

ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ε.Γ. Παπαδάκης, Μ.Π. Ευσταθίου

*Ε.Γ. Παπαδάκης & Συνεργ., Επιστημονικό Πάρκο Πατρών Α.Ε., Οδός Σταδίου, Πλατάνι, 26504
Πάτρα*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό σχεδιασμού συνθέσεων σκυροδέματος και προβλέψεων ιδιοτήτων του, επιχειρείται μια ποσοτική συγκριτική αξιολόγηση διαφόρων βιομηχανικών παραπροϊόντων ως προσθέτων σκυροδέματος (πυριτική και ασβεστιτική ιπτάμενη τέφρα, πυριτική παιπάλη) σχετικά με:

1. την αντοχή σκυροδέματος
2. την ενανθράκωση σκυροδέματος και την διάβρωση του οπλισμού
3. την διείσδυση χλωριόντων και την διάβρωση του οπλισμού
4. το οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος ολικού κύκλου ζωής της κατασκευής.

Από αυτήν την παραμετρική ανάλυση προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα για την αξιοποίηση των υλικών αυτών στην βιώσιμη ανάπτυξη του τομέα δόμησης.

Λέξεις κλειδιά: ανθεκτικότητα, αξιολόγηση, βιομηχανικά παραπροϊόντα, κόστος, σκυρόδεμα

A QUANTITATIVE COMPARATIVE ASSESSMENT OF VARIOUS INDUSTRIAL BY-PRODUCTS AS CONCRETE ADDITIONS

V.G. Papadakis, M.P. Efstathiou

V.G. Papadakis & Assoc., Patras Science Park S.A., Stadiou Str., Platani, 26504 Patras, Greece

ABSTRACT: In the present work, using an appropriate software for concrete mix design and properties prediction, a quantitative comparative assessment is undertaken about the use of various industrial by-products as concrete additions (siliceous and calcareous fly ash, silica fume) as regards:

1. the concrete strength
2. the concrete carbonation and the corrosion of its reinforcement
3. the chloride penetration in concrete and the corrosion of its reinforcement
4. the economical and environmental cost of the total life cycle of the construction.

From the present parametrical analysis, very significant results were derived as regards the exploitation of these materials on the sustainable development of the building sector.

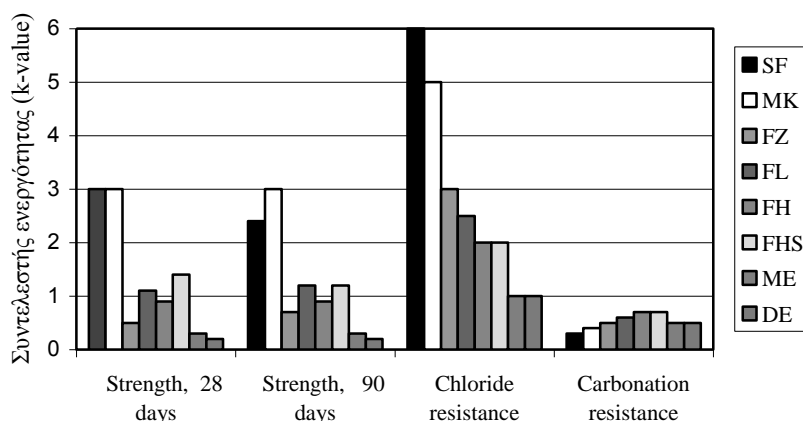
Keywords: assessment, concrete, cost, durability, industrial by-products

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τομέας δόμησης στον Ελληνικό χώρο κατέχει πρωτεύουσα θέση στις γενικότερες βιομηχανικές/ τεχνολογικές δραστηριότητες. Είναι η μεγαλύτερη βιομηχανία και στον ευρύτερο Ευρωπαϊκό χώρο, κύκλου εργασιών 800 δις. € ετησίως που αντιστοιχεί στο 11% του συνολικού Ευρωπαϊκού εισοδήματος, απασχολώντας περίπου το 20% του συνολικού εργατικού δυναμικού της ΕΕ (15). Αντίστοιχη είναι και η συμμετοχή του τομέα δόμησης στην επιβάρυνση του περιβάλλοντος από πλευράς κατανάλωσης μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αερίων εκπομπών (κυρίως CO₂), στερεών αποβλήτων, κλπ. Την σημαντικότερη θέση στον τομέα δόμησης κατέχει η βιομηχανία τσιμέντου και σκυροδέματος (65% του εργατικού δυναμικού, 80% των αερίων εκπομπών). Τα παρακάτω τρία θέματα αιχμής απασχολούν κυρίως την βιομηχανία κατασκευών:

- ✓ Οι τεράστιες ανάγκες υποδομής της γρήγορης αστικοποίησης της κοινωνίας στον κόσμο.
- ✓ Η ανάγκη για μια ισορροπία ανάμεσα στη βιομηχανική ανάπτυξη και το περιβάλλον.
- ✓ Η κρίση στο χώρο της ανθεκτικότητας των κατασκευών και κυρίως του σκυροδέματος.

