

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΥΨΗΛΗΣ ΡΕΥΣΤΟΤΗΤΑΣ ΠΑΣΤΑΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ - ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Μ. Μπεάζη – Κατσιώτη¹, Ν. Διαμαντώνης¹, Α. Σακελλαρίου², Α. Παπαθανασίου², Μ. Κατσιώτης¹, Β. Καλοϊδάς³, Ι. Μαρίνος⁴

1. Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.
2. Κέντρο Δοκιμών Ερευνών και Προτύπων, Δ.Ε.Η.
3. Ε.Κ.Ε.Τ.
4. Α.Γ.Ε.Τ. Ηρακλής

Ι. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα και η τεχνολογία του πρωτοεμφανίστηκαν στην Ιαπωνία, το έτος 1983. Ο Okamura έθεσε τα θεμέλια για έναν τύπο σκυροδέματος ο οποίος, χάρη στις υψηλές προδιαγραφές του, θα προοριζόταν για μεγάλα και ποιοτικά έργα, επιδεικνύοντας την αυξημένη αντοχή του και την μεγάλη ανθεκτικότητα. Δυο άλλοι Ιάπωνες ερευνητές, οι Ozawa και Mackawa, από το πανεπιστήμιο του Τόκιο, κατέθεσαν τις έρευνές τους περί θεμελιωδών αρχών και κανονισμών που διέπουν το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Η Ευρώπη, κάνει την πρώτη της επαφή με το συγκεκριμένο τύπο σκυροδέματος στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και στη Σκανδιναβία χρησιμοποιείται για προκατασκευασμένα στοιχεία.

Με τον όρο «**Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα**» (ΑΣΣ) προσδιορίζεται μια ειδική κατηγορία σκυροδέματος που κατά την έγχυσή του σε καλούπι ή ξυλότυπο, πληρώνει όλα τα κενά και τις κοιλότητες χωρίς να απαιτείται κάποιας μορφής συμπύκνωση ή δόνηση. Δηλαδή διέρχεται μέσω του οπλισμού χρησιμοποιώντας μόνο το ίδιο βάρος. Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται κυρίως από την υψηλή ρευστότητά του όταν αυτό βρίσκεται ακόμα στη νωπή του φάση. Κατ' αυτή την έννοια, διέρχεται μέσα από εμπόδια όπως ο πυκνός οπλισμός, οι στενώσεις ξυλότυπου, και οι απομακρυσμένες από το σημείο έγχυσης περιοχές του ξυλότυπου, χωρίς υποβοήθηση, μέσω αντλίας. Επιπλέον, αυτό επιτυγχάνεται με ταχύτητα πολύ υψηλή και ίσως αδιανόητη για το συμβατικό σκυρόδεμα.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό του αυτοσυμπυκνόμενου είναι η μεγάλη αντίσταση στο διαχωρισμό. Συγκεκριμένα, είναι η ικανότητα που έχει να εγχύεται και να ρέει μέσα στους ξυλότυπους διατηρώντας πάντα μια ομοιόμορφη κατανομή των συστατικών του (πάστα, αδρανή κλπ). Η αντίσταση στο διαχωρισμό έχει τρεις υποπεριπτώσεις, οι οποίες αναφέρονται σε διαφορετικές φάσεις της εφαρμογής του σκυροδέματος. Πρώτα, παρατηρείται η αντίσταση στον **εξωτερικό διαχωρισμό**, δηλαδή κατά τη φάση της διάστροφης. Ακολούθως, αφού το σκυρόδεμα ρέει και προσκρούει στον οπλισμό που υπάρχει εσωτερικά του καλουπιού, εμφανίζεται η **αντίσταση στο διαχωρισμό κατά τη ροή**. Τέλος, με την πλήρωση του καλουπιού, εμφανίζεται η αντίσταση στον **εσωτερικό διαχωρισμό**, όπου αποφεύγεται η καθίζηση των χονδρόκοκκων αδρανών στον πυθμένα και η εμφάνιση νερού στην επιφάνεια. Αυτή η ιδιότητα της αντίστασης στο διαχωρισμό, είναι μια από τις πλέον σημαντικές απαιτήσεις σε ένα αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Είναι το βαθύτερο αίτιο της υψηλής ρευστότητας, αφού επιτρέπει στο σκυρόδεμα να ρέει μεταξύ πυκνού οπλισμού ή διατομών περίπλοκης γεωμετρίας

δίχως δυσκολία. Αν δεν ικανοποιούσε την αντίσταση στο διαχωρισμό, τα χονδρόκοκκα αδρανή θα συγκεντρώνονταν κοντά στον οπλισμό, δυσχεραίνοντας έτσι τη ροή του μίγματος.

Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του ΑΣΣ είναι:

Ρευστότητα ή ικανότητα πλήρωσης (filling ability) – Είναι η ικανότητα του σκυροδέματος να ρέει υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της πίεσης (π.χ. άντληση) και να γεμίζει πλήρως τον ξυλότυπο και τον εσωκλειώμενο οπλισμό.

Ικανότητα διέλευσης (passing ability) – Η ικανότητα του σκυροδέματος να διέρχεται μέσα από αρκετά στενές περιοχές του ξυλότυπου και από πολύ πυκνό οπλισμό, χωρίς την έμφραξη των χονδρόκοκκων αδρανών.

Αντίσταση στην απόμιξη – Η ικανότητα του φρέσκου σκυροδέματος να διατηρεί την ομοιογένειά του κατά τη διάρκεια της διάστρωσης και ωρίμανσης.

