

ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΙΠΤΑΜΕΝΕΣ ΤΕΦΡΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΔΡΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΘΕΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ

Στυλιανός Κ Αντίοχος

Δρ. Χημικός Μηχανικός, Εργαστήριο Ανόργανης & Αναλυτικής Χημείας, ΕΜΠ.

Σταμάτης Τσίμας

Καθηγητής ΕΜΠ, Εργαστήριο Ανόργανης & Αναλυτικής Χημείας, ΕΜΠ.

Λέξεις κλειδιά: Ιπτάμενη τέφρα, σκυρόδεμα, ανθεκτικότητα, δραστηριότητα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στα πλαίσια της εργασίας αξιολογείται η απόδοση ποζολανικού σκυροδέματος που ενσωματώνει διαφορετικές Ελληνικές τέφρες στην επίθεση χλωριόντων. Η επιταχυνόμενη δοκιμή κατά ASTM C1202 και η πιο μακροπρόθεσμη δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων κατά NORDTEST Build 443 εφαρμόστηκαν προκειμένου να αποκτηθεί μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα σχετικά με την επίδραση κάθε είδους τέφρας, ενώ η εξέλιξη των θλιπτικών αντοχών συμπληρώνει τις τεχνικές που εφαρμόστηκαν. Τα αποτελέσματα πιστοποιούν πως τα ποζολανικά σκυροδέματα εμφανίζουν πολύ χαμηλή (για 30% προσθήκη) και χαμηλή (για 40%) διαπερατότητα στην διείσδυση χλωριόντων, την στιγμή που τα δοκίμια χωρίς ποζολάνη χαρακτηρίζονται από μέτρια (για χαμηλό λόγο w/Cm) έως και υψηλή διαπερατότητα στην επίθεση του ίδιου μέσου. Αντίστοιχα τα αποτελέσματα της έτερης δοκιμής NordTest 443, επιβεβαίωσαν πως τα δοκίμια με τέφρα εμφανίζουν σημαντικά μικρότερη συγκέντρωση χλωριόντων σε όλα τα εξεταζόμενα βάθη από την επιφάνεια του σκυροδέματος. Η μείωση της συγκέντρωσης των χλωριόντων αυξάνεται κατά βάθος των ποζολανικών δοκιμίων, γεγονός που δεικνύει πως η διείσδυση του επιθετικού μέσου δεν συνεχίζει πέρα από τα πρώτα στρώματα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Δεν αποτελεί είδηση πως η σημασία των τεφρών στον χώρο των δομικών υλικών γενικότερα και του τσιμέντου και σκυροδέματος ειδικότερα, έγκειται στο γεγονός ότι αυτές, ανάλογα με την προέλευση τους και τα

εγγενή τους χαρακτηριστικά, εκδηλώνουν όχι μόνο ποζολανικές αλλά και υδραυλικές ιδιότητες. Η εκδήλωση των ιδιοτήτων αυτών (που συχνά συμβαίνει ταυτόχρονα) είναι καθοριστική για την θετική συμβολή και των Ελληνικών τεφρών σε δομικά συστήματα, όχι μόνο για την ομαλή ανάπτυξη αντοχών του τελικού προϊόντος, αλλά επιπλέον και προς ενίσχυση της δυνατότητας αυτού να αντισταθεί σε επίθεση εξωτερικών επιθετικών μέσων [1,2].

Ανεξαρτήτως προέλευσης, τα χλωριόντα που έρχονται σε επαφή με το σκυρόδεμα, θα επιτεθούν στον σιδηροπλισμό προκαλώντας – αργά ή και γρηγορότερα – διάβρωση. Ουσιαστικά, ένα ηλεκτρολυτικό κελί δημιουργείται στην μάζα του σκυροδέματος ανάμεσα στον οπλισμό και το διάλυμα των πόρων (pore solution), με τα Fe^{3+} από την παθητική ζώνη να περνούν στο διάλυμα, ενώ τα ηλεκτρόνια κινούνται κατά μήκος της μπάρας του αποτελεί τον οπλισμό. Εκεί ενώνονται προς ανασχηματισμό του $Fe(OH)_3$. Η διάβρωση που συμβαίνει στην άνοδο οδηγεί στην απώλεια τμημάτων του σιδηροπλισμού και εν τέλει μπορεί να οδηγήσει στην αστοχία του υλικού.

Στα πλαίσια της εργασίας διερευνήθηκε – σε επίπεδο σκυροδέματος – η αντίσταση απέναντι σε εξωτερική επίθεση χλωριόντων. Για την γενικότερη επίδραση της ιπτάμενης τέφρας υπάρχουν εκτενείς αναφορές στην σχετική βιβλιογραφία [3,4], αξίζει ωστόσο να επισημανθεί πως η αντίσταση ενός ποζολανικού σκυροδέματος θεωρείται άμεσα συσχετισμένη με την μικροδομή και την δεσμευτική ικανότητα αυτού με τον χρόνο [4]. Επιλέχθηκε η σημαντική συμμετοχή ιπτάμενης τέφρας στα δοκίμια που εξετάστηκαν προκειμένου να είναι πιο εμφανής η επίδραση του είδους της ποζολάνης στην συμπεριφορά του τελικού προϊόντος. Έμφαση δίνεται στο είδος της δοκιμής (η επιταχυνόμενη δοκιμή κατά ASTM C1202 και η πιο μακροπρόθεσμη δοκιμή διεΐσδυσης χλωριόντων κατά NORDTEST Build 443 εφαρμόστηκαν), ενώ η εξέλιξη των θλιπτικών αντοχών συμπληρώνει την αξιολόγηση των σκυροδεμάτων που παρασκευάστηκαν.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

