

ΔΡΩΣΕΣ ΕΝΕΡΓΕΣ ΚΟΝΙΕΣ : ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΑ ΑΝΑΜΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Σπυράγγελος Λυκούδης
Προϊστάμενος Εργαστηρίου ΠΥΘ , Εγνατία Οδός Α.Ε.

Ηλίας Ψυχίδης
Τεχνικός Υποστήριξης Πελατών , Τιτάν Α.Ε.

Σταύρος Τηλεκερίδης
Αναπληρωτής Προϊστάμενος Εργαστηρίου ΠΥΘ , Εγνατία Οδός Α.Ε.

Λέξεις κλειδιά: Δρώσες Ενεργές Κονίες, Σκυρόδεμα Υψηλής Επιτελεστικότητας, λόγος νερού τσιμέντου, Ανθεκτικότητα στο χρόνο, PRC, HPC , VPRC, UPRC.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η παρούσα εργασία αποπειράται ενδεχομένως για πρώτη φορά στην Ελλάδα την παραγωγή Δρωσών Ενεργών Κονιών. Η εργασία διαπραγματεύεται την παραγωγή των κονιών με υψηλά ποσά τσιμέντου, εξαιρετικά χαμηλό λόγο νερού – τσιμέντου (της τάξης του 0,15) και την προσθήκη μεταλλικών ινών . Μετρούνται τα χαρακτηριστικά του φρέσκου κονιάματος συγκρινόμενα με τα χαρακτηριστικά αυτοεπιπεδούμενης κονιάς και τα χαρακτηριστικά της σκληρυμένης κονιάς δεδομένου ότι οι αντοχές σε κάποια δοκιμαστικά είναι της τάξης των 170 MPa.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αρκετά δοκιμαστικά αναμείγματα έχουν πραγματοποιηθεί τα περασμένα χρόνια προκειμένου να δημιουργηθούν τσιμεντοειδή υλικά με υψηλές μηχανικές ιδιότητες. Στη δεκαετία του '30 ο Freyssinet απέδειξε τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής πίεσης στην αύξηση της μηχανικής αντοχής κατά την διάρκεια της συντήρησης. Στη δεκαετία του '60 αναφέρθηκαν θλιπτικές αντοχές της τάξης των 650 MPa σε δοκίμια τα οποία συντηρήθηκαν σε αυξανόμενη θερμοκρασία υπό πίεση.

Το πρόβλημα της χαμηλής ολκιμότητας επιλύθηκε με την προσθήκη μεταλλικών ινών διαφόρων χαρακτηριστικών. Ως μια λύση θεωρήθηκε η τεχνική SIFCON (Slurry Infiltrated Fibered Concrete) όπου αφού γεμίσει το καλούπι με ίνες διαχέεται μέσα σ' αυτό η τσιμεντοκονία. Ο όρος δρώσα ενεργή κονία (PRC Powder Reactive Concrete), είναι ένα γενικό όνομα για μια ομάδα τσιμεντοειδών υλικών που σχεδιάστηκαν στο τεχνικό τμήμα της Bouyges στην αρχή της δεκαετίας του '90. Στον

ακόλουθο πίνακα φαίνονται τα χαρακτηριστικά των Δρώσων Ενεργών Κονιών συγκρινόμενα με το σκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας. Αν και τα 2 σκυροδέματα είναι διαφορετικής κοκκομετρικής διαβάθμισης. Ο Πίνακας είναι ενδεικτικός για την συσχέτιση των ιδιοτήτων των Σκυροδεμάτων Υψηλής Επιτελεστικότητας με τις Δρώσες Ενεργές Κονίες).

Πίνακας 1. Ενδεικτικές Ιδιότητες Σκυροδέματος Υψηλής Επιτελεστικότητας – Δρωσών Ενεργών Κονιών.

