ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

Παναγιώτης Κακαβάς[1], Δημήτριος Μπάρος[1] και Νικόλαος Ανυφαντής[2]
[1] Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε., Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας, Μεγ. Αλεξάνδρου 1
[2] Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών
email: kakavas@teiwest.gr

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη περιγράφει τον πειραματικό προσδιορισμό της παραμένουσας αντοχής τοίχων μεγάλου πάχους ή μη προσπελάσιμους και από τις δύο πλευρές με την μη καταστροφική μέθοδο των υπερήχων. Η πιστοποιημένη μέθοδος εξαγωγής πυρήνων είναι ακριβή και δύσχρηστη, απαιτεί ακριβό εξοπλισμό και οδηγεί σε μικρής έκτασης βλάβες στον οργανισμό του κτηρίου. Η μέθοδος των υπερήχων παρέχει ακριβή αποτελέσματα με εύχρηστο εξοπλισμό μικρού κόστους. Στις τοιχοποιίες μεγάλου πάχους ή μιας προσπελάσιμης πλευράς, όπου ο δέκτης δεν μπορεί να λάβει μετρήσεις, πρέπει να χρησιμοποιηθεί κατάλληλη διάταξη της θέσης πομπού-δέκτη για την άμεση λήψη μετρήσεων ώστε να λαμβάνει στο υπολογισμό παρόμοιους περιορισμούς εφαρμογής. Στο εργαστήριο σχεδιάστηκαν και πραγματοποιήθηκαν πειράματα μέτρησης αντοχών τοιχοποιίας μεγάλου πάχους. Ο σχεδιασμός αυτός συμπεριλαμβάνει δύο ξύλινα δοκίμια τριγωνικής διατομής τα οποία προσαρτώνται στην υπό εξέταση τοιχοποιία. Η μέτρηση του χρόνου διόδου των υπέρηχων από τον πομπό στο δέκτη ανάγεται με απλή μαθηματική ανάλυση στον υπολογισμό του χρόνου διέλευσης του ήχου μέσα από την τοιχοποιία. Αυτό απαιτεί την γνώση της αξονικής και εγκάρσιας ταχύτητας του ήχου μέσω των ξύλινων δοκιμίων οι οποίες προσδιορίζονται πειραματικά. Ο στατιστικός προσδιορισμός της ταχύτητας ανάγεται στον υπολογισμό της αντοχής της τοιχοποιίας.

Λέξεις-Κλειδιά: Μέθοδος υπερήχων, Ακρίβεια μέτρησης, Εναλλακτικές διαδικασίες δοκιμής, Διακρίβωση μεθόδου σε ανομοιογενή υλικά

Abstract

The application of the non-destructive technique of ultrasonic wave propagation to determine the strength of thick masonry or blind from one side is described in this paper. The certified method of core extraction is expensive and cumbersome which requires expensive equipments and results in minor damage to the construction elements where the tests are taken place. Unlike the method of ultrasound gives accurate results with easy to use inexpensive equipments. In thick walls or in one visible side, where the receiver can not take measurements should be used another arrangement of the transmitter-receiver position for immediate measurements. In the laboratory designed and performed experiments measuring strength of thick walls. This design includes two wooden pieces of triangular section which are glued to the test masonry with adhesive glue. The measuring time passage of the ultrasound from the transmitter to the receiver is reduced by a simple mathematical analysis to calculate the transit time of the sound through the walls. This requires knowledge of the axial and transverse velocity of sound through wood specimens identified experimentally. Statistical speed determination leads to the calculation of the vertical wall strength.

Keywords: Ultrasonic method, Measurement accuracy, Alternative test procedures, Calibration method in inhomogeneous materials.

1. Εισαγωγή

Η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων μέσω των στερεών σωμάτων συνδέεται με το μέτρο ελαστικότητας και την πυκνότητά του υλικού:

$$V = (E / \rho)^{1/2} \tag{1}$$

Η ανωτέρω εξίσωση χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας του υλικού το οποίο σχετίζεται με τη θλιπτική αντοχή του. Ο υπολογισμό της αντοχής, μέσω της πειραματικά προσδιορισμένης ταχύτητας του ήχου διαμέσου του υλικού, δίδεται από τις κάτωθι σχέσεις:

$$E_d = V^2 \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \tag{2}$$

$$\mathrm{E_{st}} = 0.83\mathrm{E_d} \tag{3}$$

$$\mathrm{f_c} = (\mathrm{E_{st}} / 4.73)^2 \tag{4}$$

όπου E_d ορίζει το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας του υλικού (εν προκειμένω της τοιχοποιίας), E_{st} το στατικό μέτρο ελαστικότητας, ν παριστάνει τον λόγο Poisson του υλικού της τοιχοποιίας και f_c ορίζει την ζητούμενη αντοχή σε θλίψη. Για συμβατικές τοιχοποιίες όπου η τιμή του ν είναι περίπου 0,20 ÷ 0,30 ο λόγος $\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}$ ισούται με 0,9 και η (2) απλοποιείται ως εξής:

