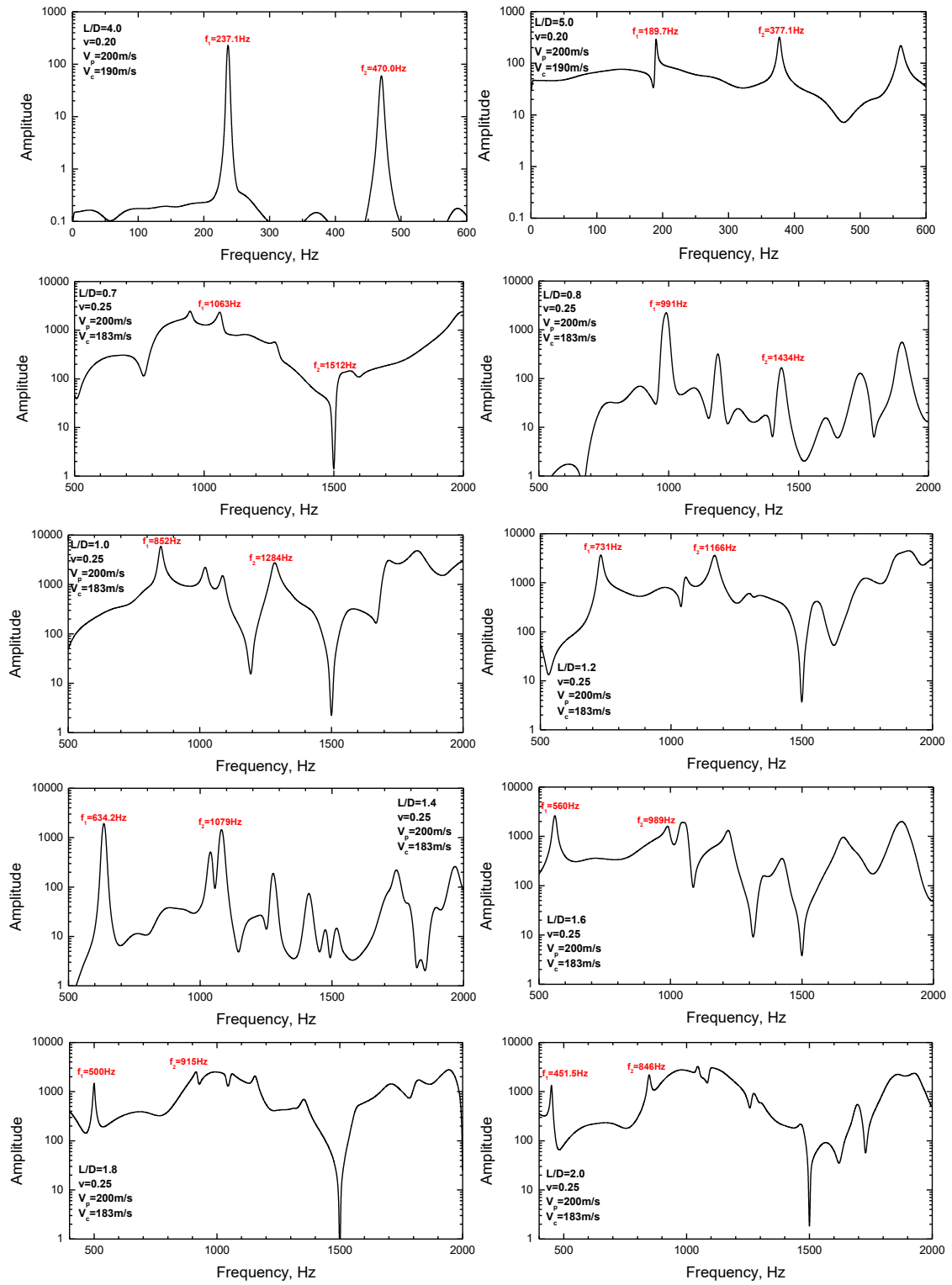
Properties	Nr.	Nr. of elements	dt (s)	N	f _{max}	df (s)	Height L (m)	Diameter D (m)	L\D	Infinite Rod (Hz)		FEM (Hz)			Infinite/FEM	
										f1	f2	f1	f2	f2/f1	f1	f2
Vp= 200 m/s Vc= 190m/s v= 0.20	1	104	0.00050	1024	1000	1.953	0.50	0.10	5.0	189.7	379.5	189.7	377.1	19.879	10.002	10.063
	2	100	0.00050	1024	1000	1.953	0.40	0.10	4.0	237.2	474.3	237.1	470.0	19.823	10.003	10.092
	3	96	0.00025	1024	2000	3.906	0.30	0.10	3.0	316.2	632.5	315.8	622.0	19.696	10.014	10.168
	4	110	0.00025	1024	2000	3.906	0.25	0.10	2.5	379.5	758.9	378.5	737.0	19.472	10.026	10.298
	5	100	0.00025	1024	2000	3.906	0.20	0.10	2.0	474.3	948.7	471.7	896.5	19.006	10.056	10.582
	6	116	0.00025	512	2000	7.813	0.18	0.10	1.8	527.0	1054.1	523.0	975.0	18.642	10.077	10.811
	7	140	0.00025	512	2000	7.813	0.16	0.10	1.6	592.9	1185.9	586.0	1050.0	17.918	10.118	11.294
	8	118	0.00025	512	2000	7.813	0.14	0.10	1.4	677.6	1355.3	665.0	1133.5	17.045	10.190	11.956
	9	116	0.00025	1024	2000	3.906	0.12	0.10	1.2	790.6	1581.1	768.0	1227.0	15.977	10.294	12.886
	10	118	0.00010	1024	5000	9.766	0.10	0.10	1.0	948.7	1897.4	899.0	1347.0	14.983	10.553	14.086
	11	122	0.00013	2048	4000	3.906	0.08	0.10	0.8	1185.9	2371.7	1050.0	1506.0	14.343	11.294	15.748
	12	106	0.00010	1024	5000	9.766	0.07	0.10	0.7	1355.3	2710.5	1122.0	1587.0	14.144	12.079	17.080
Properties	Nr.	Nr. of elements	dt (s)	N	f _{max}	df (s)	Height L (m)	Diameter D (m)	L\D	Infinite Rod (Hz)		FEM (Hz)			Infinite/FEM	
										f1	f2	f1	f2	f2/f1	f1	f2
Vp= 200 m/s Vc= 190m/s v= 0.25	1	104	0.00050	1024	1000	19.531	0.50	0.10	5.0	182.6	365.1	182.4	362.0	19.846	10.010	10.087
	2	100	0.00050	1024	1000	19.531	0.40	0.10	4.0	228.2	456.4	227.8	450.4	19.772	10.018	10.134
	3	96	0.00025	1024	2000	39.063	0.30	0.10	3.0	304.3	608.6	303.3	594.0	19.585	10.033	10.245
	4	110	0.00025	1024	2000	39.063	0.25	0.10	2.5	365.1	740.3	363.0	710.0	19.559	10.058	10.427
	5	100	0.00025	1024	2000	39.063	0.20	0.10	2.0	456.4	912.9	451.5	846.0	18.738	10.109	10.790
	6	116	0.00025	1024	2000	39.063	0.18	0.10	1.8	507.2	1014.3	500.0	915.0	18.300	10.143	11.085
	7	140	0.00025	512	2000	78.125	0.16	0.10	1.6	570.5	1141.1	560.0	989.0	17.661	10.188	11.538
	8	118	0.00025	512	2000	78.125	0.14	0.10	1.4	652.1	1304.1	634.2	1079.0	17.014	10.281	12.086
	9	116	0.00025	528	2000	75.758	0.12	0.10	1.2	760.7	1521.5	731.0	1166.0	15.951	10.407	13.048
	10	118	0.00010	512	5000	19.531	0.10	0.10	1.0	912.9	1825.7	852.0	1284.0	15.070	10.714	14.219

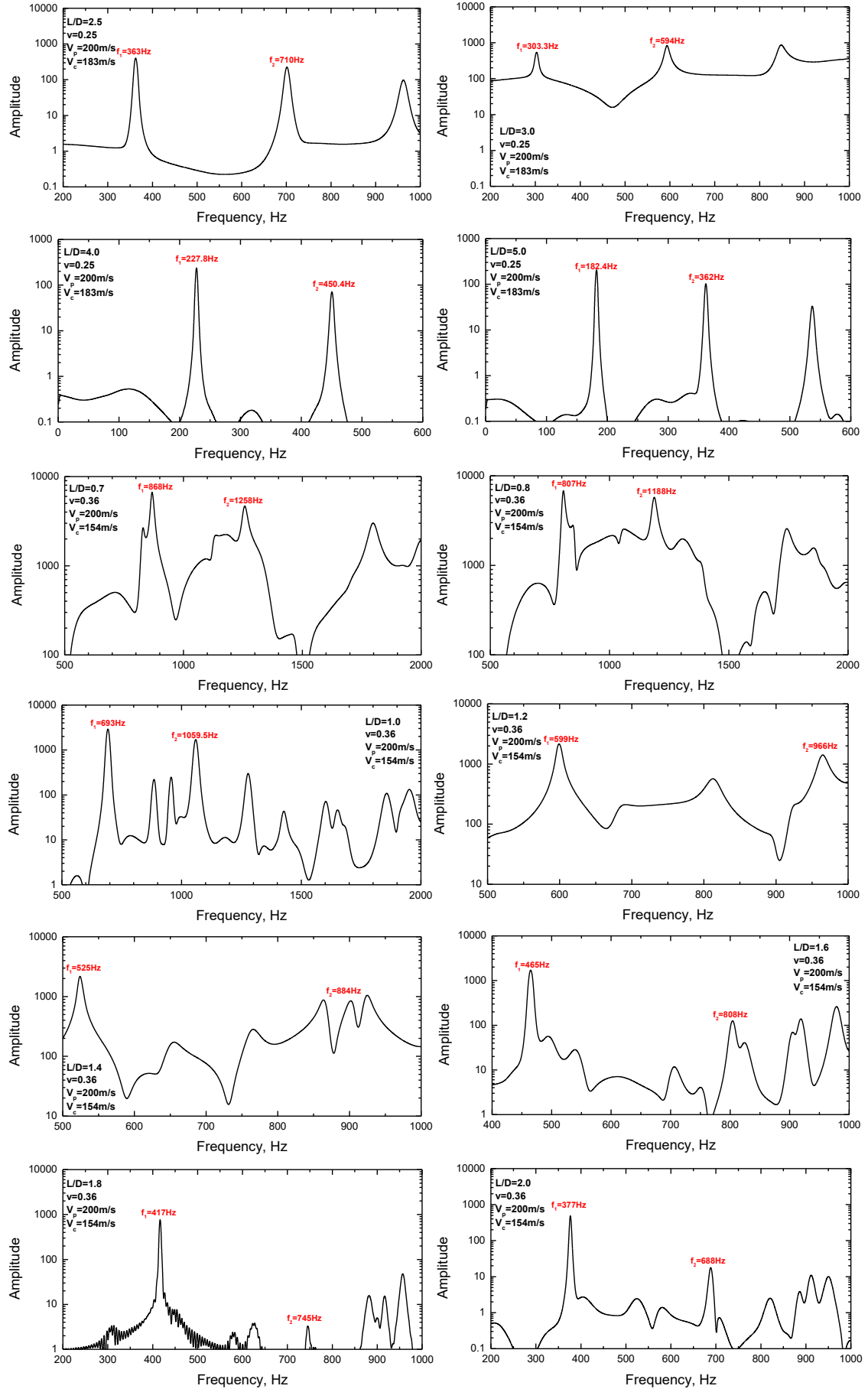
	11	122	0.00013	512	4000	15.625	0.08	0.10	0.8	1141.1	2282.2	991.0	1434.0	14.470	11.515	15.915
	12	106	0.00010	512	5000	19.531	0.07	0.10	0.7	1304.1	2608.2	1063.0	1512.0	14.224	12.268	17.250
Properties	Nr.	Nr. of elements	dt (s)	N	f _{max}	df (s)	Height L (m)	Diameter D (m)	L\D	Infinite Rod (Hz)		FEM (Hz)			Infinite/FEM	
										f1	f2	f1	f2	f2/f1	f1	f2
Vp= 200 m/s Vc= 190m/s v= 0.30	1	104	0.0010	1024	500	0.9766	0.50	0.10	5.0	172.4	344.8	172.0	340.5	19.797	10.022	10.125
	2	100	0.0010	1024	500	0.97656	0.40	0.10	4.0	215.5	430.9	214.7	423.0	19.702	10.036	10.188
	3	96	0.0005	1024	1000	195.313	0.30	0.10	3.0	287.3	574.6	285.5	555.5	19.457	10.063	10.344
	4	110	0.0005	1024	1000	195.313	0.25	0.10	2.5	344.8	689.5	341.2	654.0	19.168	10.106	10.543
	5	106	0.0005	1024	1000	195.313	0.20	0.10	2.0	430.9	861.9	423.5	787.0	18.583	10.176	10.952
	6	116	0.0005	1024	1000	195.313	0.18	0.10	1.8	478.8	957.7	469.0	850.0	18.124	10.210	11.267
	7	140	0.0003	1024	2000	390.625	0.16	0.10	1.6	538.7	1077.4	524.0	919.0	17.538	10.280	11.723
	8	118	0.0003	1024	2000	390.625	0.14	0.10	1.4	615.6	1231.3	594.0	1004.0	16.902	10.364	12.264
	9	116	0.0003	1024	2000	390.625	0.12	0.10	1.2	718.2	1436.5	680.0	1090.0	16.029	10.562	13.179
	10	118	0.0003	1024	2000	390.625	0.10	0.10	1.0	861.9	1723.8	789.0	1199.0	15.196	10.924	14.377
	11	122	0.0003	1024	2000	390.625	0.08	0.10	0.8	1077.4	2154.7	921.0	1340.0	14.549	11.698	16.080
	12	106	0.0025	1024	200	0.39063	0.07	0.10	0.7	1231.3	2462.5	988.0	1416.0	14.332	12.462	17.391
Properties	Nr.	Nr. of elements	dt (s)	N	f _{max}	df (s)	Height L (m)	Diameter D (m)	L\D	Infinite Rod (Hz)		FEM (Hz)			Infinite/FEM	
										f1	f2	f1	f2	f2/f1	f1	f2
Vp= 200 m/s Vc= 190m/s v= 0.36	1	104	0.0010	1024	500	0.9766	0.50	0.10	5.0	154.0	309.0	153.6	304.5	19.824	10.026	10.148
	2	100	0.0010	1024	500	0.9766	0.40	0.10	4.0	192.8	385.7	191.9	376.5	19.620	10.049	10.244
	3	96	0.0005	1024	1000	19.531	0.30	0.10	3.0	257.1	514.2	254.8	492.5	19.329	10.091	10.441
	4	110	0.0005	1024	1000	19.531	0.25	0.10	2.5	308.5	617.1	304.2	577.0	18.968	10.141	10.695
	5	100	0.0005	1024	1000	19.531	0.21	0.10	2.0	385.7	771.4	377.0	688.0	18.249	10.230	11.212
	6	116	0.0005	695	1000	28.777	0.18	0.10	1.8	428.5	857.1	417.0	745.0	17.866	10.277	11.504
	7	140	0.0005	512	1000	39.063	0.16	0.10	1.6	482.1	964.2	465.0	808.0	17.376	10.368	11.933
	8	118	0.0005	512	1000	39.063	0.14	0.10	1.4	551.0	1101.9	525.0	884.0	16.838	10.495	12.465
	9	116	0.0005	512	1000	39.063	0.12	0.10	1.2	642.8	1285.6	599.0	966.0	16.127	10.731	13.309
	10	118	0.0003	512	2000	78.125	0.10	0.10	1.0	771.4	1542.7	693.0	1059.5	15.289	11.131	14.561
	11	122	0.0003	512	2000	78.125	0.08	0.10	0.8	964.2	1928.4	807.0	1188.0	14.721	11.948	16.232

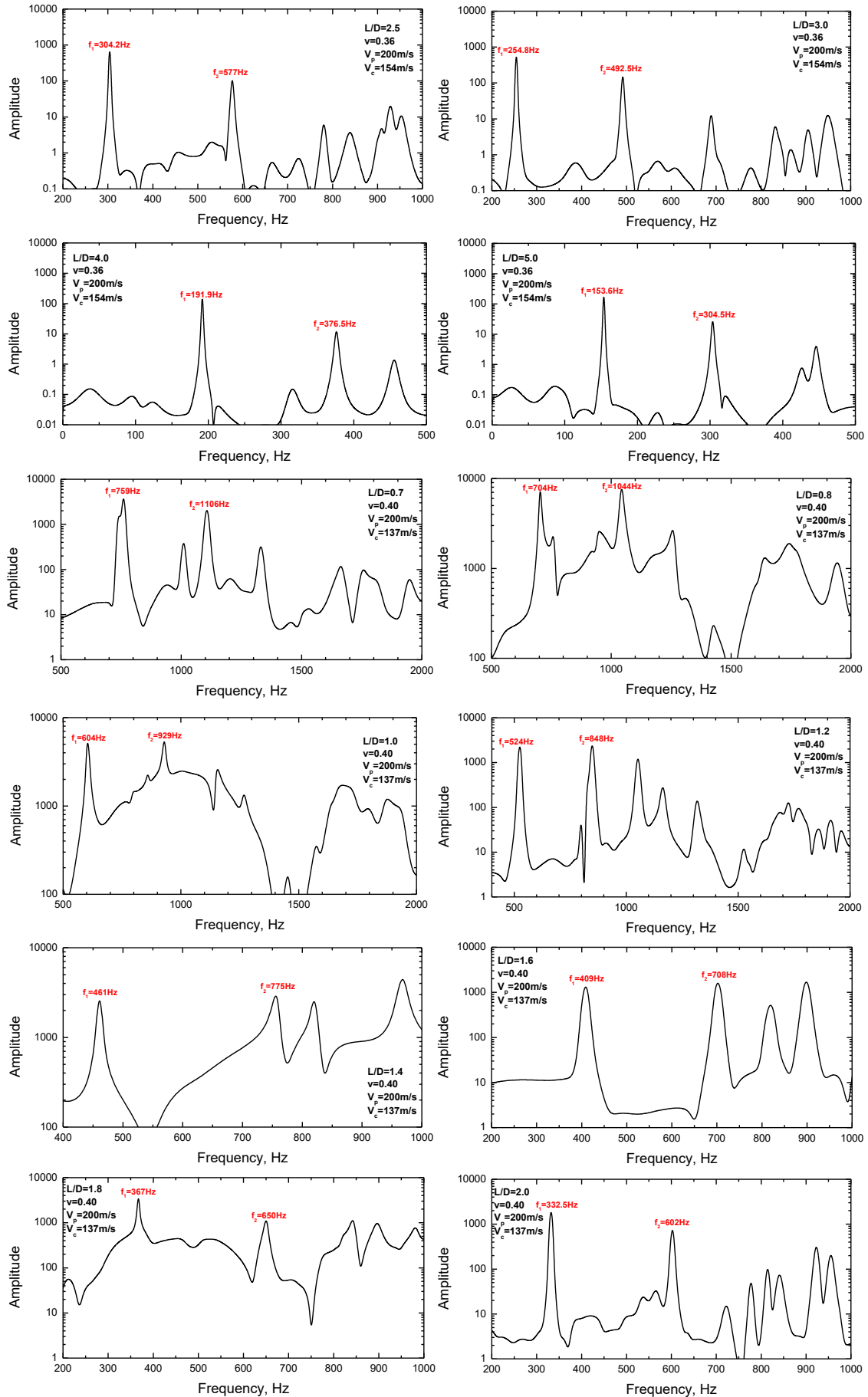
	12	106	0.0003	512	2000	78.125	0.07	0.10	0.7	1101.9	2203.9	868.0	1258.0	14.493	12.695	17.519
Properties	Nr.	Nr. of elements	dt (s)	N	f _{max}	df (s)	Height L (m)	Diameter D (m)	L/D	Infinite Rod (Hz)		FEM (Hz)			Infinite/FEM	
										f1	f2	f1	f2	f2/f1	f1	f2
Vp= 200 m/s Vc= 190m/s v= 0.40	1	104	0.0010	512	500	19.531	0.50	0.10	5.0	136.6	273.3	136.2	268.5	19.714	10.031	10.177
	2	100	0.0010	512	500	19.531	0.40	0.10	4.0	170.8	341.6	169.8	332.0	19.552	10.058	10.288
	3	96	0.0005	512	1000	39.063	0.30	0.10	3.0	227.7	455.4	225.2	433.0	19.227	10.111	10.518
	4	110	0.0005	512	1000	39.063	0.25	0.10	2.5	273.3	546.5	268.8	505.0	18.787	10.166	10.822
	5	106	0.0005	512	1000	39.063	0.20	0.10	2.0	341.6	683.1	332.5	602.0	18.105	10.273	11.348
	6	116	0.0005	512	1000	39.063	0.18	0.10	1.8	379.5	759.0	367.0	650.0	17.711	10.341	11.677
	7	140	0.0003	512	2000	78.125	0.16	0.10	1.6	427.0	853.9	409.0	708.0	17.311	10.439	12.061
	8	118	0.0003	512	2000	78.125	0.14	0.10	1.4	488.0	975.9	461.0	775.0	16.811	10.585	12.592
	9	116	0.0003	512	2000	78.125	0.12	0.10	1.2	569.3	1138.6	524.5	848.0	16.168	10.854	13.426
	10	118	0.0003	512	2000	78.125	0.10	0.10	1.0	683.1	1366.3	604.0	929.0	15.381	11.310	14.707
	11	122	0.0003	512	2000	78.125	0.08	0.10	0.8	853.9	1707.8	704.0	1044.0	14.830	12.129	16.358
	12	106	0.0003	512	2000	78.125	0.07	0.10	0.7	975.9	1951.8	759.0	1106.0	14.572	12.858	17.647
Properties	Nr.	Nr. of elements	dt (s)	N	f _{max}	df (s)	Height L (m)	Diameter D (m)	L/D	Infinite Rod (Hz)		FEM (Hz)			Infinite/FEM	
										f1	f2	f1	f2	f2/f1	f1	f2
Vp= 200 m/s Vc= 190m/s v= 0.45	1	104	0.0010	512	500	195.313	0.50	0.10	5.0	102.7	205.4	102.2	201.0	1.967	10.048	10.218
	2	100	0.0010	512	500	195.313	0.40	0.10	4.0	128.4	256.7	127.3	248.0	1.948	10.084	10.352
	3	96	0.0005	512	1000	390.625	0.30	0.10	3.0	171.2	342.3	168.8	322.0	1.908	10.139	10.631
	4	110	0.0005	512	1000	390.625	0.25	0.10	2.5	205.4	410.8	201.2	375.0	1.864	10.208	10.954
	5	106	0.0005	512	1000	390.625	0.20	0.10	2.0	256.7	513.5	248.0	445.3	1.796	10.352	11.531
	6	116	0.0005	568	1000	352.113	0.18	0.10	1.8	285.3	570.5	273.5	480.5	1.757	10.430	11.873
	7	140	0.0003	1024	2000	390.625	0.16	0.10	1.6	320.9	641.8	305.0	524.5	1.720	10.522	12.237
	8	118	0.0003	514	2000	77.821	0.14	0.10	1.4	366.8	733.5	343.5	575.7	1.676	10.677	12.741
	9	116	0.0003	1024	2000	390.625	0.12	0.10	1.2	427.9	855.8	391.0	633.0	1.619	10.943	13.519
	10	118	0.0003	1024	2000	390.625	0.10	0.10	1.0	513.5	1026.9	447.0	691.5	1.547	11.487	14.850
	11	122	0.0003	1024	2000	390.625	0.08	0.10	0.8	641.8	1283.6	519.5	777.5	1.497	12.355	16.510
	12	106	0.0003	1024	2000	390.625	0.07	0.10	0.7	733.5	1467.0	562.0	825.0	1.468	13.052	17.782

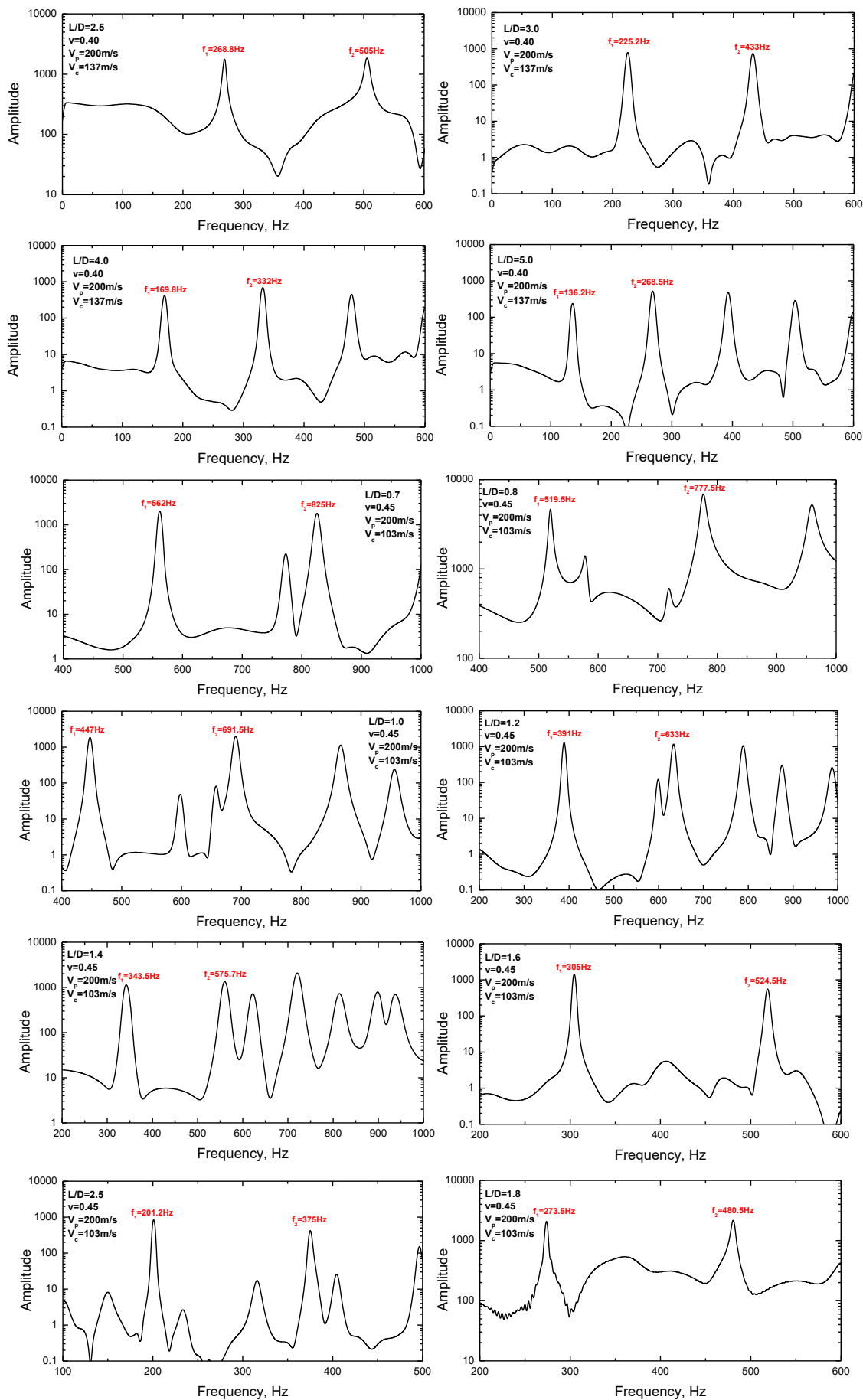
Φάσματα Ελεύθερης Ταλάντωσης

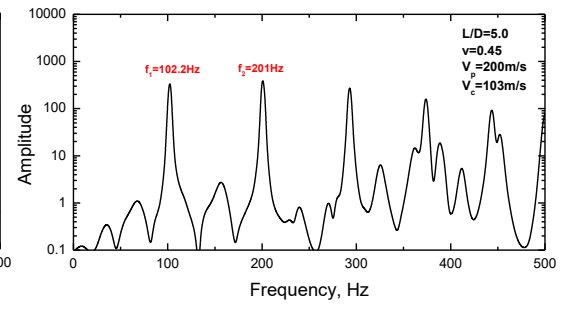
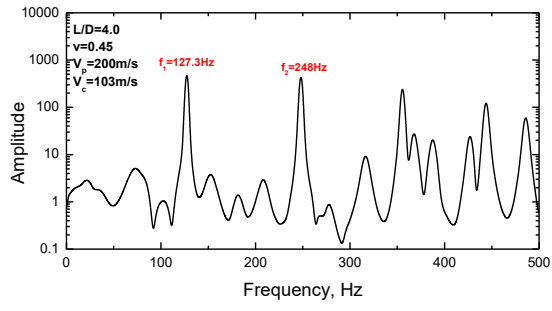
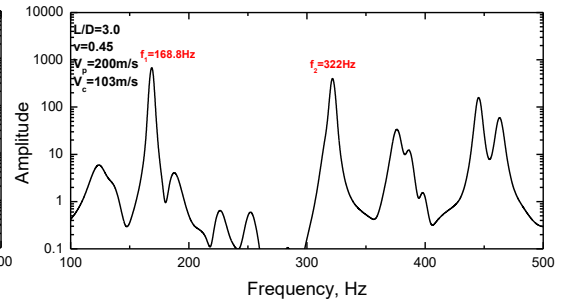
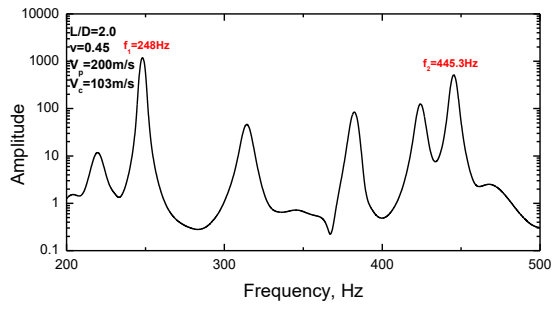












Πηγαίος Κώδικας R Στατιστικής Ανάλυσης SCF

Παρακάτω παρατίθεται ο πηγαίος κώδικας σε γλώσσα R (έκδοση ≥ 4.5) που υλοποιεί τη μεθοδολογία Multivariable Fractional Polynomial (MFP) regression, η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.3. Ο κώδικας πραγματοποιεί την προσαρμογή εμπειρικών εξισώσεων για τον Διορθωτικό Συντελεστή Σχήματος (SCF) ως συνάρτηση της λυγηρότητας L/D και του λόγου Poisson ν , για τις δύο πρώτες ιδιομορφές ταλάντωσης κοντών κυλινδρικών δοκιμίων.

Τα βασικά πακέτα που απαιτούνται είναι: *mfp* (Multivariable Fractional Polynomials), *tidyverse* (διαχείριση δεδομένων), *plotly* (τριδιάστατη απεικόνιση επιφανειών παλινδρόμησης) και *reshape2* (αναδιάταξη πινάκων δεδομένων).

Τα αρχεία εισόδου *mode1.xlsx* και *mode2.xlsx* περιέχουν τα αριθμητικά δεδομένα $SCF = f_{theoretical}/f_{FEM}$ των 72 αναλύσεων FEM για την 1^η και 2^η ιδιομορφή αντίστοιχα, σε μορφή πίνακα με στήλες ανά τιμή ν .

```
1 library(readxl)
2
3 library(tidyverse)
4
5 library(mfp)
6
7 library(ggplot2)
8 library(plotly)
9
10 library(reshape2)
11
12 library(viridis)
13
14 # =====
15 # FUNCTION: Run_FP_Analysis (Fixed & Enhanced)
16 # =====
17 run_fp_analysis <- function(file_path, model_label = "Model") {
18
19   cat(paste0("\n", paste(rep("=", 60), collapse = ""), "\n"))
20   cat(paste0(">>> DETAILED ANALYSIS: ", model_label, "\n"))
21   cat(paste(rep("=", 60), collapse = ""), "\n")
22
23   # 1. Data Cleaning
24   df_raw <- read_excel(file_path)
25   df_final <- df_raw %>%
26     pivot_longer(cols = `L/D`, names_to = "v", values_to = "Value") %>%
27     mutate(v = as.numeric(str_remove(v, "v="))) %>%
28     rename(X1 = `L/D`, X2 = v, Y = Value) %>%
29     drop_na()
30
31   # 2. Model Fitting
32   interaction_name <- "X1_x_X2"
33   df_final[[interaction_name]] <- df_final$X1 * df_final$X2
34 }
```

```

35   fp_formula <- as.formula(paste("Y ~ fp(X1, df=4) + fp(X2, df=4) + fp(",
interaction_name, ", df=4)"))
36   fit <- mfp(fp_formula, data = df_final, family = gaussian)
37
38   # 3. Create Prediction Surface
39   grid_res <- 50
40   surface_grid <- expand.grid(
41     X1 = seq(min(df_final$X1), max(df_final$X1), length.out = grid_res),
42     X2 = seq(min(df_final$X2), max(df_final$X2), length.out = grid_res)
43   )
44   surface_grid[[interaction_name]] <- surface_grid$X1 * surface_grid$X2
45   surface_grid$preds <- predict(fit, newdata = surface_grid)
46
47   # 4. 3D Visualization
48   z_matrix <- acast(surface_grid, X1 ~ X2, value.var = "preds")
49   p_3d <- plot_ly() %>%
50     add_surface(x = as.numeric(colnames(z_matrix)), y =
as.numeric(rownames(z_matrix)), z = z_matrix,
51               colorscale = "Viridis", opacity = 0.8, name = "Fit Surface")
%>%
52     add_markers(data = df_final, x = ~X2, y = ~X1, z = ~Y,
53               marker = list(size = 3, color = "black", opacity = 0.4), name
= "Observed") %>%
54     layout(title = paste(model_label, "Regression Surface"),
55           scene = list(xaxis=list(title="v (X2)"), yaxis=list(title="L/D
(X1)"), zaxis=list(title="Y")))
56
57   # 5. Calculation of Metrics
58   preds_all <- predict(fit)
59   resids <- df_final$Y - preds_all
60   n <- nrow(df_final)
61   rss <- sum(resids^2); tss <- sum((df_final$Y - mean(df_final$Y))^2)
62   r_sq <- 1 - (rss / tss)
63   rmse <- sqrt(rss / n); mae <- mean(abs(resids))
64
65   # 6. AUTO-INTERPRETATION OUTPUT
66   cat("\n[1] PERFORMANCE SUMMARY:\n")
67   cat(sprintf(" - Fit Confidence (R²): %.2f%%\n", r_sq * 100))
68   cat(sprintf(" - Avg. Error (RMSE): %.5f\n", rmse))
69   cat(sprintf(" - Info Criterion (AIC): %.2f\n", AIC(fit)))
70
71   cat("\n[2] TRANSFORMATION ANALYSIS:\n")
72   # Safely extract powers using grepl to avoid 'subscript out of bounds'
73   all_powers <- fit$powers
74   for(var in c("X1", "X2", interaction_name)) {
75     row_idx <- which(rownames(all_powers) == var)
76     if(length(row_idx) > 0) {
77       p_vals <- all_powers[row_idx, ]
78       p_vals <- p_vals[!is.na(p_vals)]
79       cat(paste0(" - ", var, " Powers: [", paste(p_vals, collapse = ", "),
"]\n"))
80     }
81   }
82
83   cat("\n[3] EXPERT INTERPRETATION:\n")
84   if(r_sq > 0.99) {

```

```

85     cat(" - STATUS: Near-Perfect Fit. The model has captured the underlying
physics/logic.\n")
86   } else if(r_sq > 0.90) {
87     cat(" - STATUS: Strong Model. Excellent for predictive purposes.\n")
88   } else {
89     cat(" - STATUS: Moderate Fit. Consider if additional variables are
missing.\n")
90   }
91
92   # Sensitivity Logic
93   if(rmse < 0.01) {
94     cat(" - PRECISION: High. The average deviation is less than 1% of the
typical Y scale.\n")
95   }
96
97   cat(paste0("\n", paste(rep("-", 60), collapse = ""), "\n"))
98
99   return(list(plot = p_3d, model = summary(fit), r2 = r_sq))
100 }
101
102 # =====
103 # EXECUTION
104 # =====
105 m1 <- run_fp_analysis("model1.xlsx", "Model 1")
106
107 m1$model
108
109 m1$plot
110
111 m2 <- run_fp_analysis("model2.xlsx", "Model 2")
112
113 m2$model
114
115 m2$plot

```


Παράρτημα Β - Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων 2D (για τη διερεύνηση της ΙΕ ως αυτόνομης δοκιμής)

1. Πινακοποιημένα Αποτελέσματα – Μεθοδολογίας 1 / Μεθοδολογίας 2
2. Διαγράμματα δείκτη Poisson – z/L
3. Κανονικοποιημένα διαγράμματα δείκτη Poisson – z/L

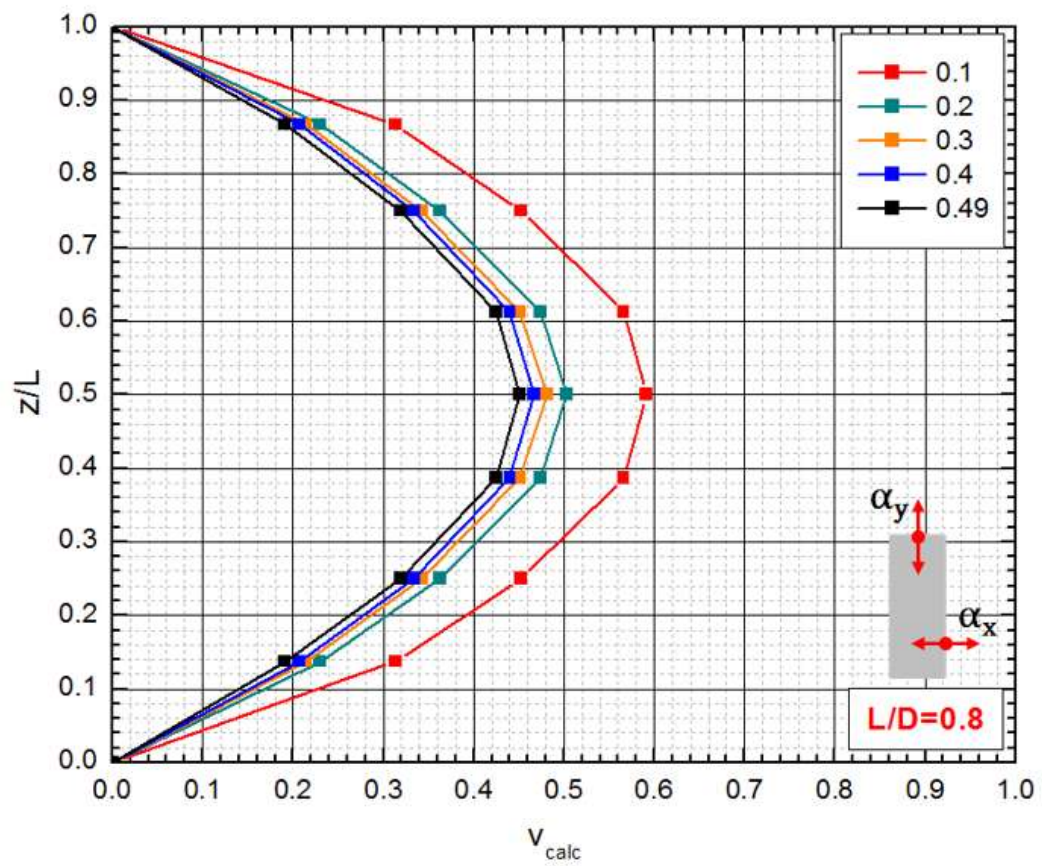
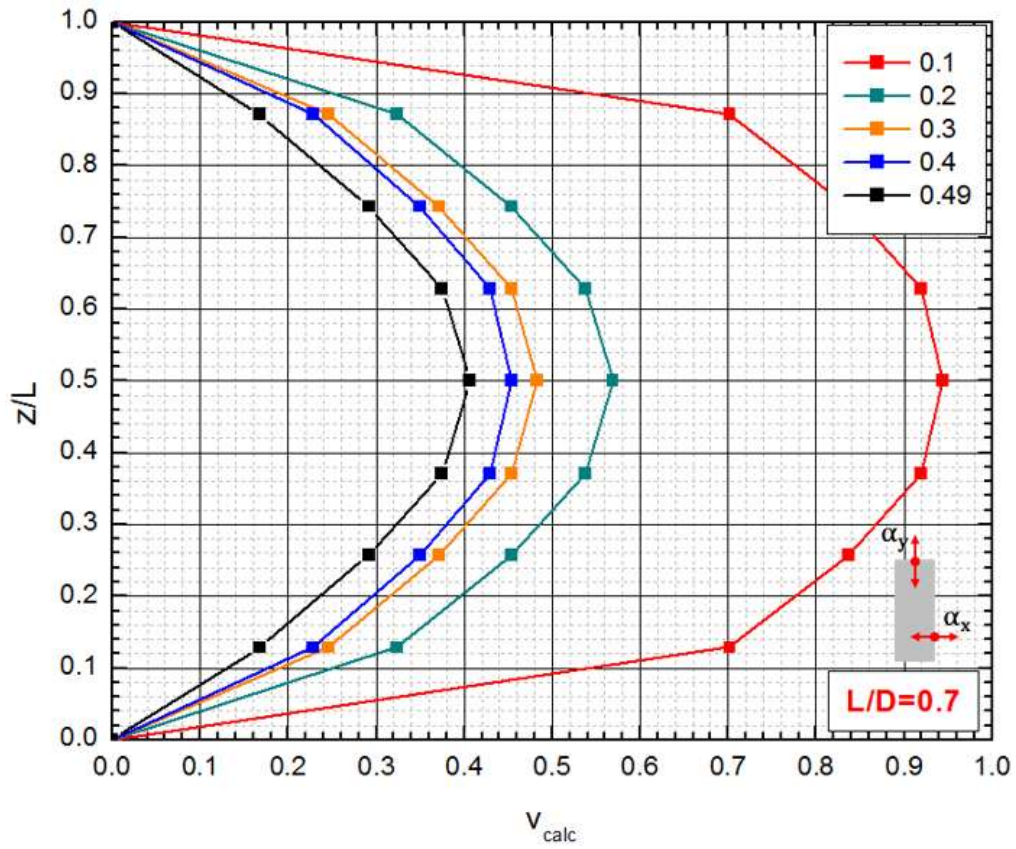
Πινακοποιημένα αποτελέσματα (Μεθοδολογία 1)

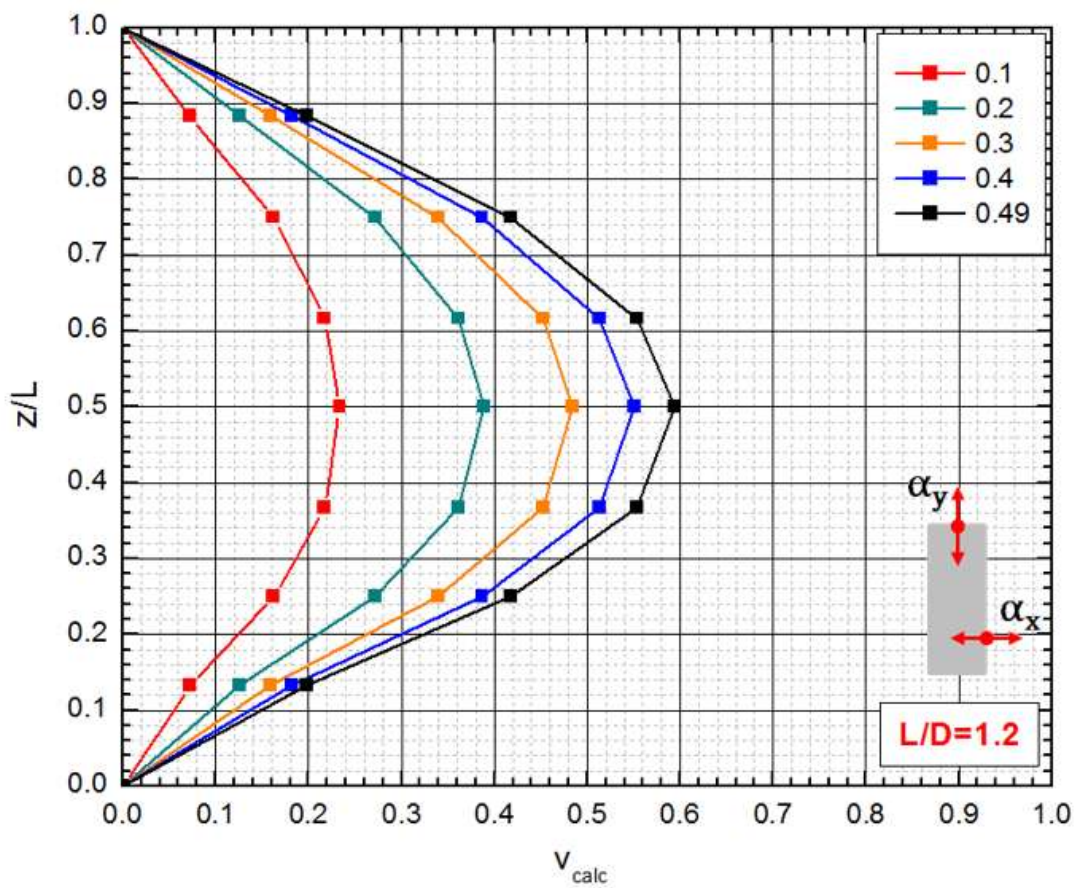
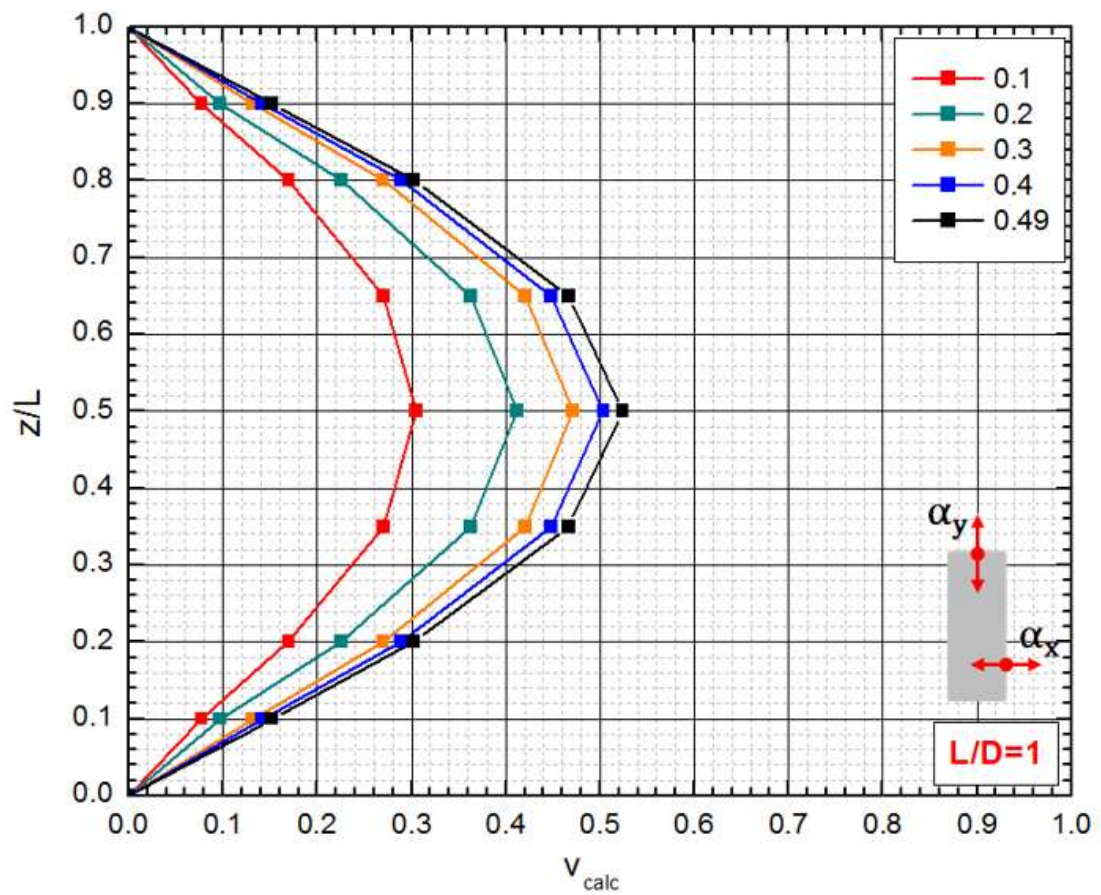
$V_s = 100\text{m/s}$	Theoretical Poisson's Ratio	dt (s)	N	fmax (Hz)	Height L (m)	Diameter D (m)	Theoretical f1	FEM f1	Theoretical/ FEM	Calculated Poisson's Ratio			
										z=0.5L	z=0.63L	z=0.74L	z=0.87L
L/D= 0.7	0,10	0,0001	1024	5000	0,07	0,10	1059,46	888,67	1,1922	0,944	0,919	0,837	0,702
	0,20	0,0001	1024	5000	0,07	0,10	1106,57	917,96	1,2055	0,569	0,538	0,454	0,324
	0,30	0,0001	1024	5000	0,07	0,10	1151,75	927,73	1,2415	0,483	0,454	0,372	0,246
	0,40	0,0001	1024	5000	0,07	0,10	1195,23	927,73	1,2883	0,454	0,429	0,350	0,229
	0,49	0,0001	1024	5000	0,07	0,10	1233,05	937,00	1,3160	0,407	0,375	0,292	0,168
L/D= 0.8	0,10	0,0001	1024	5000	0,08	0,10	927,02	859,38	1,0787	z=0.5L	z=0.61L	z=0.75L	z=0.86L
	0,20	0,0001	1024	5000	0,08	0,10	968,25	859,38	1,1267	0,592	0,566	0,452	0,313
	0,30	0,0001	1024	5000	0,08	0,10	1007,78	859,38	1,1727	0,503	0,474	0,363	0,230
	0,40	0,0001	1024	5000	0,08	0,10	1045,83	859,38	1,2170	0,482	0,452	0,342	0,215
	0,49	0,0001	1024	5000	0,08	0,10	1078,92	859,38	1,2555	0,466	0,440	0,335	0,207
L/D= 1.0	0,10	0,0001	1024	5000	0,10	0,10	741,62	722,66	1,0262	0,451	0,425	0,319	0,191
	0,20	0,0001	1024	5000	0,10	0,10	774,60	732,42	1,0576	z=0.5L	z=0.65L	z=0.8L	z=0.9L
	0,30	0,0001	1024	5000	0,10	0,10	806,23	742,18	1,0863	0,305	0,271	0,170	0,077
	0,40	0,0001	1024	5000	0,10	0,10	836,66	742,18	1,1273	0,412	0,363	0,225	0,097
	0,49	0,0001	1024	5000	0,10	0,10	863,13	742,18	1,1630	0,471	0,420	0,270	0,131
L/D= 1.2	0,10	0,0003	1024	2000	0,12	0,10	618,02	613,28	1,0077	0,504	0,448	0,289	0,142
	0,20	0,0003	1024	2000	0,12	0,10	645,50	628,91	1,0264	0,524	0,467	0,302	0,152
	0,30	0,0003	1024	2000	0,12	0,10	671,85	636,72	1,0552	z=0.5L	z=0.62L	z=0.75L	z=0.9L
	0,40	0,0003	1024	2000	0,12	0,10	697,22	644,53	1,0817	0,233	0,217	0,162	0,073
	0,49	0,0003	1024	2000	0,12	0,10	719,28	648,44	1,1092	0,388	0,362	0,272	0,126
L/D= 1.2	0,10	0,0003	1024	2000	0,12	0,10	618,02	613,28	1,0077	0,485	0,452	0,340	0,159
	0,20	0,0003	1024	2000	0,12	0,10	645,50	628,91	1,0264	0,550	0,513	0,387	0,183
	0,30	0,0003	1024	2000	0,12	0,10	671,85	636,72	1,0552	0,593	0,554	0,417	0,199
	0,40	0,0003	1024	2000	0,12	0,10	697,22	644,53	1,0817				
	0,49	0,0003	1024	2000	0,12	0,10	719,28	648,44	1,1092				

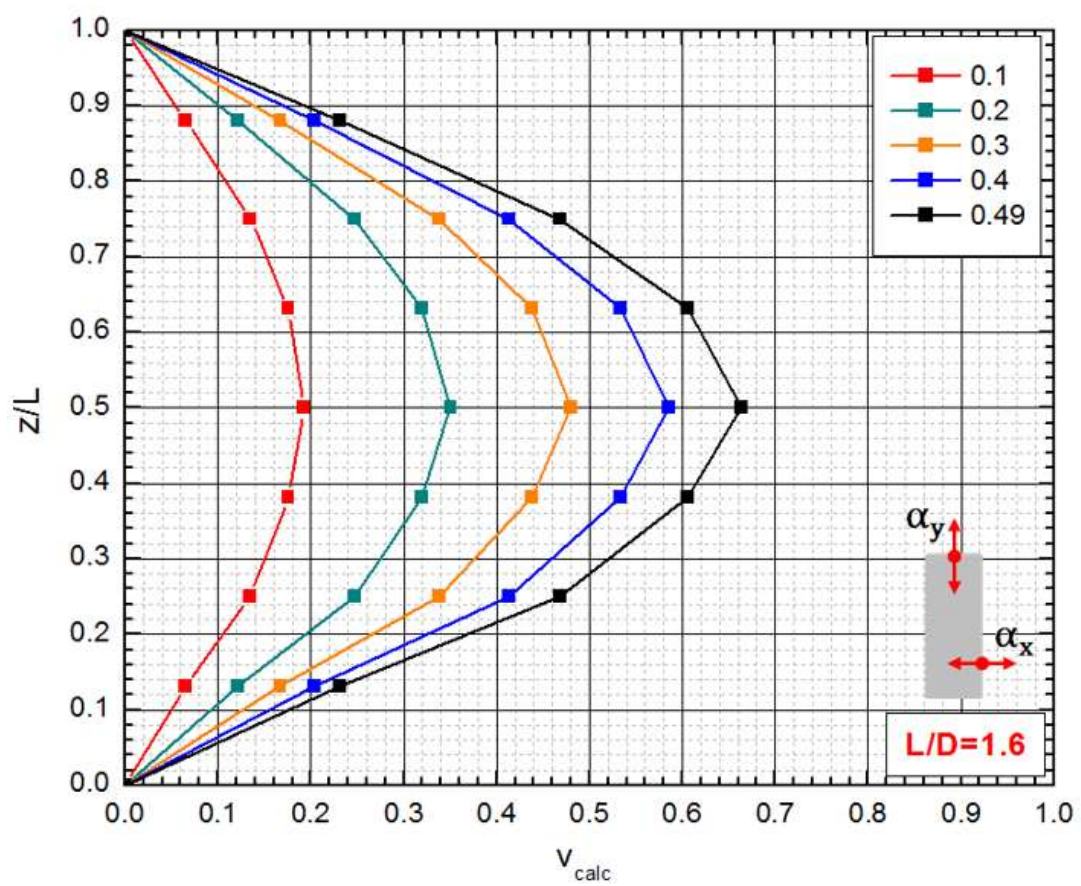
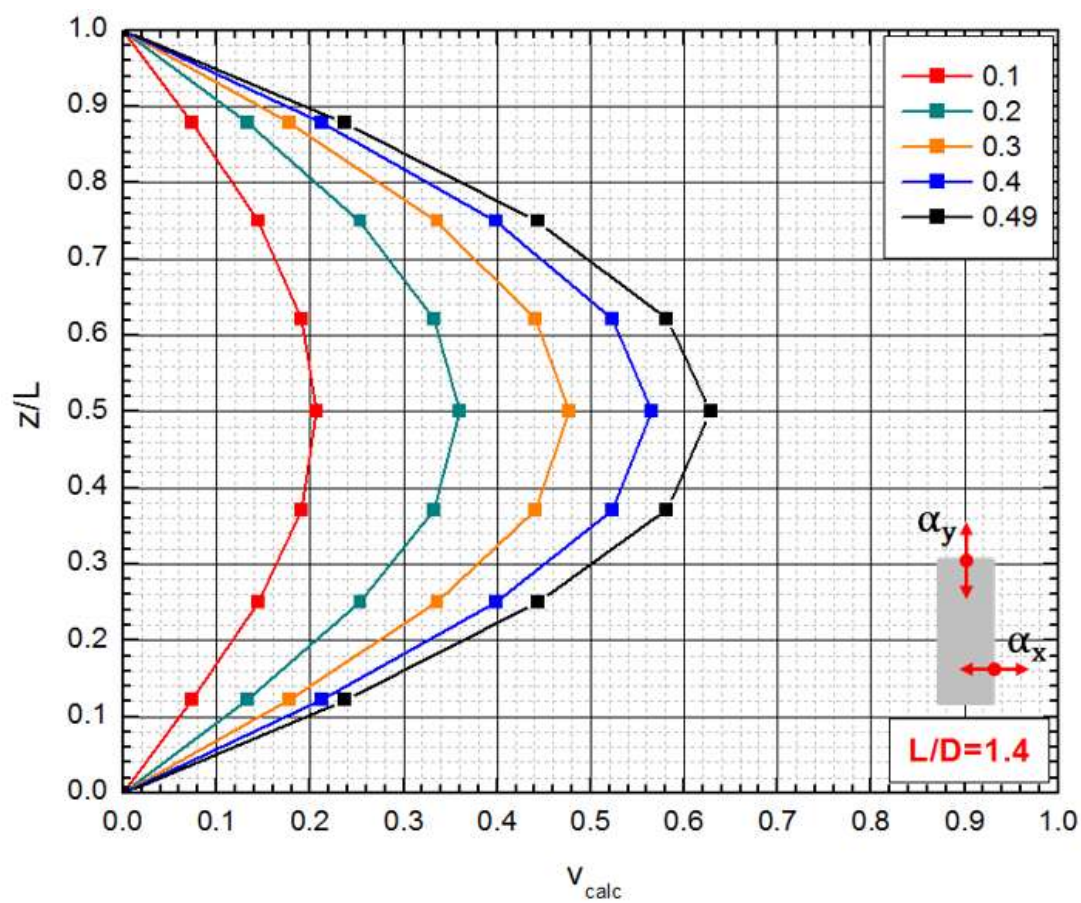
Vs= 100m/s	Theoretical Poisson's Ratio	dt (s)	N	fmax (Hz)	Height L (m)	Diameter D (m)	Theoretical f1	FEM f1	Theoretical/ FEM	Calculated Poisson's Ratio			
										z=0.5L	z=0.62L	z=0.75L	z=0.88L
L/D= 1.4	0,10	0,0003	1024	2000	0,14	0,10	529,73	525,39	1,0083	0,206	0,190	0,145	0,074
	0,20	0,0003	1024	2000	0,14	0,10	553,28	542,96	1,0190	0,361	0,333	0,254	0,133
	0,30	0,0003	1024	2000	0,14	0,10	575,88	554,68	1,0382	0,477	0,441	0,336	0,178
	0,40	0,0003	1024	2000	0,14	0,10	597,61	564,45	1,0588	0,566	0,523	0,399	0,212
	0,49	0,0003	1024	2000	0,14	0,10	616,52	570,31	1,0810	0,629	0,581	0,444	0,236
L/D= 1.6										z=0.5L	z=0.63L	z=0.75L	z=0.88L
	0,10	0,00025	1024	2000	0,16	0,10	463,51	460,93	1,0056	0,192	0,176	0,135	0,065
	0,20	0,00025	1024	2000	0,16	0,10	484,12	478,51	1,0117	0,351	0,320	0,247	0,121
	0,30	0,00025	1024	2000	0,16	0,10	503,89	490,23	1,0279	0,480	0,438	0,339	0,167
	0,40	0,00025	1024	2000	0,16	0,10	522,91	500,00	1,0458	0,585	0,534	0,413	0,204
L/D= 1.8	0,49	0,00025	1024	2000	0,16	0,10	539,46	507,81	1,0623	0,664	0,605	0,469	0,232
										z=0.5L	z=0.62L	z=0.75L	z=0.88L
	0,10	0,00025	512	2000	0,18	0,10	412,01	410,15	1,0045	0,182	0,170	0,130	0,067
	0,20	0,00025	512	2000	0,18	0,10	430,33	425,78	1,0107	0,340	0,316	0,242	0,128
	0,30	0,00025	512	2000	0,18	0,10	447,90	437,50	1,0238	0,476	0,441	0,338	0,180
L/D= 2.0	0,40	0,00025	512	2000	0,18	0,10	464,81	445,31	1,0438	0,592	0,549	0,421	0,225
	0,49	0,00025	512	2000	0,18	0,10	479,52	453,13	1,0582	0,682	0,631	0,484	0,260
										z=0.5L	z=0.625L	z=0.75L	z=0.875L
	0,10	0,00025	512	2000	0,20	0,10	370,81	367,18	1,0099	0,176	0,163	0,126	0,066
	0,20	0,00025	512	2000	0,20	0,10	387,30	384,75	1,0066	0,331	0,306	0,237	0,127
	0,30	0,00025	512	2000	0,20	0,10	403,11	396,10	1,0177	0,470	0,434	0,335	0,180
	0,40	0,00025	512	2000	0,20	0,10	418,33	406,25	1,0297	0,590	0,548	0,422	0,228
	0,49	0,00025	512	2000	0,20	0,10	431,57	414,06	1,0423	0,690	0,638	0,491	0,265

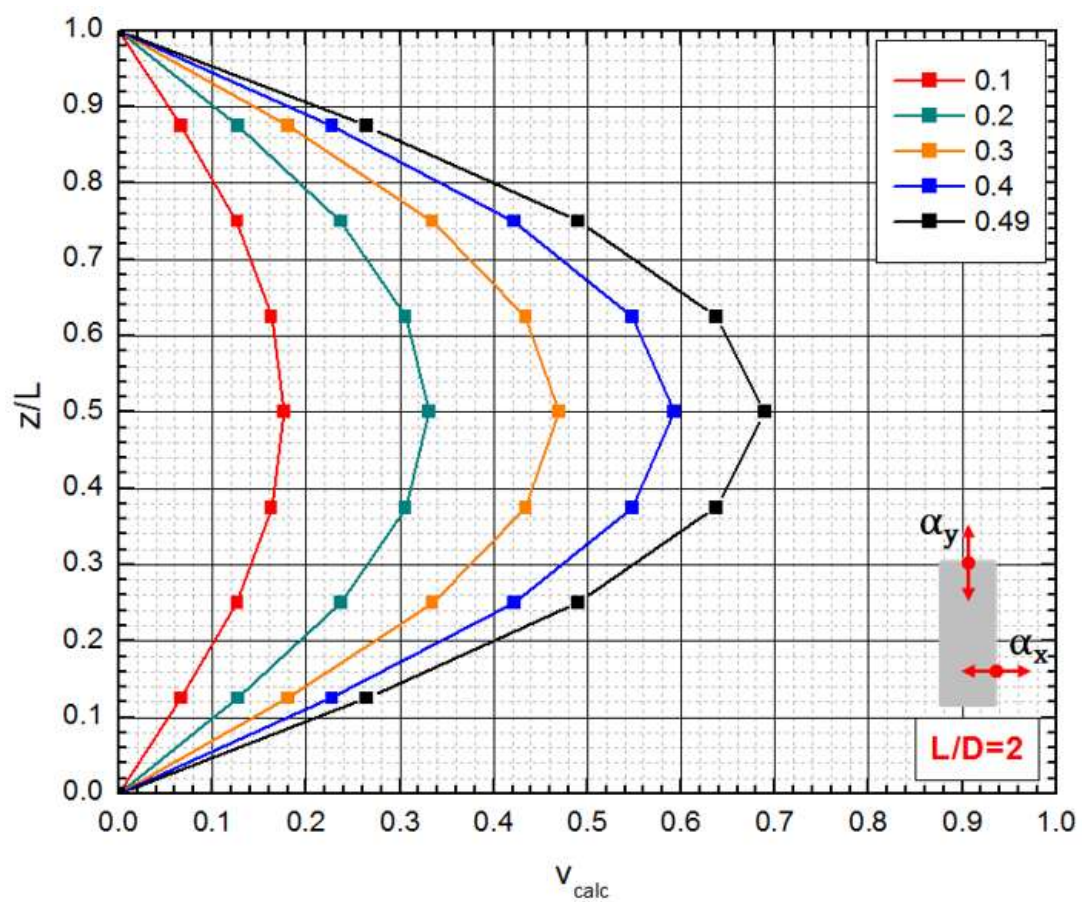
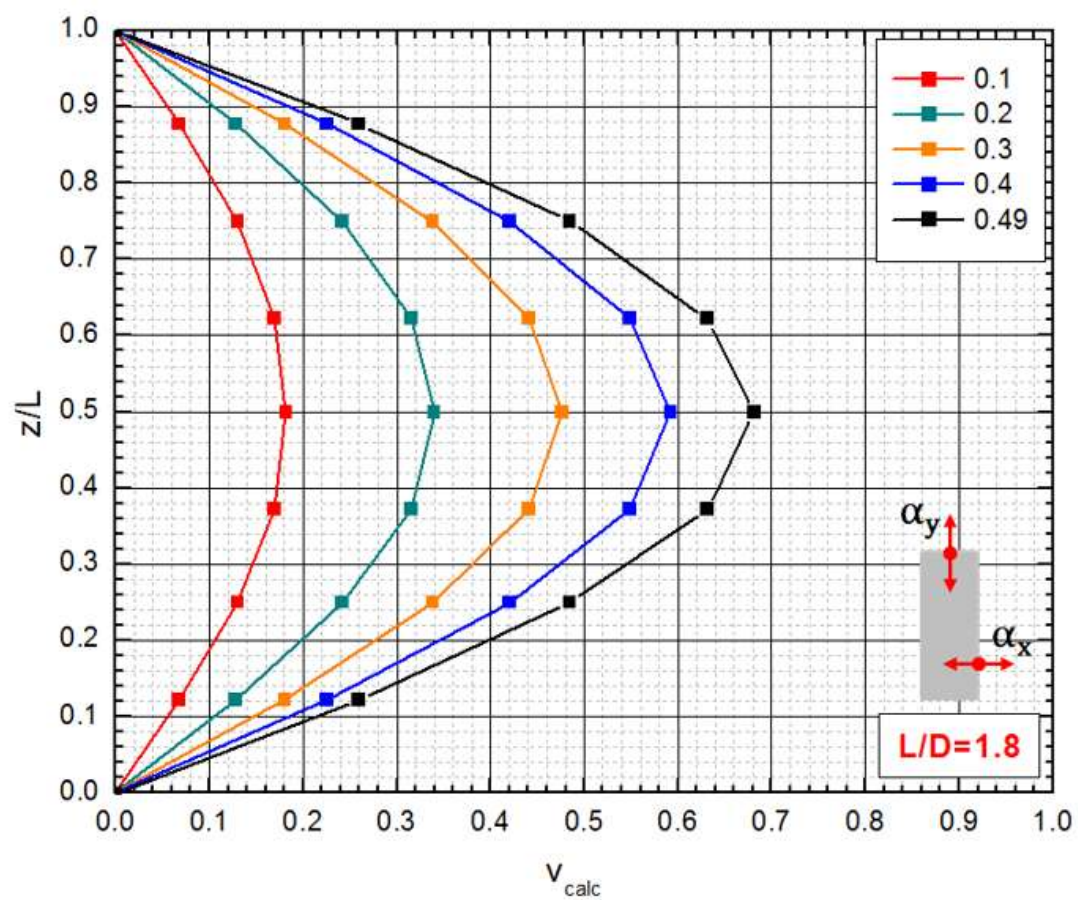
Vs= 100m/s	Theoretical Poisson's Ratio	dt (s)	N	fmax (Hz)	Height L (m)	Diameter D (m)	Theoretical f1	FEM f1	Theoretical/ FEM	Calculated Poisson's Ratio			
										z=0.5L	z=0.62L	z=0.75L	z=0.88L
L/D= 2.5	0,10	0,00025	512	2000	0,25	0,10	296,65	296,88	0,9992	0,169	0,154	0,117	0,064
	0,20	0,00025	512	2000	0,25	0,10	309,84	308,59	1,0040	0,324	0,298	0,229	0,124
	0,30	0,00025	512	2000	0,25	0,10	322,49	320,32	1,0068	0,469	0,433	0,332	0,180
	0,40	0,00025	512	2000	0,25	0,10	334,66	328,13	1,0199	0,603	0,558	0,428	0,232
	0,49	0,00025	512	2000	0,25	0,10	345,25	335,94	1,0277	0,715	0,661	0,508	0,275
L/D= 3.0										z=0.5L	z=0.62L	z=0.75L	z=0.87L
	0,10	0,00025	256	2000	0,30	0,10	247,21	246,09	1,0045	0,165	0,154	0,118	0,066
	0,20	0,00025	256	2000	0,30	0,10	258,20	257,81	1,0015	0,322	0,300	0,229	0,115
	0,30	0,00025	256	2000	0,30	0,10	268,74	265,63	1,0117	0,472	0,440	0,343	0,190
	0,40	0,00025	256	2000	0,30	0,10	278,89	277,34	1,0056	0,614	0,573	0,436	0,248
L/D= 4.0	0,49	0,00025	256	2000	0,30	0,10	287,71	281,25	1,0230	0,735	0,686	0,521	0,297
										z=0.5L	z=0.62L	z=0.75L	z=0.87L
	0,10	0,001	512	500	0,40	0,10	185,40	185,54	0,9993	0,161	0,149	0,115	0,062
	0,20	0,001	512	500	0,40	0,10	193,65	193,35	1,0015	0,317	0,294	0,226	0,121
	0,30	0,001	512	500	0,40	0,10	201,56	201,17	1,0019	0,469	0,433	0,332	0,180
L/D= 5.0	0,40	0,001	512	500	0,40	0,10	209,17	207,03	1,0103	0,620	0,573	0,439	0,237
	0,49	0,001	512	500	0,40	0,10	215,78	212,89	1,0136	0,749	0,692	0,530	0,286
										z=0.5L	z=0.6L	z=0.75L	z=0.91L
	0,10	0,001	512	500	0,50	0,10	148,32	148,44	0,9992	0,159	0,150	0,113	0,043
	0,20	0,001	512	500	0,50	0,10	154,92	154,30	1,0040	0,316	0,298	0,224	0,085
	0,30	0,001	512	500	0,50	0,10	161,25	160,16	1,0068	0,470	0,443	0,333	0,126
	0,40	0,001	512	500	0,50	0,10	167,33	166,02	1,0079	0,622	0,585	0,441	0,167
	0,49	0,001	512	500	0,50	0,10	172,63	171,88	1,0044	0,755	0,711	0,536	0,203

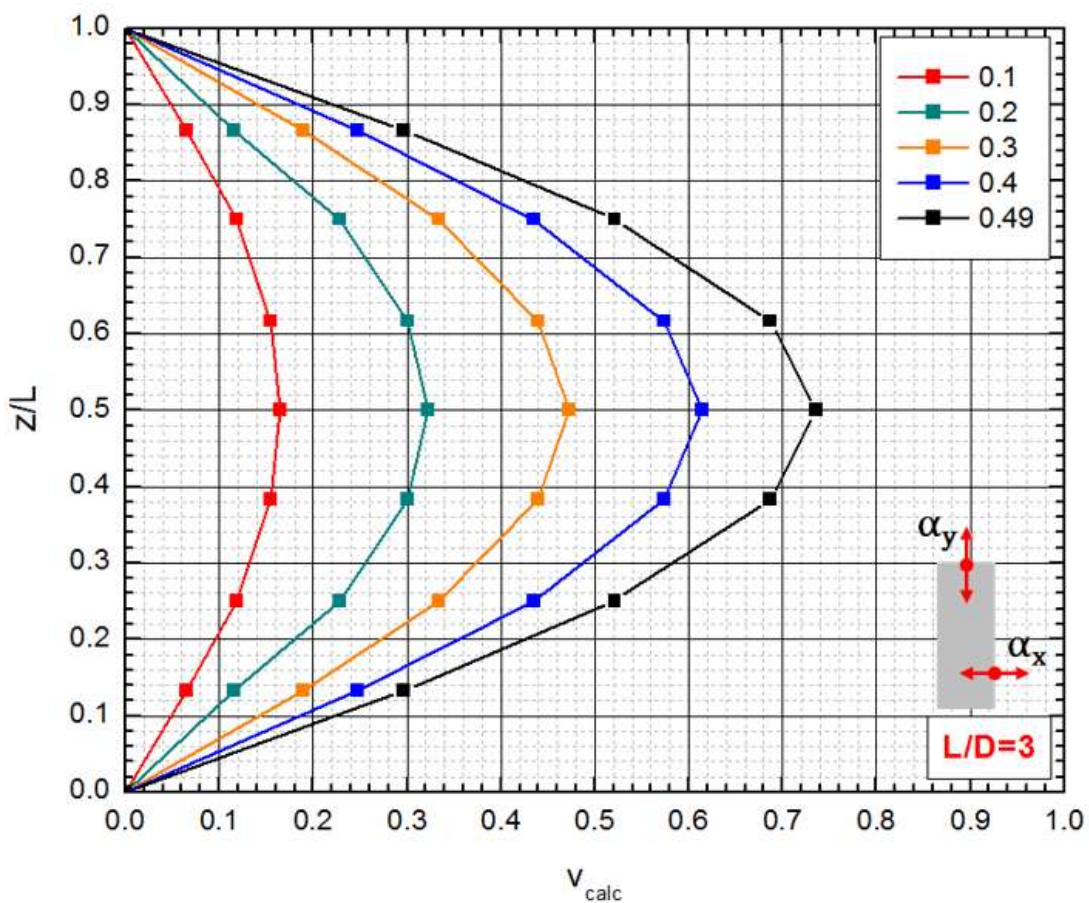
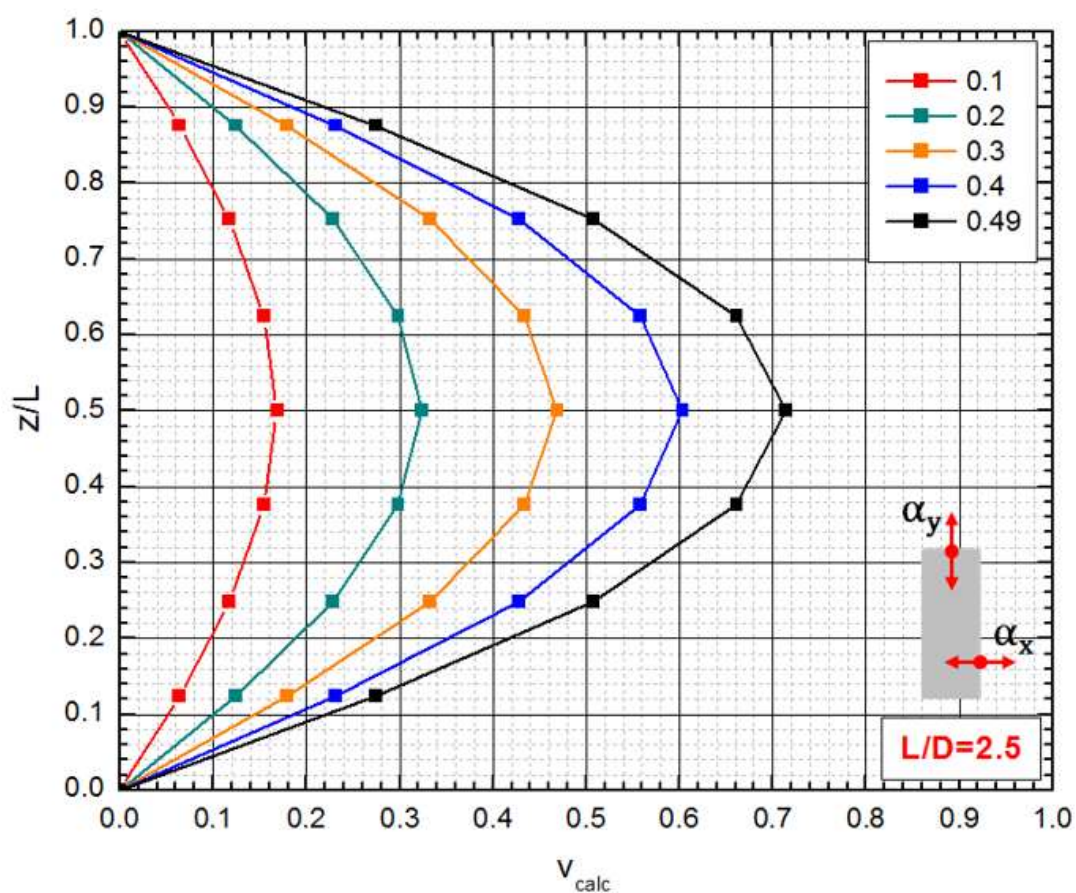
Διαγράμματα δείκτη Poisson – z/L (Μεθοδολογία 1)

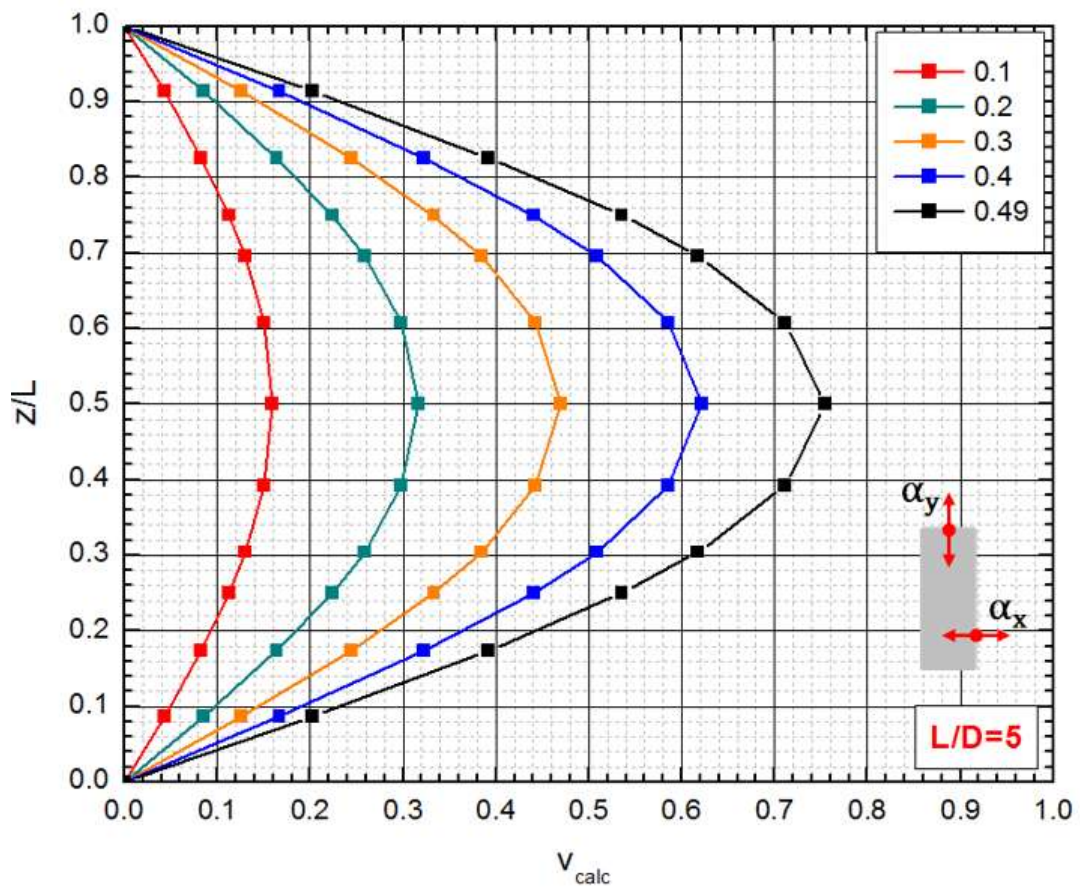
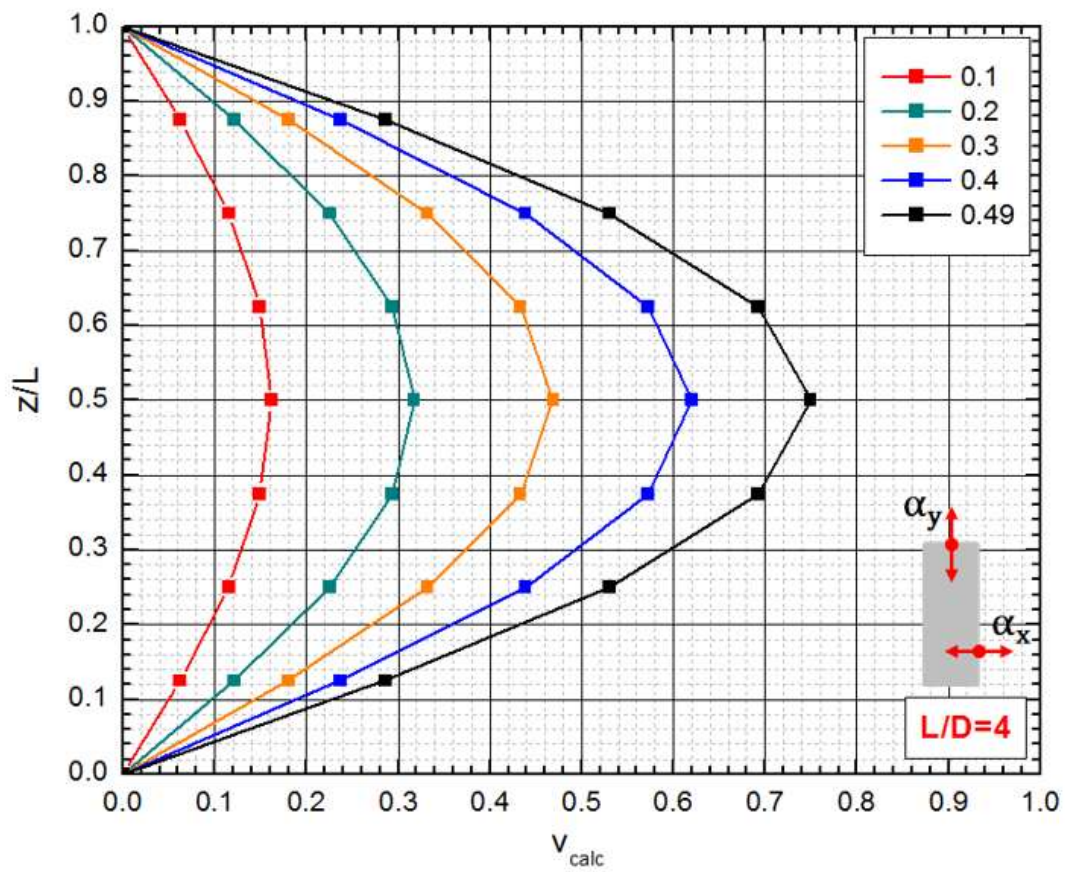




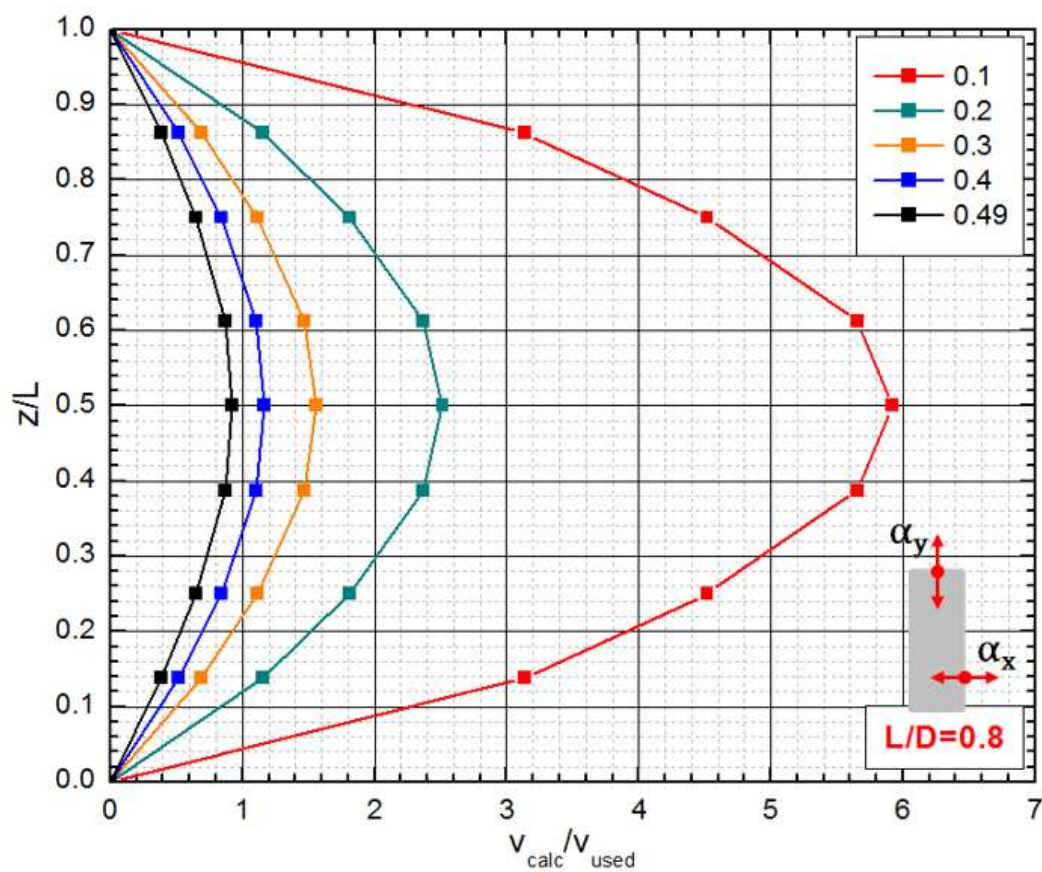
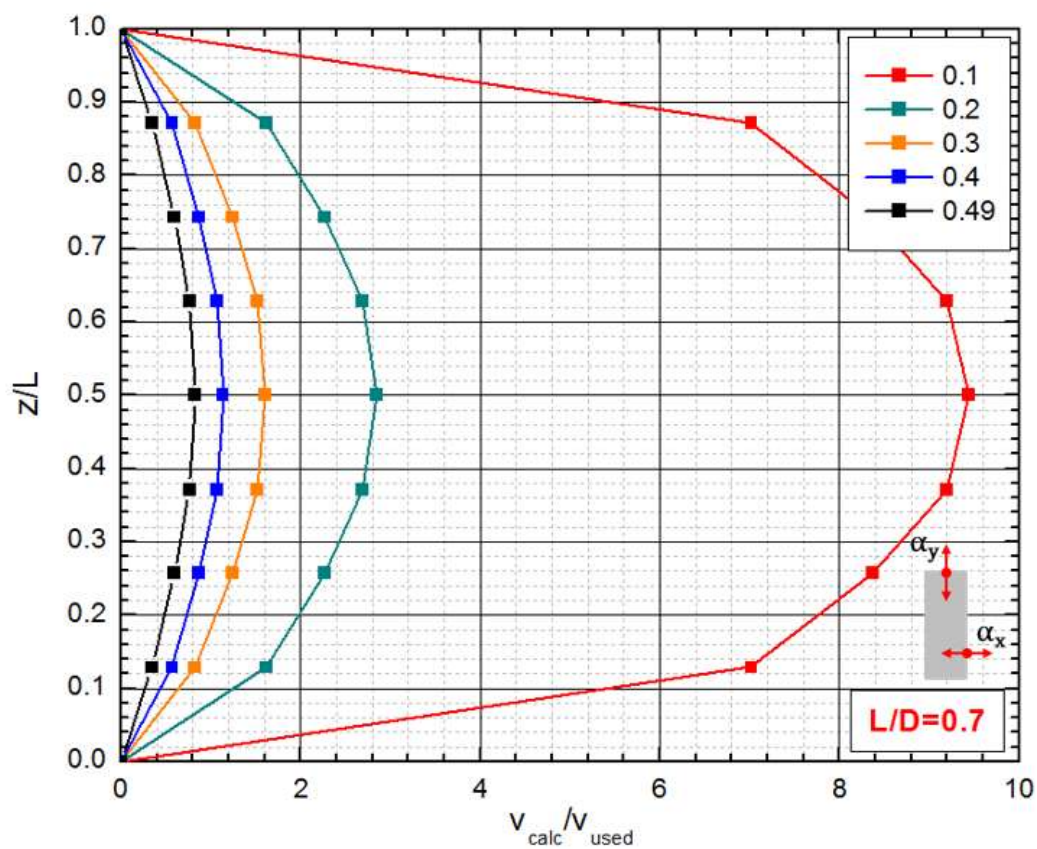