Ιδιότητα	HPC ¹	PRC ²
Θλιπτική αντοχή (MPa)	60-100	180-200
Καμπτική αντοχή (MPa)	6-10	40-50
Fracture energy (J/m ²)	140	1,200-40,000
Young modulus (GPa)	23-37	50-60

¹ Σκυρόδεμα Υψηλής Επιτελεστικότητας

² Δρώσες Ενεργές Κονίες

Μερικές από τις ουσίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή Δρωσών Ενεργών Κονιών είναι μετακαολίνης, ιπτάμενη τέφρα, ασβεστολιθικά micro fillers, πυριτικά micro fillers και πυριτική παιπάλη.

Για τη παραγωγή των Δρώσων Ενεργών Κονιών στην παρούσα Εργασία χρησιμοποιούνται εμπορικά (και συνηθισμένα υλικά) με απλή διαδικασία ανάμειξης και συντήρησης προκειμένου να επιτευχθούν οι υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες (θλιπτική αντοχή, κάμψη), σε συνδυασμό με ομογενές σχεδόν αυτοεπιπεδούμενο μίγμα στην φρέσκια μορφή.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

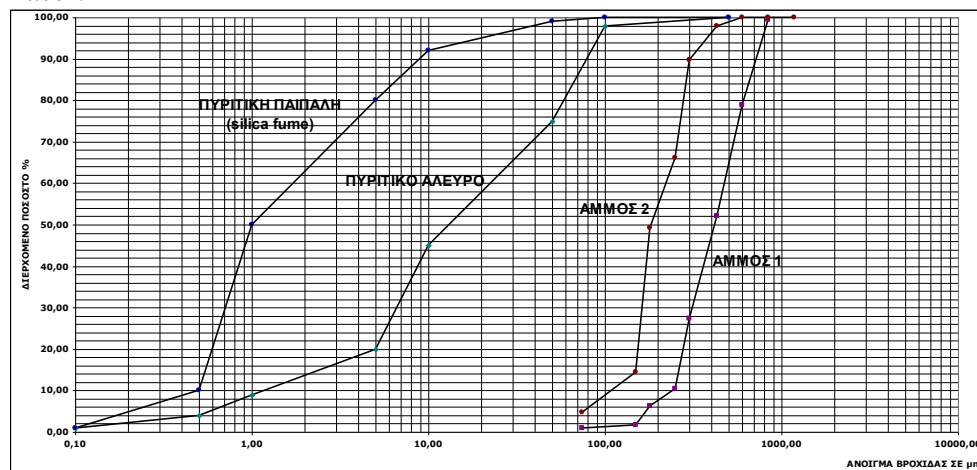
Μια τυπική σύνθεση Δρώσας Ενεργής Κονίας σύμφωνα με την βιβλιογραφία φαίνεται στον Πίνακα 2. Είναι χαρακτηριστικό το υψηλό ποσό τσιμέντου, ο εξαιρετικά χαμηλός λόγος νερού – τσιμέντου, η παρουσία ενεργής ποζολανικής κονίας (πυριτικής παιπάλης) και το υψηλό ποσοστό υπερπλαστικοποιητή. Όπως είναι προφανές υπάρχει παντελής απουσία συμβατικών αδρανών και αντικατάστασή τους από λεπτή πυριτική άμμο ή πυριτικό άλευρο ground silica.

Πίνακας 2. Τυπική Σύνθεση Δρώσας Ενεργής Κονίας

Ποσότητες κατά βάρος	Χωρίς ίνες	Με ίνες
Τσιμέντο	1	1
Πυριτική παιπάλη	0.25	0.23
Άμμος	1.1	1.1
Υπερπλαστικοποιητής	0.016	0.016
Μεταλλικές ίνες	-	0.175
Λόγος Νερού/ Τσιμέντου	0.15	0.157

Τα υλικά τα οποία επιλέχθηκαν για τα δοκιμαστικά αναμείγματα των Δρωσών Ενεργών Κονιών είναι:

Τσιμέντο CEM I 52.5, Άμμος 1, Άμμος 2, Πυριτικό αλεύρο (ground silica), Πυριτική παιπάλη (silica fume), Μεταλλικές ίνες OL 6/0.16, Υπερπλαστικοποιητής 1. Οι κοκκομετρικές αναλύσεις των υλικών φαίνονται στον ακόλουθο Διάγραμμα. Σημειώνεται ότι οι κοκκομετρικές αναλύσεις του πυριτικού αλεύρου και της πυριτικής παιπάλης έγιναν με την μέθοδο Laser.



