

**Ανθεκτικότητα σε χλωριόντα κονιαμάτων
με τσιμεντοειδή πρόσθετα - εκτίμηση της διάρκειας ζωής**
Chloride durability of mortars with supplementary
cementitious materials – prediction of service life

**Ευστράτιος ΜΠΑΛΟΓΙΑΝΝΗΣ¹, Ιωάννης Π. ΣΦΗΚΑΣ²,
Ειρήνη ΜΑΚΡΙΝΟΥ³, Αναστασία ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ⁴**

*Λέξεις κλειδιά: Ιπτάμενη Τέφρα, Σκωρία, Μετακαολίνη, Πυριτική Παιπάλη,
Fly Ash, Slag, Metakaolin, Silica Fume, Life365*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η εκτίμηση της διάρκειας ζωής ενός έργου από σκυρόδεμα αποτελεί μέρος της μελέτης ανθεκτικότητας και πραγματοποιείται με χρήση κατάλληλων θεωρητικών μοντέλων. Στην περίπτωση διερεύνησης του κινδύνου διάβρωσης από χλωριόντα, βασική παράμετρο εισαγωγής στα σχετικά μοντέλα αποτελεί ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων, ο οποίος εξαρτάται εν πολλοίς από τα συστατικά του σκυροδέματος. Ενώ σημαντικό σχετικό ερευνητικό έργο έχει πραγματοποιηθεί σε παγκόσμιο επίπεδο, η ευαισθησία της εκτίμησης της διάρκειας ζωής στον τύπο των συστατικών αλλά και στην πειραματική μέθοδο προσδιορισμού της διάχυσης εξακολουθεί να αποτελεί επίκαιρο ερευνητικό θέμα. Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακά πειράματα σε κονιάματα με χρήση ιπτάμενης τέφρας, σκωρίας υψικαμίνου, μετακαολίνη και πυριτικής παιπάλης. Η εκτίμηση της αντίστασης των κονιαμάτων σε διείσδυση χλωριόντων πραγματοποιήθηκε με δύο μεθόδους: την επιταχυνόμενη μέθοδο προσδιορισμού του συντελεστή διάχυσης (NT Build 492), που αφορά σε συνθήκες μη σταθερής κατάστασης, και τη μέθοδο προσδιορισμού του φαινόμενου συντελεστή διάχυσης (NT Build 443), που αφορά σε συνθήκες σταθερής κατάστασης. Η παρούσα έρευνα έχει στόχο να εμπλουτίσει την υπάρχουσα βιβλιογραφία με πειραματικά αποτελέσματα διάχυσης σε κονιάματα που εμπεριέχουν διάφορους τύπους τσιμεντοειδών πρόσθετων υλικών, υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Επίσης, εξάγονται συμπεράσματα ως προς τη μεταβλητότητα των μεθόδων και τη μεταξύ τους συσχέτιση. Τέλος, εξετάζεται η

¹ Επίκουρος Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: badstrat@civil.ntua.gr

² Chartered Engineer, PhD, CEng MICE MICT, Mott MacDonald Ltd. email: gsfikas@gmail.com; Ioannis.Sfikas@mottmac.com

³ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: eiren126@hotmail.com

⁴ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: natasa.oikonomou1@gmail.com

επιρροή των διαφορετικών τσιμεντοειδών πρόσθετων στον θεωρητικό προσδιορισμό της διάρκειας ζωής του σκυροδέματος.

ABSTRACT : Service-life prediction of concrete structures forms part of the durability study and is performed by using suitable theoretical models. For the assessment of the chloride-induced corrosion risk, the chloride diffusion coefficient is a fundamental input parameter that largely depends on the concrete ingredients. While extensive relevant research work has been done on a worldwide scale, the sensitivity of service-life prediction to the type of ingredients, but also to the experimental method for the determination of diffusion is still an attractive research subject. As part of this study, laboratory investigations were performed to mortars, with the use of fly ash, ground-granulated blast-furnace slag, metakaolin and silica fume. The prediction of the resistance of the mortars to chloride penetration was performed by two methods: the accelerated method for the determination of the diffusion coefficient (NT Build 492), which concerns non-steady state conditions, and the method for the determination of the apparent diffusion coefficient (NT Build 443), which concerns steady state conditions. The current study is aiming at enhancing current literature with experimental results on diffusion in mortars that incorporate various types of supplementary cementitious materials, under controlled conditions. It aims also to draw conclusions on the variability of the methods and their correlation, as well as to show the effect of the measurements on the theoretical determination of the service-life of concrete.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι, κατά τον σχεδιασμό των κατασκευών, καθορίζεται ένας ελάχιστος χρόνος, κατά τον οποίο θα πρέπει να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις επιτελεστικότητας που σχετίζονται με την ασφάλεια, τη λειτουργικότητα και την αισθητική εμφάνιση, με περιορισμένη ή/ και μηδενική ανάγκη για επεμβάσεις αποκατάστασης. Πέραν των φορτίων λειτουργίας (μόνιμα και κινητά) και των τυχηματικών δράσεων (π.χ. σεισμός, φορτία χιονιού, κ.λπ.), υπό τα οποία η κατασκευή δε θα πρέπει να παρουσιάσει προβλήματα (π.χ. απώλεια φέρουσας ικανότητας κάτω από ένα επιθυμητό επίπεδο, έντονες ρηγματώσεις), σημαντική είναι και η ανάγκη προστασίας έναντι των περιβαλλοντικών συνθηκών. Οι κυριότεροι περιβαλλοντικοί παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν το υλικό και, δυνητικώς, να μειώσουν τη διάρκεια ζωής του έργου, περιλαμβάνουν το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας ή/ και κοντινών πηγών εκπομπής (π.χ. βιομηχανία, αυτοκινητόδρομοι), χλωριόντα από θαλάσσιες ή μη πηγές (π.χ. αντιπαγωτικά άλατα σε οδικά δίκτυα), επιθετικές χημικές ουσίες (π.χ. θειϊκά οξέα σε εδάφη), έντονες διακυμάνσεις θερμοκρασίας (κύκλοι ψύξης-απόψυξης), κ.λπ.