Η πλειονότητα των περιπτώσεων φθοράς σκυροδέματος σχετίζεται με την διάβρωση του οπλισμού, η οποία κυρίως οφείλεται σε ενανθράκωση ή διείδυση χλωριόντων [1,2]. Από την άλλη πλευρά, είναι πλέον κοινός τόπος [3,4] ότι η βιώσιμη ανάπτυξη των βιομηχανιών τσιμέντου και σκυροδέματος μπορεί να επιτευχθεί με μεγιστοποίηση της χρήσης ποζολανικών και υδραυλικών παραπροϊόντων (*supplementary cementing materials: SCM*), όπως τέφρα, σκωρία, κλπ., παραγόμενων σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς και μεταλλουργικές βιομηχανίες. Εκτός από την επίδραση των υλικών αυτών σε συνήθεις δομικές ιδιότητες του σκυροδέματος, όπως αντοχή και σταθερότητα όγκου, η επίδραση στην ανθεκτικότητα πρέπει επίσης να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. Σε προηγούμενες εργασίες [5-7] προτείνεται ένα απλοποιημένο σχήμα χημικών αντιδράσεων που περιγράφει την δράση της πυριτικής παιπάλης και της ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα, δίνοντας επίσης ποσοτικές εκφράσεις εκτίμησης της χημικής και ογκομετρικής σύνθεσης ενός ποζολανικού σκυροδέματος. Έχει επίσης παρουσιασθεί [8-10], μια πρακτική προσέγγιση της επίδρασης των ποζολανικών υλικών στην αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, χρησιμοποιώντας την έννοια του συντελεστή ενεργότητας k . Ο συντελεστής ενεργότητας k ορίζεται ως το μέρος της ποζολάνης που μπορεί να θεωρηθεί ως ισοδύναμο του τσιμέντου Portland παρέχοντας ίσες τιμές ιδιοτήτων με το σκυρόδεμα χωρίς ποζολάνη ($k=1$ για τσιμέντο Portland).



Σχήμα 1. Συντελεστές ενεργότητας για διάφορα SCM (SF: πυριτική παιπάλη, MK: μετακαολίνη, FZ: ιπτάμενη τέφρα με μηδενικό ασβέστιο, FL: πυριτική ιπτάμενη τέφρα, FH: ασβεστιτική ιπτάμενη τέφρα, FHS: ασβεστιτική ιπτάμενη τέφρα υψηλών θεικών, ME: Μηλαϊκή γη, και DE: γη διατόμων).

Στο Σχήμα 1 συνοψίζονται πειραματικές μετρήσεις του συντελεστή k για διάφορα βιομηχανικά παραπροϊόντα και φυσικές ποζολάνες, και για διάφορες ιδιότητες σύγκρισης (αντοχή, ανθεκτικότητα).

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό σχεδιασμού συνθέσεων σκυροδέματος και προβλέψεων ιδιοτήτων του, επιχειρείται μια περαιτέρω συγκριτική αξιολόγηση των σημαντικότερων βιομηχανικών παραπροϊόντων ως προσθέτων σκυροδέματος, σχετικά με τις ιδιότητες αντοχής, ανθεκτικότητας και κόστους που προσδίδουν στο σκυρόδεμα.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει δαπανηθεί μια τεράστια ποσότητα ενέργειας σε *εργαστηριακές και πειραματικές μελέτες* σε θέματα ανθεκτικότητας σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας είναι ακόμα είτε διασκορπισμένα σε επιστημονικά περιοδικά και πρακτικά συνεδρίων είτε αναφέρονται συνοπτικά σε εξειδικευμένα βιβλία. Επιπρόσθετα, θεωρητικές προσεγγίσεις των μηχανισμών φθοράς, με ισχυρά προβλεπτικό χαρακτήρα, είναι περιορισμένες σε κάποια πολύπλοκα και δύσχρηστα στην πράξη μαθηματικά μοντέλα.