2.1 Πρώτες ύλες

Δύο διαφορετικές ιπτάμενες τέφρες, μία από την ευρύτερη περιοχή Πτολεμαΐδας (συμβολιζόμενη στην παρούσα εργασία ως T_F) και μία από την Μεγαλόπολη (T_M) χρησιμοποιήθηκαν ως πρώτες ύλες. Σε μία προσπάθεια να εξαλειφθεί η επίδραση της λεπτότητας στην ποζολανική τους δράση, οι δύο τέφρες αλέστηκαν, πριν χρησιμοποιηθούν, στην ίδια λεπτότητα (βλ. Πίνακα 1) σε εργαστηριακό μύλο άλεσης. Κατά την παρασκευή των δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκε ένα κανονικής αντοχής

τσιμέντο Portland (CEM I 42.5N σύμφωνα με το EN 197-1). Η χημική ανάλυση και ορισμένες κρίσιμες φυσικές ιδιότητες των τεφρών και του τσιμέντου δίνονται επίσης στον Πίνακα 1. Για να αντισταθμιστεί η απώλεια κάθισης που προκλήθηκε από την σημαντική παρουσία ποζολάνης στο μίγμα, ένας υπερρευστοποιητής τύπου CHEM SPL-P προστέθηκε σε υγρή μορφή. Τέλος, ασβεστολιθικά αδρανή τυπικής διαβάθμισης (λεπτού, μέσου και χοντρού διαμετρήματος) χρησιμοποιήθηκαν σε όλα τα δοκίμια. Το μέγιστο μέγεθος των χοντρών αδρανών ήταν 31,5 mm, των μεσαίων 8mm και των λεπτών 4 mm αντίστοιχα.

Πίνακας 1. Κύριες χημικές και φυσικές ιδιότητες των πρώτων υλών

	SiO ₂	^a SiO _{2re}	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	^b CG	^c S _B
C	20.28	-	65.01	4.75	3.76	1.61	2.55	0.17	0.35	-	3760
T _F	36.92	29.13	29.79	13.50	7.06	2.69	5.10	0.92	0.5	85.48	5450
T _M	51.36	31.36	13.80	16.73	8.75	2.26	1.49	0.77	1.52	74.84	5500

a - Οι μέθοδοι που περιγράφονται στα EN 450-1 και 196-2 εφαρμόστηκαν για τον προσδιορισμό του ενεργού SiO₂

b - GC: Ποσοστό της υαλώδους φάσης στο υλικό, σύμφωνα με τις οδηγίες της RILEM([5])

c - S_B: Ειδική επιφάνεια (cm²/g), κατά Blaine.

2.2 Παρασκευή δοκιμίων σκυροδέματος – Μηχανική συμπεριφορά

Για την μελέτη των θλιπτικών αντοχών παρασκευάστηκαν δοκίμια σκυροδέματος. Προς μελέτη της επιρροής της παραμέτρου W/Cm στην εξέλιξη των αντοχών των δοκιμίων, η περιεκτικότητα σε νερό για τα δοκίμια σκυροδέματος διατηρήθηκε σταθερή σε δύο εύρη τιμών (εξετάστηκαν δύο διαφορετικοί λόγοι W/Cm, ήτοι 0,58 και 0,47). Για κάθε W/Cm και προσθέτοντας κατάλληλη ποσότητα υπερρευστοποιητή (SP) ώστε να διατηρηθεί η κάθιση του νωπού ποζολανικού σκυροδέματος σε τιμές κοντά στις αντίστοιχες των δοκιμίων αναφοράς (80 και 50 mm αντίστοιχα), ετοιμάστηκαν δύο σειρές δειγμάτων. Για κάθε σειρά δοκιμίων, παρασκευάστηκαν και τα δοκίμια αναφοράς (control), με τον αντίστοιχο λόγο νερού/τσιμέντο (W/C) για συγκριτικούς λόγους.

Όταν ποσότητα τέφρας προστέθηκε στα δοκίμια, τότε ίση μάζα (και περίπου ίσος όγκος) τσιμέντου αντικαταστάθηκε (το ποσοστό αντικατάστασης ήταν 30% και 40% επί του τσιμέντου αναφοράς). Τα ξηρά υλικά αναμίχθηκαν για 2 min, προστέθηκε το νερό με τον ρευστοποιητή και η ανάμιξη συνεχίστηκε για 2 min επιπλέον. Κατόπιν, τα διάφορα δοκίμια χυτεύτηκαν σε κύβους ακμής 100 mm, δονήθηκαν σε τράπεζα δόνησης

προς απομάκρυνση του περιεχόμενου αέρα και συντηρήθηκαν σε κορεσμένο υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του ασβεστίου στους 20°C.