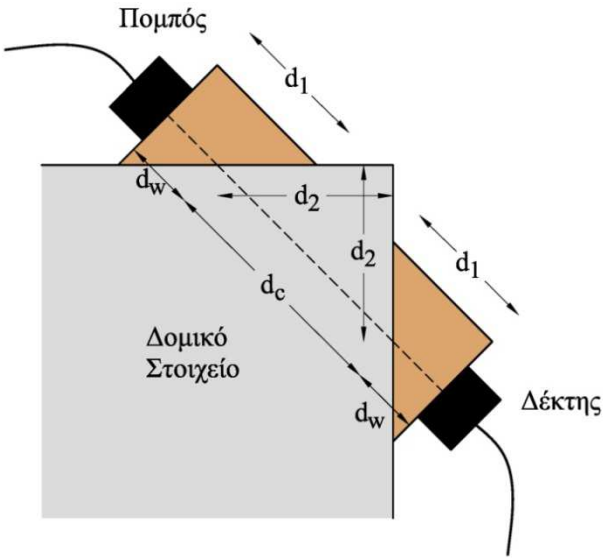
$$E_d = 0,9 V^2 \rho \tag{5}$$

Η μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων απαιτεί το πάχος της τοιχοποιίας να μην είναι πολύ μεγάλο, ώστε ο ήχος χάνεται μέσω των ατελειών που τυχών υπάρχουν μέσα στην τοιχοποιία. Επιπλέον, η πλέον ενδεδειγμένη μέθοδος απαιτεί την τοποθέτηση πομπού και δέκτη της συσκευής στις απέναντι παρειές του δομικού στοιχείου. Ωστόσο, σε πραγματικές κατασκευές αυτό δεν είναι πάντοτε εφικτό, καθώς ενδέχεται η μία εκ των δύο παρειών να είναι «τυφλή» δηλαδή μη προσπελάσιμη από τον χειριστή (π.χ. λόγω όμορων κτιρίων σε περιοχές όπου η δόμηση είναι συνεχής). Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι σκόπιμο να αναζητηθεί μία εναλλακτική μέθοδος τοποθέτησης πομπού και δέκτη της συσκευής υπερήχων που θα επιτρέπει τη μέτρηση της ταχύτητας η οποία, μέσω κατάλληλης επεξεργασίας, θα οδηγεί στη ζητούμενη αντοχή. Στην παρούσα εργασία διερευνάται και παρουσιάζεται μία τέτοια, εναλλακτική διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου των υπερήχων.

2. Προτεινόμενη διάταξη και μεθοδολογία μέτρησης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μέθοδος των υπερήχων για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών σε κατασκευές βασίζεται στη στοιχειώδη αρχή της μέτρησης της ταχύτητας του υπερήχου εντός του υπό εξέταση δομικού στοιχείου. Σημειώνεται ότι, δεδομένης της τοποθέτησης τω στελεχών της συσκευής σε απέναντι παρειές του δομικού στοιχείου, η μετρούμενη ταχύτητα αφορά το δεσπόζων διαμήκες κύμα, καθώς η επιρροή των εγκαρσίων και διατμητικών κυμάτων στη μέτρηση είναι αμελητέα.

Στις περιπτώσεις που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, όπου τα στελέχη της συσκευής τοποθετούνται υπό γωνία επί του δομικού στοιχείου χρησιμοποιώντας παρεμβλήματα (Σχήμα 1), μία σειρά από παράμετροι ενδέχεται να επηρεάσουν την μετρούμενη ταχύτητα. Η πλέον σημαντική παράμετρος είναι η κλίση θ υπό την οποία το εκπεμπόμενο κύμα προσπίπτει τόσο στο δομικό στοιχείο όσο και στο βοηθητικό παρέμβλημα. Αυτή η γωνία επηρεάζει την τιμή της μετρούμενης ταχύτητας V_θ που είναι διαφορετική από αυτήν του διαμήκους κύματος, έστω V_0, που μετράται όταν τα στελέχη της συσκευής τοποθετούνται χωρίς κλίση. Επιπλέον, αφού ο εκπεμπόμενος υπέρηχος διέρχεται από τη διεπιφάνεια μεταξύ του παρεμβλήματος και του δομικού στοιχείου, είναι κρίσιμο να διερευνηθεί η επίδραση της διεπιφάνειας στα χαρακτηριστικά του κύματος. Τέλος, είναι σκόπιμο να αξιολογηθεί η επίδραση του ιδίου του υλικού του παρεμβλήματος στα χαρακτηριστικά του υπερήχου και, τελικώς, στη μέτρηση.