Το θέμα της ανθεκτικότητας αντιμετωπίζεται με τη χρήση θεωρητικών μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί (στη σύγχρονη μορφή τους) κατά τα τελευταία 20, περίπου, χρόνια. Τα μοντέλα αυτά λαμβάνουν υπόψη, αφενός, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και δράσεις και, αφετέρου, τις ιδιότητες των υλικών και προβλέπουν το

χρόνο που απαιτείται μέχρι να επιτευχθεί μια προκαθορισμένη οριακή κατάσταση αστοχίας (π.χ. έναρξη διάβρωσης του οπλισμού, πρώτη ρηγμάτωση, κ.λπ.). Το κριτήριο αστοχίας βασίζεται εν γένει στη σπουδαιότητα της κατασκευής, στον κίνδυνο απώλειας ζωής και τραυματισμών, στο κόστος επισκευών και στην επιρροή στους χρήστες γενικότερα (Lounis Z., 2003). Τα μοντέλα πρόβλεψης της διάρκειας ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα σε περιβάλλον πλούσιο σε χλωριόντα είναι αδιαμφισβήτητα εκείνα που μέχρι σήμερα έχουν διερευνηθεί σε μεγαλύτερο βάθος. Η βασική τους αρχή είναι η επίτευξη οριακής ισορροπίας μεταξύ της συγκέντρωσης χλωριόντων στη στάθμη του οπλισμού (όπως αυτή αναπτύσσεται σταδιακά, συναρτήσει της διεισδυτικότητας του σκυροδέματος της επικάλυψης) και της κρίσιμης συγκέντρωσης χλωριόντων που θα επιφέρει την έναρξη της ρηγμάτωσης (αναλόγως του τύπου του οπλισμού).

Η διεθνής βιβλιογραφία προσφέρει ένα μεγάλο πλήθος μοντέλων (Luping, 2008, Ehlen, 2009, Demis and Papadakis, 2016), που χωρίζονται σε εμπειρικά μοντέλα, που βασίζονται σε εμπειρικές σχέσεις μεταξύ της διάρκειας ζωής, της σύνθεσης σκυροδέματος και των συνθηκών έκθεσης, και σε φυσικοχημικά μοντέλα, που βασίζονται σε μαθηματικά μοντέλα φυσικοχημικών διεργασιών του μηχανισμού φθοράς. Καθένα από αυτά τα μοντέλα μπορεί να εφαρμοστεί είτε ντετερμινιστικά, όπου εξετάζεται ένας μοναδικός συνδυασμός παραμέτρων, είτε στοχαστικά, όπου εκτιμάται η διάρκεια ζωής με βάση τυχαίους συνδυασμούς τιμών των παραμέτρων, καθεμία εκ των οποίων ορίζεται από μία πιθανοτική κατανομή, που είναι κατά το δυνατόν πιο ρεαλιστική (Sfikas and Ingham, 2016).

Οι βασικές παράμετροι που υπεισέρχονται στους αναλυτικούς υπολογισμούς των μοντέλων που αφορούν στην εκτίμηση της διάρκειας ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα σε περιβάλλον πλούσιο σε χλωριόντα περιλαμβάνουν: την επιφανειακή συγκέντρωση χλωριόντων (από διάφορες πηγές), την κρίσιμη συγκέντρωση χλωριόντων για τον χάλυβα (διαφορετική ανά τύπο χάλυβα), τον συντελεστή διάχυσης που εξαρτάται από τη σύνθεση και την ποιότητα της κατασκευής (π.χ. καλή διάστρωση, συντήρηση, κ.λπ.), καθώς επίσης και από τον ηλικιακό συντελεστή που εκφράζει τη βελτίωση του συντελεστή εν χρόνω, και τις συνθήκες περιβάλλοντος, κατά τις φάσεις διάστρωσης και συντήρησης, αλλά και κατά τη λειτουργία. Όσο αφορά ειδικότερα στην επιρροή της σύνθεσης, οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντίσταση του σκυροδέματος στη διείσδυση χλωριόντων συνοψίζονται στην προέλευση και τις αναλογίες των συστατικών και, κυρίως, στον περιεχόμενο τύπο τσιμέντου και στην ποσότητά του στο μείγμα, τα πρόσθετα τσιμεντοειδή υλικά που περιέχονται στη σύνθεση, είτε ως υλικά αντικατάστασης του τσιμέντου είτε ως πρόσθετα λεπτομερή υλικά, και στον λόγο νερού προς τσιμεντοειδή υλικά.