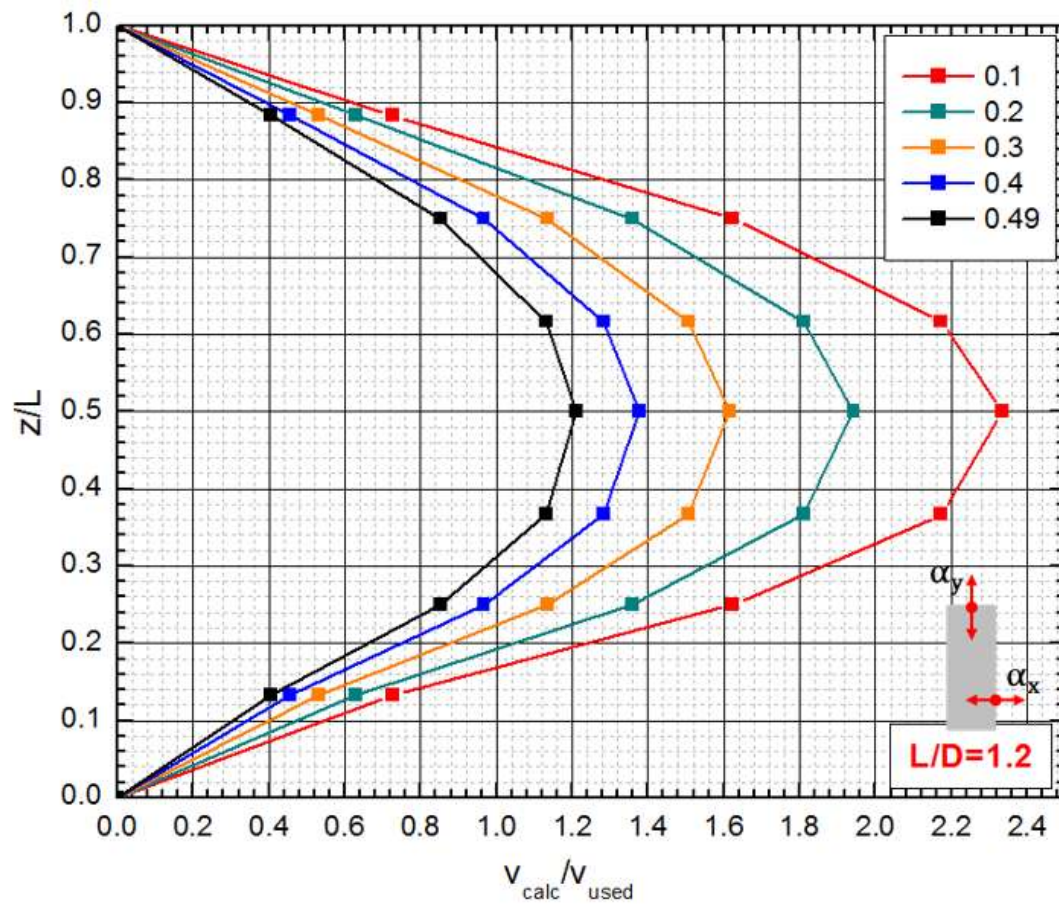
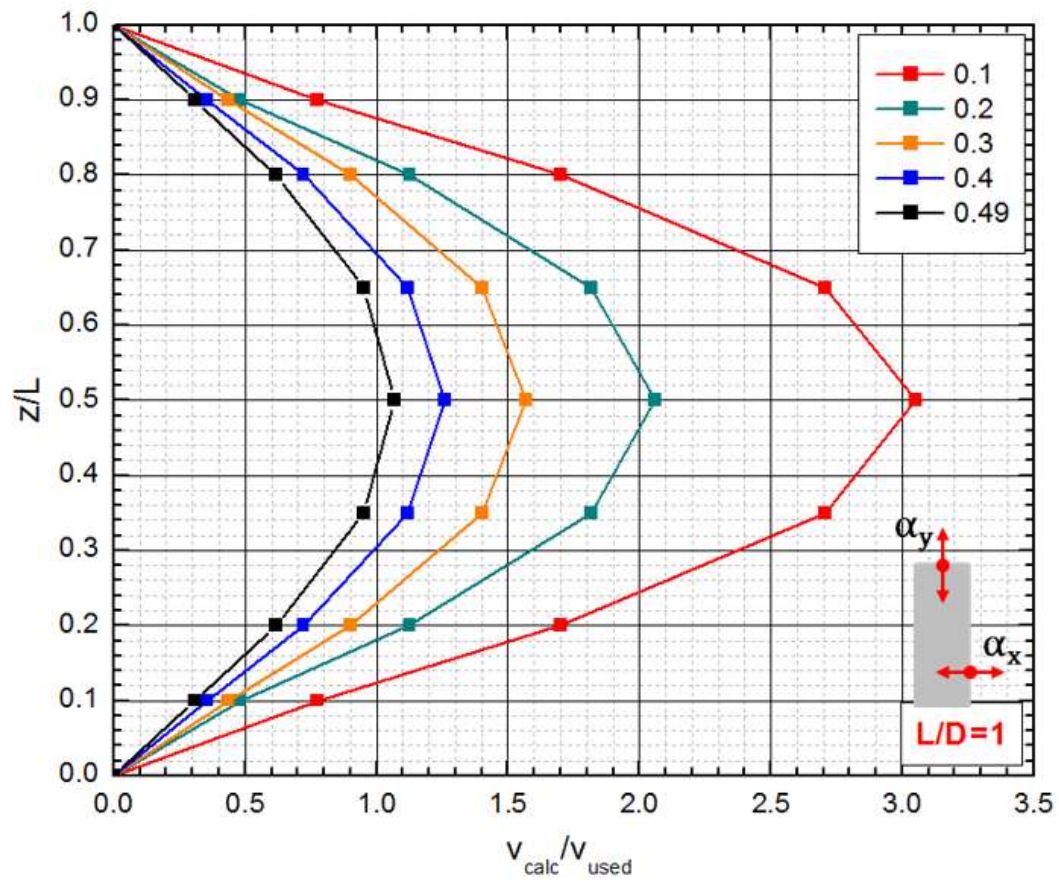


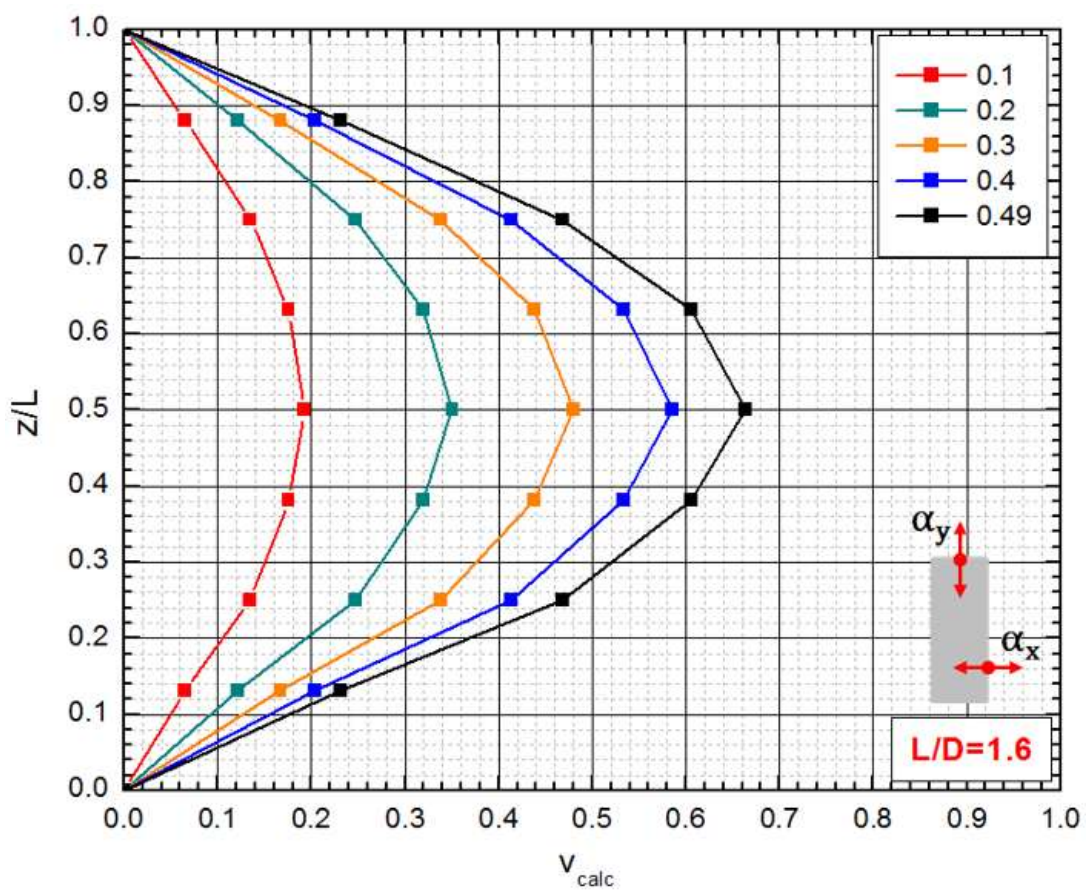
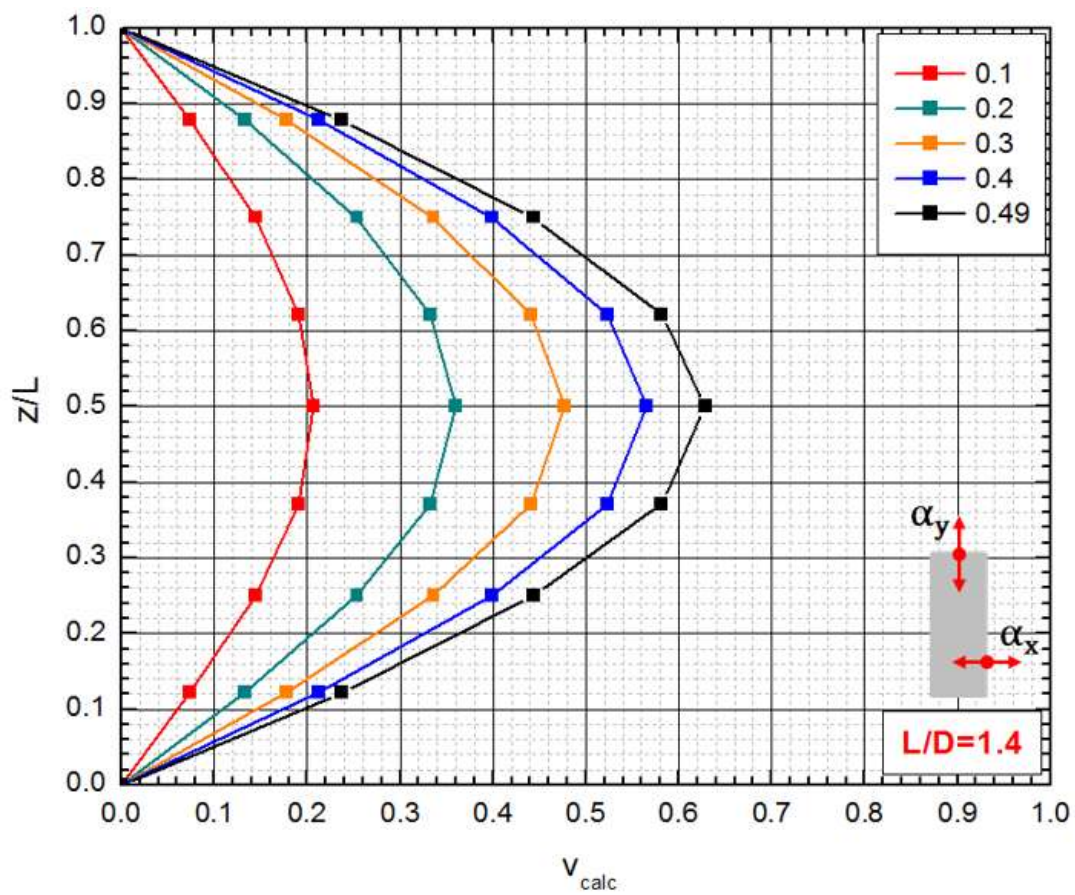


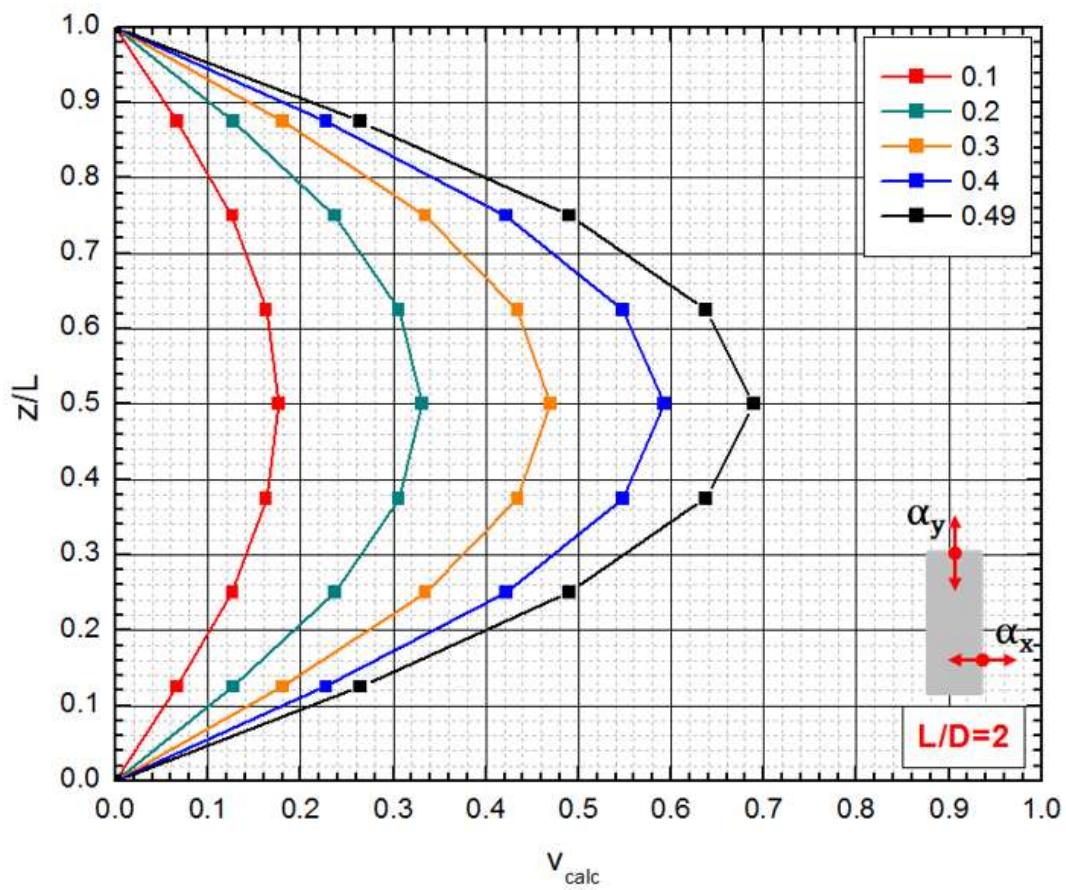
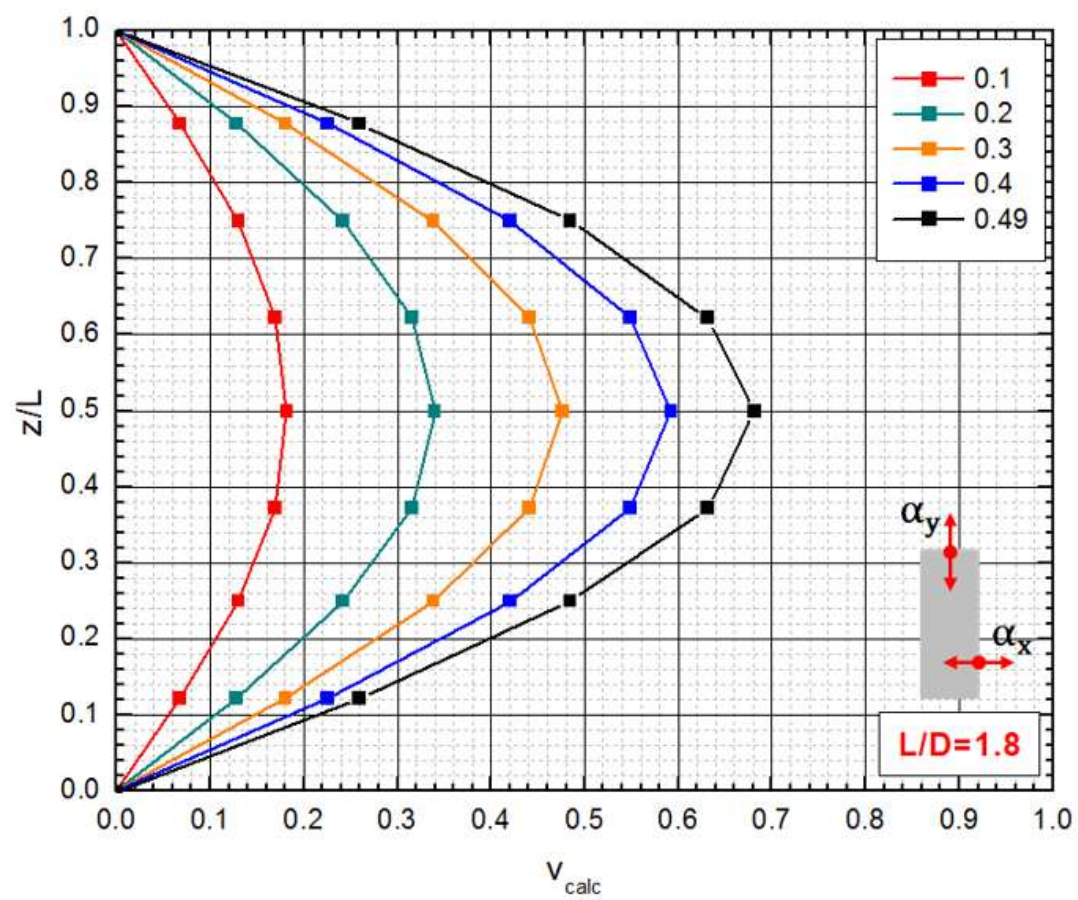


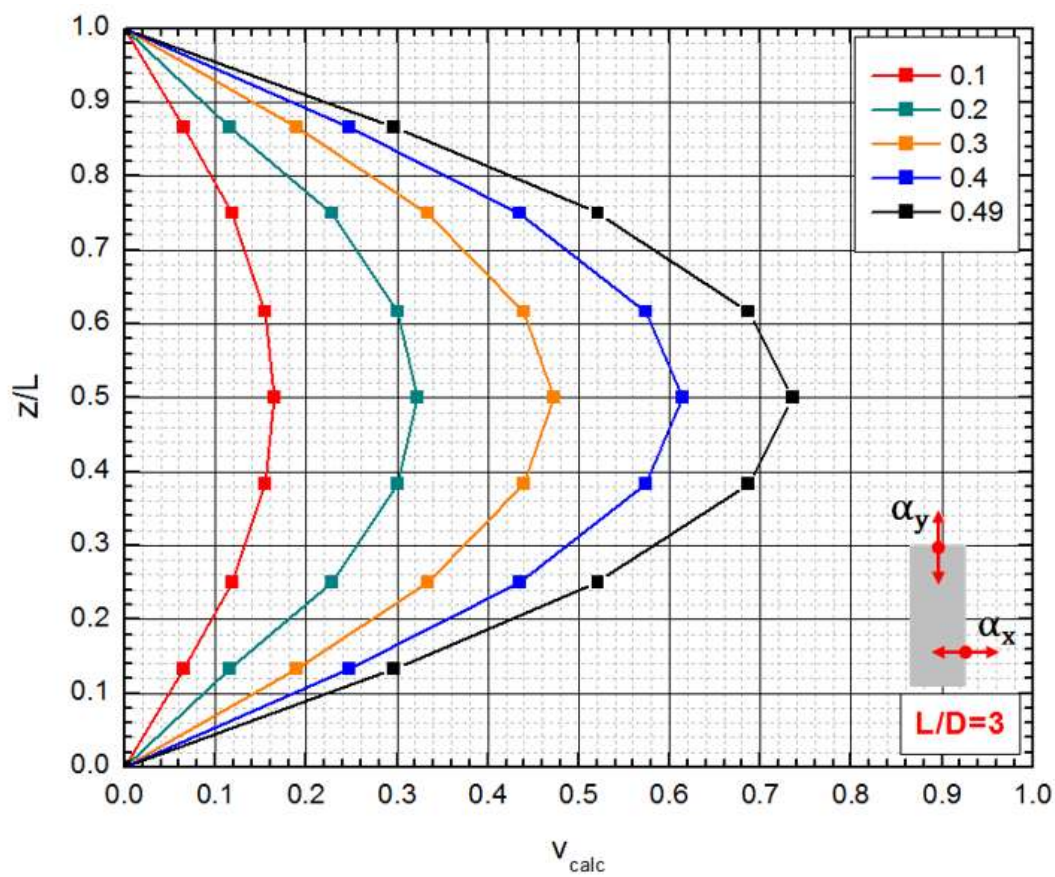
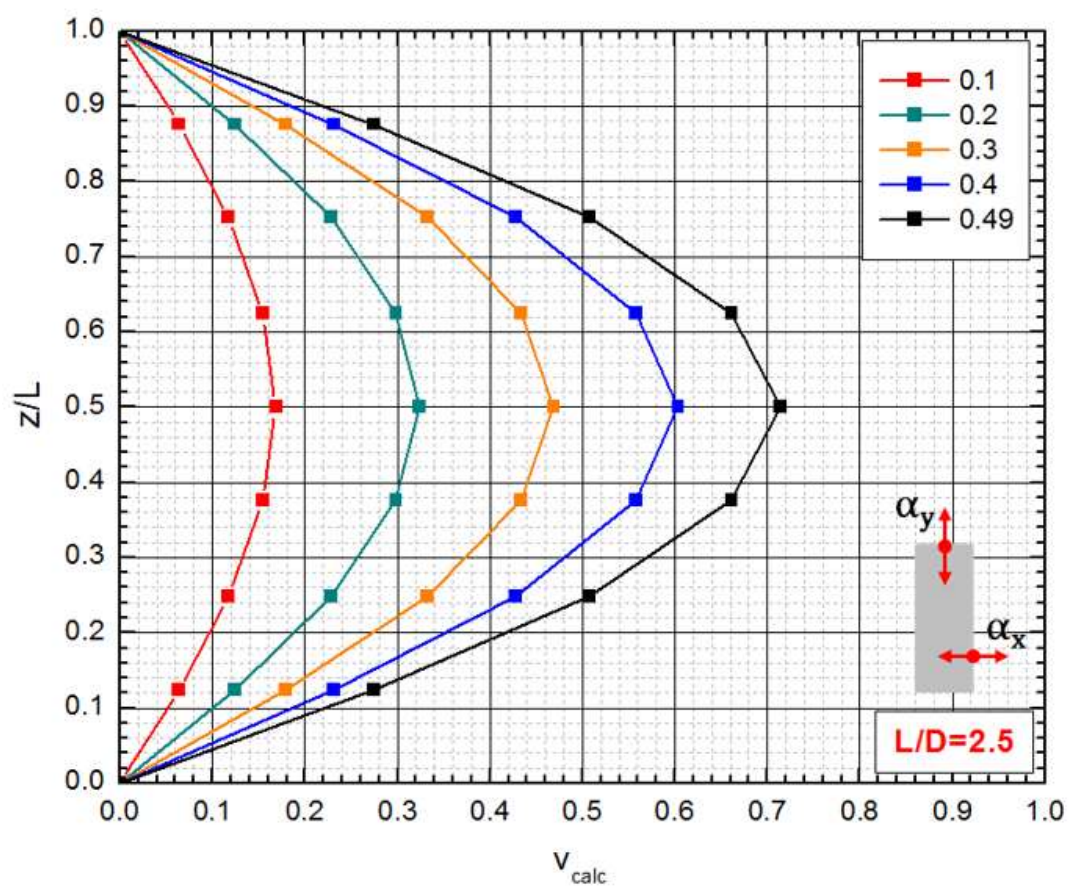
Κανονικοποιημένα διαγράμματα δείκτη Poisson – z/L (Μεθοδολογία 1)

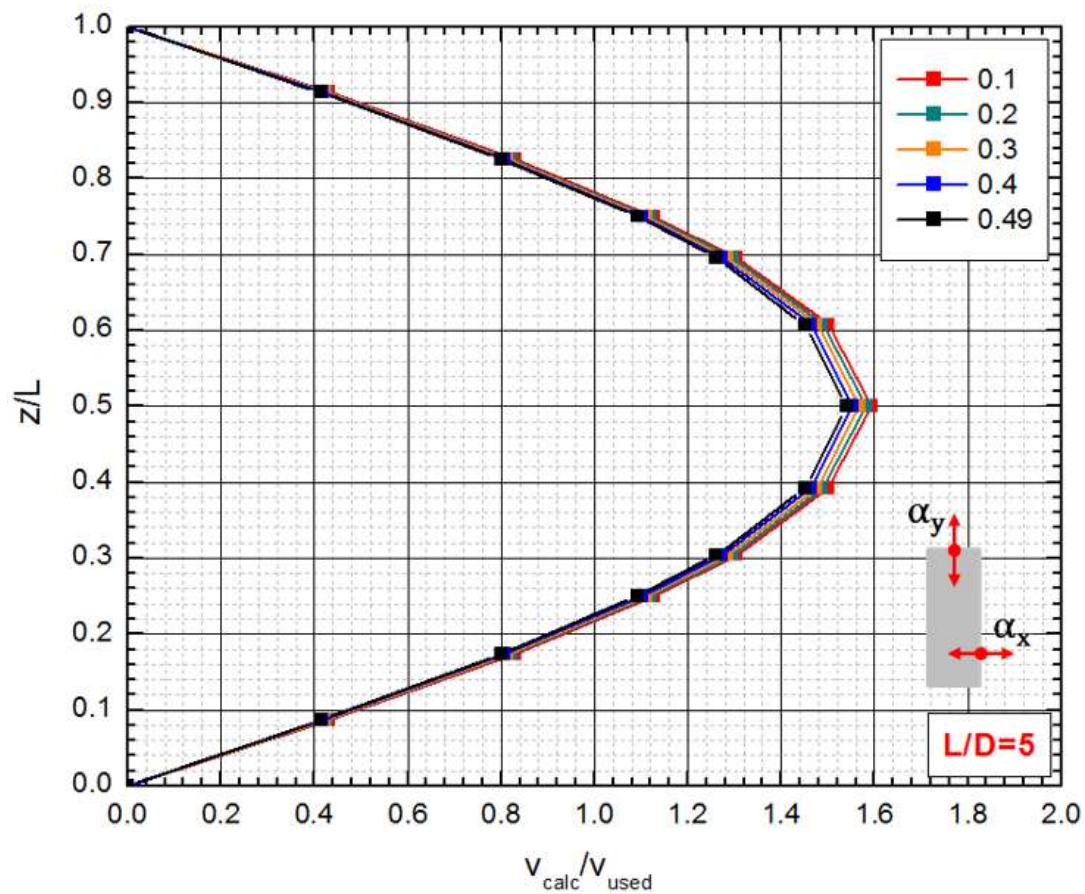
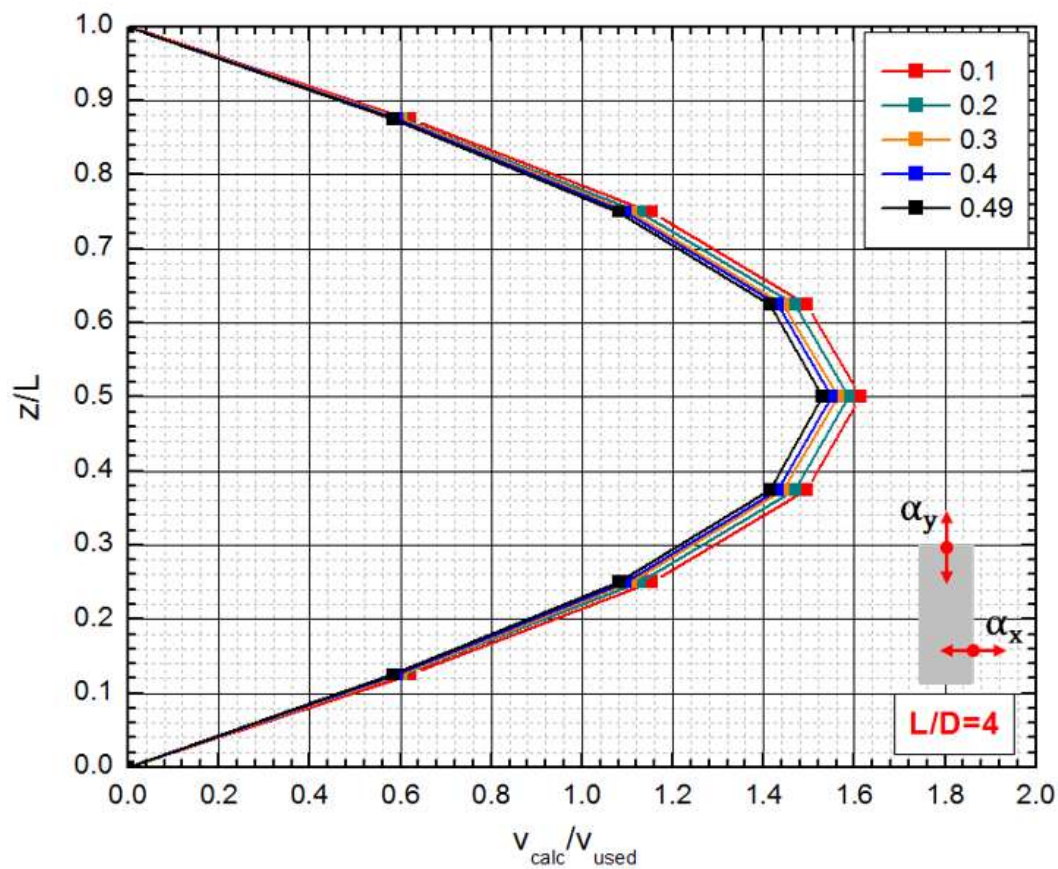












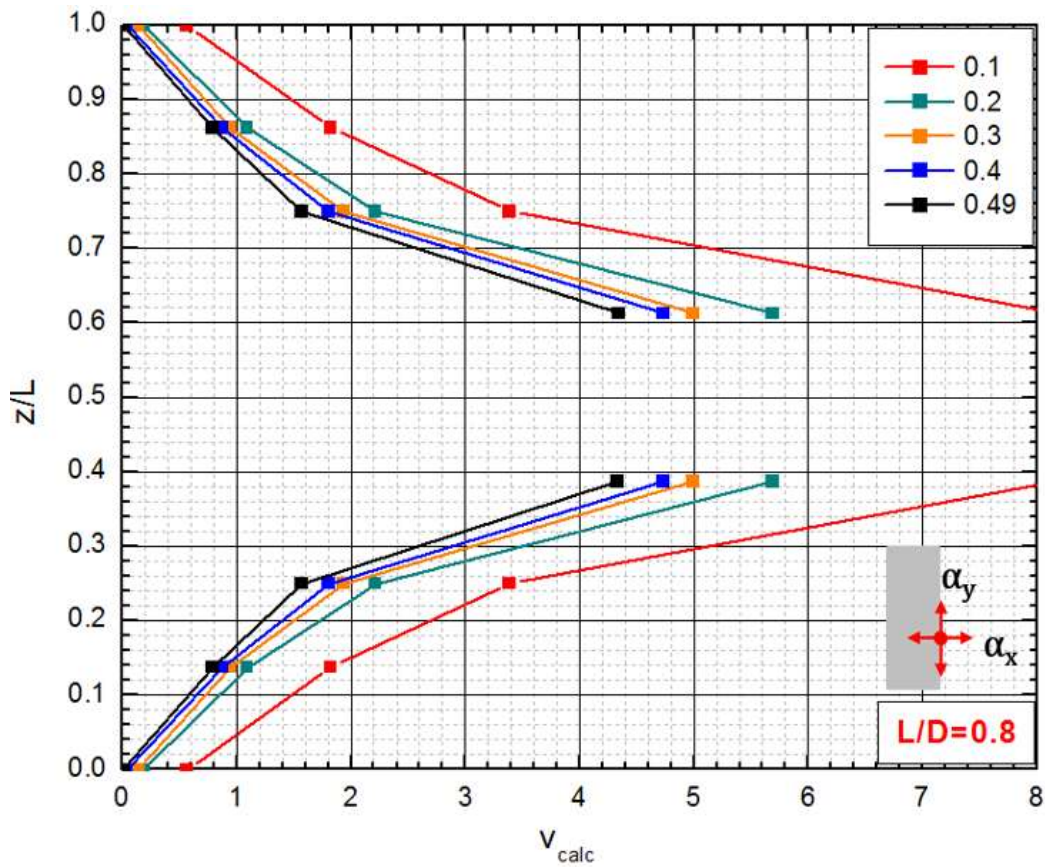
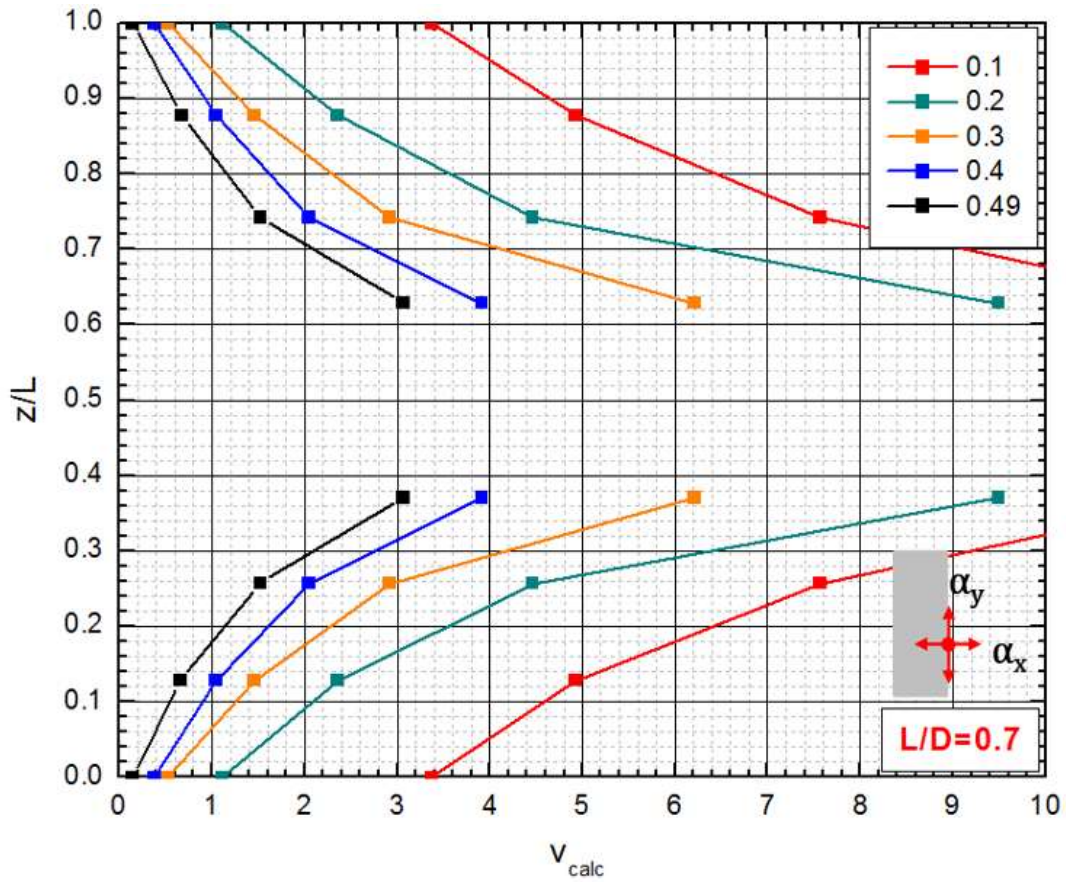
Πινακοποιημένα αποτελέσματα (Μεθοδολογία 2)

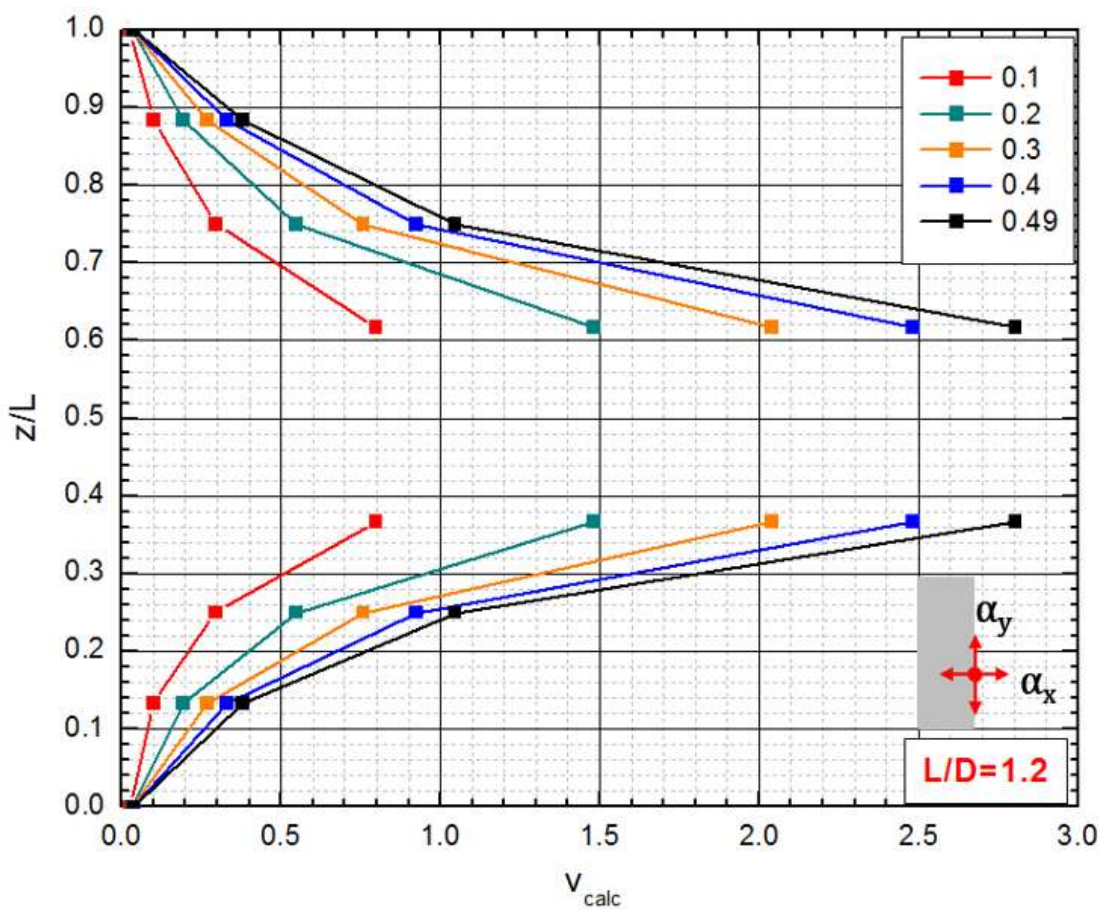
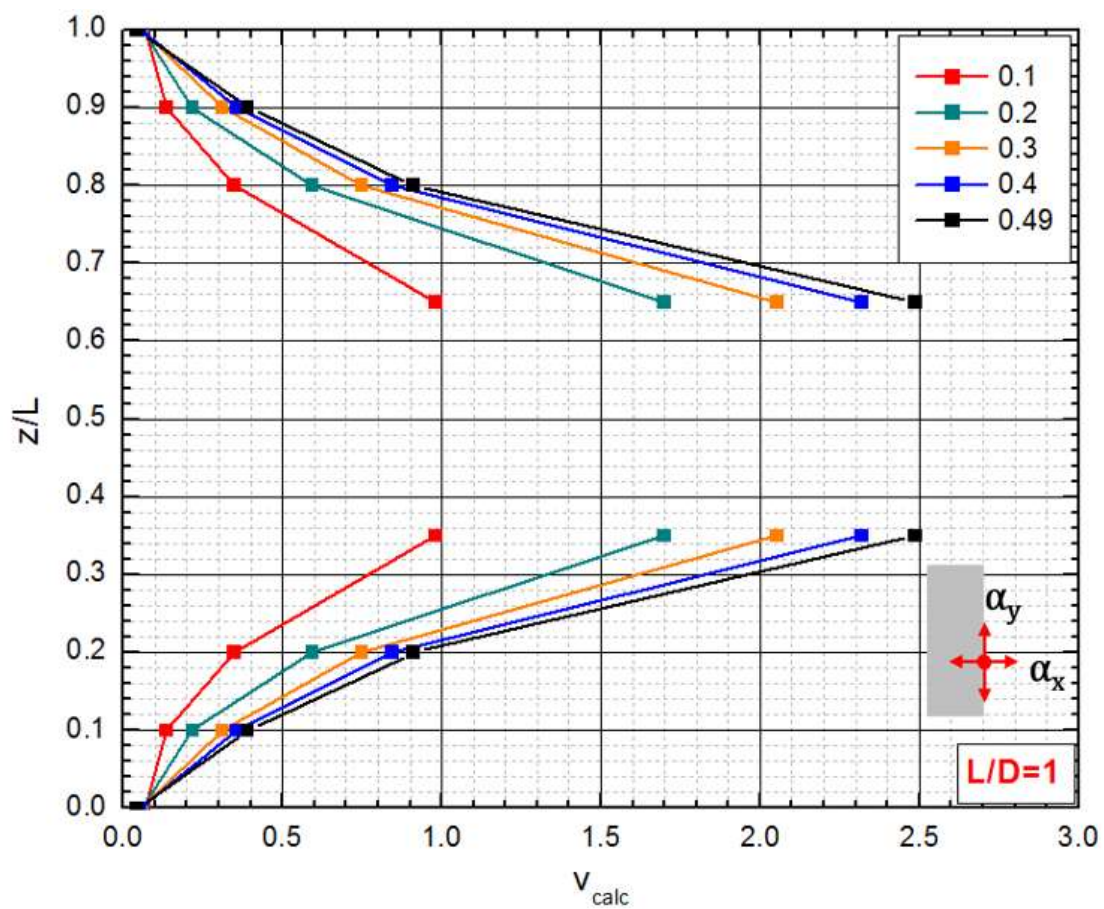
$V_s = 100\text{m/s}$	Theoretical Poisson's Ratio	dt (s)	N	fmax (Hz)	Height L (m)	Diameter D (m)	Theoretical f1	FEM f1	Theoretical/FEM	Calculated Poisson's Ratio			
										z=0.63L	z=0.74L	z=0.87L	z=L
L/D= 0.7	0,10	0,0001	1024	5000	0,07	0,10	1059,46	888,67	1,1922	11,817	7,571	4,931	3,375
	0,20	0,0001	1024	5000	0,07	0,10	1106,57	917,96	1,2055	9,492	4,464	2,355	1,113
	0,30	0,0001	1024	5000	0,07	0,10	1151,75	927,73	1,2415	6,210	2,918	1,453	0,525
	0,40	0,0001	1024	5000	0,07	0,10	1195,23	927,73	1,2883	3,915	2,050	1,043	0,378
	0,49	0,0001	1024	5000	0,07	0,10	1233,05	937,00	1,3160	3,066	1,523	0,678	0,147
L/D= 0.8										z=0.61L	z=0.75L	z=0.86L	z=L
	0,10	0,0001	1024	5000	0,08	0,10	927,02	859,38	1,0787	8,193	3,385	1,823	0,567
	0,20	0,0001	1024	5000	0,08	0,10	968,25	859,38	1,1267	5,689	2,213	1,089	0,184
	0,30	0,0001	1024	5000	0,08	0,10	1007,78	859,38	1,1727	4,989	1,933	0,943	0,137
	0,40	0,0001	1024	5000	0,08	0,10	1045,83	859,38	1,2170	4,930	1,805	0,871	0,040
L/D= 1.0	0,49	0,0001	1024	5000	0,08	0,10	1078,92	859,38	1,2555	4,344	1,560	0,787	0,007
										z=0.65L	z=0.8L	z=0.9L	z=L
	0,10	0,0001	1024	5000	0,10	0,10	741,62	722,66	1,0262	0,981	0,349	0,136	0,068
	0,20	0,0001	1024	5000	0,10	0,10	774,60	732,42	1,0576	1,699	0,594	0,218	0,063
	0,30	0,0001	1024	5000	0,10	0,10	806,23	742,18	1,0863	2,053	0,750	0,311	0,059
L/D= 1.2	0,40	0,0001	1024	5000	0,10	0,10	836,66	742,18	1,1273	2,319	0,846	0,357	0,054
	0,49	0,0001	1024	5000	0,10	0,10	863,13	742,18	1,1630	2,488	0,912	0,391	0,045
										z=0.62L	z=0.75L	z=0.9L	z=L
	0,10	0,0003	1024	2000	0,12	0,10	618,02	613,28	1,0077	0,799	0,294	0,100	0,026
	0,20	0,0003	1024	2000	0,12	0,10	645,50	628,91	1,0264	1,483	0,550	0,193	0,033
L/D= 1.2	0,30	0,0003	1024	2000	0,12	0,10	671,85	636,72	1,0552	2,039	0,758	0,270	0,037
	0,40	0,0003	1024	2000	0,12	0,10	697,22	644,53	1,0817	2,482	0,925	0,332	0,038
	0,49	0,0003	1024	2000	0,12	0,10	719,28	648,44	1,1092	2,805	1,047	0,379	0,038

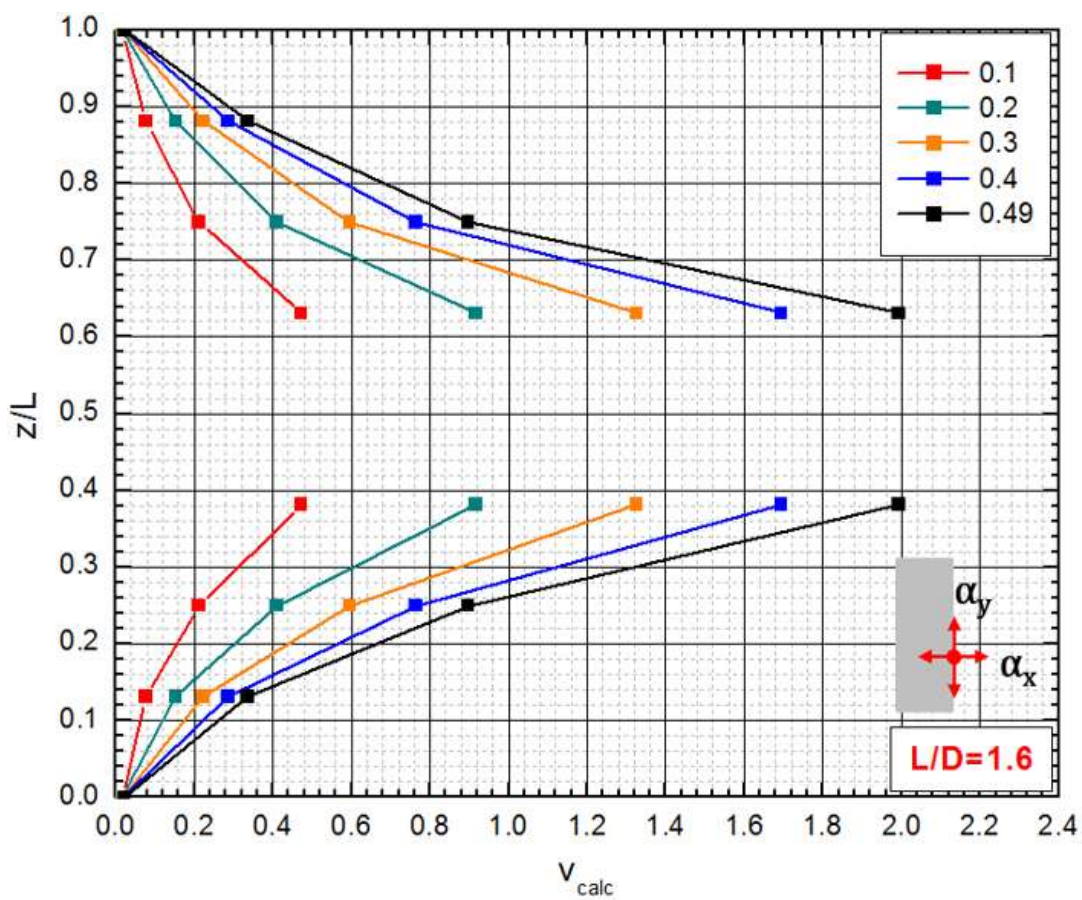
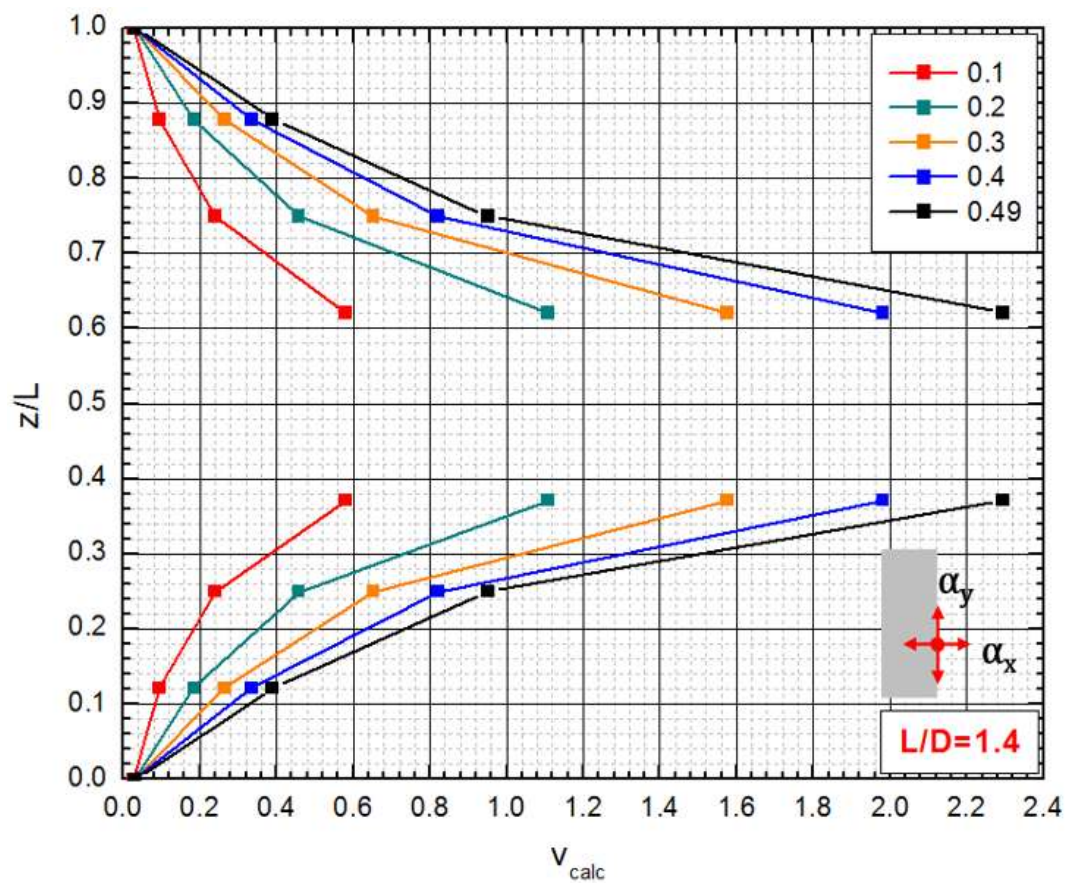
$V_s = 100 \text{ m/s}$	Theoretical Poisson's Ratio	dt (s)	N	fmax (Hz)	Height L (m)	Diameter D (m)	Theoretical f1	FEM f1	Theoretical/FEM	Calculated Poisson's Ratio			
										z=0.62L	z=0.75L	z=0.88L	z=L
L/D= 1.4	0,10	0,0003	1024	2000	0,14	0,10	529,73	525,39	1,0083	0,581	0,240	0,094	0,028
	0,20	0,0003	1024	2000	0,14	0,10	553,28	542,96	1,0190	1,108	0,458	0,185	0,030
	0,30	0,0003	1024	2000	0,14	0,10	575,88	554,68	1,0382	1,575	0,652	0,266	0,031
	0,40	0,0003	1024	2000	0,14	0,10	597,61	564,45	1,0588	1,980	0,821	0,336	0,032
	0,49	0,0003	1024	2000	0,14	0,10	616,52	570,31	1,0810	2,295	0,951	0,390	0,031
L/D= 1.6										z=0.63L	z=0.75L	z=0.88L	z=L
	0,10	0,00025	1024	2000	0,16	0,10	463,51	460,93	1,0056	0,473	0,211	0,077	0,016
	0,20	0,00025	1024	2000	0,16	0,10	484,12	478,51	1,0117	0,917	0,411	0,153	0,018
	0,30	0,00025	1024	2000	0,16	0,10	503,89	490,23	1,0279	1,326	0,596	0,223	0,020
	0,40	0,00025	1024	2000	0,16	0,10	522,91	500,00	1,0458	1,695	0,763	0,286	0,022
L/D= 1.8	0,49	0,00025	1024	2000	0,16	0,10	539,46	507,81	1,0623	1,993	0,897	0,337	0,023
										z=0.62L	z=0.75L	z=0.88L	z=L
	0,10	0,00025	512	2000	0,18	0,10	412,01	410,15	1,0045	0,481	0,200	0,079	0,022
	0,20	0,00025	512	2000	0,18	0,10	430,33	425,78	1,0107	0,936	0,389	0,158	0,020
	0,30	0,00025	512	2000	0,18	0,10	447,90	437,50	1,0238	1,365	0,567	0,232	0,021
L/D= 2.0	0,40	0,00025	512	2000	0,18	0,10	464,81	445,31	1,0438	1,764	0,733	0,301	0,022
	0,49	0,00025	512	2000	0,18	0,10	479,52	453,13	1,0582	2,093	0,870	0,358	0,022
										z=0.625L	z=0.75L	z=0.875L	z=L
	0,10	0,00025	512	2000	0,20	0,10	370,81	367,18	1,0099	0,460	0,193	0,078	0,030
	0,20	0,00025	512	2000	0,20	0,10	387,30	384,75	1,0066	0,896	0,374	0,155	0,025
L/D= 2.0	0,30	0,00025	512	2000	0,20	0,10	403,11	396,10	1,0177	1,315	0,548	0,227	0,025
	0,40	0,00025	512	2000	0,20	0,10	418,33	406,25	1,0297	1,712	0,712	0,295	0,024
	0,49	0,00025	512	2000	0,20	0,10	431,57	414,06	1,0423	2,042	0,849	0,352	0,023

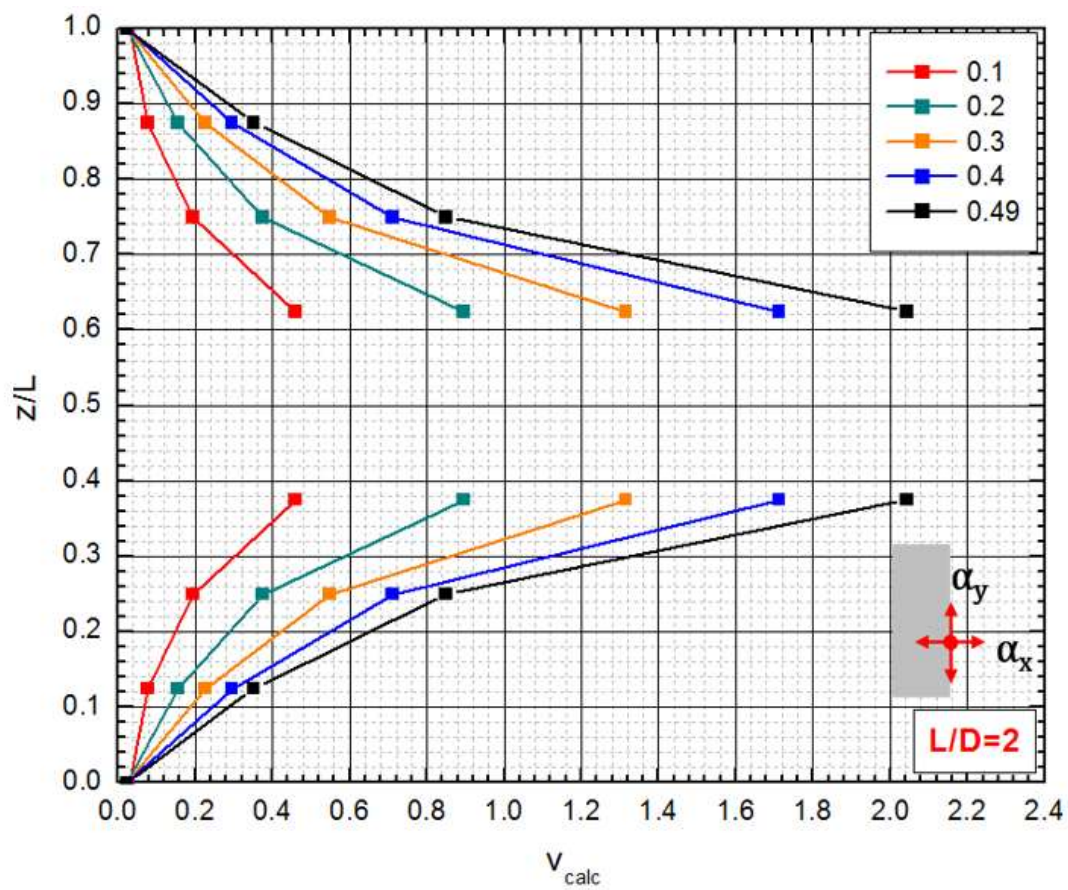
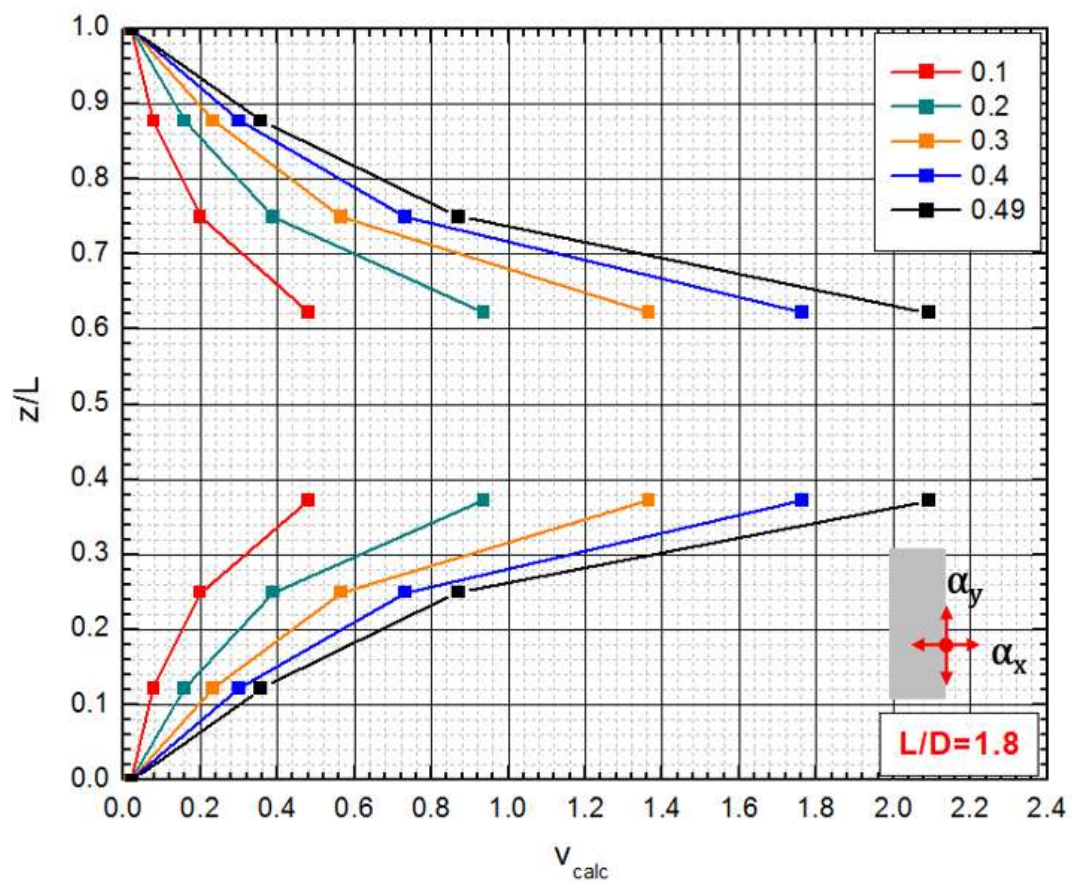
$V_s = 100\text{m/s}$	Theoretical Poisson's Ratio	dt (s)	N	fmax (Hz)	Height L (m)	Diameter D (m)	Theoretical f1	FEM f1	Theoretical/FEM	Calculated Poisson's Ratio			
										z=0.62L	z=0.75L	z=0.88L	z=L
L/D= 2.5	0,10	0,00025	512	2000	0,25	0,10	296,65	296,88	0,9992	0,419	0,174	0,073	0,022
	0,20	0,00025	512	2000	0,25	0,10	309,84	308,59	1,0040	0,835	0,348	0,145	0,024
	0,30	0,00025	512	2000	0,25	0,10	322,49	320,32	1,0068	1,243	0,517	0,215	0,023
	0,40	0,00025	512	2000	0,25	0,10	334,66	328,13	1,0199	1,635	0,679	0,282	0,022
	0,49	0,00025	512	2000	0,25	0,10	345,25	335,94	1,0277	1,977	0,820	0,341	0,020
L/D= 3.0										z=0.62L	z=0.75L	z=0.87L	z=L
	0,10	0,00025	256	2000	0,30	0,10	247,21	246,09	1,0045	0,441	0,173	0,074	0,018
	0,20	0,00025	256	2000	0,30	0,10	258,20	257,81	1,0015	0,871	0,339	0,130	0,017
	0,30	0,00025	256	2000	0,30	0,10	268,74	265,63	1,0117	1,293	0,502	0,220	0,016
	0,40	0,00025	256	2000	0,30	0,10	278,89	277,34	1,0056	1,714	0,664	0,292	0,015
L/D= 4.0	0,49	0,00025	256	2000	0,30	0,10	287,71	281,25	1,0230	2,078	0,804	0,354	0,014
										z=0.62L	z=0.75L	z=0.87L	z=L
	0,10	0,001	512	500	0,40	0,10	185,40	185,54	0,9993	0,398	0,166	0,068	0,015
	0,20	0,001	512	500	0,40	0,10	193,65	193,35	1,0015	0,789	0,328	0,136	0,014
	0,30	0,001	512	500	0,40	0,10	201,56	201,17	1,0019	1,177	0,489	0,202	0,013
L/D= 5.0	0,40	0,001	512	500	0,40	0,10	209,17	207,03	1,0103	1,560	0,647	0,268	0,013
	0,49	0,001	512	500	0,40	0,10	215,78	212,89	1,0136	1,899	0,788	0,326	0,012
										z=0.6L	z=0.75L	z=0.91L	z=L
	0,10	0,001	512	500	0,50	0,10	148,32	148,44	0,9992	0,455	0,162	0,045	0,017
	0,20	0,001	512	500	0,50	0,10	154,92	154,30	1,0040	0,908	0,323	0,090	0,016
	0,30	0,001	512	500	0,50	0,10	161,25	160,16	1,0068	1,358	0,483	0,134	0,016
	0,40	0,001	512	500	0,50	0,10	167,33	166,02	1,0079	1,803	0,642	0,179	0,015
	0,49	0,001	512	500	0,50	0,10	172,63	171,88	1,0044	2,200	0,784	0,218	0,014

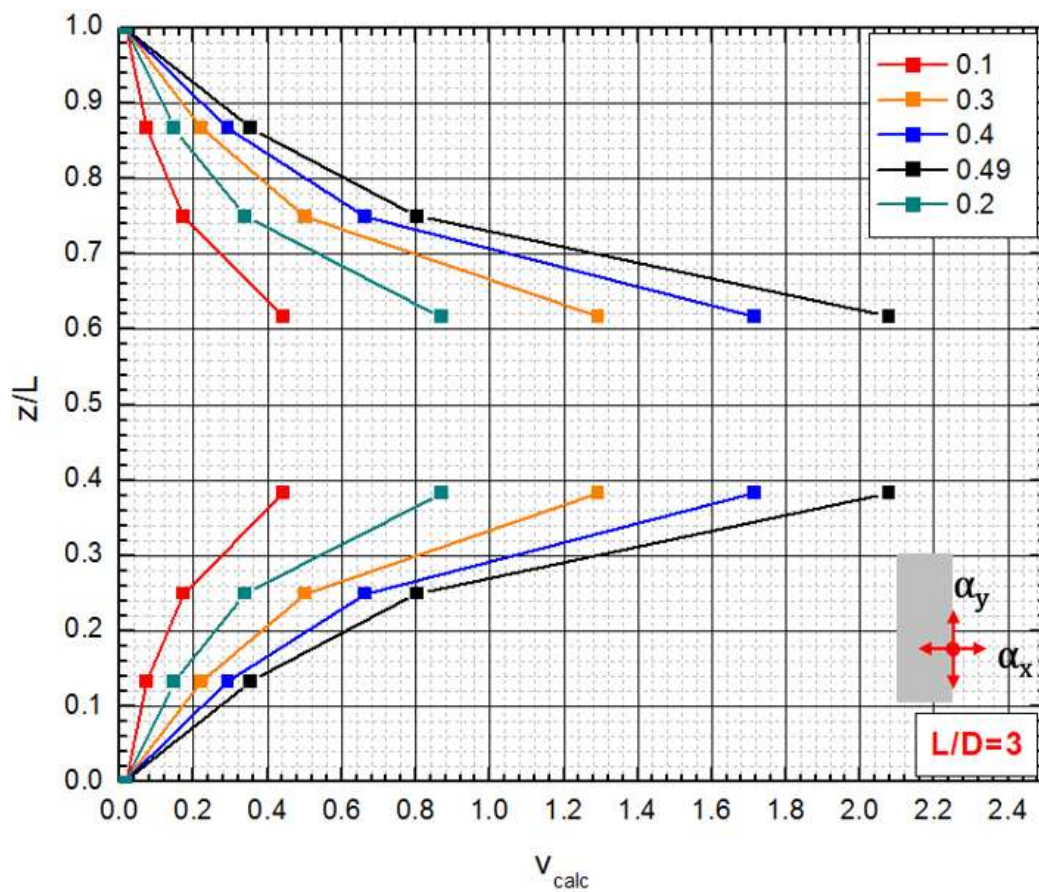
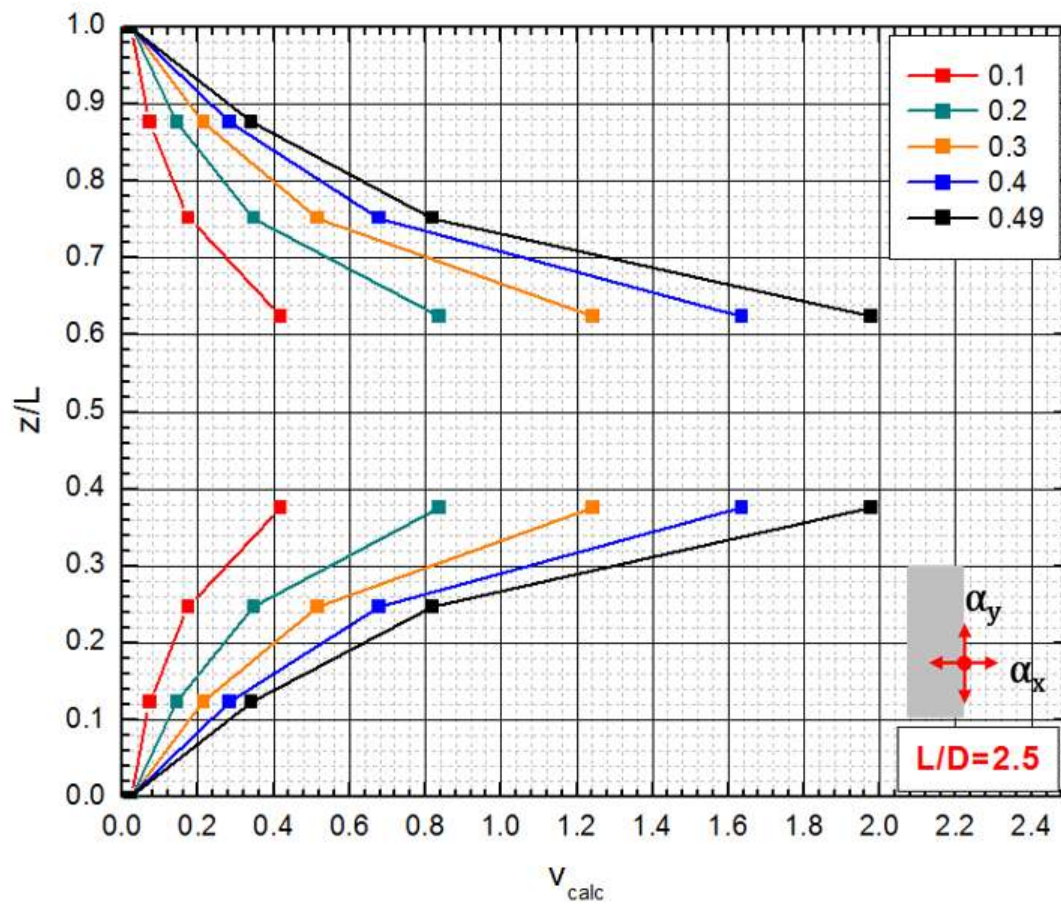
Διαγράμματα δείκτη Poisson – z/L (Μεθοδολογία 2)

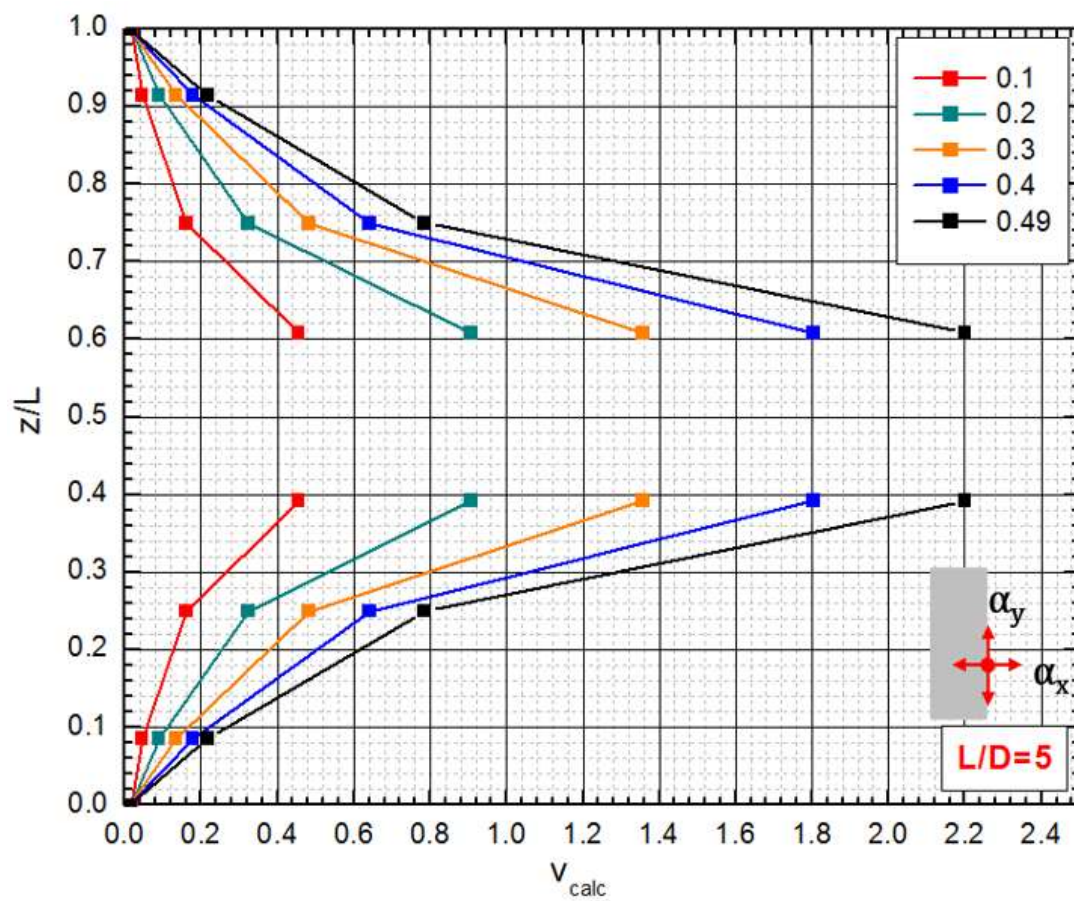
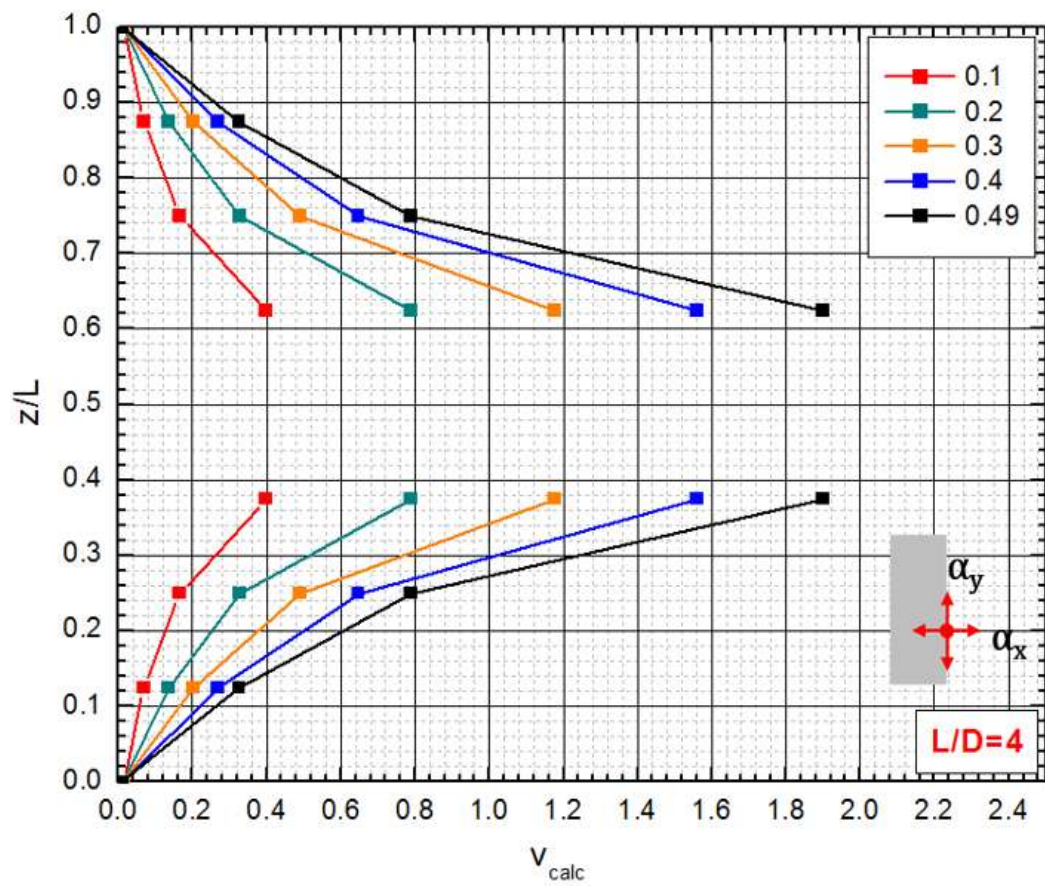




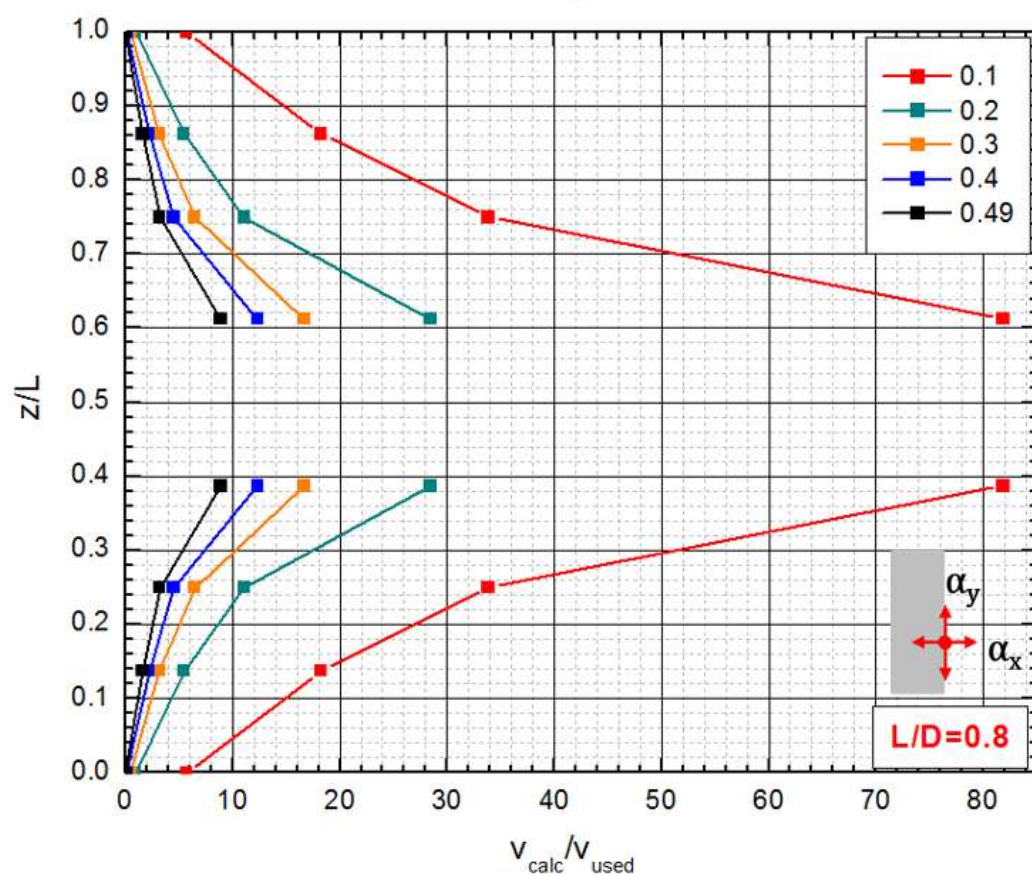
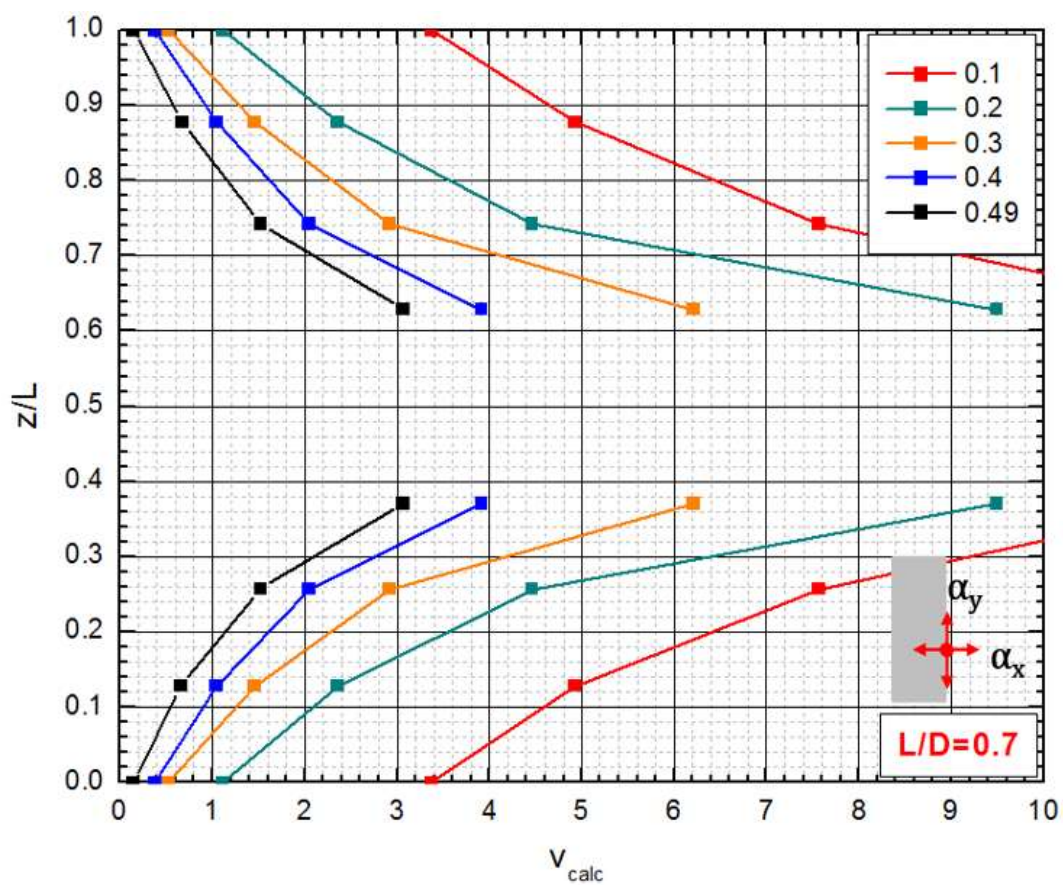


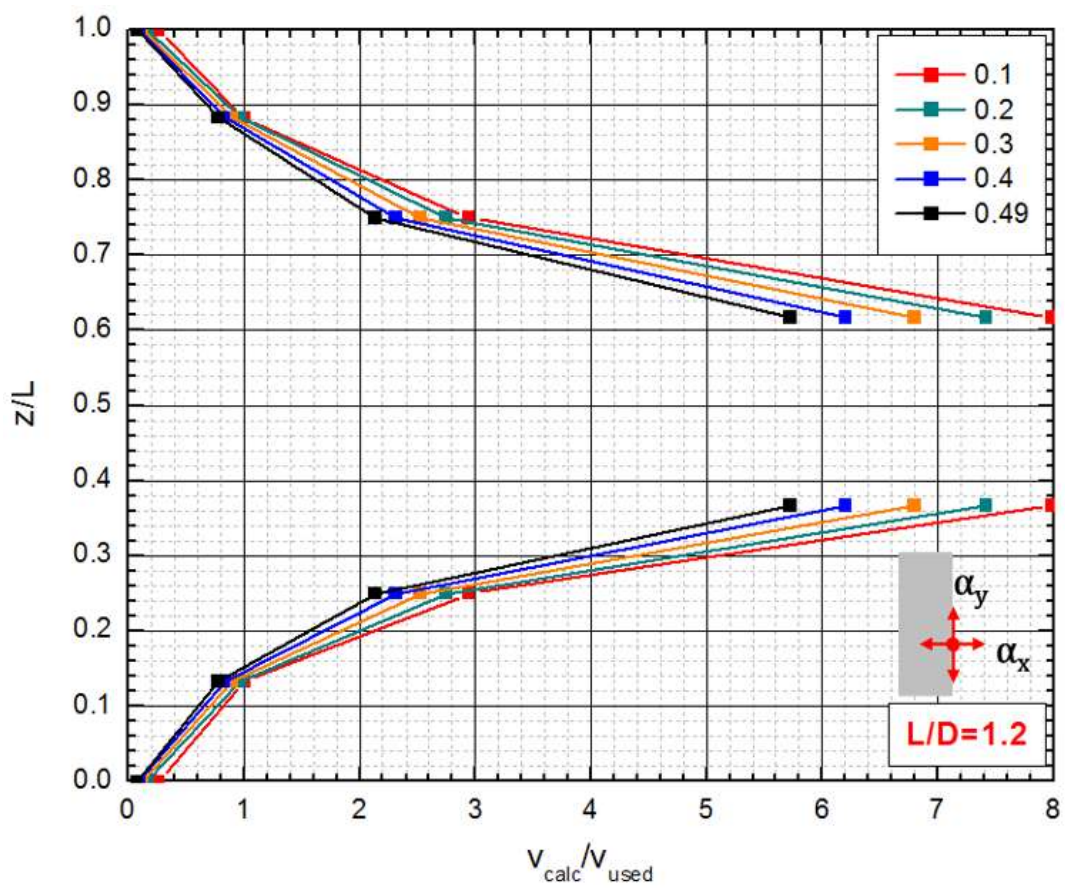
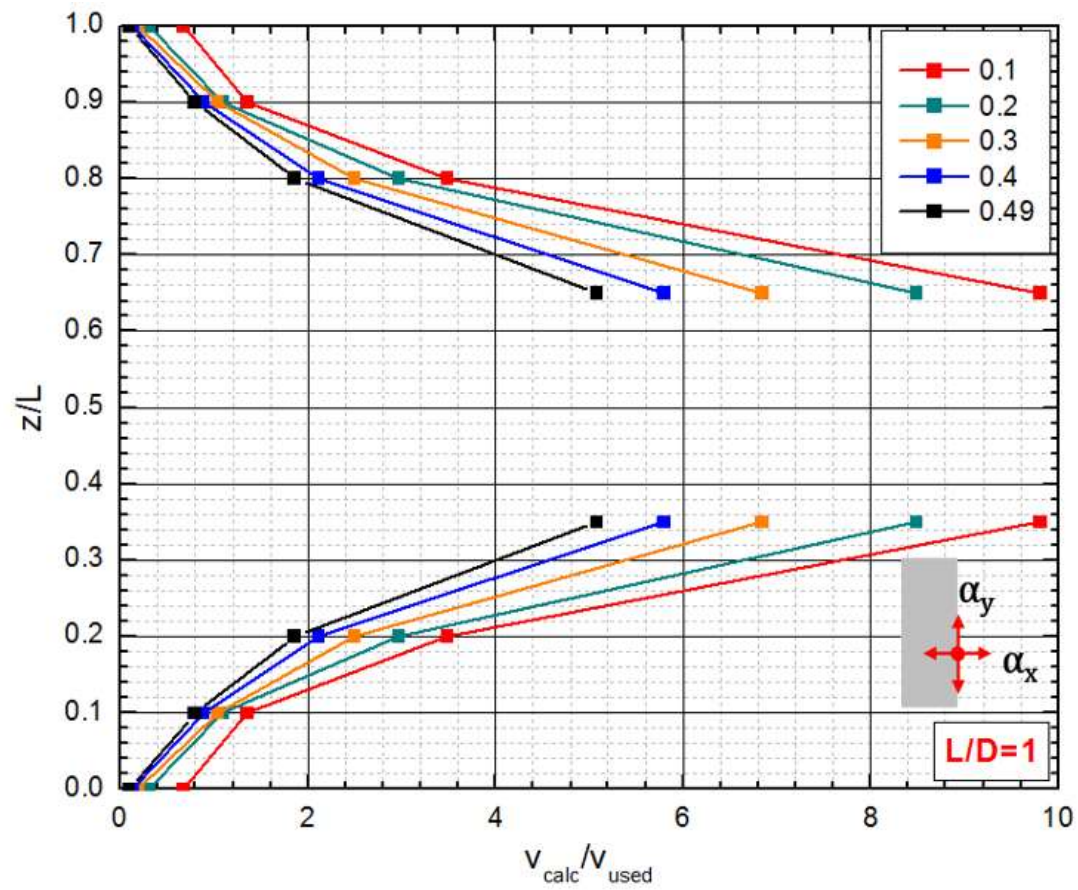


