

Πιλοτική ανάπτυξη Μη Καταστροφικού Ελέγχου για την εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος

New Non Destructive Technique for the Assessment of Concrete Compressive Strength

Μιχαήλ Παπαχριστοφόρου¹, Στέλιος Ξανθός²

Λέξεις κλειδιά: μη καταστροφικές δοκιμές, σκυρόδεμα, εκτίμηση θλιπτικής αντοχής,
Key words: non destructive testing, concrete, assessment of compressive strength

ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε πιλοτική ανάπτυξη μιας νέας μεθόδου για την εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, μέσω συσχέτισμού της με α) την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνει κρουστικό δρέπανο κατά τη διάτρηση του σκυροδέματος, β) με το χρόνο που απαιτείται για να εισχωρήσει το τρυπάνι μέσα στο σκυρόδεμα μέχρι ένα ορισμένο βάθος και γ) με τη διάμετρο του τρυπανιού. Ελέγχθηκαν δείγματα σκυροδέματος διαφορετικής κατηγορίας αντοχής (C16/20, C20/25, C30/37) και τρυπάνια διαφορετικής διαμέτρου (6 και 10 mm) για τη βαθμονόμηση της μεθόδου. Τα αποτελέσματα ήταν πολύ ενθαρρυντικά, αφού παρατηρήθηκε συσχέτιση των μετρούμενων μεγεθών (ηλεκτρική ισχύς, ταχύτητα εισχώρησης) με την αντοχή του σκυροδέματος, ανοίγοντας το πεδίο για την περαιτέρω εξέλιξη της μεθόδου. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπάρχουσες, όπως ταχύτητα μέτρησης, μικρή επεμβατικότητα, πραγματοποίηση ελέγχου ακόμα και αν υπάρχει επίχρισμα, έλεγχος του σκυροδέματος σε βάθος, χαμηλό κόστος εξοπλισμού και δυνατότητα ελέγχου στοιχείων με μικρό πάχος.

ABSTRACT: In this paper, the evaluation of the drilling energy is regarded as a method for the assessment of concrete compressive strength. The calibration of the method was carried out by measuring the total drilling energy needed for drilling specimens of various strength categories (C16/20, C20/25, C30/37). Drill diameter (6 and 10 mm) was also a test parameter. Results are very promising since correlation between drilling energy and concrete strength was observed.

¹Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,
email: papchr@civil.auth.gr

²Αν. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Αυτοματισμού ΤΕ, Α.Τ.Ε.Ι.Θ.
e-mail: xanthos@autom.teithe.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος (ΜΚΕ) των χαρακτηριστικών του σκυροδέματος σε σημαντικά έργα υποδομής που έχουν κατασκευαστεί, όπως γέφυρες, φράγματα, λιμενικά έργα, αλλά και σε κτίρια κατοικίας και επαγγελματικής στέγης, για έλεγχο επάρκειας ή για μελέτη ενίσχυσης-αποκατάστασης ήταν ανέκαθεν πολύ σημαντικός λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει έναντι των καταστροφικών ελέγχων. Τα πλεονεκτήματα αυτά που έχουν αναγνωριστεί από τους μηχανικούς στην πράξη είναι η ταχύτητα της μέτρησης, η δυνατότητα ελέγχου επιτόπου στο έργο, η μόνιμη καταγραφή των αποτελεσμάτων, η διεξαγωγή ελέγχου σε πολλά σημεία της κατασκευής με σχετικά χαμηλό κόστος, η δυνατότητα πραγματοποίησης ελέγχου κατά τη διάρκεια λειτουργίας καθώς επίσης και απομακρυσμένου ελέγχου και επιτήρησης με χρήση αυτοματοποιημένων συστημάτων και κυρίως, η καθόλου ή ελάχιστη παρέμβαση που πραγματοποιείται στο υλικό χωρίς να επηρεάζεται η ακεραιότητα του. Τα τωρινά δεδομένα, δηλαδή η σχετικά μεγάλη ηλικία των κατασκευών από σκυρόδεμα, η χαμηλή ποιότητα κατασκευής και υλικών των προηγούμενων δεκαετιών όπου δεν δίνονταν μεγάλη σημασία στην ανθεκτικότητα, το κανονιστικό και νομικό πλαίσιο (Κανονισμός Επεμβάσεων, Νόμος αυθαιρέτων για έλεγχο στατικής επάρκειας κτλ.) και η ανάγκη για καλύτερο καταμερισμό των ελάχιστων οικονομικών πόρων σε περιπτώσεις όπου υπάρχει μεγαλύτερο πρόβλημα καταδεικνύουν ακόμα περισσότερο τη σημαντικότητα των ΜΚΕ που ήδη χρησιμοποιούνται (πχ. υπέρηχοι, κρουσίμετρο) και αφήνουν περιθώριο για ανάπτυξη και νέων μεθόδων που παρουσιάζουν ακόμα περισσότερα πλεονεκτήματα.