Ένα σημαντικό βήμα προόδου σε αυτό το θέμα, συντελέστηκε σχετικά πρόσφατα [11,12], με την ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού (*EUCON[®]*) για υπολογισμούς με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, που περιλαμβάνει τα πλέον αξιόπιστα και αποδεδειγμένα μοντέλα, ενισχυμένο με μια καλή βάση πειραματικών δεδομένων. Το λογισμικό, αυτό αναπτυγμένο σε φιλική προς τον χρήστη μορφή, καταρχήν ξεκινά με την κατάστρωση της *μελέτης σύνθεσης*, δηλαδή τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό του συστατικών του σκυροδέματος, ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη από το έργο *κατηγορία αντοχής* σκυροδέματος. Κατόπιν υπολογίζονται τα φυσικοχημικά εκείνα χαρακτηριστικά από τα οποία εξαρτάται ο ρυθμός των διεργασιών φθοράς. Στην συνέχεια και ανάλογα των περιβαλλοντικών συνθηκών (κατηγορίες έκθεσης) προσδιορίζεται ο ρυθμός προόδου των μηχανισμών φθοράς που αφορούν αυτό το περιβάλλον, και τελικά εκτιμάται η *διάρκεια χρήσιμης ζωής της κατασκευής*. Τέλος, δίνονται *στοιχεία κόστους*, αλλά και περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ώστε να είναι δυνατή μια τεχνοοικονομική βελτιστοποίηση. Οι κύριοι μηχανισμοί φθοράς που εξετάζονται είναι η διάβρωση του οπλισμού προκαλούμενη είτε από ενανθράκωση είτε από διείσδυση χλωριόντων (θαλάσσιου νερού ή άλλων πηγών), και η χημική προσβολή (οξέων, θεικών και αλκαλίων). Έχουν χρησιμοποιηθεί βασικές θεμελιώδεις αρχές Χημικής Μηχανικής και Μηχανικής Υλικών ώστε να προσομοιωθούν οι φυσικοχημικές διεργασίες μέσω μαθηματικών μοντέλων για σχεδιασμό και πρόβλεψη. Η δομή του βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα για το τσιμέντο EN 197 (27 διαφορετικοί τύποι τσιμέντου) και για το σκυρόδεμα EN 206 (επιπλέον χρήση προσθέτων όπως ιπτάμενη τέφρα και πυριτική πιαπάλη, χρήση βελτιωτικών ή χημικών προσμίκτων, κλπ.).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Πρόγραμμα παραμετρικής ανάλυσης

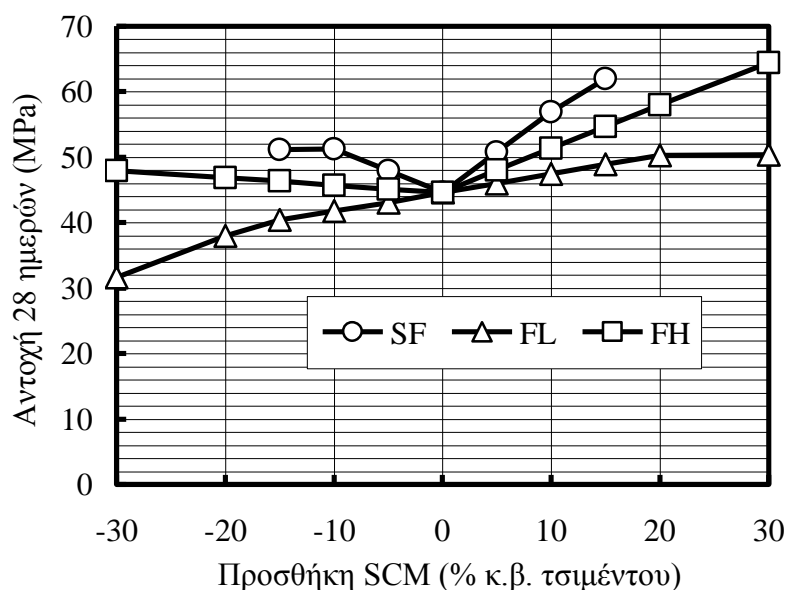
Χρησιμοποιώντας το ανωτέρω λογισμικό διεξάγουμε στην συνέχεια μια παραμετρική ανάλυση σχετικά με την επίδραση του είδους και της ποσότητας προσθήκης SCM σε σκυρόδεμα. Πρέπει να τονισθεί ότι οι προβλέψεις του ανωτέρω λογισμικού έχουν εκτενώς επιβεβαιωθεί από πειραματικές μετρήσεις, για συγκεκριμένα όρια παραμέτρων, και η συγκριτική αξιολόγηση που επιχειρείται στην παρούσα εργασία κινείται εντός αυτών των ορίων.

