

Η μέτρηση της Ωριμότητας του Σκυροδέματος ως στοιχείο επιτάχυνσης στην Ελληνική Προκατασκευή

Measuring maturity of concrete as an acceleration factor at Greek Precast Industry

Σπυράγγελος ΛΥΚΟΥΔΗΣ¹, Ηλίας ΨΥΧΙΔΗΣ², Γεώργιος ΡΟΥΠΑΚΙΑΣ³

Λέξεις κλειδιά: Σκυρόδεμα , Δείκτης Ωριμότητας ,Πρώιμη Αντοχή, Τελικές Αντοχές, Ενυδάτωση, Προκατασκευή,Arduino, ASTM C-1074, Concrete, Maturity Index, Early Strength, Final Strength, Hydration, Precast.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία, με τη χρήση του ASTM C-1074, γίνεται μέτρηση της Ενέργειας Ενεργοποίησης (Activation Energy) της μελέτης συνθέσεως και εμμέσως εκτιμάται η επί τόπου αντοχή του σκυροδέματος, με την μέτρηση της θερμοκρασίας των σκυροδετημένων στοιχείων, στη Μονάδα Προκατασκευής της εταιρείας ΠΡΟΚΕΛ. Η πρόβλεψη της αντοχής του σκυροδέματος σε πρώιμες ηλικίες, βασίζεται στην υπόθεση ότι σκυροδέματα από την ίδια μίξη που έχουν τον ίδιο Δείκτη Ωριμότητας (Maturity Index), έχουν την ίδια αντοχή.

Οι στόχοι της εργασίας είναι η βελτίωση και η αξιολόγηση των παραγωγικών διαδικασιών, όπως της ανάμιξης, διάστρωσης, συμπύκνωσης, ωρίμανσης, η εκτίμηση της πραγματικής αντοχής ενός δομικού στοιχείου και η σύγκρισή του με την αντοχή του δοκιμίου και τέλος η χρήση της τεχνολογίας IOT (Internet Of Things) στη προκατασκευή.

ABSTRACT: This paper aims with the use of ASTM C-1074, to measure the Activation Energy of the mix design, and indirectly to estimate the real strength of concrete, measuring the temperature of precast elements, at the job site of PROKEL SA. The strength prediction is based at the fact that concrete from the same mix that has the same Maturity Index, has also the same strength.

This paper tries to improve production procedures such as mixing, placing, compaction, maturity, the real concrete strength estimation of a precast element, comparing with a concrete cube and finally the use of technology Internet of Things.

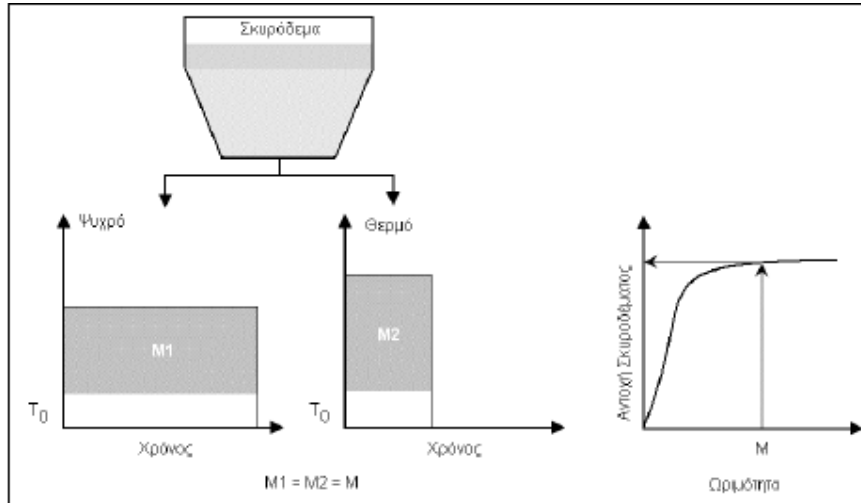
¹ Προϊστάμενος Εργαστηρίου ΠΥΘ, ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε. email: slicoudis@egnatia.gr

² Τεχνικός Εξυπηρέτησης Πελατών, TITAN AE email: psichidis@titan.gr

³ Υπεύθυνος Παραγωγής ΠΡΟΚΕΛ email: group@prokel.gr

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Η τεχνική πρόβλεψης της αντοχής του σκυροδέματος βασίζεται στην υπόθεση ότι σκυροδέματα από την ίδια μίξη που έχουν τον ίδιο δείκτη ωριμότητας, (υπολογισμένα σε θερμοκρασία-χρόνο) έχουν περίπου την ίδια αντοχή ανεξαρτήτως του συνδυασμού θερμοκρασίας και χρόνου που ακολούθησαν για να φτάσουν αυτή την ωριμότητα (A.G.A Saul, 1951).