Η χρήση πρόσθετων τσιμεντοειδών υλικών στα κονιάματα και το σκυρόδεμα, είτε ως υλικά αντικατάστασης του τσιμέντου, είτε ως πρόσθετα λεπτομερή υλικά, είναι εξαιρετικά διαδεδομένη, καθώς προσφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων. Πέραν της βελτίωσης της ανθεκτικότητας, η χρήση των υλικών αυτών συνεισφέρει σημαντικά στη βιωσιμότητα, καθώς τα περισσότερα από τα υλικά αυτά αποτελούν παραπροϊόντα της βιομηχανίας και η χρήση τους αφενός μειώνει

το παραγόμενο διοξείδιο του άνθρακα που σχετίζεται με την παραγωγή τσιμέντου και αφετέρου περιορίζει την ανάγκη απόρριψης των παραπροϊόντων αυτών. Τα συνηθέστερα πρόσθετα υλικά είναι η ιπτάμενη τέφρα (fly ash, FA), η σκωρία υψικαμίνου (ground-granulated blast-furnace slag, GGB(F)S ή SL) και η πυριτική παιπάλη (silica fume, SF), με τον μετακαολίνη (metakaolin, MK) να κερδίζει τελευταία την εμπιστοσύνη των ερευνητών (Badogiannis et al. 2004, Batis et al. 2005, Badogiannis et al. 2009, Badogiannis et al. 2015) και της αγοράς. Πάντως, υπάρχει πληθώρα εφαρμογών και με άλλα υλικά σε ερευνητικό, κυρίως, στάδιο. Μια παρουσίαση των κυριότερων τσιμεντοειδών πρόσθετων υλικών περιλαμβάνεται στη μελέτη των Khan et al (2014).

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε κονιάματα σκυροδέματος με χρήση τσιμέντου τύπου CEM I και με προσθήκη διαφορετικών τσιμεντοειδών πρόσθετων υλικών (ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνου, πυριτική παιπάλη και μετακαολίνη) σε δύο διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου (10% και 20%). Τα πειράματα στόχευαν στον εργαστηριακό προσδιορισμό της διεύθυνσης χλωρίωντων με δύο συνήθεις πρότυπες μεθόδους (επιταχυνόμενη και αργή), και τον περαιτέρω θεωρητικό υπολογισμό της διάρκειας ζωής. Σκοπό της έρευνας αποτελεί η εξαγωγή συμπερασμάτων περί της επιρροής του είδους και του ποσοστού προσθήκης τσιμεντοειδών πρόσθετων στην αντίσταση των κονιαμάτων έναντι διεύθυνσης χλωρίωντων και βάσει των αποτελεσμάτων αυτών, στη διάρκεια ζωής.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Συνολικά παρασκευάστηκαν εννέα συνθέσεις κονιαμάτων, με λόγο άμμου προς κονία (τσιμέντο και πρόσθετο) ίσο με $A/K=3$ και σταθερό λόγο νερού προς τσιμέντο, $N/T=0.55$. Το μείγμα αναφοράς παρασκευάστηκε με αμιγές τσιμέντο CEM I 42.5 N, ενώ στη συνέχεια παρασκευάστηκαν ζεύγη μειγμάτων για κάθε διαφορετικό πρόσθετο τσιμεντοειδές υλικό (ιπτάμενη τέφρα/ FA, σκωρία υψικαμίνου/ SL, μετακαολίνης/ MK και πυριτική παιπάλη/ SF) σε δύο ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου, 10% και 20%.

Στους Πίνακες 1 και 2 δίνονται η χημική σύσταση και τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κοκκομετρικής κατανομής των υλικών, αντίστοιχα. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ασβεστολιθική άμμος με μέγεθος 0-2 mm. Η ποσότητα ρευστοποιητή προσαρμόστηκε κατάλληλα, ώστε να επιτευχθεί εξάπλωση 180 εκ. όπως αυτή προσδιορίστηκε με τη δοκιμή εξάπλωσης. Οι ποσότητες των υλικών ανά σύνθεση παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Οι συνθέσεις κωδικοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας συνήθεις συμβολισμούς του πρόσθετου τσιμεντοειδούς από την αγγλική γλώσσα, ακολουθούμενο από το ποσοστό (%) αντικατάστασης του τσιμέντου από το εν λόγω τσιμεντοειδές. Τα παραγόμενα δοκίμια συντηρήθηκαν στο νερό έως την ηλικία ελέγχου.

Πίνακας 1. Χημική σύσταση (% κ.β.) των τσιμεντοειδών προσθέτων υλικών

Συστατικό	Τσιμέντο	MK*	FA	SL	SF
SiO ₂	20.00	47.85	46.96	54.41	96.40
Al ₂ O ₃	4.90	38.20	21.00	43.94	0.75
Fe ₂ O ₃	3.50	1.29	9.83	0.89	0.56
CaO	62.00	0.03	13.74	0.37	0.35
MgO	3.10	0.04	2.20	6.75	-
K ₂ O	0.50	-	1.36	0.30	0.43
Na ₂ O	0.20	-	0.16	-	0.04
SO ₃	2.70	-	2.42	0.49	0.05
TiO ₂	-	-	-	-	-
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-
L.O.I.	2.80	12.30	1.94	0.16	3.01

