

Μελέτη της συμπεριφοράς και της εργασιμότητας πηγμάτων με ελληνικές ιπτάμενες τέφρες

Ι. Παπαγιάννη, Φ. Καρκαντελίδου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ, 54124 Θεσσαλονίκη

Λέξεις κλειδιά: αντοχή, ιπτάμενη τέφρα, λόγος νερό/κονία, πήγμα, πολυκαρβοξυλικός αιθέρας, πορώδες, ρευστοποιητής, σουλφονική ναφθαλίνη φορμαλδεΰδη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Ο συνδυασμός υλικών με τσιμεντοειδείς ιδιότητες, όπως η ιπτάμενη τέφρα, με το τσιμέντο Portland παρέχει υψηλή πλαστικότητα στο σχεδιασμό μιγμάτων σκυροδέματος με τεχνικά πλεονεκτήματα και χαμηλό κόστος. Ωστόσο, η προσθήκη τέτοιων υλικών επηρεάζει τις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος και προκαλεί προβλήματα συμβατότητας στα συστήματα μικτών κονιών, τα οποία περιέχουν επιπλέον ρευστοποιητές, είτε για την μείωση της απαίτησης σε νερό, είτε για την αύξηση της εργασιμότητας.

Στην παρούσα μελέτη, εξετάστηκαν δύο τύποι ρευστοποιητών, ο πρώτος τύπος είναι ένα πολυμερές με βάση τη σουλφονική ναφθαλίνη φορμαλδεΰδη (SNF), και ο δεύτερος ένα πολυμερές με βάση τον πολυκαρβοξυλικό αιθέρα (PC), σε συστήματα που περιείχαν 20, 30, 50 και 80% αντικατάσταση του τσιμέντου Portland από ελληνικές ιπτάμενες τέφρες (Πτολεμαΐδας και Μεγαλόπολης).

Η δράση των ρευστοποιητών στις τσιμεντόπαστες εκτιμήθηκε ελέγχοντας την ανάπτυξη των μηχανικών χαρακτηριστικών (αντοχή σε κάμψη και θλίψη) και το πορώδες σε διάφορες ηλικίες. Σκοπός της παρούσας ερευνητικής εργασίας ήταν να προσδιοριστεί ποιος τύπος ρευστοποιητή είναι καταλληλότερος για καθένα σύστημα κονιών που χρησιμοποιήθηκε. Η μεγαλύτερη μείωση σε απαίτηση νερού επιτεύχθηκε με τον PC ρευστοποιητή.

Study of the effectiveness and the workability in pastes containing Greek Fly Ashes

I. Papayianni, F. Karkantelidou

Lab. of Building Materials, Civil Engineering Department AUTH, 54124 Thessaloniki

Keywords: fly ash, polycarboxylate, paste, porosity, strength, superplasticizer, sulfonated naphthalene formaldehyde, water/binder

ABSTRACT: The combination of cementitious materials, such as fly ash, with portland cement provides high flexibility in designing concrete mixtures with several technical advantages and low cost. However, their addition influences the properties of fresh concrete and causes problems of compatibility in blended cement systems containing superplasticizers that are usually used either for reduction of water demand or for increase of workability.

In this study, two of the widely used type of superplasticizers, one based on sulphonated naphthalene formaldehyde condensate (SNF) and another based on polycarboxylate polymers (PC), were tested with mixtures containing 20, 30, 50 or 80% portland cement replacement with Greek fly ashes (from Ptolemaida and Megalopolis regions).

The action of superplasticizer on cement pastes was estimated by monitoring strength development and porosity at different ages. The aim of the research work was to find which type of superplasticizer was more suitable for each type of binder system.