Οι πιο διαδεδομένοι ΜΚΕ κατά τον έλεγχο μιας κατασκευής σκυροδέματος είναι η κρουσιμέτρηση και η σονομέτρηση. Στην πρώτη μέθοδο, η αναπήδηση του εμβόλου που επιταχύνεται με ελατήριο και κτυπά την επιφάνεια του σκυροδέματος συσχετίζεται με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Ο έλεγχος με κρουσίμετρο εξετάζει μόνο την επιφανειακή κατάσταση του σκυροδέματος και απαιτεί μια προεργασία καθαρισμού πριν τον έλεγχο. Στην σονομέτρηση, μετράται η ταχύτητα διέλευσης των υπερήχων μέσα από το σκυρόδεμα η οποία επίσης συσχετίζεται με τη θλιπτική αντοχή. Καθαρισμός της επιφάνειας και χρήση μέσου σύζευξης υλικού-αισθητήρων (πχ. τζελ, γλυκερίνη, γράσο κ.α.) είναι απαραίτητα για τη διεξαγωγή του ελέγχου. Βασικά μειονεκτήματα των δυο μεθόδων είναι ότι απαιτούν πρόσβαση στην επιφάνεια του σκυροδέματος (πχ. αδυναμία διεξαγωγής ελέγχου αν υπάρχει επίχρισμα) και ένα ελάχιστο πλάτος επιφάνειας μέτρησης ώστε ο εξοπλισμός να έρθει σε επαφή με το υλικό.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε πιλοτική ανάπτυξη μιας νέας μεθόδου για την εκτίμηση της σημαντικότερης ίσως ιδιότητας που χαρακτηρίζει το σκυρόδεμα, της θλιπτικής αντοχής του, που στηρίζεται στην μέτρηση της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει ένα κοινό κρουστικό δράπανο για τη διάτρηση του σκυροδέματος μέχρι ορισμένο βάθος. Σε αντίθεση με τη διαδικασία διάτρησης σε όλκιμα υλικά (πχ. χάλυβας) τα οποία διέπονται από τη διάδοση της θραύσης υπό συνθήκες εφελκυσμού (συνεχής αποκοπή, continuous chipping),

στα ψαθυρά υλικά όπως το σκυρόδεμα το σχήμα του τρυπανιού έχει τέτοια μορφή ώστε να επικρατούν θλιπτικές τάσεις μπροστά από το εργαλείο (Chiaia, B. 2001). Αυτός είναι και ο λόγος που τα τρυπάνια για χάλυβα έχουν διαφορετική μορφή από αυτά για σκυρόδεμα, αλλά και το ότι απαιτείται μηχανισμός κρούσης για τη διάτρηση σκυροδέματος ο οποίος και καταναλώνει το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας (Carpinteri A, 2002).