Είναι απαραίτητο να εκτιμώνται και οι τρεις ιδιότητες για κάθε σύνθεση αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Από την πλευρά της συσχέτισης των αποτελεσμάτων των δοκιμών με την απόδοση του αυτοσυμπυκνούμενου στην κατασκευή, δεν υπάρχουν σαφείς σχέσεις, παρά μόνο **όρια συμμόρφωσης**, τα οποία δεν είναι σαφώς καθορισμένα λόγω έλλειψης ακριβών δεδομένων. Ακόμη, αυτά τα όρια συμμόρφωσης είναι διαφορετικά για οριζόντια διάστρωση και για κατακόρυφη χύτευση. Ο οπλισμός και η πυκνότητά του διαδραματίζουν πρωτεύοντα ρόλο στη θέσπιση των ορίων. Επίσης, υπάρχουν περιορισμοί σχετικά με το μέγεθος των αδρανών και την εκάστοτε πειραματική διάταξη.

Στον Πίνακα 1 αναφέρονται επιγραμματικά οι προαναφερθείσες ιδιότητες και οι αντίστοιχες δοκιμές..

Πίνακας 1: Ιδιότητες ΑΣΣ και αντίστοιχες δοκιμές:

Εξεταζόμενη ιδιότητα	Δοκιμή Ελέγχου	Μετρούμενο μέγεθος
Ικανότητα πλήρωσης	Εξάπλωση (slump test)	Συνολική εξάπλωση
	Κώνος σχήματος V (V-Funnel test)	Χρόνος εκροής
Ικανότητα διέλευσης	Δοκιμή δοχείου L (L-Box)	Ποσοστό διέλευσης
	Δοκιμή δοχείου U (U-Box)	Διαφορά στάθμης
	Δοκιμή με δακτύλιο J (J-Ring)	Διαφορά ύψους εντός και εκτός του δακτυλίου
Αντίσταση στην απόμιξη	Δοκιμή με κόσκινα (sieve test)	Ποσοστό κατακράτησης

Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, έχουν αναπτυχθεί δοκιμές που μπορούν να γίνουν είτε σε εργαστηριακό, είτε σε εργοταξιακό επίπεδο.

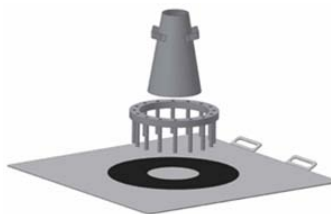
Παρακάτω, δίδονται οι προτεινόμενες δοκιμές και οι αντίστοιχες διατάξεις.

Πίνακας 2: Δοκιμές για το ΑΣΣ.

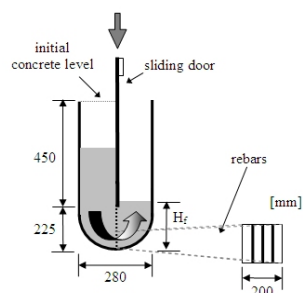
Δοκιμή Εξάπλωσης (Slump Test)



Δοκιμή με δακτύλιο J (J-Ring Test)



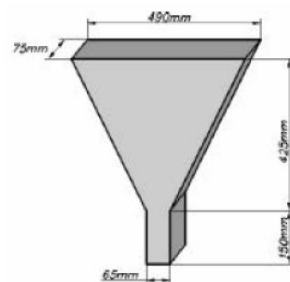
Δοκιμή με δοχείο U (U-Box Test)



Δοκιμή με δοχείο L (L-Box Test)



Δοκιμή με χοάνη V (V-Funnel Test)



Δοκιμή αντίστασης στην απόμειξη με κόσκινο (Sieve segregation resistance Test)



Οι ιδιότητες αυτές και ο προσδιορισμός τους μέσω των δοκιμών, καθορίζουν την **εργασιμότητα** του σκυροδέματος. Ο όρος εργασιμότητα είναι πολύ πλατιά ορισμένος. Καμία δοκιμή από μόνη της δεν μπορεί να μετρήσει όλα τα επίπεδα της εργασιμότητας. Το Αμερικανικό Ινστιτούτο Σκυροδέματος περιγράφει την εργασιμότητα ως “εκείνη την ιδιότητα του φρέσκου σκυροδέματος ή κονιάματος που καθορίζει την ευκολία με την οποία μπορεί να αναμιχθεί, να τοποθετηθεί και να φινιριστεί σε ομογενή κατάσταση”. Κατά την Ένωση Ιαπώνων Μηχανικών Σκυροδέματος, η εργασιμότητα ορίζεται ως “η ιδιότητα του φρέσκου σκυροδέματος ή κονιάματος που καθορίζει την ευκολία και την ομοιογένεια με τις οποίες μπορεί να αναμιχθεί, τοποθετηθεί και να συμπυκνωθεί λόγω της συνεκτικότητάς του, της ομοιογένειας με την οποία μπορεί να μετατραπεί σε σκυρόδεμα και του βαθμού στον οποίο μπορεί να αντισταθεί στο διαχωρισμό των υλικών”. Ακόμα, ο Neville ορίζει την εργασιμότητα ως “το ποσό του χρήσιμου εσωτερικού έργου που είναι απαραίτητο για να επιτευχθεί πλήρης συμπύκνωση”. Η εργασιμότητα δεν εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του σκυροδέματος, αλλά επίσης και από τη φύση της εφαρμογής.