The highest reduction of water demand was achieved with polycarboxylate polymer superplasticizer.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ: Η χρήση αναμεμιγμένων τσιμέντων στα μίγματα σκυροδέματος, είτε χρησιμοποιώντας ένα αναμεμιγμένο τσιμέντο Portland, είτε προσθέτοντας κατάλληλα υλικά απευθείας στο μίγμα του σκυροδέματος, φαίνεται να είναι η απάντηση στην πρόκληση της βιομηχανίας του σκυροδέματος του 21^{ου} αιώνα για περαιτέρω ανάπτυξη. Τα τελευταία χρόνια η σκέψη αυτή έχει επαρκώς τεκμηριωθεί, τόσο μέσω της έρευνας, όσο και μέσω διαφόρων εφαρμογών [1], [2], [3]. Ανάμεσα στις δύο μεθόδους χρήσης υλικών με τσιμεντοειδείς ιδιότητες, η πρώτη μέθοδος είναι ευκολότερη και παράγει σκυρόδεμα σταθερής ποιότητας, ενώ η δεύτερη είναι περισσότερο ευέλικτη, όμως απαιτεί ικανοποιητικό έλεγχο της ποιότητας του συστήματος. Για την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης πρέπει να διερευνηθούν η μικροδομή και οι ιδιότητες των πουζολανικών υλικών, καθώς και τα προϊόντα ενυδάτωσής τους. Η ορυκτολογική σύσταση των άμορφων φάσεων, η λεπτότητα άλεσης και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας των σωματιδίων επηρεάζουν τα προϊόντα της ενυδάτωσης και συνεπώς και τις ιδιότητες του σκυροδέματος [4].

Στην περίπτωση των συστημάτων τσιμέντου, που περιέχουν ιπτάμενη τέφρα υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο, η απαίτηση σε νερό, για σύστημα δεδομένης συνεκτικότητας, αυξάνεται, με αποτέλεσμα την μικρότερη ανάπτυξη αντοχών σε σχέση με το καθαρό τσιμέντο. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε εμπόδιο για την περαιτέρω εκμετάλλευση του βιομηχανικού αυτού παραπροϊόντος, παρόλο που ο αργός ρυθμός ενυδάτωσής του παράγει μια ισχυρότερη διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη στο σκυρόδεμα [4].

Εκτεταμένη έρευνα απέδειξε ότι η χρήση ρευστοποιητών είναι δυνατό να ξεπεράσει το παραπάνω εμπόδιο [1]. Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τύποι ρευστοποιητών, με διαφορετικό μηχανισμό διασποράς στην ενυδατωμένη τσιμεντόπαστα. Στην περίπτωση του ρευστοποιητή με βάση τη σουλφονική ναφθαλίνη φορμαλδεΰδη (SNF), ο μηχανισμός διασποράς είναι ηλεκτροστατικός. Οι σουλφονικές ομάδες των πολυμερικών αλυσίδων, αυξάνουν το αρνητικό φορτίο στην επιφάνεια των σωματιδίων του τσιμέντου και προκαλούν τη διασπορά τους, λόγω απώθησης. Στην περίπτωση του ρευστοποιητή με βάση τον πολυκαρβοξυλικό αιθέρα (PC), λαμβάνουν χώρα δύο μηχανισμοί. Στο αρχικό στάδιο της ανάμιξης, λειτουργεί με τον ηλεκτροστατικό μηχανισμό, όμως οι παράπλευρες αλυσίδες, οι οποίες είναι συνδεδεμένες με την κύρια πολυμερική αλυσίδα, προκαλούν στερική τροχοπέδη, η οποία σταθεροποιεί σε μεγάλο βαθμό την ικανότητα των σωματιδίων του τσιμέντου να διασπείρονται [5].

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ:

Υλικά

Για τη μελέτη της αποτελεσματικότητας των ρευστοποιητών χρησιμοποιήθηκαν έξι συνδυασμοί κονιών, που αποτελούνταν από τσιμέντο Portland υψηλής αντοχής (CEM I 42.5) και ιπτάμενη τέφρα από δύο διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας, Πτολεμαΐδα και Μεγαλόπολη. Παρασκευάστηκαν πάστες κανονικής συνεκτικότητας σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 196-3, τόσο χωρίς, όσο και με ρευστοποιητή 1% κ.β. κονίας. Τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στον Πίνακα 1, ενώ στον Πίνακα 2 φαίνονται οι συνθέσεις που παρασκευάστηκαν και τα ποσοστά των ιπτάμενων τεφρών που αντικατέστησαν το τσιμέντο.