Η λογική της καταγραφής της ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάτρηση ψαθυρών υλικών έχει μελετηθεί στο παρελθόν. Σύμφωνα με οδηγία της RILEM, με αυτό τον τρόπο μπορεί να ελεγχθεί η ανθεκτικότητα τσιμεντοκονιαμάτων (RILEM TC 177-MDT, 2004). Ο Felicetti προσπάθησε να συσχετίσει την αντίσταση σε διάτρηση του σκυροδέματος με το επίπεδο βλάβης μετά από έκθεση του σε υψηλές θερμοκρασίες (Felicetti, 2006). Η εταιρία μηχανολογικού εξοπλισμού SINT έχει αναπτύξει κατάλληλο εξοπλισμό με πατέντα για τον έλεγχο υλικών όπως μάρμαρο ή πέτρα όπου κατά τη διάτρηση με κρουστικό δράπανο υπό σταθερό ρυθμό διείσδυσης του τρυπανιού μετράται η δύναμη που απαιτείται για την προώθηση του (Sint technology).

Σε αυτή την εργασία, έγινε προσπάθεια συσχέτισης της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος με α) την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει το κρουστικό δράπανο κατά τη διάτρηση του σκυροδέματος, β) με το χρόνο που απαιτείται για να εισχωρήσει το τρυπάνι μέσα στο σκυρόδεμα μέχρι ένα ορισμένο βάθος και γ) με τη διάμετρο του τρυπανιού.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Κατάλληλος εξοπλισμός προσαρμόστηκε σε κοινό κρουστικό δράπανο μάρκας Black&Decker 750W με ταχύτητα περιστροφής περίπου 3100rpm (Εικόνα 1), ώστε να καταγραφεί κατά τη διάτρηση η ηλεκτρική ισχύς (σε W) που καταναλώνει, το βάθος διείσδυσης (mm) και ο χρόνος (s). Ελέγχθηκαν δείγματα σκυροδέματος διαφορετικής κατηγορίας αντοχής (C16/20, C20/25, C30/37) και τρυπάνια διαφορετικής διαμέτρου (6 και 10 mm μάρκας KRINO) για τη βαθμονόμηση της μεθόδου. Προτιμήθηκε η διάτρηση να πραγματοποιηθεί με τον συμβατικό τρόπο πιέζοντας το δράπανο κάθετα στην επιφάνεια σκυροδέματος και όχι προσαρμόζοντας το σε ειδική διάταξη που να εξασφαλίζει σταθερό ρυθμό διείσδυσης ή φορτίο προώθησης, ώστε η δοκιμή να είναι εύκολα εφαρμόσιμη στην πράξη. Τα δεδομένα καταγραφής μετρήθηκαν σε όλες τις περιπτώσεις μέχρι το τρυπάνι να διεισδύσει σε βάθος 30 mm. Σε δοκίμια σκυροδέματος από διαφορετική κατηγορία αντοχής, πραγματοποιήθηκαν 2 διατρήσεις. Δυστυχώς δεν στάθηκε δυνατόν να διεξαχθούν περισσότερες μετρήσεις γιατί ο μηχανισμός καταγραφής υπέστη βλάβη η οποία δεν μπορούσε να αποκατασταθεί μέσα στα χρονικά πλαίσια του συνεδρίου, ωστόσο το δείγμα κρίνεται ότι επαρκεί ώστε να εξαχθούν κάποια βασικά συμπεράσματα. Από τα δεδομένα καταγραφής αρχικά σχεδιάστηκε το διάγραμμα ηλεκτρικής ισχύος/χρόνου μέχρι το βάθος διείσδυσης των 30mm. Στη συνέχεια, από το εμβαδό που περικλείεται κάτω από την καμπύλη, δηλαδή το γινόμενο W·s, υπολογίστηκε η ενέργεια που καταναλώνεται



Σχήμα 1. Αριστερά, το δράπανο που χρησιμοποιήθηκε με το μετρητή διείδυσης του τρυπανιού και δεξιά ο μετρητής κατανάλωσης ισχύος