Διάγραμμα 1. Κοκκομετρικές αναλύσεις υλικών

2.1 Εργαστηριακές Δοκιμές

Πραγματοποιήθηκαν 2 ομάδες δοκιμαστικών αναμειγμάτων μία με 1,015 κιλά τσιμέντου ανά κυβικό και μία με 710 κιλά ανά κυβικό. Ο στόχος ήταν κρατώντας σχεδόν σταθερό τον λόγο νερού προς τσιμέντο να μεταβάλλεται το ποσοστό των μεταλλικών ινών από 160-610 κιλά ανά κυβικό, και να ελέγχονται οι μηχανικές αντοχές κρατώντας χαρακτηριστικά αυτοεπιπεδούμενης κονιάς ρυθμίζοντας το ποσό του υπερπλαστικοποιητή. Οι δυο ομάδες μιγμάτων φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα. Για τον υπολογισμό λόγου νερού τσιμέντου (v/τ) χρησιμοποιείται ο τύπος [νερό/τσιμέντο + k * πρόσμιξη] σύμφωνα με το EN 206-1. Σύμφωνα με το prEN 13263 ο συντελεστής k της πυριτικής παιπάλης για σκυρόδεμα που περιέχει τσιμέντο τύπου CEM I (EN197-1) είναι 2.

Πίνακας 3.

Ποσότητες σε kg	PRC-1	PRC-2
Τσιμέντο Ι52,5	1,015	710
Πυριτική παιπάλη	254	254
Μεταλλικές ίνες	160-610	160-610
Πυριτικό Άλευρο	-	210
Άμμος 1	459	740
Άμμος 2	218	-
Υπερπλαστικοποιητής 1	40	40
Λόγος νερού/τσιμέντο N/T	0.151	0.175

Προκειμένου να καταλήξει η έρευνα στο συγκεκριμένο τύπο υπερπλαστικοποιητή δοκιμάστηκαν προϊόντα από διάφορες εταιρίες. Σημειώνεται ότι είναι εξαιρετικά σημαντική η συμβατότητα του υπερπλαστικοποιητή με τα υλικά της ανάμιξης. Σε περίπτωση που η συμβατότητα δεν επιτευχθεί εμφανίζονται τα αρνητικά αποτελέσματα της υπερδοσολόγησης του υπερπλαστικοποιητή, όπως συρρίκνωση και καθυστέρηση της πήξης.

