

**Χρήση μηχανισμού αυτοσυντήρησης με σκοπό το μετριασμό  
δυσμενών επιπτώσεων σκυροδέτησης και συντήρησης σε  
υψηλές θερμοκρασίες**  
Mitigation of high temperature concreting detrimental effects using  
internal curing

Περικλής ΣΑΒΒΑ<sup>1</sup>, Κωνσταντίνος ΑΪΒΑΛΙΩΤΗΣ<sup>2</sup>, Δημήτρης ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ<sup>3</sup>,  
Μιχάλης Φ. ΠΕΤΡΟΥ<sup>4</sup>

*Λέξεις κλειδιά: Αυτοσυντήρηση, Αυτοζήρανση, Σκυροδέτηση σε Υψηλές Θερμοκρασίες*

*Keywords: Internal curing, Self-desiccation, High temperature concreting*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση της επίδρασης της θερμοκρασίας σκυροδέτησης, καθώς και των συνθηκών συντήρησης στις μηχανικές ιδιότητες και τους δείκτες ανθεκτικότητας του σκυροδέματος. Για να επιτευχθεί αυτό, σκυροδετήθηκαν δεκαέξι διαφορετικά μίγματα, τα οποία ελέγχθηκαν σε διαφορετικές ημερομηνίες. Οι διαφοροποιήσεις των μιγμάτων αφορούσαν τον τύπο των αδρανών, τις θερμοκρασίες παραγωγής και τις μεθόδους συντήρησης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι ασβεστολιθικών αδρανών από την Κύπρο των οποίων η βασικότερη διαφορά τους αφορούσε την υδαταπορροφητικότητα τους. Ο σκοπός ήταν να ελεγχθεί η πιθανότητα μείωσης των

---

<sup>1</sup> Υποψήφιος Διδάκτορας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου, email: [savva.pericles@ucy.ac.cy](mailto:savva.pericles@ucy.ac.cy)

<sup>2</sup> Μεταπτυχιακός φοιτητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου, email: [kaival01@ucy.ac.cy](mailto:kaival01@ucy.ac.cy)

<sup>3</sup> Επίκουρος Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Frederick email: [dnicolaides@frederick.ac.cy](mailto:dnicolaides@frederick.ac.cy)

<sup>4</sup> Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου, email: [petrou@ucy.ac.cy](mailto:petrou@ucy.ac.cy)

δυσμενών επιπτώσεων σκυροδέτησης και έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες μέσω του μηχανισμού αυτοσυντήρησης. Τα μίγματα παράχθηκαν σε τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες (22, 30, 35 και 40 βαθμούς Κελσίου). Ο σκοπός των μεθόδων συντήρησης ήταν η εκτίμηση της βλάβης που θα προκαλούσε η έκθεση δοκιμίων σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες, σε σύγκριση με πανομοιότυπα δοκίμια συντηρημένα σε ελεγχόμενες συνθήκες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ικανότητα αυτοσυντήρησης των αδρανών υψηλής απορροφητικότητας συνέτειναν στη βελτίωση των ιδιοτήτων του εκτεθειμένου στο περιβάλλον σκυροδέματος. Επιβεβαιώθηκε επίσης η επιβλαβής δράση των υψηλών θερμοκρασιών παραγωγής σκυροδέματος στις μηχανικές ιδιότητες και τους δείκτες ανθεκτικότητας.

**ABSTRACT :** During the course of this research, sixteen mixtures were cast out of which, specimens were tested at various ages. Variability was introduced in the type of aggregates as well as casting and curing temperature. Two different types of curing regimes were applied, aiming to evaluate the effect on specimens exposed to adverse environmental conditions as opposed to controlled curing. For the purposes of this research, two concrete batches were designed. The first concrete batch was designed using low absorptive normal weight aggregates whereas the second concrete batch included high absorptive normal weight aggregates, at a saturated surface dried condition. The mixtures were stored at 22°C, 30°C, 35°C and 40°C up to the day of testing. The objective of this research was to quantify the effect of the mixing temperature and the curing conditions on the mechanical and durability properties of concrete. It was concluded that the high absorptive normal weight aggregates mixtures had improved mechanical and durability properties after exposed to adverse environmental conditions, compared to low absorptive normal weight aggregate mixtures. The specific was attributed to internal curing.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σκυροδέτηση σε υψηλές θερμοκρασίες αποτελεί αντικείμενο εκτενούς έρευνας (Ahmad & Nazir, 2004; Bappa, Paul, Saha, Saha, & Rashid, 2013; Benoudjafer, Merbouh, Labbaci, & Hamouine, 2013; Burg, 1996; Iqieger, n.d.; Shoukry, William, Downie, & Riad, 2011). Η ενυδάτωση του σκυροδέματος είναι μια εξώθερμη διαδικασία, κατά την οποία η παραγόμενη θερμότητα σχετίζεται με τον ρυθμό ενυδάτωσης. Η αντοχή του σκυροδέματος βασίζεται στο ρυθμό και το βαθμό ενυδάτωσης του τσιμέντου, καθώς και στην ποιότητα των αδρανών. Ο ρυθμός ενυδάτωσης καθορίζει την ποιότητα της τσιμεντόπαστας. Σε περίπτωση υψηλού