Η εργασιμότητα του σκυροδέματος δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να θυσιάζεται ώστε να αναπτυχθούν καλύτερες ιδιότητες στο σκληρυμένο σκυρόδεμα, όπως η αντοχή και η ανθεκτικότητα. Η εργασιμότητα μετριέται τυπικά στον τόπο διάστρωσης του σκυροδέματος μέσω των αποτελεσμάτων της δοκιμής εξάπλωσης (cone slump test). Εντούτοις, κάποιες έρευνες που διεξήχθησαν από την NMRCA (National Ready Mixed Concrete Association) και το NIST (National Institute of Standards and Technology), έδειξαν ότι οι μετρήσεις αυτές δεν είναι και τόσο αντιπροσωπευτικές για την πραγματική συμπεριφορά του νωπού σκυροδέματος στο πεδίο τοποθέτησής του. Αναφέρθηκε ότι μίγματα σκυροδέματος με την ίδια μετρούμενη τιμή εξάπλωσης, δε συμπεριφέρονται το ίδιο κατά την τοποθέτηση. Αυτό υπονοεί ότι η τιμή εξάπλωσης δε δίνει αρκετά δεδομένα για να χαρακτηριστεί η ρεολογική συμπεριφορά του σκυροδέματος.

Στο πεδίο της κατασκευής, τεχνικοί όροι όπως η εργασιμότητα, η ρευστότητα και η συνεκτικότητα, χρησιμοποιούνται εναλλακτικά για την περιγραφή της συμπεριφοράς του νωπού σκυροδέματος κατά τη ροή του. Οι ορισμοί τους βέβαια είναι πολύ υποκειμενικοί. Παρ’ όλα αυτά, υπάρχει ανάγκη για μια πιο θεμελιώδη και ποσοτική περιγραφή της ροής του σκυροδέματος. Αρκετοί ερευνητές, όπως ο Banfill και ο De Larrard, έχουν χρησιμοποιήσει με επιτυχία την **εξίσωση του Bingham**. Σύμφωνα με αυτή, δύο είναι οι παράμετροι που προσδιορίζουν τη ροή, η **διατμητική τάση** και το **πλαστικό ιξώδες**. Η μεν **διατμητική τάση** σχετίζεται με την **εξάπλωση**. Το δε **ιξώδες** μπορεί να σχετιστεί και με άλλες ιδιότητες όπως την ευκολία τοποθέτησης και άντλησης, το βαθμό φινιρίσματος και την κολλώδη συμπεριφορά. Επιπροσθέτως, η απόμιξη θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως η μη ικανότητα των αδρανών να βυθίζονται μέσα στην πάστα του τσιμέντου. Αυτό το φαινόμενο συνδέεται με το **ιξώδες της τσιμεντόπαστας** και το σχεδιασμό των **αναλογιών στο μίγμα του σκυροδέματος**. Το πλαστικό ιξώδες συνήθως αμελείται λόγω του ότι υπάρχουν πολύ λίγοι τύποι συσκευών και διατάξεων που μπορούν να το μετρήσουν. Συνεπώς, οι μέθοδοι που αξιοποιούνται για την **πρόβλεψη της εργασιμότητας του σκυροδέματος**, πρέπει να λάβουν υπόψη τους τη διατμητική τάση και το ιξώδες της πάστας του τσιμέντου, η οποία είναι το **συνδεδεμένο υλικό** των αδρανών στο σκυρόδεμα.

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα είναι ένας τύπος σκυροδέματος που εμφανίζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και αρκετές διαφορές, έναντι των συμβατικών, όσον αφορά τη ρεολογική

συμπεριφορά του. **Το είδος των αδρανών, το σχήμα και το μέγεθός τους** είναι τα χαρακτηριστικά που μπορούν να βελτιώσουν τις ρεολογικές ιδιότητες του αυτοσυμπυκνούμενου. Τα εργαλεία του ρεολογικού χαρακτηρισμού των ΑΣΣ είναι στοιχειακά και λίγες είναι οι μελέτες που έχουν αφιερωθεί στην ανάλυση, κατανόηση και προτυποποίηση της ρεολογικής συμπεριφοράς των υλικών αυτών. **Το ΑΣΣ είναι ρευστό τύπου Bingham.** Τα κοκκομετρικά χαρακτηριστικά των στερεών συστατικών επιδρούν αισθητά στην τιμή κατωφλίου διάτμησης. Ως τιμή κατωφλίου ορίζεται η κατά Bingham τιμή της διατμητικής τάσης πάνω από την οποία, ένα ρευστό συμπεριφέρεται ως υγρό.