Σχήμα 1. Σκυροδέματα με Ισοδύναμο δείκτη Ωριμότητας

Η υπόθεση αυτή επαληθεύεται και στη πράξη από το γεγονός ότι σκυροδέματα που συντηρούνται σε υψηλότερες θερμοκρασίες αναπτύσσουν ταχύτερα πρώιμες αντοχές. Η ιδιότητα αυτή γίνεται εύκολα αντιληπτή και από τις διαφορές στις αντοχές των δοκιμίων, το καλοκαίρι και το χειμώνα.

Το πρότυπο ASTM C-1074 ορίζει δύο τρόπους για το προσδιορισμό της μέτρησης του θερμοκρασιακού μητρώου της κατασκευής:

Την εξίσωση 1 Nurse- Saul :

$$M(t) = \sum (T_a - T_0) \Delta t$$

Όπου:

$M(t)$ = η σχέση χρόνου – θερμοκρασίας, σε ηλικία t , μετρούμενη σε ημεροβαθμούς ή ώρο-βαθμούς

$\Delta(t)$ = το χρονικό διάστημα μέτρησης θερμοκρασίας, σε ημέρες ή ώρες

T_a = η μέση θερμοκρασία σκυροδέματος, κατά το χρονικό διάστημα $\Delta(t)$ σε βαθμούς Κελσίου

T_0 = η θερμοκρασία βάσης σε βαθμούς Κελσίου

Και η εξίσωση 2 όπου είναι βασισμένη στην εξίσωση του Arrhenius, και χρησιμοποιείται για να περιγράψει την επίδραση της θερμοκρασίας στη κλιμάκωση της αντίδρασης της ενυδάτωσης:

Όπου:

$$t_e = \sum e^{-Q\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_0}\right)\Delta t}$$

T_e = η ισοδύναμη ηλικία σε μια καθορισμένη θερμοκρασία, t_s (20°C)

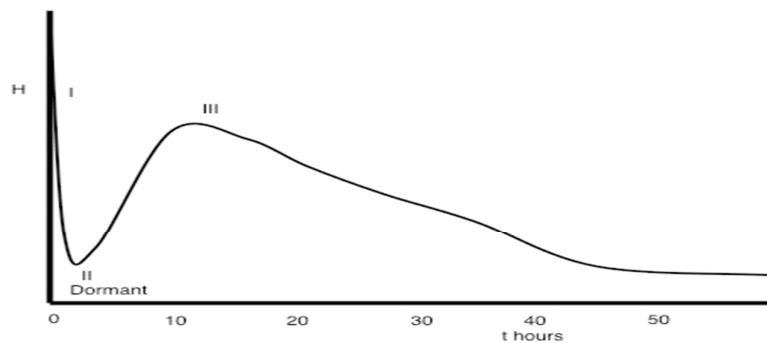
Q = η ενέργεια ενεργοποίησης διαιρούμενη με την σταθερά αερίων K

T_a = η μέση θερμοκρασία σκυροδέματος κατά το χρονικού διαστήματος Δt , °K

T_s = η καθοριζόμενη θερμοκρασία, °K

Δt = το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα στις μετρήσεις, σε μέρες ή ώρες

Η φυσική εξήγηση της εξίσωσης 2, είναι ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας, αυξάνει η ταχύτητα της ενυδάτωσης του σκυροδέματος. Αν είναι γνωστή η ενέργεια ενεργοποίησης και καταγράφεται παράλληλα και η θερμοκρασία, μπορεί να υπολογιστεί η ισοδύναμη ηλικία του σκυροδέματος.