Πίνακας 2 Σχεδιασμός δοκιμίων σκυροδέματος*

Δείγμα	C	W	W/(C	F	A	SP	Κάθιση (mm)
C ₁	350	203	0.58	-	1830	-	80
30T _F	245	203	0.58	105	1830	1.84	75
40T _F	210	203	0.58	140	1830	1.40	75
30T _M	245	203	0.58	105	1845	0.88	75
40T _M	210	203	0.58	140	1840	1.40	75
C ₂	350	203	0.47	-	1930	2.97	50
30T _F	245	165	0.47	105	1925	5.00	40
40T _F	210	160	0.46	140	1950	5.00	40
30T _M	245	165	0.47	105	1925	5.00	45
40T _M	210	160	0.47	140	1925	5.50	40

*C, W, F, A, SP: kg τσιμέντου, νερού, ποζολάνης, αδρανών και υπέρ-ρευστοποιητή αντίστοιχα, ανά m³ όγκου σκυροδέματος

Συνολικά 10 δοκίμια σκυροδέματος προετοιμάστηκαν των οποίων οι αναλογίες παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Στις 2, 7, 28 και 90 ημέρες μετά την μίξη, δοκιμάστηκε η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων κατά DIN 1048. Δύο δοκίμια ανά μέτρηση δοκιμάστηκαν και οι μέσες τιμές των θλιπτικών αντοχών αναφέρονται.

2.3 Επιταχυνόμενη δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων (AASHTO T277)

Κατά την AASHTO T277 (ASTM C1202) δοκιμή [6] κορεσμένα σε νερό, 50-mm πάχους και 100-mm διαμέτρου δοκίμια σκυροδέματος που κόπηκαν από την μέση των κυλινδρικών δοκιμίων που χυτεύτηκαν, υποβάλλονται σε ηλεκτρική τάση μεγέθους 60 V για 6 h. Οι εξεταζόμενες τομές σκυροδέματος επικαλύφθηκαν πριν την δοκιμή με υδατό-στεγανή ταινία στη κυλινδρική τους επιφάνεια. Μετράται το ολικό φορτίο (σε Coulombs) που διέρχεται από το εξεταζόμενο δοκίμιο και χρησιμοποιείται για την κατάταξη του δείγματος σύμφωνα με τα κριτήρια του προτύπου.

2.4 Μακροπρόθεσμη δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων (NORDTEST BUILD 443)

Φέτες σκυροδέματος των 60-mm από τα αρχικά κυλινδρικά δοκίμια ελήφθησαν για την μακροπρόθεσμη δοκιμή της ανθεκτικότητας κατά NT Build 443. Πριν από την έκθεση τους στο διάλυμα των χλωριόντων, τα

δοκίμια συντηρήθηκαν σε κορεσμένο διάλυμα $\text{Ca}(\text{OH})_2$ μέχρι να σταθεροποιηθεί το βάρος τους (απαιτήθηκαν 40 ημέρες). Κατόπιν και πριν την έκθεση τους στο διάλυμα των χλωριόντων, κάθε επιφάνεια των δοκιμίων εκτός από την μία βάση τους στεγανοποιήθηκε (με ένα στρώμα αστάρι και 4 στρώματα ειδικό στεγανωτικό τσιμέντου). Σκοπός της εν λόγω διαδικασίας είναι να εξασφαλιστεί πως η διάχυση του επιθετικού μέσου θα εξελιχθεί προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση εντός του δοκιμίου. Τα δοκίμια εμβαπτιστήκαν σε δεξαμενές με το δοκιμαστικό διάλυμα (165g $\text{NaCl}/\text{l H}_2\text{O}$) και παρέμειναν εκεί για 100 ημέρες. Στο τέλος της δοκιμαστικής περιόδου, με την βοήθεια κρουστικού δραστικού ελήφθησαν δείγματα σκόνης (powder) από την εκτιθέμενη επιφάνεια των δοκιμίων από 5 διαδοχικά στρώματα βάθους (ανά 3-mm από την επιφάνεια). Ο προσδιορισμός των χλωριόντων σε κάθε στρώμα (παρουσιάζεται εδώ ο μέσος όρος δύο μετρήσεων) των δοκιμίων έγινε με την υγροχημική μέθοδο Volhard.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Δόση ρευστοποιητή και κάθιση

Οι μετρήσεις της κάθισης πραγματοποιήθηκαν με βάση την πρότυπη μέθοδο ASTM C143-90a και έλαβε χώρα αμέσως μετά την ανάμιξη των πρώτων υλών. Η δόση του υπέρ-ρευστοποιητή ρυθμίστηκε με βασικό κριτήριο την διατήρηση της κάθισης του νωπού προϊόντος στις επιθυμητές τιμές για κάθε σειρά σκυροδεμάτων (ανάλογα με τον λόγο W/Cm) που παρασκευάστηκαν.