Το νωπό σκυρόδεμα μπορεί να χαρακτηριστεί ρευστό, δεδομένου ότι μπορεί να επιτευχθεί ένας συγκεκριμένος βαθμός ρευστότητας και ότι το υλικό είναι ομογενές. Η περιγραφή της ροής ενός σκυροδέματος περιλαμβάνει τη χρήση εννοιών όπως η **διατμητική τάση (shear stress) και ο ρυθμός διάτμησης (shear rate), των οποίων ο λόγος δίνει το ιξώδες (viscosity)**. Το σκυρόδεμα ως ρευστό, κατατάσσεται στα λεγόμενα ρευστά Bingham. Τα ρευστά Bingham χαρακτηρίζονται από μια τιμή κατωφλίου διάτμησης. Σε αντίθεση με τα νευτώνικα ρευστά, μπορούν να μεταδώσουν τη διατμητική τάση χωρίς την ύπαρξη βαθμίδας ταχύτητας. Όμως για να αρχίσει ένα ρευστό τύπου Bingham να ρέει, θα πρέπει η ασκούμενη σε αυτό διατμητική τάση να υπερβεί την τιμή κατωφλίου. Το ρευστό αυτό με διατμητικές τάσεις μικρότερες του κατωφλίου θα συμπεριφέρεται περίπου ως στερεό, ενώ με μεγαλύτερες τιμές αυτής θα περνάει στην περιοχή των υγρών. Όσον αφορά το προφίλ των ταχυτήτων κατά την κίνηση του ρευστού πρέπει να σημειωθούν τα παρακάτω: Όταν τα νευτώνικα ρευστά ρέουν μέσα σε αγωγούς ή κανάλια, εμφανίζουν ένα προφίλ ταχυτήτων, του οποίου η βαθμίδα μειώνεται προς το κέντρο του αγωγού. Έτσι η διατμητική τάση που μεταδίδεται από στρώμα σε στρώμα, συνεχώς ελαττώνεται όσο η μελέτη προχωράει προς το κέντρο. Επειδή τα ρευστά τύπου Bingham μετατρέπονται σε στερεά όταν η ασκούμενη διατμητική τάση μειωθεί κάτω από την τιμή κατωφλίου, καθίσταται σαφές ότι θα γίνονται στερεά κοντά στο κέντρο του αγωγού, δημιουργώντας έτσι ένα στερεό μόρφωμα, το οποίο συμπαρασύρεται από το υπόλοιπο ρευστό κατά τη ροή.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, όταν αναμιγνύονται υλικά που έχουν προέλθει από θραύση και μείωση μεγέθους με συνδετικά υλικά, όπως στη περίπτωση των αδρανών με το τσιμέντο προς δημιουργία σκυροδέματος, είναι κρίσιμο να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή «**σωματιδιακή πλήρωση**» (**particle pack**). Με τον όρο αυτό εννοείται ο συνδυασμός των υλικών έτσι ώστε το μίγμα να έχει τη μεγαλύτερη πυκνότητα όταν ανακατεύεται χωρίς τη προσθήκη νερού. Η επίτευξη της υψηλότερης πυκνότητας μπορεί να αυξήσει σημαντικά τις αντοχές και να μειώσει την απαίτηση σε υδατικό περιεχόμενο. Τα τελευταία επιτυγχάνονται αυξάνοντας την επιφάνεια σύνδεσης ανά μονάδα μάζας του υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα, τόσο περισσότερα είναι τα σωματίδια με τα οποία έρχεται σε επαφή ένα συγκεκριμένο σωματίδιο, συνεπώς αυξάνει η επιφάνεια σύνδεσης, με άμεση επίδραση στις μηχανικές αντοχές.

Μία άλλη ιδιότητα που επηρεάζει την ρεολογία του ΑΣΣ είναι η **πυκνότητα στοίβαξης (packing density)**. Ο τρόπος με τον οποίο διατάσσονται τα αδρανή εντός του σκυροδέματος είναι καθοριστικός για την καλή συμπεριφορά του υλικού. Σκοπός είναι να καλυφθούν αποτελεσματικά τα κενά μεταξύ των αδρανών και να ελαχιστοποιηθούν οι ανομοιογένειες στο μίγμα της πάστας και των αδρανών, μειώνοντας έτσι την ανισοτροπία του τελικού προϊόντος. Για δεδομένο όγκο υλικού κυβικού

σχήματος, αυτό επιτυγχάνεται μεγιστοποιώντας το πηλίκο του όγκου των αδρανών προς τον συνολικό όγκο του κυβικού δοχείου, δηλαδή μεγιστοποιώντας τη τιμή της πυκνότητας στοιβαξης.

Επομένως, η δημιουργία ενός ΑΣΣ προϋποθέτει την δημιουργία ενός σκυροδέματος το οποίο θα έχει υψηλές τιμές σωματιδιακής πλήρωσης και πυκνότητας στοιβαξης. Οι δυο παράμετροι αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες της ρεολογίας της τσιμεντόπαστας, οι δε τιμές τους εξαρτώνται άμεσα από **το ποσοστό και το είδος των λεπτόκοκκων αδρανών (ultrafine aggregates)**.

Το αντικείμενο της έρευνας είναι η μελέτη της ρεολογικής συμπεριφοράς του ΑΣΣ θεωρώντας ότι είναι διφασικό σύστημα με μια φάση από στερεά υλικά και μια υγρή φάση του τσιμέντου και μελετάται η **επίδραση της κοκκομετρίας της στερεής φάσης στο ιξώδες της υγρής**. Στόχος είναι να καθοριστεί ο ρόλος της θιξοτροπίας μέσω πειραματικών προσεγγίσεων με κύριο πεδίο εφαρμογής την κατεργασία του αυτοσυμπυκνούμενου.

Το ρόλο του συνδετικού υλικού στο σκυρόδεμα, διαδραματίζει η τσιμεντόπαστα που με τις ρεολογικές ιδιότητές της καθορίζει τη σχετική κίνηση των χονδρόκοκκων αδρανών μέσα στο μίγμα. Έχουν γίνει αρκετές μελέτες πάνω στον τρόπο με τον οποίο η προσθήκη εξαιρετικά λεπτόκοκκων αδρανών (ultra-fine aggregates) στο τσιμέντο, μεταβάλλει τις ρεολογικές ιδιότητες της τσιμεντόπαστας.

Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται η επίδραση μερικών εξαιρετικά λεπτόκοκκων υλικών στο ιξώδες της τσιμεντόπαστας. Τα πειραματικά αποτελέσματα συνδέονται με μαθηματικά μοντέλα μηχανικής ρευστών, ώστε να γίνει **πρόβλεψη των ιδιοτήτων του ΑΣΣ** μέσω σύνθεσης πάστας τσιμέντο με διάφορα λεπτόκοκκα Ελληνικής προέλευσης (ασβεστόλιθος, ιπτάμενη τέφρα, ποζολάνη, πυριτική παιπάλη)

II. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Σκοπός των πειραμάτων που διεξήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ήταν να προσδιοριστεί η επίδραση εξαιρετικά λεπτόκοκκων υλικών στο ιξώδες της τσιμεντόπαστας.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές προσφέρθηκαν από την ΑΓΕΤ Ηρακλής και το ΕΚΕΤ, και είναι τα παρακάτω:

- I. Τσιμέντο
- II. Πυριτική παιπάλη
- III. Ασβεστόλιθος
- IV. Ποζολάνη Μήλου
- V. Ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης

Ο σχεδιασμός των μιγμάτων έγινε με τέτοιον τρόπο ώστε να εντοπιστεί η όποια επίδραση του κάθε υλικού στη ρεολογία της πάστας. Σχεδιάστηκαν διμερή μίγματα στα οποία προστέθηκε μικρό ποσοστό πυριτικής παιπάλης, σχηματίζοντας τα τριμερή μίγματα. Ο αναλυτικός πίνακας με τα μίγματα δίνεται παρακάτω (Πίνακας 3), μαζί με τις μετρήσεις.

Η λογική του σχεδιασμού, στηρίχθηκε στη δημιουργία δύο μιγμάτων τσιμέντου με κάθε υλικό, ένα μίγμα χαμηλής περιεκτικότητας στο δεύτερο υλικό και ένα υψηλής. Τα τριμερή μίγματα σχηματίστηκαν με την αντικατάσταση ενός μικρού ποσοστού του δεύτερου υλικού από πυριτική παιπάλη. Επίσης σχεδιάστηκαν και τρία μίγματα, τα οποία περιείχαν τσιμέντο και δύο από τα υλικά ασβεστόλιθο, ποζολάνη και ιπτάμενη τέφρα.

Το ιξώδες της τσιμεντόπαστας μετρήθηκε σε ιξωδόμετρο ομοαξονικών κυλίνδρων. Ο κατασκευαστής του οργάνου είναι ο οίκος Fann και το μοντέλο της συσκευής είναι FANN Model 35 S/A Viscometer. Οι μετρήσεις έγιναν στο Εργαστήριο Σκυροδέματος στο Κέντρο Ερευνών Δοκιμών και Προτύπων της ΔΕΗ.

Κάθε μίγμα τοποθετείται στο δοχείο του ιξωδομέτρου, ώστε η απαιτούμενη για τη μέτρηση ποσότητα να διέρχεται ανάμεσα στους δύο κυλίνδρους. Κατά τη μέτρηση, ο εξωτερικός κύλινδρος περιστρέφεται με ταχύτητα ελεγχόμενη από το χειριστή προκαλώντας διάτμηση στο μίγμα. Η διάταξη μετρά την αντίσταση που προβάλλει το ρευστό στην κίνηση και η μέτρηση αποδίδεται ως ιξώδες.

Τα στερεά μίγματα παρασκευάστηκαν εφαρμόζοντας λόγο Νερού προς Κονία, όπου Κονία το σύνολο των στερεών υλικών, ίσο με 0,6 κ.β..

III. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι μετρήσεις από τα πειράματα, καταγράφονται στους επόμενους πίνακες και εν συνεχεία παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων.

Πίνακας 3: Μίγματα Α1-Γ2

ΥΛΙΚΟ/ΜΙΓΜΑ	A1	A2	B1	B2	Γ1	Γ2
Τσιμέντο CEM I 42,5	80	60	80	60	80	60
Πυριτική παιπάλη						
Ασβεστόλιθος					20	40
Ποζολάνη Μήλου	20	40				
Ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης			20	40		
ΣΤΡΟΦΕΣ/ΛΕΠΤΟ	ΙΞΩΔΕΣ (cP)					
600	127	173	145	258	90	70
300	80	122	88	160	56	46

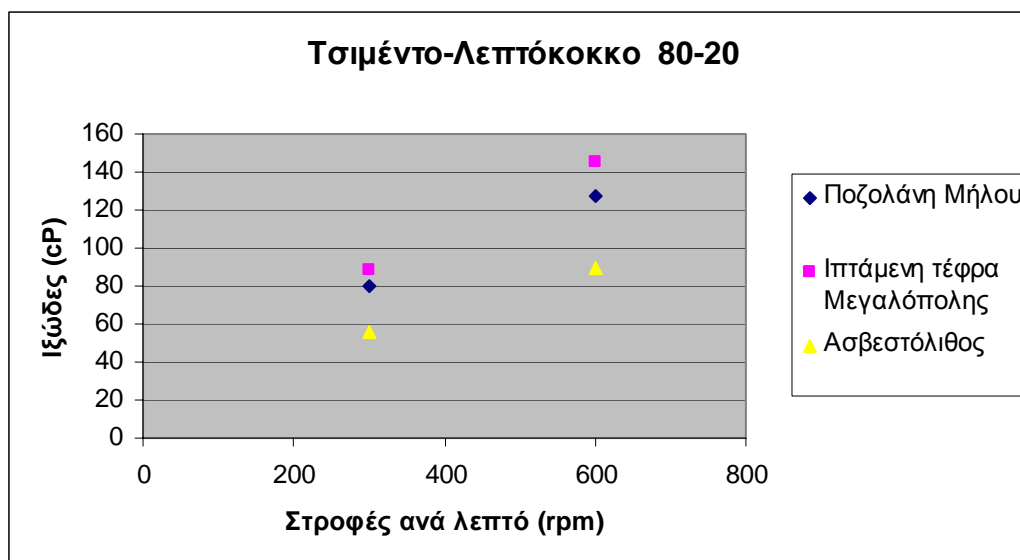
Πίνακας 4: Μίγματα Δ1-Z2

ΥΛΙΚΟ/ΜΙΓΜΑ	Δ1	Δ2	E1	E2	Z1	Z2
Τσιμέντο CEM I 42,5	80	60	80	60	80	60
Πυριτική παιπάλη	5	5	5	5	5	5
Ασβεστόλιθος					15	35
Ποζολάνη Μήλου	15	35				
Ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης			15	35		
ΣΤΡΟΦΕΣ/ΛΕΠΤΟ	ΙΞΩΔΕΣ (cP)					
600	92	183	143	256	86	77,5
300	57	129	90	166	54	50,5
200	42	105	69	126	42	40,5
100	30	77	47	84	30	30
6	12	20	14,5	16,5	11,5	13
3	8,5	15	8,5	11	9	9