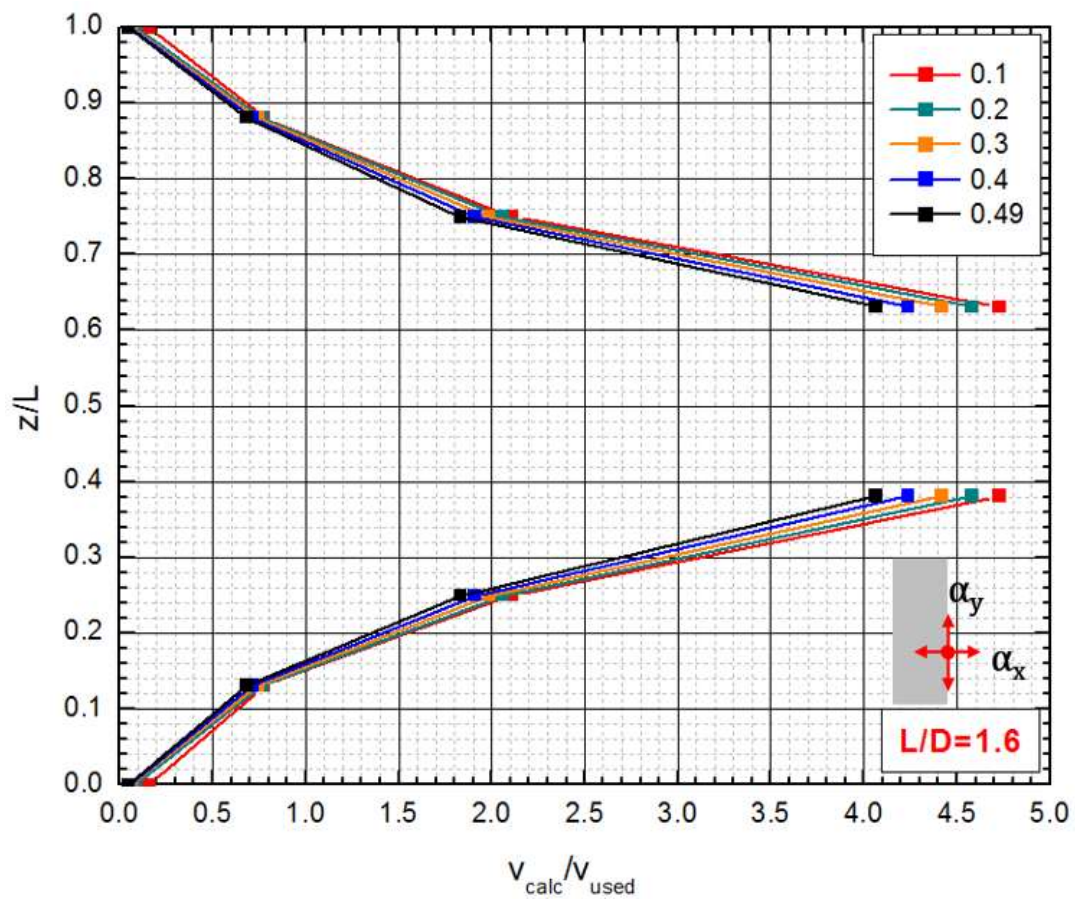
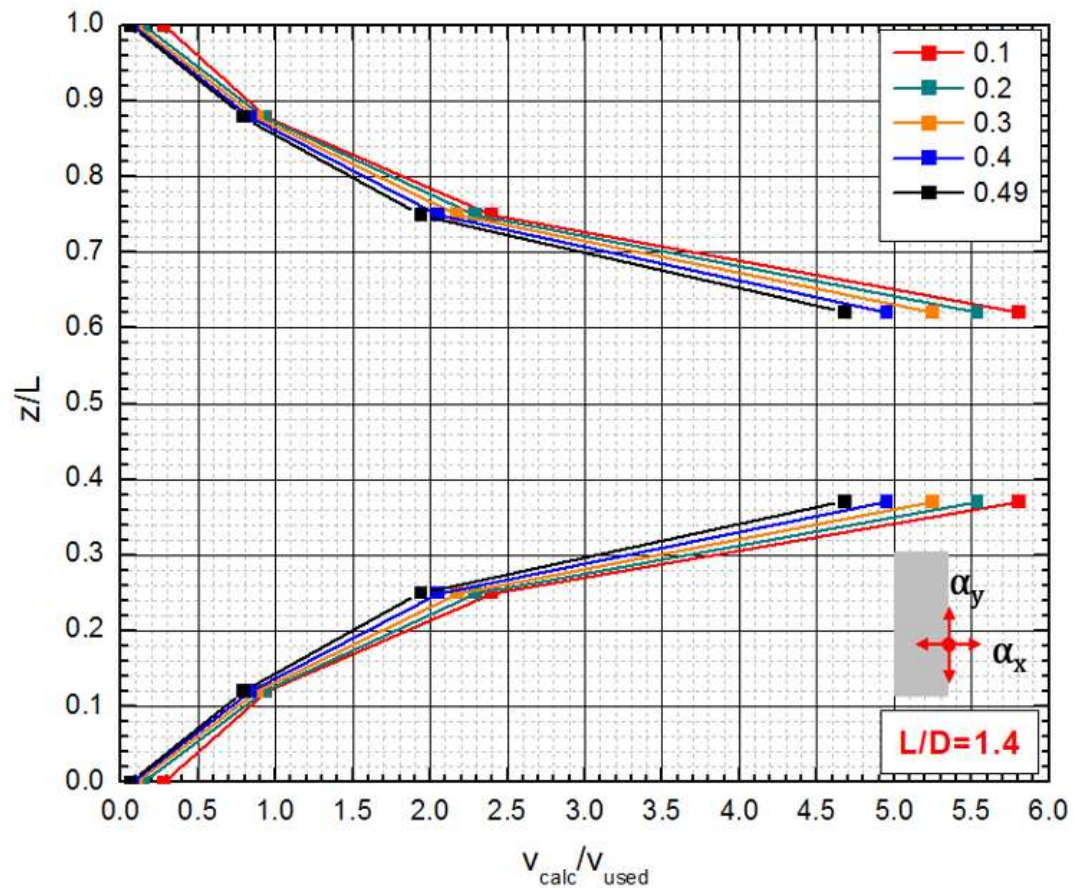


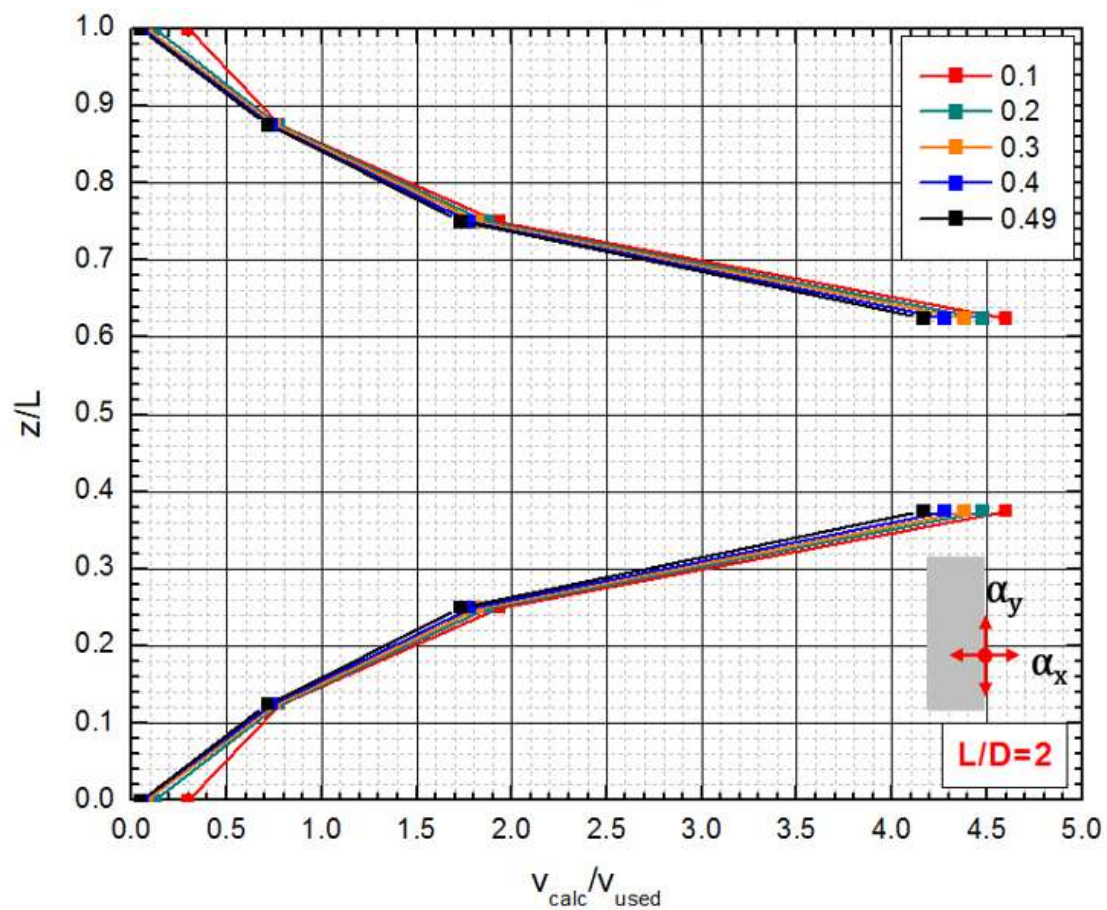
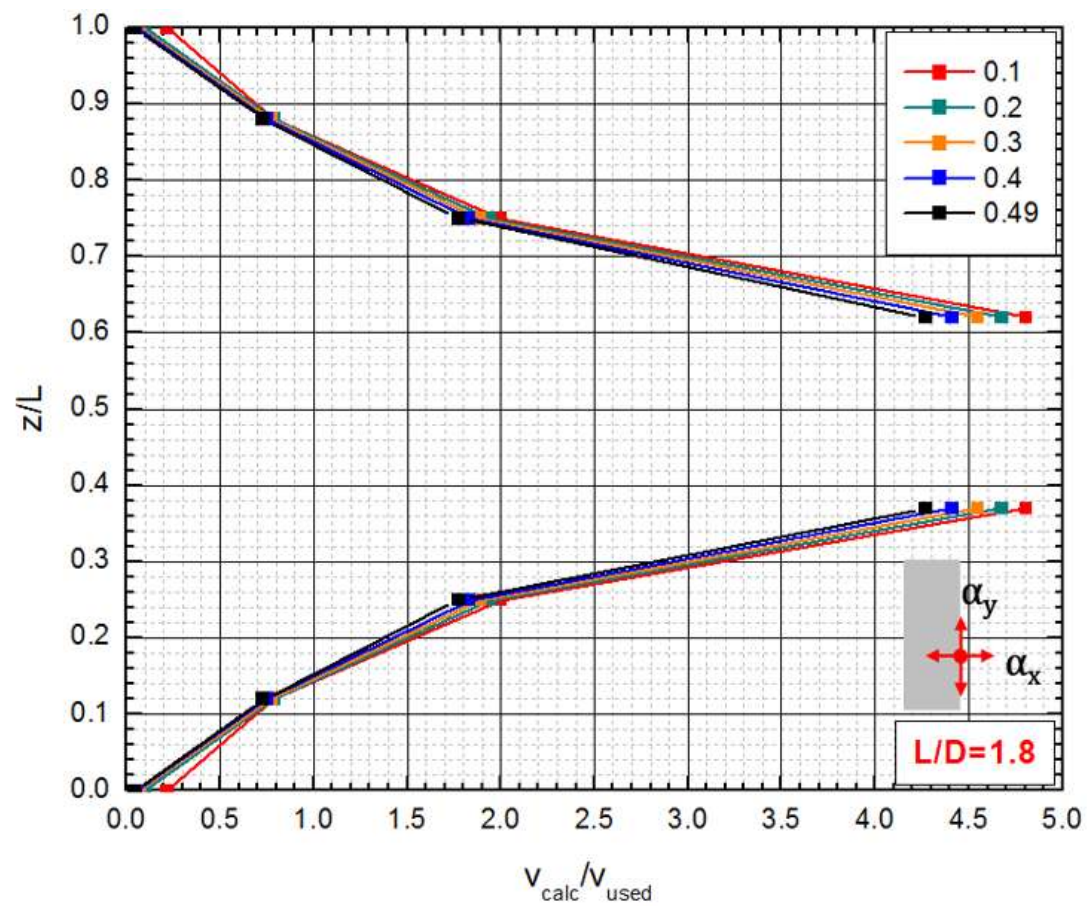


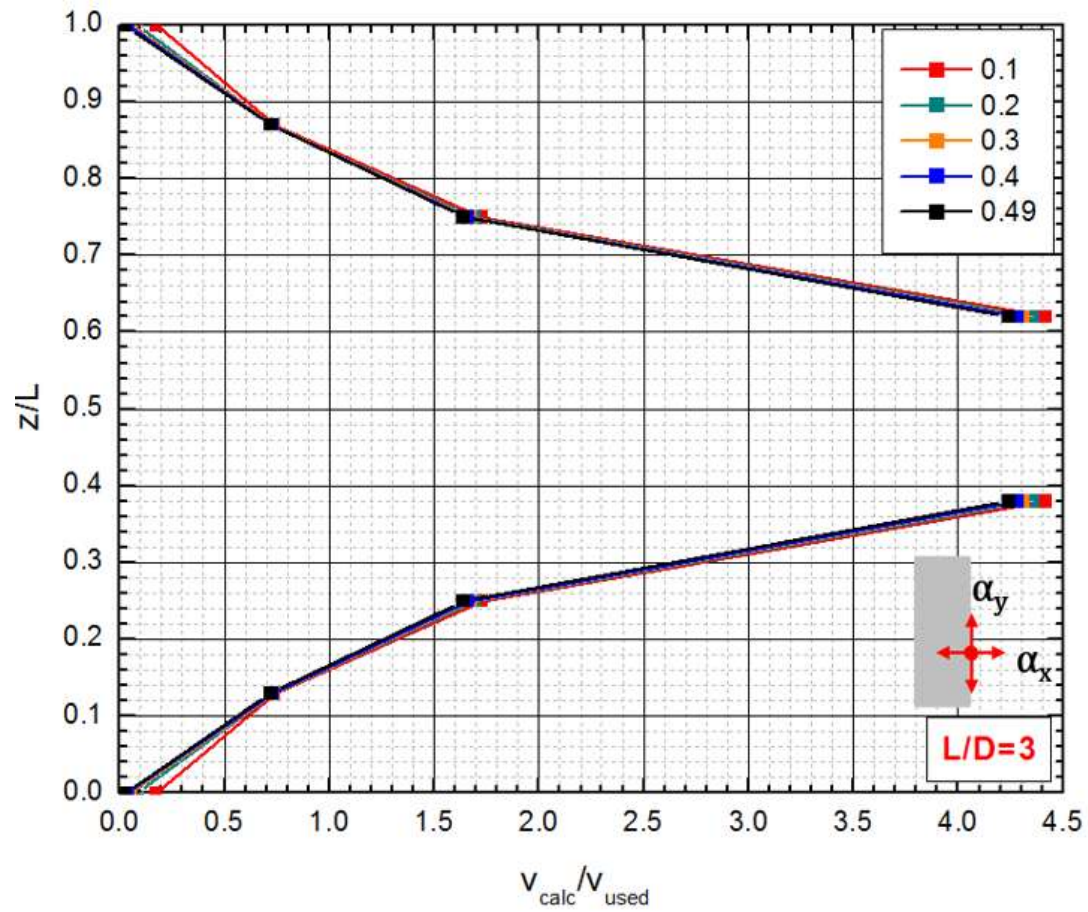
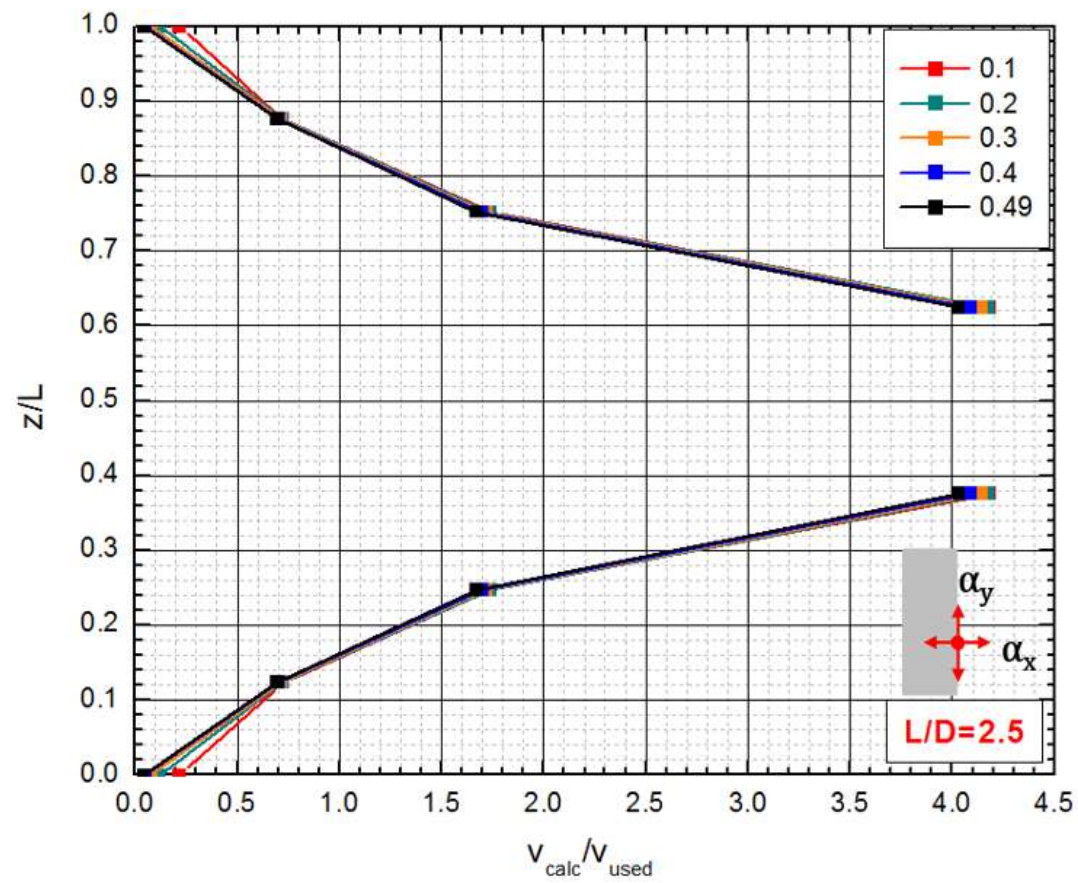
Κανονικοποιημένα διαγράμματα δείκτη Poisson – z/L (Μεθοδολογία 2)

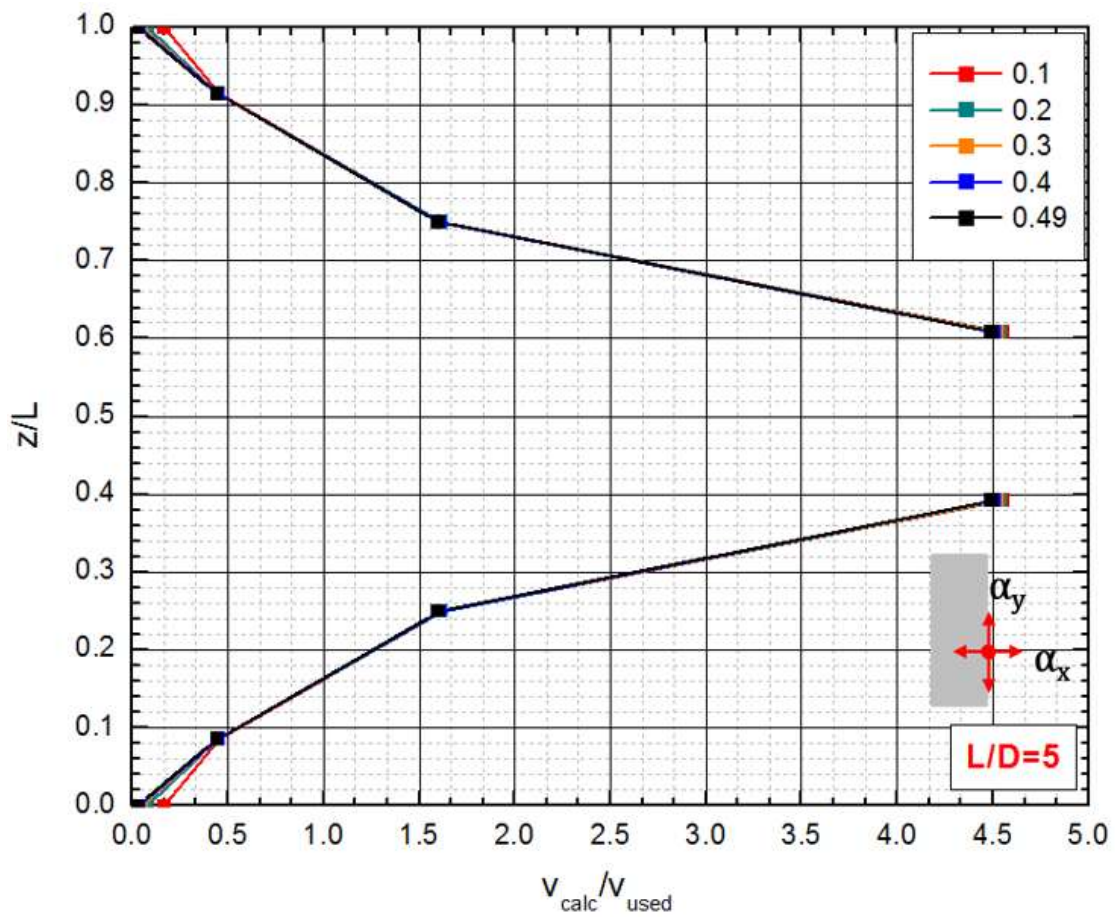
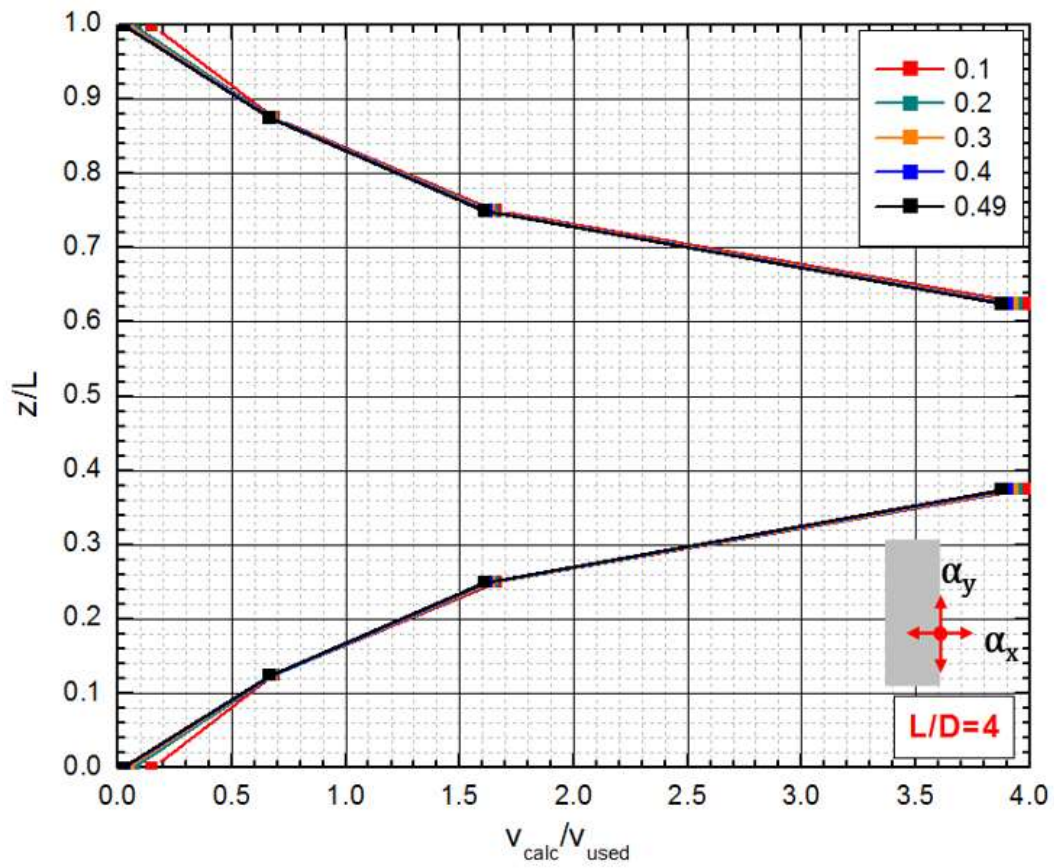












Παράρτημα Γ - Αποτελέσματα Αριθμητικών Αναλύσεων 3D

1. Πινακοποιημένα Αποτελέσματα
2. Φάσματα Ελεύθερης Ταλάντωσης

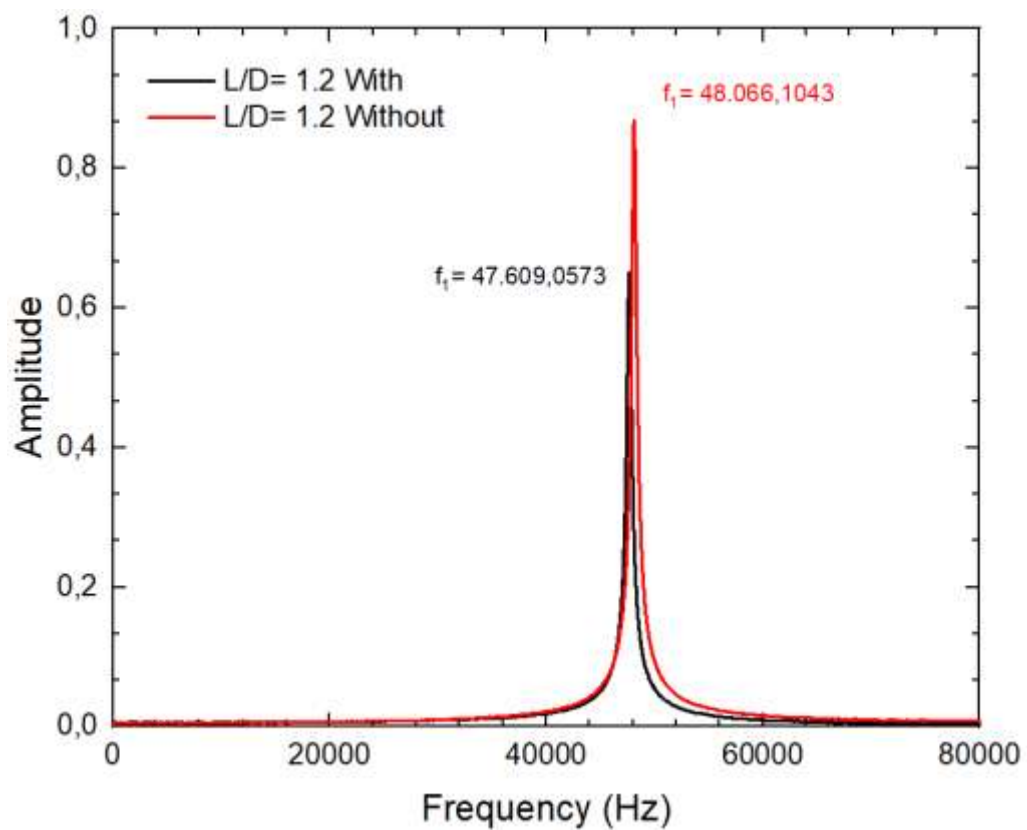
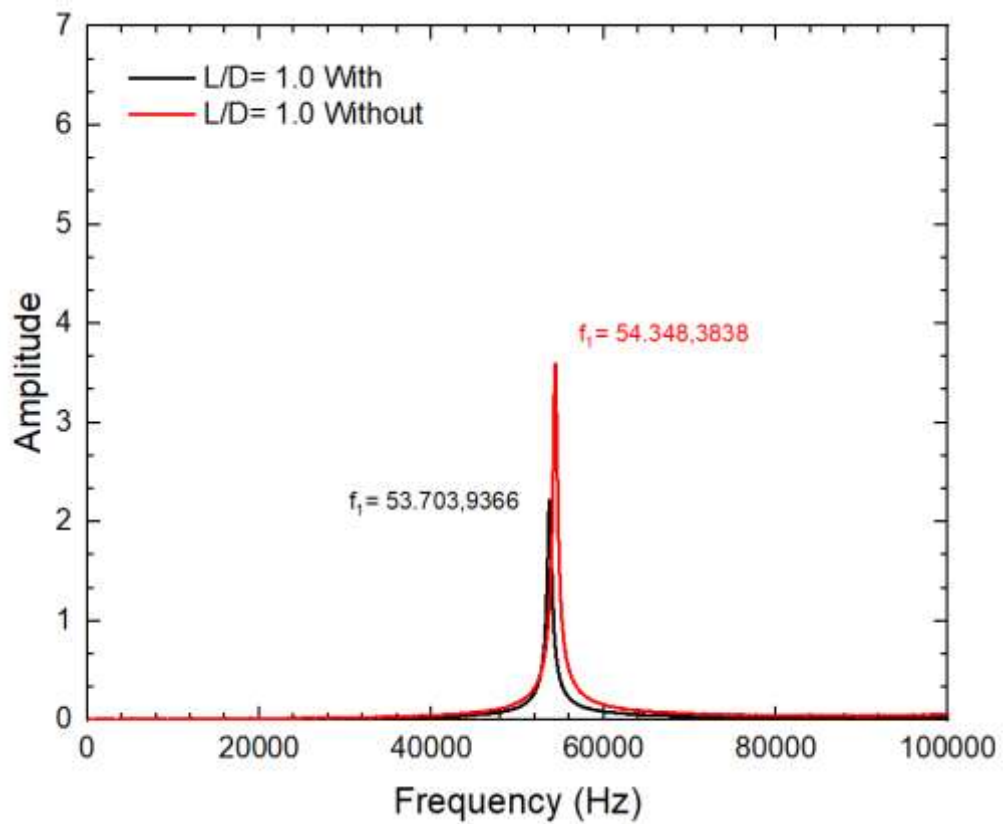
Πινακοποιημένα αποτελέσματα

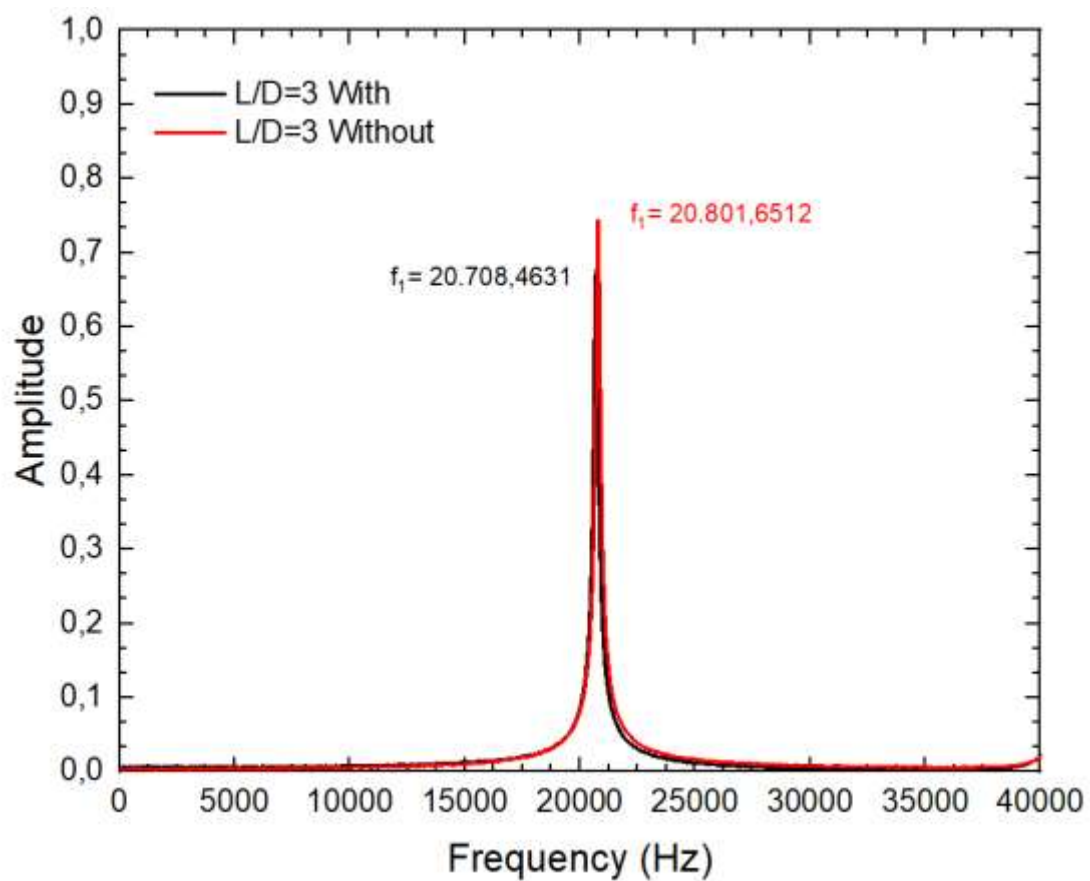
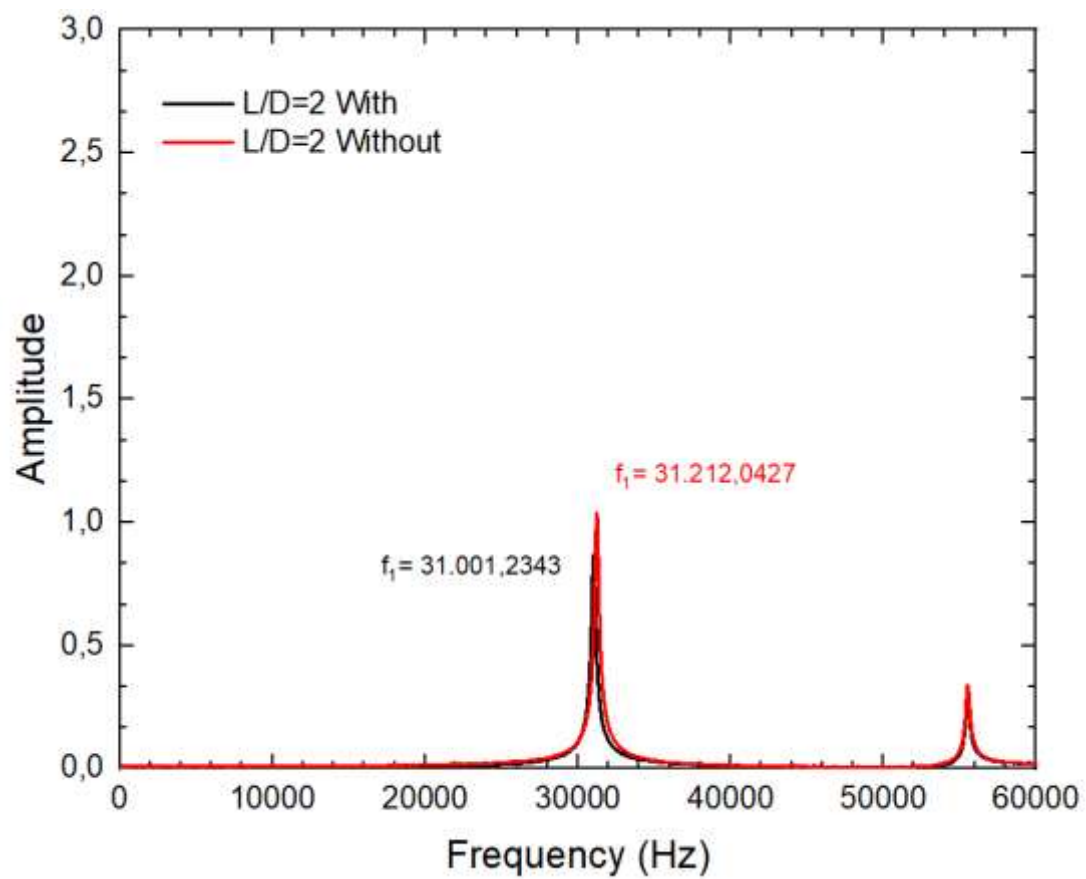
Υλικό Προσομοίωσης	L/D	Διαμήκης Διάδοση		MCF
		Με Μάζα	Χωρίς Μάζα	
Χάλυβας	5,0	12.635,7059	12.679,9309	1,0035
Χάλυβας	4,0	15.726,1726	15.792,2225	1,0042
Χάλυβας	3,0	20.708,4631	20.801,6512	1,0045
Χάλυβας	2,0	31.001,2343	31.212,0427	1,0068
Χάλυβας	1,2	47.609,0573	48.066,1043	1,0096
Χάλυβας	1,0	53.703,9366	54.348,3838	1,0120
Αλουμίνιο	5,0	12.480,4077	12.574,0108	1,0075
Αλουμίνιο	4,0	15.492,9199	15.621,5111	1,0083
Αλουμίνιο	3,0	20.578,9795	20.805,3483	1,0110
Αλουμίνιο	2,0	30.203,3691	30.614,1349	1,0136
Αλουμίνιο	1,2	46.948,2422	47.952,9346	1,0214
Αλουμίνιο	1,0	52.582,0313	54.143,7176	1,0297

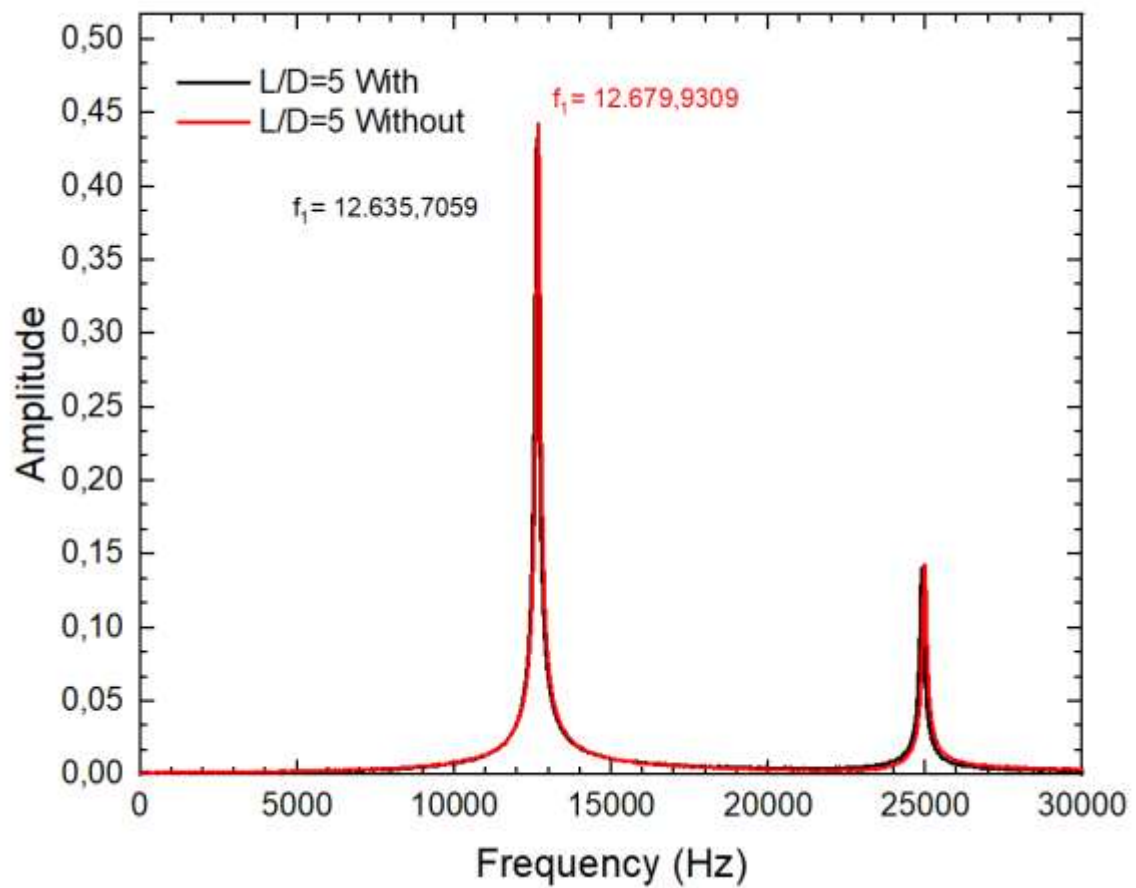
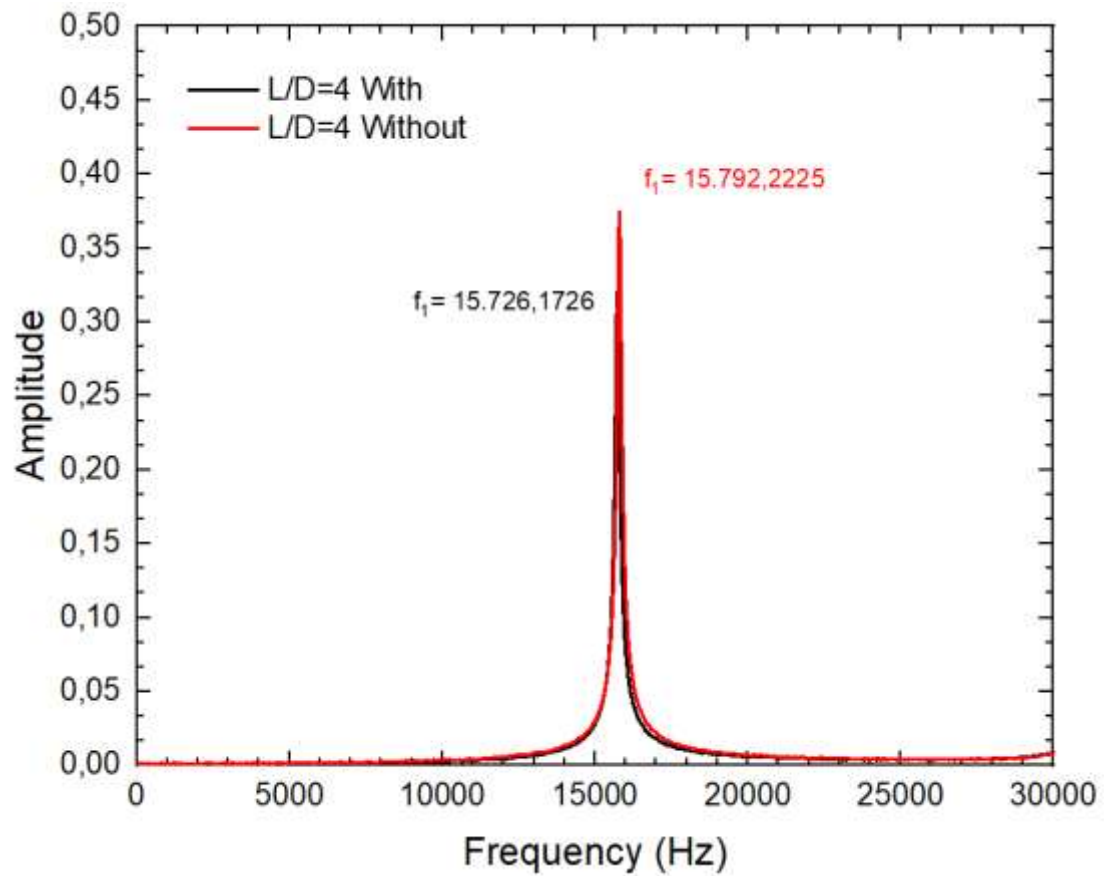
Υλικό Προσομοίωσης	L/D	Στρεπτική Διάδοση		ICF
		With mass	Without mass	
Χάλυβας	5,0	8.071,2772	8.077,7342	1,0008
Χάλυβας	4,0	10.096,8872	10.105,9744	1,0009
Χάλυβας	3,0	13.400,1900	13.416,2702	1,0012
Χάλυβας	2,0	20.245,9092	20.276,2781	1,0015
Χάλυβας	1,2	31.758,7002	31.888,9109	1,0041
Χάλυβας	1,0	39.117,4234	39.399,0688	1,0072
Αλουμίνιο	5,0	7.724,8317	7.795,1277	1,0091
Αλουμίνιο	4,0	9.629,6583	9.717,2882	1,0091
Αλουμίνιο	3,0	12.777,2164	12.916,4881	1,0109
Αλουμίνιο	2,0	19.010,0050	19.268,5411	1,0136
Αλουμίνιο	1,2	30.073,2046	30.773,9103	1,0233
Αλουμίνιο	1,0	37.085,0916	38.371,9443	1,0347

Φάσματα Ελεύθερης Ταλάντωσης

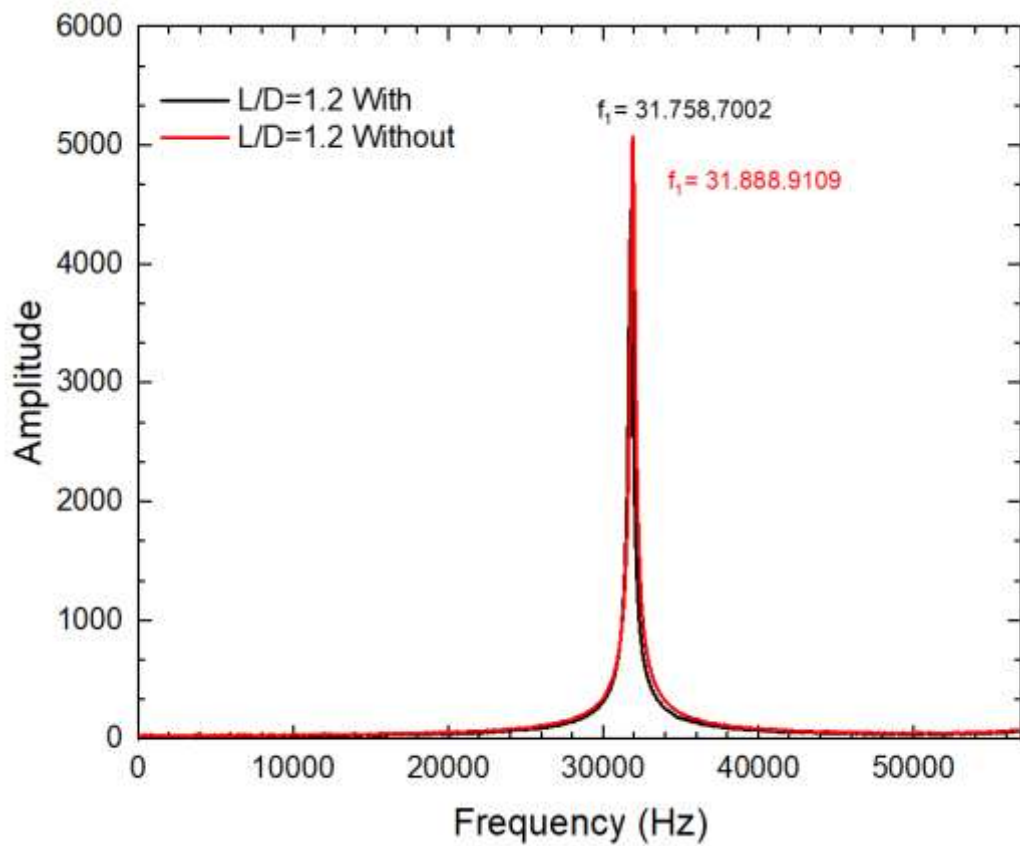
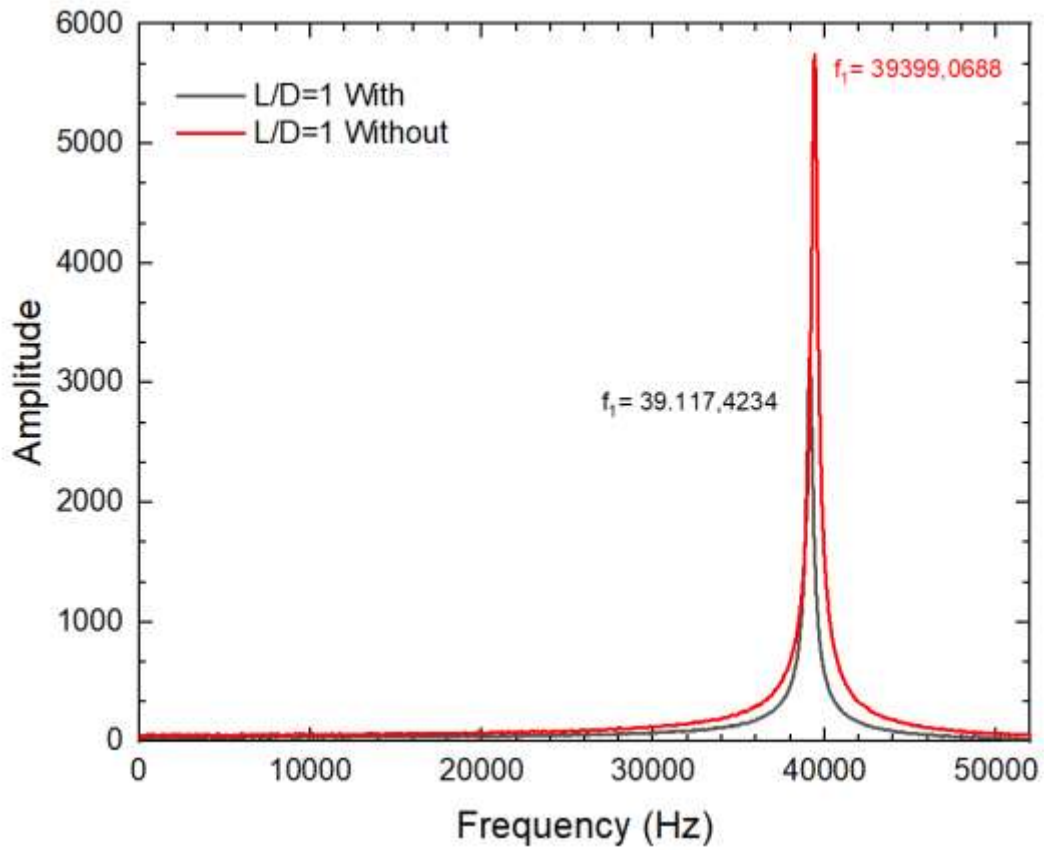
Διαμήκης Φόρτιση – Χάλυβας

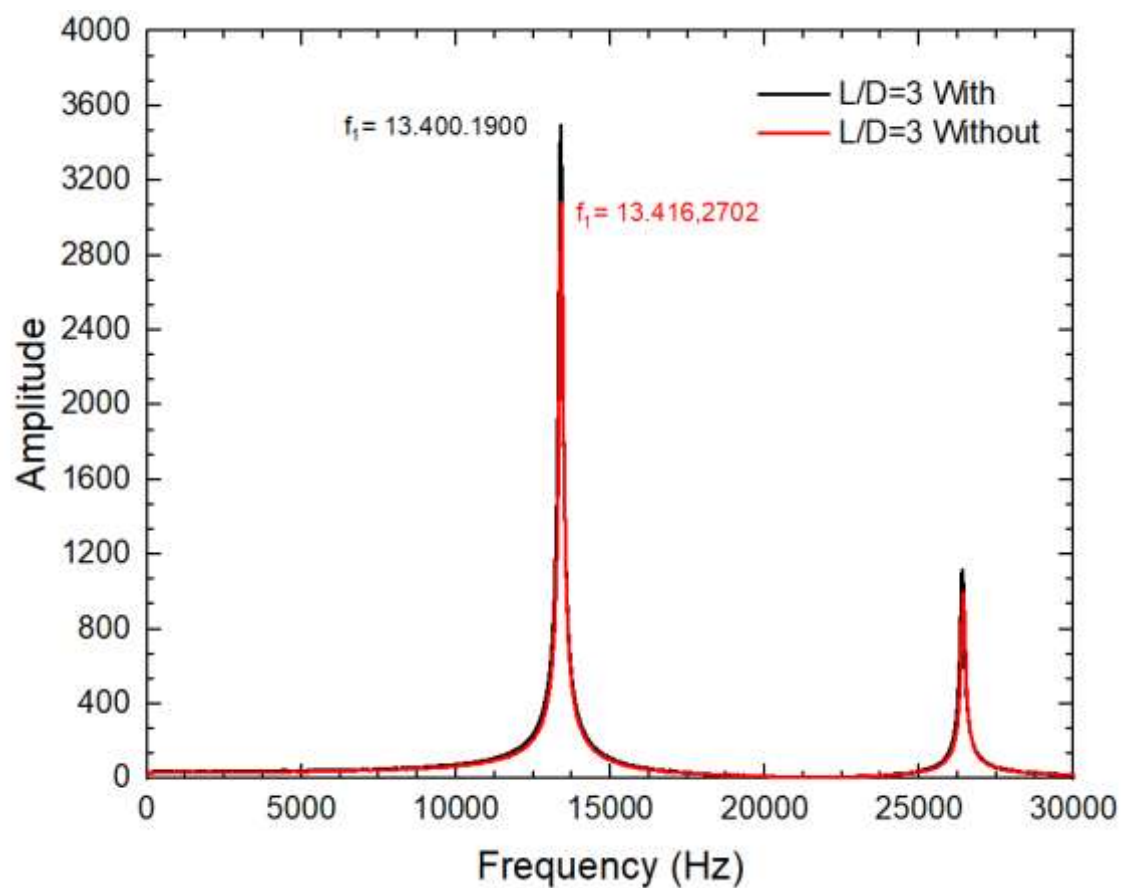
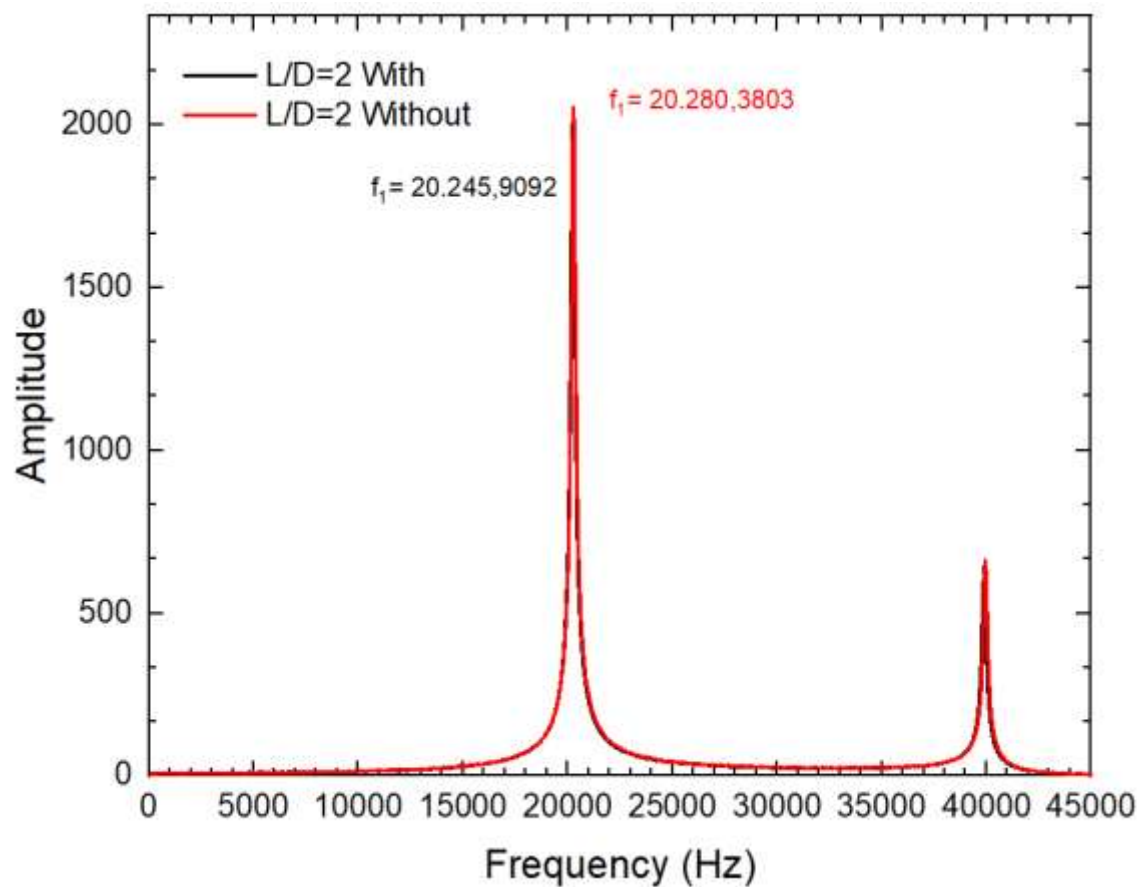


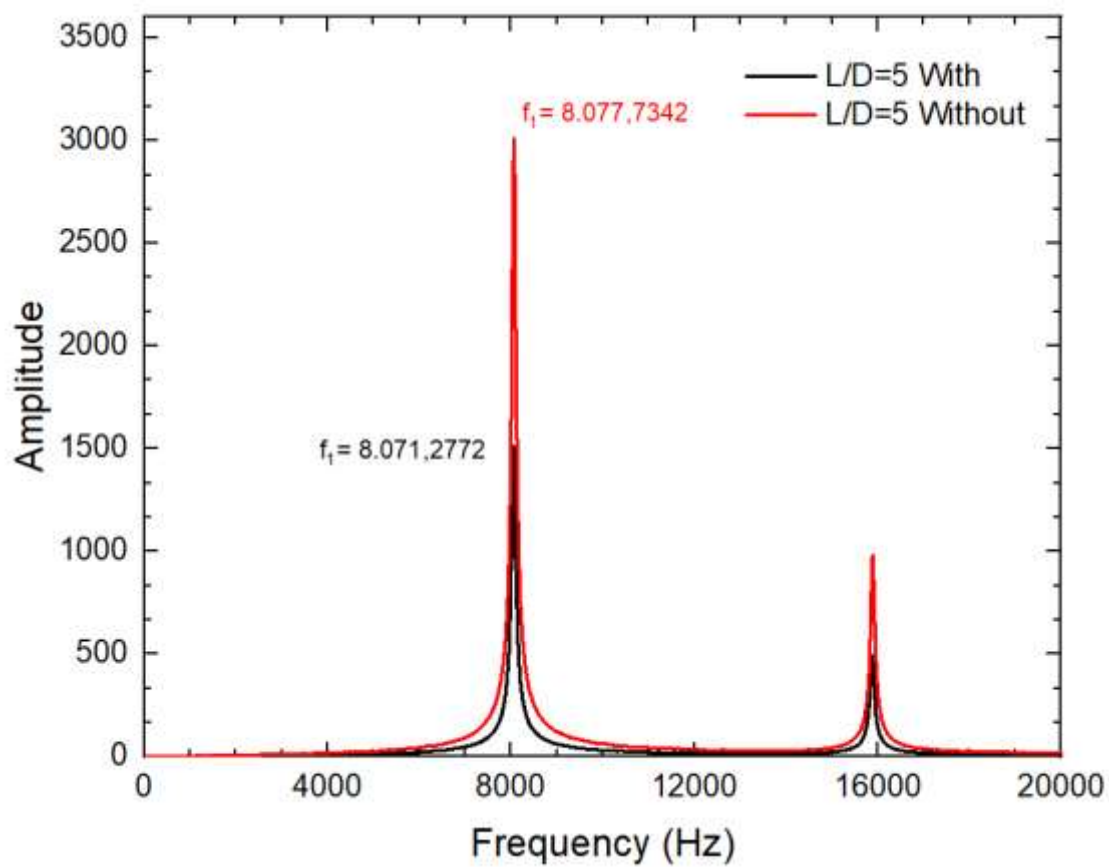
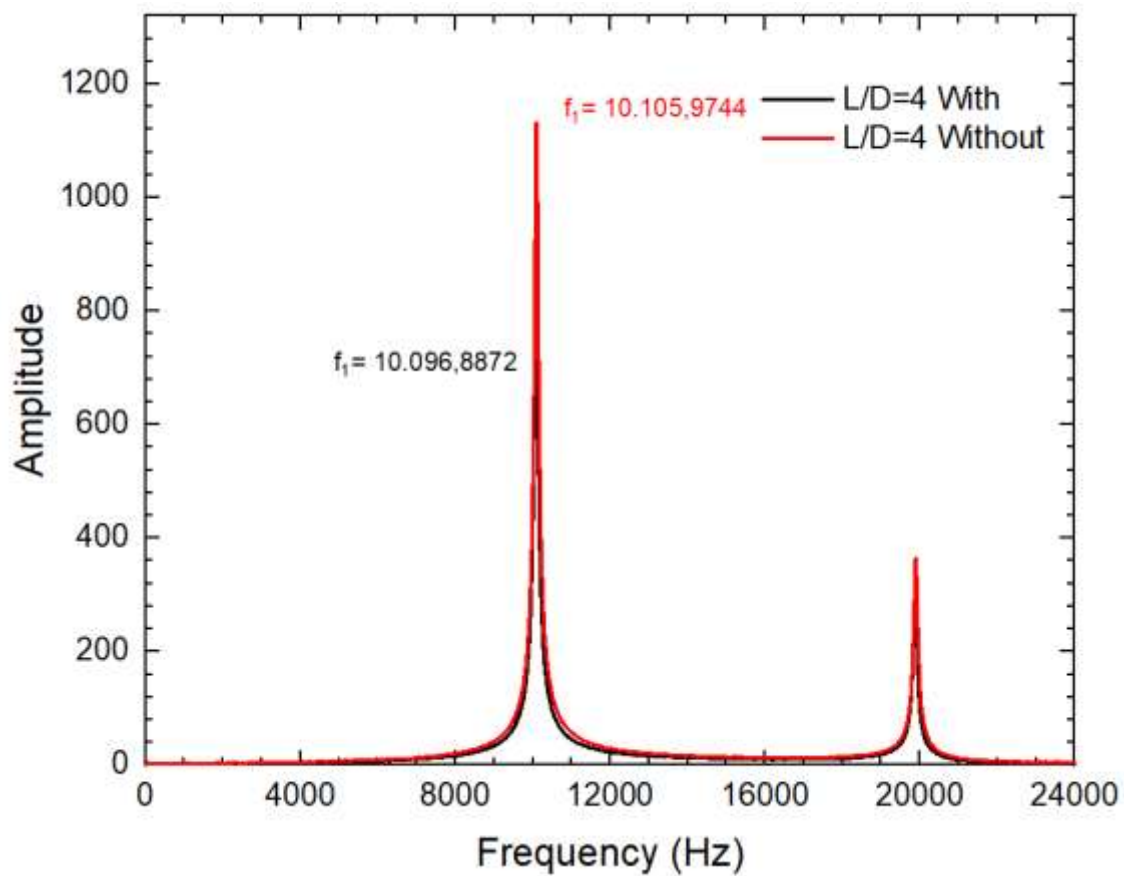




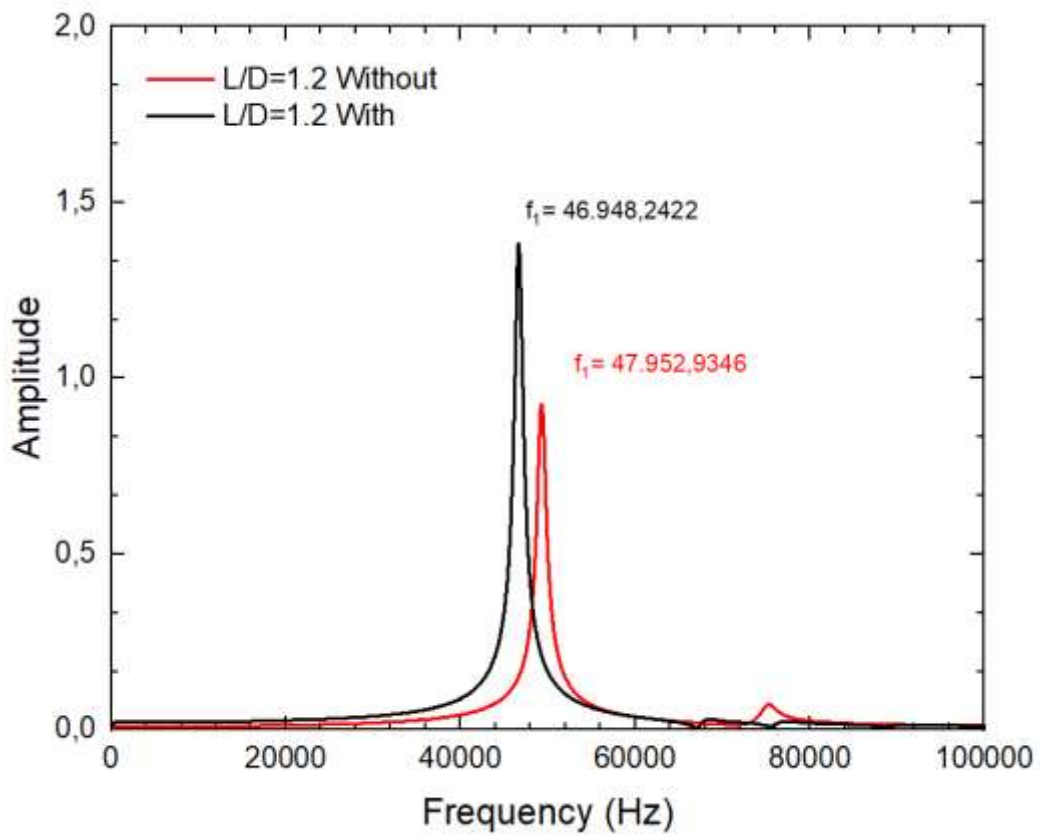
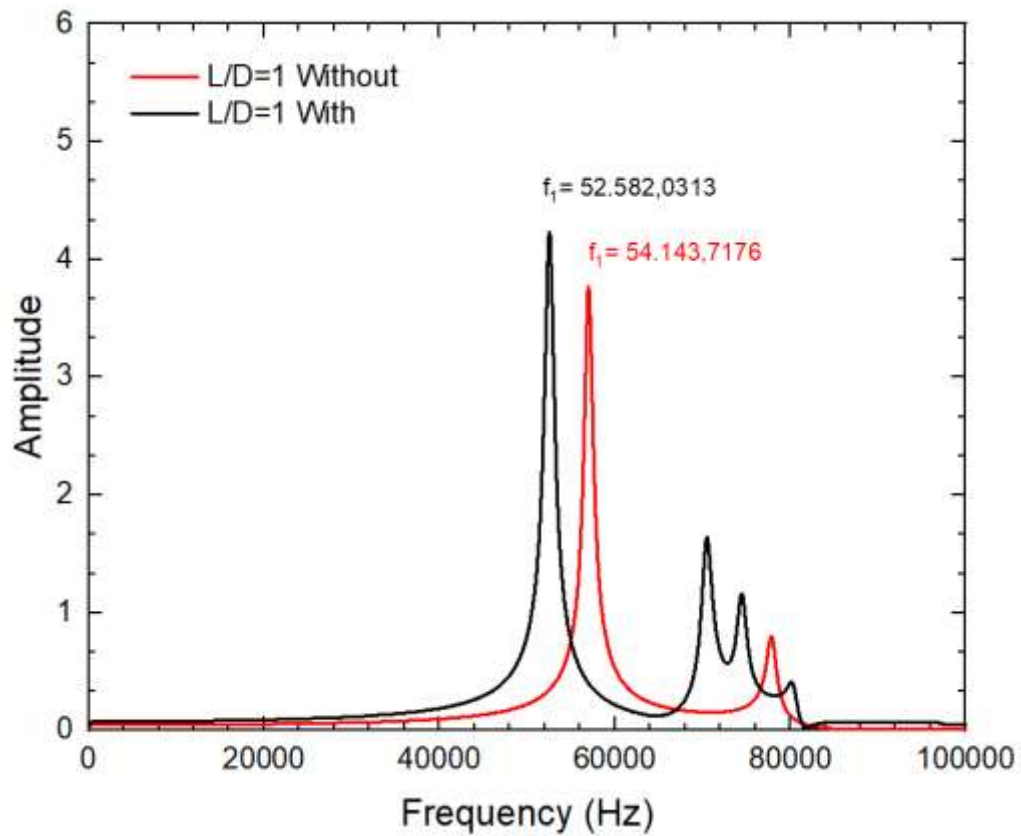
Στρεπτική Φόρτιση – Χάλυβας

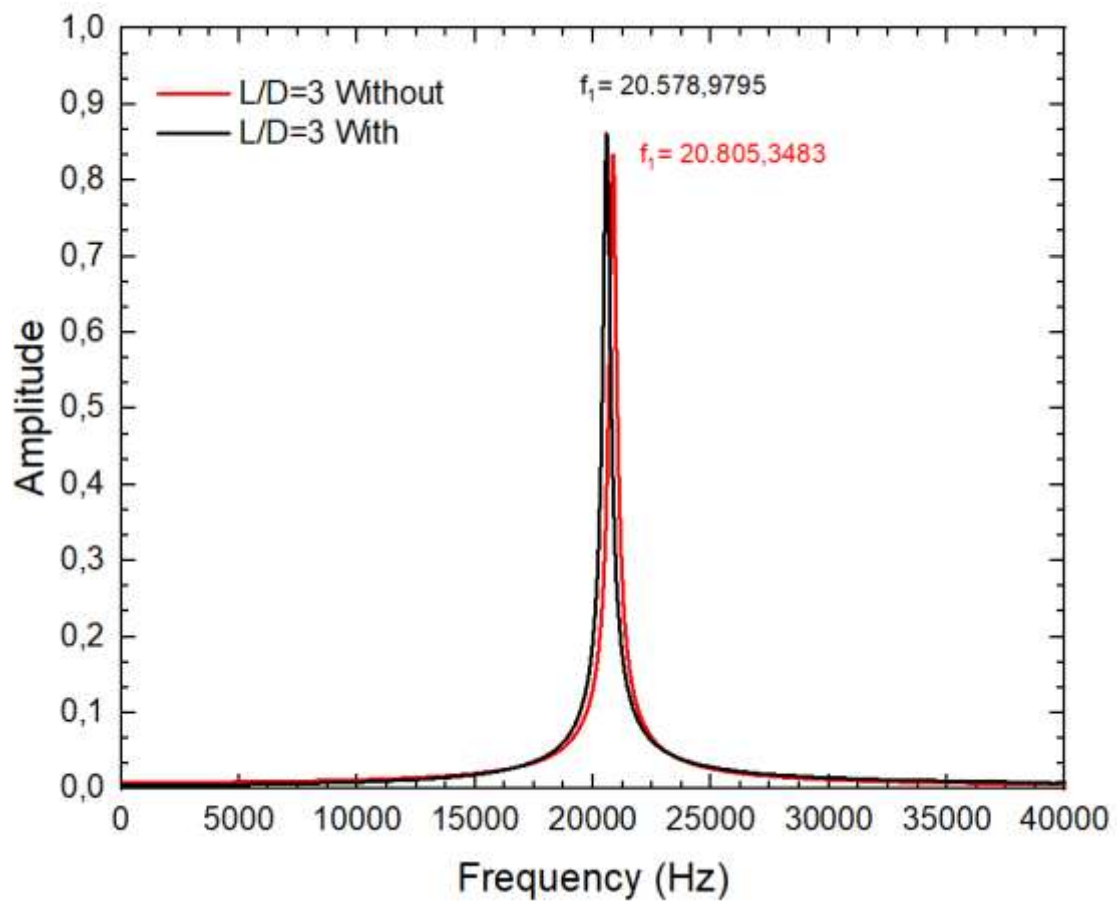
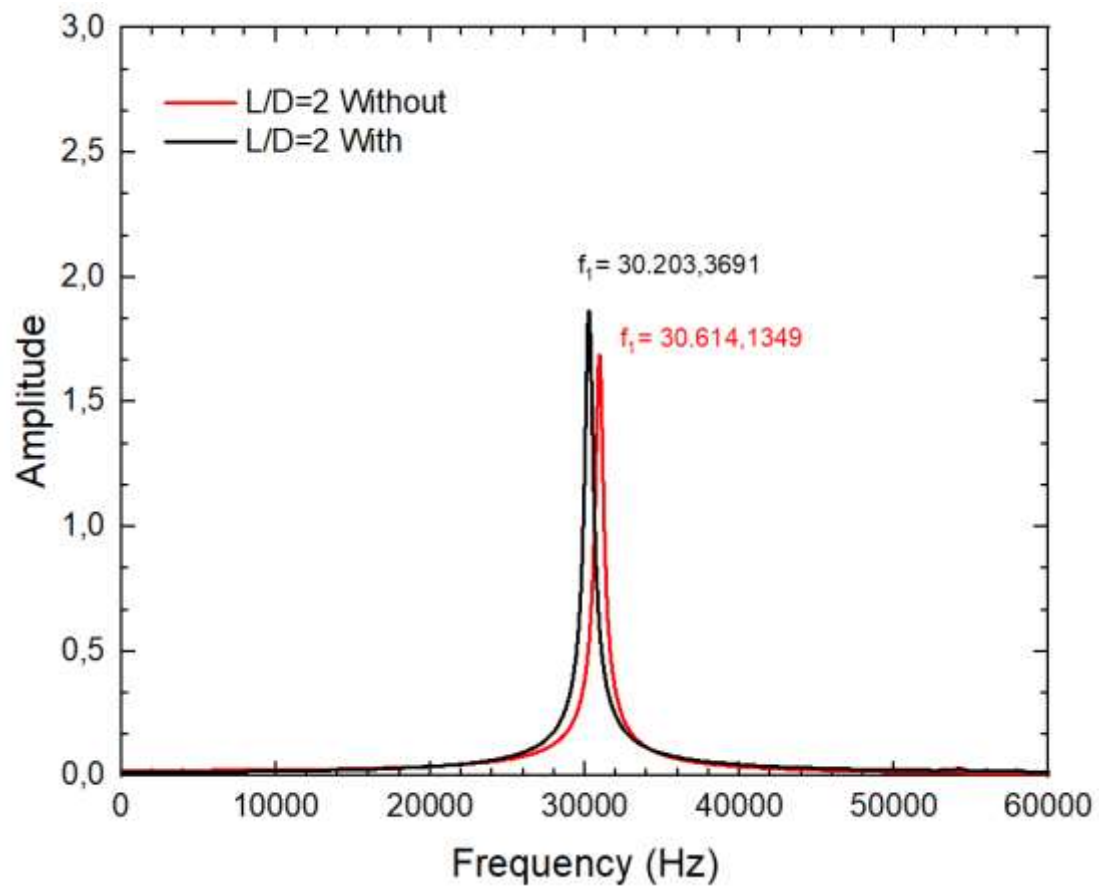


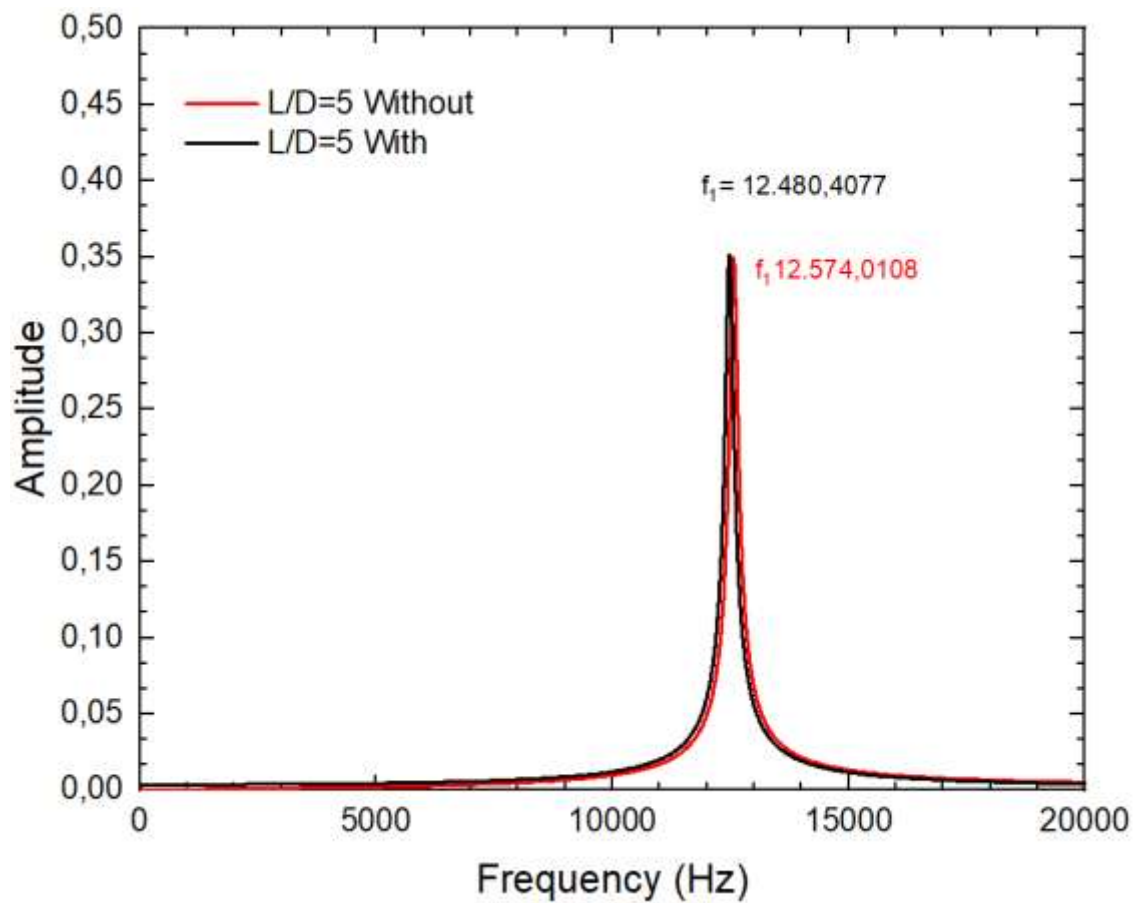
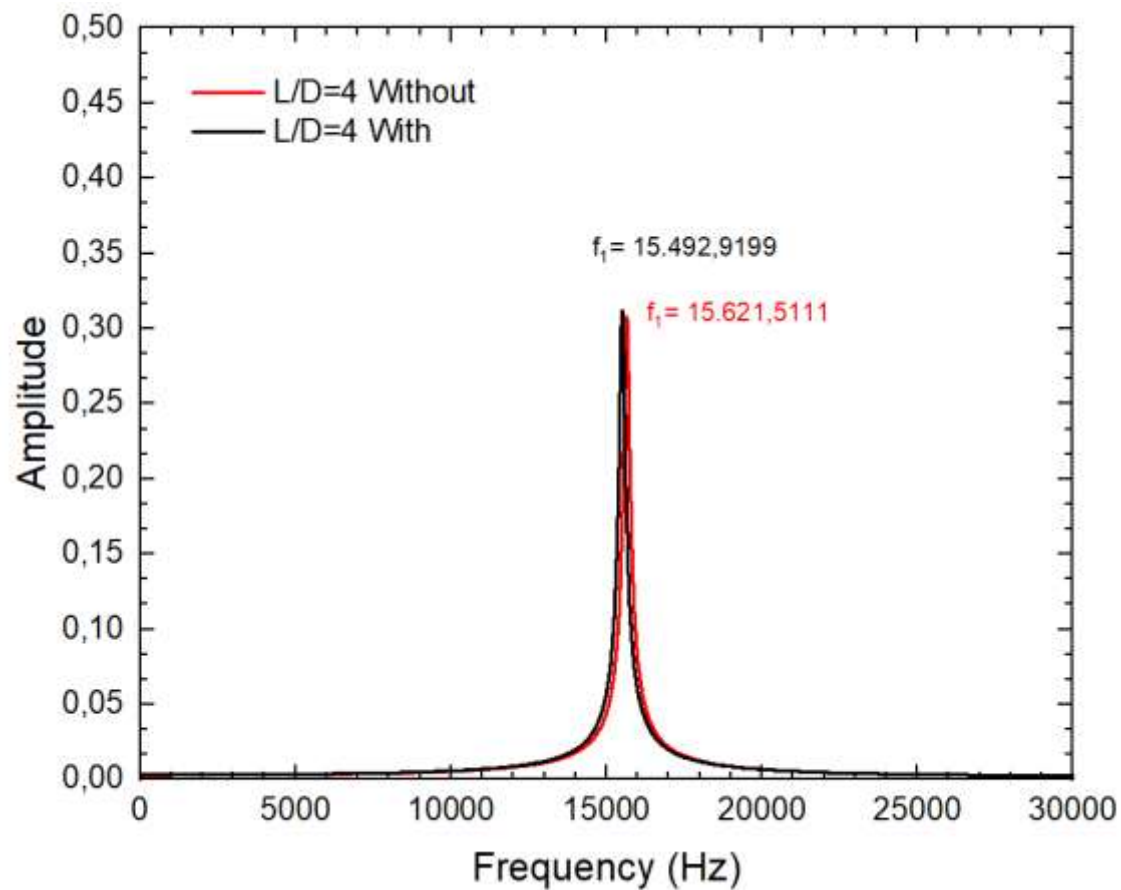




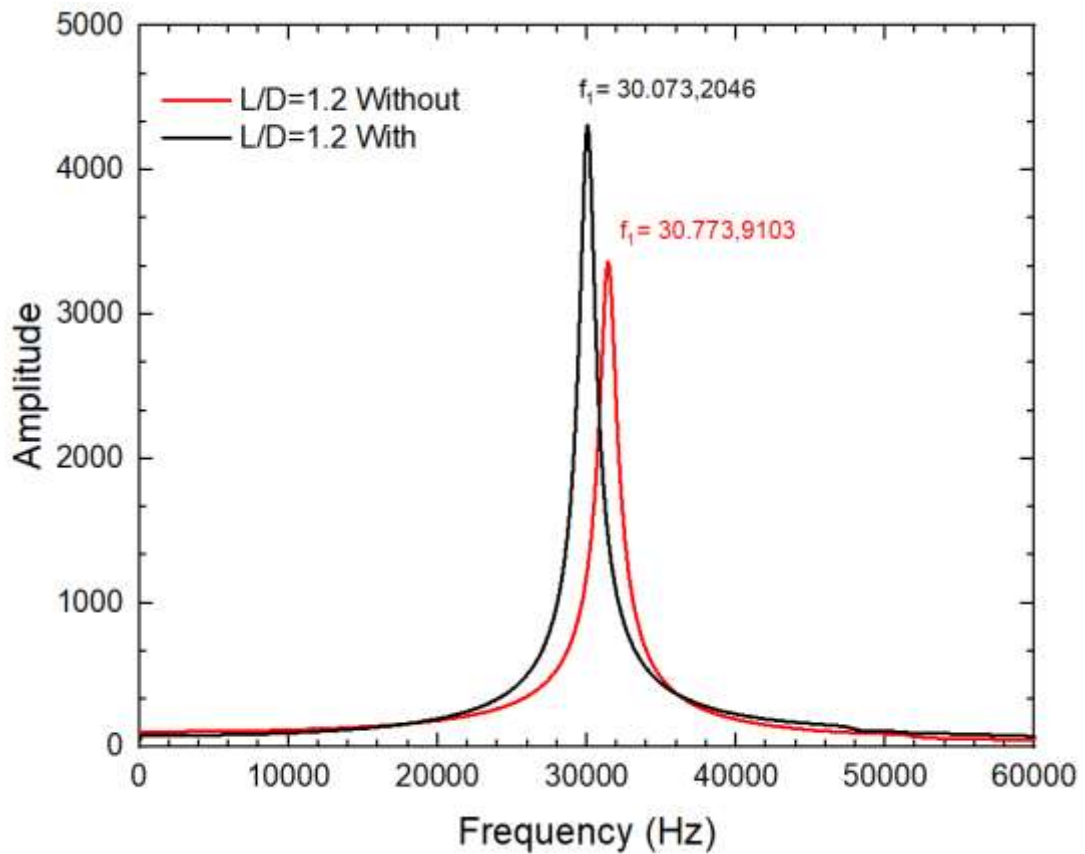
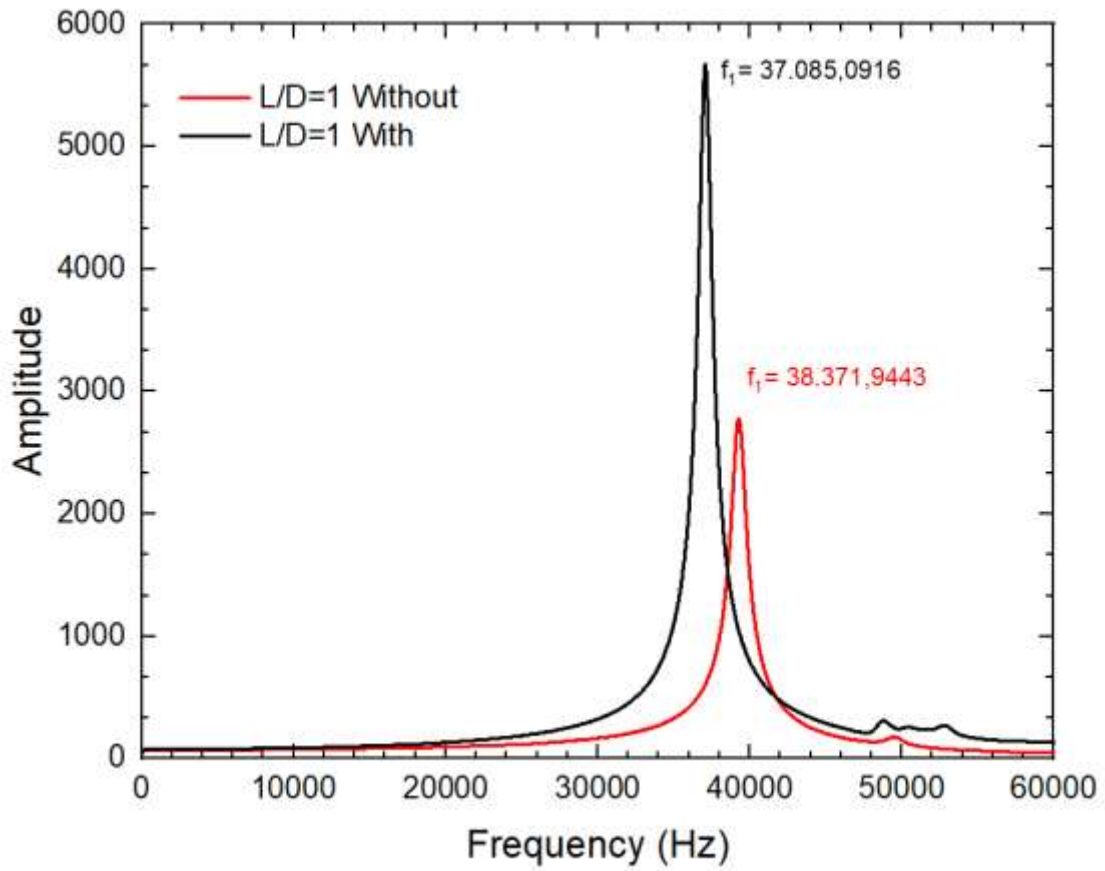
Διαμήκης Φόρτιση – Αλουμίνιο

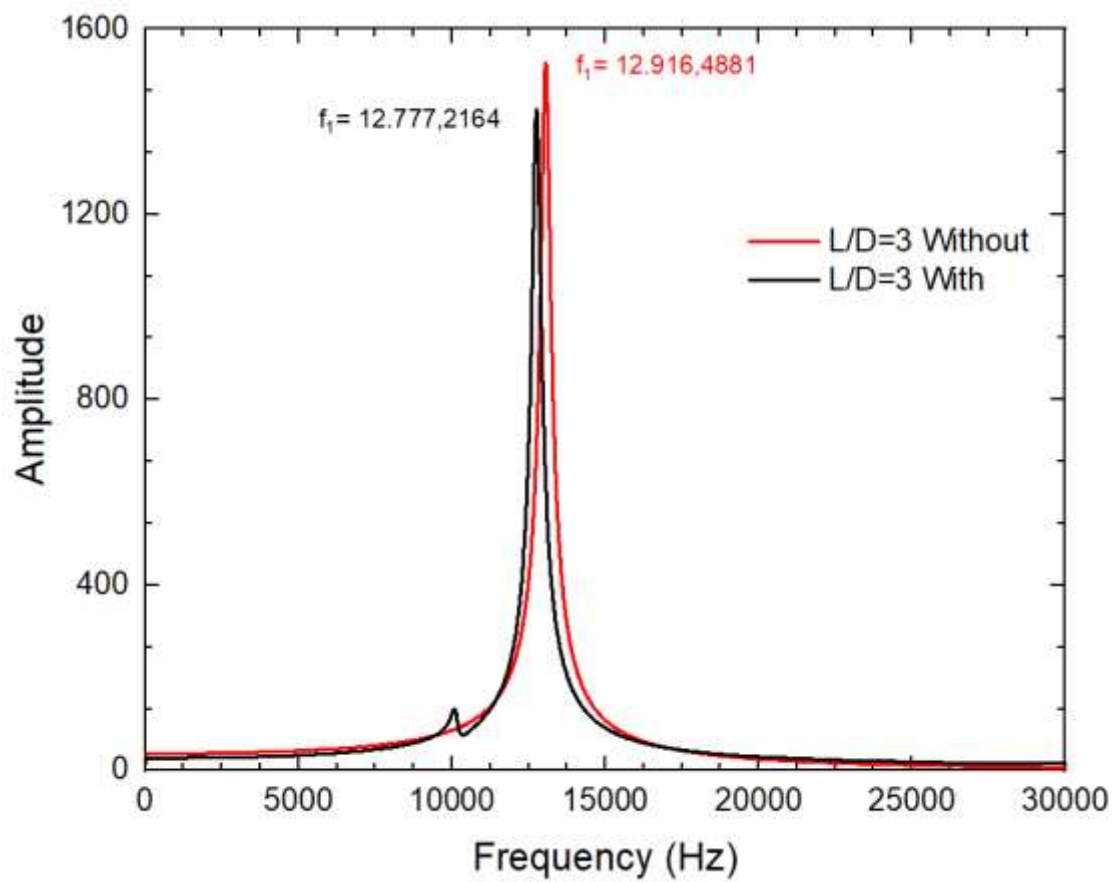
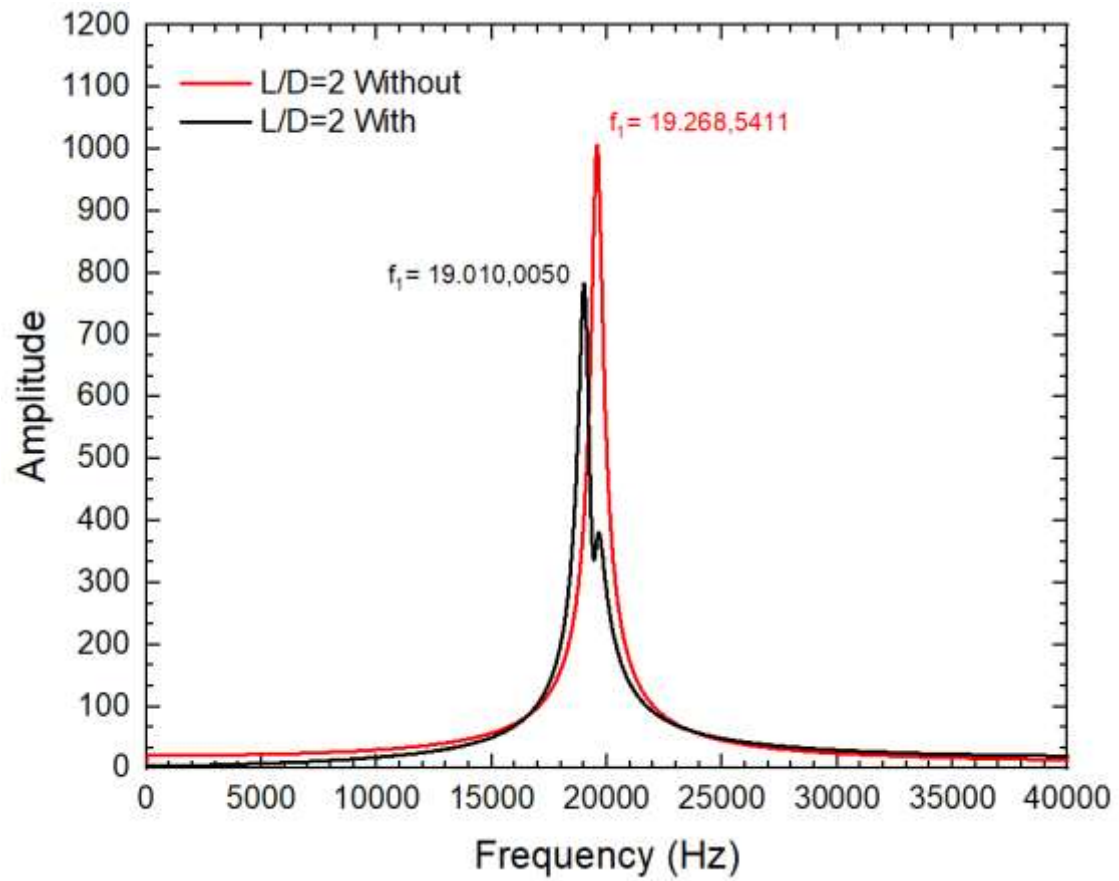