ρυθμού ενυδάτωσης δημιουργείται ένα εξωτερικό κέλυφος ενυδατωμένης τσιμεντόπαστας με χαμηλή διαπερατότητα, εμποδίζοντας περαιτέρω ενυδάτωση (Kjellsen & Detwiler, 1992; Taylor, 1990). Επιπλέον, η ταχεία ενυδάτωση κόκκων τσιμέντου οδηγεί σε έντονη τοπική συσσώρευση των προϊόντων ενυδάτωσης παρεμποδίζοντας την ομαλή διάχυση τους στο χώρο αυξάνοντας το πορώδες, το οποίο συνεπακόλουθα ενδέχεται να οδηγήσει σε μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων και της ανθεκτικότητας (Neville, 2002). Επιπρόσθετα, η θερμοκρασία συντήρησης επηρεάζει την παραμόρφωση του σκυροδέματος, ιδιαίτερα κατά τις αρχικές μέρες. Η συρρίκνωση του υλικού σε χαμηλούς λόγους N/T προκαλείται μεταξύ άλλων λόγω της αυτοξήρανσης. Η αυτοξήρανση παρουσιάζεται λόγω της έλλειψης νερού. Στις περιπτώσεις όπου υπάρχει άφθονο νερό στους πόρους του υλικού, οι ελκτικές δυνάμεις ενυδατωμένων κόκκων τσιμέντου οδηγούν σε προσρόφηση μορίων νερού στην επιφάνεια τους. Λόγω περιορισμένου χώρου, τα μόρια αυτά συμπιέζονται μεταξύ τους με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται δυνάμεις αποκόλλησης στους ενυδατωμένους κόκκους ένυδρου πυριτικού ασβεστίου. Η μείωση του νερού οδηγεί στην εξασθένηση του συγκεκριμένου μηχανισμού προκαλώντας συρρίκνωση. Άλλος μηχανισμός συρρίκνωσης είναι η αύξηση της επιφανειακής τάσης του νερού των πόρων, η οποία οδηγεί σε αύξηση των θλιπτικών τάσεων στα τοιχώματα των πόρων, με αποτέλεσμα την επιπλέον συρρίκνωση. Επιπρόσθετα, οι υψηλές θερμοκρασίες εντείνουν τα φαινόμενα αυτά λόγω εξάτμισης.

Στην παρούσα εργασία, έγινε έλεγχος του μηχανισμού της αυτοσυντήρησης ως λύση στα προβλήματα σκυροδέτησης σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε αντιδιαστολή με την βιβλιογραφία, η προτεινόμενη αυτοσυντήρηση προσφέρει πιθανή αύξηση των αντοχών, με πρακτικά καμία αλλαγή στην σύνθεση του σκυροδέματος. Ο μηχανισμός της αυτοσυντήρησης, αντιμετωπίζει επαρκώς τους μηχανισμούς συρρίκνωσης, οι οποίοι σχετίζονται με τη θερμοκρασία συντήρησης και το βαθμό ενυδάτωσης (Jensen & Hansen, 2000).

## **Πειραματικές μέθοδοι και υλικά**

### **Μίγματα**

Για σκοπούς αξιολόγησης της θερμοκρασίας παραγωγής και συντήρησης στην αντοχή του σκυροδέματος, προετοιμάστηκαν δεκαέξι διαφορετικά μίγματα. Οι διαφορές μεταξύ αυτών βασίζονται στον τύπο και την κατάσταση των αδρανών (κορεσμένα ή ξηρά) και τη θερμοκρασία συντήρησης. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι αδρανών για την παραγωγή των μιγμάτων. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν

αδρανή υψηλής υδατοαπορροφητικότητας (ΥΑ) και αδρανή χαμηλής υδατοαπορροφητικότητας (ΧΑ). Ο σκοπός ήταν τα ΥΑ να εξυπηρετούσαν ως μέσα μεταφοράς νερού στο εσωτερικό του σκυροδέματος και να γίνεται σύγκριση με τα μίγματα τα οποία είχαν παραχθεί με αδρανή ΧΑ. Επιπλέον, τα μίγματα παράχθηκαν και συντηρήθηκαν σε τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες (22°, 30°, 35° και 40°C), και συντηρήθηκαν με δύο διαφορετικούς τρόπους. Πιο συγκεκριμένα, οι τρόποι συντήρησης περιλάμβαναν την έκθεση δοκιμίων στο εξωτερικό περιβάλλον (Π), καθώς και εμβάπτιση σε νερό αντίστοιχης θερμοκρασίας με τη θερμοκρασία παραγωγής (Ε). Τα μίγματα παράχθηκαν κατά τους καλοκαιρινούς μήνες Ιούλιο-Σεπτέμβριο, με σκοπό την προσομοίωση της σκυροδέτησης σε υψηλές θερμοκρασίες. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέση ημερήσια θερμοκρασία της περιόδου αυτής ήταν 30.7°C, και η μέση θερμοκρασιακή διακύμανση σε περίοδο 24-ωρών ήταν 18 °C (Σχήμα 1).

Οι κωδικοί με τους οποίους περιγράφονται τα μίγματα στο παρόν άρθρο περιλαμβάνουν αρχικά την θερμοκρασία παραγωγής, Π ή Ε για τον τρόπο συντήρησης και Υ ή Χ για τον τύπο των αδρανών. Για παράδειγμα ο κωδικός 22ΠΥ αναφέρεται στο μίγμα το οποίο είχε παραχθεί στους 22°C, είχε εκτεθεί στο περιβάλλον και για την παραγωγή του είχαν χρησιμοποιηθεί αδρανή υψηλής υδατοαπορροφητικότητας.