Πίνακας 1 Τυπική ανάλυση οξειδίων (%) και δραστικού πυριτίου (%), κλίνκερ πόρτλαντ, πυριτικής παιπάλης, ιπτάμενων τεφρών και σκωρίας υψικαμίνου.

Υδραυλικά/ ποζολανικά υλικά	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Ενεργ. πυρίτιο
Κλίνκερ πόρτλαντ	23	6	3	65	0.5	-
Πυριτική παιπάλη (SF)	91	1	1.5	0.7	0.4	96
Πυριτική ιπτάμενη τέφρα (FL)	53	20	9	4	0.6	82
Ασβεστιτική ιπτάμενη τέφρα (FH)	39	16	6	24	4.3	71

Μία σταθερή μονάδα όγκου (1 m³) σκυροδέματος επιλέχθηκε ως κοινή βάση σύγκρισης. Όταν ένα SCM προστίθεται σε αυτήν την μονάδα τότε ίσος όγκος (και περίπου ίση μάζα) από ένα άλλο υλικό, είτε τσιμέντο είτε αδρανή, αφαιρούνται ώστε να διατηρείται σταθερός ο συνολικός όγκος (το ποσοστά αντικατάστασης ήταν από ±5 - ±30% επί του τσιμέντου αναφοράς). Η περιεκτικότητα σε νερό, W= 150 kg/m³, έμεινε πάντα σταθερή σε όλες τις συνθέσεις.

Ως βάση σύγκρισης (σκυρόδεμα αναφοράς) θεωρείται ένα σκυρόδεμα με περιεκτικότητα C= 300 kg/m³ σε τσιμέντο τύπου CEM I 42,5N, με περιεκτικότητα σε νερό W= 150 kg/m³, με θραυστά, ασβεστολιθικά αδρανή μέγιστου κόκκου 31.5 mm, χωρίς πρόσθετα, και με περιεκτικότητα σε παγιδευμένο αέρα 1.5%. Ως βασικά SCM για σύγκριση χρησιμοποιήθηκαν τρία τυπικά ποζολανικά / υδραυλικά υλικά, μια τυπική πυριτική παιπάλη (*silica fume: SF*) που χρησιμοποιείται αρκετά σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες, μια πυριτική ιπτάμενη τέφρα, ιδιαίτερα χαμηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο (*FL*) που επίσης χρησιμοποιείται ευρέως σε αρκετές Ευρωπαϊκές χώρες (κατά EN-450), και μία ιπτάμενη τέφρα υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο (*FH*), *Ελληνικού τύπου*, όπως αυτές που παράγονται π.χ. στον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας. Μια τυπική περιεκτικότητα σε οξείδια που υποθετικά περιέχονται στα ανωτέρω υλικά δίνεται στον Πίνακα 1.



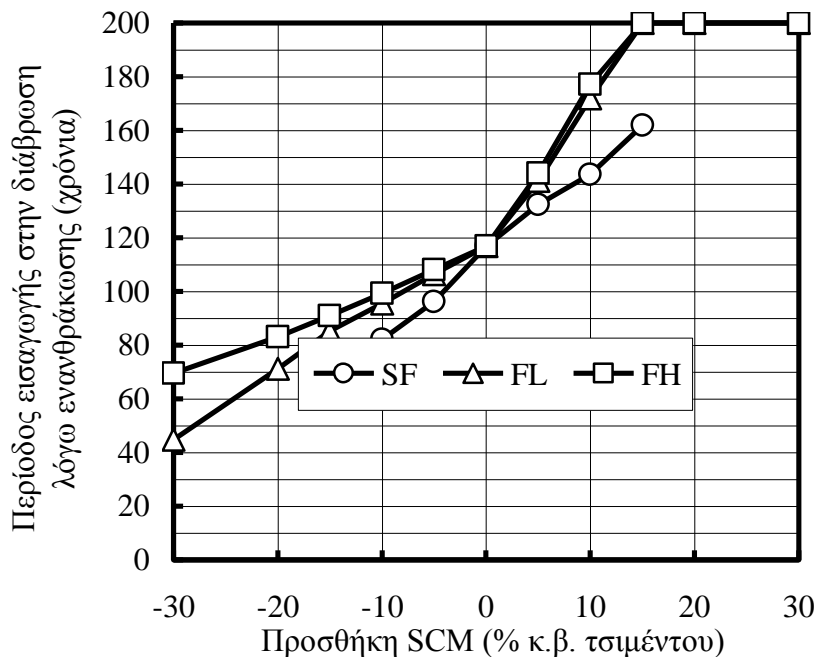
Σχήμα 2. Συγκριτικά αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής 28 ημερών, έναντι διαφόρων ποσοστών προσθήκης SCM σε σκυρόδεμα. Το δεξιό μέρος αναφέρεται στην περίπτωση αντικατάστασης αδρανών από ποζολάνες και το αριστερό στην περίπτωση αντικατάστασης τσιμέντου από ποζολάνες.