Οι ρευστοποιητές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των Ευρωπαϊκών και Αμερικάνικων Προτύπων, EN 934-2:2001 και ASTM C-494, και είναι απαλλαγμένοι από χλώριο (Πίνακας 3). Ο πρώτος τύπος ρευστοποιητή, πολυμερές με βάση τη σουλφονική ναφθαλίνη φορμαλδεΰδη (SNF), χρησιμοποιείται για την παραγωγή υψηλής αντοχής ρεοπλαστικού σκυροδέματος με χαμηλό λόγο N/T, ενώ ο δεύτερος τύπος, πολυμερές με βάση τον

πολυκαρβοξυλικό αιθέρα (PC), συνίσταται για την παραγωγή ρεοπλαστικού σκυροδέματος υψηλών μηχανικών αντοχών, αρχικών και τελικών.

Έλεγχοι

Δεκαοκτώ συστήματα πηγμάτων κανονικής συνεκτικότητας παρασκευάστηκαν σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 196-3. Η προσθήκη ρευστοποιητή σε ποσότητα 1% κ.β. κονίας πραγματοποιήθηκε μαζί με το νερό της ανάμιξης. Μετά την ολοκλήρωση της ανάμιξης μετρήθηκαν οι τιμές του pH και της θερμοκρασίας στο πηγμα. Στη συνέχεια, το ανάμικτο τοποθετήθηκε σε μήτρες διαστάσεων 25x25x300 mm, απ' όπου διαμορφώθηκαν δοκίμια διαστάσεων 25x25x100 mm και 25x25x25 mm για τον έλεγχο της καμπτικής και της θλιπτικής αντοχής, αντίστοιχα. Οι μετρήσεις του ανοιχτού πορώδους έγιναν σύμφωνα με την μέθοδο RILEM CPC 11.3. Όλα τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε θάλαμο γήρανσης, σχετικής υγρασίας 99±1 % και θερμοκρασίας 20±1 °C, μέχρι την ηλικία ελέγχου. Οι αντοχές και το πορώδες προσδιορίστηκαν κατά την 1^η, 3^η, 7^η, 28^η, 90^η, 180^η και 360^η ημέρα.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά Πρώτων Υλών που χρησιμοποιήθηκαν

Χαρακτηριστικά	CEM I 42.5	Ιπτάμενη Τέφρα Πτολεμαΐδας	Ιπτάμενη Τέφρα Μεγαλόπολης
Χημική Σύσταση (% κ.β.)			
Na ₂ O	0.57	0.38	0.54
K ₂ O	1.08	0.80	3.29
CaO	66.84	41.70	18.75
MgO	3.91	7.30	1.90
Fe ₂ O ₃	8.11	5.26	8.20
Al ₂ O ₃	2.40	6.69	16.00
SiO ₂	19.55	29.42	48.32
SO ₃		3.85	2.48
Απώλεια πύρωσης	1.91	8.46	3.00
Αδιάλυτο υπόλειμμα	0.8	9.93	14.64
Λεπτότητα Άλεσης Συγκρατούμενο στο κόσκινο 45 μm	1.5	38%	25%
Ποζολανικότητα με τσιμέντο 28-ημέρες (EN 450-1)	-	85%	60%
Ποζολανικότητα με άσβεστο 28-ημέρες (ASTM C593)	-	4.64 MPa	7.26 MPa
Φαινόμενο ειδικό βάρος	3.141	2.556	1.950