Οι τιμές του ρευστοποιητή SP (σε kg/m^3) που προστέθηκε σε κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. μαζί με την μετρούμενη κάθιση του φρέσκου σκυροδέματος. Παρατηρείται πως η ποσότητα του SP που προστέθηκε κυμάνθηκε (και για τους δύο λόγους W/Cm που μελετήθηκαν) μεταξύ 0,9 και 6 kg ανά m^3 σκυροδέματος. Είναι γνωστό πως, εκτός των άλλων, κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την δόση του ρευστοποιητή είναι η χημική σύσταση του τσιμέντου (απλού ή ποζολανικού), η λεπτότητα των υλικών, το προστιθέμενο νερό, καθώς και το αν η ποζολάνη προστέθηκε ξεχωριστά ή συναλέστηκε με το τσιμέντο [7,8]. Στα πλαίσια της εργασίας, δεδομένου πως χρησιμοποιήθηκε το ίδιο τσιμέντο, η λεπτότητα των ποζολανών ήταν πρακτικά η ίδια και το γεγονός πως κατά την προετοιμασία των σκυροδεμάτων ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία, προκύπτει πως καθοριστικό ρόλο στην διαφορά των ποσοτήτων υπέρ-ρευστοποιητή που προστέθηκαν διαδραμάτισαν τα κύρια φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των ποζολανών και το νερό που προσφέρθηκε στα δοκίμια.

Είναι χαρακτηριστικό πως ακόμα και για τα ποζολανικά δοκίμια που παρασκευάστηκαν με υψηλό W/Cm, απαιτήθηκε προσθήκη SP για να παρουσιάσουν ανάλογη κάθιση με το δοκίμιο αναφοράς. Η προσθήκη αυτή κυμάνθηκε σε χαμηλά επίπεδα (της τάξης του 1-1,5 kg/m³ σκυροδέματος), ενώ για να επιτευχθεί ίδια κάθιση στα δοκίμια με αυξημένη δόση ποζολάνης χρειάστηκε μικρή αύξηση της δόσης του ρευστοποιητή. Όταν ο λόγος W/Cm μειώθηκε, η ποσότητα του ρευστοποιητή που απαιτήθηκε, αυξήθηκε όπως αναμένετο. Σε αυτήν την περίπτωση, απαιτήθηκε περίπου 1 kg/m³ επιπλέον SP κατά την επιπρόσθετη εισαγωγή τέφρας (από 30 σε 40%) στα μίγματα.

3.2 Εξέλιξη θλιπτικών αντοχών

Η εξέλιξη των θλιπτικών αντοχών συναρτήσει της ηλικίας ενυδάτωσης παρουσιάζεται στον Πίνακα 3. Μολονότι πως, κατά τα πρώτα στάδια της ενυδάτωσης οι θλιπτικές αντοχές των ποζολανικών συστημάτων υστερούν των τιμών των δοκιμίων αναφοράς (C1 και C2) για όλα τα εξεταζόμενα W/Cm και ποσοστά αντικατάστασης, από το τέλος της πρώτης εβδομάδας και έπειτα, αναπτύσσουν γρηγορότερα αντοχές. Σε αυτό το στάδιο, η ασβεστιτική τέφρα T_F αποδίδει καλύτερα από την πυριτική T_M ως συνέπεια του πλεονάσματος ενεργού CaO που διαθέτει. 28 ημέρες αντίθετα μετά την μίξη, παρατηρείται σημαντική αύξηση των αντοχών των ποζολανικών συστημάτων, τα οποία είτε προσεγγίζουν τις τιμές των δοκιμίων αναφοράς είτε τις ξεπερνούν.

Πίνακας 3 Εξέλιξη θλιπτικών αντοχών για τα δοκίμια σκυροδέματος

Δοκίμιο	W/Cm	Θλιπτική Αντοχή (MPa)			
		Ηλικία (ημέρες)			
		2	7	28	90
C ₁	0,58	17,2	26,8	32,8	39,5
30T _F	0,58	12,8	23,2	31,4	42,5
40T _F	0,58	10,8	22,2	35,5	43,0
30T _M	0,58	13,3	22,7	34,7	41,4
40T _M	0,58	11,6	21,8	33,9	39,7
C ₂	0,47	28,0	41,8	50,2	57,8
30T _F	0,47	22,1	38,0	52,1	62,1
40T _F	0,47	19,1	33,4	50,2	60,4
30T _M	0,47	23,8	34,9	46,9	57,2
40T _M	0,47	16,8	29,4	44,9	52,7

Σε αυτήν την ηλικία, η T_F παραμένει η πιο αποδοτική τέφρα ιδιαίτερα στα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με χαμηλό λόγο W/Cm. Η υπεροχή της παραμένει και μετά από 2 μήνες (90 ημέρες ενυδάτωσης), πιθανόν ως αποτέλεσμα της ταχύτερα εκδηλωμένης ποζολανικής της δράσης και του