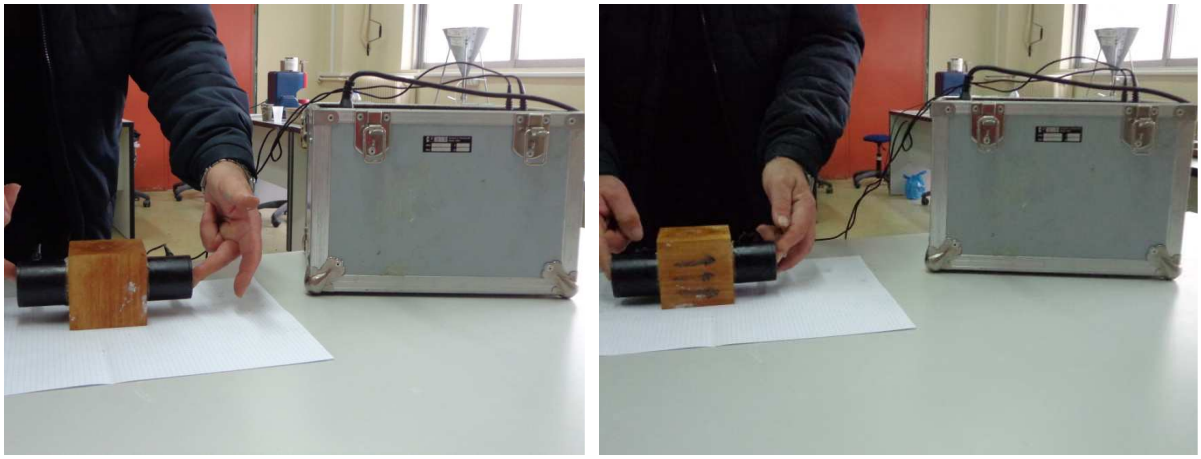
Σχήμα 1: Η προτεινόμενη εναλλακτική διάταξη για τον προσδιορισμό της αντοχής τοιχοποιίας με τη μέθοδο των υπερήχων.

2.1 Διερεύνηση της επίδρασης των παρεμβλημάτων στις μετρήσεις

Για να εκτιμηθεί ποσοτικά η επιρροή του υλικού του παρεμβλήματος στη μέτρηση, απαιτείται να είναι γνωστή με υψηλή αξιοπιστία η ταχύτητα διάδοσης του υπερήχου στο

υλικό αυτό. Ως εκ τούτου, η προτεινόμενη μέθοδος προϋποθέτει αρχικά τη μέτρησή της σε συνθήκες εργαστηρίου χρησιμοποιώντας τυπικά δοκίμια. Εάν το υλικό που χρησιμοποιείται είναι ανομοιογενές απαιτούνται μετρήσεις της εν λόγω ταχύτητας σε διαφορετικές διευθύνσεις.

Για τις ανάγκες τις παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκαν παρεμβλήματα από ξύλο, συγκεκριμένης συγκέντρωσης υγρασίας και προέλευσης λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι πρόκειται για υλικό χαμηλού κόστους, ευρέως διαθέσιμο στην πράξη και σε εργοτάξια, που μπορεί εύκολα να διαμορφωθεί στο επιθυμητό σχήμα (Σχήμα 1). Δεδομένου ότι το υλικό που επελέγη είναι ανισότροπο και ανομοιογενές, στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις υπερήχων για τις δύο δεσπόζουσες διευθύνσεις παράλληλα και κάθετα στις ίνες. Για τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια του υλικού μορφής κύβου ακμής 8.0 cm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Από τις εργαστηριακές μετρήσεις υπολογίστηκαν οι τιμές της ταχύτητας διάδοσης του ήχου στην αξονική και εγκάρσια κατεύθυνση. Η διαμήκης ταχύτητα διάδοσης υπολογίστηκε V_0 = 4762 m/sec και η εγκάρσια ταχύτητα διάδοσης είναι V_{90} = 2046 m/sec για διεύθυνση παράλληλα και κάθετα στις ίνες αντιστοίχως. Αντίστοιχες ενδεικτικές τιμές από τη βιβλιογραφία (Xu et al., 2014) είναι 4095 m/sec και 680 m/sec. Η παρατηρούμενη απόκλιση στην περίπτωση



(α) (β)

Σχήμα 2: Μετρήσεις υπερήχων σε κυβικά δοκίμια ξύλου όμοιου με αυτού των παρεμβλημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην προτεινόμενη διάταξη (α) κάθετα και (β) παράλληλα στις ίνες.