σε J. Με αυτό τον τρόπο, εξαλείφεται ο παράγοντας της πίεσης του δράπανου πάνω στο σκυρόδεμα. Για παράδειγμα, για μεγάλη ασκούμενη πίεση η ισχύς που καταναλώνει το δράπανο θα είναι μεγάλη και ο χρόνος διάτρησης μικρός, ενώ για χαμηλή πίεση η ισχύς θα είναι μικρότερη και ο χρόνος διάτρησης μεγαλύτερος με το γινόμενο $W \cdot s$ να παραμένει το ίδιο και στις δυο περιπτώσεις (αρχή διατήρησης ενέργειας), αρκεί η πίεση που ασκείτε να είναι η ελάχιστη ώστε να μπορεί να δουλέψει ο μηχανισμός κρούσης του δράπανου. Η συνολική ενέργεια που καταναλώθηκε μέχρι το τρυπάνι να φτάσει σε βάθος 10, 20 και 30 mm συσχετίστηκε με την θλιπτική αντοχή των σκυροδεμάτων η οποία μετρήθηκε με θραύση των δοκιμίων ίδιας κατηγορίας με ηλεκτρουδραυλική πρέσα. Πριν τη θραύση των δοκιμίων διενεργήθηκαν και έλεγχοι με κρουσίμετρο και σονόμετρο για σύγκριση με τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

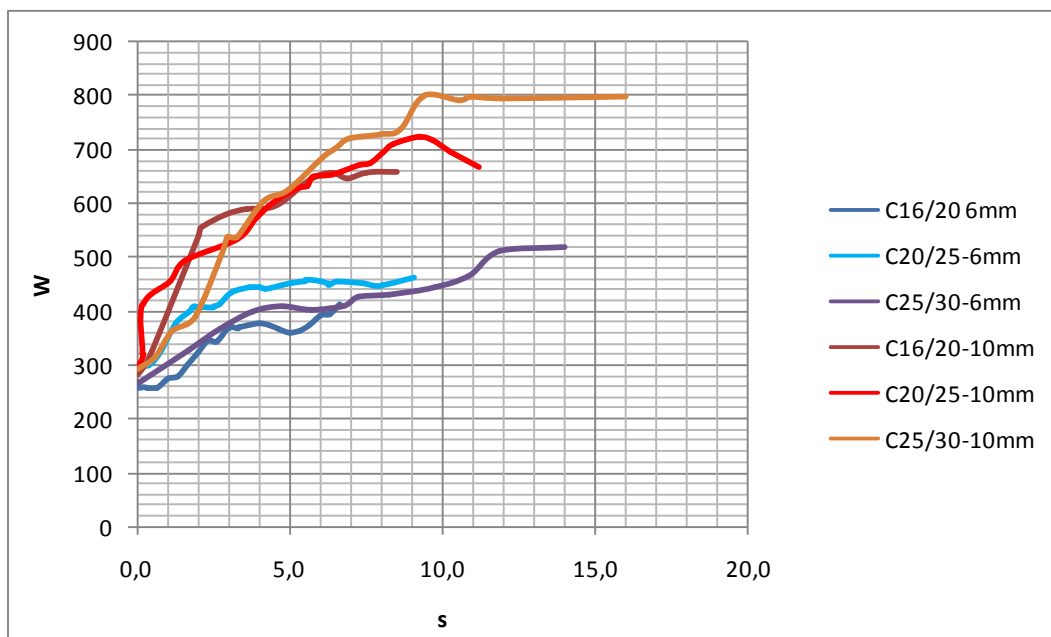
Οι τιμές που προέκυψαν από τις δοκιμές σονομέτρησης και κρουσιμέτρησης, καθώς και από την δοκιμή θλιπτικής αντοχής κύβου 15 cm δίνονται παρακάτω.

