

Επίδραση των κρυσταλλικών προσμείκτων PRAH στην ανθεκτικότητα των σκυροδεμάτων

Influence of PRAH crystalline admixtures on the durability of concretes

Κοσμάς ΣΙΔΕΡΗΣ¹, Χρήστος ΤΑΣΣΟΣ², Αλέξανδρος ΧΑΤΖΟΠΟΥΛΟΣ³,
Παναγιώτα ΜΑΝΙΤΑ⁴

Λέξεις κλειδιά: κρυσταλλικά πρόσμεικτα (crystalline admixtures), ανθεκτικότητα (durability), ενανθράκωση (carbonation), χλωριόντα (chlorine penetration), σκυρόδεμα (concrete)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επίδραση των κρυσταλλικών προσμείκτων PRAH στην ανθεκτικότητα των μειγμάτων σκυροδέματος. Παρασκευάστηκαν τέσσερα σκυροδέματα – δύο μείγματα αναφοράς και δύο εναλλακτικά μείγματα με προσθήκη κρυσταλλικών προσμείκτων-. Σε όλα τα μείγματα ελήφθησαν μετρήσεις μηχανικών αντοχών και δεικτών ανθεκτικότητας. Τα εναλλακτικά μείγματα παρουσίασαν αυξημένη θλιπτική αντοχή και καλύτερη ανθεκτικότητα σε σχέση με τα αντίστοιχα μείγματα αναφοράς.

ABSTRACT: The influence of crystalline admixtures on the durability of concretes was the objective of the present study. We produced four concrete mixtures – two reference concretes and two alternative mixtures- The properties measured were the compressive strength and different durability indicators. The results revealed that crystalline admixtures enhanced the strength and the durability of alternative mixtures.

¹Αναπληρωτής Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: kksider@civil.duth.gr

²Πολ. Μηχανικός, υπ. Διδάκτορας, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: ctassos@civil.duth.gr

³Πολ. Μηχανικός, υπ. Διδάκτορας, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: achatzop@civil.duth.gr

⁴ Δρ. Πολ. Μηχανικός, επιστημονικός συνεργάτης ΕΔΥ/ΔΠΘ, peg.manita@gmail.com

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα πρόσμεικτα μείωσης της υδατοπερατότητας υπό υψηλή πίση (Permeability Reducing Admixtures under Hydrostatic pressure – PRAH) είναι μία κατηγορία στεγανοποιητικών προσμείκτων που αναφέρονται από το ACI 212.3-R10. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούν ένα μηχανισμό σφράγισης των πόρων του σκυροδέματος μέσω του μηχανισμού ανάπτυξης κρυστάλλων. Το υλικό προστίθεται στο σκυρόδεμα κατά την φάση της παρασκευής του και ενεργοποιείται παρουσία υγρασίας, αναπτύσσοντας αδιάλυτους κρυστάλλους οι οποίοι γεμίζουν τους πόρους και αποτρέπουν την περαιτέρω διείσδυση της υγρασίας.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επίδραση των κρυσταλλικών προσμείκτων PRAH στην ανθεκτικότητα κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, παρασκευάστηκαν σκυροδέματα διαφορετικών κατηγοριών αντοχής με και χωρίς την προσθήκη κρυσταλλικών προσμείκτων. Μετρήθηκαν η θλιπτική αντοχή των μειγμάτων αλλά και δείκτες ανθεκτικότητας όπως η υδατοποροφητικότητα, η διείσδυση χλωριόντων και η ενανθράκωση των μειγμάτων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προσθήκη των PRAH στο μείγμα του σκυροδέματος οδηγεί σε σφράγιση του πορώδους και σημαντική αύξηση της ανθεκτικότητάς του ιδιαίτερα έναντι διείσδυσης χλωριόντων, γεγονός που μεταφράζεται σε σημαντική αύξηση της οφέλιμης ζωής των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Παρήχθησαν τέσσερα μείγματα σκυροδέματος—δύο συμβατικά σκυροδέματα και δύο εναλλακτικά μείγματα με προσθήκη κρυσταλλικών προσμείκτων. Τα μείγματα σκυροδέματος ανήκαν στις κατηγορίες αντοχής C25/30 και C30/37, σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN206-1. Για την παρασκευή των μειγμάτων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEM I 42.5R και CEM II 32.5(B-M)N. Τα αδρανή υλικά ήταν ασβεστολιθικής προελεύσεως με μέγιστο κόκκο διαμέτρου 32 mm. Χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες δοσολογίες επιβραδυντή και πολυκαρβοξυλικού υπερρευστοποιητή προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή εργασιμότητα.