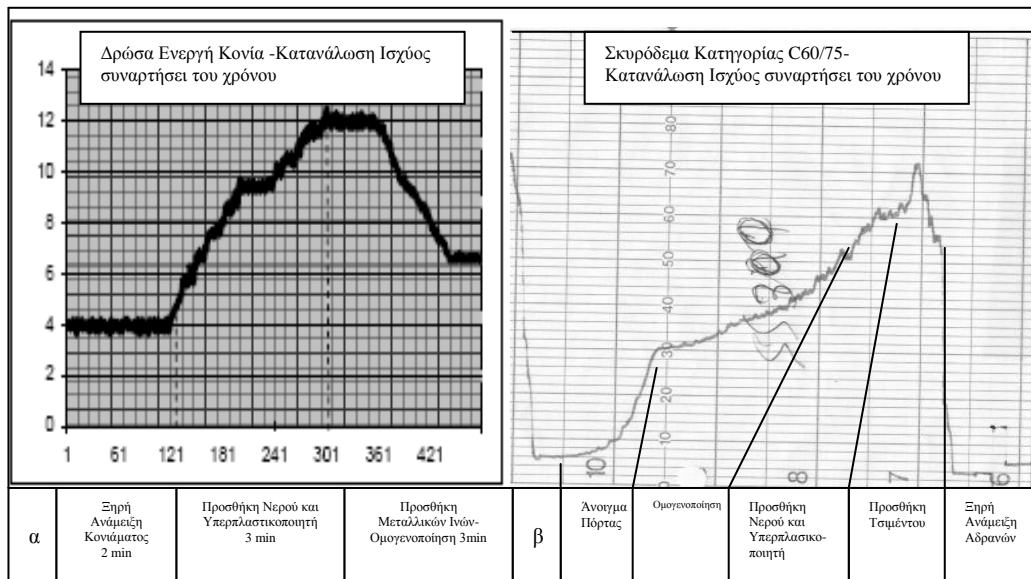
Στο συμβατικό σκυρόδεμα τα αδρανή (άμμος – χαλίκι – γαρμπίλι) αποτελούν το βασικό χαρακτηριστικό του σκυροδέματος. Στην περίπτωση των Δρωσών Ενεργών Κονιών ο όγκος της πάστας (τσιμεντοειδή + νερό) είναι 20% μεγαλύτερος από τα κενά της μη συμπυκνωμένης άμμου. Έτσι στην περίπτωση των Δρωσών Ενεργών Κονιών τα αδρανή δεν σχηματίζουν ένα συμπαγή σκελετό αλλά αποτελούν ενθέματα μέσα σε μια συνεχόμενη πάστα.

Η διαδικασία μείξης που ακολουθήθηκε είναι η εξής: Ξηρή ανάμιξη όλων των κονιών για δύο λεπτά, προσθήκη του νερού με τον

υπερπλαστικοποιητή, ανάμιξη για τρία λεπτά και σταδιακή προσθήκη των μεταλλικών ινών για άλλα τρία λεπτά. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικά αναμείγματα με διαφόρων τύπων αναμεικτήρες μέχρι να καταλήξει η έρευνα ποιος είναι ο πλέον κατάλληλος από πλευράς ομοιογένειας του μείγματος και από πλευράς χρόνου ανάμιξης. Η βέλτιστη μίξη με την οποία πραγματοποιήθηκε τελικά η σειρά των πειραμάτων PRC-1 και PRC-2 ήταν ο turbo αναμεικτής.

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται συγκριτικά η κατανάλωση της ισχύος συναρτήσει του χρόνου, σε σκυρόδεμα κατηγορίας C60/75 και Δρώσας Ενεργής Κονιάς, που πραγματοποιήθηκε με καταγραφικό βατόμετρο. Δεδομένου ότι η κατανάλωση της ισχύος του ηλεκτρικού ρεύματος είναι ένα ισχυρό εργαλείο για τον ποιοτικό έλεγχο της παραγωγής του σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κατανάλωσης ισχύος συναρτήσει του χρόνου.

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται συγκριτικά η κατανάλωση της ισχύος του ηλεκτρικού ρεύματος στα διάφορα στάδια της ανάμιξης ανάμεσα σε Δρώσα Ενεργή Κονία και "κλασσικό" σκυρόδεμα υψηλής αντοχής κατηγορίας C60/75 μέγιστου κόκκου 20mm.



Διάγραμμα 2. α)Κατανάλωση Ισχύος ηλεκτρικού ρεύματος σε Δρώσα Ενεργή Κονία στα στάδια της ανάμιξης β)Κατανάλωση Ισχύος ηλεκτρικού ρεύματος σε σκυρόδεμα κατηγορίας C60/75 μέγιστου κόκκου 20 mm.