Από το κάθε μίγμα έχουν ληφθεί 12 κυβικά δοκίμια για τον έλεγχο της θλιπτικής αντοχής, 12 κυβικά δοκίμια για την δοκιμή του πορώδους και 12 κυλινδρικά δοκίμια για τον έλεγχο της διαπερατότητας σε χλωριόντα.

### **Θερμοκρασία**

Η θερμοκρασία μετρήθηκε με τη χρήση θερμοστοιχείων. Οι μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες ήταν 44.3°C και 21.2°C αντίστοιχα, και οι μεγαλύτερες και μικρότερες διακυμάνσεις ήταν 22 °C and 8.5°C αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι θερμοκρασιακή διακύμανση ήταν μεγαλύτερη των 15°C για τουλάχιστον 80% των ημερών του πειράματος. Τα αδρανή τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα είναι παρόμοια της έρευνας (P A Savva & Petrou, 2015; Pericles A Savva & Petrou, 2015) με μια μικρή διαφοροποίηση στα κλάσματα. Για τον υπολογισμό του νερού αυτοσυντήρησης έγινε χρήση της εξίσωσης Bentz (Bentz, Lura, & Roberts, 2005). Οι ιδιότητες των αδρανών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Η χημική συρρίκνωση υπολογίστηκε θεωρητικά με βάση το πρότυπο ASTM C1608 (Zhang et al., 2013). Αξίζει να σημειωθεί πως δεν εντοπίστηκε οποιαδήποτε αναφορά στη βιβλιογραφία

για αδρανή κλάσματος 8/20 σε εφαρμογές αυτοσυντήρησης, λόγω του αναμενόμενου χαμηλού βαθμού διασποράς. Παρόλα αυτά, ο βασικός στόχος της παρούσας εργασίας ήταν να γίνει προσπάθεια βελτίωσης σε μίγματα συνήθους χρήσης από την τοπική οικοδομική βιομηχανία, ώστε να δημιουργηθεί η προοπτική υιοθέτησης των μέτρων. Χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM II 42.5R με ειδική επιφάνεια Blaine 430 m<sup>2</sup>/kg. Τα χαρακτηριστικά των αδρανών περιγράφονται εκτενώς στην βιβλιογραφία ((P A Savva & Petrou, 2015; Pericles A Savva & Petrou, 2015)). Η σύνθεση του μίγματος υπολογίστηκε σύμφωνα με το πρότυπο ACI 211.1 (Πίνακας 2). Ο σχεδιασμός των μιγμάτων βασίστηκε στην ποσότητα αδρανών η οποία προέκυψε από τον υπολογισμό του αναγκαίου νερού για αυτοσυντήρηση (Bentz, Lura, & Roberts, 2005). Χρησιμοποιήθηκε λόγος ν/τ ίσος με 0.40. Ελέγχθηκε η θερμοκρασία κατά την ωρίμανση, η θλιπτική αντοχή, και το πορώδες στην περίοδο των 3,7,28 και 90 ημερών. Τα μίγματα τα οποία σχεδιάστηκαν με YA και XA ορίζονται ως αυτοσυντηρούμενα μίγματα και μίγματα αναφοράς αντίστοιχα.

**Πίνακας 1:** Ιδιότητες Αδρανών

	Κλάσμα (mm)	$\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{ssd}$ (g/cm <sup>3</sup> )	WA <sub>24</sub> (%)*
XA	8/20	2.71	2.74	1,00
	4/10	2.71	2.76	1.60
YA	8/20	2.40	2.58	2.35
	4/10	2.52	2.52	4.65
ΑΜΜΟΣ	0/4	2.60	2.69	1.29

\*:Υδαταπορροφητικότητα 24 ωρών

**Πίνακας 2:** Σύνθεση Σκυροδέματος

	XA (kg/m <sup>3</sup> )	YA (kg/m <sup>3</sup> )
Τσιμέντο II 42.5R	512	512
Νερό	205	205
Χονδρόκοκκα 8/20	336	332
Λεπτόκοκκα 4/10	671	665
Άμμος 0/4	627	577

## **Ιδιότητες Νωπού Σκυροδέματος**

Η κάθιση των μιγμάτων διατηρήθηκε σταθερή ( $80 \pm 30\text{mm}$ ) με χρήση υπερρυστοποιητή σε όλα τα μίγματα. Η μέτρηση της θερμοκρασίας έγινε με τη χρήση θερμοστοιχείων τα οποία εισήχθησαν στα μίγματα περίπου 30 λεπτά μετά την ανάμιξη, σε ένα μονωμένο σύστημα, το οποίο εγγυάται συνθήκες αδιαβατικής συμπεριφοράς (Πίνακας 3).

## **Θλιπτική Αντοχή**

Μετρήθηκε ο μέσος όρος αντοχής σε θλίψη τριών κύβων 100mm, με συντελεστή διασποράς < 10%. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακας 4. Τα πειράματα έγιναν βάσει του Ευρωπαϊκού προτύπου EN 12390-3.