Οι αναλογίες καθώς και οι ιδιότητες των νωπών μειγμάτων παρουσιάζονται για τα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν στον Πίνακα 1.

Παρασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 150mm και κυλινδρικά διαστάσεων 100x200mm. Όλα τα δείγματα συντηρήθηκαν σε θάλαμο συντήρησης ($T=20^{\circ}\text{C}$,

RH>98%) μέχρι την ηλικία των δοκιμών. Παρασκευάστηκαν επίσης κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 60X100mm τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση του βάρους ενανθράκωσης.

Οι κύβοι των 150mm χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής στις ηλικίες των 2 και 28 ημερών καθώς και για τον προσδιορισμό της υδατοαπορροφητικότητας. Η αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων των σκυροδεμάτων μετρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια με διάμετρο 100mm και ύψος 50mm που αποκόπηκαν από τους κυλίνδρους 100x200mm. Τα δοκίμια αυτά συντηρήθηκαν όπως παραπάνω μέχρι την ηλικία των 28 ημερών. Ακολούθως εκτιμήθηκε ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων D_c σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο NT Build 492.

Πίνακας 1: Αναλογίες σύνθεσης μειγμάτων σκυροδέματος

Υλικά	C 25/30	C 25/30- PRAH	C30/37	C 30/37- PRAH
kg/m ³				
CEMI 42,5R	0	0	330	0
CEM II/(B-M) 32.5N	400	320	0	350
Άμμος	1042	1105	1133	1133
Γαρμπίλι	180	190	195	195
Χαλίκι	575	610	625	625
Νερό	200	160	165	160
Υπερ/της	1.40	1.12	1.16	1.16
Επιβρ/ής	5.60	4.80	5	3.5
PRAH	--	2.56	--	2.8
N/T	0.50	0.50	0.50	0.46
S0 (cm)	25	23	24	21
S30 (cm)	20	22	22	19

Η αντίσταση σε ενανθράκωση μετρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια 60x100mm. Τα δοκίμια αυτά συντηρήθηκαν στον ανωτέρω υγρό θάλαμο για 3 ημέρες ενώ στη συνέχεια συντηρήθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου μέχρι την ηλικία των 28 ημερών. Μετά την ηλικία αυτή εισήχθησαν στο θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης (RH=55-60%, T=20°C, CO₂=1%) όπου και παρέμειναν για 60 ημέρες.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Αντοχή σε θλίψη

Η θλιπτική αντοχή μετρήθηκε για όλα τα μείγματα σκυροδέματος στις ηλικίες των 2, και 28 ημερών. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Αντοχή σε θλίψη των μειγμάτων σκυροδέματος (MPa)

(MPa)	C25/30	C25/30-PRAH	C30/37	C30/37-PRAH
f_{c2}	26.85	21.20	31.40	31.60
f_{c28}	39.30	41.10	54.20	64.00

Από τις τιμές των ανωτέρω πινάκων φαίνεται η θετική επίδραση των κρυσταλλικών προσμείκτων στην θλιπτική αντοχή των μειγμάτων. Συγκεκριμένα, τα μείγματα κατηγορίας αντοχής C30/37 παρουσιάζουν την ίδια αντοχή στην ηλικία των 2 ημερών. Το μείγμα όμως που παρασκευάστηκε με προσθήκη κρυσταλλικών προσμείκτων παρουσιάζει αυξημένη αντοχή κατά 9,8 MPa (ποσοστό 18,15%) σε σχέση με το μείγμα αναφοράς.

Στην περίπτωση των μειγμάτων κατηγορίας C25/30 η αντοχή των 2 ημερών του εναλλακτικού σκυροδέματος είναι μειωμένη κατά 5,65 MPa (ποσοστό μείωσης 21,04%) σε σχέση με το μείγμα αναφοράς, γεγονός που οφείλεται στη μειωμένη κατά 20% ποσότητα του τσιμέντου στο μείγμα αυτό. Η σταδιακή όμως ανάπτυξη των κρυστάλλων οδήγησε σε αύξηση της μεθύτερης αντοχής του εναλλακτικού μείγματος η οποία στην ηλικία των 28 ημερών μετρήθηκε ίση με 41,10MPa, δηλαδή 1,8MPa υψηλότερη από το μείγμα αναφοράς (ποσοστό αύξησης 4,6%).