Μετά την παρασκευή των αναμειγμάτων πραγματοποιήθηκε έλεγχος εξάπλωσης (στην μήτρα κονιαμάτων άνω διαμέτρου 70 mm κάτω διαμέτρου 100 mm) και έλεγχος Θλιπτικής Αντοχής κύβου 5X5X5 cm 2, 7 και 28 ημερών συντηρημένα στους 20 ° C και Θλιπτικής Αντοχής κύβου 5X5X5 cm 7 και 28 ημερών συντηρημένα επί 48 ώρες σε υδατόλουτρο στους 90 °C.

Οι δοκιμές αντοχής σε κάμψη πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1 σε δοκίμια 40X40X160 mm και οι δοκιμές αντοχής σε θλίψη σύμφωνα με το EN 12390-1.

Σημειώνεται εδώ ότι οι επιθυμητές τιμές εξάπλωσης για αυτοεπιπεδούμενο κονίαμα είναι Slump- Flow κονιάματος = 240-260mm , V-funnel κονιάματος =9-11 sec.

Στους ακόλουθους πίνακες 4 και 6 φαίνονται οι Αναλογίες Μείξης των Δοκιμαστικών Αναμειγμάτων HLT 1a, 2, 3 , 4 και 6, 7, 8, 9 αντίστοιχα, και στους πίνακες 5, 7 τα αποτελέσματα των Δοκιμών στα αναμειγμάτα αυτά.

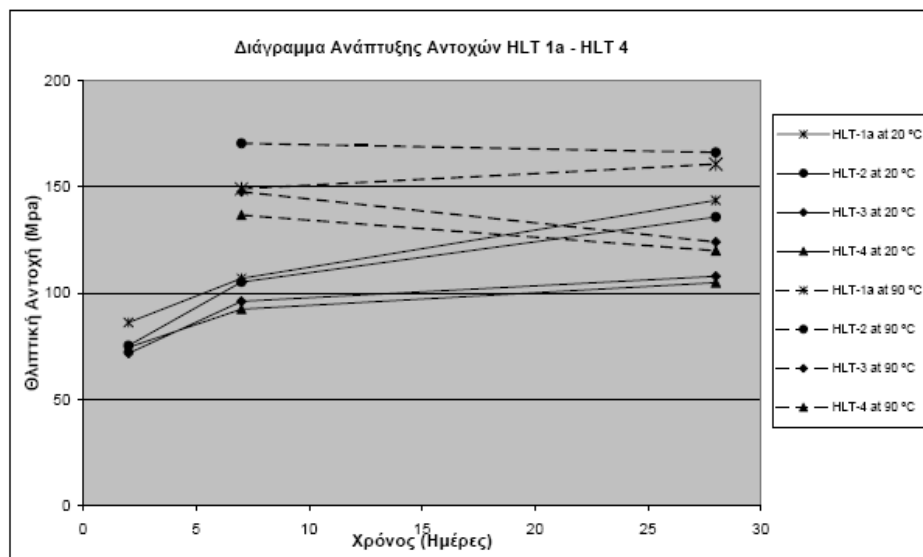
Πίνακας 4. Αναλογίες σύνθεσης PRC-1

Ποσότητες σε kg	HLT-1a	HLT-2	HLT-3	HLT-4
Τσιμέντο Ι52,5	1,015	1,015	1,015	1,015
Πυριτική παιπάλη	254	254	254	254
Μεταλλικές ίνες	610	305	405	405
Πυριτικό Άλευρο	-	-	-	-
Άμμος 1	345	459	423	420
Άμμος 2	180	218	217	180
Υπερ/τής 1	40	40	40	43
N/T	0.168	0.151	0.155	0.155

Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά σύνθεσης PRC-1

	HLT -1a	HLT-2	HLT-3	HLT-4
Εξάπλωση mm	360	230	210	235
5X5X5 20°C 2d ¹	86.2	75.3	71.7	74.5
5X5X5 20°C 7d ¹	107	105.3	96.2	92,5
5X5X5 90°C 7d ¹	149.2	170.6	147.8	136.8
5X5X5 20°C 28d ¹	143.7	135.9	108	105
5X5X5 90°C 28d ¹	160.8	166.3	124.1	120
Κάμψη 28d ¹	39.5	33.7	36.5	40.28
Κάμψη 90°C 28d ¹	50.4	39.7	42.8	46.8

¹ Αντοχές σε MPa



Διάγραμμα 3. Ανάπτυξη αντοχών HLT 1a – HLT 4

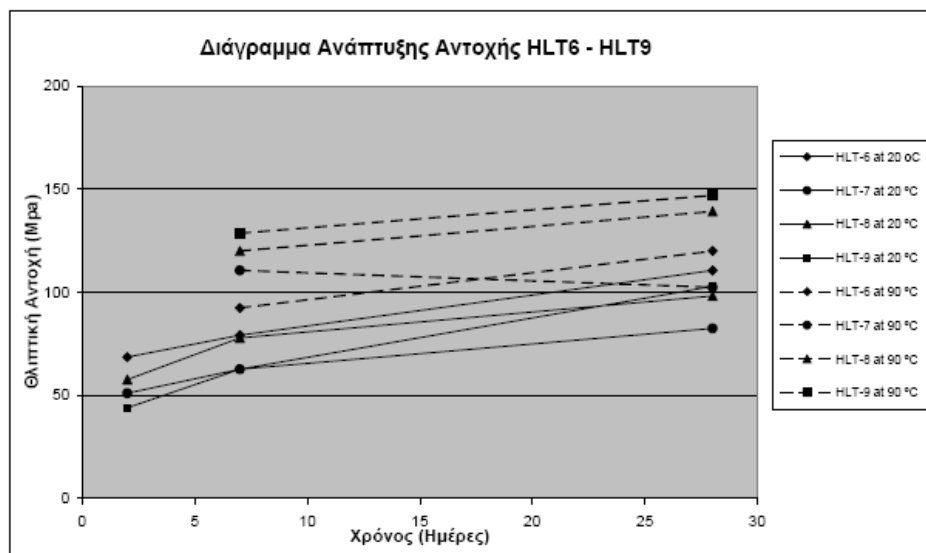
Πίνακας 6. Αναλογίες σύνθεσης PRC-2

Ποσότητες σε kg	HLT-6	HLT-7	HLT-8	HLT-9
Τσιμέντο I52,5	710	710	710	710
Πυριτική παιπάλη	254	254	254	254
Μεταλλικές ίνες	160	260	460	360
Πυριτικό Άλευρο	200	200	200	200
Άμμος 1	965	860	860	740
Άμμος 2	-	-	-	-
Υπερ/τής 1	45	40	40	40
N/T	0.169	0.175	0.175	0.184

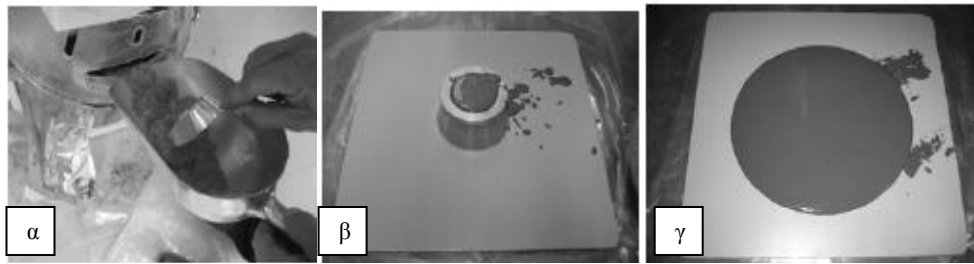
Πίνακας 7. Χαρακτηριστικά σύνθεσης PRC-2

