

**Ο Έλεγχος του Σκυροδέματος με Καταστροφικές και Μη  
Καταστροφικές Μεθόδους**  
18<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ-ΕΜΠ-ΕΤΕΚ, 29-31/3/2018

**Concrete Testing by Destructive and  
Non Destructive Testing Methods**

**Ιωάννης Ν. ΠΡΑΣΙΑΝΑΚΗΣ\***

**Keywords:** ΜΚΕ-NDT, υπέρηχοι-ultrasounds, σκυρόδεμα-concrete, αντοχή θραύσης-fracture strength, φθορά-damage, μέτρο ελαστικότητας- moduli of elasticity.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η συνοπτική παρουσίαση των σημαντικότερων καταστροφικών και μη καταστροφικών μεθόδων (ΜΚΜ) για τον έλεγχο του σκυροδέματος, οι οποίες εφαρμόζονται για τον προσδιορισμό τόσο των μηχανικών χαρακτηριστικών του όσο και για την εύρεση τυχόν σοβαρών ατελειών στο εσωτερικό της μάζας του και γενικότερα για την εκτίμηση της ποιότητας του. Η σημασία της εφαρμογής των ΜΚΜ για τον έλεγχο του σκυροδέματος κρίνεται ουσιαστική λόγω του μεγάλου αριθμού ιδιοτήτων που είναι δυνατόν να ελεγχθούν, της άμεσης διαθεσιμότητας των πληροφοριών, του χαμηλού σχετικά κόστους του απαιτούμενου εξοπλισμού και της δυνατότητας που προσφέρουν ορισμένες από αυτές τις μεθόδους για τον επί τόπου έλεγχο του συνόλου της κατασκευής που μπορεί να βρίσκονται ήδη και σε λειτουργία. Από αυτές τις μεθόδους στην εργασία αυτή εφαρμόζεται μόνο η ΜΚΜ των υπερήχων σε ένα τύπο σκυροδέματος, που έχει κατασκευαστεί πριν από 45 χρόνια στο ΕΜΠ και που έχει εξεταστεί αναλυτικά τόσο με καταστροφικές όσο και με μη τη ΜΚΜ των υπερήχων.

**ABSTRACT:** This paper is the continuity, the evolution and the completion of an experimental work that was started from 1971. In this paper is controlled the variation of the properties of a specific type concrete 28 year old, whose characteristics were known on 7, 28, 36 and 90 days. Beyond the destructive tests (compression, splitting, tension and bending), this concrete was studied with the non-destructive method of ultrasounds. Moreover was determined the relation

---

\*Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ, Πρόεδρος της ΕΛΕΜΚΕ, Τομέας Μηχανικής, ΣΕΜΦΕ - ΕΜΠ, E-mail: [prasian@central.ntua.gr](mailto:prasian@central.ntua.gr).

between the compressive strength of this concrete and the ultrasonic longitudinal waves velocity, as well as the dynamic modulus of elasticity. The main objective of the paper is to control the changes in the quality of concrete after a long period of time and to contribute to the development of a nondestructive testing method for the determination of concrete strength in structures. The presented approach, that seems promising for such development, uses the velocity of ultrasonic waves in concrete.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως είναι γνωστό, το σκυρόδεμα είναι ένα τεχνητό σύνθετο υλικό, που κατασκευάζεται από αδρανή υλικά, τσιμέντο και νερό, σε κατάλληλες αναλογίες. Οι διαδικασίες μελέτης και παρασκευής του πρέπει να είναι τέτοιες ώστε ως νωπό να έχει: (α) ομοιογένεια και (β) την απαραίτητη εργασιμότητα, για το είδος της κατασκευής, ώστε να μπορεί να διαστρωθεί και να συμπυκνωθεί με τα διαθέσιμα μέσα, και ως σκληρυμένο να έχει: (α) την απαιτούμενη αντοχή, (β) την απαιτούμενη ανθεκτικότητα και (γ) τις πρόσθετες μηχανικές ιδιότητες που απαιτούνται ανάλογα με το είδος της κατασκευής, Τάσιος Θ., Δεμίρης Κ. (1968), Jones R. and Facsoaru I. (1969).

Επειδή το υλικό αυτό τοποθετείται στις κατασκευές για την ανάληψη κυρίως θλιπτικών φορτίων, λόγω της ιδιότητας να εμφανίζει σε αυτά τα φορτία υψηλή αντίσταση, ελέγχεται συνήθως με τον προσδιορισμό της αντοχής του μέσω της δοκιμής θλίψεως κυλινδρικών ή κυβικών δοκιμίων, ηλικίας 28 ημερών. Εκτός από τον έλεγχο της αντοχής του σε θλίψη, εκτελούνται και οι δοκιμές, σπανιότερα όμως, του εφελκυσμού (αντιδιαμετρικής θλίψεως), της κάμψης και της τριαξονικής καταπόνησης. Σήμερα δε, γίνεται προσπάθεια για τον έλεγχο κατασκευών από σκυρόδεμα με ΜΚΜ (υπέρηχοι, ακτινογραφίες με ακτίνες x ή γ και ακουστική εκπομπή), όπως και με την κρουστική μέθοδο και τη μέθοδο της εξόλκευσης ήλου κ.α. Οι τελευταίες μέθοδοι ελέγχου του σκυροδέματος, εμφανίζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στον έλεγχο κατασκευών από σκυρόδεμα που έχουν βλάβες από διάφορες αιτίες όπως από σεισμούς, πυρκαγιά και κόπωση.