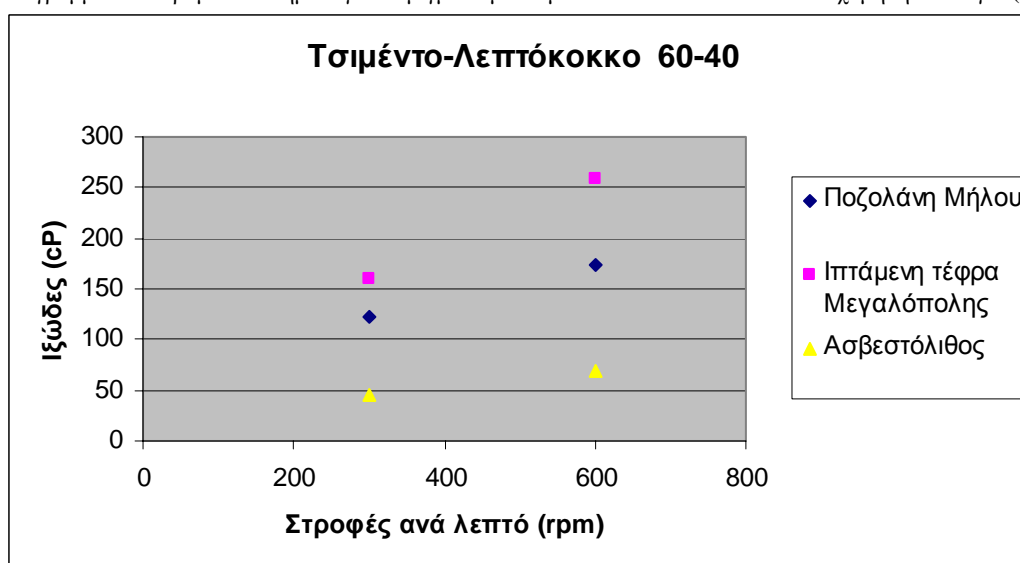
Πίνακας 5: Μίγματα Η,Θ,Ι

ΥΛΙΚΟ/ΜΙΓΜΑ	Η	Θ	Ι
Τσιμέντο CEM Ι 42,5	60	60	60
Πυριτική παιπάλη			
Ασβεστόλιθος	20		20
Ποζολάνη Μήλου	20	20	
Ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης		20	20
ΣΤΡΟΦΕΣ/ΛΕΠΤΟ	ΙΞΩΔΕΣ (cP)		
600	112,5	197	123
300	76,5	132	81
200	62	105	64
100	46	74,5	45
6	20	18	17,5
3	11	12	9

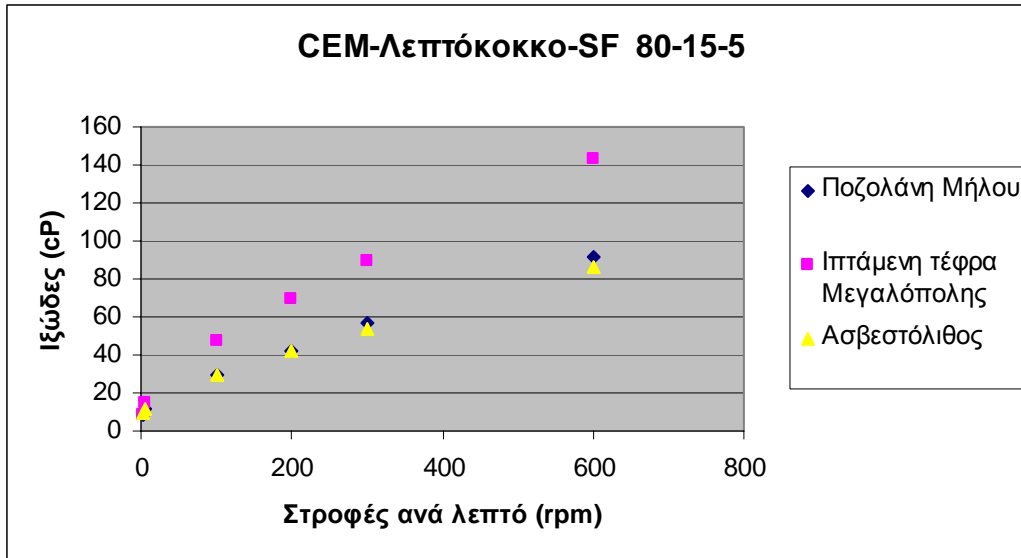
Από την επεξεργασία των μετρήσεων, παρατίθενται τα επόμενα διαγράμματα:



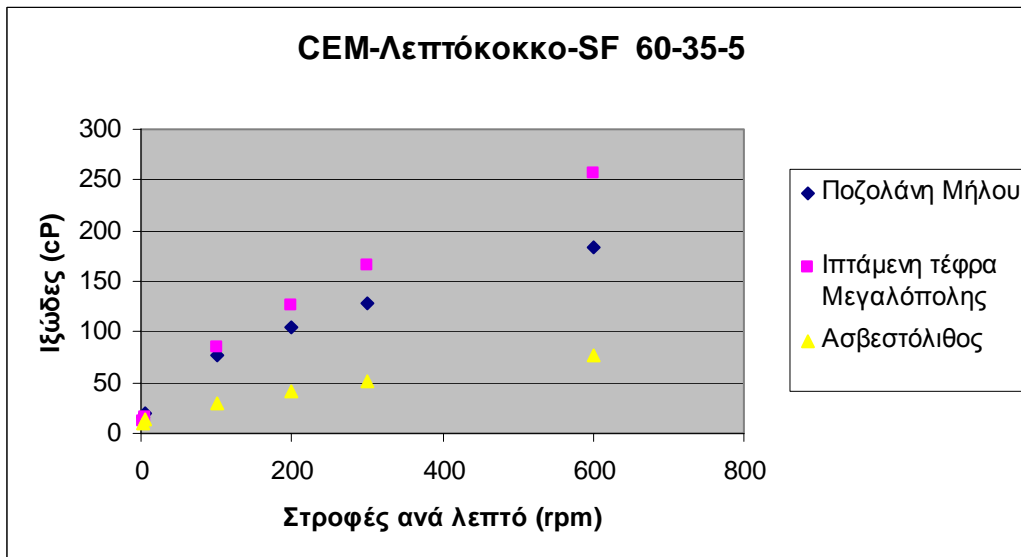
Διάγραμμα 1: Πειραματικά σημεία για τα μίγματα με τσιμέντο και ένα λεπτόκοκκο σε χαμηλή αναλογία (20%).



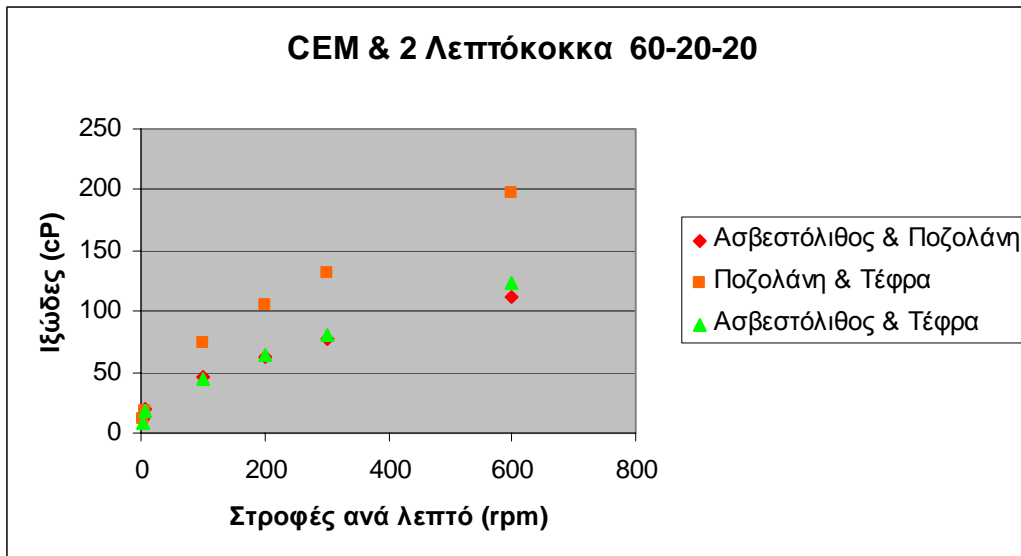
Διάγραμμα 2: Πειραματικά σημεία για τα μίγματα με τσιμέντο και ένα λεπτόκοκκο σε υψηλή αναλογία (40%).



Διάγ. 3: Πειραματικά σημεία για τα μίγματα με τσιμέντο, ένα λεπτόκοκκο σε χαμηλή αναλογία (15%), και 5% πυριτική παιπάλη.



Διάγ. 4: Πειραματικά σημεία για τα μίγματα με τσιμέντο, ένα λεπτόκοκκο σε υψηλή αναλογία (35%), και 5% πυριτική παιπάλη.



Διάγραμμα 5: Πειραματικά σημεία για τα μίγματα με τσιμέντο και δύο λεπτόκοκκα σε ίσες αναλογίες, 20% έκαστο.

IV. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Επίδραση της πυριτικής παιπάλης στα μίγματα με ποζολάνη.

Στα χαμηλής περιεκτικότητας σε ποζολάνη δείγματα A1 και Δ1, η ύπαρξη της πυριτικής παιπάλης έχει θετική επίδραση, μειώνοντας το ιξώδες. Αντίθετα, στα δείγματα υψηλής περιεκτικότητας σε ποζολάνη A2 και Δ2 παρατηρείται ότι η ύπαρξη της πυριτικής παιπάλης επιδρά αρνητικά στο ρευστό, αυξάνοντας την τιμή του ιξώδους.

Επίδραση της πυριτικής παιπάλης στα μίγματα με ιπτάμενη τέφρα.

Παρατηρείται ότι η προσθήκη πυριτικής παιπάλης στα μίγματα που περιέχουν ιπτάμενη τέφρα, δεν επιδρά στο ιξώδες.

Επίδραση της πυριτικής παιπάλης στα μίγματα με ασβεστόλιθο.

Στα μίγματα με χαμηλή περιεκτικότητα 20% σε ασβεστόλιθο (Γ1,Z1), η προσθήκη πυριτικής παιπάλης προκαλεί αμελητέα μείωση του ιξώδους.