## **Πορώδες και Διαπερατότητα σε χλωριόντα**

Τα δοκίμια σφραγίστηκαν σε αεροστεγή θάλαμο, από τον οποίο αφαιρέθηκε ο αέρας και προστέθηκε νερό σε κατάσταση κενού. Ακολούθως παρέμειναν εμβαπτισμένα σε νερό για 24 ώρες ώστε να περιέλθουν σε κατάσταση κορεσμού και να μετρηθεί η μάζα τους. Στη συνέχεια, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε κλίβανο στους 105 °C μέχρι να καταγραφεί σταθερή (ξηρή) μάζα. Οι τιμές οι οποίες αναγράφονται στον Πίνακας 4 αντιπροσωπεύουν τον μέσο όρο τριών δοκιμίων. Ο συντελεστής διακύμανσης μεταξύ των δοκιμίων ήταν < 2%. Τα πειράματα εκτελέστηκαν με βάση αντίστοιχες δοκιμές που εντοπίστηκαν στην βιβλιογραφία (Kanellopoulos, Petrou, & Ioannou, 2012).

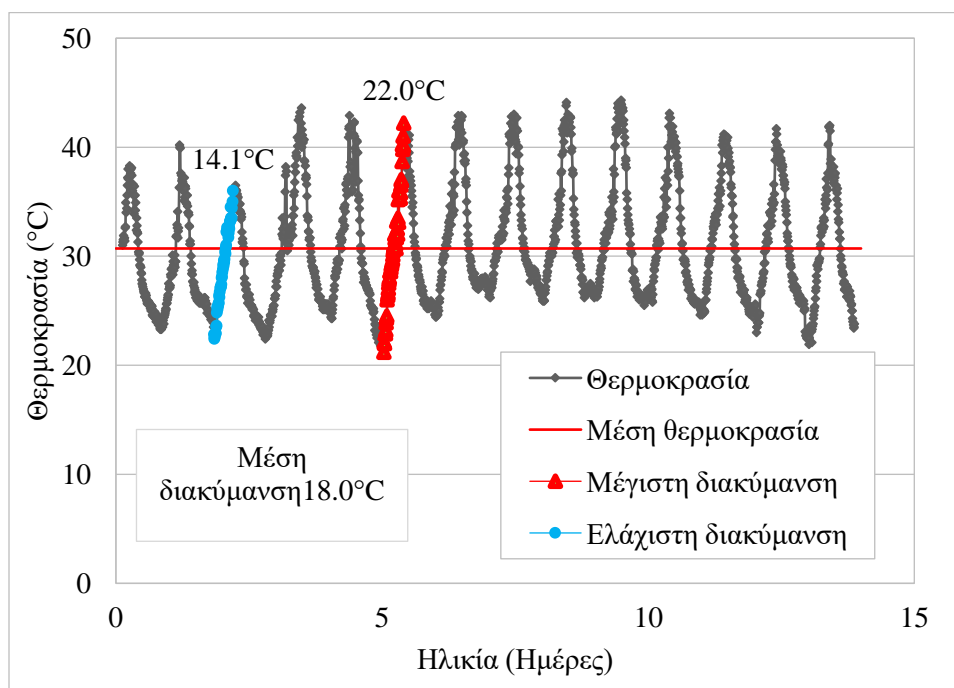
Οι μετρήσεις διαπερατότητας σε χλωριόντα έγιναν σε κυλινδρικά δοκίμια με την χρήση της διάταξης PROOVEit της εταιρείας GERMANN Instruments η οποία είναι εναρμονισμένη με το πρότυπο ASTM-C1202. Οι τιμές οι οποίες αναγράφονται στον Πίνακας 4 αντιπροσωπεύουν τον μέσο όρο τριών δοκιμίων. Ο συντελεστής διακύμανσης μεταξύ των δοκιμίων ήταν < 4%.

## **Αποτελέσματα και συζήτηση**

Η μέγιστη θερμοκρασιακή μεταβολή σε μια περίοδο 24 ωρών ήταν περίπου 22°C ενώ η ελάχιστη 14°C (Σχήμα 1). Η δημιουργία μικρορωγμών ήταν αναμενόμενη λόγω του

περιορισμού της συρρίκνωσης και των κύκλων συστολής/διαστολής. Το συγκεκριμένο φαινόμενο εντείνεται στα πραγματικά κτήρια, λόγω του εντονότερου περιορισμού (πακτώσεων), το οποίο οδηγεί σε εκτεταμένη ρηγμάτωση.

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των θερμοκρασιών ωρίμανσης των δοκιμίων σε ένα θερμο-μονωμένο περιβάλλον. Τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται ομαδοποιημένα ως προς τη μέθοδο συντήρησης, καθώς οι συγκεκριμένες μετρήσεις προηγήθηκαν της έκθεσης των δοκιμίων στις μεθόδους συντήρησης. Το βασικότερο συμπέρασμα από τα συγκεκριμένα πειράματα, είναι ότι τα αυτοσυντηρούμενα μίγματα (ΥΑ) παρουσιάζουν αυξημένη μέγιστη θερμοκρασία σε σχέση με τα μίγματα αναφοράς (ΧΑ). Παρατηρείται επίσης διαφοροποίηση στην εμφάνιση της μέγιστης θερμοκρασίας μεταξύ των μιγμάτων αναφοράς και των αυτοσυντηρούμενων μιγμάτων στην καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου. Η αυξημένη θερμοκρασία στα αυτοσυντηρούμενα σκυροδέματα, καθώς και η καθυστέρηση εμφάνισης μέγιστης θερμοκρασίας, αποδίδονται στον αυξημένο ρυθμό ενυδάτωσης.