Σύγκριση ως προς την αντοχή

Τυπικά αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής δίνονται στο Σχήμα 2. Γενικά παρατηρείται ότι όταν τα ποζολανικά υλικά αντικαθιστούν αδρανή επιτυγχάνονται υψηλότερες αντοχές. Η τελική αύξηση της αντοχής είναι ανάλογη του ποσοστού δραστικού SiO_2 στην ποζολάνη (με την SF να απογειώνει τις αντοχές). Όταν αντικαθίσταται τσιμέντο από αυτά τα υλικά (μέχρι ενός σημείου) η τελική αντοχή ξεπερνά την αντοχή του δοκιμίου αναφοράς μόνον εάν το ποσοστό δραστικού πυριτίου στην ποζολάνη είναι μεγαλύτερο από αυτό του τσιμέντου. Για την Ελληνική ιπτάμενη τέφρα (FH), επειδή οι τιμές του k είναι περίπου στην μονάδα (1) κατά τις πρώιμες ηλικίες, αυτό σημαίνει ότι, τουλάχιστον μέχρι ενός ορίου [7], αυτή η συγκεκριμένη τέφρα, αφού αλεσθεί, μπορεί να αντικαταστήσει τσιμέντο Portland, δίνοντας ίδιες αντοχές.

Σύγκριση ως προς την ενανθράκωση

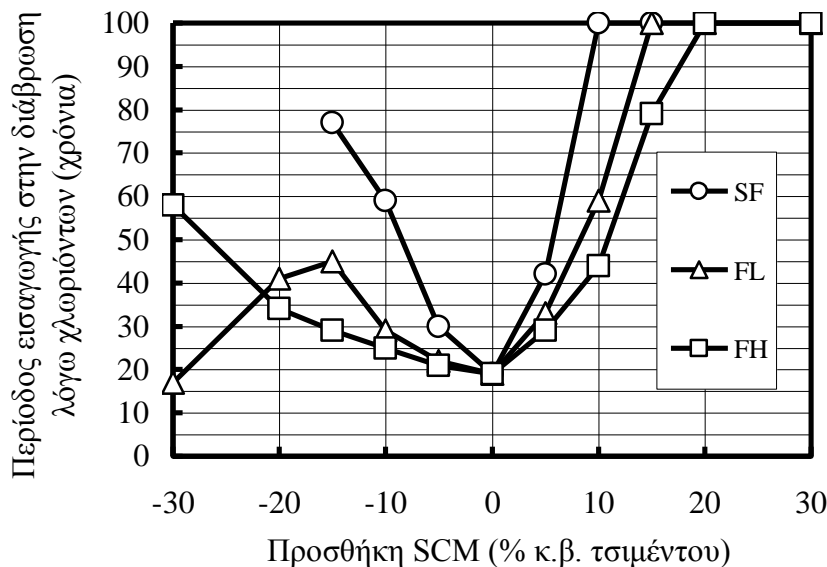
Τυπικά αποτελέσματα υπολογισμού της περιόδου εισαγωγής στην διάβρωση (αποπαθητικοποίησης) του οπλισμού λόγω ενανθράκωσης δίνονται στο Σχήμα 3. Πρέπει να σημειωθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η περίοδος, τόσο μακρύτερη είναι η προστασία του οπλισμού έναντι διάβρωσης, μάλιστα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κατώτερο όριο χρήσιμης ζωής. Για τα παρόντα ποζολανικά υλικά το βάθος ενανθράκωσης μειώνεται καθώς αυξάνει η αντικατάσταση αδρανών από ποζολάνη και αυξάνει καθώς αυξάνει η αντικατάσταση τσιμέντου από ποζολάνη. Έτσι αντίστοιχα η περίοδος εισαγωγής στην διάβρωση επιμηκύνεται στην πρώτη περίπτωση, ενώ στην δεύτερη μειώνεται δραστικά. Συγκρίνοντας επίσης την σχετική συμπεριφορά για αντικατάσταση 10% είτε σε τσιμέντο είτε σε αδρανή παρατηρείται ότι η FH παρουσιάζει την μεγαλύτερη προστασία (λόγω ίδιας σημαντικής περιεκτικότητας σε ασβέστιο), ενώ η SF την χαμηλότερη.