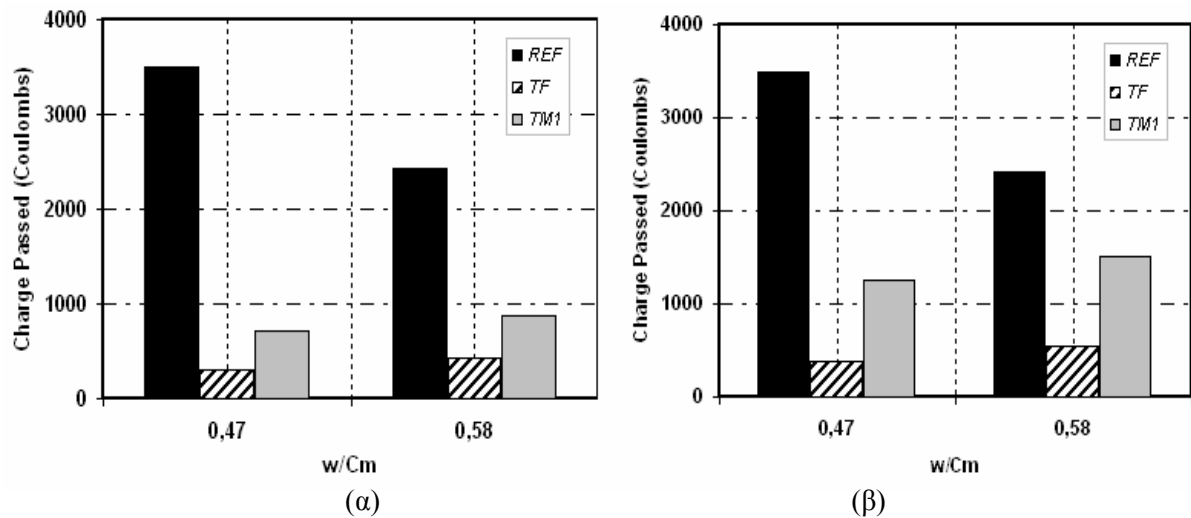
ασυνήθιστα υψηλού ποσοστού ενεργού πυριτίου που περιέχει. Γίνεται σαφές πως αμφότερες τέφρες παρουσιάζουν συντελεστές απόδοσης χαμηλότερους της μονάδας (ισοδύναμη του δοκιμίου αναφοράς) μετά την πρώτη εβδομάδα, αλλά αργότερα, όταν εμπλέκονται στις ποζολανικές αντιδράσεις την ξεπερνούν εύκολα, ανεξάρτητα από το ποσοστό αντικατάστασης και τον παράγοντα W/Cm, απεικονίζοντας έτσι την ικανότητα των συγκεκριμένων υλικών να αντικαταστήσουν σημαντικό μέρος της βασικής πρώτης ύλης, προσδίδοντας ίση ή και ανώτερη αντοχή στο τελικό προϊόν.

3.3 Αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων – Δοκιμή AASHTO

Η εξαιρετική επίδοση και των δύο τύπων τεφρών που δοκιμάστηκαν σε σχέση με την απόδοση του δοκιμίου αναφοράς απεικονίζεται στις Εικόνες 3.1(α) και (β), όπου το ηλεκτρικό φορτίο που διήλθε από τα δοκίμια παρουσιάζεται συναρτήσει του λόγου w/Cm για τα δοκίμια με 30 και 40% αντικατάσταση τσιμέντου. Η προχωρημένη ηλικία στην οποία τα δοκίμια εξετάστηκαν (120 ημέρες) εξασφάλισε την εκδήλωση ποζολανικής δράσης από τις τέφρες που εντάχθηκαν στα σύνθετα σκυροδέματα. Αυτός είναι προφανώς και ο βασικός λόγος που τα τεφρό-σκυροδέματα επιτρέπουν την διέλευση μικρότερου φορτίου ανεξάρτητα από τον λόγο w/Cm που χρησιμοποιήθηκε κατά την προετοιμασία των δοκιμίων.

Είναι γενικώς αποδεκτό πως – σε επίπεδο σκυροδέματος – οι μικρότεροι κόκκοι των ιπταμένων τεφρών ενισχύουν (μέσα από το filler effect) την στοιβαξή (packing) μεταξύ των αδρανών (ειδικώς των λεπτών) και των κόκκων του τσιμέντου, μειώνοντας έτσι το συνολικό πορώδες (άρα και την διαπερατότητα) του τελικού προϊόντος [9]. Σε κάθε περίπτωση και σύμφωνα με την επίσημη κατάταξη κατά ASTM C1202, τα ποζολανικά σκυροδέματα εμφανίζουν πολύ χαμηλή (για 30% προσθήκη) και χαμηλή (για 40%) διαπερατότητα στην διείσδυση χλωριόντων, την στιγμή που τα δοκίμια χωρίς ποζολάνη χαρακτηρίζονται από μέτρια (για χαμηλό λόγο w/Cm) έως και υψηλή διαπερατότητα στην επίθεση του ίδιου μέσου.

Όταν η ποσότητα του τσιμέντου που αντικαθίσταται αυξάνεται (βλέπε Εικόνα 3.1(β)), το ηλεκτρικό φορτίο που διέρχεται από τα ποζολανικά δοκίμια αυξάνεται για τις αντίστοιχες τιμές w/Cm. Παραμένει ωστόσο σημαντικά αισθητά χαμηλότερο του φορτίου που διέρχεται από το δοκίμιο αναφοράς. Η παρατηρούμενη αύξηση μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός πως ο ρυθμός αντίδρασης της ποζολάνης μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό συμμετοχής της στο μίγμα. Αυτό έχει διαπιστωθεί από σωρεία ερευνητών, αλλά επιπλέον δείχτηκε και στην αντίστοιχη ενότητα της παρούσας εργασίας. Σύμφωνα με τους Hanehara et al. [10], το φαινόμενο αυτό είναι ακόμη πιο έντονο μετά από εκτεταμένη συντήρηση όπως αυτή που εφαρμόστηκε στα πλαίσια της εξέτασης.