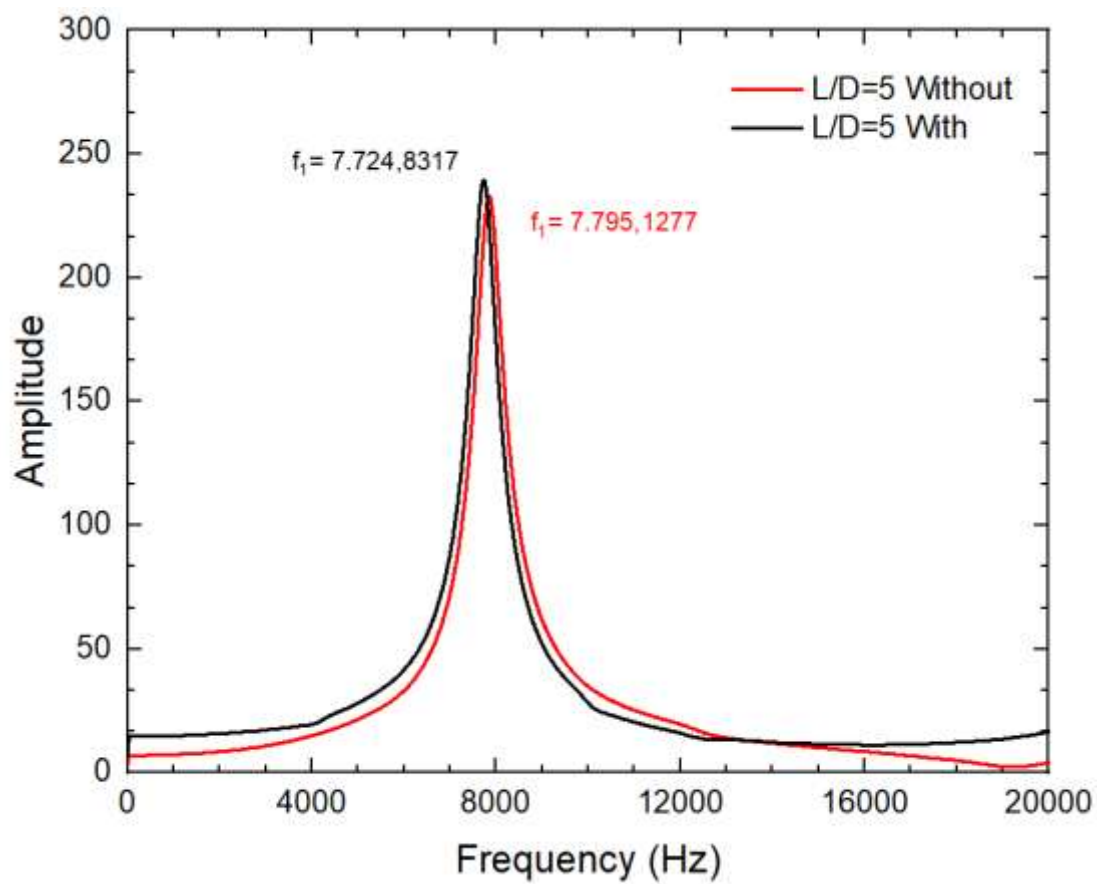
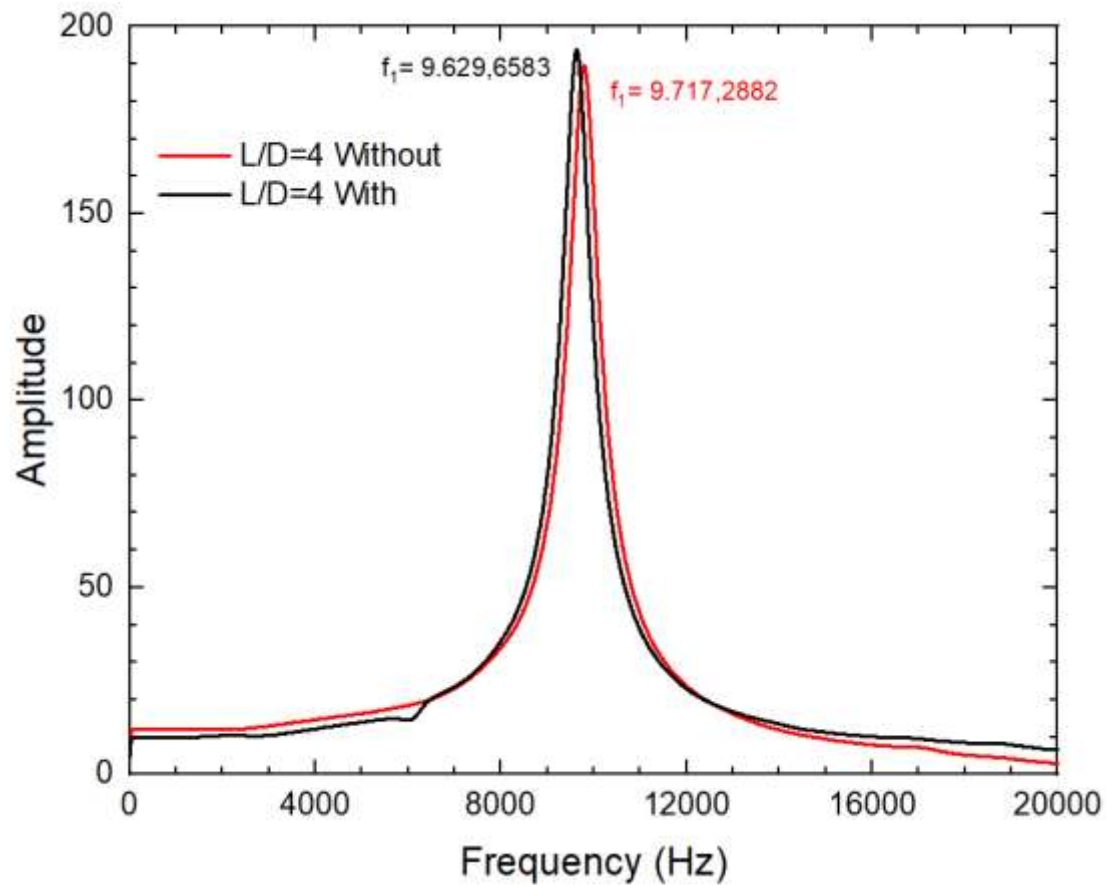




Στρεπτική Φόρτιση – Αλουμίνιο







Παράρτημα Δ - Πειραματική επιβεβαίωση διορθωτικού συντελεστή μεγέθους (SCF) σε δοκίμια αλουμινίου – χάλυβα

1. Αποτελέσματα Δοκιμών Ακουστικού Συντονισμού (Διαμήκης διάδοση)
2. Αποτελέσματα Δοκιμών Ακουστικού Συντονισμού (Εγκάρσια διάδοση)

Αποτελέσματα Δοκιμών Ακουστικού Συντονισμού (Διαμήκης διάδοση)

Aluminium L/D= 5.0 Longitudinal Test

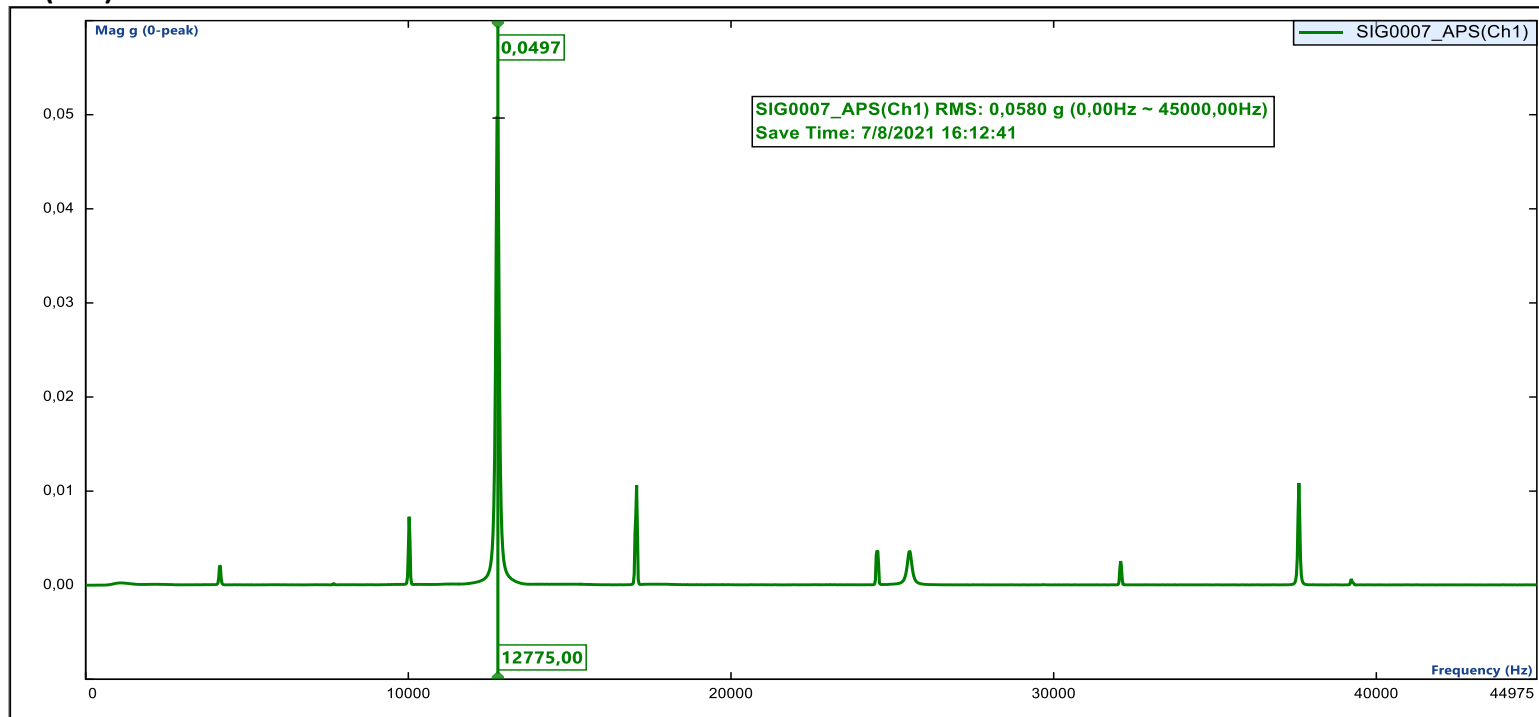
Report time: Apr-02-2026 18:14:26 Data measured at: Aug-07-2021 16:12:41

Test name: SR-Aluminum9 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2

Serial Number (Master): 5785504

SIG0007_APS(Ch1)



Total elapsed time: 00:10:35 Run Start Time: Aug-07-2021, 16:02:05

Test parameters

Frame#: 020 Frequency range (fa): 46,08 kHz

Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Block Size/Line: 1024 / 450 Window: Hanning

Average mode: Linear

Average number: 20

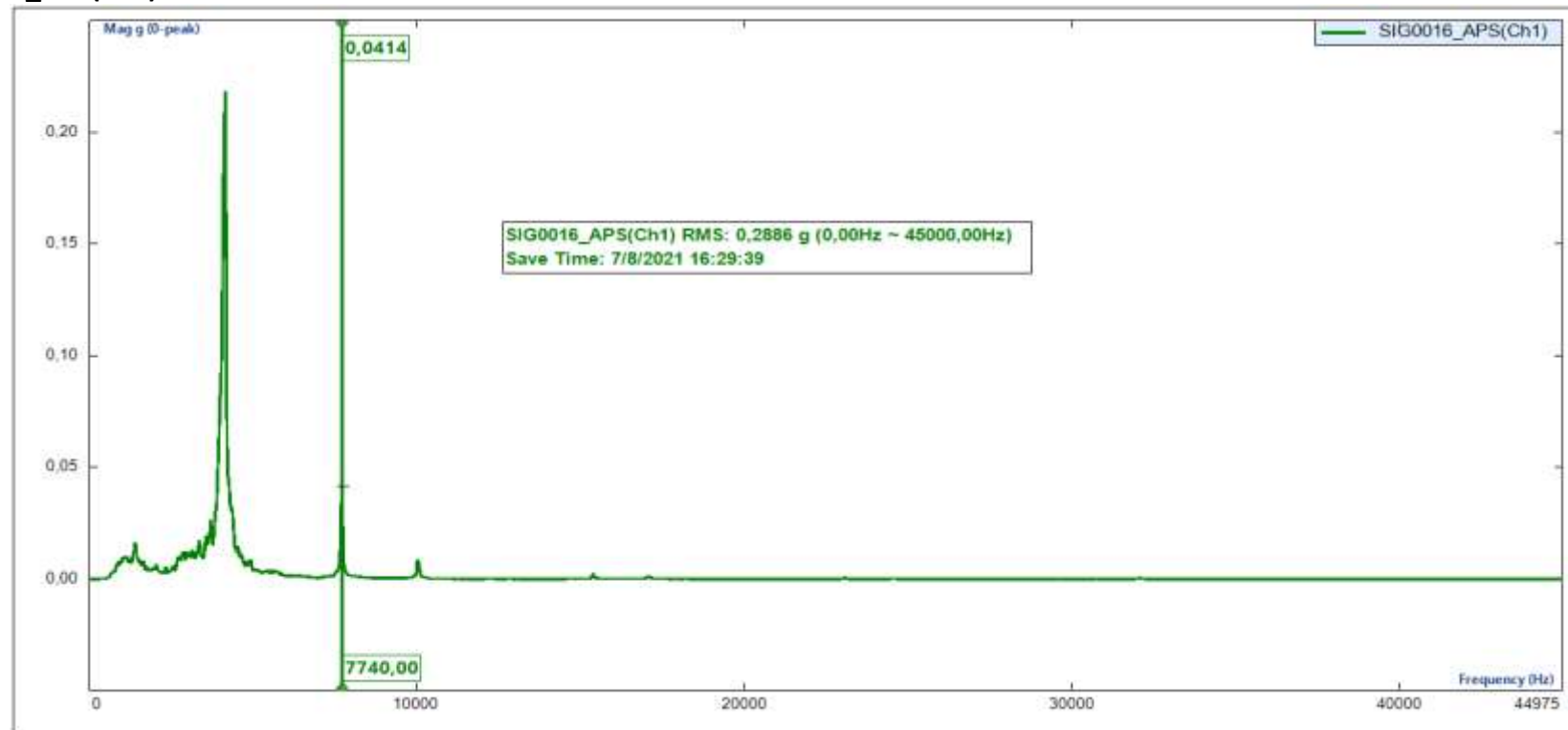
Aluminium L/D= 5.0 Transverse Test

Report time: Apr-03-2026 13:42:18 Data measured at: Aug-07-2021 16:29:39

Test name: SR-Aluminum9 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2 Serial Number (Master): 5785504

SIG0016_APS(Ch1)



Total elapsed time: 00:04:47 Run Start Time: Aug-07-2021, 16:24:51

Test parameters

Frame#: 20 Frequency range (fa): 46,08 kHz Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Block Size/Line: 2048/900 Window: Hanning Average mode: Linear Average number: 20

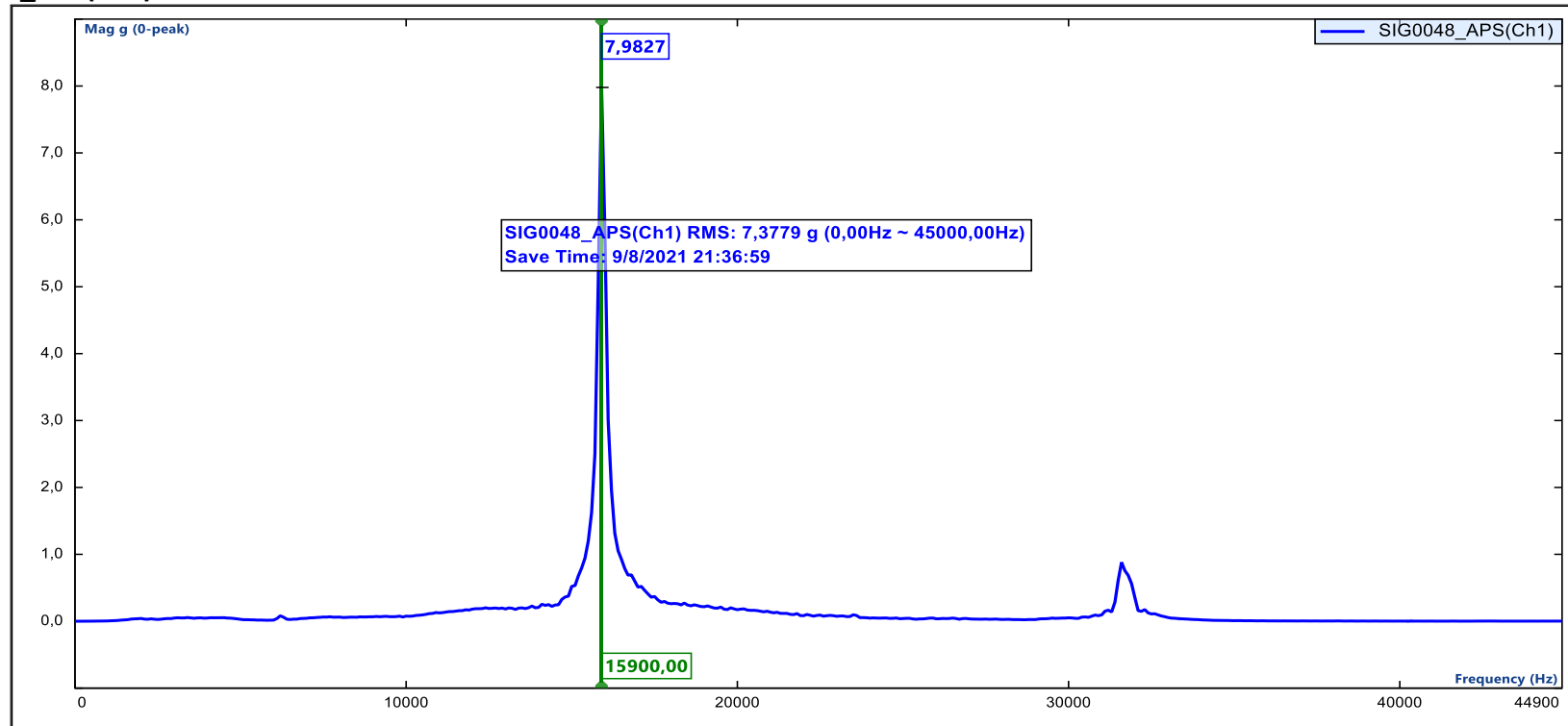
Aluminium L/D= 4.0 Longitudinal Test

Report time: Apr-03-2026 14:23:56 Data measured at: Aug-09-2021 21:36:59

Test name: SR-Aluminum9 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2 Serial Number (Master): 5785504

SIG0048_APS(Ch1)



Total elapsed time: 00:07:49 Run Start Time: Aug-09-2021, 21:29:10

Test parameters

Frame#: 19 Frequency range (fa): 46,08 kHz Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Block Size/Line: 512/225 Window: Hanning Average mode: Linear Average number: 20

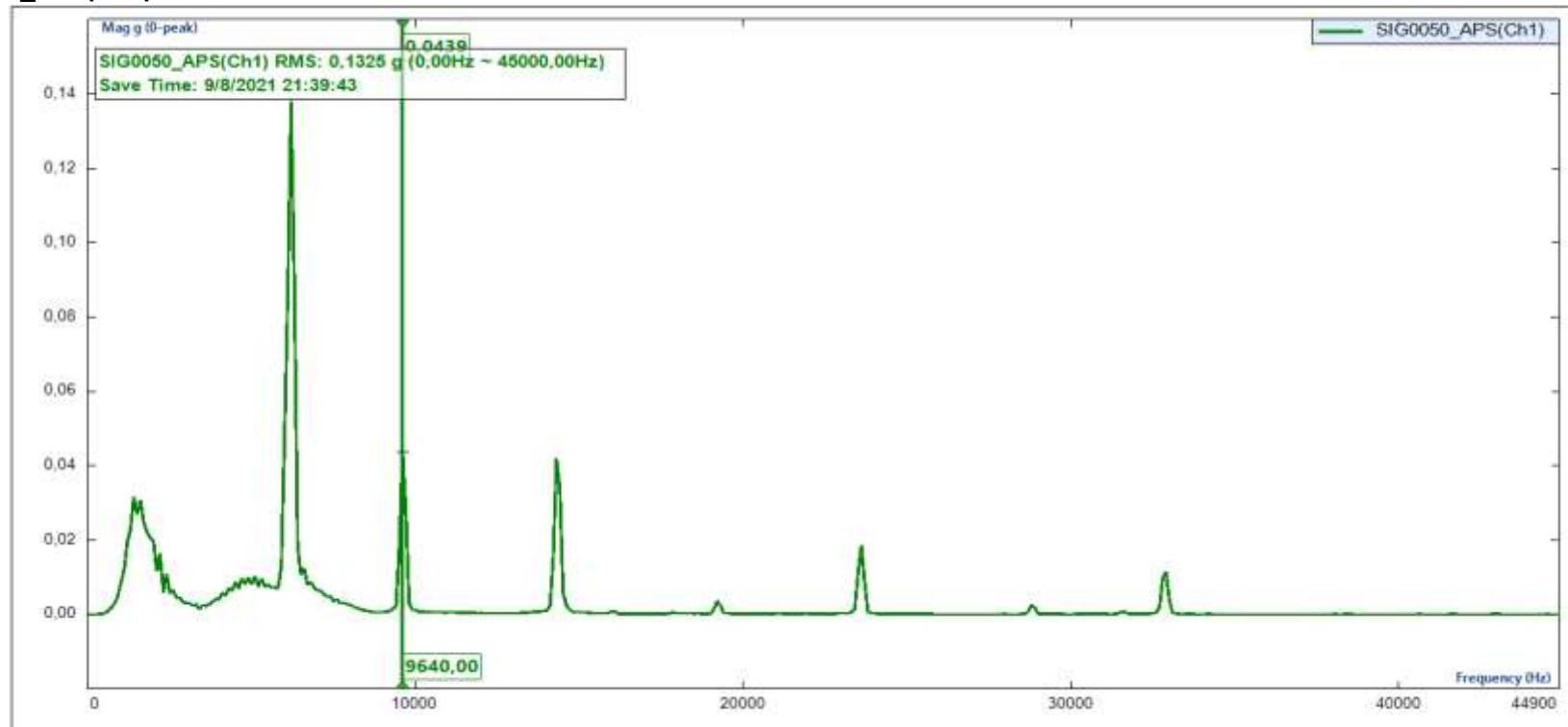
Aluminium L/D= 4.0 Transverse Test

Report time: Apr-03-2026 14:25:01 Data measured at: Aug-09-2021 21:39:43

Test name: SR-Aluminum9 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2 Serial Number (Master): 5785504

SIG0050_APS(Ch1)



Total elapsed time: 00:10:33 Run Start Time: Aug-09-2021, 21:29:10

Test parameters

Frame#: 19 Frequency range (fa): 46,08 kHz Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Block Size/Line: 512/225 Window: Hanning Average mode: Linear Average number: 20

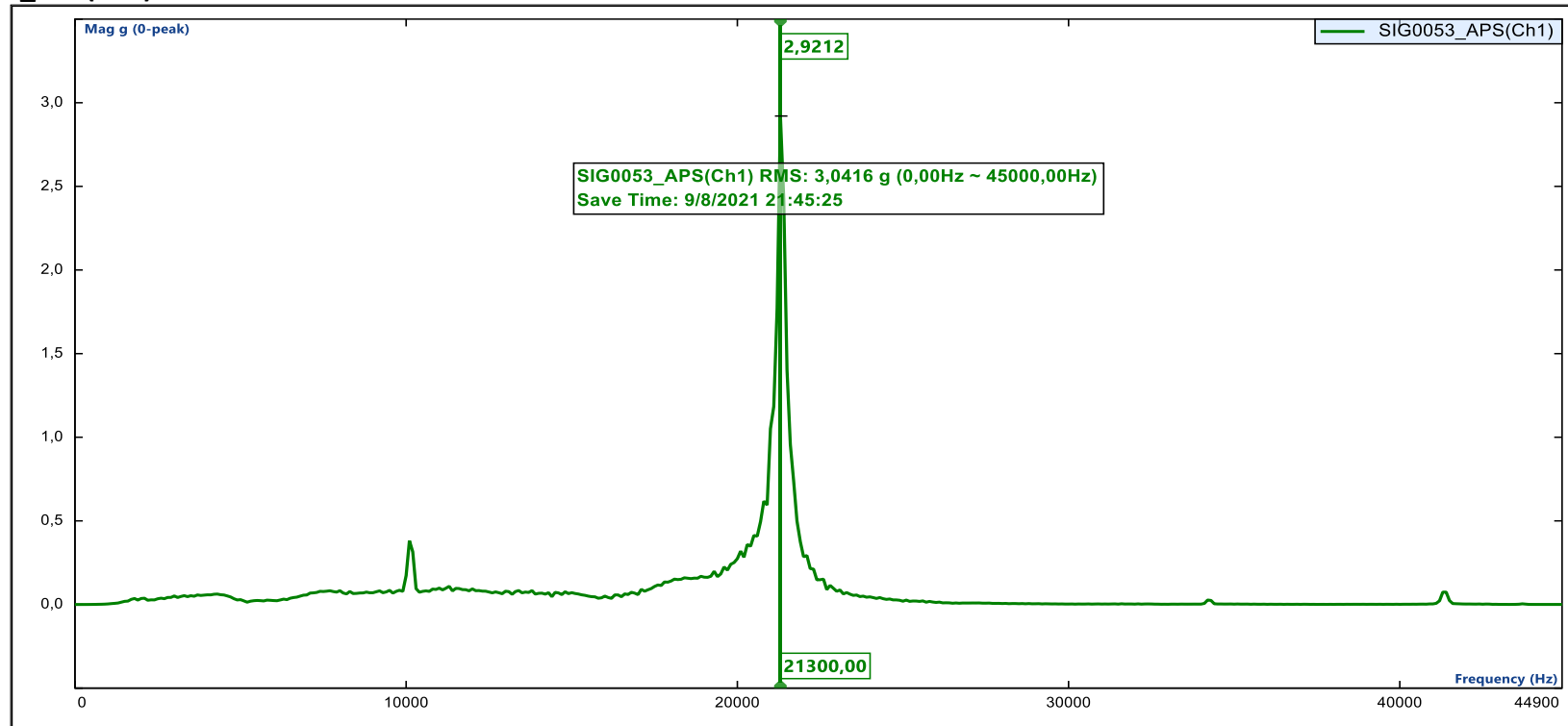
Aluminium L/D= 3.0 Longitudinal Test

Report time: Apr-03-2026 14:38:42 Data measured at: Aug-09-2021 21:45:25

Test name: SR-Aluminum9 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2 Serial Number (Master): 5785504

SIG0053_APS(Ch1)



Total elapsed time: 00:16:15 Run Start Time: Aug-09-2021 21:29:10

Test parameters

Frame#: 11 Frequency range (fa): 46,08 kHz Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Block Size/Line: 512/225 Window: Hanning Average mode: Linear Average number: 20

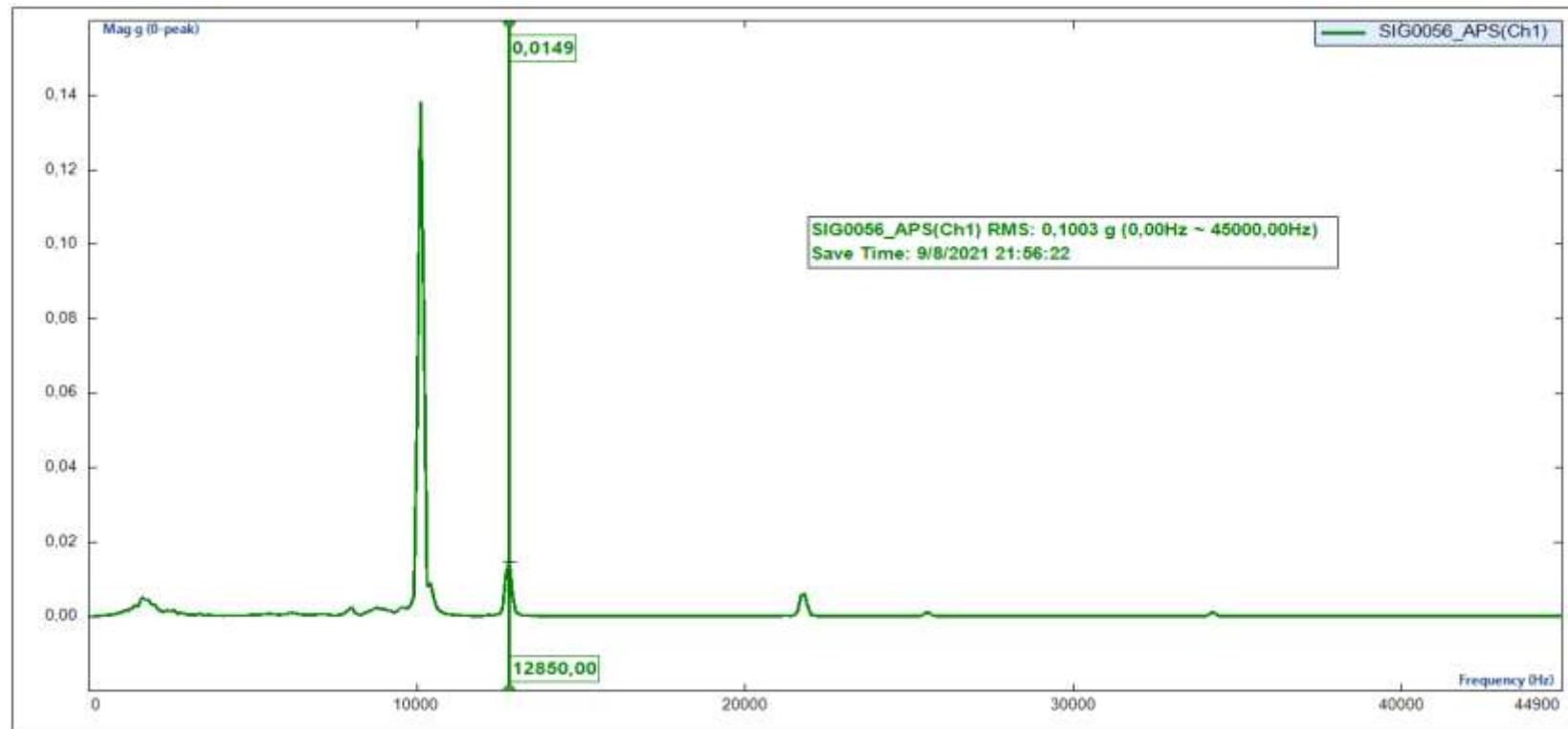
Aluminium L/D= 3.0 Transverse Test

Report time: Apr-03-2026 16:17:03 Data measured at: Aug-09-2021 21:56:22

Test name: SR-Aluminum9 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2 Serial Number (Master): 5785504

SIG0056_APS(Ch1)



Total elapsed time: 00:27:12 Run Start Time: Aug-09-2021, 21:29:10

Test parameters

Frame#: 19 Frequency range (fa): 46,08 kHz Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Block Size/Line: 512/225 Window: Hanning Average mode: Linear Average number: 20

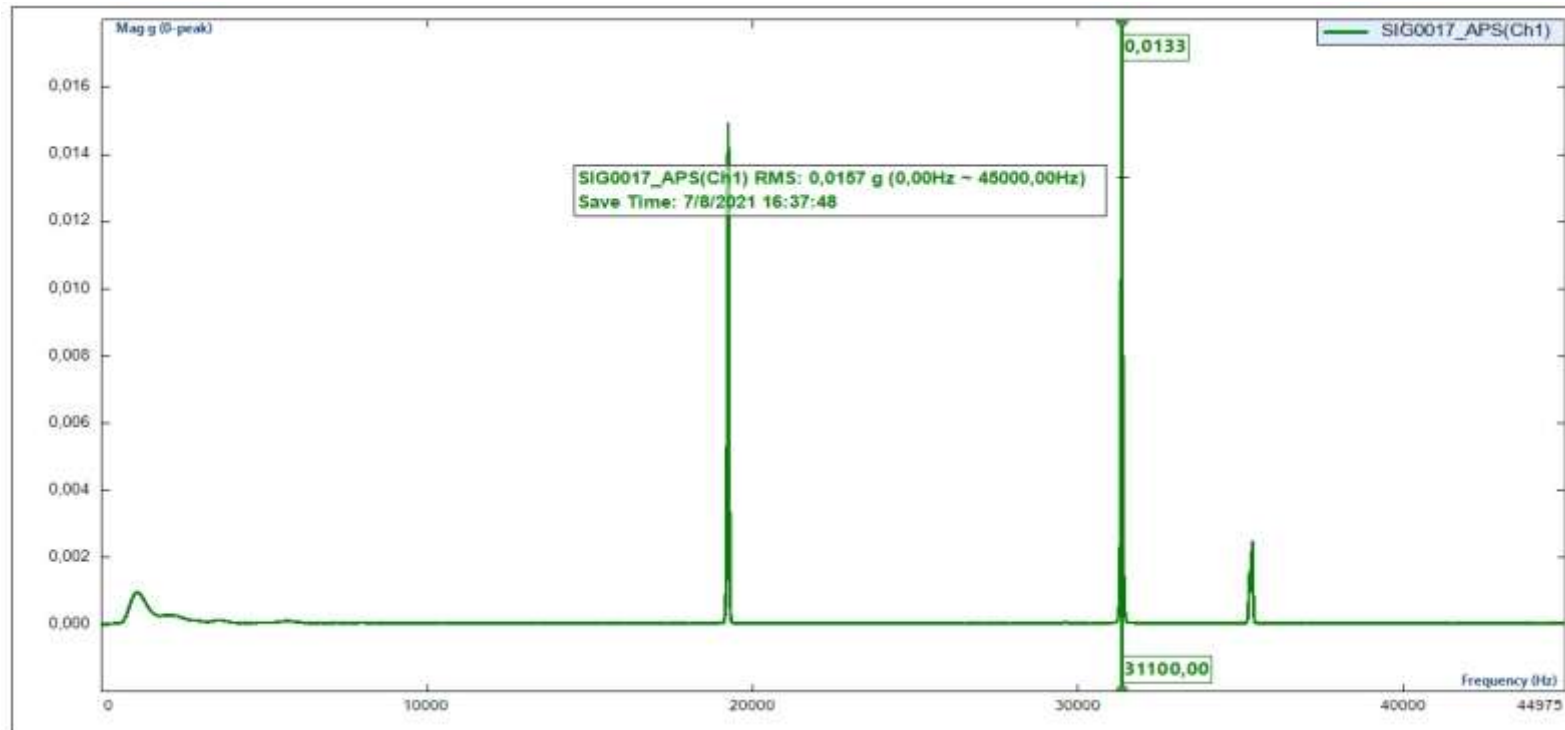
Aluminium L/D= 2.0 Longitudinal Test

Report time: Apr-03-2026 14:40:51 Data measured at: Aug-07-2021 16:37:48

Test name: SR-Aluminum9 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2 Serial Number (Master): 5785504

SIG0017_APS(Ch1)



Total elapsed time: 00:02:00 Run Start Time: Aug-09-2021 21:29:10

Test parameters

Frame#: 19 Frequency range (fa): 46,08 kHz Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Block Size/Line: 2048/900 Window: Hanning Average mode: Linear Average number: 20

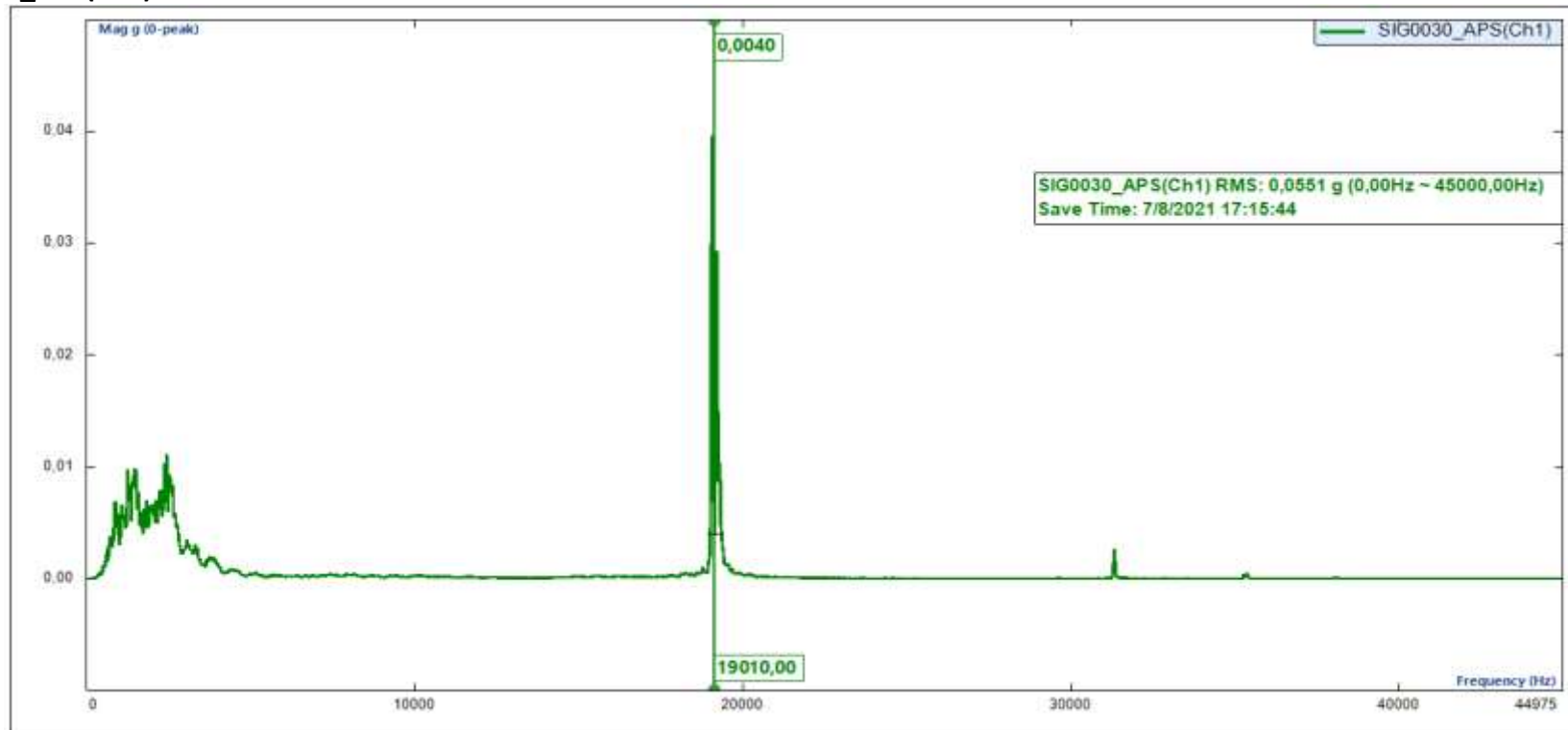
Aluminium L/D= 2.0 Transverse Test

Report time: Apr-03-2026 16:10:06 Data measured at: Aug-07-2021 17:15:44

Test name: SR-Aluminum9 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2 Serial Number (Master): 5785504

SIG0030_APS(Ch1)



Testing time

Total elapsed time: 00:01:28 Run Start Time: Aug-09-2021 17:14:16

Test parameters

Frame#: 0 / 20 Frequency range (fa): 46,08 kHz

Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Block Size/Line: 1024 / 450 Window: Hanning

Average mode: Linear

Average number: 20

Aluminium L/D= 1.2 Longitudinal Test

Report time: Apr-03-2026 14:42:59 Data measured at: Aug-09-2021 20:34:10

DSA: HP 35660A



Test parameters

Sampling Rate (fs): 102400 Hz

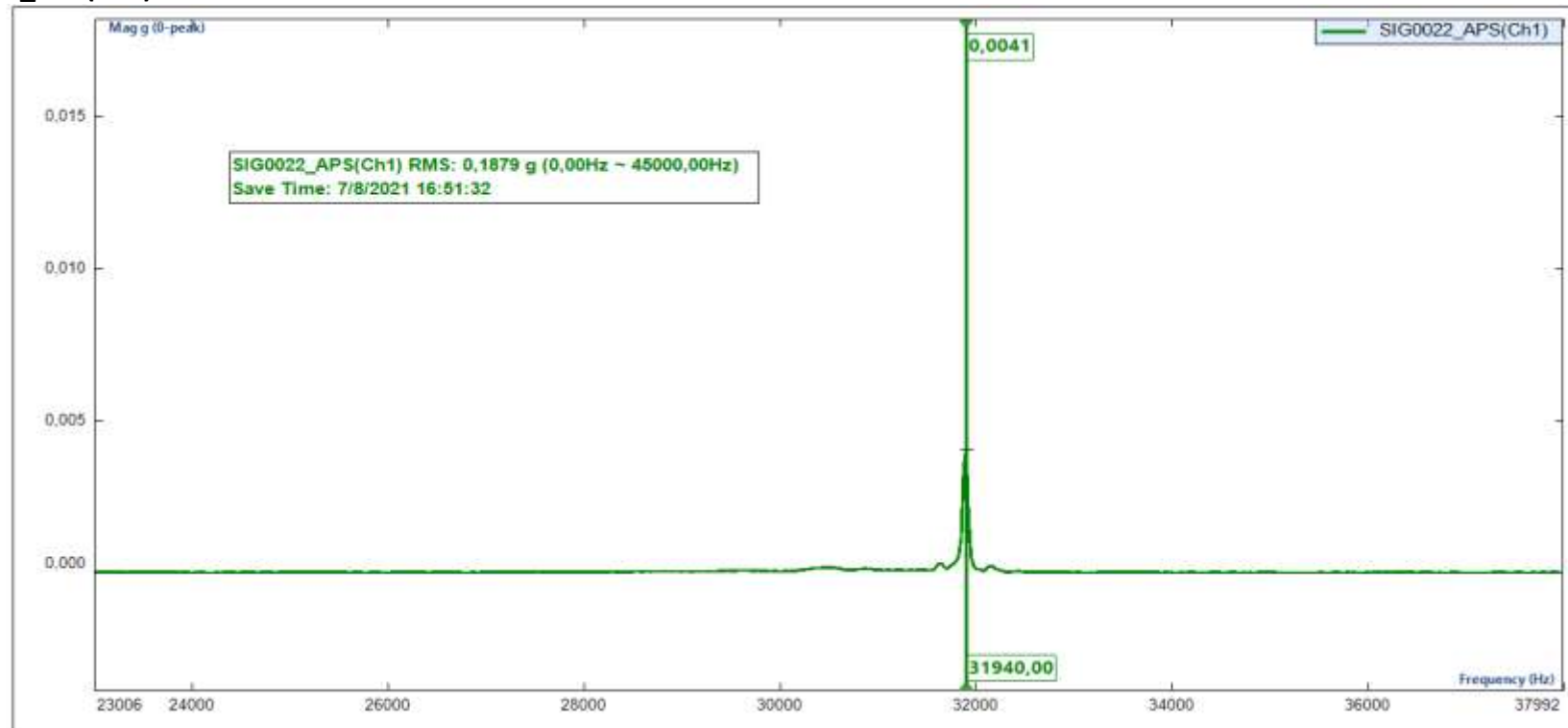
Aluminium L/D= 1.2 Transverse Test

Report time: Apr-03-2026 16:10:06 Data measured at: Aug-07-2021 16:51:32

Test name: SR-Aluminum9 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2 Serial Number (Master): 5785504

SIG0022_APS(Ch1)



Total elapsed time: 00:05:56 Run Start Time: Aug-07-2021, 16:45:36

Test parameters

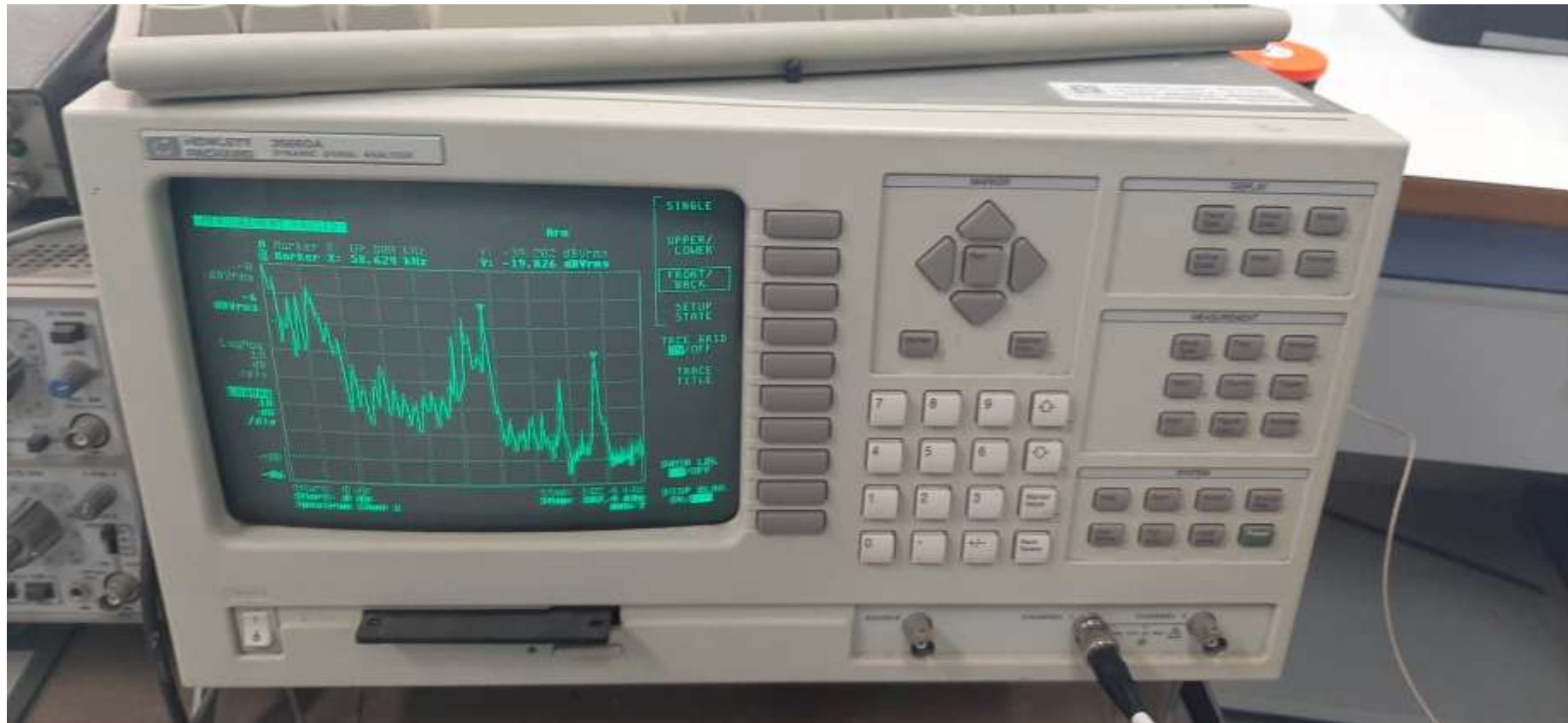
Frame#: 21 Frequency range (fa): 46,08 kHz Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Block Size/Line: 2048/900 Window: Hanning Average mode: Linear

Aluminium L/D= 1.0 Longitudinal Test

Report time: Apr-03-2026 14:42:59 **Data measured at:** Aug-09-2021 20:34:10

DSA: HP 35660A



Test parameters

Sampling Rate (fs): 102400 Hz

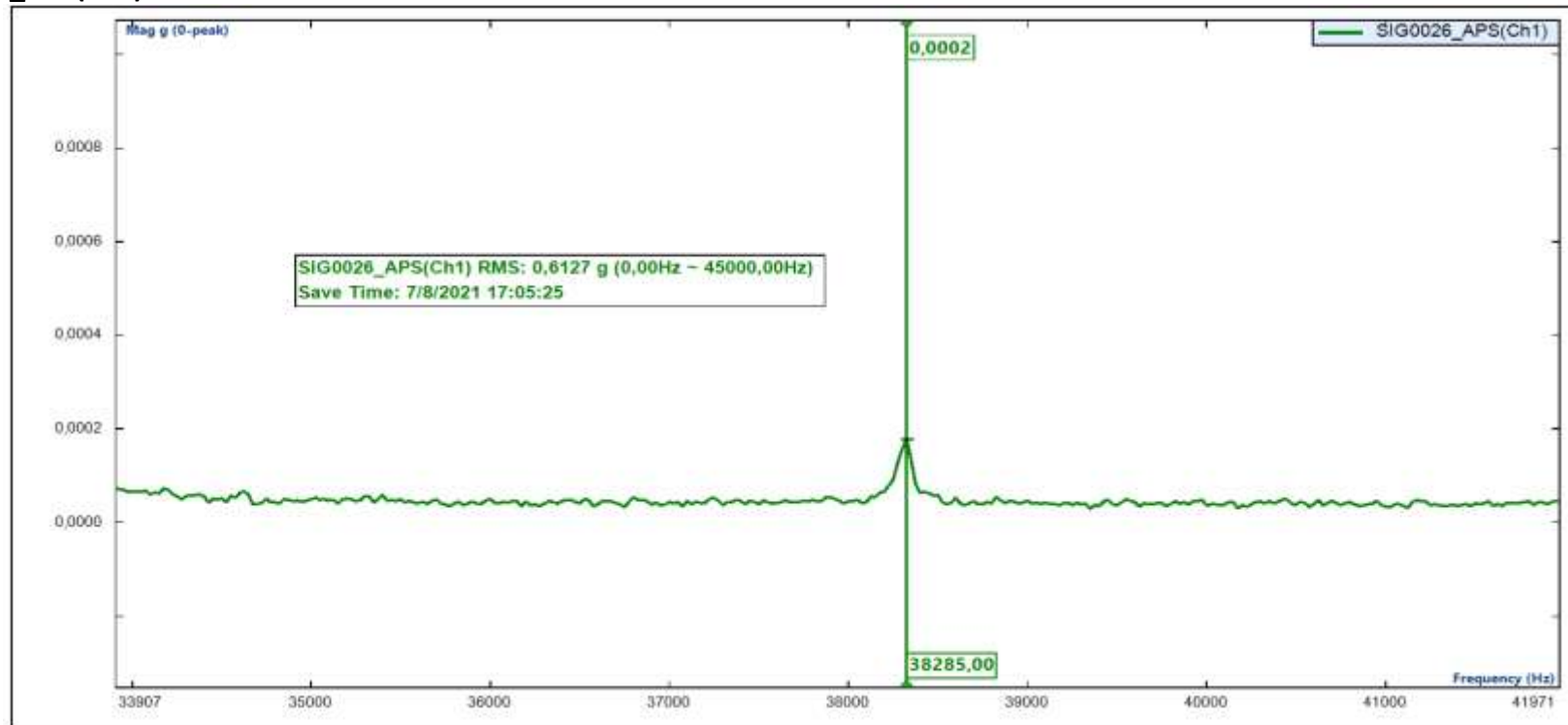
Aluminium L/D= 1.0 Transverse Test

Report time: Apr-03-2026 16:10:06 Data measured at: Aug-07-2021 16:51:32

Test name: SR-Aluminum9 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2 Serial Number (Master): 5785504

SIG0026_APS(Ch1)



Total elapsed time: 00:01:56 Run Start Time: Aug-07-2021, 17:03:29

Test parameters

Frame#: 20 Frequency range (fa): 46,08 kHz Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Block Size/Line: 2048/900 Window: Hanning Average mode: Linear Average number: 20

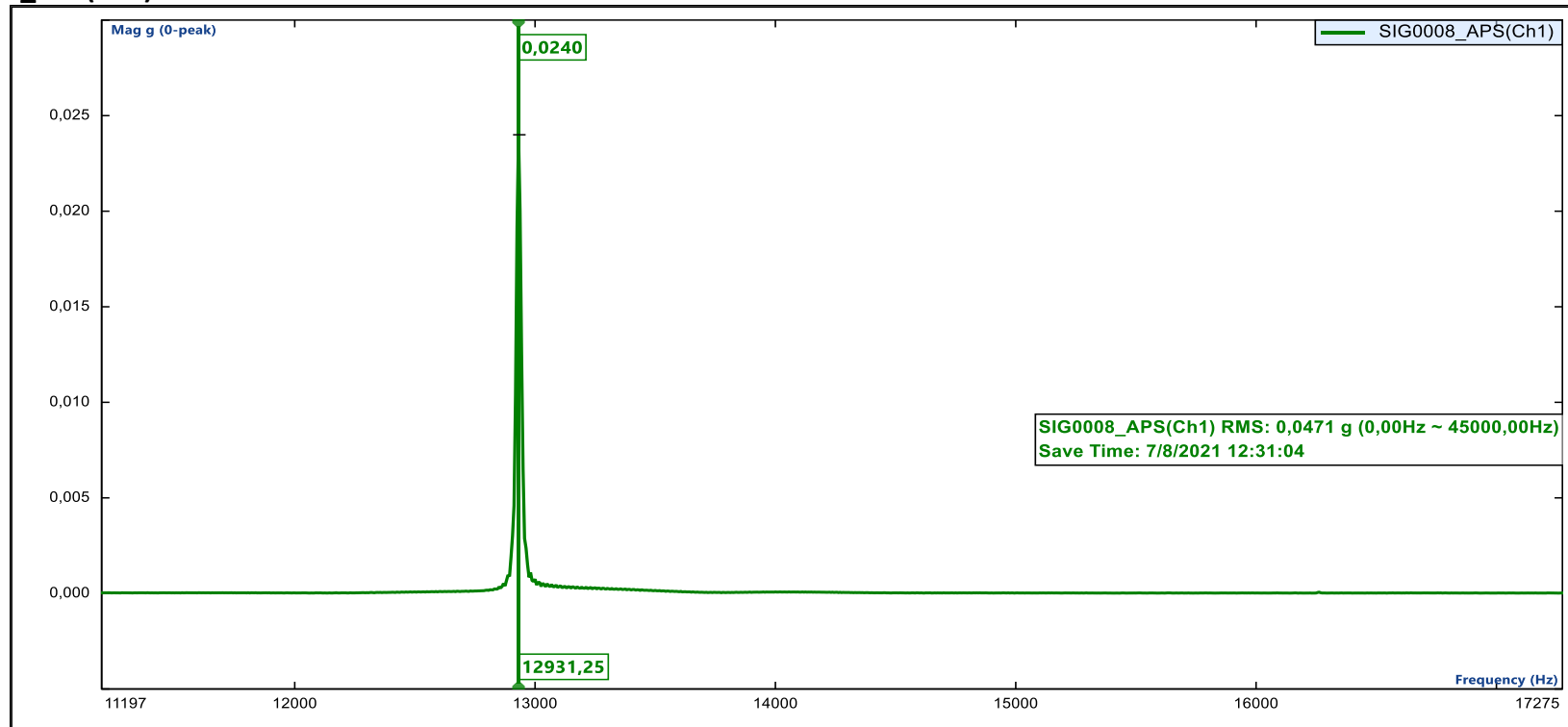
Steel L/D= 5.0 Longitudinal Test

Report time: Apr-03-2026 16:10:06 Data measured at: Aug-07-2021 16:51:32

Test name: SR-Steel7 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2 Serial Number (Master): 5785504

SIG0008_APS(Ch1)



Total elapsed time: 00:01:02 Run Start Time: Aug-07-2021, 12:30:01

Test parameters

Frame#: 20 Frequency range (fa): 46,08 kHz Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Block Size/Line: 8192/3600 Window: Hanning Average mode: Linear Average number: 20

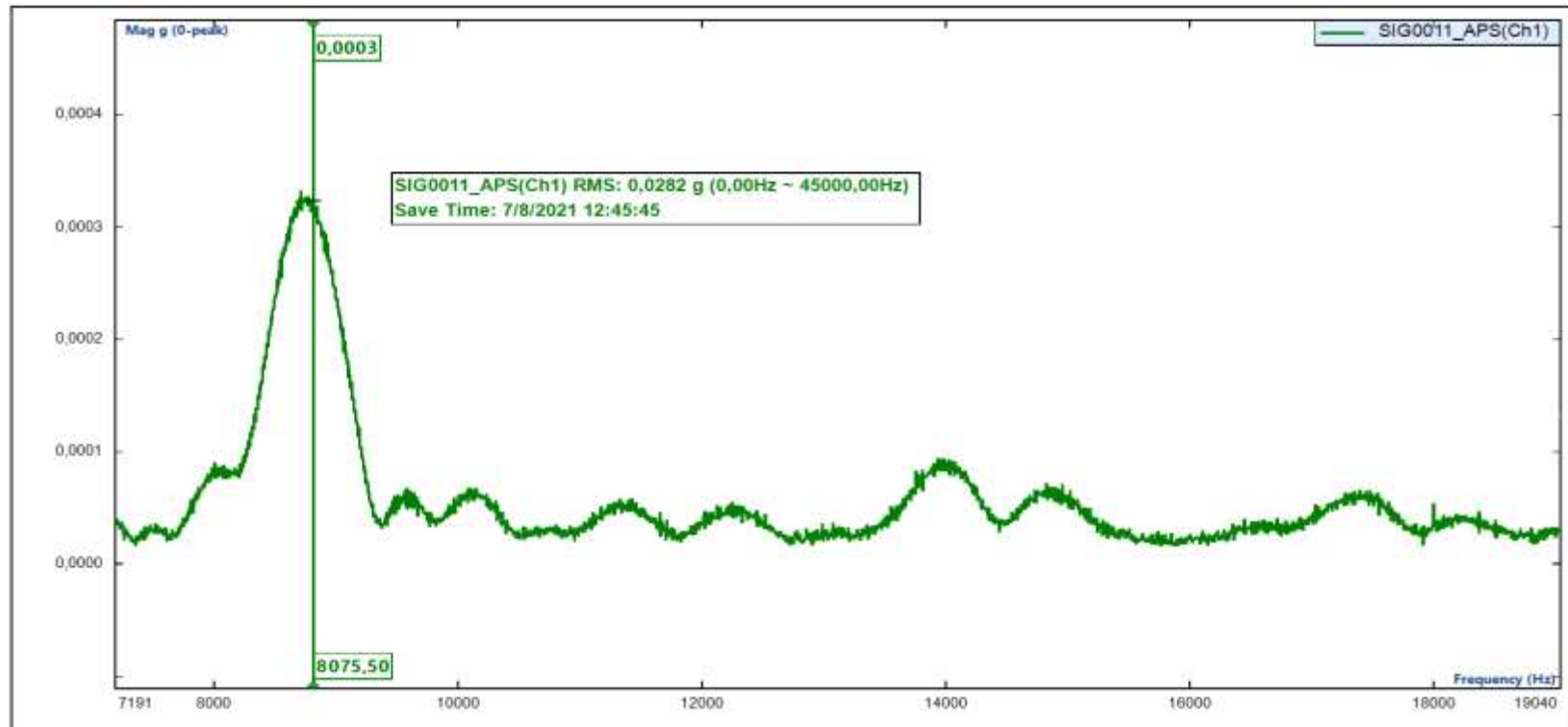
Steel L/D= 5.0 Transverse Test

Report time: Apr-03-2026 16:10:06 Data measured at: Aug-07-2021 12:45:45

Test name: SR-Steel7 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2 Serial Number (Master): 5785504

SIG0011_APS(Ch1)



Total elapsed time: 00:00:29 Run Start Time: Aug-07-2021, 12:45:16

Test parameters

Frame#: 20 Frequency range (fa): 46,08 kHz Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Block Size/Line: 8192/3600 Window: Hanning Average mode: Linear Average number: 20

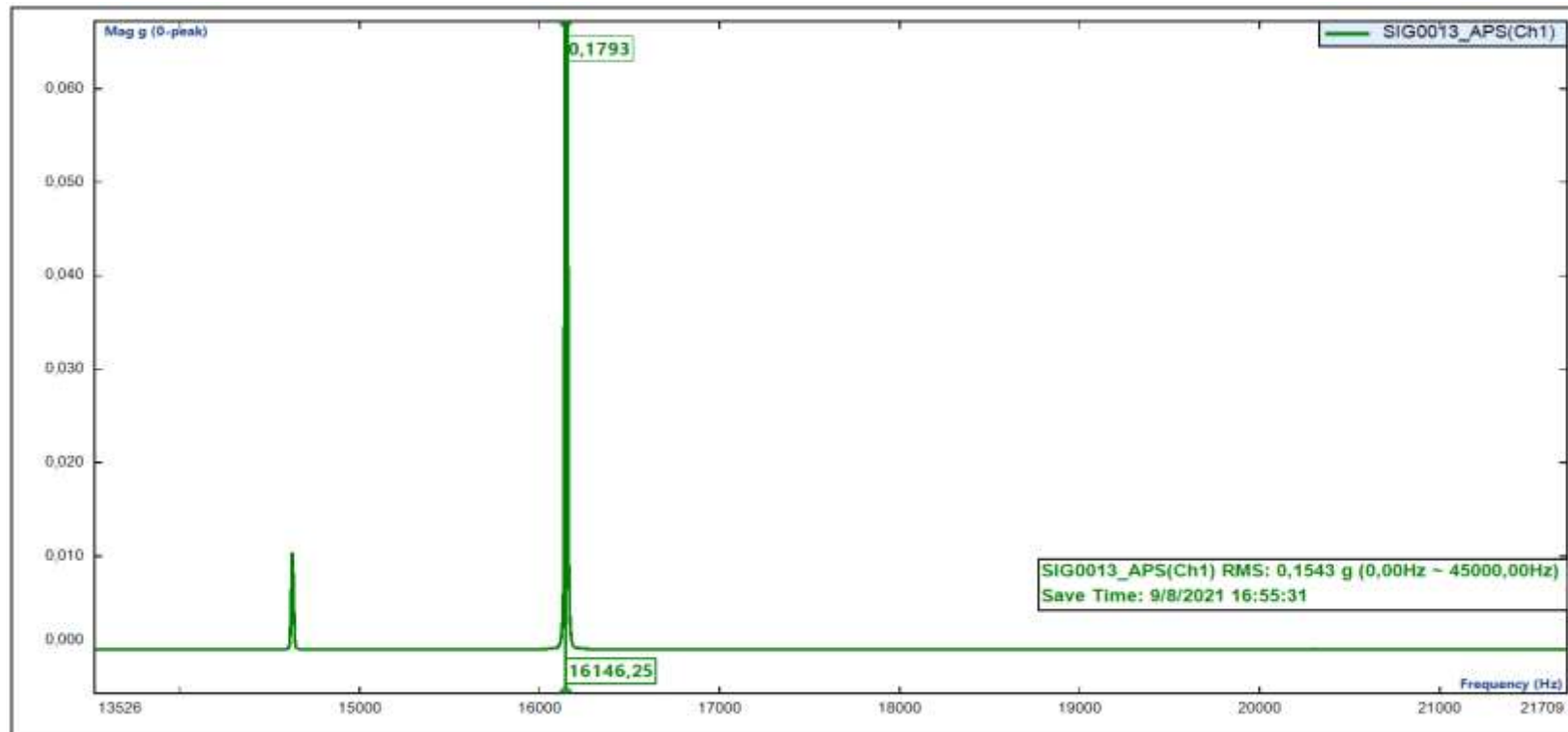
Steel L/D= 4.0 Longitudinal Test

Report time: Apr-03-2026 17:28:52 Data measured at: Aug-09-2021 16:55:31

Test name: SR-Steel7 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2 Serial Number (Master): 5785504

SIG00013_APS(Ch1)



Total elapsed time: 00:01:22 Run Start Time: Aug- 09-2021, 16:54:08

Test parameters

Frame#: 20 Frequency range (fa): 46,08 kHz

Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Block Size/Line: 8192/3600 Window: Hanning

Average mode: Linear

Average number: 20

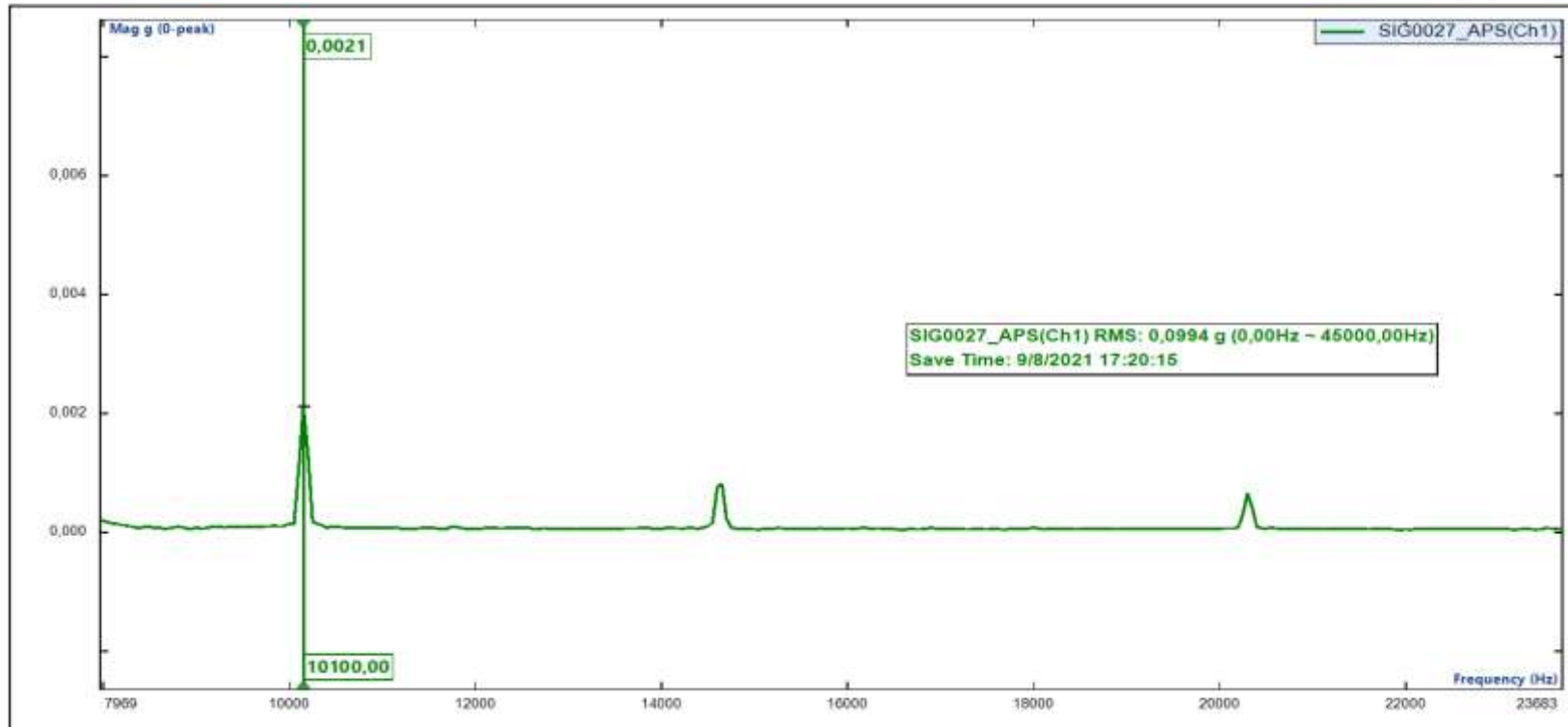
Steel L/D= 4.0 Transverse Test

Report time: Apr-03-2026 16:10:06 Data measured at: Aug-09-2021 17:20:15

Test name: SR-Steel7 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2 Serial Number (Master): 5785504

SIG0027_APS(Ch1)



Total elapsed time: 00:08:01 Run Start Time: Aug-09-2021, 17:12:14

Test parameters

Frame#: 19 Frequency range (fa): 46,08 kHz Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Block Size/Line: 1024/450 Window: Hanning Average mode: Linear Average number: 20

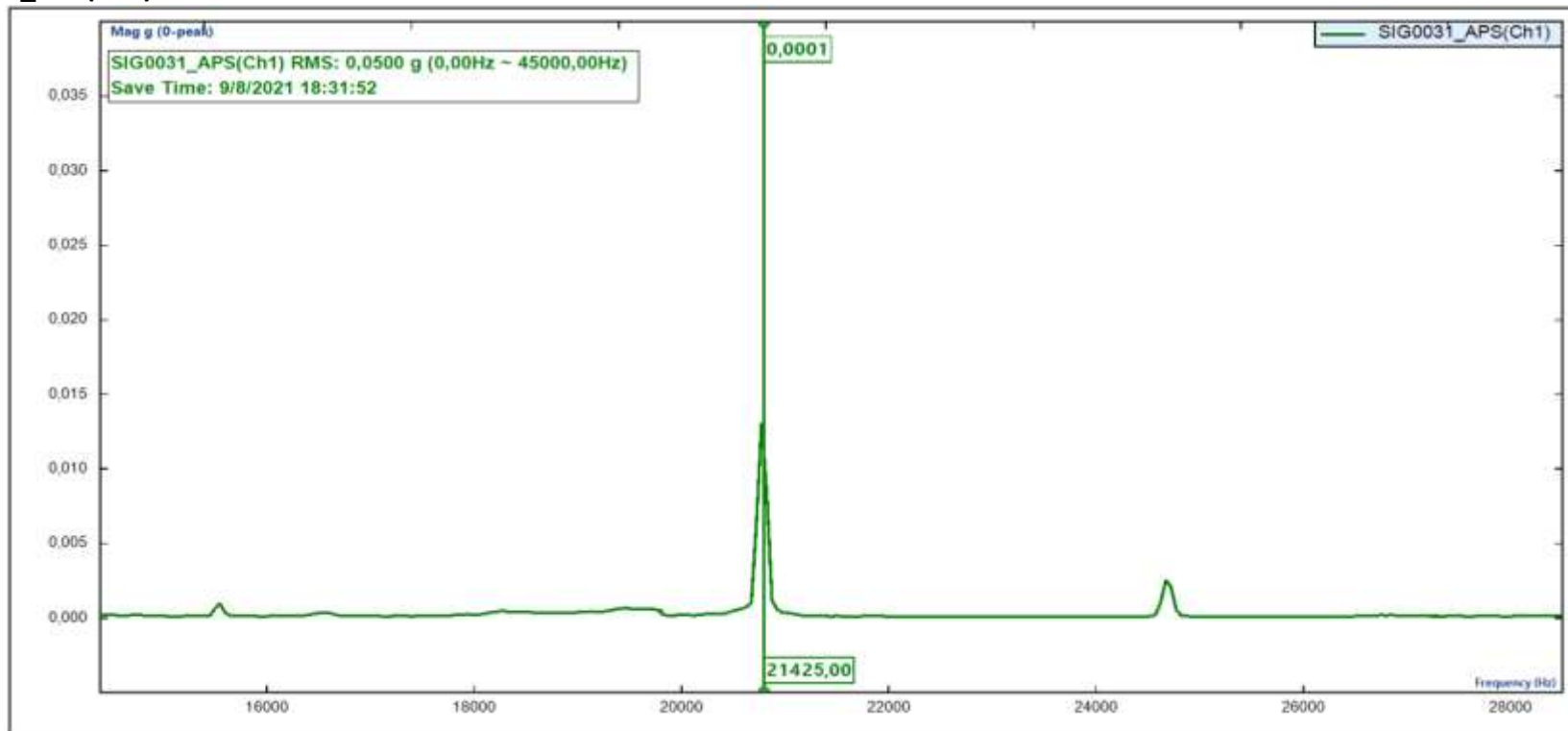
Steel L/D= 3.0 Longitudinal Test

Report time: Apr-03-2026 18:01:03 Data measured at: Aug-09-2021 18:31:52

Test name: SR-Steel7 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2 Serial Number (Master): 5785504

SIG0031_APS(Ch1)



Total elapsed time: 01:07:21 Run Start Time: Aug-09-2021, 17:24:30

Test parameters

Frame#: 20 Frequency range (fa): 46,08 kHz Sampling Rate (fs): 102400 Hz
Block Size/Line: 1024/450 Window: Hanning Average mode: Linear Average number: 20

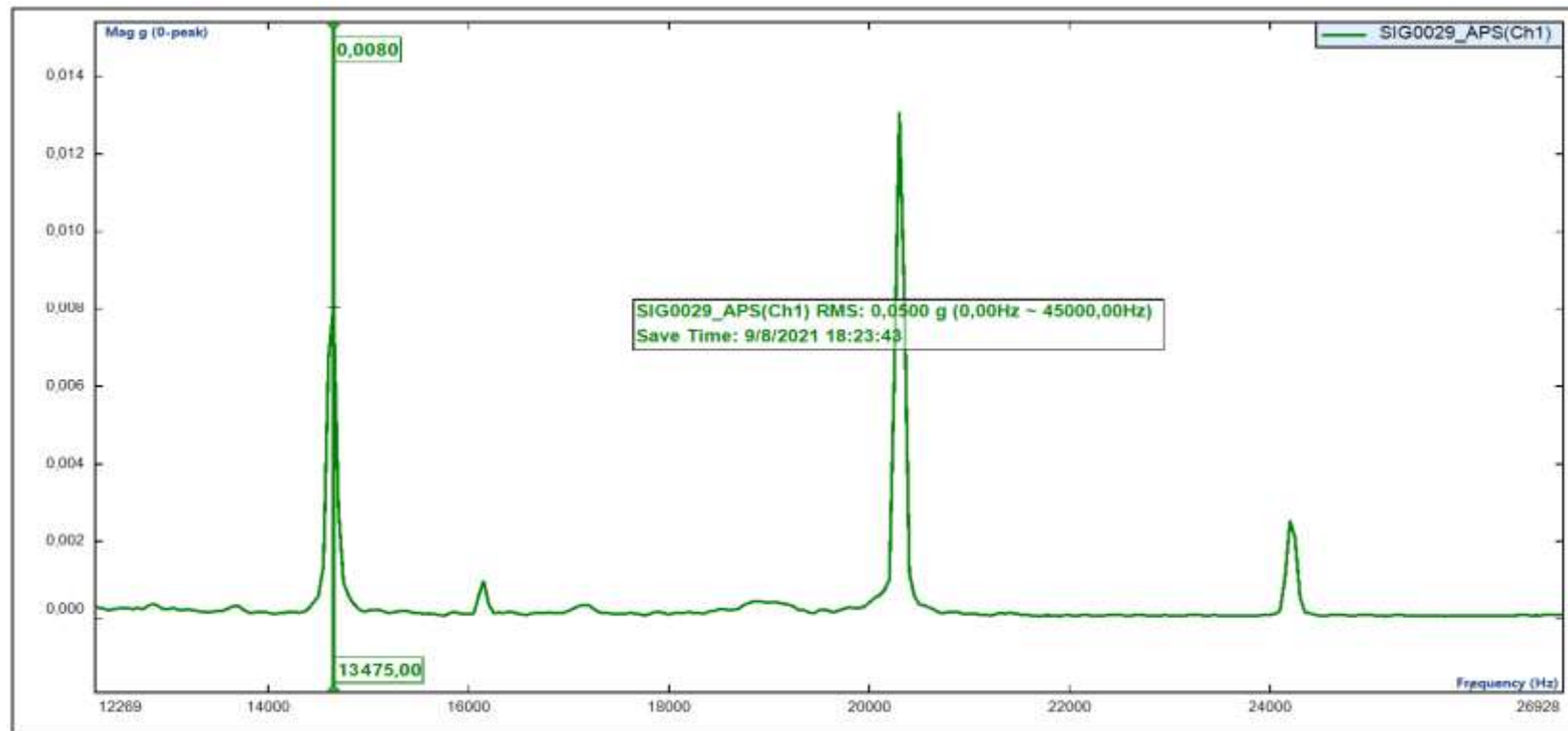
Steel L/D= 3.0 Transverse Test

Report time: Apr-03-2026 17:50:56 Data measured at: Aug-09-2021 18:23:43

Test name: SR-Steel7 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2 Serial Number (Master): 5785504

SIG0029_APS(Ch1)



Total elapsed time: 00:59:12 Run Start Time: Aug-09-2021, 17:24:30

Test parameters

Frame#: 19 Frequency range (fa): 46,08 kHz Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Block Size/Line: 1024/450 Window: Hanning Average mode: Linear Average number: 20

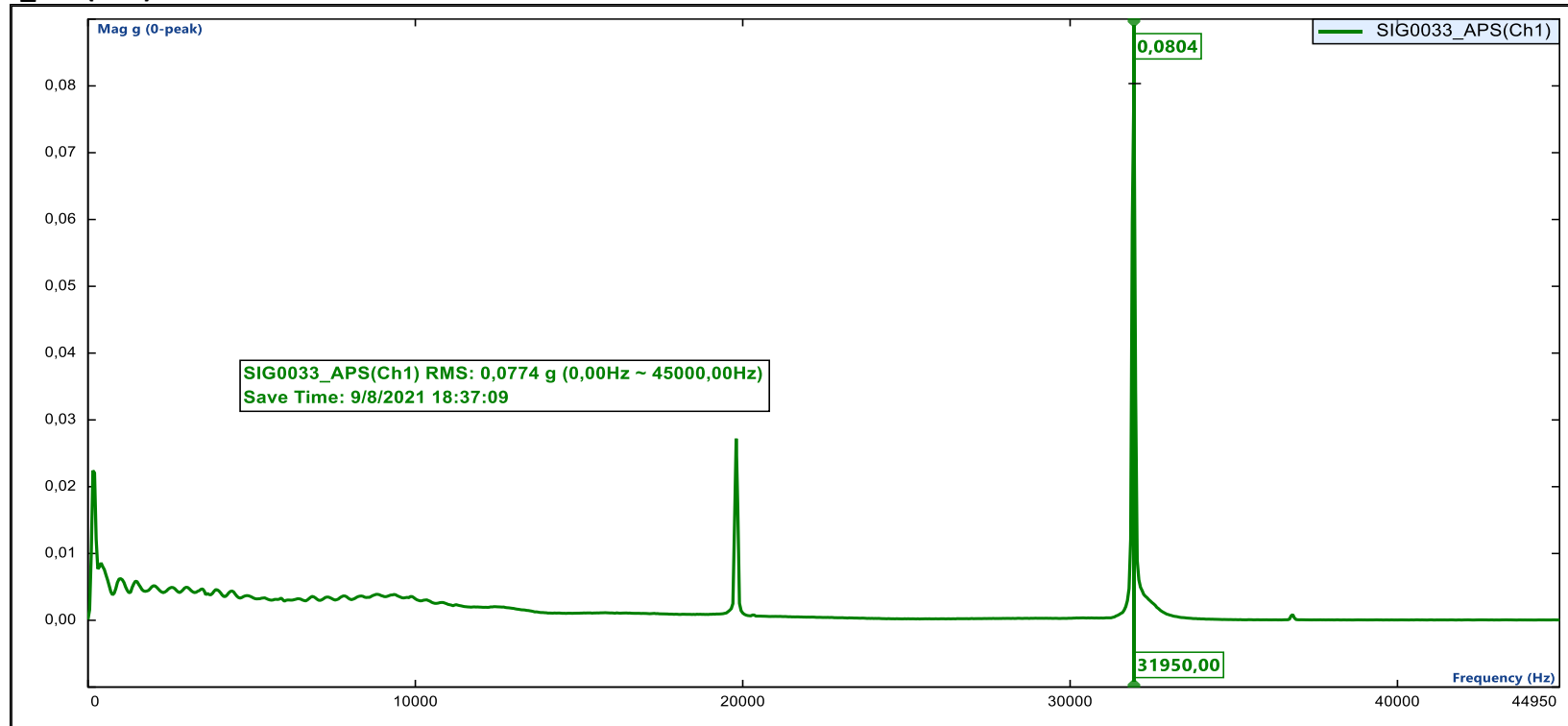
Steel L/D= 2.0 Longitudinal Test

Report time: Apr-03-2026 16:10:06 Data measured at: Aug-09-2021 18:37:09

Test name: SR-Steel7 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2 Serial Number (Master): 5785504

SIG0033_APS(Ch1)



Total elapsed time: 01:12:38 Run Start Time: Aug-09-2021, 17:24:30

Test parameters

Frame#: 19 Frequency range (fa): 46,08 kHz

Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Block Size/Line: 1024/450 Window: Hanning

Average mode: Linear

Average number: 20

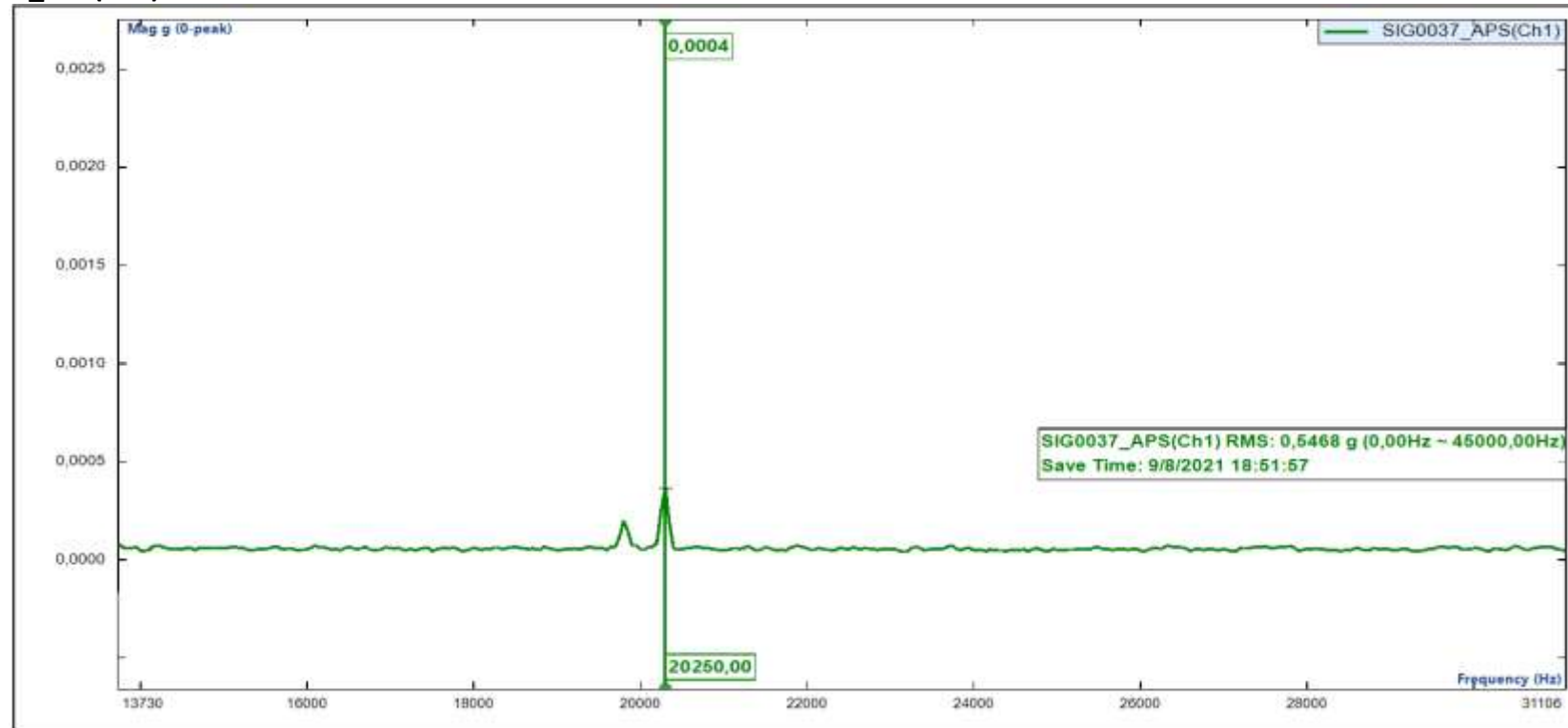
Steel L/D= 2.0 Transverse Test

Report time: Apr-03-2026 16:10:06 Data measured at: Aug-09-2021 18:51:57

Test name: SR-Steel7 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2 Serial Number (Master): 5785504

SIG0037_APS(Ch1)



Total elapsed time: 00:08:56 Run Start Time: Aug-09-2021, 18:43:01

Test parameters

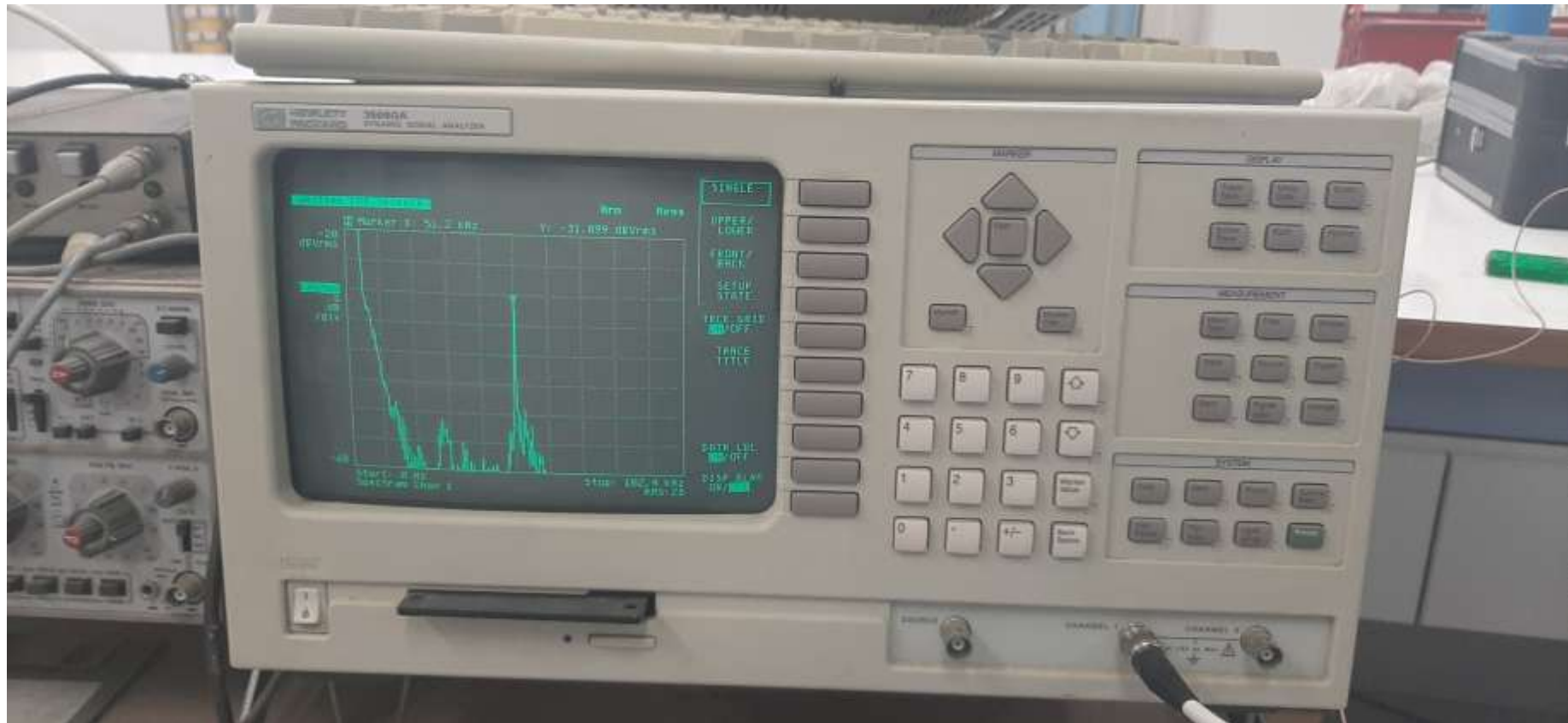
Frame#: 20 Frequency range (fa): 46,08 kHz Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Block Size/Line: 1024/450 Window: Hanning Average mode: Linear Average number: 20