Πίνακας 1. Τιμές συμβατικών μη καταστροφικών δοκιμών και αντοχής σε θλίψη

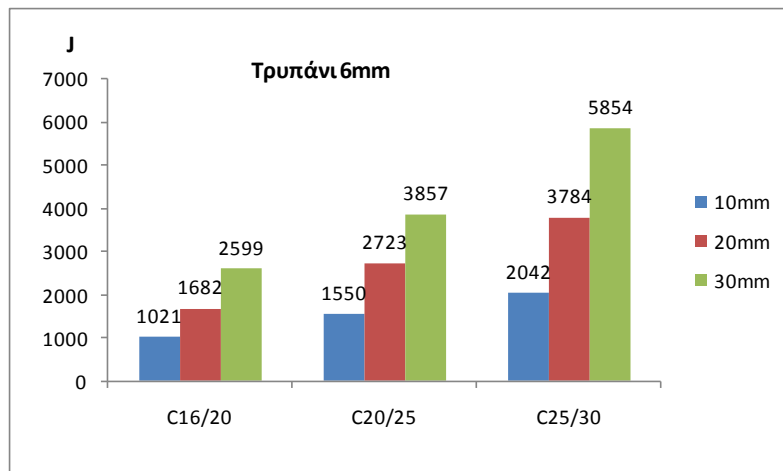
		C16/20	C20/25	C25/30
Κρουσίμετρο	Καταγραφή οργάνου	20-22	20-22	26-28
	Εκτίμηση θλιπτικής αντοχής κύβου (MPa)	16	16	30
Σονόμετρο	Ταχύτητα διέλευσης υπερήχων (m/s)	5208	4950	5119
	Εκτίμηση θλιπτικής αντοχής κύβου (MPa)	>30	28	>30
Θλιπτική αντοχή 28 ημερών (MPa)		30,0	33,0	39,0

Από τις παραπάνω τιμές φαίνεται ότι με το κρουσίμετρο και το σονόμετρο δεν μπορεί να γίνει διάκριση μεταξύ των σκυροδεμάτων C16/20 και C20/25. Επίσης, το κρουσίμετρο δίνει εκτίμηση θλιπτικής αντοχής αρκετά μικρότερη από την πραγματική.

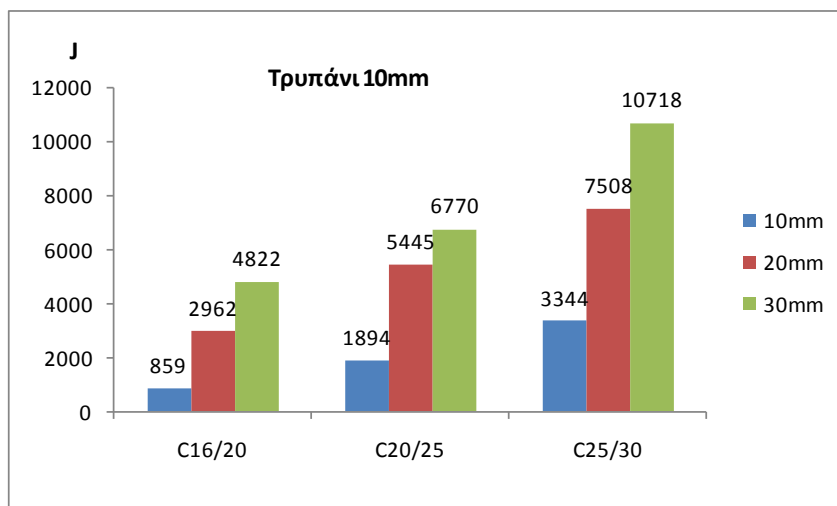
Στη συνέχεια ακολούθησε ο έλεγχος με την προτεινόμενη μέθοδο. Στο Σχήμα 2 δίνονται τα διαγράμματα ηλεκτρικής ισχύος/χρόνου για το τρυπάνι των 6 και 10 mm. Η χρήση τρυπανιού μεγαλύτερης διαμέτρου αυξάνει τις τιμές της ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνει το δράπανο κατά 45 με 50%. Επίσης αυξάνεται και ο απαιτούμενος χρόνος μέχρι το τρυπάνι να διεισδύσει στα 30 mm κατά 15-25%. Για τον ίδιο τύπο τρυπανιού, φαίνεται ότι για μεγαλύτερη κατηγορία σκυροδέματος απαιτείται περισσότερος χρόνος για να επιτευχθεί ο στόχος διείσδυσης των 30 mm. Η συγκεκριμένη παρατήρηση δείχνει ότι ο χρόνος διείσδυσης θα μπορούσε να αποτελέσει κριτήριο για την αντοχή του σκυροδέματος, αν μπορούσε να κρατηθεί σταθερή η ηλεκτρική ισχύς αυξομειώνοντας συνεχώς την δύναμη πίεσης που ασκείται στο δράπανο. Ωστόσο, κάτι τέτοιο είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί τεχνικά. Για αυτό το λόγο, απαραίτητος είναι ο υπολογισμός της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει το δράπανο κατά τη διάτρηση. Η ενέργεια αυτή υπολογίστηκε από το εμβαδό που περικλείεται κάτω από την καμπύλη W/s μέχρι το βάθος των 10, 20 και 30 mm και οι μέσες τιμές από τις μετρήσεις δίνονται στα Σχήματα 3 και 4.