	HLT -6	HLT-7	HLT-8	HLT-9
Εξάπλωση mm	240	260	248	255
5X5X5 20°C 2d ¹	68.6	51.1	57.7	44
5X5X5 20°C 7d ¹	79.2	62.7	77.9	62.7
5X5X5 90°C 7d ¹	92.4	110.6	120	128.6
5X5X5 20°C 28d ¹	110.6	82.5	98.2	102.9
5X5X5 90°C 28d ¹	120	102.4	139.2	147
Κάμψη 28d ¹	7.48	16.36	30.19	43.15
Κάμψη 90°C 28d ¹	26.23	36.8	42.9	48.6

¹ Αντοχές σε MPa



Διάγραμμα 3. Ανάπτυξη αντοχών HLT 6 – HLT 9



Σχήμα 1. (α) Σταδιακή προσθήκη των μεταλλικών ινών. (β) Τοποθέτηση της Δρώσας Ενεργής Κονίας στην μήτρα εξάπλωσης. (γ) Εξάπλωση στην Δρώσα Ενεργή Κονία χωρίς μεταλλικές ίνες.

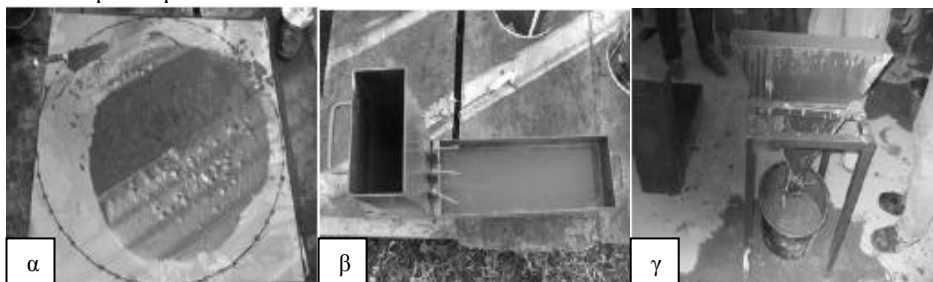
2.2 . Δοκιμές μεγάλης κλίμακας

Στα δοκιμαστικά HLT-2 και HLT-4 πραγματοποιήθηκαν οι κλασσικές δοκιμές SCC: Slump/Flow, V- funnel, L-Box. Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα των δύο δοκιμών.

Πίνακας 6.

Δοκιμές	HLT-2	HLT-4
Slump/Flow (mm)	72	71
V- Funnel (sec)	4.8	6.0
L-Box	1.0	1.0

Σημειώνεται εδώ ότι στο δοκιμαστικό HLT-4 (405 kg ίνες ανά m^3), αν και τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά για SCC, παρατηρήθηκαν αρκετά συσσωματώματα ινών. Στο δοκιμαστικό HLT- 2 (305 kg ίνες ανά m^3) η εμφάνιση του σκυροδέματος ήταν εξαιρετικά ομογενής, χωρίς παρουσία συσσωματωμάτων.



Σχήμα 2 (α) Δοκιμή Slump/Flow στο Ανάμειγμα HLT-4 διακρίνονται τα συσσωματώματα των ινών. (β) Δοκιμή L-Box. (γ) Δοκιμή V- Funnel .

3. ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Προκειμένου να μελετηθούν οι ιδιότητες του υλικού, οι γράφοντες βρίσκονται στην διενέργεια ερευνητικού προγράμματος το οποίο έχει ως στόχο να μελετήσει τον δείκτη δυσθραυστότητας, την εφελκυστική αντοχή, την ανθεκτικότητα στον χρόνο (δοκιμές ενανθράκωσης και διείσδυσης χλωριόντων) καθώς και να συγκρίνει θλιπτικές αντοχές κυβικών δοκιμίων (5X5X5 , 10X10X10 , 15X15X15) και κυλινδρικών δοκιμίων (10X20 , 15X30) καπελωμένο τόσο με υψηλής επιτελεστικότητας κονία όσο και με την μέθοδο Sand Box (NFP 18 415, EN 12390-3).