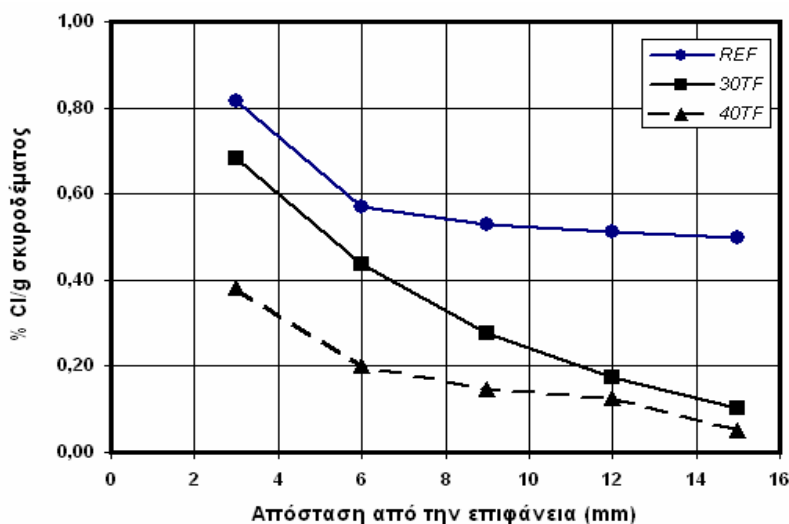
Εικόνα 3.1 – Επίδραση του λόγου w/Cm στο ηλεκτρικό φορτίο που διέρχεται από το σκυρόδεμα για (α) 30% προσθήκη τέφρας και (β) 40% προσθήκη τέφρας

Εξαιρετικά ενδιαφέρον είναι το γεγονός πως για χαμηλό λόγο w/Cm , το ηλεκτρικό φορτίο που διέρχεται από το σκυρόδεμα που περιέχει 40% υψηλού ασβεστίου τέφρα T_F είναι μικρότερο από την αντίστοιχη τιμή του σκυροδέματος με μικρότερη παρουσία της ίδιας τέφρας (30% κ.β. τσιμέντου) και μεγαλύτερο λόγο w/Cm , κάτι που δεν διαπιστώθηκε στην περίπτωση της τέφρας Μεγαλόπολης. Η παραπάνω παρατήρηση, όχι μόνο υπογραμμίζει την επίδραση του λόγου w/Cm στην απόδοση του τελικού προϊόντος, αλλά επιπλέον δεικνύει πως τέφρες υψηλού ασβεστίου ικανοποιητικής ενεργότητας είναι πιο κατάλληλες για υψηλή αντικατάσταση τσιμέντου, τουλάχιστον για περιπτώσεις συντήρησης που ξεπερνούν τα αρχικά στάδια της ενυδάτωσης.

Επιχειρώντας μια προσπάθεια σύγκρισης μεταξύ των δύο τύπων τεφρών που εξετάστηκαν (οι οποίες υπενθυμίζεται πως είχαν αλεστεί σε ίδια λεπτότητα), διαπιστώνεται η υπεροχή της ασβεστούχου T_F σε σχέση με τα δοκίμια που ενσωματώνουν την πυριτική τέφρα από την Μεγαλόπολη. Το γεγονός αυτό είναι εξαιρετικά ενδιαφέρον δεδομένου πως η τελευταία διαθέτει περισσότερο ενεργό SiO_2 από την πρώτη. Το γεγονός πως η ασβεστούχος τέφρα (όπως κατά κανόνα συμβαίνει στις τύπου class C κατά ASTM τέφρες και επιβεβαιώθηκε κατά την ορυκτολογική ανάλυση) περιέχει συστατικά με υδραυλικές ιδιότητες όπως τα C_3A , CA και πιο σπάνια τύπου C_4AF (ιδιαίτερα σε τέφρες με περίσσεια σιδήρου) σε συνδυασμό με την μεγαλύτερη ικανότητα που επέδειξε στην δέσμευση χλωριόντων [11] δικαιολογούν την θετική της συμβολή στα δοκίμια που εξετάστηκαν.

3.4 Αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων – Δοκιμή NORDTEST

Το ολικό προφίλ συγκέντρωσης χλωριόντων (εκφρασμένο ως % Cl⁻/ μάζα σκυροδέματος) κατά την παραμονή 100-ημερών των δοκιμίων αναφοράς και T_F (για τον υψηλό λόγο w/Cm) παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2 συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια του δοκιμίου. Διαπιστώνεται και σε αυτήν την περίπτωση πως τα δοκίμια που περιέχουν ποζολάνη εμφανίζουν σημαντικά μικρότερη συγκέντρωση χλωριόντων σε όλα τα εξεταζόμενα βάθη από την επιφάνεια του σκυροδέματος. Η μέγιστη συγκέντρωση χλωριόντων μετρήθηκε – όπως αναμενόταν – σε όλα τα δοκίμια στο πρώτο στρώμα (0-3mm) από την επιφάνεια του σκυροδέματος και κατόπιν μειώθηκε όσο αυξήθηκε το βάθος της εξέτασης. Ειδικά στην περίπτωση του δοκιμίου αναφοράς, η συγκέντρωση των χλωριόντων παρέμεινε ουσιαστικά σταθερή στα επόμενα τέσσερα στρώματα, πάντα όμως υψηλότερη από τις αντίστοιχες τιμές που σημειώθηκαν στα ποζολανικά δοκίμια. Ανάλογη είναι η τάση που παρατηρείται και στο σκυρόδεμα με την έντονη παρουσία τέφρας (40% κ.β. τσιμέντου), με μια μείωση της συγκέντρωσης των χλωριόντων που αγγίζει το 50% (για το πρώτο στρώμα) και αυξάνεται ελάχιστα κατά βάθος του δοκιμίου.