Σχήμα 2. Τιμές ηλεκτρικής ισχύος και χρόνου για τις τρεις κατηγορίες σκυροδεμάτων και για τα τρυπάνια 6 και 10mm. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε μέχρι το τρυπάνι να διεισδύσει σε βάθος 30 mm



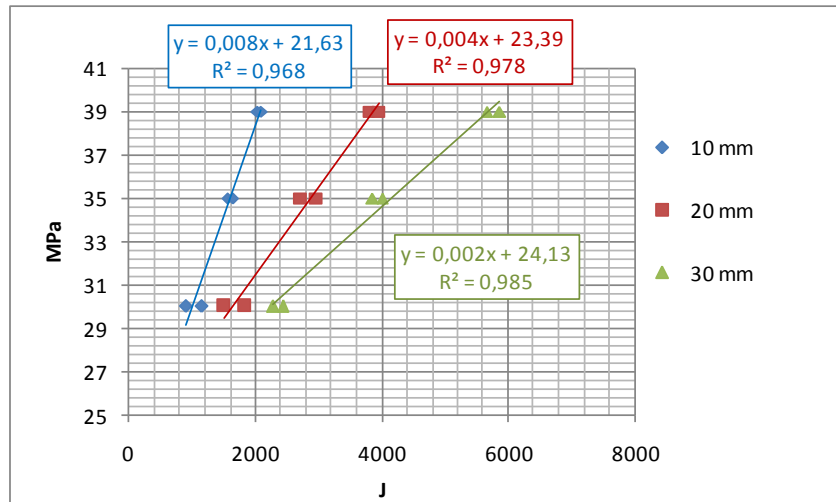
Σχήμα 3. Συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι τα 10, 20 και 30 mm διεύθυνσης του τρυπανιού των 6 mm για τις τρεις κατηγορίες αντοχής



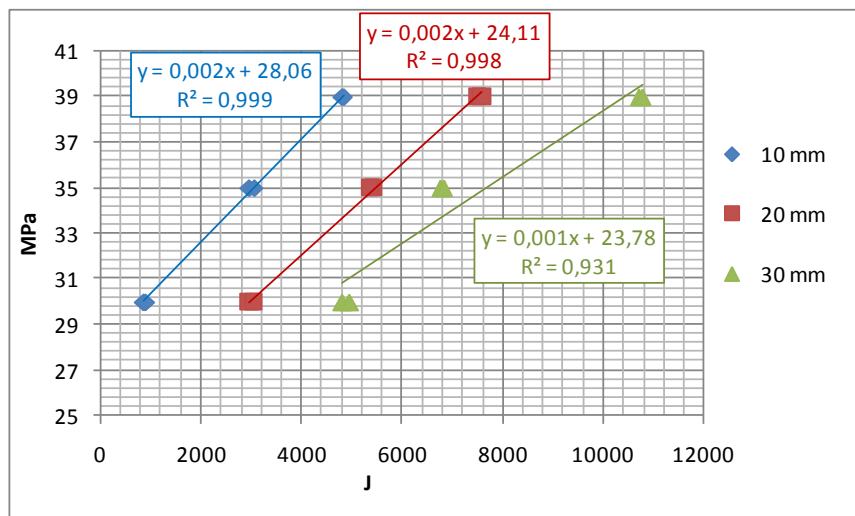
Σχήμα 4. Συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι τα 10, 20 και 30 mm διεύθυνσης του τρυπανιού των 10 mm για τις τρεις κατηγορίες αντοχής