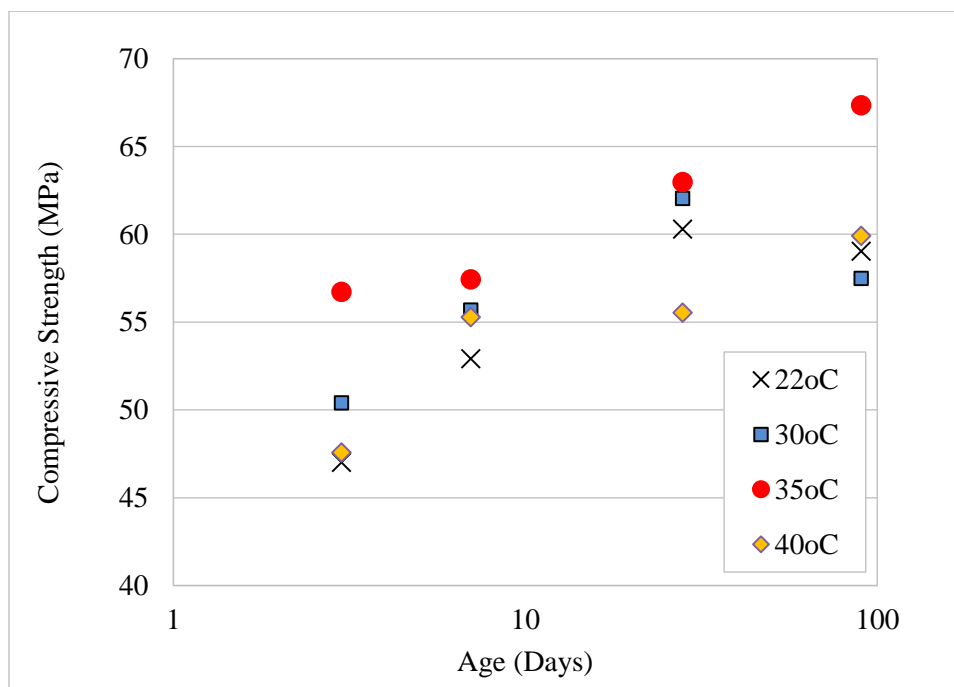


**Σχήμα 1:** Θερμοκρασιακή μεταβολή σε περίοδο δυο εβδομάδων.

**Πίνακας 3: Μέγιστη Θερμοκρασία**

	22XA	22YA	30XA	30YA	35XA	35YA	40XA	40YA
Μέγιστη θερμ. (°C)	36.9	39.5	41.9	44.0	43.9	49.2	47.5	47.2
Ηλικία (hr)	8.3	9.3	7.6	9.2	7.6	7.4	7.3	7.3

Οι τιμές της θλιπτικής αντοχής, του πορώδους και της διείσδυσης χλωριόντων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Συγκρίνοντας τη μέση θλιπτική αντοχή των μίγμάτων βάσει της θερμοκρασίας ανάμιξης, ασχέτως του τύπου των αδρανών ο οποίος χρησιμοποιήθηκε, συμπεραίνουμε ότι η μέγιστη θλιπτική αντοχή υπάρχει στα μίγματα των 35°C (61.1 MPa), ενώ η ελάχιστη εμφανίζεται στα μίγματα των 22°C (54.8 MPa) και 40°C (54.6 MPa). Επιπρόσθετα, το μίγμα αναφοράς παρουσιάζει 16% υψηλότερη θλιπτική αντοχή (61.6 MPa) σε σχέση με τα αυτοσυντηρούμενα μίγματα (51.8 MPa). Στο παρουσιάζεται η ανάπτυξη των αντοχών των δοκιμίων σε συνάρτηση με τον χρόνο. Ο σκοπός είναι για να παρουσιαστεί η δράση των θερμοκρασιών παραγωγής στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.



**Σχήμα 2: Θλιπτική αντοχή (M.O.) με βάση την ηλικία**



Σύμφωνα με την ηλικία του σκυροδέματος, παρατηρείται ότι τα μίγματα αποκτούν τη μέγιστη θλιπτική αντοχή τους (60.2 MPa) στην ηλικία των 28 ημερών, με ελάχιστη διαφοροποίηση στην ηλικία των 90 ημερών (60.9 MPa). Τα μίγματα αναφοράς δεν παρουσιάζουν καμία διαφοροποίηση σε σχέση με τις διαφορετικές μεθόδους συντήρησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι, τα μίγματα αναφοράς τα οποία είχαν τύχει υγρής συντήρησης παρουσίασαν χαμηλότερη θλιπτική αντοχή από τα αντίστοιχα τα οποία είχαν εκτεθεί στο περιβάλλον, σε ηλικία τριών ημερών. Η συμπεριφορά αυτή αντιστρέφεται στην ηλικία των 90 ημερών, όπου τα δοκίμια υγρής συντήρησης παρουσιάζουν καλύτερες αντοχές.