*Χημική σύσταση αντίστοιχου καολίνη

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά μεγέθη κοκ. κατανομής τσιμεντοειδών προσθέτων υλικών

Πρόσθετο	d ₁₀ (μm)	d ₅₀ (μm)	d ₉₀ (μm)
MK	0.95	5.10	12.93
SF	0.07	0.15	0.34
FA	2.03	19.24	63.45
SL	2.09	24.17	74.08

Πίνακας 3. Συνθέσεις κονιαμάτων (% κ.β. κονιάς)

Κωδικός Κονιάματος	Τσιμέντο	Πρόσθετο	Άμμος	Ρευσ/τής	N/K
CEM I	100	0	300	0.00	0.55
FA10	90	10	300	0.45	0.49
FA20	80	20	300	0.80	0.44
SL10	90	10	300	0.45	0.49
SL20	80	20	300	0.80	0.44
MK10	90	10	300	0.52	0.49
MK20	80	20	300	0.40	0.44
SF10	90	10	300	0.80	0.49
SF20	80	20	300	1.75	0.44

Για την εκτίμηση της διείσδυσης χλωριόντων εφαρμόστηκαν δύο μέθοδοι. Η πρώτη, πρότυπη μέθοδος NordTest Build 492 (1999), εφεξής NT Build 492, αποτελεί μια επιταχυνόμενη μέθοδο μη-σταθερής κατάστασης, κατά την οποία κυλινδρικό δοκίμιο κονιάματος (ή σκυροδέματος), εξαγόμενο από το μέσον πρότυπου κυλινδρικού δοκιμίου, εμβαπτίζεται σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου σταθερής συγκέντρωσης 10% NaCl (κάθοδος) και διάλυμα υδροξειδίου του

νατρίου 0.3M NaOH (άνοδος), στο οποίο στην συνέχεια επιβάλλεται σταθερή ηλεκτρική τάση για προδιαγεγραμμένο χρονικό διάστημα (συνήθως 24 ωρών). Μετά το πέρας της δοκιμής, το δοκίμιο διαρρηγνύεται κατά το πάχος του και το προφίλ ψεκάζεται με διάλυμα AgNO_3 , 0.1 M. Τα ελεύθερα χλωριόντα αποχρωματίζουν το διάλυμα και, βάσει αυτής της χρωματογραφικής μεθόδου, είναι δυνατός ο προσδιορισμός του βάθους διείσδυσης των χλωριόντων. Στη συνέχεια, με βάση την πρότυπη εξίσωση της μεθόδου υπολογίζεται ο συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων, D_{nssm} ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$). Σημειώνεται ότι η κριτική της μεθόδου αφορά κυρίως στην επιρροή της θερμοκρασίας στην τελική τιμή του συντελεστή, αλλά και στην αξιοπιστία και ακρίβεια της χρωματογραφικής μεθόδου, ενώ σημειώνεται ότι η διαδικασία δέσμευσης ελεύθερων χλωριόντων που λαμβάνει χώρα υπό κανονικές, μη επιταχυνόμενες, και η επιρροή στην αγωγιμότητα του διαλύματος των πόρων υπό ηλεκτρικά επιταχυνόμενες συνθήκες, συνήθως αγνοούνται. Πάντως, η μέθοδος είναι διεθνώς αναγνωρισμένη και χρησιμοποιείται ευρέως για τον χαρακτηρισμό μειγμάτων σε έργα υποδομής.

Η δεύτερη, πρότυπη μέθοδος NordTest Build 443 (1995), εφεξής NT Build 443, αποτελεί μια αργή μέθοδο σταθερής κατάστασης, κατά την οποία κυβικό δοκίμιο κονιάματος (ή σκυροδέματος) εμβαπτίζεται σε διάλυμα NaCl, συγκέντρωσης 10% και παραμένει σε ηρεμία για 90 ημέρες. Στη συνέχεια, λαμβάνονται δείγματα σκόνης από διάφορα βάθη και, με την διεξαγωγή εργαστηριακών χημικών αναλύσεων, προσδιορίζεται η συγκέντρωση χλωριόντων ως συνάρτηση του βάθους. Με βάση την πρότυπη εξίσωση που βασίζεται στον 2^ο νόμο του Fick, υπολογίζεται ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων, D_{sm} ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$). Η κριτική της μεθόδου αφορά, κυρίως, στην εξαιρετικά αργή ταχύτητά της -ακόμα και για την πλήρη διάρκεια της δοκιμής, είναι αμφίβολο πώς η τελική κατάσταση μπορεί να αποτελέσει μέτρο εκτίμησης για την πλήρη διάρκεια ζωής 100 ή πλέον ετών-την αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος που λαμβάνεται, αλλά και στην αξιοπιστία και ακρίβεια των εργαστηριακών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη χημική ανάλυση. Τα συμπεράσματα σχετικών μελετών που αφορούν στις αβεβαιότητες που συνδέονται με τις εν λόγω χημικές αναλύσεις, παρουσιάζονται αναλυτικά στην οδηγία Concrete Society Technical Report 32 (2015).