Σχήμα 3. Συγκριτικά αποτελέσματα υπολογισμού περιόδου εισαγωγής στην διάβρωση οπλισμού λόγω ενανθράκωσης (κατηγορία έκθεσης περιβάλλοντος: XC3, αστική περιοχή, επικάλυψη οπλισμού: 30mm), έναντι διαφόρων ποσοστών προσθήκης SCM σε σκυρόδεμα. Το δεξιό μέρος αναφέρεται στην περίπτωση αντικατάστασης αδρανών από ποζολάνες και το αριστερό στην περίπτωση αντικατάστασης τσιμέντου από ποζολάνες.

Σύγκριση ως προς την διείσδυση χλωριόντων

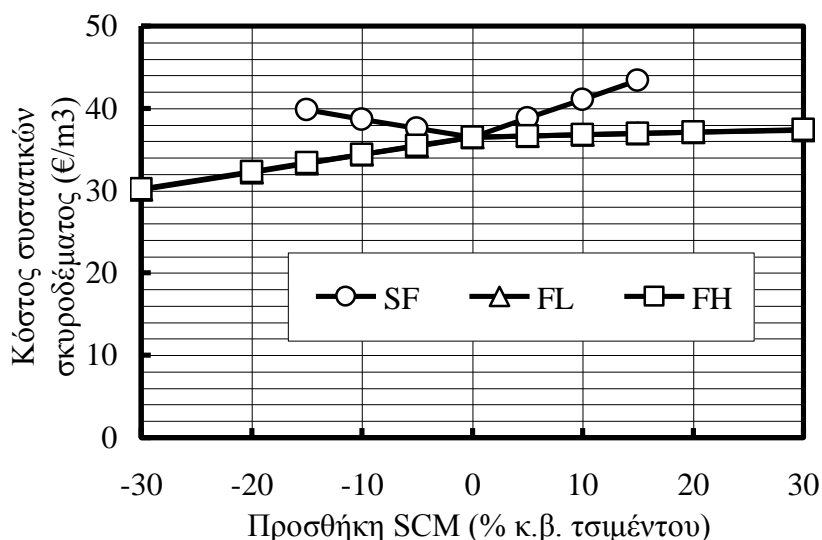
Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4, οι συνθέσεις σκυροδέματος που περιέχουν ποζολάνες είτε αυτές αντικαθιστούν αδρανή είτε τσιμέντο (μέχρι ενός ορίου) παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερη περίοδο εισαγωγής στην διάβρωση του οπλισμού λόγω διείσδυσης χλωριόντων. Από όλα τα υλικά που δοκιμάστηκαν η SF παρουσίασε την μεγαλύτερη αντίσταση έναντι διείσδυσης χλωριόντων, κατόπιν η FL και τέλος η FH. Αυτή η συμπεριφορά, που αντικατοπτρίζεται επίσης στις σημαντικά υψηλότερες τιμές του k συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες για αντοχή (Σχ. 1), μπορεί να εξηγηθεί λόγω των σημαντικών αλληλεπιδράσεων των χλωριόντων με τα ένυδρα συστατικά του άμορφου πυριτίου των ποζολανικών υλικών [8].



Σχήμα 4. Συγκριτικά αποτελέσματα υπολογισμού περιόδου εισαγωγής στην διάβρωση οπλισμού λόγω διείσδυσης χλωριόντων (κατηγορία έκθεσης περιβάλλοντος: XS2, Μεσόγειος Θάλασσα, επικάλυψη οπλισμού: 40mm), έναντι διαφόρων ποσοστών προσθήκης SCM σε σκυρόδεμα. Το δεξιό μέρος αναφέρεται στην περίπτωση αντικατάστασης αδρανών από ποζολάνες και το αριστερό στην περίπτωση αντικατάστασης τσιμέντου από ποζολάνες.