Τα αποτελέσματα δείχνουν μια πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ ενέργειας και κατηγορίας αντοχής με την πρώτη να αυξάνεται για μεγαλύτερη κατηγορία σκυροδέματος, παρατήρηση που ισχύει και για τις δυο διαμέτρους τρυπανιού. Με αυτά τα δεδομένα, υλοποιήθηκε μια πρώτη βαθμονόμηση της μεθόδου, δηλαδή συσχέτιση της ενέργειας με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ώστε να προκύψουν εξισώσεις που να τις συνδέουν. Τα διαγράμματα από όπου

προέκυψαν οι εξισώσεις παλινδρόμησης που συσχετίζουν τα δυο μεγέθη δίνονται στα Σχήματα 5 και 6.

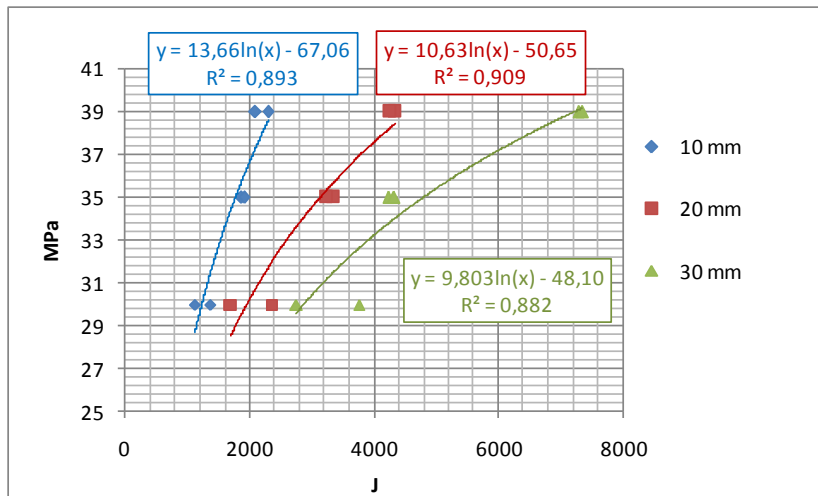


Σχήμα 5. Για το τρυπάνι των 6 mm, συσχέτιση ενέργειας με αντοχή για διαφορετικά βάθη διείσδυσης

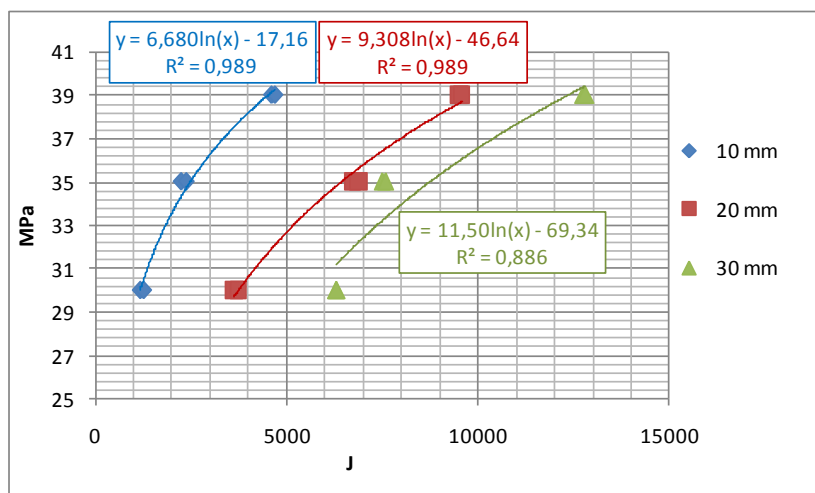


Σχήμα 6. Για το τρυπάνι των 10 mm, συσχέτιση ενέργειας με αντοχή για διαφορετικά βάθη διείσδυσης

Υπολογίστηκαν επίσης οι στιγμιαίες καταναλώσεις ενέργειας για τη διείσδυση των 10, 20 και 30 mm, ώστε σε αυτά τα βάθη ο χειριστής παίρνοντας την τιμή της ενέργειας να μπορεί να εκτιμήσει την θλιπτική αντοχή.