Τα δοκίμια της παρούσης έρευνας (κύλινδροι, κύβοι και πρισματικοί δοκοί) είχαν κατασκευασθεί από τον συγγραφέα την περίοδο 1971-75 στο ΕΑΥ του ΕΜΠ και είχαν ελεγχθεί σε θλίψη, αντιδιαμετρική θλίψη, καθαρό εφελκυσμό, κάμψη και τριαξονική καταπόνηση (εφελκυσμό-θλίψη και πλευρική θλίψη). Όλα τα αποτελέσματα είχαν δημοσιευθεί τότε τόσο στα Τεχνικά Χρονικά, Θεοχάρης Π.Σ., Πρασιανάκης Ι.Ν. (1974) όσο και στο γνωστό περιοδικό Magazine of Concrete Research, Theocaris, P.S. and Prassianakis I. N. (1975).

Ένας σημαντικός αριθμός εκ των δοκιμίων αυτών είχαν διαφυλαχθεί επιμελώς μέχρι το 2008 στον υγρό θάλαμο του Ε.Α.Υ. του Ε.Μ.Π. και τότε ελέγχθηκαν σε θλίψη, αντιδιαμετρική θλίψη και κάμψη. Οι αντοχές και το στατικό μέτρο ελαστικότητας που προέκυψαν από αυτές τις καταπονήσεις συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές που προήλθαν από το ίδιο υλικό ηλικίας όμως 7, 28, 36 και 90 ημερών, 28 και 30 ετών. Όλα τα χρησιμοποιηθέντα σε αυτήν την έρευνα δοκίμια σκυροδέματος ηλικίας 28 και 30 ετών ελέγχθηκαν και με τη ΜΚΜ των υπερήχων πριν από τον καταστροφικό τους έλεγχο, δια της οποίας προσδιορίστηκαν η ταχύτητα των διαμηκών υπερηχητικών κυμάτων, το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας και η τάση θραύσεως. Τέλος, εξετάστηκε η διατομή θραύσεως των θραυσθέντων δοκιμίων ηλικίας 28 ημερών, η μορφή της οποίας, Σχήμα 3, εμφανίζει σημαντικές διαφορές σε θραύση από απλό εφελκυσμό και σε θραύση σε σύνθετη καταπόνηση με εφελκυσμό και πλευρική υδροστατική πίεση.

## **ΤΣΙΜΕΝΤΟ – ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ**

Το τσιμέντο υπάρχει στη φύση τουλάχιστον πριν από 12 εκατομμύρια χρόνια. Όταν η γη υφίστατο έντονες γεωλογικές μεταβολές συνέβαινε φυσική παραγωγή τσιμέντου. Αυτό το φυσικό τσιμέντο ήταν και το πρώτο που χρησιμοποίησαν οι άνθρωποι ως δομικό υλικό. Το αρχαιότερο γνωστό σήμερα σκυρόδεμα, 7.000 π.Χ., βρίσκεται στη νότια Γαλιλαία του Ισραήλ. Οι Φοίνικες ανακάτευαν πριν από 3.000 χρόνια στη λάσπη τέφρα ηφαιστείου και δημιουργούσαν ένα μίγμα που στερεοποιείται και σκληραίνει με την προσθήκη νερού. Τις ίδιες περίπου τεχνικές χρησιμοποιούσαν επίσης και οι αρχαίοι Έλληνες οικοδόμοι πριν από 3.000 χρόνια, κατασκευάζοντας σκυρόδεμα με θρυμματισμένη πέτρα και χώμα της Σαντορίνης-Θηραϊκή γη. Το 800 π.Χ. Κρήτες και Κύπριοι χρησιμοποιούσαν λάσπη κτισίματος που είχε πολύ υψηλότερες αντοχές από τις μετέπειτα Ρωμαϊκές εφαρμογές. Οι ρωμαίοι το 300 - 476 μ.Χ. χρησιμοποιούσαν ποζολάνες από την Pozzuoli, πόλη που βρισκόταν κοντά στο ηφαίστειο Βεζούβιος για να κατασκευάσουν σκυρόδεμα.

Η σύγχρονη ιστορία του τσιμέντου αρχίζει το έτος 1824, όταν ο Άγγλος οικοδόμος, Joseph Aspdin δημιούργησε ένα μίγμα αργίλου και ασβεστόλιθου, το οποίο «έψησε» σε κλίβανο. Αυτό το μίγμα ήταν ο τελευταίος πρόδρομος του σημερινού υδραυλικού τσιμέντου και ονομάστηκε «τσιμέντο Πόρτλαντ», λόγω του χρώματός του που μοιάζει με το πέτρωμα της χερσονήσου Portland στην Αγγλία.

## **ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είχαν κατασκευαστεί την περίοδο 1971-75 και ένας σημαντικός αριθμός από αυτά είχαν ελεγχθεί σε όλες τις μορφές καταπόνησης από τους Πρασιανάκη και Θεοχάρη τότε, ενώ είχε προσδιοριστεί τόσο το αρχικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας όσο και ο λόγος Poisson. Όλα τα δοκίμια είχαν κατασκευαστεί από την ίδια παραλαβή τσιμέντου Portland Ελληνικού τύπου με ασβεστολιθική άμμο και ασβεστολιθικά χαλίκια διαμέτρου από 7 έως 30 mm. Ο λόγος αδρανών – τσιμέντου ήταν 6.46 κατά βάρος, ο λόγος νερού – τσιμέντου ήταν 0.53 κατά βάρος.