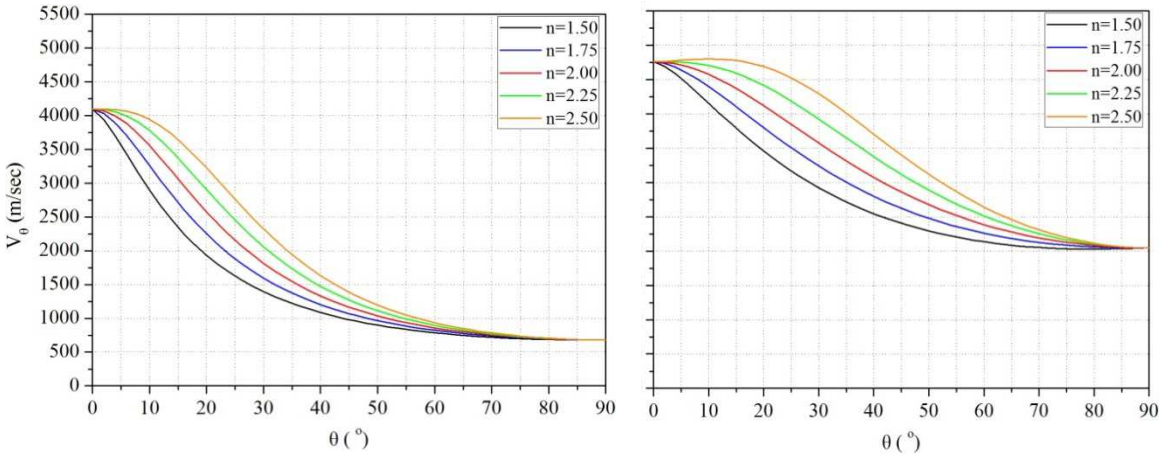
της μέτρησης κάθετα στις ίνες ενισχύει την απαίτηση για ακριβείς μετρήσεις σε ελεγχόμενες συνθήκες πριν από την εφαρμογή της μεθόδου στο πεδίο.

Με γνωστές τις ταχύτητες διάδοσης σε δύο κύριες διευθύνσεις, V_0 και V_{90}, είναι δυνατόν να προσδιορισθεί η αντίστοιχη ταχύτητα V_θ για την περίπτωση όπου το κύμα προσπίπτει και διαδίδεται μέσω του υλικού υπό τυχούσα, γνωστή γωνία θ ως προς τη διεύθυνση των ινών (για την περίπτωση του ξύλινου παρεμβλήματος). Για τον προσδιορισμό της εν λόγω

ταχύτητας χρησιμοποιείται η κλασσική εξίσωση (6) (Hankinson, 1921, and Armstrong et al., 1991)

$$V_\theta = \frac{V_0 V_{90}}{V_0 \sin^n \theta + V_{90} \cos^n \theta} \tag{6}$$

Στην εξίσωση (6), n είναι ένας εμπειρικός συντελεστής, ο οποίος για την περίπτωση του ξύλου κυμαίνεται από 1.5 έως 2.5. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3 για γωνίες διάδοσης περί τις 45° ή μεγαλύτερες, η εύλογη επιλογή n = 2 οδηγεί σε τιμές του V_θ που δεν διαφέρουν σημαντικά από τις ακραίες εκτιμήσεις της εξίσωσης (6) (~15% απόκλιση από τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή που προέκυψαν για n = 1.5 και 2.5 αντιστοίχως). Ως εκ τούτου, στην παρούσα εργασία η εφαρμογή της εξίσωσης (6) για τα ξύλινα στοιχεία της διάταξης έγινε θεωρώντας ότι n = 2.



Σχήμα 3: Μεταβολή της τιμής της ταχύτητας διάδοσης του κύματος (υπερήχου) V_θ σε δοκίμιο ξύλου σχέση με τη γωνία θ – V_0 και V_{90} από τη βιβλιογραφία (αριστερά) και έπειτα από εργαστηριακές μετρήσεις (δεξιά).