Πίνακας 2. Σύσταση των πηγμάτων στα συστήματα μικτών κονιών

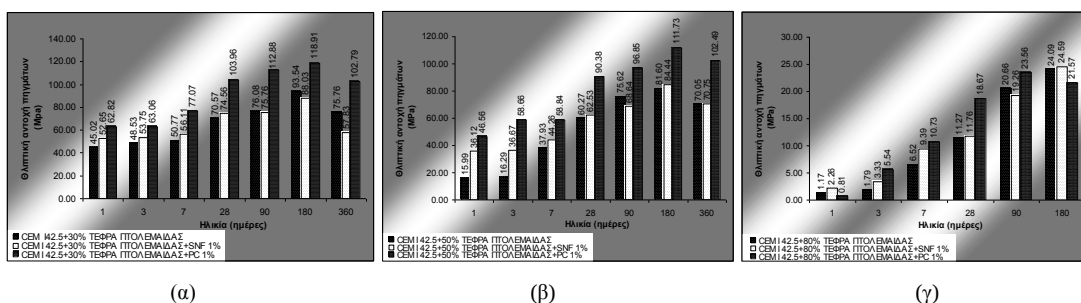
Σύσταση	Τσιμέντο Portland	Ιπτάμενη Τέφρα Πτολεμαΐδας	Ιπτάμενη Τέφρα Μεγαλόπολης	Λόγος N/K	Κανονική Συνεκτικότητα κατά EN 196-3 Διείσδυση εμβόλου Vicat (mm)	Θερμοκρασία του πηγματος μετά την ολοκλήρωση της ανάμιξης (°C)	Τιμή pH του πηγματος μετά την ολοκλήρωση της ανάμιξης
CEM I 42.5+30% Τέφρα Πτολεμαΐδας	+	+	-	0.31	7	27.9	13.20
CEM I 42.5+30% Τέφρα Πτολεμαΐδας+SNF 1%	+	+	-	0.30	7	27.0	13.15
CEM I 42.5+30% Τέφρα Πτολεμαΐδας+PC 1%	+	+	-	0.25	5	26.3	13.10
CEM I 42.5+50% Τέφρα Πτολεμαΐδας	+	+	-	0.34	7	25.3	13.02
CEM I 42.5+50% Τέφρα Πτολεμαΐδας+SNF 1%	+	+	-	0.29	5	24.8	13.00
CEM I 42.5+50% Τέφρα Πτολεμαΐδας+PC 1%	+	+	-	0.28	5	24.7	12.84
CEM I 42.5+80% Τέφρα Πτολεμαΐδας	+	+	-	0.47	5	33.4	12.23
CEM I 42.5+80% Τέφρα Πτολεμαΐδας+SNF 1%	+	+	-	0.48	5	29.9	12.21
CEM I 42.5+80% Τέφρα Πτολεμαΐδας+PC 1%	+	+	-	0.50	5	30.6	12.31
CEM I 42.5+20% Τέφρα Μεγαλόπολης	+	-	+	0.29	7	24.4	12.83
CEM I 42.5+20% Τέφρα Μεγαλόπολης+SNF 1%	+	-	+	0.26	7	23.7	12.40
CEM I 42.5+20% Τέφρα Μεγαλόπολης+PC 1%	+	-	+	0.23	5	23.5	12.40
CEM I 42.5+30% Τέφρα Μεγαλόπολης	+	-	+	0.31	6	24.6	12.25
CEM I 42.5+30% Τέφρα Μεγαλόπολης+SNF 1%	+	-	+	0.29	7	26.5	12.34
CEM I 42.5+30% Τέφρα Μεγαλόπολης+PC 1%	+	-	+	0.26	5	25.1	12.23
CEM I 42.5+40% Τέφρα Μεγαλόπολης	+	-	+	0.34	5	24.2	12.37
CEM I 42.5+40% Τέφρα Μεγαλόπολης+SNF 1%	+	-	+	0.31	5	23.4	12.14
CEM I 42.5+40% Τέφρα Μεγαλόπολης+PC 1%	+	-	+	0.29	5	24.3	12.26

Πίνακας 3. Τεχνικά χαρακτηριστικά ρευστοποιητών

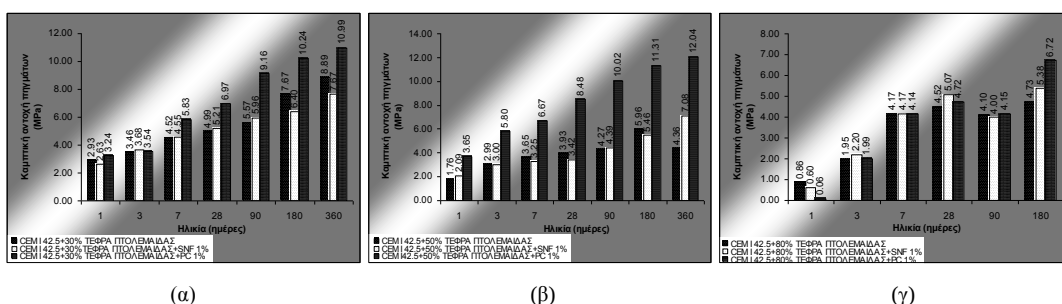
Ρευστοποιητής	Εμφάνιση	Ειδικό βάρος στους 20 °C (gr/ml)	Τιμή pH στους 20 °C	Περιεχόμενο χλώριο (%)
SNF	Καφέ υγρό	1.185 – 1.205	8.5 – 9.8	≤ 0.01
PC	Καφέ υγρό	1.080 – 1.150	~ 6.6	≤ 0.01