Steel L/D= 1.2 Longitudinal Test

Report time: Apr-03-2026 14:42:59 Data measured at: Aug-09-2021 19:43:49

DSA: HP 35660A



Test parameters

Sampling Rate (fs): 102400 Hz

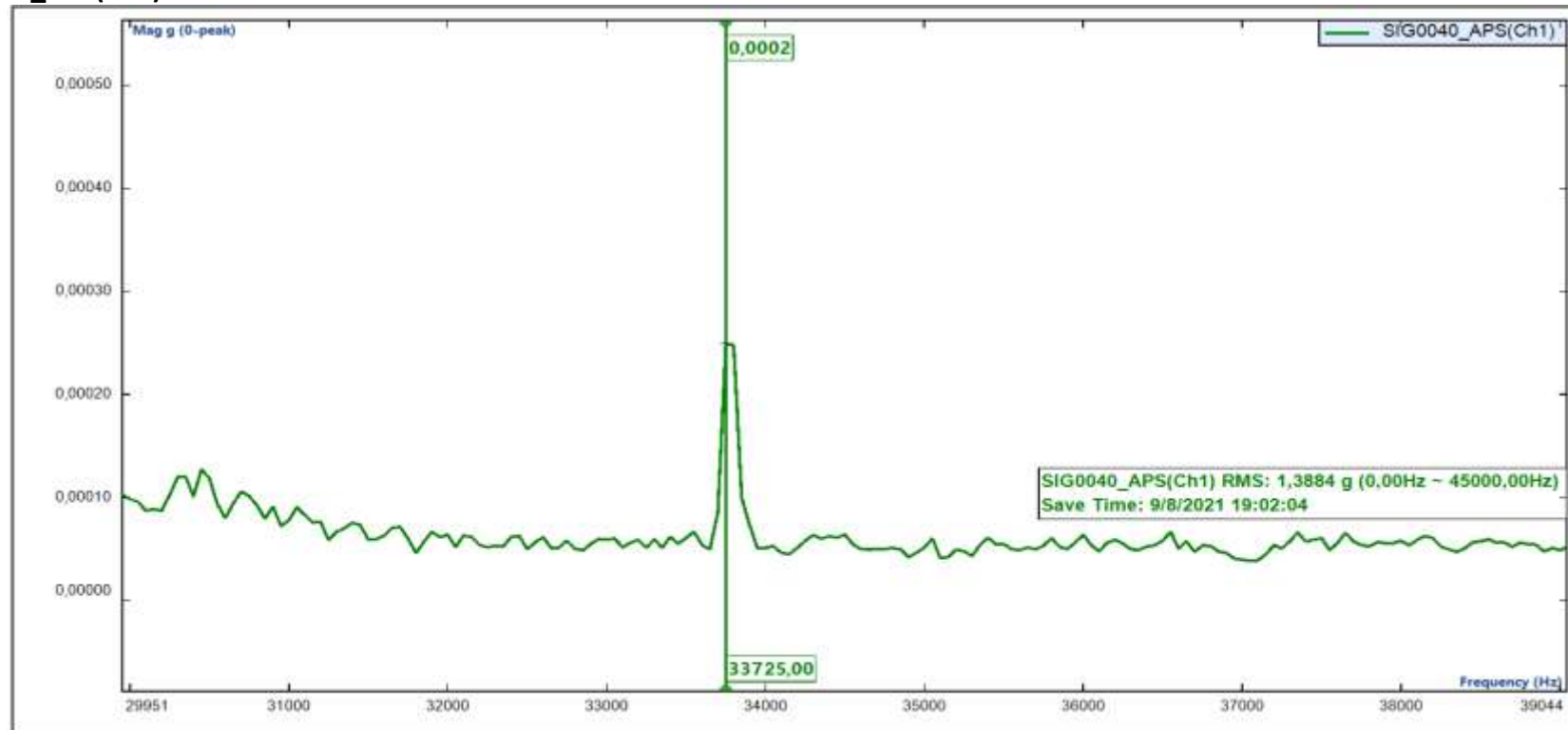
Steel L/D= 1.2 Transverse Test

Report time: Apr-03-2026 17:08:57 Data measured at: Aug-09-2021 19:02:04

Test name: SR-Steel7 Test type: DSA (FFT)

EDM version: 10.0.0.2 Serial Number (Master): 5785504

SIG0040_APS(Ch1)



Total elapsed time: 00:05:19 Run Start Time: Aug-09-2021, 18:56:45

Test parameters

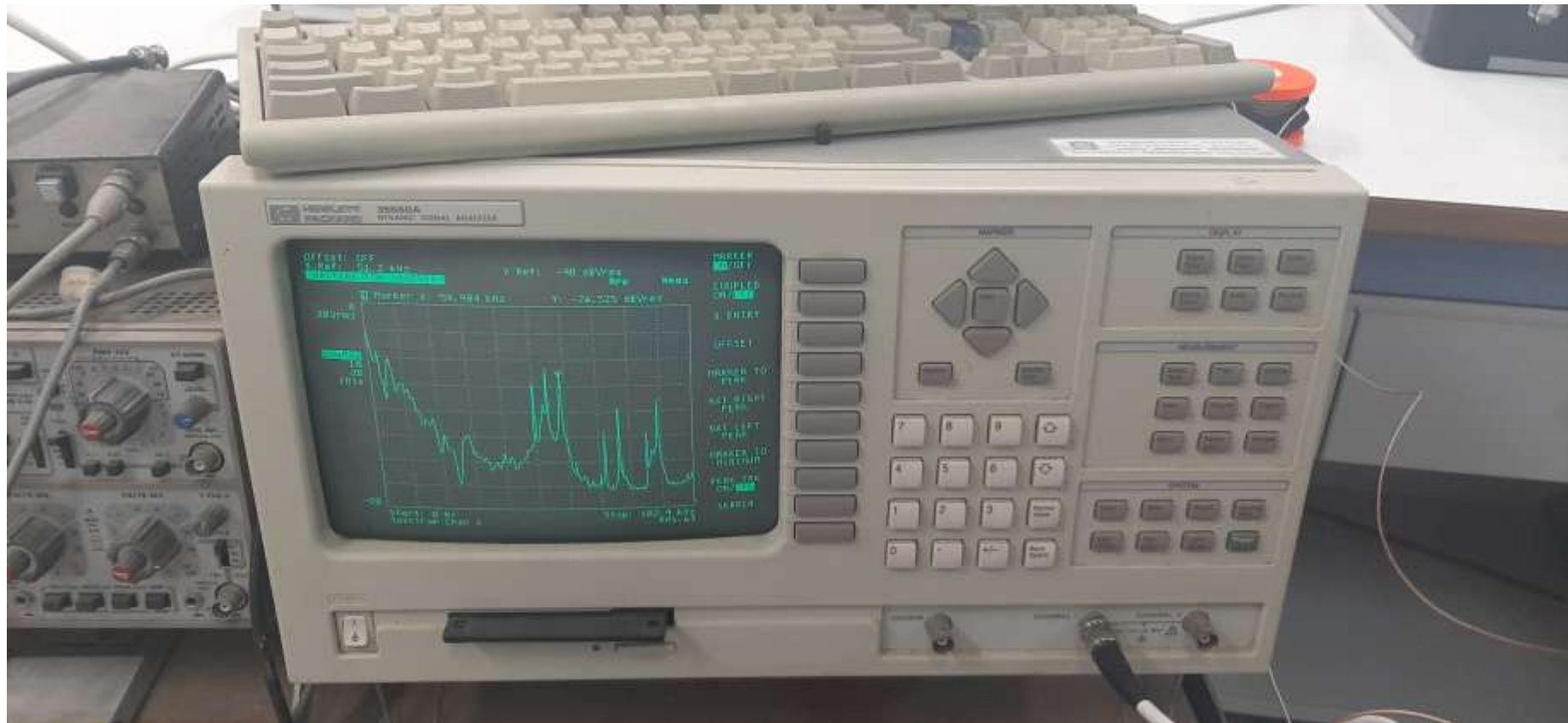
Frame#: 20 Frequency range (fa): 46,08 kHz Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Block Size/Line: 1024/450 Window: Hanning Average mode: Linear Average number: 20

Steel L/D= 1.0 Longitudinal Test

Report time: Apr-03-2026 14:42:59 Data measured at: Aug-09-2021 19:54:19

DSA: HP 35660A



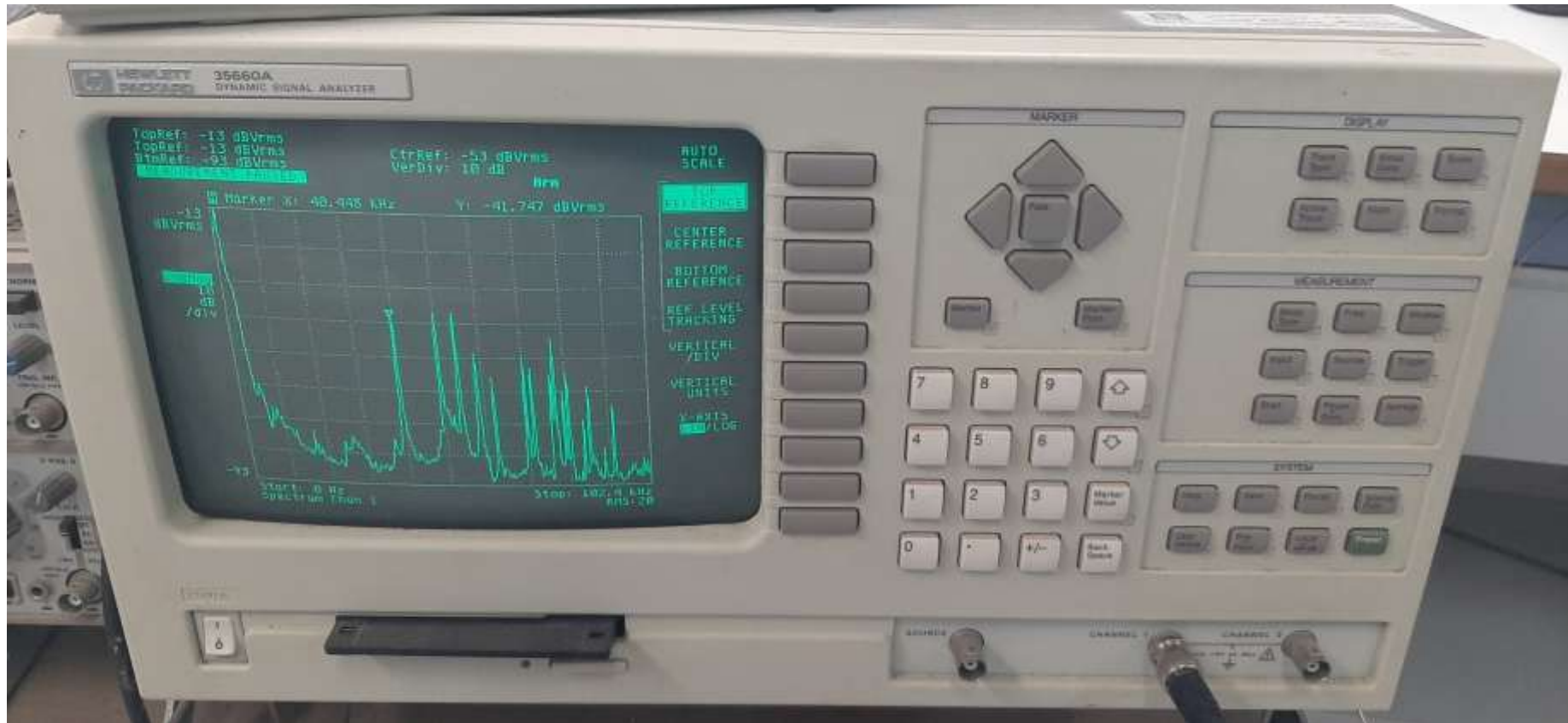
Test parameters

Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Steel L/D= 1.0 Transverse Test

Report time: Apr-03-2026 14:42:59 Data measured at: Aug-09-2021 19:58:57

DSA: HP 35660A



Test parameters

Sampling Rate (fs): 102400 Hz

Παράρτημα Ε - Πυρήνες υφιστάμενων κατασκευών

1. Πίνακας Μετρήσεων & Αποτελεσμάτων
2. Αποτελέσματα Δοκιμών Ακουστικού Συντονισμού
3. Σύγκριση Μετρήσεων UPV-IE ανά εύρος λόγου Poisson

Πίνακας Μετρήσεων & Αποτελεσμάτων

A/A	ΕΡΓΟ	ΠΥΡΗΝΑΣ	Υψος, L (cm)	Διάμετρος, D (cm)	Βάρος (gr)	Φορτίο Θραύσης, kN	γ_c (kN/m ³)	L/D	Αντοχή F_c (MPa)	Corrected F_c	Ταχύτητα Υπερήχων, V_p (km/s)	M (GPa)	f1 (kHz)	f2 (kHz)	assumed poisson	f1 Corrected (kHz)	V_c Corrected (km/s)	E_d (GPa)	ν (M - E_d)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	4ο Δημοτικό Σχολείο Αργοστολίου	Π1-I	9,81	9,91	1624	60	21,46	0,990	7,78	6,32	4,130	37,32	12,930		0,393	14,75	2,89	18,31	0,393
2		Π2-I	9,91	9,91	1615	68	21,13	1,000	8,82	7,19	3,900	32,76	14,460		0,331	16,15	3,20	22,06	0,331
3		Π3-I	10,17	9,91	1712	70	21,82	1,026	9,08	7,46	4,020	35,95	12,240		0,394	13,82	2,81	17,58	0,394
4		Π1-II	9,92	9,91	1690	99	22,09	1,001	12,84	10,47	4,210	39,91	16,000		0,319	17,78	3,53	28,01	0,319
5		Π2-II	10,02	9,91	1694	174	21,92	1,011	22,56	18,46	4,370	42,67	17,152		0,297	18,87	3,78	31,97	0,297
6		Π3-II	10,20	9,91	1799	134	22,87	1,029	17,37	14,30	4,910	56,19	17,408		0,341	19,34	3,95	36,29	0,341
7		Π4-II	10,16	9,91	1687	93	21,53	1,025	12,06	9,91	4,510	44,63	15,360		0,358	17,18	3,49	26,75	0,358
8		Π5-II	10,00	9,91	1703	94	22,08	1,009	12,19	9,97	4,390	43,37	15,744		0,343	17,60	3,52	27,87	0,343
9		Π6-II	10,17	9,91	1707	117	21,76	1,026	15,17	12,47	4,440	43,73	15,872		0,339	17,64	3,59	28,57	0,339
10	3ο ΓΥΜΝΑΣΙΟ Αργοστολίου	Π2-ΚΤ1	10,05	9,91	1730	198	22,32	1,014	25,67	21,02	4,630	48,77	17,024		0,330	18,92	3,80	32,91	0,330
11		Π3-ΚΤ1	10,10	9,91	1738	212	22,31	1,019	27,49	22,55	4,610	48,33	17,280		0,319	19,11	3,86	33,90	0,319
12		Π4-ΚΤ1	10,10	9,91	1741	168	22,35	1,019	21,78	17,87	4,590	47,99	17,024		0,324	18,86	3,81	33,08	0,324
13		Π5-ΚΤ1	7,02	9,91	1201	157	22,18	0,708	20,35	14,55	4,250	40,84	17,280		0,377	22,30	3,13	22,16	0,377
14		Π6-ΚΤ1	9,55	9,91	1639	122	22,25	0,964	15,82	12,74	4,410	44,11	17,280		0,317	19,39	3,70	31,10	0,317
15		Π1-ΚΤ4	10,15	9,91	1801	146	23,00	1,024	18,93	15,55	4,670	51,13	17,020		0,331	18,87	3,83	34,40	0,331
16		Π2-ΚΤ4	10,14	9,91	1779	196	22,74	1,023	25,41	20,87	4,550	47,99	17,280		0,311	19,04	3,86	34,56	0,311
17		Π3-ΚΤ4	9,10	9,91	1612	275	22,97	0,918	35,65	28,24	5,360	67,26	20,096		0,352	23,14	4,21	41,52	0,352
18		Π4-ΚΤ4	10,13	9,91	1803	130	23,08	1,022	16,85	13,84	4,810	54,42	17,150		0,341	19,09	3,87	35,17	0,341
19		Π5-ΚΤ4	10,10	9,91	1842	294	23,64	1,019	38,12	31,27	5,230	65,93	18,300		0,350	20,43	4,13	41,05	0,350
20		Π6-ΚΤ4	8,61	9,91	1519	206	22,87	0,869	26,71	20,74	4,960	57,36	19,840		0,341	23,19	3,99	37,18	0,341

A/A	ΕΡΓΟ	ΠΥΡΗΝΑΣ	Υψος, L (cm)	Διάμετρος, D (cm)	Βάρος (gr)	Φορτίο Θραύσης, kN	γ_c (kN/m ³)	L/D	Αντοχή F_c (MPa)	Corrected F_c	Ταχύτητα Υπερήχων, V_p (km/s)	M (GPa)	f1 (kHz)	f2 (kHz)	assumed poisson	f1 Corrected (kHz)	V_{c1} Corrected (km/s)	E_d (GPa)	ν (M - E_d)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	ΛΥΚΕΙΟ ΛΥΣΟΥΡΙΟΥ	Π1-ΛΗΞ	10,22	9,91	1787	140	22,67	1,031	18,15	14,95	4,320	43,13	13,440	16,890	0,387	15,12	3,09	22,08	0,387
22		Π2-ΛΗΞ	9,65	9,91	1659	173	22,29	0,974	22,43	18,13	4,660	49,34	13,820	17,660	0,409	15,90	3,07	21,39	0,409
23		Π3-ΛΗΞ	9,27	9,91	1583	135	22,14	0,935	17,50	13,95	4,220	40,19	14,210	17,790	0,384	16,43	3,05	20,94	0,384
24		Π4-ΛΗΞ	10,00	9,91	1649	156	21,38	1,009	20,22	16,54	4,310	40,48	15,870		0,331	17,68	3,54	27,24	0,331
25		Π5-ΛΗΞ	9,83	9,91	1574	126	20,76	0,992	16,34	13,28	4,010	34,03	14,850		0,334	16,64	3,27	22,64	0,334
26		Π6-ΛΗΞ	10,11	9,91	1758	223	22,54	1,020	28,91	23,72	4,760	52,07	17,410		0,330	19,32	3,91	35,08	0,330
27		Π7-ΛΗΞ	10,20	9,91	1639	110	20,83	1,029	14,26	11,74	4,230	38,00	15,100		0,338	16,78	3,42	24,88	0,338
28		Π8-ΛΗΞ	10,03	9,91	1846	170	23,86	1,012	32,70	26,77	4,780	55,57	18,560	28,016	0,303	20,44	4,10	40,90	0,303
29		Π9-ΛΗΞ	9,67	9,91	1586	127	21,26	0,976	16,47	13,32	4,320	40,45	16,768		0,317	18,76	3,63	28,53	0,317
30		Π10-ΛΗΞ	9,96	9,91	1642	137	21,37	1,005	17,76	14,51	4,270	39,72	16,256		0,316	18,04	3,59	28,13	0,316
31		Π11-ΛΗΞ	8,96	9,91	1422	80	20,58	0,904	10,37	8,17	4,190	36,82	13,952		0,393	16,37	2,93	18,05	0,393
32		Π12-ΛΗΞ	9,94	9,91	1653	124	21,56	1,003	16,08	13,12	4,170	38,22	15,616		0,325	17,39	3,46	26,25	0,325
33		Π13-ΛΗΞ	10,25	9,91	1786	204	22,58	1,034	26,45	21,80	4,620	49,14	16,360		0,340	18,15	3,72	31,88	0,340
34		Π14-ΛΗΞ	10,12	9,91	1680	152	21,52	1,021	19,71	16,18	4,360	41,71	15,872		0,332	17,63	3,57	27,94	0,332
35		Π15-ΛΗΞ	9,73	9,91	1640	154	21,85	0,982	19,97	16,18	4,160	38,55	14,840		0,353	16,76	3,26	23,70	0,353

A/A	ΕΡΓΟ	ΠΥΡΗΝΑΣ	Υψος, L (cm)	Διάμετρος, D (cm)	Βάρος (gr)	Φορτίο Θραύσης, kN	γ_c (kN/m ³)	L/D	Αντοχή F_c (MPa)	Corrected F_c	Ταχύτητα Υπερήχων, V_p (km/s)	M (GPa)	f1 (kHz)	f2 (kHz)	assumed poisson	f1 Corrected (kHz)	V_{c1} Corrected (km/s)	E_d (GPa)	ν (M - E_d)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
36	ΓΥΜΝΑΣΙΟ ΛΗΘΟΥΡΙΟΥ	Π16-ΛΗΞ	10,06	9,91	1791	155	23,08	1,015	20,10	16,46	4,740	52,86	14,460		0,395	16,37	3,29	25,53	0,395
37		Π17-ΛΗΞ	9,96	9,91	1753	365	22,82	1,005	47,32	38,65	4,980	57,69	18,690		0,324	20,77	4,14	39,83	0,324
38		Π18-ΛΗΞ	10,40	9,91	1861	321	23,20	1,049	41,62	34,46	4,960	58,18	18,300		0,316	20,08	4,18	41,23	0,316
39		Π19-ΛΗΞ	10,35	9,91	1805	253	22,61	1,044	32,80	27,12	4,700	50,91	17,280		0,319	19,00	3,93	35,67	0,319
40		Π20-ΛΗΞ	10,08	9,91	1734	211	22,30	1,017	27,36	22,43	4,440	44,82	17,660		0,286	19,33	3,90	34,53	0,286
41		Π21-ΛΗΞ	9,75	9,91	1652	230	21,97	0,984	29,82	24,18	4,400	43,35	17,920		0,287	19,78	3,86	33,33	0,287
42		Π22-ΛΗΞ	9,65	9,91	1695	289	22,77	0,974	37,47	30,28	4,990	57,80	19,200		0,323	21,51	4,15	40,02	0,323
43		Π23-ΛΗΞ	10,00	9,91	1708	241	22,14	1,009	31,24	25,55	4,500	45,71	17,408		0,306	19,22	3,84	33,36	0,306
44		Π24-ΛΗΞ	10,20	9,91	1806	196	22,96	1,029	25,41	20,91	4,720	52,13	16,510		0,347	18,38	3,75	32,88	0,347
45		Π25-ΛΗΞ	10,25	9,91	1762	135	22,29	1,034	17,50	14,43	4,010	36,53	13,163		0,369	14,73	3,02	20,72	0,369
46	ΛΥΚΕΙΟ ΛΥΞΟΥΡΙΟΥ	Π26-ΛΗΞ	10,12	9,91	1723	175	22,07	1,021	22,69	18,62	4,350	42,56	16,260		0,319	17,98	3,64	29,80	0,319
47		Π27-ΛΗΞ	9,95	9,91	1645	180	21,43	1,004	23,34	19,05	4,180	38,16	15,740		0,322	17,50	3,48	26,50	0,322
48		Π28-ΛΗΞ	10,09	9,91	1674	117	21,51	1,018	15,17	12,44	3,980	34,73	14,590		0,330	16,21	3,27	23,46	0,330
49		Π29-ΛΗΞ	10,00	9,91	1631	86	21,15	1,009	11,15	9,12	4,070	35,71	15,360		0,319	17,04	3,41	25,05	0,319
50		Π30-ΛΗΞ	9,78	9,91	1628	98	21,58	0,987	12,71	10,31	4,350	41,63	15,740		0,346	17,72	3,47	26,42	0,346
51		Π31-ΛΗΞ	9,93	9,91	1708	122	22,29	1,002	15,82	12,90	4,820	52,80	17,920		0,329	19,97	3,97	35,76	0,329
52		Π32-ΛΗΞ	10,00	9,91	1757	232	22,78	1,009	30,08	24,60	5,010	58,28	18,180		0,338	20,28	4,06	38,19	0,338
53		Π33-ΛΗΞ	10,17	9,91	1798	231	22,92	1,026	29,95	24,62	4,670	50,96	17,920		0,304	19,68	4,00	37,46	0,304

A/A	ΕΡΓΟ	ΠΥΡΗΝΑΣ	Υψος, L (cm)	Διάμετρος, D (cm)	Βάρος (gr)	Φορτίο Θραύσης, kN	γ_c (kN/m ³)	L/D	Αντοχή F_c (MPa)	Corrected F_c	Ταχύτητα Υπερήχων, V_p (km/s)	M (GPa)	f1 (kHz)	f2 (kHz)	assumed poisson	f1 Corrected (kHz)	V_{c1} Corrected (km/s)	E_d (GPa)	ν (M - E_d)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
54	5ο Γυμνάσιο Αμαρουσίου ΥΛΟΣ ΚΤ1_ΚΤ2_ΚΑΝΑΒΑ_Μ ΠΑΡΟΣ	Π1-MAP	9,97	9,95	1751	186	22,59	1,002	23,92	19,52	4,793	52,91	17,792	26,750	0,328	19,82	3,95	35,96	0,328
55		Π2-MAP	8,41	9,90	1450	154	22,39	0,849	20,01	15,41	4,358	43,34	19,330		0,297	22,42	3,77	32,47	0,297
56		Π3-MAP	8,22	9,90	1428	100	22,56	0,830	12,99	9,92	4,152	39,64	18,300		0,308	21,51	3,54	28,76	0,308
57		Π1-KAN-KT2	9,91	9,90	1625	246	21,30	1,001	31,96	26,06	4,253	39,28	15,360		0,342	17,21	3,41	25,26	0,343
58		Π1-KAN-KT1	9,86	9,96	1624	200	21,15	0,990	25,67	20,86	3,913	33,00	14,340		0,337	16,08	3,17	21,69	0,337
59		Π2-KAN-KT1	10,00	9,95	1630	130	20,96	1,005	16,72	13,65	4,132	36,48	12,540		0,397	14,26	2,85	17,38	0,397
60		Π2-KAN-KT2	9,90	9,80	1527	113	20,45	1,010	14,98	12,25	4,024	33,77	12,000		0,404	13,66	2,71	15,26	0,404
61		Π3-KAN-KT1	10,18	9,90	1682	96	21,47	1,028	12,47	10,26	4,056	36,00	10,880		0,421	12,38	2,52	13,90	0,421
62		Π3-KAN-KT2	10,02	9,98	1607	100	20,51	1,004	12,78	10,44	3,945	32,53	12,930		0,375	14,62	2,93	17,94	0,375
63		T1	9,94	10,40	1860	292	22,03	0,956	34,37	27,61	4,802	51,78	17,408	26,200	0,335	19,66	3,91	34,31	0,335
64		T2	10,05	10,42	1960	427	22,87	0,964	50,07	40,34	4,832	54,43	18,432	27,500	0,306	20,55	4,13	39,76	0,306
65		Π1	10,13	10,41	1966	391	22,80	0,973	45,94	37,12	4,756	52,57	18,048	26,500	0,306	20,07	4,07	38,43	0,306
66		Π2	9,88	10,43	1920	394	22,74	0,947	46,11	36,93	4,867	54,92	18,176		0,323	20,49	4,05	38,00	0,323
67		Π3	9,98	10,43	2015	356	23,63	0,957	41,67	33,48	4,892	57,65	17,792		0,332	20,05	4,00	38,59	0,332

A/A	ΕΡΓΟ	ΠΥΡΗΝΑΣ	Υψος, L (cm)	Διάμετρος, D (cm)	Βάρος (gr)	Φορτίο Θραύσης, kN	γ_c (kN/m ³)	L/D	Αντοχή F_c (MPa)	Corrected F_c	Ταχύτητα Υπερήχων, V_p (km/s)	M (GPa)	f1 (kHz)	f2 (kHz)	assumed poisson	f1 Corrected (kHz)	V_{c1} Corrected (km/s)	E_d (GPa)	ν (M - E_d)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
68	ΕΚΑΛΗ	Π1	10,20	9,91	1761	262	22,40	1,029	33,98	27,96	5,024	57,62	17,664		0,345	19,65	4,01	36,68	0,345
69		Π2	9,96	9,91	1750	215	22,79	1,005	27,89	22,77	4,674	50,75	18,304		0,301	20,19	4,02	37,56	0,301
70		Π3	6,95	9,91	1201	200	22,43	0,701	25,94	18,45	4,543	47,19	21,632	30,500	0,314	27,60	3,83	33,62	0,314
71		Π1	10,12	9,87	1740	217	22,49	1,026	28,39	23,34	4,889	54,81	17,823	26,700	0,332	19,77	4,00	36,71	0,332
72		Π2	10,16	9,89	1795	291	23,00	1,027	37,88	31,15	5,005	58,72	18,373	27,700	0,327	20,33	4,13	40,02	0,327
73		Π2B	8,97	9,87	1550	263	22,58	0,909	34,37	27,13	4,463	45,85	17,280	25,400	0,343	19,91	3,57	29,38	0,343
74		Π3	10,05	9,88	1800	368	23,39	1,018	48,05	39,40	5,180	63,97	19,200	28,660	0,327	21,29	4,28	43,66	0,327
75	ΣΥΘΑΣ	Π4	10,24	9,88	1810	222	23,06	1,036	28,96	23,88	4,613	50,00	16,000		0,350	17,79	3,64	31,20	0,350
76		Π5	10,19	9,86	1710	258	21,98	1,033	33,79	27,84	4,674	48,95	16,500		0,344	18,34	3,74	31,30	0,344
77		Π6	9,89	9,90	1690	203	22,20	0,999	26,37	21,49	4,920	54,78	16,630		0,369	18,78	3,71	31,22	0,369
78		Π7	9,87	9,88	1775	340	23,46	0,999	44,35	36,15	5,141	63,19	18,910	28,310	0,337	21,13	4,17	41,62	0,337
79		Π8	10,31	9,86	1875	494	23,82	1,046	64,70	53,50	4,957	59,65	19,180	29,300	0,293	20,90	4,31	45,11	0,293
80		Π9	10,22	9,91	1850	484	23,47	1,031	62,75	51,67	4,798	55,08	19,060	28,760	0,281	20,75	4,24	43,02	0,281
81		Π10	10,30	9,88	1880	556	23,81	1,043	72,52	59,92	4,952	59,51	19,460	29,600	0,284	21,16	4,36	46,09	0,284
82		Π12	9,82	9,88	1760	313	23,38	0,994	40,83	33,22	4,721	53,12	18,674	28,000	0,302	20,66	4,06	39,23	0,302
83		Π13	10,39	9,89	1860	401	23,33	1,051	52,25	43,28	4,766	54,01	18,304	28,000	0,294	19,93	4,14	40,80	0,294
84		Π14	9,94	9,95	1833	447	23,72	0,999	57,49	46,86	4,897	57,96	19,510	29,420	0,292	21,47	4,27	44,04	0,292
85		Π15-A1	10,07	9,88	1795	215	23,25	1,019	38,04	31,21	5,356	68,00	18,405	28,008	0,358	20,60	4,15	40,80	0,358
86		Π16-M1	10,09	9,88	1795	340	23,20	1,021	44,35	36,41	4,995	59,02	18,570	28,050	0,324	20,56	4,15	40,71	0,324

A/A	ΕΡΓΟ	ΠΥΡΗΝΑΣ	Υψος, L (cm)	Διάμετρος, D (cm)	Βάρος (gr)	Φορτίο Θραύσης, kN	γ_c (kN/m ³)	L/D	Αντοχή F_c (MPa)	Corrected F_c	Ταχύτητα Υπερήχων, V_p (km/s)	M (GPa)	f1 (kHz)	f2 (kHz)	assumed poisson	f1 Corrected (kHz)	V_{c1} Corrected (km/s)	E_d (GPa)	ν (M - E_d)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
87	ΓΕΦΥΡΑ ΑΛΜΥΡΟΥ #37	Π1-A1-37BR	10,13	9,91	1811	293	23,17	1,022	37,99	31,19	5,388	68,59	19,060		0,345	21,23	4,30	43,71	0,345
88		Π2-M2-37BR	9,90	9,86	1788	272	23,65	1,004	45,62	37,24	5,238	66,14	20,095	30,040	0,316	22,27	4,41	46,89	0,316
89		Π3-M1-37BR	10,03	9,86	1798	390	23,48	1,017	51,08	41,87	5,481	71,91	19,860	29,950	0,338	22,11	4,43	47,07	0,338
90		Π4-B8-37BR	10,04	9,88	1788	250	23,22	1,016	32,61	26,73	4,804	54,63	18,006	27,050	0,322	19,94	4,00	37,96	0,322
91		Π5-B4-37BR	9,80	9,87	1693	163	22,57	0,993	21,30	17,33	5,213	62,53	16,700		0,387	18,99	3,72	31,88	0,387
92		Π6-T7-37BR	9,80	9,88	1703	195	22,67	0,992	25,43	20,68	4,851	54,38	17,820	26,646	0,339	19,98	3,92	35,43	0,339
93		Π7-B6-37BR	10,09	9,88	1850	273	23,91	1,021	35,61	29,23	5,514	74,10	19,090	28,880	0,355	21,33	4,30	45,16	0,355
94		Π8-B4-37BR	10,08	9,88	1863	283	24,11	1,020	36,91	30,29	4,966	60,60	18,816	28,080	0,315	20,76	4,19	43,07	0,315
95		Π9-T5-37BR	9,93	9,92	1816	294	23,67	1,001	38,04	31,02	4,892	57,73	18,850	28,680	0,311	20,88	4,15	41,47	0,311
96		Π10-B13-37BR	10,10	9,87	1839	334	23,80	1,023	43,65	35,86	5,101	63,13	19,200	29,400	0,318	21,20	4,28	44,47	0,318
97		Π11-T14-37BR	9,90	9,91	1821	195	23,85	0,999	25,28	20,60	5,051	62,02	18,160		0,345	20,35	4,03	39,45	0,345
98		Π12-M3-37BR	10,05	9,89	1811	376	23,45	1,016	48,94	40,11	4,718	53,22	19,060	29,000	0,278	20,80	4,18	41,79	0,278
99		Π13-M4-37BR	9,84	9,89	1810	473	23,95	0,995	61,57	50,12	5,348	69,82	20,701	30,881	0,313	22,97	4,52	49,90	0,313
100		Π14-B25-37BR	10,06	9,90	1826	224	23,58	1,016	29,10	23,85	4,837	56,23	18,410	27,540	0,313	20,33	4,09	40,20	0,313
101		Π15-B26-37BR	9,84	9,89	1817	154	24,04	0,995	20,05	16,32	5,234	67,14	18,433	27,200	0,355	20,74	4,08	40,82	0,355
102		Π16-A2-37BR	9,86	9,86	1799	264	23,89	1,000	34,57	28,19	5,082	62,90	19,170	28,720	0,326	21,34	4,21	43,12	0,326
103		Π17-T23-37BR	10,15	9,91	1864	338	23,80	1,024	43,82	36,00	5,126	63,77	18,943		0,324	20,95	4,25	43,89	0,324
104		Π18-B20-37BR	10,11	9,89	1861	319	23,96	1,022	41,52	34,10	5,378	70,64	19,580	29,440	0,333	21,73	4,39	47,14	0,333
105		Π19-B22-37BR	9,76	9,94	1788	257	23,61	0,982	33,12	26,84	5,164	64,19	19,340	28,830	0,332	21,67	4,23	43,08	0,332
106		Π20-T17-37BR	9,97	9,89	1806	259	23,58	1,008	33,71	27,56	5,035	60,95	18,672	28,340	0,329	20,77	4,14	41,23	0,329

A/A	ΕΡΓΟ	ΠΥΡΗΝΑΣ	Υψος, L (cm)	Διάμετρος, D (cm)	Βάρος (gr)	Φορτίο Θραύσης, kN	γ_c (kN/m ³)	L/D	Αντοχή F_c (MPa)	Corrected F_c	Ταχύτητα Υπερήχων, V_p (km/s)	M (GPa)	f1 (kHz)	f2 (kHz)	assumed poisson	f1 Corrected (kHz)	V_{c1} Corrected (km/s)	E_d (GPa)	ν (M - E_d)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
107	ΓΕΦΥΡΑ ΑΛΜΥΡΟΥ #41	Π1-A1-41BR	9,92	9,91	1788	406	23,37	1,001	52,64	42,93	5,305	67,03	19,850	29,300	0,327	22,10	4,38	45,79	0,327
108		Π2-M1-41BR	9,84	9,86	1787	323	23,79	0,998	42,30	34,47	5,206	65,73	19,600		0,327	21,84	4,30	44,80	0,327
109		Π3-M1-41BR	9,77	9,88	1713	380	22,86	0,989	49,57	40,26	5,197	62,94	19,700	29,160	0,326	22,01	4,30	43,10	0,326
110		Π4-T6-41BR	9,92	9,88	1764	363	23,20	1,004	47,35	38,65	5,010	59,36	18,890	28,230	0,323	21,00	4,17	41,03	0,323
111		Π5-B6-41BR	10,05	9,91	1791	343	23,10	1,014	44,47	36,42	5,207	63,85	18,950	28,171	0,335	21,09	4,24	42,31	0,335
112		Π6-B4-41BR	9,88	9,87	1817	420	24,03	1,001	54,89	44,77	4,750	55,27	19,810	29,866	0,266	21,60	4,27	44,62	0,266
113		Π7-M2-41BR	9,82	9,92	1801	500	23,73	0,990	64,69	52,57	5,088	62,62	20,655		0,286	22,74	4,47	48,24	0,286
114		Π8-M2-41BR	10,20	9,86	1786	150	22,93	1,034	19,64	16,19	5,178	62,66	16,772	25,730	0,375	18,80	3,84	34,38	0,375
115		Π9-T15-41BR	10,20	9,86	1865	290	23,94	1,034	37,98	31,30	5,000	61,01	17,670	26,692	0,344	19,61	4,00	39,07	0,344
116		Π10-B14- 41BR	10,12	9,86	1823	402	23,59	1,026	52,65	43,29	4,889	57,47	18,309	27,600	0,319	20,21	4,09	40,24	0,319
117		Π11-B13- 41BR	10,10	9,87	1814	186	23,50	1,024	24,33	19,99	4,449	47,43	16,859	25,470	0,314	18,59	3,76	33,79	0,314
118		Π12-T19- 41BR	9,85	9,86	1774	670	23,59	0,999	87,75	71,52	4,975	59,50	20,195	30,100	0,286	22,18	4,37	45,92	0,286
119		Π13-B7-41BR	10,13	9,91	1881	580	24,08	1,022	75,20	61,74	4,990	61,11	19,358	29,157	0,300	21,24	4,30	45,45	0,300
120		Π14-B8-41BR	9,98	9,86	1845	450	24,21	1,012	58,93	48,24	5,171	66,00	19,430	29,480	0,323	21,54	4,30	45,63	0,323
121		Π15-A2- 41BR	9,95	9,88	1862	480	24,41	1,007	62,61	51,16	5,265	68,97	20,350	30,830	0,310	22,48	4,47	49,82	0,310

A/A	ΕΡΓΟ	ΠΥΡΗΝΑΣ	Υψος, L (cm)	Διάμετρος, D (cm)	Βάρος (gr)	Φορτίο Θραύσης, kN	γ_c (kN/m ³)	L/D	Αντοχή F_c (MPa)	Corrected F_c	Ταχύτητα Υπερήχων, V_p (km/s)	M (GPa)	f1 (kHz)	f2 (kHz)	assumed poisson	f1 Corrected (kHz)	V_{c1} Corrected (km/s)	E_d (GPa)	ν (M - E_d)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
122	ΓΕΦΥΡΑ ΑΛΜΥΡΟΥ #46	Π1-B1-46BR	8,15	9,89	1439	433	22,98	0,824	56,36	42,90	4,711	51,98	21,123	30,170	0,302	24,84	4,05	38,39	0,302
123		Π2-B2-46BR	10,05	9,85	1833	285	23,94	1,020	37,40	30,69	4,879	58,08	17,540	26,780	0,341	19,52	3,92	37,57	0,341
124		Π3-B3-46BR	9,96	9,85	1791	392	23,60	1,011	51,44	42,09	4,812	55,69	18,400	27,400	0,315	20,36	4,06	39,56	0,315
125		Π4-T5-46BR	9,79	9,88	1805	416	24,05	0,991	54,26	44,11	4,970	60,54	18,180	26,782	0,342	20,39	3,99	39,07	0,342
126		Π5-T6-46BR	9,80	9,90	1816	485	24,08	0,990	63,01	51,20	4,734	55,01	17,819	26,249	0,328	19,90	3,90	37,34	0,328
127		Π6-A2-46BR	9,77	9,90	1733	286	23,05	0,987	37,15	30,16	4,482	47,19	18,106	26,970	0,292	19,99	3,91	35,86	0,292
128		Π7-A2-46BR	9,88	9,89	1810	440	23,84	0,999	57,28	46,68	4,990	60,51	19,800	29,186	0,298	21,84	4,31	45,25	0,298
129		Π8-A2-46BR	9,89	9,88	1750	243	23,08	1,001	31,70	25,85	4,872	55,84	18,200	27,680	0,329	20,28	4,01	37,86	0,329
130	ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΗ ΓΕΦΥΡΑ ΑΙΓΙΟΥ	294-Π1	9,90	10,03	1776	251	22,71	0,987	31,77	25,79	4,877	55,05	18,686	27,649	0,314	20,79	4,12	39,22	0,314
131		294-Π2	10,13	10,03	1840	455	22,99	1,010	57,59	47,10	4,734	52,52	18,800	28,398	0,283	20,58	4,17	40,73	0,284
132		294-Π3	9,90	10,02	1745	375	22,36	0,988	47,56	38,62	4,459	45,32	17,760	26,740	0,292	19,61	3,88	34,36	0,292
133		294-Π4	10,09	10,02	1783	230	22,41	1,007	29,17	23,83	4,545	47,19	17,758	26,141	0,295	19,54	3,94	35,50	0,295
134		294-Π5	9,86	10,02	1707	283	21,96	0,984	35,89	29,11	4,325	41,86	17,207	25,851	0,295	19,04	3,75	31,55	0,295
135		294-Π6	9,95	10,03	1765	433	22,44	0,992	54,80	44,57	4,671	49,93	18,560	27,765	0,291	20,47	4,07	37,95	0,292
136		294-Π7	10,14	10,03	1842	511	22,99	1,011	64,67	52,92	4,971	57,91	19,330	29,200	0,296	21,24	4,31	43,50	0,296
137		294-Π8	10,14	10,05	1848	569	22,97	1,009	71,73	58,65	4,995	58,42	19,342	29,171	0,298	21,28	4,32	43,61	0,298
138		294-Π9	10,16	10,03	1801	420	22,43	1,013	53,16	43,52	4,661	49,67	17,820	26,520	0,305	19,64	3,99	36,41	0,305
139		294-Π10	10,05	10,03	1799	510	22,65	1,002	64,55	52,66	4,832	53,91	19,033	28,548	0,292	20,94	4,21	40,90	0,292
140		294-Π11	10,05	10,03	1812	458	22,82	1,002	57,97	47,29	4,926	56,45	19,330	28,867	0,295	21,28	4,28	42,55	0,295
141		296-Π1	9,74	10,00	1682	552	21,99	0,974	70,28	56,81	4,348	42,38	18,496	27,637	0,257	20,25	3,94	34,87	0,257
142		296-Π2	10,30	10,03	1798	403	22,09	1,027	51,01	41,94	4,518	45,96	18,085	27,300	0,269	19,63	4,04	36,84	0,269

A/A	ΕΡΓΟ	ΠΥΡΗΝΑΣ	Υψος, L (cm)	Διάμετρος, D (cm)	Βάρος (gr)	Φορτίο Θραύσης, kN	γ_c (kN/m ³)	L/D	Αντοχή F_c (MPa)	Corrected F_c	Ταχύτητα Υπερήχων, V_p (km/s)	M (GPa)	f1 (kHz)	f2 (kHz)	assumed poisson	f1 Corrected (kHz)	V_{c1} Corrected (km/s)	E_d (GPa)	ν (M - E_d)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
143	ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΗ ΓΕΦΥΡΑ ΑΙΓΙΟΥ	296-Π3	10,10	10,00	1826	342	23,01	1,010	43,54	35,62	4,469	46,85	17,554		0,292	19,27	3,89	35,55	0,292
144		296-Π4	9,93	10,01	1793	497	22,94	0,992	63,15	51,36	4,892	55,97	19,090	28,490	0,303	21,13	4,20	41,19	0,303
145		296-Π5	10,04	10,03	1771	504	22,32	1,001	63,79	52,02	4,714	50,55	18,690	27,840	0,289	20,54	4,13	38,72	0,289
146		296-Π6	9,99	10,03	1833	715	23,23	0,996	90,49	73,69	5,020	59,67	19,740	29,779	0,296	21,77	4,35	44,80	0,296
147		296-Π7	9,95	10,00	1850	623	23,68	0,995	79,32	64,57	5,129	63,49	20,480	30,552	0,289	22,54	4,48	48,54	0,289
148		296-Π8	10,07	10,02	1850	636	23,30	1,005	80,66	65,87	5,086	61,43	20,330	30,522	0,282	22,27	4,48	47,76	0,283
149		296-Π9	9,85	10,02	1802	756	23,20	0,983	95,87	77,73	4,950	57,94	19,970	30,058	0,287	22,03	4,34	44,53	0,287
150		296-Π10	9,61	10,00	1810	863	23,97	0,961	108,36	87,21	5,254	67,46	21,003		0,303	23,43	4,51	49,62	0,304
151		296-Π11	9,81	9,97	1852	649	24,18	0,984	83,13	67,42	5,190	66,41	20,790	31,130	0,294	22,98	4,51	50,10	0,294
152		KAL-1	10,09	10,03	1775	110	22,26	1,006	13,92	11,37	4,525	46,46	16,227		0,339	18,12	3,66	30,33	0,339
153		KAL-2	9,60	10,03	1748	239	23,05	0,957	30,25	24,31	4,974	58,12	18,304	27,330	0,343	20,74	3,98	37,25	0,343
154	ΣΑΡΩΝΙΔΑ	Π1-ΣΑΡ	10,08	10,25	1835	253	22,07	0,983	30,66	24,86	4,963	55,42	18,176	27,338	0,327	20,33	4,10	37,75	0,327
155		Π2-ΣΑΡ	8,32	10,00	1528	140	23,38	0,832	35,00	26,74	4,782	54,51	20,096	28,838	0,327	23,75	3,95	37,21	0,327
156		Π3-ΣΑΡ	9,85	10,00	1784	202	23,09	0,985	25,74	20,88	4,874	55,92	17,985	26,750	0,335	20,16	3,97	37,09	0,335

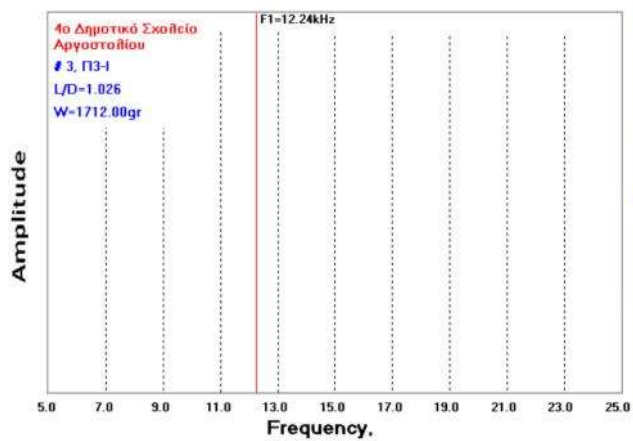
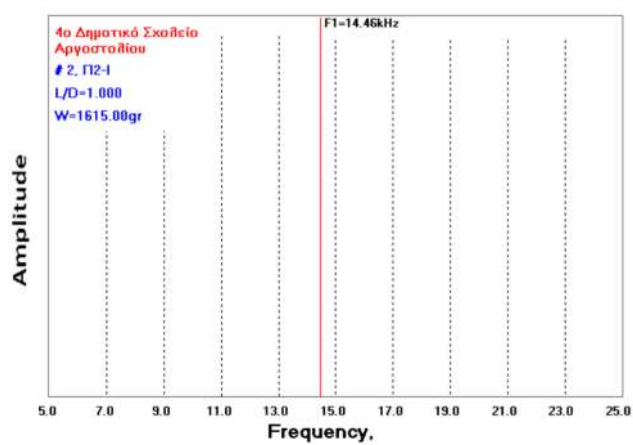
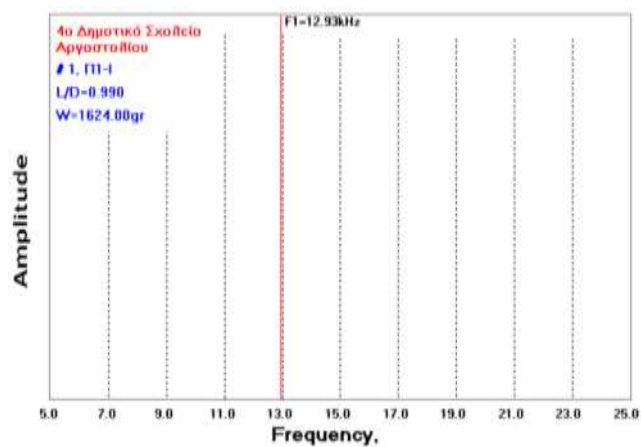
A/A	ΕΡΓΟ	ΠΥΡΗΝΑΣ	Υψος, L (cm)	Διάμετρος, D (cm)	Βάρος (gr)	Φορτίο Θραύσης, kN	γ_c (kN/m ³)	L/D	Αντοχή F_c (MPa)	Corrected F_c	Ταχύτητα Υπερήχων, V_p (km/s)	M (GPa)	f1 (kHz)	f2 (kHz)	assumed poisson	f1 Corrected (kHz)	V_{c1} Corrected (km/s)	E_d (GPa)	ν (M - E_d)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
157	ΑΡΓΥΡΟΥΠΟΛΗ	Π1-ΑΡΓ	9,82	10,02	1778	245	22,97	0,980	31,07	25,16	4,502	47,47	17,255	25,935	0,317	19,26	3,78	33,46	0,317
158		Π2-ΑΡΓ	7,06	10,02	1293	283	23,23	0,705	35,89	25,59	4,614	50,40	22,023		0,306	27,91	3,94	36,77	0,306
159		Π3-ΑΡΓ	9,91	10,01	1832	377	23,49	0,990	32,00	26,01	4,653	51,83	15,616		0,370	17,66	3,50	29,35	0,370
160		Π1-A	10,10	10,00	1762	168	22,21	1,010	21,39	17,50	4,008	36,37	15,360		0,306	16,95	3,42	26,55	0,306
161	ΚΑΜΜΕΝΑ ΚΟΡΙΝΘΟΣ	Π1-B	10,41	10,00	1856	240	22,70	1,041	30,56	25,24	4,887	55,27	17,871	27,371	0,319	19,66	4,09	38,77	0,319
162		Π1-Γ	10,00	10,00	1789	265	22,77	1,000	33,74	27,51	4,831	54,18	18,673	28,154	0,306	20,65	4,13	39,59	0,306
163		Π2-A	9,93	10,00	1751	164	22,45	0,993	20,88	16,99	3,424	26,84	11,568		0,367	13,07	2,60	15,43	0,367
164		Π2-Γ	10,03	10,00	1808	242	22,95	1,003	30,81	25,15	4,822	54,40	18,304	27,736	0,314	20,28	4,07	38,73	0,314
165		Π5-A	10,23	10,00	1830	155	22,77	1,023	19,74	16,21	3,905	35,39	15,116	22,932	0,295	16,56	3,39	26,66	0,295
166		Π5-B	10,25	10,00	1874	189	23,28	1,025	24,06	19,78	4,702	52,46	16,501		0,344	18,36	3,76	33,60	0,344
167		Π5-Γ	10,22	10,00	1856	224	23,13	1,022	28,52	23,42	4,890	56,37	18,688		0,303	20,53	4,20	41,53	0,303
168		Π6	9,89	10,00	1739	79	22,39	0,989	10,06	8,17	3,760	32,27	12,416		0,375	14,08	2,79	17,70	0,375
169		Π8	10,26	10,00	1812	233	22,48	1,026	29,67	24,39	4,601	48,51	17,664	26,750	0,298	19,37	3,97	36,20	0,298
170		Π9	10,44	10,00	1855	190	22,63	1,044	24,19	20,00	3,783	33,00	11,915	17,961	0,378	13,33	2,78	17,86	0,378
171		Π11	10,35	10,00	1863	357	22,92	1,035	20,00	16,49	4,277	42,74	13,184		0,386	14,81	3,07	21,96	0,386
172		Π12	8,30	10,00	1487	324	22,81	0,830	41,25	31,49	4,536	47,84	20,864	30,086	0,278	24,22	4,02	37,58	0,278
173		Π13	10,25	10,00	1896	377	23,55	1,025	48,00	39,45	4,928	58,29	18,432		0,314	20,31	4,16	41,60	0,314
174		Π14	10,16	10,00	1754	180	21,97	1,016	22,92	18,78	4,269	40,82	17,557	26,446	0,258	19,04	3,87	33,52	0,258
175		Π15	10,12	10,00	1758	238	22,11	1,012	30,30	24,80	4,306	41,80	17,152	26,023	0,282	18,77	3,80	32,52	0,282
176		Π16	9,97	10,00	1759	301	22,47	0,997	38,32	31,22	4,573	47,90	17,920	27,183	0,299	19,79	3,95	35,66	0,299
177		Π17	10,13	10,00	1772	287	22,28	1,013	36,54	29,92	4,443	44,83	17,599	26,693	0,285	19,27	3,90	34,61	0,285
178		Π18	9,43	10,00	1692	218	22,84	0,943	27,76	22,19	4,668	50,75	17,792		0,334	20,19	3,81	33,76	0,334
179		Π19	9,92	10,00	1839	320	23,60	0,992	40,74	33,13	4,935	58,59	18,300		0,330	20,44	4,05	39,54	0,330

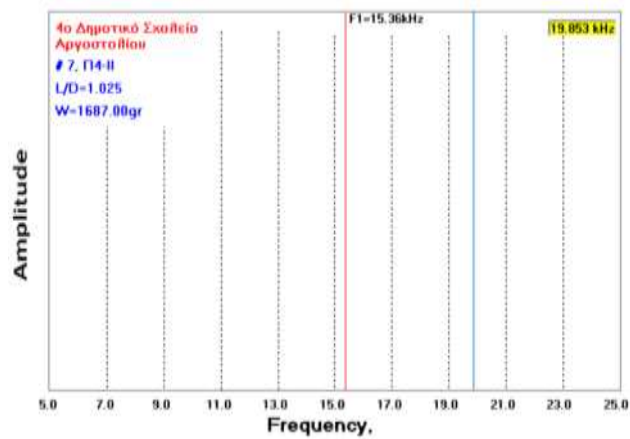
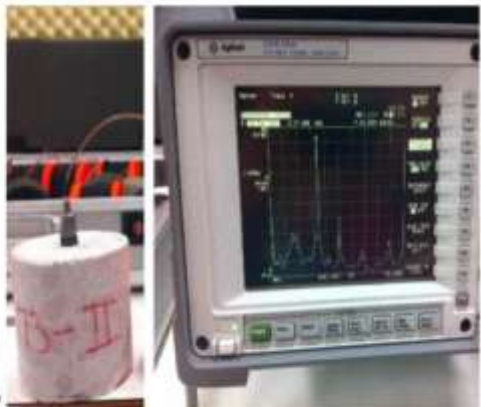
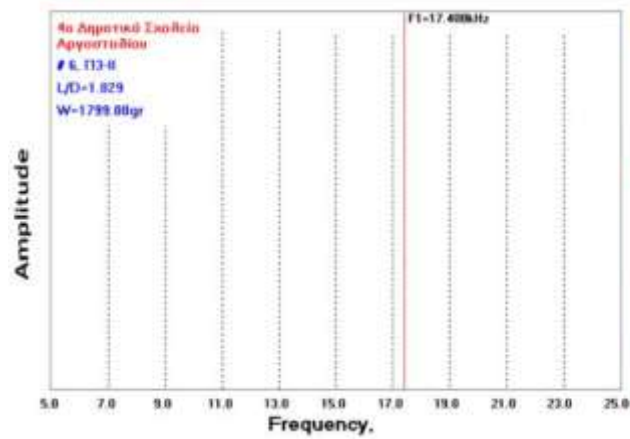
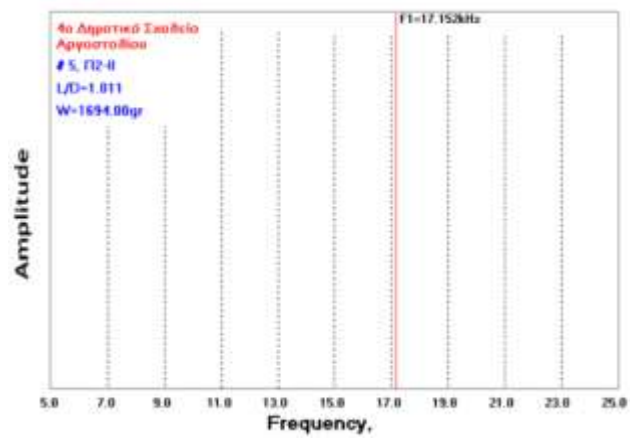
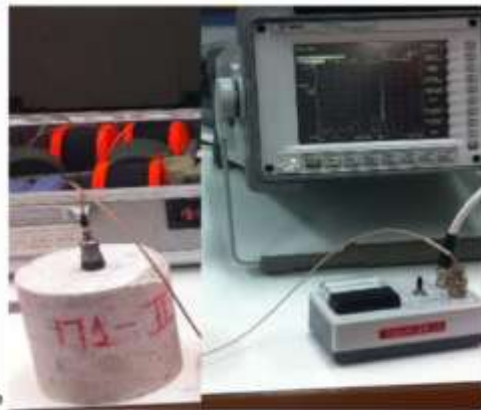
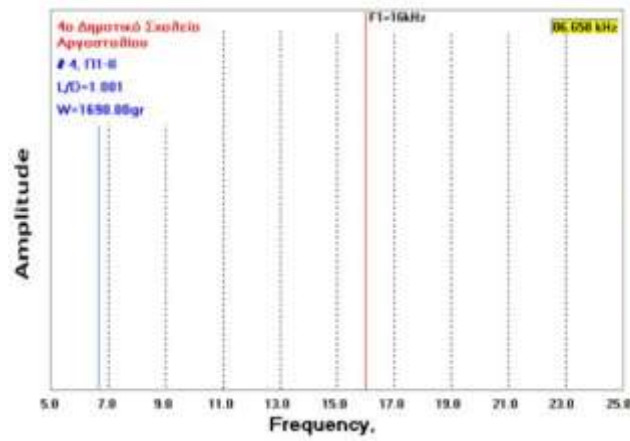
A/A	ΕΡΓΟ	ΠΥΡΗΝΑΣ	Υψος, L (cm)	Διάμετρος, D (cm)	Βάρος (gr)	Φορτίο Θραύσης, kN	γ_c (kN/m ³)	L/D	Αντοχή F_c (MPa)	Corrected F_c	Ταχύτητα Υπερήχων, V_p (km/s)	M (GPa)	f1 (kHz)	f2 (kHz)	assumed poisson	f1 Corrected (kHz)	V_{c1} Corrected (km/s)	E_d (GPa)	ν (M - E_d)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
180	ΚΟΣΜΟΠΟΛΙΣ	Π1	12,37	10,02	2256	322	23,13	1,234	40,83	35,45	4,794	54,19	15,360		0,314	16,36	4,05	38,59	0,314
181		Π2	10,18	10,02	1848	370	23,01	1,016	46,92	38,46	4,992	58,46	18,780	28,416	0,313	20,73	4,22	41,82	0,313
182		Π3	10,31	10,02	1862	300	22,91	1,029	38,04	31,30	4,729	52,21	18,217	27,703	0,294	19,93	4,11	39,42	0,294
183		Π4	10,53	10,02	1886	300	22,72	1,051	38,04	31,51	4,897	55,53	17,606	26,717	0,323	19,35	4,07	38,44	0,323
184		Π5	10,12	10,02	1830	391	22,94	1,010	49,59	40,55	4,840	54,79	18,540	27,750	0,302	20,42	4,13	39,93	0,307
185		Π6	10,00	10,02	1791	179	22,70	0,998	22,70	18,50	4,697	51,05	17,664	26,811	0,320	19,63	3,93	35,71	0,320
186		Π7	9,32	10,02	1699	461	23,12	0,930	58,46	46,52	5,092	61,11	20,494	30,080	0,311	23,16	4,32	43,91	0,311
187		Π8	10,55	10,02	1915	380	23,01	1,053	48,19	39,94	4,978	58,13	18,311	27,750	0,310	20,03	4,23	41,93	0,310
188		Π9	10,35	10,02	1867	244	22,88	1,033	30,94	25,49	4,974	57,72	17,865	27,022	0,330	19,76	4,09	38,98	0,330
189		Π10	10,32	10,02	1846	322	22,70	1,029	40,83	33,61	4,524	47,35	17,792	26,881	0,281	19,38	4,00	36,96	0,281
190		Π11	10,03	10,02	1805	335	22,83	1,000	42,48	34,64	5,038	59,07	18,569	27,961	0,329	20,69	4,15	40,05	0,329
191		Π12	10,28	10,02	1846	392	22,76	1,026	49,71	40,87	5,066	59,55	18,170	27,680	0,333	20,14	4,14	39,82	0,333
192		Π13	10,40	10,02	1903	363	23,21	1,038	46,03	37,98	4,975	58,56	18,381	27,776	0,314	20,20	4,20	41,73	0,314
193		Π14	10,25	10,02	1835	270	22,70	1,023	34,24	28,12	4,835	54,10	18,029	27,207	0,315	19,89	4,08	38,46	0,315
194		Π15	9,88	10,02	1809	369	23,23	0,986	46,80	37,97	4,988	58,91	19,185	29,012	0,313	21,34	4,22	42,08	0,313
195		Π16	10,33	10,02	1867	297	22,92	1,031	37,66	31,01	4,850	54,95	18,287	27,776	0,306	20,07	4,15	40,17	0,306
196		Π17	9,95	10,02	1848	470	23,55	0,993	59,60	48,49	5,025	60,63	19,200	29,056	0,314	21,32	4,24	43,21	0,314
197		Π18	10,15	10,02	1877	420	23,45	1,013	53,26	43,61	5,127	62,83	19,328	29,116	0,313	21,35	4,33	44,91	0,313
198		Π19	10,04	10,02	1847	430	23,32	1,002	54,53	44,49	4,899	57,06	19,006	28,544	0,302	20,97	4,21	42,17	0,302
199		Π20	9,69	10,02	1750	446	22,91	0,967	56,56	45,60	5,293	65,44	19,834	29,568	0,333	22,33	4,33	43,72	0,333
200		Π21	10,39	10,02	1950	488	23,81	1,037	61,89	51,04	5,117	63,54	18,693	28,899	0,320	20,58	4,28	44,36	0,320
201		Π22	10,29	10,02	1881	469	23,18	1,027	59,48	48,91	5,198	63,84	19,012	28,681	0,323	21,00	4,32	44,15	0,323

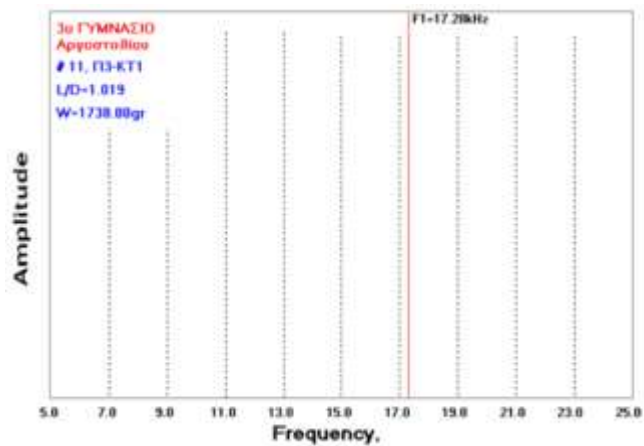
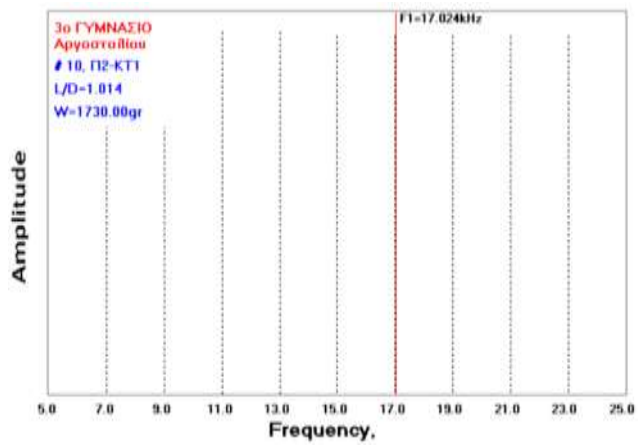
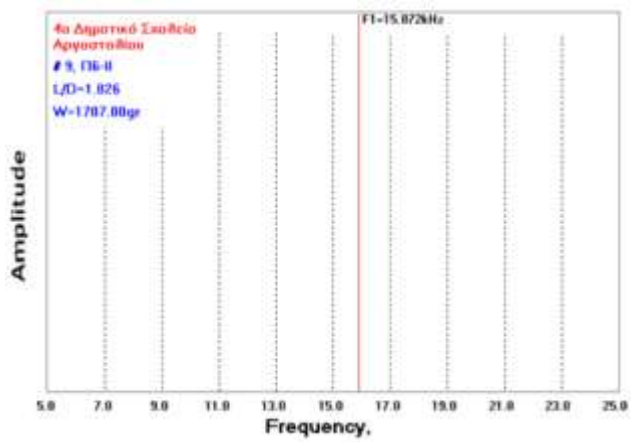
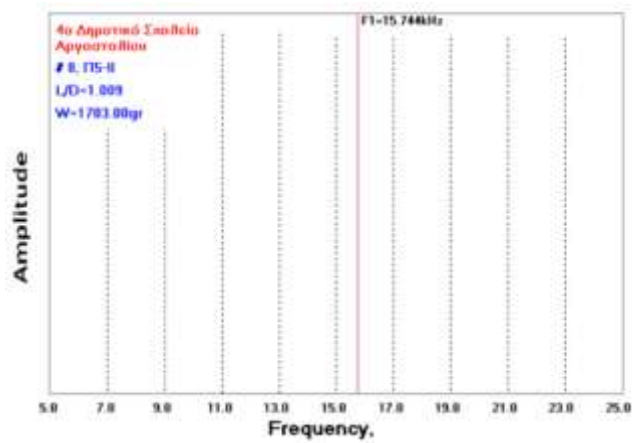
A/A	ΕΡΓΟ	ΠΥΡΗΝΑΣ	Υψος, L (cm)	Διάμετρος, D (cm)	Βάρος (gr)	Φορτίο Θραύσης, kN	γ_c (kN/m ³)	L/D	Αντοχή F_c (MPa)	Corrected F_c	Ταχύτητα Υπερήχων, V_p (km/s)	M (GPa)	f1 (kHz)	f2 (kHz)	assumed poisson	f1 Corrected (kHz)	V_{c1} Corrected (km/s)	E_d (GPa)	ν (M - E_d)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
202	ΠΕΤΡΑΛΩΝΑ	Π1-ΠΕΤ	10,18	10,02	1824	220	22,73	1,016	27,90	22,86	4,425	45,36	16,567	25,214	0,315	18,31	3,73	32,18	0,315
203		Π2-ΠΕΤ	10,01	10,02	1798	197	22,78	0,999	24,98	20,36	4,390	44,76	17,255	25,815	0,294	19,01	3,81	33,63	0,296
204		Π3-ΠΕΤ	10,15	10,02	1842	206	23,01	1,013	26,12	21,39	4,880	55,87	18,100	27,265	0,321	20,05	4,07	38,87	0,321
205	ΜΗΛΟΣ	Π1	9,79	9,96	1697	130	22,23	0,983	16,68	13,52	4,491	45,71	17,335	26,022	0,315	19,33	3,78	32,45	0,315
206		Π2	9,98	9,96	1746	149	22,45	1,002	19,12	15,59	4,844	53,69	18,840		0,303	20,82	4,15	39,49	0,304
207		Π3	9,66	9,96	1664	152	22,09	0,970	19,50	15,74	4,580	47,24	16,768	24,832	0,344	18,94	3,66	30,20	0,344
208	ΑΙΓΙΝΑ	ΚΤ2-Π1	10,10	9,96	1787	132	22,71	1,014	16,94	13,88	4,810	53,55	16,896		0,348	18,88	3,81	33,67	0,348
209		ΚΤ2-Π2	10,21	9,96	1816	106	22,83	1,025	13,60	11,18	4,518	47,49	16,896		0,315	18,63	3,81	33,69	0,315
210		ΚΤ2-Π3	9,97	9,96	1761	114	22,67	1,001	14,63	11,93	4,594	48,78	17,024	25,920	0,329	18,97	3,78	33,07	0,329
211		ΚΤ5-Π1	10,24	9,96	1814	164	22,74	1,028	21,05	17,31	4,632	49,74	17,280	26,170	0,316	19,05	3,90	35,26	0,316
212		ΚΤ5-Π2	10,08	9,96	1779	190	22,66	1,012	24,39	19,96	4,538	47,58	18,048	27,648	0,286	19,77	3,98	36,67	0,286
213		ΚΤ9-Π1	9,72	9,96	1722	129	22,73	0,976	16,56	13,39	4,674	50,63	17,985	26,752	0,319	20,11	3,91	35,44	0,319
214		ΚΤ9-Π2	10,16	9,96	1783	130	22,52	1,020	16,69	13,69	4,216	40,81	17,214	26,240	0,264	18,68	3,80	33,09	0,264

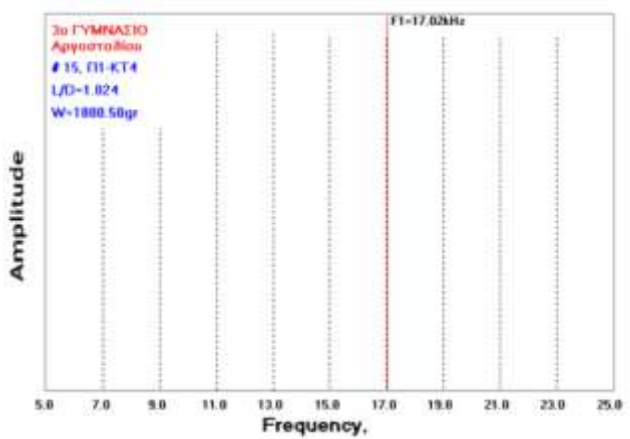
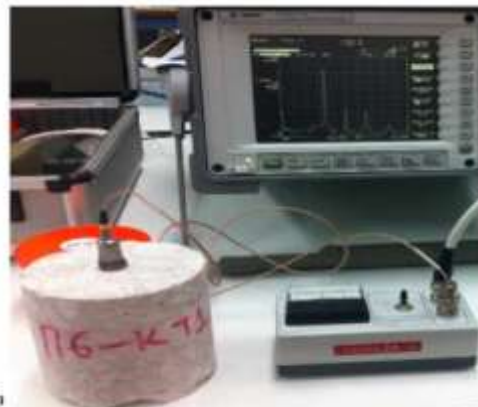
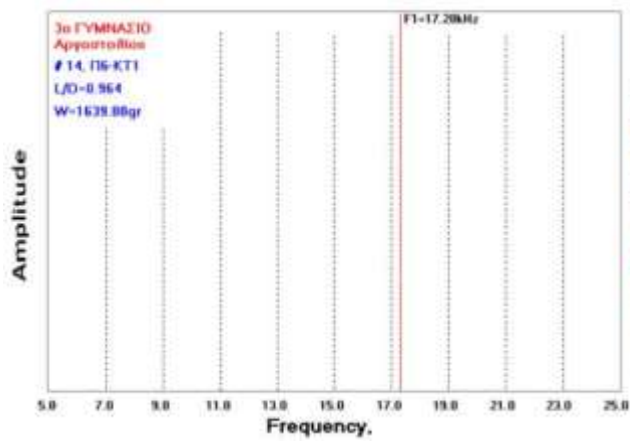
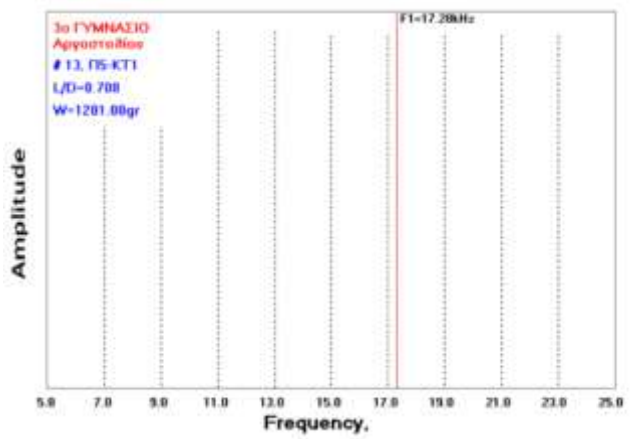
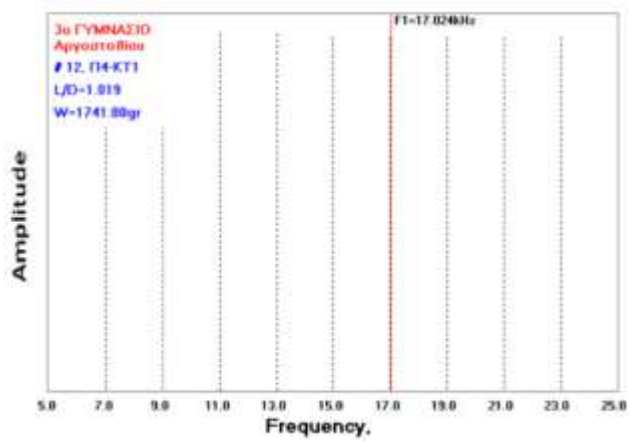
A/A	ΕΡΓΟ	ΠΥΡΗΝΑΣ	Υψος, L (cm)	Διάμετρος, D (cm)	Βάρος (gr)	Φορτίο Θραύσης, kN	γ_c (kN/m ³)	L/D	Αντοχή F_c (MPa)	Corrected F_c	Ταχύτητα Υπερήχων, V_p (km/s)	M (GPa)	f1 (kHz)	f2 (kHz)	assumed poisson	f1 Corrected (kHz)	V_{c1} Corrected (km/s)	E_d (GPa)	ν (M - E_d)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
215	ΤΕΧΝΙΚΑ ΟΣΕ	T4-Π1 (A1)	10,08	10,03	1947	353	24,44	1,005	44,68	36,49	4,991	62,07	18,944	28,800	0,312	20,95	4,22	44,46	0,312
216		T4-Π2 (M1)	9,96	10,03	1900	364	24,16	0,993	46,07	37,47	4,928	59,80	19,072	27,904	0,307	21,12	4,21	43,55	0,307
217		T4-Π3 (M5)	10,00	10,03	1873	159	23,71	0,997	20,12	16,39	4,926	58,64	12,416	19,584	0,434	14,28	2,86	19,71	0,434
218		T4-Π4 (M7)	10,30	10,03	1955	152	24,02	1,027	19,24	15,82	5,099	63,67	18,176		0,335	20,15	4,15	42,18	0,335
219		T4-Π5 (M9)	10,19	10,03	1917	210	23,81	1,016	26,58	21,78	5,145	64,27	18,816	28,800	0,327	20,86	4,25	43,86	0,327
220		T4-Π6 (A2)	10,03	10,03	1898	225	23,94	1,000	28,48	23,22	5,093	63,31	18,304	26,880	0,340	20,46	4,11	41,13	0,340
221		T4-Π7 (M5)	10,03	10,03	1817	225	22,93	1,000	28,48	23,22	4,822	54,35	18,688	28,160	0,303	20,64	4,14	40,07	0,303
222		T4-Π8 (M4)	10,19	10,03	1834	130	22,77	1,016	16,45	13,49	4,925	56,29	17,920		0,329	19,89	4,05	38,16	0,329
223		T64-Π1	10,41	10,03	1955	220	23,76	1,038	27,84	22,97	4,911	58,43	17,792		0,323	19,60	4,08	40,36	0,323
224		T64-Π2	10,14	10,03	1904	250	23,76	1,011	31,64	25,89	4,783	55,43	18,432	27,264	0,301	20,29	4,11	41,00	0,301
225		T64-Π3	10,10	10,03	1936	407	24,26	1,007	51,51	42,09	5,000	61,82	19,584	29,440	0,294	21,51	4,35	46,70	0,294
226		T64-Π4	10,00	10,03	1894	507	23,97	0,997	64,17	52,27	5,051	62,33	20,096	30,080	0,289	22,09	4,42	47,71	0,289
227		T64-Π5	10,42	10,03	1932	209	23,48	1,038	26,45	21,83	4,778	54,63	17,152	26,240	0,328	18,92	3,94	37,18	0,328
228		T64-Π6	9,33	10,03	1740	424	23,60	0,930	53,66	42,70	4,963	59,26	21,376	30,208	0,271	23,79	4,44	47,40	0,270
229		T74-Π1	9,99	10,03	1840	140	23,31	0,996	17,72	14,43	4,501	48,13	18,432		0,270	20,15	4,03	38,51	0,270
230		T74-Π2	8,53	10,03	1579	149	23,44	0,850	18,86	14,53	4,560	49,67	19,711	28,928	0,304	22,90	3,91	36,43	0,304
231		T74-Π3	10,28	10,03	1856	152	22,86	1,025	19,24	15,81	4,714	51,78	18,048	27,648	0,299	19,79	4,07	38,57	0,299
232		T74-Π4	10,21	10,03	1841	185	22,81	1,018	23,41	19,20	4,818	53,98	18,048	26,752	0,314	19,92	4,07	38,50	0,314

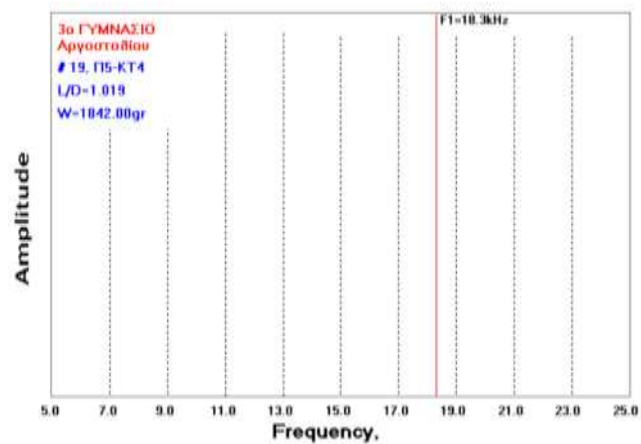
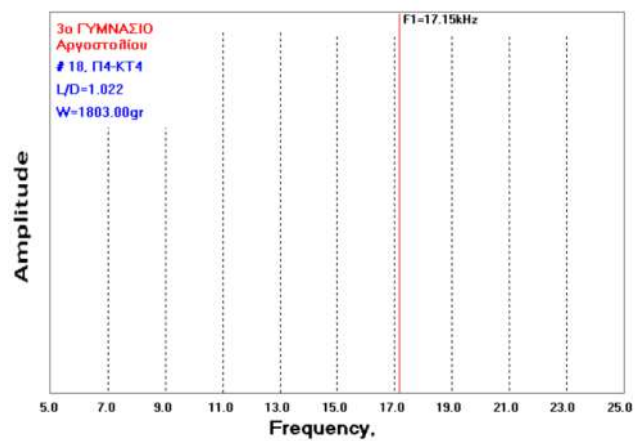
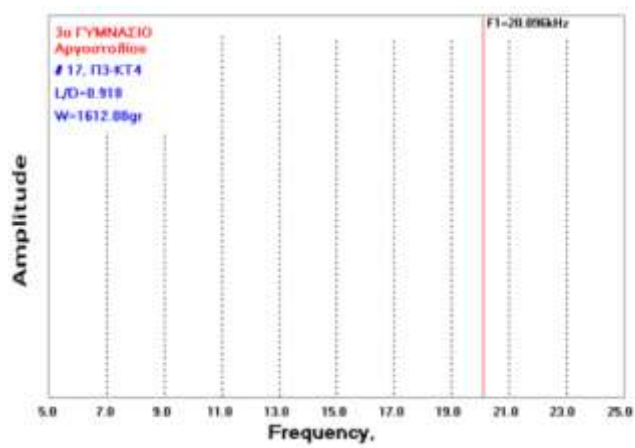
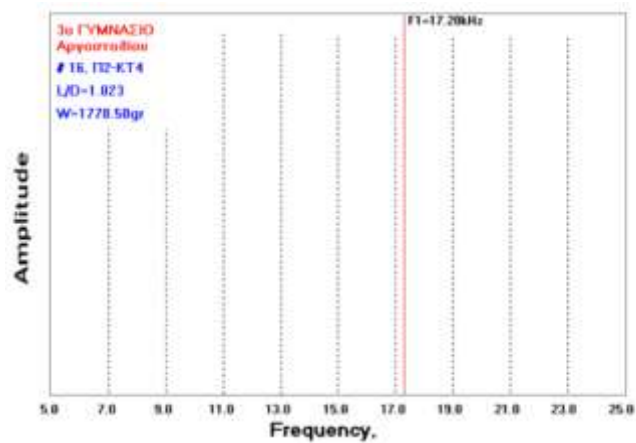
Αποτελέσματα Δοκιμών Ακουστικού Συντονισμού

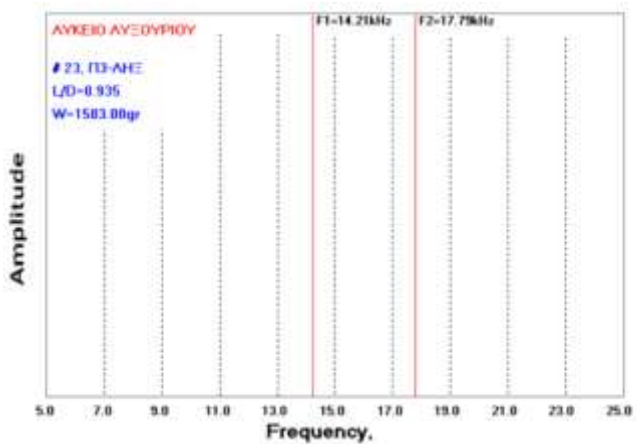
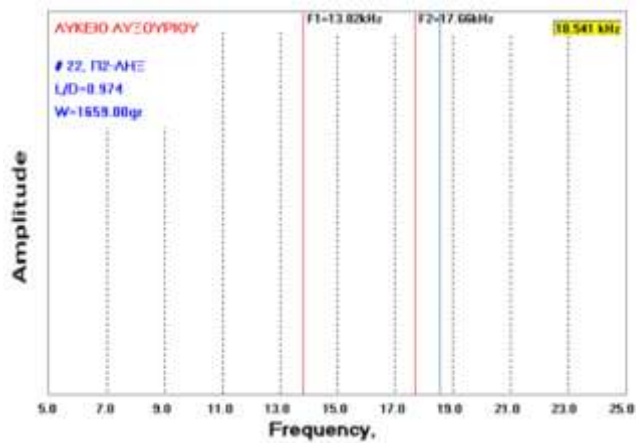
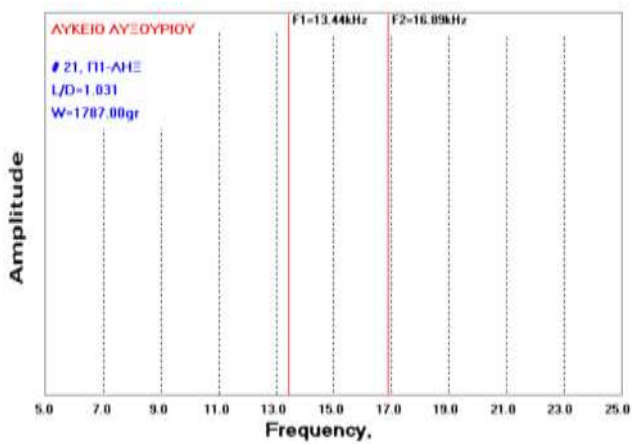
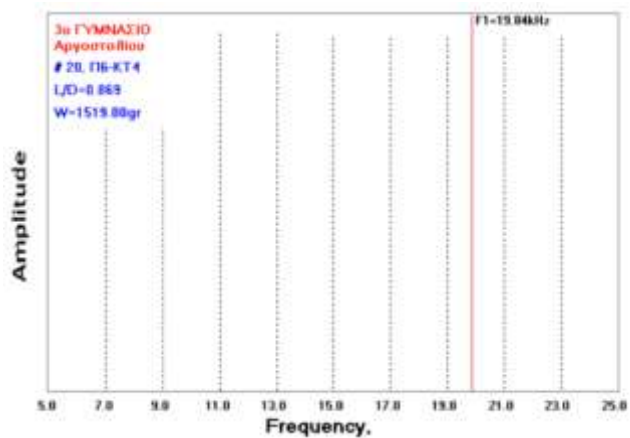


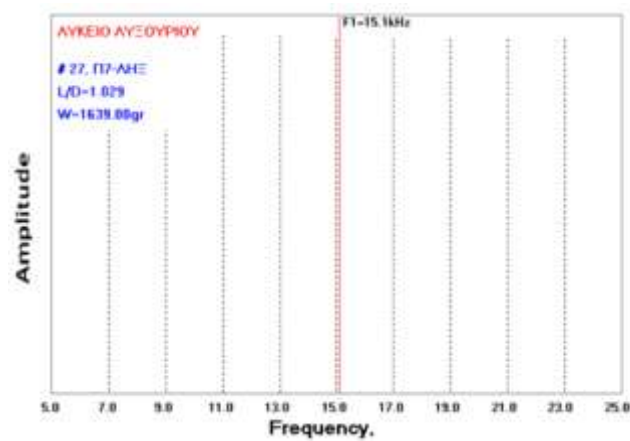
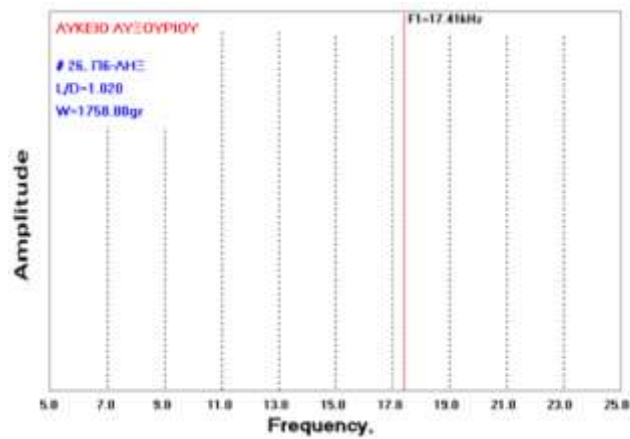
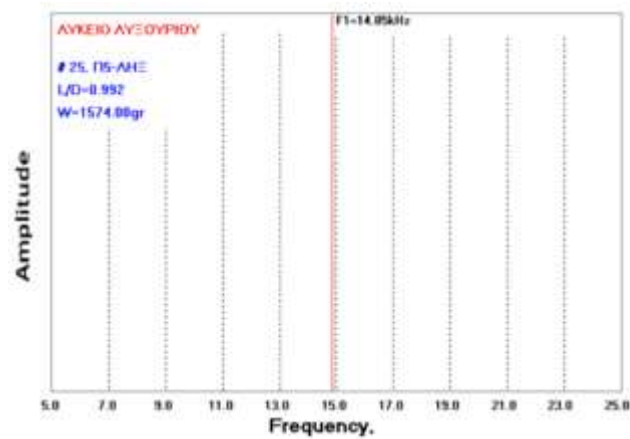
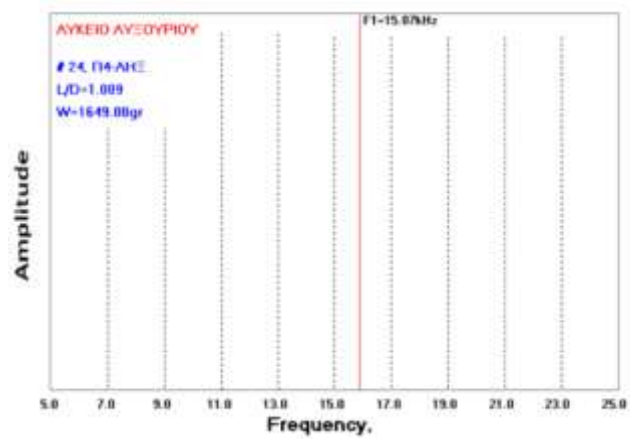


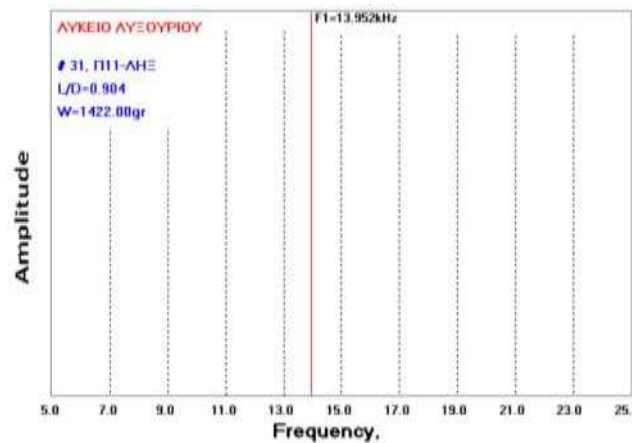
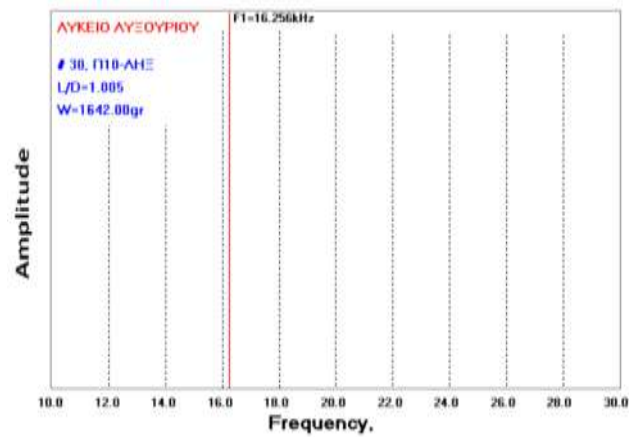
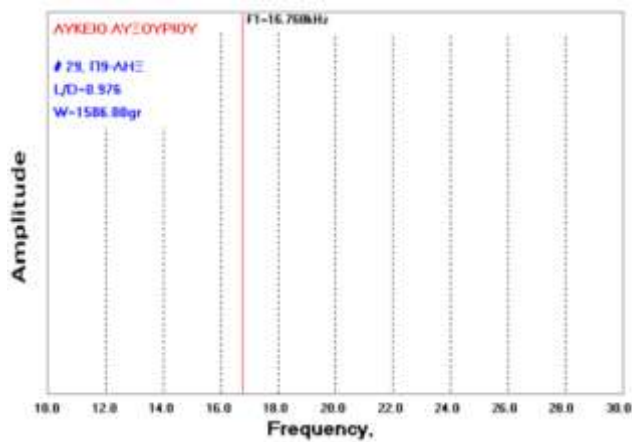
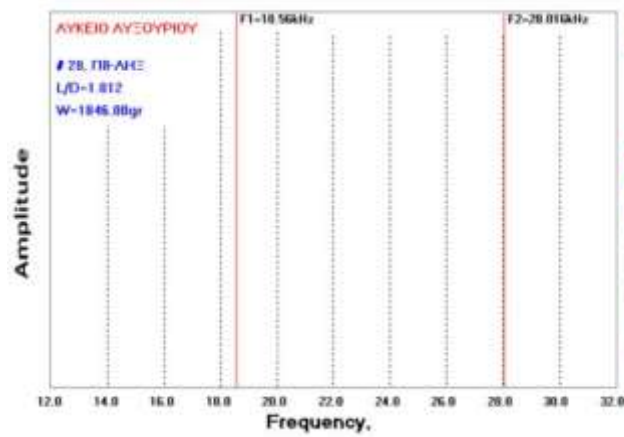