Τα δοκίμια του σκυροδέματος σε διάφορους τύπους και διαστάσεις κατασκευάζονταν σε ομάδες των έξι δοκιμίων. Για την κατασκευή όλων των δοκιμίων η ανάμειξη του μίγματος των αδρανών γινόταν εντός μηχανικού αναμεικτήρα και για χρόνο ανάμειξης 2 λεπτών. Σε κάθε περίπτωση η ανάμειξη πραγματοποιείτο σε ποσότητα σκυροδέματος κατάλληλη για την παρασκευή έξι δοκιμίων. Ο χρόνος συμπίκνωσης του σκυροδέματος με τη χρήση δονητή ήταν 20sec και με την δονητική τράπεζα 50sec. Όλα τα δοκίμια παρέμεναν στα καλούπια τους κατά τις πρώτες 24 ώρες και στη συνέχεια εντός δεξαμενής με νερό θερμοκρασίας περιβάλλοντος πάνω σε ξύλινη εσχάρα και συνολικά για 6 ημέρες. Στη συνέχεια τα δοκίμια ετοποθετούντο εντός υγρού θαλάμου με μέση σχετική υγρασία 80% και μέση θερμοκρασία 20°C και εκεί παρέμεναν μέχρι την ημέρα της δοκιμής τους.

Το αρχικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας είχε μετρηθεί, για τα κυλινδρικά δοκίμια ηλικίας 28 ημερών, διαμέτρου 15 cm και ύψους 30 cm, ίσο με  $E_s = 4.08 \cdot 10^5$  kp/cm<sup>2</sup> ή 40.00GPa. Ο λόγος Poisson είχε μετρηθεί, για τις πρισματικές δοκούς (ύψους 50 cm και τετραγωνικής διατομής πλευράς 10 cm) υποβαλλόμενες σε απλό εφελκυσμό, με χρήση ηλεκτρομηκυσιομέτρων, ίσος με 0.26. Οι αντίστοιχες τάσεις θραύσεως για τα κυλινδρικά, τα κυβικά ακμής 20 cm δοκίμια και τις πρισματικές δοκούς παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 1. Στο Σχήμα 1 φαίνεται η μεταβολή της αντοχής σκυροδέματος συναρτήσει της ηλικίας του για τη δοκιμή της θλίψεως κυλινδρικών και κυβικών δοκιμίων.

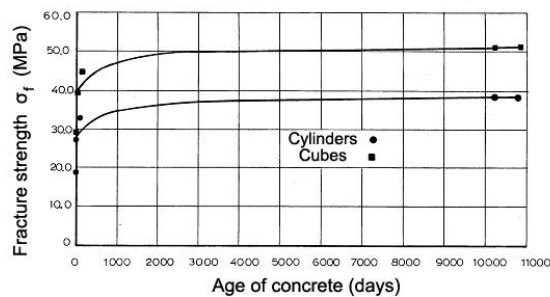
Όλα τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο τους και με υπερήχους, είχαν φυλαχτεί μέσα στον προαναφερθέντα υγρό θάλαμο του ΕΑΥ και ήταν απαλλαγμένα από κάθε είδους εξωτερική επίδραση (αέρας, ήλιος, κ.λπ.), η οποία ενδεχομένως θα αλλοίωνε τις ιδιότητες τους και θα καθιστούσε αδύνατη τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνα που είχαν προκύψει πριν από 28 χρόνια. Το αντίστοιχο στατικό μέτρο ελαστικότητας βρέθηκε για τα κυλινδρικά δοκίμια σε ηλικία 28 ετών  $E_s = 39,8$ GPa.

Κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος ηλικίας 28 ημερών ελέγχθηκαν σε καθαρό εφελκυσμό, και σε τριαξονική καταπόνηση με αξονικό εφελκυσμό και πλευρική θλίψη όπως και με αξονική θλίψη και πλευρική επίσης θλίψη, Πίνακας 2. Στο Σχήμα 2 φαίνεται η συσκευή της τριαξονικής καταπόνησης και η κατασκευασθείσα περιβάλλουσα θραύσεως των κύκλων του Mohr.

**Πίνακας 1.** Τάσεις θραύσης δοκιμίων σκυροδέματος υποβαλλόμενων σε δοκιμές θλίψης, εφελκυσμού, αντιδιαμετρικής θλίψης και κάμψης