Στα υψηλής περιεκτικότητας σε ασβεστόλιθο 40% (Γ2,Z2), η προσθήκη πυριτικής παιπάλης προκαλεί αύξηση του ιξώδους κατά 10%.

Για το μίγμα Τσιμέντο-Ασβεστόλιθος-Ποζολάνη (Η).

Το ιξώδες του μίγματος λαμβάνει τιμή ενδιάμεση των τιμών ιξώδους των μιγμάτων που έχουν μόνο το ένα από τα δύο λεπτόκοκκα αδρανή, είτε πρόκειται για υψηλή είτε για χαμηλής περιεκτικότητα σε αυτά (A1,Γ1,A2,Γ2).

Για το μίγμα Τσιμέντο-Ποζολάνη-Τέφρα (Θ).

Συγκριτικά με τα μίγματα που περιέχουν μόνο ποζολάνη από τα λεπτόκοκκα αδρανή (A1,A2), το ιξώδες αυτού του μίγματος είναι αρκετά μεγαλύτερο. Όσον αφορά τη συσχέτισή του με τα μίγματα που περιέχουν μόνο ιπτάμενη τέφρα, αξίζει να σημειωθεί ότι το ιξώδες του Θ είναι υψηλότερο από το B1 (20% τέφρα) και χαμηλότερο από το B2 (40% τέφρα).

Για το μίγμα Τσιμέντο-Ασβεστόλιθος-Τέφρα (Ι).

Το ιξώδες του βρίσκεται μικρότερο σε σχέση με τα μίγματα που περιέχουν μόνο τέφρα (B1,B2) και μεγαλύτερο συγκριτικά με τα μίγματα του ασβεστόλιθου (Γ1,Γ2).

V. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

A. Το ΑΣΣ είναι ένας τύπος σκυροδέματος, όπου μικρή απόκλιση της σύνθεσης του μίγματος προκαλεί απώλεια της ικανότητας της αυτοσυμπύκνωσης.

B. Στο ΑΣΣ απαιτείται περισσότερη πάστα τσιμέντου και υψηλότερο ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών στη πάστα. Το ΑΣΣ είναι ένας αποδέκτης υλικών σε μορφή σκόνης. Η προσθήκη εξαιρετικά λεπτόκοκκων αδρανών στο τσιμέντο επιδρά στο ιξώδες της πάστας. Ο ρόλος του ασβεστόλιθου λόγω κοκκομετρίας και σχήματος κόκκου παρουσιάζει βελτίωση του ιξώδους και είναι το καλύτερο λεπτόκοκκο υλικό.

VI. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Domone P.L., "Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies", *Cement and Concrete Composites* 28 (2006): 198-208.
2. Kordts S. and Grube H., "Controlling the workability properties of self-compacting concrete used as ready-mixed concrete", *RILEM Proceedings Pro 33*: 103-112.
3. Kordts S. and Grube H., "Assessment of the fresh concrete properties of self-compacting concrete", *RILEM Proceedings Pro 33*: 113-124.
4. Sebaibi Y. et al., "A study of the viscosity of lime-cement paste: influence of the physicochemical characteristics of lime", *Construction and Building Materials* 18 (2004): 653-660.
5. Ouchi, Nakamura et al., "Applications of self-compacting concrete in Europe, Japan and the United States", *ISHPC 2003*.
6. Ferraris F.C., "Simulation of SCC Flow", *1st North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete Proceedings, Chicago, IL, November 2002*, pp. 27-30.
7. Petersson O., "Final Report of Task 2 – Workability", *Self Compacting Concrete, September 1999*.
8. Sedran T., "Final Report of Task 3 – Rheology", *Self Compacting Concrete, February 2000*.
9. EFNARC, "The European Guidelines for Self Compacting Concrete", *May 2005*.
10. Claus Pade, "Material Models in SCC Mix Design", *SCC Seminar in Copenhagen, June 2006*.
11. Claus Pade, "Environmental Impact of Self-Compacting Concrete, ECOserve Meeting in Warsaw, May 2006.
12. Zhang X. and Han J., "The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste"
13. Ozylidirim C. and Lane S., "Evaluation of Self-Consolidating Concrete", *VTRC 03-R13RB, August 2004*.
14. Ferraris F.C. et al., "Workability of Self-Compacting Concrete", *International Symposium on High Performance Concrete Orlando, Florida 2000, Proceedings 398-407*.
15. "Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές", Υπουργείο ΠΕ. ΧΩ. ΔΕ., Ινστιτούτο Οικονομίας Κατασκευών, Έκδοση 1η.
16. Παπανικολάου Κ.Γ. και Τριανταφύλλου Αθ.Χ., "Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα: Ανασκόπηση, Ιδιότητες και Προοπτικές στην Ελλάδα", *Πρακτικά 14ου Συνεδρίου Σκυροδέματος, Κως 2003*.
17. Σίδηρης Κ.Κ. κ.ά., "Μηχανικά χαρακτηριστικά και ανθεκτικότητα αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων παρασκευασθέντων με ελληνικά υλικά", *Πρακτικά 14ου Συνεδρίου Σκυροδέματος, Κως 2003*.
18. *API Specification 13A, Specification for drilling fluid materials, July 2004*.
19. *API RP 13B-1, Recommended practice standard procedures for field testing water-based drilling fluids*.
20. Α. Σακελλαρίου, *Μετρήσεις ιξώδους ρευστών. Εσωτερικές τεχνικές εκθέσεις., ΚΔΕΠ-ΔΕΗ, 2007-2008*.