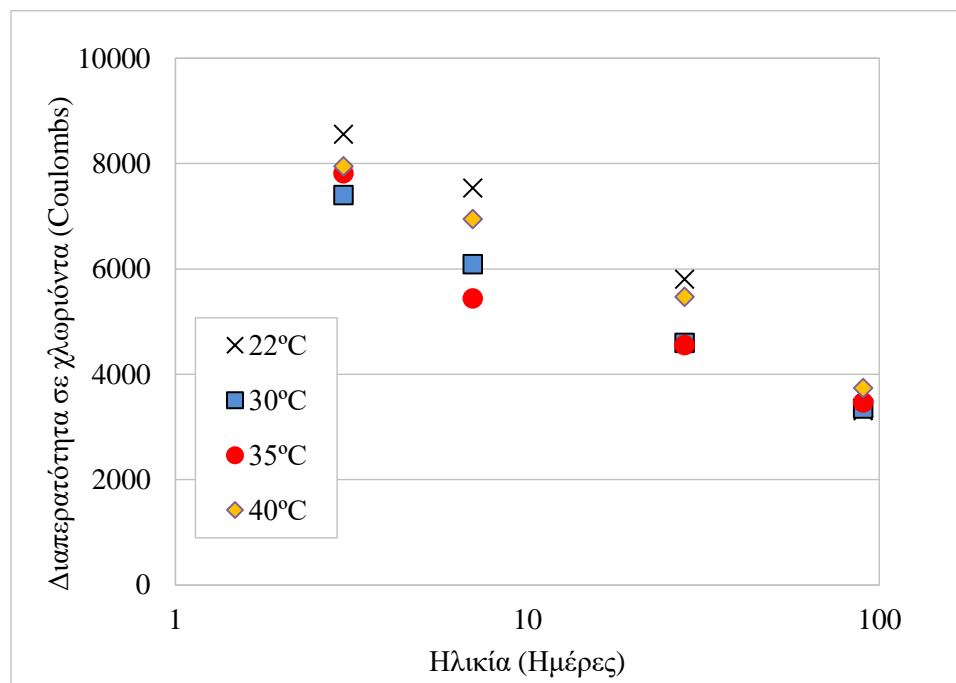
Η συγκεκριμένη συμπεριφορά δεν παρατηρείται στα αυτοσυντηρούμενα μίγματα. Η μόνη διαφορά παρατηρείται στους 22 °C, όπου τα εμβαπτισμένα μίγματα παρουσίασαν ψηλότερες αντοχές (62.0 MPa) από αυτά που έτυχαν ξηρής συντήρησης (56.5 MPa). Επιπλέον, τα αυτοσυντηρούμενα δοκίμια παρουσίασαν παρόμοιες ιδιότητες, ασχέτως της θερμοκρασίας σκυροδέτησης/συντήρησης. Τα δοκίμια σκυροδέτησης στους 22°C σε υγρή/ξηρή συντήρηση παρουσίασαν μέση θλιπτική αντοχή 48.7 MPa και 52.1 MPa αντίστοιχα, ενώ τα αντίστοιχα μίγματα των 40°C παρουσίασαν αντίστοιχες θλιπτικές αντοχές 45.4 MPa και 47.0 MPa. Τα αυτοσυντηρούμενα σκυροδέματα με θερμοκρασίες σκυροδέτησης 30°C και 35°C παρουσίασαν 18% υψηλότερες θλιπτικές αντοχές σε σχέση με αυτά της υγρής συντήρησης. Λαμβανομένου υπόψη ότι τα εκτεθειμένα στο περιβάλλον μίγματα αναφοράς παρουσίασαν μείωση της θλιπτικής αντοχής τους, σε αντίθεση με τα αυτοσυντηρούμενα μίγματα, η διαφορά μεταξύ τους πιστώθηκε στο μηχανισμό της αυτοσυντήρησης.

Τα αποτελέσματα της διείδυσης χλωριόντων ενισχύουν τη θέση αυτή, παρουσιάζοντας μικρή διείδυση, παρόμοιας των δοκιμίων ελέγχου, παρά το αυξημένο πορώδες. Τα μίγματα αναφοράς σε μικρές ηλικίες (3 και 7 ημερών) δεν παρουσίασαν διαφορά στην θλιπτική αντοχή σε θερμοκρασίες σκυροδέτησης 35°C και 40°C. Η συγκεκριμένη παρατήρηση οφείλεται στον αυξημένο τοπικό λόγο CSH/χώρου (Hasholt, Jespersen, & Jensen, 2010), λόγω του οποίου μειώνεται η ενυδάτωση, ακόμα και με την ύπαρξη νερού και τσιμέντου. Επιπρόσθετα, το κέλυφος του τσιμέντου που δημιουργείται γύρω από τους κόκκους αυτούς, σκληραίνει πρόωρα με την αύξηση της θερμοκρασίας. Το συγκεκριμένο φαινόμενο μειώνει την διάχυση των ιόντων προς τους τσιμεντόκοκκους, μειώνοντας έτσι το βαθμό ενυδάτωσης (Kjellsen & Detwiller, 1992). Παρατηρείται ότι η τελική αντοχή (90 ημερών) του αυτοσυντηρούμενου σκυροδέματος υψηλής θερμοκρασίας συντήρησης είναι παρόμοια με των μιγμάτων αναφοράς σε υψηλή θερμοκρασία συντήρησης, παρά την χρήση χαμηλής ποιότητας αδρανών.

Το μέσο πορώδες των μιγμάτων αναφοράς είναι αρκετά χαμηλότερο (30%) σε σχέση με το αυτοσυντηρούμενο σκυρόδεμα, ασχέτως θερμοκρασίας. Η υψηλή θερμοκρασία συντήρησης επηρεάζει αρνητικά (11% αύξηση κατά μέσο όρο) το πορώδες των μιγμάτων αναφοράς.

Οι τιμές διείσδυσης χλωριόντων μειώνονταν με την πάροδο του χρόνου (Σχήμα 3). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η συσχέτιση μεταξύ της διείσδυσης χλωριόντων και του χρόνου παρατηρείται να είναι λογαριθμική ( $\min R^2 > 0.92$ ).