| Ηλικία σκυροδέματος (ημέρες-χρόνια) | ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ          |      |                    |      |                      |      | ΔΟΚΟΙ              |      |                    |      | ΚΥΒΟΙ              |      |
|-------------------------------------|--------------------|------|--------------------|------|----------------------|------|--------------------|------|--------------------|------|--------------------|------|
|                                     | Θλίψη              |      | Εφελκυσμός         |      | Αντιδιαμετρική θλίψη |      | Εφελκυσμός         |      | Κάμψη              |      | Θλίψη              |      |
|                                     | M.T.               | Σ.Α. | M.T.               | Σ.Α. | M.T.                 | Σ.Α. | M.T.               | Σ.Α. | M.T.               | Σ.Α. | M.T.               | Σ.Α. |
|                                     | kp/cm <sup>2</sup> |      | kp/cm <sup>2</sup> |      | kp/cm <sup>2</sup>   |      | kp/cm <sup>2</sup> |      | kp/cm <sup>2</sup> |      | kp/cm <sup>2</sup> |      |
| 7                                   | 192.5              | 28.3 | 21.4               | 0.9  | 21.5                 | 3.5  | 26.0               | 0.4  | 52.0               | 4.9  | 291.2              | 15.8 |
| 28                                  | 271.2              | 16.5 | 22.5               | 2.4  | 27.0                 | 4.0  | 29.2               | 1.5  | 55.1               | 6.6  | 395.0              | 11.2 |
| 36                                  | 280.0              | 16.5 | 24.7               | 3.6  | -                    | -    | -                  | -    | -                  | -    | -                  | -    |
| 90                                  | 330.0              | 24.5 | 24.9               | 3.0  | 25.8                 | 8.4  | 32.5               | 1.0  | 64.3               | 3.9  | 452.0              | 4.8  |
| (28 χρόνια) <sup>*</sup>            | 362.1              | -    | -                  | -    | -                    | -    | -                  | -    | -                  | -    | 507.2              | -    |
| (30 χρόνια) <sup>*</sup>            | 361.8              | -    | -                  | -    | -                    | -    | -                  | -    | -                  | -    | 507.6              | -    |

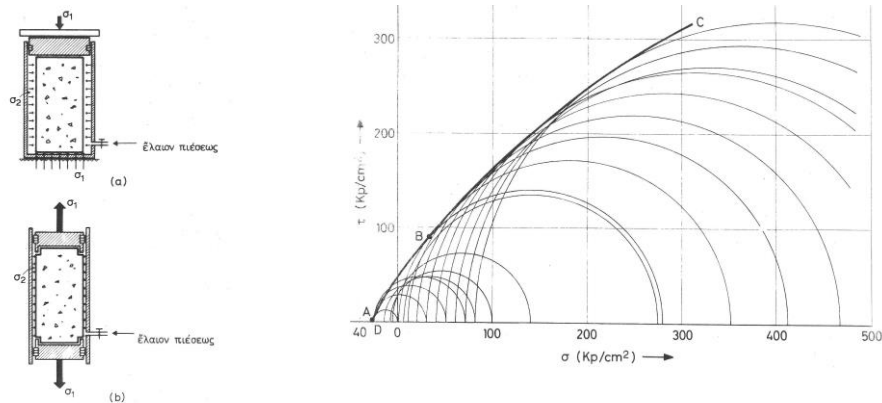
- 1 έτος = 365.24 ημέρες



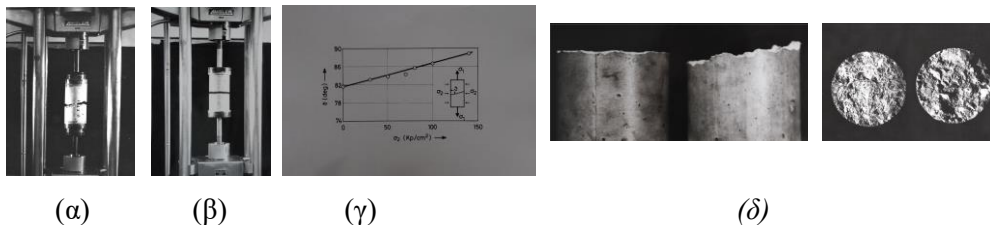
**Σχήμα 1.** Καμπύλη μεταβολής της αντοχής σκυροδέματος συναρτήσει της ηλικίας για δοκιμή θλίψεως κυλινδρικών και κυβικών δοκιμίων.

**Πίνακας 2.** Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών

| Α. Θλίψις – θλίψις   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| Πλευρική υδροστατική πίεση (kp/cm <sup>2</sup> )             | 0     | 5     | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 100  | 140  |
| Μέση τιμή αξονικής θλιπτικής τάσεως (Kp/cm <sup>2</sup> )    | 280,0 | 275,0 | 353,3 | 413,3 | 466,7 | 526,7 | 580,0 | 600,0 | 658,3 | 716,0 | —    | —    |
| Σταθερά απόκλισης (Kp/cm <sup>2</sup> )                      | 16,5  | 44,7  | 29,2  | 27,5  | 18,9  | 29,8  | 36,1  | 19,2  | 18,9  | 48,0  | —    | —    |
| Β. Έφελκυσμός – θλίψις                                       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |
| Μέση τιμή αξονικής εφελκυστικής τάσεως (Kp/cm <sup>2</sup> ) | 26,04 | —     | —     | —     | 27,20 | —     | 26,20 | —     | 27,20 | 13,60 | 6,70 | 6,00 |
| Σταθερά απόκλισης (Kp/cm <sup>2</sup> )                      | 2,65  | —     | —     | —     | 2,04  | —     | 2,04  | —     | 2,04  | 3,20  | 1,89 | 2,15 |



**Σχήμα 2.** Συσκευές τριαξονικής καταπόνησης σκυροδέματος θλίψεως-θλίψεως και εφελκυσμού-θλίψεως και η περιβάλλουσα των κύκλων του Mohr που προέκυψαν από τα αντίστοιχα πειράματα



**Σχήμα 3.** Θραύση από καθαρό εφελκυσμό (α) και σύνθετη καταπόνηση εφελκυσμού-θλίψεως (β) κυλινδρικών δοκιμίων, η μεταβολή της γωνίας θραύσεως συναρτήσει της πλευρικής θλιπτικής τάσεως (γ) και οι αντίστοιχες διατομές θραύσεως (δ).

## ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (ΜΚΕ) ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΜΚΕ καλείται κάθε έλεγχος που εφαρμοζόμενος δεν αλλάζει τη μελλοντική χρήση των ελεγχόμενων υλικών, Πρασιανάκης Ι.Ν. (1997, 2007). Οι ΜΚΕ αν και εμφανίζονται στις αρχές του περασμένου αιώνα υπό τη σύγχρονη μορφή τους, μόνο μετά το 2<sup>ο</sup> Παγκόσμιο Πόλεμο και κυρίως τις τελευταίες δεκαετίες εφαρμόζονται συστηματικά στον ποιοτικό έλεγχο των υλικών, παράλληλα με την ανάπτυξη διαφόρων άλλων επιστημών όπως είναι η Μηχανική, η Αντοχή των Υλικών, η Πληροφορική, η Ηλεκτρονική και κυρίως η Μηχανική των Θραύσεων, British Standards B.S.-1881 (1986).

Οι σημαντικότερες ΜΚΜ που εφαρμόζονται σήμερα στον ποιοτικό έλεγχο των υλικών είναι: Οι οπτικές μέθοδοι, η μέθοδος των υπερήχων, οι ακτινογραφικές μέθοδοι, η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής, η μέθοδος της θερμογραφίας, η μέθοδος των δινορευμάτων, η μέθοδος των μαγνητικών

σωματιδίων, η μέθοδος των διεισδυτικών υγρών, η αντίσταση στην εξόλκευση ήλου, το κρουσίμετρο αναπήδησης και το κρουσίμετρο ουλής κ.ά.

Η αμεσότερη μέθοδος προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος είναι η μηχανική μέθοδος, η οποία προϋποθέτει την κατασκευή ή λήψη δοκιμίων και την καταστροφή τους για την πραγματοποίηση του ελέγχου. Σε αντίθεση με αυτήν τη μέθοδο ο έλεγχος του σκυροδέματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια των ΜΚΜ, όπως των ακτινών (Χ, α, β, γ) ή των υπερηχητικών κυμάτων, κ.α. Πίνακας 3.

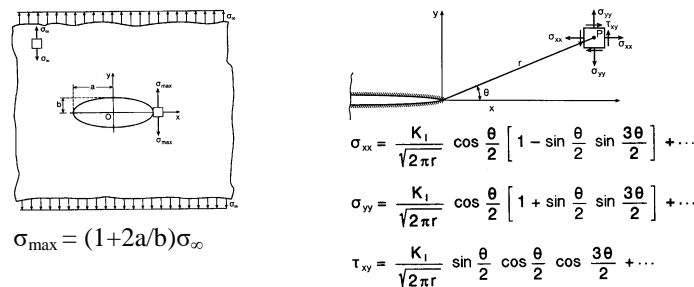
**Πίνακας 3.** Σημαντικότερες μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου του σκυροδέματος και οι βασικές εφαρμογές τους

| ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ  | ΜΕΘΟΔΟΣ                                     | ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΙΔΙΟΤΗΤΑ                     | ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ - ΈΛΕΓΧΟΙ  |
|--|---|---|--|
| Μέθοδοι που μετρούν τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος       | Κρουσίμετρο αναπήδησης<br>Κρουσίμετρο ουλής | Επιφανειακή σκληρότητα                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ποιοτικός</li> <li>• Εξέλιξης αντοχής</li> <li>• Επίδραση φθοροποιών παραγόντων</li> </ul>          |
|  | Μηκυσιόμετρα<br>Ακουστική εκπομπή           | Παραμορφώσεις                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ομοιογένειας</li> <li>• Δια. παρασκευής</li> <li>• Εξέλιξης αντοχής</li> </ul>                      |
| Μέθοδοι που μετρούν τις φυσικές ιδιότητες του σκυροδέματος         | Μέθοδος συντονισμού                         | Ιδιοσυχνότητα, ικανότητα απόσβεσης      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ποιοτικός έλεγχος</li> </ul>  |
|  | Υπέρηχοι                                    | Ταχύτητα διάδοσης κυμάτων               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ποιοτικός</li> <li>• Ομοιογένειας</li> <li>• Εξέλιξης αντοχής</li> <li>• Ελαστ. στεθερές</li> </ul> |
|  | Ατομικές μέθοδοι (ακτινογραφίες κ.λπ)       | Απορρόφηση ακτινών χ, γ, νετρονίων      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Διαδικασίας παρασκευής</li> </ul>   |
|  | Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι                   | Ανίχνευση οπλισμών, προσδ. της υγρασίας | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ομοιογένειας</li> <li>• Διαδικασία παρασκευής</li> </ul>  |
|  | Μέτρηση της ωρίμανσης, Θερμογραφία          | Μεταβολή θερμοκρασίας                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Εξέλιξης αντοχής</li> <li>• Διαδικασία κατασκευής</li> </ul>  |
| Μέθοδοι που προκαλούν τοπική καταστροφή του ιστού του σκυροδέματος | Ελληνική μέθοδος                            | Αντίσταση στην εξόλκευση ήλου           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ποιοτικός</li> <li>• Διαδικασία κατασκευής</li> <li>• Ομοιογένειας</li> </ul>                       |
|  | Αμερικανική μέθοδος                         | Αντίσταση στη διείσδυση βελόνας         |  |
|  | Ολλανδική μέθοδος                           | Αντίσταση στην εξόλκευση βύσματος       |  |
|  | Ρωσική μέθοδος                              | Εκτόξευση βλήματος                      |  |