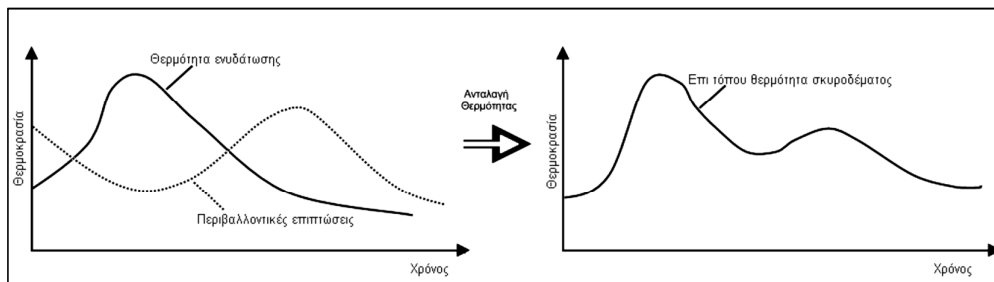
Σχήμα 2. Στάδια κατά τη διαδικασία Ενυδάτωσης (<https://www.understanding-cement.com/hydration.html#>)

Στο σχήμα 2 απεικονίζονται:

- Το σημείο «ύπνωσης» του σκυροδέματος όπου αμέσως μετά τη διάστρωση πέφτει η θερμοκρασία για να ακολουθήσει η κατακόρυφη αύξησή της
- Ο βαθμός ανάπτυξης της ενυδάτωσης, που αυξάνεται με το χρόνο
- Οι διάφορες φάσεις του σκυροδέματος, όπου από πλαστικό και εργάσιμο, «πήζει» και αυξάνει την αντοχή του παράλληλα με την αύξηση της θερμοκρασία της μάζας του.

Οι μίξεις του σκυροδέματος μπορούν να χαρακτηριστούν ως «Αργές» ή «Γρήγορες», ανάλογα με το πόσο γρήγορα επιτυγχάνεται της καμπύλης (α) (Ανάπτυξη θερμότητας). Τα στοιχεία που επηρεάζουν τη ταχύτητα ανάπτυξης των πρώιμων αντοχών, είναι ο τύπος του τσιμέντου (χημική σύσταση, λεπτότητα άλεσης, πρόσθετα) η ποσότητα του τσιμέντου, ο λόγος N/τ, τα πρόσμικτα και η αρχική θερμοκρασία μίξης.

Η θερμοκρασία στη θέση σκυροδέτησης προκύπτει ως αλληλεπίδραση των καιρικών συνθηκών με την αδιαβατική ανάπτυξη της θερμοκρασίας του σκυροδέματος. Η ανάπτυξη της θερμοκρασίας στο έργο φαίνεται στο σχήμα 3:



Σχήμα 3. Ανάπτυξη θερμοκρασίας

Αν είναι γνωστή στη μονάδα του χρόνου η θερμοκρασία του σκυροδέματος στο έργο και η ενέργεια ενεργοποίησης, μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση 2, η ισοδύναμη ηλικία (αντοχή σε να είχε συντηρηθεί το στοιχείο σε θάλαμο συντήρησης δοκιμών, σε θερμοκρασία 20 °C.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

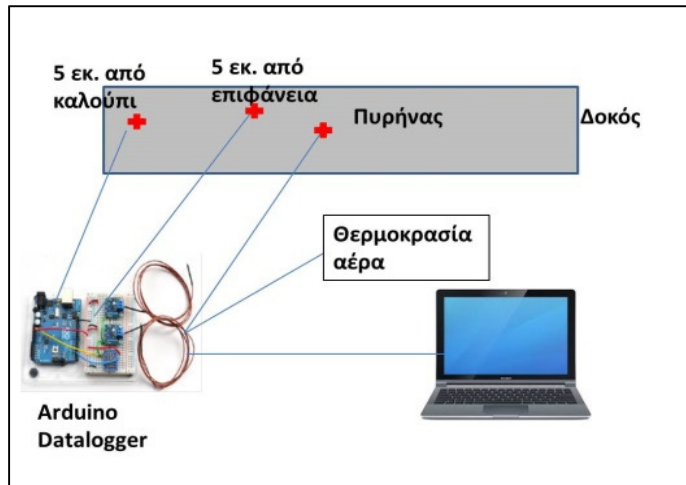
Το Arduino είναι ένας μικροελεγκτής μονής πλακέτας, δηλαδή μια απλή μητρική πλακέτα ανοικτού κώδικα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή και εισόδους/εξόδους, η οποία μπορεί να προγραμματιστεί με τη γλώσσα Wiring (ουσιαστικά πρόκειται για τη γλώσσα προγραμματισμού C++ και ένα σύνολο από βιβλιοθήκες, υλοποιημένες επίσης στην C++). Οι περισσότερες εκδόσεις του Arduino μπορούν να αγοραστούν προ-συναρμολογημένες· το διάγραμμα και πληροφορίες για το υλικό είναι ελεύθερα διαθέσιμα για αυτούς που θέλουν να συναρμολογήσουν το Arduino μόνοι τους.