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ: Η προσθήκη των δύο τύπων ρευστοποιητών στα περισσότερα μικτά συστήματα κονιών κανονικής συνεκτικότητας είχε σαν αποτέλεσμα την μείωση του λόγου νερού/κονία, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2. Μόνο στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε 80% αντικατάσταση του τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα ο λόγος νερού/κονία αυξήθηκε, γεγονός που συνεπάγεται ότι η ποσότητα του εκάστοτε ρευστοποιητή (1% κ.β. κονιάς) δεν ήταν επαρκής, ώστε να λειτουργήσει ως μειωτής νερού. Οι μετρήσεις της τιμής του pH μετά την ολοκλήρωση της ανάμιξης έδειξαν ότι υπάρχει μια σχετική μείωση στα συστήματα που περιέχουν ρευστοποιητή. Εξαίρεση παρατηρείται σε δύο μόνο περιπτώσεις. Η πρώτη είναι στο σύστημα CEM I 42.5+80% Ιπτάμενη Τέφρα Πτολεμαΐδας+1% κ.β. SNF, και η δεύτερη στο σύστημα CEM I 42.5+30% Ιπτάμενη Τέφρα Μεγαλόπολης+1% κ.β. SNF. Η αύξηση της τιμής του pH είναι μικρότερη του 0.01% και στα δύο συστήματα.

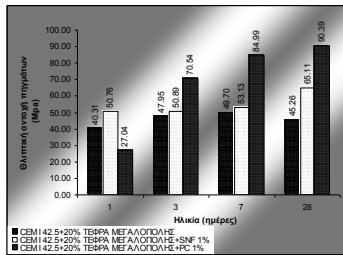
Η ανάπτυξη των αντοχών, σε θλίψη και σε κάμψη, των πηγμάτων που περιέχουν 30, 50 και 80% Τέφρα Πτολεμαΐδας φαίνεται στα διαγράμματα 1 και 2, ενώ τα αντίστοιχα διαγράμματα για τα συστήματα που περιέχουν 20, 30 και 40% Τέφρα Μεγαλόπολης είναι τα 3 και 4. Όσον αφορά στον προσδιορισμό της αντοχής σε θλίψη λήφθηκε ο μέσος όρος τεσσάρων κυβικών δοκιμίων διαστάσεων 25x25x25 mm, ενώ για τον προσδιορισμό της αντοχής σε κάμψη ο μέσος όρος δύο πρισματικών δοκιμίων διαστάσεων 25x25x100 mm.



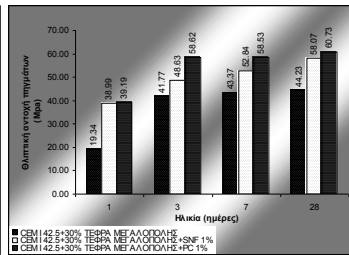
Διάγραμμα 1: Ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής σε πάστες κανονικής συνεκτικότητας σε διάφορες ηλικίες. (α) Σύστημα κονιών με 30% κ.β. Τέφρα Πτολεμαΐδας, (β) Σύστημα κονιών με 50% κ.β. Τέφρα Πτολεμαΐδας και (γ) Σύστημα κονιών με 80% κ.β. Τέφρα Πτολεμαΐδας.



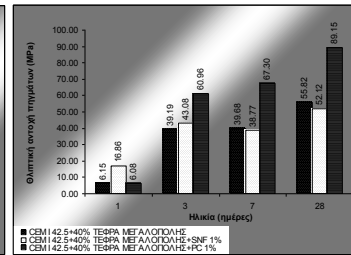
Διάγραμμα 2: Ανάπτυξη της καμπτικής αντοχής σε πάστες κανονικής συνεκτικότητας σε διάφορες ηλικίες. (α) Σύστημα κονιών με 30% κ.β. Τέφρα Πτολεμαΐδας, (β) Σύστημα κονιών με 50% κ.β. Τέφρα Πτολεμαΐδας και (γ) Σύστημα κονιών με 80% κ.β. Τέφρα Πτολεμαΐδας.