Για την προτεινόμενη στην παρούσα εργασία διάταξη μέτρησης η γωνία πρόσπτωσης και διάδοσης του υπερήχου στα ξύλινα παρεμβλήματα είναι 45°, οπότε με βάση τις μετρηθείσες V_0 και V_{90} (Σχήμα 2), από την (6) υπολογίστηκε η μέση τιμή $V_{w,45}$ = 2862 m/sec.

Συνεπώς, είναι δυνατόν να υπολογισθεί το τμήμα του χρόνου που αφορά τα ξύλινα στοιχεία της διάταξης και να «αφαιρεθεί» από τη μέτρηση. Για τη διευκόλυνση των υπολογισμών συνιστάται προφανώς η χρήση παρεμβλημάτων ίσων διαστάσεων και η συμμετρική τοποθέτησή τους επί του δομικού στοιχείου (Σχήμα 1). Η συμμετρία της διάταξης εξασφαλίζει ότι ισχύει:

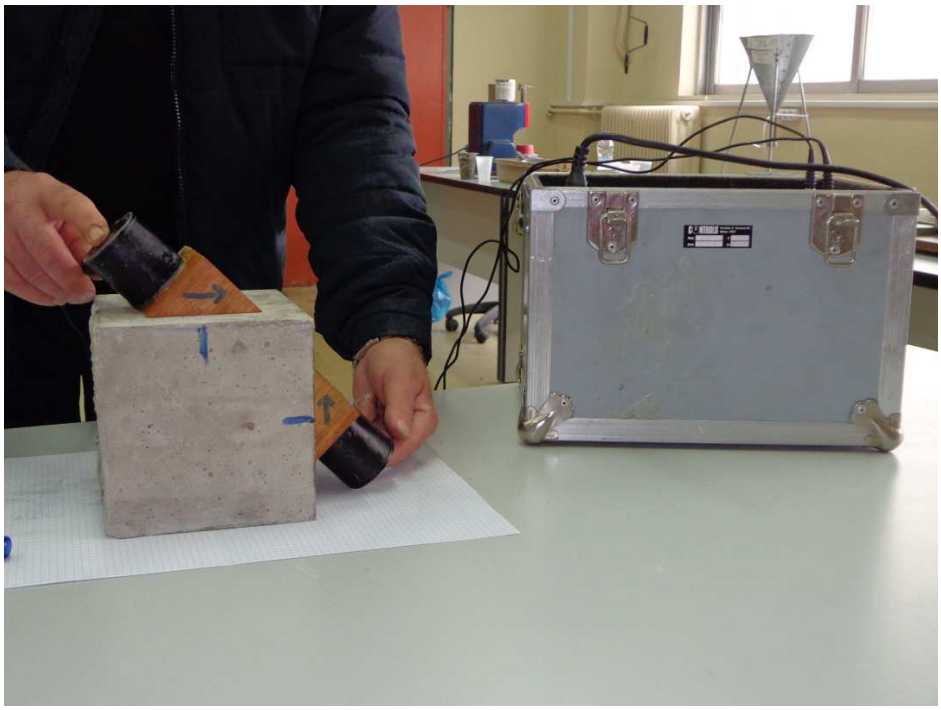
$$t_{tot} = 2t_w + t_c \tag{7}$$

όπου t_w και t_c οι χρόνοι για τα ξύλινα παρεμβλήματα και το δομικό στοιχείο αντιστοίχως και t_{tot} ο χρόνος που μετράται κατά το πείραμα, προφανώς:

$$t_w = d_w / V_{w,\theta} \quad (8)$$

όπου η απόσταση d_w προκύπτει εύκολα γεωμετρικά (Σχήμα 1) και η $V_{w,\theta}$ υπολογίζεται από την εξίσωση (6).

Στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας η προτεινόμενη διάταξη εφαρμόσθηκε σε ελεγχόμενες συνθήκες στο εργαστήριο, όπου τα δομικά στοιχεία αντιπροσωπεύονται από τυπικά κυβικά δοκίμια (ακμής 150 mm) σκυροδέματος (Σχήμα 4). Χρησιμοποιήθηκαν ξύλινα παρεμβλήματα με διαστάσεις πλευράς d_1 = 6 cm (Σχήμα 1), οπότε d_w = 3 cm. Ο συνολικός χρόνος προέκυψε t_{tot} = 53.20 μsec (μέση τιμή μετρήσεων).



Σχήμα 4: Εφαρμογή της προτεινόμενης διάταξης σε ελεγχόμενες, εργαστηριακές συνθήκες με δοκιμία σκυροδέματος για την αντιπροσώπευση της τοιχοποιίας.