Ηλικιακός Συντελεστής

Ο ηλικιακός συντελεστής περιγράφει τη βελτίωση εν χρόνω (λόγω της συνεχιζόμενης, αν και με μικρότερο ρυθμό, ενυδάτωσης) της αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων, η οποία έχει αποδειχτεί πειραματικώς ότι ακολουθεί τη σχέση δυνάμεως (1), με πολύ καλό συντελεστή συσχέτισης:

$$D(t) = D_{\text{ref}} (t_{\text{ref}} / t)^m \quad (1)$$

όπου $D(t)$ η τιμή του συντελεστή κατά την χρονική στιγμή t , D_{ref} η τιμή του συντελεστή στη συμβατική ηλικία t_{ref} (συνήθως 28 ημέρες) και m ο ηλικιακός συντελεστής (συχνά στη βιβλιογραφία συμβολίζεται ως 'a').

Θεωρητικά Μοντέλα

Δύο από τα πλέον διαδεδομένα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής σε κατασκευές με κυρίαρχο μηχανισμό αστοχίας τη διάβρωση του οπλισμού από έκθεση σε χλωριόντα είναι:

A) το μοντέλο που αναπτύχθηκε από την αμερικάνικη βιομηχανία και διατίθεται ελεύθερα στο διαδίκτυο υπό μορφή λογισμικού με την εμπορική ονομασία Life365. Το εν λόγω λογισμικό χρησιμοποιείται συνήθως για ντετερμινιστικές επιλύσεις (αν και περιλαμβάνει ένα υποτυπώδες πιθανοτικό μοντέλο).

B) το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος Duracrete (2000) και στη συνέχεια, υιοθετήθηκε στον τεχνικό κώδικα *fib* Bulletin 34 (2006). Το εν λόγω μοντέλο προσεγγίζει πιθανοτικά το πρόβλημα, με στόχο μια επιθυμητή επιτελεστικότητα για μια επιθυμητή κατάσταση οριακής αστοχίας, εντός μιας συγκεκριμένης διάρκειας ζωής του έργου (π.χ. έναρξη διάβρωσης του χάλυβα στα επόμενα 120 χρόνια, με πιθανότητα 10%). Το μοντέλο αυτό δε χρησιμοποιείται στην παρούσα εισήγηση, αλλά θα αποτελέσει πεδίο περαιτέρω διερεύνησης σε επόμενο στάδιο.

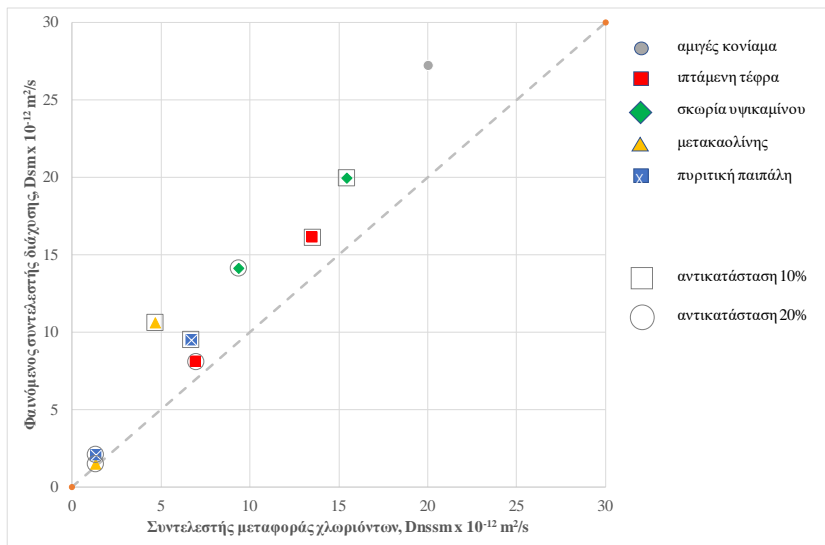
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Συντελεστής Διάχυσης

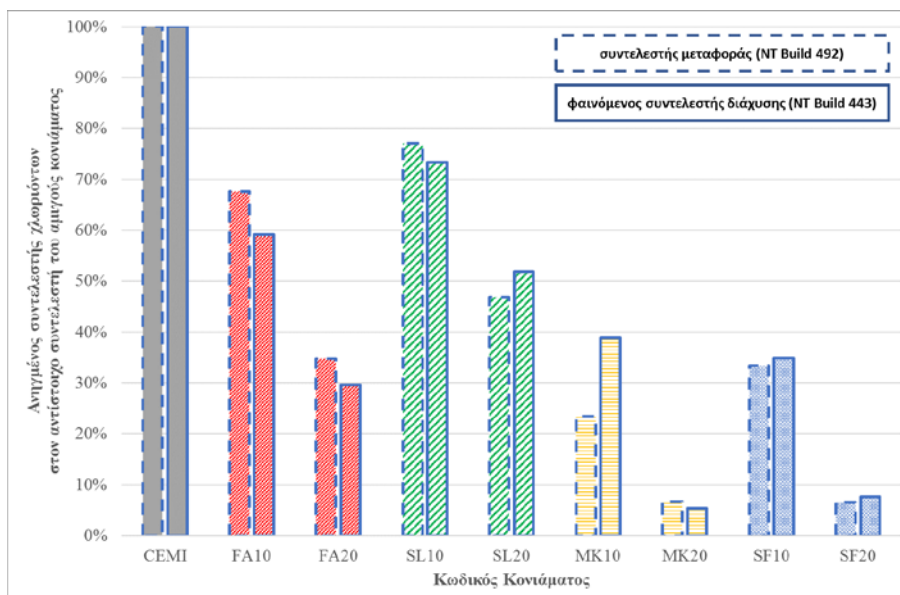
Ο Πίνακας 4 περιλαμβάνει τα αναλυτικά αποτελέσματα για κάθε πρότυπη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε: NT Build 492 και NT Build 443. Η περαιτέρω σύγκριση των δύο μεθόδων και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με τη βοήθεια των Σχημάτων 2 και 3 που ακολουθούν.