(α)

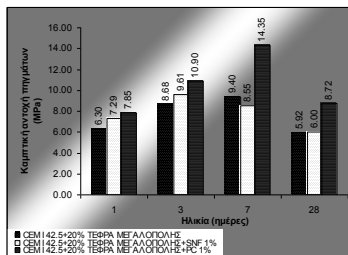


(β)

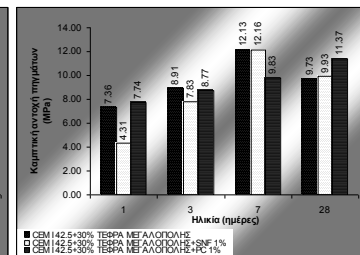


(γ)

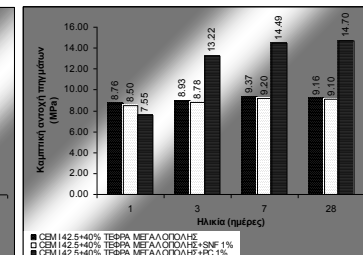
Διάγραμμα 3: Ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής σε πάστες κανονικής συνεκτικότητας σε διάφορες ηλικίες. (α) Σύστημα κονιών με 20% κ.β. Τέφρα Μεγαλόπολης, (β) Σύστημα κονιών με 30% κ.β. Τέφρα Μεγαλόπολης και (γ) Σύστημα κονιών με 40% κ.β. Τέφρα Μεγαλόπολης.



(α)



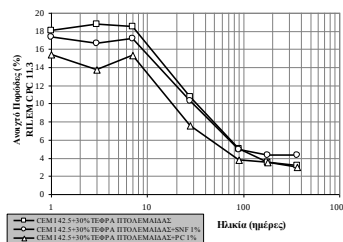
(β)



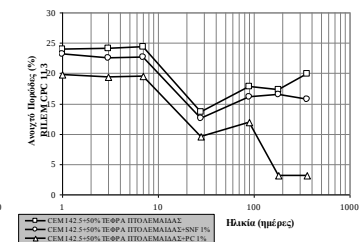
(γ)

Διάγραμμα 4: Ανάπτυξη της καμπτικής αντοχής σε πάστες κανονικής συνεκτικότητας σε διάφορες ηλικίες. (α) Σύστημα κονιών με 20% κ.β. Τέφρα Μεγαλόπολης, (β) Σύστημα κονιών με 30% κ.β. Τέφρα Μεγαλόπολης και (γ) Σύστημα κονιών με 40% κ.β. Τέφρα Μεγαλόπολης.

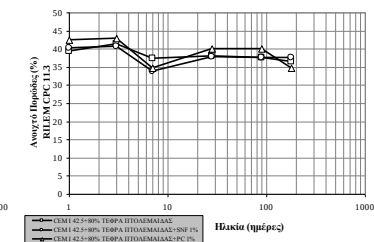
Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα η προσθήκη των ρευστοποιητών, και ειδικά του PC τύπου, συμβάλλει στην ανάπτυξη της πρώιμης αντοχής όλων των συστημάτων που εξετάστηκαν. Επιπρόσθετα, προσδιορίστηκε το ανοιχτό πορώδες, που συνδέεται άμεσα με την αντοχή σε κάμψη, και οι τιμές του οποίου παρατίθενται στα διαγράμματα 5 και 6.