Οι ΜΚΕ χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στον έλεγχο των υλικών, γιατί με αυτές εκτός από τον προσδιορισμό αρκετών εκ των μηχανικών τους ιδιοτήτων χωρίς τη χρήση και θραύση κατάλληλων δοκιμίων, προσδιορίζονται και τα ελαττώματα που περιέχονται στο εσωτερικό τους και τα οποία αποτελούν την αιτία της

πρώρης αστοχίας τους βάσει των στοιχείων που η Μηχανική των Θραύσεων μας παρέχει. Στα παρακάτω δύο Σχήματα 4 φαίνεται π.χ. η τροποποίηση του τασικού πεδίου στο πρόβλημα ατέλειας μορφής ελλείψεως και ακραίας ρωγμής που υπάρχουν σε καταπονούμενο σώμα.

Οι ΜΚΕ όπως είναι γνωστό από την ανεύρεση πολλών επιγραφών σε μαρμάρινες πλάκες σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας, όπως στην Ελευσίνα, την Αθήνα, τον Ωροπό, τη Θάσο κ.α., χρησιμοποιούνται κατά τον 4<sup>ο</sup> π.χ. αιώνα υπό των αρχαίων Ελλήνων για τον ποιοτικό έλεγχο των υλικών με τα βοήθεια των 5 αισθήσεων, Prassianakis I.N. and Prasianakis N.I. (2010), Prasianakis I.N. (2014, 2016).



**Σχήμα 4.** Τα προβλήματα της ελλείψεως και της ακραίας ρωγμής της Μηχανικής των Θραύσεων.

## Ο ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΚΜ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

### Προσδιορισμός των ελαστικών σταθερών

Στην παρούσα εργασία ελέγχθηκαν 6 κυλινδρικά δοκίμια. Τα 3 πρώτα είχαν κατασκευαστεί στις 19/9/1972 και τα υπόλοιπα 3 στις 18/9/1972. Επίσης ελέγχθηκαν 5 κυβικά δοκίμια, τα οποία είχαν κατασκευαστεί στις 1/7/1971. Για την πραγματοποίηση της δοκιμής κάμψης ελέγχθηκαν και 5 πρισματικοί δοκοί.

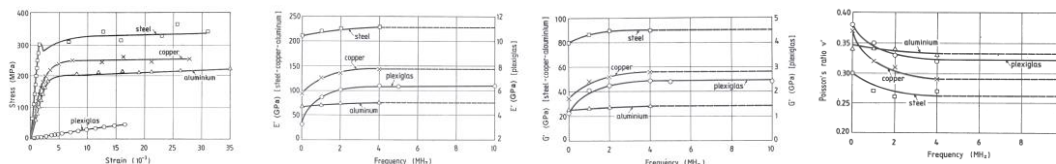
Με τη βοήθεια της παρακάτω σχέσεως (1) από την ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων  $c_l$ , το λόγο Poisson  $\nu$  και την πυκνότητα  $\rho$  του σκυροδέματος το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας του σε ηλικία 30 ετών βρέθηκε ίσο με  $E' = 43\text{GPa}$ , Prassianakis I.N. (1997), Krautkramer J-H, (1977). Παρόμοιος υπολογισμός έγινε και σε διάφορα άλλα υλικά, Σχήμα 5.

$$E' = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \rho c_l^2 \quad (1)$$

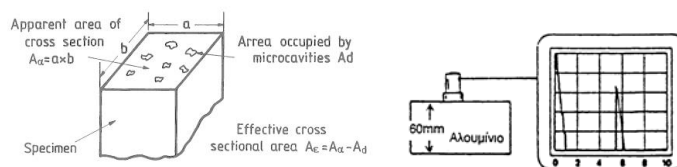
### Εσωτερική Φθορά των Υλικών (Damage)



Η εσωτερική φθορά των υλικών και κατά συνέπεια και του σκυροδέματος μπορεί να προσδιορισθεί με τη βοήθεια των υπερήχων από τις παρακάτω σχέσεις (2), Σχήμα 6 και 7, Prassianakis I. N. (1994)

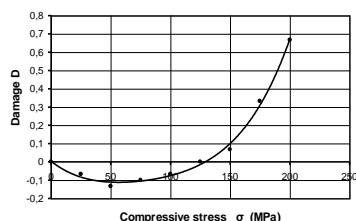


Σχήμα 5. Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων και τα δυναμικά υπερηχητικά μέτρα ελαστικότητας διαφόρων υλικών, Prassianakis I.N, Prasianakis N.I. (2004).



$$D = \frac{A - A_o}{A}, D = \frac{(A_a - A_e)}{A_a}, 0 \leq D \leq 1, D = 1 - \frac{H_i}{H_o}, \Delta\alpha = (20/2d)\log(H_o/H) \quad (2)$$

Σχήμα 6. Εσωτερική Φθορά των Υλικών με τη ΜΚΜ των Υπερήχων



Σχήμα 7. Μεταβολή της damage  $D$  κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος με διαμήκη υπερηχητικά κύματα συναρτήσει της θλιπτικής τάσεως  $\sigma$ .