Στη συγκεκριμένη υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε η πλακέτα Arduino Uno, και δύο θερμοζεύγη τύπου K, με εύρος μέτρησης θερμοκρασίας -270 έως 1370 °C, με βήμα εξόδου 0,25 °C.

Η απεικόνιση των θερμοκρασιών γίνεται στη σειριακή οθόνη ενός Η/Υ που τρέχει το Arduino IDE, ή σε κινητό Android με την εφαρμογή Blynk, είτε με προγράμματα όπως το Realtmp, PLX-DAQ. Εκτός από την απεικόνιση της θερμοκρασίας μπορεί να εισαχθεί η εξίσωση 1 ή 2 και το αποτέλεσμα να είναι η αντοχή σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 4. Μέτρηση θερμοκρασιών στο εργαστήριο



Σχήμα 5. Σκαρίφημα τοποθέτησης στη δοκό

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΜΟΝΑΔΑ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

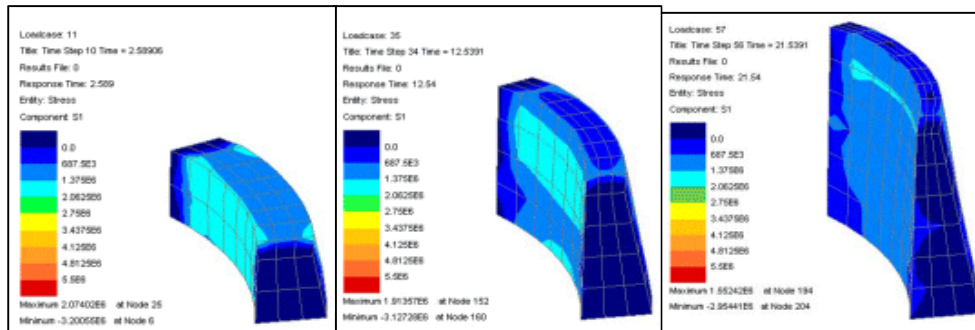
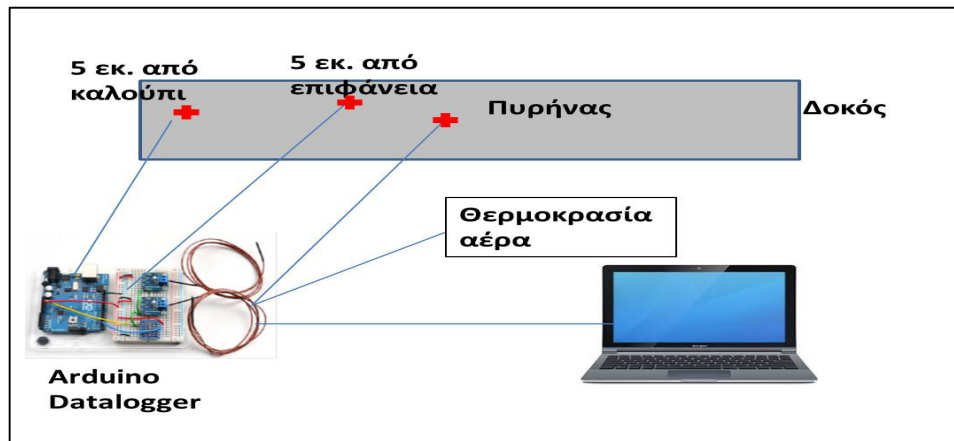
Το μελετηθέν από τη παρούσα εργασία, είναι η προκατασκευασμένη δοκός MB-001 η οποία έχει διαστάσεις 8μ x 1,1μ x 0,28μ, χαρακτηριστικά που φαίνονται στην ακόλουθη φωτο



Σχήμα 6. Η δοκός

Η σύνθεση που χρησιμοποιήθηκε είναι C30/37 με τσιμέντο CEMII42,5. Από τις πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο υπολογίστηκε η ενέργεια ενεργοποίησης Activation Energy AE, η οποία χρησιμοποιήθηκε στη θεωρία του Arrhenius και στην εξίσωση 2.