Πίνακας 4. Πειραματικά αποτελέσματα συντελεστή μεταφοράς και συντελεστή διάχυσης χλωριόντων σε κονιάματα με διαφορετικά τσιμεντοειδή πρόσθετα σε ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου, 10% ή 20%.

Κωδικός Κονιάματος	Συντελεστής μεταφοράς	Φαινόμενος συντελεστής
	χλωριόντων	διάχυσης χλωριόντων
	$D_{nssm} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$D_{sm} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
CEMI	20.1	27.2
FA10	13.5	16.1
FA20	7.0	8.1
SL10	15.5	19.9
SL20	9.4	14.1
MK10	4.7	10.6
MK20	1.3	1.5
SF10	6.7	9.5
SF20	1.3	2.1



Σχήμα 1. Συσχέτιση φαινόμενου συντελεστή διάχυσης χλωριόντων με τον συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων, αναλόγως του τσιμεντοειδούς πρόσθετου, σε κονιάματα με διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου.



Σχήμα 2. Βελτίωση (μείωση) συντελεστή μεταφοράς και φαινόμενου συντελεστή διάχυσης χλωριόντων σε κονιάματα, αναλόγως του είδους και του % προσθήκης τσιμεντοειδούς πρόσθετου.

Από το Σχήμα 1 παρατηρείται ότι ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης είναι εν γένει ίσος ή υψηλότερος του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων, με τη διαφορά των συντελεστών να φτάνει το 35% για το αμιγές κονίαμα. Παρατηρείται ότι, με εξαίρεση τα μείγματα που περιέχουν σκωρία, η αντικατάσταση κατά 20% του

τσιμέντου με τα υπόλοιπα τρία τσιμεντοειδή πρόσθετα (ιπτάμενη τέφρα, μετακαολίνη και πυριτική παιπάλη), οδηγεί σε παρεμφερείς συντελεστές.

Όσο αφορά στη βελτίωση (μείωση) του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων που επιφέρει η χρήση πρόσθετων τσιμεντοειδών υλικών (Σχήμα 2), φαίνεται ότι ο μετακαολίνης έχει την ισχυρότερη επιρροή, αν και για το υψηλότερο ποσοστό αντικατάστασης 20% η μείωση είναι παρεμφερής, είτε για τον μετακαολίνη είτε για την πυριτική παιπάλη. Παρατηρείται, επίσης, ότι, ενώ η χρήση πρόσθετων τσιμεντοειδών υλικών σε ποσοστό αντικατάστασης 10% βελτιώνει το συντελεστή μεταφοράς, ο διπλασιασμός του ποσοστού αντικατάστασης δε μειώνει γραμμικά τον συντελεστή (ο βαθμός επιρροής είναι μικρότερος για μεγαλύτερα ποσοστά αντικατάστασης). Αντίστοιχη εικόνα παρουσιάζει και ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης, αν και η επιρροή του μετακαολίνης και της πυριτικής παιπάλης είναι παρεμφερής, για ίδια ποσοστά αντικατάστασης, με ελαφρώς υψηλότερη μείωση του συντελεστή για την πυριτική παιπάλη, στο ποσοστό αντικατάστασης 10%.

Ηλικιακός Συντελεστής

Ο ηλικιακός συντελεστής προσδιορίστηκε αναλυτικά, με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα σε ηλικία 2 μηνών και, μετέπειτα, 2 ετών. Οι υπολογισθείσες τιμές περιλαμβάνονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5. Πειραματικά αποτελέσματα ηλικιακού συντελεστή

Κωδικός Κονιάματος	Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων, $D_{nssm} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		Ηλικιακός Συντελεστής, m
	2 μήνες	2 έτη	
CEMI	20.1	*	0.00
FA10	13.5	11.0	0.09
FA20	7.0	3.5	0.32
SL10	15.5	15.1	0.01
SL20	9.4	7.7	0.09
MK10	4.7	5.3**	0.00
MK20	1.3	1.2	0.04
SF10	6.7	8.0**	0.00
SF20	1.3	1.9**	0.00

*δεν πραγματοποιήθηκε, **αποδίδεται σε διασπορά αποτελεσμάτων (προς διερεύνηση)

Σημειώνεται ότι για το αμιγές κονίαμα δεν πραγματοποιήθηκε έλεγχος σε ηλικία 2 ετών. Παρόλα αυτά, ο ηλικιακός συντελεστής θεωρήθηκε αμελητέος. Η υπόθεση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ορθή, καθώς η συντήρηση σε νερό καθ' όλη τη διάρκεια μέχρι την πραγματοποίηση των ελέγχων (σε 2 μήνες και σε 2 έτη) θεωρείται ότι οδηγεί σε ολοκλήρωση της ενυδάτωσης, ήδη από μικρές ηλικίες. Η υπόθεση αυτή τεκμηριώνεται και από τις γενικώς χαμηλές τιμές του ηλικιακού