Όπου  $D$  η εσωτερική φθορά,  $A_a$  συμβολίζει την αρχική εγκάρσια διατομή του δοκιμίου και  $A_e$  την ενεργό διατομή,  $H_o$  είναι το ύψος του παλμού στην οθόνη της υπερηχητικής συσκευής για το αφόρτιστο δοκίμιο και  $H_i$  το ίδιο ύψος συναρτήσει του φορτίου και  $\Delta\alpha$  η απόσβεση των υπερηχητικών κυμάτων.

### Προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας

Με τη χρήση των ηλεκτρομηκυσιομέτρων κατά τη δοκιμή της θλίψεως προσδιορίζεται ο λόγος του Poisson  $\nu$  για κάθε κυλινδρικό δοκίμιο. Από τη σχέση

(1) προσδιορίζεται το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας  $E_\delta$  από την ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων  $c_l$ , Πίνακας 4, για κάθε δοκίμιο και επιπρόσθετα συγκρίνεται με το στατικό μέτρο ελαστικότητας (αρχικό εφαπτομενικό), που προκύπτει ως μέσος όρος εκείνου που προσδιορίζεται από τα βελόμετρα και τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα, Prassianakis I. N., Gkiokas P. (200 - 2003). Τα αποτελέσματα περιέχονται στον παρακάτω Πίνακα 5.

**Πίνακας 4.** Μέσες τιμές ταχυτήτων των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων για κυλινδρικά και κυβικά δοκίμια σκυροδέματος

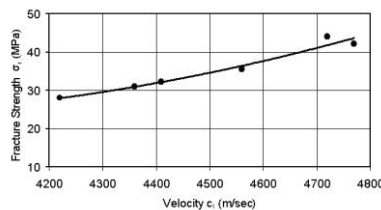
| Δοκίμια   | Κάθετα προς τη διεύθυνση σκυροδετήσεως $c_l$ (m/sec) | Παράλληλα προς τη διεύθυνση σκυροδετήσεως $c_l$ (m/sec) | Μέση τιμή $c_l$ (m/sec) |
|-----------|--|---|-------------------------|
| Κύλινδροι | 4590   | 4470  | 4530                    |
| Κύβοι     | 4810   | 4700  | 4760                    |
| M. T.     | 4700   | 4585  | 645                     |

**Πίνακας 5.** Δυναμικά και στατικά μέτρα ελαστικότητας κυλινδρικών δοκιμίων σκυροδέματος ηλικίας 28 ετών.

| a/a  | Πυκνότητα (gr/cm <sup>3</sup> ) | Λόγος Poisson | $E_\delta$ (GPa) | $E_\sigma$ (GPa) | $E_\delta / E_\sigma$ |
|------|---------------------------------|---------------|------------------|------------------|-----------------------|
| M.T. | 2.455                           | 0.246         | 42.99            | 39.84            | 1.078                 |

### Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής – ταχύτητας διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων

Η θλιπτική αντοχή για κάθε δοκίμιο προσδιορίστηκε μέσω της δοκιμής θλίψεως. Στο παρακάτω Σχήμα 8 περιέχεται η γραφική απεικόνιση της τάσης θραύσεως (εξαρτημένη μεταβλητή) με την ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων κατά τη διεύθυνση σκυροδέτησης (ανεξάρτητη μεταβλητή) για κάθε κυλινδρικό δοκίμιο.



**Σχήμα 8.** Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος συναρτήσει της ταχύτητας διαδόσεως των διαμήκων κυμάτων

Η εκτίμηση της σχέσεως μεταξύ της θλιπτικής αντοχής των κυλινδρικών δοκιμίων και της ταχύτητας διαδόσεως των διαμήκων κυμάτων κατά τη

διεύθυνση σκυροδέτησης πραγματοποιήθηκε με την ανάπτυξη μαθηματικών προτύπων. Η μαθηματική σχέση που κρίθηκε ικανοποιητικότερη για την εκτίμηση της αντοχής ενός κυλινδρικού δοκίμιου σκυροδέματος με βάση την ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων κατά τη διεύθυνση σκυροδέτησης είναι η παρακάτω (3), Ferreira A.P. and Castro P.F. (1999).

$$\sigma_f = e^{\left(9,809545 - \frac{17,712800}{c_l}\right)}, \text{ με } R^2 = 0,9688 \quad \text{και } F = 124,132 \quad (3)$$

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως φαίνεται από την προηγούμενη συνοπτική παρουσίαση των MKM, και σύμφωνα με το σχετικό πίνακα, όπου παρουσιάζονται οι βασικές εφαρμογές των κυριότερων MKM στο σκυρόδεμα, προκύπτει ότι η μέθοδος με τις περισσότερες δυνατότητες είναι η μέθοδος των υπερήχων. Η μέθοδος των υπερήχων δίνει αφ' ενός τη δυνατότητα εκτίμησης της αντοχής του σκυροδέματος μέσω της συσχέτισης της με την ταχύτητα των υπερηχητικών κυμάτων, καθώς και τον προσδιορισμό των ελαστικών σταθερών του και αφ' ετέρου τον έλεγχο του εσωτερικού της μάζας του, για την ανίχνευση ρωγμών ή άλλου είδους ατελειών ή ακόμα και την ανίχνευση της ύπαρξης, της θέσης και του μεγέθους του οπλισμού. Οι μέθοδοι του κρουσίμετρου αναπήδησης και της εξόλκευσης ήλου είναι σχετικά ευκολότερες στην εφαρμογή τους και ενώ με βάση αυτές μπορεί να εκτιμηθεί η αντοχή του σκυροδέματος, μειονεκτούν γιατί δεν είναι δυνατό να γίνει έλεγχος του εσωτερικού της μάζας του σκυροδέματος.