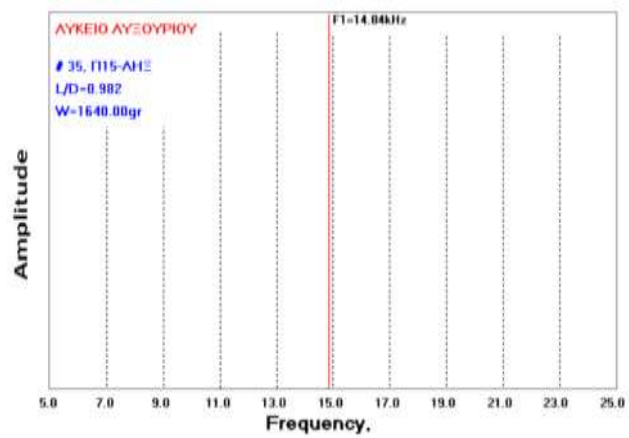
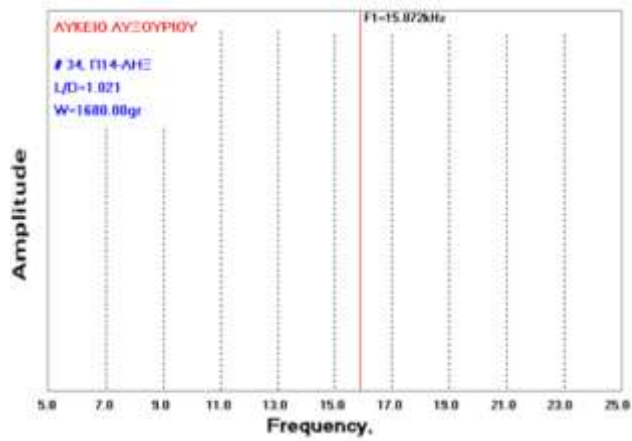
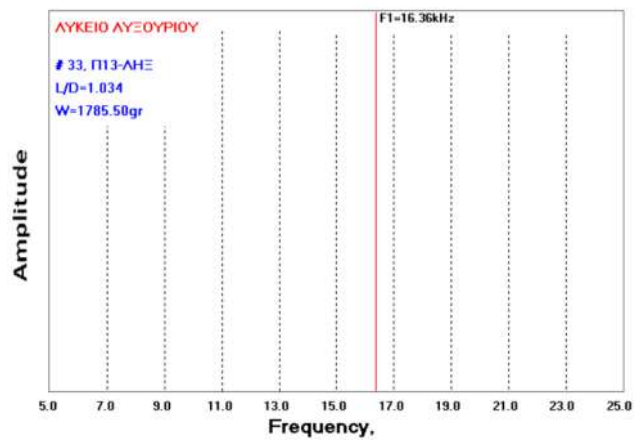
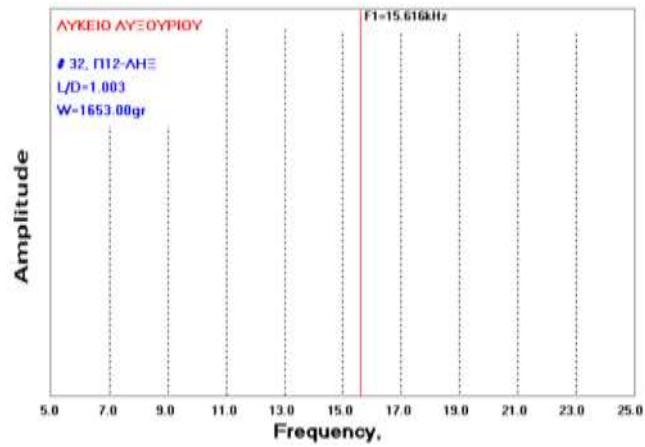


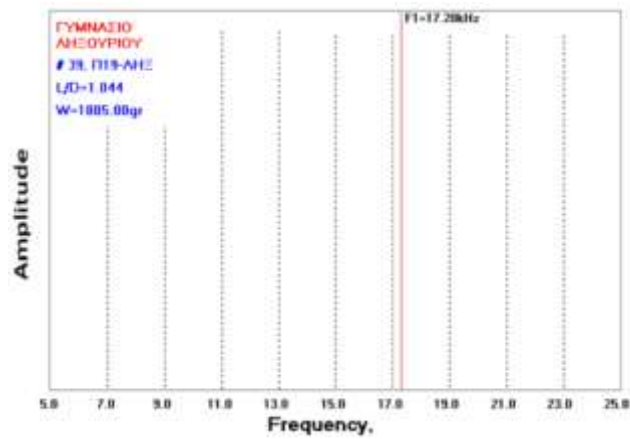
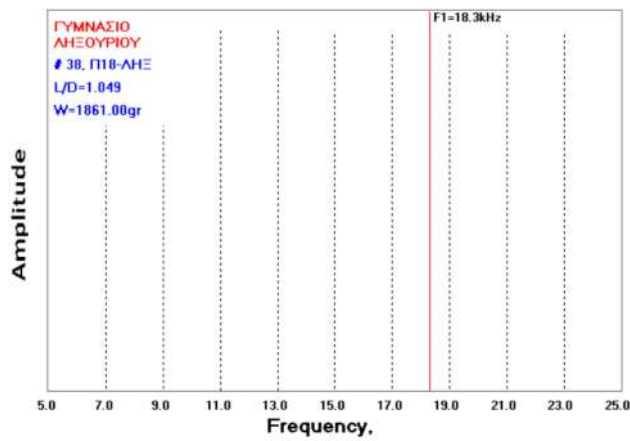
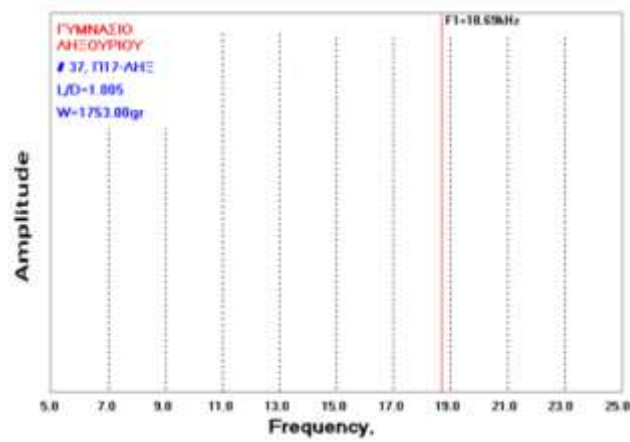
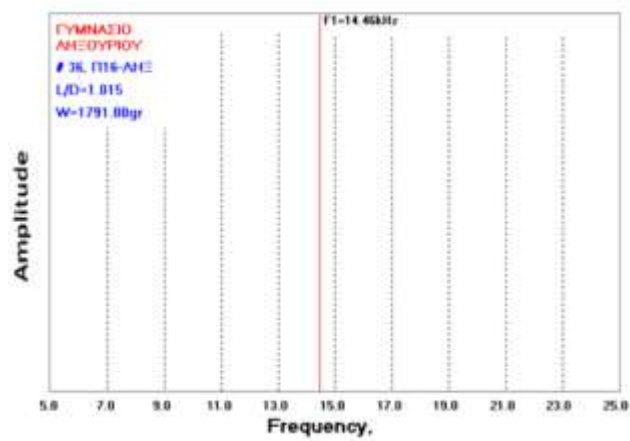


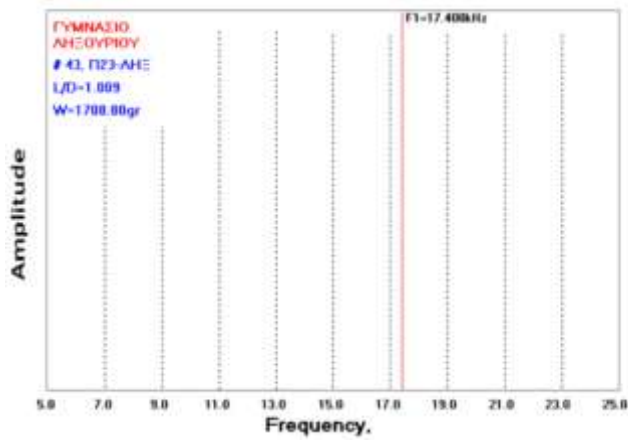
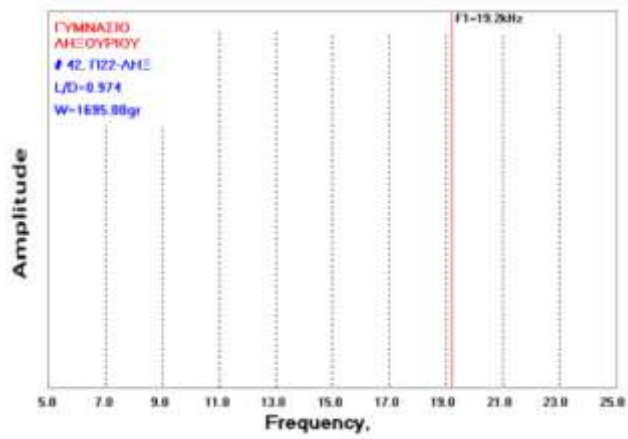
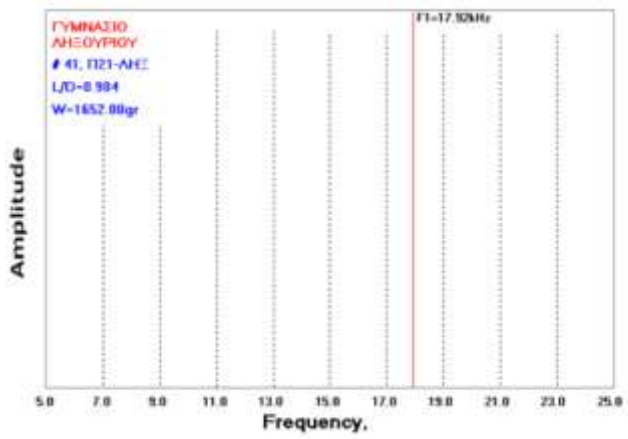
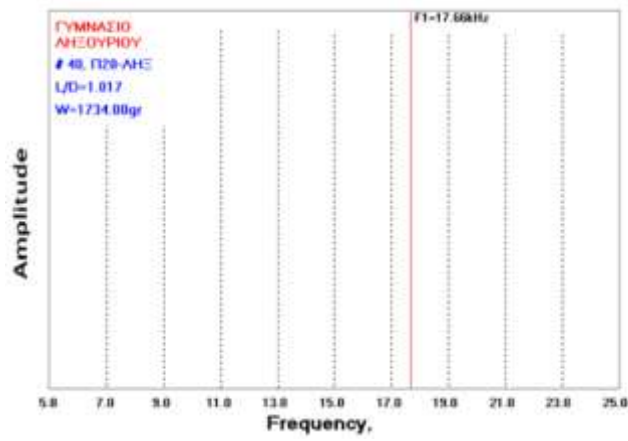


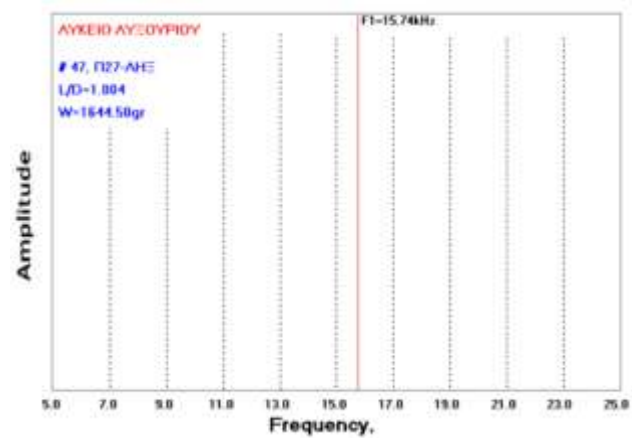
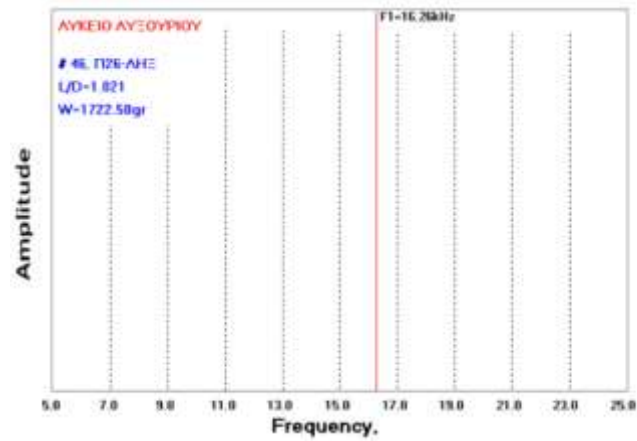
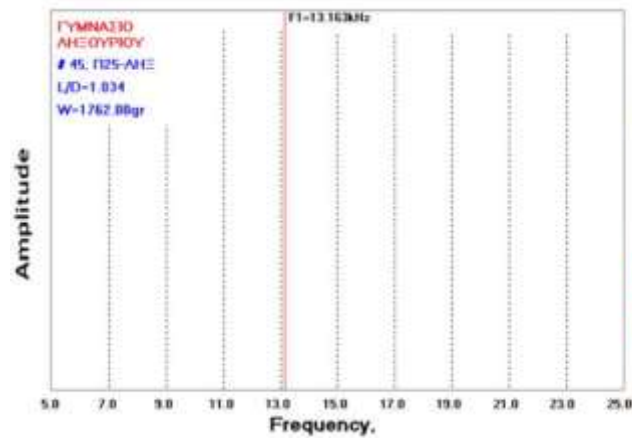
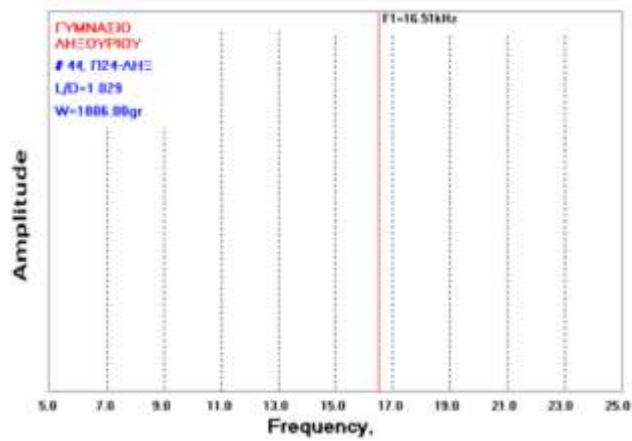


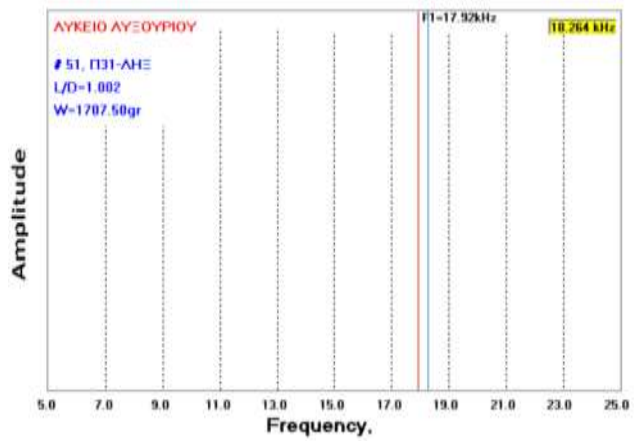
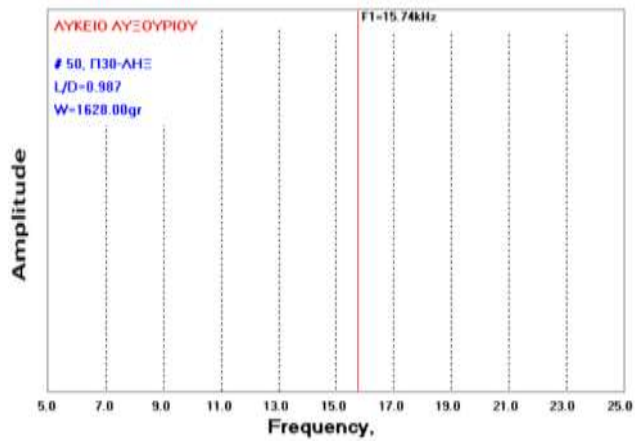
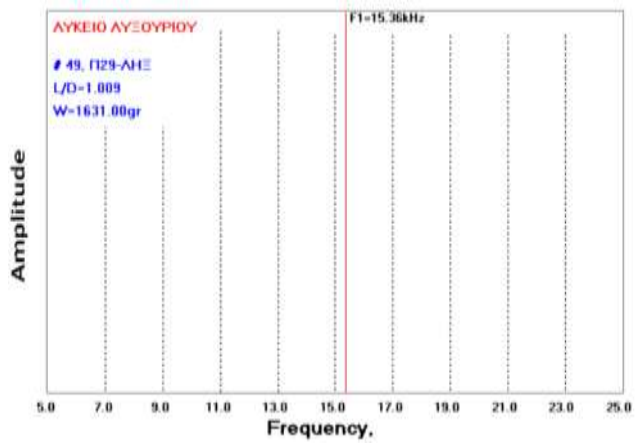
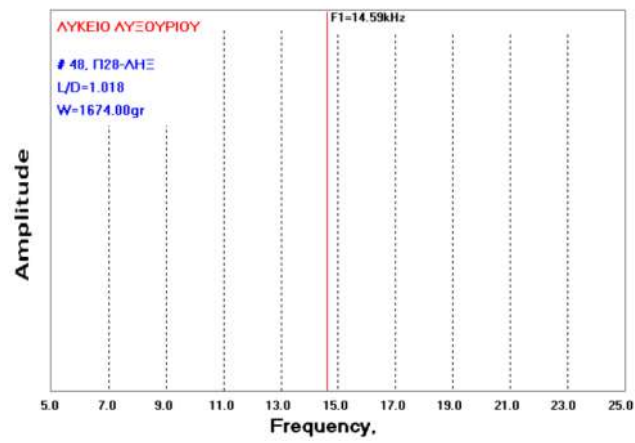


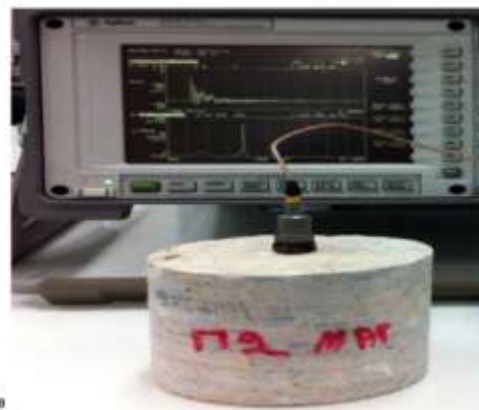
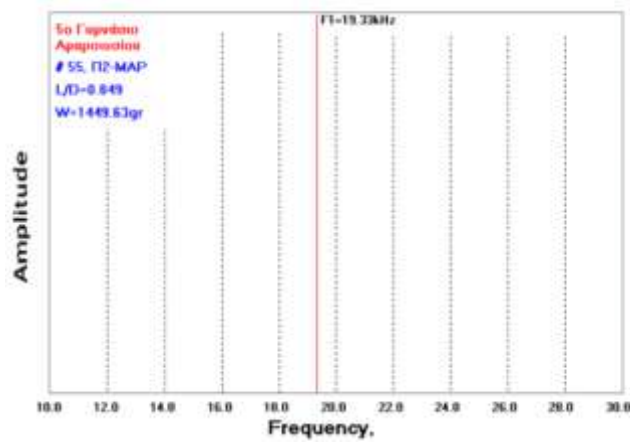
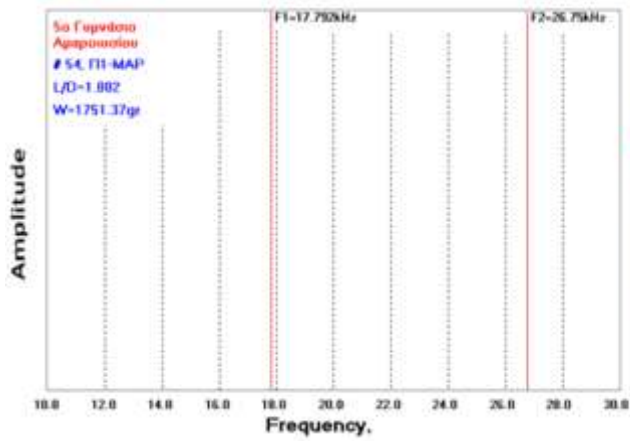
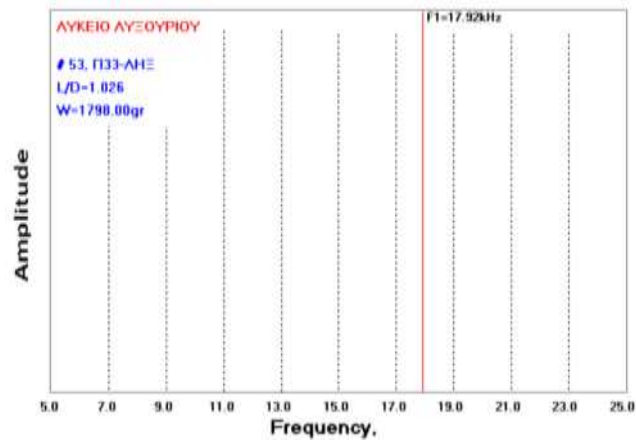
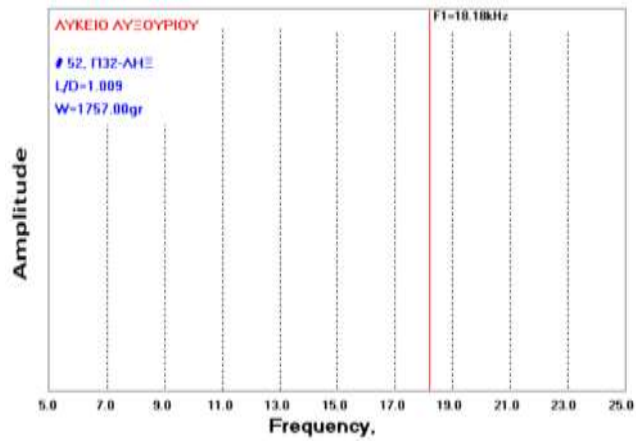


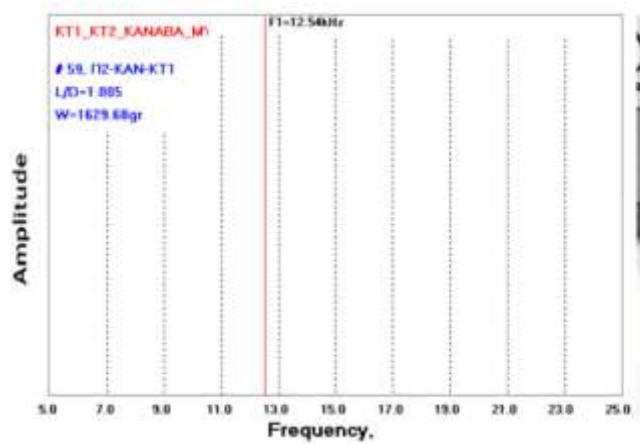
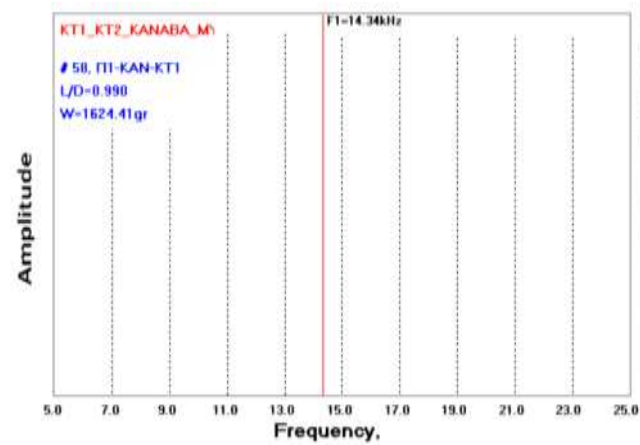
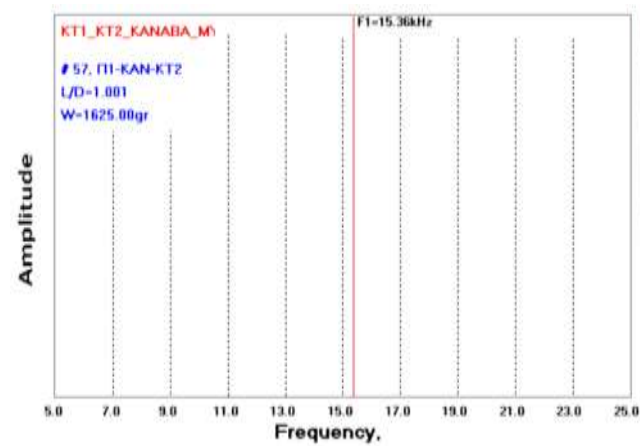
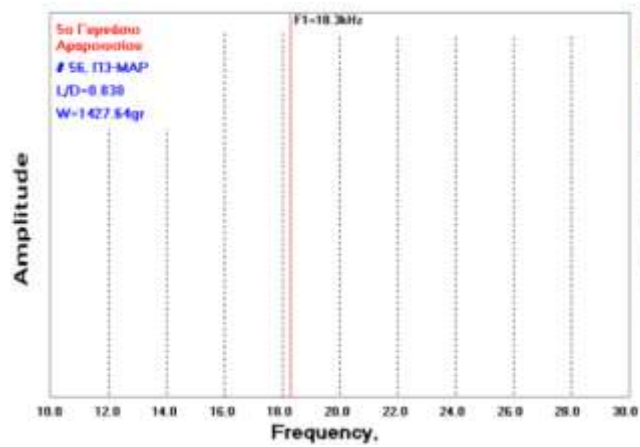


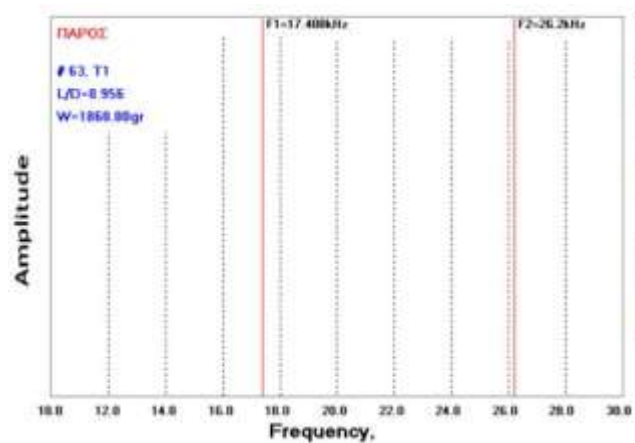
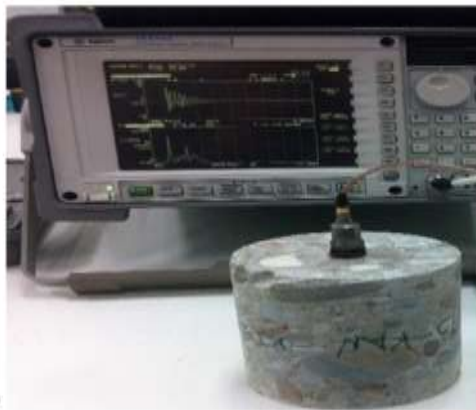
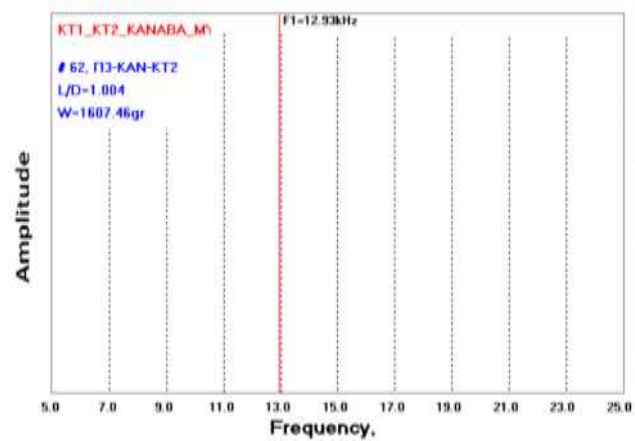
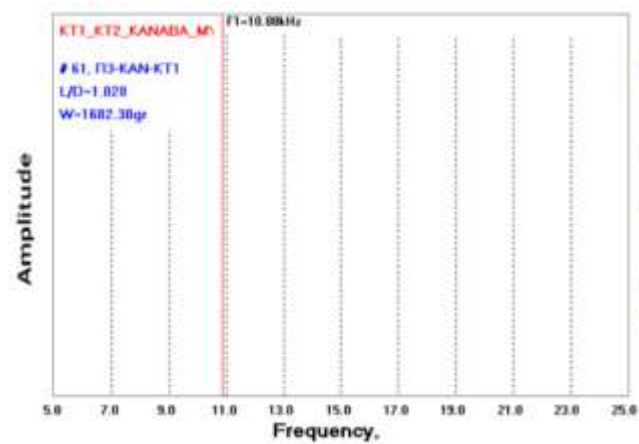
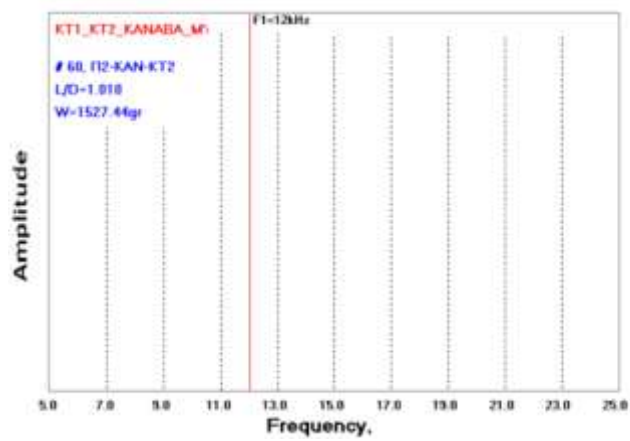


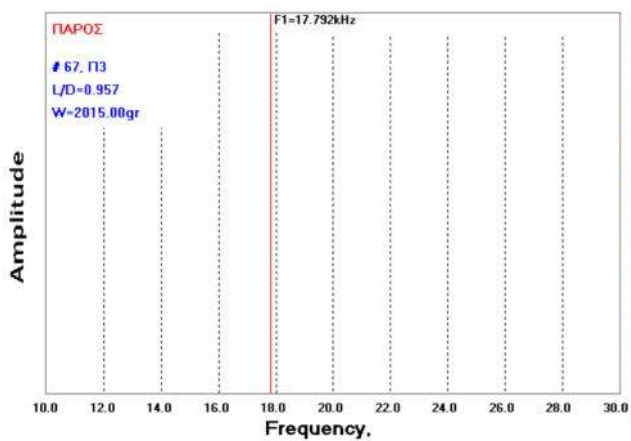
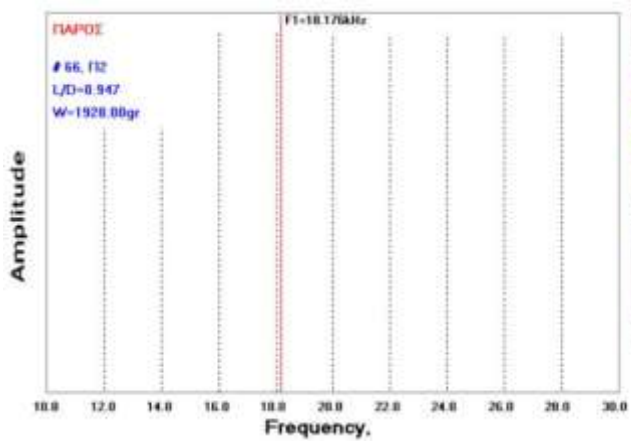
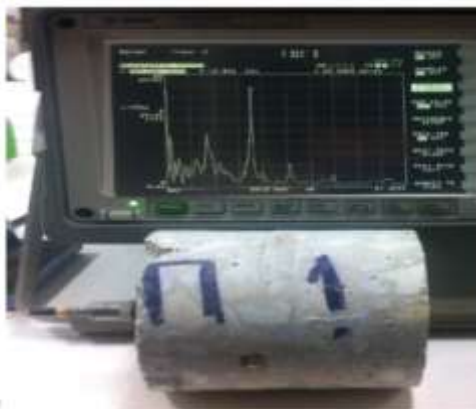
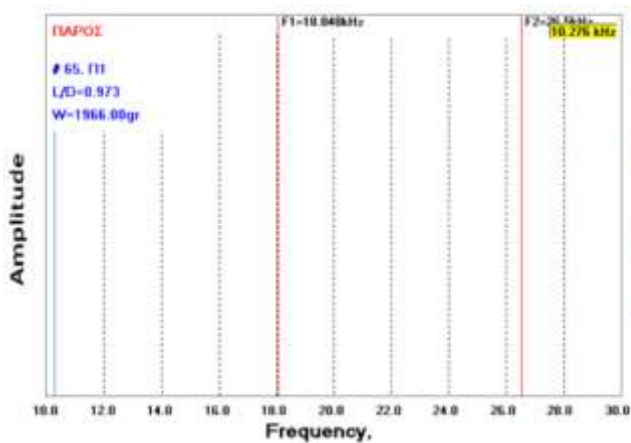
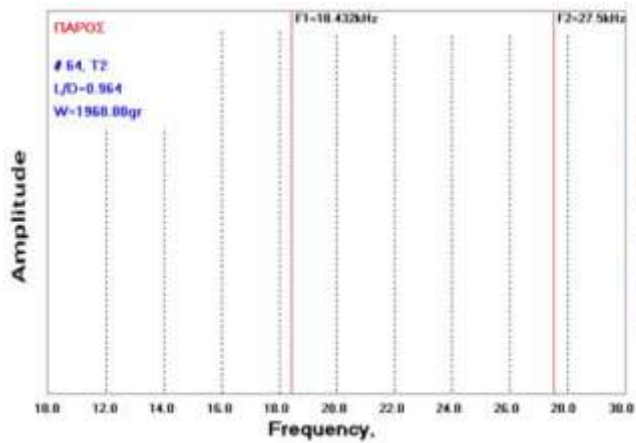


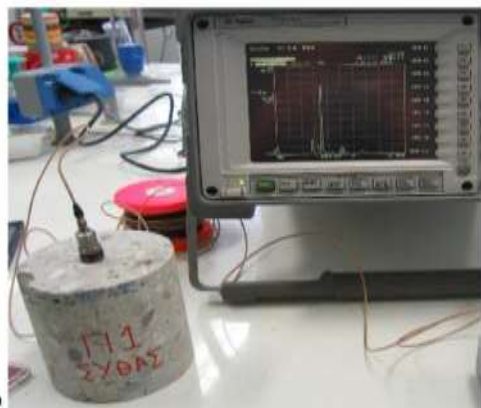
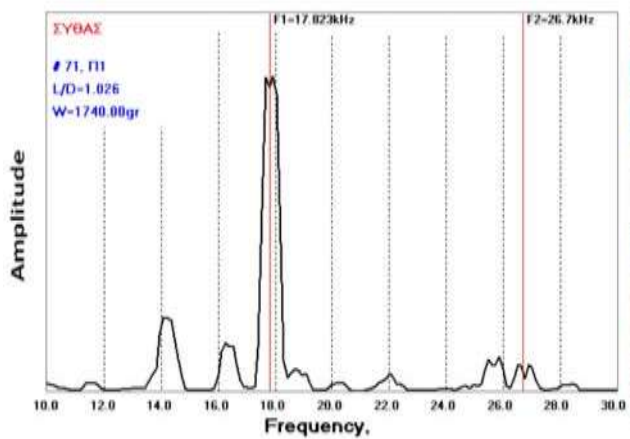
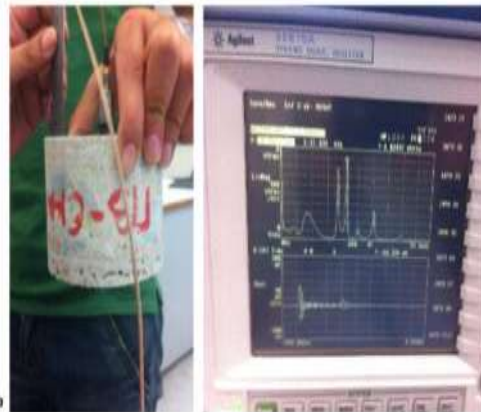
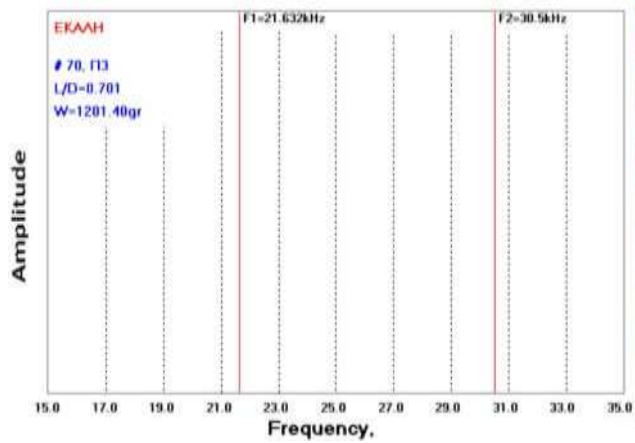
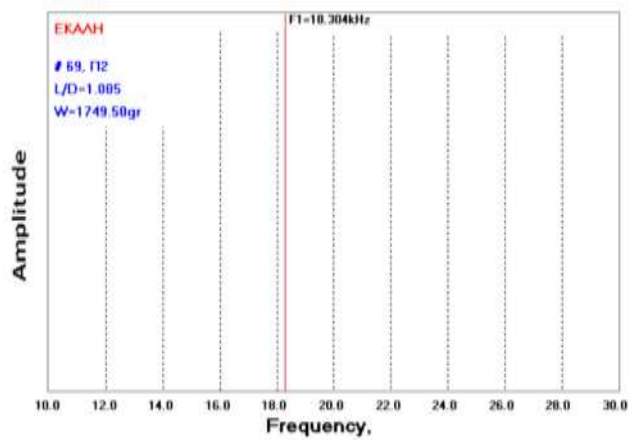
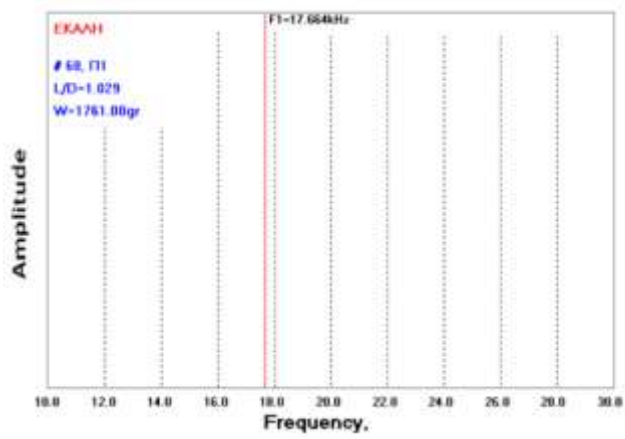


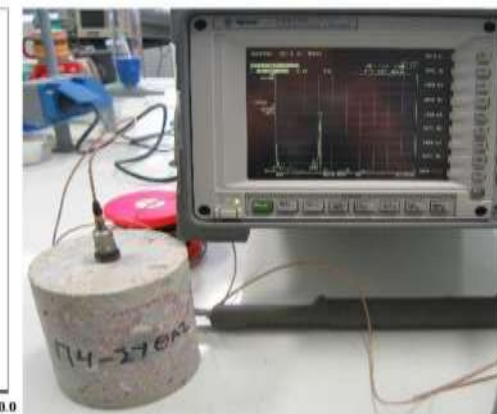
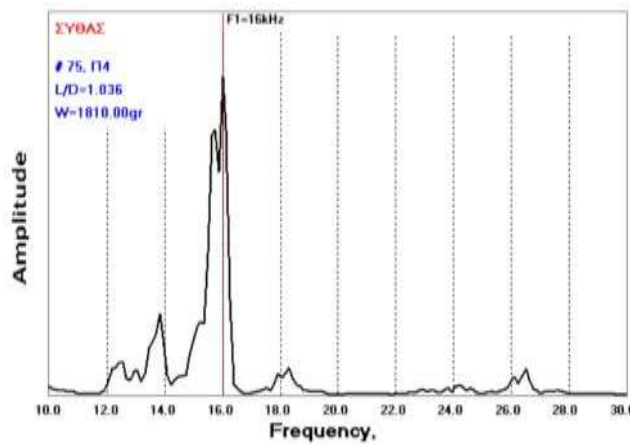
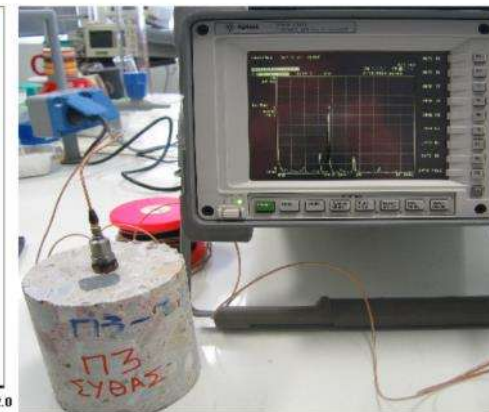
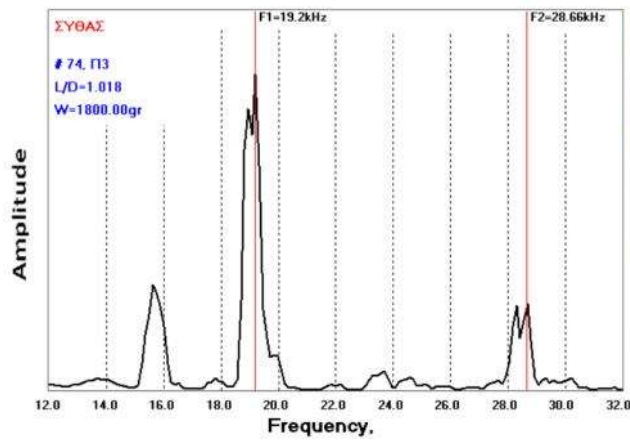
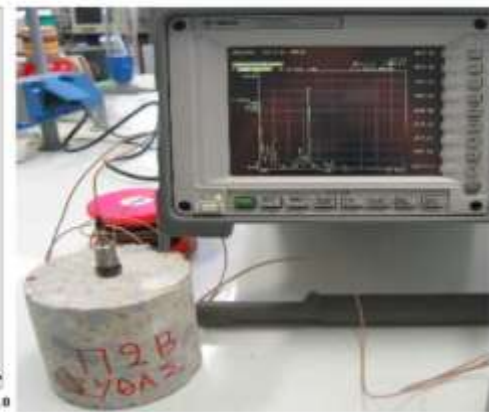
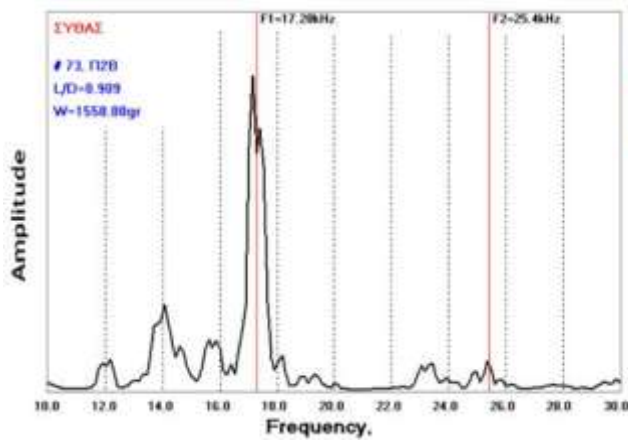
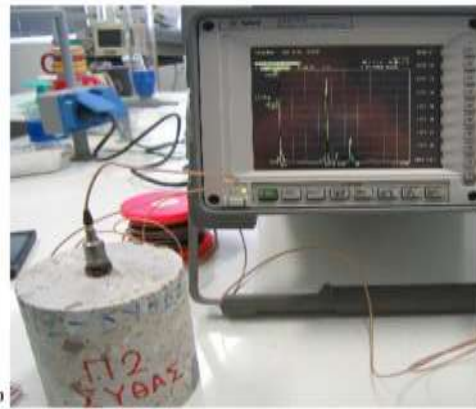
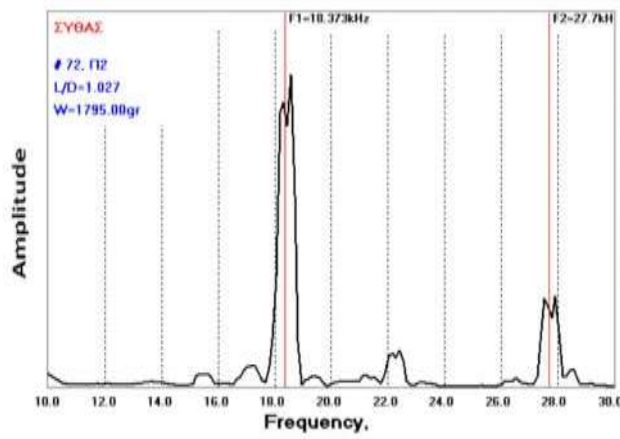


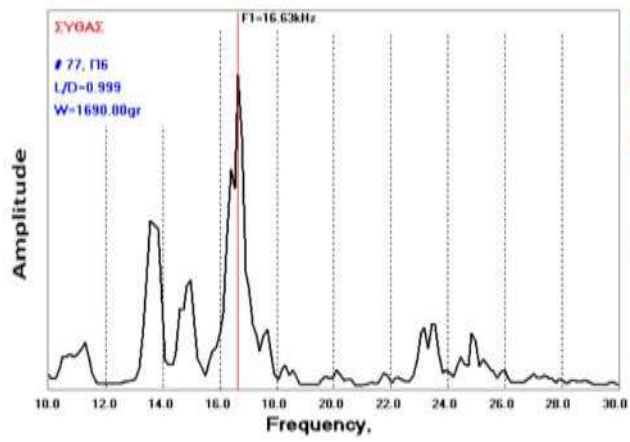
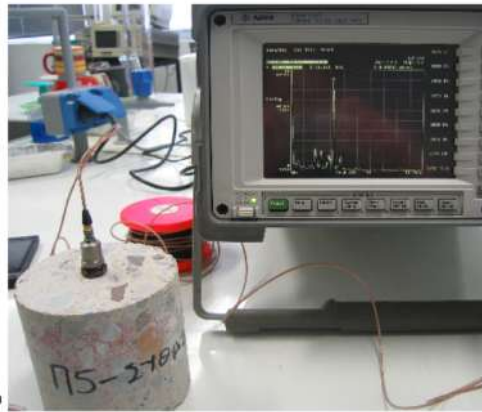
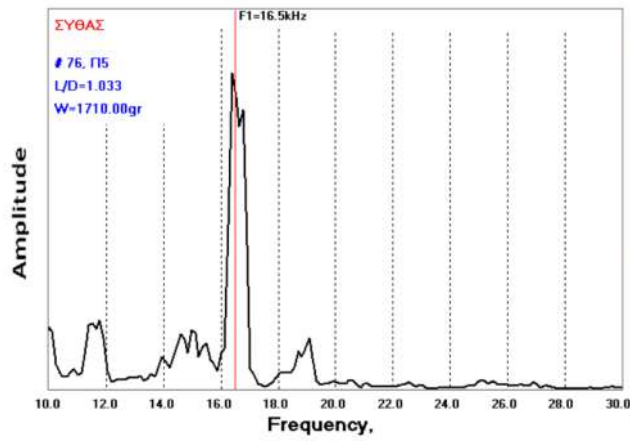


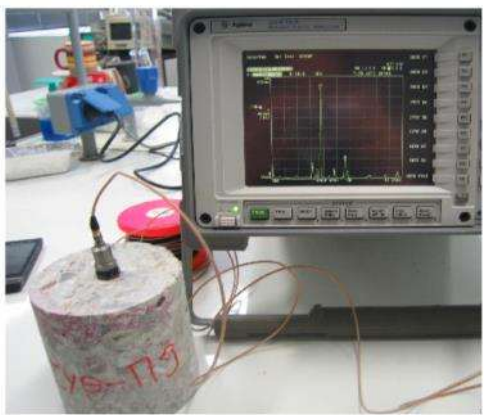
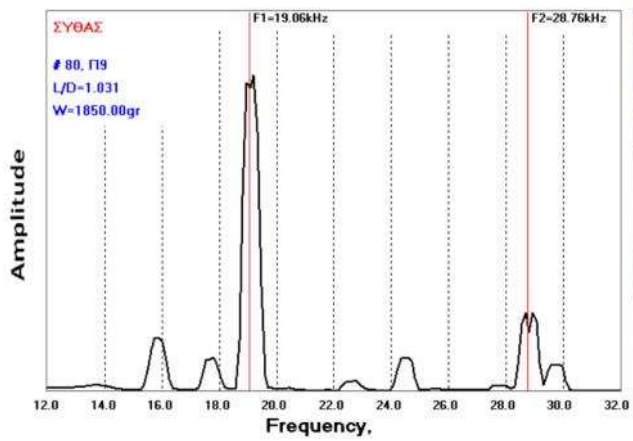
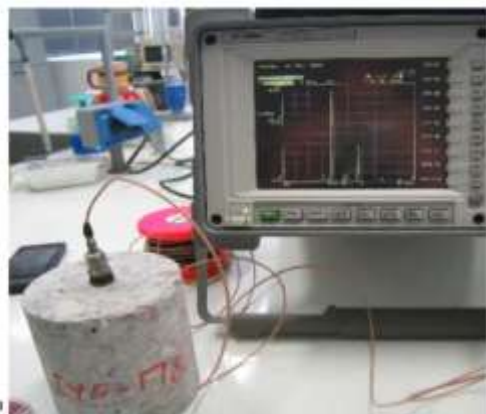
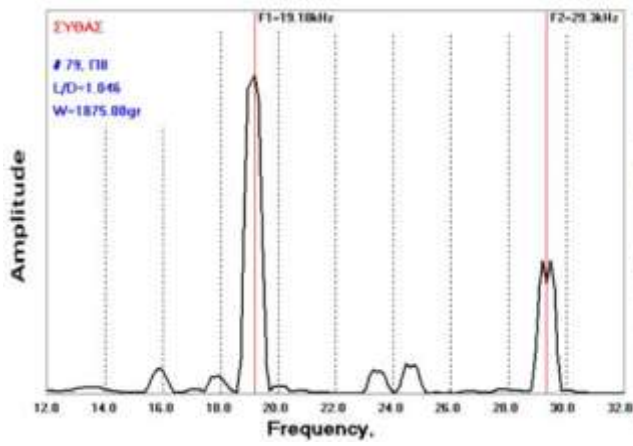
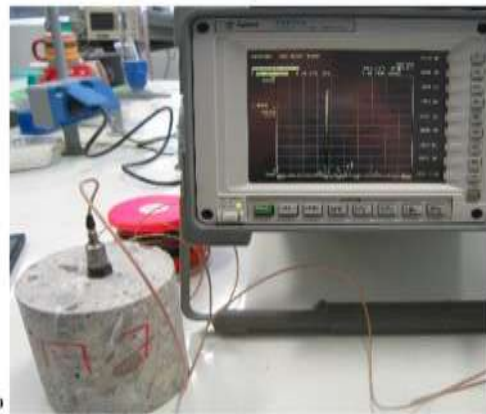
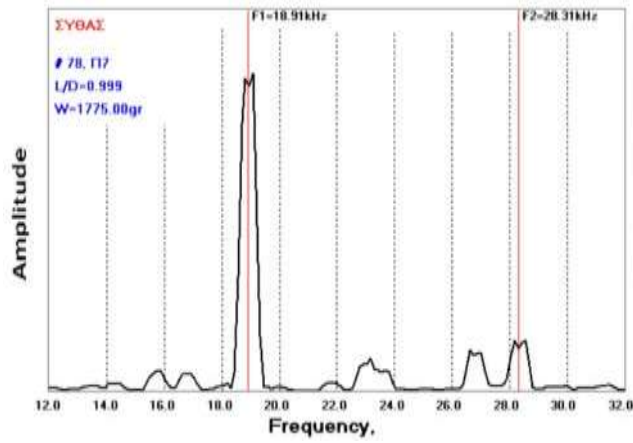


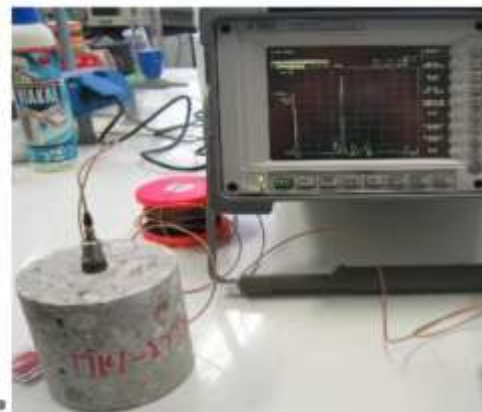
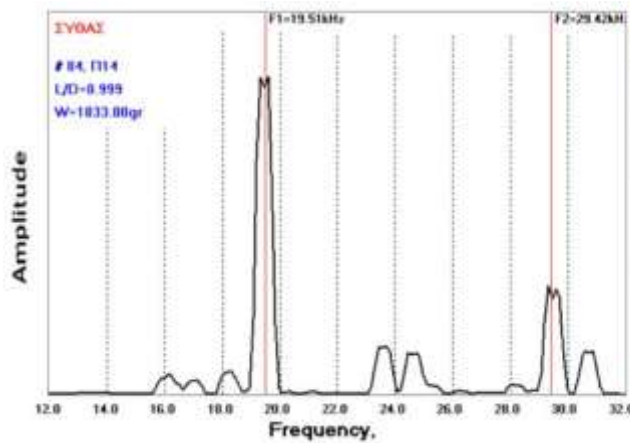
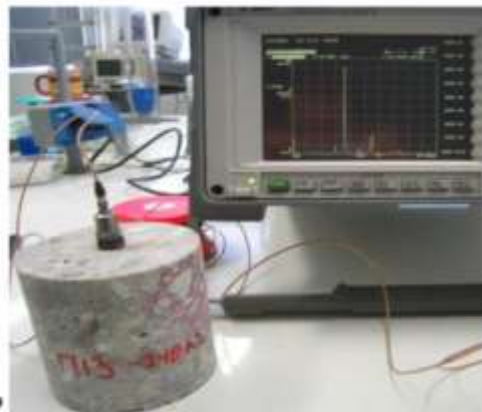
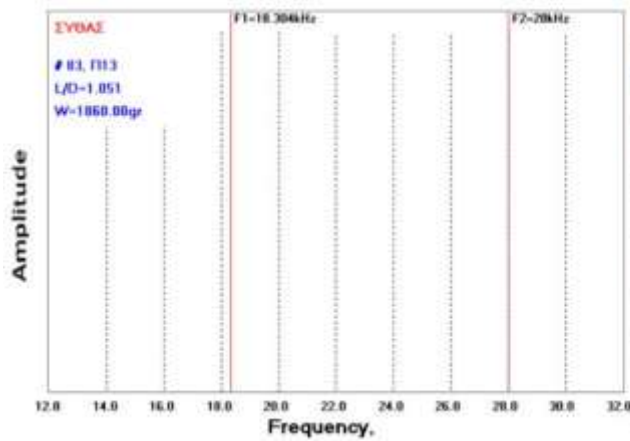
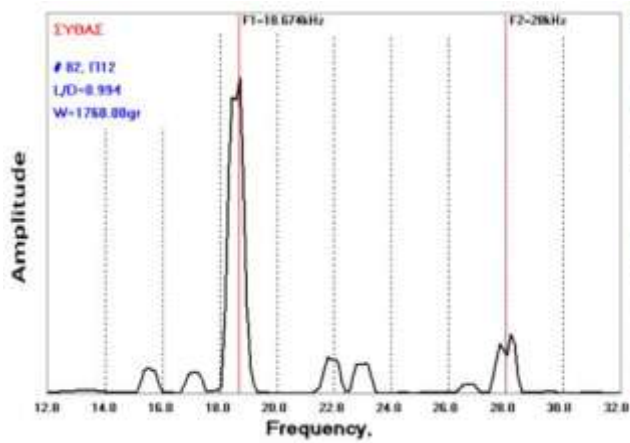
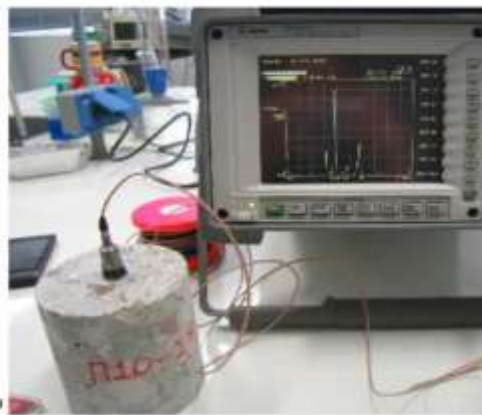
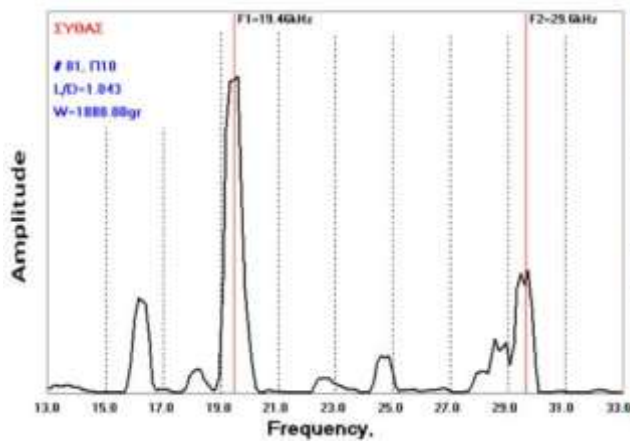


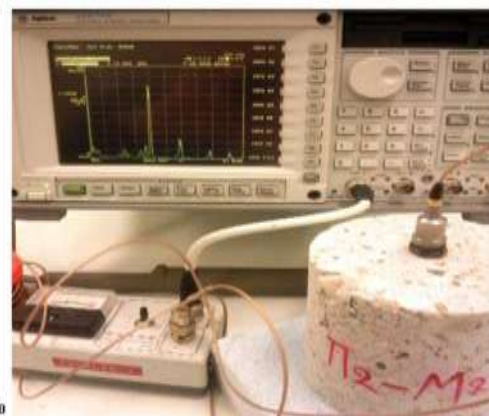
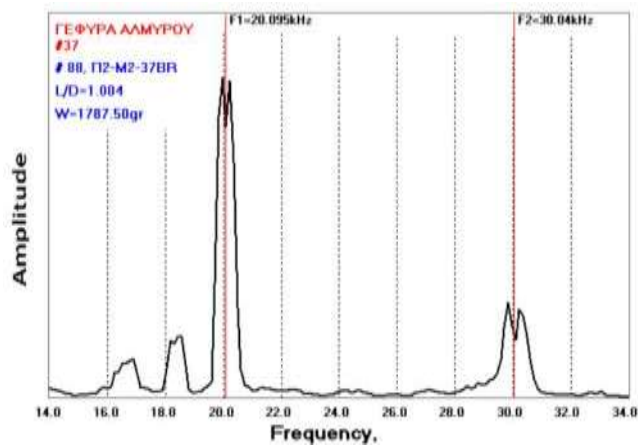
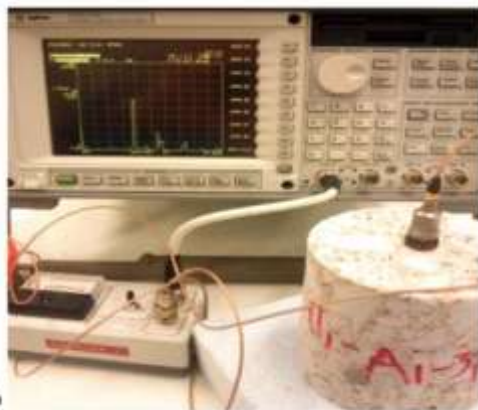
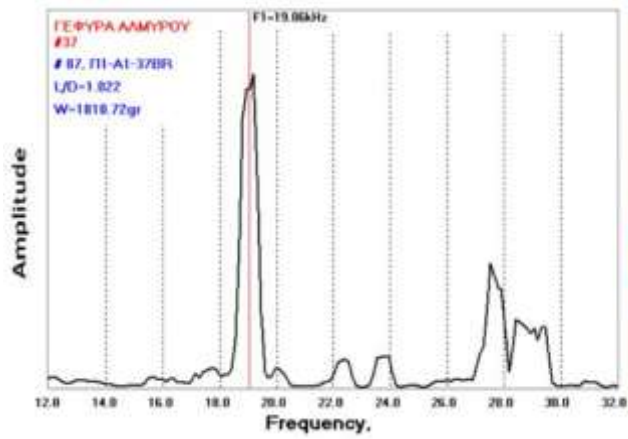
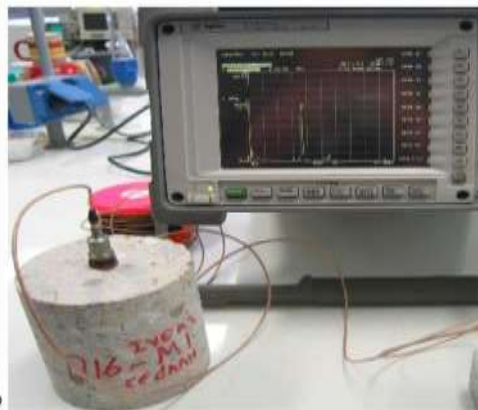
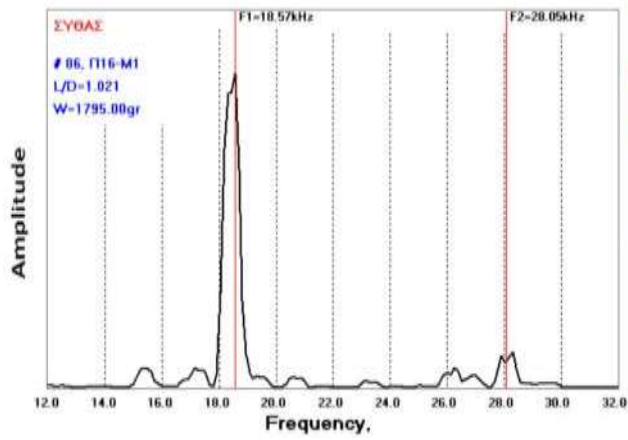
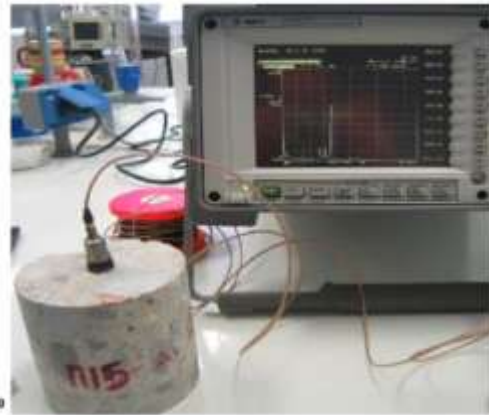
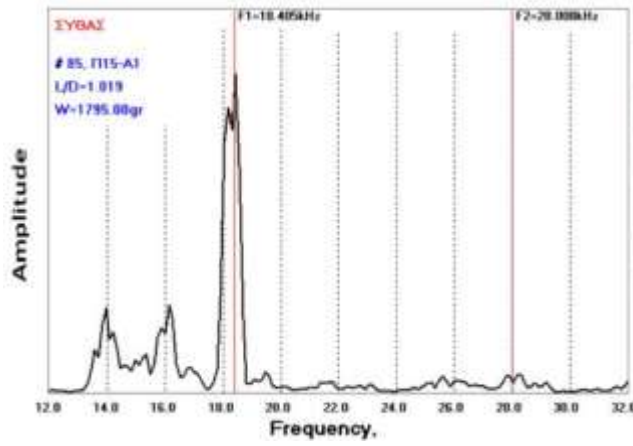


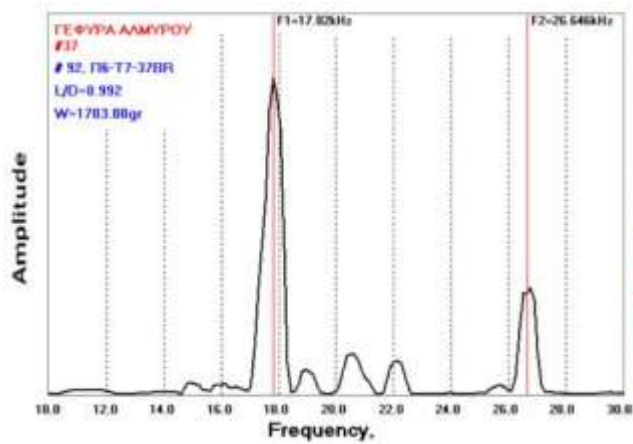
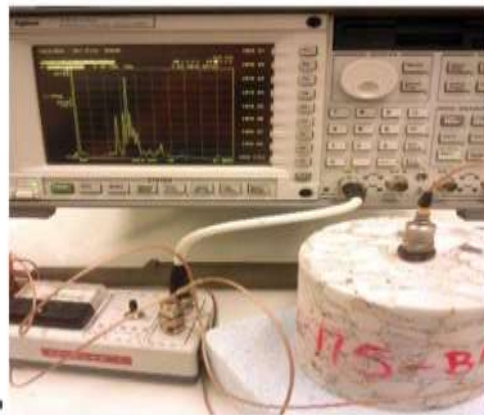
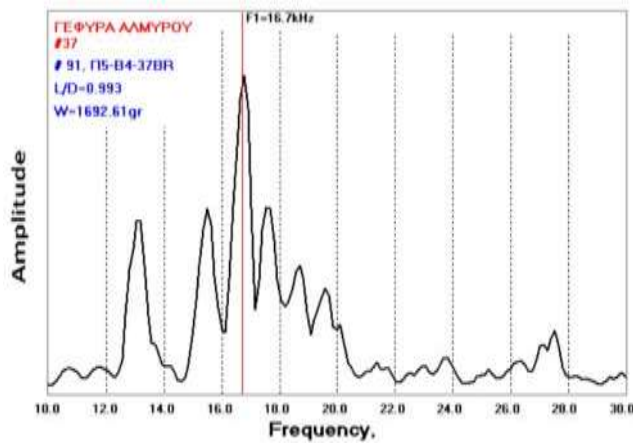
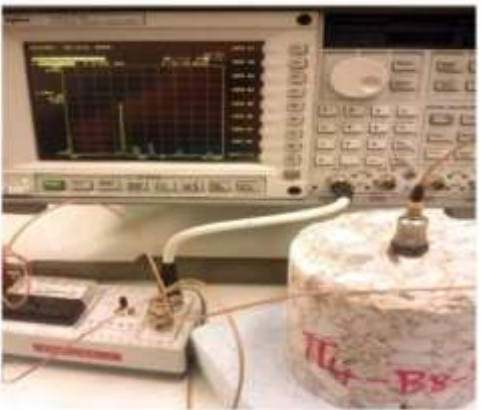
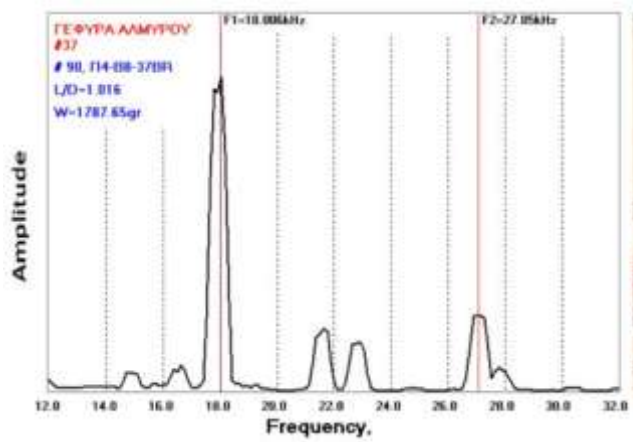
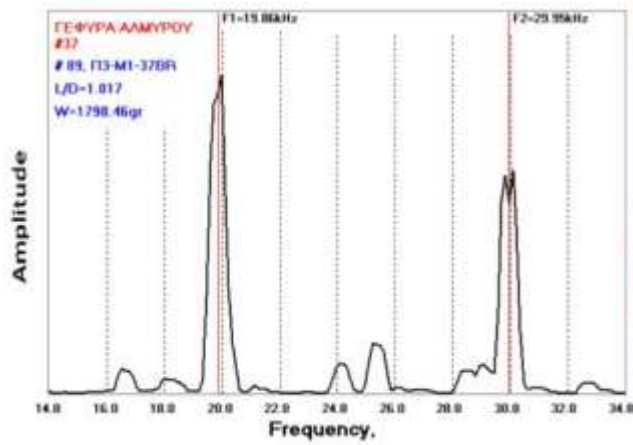


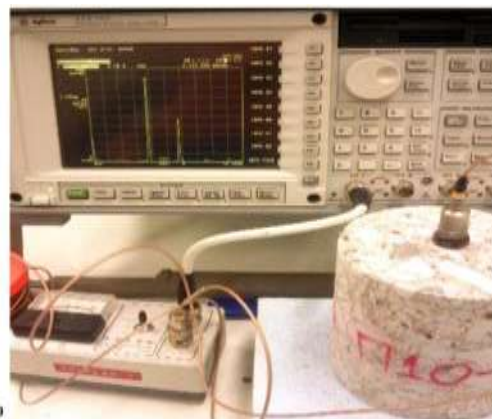
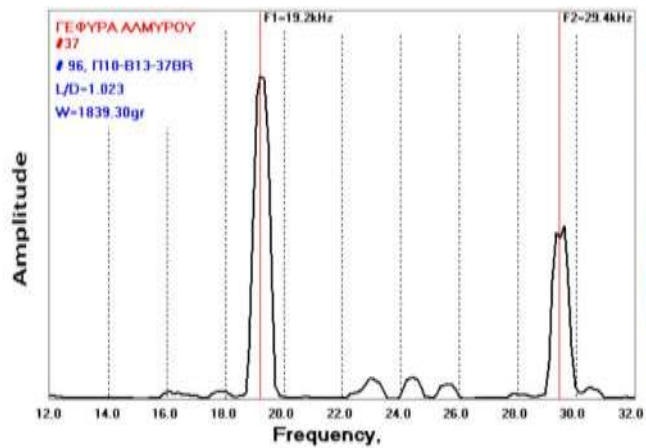
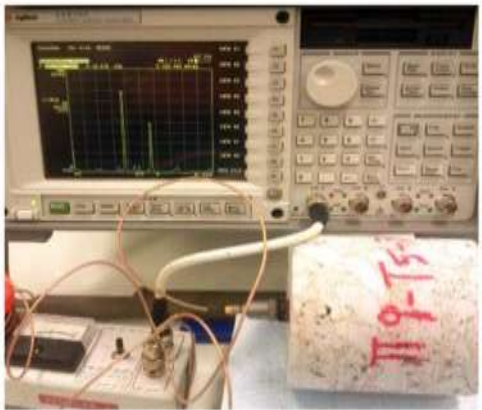
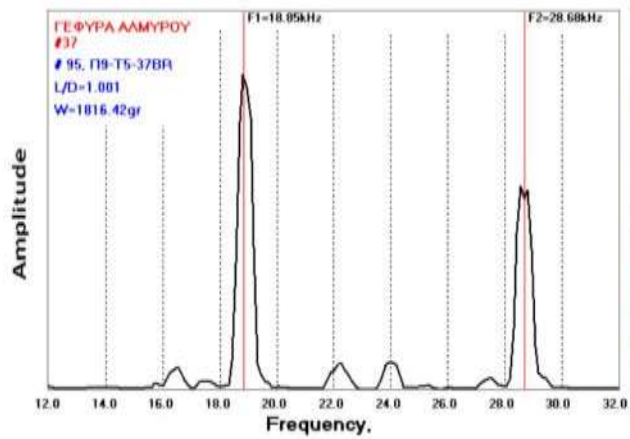
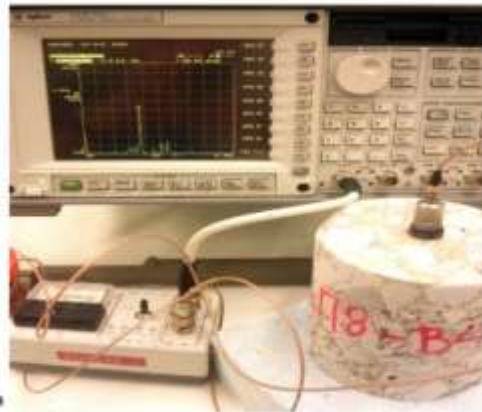
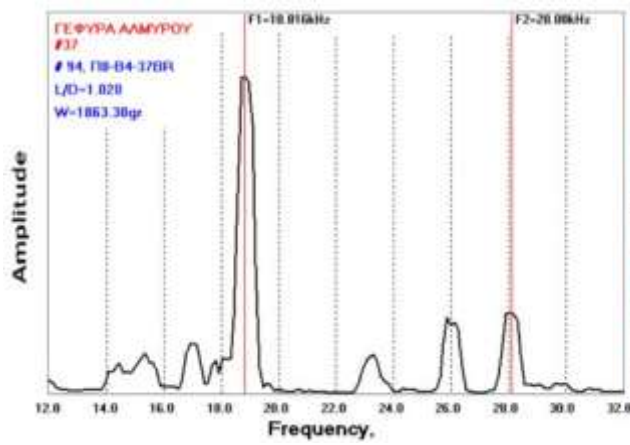
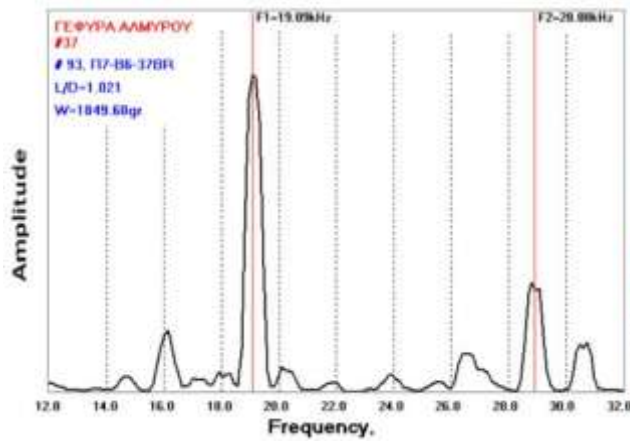


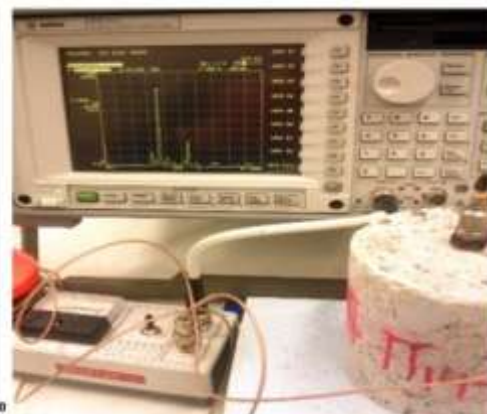
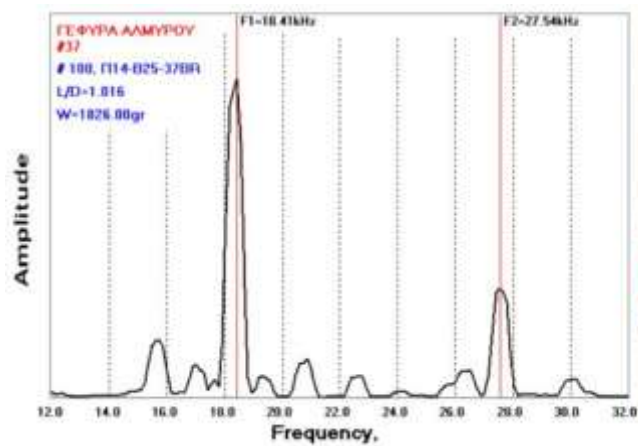
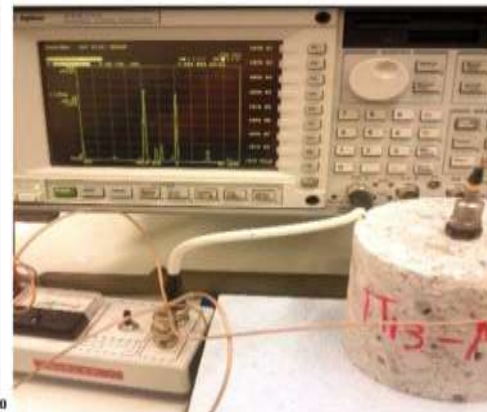
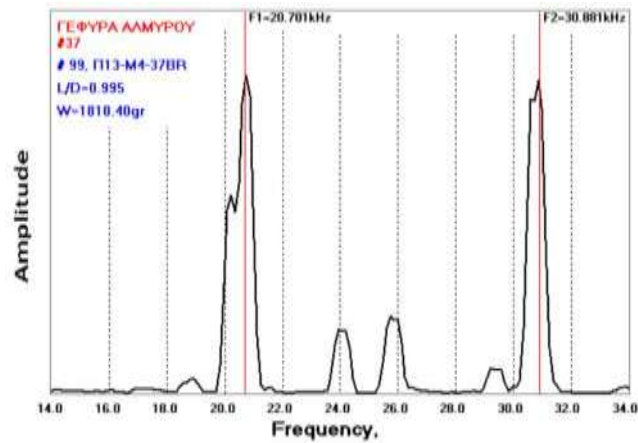
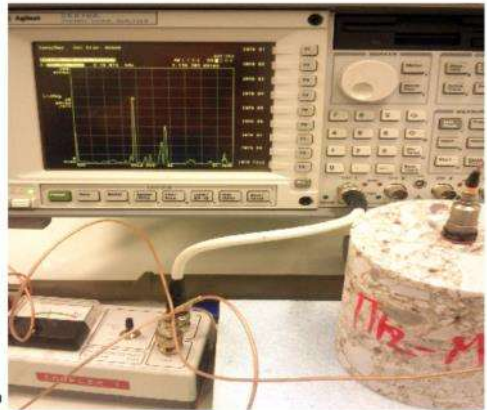
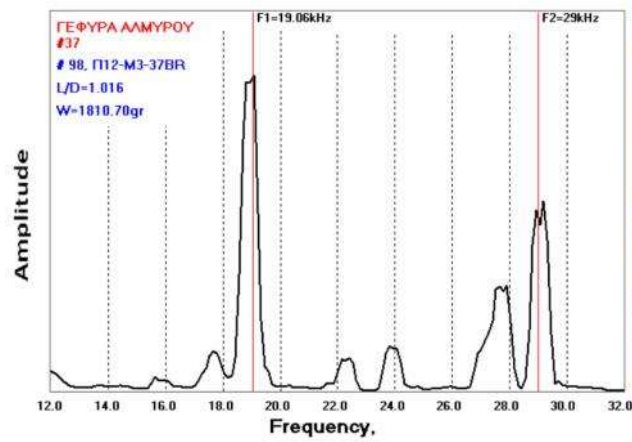
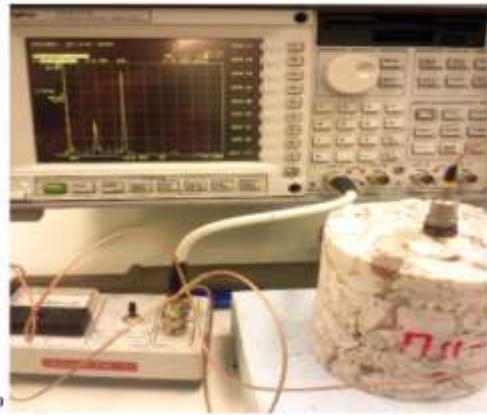
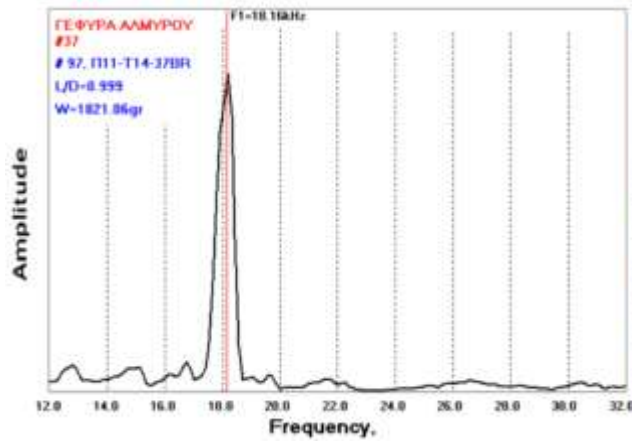


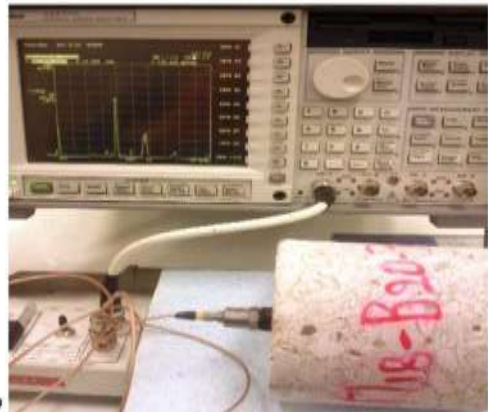
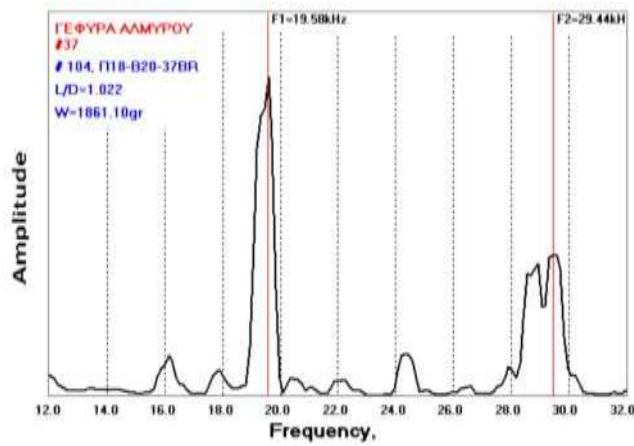
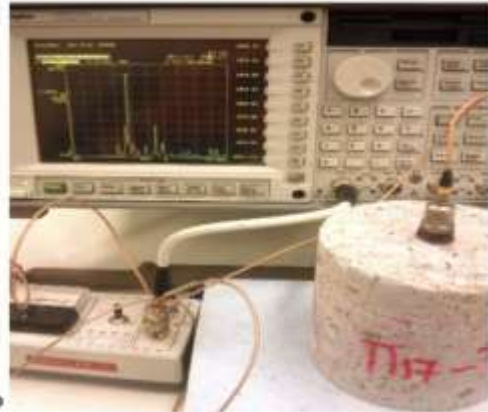
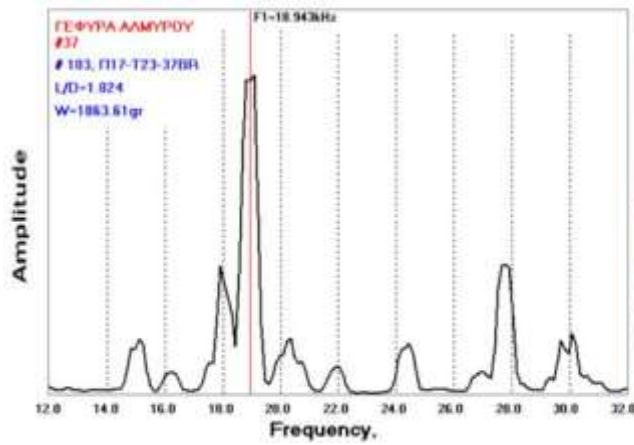
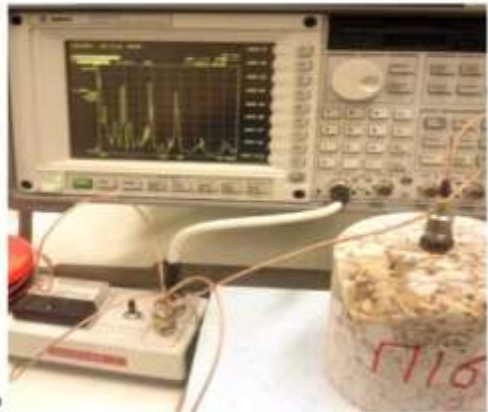
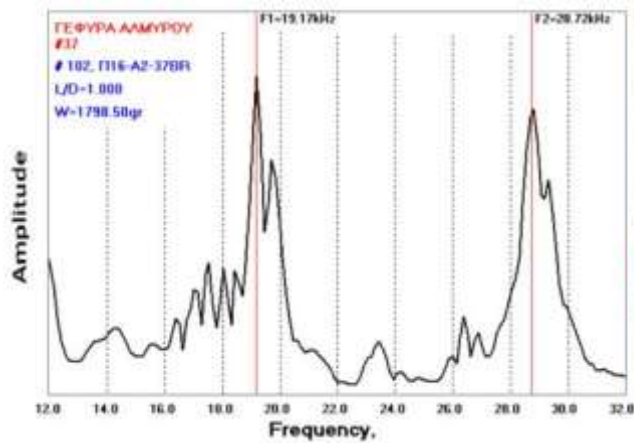
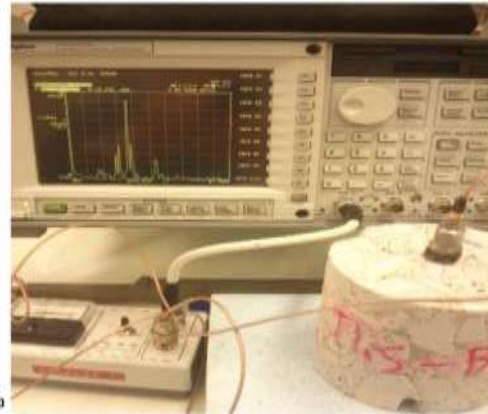
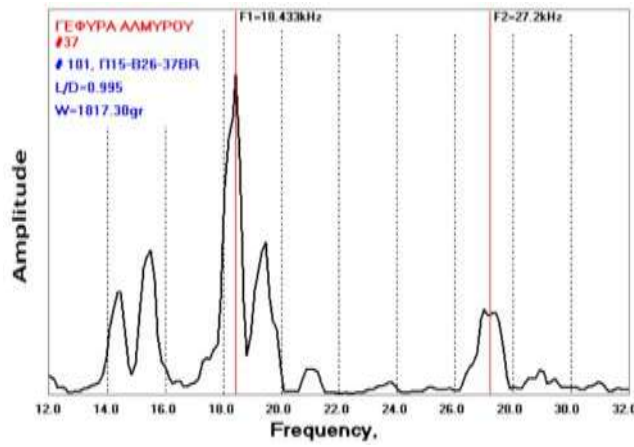