συντελεστή στις υπόλοιπες συνθέσεις, σε σχέση με αντίστοιχες τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Επιπλέον, για τρεις συνθέσεις (MK10, SF10 και SF20) οι συντελεστές που υπολογίστηκαν σε ηλικία δύο ετών έχουν υψηλότερες τιμές από τους συντελεστές σε ηλικία δύο μηνών. Αυτό αποδόθηκε σε εσωτερική διακύμανση των αποτελεσμάτων και, ειδικά για την περίπτωση της πυριτικής παιπάλης, σε πιθανή αστοχία υλικού ή κακή διασπορά της παιπάλης στο μείγμα. Το φαινόμενο θα διερευνηθεί μελλοντικά μέσω επαναληπτικών συνθέσεων.

Εκτίμηση Διάρκειας Ζωής

Η εκτίμηση της διάρκειας ζωής έγινε με βάση το ντετερμινιστικό μοντέλο του εμπορικού προγράμματος λογισμικού Life365 (v.2.2). Εξετάστηκε ένα μοναδικό σενάριο που περιλαμβάνει τις ακόλουθες υποθέσεις:

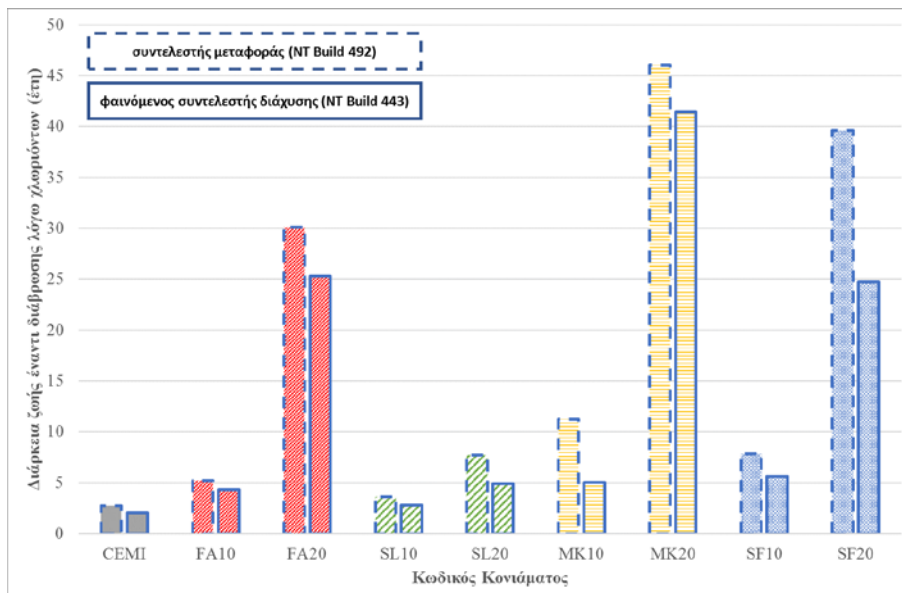
- Υποθαλάσσιο σκυρόδεμα (διαρκώς εμβαπτισμένο σε θαλασσινό νερό)
- Ελάχιστο πάχος επικάλυψης οπλισμού: 75 mm
- Μέγιστη συγκέντρωση χλωριόντων στην επιφάνεια: 0.3% κ.β. κονιάς
- Άμεση ανάπτυξη μέγιστης επιφανειακής συγκέντρωσης χλωριόντων
- Ετήσια διακύμανση θερμοκρασίας νερού ανά μήνα, σύμφωνα με τυπικά στοιχεία που αντλήθηκαν από το διαδίκτυο για ελληνικές θάλασσες, μεταξύ 16°C και 26°C
- Κρίσιμη συγκέντρωση χλωριόντων στη στάθμη του χάλυβα για την έναρξη της διάβρωσης 0.06% κ.β. κονιάς
- Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων κατά NT Build 492 ή NT Build 443: τιμή ανά σύνθεση, όπως προσδιορίστηκε πειραματικά
- Διάρκεια ολοκλήρωσης ενυδάτωσης: 10 έτη (ταχύτερη από τη συνήθη διάρκεια 20 έως 25 ετών λόγω διαρκούς έκθεσης σε θαλασσινό νερό)

Η ακρίβεια των παραπάνω υποθέσεων θα εξεταστεί σε μεγαλύτερο βάθος σε επόμενα στάδια της έρευνας. Παρ'όλα αυτά, για το σκοπό της παρούσας μελέτης που περιλαμβάνει μια ποιοτική συγκριτική αξιολόγηση της επιρροής των τσιμεντοειδών πρόσθετων υλικών, οι παραπάνω υποθέσεις θεωρούνται ασφαλείς. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. Παρατηρείται ότι:

- (i) η προσθήκη 10% τσιμεντοειδούς πρόσθετου αύξησε τη διάρκεια ζωής του αμιγούς μείγματος (περίπου 2.5 έτη) κατά δύο έως τέσσερις φορές (διάρκεια ζωής από 5 έως 10 έτη). Μεγαλύτερη ήταν η αύξηση για τα μείγματα MK10 και SF10.
- (ii) η προσθήκη 20% τσιμεντοειδούς πρόσθετου αύξησε τη διάρκεια ζωής του αμιγούς μείγματος (περίπου 2.5 έτη) κατά τρεις έως είκοσι φορές (διάρκεια ζωής από 7.5 έως 45 έτη). Η μικρότερη αύξηση παρατηρήθηκε στο μείγμα SL20, ενώ η μεγαλύτερη στο μείγμα MK20.