Τέλος, παρά την υψηλή διαπερατότητα των μιγμάτων τα οποία συντηρήθηκαν στους 22°C, ο ρυθμός μείωσης της σειράς δεδομένων είναι 30% υψηλότερος σε σχέση με τα άλλα μίγματα με παρόμοια διαπερατότητα σε χλωριόντα σε περίοδο 90 ημερών. Παρατηρείται ότι τα μίγματα με θερμοκρασία σκυροδέτησης 40°C παρουσίασαν τη μεγαλύτερη διαπερατότητα σε χλωριόντα.



**Σχήμα 3:** Τιμές διαπερατότητας σε χλωριόντα σε σχέση με την ηλικία του σκυροδέματος.

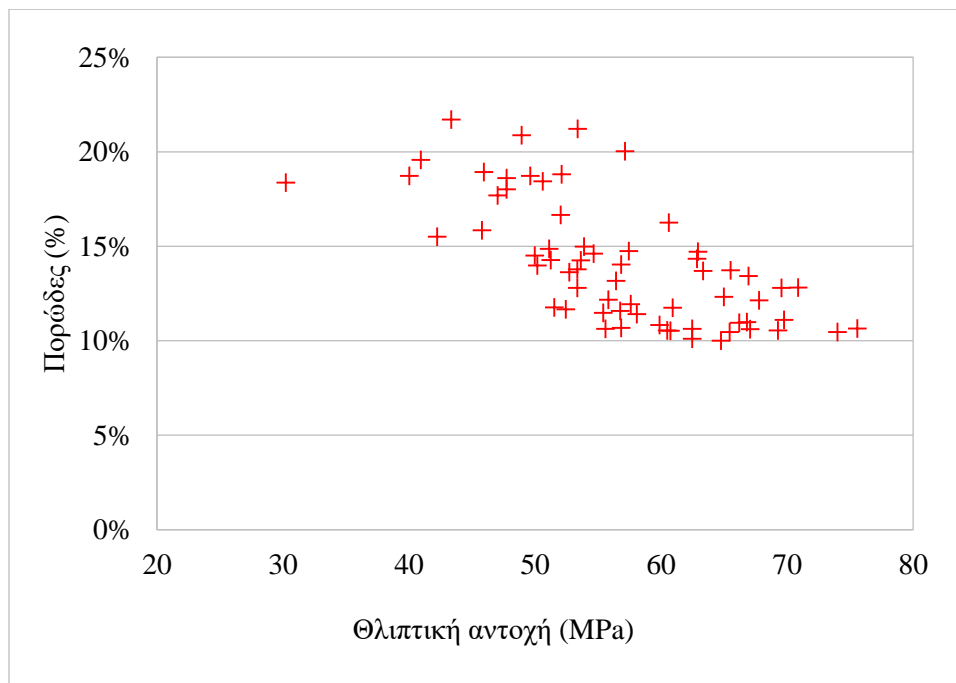
Τα δοκίμια τα οποία έτυχαν υγρής συντήρησης παρουσίασαν 47% μειωμένη διαπερατότητα χλωριόντων σε σχέση με τα αντίστοιχα τα οποία παρέμειναν

εκτεθειμένα στο περιβάλλον. Η μέση τιμή διαπερατότητας χλωριόντων σε δοκίμια εκτεθειμένα στο περιβάλλον παρουσίασε 70% αύξηση σε σχέση με τα δοκίμια της υγρής συντήρησης. Οι παραπάνω παρατηρήσεις τονίζουν τη σημαντικότητα των σωστών συνθηκών συντήρησης κατά τις πρώτες μέρες μετά τη σκυροδέτηση.

**Πίνακας 4:** Θλιπτική Αντοχή (MPa), Πορώδες (%) and Διαπερατότητα σε Χλωριόντα (Coulombs)

	3 ημέρες			7 ημέρες			28 ημέρες			90 ημέρες		
	$f_c$	P	RCP	$f_c$	P	RCP	$f_c$	P	RCP	$f_c$	P	RCP
	MPa	%	Coulombs	MPa	%	Coulombs	MPa	%	Coulombs	MPa	%	Coulombs
22ΠΥ	42.23	15.51	9540	53.63	14.25	7100	60.62	16.25	5704	52.04	16.65	3373
22ΠΧ	53.34	13.78	8197	56.84	14.04	6526	62.93	14.71	5976	52.71	13.62	4618
22ΕΥ	40.94	19.57	8357	45.78	15.84	6572	50.60	18.43	4542	57.44	14.75	2550
22ΕΧ	51.52	11.77	8119	55.42	11.48	9938	67.07	10.62	6985	74	10.46	2700
30ΠΥ	53.34	12.8	6760	60.91	11.75	5817	65.52	13.73	5965	54.65	14.61	5112
30ΠΧ	55.82	12.17	5858	58.08	11.41	6242	63.32	13.69	5784	56.43	13.17	3711
30ΕΥ	40.03	18.72	7008	47.03	17.69	6012	53.88	14.98	2444	52.11	18.81	2495
30ΕΧ	52.44	11.67	9969	56.75	11.57	6286	65.43	10.46	4179	66.8	10.99	2091
35ΠΥ	62.85	14.33	6324	51.11	14.87	5044	70.88	12.82	6252	66.93	13.43	4445
35ΠΧ	60.75	10.53	6827	66.21	10.95	5084	60.48	10.54	4652	69.76	11.1	3508
35ΕΥ	47.73	18.02	8119	49.97	14.51	5896	51.25	14.27	3261	57.14	20.02	2509
35ΕΧ	55.58	10.63	10000*	62.47	10.63	5733	69.28	10.54	4052	75.57	10.65	3400
40ΠΥ	43.36	21.71	7051	45.94	18.92	5840	49.61	18.73	4681	48.94	20.88	3979
40ΠΧ	59.88	10.84	10000*	64.99	12.33	8720	57.6	11.94	9247	67.77	12.14	6222
40ΕΥ	30.21	18.36	5581	47.74	18.61	4893	50.18	13.98	3018	53.37	21.21	2201
22ΠΥ	56.84	10.68	9150	62.48	10.11	8328	64.76	10	4927	69.56	12.79	2546