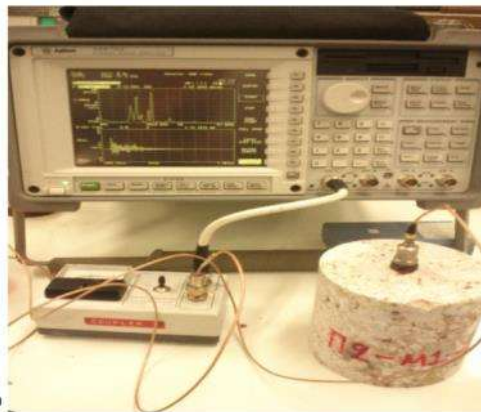
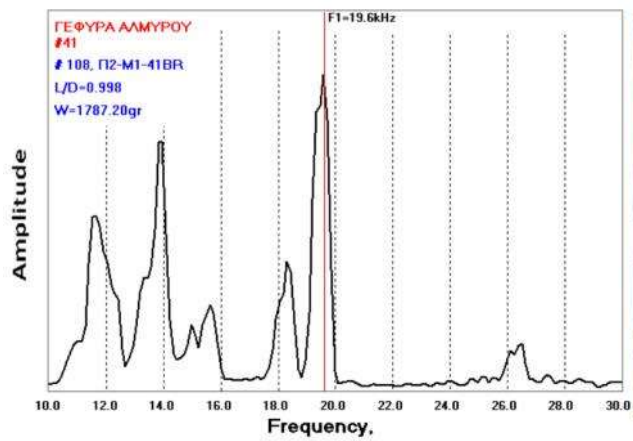
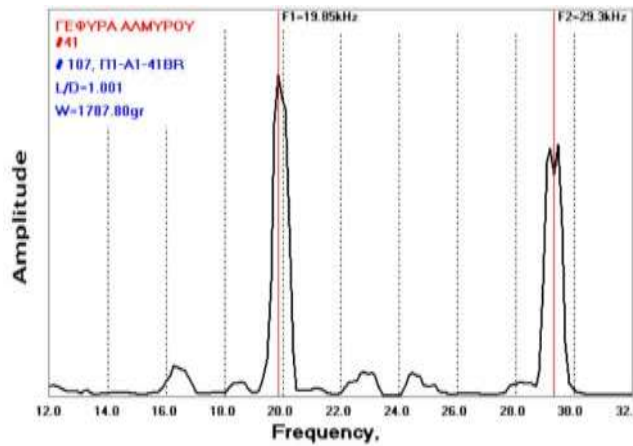
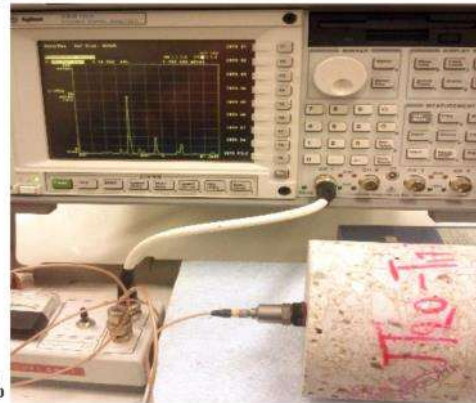
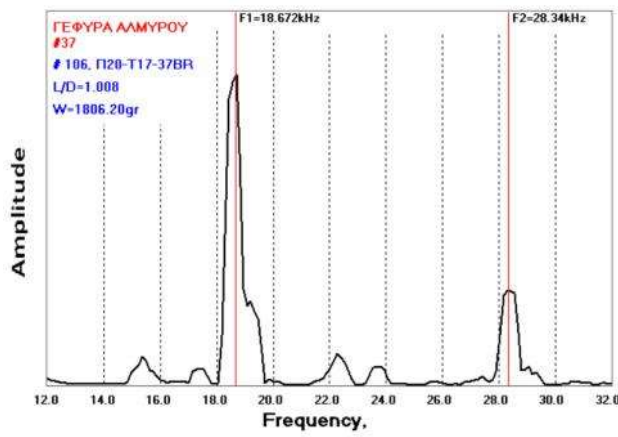
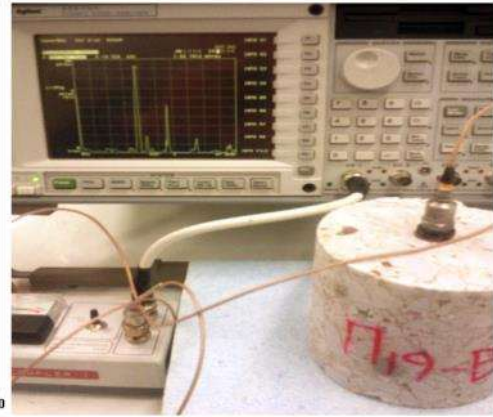
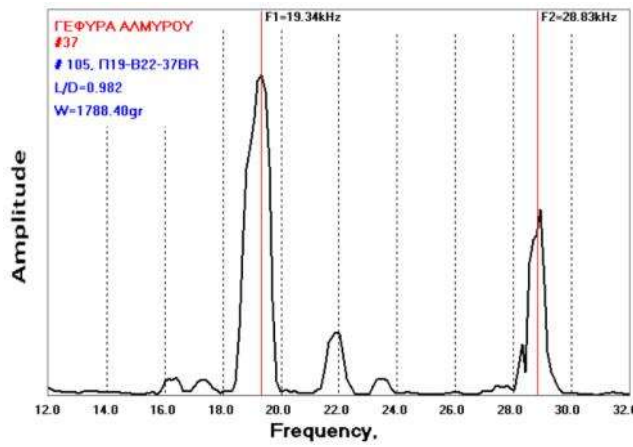


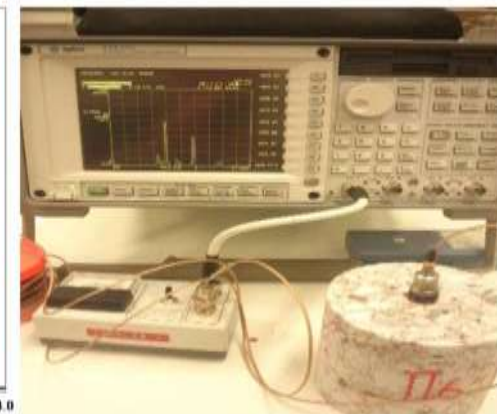
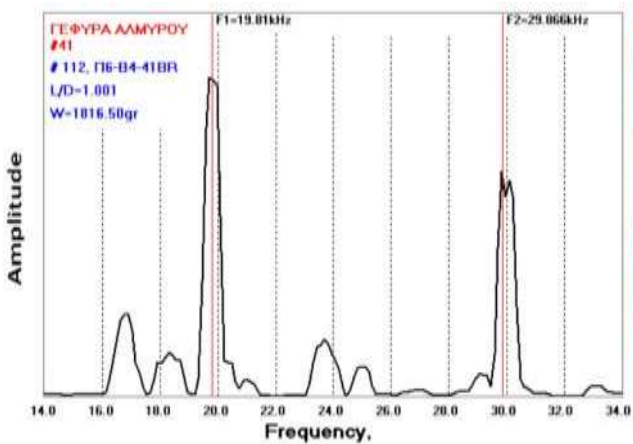
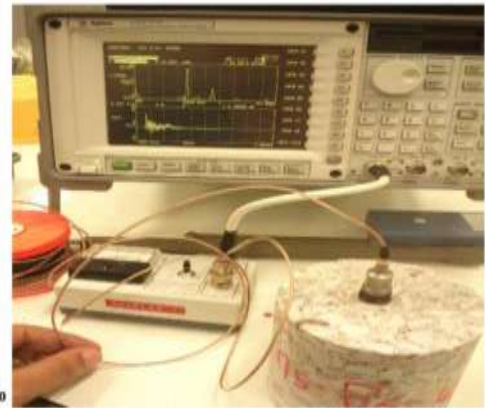
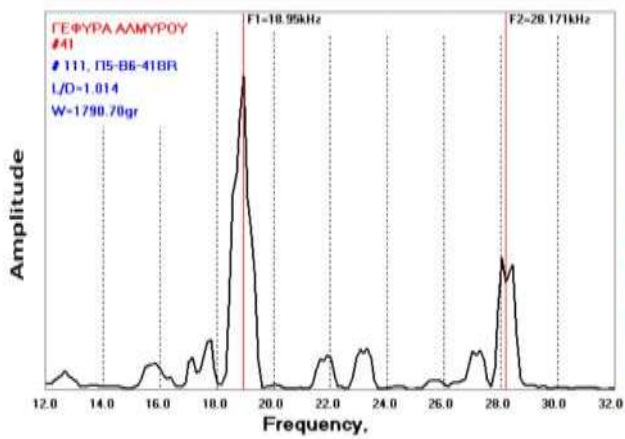
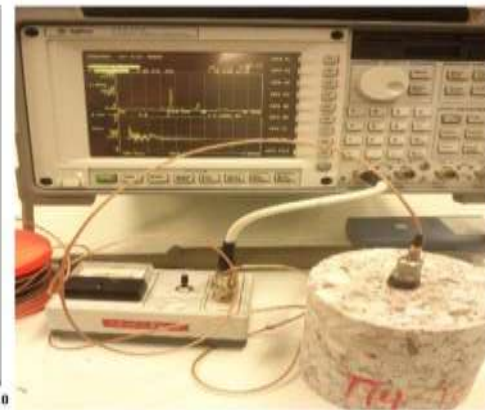
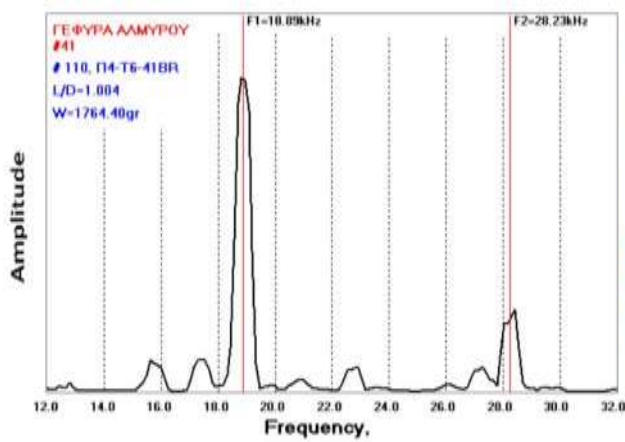
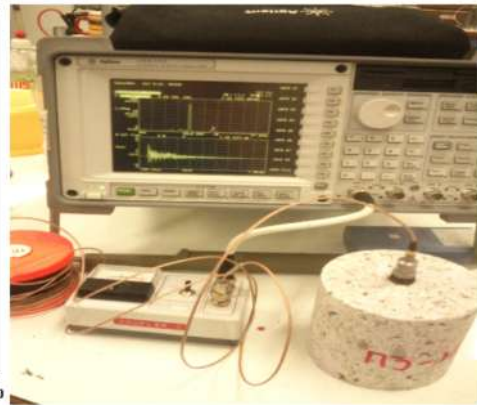
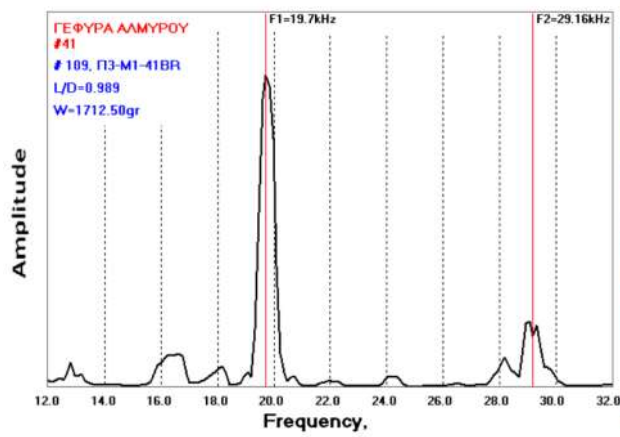


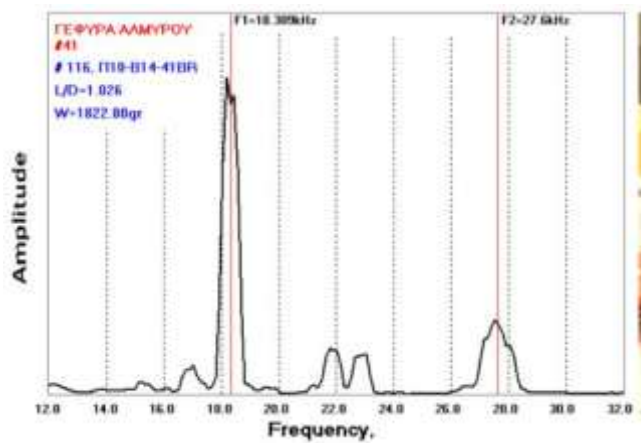
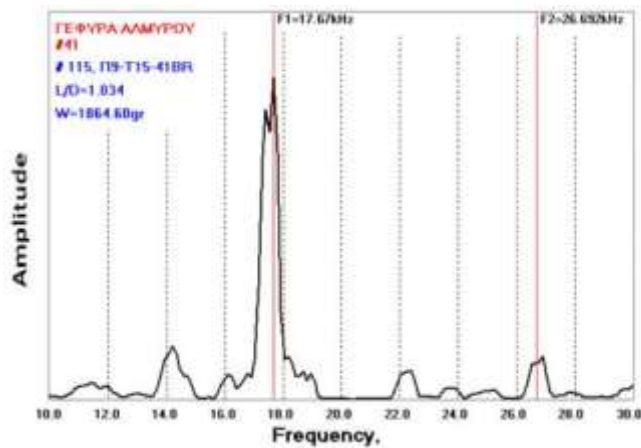
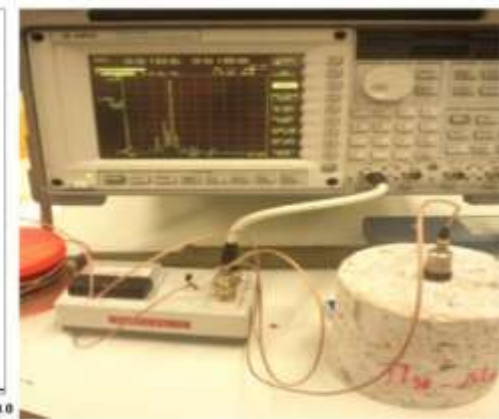
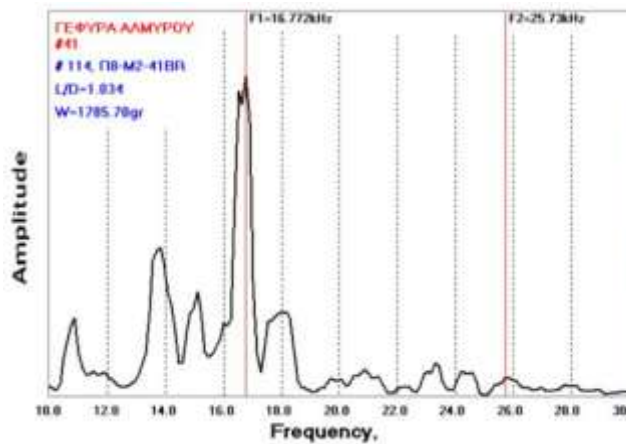
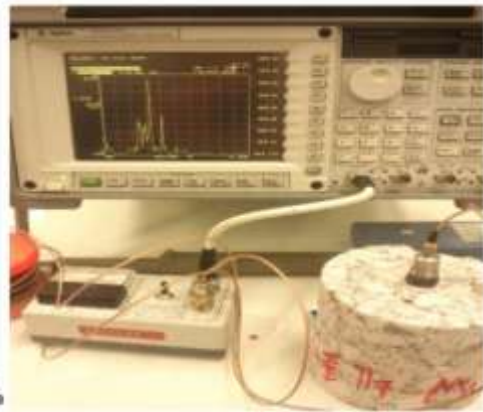
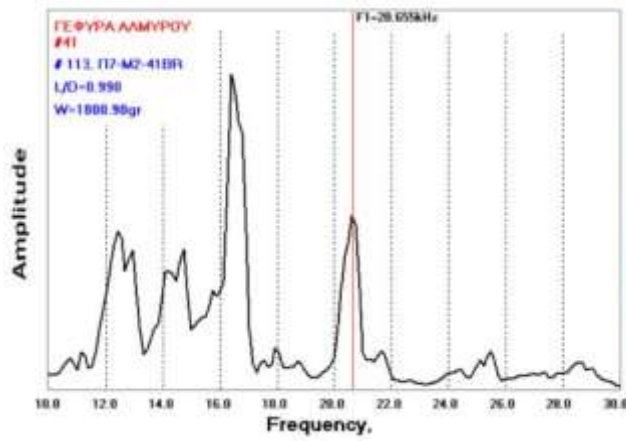


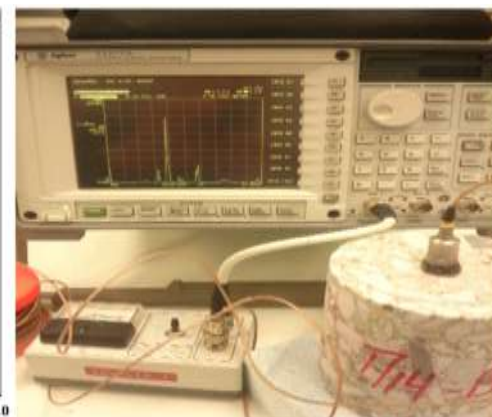
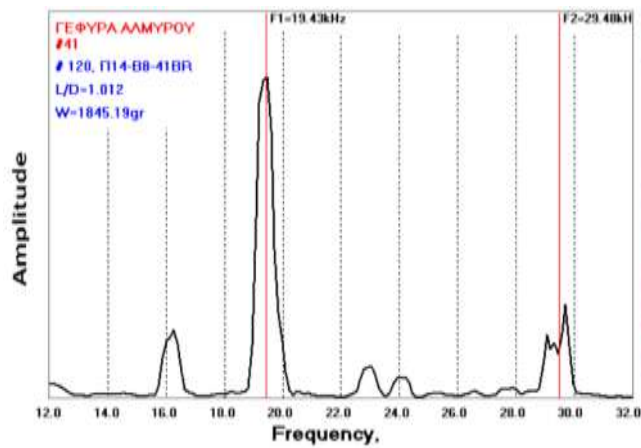
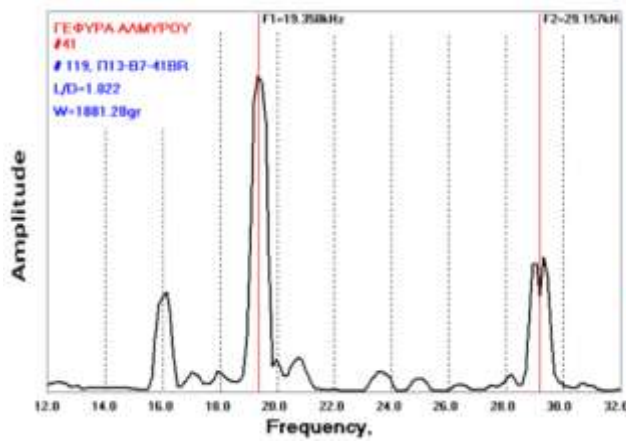
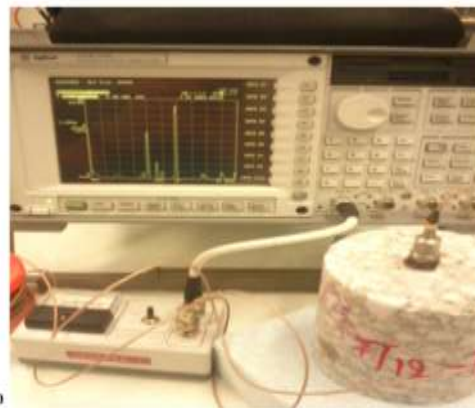
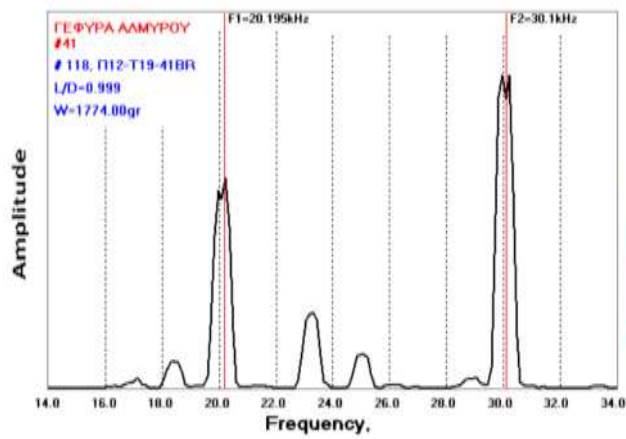
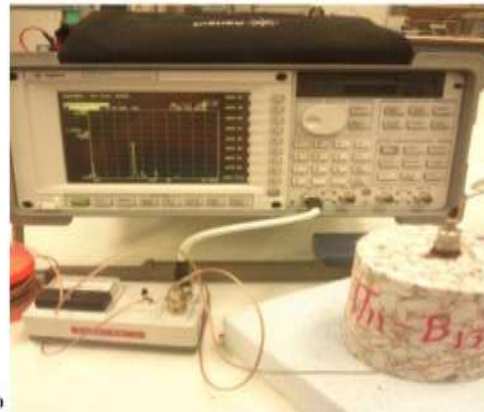
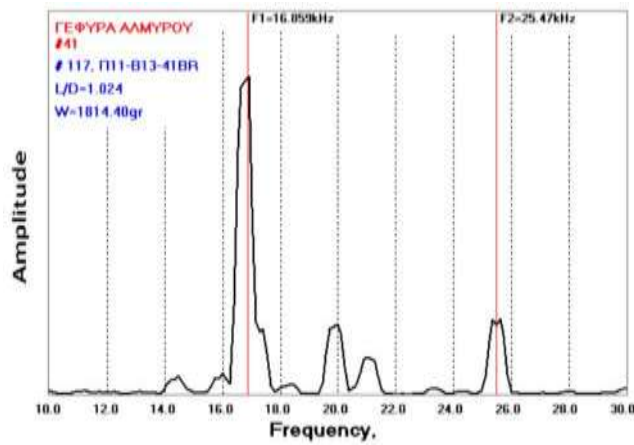


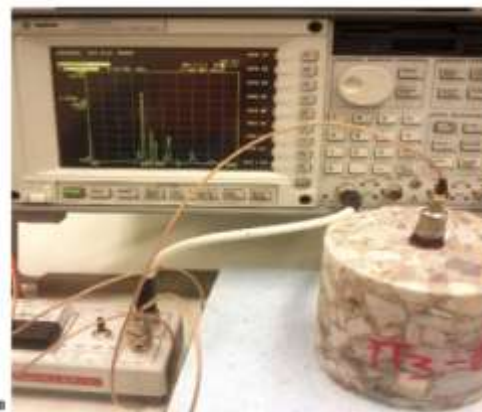
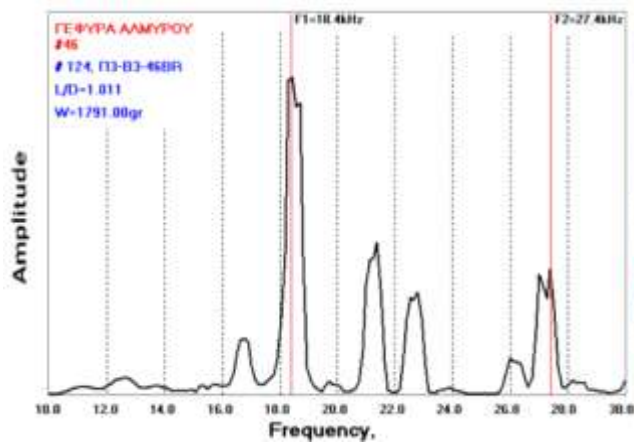
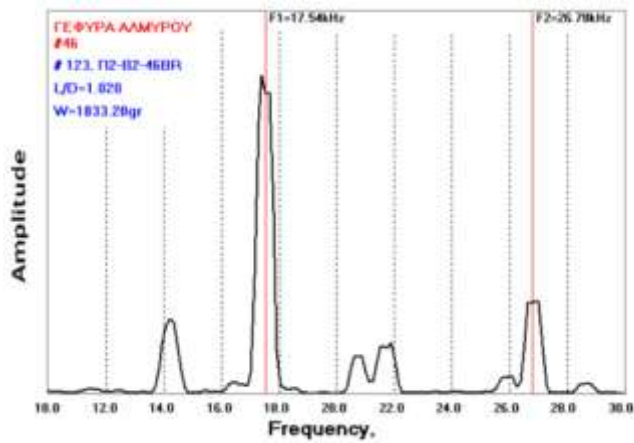
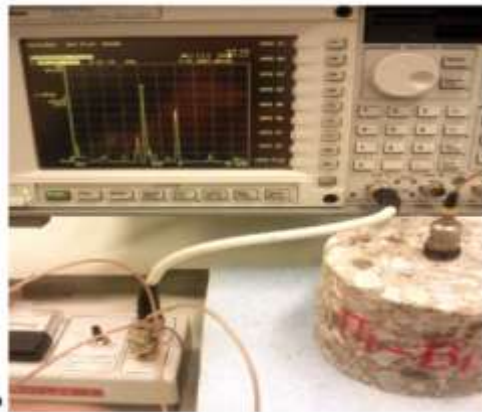
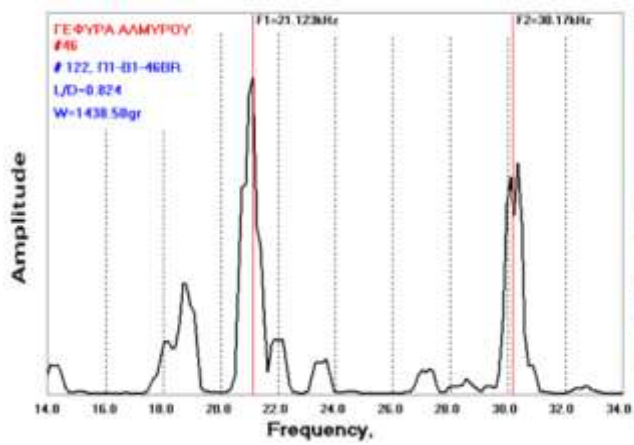
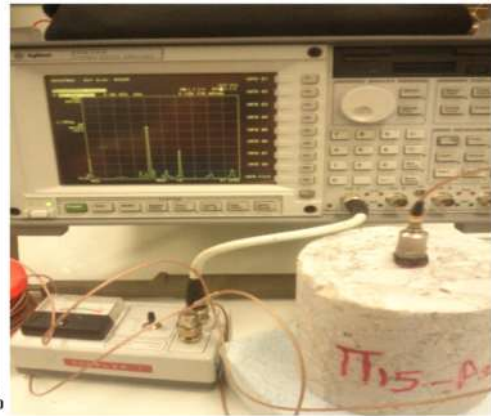
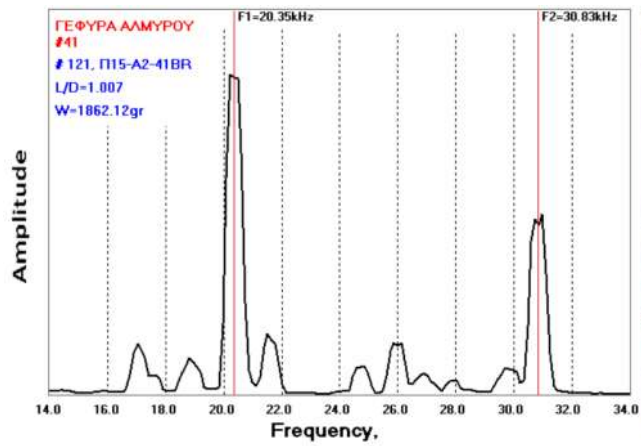


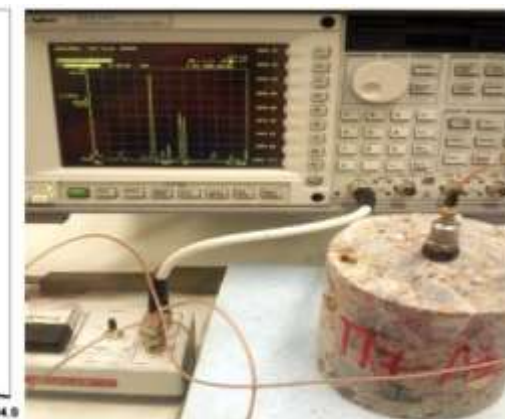
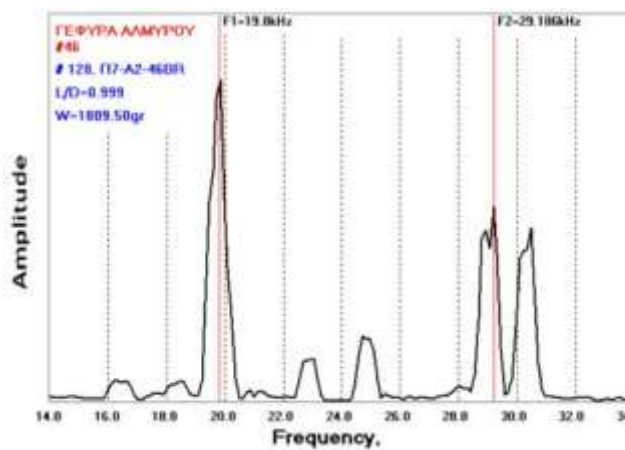
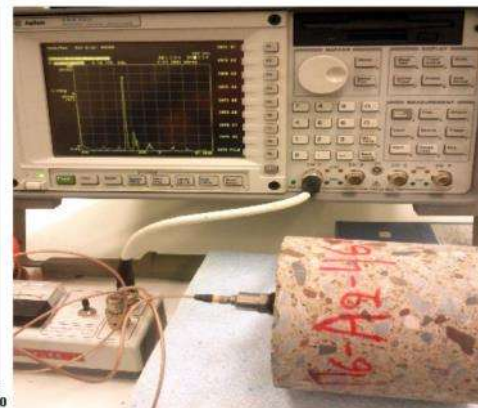
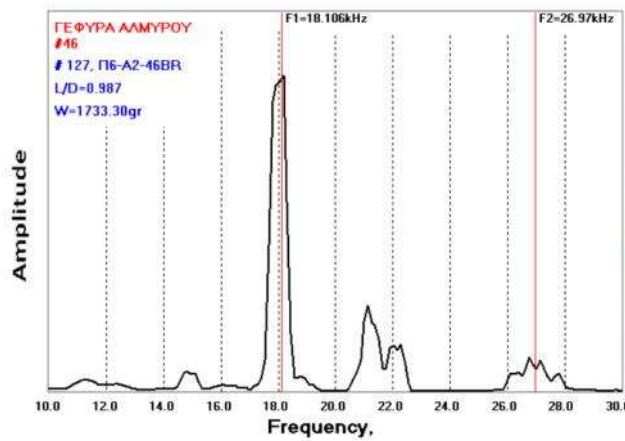
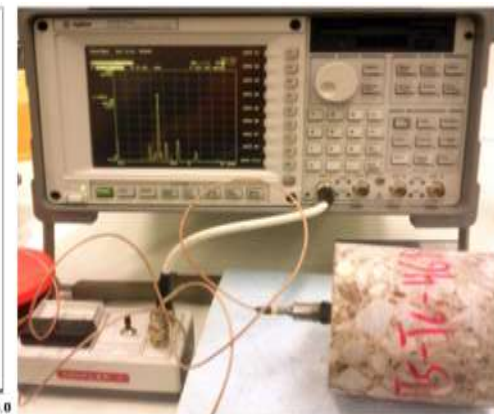
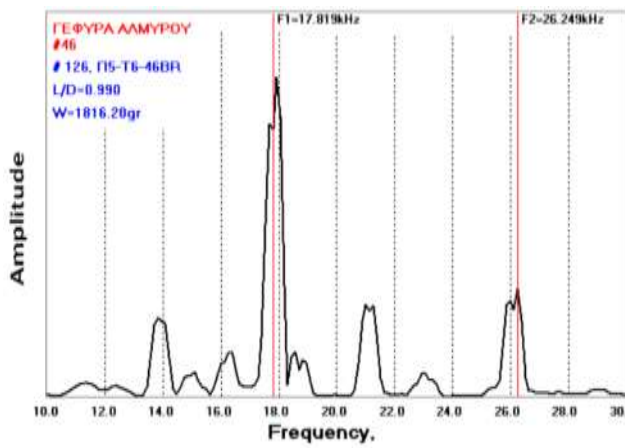
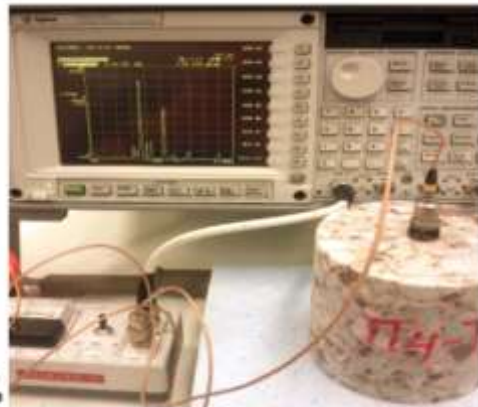
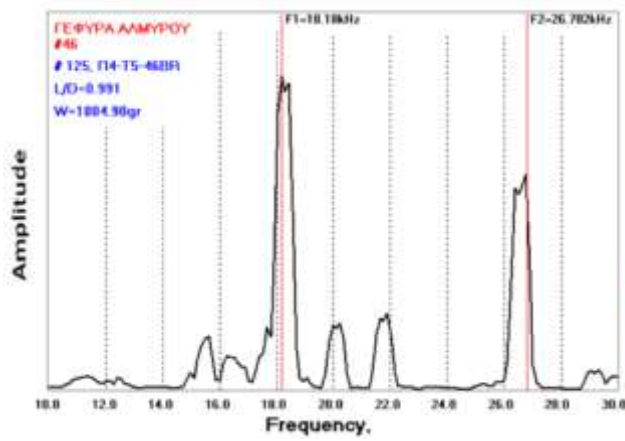


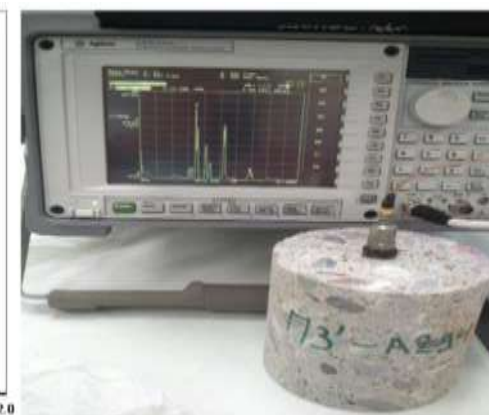
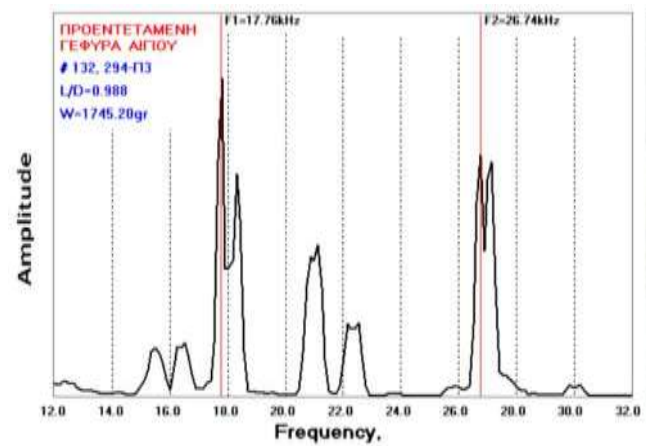
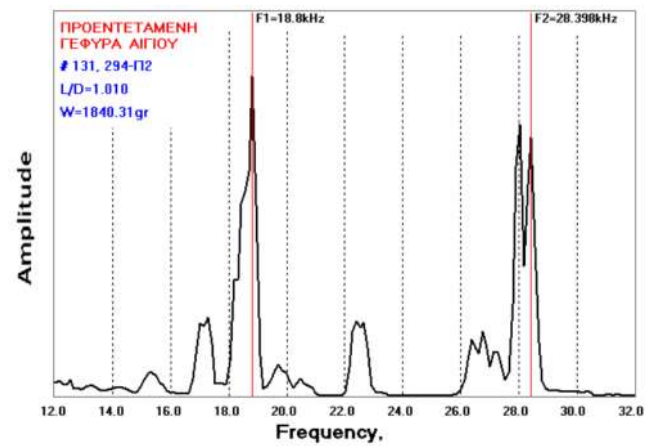
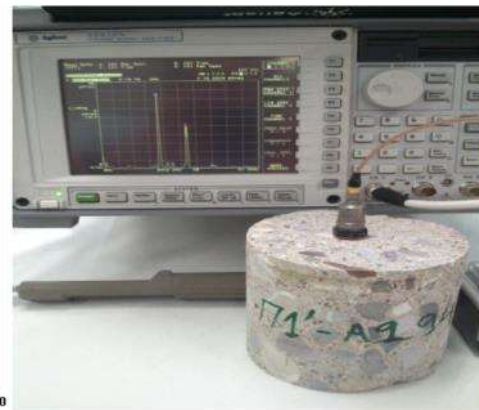
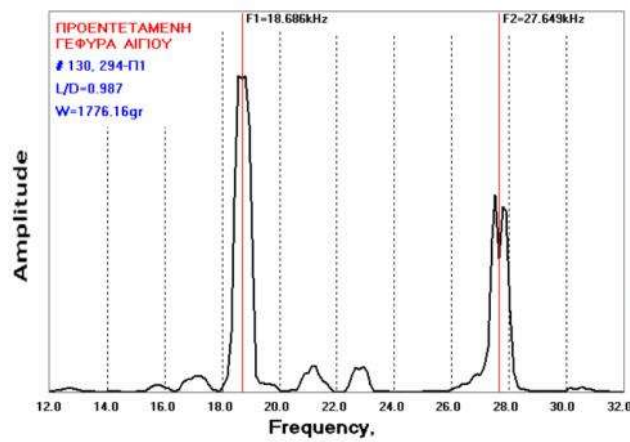
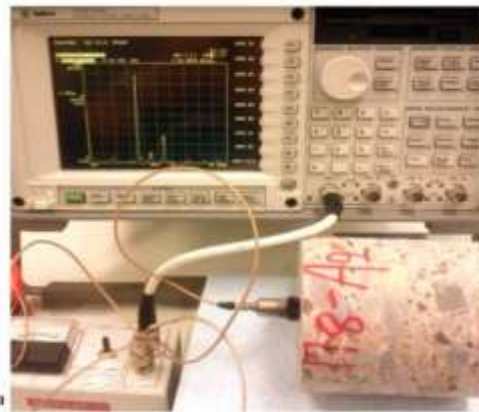
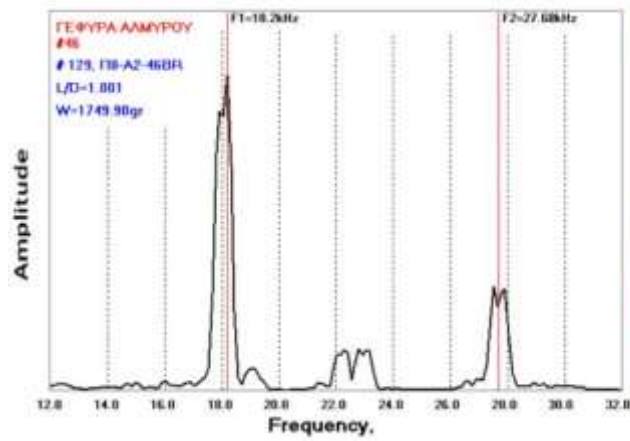


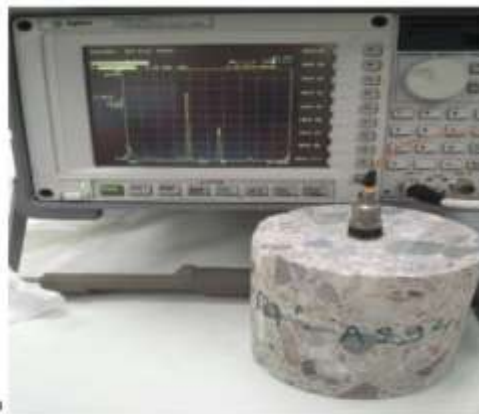
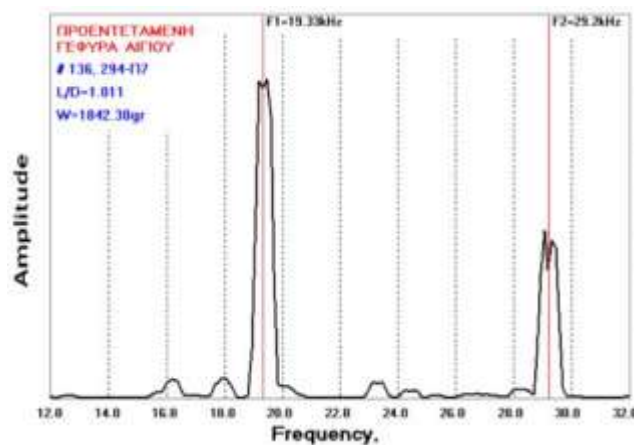
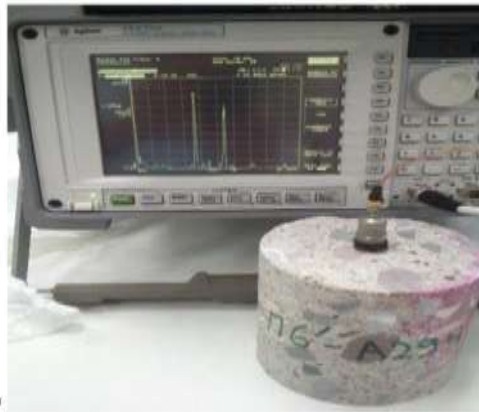
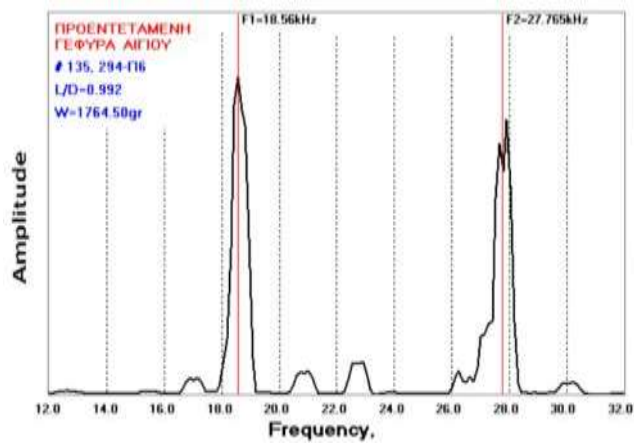
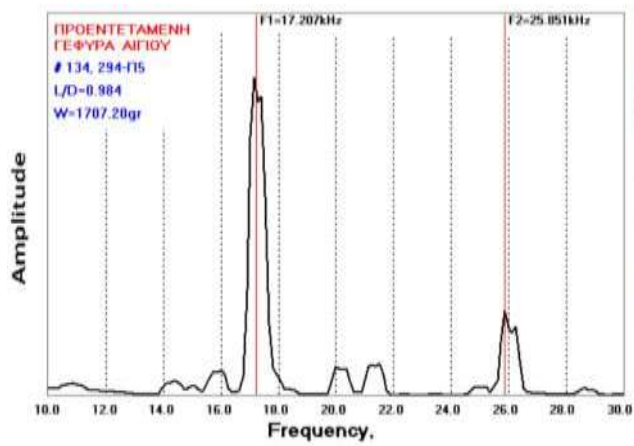
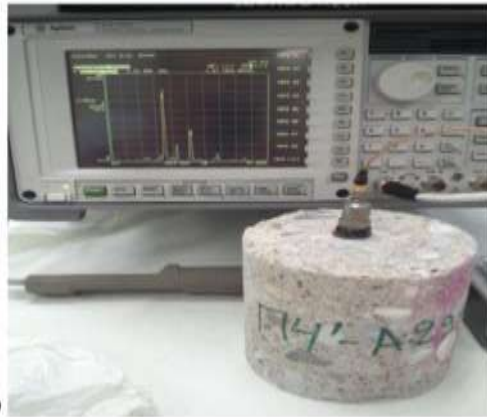
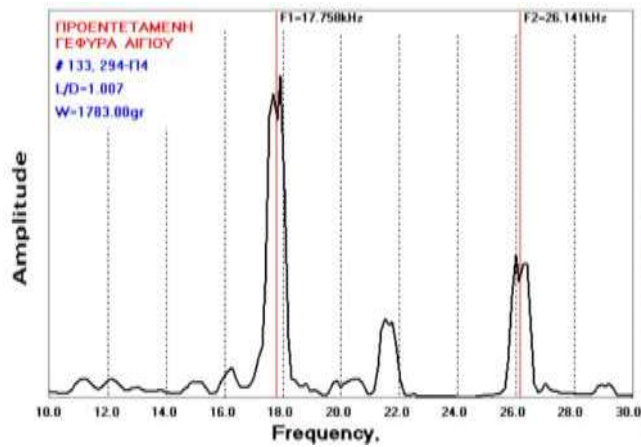


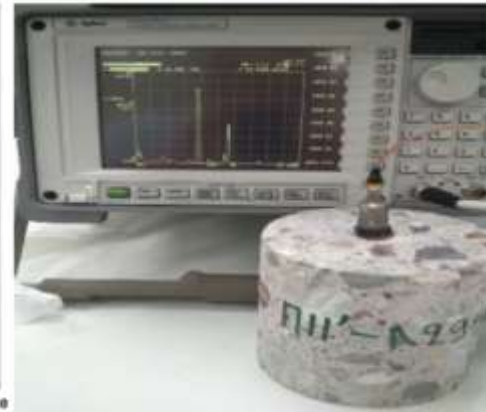
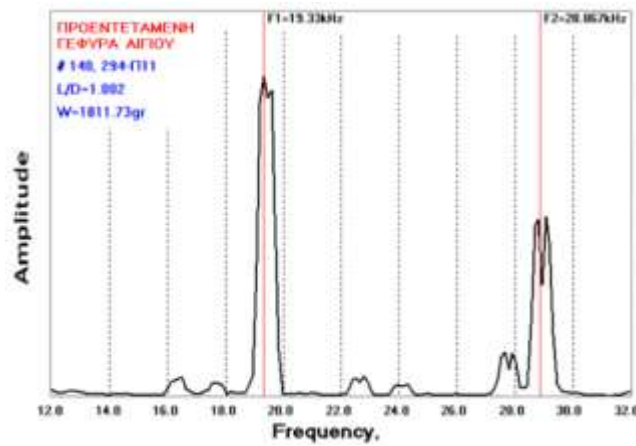
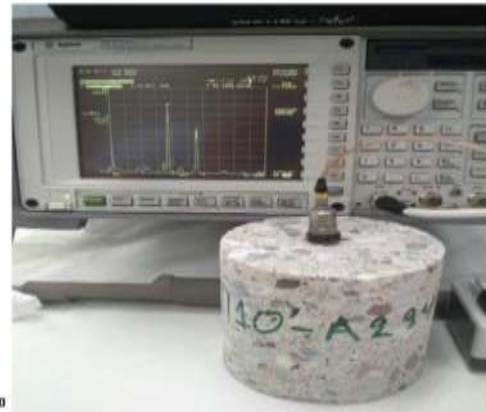
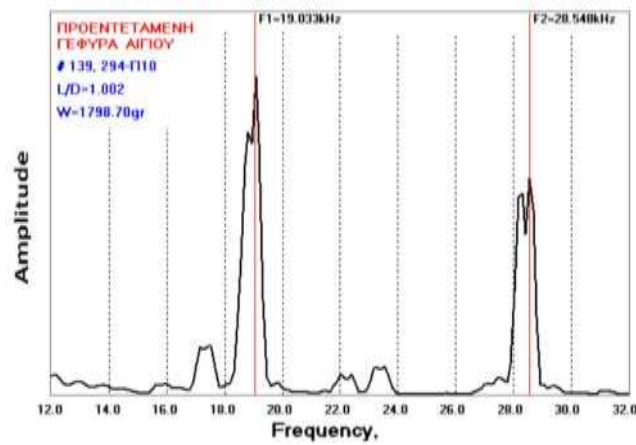
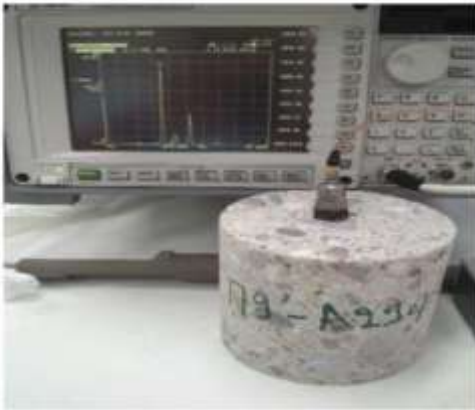
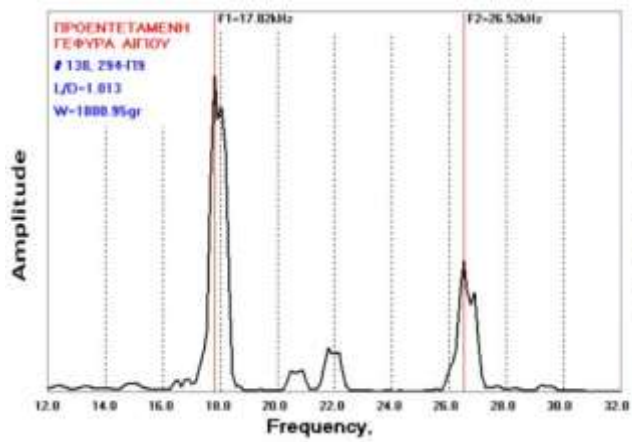
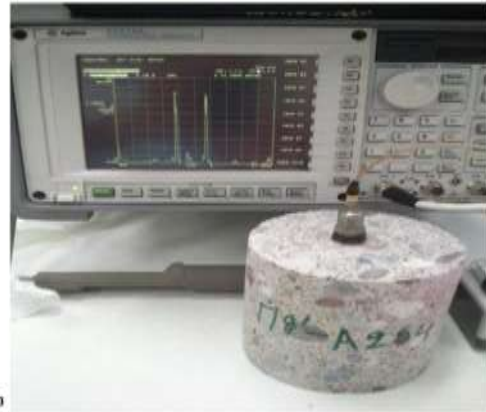
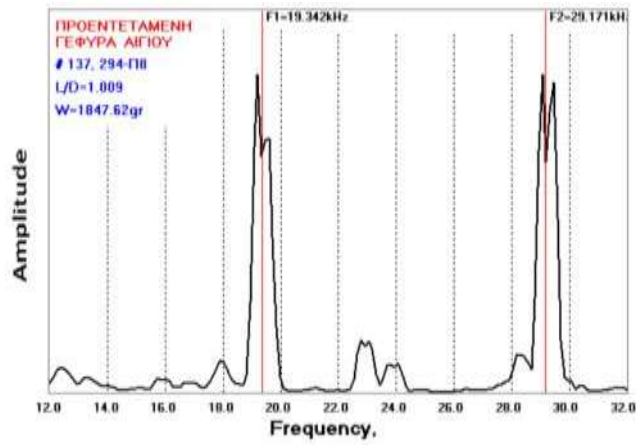


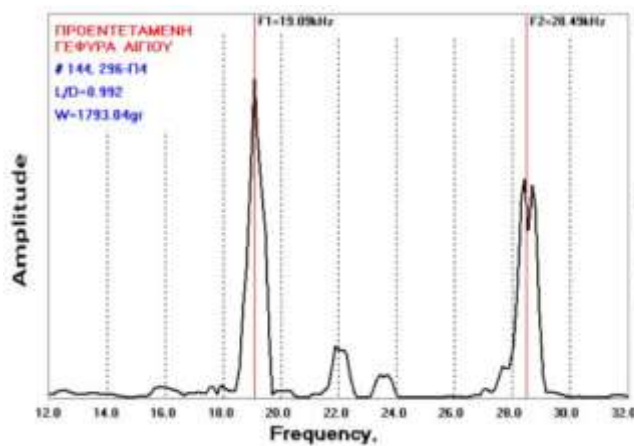
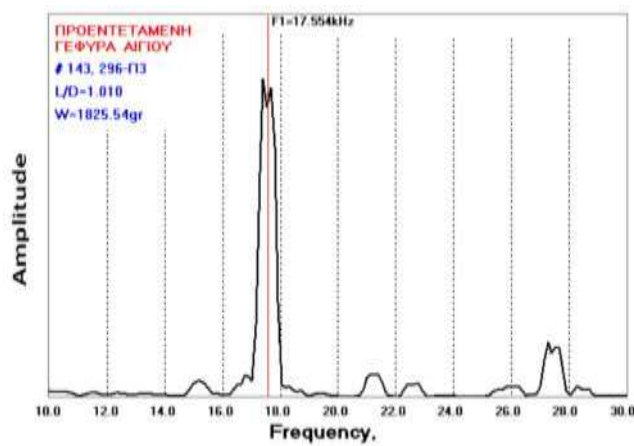
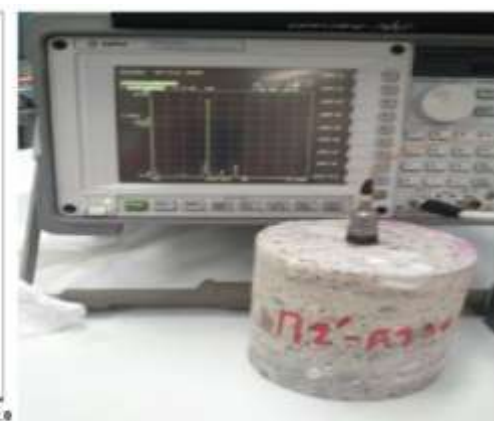
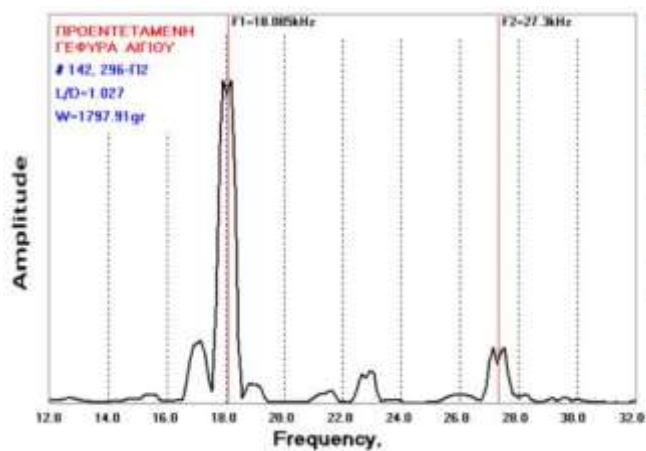
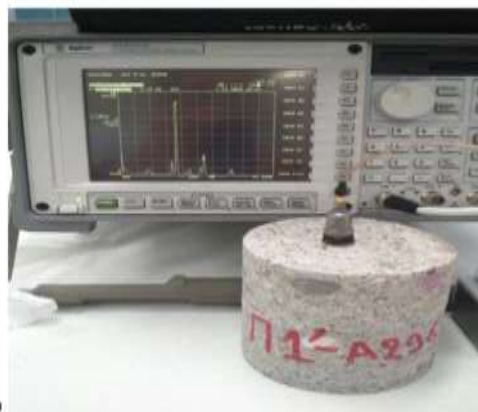
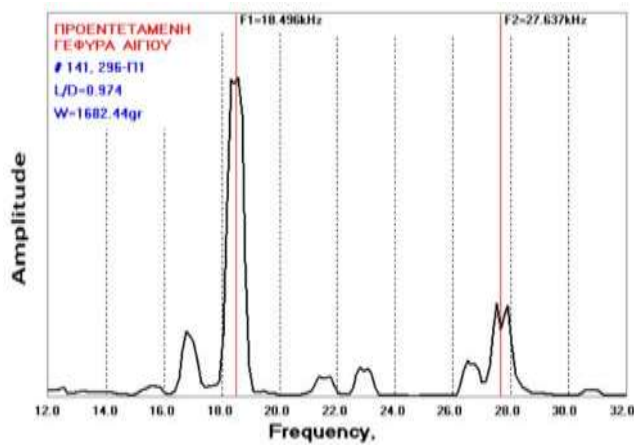


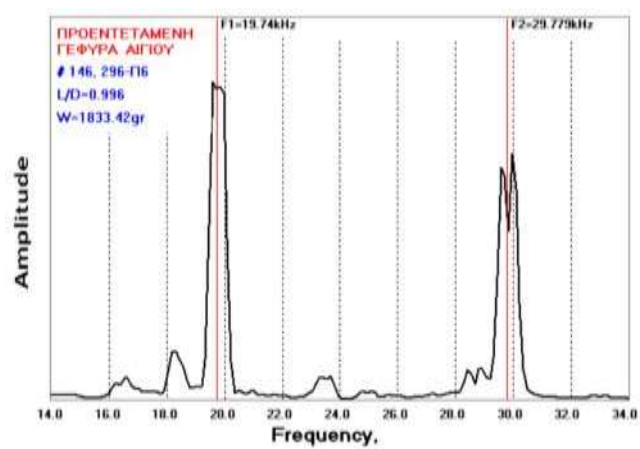
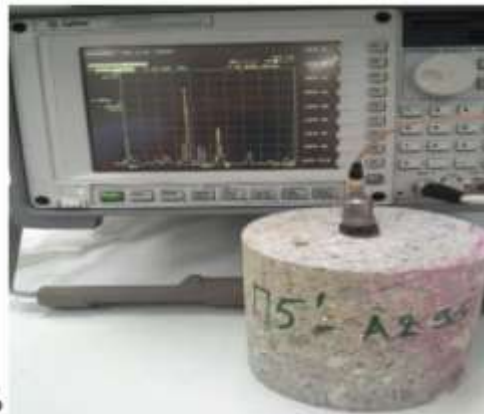
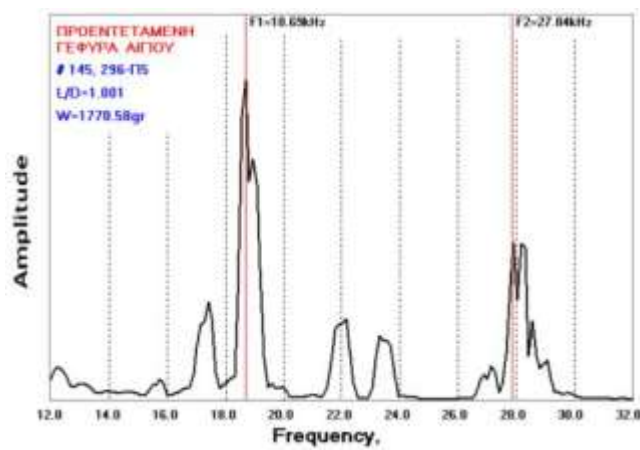


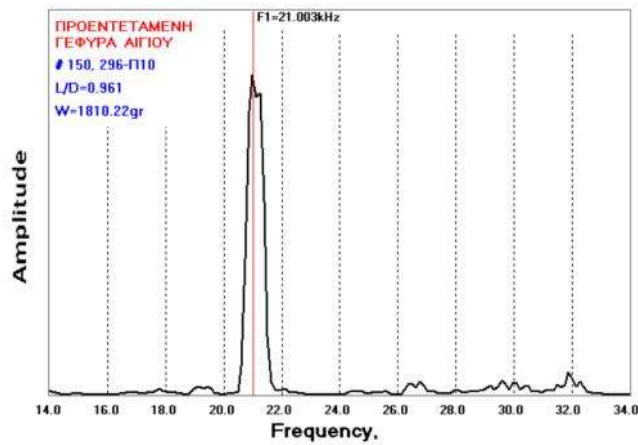
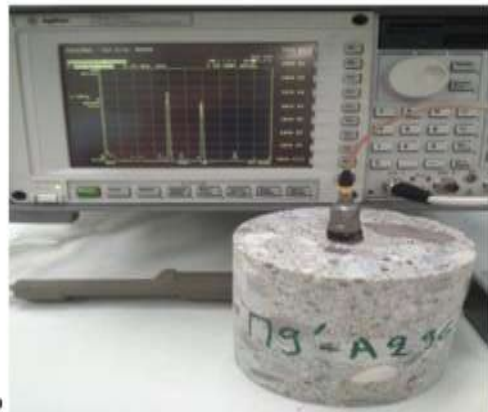
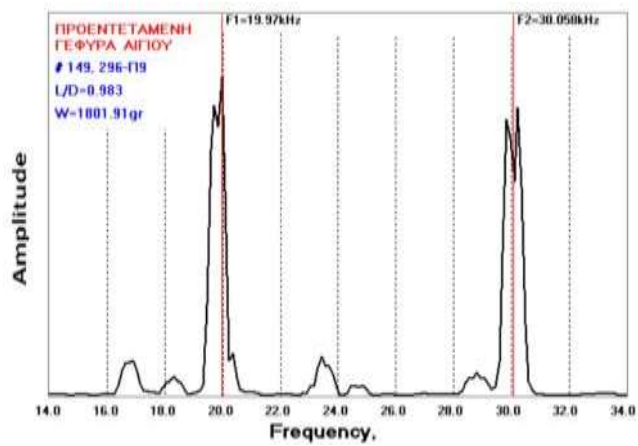
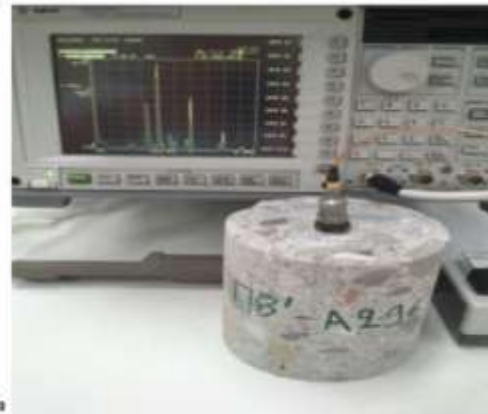
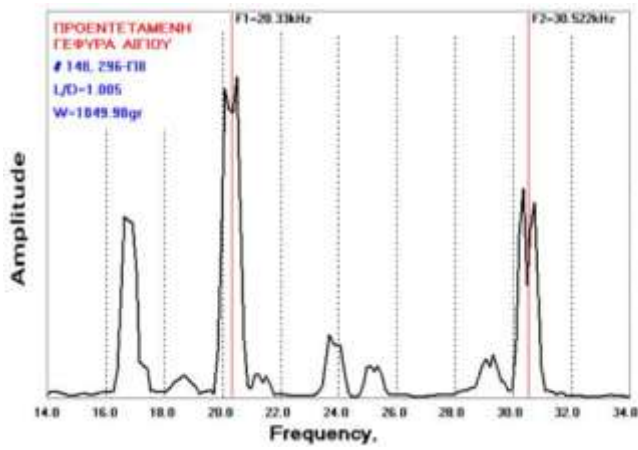
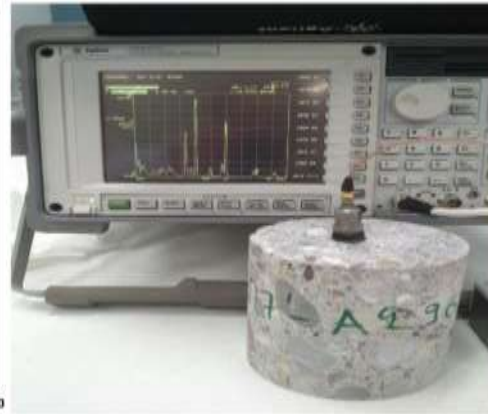
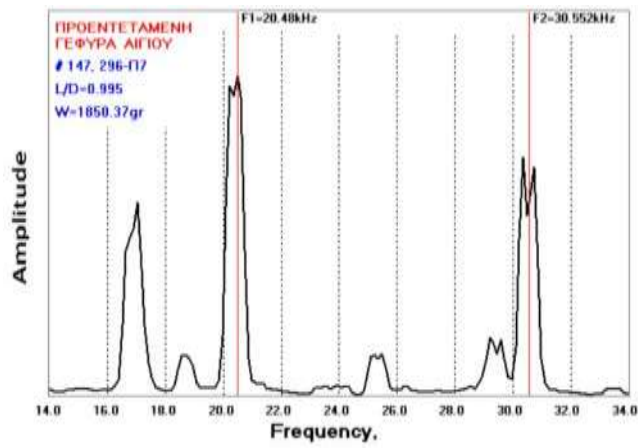


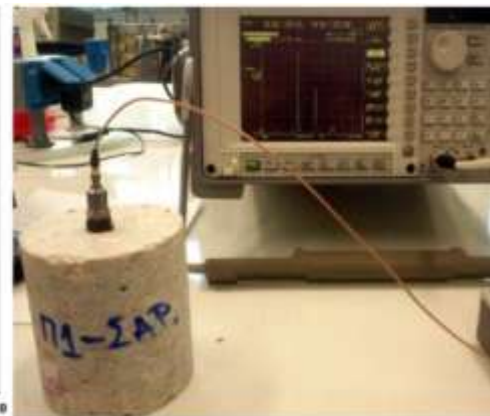
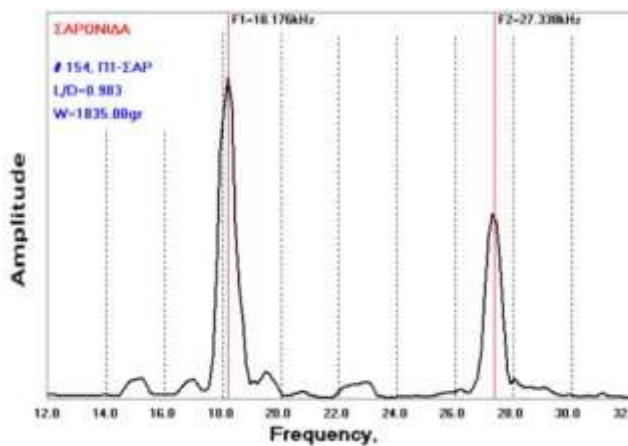
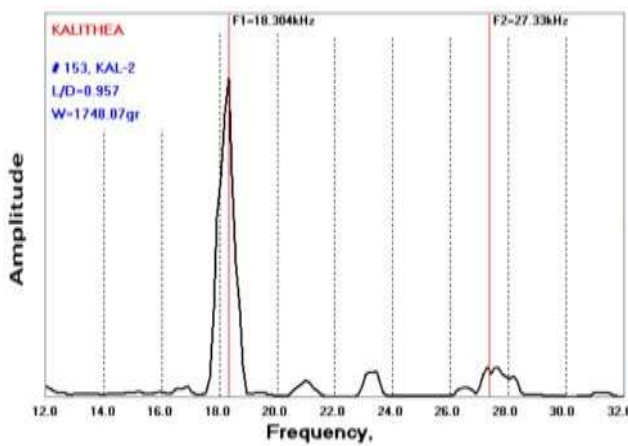
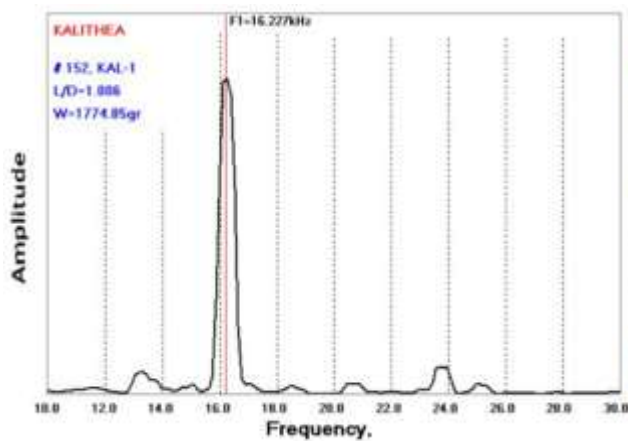
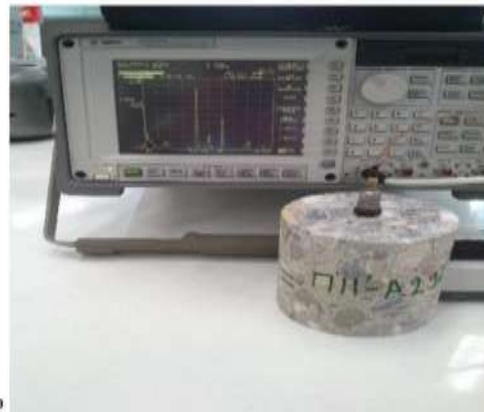
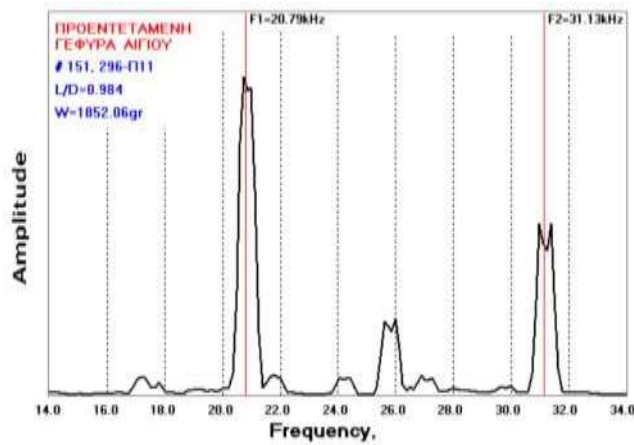


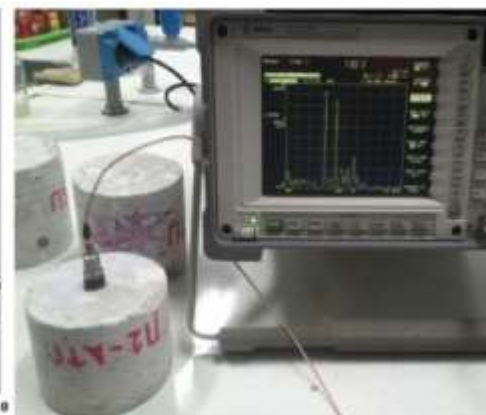
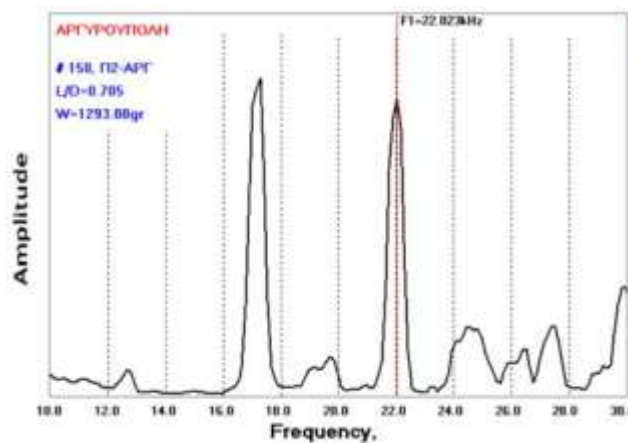
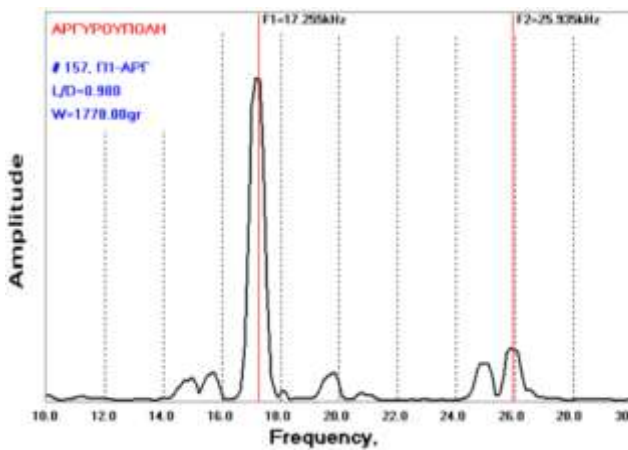
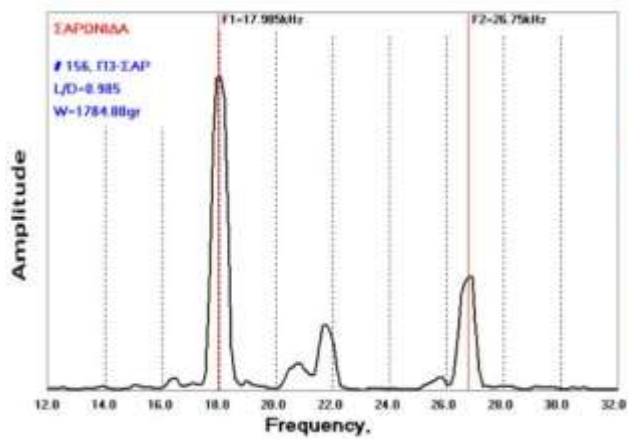
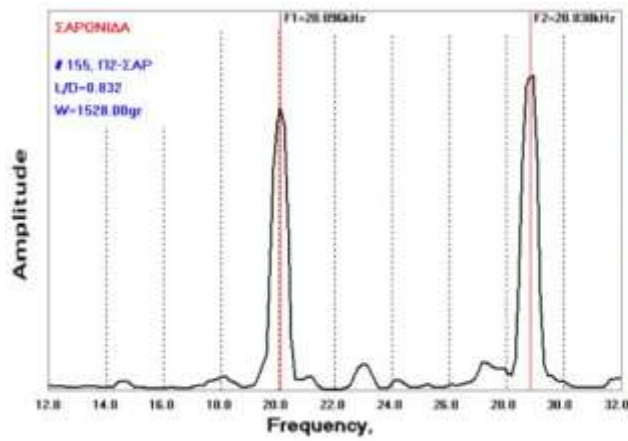


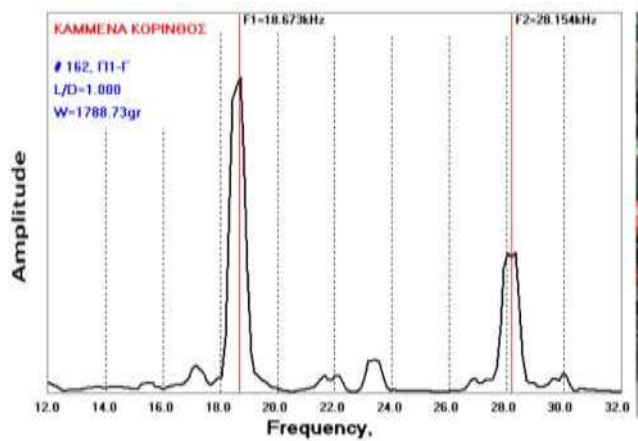
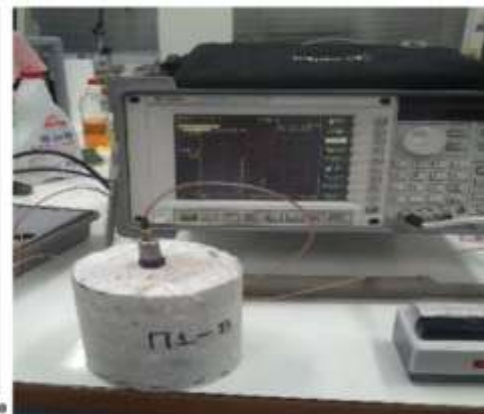
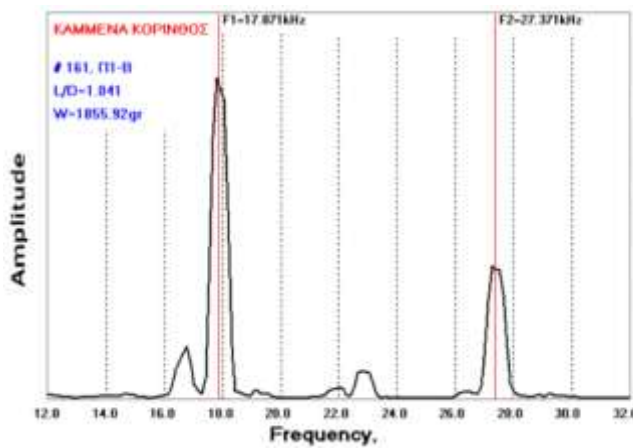
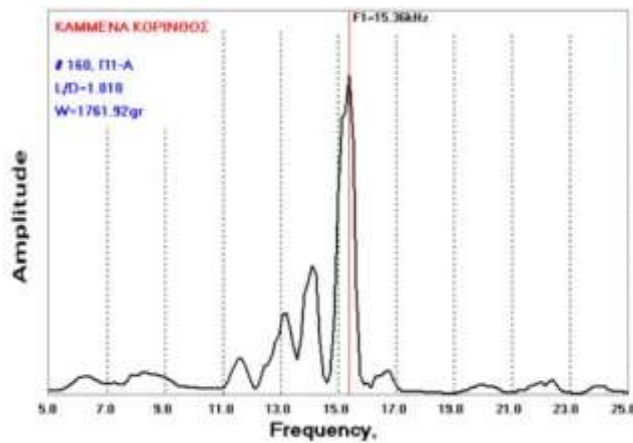
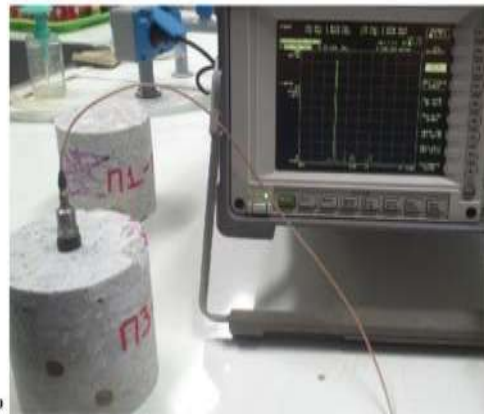
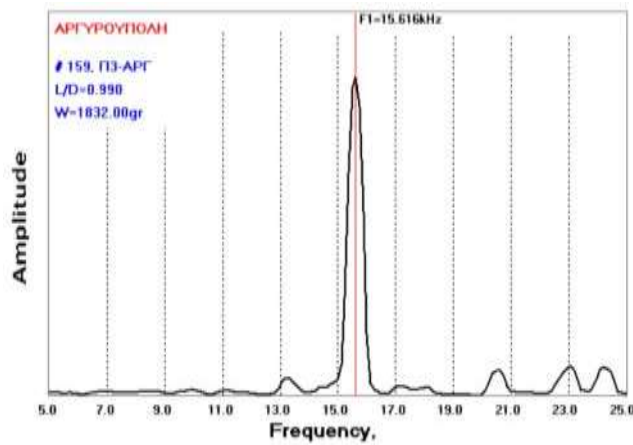


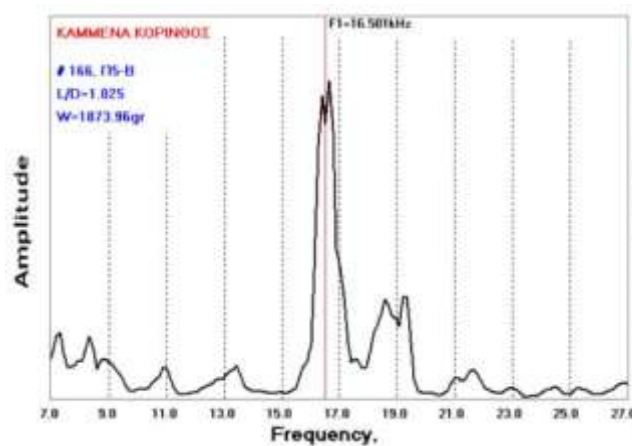
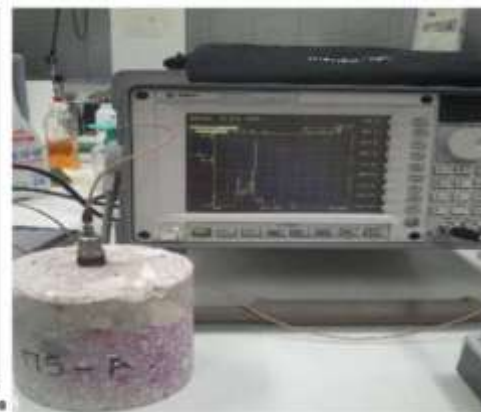
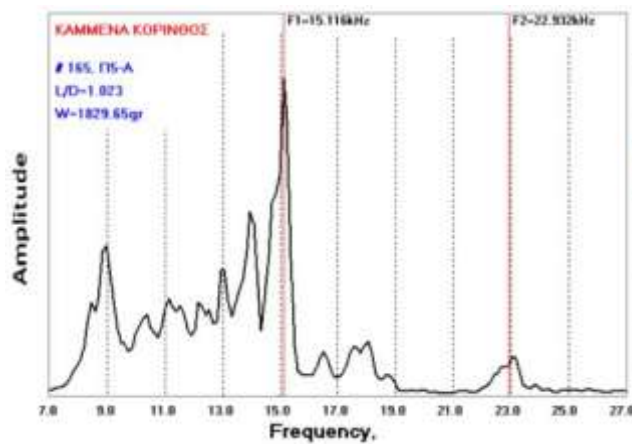
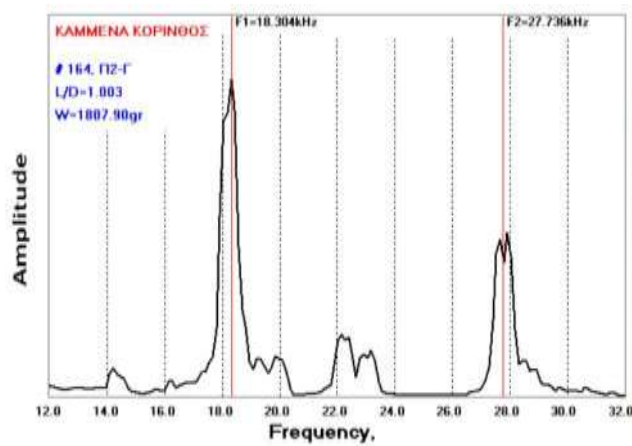
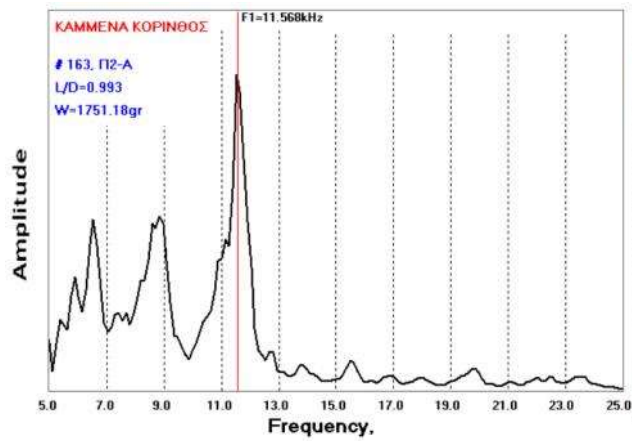


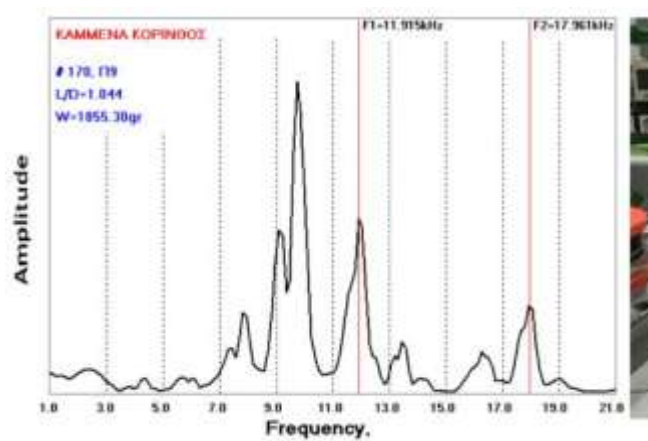
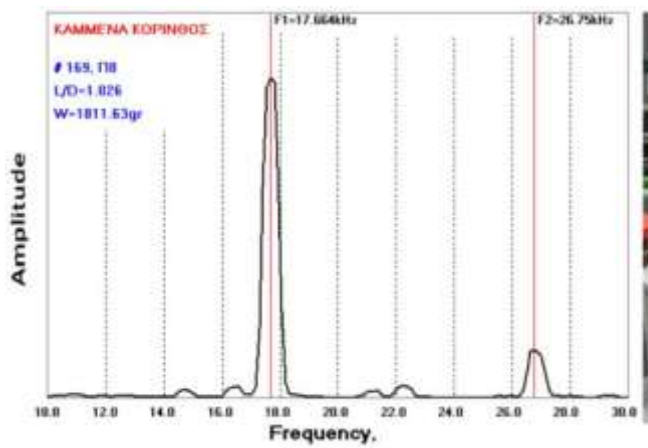
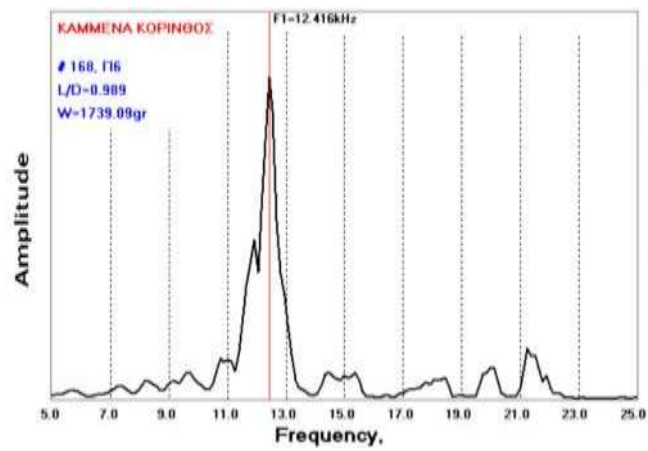
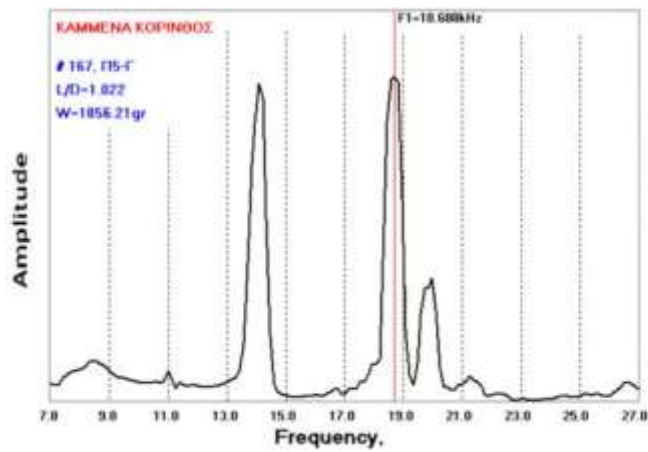


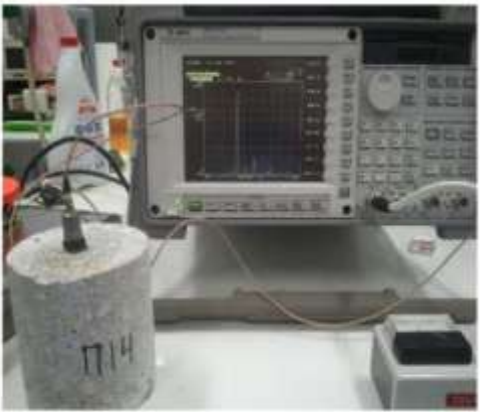
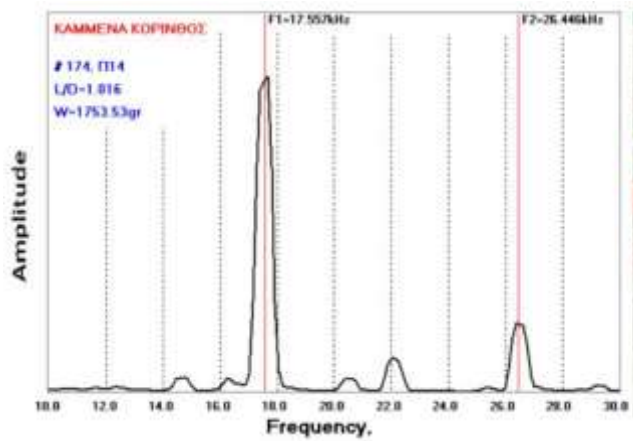
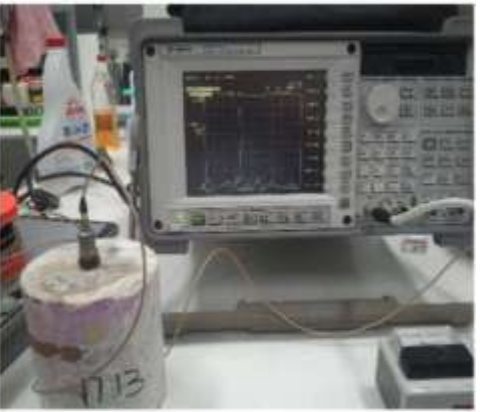
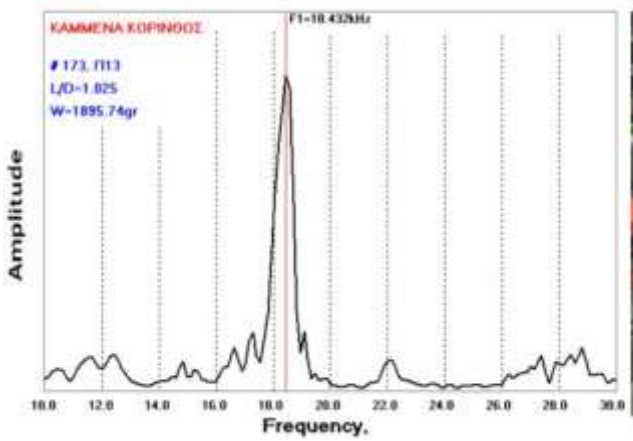
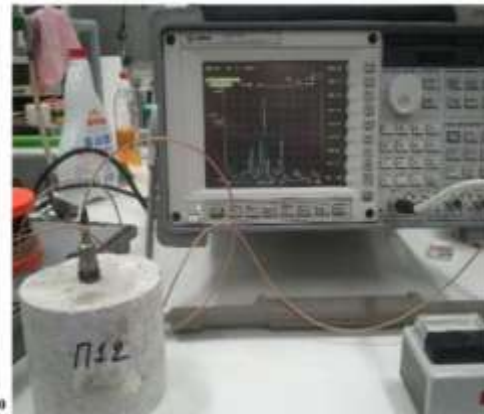
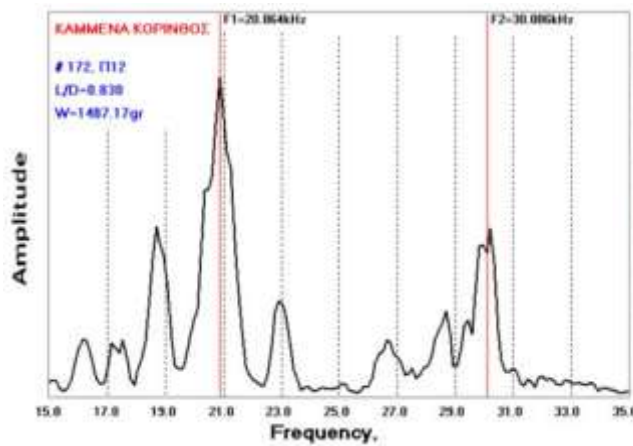
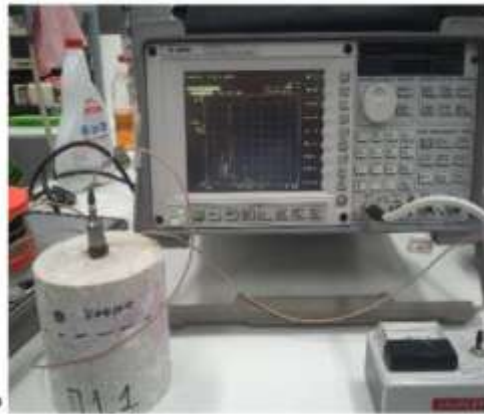
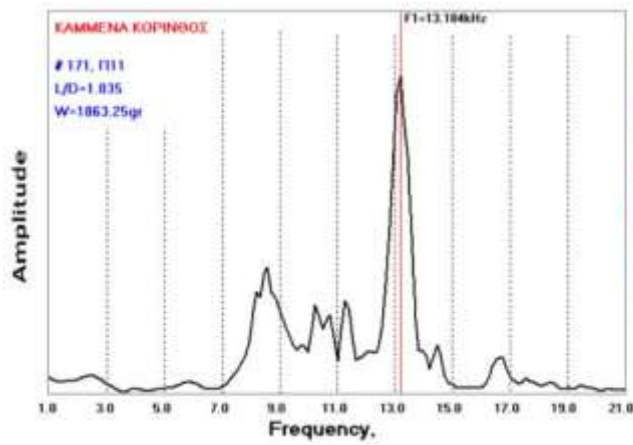