Για το υλικό των παρεμβλημάτων είχε προσδιοριστεί πειραματικά όπως περιγράφηκε παραπάνω η ταχύτητα $V_{w,45}$ = 2862 m/sec. Οπότε ο αντίστοιχος χρόνος είναι t_w = 10.48 μsec (εξίσωση (8)) και τελικά t_c = 32.24 μsec, ο χρόνος που αφορά μόνο το δομικό στοιχείο και απαιτείται προκειμένου να υπολογισθεί η αντίστοιχη ταχύτητα που σχετίζεται με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού.

2.2 Σύνδεση της ταχύτητας στο δομικό στοιχείο με τα χαρακτηριστικά του υλικού

Η παρεμβολή των ξύλινων στοιχείων συνεπάγεται ότι το διάμηκες κύμα προσπίπτει υπό γωνία 45° στη διεπιφάνεια ξύλινου παρεμβλήματος και στοιχείου σκυροδέματος ή τοιχοποιίας. Η γωνία διεύθυνσης του διαδιδόμενου διαμήκους κύματος, του οποίου η ταχύτητα συνδέεται με την αντοχή του δομικού μέλους που ζητείται να προσδιορισθεί,

είναι γενικά άγνωστη και συνδέεται με την αντίστοιχη του προσπίπτοντος κύματος σύμφωνα με την εξίσωση (9), νόμος του Snell (Nayfeh, 1995)

$$\frac{\sin\theta^{(w)}}{V_{w,\theta}} = \frac{\sin\theta^{(c)}}{V_{c,\theta}} \tag{9}$$

όπου $\theta^{(w)}$ και $\theta^{(c)}$ οι γωνίες διεύθυνσης των διαμηκών κυμάτων στο ξύλινο στοιχείο (45°) και στο στοιχείο του σκυροδέματος (ή τοιχοποιίας) αντιστοίχως και $V_{w,\theta}$, $V_{c,\theta}$ οι αντίστοιχες ταχύτητες. Για την απλοποίηση του προβλήματος και με δεδομένη τη συμμετρική τοποθέτηση των ξύλινων στοιχείων στο δομικό στοιχείο μπορεί εύλογα να θεωρηθεί ότι και η $\theta^{(c)} = 45^o$. Η υπόθεση αυτή μέσω της Σχέσης (9) εισάγει εμμέσως την παραδοχή ότι $V_{w,\theta} \approx V_{c,\theta}$, η ορθότητα της οποίας εξαρτάται κυρίως από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των δύο υλικών που επηρεάζουν την ταχύτητα του υπερήχου. Σημειώνεται ότι αποκλίσεις της τάξεως του 5% είναι αναμενόμενες και θεωρούνται αποδεκτές σε περιπτώσεις εμμέσων μεθόδων μέτρησης της αντοχής δομικών υλικών όπως η προτεινόμενη. Σε κάθε περίπτωση η εξίσωση (9) μπορεί ενδεχομένως να αξιοποιηθεί για την διόρθωση των τιμών των υπολογιζόμενων μεγεθών, εάν βέβαια κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο (μεγάλη απόκλιση στην τιμή της γωνίας $\theta^{(c)}$).

Με βάση την παραπάνω παραδοχή εύκολα προκύπτει γεωμετρικά ότι $d_c = \sqrt{2}d_2$ και, ανάλογα με την εξίσωση (8), μπορεί να υπολογισθεί η ταχύτητα του υπερήχου στο δομικό στοιχείο:

$$V_{c,\theta} = d_c / t_c \tag{10}$$

Ωστόσο, η ως άνω προσδιορισθείσα ταχύτητα αφορά το διαδιδόμενο υπό γωνία θ (εδώ 45°) κύμα, ενώ η γνωστή διαδικασία μέτρησης λαμβάνει υπ' όψιν την ταχύτητα του δεσπόζοντος διαμήκους κύματος, η οποία και μετράται όταν τα στελέχη της συσκευής τοποθετούνται ιδανικά (σε απέναντι παρειές). Η ζητούμενη ταχύτητα V_c δύναται να υπολογιστεί από τη $V_{c,\theta}$ θεωρώντας ότι η σχέση τους εκφράζεται από την παραπάνω εξίσωση (6). Για την εφαρμογή της σχέσης αυτής στο δομικό στοιχείο θεωρείται ότι $V_0 = V_{90} = V_c$, υπόθεση η οποία ισχύει για την περίπτωση υλικών που θεωρούνται ομογενή (όπως το σκυρόδεμα) και είναι αποδεκτή υπό συνθήκες σε στοιχεία τοιχοποιίας από άλλα υλικά, για τα οποία συνήθως θεωρείται ένα «ισοδύναμο» ομοιογενές υλικό για τις ανάγκες των υπολογισμών. Σύμφωνα με τις παραδοχές αυτές από τη εξίσωση (6) προκύπτει για την περίπτωση του δομικού υλικού:

$$V_{c,\theta} = V_c^{\,n/2-1} \tag{11}$$

Σημειώνεται ότι η παραπάνω σχέση αφορά την τοιχοποιία, επομένως οι τιμές της εμπειρικής σταθεράς n που αναφέρθηκαν προηγουμένως δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ωστόσο, μία ενδεικτική τιμή για τη σταθερά αυτή μπορεί να προκύψει από τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης που ούτως ή άλλως πραγματοποιούνται κατά τις μελέτες αποτίμησης της ικανότητας υφιστάμενων κτιρίων. Οι σχετικοί Κανονισμοί (π.χ. Κανονισμός Επεμβάσεων, ΟΑΣΠ, 2013) απαιτούν να συνοδεύονται οι έμμεσες μέθοδοι διακρίβωσης των ιδιοτήτων των δομικών υλικών στο πεδίο από άμεσες, εργαστηριακές, σε μικρό αριθμό δοκιμίων που λαμβάνονται για το σκοπό αυτό. Τα

αποτελέσματα των αμέσων μεθόδων χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση των εμμέσων διαδικασιών (π.χ. υπερήχων) με στόχο την αύξηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

Αξιοποιώντας την παραπάνω λογική, στην παρούσα μέθοδο προτείνεται η λήψη τριών τυπικών δοκιμίων τοιχοποιίας από το υπό μελέτη κτίριο. Στα δοκίμια αυτά πραγματοποιούνται μετρήσεις υπερήχων με την προτεινόμενη διάταξη ώστε να προκύψει η εκτιμώμενη ταχύτητα υπό γωνία $V_{c,\theta}$, σύμφωνα με τη διαδικασία που παρουσιάσθηκε παραπάνω. Ακολούθως τα δοκίμια υποβάλλονται σε δοκιμές άμεσης θλίψης με στόχο τον υπολογισμό μίας ενδεικτικής τιμής της θλιπτικής αντοχής $f_{c,est}$. Χρησιμοποιώντας την τιμή αυτή προσδιορίζεται αρχικά το εκτιμώμενο στατικό μέτρο ελαστικότητας E_{st} (εξίσωση (4)), ακολούθως το εκτιμώμενο δυναμικό μέτρο ελαστικότητας E_d (εξίσωση (3)) και, τέλος, η εκτιμώμενη, συμβατή με τη θλιπτική αντοχή των δοκιμίων, ταχύτητα $V_{c,est}$ (εξίσωση (2)). Οπότε από την εξίσωση (11) μπορεί να εκτιμηθεί η τιμή του n για την τοιχοποιία του υπό μελέτη κτιρίου:

$$n = 2\left(1 + \frac{\log V_{c,\theta}}{V_{c,est}}\right) \tag{12}$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ανωτέρω διαδικασία εφαρμόσθηκε στο εργαστήριο, χρησιμοποιώντας μία παρτίδα τυπικών κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος (ακμής 150mm) που αντιπροσωπεύουν την υπό εξέταση τοιχοποιία και σφηνοειδή παρεμβλήματα από ξύλο. Οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί που αφορούν τα ξύλινα στοιχεία αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα της παρούσης. Για τα δοκίμια σκυροδέματος, αρχικά παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν με βάση τη δοκιμή άμεσης θλίψης με στόχο τον προσδιορισμό της εκτιμώμενης ταχύτητας $V_{c,est}$ (Πίνακας 1) και, ακολούθως, η διαδικασία βαθμονόμησης της εμπειρικής σταθεράς n (Πίνακας 2).

Πίνακας 1: Αποτελέσματα πειραμάτων άμεσης θλίψης σε δοκίμια σκυροδέματος και επεξεργασία τους σύμφωνα με την προτεινόμενη διαδικασία (μέσες τιμές για τρία δοκίμια.

Πυκνότητα, ρ (kg/m^3)	2312
Μέγιστη θλιπτική δύναμη F_{max} (kg force)	50800
Αντοχή $f_{c,est}$ (MPa)	23.02
Στατικό μέτρο ελαστικότητας Est (Σχέση 3, GPa)	22.69
Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας E_d (Σχέση 2, GPa)	27.34
Εκτιμώμενη ταχύτητα υπερήχου $V_{c,est}$ (εξίσωση (1), km/sec)	**3.62**

Πίνακας 2: Αποτελέσματα της διαδικασία εργαστηριακού προσδιορισμού της εμπειρικής σταθεράς n σε τοιχοποιίες.