Υδατοαπορροφητικότητα

Οι μετρήσεις υδατοαπορροφητικότητας των μειγμάτων σκυροδέματος πραγματοποιήθηκαν στην ηλικία των 28 ημερών σε δοκίμια ακμής 150mm. Τα δοκίμια παρέμειναν στο θάλαμο συντήρησης του εργαστηρίου μέχρι την ηλικία των 28 ημερών. Στη συνέχεια, ξηράθηκαν στους 65 °C μέχρι σταθεροποίησης του βάρους τους. Κατόπιν, τα δοκίμια προετοιμάστηκαν κατάλληλα (τυλίχθηκαν με μονωτική ταινία περιμετρικά για την εξασφάλιση της απορρόφησης μόνο από τη βάση του δοκιμίου) και αφού ζυγίστηκαν, τοποθετήθηκαν σε λεκάνες με καθαρό νερό κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η το νερό να καλύπτει 3-5 mm του ύψους του δοκιμίου.

Μετρήσεις μεταβολής του βάρους των δοκιμίων πραγματοποιήθηκαν στις χρονικές στιγμές των 10 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min, 180 min, 240 min, 480 min και

24hr. Τα βάρη αυτά διαιρέθηκαν με την εκτεθειμένη επιφάνεια του δοκιμίου στο νερό για να υπολογιστεί η υδατοαπορροφητικότητα σε μονάδες gr/m^2 .

Πίνακας 3: Υδατοαπορροφητικότητα μειγμάτων σκυροδέματος

	C25/30	C25/30-PRAH	C30/37	C30/37-PRAH
gr/m^2				
S_{index} ($\text{mm/min}^{0.5}$)	1.21	0.76	1.09	0.81

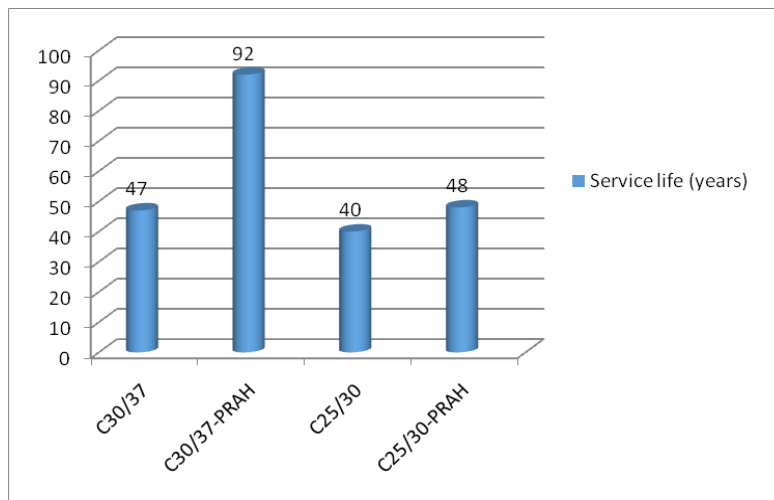
Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων

Οι τιμές του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων D_{nssm} μετρήθηκαν σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492 και παρουσιάζονται για όλα τα μείγματα στον Πίνακα 4

Πίνακας 4: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) μειγμάτων σκυροδέματος.

	C25/30	C25/30-PRAH	C30/37	C30/37-PRAH
D_{nssm} ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	15.27	12.54	11.6	8.61

Οι ανωτέρω συντελεστές χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του χρόνου ζωής κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος που σκυροδετούνται με τα συγκεκριμένα μείγματα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Life 365. Έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές: Κατηγορία έκθεσης XS1, χρόνος εξέλιξης της διάβρωσης 10 έτη, επικάλυψη οπλισμών 50 mm. Ο χρόνος ζωής των κατασκευών παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα:



Διάγραμμα 1: Υπολογισθέντες χρόνοι ζωής κατασκευών .

Από το ανωτέρω σχήμα φαίνεται η ιδιαίτερα θετική επίδραση των κρυσταλλικών προσμείκτων στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα το μείγμα C30/37-PRAH αναπτύσσει διπλάσιο χρόνο ζωής έναντι διείσδυσης χλωριόντων σε σχέση με το μείγμα αναφοράς C30/37, ενώ το μείγμα C25/30-PRAH παρουσιάζει αυξημένο κατά 20% χρόνο ζωής σε σχέση με το μείγμα αναφοράς C25/30. Η ενεργοποίηση των κρυστάλλων και στις δύο περιπτώσεις οδήγησε σε δραστική μείωση του πορώδους αποτρέποντας έτσι την διείσδυση των χλωριόντων στο εσωτερικό των μειγμάτων.