4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΡΩΣΩΝ ΕΝΕΡΓΩΝ ΚΟΝΙΩΝ ΕΩΣ ΣΗΜΕΡΑ

Σημειώνεται ότι οι Δρώσες Ενεργές Κονίες έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα για την κατασκευή διάφορων γεφυρών (πεζογέφυρα Sherbrooke - Καναδάς, γέφυρα Shepherd Creek Αυστραλία, γέφυρα Wapello County – ΗΠΑ, κ.α.), για την παραγωγή δομικών στοιχείων σε εργοστάσια παραγωγής ενέργειας (Γαλλία), για την κατασκευή κυματοθραυστών στην Πορτογαλία κ.α.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η παρούσα εργασία αποδεικνύει ότι με υλικά τα οποία σχετικά εύκολα μπορούν να βρεθούν στο εμπόριο μπορούν να κατασκευαστούν κονίες οι οποίες μπορούν να έχουν θλιπτική αντοχή μεγαλύτερη από 140 MPa και καμπτική περίπου 40 MPa.
- Η συντήρηση σε υψηλές θερμοκρασίες (90 °C) για 48 ώρες μπορεί να αυξήσει την αντοχή έως και 20%, πλην όμως αυτό είναι δύσκολα εφαρμόσιμο σε πρακτικό επίπεδο.
- Αν και η υφή της κονίας είναι κολλώδης εξαιτίας της παρουσίας της πυριτικής παιπάλης, του χαμηλού λόγου νερού – τσιμέντου και της ύπαρξης των ιών με την ορθή δοσολογία του κατάλληλου υπερπλαστοποιητή μπορεί να έχει τα χαρακτηριστικά του κλασσικού αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος.
- Οι Δρώσες Ενεργές Κονίες σε καμιά περίπτωση δεν αντικαθιστούν το κλασσικό σκυρόδεμα ή τον κλασσικό οπλισμό αλλά εξαιτίας των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους μπορούν να δώσουν λύση σε δύσκολα τεχνικά προβλήματα.

6.ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. E. Freyssinet, Cem. Concrete Manufacture, Vol.9, p.71, (1936)
2. D.M. Roy,G.R. Gouda ,Cem. Concr. Res., Vol 3 (6), p.807-820 ,(1983)
3. P. Richard, M. Cheyrezy, “Reactive Powder Concrete Composition”, Cement and Concrete Research, Vol 25, No 7, pp. 1501-1511, (1995)
- 4.N.P. Lee ,D.H. Chisholm, Study Report No 146- Reactive Powder Concrete, (2005)
5. A. Cwirzen, “The effect of the heat treatment regime on the properties of reactive powder concrete”, Advances in Cement Research, Vol 19,(2007)
6. U.S. Department of Transportation, Publication No FHWA-HRT-06-103, “Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete, (2006)
7. F. de Larrard,A. Belloc,S. Renwez, C. Boulay, “Is the cube test suitable for high performance concrete?”, Materials and Science Structure,Vol 27,pp.580-583,(1994)
8. NF P 18-415, “Boite a sable pour essai de compression des eprouvettes cylindriques,(1994)
- 9.J Voo, J Foster, R Gilbert, “Shear Strength of Fibre Reinforced Reactive Powder Concrete Girders without stirrups”, UNICIV Report No R-421,(2003)
- 10.Ι. Μαρίνος ,Α. Κερμετζόγλου ,Β. Καλοιδάς,Γ. Ρουβέλας , “Ινοπλισμένο κονίαμα υψηλών αντοχών”,15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος Αλεξανδρούπολη, (2006)
- 11.F. Dehn,M. Orgass, A. Konig, “The Influence of the widest variety of mixing parameters on the fresh concrete properties of ultra-high performance fiber reinforced concrete” ,Concrete Plant International Magazine , (2007)