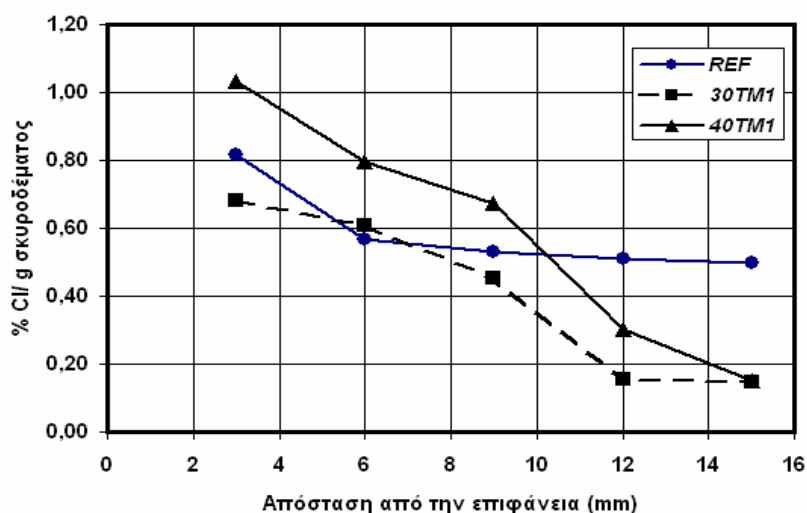


Εικόνα 3.2 – Προφίλ διείσδυσης χλωριόντων για δοκίμιο αναφοράς και ποζολανικά σκυροδέματα με την τέφρα Πτολεμαΐδας (w/Cm=0,58).

Αντίθετα στο σκυρόδεμα που περιέχει 30% T_F, η μείωση της συγκέντρωσης των χλωριόντων αυξάνεται κατά βάθος του δοκιμίου, γεγονός που δεικνύει πως η διείσδυση του επιθετικού μέσου δεν συνεχίζει πέρα από τα πρώτα στρώματα. Ωστόσο σε απόλυτες τιμές, είναι γεγονός πως όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τέφρα, το περιεχόμενο κάθε στρώματος σε χλωριόντα μειώνεται. Στην Εικόνα 3.3

απεικονίζεται η αντίσταση των σκυροδεμάτων που ενσωματώνουν την τέφρα χαμηλού ασβεστίου T_M . Στην περίπτωση αυτή – και παρά το γεγονός πως τα δοκίμια δοκιμάστηκαν αφού συντηρήθηκαν για επαρκές χρονικό διάστημα ώστε να εκδηλωθεί η ποζολανική δράση της T_{M1} – η συμμετοχή της τέφρας δεν επιφέρει βελτίωση του προφίλ αντίστασης του σκυροδέματος τουλάχιστον όσον αφορά τα πλησιέστερα στην επιφάνεια των δοκιμίων στρώματα.

Εν αντιθέσει με τη τάση που παρατηρήθηκε στα σκυροδέματα με την τέφρα Πτολεμαΐδας, εδώ η αντίσταση στην διείσδυση του επιθετικού μέσου μειώνεται όσο αυξάνεται η συμμετοχή της ποζολάνης στο μίγμα. Η τάση αυτή παρατηρήθηκε και στην ικανότητα της δέσμευσης χλωριόντων και θα πρέπει να αποδοθεί στον αργό ρυθμό αντίδρασης της T_M , παρά σε έλλειμμα ενεργών συστατικών. Το γεγονός πως η διείσδυση των χλωριόντων μειώνεται κατά βάθος των δοκιμίων σε βαθμό που ξεπερνά την αντίσταση του δοκιμίου αναφοράς (γεγονός που γίνεται εμφανές μετά τα πρώτα 10-mm περίπου) υποδηλώνει πιθανώς πως η παρουσία της τέφρας Μεγαλόπολης λειτουργεί αποτρεπτικά για την περαιτέρω διείσδυση των χλωριόντων.



Εικόνα 3.3 – Προφίλ διείσδυσης χλωριόντων για δοκίμιο αναφοράς και ποζολανικά σκυροδέματα με την τέφρα Μεγαλόπολης ($w/C_m=0,58$).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της εργασίας, μετρήθηκε η μηχανική ικανότητα σύνθετου σκυροδέματος με διαφορετικής προέλευσης Ελληνικές τέφρες καθώς και η

αντίσταση του απέναντι σε επίθεση χλωριόντων. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται ως εξής:

1. Σχετικά με την εξέλιξη των θλιπτικών αντοχών για τα δοκίμια ποζολανικού σκυροδέματος διαπιστώθηκε πως ενώ υστερούν των τιμών των δοκιμίων αναφοράς από το τέλος της πρώτης εβδομάδας και έπειτα, αναπτύσσουν γρηγορότερα αντοχές. Σε αυτό το στάδιο, η ασβεστιτική τέφρα T_F αποδίδει καλύτερα από την πυριτική T_M ως συνέπεια του πλεονάσματος ενεργού CaO που διαθέτει. Με την εξέλιξη της ενυδάτωσης παρατηρείται σημαντική αύξηση των αντοχών των ποζολανικών συστημάτων, τα οποία είτε προσεγγίζουν τις τιμές των δοκιμίων αναφοράς είτε τις ξεπερνούν. Σε αυτήν την ηλικία, η T_F παραμένει η πιο αποδοτική τέφρα ιδιαίτερα στα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με χαμηλό λόγο W/Cm .
2. Διαπιστώθηκε πολύ ικανοποιητική επίδοση και των δύο τύπων τεφρών σε σχέση με το μετρούμενο ηλεκτρικό φορτίο που διήλθε από τα δοκίμια. Τα τεφρό-σκυροδέματα επιτρέπουν την διέλευση μικρότερου φορτίου από το δοκίμιο αναφοράς ανεξάρτητα από τον λόγο w/Cm που χρησιμοποιήθηκε κατά την προετοιμασία των δοκιμίων.
3. Σύμφωνα με την επίσημη κατάταξη κατά ASTM C1202, τα ποζολανικά σκυροδέματα εμφανίζουν πολύ χαμηλή (για 30% προσθήκη) και χαμηλή (για 40%) διαπερατότητα στην διείσδυση χλωριόντων, την στιγμή που τα δοκίμια χωρίς ποζολάνη χαρακτηρίζονται από μέτρια (για χαμηλό λόγο w/Cm) έως και υψηλή διαπερατότητα στην επίθεση του ίδιου μέσου. Η προσθήκη της ασβεστούχου T_F επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα από ότι τα δοκίμια με την πυριτική τέφρα από την Μεγαλόπολη.
4. Με βάση τα αποτελέσματα της δοκιμής NordTest 443, διαπιστώθηκε πως τα δοκίμια που περιέχουν ποζολάνη εμφανίζουν σημαντικά μικρότερη συγκέντρωση χλωριόντων σε όλα τα εξεταζόμενα βάθη από την επιφάνεια του σκυροδέματος. Η μείωση της συγκέντρωσης των χλωριόντων αυξάνεται κατά βάθος του δοκιμίου, γεγονός που δεικνύει πως η διείσδυση του επιθετικού μέσου δεν συνεχίζει πέρα από τα πρώτα στρώματα. Εκφράζοντας τα αποτελέσματα σε απόλυτες τιμές, παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τέφρα, το περιεχόμενο κάθε στρώματος σε χλωριόντα μειώνεται.
5. Στην περίπτωση των σκυροδεμάτων με την τέφρα Μεγαλόπολης, η συμμετοχή της τέφρας δεν επιφέρει βελτίωση του προφίλ αντίστασης του σκυροδέματος τουλάχιστον όσον αφορά τα πλησιέστερα στην επιφάνεια των δοκιμίων στρώματα. Το γεγονός ωστόσο πως η διείσδυση

των χλωριόντων μειώνεται κατά βάθος των δοκιμών σε βαθμό που ξεπερνά την αντίσταση του δοκιμίου αναφοράς (γεγονός που γίνεται εμφανές μετά τα πρώτα 10-mm περίπου) υποδηλώνει πως η παρουσία της τέφρας Μεγαλόπολης λειτουργεί αποτρεπτικά για την περαιτέρω διείσδυση των χλωριόντων.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Keck R.H. and Riggs E.H., Specifying fly ash for durable concrete, *Concrete International*, 1997, April, pp. 53-58.
2. Thomas M.D.A., A comparison of the properties of OPC and fly ash concrete in 30 year old mass concrete structures, *Durability of building materials and components*, E &F.N. Spon, London, 1990, pp. 383-394.
3. Zhang, Min-Hong et al, Concrete Incorporating Supplementary Cementing Materials: Effect on Compressive Strength and Resistance to Chloride-Ion Penetration. *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No.2, 1999, pp. 181-188.
4. Papadakis, V.G., Effect of Supplementary Cementing Materials on Concrete Resistance Against Carbonation and Chloride Ingress. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No.2, 2000, pp. 291-299.
5. RILEM Recommendations – TC FAB-67 Use of fly ash in building – FAB1; Test methods for determining the properties of fly ash, 2003.
6. Standard Test Method for Electrical Indication of Chloride's Ability to Resist Chloride" (ASTM C1202-94) *1994 Annual Book of ASTM Standards V 04.02*, ASTM, Philadelphia, pg. 620-5.
7. Bouzoubaa, N., Zhang, M.H., Malhotra, V.M. Mechanical Properties and Durability of Concrete Made With High-Volume Fly Ash Blended Cements Using a Coarse Fly Ash, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, p. 1393.
8. Bouzoubaa, N., Zhang, M.H., Malhotra, V.M. Laboratory-produced High-volume Fly ash Blended Cements. Compressive Strength and Resistance to the Chloride-ion Penetration of Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, p. 1037.
9. Ampadu, K. O., Torii, K., Kawamura, M., Beneficial effect of fly ash on chloride diffusivity of hardened cement paste. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No.4, 1999, pp. 585-590.
10. Hanehara, S. et al, "Effects of water/powder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste"; *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 1, 2001, pp. 31-39.
11. Σ.Κ. Αντίοχος, Διερεύνηση της συμβολής του ενεργού διοξειδίου του πυριτίου στην ποζολανική δραστηριότητα των Ελληνικών ιπταμένων τεφρών, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Ιούλιος 2007.