Έτσι, με βάση τη στατιστική καμπύλη  $\sigma_f = f(c_l)$ , μπορεί να προσδιορίζεται για κάθε κυλινδρικό δοκίμιο η θλιπτική αντοχή με τη MKM των υπερήχων, από τον υπολογισμό της ταχύτητας των. Η MKM των υπερήχων μπορεί να εφαρμοστεί για τον έλεγχο κατασκευών από σκυρόδεμα εφ' όσον έχει κατασκευαστεί η καμπύλη αυτού του σχήματος, κατά τη φάση της σκυροδετήσεως της κατασκευής. Στη συνέχεια σε οποιαδήποτε μελλοντική εξέταση η λήψη ενός δοκίμιου από την κατασκευή της οποίας την αρχική καμπύλη  $\sigma_f = f(c_l)$  γνωρίζουμε και εξέταση του με υπερήχους και θραύση για τον προσδιορισμό των νέων μεγεθών  $\sigma_f$  και  $c_l$ , μας δίνει τη δυνατότητα να τοποθετήσουμε αυτό το σημείο στο αρχικό διάγραμμα  $\sigma_f = f(c_l)$ . Στη συνέχεια κατασκευάζοντας μια παράλληλη καμπύλη προς την αρχική μπορούμε πλέον με τον προσδιορισμό της ταχύτητας  $c_l$  σε οποιοδήποτε σημείο της κατασκευής να προσδιορίζουμε σε αυτό το σημείο της την αντοχή του σκυροδέματος  $\sigma_f$ .

Συνεπώς η MKM των υπερήχων μπορεί να εφαρμοστεί για τον έλεγχο κατασκευών από σκυρόδεμα και να εκτιμηθεί η αντοχή του, εφ' όσον έχει κατασκευαστεί η καμπύλη ταχύτητας υπερηχητικών κυμάτων-αντοχής θραύσεως κατά τη φάση της σκυροδετήσεως της κατασκευής.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- British Standards B. S. – 1881, Testing Concrete – Guide to the Use of Non-destructive Methods of Test for Hardened Concrete, Part 201, (1986).
- Ferreira A. P. and Castro P. F. “Application of NDT to Concrete Strength Estimation”, International Symposium on NDT Contribution to the Infrastructure Safety Systems, (1999), Nov 22-26, Torres.
- Jones R. and Făcșoaru I., “Recommendations for Testing Concrete by the Ultrasonic Pulse Method”, *Materiaux et Constructions*, Vol. 2, No 10, (1969), pp.275-284.
- Krautkrämer J. and Hirsh, “Ultrasonic Testing of Materials”, Second Edition, Springer – Verlag, Berlin, (1977).
- Prassianakis I. N. and Giokas P., “Mechanical Properties of an Old Concrete Using Destructive and Ultrasonic Non-Destructive Testing Methods”, *Magazine of Concrete Research*, 55, No 2, pp. 171-176, April (2003).
- Prassianakis I. N. and Prassianakis N. I., Ultrasonic testing of non-metallic materials: Concrete and Marble, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 42, pp. 191-198, (2004).
- Prassianakis I. N. and Gkiokas P., Destructive and Non-Destructive Testing of 28 Days and 28 Years Old Concrete, *Technika Chronika Scientific Edition TCG*, December (2000).
- Prassianakis I. N., “Moduli of elasticity evaluation using ultrasound”, *Insight*, Vol. 39, N° 6, pp. 425-429, June (1997),
- Prassianakis I. N., “An Experimental Approach to Damage Evaluation Using Ultrasounds”, *European Journal of NDT Insight*, 3, (1994), pp. 93-96.
- Prassianakis I. N., and Prassianakis N. I., Quality Control of Materials in Ancient Greece Using Non Destructive Testing Methods, *Proceedings of the 10th ECNDT of EFNDT, RSNDT*, 7-11 June (2010), Moscow Russia.
- Prassianakis I. N., Non-Destructive Testing of Materials in Ancient Greece, *HELLENIC SOCIETY OF NDT (HSNT)*, 11th ECNDT of EFNDT, Prague 6-10 October (2014), President of HSNT, Professor Emeritus National Technical University of Athens, Greece, E-mail: prasian@central.ntua.gr, i.prasianakis@gmail.com.
- Prassianakis I. or the Testing of Their Materials, 19th WCNDT of ICNDT, International Academy of NDT Meeting, 12-17 June (2016), Munich Germany.
- Theocaris P. S., Prassianakis I. N., “The Mohr envelope of failure for concrete: a study of its tension-compression part”, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 26, N° 87, pp. 73-82, June (1974),
- Θεοχάρης Π.Σ., Πρασιανάκης Ι.Ν., “Μελέτη σκυροδέματος εις πολυαξονικήν καταπόνησιν”, *Τεχνικά Χρονικά – Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ*, Απρίλιος (1974), σελ. 293-302.
- Πρασιανάκης Ι. Ν., “Μη Καταστροφικός Έλεγχος των Υλικών. Η Μέθοδος των Υπερήχων”, *Ε.Μ.Π.*, (1997, 2007).
- Τάσιος, Θ. Δεμίρης, Κ., “Νέα έμμεση μέθοδος προσδιορισμού αντοχής δι’ εξολκεύσεως ήλου”, *Επιστημονική Δημοσίευση Ε.Μ.Π.*, No. 21, (1968).