Σύγκριση ως προς το κόστος των πρώτων υλών

Τέλος, στο Σχήμα 5 δίνεται μια συγκριτική εικόνα του συνολικού κόστους α' υλών που συνθέτουν 1 m³ σκυροδέματος, στις ανωτέρω περιπτώσεις προσθήκης διαφόρων SCM. Παρατηρείται ότι το κόστος παραμένει περίπου ίδιο στην περίπτωση επιπλέον προσθήκης τεφρών (αντικαθιστώντας μόνον αδρανή) και ελαφρά μεγαλύτερο όταν γίνεται η αντίστοιχη προσθήκη πυριτικής παιπάλης. Όμως, αυτή η ελαφρά αύξηση κόστους πρώτων υλών, μακροπρόθεσμα εξισορροπείται και ανατρέπεται λόγω της επιμήκυνσης της χρήσιμης ζωής της κατασκευής (σημαντική αύξηση των περιόδων εισαγωγής στην διάβρωση λόγω ενανθράκωσης ή διείσδυσης χλωριόντων). Επιπλέον το παραγόμενο σκυρόδεμα αποκτά και υψηλότερες αντοχές. Στην περίπτωση αυτή έχουμε σημαντικό περιβαλλοντικό κέρδος λόγω της εξαιρετικής ανθεκτικότητας των κατασκευών και της δραστηρικής μείωσης των συνεχών επισκευών και ίσως των ολικών αντικαταστάσεων των κατασκευών.



Σχήμα 5. Συγκριτικά αποτελέσματα υπολογισμού κόστους αξίας α' υλών σκυροδέματος, έναντι διαφόρων ποσοστών προσθήκης SCM σε σκυρόδεμα. Το δεξιό μέρος αναφέρεται στην περίπτωση αντικατάστασης αδρανών από ποζολάνες και το αριστερό στην περίπτωση αντικατάστασης τσιμέντου από ποζολάνες.

Η αντικατάσταση τσιμέντου από ιπτάμενες τέφρες μειώνει αφενός το οικονομικό κόστος των κατασκευών (στην περίπτωση της πυριτικής παιπάλης το κόστος και πάλι αυξάνεται λόγω της υψηλότερης τιμής της), και μειώνει επίσης αναλογικά το περιβαλλοντικό κόστος των α' υλών. Εάν επίσης η κατασκευή υποτεθεί ότι εκτίθεται σε περιβάλλον χλωριόντων, η αντικατάσταση αυτή οδηγεί σε σημαντική επιμήκυνση της χρήσιμης ζωής και άρα σε περαιτέρω μείωση του συνολικού οικονομικού και περιβαλλοντικού κόστους του κύκλου ζωής της κατασκευής.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αρκετά στερεά βιομηχανικά παραπροϊόντα θερμικών κατεργασιών (τέφρες από εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή καύσης αποβλήτων, σκωρίες από μεταλλουργικές διεργασίες, κλπ.) μπορούν να χαρακτηρισθούν ως *δευτερεύοντα υδραυλικά υλικά: SCM*. Η μεγιστοποίηση της χρήσης των υλικών αυτών θα βοηθήσει σημαντικά στην βιώσιμη ανάπτυξη του τομέα δομικών έργων, μειώνοντας παράλληλα το κόστος κατασκευής. Σε αυτήν την εργασία παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα, χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό, σχετικά με την δράση των υλικών αυτών στο σκυρόδεμα και την επίδρασή τους στην αντοχή και την ανθεκτικότητά του σε διάρκεια (αντίσταση σε ενανθράκωση και διείσδυση χλωριόντων).

Όταν αυτά τα υλικά αντικαθιστούν αδρανή επιτυγχάνονται υψηλότερες αντοχές. Η τελική αύξηση της αντοχής είναι ανάλογη του ποσοστού δραστικού πυριτίου στην ποζολάνη. Όταν αντικαθίσταται τσιμέντο από αυτά τα υλικά (μέχρι ενός σημείου), η τελικά αντοχή ξεπερνά την αντοχή του δοκιμίου αναφοράς μόνον εάν το ποσοστό δραστικού πυριτίου στην ποζολάνη είναι μεγαλύτερο από αυτό του τσιμέντου. Την καλύτερη συμπεριφορά δίνει η πυριτική παιπάλη, κατόπιν η τέφρα υψηλού ασβεστίου και τέλος η τέφρα χαμηλού ασβεστίου. Η Ελληνική ιπτάμενη τέφρα υψηλού ασβεστίου, αφού αλεσθεί, μπορεί να αντικαταστήσει τσιμέντο Portland, μέχρι ενός ορίου, δίνοντας παρόμοιες αντοχές με αυτό.