Θέση παρεμβλήματος d_2 (mm)	75
«Διαδρομή» στο σκυρόδεμα d_c (mm)	106
Χρόνος που αντιστοιχεί στο σκυρόδεμα t_c (Σχέση 5, μsec)	32.24
Ταχύτητα στο σκυρόδεμα υπό γωνία $V_{c,\theta}$ (Σχέση 8, km/sec)	3.29
Εμπειρική σταθερά n (εξίσωση 10)	**3.85**

Έχοντας πλέον βαθμονομήσει την εμπειρική σταθερά της μεθόδου, είναι δυνατή η πολλαπλή εφαρμογή της στην τοιχοποιία.. Σε κάθε θέση εφαρμογής η ζητούμενη ταχύτητα V_c που συνδέεται με τη θλιπτική αντοχή του δομικού μέλους προκύπτει από τις εξισώσεις (10) και (11), χρησιμοποιώντας την παραπάνω «εργαστηριακή» τιμή της σταθεράς n.

3. Συμπεράσματα – Πρόταση

Η παρούσα πειραματική μελέτη προσδιορίζει με ακρίβεια την αντοχή τοιχοποιίας μεγάλου πάχους με κατάλληλη τοποθέτηση των αισθητήρων πομπού και δέκτη, αλλά και χρήση παρεμβλημάτων. Για την εκτίμηση της ταχύτητας διόδου του ήχου μέσω της διεπιφάνειας ξύλου - τοιχοποιίας χρησιμοποιήθηκε ο νόμος του Snell, ο οποίος συνδέει την ταχύτητα διάδοσης του κύματος στη διεπιφάνεια δύο υλικών. Προσδιορίστηκε από τη μέτρηση της ταχύτητας του ήχου στα δύο υλικά η αντοχή της τοιχοποιίας σε πειραματική βάση στο εργαστήριο μας με βάση την πειραματική διάταξη που εκθέσαμε ανωτέρω.

Η προτεινόμενη μελέτη παρέχει μια εύκολη και μεγάλης ακρίβειας διαδικασία εύρεσης της αντοχής της τοιχοποιίας, καθ' όσον η ενδεδειγμένη μέθοδος των υπερήχων με τους αισθητήρες σε αντικριστές θέσης δεν είναι πάντα εφαρμόσιμη ή δεν μπορεί να υπολογίσει την ταχύτητα του ήχου σε τοιχοποιίες μεγάλου πάχους.

4. Βιβλιογραφία

Κακαβάς Π. Κ. και Λέμης - Πετρόπουλος Π., "Τεχνολογία Δομικών Υλικών (2η έκδοση)", 2016, Θεσσαλονίκη, εκδ. Ζήση.

Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ), "ΚΑΝ.ΕΠΕ. – Κανονισμός Επεμβάσεων", 2013, Αθήνα.

Σπανός Χ, Σπιθάκης Μ. και Τρέζος Κ., "Μέθοδοι για την επιτόπου αποτίμηση των χαρακτηριστικών των υλικών", 2002, Πρακτικά-Διδακτικά εγχειρίδια ΤΕΕ.

Τρέζος Κ., Γεωργίου Κ. και Μαραβέλιας Χ., Τεχνικά Χρονικά Α 13(2), 27-44, 1993.

Τριανταφύλλου Α. Χ., "Δομικά Υλικά", 2010, Πάτρα, αυτοέκδοση.

Armstrong J. P., Patterson D. W. and Sneckenberger J. E., "Comparison of three equations for predicting stress wave velocity as a function of grain angle", Wood and Fiber Science, 23(1), p.p. 32-43, 1991.

Hankinson R. L., "Investigation of crushing strength of spruce at varying angles of grain", Air Service Information Circular, 3(259), 1921.

Nayfeh A. H., "Wave propagation in layered anisotropic media with applications to composites", 1995, Elsevier.

Neville A. M., "Properties of Concrete 3rd edition", 1981, Pitman Books Lt., London.

Smith I., Landis E. and Gong M., "Fracture and Fatigue in Wood", 2003, Elsevier.

Wendehorst R., "Δομικά Υλικά, 3η Έκδοση", 2009, Αθήνα, εκδ. Μ. Γκιούρδας.

Xu H., Xu G., Wang L. and Yu L., “Propagation behavior of acoustic wave in wood”, Journal of Forestry Reasearch, 25(3), p.p. 671-676, 2014.