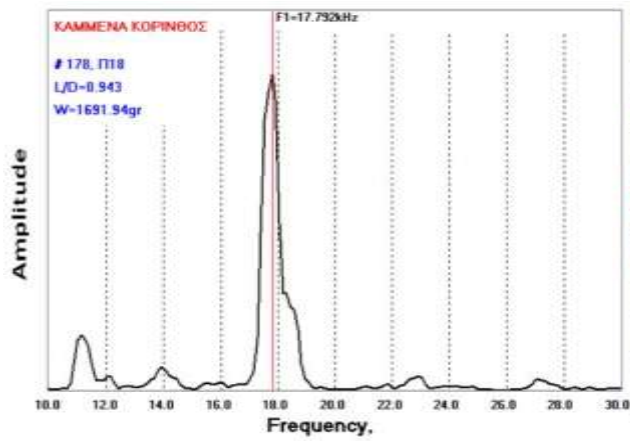
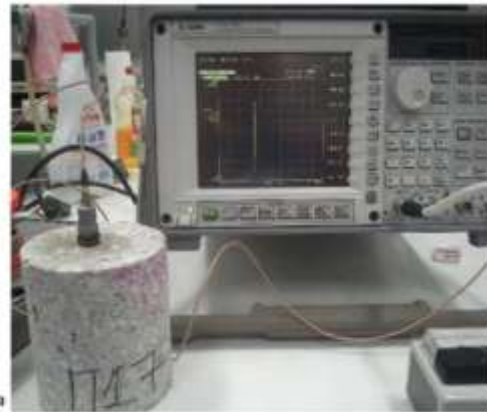
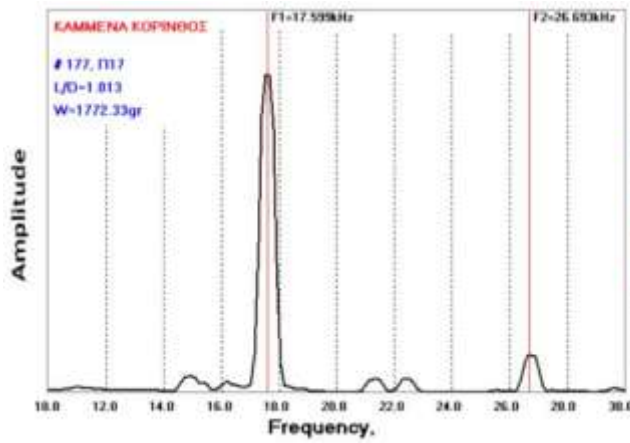
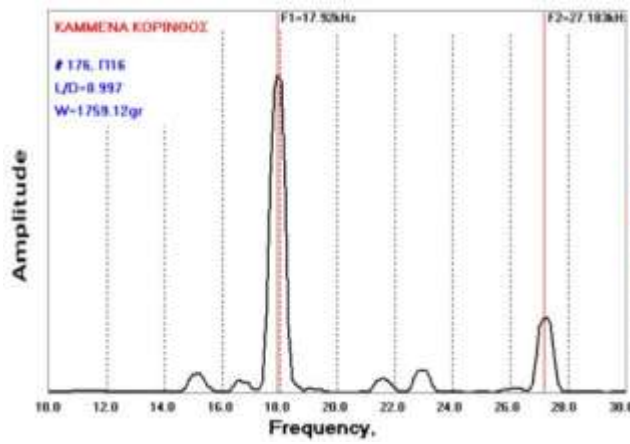
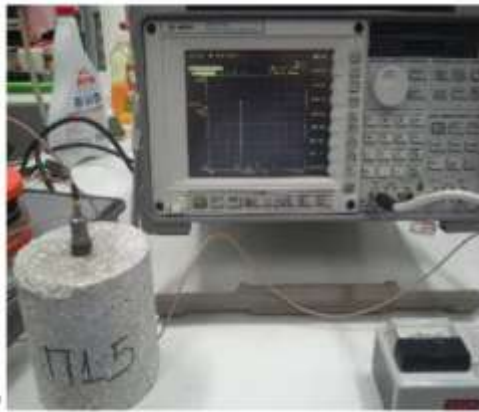
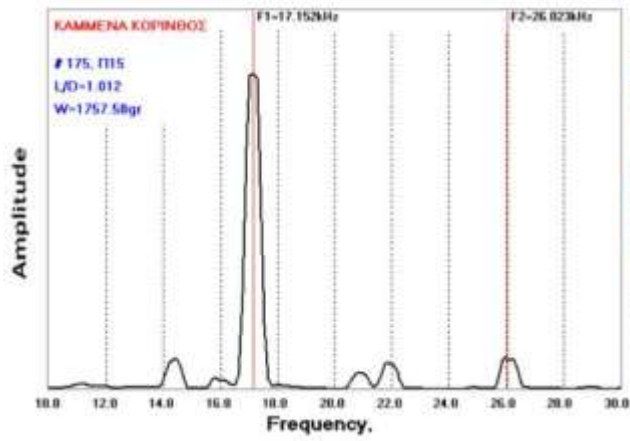


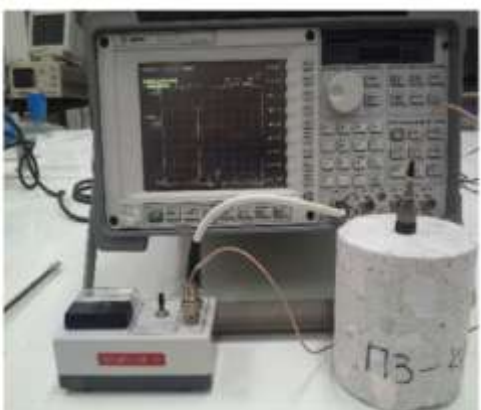
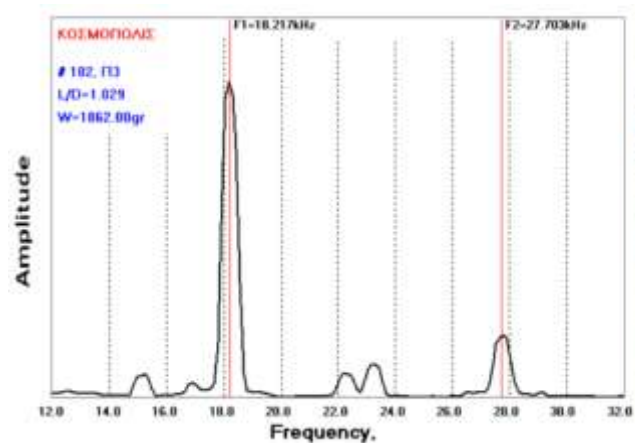
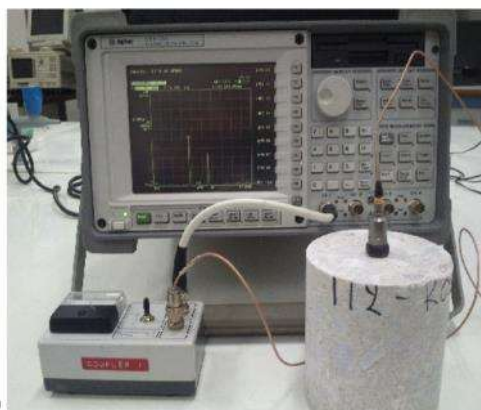
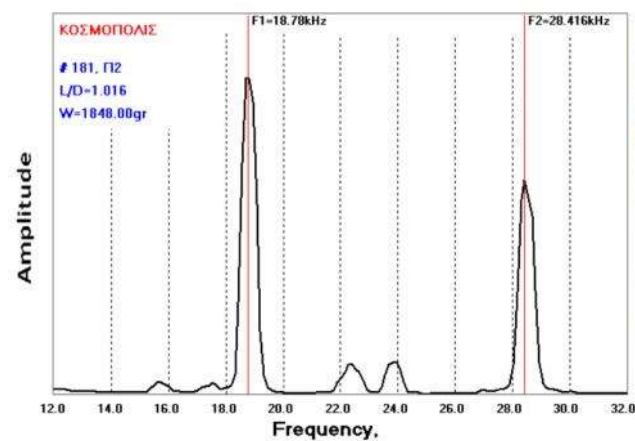
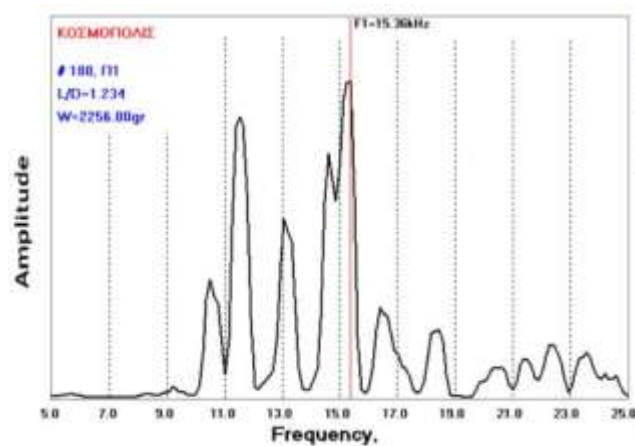
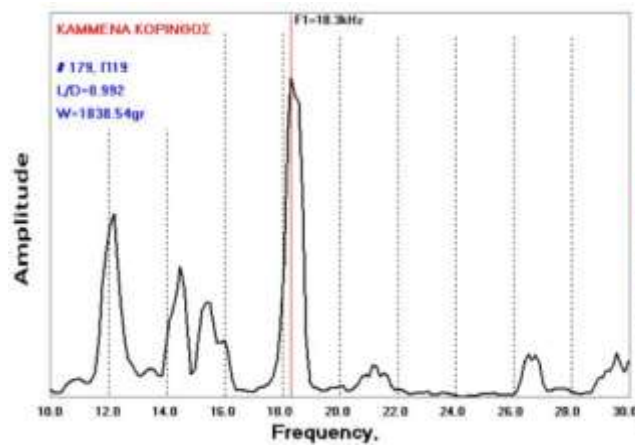


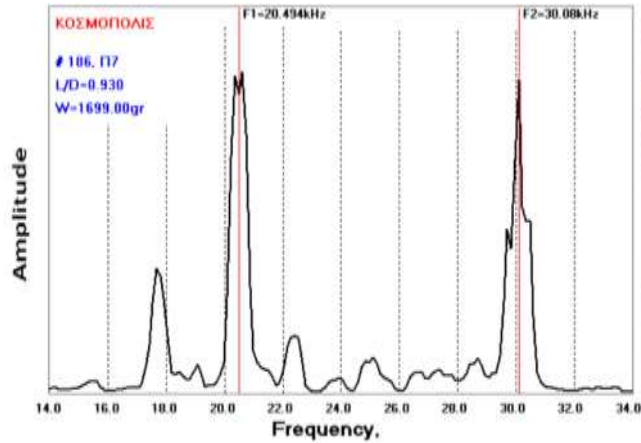
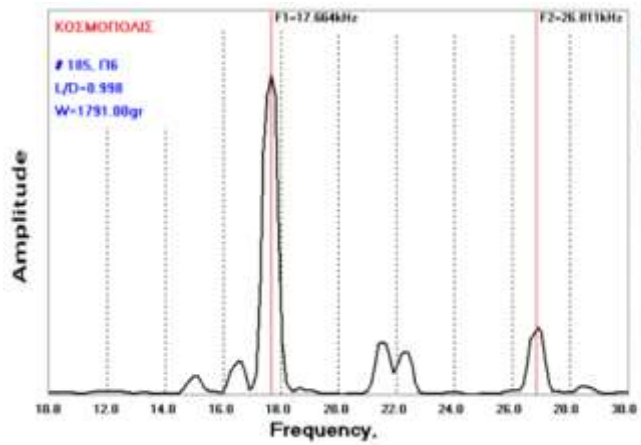
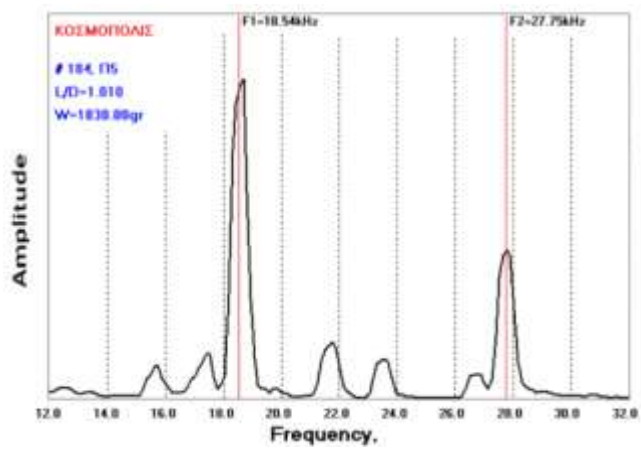
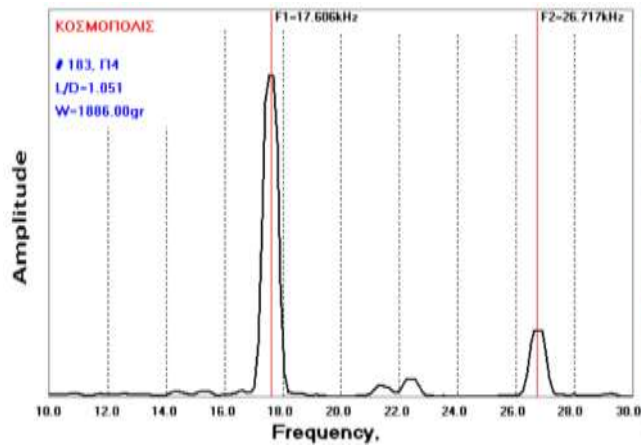


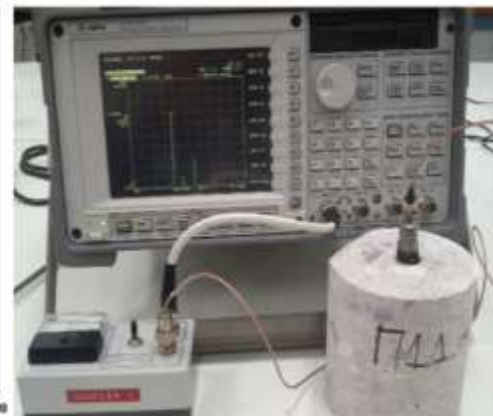
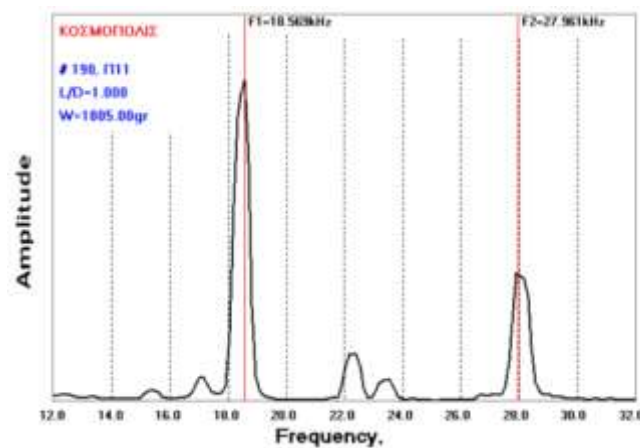
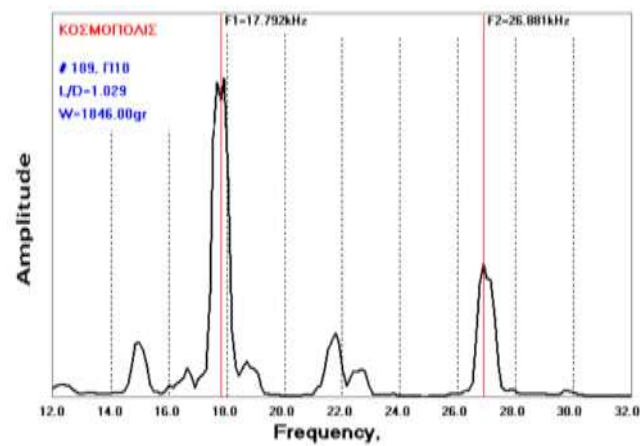
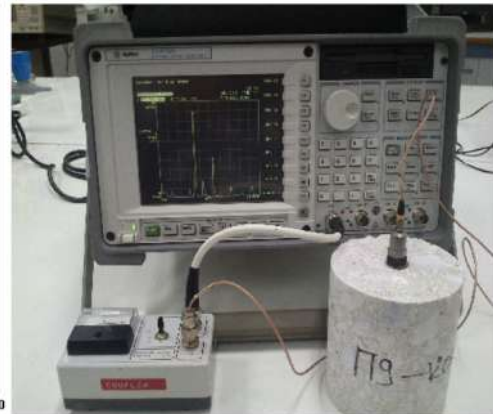
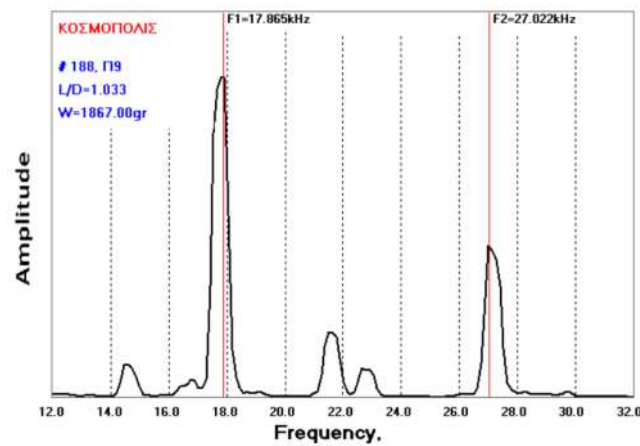
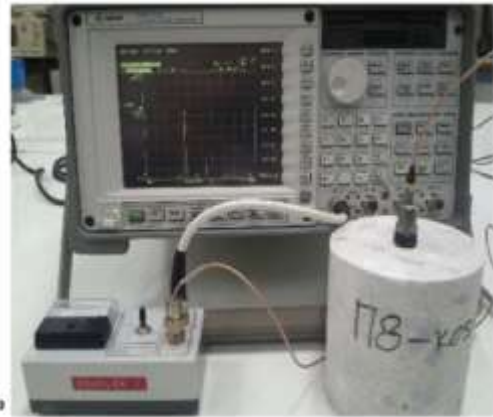
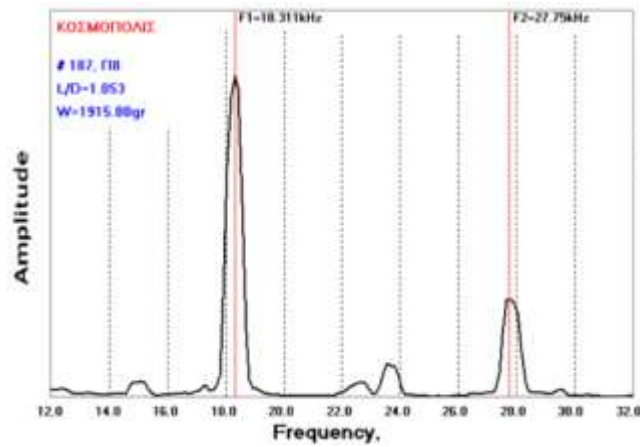


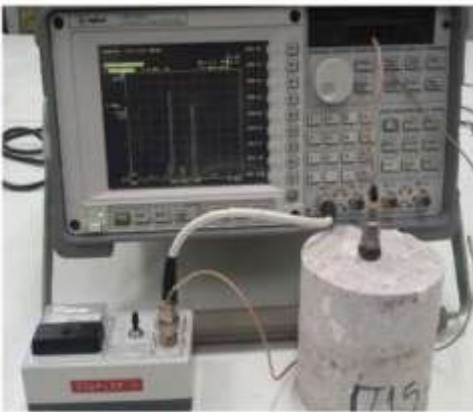
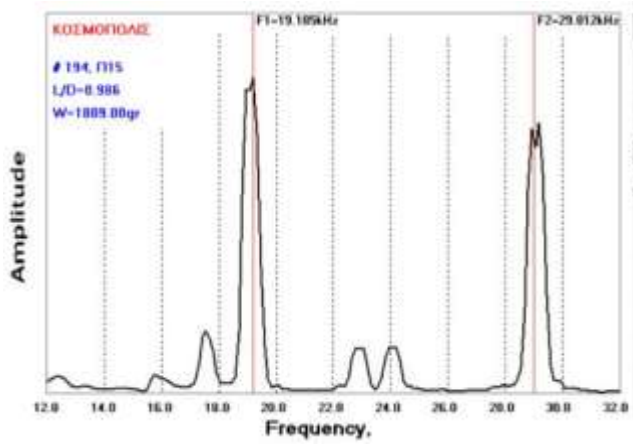
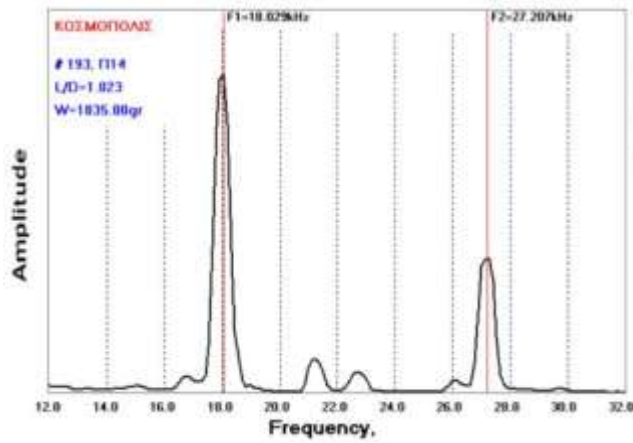
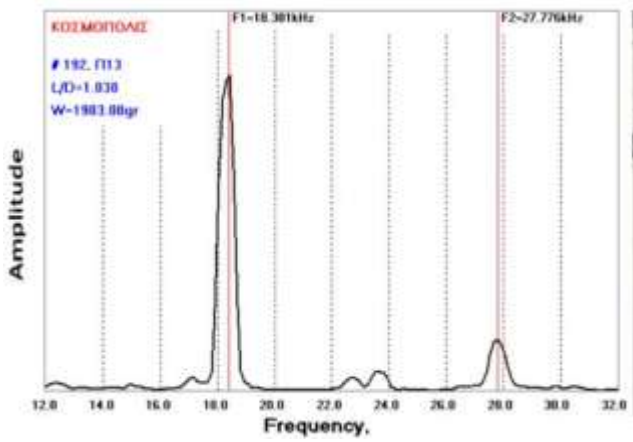
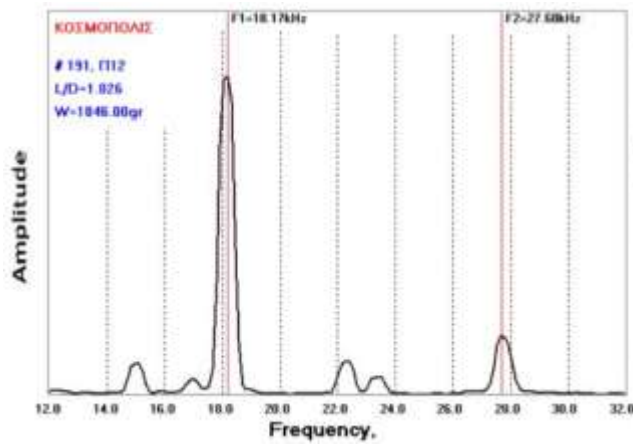


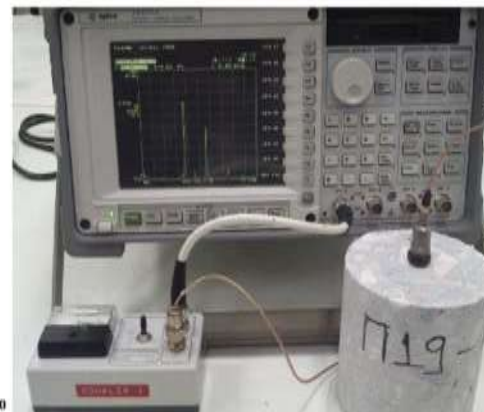
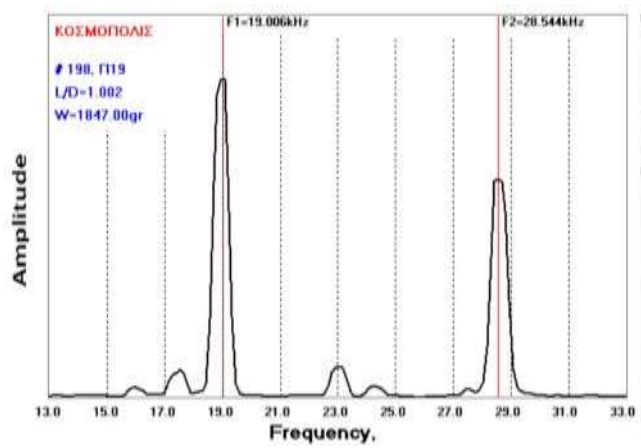
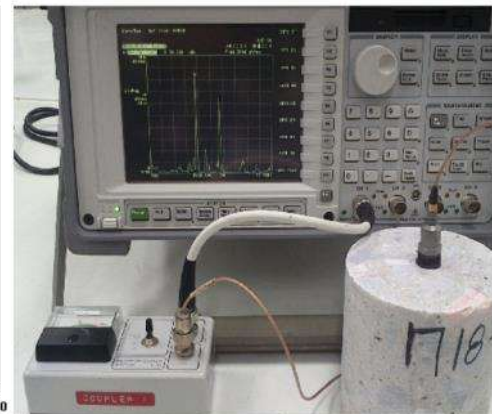
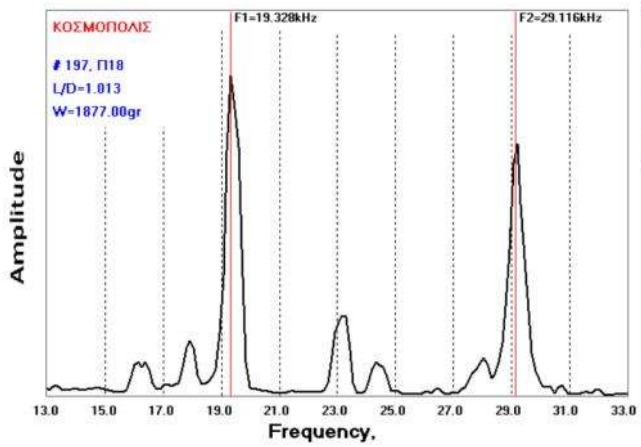
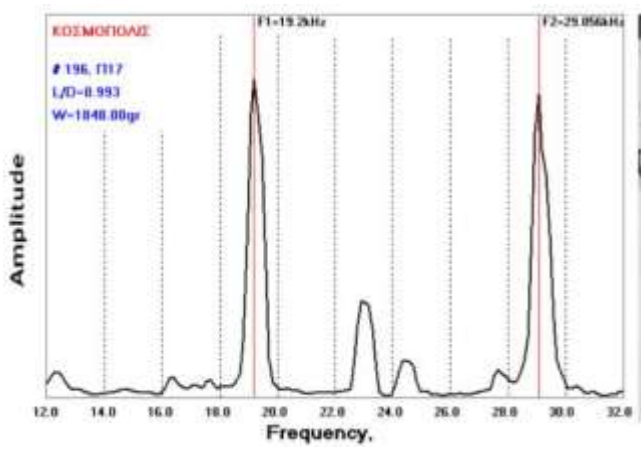
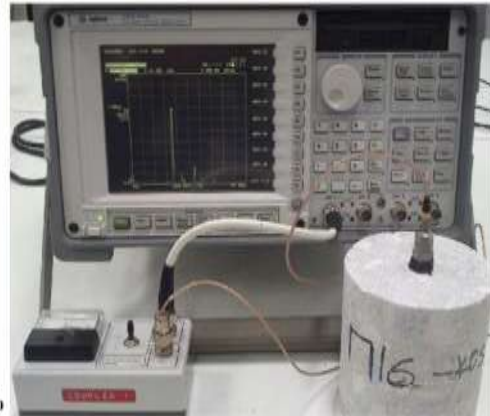
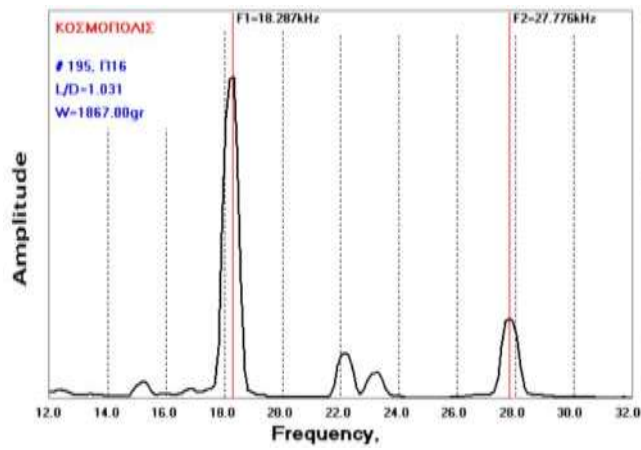


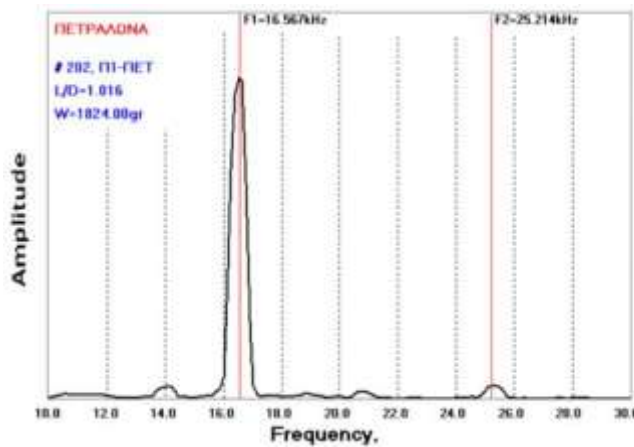
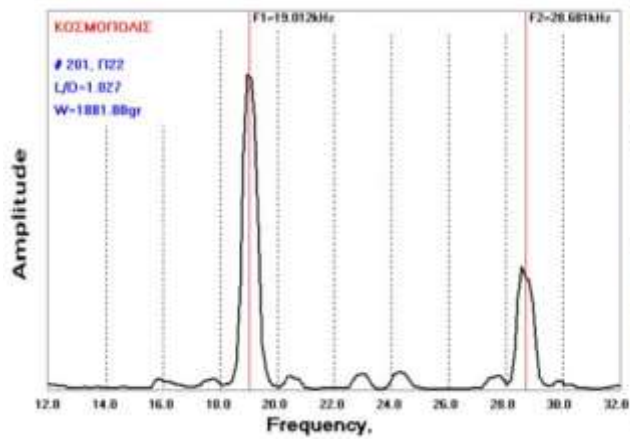
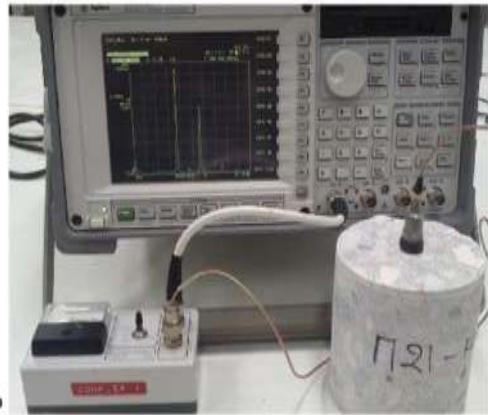
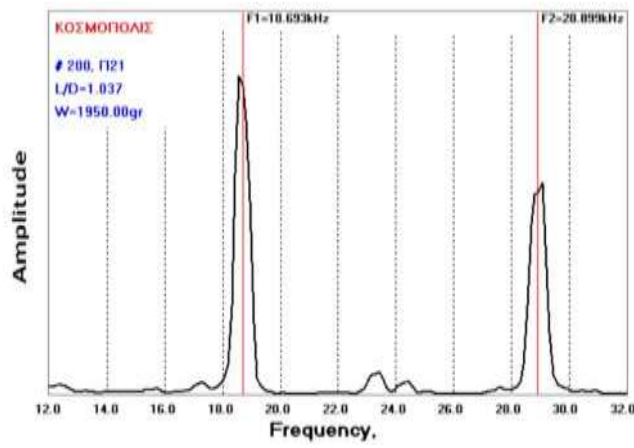
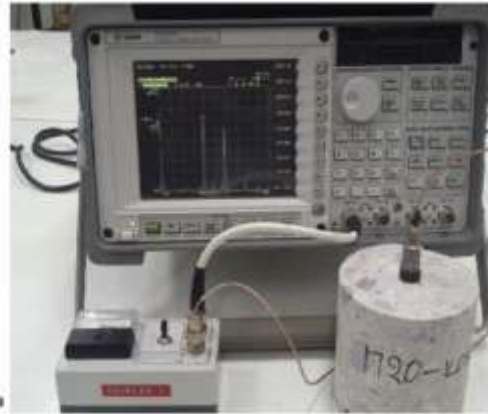
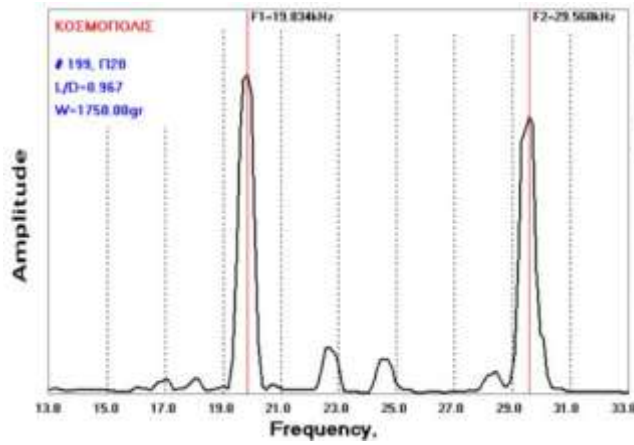


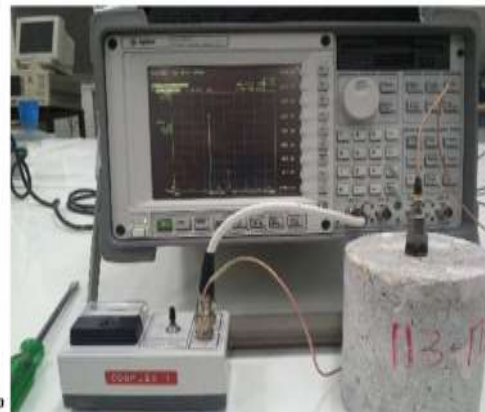
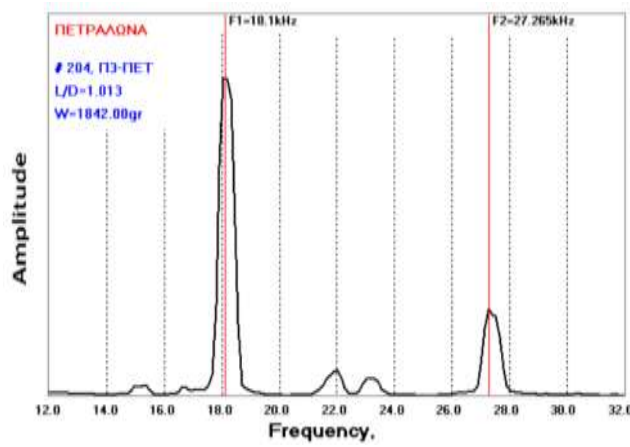
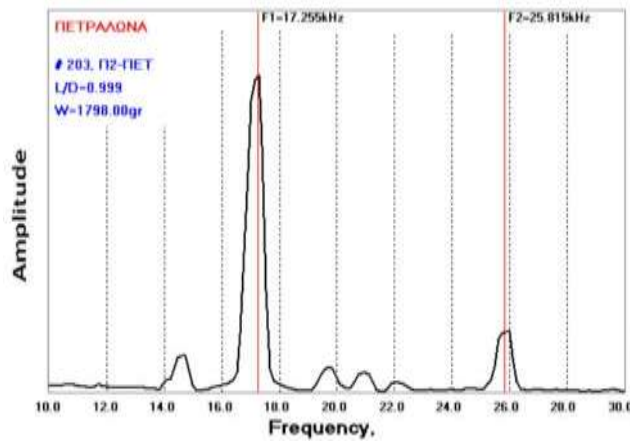




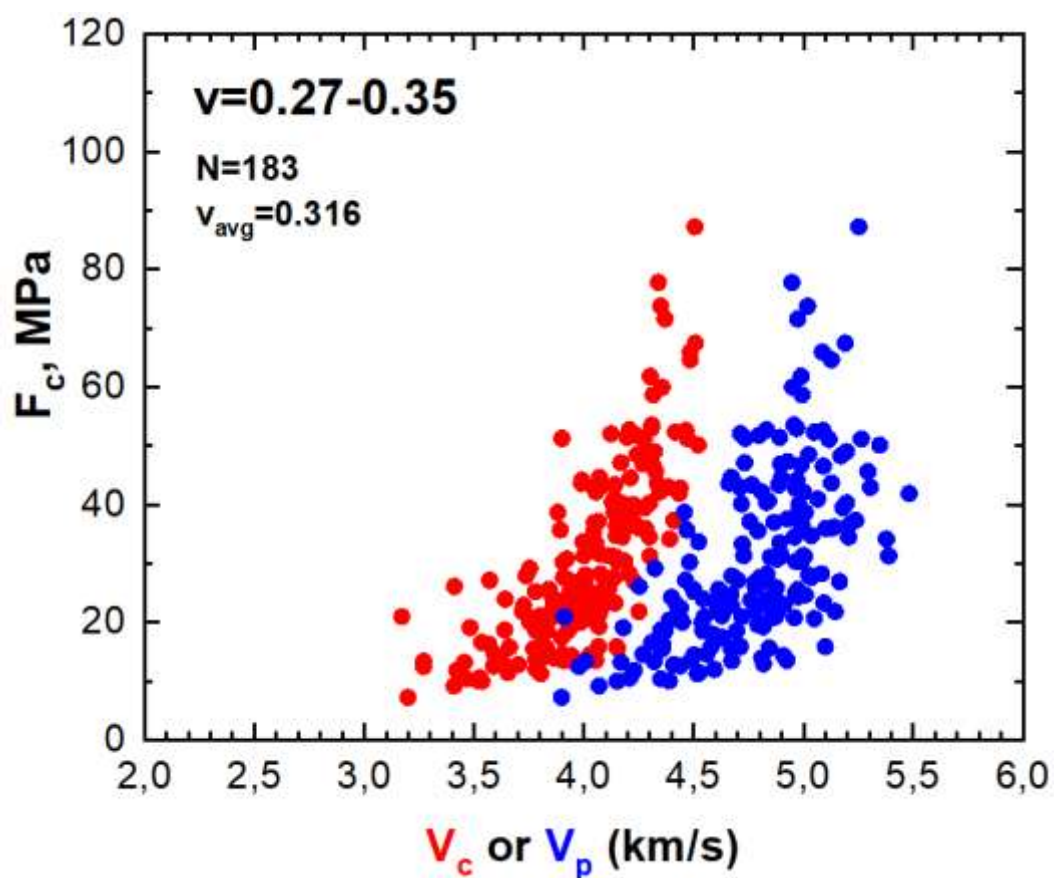
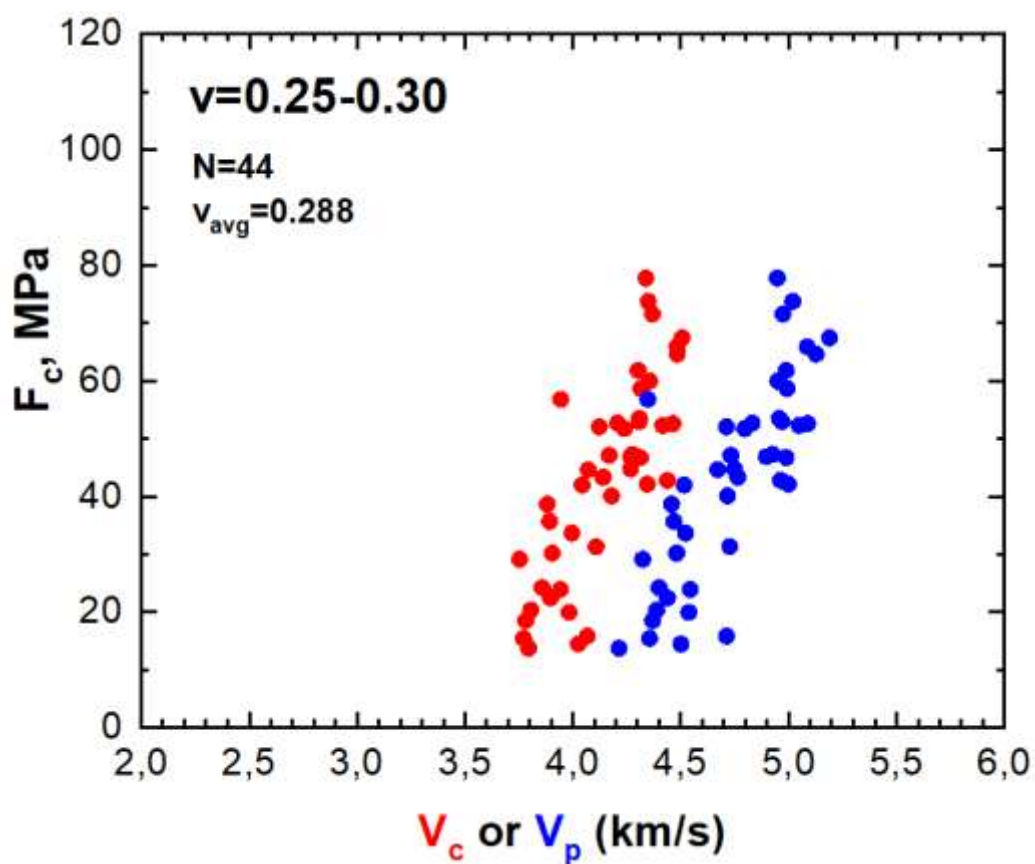


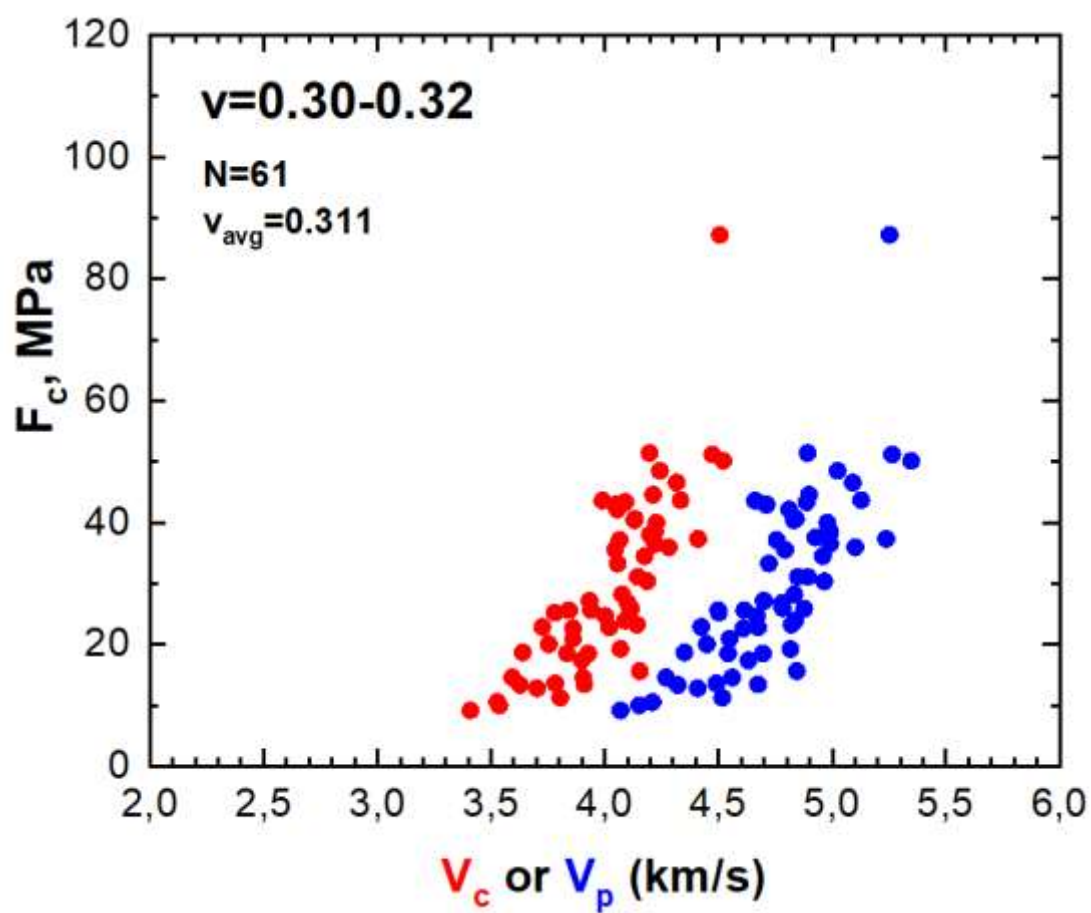
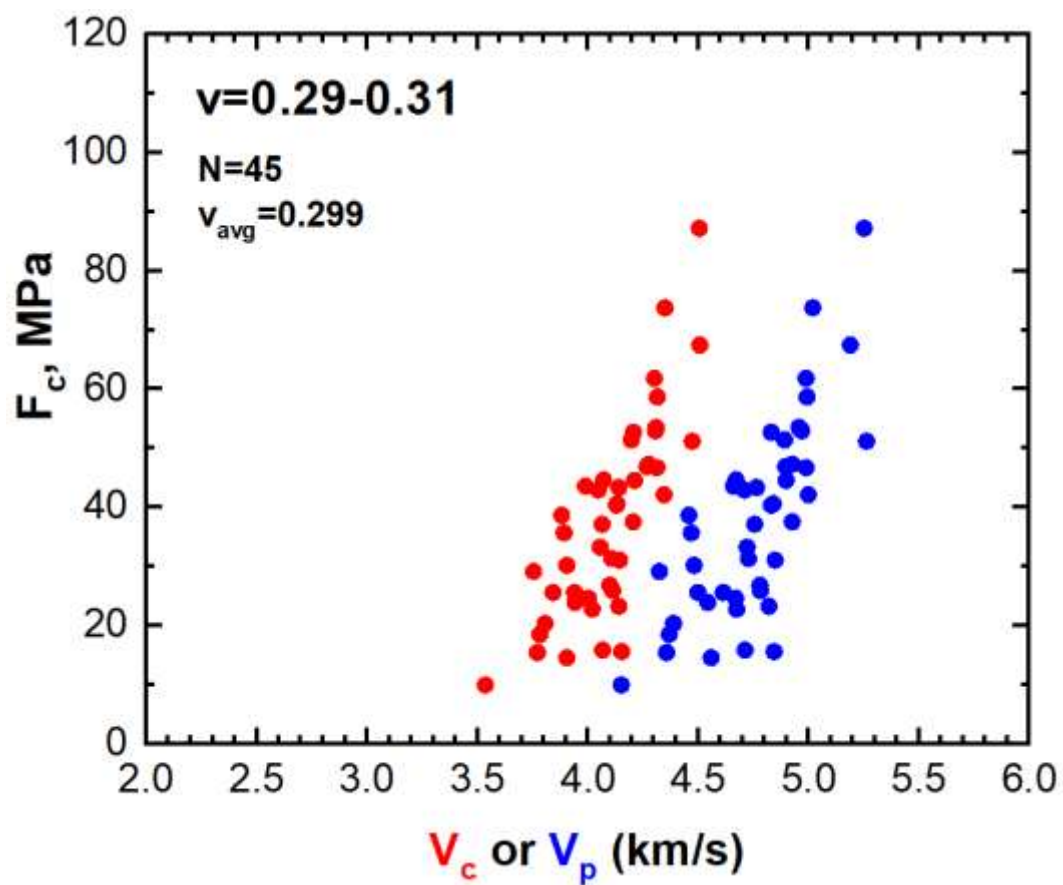


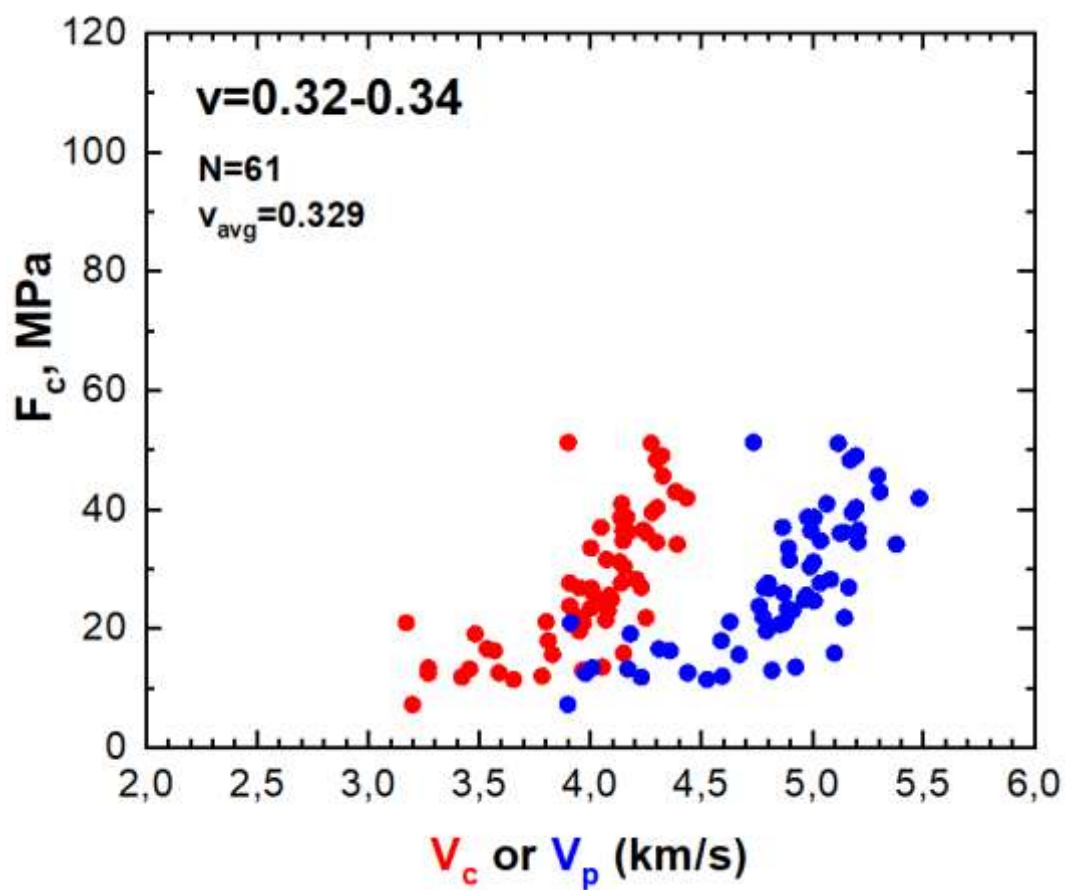
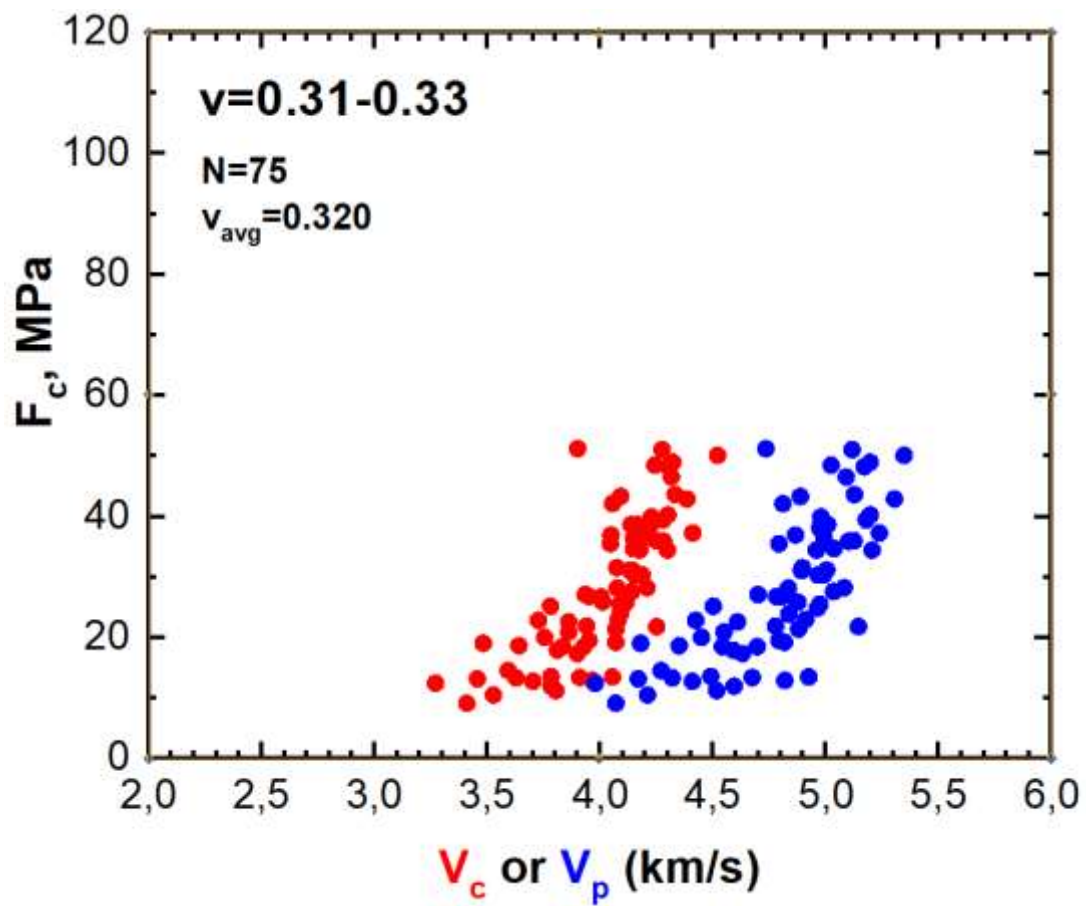


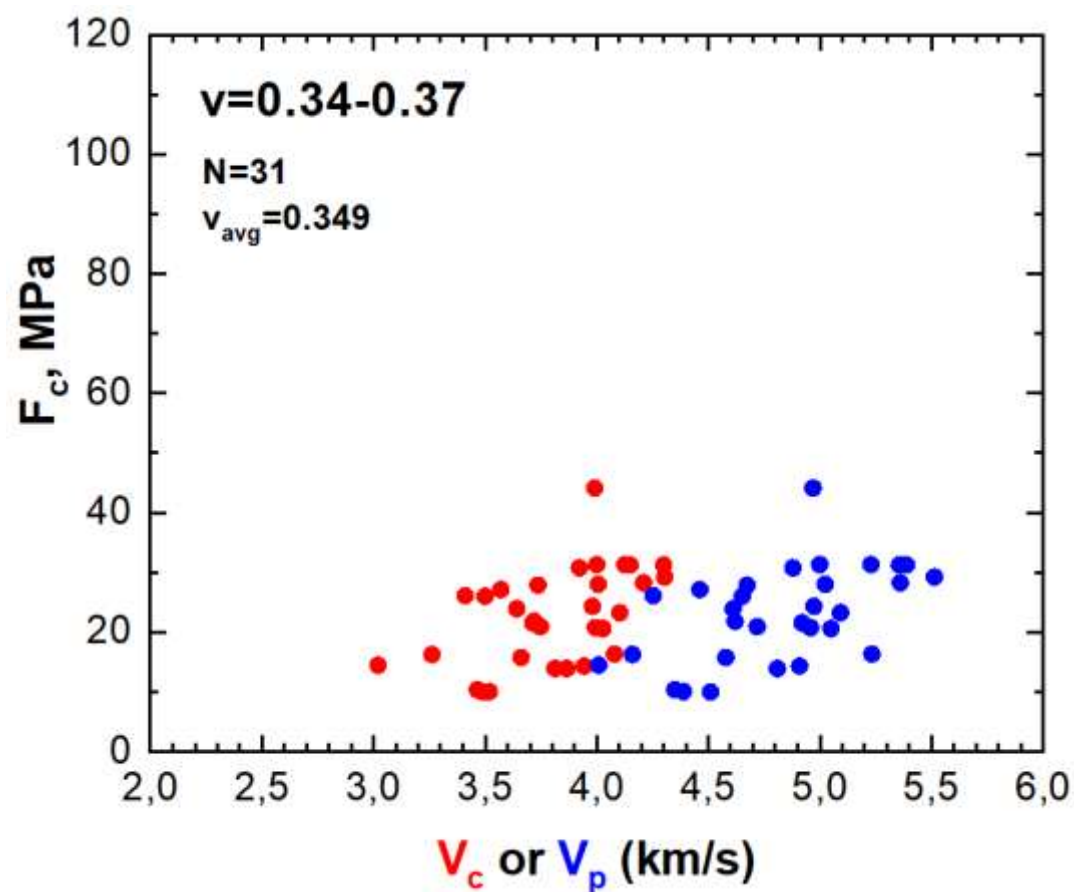
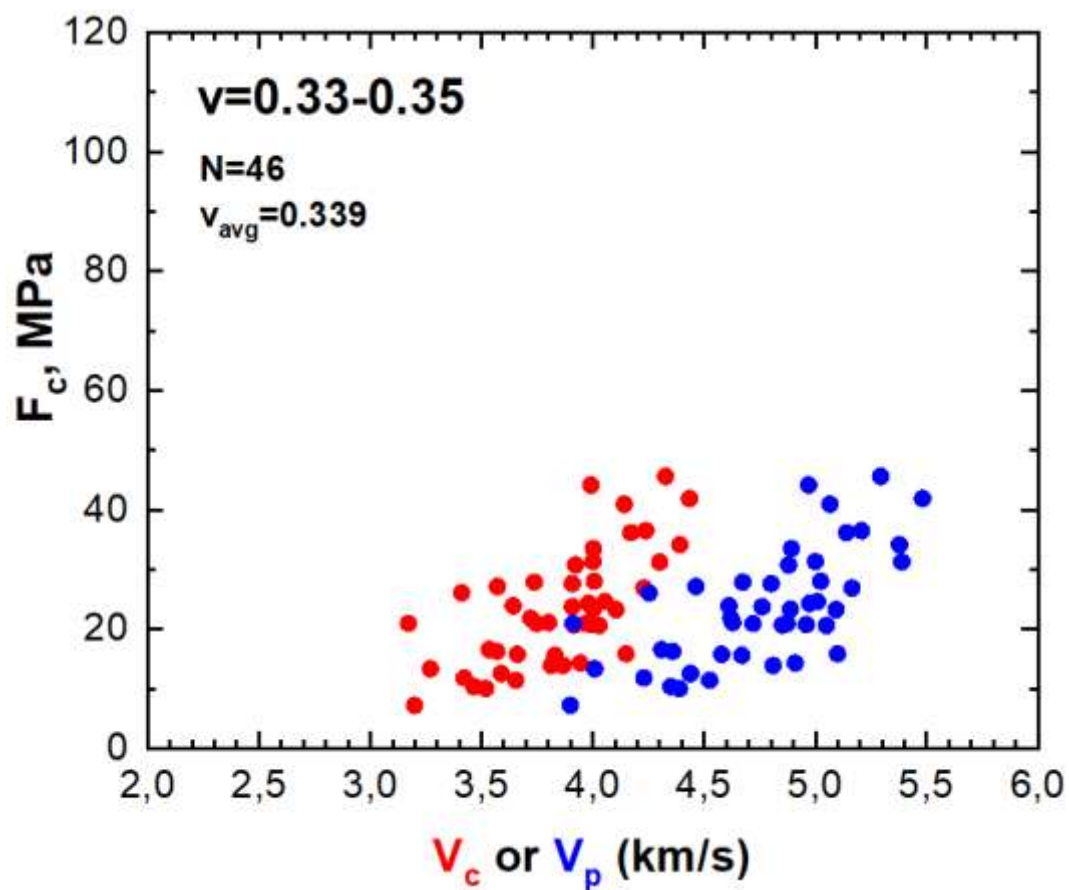


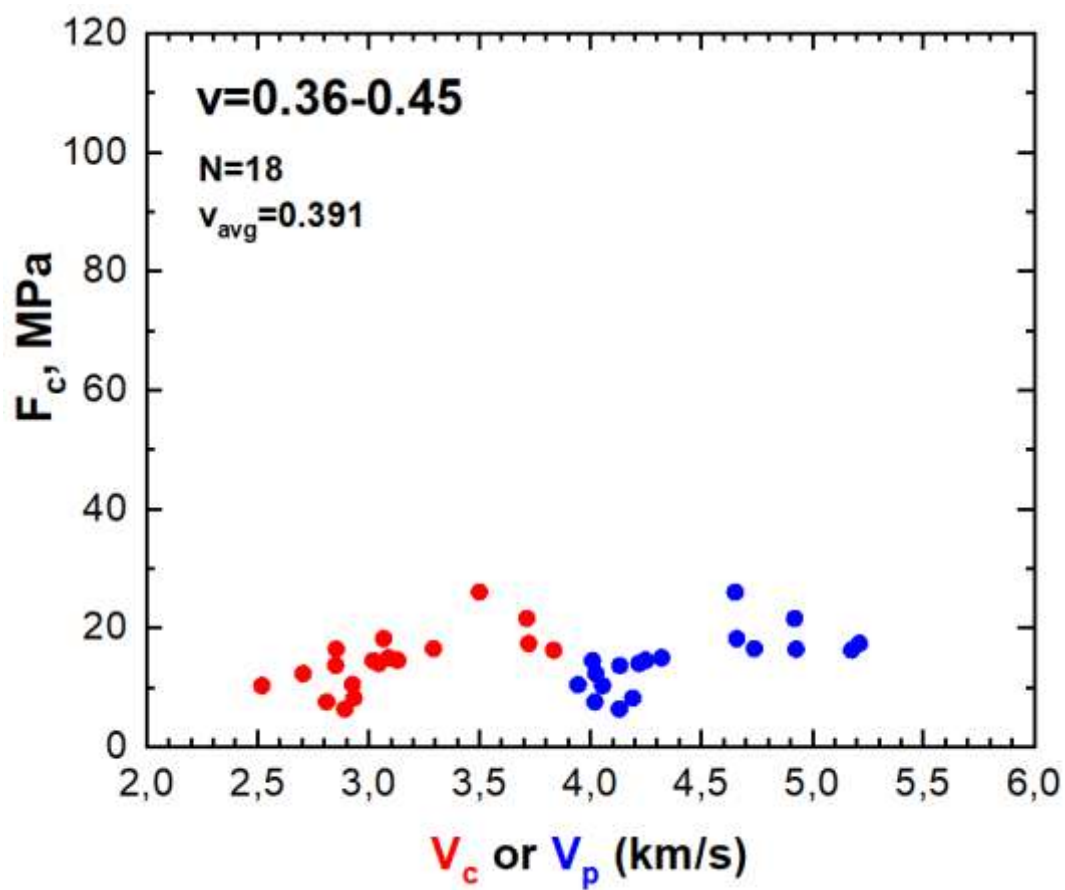
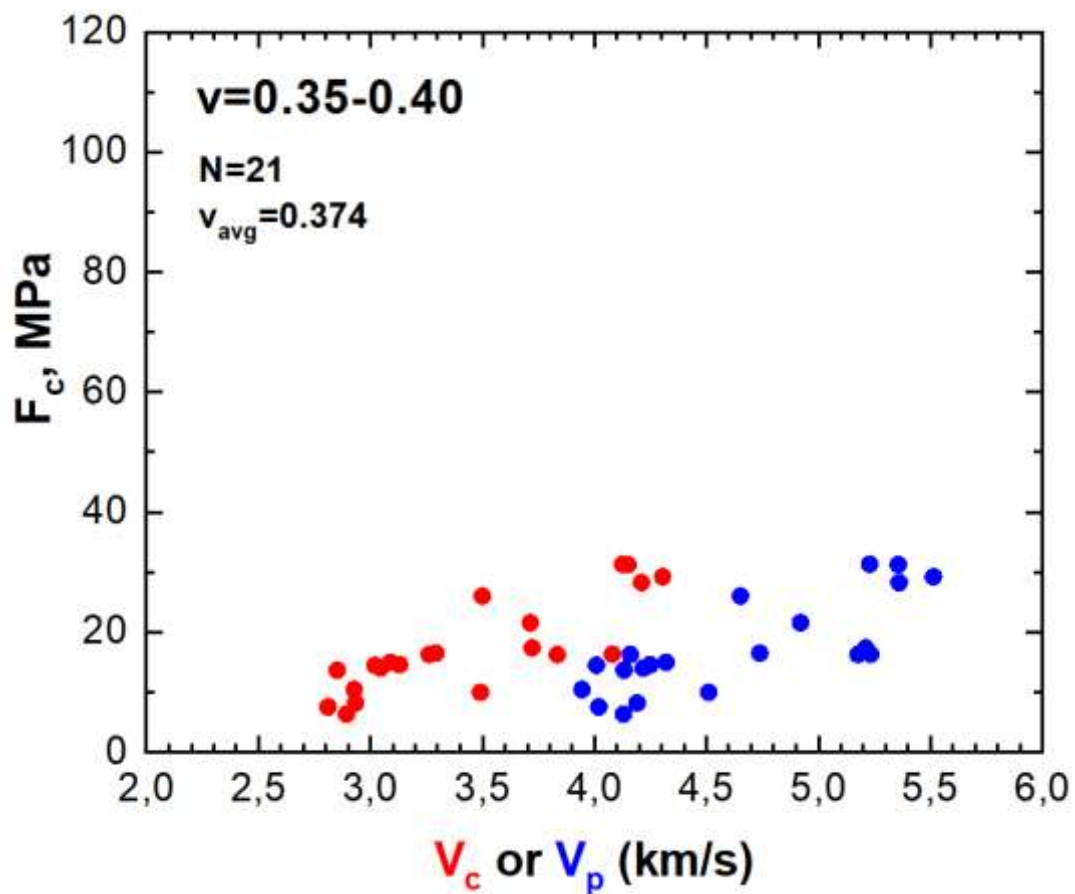
Σύγκριση Μετρήσεων UPV-IE ανά εύρος λόγου Poisson











Παράρτημα ΣΤ - Ανάπτυξη εμπειρικών σχέσεων Θλιπτικής Αντοχής – Ταχυτήτων Διάδοσης - Ειδικού Βάρους

1. Πηγαίος Κώδικας R Στατιστικής Ανάλυσης Ανάπτυξης
Εμπειρικών Σχέσεων Θλιπτικής Αντοχής – Ταχυτήτων
Διάδοσης – Ειδικού Βάρους

Πηγαίος Κώδικας R Στατιστικής Ανάλυσης Ανάπτυξης Εμπειρικών Σχέσεων Θλιπτικής Αντοχής – Ταχύτητων Διάδοσης – Ειδικού Βάρους

Παρακάτω παρατίθεται ο πηγαίος κώδικας σε γλώσσα R (έκδοση ≥ 4.5) που υλοποιεί τη μεθοδολογία η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 8. Ο κώδικας πραγματοποιεί τη βαθμονόμηση του προτεινόμενου μοντέλου μικτών αποτελεσμάτων (LMM) πρόβλεψης της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος από δεδομένα μη καταστροφικών δοκιμών (ταχύτητα παλμού υπερήχων, ταχύτητα ράβδου, ειδικό βάρος), όπως αυτό βαθμονομείται στο Κεφάλαιο 9.7 με αλληλεπιδράσεις τύπου δομικού στοιχείου και τυχαία σταθερά ανά θέση πυρηνοληψίας.

Τα βασικά πακέτα που απαιτούνται είναι: mfp (Multivariable Fractional Polynomials), lme4 (γραμμικά μοντέλα μικτών αποτελεσμάτων), lmerTest (έλεγχοι σημαντικότητας Satterthwaite), MuMIn (δείκτες R_m^2 και R_c^2) performance (συντελεστής ICC), MASS (μετασχηματισμός Box–Cox) και car (έλεγχος Joint F-test).

```
1 # =====
2 # --- 1. LOAD REQUIRED LIBRARIES ---
3 # =====
4 library(readxl)
5 library(tidyverse)
6 library(mfp)          # For Fractional Polynomial search
7 library(lme4)         # For Mixed-Effects Models
8 library(lmerTest)     # For p-values in mixed models (Satterthwaite's method)
9 library(performance)  # For ICC calculation
10 library(MuMIn)       # For R-squared calculation (Marginal/Conditional)
11 library(MASS)        # For Box-Cox transformation
12 library(gridExtra)   # For arranging ggplot outputs
13 library(car)         # Required for the Joint F-Test (linearHypothesis)
14
15 # =====
16 # --- 2. DETAILED EVALUATION & PLOTTING FUNCTION ---
17 # =====
18 evaluate_mixed_fp_model <- function(model, data, label = "Mixed Model",
19   opt_lambda = NULL) {
20   # A. Calculate Performance Metrics
21   r2_vals <- MuMIn::r.squaredGLMM(model)
22   r2m <- round(r2_vals[1, "R2m"], 3)
23   r2c <- round(r2_vals[1, "R2c"], 3)
24   icc_val <- round(performance::icc(model)$ICC_adjusted, 3)
25
26   # B. Predictions and Back-transformation
27   data$Pred_logY <- predict(model)
28   data$Pred_Y_MPa <- exp(data$Pred_logY)
29   data$Residuals_logY <- resid(model)
30
31   rmse_val <- round(sqrt(mean((data$Y - data$Pred_Y_MPa)^2)), 2)
32   mae_val <- round(mean(abs(data$Y - data$Pred_Y_MPa)), 2)
33   mean_y <- round(mean(data$Y), 2)
34   error_percent <- round((mae_val / mean_y) * 100, 2)
35
36   # -----
37   # C. PREDICTION VS ACTUAL F-TEST (Based on DOI:
38   10.1080/23737484.2020.1805818)
39   # -----
40   lm_val <- lm(Y ~ Pred_Y_MPa, data = data)
```



```

40   f_test <- car::linearHypothesis(lm_val, c("(Intercept) = 0", "Pred_Y_MPa
= 1"))
41   f_stat <- round(f_test$F[2], 3)
42   p_val  <- f_test$`Pr(>F)`[2]
43
44   # D. Visualizations
45   re_df <- as.data.frame(lme4::ranef(model, condVar = TRUE))
46   p_cat <- ggplot(re_df, aes(x = reorder(grp, condval), y = condval)) +
47     geom_hline(yintercept = 0, linetype = "dashed", color = "red", linewidth
= 1) +
48     geom_errorbar(aes(ymin = condval - 1.96 * condsd, ymax = condval + 1.96
* condsd),
49                   width = 0.2, color = "#2C3E50", linewidth = 0.8) +
50     geom_point(size = 3, color = "#E74C3C") +
51     coord_flip() +
52     labs(title = "Site Random Effects (ID)",
53          subtitle = "Deviations from the global average per site",
54          x = "Site ID", y = "Log Deviation") +
55     theme_minimal()
56
57   p_avp <- ggplot(data, aes(x = Y, y = Pred_Y_MPa)) +
58     geom_point(aes(color = Type_Grouped), alpha = 0.7, size = 2.5) +
59     geom_abline(intercept = 0, slope = 1, color = "red", linetype =
"dashed", linewidth = 1) +
60     labs(title = "Actual vs. Predicted Strength", subtitle = label,
61          x = "Actual fc (MPa)", y = "Predicted fc (MPa)", color = "Concrete
Type") +
62     theme_minimal() +
63     theme(legend.position = "bottom")
64
65   p_res <- ggplot(data, aes(x = Pred_logY, y = Residuals_logY)) +
66     geom_point(alpha = 0.6, color = "#3498DB", size = 2) +
67     geom_hline(yintercept = 0, color = "red", linetype = "dashed", linewidth
= 1) +
68     labs(title = "Residuals vs Fitted",
69          subtitle = "Checking for homoscedasticity",
70          x = "Fitted Values (log scale)", y = "Residuals") +
71     theme_minimal()
72
73   combined_plot <- gridExtra::arrangeGrob(p_avp, p_res, p_cat, ncol = 2,
74                                           layout_matrix = rbind(c(1, 2),
c(3, 3)))
75   grid::grid.newpage()
76   grid::grid.draw(combined_plot)
77
78   # E. Detailed Narrative Output
79
80   cat("\n=====\\n")
81   cat("          AUTOMATED PERFORMANCE REPORT: ", toupper(label), "\\n")
82   cat("=====\\n\\n")
83   if(!is.null(opt_lambda)) {
84     cat("1. BOX-COX TRANSFORMATION DIAGNOSTIC:\\n")
85     cat("   Optimal Lambda: ", round(opt_lambda, 4), "\\n")
86     cat("   Interpretation: Because 0 falls within the 95% CI for lambda,
taking the \\n",
87          "       natural logarithm (log(Y)) is statistically justified to
stabilize variance.\\n\\n", sep="")
88   }
89
90   cat("2. PREDICTION VALIDITY (JOINT F-TEST):\\n")
91   cat("   H0: Intercept = 0 and Slope = 1 (Perfect 1:1 Actual vs Predicted
mapping)\\n")

```

```

92   cat("    F-Statistic: ", f_stat, "\n")
93   cat("    p-value:      ", format(p_val, scientific = FALSE, digits = 4),
"\n")
94   if(p_val > 0.05) {
95     cat("    Interpretation: p > 0.05. We fail to reject H0. The predictions
do not \n",
96       "    systematically over- or under-estimate the true values (Ideal
outcome).\n\n", sep="")
97   } else {
98     cat("    Interpretation: p < 0.05. We reject H0. There is systematic
bias \n",
99       "    between the predictions and the actual values (Line deviates
from y=x).\n\n", sep="")
100  }
101
102  cat("3. EXPLANATORY POWER (R-SQUARED):\n")
103  cat("    Marginal R2 (Fixed Effects): ", r2m * 100, "%\n")
104  cat("    Conditional R2 (Total Model): ", r2c * 100, "%\n")
105  cat("    Interpretation: The physical variables and NDT measurements
(Ultrasonic, Rebound, etc.)\n",
106    "    alone explain ", r2m * 100, "% of the variance in core concrete
strength. When we include \n",
107    "    the unique characteristics of the specific test Site (ID), the
total explanatory \n",
108    "    power jumps to ", r2c * 100, "%.\n\n", sep="")
109
110  cat("4. SITE-TO-SITE VARIABILITY (ICC):\n")
111  cat("    Adjusted ICC: ", icc_val * 100, "%\n")
112  cat("    Interpretation: ", icc_val * 100, "% of the remaining unexplained
variance is systematically \n",
113    "    tied to unmeasured, site-specific differences (like local curing
conditions or aggregate \n",
114    "    sources). This completely justifies the use of a Mixed-Effects
Model over standard OLS.\n\n", sep="")
115
116  cat("5. PRACTICAL ERROR METRICS (MPa):\n")
117  cat("    Dataset Mean Strength:      ", mean_y, " MPa\n")
118  cat("    Mean Absolute Error (MAE):    ", mae_val, " MPa\n")
119  cat("    Root Mean Square Error (RMSE):", rmse_val, " MPa\n")
120  cat("    Interpretation: On average, the model's predictions deviate from
the true core \n",
121    "    strength by ±", mae_val, " MPa. Given the average concrete
strength of ", mean_y, " MPa, \n",
122    "    this represents a relative prediction error of ", error_percent,
"%.\n", sep="")
123
124  cat("=====\n")
125  return(invisible(data))
126 }
127
128 # =====
129 # --- 3. DATA IMPORT AND PREPARATION ---
130 # =====
131 df_raw <- read_excel("primary_r1.xlsx")
132 dim(df_raw)
133 table(df_raw$Meros)
134 df_final <- df_raw %>%
135   rename(ID = 1, Type = 2, X1 = `L/D`, X2 = `ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΥΠΕΡΗΧΩΝ, Vp (km/s)`,
136     X3 = `Ταχύτητα ράβδου, vc1 (km/sec)`, X4 = `γc (kN/m3)`, Y =
`Αντοχή fc, Mpa`) %>%
137   mutate(
138     ID = as.factor(ID),
139
140     X2_scaled = X2 / 10,
141     X3_scaled = X3 / 10,

```

```

142     X4_scaled = X4 / 10, # <-- NEW: Scaling unit weight down
143
144     # Visual grouping for plots and the Full Model baseline
145     Type_Grouped = fct_collapse(as.factor(Type),
146                                "Reference_Types" = c("Γ-A", "Γ-B", "Γ-Δ",
147                                "Δ", "Π"),
148                                "Type_GDP" = "Γ-Δ-ΠP",
149                                "Type_K" = "K"
150                                ),
151     # Binary Dummy variables for the Strict Mathematical Model
152     Is_Type_K = ifelse(Type == "K", 1, 0),
153     Is_Type_GDP = ifelse(Type == "Γ-Δ-ΠP", 1, 0)
154   ) %>%
155   drop_na(X1, X2, X3, X4, Y) # Keep dropping NAs based on the original
                                columns
156
157   # =====
158   # --- 4. STEP 1: RESPONSE VARIABLE TRANSFORMATION (BOX-COX) ---
159   # =====
160   cat("\n\n--- STEP 1: JUSTIFYING LOG TRANSFORMATION (BOX-COX) ---\n")
161   cat("Rationale: Before building complex models, we must ensure our dependent
variable (Y)\n")
162   cat("meets the assumptions of normality and homoscedasticity. We use the
Box-Cox method\n")
163   cat("to find the optimal power transformation lambda.\n\n")
164
165   bc_model <- lm(Y ~ Type + X1 + X2 + X3 + X4, data = df_final)
166
167   bc <- boxcox(bc_model, lambda = seq(-1, 1, 0.01), plotit = TRUE)
168
169   opt_lambda <- bc$x[which.max(bc$y)]
170   threshold <- max(bc$y) - (qchisq(0.95, 1) / 2)
171   ci_lambdas <- bc$x[bc$y >= threshold]
172
173   cat("Optimal Box-Cox Lambda: ", round(opt_lambda, 4), "\n")
174   cat(sprintf("95%% Confidence Interval for Lambda: [%.2f, %.2f]\n",
min(ci_lambdas), max(ci_lambdas)))
175
176   if(0 >= min(ci_lambdas) && 0 <= max(ci_lambdas)) {
177     cat(">> CONCLUSION: Lambda = 0 is inside the 95% CI. We will proceed with
log(Y).\n")
178   } else {
179     cat(">> WARNING: Lambda = 0 is outside the 95% CI. A different
transformation may be required.\n")
180   }
181
182   # =====
183   # --- 5. STEP 2: IDENTIFYING NON-LINEAR RELATIONSHIPS (MFP) ---
184   # =====
185   cat("\n\n--- STEP 2: FRACTIONAL POLYNOMIAL SEARCH (MFP) ---\n")
186   cat("Rationale: Standard regression assumes a straight-line relationship.
However,\n")
187   cat("ultrasonic and rebound measurements often have non-linear effects on
strength.\n")
188   cat("We run Multivariable Fractional Polynomials (mfp) to mathematically
discover\n")
189   cat("the best-fitting exponential powers for our continuous
variables.\n\n")
190
191   fp_model <- mfp(log(Y) ~ Type_Grouped + fp(X1) + fp(X2_scaled) +
fp(X3_scaled) + fp(X4),
192                  data = df_final, alpha = 0.05)
193   print(summary(fp_model))
194
195   # =====

```

```

196 # --- 6. NEW FUNCTION: RUTHLESS NON-HIERARCHICAL ELIMINATION ---
197 # =====
198 auto_prune_mixed_model <- function(model, data, alpha = 0.05) {
199   current_model <- model
200   cat("\n--- Starting Strict Non-Hierarchical Elimination (Target p < ",
      alpha, ") ---\n", sep="")
201   cat("Note: Hierarchy rules are disabled. Main effects will be dropped if
      p > ", alpha, ".\n\n", sep="")
202
203   repeat {
204     # 1. Extract the raw coefficient table (requires lmerTest for p-values)
205     coef_table <- as.data.frame(summary(current_model)$coefficients)
206
207     # 2. Isolate terms and p-values (ignoring the Intercept)
208     terms_all <- rownames(coef_table)
209     non_int_idx <- which(terms_all != "(Intercept)")
210
211     term_names <- terms_all[non_int_idx]
212     term_p_vals <- coef_table[non_int_idx, "Pr(>|t|)"]
213
214     # 3. Stop if no terms are left
215     if (length(term_names) == 0) {
216       cat("\n>> STOPPING: All predictors removed. Only the intercept
      remains.\n")
217       break
218     }
219
220     # 4. Find the single worst term (highest p-value)
221     max_p <- max(term_p_vals, na.rm = TRUE)
222     worst_term <- term_names[which.max(term_p_vals)]
223
224     # 5. Drop it if it is above our alpha threshold
225     if (max_p >= alpha) {
226       cat("Dropping:", worst_term, sprintf("(p = %.4f)", max_p), "\n")
227
228       # Create a new list of surviving terms
229       terms_to_keep <- term_names[term_names != worst_term]
230
231       # Rebuild the formula completely from scratch as a flat string.
232       # Destroying R's hierarchy logic enforces pure statistical pruning.
233       if (length(terms_to_keep) > 0) {
234         fixed_eff <- paste(terms_to_keep, collapse = " + ")
235         new_form_str <- paste("log(Y) ~ 1 +", fixed_eff, "+ (1 | ID)")
236       } else {
237         new_form_str <- "log(Y) ~ 1 + (1 | ID)"
238       }
239
240       # Refit the model. REML = FALSE is mandatory here because we are
241       # comparing models with different fixed effect structures (Maximum
      Likelihood).
242       current_model <- lmer(as.formula(new_form_str), data = data, REML =
      FALSE)
243
244     } else {
245       cat("\n>> SUCCESS: All remaining terms strictly have p <", alpha, ".
      Stopping.\n")
246       break
247     }
248   }
249
250   # Return the final model refitted with REML = TRUE for accurate
      variance/standard error reporting.
251   return(update(current_model, . ~ ., REML = TRUE))
252 }
253
254 # =====

```

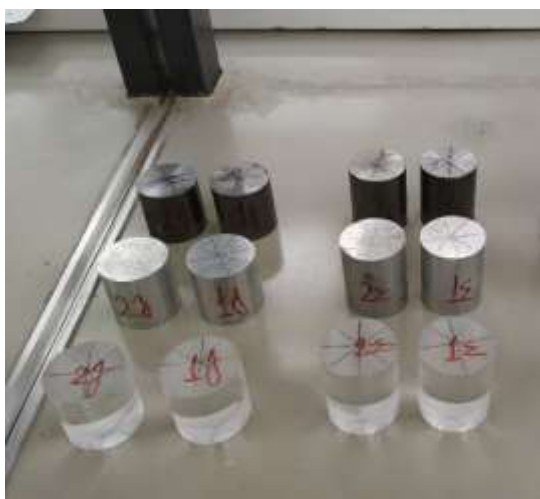
```

255 # --- 7. STEP 3: DEFINE THE MAXIMAL DUMMY MODEL ---
256 # =====
257 cat("\n\n--- STEP 3: DEFINING MAXIMAL DUMMY MODEL ---\n")
258 cat("Rationale: We feed every possible main effect and interaction into
the starting \n")
259 cat("model. Our custom algorithm will tear this down term-by-term based
strictly on p-values.\n\n")
260
261 # Use a flat formula definition so names map perfectly back during string
destruction
262 fit_max_dummy <- lmer(log(Y) ~ 1 +
263                       Is_Type_K + Is_Type_GDP + X1 + X4_scaled +
264                       I(X3_scaled^3) + I(X3_scaled^3 * log(X3_scaled)) +
265                       I(X2_scaled^3) + I(X2_scaled^3 * log(X2_scaled)) +
266
267                       Is_Type_K:I(X3_scaled^3) + Is_Type_K:I(X3_scaled^3
* log(X3_scaled)) +
268                       Is_Type_K:I(X2_scaled^3) + Is_Type_K:I(X2_scaled^3
* log(X2_scaled)) +
269                       Is_Type_K:X1 + Is_Type_K:X4_scaled +
270
271                       Is_Type_GDP:I(X3_scaled^3) + Is_Type_GDP:I(X3_scaled^3
* log(X3_scaled)) +
272                       Is_Type_GDP:I(X2_scaled^3) + Is_Type_GDP:I(X2_scaled^3
* log(X2_scaled)) +
273                       Is_Type_GDP:X1 + Is_Type_GDP:X4_scaled +
274
275                       (1 | ID),
276                       data = df_final, REML = FALSE)
277 # =====
278 # --- 8. STEP 4: AUTOMATED RUTHLESS SELECTION ---
279 # =====
280 cat("\n\n--- STEP 4: STRICT AUTOMATED SELECTION ---\n")
281 best_model <- auto_prune_mixed_model(fit_max_dummy, df_final, alpha = 0.10)
282
283
284 cat("\n\n--- FINAL OPTIMIZED MODEL SUMMARY ---\n")
285 print(summary(best_model))
286
287 # =====
288 # --- 9. STEP 5: FINAL EVALUATION ---
289 # =====
290 # Feed the best_model directly into the unified evaluation function
291 df_evaluated <- evaluate_mixed_fp_model(best_model, df_final,
292                                         label = "Automated Best FP Model",
293                                         opt_lambda = opt_lambda)

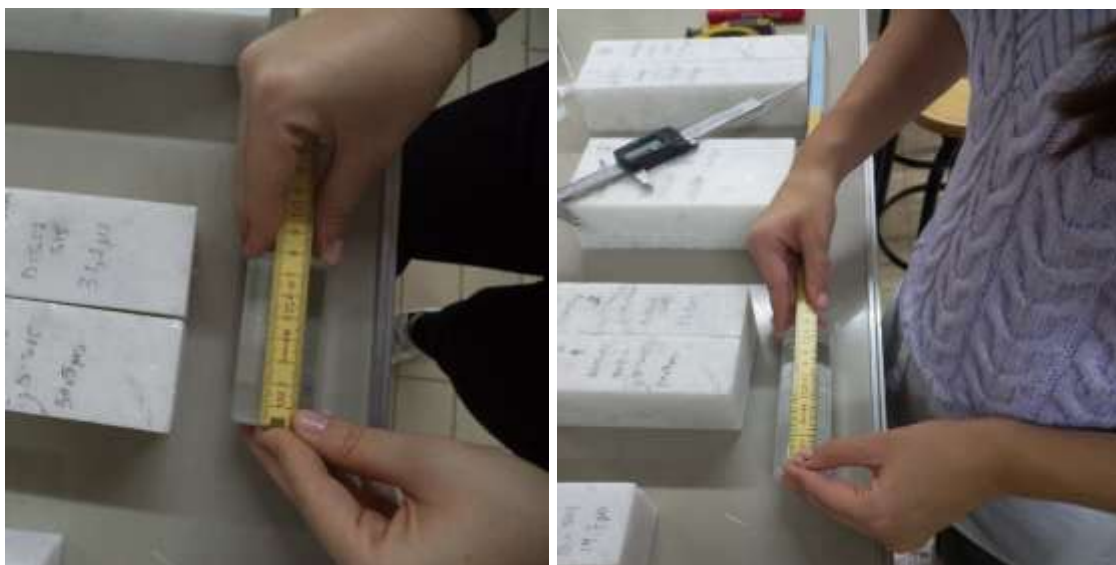
```

Παράρτημα Ζ - Πρόσθετες Εικόνες

Δοκίμια Χάλυβα – Αλουμινίου – Ακρυλικού - Μαρμάρου



Μετρήσεις Μήκους Δοκιμίων

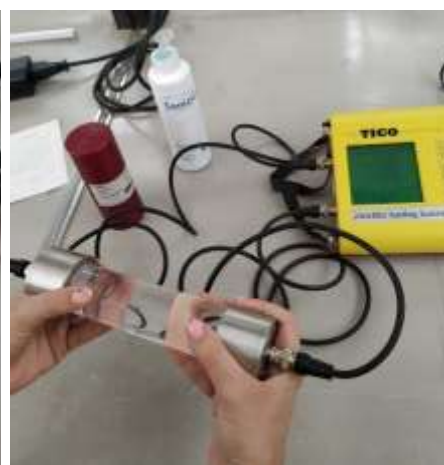


Βαθμονόμηση Συσκευής Υπερήχων





Μετρήσεις UPV



Δοκίμια Σκυροδέματος Διαφορετικών Συνθέσεων

Προετοιμασία Δοκιμών



ΜΚΔ – Μετρήσεις UPV και ΙΕ



Δοκιμή Μονοαξονικής Θλίψης



Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/ εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/ δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.