(α)

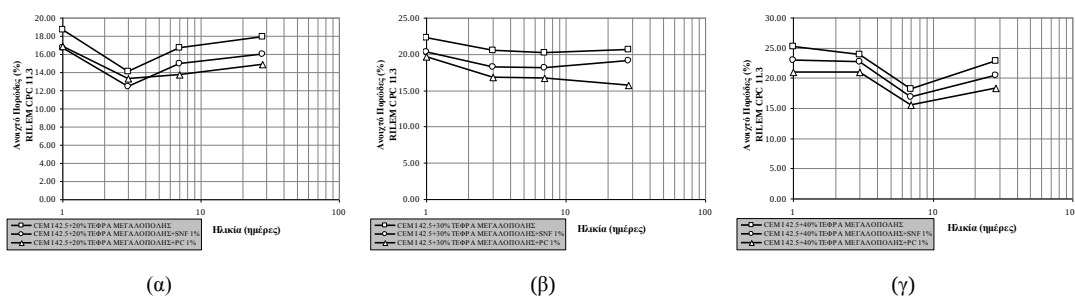


(β)



(γ)

Διάγραμμα 5: Εξέλιξη του ανοιχτού πορώδους σε συνάρτηση με τον χρόνο σε πάστες κανονικής συνεκτικότητας. (α) Πήγμα με 30% κ.β. Τέφρα Πτολεμαΐδας, (β) Πήγμα με 50% κ.β. Τέφρα Πτολεμαΐδας και (γ) Πήγμα με 80% κ.β. Τέφρα Πτολεμαΐδας.



Διάγραμμα 6: Εξέλιξη του ανοιχτού πορώδους σε συνάρτηση με τον χρόνο σε πάστες κανονικής συνεκτικότητας. (α) Πήγμα με 20% κ.β. Τέφρα Μεγαλόπολης, (β) Πήγμα με 30% κ.β. Τέφρα Μεγαλόπολης και (γ) Πήγμα με 40% κ.β. Τέφρα Μεγαλόπολης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ: Η προσθήκη των ρευστοποιητών στα συστήματα που περιείχαν 30 και 50% αντικατάσταση του τσιμέντου Portland από την Τέφρα Πτολεμαΐδας είχε σαν αποτέλεσμα τη μείωση του λόγου νερού/κονία και την ανάλογη αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Επιπλέον παρατηρήθηκε μείωση του πορώδους ακόμα και σε πρώιμες ηλικίες, το οποίο συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη της αντοχής σε κάμψη. Στην περίπτωση του συστήματος που περιείχε 80% Τέφρα Πτολεμαΐδας η ποσότητα των ρευστοποιητών ήταν ξεκάθαρο πως υπήρξε ανεπαρκής.

Όσον αφορά στα συστήματα που περιείχαν 20, 30 και 40% αντικατάσταση του τσιμέντου Portland από την Τέφρα Μεγαλόπολης, η αποτελεσματικότητα των ρευστοποιητών μειωνόταν όσο αυξανόταν το ποσοστό του πουζολανικού υλικού στο σύστημα.

Συμπερασματικά, είναι φανερό ότι οι ρευστοποιητές, και ειδικά οι πολυκαρβοξυλικού τύπου, έχουν κάνει εφικτή την αντικατάσταση σημαντικών ποσοτήτων τσιμέντου Portland με πουζολανικά βιομηχανικά παραπροϊόντα, όπως η ιπτάμενη τέφρα, μειώνοντας μ' αυτό τον τρόπο το κόστος και ενισχύοντας την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ: Ευχαριστούμε θερμά την εταιρεία BASF-CC HELLAS και ιδιαίτερα την Κυρία και τον Κύριο Δηλαβέρη για την οικονομική ενίσχυση που παρέχουν για την ολοκλήρωση της παρούσας ερευνητικής μελέτης, καθώς και για το ενδιαφέρον που δείχνουν στο συγκεκριμένο πεδίο της έρευνας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ:

1. Malhotra, V.M., "Superplasticized Fly Ash Concrete for Structural Applications", Concr. Int. Vol 8, No. 12, pp 28 – 31, 1986.
2. Mehta, P.K., Langley, W.S., "Monolith Foundation; Built to last 1000 years", Concr. Int. Vol 22, No. 7, pp 27 – 32, 2000.
3. Naik, Tarun et al, "Mechanical Properties and Durability of Concrete Pavements Containing High Volumes of Fly Ash", ACI SP-212, June 2003 V. M. Malhotra ed., pp 319 – 340.
4. Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M., "Concrete Microstructure, Properties and Materials", McGraw Hill Third edition, pp 302 – 305, pp 35 – 44, 2007.
5. Collepardi, Mario, "The New Concrete", Tintoretto editions, pp 197 – 218, 2006.