(iii) Ο διπλασιασμός του ποσοστού αντικατάστασης από 10% σε 20% είχε τη μεγαλύτερη επιρροή στα μείγματα FA και SF (αύξηση κατά 5 έως 6 φορές), ενώ μικρότερη ήταν η αύξηση στα μείγματα MK (4.5 φορές) και SL (2 φορές)

(iv) Η επιταχυνόμενη μέθοδος NT Build 492 οδηγεί σε εκτίμηση αυξημένης διάρκειας ζωής, με εντονότερη αύξηση στα μείγματα MK10, SL20 και SF20.



Σχήμα 3. Συγκριτικά ραβδογράμματα διάρκειας ζωής σε κονιάματα με διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου από διάφορα τσιμεντοειδή πρόσθετα υλικά

ΚΥΡΙΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας συνοψίζονται ως εξής:

- Ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης είναι εν γένει ίσος ή υψηλότερος του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων, με τη διαφορά να εκμηδενίζεται για ποσοστά αντικατάστασης 20% με ιπτάμενη τέφρα, μετακαολίνη ή πυριτική παιπάλη.
- Ο μετακαολίνης φαίνεται να έχει την ισχυρότερη επιρροή όσο αφορά στη βελτίωση (μείωση) του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων, με την πυριτική παιπάλη να παρουσιάζει παρεμφερή συμπεριφορά
- Η αντικατάσταση τσιμέντου από τσιμεντοειδή πρόσθετα μπορεί να αυξήσει τη διάρκεια ζωής υποθαλάσσιου κονιάματος έως και 4 φορές για ποσοστά 10% και έως και 20 φορές για ποσοστά 20%.
- Υψηλότερα ποσοστά αντικατάστασης φαίνεται να αυξάνουν γεωμετρικά τη διάρκεια ζωής κονιαμάτων σε συνθήκες υποθαλάσσιου περιβάλλοντος

- Η διάρκειας ζωής βάσει των αποτελεσμάτων της μεθόδου NT Build 492 είναι αυξημένη, με την αύξηση πάντως αυτή να μην είναι σταθερή.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Badogiannis, E., Papadakis, V., Chaniotakis, E., Tsivilis, G. “Exploitation of poor Greek kaolins: Strength development of metakaolin concrete and evaluation by means of k-value”. *Cement & Concrete Research*, Vol. 34, (2004) 1035-1041
- Badogiannis, E., Tsivilis, S. “Exploitation of poor Greek kaolins: Durability of metakaolin concrete”. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 31, (2009) 128–133
- Badogiannis, E.G., Sfikas, I.P., Voukia D.V., Trezos, K.G., Tsivilis, S.G. “Durability of metakaolin self-compacting concrete”. *Construction & Building Materials*, Vol. 82, (2015) 133–141
- Concrete Society Technical Report 32. “Analysis of Hardened Concrete: A guide to tests, procedures and interpretation of results” (2nd Edition) (2015)
- DuraCrete, “Probabilistic performance based durability design of concrete structures,” Final Technical Report Document, BE95-1347/R17, European Brite-EuramIII, CUR, Gouda, The Netherlands (2000)
- Ehlen, M.E., Thomas, M.D.A., Bentz, E.C., “Life-365 service life prediction model” *Concrete International* (2009)
- Duracrete – Final Technical report: General Guidelines for durability design and redesign Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347. The European Union – Brite EuRam III. (2000)
- fib* Bulletin 34, “Model code for service life design (SLD)” (2006)
- G. Batis, G., P. Pantazopoulou, P., Tsivilis, S., Badogiannis, E. “The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars”. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, (2005) 125-130
- Khan, S.U., Nuruddin, M.F., Ayub, T. & Shafiq, N., “Effects of Different Mineral Admixtures on the Properties of Fresh Concrete”. *Scientific World Journal*. Article ID 986567 (2014). doi: 10.1155/2014/986567
- Lounis Z., Amleh L. “Reliability - based prediction of chloride ingress and reinforcement corrosion of aging concrete bridge decks” (2003)
- Luping, T. “Engineering expression of the ClinConc model for prediction of free and total chloride ingress in submerged marine concrete” (2008)
- NT Build 492 “Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient From Non-Steady-State Migration Experiments” (1999)
- NT Build 443 “Concrete, Hardened: Accelerated chloride penetration” (1995)
- Sfikas, I. & Ingham, J., “Service life design of concrete structures using probabilistic modelling tools: Statistical analysis of input parameters”, in *Proceedings of the Concrete Solutions 2016*, ed. Grantham, M., et al. (eds.), CRC Press, Thessaloniki, Greece (2016) ISBN 978-1-138-03008-4
- Demis, S. & Papadakis, V.G., “Durability design of reinforced concrete structures-Service life estimation”, in *Proceedings of the Concrete Solutions 2016*, ed. Grantham, M., et al. (eds.), CRC Press, Thessaloniki, Greece (2016) ISBN 978-1-138-03008-4