Είναι σημαντική η έλλειψη συσχέτισης ( $R^2=0.07$ ) μεταξύ της θλιπτικής αντοχής και της διαπερατότητας σε χλωριόντα, βάσει των πειραματικών δεδομένων. Παρατηρείται μικρή συσχέτιση ( $R^2=0.47$ ) μεταξύ της θλιπτικής αντοχής και του πορώδους (Σχήμα 4). Δεν παρατηρείται συσχέτιση μεταξύ του πορώδους και της διαπερατότητας σε χλωριόντα ( $R^2=0.10$ ). Η τιμή των χλωριόντων σε ορισμένες περιπτώσεις (Πίνακας 4) ξεπερνούν τις 10000 Coulombs και σημειώνονται με αστερίσκο. Οι τιμές αυτές συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση για σκοπούς σύγκρισης της συμπεριφοράς μεταξύ των μιγμάτων και της εξέλιξης των ιδιοτήτων αυτών, παρόλο που θεωρείται ότι βρίσκονται εκτός των ορίων τα οποία μπορεί να καταγράψει η διάταξη.



**Σχήμα 4:** Πορώδες (%) / Θλιπτική Αντοχή (MPa)

## Συμπεράσματα

Η έκθεση του σκυροδέματος σε υψηλές περιβαλλοντικές θερμοκρασίες και υψηλές θερμοκρασιακές μεταβολές οδηγεί σε μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων και της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος. Οι συνθήκες συντήρησης επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την τελική συμπεριφορά και τις τελικές ιδιότητες του υλικού. Τα μίγματα αναφοράς είχαν καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με τα αυτοσυντηρούμενα μίγματα, λόγω της καλύτερης ποιότητας των αδρανών. Παρ'όλα αυτά, η έκθεση στο περιβάλλον επηρέασε σημαντικά τα μίγματα αναφοράς. Από την άλλη, τα εκτεθειμένα αυτοσυντηρούμενα μίγματα παρουσίασαν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.

Συμπεραίνεται ότι η αυτοσυντήρηση του σκυροδέματος με αδρανή υψηλής απορροφητικότητας είναι μια μέθοδος χαμηλού κόστους, η οποία μπορεί να βελτιώσει ουσιαστικά τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος.

## Βιβλιογραφία

- Ahmad, S., & Nazir, A. (2004). Investigation on extreme weather concreting.
- Bappa, B., Paul, K., Saha, G. C., Saha, K. K., & Rashid, M. H. (2013). Effect of Casting Temperature on Bond Stress of Reinforced Concrete Structure, *13*(2).
- Benoudjafer, I., Merbouh, M., Labbaci, B., & Hamouine, A. (2013). Contribution to the experimental study of the concrete behavior in its climatic environment. *Energy Procedia*, *36*, 1320–1327. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.150>
- Bentz, D. P., Lura, P., & Roberts, J. W. (2005). Mixture proportioning for internal curing. *Concrete International*, *27*(2), 35–40. Retrieved from <http://concrete.nist.gov/~bentz/Mixpropfin/CI2702Bentz.pdf>
- Burg, R. G. (1996). The Influence of Casting and Curing Temperature on the Properties of Fresh and Hardened Concrete, 18.
- Hasholt, M. T., Jespersen, M. H. S., & Jensen, O. M. (2010). Mechanical properties of Concrete with SAP Part I: Development of compressive strength, (August).
- Iqieger, P. (n.d.). Effect of Mixing and Curing on Concrete Strength.
- Jensen, O. M., & Hansen, P. F. (2000). Water-entrained cement-based materials I .

- Principle and theoretical background. *Cement and Concrete Research*, 31, 1–13.
- Kanellopoulos, A., Petrou, M. F., & Ioannou, I. (2012). Durability performance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 37, 320–325. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.049>
- Kjellsen, O. K., & Detwiller, J. . (1992). Reaction kinetics of portland cement mortars hydrated at different temperatures. *Cement and Concrete Research*, 22, 112–120.
- Neville, A. M. (2002). *Properties of Concrete*. Pearson Education Limited.
- Savva, P. A., & Petrou, M. F. (2015). A new approach for internal curing of high performance concrete to reduce early-age volume variations. In *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV, Leipzig, Germany* (pp. 435–441).
- Savva, P. A., & Petrou, M. F. (2015). High-Absorptive Normal-Weight Aggregates used as Internal Curing Agent. In *27th Biennial National Conference of the Concrete Institute of Australia in conjunction with the 69th RILEM week* (pp. 1305–1313).
- Shoukry, S. N., William, G. W., Downie, B., & Riad, M. Y. (2011). Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2), 688–696. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.020>
- Taylor, H. F. W. (1990). Cement chemistry. *Library*.
- Zhang, T., Gao, P., Luo, R., Guo, Y., Wei, J., & Yu, Q. (2013). Measurement of chemical shrinkage of cement paste: Comparison study of ASTM C 1608 and an improved method. *Construction and Building Materials*, 48, 662–669. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.086>