Σχήμα 7. Για το τρυπάνι των 6 mm, συσχέτιση στιγμιαίας ενέργειας στα βάθη των 10, 20 και 30 mm με την αντοχή



Σχήμα 8. Για το τρυπάνι των 10 mm, συσχέτιση στιγμιαίας ενέργειας στα βάθη των 10, 20 και 30 mm με την αντοχή

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη μέθοδο ελέγχου σκληρυμένου σκυροδέματος που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, συσχετίστηκε η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη διάτρηση σκυροδέματος με κρουστικό δράπανο με την θλιπτική αντοχή του. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε η συνολική ενέργεια που απαιτείται για τη διεύδυση του τρυπανιού σε βάθος 10, 20 και 30 mm σε δοκίμια σκυροδέματος διαφορετικής αντοχής (C16/20, C20/25, C30/37) καθώς και η στιγμιαία

κατανάλωση ενέργειας σε αυτά τα βάθη, ώστε ο ελεγκτής ενός έργου να μπορεί να εκτιμήσει την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε διαφορετικά βάθη από την επιφάνεια. Ελέγχθηκε επίσης η επίδραση της διαμέτρου του τρυπανιού. Τα πρώτα συμπεράσματα από την βαθμονόμηση της μεθόδου είναι ιδιαίτερω ενθαρρυντικά, αφού κατέστη δυνατό να γίνει διάκριση σκυροδεμάτων με διαφορά στην θλιπτική αντοχή της τάξης των 5 MPa. Στα ίδια δοκίμια, οι κρουσιμετρήσεις και σονομετρήσεις που διεξήχθησαν για λόγους σύγκρισης, δεν μπόρεσαν να διακρίνουν αυτή τη διαφορά αντοχής. Επιπλέον, πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθόδου σε σχέση με τις παραπάνω αποτελούν η ταχύτητα μέτρησης, η δυνατότητα πραγματοποίηση ελέγχου ακόμα και αν υπάρχει επίχρισμα, ο έλεγχος του σκυροδέματος σε βάθος, το χαμηλό κόστος εξοπλισμού, η ευκολία χειρισμού και η δυνατότητα ελέγχου στοιχείων με μικρό πάχος, όπως κονιαμάτων σύνδεσης τούβλων ή λιθοδομής. Όσον αφορά τη διάμετρο του τρυπανιού, το τρυπάνι διαμέτρου 10 mm φαίνεται ότι έχει καλύτερη ακρίβεια σε σχέση με αυτό των 6 mm, ειδικά μέχρι το βάθος διείσδυσης των 10 mm. Στα περαιτέρω βήματα για την εξέλιξη της μεθόδου περιλαμβάνονται ο έλεγχος μεγαλύτερου δείγματος δοκιμίων και με μεγαλύτερο εύρος αντοχών, η χρήση διαφορετικού τύπου δράπανου και τρυπανιών και η μελέτη της επίδρασης του μέγιστου κόκκου αδρανών, της υγρασίας του σκυροδέματος και του αριθμού των χρήσεων του τρυπανιού.

EΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν θερμά την εταιρία INTERBETON για τη προμήθεια δοκιμίων σκυροδέματος διαφορετικής κατηγορίας αντοχής.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Carpinteri A, Pugno N, “A fractal comminution approach to evaluate the drilling energy dissipation”. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol 26, (2002) 499–513

Chiaia B., “Fracture mechanisms induced in a brittle material by a hard cutting indenter”. *International Journal of Solids and Structures*, Vol 38, (2001) 7747-7768

Felicetti, R., “The drilling resistance test for the assessment of fire damaged concrete”. *Cement & Concrete Composites*, Vol 28, (2006) 321–329

RILEM TC 177-MDT: Masonry durability and on-site testing, RILEM Recommendation MDT. D.1 – Indirect determination of the surface strength of unweathered hydraulic cement mortar by the drill energy method. *Materials and Structures*, Vol 37, (2004) 485-487

Sint technology. Available at: <http://www.sintechnology.com>