Είναι προφανές ότι η ανάπτυξη των αντοχών στο σκυρόδεμα ΔΕΝ συμβαίνει ομοιόμορφα, (όπως σε ένα μικρής διάστασης κύβο) αλλά αναπτύσσεται από τον πυρήνα του σκυροδετούμενου στοιχείου προς την επιφάνεια όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 7,8. Ανάπτυξη θερμοκρασίας, σκαρίφημα τοποθέτησης αισθητήρων στη δοκό

Στο σκυροδετούμενο στοιχείο τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες από τη συσκευή Arduino στις ακόλουθες θέσεις

Sensor 1	Πυρήνας σκυροδετούμενου στοιχείου
Sensor 2	5 cm από την επιφάνεια
Sensor 3	5 cm από το πλαϊνό καλούπι
Sensor 4	Αέρας

Το πείραμα υλοποιήθηκε το Σεπτέμβριο όπου η μέγιστη θερμοκρασία ήταν 28 °C, ενώ η αρχική θερμοκρασία της δοκού ήταν 27 °C. Η ανάπτυξη της αντοχής στις θέσεις 1,2,3 φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα



Σχήμα 9. Συγκριτικά διαγράμματα για τον ισοδύναμο χρόνο.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Με τη χρήση του Arduino και τη χρήση χαμηλού κόστους υλικών, μπορούν να υλοποιηθούν αξιόπιστες μετρήσεις για την αξιολόγηση των πρώιμων αντοχών.
- Είναι προφανές ότι η αύξηση της αντοχής είναι μεγαλύτερη στο πυρήνα της σκυροδέτησης από ότι στην επιφάνεια ή κοντά στο καλούπι, λόγω της μεγαλύτερης ανάπτυξης θερμοκρασίας. Έτσι για λόγους ασφάλειας, πρέπει να επιλέγουμε τη μέτρηση στα κρίσιμα στοιχεία, αυτά δηλαδή που θα εμφανίσουν χαμηλότερες αντοχές.
- Κρίνεται σκόπιμο να παρακολουθείται η ανάπτυξη των πρώιμων αντοχών με τη μέθοδο της ωριμότητας επί τόπου του έργου, δεδομένου ότι τα δοκίμια έργου υποεκτιμούν την επί τόπου αντοχή. Με τον τρόπο αυτό ίσως είναι εφικτό να μειωθεί σε κάποιες περιπτώσεις και ο όγκος των ληφθέντων δοκιμίων.
- Η μέθοδος ωριμότητας παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την ανάπτυξη των αντοχών σε πρώιμες ηλικίες και είναι ένα σημαντικό εργαλείο για το προγραμματισμό των εργασιών. Μπορεί επίσης να βοηθήσει αποφασιστικά στη βελτιστοποίηση της Μελέτης Σύνθεσης και στην επιλογή των καταλληλότερων πρώτων υλών.
- Είναι ουσιώδες για την ασφάλεια και την επιτυχία της μεθόδου, να χρησιμοποιηθούν όσο το δυνατόν πιο ακριβείς τιμές στις συναρτήσεις ωριμότητας T_0 και Q , αλλά και να γνωρίζουμε λεπτομερώς την ακρίβεια και τις αδυναμίες της μεθόδου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά

Norberto Barroca, Luís M. Borges, Fernando J. Velez, Filipe Monteiro, Marcin Górski b,c, João Castro-Gomes “Wireless sensor networks for temperature and humidity monitoring within concrete structures”. *Construction and Building Materials* 40 (2013) 1156–1166

Waller V, d’ aloia L, Cussigh F., Lecrux S. “Using the Maturity Method in concrete cracking control at early ages”, *Cement & Concrete Composites* 26 (2004) 589-599

Βιβλία

Neville, A.M., “Properties of concrete, fourth edition”, Prentice Hall, (2000)

Popovits, S, “Strength and related properties of concrete a quantitative approach”, (1998).

Τεχνικές Εκθέσεις

Carino N, Petersen Germann C, “Concrete Science & Advanced Methods for Evaluation of Concrete”

Adafruit Industries, “1-Wire Thermocouple Amplifier - MAX31850K”

Άρθρα σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά

Λυκούδης Σ., Κοτρώτσιος Θ., “Εκτίμηση της Πρώιμης Αντοχής του Σκυροδέματος, με τη χρήση της Θεωρίας της Ωριμότητας (ASTM C-1074). Εφαρμογή στην Εγνατία Οδό”.

Πρότυπα (standards)

ASTM C1074-87 Standard Practice for Estimating Concrete Strength by th Maturity Method

NT BUILD 476, Nordest Method, Concrete Fresh: “Initial Setting Time and Activation Energy During Setting” 1996.