Δείχθηκε επίσης ότι για όλες τις ποζολάνες που μελετήθηκαν σε αυτήν την εργασία, η περίοδος εισαγωγής στην διάβρωση οπλισμού λόγω ενανθράκωσης αυξάνεται, καθώς αυξάνει η αντικατάσταση αδρανών από ποζολάνη, και μειώνεται καθώς αυξάνει η αντικατάσταση τσιμέντου από ποζολάνη. Την καλύτερη συμπεριφορά δίνει η τέφρα υψηλού ασβεστίου, κατόπιν η τέφρα χαμηλού ασβεστίου και τέλος η πυριτική παιπάλη (όσο υψηλότερο ασβέστιο, τόσο καλύτερα). Οι συνθέσεις που περιείχαν ποζολάνη, ανεξάρτητα εάν αντικαθιστούσε αδρανή ή τσιμέντο παρουσίασαν σημαντική αύξηση της περιόδου εισαγωγής στην διάβρωση λόγω διείσδυσης χλωριόντων. Την καλύτερη συμπεριφορά δίνει η πυριτική παιπάλη, κατόπιν η τέφρα χαμηλού ασβεστίου και τέλος η τέφρα υψηλού ασβεστίου (όσο υψηλότερο πυρίτιο, τόσο καλύτερα).

Η αντικατάσταση αδρανών από τέτοια βιομηχανικά παραπροϊόντα μπορεί να αυξήσει ελαφρώς το κόστος α' υλών, όμως η ασύγκριτα υψηλότερη ανθεκτικότητα και αντοχή που προσφέρει στις κατασκευές, οδηγεί σε σημαντική μείωση του οικονομικού και περιβαλλοντικού κόστους του ολικού κύκλου ζωής των. Επίσης, κάτω από προϋποθέσεις, η αντικατάσταση τσιμέντου από ποζολάνες δίνει επιμήκυνση του χρόνου ζωής (περίπτωση διείσδυσης χλωριόντων), με αναλογική επιπλέον μείωση του οικονομικού και περιβαλλοντικού κόστους των α' υλών. Εάν στην τελευταία περίπτωση χρησιμοποιηθεί στην σύνθεση σκυροδέματος χαμηλότερη περιεκτικότητα σε νερό, τότε πράγματι προκύπτει ένα συνολικά ανθεκτικό, οικονομικό, και ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον, σκυρόδεμα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Basheer, P.A.M., Chidiac, S.E., and Long, A.E., 1996. Predictive Models for Deterioration of Concrete Structures, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 10, p. 27.
2. Thompson, N.G., and Lankard, D.R., 1997. *Improved Concretes for Corrosion Resistance*, Georgetown Pike, McLean VA, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-96-207.
3. Mehta, P.K., 1998. Role of Pozzolanic and Cementitious Material in Sustainable Development of the Concrete Industry, *Proceedings of the 6th International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, Bangkok, ACI SP-178, p. 1.
4. Berry, E.E., and Malhotra, V.M., 1987. Fly Ash in Concrete, in: *Supplementary Cementing Materials for Concrete*, Ed. V.M. Malhotra, CANMET SP-86-8E, p. 35, Ottawa.
5. Papadakis, V.G., 1999. Experimental Investigation and Theoretical Modeling of Silica Fume Activity in Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, p. 79.
6. Papadakis, V.G., 1999. Effect of Fly Ash on Portland Cement Systems. Part I: Low-calcium Fly Ash, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, p. 1727.
7. Papadakis, V.G., 2000. Effect of Fly Ash on Portland Cement Systems. Part II: High-Calcium Fly Ash, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30(10), 1647-1654
8. V. G. Papadakis, 2000, Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30(2), 291.
9. Papadakis, V.G. and S. Tsimas, 2002. Supplementary Cementing Materials in Concrete - Part I: Efficiency and Design, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32(10), 1525-1532.
10. Badogiannis, E., V.G. Papadakis, E. Chaniotakis, and S. Tsivilis, 2004. Exploitation of Poor Greek Kaolins: Strength Development of Metakaolin Concrete and Evaluation by means of k-value, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34(6), 1035-1041.
11. Papadakis, V.G. and M.P. Efstathiou, 2005. EUCON: Computer Software for Estimation of Concrete Service Life, Patras Science Park S.A., Patras, Greece.
12. Papadakis, V.G., 2005. Estimation of Concrete Service Life – The Theoretical Background, Patras Science Park S.A., Patras, Greece.