Βάθος Ενανθράκωσης

Το βάθος ενανθράκωσης μετρήθηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο Πρότυπο EN 14630. Τα δοκίμια παρέμειναν για 60 ημέρες στο θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών. Το βάθος ενανθράκωσης όλων των μειγμάτων παρουσιάζεται στους Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Βάθος ενανθράκωσης των μειγμάτων σκυροδέματος

Ενανθράκωση (mm)	C25/30	C25/30-PRAH	C30/37	C30/37-PRAH
	8,7	9,1	2,9	4,5

Με βάση τις τιμές του Πίνακα 4 φαίνεται ότι το βάθος ενανθράκωσης των παρασκευασθέντων μειγμάτων επηρεάζεται από την προσθήκη των κρυσταλλικών προσμεικτών με διαφορετικό τρόπο. Συγκεκριμένα, το μείγμα C25/30-PRAH παρουσιάζει ελαφρώς αυξημένο κατά 5% βάθος ενανθράκωσης σε σχέση με το μείγμα αναφοράς ενώ το μείγμα C30/37-PRAH παρουσιάζει βάθος ενανθράκωσης αυξημένο κατά 55% σε σχέση με το μείγμα αναφοράς C30/37. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως οφείλεται στην μη ενεργοποίηση των κρυστάλλων· τα δοκίμια παρέμειναν σε θάλαμο υγρής συντήρησης για μόλις τρεις ημέρες, σε αντίθεση με τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στις προηγούμενες δοκιμές και τα οποία συντηρήθηκαν στον υγρό θάλαμο συντήρησης του εργαστηρίου για 28 ημέρες. Επιπλέον θα πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι το εναλλακτικό μείγμα C25/30-PRAH παρασκευάστηκε με χαμηλότερη κατά 20% ποσότητα τσιμέντου, ενώ το εναλλακτικό μείγμα C30/37-PRAH παρασκευάστηκε αποκλειστικά με χρήση τσιμέντου CEMIII(B-M) 32.5N το οποίο είναι περισσότερο επιρρεπές έναντι ενανθράκωσης λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε ποζολάνες.

Μακροχρόνια πειράματα έκθεσης σε εξωτερικό περιβάλλον βρίσκονται σε εξέλιξη στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών στην Ξάνθη προκειμένου να υπολογισθεί ο συντελεστής ενανθράκωσης και να αποτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια ο χρόνος ζωής έναντι ενανθράκωσης των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος που εκτίθενται στην κατηγορία XC4.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κρυσταλλικά πρόσμεικτα PRAH που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία φαίνεται ότι αποτελούν έναν αποτελεσματικό τρόπο σφράγισης του πορώδους των σκυροδεμάτων που παρασκευάζονται με αυτά. Η ύπαρξη υγρασίας αποτελεί καταλυτικό παράγοντα για την ενεργοποίηση των κρυστάλλων οι οποίοι έτσι φράζουν τους πόρους του τσιμεντολιθώματος και αποτρέπουν τη διείσδυση των βλαβερών υγρών και αερίων. Τα εναλλακτικά μείγματα με κρυσταλλικά πρόσμεικτα PRAH που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας παρουσιάζουν αυξημένη θλιπτική αντοχή, χαμηλότερο συντελεστή υδατοαπορροφητικότητας και σημαντικά χαμηλότερο συντελεστή διαπερατότητας έναντι χλωριόντων σε σχέση με τα μείγματα αναφοράς, προσδίδοντας έτσι στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος αυξημένο χρόνο ζωής έναντι των χλωριόντων που προέρχονται από τη θάλασσα. Τα μείγματα αυτά παρουσίασαν επίσης ελαφρώς αυξημένο βάθος ενανθράκωσης, γεγονός που οφείλεται στη χρήση διαφορετικής δοσολογίας και τύπου τσιμέντου καθώς και στο μικρό χρόνο υγρής συντήρησης, γεγονός που δεν βοήθησε την ενεργοποίηση των κρυστάλλων.

Ευχαριστίες Τα κρυσταλλικά πρόσμεικτα και τα χημικά πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν στα ανωτέρω πειράματα αποτελούν χορηγίες των εταιριών

Penetron Hellas και NORDIA ΑΕΒΕ. Εκφράζονται ευχαριστίες για την υποστήριξή τους στο ερευνητικό έργο του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

ΕΛΟΤ EN 206 Σκυρόδεμα - Προδιαγραφή, επιδόσεις, παραγωγή και συμμόρφωση.

Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 2016 (ΦΕΚ Β/02-06-2016)

ACI 212.3R-10 Report on Chemical Admixtures for Concrete

NT Build 492 - Concrete Mortar and Cement-based Repair Materials - Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments, 1999

EN 14630 Comité Européenne de Normalisation (2006). Products and systems for the protection and repair of concrete structures — Test methods — Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method.